

Blendung durch optische Strahlungsquellen

H.-D. Reidenbach, K. Dollinger, G. Ott, M. Janßen, M. Brose

**Forschung
Projekt F 2185**

**Forschung
Projekt F 2185**

H.-D. Reidenbach
K. Dollinger
G. Ott
M. Janßen
M. Brose

**Blendung durch
optische Strahlungsquellen**

Dortmund/Berlin/Dresden 2008

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Untersuchungen zu arbeitsplatz-bezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen“ – Projekt F 2185 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Hans-Dieter Reidenbach (Projektleiter)
Dipl.-Ing. Klaus Dollinger (Stellvertreter)
Fachhochschule Köln
Forschungsbereich Medizintechnik,
Hochfrequenz- und Lasertechnik¹
Claudiusstr. 1, 50678 Köln

¹ Unter Mitarbeit von:
Dipl.-Ing. Joachim Hofmann, M. Sc.
Dipl.-Ing. Martin Seckler
Dipl.-Ing. Esther Hild, M. Sc.
Dipl.-Ing. Christian Dahmen, M. Sc.

Dipl.-Ing. Günter Ott
Dipl.-Ing. Marco Janßen
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Dipl.-Phys. Martin Brose
BG Elektro Textil Feinmechanik
Gustav-Heinemann-Ufer 130, 50968 Köln

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund
Telefon: 0231 9071-0
Telefax: 0231 9071-2454
E-Mail: poststelle@buaa.bund.de
Internet: www.buaa.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40-42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Proschhübelstr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-093-2

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	7
Abstract	8
1 Einleitung	9
1.1 Allgemeines zu Festlegungen in Bezug auf optische Strahlung	10
1.2 Blendung als indirekte Wirkung	13
1.3 Blendung unter Berücksichtigung höherer Grenzwerte bei optischer Strahlung und Stand der Festlegungen	14
1.4 Forschungsnotwendigkeiten und -ziele auf dem Gebiet der Blendung	28
2 Bisheriges Wissen und Diskussion zum Thema Blendung	37
2.1 Allgemeines zu Licht und rechtlicher Regelungsbereich bei Blendung	37
2.2 Grundbegriffe von Lichtstärke, Hellempfindung, Helligkeit und Leuchtdichte im Zusammenhang mit Blendung	40
2.2.1 Allgemeines zu Licht und Farben	40
2.2.2 Optische Strahlung, die zur Blendung führen kann	45
2.2.3 Quantifizierung der Blendung und Bedeutung der Leuchtdichte	47
2.3 Adaptation	53
2.4 Streuung als Blendungsursache	58
2.4.1 Detektion von Streuung	65
2.4.2 Schleierleuchtdichte	66
2.4.3 Blendschwelle	70
2.5 Blendungsarten und -begriffe	71
2.6 Blendungsempfindung und -empfindlichkeit bei physiologischer und psychologischer Blendung	74
2.7 Nachbilderscheinungen	84
2.7.1 Nachbild und Komplementärfarben	92

2.7.2	Begriffsbestimmungen und Definitionen	97
2.7.3	Zeitlicher Nachbildverlauf	114
2.7.4	Charakteristika, Abhängigkeiten und Farbenverlauf von Nachbildern	119
2.7.5	Nachbildfarben bei Blendung durch helle optische Quellen	145
2.8	Blendungsbewertung	146
2.8.1	Sehleistung und Sehfunktionen	147
2.8.1.1	Visus	147
2.8.1.1.1	Fehlsichtigkeit (Brechungsfehler des Auges)	149
2.8.1.1.2	Pupillengröße	149
2.8.1.1.3	Umgebungs-Beleuchtung	150
2.8.1.1.4	Zeitdauer der Objektbestrahlung	150
2.8.1.1.5	Ort auf der Retina	150
2.8.1.1.6	Adaptationszustand	150
2.8.1.1.7	Augenbewegungen	150
2.8.1.1.8	Kombination verschiedener Einflüsse	151
2.8.1.2	Weitere Beiträge zur Sehleistung	151
2.8.2	Physiologische und psychologische Blendungsbewertung	152
2.8.3	Wellenlängenabhängigkeit	166
2.8.4	Farbsehbeeinträchtigungen und Farbsehtests	167
2.9	Blendungssituationen	172
2.9.1	Allgemeine Blendungssituationen	172
2.9.2	Blendung im Straßenverkehr	173
2.10	Blendung und die Folgen	186
3	LEDs als Blendlichtquellen	191
4	Durchgeführte Untersuchungen	194
4.1	Allgemeines zu den Untersuchungen	194

4.2	Grundsätzliches zu den verschiedenen Testeinrichtungen	197
4.3	Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen	197
4.3.1	Vorversuche und -untersuchungen	201
4.3.1.1	Erkennbarkeitsstudie von Nachbildfarben und -intensitätsverläufen (Untersuchungen zum Farbenverlauf von Nachbildern)	202
4.3.1.2	Orientierende Untersuchungen zum Verlauf der Nachbildfarben (Nachbildfarbverlauf bei Blendung durch farbige HB-LEDs durch Beobachtung in einem dunklen Raum)	204
4.3.1.3	Zeitdynamischer Verlauf der Nachbildfarben	220
4.3.1.4	Voruntersuchungen zur Beeinträchtigung der Sehschärfe	220
4.3.2	Nachbildgröße als Funktion der Zeitdauer nach einer Blendung	221
4.3.3	Untersuchungen zur Sehschärfe nach einer Blendung	230
4.3.4	Lesefähigkeit als Sehschärfekriterium nach Blendung mit einer weißen HB-LED	243
4.3.5	Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit der Nachbilddauer	252
4.3.6	Untersuchungen zum Verlauf der Nachbildfarben	273
4.3.6.1	Vor-Untersuchungen mit Farbenvorgabe	273
4.3.6.2	Messaufbau und -programm zur Aufzeichnung des Farbverlaufes und verwendete Blendlichtquellen	280
4.3.6.3	Bestimmung des Verlaufes der Nachbildfarben für eine Blendung mit HB-LEDs mittels einer Messung an einem Farbkreis	286
4.3.6.4	Blendeindruck bei einem bewegten Linienlaser	303
4.3.7	Farberkennbarkeit und Kontrastempfindlichkeit	305
4.3.7.1	Farbunterscheidungsfähigkeit nach Blendung mit farbigen LEDs	306
4.3.7.2	Farb- und Kontrastsehen nach Blendung durch farbige LEDs	320
4.3.8	Übersicht der Untersuchungsergebnisse	340
4.3.9	Einordnung der Versuchsbedingungen in typische Expositionssituationen	342
4.4	Ermittlung von Schwellwerten	344

4.5	Einsatz von Fragebögen	352
5	Bewertung und Ausblick	362
6	Literatur	366
7	Abbildungsverzeichnis	393
8	Tabellenverzeichnis	404

Blendung durch optische Strahlungsquellen

Kurzreferat

In der EU-Richtlinie 2006/25/EG "Künstliche optische Strahlung" sind Festlegungen enthalten, wonach der Unternehmer die Expositionen zu ermitteln hat. Außerdem hat er bei der Risikobewertung indirekte Effekte, wie vorübergehende Blendung, zu berücksichtigen.

Um zu zuverlässigen quantitativen Angaben bezüglich des Einflusses von Blendung, Blitzlichtblindheit und Nachbildern zu kommen, war es das Ziel dieses Forschungsvorhabens, die verschiedenen Parameter hinsichtlich der Minderung der relevanten Sehfunktionen zu bestimmen. Deshalb wurden Laser mit niedriger Leistung und Hochleistungs-LEDs (HB-LEDs) in verschiedenen speziell entwickelten Testanordnungen eingesetzt. Insgesamt wurden damit 191 Versuchspersonen 1 736 Blendversuchen unterzogen.

Es wurden Nachbilddauern bis 300 Sekunden ermittelt, wenn das Auge im Fleck schärfsten Sehens (Fovea) mit einem Laserstrahl von weniger als 30 μW während 10 Sekunden bestrahlt wurde.

Für 4 verschiedene HB-LEDs mit den Wellenlängen 455 nm, 530 nm, 590 nm und 625 nm wurden im Leistungsbereich zwischen 0,05 mW und 0,5 mW bei Bestrahlungsdauern zwischen 0,5 s und 5 s die RGB-Werte des farbigen, zeitlichen Nachbildverlaufes bestimmt.

Das Farbkontrastsehvermögen nach einer Blendung durch HB-LEDs wurde mittels speziell entwickelter Farbsehtafeln ermittelt. Dabei zeigte sich, dass Blendung die Zeitdauer zur Identifikation um etwa 16 s erhöht und dass der Einfluss besonders bei niedrigen Farbkontrastwerten noch deutlich größer ist.

Untersuchungen mit sogenannten pseudoisochromatischen Farbtafeln (Ishihara-Tafeln) haben ergeben, dass sich je nach verwendeter Farbtafel und Wellenlänge der LED Farbsehstördauern zwischen 27 s und 186 s ergeben können.

Solche lang dauernden Sehstörungen können von besonderer Bedeutung sein, und zwar insbesondere wenn sicherheitsrelevante kritische Tätigkeiten ausgeführt werden müssen, wie beim Arbeiten an einer Maschine oder in der Höhe, unter Hochspannung oder beim Führen eines Fahrzeuges oder Flugzeugs.

Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wird vorgeschlagen, Lichtquellen in die Blendgruppen B0, B1, und B2 einzuteilen, wobei dies von der Dauer der Sehstörung abhängig gemacht werden soll. B0 entspräche keiner Sehbeeinträchtigung bzw. bis maximal 2 s Dauer, B1 einer Dauer bis 10 s und B2 über 10 s.

Schlagwörter:

Künstliche optische Strahlung, Grenzwerte optischer Strahlung, Blendung, Nachbild, Sehbeeinträchtigungen, Arbeitsschutz, Arbeitsplatz, Gefährdungsbeurteilung, EU-Richtlinie, Lichtquellen, Blendgruppen

Dazzle caused by sources of optical radiation

Abstract

According to the European Directive 2006/25/EC on Artificial Optical Radiation the employer has to determine the exposure at the workplace. In addition he shall give particular attention, when carrying out the risk assessment, to any indirect effects amongst others such as temporary blinding.

In order to get reliable quantitative data concerning the influence of dazzle, flash-blindness and afterimages it was the goal of this research project to investigate the various parameters which determine the respective impact on vision. Therefore low power laser and high-brightness light emitting diodes (HB-LEDs) have been applied in different specially developed test setups. A total of 191 subjects have been tested in 1,736 trials during the project.

Afterimage durations up to 300 seconds were found if the fovea of the human retina is irradiated during 10 seconds from a laser beam with less than 30 μW . The visual acuity was strongly reduced during about 30 % of the afterimage time.

The time-dependent progression of the afterimage colors was determined as RGB-values for 4 different dominant wavelengths of HB-LEDs, i.e. 455 nm, 530 nm, 590 nm and 625 nm, in the optical power range between 0.05 mW and 0.5 mW for exposure durations between 0.5 s and 5 s.

The color contrast capability after glare from HB-LEDs was investigated with specially developed test color charts. Glare increases the identification times about 16 s and even stronger impairment is observable especially at low color contrast.

Tests with pseudoisochromatic color plates (Ishihara charts) have shown that color vision was impaired for periods between 27 s and 186 s depending on the applied color plate and respective LED color.

Such relatively long lasting visual disturbances could be of particular importance connected with performing safety critical operations such as working with machines or at height, with high voltages or driving a vehicle or an airplane.

Due to the results of the present work we propose to classify light-sources according to their temporary blinding effect into classes B0, B1 and B2. Whereas class B0 means no blinding effect or a dysfunction of vision up to maximum 2 s, class B1 means the dysfunction lasts up to 10 s and class B2 means it lasts longer than 10 s.

Key words:

Artificial optical radiation, exposure limits to optical radiation, blinding effects, after-image, impairment of vision, occupational health and safety, working environment, risk assessment, EU-directive, light source, blinding-class

1 Einleitung

In der EU-Richtlinie "Künstliche optische Strahlung" sind Festlegungen enthalten wonach bei der Gefährdungsermittlung Sekundäreffekte, wie die Blendung, zu berücksichtigen sind. Bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten, wie dem Führen eines Fahr- oder Flugzeuges, beim Bedienen einer Maschine, bei Installations- oder Reparaturarbeiten kann durch Blendung aus künstlichen optischen Quellen ein erhebliches Gefährdungspotenzial am Arbeitsplatz entstehen, da es insbesondere bei solchen Arbeiten bzw. Tätigkeiten auf ein uneingeschränktes Sehvermögen ankommt und nur dieses gewährleistet, dass die jeweilige Aufgabe erfolgreich zum Abschluss gebracht werden kann. Zur Verbesserung der Sehbedingungen wurden in der Vergangenheit große Anstrengungen gemacht, z. B. eine angemessene Beleuchtung sicherzustellen. Aber wie das auch in anderen Bereichen häufig der Fall ist, so hat auch hier die Lösung des eines Problems in manchen Fällen dazu geführt, dass ein anderes entstanden oder ein bereits vorhandenes noch verstärkt wurde. So kann auf der einen Seite durch Erhöhung des Beleuchtungsniveaus eine Steigerung der Sehleistung erzielt werden, es kann aber auf der anderen Seite durch dadurch bedingte Blendungserscheinungen zu einer Sehleistungsverminderung kommen.

Ohne das Fahrlicht am Auto wäre kein Fahren bei Dunkelheit oder während der Nacht möglich und ein heller Scheinwerfer verleiht dem Fahrer des betreffenden Fahrzeuges einerseits eine gute Sicht, führt aber andererseits unter Umständen dazu, dass der Fahrer des entgegenkommenden Fahrzeuges damit ein Problem bekommt, und zwar insbesondere dann, wenn er infolge Blendung nur noch eine verminderte Sehfähigkeit hat und dadurch eine gefährliche Fahrsituation entstehen kann.

Um die Datenlage zur Beeinträchtigung des Sehvermögens durch Blendung und Farbverfälschungen insbesondere durch neue optische Quellen, wie z. B. Laser und LED, die zunehmend mehr Anwendung im beruflichen und privaten Bereich finden, zu verbessern, wurden Untersuchungen insbesondere zu arbeitsplatzbezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen durchgeführt. Ziel des Projektes war, den Grad bzw. das Ausmaß einer Blendung durch künstliche optische Quellen qualitativ und quantitativ zu bestimmen. Bei den Untersuchungen wurden das Ausmaß und die Dauer von Nachbildern sowie die mit einer Blendung verbundenen Beeinträchtigungen des Farbsehvermögens ermittelt. Bei diesen Effekten wurden insbesondere die Einflussparameter wie Art und Ausdehnung der Quelle, Einwirkungsdauer der Exposition, Wellenlänge bzw. Wellenlängenbereich, sowie optische Strahlungsleistung bzw. -energie genauer untersucht. Die ermittelten Daten dienen als Grundlage für eine Gefährdungsanalyse, um festzustellen, welche Gefährdungen bei Tätigkeiten am Arbeitsplatz durch die Blendung von künstlichen Quellen entstehen können. Damit können sie gleichzeitig bei der nationalen Umsetzung der EU-Richtlinie "Künstliche optische Strahlung" Berücksichtigung finden. Als eine Erleichterung bei der Gefährdungsanalyse wurde eine Kennzeichnung des mit einer künstlichen Quelle optischer Strahlung verbundenen Blendungsgrades ermittelt, der langfristig auch Eingang in die Normung finden sollte.

1.1 Allgemeines zu Festlegungen in Bezug auf optische Strahlung

Eine der wesentlichen Aufgaben der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung nach dem Siebten Buch Sozialgesetzbuch (SGB VII) [162] ist es, im Rahmen der Prävention u. a. Arbeitsunfälle, Berufskrankheiten und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren zu verhüten. Dabei folgt eine zeitnahe Prävention, also eine Vorbeugung, einem ganzheitlichen Ansatz, der sicherheitstechnische und arbeitsmedizinische Maßnahmen genauso einschließt, wie Fragen der Ergonomie und der Arbeitsorganisation. In diesem Zusammenhang werden aufgrund § 15 SGB VII Unfallverhütungsvorschriften erlassen.

Im Falle optischer Strahlung liegt hierzu zum einen die UVV BGV B 2 "Laserstrahlung" [163] vor, und zwar in der Fassung vom 1.1.1997 und zum anderen existiert ein abgestimmter Fachausschussentwurf "Künstliche optische Strahlung" vom Januar 2003 (letzter Stand: 21. Juli 2003 [164]). Abgesehen davon, dass es zutreffender wäre von "Optischer Strahlung künstlicher Quellen" zu sprechen, sind in diesem Entwurf LEDs als Strahlungsquellen mit eingeschlossen, was in einem gewissen Gegensatz zu der über viele Jahre gültigen horizontalen Sicherheitsnorm DIN EN 60825-1 [151] stand, wonach LEDs zum Geltungsbereich der Norm gehörten. Erst mit der 2. Ausgabe der internationalen Norm IEC 60825-1 [1] wurden LEDs wieder aus dem Teil 1 der Normenreihe 60825 heraus genommen und sie verbleiben nur noch in den mit Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen sowie bei Freiraumübertragung geltenden vertikalen Normen DIN EN 60825-2 [165] und DIN EN 60825-12 [166], da sie dort laserähnliche Verwendung finden. Die 2. Ausgabe der Norm IEC 60825-1 wird als DIN EN 60825-1 im März 2008 erfolgen. Es gibt aber bereits Bestrebungen hinsichtlich der Herausnahme von LEDs auch aus dem Anwendungsbereich des Teils 12 von IEC 60825.

Seit dem Jahre 2001 liegt die Situation vor, dass die gültige UVV "Laserstrahlung" maximal zulässige Bestrahlungswerte (MZB-Werte) und Laserklassen enthält, die – insbesondere in dem in diesem Forschungsprojekt interessierenden Bereich, in dem Blendung als Effekt auftreten kann – in weiten Bereichen international nicht mehr zur Beurteilung zu Grunde gelegt werden bzw. bei denen Hersteller und Inverkehrbringer bei der Klassifizierung von Lasereinrichtungen aufgrund normativer Änderungen andere Klassenzuordnungen anwenden. Bei den neuen Laserklassen handelt es sich insbesondere um diejenigen von 2M und 3R, bei denen neue Klassengrenzwerte eingeführt wurden. Außerdem sind inzwischen in weiten Bereichen die MZB-Werte angehoben worden, besonders für Einwirkungsdauern von mehr als 10 Sekunden.

Gemäß der im Jahre 1999 erfolgten Reform des berufsgenossenschaftlichen Regelwerkes sollen in Berufsgenossenschaftlichen Informationen (BG-Informationen, BGI) weitere Empfehlungen als dies in Berufsgenossenschaftlichen Regeln (BG-Regeln) und UVVen der Fall ist, für eine sichere und gesunde Arbeitsplatzgestaltung zusammen gefasst werden. Im Falle von Laserstrahlung ist, gewissermaßen aus der Not heraus, dass von Seiten des BMA (heute BMAS, zwischenzeitlich auch BMWA) ein Nachtrag zur UVV BGV B 2 "Laserstrahlung" mit Blick auf die damals zu erwartende Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) nicht gewünscht wurde, eine BG-

Information "Betrieb von Lasereinrichtungen" (BGI 832) [154] erarbeitet worden. Darin sind sowohl die neuen Laserklassen unter Berücksichtigung der geänderten GZS (Grenzwerte zugänglicher Strahlung in Watt bzw. Joule) der Klassen als auch die neuen MZB-Werte (Werte maximal zulässiger Bestrahlung in W/m^2 bzw. J/m^2) auf der Basis sowohl photochemischer als auch thermischer Schädigungen enthalten. Insofern geht diese BGI über ihre eigentliche Intention weit hinaus und stellt fast so etwas wie eine UVV dar. Im Sinne des Arbeitsschutzes, wonach Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer eine hohe Bedeutung zukommt war dies ein begrüßenswerter Weg, der darüber hinaus Probleme, die aus den unterschiedlichen zeitlichen Stadien der Unfallverhütungsvorschrift auf der einen und der Lasersicherheitsnorm auf der anderen Seite resultieren könnten, weitgehend verhindert.

Die BGI wurde aufgrund der Veröffentlichung der „Aktualisierten Nachdruckfassung“ der BGV B2 „Laserstrahlung“ vom April 2007 zwischenzeitlich zurückgezogen. Die Inhalte der BGI 832 befinden sich jetzt praktisch vollständig in den Durchführungsanweisungen der aktualisierten Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ [155].

Festlegungen von Grenzwerten der Exposition durch optische Strahlung basieren im Wesentlichen auf Erkenntnissen zu möglichen Schädigungen als Folge thermischer oder fotochemischer Wirkungen der elektromagnetischen Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 1 mm auf Augen oder Haut. So liegen zurzeit sowohl internationale Empfehlungen von Expositionsgrenzwerten für kohärente, aber auch für inkohärente optische Strahlung vor, wie diejenigen der ICNIRP und der WHO [20,167 – 170]. Daraus wurden mehrere nationale Regelwerke abgeleitet und die regionalen Richtlinien der Europäischen Union haben die darin empfohlenen Grenzwerte weitgehend übernommen, wodurch sie zu europäischen Expositionsgrenzwerten werden. Selbst Normen und Standards, Unfallverhütungsvorschriften und andere berufsgenossenschaftliche Regelwerke sind dem allgemeinen Trend gefolgt und halten sich bei Grenzwertfestlegungen weitgehend an die internationalen Vorgaben.

Bei der Einwirkung optischer Strahlung auf den Menschen, insbesondere auf die Augen, wurden zur Sicherheit von Personen und zum Schutz der Gesundheit (Gesundheitsschutz) Grenzwerte eingeführt. Die Festlegung solcher Grenzwerte in Regelungen basiert weitestgehend auf in Leitlinien („Guidelines“) der internationalen Strahlenschutzkommission (ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) empfohlenen Expositionsgrenzwerten (ELs, exposure limits). Dabei erfolgt die Angabe der Grenzwerte für inkohärente und kohärente optische Strahlung aufgrund bestimmter Unterschiede, wie z. B. hinsichtlich der Monochromasie (Einfarbigkeit), zwar in verschiedenen Leitlinien, trotzdem sind die jeweiligen Grenzwerte in Bezug auf die zu betrachtenden Wellenlängen bzw. -bereiche im Grundsatz gleich.

Der Festlegung von Grenzwerten liegen reproduzierbare wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zugrunde, bei denen Wirkmodelle Berücksichtigung fanden, wie z. B. die Übertragung der Energie optischer Strahlung durch Absorption auf das jeweilige Gewebe und die anschließende Umwandlung in thermische Energie (Wärme).

Durch die Einführung eines Sicherheits- bzw. Reduktionsfaktors gegenüber einem experimentell bestimmten Expositionswert (ED50), bei dem man z. B. im Auge in

50 % der Fälle einen ophthalmoskopisch sichtbaren Schaden erhält, gelangt man zu einem Expositionsgrenzwert. Der Sicherheits- bzw. Reduktionsfaktor ist dabei häufig in der Größenordnung von 10.

In Regelwerken werden daher auf der Grundlage international, regional oder national festgelegter Verträge, Richtlinien usw. Expositionsgrenzwerte in Regelwerken der verschiedensten Art festgelegt, deren Einhaltung von den verschiedenen Organen usw. überwacht wird. Soweit es Arbeitnehmer und Arbeitgeber, also Beschäftigte und Unternehmer, betrifft, basieren in Europa solche Festlegungen auf dem EG-Vertrag (EGV). Dazu werden gemäß Art. 118a (heute: Art. 138) des EGV Rahmenrichtlinien für den Arbeitsschutz erlassen, die dann in Einzel-Richtlinien hinsichtlich der Beschaffenheits- und Benutzungsvorschriften sowie in Mindestanforderungen konkretisiert werden. Die nationale Umsetzung solcher Richtlinien ist für die Mitgliedstaaten der Europäischen Union verpflichtend, wobei dies von staatlicher Seite entweder durch Gesetze oder Verordnungen geschehen kann. Berufsgenossenschaftliche Vorschriften dürfen den auf dem Verordnungswege erlassenen staatlichen Vorschriften nicht widersprechen und werden daher in der Regel zurückgezogen – nicht zuletzt auch um Doppelregelungen zu vermeiden. Es gilt dabei aber dennoch praktisch, dass ein bisher schon durch berufsgenossenschaftliche Regelungen „erreichtes“ Sicherheitsniveau auch in staatliche Vorschriften „übernommen“ wird.

Entsprechende Grenzwertsätze als sogenannte maximal zulässige Bestrahlungswerte (MZB) finden sich in Deutschland in den Unfallverhütungsvorschriften (UVV BGV B 2 „Laserstrahlung“ [163]; im abgestimmten Fachausschussentwurf der UVV BGV B 9 „Optische Strahlung“ [164]), die durch BG-Informationen ergänzt werden, wie z. B. durch die BGI 832 „Betrieb von Lasereinrichtungen“ [154] und BGI 5006 „Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung“ [174], sowie in der Norm DIN EN 60825-1 „Sicherheit von Lasereinrichtungen“ [151]. Die in europäischen Normen angegebenen Expositionsgrenzwerte dürfen den in EU-Richtlinien festgelegten Werten nicht widersprechen und dürfen allenfalls informativ in entsprechenden Normen enthalten sein.

Allen voran steht aber im Hinblick auf Grenzwertfestlegungen seit April 2006 die neue Europäische Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“ [17], in der sowohl Laserstrahlung als auch inkohärente optische Strahlung behandelt werden.

In ähnlicher Weise wie es, insbesondere zunächst unter Rücksichtnahme auf die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und jetzt nach Veröffentlichung der europäischen Regelung in Form einer Richtlinie keine Neufassung der Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ geben wird, so wird auch der abgestimmte Fachausschussentwurf zu „Optischer Strahlung künstlicher Quellen“ vor dem zuvor dargestellten rechtlichen Hintergrund der „Region Europa“ nie als gültige UVV mit der Nummer BGV B 9 erscheinen. Wesentliche Inhalte, wie die dort in der Anlage aufgeführten Grenzwerte sind inzwischen in einer weiteren Berufsgenossenschaftlichen Information BGI 5006 veröffentlicht worden [174] und geben erstmals national für die Bundesrepublik Deutschland Grenzwerte auf dem Gebiet inkohärenter optischer Strahlung an.

Die in der BGI 5006 angegebenen Expositionsgrenzwerte entsprechen den Werten des dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (heute: Bundesministerium für Arbeit und Soziales, BMAS) zugeleiteten Abgestimmten Fachausschussentwurfs der Unfallverhütungsvorschrift "Künstliche optische Strahlung" (BGV B 9) und zugehöriger BG-Regel (BGR B 9 [175]). Dabei entsprechen die darin enthaltenen Expositionsgrenzwerte weitgehend den internationalen Empfehlungen der ICNIRP, werden aber andererseits um sogenannte Jahresgrenzwerte ergänzt.

Mit Hilfe der BGI 5006 soll eine Gefährdungsermittlung bei Einwirkung von inkohärenter optischer Strahlung künstlicher Quellen ermöglicht werden, wenn eine solche durchgeführt werden muss.

Unter dem Stichwort schädliche Wirkungen durch sichtbare und infrarote Strahlung auf das Auge wird in der BGI 5006 auch auf Blendung eingegangen, und zwar mit der Aussage *„Die Blendung ist zwar keine direkte Schädigung des Auges, sie kann jedoch das Sehen und Erkennen beeinträchtigen und damit Folgeschäden (z. B. Unfälle im Straßenverkehr) hervorrufen.“*

Bei der exemplarischen Darstellung von Tätigkeiten/Expositionsbedingungen wird auf Grund der derzeitigen Erkenntnisse angegeben, ob und unter welchen Voraussetzungen Messungen in der Regel notwendig, eventuell notwendig oder nicht notwendig sind. Dazu findet sich für Diaprojektor, Beamer oder ähnliche Geräte der Kommentar, dass *„die Expositionsgrenzwerte für die Augen nach kurzer Zeit (Sekundenbereich) überschritten werden. Ein längeres Hineinschauen in den direkten Strahl wegen der hohen Leuchtdichte (Blendung) jedoch von jedem Benutzer vermieden wird.“* Schutzmaßnahmen werden daher in diesen Fällen nur dann notwendig, wenn ein absichtliches Hineinschauen für die Arbeit notwendig ist.

In der neuen europäischen Richtlinie (EU-RL) werden über die auf den Empfehlungen der ICNIRP-Leitlinien basierenden Expositionsgrenzwerte (EGW) hinaus erstmals auch indirekte Effekte behandelt. Dazu gehört vorübergehende Blendung von Arbeitnehmern. Es wird daher die Aufgabe des Gesetzgebers sein, dies bei der Umsetzung der EU-RL in einer nationalen Regelung zu beachten. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Auftreten von Blendungserscheinungen sollen dabei einen Beitrag zu einer entsprechenden quantitativen Basis darstellen.

1.2 Blendung als indirekte Wirkung

Sekundäre (mittelbare, indirekte) Wirkungen finden sich zwar auch bei der Festlegung von Grenzwerten bei speziellen physikalischen Einwirkungen wie z. B. bei elektromagnetischen Feldern, aber bezüglich optischer Strahlung ist dies gewissermaßen „Neuland“ und geht – wenn darauf überhaupt irgendwo Bezug genommen wurde – über rein qualitative Angaben in der Regel nicht hinaus.

Die WHO befasste sich allerdings bereits 1982 in den Environmental Health Criteria (EHC) [20] mit Blendung insofern, dass dort von „Blitzlichtblindheit“ und „psychologischer Blendung“ die Rede ist. Blitzlichtblindheit wird dabei als ein normaler physiologischer Vorgang bezeichnet, der zu einem vorübergehenden Verlust von Sehfunktionen führt. Die WHO stellt in diesem Zusammenhang auch fest, dass der Me-

chanismus komplex ist und nicht vollständig verstanden wird, da er sowohl biochemische als auch neuronale Vorgänge beinhaltet [21]. Die Erholzeit wird als ein Maß des Grades der Blitzlichtblindheit angesehen.

Psychologische Blendung tritt nach WHO auf, wenn ein sehr helles Licht plötzlich eingeschaltet wird, nachdem sich das Auge auf eine viel niedrigere Leuchtdichte adaptiert hat. Als Folge dessen wird davon ausgegangen, dass man blinkt und die Neigung besteht, den Kopf oder die Augen abzuwenden. Es wird dann in den EHC 23 noch darauf hingewiesen, dass dieser Effekt bei niedriger Leuchtdichte der Umgebung sehr viel dramatischer ist.

Ganz neu ist also die Befassung mit Blendung nicht. Würde man sie im Lichte der hehren Gesundheitsdefinition der WHO sehen, wonach gilt: „*Health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity.*“ [173], so könnte man Blendung durchaus mit einer Beeinflussung des physischen bzw. mentalen Zustandes in Verbindung bringen. Diese WHO-Definition wurde im Übrigen seit 1948 nicht mehr ergänzt.

1.3 Blendung unter Berücksichtigung höherer Grenzwerte bei optischer Strahlung und Stand der Festlegungen

Als Ergebnis von Überlegungen und bereits zu Beginn des Forschungsprojektes F 1775 "Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes" [152] experimentell erzielter erster Erkenntnisse, wurde in die BGI 832 bereits ein Hinweis auf Blendungserscheinungen aufgenommen, und zwar heißt es dort "*Bei Lasereinrichtungen der Klasse 1 können im oberen Leistungsbereich z. B. Blendung, Beeinträchtigung des Farbsehens und Belästigungen nicht ausgeschlossen werden.*" Dieser Satz wurde auch in den Leitfaden „Laserstrahlung“ des Fachverbandes für Strahlenschutz übernommen [176]. Eine solche Formulierung hat zwar keine Rechtsverbindlichkeit im Sinne einer UVV, stellt aber einen ernstzunehmenden Hinweis für die Benutzer von Lasereinrichtungen der Klasse 1 dar und trägt durchaus zur Sicherheit am Arbeitsplatz bei, wenn er richtig angewandt und befolgt wird. Diese rein qualitativen Aussagen können daher zwar dazu beitragen, die Sicherheit der Berufstätigen zu erhöhen, quantitativ lässt sich damit aber noch nichts anfangen, d. h. dass das Ausmaß und die Folgen einer Blendung nur erahnt werden können.

Die derzeit gültige Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ (BGV B 2) [155,163] befasst sich dagegen überhaupt nicht mit der Möglichkeit einer Beeinträchtigung durch Blendung beim Umgang mit Lasereinrichtungen.

Bei der vorstehenden Aussage in der BGI 832 war in erster Linie an Laser der Klasse 1 gedacht worden, und zwar unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich deren Klassengrenzwerte seit der letzten Fassung der UVV bzw. der Durchführungsanweisungen zum Teil erheblich verändert hatten.

Aufgrund der Grenzwertänderung in der DIN EN 60825-1:2001-11 ergab sich gegenüber der Ausgabe März 1997 eine relativ große Anhebung der oberen Grenze der Klasse 1 (vgl. Abb. 3.3 in [152]). Auch der Korrekturfaktor C3, der bisher für Laser der Klasse 1 bei der Zeitbasis von 30 000 s nur für Wellenlängen zwischen 550 nm

und 700 nm galt, wurde von $C_3 = 10^{0,015 \cdot (\lambda - 550)}$ in $C_3 = 10^{0,02 \cdot (\lambda - 450)}$ geändert und gilt jetzt für den Bereich zwischen 450 nm und 600 nm und hat unterhalb von 450 nm den konstanten Wert 1. Ursache für die erhebliche Anhebung der Grenzwerte ist die Neubewertung der fotochemischen und thermischen Schädigung und damit der MZB-Werte insbesondere für Langzeitexpositionen unter Einbeziehung neuerer Erkenntnisse zu Augenbewegungen oberhalb von 10 Sekunden Einwirkungsdauer [169].

Als Folge der Änderung der MZB-Werte (maximal zulässige Bestrahlung) und neuer Klassengrenzen bei Lasern der Klasse 1 in der internationalen Norm IEC 60825-1:2001-08, die als deutsche Norm DIN EN 60825-1:2001-11 übernommen wurde und zu der 2003 eine weitere Ausgabe erschien, mit der einige Korrekturen und inzwischen veröffentlichte Ergänzungen aufgenommen wurden, ergibt sich die Situation, dass jetzt z. B. im Bereich von 600 nm bis 700 nm eine um den Faktor 1,76 höhere Laserleistung bei Klasse 1 für eine Zeitdauer von 100 s und um den Faktor 5,6 bis 177,6 höhere für eine Zeitdauer von 30 000 s (8 h) gegenüber der Ausgabe aus dem Jahr 1997 erlaubt ist. Im Bereich von 400 nm bis 450 nm erfolgte eine Anhebung um den Faktor 100 bei 30 000 s als Zeitbasis. Im Bereich von 500 nm bis 550 nm beträgt der Faktor der Grenzwertanhebung sogar 1 000 für die Zeitbasis 30 000 s (vgl. Abb. 3.2 u. 3.3 in [152]).

Bis 1997 erstreckte sich der Bereich der Klasse 1 von $0,39 \mu\text{W}$ ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 550 \text{ nm}$) bis $6,935 \cdot 10^{-2} \text{ mW} = 69,35 \mu\text{W}$ bei 700 nm. Ein He:Ne-Laser bei 632,8 nm durfte danach als Klasse 1-Laser bei der Zeitbasis von 30 000 s nur $6,8 \mu\text{W}$ emittieren. Seit dem Jahre 2001 sind ab 500 nm dagegen $0,39 \text{ mW}$ zulässig, d. h. dieser Wert ist sowohl für 100 s als auch für 30 000 s erlaubt. Lediglich für Wellenlängen unter 500 nm ist die maximal zulässige Leistung ab einer Zeitdauer von 10 s bis 100 s zeitabhängig (vgl. Abb. 4.8 in [152]).

Während es bis 1997 daher ein Unterschied war, ob ein Laser der Klasse 1 mit der Zeitbasis von 100 s oder 30 000 s klassifiziert war, so ist dieser Unterschied heute nur noch in dem relativ kleinen Wellenlängengebiet von Bedeutung, das im wesentlichen durch fotochemische Gefährdung bestimmt wird, also unterhalb von 500 nm. Dabei besteht der Unterschied aber auch unterhalb von 500 nm nicht in den Grenzwerten selbst, sondern darin, dass für $t = 100 \text{ s}$ mit einem Grenzempfangswinkel γ_p von 11 mrad, für $t = 30\,000 \text{ s}$ dagegen mit $\gamma_p = 110 \text{ mrad}$ hinsichtlich der fotochemischen Grenzwerte bewertet werden soll und zwischen 100 s und 10^4 s der zeitabhängige Winkel $\gamma_p = 1,1 \cdot t^{0,5} \text{ mrad}$ bei der Messung der Leistung zu verwenden ist. Der Empfangswinkel, der manchmal auch Gesichtsfeld genannt wird, berücksichtigt dabei die Augenbewegungen und hat nichts mit der Winkelausdehnung der Quelle zu tun.

Auffallend ist dabei insbesondere, dass in der neuen DIN-Norm für Lasereinrichtungen eine "Langzeitklassengrenze" für Laser der Klasse 1 fast im ganzen sichtbaren Spektralbereich vorliegt, d. h. es ist nicht nur eine Anhebung der Grenzwerte erfolgt, sondern bei der Klasse 1 wurde von 500 nm bis 700 nm, also von "blaugrün" bis "rot" durchweg die Zeitbasis von 8 h zugrunde gelegt.

Dabei stellt sich nicht die Frage, ob es bei den neuen MZB-Werten bzw. bei den neuen Grenzwerten zugänglicher Strahlung nicht doch oberhalb von 500 nm zu photothermischen Schäden oder unterhalb von 500 nm zu photochemischen Schäden kommen kann, denn dies wird zumindest aufgrund der Neubewertung bzw. Revision der bisherigen Grenzwerte durch ICNIRP [169] eigentlich ausgeschlossen, sondern es stellt sich vielmehr die Frage, "wie viel darf es denn noch sein?".

In Untersuchungen mit einem Laserlinienstrahl bei 532 nm Wellenlänge, bei dem die Grenzwerte der Klasse 1 eingehalten waren, konnten in einer Versuchsanordnung dazu bereits erste Eindrücke bei Freiwilligen auf der Lasermesse im Juni 2005 („Laser 2005“) in München gesammelt werden, und zwar dergestalt, dass alle Versuchsteilnehmer den Blick in einen solchen Klasse 1-Laserscanner bereits bei Zeitdauern im Sekundenbereich für sehr hell bis unangenehm hell eingestuft haben. Wirklich längere Zeit wollte in einen solchen Strahl niemand hineinschauen. Ein Blick in einen solchen Strahl bzw. das über einen Zeitraum bis zu 8 Stunden lange Ausgesetztsein wurde als unerwünscht angesehen.

In einer weiteren Untersuchung mit auf der Basis der neuen Grenzwerte als Laser der Klasse 1 klassifizierten Lumineszenzdioden (LED) haben die Expositionen bei den untersuchten Personen – nach deren eigenen subjektiven Angaben – durchaus zu beträchtlichen Blendungserscheinungen geführt, und es wurde dabei nicht selten die Frage gestellt, "ob denn dies wirklich sein müsste". Dabei war die Expositionsdauer bei den bisher durchgeführten Vorversuchen und Demonstrationen lediglich im Bereich von 1 s bis 5 s, d. h. weit unterhalb dessen, was zeitlich zulässig ist.

Auch wenn aus der Sicht der MZB-Werte (Grenzwerte) keine unmittelbare Gefahr durch thermische oder photochemische Effekte besteht, so könnte eine Minimierung der Expositionswerte den Bereich, der zwar bereits als unbedenklich gilt, doch noch weiter in Richtung völlig unbedenklich verschieben. Hierdurch könnten dann Belästigungen und erhebliche Beeinträchtigungen zumindest verringert werden. Die Anhebung der Grenzwerte, zum Teil um den Faktor 1 000, in den letzten Jahren, zeigt allerdings eher eine gegenläufige Tendenz.

Insbesondere längere Expositionen im Bereich von Sekunden bis Minuten sollten unbedingt unter den vorstehenden Aspekten einer genaueren Untersuchung unterzogen werden.

Die Frage ist hier aber nicht primär diejenige, ob nicht doch längere Zeiten, d. h. Einwirkungsdauern von mehr als 100 s, eventuell auch 10 000 s bis 30 000 s und darüber hinaus schädliche Wirkungen mit sich bringen könnten, es also um Fragen wie diejenigen nach den Sicherheitsfaktoren geht, sondern vordergründig darum, in wieweit kurzzeitige Überschreitungen von noch zu ermittelnden Blendungsgrenzwerten Belästigungen oder erhebliche Beeinträchtigungen beinhalten.

Dabei ist die Kurzzeitigkeit am normalen Gebrauch der Arbeitsmittel bzw. Gebrauchsgegenstände auszurichten, d. h. hier steht der bestimmungsgemäße Gebrauch im Vordergrund.

Orientiert man sich an der Klasse 2, der die Zeitdauer/-basis von 0,25 s zugrunde liegt, so sind Einwirkungsauern von größer als 0,25 s bis 100 s sicherlich noch als kurzzeitig zu betrachten, während solche oberhalb von 100 s bis etwa 1 000 s in diesem Sinne eigentlich nicht mehr als kurzzeitig angesehen werden sollten. Der Maßstab, der für Expositionsgrenzwerte gilt, wonach „langzeitig“ bereits ab 10 s beginnt, ist hier wahrscheinlich zu relativieren bzw. wirklich arbeitsplatzbezogen festzulegen.

Bedenkt man, dass die über Klasse 1 liegende Klasse 2 jahrelang durch Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes als sicher eingestuft wurde, es sich aber inzwischen klar herausgestellt hat, dass der Lidschlussreflex nur in maximal ca. 20% der Fälle auftritt, so ist auch bei Blendung daran zu denken, dass sich eine vergleichbare Situation, d. h. diejenige einer Fehleinschätzung zumindest bei den indirekten Effekten in der Klasse 1 nicht per se ausschließen lässt.

In der seinerzeit aktuellen Ausgabe der DIN 58126 - Teil 6 (1981-04) "Sicherheits-technische Anforderungen für Lehr-, Lern- und Ausbildungsmittel; Laser" [177] wurde, wie in vielen anderen Festlegungen auch, davon ausgegangen, dass zum einen der Lidschlussreflex bei plötzlichem starken Lichteinfall zu einem automatischen Schließen des Auges führt und die Belichtungszeit auf 250 ms begrenzt und zum anderen, dass nach dem Stand der Erkenntnis keine Gefahr für das Auge besteht, solange der Betrachter sich nicht geblendet fühlt, da die in das Auge eintretende Leistung, die den Eindruck der Blendung hervorruft, erheblich unter 1 mW liegt.

Es kann zwar aus eigener Erfahrung bestätigt werden, dass eine Blendung durch Laserstrahlung andererseits zum Teil bereits bei wenigen μW eintritt, dass aber im Hinblick auf eine Grenze zwischen "sicher und durch vorliegende Blendung geschützt" keine relevante Aussage gemacht werden kann, weil sich erstens der Lidschlussreflex im Wesentlichen als Trugschluss erwiesen hat und zweitens die Einschätzung einer Blendung in der Regel nicht aus vorliegender Erfahrung abgeleitet werden kann. Es besteht auch keine belastbare Aussage dahingehend, dass "verstärkte" Blendung eher zur Auslösung eines Lidschlussreflexes führt. Die Grenze zwischen gefährlich und ungefährlich kann allein vor dem Hintergrund der Blendung - zumindest zurzeit - nicht gezogen werden.

Erste Erfahrungen mit optischen Strahlern der Klasse 1 haben gezeigt, dass deren Einwirkung über Zeitdauern von ca. 1 s auf die Augen als sehr unangenehm empfunden wird und mit dem Auftreten unter Umständen minutenlanger Nachbilder verknüpft ist.

Ein Beispiel des Zahlenmaterials soll die Problematik verdeutlichen. Im Bereich von $500 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$ liegen die MZB-Werte derzeit bei $3,9 \cdot 10^{-4} \cdot C_6 \text{ W} = 390 \mu\text{W} \cdot C_6$ für Einwirkungsauern von 100 s bis zu 30 000 s. C_6 kann für ausgedehnte Quellen maximal 66,7 werden.

Im Gegensatz dazu ist der Maximalwert der Klasse 2 für $t = 0,25 \text{ s}$ 1 mW, d. h. der Faktor beträgt $1 \text{ mW} / 0,39 \text{ mW} = 2,564$ bzw. es ergeben sich als Kehrwert 39 % des zulässigen Wertes und das bei einer Einwirkungsauer, die um den Faktor $30\,000 / 0,25 = 1,2 \cdot 10^5$ größer sein darf. Hier ist die Erwartungshaltung bereits relativ hoch, dass sich Effekte einstellen könnten, die bislang nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 1.1 fasst die Verhältnisse bezüglich der MZB-Werte für Laserstrahlung zusammen.

Tab. 1.1 MZB-Werte für Laserstrahlung als Funktion der Einwirkungsdauer für Wellenlängen zwischen 500 nm und 700 nm

Einwirkungsdauer in s	maximal zulässige Leistung in mW
0,25	1,0
1,0	0,7
10 – 30 000	0,39

Obwohl die Überlegungen zu Blendungserscheinungen daher ihren Ursprung im Wesentlichen in den zum Teil drastisch angehobenen Grenzwerten für Laser hatten, so galt dies doch gleichwohl auch für LED – und im Grunde auch für andere nicht-kohärente optische Strahlungsquellen, wenn es um ein mögliches Blendungspotenzial ging.

Auf das Potenzial einer Blendung weist auch eine auf Initiative der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) nach § 12 Abs. 2 des Geräte- und Produktsicherheitsgesetzes (GPSG) entstandene Stellungnahme zur Risikobewertung von Lasern und LED der Klassen 2, 2M und 3A im sichtbaren Wellenlängenbereich hin [178]. Dort heißt es: *„Bei der Anwendung von Lasern und LED der Klassen 2, 2M und 3A im sichtbaren Wellenlängenbereich können bei einer Einwirkungszeit von mehr als 0,25 s die maximal zulässigen Bestrahlungs-Werte ... überschritten werden. Damit kann das Risiko einer möglichen Augenschädigung steigen. Darüber hinaus kann es bei der Anwendung von Lasern und LED zu indirekten bzw. mittelbaren Gefährdungen, wie z. B. Blendung, kommen.“* Und weiter: *„Mögliche Augengefährdungen durch LED unterscheiden sich nicht von einer Gefährdung durch konventionelle Lichtquellen. Aufgrund der allgemein großen Strahldivergenz und ihrer flächenhaften Quellenausdehnung besitzen diese Lichtquellen kein mit kollimierter Laserstrahlung vergleichbares Gefährdungspotenzial. ... Allerdings kann es auf Grund von großen Leuchtdichten von LED zu Blenderscheinungen kommen.“*

Darüber hinaus wird in dieser Stellungnahme [178] auch in Kombination Bezug genommen auf die Erkenntnisse zum Lidschlussreflex und zu anderen Abwendungsreaktionen [152, 153], indem es heißt: *Beim bewussten Blick in eine Strahlungsquelle der Klassen 2 oder 3A steigt mit zunehmender Expositionsdauer das Risiko eines Augenschadens. Selbst eine starke Blendung führt nicht unbedingt zu Abwendungsreaktionen und somit nicht zur Verkürzung der Expositionsdauer.*

Laser und LED können durch ihre Blendwirkung ein vergleichbar hohes sekundäres Gefahrenpotenzial besitzen. Wie nach dem Blick in andere helle Lichtquellen, z. B. Sonne oder Scheinwerfer, können temporär eingeschränktes Sehvermögen und Nachbilder je nach Situation zu Irritationen, Belästigungen, Beeinträchtigungen und sogar zu Unfällen führen. Grad und Abklingzeit sind nicht einfach quantifizierbar. Sie

hängen jedoch maßgeblich vom Helligkeitsunterschied zwischen Blendlichtquelle und Umgebung ab.“

Im speziellen Fall von LEDs ist inzwischen deren Herausnahme aus der Basisnorm IEC 60825-1 [1] im Sinne der Gleichbehandlung in entsprechenden Normen für inkohärente optische Strahler erfolgt, und zwar soweit es sich um die Anwendung als Lampen handelt. LEDs wurden daher jetzt in die Norm IEC 62471 [287] aufgenommen. Nach der in dieser Norm eingeführten Klassifizierung gehören z. B. zur „Risikogruppe 2 (Moderate-Risk)“ Lampen und Lampensysteme, für die gilt: *“The philosophical basis for the Risk Group 2 (Moderate-Risk) classification is that the lamp does not pose a hazard due to the aversion response to very bright light sources or due to thermal discomfort.”* [287]. Entsprechend der bisherigen – schon traditionellen – Annahme wird auch hierbei sowohl in Bezug auf Blaulichtgefährdung als auch für thermische Gefährdung von einer Abwendungsreaktion innerhalb von 0,25 s ausgegangen und diesbezüglich bislang in keiner Weise der Stand von Technik und Wissenschaft berücksichtigt, wie er mittlerweile veröffentlicht ist [153, 190, 196].

Auch die Normung zu Lasern nimmt sich erstmals dem Thema indirekter Gefährdung an, indem in der zweiten Ausgabe der IEC 60825-1 in der Beschreibung der Laserklassen der Klasse 1 der Hinweis *„Class 1 laser products which emit visible radiant energy may still produce dazzling visual effects, particularly in low ambient light.“* steht [1]. Bei Klasse 1M ist der Satz *„Intrabeam viewing of Class 1M laser products which emit visible radiant energy may still produce dazzling visual effects, particularly in low ambient light.“* zu finden und für Klasse 2 wurde eine noch deutlich weitergehende Formulierung in die Klassenbeschreibung aufgenommen. Dort heißt es *„However, dazzle, flash-blindness and afterimages may be caused by a beam from a Class 2 laser product, particularly under low ambient light conditions. This may have indirect general safety implications resulting from temporary disturbance of vision or from startle reactions. Such visual disturbances could be of particular concern connected with performing safety-critical operations such as working with machines or at height, with high voltages or driving.“* Ein praktisch gleicher Satz findet sich sowohl bei Lasern der Klasse 2M als auch bei denjenigen der Klasse 3R, wobei es sich bei Letzteren nur um diejenigen im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm handelt.

Dies ist ein eindeutiger Beweis dafür, dass sich neuerdings Fragen zur Sicherheit und Gefährdung in der Normung nicht nur mit der Möglichkeit direkter Schädigung befassen, sondern auch indirekte Effekte angesprochen werden [286]. Von einem Paradigmenwechsel sollte man gleichwohl noch nicht sprechen, aber im Sinne einer Prävention ist dies durchaus begrüßenswert.

Es muss dabei aber bedacht werden, dass die Anwendung harmonisierter oder sonstiger Normen freiwillig ist, und dem Hersteller steht es stets frei, andere technische Spezifikationen zu benutzen, um den Anforderungen zu entsprechen. Allerdings wird bei Produkten, die nach harmonisierten Normen hergestellt worden sind, davon ausgegangen, dass sie die entsprechenden wesentlichen Anforderungen erfüllen.

Aufgrund der Mit- und Zuarbeit im Fachausschuss Elektrotechnik, der die BGI 832 erarbeitet hat und der Mitarbeit im entsprechenden Gremium der DKE (im DIN und VDE), das für die DIN EN 60825-1 zuständig ist, sind inzwischen bereits Formu-

lierungen bezüglich Blendung in den entsprechenden Regelungen und Standards enthalten. Wichtig ist aber, dass neben der qualitativen Aussage durch quantitative Angaben faktische Sicherheit erreicht wird.

Es sollte daher ein vordringliches Ziel der Forschung im Bereich zugänglicher und zulässiger Grenzwerte der Klasse 1 im Spektralbereich von 400 nm bis 700 nm sein, den Grad bzw. das Ausmaß einer Blendung qualitativ und quantitativ zu ermitteln, um daraus eine Bewertung der Beeinträchtigungen bzw. Belästigungen bei Tätigkeiten am Arbeitsplatz vornehmen zu können.

Es dürfte unbestritten sein, dass neben den Gefährdungen durch thermische Schädigungen auch solche vorübergehender biologischer Effekte und der Beeinträchtigung sowie des Wohlbefindens, d. h. der visuellen Ergonomie, einer eingehenden Betrachtung bedürfen, und zwar insbesondere dann, wenn damit Sehaufgaben und sicherheitsrelevante Tätigkeiten verknüpft sind.

Dabei handelt es sich insbesondere um Tätigkeiten, die sehr stark von der menschlichen Fähigkeit des Sehens abhängig sind. Dazu gehören u. a. das Führen eines Fahrzeuges, und zwar zu Lande, zu Wasser und in der Luft, das Bedienen einer Maschine, das Erkennen von Anzeigen, sowie die Form-, Farb- und Kontrasterkennbarkeit bei vornehmlich visuell bestimmten Arbeiten.

Erst die quantitative Bestimmung der Art, des Ausmaßes und der Dauer eines Nachbildes und der mit einer Blendung verbundenen Effekte wie Beeinträchtigung des Farbsehvermögens als Funktion von Einwirkungsdauer, zeitlichem Verlauf der Exposition, Ausdehnung und Form der blendenden Quelle, Umgebungshelligkeit, Adaptionszustand der exponierten Personen, Wellenlänge bzw. Wellenlängenbereich usw. liefern die erforderlichen Erkenntnisse für eine weitergehende Gefährdungsanalyse und stellen die entsprechenden Grundlagen dar, um belastbare Aussagen z. B. zur Erkennbarkeit von Farben, Formen, Details und Kontrasten zu machen bzw. Empfehlungen und Handlungsanweisungen für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz bei der Arbeit zu geben. Auch Schreckreaktionen, die als Folge einer überraschenden Blendung eintreten können, beinhalten unter Umständen ein erhebliches Gefährdungspotenzial am Arbeitsplatz. Dazu gehören auch Tauglichkeitstests z. B. beim Führen von Fahrzeugen und beim Bedienen von Maschinen.

Darüber hinaus tragen die Ergebnisse der beiden Forschungsprojekte F 1775 "Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes" [152] und F 1984 „Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung" [153] insofern sichtbare Früchte, dass bei der Beschreibung der Laserklassen 2 und 2M das Sicherheitskonzept dieser Klassen in der 2. Ausgabe der Norm IEC 60825-1, das bisher allein auf Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes beruhte, jetzt durch die Aufforderung „*Users are instructed by labelling not to stare into the beam, i.e. to perform active protective reactions by moving the head or closing the eyes and to avoid continued intentional intrabeam viewing.*“ ergänzt bzw. ersetzt wurde. Die Einbeziehung aktiver Schutzreaktionen statt der bisherigen Abstützung allein auf angenommene physiologische Gegebenheiten in das Sicherheitskonzept der Laser stellt international eine weitgehende Anerkennung der Forschungsergebnisse zum Lidschlussreflex und zu Abwendungsreaktio-

nen dar und kann daher als Erfolg der Bemühungen um Erhöhung der Sicherheit im Umgang mit Lasern derjenigen Klassen betrachtet werden, bei denen in Deutschland bei der Anwendung im gewerblichen Bereich kein Laserschutzbeauftragter gemäß BGV B 2 benannt werden muss. Dies war auch eine Notwendigkeit, um die als Folge des häufigen Fehlens des Lidschlussreflexes sich ergebende Unsicherheit nicht zur Sorge um potenzielle Schädigungsmöglichkeiten werden zu lassen.

Bei Lasern der Klasse 3R wurde darüber hinaus durch die Aufnahme des Textes „*Class 3R lasers should only be used where direct intrabeam viewing is unlikely.*“ klar darauf hingewiesen, dass diese Laser dort nicht zur Anwendung kommen sollen, wo mit einer Exposition der Augen gerechnet werden kann. Eine andere Formulierung wäre auch schwerlich akzeptabel gewesen, da bei diesen Lasereinrichtungen Strahlung emittiert wird, bei der es beim direkten Blick in den Strahl zu einer Überschreitung der MZB-Werte kommen kann.

Diese Thematik der Möglichkeit der Überschreitung der MZB-Werte erhält in Europa – und damit natürlich auch in Deutschland – schon bald eine neue Dimension dadurch, dass die Veröffentlichung der 19. Einzelrichtlinie im Rahmen der Arbeitsschutzrichtlinie [17, 180] Maßnahmen enthält, die dann vom Arbeitgeber/Unternehmer zu erfüllen sind, wenn Expositionsgrenzwerte (EGW) überschritten werden. Da die Expositionsgrenzwerte in dieser im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlichten neuen Richtlinie den „exposure limits“ der Leitlinien der Internationalen Strahlenschutzkommission für Nichtionisierende Strahlung entsprechen (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), auf denen wiederum die MZB-Werte der Norm IEC 60825-1 in der Ausgabe bis 2001 weitgehend basieren, kann auch die Benutzung einer Lasereinrichtung der Klasse 2 zu einer Überschreitung der Expositionsgrenzwerte führen. Dazu heißt es in Artikel 5 (Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Risiken) Abs. 2 [17] *„Sofern bei der gemäß Artikel 4 Absatz 1 durchgeführten Risikobewertung für die Exposition von Arbeitnehmern gegenüber künstlichen Quellen optischer Strahlung festgestellt wird, dass die Expositionsgrenzwerte möglicherweise überschritten werden, muss der Arbeitgeber ein Aktionsprogramm mit technischen und/oder organisatorischen Maßnahmen zur Vermeidung einer über die Grenzwerte hinausgehenden Exposition ausarbeiten und durchführen und dabei insbesondere Folgendes berücksichtigen:*

- b) gegebenenfalls die Auswahl von Arbeitsmitteln, die in geringerem Maße optische Strahlung emittieren, unter Berücksichtigung der auszuführenden Arbeit;*
- c) technische Maßnahmen zur Verringerung der Einwirkung optischer Strahlung, erforderlichenfalls auch unter Einsatz von Verriegelungseinrichtungen, Abschirmungen oder vergleichbaren Gesundheitsschutzvorrichtungen;*
-*
- f) die Begrenzung der Dauer und des Ausmaßes der Exposition;*
- g) die Verfügbarkeit geeigneter persönlicher Schutzausrüstung;... .*

In Abs. 3 steht darüber hinaus *„...Die betreffenden Bereiche werden abgegrenzt und der Zugang zu ihnen wird eingeschränkt, wenn dies technisch möglich ist und die Gefahr einer Überschreitung der Expositionsgrenzwerte besteht.“* und Abs. 4 fordert

„Die Arbeitnehmer dürfen auf keinen Fall einer über den Grenzwerten liegenden Exposition ausgesetzt sein. Werden die Expositionsgrenzwerte trotz der vom Arbeitgeber aufgrund dieser Richtlinie durchgeführten Maßnahmen in Bezug auf künstliche Quellen optischer Strahlung überschritten, so ergreift der Arbeitgeber unverzüglich Maßnahmen, um die Exposition auf einen Wert unterhalb der Expositionsgrenzwerte zu senken. Der Arbeitgeber ermittelt, warum die Expositionsgrenzwerte überschritten wurden, und passt die Schutz- und Präventivmaßnahmen entsprechend an, um ein erneutes Überschreiten der Grenzwerte zu verhindern.“

Damit wird es zukünftigen nationalen Regelungen vorbehalten sein, wie bei der Umsetzung dieser Richtlinie, d. h. bis zum 27. April 2010, mit der Situation umzugehen ist, wenn eine Überschreitung des Expositionsgrenzwertes möglich ist. Dies ist bereits potenziell bei der Anwendung eines Lasers der Klasse 2 möglich, und zwar dann, wenn weder der Lidschlussreflex noch eine andere Abwendungsreaktion auftritt, denn eine Expositionsdauer von mehr als einer Viertel Sekunde kann bei einem Laser mit einer Ausgangsleistung von 1 mW, d. h. beim direkten Blick in den Laserstrahl, zu einer Expositionsgrenzwertüberschreitung führen. Deshalb kommt aktiven Schutzreaktionen eine erhöhte Bedeutung im Hinblick auf Unterweisungen auf der einen Seite und auf ihre Formulierung in den Benutzerinformationen des Herstellers bzw. Inverkehrbringers einer entsprechenden Lasereinrichtung andererseits zu.

Die Thematik, wie man durch aktive Schutzreaktionen, auf die z. B. in Unterweisungen eingegangen wird, das Risiko einer Überexposition verringern kann, wurde erstmals auch international vorgestellt und zur Diskussion gestellt [179].

Die für Laser dargestellte Situation gilt natürlich auch für LED und andere künstliche Quellen optischer Strahlung, denn dort können ebenfalls Expositionsgrenzwerte überschritten werden.

Weiter heißt es in Artikel 4 (Ermittlung der Exposition und Bewertung der Risiken) Abs. 3 der europäischen Richtlinie zu optischer Strahlung aus künstlichen Quellen *„Nach Artikel 6 Absatz 3 der Richtlinie 89/391/EWG berücksichtigt der Arbeitgeber bei der Risikobewertung insbesondere Folgendes:*

a) *Ausmaß, Wellenlängenbereich und Dauer der Exposition gegenüber künstlichen Quellen optischer Strahlung;*

....

e) *alle indirekten Auswirkungen wie vorübergehende Blendung, Explosion oder Feuer;... .*

Last but not least können gemäß Artikel 10 (Technische Änderungen) Änderungen in den Anhängen erforderlich werden, und zwar z. B. aufgrund *„...neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse auf dem Gebiet der Exposition gegenüber optischer Strahlung am Arbeitsplatz.“* M. a. W. wirft die neue Richtlinie ihre Schatten bereits voraus, und es ist zu empfehlen, die entsprechenden Regelungsinhalte frühzeitig „anzudecken“, damit Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) gemäß der Mindestvorschriften gewährleistet werden.

Darüber hinaus hat nach Art. 6, Abs. 2, Nr. h, der europäischen Arbeitsschutzrichtlinie 89/391/EWG [180] der kollektive Gefahrenschutz Vorrang vor dem individuellen Gefahrenschutz, d. h. wenn es möglich ist, sind Beschäftigte/Arbeitnehmer insgesamt gegenüber einer potenziellen Gefährdung zu schützen und persönliche Schutzausrüstung erst dann anzuwenden, wenn die entsprechende Gefährdung nicht – gewissermaßen en bloc, also „an der Wurzel“, beseitigt werden kann.

Bei der Richtlinie 89/391/EWG handelt es sich um eine gemäß Art. 138 (ex-Art. 118a) des EG-Vertrages erlassene Arbeitsschutz-Richtlinie. Solche EG-Rahmen-Richtlinien führen zu verschiedenen Einzel-Richtlinien, in denen Beschaffenheits- und Benutzungsvorschriften sowie Mindestanforderungen formuliert sind.

In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass es eine elektromagnetischen Feldern entsprechende Empfehlung der EU für die Allgemeinbevölkerung bei optischer Strahlung bislang nicht gibt. Hier wäre es bedenkenswert, dass man für optische Strahlung eine ähnliche Lösung findet, wie im Falle elektromagnetischer Felder auch, wo die Europäische Union, gestützt auf den Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft (EG-Vertrag, EGV), insbesondere auf Artikel 152 (ex-Art. 129) Absatz 4 Unterabsatz 2, ("Erlass von Empfehlungen des Rates auf Vorschlag der Kommission") und Art. 3 Abs. 1 Buchstabe p) eine Empfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz) veröffentlicht hat [181]. Inwieweit hierbei aber die durch das Parlament erwirkte Herausnahme der optischen Strahlung natürlicher Quellen, insbesondere der Sonnenstrahlung, aus der EU-Richtlinie wiederum „hinderlich“ sein könnte, kann nur schwer abgeschätzt werden.

Bei den Richtlinien nach Art. 152 des EG-Vertrages sind die Ziele ein Beitrag zur Erreichung eines hohen Gesundheitsschutzniveaus und der Schutz der Gesundheit der Arbeitnehmer und der Verbraucher.

Mit eine Basis der EU-Empfehlung für elektromagnetische Felder war die Tatsache, dass das Europäische Parlament in seiner EntschlieÙung vom 5. Mai 1994 zur Bekämpfung der durch nichtionisierende Strahlung verursachten Gefahren [182] die Kommission aufgefordert hat, gesetzgeberische Maßnahmen zur Begrenzung der Exposition der Arbeitnehmer und der Bevölkerung gegenüber nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung vorzuschlagen.

Nach dem Grundsatz der Subsidiarität können neue Maßnahmen in einem Bereich, der nicht in die ausschließliche Zuständigkeit der Gemeinschaft fällt, wie der Schutz der Bevölkerung vor nichtionisierender Strahlung, nur dann von der Gemeinschaft eingeleitet werden, wenn aufgrund des Umfangs oder der Auswirkungen der vorgeschlagenen Maßnahmen die Ziele eher von der Gemeinschaft als von den Mitgliedstaaten erreicht werden können [181].

Ähnlich wie bei elektromagnetischen Feldern sollten dabei die den Maßnahmen zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber optischer Strahlung gegenüber anderen Vorteilen auf dem Gebiet der Gesundheit, der Sicherheit am Arbeitsplatz und der öffentlichen Sicherheit abgewogen werden, die Geräte, bei denen opti-

sche Strahlung erzeugt wird, für die Lebensqualität, zum Beispiel in den Bereichen Beleuchtungstechnik, Straßenverkehr und öffentliche Sicherheit, mit sich bringen.

Es wird aber als erforderlich angesehen, durch Empfehlungen an die Mitgliedstaaten zum Schutz der Bevölkerung einen Gemeinschaftsrahmen für die Exposition gegenüber optischer Strahlung festzulegen. Hierzu wird die Auffassung vertreten, dass auch die Europäische Kommission gemeinsam mit dem Rat und dem Europäischen Parlament aufgrund vereinbarter Grundsätze auch im Bereich optischer Strahlung in Verfolgung ihrer Ziele über kurz oder lang eine EU-Ratsempfehlung für den Schutz der Allgemeinbevölkerung erarbeiten muss. Mit einer solchen Empfehlung würde bezweckt, dass die Gesundheit der Bevölkerung geschützt wird. Sie würde deshalb insbesondere für die relevanten Bereiche gelten, in denen sich Einzelpersonen der Bevölkerung oder auch ganze Gruppen unter dem Gesichtspunkt der von der Empfehlung erfassten Wirkungen für eine erhebliche Zeit aufhalten.

Da auch der nationale Gesetzgeber bislang für den Bereich der Allgemeinbevölkerung und der Nachbarschaft keine rechtsverbindlichen Regelungen zur Bestimmung der immissionsschutzrechtlichen Erheblichkeitsgrenzen für die Immissionen von Licht bzw. optische Strahlung erlassen hat, ist dieser Bereich zurzeit weitgehend ungeregelt.

Ergänzend dazu wären auch Fragen der Vorsorge gegenüber einer Exposition durch kohärente und inkohärente optische Strahlung der Allgemeinbevölkerung Sache des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) [18], aus dem wiederum auf Grund des § 23 Abs. 1 eine Verordnung über optische Strahlung nach Anhörung der beteiligten Kreise durch die Bundesregierung erfolgen könnte, und zwar ähnlich wie dies bei der 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (26. BImSchV) für elektromagnetische Felder der Fall ist [198].

Eine Absenkung der Expositionsgrenzwerte um den Faktor 5 für die Allgemeinbevölkerung gegenüber den Expositionsgrenzwerten, wie sie für Arbeitnehmer in der neuen EU-Richtlinie auf der Basis der ICNIRP-Leitlinien für inkohärente optische Strahlung und für Laserstrahlung [167-170] festgelegt wurden, erscheint nicht erforderlich. Allerdings sollten dabei alle Auswirkungen auf die Gesundheit der Teile der Allgemeinbevölkerung Beachtung finden, die besonders gefährdeten Risikogruppen angehören und diejenigen Auswirkungen, die sich aus dem Zusammenwirken zwischen optischer Strahlung und fotosensibilisierenden Stoffen ergeben können, Berücksichtigung finden.

Zurzeit kann ohne eine Rechtsverordnung oder Verwaltungsvorschrift mit abschließender Bewertung des Standes der Technik im Bereich optischer Strahler, d. h. ohne behördliche Bindung wie z. B. bei der 26. BImSchV im Bereich elektromagnetischer Felder, die Feststellung des Standes der Technik nur auf der Basis der Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ und der Normung erfolgen.

Die derzeitigen MZB-Werte im informativen Anhang der Norm IEC 60825-1 und seit November 2001 auch der DIN EN 60825-1:2001-11 basieren auf den entsprechenden Werten in den ICNIRP-Guidelines.

Die SSK hat vor kurzem ([3, 10]) eine Empfehlung zur Blendung verabschiedet, wobei davon ausgegangen werden kann, dass damit durchaus eine gewisse Befassung mit der Thematik Blendung in der Öffentlichkeit erfolgen wird.

Bei der Frage, ob Blendung unmittelbar die Gesundheit negativ beeinflusst, kann man nicht den Maßstab der WHO anlegen, wonach Gesundheit – wie vorstehend dargelegt – sehr umfassend definiert ist. Vielmehr sollte man von dem Risikobegriff ausgehen, wonach es sich um die „Kombination der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und der Schwere dieses Schadens“ handelt. Dabei wird ein Schaden gemäß ISO/IEC-Guide 51 [195] als „physische Verletzung oder Schädigung der Gesundheit von Menschen oder als Schädigung des Eigentums“ definiert.

Im Hinblick auf eine Einordnung der Blendung muss selbstverständlich berücksichtigt werden, dass die Auswirkung einer Blendung durchaus auch mit einer thermischen und damit praktisch irreversiblen Schädigung verbunden sein kann, wenn davon Gewebe betroffen ist, wie im Falle der Netzhaut, das nicht regeneriert werden kann. Darüber hinaus muss eine Korrelation zwischen einer länger andauernden optischen Strahlungseinwirkung bzw. einer intermittierenden bzw. wiederholten Einwirkung auch im Hinblick auf die Gefahr eines photochemischen Schadens bedacht werden – zumindest bei kürzeren Wellenlängen.

Die „Gemeinde der Strahlenschützer“ muss sich bei der Blendung sicherlich an diese neue Qualität der physikalischen Einwirkung und die damit verbundenen Effekte erst noch gewöhnen. Es ist daher sinnvoll und notwendig, Untersuchungen durchzuführen, die das Ziel verfolgen, Schwellen zu bestimmen, die mit bestimmten biologischen Wirkungen verbunden sind, die zwar reversibel sind, deren Persistenz aber eine gewisse Zeitdauer anhält. Aus dieser jeweiligen Dauer können dann entsprechende Einflüsse z. B. auf Funktionen und Fähigkeiten der Augen und des gesamten Sehapparates abgeleitet werden. Damit besteht dann zugleich die Möglichkeit, eine Blendungsbegrenzung bzw. -verhinderung in das Vorbeugungs- und eventuell auch in das Vorsorgeprinzip zu integrieren, wobei nicht – wie üblich – unmittelbare Gefahren abgewehrt, sondern mittelbare entsprechend Berücksichtigung finden. Insofern könnte es dann auch nicht zu einem Konflikt kommen, dass der Staat die Pflicht zur Vorsorge gegen eine unmittelbare Gefahrensituation wahrnehmen müsse, diese aber aus dem möglichen Schadens-Ausmaß abgeleitet werden könnte, das wiederum die indirekte Folge einer Blendung sein könnte.

Damit wäre es nicht gerechtfertigt, eine Pflicht des Staates auf Vorsorge deshalb zu verneinen, da diese bei rein hypothetischen Gefährdungen nicht bestehe, was nur dann als gegeben betrachtet wird, wenn verlässliche wissenschaftliche Erkenntnisse über Gesundheitsschäden vorliegen. Dass nachteilige Auswirkungen durch optische Strahlung nicht ausgeschlossen werden können, genügt dazu nicht.

Da im Gegensatz zu Grenzwerten, die vor photothermischen oder -chemischen Schädigungen durch optische Strahlung schützen, für durch Blendung hervorgerufene, vorübergehende Effekte bislang international keine Empfehlungen vorliegen, es aber gewisse Notwendigkeiten und Zwänge gibt, die mehr als nur eine qualitative Aussage erforderlich machen, wird eine Befassung mit den aufgrund unterschiedlicher „Intensitäten“ der von einer Blendlichtquelle emittierten sichtbaren, opti-

schen Strahlung für dringend notwendig gehalten. Dazu sollten Untersuchungen durchgeführt werden, die sich mit den verschiedenen Graden der Auswirkungen einer Blendung befassen, aufgrund dessen dann auch – unter Berücksichtigung (noch) „tolerabler“ Effekte – Blend-Grenzwerte festgelegt werden könnten.

Bislang fehlt es noch an der Festlegung blendungsrelevanter Grenzwerte. Lediglich der US-amerikanische Standard ANSI Z136.6 [183] gibt dazu folgende Werte an:

„Laserfreie Zone“ (laser-free zone)	50 nW·cm ⁻²
„Kritische Zone“ (critical)	5 μW·cm ⁻²
„Empfindliche Zone“ (sensitive)	100 μW·cm ⁻² ,

die als „visual interference levels“ eingeführt wurden.

Dies ergibt Werte von 19,25 nW, 1,9 μW und 38,5 μW in eine 7-mm Blende (Pupille), d. h. Laserleistungen, die denjenigen in Klasse 1 entsprechen. In Untersuchungen wurden z. B. Leistungsdichten oberhalb von 50 μW·cm⁻², entsprechend einer Laserleistung von 20 μW, als inakzeptabel in der sogenannten „laserfreien Zone“ oberhalb der Start- und Landebahn eines Flugzeuges angesehen [184].

Bezüglich der Sicherheit im Flugverkehr spielt die Fähigkeit des Piloten eine entscheidende Rolle, und es ist wichtig, dass er sowohl im als auch außerhalb des Cockpits die visuelle Szene uneingeschränkt beobachten kann, während er das Flugzeug lenkt. Dabei ist zu bedenken, dass z. B. die Sehschärfe in dunkler Umgebung nach vollständiger Dunkeladaptation wesentlich geringer ist als unter Bedingungen der Helladaptation, bei der diese normalerweise ermittelt wird.

Piloten sind während des Fluges natürlicherweise unterschiedlichen Helligkeiten ausgesetzt. So unterscheidet sich diejenige der Sonne von der des Mondes etwa um einen Faktor 30 000. Dazu kommen insbesondere in der Start- und Landephase Bestrahlungen durch künstliche Lichtquellen.

Von NAKAGAWARA et al. [303] wurden Untersuchungen vorgestellt, die in einem Flugsimulator durchgeführt worden waren und wobei aufgrund subjektiver Empfindung der Testpersonen 5 μW/cm² als sogenannter „flugsicherer Expositionswert“ eingestuft wurden.

In einem anlässlich der International Laser Safety Conference (ILSC 2005) verfassten Beitrag wurde vom Verfasser (HDR) zu den insbesondere zum damaligen Zeitpunkt erst im Entwurf der Norm ANSI Z136.6 angegebenen Werten von 100 nW·cm⁻², 10 μW·cm⁻² bzw. 100 μW·cm⁻², folgender Kommentar und Vorschlag unterbreitet [196], der inzwischen in der 2. Ausgabe der IEC 60825-1 [1] inhaltlich übernommen wurde:

“Due to these given values (Anm.: gemeint sind die vorstehend genannten) laser belonging to class 1 and emitting in the visible part of the spectrum have the potential to cause distraction, glare, dazzle, afterimages, and startle reactions too. There is neither a physiological nor a psychological reason, which reduces such temporary bioef-

fects in the case of higher exposure values. Therefore the description of the respective laser classes, i.e., class 1, 1M, 2, 2M, and 3R, must take into account such effects too, like it has been discussed in WG1/TC76 (Working group 1: Optical Radiation Safety of the Technical Committee 76: Optical Radiation Safety and Laser Equipment) already.

From personal experience with class-1 lasers (short) afterimages could be produced even with power levels of about 3 μW to 5 μW . But up to now the “dynamics” of such effects like glare, dazzle, and afterimages are not investigated quantitatively as a function of time, power, and wavelength.”

NAKAGAWARA et al. berichten von 58 Fällen, in denen helles Licht bei 30 Unfällen und 28 Zwischenfällen als ein Beitrag zu jeweiligen Ereignis betrachtet wurde [248]. Es kam dabei insbesondere zu einer Verminderung der Fähigkeit Entfernungen einzuschätzen. Als Ursachen wurden Landepistenbeleuchtung, das Anflugwinkelfeuer und das Landelicht selbst, wobei dieses von Nebel, Staub, Regen, Schnee oder Eis reflektiert wurde, angegeben. Selbst Blendung durch die Lichter von Rettungsfahrzeugen sind in dem Bericht enthalten [358]. Als Effekte wurden insbesondere Blitzlichtblindheit und das Auftreten mehr oder weniger kleiner heller Flecke oder anderer Nachbilder wahrgenommen, wenn insbesondere Laserlicht als Ursache in Frage kam. Die Verminderung der Einschätzung von Entfernung und Höhe führte dabei dazu, dass entweder zu früh oder zu spät zur Landung aufgesetzt wurde.

Nach einem Bericht der Federal Aviation Administration (FAA) ist es bei 3 Zwischenfällen bei Piloten, die während des Fluges von einem Laserstrahl im Cockpit getroffen wurden, zu Blitzlichtblindheit gekommen und es wurde von „Flecken“ oder anderen Nachbildern gesprochen, die die Piloten sahen [248]. In einem Fall, der sich während des Starts einer B 737 in einer Höhe von 4 500 „feet“ über Grund in Las Vegas ereignete, wurde der erste Offizier durch einen nicht-identifizierten Laser am Boden sehunfähig gemacht [249]. Er verspürte dabei Schmerzen im Auge und war vollständig geblendet im rechten Auge. Es kam zur Blitzlichtblindheit auf dem rechten und zu Nachbilderscheinungen auf dem linken Auge, und zwar durch den Blick in einen grünen Laserstrahl. Dabei war der erste Offizier ca. 30 s vollständig nicht in der Lage etwas zu sehen und weitere 2 Minuten konnte er weder fokussieren noch irgendein Instrument ablesen. Der Getroffene berichtete außerdem, dass er räumliche Desorientierung hatte, d. h. den Bezug zur Vertikalen verloren hatte. Ein bleibender Schaden trat nicht ein. Da der Flugkapitän die Kontrolle über das Flugzeug übernehmen konnte, blieb ein Ereignis aus, das tragisch hätte enden können.

In einer Art Rekonstruktion unter Einbeziehung der vermuteten Laseranlage ergab sich eine Bestrahlungsstärke am Ort des „Geschehens“ von weniger als 1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, woraus sich die vom Piloten angegebenen Effekte nach Erfahrungen des U.S. Air Force Armstrong Labors in Brooks AFB nicht erklären ließen [249].

Im Bericht des National Transportation Safety Board (NTSB) [249] wird in diesem Zusammenhang von 51 früheren Ereignissen mit Laserbestrahlung von Piloten allein durch die Luftverkehrsanlage in Las Vegas innerhalb von zwei Jahren gesprochen. Einige der im sogenannten Flugsicherheitssystem (ASRS, aviation safety reporting

system) abgegebenen Berichte werden in [302] auszugsweise dargestellt und zeigen, dass es auch ernstere Vorfälle gegeben hat, wie Augenverletzungen.

Festzuhalten ist, dass es zum Zeitpunkt des hier näher dargestellten bzw. rekonstruierten Zwischenfalls eine sogenannte „Anordnung“ [284, 303] gab, in der Leitlinien für FAA-Personal enthalten sind bezüglich der Bewilligung von Lasershows im Freien. Dabei wurde die Kompatibilität anhand der beiden als NOHD („nominal ocular hazard distance“, Sicherheitsabstand) und ESD („eye safe distance“) definierten Begriffe vorgenommen. Bei dieser Vorgehensweise werden aber Effekte wie Blitzlichtblindheit, Nachbilder, Schreckreaktion und starke Blendung nicht berücksichtigt.

Neben diesen wenigen Fällen eines bemerkenswerten Zwischenfalls durch Laserbestrahlung im Flugzeug gibt es etwa 500 Berichte von Laserzwischenfällen in anderen Quellen als diejenigen der FAA.

Es ist sicherlich bedenkenswert, dass ein Pilot bereits durch die Exposition von einem relativ leistungsschwachen Laser neben einer Beeinträchtigung auch eine Ablenkung bei seinen Sehaufgaben erfahren kann, und zwar als Folge einer Blendung, Blitzlichtblindheit und aufgrund von Nachbildern [301]. Hierdurch kann es zu räumlicher Desorientierung und zum Verlust des Erkennens der Situation kommen [302].

Wenn auch Langzeitschäden aufgrund der großen Entfernung und der meist geringen Laserleistung praktisch ausgeschlossen werden können, so sind die indirekten Effekte aber nicht zu verharmlosen.

Auch wenn bis heute noch kein Unfall im Flugverkehr auf eine Laserstrahlexposition zurückgeführt wird, so sind andererseits aber Abstürze durch Blendung und Blitzlichtblindheit durch natürliches Sonnenlicht berichtet worden [184].

1.4 Forschungsnotwendigkeiten und -ziele auf dem Gebiet der Blendung

Im Gegensatz zur vorhandenen Basis der Grenzwertfestlegung unter Berücksichtigung photothermischer und photochemischer Effekte fehlt eine solche zur Festlegung zur Vermeidung einer Blendung weitgehend. Blendung wird zwar unterschwellig bis direkt als eine Basis zur Auslösung des Lidschlussreflexes bzw. von Abwendungsreaktionen betrachtet. Wie aber Untersuchungen zu diesen physiologischen Reaktionen gezeigt haben, ist auf sie kein Verlass, sodass es falsch wäre, im Umkehrschluss einen Blendgrenzwert mit gerade diesen unzuverlässigen physiologischen Effekten in Verbindung bringen zu wollen, wenngleich durchaus ein gewisser Zusammenhang bestehen kann. Es ist nicht von der Hand zu weisen, dass sich eine Person, die geblendet wurde, von der Blendquelle abwendet oder dabei einen Lidschlussreflex bzw. einen bewussten Lidschlag oder Lidschluss zeigt, aber zur Festlegung von Blendgrenzwerten bedarf es einer anderen Vorgehensweise.

Der Strahlenschutz ist insbesondere daran gewöhnt, Werte festzulegen, die einen direkten (unmittelbaren) Schaden, und zwar sowohl akut als auch chronisch, verhindern sollen. In diesem Kontext stellt die Betrachtung von Blendung eine Art neuer Qualität im Strahlenschutz dar. Dabei zeigt eine Betrachtung der Blendgefahren,

dass darin ein Potenzial liegt, das zu erheblichen Schäden führen kann. Man denke dabei nur an Verkehrsunfälle, die auf eine Blendung durch die Sonne oder entgegenkommende Fahrzeuge zurückgeführt werden können. So fand z. B. HEMION in den späten 60er Jahren, dass ca. 1 % der Verkehrsunfälle – wenigstens zum Teil – auf Blendung durch Frontscheinwerfer zurückzuführen waren [253]. Auch an anderer Stelle wird ein Zusammenhang zwischen Blendung und erhöhten Unfallzahlen auf Autobahnen gesehen [353]. Auf der anderen Seite haben gerade die Untersuchungen in [353] das überraschende Ergebnis gebracht, dass dann wenn eine sonst monotone Tätigkeit von kurzen Lichtblitzen unterbrochen wird, diese zwar zunächst als unangenehm, dann aber als mehr oder weniger willkommene Unterbrechung betrachtet werden, wodurch die Aufmerksamkeit gesteigert wurde. Bei dieser Untersuchung könnte aber auch die Erwartungshaltung bezüglich des Auftretens von Lichtblitzen, die in der Einweisung den Studienteilnehmern mitgeteilt wurde, dazu beigetragen haben, dass sich die Testpersonen mit dieser Situation arrangiert haben. So wird man sicherlich nicht ohne weiteres von einer ausschließlich begrüßenswerten Abwechslung sprechen können, insbesondere dann nicht, wenn Sehfunktionen stark genug beeinträchtigt sind.

Ursache und Wirkung können bei Blendung gegenüber derjenigen einer direkten Wirkung durch Strahlungsabsorption in einem Expositionsbereich, der an sich kaum zu einer nachhaltigen Schädigung führt, deutlich dramatischer ausfallen. Dies gilt insbesondere in einem Bereich, bei dem die Expositionswerte in vergleichbaren Größenordnungen liegen, wie z. B. im sichtbaren Bereich von Lasern der Klasse 1, 2 und 3R.

Da in den derzeit existierenden Regelwerken meist Abwendungsreaktionen als natürliche Schutzmechanismen gegenüber optischer Strahlung aufgeführt werden, und zwar insbesondere im Zusammenhang mit Laserstrahlung; dies aber gedanklich schnell eine Übertragung auch auf andere optische Strahlungsquellen finden könnte, besteht umso mehr Handlungsbedarf, nachdem sich gezeigt hat, dass dies zumindest bei Laser und LED nicht in ausreichendem Maße der Fall ist. Insofern ist mit dem Auftreten von Blendung noch mehr zu rechnen, da eine „automatische“ zeitliche Expositionsbegrenzung auf z. B. 0,25 s nicht stattfindet. Die allgemeine Lebenserfahrung zeigt bereits, dass die Zeitdauer einer Strahlungseinwirkung für das Ausmaß einer Blendung eine wichtige Rolle spielen sollte.

Dass das Auftreten von Blenderscheinungen länger- oder mittelfristig zu Schädigungen führt, wird derzeit auf Grund der Grenzwerte (maximal zulässige Bestrahlungswerte) ausgeschlossen, allerdings sind diese nur bis maximal 30 000 s festgelegt, und es gibt keine Aussage erstens für längere Einwirkungsdauern und zweitens für wiederholte 8-Stunden-Perioden.

Sowohl Berufstätige als auch die Allgemeinbevölkerung werden aber erhebliche Belästigungen als Wirkungen nicht akzeptieren, die von optischen Strahlern, wie Laser oder LED ausgehen, auch soweit sie als ungefährlich betrachtet werden können, aber indirekte Wirkungen wie erhebliche Farb-, Formen- und Kontrasterkennbarkeitsdefizite hervorrufen können.

Untersuchungen zu Expositionen im Bereich von Einwirkungsdauern oberhalb der Zeitbasis von 0,25 s, bei der definitionsgemäß Dauerstrichbetrieb beginnt, man es also mit sogenannten Langzeitexpositionsgrenzwerten mit Zeitdauern bis zu 30 000 s zu tun hat, sind nicht allzu zahlreich und sind insbesondere im Hinblick auf erhebliche Beeinträchtigungen und im Sinne von Vorbeugung und Vorsorge dringend geboten. Außerdem ist wenig bekannt darüber, ob nicht doch auch von Expositionen, bei denen über sehr lange Zeitdauern Einwirkungen nahe der Expositionsgrenzwerte stattfinden, eventuell chronische Veränderungen bewirkt werden können. Bislang wurden solche Betrachtungen entweder aus dem Blickwinkel der Erreichung eines thermischen Gleichgewichtes auf einem Temperaturniveau unterhalb einer Schädigungsgrenze gemacht oder bei kürzeren Wellenlängen, d. h. unterhalb von ca. 600 nm unter dem Aspekt einer möglichen fotochemischen Schädigung. Untersuchungen hinsichtlich eventueller Veränderungen in der Sehschärfe, der Kontrastempfindlichkeit oder der Farbwahrnehmung sind diesbezüglich nicht bekannt.

Gefährdungen können bei Verwendung von Lasern der Klasse 1, d. h. eigentlichen Lasern und lichtemittierenden Dioden (Lumineszenzdioden oder LED), die Laser im Sinne der bisherigen Norm DIN EN 60825-1 sind, und die nach der Unfallverhütungsvorschrift BGV B 2 "Laserstrahlung" zwar im Gegensatz zur Norm nicht ausdrücklich im Geltungsbereich der UVV liegen, für deren Strahlung aber die Regelungen der UVV sinngemäß heran gezogen werden können, dort auftreten, wo z. B. Tätigkeiten ausgeübt werden, die stark durch "Sehaufgaben" geprägt sind. Dazu gehören z. B. das Maschinenbedienen, das Ablesen von Anzeigen und das Führen eines Fahrzeuges. Damit erstreckt sich der Einflussbereich über denjenigen betrieblich veranlasster Arbeiten bzw. Tätigkeiten auf denjenigen bei der Allgemeinbevölkerung, die aber nicht in formalen Unterweisungen über mögliche Gefahren unterrichtet werden kann, wie das bei Beschäftigten am Arbeitsplatz der Fall ist.

Es sollte vordringliches Ziel der Forschung im Bereich zugänglicher und zulässiger Grenzwerte der Laser-Klasse 1 im Spektralbereich von 400 nm bis 700 nm sein, den Grad bzw. das Ausmaß einer Blendung qualitativ und quantitativ zu ermitteln, um daraus eine Bewertung der Beeinträchtigungen bzw. Belästigungen bei Tätigkeiten am Arbeitsplatz vornehmen zu können.

Eine Analyse der mit einer Blendung durch künstliche optische Quellen ("Blendungsquellen" bzw. „Blendlichtquellen“) zusammenhängenden Vorgänge muss selbstverständlich auch die vom Länderausschuss für Immissionsschutz am 10.5.2000 beschlossenen "Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen" [19, 185] berücksichtigen.

In der Empfehlung zur "Weiterentwicklung der Forschung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung" der Strahlenschutzkommission (verabschiedet am 11./12.4.2002) [186] führt die SSK – unabhängig von ausgeführten und durchgeführten Vorhaben – aus, dass eine Aufklärung und Quantifizierung der Schädigungsmechanismen der Augen durch "intensive" optische Strahlung erforderlich ist und stellt fest, dass es hier relativ große Kenntnislücken gibt.

Zwar wird eine Schädigung des Auges in vielen Fällen, wie z. B. bei Xenon-Scheinwerfern, ausgeschlossen, aber sowohl von entgegenkommenden Verkehrsteil-

nehmern als auch von Vorausfahrenden wird die höhere Blendungswirkung vielfach beklagt. Daraus könnte eine erhöhte Unfallgefährdung vermutet werden, da Blendung auch subjektive Missempfindungen beinhaltet ("psychologische Blendung") bzw. einer messbaren Beeinträchtigung des Sehvermögens ("physiologische oder physische Blendung") entspricht.

Hinzu kommt, dass Menschen vielfach ihren Blick auf eine Lichtquelle - auch auf eine helle - richten, und zwar insbesondere dann lange und intensiv, wenn die entsprechende Quelle ungewohnt ist, was die damit verbundene erhöhte Blendwirkung zumindest teilweise erklärt.

Nicht beantwortet werden kann zurzeit auch die Frage, ob es eventuell der höhere Weiß- oder Blauanteil der neuartigen Xenon-Strahler ist, der die erhöhte Blendwirkung hervorruft. Dies könnte auch bei Weißlicht-LED der Fall sein, obwohl sich die physikalischen Prinzipien dieser beiden Lichtquellen unterscheiden.

Aufgrund der im Alter zunehmenden Trübungen im Bereich der brechenden Medien der Augen, d. h. in erster Linie der Augenlinse, aber auch der Hornhaut und des Glaskörpers, ist die Blendungsempfindlichkeit besonders bei der Altersgruppe oberhalb von ca. 50 Jahren zu berücksichtigen, wobei gleichzeitig die Kontrast- und Unterschiedsempfindlichkeit herabgesetzt sind. Eine erhöhte Blendungsempfindlichkeit ist auch z. B. bei degenerativen und dystrophischen Erkrankungen der Retina und der darunter liegenden Aderhaut zu erwarten. Zu diesen Erkrankungsbildern gehören z. B. die Retinitis pigmentosa und der Diabetes mellitus.

Inwieweit z. B. ein Einfluss von Multifokal-Augenlinsen, Kontaktgläsern, der Einnahme bestimmter Medikamente u. a. m. bei einer Blendung zu berücksichtigen sind, ist zurzeit ebenfalls nicht bekannt.

Blendung ist z. B. nicht selten die Ursache von Verkehrsunfällen, wobei meist entgegenkommende Fahrzeuglenker geblendet werden. Es kann aber auch zur Eigenblendung durch Reflexion und zur Blendung Vorausfahrender kommen. Das "intelligente Licht" ist ein Ziel einiger Zulieferer des Automobilmarktes, und zwar nicht nur auf dem Gebiet des Kurvenlichtes mittels schwenkbarer Bi-Xenon-Scheinwerfer, sondern bereits in naher Zukunft auch für Ausführungen, bei denen LEDs Verwendung finden werden.

Es ist zu erwarten, dass LEDs außer bei Bremsleuchten zukünftig auch als Fahrlicht zum Einsatz kommen - zumindest sind bereits ernsthafte Ansätze dazu zu erkennen, und die Entwicklungsgeschwindigkeit gerade der letzten Jahre lässt dies in wenigen Jahren erwarten.

Es könnte auch sein, dass mit der Nähe der Blendlichtquelle zum Beobachter die Blendung selbst stärker empfunden wird, wie auch eine kleinere Leuchtfläche einen Einfluss auf die Blendwirkung hat. Dabei hat sich allerdings bei den Stimulationsversuchen zum Lidschlussreflex gezeigt, dass ein großflächiger Fotoblitz zu einer deutlich höheren Lidschlussreflexhäufigkeit führt als ein kleinflächiger Laser oder eine ca. 5 mm große LED, d. h. dass hier eine Vielzahl von Parametern berücksichtigt werden müssen.

Forschung im Bereich neuer optischer Quellen, und zwar insbesondere aufgrund der Neueinteilung und Klassenzuordnung von Lasern, aber auch bei LED, die heute als sogenannte „high-brightness“ LED (HB-LED) und „super-high-brightness“ bzw. „ultra-high-brightness“ LED (SHB-LED bzw. UHB-LED) sowie z. B. „high intensity discharge“ (HID) Lampen in Form von Xenonstrahlern Verwendung finden, scheint dringend geboten, um die Sicherheit am Arbeitsplatz beim Einsatz solcher Quellen zu erhöhen.

Nach § 2 (Geltungsbereich) des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) sind auch "erhebliche Belästigungen" von Bedeutung, und optische Strahlung kann als Immission eine schädliche Umwelteinwirkung sein, die u. a. eine erhebliche Belästigung für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeiführen kann. M. a. W., das Wohlbefinden kann gestört werden, ohne dass dabei direkt ein Schaden eintreten muss. Inwieweit es darüber hinaus zu einem erheblichen Nachteil, also der Einschränkung des Lebensraumes ohne eine Beeinträchtigung körperlichen und seelischen Wohlbefindens kommen kann, ist noch offen.

Optische Strahlung im Sinne der Laser-Klasse-1 bzw. mit dazu äquivalenten Expositionswerten kann z. B. durch Blendung und den damit verbundenen Effekten das körperliche und/oder seelische Wohlbefinden stören, d. h. zu Belästigungen führen, ohne dass damit ein Schaden für die Gesundheit verbunden ist. Entscheidend dürfte dabei sein, dass es sich um solche Belästigungen handeln kann, die erheblich sind.

In den Environmental Health Criteria 23 "Lasers and Optical Radiation" (1982) wird zum einen noch davon ausgegangen, dass normale Abwendungsreaktionen gegenüber sehr hellen Lichtquellen, d. h. der Lidschlussreflex und Bewegungen des Kopfes und der Augen weg von der Quelle, ausreichenden Schutz gegen die meisten hellen Quellen bietet.

Zum anderen wird festgestellt, dass weitere Studien unternommen werden müssen zur Quantifizierung der oberen Grenze von Blitzlichtblindheit und andauernden Nachbildern und den unteren Grenzen für Ödeme und irreversible Schädigung.

Hierzu führt die WHO in den EHC 23 [20] in Abschnitt 8.7. unter psychologischer Blendung (engl. Discomfort Glare) aus: „If a very bright light source is suddenly switched on after the eye has adapted to a luminance much lower than that of the source, the viewer experiences discomfort, blinks, and tends to turn the head or eyes. This effect is much more dramatic when the ambient luminance is low. Out-of-doors, in full daylight, the luminance of a large extended source required to elicit this phenomenon is of the order of 100 000 cd/m² (10 cd/cm² or 29 000 foot-lamberts); however, the luminance of this source must be far greater to elicit a response, if the source subtends an angle of less than about 4.5 mrad (0.25 degree).“

Damit wurden erstmals auch einige quantitative Angaben zur Blendung im Zusammenhang mit einer Empfehlung gemacht.

Die Erkenntnisse haben in den letzten 20 Jahren bezüglich Blendung nicht entscheidend zugenommen, wohl aber wurden die Grenzwerte in Bezug zu einer Schädigung erheblich angehoben.

Gesundheitliche Beeinträchtigungen können durch Überexposition auch bzw. gerade im Sinne einer Blendung vorliegen, und zwar insbesondere dann, wenn es zu lang anhaltenden Nachbildern und damit verbundenen Tätigkeitseinschränkungen kommt.

Für das Vorliegen gesundheitlicher Beeinträchtigungen genügt jedoch die alleinige Furcht vor Gesundheitsgefahren nicht. Es muss aber konzediert werden, dass Beschwerden als etablierte Beeinträchtigungen aus Ängsten bzw. Furcht vor möglichen Gesundheitsgefahren resultieren können.

Bei den bislang durchgeführten und hier berichteten Untersuchungen wurden insbesondere Parameter wie Einwirkungsdauer (Immissionszeit), optische Strahlungsleistung bzw. Bestrahlungsstärke und/oder Bestrahlung ("Intensität"), Art der optischen Strahlerquelle, Wellenlänge bzw. Wellenlängenbereich ("Farbe"), Strahldivergenz, Quellenausdehnung bzw. -größe, die Umgebungshelligkeit (evtl. auch Tageszeit und Lichtverhältnisse) berücksichtigt, so weit dies mit einigermaßen vertretbarem messtechnischen und zeitlichen Aufwand möglich war.

Da bisher nur wenig bis nichts bezüglich gegenüber optischer Strahlung besonders empfindlicher Personen bekannt ist, hätte man darauf in individuellen Fragebögen zwar achten können, es wurde aber weder erwartet, dass dies die Ergebnisse beeinflusst hätte, noch war es erklärtes Ziel, dies zu ermitteln, insbesondere da die Frage der Belästigungen an einem Kollektiv verständiger, durchschnittlich empfindlicher Personen orientiert wurde. Im Labor haben sich dazu Studierende als eine durchaus repräsentative Gruppe in anderen Untersuchungen bewährt. Nach BImSchG muss bei der Beurteilung psychologischer Beeinträchtigungen auch die Wahrung des Allgemeininteresses Beachtung finden.

Da es zurzeit keine Normen und Vorschriften gibt, die eine Aussage darüber beinhalten, ab welcher "Intensität" Lichteinwirkungen als Belästigungen bzw. erhebliche Beeinträchtigungen anzusehen sind, besteht eigentlich Handlungsbedarf. Es war daher ein wesentliches Ziel, dass die Untersuchungen eine Basis für die Konkretisierung des Begriffes erhebliche Beeinträchtigung bei der Blendung durch optische Strahlung künstlicher Quellen sowohl im Sinne des BImSchG als auch im Hinblick auf die Risikobewertung durch den Arbeitgeber darstellen.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei Lasereinrichtungen nach der Begriffsdefinition in Nr. 3.40 der DIN EN 60825-1:2003-10 um Geräte handelt, kann im Sinne des BImSchG von einer Anlage mit gewisser Selbständigkeit und Beständigkeit ausgegangen werden. Fahrzeuge sind dagegen nur insofern im Anlagenbegriff subsummiert, wie diese als Arbeitsgeräte Verwendung finden, dies sollte aber keinen Einfluss auf Strahler haben, die auch in Fahrzeugen Verwendung finden.

Nun könnte man allerdings davon ausgehen, dass der vom Betreiber einer Laser- bzw. LED-Einrichtung zu erbringende Beweis für die Unwesentlichkeit der Beeinträchtigung dadurch erbracht ist, dass es sich um Lasereinrichtungen der Klasse 1 nach DIN EN 60825-1:2003-10 handelt. Solche Einrichtungen sind danach unter vernünftigerweise vorhersehbaren Bedingungen ungefährlich. Ob es unvernünftig ist, sich während einer Zeitdauer von 30 000 s der von einer solchen Einrichtung ausgehenden Strahlung auszusetzen, bedarf einer näheren Betrachtung. Die Zeitdauer von

30 000 s ergibt sich erstens aus der Norm selbst, wo es sich um eine Zeitbasis der Laser-Klasse-1 handelt und entspricht zweitens dem im Arbeitsleben üblichen 8-Studentag. Für die Allgemeinbevölkerung kann zudem von keiner anderen Zeitdauer ausgegangen werden, wenn es sich um eine Exposition von nicht nur vorübergehender Dauer handelt. Sollte es z. B. so sein, dass Blenderscheinungen bereits nach wenigen Sekunden als nicht unbeträchtlich empfunden werden, dann läge eine erhebliche Beeinträchtigung vor. Erste Erfahrungen mit verschiedenen „hellen“ optischen Quellen legen aufgrund der Äußerungen freiwillig exponierter Personen eine entsprechende Vermutung nahe. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Blendung durch optische Quellen als Belästigung und Beeinträchtigung des Wohlbefindens empfunden werden kann.

Da das bisherige Wissen bezüglich Blendung weder qualitativ noch quantitativ zu einer Bewertung ausreicht, wurde zunächst die Realisierung einer Meßmethode zur Bestimmung des Nachbildes und der Farbsehbeeinträchtigung (z. B. als Farbverschiebung, Farbstimmung, Farbumstimmung, Farbverzerrung, Farbwandlung) als Folge einer Blendung als vorrangiges Ziel der durchzuführenden Untersuchungen betrachtet. Dabei ging es sowohl

- um die Ausdehnung des Nachbildes auf der Netzhaut im Sinne der prozentualen flächenmäßigen Beteiligung der retinalen Sehzellen als auch
- um die zeitliche Dauer eines Nachbildes und dessen dynamische Veränderung, und zwar sowohl im Hinblick auf die Fläche als auch bezüglich der damit verbundenen Farbeindruckveränderung bzw. des dadurch bedingten Farbfehlempfindens sowie
- um die Auswirkungen auf den Visus.

Von Interesse war dabei auch die Berücksichtigung der Umgebungshelligkeit und der Zeitdauer einer Adaptation der Augen an wechselnde Umgebungsbedingungen.

Eine wichtige Größe zur Bestimmung des Einflusses der Blendung ist zweifelsohne durch die Ausdehnung und Dauer des Nachbildes gegeben. Bei der Bestimmung des Durchmessers eines Nachbildes wird der Durchmesser insbesondere bestimmt durch:

- den transformierten Durchmesser des individuell „gesehenen“ bzw. wahrgenommenen Nachbildes zum retinal tatsächlich vorliegenden Nachbild, und zwar in Relation zu den Rezeptorabständen, d. h. im Vergleich zum Auflösungsvermögen
- die verschiedenen Augenbewegungen, nämlich Konvergenz und Divergenz als Vergenz, Augenrollen bzw. Augenrotation, Sakkaden, Folgebewegungen, Nystagmus, Drift und Mikrosakkaden, Tremor, Bewegung des Augapfels in Richtung Augenhöhle bei Lidbewegung und insbesondere deren Maximalbewegungen.

Erst die quantitative Bestimmung der Art, des Ausmaßes und der Dauer eines Nachbildes und der mit einer Blendung verbundenen Effekte wie Beeinträchtigung des

Farbsehvermögens und des Visus als Funktion von Einwirkungsdauer, zeitlichem Verlauf der Exposition, Ausdehnung und Form der blendenden Quelle, Umgebungshelligkeit, Adaptationszustand der exponierten Personen, Wellenlänge bzw. Wellenlängenbereich usw. liefern die erforderlichen Erkenntnisse für eine weitergehende Gefährdungsanalyse und stellen die entsprechenden Grundlagen dar, um belastbare Aussagen z. B. zur Erkennbarkeit von Farben, Formen, Details und Kontrasten zu machen bzw. Empfehlungen und Handlungsanweisungen für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz bei der Arbeit zu geben. Auch Schreckreaktionen, die als Folge einer überraschenden Blendung eintreten können, beinhalten unter Umständen ein erhebliches Gefährdungspotenzial am Arbeitsplatz. Dazu gehören auch Tauglichkeitstests, z. B. beim Führen von Fahrzeugen und beim Bedienen von Maschinen.

Bei den durchgeführten Untersuchungen zur Blendung wurde davon ausgegangen, dass das Ausmaß und die Dauer von Nachbildern sowie die mit einer Blendung verbundene Beeinträchtigung des Farbsehvermögens sowie der Kontrastempfindlichkeit die entscheidenden Größen darstellen, während die Bestimmung der Sehschärfe (Visus) nicht im gleichen Maße von Bedeutung ist, aber dennoch in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen wurde – nicht zuletzt, weil es sich dabei um ein Standardmessverfahren bei Augenärzten und Optikern handelt. Es wurde aufgrund von Vorversuchen erwartet, dass der Visus nach einer Blendung relativ schnell wieder den Wert erreicht, den er vor dem Blendereignis hatte, d. h. dass sich ein Nachbild auf die Sehschärfe nur kurzzeitig auswirkt, während andere Sehfunktionen, wie Farbsehen und Kontrastempfindlichkeit deutlich länger verändert bzw. verringert sein können.

Die ermittelten Daten sollen die Grundlage für eine Gefährdungsanalyse bilden, mit deren Hilfe festgestellt werden kann, welche Gefährdungen bei Tätigkeiten am Arbeitsplatz durch die Blendung mit optischer Strahlung von künstlichen Quellen entstehen können. Die Ergebnisse sollen auch eine wesentliche Grundlage für die nationale Umsetzung der EU-Richtlinie „Künstliche Optische Strahlung“ darstellen. Anhand der Ergebnisse ist weiter zu prüfen, ob z. B. Anforderungen bezüglich einer Blendungsbegrenzung bei künstlichen Quellen optischer Strahlung Eingang in die Normung finden sollen.

Anders als bei den Untersuchungen zum Lidschlussreflex und zu anderen Abwendungsreaktionen, bei denen nur relativ kurze Expositionsdauern von 250 ms bis maximal 2 s angewandt wurden, wurden bei den Untersuchungen zu Blendungseffekten auch längere Expositionsdauern von bis zu ca. 10 s und mehr benötigt, um insbesondere den Einfluss des Parameters Einwirkungsdauer zu ermitteln. Außerdem ging es bei diesen Untersuchungen nicht darum, festzustellen, wann Menschen eine Abwendungsreaktion bzw. einen Lidschlussreflex aufweisen, sondern Ziel war es, während einer vorgegebenen Expositionsdauer eine beabsichtigte optische Strahlungsenergie auf die Netzhaut zu bringen, d. h. während der vorgewählten Zeitdauer sollten gerade keine Abwendungsreaktionen durchgeführt werden.

Die durchgeführten Untersuchungen wurden auch dazu benutzt, das mögliche Vorhandensein und die Existenz möglicherweise nicht ganz unbedenklicher biologischer Effekte bzw. Wirkungen sichtbarer optischer Strahlung auf den Menschen auch unterhalb der MZB-Werte zu beobachten.

Ausgenommen wurden Untersuchungen mit stroboskopartigen Blitzlichtern, die durchaus Interesse verdienen, denn bereits in den EHC 23 [20] wird darauf hingewiesen, dass nach klassischen Untersuchungen ein bei 10 Hz betriebenes Stroboskop aufgrund des Bartley-Effektes für Blitzlichtquellen subjektiv heller erscheinen kann als eine Dauerstrichquelle bei der gleichen Maximalhelligkeit. Ähnlich erscheint ein einzelner Puls aufgrund des Broca-Sulzer-Effekt genannten Phänomens heller als er tatsächlich ist [187]. Ebenso wurden in den Untersuchungen zur Blendung Fragen, die mit der Auslösung epileptischer Anfälle zusammenhängen könnten, ausgespart.

2 Bisheriges Wissen und Diskussion zum Thema Blendung

In den nachfolgenden Abschnitten wird insgesamt das Ziel verfolgt, eine möglichst vollständige, zusammenhängende Darstellung zum Thema Blendung zu geben und gleichzeitig eine kritische Auseinandersetzung und Bewertung mit einzelnen bisher vorliegenden Aussagen, Theorien usw. durchgeführt.

2.1 Allgemeines zu Licht und rechtlicher Regelungsbereich bei Blendung

Licht stellt den Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums dar, in dem wir sehen. Licht ist mit anderen Worten elektromagnetische Strahlung, die wir sehen. Daher ist dieser Bereich wellenlängenmäßig nicht exakt anzugeben, und die dazu benutzten Definitionen der Bereichsgrenzen schwanken zwischen 360 nm und 800 nm.

Während die Wellenlänge eine Eigenschaft des Lichtes darstellt, gilt dies für Farbe dagegen nicht, obwohl ihr manchmal bestimmte Wellenlängenbereiche zugeordnet werden. Geht man von der spektralen Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ aus, dann sind die entsprechenden Grenzen mit 380 nm und 780 nm festgelegt. Auch die neue EU-RL [17] bezeichnet „sichtbare Strahlung“ als optische Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm.

Aus rechtlicher Sicht stellt Licht eine Immission im Sinne des § 3 Abs. 2 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) [18] dar und Blendung findet bei der Anwendung des BImSchG nur dann Berücksichtigung, wenn diese zu einer erheblichen Belästigung oder erheblichen Beeinträchtigung führt. Darauf geht auch eine Empfehlung der SSK zur Blendung ein [3, 100].

Die Beurteilung von Lichtimmissionen erfolgt aufgrund eines Beschlusses des Länderausschusses für Immissionsschutz vom 10. Mai 2000 [19] soweit es sich um Licht emittierende Anlagen im Sinne des § 3 Abs. 5 BImSchG handelt; dabei sind Anlagen zur Beleuchtung des öffentlichen Straßenraumes und Beleuchtungsanlagen von Kraftfahrzeugen ebenso ausgenommen wie z. B. Laser.

Die beruflich exponierte Personengruppe (Berufstätige, Arbeitnehmer, Beschäftigte) wird unter kontrollierten Bedingungen des Arbeitsgeschehens während ihrer Tätigkeiten/Arbeiten am Arbeitsplatz optischer Strahlung künstlicher Quellen ausgesetzt. Sie ist besonders ausgebildet und kann geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen. Die Expositionsdauer ist auf die Dauer der jeweiligen Arbeitszeit begrenzt, kann sich aber dabei auf einen vollen Arbeitstag erstrecken.

Anders stellt sich die Situation bei der Allgemeinbevölkerung dar. Diese setzt sich aus Personen jeden Alters und Gesundheitszustandes zusammen. Darunter können sich Personen mit Augenerkrankungen befinden. Ob es eine besondere Augenempfindlichkeit gegenüber optischer Strahlung gibt, ist zurzeit nicht mit Bestimmtheit zu sagen. Die Allgemeinbevölkerung kann sich optischer Strahlung künstlicher Quellen praktisch 24 Stunden lang am Tag nicht entziehen. Insbesondere ist nicht davon

auszugehen, dass sie bereit ist, Gefährdungen, die mit optischer Strahlung künstlicher Quellen verbunden sein könnte, hinzunehmen.

Eine besondere Dringlichkeit von Untersuchungen zur Blendung musste darin gesehen werden, dass in der neuen im Amtsblatt der EU veröffentlichten Richtlinie „Künstliche Optische Strahlung“ [17] Festlegungen enthalten sind, wonach bei der Gefährdungs- bzw. Risikoermittlung auch Sekundäreffekte, wie die Blendung, zu berücksichtigen sind. Bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten, wie dem Führen eines Fahrzeuges oder dem Bedienen einer Maschine kann durch Blendung von künstlichen Quellen ein erhebliches Gefährdungspotenzial am Arbeitsplatz entstehen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Datenlage zur Beeinträchtigung des Sehvermögens durch Blendung und Farbverfälschungen insbesondere durch neue optische Quellen wie z. B. Laser und LED, die zunehmend mehr Anwendung im beruflichen und privaten Bereich finden, unzureichend.

Mit der unzureichenden Kenntnis in Sachen Blendung stellt sich natürlich das Problem, wie der Arbeitgeber nach Artikel 4, Abs. 3, der europäischen Richtlinie zu optischer Strahlung aus künstlichen Quellen Ermittlungen der Exposition und Bewertung der Risiken durchführen und gemäß Artikel 6 Abs. 3 der Richtlinie 89/391/EWG der Verpflichtung zur Beurteilung von Gefahren für Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer, unter anderem bei der Auswahl von Arbeitsmitteln, nachkommen soll, wenn er bezüglich einer Beurteilung der indirekten Auswirkungen wie vorübergehender Blendung praktisch keine Fakten vorliegen hat. Damit der Arbeitgeber diesen aus der Arbeitsschutzrichtlinie erwachsenden allgemeinen Pflichten nachkommen kann, muss durch Untersuchungen dazu beigetragen werden, dass das bisher vorliegende Wissen ausreichend repräsentativ verfügbar gemacht wird und zur adäquaten Umsetzung der aus der Richtlinie 89/391/EWG [180] erwachsenden Pflichten benutzt werden kann.

Zur Umsetzung der neuen EU-RL wird mit großer Wahrscheinlichkeit nach § 18 ArbSchG in einer Rechtsverordnung vorgeschrieben, welche Maßnahmen der Arbeitgeber und die sonstigen verantwortlichen Personen zu treffen haben und wie sich die Beschäftigten zu verhalten haben, um ihre jeweiligen Pflichten, die sich aus dem ArbSchG ergeben, erfüllen zu können.

Nach § 18 Abs. 2 Nr. 1 ArbSchG kann in einer Rechtsverordnung insbesondere bestimmt werden, dass und wie zur Abwehr bestimmter Gefahren die Dauer der Beschäftigung begrenzt werden muss, sowie nach Nr. 2, dass der Einsatz bestimmter Arbeitsmittel mit besonderen Gefahren für die Beschäftigten verboten ist oder besonders gefährdete Personen dabei nicht beschäftigt werden dürfen.

Da in der EU-RL für Künstliche Optische Strahlung (KOS) auch indirekte Gefährdungen durch Blendung aufgeführt sind, ist es daher dringend erforderlich, das quantitative Ausmaß einer Blendung genauer zu bestimmen, um daraus gewisse Grenzen ableiten zu können, die bei einer Gefährdungsbeurteilung benötigt werden.

Es ist zwar bekannt, dass bei der Blendung die Leuchtdichte der optischen Quelle und die Umgebungsleuchtdichte sowie der Raumwinkel der Quelle bzw. der von ihr emittierten Strahlung, und zwar aus der Sicht des Beobachters, von entscheidender

Bedeutung sind, aber dennoch fehlt es zurzeit noch an jedweder Konkretisierung in einem Regelwerk bzw. in einer Vorschrift. Im Hinblick auf die Vorbeugung bei betrieblichen Tätigkeiten von Versicherten gilt, dass geeignete Präventionsmaßnahmen mit Hilfe von Gefährdungsbeurteilungen zu ermitteln sind. Gesetzliche Grundlage dazu ist neben dem Sozialgesetzgebungsbuch (SGB VII [162]) das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG, § 5) [161].

Die konkreten Gefährdungen müssen im Betrieb von den Unternehmern anhand von Gefährdungsbeurteilungen ermittelt und bewertet werden. Darauf hin sollen die Gefährdungen gezielt abgestellt und rechtzeitig geeignete Maßnahmen zum Arbeitsschutz ergriffen werden. Soweit möglich helfen dazu branchenspezifische Anleitungen, die von den Berufsgenossenschaften (BGen) entwickelt werden.

Insbesondere ist es die Aufgabe der Präventionsdienste und der technischen Aufsichtspersonen branchenbezogene Vorschriften und Regeln des Arbeitsschutzes zu entwickeln.

Wesentliche Quelle für Regelungen des Arbeitsschutzes sind die Erkenntnisse aus Forschungsarbeiten zu den jeweiligen Arbeitsgebieten, in denen primäre und/oder sekundäre Gefährdungen auftreten können. Hierzu gehört zweifelsohne auch der Bereich der Blendung durch optische Strahlung künstlicher Quellen.

Dadurch dass seit 2002 die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV [242]) zu beachten ist, wurde im Laufe der Zeit das bisherige berufsgenossenschaftliche Satzungsrecht zunehmend durch staatliches Recht ersetzt. Gemäß § 24 der BetrSichV gehört es zu den Aufgaben des Ausschusses für Betriebssicherheit (ABS) Regeln zu ermitteln, wie die in der BetrSichV gestellten Anforderungen erfüllt werden können.

Gemäß der Vorbemerkung bei den hieraus resultierenden Technischen Regeln zur BetrSichV heißt es einheitlich „Diese Technische Regel für Betriebssicherheit (TRBS) gibt dem Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene entsprechende Regeln und sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für die Bereitstellung und Benutzung von Arbeitsmitteln sowie für den Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen wieder.

Sie wird vom Ausschuss für Betriebssicherheit ermittelt und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Bundesarbeitsblatt bekannt gemacht.

Die Technische Regel konkretisiert die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung von Gefährdungen sowie der Ableitung von geeigneten Maßnahmen. Bei Anwendung der beispielhaft genannten Maßnahmen kann der Arbeitgeber insoweit die Vermutung der Einhaltung der Vorschriften der Betriebssicherheitsverordnung für sich geltend machen. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, hat er die gleichwertige Erfüllung der Verordnung schriftlich nachzuweisen.“

Der Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene ist für Arbeitsmittel Ausgangsbasis zur Ermittlung von entsprechenden Regeln und sonstigen gesicherten arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen und damit ein ganz entscheidender Sicherheits-

maßstab. Dieser Stand der Technik wird durch die vom Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS) ermittelten und durch das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) bekannt gemachten Regeln (Technische Regeln für Betriebssicherheit - TRBS) definiert. Der Betreiber kann dann von der Vermutung ausgehen, dass bei Berücksichtigung dieser Technischen Regeln die Vorschriften der BetrSichV eingehalten sind. Diese Regeln sind vom Arbeitgeber bzw. Betreiber jedoch nicht zwingend einzuhalten. In diesem Fall hat er gegebenenfalls der zuständigen Behörde nachzuweisen, dass die vom ihm gewählte Lösung aber den Anforderungen der BetrSichV entspricht.

Da das Ergebnis der Beurteilungen der Arbeitsbedingungen ausschlaggebend für die vom Arbeitgeber zu treffenden Maßnahmen bei der Bereitstellung und Benutzung von Arbeitsmitteln und beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen ist, wird das Regelwerk zur BetrSichV konsequenterweise gefährdungsbezogen aufgebaut. Damit wird den Arbeitgebern eine Hilfestellung, und zwar bezogen auf die von ihnen durchzuführenden Gefährdungsbeurteilungen gegeben. Durch den gefährdungsbezogenen Aufbau wird die Integration der nach Arbeitsschutzgesetz durchzuführenden Gefährdungsbeurteilung möglich. Außerdem geht man davon aus, dass so eine Straffung und Modernisierung des bisherigen Regelwerks möglich ist und dass das neu aufgebaute Regelwerk darüber hinaus unabhängiger von technischen Entwicklungen ist. Neben diesem grundsätzlich gefährdungsbezogenen Ansatz besteht in der Struktur des Technischen Regelwerkes die Möglichkeit, für bestimmte Arbeitsmittel, Anlagen und Tätigkeiten bei komplexen Sachverhalten, in sich geschlossene Technische Regeln zu erstellen.

In wieweit Blendung als indirekte Gefährdung beim Vorhandensein optischer Strahlung in diesem Regelwerk Beachtung finden wird, kann zurzeit nicht gesagt werden. Dazu ist insbesondere auch die weitere Entwicklung bei der Umsetzung der EU-RL 2006/25/EG auf dem Verordnungswege abzuwarten. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass in einer Verordnung zu optischer Strahlung keine detaillierten Regelungen zu Blendung zu finden sein werden und dass dies erst in nachgeordneten Regeln erfolgen wird.

2.2 Grundbegriffe von Lichtstärke, Hellempfindung, Helligkeit und Leuchtdichte im Zusammenhang mit Blendung

2.2.1 Allgemeines zu Licht und Farben

Die Menschheit ist zwar seit ihrem Beginn an die Sonne als natürliche Lichtquelle gewöhnt und hat ihr Verhalten an deren Lichtaussendung angepasst. Durch die Erfindung des elektrisch erzeugten Lichtes in Form von Glühlampen und Leuchten aller Art wurden viele Tätigkeiten, die vor dieser Zeit auf den hellen Tag angewiesen waren, auch auf den Rest des Tages und teilweise auch auf die Nachtstunden ausgedehnt. Es sind dadurch Möglichkeiten geschaffen worden, die ganz entscheidend zur kulturellen, gesellschaftlichen und technischen Entwicklung beigetragen haben.

Unsere Augen sind das wichtigste Sinnesorgan im Hinblick auf die Kommunikation mit der Umgebung. Die damit visuell aufgenommene Informationsmenge von ca.

90 % stellt diejenige aller anderen Sinnesorgane bei weitem in den Schatten. Dabei sind unsere Augen äußerst anpassungsfähig an die sich ständig ändernden Umgebungsbedingungen, wobei sie uns insbesondere die Orientierung und das Sehen in sowohl hellstem Sonnenschein als auch bei fast dunkler Nacht ermöglichen. Das menschliche Auge ist aber auch sehr empfindlich gegenüber konzentrierter optischer Strahlung. Unter falschen Anwendungsbedingungen kann z. B. die Strahlung eines Lasers zu einem bleibenden Netzhautschaden führen. Diese Schädigung ist vergleichbar derjenigen, die auftreten kann, wenn man zu lange in die hoch stehende Sonne blickt oder in einen Schweißlichtbogen oder sogar dann, wenn man sich zu nahe vor einem Suchscheinwerfer befindet.

Trifft Strahlung dieser Lichtquellen in unser Auge, kommt es meist zu Blendungserscheinungen. Ob es zu einer vorübergehenden oder bleibenden Beeinträchtigung von Sehfunktionen kommt, hängt von Faktoren ab, wie der Stärke der Lichtquelle und dem Abstand vom Auge, aber auch von der Einwirkungsdauer der optischen Strahlung. Sicherheit ist also eine Funktion sowohl der Lichtquelle als auch ihrer Anwendung.

Licht stellt in unserem Leben nicht nur ein wichtiges Bindeglied zwischen der Umwelt und uns dar, es hat in Form künstlichen Lichtes auch viele unserer Lebensweisen und Gewohnheiten beeinflusst. Am Arbeitsplatz, aber auch im Alltag ist künstliches Licht in Form von Arbeits- und als Beleuchtungsmittel schon lange nicht mehr wegzudenken. Dabei hat eine technische Entwicklung stattgefunden, die uns vom Glühstrumpf der Anfangszeit zu hochmodernen Leuchtmitteln geführt hat.

Allgemeine Lampen zur Beleuchtung werden üblicherweise in drei Gruppen eingeteilt, nämlich Glühlampen, Leuchtstofflampen und Entladungslampen. Insgesamt gibt es etwa 14 000 verschiedene Lampentypen.

Während Edison's Kohlefadenlampe 1879 eine Lichtausbeute von 1,4 lm/W hatte, reichen die Werte heutiger Lampen von etwa 14 lm/W für kleine Glühlampen bis zu etwa 180 lm/W für Niederdruck-Natriumdampflampen.

Wir leben heute in einer Welt, in der visuelle Informationen eine zunehmende Bedeutung erlangt haben und ein weiterer Anstieg durch noch mehr Texte, Zeichen, und Symbole zu erwarten ist. Ein gutes Beispiel stellt der Computer dar, der neben das Fernsehen getreten ist und uns mit ständig neuen Informationen zu überfluten droht. Dies ist nicht allein auf den privaten Bereich beschränkt, sondern gilt auch im beruflichen Alltag.

Selbst die relativ lange Zeit seit der Erfindung des Buchdrucks durch Gutenberg hat nicht ausgereicht, unser Sehsystem auf das Sehen immer kleinerer Details entsprechend anzupassen. Dazu kommt, dass wir uns in einer Welt befinden, in der es durch immer bessere Aus- und Beleuchtung auch zu Problemen durch Blendung kommen kann, die uns dann bei den erhöhten Sehanforderungen behindern könnte.

Licht ist zweifellos eine gute Sache. Ohne Licht können wir nicht sehen und wir sehen sogar besser in hellerem Licht. In unserem täglichen Leben bevorzugen wir die sonnenbeschieneenen Tage gegenüber den düsteren und wir fühlen uns in einer gut

beleuchteten Stadt nachts sicherer. Dennoch ist es wie bei vielen anderen Dingen auch, dass man manchmal davon „zu viel haben“ kann. Dieser Frage wird im Zusammenhang mit Blendungserscheinungen in dieser Abhandlung nachgegangen.

Es ist zweifelsohne das Verdienst von YOUNG [22], das Sehen von Farben theoretisch auf 3 Sehzellentypen zu begründen. Jeder dieser 3 sogenannten Zapfentypen ist am Farbeintrag beteiligt, nämlich bezüglich des Farbtons, der Farbsättigung und der Helligkeit. Darüber hinaus tragen die Zapfen gleichzeitig zum Formen-, Bewegungs-, Muster- und Tiefenseheindruck bei.

1866 hat SCHULTZE [220] den Gedanken ausgesprochen, „dass die Stäbchen den Licht- und Raumsinn, die Zapfen daneben auch noch den Farbsinn vermitteln“. Er zeigte, dass die Stäbchen vor allem in der Netzhautperipherie auftreten und für das indirekte Sehen verantwortlich sind und dass Zapfen in der Retina von einigen nachtaktiven Tieren fehlen. Dies war für SCHULTZE Anlass genug, den Stäbchen die Rolle des Nachtsehens und den Zapfen die des Tagessehens zuzuteilen. Auch CHARPENTIER (1877), der die Befunde von SCHULTZE nicht kannte, kam zu ähnlichen Ergebnissen, indem er aufgrund der Daten von AUBERT und von PURKINJE einen Helligkeitssinn und einen Farbsinn postulierte. In den Jahren 1881 – 1884 entwickelte auch PARINAUD [221] eine Theorie, die eine getrennte Funktion der Stäbchen und Zapfen zur Grundlage hatte. Dabei stellte er eine ähnliche Theorie auf; die der *zwei Retinas*, bei denen Zapfen und Stäbchen „operieren“ und wobei die Erregung der Zapfen als Farbe empfunden wird.

Sowohl Farbton und Farbsättigung als auch Helligkeit hängen von der spektralen Zusammensetzung des jeweiligen Lichtes ab, jedoch können Unterschiede in den spektralen Komponenten nur im Farbton und in der Farbsättigung, nicht aber durch Helligkeitsunterschiede bestimmt werden. Daher erfolgt durch Farbton und Farbsättigung die Transformation achromatischen, d. h. Helligkeitssehens, in chromatisches, also Farbsehen.

Ob die Entwicklung zur Trichromasie, wie es aus der Biologie und Evolution meist erklärt wird, zur Nahrungsaufnahme erfolgte und hier insbesondere zum Zwecke der Unterscheidung reifer von unreifen Früchten, ist nach einer neueren Theorie zumindest nicht abschließend zu klären. Seit kurzem wird davon ausgegangen, dass es die Modulation der Hautfärbung infolge des variierenden Sauerstoffgehaltes im Blut gewesen sein könnte, die letztlich evolutionär zur Trichromasie geführt hat und mit deren Hilfe Artgenossen erkannt, Gefühls- und Erregungszustände vermittelt und die Möglichkeit der Signalisierung geschlechtlicher Verhaltensmerkmale, aber auch von Drohgebärden usw., bestand [346]. In allen Fällen stellen die Augen die wesentlichste Verbindung des Körpers mit der Umwelt dar.

Grundsätzlich besitzt das menschliche Sehsystem drei Kanäle, also Wege, auf denen die Verarbeitung der von den Sehzellen empfangenen optischen Reize erfolgt, nämlich einen achromatischen Luminanz-Kanal (magnozellulärer Kanal), in dem die Signale der lang- und mittelwelligen Zapfentypen (L- und M-Zapfen) verknüpft sind und zwei gegenfarbige Farbkanäle (parvozelluläre Kanäle), in denen die Signale verschiedener Kombinationen der Zapfentypen kombiniert werden. Es handelt sich dabei um einen Rot-Grün-Opponenten-Kanal (L – M) und einen solchen, der die Signa-

le der S-Zapfen weiterleitet. Dabei ist die Helligkeits-Wahrnehmung von der Aktivität aller drei Kanäle abhängig, wobei im photopischen Bereich, d. h. oberhalb von ca. 3 cd/m^2 , alle aktiven Fotorezeptoren zur Helligkeit beitragen. Es ist aber zu beachten, dass der Seheindruck z. B. beim Flickerverfahren nur vom achromatischen Pfad verarbeitet wird [240]. Da aber die gegenfarbigen Farbkanäle zur Helligkeit den chromatischen Anteil beitragen, kann dessen Ausschluss beim Flickerverfahren – und damit bei $V(\lambda)$ -basierten Messungen wie bei derjenigen der Beleuchtungsstärke – zu fehlerbehafteten Vorhersagen der Helligkeit führen. Die einzelnen Kanäle oder Pfade bzw. Bahnen sind nicht alle linear und additiv, d. h. das sogenannte Abney'sche Gesetz, wonach sich Leuchtdichten gleicher oder verschiedener Farbarten linear addieren [295], gilt nicht für jeden Kanal, und die Helligkeitswahrnehmung folgt diesem Gesetz nicht.

Die Farbe eines Gegenstandes selbst hängt nicht nur von demjenigen Licht ab, das von der Oberfläche des Objektes abhängt, also von der Körperfarbe, sondern auch vom Licht, das aus der Umgebung kommt, in der sich das Objekt befindet.

Die 3 verschiedenen Zapfentypen besitzen die Eigenschaften, ihre Empfindlichkeit quasi selektiv steigender Netzhautbeleuchtungsstärke derart anzupassen, dass sie erstens abnimmt und zweitens, dass dies bei z. B. kurzwelliger Bestrahlung bevorzugt zu einer Abnahme der Empfindlichkeit bei den kurzwelligen, also S-Zapfen führt, während M- und L-Zapfen davon mehr oder weniger geringer beeinflusst werden, da sie für kurzwelligere Strahlung an sich schon weniger empfindlich sind.

Farben werden bei unterschiedlichen Größen verschieden gesehen, und zwar bei besonders kleinen Abmessungen deshalb, weil dann die die jeweiligen lichtempfangenden Zapfen umgebenden antagonistischen Zapfen der Umgebung fehlen und damit der für eine Farbwahrnehmung notwendige Vergleich fehlt. Wird das farbige Objekt größer, machen sich die verschiedensten Effekte bemerkbar [23], wie z. B. eine Änderung der optischen Dichte der Zapfen durch Konzentrationsänderung der fotoempfindlichen Proteine in den äußeren Segmenten („self-screening“), eine Änderung der Wellenleitereigenschaften als Folge des größeren Einfallswinkels und eine Verschiebung des Absorptionsspektrums der Farbstoffe selbst.

Durch eine ausreichend große Beleuchtung der Netzhaut werden die Farbstoffe in den fotoempfindlichen Proteinen verändert, d. h. die entsprechenden Proteine werden inaktiviert, und der Selbstabschirmungs-Effekt verschwindet eventuell vollständig.

Die Farbstoffe in den Sehzellen sind fotolabil, d. h. sie können bleichen. Dabei ist die Menge des gebleichten Farbstoffes der absorbierten optischen Strahlung proportional. Man kann dabei davon ausgehen, dass durch die Bleichung die effektive, d. h. jeweils zur Verfügung stehende Konzentration der Farbstoffe abnimmt und außerdem deren spektrale Empfindlichkeit eingeschränkt wird. Genauer betrachtet ist der „Bleichvorgang“ eine Aktivierung der Photopigmente (Farbstoffe) und hierdurch kommt es dann im Zuge der ablaufenden Reaktionskette zu einer Änderung der Absorptionseigenschaften.

SMITH et al. stellen fest, dass ein Modell erforderlich ist, bei dem die Regenerationsrate mit abnehmendem Pigmentanteil, der gebleicht ist, steigt, um die Abhängigkeit sowohl von der Strahlungsfunktion als auch der Regenerationsraten zu berücksichtigen [110].

Nach Untersuchungen von COOLEN et al. [111] scheint die Regeneration aus dem vollständig ausgebleichten Zustand davon abzuhängen, wie dieser Zustand erreicht wurde und die Form der Regenerationskurve kann nicht durch eine Reaktion 1. Ordnung dargestellt werden. Sie unterstreichen damit, dass die Vorstellung von RUSHTON und HENRY [112], die eine Speicherung von 11-cis-Retinal zur Erklärung der raschen Regeneration nach einer kurzen Ausbleichung angegeben hatten, ihre eigenen densitometrischen Messungen gut beschreiben [111].

Nach RUSHTON und HENRY [112] beträgt die Leuchtdichte, bei der 50 % der L- und M-Zapfen gebleicht sind, „4,3 log photopische Troland“ in der Fovea. Rechnet man mit der Umrechnungsformel „ $y \text{ cd/m}^2 = x \text{ trol} / \left\{ \frac{\pi}{4} \cdot (\text{Pupillendurchmesser in mm})^2 \right\}$ “ um, so erhält man bei einem Pupillendurchmesser von 6 mm ca. 705 cd/m^2 , bei 4 mm Pupillendurchmesser 1590 cd/m^2 und bei einem Pupillendurchmesser von nur 2 mm eine Leuchtdichte von ca. 6350 cd/m^2 . Als Gleichgewichtsbedingung für die Ausbleichung wird angegeben

$$1 - p = \frac{L}{L + L_0} \quad \text{bzw.} \quad , \quad p = \frac{L_0}{L + L_0} \quad (2.1)$$

wobei

p : = % Pigment,

L : = Leuchtdichte des bleichenden Lichtes in Troland und

L_0 : = Leuchtdichte zur Bleichung von 50 % in Troland.

Beträgt die Expositionsdauer weniger als 30 s, kann die folgende Beziehung angewandt werden:

$$\log \left[\ln \left(\frac{1}{p} \right) \right] = \log(L \cdot t) - 7,3, \quad (2.2)$$

wobei die zuvor benannten Bezeichnungen zutreffen und t die Expositionsdauer in Sekunden angibt [112]. RUSHTON und HENRY fanden darüber hinaus, dass eine „Energie“ von $2,4 \cdot 10^6$ Troland erforderlich ist, um den Anteil p der nicht gebleichten Farbstoffpigmente von 1 auf $\exp(-1)$ zu verringern, d. h. die Zeitkonstante beträgt $t_0 = 120$ s. Man kann auch aus der zeitabhängigen Beziehung [327]

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(1-p)}{t_0} \quad (2.3)$$

den exponentiellen Verlauf des Anteils ungebleichten Farbstoffes gemäß

$$p = 1 - q_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \quad (2.4)$$

bestimmen, wobei q_0 der zu Beginn der Exposition vorliegende ausgebleichte Anteil ist [112].

Aus der Methode der Dunkeladaptometrie, bei der die Anpassungsvorgänge des Sehsystems an völlige Dunkelheit nach einer sehr hellen Umfeldbeleuchtung geprüft wird, ist bekannt, dass dabei mit einer Bleichung von ca. 70 % des Stäbchens- und 88 % des Zapfenpigments ausgegangen wird, und zwar weil sonst bei geringerer Bleichung die Zapfenadaptation und der sogenannte Kohlrausch-Knick (Stäbchen-Zapfen-Knick), der den Übergang im Zeitverlauf der Zapfen- zur Stäbchenadaptation darstellt, undeutlicher ausgeprägt sind. Bei regelrechter Stäbchenfunktion beginnt der zweite Schenkel der Dunkeladaptationskurve nach 5 min – 12 min und erreicht nach 30 min – 40 min eine normale Endschwelle, das dunkeladaptierte Gesichtsfeld ist dann bis auf ein physiologisches Zentralskotom frei [305].

Zwischen der Änderung des Durchmessers der Pupille im Dunkeln nach einer vollständigen Bleichung und dem Anteil nicht regenerierten Farbstoffes ($1 - p$) besteht ein linearer Zusammenhang, d. h. dass der Pupillendurchmesser sich linear mit der Farbstoffkonzentration verändert und daher als Farbstoffdensitometer dienen könnte [325].

Eine weitere Abhängigkeit bei der Farbwahrnehmung ist darin begründet, dass die Zapfen auch als Wellenleiter wirken und daher maximale Empfindlichkeit dann aufweisen, wenn das Licht sie in der Längsachse trifft. Dabei ist der Effekt bei den S-Zapfen größer als bei den M- und L-Zapfen [24]. Außerdem nimmt die Größe der Zapfen von der Fovea aus nach außen hin zu, was ebenfalls die Effekte durch Wellenleitung beeinflusst. Dadurch werden Farben je nach Lage auf der Retina unterschiedlich gesehen.

Das menschliche Auge ist aus verschiedenen Strukturen aufgebaut, die jeweils ihren speziellen Beitrag zum Sehvorgang leisten. So findet in der Netzhaut insbesondere eine Umwandlung des darauf fallenden Lichtes, d. h. des sichtbaren Spektrums, in neuronale Signale statt, und zwar vermittelt einer Reihe komplexer chemischer bzw. biochemischer Vorgänge. Außer diesen gewollten Vorgängen kann ein Übermaß an optischer Strahlung aber auch zu einer Schädigung der Netzhaut führen.

Andererseits kann das Sehen, ohne dass es zu bleibender Schädigung kommt, durch Blendung beeinträchtigt werden.

2.2.2 Optische Strahlung, die zur Blendung führen kann

Blendung setzt voraus, dass Photonen die Fotorezeptoren (Sehzellen) in der Netzhaut (Retina) erreichen. Dies ist aber nur möglich, wenn die Augenmedien für die entsprechende Strahlung durchlässig sind und außerdem eine Umwandlung empfangener Photonen (optischer Strahlungsenergie) in elektrische Impulse (elektrische Energie) auf biochemischem Wege erfolgt.

Das menschliche Auge ist im Wellenlängenbereich von etwa 380 nm bis 1 400 nm mehr oder weniger transparent [68, 69]. Dabei „sehen“ wir aber nur solche Photonen, die aus dem Bereich von etwa 380 nm bis 780 nm stammen. Dieser Bereich wird oft auch als Licht oder sichtbare Strahlung bezeichnet.

Optische Strahlung mit Wellenlängen unterhalb von 300 nm wird durch die Hornhaut zurückgehalten, während die Augenlinse Strahlung im Bereich von 300 nm bis 400 nm weitgehend blockiert [68 – 70]. Die alternde kristalline Linse hält darüber hinaus zunehmend die potenziell phototoxischen kürzeren Wellenlängen des „Blau-lichtes“ zurück [68, 71, 72]. Dies erklärt auch, warum viele Menschen – insbesondere ältere – nach einer Kataraktoperation (Staroperation) eine erhöhte Streuempfindlichkeit aufweisen, da die „Ersatzlinse“ weniger UV und insbesondere Blauanteile des sichtbaren Spektrums absorbiert und dieser spektrale Anteil die Streuung erhöhen kann.

Aufgrund der Verschiebung des Maximums der spektralen Hellempfindlichkeitskurve für photopisches Sehen (Tagsehen) zum skotopischen Sehen (Nachtsehen) von 555 nm zu 507 nm wird deutlich, dass der blau-grüne Teil des Spektrums gerade beim Nachtsehen, aber auch beim Dämmerungssehen (mesopisches Sehen) von größerer Bedeutung ist als beim Tagsehen.

Da der Farbstoff Rhodopsin („Sehpurpur“) in den menschlichen Sehzellen, insbesondere in den Stäbchen, sein Absorptionsmaximum bei 494 nm hat [73], liegt es nahe, die Bedeutung einer Mediation des skotopischen Sehens durch Rhodopsin anzunehmen. Gleichzeitig scheint eine Beziehung zwischen dem Absorptionsspektrum des Rhodopsins und dem Aktionsspektrum des Blau-Grün-Typs retinaler Fototoxizität oder foveomakularer Retinitis (Fotoretinitis) zu bestehen, die zur Retinopathie führen kann.

Mit zunehmendem Alter nimmt die skotopische Hellempfindlichkeit etwa doppelt so stark ab wie die photopische, was sich auch darin äußert, dass ältere Menschen in abgedunkelter Umgebung größere Orientierungsschwierigkeiten haben können [74]. Eine Erklärung kann dies einmal darin finden, dass Altern wenig Einfluss auf die fovealen Zapfen hat, aber die parafovealen Stäbchen um bis zu 30 % weniger werden können [75]. In diesem Zusammenhang ist es auch bedeutsam festzustellen, dass sich die Dunkeladaptation der Stäbchen als Folge verzögerter Rhodopsinregeneration verlängert [76]. Ein zwei- bis dreistündiger Aufenthalt im hellen Sonnenschein kann dazu führen, dass die eigentliche Dunkeladaptation um 10 oder mehr Minuten verzögert beginnt und dass außerdem die erreichte Schwelle anschließend niedriger liegt, sodass volle Nachtsichtempfindlichkeit für mehrere Stunden nicht erzielt werden kann. Selbst von der Einbuße von bis zu 50 % der Nachtsehfähigkeit bei einem Aufenthalt von 10 Tagen hintereinander im Sonnenschein wurde berichtet [285].

Ein möglicher Zusammenhang könnte in einer Ermüdung des Regenerationssystems liegen, was durch verschiedene Faktoren bedingt werden kann, zu denen u. a. auch das Altern gehört. Eine gewisse Analogie besteht in der Reziprozität zwischen Netzhautbestrahlungsstärke und Expositionsdauer bei der Fototoxizität und diese wiederum könnte additiv sein, d. h. vorangegangene Expositionen könnten das Risiko eines

nachfolgenden Schadens erhöhen. Gewissermaßen eine Vorstufe oder ein „Link“ könnte sich in einer Verlangsamung der Regeneration im Rhodopsinzyklus finden. Dies ist zumindest nicht auszuschließen.

Eine weitere Ursache für eine altersbedingte Abnahme der skotopischen Empfindlichkeit kann auch darin liegen, dass es außer zu Verlusten von Stäbchen und Ganglien-Zellen auch zu Veränderungen in den zentralen Sehpfaden kommt, wobei z. B. die Fläche der räumlichen Summation in der Netzhaut und in den nachgeschalteten Sehbezirken des Gehirns vergrößert wird [77].

2.2.3 Quantifizierung der Blendung und Bedeutung der Leuchtdichte

Im Hinblick auf eine Blendung des menschlichen Auges spielt der Helligkeitseindruck eine wesentliche Rolle. Für den Helligkeitseindruck ist die maßgebliche Größe die „Netzhautbeleuchtung“ (Netzhautbeleuchtungsstärke), die bei verschiedener Leuchtdichte L (üblicherweise in cd/m^2) und verschieden großer Augenpupille entsteht. Es gilt

$$L = k_m \cdot \int L_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.5)$$

wobei L_λ die spektrale Strahldichte ist und $V(\lambda)$ die spektrale Hellempfindlichkeit darstellt und k_m das photometrische Strahlungsäquivalent angibt.

Um Blendung zu quantifizieren, müssen Messgrößen definiert werden. Wenn man z. B. von der Helligkeit einer Lichtquelle spricht, dann verknüpft man damit eine Empfindung, die man einer Fläche zuordnet, die mehr oder weniger viel Licht emittiert. Die damit zusammenhängenden Bezeichnungen, die von dunkel bis sehr hell oder gar grell reichen, sind mehr qualitativer Art. Auch wenn man von größeren Intensitäten spricht, fehlt dabei eigentlich das quantitative Maß.

Dieses Maß stellt die Leuchtdichte dar, also der Lichtstrom, der entweder von einer Fläche emittiert oder reflektiert wird, und zwar in einen Raumwinkel und pro Einheitsfläche senkrecht zu einer gegebenen Richtung. Mit dieser Menge der Photonen verbindet man dann das subjektive Maß bzw. den Eindruck der Helligkeit.

Die physikalische Größe, die die Helligkeit einer Quelle bzw. eines Gegenstandes beschreibt, ist die Leuchtdichte. Leider besitzen die Augen keine linearen Eigenschaften im Hinblick auf die „Menge“ der empfangenen Photonen, sodass eine Quelle der doppelten Leuchtdichte dem Auge nicht notwendigerweise doppelt so hell erscheint, da kein linearer Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und wahrgenommener Helligkeit besteht.

Da aber die Leuchtdichte über die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ eigentlich an eine Flicker-Photometrie geknüpft ist, denn damit wird üblicherweise die $V(\lambda)$ -Kurve bestimmt, kann die Leuchtdichte nur bedingt die scheinbare Helligkeit einer kontinuierlich betrachteten Lichtquelle angeben. Hierauf weisen auch SCHANDA et al. hin [294].

Bereits in einer Empfehlung der SSK [3, 10] wurde die Bedeutung der Leuchtdichte bei der Blendung herausgearbeitet und die verschiedenen Blendungsbegriffe dargestellt. Textpassagen aus dieser Empfehlung wurden auch in die nachstehenden Darlegungen aufgenommen.

Der Leuchtdichte L kommt bei der Blendung durch Lichtquellen eine zentrale Bedeutung zu. Sie stellt ein Maß für die von einem Beobachtungsort aus empfundene Helligkeit einer Lichtquelle dar (Abb. 2.1). Sie wird in der SI-Einheit Candela pro Quadratmeter (cd/m^2) angegeben, also als Lichtstärke pro Fläche. Für die Leuchtdichte L gilt:

$$L = \frac{\text{Lichtstrom } \Phi \text{ in Lumen (lm)}}{\text{Projektion der leuchtenden Fläche } A \text{ in } \text{m}^2 \cdot \text{Raumwinkel } \Omega \text{ in Steradian (sr)}} \quad (2.6a)$$

bzw.

$$L = \frac{\text{Lichtstärke } I \text{ in cd}}{\text{Fläche } A \text{ in } \text{m}^2}. \quad (2.6b)$$

Bei einer leuchtenden flächigen Blendlichtquelle wird die Leuchtfläche auf eine Ebene senkrecht zur Verbindungslinie zwischen dem Auge (Beobachtungs- bzw. Immisionsort) und der Blendlichtquelle projiziert. Damit ergibt sich eine „scheinbare“ Blendlichtquellengröße bzw. -fläche.

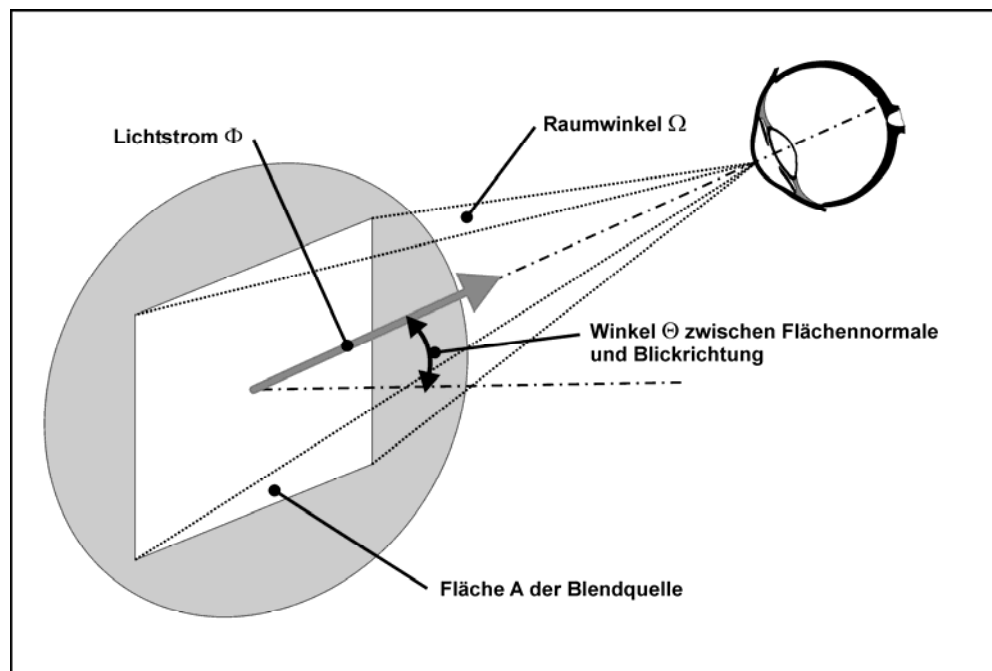


Abb. 2.1 Darstellung der mit der Leuchtdichte zusammenhängenden Verhältnisse und Blendung durch eine Leuchtfläche

Da es sich bei der Leuchtdichte um ein auf die Quellenfläche bezogenes Maß handelt, kann eine Lichtquelle nur dann eine große Leuchtdichte aufweisen, wenn sie

entweder eine große Lichtstärke, eine kleine Leuchtfläche oder beides zusammen aufweist.

Die subjektiv empfundene Lichtstärke stellt das photometrische Gegenstück zur objektiv messbaren physikalischen Größe der Strahlstärke dar. Unter der Lichtstärke einer Lichtquelle wird jener Lichtstrom verstanden, der in ein Raumwinkelement ausgesendet wird. Der Raumwinkel ist die Fläche eines Kugelsegments dividiert durch das Quadrat des Kugelradius. Zur Berücksichtigung der subjektiven Helligkeitsempfindung wird die Einheit Lumen für den Lichtstrom (lm) auf eine Strahlstärke von $1/683 \text{ W/sr}$ bei einer Wellenlänge von 555 nm („grünes Licht“) bezogen.

Wenn eine ideale Punktlichtquelle in alle Richtungen gleichmäßig strahlt, ergibt eine Lichtstärke von 1 cd einen Lichtstrom von $12,57 \text{ lm}$. Bei 555 nm kann eine maximale Lichtausbeute von 683 lm/W (theoretische Grenze der Lichtausbeute, photometrisches Strahlungsäquivalent km) erzielt werden. Für weißes Licht, d. h. für ein Spektrum von 380 nm bis 780 nm , sind es 199 lm/W .

Bei gleichem Lichtstrom erscheint eine Lichtquelle umso heller, je kleinflächiger sie ist. Die Ausdehnung technischer Lichtquellen wird jedoch durch den Anwendungsfall bestimmt. Bei Autoscheinwerfern oder bei Taschenlampen wird im Wesentlichen ein Strahl, d. h. eine Lichtquelle mit hoher Leuchtdichte, verwendet, während Brems- oder Begrenzungsleuchten nur gesehen werden und daher nicht stark gebündelt leuchten müssen. Bei Geräten zur Betrachtung von Dias oder Röntgenaufnahmen, bei beleuchteten Hinweisschildern u. a. wird eine großflächige Lichtquelle mit möglichst gleichmäßiger Lichtabgabe angestrebt.

Die Leuchtdichte ist definitionsgemäß unabhängig vom Abstand zwischen Lichtquelle und Auge. Man erhält die Leuchtdichte (in cd/m^2) indem man die Lichtstärke (in cd) durch die Fläche (in m^2) der Lichtquelle dividiert. Dabei ist die Lichtstärke ein Maß für die Stärke sichtbaren Lichtes, das von einer Lichtquelle in eine spezifische Richtung abgegeben wird, also der Lichtstrom (in lm) pro Einheitsraumwinkel (in sr) in eine gegebene Richtung.

Die von der CIE definierte Leuchtdichte, und zwar als skotopische oder photopische, bedeutet nicht, dass gleiche Helligkeit vorliegt, insbesondere wenn heterochromatische Farben beteiligt sind. Allgemein ist es so, dass eine Farbe umso heller aussieht, je höher deren Sättigung ist. Dies liegt an dem chromatischen Beitrag, der dabei auch Helmholtz-Kohlrausch-Effekt genannt wird. Es zeigt sich nämlich, dass die „wahrgenommene Helligkeit“ bei konstanter Leuchtdichte mit der Sättigung zunimmt. Außerdem hängt die Stärke des Effekts vom Farbton ab. Ein farbiger Reiz erscheint daher heller als ein weißer Vergleichsreiz, der dieselbe Leuchtdichte besitzt. Dafür wird manchmal auch der Begriff Farbgelut verwendet. Die „wahrgenommene Helligkeit“ lässt sich nach dem vorstehend genannten Zusammenhang nicht als unmittelbare Funktion der Leuchtdichte des Reizes angeben.

Außerdem ist im skotopischen und mesopischen Bereich der PURKINJE-Effekt zu berücksichtigen, der aus dem Beitrag der Stäbchen zur Helligkeit stammt und sich darin äußert, dass insbesondere im mesopischen Bereich bläuliches Licht relativ heller erscheint als rötliches.

Man muss daher Helligkeit als die Summierung dreier Arten von Signalen des Sehens betrachten, nämlich eines zapfen-achromatischen, zapfen-chromatischen und stäbchen-achromatischen Kanals, wobei im photopischen Bereich praktisch allein die beiden erstgenannten wirksam zur Helligkeit beitragen [337]. Dabei ist die Abhängigkeit des Farbkanals von der Feldgröße bislang noch nicht im Einzelnen bekannt [337].

Im Gegensatz zur Leuchtdichte ist die Beleuchtungsstärke (in lux bzw. lm/m^2) auf einer Fläche vom Abstand abhängig, und zwar nimmt diese quadratisch mit der Entfernung von der Lichtquelle ab, wenn eine gegebene Lichtstärke vorliegt.

Die retinale Beleuchtungsstärke hängt vom Pupillendurchmesser und von der Absorption der Augenmedien vor der Retina ab. Als Einheit für die retinale Beleuchtungsstärke wird vielfach das Troland (Td) benutzt, wobei aber die Absorption unberücksichtigt bleibt. Die retinale Beleuchtungsstärke E_r (Pupillenlichtstärke I_p) ergibt sich aus dem Produkt der Leuchtdichte L und der Pupillenfläche A_p des jeweiligen Auges, wobei die Leuchtdichte L in cd/m^2 und die Pupillenfläche A_p in mm^2 angegeben werden. Bei einer Pupillenfläche A_p von 1 mm^2 ist die retinale Beleuchtungsstärke E_r gleich der Leuchtdichte L , d. h. es gilt dann $1 \text{ Td} = 1 \text{ cd}/\text{m}^2$. Ein Beobachter erfährt also eine retinale Beleuchtungsstärke von 1 Td, wenn er auf eine Fläche mit der Leuchtdichte $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ durch eine Pupillenfläche von 1 mm^2 blickt. Wenn also das Auge auf eine Fläche konstanter Leuchtdichte blickt, ist der Zahlenwert der Pupillenlichtstärke in Troland gleich dem Produkt der Leuchtdichte der Fläche in Candela je Quadratmeter und der Fläche der begrenzenden Pupille in Quadratmillimeter

$$I_p = L \cdot A_p = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_p^2 \quad , \quad (2.7)$$

mit I_p in Troland, wenn L in cd/m^2 und A_p in mm^2 eingesetzt werden. Im Allgemeinen erzeugt ein Troland eine retinale bzw. Netzhautbeleuchtungsstärke von annähernd $2 \cdot 10^{-3}$ Lumen je Quadratmeter bzw. Lux.

Ob eine Lichtquelle blendet, hängt dabei vom Adaptationszustand des Auges und der Umgebungsleuchtdichte ab. Bei dunkel adaptiertem Auge kann bereits der Vollmond zu einer Blendung führen.

Im Alltag treten Leuchtdichten im Bereich von ca. $10^{-11} \text{ cd}/\text{m}^2$ bis $5 \cdot 10^9 \text{ cd}/\text{m}^2$ auf (in [3] ist hierzu eine Tabelle enthalten, die repräsentative Leuchtdichten zwischen sternklarem Nachthimmel mit ca. $10^{-11} \text{ cd}/\text{m}^2$... $0,02 \text{ cd}/\text{m}^2$ bis zum Blitz beim Gewitter mit $10^{11} \text{ cd}/\text{m}^2$ beinhaltet).

Kfz-Bremsleuchten haben Lichtstärken von 40 cd bis 100 cd, die Nebelschlussleuchte 150 cd bis 300 cd und das Fernlicht $4,5 \cdot 10^3 \text{ cd}$ bis $6 \cdot 10^4 \text{ cd}$. Die Lichtstärke aller gleichzeitig einschaltbaren Fernscheinwerfer darf laut Zulassungsbedingungen $2,25 \cdot 10^5 \text{ cd}$ nicht übersteigen [ECE bzw. EC-Direktiven]. Einzelne Leuchtdioden (LED) haben heute eine Lichtstärke zwischen 10^{-3} cd und ca. 20 cd [3].

Die Beleuchtung der Netzhaut löst durch Erregung der Sehzellen eine Lichtempfindung aus, die von der Erregbarkeit der Sehzellen und vom Adaptationszustand in der zuvor beschriebenen Weise abhängt.

Die Augen besitzen zwei Arten von Lichtrezeptoren, für das Hell-Dunkel-Sehen die Stäbchen und die Zapfen für das Farbsehen. Letztere sind wesentlich unempfindlicher und reagieren auf Licht erst ab ca. 3 cd/m^2 . Das volle Farbsehen erfordert Leuchtdichten von mehr als 10 cd/m^2 . Die empfundene „Farbqualität“ nimmt mit der Leuchtdichte zu. Die Wahrnehmung von Kontrasten kann bei Leuchtdichten unterhalb von 100 cd/m^2 wegen der fehlenden Adaptierung der Augen erschwert sein.

Die deutlich größere Empfindlichkeit der Stäbchen im Vergleich zu derjenigen der Zapfen hängt neben der Konzentration der Sehpigmente von der enormen „Sammel-eigenschaft“ von jeweils etwa 10 000 Stäbchen ab, die im Hinblick auf den „Einfang“ von Photonen kooperieren [88]. RUSHTON geht bei seinen Betrachtungen davon aus, dass ca. 30 % des Lichtes, das durch die Hornhaut ins Auge gelangt, zum Sehen beiträgt.

Insgesamt besitzen die Augen die Fähigkeit, sich dem Leuchtdichtebereich von etwa 10^{-6} cd/m^2 (absolute Sehschwelle) bis 10^5 cd/m^2 anzupassen, wobei man von konstanten Sehleistungen in einem Bereich von etwa 10^2 cd/m^2 bis 10^4 cd/m^2 ausgehen kann. Bei Änderungen der Leuchtdichte kann die Pupille durch Anpassung ihres Durchmessers den in das Auge eindringenden Lichtstrom im Verhältnis von ca. 1:16 regeln. Allerdings dürfen dabei die Änderungen der Leuchtdichte nicht zu schnell und zu kurz erfolgen. So wurde z. B. bei den Lidschlussreflexuntersuchungen festgestellt, dass sehr häufig kein Pupillenreflex eintrat, weil die Dauer der Exposition zu dessen Auslösung zu kurz war.

Insbesondere im Straßenverkehr kommt es weniger auf die Erkennung von Details, wohl aber von Umrissen, d. h. von Leuchtdichteunterschieden gegenüber einem Hintergrund an, die in weniger als etwa 0,2 s sicher erfolgen muss. Aus diesem Grund wird eine Straßenleuchtdichte von etwa 2 cd/m^2 als ausreichend betrachtet.

Für den Helligkeitseindruck einer Lichtquelle ist die Leuchtdichte entscheidend und nicht die Beleuchtungsstärke (in Lux (lx)) oder der Quotient aus dem auf eine Fläche auftreffenden Lichtstrom (in Lumen (lm)) und der beleuchteten Fläche (in m^2). Um die maximale Sehschärfe zu erreichen, sodass auch noch sehr kleine Details gesehen werden, ist eine Leuchtdichte oberhalb von 100 cd/m^2 erforderlich. Der Einfluss der Leuchtdichte auf den Helligkeitseindruck ist nicht linear, z. B. ist eine 4,5-fache Leuchtdichtesteigerung erforderlich, um einen doppelt so starken Helligkeitseindruck zu erzielen.

Wenn von Blendung gesprochen wird, dann handelt es sich meist um eine Situation, bei der die Augen plötzlich einer deutlich größeren Lichtmenge ausgesetzt werden, sodass sie dies in der momentanen Adaptation nicht mehr ausreichend ausgleichen können. Dies ist vergleichbar mit der Überschreitung eines Messbereiches bei einem Messgerät, denn auch die Augen stellen in dieser Hinsicht Sensoren dar, die neben der „Qualität und dem Inhalt“ auch die Quantität des einfallenden Lichtes „messen“.

Durch diese Messbereichserweiterung kommt es zum Glück nur in den seltensten Fällen, d. h. wenn dabei gleichzeitig auch thermische Grenzwerte überschritten werden, zusätzlich zur Blendung auch zu einer Schädigung, was schlimmstenfalls eine Erblindung zur Folge haben kann. Insofern kommt dem Begriff „Blendung“ nicht die finale Bedeutung zu, wie dies beim Blenden durch einen glühenden Holzsplitter oder Eisenstab in der Geschichte der Menschheit belegt ist, sondern es handelt sich um ein temporäres Ereignis. Gleichwohl können mit einer vorübergehenden Blindheit sehr wohl indirekte Gefährdungen verbunden sein, die es zu beachten und abzuwenden gilt.

Die Sehaufgaben werden insbesondere dadurch erfüllt, dass die Sehobjekte Unterschiede in der Leuchtdichte, in den Kontrasten und Farben aufweisen. Dabei spielt die jeweilige momentane Anpassung der Augen eine wichtige Rolle und ergibt sich vorwiegend aus der Umgebungsleuchtdichte, also aus der Helligkeit der Umgebung, die sich als Lichtstärke pro leuchtender, d. h. selbstleuchtender oder beleuchteter Flächeneinheit, ergibt.

Der Bereich, in dem wir eine Hell-Dunkel-Adaptation vornehmen können, ist sehr groß. Er beträgt etwa 11 Zehnerpotenzen. In diesem großen Bereich soll das Auge eigentlich auch Gegenstände unterscheiden können, und zwar auch dann, wenn die Helligkeitsunterschiede nur Faktoren von 20 bis 100 aufweisen. Wenn daher insgesamt ein sehr großer Bereich von den Augen „verarbeitet“ werden kann, so liegen die Leuchtdichteunterschiede, denen die Augen üblicherweise ausgesetzt sind bzw. die im jeweiligen Gesichtsfeld vorliegen, im Bereich bis etwa zu einem Faktor 50. Liegen die Werte deutlich darüber, dann kann Blendung auftreten. Nun ist es aber so, dass sich eine einfache Grenze für die Blendung nicht angeben lässt, denn Blendung hängt von mehreren Faktoren ab.

DIN 5340 [4] definiert *Blendung* als durch zu hohe Leuchtdichte oder Leuchtdichteunterschiede ausgelöste visuelle Störempfindung mit oder ohne nachweisbare Minderung von Sehfunktionen.

Blendung stellt also einen Sehzustand dar, der entweder aufgrund zu großer absoluter Leuchtdichte, zu großer Leuchtdichteunterschiede oder aufgrund einer ungünstigen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld als unangenehm empfunden wird oder zu einer Herabsetzung der Sehleistung führt. Die Blendung hängt vom Adaptionszustand des Auges ab und entsteht daher bei einer Leuchtdichte einer Blendlichtquelle, die für den jeweiligen Adaptionszustand zu hoch ist. Auch die Dauer der Einstrahlung in die Augen spielt beim Ausmaß einer Blendung eine Rolle. Zusätzlich sind die scheinbare Größe der Blendlichtquelle bzw. deren Raumwinkel von Bedeutung sowie der Projektionsort der jeweiligen Blendlichtquelle auf der Netzhaut, also der Winkel zwischen Blendlichtquelle und Blickrichtung. Die Augen wenden sich häufig unwillkürlich direkt zur Blendlichtquelle hin, wenn eine solche seitlich auf die Netzhaut abgebildet wurde, wo sich die besonders blendungsempfindlichen Stäbchen befinden.

Gerade dem Parameter Umgebungsleuchtdichte kommt eine besondere Rolle zu. Letztlich adaptieren die Augen auf die Umgebung, wenn dazu genügend Zeit vorhanden ist. Durch diese Adaptation wird erreicht, dass die Antwort der Netzhaut auf

Sehobjekte in etwa gleich gehalten wird, und zwar auch dann noch, wenn sich das Beleuchtungsniveau ändert.

Bei der Arbeit kommt es darauf an, dass die dabei auszuführenden Tätigkeiten möglichst blendfrei erfolgen können. So muss z. B. ein Schweißer den Schweißvorgang beobachten können und dabei beachten, dass er dabei so stark geblendet werden kann, dass ihm dies nicht möglich ist. Die Lösung dieser Aufgabe geschieht in diesem Fall durch Verwendung geeigneter Schweißerschutzfilter. Es gibt aber auch Situationen, bei denen entweder keine Augenschutzfilter verwendet werden können oder dies ursprünglich nicht zur Sicherheitsphilosophie gehörte. Beispiele stellen die Expositionen von Bühnendarstellern und Schauspielern dar, die entweder im Rampenlicht stehen oder bei den Aufnahmen „ausgeleuchtet“ werden. Hier wäre das Tragen von Schutzbrillen – welcher Art auch immer – nicht im Sinne der beabsichtigten Performance.

Ein anderes Beispiel stellt die potenzielle Exposition durch Strahlung eines Lasers der Klasse 2 dar, wobei man den Lidschlussreflex und andere Abwendungsreaktionen als die zeitliche Begrenzung angesetzt hat, die bei nur kurzzeitiger Exposition Risiken ausschließen sollte. In ausführlichen Untersuchungen konnte aber gezeigt werden, dass weder der Lidschlussreflex noch andere Abwendungsreaktionen sicher auftreten. Der Effekt der Blendung führt in diesen Fällen der Laserstrahl-exposition also nicht zu einer physiologischen Schutzreaktion, d. h. es kann – wenn schon nicht sofort zu einer Schädigung der Augen – so doch zu einer größeren Blendung kommen, als es einer kürzeren Zeitdauer entsprechen würde.

In der Normung zum Augenschutz wurde eine Leuchtdichte von 730 cd/m^2 für eine noch „annehmbare“, d. h. blendungsfreie Betrachtung einer Lichtquelle angesetzt und insbesondere im Zusammenhang mit Schweißerschutzfiltern empfohlen [204]. Der erforderliche Lichttransmissionsgrad eines Filters wird dabei so bestimmt, dass die Leuchtdichte auf 730 cd/m^2 verringert wird.

2.3 Adaptation

Die Augen werden unter Alltagsbedingungen prinzipiell einer Lichtintensität ausgesetzt, die sich über ca. 11 Zehnerpotenzen erstreckt. Allerdings können die Neuronen der Retina selbst nur in einem Bereich von zwei bis drei Zehnerpotenzen arbeiten.

An der Lichtempfindlichkeitssteigerung sind außer den Sehzellen, das retinale Netzwerk und die zentrale Signalverarbeitung beteiligt.

Diese Tatsachen machen natürlich einen automatischen Adaptations-Mechanismus erforderlich, der es erlaubt, dass die Empfindlichkeit der Augen so eingestellt wird, gutes Sehen bei allen Beleuchtungsniveaus zu gewährleisten.

Von Interesse ist beim Auftreten einer Blendung auch die Berücksichtigung der Umgebungshelligkeit und der Zeitdauer einer Adaptation der Augen an wechselnde Umgebungsbedingungen.

Unter Helligkeits-Konstanz versteht man die Tendenz, durch Lichtadaptation die mittlere Helligkeit einer Szene ungefähr auf gleichem Niveau zu halten. Dabei gibt es naturgemäß allerdings einen Bereich, über den hinaus dies nicht mehr möglich ist, und zwar ist dies bei sehr geringen und bei sehr hohen Beleuchtungswerten der Fall.

Das menschliche Auge verfügt über die Fähigkeit der Adaptation, d. h. sich an die momentane Umgebung im Hinblick auf die Beleuchtungsverhältnisse anzupassen. Dabei geht es um die Haupteigenschaften von Licht, nämlich um dessen Helligkeit und Farbe. Die Adaptationsfähigkeit äußert sich dabei sowohl in der Anpassung an steigende als auch an sinkende Lichtintensität – oder genauer Beleuchtungsstärke –, aber auch um Veränderungen in der spektralen Leistungsverteilung der Beleuchtung. Als Folge dessen herrscht die Tendenz, alle Beleuchtungen hinsichtlich der Farbe als ‚weiß‘ oder ‚neutral‘ und in Bezug auf die Intensität als ‚normal‘ oder ‚mittel‘ zu erleben [240]. In dem einen Fall geht es dabei um chromatische Adaptation, wobei sich das Sehsystem auf Veränderungen der Spektralverteilung der vorherrschenden Beleuchtung in seiner Empfindlichkeit einstellt und damit das Farbsehen über einen großen Bereich verschiedener Beleuchtungsbedingungen sicherstellt. Das bedeutet dann aber auch zugleich, dass die jeweils vorherrschende Beleuchtung – gleich welcher Szene – nahezu farblos erscheint und damit – trotz relativ großer Änderungen in der Spektralverteilung – Gegenstände im Hinblick auf ihre Farbe als unverändert erscheinen. Das ist das, was man als Farbkonstanz bezeichnet, also ein Idealzustand, bei dem das visuelle System einen vollständigen Ausgleich bezüglich der physikalisch durch von Gegenständen reflektiertes Licht vornimmt, sodass die wahrgenommene Farbe unverändert bleibt.

Nach heutiger Kenntnis wird die Adaptation der Augen an unterschiedliche Helligkeitsverhältnisse zum einen durch die Größe der Pupille, den Pupillendurchmesser also, der sich unwillkürlich anpasst, erreicht. Der größere Anteil der Adaptation wird aber durch eine Veränderung der Empfindlichkeit der Sehzellen bewirkt.

In der Netzhaut sind zwei verschiedene Adaptationsmechanismen vorhanden, nämlich zum einen ein rascher neuronaler in der Strukturierung der Netzhaut begründeter und ein langsamer photochemischer in den jeweiligen Fotorezeptoren.

Man geht heute davon aus, dass bei dem zweistufigen Adaptationsprozess die schnelle Stufe bereits innerhalb der ersten 5 s ca. 60 % der chromatischen Adaptation erreicht und dass mit der langsameren Stufe nach 60 s etwa 90 % erreicht sind [240].

Darüber hinaus ist bekannt, dass die vorherrschende Beleuchtung dann, wenn die chromatische Adaptation abgeschlossen ist, als farblos erscheint, d. h. es liegt im farbverarbeitenden Kanal keine Aktivität mehr vor, die mit der Beleuchtung zusammenhängt. Dies bedeutet aber auch, dass das Spektrum der Lichtquelle die Helligkeit nicht mehr beeinflusst. Wenn dagegen aber nur teilweise chromatische Adaptation vorliegt, bedeutet dies aufgrund des noch fehlenden Weißindrucks, dass auch noch Aktivität in den zellulären Pfaden herrscht, die mit der Beleuchtung – und damit mit dem Spektrum – zusammenhängt und die Helligkeit beeinflusst.

Zu einer Zeit, als noch vom „Lichtäther“ – im heutigen Sinne optischer Strahlung – gesprochen wurde, befasste sich KÜHNE eingehend mit dem Sehpurpur und stellte dabei fest, dass dieser am Ende des Ausbleichvorgangs, nur noch die „blauen und violetten Strahlen“ zurückhält, immer heller gelb wird und schließlich – am Ende der Zersetzung – in der Lösung wie Wasser entfärbt ist [333]. Eine vollständige Entfärbung der Retina unterstellte 1878 KÜHNE auch bei längerer Einwirkung des Sonnenlichtes, die er als Blendung bezeichnete.

So kann man in einem dieser ersten Berichte auch geradezu Erstaunliches lesen, wie z. B. das „Einfrieren“ einer hellen Lichtquelle in der Netzhaut. KÜHNE schreibt dazu im Zusammenhang mit Untersuchungen zu Veränderungen des Sehpurpurs, wozu er Netzhautteile mittels einer Gasflamme als Lichtquelle beleuchtete: „Ich hätte darum nach Erreichung einiger positiver Resultate, unter recht vielen negativen, die ganze Anordnung verlassen, wenn ich nicht zufällig bei einem nur 14 Stunden in Blau gehaltenen Frosche, der beharrlich nur mit einem Auge in das Licht glotzte, das schönste Bild der Gasflamme völlig farblos in den tiefrothen Grund der Stäbchenmosaik eingezeichnet gefunden hätte.So musste eine helle, scharf berandete, ziemlich central gelegene, farblose Stelle, die ich darin fand, ungewöhnlich auffallen, und als ich mir dieselbe bei schwächerer Vergrößerung besah, war das Flammenbild mit seinen zwei züngelnden Spitzen gar nicht zu verkennen.“ [333].

KÜHNE hatte damit einen Beweis dafür, dass Licht im Auge auf der Netzhaut genauso wirkte wie auf die photographische Platte in der sogenannten Camera obscura. Er nannte die so erhaltenen Bilder Optogramme und stellte in der Folgezeit fest, dass sich dazu am besten die Augen albinotischer Kaninchen eigneten. Aus heutiger Sicht muss man bei diesen frühen Berichten z. B. an photochemisch bzw. photothermisch erzeugte Schädigungen beim längeren Blick in die Sonne während einer Sonnenfinsternis denken. Aus den Berichten von KÜHNE ist auch zu entnehmen, dass er zur Erzeugung seiner aus den ersten noch überraschenden Ergebnissen entwickelten Optogramme in der Netzhaut Bestrahlungsdauern von z. B. 3 – 5 Minuten verwendete, während derer Mittagslicht durch eine matte Scheibe auf die Netzhaut fiel. In einer anderen Exposition war sogar nur von 15 s durch eine Magnesiumflamme die Rede.

Noch vor KÜHNE hatte BOLL (zit. in [334]) in einer Mitteilung an die Berliner Akademie (Sitzung vom 12. Nov. 1876) veröffentlicht, „dass die Stäbchenschicht der Retina aller Geschöpfe im lebenden Zustand nicht farblos sei, wie man bis dahin angenommen hatte, sondern purpurroth“. Dazu sagte BOLL, „dass die Eigenfarbe der Netzhaut beständig durch das ins Auge fallende Licht verzehrt, in der Dunkelheit wieder hergestellt und im Tode halte sie sich nur einige Augenblicke“. KÜHNE konnte in seiner Arbeit auch zeigen, dass eine vom Licht gebleichte Netzhaut, wenn sie mit der natürlichen Unterlage in Berührung stand, wieder purpurfarben wurde, also ihre Regeneration von den anatomisch darunter liegenden Schichten herrührt, zu denen in erster Linie das retinale Pigmentepithel gehört, wie es wohl als eventuell Erster überhaupt HAAB 1879 fand [335].

Aufgrund seiner Erfahrungen formulierte KÜHNE „Ich möchte behaupten, dass wir nicht 30 Secunden ein grösseres, helleres Object bei behindertem Lidschlage fixiren können, ohne unfähig zu werden es zu sehen und finde es nicht wunderbar, wenn das Säugethiergeuge bei minutenlang constanter, mässiger Belichtung da geblendet

ist, wo im Bilde das Licht auf die Netzhaut fiel, ja soweit geblendet ist, dass der Purpur dort gar nicht mehr, oder sicherlich verfärbt gefunden wird und um so viel abgenommen hat, dass die Regeneration beträchtlicher Zeit bedarf, um ihn wieder kenntlich zu machen.“ So nannte er das auf diese Weise entstehende Optogramm ein „Nachbild im eigentlichen Sinne des Worts“ [333].

Fällt helles Licht auf die Netzhaut, so wird der Sehpurpur sehr schnell zerlegt. Wenn dessen Regeneration langsam erfolgt, bleibt die Konzentration zunächst niedrig und ein photochemischer Effekt ist vernachlässigbar, d. h. die Stäbchen bleiben inaktiv. Mit der Zeit wird weiterer Sehpurpur erzeugt und die wachsende Konzentration bewirkt bereits bei einem schwachen Reiz einen photochemischen Effekt, wodurch die Reaktion auf einen visuellen Stimulus anwächst. Dieser Anstieg in der Empfindlichkeit setzt sich solange fort, bis ein Gleichgewicht zwischen den Regenerationsprozessen und der photochemischen Zerlegung erreicht ist, d. h. es gibt sehr viele Stufen der Dunkel-Adaptation. Analog gibt es viele Stufen der Hell-Adaptation, wenn nur die Zapfen aktiv sind und deren Chromophore betrachtet werden.

Man kann davon ausgehen, dass die Regeneration bei der Hell-Adaptation innerhalb von wenigen Minuten abgeschlossen ist. Reduziert man die Helligkeit, d. h. die Reizamplitude von sehr hohen Werten, tritt eine Dunkeladaptation der Zapfen ein, d. h. sie werden empfindlicher. Wird die Reizamplitude noch weiter reduziert, dann sind unterhalb der sogenannten Schwelle nur noch die Stäbchen aktiv.

Wenn plötzlich ein Reiz auf ein dunkeladaptiertes Auge trifft, steigt die Reaktion, d. h. das Erscheinungsbild, zu einem Maximum und fällt danach zu einem Gleichgewichtswert.

Nach DIN 5031 Teil 2 wird zwischen 10^{-5} cd/m² und 10^2 cd/m² weder nach dem Hellempfindlichkeitsgrad für das dunkel- noch nach dem für das helladaptierte Auge bewertet. Eine eindeutige Dunkeladaptation liegt unterhalb von 10^{-3} cd/m², eine für Helladaptation oberhalb von 10 cd/m² vor. Dabei ist aber noch nichts über die Zeitdauer der Adaptation zum Zeitpunkt der Blendung und den daraus resultierenden Einfluss auf die Blendungserscheinungen ausgesagt, d. h. auch hierin besteht Forschungsbedarf.

Unter Adaptation wird allgemein die Fähigkeit der Anpassung des menschlichen Auges an die verschiedenen Helligkeitsgrade verstanden. Dabei werden die Sehpigmente (Rhodopsin in den Stäbchen und verschiedene Iodopsine in den Zapfen) in den Stäbchen bzw. Zapfen, reversibel chemisch im Sinne einer Bleichung bzw. Farbveränderung (Gelbwerden) verändert. RUSHTON hat zusätzlich zum blauempfindlichen, sogenannten Cyanolabe (Absorptionsmaximum bei 430 nm bis 445 nm), zwei fotoempfindliche Farbstoffe in den Zapfen angegeben, nämlich das „Chlorolabe“ („green taking“) mit einem Maximum der Absorption bei 540 nm und „Erythrolabe“ („red taking“) bei 590 nm ([322, 345]). Bei diesen Farbstoffen handelt es sich um die Protein-Pigment-Komplexe Photopsin I, II und III, die auch Erythrolabe, Chlorolabe und Cyanolabe genannt werden. Damit hatte RUSHTON im Grunde die bereits vor rund 200 Jahren von Th. YOUNG vorgeschlagenen 3 sogenannten „Resonatoren“ in 3 verschiedenen Zapfenpigmenten gefunden.

Außer der chemischen Reaktion des Sehfärbstoffes finden bei einer Adaptation in der Netzhaut verschiedene neuronale Umschaltprozesse mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten statt. Die neuronalen Vorgänge sind deutlich schneller als die bei der Adaptation beteiligten fotochemischen Vorgänge.

RUSHTON hat gezeigt, dass die Stäbchen während der Dunkeladaptation normalerweise nicht zu arbeiten beginnen, bis nicht wenigstens 90 % des Rhodopsins regeneriert wurde. Da diese restlichen 10 % im Anstieg der Pigmentkonzentration von einem mehr als 100-fachen Anstieg der Sehschwelle begleitet sind, ist die Empfindlichkeit offensichtlich nicht direkt proportional zur Pigmentkonzentration [345]. Vielmehr liegt der Logarithmus der Empfindlichkeit proportional zur Rhodopsinmenge [345].

Die Zeitdauer der Adaptation hängt entscheidend davon ab, welche Leuchtdichteunterschiede in welche Richtung angepasst werden müssen, also auch davon, ob eine Dunkel- oder eine Helladaptation erforderlich ist. Die Helladaptation erfolgt dabei im Hellen, während die Regenerierung im Dunkeln als Dunkeladaptation bezeichnet wird.

Bei Dunkeladaptation selbst wird unterschieden zwischen Sofortadaptation, die den Anpassungsvorgang der ersten zwei bis zehn Minuten umfasst und der anschließenden Daueradaptation, die erst nach einer halben bis zu einer Stunde abgeschlossen ist. Die Adaptation erfolgt für Zapfen schneller als für Stäbchen, d. h. die Augen stellen sich mit unterschiedlichen Zeitkonstanten auf das jeweils vorliegende Leuchtdichtenniveau ein – sie adaptieren auf die Umgebungsleuchtdichte.

Auch die Helladaptation erfolgt in zwei Phasen, und zwar in der unmittelbar einsetzenden α -Adaptation, die nach etwa 50 ms bis 100 ms abgeschlossen ist und aus der anschließenden β -Adaptation. Diese wiederum kann nach vorheriger vollkommener Dunkelheit einige Minuten dauern, verläuft aber wesentlich schneller als die Dunkeladaptation.

Der Tatsache, dass die Augen einen sehr großen Adaptations- oder Dynamikbereich aufweisen, verdanken wir es, dass wir sowohl im gleißenden Sonnenlicht als auch im fahlen Mondlicht in der Lage sind, Formen und Bewegungen zu erkennen bzw. wahrzunehmen. Während die Mondscheibe oder ein brennendes Streichholz am Tage kaum wahrgenommen werden, können diese beiden Objekte/Quellen in der Nacht durchaus sogar Blenderscheinungen hervorrufen.

Darüber hinaus ist bekannt, dass transiente Hintergründe bezüglich des Anstieges der Nachweisschwelle wirkungsvoller sind als stationäre Hintergründe gleicher Helligkeit [347]. Wenn ein vorübergehendes Adaptationsfeld vorliegt, dann adaptiert sich das Auge nicht auf die höhere Leuchtdichte und bleibt in dem Anfangsbereich der Adaptationskurve, wo die Schwelle höher ist.

2.4 Streuung als Blendungsursache

Ein Blick in die Geschichte der Befassung mit Blendungssituationen zeigt, dass HOLLADAY bereits 1926 [7] das Konzept der physiologischen Blendung („disability glare“) entwickelte. Dabei ging er davon aus, dass dieser Eindruck erst im Sehnerv entstehen würde, und zwar gewissermaßen als eine Art Übersprechen.

Dieser Ansicht widersprach STILES [35] indem er davon ausging, dass die Ursache der Blendung in den optischen Medien des Auges lag. HOLLADAY schloss sich dann dieser Meinung an, stellte aber fest, dass dadurch nicht alle Blendeffekte erklärt werden könnten. Dadurch kam es in der Folge zur Unterscheidung von physiologischer und psychologischer Blendung („disability und discomfort glare“).

Das Bild auf der Netzhaut kann als Produkt der Punktverwaschungsfunktion (PSF) mit dem Original betrachtet werden, während sich der Visus aus dem zentralen Teil dieses Bildes ergibt [306]. Aus dieser Grundaussage entwickelte VAN DEN BERG die Vorstellung, dass Licht außerhalb von 1° üblicherweise als Streulicht und damit als die Basis der Blendungserscheinung betrachtet werden kann.

Grundsätzlich entsteht Blendung dann, wenn „Helligkeiten“ im Sehfeld/Gesichtsfeld auftreten, die größer sind als diejenigen, auf die das Auge adaptiert ist. Dabei können direkte oder indirekte Lichtquellen die Ursache sein.

Dass es der Leuchtdichteunterschied ist, der die Blendung ganz wesentlich beeinflusst, wird klar, wenn man z. B. die Verhältnisse bei Scheinwerferlicht während der Nacht und am Tage vergleicht. Da man bei einer Nachtfahrt eine Adaptation auf einen viel geringeren Pegel hat, und somit eine größere Differenz in der Leuchtdichte zwischen Gegenständen und der Umgebung/dem Hintergrund benötigt, um Gegenstände zu erkennen, ist der Effekt der Blendung viel größer als am Tage.

Die Leuchtdichtedifferenz wird durch Streulicht, das entweder direkt von einer Blendlichtquelle oder indirekt durch Reflexionen, z. B. von Scheinwerfern auf nasser Straßenoberfläche, von Spiegeln oder Flächen im Fahrzeug kommt, reduziert.

Licht, das am Tage kaum wahrgenommen wird, wie z. B. das des Mondes, kann in der Nacht als unangenehm blendend empfunden werden.

Man geht heute davon aus, dass physiologische Blendung von der Streuung in den Augenmedien bzw. an deren Grenzflächen entsteht, während die psychologische Blendung in den neuronalen Prozessen entsteht.

Die Tatsache, dass in der Stiles-Holladay-Blendungsformel die äquivalente Leuchtdichte L_{eq} proportional zur Beleuchtungsstärke E_B im Auge ist, wie noch in Gl. (2.8) dargestellt wird, zeigt, dass physiologische Blendung eine durch Streuung hervorgerufene optische Erscheinung ist und nicht das Ergebnis neuronaler Vorgänge.

Streuung kann auf insbesondere vier verschiedene Weisen entstehen, und zwar als Rayleigh-Streuung an Streuteilchen, die klein gegen die Wellenlänge sind, als Mie-Streuung an Teilchen, die groß gegen die Wellenlänge sind, sowie als Grenzflächen-

streuung an den Übergangsstellen zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex und dann noch die Streuung beim Auftreffen auf die Netzhaut selbst.

Bereits 1852 schrieb der Physiologe HELMHOLTZ, „dass ohne Zweifel ein Teil des Lichtes, das in das Auge fällt, auf andere Teile der Netzhaut verteilt wird“ und weiter „dass wir jedoch ohne weitere Untersuchungen nicht entscheiden können, ob nicht zusätzlich eine neuronale Erregung für eine Verbreiterung sorgt“ [25].

Die entoptischen, d. h. inneren Hauptursachen einer Blendungserscheinung finden sich im Auge selbst. Verantwortlich sind insbesondere die Hornhaut, die Linse und der Fundus, d. h. die Netzhaut mit den darunter liegenden Schichten, also der Augenhintergrund [26].

Diese Tatsachen kann man bereits daraus ableiten, dass man die Struktur von Hornhaut, Linse und Augenhintergrund aufgrund ihres jeweiligen Streubeitrages „sehen“ kann, dass sich dagegen weder die vordere Augenkammer noch der Glaskörper mittels einer Spaltlampe inspizieren lassen, da deren Streuung normalerweise vernachlässigbar klein ist.

Nun muss man bei einer Betrachtung der Streuung allerdings noch zwischen Rückwärts- und Vorwärtsstreuung unterscheiden, denn während bei der Spaltlampen-Untersuchung die Rückwärtsstreuung verantwortlich ist, ist es die Vorwärtsstreuung in den Augenmedien, die zu dem Empfinden der Blendung wesentlich beiträgt. Dies kann als Auftreten einer Schleierleuchtdichte beschrieben werden.

DE MOTT und BOYNTON fanden, dass 70 % der Streuung von der Hornhaut und 30 % von der Linse und der vorderen Augenkammer stammen [27]. Dabei wurde aber erstens der Anteil des Augenhintergrundes außer Acht gelassen und zweitens angenommen [26], dass der hohe Beitrag zur Streuung von der Hornhaut und insbesondere von der vorderen Augenkammer das Ergebnis der nach dem Tod rasch eintretenden Veränderungen im Streuverhalten gerade dieser Abschnitte sei, zumal gerade die vordere Augenkammer üblicherweise als „optisch leer“, d. h. vollständig transparent betrachtet wird.

Die Selbstuntersuchungen von VOS und BOOGARD ergaben einen Wert von etwa 30 %, den die Hornhaut zur Gesamtstreuung beiträgt [26], was von VOS und BOOGARD als Wert derselben Größenordnung wie diejenige von DE MOTT und BOYNTON angesehen und die Abweichung im Hinblick auf den fehlenden Beitrag des Augenhintergrundes zur Streuung erklärt wird.

Ein Wert von 25 % für den Hornhautbeitrag zur Streuung wurde auch von BOYNTON und CLARKE [28] angegeben.

Die Linse des Auges ist aus organellen-freien faserförmigen Zellen aufgebaut, wobei Proteine das Zytoplasma dieser Zellen ausfüllen. Diese Proteine bleiben in den jeweiligen Zellen, wenn sie erst einmal gebildet wurden. Dies bedeutet aber auch, dass sie infolge von Veränderungen, zu denen Oxidationen usw. gehören, auch eine Aggregation zu größeren Strukturen aufweisen können. Dies ist gleichbedeutend mit der Erzeugung von Strukturen höheren Molekulargewichtes und einer örtlichen Än-

derung der relativen Permittivität (Brechungsindex) und damit eine Ursache vermehrter Streuung in der Linse. Es wird aber angenommen, dass Veränderungen in den Zellmembranen der faserförmigen Linsenzellen noch mehr zur Streuung beitragen [29], insbesondere da die entsprechenden Strukturen im Vergleich zu den Proteinen größere Abmessungen besitzen.

Teilchen, die zu Zellstrukturen und deren Veränderungen gehören, haben Abmessungen im Bereich von Mikrometern und führen damit zur sogenannten Mie-Streuung [30].

Bei den Strukturen, die diese Art der Streuung bewirken, handelt es sich um solche mit Abmessungen zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $4\ \mu\text{m}$, während größere von etwa $5\ \mu\text{m}$ bis $20\ \mu\text{m}$ außer zur Streuung auch zur Reflexion von Licht führen.

Obwohl auch heute noch viele Fragen offen sind, so ist es unbestritten, dass die Linse und deren strukturelle Veränderungen, insbesondere bei einer Katarakt, mehr oder weniger zur Streuung im Auge beitragen. Von GILLILAND et al. wurden dazu beim nicht-pathologischen Auge 2 bis 3 % und beim pathologischen Auge bis zu 20 % angegeben [29].

Die Menge des Lichtes, die die Netzhaut erreicht, ist nicht nur von der Größe der Pupille abhängig, sondern auch von der Farbe der Regenbogenhaut (Iris). Eine helle, z. B. blaue Iris lässt deutlich mehr Licht durch als eine dunkler gefärbte. Bei Personen mit blau gefärbten Augen kommt es aber eigentlich nur dann zu mehr physiologischer Blendung, wenn der Blendlichtwinkel groß ist, da dann die Streubeiträge von Hornhaut, Linse und Fundus weniger von Bedeutung sind und die Augenfarbe zunehmende Bedeutung im Hinblick auf die durch die Iris und die Sklera (Lederhaut, im vorderen Augenabschnitt: Bindehaut) gelangende Strahlung hat.

Optische Strahlung gelangt auf ihrem Weg durch die Hornhaut, die vordere Augenkammer, die Augenlinse und den Glaskörper zum okularen Fundus (Augenhintergrund). Dabei kommt es außer zu einer wellenlängenmäßigen Absorption, wobei sich z. B. der Glaskörper optisch praktisch wie Wasser verhält und die Augenlinse aufgrund des darin enthaltenen Pigmentes stark im blauen Bereich des Spektrums absorbiert und darüber hinaus als Folge einer altersbedingten Gelbfärbung eine entsprechende Veränderung aufweist, auch zur Streuung bzw. Reflexion an einer Reihe von Grenzflächen, wie z. B. der Augenlinsen-Glaskörper-Grenze. Der Grund liegt in der Änderung des Brechungsindex der aneinander grenzenden Medien.

Der größte Teil der dabei reflektierten optischen Strahlung ist – soweit es die vorderen und mittleren Augenabschnitte betrifft – gerichtet, während die optische Strahlung beim Eintritt in den Fundus dagegen auch zunehmend seitwärts streut, d. h. aus der Einfallrichtung zunehmend abgelenkt und remittiert wird. Dabei kann man denjenigen Anteil, der vom Übergang zwischen dem Glaskörper und der inneren Grenzmembran stammt, praktisch vernachlässigen, da der Brechungsindexunterschied klein ist und daher nur weniger als 1 % zur remittierten optischen Strahlung beiträgt [78, 79].

Dagegen entsteht mehr oder weniger remittierte optische Strahlung in den anschließenden Rezeptorschichten der neuronalen Netzhaut, im retinalen Pigmentepithel (RPE, ca. 9 μm bis 11 μm dick), in der Aderhaut (Chorioidea, ca. 250 μm dick) und in der Lederhaut (Sklera, ca. 700 μm dick). Genauer betrachtet werden die Remissionsverhältnisse von den verschiedenen Farbstoffen (Chromophoren) bestimmt, d. h. vom Xanthophyll, das sich praktisch nur in der Makula und insbesondere in der Fovea findet, von den 0,5 μm bis 1 μm großen Melaninkörnchen im RPE und in der Chorioidea, sowie vom Hämoglobingehalt in den Erythrozyten, insbesondere in Blutgefäßen der Chorioidea und vom strukturellen Aufbau selbst, wodurch eine Überlagerung von gerichteter und ungerichteter optischer Strahlung entsteht.

VOS gibt für den Augenhintergrund (Fundus), gestützt durch theoretische Überlegungen, einen winkelabhängigen Beitrag zwischen 10 % und 60 % an der Streuung an, woraus dann unter Berücksichtigung der nicht allzu großen Genauigkeit bei den experimentellen Ergebnissen, der Schluss auf einen Beitrag von 30 % gezogen wird [349].

So muss sowohl die Wellenleiterstruktur der Rezeptoren als auch die zu gerichteter Reflexion führende Scheibchenanordnung, in der die Sehpigmente enthalten sind, betrachtet werden.

Möglicherweise müssen bestimmte bisher angenommene Zusammenhänge, die den „Weg“ der Photonen durch die Augenmedien zu den Sehzellen beschreiben – zumindest in Teilen – neu überdacht werden, denn nach einer jüngsten Publikation kommen Wellenleiterstrukturen nicht erst den Rezeptoren selbst, sondern bereits in der Retina den Müllerschen Zellen zu. Densitometrische Betrachtungen von RUSHTON [360] und KING-SMITH [84] zur optischen Dichte der Farbstoffe „Chlorolabe“ und „Erythrolabe“ müssen unter Umständen neu bewertet werden, da bei praktisch allen bisherigen Analysen von der alleinigen Wellenleiterstruktur der Sehzellen ausgegangen wurde und quantitative Ergebnisse nur die Passage des Lichtes durch die Außensegmente der Sehzellen und die angrenzenden Zwischenräume berücksichtigt haben, wenn es um die Aufteilung in absorbiertes und gestreutes Licht ging. Eventuell trägt eine Neubewertung unter Berücksichtigung weiterer Wellenleiterstrukturen auch dazu bei, dass bisherige Diskrepanzen geringer ausfallen. Inwieweit die Berücksichtigung der Müllerschen Zellen im Hinblick auf ihre Wellenleitereigenschaften sich auch auf Folgerungen aus dem STILES-CRAWFORD-Effekt auswirkt, kann ohne nähere Befassung nicht vorhergesagt werden.

Es ist bekannt, dass das menschliche Auge eigentlich im Hinblick auf seine optischen Empfänger- und Abbildungsfunktion invertiert ist und dass daher eine Abbildung durch ungeordnete Zellen, wie sie vor den eigentlichen Sehzellen in mehreren Schichten der Netzhaut vorhanden sind, mit Beugung, Reflexion und Streuung verknüpft ist. Bevor das Licht zu den Photorezeptoren gelangt, muss es erst mehrere Schichten verschiedener anderer Netzhautzellen durchdringen. Diese Schichten sind im Bereich des schärfsten Sehens, in der sogenannten Netzhautgrube vergleichsweise dünner als außerhalb, wodurch die „Störungen“ durch Zellstrukturen geringer ausfallen, aber dennoch „ein nicht ganz so scharfes Bild“ entsteht.

In einer Untersuchung fanden FRANZE et al., dass Müller-Zellen, die sich von der Innenseite, also zum Glaskörper hin gelegen, wo sie eine trichterartige Ausstülpung aufweisen, ca. 150 μm bis zur sogenannten äußeren Grenzschicht vor den Sehzellen erstrecken und dabei als Gliazellen eine klare strukturelle und funktionelle Abgrenzung zu den Neuronen aufweisen, sich ähnlich wie technische Lichtwellenleiter der optischen Kommunikationstechnik verhalten. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sie das aus Richtung Glaskörper auf die Netzhaut treffende Licht gewissermaßen sammeln und zu den Sehzellen leiten [340]. Man kann sich die parallele Anordnung der Müller-Zellen auch ähnlich wie in einer optischen Faserplatte vorstellen, mit der möglichst verzerrungsfreie Abbildungen erzielt werden.

Diese Zusammenhänge tragen auch wesentlich zum besseren Verständnis des „invertierten Auges“ bei und erklären – in gewisser Hinsicht – dessen gute optische Abbildungseigenschaften vor einem anderen – zumindest in Teilen – funktionellen Hintergrund.

Welchen Einfluss diese neuere Feststellung, die sich aus der Zuordnung lichtleitender Funktionen der retinalen Gliazellen ergeben, auf die Betrachtung der Streuung hat, kann ohne weitere Untersuchungen zurzeit nur vermutet werden. Möglicherweise müssen aber diesbezügliche Erklärungen einer Neuüberlegung unterzogen werden, denn eine solche Lichtleitereigenschaft reduziert Verluste und verbessert die Abbildungseigenschaften der schichtförmigen Strukturen der Netzhaut.

Insbesondere ist zu bedenken, dass die Dichte der Müller-Zellen im Wesentlichen derjenigen der Zapfen entspricht und daher praktisch eine 1:1-Zuordnung zusammen mit der Lichtleitereigenschaft der Müller-Zellen zur diskreten Bilderzeugung bedeutsam beiträgt und dass sich dies aber auch gleichzeitig auf die Streuverhältnisse in der Netzhaut auswirkt. Dabei ist davon auszugehen, dass auch eine Richtungs-, d. h. Winkelabhängigkeit, sehr wahrscheinlich ist, und zwar sowohl bei der einfallenden optischen Strahlung als auch bei der vom Augenhintergrund reflektierten bzw. remittierten Strahlung, aus der in der Vergangenheit quantitative Angaben bezüglich des prozentualen Anteils der unterschiedlichen Bereiche der Augenabschnitte gemacht wurden.

Einen bedeutenden Einfluss hat in jedem Falle die Pigmentierung und Struktur des RPE. Diese ist erstens eine Funktion des Ortes und zweitens variiert sie individuell, und zwar soweit es die ethnische Zugehörigkeit und die Augenfarbe betrifft [80].

Dass die Augenfarbe sich auch auf die Absorptions- und Streuverhältnisse der Chorioidea auswirkt, lässt sich dadurch begründen, dass die Schicht anatomisch dieselbe betrifft wie die Iris (Regenbogenhaut), die ja bekannt ist für ihre individuelle Farbprominenz. Daher kommt der jeweiligen Melanin-Konzentration in der Chorioidea eine größere Bedeutung zu.

Bei der Chorioidea ist es darüber hinaus der strukturelle Aufbau insbesondere der Kapillaren und der dadurch bedingte unterschiedliche Hämoglobingehalt, sowie Unterschiede in der Melaninkonzentration.

Schließlich ist noch die Sklera zu betrachten, von der ca. 50 % rückreflektiert werden [81]. Dieser Anteil ist praktisch wellenlängenunabhängig, was sich in der weißen Farbe zeigt. Andererseits wird davon ausgegangen, dass der größte Anteil der von der Sklera zurückkehrenden optischen Strahlung in die Chorioidea rückgestreut und eigentlich nur zu einem kleineren Teil reflektiert wird [82]. In jedem Falle gelangt insgesamt wenig optische Strahlung durch die Chorioidea zur Sklera, da sie entweder in der Chorioidea rückgestreut oder darin absorbiert wird, sodass es von untergeordneter Bedeutung ist, wie die Reflexion von der Sklera erfolgt. Die vielfach geäußerte Ansicht, dass das rückgestreute Licht vom hinteren Augenhintergrund stamme, ist nicht haltbar, da es hauptsächlich das Ergebnis der Rückstreuung innerhalb der Chorioidea ist und nicht von der Sklera stammt.

Man kann davon ausgehen, dass alle Photonen, die aus der Rezeptorschicht oder aus den darunterliegenden Schichten remittiert werden, mehrfache Streuprozesse hinter sich haben, d. h. deren Ausbreitungsrichtungen haben sich daher mehrfach geändert und es kann eine Lambertsche Verteilung angenommen werden.

Üblicherweise wird die Streuung durch einen Anisotropiefaktor charakterisiert. Dieser beträgt für die Netzhaut 0,97, für das RPE 0,84, für die Chorioidea 0,87 und für die Sklera 0,9 [336] und gibt den Wert des Kosinus des Streuwinkels an.

Die gesamte optische Strahlung, die von der Sehzellenschicht oder dem Augenhintergrund remittiert wird, hat mehrfache Streuprozesse hinter sich, wodurch vielfach die Richtung der ursprünglich einfallenden Photonen umgekehrt wird. Daher wird üblicherweise auch eine Lambertverteilung beobachtet, d. h. die Streuung ist nahezu ideal diffus und die Lichtstärke eines Lambert-Strahlers ist dem Kosinus des Ausstrahlwinkels proportional.

VOS [119] weist auch darauf hin, dass sich aufgrund der Tatsache, dass seitwärts gestreutes Licht polarisiert ist, wie dies z. B. auch beim Sonnenlicht der Fall ist, ein „bürstenförmiger Lichthof (Halo)“ zu erwarten sei. Dies konnte von VOS und BOUMAN nachgewiesen werden [120], wobei gefunden wurde, dass der Fundus etwa 40 % zur gesamten „Schleierblendung“ beitrug, wenn eine übliche Blendsituation betrachtet wird, in der eine Blendlichtquelle außerhalb der Sichtlinie den scharfen zentralen Blick behindert. Dagegen beträgt der Beitrag des Fundus nur etwa die Hälfte dieser 40 %, wenn die Blendlichtquelle selbst fixiert und das Streulicht außerhalb der Sichtlinie gemessen wird [309]. Dies wird durch die in der Netzhautgrube deutlich geringere Dicke der Netzhaut begründet und zeigt gleichzeitig, dass die mikroskopisch kleinen Nervenstrukturen in der Netzhaut zumindest teilweise zur Streuung beitragen und nicht nur das tiefer liegende Pigmentepithel und die sich anschließende Chorioidea.

Nach den Darstellungen von VOS [119] beläuft sich der Anteil von Hornhaut und Linse zusammen auf die restlichen etwa 60 %. Es sei noch angemerkt, dass die Ergebnisse weitgehend auf einem Auge basieren, nämlich demjenigen von VOS selbst, d. h. dies war historisch gesehen auch die Ausgangsbasis für ursprünglichen Festlegungen durch die CIE.

Darüber hinaus können krankheitsbedingt bedeutende Veränderungen der Pigmentierung des Augenhintergrundes vorliegen, die eine entsprechende quantitative Vorhersage des jeweiligen Streueffektes sehr erschweren bzw. praktisch verhindern.

Altersbedingte Abhängigkeiten wurden von IJSPEERT et al. [121] für einen Blendwinkel zwischen 3 und 25 Grad gefunden.

Dass die physiologische Blendung nicht allein durch eine Winkelabhängigkeit der Form $1/\Theta^2$ (Θ : Winkel zwischen Blendlichtquelle und Blickrichtung) beschrieben werden könne, war auch insbesondere für kleine und große Winkel zu erwarten. Dabei konnte man davon ausgehen, dass die Funktion statt gegen Unendlich zu gehen, für sehr kleine Winkelwerte abflachen sollte, wie es durch die Punktabbildungsfunktion bzw. Punktverbreiterungsfunktion (PSF, point spread function, „Punktverwaschungsfunktion“, Punktbildfunktion) beschrieben wird, die von der Pupillenweite abhängt. Dabei beschreibt die PSF gewissermaßen die Unschärfteeigenschaften eines realen Systems. Setzt man eine inkohärent strahlende Blendlichtquelle voraus, ist idealisiert gesehen die komplexe elektromagnetische Feldamplitude an zwei verschiedenen Orten in der Lichtquellenebene, d. h. in der Objektebene, unkorreliert. Jeder „Lichtpunkt“ (Objektpunkt) gibt Anlass zu einer "Kopie" der PSF in der Netzhautenebene, die hierbei die Bildebene darstellt. Da benachbarte Bildpunkte inkohärent sind, addieren sich Intensitäten. Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang häufig durch ein Faltungsintegral beschreiben, und zwar insbesondere dann, wenn sich Gebiete in der Netzhautenebene finden lassen, innerhalb derer sich die PSF nicht signifikant ändert, es sich also um isoplanare Bereiche handelt. In diesem Fall lässt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen der Intensitätsverteilung der Blendlichtquelle und der Intensitätsverteilung im Bild auf der Netzhaut finden. Eine sicherlich andere Vorgehensweise wird erforderlich, wenn man dagegen von einer kohärent strahlenden Blendlichtquelle, wie im Falle eines Lasers ausgeht. Dabei darf dann aber dennoch nicht übersehen werden, dass die realen Augenmedien die Kohärenz zerstören können und es sich dann doch wieder – näherungsweise – um eine Betrachtung inkohärenter Überlagerung von einzelnen „Lichtpunkten“ – wie im vorstehend beschriebenen Fall – handelt.

Geht man zunächst von einer idealen Punktquelle aus, d. h. nimmt man entweder aufgrund der relativ großen Entfernung einer Blendlichtquelle vom Auge oder aufgrund der relativen Kleinheit der Abmessungen der Blendlichtquelle in Bezug auf das optische System Auge, ideale Bedingungen an, so wird aufgrund der Wellennatur des Lichtes und der endlichen Größe der Pupille, eine Punktquelle als ein Scheibchen endlicher Breite, dem sogenannten Beugungsscheibchen, abgebildet. Der Durchmesser dieses Beugungsscheibchens hängt von der Wellenlänge des Lichtes und dem Durchmesser der Pupille ab und wird auch als „Airy-Disk“ bezeichnet. Das Licht einer Punktquelle erfährt durch die Beugung an der kreisförmigen Pupille auch eine neue Helligkeitsverteilung, die durch das Quadrat der Bessel-Funktion 0.ter Ordnung beschrieben wird. Man spricht dabei auch von der zuvor beschriebenen Punkt-Verbreiterungs-Funktion (Point Spread Function, PSF).

Bereits bei etwa 1 Grad lässt sich der Verlauf aber besser durch eine Abhängigkeit gemäß $1/\Theta^3$ darstellen.

Bei großen Winkelwerten tragen im Wesentlichen die Iris und die Sklera zur Streuung bei, wobei der Anteil bei helleren Augen größer ist als bei dunkleren.

Alle bisherigen Ergebnisse zusammengenommen lässt sich die heutige CIE-Formel für die verallgemeinerte äquivalente Leuchtdichte bei physiologischer Blendung (CIE General Disability Glare equation) im Bereich von 0,1 Grad bis 100 Grad angeben zu:

$$L_{eq,verall.} = E_B \cdot \left\{ \frac{10}{\Theta^3} + \left[\frac{5}{\Theta^2} + 0,1 \cdot \frac{p_i}{\Theta} \right] \cdot \left\langle 1 + \left(\frac{Alter}{62,5} \right)^4 \right\rangle + 0,0025 \cdot p_i \right\} \quad (2.8)$$

wobei Θ in Grad und E_B (Beleuchtungsstärke) in Lux einzusetzen sind. Der Faktor p_i steht für die Pigmentierung und nimmt Werte zwischen 0 für dunkle Augen und 1,2 für sehr helle Augen an. Für braune Augen beträgt p_i etwa 0,5. Hiermit werden die Abweichungen oberhalb von etwa 30° besser wiedergegeben, die sich sonst ohne Berücksichtigung der Augenfarbe ergeben können.

Um die Kompliziertheit einigermaßen zu beschränken, wurde von der CIE auch eine Beziehung (CIE Small Angle Disability Glare Equation, vgl. [309]) für kleine Winkel, d. h. für $0,1^\circ < \Theta < 30^\circ$, angegeben:

$$L_{eq,verall.,kleineWinkel} = E_B \cdot \left\{ \frac{10}{\Theta^3} + \left[\frac{5}{\Theta^2} \right] \cdot \left\langle 1 + \left(\frac{Alter}{62,5} \right)^4 \right\rangle \right\} \quad (2.9)$$

und eine weitere als altersmäßig angepasste (CIE Age-adjusted Stiles-Holaday Disability Glare equation, [309]):

$$L_{eq,altersangep.} = E_B \cdot \left\{ \frac{10}{\Theta^2} \cdot \left\langle 1 + \left(\frac{Alter}{70} \right)^4 \right\rangle \right\}. \quad (2.10)$$

Lediglich oberhalb von 70 Jahren wird der Effekt des Alters signifikant, d. h. die Streuung steigt etwa um einen Faktor zwei.

Es ist hier anzumerken, dass auch andere von den vorstehenden Gleichungen abweichende Beziehungen zur Bestimmung der äquivalenten Schleierleuchtdichte in der Literatur angegeben werden, wie z. B. von SCHIEBER [320]:

$$L_{eq} = 9,05 \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{Alter \text{ (in Jahren)}}{66,4} \right)^4 \right\} \cdot \frac{E_B}{\Theta^2} \quad (2.11)$$

2.4.1 Detektion von Streuung

Beim Sehvorgang unterscheiden die Sehzellen zunächst einmal nicht, ob es sich bei den einfallenden Photonen um solche handelt, die vom eigentlich betrachteten („gesehenen“) Objekt kommen oder um solche, die auf „gestreutem Wege“ dort angelan-

gen. So ist es z. B. auch zu erklären, dass wir – auch bei praktisch kleinstmöglicher Fokussierung eines Lichtstrahles im „blauen“ Bereich - dennoch diese Farbe wahrnehmen, obwohl es im Zentrum der Fovea ausreichend große Flächenbereiche gibt, in denen keine blauempfindlichen Rezeptoren vorhanden sind, und zwar weil genügend Photonen dieses „blauen“ Lichtstrahls auch auf blauempfindliche Sehzellen fallen, die sich außerhalb des direkt abgebildeten Lichtstrahlflecks befinden.

Insbesondere sind die Sehzellen außerhalb des Flecks schärfsten Sehens, der Fovea centralis oder Netzhautgrube, so empfindlich, dass sie sogar einzelne Photonen detektieren können.

Die drei verschieden farbempfindlichen Zapfen sind unterschiedlich in der Netzhaut verteilt. So beträgt z. B. die Anzahl der blauempfindlichen Zapfen (S-Zapfen, S:= short) im Gegensatz zu den grün- und rottempfindlichen (M-Zapfen, M:= middle; L-Zapfen, L:= long) nur ca. 5 % und außerdem ist die Fovea fast frei davon. Daraus ergibt sich für blauempfindliche Zapfen eine deutlich geringere Ortsfrequenz. Durch das Fehlen der S-Zapfen liegt eine örtliche Tritanopie (Blaubindheit, d. h. Blau wird nicht wahrgenommen) vor.

Aus neueren Untersuchungen weiß man, dass die Zapfen eine randomisierte Verteilung aufweisen [31, 32]. Daraus folgt aber auch, dass das Auge lokal farbenblind ist, und zwar über Flächen mit einem Durchmesser von ca. 20 μm [33]. Allerdings bemerkt man einen solchen Effekt praktisch nicht.

Das Sehvermögen wird durch die Faktoren der Adaptation, Pigmentierung der Sehzellen, Absorption von Photonen und neuroretinale „Verdrahtung“ bestimmt. Das vom Auge empfangene Spektrum wird dabei entsprechend dem jeweiligen Lichtpegel bewertet.

Bei niedrigen Pegeln dominieren die Stäbchen das Sehvermögen, da sie deutlich empfindlicher sind als die Zapfen. In diesem Bereich kann man für die wellenlängenabhängige Bewertung, die sogenannte skotopische spektrale Hellempfindlichkeit zugrunde legen.

Liegen dagegen höhere Pegel vor, so werden die Stäbchen zunehmend gesättigt und die Zapfen übernehmen die Empfindungsaufgabe. Da hier insbesondere eine Art Mittelung zwischen den M- und L-Zapfen erfolgt, ist das Spektrum entsprechend ihrer spektralen Empfindlichkeit verschoben und liegt in der wohlbekannteren $V(\lambda)$ -Kurve, der photopischen spektralen Hellempfindlichkeit, vor.

2.4.2 Schleierleuchtdichte

Das Gesichtsfeld des Menschen stellt streng genommen den Bereich dar, in dem alle visuellen Sinneseindrücke von einer Person mit unbewegtem Auge wahrgenommen werden können. Der Begriff Gesichtsfeld wird manchmal auch in abgewandelter Form verwendet.

Beim Menschen beträgt der horizontale Gesamtwinkel des Gesichtsfeldes (Sehbereich, „field of view“) ca. 180°. Das binokulare (beidäugige) Gesichtsfeld hat dagegen

nur eine Winkelausdehnung von etwa 100° , d. h. man sieht das Gesicht einer Person im Armabstand gerade noch binokular. In diesem binokularen Gesichtsfeld liegt unter einem Winkel von etwa 16° vom Fixationspunkt aus gesehen nasal der Blinde Fleck mit einer Winkelausdehnung von etwa $6,5^\circ$ ($2 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$).

Bei Sehaufgaben („visual task“) wird das gesamte Gesichtsfeld meist nicht unmittelbar wahrgenommen. Selbst wenn man den Fixationspunkt durch Augenbewegungen um bis zu 10° verlagert, geschieht dies ohne dass dabei die Eindrücke aus dem gesamten umliegenden Gesichtsfeld geändert werden.

Genau wie das daraus resultierende Umgebungsbild gewissermaßen auf der Netzhaut im Kurzzeitgedächtnis „eingefroren“ wird, erfolgt dies auch für die Umgebungsleuchtdichte, die auch eine Art Basis-Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut bewirkt.

In den ersten Untersuchungen zu Blendungseffekten fanden LUCKIESH und HOLLADAY [34] und STILES [35], dass eine Punktlichtquelle einer „einheitlichen“ oder gleichmäßigen Leuchtdichte B_u der Umgebung, wenn sie unter einem Winkel Θ gegenüber dem Sehobjekt, das in der Fovea abgebildet wurde, angeordnet war, und dabei die Beleuchtungsstärke E_B in der Pupillenebene der Testperson erzeugte, die erforderliche Leuchtdichtedifferenzschwelle (kleinster bemerkbarer Helligkeitsunterschied) von einem Wert auf einen solchen anhub, der der Umgebungsleuchtdichte von

$$\beta = B_u + k \cdot \frac{E_B}{\Theta^n} \quad (2.12)$$

entsprach. Damit war gezeigt worden, dass Blendung der Überlagerung einer gleichmäßigen Leuchtdichte $\gamma = k \cdot \frac{E_B}{\Theta^n}$ zur Umgebungsleuchtdichte B_u entsprach,

d. h. dass der Maskierungseffekt bezüglich der Sichtbarkeit von Objekten mit demjenigen desselben Objektes durch einen „Schleierhintergrund“ verglichen werden konnte. Dabei wurde β als äquivalente gleichmäßige Umgebungsleuchtdichte bezeichnet und γ als äquivalente Schleierleuchtdichte L_{eq} („equivalent veiling brightness“) einer gegebenen Situation.

Man erhält die Schleierleuchtdichte L_V in cd/m^2 , wie vorstehend dargelegt, aus Beziehungen der Form

$$L_V = k \cdot \frac{E_B}{\Theta^n}, \quad (2.13)$$

mit E_B : = Beleuchtungsstärke, die von einer Blendlichtquelle in der Hornhautebene verursacht wird in lx, Θ : = Winkel zwischen Blickrichtung und Blendlichtquelle in Grad, k : = Konstante, $k \approx 10$ für $\Theta > 5^\circ$ und n : = Exponent, $n \approx 2$ für $\Theta > 2^\circ$ und $n \approx 2,3 - 0,7 \cdot \log \Theta$ für $0,2^\circ < \Theta < 2^\circ$ [47].

Bei den in den vergangenen Jahren entwickelten Beziehungen wird die Schleierleuchtdichte als Funktion der Beleuchtungsstärke angegeben, die die Blendlicht-

quelle erzeugt, und zwar gemessen in einer vertikalen Ebene des Auges, d. h. in einer Ebene senkrecht zur Blickrichtung. Unterschiede der einzelnen Beziehungen finden sich in den Exponenten des Blendwinkels. Der Unterschied in der Beleuchtungsstärke in der Pupillenebene zu derjenigen in der Hornhautebene wurde in der Vergangenheit meist vernachlässigt, was sicherlich im Hinblick auf Streuung nicht gerechtfertigt ist (vgl. VOS [309]).

Bei den verschiedenen Untersuchungen fand man unterschiedliche Faktoren für k und n , aber die beste Näherung wurde mit $k = 10$ und $n = 2$ als sogenannte Stiles-Holladay-Formel für physiologische Blendung durch eine Punktquelle angegeben. LUCKIESH und HOLLADAY [34] fanden $k = 12,7$ und $n = 2$, HOLLADAY [36] gab K (entsprechend k) = 2,9 und $n = 2$ an, STILES [35] fand $n = 4,2$ und $n = 1,5$, allerdings bei einem Winkel von $\Theta \approx 1^\circ$, während CRAWFORD und STILES später Werte von $k = 11,5$ und $n = 2,09$ angaben [37]. STILES und CRAWFORD [38] fanden außerdem, dass der Wert von β für eine gegebene Blendungssituation unabhängig von der Größe, der Farbe und Expositionsdauer ist. Wenn dagegen das Sehobjekt bei der Blendung nicht in der Fovea abgebildet wird, ergeben sich noch kompliziertere Zusammenhänge [39]. Allerdings kann man auch in diesem Fall eine Überlagerung eines zusätzlichen Helligkeitsfeldes vornehmen. So ergab sich z. B. für $\Theta = 6^\circ$ statt $\gamma = 0,28 \cdot E$ nunmehr $\gamma = 0,3 \cdot E$ für $k = 10$ und $n = 2$, d. h. die äquivalente Schleierleuchtdichte ist auch bei parafovealem Sehen von derselben Größenordnung wie bei fovealem Sehen. Wie z. B. Gl. (2.10) zeigt, wird der Faktor k auch vom Alter der Person mit bestimmt.

In ausführlichem Selbststudium konnten STILES und CRAWFORD [40] z. B. zeigen, dass beim extrafovealen Sehen weder die Fovea noch der blinde Fleck außergewöhnliche Stellen in Bezug auf die Richtung der Blendlichtquellen sind, denn sie fanden insgesamt keinen Bereich auf der Netzhaut, der zu einer besonders starken Blendung führte, wenn der Winkel-Abstand zur Blendlichtquelle gleich groß war.

Es wurde aber aufgrund der bei beiden untersuchten Personen vorliegenden Augenfehler nicht ausgeschlossen, dass es durchaus individuelle Punkte für verschiedene Lagen der Blendlichtquelle geben kann, die einen Effekt auf die Schwellenleuchtdichtedifferenz haben können.

Für den Straßenverkehr wurde der Zusammenhang, wonach eine Schleierleuchtdichte im Gesichtsfeld zu einer Kontrastverringerng führt, durch Anpassung der Gl. (2.13) z. B. durch die folgende Beziehung vorgenommen:

$$L_V = 9,2 \cdot \frac{E_B}{\Theta \cdot (\Theta + 1,5)} \quad (2.14)$$

wobei dann z. B. mehrere Blendlichtquellen, also auch das Paar der entgegengerichteten Scheinwerfer, durch Addition der äquivalenten Schleierleuchtdichte berücksichtigt wurden [252]. Bei einem für Fahrzeugbegegnungen typischen Winkel von $2,5^\circ$ zwischen der Blickrichtung und der Blendlichtquelle entsprechend Beleuchtungsstärken von 0,2 lx bis 5 lx äquivalente Schleierleuchtdichten von 0,06 cd/m² und 1,4 cd/m².

In einer Überarbeitung der von FRY angegebenen Formel (2.14) [280] konnte HILLS auch den größeren Einfluss einer näher an der Blickrichtung, d. h. innerhalb von $1,5^\circ$ gelegenen Blendlichtquelle berücksichtigen [281]:

$$L_V = 9,2 \cdot \frac{E_B}{\Theta^{3,44}} \quad (2.15)$$

In dieser Beziehung werden mehrere Blendlichtquellen, wie z. B. ein Scheinwerferpaar, durch Addition ihrer Beiträge berücksichtigt.

Für kleine Winkel haben auch noch andere Autoren andere Beziehungen angegeben, so z. B. VOS und BOUMAN [120] für $1^\circ < \Theta < 8^\circ$:

$$L_V = 29 \cdot \frac{E_B}{\Theta^{2,8}} \quad (2.16)$$

oder für noch kleinere Winkel $0,15^\circ < \Theta < 8^\circ$ WALRAVEN [341]:

$$L_V = 29 \cdot \frac{E_B}{(\Theta + 0,13)^{2,8}} \quad (2.17)$$

Dabei wurde Gl. (2.17) für eine Eingangspupille von 2 mm hergeleitet und man kann davon ausgehen, dass Gl. (2.17) daher zu einer Unterschätzung der Verhältnisse für größere Pupillendurchmesser führt.

Für noch kleinere Winkelwerte haben VOS et al. eine Betrachtung der Punktabbildungsfunktion durchgeführt und dabei die Gl. (2.16) und (2.17) „fortgesetzt“ und gleichzeitig die Abhängigkeit von der Pupillengröße dargestellt [342].

Nach Untersuchungen von LE GRAND [125] hängt die äquivalente Schleierleuchtdichte weder von der Beleuchtungsstärke, die die Blendlichtquelle in der Pupillenebene erzeugt, noch von deren Leuchtdichte und Größe ab, solange deren scheinbarer Durchmesser kleiner als 1° ist. Dagegen geht der Winkel zwischen Blendlichtquelle und Blickrichtung ein.

STILES und CRAWFORD fanden auch, dass Unterschiede im Erkennen der Helligkeitsschwellendifferenz Ergebnisse von Drift und Tag-zu-Tag-Verschiedenheiten sein können, wodurch unter Umständen Fehlinterpretationen möglich sind.

Unterschiede in den Faktoren fanden sich bei extrafovealem Sehen gegenüber fovealem Sehen nur beim Faktor k, der durchaus größere Werte als 10 ergab, und zwar im Mittel war $k \approx 16$, während für $n \approx 2$ auch beim extrafovealen Sehen gilt.

Vergrößert man den Blendwinkel Θ , dann wird die effektive Pupillenfläche abnehmen, und zwar typischerweise unter Berücksichtigung der Brechung durch die Hornhaut bei ca. 105° zu Null werden, d. h. die Lichtmenge nimmt mit dem Winkel ab und damit auch die Beleuchtungsstärke in der Pupillenebene. Dies kann mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt werden, der das Verhältnis der projizierten Fläche zur maximalen Fläche unter senkrechter Ausrichtung enthält.

Bereits 1927 stellte HOLLADAY [36] fest, dass ein Objekt dann nicht mehr gesehen werden kann, wenn der Winkel zwischen der Blendlichtquelle und der Blickrichtung unter einen bestimmten Wert sinkt, da dann der tatsächliche Helligkeitsunterschied zwischen Gegenstand und Hintergrund kleiner als der minimale Helligkeitsunterschied wird, der für eine Wahrnehmung erforderlich ist.

Das außerdem von HOLLADAY als Sicherheitsfaktor definierte Verhältnis zwischen tatsächlichem Helligkeitsunterschied und minimal erforderlichem Helligkeitsunterschied kann gesteigert werden, indem der Reflexionsgrad des Objektes bzw. das Verhältnis der Reflexionsgrade zwischen Objekt und dessen Umgebung erhöht und die durch die Blendlichtquelle in der Hornhautebene verursachte Beleuchtungsstärke verringert wird – und natürlich auch, indem die Helligkeit des Objektes vergrößert wird.

Bei Betrachtung zur Blendung im Straßenverkehr sollte natürlich auch die Tatsache Berücksichtigung finden, dass zu den vom Auge resultierenden Streubeiträgen solche durch Brillen, die Windschutzscheibe und die Luft, wie z. B. im Falle von Nebel, nicht vernachlässigt werden dürfen, sondern sich zu dem „entoptischen“, d. h. im Auge selbst entstehenden, Lichtschleier addieren.

2.4.3 Blendschwelle

Beim Sehvorgang wird Licht, das aus Photonen besteht, in den Rezeptoren absorbiert, und zwar in dem jeweils zutreffenden Pigment. Dies ist insbesondere das Rhodopsin (Sehpurpur) in den Stäbchen und verschiedene Opsine („opsin“ kommt dabei aus dem Griechischen und bedeutet „sehen“) in den Zapfen.

Rhodopsin stellt eine molekulare Kombination aus Vitamin A und Eiweiß dar. Man kann auch sagen, dass es aus einem Eiweißkörper, nämlich dem Opsin und aus Retinal besteht, wobei Letzteres ein Aldehyd des als Vitamin A bezeichneten Alkohols, nämlich des Retinols, ist. Rhodopsin besteht somit aus dem 11-cis-retinal, einem Aldehyd des Vitamin A₁ und Opsin, einem Glykoprotein. Bei der Absorption wird der Farbstoff von Licht gebleicht. Dabei findet eine Stereoumwandlung der 11-cis-Stellung in eine molekulare Transstellung statt. Das Molekül wird also gewissermaßen „verbogen“. Eine solche Umwandlung, bei der verschiedene cis-trans-Isomere auftreten können, ist beim Abbau des Sehpigmentes möglich, da sich in den Seitenketten der Vitamine A und der Retinale 4 Kohlenstoffdoppelbindungen befinden, die sich verschieden anordnen können. Analog zu den Vorgängen bei Rhodopsin, das in den Stäbchen vorhanden ist, verlaufen diejenigen in den verschiedenen sogenannten Zapfenopsinen, d. h. in den Zapfen liegt ebenfalls das 11-cis-Retinal vor, und zwar gemeinsam mit unterschiedlichen Zapfenopsinen. Allein in einer sogenannten Disk eines Fotorezeptors befinden sich ca. 10⁸ Rhodopsinmoleküle.

Die Effizienz der Lichtabsorption kann in einem Wirkungs- oder Aktionsspektrum dargestellt werden, worin sich dann auch die Wellenlängenabhängigkeit widerspiegelt.

Bislang ist zwar nicht genau bekannt, welche Strukturen und welche darin enthaltenen Pigmente letztendlich für Blendungserscheinungen verantwortlich sind, man

kann aber davon ausgehen, dass es sich dabei um einen Sättigungseffekt handelt, wobei dem Ausbleichvorgang der Pigmente eine dominante Rolle zukommt.

Im Zusammenhang mit Betrachtungen zum Auftreten von photochemischen Schädigungen der Netzhaut wurde ein Bereich von 30 lux bis 135 lux als Wert angenommen, der zu einem 50%igen Ausbleichen führt [41, 42].

Eine solche Beleuchtungsstärke korrespondiert unter Weißlichtbedingungen etwa mit einer retinalen Bestrahlungsstärke von $0,004 \text{ mW/cm}^2$... $0,06 \text{ mW/cm}^2$ (zum Vergleich: $0,02 \text{ mW/cm}^2$ für Xenon-Strahler n. KREMERS und VAN NORREN).

Der Versuch der Angabe einer Schwelle ist nur äußerst selten in der Literatur zu finden. PULLING et al. bezeichnen als Schwelle der Blendung „diejenige Helligkeit beider Frontscheinwerfer von entgegenkommenden Fahrzeugen, bei der potenzielle Gefährdungen auf der Straße nicht abgeschwächt werden können“ [43].

2.5 Blendungsarten und -begriffe

Begrifflich wird Blendung auf verschiedene Weise beschrieben, dabei werden nach DIN 5340 die Begriffspaare Simultan- und Sukzessivblendung, Direkt- und Indirektblendung, Infeld- und Umfeldblendung sowie Adaptations- und Absolutblendung unterschieden. In Anlehnung an eine davon in gewisser Weise abweichenden Form werden im Folgenden die einzelnen Begriffe gemäß der SSK-Empfehlung zur Blendung näher ausgeführt.

Blendung durch Störung des Adaptationszustandes (Adaptationsblendung) und durch Leuchtdichteunterschiede (Relativblendung) [3]:

Adaptationsblendung wird nach DIN 5340 [4] als vorübergehende Blendung durch Leuchtdichten, an die Adaptation möglich ist, definiert. Sie entsteht, wenn der Adaptationszustand als Folge einer plötzlichen und erheblichen Leuchtdichteänderung dem bestehenden Leuchtdichteniveau nicht mehr entspricht. Somit kann jede über ein gewisses Maß hinausgehende Störung des örtlichen oder zeitlichen Adaptationszustandes der Augen als Adaptationsblendung bezeichnet werden. Die Adaptationsblendung ist eigentlich eher ein Adaptationsproblem der Augen als ein Blendereignis.

Sie kommt besonders bei dunkel adaptierten Augen vor. Oberhalb von 730 cd/m^2 bis 10^4 cd/m^2 ergibt sich eine mehr oder weniger starke Blendung, die aber noch durch Adaptation ausgeglichen werden kann.

Beispiele für diese Art der Blendung sind das Heraustreten aus einem relativ dunklen Raum in das Sonnenlicht im Freien oder das Herausfahren aus einem wenig beleuchteten Tunnel in das Tageslicht.

Zur *Relativblendung* kommt es, wenn auf der Netzhaut durch zu große Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld eine lokale Störung des Adaptationszustandes auftritt, die im betroffenen Gebiet zu Veränderungen sowohl der Unterschiedsempfindlichkeit, der Sehschärfe und des Farbsehens führt. Durch Lokaladaptation, bei der nur ein Teil der Fotorezeptoren der Netzhaut beteiligt ist, kann die Relativ-

blendung erst nach einer relativ langen Zeit ausgeglichen werden, indem die Erregbarkeit der jeweils betroffenen Sehzellen verändert wird, d. h. der Eindruck des Geblendetseins vermindert sich entsprechend nur langsam.

Bei der Relativblendung kann es außer zu einer Ablenkung der Aufmerksamkeit von eigentlichen Sehaufgaben zu einer Verzögerung bzw. Behinderung des Sehvermögens kommen. Zum anderen werden die Seheigenschaften durch die adaptive Einstellung auf ein zu hohes und damit ungünstiges Leuchtdichteniveau nachteilig beeinflusst.

Ein besonderes Gefahrenpotenzial verursacht Relativblendung beim direkten Blick in den Scheinwerfer entgegen kommender Fahrzeuge oder beim Blick in unabhgeschirmte andere Leuchtmittel mit der nachfolgenden Behinderung der Sehleistung. Gerade beim Blick in einen Scheinwerfer kann es lebenswichtig sein, dass Personen, Hindernisse und Gegenstände unmittelbar anschließend neben einem entgegenkommendem Fahrzeug bzw. direkt vor dem eigenen Fahrzeug rasch und sicher erkannt werden. Der Effekt der Relativblendung führt vielfach bei Autofahrten in der Nacht zu Problemen.

Blendung durch zu hohe absolute Leuchtdichte (Absolutblendung) [3]:

Zur *Absolutblendung* kommt es, wenn im Gesichtsfeld so hohe Leuchtdichten auftreten, dass eine Adaptation des Auges nicht mehr möglich ist. Erfolgt die Blendung durch so hohe Leuchtdichten, dass keine Adaptation möglich ist, setzen Schutzreaktionen ein, wie das Zukneifen der Augenlider, Augen- und Kopfbewegungen, und es kann eventuell sogar Tränenfluss einsetzen. Bei der hier in Anlehnung an die in DIN 5340 [4] gegebene Definition ist zu bedenken, dass das Auftreten von Augen- und Kopfbewegungen bei Absolutblendung ähnlich wie bei den Abwendungsreaktionsuntersuchungen mit Laser- und LED-Strahlung zwar nicht ausgeschlossen ist, andererseits aber keine verlässliche Schutzreaktion darstellt, wie sich bei den Untersuchungen zu allgemeinen Abwendungsreaktionen gezeigt hat [153].

Die örtliche Ausdehnung der Absolutblendung kann von einzelnen Bereichen des Gesichtsfeldes, also einer lokalen Blendung, bis hin zur Blendung im gesamten Gesichtsfeld reichen.

Im Bereich von 10^4 cd/m^2 bis $1,6 \cdot 10^5 \text{ cd/m}^2$ reicht die Adaptation nicht mehr aus, und es kommt zu einer Absolutblendung, bei der mit einer zunehmenden direkten (unmittelbaren) Gefährdung des Auges gerechnet werden muss. Insofern liegt bei Absolutblendung ein quantitativer Gefährdungsschwellwert vor, während dies bei Blendung, die zur Belästigung führt, so nicht der Fall ist. Im schlimmsten Fall der Absolutblendung kann es sogar zu einer thermischen Schädigung der Netzhaut (Netzhautverbrennung) kommen.

Das Auftreten von Absolutblendung hängt auch vom Durchmesser der Augenpupille ab. Zu einer Absolutblendung kann es z. B. beim Blick auf von der Sonne beschienene Schnee- und Wasserflächen und manchmal auch bereits bei besonders heller Tagesbeleuchtung kommen.

Beim Auftreten hoher bis sehr hoher Leuchtdichten kommt es im Allgemeinen zu Schutzreflexen, wie dem unwillkürlichen Schließen der Augenlider („Lidschlussreflex“, „Blinkreflex“) oder Augen- und Kopfbewegungen, die jedoch keinen sicheren Schutz gewährleisten, sodass es zu direkten (thermischen) Netzhautschädigungen kommen kann. Dazu kann bereits der längere direkte Blick in die Mittagssonne ausreichen.

Für die Risikobeurteilung ist auch die Zeitdauer von besonderem Interesse, während der die Sehleistung nach einer Blendung eingeschränkt ist, auch wenn diese nur durch einen kurzzeitigen Lichtreiz aufgetreten ist, weil während dieser Zeit Objekte übersehen werden können, deren Helligkeit sich nicht ausreichend von der durch Blendung bzw. Adaptationsstörung veränderten Wahrnehmbarkeitsschwelle (Unterschiedsschwelle) abhebt. Infolgedessen können Sehobjekte, deren Kontrast nicht ausreichend von der Schwelle entfernt liegt, kurzzeitig – für die Dauer der fehlenden Readaptation – unsichtbar bleiben.

Im Zusammenhang mit Blendung sind noch weitere Begriffe üblich, und zwar direkte und indirekte Blendung, Infeld- und Umfeldblendung sowie Simultan- und Sukzessivblendung.

Diese Begriffe sind mit der Blendquelle, deren Lage im Gesichtsfeld und dem zeitlichen Geschehen bei der Blendung verknüpft.

Eine Direktblendung liegt dann vor, wenn eine Blendung unmittelbar (direkt) durch die leuchtende Fläche einer Lichtquelle selbst hervorgerufen wird, d. h. wenn die Blendlichtquelle direkt im Gesichtsfeld liegt, während die Indirektblendung ihre Ursache im Reflexionsbild der blendenden Lichtquelle an spiegelnden Oberflächen hat, also die Blendung mittelbar (indirekt) erfolgt. In diesem Fall können Objekte auch ohne eigentliche Blendung bereits durch Herabsetzung des Leuchtdichteunterschiedes bei der Überlagerung mit dem Reflexbild unsichtbar werden. Man spricht daher auch von Reflexblendung (engl. veiling reflections), da es sich um Spiegelung, d. h. einen Reflex hoher Leuchtdichten meist durch glänzende Oberflächen handelt.

Liegt die blendende Lichtquelle in der eigenen Blickrichtung bzw. in deren Nähe (Infeld, d. h. im zentralen Bereich des Gesichtsfeldes), wird die Blendung Infeldblendung genannt, während bei deren Lage in der Peripherie (Umfeld) des Gesichtsfeldes diese als Umfeldblendung bezeichnet wird.

In Bezug auf den zeitlichen Ablauf wird der Zeitbereich der tatsächlichen Blendung als Simultanblendung, der sich daran anschließende Bereich als Sukzessivblendung bezeichnet. Letztere ist mit dem Auftreten mehr oder weniger ausgeprägter Nachbilder verbunden. Zum einen erfolgt daher die Blendung aufgrund örtlich ungleicher aber zeitlich konstanter und zum anderen aufgrund zeitlich sich erhöhender Leuchtdichten.

2.6 Blendungsempfindung und -empfindlichkeit bei physiologischer und psychologischer Blendung

In der neuen europäischen Richtlinie (EU-RL) 2006/25/EG [17] werden über die auf den Empfehlungen der ICNIRP-Leitlinien basierenden Expositionsgrenzwerte (EGW) hinaus erstmals auch indirekte Effekte behandelt. Dazu gehört vorübergehende Blendung von Arbeitnehmern. Es wird daher die Aufgabe des Gesetzgebers sein, dies bei der Umsetzung der EU-RL in einer nationalen Regelung zu beachten.

Es war daher von Anfang an eine der wichtigsten Aufgaben und Ziele dieses Forschungsvorhabens das Wissen um Blendung und die damit verbundenen Beeinträchtigungen dahingehend zu erweitern, dass ausreichende Kenntnisse bezüglich dieses indirekten Effektes vorliegen, um die nationale Umsetzung in dieser Hinsicht möglichst aussagekräftig zu machen und dem Unternehmer die notwendige Unterstützung bei einer Gefährdungsanalyse an die Hand geben zu können.

Sekundäre (mittelbare, indirekte) Wirkungen finden sich zwar auch bei der Festlegung von Grenzwerten bei physikalischen Einwirkungen wie z. B. bei elektromagnetischen Feldern, aber bezüglich optischer Strahlung ist dies gewissermaßen „Neuland“ und geht – wenn darauf überhaupt irgendwo Bezug genommen wurde – über rein qualitative Angaben in der Regel nicht hinaus.

Im Hinblick auf die Vorbeugung bei betrieblichen Tätigkeiten von Versicherten gilt, dass geeignete Präventionsmaßnahmen mit Hilfe von Gefährdungsbeurteilungen zu ermitteln sind. Gesetzliche Grundlage dazu ist neben dem SGB VII das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG, § 5).

In Zukunft – und diese hat schon begonnen – ist davon auszugehen, dass Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) an die Stelle berufsgenossenschaftlicher Vorschriften treten. Speziell wird es sich hier um TRBS im Nummernbereich von 2171 bis 2179 unter dem Titel „Gefährdung durch sonstige physikalische Einwirkungen“ handeln. In wieweit oder ob überhaupt hierin auf indirekte Wirkungen durch optische Strahlung eingegangen wird, bleibt abzuwarten. Von dem Erfordernis einer diesbezüglichen Gefährdungsbeurteilung ist dies ohnehin unabhängig.

Laser nehmen nach wie vor aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften eine Ausnahmestellung bei den Quellen optischer Strahlung ein. Entsprechend groß sind seit langem die Forschungsaktivitäten, die sich mit dieser Strahlungsquelle befassen. Allerdings ist das Thema Blendung durch Laserstrahlung bisher nur sehr wenig betrachtet worden und erfordert eine entsprechende Befassung.

Auf der anderen Seite stellen Licht emittierende Dioden (LED) sicherlich die Art optischer Quellen dar, denen ein stetig wachsender Anwendungsbereich gehören wird und denen in Zukunft ein immer größeres Gewicht sowohl am Arbeitsplatz als auch im Alltag zukommen wird, in dem sie sowohl als Arbeitsmittel aber auch in der Beleuchtung zum Einsatz kommen werden.

Es lag daher nahe, dass die Untersuchungen zur Beeinträchtigung durch Blendung vorrangig auf diese Quellen optischer Strahlung konzentriert wurden.

In diesem Forschungsvorhaben wurde das Hauptaugenmerk bei den überwiegenden Teiluntersuchungen auf den sich über das eigentliche Ereignis der Blendung hinaus erstreckenden Zeitraum gelegt, da die Auswirkungen einer Blendung auch noch dann anhalten, wenn entweder keine Sichtverbindung zu der auslösenden Blendlichtquelle mehr besteht oder diese bereits ausgeschaltet ist.

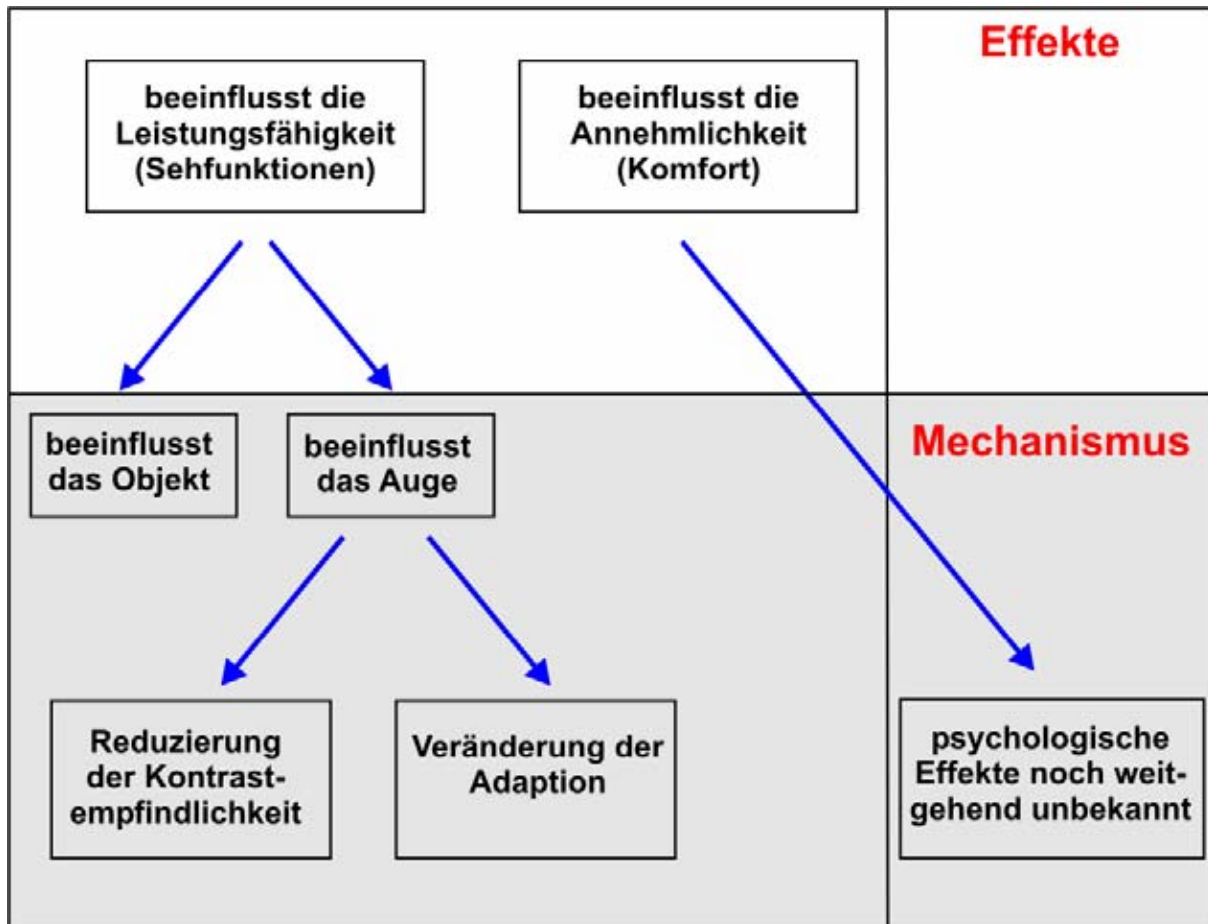
Zur Beschreibung der Blendungsempfindlichkeit werden zwei unterschiedliche Aspekte herangezogen, die physiologische und die psychologische Blendung. Beide können entweder getrennt oder gemeinsam auftreten. Ihre Bewertung wie auch die damit zusammenhängenden quantitativen Aussagen sind sehr verschieden. Auch hier werden in Abweichung zur Definition und den entsprechenden Anmerkungen in der DIN 5340, wonach statt von physiologischer und psychologischer Blendung von physiologischer und psychologischer Blendungsbewertung gesprochen werden sollte, die eingeführten Begriffe physiologische und psychologische Bewertung beibehalten, da sie den Effekt beschreiben, während die Bewertung sich mit der quantitativen Seite, also deren Auswirkungen, befasst und demzufolge getrennt behandelt wird.

Während die deutschen Bezeichnungen physiologische Blendung und psychologische Blendung auf die jeweiligen Ursachen hinweisen, lässt sich aus den englischen Bezeichnungen, nämlich „disability glare“ und „discomfort glare“, die jeweilige Wirkung ablesen. So stellt „discomfort glare“ ein Ereignis dar, wodurch es zu „Discomfort“, Ablenkung, Ermüdung und Schmerzen kommen kann, während „disability glare“ die Sehfunktionen wie z. B. den Kontrast insbesondere bei Gegenständen mit geringem Kontrast beeinträchtigt.

Physiologische Blendung wird als „disability glare“ im internationalen elektrotechnischen Wörterbuch unter der IEV Nummer 845-02-57 als „glare that impairs the vision of objects without necessarily causing discomfort“ beschrieben [312]. Für *psychologische Blendung*, d. h. „discomfort glare“, gibt die IEV Nummer 845-02-56 an: „glare that causes discomfort without necessarily impairing the vision of objects“ [312].

Bei Blendung können grundsätzlich deren Auswirkungen während der Zeitdauer des Vorhandenseins einer Blendlichtquelle, also des Zeitraumes, indem sich eine Blendlichtquelle unter einem bestimmten – eventuell sich verändernden – Winkels zur Blickrichtung befindet oder direkt in die Blendlichtquelle geblickt wird, oder aber deren Folgeauswirkungen betrachtet werden. Bekanntlich kann Blendung während der aktuellen Phase sowohl als physiologische Blendung auftreten, die zu einer Beeinflussung der verschiedenen Sehfunktionen führt, als auch als psychologische Blendung, die als eine Beeinträchtigung des Empfindens anzusehen ist.

Tab. 2.1 Übersicht über Effekte und Mechanismen bei Blendung



In der Tabelle 2.1 und in Abbildung Abb. 2.2 sind grundlegende Zusammenhänge dargestellt, die mit Blendung zusammenhängen und auf die in den durchgeführten Untersuchungen Bezug genommen wurde. In Abbildung 2.3 wird physiologische Blendung in den möglichen verschiedenen Situationen dargestellt.

Physiologische Blendung lässt sich darüber hinaus noch in direkte und indirekte physiologische Blendung unterteilen (Abb. 2.3), wobei es sich in beiden Fällen aber um eine Reduzierung des Kontrastes handelt. Entweder wird der Kontrast zwischen dem Sehobjekt und seinem Hintergrund verringert, d. h. die Sehaufgabe wird direkt beeinflusst, oder es wird das Auge beeinträchtigt, also ein indirekter Einfluss ausgeübt.

Man kann Blendung daher in dem Schema gemäß Tabelle 2.1 darstellen, wobei berücksichtigt wird, dass Blendung zum einen als unangenehm empfunden werden kann und zum anderen die Sehleistungsfähigkeit beeinträchtigen kann. Beide Effekte „entstehen“ im Wesentlichen unabhängig voneinander und als Folge dessen können psychologische und physiologische Blendung als unabhängige Erscheinungen betrachtet werden, obwohl sie häufig bzw. sogar meist gemeinsam auftreten.

Es ist aber z. B. bekannt, dass zunehmendes Alter die Entstehung psychologischer Blendung anders beeinflusst als die physiologische, da unterschiedliche Mechanismen dafür verantwortlich sind. Ältere Menschen, solche mit hellen Augen und diejenigen, die unter grauem Star (Katarakt) leiden, sind besonders durch physiologische Blendung betroffen.

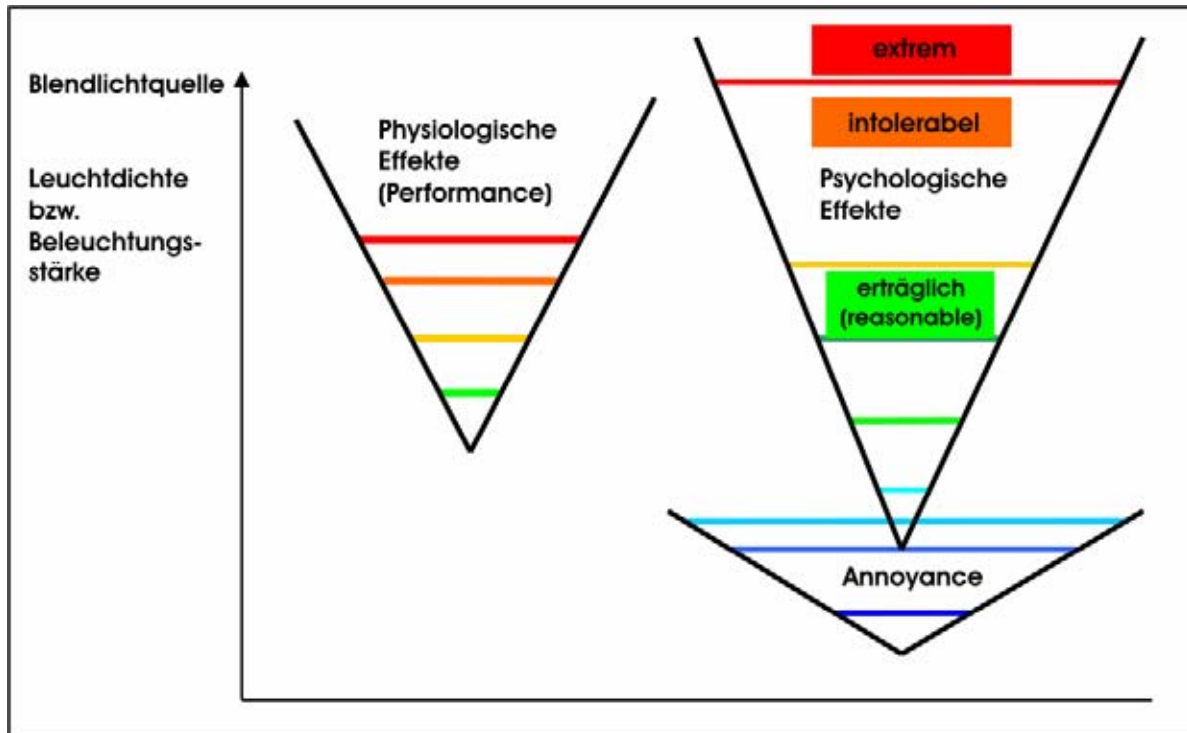


Abb. 2.2 Blendungstyp und -grad als Funktion der Blendlichtquelle und deren Eigenschaften

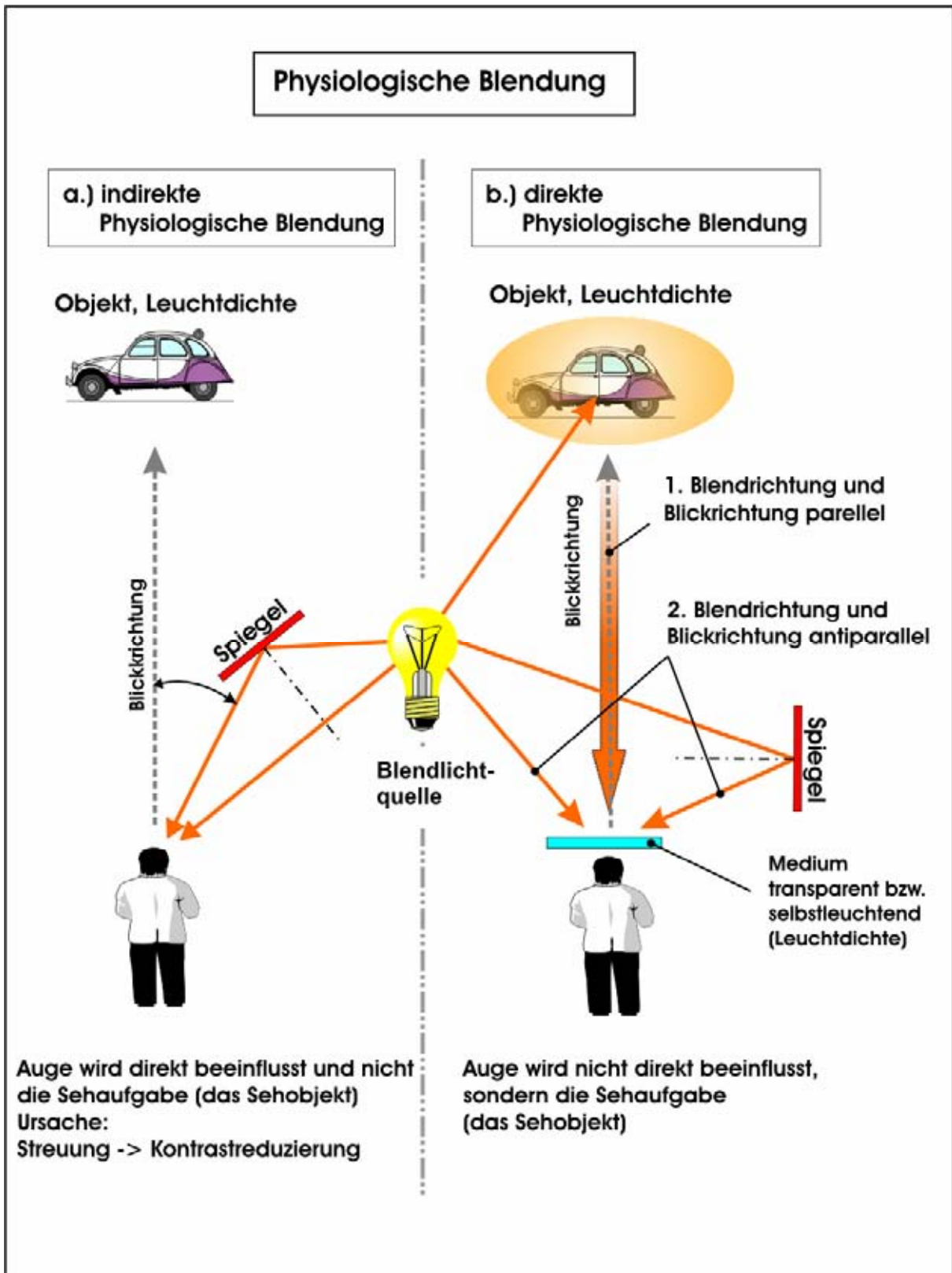


Abb. 2.3 Unterteilung physiologischer Blendung in direkte und indirekte physiologische Blendung

Beispielsweise kommt es beim Blick auf das Armaturenbrett eines Fahrzeuges infolge der Reflexionen der Sonnenstrahlung zu einer direkten physiologischen Blendung, und zwar obwohl die Helligkeit beider Objekte, d. h. der Anzeigeelemente

und deren Umgebung, durch die Hinzufügung zusätzlichen Lichtes von der Sonne gesteigert wird. Da aber gleichzeitig auch der Unterschied zwischen Sehaufgabe und Hintergrund verringert wird, wird die Sehaufgabe selbst erschwert, und zwar als Folge der Kontrastverringering. Der Eindruck, den man in einem solchen Falle hat, ist vergleichbar demjenigen beim Blick durch eine beschlagene Windschutzscheibe, d. h. das gesamte Bild erscheint grau und ausgewaschen, da sowohl der Helligkeits- als auch der Farbkontrast vermindert sind.

Indirekte physiologische Blendung beeinflusst dagegen direkt das Auge und nicht die Sehaufgabe. Dieser Fall liegt z. B. vor wenn nachts ein anderes Fahrzeug entgegen kommt, und zwar mit aufgeblendeten Scheinwerfern. Dadurch wird das Auge geblendet, wobei häufig auch psychologische Blendung auftritt. Die physiologische Blendung ist in einem solchen Fall das Ergebnis der Verringerung des retinalen Kontrastes als Folge von Lichtstreuung im Auge, wodurch das Adaptationsniveau bei Annäherung des anderen Fahrzeuges angehoben wird. Dieser Effekt hält noch einige Zeit nach der Passage des anderen Fahrzeuges an, und zwar bis sich das Auge auf das Umgebungsniveau re-adaptiert hat.

Zu beachten ist bei der Blendung im nächtlichen Straßenverkehr, dass sich der Pupillendurchmesser nicht aufgrund des hellsten Gegenstandes im Gesichtsfeld verringert, sondern aufgrund der Gesamtmenge des Lichtes im Gesichtsfeld.

Die beiden Blendungsarten physiologische und psychologische Blendung werden unterschiedlich von den Umgebungsbedingungen beeinflusst.

Die physiologische Blendung scheint nicht von der Quellengröße abzuhängen, wird aber durch den Lichtstrom und den Winkel zur Lichtquelle beeinflusst.

Durch eine Anpassung des Umgebungslichtes lässt sich der Effekt der physiologischen Blendung verändern. Zum Beispiel bewirkt die Erhöhung des Umgebungslichtes vor einem Bildschirm ein Anwachsen der physiologischen Blendung, während dieselbe Erhöhung des Umgebungslichtes beim Lesen eines Textes auf einem Blatt Papier deutlich verbessert werden kann, es sei denn das Umgebungslicht wird dermaßen erhöht, wie z. B. durch das Sonnenlicht, dass es auch dann zu einer Reduzierung der Sehfähigkeit kommt.

Bei *physiologischer Blendung* (engl. disability glare) kommt es, wenn die Höhe und das räumliche Ausmaß der intraokularen Streuung groß genug sind, zu einer Herabsetzung der Sehleistung bzw. des Sehvermögens bis zur Sehbehinderung, und zwar z. B. durch Minderung der Unterschiedsempfindlichkeit (Kontrastempfindlichkeit), der Sehschärfe, des Form- bzw. Gestalterkennungsvermögens, der Tiefenwahrnehmung, des Farbsehvermögens, der spektralen Hellempfindlichkeit und der Wahrnehmungsgeschwindigkeit.

Als Unterschiedsempfindlichkeit wird auch der Reziprokwert des Schwellenkontrastes (Kontrastschwelle, d. h. geringster wahrnehmbarer photometrischer Kontrast) bezeichnet. Dieser wird häufig allein zur Beschreibung einer Blendwirkung herangezogen. Alternativ wird auch die gerade noch erkennbare Leuchtdichtedifferenz (Unterschiedsschwelle, Empfindungsschwelle, d. h. der kleinste wahrnehmbare Unter-

schied zweier gleichartiger Empfindungen) verwendet. Die Unterschiedsempfindlichkeit hängt im Wesentlichen von der Größe des Sehobjektes, von der Leuchtdichte, der Größe des Umfeldes und von der Betrachtungsdauer ab und ist damit die elementare Fähigkeit des Auges, Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen. Eine gewisse Abhängigkeit wurde auch von der Wellenlänge des Lichtes festgestellt.

Es wurde festgestellt [6], dass bei einer Verschlechterung der Unterschiedsschwelle um etwa 2 % auch eine Verminderung der Empfindlichkeit zur Formenerkennung beginnt. Zur Quantifizierung der Formenerkennbarkeit fehlt derzeit jedoch die Festlegung einer geeigneten Messgröße.

Üblicherweise wird eine Sehfunktion einmal mit und einmal ohne eine Blendlichtquelle gemessen und der Unterschied zwischen beiden Messungen wird als Einschätzung der Empfindlichkeit der physiologischen Blendung genommen. Dazu wird normalerweise eine unbewegte Blendlichtquelle verwendet. Dabei ist aber zu beachten, dass die Blendlichtquelle eigentlich zu zwei Ergebnissen führt, nämlich einerseits erzeugt sie eine Schleierleuchtdichte und andererseits beinhaltet sie eine Adaptationsleuchtdichte, d. h. dadurch wird der Adaptationszustand des Auges verändert.

Unmittelbar nach dem Einsetzen des Adaptationsfeldes ist der Anstieg der Erkennungsschwelle am größten und die Empfindlichkeit kehrt rasch in der ersten Sekunde zurück und erreicht üblicherweise nach der ersten Minute ein asymptotisches Niveau. Wenn die Blendung allerdings sehr intensiv ist, dann kann es auch bis zu 10 Minuten dauern, bis der stationäre Zustand erreicht ist. Dabei weist der Anstieg einen logarithmischen Verlauf auf [347].

Die Verminderung des Sehvermögens kommt bei physiologischer Blendung insbesondere durch Streulicht in den Augenteilen wie Hornhaut, Linse und Glaskörper sowie an deren Grenzflächen zustande. Daher sind ältere Menschen aufgrund bereits bestehender Trübungen in den verschiedenen Augenteilen für physiologische Blendung empfindlicher als jüngere und können daher eine erheblich gesteigerte Blendungsempfindlichkeit aufweisen. Infolge der erhöhten Streuwirkung kommt es zu einer Verminderung der Erkennbarkeit vor allem kontrastarmer Objekte. Da sich das entstehende Streulicht wie ein Schleier auf die Netzhaut legt, wird in diesem Zusammenhang vom Auftreten einer Schleierleuchtdichte gesprochen. Diese kann nach HOLLADAY [7] berechnet werden (siehe Gl. (2.13)). Danach hängen die Sehfunktionen vom Adaptationszustand bzw. von der mittleren Gesichtsfeldleuchtdichte ab. Der jeweilige Adaptationszustand setzt sich aus der Grundadaptation, die das Ergebnis der Umfeldleuchtdichte (des Umfeldes) und der Sehaufgabe ist, und aus der Adaptationsstörung durch die im Gesichtsfeld befindliche Blendquelle zusammen. Die Schleierleuchtdichte erhöht die Adaptationsleuchtdichte um den Beitrag der Blendlichtquelle und ist proportional zur in der Hornhautebene erzeugten Beleuchtungsstärke und umgekehrt proportional zum Quadrat des Winkels, unter dem die Blendquelle zur optischen Achse bzw. momentanen Blickrichtung des Auges erscheint.

Der Einfluss des Winkels zwischen der Blickrichtung (Fixierungslinie) und der Blendlichtquelle wird besonders deutlich, wenn der Winkel relativ klein ist. Außerdem blendet eine kleinere Blendlichtquelle nahe der Fixierungslinie mit entsprechend größerer

Leuchtdichte unter sonst gleichen Voraussetzungen stärker als eine größere Blendlichtquelle geringerer Leuchtdichte. In diesem Falle wirkt sich die Blendlichtquelle nicht nur als Streulicht aus, sondern die Empfindlichkeit der den belichteten Sehzellen unmittelbar benachbarten Rezeptoren wird herabgesetzt, d. h. es kommt zu einer partiellen Hemmung in den neuroretinalen Strukturen, zumindest in einem beschränkten Gebiet, in dem dort die Empfindlichkeit der unmittelbar benachbarten Rezeptoren verringert wird.

Der photometrische Kontrast, der für die Detailerkennbarkeit von besonderer Bedeutung und als Beziehung zwischen örtlich und zeitlich unterschiedlichen Leuchtdichten im Gesichtsfeld definiert ist, verringert sich mit zunehmender Streulichtleuchtdichte bis das Sehobjekt bei weiterer Herabsetzung des Leuchtdichtekontrastes schließlich ganz verschwindet.

Erfahrungsgemäß bleibt die Sehschärfe (Visus) praktisch unverändert, solange die Schleierleuchtdichte nicht mehr als etwa 1 bis 2 % der Grundadaptation beträgt, die erforderlich ist, um Informationen visuell aufzunehmen.

Die physiologische Blendung wird als umso geringer wahrgenommen, je besser das jeweilige Sehobjekt sichtbar (überschwellig) ist. Sie ist umso stärker, je näher die Blendquelle der eigenen Blickrichtung liegt. Liegen mehrere Blendquellen im Gesichtsfeld, addieren sich deren Wirkungen in Bezug auf die Blendung, was durch die Streulichtannahme erklärt werden kann. Auch eine Störung der Pupillenmotorik (krankheitsbedingt oder durch medikamentöse Pupillenerweiterung) kann zu einer erheblichen physiologischen Blendung führen. Darüber hinaus könnte auch eine Verkopplung zwischen dem jeweils geblendeten Netzhautbereich und dem Ort des Gegenstandsbildes des Sehobjektes über neuronale Vorgänge bei physiologischer Blendung in Frage kommen. Dieser Zusammenhang konnte aber bisher nicht nachgewiesen werden.

Die Besonderheit bei der physiologischen Blendung besteht darin, dass die Verminderungen und damit Verschlechterungen der Sehfunktionen messtechnisch nachweisbar sind. Dazu wird so vorgegangen, dass zu einer gegebenen Leuchtdichte des Gesichtsfeldes (Gesichtsfeldleuchtdichte) die Sehfunktionen einmal ohne und einmal mit Blendquelle bestimmt werden. Dabei interessiert insbesondere der Einfluss der jeweiligen Blendquelle bezüglich einer bestimmten Sehaufgabe und Situation.

Nach HARTMANN [6] hängt die physiologische Blendung im Gegensatz zur psychologischen Blendung unter normalen Bedingungen nicht von der Farbe der jeweiligen Blendquelle ab. Eine geringe Zunahme der Blendwirkung ergibt sich mit zunehmender Wellenlänge lediglich für reine Spektralfarben. Es ist auch bekannt, dass z. B. die Signalerkennbarkeit nicht von der Farbe des jeweiligen Signals, sondern nur von dessen Leuchtdichte und der Leuchtdichte der Umgebung abhängt.

Nicht zuletzt gibt es auch eine Abhängigkeit der physiologischen Blendung von der Größe der Blendlichtquelle. So fand MILES [147] z. B. eine schlechtere Leistungsfähigkeit bei kleinflächigeren Scheinwerfern. Bei gleicher Intensität fand MILES eine umgekehrte Proportionalität zwischen Blendlichtquellengröße und Blendung und

schlug daher vor, dass Fahrzeugscheinwerfer eine möglichst große Fläche aufweisen sollten.

Physiologische Blendung liegt auch vor, wenn sich dem Bild des Sehobjektes auf der Netzhaut ein anderes überlagert, das nicht erst im Auge selbst durch Streuung entsteht, sondern bereits durch Streuung bei der Erzeugung vor dem Auge. Dies wird auch als Schleier- oder Nebelblendung (engl. veiling glare) bezeichnet. Diese Art der Blendung ist z. B. beim Fahren im Nebel zu beobachten, wenn sich das von den eigenen Scheinwerfern aus dem Nebel rückgestreute Licht wie ein Schleier über die Netzhautbilder legt. Der Effekt tritt auch bei verschmutzten, beregneten oder zerkratzten Windschutzscheiben und Fensterscheiben, aber auch bei Visieren von Motorradhelmen oder Brillengläsern, auf. Er wird durch Trübung der Augenteile, insbesondere der Augenlinse, in seiner Wirkung noch verstärkt.

Psychologische Blendung (engl. discomfort glare) tritt häufig in Innenräumen auf und liegt dann vor, wenn ein aufgrund des qualitativen Urteils eines Beobachterkollektivs ermittelter Grenzwert von gerade noch annehmbarer nach gerade unannehmbare Blendung überschritten wird. Bei der psychologischen Blendung müssen zu einer Beurteilung subjektive Maßstäbe angesetzt werden, d. h. eine objektive Messung ist nicht möglich.

Bei psychologischer Blendung ist es nicht so sehr der Fall, dass man nicht sehen kann, sondern vielmehr können einen die Lichtquellen in der Umgebung stören, die eigentlich zur Be- oder Ausleuchtung vorhanden sind. Hinzu kommt, dass Menschen eine gewisse phototaktische, d. h. eine in Bezug auf die Einstrahlungsrichtung von Licht gerichtete Bewegung ausführen, und zwar in die Richtung des Lichtes zu blicken. Vielleicht ist dies ein atavistisches Relikt der Evolution, so wie Insekten in Flammen fliegen oder Vögel von Scheinwerfern angezogen werden.

Psychologische Blendung kann auch als eine Art Schutzmechanismus des Menschen angesehen werden, indem es zu einer Abwendungsreaktion kommt, mit der sich der Körper aus einer Gefahr bringen will.

Bei niedrigem Blendungsgrad wird von Betroffenen häufig von Belästigung und Störung berichtet und weniger von Unbehagen und Beschwerden an sich. Obwohl durch die Belästigung die allgemeine Leistungsfähigkeit beeinflusst werden kann, bleibt die visuelle Leistungsfähigkeit generell unbeeinflusst. Bei höherem Grad der Blendung wird von physischem Unbehagen und von Beschwerden berichtet, und zwar eher als von Belästigung. Dies kann dann wiederum von Behinderungen der Sehfähigkeit begleitet sein.

Ein Problem besteht nun darin, dass man den Sinneseindruck des Unbehagens, den eine Person durch Blendung erleidet, nicht direkt messen kann, sondern dass nur der Befund des Unbehagens berichtet werden kann.

Dabei gibt es große individuelle Unterschiede in der Höhe des Unbehagens, die von unterschiedlichen Personen berichtet wird, und zwar bei ein und derselben physikalischen Stimulation durch Licht. Umgebungsbedingungen, die für die eine Person na-

hezu unerträglich sein können, werden von einer anderen Person als nahezu perfekt zumutbar empfunden.

Bei psychologischer Blendung tritt eine als unangenehm bis belästigend empfundene Befindlichkeitsstörung auf, ohne dass es zu einer Herabsetzung der Sehleistung, d. h. des Sehvermögens kommen muss. Die Sicht muss daher nicht als behindert empfunden werden. Psychologische Blendung wird manchmal auch als Unbehaglichkeitsblendung bezeichnet, da sie als störend empfunden wird, ohne dass es zu einer messbaren Herabsetzung des Sehvermögens kommt. Das Erkennen psychologischer Blendung ist daher oft schwierig. Sie kann erhebliche Beeinträchtigungen des allgemeinen Wohlbefindens, der Arbeitsleistung und Arbeitssicherheit sowie der Konzentrationsfähigkeit bewirken und wesentlich zur Ermüdung beitragen, indem eine ungewollte und ständige Ablenkung der Blickrichtung auf die Lichtquelle stattfindet, wodurch insbesondere bei großen Leuchtdichteunterschieden zwischen Umgebung (Umgebungsleuchtdichte) und Lichtquelle (Quellenleuchtdichte) eine fortwährende Adaptation der Augen stattfindet.

Psychologische Blendung stellt daher im Wesentlichen eine Belästigung dar, in dem als Folge ständigen Blickrichtungswechsels Stressempfindung, Ermüdung, Unbehagen und Unwohlsein auftreten können.

Psychologische Blendung hängt nicht nur von der scheinbaren Leuchtdichte der Blendlichtquelle ab, sondern wird auch von der Adaptationsleuchtdichte (Umgebungsleuchtdichte) und von der Ausdehnung der jeweiligen Blendlichtquelle, also von deren Größe, beeinflusst. Dabei nimmt sie sowohl mit abnehmender Lichtaustrittsfläche als auch mit abnehmender Entfernung zu. Da für das individuelle Empfinden Farben unter Umständen eine Rolle spielen können, ist es nicht verwunderlich, dass sie – im Gegensatz zur physiologischen Blendung – von der spektralen Zusammensetzung des Lichtes abhängt.

Die psychologische Blendung lässt sich dadurch verringern, dass der Kontrast zwischen der Blendlichtquelle und der Umgebung reduziert wird, und zwar entweder indem die Leuchtdichte der Quelle verringert oder diejenige der Umgebung erhöht wird. Darüber hinaus gelingt eine Reduzierung durch Verkleinerung der Quellenabmessungen oder dadurch, dass die Blendlichtquelle aus der Sichtlinie fortbewegt wird.

Solange Lage und Größe der Blendlichtquelle gleich bleiben, bedeuten Maßnahmen zur Reduzierung der psychologischen Blendung zugleich auch eine Reduzierung der physiologischen Blendung. Wird aber bei gleichem Lichtstrom die Quellengröße verringert, dann steigt die psychologische Blendung, während die physiologische gleich bleibt.

Dies erklärt die als größer empfundene psychologische Blendung bei den neueren Xenon-Entladungslampen im Vergleich zu Halogenstrahlern, da die Austritts- bzw. Reflektorflächen bei den Xenon-Strahlern kleiner sind. Es darf dabei aber nicht übersehen werden, dass zur Erzielung gleicher Lichtstärke ein kleinerer Scheinwerfer eine größere Beleuchtungsstärke besitzen muss und damit auch eine höhere psychologische Blendung verbunden ist (MANZ [279]).

Ein weiterer bedeutsamer Unterschied in den Blendungsarten besteht darin, dass physiologische Blendung schon auftreten kann, wenn noch keine psychologische bemerkt wird. Dies ist bei geringen Hintergrundleuchtdichten der Fall. Andererseits kann daher bei ausreichender Umgebungsbeleuchtung eine Blendlichtquelle zwar eine unangenehme Empfindung hervorrufen, ohne dass ein physiologischer Blendefekt eintritt.

VOS hat im Grunde noch eine dritte Art der Blendung begrifflich vorgeschlagen, und zwar „dazzling glare“ [309], was soviel wie grelle Blendung bedeutet und welche einem Unbehagen durch Überexposition entspricht. Eine solche Art der Blendung bedarf eines hellen Sichtfeldes, also z. B. eines sonnenbeschienenen Buches, des Himmels, der sandigen Wüste oder eines Schneefeldes. In einem solchen Fall liegt eine ganz andere Situation vor, wobei die betroffene Person nicht von der Lichtquelle angezogen wird, sondern sich eher abwenden möchte. Bei greller Blendung kann es zu vorübergehender oder sogar längerer Blindheit kommen und permanente Blindheit ist als Folge photochemischer Lichtschädigung nicht auszuschließen. Grelle Blendung kann sogar schmerzhaft sein, aber dieser Schmerz kann dabei nicht in der Netzhaut entstehen, denn diese besitzt keine Schmerz-Sensoren. Wahrscheinlich entsteht der Schmerz dadurch, dass sich der Musculus sphincter pupillae (Pupillenverenger) aufgrund der grellen Blendung übermäßig verengt und ein Pupillenkrampf auftritt.

2.7 Nachbilderscheinungen

In den diesem Forschungsvorhaben zugrunde liegenden Überlegungen soll sich der Hauptaugenmerk auf den über das eigentliche Ereignis der Blendung hinaus erstreckenden Zeitraum beziehen, da die Auswirkungen auch noch dann anhalten, wenn entweder keine Sichtverbindung zu der auslösenden Blendlichtquelle mehr besteht oder diese bereits ausgeschaltet ist. Während es zur Bestimmung bzw. Ermittlung der Blendwirkung unter unmittelbaren Blendlichtbedingungen bereits einige in der Literatur beschriebene Verfahren und in der augenärztlichen Praxis bzw. in Forschungseinrichtungen eingesetzte Geräte bzw. Messmethoden gibt, wurde den zeitlich unmittelbar auf eine Blendung folgenden Auswirkungen deutlich weniger Beachtung geschenkt, und zwar insbesondere in quantitativer Hinsicht.

Blendung ist in der Regel vom Auftreten von Nachbilderscheinungen geprägt. Bei den entsprechenden Untersuchungen ging es sowohl

- um die Ausdehnung des Nachbildes auf der Netzhaut im Sinne der prozentualen flächenmäßigen Beteiligung der retinalen Sehzellen als auch
- um die zeitliche Dauer eines Nachbildes und dessen dynamische Veränderung, und zwar sowohl im Hinblick auf die Fläche als auch bezüglich der damit verbundenen Farbeindruckveränderung bzw. des dadurch bedingten Farbfehlemphindens.

Das Auftreten von Nachbildern ist eine durchaus bekannte Situation. Schaut man z. B. in eine helle Lichtquelle und schließt dann die Augen, so empfindet man noch einige Zeit dasselbe Bild in abklingender Stärke, und zwar um so länger, je stärker

der Lichteindruck war. Diese Wahrnehmung bzw. Erscheinung wird das positive Nachbild genannt.

Richtet man dann das betroffene Auge auf einen hellen Hintergrund – ein Stück weißes Papier oder eine helle Wand – so sieht man dasselbe Bild mit umgekehrten Lichtverhältnissen, vergleichbar einem Negativ bei einem Film. In diesem Fall handelt es sich um das negative Nachbild.

Das positive Nachbild erscheint früher, und es verschwindet auch wieder früher. Ist der erzeugende Lichteindruck nicht besonders stark gewesen, so kann das positive Nachbild so schnell verschwinden, dass man es gar nicht wahrnimmt, während das negative Nachbild normalerweise deutlich wahrgenommen wird.

Ein entscheidender Unterschied zwischen einem „normalen“ Bild und einem Nachbild besteht darin, dass sich normale Bilder von Gegenständen aus unserer Umwelt ständig auf der Netzhaut bewegen, während dies beim Nachbild gerade nicht der Fall ist. Zwar kommt es dem Betrachter selbst manchmal so vor als sei dies gerade umgekehrt, Tatsache ist aber, dass sich das Auge nicht absolut fixieren lässt, das Nachbild aber unbeweglich an seinem Ort auf der Netzhaut verbleibt.

Betrachtet man z. B. ein Objekt, so wird ein Bild erzeugt, bei dem nach ein paar Sekunden die bis dahin scharfen Konturen zu verschwimmen beginnen und feine Details verschwinden zunehmend. Auch der Kontrast lässt nach, sodass das was anfangs als ein helles Bild erschien grauer aussieht und sich immer weniger vom Hintergrund abhebt.

Dass wir im täglichen Leben nicht fortwährend von Nachbildern geplagt werden, rührt daher, dass wir gelernt haben, von ihnen abzusehen und sie gar nicht in das Bewusstsein kommen zu lassen – wir „übersehen“ sie ganz einfach. Andererseits gibt es erstens Personen, bei denen die Empfindung der Nachbilder krankhaft gesteigert ist, und zweitens kann das Auftreten eines „starken“ Nachbildes auch bei ansonsten davon unbehelligten Personen zu bestimmten Reaktionen führen, wie Erschrecken und lang andauernde Wahrnehmungsbeeinträchtigungen.

Diese bekannten Tatsachen zeigen, dass die vom eigentlichen Lichtreiz ausgehenden Empfindungen nicht gleichzeitig mit dem Reiz aufhören, sondern eine zweifache Nachwirkung ausüben. Die erste besteht in der Fortsetzung der Empfindung mit abnehmender Stärke. Dies entspricht der allgemeinen Tatsache, dass kein Organ einen abrupten Tätigkeitsablauf aufweist. Bei der Netzhaut sind es photochemische Vorgänge, bei denen charakteristische Zeitkonstanten eine Rolle spielen. Der zweite Effekt lässt sich dahin deuten, dass durch den Reiz mit seinem Erfolg ein Zustand bewirkt worden ist, der dem ersten entgegengesetzt ist, und der gleichfalls abklingt oder sich selbsttätig ausgleicht. Auch hierfür lässt sich leicht ein chemisches Bild finden, das in unmittelbarem Zusammenhang mit dem ersten steht.

Außer den unbunten Nachbildern, die bei Stimulation durch weiße, graue oder schwarze Flächen hervorgerufen werden, gibt es auch farbige Nachbilder. Von solchen kommen die negativen am häufigsten vor. Sie machen sich dahin geltend, dass nach einem farbigen Reiz ein Nachbild in der Gegenfarbe (Komplementärfarbe) er-

scheint, welches logarithmisch abklingt. Dabei ist es nicht nötig, dass hernach ein äußerer Lichtreiz auf die beleuchtete Stelle der Netzhaut fällt; man sieht gegenfarbige Nachbilder auch bei geschlossenen Augen oder wenn man auf eine schwarze Fläche schaut.

Diese Erfahrung beweist, dass durch einen farbigen Reiz die Netzhaut in einen Zustand versetzt wird, welcher mit dem übereinstimmt, welchen ein gegenfarbiger Reiz hervorbringt.

Die theoretische Auffassung dieser Erscheinung ist verschieden. FECHNER betrachtete sie als eine Ermüdungserscheinung. Das Auge ist durch die Beanspruchung für die entsprechende Farbe unempfindlicher geworden. Wirkt anschließend weißes Licht auf die betroffene Stelle der Netzhaut ein, so kommt an der ermüdeten Stelle der gegenfarbige Teil zu stärkerer Wirkung und die Stelle wird in dieser Gegenfarbe gesehen. Den Einwand, dass diese Gegenfarben auch ohne weißes Licht empfunden werden, beantwortet er dahin, dass das Gesichtsfeld nie von weißem Licht ganz frei sei, indem mindestens das graue „Eigenlicht“ des Auges sich betätige. Die andere, hauptsächlich von HERING vertretene Ansicht geht dahin, dass das gegenfarbige Nachbild nicht von einer passiven Ermüdung herrühre, sondern von einer aktiven Gegenwirkung der Netzhaut, durch welche ein polar entgegengesetzter Vorgang bewirkt wird [209]. Er fasste diese gegensätzlichen Vorgänge als Assimilation und Dissimilation auf, die damit die Grundlage seiner Theorie der bunten Empfindungen bilden.

Bereits 1844 beschrieb J. MÜLLER [224, S. 544] über die Veränderung der Reizbarkeit durch die Reize „Je länger man ein farbiges Bild ansieht, um so schmutziger wird es und es verschwindet zuletzt in Grau, je mehr die vom Licht gereizte Stelle an Reaktionskraft verliert; diese Stelle sieht zuletzt gar nicht mehr. In all diesen Fällen wird die Reizbarkeit durch die Reizung erschöpft, und nicht durch die eigentümliche Wirkung der Einflüsse“.

Mittels theoretischer Aussagen hat später MÜLLER [143] eigene Experimente durchgeführt und diejenigen seiner Vorgänger beschrieben bzw. widerlegt. Die dabei benutzte Beschreibungsweise unter Annahme von Zwischen- und Endprodukten sowie Hilfsstoffen – letztlich optisch induzierter chemischer Vorgänge – hat sich in dieser Form aber nicht in der Beschreibung von Nachbilderscheinungen gehalten.

So beschreibt MÜLLER [206] das Zustandekommen der erregenden Wirkungen der sogenannten Primärprozesse (P-Prozesse), die er als drei sensibilatorische Prozesse, hervorgerufen durch die Lichtreize in den Zapfenaußengliedern, auffasst, die sich darüber hinaus nach seiner Ansicht in ähnlicher Weise wie die drei Komponenten der YOUNG-HELMHOLTZschen Theorie nach den Wellenlängen bestimmen. Die Drei-Farben-Theorie erklärt das Farbensehen auf der Grundlage der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. MÜLLER ging darüber hinaus davon aus, dass „die P-Prozesse noch auf gewisse chromatische Sinnessubstanzen (Schaltsubstanzen) der Netzhaut, nämlich eine Rotgrün- und eine Gelbblausubstanz, deren chemische Umwandlungen ihrerseits die chromatische Sehnervenerregung hervorrufen, wirken“ [206].

Bei der Analyse früherer Darstellungen anderer Untersucher macht MÜLLER z. B. bezüglich Untersuchungen mit zwei vor dem Auge vorbei geführten Lichtstreifen und den dabei bei einer bestimmten Geschwindigkeit auftretenden drei Bildern, wobei das erste positive, also das HERINGSche Nachbild (siehe Tab. 2.2 in Abschnitt 2.7.2) des vorderen Lichtstreifens mit dem „Wahrnehmungsbild“ des hinteren, also nachfolgenden Lichtstreifens zusammenfällt, die Aussage, dass die Annahme, wonach „das positive, also das HERINGSche Nachbild rein nervösen Ursprunges sei und auf dem bloßen Nachwirken einer durch den Reiz im Sehnerven bewirkten Veränderungen beruhe, völlig ausgeschlossen werden könne, da einer Sehnervenerregung, die durch die Nachwirkung eines vorausgegangenen Reizes gegenteiliger Art ganz unterdrückt wird, kein Nachbild zugehören kann, wenn ein Nachbild nur auf der Fortdauertendenz einer Sehnervenerregung beruht“. MÜLLER drückt das so aus: „Nicht die zweiten Teilvorgänge der P-Prozesse selbst, sondern nur die von ihnen ausgehenden Erregungsantriebe können sich gegenseitig aufheben“.

MÜLLER kommt dabei zu dem Schluss, „dass nicht die von den Lichtern unmittelbar erweckten peripheren Vorgänge, sondern nur die von diesen ausgehenden Erregungsantriebe in antagonistischen Beziehungen zueinander stehen“.

Des Weiteren befasst sich MÜLLER mit dem Auftreten von Nachbildern beim Blick in die Sonne. Er stellt dabei fest, dass nur dann beim Hinblicken auf eine weiße Fläche ein negatives Nachbild der Sonne bewirkt wird, wenn das positive Nachbild derselben dunkler ist als die Fläche. MÜLLER unterstreicht auch die Feststellung von EBBECKE [207], wonach „das in die geschlossenen Augen eindringende Himmelslicht bei starkem Dunkeladaptiertsein das negative Nachbild der Sonne bewirken kann, während es bei minderem Dunkeladaptiertsein derselben das positive Nachbild auftreten lässt“.

Das Fixieren der Sonne wie auch die Folgen direkter Einwirkung sehr intensiver Beleuchtung ordnet BOSSCHA [230] bereits pathologischen Vorgängen zu, die er von den physiologischen getrennt sehen wollte.

Ebenso lässt sich die oftmalige Wiederkehr des positiven Sonnenbildes nicht befriedigend erklären, wenn man dabei von einem rein nervösen Ursprung ausgeht, da ein einmal durch Kontrastwirkung ausgelöschtes positives Nachbild kaum von neuem entstehen kann.

MÜLLER setzt sich auch mit den Untersuchungen von COMBERG [208] auseinander, der festgestellt hatte, dass eine Erhöhung der Lichtstärke im Allgemeinen die Tendenz zum positiven Nachbild fördert, falls die Reizdauer nicht allzu lang ist. Auf den Einfluss der Lichtstärke hatte bereits HERING hingewiesen [209].

Bei sehr geringer Lichtstärke des blendenden Objektes wird dieses schon vor dem Ende der Exposition unsichtbar, während es bei etwas höherer Lichtstärke für die gesamte Dauer der Exposition sichtbar bleibt und das negative Nachbild länger ausfällt. Bei noch größerer Lichtstärke ist das Nachbild zunächst positiv und wird dann durch einen annähernd neutralen Zustand ersetzt, dem ein negatives Nachbild von relativ kurzer Dauer folgt. Eine Verlängerung der Reizdauer fördert die Tendenz zum negativen Nachbild, sodass durch eine Verlängerung der Reizdauer häufig das Auf-

treten des positiven Nachbildes eingeschränkt oder gar ganz verhindert wird. Allerdings, so stellt MÜLLER weiter fest, wird durch eine Verlängerung der Reizdauer auch eine „gewisse Förderung zum positiven Nachbild bewirkt“. Bei sehr langdauernden Reizen gewinnt das negative Nachbild an Bedeutung und die relative Dauer des positiven Nachbildes nimmt ab.

MÜLLER unterscheidet dann noch sogenannte stabile von labilen Formen langdauernder Nachbilder, wobei erstere ohne Unterbrechung unmittelbar ineinander übergehen, während bei der labilen Form vielfach Pausen (Zeiten fehlender Sichtbarkeit der Nachbilder) zwischen den einzelnen Nachbildern eingeschoben werden, und zwar sowohl zwischen gleichartige, also beide positiv oder beide negativ, als auch zwischen ungleichartige.

MÜLLER beschreibt auch, dass mit „dem Auftreten eines Lichthofes die Tendenz zu positiven Nachbildern verbunden ist“. Dies war nach seinen Feststellungen dann der Fall, wenn sich z. B. eine weiße Scheibe auf einem schwarzen Grund befand und als Blendquelle diente.

An dieser Stelle kann auch auf das bereits von AUBERT [210], der 1865 das Konzept und den Begriff der Adaptation zur Bezeichnung der Anpassung des Auges an die jeweilige Lichtintensität einführte, bekannte Phänomen hingewiesen werden, dass ein längere Zeit hindurch starr fixiertes Objekt plötzlich für die Wahrnehmung verschwindet. Man spricht dabei von der sogenannten „Starrblindheit“. Das nicht mehr wahrgenommene Objekt wird dabei durch die Farbe seiner Umgebung ersetzt.

Das Verschwinden eines Nachbildes wird dagegen durch Bewegungen der Augen oder auch der Augenlider, und überhaupt durch Körperbewegungen, begünstigt. Hierbei nahm MÜLLER an, dass es bei der labilen Form der Nachbilder eingeschobene Augenbewegungen sein könnten, die an Stelle eines negativen oder positiven Nachbildes zu einer Mehrzahl solcher führen können.

Bezüglich des Ortes, an dem ein Nachbild auftritt, macht MÜLLER die Aussage, dass die positiven Nachbilder in der Netzhautperipherie kürzer ausfallen als im Netzhautzentrum. Er verweist dabei auch auf AUBERT [210], der angibt, dass bei ihm sogar die Sonne dann zu keinem positiven Nachbild führt, wenn er sie auf einer Netzhautstelle abbildet, die mehr als 30° vom Netzhautzentrum entfernt ist. Eine Erklärung für dieses Verhalten sieht MÜLLER in einer „nutritiven Minderwertigkeit der Netzhautperipherie“, wobei seinen Darlegungen, wonach der für das Zustandekommen eines positiven Nachbildes erforderliche sogenannte P-Hilfsstoff in der Netzhautperipherie in geringerer Menge zur Verfügung steht und somit weniger P-Zwischenstoff durch einen Lichtreiz angehäuft und in P-Endprodukt verwandelt werden kann, sicherlich aus heutiger Sicht nicht leicht zu folgen ist.

EBBECKE [211] teilt dagegen aus seinen Beobachtungen mit, dass die positiven und negativen Nachbilder der Netzhaut, wenn diese in der Peripherie entstanden sind, länger dauern als diejenigen des Netzhautzentrums. Allerdings fehlt bei diesen im Widerspruch zu den MÜLLERschen Aussagen stehenden Beobachtungen die Mitteilung, ob es sich um solche im Dunkeln oder im Hellen gehandelt hat. Zum Beispiel müsste das zu einem bestimmten Reiz gehörige, auf einer grauen Fläche entstehen-

de negative Nachbild deutlicher und länger andauernd sein, wenn es in der Peripherie der Netzhaut liegt, da der Simultankontrast in diesem Bereich größer ist als im Zentrum, denn die Dunkelheit eines auf einen hellen Hintergrund projizierten negativen Nachbildes wird nach MÜLLER zu einem wesentlichen Teil durch die Kontrastwirkung der Umgebung bedingt.

Nach MÜLLER [206] übt selbstverständlich auch ein positives Nachbild auf seine unmittelbare Umgebung eine Kontrastwirkung aus, die schließlich zu simultaner Lichtinduktion führen kann. Dies drückt eigentlich auch EBBECKE [211] aus, wenn er davon spricht, dass auch innerhalb der Nachbilder die Lokaladaptation zu beobachten sei.

Ob dagegen ein projiziertes Nachbild positiv oder negativ ist, hängt wesentlich von der Helligkeit der jeweiligen Projektionsfläche ab. So gibt es praktisch für jedes Nachbild, das im Dunkeln hell erscheint, eine bestimmte „kritische Helligkeit“ der Projektionsfläche, bei der es unmerkbar ist. Dabei fällt das projizierte Nachbild entweder positiv oder negativ aus, je nachdem die Helligkeit kleiner oder größer als deren kritischer Wert ist. Daraus folgt, dass ein „starkes Nachbild“ auf einer Projektionsfläche positiv erscheinen und ein „schwächeres Nachbild“ auf derselben Fläche negativ ausfallen kann (EBBECKE [211]). Von EBBECKE [212] wird ein Stadium der optischen Reiznachwirkung beschrieben, in welchem das Nachbild, das sonst im Dunkeln positiv, im Hellen negativ zu sein pflegt, sich bei Belichtung hell, bei Verdunklung dunkel vom Untergrund abhebt (positives Hellbild und negatives Dunkelbild), und es wird eine Deutung der Erscheinung gegeben auf Grund einer peripher verschiedenen Höhe der Dauererregung und einer in zentralnervösen Zwischenstationen wirksamen lokalen Adaptation. Nach EBBECKE ergibt sich dann, wenn die Helligkeit der Projektionsfläche, auf der das Nachbild sich bereits negativ darstellt, noch weiter erhöht wird, die Situation, dass dieses an Deutlichkeit zunächst bis zu einem gewissen Maximalwert zunimmt, um sich dann bei noch weiterer Helligkeitserhöhung zu verringern und schließlich ganz zu verschwinden [211].

Experimentell wurde festgestellt, dass diejenige Helligkeit der Projektionsfläche, bei der das negative Nachbild einer bestimmten primären Reizung seine größte Deutlichkeit besitzt, zugleich auch diejenige ist, bei welcher das Nachbild am längsten dauert. Nach EBBECKE führt dabei eine lokale Erregungsdifferenz ausgleichende Adaptation umso rascher zum Ziel, je weniger die auszugleichende Differenz von der Unterschiedsschwelle entfernt ist.

Lässt andererseits eine Projektionsfläche infolge ihrer großen Helligkeit ein auf sie projiziertes Nachbild ganz verschwinden, so kann dieses, wenn es an sich ein „kräftiges Nachbild“ war, hinterher auf einer weniger hellen Projektionsfläche als ein schwaches negatives Nachbild wieder auftauchen [211]. Dieser Effekt kann auch auftreten, wenn das Nachbild aufgrund der Projektion auf eine helle Fläche zunächst nicht wahrnehmbar ist, aber nach Schließen der Augen allmählich wiederkehrt, und zwar bevorzugt dann, wenn das Nachbild die Folge einer längeren Fixierung einer Lichtquelle ist. EBBECKE berichtet darüber hinaus, „dass wenn für das geschlossene Auge das positive Nachbild verschwunden ist, ein negatives zum Vorschein kommt, sobald das Auge gegen eine mäßig helle Fläche aufgeschlagen wird und

wenn für das geöffnete Auge das negative Nachbild verschwunden ist, ein positives zum Vorschein kommt, sobald das Auge geschlossen oder verdunkelt wird“.

COMBERG [208] hat bei im Hellen durchgeführten Versuchen über Nachbilder festgestellt, „dass es durchaus Versuchspersonen gibt, bei denen es trotz der von manchen gemachten Voraussetzungen eines stets intermittierenden Verlaufes der langandauernden Nachbilder tatsächlich vorkam, dass das negative Nachbild einer einfachen farbigen Fläche bis zu seinem Ende ohne merkbare Schwankungen verlief“. Ansonsten sah COMBERG den Nachbildverlauf nicht als bereits bei Abschluss der Stimulation durch den Lichtreiz präeterminiert, sondern vielmehr ganz wesentlich durch regionär wirksame Einflüsse bestimmt an. Hinzu kommt, dass beim Fehlen eines prägnanten Teiles im primären Bild, dieses fehlende Stück im Nachbild ersetzt werden kann.

Auch der auffrischende Einfluss, den ein Augenzwinkern auf ein im Verschwinden begriffenes Nachbild ausübt, gehört in diesen Bereich der Beobachtungen, die auch von McDOUGALL [213] gemacht wurden.

EBBECKE schreibt in diesem Zusammenhang, dass „auch die scheinbar völlig ausgelöschten Nachbilder unter Umständen erst nach mehreren Minuten wiederkehren und dabei sowohl positiv wie negativ sichtbar werden“.

EBBECKE hat auch festgestellt, dass sich an Stelle eines verschwundenen positiven Nachbildes ein negatives und dann nach Verschwinden des negativen Nachbildes wiederum ein positives durch Wechsel der Belichtung erzeugen und bei genügend starker primärer Lichtreizung viele Male nacheinander wiederholen lässt.

MÜLLER erklärt die vorstehenden Erscheinungen durch verschiedene Vorgänge, wobei sowohl von „Ermüdung“ als auch von „Förderung“ die Rede ist und es dabei zur „Umstimmung“ kommt [206]. Diesen Erklärungen kann man aber nur dann folgen, wenn man die MÜLLERschen theoretischen Aussagen bezüglich der Funktionsweise der lichtempfindlichen Substanzen und ihrer verschiedenen Stadien akzeptiert. MÜLLER selbst tritt in diesem Zusammenhang entschieden gegen die Ansicht an, dass die „theoretische Behandlung der Gesichtsempfindungen eine für Dilettanten und Anfänger ganz besonders geeignete Beschäftigung sei“.

So stellt MÜLLER z. B. fest, dass bei dem mehrfachen Wechsel der Nachbilder, abgesehen vom ersten, echten positiven Nachbild, der ganze Wechsel der Nachbilder nur auf dem Wechsel der Belichtung und auf dem langsamen Abklingen der durch die primäre Reizung bewirkten „Minderwertigkeit“ beruht, die die „P-Erregbarkeit“ (Erregbarkeit für Primärprozesse) des Ortes, der belichtet wurde, gegenüber derjenigen der Umgebung besitzt.

Wenn helles Licht auf die Netzhaut fällt, wird dieses Ereignis anschließend in Dunkelheit als positives Nachbild wahrgenommen, während es beim Blick auf eine weiße Fläche dunkler als die Umgebung erscheint, also ein negatives Nachbild darstellt. Wird nun eine solche Fläche betrachtet, die zusätzlich beleuchtet werden kann, dann lässt sich – wie bereits früher festgestellt – erreichen, dass es bei einem bestimmten Beleuchtungsniveau zum Umschlagen eines positiven in ein negatives Nachbild

kommt [227]. BARLOW et al. [227] konnten zeigen, dass eine gute Übereinstimmung zwischen der äquivalenten Leuchtdichte des Nachbildes und dem äquivalenten Hintergrund besteht. Damit zeigte sich, dass die Schwelle während der Dunkeladaptation eine durch das positive Nachbild gebildete Differenz gegenüber dem Hintergrund bedeutet. Die fortwährende Aktivität, die das positive Nachbild bedingt, ist dafür verantwortlich, dass die Schwelle erhöht wird, solange ausgebleichenes Pigment vorhanden ist. Wenn dieses wieder regeneriert ist, fällt dieses unechte dunkle Licht oder Eigenrauschen ab und die Schwelle kann sinken. Dies besagt aber auch, dass ausgebleichenes Pigment die Sehzellen nicht unwirksam macht, sondern diese weisen nur erhöhtes Rauschen auf. Somit erklärt sich auch die Veränderung der Nachbildwahrnehmung bei Veränderung der Lichtverhältnisse auf der Betrachtungsfläche. Wird nämlich Licht auf zwei nicht gleich helle Flächen zusätzlich gestrahlt, so erscheint die vorher hellere Fläche anschließend dunkler, obwohl doch insgesamt mehr Licht auf diese Fläche fällt. Damit hängt auch die Helligkeit des Nachbildes von dem System ab, das das geringere „Dunkellicht“ hat. Eine exakte Erklärung für diese Zusammenhänge fehlt zurzeit noch [227]. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass es das erhöhte Rauschen der ausgebleichenen Sehzellen ist, welches die Hauptursache für die Veränderungen darstellt, die während der Dunkeladaptation stattfinden. Es könnte daher auch sein, dass es eine Art automatischer Helligkeitskontrolle gibt, also eine Rückkopplung, die das Verblässen des Nachbildes bewirkt.

HERING, der als Begründer der Psychophysik der Gesichtsempfindungen und als Lehrmeister der experimentellen Untersuchung auf diesem Gebiet gilt, stellte seine Lehre von den Gegenfarben und von den physiologischen Grundlagen des Simultan- kontrastes auf. Allerdings beschränkte sich HERING bei der Beschreibung der Funktionsweise auf Erregungsvorgänge der drei optischen „Spezialsinne“, die voneinander unabhängig verlaufen [209]. HERING ging von drei Sehsubstanzen aus, von welchen jede zwei gegensätzliche Prozesse durchmacht, nämlich eine weiß-schwarz, rot-grün, gelb-blau auslösende Substanz, deren Dissimilation Weiß, Rot, Gelb, deren Assimilation Schwarz, Grün, Blau erregt [209]. Die Gegenfarbtheorie bzw. Gegenfarbentheorie besagt also, dass das Farbsehen auf vier verschiedenen Grundfarben beruht, die sich als zwei Gegensatzpaare Rot – Grün und Blau – Gelb anordnen lassen.

Die sogenannte Zonentheorie besagt dagegen, dass physikalische Farbreize, die auf die Netzhaut treffen, entsprechend der YOUNG-HELMHOLTZschen Dreifarben- theorie aufgenommen und additiv gemischt werden, dass aber ihre neuronale Weiterleitung zum Gehirn gemäß der HERINGschen Gegenfarbtheorie erfolgt, wonach beide Theorien gemeinsam in die Erklärung einfließen. Bleibt schließlich noch die Duplizitätstheorie zu berücksichtigen, die besagt, dass auf der Netzhaut zwei verschiedene Rezeptortypen mit unterschiedlichen Funktionen vorhanden sind, nämlich die besonders lichtempfindlichen Stäbchen für das Sehen im Dunkeln und in der Dämmerung, die keine unmittelbare Farbwahrnehmung besitzen, und die weniger lichtempfindlichen Zapfen für das Farbsehen.

Wenn es darum geht zu beschreiben wie eine Farbe vom Menschen empfunden bzw. wahrgenommen wird, dann beschreiben dies weder die Helmholtzsche Dreifar- bentheorie noch die HERINGsche Gegenfarbentheorie. Deshalb wurde ein Modell

auf der Basis von 3 Parametern aufgestellt, nämlich Farbart bzw. Farb- oder Buntton, Sättigung und Helligkeit.

Man kann heute davon ausgehen, dass es unmöglich ist, allein aus der Beschaffenheit der physikalischen und physiologischen Reizvorgänge die Beschaffenheit der Empfindungen abzuleiten, da die Reizvorgänge der naturwissenschaftlichen oder mittelbaren, die Empfindungen und Wahrnehmungen dagegen der psychologischen oder unmittelbaren Erfahrung angehören, beide also nicht miteinander direkt vergleichbar sind. Es besteht aber dennoch ein Wechselverhältnis zwischen den physiologischen Reizvorgängen und den Empfindungen, da verschiedenen Empfindungen bzw. Wahrnehmungen stets verschiedene Reizvorgänge zugrunde liegen.

In diesem Zusammenhang stellt sich dann natürlich auch die Frage danach, was der Zusammenhang zwischen den physikalischen Prozessen im Gehirn und den Empfindungen, der Wahrnehmung also, über die wir unsere Umwelt erfahren, sein mag. Zurzeit steht eine allgemein akzeptierte Darlegung dieses psychophysischen Zusammenhanges noch aus. Andererseits besteht heute aber weitgehend Einigkeit bei der Antwort auf die Frage danach, in welchen Teilen des Gehirns die bewusste Wahrnehmung von Objekten erfolgt.

Auch die Untersuchungen zum Auftreten von Nachbildern stützen dabei die Aussage, wonach das neurale Korrelat der Wahrnehmung nicht in retinotop (im engeren Sinne) organisierten kortikalen Arealen liegt. Es ist ebenso nicht möglich, dass Neuronen, die sich als Kardinalzellen klassifizieren lassen, allein das neurale Korrelat des Bewusstseins bilden können. Aufgrund der vorgenommenen Analyse von Nachbildern liegt das neurale Korrelat des Bewusstseins in kortikalen Arealen, die topographisch organisiert sein müssen, und in denen eine Reihe von Konstanzleistungen, wie z. B. Größenkonstanz, realisiert sind. Die intuitiv naheliegende Vorstellung, je höher in der kortikalen Hierarchie, desto näher beim Bewusstsein, ist danach unzutreffend.

2.7.1 Nachbild und Komplementärfarben

Anfang des 19. Jahrhunderts sprach man von den sogenannten Ergänzungsfarben und teilte diese in 3 Klassen ein, nämlich die zufällig komplementären, die GOETHE die subjektiven nannte, die farbigen Schatten und als dritte Klasse diejenigen, die durch Reflex und Brechung des Lichtes in durchsichtigen Mitteln entstehen. Diese letzte Klasse nannte OSANN [226] die objektiven komplementären Farben.

Bei den ersten beiden hatte man zur damaligen Zeit noch keine Erklärungen, sondern war z. B. auf Ansichten über sie angewiesen, so wie sie z. B. GOETHE vom physiologischen Standpunkt ausgehend als gereizten Zustand der Netzhaut ansah. Man sprach damals von einem gewissen Abgestumpftsein des Auges, wenn es eine Zeit lang im Hellen gewesen war und erklärte die Wahrnehmung eines komplementär gefärbten Bildes durch das nach einer Bestrahlung noch im Auge befindliche Licht, das das geschlossene Augenlid erhellte.

So wurde von OSANN auch bereits damals berichtet, dass nach anhaltendem Blick auf eine rote Fläche, die sich auf weißem Grund befand, ein grünes „Scheinbild“ von

der Größe der roten Fläche entstand, wenn die rote Fläche vorher plötzlich verschwunden war. GOETHE nahm an, dass durch die Betrachtung eines farbigen Gegenstandes im Auge die Disposition zur entgegen gesetzten Farbe erzeugt werde. Als physikalische Erklärung wurde eine gewisse Lähmung der Netzhaut angenommen, wobei man beim Blick auf eine weiße Fläche nach einer Bestrahlung davon ausging, dass dann nur diejenigen Farben auf die Netzhaut wirken, für welche diese nicht gelähmt ist, sich also das Erblicken der komplementären Farbe aus der entsprechenden Lähmung ergab.

OSANN [226] führte als Erklärung für die komplementäre Farbe an, dass es nach Wegnahme eines farbigen Gegenstandes nicht zwangsläufig auch zum Wegfall der komplementären Farbe kommen müsse, sondern dass deren Erscheinen vielmehr von den vom Hintergrund des Auges in den vor dem Auge befindlichen Raum reflektierten komplementären Lichtstrahlen stammen müsse. Die komplementäre Farbe wäre also der Rest des farbigen Lichtes, der nach dem Verschwinden des Gegenstandes übrig bliebe [226].

Das Auftreten der Komplementärfarbe beim Nachbild ist für den Menschen eine allgemein vertraute Beziehung geworden, wenngleich sie meist auch nur unterbewusst wahrgenommen wird. Komplementärfarben bei einer Blendung können auch als eine Bestätigung für die Existenz eines Farbausgleichprozesses, also einer Adaptation des chromatischen Sehsystems, angesehen werden.

In neuerer Zeit wurden psychophysiologische Untersuchungen beim Auftreten von Nachbildern durchgeführt, und zwar um die beiden Hypothesen bezüglich der Mechanismen farbiger Nachbilder zu überprüfen. Dabei handelt es sich zum einen um eine photochemische Ausbleichung, welche eine Minderung der Empfindlichkeit der drei Zapfentypen in der Netzhaut bewirkt und zum anderen um eine Adaptation höherer neuronaler Mechanismen, die das Farbwahrnehmungsvermögen verändern. Hierzu hat insbesondere SAKATA [145] Untersuchungen vorgenommen und dabei herausgefunden, dass unterschiedliche farbige Nachbilder dann erzeugt werden konnten, wenn bei gegebener Stimulusfarbe unterschiedliche periphere Farben einwirkten [146]. Daraus folgerte er, dass neuronale Adaptations-Mechanismen die Nachbildfarbe beeinflussen. In weiteren Versuchen sollten die Versuchspersonen ein farbiges Nachbild auf schwarzem Hintergrund mit zusätzlicher schwarzer Umgebung in einem dunklen Raum „beobachten“. Dabei zeigte sich, dass keine Versuchsperson ein farbiges Nachbild auf einem schwarzen Hintergrund in einem dunklen Raum nach 15minütiger Dunkeladaptation „sehen“ konnte [145]. In einem weiteren Experiment wurde dann ein farbig peripherer Hintergrund statt eines schwarzen gewählt und auch dann ergab sich kein Nachbild. Hieraus schloss SAKATA, dass eine Lichtquelle erforderlich ist, um ein farbiges Nachbild zu erzeugen und damit die Veränderung der Empfindlichkeit als Folge photochemischer Bleichprozesse der Zapfen Ursache farbiger Nachbilder ist. Zusätzlich werden diese durch höhere neuronale Adaptation beeinflusst.

SAKATA fand darüber hinaus, dass der Schnittpunkt der Linien, welche die Stimulusfarbe und diejenige des Nachbildes verbinden, nicht direkt der Weißpunkt auf einem Bildschirm ist, sondern nahe daneben liegt. Auch hierdurch wird der starke Einfluss der Umgebung auf die Stimulation deutlich [146].

Während die frühen periodischen Nachbilder durch rasche neuronale Adaptation erklärt werden können, sind die langdauernden späten Nachbilder vorwiegend photochemisch bedingt. Dabei können die Nachbilderscheinungen zum einen als Sukzessivkontrast bezeichnet und zum anderen physiologisch als eine Lokaladaptation gedeutet werden. So wird eine von einem Lichtreiz getroffene Netzhautstelle als Folge einer lokalen Adaptation für den Reiz – und damit auch für dessen „Farbe“ – zunehmend unempfindlicher und als Folge dessen für die Gegenfarbe empfindlicher. Dies kann meist schon bei kleinen Beleuchtungsunterschieden am Auftreten des Gegenfarbenprozesses festgestellt werden. Die Farben des Nachbildes bzw. der verschiedenen späten Phasen verändern sich mit den Beleuchtungsbedingungen und so lassen sich zum Teil eindrucksvolle Farbwechsel bereits dadurch erreichen, dass man die Beleuchtungsverhältnisse – zum Beispiel durch Vorhalten einer Hand vor die geschlossenen Augen – ändert. Allerdings können sich hierbei insgesamt auch interindividuell unterschiedliche Erscheinungen ergeben. Das folgende Beispiel (Abb. 2.4) mag die Vorgänge bei der Entstehung farbiger Nachbilder demonstrieren:

Rot	Gelb	Rot	Gelb
Grün	Blau	Grün	Blau

Abb. 2.4 Beispiel zur Demonstration des Auftretens der Komplementärfarben im Nachbild

In dem Bereich, in dem man zuvor Rot gesehen hat, erkennt man anschließend als Nachbildfarbe Grün, dort wo vorher Grün war, erscheint rötlich, an die Stelle von Blau gelangt Gelb und der gelbe Bereich wird blau-grünlich.

Da die Netzhaut 3 Hauptfarbrezeptoren besitzt, nämlich für rot, grün und blau und dadurch, dass man ausreichend lange auf eine Farbe gestarrt hat, werden die jeweiligen Rezeptoren „müde“, d. h. es findet eine entsprechende biochemische Veränderung statt, sodass die angebotene weiße Hintergrundfarbe gerade von den anderen Farben beherrscht wird. Dabei muss man natürlich beachten, dass Gelb durch eine Kombination von Rot und Blau erhalten wird.

Die Entstehung komplementärer Nachbildfarben gehört zweifelsohne zu den sehr interessanten Erscheinungen bei Nachbildern überhaupt. Durch den Blick auf die vorstehenden farbigen Flächen „ermüden“ die betreffenden Sehzellen und „feuern“ weniger. Wird der Blick anschließend auf die daneben befindliche weiße Fläche gerichtet, subtrahieren die Augen gewissermaßen die zuvor „gesehene“ Farbe, also z. B. Rot, und das Auge sieht dann „Grün“ als Komplementärfarbe.

Man kann also feststellen, dass die erste Stufe der „Verschlüsselung“ auf der Ebene der 3 verschiedenen Farb-Sehzellentypen erfolgt. Das einfallende Licht wird dann in elektrische Signale konvertiert, und zwar vorwiegend von den spezifischen Farb-Rezeptoren. Dabei gelangen die in einem Gegenfarbenprozess in 3 Kanälen erzeugten Signale über den Sehnerv, der ca. 1 Million Fasern enthält, in das Gehirn.

Eine Neuronensorte verschlüsselt die Hell-Dunkel-Unterschiede entsprechend dem Helligkeitsunterschied im Bild, während eine andere Sorte auf die Farbunterschiede von Rot und Grün antwortet. Die dritte Sorte spricht auf die Blau-Gelb-Unterschiede an. So erhöht z. B. eine Rot-Grün-Zelle ihre Aktivität durch Stimulation mit rotem Licht und verringerte diese bei grünem Licht. Dies wird üblicherweise symbolisch mit „+R-G“ bezeichnet. Darüber hinaus gibt es die entgegengesetzt reagierenden „+G-R“-Zellen und außerdem „+B-Y“ sowie „+Y-B“, während die Helligkeitszellen durch eine Summation von R, G und B beschrieben werden können. Die subjektive Wahrnehmung einer Farbe hängt daher von den relativen Aktivitäten der 3 verschiedenen Nervenfasern ab.

Auf dieser Basis lassen sich zumindest einige Nachbilderscheinungen relativ einfach erklären. Beim Blick auf z. B. das rote Feld in Abb. 2.4 werden die rot “meldenden” Zellen ermüden. Da sie aber normalerweise durch ihre Aktivität die Gegenwart von Rot bzw. die Abwesenheit von Grün verschlüsseln, feuern sie unter entsprechender Beleuchtung mit Rot weniger, was wiederum beim Blick auf eine weiße Fläche als Folge einer Aktivitätsverringering vom Gehirn als Anwesenheit von Grün interpretiert wird. In diesem Fall wird daher das Nachbild Grün wahrgenommen.

Mit fortschreitender Zeitdauer verblasst das Nachbild und seine Farbe ändert sich. Dies wiederum ist die Folge unterschiedlicher Zeitkonstanten, mit denen sich die verschiedenen Farbsehzellen und die chromatischen Mechanismen erholen.

Durch einen anderen Hintergrund lassen sich die Nachbildfarben noch in gewissem Grad verändern, wie das folgende Bild (Abb. 2.5a) zeigt:

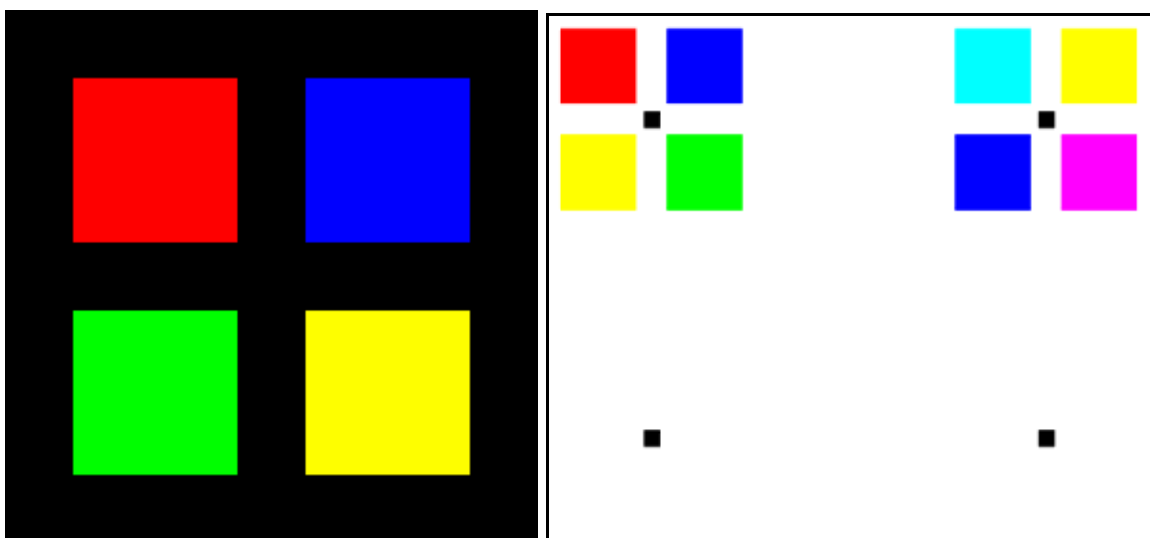


Abb. 2.5 a: Testbildfarben vor schwarzem Hintergrund
b: Demonstration der Nachbildfarben

Die dargelegten Verhältnisse lassen sich auch in den Farbkombinationen der Abb. 2.5b leicht erkennen.

Beim Auftreten von Nachbildern kann man sich natürlich die Frage stellen, warum man diese nach den so eben dargestellten Zusammenhängen nicht permanent sieht. Dies liegt daran, dass praktisch jedes Nachbild von einem neuen "überschrieben" wird. Allerdings kann man sich durch ein anschließendes Bild ähnlicher Gestalt, das ursprüngliche Nachbild auch wieder beschränkt zurück holen, d. h. es kann wieder „verstärkt“ werden, wenn es schon am verblassen ist.

In dem folgenden Beispiel in Abb. 2.6 kann das Nachbild der farbigen Quadrate auf dem grauen Hintergrund darunter gut wahrgenommen werden. Blickt man allerdings auf den farbigen Hintergrund mit den vielen kleinen Quadraten links, dann wird dadurch das ursprüngliche Nachbild überschrieben. Es kann aber dennoch zurückgeholt werden, wenn man auf das Bild mit ähnlichen grauen Quadraten rechts blickt. Dies gelingt allerdings nur dann noch, wenn der Blick nicht schon zu lange auf den vielen farbigen Quadraten ruhte, denn sonst dominiert das neue Nachbild.

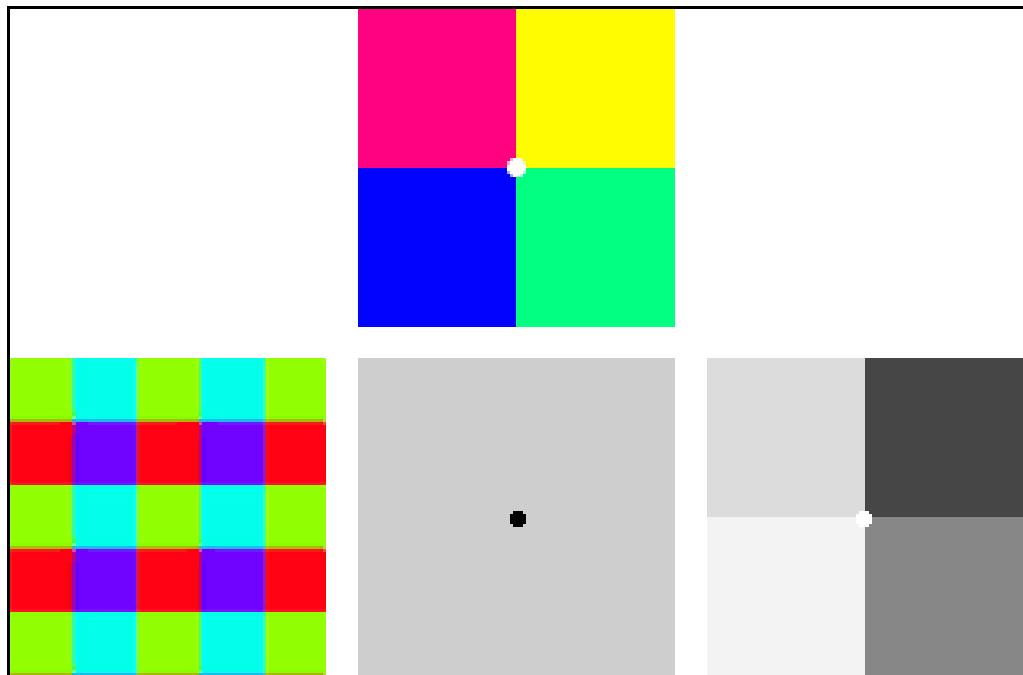


Abb. 2.6 Unterdrückung und Verstärkung durch Sukzessiv-Kontrast

Bezüglich des Auftretens der Komplementärfarbe im Nachbild liegt zweifelsohne die größte Übereinstimmung in den Angaben bereits der frühen Forschung bei dieser Thematik vor. Allerdings gibt es auch hierbei ein paar Ungereimtheiten. So weist z. B. MÜLLER [206] darauf hin, „dass HAMAKER [95] die den Aussagen vieler anderer Beobachter widersprechende Angabe macht, dass bei ihm das PURKINJESche Nachbild (siehe Tab. 2.3. in Abschnitt 2.7.2) die komplementäre Färbung am meisten im Falle der Benutzung roten Lichtes zeige“. Unklar bleibt dabei aber, welches Farbensystem die Versuchsperson(en) dabei hatte(n), d. h. es könnte auch ein Fall von Protanomalie (Rot-Schwäche), Protanopie (Rotblindheit), Deuteranomalie (Rot-Grün-Schwäche) oder Deuteranopie (Grünblindheit) vorgelegen haben.

Bereits AUBERT hatte festgestellt und dabei bemerkt, dass es ihm merkwürdig vorkam, dass bei der Verwendung roten Glases ein positives komplementäres Nachbild, d. h. ein grünes Nachbild, auftrat [232]. Dabei gibt AUBERT an, dass nach seinen Beobachtungen der rote Streifen, den eine bewegte glühende Kohle ergab, allmählich farblos wurde und direkt in einen blaugrünen Streifen übergang, und zwar ohne ein dunkleres Intervall dazwischen (zitiert n. [251]).

Anschließend ruhten Untersuchungen zu Nachbildern im Wesentlichen und erst HESS befasste sich wieder damit, indem er Untersuchungen HERINGs aufgriff, die es wahrscheinlich machten, dass die bis dahin geläufige Meinung, wonach das positive Nachbild als ein Abklingen des Eindrucks, nicht die richtige sei.

HESS konnte in seinen Untersuchungen mit einem vor dem Auge bewegten Glühlämpchen zwar einen meist nur kurzen, hell leuchtenden Strich, der von einem dunklen Zwischenraum gefolgt wurde, dessen scheinbare Länge bei unveränderter Lichtstärke von der Schnelligkeit der Bewegung abhing, wahrnehmen, nicht aber, wie er berichtet, feststellen, ob dieser Zwischenraum dunkler als die Umgebung war [251]. HESS bemerkt aber auch, dass sich der Ablauf der Erscheinungen bei sehr großen Lichtstärken durch das Eintreten von Blendung anders gestalten kann.

Die Färbung des 2. positiven Nachbildes beschrieben DITTLER und EISENMEIER [93] in aller Deutlichkeit. Dieses erschien ihnen bei rötlichgelbem Reizlicht ungesättigt grünlichblau, bei gelbem ungesättigt bläulich, bei grünem schwach violett, bei blauem deutlich gelb und bei violetter deutlich grünlichgelb. Außerdem fiel ihnen auf, dass bei orange- und purpurfarbenem Reizlicht erstens die höchste Stufe der Intensität – in diesem Falle gespiegeltes Himmelslicht – verwendet werden musste, um diese Phase überhaupt zu sehen und zweitens, dass diese dann bei orangefarbenem Reizlicht sehr ungesättigt bläulich, fast farblos hell war und bei purpurnem Reizlicht schwach grünlich gelb. Bei dem von ihnen verwendeten Spektralrot blieb auch bei stärkster Beleuchtung das zweite positive Nachbild immer vollkommen aus, und zwar sowohl im Netzhautzentrum als auch in der Peripherie.

2.7.2 Begriffsbestimmungen und Definitionen

Die Tatsache, dass die „Geschichte“ der Untersuchungen und Forschungen zum Thema Nachbilder zum Teil mit einigen Ungereimtheiten versehen ist und dass es unter einigen Forschern ein wahres Kompetenzgerangel gegeben hat, macht es nicht leicht, erstens den historischen Wert immer gebührend zu berücksichtigen und heraus zu stellen. Zweitens ist es fast durchweg nicht möglich aufgrund der fehlenden Angaben der Bedingungen unter denen die jeweiligen Untersuchungen gemacht wurden, diese zu überprüfen. Dazu kommt, dass die allermeisten der damals benutzten Lichtquellen heute überhaupt nicht mehr benutzt werden bzw. durch andere Leuchtmittel ersetzt wurden. Besonders stark zeigt sich der Wandel z. B. bei Fahrzeugscheinwerfern und bei den technologischen Entwicklungen der LEDs, wo es in beiden Gebieten zu einem technischen Stand gekommen ist, der sich ohnehin aus den Untersuchungen der Vergangenheit nicht adäquat abbilden bzw. beurteilen lässt.

Darüber hinaus hat das Studium der frühen Untersuchungen gezeigt, dass vielfach die Zuordnungen der einzelnen Nachbildphasen sehr unterschiedlich bezeichnet

wurden, und zwar nicht zuletzt, da entweder die sogenannte Bewegungsmethode zur Anwendung kam, wobei z. B. eine glühende Kohle im Kreis bewegt wurde oder ein Lichtstreifen vor dem Auge wanderte, oder aber die Lichtquelle stationär angeordnet war, wie bei der sogenannten Ruhemethode.

Da in den solchermaßen unterschiedlichen Versuchsanordnungen und Vorgehensweisen aber auch ein entscheidender Einfluss auf die zeitliche Abfolge und Wahrnehmbarkeit der verschiedenen Nachbildphasen liegen kann bzw. meistens liegt, wurden verschiedentlich Begriffe verwechselt bzw. missverständlich verwendet. Schon allein deshalb war eine Aufarbeitung dieses Bereiches erforderlich.

Bei der Bewertung einer Blendung kommt dem Nachbild und seinen verschiedenen zeitlichen Erscheinungen eine zentrale Bedeutung zu, daher wird in diesem Abschnitt etwas grundlegender auf Nachbilderscheinungen eingegangen. Noch 1958 bezeichnete AULHORN den Kenntnisstand bezüglich des physiologischen Vorganges bei der Wahrnehmung von Nachbildern so, dass „es bis heute nicht gelungen ist, eine ausreichende Erklärung für dieses interessante Phänomen zu finden“ [89].

Es wird deshalb als notwendig angesehen, dass die vorkommenden Erscheinungen und Wahrnehmungen möglichst klar und deutlich sprachlich und begrifflich definiert werden. Dabei gilt es aber gleichzeitig zu beachten, dass diese Definitionen nicht im Widerspruch zu in der Literatur bereits benutzten Begriffen stehen. Dies lässt sich allerdings schon allein deshalb nicht vermeiden, da gerade die Literatur bisher eine Einheitlichkeit vermissen lässt. Es wird daher im Folgenden so vorgegangen, dass weitestgehend übereinstimmend benutzte Begriffe übernommen und nur dort wo es für sinnvoll erachtet wurde, ergänzt wurden. Andere Begriffe wurden modifiziert und eine dritte Gruppe neu eingeführt.

Die Befassung mit Begriffen im Zusammenhang mit einem Nachbild kann nicht ganz ohne Blick in die Geschichte erfolgen. 1823 beschrieb PURKINJE erstmals ein vergängliches Nachbild, das nach einer kurzen Stimulation des Auges auftrat [92]. Er war es auch, der schon die ersten vier Phasen an einem im Kreis bewegten glühenden Körper genau beobachtet und beschrieben hat [236].

In der nachfolgenden Zeit gab es relativ viele Forscher, die sich mit Nachbildern befassten, wobei allerdings nicht immer Übereinstimmung in der Beschreibung der einzelnen zeitlichen Phasen vorlag.

Pionierarbeit kommt zweifelsohne DITTLER und EISENMEIER zu [93], die 8 getrennte Phasen beschrieben, die auf eine Beleuchtung der Netzhaut folgten, wobei 7 zu den eigentlichen Nachbildphasen gezählt wurden. Deren Arbeit wurde durch ausgedehnte experimentelle Studien von FRÖHLICH [94] ergänzt, sodass in der Zeit um 1922 eine weitgehend gesicherte Kenntnislage existierte.

Auch MÜLLER [206] beschreibt 9 Phasen, die im Nachbildverlauf nach kurz-dauerndem Lichtreiz beobachtbar sind.

Von HAMAKER [95] wurden bereits 1899 Begriffe wie positives und negatives Nachbild eingeführt und dazu verwendet, um eine Phase zu beschreiben, in der das Bild

heller bzw. dunkler als die Umgebung erschien, d. h. es wurde nur ein Bezug hinsichtlich der Helligkeit benutzt und nicht im Hinblick auf den Farbton des Bildes. Ein Nachbild kann demnach positiv bezüglich der Helligkeit und komplementär zum ursprünglich stimulierenden Ereignis sein. Dieser Darstellung wird in den nachstehenden Definitionen weitgehend gefolgt (Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Begriffe und deren Beschreibung

Begriff	Beschreibung
Phase	Erscheinung eines Bildes, und zwar entweder positiv oder negativ
Positive Phase	Bild erscheint heller als der Hintergrund bzw. die Umgebung, und zwar unabhängig vom Farbton
Negative Phase	Bild erscheint dunkler als der Hintergrund bzw. die Umgebung, und zwar unabhängig vom Farbton
Intervall	Zeitdauer zwischen zwei Phasen; neutrale Erscheinung, d. h. kein Bild Ein Intervall kann auch als eine neutrale oder passive Phase bezeichnet werden.

Will man nur von Phasen sprechen, kann man diese in aktive und passive Phasen aufteilen und aktive Phasen wiederum in positive und negative unterscheiden.

Trotz der hier getroffenen Vereinbarung zu den Begriffen negatives und positives Nachbild kann das Studium der Literatur doch immer wieder zu Fehlinterpretationen führen, da dort die Begriffe zum Teil sehr unterschiedlich und auch in anderem Sinne benutzt wurden. Ganz abgelehnt hat z. B. WEVE diese Bezeichnungen [329].

In Tab. 2.3 wird als Besonderheit zwar eine durchgehende Nummerierung vorgenommen, andererseits aber zwischen Phasen und Intervallen unterschieden sowie das primäre Bild nicht als 1. sondern als 0. Phase bezeichnet. Eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit den Angaben in der bisherigen Literatur ist ohnehin nur eingeschränkt möglich, da es zu keiner Zeit eigentlich ein einheitliches Schema gab. Daher kann die Auflistung in Tab. 2.3 als der Versuch betrachtet werden, ein solches System für die Zukunft einzuführen, und zwar basierend auf dem heutigen Erkenntnisstand.

JUDD [96] benutzte in seiner Abhandlung die Bezeichnung Stufen („stages“), um sie von den 4 Phasen, primäres Bild (Phase 0), HERING- oder PURKINJE-Nachbild (Phase 1 oder 2), Hess-Nachbild (Phase 3) und Phase 4 zu unterscheiden.

Tab. 2.3 Beschreibung der Begriffe in zeitlicher Reihenfolge bei Nachbildern

Reihenfolge, Bezeichnung und Kennzeichen:		
Nr.	Begriff	Beschreibung, Eigenschaften
1.	0. Phase	Primäres Bild (Primärbild); kein Nachbild, sondern Empfindung des Stimulus unmittelbar
2.	1. Intervall	Kurz (etwa 30 ms bis 50 ms), dunkel; negativ
3.	1. Phase	HERING (Nach-)Bild; 1. helles, also positives Nachbild; ähnlich im Farbton zum Primärbild, aber nicht so hell wie dieses; sehr kurze Dauer, d. h. weniger als etwa 100 ms; tritt nur auf bei kurzen (Blitz-)Reizen
4.	2. Intervall	Bedeutend länger als das 1. Intervall, dunkel; negativ
5.	2. Phase	PURKINJE (Nach-)Bild, manchmal auch „BIDWELL-Geist oder -Schatten“ oder “recurrent vision“ genannt; 2. positives Nachbild, das nicht die Helligkeit des HERINGSchen Nachbildes erreicht; Tendenz (meistens) komplementär zum Farbton des Primärbildes; ungefähr von gleicher Dauer wie das Primärbild; Beginn: etwa 150 ms bis 200 ms nach Reizbeginn; Maximum wird ca. 200 ms nach Reizende erreicht
6.	3. Intervall	Länger als das 2. Intervall, dunkel, aber weniger als das 2. Intervall; negativ
7.	3. Phase	HESS (Nach-)Bild; positives Nachbild; üblicherweise gleich oder ähnlich im Farbton zu demjenigen des Primärbildes, aber mit geringerer Helligkeit als das 2. Nachbild und mit geringerer Farbsättigung; Beginn: etwa 200 ms bis 500 ms nach Reizende, relativ lange Dauer von ca. 1 s bis 2 s
8.	4. Intervall	Üblicherweise lang, neutral, d. h. nicht von der Umgebung zu unterscheiden
9.	4. Phase	FRÖHLICH (Nach-)Bild; Negatives (Nach-)Bild; hell oder dunkel Grau ohne Farbton oder komplementär im Farbton zum Primärbild
10.	5. Intervall	-
11.	5. Phase	4. positives (Nach-)Bild; selten beobachtet

HESS, nach dem das 3. Nachbild benannt wurde, beschreibt die wahrnehmbaren bzw. sichtbaren Vorgänge beim Blick auf eine schwarze Scheibe, die sich in der Mitte einer hellen Fläche befindet, wie folgt: „Bei Anwendung farblosen oder angenähert farblosen Lichtes sieht man unmittelbar nach dem Schwinden der primären Erregung als Nachbild der lichtlosen Fläche eine hellweiße, in der Regel nicht scharf begrenzte Scheibe von der Größe des lichtlosen Flecks auf dunklem Grund. Diese Phase entspricht dem ersten negativen Nachbild.“ Die Wahrnehmung sieht HESS dabei durch sukzessive Lichtinduktion nach HERING erklärbar. „An der Stelle der hellen Scheibe tritt weiterhin, und zwar außerordentlich rasch, eine dunkle scharf begrenzte Scheibe auf hellem Grund auf: diese Phase stellt das positive Nachbild dar.“

„Bei Benutzung farbigen Grundes erscheint im Augenblick der Belichtung die dunkle Scheibe mit einem Schimmer der zur Farbe der Fläche komplementären Farbe überzogen“, was wiederum seine Ursache im Sukzessivkontrast hat. „Unmittelbar nach dem Abklingen der primären Erregung sieht man eine helle Scheibe von der Farbe, welche die umgebende Fläche bei der Belichtung gezeigt hatte, auf dunklem, deutlich komplementär gefärbten Grund“, und zwar ebenfalls als Folge sukzessiver Farbeninduktion. „Diese Phase entspricht dem ersten negativen Nachbilde. Sehr rasch taucht an seiner Stelle das positive Nachbild auf, in welchem wieder eine dunkle, meist ganz oder fast ganz farblose Scheibe auf hellerem Grund gesehen wird, welche letzterer eine schwache Färbung zeigt, die mit jener übereinstimmt, welche derselbe im Augenblick der Belichtung gezeigt hatte“.

Wie dieses Beispiel eines noch recht einfachen Belichtungsversuches zeigt, bedarf es einer recht guten Beobachtungs- und Wahrnehmungsgabe, damit sich die Zusammenhänge aus den zeitlichen Abfolgen zweifelsfrei bestimmen lassen.

Bei der Anwendung größerer Lichtstärken fand HESS [222] oft nach den zuvor geschilderten Nachbildphasen noch ein zweites negatives Nachbild, was in diesem Falle einer hellen Scheibe auf dunklem Grund entsprochen hätte, das er stets völlig farblos gefunden hat.

Seine wohl wichtigste Feststellung war die, dass die Farbe des positiven Nachbildes nach kurz dauernder Reizung mit farbigem Licht im Allgemeinen mit der Farbe des zur Reizung benutzten Lichtes übereinstimmt.

Besonderheiten:

Die Helligkeit der positiven Nachbilder (1. Phase, 2. Phase, 3. Phase, 5. Phase) nimmt von Phase zu Phase ab. Dies erklärt MÜLLER [206] ohne weiteres daraus, „dass die jeweilige Erregung nach Erreichung ihres Maximalwertes eine allmählich absinkende ist und dass durch das Absinken der Erregung die Wellenhöhe, bis zu der die infolge des Eingreifens der Selbstinduktion wellenartig verlaufende Erregung bei einem Nachlassen des jeweiligen Antriebes emporsteigt, von Welle zu Welle sich verringert“.

Die Helligkeit der Intervalle und des negativen Nachbildes hängt auch von derjenigen des Hintergrundes ab.

Die Gesamtheit der verschiedenen Phasen und Intervalle wird nur selten beobachtet.

Dem 1. Intervall ist in der Literatur relativ wenig Beachtung geschenkt worden und seine „Herkunft“ wird eigentlich nicht beschrieben. Geht man bei der Entstehung von Nachbildern von photochemischen Bleichvorgängen in der Netzhaut aus, dann liegt es nahe anzunehmen, dass es gerade zeitabhängige photochemische Vorgänge sind, die dieses 1. Intervall bedingen, denn eine endliche Zeit benötigt der Wechsel des chemischen Zustandes der Farbstoffe nach der Exposition.

Das 1. positive Bild (HERING-Nachbild) stellt in gewisser Weise ein Duplikat des Primärbildes dar, d. h. es ist gleichgefärbt mit dem jeweiligen Reizlicht. Es wurde so von FRÖHLICH benannt [100], weil HERING [97] die Methode beschrieb, die DITTLER und EISENMEIER zu dessen Entdeckung und Identifikation führte. Es entwickelt sich aus dem Primärbild, also aus dem Bild, das der Lichtquelle entspricht. Nach DITTLER und EISENMEIER [93] beträgt die Zeitdauer, die seit dem Beginn des Lichtreizes bis zum Auftreten des HERINGschen Nachbildes vergeht, zwischen 298 ms und 784 ms. Bei FRÖHLICH [108] liegt der niedrigste Wert dazu bei 0,02 s und der höchste bei 0,04 s bzw. 0,05 s [100].

Die Dauer des HERINGschen Nachbildes selbst wird von FRÖHLICH mit weniger als 0,06 s angegeben [100]. Dabei hat FRÖHLICH das HERING-Nachbild stets nur als komplementär gefärbt, aber nie als rein komplementär in Erscheinung tretend wahrgenommen.

Das 2. positive Bild (PURKINJE-Nachbild) hängt noch mehr als das HERING-Nachbild von der „Leuchtdichtestufe“ – also der Belichtungsintensität – und von der Adaptation des Auges ab (Tab. 2.4):

Tab. 2.4 Abhängigkeit des PURKINJE-Nachbildes von der Leuchtdichte

1.	Niedrige Leuchtdichte („Schwellennähe“)	Farblos bis grau, abhängig von der Adaptation und der Leuchtdichte
2.	Etwas größere Leuchtdichte (ca. 4-fache Schwellennähe)	Ungesättigter violetter bzw. bläulicher Farbton, und zwar unabhängig vom Stimulus-Farbton
3.	Mittlere Leuchtdichte (ca. 16-fache Schwellennähe)	Farbton komplementär zum Stimulus
4.	Noch größere Leuchtdichte (ca. 64-fache Schwellennähe)	Farbton entspricht demjenigen des Stimulus, aber mit leichtem violetterem „Touch“ niedriger Sättigung
5.	Sehr große Leuchtdichte (ca. 100- bis 200-fache Schwellennähe)	Verschmelzung mit HERING-Nachbild
6.	Extrem große Leuchtdichte	Nachbild verschwindet zugunsten des 1. positiven Bildes
7.	Darüber liegende Leuchtdichte	Erscheinung eines zweiteiligen Nachbildes: 1. Teil im Farbton des Primärbildes, 2. Teil komplementär dazu

Zu beachten ist dabei, dass individuell der minimale Helligkeitswert um den Faktor ca. 100 unterschiedlich sein kann, sich also die Stufen ebenfalls individuell verschieben können.

Der Beginn des 2. positiven Nachbildes (PURKINJE Nachbild) tritt je nach Reizintensität 150 ms bis 200 ms nach Empfindungsbeginn auf [332].

Über die Färbung des 2. positiven Nachbildes finden sich in der Literatur die widersprüchlichsten Angaben, wobei insbesondere nicht übersehen werden darf, dass dies manchmal schon allein daraus erklärt werden kann, dass von manchen Autoren die Zuordnung entweder zum HERINGSschen oder zum PURKINJEschen Nachbild oder sogar zum HESSschen Nachbild erfolgt ist und insofern ein Vergleich deutlich erschwert wurde.

V. KRIES führte die Tatsache, dass die einen Autoren das sekundäre Bild als dem primären komplementär, die anderen als gleich gefärbt beschrieben, darauf zurück, dass der „trichromatische Apparat je nach Intensität und Dauer des Lichtreizes verschiedene Reaktionsweise zeige“ [296]. Dabei stellte er aber gleichzeitig fest, dass es viel wichtiger sei, „ob nämlich die sekundäre Helligkeit von der primären durch ein Intervall der Dunkelheit geschieden sei“ [296]. Dies lässt den Schluss zu, dass die verschiedenen Autoren auch im Hinblick auf die zeitliche Abfolge der Nachbildphasen diese entweder nicht beobachtet hatten, weil sie entweder übersehen worden waren oder aufgrund der Versuchsbedingungen nicht auftraten und daher auch Zuordnungsprobleme zur Erklärung der unterschiedlichen Darstellungen dienen können.

PURKINJE war es wohl, der zuerst die Erscheinungen beim Herumschwingen einer glühenden Kohle beschrieben hat. Die meisten Forscher bezeichneten die Färbung dieses hellen Nachbildes als gering und zu jener des erregenden Lichtes komplementär, während BIDWELL angab, dass die entsprechende Färbung nach Reizung mit jedem beliebigen Lichte „gewöhnlich violett (generally violet coloured) sei“.

HESS sah dieses Nachbild bei allen seinen Beobachtungen in der Färbung stets mit derjenigen des zur Reizung benutzten Lichtes übereinstimmend. Einen Irrtum seinerseits schloss HESS insofern aus, dass er die Differenzen zu den Aussagen anderer Forscher nicht etwa auf unterschiedliche Lichtstärken zurückführte, sondern im Gegenteil führte er an, dass sich die Lichtstärke bis nahe an die Grenzen der Blendung steigern ließ, ohne dass bezüglich der Färbung des Nachbildes eine Änderung bemerkbar wäre. Damit wird gleichzeitig erstmals auch eine Relation zum Effekt der Blendung dargelegt.

HESS, nach dem das 3. Nachbild benannt wurde, hat das Auftreten der Nachbilder wie folgt beschrieben [222]. „Bei Anwendung farbigen Lichtes sieht man Folgendes: Unmittelbar hinter dem bewegten, leuchtenden Objekte sieht man eine kurze helle Linie von der gleichen Farbe, wie die Lichtquelle. Hierauf folgt eine in der Regel etwas längere Strecke, welche insbesondere bei Benutzung stark gesättigter Lichter, deutlich komplementäre Färbung zeigt: diese Strecke ist meist weniger hell, als die erste, aber die Anwendung einer hellleuchtenden Lichtquelle deutlich heller, als die Umgebung. Es folgt dann ein etwas kürzeres, dunkles Intervall, in welchem ich eine

Färbung überhaupt nicht mit Sicherheit wahrnehmen konnte, und hieran schließt sich ein langer, heller Streifen, dessen Färbung im ersten Augenblicke mit derjenigen der benutzten Lichtquelle übereinstimmt. Er wird sehr bald völlig farblos, bleibt aber dann noch einige Sekunden sichtbar“. Bei dem letztgenannten Nachbild hat HESS das nach ihm benannte Nachbild auch insofern charakterisiert, dass er es erstens als lang bezeichnet und zweitens mit einer Färbung des Stimulus, die allerdings bald verschwindet.

HESS hat also nach kurzdauernder Reizung der Augen mit „mäßig hellem Licht“ 6 Phasen des Erregungsabklingens wahrgenommen, wovon 3 deutlich heller als der passend gewählte Grund waren, nämlich die 1., 3. und 5., während die 2., 4. und 6. Phase deutlich dunkler wahrgenommen werden [217].

Das Auftreten komplementär gefärbter Nachbilder beschreibt HESS daraus, dass die Nachwirkungen der farbigen Komponente des Lichtreizes nach der Theorie der Gegenfarben sowohl betreffs der Stärke oder Deutlichkeit als auch betreffs der Dauer ihrer einzelnen Phasen innerhalb gewisser Grenzen unabhängig von jenen der farblosen Komponenten ablaufen und dass daher unter Umständen eine negative Phase der farbigen Nachwirkungen sich zum Teil mit einer positiven Phase der farblosen Nachwirkung decken kann [251].

HESS weist darauf hin, dass v. KRIES in mehreren Punkten nicht zu seinen Ergebnissen gekommen ist. So z. B. darin, dass das positive Nachbild, das HESS „als das sekundäre, durch ein dunkles Intervall von der primären Erregung getrennte und meist mehrere Sekunden lang sichtbare Nachbild“ „einen kleinen Bezirk am Fixationspunkt überspringe“. Damit drückt v. KRIES aus, dass dem stäbchenfreien Netzhautbezirk „die Duplizität des Erregungseffektes“ ermangele. Außerdem behauptete v. KRIES, dass die Farbe des sekundären positiven Nachbildes zwar zu jener des Reizlichtes komplementär sei, dass aber bei „Anwendung roten Lichtes ein positives Nachbild überhaupt vollständig fehle“ (siehe hierzu auch Abschn. 2.7.4).

Diese im Widerspruch zu seinen eigenen Untersuchungen stehenden Ergebnisse deutete HESS so, „dass bei den v. KRIESschen Versuchen die späteren Lichtreize auf eine mehr oder weniger alterierte, im allgemeinen merklich ermüdete Netzhautstelle trafen, die auf neue Reize in ganz anderer Weise reagiert, als eine solche, auf der die vorhergegangene Erregung vollständig abgeklungen ist“. Dabei handelt es sich wohlgerne um Untersuchungen mit der Bewegungsmethode.

Zu den abweichenden Meinungen von v. KRIES äußert HESS auch die Vermutung, dass dies entweder an individuellen Eigentümlichkeiten der Augen von v. KRIES gelegen oder aber dass dieser ganz einfach Fehler gemacht habe [222]. Als solche Fehler kämen nach Sicht von HESS [234] in Betracht, dass das Reizlicht oder das Fixierlicht dauernd sichtbar waren, dass die Aufeinanderfolge der einzelnen Reizungen zu schnell erfolgte und dass es zu einer raschen Ermüdung der Netzhaut dadurch kam, dass die nachfolgenden Reize immer auf die gleiche Netzhautstelle trafen wie die vorangegangenen.

Die nach dem Abklingen der primären Erregung sichtbare komplementär gefärbte Phase, die heller als die Umgebung ist, erklärt v. KRIES dadurch, dass „das von den Stäbchen herrührende positive Nachbild mit dem negativ-komplementären der Zapfen verschmilzt“ (zit. in [234]). V. KRIES hat die Vermutung ausgesprochen, dass das sogenannte „PURKINJE-Nachbild auf eine Funktion der Stäbchen und das Zeitverhältnis ihrer Wirksamkeit gegenüber der der Zapfen zurückzuführen sei“ [296]; eine Annahme, die aus heutiger Sicht nicht mehr Bestand hat. Diese „Duplizitätstheorie“, aufgrund derer v. KRIES „die periodischen Empfindungen nach einer Momentanreizung als wiederholtes, abwechselndes Auftreten von Erregungen in dem schnellen Tages- und dem trägen Dämmerungsapparat der Netzhaut erklärte“, ist ebenso wenig geeignet, die Nachbilderscheinungen tatsächlich aufzuklären, wie es der Bezug von v. HESS „auf die Erregungen der farbigen und der Schwarzweißsehsubstanz HERINGS“ nicht vermag [332].

HESS kann die Verschiedenheit seiner Ergebnisse gegenüber anderen Forschern nicht in der Lichtstärke des Reizlichtes sehen, zumal er selbst bei solchen Lichtstärken, die nach seiner Meinung nahe an der Blendung lagen [222], bezüglich der Färbung der Nachbilder keine Änderung bemerkte.

HESS selbst sieht in Bezug auf die besondere Aussage bei der Farbe Rot einen Zusammenhang darin, dass rotes Licht „wegen seiner verhältnismäßig geringen weißen Valenz im Allgemeinen weniger hell ist, als das der meisten übrigen farbigen Lichter“. Bei eigenen Untersuchungen mit farbigen Gläsern, die nur Licht oberhalb von 623 nm durchließen, stellte HESS allerdings auch fest, dass die Färbung des positiven Nachbildes sehr rasch abnahm und er niemals eine komplementäre Färbung dabei wahrnehmen konnte. Er bemerkt weiter, „dass man in unmittelbarem Anschluss an die primäre Erregung, und zwar lange vor dem Auftreten des positiven Nachbildes, also des PURKINJESchen Nachbildes, und von diesem“ – bei der Bewegungsmethode – „durch eine kurze, dunkle Strecke getrennt, eine deutliche komplementäre Färbung, die v. KRIES ganz und gar übersehen zu haben scheint, sieht“.

Da HESS feststellte, dass man einigen seiner Darstellungen von anderer Seite widersprach, beschrieb er zur Verständigung über die jeweiligen Erscheinungen diese noch einmal wie folgt: „Nach der Reizung mit kurz dauernden bewegten Lichtern“ (z. B. durch Bewegen eines Glühlämpchens) „vor dem ruhig gehaltenen Auge kann man im Allgemeinen folgende sechs Phasen wahrnehmen: Phase I entspricht der ‚primären‘ Reizung, ihr folgt ein dunkles Intervall, das deutlich dunkler als die seitliche Umgebung ist (Phase II), darauf ein helles, das sogenannte PURKINJESche Nachbild, im folgenden kurz Phase III bezeichnet. An diese schließt sich ein länger dauerndes dunkles Intervall (Phase IV) und darauf ein mehrere Sekunden dauernder heller Nachbildstreif (Phase V), worauf dann noch ein meist schwaches, aber deutliches drittes dunkles Nachbild (Phase VI) folgt“. Weitere eventuell bei anderer Anordnung auftretende Phasen hat HESS dabei nicht betrachtet, aber auch nicht ausgeschlossen.

Das von HESS als Phase V bezeichnete Nachbild wurde später nach ihm als das HESS'sche Nachbild benannt.

Diese Phase entwickelt sich bei anwachsender Intensität aus einem gleichgefärbten „Nachbildschein“, der sich direkt an die primäre Empfindung anschließt und in dem dann ein dunkles Intervall auftritt. Man kann unter dieser Annahme eigentlich nur vom Vorhandensein des HESS'schen Nachbildes sprechen. Erst bei weiterer Reizverstärkung schieben sich HERING'sches und PURKINJEsches Nachbild zwischen die Primärempfindung und das HESS'sche Nachbild, wodurch dieses selbst verspätet wird und zwischen 200 ms und 450 ms nach Empfindungsbeginn eintritt. Seine Dauer kann dann aber mehrere Sekunden betragen [332]. Eine weitere Steigerung der Reizintensität führt schließlich zuerst zum Verschwinden des PURKINJEschen, dann des HERING'schen und schließlich des HESS'schen Nachbildes und es schließt sich ein mehrere Sekunden dauernder Lichtschein direkt an die primäre Empfindung an. In diesem Lichtschein treten dann bei noch größerer Intensität des Reizes neue Nachbildphasen in Erscheinung. Dabei handelt es sich nach Untersuchungen von BAYER, die er mit der Bewegungsmethode unternahm, um eine späte, gleichgefärbte, aber kurzdauernde Phase, die etwa 250 ms nach dem Empfindungsbeginn folgt und eine Dauer von ca. 50 ms aufweist. An ein ca. 300 ms bis 400 ms langes dunkles Intervall schließt sich dann eine komplementäre, mehrere Sekunden dauernde Phase an. Ähnliche Verhältnisse werden auch bei längerdauernder Belichtung berichtet.

BAYER kommt aufgrund seiner Untersuchungen zu dem Schluss, die Periodik der Nachbildphasen in das Sehzentrum zu verlegen und den Wechsel gleichgefärbter und komplementärer Phasen mit dem Wechsel antagonistischer Erregungs- und Hemmungsprozesse in Zusammenhang zu bringen.

Im Übrigen muss diese Darstellung, die jedem der selbst experimentell arbeitet und die bei Blendung auftretenden Nachbilderscheinungen zu beschreiben hat, sicherlich schon als sehr detailliert auffallen, gleichzeitig ist sie aber auch ein Beispiel dafür, dass es durch die von HESS vorgenommene Nummerierung auch zu Verwechslungen mit der entsprechenden Bezeichnung durch andere Autoren gekommen sein kann.

Seine in [225] dargelegten Untersuchungsergebnisse galten in erster Linie der Phase III, also dem PURKINJEschen Nachbild, das in Tab. 2.3 als 2. Phase unter Nr. 5 aufgeführt ist, da nach seiner Ansicht gerade zu dieser Nachbildphase die meisten unrichtigen Angaben vorlagen.

Auch FRÖHLICH hat die Erscheinungen sowohl des HERING'schen als auch des PURKINJEschen Nachbildes sowie diejenigen des 3. Nachbildes, also des HESS'schen Nachbildes, sehr detailliert in Abhängigkeit der Bestrahlungsparameter beschrieben und ihre zeitlichen Abstände aufgelistet [100]. Darüber hinaus hat er Angaben darüber gemacht, dass z. B. bei größeren Lichtintensitäten der Eindruck des Fehlens des PURKINJEschen Nachbildes entstehen kann, da es dann dicht an das HERING'sche Nachbild heranrückt.

FRÖHLICH gab die 3. positive Nachbildphase, die er nicht das HESSsche Nachbild nannte, als jenen Teil des gesamten Nachbildes an, der schon bei der geringsten von ihm verwendeten Lichtintensität auftrat. Außerdem stellte er fest, dass es sich dabei um das Nachbild mit der längsten Dauer handelte und um dasjenige, dessen Eintrittszeitpunkt am stärksten von der Belichtungsintensität abhängt. So beginnt diese Phase bei geringen Intensitäten bereits dann, wenn bei größeren Intensitäten sonst erst das PURKINJEsche Nachbild auftritt [100]. Insofern gab FRÖHLICH auch an, dass sich das PURKINJEsche Nachbild aus der 3. positiven Nachbildphase entwickelt. Manchmal wird das 4. Bild als FRÖHLICH-Nachbild bezeichnet [339].

Auch das Vorliegen helladaptierter Augen führt dazu, dass sich die 3. positive Nachbildphase dem Reiz nähert, während sie als Folge einer Dunkeladaptation erst wesentlich später erscheint. Zudem wirkt sich Dunkeladaptation ähnlich wie eine Zunahme der Lichtintensität des Reizes aus, d. h. die Nachbildphasen erscheinen heller, sie folgen schneller aufeinander und dauern insgesamt länger.

Von FRÖHLICH stammt auch die Empfehlung, die Augen „nach erfolgter Belichtung zu schließen, damit die dunklen Phasen besonders schön hervortreten“, wobei er gleichzeitig hervorhebt, dass dann „das Eigenlicht der Netzhaut wesentlich vermindert ist“, während beim Blick auf eine beleuchtete Fläche festgestellt werden kann, dass „die Wirkung des schwachen Lichtes der fixierten Fläche während der Dauer der dunklen Phasen vermindert ist“ [100].

DITTLER und EISENMEIER [93] beschrieben die 6 Nachbildphasen hinsichtlich ihrer Unterscheidung – unter Bezugnahme einer Darstellung von HESS [234] – sogar noch detaillierter, nämlich als „1. die primäre Erregung (Phase 1); 2. ein kurzes dunkles Intervall (Phase 2); 3. ein kurzdauerndes, zum Reizlicht im Allgemeinen gegenfarbiges Nachbild, heller als die Umgebung (Phase 3); 4. ein längeres dunkles Intervall, dunkler als die Umgebung (Phase 4, Anm.: HESS selbst konnte nicht mit Sicherheit angeben, ob es dunkler als die seitliche Umgebung ist [234]); 5. ein länger dauerndes, dem Reizlicht gleichgefärbtes, wenig gesättigtes Nachbild, heller als die Umgebung (Phase 5, Anm.: Dieses Nachbild bezeichnete HESS als „positives Nachbild schlechtweg“ [234]) und 6. ein länger dauerndes, dunkles Intervall, in dem im Allgemeinen eine Färbung nicht wahrnehmbar ist (Phase 6)“. Und weiter: „Diese Phase wird meist nicht unmittelbar nach dem Schwinden der Phase 5 deutlich sichtbar, sondern erst eine kurze Zeit später“.

HESS hat mehrfach das „sekundäre, durch ein dunkles Intervall von der primären Erregung getrennte und meist mehrere Sekunden lang sichtbare Nachbild“ als das positive Nachbild bezeichnet.

HESS stellt fest, dass v. KRIES vermutlich nach der primären Erregung nur die Phasen 2 und 3 wahrgenommen hat, die 4. bis 6. aber dagegen völlig übersehen haben muss [234], deren Dauer bei mäßigen Lichtstärken oft 3 bis 10 Sekunden beträgt. HESS weist in diesem Zusammenhang auch einen an ihn gerichteten Vorwurf zurück, der darin begründet wurde, dass „bei Anwendung sehr heller Lichter die Erscheinungen allerdings ganz anders sind“ [234]. HESS hat selbst auf diesen Sachverhalt verwiesen und ihn in [234] ausdrücklich mit den Worten „Bei Anwendung sehr großer Lichtstärken kann der Ablauf der Erscheinungen durch den Eintritt von Blen-

„dung sich anders gestalten. Doch wurde diese bei meinen Versuchen sorgfältig vermieden“. Er hat seine Versuche eigentlich stets mit „mäßigen und mittleren, einige sogar mit geringst möglichen Lichtstärken“ angestellt. Von v. KRIES wurde dagegen in seinen wohl wichtigsten Versuchsreihen eine mit Mattglas und mit einem blauen Glas verdeckte Öffnung in einem Fensterladen direkt betrachtet.

Es kann schon allein aufgrund dieser Gegebenheiten bei den hier insbesondere interessierenden und durchgeführten Untersuchungen unter Blendungsbedingungen nicht allein aus den bislang bekannten Feststellungen auf zu erwartende Erscheinungen geschlossen werden, sondern es wird zumindest Neuland beschritten, was auch gleichzeitig bedeuten kann, dass sich andere, bisher nicht beschriebene Erscheinungen ergeben können.

DITTLER und EISENMEIER berichteten über ihre Feststellungen zweier neuer, bis dahin nicht beschriebener Nachbildphasen [93], nämlich einer dunklen und einer hellen, mit dem Reizlicht gleichgefärbten. Diese beiden Phasen sind gerade unter den Bedingungen, unter denen HERING seine „Dreibildmethode“ anwandte, also im hellen Raum, bei Helladaptation des Auges, besonders deutlich zu sehen. Dabei sind dies nicht etwa zeitlich sich hinten anschließende Nachbilder, sondern es ist z. B. bei dem neuen positiven Nachbild, das DITTLER und EISENMEIER isoliert haben, das erste positive Nachbild gemeint, das bereits HERING angab, das aber zugleich mit keinem der bisher beschriebenen Nachbilder identifiziert werden durfte. Zur Beobachtung können auch die sonst zum Nachweis der verschiedenen Nachbildphasen gewählten Versuchsverhältnisse, nämlich mäßige Dunkeladaptation, vorliegen.

Durch die Neuentdeckung zweier weiterer Nachbildphasen liest sich nach DITTLER und EISENMEIER [93] der Nachbildverlauf damit wie folgt: „1. das primäre Bild (Phase 1); 2. ein sehr kurzes dunkles Intervall (Phase 2); 3. ein erstes positives (also helles) Nachbild; bei Verwendung farbiger Reizlichter ausgesprochen gleichfarbig. Weniger hell als die 1. Phase (Phase 3); 4. ein kurzes dunkles Intervall, jedoch länger als 2 (Phase 4); 5. ein zweites positives Nachbild, das bei farbigen Reizlichtern meist deutlich in der Gegenfarbe erscheint. Bedeutend weniger hell als 3 (Phase 5, Anm.: Dies war bisher die Phase 3 nach HESS); 6. ein längeres dunkles Intervall, (Phase 6); 7. ein drittes langdauerndes positives Nachbild; bei farbigen Lichtern ungesättigt gleichfarbig. Weniger hell als 5 (Phase 7) und 8. ein lang anhaltender dunkler Streifen (Phase 8, Anm.: Der Streifen ergibt sich aufgrund der Bewegungsmethode.)“. Da die beiden neuen Bilder bei spektralroten Lichtern fehlten, sind sie dem PURKINJESchen Nachbild zuzuordnen, das meist in der Komplementärfarbe gefunden wird. Es ist also von einer gewissen „Zwischenschaltung“ hinter das primäre Bild auszugehen. Allerdings stimmen die entsprechenden Angaben verschiedener Autoren wie HESS [234], v. KRIES [237] und McDOUGALL [214] leider nicht überein, sodass Phase 3 nach HESS jetzt zur Phase 5 wurde. Nach DITTLER und EISENMEIER darf deren erstes positives Nachbild nicht mit dem PURKINJESchen Nachbild identifiziert werden. Für die von ihnen bezeichnete „Entwicklungszeit“ dieses Nachbildes geben sie Werte zwischen 0,03 und 0,04 Sekunden an. Die von ihnen neu gefundenen beiden Bilder sind zeitlich hinter die bisherige Phase 1, aber vor die Phase 2 des Ablaufes des Erregungsvorganges bei kurzdauernder Reizung des Auges einzuschalten. Das dabei „eingeschaltete“ sehr kurze dunkle Intervall wird von DITTLER und EISENMEIER mit ca. 1/25 Sekunde angegeben.

Es kann angenommen werden, dass in der Zeit vor DITTLER und EISENMEIER deren neue Bilder meist mit dem positiven Nachbild, nämlich dem PURKINJEschen gleichgesetzt wurden, also anders gedeutet wurden. Eine gewisse Übereinstimmung kann in der von HESS als Phase 1a und dem wirklichen primären Bild bestehen, während dann das von HESS als Phase 1b bezeichnete Bild mit dem ersten positiven von DITTLER und EISENMEIER übereinstimmen würde.

Leider ist wohl auch einige Male das von HESS entdeckte und von ihm als Phase 5 oder als tertiäres Bild bezeichnete Bild mit dem PURKINJEschen Nachbild verwechselt worden, was auch nicht zur Aufhellung beitragen konnte, da das HESSsche Nachbild verhältnismäßig spät im Nachbildverlauf auftritt.

Die Bedeutung der richtigen Bezeichnung und Zuordnung der einzelnen Nachbildphasen wird gerade beim HESSschen Nachbild deutlich, denn dieses tritt bei kurzdauernder, schwächerer Bestrahlung und bei Beobachtung auf dunkler Fläche als einzige Nachbildphase auf. Nach Ansicht BAYERs wäre es daher wenig sinnvoll, diese Phase als die Nummer 5 zu bezeichnen [332]. Auch BAYER hat die Abhängigkeit der Nachbildphasen von der Fläche erkannt, auf der sie beobachtet werden und festgestellt, dass auf heller Fläche erstens größere Intensitäten zur Beobachtung der Nachbilder erforderlich sind und dass zweitens die helleren Phasen, also das HERINGsche und das PURKINJEsche Nachbild früher auftreten, und zwar entsprechend der Lichtintensität des Reizes zuerst das HERINGsche und dann das PURKINJEsche Nachbild. Wird dagegen die Beobachtung auf dunkler Fläche vorgenommen, dann tritt bei schwächeren Intensitäten zuerst das HESSsche, dann das HERINGsche und PURKINJEsche Nachbild in Erscheinung.

BAYER kam in seinen Untersuchungen zumindest in Teilen zu anderen Ergebnissen als sie sowohl v. HESS als auch DITTLER und EISENMEIER aber auch FRÖHLICH angegeben hatten, und zwar dann, wenn mit kurzdauernden, starken Lichtreizen gearbeitet wurde. Nach Ansicht von BAYER entspricht dann die späte, gleichgefärbte Nachbildphase weder dem von v. HESS angenommenen PURKINJEschen Nachbild noch dem HERINGschen Nachbild, wie es DITTLER, EISENMEIER und FRÖHLICH meinten [332], sondern einem bisher nicht beschriebenen, und zwar einer späten gleichgefärbten kurzdauernden Phase, die etwa zu gleicher Zeit wie das komplementäre PURKINJE-Nachbild auftritt, ihrerseits aber durch keinerlei Übergänge weder mit dem HERINGschen noch dem PURKINJEschen Nachbild verknüpft ist.

Wenig Verwechslung kann dann auftreten, wenn man das PURKINJEsche Nachbild als eines mit mehr oder weniger ausgesprochen komplementärer Färbung ansieht, das jedenfalls nie gleichfarbig zum Reizlicht ist und das erste positive Nachbild stets gleichfarbig und nie komplementär zum Reizlicht einordnet. Insofern hätte man es statt als HERINGsches Nachbild auch als DITTLER und EISENMEIER-Nachbild bezeichnen können. Wenn daher von verschiedenen Autoren das PURKINJEsche Nachbild gleichfarbig berichtet wurde zum Reizlicht, dann war es stattdessen mit großer Wahrscheinlichkeit das erste positive Bild, was sie gesehen hatten. Diese Verwechslung ist vermutlich besonders groß gewesen, wenn es um Untersuchungen mit rotem Licht ging, da hier unter anderem berichtet wurde, dass das PURKINJEsche Bild ganz ausbleibe oder aber gegenfarbig und ein anderes Mal wieder gleichfarbig sei. So haben z. B. weder v. KRIES [237] noch BIDWELL [99] nach rotem

Reizlicht ein sekundäres Nachbild gesehen, während dies bei HESS und McDOUGALL [214] der Fall war. McDOUGALL schreibt dazu z. B. „But if the intensity of this red object-light is much increased there appears, ... a single narrow band of low intensity but of good saturation, forming a ‚ghost‘ very similar in general appearance and behaviour (except as regards colour) to the typical ‚Bidwell’s ghost‘ ”. McDOUGALL hat dazu direktes Sonnenlicht „bemüht“.

V. KRIES hat das von ihm beobachtete Fehlen des sekundären Nachbildes bei rotem Licht mit der Annahme zweier voneinander unabhängiger lichtempfindlicher „Apparate“, nämlich der Stäbchen und Zapfen, insofern in Verbindung gebracht, dass er für das primäre Bild die Reizung der Zapfen und für das sekundäre Nachbild die verspätete Reizung der Stäbchen annahm, da gerade die Stäbchen für rotes Licht unerregbar sind [237].

DITTLER und EISENMEIER [93] weisen noch darauf hin, dass sie im Gegensatz zu McDOUGALL niemals bis zu zwanzig Nachbilder zwischen der primären Phase und dem „Bidwells Ghost“, also dem PURKINJEschen Bild gesehen haben, allerdings waren die Versuchsbedingungen auch verschieden voneinander.

BOSSCHA [230] hat sich in der von ihm gewählten Nomenklatur von den Bezeichnungen positives und negatives Nachbild insofern abgesetzt, dass er von dem primären, sekundären und tertiären Bild sprach, um – wie er es bezeichnete – möglichst objektiv zu bleiben. Die Dauer des primären Bildes war bei seinen Versuchen stets kleiner als die der Beleuchtung selbst. Er fand für die Gesamtdauer von primärem und sekundärem Bild weniger als 1 Sekunde und gab gleichzeitig ein Verhältnis der Lichtstärken der 3 Bilder wie 100:80:10 an. Außerdem fand er die Farbe des sekundären Bildes stets als komplementär zu der des primären und fand immer eine „eigentümlich rötlich, schwerlich definierbare Farbe“ beim tertiären Bild.

Dabei ist es nicht einfach, einen Vergleich zwischen den von HESS mit einem sogenannten Momentverschluss erzielten Ergebnissen und denjenigen von BOSSCHA zu machen. Zumindest fand BOSSCHA sein sekundäres Bild immer als hell, während HESS dieses als komplementäres Nachbild dunkel nennt. Außerdem sah BOSSCHA das tertiäre Bild nie in der Farbe des primären, wie es andererseits HESS öfter vorgekommen ist.

Ein 4. positives Nachbild hat vermutlich PLATEAU [98] 1834 erstmals beschrieben.

Das PURKINJE-Nachbild, d. h. die 2. Phase, wird üblicherweise wahrgenommen, da es nach einer Zeit von ca. 0,2 s nach Ende des primären Stimulus auftritt.

Es wurde 1823 von PURKINJE erstmals beschrieben. Die nach BIDWELL [99] benannte Bezeichnung „Bidwell’s ghost“ bzw. „wiederkehrendes Bild („recurrent image“)" beinhaltet das PURKINJE-Nachbild, während dessen die Benennung als Blitzlicht-Bild („flash image“) durch HAMAKER und JUDD [95, 96] darauf zurück zu führen ist, dass man nach einer entsprechend starken visuellen Reizung durch einen Primärstimulus eine Folge von Blitzen sieht, von denen das PURKINJE-Nachbild einer ist, wenn die Stimulation stationär erfolgt. Bewegt sich dagegen entweder die Quelle oder das Auge, erscheint das PURKINJE-Nachbild örtlich von anderen ge-

trennt. Als Bezeichnungen finden sich dafür in der Literatur auch die Begriffe „Bidwell Schatten“, als das auf das von KRIESSsche Bild folgende, oder „Bidwell Nachbildphaenomen“ oder eben in fast wörtlicher Übersetzung „Bidwell Geist“, aber auch Satellit von HAMAKER bzw. „Hamaker Nachbild“.

HAMAKER war es auch, der 1899 zum ersten Mal 7 Phasen aufführte. Das HERING-Nachbild wurde von DITTLER und EISENMEIER 1909 hinzugefügt. Ebenso eigentlich auch das HESSsche Nachbild.

JUDD [96] beobachtete in manchen Fällen während des bzw. statt des 3. Intervalls, also zwischen dem 2. und 3. positiven Nachbild, ein negatives Nachbild („negative flash-image“), und zwar bei Stimulation mit konzentrischen schwarzen und weißen Ringen.

Es lässt sich daher festhalten, dass es von den Versuchsbedingungen abhängt, wie viele und welche der in Tabelle 2.3 aufgeführten und in Abb. 2.8 (Abschn. 2.7.3) dargestellten Phasen und Intervalle beobachtet werden können.

HESS hat z. B. mit der sogenannten Bewegungsmethode 3 helle Bilder, nämlich das Primärbild, das PURKINJEsche und das nach ihm benannte HESSsche Nachbild sehr eingehend untersucht.

McDOUGALL war es dagegen mit der sogenannten Ruhemethode durch Vermeidung gewisser Fehlerquellen und unter Verwendung stärkerer Lichtreize, als sie von anderen benutzt wurden, gelungen, das Auftreten von 4 bis 7 durch relativ dunkle Intervalle voneinander getrennte, helle Bilder vor dem HESSschen Nachbild zu beobachten. Dabei nahm mit fortschreitender Nachbildzahl deren Bildhelligkeit ab und das Intervall zwischen je 2 Bildern wurde größer [214]. Ein 6- oder 7-maliges Erscheinen hatte zuvor bereits BIDWELL unter günstigen Versuchsbedingungen wahrgenommen, wenn er ein Objekt mittels einer einmaligen elektrischen Entladung beleuchtete [215]. McDOUGALL weist auch darauf hin, dass die häufige Wiederkehr, also die „Folge der Serie von Empfindungen“ (series of pulses of sensation), dann nicht zu beobachten war, wenn die Stimulation länger dauerte [214]. Nach McDOUGALL waren die farbigen Pulse nicht durch bestimmte dunkle Intervalle getrennt, sondern ein neuer „Puls“ begann bevor der vorangegangene vollkommen verschwunden war, sodass eine Art grobes Flimmern entstand.

Bei seinen relativ detaillierten Untersuchungen wandte McDOUGALL sowohl die Ruhe- als auch die Bewegungsmethode an und verglich die entstehenden Nachbildphasen miteinander. Es ist aus heutiger Sicht aber nicht zu übersehen, dass viele spätere Autoren der Arbeit McDOUGALLs nicht so ganz gerecht wurden, was möglicherweise auch teilweise darauf zurückzuführen ist, dass nicht alle Autoren, die sich mit Nachbildern befassten, die englische Originalliteratur kannten oder eventuell auch nicht in der erforderlichen Tiefe gelesen hatten.

Bei der Ruhemethode wirkt eine ruhende Lichtquelle auf das Auge ein, wodurch sich die Schwierigkeit ergibt, die schnell aufeinander folgenden Phasen der Empfindung und Wahrnehmung richtig und vollständig zu erfassen bzw. deren jeweilige zeitliche Zuordnung zweifelsfrei zu bestimmen.

Dagegen ist es bei der Bewegungsmethode von Vorteil, dass die verschiedenen Nachbildphasen örtlich nebeneinander zu liegen kommen, und zwar praktisch gleichzeitig, wobei allerdings zur Betrachtung der einzelnen von einer bewegten Lichtquelle entworfenen Bilder durch die betreffende Person auch eine gewisse Zeit vergeht, da diese nicht gleichzeitig alle Erscheinungen wahrnehmen kann. Insbesondere die kurz dauernden ersten Nachbildphasen lassen sich aber mit dieser Methode recht gut bestimmen. Die Geschwindigkeiten der bewegten Lichtquelle, mit denen die verschiedenen Forscher ihre Versuche durchführten, lagen zwischen denjenigen von FRÖHLICH mit 5 cm/s bis 15 cm/s und ca. 31 cm/s bis 370 cm/s bei McDOUGALL. Dabei gab McDOUGALL bei hoher Geschwindigkeit bis zu 18 durch dunkle Streifen voneinander getrennte helle Bänder an, wobei in bemerkenswerter Weise die Zahl der Pulsationen mit der Geschwindigkeit der bewegten Lichtquelle anwuchs. Zu beachten ist allerdings, dass bei „bewegtem Licht“ dann, wenn die Dauer der Einwirkung lang genug ist, verschiedene Nachbildphasen aufeinander fallen können, nämlich dann, wenn auf den Eindruck einer noch nicht abgeschlossene Phase eine neue fällt. In diesem Fall unterscheiden sich dann beide Methoden, also die Ruhe- und die Bewegungsmethode, nicht wesentlich voneinander.

Auch in Bezug auf die im Auge auftretende Streuung sind beide Methoden unterschiedlich betroffen. So trifft das Streulicht bei der Ruhemethode auf die Umgebung des von der Lichtquelle auf der Netzhaut exponierten Bereiches und wirkt der von dieser Expositionsstelle ausgehenden Kontrastwirkung entgegen. Anders ist es bei der Bewegungsmethode, wo das Streulicht die Umgebung des sich bewegenden Lichtflecks, den die Lichtquelle auf der Netzhaut erzeugt, aufhellt, sodass die verschiedenen Nachbildphasen und -bilder mit dem Streulicht gewissermaßen vermischt werden und daher nicht ganz rein auftreten.

Eine besondere Stellung scheint die Farbe Rot bei Nachbildern einzunehmen, und zwar wurde mehrfach betont, dass sich weder das HERINGSsche noch das PURKINJEsche Nachbild leicht erzeugen ließen. FRÖHLICH [108] konnte bei seinen Versuchen stets nur das HESSsche Nachbild, nicht aber die anderen wahrnehmen, wenn er mit rotem Licht arbeitete. Einzig HAMAKER [95] stand mit seiner Aussage im Wesentlichen alleine, da bei ihm das PURKINJEsche Nachbild die komplementäre Färbung am meisten im Falle der Benutzung roten Lichtes zeigte. In diesem Zusammenhang ist es interessant festzuhalten, dass bereits v. HELMHOLTZ [219] bemerkt hat, dass die nach momentaner Stimulation mit weißem Licht eintretenden „Erscheinungen farbigen Abklingens gleichfalls zu der Annahme führen, dass die Abnahme der nachbleibenden Reizung im Anfang für Rot die schnellste ist“.

HESS [222] stellt fest, dass sich die fovealen Netzhautpartien langsamer und unvollständiger adaptieren als die Umgebung und dass es daher aus seiner Sicht denkbar erscheint, dass sich dies unter besonderen Umständen, so etwa bei sehr geringen Intensitäten des Reizlichtes, auch eventuell im Nachbild bemerkbar machen könne. Ein komplementäres Nachbild hat er bei Rot wohl auch nicht gesehen [225].

Bleibt noch die Frage nach der Ursache für das Auftreten dunkler Intervalle. Hierzu vertritt MÜLLER [206] die Meinung, „dass bei momentaner Exposition eines farbigen Umfeldes das erste dunkle Intervall mit einem Vorhandensein der Kontrastfarbe im

Infeld gleichzeitig sein muss“, denn dunkles Intervall und Kontrastfarbe beruhen nach MÜLLER beide auf den kontrastiven Induktionen, und zwar auf Selbstinduktion.

In neueren Untersuchungen beobachteten TAYA und OHINATA [339] sogar ein 5. helles Bild, und zwar dann, wenn sowohl das HERINGsche als auch das PURKIN-JEsche Bild auftraten. Angewandt worden war dabei die Bewegungsmethode, wobei ein Schlitz mit einer Leuchtdichte von 166 cd/m^2 (maximal: 500 cd/m^2) mit einer Geschwindigkeit zwischen 5 cm/s und 20 cm/s bewegt wurde. Die Versuchsteilnehmer waren hell-adaptiert. Die Ursache für die dabei auftretenden Helligkeits-Oszillationen wiesen TAYA und OHINATA dem magnozellulären System zu, wobei sie einen Beweis auch darin sahen, dass die Erscheinungen bei dominanter größerer Wellenlänge von 640 nm nicht auftraten, wo auch das magnozelluläre System wenig antwortet. Keine Oszillationen traten auch bei „Konditionierung“ mit einem hellen Schlitz auf, was aufgrund der Sättigungseigenschaften des magnozellulären Systems bereits bei niedrigen Pegeln ebenfalls für dessen überwiegende Beteiligung spricht.

Bereits die prinzipielle Verschiedenheit der angewandten Methoden bringt es mit sich, dass nicht alle Phasen in einem Versuch beobachtet werden können, da wenigstens zum Teil gerade bestimmte Parametereinstellungen notwendige Voraussetzungen für die besondere „Betonung“ einer bestimmten Phase sind. So können z. B. Reizbedingungen für die frühen Phasen optimal sein, während sie dann nicht optimal für die späten Phasen sind. Hierzu wurden auch neurologische „Entsprechungen“ diskutiert [339].

Es bleibt an dieser Stelle festzustellen, dass es in der frühen Zeit der Befassung mit Nachbilderscheinungen, sei es mit der Bewegungs- oder mit der Ruhemethode, sicherlich widersprüchliche Aussagen gab und sogar aus heutiger Sicht nicht zutreffende Angaben gemacht wurden. Dabei liegen die Gründe für offensichtlich im Gegensatz zueinander stehender Aussagen vielfach darin, dass zu unterschiedliche Versuchsbedingungen herrschten und vielfach die Methoden auch nicht unmittelbar miteinander vergleichbar waren. Da sich diese historischen Darstellungen hinsichtlich der optischen Parameter, wegen fehlender oder nur sehr ungenauer Angaben, nicht reproduzieren lassen, besteht zuviel Spielraum für Spekulationen und Annahmen, aus denen aber keine quantitativen Schlüsse gezogen werden können. Nichtsdestotrotz wird beim Studium der Nachbildforschungsergebnisse doch eine erstaunlich große Bandbreite sichtbar, die Anregungen zu gezielten Teiluntersuchungen geben kann.

Auch im Hinblick auf das zeitliche Geschehen des Nachbildverlaufs sind diese Aussagen und Feststellungen übertragbar, denn auch dabei wurde nicht selten übersehen, dass methodisch bedingt manchmal andere Abfolgen „sichtbar“ werden mussten, dies aber nicht immer in systematischer Art und Weise erkannt wurde.

Die Tatsache, dass sowohl der Zeitpunkt als auch die Zuordnung einer bestimmten Phase nicht für alle Expositionsbedingungen gleich ist und dass sogar einmal ein komplementäres, unter anderen Bedingungen aber eine gleichfarbiges Bild wahrgenommen wird und dabei auch noch der Adaptationszustand eine Rolle spielen kann, wurde verschiedentlich festgestellt (z. B. [96, 107, 332, 339]).

2.7.3 Zeitlicher Nachbildverlauf

Nachbilder beeinflussen unseren Alltag – beruflich und privat – nicht allzu wesentlich und haben daher bisher eigentlich nur in der Wissenschaft eine gewisse Bedeutung erlangt. Es handelt sich bei Nachbildern um komplexe Wahrnehmungen, die variieren können, in

- Farbe
- Helligkeit
- Sättigung
- Form
- Profil
- Textur
- Latenz
- Dauer
- Ablauffolge.

Obwohl bereits NEWTON schon erste Aussagen zur Dauer eines Nachbildes machte, indem er schrieb „... and do not the motions once excited continue about a second of time before they cease?“ (Newton, I.: *Opticks* (1704, 1706, 1717, final edition 1730, reprinted by Dover Publications (N.Y.C.), 1952 oder *A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light* (London: Smith and Walford)), so hat sich vermutlich SEGNER als Erster mit einer genaueren Bestimmung der Dauer von Nachbildern befasst (zit. in [230]) und gab dazu 1/3 Sekunde an. D’Arcy [231], der genau wie SEGNER eine glühende Kohle als leuchtenden Gegenstand benutzt hatte, wie es anfangs häufig üblich war, ermittelte 0,13 Sekunden als Dauer des Nachbildes. PLATEAU (zit. in [230] Plateau, J.: *Sur une loi de la persistance des impressions dans l’oeil* ; 1878) ermittelt aus umfangreichen eigenen Untersuchungen und anderer Versuchspersonen die Dauer des Nachbildes („temps de constance apparente“) und kommt unter anderem zu dem Ergebnis, dass die Beleuchtungsstärke auf diesen Zeitraum nur unbedeutenden Einfluss hat. Dabei stellt er aber auch fest, dass die Dauer des Nachbildes durchaus von den Versuchsbedingungen und von der betroffenen Person abhängen kann.

CHARPENTIER (zit. in [230] *Recherches sur la persistance des impressions rétiniennees et sur les excitations lumineuses de courte durée*; *Archives d’ophtalmologie* X) fand, dass die Farbe auf die Dauer des Bestehens eines Nachbildes keinen Einfluss hatte, wohl aber dass die „Zeit des ungeschwächten Fortbestehens“ im umgekehrten Verhältnis steht zur Quadratwurzel der Lichtstärke und sich ebenso verhält zur Einwirkungsdauer. Genauer gesagt fand CHARPENTIER, dass die Zeitdauer nicht von der absoluten Lichtstärke abhängig war, sondern von der relativen, also von der Adaptation der Netzhaut, sodass sich insgesamt ein Zeitbereich zwischen 0,01 s und 0,3 s ergab.

HESS beschrieb die Nachbildwahrnehmung nach einem kurzdauernden Lichtreiz wie folgt: „Wirkt auf das Sehorgan ein kurzdauernder Lichtreiz ein, so wird durch densel-

ben zunächst eine Lichtempfindung hervorgerufen, welche nach dem Aufhören des Reizes in fast unmessbar kurzer Zeit abklingt. Nach diesem primären Lichteindrucke wird bei günstigen Versuchsbedingungen ein negatives Nachbild wahrgenommen, dessen Dauer durchschnittlich etwas weniger als $\frac{1}{3}$ Sekunde beträgt“ [251]. Weiter schreibt HESS [251] „Auf dieses negative Nachbild folgt dann rasch ein positives Nachbild, dessen Dauer von der Stärke des primären Reizes und dem jeweiligen Zustande des Auges abhängt, und welches in der Regel durch mehrere Secunden in allmählich abnehmender Stärke wahrgenommen werden kann. Nicht selten nimmt man nach diesem positiven noch ein zweites negatives Nachbild wahr.“

Weiter korrigiert HESS [251] die Aussagen von v. HELMHOLTZ und FICK dahingehend, dass das was diesen Forschern „als das Abklingen der durch den Lichtreiz gesetzten Erregung beschrieben worden ist, in Wirklichkeit nicht diesem, sondern dem Abklingen des positiven Nachbildes entspricht“. Er sieht das positive Nachbild nicht einfach als Fortdauer und das allmähliche Abklingen der durch den Lichtreiz im Auge hervorgerufenen Erregung, da es regelmäßig von dieser durch eine negative Phase getrennt ist.

HELMHOLTZ macht über das Abklingen der Erregungen, die durch einen kurzdauernden Lichteindruck hervorgerufen werden, u. a. die folgenden Angaben: „Man kann auch von sehr mässig erleuchteten Gegenständen, z. B. von weissem Papier, welches die zu Lesen und Schreiben bequeme Helligkeit hat, nach der beschriebenen Methode“, d. h. durch rasches Auf- und Zudecken der auf den Gegenstand gerichteten Augen, „noch positive Nachbilder gewinnen, die eine erkennbare Dauer von etwa 2 Secunden haben.“ Außerdem stellte bereits HELMHOLTZ fest, dass „je größer die Intensität des primären Lichtes ist, desto heller ist das positive Nachbild und desto länger dauert es an.“(zitiert in [251]).

Bei einem Vergleich bzw. bei einer Bewertung der jeweiligen Aussagen darf man nicht übersehen, dass HESS seine Untersuchungen mit „kurzdauerndem Licht“ durchgeführt hat, während in vielen anderen Untersuchungen aus dieser Zeit die Netzhaut 24- bis 30-mal in der Sekunde getroffen wurde und daher nach HESS „jeder Lichtreiz die betroffenen Netzhautstellen durch die vorhergegangenen Reizungen mehr oder minder verändert vorfindet“ [251].

Insofern sind auch die unterschiedlichen Zeiten, die vom Eintritt des primären Bildes bis zur Erscheinung des positiven Nachbildes vergingen, verschieden. HESS bezifferte diese Zeitdauer mit etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ Sekunde [251].

Missverständnisse gab es damals auch zwischen BOSSCHA und HESS im Hinblick auf die Bezeichnungen der einzelnen Phasen. So schreibt HESS, dass er „nur die der negativen Phase nachfolgende positive Phase als positives Nachbild bezeichnet, nicht aber auch das rasch abklingende primäre Bild, wenn es gleich länger dauert, als das einwirkende objective Licht, und insofern auch in gewissem Sinne ein positives Nachbild ist“ [251]. „Wollte man es so bezeichnen, so müsste man es als erstes positives Nachbild von dem viel länger dauernden zweiten unterscheiden, welches letzteres v. HELMHOLTZ, FICK u. a. beschrieben haben. Dies hielt HESS aber nicht für zweckmäßig.“

Bei kurz dunkel adaptiertem Auge liefen nach HESS die Phasen 1 bis 3 während der ersten Viertel bis halben Sekunde ab, während sich etwa am Ende der ersten Sekunde die Phase 5 entwickelte, um dann etwa 4 bis 5 Sekunden sichtbar zu bleiben. Nach seiner Beobachtung wurde schließlich in der 9. bis 12. Sekunde die 6. Phase mehr oder weniger sichtbar [235].

Die Nachbilderscheinungen nach kurzdauernder Reizung des Auges sah HESS [225] insbesondere auch als Ergebnis einer Wechselwirkung der somatischen, d. h. der körpereigenen Sehfeldstellen aufeinander, und zwar ganz im Sinne von HERING, an. Dabei wies er darauf hin, dass wiederholt versucht worden sei, die dabei entstehenden Nachbilder mit der PARINAUDSchen Lehre von der aus Stäbchen und Zapfen bestehenden sogenannten Doppelnetzhaute in Verbindung zu bringen und insbesondere das PURKINJEsche Nachbild aus einer verspäteten Erregung der Stäbchen zu erklären. Die aus der Sicht von HESS irrigen Annahmen gingen davon aus, dass das fragliche Nachbild im stäbchenfreien Bereich der Netzhaut fehle, nur im hell- bzw. kurz dunkeladaptierten Auge wahrnehmbar sei, während es im lange dunkeladaptierten fehle und ebenso bei rotem Reizlicht. BOSSCHA [230] sah insbesondere in der Entdeckung, dass die ursprüngliche Empfindung von einem komplementären und diese von einem gleichnamigen Nachbild gefolgt wird, das besondere Verdienst von HESS. Zwar kannten bereits PURKINJE und AUBERT das komplementäre Nachbild, HESS hat es aber als Erster als einen konstanten Vorgang nach momentanem Lichteindruck beschrieben.

HESS [225] konnte außerdem zeigen, dass das PURKINJEsche Nachbild bei richtiger Versuchsanordnung auch foveal leicht wahrnehmbar ist und dass es sich auch nach langdauernder Dunkeladaptation in ähnlicher oder gleicher Weise wie im hell- bzw. kurz dunkeladaptierten Auge zeigt. Dabei muss dann allerdings die gesteigerte Lichtempfindlichkeit des dunkeladaptierten Auges durch entsprechende Verminderung der Lichtstärke des Reizlichtes berücksichtigt werden. Darüber hinaus war das Nachbild auch bei rotem Licht für HESS leicht wahrnehmbar, d. h. er sah es bei genügend gesättigtem Rot wie bei den meisten anderen farbigen Lichtern nicht gegenfarbig, sondern dem Reizlicht gleichfarbig, also ebenfalls rot. Dabei kommt der Sättigung, die HESS als Freiheit bezeichnet, eine recht große Rolle zu. Darüber hinaus sah HESS [217] eine gewisse räumliche Trennung des das PURKINJEsche Phänomen bedingenden farblosen Anteils von dem farbigen als erwiesen an.

BOSSCHA [230] fand heraus, dass die Deutlichkeit des Vorganges mit zunehmender Beleuchtungsdauer abnimmt und dass dies an einer Veränderung in der Dauer des komplementären Nachbildes liegt, das umso länger anhält, je kürzer der Reiz einwirkt. Auch die früheren Untersucher wie PLATEAU und CHARPENTIER fanden die Zeit des Fortbestehens umso länger, je kürzer die Beleuchtung dauerte.

Einfache Nachbilder können klassifiziert werden als positiv oder negativ, und zwar aufgrund ihres Verhältnisses in der Helligkeit, welches sie in Bezug auf den ursprünglichen und damit verursachenden Reiz und dessen Umgebung haben [106].

Üblicherweise wird von negativen Nachbildern berichtet. Dabei wird von einer Verzögerung von 50 ms berichtet und von einer Dauer bis zu einigen Minuten. Die Erscheinung des Nachbildes hängt auch von der Hintergrundbeleuchtung ab. So fand

BROWN, dass das Nachbild bei geeigneter Hintergrundbeleuchtung neutral erscheint [107]. Bei ausreichend starker Stimulationsamplitude und -dauer entstehen mehrere Nachbildphasen [106, 107].

Bei der physiologischen Betrachtung der Hell- und Dunkelwahrnehmung wird meist davon ausgegangen, dass es zwei reziprok arbeitende antagonistische Neuronsysteme gibt, nämlich ein lichtaktiviertes Hellsystem der sogenannten on-Zentrum-Neuronen, die das B-System (B entsprechend „brighthness“) bilden, und ein lichtgehemmtes Dunkelsystem der sogenannten off-Zentrum-Neuronen, die das D-System (D entsprechend „darkness“) bilden [114, S. 28 ff].

Die jeweilige Aktivität der Neuronen in diesen beiden reziproken Systemen wird auch deutlich bei den Erscheinungen von Nachbildphasen, wobei ein Überwiegen des B-Systems einer Hellempfindung und ein Überwiegen des D-Systems einer Dunkelempfindung gleich kommt.

Die frühen kurzen Nachbilder (Abb. 2.7) und die im zeitlichen Verlauf auftretenden Dunkelintervalle in der ersten Sekunde nach einer Lichtreizung kommen durch periodisch alternierende B- und D-System-Aktivierung und -Hemmung zustande. Dieser Zeitabschnitt wird beim subjektiven Sehen auch als Sukzessivkontrast bezeichnet und tritt nur nach einem kurzen Lichtreiz im Dunkeln auf.

Einen zeitlichen Verlauf, der mehr das Anklingen und Abfallen der Erregung in den einzelnen Phasen berücksichtigt, als dies in Abb. 2.7 geschehen ist, mit der lediglich ein schematischer Überblick gegeben werden sollte, findet sich bei HESS [217, 235], auf den sich auch DITTLER und EISENMEIER in ihrer Darstellung beziehen [93].

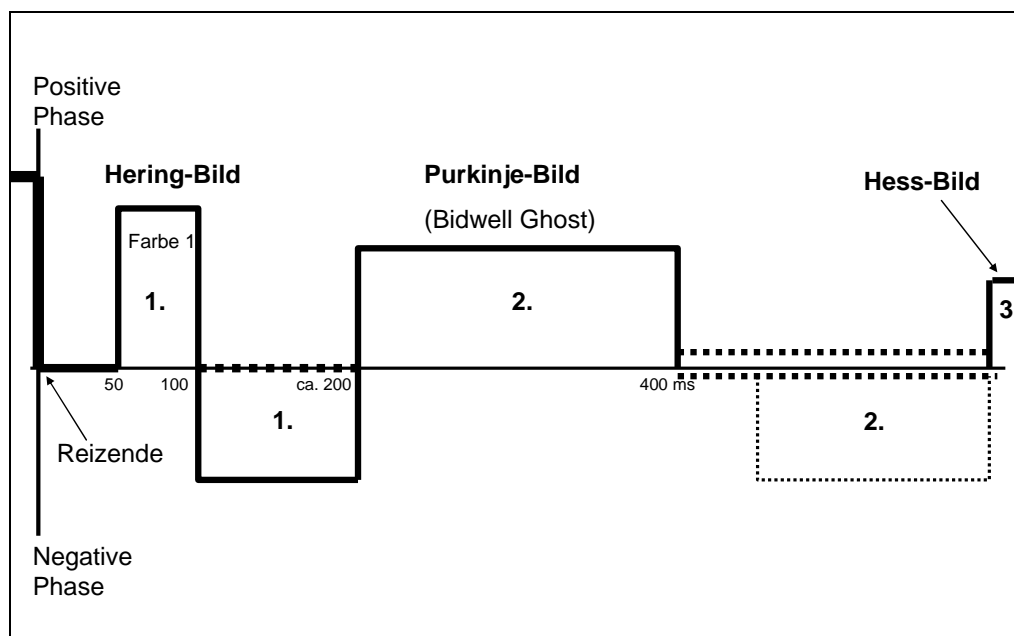


Abb. 2.7 Schematische Darstellung der Nachbildphasen 1 bis 3

Die Erscheinungen des zeitlichen Verlaufes der Nachbildphasen kann man sich auch rasch selbst demonstrieren, indem man in einem Dunkelzimmer durch Fixieren einer Lichtquelle ein positives Nachbild, d. h. ein helles auf dunklem Grund, erzeugt, das

dann erscheint, wenn man die geschlossenen Augen nach einer im passenden Abstand befindlichen Lichtquelle richtet. Schiebt man dann die Hände vor die Augen bzw. zieht man sie zurück, dann kann man dadurch fast plötzlich die Lichtstärke des Gesamtfeldes gleichmäßig erniedrigen bzw. erhöhen. Hat man dabei die Lichtstärke zu weit erhöht, dann schlägt das positive Nachbild in ein negatives um. Besonders bemerkenswert ist dabei, dass im nächsten Augenblick nachdem man die Hände vor den Augen weggezogen hat, das Nachbild für einen kurzen Moment sehr dunkel, d. h. negativ, also dunkel auf hellerem Grund, erscheint. Diese Vorgänge lassen sich daher mit den oszillatorischen nach Momentbelichtung mit stationärem Reizlicht vergleichen.

Fast noch schöner ist eine solche rasch vorübergehende negative Nachbildphase wenn man einen flüchtigen Blick auf die Sonne wirft. Dies hat dann noch den Vorzug, dass ein kräftiges Nachbild entsteht, das insgesamt minutenlang bestehen bleibt und sich daher viel besser beobachten lässt.

So wie es bei Hell-Dunkel-Verhältnissen das B- und D-System gibt, so sind bezüglich der verschiedenen Farben (z. B. bei Rot, Gelb oder Blau) Zellen vorhanden, die entweder auf eine Reizung mit einer Depolarisation oder mit einer Hyperpolarisation antworten, also nach dem sogenannten Gegenfarbenprinzip. Zu diesen Zellen gehören die Horizontalzellen, die als erste Neuronenschicht auf die Sehzellen folgen. Dieses Prinzip wird auch in den Ganglienzellen gefunden, d. h. es kann bei der Weiterverarbeitung der zufolge der Intensität der Reizung graduierten Zellsignale je nach „Lichtfarbe“ zu einer Erregung mit einer Erhöhung der Spikefrequenz oder einer Hemmung mit Verminderung der Spikefrequenz kommen, in der sich letztlich die Information befindet.

Die Folge der frühen Nachbilder und deren Ausprägung werden sowohl von der „Intensität“ als auch von der Dauer des auslösenden Lichtreizes bestimmt. Sie werden eigentlich nur als kurzes „Nachblitzen“ im Dunkeln wahrgenommen.

Späte langandauernde Nachbilder erscheinen nach starken Lichtreizen erst nach Abklingen der frühen Nachbilder und können dann über viele Minuten anhalten (vgl. Abb. 2.8). PURKINJE [116] hat sie als „Blendungsbilder“ bezeichnet.

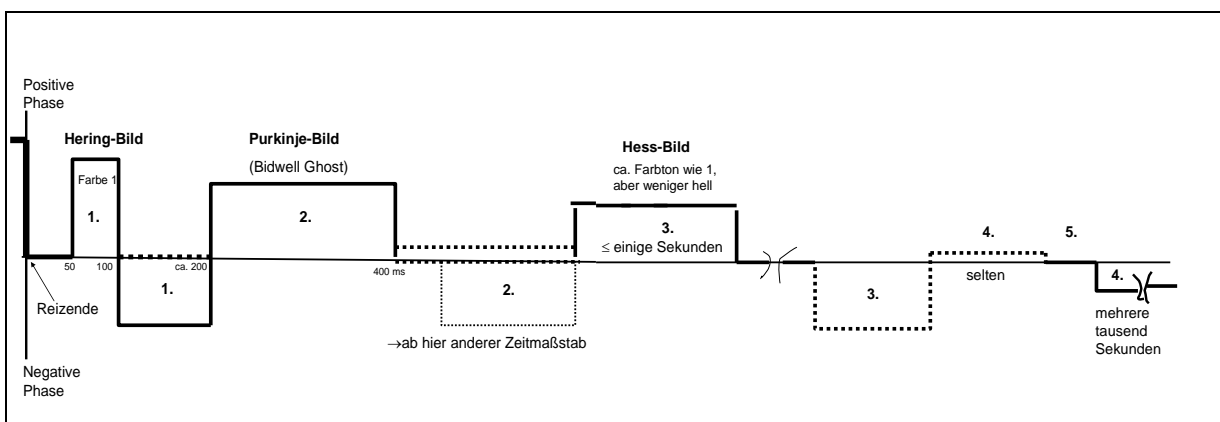


Abb. 2.8 Alle Nachbildphasen

2.7.4 Charakteristika, Abhängigkeiten und Farbenverlauf von Nachbildern

Eine Lichtexposition erzeugt bekanntlich ein Nachbild und die betroffene Person stellt dabei fest, dass sich die wahrgenommenen Farben des Nachbildes im Laufe der Zeit verändern. Da die Exposition der Netzhaut dort einen relativ komplizierten Bleichvorgang auslöst, wobei die Pigmente photo-isomerisiert werden, also z. B. aus dem cis-Retinal ein trans-Retinal wird, müsste andererseits aus der jeweils wahrgenommenen Farbe und deren Veränderungen etwas über den Regenerationszustand und die Rate der verschiedenen Farbstoffe ausgesagt werden können. Zum Beispiel regeneriert sich Chlorolabe, der Farbstoff, der bei mittleren Wellenlängen des sichtbaren Spektrums am empfindlichsten ist, schneller als Erythrolabe, das sich in den langwellig empfindlichsten Zapfen befindet [322]. Da die von einer monochromatischen Lichtquelle mit einer dominanten Wellenlänge bei etwa 500 nm ausgesandten Photonen vorwiegend mehr Chlorolabe, was soviel wie „grün-nehmend“ (green-taking [322]) bedeutet, bleichen als Erythrolabe, wird das Nachbild anfangs rot aussehen. Auf diese Weise besteht eine recht einfache Beschreibungsmöglichkeit für das Auftreten eines komplementären Nachbildes. Wenn, wie in diesem Fall, das Rot zunehmend verschwindet, kann man davon ausgehen, dass Chlorolabe wieder in den Sehzellen vorhanden ist.

Diese Darstellung ist aber aufgrund später gemachter Angaben von RUSHTON, wonach die Regenerationsrate von Chlorolabe und Erythrolabe gleich sind [345], nicht mehr so einfach aufrecht zu halten. Außerdem tritt ein komplementäres Nachbild, wie bereits ausführlich beschrieben, nicht in allen Fällen auf und daher bedarf der farbige Verlauf eines Nachbildes generell einer genaueren Betrachtung.

Einem ersten Ziel der Untersuchungen von Nachbildern gilt die Ermittlung der Charakteristika, Abhängigkeiten und des Farbenverlaufs der jeweiligen Nachbilder.

Die Charakteristika der Phasen und Intervalle sind:

- Zeitpunkt des Auftretens
- Dauer
- Intensität
- Qualität.

Sie hängen von folgenden Versuchsbedingungen ab:

- Expositionsdauer
- Intensität der Stimulation
- spektrale Verteilung
- Umgebung des Stimulus
- Ort der Stimulation auf der Netzhaut

- Eigenschaften des Feldes auf das die Nachbild-Folge „projiziert“ wird
- Adaptationsbedingung und -zustand der Testperson
- Kompetenz der Testperson.

Es ist eine bekannte Tatsache, dass die relativen Helligkeiten einer Lichtquelle bei unterschiedlichen Adaptationsbedingungen verschieden sind. So erscheint dem helladaptierten Auge Licht z. B. mäßig hell und dem dunkeladaptierten dagegen in großer Helligkeit. Dies kann aber auch bedeuten, dass dann wenn die Bedingungen für eine besonders gute Sichtbarkeit der gegenfarbigen Nachbildphase für das eine Auge günstig sind, sie z. B. für das andere Auge recht ungünstig sein können [234].

HESS [222] fand bezüglich der Phasenfolge der Nachbilder selbst nach mehrstündiger Dunkeladaptation keine anderen als für das hell- oder schwach dunkeladaptierte Auge. So lässt sich z. B. zeigen, dass selbst mit einer glimmenden Zigarette sämtliche Phasen selbst nach sechsstündiger Dunkeladaptation nicht weniger deutlich zu sehen sind, wie nach einer nur relativ kurzen Adaptationszeit.

Eine Adaptation ändert nicht die Erscheinung eines Nachbildes, kann aber zu einer Entsättigung des wahrgenommenen Farbtones führen, und zwar in erster Linie wegen der gesteigerten Weißempfindlichkeit des dunkeladaptierten Auges.

Die Dunkeladaptation des Auges wirkt sich so aus, dass es zu einer Entsättigung des PURKINJE-Nachbildes kommt, wenn die Stimulusstärke entsprechend angepasst wird. Ansonsten kann man eine Dunkeladaptation in der Wirkung derjenigen einer Intensitätssteigerung der Stimulation gleichsetzen. Dem dunkel adaptierten Auge kommt ein Reizlicht erstens wesentlich heller vor und zweitens meistens auch etwas weißlicher, also ungesättigter [93]. Aufgrund dessen ist das erste positive Nachbild auch heller und meist weißlicher als bei helladaptiertem Auge.

Außerdem nimmt dieser Effekt in den ersten 10 Minuten nur wenig, danach aber sehr viel stärker zu [96].

Nur auf den zeitlichen Ablauf der einzelnen Phasen als solchen hat die Adaptation einen Einfluss, und zwar in dem Sinne, dass die Vorgänge im Auge bei gleich bleibender Intensität des Reizlichtes mit zunehmender Dunkeladaptation mehr und mehr beschleunigt werden [93].

Es ist bekannt, dass dann wenn ein sehr intensives langwelliges Licht ständig betrachtet wird, dessen Farbton sich von rot über gelb nach grün verändert [229]. PURDY [228] fand darüber hinaus, dass sowohl rote als auch gelb-grüne Stimulationen bei höherer Intensität gelber erschienen als bei geringerer.

CORNSWEET et al. [229] stellten im Gegensatz zu PURDY allerdings fest, dass sich auch ein intensiver gelber Stimulus in Grün verwandelte, während sich intensives grünes Licht nur entsättigte, aber nicht nach rot veränderte. Diese Entsättigung war auch bei Blau zu beobachten.

Für die beschriebenen Farbänderungen können photochemische Effekte verantwortlich gemacht werden, wenn man annimmt, dass wenigstens zwei Photopigmente, nämlich ein rotes und ein grünes in der Netzhaut vorhanden sind und wenn gleichzeitig davon ausgegangen wird, dass die Regenerationsrate des grünen Pigmentes geringfügig größer ist als diejenige des roten.

Die „Intensität“ weist einen Einfluss auf sowohl die Nachbildphasen selbst als auch auf deren zeitlichen Abstand auf [94]. Mit wachsender „Intensität“ trennt sich das PURKINJE-Nachbild zeitlich gesehen vom dritten positiven Nachbild (Hess-Bild) und das HERING-Nachbild vom Primärbild. Bei einer weiteren Intensitätssteigerung kann dann der Bereich zeitlich mehr oder weniger getrennter Nachbilder dahingehend verlassen werden, dass sich die Phasen einander nähern und schließlich wieder verschmelzen. Dabei verschiebt sich gleichzeitig das Empfinden mehr zu den auf das PURKINJE-Nachbild folgenden Phasen, die mehr wahrgenommen werden und deren Dauer zunimmt. HESS [225] bemerkte, dass bei zunehmender Lichtstärke das PURKINJE'sche Nachbild rasch zum Vorbilde, d. h. dem Primärbild, heranrückte und dann sogar indem es mit ihm verschmilzt, nicht mehr als gesonderte Phase sichtbar ist. Bei abnehmender Lichtstärke fiel ihm auf, dass dieses Nachbild ein wenig vom Vorbilde abrückte und dabei gleichzeitig sehr schwach und schließlich unsichtbar wurde. Bei passend herabgesetzter Lichtstärke stellte HESS [234] fest, dass die Phasen 3 und 5 nach seiner Nummerierung deutlich und durch ein leeres Intervall getrennt werden, ansonsten aber farblos gesehen werden. Wird dann die Lichtstärke noch weiter verringert, wird die Phase 4 allmählich weniger deutlich bzw. kann sogar ganz verschwinden, sodass die Phase 3 mehr oder weniger kontinuierlich, und zwar ohne deutlichen Zwischenraum, in Phase 5 übergeht. Man sieht dann nach Abklingen der primären Erregung einen der Phase 2 entsprechenden dunklen Zwischenraum, darauf eine längere helle Linie, deren Helligkeit nach hinten allmählich abnimmt [234].

Dies bedeutet aber auch, dass die von ihm als Phase III bezeichnete Nachbilderscheinung für jeden Adaptationszustand nur innerhalb eines verhältnismäßig kleinen Lichtstärkebereiches gut sichtbar ist.

So stellte HESS [225] fest, dass z. B. sein hell adaptiertes Auge bei sehr geringer Lichtstärke nichts von dem für das dunkeladaptierte Auge deutlich sichtbaren PURKINJE'schen Nachbild sah. Worauf er zu der Schlussfolgerung kam, dass man diesen Sachverhalt auch dahingehend umkehren könne, indem man die Sichtbarkeit der Phase III allein der Dunkeladaptation zuschreibt, und zwar sofern man diese Aussage auf relativ geringe Lichtstärken beschränkt. Die Lichtempfindlichkeit stellt also eine bedeutsame Größe bei der Wahrnehmung des Nachbildverlaufs dar.

Hart geht HESS [222] mit der Aussage von v. KRIES ins Gericht, der davon sprach, „dass das positive Nachbild in der Nähe des der Fovea entsprechenden Bezirkes, erlischt, d. h. dass es diesen Bezirk, überspringt' als ob es durch einen Tunnel schlüpfe“ [237]. Ein Fehlen des Nachbildes auf dem fovealen Bezirk konnte HESS überhaupt nicht feststellen, sondern er fand, dass der Erregungsvorgang dort nicht wesentlich anders verlief als auf dem extrafovealen. Er konnte auch in der Fovea ein positives Nachbild erzeugen, das bei Anwendung farbigen Lichtes schwach gleichartig gefärbt oder ganz farblos erschien. HESS unterstrich seine Aussage bezüglich der irrigen Annahme von v. KRIES dahingehend, dass sich für den Fall der Gültigkeit

andernfalls zeigen lassen müsse, dass sich bei einer Reizung durch ein rasch am Auge vorbeigeführtes farbiges Licht auf der nur Zapfen enthaltenden fovealen Strecke ein sehr starkes negatives Nachbild in gesättigter komplementärer Farbe zeigen müsse, die sich von einem deutlich schwach gefärbten extrafoveal erzeugten Nachbild abhebe. Es wäre also beim Fehlen der positiv-gegenfarbigen Phase in der Fovea zu erwarten, dass sich nach Abklingen der primären Erregung ein dunkler Fleck in der gegenfarbig erscheinenden Fläche zeigen müsste. Dies wurde aber nicht beobachtet. Das komplementär gefärbte Nachbild erscheint in der Fovea lediglich einen Moment später.

Nach Untersuchungen von FRÖHLICH erklärt sich das „Verschwinden“ des PURKINJESchen Nachbildes in der Fovea und in deren unmittelbarer Nähe dadurch, dass dort eine geringere Erregbarkeit im Vergleich zur Netzhautperipherie vorliegt und dass daher zur Wahrnehmung eines farbigen Nachbildes vergleichsweise höhere Lichtintensitäten erforderlich sind [100].

FRÖHLICH sieht in der geringeren „Ermüdbarkeit und der damit verbundenen raschen Erholbarkeit eine wesentliche Bedeutung der Fovea centralis für das Tagessehen“ [100]. Mit der Ermüdbarkeit ist hier eigentlich die Erregbarkeit gemeint.

Wohl schon HELMHOLTZ hat bemerkt, dass der Lichteindruck in den zentralen Stellen der Netzhaut einen Moment später zur Empfindung kommt als in der Peripherie (Helmholtz, *Physiol. Optik*, 2. Aufl. 1896, S. 568, zit. in [217]). Darüber hinaus fand er, dass der Lichteindruck dann, wenn das Auge „recht erholt und reizbar“ ist, im gelben Fleck länger anhält als in den übrigen Teilen der Netzhaut.

Auch DITTLER und EISENMEIER [93] konnten in ihren Untersuchungen kein einziges Mal ein foveales Aussetzen eines Nachbildes beobachten, wenn dieses in der Peripherie zu sehen war. Allerdings stellten auch sie fest, dass es im Hinblick auf die Geschwindigkeiten, mit denen die einzelnen Nachbildphasen abliefen, örtliche Unterschiede gab. So blieben die Erscheinungen im Netzhautzentrum jeweils etwas zeitlich zurück, da Prozesse in der Fovea centralis durchgehend beträchtlich langsamer ablaufen als im extrafovealen Bereich.

Nach Untersuchungen von HESS [234] zeigen auch Farbenblinde im Allgemeinen die Nachbilderscheinungen ganz genau so wie Normalsichtige, also Farbentüchtige, allerdings abgesehen von den Farben.

Nach HESS [225] wird die Farbe einer bunten Scheibe auf farblosem Grund bei zunehmend indirektem Sehen am weitesten peripherwärts wahrgenommen, wenn der Grund die gleiche Helligkeit hat wie die Farbe.

Von HESS wurde auch der Frage nachgegangen, ob auch bei länger dauernder Belichtung mit unbewegtem Reizlicht phasisch verlaufende Erscheinungen wahrgenommen werden können. Dazu fand er [225], dass bei konstanter Reizung einer bis dahin ‚ausgeruhten‘ Netzhautstelle, die Erregung nicht in der bis dahin allgemein angenommenen Weise kontinuierlich ansteigt, sondern sich oszillatorisch entwickelt, und zwar so, dass zunächst eine positive (helle) Phase auftritt, der rasch eine negative (dunkle) folgt. Dieser von OSANN als Phase 2 bezeichnete Abschnitt wird nach sei-

ner Meinung mit zunehmender Lichtstärke des Reizlichtes kürzer, wobei es bei ausreichend starker Reizung dazu kommt, dass die Phase 2 wesentlich kürzer als die 1. Phase wird. OSANN [226] beschreibt, dass daran anschließend wieder eine positive Phase (Phase 3) von ca. 4- bis 6-mal längerer Dauer folgt, dann eine zweite dunkle Phase (Phase 4) und zuletzt eine angenähert gleichmäßig erscheinende Helligkeit der nachfolgenden Fläche (Phase 5). Dieser Verlauf wurde von OSANN auch grafisch dargestellt (s. Fig. 3 in [226]). Bei länger auf das Auge einwirkendem Reiz wurde von OSANN [226] eine etwas längere Phase 5 beobachtet.

Darüber hinaus fand HESS, „dass an einer dauernd durch ein Reizlicht von konstant bleibender Stärke erhellten Sehfeldstelle lediglich durch plötzliche Belichtungsänderung der Umgebung phasische, in deutlichen Verdunkelungen und Erhellungen zum Ausdruck kommenden Regungen ausgelöst werden“. Dies sah er zugleich als einen Beweis für die Irrigkeit der Annahmen der HELMHOLTZschen Schule an, da er auch ein Anhänger HERING's war.

Fast alle Beobachter in der Zeit vor und mit HESS stimmen in der Angabe überein, dass sich die die Lichtempfindung darstellende Kurve bei konstant bleibendem Reiz aus einem relativ kurzen ansteigenden und einem langen abfallenden Ast beschreiben lässt, wie dies bereits 1868 EXNER dargelegt hatte [233]. HESS fand, dass die Erregung bei geringerer Lichtstärke wesentlich langsamer „anklingt“ als bei höherer [217]. EXNER fand darüber hinaus auch einen Zusammenhang zwischen Intensität und Zeitdauer, und zwar gab er an, dass bei „geometrischer Progression der Reizungs-Intensitäten“ die „Zeiten zwischen Beginn der Reizung und ihrer höchsten Intensität in arithmetischer Progression abnehmen“.

Eine einfache Angabe bezüglich der zeitlichen Lage des Farbtones der jeweiligen Nachbildphasen lässt sich nicht machen, da beide Kenngrößen bereits durch die Intensität der Stimulation mehr oder weniger stark verändert werden.

In einigen Fällen wurde festgestellt, dass das PURKINJE-Nachbild einer Verschiebung des Helligkeitsmaximums zum kurzwelligen Teil des Spektrums entspricht. So ergibt sich aus einem grünen Stimulus ein violettes Nachbild. Dabei darf aber nicht der Fehler gemacht werden diese Verschiebung in Bezug auf die Nachbild-Farbe mit der Verschiebung der spektralen Hellempfindung des Auges beim Übergang vom photopischen zum skotopischen Sehen, also vom Zapfen- („Hellsehen“) zum Stäbchensehen („Dunkelsehen“), die als PURKINJE-Effekt bezeichnet wird, in Verbindung zu bringen bzw. gleich zu setzen.

Eine Effizienzsteigerung im Hinblick auf das Erscheinen des komplementären PURKINJE-Nachbildes, d. h. des PURKINJE-Nachbildes komplementär zur Primärfarbe (Farbe des Stimulus), für kurzwellige sichtbare Strahlung wurde sowohl von JUDD als auch von FRÖHLICH [96, 100] angegeben. Dabei wurde zugleich berichtet, dass der komplementäre Charakter immer mehr verloren geht, wenn der der jeweiligen Wellenlänge zugeordnete optimale Bereich intensitätsmäßig überschritten und am Ende nur noch den Farbton des Primärbildes aufweist.

Dabei ist die Unsicherheit in der Angabe insbesondere bei Grün als Stimulus am größten, da hier die violett-weiße Stufe sowohl diejenige der „etwas größeren

Leuchtdichte“, der „mittleren Leuchtdichte“ oder dem Beginn der „noch größeren Leuchtdichte“ entsprechen kann.

Hinsichtlich der Sättigung wurde durch einen stark-gesättigten roten Stimulus ein rotes PURKINJE-Nachbild erzielt, während ein gering gesättigter roter Stimulus ein dazu komplementäres PURKINJE-Nachbild ergab.

McDOUGALL sieht die komplementäre Farbe als einen Kontrasteffekt, und zwar indem es durch eine „Synchronisation“ von Stäbchen- und Zapfenreaktionen zu einer zeitlichen Überlagerung oder Mischung von Bändern kommt, wobei auch ein inhibitorischer Effekt dazu kommt [214]. Gleichzeitig weist er darauf hin, dass die komplementäre Farbe gerade dann besonders in Erscheinung tritt, wenn die Lichtquelle so hell ist, dass jede weitere Steigerung das Auftreten des sogenannten „Ghost“ verhindert.

Bei Anwendung ziemlich großer Lichtstärken, wie es HESS bezeichnete [225], und unter Benutzung sehr gesättigter roter Gläser konnte er die Phase III sehr deutlich wahrnehmen, allerdings nicht komplementär, sondern ebenfalls rot, und zwar in einem leicht bläulichen Farbton. Lediglich McDOUGALL bestätigte diese Darstellungen von HESS, während dies andere Forscher in dieser Zeit nicht so sahen.

HESS schlug auch vor, so wie man den Reizwert eines jeden farbigen Lichtes in eine farblose und in eine farbige Komponente zerlegen könne, so ließe sich bei kurz dauernder Belichtung der Netzhaut auch die nachfolgende Erscheinungsreihe in eine farblose und eine farbige Komponente zerlegt denken, die dabei nicht genau synchron verlaufen müssten [225], sondern in ihrem Ablauf mehr oder weniger verschoben sein können. Die Nachwirkungen der farbigen Komponente des Lichtreizes können dabei nach der Gegenfarbentheorie sowohl bezüglich der Stärke oder Deutlichkeit als auch betreffs der Dauer ihrer einzelnen Phasen innerhalb gewisser Grenzen unabhängig von jenen der farblosen Komponente ablaufen [234]. Daher könnte es dann auch vorkommen, dass sich z. B. eine negative Phase der farbigen Nachwirkung zum Teil mit einer positiven der farblosen Nachwirkung deckt. Auf diese Weise entstehen dann überhaupt erst die sogenannten positiv komplementär gefärbten Nachbilder.

Bei sehr gesättigten roten Lichtern ist das Verhältnis der beiden Komponenten insofern anders, da diese eine relativ große farbige Valenz besitzen. Dann kann bei dem entsprechenden Nachbild auch einmal eine positive Phase der farblosen Nachwirkung mit der positiven der farbigen zusammenfallen.

Im Allgemeinen erwartet man ein gleichfarbiges PURKINJEsches Nachbild immer dann, wenn im Vorbilde der farbige Empfindungsanteil gegenüber dem farblosen besonders stark hervortritt, also bei großer Sättigung („Freiheit“ nach HESS) der Vorbildfarbe. Eine geringe Sättigungsabnahme bei der Vorbildfarbe kann schon genügen, aus der gleichfarbigen eine gegenfarbige, also komplementäre Phase III zu machen. So kann dann aber auch bereits ein relativ kurzer Aufenthalt im Dunkeln z. B. dafür sorgen, dass ein zuvor bei Helladaptation blau erscheinendes PURKINJEsches Nachbild nach Stimulation mit blauem Licht als gelbes Nachbild wahrgenommen

wird, wobei das Vorbild dem helladaptierten Auge als gesättigt blau erscheint und dem dunkeladaptierten weniger gesättigt, und zwar mit Weiß verhüllt.

Die Zeitdauer der Stimulation spielt natürlich auch eine wichtige Rolle. So wächst insbesondere die Dauer der komplementären Nachbildphase mit steigender Expositionsdauer. Außerdem wurde von MUNK [101] beobachtet, dass diese Phase unmittelbar auf die Stimulation folgte, was er als Ermüdung deutete, während er im Kontrast die Variable bei einem kurzen Stimulus sah. Allerdings weist die komplementäre Phase eine solche graduelle Veränderung mit steigender Expositionsdauer auf, dass eine neue Variable nicht als gerechtfertigt angesehen wird [102].

JUDD fand in seinen Untersuchungen, dass das Produkt von Stimulations-Helligkeit und Expositionsdauer zwischen 0,02 s und 0,2 s eine Konstante ist, soweit es die Erzeugung des PURKINJE-Nachbildes betrifft [96]. Dies lässt darauf schließen, dass eine Sehzelle eine gewisse Menge an Lichtenergie absorbieren muss, damit sich ein PURKINJE-Nachbild ergibt. Gleichzeitig fand er aber auch, dass oberhalb von 0,2 s kein detailliertes PURKINJE-Nachbild feststellbar war. Dies wiederum kann daran liegen, dass zum einen die negative Phase (negatives Nachbild, 4. Phase) das PURKINJE-Nachbild bereits zeitlich gesehen überdeckt und zum anderen, dass die Helligkeit so blendend empfunden wurde und deshalb bereits das Primärbild keine Details zu erkennen gab und daher auch das PURKINJE-Nachbild solche nicht enthalten konnte.

FRÖHLICH stellte fest, dass sowohl die Helligkeit als auch die Dauer der einzelnen Nachbildphasen in gleicher Weise mit zunehmender Dauer der Belichtung zunimmt wie bei anwachsender Belichtungsintensität [100]. Er schränkt die Gültigkeit dieser Aussage aber dann doch für Zeiten von maximal 1 s bis 2 s ein. Wird dagegen noch länger beleuchtet, dann kommt es zu einer Verminderung in der Helligkeit der positiven Phasen, während die negativen deutlicher hervortreten.

Von Bedeutung sind auch die Farbe und die Helligkeit des Feldes auf dem das Nachbild betrachtet wird. Detaillierte Angaben hierzu finden sich an mehreren Stellen in der Literatur [103 – 107].

Auch wenn die einzelnen Angaben dabei nicht immer ganz übereinstimmen, so lässt sich doch aussagen, dass das Nachbild entweder heller oder dunkler als die Fläche, auf der man es betrachtet, empfunden wird, je nachdem, ob das betrachtete Objekt, d. h. die Blendlichtquelle heller oder dunkler ist, als das Feld, das dieses Objekt bzw. die Blendlichtquelle umgibt.

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Theorien zur Erklärung der Nachbildphasen und -farberscheinungen aufgestellt. Während BIDWELL [99] die Ursache in einer besonderen Violett-Empfindlichkeit der Netzhaut sah, in den „violettten Nervenfasern“ (violet nerve-fibres), ging FRÖHLICH [100, 108] von periodischen Reaktionen des Nervensystems aus und betrachtete die Nachbilder als deren periodische Empfindungsreflexionen.

JUDD ordnete die verschiedenen Leuchtdichtestufen unterschiedlichen Bereichen derart zu, dass er Stufe 1 (niedrige Leuchtdichte) als solche betrachtete, bei der die

Exposition unterhalb der Schwelle der Zapfen erfolgte und daher auch keine Farben wahrgenommen werden, während in Stufe 2 die Leuchtdichte groß genug ist, um die Zapfen zu erregen. Der Stufe 3 wies er dann den Bereich zu, in dem es zur Sättigung der Farbempfindlichkeit der Zapfen kommt, sodass die violett-weiße Charakteristik durch die Komplementärfarbe des primären Stimulus ersetzt wird, da die Zeit nicht ausreichend ist, um die farbempfindlichen Stoffe schnell genug zu ersetzen.

In seinen Erklärungen hat JUDD eine sogenannte Biolumineszenz-Hypothese aufgestellt, wonach von den Nervenfasern oder den die Sehzellen umgebenden Strukturen sekundäre, nicht-selektive optische Strahlung abgegeben wird, die wiederum von den Sehzellen empfangen wird und dabei entweder nur die Stäbchen erregt, also Grautöne erzeugt, oder in beiden Sehzellentypen zur weißlich-violetten Erscheinung führt oder letztlich, wenn nur die Zapfen betroffen sind, weil die Stäbchen bereits unempfindlich geworden sind, die Komplementärfarbe wahrgenommen wird.

Dabei wurde davon ausgegangen, dass diese Sekundärstrahlung etwa 0,2 s nach dem Beginn der Stimulation einsetzt und daher das PURKINJE-Nachbild bewirkt. Ein Beweis für diese Hypothese fehlt aber noch.

In gewisser Hinsicht stellt die JUDDsche Hypothese der Bio-Lumineszenz eine Anlehnung an Aussagen von FECHNER dar, in denen er nicht in Abrede stellen wollte, dass „im Auge auch unabhängig von äußeren Lichteinwirkungen eine Entwicklung von Licht oder von Lichtempfindungen stattfinden kann“ [105]. FECHNER sprach dabei von „formlosem Lichtstaub oder Lichtdunst“, mit dem das Auge auch in absoluter Dunkelheit „überzogen ist“ und zitierte dabei eine Aussage PURKINJE's, der davon sprach, dass „in der Dunkelheit ein Chaos von schwachem Lichte schwebt“. FECHNER nahm als Erklärung an, dass das Auge gewissermaßen selbst, „von Innen aus angeregt“ werden könne. Diese von Innen aus angeregte Lichtempfindung sah FECHNER nur durch den äußeren Eindruck erhöht oder vermindert an, je nachdem das „organische Vermögen dazu durch vorherige Ruhe oder stark objektive Nötigung gestärkt oder erschöpft ist“.

In der neueren Literatur wird vom „Eigengrau“ als einer retinalen Eigentätigkeit gesprochen, die das graue Empfinden beschreibt, das man bei geschlossenen Augen hat und das man nicht genau zwischen Schwarz und Weiß, sondern etwas mehr zum Schwarz hin wahrnimmt. Selbst in einem total dunklen Raum nimmt man dies nicht als tiefschwarz, sondern dunkel-grau wahr und gelegentlich auch leichte nebelartige Bewegungserscheinungen. Eine Erklärung findet dies darin, dass die Frequenz der unregelmäßigen Ruheentladung im sogenannten D-System ein wenig höher liegt als im B-System und dass außerdem ein labiles Gleichgewicht zwischen den beiden Systemen vorliegt, wobei tonische Entladungen festgestellt wurden [115].

PLATEAU hielt die Erklärung, wonach die Nachbildfarben das Ergebnis eines durch „den Empfang von Strahlen einer bestimmten Farbe weniger empfindlich gewordenen Bereiches sind und dadurch eine größere Empfindlichkeit für die Strahlen der komplementären Farben erlangen“ für „ganz unzulänglich“ [98]. Er nahm an, dass die „zufälligen Farben aus einem entgegen gesetzten Zustand, welchen die Netzhaut nach dem Aufhören der unmittelbaren Eindrücke freiwillig annimmt, entspringen und nicht bloß von einer verringerten Empfindlichkeit der Netzhaut herrühren“.

Darüber hinaus beschrieb er eine mehr oder weniger oszillatorische Bewegung, die die Netzhaut annimmt, sobald sie sich selbst überlassen ist und verglich diese mit einer plötzlich sich selbst überlassenen Feder.

PLATEAU fixierte dabei ein rotes Papier im vollen Tageslicht und beschrieb, was er beim anschließenden Blick an die weiße Zimmerdecke sah, nämlich dass er „alsdann ein grünes Bild, dem einige Zeit hernach ein rotes folgt, und zwar von geringerer Stärke und kürzerer Dauer, worauf dann eine grüne Farbe erscheint, welche kurze Zeit hernach abermals durch ein rotes Bild ersetzt wird, und so fort 3- bis 4-mal, wobei die entgegengesetzten Eindrücke immer schwächer und schwächer werden“ (zit. in [226]).

Weder FECHNER noch AUBERT konnten von dem positiven Bild etwas sehen, allerdings bestätigte AUBERT wenigstens die PLATEAUschen Oszillationen. Erst HERING hat das phasische Abklingen betont, während FECHNER und HELMHOLTZ den Angaben PLATEAUs entschieden entgegen getreten sind. HELMHOLTZ erklärte die negativen komplementären Nachbilder nicht durch „aktive Tätigkeiten der Netzhaut, sondern im Gegenteil als Verminderungen der schon vorher bestehenden inneren Lichtempfindung“ und darüber hinaus „den Wechsel zwischen positiven und negativen Bildern als abhängig von schwachen Änderungen in der Beleuchtung des Augengrundes“.

In diesem Zusammenhang benutzte PLATEAU [98] die Begriffe „negative Farben“ für „zufällige Farben“ und „positive Farben“ für „wirkliche Farben“ und sprach darüber hinaus von negativen Phasen, wobei er außer den zeitlich stattfindenden Vorgängen auch solche nach dem Raum beschrieb. Bei letzteren galt sein Interesse den Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich rings um den direkt erregten Teil Veränderungen zeigten, wobei er ebenfalls von Oszillationen sprach, wonach sich der positive Eindruck des direkt vom Licht erregten Raums über dessen Grenzen hinaus erstreckte und dass weiter nach außen ein negativer Eindruck entsteht.

Nach der Ansicht NEWTON's gab es zwischen dem Hellen und dem Dunkeln nur einen graduellen Unterschied, dagegen zwischen den Farben aber eine Qualitätsverschiedenheit [226].

Zu einer anderen Sichtweise kam man, wenn von der sogenannten „Undulationstheorie“ ausgegangen wurde. Danach bestanden die Lichteindrücke aus einer Reihenfolge von Pulsationen des Äthers, die auf die Nerven des Gesichtorgans, also des Auges, treffen, und dort nur eine mechanische Verschiedenheit, aber kein Qualitätsunterschied statt findet [226].

PLATEAU nahm also an, dass die Netzhaut nach einer farbigen Bestrahlung durch Oszillationen wieder in den Zustand der Ruhe zurückkehre und „dass sich während der Oszillationen dem Auge mehrere Farben zeigen“, die auf eine Abnahme der Undulationen des Lichtäthers zurück zu führen seien [226].

Die oszillatorischen Erscheinungen PLATEAUs sah FECHNER [105] zwar auch, er sah aber den Grund in willkürlichen oder unwillkürlichen Bewegungen der Augen bzw. der Augenlider; zumindest war es ihm nach eigenen Angaben gelungen, das

Blendungsbild unverrückt dadurch zu erhalten, dass er sein Auge dabei gewissermaßen durch eine Vielzahl von Versuchen trainiert hatte, fixiert zu bleiben.

HELMHOLTZ stand dagegen der Annahme oszillatorischer Vorgänge ablehnend gegenüber, da sie nicht in seine Dreifasertheorie passten, die selbst nur noch für die rund 7 Millionen Zapfen in Anspruch genommen wurde, nicht aber auch für die Stäbchen, denen seit dieser Zeit nur die Vermittlung farbloser Lichtempfindung zugedacht wurde. Es wurde insofern damals davon ausgegangen, dass bei momentaner Reizung des Auges die Stäbchen zwei zeitlich auseinander fallende Empfindungseffekte liefern, wobei der zweite, der selbst um ca. 1/4 bis 1/3 Sekunde gegenüber demjenigen der Zapfenerregung verzögert ist, für das Zustandekommen des positiven, gegenfarbigen Nachbildes (Phase 3 nach OSANN) verantwortlich ist [226]. Diese Phase 3 sollte nach HAMAKER bei Anwendung roten und grünen Lichtes foveal sehr dunkel erscheinen [226].

PLATEAU war wohl auch einer der ersten, der sich mit der „Stärke“ von Farben im Hinblick auf ihre Nachbildwirkung befasste. Er fand dabei die Reihenfolge (schwach) „blau → rot → gelb → weiß“ (stark), d. h. dass von weiß und gelb die dauerndsten Eindrücke hervorgebracht werden, während solche von rot und insbesondere blau bewirkte früher wieder verschwinden. Dabei stellte er allerdings fest, dass die Unterschiede selbst nicht allzu groß seien.

In seinen Versuchen fand PLATEAU hinsichtlich der Schnelligkeit, mit der der von verschiedenen Farben bewirkte Eindruck wieder verschwand, dass hier eine umgekehrte Reihenfolge zu derjenigen bezüglich der Stärke vorlag, dass nämlich der von weiß erzeugte Eindruck am schnellsten und derjenige von blau am langsamsten abnahm, die Reihenfolge also bezüglich der Schnelligkeit (langsam) „blau → rot → gelb → weiß“ (schnell) lautet.

Der von Weiß bewirkte ist also zugleich der stärkste und am schnellsten abnehmende, während blau gleichzeitig den geringsten, also auch den kürzesten, aber auch am langsamsten abnehmenden Eindruck vermittelt. Nicht im Widerspruch dazu steht die Feststellung, dass z. B. Blau gleichzeitig auch den kürzesten Eindruck hinterlässt. Letzteres ist eine Feststellung, die BUFFON bereits 1743 fand, als er sagte, dass „das bläuliche Bild, welches durch das gelb in seinem Auge hervor gebracht wurde, ihm schwieriger zu erlöschen scheine als das von Rot erzeugte grüne Bild und dass die zufällige Farbe, welche vom Blau entsteht, bei weitem nicht so lange anhalte als die beiden Vorhergenannten“ [109].

Das Nachbild kann üblicherweise durch 4 Bereiche gekennzeichnet werden: ein Zentrum, einen dünnen Ring um das Zentrum, eine weitere Kante und daran anschließend ein großes Feld, das sich in die Peripherie erstreckt [113]. Die Veränderungen der Farben des Nachbildes („flight of colors“) finden vorwiegend im Zentrum statt.

BERRY [199] untersuchte die von HELMHOLTZ als „farbiges Abklingen der Nachbilder“ bezeichnete Erscheinung des „flight of colors“ mit 8 Versuchspersonen und berichtete dabei ausführlich über die aufgetretenen Farben, wenn die Testpersonen der Strahlung einer 100-W-Wolframfadenlampe, also weißem Lichtes, ausgesetzt wor-

den waren. Dabei konnte er feststellen, dass es erhebliche individuelle Unterschiede in der Farbenwahrnehmung gab. Einige Versuchspersonen konnten bestimmte Farben überhaupt nicht feststellen, bei anderen ergaben sich andere zeitliche Abläufe. Die Unterschiede waren besonders ausgeprägt während der ersten Stufen der farbigen Nachbilder. Es kam auch vor, dass die Nachbilder manchmal zu Beginn positiv, ein anderes Mal zuerst negativ wahrgenommen wurden [199].

Bezüglich des Zentrums berichtete BERRY von einer Abnahme des Durchmessers hin zu einem schmalen farbigen Kreis, insbesondere dann, wenn das Nachbild vor einem dunklen Hintergrund oder gegen einen ungesättigten farbigen Hintergrund betrachtet wurde. In einigen Fällen wurde von den Testpersonen gerade in der letzten Phase ein intermittierendes Erscheinen des zentralen Nachbildes beobachtet, bevor es nicht mehr wahrnehmbar war. In einigen anderen Fällen wurde das Nachbild als farblose Scheibe wahrgenommen, und zwar dann, wenn die Farben selbst verschwunden waren.

Der Begriff des Nachbildes ist in DIN 5340:1998-04 [4] wie folgt definiert:

„Visuelle Empfindung, die nach Verschwinden des auslösenden Reizes an der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes auftritt“.

Wenn Licht auf die Netzhaut fällt, kann es bei ausreichender retinaler Beleuchtungsstärke zu einem Nachbild kommen. LeGRAND [88] nahm wie HOLLADAY [7] an, dass die Dauer der partiellen Blindheit im Bereich des retinalen Bildes, das von einer Blendlichtquelle dort erzeugt wurde, proportional zur Leuchtdichte der Blendlichtquelle und zur Zeitdauer der Einwirkung auf die Netzhaut ist. Weil bei der Blendung eine Art blinder Fleck entsteht, nannte man dies ursprünglich auch „skotomatische Blendung“ („scotomatic glare“).

Netzhautstellen, welche durch Exposition mit Licht einer höheren Leuchtdichte ausgesetzt wurden, verlieren an Hellempfindlichkeit. Wird nach Beendigung der optischen Reizung das zuvor gesehene Objekt, d. h. die Blendlichtquelle, durch ein homogen ausgeleuchtetes Gesichtsfeld höherer oder niedrigerer Leuchtdichte ersetzt, führt die Lokaladaptation, je nach vorheriger Reizsituation, zu unterschiedlicher Interpretation des neuen Gesichtsfeldes in Helligkeit, Buntton und Sättigung. Es wird dabei ein Nachbild wahrgenommen, und zwar ist dafür die physiologische Trägheit des Regenerationsprozesses der zuvor „belichteten“ Photorezeptoren verantwortlich.

Die Photorezeptormembran der Sehfärbstoffe hat bei Dunkeladaptation etwa ein Membranpotenzial von -30 mV. Der Grund für das negative Membranpotenzial ist ein Na/Ca-Einstrom am Außensegment, dem ein Kaliumausstrom am Außensegment der Fotorezeptoren entgegenwirkt. Das Auftreffen von Licht auf die Netzhaut hyperpolarisiert dagegen die Sehzellen, wodurch die Freisetzung von Transmittern (Überträgerstoffe) beendet wird, wodurch dann wiederum auch OFF-Bipolar- und Horizontalzellen hyperpolarisiert werden. Dadurch wird auch das Parallelsystem der sogenannten ON-Bipolarzellen desinhibiert. Die Desinhibition tritt auf, weil dieselben Transmitter, die von den Sehzellen freigesetzt werden, auch die ON-Bipolarzellen hemmen und die OFF-Bipolarzellen erregen, was wiederum auf verschiedene Re-

zeptoren der ON- und OFF-Bipolarzellen für ein und denselben Transmitter schließen lässt.

Etwas genauer betrachtet aktiviert ein Photon, das von einem Protein absorbiert wird, welches an ein 11-cis-Isomer des Retinaldehyds gebunden ist, das Opsin, welches wiederum ein anderes Protein, nämlich Transducin aktiviert. Hierdurch wird ein Enzym, nämlich Phosphodiesterase aktiviert, das ein zyklisches Nukleotid aufbricht, um die Zellmembran gegen depolarisierende Ionen zu verschließen. Bei Lichteinfall auf die Netzhaut, werden also Photonen in den Sehfärbstoffmolekülen der Photorezeptoren absorbiert und lösen somit einen komplexen molekularbiologischen Prozess des Sehens aus; den sogenannten Transduktionsprozess. Dieser Prozess bildet aufgrund der Absorption den gerade beschriebenen mehrstufigen Zerfall von Sehfärbstoffen, welcher schließlich eine Hyperpolarisation, eine Absenkung des Membranpotenzials des Photorezeptors zur Folge hat und somit einen elektrischen Impuls auslöst, welcher von dem Photorezeptor weitergeleitet wird [85,86].

Stoppt der Lichteinfall und somit die Photonenabsorption in den Sehfärbstoffen, so kommt es zur Depolarisation, d. h. zu einer Erhöhung des Photorezeptormembranpotenzials bis die Zelle repolarisiert ist, also ihren Ausgangszustand wieder erreicht hat. Da die Depolarisation der Zelle länger dauert als die Hyperpolarisation, kommt es zu lokal unterschiedlicher Adaptation der Photorezeptoren und somit zu einer unterschiedlichen Bewertung von Leuchtdichten durch die neuronale Verarbeitung, was wiederum zur Wahrnehmung eines Nachbildes führt.

Ein Schatten depolarisiert, d. h. er inaktiviert die betroffenen Sehzellen, die wiederum einen Neurotransmitter freisetzen, der dann Neuronen zweiter Ordnung in der Netzhaut, also Bipolarzellen, die als OFF-Zentrum Bipolarzellen bezeichnet werden, und Horizontalzellen, depolarisiert.

Je heller das Umgebungslicht, desto kürzer ist der Fototransduktionsvorgang und desto schneller wird er wieder umgekehrt nach Wegfall des Lichtes, d. h. die gesteigerte Geschwindigkeit des Verstärkungsprozesses verringert die Empfindlichkeit, beschleunigt aber die Antwort.

AULHORN [89] untersuchte die Zeitdauer der Lichtunterschiedsempfindlichkeit als Folge von Bestrahlungen dreier verschiedener Netzhautareale (Zentrum, 5° und 15° nasal; stimulierendes Feld: 2° x 3°, ca. 15 000 cd/m²; Adaptationsleuchtdichte: ca. 0,3 cd/m²) für Bestrahlungsdauern von 0,5, 2,5, 5, 10, 20, 40 und 80 s.

Er fand dabei, dass der Wiederanstieg der Empfindlichkeit einer Exponentialfunktion folgte, wobei das Erreichen der Ausgangsempfindlichkeit, d. h. die Geschwindigkeit des Wiederanstiegs von der Dauer der Bestrahlung abhängt. Eine wachsende Bestrahlungsdauer bewirkt auch eine zeitliche Verlängerung der verschiedenen Nachbildphasen.

AULHORN kommt u. a. zu dem Schluss, dass Nachbilderscheinungen auf zwei verschiedenen – allerdings nicht bekannten – physiologischen Vorgängen beruhen. Er schließt dies daraus, dass Nachbilder dann noch wahrgenommen werden bzw. wie-

der „zurückgeholt“ werden können, wenn die Ausgangsempfindlichkeit des zuvor bestrahlten Netzhautareals längst wieder erreicht ist.

Daraus dann aber wieder zu folgern, dass deshalb Blendung eine deutlich geringere Bedeutung zugemessen werden braucht, als dies allein aufgrund des zeitlichen Verlaufes unter Berücksichtigung umfassender Nachbilderscheinungen der Fall sein könnte, wäre aber erstens zu undifferenziert und zweitens präventiv gesehen möglicherweise gefährlich.

Es ist allerdings richtig, dass die durch Blendung erfolgende „Skotomisierung“ nur zu einer relativ kurz andauernden Herabsetzung bzw. Störung des Sehvermögens an dieser Stelle führt, während Nachbilder noch empfunden werden, wenn die Empfindlichkeit längst ihren Ausgangswert erreicht hat.

Typische diesbezügliche Verhältnisse betragen z. B. 1 bis 3 Minuten für die deutliche Licht-Empfindlichkeitsverringering bei einer gesamten Nachbilddauer von 12 bis 17 Minuten. FRÖHLICH gab 1921 bereits 20 Minuten Nachbilddauer nach längerdauernder Belichtung an [100].

Die Tatsache, dass die sogenannten „positiven Nachbilder“ „nach kurz dauernder Belichtung umso länger dauern, je heller die Lichtquelle, d. h. je stärker der Reiz war“, wurde bereits von v. HELMHOLTZ (zit. in [251], [219]) angeführt. Nur bei AUBERT findet sich die entgegengesetzte Ansicht vertreten (zit. in [251], [210, 273]). Dort heißt es „Ich habe die Beobachtung gemacht, dass nach einem lichtschwachen Funken die Nachbilder von den durch ihn beleuchteten Objecten länger dauerten als nach einem sehr hellen Funken.“

Fällt „intensives“ Licht in das Auge, so kontrahiert sich die Pupille und es beginnt ein Adaptationsprozess auf das entsprechende „Lichtniveau“. Dieser Vorgang erfolgt relativ rasch und stabilisiert sich dann einigermassen.

Als Erscheinung bleibt auch nach Verschwinden der Blendlichtquelle diese als virtuelles Bild auf der Netzhaut erhalten, und es kann eine partielle Inhibition von Sehfunktionen festgestellt werden.

Die Bewertung des Gehirns bei der Wahrnehmung eines Objektes wird in der Größe des Nachbildes deutlich. Wird dieses aus einer kürzeren Entfernung wahrgenommen als sie der Stimulation entsprach, ist es größer und bei Wahrnehmung aus größerer Entfernung kleiner als es dem Originalbild auf der Netzhaut entsprach. Daran zeigt sich, dass das Gehirn auch Korrekturfaktoren anwendet, die der ursprünglichen Entfernung des Objektes entsprechen.

Bei der Frage, ob es sich um einen rein photochemischen oder um einen photochemischen, aber auch neuronal bedingten Vorgang handelt, der für die Farben der Nachbilder verantwortlich ist, hat es schon mehrere Erklärungen bzw. Versuche dazu gegeben.

Zunächst könnte man davon ausgehen, dass ein optischer Stimulus zu einer Farbadaptation führt, d. h. dass Licht eines bestimmten Wellenlängenbereiches, das eine gewisse Zeit von einer Zapfenart absorbiert wurde, dazu führt, dass dessen Pigment

anschließend unempfindlicher gegen diesen Wellenlängenbereich wird. Damit würde eine stärkere Sättigung erforderlich, um die gleiche Helligkeit wahrzunehmen. Farb-adaptation bewirkt damit, dass sich das Sehsystem auf sich verändernde Lichtverhältnisse besser einstellen kann, wobei der jeweilige Zapfenfarbstoff (Zapfenopsine) gegenüber dem Wellenlängenbereich unempfindlicher wird, aus dem andauernd Licht auf die entsprechenden Rezeptoren trifft. Licht aus diesem Spektralbereich kann dann anschließend den Farbeindruck nicht mehr so stark wie vorher beeinflussen.

In einer neueren Untersuchung hat auch SAKATA [127] die Frage gestellt, ob es sich um das Ausbleichen von Farbpigmenten oder um eine neuronale Adaptation der Netzhaut handelt, wenn es um die Farbe der Nachbilder geht. Da es schwierig ist, die entgegengesetzten Farben genau zu messen, es aber andererseits für ein Verständnis der mit dem Auftreten der Nachbildfarben verbundenen Vorgänge äußerst wichtig ist, hat er mittels einer Anordnung, bei der kleine, kreisförmig angeordnete Farbtargets zur Stimulation dienten und wobei rasch abwechselnd eines ausgeblendet wurde, sodass zu jedem Zeitpunkt ein frisches Nachbild entstand, gearbeitet. Das Nachbild änderte dabei zwar seine örtliche Lage, blieb aber in der empfundenen Farbe konstant, sodass diese mit den in der Testanordnung vorhandenen Farben zur Ermittlung der Nachbildfarbe verglichen werden konnte.

Dabei fand er, dass die Linien, die jeweils den Stimulus mit dem induzierten Nachbild verbanden, im Farbart-Diagramm (Chromazitäts-Diagramm, in dem Chromazität oder Buntheit die Verschiedenheit einer Farbe vom gleichhellen Unbunt beschreibt) nicht durch den optischen Weißpunkt gingen, sondern durch den Weißpunkt konstanter Farbe (Farbkonstanz).

Nach SAKATAS Untersuchungen ergab sich, dass der Schnittpunkt mit der Chromazität, also dem Grad oder der Stufe der Sättigung (mit Farbsättigung ist die Reinheit des Farbtons gemeint, d. h. das Fehlen einer Beimischung von Weiß), der Umgebung koinzidierte, und zwar auch dann, wenn diese farbig war. Daher ergab sich, dass die Chromazität der Umgebung den Unbuntpunkt (neutraler Punkt) ergibt.

Farbkonstanz beschreibt dabei die Fähigkeit der Augen bzw. des Sehapparates, Gegenstände anhand ihrer Farben auch unter stark wechselnden Lichtverhältnissen identifizieren zu können, und zwar als Folge der Tendenz bzw. „Fähigkeit“ einer Farbe eines Objektes konstant (gleich) zu bleiben, auch wenn Helligkeit und Farbe der Beleuchtung variieren.

Man kann den Effekt der Farbkonstanz zeigen, wenn einer Person verschiedenfarbige Flächen dargeboten und dabei mit verschiedenem „Weiß“ beleuchtet werden, d. h. z. B. indem durch verschiedene Filter projiziert wird. Wenn dann die Versuchsperson die jeweilige Lichtintensität so einstellen soll, dass ihr eine bestimmte Fläche als Weiß erscheint und der Versuchsleiter dann die von dieser Fläche jeweils bei Rot, Grün und Blau reflektierte Intensität misst und anschließend die Versuchsperson nach der Farbe der der als weiß empfundenen Fläche benachbarten Fläche fragt – also z. B. gelb –, und er dann das Licht, das von der neuen Fläche – hier gelb – bei Rot, Grün und Blau reflektiert wird, so einstellt, wie es zunächst von der als weiß-

empfundene Fläche stammte, dann wird die Versuchsperson die neue Fläche immer unter derselben Farbe sehen. Dies gilt auch für alle anderen Farben.

Farbkonstanz wird als die wahrgenommene Konstanz der Farberscheinung unter veränderlichen Beleuchtungsbedingungen bezeichnet. Farbkonstanz stellt also die Fähigkeit dar, die Farbe von Objekten, unabhängig von der jeweils herrschenden spektralen Zusammensetzung der Beleuchtung oder der Umgebung wahrzunehmen. Änderungen der Lichtquelle werden dabei kompensiert, d. h. die Objektfarben ändern sich scheinbar kaum. Zur Erklärung werden verschiedene Mechanismen dieses Phänomens diskutiert. Nach dem Zapfenskalierungsmodell wird die Zapfenerregung bei Beleuchtungsänderung durch lokale Adaptation normalisiert und dadurch konstant gehalten. Es gibt aber verschiedene Hinweise aus Untersuchungen, dass es nicht allein Korrelation der Zapfenerregung unter Beleuchtungsänderungen sein kann, die die Farbkonstanz bewirkt, sondern dass noch globalere Mechanismen bzw. Eigenschaften des Sehapparates dafür verantwortlich sind, und zwar insbesondere deshalb, weil die üblichen Adaptationszeiten der Zapfensysteme zu langsam sind [136].

Obwohl die Zusammenhänge, die dafür verantwortlich sind, dass das Auge Farbkonstanz besitzt, noch nicht genau bekannt sind, so ist doch davon auszugehen, dass dies in einer bestimmten Hirnregion im visuellen Kortex erfolgt. Dort wird offenbar die veränderte Intensität der Lichtwellenlängen kompensiert.

Folglich geht SAKATA davon aus, dass der Sehapparat auch beim Nachbild als ein Korrekturmechanismus eine Rolle spielt, der – eventuell wie bei der üblichen Farbkonstanz, bei der die Änderungen der Beleuchtungsfarbe kompensiert werden, da sonst Objekte aufgrund des Farbtons nicht wieder erkannt werden könnten. Seine Ergebnisse haben gezeigt, dass einige Nachbilder durch die wahrgenommene Farbkonstanz beeinflusst wurden, woraus er wiederum schließt, dass es sich nicht nur um das Ausbleichen von Farbstoffen handeln kann, sondern dass noch höhere Mechanismen beteiligt sein müssen.

Die zumindest teilweise Beteiligung des zerebralen Kortex bei der Entstehung von Nachbildern sehen auch CHAN et al. als gegeben, und zwar bei einer Patientin mit einer hinteren kortikalen Schädigung, die erstens abnormale farbige Nachbilder aufwies und zweitens – im Gegensatz zu normalen Beobachtern – unmittelbar nach dem Ende der Stimulation ein Nachbild zeigte und drittens dauerten diese bis zu 400 % länger als normal [308]. Außerdem hat diese Gruppe einen interokularen Transfer beobachtet, der allein auf retinaler Ebene nicht erklärt werden konnte, sondern auf einen kortikalen Prozess hinwies.

Wenn man die Gültigkeit der Farbkonstanz auch beim Auftreten von Nachbildern unterstellt, handelt es sich um eine Kombination der Farbadaptation der verschiedenen Zapfensysteme, der „Gedächtnisfarbe“ (Erinnerung an die „gesehene“ Farbe des Stimulus) und der Umfeldbeziehungen. Dies würde bedeuten, dass die wahrgenommene Nachbildfarbe aus einer „Berechnung“ der Lichtintensitäten der verschiedenen Wellenlängen des ursprünglichen Reizes (Stimulus) und der Umgebung stammt.

SAKATA weist darüber hinaus darauf hin, dass nach jüngeren Untersuchungen auch eine Verbindung zum sogenannten „neon color spreading“ bestehen könnte, wonach das Auftreten von Nachbildern nicht nur ein reines Nebenprodukt lokaler Nachbilder ist, sondern eine Adaptation kortikalen Ursprungs beinhalten könnte, d. h. es könnte neben einer „Farbdiffusion“ auch ein Transparenzeindruck auftreten bzw. wahrgenommen werden.

Von WILLMER [130] wurden Beweise erbracht, welche darauf hindeuten, dass das Helligkeitssehen durch einen Mechanismus bestimmt wird, der nahe bei den Rezeptoren selbst liegt. Die polysynaptischen flachen oder pinselartigen Bipolaren werden von ihm als die hauptsächlichsten Übermittler des Eindrucks der Helligkeit angesehen. Es wird dabei angenommen, dass die Farbenanalyse als solche dann vor sich geht, wenn die Wirkung des Stimulus in Nervenimpulse umgewandelt ist, d. h. entweder in der inneren synaptischen Schicht oder in einem mehr zentralen Abschnitt.

Ein vorübergehend nicht wahrgenommenes Nachbild kann wieder wahrgenommen werden. Dazu wurden folgende Möglichkeiten beobachtet:

- durch natürlichen Lidschlag bzw. Lidschluss (einmal anhaltend oder mehrfach kurz hintereinander)
- Augenbewegungen („durch kleine Veränderungen des Auges befördert werden“, sagt FECHNER hierzu [103])
- Blickwendungen (z. B. Umherblicken).

Der Zeitraum, in dem das Nachbild durch Umfeldwechsel wieder zur Wahrnehmung gebracht werden kann, ist meist viel größer als derjenige, in dem eine direkte Beeinträchtigung wahrgenommen bzw. empfunden wird.

Die Möglichkeit des „Zurückholens“ eines Nachbildes zeigt, dass es sich um ein temporäres Ereignis handelt. Verantwortlich dafür ist der Wechsel des Umfeldes bzw. die Änderung der Umgebungshelligkeit.

In der Literatur wird das Auftreten von Nachbildern durchaus schon seit Langem beschrieben. So hat schon GOETHE in seiner Farbenlehre [128] darlegt, welche „Farbenspiele“ sich beim Betrachten heller Quellen ergeben können. Im Folgenden wird daraus zitiert (kursiv) und durch ergänzte Bildern untermalt, welche Farben man sich vorzustellen hat.

„Blendendes farbloses Bild

39.

Wenn man ein blendendes völlig farbloses Bild ansieht, so macht solches einen starken dauernden Eindruck, und das Abklingen desselben ist von einer Farbenerscheinung begleitet.

40.

In einem Zimmer, das möglichst verdunkelt worden, habe man im Laden eine runde Öffnung, etwa drei Zoll im Durchmesser, die man nach Belieben auf- und zudecken kann; durch selbige lasse man die Sonne auf ein weisses Papier scheinen und sehe in einiger Entfernung starr das erleuchtete Rund an; man schliesse darauf die Öffnung und blicke nach dem dunkelsten Orte des Zimmers, so wird man eine runde Erscheinung vor sich schweben sehen. Die Mitte des Kreises wird man hell, farblos, einigermassen gelb sehen, der Rand aber wird sogleich purpurfarben erscheinen. Es dauert eine Zeitlang, bis diese Purpurfarbe von aussen herein den ganzen Kreis zudeckt, und endlich den hellen Mittelpunkt völlig vertreibt. Kaum erscheint aber das ganze Rund purpurfarben, so fängt der Rand an blau zu werden, das Blaue verdrängt nach und nach hereinwärts den Purpur. Ist die Erscheinung vollkommen blau, so wird der Rand dunkel und unfärbig. Es währet lange, bis der unfärbige Rand völlig das Blaue vertreibt und der ganze Raum unfärbig wird. Das Bild nimmt sodann nach und nach ab, und zwar dergestalt, dass es zugleich schwächer und kleiner wird. Hier sehen wir abermals, wie sich die Netzhaut durch eine Sukzession von Schwingungen gegen den gewaltsamen äusseren Eindruck nach und nach wieder herstellt. (25, 26; Anmerkung: Die angegebenen Nummern beziehen sich auf andere, hier nicht wiedergegebene Teile aus [128]). (Die hier und im Folgenden in Nr. 42 sowie nach Nr. 43 dargestellten Abbildungen sind lediglich zur Illustration der GOETHESchen Aussagen zu verstehen. Seine im Original vorliegende Darstellung ist als „Zehnte Figur“ diesen Auszügen angefügt.)



41.

Die Verhältnisse des Zeitmasses dieser Erscheinung habe ich an meinem Auge, bei mehreren Versuchen übereinstimmend, folgendermassen gefunden. Auf das blendende Bild hatte ich fünf Sekunden gesehen, darauf den Schieber geschlossen; da erblickt' ich das farbige Scheinbild schwebend, und nach dreizehn Sekunden erschien es ganz purpurfarben. Nun vergingen wieder neunundzwanzig Sekunden, bis das Ganze blau erschien, und achtundvierzig, bis es mir farblos vorschwebte. Durch Schliessen und Öffnen des Auges belebte ich das Bild immer wieder (27), sodass es sich erst nach Verlauf von sieben Minuten ganz verlor. Künftige Beobachter werden diese Zeiten kürzer oder länger finden, je nachdem sie stärkere oder schwächere Augen haben (23). Sehr merkwürdig aber wäre es, wenn man dem ungeachtet durchaus ein gewisses Zahlenverhältnis dabei entdecken könnte.

42.

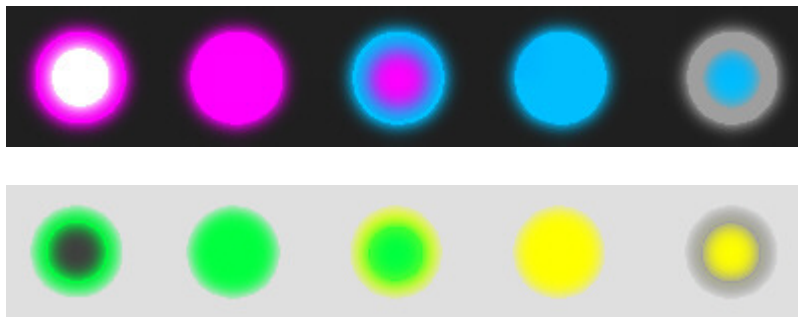
Aber dieses sonderbare Phänomen erregt nicht so bald unsre Aufmerksamkeit, als wir schon eine neue Modifikation desselben gewahr werden. Haben wir, wie oben gedacht, den Lichteindruck im Auge aufgenommen und sehen in einem mässig er-

leuchteten Zimmer auf einen hellgrauen Gegenstand, so schwebt abermals ein Phänomen vor uns, aber ein dunkles, das sich nach und nach von aussen mit einem grünen Rande einfasst, welcher ebenso wie vorher der purpurne Rand sich über das ganze Rund hineinwärts verbreitet. Ist dieses geschehen, so sieht man nunmehr ein schmutziges Gelb, das, wie in dem vorigen Versuche das Blau, die Scheibe ausfüllt und zuletzt von einer Unfarbe verschlungen wird.



43.

Diese beiden Versuche lassen sich kombinieren, wenn man in einem mässig hellen Zimmer eine schwarze und weisse Tafel nebeneinander hinsetzt und, solange das Auge den Lichteindruck behält, bald auf die weisse, bald auf die schwarze Tafel scharf hinblickt. Man wird alsdann im Anfange bald ein purpurnes, bald ein grünes Phänomen und so weiter das übrige gewahr werden. Ja, wenn man sich geübt hat, so lassen sich, indem man das schwebende Phänomen dahin bringt, wo die zwei Tafeln aneinander stossen, die beiden entgegengesetzten Farben zugleich erblicken; welches um so bequemer geschehen kann, als die Tafeln entfernter stehen, indem das Spektrum alsdann grösser erscheint.



In der der Farbenlehre beigegefügteten Tafel 1 findet sich auch die 10. Figur, die nachstehend auszugsweise zum Vergleich dargestellt ist. Dabei ist der zeitliche Verlauf hier von oben nach unten.



„Zehnte Figur. Stellt vor, wie das abklingende blendende Bild (E. 39 ff.), wenn das Auge sich auf einen dunklen oder hellen Grund wendet, nach und nach die Farben verändert und auf eine oder die andere Weise im entschiedenen Gegensatze abklingt.“

GOETHES Beobachtungen [128] lassen sich tabellarisch wie folgt zusammenfassen (Tabelle 2.5)

Blendquelle: Sonne als kreisrunde Reflexion eines weißen Papiers

Blenddauer: 5 Sekunden (Genauigkeit nicht bekannt)

Betrachtung im Dunkeln

Tab. 2.5 Zeitlicher Verlauf der Nachbildphasen nach GOETHE

Farbe der Phase	Zeitdauer der jeweiligen Phase
Weiß – Gelb	13
Purpur	29
Blau → Schwarz	48

Die Zeitdauern in Tabelle 2.5 geben jeweils die Zeit an, bis sich die jeweilige Phase komplett in die nächste gewandelt hat. Es dauerte z. B. 13 Sekunden bis die Phase Weiß-Gelb so weit „abgeschlossen“ war, dass nur noch Purpur gesehen wurde.

Aus Tabelle 2.5 wird auch deutlich, dass die Phasen des farblichen Nachbildes sich zu Anfang schneller ändern als am Ende. Dies könnte jedoch auch daran liegen, dass Farbnuancen zwischen den einzelnen konkreten Farben von GOETHE nicht wahrgenommen wurden.

Abbildung 2.9 zeigt den in Tabelle 2.5 aufgeführten Farbverlauf im Farbdigramm.

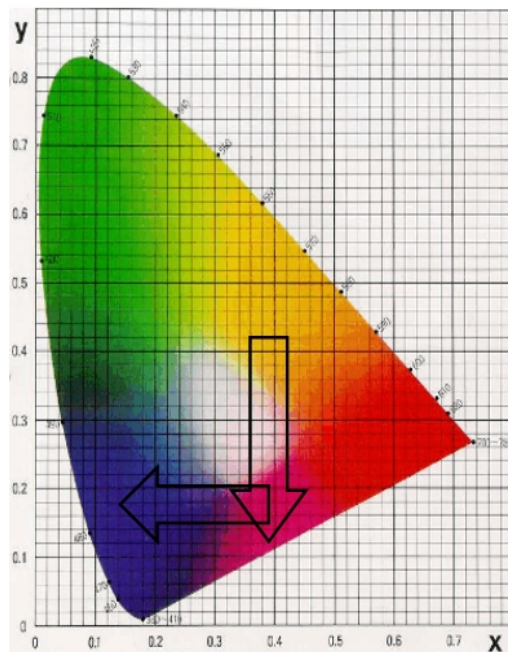


Abb. 2.9 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach 5 Sekunden Blendung durch von der Sonne beschienenes weißes Papier nach GOETHE [128]

Weitere Beobachtung:

Blendquelle: Sonne als kreisrunde Reflexion eines weißen Papiers

Blenddauer: 5 Sekunden (Genauigkeit nicht bekannt)

Betrachtung im mäßig erleuchteten Raum mit Blick auf hellgrauem Hintergrund

Der dieser Beobachtung entsprechende Farbverlauf der Nachbilderscheinung ist in Abb. 2.10 dargestellt.

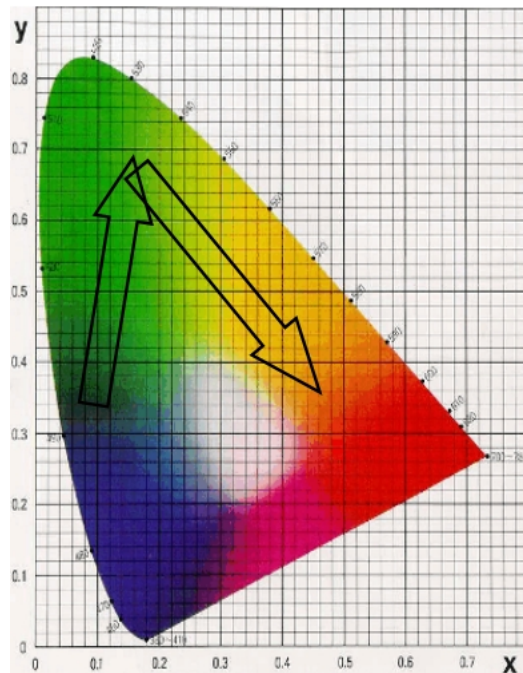


Abb. 2.10 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach 5 Sekunden Blendung durch von der Sonne beschienenes weißes Papier nach GOETHE (Betrachtung auf hellgrauem Hintergrund)

Bei Vergleich von Abb. 2.9 und 2.10 wird deutlich, dass GOETHE durch den Blick auf einen helleren Gegenstand bei beleuchtetem Raum jeweils die Komplementärfarbe gesehen hat. Ob die Zeitkonstanten hierbei exakt dieselben waren, erwähnt GOETHE nicht. Bei einer Literaturrecherche zum Nachbildverlauf wurde darüber hinaus folgende Abfolge der Farben ermittelt:

a.) A. BECK – Über künstlich hervorgerufene Farbenblindheit [132]

Blendung über Reflexion der Sonne
Darbietung ausgewählter Farben
Betrachtung im Schatten, sowie im Sonnenlicht

Ergebnisse:

Die Dauer der auftretenden Farbenblindheit beträgt einige Minuten und betrifft vor allem Rot und Grün.

Farbwahrnehmung:

Rot → Braun oder Schwarz

Grün → Grau oder Schwarz

Mischfarben, welche Rot oder Grün enthalten, werden entsprechend verändert gesehen.

Die Änderung der Farbwahrnehmung trat nur bei Betrachtung der Farben im Dämmerlicht auf.

Bei kurzzeitiger Fixierung (2-3 Minuten) wird kaum eine Veränderung der Wahrnehmung von Gelb, Blau und Violett wahrgenommen.

Die Dauer der Farbenblindheit ist abhängig von der Intensität des Lichtes und der Dauer der Blendung.

Betrachtung der Reflexion der Sonne durch ein Violette Filter:

Auch hier sinkt zunächst die Wahrnehmung für Rot und Grün und später erst in einem geringeren Maße für Blau-Violett.

In den meisten Fällen hielt die Blindheit für diejenige Farbe am längsten an, für die sie auch als erstes auftrat.

b.) Blendung ohne Filter:

Aus: A. MOSSO – Der Mensch auf den Hochalpen [133]:

„Auch nach der stärksten Blendung, welche das von den Schneefeldern zurückgeworfene Licht in meinem Auge verursachte, war ich im Stande, die Farben noch zu unterscheiden. Ich muss jedoch hinzufügen, dass mir dieselben allesamt dunkler erschienen. Hellgelb verwechselte ich mit Weiß, Blassrosa und Dunkelrosa erschienen mir schmutzig und schwärzlich. Grün war ich geneigt mit Blau zu verwechseln. Das Rot vermochte mein Auge unter allen Farben auch im Zustande der größten Ermüdung am besten zu erkennen.“ [133]

Bei sehr starker Blendung verschwindet auch die Fähigkeit Grün wahrzunehmen, und zwar selbst bei Betrachtung im Sonnenlicht. Andere Farben werden noch immer erkannt, es sei denn sie sind sehr dunkel und erscheinen dann alle gleichsam schwarz.

In diesem Stadium tritt im Dämmerlicht eine totale Farbenblindheit ein.

Farbwahrnehmung:

Rot, Grün, Blau, Violett → Schwarz

Gelb → Grau, Weißlich-Grau

Orange → Braun

Wiederkehren der Farbwahrnehmung nach Blendung:

Blau und Violett → Gelb → Orange → später Rot → Grün

Es traten keine positiven oder negativen Nachbilder auf (Betrachtung einer homogenen Fläche)

c.) Verwicklungen beim „flight of colors“ [172]

BARRY gibt die Reihenfolge der Farben, die nach einer intensiven und langdauernden Stimulation auftreten, mit: „grün → gelb → orange → rot → purpur → blau → grün → schwarz“ an. Er weist aber auch darauf hin, dass Modifikationen vorkommen können, wie z. B. „gelb → orange → rot → violett → blau → grün“, d. h. es fehlt am Anfang grün und statt purpur wird violett wahrgenommen oder – wenn z. B. die Sonne die Blendlichtquelle war – wurde häufig die Folge „gelb → rot → grün → blau“ angegeben, d. h. es fehlten im Verlauf einige Farben, und es kam auch häufig zur „Inversion“ von Blau und Grün am Ende des Verlaufs der Farben. Meist folgten die Angaben aber einem generellen Verlauf im Farbdigramm. BARRY berichtete auch von individuellen Unterschieden bei einem Test mit 24 Studierenden, wobei einige Farben an anderer Stelle im Verlauf eingefügt vorkamen oder aber ein und dieselbe Person gab einmal „gelb → blau → gelb → rot → purpur → blau → schwarz“ an, dann aber auch „gelbgrün → gelb → rot → purpur → blau → purpur → schwarz“. Dass am Ende schwarz wahrgenommen wird, führte BARRY darauf zurück, dass dem ein anderer Effekt zugrunde liege, auf den er aber in seiner Abhandlung nicht eingehen wollte. Insbesondere im Zusammenhang mit der Abfolge „blau → grün → schwarz“ sah Barry auch ein charakteristisches Kleinerwerden des Nachbildes, bis dieses schließlich ganz verschwand. BARRY gab auch mögliche Gründe für unterschiedliche Angaben an, so z. B. den Bekanntheitsgrad der Testteilnehmer mit Farbtheorien im Hinblick auf Interpretationsmöglichkeiten, und er brachte dies in Zusammenhang mit der Darstellung zurück liegender Berichte.

Die von BARRY angegebenen chemischen Veränderungen, wonach es unter der Einwirkung von Licht zu einer Zerlegung einer photochemisch-empfindlichen Substanz S in eine Substanz P und in ein oder mehrere Nebenprodukte A und B kommt, die er als reversibel ansah, sodass es bei Abwesenheit einer Stimulation unter der Mitwirkung einer im Überschuss vorhandenen weiteren, vierten Substanz C zum Aufbau einer neuen Substanz aus P, A und C kommen kann. Dabei nahm BARRY an, dass die Nebenprodukte A und B unter extremen Bedingungen in starkem Überschuss vorhanden seien, aber auch gleichzeitig vom Ort der Stimulation wegdiffundieren würden, sodass die Substanz P nicht ohne weiteres zur Ausgangsform S rekombinieren könne und damit P aber auf den Rezeptor wirken und Nervenimpulse auslösen könne, die wiederum als Bilder wahrgenommen würden. So erklärte BARRY das Auftreten positiver Nachbilder vor einem dunklen Hintergrund.

Eine Interpretation im Sinne der HERINGSchen Theorie fand BARRY nicht als einfach. Er ging daher von der YOUNG-HELMHOLTZschen Dreifarbentheorie aus und von 3 photo-empfindlichen Substanzen Srot, Sgrün und Sviolett. Dann musste er nur noch annehmen, dass das Nebenprodukt A ebenfalls in 3 verschiedenen Nebenprodukten Arot, Agrün und Aviolett existiert, die unterschiedliche Diffusionsraten aufweisen, wie z. B. eine geringere für Rot im Vergleich zu Grün und Violett.

Diese Vorstellungen finden sich in gewisser Weise zeitlich späteren Betrachtungen zu den Darstellungen der 3 Opsine Erythrolabe, Chlorolabe und Cyanolabe wieder.

d.) J. SEGAL – Mechanismus des Farbensehens (Untersuchungen nach HAAS) [129, 131]

Blenddauer: kurzzeitig (ohne weitere Angabe)

Blendquelle: weißes Licht auf epizykloidischer Bahn (nicht näher ausgeführt)

Umgebungsbeleuchtung: ohne Angabe

Ergebnisse: sind in Tabelle 2.6 dargestellt

Tab. 2.6 Entwicklung des positiven Nachbildes, das von einem kurzen weißen Reiz herrührt. (Nach HAAS 1949)

Farbe der Phase	Dauer der Phase / s
Orange	0,12
Gelb	0,37
Grün	1,25
Blau	0,75
Violett	2,5

Zur genaueren Untersuchung des Farbverlaufs des Nachbildes ist der Versuchsaufbau zu verstehen.

Interpretation 1:

Durch die besondere Bewegung der Blendquelle können die einzelnen Farben des Nachbildes gewissermaßen nebeneinander betrachtet werden. Die Nachbildfarbe, welche nach Blendung zuerst auftritt, zeigt sich am Ende der „Farbskala“, während die Farbe zu Anfang diejenige ist, welche als letztes bzw. erst später auftritt, da dieses Nachbild Zeit hatte sich zu verändern, bis die Bewegung zu Ende ist und die einzelnen Phasen betrachtet werden.

Da sich die Farben Gelb und Orange sowie Violett und Blau im selben Farbbereich befinden, werden sie in der nachfolgenden Tabelle 2.7 zusammengefasst.

Tab. 2.7 Zeitlicher Verlauf des Nachbildes nach HAAS

Farbe der Phase	Zeitdauer der Phase / s
Violett - Blau	3,25
Grün	1,25
Gelb - Orange	0,49

Aus Tabelle 2.7 geht hervor, dass sich die farblichen Phasen des Nachbildes mit der Zeit schneller entwickeln. Die Ergebnisse dieses Versuches sind jedoch ohnehin fraglich, da angegeben wurde, dass die Nachbilder auf einer dunklen Fläche betrachtet wurden, sich jedoch, wie in Tabelle 2.7 zu sehen ist, die Komplementärfarben zeigten. Zusätzlich handelt es sich um sehr kleine Zeiteinheiten, welche zwar exakt durch die Bewegungsgleichung der Quelle bestimmt werden können, eine konkrete Trennung einzelner Farbnuancen jedoch vermutlich erschwert war.

Der Autor J. SEGAL gibt an, bei eigenen Untersuchungen auf dieselbe Weise, keine so klaren Trennungen einzelner Phasen erkannt zu haben. Bei ihm wurde lediglich eine gelbe Phase von 1,2 Sekunden Länge, sowie eine violette Phase von 1,8 Sekunden Länge erkennbar. Auch für SEGAL erscheint die 2. Nachbildphase, Gelb, kürzer als die Erste.

Unabhängig von der Zeitdauer der einzelnen Phasen ergibt sich dazu folgender Verlauf im CIE-Farbraum (Abb. 2.11):

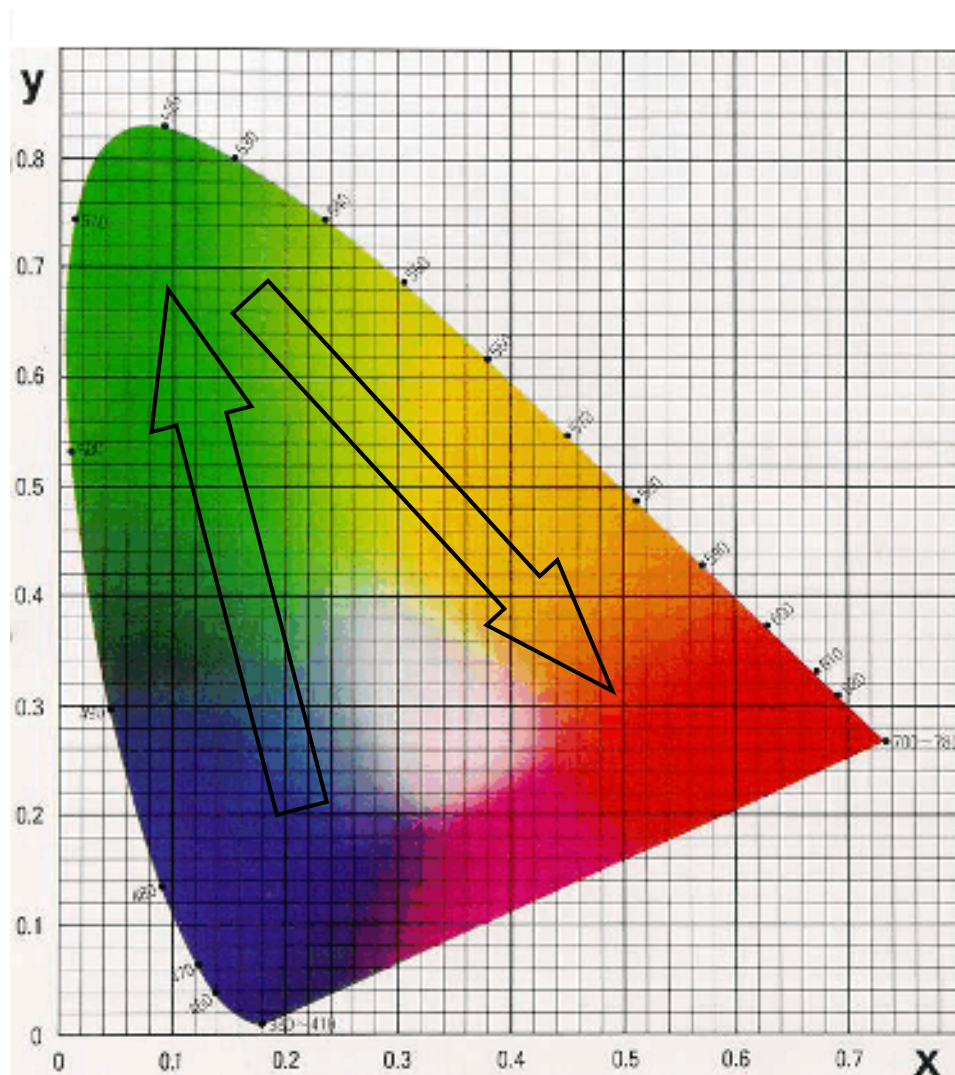


Abb. 2.11 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach HAAS (Abb. 2.11 entspricht hierbei Abb. 2.10.)

Interpretation 2:

Eine andere Überlegung wäre, dass es sich bei der Angabe von HAAS bereits um die umgekehrte, also richtige Reihenfolge handelt. Dies hieße jedoch, dass zunächst Orange, dann Gelb gesehen wird, was dem Nachbild nach Blendung mit weißem Licht und anschließendem Blick auf dunklen Hintergrund, entspricht. Die grüne Phase entspricht hierbei jedoch nicht der Erwartungshaltung. Da es jedoch keine neueren Untersuchungen hierzu gibt, ist auch dieser Verlauf nicht auszuschließen, vor allem da nicht bekannt ist, mit welcher Quelle HAAS blendete. Der entsprechende farbliche Verlauf ist in Abb. 2.12 dargestellt.

HAAS gibt zwar an, wie lange die einzelnen Phasen dauern. Übergänge in Form von Ringen oder ähnlichem erwähnt er aber nicht.

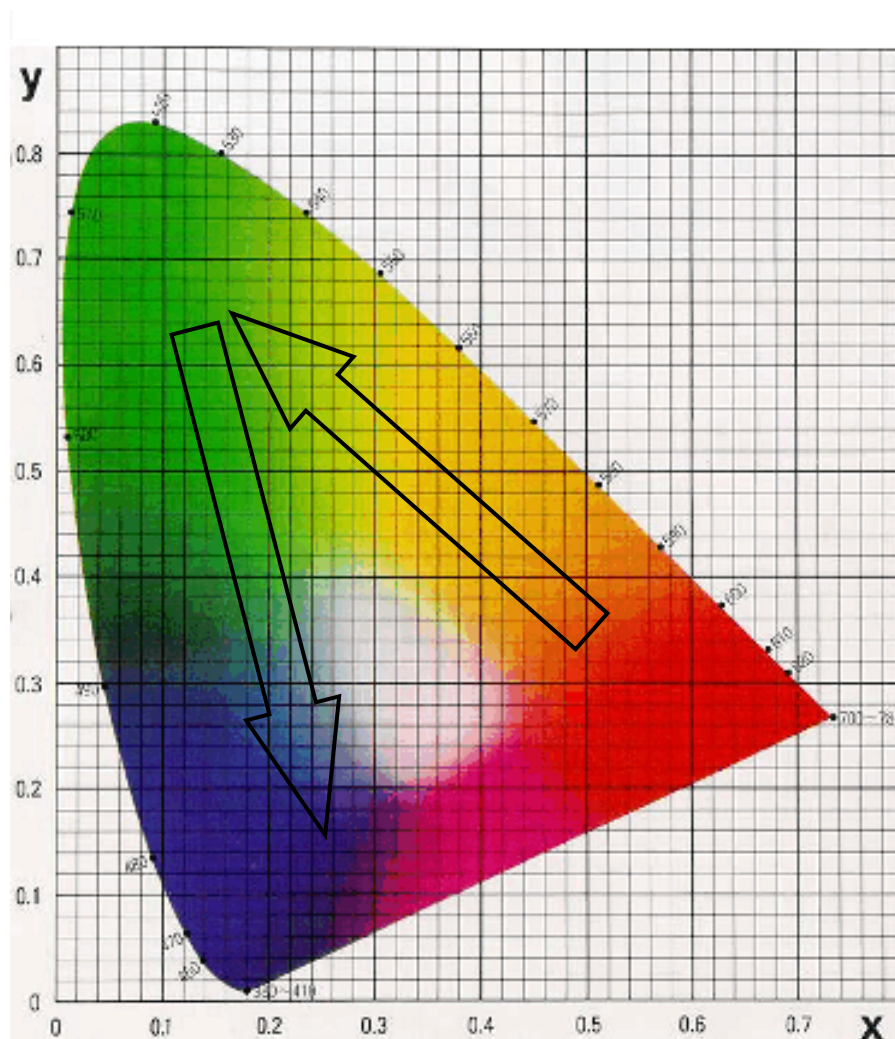


Abb. 2.12 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach HAAS

Aus der Darstellung der historischen Betrachtungen von Nachbildern lassen sich praktisch keine unmittelbaren quantitativen Angaben machen, da in nahezu allen Veröffentlichungen keine solchen Daten angegeben wurden, die eine Reproduktion der Untersuchungen zulassen würden. Es ist daher nicht möglich, die in der Vergangenheit bei den Untersuchungen zum Auftreten von Nachbildern benutzten Lichtquel-

len unmittelbar mit heute verfügbaren Lichtquellen, wie sie z. B. in Autoscheinwerfern Verwendung finden oder mit sogenannten Hochleistungs-LEDs zur Verfügung stehen, zu vergleichen.

Diese Tatsache, dass früher nur mehr qualitative Expositionsdaten vorlagen, war sicherlich ein wesentlicher Grund dafür, dass unterschiedliche Beobachtungen und Analysen gemacht wurden, die dann zu verschiedenen Hypothesen führten.

Dennoch stellen die historischen Betrachtungen eine reichhaltige Quelle an Informationen dar, die in einer Darstellung der Nachbilderscheinungen nicht fehlen dürfen und darüber hinaus auch heute noch Anregungen zu genaueren Untersuchungen geben können. Wenn aber Schlussfolgerungen und Konsequenzen aus Blendereignissen und den damit verbundenen Nachbilderscheinungen gezogen werden sollen, dann muss dies unter Berücksichtigung der für die jeweilige Exposition relevanten Parameter und Bedingungen geschehen. Die für eine Beurteilung wichtigen Bestimmungsgrößen sind dabei zum einen die zeitlich veränderlichen Nachbildfarben und zum anderen die Nachbilddauer als Funktion der verschiedenen Lichtquellen und der damit verfügbaren Expositionsparameter. Die Nachbilderscheinungen selbst sind dann wiederum das Ergebnis einer entsprechenden Immission.

2.7.5 Nachbildfarben bei Blendung durch helle optische Quellen

Ein Ziel der vorliegenden Untersuchungen war auch die Beschreibung der Farben und deren Wechsel bei Blendung durch helle Quellen moderner Bauart.

Es wurde in der Vergangenheit berichtet, dass sich Nachbilder als Folge einer Laserstrahlexposition von denjenigen bei Anwendung einer inkohärenten Quelle unterscheiden. So wird ein kollimierter Laserstrahl nicht allein in der Ausdehnung des Fleckdurchmessers auf der Retina wahrgenommen, sondern infolge von Streuung und Reflexionen erscheint das ganze Auge lichterfüllt. Die Intensität des Lichtreizes beeinflusst dabei die Deutlichkeit des 2. periodischen Nachbildes, des sogenannten PURKINJE-Bildes, die Helligkeitsunterschiede in den Nachbildern sowie das Auftreten von Halos und der verschiedenen Nachbildphasen.

Eine wichtige Größe zur Bestimmung des Einflusses der Blendung ist zweifelsohne durch die Ausdehnung und Dauer des Nachbildes gegeben. Bei der Ermittlung des Durchmessers eines Nachbildes wird dieser insbesondere bestimmt durch:

- den transformierten Durchmesser des individuell „gesehenen“ bzw. wahrgenommenen Nachbildes zum retinal tatsächlich vorliegenden Nachbild, und zwar in Relation zu den Rezeptorabständen, d. h. im Vergleich zum Auflösungsvermögen
- die verschiedenen Augenbewegungen, nämlich Konvergenz und Divergenz als Vergenz, Augenrollen bzw. Augenrotation, Sakkaden, Folgebewegungen, Nystagmus, Drift und Mikrosakkaden, Tremor, Bewegung des Augapfels in Richtung Augenhöhle bei Lidbewegung und insbesondere die Maximalbewegungen.

Erst die quantitative Bestimmung der Art, des Ausmaßes und der Dauer eines Nachbildes und der mit einer Blendung verbundenen Effekte wie Beeinträchtigung des Farbsehvermögens und des Visus als Funktion von Einwirkungsdauer, zeitlichem Verlauf der Exposition, Ausdehnung und Form der blendenden Quelle, Umgebungshelligkeit, Adaptationszustand der exponierten Personen, Wellenlänge bzw. Wellenlängenbereich usw. liefern die erforderlichen Erkenntnisse für eine weitergehende Gefährdungsanalyse und stellen die entsprechenden Grundlagen dar, um belastbare Aussagen z. B. zur Erkennbarkeit von Farben, Formen, Details und Kontrasten zu machen bzw. Empfehlungen und Handlungsanweisungen für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz bei der Arbeit zu geben.

Beim Auftreten eines Nachbildes muss dann unter anderem unterschieden werden zwischen dem sogenannten „negativen Nachbild“, d. h. demjenigen Nachbild, das annähernd gegenfarbig zur Empfindung während des Reizes, also dem Blendereignis, ist und dem „positiven Nachbild“. Als gegenfarbig werden dabei zwei Farben dann bezeichnet, wenn deren Bunttöne (früher als Farbtöne bezeichnet) und damit dasjenige Merkmal einer Farbempfindung, das bei gleicher Helligkeit und Sättigung zwei „bunte Farben“ – im Gegensatz zu unbunten Farben, zu denen weiß, grau und schwarz gezählt werden – aufweisen, sich unterscheiden, wie das bei den Farben rot, gelb, grün und blau der Fall ist. Gegenfarbig sind auch die Komplementärfarben, als die wiederum solche Farben gezählt werden, deren spektrale Hellempfindlichkeitsgrade für photopisches Sehen ($V(\lambda)$ -Werte) sich an jeder Stelle des sichtbaren Spektrums zu dem Wert 1 ergänzen. Als positiv wird ein Nachbild dagegen dann bezeichnet, wenn es annähernd mit dem gleichen Buntton wie die Empfindung während des Reizereignisses übereinstimmt.

2.8 Blendungsbewertung

Gemäß CIE wird „disability glare“ als synonym für die Leuchtdichte des Streulichtes betrachtet, d. h. Streulichtmessungen können als besonders geeignet zur Ermittlung der physiologischen Blendung angesehen werden. Dabei wird von der CIE das Konzept einer äquivalenten Leuchtdichte, d. h. einer äußeren Leuchtdichte angesetzt, die denselben Seheindruck hervorruft, wie die Blendlichtquelle [123].

Blendung ruft daher im Wesentlichen drei Effekte hervor:

- Erstens entsteht physikalisch eine Schleierleuchtdichte,
- zweitens physiologisch eine Einschränkung von Sehfunktionen und
- drittens wird psychologisch Aufmerksamkeit auf etwas gelenkt.

Eine Messung der Blendungserscheinungen kann entweder physiologisch oder psychologisch erfolgen.

Bei der physiologischen Messung werden die Veränderungen physiologischer Sehfunktionen bestimmt. Dazu gehören der Visus, der sich in der Formenerkennbarkeit äußert und die Leuchtdichtenschwellenempfindlichkeit, die sich in der Kontrastempfindung äußert. Dabei ist die Beeinträchtigung des Visus von geringerer Bedeutung.

So interessiert bei einer nächtlichen Begegnung mit einem anderen Fahrzeug dessen Nummernschild eigentlich nur dann, wenn zu befürchten ist, dass das andere Fahrzeug nach einer Kollision nicht stehen bleibt. Andererseits ist das Kontrastempfinden von großer Bedeutung, denn es kommt z. B. bei Nachtfahrten darauf an, dass man auch relativ schwache Kontraste auf und unmittelbar neben der Straße ausreichend gut erkennt.

2.8.1 Sehleistung und Sehfunktionen

Bei der Unterscheidung der Effekte, die durch Blendung hervorgerufen werden können, sind zum einen physiologische und zum anderen psychologische Fakten zu bewerten. Aus messtechnischer Sicht beeinflusst die physiologische Blendung in erster Linie die Sehfähigkeit bzw. Sehleistung eines Menschen und ist daher der Messung zugänglich.

Die Sehleistung ist zwar eine nicht hinreichend genau festgelegte Größe. Sie wurde aber zur Quantifizierung der Visuseinschränkung nach einer Blendung heran gezogen, und zwar nicht zuletzt, weil es sich um ein in der Praxis allgemein anerkanntes Verfahren zur Visusbestimmung – und damit zur Sehleistung unter Normalbedingungen – in der Ophthalmologie handelt.

Im "Internationalen Wörterbuch der Lichttechnik" wird die Sehleistung als "Leistung des visuellen Systems, wie sie beispielsweise durch die Geschwindigkeit und die Genauigkeit gemessen wird, mit welcher eine Sehaufgabe gelöst wird", definiert. Aus dieser Definition lässt sich unschwer erkennen, warum man in der Praxis sehr unterschiedliche Vorstellungen über die Sehleistung entwickelt hat.

2.8.1.1 Visus

Die Sehschärfe wird in den Empfehlungen der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft zur Qualitätssicherung bei sinnesphysiologischen Untersuchungen und Geräten [202] als die wichtigste Funktionsprüfung in der täglichen Praxis und in der augenärztlichen Begutachtung bezeichnet. Die Sehschärfe (der Visus) kennzeichnet das Auflösungsvermögen des Auges unter vorgegebenen Bedingungen. In Wirklichkeit ist die Sehschärfe, wie jeder Mensch aus eigener Erfahrung kennt, keine feste Größe, sondern Ergebnis einer Wechselwirkung zwischen dem Sehapparat des Menschen – dem Auge also – und der Umgebung. Diese Umgebung äußert sich in der Umgebungsleuchtdichte und deren Farbe, dem jeweiligen Adaptationszustand und aus der eventuell vorangegangenen Blendung. Die mit einem Sehschärfemessgerät messbare Größe ist die "Sehschärfe unter definierten Bedingungen". Damit ist eine, aber nicht die ausschließliche Beschreibung der Sehleistung möglich, nämlich der Visus. Dazu muss festgestellt werden, dass den an einem zur Sehschärfestimmung dienenden Sehtest teilnehmenden Personen eine vergleichsweise lange Zeit beim Blick auf das jeweilige Test-Sehzeichen bzw. die entsprechende Zeile auf einer Sehzeichentafel gelassen wird, um die jeweils beste Sehschärfe zu ermitteln.

Wenn von Sehschärfe (Visus) die Rede ist, wird im Allgemeinen damit die zentrale Tagessehschärfe gemeint [124]. Als Normzeichen wird nur der Landoltring mit 8 Stel-

lungen und in logarithmischer Progression betrachtet. Der bei der Sehschärfe angegebene Zahlenwert ergibt sich aus dem Kehrwert der Lückenbreite des kleinsten erkennbaren Landoltringes. Diese Lücke wird in Winkelminuten gemessen. Die Abstufung der sogenannten Optotypengröße erfolgt um den Faktor $\sqrt[10]{10} = 1,2589$.

Als Ergebnis einer Messung stellt die Sehschärfe eine physiologische Größe dar, die sich aus der physikalischen Lückenbreite von verschieden großen Optotypen ergibt. Dabei wird als Abbruchkriterium im Bereich der Visusstufen 0,25 bis 2,0 „mindestens 60 Prozent richtig erkannte Orientierungen“ beim Landoltring benutzt.

Zur Durchführung einer Visusprüfung sind die Festlegungen der Normen DIN EN ISO 8596 und DIN EN ISO 8597 zu beachten und einzuhalten [134, 135]. Bei der Prüfung der Sehschärfe nach Norm muss der Landoltring in 8 Orientierungen bzw. Positionen angeboten werden. Der Abstand zwischen der Sehtesttafel und dem Prüfling beträgt üblicherweise 4 m, wenn die Sehschärfebestimmung für die Ferne erfolgen soll. Bei einer Nahsehschärfebestimmung kann die Entfernung 40 cm, 33 cm oder 25 cm sein [202]. Soweit keine gutachterlichen Sehschärfebestimmungen vorgenommen werden, ist die Einhaltung der relevanten Normen nicht vorgeschrieben.

Sieht man von den physikalischen Grenzen, nämlich der Beugung bei der Entstehung eines Netzhautbildes und dem Abstand der Sehzellen in der Netzhaut ab, die die Sehschärfe begrenzen, so sind es insbesondere folgende Faktoren, von denen der Visus abhängt:

- Kontrast
- Brechungsfehler des Auges (Fehlsichtigkeit)
- Pupillengröße
- Umgebungs-Beleuchtung
- Zeitdauer der Objektbestrahlung
- Ort auf der Retina
- Adaptationszustand
- Augenbewegungen.

Die Sehschärfe wird durch den Kontrast beeinflusst. Ab ca. 85 % Kontrast wird das Verhältnis unabhängig. Bei zu hohem Kontrast, der mit Blendung verbunden sein kann, verschlechtert sich die Sehschärfe.

Bei der normgerechten Visusprüfung beträgt der erlaubte Leuchtdichtebereich 80 cd/m^2 - 320 cd/m^2 . Diese Einschränkung erfolgte im Hinblick auf die Durchführbarkeit von Sehtests mit Hilfe eines Computerbildschirmes, da dessen Leuchtdichte üblicherweise im Bereich um 80 cd/m^2 liegt. Nach Angabe von ADRIAN [142] ist der Visus bei Optotypen mit hohem Kontrast bei 120 cd/m^2 am größten, wenn dabei die

Pupillengröße zwischen 2 mm und 3 mm beträgt. Bei größerer Pupille nimmt der Visus als Folge zunehmender sphärischer Abberation ab und bei kleinerer Pupille infolge der Beugung.

Nach Untersuchungen von VICARIO [126] ergibt es sich, dass die Sehschärfe umgekehrt proportional der Reizfläche ist, das heißt, dass sie mit zunehmender Reizfläche abnimmt und mit abnehmender zunimmt. Diese Abhängigkeit kann als hyperbolische Funktion dargestellt werden.

Neben der Verwendung von Landoltringen kommen auch Buchstaben und Zahlen in Frage. Über deren relative Erkennbarkeit bzw. Verwechslungsgefahren hat sich WESEMANN [124] geäußert.

Wenn eine gutachtliche Bestimmung der Nahsehschärfe durchgeführt wird, werden dazu im Gegensatz zur Fernvisusbestimmung keine Landoltringe, sondern meist Texte benutzt. Hierdurch wird dann die Lesefähigkeit der Testperson geprüft. Hiermit lassen sich bezüglich der Arbeitsfähigkeit bessere Aussagen treffen als bei einer Betrachtung von Landoltringen beim Nahblick. Es ist dabei aber zu beachten, dass es erstens keine genauen Abbruchkriterien und keine normativ festgelegten Lesezeiten gibt und dass darüber hinaus die Lesegeschwindigkeit von der Erfahrung und Übung der Testpersonen im Umgang mit Texten abhängt. Lesetafeln bzw. -texte sind in einem Abstand von 30 cm bis 40 cm einzusetzen.

Bei der Nahsehschärfeprüfung geht die Tatsache ein, dass vom Auge ein Mehr an Akkommodationsfähigkeit vom Auge verlangt wird, als beim Fernsehschärfetest. Insofern kann hier leichter ein Einfluss des Alters der getesteten Person festgestellt werden.

2.8.1.1.1 Fehlsichtigkeit (Brechungsfehler des Auges)

Als Folge einer Fehlsichtigkeit kommt es zu einer unscharfen Abbildung auf der Netzhaut. Eine große Pupille lässt mehr Licht ins Auge und verringert Beugungerscheinungen, die Auflösung wird aber durch Abberation schlechter. Dieser Effekt wird durch eine kleinere Pupille verringert, während andererseits die Auflösung dann durch die Beugung begrenzt wird.

2.8.1.1.2 Pupillengröße

Der Durchmesser der Pupille verändert sich insbesondere in Abhängigkeit der Menge des Lichteinfalles und beträgt zwischen ca. 1,5 mm und knapp 8 mm. Die Sehschärfe ist nicht über den gesamten Pupillendurchmesser konstant, sondern im Zentrum größer als am Rand, wo sich u. a. Beugung bemerkbar macht. Bei kleinerer Pupille ist daher die Sehschärfe größer.

2.8.1.1.3 Umgebungs-Beleuchtung

Bezüglich der Umgebungsbeleuchtung ist es bekannt, dass die Sehschärfe mit abnehmender Helligkeit abnimmt.

2.8.1.1.4 Zeitdauer der Objektbestrahlung

Bei der Entdeckung eines hellen Punktes ist die Menge des von ihm ausgehenden Lichtes entscheidender als die Expositionsdauer. Um dagegen eine Linie zu entdecken, ist deren Bestrahlungsdauer wichtiger.

2.8.1.1.5 Ort auf der Retina

In der Peripherie des Auges ist der Visus schlechter als in der Fovea, wobei nicht nur der größer werdende Abstand der Sehzellen untereinander, sondern noch mehr die neuronale Verarbeitung, dafür verantwortlich ist.

BORSCHKE [117] fand, dass es dann, wenn das Sehobjekt so angeordnet war, dass sein Bild auf eine 15° aus der Blickrichtung (Fixationslinie) abweichende Stelle auf die Netzhaut fiel, zu einer zunehmenden Beeinflussung des Sehvermögens kam, aber nicht dadurch, dass das Bild der Blendlichtquelle sich der Fovea näherte, sondern indem es dem Bild des Sehobjektes näher rückte, das sich 15° von der Fovea entfernt im Gesichts- bzw. Blickfeld befand.

COBB [118] stellte fest, dass dann, wenn als Sehobjekt ein heller Fleck auf schwarzer Fläche betrachtet wurde, und zwar so, dass dessen Bild vollständig auf den Blinden Fleck fiel, dieses völlig verschwand. Dies war aber dann nicht mehr der Fall, wenn stattdessen an Stelle des beleuchteten Sehobjektes (Blick auf reflektiertes Licht) in eine Lichtquelle geblickt wurde, sondern dass dann „helle Blendung“ trotzdem noch sichtbar war.

Darüber hinaus fand er, dass z. B. eine Klarsichtglühlampe in der Peripherie des Gesichtsfeldes zu einer größeren Irritation beitrug als eine mattierte, und zwar selbst dann, wenn letztere einen größeren Lichtstrom aufwies.

2.8.1.1.6 Adaptationszustand

Die beste Sehschärfe erhält man zentral, wenn das Auge an das Testobjekt adaptiert ist – zumindest im Bereich von Leuchtdichten zwischen etwa 50 cd/m^2 und $50\,000 \text{ cd/m}^2$, also im photopischen Bereich, während im skotopischen Bereich die Sehschärfe bei einer Exzentrizität von etwa $5 - 15^\circ$ am größten ist.

2.8.1.1.7 Augenbewegungen

Schließlich spielen die natürlichen Augenbewegungen auch noch eine Rolle, wenn es um die Sehschärfe geht. Eine einfache Aussage ist dazu jedoch kaum möglich.

2.8.1.1.8 Kombination verschiedener Einflüsse

Bei der Bestimmung der Sehschärfe sind nicht nur die Einflüsse der einzelnen Parameter zu berücksichtigen, sondern auch deren kombinierte Wirkung.

2.8.1.2 Weitere Beiträge zur Sehleistung

Weitere physiologische Größen, die die Sehleistung kennzeichnen, sind u. a. die Unterschiedsempfindlichkeit, die Formempfindlichkeit, die Wahrnehmungsgeschwindigkeit und die Akkommodationsgeschwindigkeit.

Hierbei bedeutet Wahrnehmungsgeschwindigkeit die Schnelligkeit, mit der ein bestimmtes Sehobjekt unter definierten Bedingungen wahrgenommen werden kann. Sie wird wesentlich von der Größe des Sehobjekts, seinem Kontrast zum Hintergrund und von dem Leuchtdichteniveau, d. h. von der Adaptation, bestimmt. Je stärker diese Größen ausgeprägt sind, desto größer ist in der Regel die Wahrnehmungsgeschwindigkeit.

Die Unterschiedsempfindlichkeit stellt das Unterscheidungsvermögen der Augen für Leuchtdichteunterschiede bzw. Kontraste dar. Sie hängt im Wesentlichen von der Sehobjektgröße und dem Leuchtdichteniveau ab. Bei geringen Leuchtdichten (z. B. bei Nacht) ist sie sehr gering und nimmt mit zunehmender Leuchtdichte im Gesichtsfeld zu, bis diese in Blendung übergeht und die Unterschiedsempfindlichkeit wieder herabsetzt.

Die Akkommodationsgeschwindigkeit kennzeichnet die zeitliche Änderung der Fähigkeit des Auges, sich auf eine bestimmte Sehentfernung einzustellen, d. h. zu akkommodieren. Nach DIN 5340 [4] wird darunter definitionsgemäß die akkommodationsbedingte Änderung der Einstellpunktrefraktion je Zeiteinheit verstanden, wobei die Einstellpunktrefraktion der Kehrwert des in Metern gemessenen Einstellpunktabstandes, also des Abstandes des Einstellpunktes (Punkt, der scharf in der Foveola abgebildet wird) vom objektseitigen Hauptpunkt des Auges ist. Unter Akkommodation versteht man dabei die Änderung der Brechkraft durch Brennweitenänderung mit Hilfe des Ziliarmuskels der Augenlinse für die Scharfeinstellung auf eine bestimmte Objektentfernung. Die mögliche Einstellung (Akkommodationsbreite) ist sehr stark vom Alter abhängig, was auch für die Geschwindigkeit, mit der die Akkommodation erfolgt kann, gilt. Die Akkommodationsgeschwindigkeit wird wesentlich vom Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld beeinflusst.

Die Formempfindlichkeit bezeichnet die Gestaltwahrnehmung. Sie stellt die heute noch am wenigsten erforschte Sehleistung dar, weil sie sehr stark von der Gestalt der wahrzunehmenden Objekte abhängt. Die Erkennungsgüte von Schriftzeichen (z. B. Lesbarkeit) stellt eine der Formempfindlichkeit verwandte Sehleistung dar.

Eine weitere Sehfähigkeit stellt das querdysparate Tiefensehen, die Stereopsis, dar. Sie wird als die höchstentwickelte Binokularfunktion betrachtet und ermöglicht das korrekte Erkennen der räumlichen Anordnung von Gegenständen und sichert damit insbesondere die Handlungssicherheit einer Person bezüglich der räumlichen Tiefe.

Da davon auszugehen ist, dass durch Blendung, und zwar insbesondere durch monokulare Blendung, die Stereopsis vorübergehend gestört wird, wäre auch eine Untersuchung dieser Sehfähigkeit unter Blendungsbedingungen sehr empfehlenswert. Aus Zeitgründen musste in den hier durchgeführten Untersuchungen aber darauf verzichtet werden.

2.8.2 Physiologische und psychologische Blendungsbewertung

Bis zum Jahre 1999 galt eine Prüfung des sogenannten mesopischen Kontrastsehens, d. h. des Dämmerungssehens insbesondere im Bereich von Umgebungsleuchtdichten zwischen $0,003 \text{ cd/m}^2$ und 2 cd/m^2 , als obligatorisch im Zusammenhang mit dem Erwerb einer Fahrerlaubnis. Dabei wurde neben der Sehschärfe unter mesopischen Bedingungen insbesondere die Kontrastempfindlichkeit ermittelt und die im Test festgestellte Kontrastschwelle begrifflich etwas irreführend als „Dämmerungssehschärfe“ bezeichnet. Die Prüfung des mesopischen Kontrastsehens kann ferner unter zusätzlicher Blendung durchgeführt werden, wobei die Blendung entsprechend der Situation im Straßenverkehr von links kommt. Diese Untersuchung wird als Prüfung der Blendempfindlichkeit bezeichnet, obwohl nur eine Sehleistung unter Blendung gemessen wird [202]. Dämmerungssehschärfebestimmung und Blendempfindlichkeit werden nach dem anerkannten berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 25 vorgenommen [304] und zur Eignungsprüfung für innerbetriebliche Aufgaben angewandt.

Nach den Empfehlungen der DOG [202] wird die Dämmerungssehschärfe unter Blendbedingungen mit einem als Punktlichtquelle mit einem maximalen Durchmesser von 20° unter einem Blendwinkel von 3° links von der Mitte des Sehzeichens angebrachten Blendlicht ermittelt. Dadurch soll eine Hornhautbeleuchtungsstärke von $0,35 \text{ lux}$ hervorgerufen werden.

Die Blendempfindlichkeit wird im Wesentlichen durch die physiologische Blendung bedingt und stellt die Verringerung der Sehfähigkeiten dar, die durch die Schleierleuchtdichte bewirkt wird, die sich als Folge von Streulicht auf der Retina – genauer gesagt in der Fovea – ergibt, und zwar durch Blendlichtquellen außerhalb des Fixationspunktes. Dieser Effekt auf die Sehfunktionen ist besonders dann stark, wenn die Umgebungsleuchtdichte relativ gering ist, d. h. bei Autofahrten, bei Dämmerung und in der Nacht. Dabei wird der Effekt noch verstärkt, wenn ein Autofahrer versucht, Gegenstände mit niedrigem Kontrast zu identifizieren [62]. THEEUWES et al. berichten auch, dass sich die Entfernung, in der Gegenstände entdeckt werden konnten, von $35,4 \text{ m}$ auf $27,4 \text{ m}$ verringerte, wenn Blendung durch eine Blendlichtquelle mit $1\,380 \text{ cd}$ auftrat und dass dabei auch Gegenstände übersehen wurden [354].

Durch die vorübergehende Fehladaptation infolge schnell sich ändernder Leuchtdichten von Gegenständen im Gesichtsfeld erfolgt eine Reduzierung in grundlegenden Sehfunktionen wie z. B. in der Kontrastempfindlichkeit und in der Formerkennbarkeit.

Der Grad der Funktionsbeeinträchtigung hängt von der Änderung der Leuchtdichte ab, auf die sich das Auge anpassen muss. Bei den vorübergehenden Sehbeeinträchtigungen kommt es zu schnellen Änderungen des Blendungsgrades und Wechseln in

der Leuchtdichte der gesehenen Szene wie auch zu schnellen Augenbewegungen in Form von Sakkaden.

Das gestreute Licht im Auge, das zur Blendung führt, kann man durch eine Übertragung mit einem festen Leuchtdichtewert auf das Netzhautbild berücksichtigen, und zwar als sogenannte Schleierleuchtdichte (s. Gl. (2.13)). Diese wiederum ist eine Funktion des Blendwinkels, d. h. des Winkels zwischen Blendlichtquelle und Blickrichtung. Sie addiert sich zur Umgebungsleuchtdichte und reduziert den Kontrast des zu betrachtenden Gegenstandes.

Allgemein wird eine Beeinträchtigung der Sehfunktionen in Anwesenheit einer Blendlichtquelle umso mehr steigen, je heller diese Quelle, je niedriger die Helligkeit des Sehobjektes und je kleiner der Winkel zwischen Sehobjekt und Blendlichtquelle ist.

Eine Ausnahme besteht dann, wenn das Sehobjekt selbst sehr hell ist, denn dann kann eine Beleuchtung des Auges dessen Sehfähigkeit verbessern [118].

Die messtechnisch erfassbare Auswirkung einer Blendung, also der Reduzierung von Sehfunktionen, kann durch die *physiologische Blendungsbewertung* ausgedrückt werden. Ihr Maß ist der Blendungsgrad, welcher als der Quotient der Kontrastempfindlichkeit ohne und mit Blendung (K_0 bzw. K_{Bl}) dargestellt wird.

Der Kehrwert der Kontrastempfindlichkeit, die Kontrastschwelle, wird dabei durch den geringsten wahrnehmbaren photometrischen Kontrast ausgedrückt. Somit ergibt sich für die Kontrastschwelle die Gleichung für den Blendungsgrad zu

$$n_{Bl} = \frac{K_{Bl}}{K_0} \quad (2.18)$$

Dabei wird der Kontrast ohne Blendung

$$K = \frac{L_O - L_U}{L_U} = \frac{\Delta L}{L_U} \quad (2.19)$$

als sogenannter „WEBER-Kontrast“ benutzt, und zwar mit L_O als Infeldleuchtdichte des Sehobjektes (Objektleuchtdichte, Ziel, Target) und L_U als Umfeldleuchtdichte (mittlere Leuchtdichte; Umgebungs- oder Hintergrundleuchtdichte).

Durch die Schleierleuchtdichte wird eine Reduzierung des retinalen Kontrastes bewirkt und dies führt zu einem messbaren Blendungseffekt. Addiert man die äquivalente Schleierleuchtdichte L_V sowohl zur Target- als auch zur Hintergrundleuchtdichte, so erhält man für den Kontrast in Gegenwart einer Blendlichtquelle:

$$K_n = \frac{(L_O + L_V) - (L_U + L_V)}{L_U + L_V} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_V} = K \cdot \frac{L_U}{L_U + L_V} \quad (2.20)$$

Daraus ist zu erkennen, dass der Kontrast abnimmt, wenn L_V ansteigt.

Wenn also das Verhältnis des Kontrastes des Objektes zum Schwellenkontrast als Folge der Gegenwart einer Blendlichtquelle abnimmt, dann wird das Objekt schlechter gesehen und kann vollständig im entstandenen Schleier verschwinden.

Man kann auch die durch die Blendung resultierende relative Anhebung K_{rel} der Kontrastschwelle ausdrücken durch

$$K_{\text{rel}} = \frac{\Delta L / L_U}{\Delta L / (L_U + L_V)} = \frac{(L_O - L_U) \cdot (L_U + L_V)}{(L_O - L_U) \cdot L_U} = \frac{(L_U + L_V)}{L_U} \quad (2.21a)$$

Diese Kontrastschwelle beträgt für kleine bis mittlere Gegenstände nach BLACKWELL ca. 1 % [321], wodurch sich die Beziehung

$$K_{\text{rel}} = \frac{0,01}{0,01 \cdot L_U / (L_U + L_V)} \quad (2.21b)$$

ergibt. Relative Anhebungen durch eine Blendlichtquelle müssen daher einen Wert von ca. 2 überschreiten, damit sie zu einer signifikanten physiologischen Blendung führen [261].

Die relative Erhöhung der Kontrastschwelle durch Blendung wird nach DIN 5340 [4] durch die Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL beschrieben, welche aber durch die Kontrastempfindlichkeit, den Kehrwert der Kontrastschwelle und somit durch den photometrischen Kontrast K , ausgedrückt werden soll. Somit ergibt sich aus der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{Bl} mit Blendung und der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_0 ohne Blendung für die relative Kontrastschwellerhöhung (relative Schwellenerhöhung durch Blendung)

$$T_{\text{Bl}} = \frac{\Delta L_{\text{Bl}} - \Delta L_0}{\Delta L_0} = \frac{K_{\text{Bl}} - K_0}{K_0} \quad (2.22)$$

Um den Einfluss einer Blendlichtquelle auf den Kontrast eines Bildes zu beschreiben, wurde ein Lichtstrefaktor LSF eingeführt [90] und definiert als

$$LSF = \frac{L_S}{E}, \quad (2.23)$$

wobei

L_S := äquivalente Schleierleuchtdichte und

E := Beleuchtungsstärke am Auge

ist. Dabei kann man L_S aus zwei nacheinander erfolgenden Messungen der Kontrastschwelle ermitteln, und zwar einmal mit (M_1) und einmal ohne Blendlichtquelle (M_2), d. h. man erhält

$$L_S = L_U \cdot \left(\frac{M_2}{M_1} - 1 \right), \quad (2.24)$$

wobei L_U die mittlere Leuchtdichte der Umgebung ist.

Für die Gültigkeit dieser Gleichung muss als eine Voraussetzung erfüllt sein, dass eine feste Beziehung zwischen dem Kontrast des Ziels und dem Bild auf der Netzhaut besteht.

Dies ist bei einem lichtstreuenden Abbildungssystem, wie es das reale Auge darstellt – im Gegensatz zu einem idealen Abbildungssystem – nicht selbstverständlich, sondern hängt sowohl von Objektkontrast und -geometrie als auch von der Kontrastdefinition ab.

Mit dieser Frage haben sich THAUNG et al. [91] ausführlich befasst und auch zu Korrekturfaktoren Stellung bezogen. Sie kamen dabei zu dem Ergebnis, dass die Definition des Kontrastes bei normalsichtigen Augen nicht von großer Bedeutung ist, allerdings bei Menschen mit einer Katarakt berücksichtigt werden muss, d. h. es sollte bei Gitterstrukturen die Michelson-Kontrastdefinition

$$M_M = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (2.25)$$

entsprechend Gl. (2.20) verwendet werden und bei z. B. Buchstabentesttafeln diejenige nach WEBER

$$M_W = \frac{L_U - L_{\text{Target}}}{L_U} \quad (2.26)$$

benutzt werden, da man sonst einen Fehler von etwa dem Faktor 2 macht.

Außerdem wurde gezeigt, dass Adaptation nur eine geringe Rolle spielt, wenn die Blendleuchtdichten größer als etwa 10 cd/m^2 waren.

Dass in der vorstehenden Definitions-Gleichung im Zähler $L_U - L_{\text{Target}}$ statt $L_I - L_U$ wie im WEBER-Kontrast K (s. Gl. (2.19)) verwendet wird, liegt daran, dass zum einen bei Buchstaben die Leuchtdichte kleiner als diejenige des Umfeldes, zum anderen aber die Infeldleuchtdichte L_I meist größer als diejenige des Umfeldes ist und man so negative Werte für den Kontrast vermeidet, ansonsten aber Target und Infeld gleiche Bedeutung haben, wie in der ursprünglichen Definitionsgleichung nach WEBER.

Versucht man die theoretischen Betrachtungen und experimentellen Erkenntnisse bei Kontrastuntersuchungen, die den Einfluss der Anwesenheit einer Blendlichtquelle beinhalten, auf die Auswirkungen einer Blendung zu übertragen, so könnte man das Nachbild durch eine zeitlich veränderliche äquivalente Nachbildschleierleuchtdichte L_{SN} beschreiben, die sich über das Bild auf der Retina legt.

Aufgrund zweier unterschiedlicher Zielgruppen, nämlich zum einen des Straßenverkehrs und zum anderen der Innenraumbelichtung, wurden für die psychologische Blendung auch zwei Bewertungen entwickelt, die sich in entsprechenden CIE-Publikationen niedergeschlagen haben [310, 311].

Bei der psychologischen Messung wird eine Stufung z. B. zwischen „gerade erkennbar“ bis „schmerzhaft“ durchgeführt, die nicht auf quantitativ messbaren Größen, d. h. Observablen, beruht, sondern auf dem Grad des „Unangenehmseins“.

Die *psychologische Blendungsbewertung* stellt daher die Bewertung der rein subjektiv störenden Blendung, also der Störimpfindung, welche zum Beispiel als ablenkend oder unangenehm beschrieben wird, dar.

Als Maß für die Störimpfindung wird die Blendungszahl definiert. Da es sich jedoch um subjektive Bewertungen von Blendereignissen handelt, wird nach DIN 5340 keine Formel zu deren Berechnung definiert, da je nach Anwendungsfall verschiedene Parameter mit einfließen können [4].

In der Praxis wird die psychologische Blendung durch eine Blendzahl beschrieben (vgl. [8]), die von der Blendleuchtdichte, dem Raumwinkel der Blendlichtquelle, der Umfeldadaptationsleuchtdichte und von einem Positionsfaktor abhängt. Dabei beziehen sich die abgeleiteten Zusammenhänge auf die Grenze zwischen zulässiger und störender bzw. zwischen noch annehmbarer und gerade unannehmbare Blendung (vgl. engl. *borderline between comfort and discomfort glare*, BCD). In jedem Falle ist bei der psychologischen Blendung nur ein subjektives Urteil möglich. Der Gegenbeweis, dass eine Einrichtung oder ein Gerät nicht blendet, ist objektiv nicht möglich.

Die Blendzahlen reichen üblicherweise von 9 bis 1, von unmerklicher Blendung (Blendzahl 9) über befriedigende Blendungsbegrenzung (7), gerade zulässige Blendung (5), störende Blendung (3) bis zu unerträglicher Blendung (Blendzahl 1). Eine in der Beschreibung etwas abweichende Benennung haben erstmals DE BOER [271] und DE BOER et al. angegeben [241]:

In der DE BOER-Skala werden die Zwischenwerte 2, 4, 6 und 8 nicht berücksichtigt; sie können aber dennoch bei einer Wertung mit der entsprechenden Ziffer angegeben werden. Es ist zu beachten, dass diese Skala gewissermaßen „um die Ziffer 5 herum“ angeordnet wurde. Dabei zeigte die Erfahrung, dass eine kleinere Zahl an Stufen zu einer geringeren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse führte, während eine größerer Zahl andererseits den jeweiligen Beobachter in seiner Bewertung unsicherer macht und sich deshalb eine größere Streuung der Werte ergibt.

Darüber hinaus ist die Entscheidung zu treffen, ob eine Lichtquelle als psychologisch unangenehm oder nicht unangenehm betrachtet wird („borderline between comfort and discomfort, BCD“).

Es ist jedoch zu beachten, dass Personen mit verminderter Unterschiedsempfindlichkeit (Kontrastempfindlichkeit) psychologische Blendungen deutlich als schlechter beurteilen, was auf einen Einfluss zunehmender Trübung der Augenlinse auch bei der subjektiven Blendungsbeurteilung schließen lässt.

Tab. 2.8 Einteilung und Bewertung der psychologischen Blendung nach der DE BOER-Skala (unter Berücksichtigung von [239], * nach [261])

Grad	Psychologische Empfindung/ Bewertung	Originalbezeichnung bzw. in anderen Publikationen verwendet	Bedeutung
1	unerträglich	(unbearable)	bad
2			
3	störend	(distracting / disturbing*)	inadequate
4			
5	gerade akzeptabel	(just acceptable / just admissible*)	fair
6			
7	zufrieden stellend	(satisfactory / acceptable)	good
8			
9	gerade bemerkbar	(unnoticeable / just noticeable / noticeable*)	excellent

Die Bewertung nach der DE BOER-Skala kann durch die jeweils vor der Blendung „erlebte“ Helligkeit beeinflusst werden. Man spricht daher auch von einem sogenannten „Bereichs-Effekt“ [320], was ein Handicap im Hinblick auf psychometrische Daten bedeutet. Außerdem wurde bei Untersuchungen festgestellt, dass z. B. erfahrene Kraftfahrer in Europa um etwa 0,7 geringere DE BOER-Werte bei Laborversuchen angaben als ihre Kraftfahrerkollegen in USA, was auf eine längere Gewöhnung an entsprechende hellere Lichtquellen in USA zurückgeführt wurde [320].

Im Straßenverkehr werden Blendzahlen von 5 bis 7 als tolerierbar angesehen. Dabei geht man davon aus, dass eine Beleuchtungsstärke von 0,1 lx am Auge als Schwelle zwischen „nichtblendend“ und „blendend“ angesehen werden kann, d. h. dass die Beleuchtungsstärke einer Blendlichtquelle beginnt, unbehaglich, ungemütlich bzw. unbequem („uncomfortable“) zu werden [258]. Eine Beleuchtungsstärke von 1 lx bis 3 lx scheint dagegen auszureichen, um entsprechend „beleuchtete“ Fahrer dazu zu veranlassen, ihre eigenen Frontscheinwerfer auf Fernlicht zu schalten, um dem Entgegenkommenden zu signalisieren, dass die Blendung nicht akzeptabel ist [259, 260]. Eine Beleuchtungsstärke von 3 lx bis 10 lx wird als eine solche betrachtet, bei der das Unbehagen unerträglich wird [45, 149, 261 – 270].

Wenn daher als Ergebnis einer Untersuchung eine Ermutigung zum häufigeren Benutzen des Fernlichtes ausgesprochen wird, weil Abblendlicht in vielen Situationen keine ausreichende Beleuchtung liefert [297], dann darf dabei aber die damit verbundene Gefahr durch vermehrte Blendung nicht übersehen werden.

SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS [261] stellten fest, dass die Bewertung nach DE BOER im Bereich von 0,003 lx bis 20 lx mit dem Logarithmus der Blendbeleuchtungsstärke korreliert und dass das Unbehagen bei großen Winkeln des Gesichtsfel-

des, d. h. zwischen 1° bis 20° , und darüber hinaus bei höheren Hintergrundleuchtdichten im Bereich von $0,015 \text{ cd/m}^2$ bis 15 cd/m^2 , abnahm. OLSON und SIVAK [262] fanden einen direkten Zusammenhang zu der DE BOER-Skala sowohl bei Laborstudien zwischen $0,0004 \text{ lx}$ und $6,5 \text{ lx}$ als auch bei Feldstudien im Bereich von $0,003 \text{ lx}$ und 11 lx , wobei aber die angegebenen Werte bei den Laboruntersuchungen generell geringer waren, d. h. einer größeren Belästigung als im Feld entsprachen. Daraus schlossen diese Autoren, dass Schätzungen bzw. Annahmen des akzeptablen Unbehagens aufgrund von Laboruntersuchungen zu konservativ sind.

Einen Zusammenhang im Bereich von $0,03 \text{ lx}$ und 3 lx bzw. zwischen $0,5 \text{ lx}$ und 8 lx fanden auch SIVAK et al. [266, 267] mit der DE BOER-Skala, wobei SIVAK et al. zusätzlich feststellten, dass die Blendlichtdauer zwischen $0,125 \text{ s}$ und 2 s eine Korrelation mit der DE BOER-Skala aufwies, und zwar einen geringeren als derjenige der Beleuchtungsstärke [266]. In diesem Beleuchtungsstärkeniveau, nämlich zwischen $0,1 \text{ lx}$ und 10 lx fand auch LEHNERT eine Korrelation mit der DE BOER-Skala und außerdem einen starken Zusammenhang mit der Blendlichtdauer im Bereich zwischen $0,2 \text{ s}$ und 10 s [270], der aber ebenfalls geringer ausfiel als der der Beleuchtungsstärke.

FLANNAGAN fand für Winkelgrößen der Blendlichtquelle zwischen $0,3^\circ$ und $0,6^\circ$ weder einen Einfluss auf die physiologische noch auf die psychologische Blendung [149]. Auch ALFERDINCK et al. fanden im Bereich von $(0,0006^\circ)^2$ bis $(0,15^\circ)^2$ nur einen geringen Effekt der Blendlichtflächengröße auf die Bewertung der psychologischen Blendung, wobei der Effekt weniger als eine Stufe in der Skala nach Tab. 2.7 betrug [269].

SIVAK et al. fanden heraus, dass eine Vergrößerung der Blendlichtquelle das „Komfortniveau“ anhebt, weil dadurch die Leuchtdichte bei konstanter Beleuchtungsstärke verringert wird [266]. Dabei wurde aber auch festgestellt, dass Blendlichtquellengrößen im Bereich von $0,3^\circ$ bis $0,6^\circ$ nur einen geringen Einfluss auf die DE BOER-Bewertung hatten, wobei die geringere Fläche einen geringeren DE BOER-Wert ergab, also unangenehmer empfunden wurde [266]. Wenn daher bisher überwiegend davon ausgegangen wurde, dass eine kleinere Blendlichtquellenfläche die psychologische Blendungsbewertung hinsichtlich einer Erhöhung beeinflusst, erklärt dies zumindest teilweise die aufgrund kleinerer Austrittsfläche bei Entladungslampen reklamierte und beobachtete größere psychologische Blendung als Folge der größeren Leuchtdichte. In der Praxis sind Scheinwerfer mit Entladungslampen im Mittel um den Faktor 1,8 kleiner als solche mit Halogenlampen [314]. Um daher durch Entladungslampen verursachte psychologische Blendung zu verringern, müsste man deren beleuchtete Oberfläche verkleinern. Eine aus der Leuchtdichte resultierende Beleuchtungsstärke von mehr als 10 lx wird geradezu sicher als unerträglich angesehen.

In einer ausführlichen Untersuchung hatten SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS gefunden, dass sich eine Bewertung der psychologischen Blendung nach der DE BOER-Skala um 2 Stufen veränderte, wenn sich die Beleuchtungsstärke E_B der Blendlichtquelle um eine Zehnerpotenz änderte [261]. Dabei gingen sie bei einem in den Untersuchungen zugrunde liegenden, bestimmten schematischen Straßenverkehrs-Szenario bei $E_B = 1 \text{ lx}$ von einer DE BOER-Bewertung $W = 3,5$ aus. Für

eine gegebene Beleuchtungsstärke E_B am Ort des Fahrerauges wurde von SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS dann die folgende Beziehung entwickelt, aus der sich die DE BOER-Bewertung W wie folgt ergibt:

$$W = 5 - 2 \cdot \log \frac{E_B}{0,02 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{L_U}{0,04}} \right) \cdot \Theta^{0,46}} \quad (2.27a)$$

wobei die Beleuchtungsstärke E_B der Blendlichtquelle in lx, die Leuchtdichte L_U des Adaptationsfeldes in cd/m^2 und der Winkel Θ zwischen der Blendlichtquelle und der Blickrichtung in Grad eingesetzt werden [261] bzw.

$$W = 5 - 2 \cdot \log \frac{E_B}{0,003 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{L_U}{0,04}} \right) \cdot \Theta^{0,46}} \quad (2.27b)$$

wenn θ in Winkelminuten eingesetzt wird, wie in [261] angegeben.

Die genauere Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass damit Angaben der W -Werte im Bereich von 1 bis 2, also dort, wo Blendung „mehr als störend“ empfunden wird, aufgrund zu großer Abweichungen, nicht mehr genau genug gemacht werden können. Hier müsste der Faktor „0,04“ in Gl. (2.27) als Funktion der Beleuchtungsstärke E_B der Blendlichtquelle ermittelt werden, und zwar wächst der Faktor „0,04“ mit der Adaptations-Leuchtdichte an. Der Faktor „0,04“ wurde in den Untersuchungen von SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS als diejenige Blendleuchtdichte in cd/m^2 ermittelt, die sich aus dem Schnittpunkt der beiden Asymptoten bestimmt, die psychologische Blendungsbewertung für geringe und größere Adaptationsleuchtdichte aufweist.

Zweifelsohne ist es das Verdienst von SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS, mit der Gl. (2.27b) erstens eine Berechnungsmöglichkeit für die DE BOER-Werte bereitgestellt zu haben und zweitens einen Zusammenhang zwischen psychologischer und physiologischer Blendung aufgezeigt zu haben. Es darf aber gleichzeitig nicht übersehen werden, dass Gl. (2.27b) für ein ganz bestimmtes Szenarium, das zwar nicht ungewöhnlich für Fahrzeugscheinwerfer ist, gilt, das aber damit auch durchaus Grenzen aufweist und nicht ohne weiteres verallgemeinert werden darf.

In Gl. (2.27b) stellt die Hornhautbeleuchtungsstärke die entscheidende photometrische Größe zur Bestimmung der psychologischen Blendung dar. Diese Vorgehensweise hat sich zumindest, soweit es die Betrachtungen der Scheinwerfersysteme aus den 80er Jahren betrifft, bewährt. Inwieweit dies aber auch für heute bereits vorhandene Projektionssysteme und für zukünftige LED-Scheinwerfer und „Pixel-Scheinwerfer“, die mittels des Einsatzes von Mikrospiegeln (Digital Mirror Device) realisiert werden, zutrifft, kann ohne weitere Untersuchungen nicht bestätigt werden. Zumindest ist darüber nachzudenken, ob hier nicht der Leuchtdichte eine größere Bedeutung zugeordnet werden muss.

Von BHISE et al. wurden aus Gl. (2.27) für das Ablendlicht für die europäischen Verhältnisse der 70er Jahre DE BOER-Werte zwischen 6 und 8 angegeben [259].

Ein Wert von 4 wird dagegen als ein solcher betrachtet, der zur Betätigung der Lichtlupe führt, um den anderen Fahrer aufzufordern, seinen Scheinwerfer abzublenden. Dabei kann man davon ausgehen, dass ein DE BOER-Wert von 3,8 bei 1 lx erreicht wird, während 0,2 lx einem Wert von 5,2 entsprechen und 5 lx bereits als störend (DE BOER-Wert: 2,4) empfunden werden.

PORTER et al. fanden in ihren umfangreichen Tests mit Versuchspersonen und unterschiedlichen Frontscheinwerfertypen zwar eine grundsätzliche Bestätigung der Beziehung gemäß Gl. (2.27), schlugen aber aufgrund ihrer eigenen Ergebnisse die nachfolgende Modifikation vor [326]:

$$W = 6,79 - 2 \cdot \log \frac{E_{B,max}}{0,003 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{L_U}{0,04}} \right) \cdot \Theta_{max}^{0,46}} . \quad (2.28)$$

In Gl. (2.28) wird mit $E_{B,max}$ die maximale Beleuchtungsstärke in lx eingesetzt, die vom Scheinwerfer am Auge des Fahrers erzeugt wird, und mit Θ_{max} der Winkel zwischen der Blickrichtung und den Scheinwerfern an dem Ort, an welchem die höchsten Beleuchtungsstärkewerte erreicht werden.

Hier ist aber anzumerken, dass in [326] bereits in der Gl. (2.27a) statt des Faktors 0,02 abweichend 0,003 verwendet wird – zumindest muss dann angegeben werden, wie der Winkel Θ_{max} einzusetzen ist.

Bislang existieren nur wenige Studien, die einen Zusammenhang zwischen psychologischer und physiologischer Blendung belegt haben. So fanden z. B. THEEUWES und ALFERDINCK [274], dass die von SCHMIDT-CLAUSEN und Bindels nach Gl. (2.27) berechneten DE BOER-Werte eine zu hohe Blendungsbewertung ergaben. So ergab sich in deren Untersuchung zwar ein Zusammenhang der psychologischen Blendungsbewertung mit der Beleuchtungsstärke, aber oberhalb von etwa 0,55 lx verschlechterte sich die Fahrleistung bis etwa 1,1 lx nicht mehr. Zu beachten ist aber auch, dass bei solchen Bewertungen die Schwierigkeiten der jeweils zu erfüllenden Aufgaben einen Einfluss haben können. Auch die Höhe der Umgebungsbeleuchtung entlang der Strasse spielt eine wichtige Rolle im Blendungsempfinden.

Da bei der Beurteilung der psychologischen Blendung meist strengere Anforderungen gestellt werden, zeigt die Erfahrung, dass eine Lichtquelle, die keine psychologische Blendung hervorruft, auch physiologisch als blendfrei angesehen werden kann. In manchen Fällen ist eine gewisse Blendung sogar erwünscht, nämlich dann wenn z. B. mit Beleuchtungseinrichtungen der Eindruck von Glanz und Festlichkeit erzeugt werden soll.

Eine andere Vorgehensweise der Bewertung findet sich in der DIN 5035 [9], in der Güteklassen der Blendungsbegrenzung angegeben sind. Dabei wird die psychologische Blendung auch aufgrund von Grenzleuchtdichtekurven bestimmt. Dazu müssen insbesondere die Leuchtdichte der Blendquelle in Beobachtrichtung und die mittlere Beleuchtungsstärke in der Nutzebene bekannt sein.

Unter Berücksichtigung der ursprünglichen Beziehung nach HOLLADAY wurde eine vereinheitlichte und vereinfachte Methode („unified glare rating method“, UGR-Methode) zur Ermittlung der (UGR-) Blendziffer bzw. -zahl entwickelt [10]. Das Verfahren wird vor allem für die künstliche Beleuchtung von Innenräumen angewendet und wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission CIE entwickelt, um die psychologischen Direktblendungen bewerten und begrenzen zu können [2].

Das UGR-Verfahren löst die Anwendung der sogenannten SÖLLNER-Grenzkurven-Diagramme als Blendungsbewertungsverfahren ab. Der wesentliche Unterschied zu dem bisherigen Vorgehen besteht darin, dass der UGR-Wert zusätzlich von den Positionen und Anordnungen der Leuchten sowie vom Standort des Beobachters abhängt. Genau genommen ist der UGR-Wert abhängig von der jeweiligen Hintergrundleuchtdichte, der Leuchtdichte L_S der Blendquelle (in cd/m^2) in Richtung zum Beobachter, von der Größe des Raumwinkels Ω_S (in sr) unter dem die Blendquelle gesehen wird, dem sogenannten GUTHschen Positionsindex p , der die Lage der Blendquelle im Gesichtsfeld beschreibt, und der Umfeldleuchtdichte L_b (in cd/m^2) und wird wie folgt errechnet:

$$UGR = 8 \cdot \log \left[\frac{0,25}{L_b} \cdot \sum_S \frac{L_S^2 \cdot \Omega_S}{p^2} \right] \quad (2.29)$$

Je höher die Leuchtdichte der Blendquelle und je größer die Blendquelle ist, desto stärker ist die Blendempfindung, wobei die Leuchtdichte quadratisch eingeht.

Je geringer die Umfeldleuchtdichte, d. h. je größer der Kontrast zwischen der Lichtquelle und der Umgebung, ist, desto stärker wird die Blendung empfunden. Die Blendwirkung wird dagegen umso geringer, wenn die Blendquelle vom Zentrum weiter zur Peripherie des Gesichtsfeldes rückt. Dies wird durch den Positionsindex p beschrieben, der von der räumlichen Anordnung der Lichtquelle(n) abhängt.

Die logarithmische Beziehung in der UGR-Formel führt dazu, dass die UGR-Werte mit einer linearen Blendungsempfindung verknüpft sind.

Das UGR-Verfahren wird zur Bewertung bestehender oder geplanter Beleuchtungsanlagen eingesetzt. Dabei gibt es zum einen die Möglichkeit, die Blendungsbewertung anhand einer Tabelle vorzunehmen, in der typische Raum- und Beleuchtungssituationen vorgegeben sind. Zum anderen können die beschriebenen Beleuchtungsparameter gemessen und der UGR-Wert berechnet werden. Das Vorgehen in komplexen Fällen mit mehreren Leuchten oder Beleuchtungssystemen ist in verschiedenen Abhandlungen beschrieben, u. a. in [13-15].

Die Grenzen der Anwendbarkeit des UGR-Verfahrens hängen von der Größe der Blendlichtquelle(n) und vom Anteil der indirekten Strahlung aus der Lichtquelle ab [12, 14, 15]. So ist es nur für Leuchten anwendbar, die einen nicht zu großen indirekten Strahlungsanteil haben (nur bis etwa 65 %). Im Vergleich zu direkt strahlenden Leuchten können Anlagen mit Leuchten, die einen Indirektanteil haben, besonders in der unmittelbaren Deckenumgebung der Blendlichtquelle eine hohe Leuchtdichte aufweisen. Hierdurch werden die angestrahlten Flächen vom Beobachter als neue

Blendlichtquelle und nicht mehr als Hintergrund empfunden. Generell ist das Verfahren bei großen Lichtquellen und bei leuchtenden Decken, die unter Raumwinkeln von mehr als 0,1 sr gesehen werden, nicht mehr anwendbar. Auch für sehr kleine Lichtquellen, die unter einem Raumwinkel von weniger als 0,0003 sr beobachtet werden, ist das Verfahren nicht anwendbar.

Die Blendungsempfindung steigt direkt proportional mit dem UGR-Wert an. Die typischen Werte liegen zwischen 10 und 30. Bei einem UGR-Wert von 13 wird die Blendung als gerade wahrnehmbar und bei einem Wert von 28 und darüber als unerträglich (unzumutbar) [14] empfunden. Grenzwerte für den UGR-Wert, die ein gerade noch akzeptables Blendungsniveau beschreiben, sind je nach Anwendungsfall in verschiedenen Vorschriften, Normen und Empfehlungen festgelegt. So enthält DIN EN 12464 [16] maximal zulässige UGR-Werte für die Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen in Abhängigkeit von den Arbeits- und Sehaufgaben.

Da eine blendungsfreie oder blendungsarme Ausführung ein wesentliches Qualitätsmerkmal einer Beleuchtungsanlage ist, wurden von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) und von der Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) Beleuchtungsanlagen anhand der UGR-Werte in Blendungs-Güteklassen eingeteilt. Die Bezeichnungen lauten A, B, C, D, E bei CIE und A, 1, 2, 3 bei der LiTG [14]. Mit der Angabe von Güteklassen erhält man eine schnelle Information über die Blendungseigenschaften von Beleuchtungsanlagen.

Interessant sind auch Beobachtungen, die beim Vergleich des Blendpotenzials, das von einer Natriumdampf- oder von einer Quecksilberdampf Lampe ausgeht, gemacht wurden. Es stellte sich nämlich heraus, dass dann wenn Beobachter zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten diesen Vergleich machten, sie unmittelbar nach der jeweiligen Bestrahlung die von einer Quecksilberdampf Lampe bei niedrigen Leuchtdichten ausgehende Blendung schwächer einstufen als 1 Minute danach. Genau umgekehrt war der Eindruck bei höheren Leuchtdichten [240]. Man kann daher davon ausgehen, dass der Eindruck nach 1 Minute durch die Adaptation abgemildert erscheint.

Eine etwas von Gl. (2.29) abweichende Berechnung wird beim sogenannten britischen Glare-Index GI benutzt

$$GI = 10 \cdot \log \left[\frac{0,45}{L_b} \cdot \sum_s \frac{L_s^{1,6} \cdot \Omega_s^{0,8}}{\rho^{1,6}} \right]. \quad (2.30)$$

In der CIE-Publikation No. 55 [311] wurde ein Blendungsindex GI (Glare Index) eingeführt, der ähnlich demjenigen des UGR-Verfahrens bei größerer psychologischer Beeinträchtigung höhere Werte beinhaltet. So lässt sich die DE BOER-Skala gewissermaßen umrechnen in GI-Werte (Tabelle 2.9) und auch mit den UGR-Werten vergleichen.

Tab. 2.9 Vergleich der DE BOER-Skala mit den GI-Werten nach CIE-Publikation No. 55 und mit der UGR-Skala

DE BOER	Bezeichnung		GI-Wert	Bezeichnung	UGR	Bewertung
1	unerträglich	(unbearable)	600	just intolerable	> 28	unerträglich (unzumutbar)
2						
3	störend	(distracting)	150	just uncomfortable		
4						
5	gerade akzeptabel	(just acceptable)	35	just acceptable		
6						
7	zufrieden stellend	(satisfactory)				
8						
9	gerade bemerkbar	(unnoticeable)	8	just perceptible	13	gerade wahrnehmbar

Die Ermittlung der GI-Werte erfolgt auf ähnliche Art und Weise wie beim UGR-Verfahren, d. h. es gehen ähnlich der Gl. (2.29) die Leuchtdichten L_s und die Raumwinkel Ω_s der Blendlichtquellen, die Leuchtdichte L_f im Gesichtsfeld und eine empirische Gewichtungsfunktion $f_s(\Theta)$ des Winkels zwischen der Lichtquelle und der Blickrichtung ein, wie in Gl. (2.31) angegeben:

$$GI_{Innen} = \sum_s \frac{(L_s)^a \cdot (\Omega_s)^b}{(L_f)^c \cdot f_s(\Theta)} \quad (2.31)$$

Die Konstanten a, b und c sind dabei ebenfalls empirisch zu ermitteln. Nähere Angaben dazu macht z. B. VOS [309]. Dabei wird festgestellt, dass die a-Werte stets größer als die b-Werte sind und damit die Leuchtdichte stärker gewichtet wird als der Raumwinkel, was wiederum bedeutet, dass eine Lichtquelle mit größeren Abmessungen weniger unangenehm betrachtet wird als eine kleinere Lichtquelle mit derselben Lichtstärke. Hierbei ist zu bemerken, dass bei der physiologischen Blendung keine unterschiedliche Gewichtung von Leuchtdichte und Raumwinkel erfolgt, da in den entsprechenden Gleichungen Leuchtdichte und Raumwinkel ohne Exponenten vorkommen (vgl. z. B. Gl. (2.8), hier kommt nur das Produkt $L \cdot \Omega = E_B$ vor), d. h. $a = b$ bei physiologischer Blendung.

Es ist eigentlich ein wenig überraschend, dass in allen Bewertungsbeziehungen der psychologischen Blendung bislang keine psychologischen Variablen enthalten sind. Die bisherigen Modelle berücksichtigen weder individuelle Unterschiede in der Beeinträchtigungsempfindung noch einen Helligkeitspegel, dem eine Person vor der Blendung ausgesetzt war. So berichtet z. B. VEITCH davon, dass Personen Blendung, die unmittelbar nach intensiver Bildschirmarbeit auftrat, als weniger stark bewerteten als solche nach einer Ruhephase [313].

Die Bewertung der Gefahren bzw. Beeinträchtigungen durch inkohärente optische Strahlung, die von künstlichen Quellen ausgeht, ist weitaus komplizierter als diejenige, die von Lasereinrichtungen bewirkt wird, da hierbei nicht nur eine oder wenige schmalbandige Linien vorliegen, sondern meist ein relativ breites Spektrum. Daher sind umfassende radiometrische Messungen erforderlich, und es müssen nicht nur kollimierte Strahlen oder solche einer Punktquelle, sondern diejenigen ausgedehnter Quellen erfasst werden, bei denen unter Umständen noch Streuscheiben und Optiken zum Einsatz kommen. Dazu kommen die durch variable Betriebsbedingungen möglichen unterschiedlichen spektralen Verteilungen.

Neben der offenen Frage ob zur quantitativen Bewertung der Blendung das derzeitige Leuchtdichtekonzept, das auf der Benutzung der für photopische Verhältnisse angegebenen spektralen Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ beruht, überhaupt zutreffend ist, weil eventuell die $V(\lambda)$ -Kurve bei höheren spektralen Strahldichtewerten in der normativ festgelegten und tabellierten Form gar nicht mehr gilt, dürfte es insbesondere das Produkt von Leuchtdichte und Einwirkungsdauer sein, das als entscheidende photometrische Größe das Ausmaß einer Blendung bestimmt. Diese Größe selbst ist bisher noch nicht mit einem Namen belegt. Es wird daher in Analogie zur radiometrischen Größe der integrierten Strahldichte der Begriff der „integrierten Leuchtdichte“ und engl. „time integrated luminance“ bzw. „Leuchtstärke“ und engl. „luminance intensity“ oder „luminance power density“ vorgeschlagen. Als Einheit gilt $\text{cd}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$.

Damit wird erstmals eine photobiologische Wirkung auf photochemischer Basis als zeit- und mengenabhängige photometrische Größe eingeführt, der man durchaus eine Wirkungsrelevanz beimessen könnte, d. h. es wird zunächst davon ausgegangen, dass dies die Größe ist, in der relevante Blendungsbegrenzungen („Blendgrenzwerte“) angegeben werden sollten.

Bei allen Betrachtungen, bei denen auf die spektrale Hellempfindungskurve Bezug genommen wird, muss berücksichtigt werden, dass diese ursprünglich, d. h. seit 1924 [290], aus der Ermittlung bei einem 2° -Feld stammt [289] und damit eigentlich ungeeignet ist, wann immer sie bei Untersuchungen berücksichtigt werden soll, bei denen das Feld, auf welches adaptiert wird, viel größer ist. Dies gilt insbesondere für photopische Bedingungen, wenn der Winkel größer als 10° ist. $V_{2^\circ}(\lambda)$ sollte dann durch $V_{10^\circ}(\lambda)$ ersetzt werden. Auf diesen Zusammenhang hat nicht zuletzt ADRIAN [142] hingewiesen. Es wurde auch gezeigt, dass die ursprüngliche $V(\lambda)$ -Kurve die Empfindlichkeit bei Wellenlängen unterhalb von 460 nm unterbewertete, was schließlich zu der sogenannten Judd-Vos-VM(λ)-Kurve führte [292]. Die Gültigkeit sowohl der ursprünglichen $V(\lambda)$ -Kurve aus dem Jahr 1924 als auch deren CIE-Festlegung im Jahr 1931 hängen von der Annahme einer Linearkombination der sogenannten Farbwertfunktionen („color-matching functions“) ab und gerade dies ist bei Abwei-

chungen um bis zu einem Faktor 100 im Violetten nicht gegeben [292]. Gesättigtes Blau und Violett weisen, wenn man einen direkten Vergleich macht, eine größere Helligkeit auf, als ihre Leuchtdichte nach der Flicker-Photometrie-Methode ergibt [292].

Ursprünglich wurde die $V(\lambda)$ -Kurve durch Vergleich der Strahlungsleistung ermittelt, die erforderlich ist, damit Licht verschiedener Wellenlängen aus dem sichtbaren Spektrum also von unterschiedlicher Farbe – als gleich hell angesehen wird. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass die Ermittlung der Helligkeit zweier verschiedener Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlänge keine leichte Aufgabe ist, und zwar insbesondere dann nicht, wenn dies durch den gleichzeitigen Unterschied in der Farberscheinung gestört wird. Um diesen Einfluss zu vermeiden, wurden Methoden benutzt, die möglichst genaue und reproduzierbare Ergebnisse ergaben, in dem der Farbunterschied gewissermaßen „versteckt“ wurde. Als bekannteste Methode gilt dabei das Flickerverfahren bzw. die Flickerphotometrie, wobei das Licht als kleine, flackernde bzw. flimmernde Stimuli dargeboten wird.

Bei dem binokularen Verfahren, bei welchem zwei Stimuli gleichzeitig auf die Augen einwirken, ist es schwierig, auf beide Weißpunkte zu adaptieren und damit ist der jeweilige Adaptationszustand schwer zu definieren.

Eine dritte Möglichkeit besteht darin, zwei Beleuchtungen rasch aufeinander folgen zu lassen, und zwar an ein und derselben Stelle. In diesem Fall ist der Farbgleich besser, weil die chromatische Adaptation teilweise noch erhalten bleibt [240].

Außerdem ist festzuhalten, dass die $V(\lambda)$ -Kurve unter Verhältnissen eines neutralen Hintergrundes und bei zentraler Fixierung ermittelt wurde.

In wieweit sich die Erkenntnisse, wonach sich das Spektrum der Lichtquelle bei kurzer Adaptationszeit stärker bemerkbar macht als bei längerer Dauer [240] auf verschieden lange Blendereignisse übertragen lässt, kann ohne genauere Untersuchung nicht vorhergesagt werden. Nicht zuletzt können ganz andere Faktoren eine modulierende Rolle spielen, so wie es z. B. bekannt ist, dass Farben häufig dann heller erscheinen, wenn sie durch einen Rahmen begrenzt sind.

Der Hauptgrund für die im Bereich kürzerer Wellenlängen vorliegende größere Hellempfindung liegt in der Pigmentierung der Makula, die eine höhere Absorption bewirkt.

Nach den bisherigen Studien zu den Ursachen und Effekten der psychologischen Blendung kann festgestellt werden, dass der psychologischen Blendungsbewertung zwar ein hoher Stellenwert zukommt, obwohl weder Ursachen noch Effekte hinreichend gut genug verstanden sind. Wegen des direkten Einflusses, den physiologische Blendung auf das Sehen hat, sollte dieser Art der Blendung hinsichtlich Forschung die größere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dies bedeutet andererseits nicht, dass psychologische Blendung einfach hingenommen werden sollte. So zeigt bereits das Beispiel neuer Scheinwerfertechnologien die Problematik der Akzeptanz, die vordergründig durch den Grad der damit verbundenen Unbehaglichkeit bestimmt wird.

2.8.3 Wellenlängenabhängigkeit

Die Tatsache, dass bei der physiologischen Blendung praktisch ausschließlich von Streuung ausgegangen wird (vgl. [119]), lässt vermuten, dass diese Art der Blendung wellenlängenunabhängig ist, da deren Ursache in Strukturen liegt, die groß gegen die Wellenlänge sind.

Im Straßenverkehr interessierte man sich schon relativ früh für die Frage, welchen Einfluss die spektrale Leistungsverteilung der Scheinwerfer auf die physiologische Blendung hat. So verglich SCHREUDER weiße mit gelben Scheinwerfern und fand nur einen sehr geringen Unterschied [275].

Ausgehend von der bekannten Tatsache, dass man insbesondere Schwierigkeiten hat, einen blau beleuchteten Gegenstand scharf zu sehen und dass blaues Licht bei Regen, Nebel und Schneefall, also immer dann, wenn das Licht auf Wasser trifft, dazu führt, dass das Sehen auf der Straße erschwert ist, hat man diesen Teil des Spektrums aus dem weißen Licht herausgefiltert und so selektiv gelbes Licht erhalten. Diese Technik wurde insbesondere bei französischen Fahrzeugen jahrelang eingesetzt, obwohl ein direkter Vergleich eigentlich nie unter den Bedingungen gleicher „Intensität“ durchgeführt wurde, denn man hatte seinerzeit lediglich die Frage untersucht, was durch das Herausfiltern des Blauanteils erreicht werden könne. Damit wurde gleichzeitig die Strahlleistung um ca. 12 % verringert, sodass ein echter Vergleich nicht existiert. Es kann daher auch nicht von einer echten Reduzierung der Blendung gesprochen werden, obwohl man eigentlich davon ausgehen sollte, dass „Blau“ aufgrund seiner kürzeren Wellenlänge, insbesondere bei höherer Intensität der Lichtquelle zu deutlich merklicherer Blendung führt. So könnte man annehmen, dass das periphere Sehen stärker beeinträchtigt wird, wenn der grün-blaue Anteil im Spektrum höher ist. Diese Hypothese wurde aber bislang nicht untersucht. In einer Untersuchung zum Vergleich ungefilterter und gelb-gefilterter Glühlampen fand JEHU [276] keine Unterschiede im Hinblick auf physiologische Blendung. Die getesteten Autofahrer fuhren lieber mit weißem Scheinwerferlicht, einige bevorzugten aber gelbes Licht bei entgegenkommenden Fahrzeugen. BULLOUGH et al. [45] fanden, dass zwar Entladungslampen als mehr blendend bewertet wurden als Halogenlampen, aber andererseits weniger blendend als blau-gefilterte Halogenlampen und das obwohl der skotopische Anteil bei letzteren größer war als bei den anderen beiden Lampentypen. Dabei kann es aber sein, dass dies insofern relativ unbedeutend ist, da beim fovealen Sehen, wie beim Lesen oder bei der Identifikation von Details, nur die photopische Empfindlichkeit von Bedeutung ist.

Neuere Untersuchungen zu dieser Thematik im Straßenverkehr sind nicht bekannt geworden und stehen zurzeit auch nicht an, da man inzwischen auch in Frankreich von den gelben Frontscheinwerfern abgekommen ist.

Im Hinblick auf psychologische Blendung kommt dem Spektrum eine größere Bedeutung zu. Dies wurde bereits 1936 von BOUMA [277] in Untersuchungen festgestellt, wonach blau mehr als gelb beeinträchtigt. Bestätigungen fanden FLANNAGAN et al. [263, 264] dahingehend, dass Quellen mit Wellenlängen von 480 nm und 505 nm als psychologisch mehr blendend bewertet wurden als solche bei 577 nm und 600 nm und bei gesättigten eine Reihenfolge von rot über gelb und grün zu blau angegeben

wurde [264]. Dies fanden auch BULLOUGH et al. [278], indem nach deren Untersuchung rot und grün farbgesättigte Blendlichtquellen als weniger komfortabel bewertet wurden als gelbe Lichtquellen gleicher Lichtstärke. Damit eine „gelbere“ Lichtquelle hinsichtlich der psychologischen Blendung gleich empfunden wird, muss deren Lichtausgangsleistung größer sein als bei einer „weißeren“ Lampe.

2.8.4 Farbsehbeeinträchtigungen und Farbsehtests

Das Farbsehen hängt von der Art der Stimulation ab, vom Zustand der Adaptation der Augen und vom Betrachter selbst. Dabei kommt der Umgebungshelligkeit eine besonders große Bedeutung zu, denn wenn diese sehr gering ist, d. h. wenn skotopisches Sehen vorliegt, nimmt das Auge nur Veränderungen in der Helligkeit, aber keine Farben wahr, während beim photopischen Sehen neben der Helligkeit auch Farbeigenschaften wie Sättigung und Farbton wahrgenommen werden. Unter Sättigung versteht man die Intensität der jeweiligen Farbtöne, also kräftig oder blass und unter "Farbton" den Namen der Farbe bzw. die jeweilige Lage im Spektrum.

Heute geht man bei theoretischen Betrachtungen zur Farbenlehre meist von der Zonentheorie der Farben aus, d. h. man unterstellt die Gültigkeit der YOUNG-HELMHOLTZ-Theorie auf der Ebene der Sehzellen und die Gegenfarbentheorie von HERING bei den anschließenden Stufen der Signalverarbeitung, d. h. Trichromasie bei den Rezeptoren wird zu einem Vorgang mit Vier-Farben auf der Stufe der Bipolarzellen während der neuronalen Verarbeitung der Farbinformationen. Die Dimensionalität der Farben wird daher an einem Ort, der nach den Rezeptoren liegt, festgelegt und nicht durch die verschiedenen Sehpigmente.

Bei Farben unterscheidet man zwischen Körperfarben und Lichtfarben. Bei den Körperfarben handelt es sich um Farben, die dadurch entstehen, dass ein Körper bzw. eine Oberfläche nur bestimmte Wellenlängenbereiche des auffallenden Lichtes remittiert und andere absorbiert. Da die Körperfarben dadurch entstehen, dass vom eingestrahlenen Licht ein Teil absorbiert wird, nennt man dieses System das subtraktive System. Die Grundfarben sind dabei Cyan bzw. Cyanblau (auch Türkis genannt), Magenta bzw. Magentarot (auch Purpurrot genannt) und Gelb, wie sie auch in der Lithografie und in der Fotografie Verwendung finden, während es Rot, Gelb und Blau bei Malerfarben sind.

Lichtfarben haben ihre Ursache in einer Lichtquelle, d. h. sie entstammen "Selbstleuchtern" oder werden dadurch erzeugt, dass sie von einer Oberfläche reflektiert werden. Bei diesem System sind die Grundfarben Rot, Grün und Blau. Da sich die Mischfarben hierbei durch Addition verschiedener Wellenlängenbereiche ergeben, nennt man dieses System auch das additive Farbsystem. So entsteht aus gleichen Teilen Rot und Grün gemischt Gelb, aus Grün und Blau ein Cyan und aus Blau und Rot ein Magenta.

Die Wahl von jeweils drei imaginären Farben im CIE-Farbsystem ist kein Beleg dafür, dass damit die YOUNG-HELMHOLTZ'sche Farbtheorie bestätigt wäre, sondern diese Wahl erfolgt rein aus Gründen der Praktikabilität.

Bei Farbsehtests wird die Prozedur festgelegt, nach der der jeweilige Test durchzuführen ist. So wird z. B. das jeweilige Testzeichen bzw. die Testtafel mit einer Lichtquelle beleuchtet, die eine definierte Farbtemperatur aufweist, wie z. B. 6 700 K oder die CIE-Beleuchtung „D“ entsprechend einer Farbtemperatur von 6 500 K. Dabei wird dann entweder unter 45° beleuchtet oder unter diesem Winkel auf die Testtafel geblickt. Das Sehfeld wird so ausgestaltet, dass dessen Leuchtdichte mindestens 10 cd/m² beträgt; meist ist der Wert zwei- bis dreimal so groß.

Bei sehr hohen Leuchtdichten nimmt die Farbsättigung ab, während bei sehr geringer Leuchtdichte hauptsächlich Fehlbeurteilungen entlang der Blau-Gelb-Achse vorkommen.

Die Größe des Gesichtsfeldes spielt ebenfalls eine Rolle beim Farbsehen, und zwar nimmt die Farbunterscheidungsfähigkeit mit dem Gesichtsfeld zu. Dies gilt insbesondere im Bereich von wenigen Winkelgraden.

Bei Tests zur Farbfehlsichtigkeit geht es erstens um das Herausfinden von insbesondere Rot-Grün-Blindheit bzw. -fehlsichtigkeit und zweitens um die Unterscheidung von Protanopen und Deuteranopen. Zum normalen Farbsehen ist die Funktionsfähigkeit von drei verschiedenen Pigmenten (Opsinen) in der Netzhaut erforderlich. Ein Pigment ist dann jeweils dafür verantwortlich, eine Farbe bzw. einen Bereich des Spektrums wahrzunehmen, d. h. es gibt jeweils einen Pigmenttyp für den Rotbereich, einen für den Grünbereich und einen dritten für den Blaubereich des sichtbaren Spektrums (Licht). Ist eine dieser Pigmentarten teilweise oder sogar total funktionsunfähig, so spricht man von abnormaler Farbsicht. "Protan"-Störung nennt man die des roten Spektralbereichs. Zu unterscheiden ist dann noch in Protanomalie, d. h. teilweisen Funktionsausfall und Protanopie, d. h. totaler Rotpigment-Funktionsausfall. Grünpigmentstörungen werden als "Deutan" bezeichnet (Deutanomalie, d. h. teilweise; Deutanopie, d. h. Totalausfall). Pigmentstörungen im blauen Spektralbereich werden als "Tritan" mit Tritanomalie und Tritanopie bezeichnet. Darüber hinaus gibt es noch "Tetartan", eine Untergruppe des Blau-Gelb gestörten Farbsinns.

Die Protan- und Deutan-Störungen werden X-Chromosom-gebunden vererbt und nur die Tritangruppe wird autosomal weitergegeben. Von Protan- und Deutanstörungen sind ca. 10 % der männlichen Bevölkerung betroffen und nur 1 % der weiblichen.

Personen mit Farbdefekten haben, aufgrund der fehlerhaften "Farbempfänger"-Pigmente in den Zapfen, eine verminderte Fähigkeit, zwischen zwei Farben unterscheiden zu können.

Farbe (oder ein "Farbton") wird die Eigenschaft von Licht genannt, die durch die Wellenlänge bestimmt wird. Während Farbnormalsichtige zwischen mehreren tausend Farben unterscheiden können, sind Farbsehgestörte dazu nicht in der Lage. Sie sind nur in der Lage, für wenige Farben eine konkrete Aussage zu treffen. Farbsehtests basieren alle auf diesem Prinzip der herabgesetzten Unterscheidungsfähigkeit und man versucht mit diesen Tests den Grad der Störung zu ermitteln.

Bei einer quantitativen Untersuchung muss es auch z. B. möglich sein, Protanope von Deuteranopen zu unterscheiden. Erstere verwechseln blau-grün mit rot und Letztere mit purpur. Z. B. sehen Protanope das langwellige Ende des sichtbaren Spektrums dunkler und das kurzwellige Ende heller als Normalsichtige. Daher sieht ein Protanoper das grüne Verkehrslicht heller und das rote dunkler und hat insbesondere in der Nacht Schwierigkeiten, das rote Licht zu sehen.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Farbsehtestverfahren entwickelt, untersucht und in die Praxis umgesetzt. Grundsätzlich kann man dabei 3 verschiedene Gründe unterscheiden, und zwar:

- zum Screening bezüglich angeborener und erworbener Farbfehlsichtigkeit
- zur Diagnose des Typs und der Schwere von Farbfehlsichtigkeit
- zur Prüfung von Farbfehlsichtigkeit bei bestimmten Berufen und Beschäftigungen.

Dazu wurden 4 verschiedene Farbsehtestverfahren eingeführt:

- Pseudoisochromatische Farbtafeln, bei denen der Prüfling eine Zahl, einen Buchstaben oder eine Form erkennen muss, die in einem Hintergrund „eingebettet“ ist, der sowohl hinsichtlich der Farbe(n) und Form verschieden ist. Die in diese Punkttafeln verborgenen Muster beinhalten gerade solche Punktfarben aus den sogenannten "konfusen Zonen" für Farbsehgestörte, die man mit chromatischen Tabellen ermitteln kann.
- Anordnungstests, bei denen der Prüfling einen Satz an Farben z. B. in einer dem Farbton entsprechenden Reihenfolge anordnen muss.
- Farbabstimmungstests, bei denen der Prüfling zwei Farben so abstimmt, bis sie entweder übereinstimmen oder weitgehende Übereinstimmung vorliegt.
- Benennungstests, bei denen der Prüfling Farben genau bezeichnen soll.

Zu jedem dieser Tests gibt es mehrere Ausführungen, wie z. B. für pseudoisochromatische Farbtafeln:

- Ishihara Tests
- City University Color Test
- Dvorine Color Screening
- Hahn Isochromatic Color Vision Test
- American Optical Hardy-Rand-Rittler Color Test (AOHRR)
- Lanthony Tritan Album
- Standard Pseudoisochromatic Plates (SPP)
- Color Vision Testing Made Easy (CVTME).

Der Ishihara-Test ist dabei weltweit der bekannteste und universell eingesetzte Test [139]. Es gibt aber noch eine ganze Menge anderer Farbsehtests, deren wissenschaftliche Basis gut etabliert ist und die in den vergangenen Jahren mehreren Vergleichsuntersuchungen unterzogen wurden [137, 138]. Mit dem Ishihara-Test haben sich insbesondere HARDY, RAND und RITTNER [144] auseinander gesetzt und dabei gefunden, dass damit das Vorliegen einer Rot-Grün-Blindheit gut festgestellt werden kann, wenn eine Trefferquote von 60 % ausreicht, dass aber deutliche Defizite bei quantitativer Ermittlung verschiedener Farbanomalien vorliegen und dass es bei der Anwendung der Ishihara-Tafeln auch auf die verwendete Beleuchtung ankommt. Diese letztere Aussage gilt aber für alle Farben und Farbzusammenstellungen gleichwohl.

Es ist bei Farbsehtests auch zu beachten, dass diese in der Regel mit Testtafeln durchgeführt werden, die ein relativ schwaches aber ausgedehntes Bild auf der Netzhaut erzeugen. Daher können daraus nur begrenzt Aussagen bezüglich der Eignung der entsprechenden Personen gezogen werden, wenn es um die Wahrnehmung von Gegenständen geht, die zu kleinen, aber hellen Bildern führen. Bei den Anordnungstests unterscheidet man insbesondere:

- Farnsworth D-15 Color Test
- Lanthony De-saturated Color Test
- Farnsworth Munsell 100 Hue Test
- Lanthony New Colour D-15 Test
- Compact Hahn Double Hue 15 Test
- Roth 28 Test
- Ohta 40 Hue
- Adams desaturated D-15
- Sahlgren's Disc Test for Acquired Color Defects.

Alle Tests besitzen ihre Vorteile und Nachteile, wie die folgende Übersicht in Tab. 2.10 zeigt.

Tab. 2.10 Vergleich einiger Merkmale bei Farbsehtests (modifiziert n. [140])

Farbtest	Screening	Angeboren	Erworben	Möglichkeit der Klassifizierung	Schweregrad	Zahl der Tafeln	Version für Ältere	Zeit zur Durchführung
City University Color Test	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	10	Nein	Moderat
Dvorine	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	23	Nein	Moderat
Hahn Type A		Ja	Ja	Ja	Ja	21	Getrennt	Moderat
HRR 4th Edition	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	24	Ja	Schnell
Ishihara - 24 Plate Version	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	24	Getrennt	Moderat
Lanthyony Tritan Album	Ja (B/Y nur)	Nein	Ja	Nein	Ja	5	Nein	Schnell
SPP1	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	19	Nein	Langsamer
SPP2	Ja	einige	Ja	Ja	Nein	12	Nein	Langsamer
Farnsworth D15 Color Test	Nein	Ja	Ja	Ja	Mittel/stark	16 Karten	Ja	Langsam
Lanthyony D 15 Color Test	Nein	Ja	Ja	Ja	Nur schwach	16 Karten	Nein	Sehr langsam

Von verschiedenen Unternehmen wurde versucht, eine rechnergestützte Version pseudoisochromatischer Farbsehtafeln zu realisieren. Es gibt dabei aber einige Probleme, die dies verhindern.

Bislang ist es noch nicht gelungen, eine kostengünstige Methode zu entwickeln, mit der man einen CMYK-PC-Monitor kalibrieren kann, und zwar so, dass die dargestellten Farben denjenigen entsprechen, die für einen Farbsehtest benötigt werden. Außerdem lassen sich mit einem Monitor nicht die Sättigungen erreichen, die bei pseudoisochromatischen Farbtafeln erforderlich sind. Typischerweise ist der RGB-Farbraum eines PC-Monitors kleiner als der sichtbare Farbraum. Der erforderliche Bereich, der benötigt wird, um die pseudoisochromatischen Testfarben zu erzeugen, ist ebenfalls größer als der RGB-Farbraum.

Daraus folgt auch, dass farbsehgestörte Personen nicht verlässlich Farben identifizieren und benennen können, wie es "Normalsichtige" können. Schließlich folgt auch hieraus, dass farbsehdefekte Personen nicht so einfach Informationen aus einem System gewinnen können, bei dem die Codierung einer Information nicht-überflüssigerweise durch eine bestimmte Wellenlänge geschieht.

Untersuchungen zur Blendung können sich möglicherweise daran orientieren, dass zeitliche Phasen auftreten, die denen einer vorübergehenden Farbsinnstörung entsprechen und sich damit entsprechend interpretieren lassen.

2.9 Blendungssituationen

2.9.1 Allgemeine Blendungssituationen

Blendung durch Licht kann bei verschiedenen Situationen auftreten (vgl. [10]), so z. B. während Autofahrten beim Blick in die tief stehende Sonne und nach Einbruch der Dunkelheit (Zwielichtbedingung) oder während der Nacht durch den Blick in Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge. Dabei ist allgemein der Effekt bekannt, dass helle Lichtquellen in den Augen zu einem hellen Fleck führen, der von einem Ring („Halo“) umgeben ist.

Darüber hinaus kann der Blick in konventionelle helle Lichtquellen bei vielen Gelegenheiten im Alltag sowohl bei Allgemeinbeleuchtungsanlagen als auch bei Arbeitsmitteln in Arbeitsstätten auftreten.

Eine Besonderheit stellt dabei sicherlich der Laser dar. In diesem Zusammenhang hat der Laserpointer in den vergangenen knappen 10 Jahren eine gewisse „Berühmtheit“ erlangt, in dem ihm eine relativ große Gefährlichkeit – zumindest in den Medien – zugesprochen wurde. Bei ernsthaften Recherchen wurde dagegen festgestellt, dass die Zahl der durch Laserpointer dokumentierten tatsächlich dauerhaft Geschädigten sehr gering ist [44]. Für eine tatsächliche Schädigung sind Expositionsdauern erforderlich, die 10 Sekunden überschreiten, d. h. ohne Kooperation desjenigen, der mit einem Laserpointer bestrahlt wird, ist dies nicht möglich. Außerdem muss dabei der Strahl über diese längere Dauer fixiert werden (zur Laserpointerproblematik siehe auch [152]).

Während also das Risiko eines permanenten Schadens durch einen Laserpointer sehr gering ist, können andererseits Risiken durch Blendung, Beeinträchtigung („annoyance“) und eventuell sogar dadurch, dass ein Anderer glaubt, von einem Zielstrahl einer Waffe getroffen zu werden, auftreten.

Es ist erwiesen, dass durch eine Laserstrahlexposition unterhalb der MZB-Werte ein „maskierender“ Effekt stattfinden kann, d. h. dass eine solchermaßen von einem Laserstrahl getroffene Person Schwierigkeiten haben kann, die erforderlichen Unterschiede in einer visuellen Szene genügend aufzulösen.

In der SSK-Empfehlung [10] werden verschiedene typische Blendungssituationen einer näheren Betrachtung unterzogen. Dazu gehören insbesondere: Blick in die hoch stehende Sonne; Blick in die tief stehende Sonne; Fahrt durch Alleen; Blick in starke Strahlungsquellen; direkter Blick in starke Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge; Einsatz neuer Lichtquellen zur Beleuchtung oder im Straßenverkehr; Fahrt aus dunkler Umgebung in eine sehr helle Umgebung; Lichtreflexion an den Frontscheiben von Fahrzeugen und Visieren von Motorradhelmen; Reflexion von hellem Licht an optischen Signalen, helles Licht hinter optischen Signalen; Reflexionen von hellem Licht auf Bildschirmen (Computermonitoren); Blendung durch starke Lichtquellen in der Nachbarschaft; Reflexion des Sonnenlichtes an spiegelnden Fensterscheiben oder an spiegelnden oder hellen Wandflächen sowie Blick in künstliche Lichtquellen wie Laser, LED, etc. der Klasse 2 und 2M. Darüber hinaus weist die SSK in der eigentlichen Empfehlung [3] auf die Blendungsgefahr durch neue künstliche Lichtquellen hin und empfiehlt verschiedene Maßnahmen zu deren Vermeidung bzw. Minimierung.

2.9.2 Blendung im Straßenverkehr

Psychologische Blendung wird als etwas Unangenehmes empfunden. Dies ist auch das, was man bei der Begegnung zweier Fahrzeuge allgemein als Blendung wahrnimmt. Die Sehfähigkeit wird dagegen durch die physiologische Blendung bestimmt, denn damit ist die Fähigkeit verknüpft, Gegenstände mehr oder weniger gut zu erkennen. So kann es z. B. bereits zu einer Beeinträchtigung des Sehvermögens kommen, und zwar bei relativ niedrigen Lichtpegeln, wenn noch kein unangenehmes Empfinden vorliegt. Die Menschen drücken ihr Geblendetsein aber in erster Linie durch den Grad des Unangenehmseins aus, sodass sich z. B. die Automobilindustrie danach gerichtet hat.

Begegnet man während einer nächtlichen Autofahrt einem Fahrzeug, so bewegen sich die Augen ständig, d. h. es kommt dabei zu vorübergehenden Wechseln in der Leuchtdichte, die das Auge erreicht, und infolgedessen zu Wechseln in der Hell- und Dunkeladaptation. Die Netzhaut passt sich daran mehr oder weniger rasch an.

Im Straßenverkehr werden relativ hohe Anforderungen an das Sehvermögen gestellt, und zwar bei den unterschiedlichsten Sichtverhältnissen. So können diese z. B. gerade noch ausgezeichnet gewesen sein, wie bei einer Fahrt bei Tageslicht auf trockener Straße, wobei also die Beleuchtungsverhältnisse hervorragend waren. Am nächsten Tag kann dann aber bereits Nieselwetter vorliegen, wobei die Straße nass ist und eventuell auch noch die Nacht herein bricht. Regentropfen auf der Frontscheibe, Reflexionen von beleuchteten Fahrbahnpartien und Gegenständen beeinträchtigen dann das Sehvermögen. Dazu kommt der Gegenverkehr mit unterschiedlich hellen Frontscheinwerfern.

Die Augen und die Aufmerksamkeit werden doppelt gefordert und die Freude am Autofahren ist in einer solchen Situation nicht allzu groß.

Die Entwicklung hin zu Entladungslampen hat insbesondere dadurch Auftrieb erhalten, indem man davon ausging, dass das bisher von Halogenlampen gelieferte Abblendlicht eine für normale Geschwindigkeiten nicht ausreichende Beleuchtungsstärke liefert. Es wurde eine Geschwindigkeit von etwa 72 km/h abgeschätzt, bei der noch genügend Zeit für den Fahrer besteht, um unter den Abblendlichtbedingungen bei einem unerwarteten Hindernis zu reagieren [314, 315]. Und so entstand ein Tauziehen zwischen dem Wunsch, die Sicht für den Fahrer – und damit die Intensität der Scheinwerfer – zu erhöhen und andererseits das Licht für entgegenkommende – in diesem Fall also das Blendlicht – zu verringern. Entladungslampen, die etwa den doppelten Lichtstrom gegenüber Halogenlampen beim Abblendlicht lieferten, waren daher als Lösung willkommen.

Neue Frontscheinwerfer-Techniken, eine älter werdende Bevölkerung und Innovationen im Fahrzeugdesign haben aber dazu beigetragen, dass Probleme mit Blendung zu einem wachsenden Interesse geführt haben. Es zeigte sich aber andererseits, dass die Entladungslampen dahin tendierten, eine geringere Blendungsbeleuchtungsstärke aufzuweisen als das Abblendlicht von Wolfram-Halogen-Lampen, allerdings mit Ausnahme bei Rechtskurven [316]. Die geringere Blendwirkung von ECE-Entladungslampen gegenüber ECE-Wolfram-Halogen-Abblendlicht wurde auch in einer anderen Untersuchung bestätigt [317].

Unbestritten muss es das Ziel sein, sichtbedingte Unfälle im Straßenverkehr zu minimieren. Allein 2.300 Fußgänger werden in USA jährlich zu Verkehrstoten, und zwar insbesondere wegen der Unfähigkeit der Fahrer nachts zu sehen [319]. Obwohl die nachts gefahrene Strecke nur etwa 25 % der Gesamtfahrstrecke in USA ausmacht, ereignen sich 46 % aller fatalen Unfälle während der Nacht [326].

Es ist gewiss keine Neuigkeit, dass Blendung dabei eine Rolle spielen kann, allerdings findet sie sich nur selten in den entsprechenden Polizeiberichten – vielleicht auch deshalb, weil sich Blendung selten in den jeweiligen Formularen findet.

Vom Beginn an, d. h. seit der Einführung von Frontscheinwerfern, galt es, einen Kompromiss zu finden zwischen einer zweckentsprechenden Ausleuchtung der Straße vor dem Fahrzeug und der Vermeidung unnötiger Blendung. So konnte in einer Studie gezeigt werden, dass durch eine Steigerung der Lichtstärke um den Faktor 3,8 die Sichtweite um 17 % anstieg. In einer anderen Studie fand man, dass die Sichtweite verbessert wurde, wenn sich zwei Fahrzeuge mit Fernlicht begegneten, und zwar verglichen mit einer Begegnung mit Abblendlicht [47].

Andererseits wurde aber auch erwartet, dass es ein Beleuchtungsniveau geben könnte, das die Menschen einfach nicht mehr tolerieren würden, und zwar wegen subjektiver Befindlichkeitseffekte durch Blendung oder aber indem Blendung indirekt objektive Fähigkeiten durch seine Auswirkungen auf subjektiven Komfort beeinträchtigen könnte.

Eine zweckentsprechende Ausleuchtung der Straße beinhaltet u. a. dass der Fahrer sowohl Straßenverkehrszeichen, Fahrbahnmarkierungen, andere Fahrzeuge, Fußgänger, Tiere und Gegenstände, die zu Gefahren werden können, sicher erkennt.

Als Folge von psychologischer Blendung („discomfort glare“) könnte Ermüdung auftreten oder ein Fahrer von der Fahrbahn vor ihm wegschauen, sodass er Gegenstände auf der Straße nur aus dem peripheren Blickwinkel sehen würde.

In der umfangreichen Studie zu Maßnahmen zur Verhinderung von Blendung durch Scheinwerfer [47] wird schlussendlich festgestellt, dass solange keine Priorität klar erkennbar ist, wodurch eine Reduzierung von Unfällen möglich wird, solange können auch keine geeigneten Festlegungen getroffen werden zwischen der Sichtweite und der Blendung.

In einer groß angelegten Studie wurden außer den konventionellen Halogenscheinwerfern und den moderneren Entladungslampen auch sogenannte Hybridscheinwerfer getestet. Diese Scheinwerfer besitzen zusätzlich zu Halogen- oder Entladungslampen noch 3 oder 5 UV-A Lampen. Dabei zielt der Einsatz von UV-A-Lampen darauf ab, dass bestimmte angestrahlte Materialien, insbesondere solche mit einem Phosphoranteil, aber auch andere Materialien, unter UV-Bestrahlung fluoreszieren und dadurch die Sichtbarkeit erhöht werden kann [326].

Durch die Entwicklung neuer Lampentypen und die Veränderung des Designs, wurden die „Strahlenintensität“, der Strahlverlauf und das Strahlprofil so verändert, dass das Nachtfahren deutlich verbessert werden konnte. Außerdem wurde durch technische Maßnahmen, z. B. durch abgedunkelte Innenspiegel und durch die Anbringung der Scheinwerfer, eine direkte bzw. indirekte Blendungsreduzierung erreicht. Gleichzeitig bedeutet aber die Anbringung der Scheinwerfer in geringerer Höhe eine Verschlechterung der Vorwärtssicht.

Praktisch hat jeder die Situation schon einmal erlebt, dass er beim Autofahren durch ein entgegenkommendes Fahrzeug geblendet wurde.

Aus verschiedenen Untersuchungen und Befragungen ist bekannt, dass insbesondere folgende Beschwerden immer wieder laut werden:

- die Augen werden verletzt bzw. tun weh,
- das Sehvermögen wird reduziert,
- Fahrer werden abgelenkt,
- die Benutzung der Rückspiegel wird schwieriger,
- nachts fahren ist erschwert und
- es werden Belästigung und Zorn bewirkt.

Bei näherer Betrachtung dieser Situation zeigt sich, dass beim entgegenkommenden Fahrzeug bei dieser Begegnung in der überwiegenden Zahl der Fälle das Fernlicht

eingeschaltet war. Nur selten war auch das Abblendlicht die Ursache, und zwar z. B. dann, wenn die Begegnung entweder unter fast rechtwinkligen Bedingungen stattfand, wie z. B. bei einer Linkskurve, oder wenn das entgegenkommende Fahrzeug aus der Sicht des betroffenen Fahrzeuges von links oder – noch seltener – von rechts in die Straße einbog und man damit plötzlich und in deutlich geringerem Abstand einer Lichtquelle ausgesetzt war, oder die Blendung kam dadurch zustande, dass größere Unebenheiten in der Fahrbahn waren bzw. deren welliger Verlauf (z. B. Fahrt über einen Buckel) zu einem völlig veränderten Lichtkegel in Bezug auf das betroffene Fahrzeug führte. Manchmal liegt die Ursache auch in einer falschen Einstellung der Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeuges.

Normalerweise ist die bei der Fahrzeugbegegnung unter Abblendlichtbedingungen auftretende Blenderscheinung wenig beeinträchtigend und man nimmt sie eigentlich gar nicht wahr.

Es ist aber bekannt, dass die Einführung eines neuen Lampentyps jedes Mal mit Sorgen und Beschwerden verbunden war. Dies war beim Umstieg von H1-Lampen auf H4, von H4 auf H7 und von Halogen- auf Xenon-Scheinwerfer stets der Fall. Nach einer gewissen Zeit der Gewöhnung gingen aber fast alle Verkehrsteilnehmer zur Tagesordnung über. Dabei ist das wesentliche Ziel der Fahrzeugbeleuchtung einen Kompromiss zwischen gerade noch tolerierbaren Blenderscheinungen auf der einen und der bestmöglichen Ausleuchtung der Fahrbahn und der seitlichen Umgebung zu erreichen, um Gefährdungen gering zu halten, andererseits aber das Fahren bei Dunkelheit und in der Nacht möglichst zügig durchführen zu können.

Selbstverständlich kann durch ungeeignete Konstruktion und Ausführung der Kfz-Leuchten der Grad der Blendung beeinflusst werden. Dabei geht es um den Lichtanteil, der aus dem Scheinwerfer im Wesentlichen direkt nach oben abgestrahlt wird. Solche Scheinwerferausführungen führen bei Nebel, Regen und Schneefall zu vermehrter Eigenblendung.

Darüber hinaus zeichnen sich Scheinwerfer mit Entladungslampen auch dadurch aus, dass sie einen höheren Lichtanteil auch unter größeren Winkeln abgeben. Hierdurch wird zum einen das periphere Sehen verbessert, gleichzeitig aber auch die Blendung erhöht [282, 283].

In Untersuchungen zum Spektrum bzw. zur Farbe von Scheinwerfern wurde ermittelt, dass sich die Mehrzahl der Fahrer weiß-blaues Licht zum Fahren und mit geringer Mehrheit gelbliches Licht beim Gegenverkehr wünscht [148]. Dies ist aber nicht gleichzeitig realisierbar. Das bläuliche Licht der Xenonscheinwerfer wird vielfach auch im Hinblick auf das mehr technische Erscheinungsbild geschätzt.

Neben dem Unterschied im Spektrum ist es die Tatsache, dass bei Xenonstrahlern mehr Licht in der Peripherie vorliegt. Dies wiederum führt dazu, dass Fahrer in entgegenkommenden Fahrzeugen durch diese neuen Lampentypen mehr geblendet werden können als durch die traditionelleren Halogenlampen. Wenn dann noch die Lampengröße durch projizierende Optiken verringert wird, kann dies zu einer weiteren Erhöhung der Blendung führen.

Xenonstrahler erzeugen einen höheren Beleuchtungsgrad, der den Fahrern schneller zu reagieren und Gegenstände in größerer Entfernung eher zu sehen erlaubt [45].

FLANNAGAN [149] fand keinen Unterschied in der Schwelle bezüglich physiologischer Blendung zwischen Halogen- und Xenonscheinwerfern. Hier wurde allerdings ein deutlicher Einfluss des Blickwinkels ermittelt, unter dem der Scheinwerfer gesehen wird. Im Hinblick auf psychologische Blendung wurden allerdings Xenonstrahler als deutlich unangenehmer eingestuft, und zwar bei allen gleichen Beleuchtungsstärken. Gleichzeitig fand FLANNAGAN, dass blaugetönte Halogenscheinwerfer nur bei geringen Beleuchtungsstärken besser abschnitten als nichtgetönte. Während also das Spektrum nur die psychologische Blendung beeinflusste, war es hauptsächlich der Winkel, unter dem in den Scheinwerfer geblickt wurde, wenn es um physiologische Blendung und um die Kontrastschwelle ging [149]. Die Beleuchtungsstärke eines Halogenscheinwerfers muss um etwa 25 – 50 % größer sein, um dieselbe psychologische Blendung hervorzurufen wie ein Xenonscheinwerfer.

Bei Untersuchungen zur Blendung von Fahrzeugscheinwerfern fanden BULLOUGH et al. [252] dass die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ zur Charakterisierung einer Blendlichtquelle im Hinblick auf die Sehfunktionen geeignet ist, dass dies aber nicht im selben Maß für die psychologische Blendung gilt.

In ersten Labor-Untersuchungen mit nahezu monochromatischem Licht fanden FLANNAGAN et al. [263, 318], dass die psychologische Blendung stark von der Empfindlichkeit der Stäbchen abhängt, was wiederum zu der Aussage führte, dass eine Bewertung gemäß der skotopischen Hellempfindlichkeitskurve besser als nach der spektralen Hellempfindlichkeitskurve sei.

Ein quantitativer Vergleich des jeweiligen skotopischen und photopischen Anteils bzw. des Verhältnisses beider ergab, dass man mit großer Wahrscheinlichkeit nicht unter allen Sehbedingungen aus dem skotopischen Anteil auf den Grad der psychologischen Blendung schließen kann. Dies lässt sich aus Untersuchungen von BULLOUGH et al. [45] schließen, wobei blau-gefilterte Halogenlampen mit hohem skotopischem Lichtausgangsanteil mit konventionellen Halogenlampen und Entladungslampen verglichen wurden und dennoch für Entladungslampen eine größere psychologische Blendung empfunden wurde. In einer neueren Untersuchung von FOTIOS und LEVERMORE [150] wird der potenzielle Einfluss der kurzwellig-empfindlichen Zapfen auf die Helligkeitsantwort berichtet. Eine eindeutige Aussage ist daraus aber noch nicht zu ziehen, aber es gibt doch starke Hinweise darauf, dass eine bestimmte Art von Mechanismus bei der psychologischen Blendung eine Rolle spielt. Dabei sollte allerdings beachtet werden, dass die kurzwellig empfindlicheren Zapfen langsamer reagieren und dass daher eine sich langsam bewegende Lichtquelle vermutlich einen geringeren Effekt verursacht.

In einer Studie, bei der eine statische Situation einer Begegnung zweier Fahrzeuge untersucht wurde, bewerteten die Versuchsteilnehmer Entladungslampen mehr blendend als Wolfram-Halogenlampen, und zwar dann, wenn beide Typen gleichen photopischen Lichtstrom am Auge der Testpersonen lieferten [319]. In einer anschließenden Berechnung zeigten SIVAK et al., dass etwa der Faktor 1,66 in der photopi-

schen Beleuchtungsstärke erforderlich wäre, um gleiche psychologische Blendung zu verursachen [314].

Die größere psychologische Blendung durch Xenonscheinwerfer führt nicht zwangsläufig zu einer Verschlechterung des Sehvermögens, solange nicht unzulässig hohe Beleuchtungsstärken vorliegen. Die Fähigkeit, die Silhouette eines Fußgängers nahe der Blendlichtquelle zu entdecken, war sowohl bei Halogen- als auch bei Entladungslampen vergleichbar.

SIVAK et al. kommen zu dem Schluss, dass es insbesondere der höhere Blauanteil der Entladungslampen ist, der im Vergleich zu den mehr gelben Halogenlampen zu vermehrter psychologischer Blendung führt und dass eine Halogenlampe eine um den Faktor 1,5-fach höhere „Intensität“ besitzen müsste, um das Blendniveau der Entladungslampen zu erreichen [314]. Gleichzeitig bestätigen sie aber auch, dass bezüglich der physiologischen Blendung kein Unterschied bei diesen beiden Lampentypen gefunden wurde.

Unbestritten ist unter den Verkehrsteilnehmern in jedem Fall die Gefahr einer Blendung durch Fernlicht. Dies gilt in besonderem Maße für Xenonstrahler. Bei diesen dienen Xenon-Gas und Metallsalze als Lichtquelle anstelle der Glühwendel in einer Halogen-Glühlampe. Als Vorteile werden neben der längeren Lebensdauer die lichttechnisch bessere und hellere Ausleuchtung der Fahrbahn und der Seitenränder angesehen.

Um eine mit Xenonstrahlern verbundene Blendung zu vermeiden, wurden elektronisch gesteuerte, dynamische Leuchtweiten-Regulierungen entwickelt, die bei Lageänderungen der Karosserie zu einer automatischen Nachführung der Scheinwerferreflektoren führen.

Eine erhöhte Blendwirkung tritt bei den Xenonstrahlern insbesondere dann auf, wenn die Scheinwerfer entweder falsch eingestellt sind oder wenn eine Art Blitzlicht beim Überfahren von Bodenwellen und dergleichen entsteht und die Strahlprofilkante über dem Auge auf- und abbewegt wird.

Beschwerden beim Autofahren kommen auch von voranfahrenden Fahrzeuglenkern, die über Blendung durch nachfolgende Fahrzeuge berichten, wobei dabei sicherlich zu unterscheiden ist, ob es sich um Effekte in den Seitenspiegeln oder in mehr oder weniger getönten Innenspiegeln handelt.

Dass Blendung im Straßenverkehr durchaus qualitativ einen Stellenwert hat, zeigen Prozentzahlen von 65 % bzw. 2/3 aller Personen, die Blendung als ein häufiges Problem angaben [47].

Seit einigen Jahren gibt es Diskussionen über und Vorschläge für die Benutzung von Tagfahrlicht. Nach einer Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) könnten 3 % aller Verkehrsunfälle verhindert werden, wenn Licht auch am Tag am Fahrzeug eingeschaltet würde. Zurzeit wären das ca. 11 000 Unfälle weniger in Deutschland. Insbesondere LED-Tagfahrleuchten sind Gegenstand der Diskussion und bereits in dem einen oder anderen Fahrzeug vorhanden.

Als Ergebnis einer Untersuchung von RUMAR wurde empfohlen, die Lichtstärke von Tagfahrlicht nach oben auf ca. 1 500 cd zu begrenzen und ca. 400 cd als Mindestlichtstärke zu wählen. Dabei wurde von einer Umgebungs-Beleuchtungsstärke von 1 500 lx bis 40 000 lx ausgegangen [300]. Die obere Lichtstärkeempfehlung wurde dabei mit dem Argument, dass eine höhere Lichtstärke einerseits die Effektivität andererseits aber auch die Blendung erhöht, gegeben.

In einer Analyse von Tagfahrlicht kam SCHIEBER zu dem Ergebnis, dass selbst bei 7.000 cd noch keine physiologische Blendung auftritt, da die relative Anhebung der Kontrastschwelle unter 2 blieb (vgl. Gl. 2.21b) [320], wenn sie am Tag benutzt werden. Dagegen führt diese Lichtstärke bei Nacht, wenn also die Adaptationsleuchtdichte nur etwa 1 cd/m² ist, zumindest ab einer Entfernung von 100 m zu deutlichen Sehbeeinträchtigungen, da sich dabei Anhebungen der Kontrastschwelle um Faktoren zwischen 5 und 11 ergaben. Damit lässt sich feststellen, dass Tagfahrlicht nicht statt des Abblendlichtes bei Nacht benutzt werden darf, um nicht zu erhöhter Blendungsgefahr zu führen. Dagegen ist bei einer Lichtstärke von 1 500 cd praktisch keine unangenehme Blendung zu erwarten und SCHIEBER kommt zu dem Schluss, dass sich mit 3 000 cd ein weiterer „Gewinn“ durch Tagfahrlicht in puncto Sicherheit erzielen ließe – und das bei geringer Blendungserhöhung. Gleichzeitig empfahl er aber dazu weitere Untersuchungen.

Betrachtet man den Vorgang der Blendung zweier sich begegnender Fahrzeuge, so stellt man fest, dass dieser sich während der gesamten Begegnungsphase eigentlich nicht ändert. Dies liegt daran, dass die Blendung von mehreren Faktoren gleichzeitig abhängt, nämlich u. a. von der Beleuchtungsstärke und vom Blendwinkel.

Wenn sich zwei Fahrzeuge begegnen, werden zunächst sowohl die Beleuchtungsstärke als auch der Blendungswinkel zunehmen, um dann ab einem gewissen Punkt dazu zu führen, dass der Winkel des Scheinwerferstrahls des entgegen kommenden Fahrzeuges groß genug ist, sodass die Beleuchtungsstärke rasch abnimmt.

Bei Nachtfahrten wird empfohlen, dass die äquivalente Schleierleuchtdichte die Hintergrundleuchtdichte nicht um mehr als 15 % überschreiten soll [47]. Hierzu gibt es zwar keine wissenschaftliche Begründung, aber dieser Wert wird allgemein akzeptiert.

Beträgt das Verhältnis zwischen äquivalenter Schleierleuchtdichte und mittlerer Umgebungsleuchtdichte $L_V/L_U = 0,15$, so wird die Sehschwelle zur Erkennung von Gegenständen etwa um 10 % angehoben, wenn diese Gegenstände einen Sehwinkel von $10' = \left(\frac{10}{60}\right)^0 = \left(\frac{10}{60}\right)^0 \cdot \frac{\pi}{180^0} \cdot 1.000 \text{ mr} \approx 3 \text{ mr}$ bei einer Leuchtdichte der Straßenoberfläche von 1 cd/m² aufweisen.

Um daher die Erkennbarkeit eines Zieles zu erhöhen, damit es auch in Gegenwart einer Blendlichtquelle erkannt werden kann, muss folglich die Leuchtdichte des Zieles erhöht werden.

Die Schwell-Leuchtdichte wird so ermittelt, dass 50 % der Beobachter ein Ziel erkennen, wenn dieses für relativ kurze Zeit präsentiert wird. Daraus lässt sich dann das

Schwell-Inkrement des Kontrastes (Schwellen-Kontrast) ΔL bestimmen, um das die Schwell-Leuchtdichte erhöht werden muss, damit das Ziel „sichtbar“ bleibt:

$$\Delta L(\text{in}\%) = 60,275 \cdot \frac{L_V}{L_m^{0,862}} \quad [47] \quad (2.32)$$

Wobei L_m die mittlere Leuchtdichte des Straßenbelags ist.

Ein weiterer Effekt bei der Begegnung zweier Fahrzeuge, aber auch beim anderen plötzlichen Auftreten einer Lichtquelle im Gesichtsfeld, verdient Beachtung. Gelangt Licht in das periphere Gesichtsfeld, so bedeutet das zum einen eine Ablenkung, wodurch eine gewisse Konfusion im Sehen hervorgerufen werden kann. Die Augen tendieren nämlich zum einen automatisch zu diesem Licht, und es muss zum anderen eine Anstrengung unternommen werden, den Blick von dem blendenden Licht abzuwenden.

Bei Objekten, die insbesondere plötzlich oder aber auch besonders hell im Vergleich zur Umgebung in der Peripherie auftauchen, wird bewusst, dass die Netzhaut eigentlich auf zwei verschiedene Arten „operiert“, nämlich die Foveola bzw. die Fovea als abbildendes System und die Peripherie als ein System, das der Warnung gegenüber einer Gefahr dient. Die Peripherie der Netzhaut weist einerseits eine begrenzte Ortsfrequenzauflösung auf, besitzt andererseits aber die Fähigkeit, auf Bewegungen zu reagieren.

Die Foveola besitzt dagegen hohe Ortsfrequenzfähigkeit und diese wird in ein zeitliches Signal umgewandelt, indem der inhärente Tremor, der ständig die Fixierlinie geringfügig ablenkt, die feinen örtlichen Details im Gesichtsfeld in feine zeitliche Details im Signalkanal umwandelt, bevor dieses in den Kortex gelangt. Es wird also die Ortsfrequenz in 1/Winkelgrad mit der Tremorgeswindigkeit in Winkelgrad/Sekunde multipliziert und ergibt die spektrale Auflösung in 1/Sekunde.

Ganz allgemein ist es insbesondere die visuelle Leistungsfähigkeit, an die besondere Anforderungen im Straßenverkehr gestellt werden.

Allgemein wird davon ausgegangen, dass der größte Anteil an Informationen beim Autofahren visueller Natur ist [55], so haben andererseits konventionelle Sehtests einen geringen Zusammenhang mit der Häufigkeitsrate von Verkehrsunfällen gezeigt [56].

Auf einer Pressekonferenz der Augenärztlichen Akademie Deutschland (AAD) gab LACHENMAYR 2001 an, dass Sehschärfe, Gesichtsfeld, Dämmerungssehvermögen und Augenstellung zusammen mit der Beweglichkeit von besonderer Bedeutung sind, während das Farbsehen und das räumliche Sehen (Stereosehen) dagegen als nachrangig betrachtet wurden.

In Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Störungen des Sehvermögens mit einem erheblichen Unfallrisiko einhergehen.

Unter Sehvermögen versteht man nach DIN 5340 [4] die „Gesamtheit der Sehfunktionen des Auges“, also neben der Tagessehschärfe auch Sehfunktionen wie Gesichtsfeld, Farbsehen, Dämmerungsehschärfe, Blendempfindlichkeit sowie Stellung und Motilität usw.

Von LACHENMAYR et al. [46] wurde festgestellt, dass Personen mit gestörtem Dämmerungsehvermögen und erhöhter Blendungsempfindlichkeit, d. h. mit eingeschränktem Nachtsehen, statistisch signifikant häufiger in Dunkelheitsunfälle verwickelt sind.

Selbst aufgrund der Ergebnisse groß angelegter Studien ist es schwer, quantitative Angaben machen zu können, die etwas zu den Folgen einer Blendung durch Kfz-Scheinwerfer aussagen könnten.

Blendung führt zu einer Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit und zu vermehrter Lenkradbewegung [47].

Unbestritten ist das Potenzial, dass Blendung die Häufigkeit von Unfällen erhöht und die Mobilität von Menschen verringert, die nicht mehr so gerne nachts Auto fahren. Dies ist bedingt durch schlechtere Sichtverhältnisse und durch das Auftreten von Müdigkeit und Anspannungen, d. h. durch Unbehagen.

Quantitativ lässt sich feststellen, dass z. B. von den 42 059 Toten im Jahre 1998 in USA 45 % auf die Nachtstunden entfielen und das obwohl nur 14 % der Gesamtfahrstrecke auf diese Zeit entfiel [47]. Daraus lässt sich aber noch lange nicht auf die ursächliche Beteiligung einer Blendung schließen. In einzelnen Angaben war von einer Beteiligung zwischen 0,5 % und 4 % die Rede [47]. Obwohl daher gewisse Unsicherheiten bei den quantitativen Angaben des Einflusses von Blendung auf Verkehrsunfälle bestehen, so wäre es eigentlich logisch, dass sich ein Einfluss allein schon deshalb ergibt, da Autofahren einer Sehaufgabe entspricht, Blendung einen verzögernden Effekt auf das Sehen hat und damit Blendung auch einen verzögernden Effekt auf das Fahren haben sollte. Dies muss aber noch nicht direkt zu etwas Schlimmen führen, insbesondere da geblendete Fahrer den Sehverlust durch langsames und möglicherweise vorsichtigeres Fahren ausgleichen.

In einer Literaturstudie ergab sich ein schwacher Zusammenhang zwischen Sehschärfe/Gesichtsfeld und Verkehrsunfällen [48]. Dabei ist aber zu beachten, dass im Straßenverkehr aufgrund verschiedener Umstände die Personen mit besonders geringer Sehschärfe gar nicht teilnehmen und insofern die bisherigen Untersuchungen daher diesen Effekt auch nicht feststellen konnten (vgl. z. B. [49]).

Es ist andererseits bekannt, dass Blendung von den Bedingungen abhängig ist und es daher vorkommen kann, dass manche Menschen dies nicht als potenzielle Gefahr wahrnehmen. Ergebnisse von verschiedenen Untersuchungen ([50 – 52]) haben gezeigt, dass es einen relativ guten Zusammenhang zwischen Blendungstests und Straßenverkehrsunfällen gibt. Dieser Zusammenhang zwischen den Ergebnissen von Blendungstests und selbst empfundener Fahrfähigkeitsbeeinträchtigung wird von vielen Personen nur als relativ gering gesehen [53], d. h. es besteht eine Diskrepanz zwischen der empfundenen und der tatsächlichen Beeinträchtigung [54]. In Simulati-

onsversuchen konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen erhöhter Blendempfindlichkeit und abnehmenden Fahrfähigkeiten festgestellt werden.

In der gegenwärtigen Europäischen Richtlinie 91/349/EWG werden weder Kontrastempfindlichkeit noch Blendung erwähnt. Es heißt darin lediglich dass, wenn Zweifel bezüglich der Sehfähigkeiten eines Führerscheinanwärters bestehen, ein Sehtest durchgeführt werden soll [63]. In diesem Test sollte auf die Sehschärfe, das Gesichtsfeld, mesopisches Sehen (Dämmerungssehen) und fortgeschrittene Augenkrankungen geachtet werden.

Während Fragen hinsichtlich der Fahrerlaubniserteilung z. B. auf dem Verordnungswege zu klären sind und daher in Zweifelsfällen auch entsprechende augenärztliche Untersuchungen angeordnet werden können, galt ein Teil des Interesses bei Blendung durch optische Quellen den Folgen einer solchen Blendung; denn anders als bei einer permanenten Störung, wie sie bei einer pathologischen Veränderung der Augen vorliegt, entsteht durch Blendung lediglich eine temporäre Beeinträchtigung des Sehvermögens. Daher ist diesbezüglich auch eine andere Betrachtungsweise erforderlich.

Es ist bekannt, dass ältere Menschen und solche mit krankheitsbedingten Sehbeeinträchtigungen ihre Situation im Straßenverkehr z. B. dadurch berücksichtigen, dass sie entweder Fahrten bei Dunkelheit möglichst ganz unterlassen oder soweit einschränken, dass sie nur wenig dabei „gefordert“ werden, also z. B. Fahrten auf ihnen vertraute Strecken beschränken. Darüber hinaus gelingt es diesem Personenkreis auch seine in vielen Jahren erworbene Fahrpraxis in defensive Fahrweise einzubringen und dadurch andere Defizite weitgehend zu kompensieren.

Dagegen ist eine blendungsbedingte Situation ganz anders zu beurteilen. Hier tritt das Ereignis entweder sehr plötzlich ein (überraschender Blick in die Sonne; plötzlich auftauchender Scheinwerfer) oder man ist ihm eine Zeitlang ausgesetzt (entgegenkommende Fahrzeuge).

Während normalerweise das Interesse dem Sehen unter Blendungsbedingungen gilt, d. h. bei Anwesenheit einer Blendlichtquelle, liegt das Hauptaugenmerk bei den hier gestellten Fragen insbesondere darin, wie sich das Sehvermögen nach einer Blendung verhält.

Nach allgemeiner Ansicht werden ca. 90 % der Informationen über die Augen aufgenommen. Soweit also etwas genau erkannt werden soll, ist dazu die Sehschärfe wichtig. Entfernungen zu einem entgegenkommenden Fahrzeug werden damit bestimmt und ein am Straßenrand spielendes Kind optisch erfasst.

Farben wird dagegen eine nicht ganz so große Bedeutung beigemessen. Es ist allerdings nicht bekannt, ob z. B. eine Signalfarbe nach einem Blendereignis noch in der richtigen Farbe erkannt oder aber gewissermaßen maskiert wird.

Die Entscheidungen für eine Ermittlung bestimmter Parameter nach einer Blendung lassen sich dabei wie folgt formulieren:

Die Sehschärfe (der Visus) ist als normale Kenngröße mit standardisierten Tests, z. B. Landoltringen, ermittelbar und differenziert Normal- von Fehlsichtigkeit. So wird nach § 12 Abs. 1 Fahrerlaubnisverordnung im „PKW-Führerscheintest“ ein Visus größer 0,7 gefordert.

Neben der Tagessehschärfe, also der Sehschärfe unter photopischen Bedingungen, interessiert im Straßenverkehr das Dämmerungssehen, das unter mesopischen Bedingungen ermittelt wird, und die Blendungsempfindlichkeit. Letztere kann altersbedingt oder durch pathologisch bedingte Trübungen von Hornhaut, Linse und Glaskörper erhöht sein und den Eindruck eines Blickes durch zerkratztes Glas bis hin zur Milchglasscheibe vermitteln.

Zweifelsohne wird hierbei die Sehleistung mehr oder weniger deutlich reduziert. Untersuchungen zum Dämmerungssehen und zur Blendungsempfindlichkeit werden bei genaueren Augenuntersuchungen durchgeführt. Es handelt sich dabei um Charakteristika des jeweiligen Menschen, die sich allerdings im Laufe des Lebens durchaus verändern – in der Regel verschlechtern – können.

Das Ziel bei der Bestimmung der Effekte als Folge einer Blendung liegt dagegen aber primär darin, festzustellen, welche vorübergehenden Auswirkungen damit verbunden sind bzw. sein können.

Daher wurden vorrangig die Kontrastempfindlichkeit und das Farbsehen als Parameter ausgewählt. Hinsichtlich des Farbsehens ist bekannt, dass bei ca. 8 % der Männer und bei etwa 0,8 % der Frauen aufgrund eines Gendefektes eine Farbsinnstörung vorliegt, und zwar können in der Regel Rot- oder Grüntöne schlecht unterschieden werden.

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass verminderte Kontrastempfindlichkeit die Fahrfähigkeiten mehr beeinträchtigt als eine reduzierte Sehschärfe. Es ist aber nicht bekannt, welches Maß an Kontrastempfindlichkeitseinbuße toleriert werden kann und welches nicht [49].

Auch dem Farbsehen kommt im Straßenverkehr eine Bedeutung zu, indem dessen Einschränkung besonders bei schlechter Sicht zu einem Unsicherheitsfaktor wird. So erkennt z. B. ein Mensch mit Rotschwäche bei einem vorausfahrenden Fahrzeug die roten Rückleuchten oder -bremsleuchten später als ein Normalsichtiger.

Ohne Zweifel besteht der Hauptunterschied beim Fahren am Tag und während der Nacht in der unterschiedlichen Beleuchtungsstärke. Bei verringerter Beleuchtungsstärke werden Sehfähigkeiten wie Auflösung [57], Kontrastunterscheidung [58], stereoskopisches Tiefenempfinden [59], Akkommodationsgeschwindigkeit und -fähigkeit [60] und Reaktionszeit [61] verringert.

Das menschliche Auge reagiert langsamer, wenn nur die Stäbchen stimuliert werden im Vergleich zu den Zapfen. Dadurch erklärt sich auch, dass der Adaptationszustand von den Umgebungsleuchtdichten abhängig ist.

Blendung im Straßenverkehr ist auch ein Thema, mit dem sich VOS [119] befasst. Er geht dabei von dem Modell zweier sich im seitlichen Abstand d in einer Entfernung R

begegnender Motorräder aus, d. h. er beschränkt sich auf jeweils eine Blendlichtquelle in jeder Richtung. Der Blendwinkel ergibt sich damit zu $\Theta = d/R$ bzw. $\Theta = (180/\pi) \cdot d/R$. Mit dem photometrischen Abstandsgesetz ergibt sich die Beleuchtungsstärke E_B am Auge aus der Lichtstärke I (Anm.: Die Lichtstärke I enthält dabei bereits die Berücksichtigung des Winkels ϕ , d. h. es gilt $I = I_\phi \cdot \cos\phi$, wobei I_ϕ die nominelle Lichtstärke ist) und dem Abstand R zu $E_B = I/R^2$ und für die Leuchtdichte eines Gegenstandes bzw. Hindernisses auf der Fahrbahn im Abstand D geradeaus ergibt sich $L = \rho \cdot I/D^2$, wobei ρ der Reflexionsgrad des Objektes ist. VOS geht in seinen Betrachtungen weiter von einem Kontrast C als Verhältnis zwischen der Leuchtdichte des Objektes und der Schleierleuchtdichte aus, wobei er die CIE-Formel für die altersbedingt angepasste Leuchtdichte benutzt (Gl. (2.10)). Damit erhält er eine Beziehung für den Abstand D , in dem man den Gegenstand geradeaus entdecken kann, zu

$$D_{Entd} = \frac{180}{\pi} \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\rho}{10 \cdot C \cdot \left[1 + \left(\frac{\text{Alter}}{70} \right)^4 \right]}} \quad (2.33)$$

und wenn man dabei jeweils sowohl für den Reflexionsgrad als auch für den Kontrast einen Wert von 0,25 ansetzt und einen seitlichen Abstand von 5 m annimmt, ergibt sich

$$D_{Entd} = \frac{90}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\text{Alter}}{70} \right)^4 \right]}} \text{ m.} \quad (2.34)$$

Ein Beispiel von VOS zeigt die entsprechende zahlenmäßige Bedeutung. Für die beiden Alter von 70 und 83 Jahren ergibt sich jeweils ein Wert von 52 m bzw. 45 m, verglichen mit 64 m für einen jungen Fahrer bzw. eine nominelle zu Verfügung stehende Bremsdauer von 2,3 s (70a), 1,9 s (83a) gegenüber 3,2 s für den jungen Fahrer. Da die Kontrastempfindlichkeit mit dem Alter abnimmt, müsste der Wert entsprechend korrigiert werden, und zwar soweit er nicht bei der Herleitung der Blendformel bereits berücksichtigt wurde. Werden alle relevanten Parameter berücksichtigt, schlägt VOS die folgende Beziehung zur Ermittlung des erforderlichen Objekterkennungsabstandes vor:

$$D_{Entd} = \frac{90}{\sqrt{\left[2 + \left(\frac{\text{Alter}}{70} \right)^4 \right]}} \text{ m.} \quad (2.35)$$

Dadurch reduziert sich die zur Verfügung stehende Bremsdauer bereits für den jungen Fahrer auf 2,3 s.

Eine Steigerung der Lichtstärke hat also eine Erhöhung der Blendwirkung zur Folge. Andererseits steigt aber auch die Sicht nach vorne mit der Gesamtlichtstärke. Als Aufgabe der Hersteller und der Zulassungsstellen ergibt sich daraus die Notwendig-

keit, die Frontscheinwerfer so zu neigen, dass entgegenkommende Fahrzeuge eine reduzierte Beleuchtungsstärke erfahren, ohne gleichzeitig die Lichtstärke in Vorausrichtung auf Objekte zu sehr einzuschränken.

VOS geht bei seinen Überlegungen aber davon aus, dass beide entgegenkommenden Fahrzeuge Frontscheinwerfer gleicher Lichtstärke besitzen. Wenn dies nicht der Fall ist, muss die obige Beziehung wie folgt modifiziert werden:

$$D_{Entd} = \frac{180}{\pi} \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\rho}{10 \cdot C \cdot \left[1 + \left(\frac{Alter}{70} \right)^4 \right]}} \cdot \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} \quad (2.36)$$

bzw.

$$D_{Entd} = \frac{90}{\sqrt{\left[2 + \left(\frac{Alter}{70} \right)^4 \right]}} \cdot \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} \text{ m} \quad (2.37)$$

wobei I_1 die Lichtstärke des entgegenkommenden Fahrzeuges und I_2 die Lichtstärke des eigenen Fahrzeuges ist. Dies zeigt, dass ein Unterschied in den Lichtstärken um den Faktor 4 zu einer Verdopplung bzw. Halbierung des Detektionsabstandes führt.

CRAWFORD zeigte bereits 1936, dass die Beiträge des Streulichtes, die von verschiedenen Quellen bewirkt werden, sich im Auge addieren [122]. Insofern müssen bei den vorstehenden Betrachtungen noch Ergänzungen dergestalt gemacht werden, dass statt jeweils einer Lichtquelle von mindestens zweien im jeweils entgegenkommenden Fahrzeug ausgegangen werden muss.

Es ist nach den vorstehenden Betrachtungen nicht ausgeschlossen, dass die Fahrer zweier sich mit Fernlicht begegnender Fahrzeuge jeweils bessere Sichtverhältnisse haben, obwohl psychologische und physiologische Blendung auftreten. Durch das Fernlicht wird dabei der Kontrast des Sehobjektes („Targets“) erhöht und so der Kontrastverlust, der zur psychologischen Blendung führt, kompensiert. Selbst wenn die sich entgegenkommenden Fahrzeuge beide mit Fernlicht fahren sind also die Entfernungen, in denen etwas gesehen werden kann, größer als in dem Fall, bei dem beide Fahrzeuge Abblendlicht eingeschaltet haben. Entsprechende Bestätigungen fanden BERGSTRÖM [254], JOHANSSON et al. [255], SCHWAB [256] und HEMION [257]. Diese Untersuchungen haben allerdings bei klaren Umgebungsbedingungen stattgefunden, d. h. wenn z. B. Nebel herrscht, kann – wie das bekannt ist – die Sicht nach vorne deutlich begrenzt sein, wenn das Fernlicht benutzt wird. Außerdem wurde in den genannten Studien nur die Kurzzeitexposition betrachtet und nicht die Auswirkung, welche von einem mit Fernlicht entgegenkommenden Fahrzeug auf die Fahrleistungen des geblendeten Fahrers ausgeübt werden. Das Fahren mit Fernlicht kann daher nicht als die Maßnahme schlechthin zum besseren Sehen empfohlen werden, da dies gefährliche sekundäre Wirkungen außer Acht lassen würde. Darüber hinaus muss auch berücksichtigt werden, dass Fahrer entgegenkommender Fahr-

zeuge auch durch deren verschmutzte Frontscheinwerfer stärker geblendet werden können, während sich gleichzeitig die Sicht dieser Fahrzeuglenker verschlechtert [272].

Probleme bei Nachtfahrten und beim Tunneldurchfahren sind die vordringlichsten in Bezug auf Effekte durch Blendung von Frontscheinwerfern. Dabei kommen bei älteren Fahrern eine Verringerung des mesopischen Sehens und eine erhöhte Blendempfindung zusammen und führen so zu einem erhöhten Unfallrisiko bei Nacht. Ältere Fahrer und Patienten mit beginnender Katarakt erfüllen wegen der erhöhten Kontrast- und Blendempfindlichkeit oft die Anforderungen an Nachtfahrten nicht in ausreichendem Maße.

Im Straßenverkehr ist nicht nur allein die Situation zu betrachten, die sich durch die Begegnung zweier Fahrzeuge unter dem Aspekt der Blendung ergeben kann, sondern es ist auch diejenige der Fußgänger zu berücksichtigen, und zwar einerseits deren Sehvermögen unter den Bedingungen von Straßenleuchten, andererseits aber auch – und das eventuell noch bedeutsamer – im Hinblick auf die Sichtbarkeit durch Fahrzeuglenker.

In der Vergangenheit wurden nur wenige Untersuchungen zum Blendverhalten verschiedener Lichtquellen durchgeführt. Dabei zeigte sich aber, dass im Mittel die Blendleuchtdichte einer Niederdruck-Natrium-Dampflampe das 1,3-Fache derjenigen einer stabförmigen Fluoreszenzlampe und das 1,45-Fache einer Quecksilber-Dampflampe beträgt, wenn man die Schwelle der gerade zulässigen Blendung ermittelt [238, 239]. Geht man von der Annahme aus, dass diese Ermittlung gleichzeitig zur Bestimmung der psychologischen Blendung benutzt werden kann, dann würde sich ergeben, dass eine Niederdruck-Natrium-Dampflampe bei gleicher Helligkeit eine höhere Leuchtdichte erfordert als eine Fluoreszenzlampe und eine Quecksilber-Dampflampe.

In einer weiteren Untersuchung fanden SIVAK et al., dass Scheinwerfer mit LEDs der von ihnen verwendeten Farbarten zu mehr psychologischer Blendung führten als Entladungslampen und wesentlich mehr als Wolfram-Halogen-Lampen. Dieses Ergebnis lässt sich eventuell durch eine möglichst geringe Farbtemperatur verringern. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass der Zusammenhang zwischen der spektralen Leistungsverteilung und der psychologischen Blendung noch nicht ganz verstanden wird und diesbezüglich weitere Forschung erforderlich ist [299].

Nicht zuletzt hängt die empfundene Blendung auch von der Einwirkungsdauer des störenden Lichtes auf die Augen ab. Zwar ist deren Einfluss weniger bedeutsam als derjenige der Beleuchtungsstärke, aber sowohl SIVAK et al. [267] als auch LEHNERT [270] konnten zeigen, dass zumindest die psychologische Blendung mit größerer Dauer des Blendereignisses zunimmt.

2.10 Blendung und die Folgen

Die Sehzellen der Netzhaut beinhalten ein interessantes Phänomen: Zum einen stellen sie die Strukturen dar, die zum Sehen benötigt werden und zum anderen können sie aber auch durch Licht geschädigt oder gar zerstört werden. Wenn Letzteres ge-

schieht geht dem eine Bestrahlung voraus, in deren Verlauf eine Apoptose in den Fotorezeptoren und im Pigmentepithel erfolgt. Dabei entstehen zunächst Vesikel und Unterbrechungen in den Scheibchenmembranen in den äußeren Segmenten (Außensegmente) der Fotorezeptoren. Bei stärkerer Exposition lässt sich zusätzlich kondensiertes Zytoplasma (Zellflüssigkeit) in den inneren Segmenten (Innensegmente) und im Chromatin des Kerns feststellen. Im späteren Stadium zerfallen sowohl die Außen- als auch die Innensegmente der Sehzellen in apoptotische Teile (Zellreste, -überbleibsel), die dann von Phagozyten (Fresszellen) entfernt werden. Auch im Pigmentepithel, das eine entscheidende Rolle beim Stoffwechsel der Sehzellen spielt, treten Chromatinkondensate im Kernbereich und kondensiertes Zytoplasma auf.

Unbewiesen, d. h. mehr spekulativ, ist in diesem Zusammenhang die Frage, ob es möglich ist, dass durch lange bis hin zu lebenslanger Bestrahlung durch helles Licht allein oder als Kofaktor ein Beitrag zu Netzhauterkrankungen geleistet wird oder nicht, wie dies im Erscheinungsbild der altersbedingten Makuladegeneration (AMD) der Fall ist, die zu einer Hauptursache ernster Sehbeeinträchtigungen älterer Menschen in den Industrieländern geworden ist.

Sollte es den direkten oder aber unterstützenden Effekt durch eine chronische Lichtexposition geben, dann läge es nahe, den damit zusammenhängenden Bereich unmittelbar unter demjenigen zu suchen, der auf denjenigen einer thermischen Netzhautschädigung folgt oder aber in Zusammenhang mit fotochemischen Effekten zu bringen. In beiden Fällen läge man z. B., soweit es Laserstrahlung betrifft, im Bereich der Laserklasse 1, also unterhalb der MZB-Werte.

Es könnte also, wenn man bekannte Langzeiteffekte durch fotochemische Reaktionen ausschließt, auch bei ausreichend hellen, relativ kurzen Expositionen, die häufig genug erfolgen, eventuell auch zu Netzhauterkrankungen kommen. Dann würde es sich aber zugleich um solche optische Strahlung handeln, die auch zur Blendung führt.

Sollte dies der Fall sein, dann käme Blendung nicht nur ein indirekter Gefährdungseffekt zu, sondern auch ein direkter chronischer.

Erste Ansätze zu Betrachtungen bezüglich der Beteiligung bestimmter Gene am Zelltod in der Netzhaut, wobei es unter anderem um deren Zusammenhang bei der sogenannten Fototransduktion geht und um eine lichtmengen abhängige Ausschüttung sogenannter Proto-Onkogene, die sich Minuten bis Stunden nach einer Exposition einstellt, wurden von REMÉ et al. [65] gemacht. Eine Expression bestimmter Proto-Onkogene bzw. Proteine kann als Mediator für eine allgemeine Stressantwort angesehen werden [66]. Deren Fehlen zeigte andererseits eine Schutzfunktion bei den Fotorezeptoren, wie dies bei einer Exposition von genetisch veränderten Mäusen, d. h. solchen, denen ein bestimmtes Gen fehlte (hier: c-fos Knockout Mäuse), nach einer zweistündigen Exposition bei 15 000 lx der Fall war [67].

In diesem Zusammenhang interessiert auch eine mögliche Wellenlängenabhängigkeit des Zelltodes. So konnte bei anästhesierten Ratten bei Bestrahlungsstärken von $3,1 \text{ mW/cm}^2$ bei 403 nm und $8,7 \text{ mW/cm}^2$ bei 550 nm nach Expositionsdauern von 60 Minuten lediglich bei der blauen Wellenlänge massiver Zelltod in den Foto-

rezeptoren und im retinalen Pigmentepithel (RPE) erzeugt werden, während bei der grünen Wellenlänge lediglich Phagosomen als natürliche physiologische Lichtantwort auftraten [66]. Eine genauere Betrachtung ergab, dass die „Grünlichtbestrahlung“ zu einer raschen und fast vollständigen Bleichung führte, während bei der „Blau-lichtbestrahlung“ 20 bis 30 % der Sehpigmente erhalten blieben. Dabei wurde angenommen, dass dies eine Folge der Fotoregeneration von Rhodopsin durch ein Bleichzwischenstadium, eventuell durch Metarhodopsin II, bedingt wurde, d. h. Chromophore während der Lichtexposition geliefert wurden.

Auf ein gutes bzw. ausreichendes Farbsehen sind Personen bei der Ausübung verschiedene Berufe und Tätigkeiten angewiesen. Dazu werden z. B. von der Firma Richmond 100 Berufe aufgeführt (siehe Tabelle 2.11) [141].

Tab. 2.11 Auf gutes bzw. ausreichendes Farbsehvermögen angewiesene Berufe [141]

1. Aerial Photographer	51. Firefighter
2. Air Conditioner Installer/Mechanic	52. Freight Conductor
3. Air Traffic Controllers	53. Game Warden
4. Aircraft Navigator	54. Graphic Artist
5. Aircraft Pilot	55. Graphic Designer
6. Animal Code Enforcement	56. Hazardous Materials Technician
7. Applications/Quality Control Specialist	57. Highway Patrolman
8. Art Teacher	58. IRS Special Agent
9. Auto Body/Painting Technician	59. Lifeguards
10. Biomedical Equipment Technician	60. Location Specialist (Water & sewer)
11. Border Patrol Agent	61. Maintenance Service Worker
12. Building Inspector	62. Mapmakers
13. Building Plans Examiner	63. Meat Inspector
14. Bus Driver	64. Military (Many job descriptions)
15. Buyer for Department Store	65. Military Engineer
16. CAD Operators	66. Military Pilot
17. Carpet Sales	67. Network Systems Administrator
18. Civil Aviation Engineer	68. Non-Destructive Inspector of Materials
19. Civil Aviation Mechanic	69. Nurse's Aides
20. Civil Service (Some positions)	70. Paint Sales
21. Clinical Lab Technician	71. Painter
22. Clothing Sales	72. Paramedic
23. Color Photographer	73. Pharmacist
24. Color Printing Press Operator	74. Pharmacy Technician
25. Commercial Printer	75. Photographic Processor
26. Communications Operator	76. Police Officer
27. Communications Technician	77. Prison Corrections Officer
28. Computer Service Technician	78. Produce Inspector
29. Court Judicial Assistant	79. Professional Truck Drivers
30. Court Reporter	80. Quality Control Specialist
31. Criminal Lab Technician	81. Railroad Conductor
32. Customs Officer	82. Railway Mechanic
33. Dairy Grader	83. Registered Nurse
34. DEA Special Agent	84. Sanitation Specialist
35. Dental Lab Technician	85. School Bus Drivers
36. Dentist	86. Shipping and Receiving Clerk
37. Deputy Sheriff	87. Software Engineer (Some types)
38. Deputy U.S. Marshal	88. State Park Ranger
39. Digital Image Librarian	89. State Trooper
40. Drapery Sales	90. Street Lighting Technician
41. Dry Cleaning Spotter	91. Teachers (Some positions)
42. Editor/Report Production Assistant	92. Transit Department Secretary
43. Electrician	93. Transit Vehicle Electronic Technician
44. Electronics Assembler	94. Transportation Security Screener
45. Electronics Technician	95. TV Programming Director
46. Emergency Medical Technicians	96. Vehicle Maintenance Supervisor
47. Engineering Technician	97. Wall Covering Sales
48. Environmental Engineer	98. Warehouse Worker/Driver
49. Farm Products Grading Inspector	99. Weather Analysts
50. FBI Special Agent	100. Youth Program Director

Es stellt sich die Frage, welches die Risiken sind, die sich dadurch ergeben, dass sich durch Blendung z. B. Effekte ergeben können, die denjenigen einer Farbseh-

störung bzw. vorübergehenden Farbenblindheit entsprechen. Dabei sind verschiedene Teilfragen und -aspekte zu beantworten bzw. zu beachten.

Welche Konsequenzen können sich durch Fehler bei der Farbbeurteilung ergeben? Welche Farben können verwechselt werden und auf welche muss bei Blendung durch bestimmte optische Quellen verzichtet werden? Wie sehr wird die Performance durch temporäre Farbsinnstörung beeinträchtigt? Gibt es Möglichkeiten, mit denen sich Risiken als Folgen von Farbstörungen auf akzeptables Niveau verringern lassen? Können betroffene Arbeiten bzw. Tätigkeiten so umgestaltet werden, dass durch Farbsinnstörung bedingte Risiken ausgeschlossen werden?

3 LEDs als Blendlichtquellen

LEDs stellen relativ schmalbandige Lichtquellen dar mit spektralen Bandbreiten („Halbwertsbreiten“) von 15 nm bis 35 nm. Dabei werden mit Materialien auf der Basis von AlInGaN Wellenlängen von Blau bis Grün und mit solchen auf der Basis von AlInGaP von Gelb bis Rot erzeugt.

Damit stehen zum einen quasi-monochromatische Lichtquellen zur Verfügung, die entweder als farbige Lichtquellen Verwendung finden oder aber indem mittels eines Clusters von rot-, grün- und blau-emittierenden Einzelelementen durch nichtabbildende Optiken eine Mischung zu Weiß erzeugt wird.

Eine andere Vorgehensweise besteht darin, dass Weiß dadurch erzeugt wird, indem z. B. eine blau-emittierende LED mit einem oder mehreren Phosphoren beschichtet wird, wie z. B. Cerium-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), um damit eine Abwärtskonvertierung der Primäremission zu breitbandigem Gelb zu erzielen. Solche LEDs werden als pcLEDs bezeichnet („phosphor coated LED“). Mit der Mischung von Blau und Gelb erhält man bei pcLEDs dann üblicherweise Farbtemperaturen im Bereich von 4 500 K bis 10 000 K, also kalt weiß. Durch Verwendung von rot-emittierenden Phosphoren lassen sich aber auch Warm-Weiß-Töne mit Farbtemperaturen zwischen ca. 2 850 K und 3 800 K erzeugen.

Die Frage stellt sich, warum gerade LEDs als Blendlichtquellen ausgewählt wurden?

Erstens, weil LEDs eine – immer noch – neue Lichtquellenart darstellen. Zweitens, weil ihnen die nahe Zukunft gehören wird und drittens, weil dies bedeutet, dass LEDs vielfach anstelle konventioneller Lichtquellen zum Einsatz kommen werden.

Es wird heute unter anderem davon ausgegangen, dass durch die Einführung von Beleuchtungseinrichtungen unter Verwendung von Festkörpern, d. h. speziell Halbleiter-Bauelementen in Form von LEDs bis zum Jahre 2025 eine Energieeinsparung von ca. 50 % möglich sein sollte. Dazu werden natürlich effiziente und preisgünstige Weißlichtquellen benötigt.

Grundsätzlich lassen sich mit Halbleitermaterialien Farbtemperaturen zwischen etwa 2 500 K und 10 000 K erreichen, durch die sich Empfindungen entsprechend dem Farbdigramm der CIE wie „warm weiß“ bis hin zu „kalt weiß“ erzielen lassen.

Gerade diese Möglichkeit wird wahrscheinlich den Markt der LEDs mehr beeinflussen als diejenige der Kosten- über die Energieeinsparung.

Dies gilt neben dem Bereich der Allgemeinbeleuchtung für den Lampenbereich und hier insbesondere auch für den Automobilbereich.

Dort finden LEDs bereits Anwendung als Zusatzbremsleuchten. Dabei ist beachtenswert, dass mit LEDs relativ schmale Bremsleuchten realisiert werden können und insbesondere, dass mit LEDs eine Zeitspanne von ca. 200 ms eingespart werden kann, die konventionelle Lampen benötigen, um die beabsichtigte Signalfunktion anzuzeigen. Damit stellt die Verwendung von LEDs einen Sicherheitsgewinn dar, indem

der Hintermann im Straßenverkehr früher ein Bremslicht sieht und entsprechend früher reagieren kann

Auch bei Frontscheinwerfern gilt als oberstes Ziel die Verbesserung der Sicherheit. Aus konstruktiver Sicht lassen sich mit LEDs bis zu 55 % dünnere Scheinwerfer realisieren als mit konventionellen Lichtquellen. Dadurch wird Platz für andere Dinge sowohl im Motorraum als auch für Styling-Elemente im Frontgrill bzw. in der Frontpartie geschaffen.

LED-basierte Scheinwerfer benötigen bis zu 40 % weniger Energie als herkömmliche Lichtquellen. Dies ermöglicht den Automobilherstellern, die eingesparte Energie für anderen Komfort und für Sicherheitszwecke zu verwenden.

Darüber hinaus ist LED-Technologie quecksilberfrei und die LEDs selbst haben mit einer Lebensdauer von 100 000 h eine solche, die diejenige der Autolebensdauer übersteigt. Letztere beträgt in etwa nur 5 000 Stunden.

Zumindest zurzeit weisen aber LEDs noch Nachteile als Lichtquellen für Scheinwerfer auf. Sie besitzen zwar einen hohen Lichtstrom, aber eine relativ geringe Leuchtdichte. Daher ist es noch eine große Herausforderung, ein gefordertes Lichtprofil zu erzeugen, bei dem ein hohes Maximum einerseits und eine scharfe Begrenzung andererseits vorliegen. Dabei bestimmt die Leuchtdichte die Größe des optischen Aufbaus.

Die Verwendung von LEDs als Scheinwerfer macht es erforderlich, dass Arrays zum Einsatz kommen, da der erzielbare Lichtstrom pro LED zurzeit noch bei etwa 50 lm liegt. Bei den letzten Neuentwicklungen werden Werte bis ca. 125 lm genannt. Gegenwärtige Halogen- und Xenonlampen liefern dagegen 400 lm bis 1.100 lm bzw. 1 000 lm bis 3 300 lm, d. h. es werden mehrere LED-Einzelelemente benötigt. Als Ziel werden zurzeit 200 lm bis 250 lm pro LED genannt, d. h. es werden 6 LEDs für das Abblendlicht, 6 für das Fernlicht, 3 für den Nebelscheinwerfer und 2 für das Tagfahrlicht benötigt.

Ein Vergleich der Leuchtdichten zeigt, dass hierbei für LEDs im Jahre 2005 10 cd/m² angegeben wurden, während zur gleichen Zeit eine übliche H7-Lampe bei Nennbetrieb 20 cd/m² und eine Xenonlampe 62 cd/m² aufwies [350]. Deutlich höhere Werte werden an anderer Stelle mit ca. 1 000 cd/m² für Halogenscheinwerfer bei einem Lichtstrom von etwas mehr als 1 000 lm angegeben [354]. In den von CLARK et al. durchgeführten Untersuchungen kamen verschiedene Scheinwerfer zum Einsatz [354], bei denen Besonderheiten im Hinblick auf Verbesserungen des Sehens getestet wurden. Die Blendungsempfindlichkeit der Versuchspersonen wurde dabei bei 3 Leuchtdichten, nämlich bei 41,2 cd/m², 343 cd/m² und 1.372 cd/m² getestet. Die eingesetzten Scheinwerfer besaßen Lichtstärken zwischen 28 772 cd und 43 181 cd. Überraschenderweise ergaben die Untersuchungen im Fahrzeug unter Versuchsbedingungen, dass ein sogenannter „niedriger und schmaler“ Halogenscheinwerferstrahl psychologisch als am meisten störend bewertet wurde, und zwar mit einem DE BOER-Wert von 5,15. Am wenigsten psychologisch beeinträchtigend mit 7,2 wurde ein „mittel/mittel“ HID-Scheinwerfer bewertet. Als eine mögliche Ursache wurde das

Fehlen eines klaren Lichtkegelrandes im Falle von Halogenscheinwerfern, verglichen mit HID-Lampenlicht, diskutiert.

Bei diesen Untersuchungen wurde unter anderem auch festgestellt, dass die entfernungsmäßige Erkennbarkeit von Personen am Straßenrand durch entgegenkommende Scheinwerfer typisch um 50 % verringert wurde. Insgesamt ergaben Scheinwerfer mit höheren Intensitätswerten (hier: Lichtstärke) sowohl größere psychologische als auch physiologische Blendung.

In einer Studie wurde der Blaulichtanteil von LED-Frontscheinwerfern in Bezug auf psychologische Blendung untersucht und dabei gefunden, dass diese dann, wenn sie blauer erschienen als gegenwärtig benutzte Wolfram-Halogen- oder Entladungslampen, als mehr psychologisch blendend empfunden wurden [298]. Dieses Ergebnis wurde eher als mit der Farbtemperatur – diese lag zwischen 4 000 K und 6 600 K – der verwendeten LEDs zusammenhängend gesehen, denn als eine inhärente Eigenschaft der LED-Quellen betrachtet. Die psychologische Blendungs-Bewertung hing linear mit dem Blauanteil zusammen, und zwar so wie er sich aus der spektralen Empfindlichkeit der kurzwelligen blauen Zapfen in der Netzhaut ergibt. Damit könnte der Blauanteil heuristisch dazu benutzt werden, eine Minimierung der Beschwerden der Fahrer zu bewirken.

Die Ausrichtung der Untersuchungen auf farbige LEDs verfolgte unter anderem den Zweck, experimentell heraus zu finden, ob und wenn ja welche Wellenlängenabhängigkeit Blendeffekten zugrunde liegen könnten. Dabei spielte die Frage der photometrischen Bewertung eine wichtige Rolle, zumal bisher nur die Vermutung besteht, dass im Bereich der Blendung, d. h. bei „größeren“ Leuchtdichten eventuell eine andere spektrale Hellempfindung als diejenige beim photopischen Sehen (Tagesehen) gelten könnte. Dies lässt sich aber nur – wenn überhaupt - mit farbigen LEDs und nicht mit weißen LEDs oder breitbandigen optischen Strahlungsquellen ermitteln.

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Allgemeines zu den Untersuchungen

Um Auswirkungen von Blendung untersuchen zu können, war es notwendig, Testmethoden zu entwickeln, die zum einen gewährleisten, dass die Probanden unter definierten Bedingungen mit optischer Strahlung exponiert werden und zum anderen der Blendeindruck objektiv bewertet werden kann. Gerade die Objektivierung eines subjektiven Blendeindrucks stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Die Erfahrungen bei Untersuchungen zum Lidschlussreflex [152] haben nämlich gezeigt, dass die Probanden sich nicht zwangsläufig durch die Exposition mit Laser- oder LED-Strahlung geblendet fühlen, was sicherlich auf persönlich unterschiedliche Schwellen eines psychologischen Blendungsempfindens zurückzuführen ist.

Deshalb wurde bei den Untersuchungen zur Blendung der Aspekt der physiologischen Blendung im Gegensatz zur psychologischen Blendung in den Vordergrund gestellt, da nur dieser objektiv zu bewerten ist.

Im Fokus der Bewertung der physiologischen Blendung stehen die Auswirkungen von Nachbildern, welche durch die Exposition mit hellen optischen Quellen verursacht werden.

Die Nachbilder haben insbesondere Auswirkungen auf

- das Farbsehen, da sich das Nachbild in seiner Farbe ändert, was dazu führt, dass bestimmte Farben temporär nicht mehr richtig wahrgenommen werden können und auf
- den Visus, welcher für einen bestimmten Zeitraum durch das Nachbild vermindert wird.

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Teiluntersuchungen gegeben, und zwar unter den jeweiligen thematischen Aspekten, die mit einer Blendung im Wesentlichen zusammen hängen.

Der Darstellung der Untersuchungsergebnisse ist die Erarbeitung des derzeitigen Wissenstandes hinsichtlich der Blendung bei Einwirkung von Laserstrahlung, Strahlung von LED und breitbandigen Strahlungsquellen und deren Bewertung in den vorherigen Abschnitten vorangestellt.

Durchgeführt wurde die Entwicklung und Erprobung geeigneter Versuchsaufbauten zur Messung der Auswirkungen einer Blendung auf Sehschärfe, Farbsehempfindlichkeit, Farberkennbarkeit und Kontrastempfindlichkeit. Die Messaufbauten wurden außer für Labor- auch für Reihenuntersuchungen im Feldversuch konzipiert. Darüber hinaus wurden geeignete Messanordnungen durch entsprechende Modifikation aus bereits realisierten Konzepten für gezielte einzelne Untersuchungen im Labor aufgebaut. In jedem Falle wurde Wert auf Vergleichbarkeit der Ergebnisse gelegt.

Da es sich um zum Teil sehr zeitaufwendige Untersuchungen handelte, bei denen Readaptationszeiten usw. zu berücksichtigen waren, mussten gezielt einzelne Probandengruppen zusammengestellt und im Labor in entsprechend strukturierten Versuchen getestet werden. Vielfach wurden auch die Versuchsdurchführenden wechselweise als Probanden in Vorversuchen und zur gezielten Ermittlung relevanter Parameter und Effekte herangezogen. Zur Ermittlung statistisch auswertbarer Ergebnisse wurden die Messungen in Form von Reihenuntersuchungen mit Probanden im Labor durchgeführt, da nur dort auf Probanden mehrfach und über einen ausreichend langen Zeitraum zugegriffen werden konnte. Reihenuntersuchungen im Feld waren für die hier zu ermittelnden Zusammenhänge und Parameterabhängigkeiten praktisch nicht geeignet. Sie können aber durchaus aus den gesammelten Erfahrungen abgeleitet und zur gezielten Beantwortung von Einzelfragen eingesetzt werden. Bei den durchgeführten Untersuchungen war sicherzustellen, dass eine Gefährdung der Probanden durch Einhaltung bestehender Grenzwerte in jedem Falle ausgeschlossen wurde.

Bei den Untersuchungen wurden die ethischen Prinzipien für medizinische Forschung, bei denen Menschen einbezogen sind, in entsprechender Abwandlung auf biomedizinisch/medizintechnische Forschung angewandt.

Danach haben Betrachtungen bezüglich der Gesundheit von Menschen Vorrang vor den Interessen der Wissenschaft und der Gesellschaft (vgl. Nr. 5 in [188]). Biomedizintechnische Forschung unter Einbeziehung von Menschen muss konform sein mit den allgemein akzeptierten wissenschaftlichen Prinzipien, die auf einem sorgfältigen Wissen der wissenschaftlichen Literatur basieren, auf anderen relevanten Informationen sowie auf einer adäquaten Laborpraxis (vgl. Nr. 11). Dabei soll das Design und die Performance jeder experimentellen Untersuchungen an Menschen klar in einem Versuchsprotokoll formuliert sein und der Verlauf der Untersuchungen ständig dahingehend beobachtet werden, um notfalls beim Auftreten nicht vorhersehbarer Effekte die weiteren Untersuchungen entsprechend so abzuändern, dass diese Effekte vermieden werden. Notfalls sind Teile der Untersuchungen ganz aus dem Studiendesign herauszunehmen (vgl. Nr. 13).

Auf die Forderung, wonach das Versuchsprotokoll einer speziellen Ethikkommission zur Betrachtung, Kommentierung, Überprüfung und falls erforderlich auch zur Anpassung vorgelegt werden soll, konnte hier verzichtet werden, da es sich erstens nicht unmittelbar um medizinische Forschung handelt und da zweitens von der ICNIRP und damit im Sinne auch von der WHO empfohlene Grenzwerte in jedem Falle eingehalten bzw. in der Regel mehr oder weniger unterschritten werden.

Bei der durchgeführten Forschung, bei der Personen einbezogen waren, war sichergestellt, dass nur wissenschaftlich qualifiziertes Personal mit der Leitung der Untersuchungen betraut war (vgl. Nr. 15). Auf eine Aufsicht durch einen kompetenten Mediziner konnte ebenfalls verzichtet werden, da es sich nicht um medizinische Forschung als solche handelte. Damit entfiel auch die Forderung wonach Verantwortung stets auf einer medizinisch qualifizierten Person ruhen muss und niemals auf der Versuchsperson selbst, und zwar auch dann, wenn diese ihr Einverständnis abgegeben hat (vgl. Nr. 15).

Die Untersuchungen wurden so durchgeführt, dass alle Probanden vorher eine sorgfältige Aufklärung bezüglich vorhersehbarer Risiken und Belastungen im Vergleich zu den vorhersehbaren eigenen Vorteilen oder anderer Personen erhielten. Dabei war das Studiendesign öffentlich zugänglich (vgl. Nr. 16).

Untersuchungen, bei denen keine Überzeugung darin bestand, dass die Risiken adäquat ermittelt wurden und zufrieden stellend gehandhabt werden konnten, wurden nicht durchgeführt (vgl. Nr. 17). Die Forschung wurde nur dahingehend durchgeführt, indem zu erwarten war, dass dadurch ein Nutzen für Menschen entsteht (vgl. Nr. 19).

Alle Versuchspersonen waren Freiwillige und informierte Teilnehmer (vgl. Nr. 20). Alle Personen wurden adäquat über die Ziele, die Methode(n), die Drittmittelgeber, alle möglichen Interessenkonflikte, die Forschungseinrichtung selbst, die erwarteten Vorteile und möglichen Risiken der Studie und die eventuellen Unbequemlichkeiten, die sich aus der Untersuchung ergeben könnten, informiert. Dabei wurde den Personen das Recht zugestanden, an den Untersuchungen nicht teilzunehmen bzw. jederzeit vom Versuch zurücktreten zu können, und zwar auch dann, wenn sie zuvor zugestimmt hatten. Nachdem sich der Versuchsleiter davon überzeugt hatte, dass die Versuchsperson die Informationen verstanden hatten, gaben die Versuchspersonen ihre freiwillige Zustimmung, und zwar bevorzugt in schriftlicher Form (vgl. Nr. 22).

Bei der Veröffentlichung der Ergebnisse haben sowohl die Autoren als auch der Verleger ethische Verpflichtungen. Die Veröffentlichungen sollen die Exaktheit der Ergebnisse sicherstellen. Dabei werden sowohl negative als auch positive Ergebnisse veröffentlicht bzw. auf andere Weise zur Kenntnis gegeben. Finanzielle Unterstützungen, institutionelle Anbindungen und mögliche Interessenskonflikte werden in den Veröffentlichungen angegeben (vgl. Nr. 27).

Obwohl es sich bei der „Helsinkierklärung“ um medizinische Forschung handelt, wurden deren Grundsätze im vorstehend übertragenen Sinne auch auf die durchgeführte und hiermit dokumentierte Forschung im Bereich Biomedizintechnik, Medizintechnik, Arbeitsschutz entsprechend angepasst, eingehalten. Die bereits in zwei vergleichbaren Projekten durchgeführte diesbezügliche Expertise mit Untersuchungen an mehr als 2 500 Personen als Probanden in Labor- und Feldversuchen [152, 153] hat dazu wesentlich beitragen.

Von Bedeutung ist natürlich auch die Frage der Sicherheit gegenüber Exposition optischer Strahlung. Hierzu wurden die relevanten Grenzwerte der ICNIRP und diejenigen, die in Unfallverhütungsvorschriften, Normen und weiteren Festlegungen enthalten sind, berücksichtigt.

Da viele der Untersuchungen mit LEDs als Blendlichtquelle durchgeführt wurden, war sicherzustellen, dass hierdurch keine zusätzlichen Gefährdungen entstehen können. Dazu wurden ebenfalls alle normativen Festlegungen beachtet und zusätzlich berücksichtigt, dass insbesondere für blaue LEDs, wo photochemische Effekte und Wirkungen dominieren, kein Unterschied in der Bestrahlung des Augenhintergrundes besteht gegenüber derjenigen durch einen entsprechenden Laser [338]. Da in allen Expositionssituationen mit Energiedichten deutlich unterhalb von 10 J/cm² [338] ge-

arbeitet wurde, konnte aufgrund vorliegender experimenteller Untersuchungen eine Schädigung ausgeschlossen werden.

4.2 Grundsätzliches zu den verschiedenen Testeinrichtungen

Bei den Untersuchungen der Auswirkungen eines Nachbildes auf die Sehschärfe bzw. auf das Farbsehen galt es bei der Realisierung der Testeinrichtungen und Methoden zu beachten, dass die Vorgänge zeitdynamisch verlaufen.

Dies bedeutet, dass sich z. B. das Nachbild kontinuierlich in seiner Farbe verändert, weshalb Kriterien entwickelt werden mussten, wie die Farbbeeinträchtigung zeitdynamisch zu beurteilen ist. Die Schwierigkeit lag hier vor allem darin, dass Menschen Farben unterschiedliche Begriffe bezüglich ihrer Farbnuancen zuordnen und dass die Farbzurordnung und die kommunikative Übermittlung der Information eine gewisse Zeit benötigt, in der sich die Nachbildfarbe schon wieder verändert haben kann.

Beim Auftreten eines Nachbildes musste dann unter anderem unterschieden werden zwischen dem sogenannten „negativen Nachbild“, d. h. demjenigen Nachbild, das annähernd gegenfarbig zur Empfindung während des Reizes, also dem Blendereignis, ist und dem „positiven Nachbild“. Als gegenfarbig werden dabei zwei Farben dann bezeichnet, wenn deren Bunttöne (früher als Farbtöne bezeichnet) und damit dasjenige Merkmal einer Farbempfindung, das bei gleicher Helligkeit und Sättigung zwei „bunte Farben“ – im Gegensatz zu unbunten Farben, zu denen weiß, grau und schwarz gezählt werden – aufweisen, sich unterscheiden, wie das bei den Farben rot, gelb, grün und blau der Fall ist. Gegenfarbig sind auch die Komplementärfarben, als die wiederum solche Farben gezählt werden, deren spektrale Hellempfindlichkeitsgrade für photopisches Sehen ($V(\lambda)$ -Werte) sich an jeder Stelle des sichtbaren Spektrums zu dem Wert 1 ergänzen. Als positiv wird ein Nachbild dann bezeichnet, wenn es annähernd mit dem gleichen Buntton wie die Empfindung während des Reizereignisses übereinstimmt. In Laborversuchen wurde untersucht, mit welcher Versuchsmethodik die sehr komplexen und individuell verschiedenen Parameter der Farbbeeinträchtigungen objektiv bestimmt werden können.

4.3 Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Im Hauptabschnitt 2 wurde ein Überblick zum Stand des Wissens zum Thema Blendung gegeben, und zwar abgestützt auf allgemein zugängliche wissenschaftliche Literatur sowie ergänzt durch daraus hergeleitete Überlegungen. Diese Darstellung ist auch im Kontext damit zu sehen, dass im Februar 2006 eine Empfehlung der Strahlenschutzkommission von einer Arbeitsgruppe von Experten aus Deutschland, die unter der Leitung des Projektleiters erarbeitet wurde, in der die wissenschaftlichen Grundlagen zur Blendung in deutlich kürzerer Form dargelegt wurden [158, 159]. Insofern kann die hier vorliegende Darstellung als eine Erweiterung des Kenntnisstandes betrachtet werden, da dieser zum Zeitpunkt der Verabschiedung der SSK-Empfehlung so nicht vorlag. Insbesondere erfolgte die Darstellung im Hinblick auf die durchgeführten Teiluntersuchungen und kann dabei auch als eine kritische Auseinandersetzung mit der bestehenden Literatur angesehen werden.

Zur Klärung der anstehenden Fragen wurden in diesem Forschungsvorhaben verschiedene Teilaspekte betrachtet. Übersicht der durchgeführten Untersuchungen:

- Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit der Nachbilddauer
- Einfluss der Blendung auf den Visus
- Visusbeeinträchtigung als Funktion der Expositionsdauer und der Quellengröße bei Verwendung einer High-brightness Weißlicht-LED
- Zeitlicher Verlauf der Nachbildfarben für verschiedenfarbige high-brightness LED (HB LED) und dessen Auswirkungen auf Farbverfälschungen
- Farbkontrastempfindlichkeit unter dem Einfluss von Blendlichtquellen

Tabelle 4.1 gibt noch einen detaillierteren Überblick über die durchgeführten Untersuchungen.

Tab. 4.1 Übersicht der durchgeführten Untersuchungen

Blendeindruck bei einem bewegten Linienlaser
Nachbildgröße als Funktion der Zeitdauer nach einer Blendung
Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit der Nachbilddauer bei Blendung durch Laserstrahlung
Untersuchungen zum Verlauf der Nachbildfarben:
Nachbildfarbverlauf bei Blendung durch farbige HB-LEDs durch Beobachtung in einem dunklen Raum
Bestimmung des Verlaufes der Nachbildfarben für eine Blendung mit HB-LEDs mittels einer Messung an einem Farbkreis
Untersuchungen zur Sehschärfe nach einer Blendung:
Sehschärfe nach Blendung mit einer weißen HB-LED
Sehschärfe nach Blendung mit einer grünen HB-LED
Lesefähigkeit als Sehschärfekriterium nach Blendung mit einer weißen HB-LED
Farberkennbarkeit und Kontrastempfindlichkeit:
Farbunterscheidungsfähigkeit nach Blendung mit farbigen LEDs
Verschiebung der Rot/Grünwahrnehmung nach Blendung mit farbigen LEDs
Farb- und Kontrastsehen nach Blendung durch farbige LEDs

Die durchgeführten Untersuchungen waren meist sehr zeitaufwendig, da erstens lange Readaptationszeiten von 30 Minuten und mehr erforderlich waren, zweitens einzelne Probandengruppen zusammengestellt werden mussten und auf Probanden mehrfach und über einen ausreichend langen Zeitraum zugegriffen werden können musste. Daher dienten auch die Versuchsdurchführenden wechselweise als Probanden in Vorversuchen und zur gezielten Ermittlung relevanter Parameter und Effekte.

Die Frage danach warum bei den Untersuchungen mehr Wert auf physiologische als auf psychologische Blendung gelegt wurde, ist erklärungsbedürftig. Psychologische Blendung wird insbesondere als unangenehm empfunden und kann ermüden. Dabei werden die Sehfunktionen nicht notwendigerweise verschlechtert. Physiologische Blendung andererseits wirkt sich auf die Sehfunktionen aus und ist oft mit psychologischer Blendung verbunden. In Tabelle 4.2a sind die wesentlichen Merkmale und Parameter der verschiedenen Teiluntersuchungen angegeben, während in Tabelle 4.2b die Anzahl der bei den verschiedenen Teiluntersuchungen jeweils getesteten Versuchspersonen aufgelistet ist.

Tab. 4.2a Merkmale und Parameter der verschiedenen Teiluntersuchungen

Untersuchungsmethode	Lichtquelle	Parameter
Blendeindruck bei einem bewegten Linienlaser	Nd:Vanadat-Laser	532 nm, 0,8 mW
Nachbildgröße als Funktion der Zeitdauer nach einer Blendung	Weißlicht-LED	2,49 mW, 11 cm Abstand, 1 s
Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit der Nachbilddauer bei Blendung durch Laserstrahlung	He:Ne-Laser, 632,8 nm	max. 30 μ W, 1 s - 10 s
Nachbildfarbverlauf bei Blendung durch farbige HB-LEDs durch Beobachtung in einem dunklen Raum	6 HB-LEDs	10 s, 10 cm
Bestimmung des Verlaufes der Nachbildfarben für eine Blendung mit HB-LEDs mittels einer Messung an einem Farbkreis	625 nm, 590 nm, 530 nm, 455 nm	0,5 mW, 2 mW, 5 s
Sehschärfe nach Blendung mit einer weißen HB-LED	Weißlicht-LED	2,49 mW, 11 cm Abstand, 1 s
Sehschärfe nach Blendung mit einer grünen HB-LED	HB-LED	0,12 mW - 1,5 mW, 1 s - 8 s
Lesefähigkeit als Sehschärfekriterium nach Blendung mit einer weißen HB-LED	HB-LED	4,5 μ W - 3,96 mW, 1 s - 20 s
Farbunterscheidungsfähigkeit nach Blendung mit	638 nm,	0,5 mW,

farbigen LEDs und Verschiebung der Rot-/Grünwahrnehmung	593 nm, 520 nm, 455 nm	1,25 s - 5 s
Farb- und Kontrastsehen nach Blendung durch farbige LEDs	638 nm, 593 nm, 520 nm, 455 nm	4 mW, 5 s

Tab. 4.2b Anzahl der Versuchspersonen in den einzelnen Teiluntersuchungen

Untersuchungsmethode	Zahl der Probanden	Zahl der Einzeltests und Teilsummen
Blendeindruck bei einem bewegten Linienlaser	89	89
Nachbildgröße als Funktion der Zeitdauer nach einer Blendung	13	$11 + 3 + 9 = 23$
Orts-, Expositionsdauer und Strahlleistungs- abhängigkeit der Nachbilddauer bei Blendung durch Laserstrahlung	12	$180 + 40 + 80 + 24 + 16 + 64 + 62 + 59 + 37 + 120 + 30 = 712$
Nachbildfarbverlauf bei Blendung durch farbige HB-LEDs durch Beobachtung in einem dunklen Raum	4	$4 + 4 + 4 + 3 + 3 + 3 = 21$
Bestimmung des Verlaufes der Nachbildfarben für eine Blendung mit HB-LEDs mittels einer Messung an einem Farbkreis	4	4
	5	$18 + 180 = 198$
Sehschärfe nach Blendung mit einer weißen HB-LED	3	3
Sehschärfe nach Blendung mit einer grünen HB-LED	3	48
Lesefähigkeit als Sehschärfekriterium nach Blendung mit einer weißen HB-LED	7	$147 + 42 + 60 = 249$
Farbunterscheidungsfähigkeit nach Blendung mit farbigen LEDs	7	118
Verschiebung der Rot/Grünwahrnehmung	1	23
Farb- und Kontrastsehen nach Blendung durch farbige LEDs	3	168
	40	$40 + 40 = 80$

Insgesamt wurden 191 Probanden in 1 736 Einzeltests untersucht.

4.3.1 Vorversuche und -untersuchungen

Da bisher noch keine Messverfahren bekannt sind, mit denen objektiv die Auswirkungen einer Blendung ermittelt werden können, mussten neue Wege gegangen werden, die sich auf objektivierbare subjektive Angaben von Versuchspersonen beziehen, weil eine unmittelbare ophthalmoskopische Diagnostik nicht möglich ist.

Dennoch wurde auch ein Standardverfahren zur Visusprüfung auf seine Einsetzbarkeit nach einer Blendung untersucht und soweit modifiziert und in mehreren, jeweils einige Stunden dauernden Einzeluntersuchungen im Labor an jeweils 3 bis 5 Versuchspersonen aus einer Auswahl der in das Forschungsprojekt vor Ort involvierten Personen (R, Do, Ho, Hi, Da, Sa, Nk, Bi und Pe) soweit angepasst, dass es für Feldreihenuntersuchungen geeignet ist. Dazu mussten auch software-technische Ergänzungen vorgenommen werden. Im einzelnen wurden Laboruntersuchungen zur Implikation des Sehschärfetests nach einer Stimulation mit 6 verschiedenen quasi-monochromatischen sogenannten High-Brightness LEDs (HB-LED) durchgeführt, und zwar mit den Farben „Royal Blue, Königsblau“ (455 nm), „blau“ (470 nm), „cyan“ (505 nm), „grün“ (530 nm), „orange“ (590 nm) und „rot“ (625 nm) sowie „weiß“ (5 500 K). Dazu wurde in einer getrennten Studie die Charakteristik (Kennlinie) der jeweiligen LEDs aufgenommen, und zwar um erstens zu ermitteln, welche maximalen Lichtströme bzw. optischen Leistungen erzielbar sind und zweitens, um reproduzierbare Verhältnisse bei den Untersuchungen mit den verschiedenen Wellenlängen und Bauelementen zu haben. Ziel dieser detaillierten Voruntersuchungen war es auch, die Frage der Gültigkeit der spektralen Hellempfindlichkeit im Bereich höherer Leuchtdichten anhand der noch zu ermittelnden Abhängigkeiten entweder zu bestätigen oder aber nach Möglichkeit dazu beizutragen, einen in diesem Bereich gültigen Zusammenhang ermitteln zu können. Die Frage der Gültigkeit der $V(\lambda)$ -Kurve wird zurzeit zwar unterstellt, indem alle photometrisch gestützten Untersuchungen deren Gültigkeit voraussetzen, andererseits ist aber auch eine Rückführung auf radiometrische Größen vorgesehen, da der entsprechende Zusammenhang sich aus der Bestimmung der entsprechenden Kennlinien auch noch im Nachhinein ermitteln lässt. Die Frage der Gültigkeit der $V(\lambda)$ -Kurve in dem bei den Untersuchungen vorkommenden Leuchtdichten deutlich oberhalb von 10 cd/m^2 , wo der photopische Bereich beginnt, wurde erstmals im Zusammenhang mit der spektralen Abhängigkeit der Häufigkeit des Lidschlussreflexes – nicht zuletzt aus psychophysiologisch/physikalischer Sicht - gestellt [152, 189-191]. Eine weitergehende Untersuchung zur Frage der Gültigkeit der $V(\lambda)$ -Kurve auch im Bereich sehr hoher Leuchtdichtewerte konnte aus Zeitgründen noch nicht durchgeführt werden, sodass zunächst von deren Gültigkeit ausgegangen wird.

Zweifel an der Gültigkeit der V -Lambda-Kurve bei größeren Leuchtdichtewerten werden bereits dadurch genährt, dass z. B. Licht einer bestimmten Wellenlänge bei Zunahme bzw. Abnahme der Intensität in unterschiedlichen Farben erscheint, was im sogenannten Bezold-Brücke-Effekt begründet ist und dass besonders „helle Farben“, wie sie heute mit LEDs erzeugt werden können, primär „fast weiß“ erscheinen, wobei kurzwellige Strahlung als „weiß mit einem Blaustich“ und langwellige als „weiß mit einem Gelbstich“ empfunden wird.

4.3.1.1 Erkennbarkeitsstudie von Nachbildfarben und -intensitätsverläufen (Untersuchungen zum Farbenverlauf von Nachbildern)

Eine hierzu durchgeführte Teil-Untersuchung galt der Frage, inwieweit erstens eine Beeinflussung dadurch entstehen kann, dass auch auf dem nicht exponierten und damit nicht geblendeten Auge ein Nachbild entsteht, und zwar im wesentlichen ein „negatives“, und zweitens welchen Einfluss dies auf die Erkennbarkeit von Farben hat, wenn ein geblendeter Proband mit dem nicht-geblendeten Auge zum Vergleich mit dem unter dem Eindruck eines Nachbildes auf dem geblendeten Auge stehenden Seheindruck „ermittelten“ Farbe die „richtige“ Farbe erkennen soll, dies aber eventuell durch Überlagerung maskiert bzw. selbst bereits verfälscht werden könnte.

Dazu wurde im Anschluss an eine Blendung an 4 Personen (R, Ho, Hi, Da) unter völliger Dunkelheit die „Farbskala“ des Nachbildes durch Angabe der „erlebten“ bzw. „wahrgenommenen“ Farben und deren flächenhafter bzw. profilmäßiger Verteilung im Nachbild ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass in völliger Dunkelheit – im Gegensatz zu normaler Laborhelligkeit, wobei geblendetes und nicht-geblendetes Auge ein jeweils verschiedenes Nachbild, d. h. zunächst einmal ein positives und dann ein negatives, wahrnehmen – kein Unterschied darin besteht, ob das Nachbild auf dem geblendeten oder auf dem nicht-geblendeten, d. h. abwechselnd mit dem einen oder anderen Auge geöffnet, wahrzunehmen versucht wird oder mit beiden gleichzeitig geöffneten Augen. Die in völliger Dunkelheit (in einem entsprechend lichtdicht abgeschlossenen Raum) durchgeführten Untersuchungen stellen die Wahrnehmung des Nachbildes unter skotopischen Sehbedingungen dar. Deren Auswertung soll dazu beitragen, die dynamischen photochemischen und neuronalen Vorgänge des Nachbildverlaufes zu ermitteln.

Bei Untersuchungen zum Auftreten von farbigen Nachbildern stellt die Wahl eines geeigneten Farbraumes bzw. -diagrammes eine wichtige Komponente dar, denn damit muss erreicht werden, dass Testpersonen die wahrgenommenen Farben eindeutig angeben können.

Möglichkeiten dazu bestehen zum einen in einer eigenen Beschreibung der wahrgenommenen Farben, was unter Umständen auch durch eine Sprachaufzeichnung unterstützt bzw. erleichtert und besser zeitlich zugeordnet geschehen kann.

Bei den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden zunächst theoretische und anschließend erste experimentell-orientierende verschiedene farbliche Darstellungen auf ihre Anwendbarkeit getestet.

Die nachstehende Übersicht (Abb. 4.1) zeigt einige der dazu untersuchten Nachbildfarbtafeln:

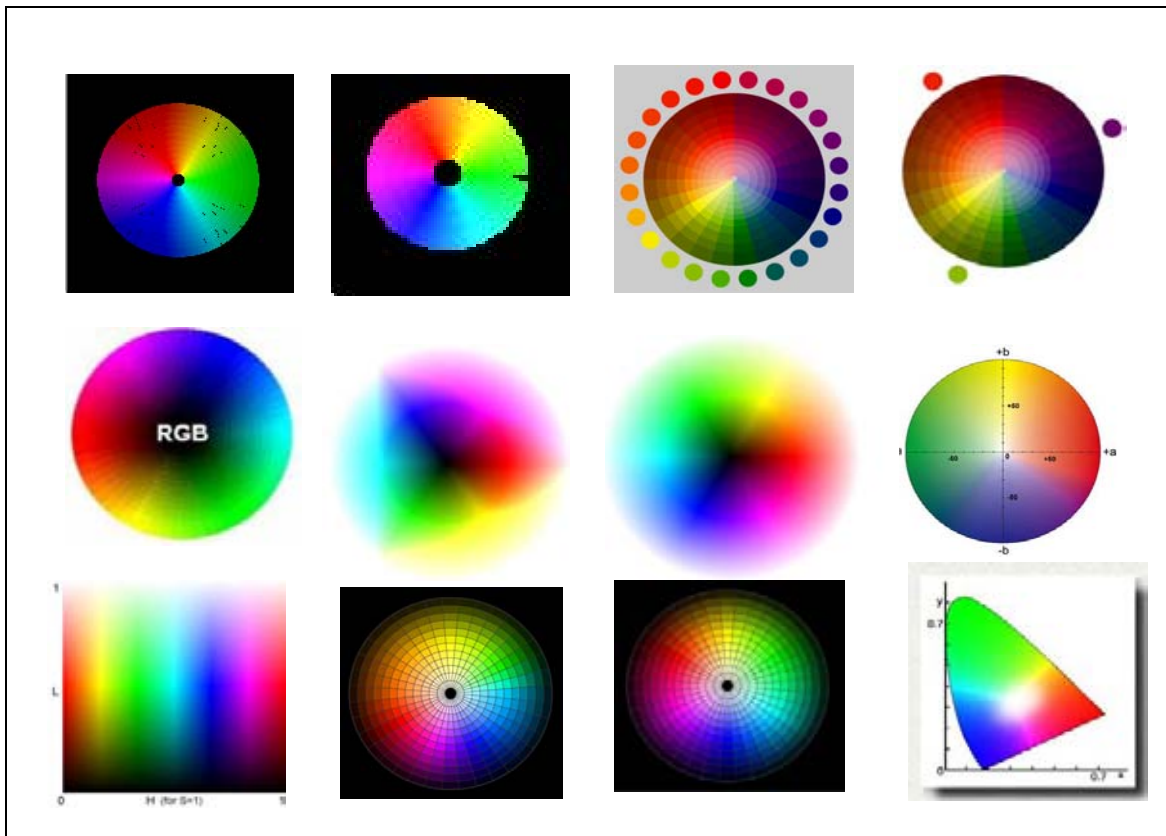


Abb. 4.1 Auswahl einiger Nachbildfarbtafeln

Der Verlauf der Nachbildfarben kann dann z. B. als eine kontinuierliche „Spur“ oder als ausgewählte Punkte im Verlauf dargestellt werden, wie es die nachstehenden Beispiele (Abb. 4.2) demonstrieren. Dabei wurde von einer Stimulation mit einer farbigen LED ausgegangen.

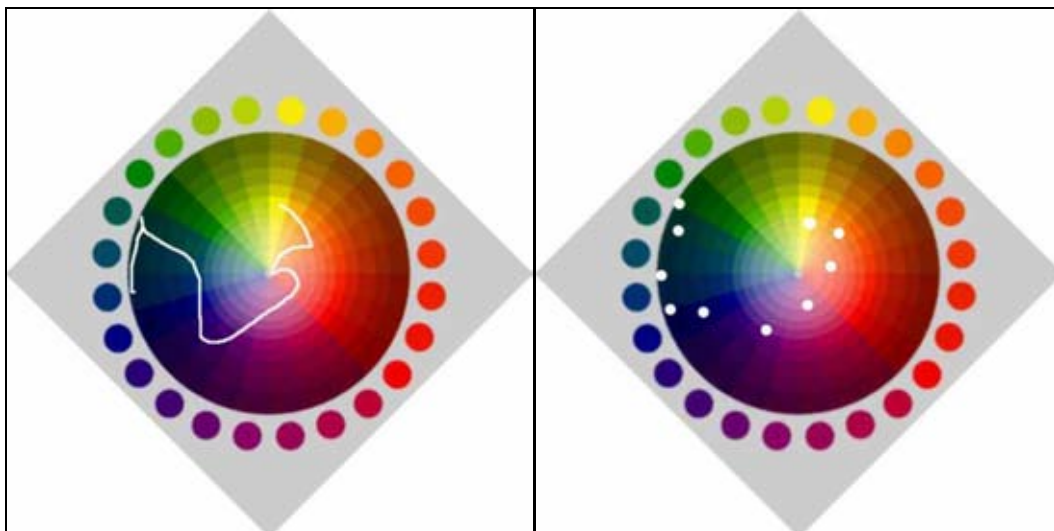


Abb. 4.2 Demonstration des Verlaufes farbiger Nachbilder

Eine genauere Analyse ergab folgende Zusammenhänge:

„Untersuchungen des Farbverlaufs des Nachbildes nach Blendung mit LEDs unterschiedlicher Wellenlängen“

Ausgangssituation:

Die konkrete Untersuchung der Farbeindruckveränderung nach Bestrahlung des Auges durch LEDs und Laser unterschiedlicher Wellenlänge bedingt einen Vergleich des Farbeindrucks im geblendeten Auge und im nicht geblendeten.

Das Problem, welches sich hier stellt, besteht jedoch darin, dass das Nachbild auch beim Sehen mit dem nicht geblendeten Auge im Sichtfeld auftritt. Die Zeitdauer des „sichtbaren“ (wahrnehmbaren) Nachbildes auf dem nicht geblendeten Auge ist jedoch kürzer als beim geblendeten Auge.

Wird nach Blendung das geblendete Auge geschlossen, so wird ein positives Nachbild der Blendquelle wahrnehmbar („sichtbar“).

Bei zwei Testpersonen wurde deutlich, dass bei Sicht auf einen hellen Hintergrund mit dem geblendeten Auge (nach kurzer Zeitdauer) ein negatives Nachbild sichtbar wird, mit dem nicht geblendeten Auge ein positives.

Bei der Untersuchung von Farbveränderungen ist zudem zu beachten, ob die Überlagerung einer Farbfläche mit dem Nachbild betrachtet wird oder eine Farbveränderung in der Peripherie.

4.3.1.2 Orientierende Untersuchungen zum Verlauf der Nachbildfarben (Nachbildfarbverlauf bei Blendung durch farbige HB-LEDs durch Beobachtung in einem dunklen Raum)

In diesem Teilprojekt wurde der Verlauf der Nachbildfarben und der Dauer der einzelnen Phasen ermittelt, und zwar für 6 HB-LED mit verschiedenen Farben, wobei der Bereich des sichtbaren Spektrums relativ gut „aufgeteilt“ ist. Außerdem wurde die Auswirkung auf die Farbverfälschungen in den einzelnen zeitlichen Phasen untersucht.

Die Untersuchungen passen in die zuvor dargestellten Betrachtungen. Es ist aber festzuhalten, dass nicht die Komplementärfarbe, wie es bei „normaler“ Blendung meist der Fall ist, vorherrscht, sondern dass bei modernen HB-LED zunächst dominant und für relativ lange Dauer die Primärfarbe, d. h. diejenige der jeweils verwendeten LED die Farbe des Nachbildes bestimmt und damit auch die dadurch bedingten Farbverfälschungen. Insofern bedarf es eines gewissen Umdenkens der Nachbilderscheinungen, wie sie bisher aus Betrachtungen der Literatur ableitbar war.

Ziel war es hier, die Zusammenhänge zwischen der Wellenlänge und den damit verbundenen Erscheinungen zu finden, sodass Vorhersagen möglich werden dergestalt, dass das „Ausmaß“ einer Blendung durch eine „farbige“ Lichtquelle aufgrund von

Messungen und Berechnungen vorliegender Daten weitgehend vorhergesagt werden kann.

Erste Untersuchungen einer Farbveränderung wurden in der Art vorgenommen, dass der Farbverlauf des Nachbildes in einem dunklen Raum geprüft wurde. Die Blenddauer betrug etwa 10 Sekunden; dieser Wert wurde jedoch durch Zählen geschätzt und ist daher nicht als genaue Angabe zu betrachten. Der Abstand des Auges zur Blendquelle variierte ebenso. Er betrug aber etwa 10 cm.

Die Angaben der Versuchspersonen über das was beim Aufenthalt in der Dunkelkammer „gesehen“ bzw. wahrgenommen wurde, erfolgten erst anschließend.

Bei den folgenden orientierenden Untersuchungen sollte zunächst allgemein der farbliche Verlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer LED abgeschätzt werden. Daher wurde auch die Dauer der jeweiligen Farbwahrnehmungen nicht genauer festgehalten.

a.) Geblendet wurde mit einer grünen LED (530 nm) mit 600 mA Diodenstrom:

Der Farbverlauf des Nachbildes vollzog sich bei den 4 Testpersonen (E.H.; J. H.; K. D.; H.-D. R.) zwar unterschiedlich, bestimmte Farben, welche wahrgenommen wurden, und deren Abfolge, deckten sich jedoch.

So erscheint für jede der Testpersonen das Nachbild zunächst einheitlich im selben Grün wie die Blendlichtquelle (s. Abb. 4.3). Bei 3 Testpersonen bildet sich anschließend ein purpurner Ring, welcher von außen nach innen größer werdend schließlich das gesamte Nachbild einnimmt. Bei einer Testperson vollzog sich dieser Vorgang zunächst mit Gelb-Weiß und anschließend erst mit Purpur. Zur Verdeutlichung zeigt nachfolgende Abbildung 4.3 den Verlauf vom Beginn der Wahrnehmung des Nachbildes bis zum Ende des farblichen Nachbildes. Dabei handelt es sich bei den Ringstrukturen nicht um scharf gegeneinander abgegrenzte Bereiche, sondern vielmehr um solche, die ineinander hinein zu fließen scheinen und außerdem auch eine radiale Varianz zeigen. Der Außendurchmesser d des Nachbildes blieb dabei annähernd konstant.

Der Durchmesser d des Nachbildes bleibt während diesem Verlauf konstant. Eine Änderung in der Größe des Nachbildes ergibt sich erst, wenn es von Außen nach Innen hin kaum mehr wahrnehmbar wird.

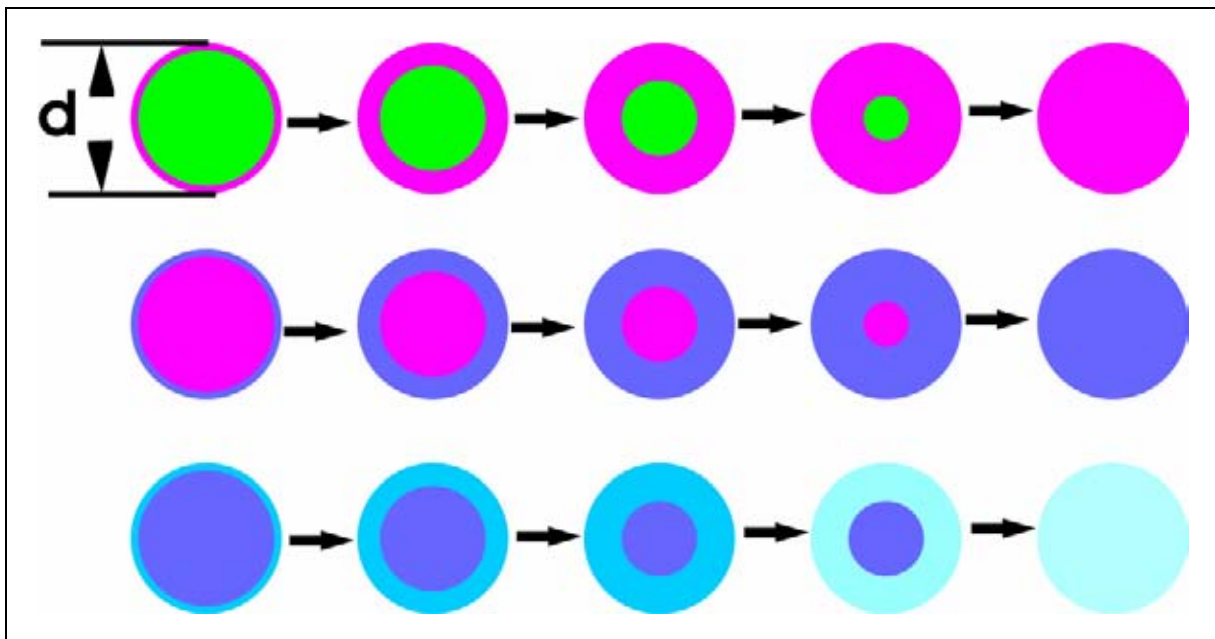


Abb. 4.3 Verlauf des kreisrunden Nachbildes bei Blendung mit einer grünen LED

Im weiteren Verlauf erschien bei allen Testpersonen außen über dem purpurnen Kreis, der der Form der Blendquelle entspricht, ein bläulicher Ring, welcher wiederum langsam, nach Innen größer werdend, das gesamte Nachbild einnahm. Zwei der Testpersonen gaben an, dass sich Blau anschließend in Cyan wandelte, während die anderen beiden Probanden kein Nachbild mehr erkennen konnten. Nachfolgende Tabelle 4.3 zeigt von oben nach unten den zeitlichen Farbverlauf des Nachbildes jedes Probanden. Den Erklärungsversuchen vorausgreifend befinden sich gleich wahrgenommene Farben der Testpersonen bzw. Farben, welche sich im gleichen Bereich befinden, auf einer Stufe, wobei nicht klar ist, ob sie auch zur gleichen Zeit aufgetreten sind.

Tab. 4.3 Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer grünen LED mit 600 mA

Testperson 1	Testperson 2	Testperson 3	Testperson 4	
Grün	Grün	Grün	Grün	Positives Nachbild
↓	↓	↓	↓	↓
Gelb-Weiß				
↓	↓	↓	↓	
Purpur	Purpur	Purpur	Purpur	
↓	↓	↓	↓	
Blau	Blau	Blau	Blau	
	↓	↓		
	Cyan	Cyan		

Sämtliche Farbeindrücke, welche dem positiven Nachbild folgen, können nicht mehr als zurückgebliebener Farbeindruck durch die Blendquelle betrachtet werden.

Der in Tabelle 4.3 aufgeführte Verlauf ist nachfolgend zur Übersicht in den CIE-Farbraum übertragen (Abb. 4.4), wobei gleichzeitig der beobachtete Verlauf eingetragen ist.

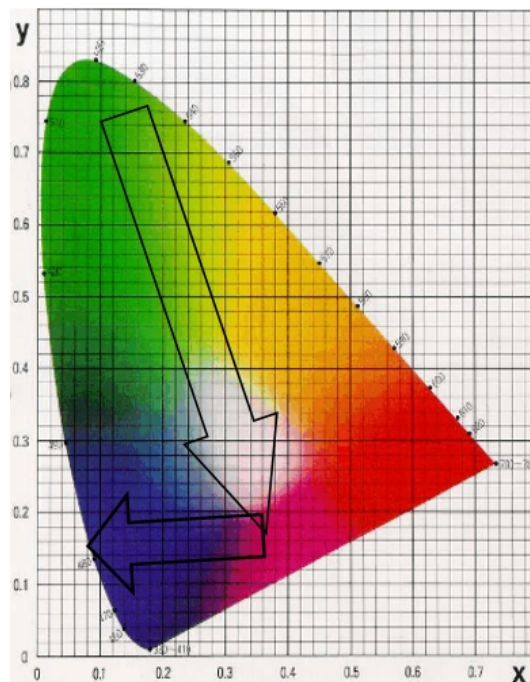


Abb. 4.4 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer grünen LED mit 600 mA

Die Pfeile in Abb. 4.4 zeigen den zeitlichen Farbverlauf des Nachbildes. Die erste Wahrnehmung „Grün“ entspricht dem durch die Lichtquelle ausgeübten Reiz (Primärreiz). Die Richtung ist gemäß den Angaben in Tabelle 4.3 auf jeden der 4 Testpersonen übertragbar. Durch die Breite der Pfeile wird deutlich, dass es keinen eindeutigen Verlauf gibt, sondern je nach Testperson während des Verlaufs auch unterschiedliche Farben wahrgenommen werden. In Tabelle 4.3, sowie Abb. 4.4, wird keine direkte Unterteilung von Kreisfarbe und Ringfarbe getroffen, da üblicherweise die Kreisfarbe mit der Zeit die Ringfarbe annimmt.

b.) Zum Vergleich wurden die Messungen mit einer blauen LED (455 nm) und 600 mA Diodenstrom wiederholt.

Hier traten wieder ähnliche Farbeindrücke bei den verschiedenen Testpersonen auf; der Verlauf zu diesen Farben unterschied sich jedoch. Zunächst besitzt das Nachbild komplett die Farbe der Blendquelle.

Eine Testperson gab an, dass das Nachbild zunächst an Farbe verlor und fast weiß wurde und anschließend wie bei den 3 anderen Probanden von 2 äußeren Ringen überlagert wurde, wobei der äußerste Ring die Farbe Gelb, der innere Ring die Farbe Purpur besaß.

Bei 2 der Testpersonen verschwand der äußere Ring und es wurde eine purpurne Fläche mit rotem Rand sichtbar. Dieser rote Rand nahm anschließend die gesamte Fläche ein und wurde im weiteren Verlauf von einem „erdgelben“ Ring umschlossen.

Bei den anderen beiden Probanden erschien dieser „erdgelbe“ Ring bereits um die purpurne Fläche. Bei diesen 2 Personen änderte sich das Nachbild in „Erdgelb“ mit grünem Rand.

Die Ergebnisse zu dieser Untersuchung sind in Tab. 4.4 und in Abb. 4.5 dargestellt.

Tab. 4.4 Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer blauen LED mit 600 mA

Testperson 1	Testperson 2	Testperson 3	Testperson 4	
Blau	Blau	Blau	Blau	Positives Nachbild
↓ Weiß ↓ (Gelb)	↓ (Gelb)	↓ (Gelb)	↓ (Gelb)	↓
↓ Purpur	↓ Purpur	↓ Purpur	↓ Purpur	
↓ Rot	↓	↓	↓ Rot	
↓ Erdgelb	↓ Erdgelb	↓ Erdgelb	↓ Erdgelb	
	↓ Grün	↓ Grün		

Auf den gelben Ring (eine äußere Umrandung) wurde hier nicht weiter eingegangen. In diesem Fall ist nicht deutlich, ob die Farbe des gelben Ringes derjenigen der erdgelben Fläche entspricht.

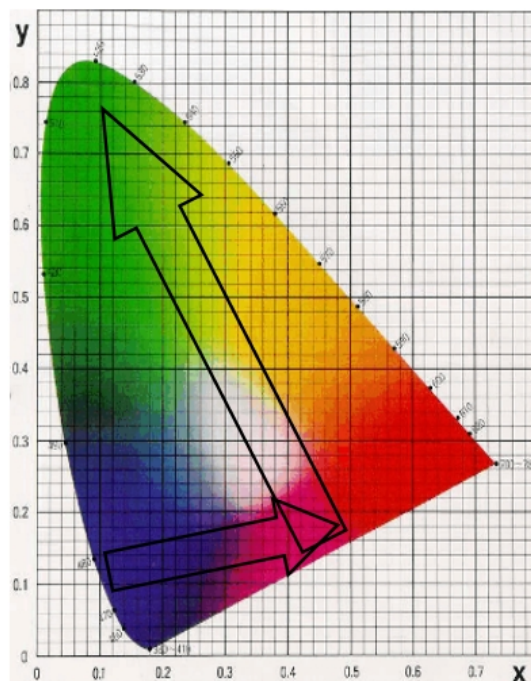


Abb. 4.5 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer blauen LED mit 600 mA

- c.) Die Vermutung war nun, dass bei geringerer Blendung der Verlauf der Farbe zwar gleich bleibt, der Weg jedoch an einer anderen Stelle im CIE-Farbraum beginnt.
- c.1) Zunächst wurde mit einer blauen LED und einem Diodenstrom zwischen 40 mA und 50 mA geblendet.

Bei allen Probanden vollzog sich der Farbverlauf ebenso wie bei stärkerer Blendung, wobei die Individualität der einzelnen Testpersonen bestehen blieb. Die erste Farbe, welche gesehen wurde, war innen Blau mit einem purpurnen Ring und einem weiteren gelben Ring und nicht wie bei stärkerer Blendung ausschließlich Blau (Tab. 4.5).

Tab. 4.5 Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer blauen LED mit 40 – 50 mA

Testperson 1	Testperson 2	Testperson 3	Testperson 4	Positives Nachbild
Blau	Blau	Blau	Blau	
↓ (Gelb)	↓ (Gelb)	↓ (Gelb)	↓ (Gelb)	↓
Purpur	Purpur	Purpur	Purpur	
↓	↓	↓	↓	
Rot			Rot	
↓			↓	
Erdgelb	Erdgelb	Erdgelb	Erdgelb	
	↓	↓		
	Grün	Grün		

Der bläulich gekennzeichnete Bereich in Tabelle 4.5 dient zum Vergleich der Messung mit der Untersuchung bei höherer Leistung. Dieser Bereich, ein reines Blau, wurde von allen Probanden nicht mehr gesehen. Hier zeigten sich bereits, zusätzlich zum Blau, Purpur und Gelb. Dies bestätigt zunächst die Vermutung, dass der farbliche Verlauf des Nachbildes gleich bleibt, jedoch „später“ einsetzt.

Die Testperson 2 und 3 wurden mit 50 mA, Testperson 1 und 4 mit 40 mA geblendet.

Bei einem weiteren Versuch wurde der Strom auf 10 mA reduziert. Nun sahen alle Probanden zunächst ein helles Violett, welches anschließend von außen her gelb wurde, bis nur noch ein gelber Kreis übrig blieb. Der Vergleich mit der Messung bei höherer Leistung findet sich in Tabelle 4.6.

Tab. 4.6 Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer blauen LED mit 10 mA

Testperson 1	Testperson 2	Testperson 3	Testperson 4	
Blau Weiß (Gelb)	Blau (Gelb)	Blau (Gelb)	Blau (Gelb)	Positives Nachbild
↓ Purpur	↓ Purpur	↓ Purpur	↓ Purpur	Beginn Blauviolett
↓ Erdgelb	↓ Erdgelb	↓ Erdgelb	↓ Erdgelb	↓ Ende Gelbgrün
	↓ Grün	↓ Grün		

Hier ist deutlich zu erkennen, dass der Farbverlauf mit einem hellen Violett an einer späteren Stelle einsetzt, bei Betrachtung des Verlaufs im CIE-Farbraum jedoch noch vor dem Purpur (Abb. 4.6). Die Farbe Purpur ist in Tabelle 4.6 nur zur Übersicht und zum Vergleich mit Tabelle 4.4 und 4.5 eingetragen. Der gelbe Ring wurde nicht mehr wahrgenommen.

Zumindest für Testperson 2 und 3 endet der farbliche Verlauf des Nachbildes früher. Diese beiden Personen nahmen nach Blendung mit höherer Leistung nach dem erdgelben noch ein grünes Nachbild wahr.

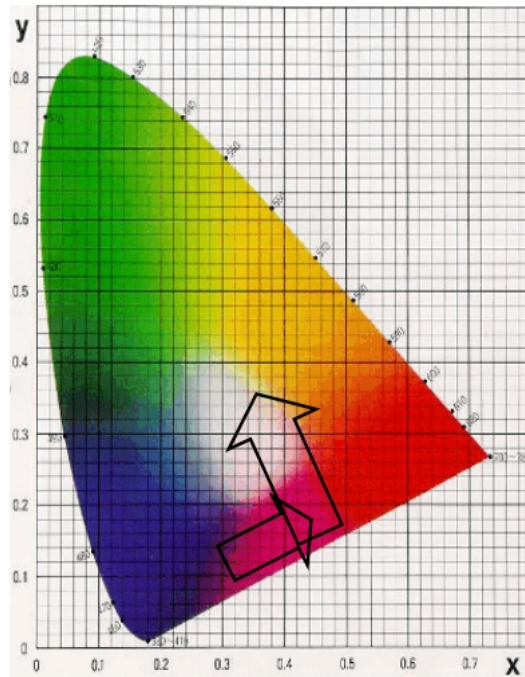


Abb. 4.6 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer blauen LED mit 10 mA

Hier wird deutlich, dass der farbliche Verlauf des Nachbildes bei niedriger Leistung richtungsbezogen zwar gleich bleibt, einige Farben jedoch nicht mehr wahrgenommen werden. Der Verlauf beginnt zwischen Blau und Purpur und zeigt damit eine Farbe, welche vorher nicht wahrgenommen wurde. Purpur wird hierbei nicht mehr gesehen, das helle Violett geht direkt in Erdgelb über, wobei davon ausgegangen werden kann, dass die Farbe Purpur nicht übersprungen, sondern nicht mehr registriert wird.

c.2) Der Versuch der Blendung bei niedrigerer Leistung wurde mit der grünen LED und 25 mA wiederholt.

Hierbei nahmen nur noch 3 Personen (Testperson 1-3) teil.

Bei 2 der Testpersonen verlief die Farbänderung ähnlich wie zuvor mit 600 mA. Bei Testperson 1 begann der Verlauf mit einem grünen Kreis und bläulich-weißer Umrandung. Testperson 3 gab an, das Nachbild sei bereits zu Beginn am verschwinden, habe aber die Farbe grün. Bei dieser Person erhielt das anschließend auftretende purpurne Nachbild direkt einen cyanfarbigen Ring und nicht wie zuvor erst einen deutlich blauen.

Testperson 2 nahm zunächst einen cyanfarbigen Kreis mit purpurnem Ring wahr und im weiteren Verlauf die umgekehrte Kombination (Tab. 4.7).

Tab. 4.7 Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer grünen LED mit 25 mA

Testperson 1	Testperson 2	Testperson 3	
Grün	Grün	Grün	
↓ Blau-Weiß	↓	↓	
↓ Purpur	↓ Purpur	↓ Purpur	
↓ Blau	↓ Blau	↓ Blau	Positives Nachbild
↓ Cyan	↓ Cyan	↓ Cyan	↓

Hier ist zu erkennen, dass der Nachbildverlauf der Testpersonen an unterschiedlichen Stellen einsetzt. Testperson 3 nimmt die Farbe Grün noch deutlich und einheitlich wahr, Testperson 2 hat keinen einheitlichen Grüneindruck mehr und bei Testperson 3 hat das Nachbild zu Beginn bereits die Farbe Purpur.

Diese Unterschiede könnten auf die ungenaue Entfernung des jeweiligen Probanden von der Blendquelle, sowie die nur geschätzte Blenddauer, zurückzuführen sein.

c.3) Zur Übersicht wurden die letzten Messungen mit einer roten LED (625 nm) bei 25 mA wiederholt.

Bei der verwendeten Leistung erschien bei allen 3 Probanden zunächst noch ein deutlicher Roteindruck, der äußere Rand des Nachbildes wurde jedoch bereits in einem helleren Rot bzw. Violett wahrgenommen (Tab. 4.8).

Tab. 4.8 Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer roten LED mit 25 mA

Testperson 1	Testperson 2	Testperson 3
Rot ↓	Rot ↓	Rot ↓
Violett ↓	Violett ↓	Helleres Rot ↓
Dunkelblau ↓	Schwarz ↓	Blau-Grün ↓
Blau-Grün ↓	Cyan	Rot ↓
Rot		Schwarz.Grün (mit Türkis dazwischen) ↓
		Rot ↓
		Türkis-Grün Cyan

Da es bei diesem Versuch Unstimmigkeiten in der Farbwahrnehmung gab, welche zu unterschiedlichen Verläufen im CIE-Farbraum führen, wurden weitere Messungen vorgenommen, hauptsächlich um eine klare Aussage über die zweite Farbwahrnehmung treffen zu können. Violett/Purpur und ein heller werdendes Rot lassen sich nur schwer unterscheiden und der Eindruck hängt zusätzlich von der Farbwahrnehmung und Farbbeschreibung der jeweiligen Person ab.

Die Testpersonen 1 und 3 stimmten nach weiteren Versuchen darin überein, dass das zu Anfang auftretende Rot sich, langsam heller werdend, in eine Art dunkles Orange wandelt (Tab. 4.9). Einer der beiden Probanden nahm anschließend zunächst ein purpurfarbenes Nachbild wahr, was sich mit den Aussagen von Testperson 2 deckt.

Tab. 4.9 Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer roten LED mit 25 mA - 2. Messung

Testperson 1	Testperson 2	Testperson 3
<p>Rot</p> <p>↓</p> <p>Orange</p> <p>↓</p> <p>Purpur</p> <p>↓</p> <p>Schwarz</p> <p>↓</p> <p>Blau</p>	<p>Rot</p> <p>↓</p> <p>Purpur</p> <p>↓</p> <p>Schwarz-Grün</p> <p>↓</p>	<p>Rot</p> <p>↓</p> <p>Orange</p> <p>↓</p> <p>Schwarz-Grün</p>

Bei allen drei Personen trat jedoch anschließend ein gänzlich schwarzes bis schwarz-grünes Loch auf, welches trotz der vollkommen dunklen Umgebung wahrgenommen wurde. Bei einer der Testpersonen wandelte sich dieses Schwarz in ein helleres Blau.

Der farbliche Verlauf ist in Abb. 4.7 zu sehen.

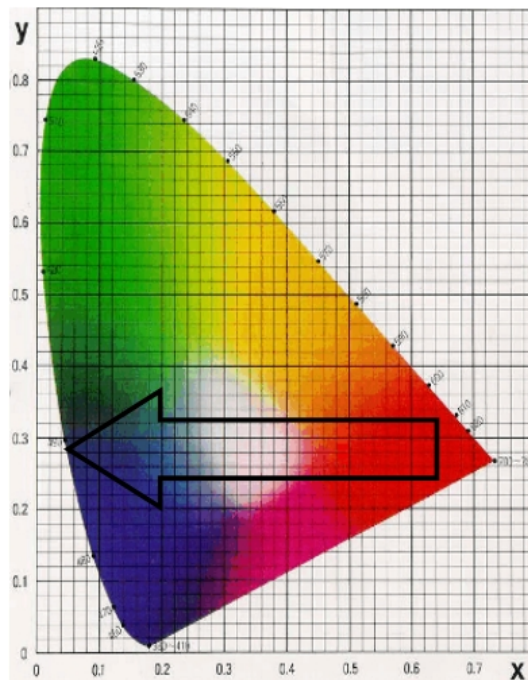


Abb. 4.7 Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer roten LED mit 25 mA

Im Ganzen kann der Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer roten LED bisher nur sehr grob geschätzt werden.

Ein grober farblicher Verlauf des Nachbildes ist zwar erkennbar, Zwischenschritte fallen hier jedoch stark unterschiedlich aus. Durch die Breite des Pfeils in Abb. 4.7 wird verdeutlicht, dass Anfangs- und Endfarbe des Nachbildes auf unterschiedliche Weise verbunden sein können.

Durch vorstehende Vorversuche ergab sich, dass der Farbverlauf des Nachbildes bei allen Testpersonen einen ähnlichen Verlauf zeigt. Farben können dennoch unterschiedlich stark wahrgenommen werden.

Die Farbänderung verläuft im Wesentlichen kontinuierlich. Die nachfolgende Farbe bildet sich zunächst als Ring um bzw. über das kreisförmige Nachbild, bevor sie zunehmend die gesamte Fläche einnimmt. Die äußere Größe des Nachbildes bleibt hierbei über längere Zeit konstant. Eine geringere Leistung der Blendquelle hat eine „Verkürzung“ des farbigen Nachbildverlaufs zur Folge, wie dies in Abschnitt 2.7.3 aus früheren Untersuchungen bekannt ist. Im individuellen Verlauf werden einzelne Farben stärker oder schwächer wahrgenommen.

Das „Intensitätsprofil“ der bei diesen Untersuchungen verwendeten LEDs spiegelte sich auch darin wider, dass z. B. außer einem zentralen Fleck in der Farbe des Blendlichtes je nach verwendeter Wellenlänge ein bis zwei Ringe in anderen Farben wahrgenommen wurden, wobei der äußere Ring im wesentlichen der Komplementärfarbe entsprach. Die prozentualen Flächenanteile änderten sich mit fortschreitender Dauer nach dem Blendereignis, indem die innere Fläche kleiner wurde und schließlich ganz verschwand, während der bzw. die äußeren Ringe flächenmäßig

prozentual zunehmen, ohne dass sich aber der Gesamtdurchmesser des Nachbildes veränderte. Dieser Nachbilddurchmesser nahm erst in der Komplementärfarbe, die als letzte Farbe wahrgenommen wurde, ab, und zwar bis zum endgültigen Verschwinden bei dem Versuch der Wahrnehmung in völliger Dunkelheit. In normaler Laborhelligkeitsumgebung konnte jedoch anschließend das Nachbild in der Komplementärfarbe jeweils auf heller, d. h. fast weißer Fläche dennoch über einen vergleichsweise langen Zeitraum – von einigen Minuten – wahrgenommen werden, und zwar in der ursprünglichen Größe des Nachbildes.

Beobachtungen, wonach im Verlaufe der individuellen Wahrnehmung des Nachbildes eine vorübergehende „Intensivierung“ des Nachbildes wahrgenommen wurde, bedürfen der weiteren Untersuchung. Insgesamt konnte aber bei diesen Teil-Untersuchungen von allen daran beteiligten Testpersonen (R, Ho, Hi, Da) weitgehende Übereinstimmung bei den jeweiligen Nachbildwahrnehmungen bezüglich der Farben festgestellt werden, es gab aber durchaus auch Abweichungen. Diese können in verschieden langer Expositionsdauer, unterschiedlicher Nachbildfläche auf der Netzhaut als Folge verschiedenen Abstandes der Blendlichtquelle vom Auge während der Exposition, aber auch in der „Kommunikation“ der jeweils wahrgenommenen Farbe bestanden haben, denn es gehört zu den Eigenschaften menschlicher Farbwahrnehmung, dass deren Übermittlung an andere dann problematisch ist, wenn es sich nicht um „eindeutige“ Farben handelt, sondern um solche, die durch Addition oder Subtraktion zustande kommen. Dies ist erfahrungsgemäß im Bereich um „Zyan“ und um „Violett“ deutlich mehr erschwert als im Bereich um „Gelb“. Dies könnte mit der spektralen Hellempfindung zusammenhängen, die bei „Gelb“ nahe dem Maximum, bei Farben wie „Rot“ und „Blau“ – also jeweils Farben am Rande des sichtbaren Spektrums – bei entsprechend niedrigeren Werten der spektralen Hellempfindung liegt.

Bei dieser Untersuchung konnte durch Änderung der „Intensität“ der jeweiligen LED festgestellt werden, dass unterhalb eines spezifischen Wertes nicht mehr die Farbe des jeweils blendenden Lichtes, sondern eine Farbe wahrgenommen wurde, die sich im Farbdreieck gewissermaßen „auf dem Weg“ zur Komplementärfarbe befand, wobei sie jeweils von einer solchen ausging, die der stimulierenden „benachbart“ war (vgl. Abb. 4.4 – 4.7).

Um Unklarheiten bezüglich der Farbbeschreibung auszuschließen, ist der Testperson ein Vergleichsfeld anzubieten. Zur Trennung von Nachbildfläche und Rand sollte der Proband mit dem Phänomen vertraut sein und ein Richtmaß zur Farbanga-be angegeben werden.

In weiteren orientierenden Untersuchungen, die auch Gegenstand einer Master-Thesis waren [193], wurde auch die Abhängigkeit vom Diodenstrom und damit von der abgegebenen optischen Leistung auf den Farbverlauf näher untersucht. Ein wesentliches Ergebnis war, dass der farbliche Verlauf des Nachbildes bei niedrigerer Leistung richtungsbezogen zwar gleich bleibt, einige Farben jedoch nicht mehr wahrgenommen wurden.

Ergebnisse:

- a.) Der Farbverlauf des Nachbildes zeigt bei allen Testpersonen einen ähnlichen Verlauf. Farben auf diesem Weg werden jedoch unterschiedlich stark wahrgenommen oder auch gar nicht.
- b.) Die Farbänderung verläuft kontinuierlich. Eine neue Farbe bildet sich zunächst als Ring über das kreisförmige Nachbild, bevor sie die gesamte Fläche einnimmt. Die Größe des Nachbildes bleibt hierbei über längere Zeit konstant.
- c.) Bei geringerer Blendung hat die Farbveränderung des Nachbildes denselben Verlauf, beginnt jedoch an einer anderen Stelle. Hierbei werden dann teilweise Farben auf der „Wegstrecke“ stark wahrgenommen, welche bei stärkerer Blendung gar nicht auftreten und umgekehrt.

Erklärungsversuche:

Dass das Nachbild zunächst die Farbe der Blendlichtquelle annimmt, ist vermutlich auf die Stärke des Reizes zurückzuführen. So wird z. B. bei einer starken Grünblendung die Information der Farbe Grün auch nach der Blendung noch gesendet. Der Grüneindruck bleibt also noch erhalten. Da dieser mit der Zeit nachlässt, wird das Nachbild dann zunächst in der Komplementärfarbe bzw. Farben dazwischen, wahrgenommen. Wird der Grüneindruck noch geringer (negative Werte), wandelt sich die Farbe ins bläuliche (mit RGB - Farben nicht darstellbar).

Ebenso verhält es sich bei der Blendung mit LEDs anderer Wellenlängen.

Unterschiedliche Wahrnehmungen der Testpersonen können auf die ungenaue Abmessung des Abstandes zur Blendquelle und die ungenaue Zeitmessung in der Blenddauer zurückgeführt werden, könnten jedoch auch abhängig von der Anatomie des jeweiligen Probanden sein.

Die LEDs haben keine konstante Leistungsdichteverteilung über dem Querschnitt (Abb. 4.8).

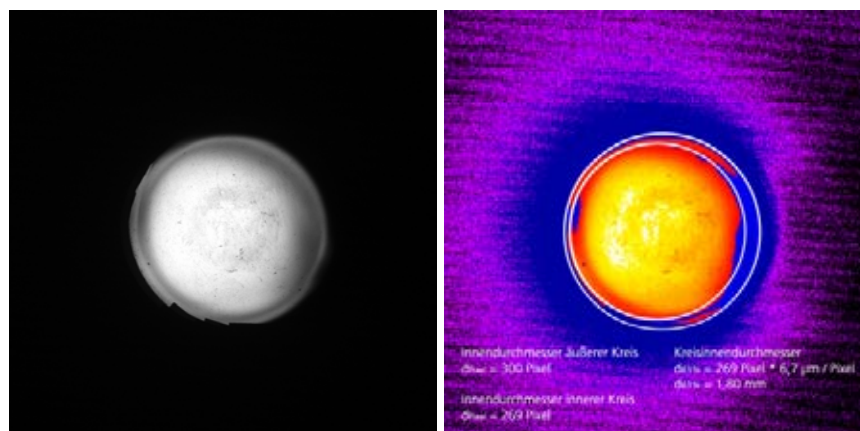


Abb. 4.8 Relative Leistungsdichteverteilung beispielhafter LED-Blendquellen, als Schwarz-Weiß-Bild und farblich kodiert

Dies führt dazu, dass die Netzhaut in der Peripherie weniger stark geblendet ist als mittig. Daher ändert sich der Farbeindruck außen als Ring schneller.

d.) Bei geringerer Blendung ist der Eindruck der Blendquelle meist so gering, dass nur noch das Fehlen der jeweiligen Farbe registriert wird. Hierbei kann der Ausfall der Farbe gerade eine Stufe (eine Position) erreicht haben, welche vorher zwar vermutlich auch auftrat, aber in dieser Weise nicht wahrgenommen wurde. Vermutlich ändert sich der Farbverlauf des Nachbildes auch in der Zeitdauer der einzelnen Farbeindrücke. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass Farben, welche bei höherer Leistung noch wahrgenommen wurden, bei niedrigerer Leistung nicht mehr auftreten, obwohl sie weiterhin auf dem „Weg“ des farblichen Nachbildverlaufs liegen.

Die Ergebnisse zeigen die dynamischen photochemischen und neuronalen Vorgänge des Nachbildverlaufes.

Bereits diese orientierenden Laboruntersuchungen zeigten zum Teil überraschende Zusammenhänge bei den Blendeffekten zu deren Erklärungen weitere detailliertere Teiluntersuchungen erforderlich waren. Es mussten darüber hinaus Modifikationen der Messmethoden und -verfahren vorgenommen werden, was aber insofern nicht weiter verwunderlich ist, da mit den als Blendlichtquellen eingesetzten HB-LEDs bisher nicht verfügbare „Intensitäten“ zur Anwendung kamen, bei denen eine Übertragbarkeit bereits bekannter Ergebnisse und Zusammenhänge nicht ohne weiteres möglich war, mit anderen Worten vielfach wurde mit den begonnenen Tests ganz einfach auch Neuland betreten.

Inwieweit diese Untersuchungen z. B. nach Blendungen im Straßenverkehr von Bedeutung sein könnten, insbesondere dadurch, dass das Nachbild dann unter mesopischen Bedingungen und eventuell unter skotopischen wahrgenommen werden könnte, bedarf einer genaueren Untersuchung. Nach bisherigen eigenen Erfahrungen der Projektteilnehmer wird das mit einer Blendung im Straßenverkehr zusammenhängende Nachbild in der überwiegenden Zahl der Fälle wenig bis überhaupt nicht wahrgenommen. Dies könnte mit den im Straßenverkehr zusammenhängenden typischen Sehaufgaben zu tun haben, die sich allerdings bei einer Fahrt auf der Autobahn, einer solchen auf einer Landstraße und in belebter Stadt sehr stark unterscheiden können. Es ist zumindest zu bedenken, dass immer wieder von Blendereignissen im Straßenverkehr die Rede ist, die als sehr „stark“ beschrieben werden, weil es sich um Situationen handelte, bei denen die Begegnung zweier Fahrzeuge einer ganz bestimmten Konstellation entsprach. Im Übrigen sei auf die in Abschnitt 2.9.2 „Blendung im Straßenverkehr“ vorgenommene Erweiterung der CIE-Formel hingewiesen, die zu einer realistischeren Einschätzung der Blendung im Straßenverkehr führt.

Bei den im Folgenden dargestellten Versuchsergebnissen wurde fast ausnahmslos nur die Farbe des „inneren Kreises“ beachtet, während durchaus zusätzlich eine Ringstruktur vorkommt. Dabei zeigt das äußere des Nachbildes andere Farben als das Zentrum und von manchen Testpersonen wurden 3 und mehr Farben wahrgenommen [329].

4.3.1.3 Zeitdynamischer Verlauf der Nachbildfarben

Eine weitere Teil-Untersuchung galt der Frage der Ermittlung des zeitdynamischen Verlaufes der Farbwahrnehmung bzw. -erkennung nach einer Blendung mit einer bestimmten Wellenlänge des Blendlichtes. Dazu wurden verschieden farbige LEDs zur Blendung ausgewählt und anschließend anhand des Farbspektrums im Bereich 400 nm bis 700 nm die entsprechende Farbwahrnehmung bei 4 Personen (R, Ho, Hi, Da) aufgezeichnet. Es ergab sich dabei, dass das Nachbild zunächst bei allen LED-Farben in der jeweiligen Farbe der zur Blendung verwendeten LED wahrgenommen wurde. Im Laufe der Zeit änderte sich diese Farbwahrnehmung zunehmend in Richtung des negativen Nachbildes, d. h. bei Blendung mit einer blauen LED wurde „gelb“, bei einer Blendung mit einer grünen LED wurde „violett“ und bei Blendung mit einer roten LED wurde „zyan“ wahrgenommen, also jeweils die Komplementärfarbe.

Diese Voruntersuchungen zeigten bereits, dass die Blendung bei „ausreichender Intensität“ der Blendlichtquelle zu einer Fülle von Effekten führen kann, bei denen es durchaus sein kann, dass das visuelle System eventuell anders antwortet als man dies zunächst erwarten könnte.

Zur genaueren Darstellung und letztlich auch Erklärung wurden dezidierte Untersuchungen der Farbwahrnehmung im Labor durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass eine der besonderen Schwierigkeiten auch darin liegt, dass es schwer ist, sich an bestimmte Farben, die man wahrgenommen hat, zu erinnern. Deshalb wurde auch daran gedacht, die momentanen Wahrnehmungen z. B. akustisch aufzuzeichnen, um einen eventuellen „Erinnerungsfehler“ auszuschließen. Berücksichtigt werden muss dabei auch, dass bei der Farbnomenklatur, d. h. der Liste der Farbnamen, meist nur von relativ wenigen Farbnamen Gebrauch gemacht wird. Hinzu kommt, dass dann wenn von einer Farbe gesprochen wird, die wahrgenommen wird, eine andere Person eine davon abweichende Wahrnehmung haben kann. Es musste daher davon ausgegangen werden, dass trotz ein und desselben Netzhautbildes, nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass auch alle Personen dieselbe Wahrnehmung haben werden.

Einen Weg zur Lösung dieser Problematik bei Dokumentation des jeweiligen Farbverlaufes des Nachbildes stellen die in Abschnitt 4.3.1.1 dargestellten Farbtafeln und deren Verwendbarkeit dar.

4.3.1.4 Voruntersuchungen zur Beeinträchtigung der Sehschärfe

Sehschärfetests dienen dazu, um die Fähigkeit zur Auflösung feiner Details unter Bedingungen maximalen Kontrastes zu bestimmen. Dies ist aber eine Situation, die sich im normalen Leben nur selten findet.

In einer Teil-Untersuchung wurde an 3 Personen (R, Ho, Do) ermittelt, nach welcher Zeitdauer die Sehschärfe nach einer Blendung mit einer grünen HB-LED wieder auf einen bestimmten Wert zurückkehrt, und zwar bei verschiedenen „Intensitäten“ einer LED-Quelle.

Nach Modifikation und Anpassung eines in der Praxis bewährten normalen Sehtestverfahrens wurde das zugehörige Gerät erstmals bei der Hannover-Messe im April 2006 bei Untersuchungen zum Einfluss der Blendung auf die Sehschärfe eingesetzt und zur Bestimmung der Zeitdauer der Wiederkehr der dem jeweiligen Versuchsteilnehmer eigenen Sehschärfe nach einem Blendereignis benutzt. Dabei kamen HB-LEDs als helle Blendlichtquellen zum Einsatz, deren abgegebene Leistung bzw. Lichtstrom durch variable Einstellung des Diodenstromes verändert und dem jeweiligen Versuch entsprechend angepasst werden konnte. Dazu wurde auf die eigenen Untersuchungen zur Charakterisierung der Abstrahlungseigenschaften von HB-LEDs der Fa. Luxeon zurückgegriffen.

4.3.2 Nachbildgröße als Funktion der Zeitdauer nach einer Blendung

Bislang fehlten belastbare Angaben über die Größe eines Nachbildes als Funktion der Zeitdauer seit Ende der Exposition, d. h. über das „Abklingen“ der räumlichen Nachbilderscheinung.

Zur Ermittlung des zeitlichen Nachbildgrößenverlaufes wurden Testpersonen mit einer Weißlicht-LED exponiert, und zwar mit einer optischen Leistung von 2,49 mW bei einem Abstand des Auges von der Quelle von 11 cm. Die Expositionsdauer war 1 s. Die maximal zulässige Leistung betrug in dem verwendeten Versuchsaufbau unter den gegebenen Bedingungen 46 mW.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur „Nachbildgröße als Funktion der Zeitdauer nach einer Blendung“ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Es zeigte sich ein leichter Trend zu einem mit wachsender Zeit nach der Blendung abnehmendem Nachbilddurchmesser. Die in diesem Teil der Untersuchungen erzielten Ergebnisse zeigen, dass es durch Blendung erstens zu lang anhaltenden Nachbildern kommen kann und dass sich zweitens deren Durchmesser nur relativ wenig ändert, und zwar abnimmt (siehe auch [2]). Die Ergebnisse wurden auf der BiOS 2007 vorgestellt und sind inzwischen veröffentlicht [83].

In dieser Teil-Studie zum Zeitverhalten eines Nachbildes hat sich gezeigt, dass der Durchmesser des Nachbildes über vergleichsweise lange Zeiten konstant bleibt. Das letztendliche Verschwinden des Nachbildes, das man sich bezüglich der Durchmesserabnahme auch als einen Vorgang, ähnlich dem Versinken eines – in diesem Falle – runden kegelförmigen Gegenstandes, d. h. mit abnehmendem Durchmesser, vorstellen möchte, der in Wasser eintaucht und versinkt, wurde in dieser Form nur in den seltensten Fällen von den Testpersonen so empfunden. Vielmehr war es unter den gegebenen Testbedingungen meist sehr schwer, das abschließende Verschwinden des Nachbildes tatsächlich zeitlich determiniert wahrzunehmen.

Insgesamt wurde eine relativ lange Phase eines konstanten Nachbilddurchmessers nach einer Blendung festgestellt.

Für Berechnungen der Größe des Netzhautbildes B eignet sich näherungsweise ein reduziertes Schema des Auges (Abb. 4.9 [2]) mit der Strecke $b = 16,7$ mm und dem Sehwinkel α [85].

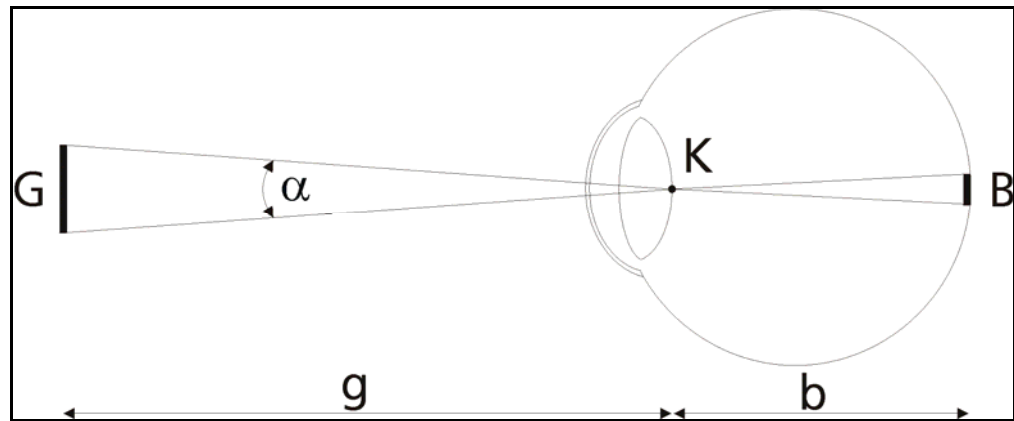


Abb. 4.9 Reduziertes Auge und Abbildungsgröße auf der Netzhaut ([2, 85])

Man erhält für die Bildgröße auf der Netzhaut die bekannte Beziehung

$$B = G \cdot \frac{b}{g} \quad (4.1)$$

Mit diesem Zusammenhang kann auch die Größe eines Nachbildes bestimmt werden, wenn dazu die Abmessungen der Blendlichtquelle G bekannt sind. Das Nachbild wird nach DIN 5340:1998-04 [4] wie folgt definiert:

„Visuelle Empfindung, die nach Verschwinden des auslösenden Reizes an der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes auftritt“.

Von SCHUMACHER wurde die Nachbildgröße nach einer Blendung genauer untersucht [2]. Die wahrgenommene Nachbildgröße kann für einen Zeitpunkt, frei nach dem EMMERTschen Gesetz, proportional zur Entfernung zwischen dem Auge und der jeweils fokussierten Fläche bzw. deren Durchmesser bzw. Abmessungen angesehen werden. Die Gleichung

$$G = k \cdot \alpha \cdot g \quad (4.2)$$

beschreibt die wahrgenommene Größe G durch den Proportionalitätsfaktor k, den vom betrachteten Objekt abhängigen Sehwinkel α und der Entfernung g. Der Proportionalitätsfaktor k ist dabei von der Sehschärfe des jeweiligen Probanden abhängig. Die wahrgenommene Nachbildgröße ist proportional zum Sehwinkel, unter dem die Blendlichtquelle gesehen wird.

Es ist eine bekannte Tatsache, dass ein auf einen Hintergrund „projiziertes“ Nachbild bei jeder Verdopplung des Abstandes doppelt so groß erscheint. Dieser Vorgang wird oft als Größenabgleich erklärt, wobei das Auge die Größe eines Gegenstandes durch einen aktiven Mechanismus gegenüber Änderungen der Bildgröße bewahrt. Dabei ist aber nicht bewiesen, ob dieser Mechanismus auch hinter dem EMMERTschen Gesetz liegt. Diese Zweifel müssen eigentlich kommen, wenn man bedenkt, dass es sich beim EMMERTschen Gesetz um recht große Änderungen handelt, und damit die Gültigkeit eines Größenabgleichs in einem weiten Bereich voraussetzt, denn grundsätzlich unterliegt das EMMERTsche Gesetz der wahrgenommenen Nachbildgrößenänderungen keiner direkten Entfernungsbegrenzung.

Beachtenswert ist auch, dass Nachbilder auch “ohne einen Hintergrund”, d. h. in einem dunklen Raum wahrgenommen werden können. Erfolgt dies z. B. auf einer ausgestreckten Hand, dann ändert sich die Nachbildgröße mit der Handbewegung vor und zurück, und zwar ebenso wenn man den Kopf dabei vor und zurück bewegt ([328], [330]). Inwieweit hierbei der Konvergenzwinkel der Augen eine Rolle spielt, ist nicht abschließend deutlich. In neuerer Zeit sind aber Untersuchungen zur Bedeutung des Abstands-Größen Paradoxons als kognitives Phänomen durchgeführt worden [331]. Dabei wurde gefunden, dass Personen oft genauer auf einen Gegenstand zeigen können als sie dies verbal auszudrücken vermögen.

Die im Außenraum wahrgenommene Nachbilderscheinung, d. h. die Tatsache, dass ein Nachbild als ein gewissermaßen im Raum schwebendes Objekt wahrgenommen wird, kann auch dadurch erklärt werden, dass der aktive Bleichprozess in der Netzhaut gleichzeitig vergleichbare Signale an das Gehirn liefert, wie ein aktueller, aktiver Sehvorgang eines Objektes.

Zur Erzeugung eines Nachbildes wurde eine Lichtquelle unter Verwendung einer Hochleistungs-LED (Luxeon Star, Fa. Lumiled) eingesetzt [197]. Der Aufbau ist in Abb. 4.10 dargestellt [2].

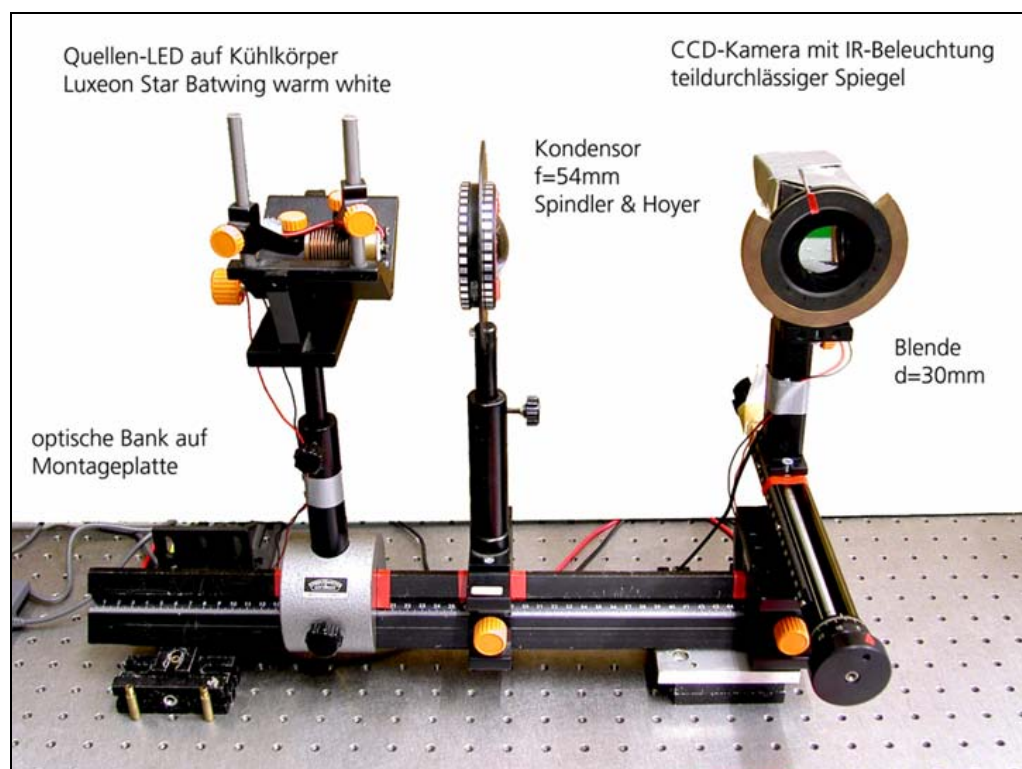


Abb. 4.10 Versuchsaufbau zur Blendung (modifizierter Aufbau aus [152])

Das mit einem Lichtwellenleiter als „Detektor“ ermittelte Strahlprofil der verwendeten Blendlichtquelle ist in Abb. 4.11 dargestellt. Als maximale Expositionsleistung wurde in 11 cm Abstand, entsprechend der Position des Probandenauges, ein Wert von 2,49 mW gemessen.

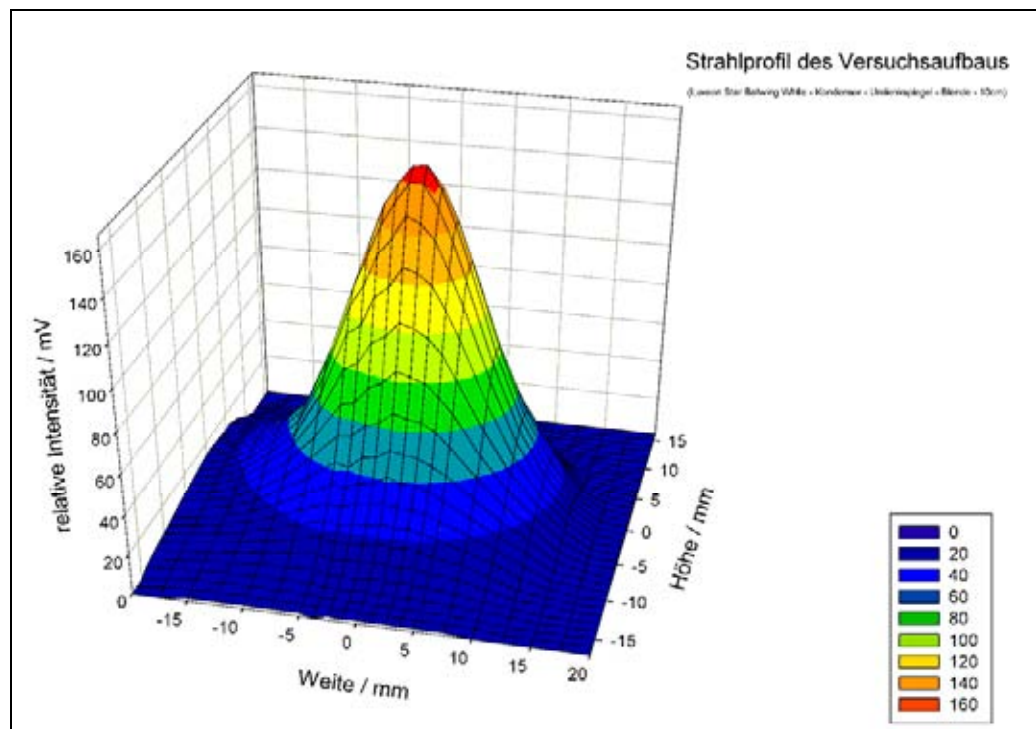


Abb. 4.11 Strahlprofil der LED-Blendlichtquelle ([2])

Unter Verwendung eines Kamerasystems bekannter Kamerabildgröße und Kamera-brennweite wurde für den verwendeten Versuchsaufbau eine Nachbildgröße von 3,21 mm bestimmt [2]. Der mit dem Strahlprofil entsprechend dem Abfall auf den 1/e-Wert des Maximums, entsprechend 63 % der Strahlleistung, bewertete Durchmesser ergab sich zu 2,88 mm.

Zur Erfassung des retinalen Nachbildes wurde ein Programm entwickelt [2], dessen wesentliche Funktionen (Hilfe- und Bedienungsformular) in Abb. 4.12 aufgelistet sind.

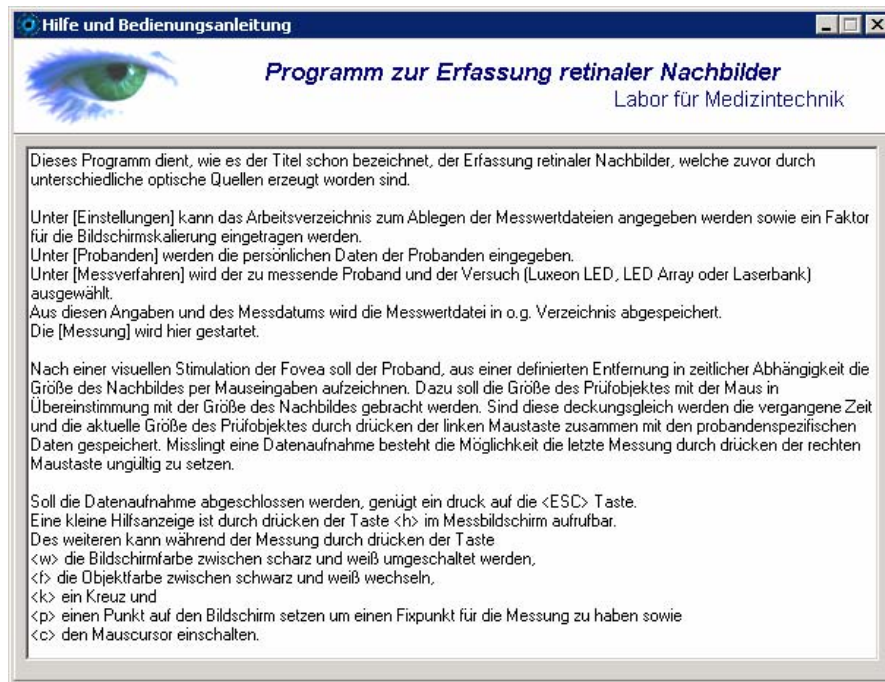


Abb. 4.12 Hilfe- und Bedienungsformular zum Programm zur Nachbilderfassung ([2])

Die eigentliche Erfassung der Größe des zeitlichen Nachbildes („Nachbildverlauf“) wurde an dem in Abb. 4.13 dargestellten Erfassungsmessplatz durchgeführt.

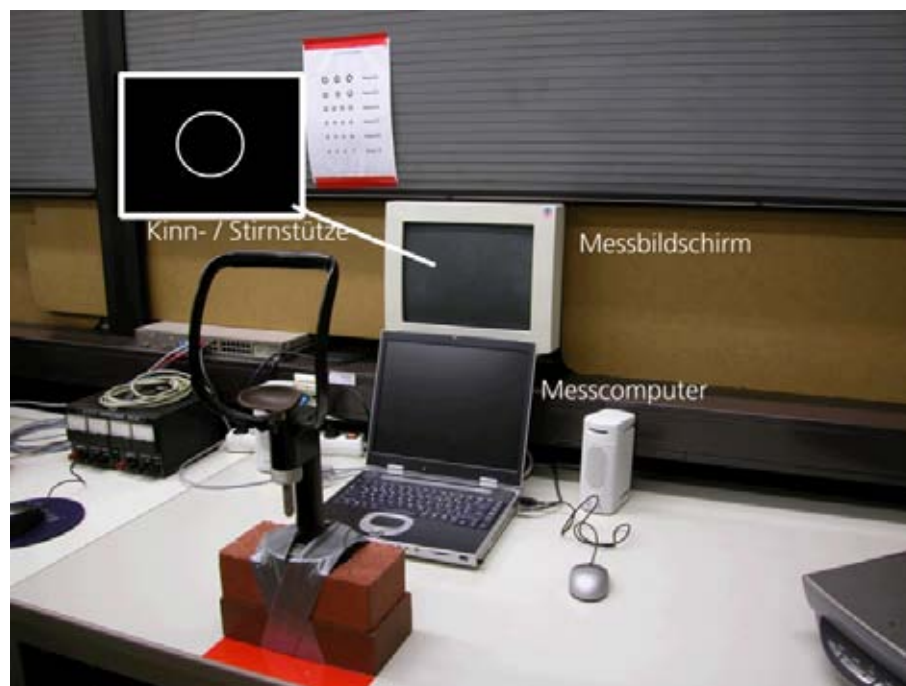


Abb. 4.13 Messplatzaufbau zur Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Nachbildgröße ([2])

Die wesentliche Versuchsteilnehmeraufgabe bestand darin, mittels Mauseaktionen die Größe eines auf einem Monitor „eingespiegelten“ Kreises (siehe Messkreis auf

Messbildschirm in Abb. 4.13) mit der wahrgenommenen Nachbildgröße in Deckung zu bringen und dies zu quittieren.

Abb. 4.14 zeigt graphisch die bei Testmessungen festgestellten Schwierigkeiten, die sich bei der individuellen Angabe der zeitabhängigen Nachbildgröße ergaben, während in Abb. 4.15 die diesen Messungen entsprechenden, durch Tabellenkalkulation ermittelten „Trendlinien“ darstellt.

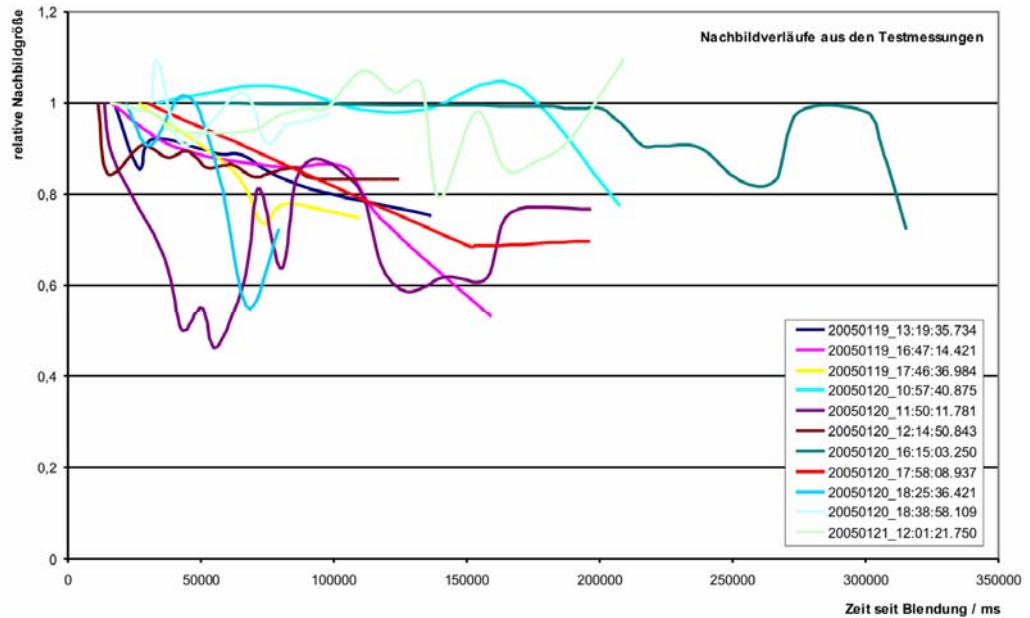


Abb. 4.14 Testmessungen (Werte auf den Startdurchmesser normiert, aus [2])

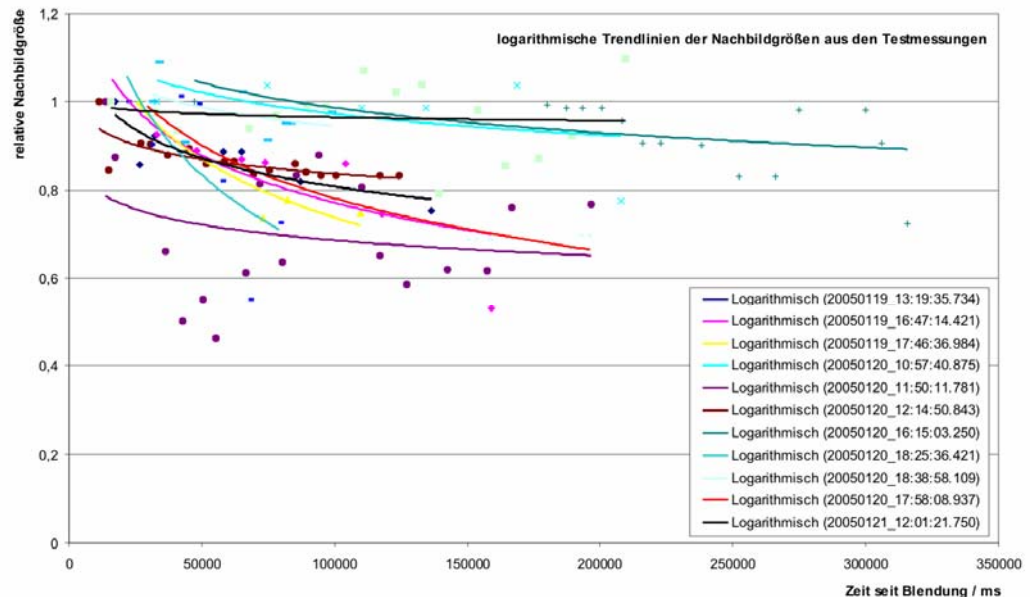


Abb. 4.15 Darstellung von durch Tabellenkalkulation erzeugten Trendlinien der Testmessungen aus Abb. 4.14 (aus [])

Abb. 4.16 stellt die bei einem Probanden erzielten Ergebnisse zweier Messungen dar, wobei von einem bestimmten Anfangsdurchmesser ausgegangen wurde, während in Abb. 4.17 alle Messergebnisse desselben Probanden aufgetragen sind.

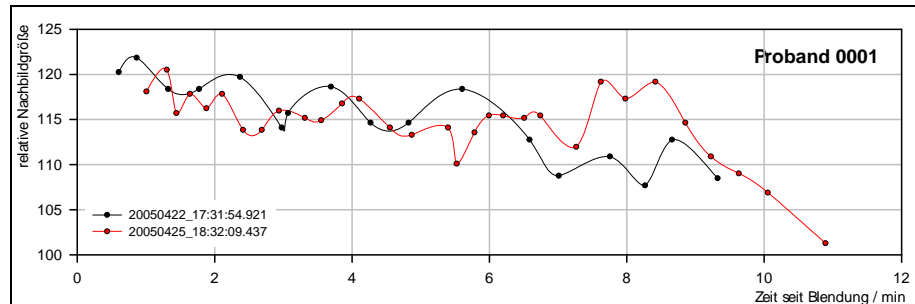


Abb. 4.16 Ergebnisse zweier Messungen eines Probanden (aus [2])

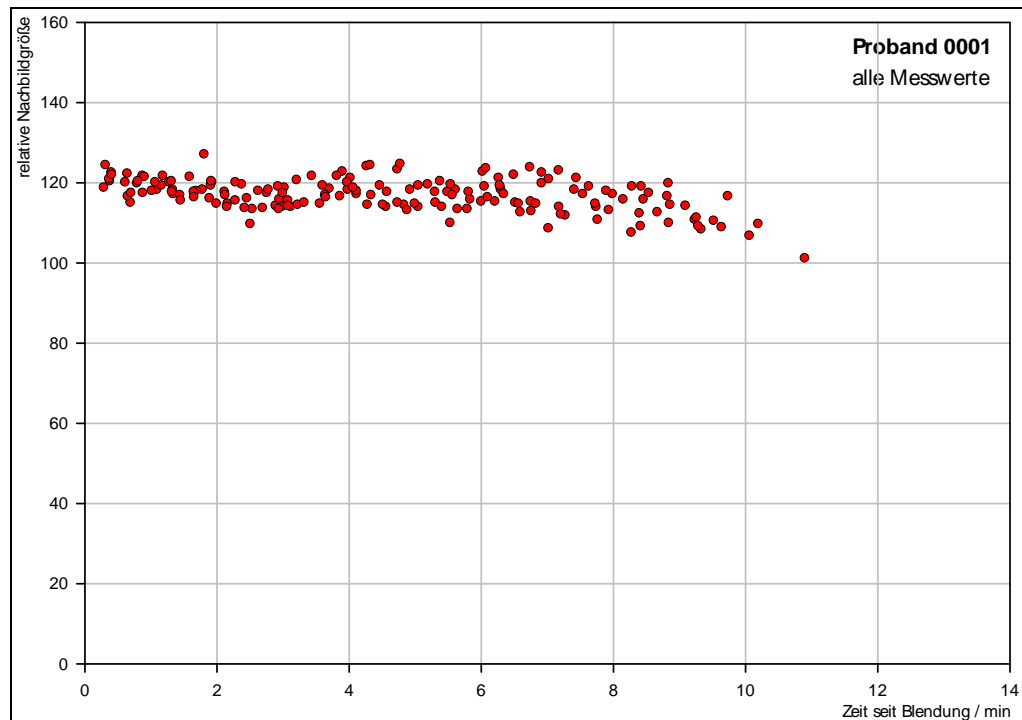


Abb. 4.17 Alle bei einem Probanden erzielten Messergebnisse

Abb. 4.18 zeigt, dass auch individuell verschiedene, ganz anders verlaufende Messergebnisse möglich sind.

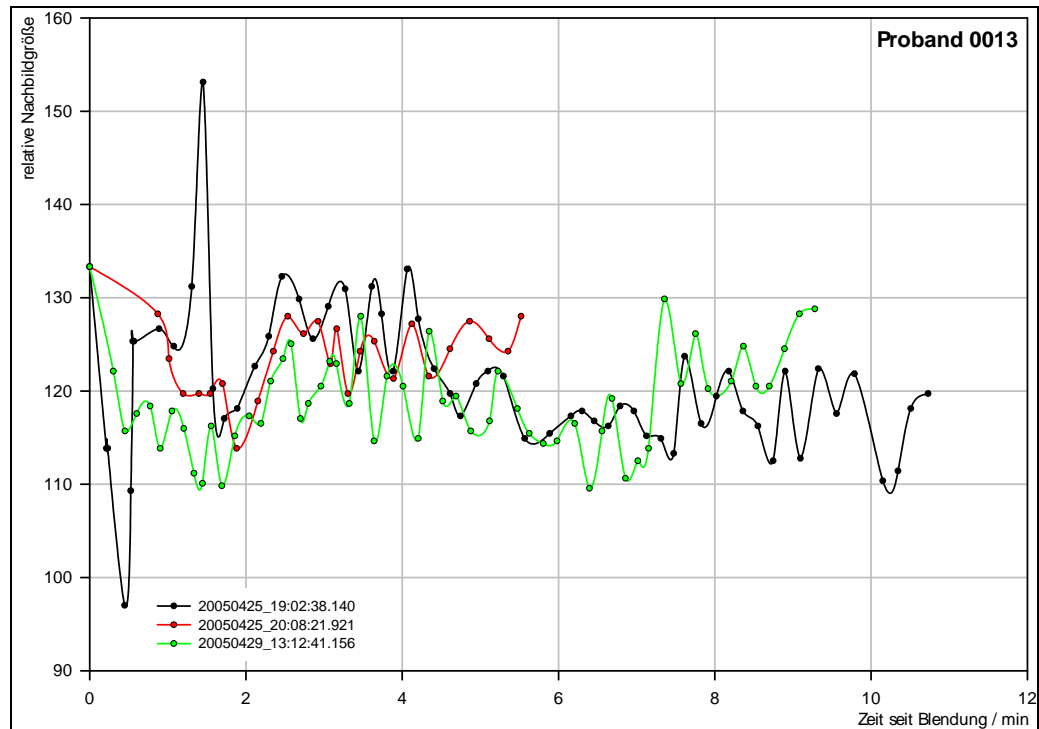


Abb. 4.18 Messergebnisse bei einem Probanden (als Anfangswert wurde ein solcher entsprechend einem Durchmesser auf dem Messbildschirm, siehe Abb. 4.13, von 134 mm ermittelt)

Alle bei den 3 Probanden (R, Do, Ho) erzielten Messergebnisse sind in Abb. 4.19 zusammengefasst und zeigen einen leichten Trend zu einem mit wachsender Zeit nach der Blendung abnehmenden Nachbilddurchmesser.

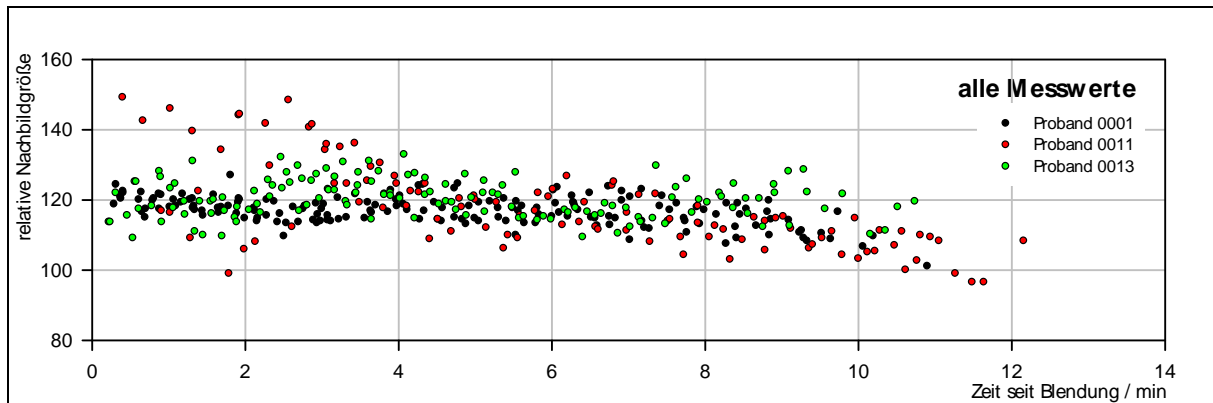


Abb. 4.19 Zusammenfassung aller Ergebnisse der Nachbildgrößenmessungen

Der Verlauf der auf subjektive Probandenangaben gestützten Ergebnisse lässt aufgrund fehlender Messwerte die Vermutung entstehen, dass das Nachbild bei der dargestellten Untersuchungsmethode und den angegebenen Versuchsparametern ab der zwölften Minute nicht mehr existent war. Dies traf jedoch nicht zu, da alle Probanden über diesen Zeitpunkt hinaus noch einen Nachbildeindruck beschreiben konnten, allerdings konnten ab ca. 12 Minuten nach der Blendung aufgrund eines zu geringen Kontrast- bzw. Helligkeitsunterschiedes zwischen Nachbild und der Dunkelodarstellung des zur Beobachtung gewählten Monitorbildes keine Messwerte mehr

aufgenommen werden. Bei den Auswertungen ergab sich sowohl unter Annahme einer linearen als auch einer exponentiellen Regression bei Mittelung über alle Messwerte der 3 Probanden – trotz individueller Unterschiede – eine Abnahme von ca. 9 % des Nachbilddurchmessers innerhalb einer Zeitdauer von 10 Minuten. Das entsprechende Ergebnis ist in Abb. 4.20 dargestellt.

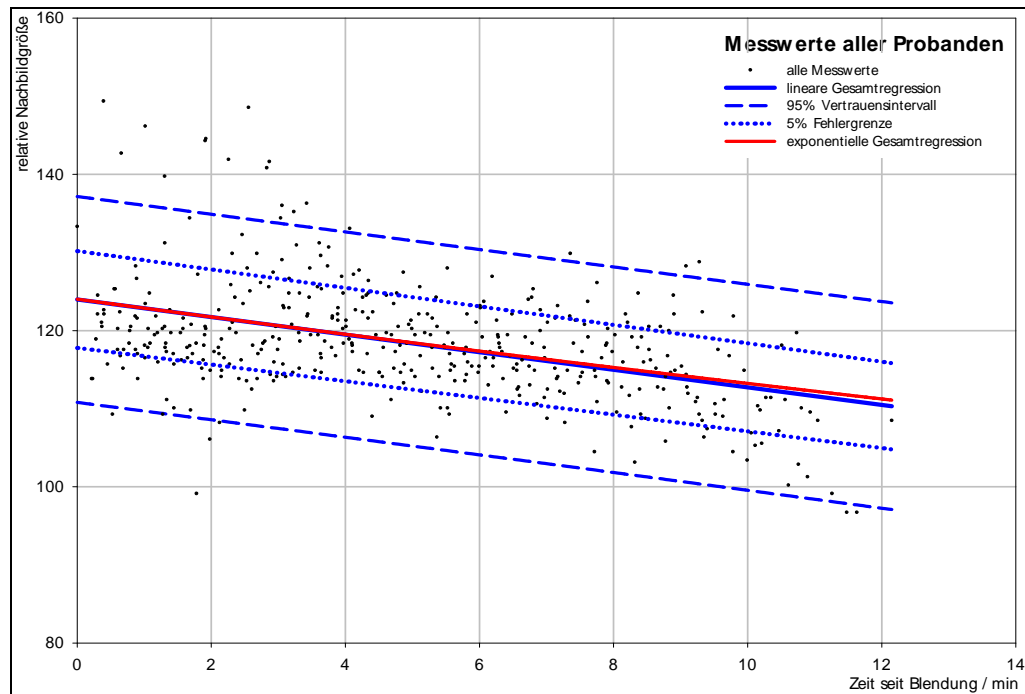


Abb. 4.20 Lineare und exponentielle Regression aller Messwerte der Probanden (aus [2])

Die Steigungen der linearen Regression bei den einzelnen Probanden betrug -1, -2,7 und -0,3, während die Mittelung insgesamt -1,13 ergab.

Die in diesem Teil der Untersuchungen erzielten Ergebnisse zeigen (vgl. auch [2]), dass es durch Blendung erstens zu lang anhaltenden Nachbildern kommen kann und dass zweitens deren Durchmesser sich nur relativ wenig ändert, und zwar abnimmt, dabei aber eine kontinuierliche Abnahme auf Null mit dem gewählten Testverfahren aufgrund fehlenden Kontrastunterschiedes an einem Dunkelmonitor nicht möglich ist. Erfahrungen haben aber gezeigt, dass das negative Nachbild auf einer homogenen, weißen Fläche noch länger wahrgenommen werden kann. Ob dabei auch Messungen des Durchmessers möglich sind, der am Ende der Nachbildwahrnehmung relativ rasch zu Null wird, d. h. das Nachbild verschwindet ganz, bleibt noch zu untersuchen.

Nach dieser Studie zum Zeitverhalten eines Nachbildes kann dieses Teilthema zwar noch nicht als völlig abgeschlossen betrachtet werden, aber es hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass der Durchmesser des Nachbildes über vergleichsweise lange Zeiten konstant bleibt. Die eigentliche Abnahme des Nachbilddurchmessers bis zum völligen Verschwinden wird dagegen nicht im selben Maße wahrgenommen, wie seine Konstanz in der relativ langen Phase nach einer Blendung.

4.3.3 Untersuchungen zur Sehschärfe nach einer Blendung

Da die Sehschärfebestimmung ein anerkanntes Verfahren ist, war es eigentlich zwingend, dass eine solche auch nach einer erfolgten Blendung durchgeführt wurde. Hierzu waren zunächst mehrere Vorversuche und Modifikationen an bestehenden Testgeräten erforderlich, um zu einer auf die Verhältnisse nach einer Blendung geeigneten Methode zu kommen.

a.) Visusbegriff und Methodik der Visusbestimmung

Auch die Sehbeeinträchtigung im Hinblick auf den Visus zeigt ein zeitabhängiges Verhalten, wobei hier der Zeitpunkt, wann eine bestimmte Visusstufe wieder erreicht wird, einfacher bestimmt werden kann als bei der Farbbeeinträchtigung, bei der die Änderungen in einem mehrdimensionalen Farbraum stattfinden.

Unter dem Wort Visus oder auch Sehschärfe wird die Fähigkeit des Menschen zur Wahrnehmung kleiner Optotypen (Prüfzeichen) bei photopischem Sehen verstanden. Der Begriff Visus ist eine sinnesphysiologische Größe, im Gegensatz zu den Begriffen Visuswert oder Sehschärfewert, die die Größe von Optotypen kennzeichnen und somit rein physikalische Größen sind. Der Visuswert kann dabei einzelnen Visusstufen zugeordnet werden.

Erste Laborversuche – wie oben dargestellt – lassen vermuten, dass nach einer Blendung Visusstufen bis zu der jeweiligen Visusstufe eines Probanden unter normalen Sehbedingungen nach einer gewissen Zeit wieder erreicht werden. Somit kann die Dauer der Sehbeeinträchtigung nach einer Blendung, bei der für einen Probanden relevanten Visusstufe, bestimmt werden, indem der Proband die ihm angebotenen Sehzeichen benennt, sobald er diese erkennen kann.

Durch den zusätzlichen Parameter Zeit, den es bei diesen Untersuchungen zu erfassen gilt, wird die Sehschärfebestimmung noch komplexer als bei vergleichbaren Standardtests z. B. für die Fahrtauglichkeitsprüfung oder die Untersuchungen für Bildschirmarbeitsplätze.

Die genaue Bestimmung der Zeitdauer und die daraus resultierenden Fehler-toleranzen werden durch Faktoren wie

- die Sprechgeschwindigkeit des Probanden,
- die Zeit, die der Operator benötigt, die Antwort als richtig oder falsch beurteilen zu können und
- das individuelle Antwortverhalten des Probanden

beeinflusst.

Während sich die Sprechgeschwindigkeit und die Beurteilungszeit des Operators aus der Referenztestreihe bei der Bestimmung des Visus unter normalen Bedingungen recht einfach durch Mittelwertbildung der Antwortzeiten ermitteln lassen, gestaltet sich dieses beim individuellen Antwortverhalten eines Probanden deutlich schwieri-

ger. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass der Visus nach einer Blendung kontinuierlich zurückkehrt, sodass der Proband zwar eine Aussage über das vermeintlich gesehene Zeichen treffen kann, ihm aber die Bestätigung, ob das Erkannte auch objektiv richtig ist, fehlt. Dem zur Folge wird es Probanden geben, welche mit einem gewissen Risiko in Kauf nehmen, dass schnelle Antworten auch Fehler zur Folge haben könnten, während andere Probanden mehr Wert auf eine richtige Antwort legen und dafür eine längere Zeit benötigen. Um diesen Unsicherheitsfaktor zu minimieren, müssen auch hier Vergleiche zu Messungen unter normalen Sehbedingungen, allerdings bei einer für den Probanden schon grenzwertigen Visusstufe, gezogen werden. Dadurch ist es möglich – da auch hier der Proband nicht selber hundertprozentig entscheiden kann, ob seine Antwort richtig ist – einen Rückschluss auf das Antwortverhalten ziehen zu können.

Aus diesem Grund ist es wichtig, dass allen Versuchsreihen zur Visusbestimmung ein standardisiertes Messverfahren zugrunde liegt, bei dem zuerst

- der Visus unter normalen Sehbedingungen überprüft wird, um dann
- den Visus unter Blendeinwirkung bewerten zu können.

Neben der oben beschriebenen besonderen Problemstellung bezüglich einer aussagekräftigen Zeitmessung sind auch grundlegende Bedingungen bei der Bestimmung der Sehschärfe zu beachten.

Für die Durchführung der Sehschärfeprüfung gilt die deutsche Fassung der internationalen Normen DIN EN ISO 8596 [134] und DIN EN ISO 8597 [135]. Diese haben 1996 die alten Vorschriften DIN 58220 [200] Teil 1 und Teil 2 abgelöst. Die Durchführung der Visusbestimmung nach diesen Normen ist nur bei Gutachten zwingend vorgeschrieben, ihre Verwendung wird jedoch wegen der besseren Vergleichbarkeit für alle Visusbestimmungen von der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft (DOG) empfohlen [201]. In diesen Normen sind die physikalischen Parameter und die vorgeschriebene Methodik der Messung festgelegt.

Physikalisch festgelegte Parameter nach DIN EN ISO 8596 sind z. B. der erlaubte Leuchtdichtebereich, die logarithmische Abstufung der Optotypengröße, der gegenseitige Abstand der Prüfzeichen, die Größe des Prüffeldes, sowie die Art der Prüfzeichen.

Der Landoltring ist ein Normzeichen nach DIN EN ISO 8596, mit dem die Visusbestimmung durchgeführt werden soll, und wird in 8 Stellungen dargeboten, nämlich in geraden Stellungen (Lücke oben, unten, rechts, links) und schrägen Stellungen (Aussparungen 45° zu geraden Positionen; also oben rechts, oben links, unten rechts, unten links). Die Sehzeichen werden in unterschiedlichen Sehschärfewerten angeboten, wobei der Sehschärfewert als Kehrwert der in Winkelminuten gemessenen Lückenbreite eines Landoltrings ausgedrückt wird.

Das zugrunde liegende Konzept bei der Visusbestimmung beruht auf der Auffassung der Sehschärfe als psychophysische Schwelle [201]. Ein physisches Maß (die Optotypengröße) wird zur Wahrnehmung in Beziehung gesetzt, und an geeigneter Stelle

wird eine Schwelle definiert. Bei der Erkennungsrate handelt es sich um ein Wahrscheinlichkeitsmaß. Man bestimmt, mit welcher Häufigkeit ein bestimmter Optotyp richtig benannt wird (Trefferate) [201].

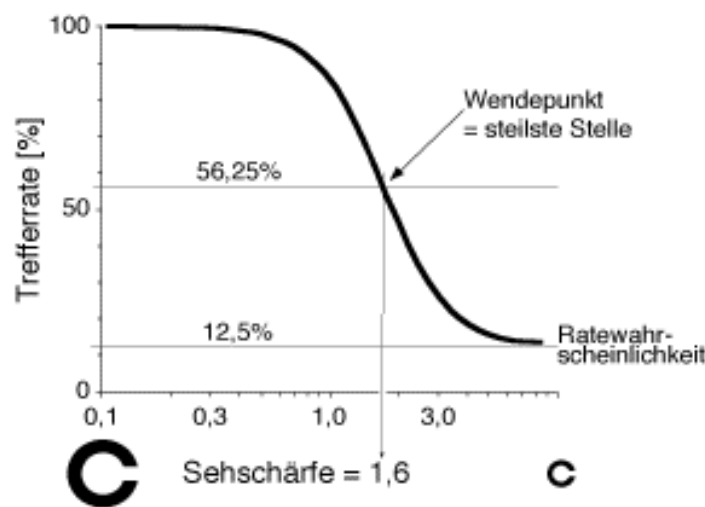


Abb. 4.21 Psychometrische Funktionen bei einer Sehschärfe von 1,6 [201]

Dies bedeutet, dass bei abnehmender Größe des Landoltrings die Trefferrate von 100 % auf die Ratewahrscheinlichkeit (Zufallswahrscheinlichkeit) von 12,5 % sinkt. Dieser allmähliche Übergang wird durch eine psychometrische Funktion beschrieben (s. Abb. 4.21), wobei die Abstufung zwischen den einzelnen Sehschärfewerten logarithmisch skaliert werden muss, um den Visus als psychophysische Empfindung bestimmen zu können [201].

Die Kurve der psychometrischen Funktion besitzt eine steilste Stelle (Wendepunkt) zwischen 100 % und 12,5 %, also bei einer Trefferrate von 56,25 %. Diese steilste Stelle wurde als Schwelle gewählt, weil die dort abgelesene Sehschärfe von zufälligen Schwankungen am wenigsten beeinflusst wird.

Nach der Norm sind folgende Kriterien für eine Schwelle zulässig:

- 3 Richtige von 5 Optotypen
- 5 Richtige von 8 Optotypen
- 6 Richtige von 10 Optotypen.

Werden bei einer Testreihe zu einer bestimmten Visusstufe diese Kriterien nicht mindestens erreicht, so wird der Test an dieser Stelle abgebrochen.

Um das Konzept der Visusbestimmung mittels einer psychophysischen Schwelle umsetzen zu können, ist eine richtige Methodik von entscheidender Bedeutung.

Dazu hat die Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft (DOG) Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei sinnesphysiologischen Untersuchungen und Geräten entwickelt [202], die als Auszug in Tab. 4.10 dargestellt sind.

Tab. 4.10 Vorschriften zur Durchführung der normgerechten Sehschärfebestimmung nach DIN EN ISO 8596 und Empfehlungen der DOG zur Fahreignungsbegutachtung

Methodik	
Sehzeichen	Neben dem Landoltring dürfen andere Sehzeichen benutzt werden, wenn diese nach DIN EN ISO 8597 an das Normsehzeichen angeschlossen wurden. (Die DOG empfiehlt allerdings nach wie vor die ausschließliche Verwendung des Landoltrings.)
Adaptation	Vor Beginn der Messung muss eine eventuelle Blendung (z. B. durch ein manuelles Refraktometer, ein Skiaskop oder ein Ophthalmoskop) abgeklungen sein.
Reihenfolge	a) voraussichtlich schlechteres Auge (sc) b) voraussichtlich besseres Auge (sc)
Startwert	Die Untersuchung muss mit einem Sehschärfewert begonnen werden, der mindestens zwei Visusstufen unter dem Grenzwert liegt, damit der Prüfling üben kann und der Untersucher erkennt, ob der Prüfling den Test beherrscht.
Anzahl der Zeichen	Im Bereich von Visus 0,25 bis 2,0 müssen mindestens 5 Optotypen pro Visusstufe abgefragt werden.
„Bestanden“-Kriterium	Eine Visusstufen gilt als richtig erkannt, wenn mindestens 60 Prozent aller Optotypen richtig angegeben wurden. Empfohlen werden folgende Kombinationen: a) mindestens 3 Richtige von 5 Optotypen b) mindestens 5 Richtige von 8 Optotypen c) mindestens 6 Richtige von 10 Optotypen Zulässig sind noch drei weitere Kombinationen, die aber weniger empfehlenswert sind.
Abbruchkriterium	Die Prüfung wird bei der ersten Optotypenreihe, bei der die Anzahl der richtig benannten Optotypen das „Bestanden“-Kriterium unterschreitet, beendet.
Ergebnis	Die letzte bestandene Visusstufe definiert die erreichte Sehschärfe.

Ermunterung des Prüflings	Um die verschiedenen Grundhaltungen der Prüflinge auszugleichen, sollte zum bestmöglichen Raten ermuntert werden, wenn eine Antwort wie zum Beispiel: „das Zeichen kann ich nicht mehr erkennen“, gegeben wird.
Wiederholung	Eine Wiederholung von einzelnen Optotypen oder ganzen Zeilen, die beim ersten Mal nicht richtig gelesen wurden, ist nicht zulässig.
Nystagmus	Auf Empfehlung der DOG sollte bei Nystagmus jedes Sehzeichen innerhalb einer Sekunde benannt werden, da bei einer Verlängerung der Lesezeit eine zu gute Sehschärfe erzielt wird.
Lesezeit pro Sehzeichen	Es darf eine Auswahl aus der Normreihe der Sehschärfewerte getroffen werden. Jedes Sehzeichen darf bis zu 10 Sekunden dargeboten werden. (Sonderregelung für berufsgenossenschaftlichen Untersuchungen G 25 und G 37)
„Lese“geschwindigkeit	Die einzelnen Landoltringe sollten mit einer Geschwindigkeit von 1 Zeichen pro Sekunde gelesen werden.

Die Nichteinhaltung der Empfehlungen der DOG oder Vorgaben der DIN EN ISO 8596 und DIN EN ISO 8597 haben zwangsläufig Fehler bei der Bestimmung des Visus bei einem Probanden zur Folge. Die Auswirkung von Fehlern bei der Befragung des Prüflings hat PETERSEN (1993) [203] untersucht, wobei er in Computersimulationen ermittelte, wie stark sich das gemessene Visusergebnis verändert, wenn die DIN-Vorschriften (wissentlich oder auch versehentlich) nicht eingehalten werden [203]. So ergibt sich eine scheinbare Verbesserung um eine ganze Visusstufe, wenn man bei jeder falsch gelesenen Optotype noch einmal nachfragt. Gleiches gilt für eine Abschwächung des Abbruchkriteriums bei „zwei Richtigen von vier“ anstatt „drei Richtigen von vier“ erkannten Optotypen, wo ebenfalls eine Verbesserung von einer Visusstufe erreicht wird.

Demzufolge ist es absolut notwendig, eine festgelegte Versuchsdurchführung einzuhalten, da Messungen von psychophysischen Parametern sonst hohe Fehler-toleranzen beinhalten.

Die Ausführungen zur Bestimmung der Sehschärfe als psychophysiologische Schwelle, wie sie in der DIN EN ISO 8596 und DIN EN ISO 8597 gefordert werden, zeigen, dass es sich hierbei um einen äußerst komplexen Vorgang handelt. Inwieweit diese Verfahren auch bei der Bestimmung der Zeit, wann der ursprüngliche Visus nach einer Blendung mit einer hellen optischen Quelle wieder erreicht wird, verwendet werden kann, war unter anderem Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen und wird an entsprechender Stelle diskutiert.

Während bei der Sehschärfebestimmung durch einen Ophthalmologen jegliche Blendung vor oder währenddessen zu vermeiden ist [202], war es gerade das Ziel der

angestrebten Untersuchungen, die Sehschärfe nach einer Blendung zu bestimmen. Daher hat der Visus unter normalen Sehbedingungen bei den Versuchsreihen zur Blendung keine zentrale Bedeutung, sodass es nicht darauf ankommt, ihn exakt nach den Vorgaben der zugrunde liegenden Normen zu bestimmen. Vielmehr sollte eine geeignete Methodik entwickelt werden, um die Frage zu beantworten, nach welcher Zeit ein Proband nach einer Blendung einen Optotyp einer zugrunde gelegten Visusstufe wieder erkennen kann. Die Visusstufe selber spielt dabei erst einmal eine untergeordnete Rolle, wenn durch die Wahl der zu erkennenden Visusstufe gewährleistet werden kann, dass die Zeit zur Erkennung eines Optotypen beliebig genau bestimmt werden kann. Gleiches gilt auch für die Wahl der Visusstufe bei der Zeitbestimmung unter normalen Sehbedingungen.

Aus diesem Grund wurden für den Zeitvergleich Visusstufen gewählt, die sowohl unter normalen Sehbedingungen als auch nach einer Blendung eine Erkennungsrate von 100 % ermöglichen. Um die Fehlertoleranzen aufgrund eines individuellen Antwortverhaltens ermitteln zu können, wurde zusätzlich eine Messreihe bei einer für den Probanden grenzwertigen Visusstufe durchgeführt.

b.) Testeinrichtung zur Bestimmung der Visusbeeinträchtigung

Um die Auswirkung der Blendung durch helle optische Quellen beurteilen zu können, wurde auf der Basis eines standardisierten Messsystem des Binoptometers 3 der Firma Oculus [160] zur Sehschärfepfung eine Testeinrichtung entwickelt, die es erlaubt, die Sehfähigkeit sowohl unter normalen Sehbedingungen als auch nach der Exposition durch helle Lichtquellen messen zu können.

Dazu wurde das Sehtestgerät Binoptometer so modifiziert, dass LEDs unterschiedlicher Wellenlängen, die mit Hilfe einer separaten Hardware bezüglich Leistung und Expositionszeit angesteuert werden, statt der eingebauten Lichtquellen in den Strahlengang des Sehtestgerätes eingekoppelt werden können.

Das Binoptometer ist ein Pupillendistanz unabhängiges freisichtiges Sehtestgerät, d. h. die Tests erscheinen unter natürlichen Sehbedingungen im freien Raum. Die Geräteakkommodation wird weitgehend ausgeschaltet, da die Augen beim natürlichen Sehen akkomodieren und konvergieren können. Das Binoptometer ist so konstruiert, dass durch einen stufenlos schwenkbaren Einblickspiegel auch Brillenträger mit Mehrstärken- und Gleitsichtbrillen problemlos untersucht werden können (Abb. 4.22).

Außerdem kann dieser Spiegel soweit heruntergeklappt werden, dass ein Auge von einer LED, die vor dem Testgerät platziert wird, exponiert werden kann.

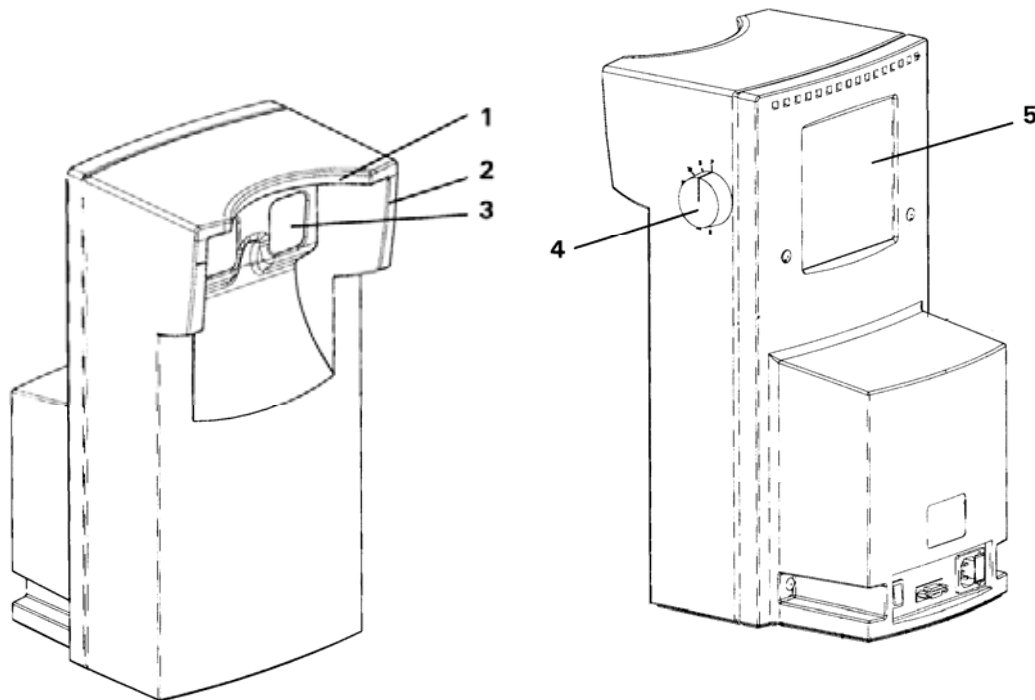


Abb. 4.22 Ansicht des Binoptometers (links Rückseite, rechts Vorderseite)

1	Stirnlage	4	Drehknopf zum Schwenken des Einblickspiegels
2	Markierung für Höhenlage des Patientenauges	5	Ausblickfenster
3	Einblickfenster		

Für den Sehtest wird der Einblickspiegel nach der Blendung wieder hochgeklappt.

Mit dem Binoptometer können verschiedene Sehtests wie

- Visusbestimmung mit Landoltringen,
- Visusbestimmung mit Zahlen,
- Stereotest,
- Phorietest und
- Farbsinnprüfung

durchgeführt werden, wobei bei der Visusbestimmung vorwiegend die Tests mit Landoltringen zum Einsatz kommen.

Beim Projektor stehen 5 Testscheiben mit jeweils 5 Landoltringen in 6 Visusstufen zur Verfügung (Tab. 4.11), die mittels einer speziell entwickelten Ansteue-

rungssoftware, sowohl bei den Untersuchungen unter Normalbedingungen als auch denen nach einer Blendung, zufällig ausgewählt werden.

Tab. 4.11 Beispiel einer Testscheibe mit 6 Visusstufen (Landoltringe sind als Pfeile dargestellt)

Visusstufe	Visus	Öffnungen der Landoltringe
1	0,5	↙ ↗ → ↑ ←
2	0,6	↘ ← ↓ → ↑
3	0,7	↖ ↑ ↗ → ↘
4	0,8	↗ → ↘ ← ↓
5	1,0	→ ↑ ↘ ← ↙
6	1,25	↑ ← ↗ → ↖

Die Sehentfernungen bei der Projektion der Landoltringe können in einem Bereich zwischen 0,3 m bis ∞ über die Software variiert werden, wobei die Untersuchungen entweder Bin- oder Monocular durchgeführt werden können.

Die LEDs werden mit einer speziell entwickelten Hardware, die ebenfalls über die Software gesteuert werden kann, geregelt. Die maximale Stromstärke beträgt 1 A mit einer Auflösung von 1 mA. Die Steuerelektronik hat drei Kanäle, wodurch es möglich ist, drei LEDs gleichzeitig oder getrennt regeln zu können. Die Expositionszeit kann mittels des integrierten Mikrocontrollers zwischen 10 ms und 100 s eingestellt werden. Über ein serielles Schnittstellenprotokoll werden sämtliche Expositionsdaten an die Programmsoftware übermittelt. Ebenso wird über diese Schnittstelle das Startkommando zur Auslösung der Exposition gegeben. Die entwickelte Programmsoftware wurde in Delphi entwickelt und besteht aus drei Teilkomponenten:

- Steuerung der LED-Hardware und des Binoptometer
- Messmodus mit Zeiterfassung und
- Datenbankerfassung.

Über den Steuerungsmodus können sämtliche Einstellungen für die LED-Hardware und das Binoptometer vorgenommen werden.

Im Messmodus kann der Sehtest gestartet werden, wobei zuerst das Binoptometer initialisiert wird, d. h. es wird zufällig eine Testscheibe ausgewählt und referenziert.

Dazu kann im Programm vorher ausgewählt werden, ob die Messung mit oder ohne Blendung erfolgen soll. Bei beiden Optionen wird die Testscheibe noch einmal gewechselt und gleichzeitig der Programmtimer gestartet. Bei Messungen mit Blendung wird zusätzlich der Startbefehl für die LED ausgelöst, wobei der Timer dann erst

nach der Exposition gestartet wird. Auf dem Computerdisplay werden die zu erkennenden Landoltringe in Form von Pfeilen angezeigt, sodass der Operator mittels zweier Tasten (richtig/falsch) die Angaben des Probanden quittieren kann. Bei jedem Quittieren wird die abgelaufene Zeit des Timers erfasst und gibt somit die Zeit wieder, wie lange der Proband für das Erkennen eines Zeichens gebraucht hat.

Im Datenerfassungsmodus können die persönlichen Daten des Probanden eingegeben werden. Nach einer Messreihe werden die fünf Zeiten, die ein Proband für das Erkennen der fünf Optotypen benötigt hat, den jeweiligen persönlichen Daten zugeordnet.

c.) Versuchsdurchführung

Vor der Versuchsdurchführung wird der Proband über den Zweck des Versuches aufgeklärt und seine persönlichen Daten werden erfasst. Danach wird ein Sehtest durchgeführt, um den Visus des Probanden unter normalen Sehbedingungen festzuhalten. Dazu wird zunächst einmal der maximal mögliche Visus des Probanden festgestellt, um anschließend eine Messung mit einer Visusstufe unterhalb des maximalen Visus, bei dem der Proband „bequem“ die Zeichen erkennen kann, durchzuführen (s. Abb. 4.23). Die Zeiten beider Versuchsreihen werden dazu aufgenommen, um in einer späteren Auswertung Rückschlüsse auf das persönliche Antwortverhalten ziehen zu können.

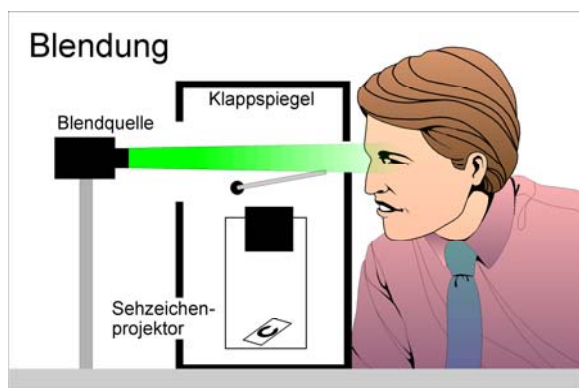


Abb. 4.23 Durchführung des Sehtests vor oder nach einer Blendung

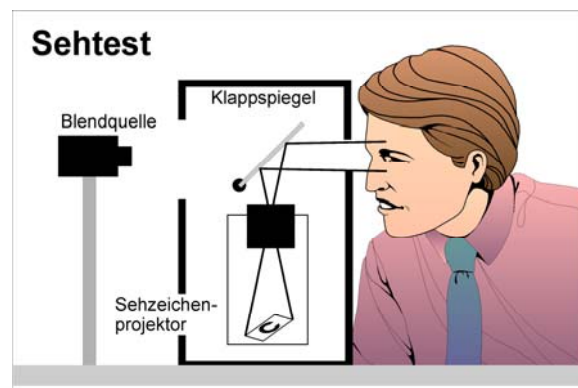


Abb. 4.24 Blendung des Probanden bei heruntergeklapptem Einblicksspiegel

Danach folgt die Blendung mittels einer LED, wozu der Einblicksspiegel (Klappspiegel) zuerst von Hand umgelegt werden muss (s. Abb. 4.24). Für den anschließenden Sehtest wird der Einblicksspiegel wieder umgeklappt und der Sehtest mit derselben reduzierten Visusstufe durchgeführt, wie sie auch unter normalen Sehbedingungen benutzt worden ist (s. Abb. 4.23).

Nach dem Versuch wird mit dem Probanden ein Interview geführt, bei dem Fragen bezüglich des Nachbildes und dem momentanen Seheindruck gestellt werden.

d.) Sehschärfe nach Blendung mit einer weißen HB-LED

Vorversuch zur Visusbestimmung nach einer Blendung mit einer LED:

In der Studie zur zeitlichen Abhängigkeit des Nachbilddurchmessers wurde an 3 Probanden (R, Do, Ho) auch ein erster Versuch zur Ermittlung der Sehschärfbeeinträchtigung nach Blendung durchgeführt.

Die Bestimmung der Zeitdauer, während der die Sehschärfe als Folge einer Blendung verändert ist, erfolgte mit den unter 4.3.2 genannten Expositionsdaten.

Dabei zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Steigung der linearen Regressionen und der Dauer der Sehbeeinträchtigung bis zur Rückkehr zum Normalvisus. Das Ergebnis zeigt Abb. 4.25. Die Visustests wurden anhand der in Abb. 4.13 oben abgebildeten Sehtafel unter Verwendung von Landolt-Ringen durchgeführt.

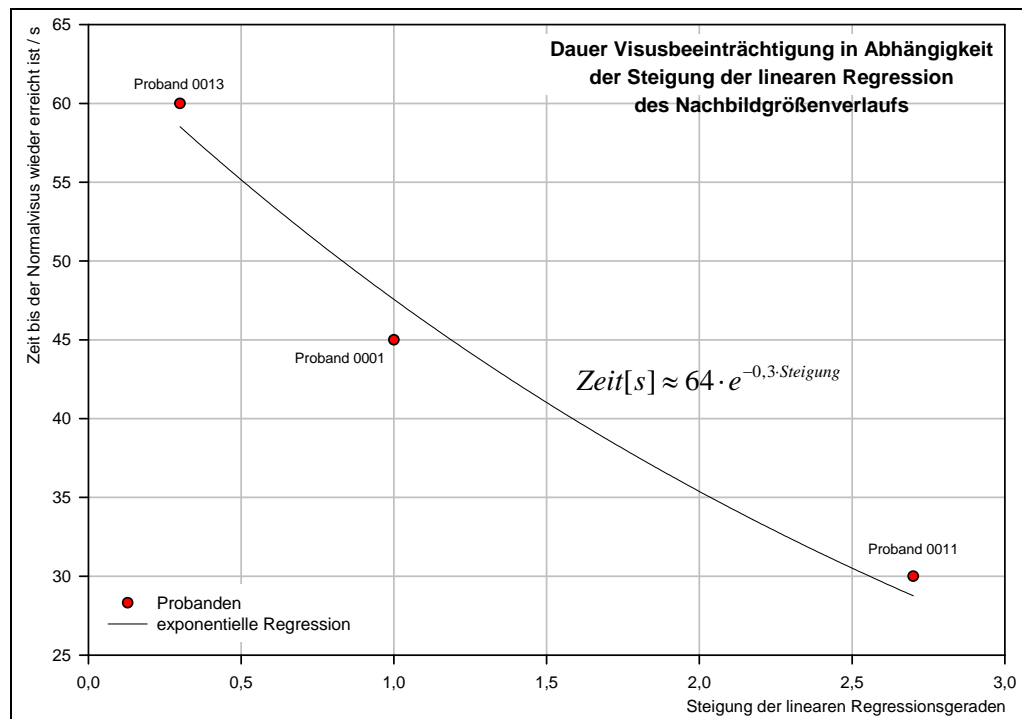


Abb. 4.25 Zeitdauer bis zur Wiederkehr der individuellen Sehschärfe nach einer Blendung als Funktion der individuellen linearen Regression für 3 Probanden

Ein Vergleich der Zeitdauern, die vergehen, bis der normale Visus der Testpersonen nach einer Blendung wieder erreicht wird, mit denjenigen Zeitdauern, die sich ergeben, während derer der Nachbilddurchmesser praktisch unverändert wahrgenommen wird, zeigt, dass der Visus eine Größe darstellt, die vergleichsweise rasch wieder den Normalwert annimmt. Dennoch kehrte die normale Sehschärfe bei keiner der 3 Testpersonen nach weniger als 30 s zurück, d. h. dass Blendung in der hier getesteten Form durchaus die Sehschärfe für einen Zeitraum von einer halben bis zu einer Minute deutlich herabsetzen kann.

Der in Abb. 4.25 dargestellte Zusammenhang lässt – vorsichtig formuliert – darauf schließen, dass die Rückkehr des normalen Visus bei Personen, bei denen der Durchmesser des Nachbildes schneller abnimmt, ebenfalls schneller erfolgt im Vergleich zu denjenigen Personen, bei denen nur eine geringere Nachbilddurchmesserabnahme vorhanden ist.

Der Zeitraum, in dem das Nachbild besteht bzw. durch Umfeldveränderungen wieder zur Wahrnehmung gebracht werden kann, ist meist viel größer als derjenige, in dem eine direkte Beeinträchtigung wahrgenommen bzw. empfunden wird.

e.) Sehschärfe nach Blendung mit einer grünen HB-LED

In einer weiteren Teil-Untersuchung wurde an 3 Personen ermittelt, nach welcher Zeitdauer die Sehschärfe nach einer Blendung mit einer HB-LED wieder auf einen bestimmten Wert zurückkehrt, und zwar bei verschiedenen „Intensitäten“ und Expositionsdauern einer LED-Quelle. Mit den verwendeten LEDs wurden optische Ausgangsleistungen von 0,12 mW bis maximal 1,5 mW erzielt und die Expositionsdauern einer LED-Quelle betrug 1 s, 2 s, 4 s oder 8 s. Die Zeitdauer bis zur Rückkehr des normalen Visus wird hier als Visuszeit bezeichnet und mittels eines Binoptometers, das im Abschnitt 4.3.3.1 beschrieben wurde, gemessen. Auch hier wurde zunächst einmal der maximal mögliche Visus der 3 Probanden festgestellt und dann sowohl vor als auch nach der Blendung mit einer grünen HB-LED (530 nm) eine Messung bei einer Visusstufe unterhalb des maximalen Visus, bei dem die Probanden „bequem“ die Zeichen erkennen konnten, durchgeführt. Die jeweilige Versuchsperson bestimmt selber den Zeitpunkt, wann sie der Meinung ist, dass sie ihren Visus wieder erreicht hat.

In Abb. 4.26 sind die Ergebnisse dargestellt, die sich für 3 Testpersonen bei einer Expositionsdauer von 2 s als Funktion der LED-Leistung ergaben.

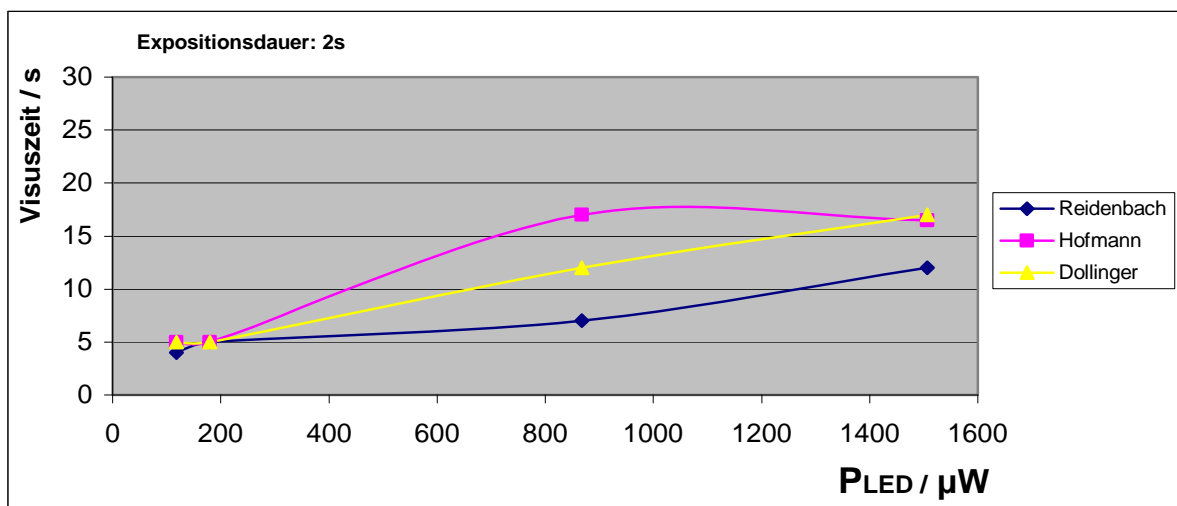


Abb. 4.26 Visuszeit als Funktion der LED-Leistung bei einer Expositionsdauer von 2 s

Abb. 4.27 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für eine Testperson für alle Versuchsparameter, und zwar für optische LED-Ausgangsleistungen zwischen 118 μW und

1,5 mW bei Expositionsdauern von 1 s bis 8 s. Nicht alle getesteten Personen zeigen in jeder Hinsicht genau gleiche Kurvenverläufe.

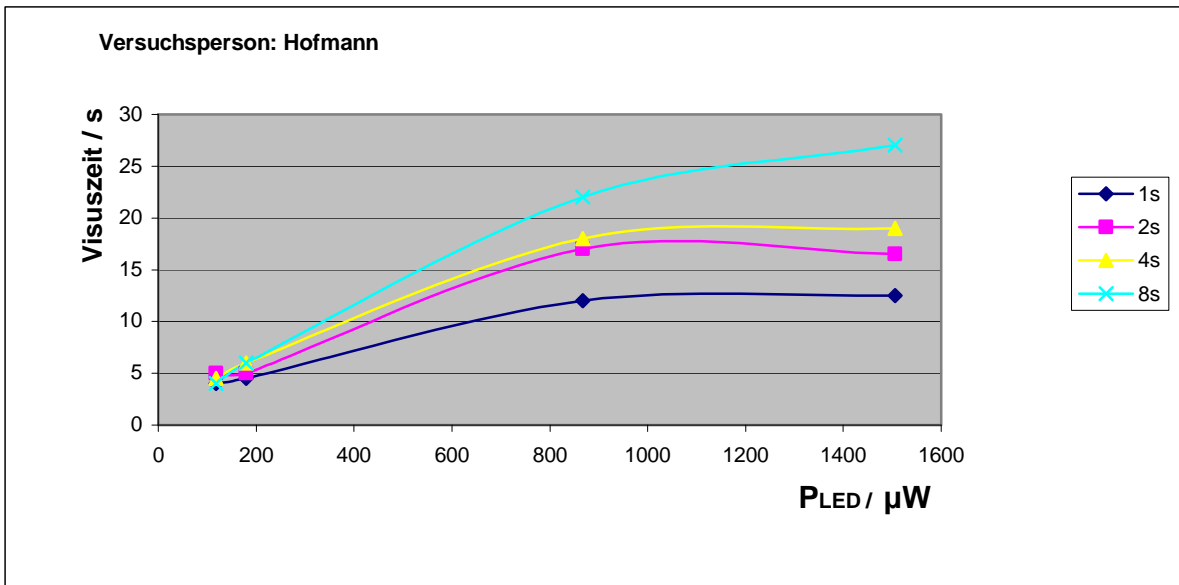


Abb. 4.27 Visuszeit als Funktion der optischen LED-Leistung für verschiedene Expositionsdauern

Abb. 4.27 zeigt, dass die benötigte Zeitdauer, die vergeht, bis der ursprüngliche Visus der 3 Testpersonen wieder erreicht wird, und zwar für 4 verschiedene Blendauern (Expositionsdauer: 1 s bis 8 s), im Wesentlichen mit der jeweils verwendeten LED-Leistung ansteigt.

Andererseits haben Untersuchungen bei konstanter LED-Leistung und verschiedenen Expositionsdauern teilweise eine weitgehende Unabhängigkeit von der Expositionsdauer ergeben. Abb. 4.28 zeigt die Ergebnisse für die geringste LED-Leistung, während in Abb. 4.29 diejenigen für die höchste eingesetzte Leistung dargestellt sind.

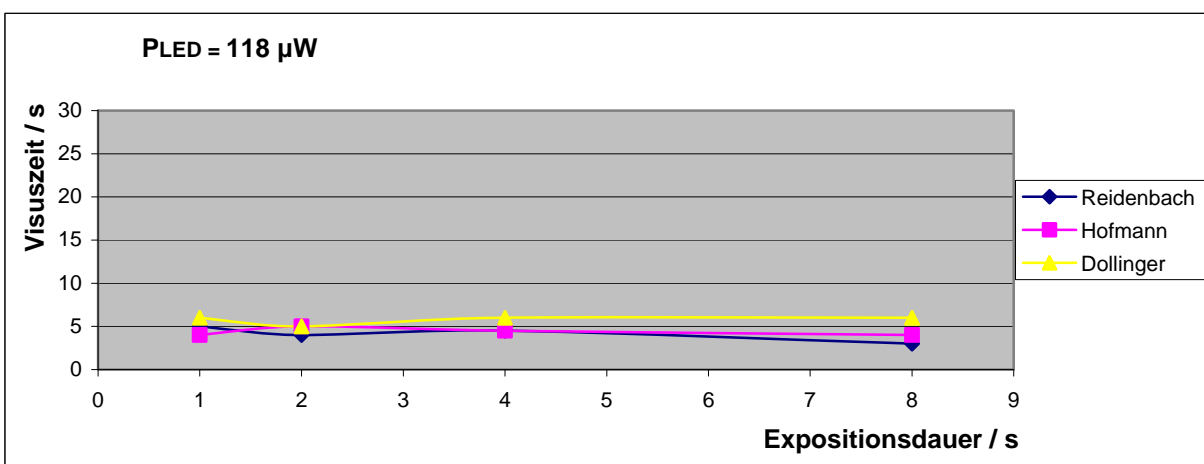


Abb. 4.28 Visuszeit als Funktion der Expositionsdauer bei $P = 118 \mu\text{W}$

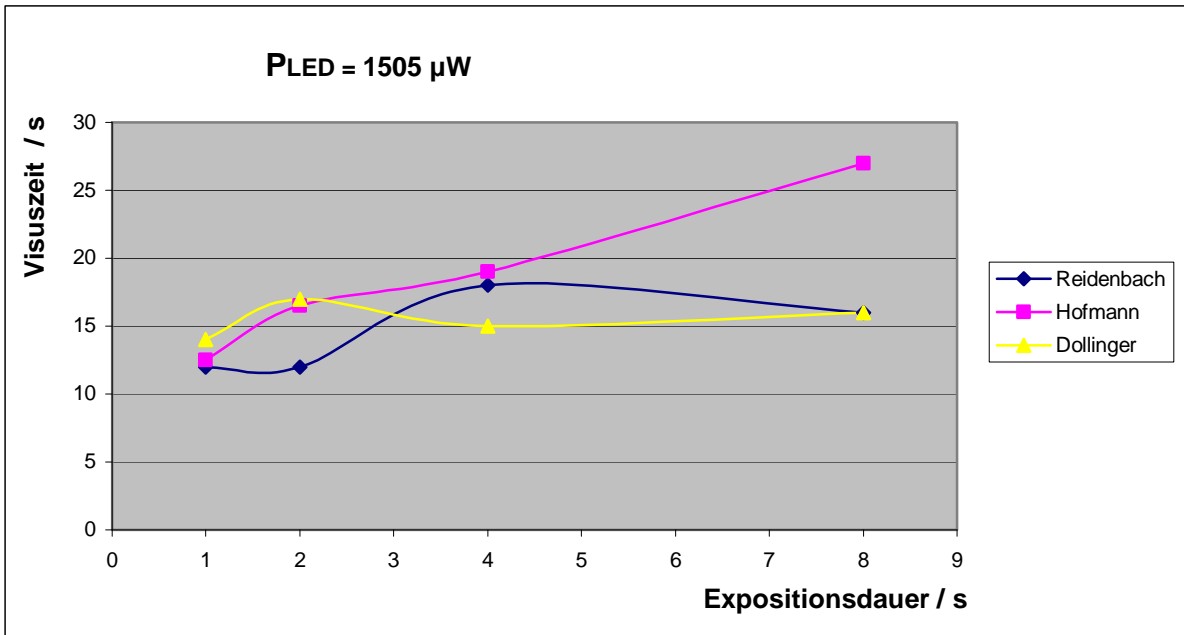


Abb. 4.29 Visuszeit als Funktion der Expositionsdauer bei $P = 1\,505\ \mu\text{W}$

Stellt man die Ergebnisse der Visuszeitmessungen als Funktion der optischen Strahlungsenergie dar, ergibt sich der Verlauf in Abb. 4.30.

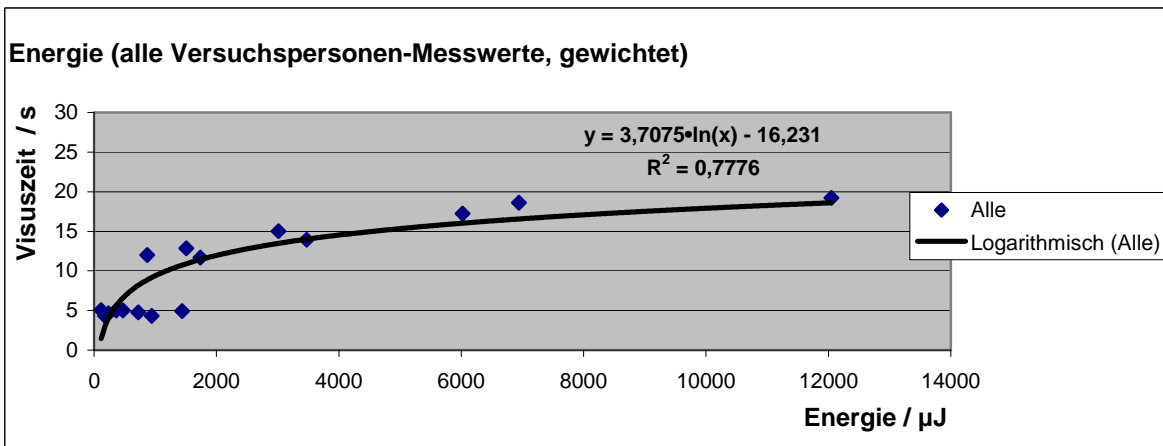


Abb. 4.30 Visuszeit für alle Messungen als Funktion der optischen Strahlungsenergie (Expositionsdauer: 1 s – 4 s)

Als Ergebnis wurde der Zusammenhang

$$\text{Visuszeit} \approx 3,7 \cdot \ln(\text{Energie}/\mu\text{J}) - 16,2 \text{ s} \quad (4.3)$$

ermittelt, d. h. dass bei einer Blendenergie von z. B. 10 mJ eine Zeitdauer (Visuszeit) von 15 s bis 20 s benötigt wird, um den personenspezifischen Visus wieder zu erlangen.

Bei diesen Tests bemerkten die Versuchspersonen, dass sie bei einem längeren starren Blick in die LED-Lichtquelle nach ca. 3 s bis 5 s die Blendung, die ein Erken-

nen von Strukturen der Blendlichtquelle nicht erlaubte, gewissermaßen „überwunden“ hatten, wobei Details der Lichtquelle „sichtbar“ wurden.

In wieweit dieser Effekt mit demjenigen in Beziehung steht, den bereits v. KRIES bei vergleichsweise geringen Helligkeitsverhältnissen dahingehend feststellte, dass „sich durch eine etwas längere Fixation jeder Helligkeitsunterschied verwischt“, wurde nicht näher untersucht [223]. Es konnte aber festgestellt werden, dass die Erscheinung nicht nur auf den Blick in eine helle LED beschränkt war, sondern auch z. B. beim Blick in eine Xenon-Stablampe auftrat und einer vorübergehenden Erhöhung der Sehschärfe während des Blicks in eine Blendlichtquelle entsprach. Zweifelsohne ist bei diesem Effekt die Adaptation von Bedeutung; eine weitergehende Betrachtung der Zusammenhänge wurde aber nicht vorgenommen.

4.3.4 Lesefähigkeit als Sehschärfekriterium nach Blendung mit einer weißen HB-LED

Üblicherweise wird die Sichtbarkeit eines Gegenstandes verringert, wenn helles Licht ins Auge fällt. Allerdings hat bereits SEWALL 1884 [288] gefunden, dass eine seitliche Beleuchtung der Augen zu einer Verbesserung der Sehleistung führen kann. COBB [118] wies aber darauf hin, dass sich bei seitlicher Beleuchtung der Augen auch der Pupillendurchmesser verringert und dadurch eine Schmälerung des Effektes eintritt. Dieser Effekt hängt zweifelsohne nicht linear mit der „Beleuchtungsmenge“ zusammen. Es ist dabei auch zu beachten, dass das seitlich in das Auge gelangende, aufgrund der größeren Eindringtiefe im Wesentlichen langwellige Licht dort auch gestreut wird.

TROLAND hatte schon früh gezeigt, dass die Nachbilddauer stark mit dem Durchmesser und mit der Dauer der Stimulation anstieg [348]. Da nach Ansicht BARRY's [172] die Abhängigkeit der Nachbilddauer von der Wellenlänge und von der Intensität als gering gegenüber Feldgröße und Stimulationsdauer angesehen wurden, was er aufgrund des von ihm angenommenen Diffusionsprozesses erwartete, war es natürlich von Interesse, zu untersuchen, welchen quantitativen Einfluss Größe und Dauer der Exposition auf Sehfunktionen haben.

In der hier durchgeführten Teiluntersuchung wurde sowohl mit unterschiedlichen „Intensitäten“ als auch mit verschiedenen langen Bestrahlungsdauern zwischen ca. 1 s und 20 s die Dauer der Herabsetzung der Sehschärfe gemessen sowie der Durchmesser des erzeugten Nachbildes mittels verschiedener Blenden vor der Blendlichtquelle geändert. Dabei wurde als Kriterium für die Sehschärfe (Visus) die Fähigkeit, einen Text zu lesen bzw. in einem vorgegebenen kreisförmigen Feld, das vom Nachbild überdeckt wurde, einzelne Wörter zu erkennen, benutzt. Die Auswahl des Textes erfolgte ohne besondere Berücksichtigung psychophysikalischer Erkenntnisse des Lesens, d. h. es wurden einfach solche Texte ausgewählt, die gebräuchliche Wörter enthielten und gewissermaßen als Alltagstexte bezeichnet werden können. Die Schriftgröße lag bei 10 Punkt.

Beim Lesen von einzelnen Wörtern nach einer Blendung kommt es nicht auf die Geschwindigkeit an, mit der man diese Wörter lesen kann, sondern in erster Linie darauf, dass man trotz vorhandenem Nachbild und der damit verbundenen Schwellen-

anhebung versucht, die Wörter nach dem Expositionsende so schnell wie möglich zu erkennen und vorzulesen. Das Lesen unter Nachbildbedingungen ist in gewisser Weise mit einem Lesen vergleichbar, bei dem die einzelnen Buchstaben etwas unscharf sind.

Beim Lesen wird die Information aus dem sichtbaren Lesefeld durch Buchstaben- und Worterkennung aus dem Text extrahiert. Dies geschieht normalerweise während des Fixationsintervalls, also zwischen den ballistischen Sakkaden, die ein unscharfes Netzhautbild erzeugen und daher nicht erlauben, dass Information aufgenommen werden kann. Den Sakkaden entsprechen Sprünge von 7 bis 8 Buchstaben [11], und zwar relativ unabhängig davon wie groß die Buchstaben sind und aus welcher Entfernung gelesen wird. Es sind aber auch kürzere Sakkaden festgestellt worden, die nur 1,2 bis 4,5 Buchstaben entsprachen. Die Fixationsintervalle dauern zwischen 100 ms und 500 ms.

Würde es beim Lesen nach einer Blendung auf deren Geschwindigkeit ankommen, müsste man auch noch berücksichtigen, dass die Ortsgrundfrequenz dem Kehrwert des Abstandes zwischen den Mitten zweier Buchstaben entspricht und dass sich die größte Kontrastempfindlichkeit, die den Kehrwert des Schwellenkontrastes darstellt, für eine Buchstabengröße von 1° mit 50, d. h. einem Schwellenkontrast von 0,02, ergibt [356].

Die Leserate wird durch die Buchstabengröße über etwa eine logarithmische Einheit, und zwar zwischen $0,2^\circ$ und 2° sowie durch den Kontrast ebenfalls über eine logarithmische Einheit von ungefähr 1,0 bis 0,1 wenig beeinflusst [356], d. h. dass das normale Sehen bemerkenswert „tolerant“ in Bezug auf Buchstabengröße und Kontrast ist. Anders sind die Verhältnisse bei Menschen mit schwachem Sehvermögen. Diese benötigen Buchstabengrößen von 3° oder mehr [356], um maximale Lesegeschwindigkeit zu erzielen.

Normalsichtige erzielen maximale Leseraten für Buchstabengrößen zwischen $0,3^\circ$ und 2° [355] und darüber hinaus wächst die Leserate mit der Feldgröße, d. h. mit der Zahl der Buchstaben, die gleichzeitig gesehen werden können, und zwar bis zu 4 Buchstaben. Außerdem hat man bei Untersuchungen zum Lesen gefunden, dass es dabei nicht auf die Kontrastpolarität ankommt, d. h. es ist praktisch gleich, ob der Text schwarz-auf-weiß oder weiß-auf-schwarz vorliegt. Andererseits ist aber gerade der Kontrast ein wichtiger Parameter beim Lesen.

Will man dessen Einfluss berücksichtigen, dann gilt es, das Schwellenkontrast-Inkrement einzubeziehen. Dieses schlägt sich im Exponenten der Potenzfunktion nieder, mit der die Inkrementschwelle des Zielkontrastes ansteigt. Hierzu findet man in der Literatur Zahlenwerte von ca. 0,6 [356].

Die Übertragung der Ergebnisse zur Untersuchung der Leseraten auf die Verhältnisse bei Sehtesttafeln lässt erwarten, dass die Buchstaben-Sehschärfe in etwa der Wurzel aus dem Kontrast proportional ist [356]. Daraus ließe sich eigentlich folgern, dass Vorgänge, welche den Kontrast reduzieren, nur einen relativ schwachen Einfluss auf die Sehschärfe haben. Daher haben LEGGE et al. angenommen, dass Blendung sich nur wenig auf die Sehschärfe auswirkt.

In den hier durchgeführten Untersuchungen war es das primäre Ziel, die Zeitdauer nach einer Blendung zu bestimmen, nach der zuvor geblendete Personen einen Text wieder lesen können.

Bei diesen Untersuchungen wurde die Visusbeeinträchtigung als Funktion der Expositionsdauer und der Quellengröße untersucht, und zwar unter Verwendung einer sogenannten High-brightness Weißlicht-LED (Power-LED vom Typ Luxeon Star Hex (Batwing) mit der Nummer LXHL-MWEC).

Die Quellengröße (scheinbare Quelle) der verwendeten Blendlichtquelle ließ sich zwischen 300 μm und ca. 18 mm, entsprechend einem Sehwinkel (Winkelausdehnung) zwischen 3 mrad und 180 mrad, verändern [87].

Die relative spektrale Leistungsverteilung der zur Blendung verwendeten LED ist in Abb. 4.31 wiedergegeben.

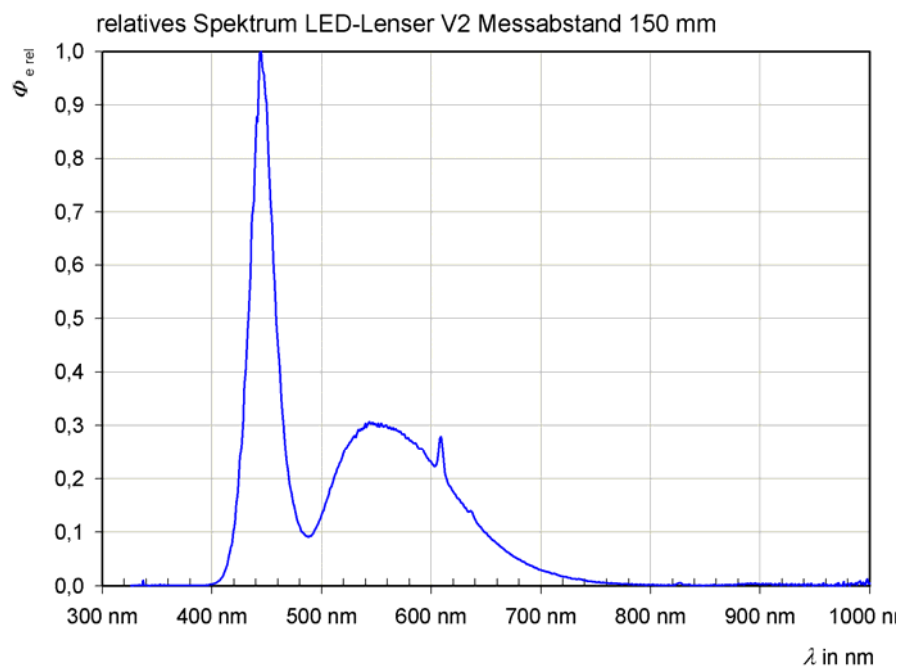


Abb. 4.31 Relatives Spektrum (spektrale Leistungsverteilung, SPD) der verwendeten HB-LED

Aus den der Abb. 4.31 zugrunde liegenden Werten kann man einen unbewerteten Anteil von 78,3 % an der Gesamtleistung ermitteln, der auf den Bereich zwischen 400 nm und 600 nm fällt, also auf den Bereich, der im Hinblick auf die Einhaltung der photochemischen Grenzwerte berücksichtigt werden muss.

In einem Abstand von 10 cm, der demjenigen des Probanden von der Blendlichtquelle entsprach, wurde als maximale Expositionsleistung, bezogen auf den Messaufbau, eine Leistung von 4 mW gemessen. Der gesamte Leistungsbereich erstreckte sich von 4,5 μW bei einer Blendenöffnung von 0,3 mm bis zu 3,96 mW bei 18 mm. Abb. 4.32 zeigt den vorstehenden Zusammenhang.

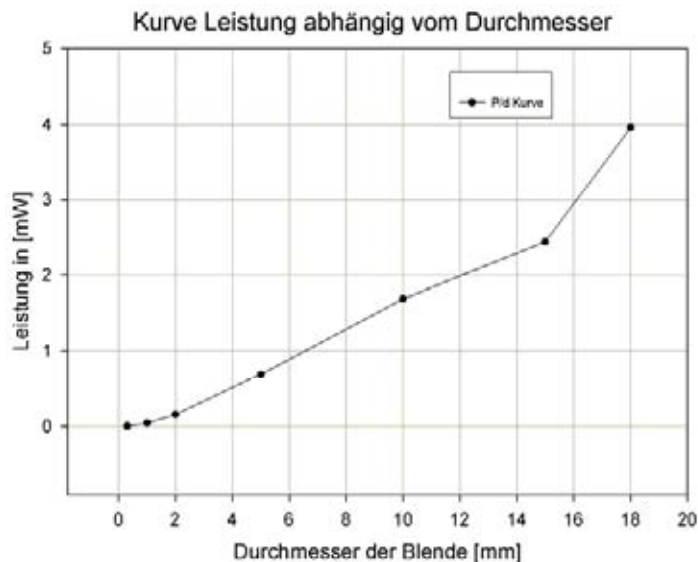


Abb. 4.32 Leistung als Funktion des Blendendurchmessers

Aus den MZB-Werten lassen sich für eine Expositionsdauer von 5 s 31 mW und für 20 s 22 mW ermitteln, d. h. dass die Versuchsbedingungen erstens nicht zu einer Gefährdung führen konnten und zweitens damit denjenigen einer Lasereinrichtung der Klasse 1 entsprachen. Auch der relativ hohe Blauanteil der weißen LED führte bei dem verwendeten Messaufbau und den gewählten Einstellungen nicht zu einer Blaulichtgefährdung, d. h. dass auch die photochemischen Grenzwerte eingehalten wurden, indem selbst bei der längsten Expositionsdauer von 20 s nur 6,03 % als prozentualer Anteil an der Gesamtleistung nach entsprechender Bewertung des Blaulichtanteils mit dem hierfür gültigen Korrekturfaktor C_3 (s. [151]) zu berücksichtigen waren. Abb. 4.33 zeigt den Versuchsaufbau.

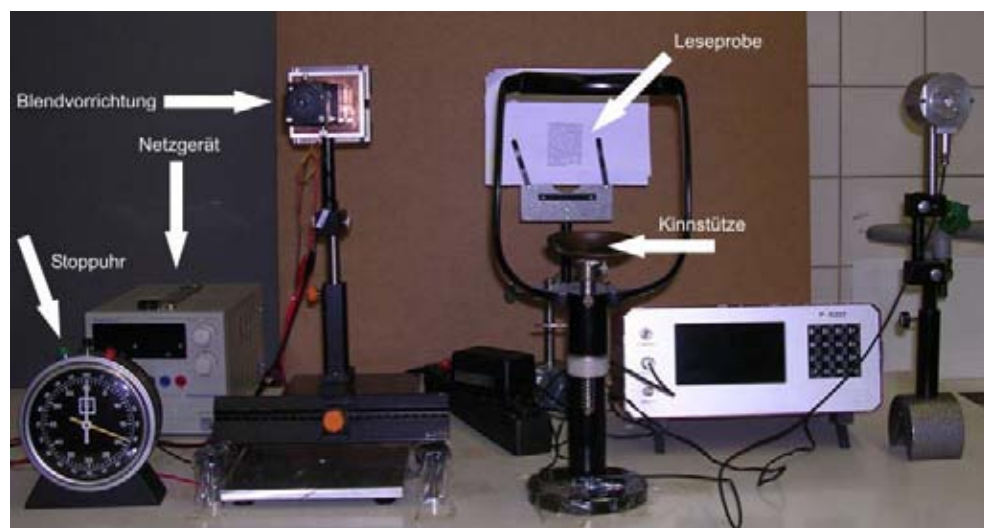


Abb. 4.33 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Lesestörzeit nach Blendung durch eine weiße HB-LED

Der Abstand zwischen Quelle und Auge des Probanden betrug konstant 100 mm. Kurz vor dem Auge des Probanden befand sich eine Linse mit einer Brennweite $f = 100$ mm, die als Lupe verwendet wurde, und eine 7-mm Blende. Die Lupe wird so

eingesetzt, dass sie ein vergrößertes, virtuelles Bild erzeugt, das vom Auge beobachtet wird. Eine weitere Blende war im Durchmesser einstellbar. Die von der LED ausgehende Strahlung wurde mit Hilfe einer Kondensorlinse ($f = 16 \text{ mm}$) nach Unendlich abgebildet (s. Abb. 4.34).

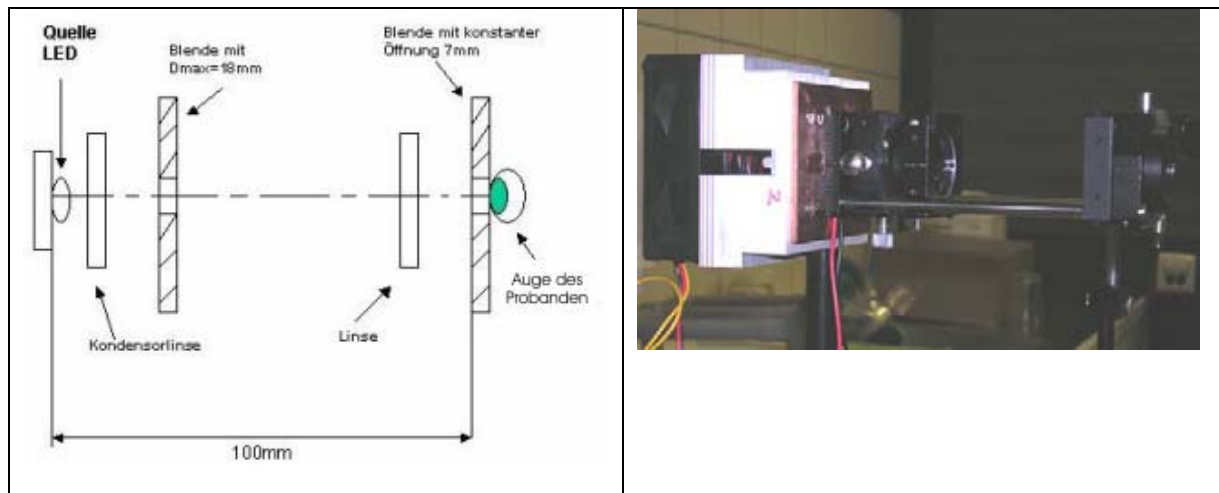


Abb. 4.34 Schematische Darstellung und realer Messaufbau zur Blendung

Während der Versuchsdurchführung führte die Raum-Beleuchtung im Augenbereich zu einer Beleuchtungsstärke von ca. 252 lx. Die Probanden hielten sich bis zum Expositionsbeginn seit mindestens 30 Minuten im Labor auf. Daher konnte von einer abgeschlossenen Helladaptation der Probanden ausgegangen werden.

Gemessen wurden

- a.) die Dauer der Lesestörzeit in Abhängigkeit von der Leuchtdichte und
- b.) die Dauer der Lesestörzeit in Abhängigkeit von der Expositionszeit.

Die Probanden wurden vor der Messung in das gesamte Messverfahren eingewiesen. Es wurde vor der eigentlichen Messung überprüft, ob die Probanden ohne Blendung den Text auf der Lesetafel in einem Abstand von 50 cm erkennen konnten (s. Abb. 4.33). Da die Messung in einer sitzenden Position ablief, nahmen die Probanden auf einem höhenverstellbaren Stuhl Platz, um sicherzustellen, dass die Versuchspersonen genau in die Blendvorrichtung sehen konnten. Nachdem der Proband vorgefertigte Fragebögen ausgefüllt hatte, konnte die Messung beginnen.

Nachdem der Proband Platz genommen hat und direkt mit dem gewählten Auge in das Loch der Blendvorrichtung blickt, werden Netzteil und Stoppuhr aktiviert und die Exposition ausgelöst. Nach einer Expositionsdauer von 5 s wird das Netzgerät ausgeschaltet. Der Proband bewegt sich zum Lesebereich und versucht die Zeichen bzw. den Text auf der Leseprobe zu lesen. Den Zeitpunkt des Erkennens gibt der Proband mündlich an, woraufhin die Stoppuhr angehalten wird. Die erste Messung ist damit beendet. Die Lese-Störzeit ergibt sich, wenn man die Expositionszeit von der Gesamtzeit der Stoppuhr subtrahiert. Die Zeit vom Ende der Exposition bis Leseanfang beträgt durchschnittlich zwei Sekunden. Diese Zeit wurde bei der Auswertung der Messergebnisse nicht als Lesezeitstörung mitberücksichtigt. Auch die Zeitdauer

zum Lesen eines Wortes blieb unberücksichtigt, da man bei maximalen Leseraten von bis zu 350 Wörtern/Minute [356] leicht zeigen kann, dass zum Lesen eines Wortes lediglich eine Zeitdauer von ca. 0,17 s (2 s) benötigt wird und diese Zeitdauer kann bei Bestimmung der Lesezeitdauer ebenfalls unberücksichtigt bleiben.

Zum Fixieren eines Textes werden Zeitdauern von etwa 250 ms angegeben, aber dieser Wert hängt stark vom angebotenen individuellen Text ab.

Die Tatsache, dass bei der Blendung durch die LED das Lesevermögen der Probanden durch die Nachbilder beeinflusst wird, bringt die Notwendigkeit einer Untersuchung der Größenverhältnisse von Nachbildern mit sich.

Zu Nachbildern gehört auch deren „Nachlassen“ nach einer bestimmten Zeit. Mit dem langsamen Verschwinden des Nachbildes wird das Lesevermögen immer besser, bis der Proband die Schrift erkennen und lesen kann. Der Blendeindruck selbst ist von der Leuchtdichte abhängig. Als Nachbildfarbe gaben die Probanden bei diesem Versuch Zyan an.

Da es bei dem hier durchgeführten Lesetest nicht um die Lesegeschwindigkeit eines „Fließtextes“ ging, sondern um das „Wiedererkennen“ eines Textes nach einer Blendung, sind Fragen der Größe des „optimalen Sehfensters“, wie sie in der Literatur diskutiert wurden [343], nicht primär von Interesse. Es ist aber zutreffend, dass nur ein relativ kleiner Teil einer Seite eines Textes so scharf gesehen wird, dass er gelesen werden kann bzw. um die Buchstaben identifizieren zu können und die Worte zu erkennen, damit daraus die Information ermittelt werden kann. Entscheidend für die Durchführung des hier benutzten Lesetestes war, dass die freigegebene Textfläche durch das Nachbild abgedeckt wurde, um den tatsächlichen Einfluss der Blendung zu ermitteln und gleichzeitig zu verhindern, dass versucht wurde, aus Buchstaben in der Peripherie, die nicht vom Nachbild überdeckt waren, den Text zu ermitteln, denn parafoveale Informationen unterstützen die Worterkennung durch Vorverarbeitung des Sehbildes [343] und unterstützen gleichzeitig die Bewegungssteuerung im Hinblick auf die nachfolgende Fixationsbewegung. Die nach einer Blendung vorliegende Umkehrung der Verhältnisse, dass nämlich üblicherweise das Zentrum scharf und die Peripherie unscharf erkannt wird, bedarf noch einer genaueren Befassung auch aus psychologischer Sicht.

Die Untersuchungen dieses Teilprojektes wurden an insgesamt 12 Probanden durchgeführt, wobei in der Regel jede Einzelmessung dreimal erfolgte. Abb. 4.35 zeigt die Dauer der Lesestörung in Abhängigkeit der eingestellten Blendenöffnung und damit auch der von der LED abgestrahlten Leistung. Durch die Wahl einer geeigneten kreisrunden Öffnung vor dem zu lesenden Text wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass die Nachbildgröße von der eingestellten Blende im Strahlengang abhängig.

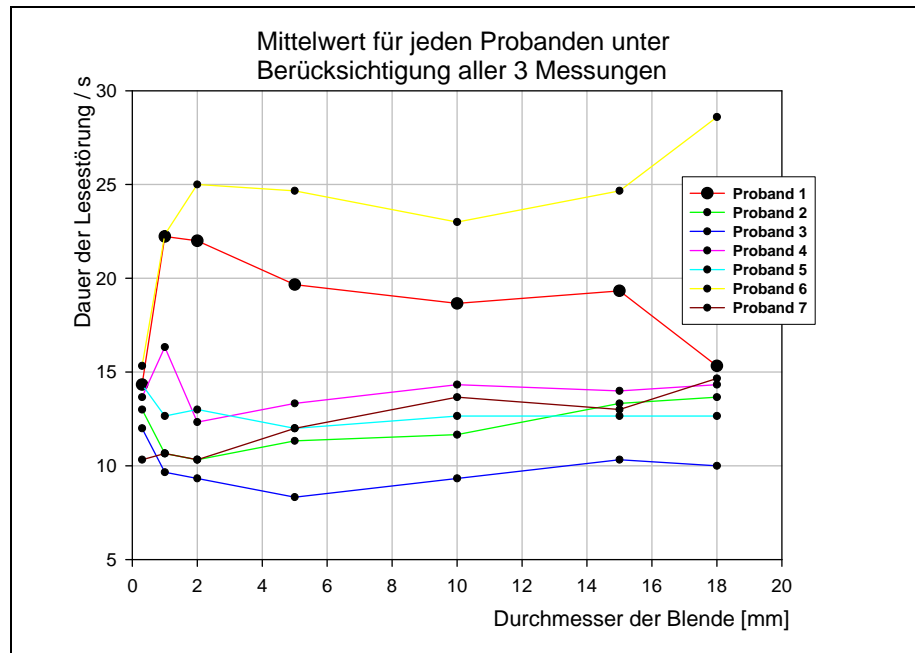


Abb. 4.35 Dauer der Lesestörung als Funktion des Blendendurchmessers

Die Betrachtung jedes einzelnen Kurvenverlaufs lässt erkennen, dass der Verlauf bei den Probanden 2, 3, 5 und 7 annähernd konstant ist. Bei den Probanden 1, 4 und 6 sind etwas größere Veränderungen erkennbar. Diese Abweichungen können z. B. durch unterschiedliche Sehschärfe oder Messfehler während der Untersuchung bedingt sein. Die Abweichungen zwischen den Probanden selbst erklären sich durch die Individualität der jeweils getesteten Personen.

Für eine genauere Überprüfung des Unterschieds bei kleiner und großer Öffnung der Blende bzw. kleiner und großer Leistung bei der Blendung, wurden Messungen ausschließlich bei den Durchmessern 2 mm und 15 mm durchgeführt. Dabei wurde auch hier jede Messung dreimal wiederholt, und zwar für 7 Probanden. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.36 dargestellt, und zwar als Mittelwerte.

Es lässt sich leicht erkennen, dass es zwischen den Messwerten bei 2 mm und bei 15 mm keine bemerkenswerte Abweichung gibt. Daraus lässt sich schließen, dass die Störungszeit der Sehschärfe innerhalb des hier betrachteten Leistungsbereiches von 0,15 mW bis 2,4 mW konstant ist. Dies lässt sich auch daraus schließen, dass die Abweichung bei Messungen bei ein und derselben Blendenöffnung teilweise größer ist als die Differenz bei unterschiedlichen Durchmessern. So zeigte z. B. Proband 1 bei 2 mm Blendendurchmesser eine maximale Abweichung von 5 s, während die maximale Differenz zwischen beiden Durchmessern nur 4 s betrug. Insgesamt ergab sich eine Differenz von ca. 10 s als individuelle Lesezeitstörungsdifferenz unter den untersuchten Bedingungen.

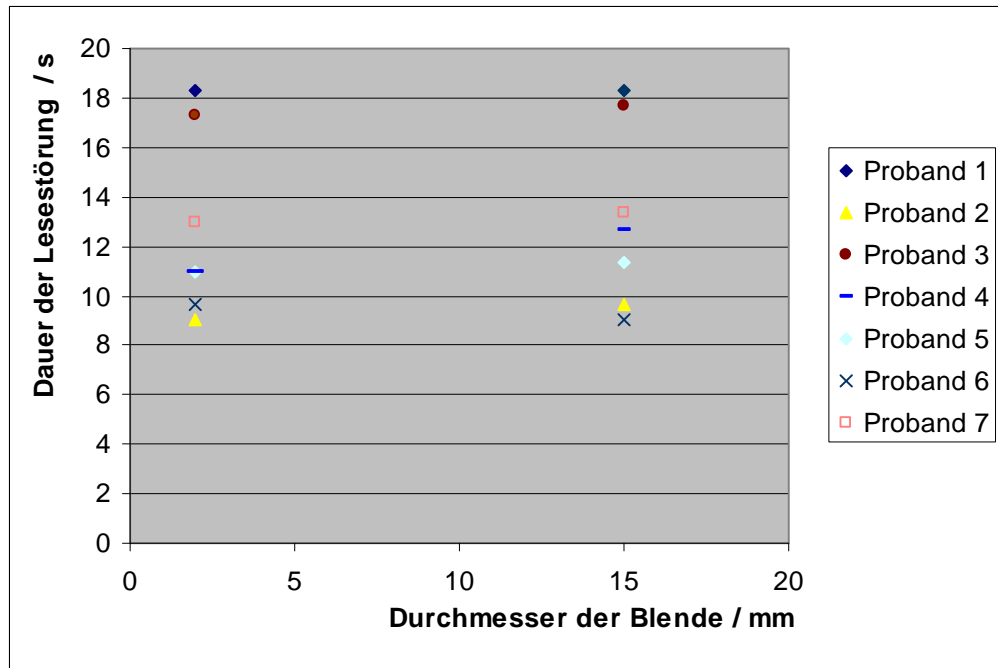


Abb. 4.36 Mittelwerte der Lesezeitstörung bei zwei verschiedenen Blendendurchmessern

In einer Teiluntersuchung wurde lediglich die Leistung der LED verändert, und zwar bei der maximalen Blendenöffnung von 18 mm. Die dabei bei 7 Versuchspersonen erzielten Ergebnisse zeigt Abb. 4.37.

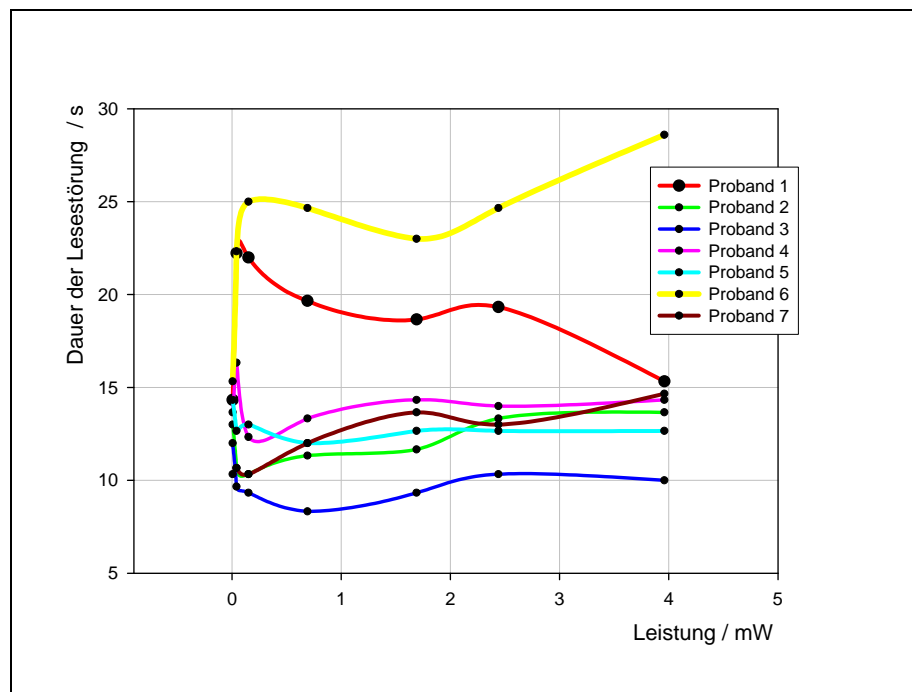


Abb. 4.37 Dauer der Lesestörung als Funktion der LED-Leistung bei einer Blendenöffnung von 18 mm

Nachdem sich keine ausgeprägte Abhängigkeit weder von der LED-Leistung noch von der Größe der scheinbaren Quelle, nämlich der eingestellten Blendenöffnung, und damit wiederum auch indirekt von der Leistung, ergeben hatte, wurde die Abhängigkeit von der Expositionsdauer genauer untersucht. Hierzu wurde die Lesezeitstörung für eine feste LED-Leistung von 1,69 mW, entsprechend einer Blendenöffnung von 10 mm, bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.36 dargestellt.

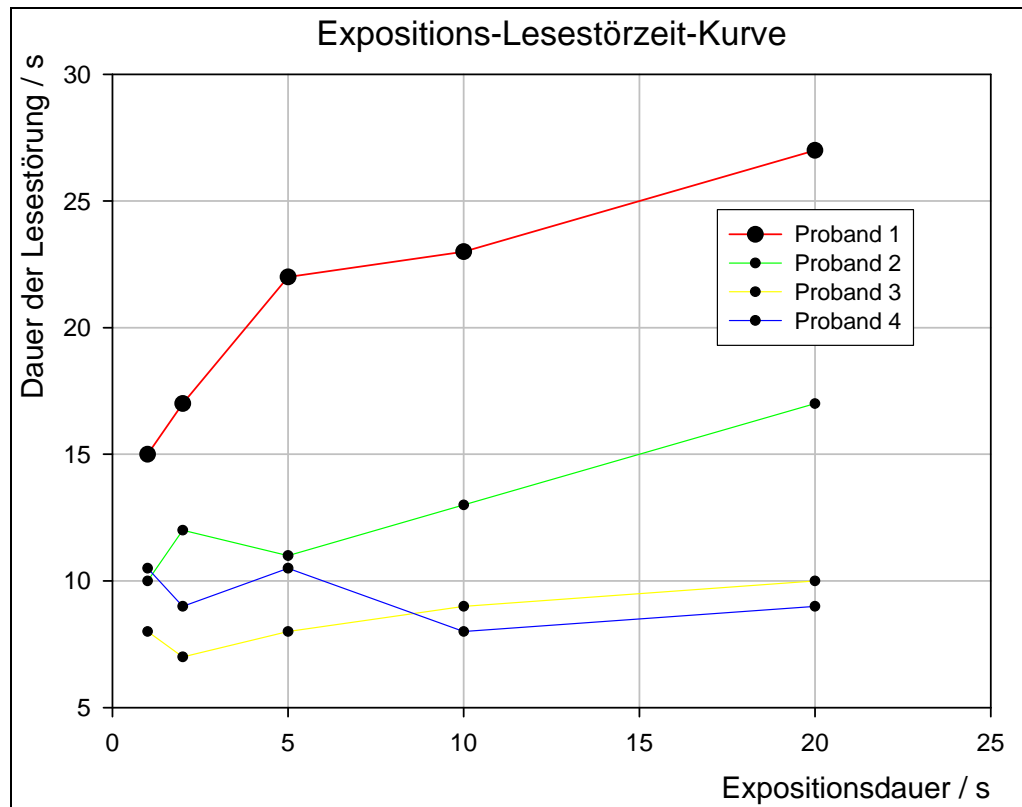


Abb. 4.38 Dauer der Lesestörung als Funktion der Expositionsdauer bei einer LED-Leistung von 1,69 mW entsprechend einer Blendenöffnung von 10 mm

Beim Betrachten der Abb. 4.38 kann man feststellen, dass bei fast jedem Probanden eine Verlängerung der Lesestörzeit mit zunehmender Expositionsdauer vorliegt.

In diesem Teil der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Zeitdauer der Sehschärfe-Störung, die hier als Lesezeitstörung betrachtet wurde, durch Exposition mit einer Hochleistungs-LED in dem verwendeten Leistungsbereich konstant ist. Sowohl bei der direkten Leistungsveränderung als auch bei Änderung der Leistung durch die variable Quellgröße, konnte der konstante Charakter der Lesestörzeit bestätigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass in relativ weitem Bereich keine Abhängigkeit der Nachbilddauer vom Durchmesser der Blendenöffnung und damit vom Nachbilddurchmesser besteht.

Andererseits wurde für Expositionsdauern zwischen 1 s und 20 s bei einer konstanten Leistung von 1,69 mW festgestellt, dass die Lesestörzeit mit zunehmender Expositionsdauer ansteigt. Dabei scheint sich eine Art Sättigung einzustellen, d. h. dass die Lesezeitstörung zwar einerseits für relativ kleine Expositionsdauern zunächst

anwächst, dann aber nahezu konstant bleibt. Eine genauere Untersuchung im Bereich von Expositionsdauern, die noch größer als 20 s sind, war erstens aufgrund wachsender Gefahr von Augenschädigungen durch den Blaulichteffekt nicht möglich und macht zweitens auch deshalb nicht allzu viel Sinn, da normalerweise nicht von einem starren Blick in eine helle Quelle ausgegangen werden kann, der noch länger als 20 s dauert.

Um weitere Kriterien für eine durch Blendung bedingte Störung der Lesefähigkeit zu ermitteln, müsste auch der Einfluss des Leuchtdichteverhältnisses zwischen Text und Hintergrund bestimmt werden und darüber hinaus auch die Abhängigkeit von farbigen Textpräsentationen. Es konnte gezeigt werden, dass das Lesen von Text erst bei einem Kontrast unterhalb von 0,12 schnell fehlerbehaftet wird, während bei mittleren und hohen Kontrasten keine Beeinflussung erfolgt [356].

4.3.5 Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit der Nachbilddauer

Hierzu wurde mittels eines He:Ne-Laser der Wellenlänge 632,8 nm, dessen Emissionswerte denjenigen der Laserklasse 1 nach DIN EN 60825-1 entsprechen [151], die Ortsabhängigkeit der Nachbilddauer ermittelt, indem der Laserstrahl von temporal bis nasal in einer horizontalen Ebene, welche die Fovea enthält, unter einem einstellbaren Winkel gegenüber der Augenachse auf die Netzhaut trifft, jeweils ein Nachbild erzeugt. Anschließend wurde eine dynamische Seheigenschaftenbestimmung durchgeführt, d. h. es wurde die ortsabhängige Nachbilddauer bestimmt. Da generell bei einer Blendung bei ein und demselben Probanden und daher auch in diesem Fall zwischen den einzelnen Messungen relativ lange Zeitdauern liegen müssen, damit die Re-Adaptation erfolgen kann, erstrecken sich solche Messungen über jeweils ca. ½ bis einen Tag pro Proband. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden die Untersuchungen an insgesamt 12 Versuchspersonen durchgeführt. Reihenuntersuchungen haben sich aufgrund des relativ großen zeitlichen Aufwandes bei einer solchen Untersuchungsmethode als praktisch unrealistisch herausgestellt.

Neben der Winkelabhängigkeit in der Horizontalebene wurden auch weitere Laserstrahlflecke und damit Messpunkte auf die Retina gelegt, sodass sich eine annähernd zweidimensionale Nachbilddauerverteilung ergibt. Es ist nicht bekannt, dass solche Messungen der Ortsabhängigkeit bisher an anderer Stelle durchgeführt wurden. Die Auswahl eines Lasers der Klasse 1 wurde deshalb vorgenommen, da diese Laser infolge der erheblichen Anhebung der Klassengrenzwerte (Grenzwerte zugänglicher Strahlung, GZS) und damit auch der maximal zulässigen Bestrahlungswerte (MZB) [3, 10, 152 – 154, 168, 169] in den letzten Jahren deutlich an Blendungspotenzial „zugelegt“ haben.

Es liegt zwar nahe anzunehmen, dass es aufgrund der bekannten unterschiedlichen Verteilung der Sehzellen, d. h. der Stäbchen und der Zapfen, auf der Netzhaut, sowie aufgrund deren spezifischer Hellempfindlichkeiten und Organisation zu den sogenannten rezeptiven Feldern auch unterschiedliche Wahrnehmungen gibt, die in der Fovea (Fleck schärfsten Sehens) anders sind als in der Netzhautperipherie, in der dem Bewegungssehen eine größere Bedeutung zukommt. Bekannt geworden sind solche Untersuchungen hinsichtlich des Auftretens von Nachbildern aber zumindest

in der jüngeren Vergangenheit nicht. Lediglich BROWN hat eine entsprechende Übersicht zu peripheren Nachbildern verfasst [107], auf die auch in [171] näher eingegangen wird.

Im Hinblick auf Fragen zur Ortsabhängigkeit eines Nachbildes ist darüber hinaus auch die Bedeutung einer Beeinflussung benachbarter Bereiche auf der Netzhaut insbesondere aus psychologischer Sicht interessant, da Blendung nicht nur zu einer Störung von Sehfunktionen, sondern auch zu einer Beeinträchtigung führen kann.

Da bereits für Laser der Klasse 1 im oberen Leistungsbereich mit Blendung, Beeinträchtigung des Farbsehens und Belästigungen gerechnet werden kann [siehe 1], wurde ein Laser der Klasse 1 als Blendlichtquelle für diese Teiluntersuchungen ausgewählt.

Unter Beachtung geltender Grenzwerte und unter Berücksichtigung einer Zeitbasis von 30.000 s ergibt sich für einen Laser der Klasse 1 bei einer Wellenlänge zwischen 500 nm und 700 nm, also auch für die hier verwendeten 632,8 nm für einen maximalen Pupillendurchmesser von 7 mm rechnerisch eine maximal zulässige Leistung von $P_{\text{MZB}} = 0,39 \text{ mW}$.

In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass selbst bei einer Laserstrahlleistung von nur 39 μW , die einen Sicherheitsfaktor von 10 beinhaltete, starke Blendungserscheinungen mit belästigenden Wirkungen festgestellt wurden, aufgrund derer eine mehrmalige Exposition nicht auf Gegenliebe bei den Versuchspersonen stieß. Infolgedessen wurde die Leistung des Lasers weiter auf einen annehmbareren Wert von $P = 30 \mu\text{W}$ reduziert und als maximaler Wert für die Versuche dieser Teiluntersuchungen benutzt.

Ein durch Laserstrahlung hervorgerufenes Nachbild ist untypisch im Vergleich zu Nachbildern, die von nichtkohärenten Lichtquellen stammen. Im ersten Moment nach der Blendung ist das Nachbild im ähnlichen Farbton zum Laserstrahl und verändert sich dann im Laufe der Zeit. Durch Augenbewegungen während der Exposition zeichnet sich eine Art Spur im Gesichtsfeld aus, und zwar aufgrund des sich zeitlich wechselnden Expositionsortes auf der Netzhaut [106].

Abb. 4.39 zeigt den Experimental-Versuchsaufbau zur winkelabhängigen Blendung mit Angabe der Komponenten, während in Abb. 4.402 der Blick des Probanden und in Abb. 4.41 die Laserstrahlabschwächer-Shutter-Kombination zu sehen ist.



Abb. 4.39 Experimental-Versuchsaufbau zur winkelabhängigen Blending. Komponenten: 1.) Zieleinrichtung („Siemensstern“ und Lochblende); 2.) Netzteil; 3.) Blendlichtquelle (He:Ne-Laser der Klasse 3B mit $P_{\max}=10$ mW bei $\lambda = 632,8$ nm, Gaußstrahl (TEM_{00}); 4.) Optischer Abschwächer (zur Einstellung der Laserleistung auf Klasse 1); 5.) Shutter (zeitgesteuert); 6.) Ausleger der Länge $l = 450$ mm (drehbar gelagert auf einer Drehscheibe mit Winkelmaßstab und einer Stützrolle) als Träger für die Blendeinrichtung aus Laser, Abschwächer und Shutter; 7.) Drehteller (halbkreisförmig aus Plexiglas, zum Stützen des Auslegers); 8.) Kinn-/Kopfstütze; 9.) Oszilloskop zur Überprüfung der Zeitsteuerung; 10.) Dreikantschiene; 11.) Zeitsteuerschaltung, bestehend aus einem Zeitrelais; 12.) Stoppuhr (zur Messung der Nachbilddauer); 13.) höhenverstellbarer Tisch

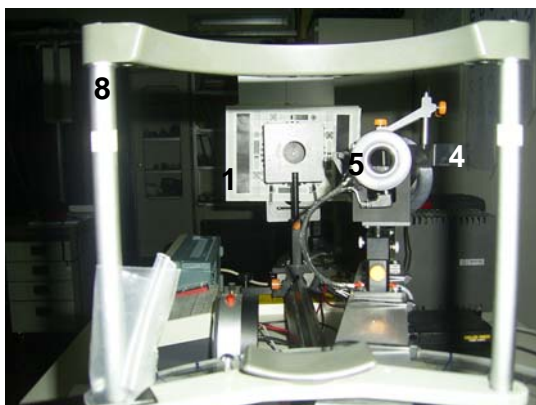


Abb. 4.40 Versuchsaufbau aus der Sicht des Probanden

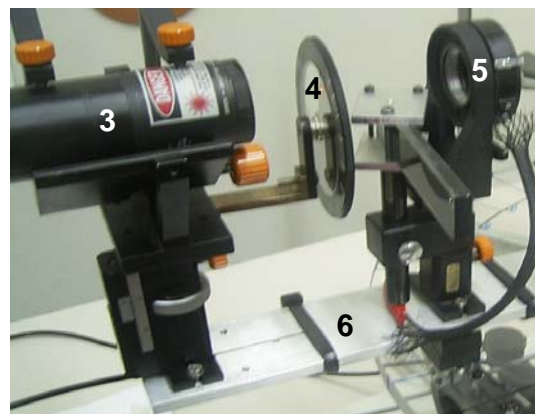


Abb. 4.41 Laser mit Abschwächer- und Shuttereinheit

Zur Versuchsdurchführung nimmt der Proband vor dem Messaufbau Platz und positioniert seinen Kopf in der Kinn- und Stirnstütze. Er visiert dann mit einem Auge bei geschlossenem anderen Auge die Mitte des Siemenssternes durch die Lochblende an (siehe Abb. 4.40 u. 4.41). Zum Verdecken des nicht geblendeten Auges kann eine Augenklappe verwendet werden.

Da die Kinnstütze nicht fixiert ist, können kleinere Korrekturen in der Position des zu blendenden Auges des Probanden durch Verschiebung an dieser Vorrichtung durch den Versuchsleiter durchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass selbst für (extrem) große Winkel, der Strahl jederzeit die Pupille des Probanden trifft. Ist dies vollbracht, so befindet sich die Pupille des Probandenauges im Mittelpunkt des Kreisbogens, auf dem sich der Laser bewegen lässt. Diese Prozedur muss für jede neue Messung und jeden Probanden von neuem durchgeführt werden und ist daher etwas zeitraubend. Sie verlangt äußerste Genauigkeit und Konzentration des Versuchsleiters, welche sich aber im Laufe der Zeit bei Testmessungen von selbst ergibt. Bei geübten Handgriffen beträgt die Zeitdauer im günstigsten Falle etwa eine Minute. Um eine unnötige Blendung des Probanden zu vermeiden, wird der Laserstrahl während der Einstellphase zusätzlich durch einen zweiten, vor dem Laser angebrachten Abschwächer minimiert. Ebenso ist die Konzentration des Probanden wichtig, d. h. dass der Proband während der Exposition möglichst stillsitzen muss, um dadurch die Zeit der Einstellungsphase zu verkürzen und demzufolge möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten.

Von allen Versuchsteilnehmern wurden Fragebögen ausgefüllt und die Zustimmung zu der jeweiligen Untersuchung schriftlich erteilt.

Zur Ermittlung des Ausmaßes der physiologischen Blendung wurde das im Auge der Probanden erzeugte Nachbild in seiner Dauer zeitlich erfasst. Um eine möglichst reibungslose Versuchsdurchführung zu gewährleisten, wurden Testdurchläufe vorgenommen.

Für die Ermittlung der winkelabhängigen Nachbilddauer als Funktion der Zeit wurden zu Beginn willkürlich Expositionsdauern von $t_{\text{exp}} = 1 \text{ s}$, 5 s und 10 s ausgewählt, in deren Abhängigkeit die Dauer des Nachbildes gemessen wurde. Als Kriterium für die Nachbilddauer wurde die Zeit genommen und vereinbart, bis das Nachbild für den jeweiligen Versuchsteilnehmer verschwunden war und selbst durch Augenzwinkern nicht mehr zurückgeholt werden konnte. Diese Zeitdauer wurde mit einer Stoppuhr gemessen und notiert.

Bei der Versuchsdurchführung wurde das Prinzip der zufälligen Winkelreihenfolge angewendet, um eine unbewusste Fehlerquelle aufgrund einer potenziellen relationalen Erwartung bezüglich der Probanden so weit wie möglich zu eliminieren.

Speziell für einen beliebig ausgewählten Blendwinkel von 5° (entsprechend temporaler Blendung im Gesichtsfeld bzw. nasalem Netzhautort) wurden weitere Zeitmessungen hinsichtlich der Nachbilddauer in Bezug auf die Abhängigkeit von zusätzlichen Expositionsdauern und Laserstrahlleistungen durchgeführt.

Bei den Untersuchungen zur winkelabhängigen Blendung und der damit verbundenen Nachbilddauer lag es nahe, außer der physiologischen auch die psychologische Blendung als Funktion der Winkelabhängigkeit genauer zu betrachten. Solche Untersuchungen sind bislang nicht bekannt geworden.

Bei der Durchführung der psychologischen Blendung wurde ein kontinuierlicher (CW-Betrieb) Laserstrahl der Klasse 1 bei einer Leistung von $P = 30 \mu\text{W}$ als Blendquelle benutzt und die dadurch hervorgerufene und subjektiv empfundene Blendung der Probanden zahlenmäßig erfasst.

Dazu wurde mit den Probanden, nach einer ausführlichen Aufklärung über den Sinn und Zweck des Experimentes und nach ihrer (unverbindlichen) Zustimmung zur Teilnahme am Versuch, welche das Recht beinhaltet, jederzeit vom Versuch zurückzutreten, ein Testlauf durchgeführt, um sie mit dem Versuchsablauf vertraut zu machen.

Als Referenzpunkt für die subjektive Blendungsbewertung wurde der zentrale Blick in den Laserstrahl vereinbart, unter der Annahme, dass dort die stärkste Blendung erfolgen muss. Dieser Punkt wurde durch Absprache mit den Probanden auf einer Skala von 0 (d. h. keine Blendung) bis 10 (maximale Blendung) mit 10 bewertet, da es ihnen psychologisch am einfachsten erschien, in diesem Wertebereich die Blendung zu beurteilen.

Um eine Erwartungshaltung der Probanden bei der Blendungsbewertung auszuschließen, wurde die winkelabhängige Blendung durch beliebige Muster aufeinander folgender Blendwinkel durchgeführt. Somit konnte eine zuverlässigere Bewertung der psychologischen Blendung erzielt werden. Natürlich spielen auch Faktoren wie z. B. das individuelle Urteilsvermögen des Einzelnen, die Konzentration, die Tagesform und nicht zuletzt die Begeisterung für den Versuch selbst eine Rolle bei der Bewertung.

Da es sich um umfangreiche Messungen handelte und lange Prozeduren erforderlich waren, wurden nur bei drei Personen ausführlichere Messungen zur psychologischen Blendung durchgeführt.

Besondere Aufmerksamkeit wurde im Hinblick auf die Winkeleinstellung dem Ort des blinden Fleckes gewidmet. Dabei war der Grundgedanke zunächst, einen Laserstrahl auf den blinden Fleck so zu richten, dass er nicht wahrgenommen werden sollte. Nach tagelangen Versuchen durch Proband 1 (den Autor von [171]), gelang es nicht, dies zu erreichen, wenn man von Laserleistungen im nW-Bereich absieht. Vielmehr traten (außer bei Proband 10, dem Verfasser R) im Bereich des blinden Fleckes erhöhte Blendempfindungen auf, die als unangenehm empfunden wurden und teilweise auch von den anderen Probanden bestätigt werden konnten. Im Zusammenhang mit diesen speziellen Untersuchungen berichteten diese Probanden über ein gerötetes Auge sowie ein Druckgefühl darin bis hin zur Schläfe, was in einigen Fällen bis zum nächsten Tag andauerte.

Beim Vorbeifahren mit dem drehbar angeordneten Laserstrahl (siehe Abb. 4.39) konnte entlang einer horizontalen Linie durch Fovea und blinden Fleck eine Erhö-

hung der Schleierleuchtdichte (in einer Art transparenter Wolke/Nebel) verzeichnet werden, die immer bei einem Winkel von etwa 15° hervortrat (bzw. zwischen 11° und 20°). Es konnte nicht sicher gesagt werden, ob der Strahl an dieser Stelle nicht zu sehen war, da er möglicherweise durch Kontrastverminderung hätte verborgen sein können. Je größer die eingestellte Laserleistung war, umso größer waren dort die Effekte der Schleierleuchtdichte.

In Bezug auf Nachbilder konnte festgestellt werden, dass im blinden Fleck keine Nachbilder zu erkennen waren, jedoch in seiner näheren Umgebung schwache Nachbilder von relativ kurzer Dauer. Auch ist aufgefallen, dass nach Blendung im blinden Fleck und anschließend einäugigen Blicken auf weißes Papier temporär ein dunkler Fleck, umrandet von einem grünlichen Kreis, im Gesichtsfeld wahrgenommen werden kann, und zwar so als wäre der Bereich des blinden Flecks in seiner Ausdehnung vergrößert worden, dort wo sonst der Bereich psychologisch aufgefüllt wird.

Die Zeitmessungen können wegen, des unterschiedlichen Urteilsvermögens, mit einem Fehler von etwa 5 s bis maximal 10 s angenommen werden.

Abb. 4.42 zeigt die winkelabhängige Nachbilddauer für 3 verschiedene Probanden bei einer festen Expositionszeit von 10 s. Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Charakteristik für 3 Probanden gleich ist und sich bei zentraler Blendung die längste Nachbilddauer – in diesem Fall von 300 s – ergibt.

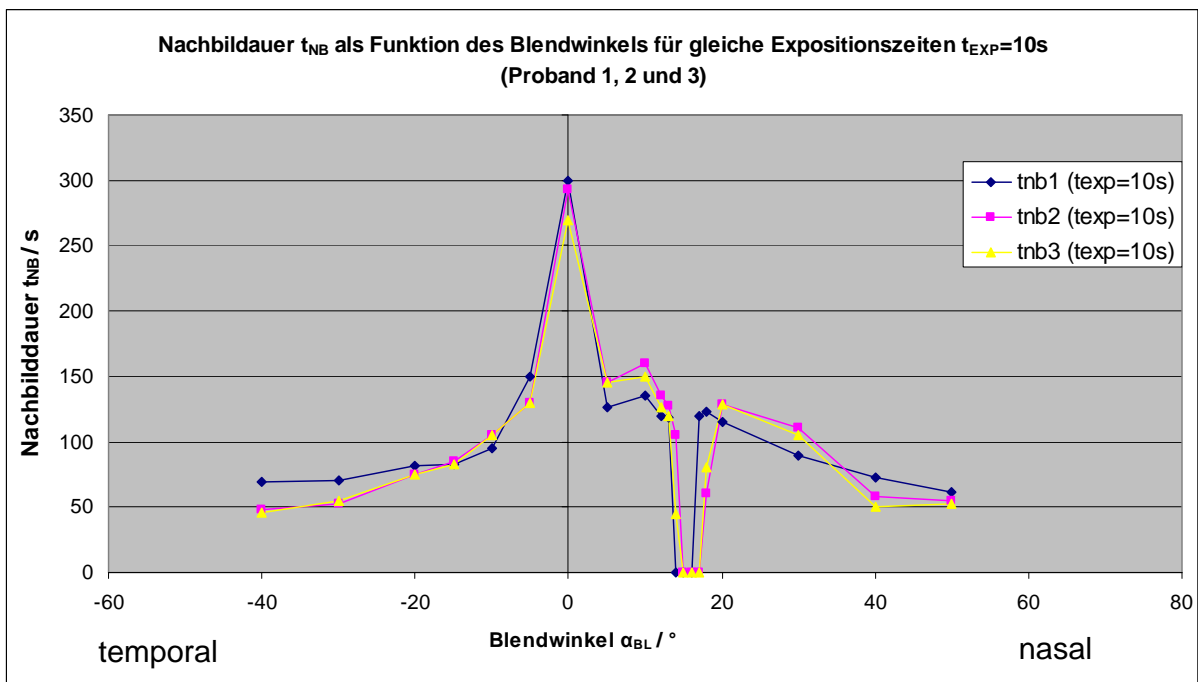


Abb. 4.42 Nachbilddauer als Funktion des Blendwinkels für Proband 1, 2 und 3 ($t_{exp} = 10$ s; bei $P = 30 \mu W$), („temporal“ steht für „schlafenwärts“ von lat. Tempus = Schläfe und „nasal“ steht für „zur Nase hin“)

Für Exzentrizitäten von 5° gegenüber dem Zentrum fällt die Nachbilddauer steil auf etwa die Hälfte ab. Für größer werdende Blendwinkel bis zu -40° (zur temporalen

Seite) tritt ein flacherer Abfall der Kurven in Erscheinung. Bei einem nasalen Winkel von 10° steigen alle Kurven leicht an. Besonderes Kennzeichen ist der Kurveneinbruch auf „praktisch Null“ bei etwa 15° . Ab 17° - 18° steigen die Kurven wieder steil auf etwa den vor dem Abfall vorhandenen Wert an und sinken für weitere nasale Exzentritäten bis 50° , ähnlich dem Verlauf auf der temporalen Seite.

In Abb. 4.43 ist die winkelabhängige Nachbilddauer für 3 verschiedene Expositionsdauern dargestellt, und zwar für eine Versuchsperson. Durch Variation der Expositionszeit lassen sich deutliche Änderungen feststellen, jedoch nicht im qualitativen Verlauf, sondern nur in quantitativer Hinsicht. Für eine Expositionsdauer von $t_{exp} = 5$ s beträgt z. B. die Nachbilddauer bei zentraler Blendung nur noch etwa dreiviertel des Wertes bei $t_{exp} = 10$ s und bei einer Exposition der Dauer von $t_{exp} = 1$ s nur noch etwas über die Hälfte. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich über den ganzen gemessenen Winkelbereich eine kürzere Nachbilddauer ergibt, wenn die Expositionsdauer verringert wird.

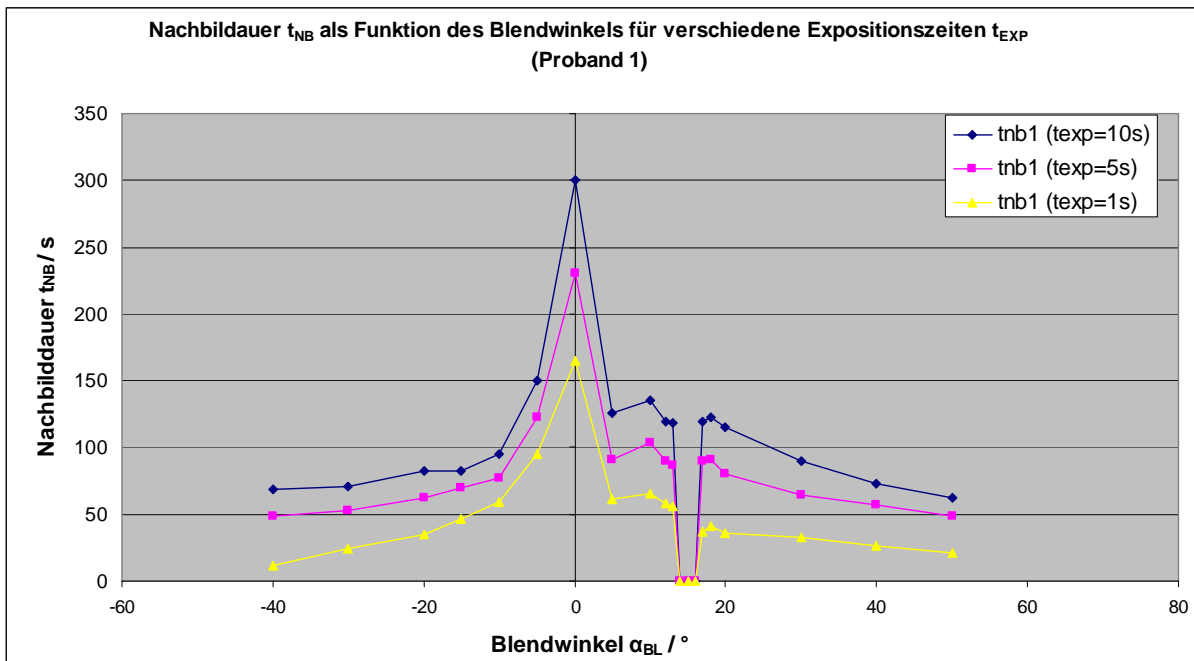


Abb. 4.43 Nachbilddauer als Funktion des Blendwinkels bei 3 verschiedenen Expositionsdauern für Proband 1 ($t_{exp} = 1$ s; 5 s und 10 s bei $P = 30 \mu W$)

In Abb. 4.44 ist die winkelabhängige Nachbilddauer, entsprechend derjenigen in Abb. 4.43 in einem Balkendiagramm dargestellt, wodurch auch der Einbruch beim Blinden Fleck besonders deutlich wird und die Bedeutung der zentralen Blendung besonders hervortritt.

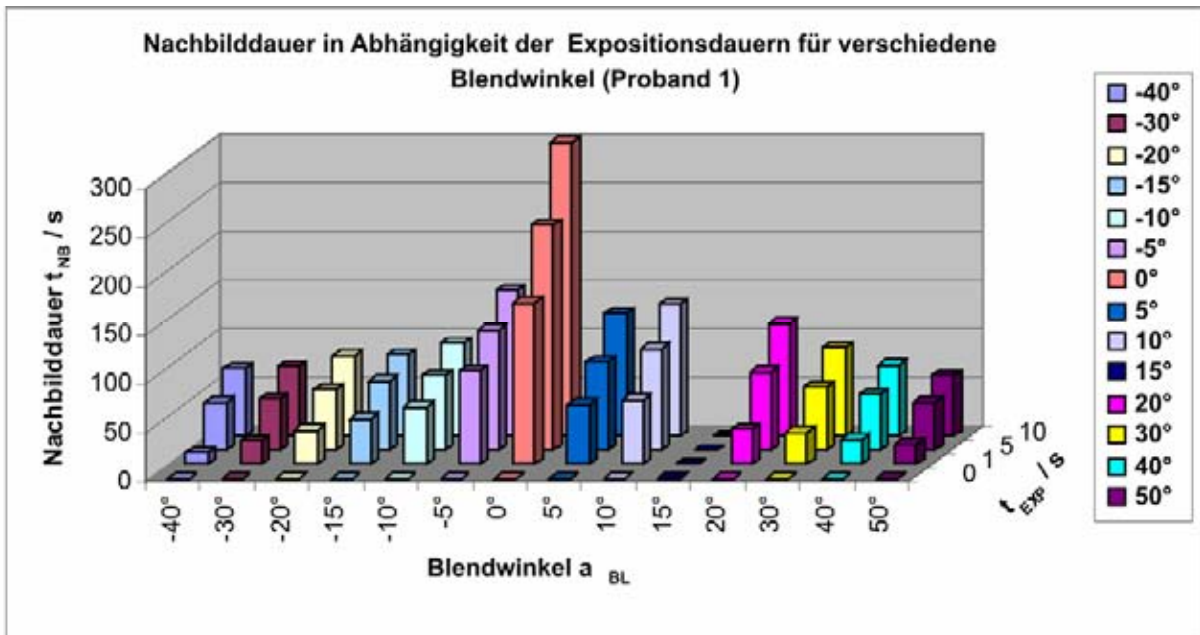


Abb. 4.44 Winkel- und expositionsdauerabhängige Nachbilddauer

Dass sich bezüglich der Winkel- und Expositionsdauer sehr ähnliche Verläufe für die verschiedenen Versuchsteilnehmer ergaben, zeigt Abb. 4.45. Der zeitliche Aufwand zur Ermittlung der in Abb. 4.45 dargestellten Kurvenverläufe betrug etwa 5 Stunden.

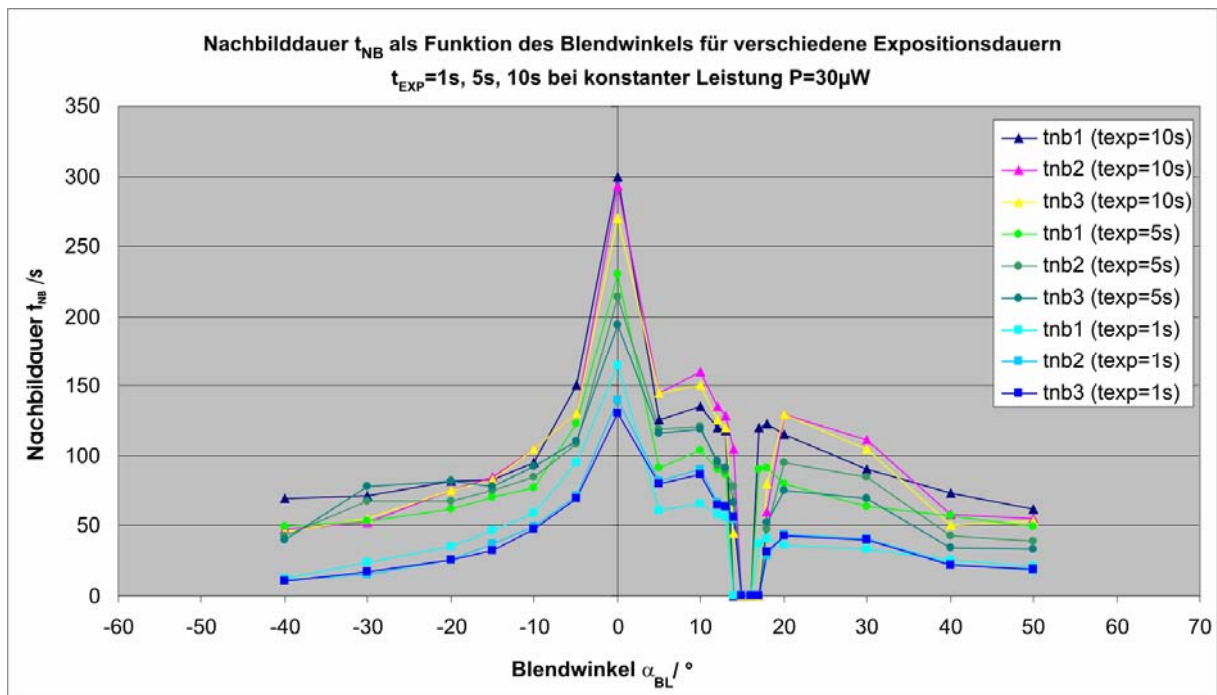


Abb. 4.45 Winkelabhängige Nachbilddauer als Funktion der Blendzeit für die Probanden 1, 2 und 3 ($t_{exp} = 1 s, 5 s$ und $10 s$ bei $P = 30 \mu W$)

Von LIE wurde ein Vergleich der Untersuchungen und theoretischen Erklärungen zur ortsabhängigen Auflösung und Erkennung unter skotopischen und photopischen Bedingungen durchgeführt. Dabei zeigte sich durchaus ein sowohl mit der retinalen Re-

zeptordichte als auch von der Ganglienzellenverteilung abhängiger Zusammenhang [307]. Diese Darstellungen betrachten aber Schwellenverhalten und sind daher nicht auf die Situation bei einer Blendung übertragbar.

Im nächsten Schritt wurde die Abhängigkeit der Nachbilddauer sowohl bezüglich der Expositionsdauer als auch der Laserstrahlleistung untersucht. Abb. 4.46 zeigt ein entsprechendes Ergebnis für einen Versuchsteilnehmer für 3 verschiedene Leistungswerte. Bei diesen Versuchen wurde nicht zentral, sondern unter einem Winkel 5° nasal geblendet.

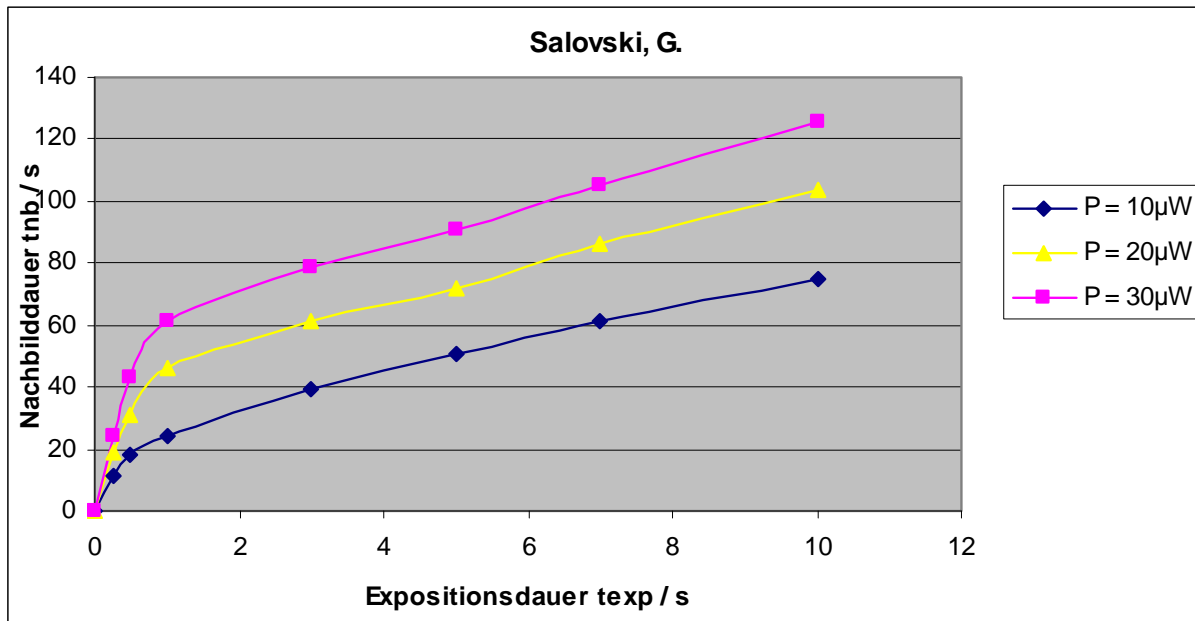


Abb. 4.46 Nachbilddauer als Funktion der Expositionsdauer bei 5° nasaler Blendung ($t_{exp} = 0,25$ s, 0,5 s, 1 s, 3 s, 5 s, 7 s und 10 s bei $P = 10 \mu\text{W}$, $20 \mu\text{W}$ und $30 \mu\text{W}$)

Abb. 4.47 enthält die entsprechenden Ergebnisse der Nachbilddauer als Funktion der Expositionsdauer für 8 verschiedene Versuchsteilnehmer.

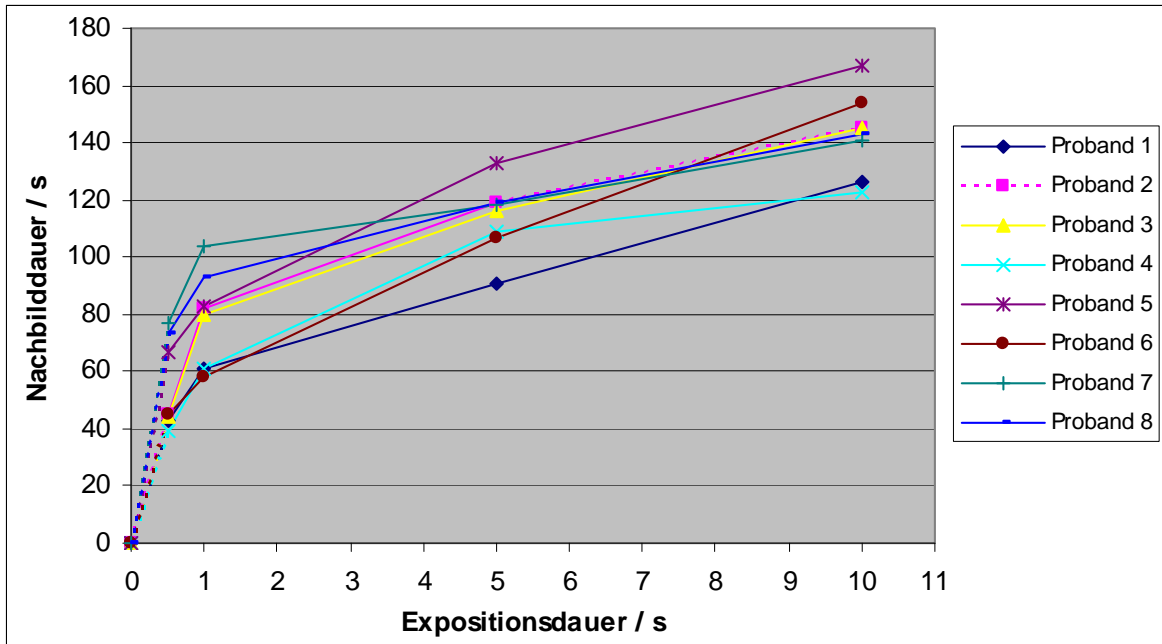


Abb. 4.47 Nachbilddauer als Funktion der Expositionszeit bei 5° temporaler Blendung ($t_{\text{exp}} = 0,5 \text{ s}; 1 \text{ s}; 5 \text{ s}$ und 10 s bei $P = 30 \mu\text{W}$)

In Abb. 4.48 sind alle Nachbilddauer-Kurven zu Mittelwertkurven zusammengefasst, und zwar für 2 verschiedene Strahlleistungswerte.

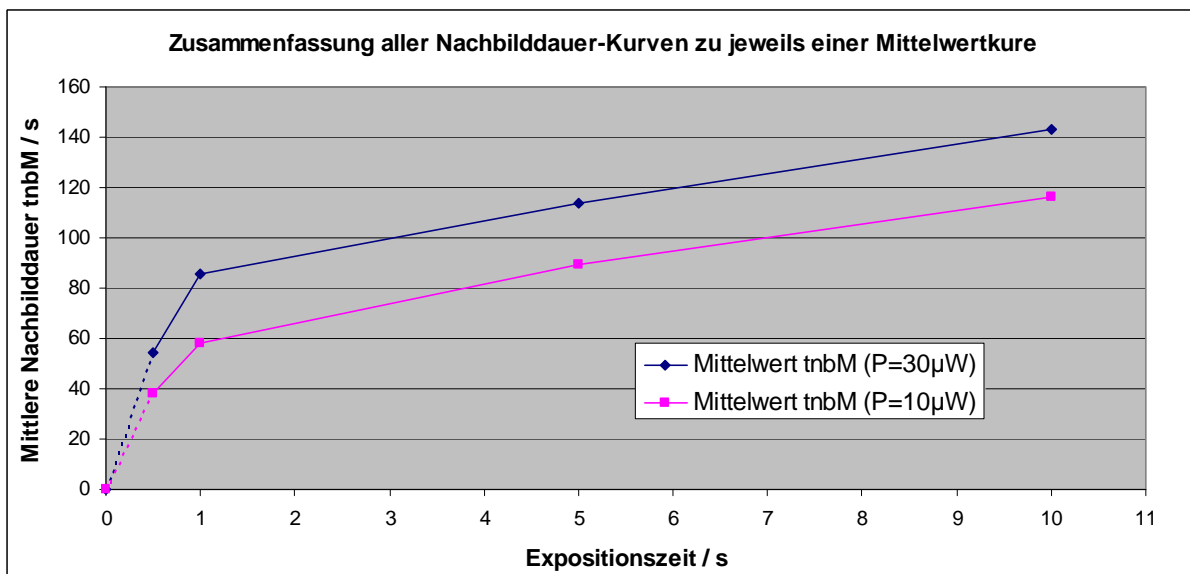


Abb. 4.48 Mittelwertkurven der Nachbilddauern für $P = 10 \mu\text{W}$ und $30 \mu\text{W}$

Betrachtet man Abb. 4.48 genauer, so lässt sich erkennen, dass sich von kleinen Expositionsauern ausgehend, d. h. für Werte unter 1 s , ein steiler Anstieg der Kurven einstellt. Ab ca. 1 s tritt eine deutliche Abnahme des weiteren Kurvenanstieges auf und es lässt sich ein sättigungsähnliches Verhalten vermuten, und zwar für Expositionsauern von mehr als 10 s . Der in Abb. 4.48 dargestellte Verlauf wurde in Abb. 4.49 noch einmal in Form eines Trendverlaufes angegeben.

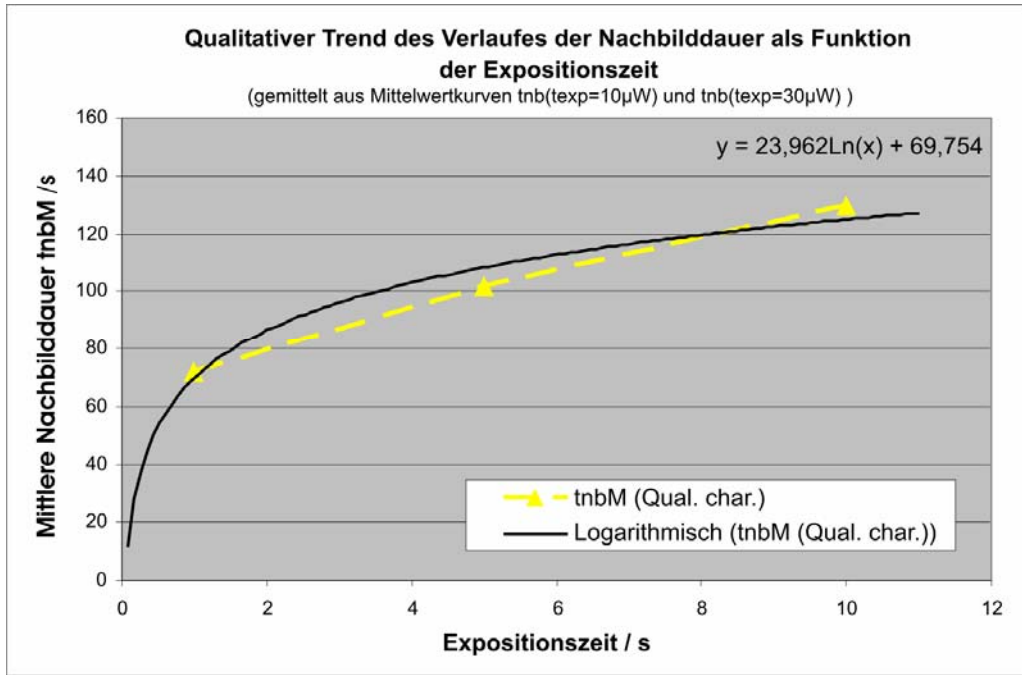


Abb. 4.49 Trendverlauf der Nachbilddauer als Funktion der Expositionsdauer (gemittelt für 2 verschiedene Strahlleistungswerte)

Schließlich kann man die Nachbilddauer auch als Funktion der Laserstrahlleistung für verschiedene Expositionsauern angeben, wie dies in Abb. 4.50 geschehen ist.

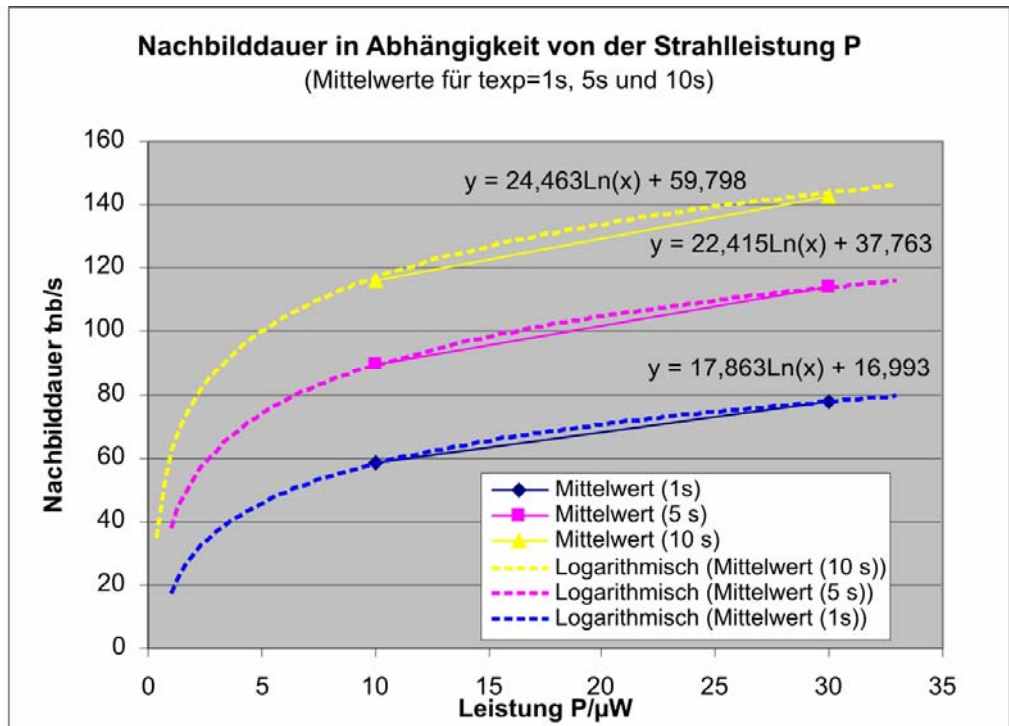


Abb. 4.50 Nachbilddauer als Funktion der Laserstrahlleistung für verschiedene Expositionsauern

Eine besonders interessante Darstellung ergibt sich, wenn man die Nachbilddauer als Funktion der Laserstrahlenergie aufträgt, wie dies für 8 Probanden in Abb. 4.51 und 4.52 getan wurde.

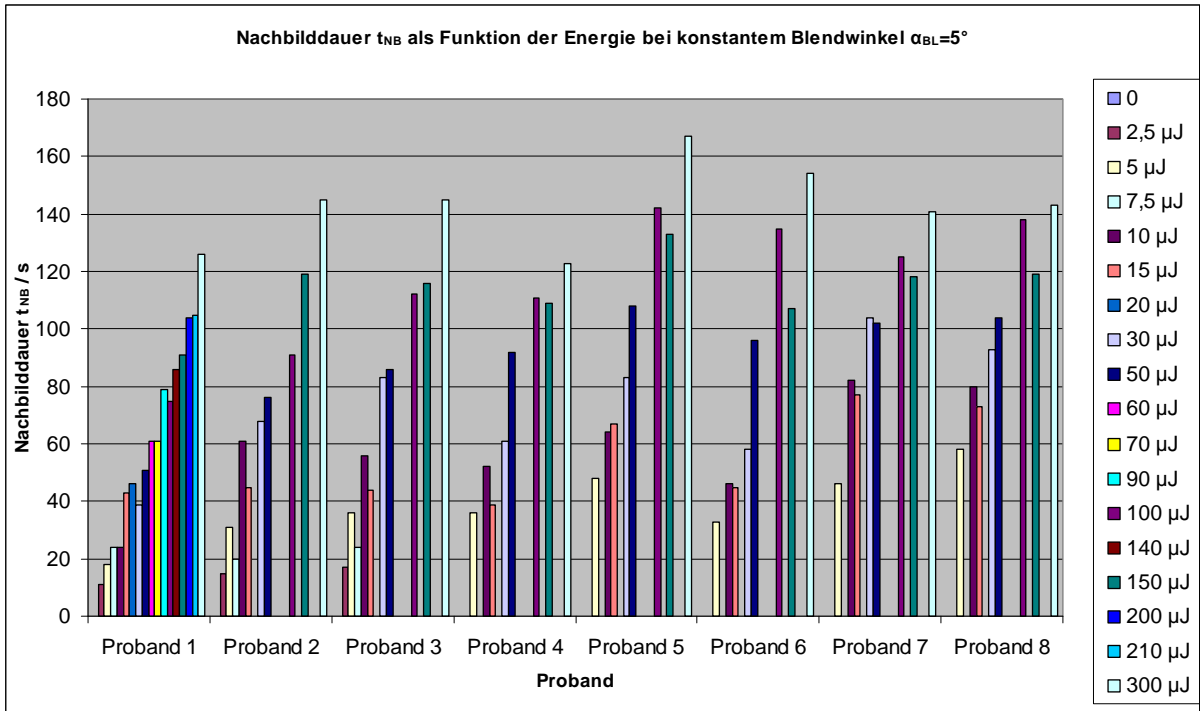


Abb. 4.51 Nachbilddauer als Funktion der Laserstrahl-Energie für 8 Probanden

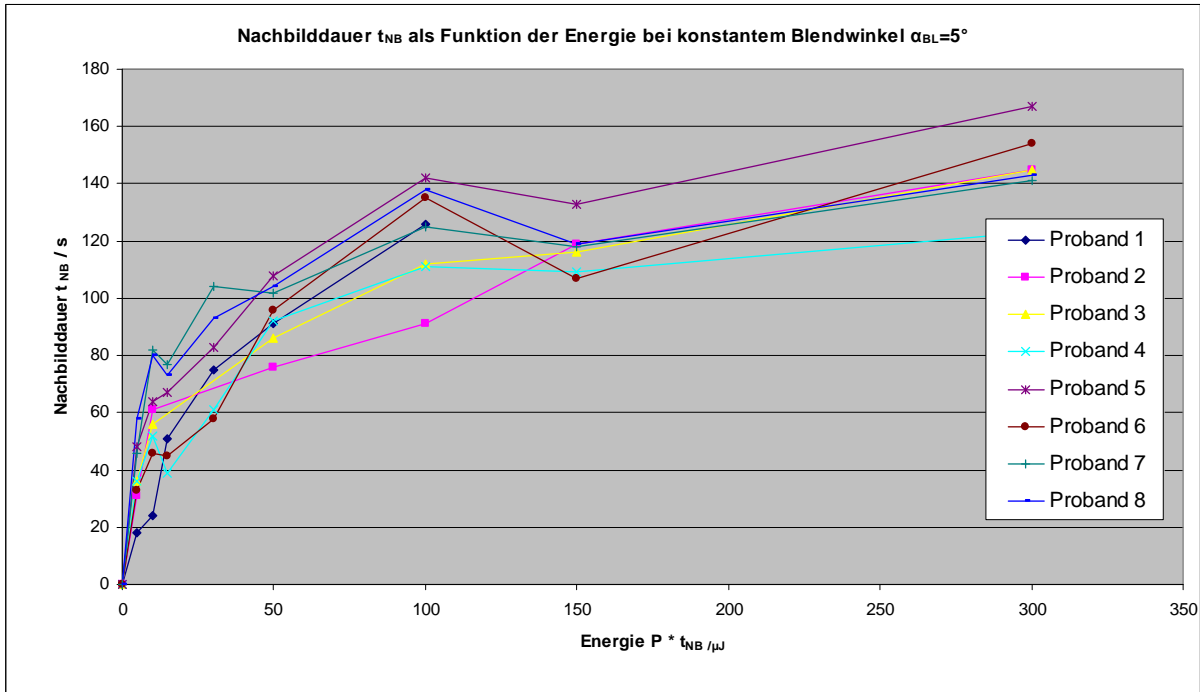


Abb. 4.52 Nachbilddauer als Funktion der Laserstrahl-Energie für 8 Probanden

Die Energiewerte lagen im Bereich von 2,5 μJ bis 300 μJ und decken somit einen relativ großen Wertebereich ab, der im Umgang mit Laserstrahlung unter Verwen-

derung von Lasern der Klasse 1 und 2 üblich ist. Eine Orientierung lässt sich zum einen aus der Laserstrahlenergie bei einer Exposition durch einen Klasse 1 Laser mit 0,39 mW und einer Zeitdauer von 1 s, also von 390 μJ , oder zum andern durch einen Laser der Klasse 2 mit 1 mW bei einer Expositionsdauer von 0,25 s, entsprechend 250 μJ , finden.

Stellt man Mittelwerte der Nachbilddauern als Funktion der Energie dar, ergibt sich der Verlauf in Abb. 4.53.

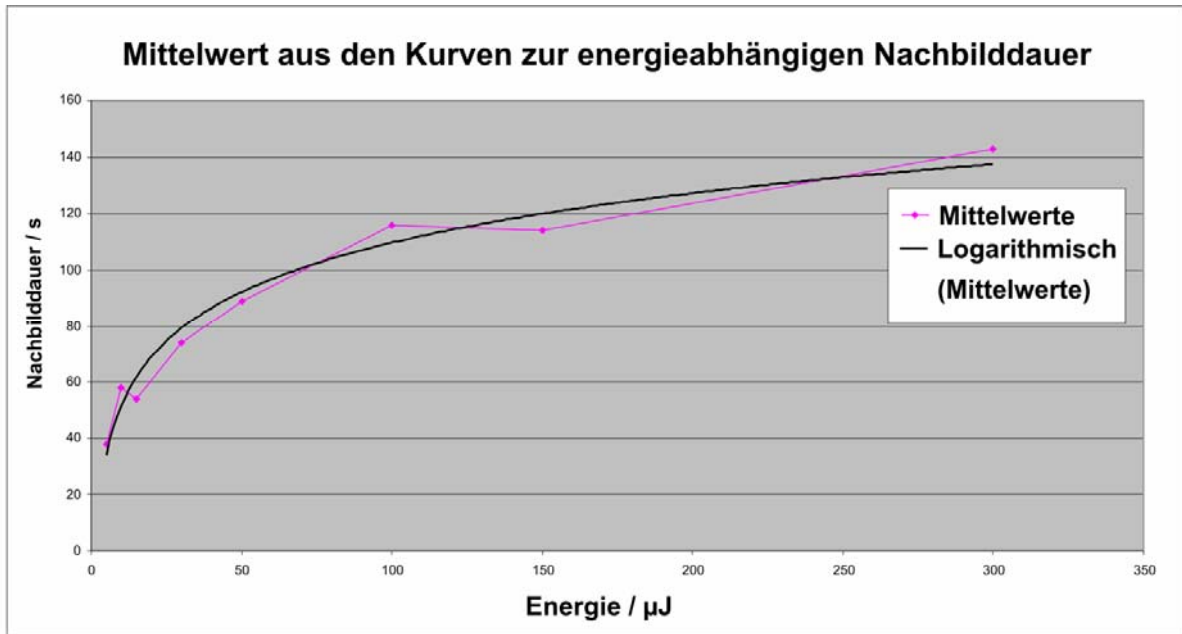


Abb. 4.53 Mittelwert und Trend der Nachbilddauer als Funktion der Energie

Daraus lässt sich der Zusammenhang

$$\frac{t_{nb}}{s} \approx 25,3 \cdot \ln\left(\frac{P \cdot t_{exp}}{\mu\text{J}}\right) - 6,7 \quad (4.4)$$

für die Nachbilddauer als Funktion von Laserstrahlleistung und Expositionsdauer formulieren – eine Gesetzmäßigkeit, die einen Zusammenhang mit dem WEBER-FECHNERSchen-Gesetz der psychophysikalischen Wahrnehmung aufweist.

Da die Beziehung gemäß Gl. (4.4) aus Messungen unter einem Blendwinkel von 5° ermittelt wurde und sich für foveale Blendung, wie z. B. Abb. 4.43 zeigt, etwa doppelt so lange Nachbilddauern ergeben, lässt sich für foveale Blendung die Nachbilddauer $t_{nb,fov}$ durch

$$\frac{t_{nb,fov}}{s} \approx 50,6 \cdot \ln\left(\frac{P \cdot t_{exp}}{\mu\text{J}}\right) - 13,4 \quad (4.5)$$

beschreiben. Entsprechende blendwinkelabhängige Beziehungen lassen sich unter Zugrundelegung der entsprechenden Ergebnisse, wie sie z. B. in Abb. 4.45 dargestellt sind, angeben.

In wieweit es zutrifft, dass das menschliche Auge auf einen Stimulus der kleiner als $3,6'$, entsprechend ca. 1 mr , ist, nur noch auf der Basis der gesamten physikalischen Energie reagiert, wie es von BLACKWELL [156] berichtet wird, kann durch die vorliegenden Untersuchungen nicht bewertet werden, da erstens nur eine Wellenlänge zum Einsatz kam und zweitens keine Größenveränderung der scheinbaren Quelle (Strahltaile) und der Strahl-Divergenz vorgenommen wurde. Es ist aber auch in diesem Falle so, dass nicht von der unmittelbaren Gültigkeit der V-Lambda-Kurve ausgegangen wird. Zur Bewertung der vorstehenden Aussage bezüglich der energetischen Abhängigkeiten bedürfte es einer umfangreichen Untersuchung bei verschiedenen Wellenlängen, Quellengrößen und Strahlkonfigurationen.

In Abb. 4.54 ist die winkelabhängige psychologische Blendungsbewertung für eine einäugige und in Abb. 4.55 für beidäugige Blendungswahrnehmung, d. h. wenn entweder das nicht geblendete Auge geschlossen oder aber geöffnet war, dargestellt.

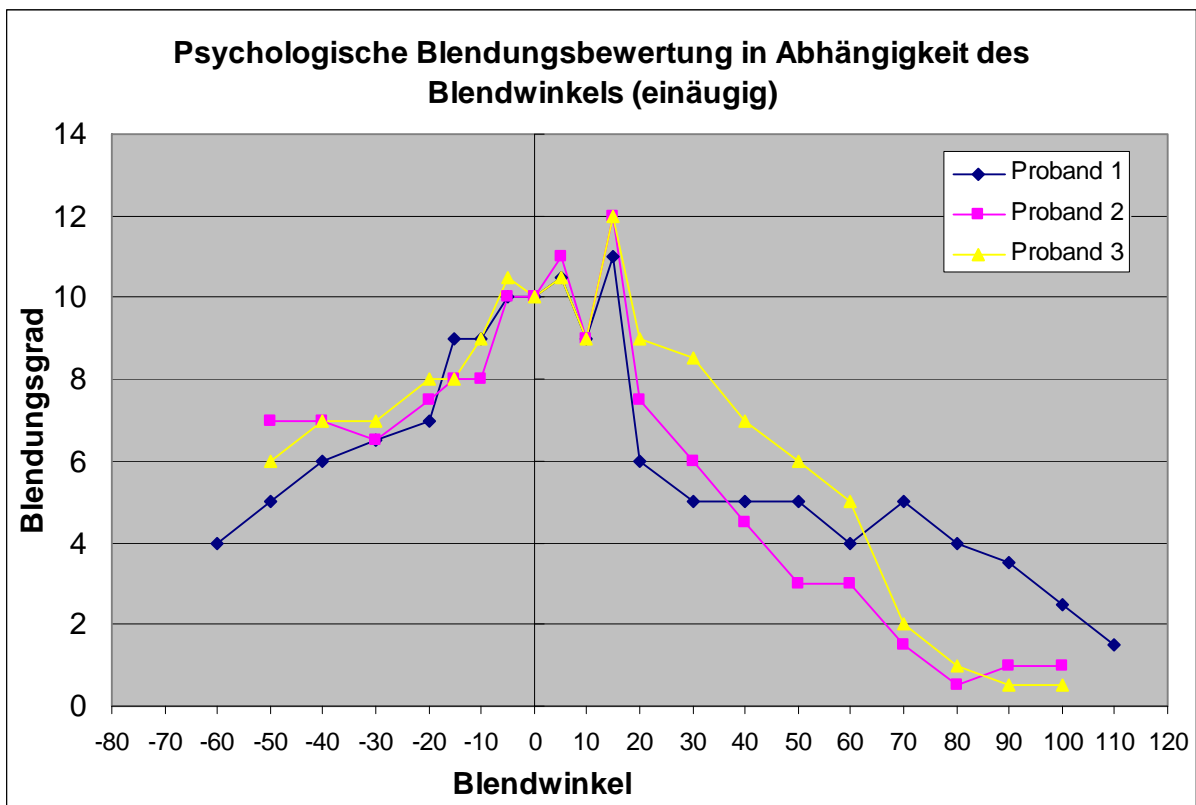


Abb. 4.54 Psychologische Blendungsbewertung in Abhängigkeit des Blendwinkels für 3 Probanden bei einäugiger Blendungsbewertung

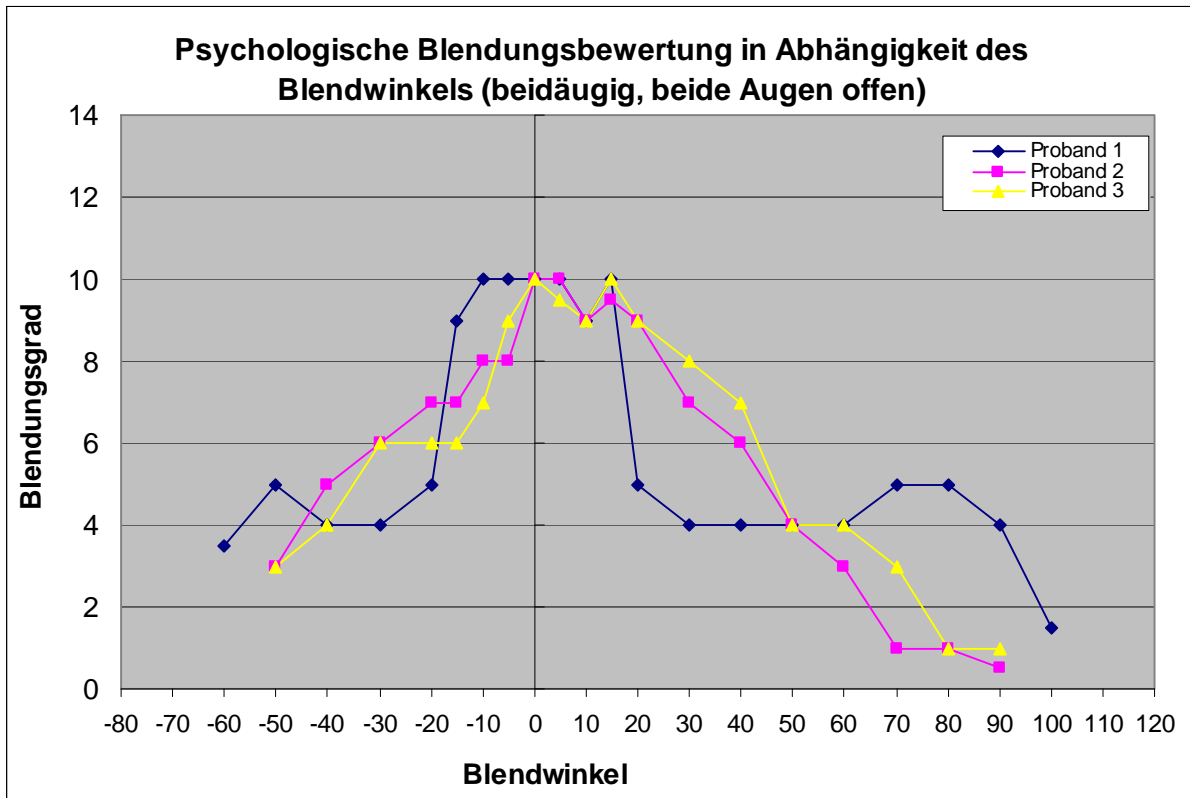


Abb. 4.55 Psychologische Blendungsbewertung in Abhängigkeit des Blendwinkels für 3 Probanden bei beidäugiger Blendungsbewertung

Schließlich ist in Abb. 4.56 ein Vergleich der winkelabhängigen Blendungsbewertung bzw. Nachbilddauer dargestellt.

In den durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass der Blendwinkel einen Einfluss auf die Blendung, deren Beurteilung und die Nachbilddauer hat. Die Unregelmäßigkeiten bei den Blendwinkeln von 5° jeweils in temporaler und nasaler Richtung, sowie die erhöhte Blendempfindung bei gleichzeitigem Fehlen des Nachbildes bei 15° im Bereich des blinden Flecks können folgende Ursachen haben:

Wenn die Makula genauer betrachtet wird, so lässt sich feststellen, dass sie von dem sogenannten Makulawall umgeben ist, in dem sich eine höhere Konzentration von Schaltzellen befindet. Diese Eigenschaft kann unter Umständen für den hier beobachteten Effekt bei 5° verantwortlich sein. Durch die im Wall angehäuften Zellen kann es zur erhöhten Streuung und Reflexion des Strahls kommen, wodurch dann weniger Licht auf die Photorezeptoren darunter einfällt. Dadurch würden diese weniger gereizt werden und es könnte eine Verkürzung der Nachbilddauer erklärt werden.

Ein Blick mit dem Ophthalmoskop auf den Augenhintergrund (Fundus oculi) zeigt, dass das Gebiet der Fovea dunkler ist als die Umgebung. Dies liegt daran, dass dort ein zusätzliches Pigment, nämlich das Makulapigment Xanthophyll, vorhanden ist.

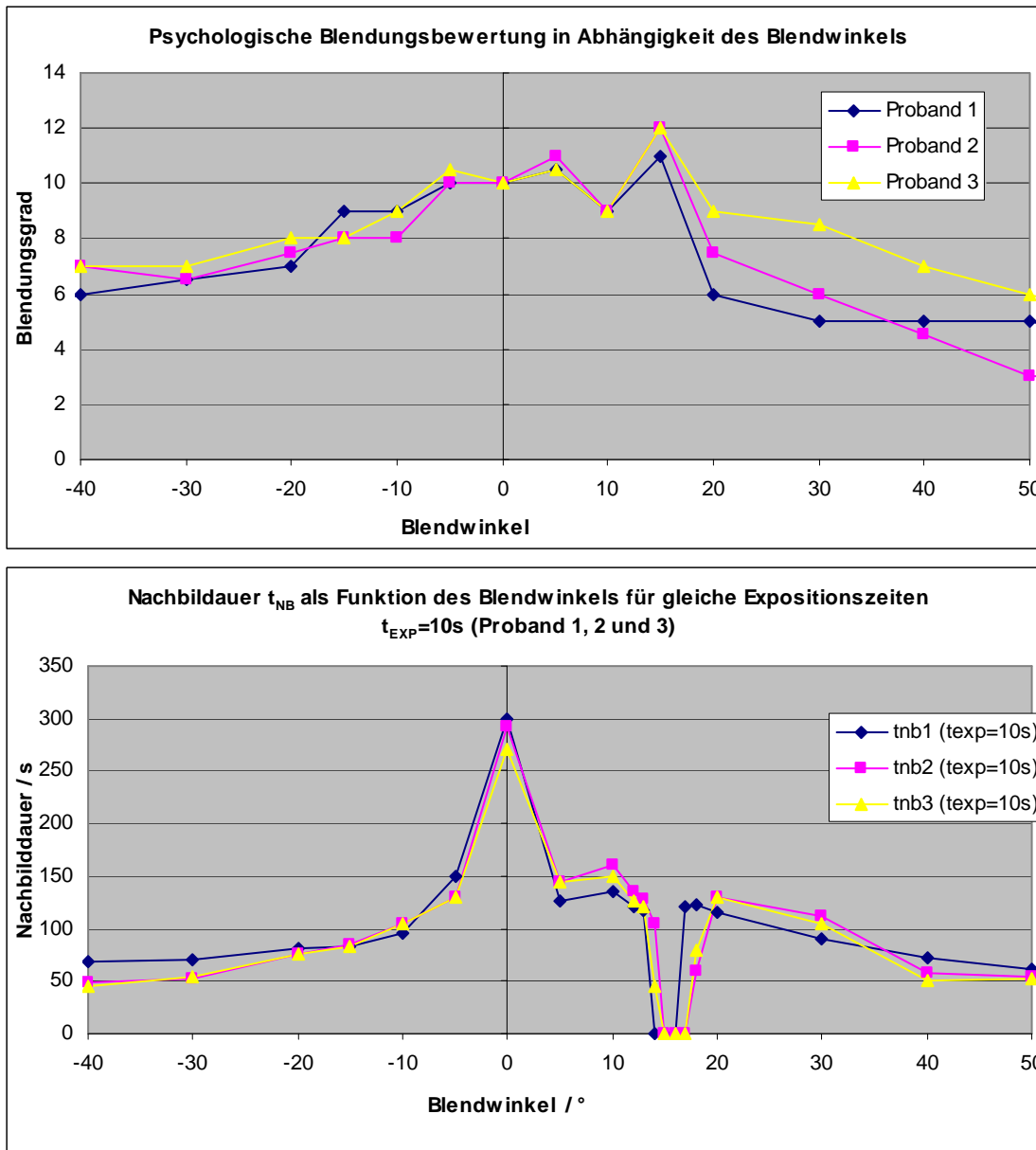


Abb. 4.56 Vergleich der Blendungsempfindung und der Nachbilddauer als Funktion des Blendwinkels

Für das beschriebene Phänomen bei 15°, d. h. im blinden Fleck, können für die erhöhte Schleierleuchtdichte und die damit verknüpfte erhöhte Blendempfindlichkeit die anatomischen Eigenschaften der Papille und ihrer Umgebung verantwortlich sein. Im Bereich der Papille fehlt bekanntlich aufgrund des Sehnervs das dunklere retinale Pigmentepithel, welches für die weitgehende Absorption des „überflüssigen“ Lichtes zuständig ist. Infolgedessen kann gewissermaßen ein auf die Papille gerichteter Laserstrahl tiefer ins Gewebe eindringen, und dort größere Streuung und Reflexionen verursachen. Durch Streuung kann es zur Überlagerung zwischen rückgestreuter und eindringender Strahlung und zur Überhöhung der Intensitäten in diesem Bereich kommen, was zu einer Reizung der in der Nachbarschaft befindlichen Photorezeptoren führen und eine Lichtempfindung verursachen kann. Durch die erhöhten Reflexionen und Streueignisse kann es zur erhöhten Aufhellung im Augeninneren kommen.

men, die die Schleierleuchtdichte vergrößert und somit weiter entferntere Photorezeptoren stimulieren kann.

COBB [118] hat in seinen Untersuchungen zur ortsabhängigen Sehschärfe schon festgestellt, dass die „blasse“ Farbe des „Nervenkopfes“, wie es schon HERING [209] hervorgehoben hat, zu einer erhöhten Streuung führen sollte.

Der Grund dafür, dass bei einem Probanden (Proband 10, der Verfasser R) dieser Effekt nicht zu beobachten war, kann möglicherweise auf getrübbte Augenmedien (z. B. Linsentrübung, Katarakt) zurückzuführen sein.

Die Abnahme der Nachbilddauer in der Peripherie der Netzhaut kann damit zusammenhängen, dass mit größer werdender Entfernung vom Netzhautzentrum zum einen die Zapfendichte abnimmt und zum anderen die Größe der sogenannten rezeptiven Felder zunimmt. Außerdem kann bereits durch Reflexionen an der Hornhaut sowie Reflexionen und Streuung an bzw. in der Linse bei immer größerem Winkel der ins Auge gelangende Laserstrahl immer stärker abgeschwächt werden, wodurch dieser mit immer geringerer Intensität auf die Rezeptoren auftrifft.

Hinsichtlich des qualitativen Verlaufes zeigt die Kurve der blendwinkelabhängigen Nachbilddauer Ähnlichkeiten mit der Kurve der ortsabhängigen Sehschärfe und kann daher mit der Verteilung der Zapfen in Zusammenhang gebracht werden. Möglicherweise ist aber auch die Summe von Zapfen und Stäbchen bei einer weiteren Analyse zu berücksichtigen.

Im Zusammenhang mit der Expositionsdauer und der Leistung kann einmal gesagt werden, dass sich mit Vergrößerung dieser beiden Parameter auch eine Vergrößerung der Nachbilddauer und der Blendempfindung erreichen lässt.

In zeitaufwändigen Teiluntersuchungen wurde bei einem Probanden eine zweidimensionale Nachbilddauerkarte der Netzhaut messtechnisch aufgenommen. Das Ergebnis ist in den Abb. 4.57 und 4.58 dargestellt und in den Abb. 4.59 und 4.60 mit der Theorie verglichen.

In wieweit es zutrifft, dass die Farbwahrnehmung nicht überall auf der Netzhaut gleich ist, also z. B. in der Peripherie ein anderer Farbeindruck vorliegen kann als im zentralen Gesichtsfeld, konnte in dieser Teilstudie nicht ermittelt werden.

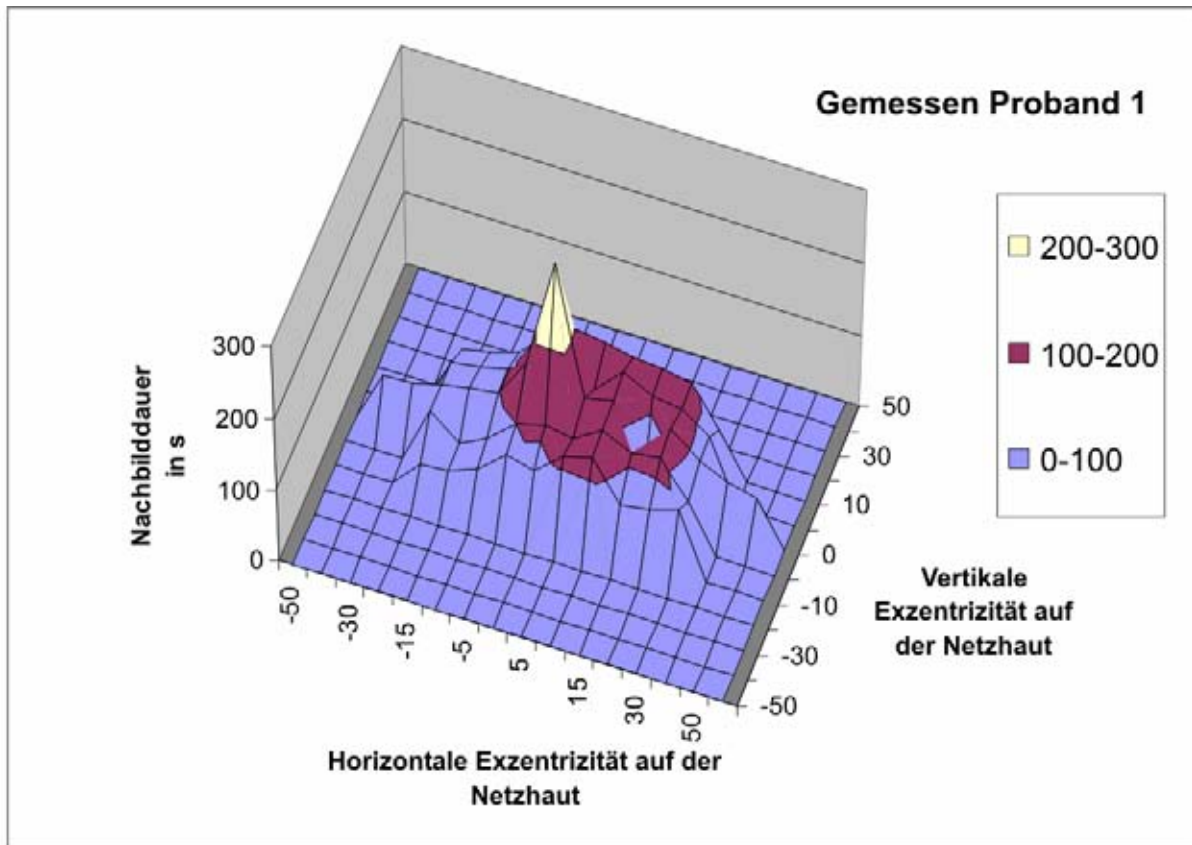


Abb. 4.57 Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels (Testweise gemessen für vertikale Auslenkung von $\pm 15^\circ$)

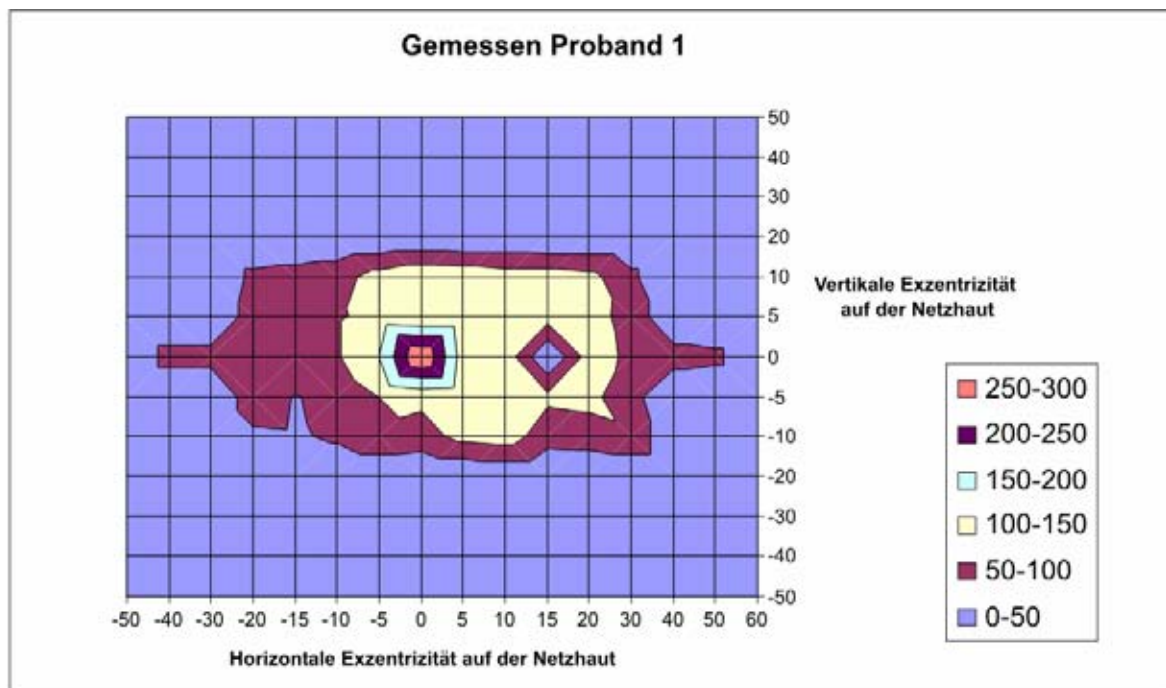


Abb. 4.58 Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels (Testweise gemessen für vertikale Auslenkung von $\pm 15^\circ$)

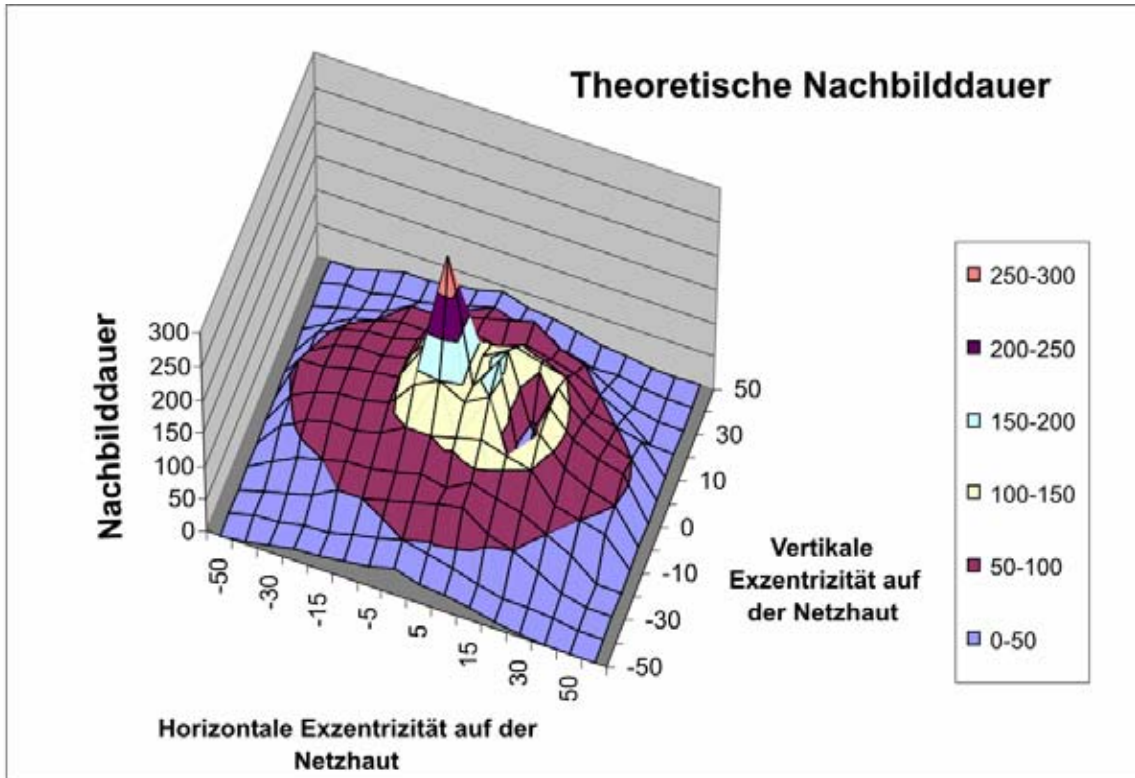


Abb. 4.59 Theoretische Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels

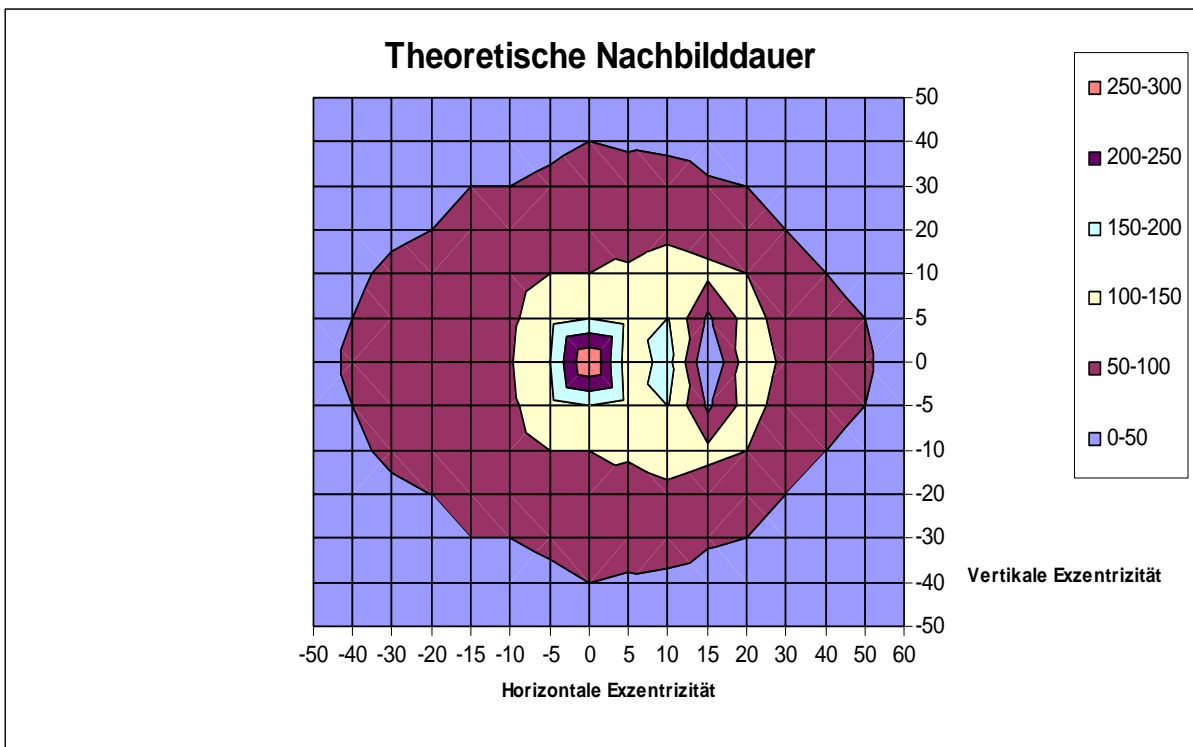


Abb. 4.60 Theoretische Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels

Die gemessenen Nachbilddauern korrelieren auch mit den bei demselben Probanden im Selbstversuch ermittelten Lagen des blinden Flecks auf der Netzhaut, die in Abb. 4.61 dargestellt sind. Dazu richtete der Versuchsteilnehmer seinen Blick mit einem Auge senkrecht auf ein Blatt und fuhr mit einem Bleistift entlang der Papieroberfläche. Wenn er dabei die Spitze des Stiftes nicht sah, befand sich diese im Bereich des blinden Flecks. Auf diese Weise konnten Markierungen gesetzt werden, die die Grundlage für die Darstellung in Abb. 4.61 waren.

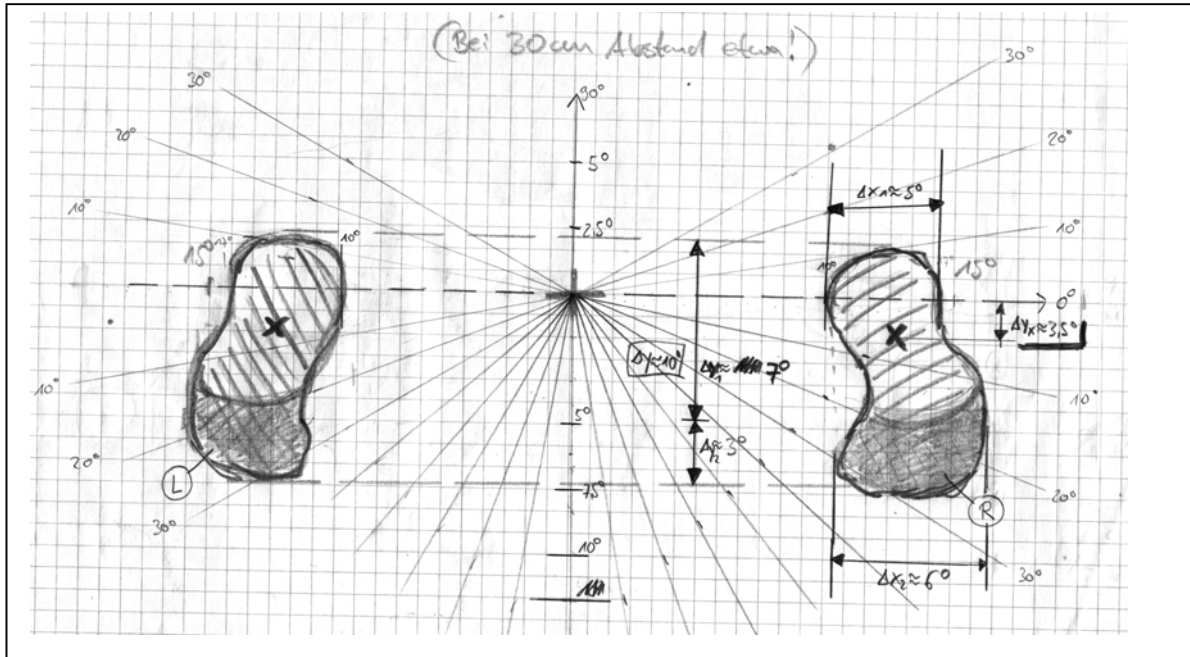


Abb. 4.61 Untersuchung der Form und Ausdehnung des blinden Flecks

Die erzielten Ergebnisse können verglichen werden mit den Angaben in einer Empfehlung der DOG [202], wonach der Mittelpunkt des blinden Flecks nach einer Isopterenbestimmung (Bestimmung gleicher Leuchtdichteempfindlichkeit im Perimeter) bei 14° temporal liegt, sein Durchmesser ca. 6° beträgt und $2/5$ -tel ober- sowie $3/5$ -tel unterhalb des horizontalen Meridians liegen. Die hier dargestellten Ergebnisse sind im Wesentlichen in [171] dokumentiert und wurden teilweise inzwischen veröffentlicht [83]. Es hat sich deutlich gezeigt, dass die Nachbilddauer stark vom Ort der jeweiligen Stimulation abhängt.

Im Hinblick auf die Expositionsdauer und auf die Laserleistung, mit der die zu einer temporären Blendung führende Laserstrahlstimulation erfolgt, lässt sich ebenfalls aus den Ergebnissen eine Dosisabhängigkeit ableiten.

Um eine Einordnung der Nachbilddauer, die in diesen Teiluntersuchungen als Abbruchkriterium verwendet wurde, zu gewinnen, wurde vom Verfasser R außerdem sowohl ein Sehschärfetest als auch ein Lesestörtest im Anschluss an eine foveale Blendung durchgeführt. Dazu wurde die Nachbilddauer für eine feste Laserstrahlleistung von $30 \mu\text{W}$ für zwei Expositionsauern, nämlich einmal für 10 s und beim zweiten Mal für 20 s ermittelt, und zwar sowohl für das linke als auch für das rechte Auge. Bei diesen Parametern wurde zum Vergleich je ein Test zur Ermittlung der Lesestörzeit und ein solcher zur Bestimmung der Zeitdauer, während der die Sehschär-

fe beeinträchtigt war, durchgeführt. Die Ermittlung der Lesestörzeit wurde ähnlich durchgeführt wie in Abschnitt 4.3.4 dargestellt, indem versucht wurde, einen unbekanntem Text zu lesen. Der Sehschärfetest fand so statt, wie er auch bei der Messung gemäß Abschnitt 4.3.3 Verwendung fand, d. h. indem versucht wurde, die Orientierung von Landolt-C's auf einer Tafel in 4 m Entfernung zu erkennen.

Gerade bei dieser Methode zeigte sich, dass die Wahl der letzten Zeile, entsprechend dem größten Visuswert, mitunter insofern Schwierigkeiten machte, dass für deren „sichere“ Erkennung unter Umständen unverhältnismäßig lange Zeiten benötigt wurden und andererseits eine darüber angeordnete Zeile, entsprechend einem kleinerem Visuswert, relativ schnell auswendig gelernt werden konnte. Diese Fehlermöglichkeiten zeigten sich auch in der hier durchgeführten Vergleichsmessung in den in Tab. 4.12 aufgeführten Ergebnissen. Dort wurden zwei Werte eingeklammert, um zu zeigen, dass es sich dabei um extrem lange Zeitdauern handelte, während derer versucht wurde, eine noch sicherere Aussage bezüglich der Orientierung der Landolt-C's zu erzielen. Aus diesen Vergleichsuntersuchungen unter vergleichbaren Expositionsbedingungen lässt sich ableiten, dass wahrscheinlich eine Bestimmung der Lesezeitstörung weniger fehlerbehaftet sein kann als eine Visustestung mit Landolt-C's.

Tab. 4.12 Vergleich der Nachbilddauer mit der Lesestörzeit und der Zeitdauer bis zur Wiederkehr des normalen Visus

Parameter ⇒	30 μW, 10 s		30 μW, 20 s	
	links	rechts	links	rechts
Nachbilddauer t_{nb} / s	345	280 250 270	310	380 312
Lesestörzeit t_{impVis} / s	33 35 36 35	68 55 90	54 53 54	70 70
Sehschärfe (Visus) t_{VA} / s	35 60 (120)	90 80 97	56 62 53	(165) 75

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass eine Nachbilddauer zwischen 300 s und 350 s gleichbedeutend mit einer Lesestörzeit von 35 s bis 70 s ist und eine Visusbeeinträchtigung von 60 s bis 90 s bedingt, d. h. dass die Sehfunktionsbeeinträchtigung ungefähr 10 % bis 30 % der Nachbilddauer beträgt.

In wieweit sich die Abhängigkeit der Sehschärfe als Funktion der retinalen Exzentrizität, wie sie von Le GRAND als Ergebnis vorliegender Forschungen angegeben wurde [125, s. auch 294], auch in den hier ermittelten Ergebnissen der blendungswinkelabhängigen Nachbilddauern und der psychologischen Blendungsbewertung widerspiegelt, kann ohne weitere detailliertere Untersuchungen nicht angegeben werden. Die erwartete Abnahme der Sehschärfe mit wachsender Exzentrizität ist aber als ein Kriterium bei der Lesefähigkeit wenig aufschlussreich, da diese von den Fähigkeiten der zentralen Sehschärfe abhängt, und wurde deshalb – und in Anbetracht des damit verbundenen erheblichen Zeitbedarfs – auch nicht näher untersucht. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich die ermittelten winkelabhängigen Nachbilddauern in vergleichbarer prozentualer Art und Weise auch auf die Lesestörzeit und Sehschärfe in der Peripherie übertragen lassen, wie es in Tab. 4.12 für zentrale Blendung zu entnehmen ist. Dabei ist natürlich zu beachten, dass in der Peripherie auch ohne Blendung nur wesentlich geringere Sehfunktionswerte für die Lesefähigkeit und Sehschärfe erzielt werden können, was nicht zuletzt an der peripherwärts deutlich abnehmenden Dichte der Zapfen liegt.

4.3.6 Untersuchungen zum Verlauf der Nachbildfarben

Man kann, wie es auch SCHANDA ausdrückt [291], zunächst davon ausgehen, dass die psychische Antwort auf eine Lichtstimulation mit den fotochemischen Vorgängen, die in den Fotorezeptoren stattfinden, in Beziehung steht. Beim Farbsehen sind dies die Zapfen und daher kann davon ausgegangen werden, dass die Zapfen-Erregungs-Spektren als fundamentaler Vorgang proportional zur Absorption der jeweiligen Zapfepigmente sind. Diese Betrachtung lag auch den verschiedenen Festlegungen durch die CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) zugrunde [291].

Wenn aber von Farben die Rede ist, dann muss man sich stets vor Augen führen, dass es sich dabei um eine menschliche Wahrnehmung handelt und dass sich demzufolge auch individuelle Abweichungen von den in Standardfunktionen festgelegten Werten, die auf Mittelwerten mehrerer Beobachter basieren, ergeben können.

4.3.6.1 Vor-Untersuchungen mit Farbvorgabe

In weiteren Versuchen wurden unterschiedliche Farbdarstellungen, zum Vergleich mit der Nachbildfarbe, erprobt.

Dabei zeigte sich die besondere Schwierigkeit, die darin lag, dass es schwer ist, sich an bestimmte Farben, die man wahrgenommen hat, zu erinnern. Deshalb war anfangs daran gedacht worden, die momentanen Wahrnehmungen z. B. akustisch aufzuzeichnen, um einen eventuellen „Erinnerungsfehler“ auszuschließen. Berücksichtigt werden musste, dass bei der Farbnomenklatur, d. h. der Liste der Farbnamen, nur von relativ wenigen Farbnamen Gebrauch gemacht wird. Hinzu kommt, dass wenn von einer Farbe gesprochen wird, die wahrgenommen wird, eine andere Person eine davon abweichende Wahrnehmung haben kann. Es ist daher davon auszugehen, dass trotz ein und desselben Netzhautbildes, nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass auch alle Personen dieselbe Wahrnehmung haben werden.

Eine Farbangabe bezüglich des Nachbildes anhand einiger weniger ausgewählter Farben, wie Grund- und deren maximal gesättigte Mischfarben, wie in Abb. 4.62 dargestellt, ist für die Testpersonen nicht möglich. Diese Darstellung schließt eine Überbeanspruchung der Testpersonen aus, die Differenz zwischen angebotener und gesehener Farbe, bezüglich des Farbtons und der Helligkeit, ist allerdings so groß, dass eine Zuordnung nicht möglich ist.

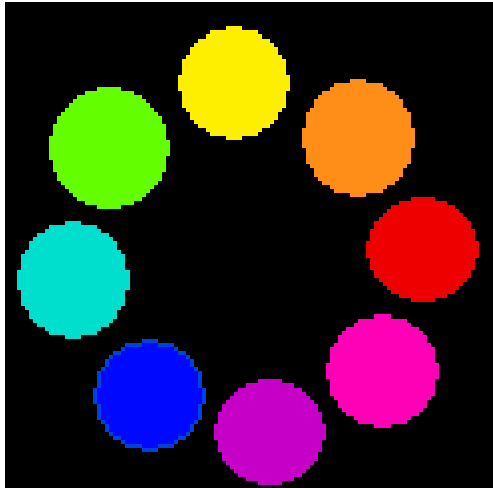


Abb. 4.62 Ausgewählte Farben

In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche Farbdarstellungen, zum Vergleich mit der Nachbildfarbe, erprobt, denn es ist für eine Versuchsperson nicht immer einfach, eine wahrgenommene Farbe eines Nachbildes so zu beschreiben, dass eine andere Person die entsprechenden Angaben zweifelsfrei verstehen kann. Daher werden der Versuchsperson ausgewählte Farbdarstellungen zum Vergleich mit der jeweiligen Nachbildfarbe angeboten.

Das CIE-Diagramm bezieht sich in seiner Darstellung zum einen auf einen Helligkeitswert, zum anderen ist nur ein geringer Teil davon mit dem Computer darstellbar. Dies führt zu großflächigen Gebieten gleichen Farbtons und schließt somit eine eindeutige Verlaufsbeschreibung aus.

Die Darbietung eines vollständigen Farbkreises einschließlich einer Helligkeitsbewertung bietet der Testperson die Möglichkeit durch die lineare Darstellung eigenständig einen Verlauf der Nachbildphase angeben zu können.

Der konkrete Aufbau des Farbkreises wurde variabel gestaltet, um in Vorversuchen die für die Testpersonen und die Auswertung optimale Einstellung zu finden und unterschiedliche Messreihen vergleichen zu können.

Abbildung 4.63 zeigt Beispiele zur Farbkreisdarstellung, ähnlich denjenigen in Abb. 4.1 („Auswahl einiger Nachbildfarbtafeln“).

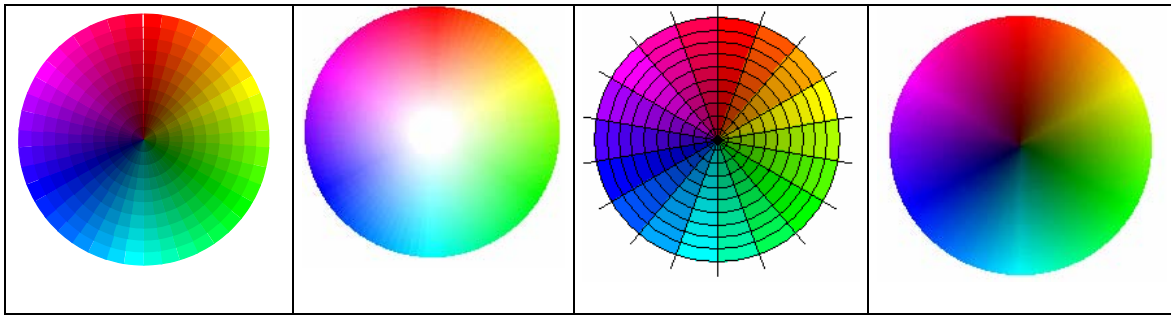


Abb. 4.63 Beispiele zur Farbkreisdarstellung

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden mit dem in Abschnitt 4.3.6.2 beschriebenen Messaufbau durchgeführt. In Selbstversuchen sollte zunächst der entstehende Fehler durch abweichende Farbangaben oder -eindrücke bei Messungen untersucht werden. Hierzu wurden jeweils 3 Messungen für 3 verschiedene LEDs, und zwar Rot, Grün und Blau, und für 2 unterschiedliche Darstellungsformen des Farbkreises durchgeführt (s. Abb. 4.64).

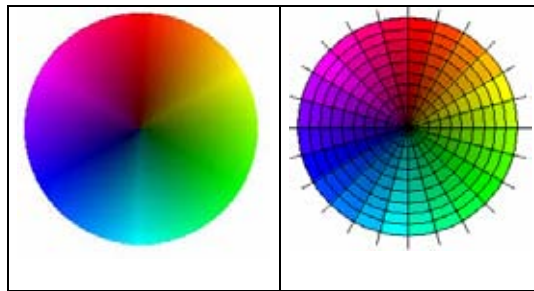


Abb. 4.64 Zwei unterschiedliche Farbkreisdarstellungen

Die kontinuierliche Darstellung (s. Abb. 4.64 links) wurde aus 200 radialen Schritten mit 0,4-prozentiger Helligkeitsabnahme nach Innen und 198 Schritten azimuthal/tangential gebildet. Die diskrete Darstellung (s. Abb. 4.64 rechts) wurde durch 10 Schritte radial mit einer 7-prozentigen Helligkeitsabnahme nach Innen und 24 Schritten azimuthal/tangential gebildet. Zudem wurden hier die Farbschritte durch Ränder voneinander abgegrenzt.

Den Erfahrungen aus den ersten Vorversuchen war insofern Rechnung zu tragen, dass Nachbilder die Tendenz zeigten, gewissermaßen im „Dunkeln“ zu verschwinden, d. h. zum Beispiel als ein „schwarzes Grün“. Daher konnte man in einem Farbkreis, der innen geringere Sättigungswerte aufwies als außen gewisse Vorteile erwarten, soweit es die abschließenden Farbangaben im Nachbildverlauf betraf. Dieser Erkenntnis wurde dadurch Rechnung getragen, dass sich zum einen ein entsprechender Wechsel im Farbverlauf und zum anderen noch eine Zoomfunktion einschalten ließ (siehe Abb. 4.65 und 4.66).

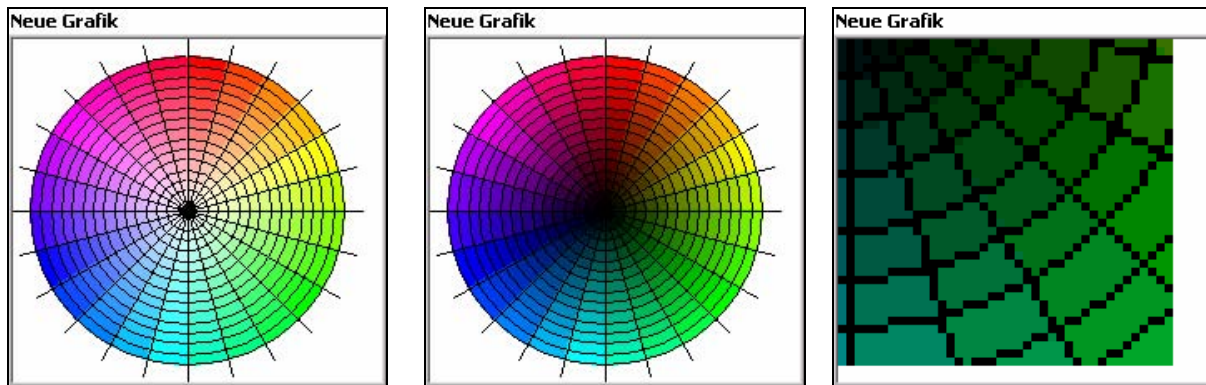


Abb. 4.65 Verfügbare Darstellungen des Farbkreises **Abb. 4.66** Zoomfunktion

Nach einem 5 Sekunden langen Vorleuchten folgt eine ebenso lange Blendung bei jeweils einer Leistung von 2 mW. Da es hier nur um den Wiedergabewert der Farbangaben, also die RGB-Werte, geht, wird nachfolgend nicht weiter auf den Verlauf der Farben eingegangen.

Mit 8 Binärziffern (bits) lassen sich alle Zahlen von 0 bis 255 darstellen. Überträgt man dies auf Farben, so kann eine Darstellung im sogenannten RGB-Farbraum mit je acht Bit, entsprechend $2^8 = 256$ „Intensitätsstufen“, erfolgen. Es gibt dann 256 Möglichkeiten für die Größe eines jeden Farbanteils, und zwar jeweils für den Rot-, Grün- und Blauanteil. Im $8 + 8 + 8 = 24$ -bit RGB-Farbraum kann also jede Farbe durch Angabe von 3 8-bit Bytes („Worte“) beschrieben werden. Reines Rot (hier 645,2 nm als Primärfarbe) ist z. B. (255, 0, 0), Grün (526,3 nm) (0, 255, 0) und Blau (444,4 nm) (0, 0, 255). Auch die Unbuntfarben Schwarz (0, 0, 0) und Weiß (255, 255, 255) lassen sich hierdurch darstellen. Werden in diesem Farbraum nebeneinander liegende Farben betrachtet, die sich nur um eine „Intensitätsstufe“ pro Farbanteil unterscheiden, so kann dies von einem normalen Betrachter nicht mehr unterschieden werden.

Es sollte aber nicht vergessen werden, dass die Angabe der numerischen RGB-Werte allein noch keine eindeutige Aussage macht, denn es liegt eine Verknüpfung mit dem jeweiligen Farbraum vor.

Um einen direkten Vergleich zwischen einzelnen Messungen und einer unterschiedlichen Darbietungsform einsehen zu können, wurden die jeweiligen RGB-Werte der angegebenen Farben miteinander verglichen. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Elemente bei einer Betrachtung am Bildschirm leuchten und dass sich deren Farben zu einer positiven Farbmischung addieren. Es liegt daher additive Farbmischung vor. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Abbildungen 4.67 bis 4.69 für Rot-, Grün- und Blaublendung dargestellt.

Rotblendung

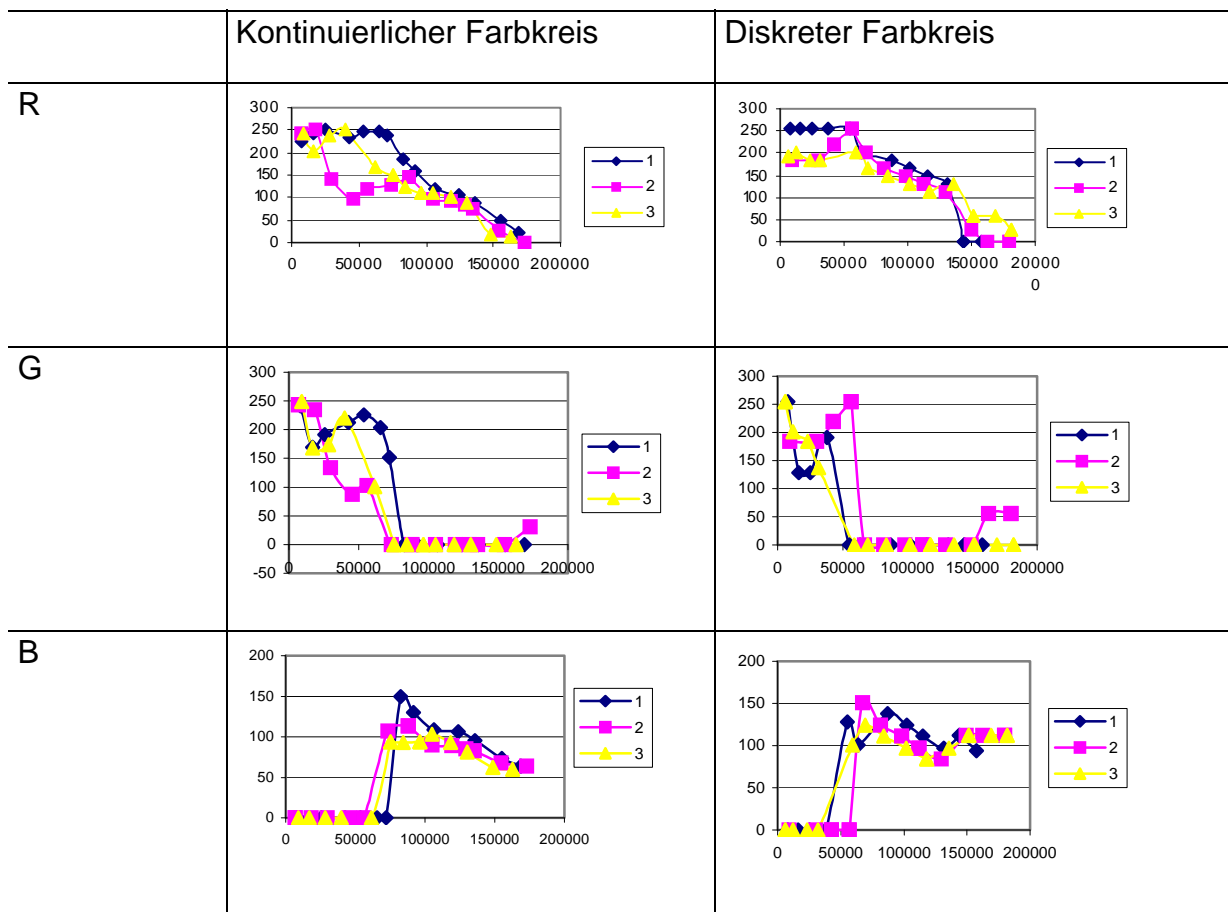


Abb. 4.67 Vergleich von jeweils drei identischen Messungen (1, 2 u. 3) bei Betrachtung kontinuierlicher und diskreter Farbkreis-Darstellung, aufgeteilt in Rot-, Grün- und Blauanteil von 0 bis 256 (RGB-Werte) bei Blendung mit einer roten LED als Funktion der Zeitdauer in ms (benutzte Farbkreise gemäß Abb. 4.63 rechts)

Grünblendung

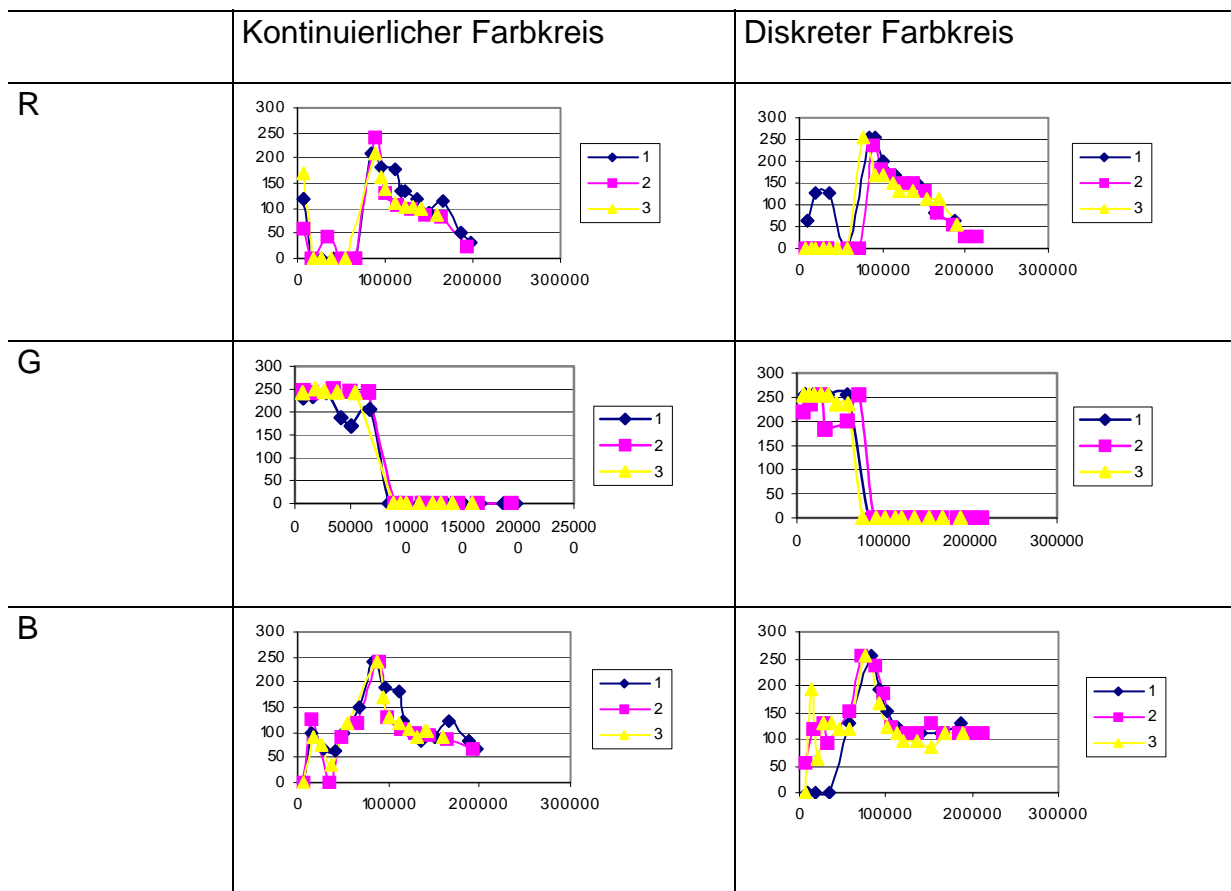


Abb. 4.68 Vergleich von jeweils drei identischen Messungen (1, 2 u. 3) bei Betrachtung kontinuierlicher und diskreter Farbkreis-Darstellung, aufgeteilt in Rot-, Grün- und Blauanteil von 0 bis 256 (RGB-Werte) bei Blendung mit einer grünen LED als Funktion der Zeitdauer in ms (benutzte Farbkreise gemäß Abb. 4.63 rechts)

Blaublendung

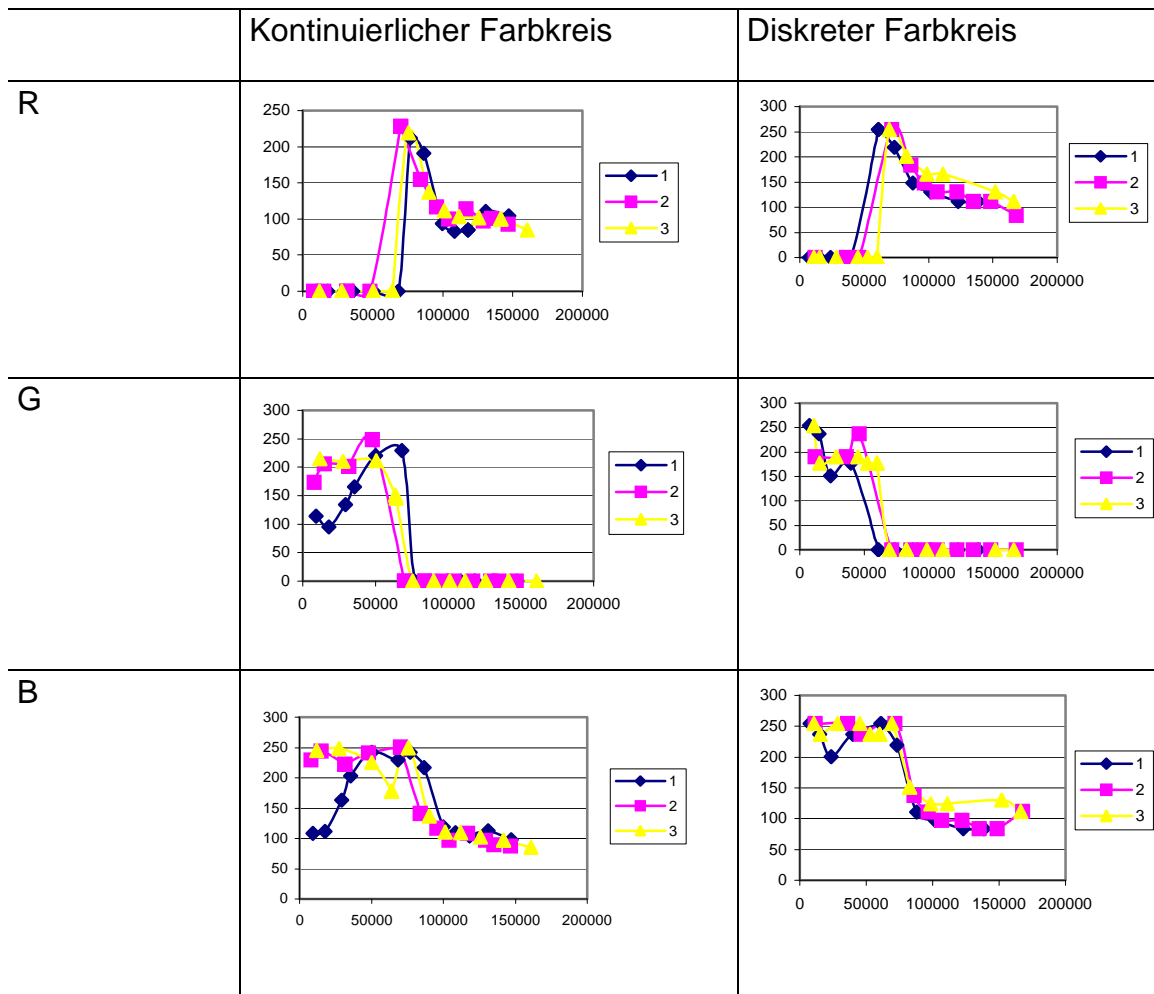


Abb. 4.69 Vergleich von jeweils drei identischen Messungen (1, 2 u. 3) bei Betrachtung kontinuierlicher und diskreter Farbkreis-Darstellung, aufgeteilt in Rot-, Grün- und Blauanteil von 0 bis 256 (RGB-Werte) bei Blendung mit einer blauen LED als Funktion der Zeitdauer in ms (benutzte Farbkreise gemäß Abb. 4.63 rechts)

Aus den Abbildungen 4.67 bis 4.69 wird deutlich, dass keine wesentlichen Abweichungen zwischen den Messungen mit diskreter und kontinuierlicher Farbdarstellungen auftreten, die den Fehler bei sonst gleichen Testparametern überschreiten. Daher konnte die Darstellung frei gewählt und rein nach der psychologischen Wirksamkeit festgelegt werden.

4.3.6.2 Messaufbau und -programm zur Aufzeichnung des Farbverlaufes und verwendete Blendlichtquellen

a.) Messaufbau

Zur Aufzeichnung des Farbbereiches, sowie der Dauer der einzelnen Nachbildphasen erschien es sinnvoll, die Betrachtung des Nachbildes wie in den Vorversuchen im Dunkeln zu vollziehen (s. Abschn. 4.3.1.1.1). Die Dunkelkammer hatte hierbei aber den Nachteil, dass der verwendete Raum nicht 100% abgedunkelt werden konnte und außerdem war der Messaufbau nicht mobil.

Um die Vorteile der Dunkelkammer, wie einheitliche Voraussetzung bei einzelnen Testreihen, trotzdem nutzen zu können, wurde der Messaufbau dementsprechend konzipiert, dass dem Auge der Testperson möglichst wenig Licht zugeführt wird.

Dazu sieht der Proband in eine Art Fernrohr, in welchem sich auf der einen Seite die LED als Blendlichtquelle befindet, auf der anderen Seite die Möglichkeit besteht, das Rohr zur Beobachtung des Computerbildschirms zu öffnen (Abb. 4.70 u. 4.71).

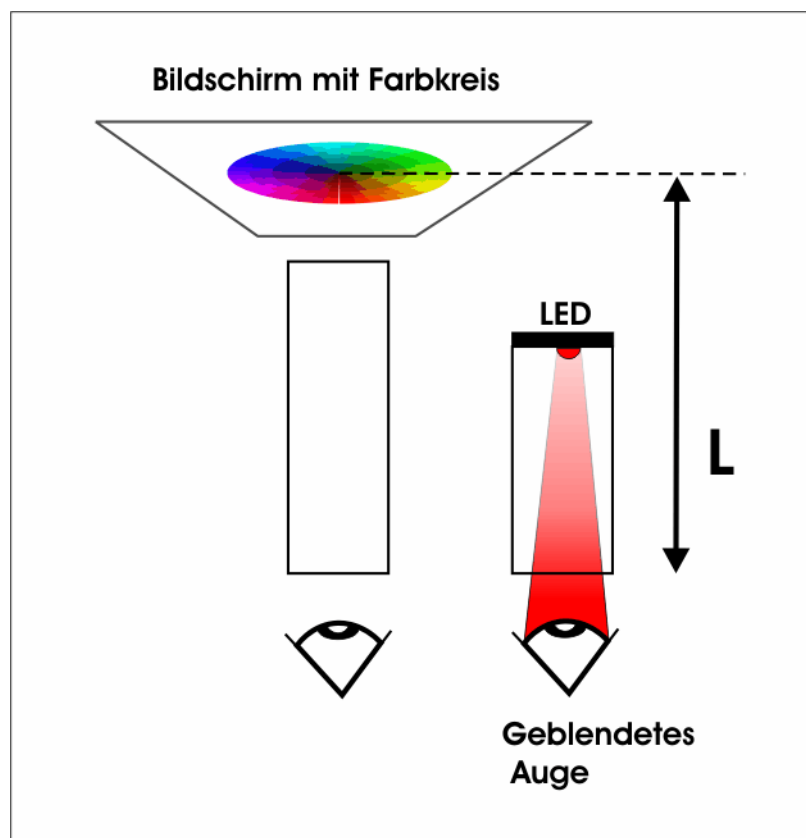


Abb. 4.70 Schematischer Messaufbau



Abb. 4.71 Verwendeter Labor-Messaufbau mit Blendeinrichtung und Bedienoberfläche mit Farbkreisdarstellung auf Monitor

Um die Farben auf dem Bildschirm deutlich erkennen zu können und Augenbeschwerden zu vermeiden, wurde ein Abstand des Auges vom Bildschirm von 30 cm eingehalten.

b.) Messprogramm

Zur Aufzeichnung der jeweils gesehenen Farbe, sowie der Zeitdauer der Nachbildphasen, wurde ein Messprogramm unter Verwendung von LabView entwickelt. Dies hat den Vorteil, dass mit Hilfe von LabView die Stromquelle zur Steuerung der LED direkt angesprochen werden kann und die Entwicklung von aufwendiger Hardware in Form von Mikrocontrollern entfällt. Abbildung 4.72 zeigt die Bedienoberfläche des Messprogramms. Nähere Einzelheiten finden sich in [193].

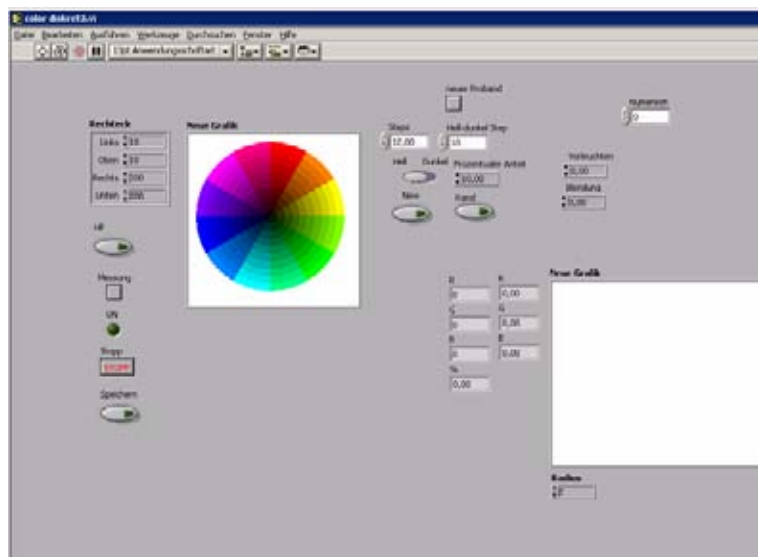


Abb. 4.72 Bedienoberfläche Messprogramm

Über die Bedienoberfläche sind die in Tabelle 4.13 dargestellten Funktionen ausführbar.

Tab. 4.13 Über die Bedienoberfläche des Messprogramms ausführbare Funktionen

- RECHTECK	Größe des Farbkreises
- STEPS	Farbschritte
-STEPS HELL DUNKEL	Helligkeitsänderung in Schritten radial
- HELL DUNKEL	Helligkeitsänderung nach Hell oder Dunkel
- NEW	erstellt neuen Farbkreis mit angegebenen Parametern
- VORLEUCHTEN	Dauer des Vorleuchtens
- BLENDUNG	Dauer der Blendung
- MESSUNG	startet das eigentliche Messprogramm
- RADIUS	Größe der Datenpunkte
- NEUER PROBAND	ermöglicht die Erfassung von Probandendaten
- SPEICHERN	schreibt die gemessenen Werte in eine Excel-datei und stellt sie grafisch dar; legt ein Messprotokoll an; legt ein Protokoll mit den Parametern des Farbkreises an
- HP	dient zur Einstellung des Netzgerätes

Um die Daten eines neuen Probanden aufzunehmen kann über NEUER PROBAND ein Panel geöffnet werden, in welchem die jeweiligen Daten eingetragen werden (s. Abb. 4.73).

Über DATEN SPEICHERN werden die Probandendaten in eine Textdatei geschrieben und unter dem angegebenen Dateinamen gespeichert (s. Abb. 4.73).

Es empfiehlt sich als Dateiname den Namen des Probanden zu wählen, um eine spätere Zuordnung zu den Protokollen und den Excel-Tabellen zu erleichtern.

Mit STOPP wird das Programm beendet und das Panel geschlossen.

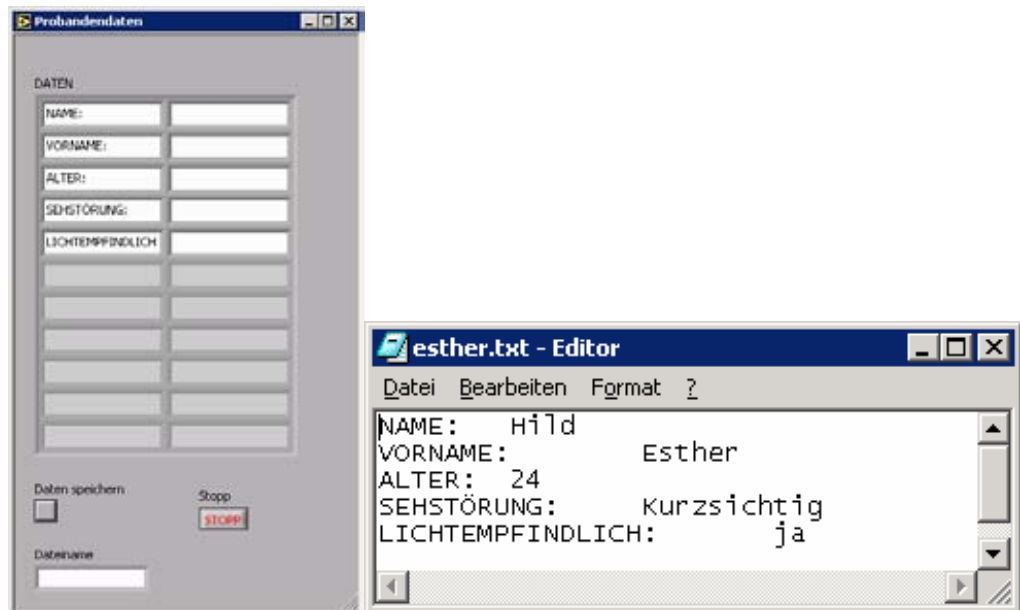


Abb. 4.73 Eingabe der Probandendaten und Probandendaten Textdatei

Unter HP (s. Abb. 4.74) kann die Stromquelle eingestellt werden. „Remote“ setzt das HP-Netzgerät in den rechnergesteuerten Zustand, „Local“ setzt den Zustand wieder zurück. „CLS“ löscht alle Register. Diese Funktion ist zu wählen, falls der Empfangsbuffer des HP überbelegt ist. Über Vorleuchten-Blendung wird die gewünschte Funktion gewählt, Spannungs- und Stromwerte eingegeben und diese mit „Set“ gesetzt. Bei Bedienungsfragen kann über „Hilfe“ eine Anleitung für dieses spezielle Steuerungsprogramm geöffnet werden. Bei Betätigung der Stopp-Taste wird das Programm geschlossen.

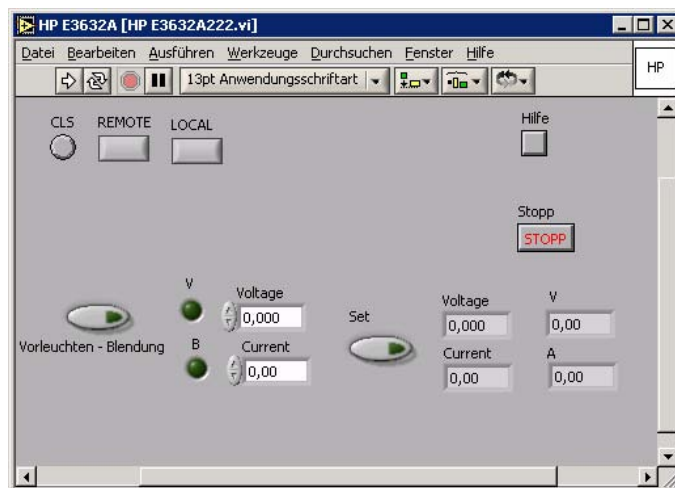


Abb. 4.74 HP E3632A-Steuerung

Bevor die Messung endgültig gestartet wird, können über Vorleuchten und Dauer die jeweiligen Zeiten für unterschiedliche Spannungs- und Stromwerte eingegeben werden. Das Vorleuchten dient zur Fixierung des Probanden. Die Leuchtdichte der LED sollte dabei möglichst klein gehalten werden, um eine anschließende Beeinträchtigung auszuschließen.

Nach Drücken der Taste „Messung“ beginnt die Messung mit dem Vorleuchten und der anschließenden Blendung.

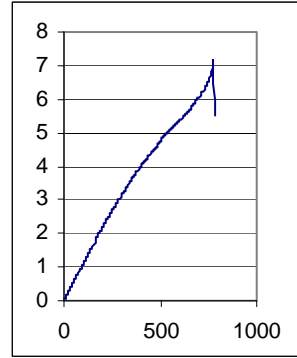
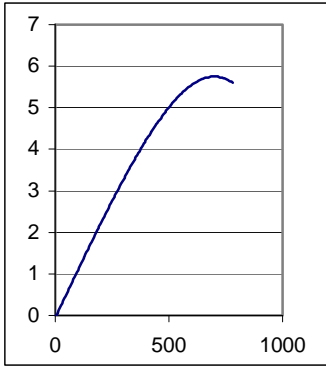
Durch Mausklicks wird die entsprechende Farbe an den Rechner mitgeteilt und der zugehörige Zeitpunkt festgehalten. Nimmt der Proband kein Nachbild mehr wahr, ist die Taste „Stopp“ zu betätigen.

c.) Verwendete Blendlichtquellen

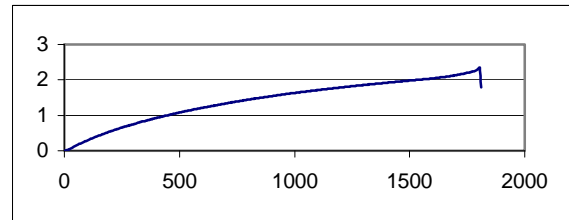
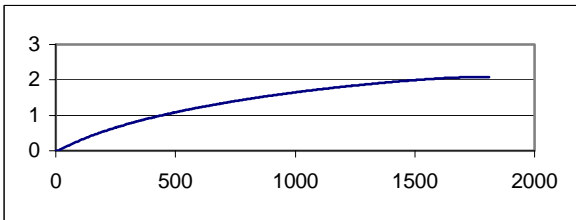
Zur Blendung wurden hauptsächlich 4 LEDs der Marke Luxeon Star mit den Wellenlängen 625 nm (rot), 590 nm (amber), 530 nm (grün) und 455 nm (blau) verwendet, deren relative spektrale Leistungsverteilung in Abb. 4.75 dargestellt ist.

Zur Vermessung der LEDs wurde ein im Forschungsbereich Medizintechnik und Nichtionisierende Strahlung der FH Köln entwickeltes Messprogramm verwendet. Dieses ermöglicht eine genaue Vermessung der LEDs, wobei nachfolgend die Spannung jeweils auf 5 V konstant gehalten wurde, während die Stromstärke in 5 mA-Schritten erhöht wurde.

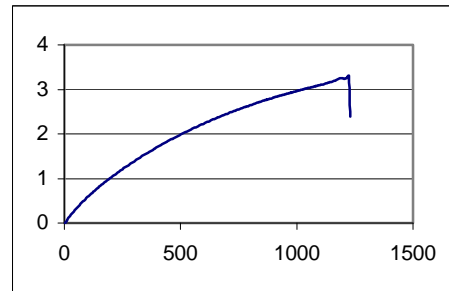
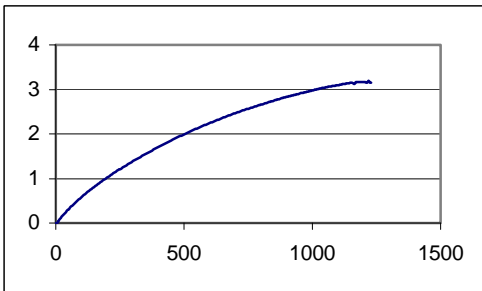
Da bei der Leistung der LEDs Hysterese auftritt, wurde der Strom einmal gesteigert, und einmal von oben verringert. Die Abbildung 4.75 zeigt die Ergebnisse dieser Kennlinienmessungen für die verschiedenen farbigen LEDs.



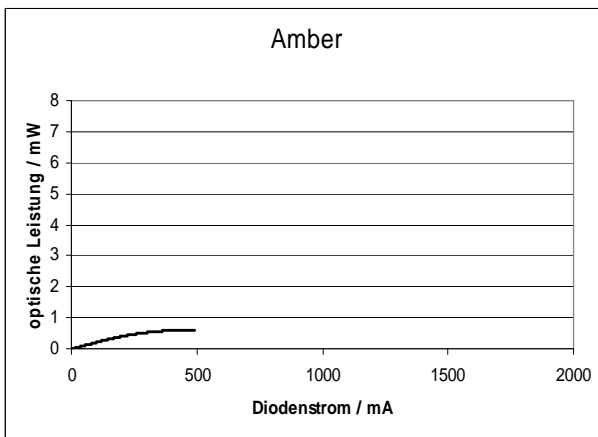
625 nm (rot)



455 nm (blau)



530 nm (grün)



590 nm (amber)

Abb. 4.75 Optische Leistungen (in mW) der LEDs über dem Strom (in mA)

Die Messungen wurden zur Durchführung der Untersuchungen zum Farbverlauf benötigt, um die erforderlichen quantitativen Auswertungen machen zu können.

Im Gegensatz zu den Angaben der jeweiligen Datenblätter, wurden die Messungen der Ausgangsleistung bis in einen deutlich höheren Strombereich durchgeführt, um Abweichungen von der Linearität zu ermitteln und um möglichst große optische Ausgangsleistungen zur Verfügung zu haben, wodurch in gewisser Weise die technologischen Entwicklungen der nahen Zukunft mit einbezogen werden sollten.

4.3.6.3 Bestimmung des Verlaufes der Nachbildfarben für eine Blendung mit HB-LEDs mittels einer Messung an einem Farbkreis

In dem Teilprojekt „Farblicher Verlauf der Nachbildfarben für verschiedenfarbige high-brightness LED (HB-LED)“ wurde der Verlauf der Nachbildfarben der einzelnen Phasen ermittelt, und zwar für 4 HB-LED mit verschiedenen Farben, wobei der Bereich des sichtbaren Spektrums relativ gut „aufgeteilt“ wurde.

Die Ergebnisse passen in die zuvor dargestellten Betrachtungen. Es ist aber festzuhalten, dass nicht die Komplementärfarbe, wie es bei „normaler“ Blendung meist der Fall ist, vorherrscht, sondern dass bei modernen HB-LEDs zunächst dominant und für relativ lange Dauer die Primärfarbe, d. h. diejenige der jeweils verwendeten LED die Farbe des Nachbildes bestimmt und damit auch die dadurch bedingten Farbverfälschungen. Insofern bedarf es eines gewissen Umdenkens bezüglich der Nachbilderscheinungen, wie sie bisher aus Betrachtungen der Literatur ableitbar war.

Da sich mit allen 4 LEDs 0,5 mW in einer 7 mm-Pupille erreichen ließen (s. Abb. 4.75), wurde diese Leistung als diejenige zur Blendung ausgewählt.

Die Messungen wurden bei 5 Testpersonen mit optischen Energien 0,25 mJ und 2,5 mJ durchgeführt, und zwar für alle 4 farbigen LEDs, d. h. es wurde je eine Rot-, eine Grün-, eine Blau- und eine Amberblendung durchgeführt. Abb. 4.76 zeigt ein Beispiel des Farbverlaufs bei Rotblendung bei 2,5 mJ für eine einzelne Testperson.

Abb. 4.76 zeigt die RGB-Werte, die der individuellen Farb-Bewertung entsprechen, d. h. der angegebenen Farben, und zwar zu der Zeit, in der der Proband diese Angaben gemacht hat. Dabei ist es dem Probanden freigestellt, wann er die jeweilige Angabe macht; er soll sich auf die Farbe im inneren Bereich des Nachbildes konzentrieren.

In Abb. 4.76 lässt sich erkennen, dass zu Beginn eine wachsende Rotempfindung vorliegt, die nach einer Zeit von 60 s ein Maximum erreicht und anschließend nahezu exponentiell bis auf Null abfällt. Der Verlauf des Grün- und Blauanteils der angegebenen Farben hat einen ähnlichen Verlauf, deren Amplitude ist jedoch im Vergleich zum R-Wert wesentlich geringer.

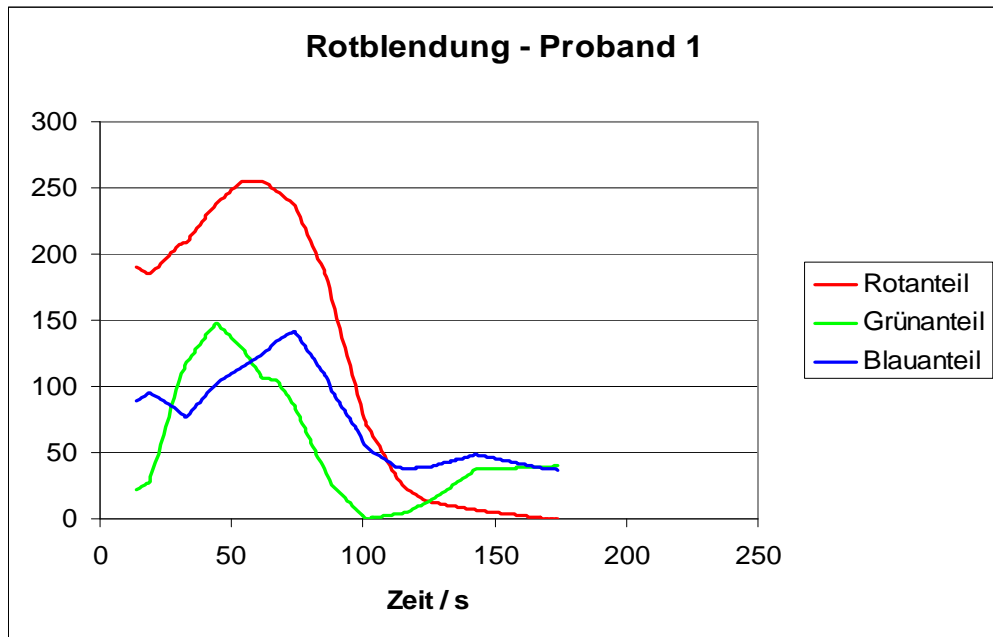


Abb. 4.76 Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Rotblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$)

Die Messpunkte stellen den Mittelwert von jeweils 3 Einzelmessungen dar. Zur Veranschaulichung sind für die Abb. 4.76 zugrunde liegenden Probanden alle 3 Einzelmessungen in Abb. 4.77 aufgetragen.

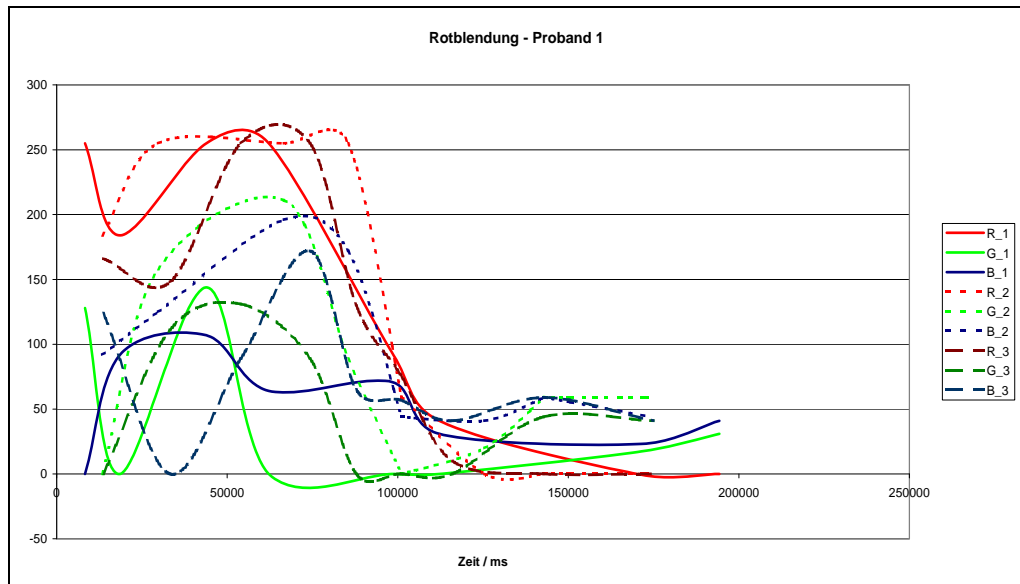


Abb. 4.77 Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Rotblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$) für 3 Einzelmessungen

Abb. 4.77 lässt bereits erkennen, dass sich selbst für ein und dieselbe Versuchsperson verschiedene Verläufe der RGB-Werte, sowohl hinsichtlich der Amplitude als auch des Zeitpunktes, ergaben.

Noch größer waren zum Teil die Abweichungen der einzelnen Versuchspersonen untereinander. Die Zeitdauer der Nachbildfarbwahrnehmung reichte von ca. 70 s bis etwa 200 s bei gleichen Versuchsbedingungen.

Dass die Testpersonen je nach Tagesform unterschiedliche Angaben bei gleichen Messungen mit konstanten Parametern, wie Leistung, Blenddauer und Wellenlänge machen, zeigt sich beim Vergleich der 3 Messungen, welche für jeden Probanden bei allen 4 verwendeten Wellenlängen bei einer optischen Leistung von 0,5 mW und einer 5-sekundigen Blendzeit durchgeführt wurden.

Auftretende Abweichungen können auch durch ungenaues „Anklicken“ der Farben auf dem Bildschirm auftreten. Wird das radiale Nachbarfeld der eigentlichen Farbe gewählt (s. Abb. 4.64), so tritt ein Fehler von +/- 7 %, entsprechend der Stufung in radialer Richtung des Farbkreises, für jeden Farbwert auf.

Das azimuthale Nachbarfeld weicht vom Bezugspunkt bei der gewählten Einstellung der Farbdarstellung um einen Wert von +/- 6,4 für jeweils einen Farbwert ab.

Bei der Mittelwertbildung ist zu beachten, dass einige Versuchspersonen in einzelnen Messungen relativ spät eine erste Farbauswahl getroffen haben und dass daher auch erst ein verspäteter Beginn der Mittelwertbildung möglich war. Das spätere Einsetzen des Nachbildes kann zum einen auf die Tagesform der Person bei dieser Messung, zum anderen auch auf Schwierigkeiten bei der Farbzuordnung zurück zu führen sein.

Dass das Nachbild bei 3 Probanden gegen Ende nicht an Farbe verlor, ist vermutlich auf die Schwierigkeit der Beschreibung des Nachbildes zu diesem Zeitpunkt zurückzuführen. Die Testpersonen bezeichneten diese Phase als ein undefinierbares Grau. Mutmaßlich ist eine Angabe der Helligkeit der Erscheinung abhängig von der Farbbeschreibung bzw. dem psychologischen Eindruck der einzelnen Personen. Eine Testperson gab sogar an, dass bei ihr die Nachbilderscheinung durch eine Minimierung der Form, nicht aber der Farbintensität, vergeht, was in gewissem Widerspruch zu den bisherigen Erkenntnissen, auch in Abschnitt 4.3.2, steht.

Abb. 4.78 zeigt die Ergebnisse bei Grünblendung, und zwar für den Probanden, dessen Ergebnisse auch bei Rotblendung in Abb. 4.76 u. 4.77 dargestellt sind.

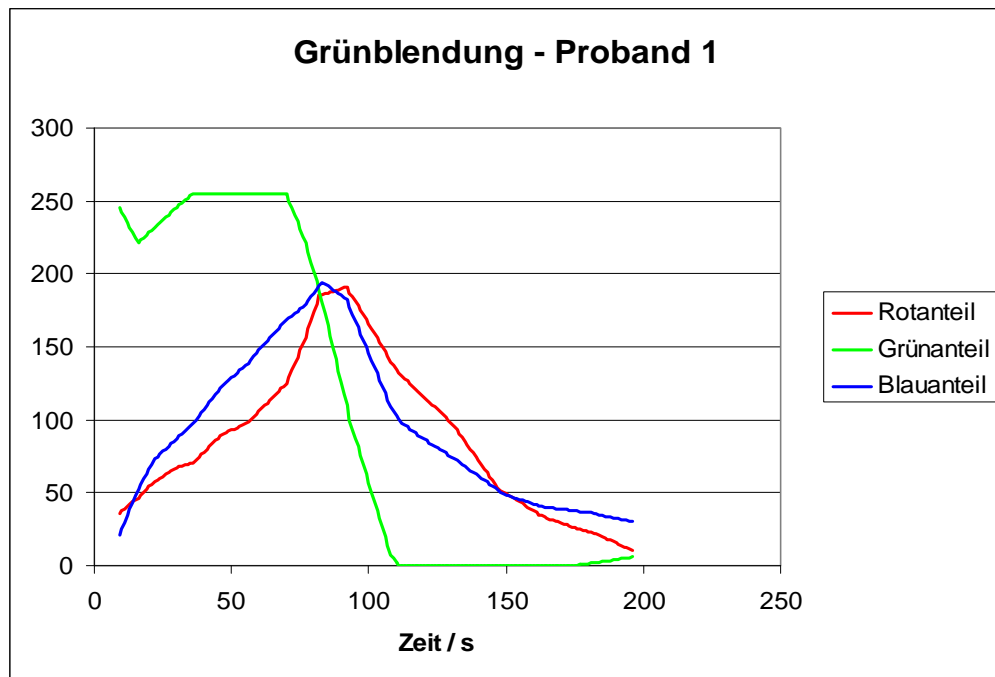


Abb. 4.78 Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Grünblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$)

Ein Vergleich der Farbanteile bei Grünblendung, die Proband 1 angegeben hat, mit den Bezeichnungen bei Rotblendung, zeigt ein ähnliches Verhalten, wobei sich die Verläufe des Rot- und Grünanteils vertauscht haben. Außerdem sind die Maxima der Blau- und Rotanteile im Vergleich zum Grünverlauf verschoben. Auch zeitlich ähneln sich die Ergebnisse von Rot- und Grünblendung.

Auffallend ist, dass die Nachbilddauer bei allen 5 Versuchspersonen bei Grünblendung wesentlich weniger variiert als bei Rotblendung und durchschnittlich etwa 190 s bis 230 s beträgt.

Blaublendung führt dagegen zu kürzeren Nachbilddauern von ca. 140 s bis 170 s, wobei sich im RGB-Werteverlauf anfangs neben einem starken Blau- auch ein solcher Grünanteil zeigt, die beide anschließend vergleichsweise abfallen, während der Rotanteil mit der Zeit anwächst. Ein typisches Beispiel für dieses Verhalten zeigt Abb. 4.79.

Die geringste Übereinstimmung in den Kurvenverläufen ergab sich bei Amberblendung.

Als Zwischenergebnis lässt sich feststellen, dass insgesamt zwar Ähnlichkeiten zwischen den Farbeindrücken nach Blendung bei den unterschiedlichen Testpersonen erkennbar sind, dass andererseits ein eindeutiger Nachbildverlauf jedoch nicht zu identifizieren ist.

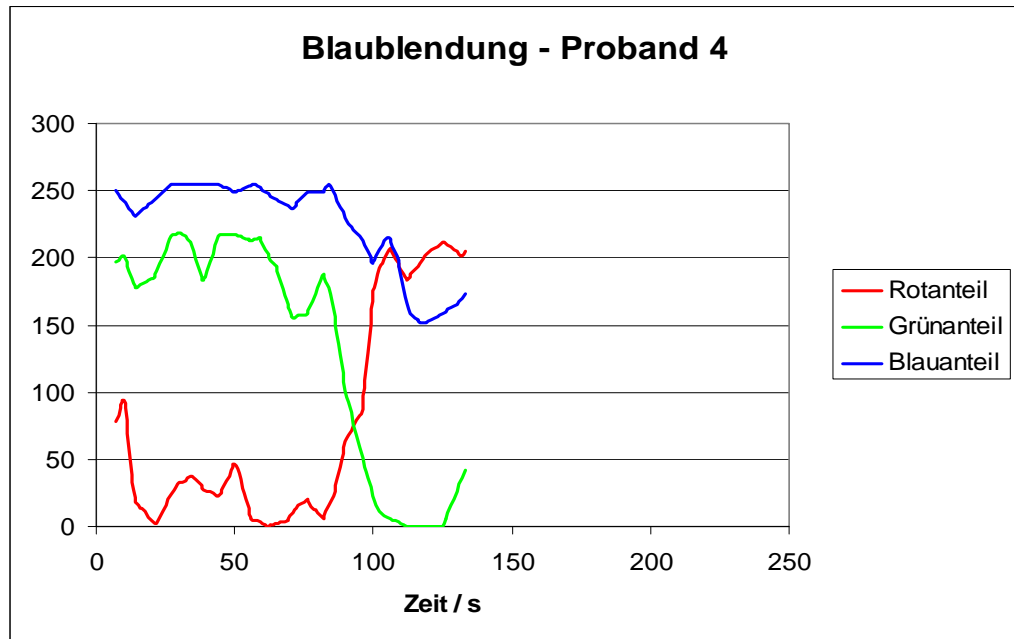


Abb. 4.79 Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Blaublendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$)

Allen Tests gemeinsam ist lediglich die Tatsache eines starken Eindruckes der Blendfarbe als Anteil an der Nachbildfarbe, welcher mit der Zeit abnimmt. Diese Aussage verdeutlicht Abb. 4.80, in der die Anteile der Blendfarbe am Nachbild aufgetragen sind.

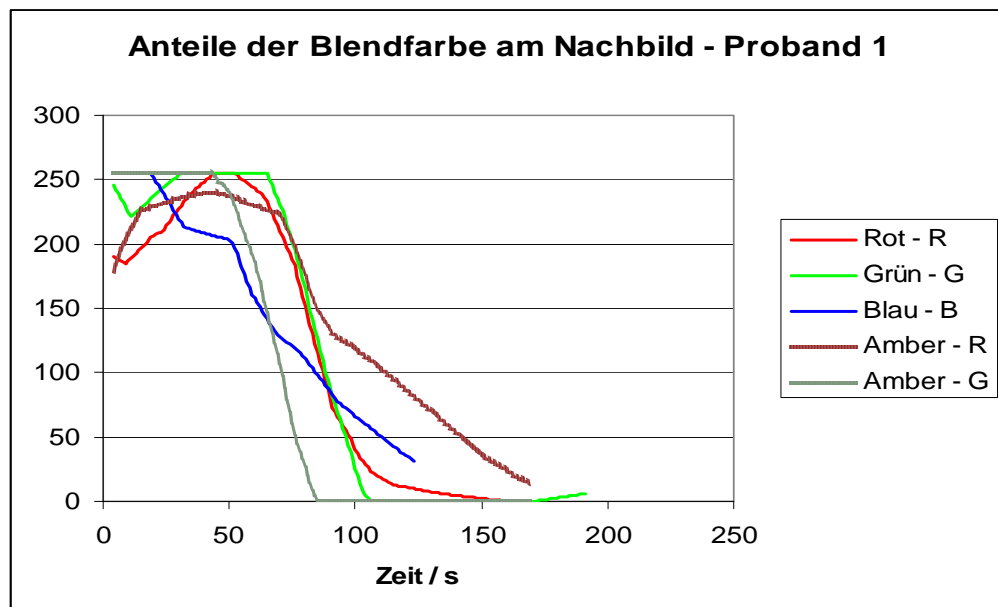


Abb. 4.80 Anteile der Blendfarbe an den Nachbildfarben als Funktion der Zeit

Bei Amberblendung wurde sowohl der Grün- als auch der Rotanteil getrennt aufgetragen. Hier fällt auf, dass der Grünanteil bei Blendung mit Amber zu Beginn des Nachbildverlaufs höher ist als die Empfindung im Roten, jedoch auch schneller abfällt.

Während für Proband 1 die Nachbildfarbe nicht bei allen Blendversuchen mit dem maximalen Blendfarbanteil beginnt (s. Abb. 4.80), ist dies bei anderen Versuchspersonen durchaus der Fall.

Ein weiteres Interesse in dieser Teilstudie galt der Überprüfung einer eventuellen Energieabhängigkeit des Nachbildverlaufes. Hierzu wurde bei jedem Probanden jeweils eine Messung mit einer optischen Leistung von 0,05 mW und 5 s Expositionsdauer (Blenddauer), sowie 0,5 mW und 0,5 s, durchgeführt. Da die Energie bei beiden Messungen gleich 0,25 mJ betrug, konnte gleichzeitig eine Überprüfung der Abhängigkeit von Leistung und Expositionsdauer durchgeführt werden.

Abb. 4.81 zeigt die Ergebnisse der leistungs- und expositionsdauerabhängigen Nachbildfarben für eine Versuchsperson bei Rotblendung. Dabei sind auch die bereits in Abb. 4.76 dargestellten RGB-Werte zum Vergleich mit eingetragen.

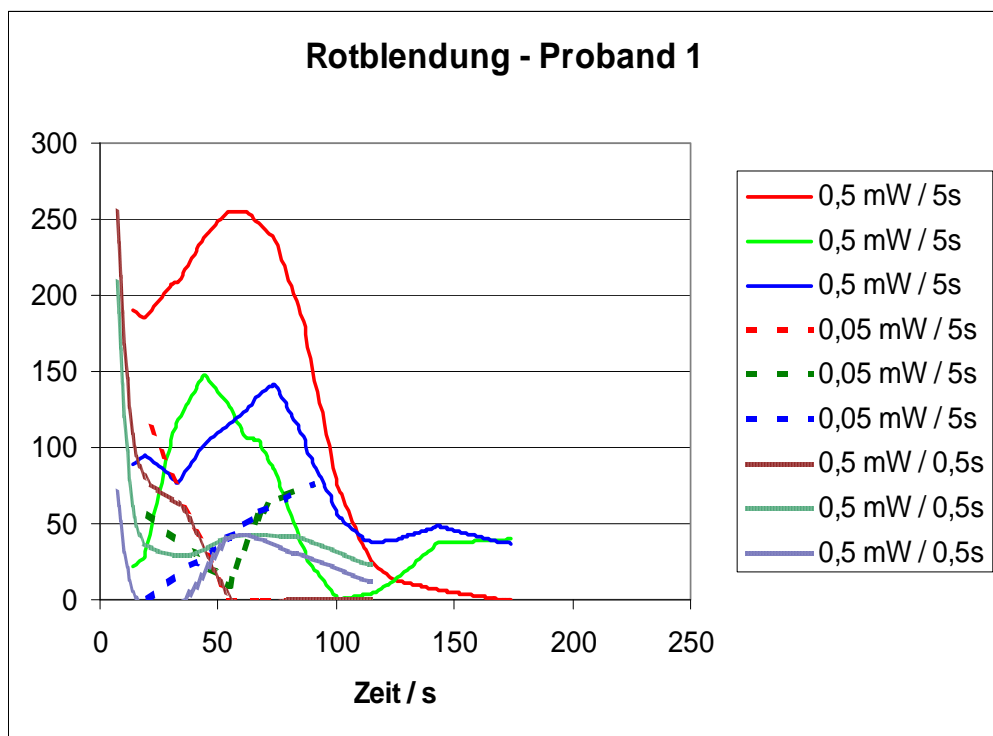


Abb. 4.81 Verlauf der Farbanteile in Abhängigkeit von der Energie bei Rotblendung

Bei Proband 1 zeigen sich die Nachbilder bei geringerer Energie als stark verschoben im Vergleich zu den vorherigen Messungen (s. Abb. 4.76). Hierbei ist eine reine Abhängigkeit von der Energie erkennbar, und zwar unabhängig davon, ob die optische Leistung oder die Blenddauer reduziert wird. Die Verschiebung beträgt etwa 100 s. Diese Verschiebung ist in Abb. 4.82 noch deutlicher zu erkennen, da hier nur die einzelnen Rotanteile dargestellt sind.

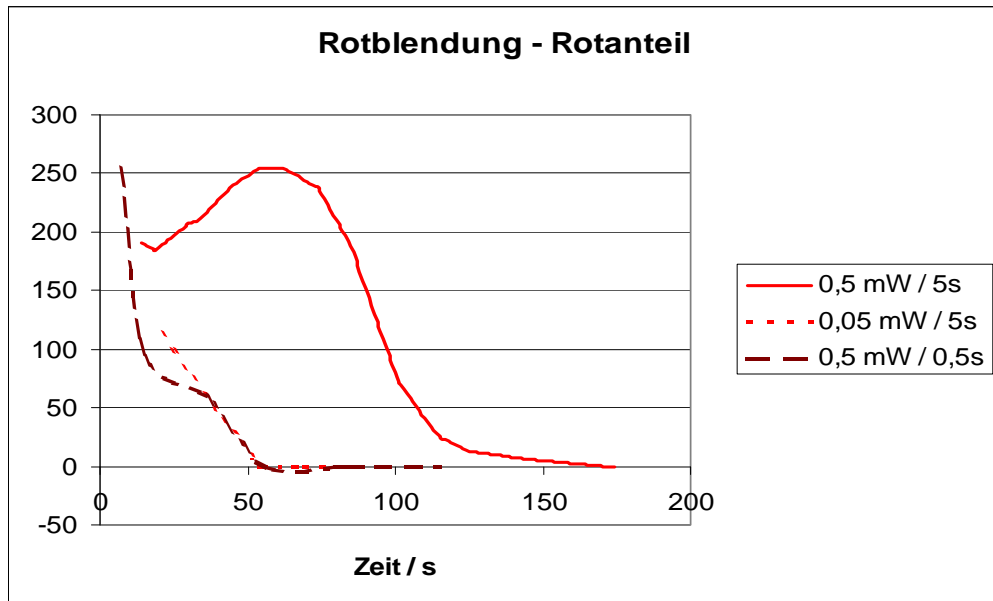


Abb 4.82 Verlauf des Rotanteils in Abhängigkeit von der Energie bei Rotblendung für Proband 1

Eine Verschiebung zeigen auch die anderen Versuchsteilnehmer, wobei allerdings die entsprechenden Werte zwischen etwa 30 s und 60 s schwanken.

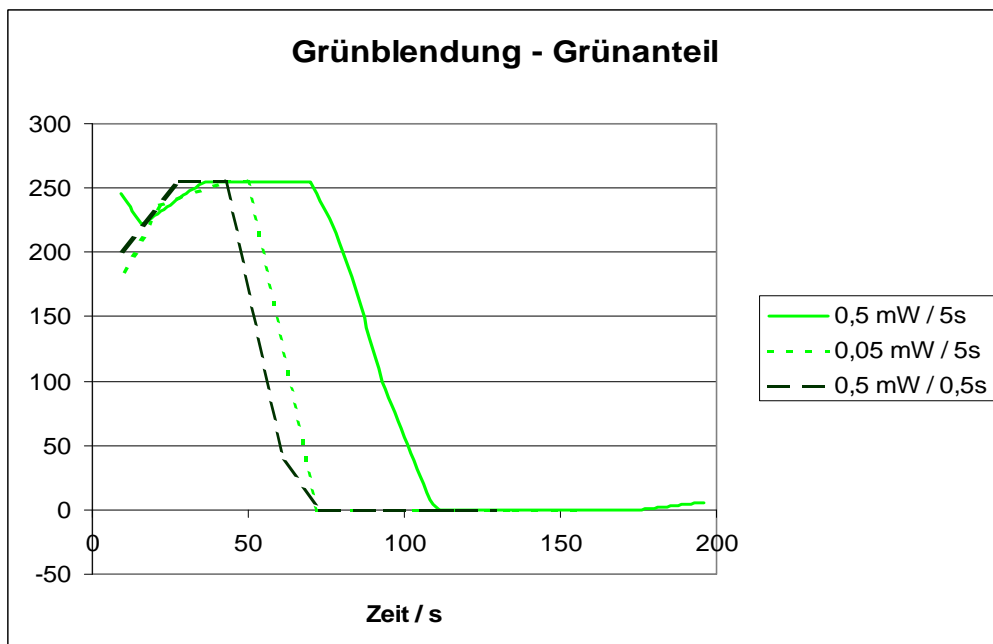


Abb. 4.83 Verlauf des Grünanteils in Abhängigkeit von der Energie bei Grünblendung für Proband 1

Auch bei Grünblendung ergeben sich ähnliche Verhältnisse, d. h. es tritt eine eindeutige zeitliche Verschiebung des Nachbildverlaufs auf, die aber meist etwas kürzer ausfällt. Die Verschiebungen lagen meist zwischen 30 s und 50 s. Zudem zeigte sich wiederum keine Abhängigkeit von der Parameterwahl, mit welcher die Energie geän-

dert wurde. Abb. 4.83 zeigt den alleinigen Grünanteilverlauf bei Grünblendung für Proband 1.

Während für Rot- und Grünblendung für Proband 1 eine deutliche Verschiebung des Nachbildverlaufs in Abhängigkeit der Energiereduzierung erkennbar war, kann bei Blaublendung nur bei einer niedrigeren Leistung auf eine solche geschlossen werden. Die Verschiebung ist hierbei so groß, dass die Steigerung auf einen Grünwert von 45 nach 60 s nach der Verschiebung bereits außerhalb des Zeitbereichs der Dauer des Nachbildes bei höherer Energie liegt.

Im Gegensatz zu den beiden Messungen mit roter und grüner Blendquelle führte der Test bei Blaublendung mit Blendzeitreduzierung bei Proband 1 zu einer Verstärkung des Nachbildeindrucks. Der Blauanteil entsprach in etwa dem der Vergleichsmessung. Dieser Zusammenhang ist für die Blauanteile in Abb. 4.84 dargestellt.

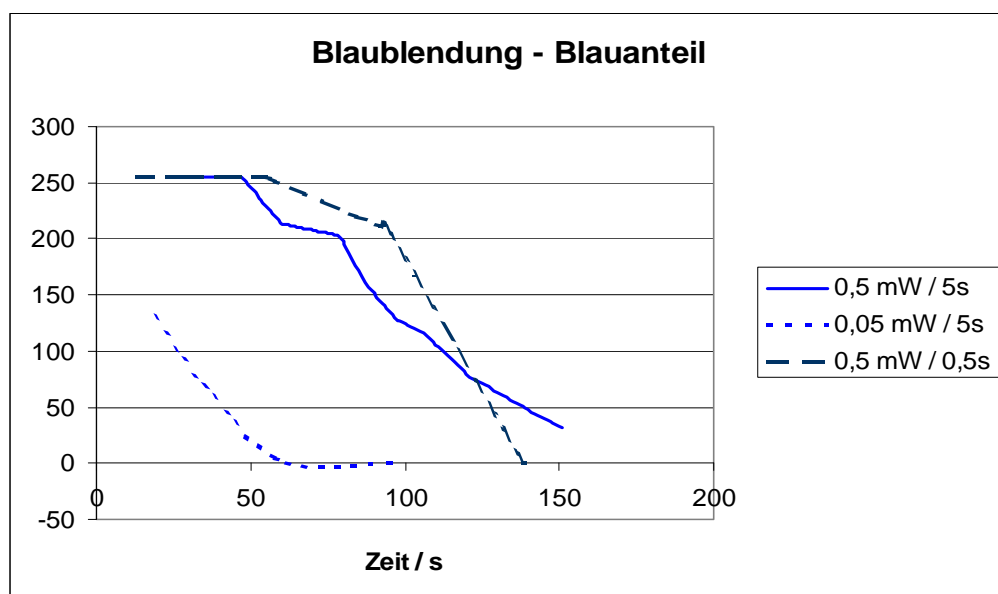


Abb. 4.84 Verlauf des Blauanteils in Abhängigkeit von der Energie bei Blaublendung für Proband 1

Der Roteindruck verlief im Wesentlichen identisch zum Blauanteil und zeigte im Vergleich zur Empfindung bei 2,5 mJ keinen „Einbruch“. Grün dagegen stieg zunächst an und fiel erst nach 100 s wieder ab.

Insgesamt zeigt sich weder bei Blaublendung noch bei Amberblendung ein einheitliches Bild bezüglich der Energieabhängigkeit.

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit ist durch die Auswertung der Helligkeitsverläufe des Nachbildes gegeben. Dazu wurde die Helligkeit aus der Summe der jeweiligen RGB-Werte ermittelt. Eine zusätzliche V-Lambda-Bewertung machte wenig Sinn, da diese bereits in den von den Testpersonen gemachten Angaben enthalten ist. Anhand der Helligkeiten können die Probanden direkt miteinander verglichen werden. Abb. 4.85 zeigt ein Beispiel des Vergleichs aller 5 Testpersonen bei Rotblendung und Abb. 4.86 den entsprechenden Vergleich für Grünblendung.

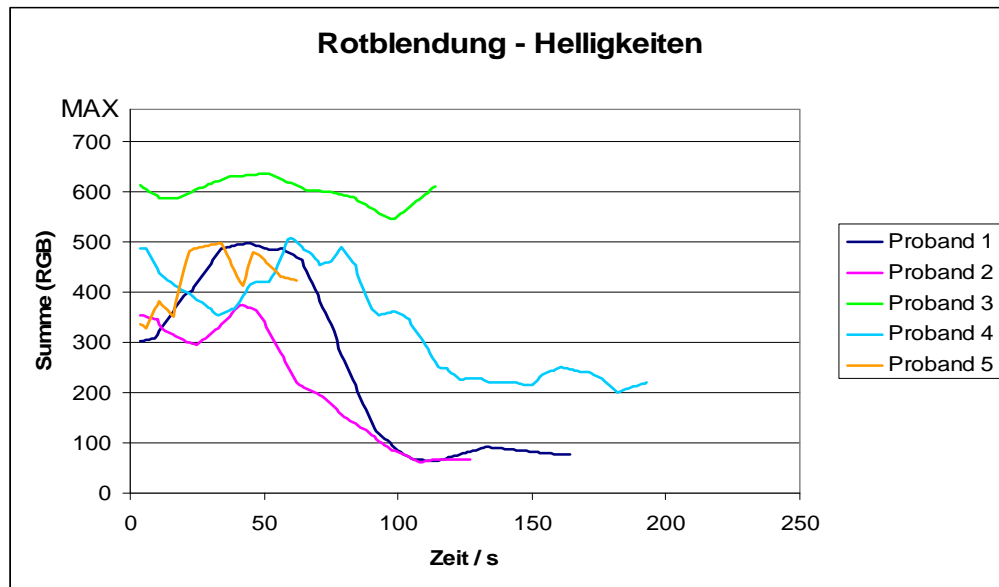


Abb. 4.85 Vergleich der Helligkeit aus den RGB-Werten bei Rotblendung für alle Probanden

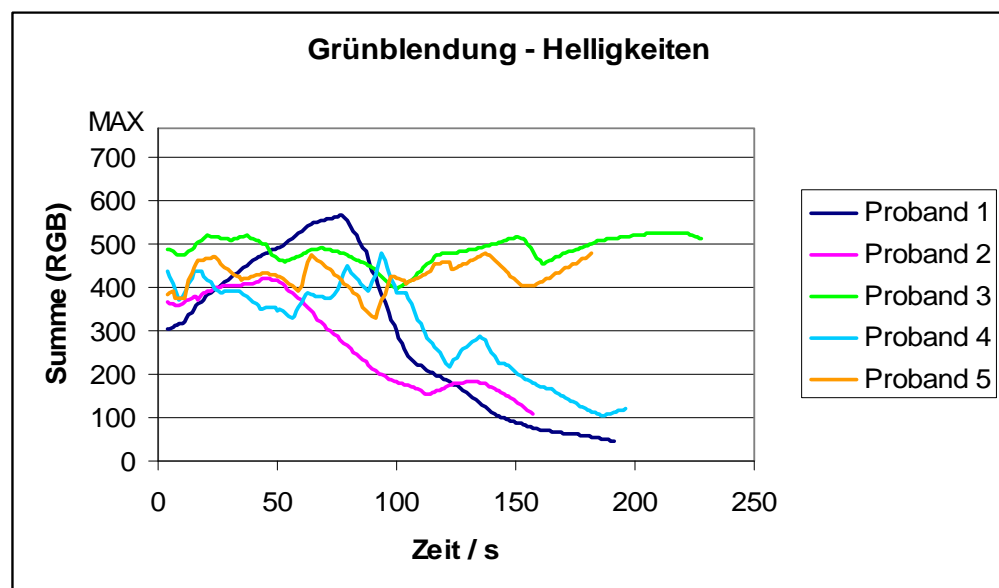


Abb. 4.86 Vergleich der Helligkeit aus den RGB-Werten bei Grünblendung für alle Probanden

Weitere detaillierte Angaben und Analysen finden sich in [193]. Dabei ist noch ergänzend anzumerken, dass nicht untersucht wurde, welchen Einfluss die Monitorleuchtdichte und die Betrachtungsdauer des Monitors bei der Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Nachbildfarben auf diese hatten. Es ist nicht auszuschließen, dass durch die Betrachtung des Farbkreises auf dem Monitor (vgl. Abb. 4.72) selbst bereits ein Nachbild in dem zur Ermittlung des im anderen Auge vorhandenen und sich zeitlich ändernden Nachbildes erzeugt wurde und dass es dadurch zu einer zwar nicht wesentlichen, aber dennoch vorhandenen Beeinflussung der jeweiligen RGB-Werte kam. So haben z. B. STOCKMAN et al. einen blauen Hintergrund benutzt, um die M-Zapfen selektiv und einen tief-roten um die L-Zapfen unempfindlich zu machen [292].

In wieweit aber dadurch ihre anschließenden Messungen beeinflusst wurden, wurde nicht diskutiert.

Da eines der Ziele dieses Teilprojektes darin bestand, den Verlauf der Nachbildfarben bei Blendung durch farbige LEDs näher angeben zu können, als dies in Vorversuchen in einer Dunkelkammer und durch anschließende Protokollierung wahrgenommener Farbverläufe (vgl. Abschnitt 4.3.1.1.1) möglich war, wurde auch eine Farbdarstellung anhand der gemessenen RGB-Werte vorgenommen. Abb. 4.87 zeigt hierzu die Farbwahrnehmung aller 5 Probanden bei Rot- und Grünblendung bei einer optischen Energie von 2,5 mJ. Obwohl diese Darstellung keine absoluten Zeitangaben enthält, kann daraus das relative Zeitverhalten ersehen werden. Die in Abb. 4.87 eingetragene Zeitangabe von 200 s ist aus den Messungen übertragen worden und kann daher durchaus zur Orientierung verwendet werden.

Eine solche Nachbildfarb-Darstellung ist insbesondere dann besser geeignet, wenn wenig Erfahrung mit der „Farbgewinnung“ aus RGB-Werten vorliegt.

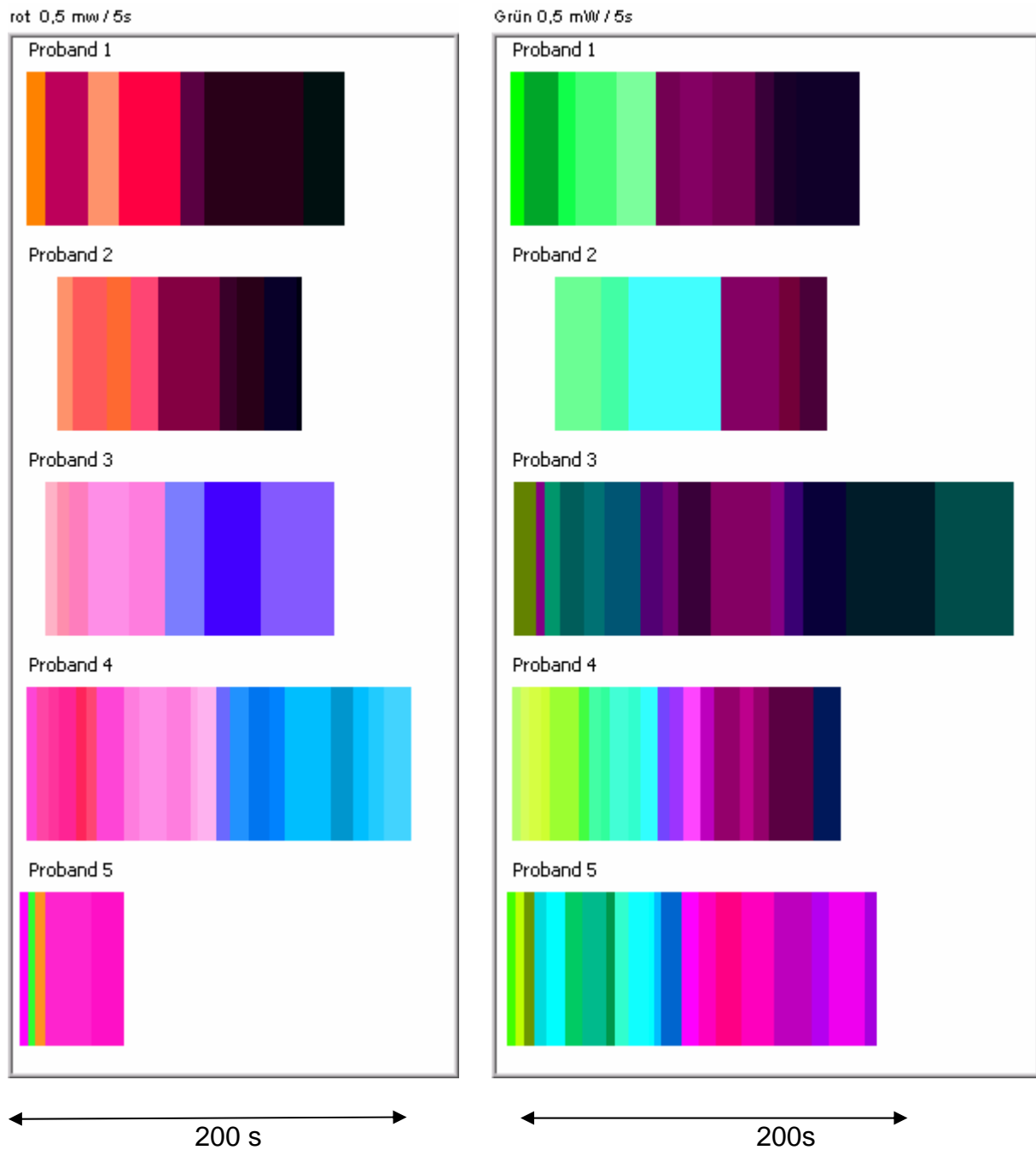


Abb. 4.87 Farbangabe des Nachbildes durch die Probanden 1 – 5 bei Rot- und Grünblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$)

Die entsprechenden Verhältnisse bei Blau- und Amberblendung sind in Abb. 4.88 wiedergegeben.

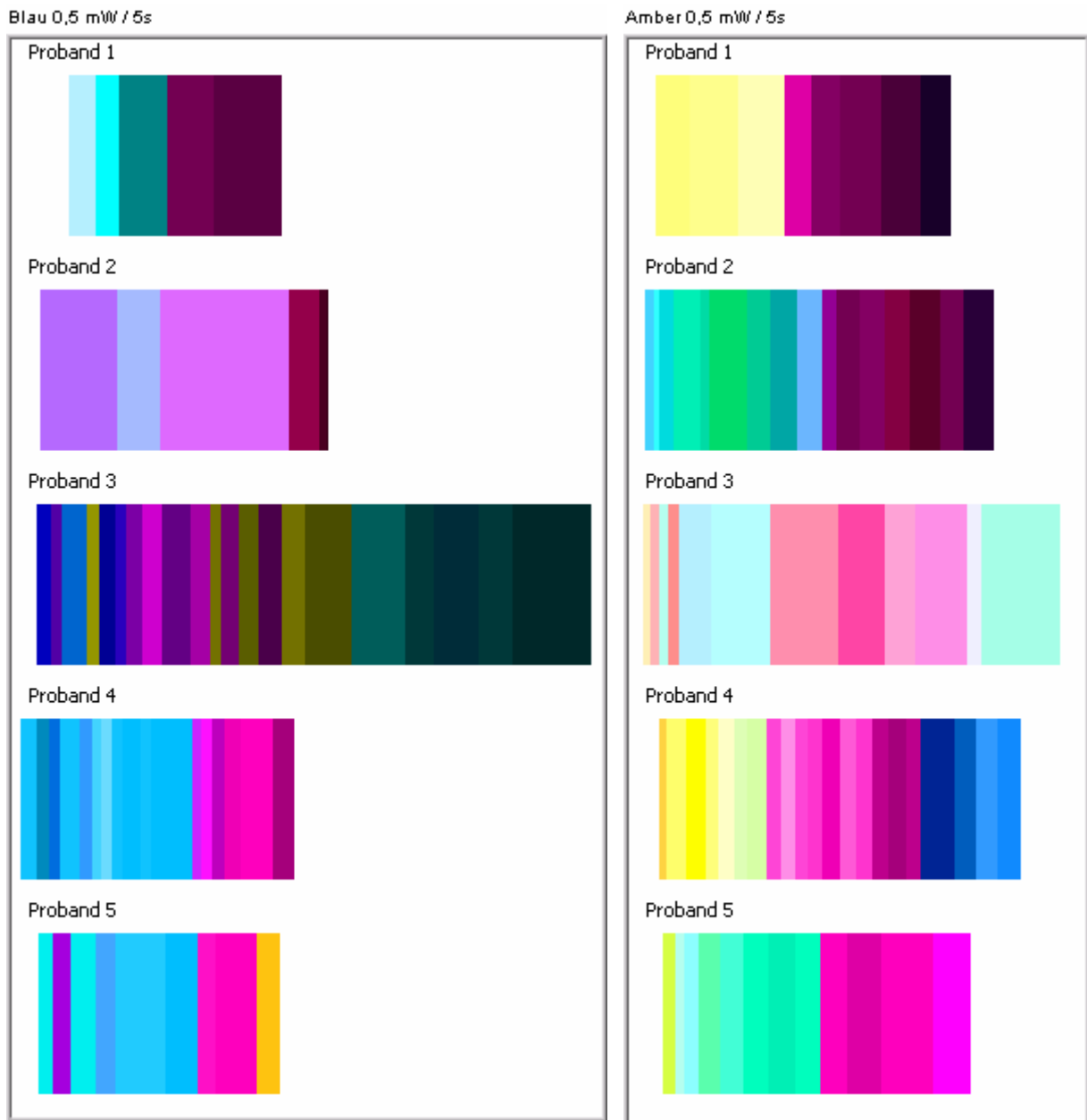


Abb. 4.88 Farbangabe des Nachbildes durch die Probanden 1 – 5 bei Blau- und Amberblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$)

Im Vergleich zur Auswertung anhand der RGB-Werte erscheinen diese eindeutiger. Aus den Abbildungen 4.87 u. 4.88 wird der starke Unterschied in den empfundenen bzw. bewerteten Helligkeiten und Farben bei den verschiedenen Probanden deutlich.

Dennoch zeigt sich auch bei der Farbverlaufsdarstellung der Einfluss unterschiedlicher optischer Energiewerte, wie dies für 2 Probanden bei Grünblendung in Abb. 4.89 geschehen ist.

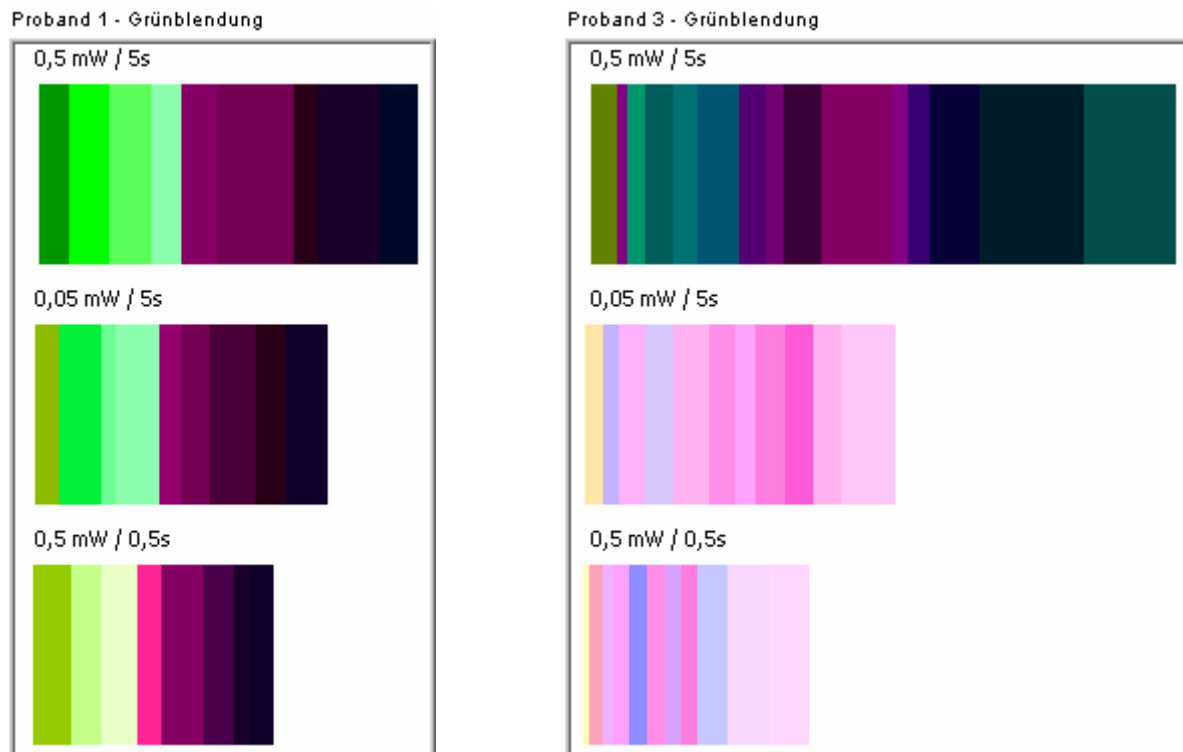


Abb. 4.89 Vergleich der Nachbild-Farbverläufe bei Grünblendung für Proband 1 und 3 bei unterschiedlichen Einstellungen von Leistung und Expositionsdauer

In Abb. 4.89 ist sehr deutlich die Verkürzung der Nachbilddauer, aber auch die Veränderung des farblichen Spektrums, in dem das jeweilige Nachbild wahrgenommen wird, zu erkennen.

Schließlich wird der Farbverlauf des Nachbildes noch im CIE-Diagramm dargestellt, wie dies ohne Ermittlung der genauen RGB-Werte bereits im Dunkelkammerversuch orientierend erfolgt war. Die Ergebnisse sind für Grünblendung für Proband 1 für 3 verschiedene Einstellungen von Leistung und Expositionsdauer in Abb. 4.90, 4.91 u. 4.92 in das CIE-Diagramm eingetragen.

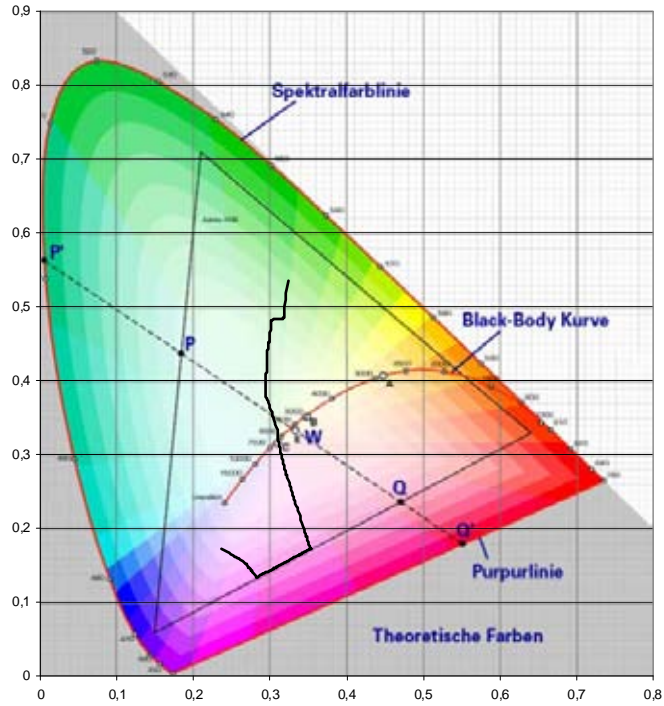


Abb. 4.90 Verlauf der Nachbildfarben im CIE-Diagramm für Grünblindung bei 2,5 mJ (Proband 1)

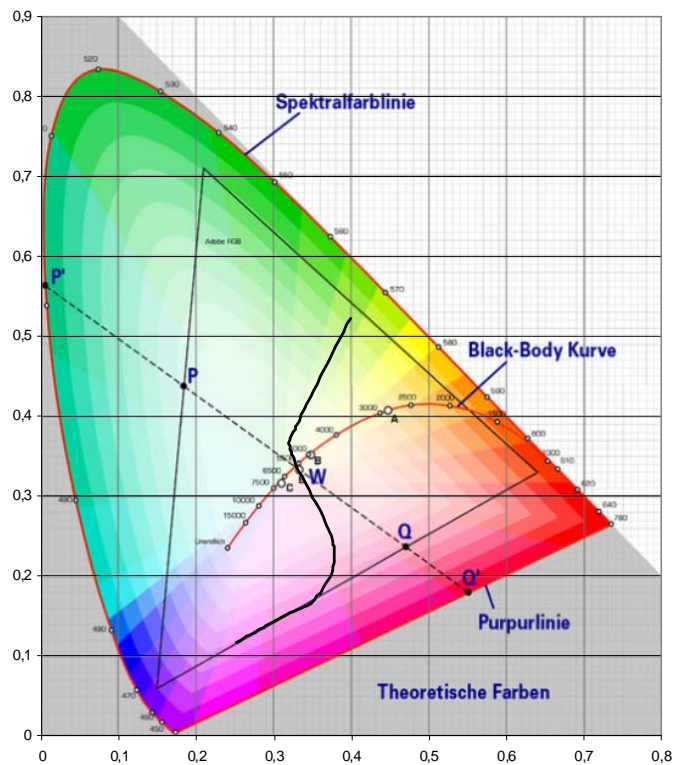


Abb. 4.91 Verlauf der Nachbildfarben im CIE-Diagramm für Grünblindung bei 0,25 mJ (0,5 mW / 0,5 s; Proband 1)

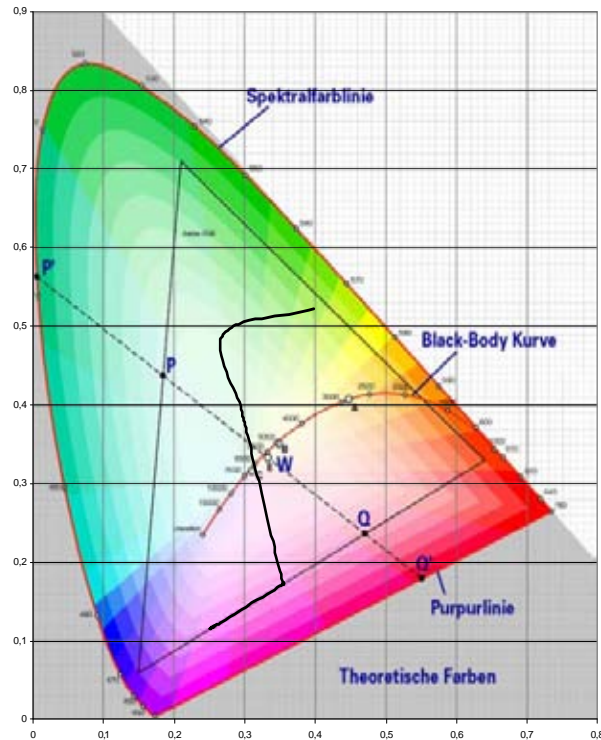


Abb. 4.92 Verlauf der Nachbildfarben im CIE-Diagramm für Grünblendung bei 0,25 mJ (0,05 mW / 5 s; Proband 1)

Durch diese Darstellung wird erstens der aufgrund der Vorversuche erwartete Verlauf eindrucksvoll bestätigt und durch quantitative Angaben dokumentiert, dass für Grünblendung weitgehend ein gemeinsamer Weg auf einer charakteristischen Trajektorie durchlaufen wird. So entspricht der in Abb. 4.90 dargestellte Farbverlauf im Wesentlichen demjenigen nach Abb. 4.4. Es zeigt sich, dass der Nachbildfarbverlauf durch den Unbuntpunkt (W) bzw. in seiner Nähe verläuft. Das im CIE-Diagramm eingezeichnete Dreieck entspricht den am Monitor darstellbaren Farben, d. h. dessen Berührung ist gleichzusetzen damit, dass an dieser Stelle zu diesem Zeitpunkt im Nachbildfarbverlauf eigentlich keine Angabe anhand der angebotenen Farbdarstellung von der Versuchsperson gemacht werden kann.

Zusammenfassend lässt sich zu diesen Teiluntersuchungen festhalten, dass

- die Blendfarbe aufgrund der angewandten „Reizstärke“ stark anteilig an der Nachbildfarbe ist und deren Anteil mit fortschreitender Zeitdauer sinkt,
- eine Energieverringering zu einer zeitlichen Verschiebung bzw. Stauchung des Farbverlaufes im Nachbild führt,
- die Verschiebung wellenlängenabhängig ist, insbesondere bei Rot- und Blaublindung, und zwar bei einer Leistungs- und Blenddauerreduzierung, während für Grün- und Amberblindung kaum Abweichungen erkennbar sind,
- eine Intensitätsreduzierung zu einer Verkürzung der Nachbilddauer führt,

- Farbübergänge in Form von Ringen erfolgen, wobei die vorstehenden Angaben sich fast ausschließlich auf die jeweilige Farbe der inneren Kreisscheibe beziehen und die Ringe vermutlich insbesondere einer radialen Intensitätsverteilung in der Abstrahlcharakteristik der LEDs entspringen und
- dass keine Phasen im Sinne der üblichen Nachbildphasenbeschreibung erkennbar sind, wohl aber eine Verzögerung in der Wahrnehmung des Nachbildes auftritt.

Das Fehlen der einzelnen schnellverlaufenden ersten Nachbildphasen erklärt sich bei den hier berichteten Untersuchungen aus der Tatsache, dass die Bestrahlungsdauern dazu viel zu lang waren, und dass daher diese sehr frühen Phasen schon lange beendet waren, bevor das eigentliche Reizende vorlag. Es kann davon ausgegangen werden, dass bereits während der Exposition Regenerationsvorgänge einsetzen, die damit gleichzeitig einzelne Nachbildphasen beenden bzw. noch andauernde zumindest beeinflussen, und zwar gemeinsam mit der noch fortdauernden Bestrahlung.

Auf das Fehlen der schnellverlaufenden Nachbildphasen bei längerer Belichtungsdauer hat im Übrigen schon FRÖHLICH einerseits hingewiesen, aber an anderer Stelle andererseits zugleich ausgedrückt, dass nach „Verdunkelung“ insbesondere die negativen Phasen hervortreten [100].

Der Anteil der Blendfarbe (Primärreiz) an der Nachbildfarbe resultiert aus der Überreizung des Sehorgans. Diese ist bei niedrigerer Energie weniger stark ausgeprägt. Die Wellenlängenabhängigkeit ist auf die unterschiedliche Hellempfindlichkeit zurückzuführen, und die relativ hohe „Intensität“ führt zur Überlagerung der einzelnen Nachbildphasen.

Die Nachbilddauern betragen bei optischen Energien von 0,25 mJ bis 2,5 mJ typisch zwischen 140 s und 250 s, können im Einzelfall aber auch unter 100 s liegen. Es handelt sich daher auch in diesem Fall um typische Anwendungen von Lichtquellen, die gemäß zum Zeitpunkt der Untersuchungen gültigen Klassifizierungsvorschriften als Laser der Klasse 1 einzuordnen sind. Eine Gefährdung der Augen ist aufgrund der Tatsache ausgeschlossen, dass es sich um ausgedehnte Quellen handelt, bei denen eine größere maximal zulässige Leistung abgestrahlt werden darf, ohne dass die maximal zulässigen Grenzwerte der Bestrahlung für eine Expositionsdauer von maximal 5 s überschritten werden.

Da hier als Abbruchkriterium das nicht mehr Wahrnehmen einer Farbe gemäß der angebotenen Farbkreisdarstellung war, zeigt ein Vergleich mit den zuvor auf andere Art und Weise, d. h. bei Anwendung anderer Abbruchkriterien, ermittelten Nachbilddauern, dass im Wesentlichen übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden.

Die anfangs gehegte Hoffnung, dass man die Auswirkung eines Nachbildes durch eine aus dem Blendungsereignis ableitbare bestimmte Farbblindheit beschreiben könne, musste relativ schnell verlassen werden, da es eine – wie auch immer definierte – Standardfarbblindheit in der Praxis kaum gibt. Die Verschiedenheiten sind dabei so groß, dass kein allgemeingültiger Zusammenhang hergeleitet werden kann

mit dem man die Auswirkungen eines Nachbildes, z. B. als Folge der Blendung durch eine bestimmte Blendlichtquelle (Wellenlänge, Dauer usw.) mit derjenigen des Farbsehvermögens eines bestimmten Farbenblinden gleich setzen kann.

Darüber hinaus ist aufgrund durchaus mehr oder weniger verschiedener Netzhautpigmentierung, und zwar sowohl im Bereich der Makula als auch extrafoveolar davon auszugehen, dass eine Übereinstimmung weder der wahrgenommenen Effekte noch der Beeinflussung der getesteten Sehfunktionen trotz physikalisch festgelegter Parameter nicht gegeben ist, da die Interindividualität bei den Testpersonen zu groß ist.

Ob es überhaupt sinnvoll sein könnte, eine Nachbilderscheinung mit dem Vorliegen einer Farbenblindheit zu vergleichen, muss aus zwei weiteren Gründen in Frage gestellt werden, auch wenn die Vorstellung an sich doch recht „sympathisch“ erscheinen könnte, da man sich eventuell relativ leicht in die Situation eines Farbenblinden versetzen könnte.

Erstens ist – wie die Untersuchungen gezeigt haben – der Nachbildfarbenverlauf ein zeitlich dynamischer Vorgang, während Farbenblindheit eine statische Erscheinung ist. Auch der Wechsel von einer Form zur anderen wäre hier nur teilweise hilfreich.

Zweitens kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Blendung selbst durch eine monochromatische bzw. durch eine quasi-monochromatische Lichtquelle – wie im Falle eines Lasers bzw. einer LED – nur eine Sorte der drei Zapfen in der Netzhaut selektiv stimuliert. Die Anschauung, dass S-Zapfen nur von blauem, M-Zapfen nur von grünem und L-Zapfen nur von rotem Licht gebleicht und damit stimuliert werden, trifft sicherlich nicht zu, und zwar auch nicht, wenn auf den drei Zapfen und deren Additivität die Trichromasie und damit das Farbsehen begründet werden. Zumindest M- und L-Zapfen haben eine sehr breite Wirkungsfunktion und man kann sogar davon ausgehen, dass alle Zapfen im Prinzip auch alle Wellenlängen und damit Farben, einschließlich weiß, „detektieren“ können [293].

Mit dem Verlauf der Farben hat sich schon früh WEVE [329] befasst und dabei festgestellt, dass z. B. der Übergang von Gelb nach Grün meist über Mischfarben – in diesem Fall über Gelbgrün – erfolgt. Wenn aber dagegen der Übergang zur komplementären Farbe, z. B. von Rot nach Grün, erfolgt, dann stellte er fest, dass dies nicht über die Mischfarbe, also Gelb, sondern plötzlich vonstatten geht.

Außerdem hat WEVE auch den Beginn der jeweiligen Nachbildfarbe in Abhängigkeit der Stimulationsintensität von weißem Licht untersucht und gefunden, dass der Beginn entweder bei Gelbgrün, Grün oder gar Rot lag, dann aber die darauf folgenden Farben immer in der unveränderten Reihenfolge blau, gelb, grün, rot, bläulichgrün beobachtet wurden. Darüber hinaus hat WEVE auch verschiedene Lichtquellen zur Bestrahlung benutzt und dabei im Nachbildverlauf immer Karminrot gefunden – ein Ergebnis, das zumindest durch die hier dokumentierten Untersuchungen nicht bestätigt werden kann.

Bei den hier dargestellten Ergebnissen zum Verlauf der farbigen Nachbilder wurde der zeitliche Einfluss der Bestrahlung des „messenden“ Auges durch das jeweilige Testbild (Farbkreis) am Bildschirm auf die vom geblendeten Auge wahrgenommene

momentane Nachbildfarbe nicht berücksichtigt. Es ist aber davon auszugehen, dass ein Bildschirm mit einer Leuchtdichte von ca. 100 cd/m² bis 250 cd/m² durchaus ein Nachbild erzeugt, das dann wiederum die Wahrnehmung der durch den Farbkreis zur eigentlichen Messung angebotenen Farben beeinflusst. Dieser Einfluss ist dann wiederum zeitabhängig und vom Ausmaß des noch auf dem ursprünglich exponierten Auge vorhandenen Nachbildes abhängig. Zu Beginn dürfte der dadurch bedingte Fehler vernachlässigbar sein, er könnte aber gerade im letzten Abschnitt des Nachbildfarbenverlaufs einen Einfluss haben. Hierzu müsste der Nachbildeindruck ermittelt werden, den das Betrachten des Farbkreises selbst erzeugt. Dies ist bis jetzt nicht erfolgt.

Man könnte aber auch eine Betrachtung auf der Basis der Untersuchungen von GEISLER [323] machen, der die Gültigkeit der Hypothese des sogenannten „äquivalenten Hintergrundbildes“ auf die Zapfen untersucht hat. Dabei wurde von einem Zusammenhang ausgegangen, der die Regeneration der gebleichten Rezeptoren im zeitlichen Verlauf berücksichtigt (vgl. Gl. (2.3)). Als Regenerationszeitkonstanten werden aufgrund insbesondere individueller Unterschiede Werte zwischen 84 s und 146 s [324] bzw. 90 s und 129 s [323] ermittelt. Die Zeitkonstante zur Regeneration der Stäbchen ist dagegen mit ca. 400 s deutlich länger [327].

GEISLER ging dabei so vor, dass er sogenannte „korrigierte Troland-Werte“ benutzte, d. h. statt von einer Intensität I jeweils von einem Wert $p \cdot I$, wobei sich der Anteil p der zum Zeitpunkt t noch vorhandenen Pigmente mit der Zeitkonstante t_0 aus einem Anfangswert q_0 wie folgt ergab:

$$p = 1 - q = 1 - q_0 \cdot \exp(-t / t_0). \quad (4.6)$$

Die aus der Betrachtung des Farbkreises als ständige Hintergrundbeleuchtung resultierende Bleichung könnte man unter der Annahme einer zur Bleichung der Hälfte aller Pigmente erforderlichen Intensität I_0 ebenfalls durch Modifikation des Ansatzes von GEISLER abschätzen gemäß

$$p^* = \frac{I_0}{I_0 + I}, \quad (4.7)$$

wobei I_0 nach [324] zwischen $3,3 \cdot \log td$ und $4,6 \cdot \log td$ liegt.

4.3.6.4 Blendeindruck bei einem bewegten Linienlaser

Es ist bekannt, dass die Empfindlichkeitsverringering durch eine flüchtige Adaptationsquelle viel größer ist als bei einer stetigen Quelle [347]. Um Erfahrungen mit bewegten Blendlichtquellen zu sammeln, wurden in einem Laborversuch 89 Personen in sitzender Position von einem Linienlaserstrahl „überstrichen“. Als Laser fand dabei ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser Verwendung, der eine Wellenlänge von 532 nm emittierte. Der Laser wurde als scannender Laser betrieben, und zwar entsprechend der Versuchsanordnung, wie sie in [153] beschrieben wurde.

Den Testpersonen fiel bei dieser Versuchsanordnung eine praktisch rein passive Aufgabe zu, da von ihnen nicht mehr verlangt wurde, als dass sie in Richtung einer

Ablenkeinheit schauen sollen, von der sie entweder gar nicht wussten, um was es sich handelte oder aber zuvor entweder teilweise oder umfassend informiert wurden.

Die Scangeschwindigkeit betrug 2,8 cm/s, wobei berücksichtigt wurde, dass der Laserstrahl des eingesetzten 10 mW Lasers mit einer maximalen Leistung von 0,8 mW während einer Zeitdauer von 250 ms in eine 7 mm-Pupille in einem Abstand von 0,5 m fallen konnte.

Im Einzelnen ergab die Befragung der Versuchspersonen nach der Exposition mit einem scannenden Laserstrahl folgendes Ergebnis:

- Als hell empfanden die Laserstrahlexposition 57 von 89, d. h. 64 %,
- geblendet fühlten sich 45 von 89, d. h. 50,6 % und
- ein Nachbild gaben 52 von 89, d. h. 58,4 % an.

Die Einzelergebnisse für 5 verschiedene Versuchsreihen sind in Tabelle 4.14 wiedergegeben. Dabei betraf Reihe 1 und 2 Personen ohne Aufklärung, Personen aus Reihe 3 waren teilaufgeklärt und solche aus den Reihen 4 und 5 vollkommen informiert über den Laserstrahl (für genauere Angaben siehe auch [153]).

Tab. 4.14 Ergebnisse von 5 Versuchsreihen mit einem Laserlinienstrahl zur Bestimmung des Blendungsempfindens und der Farbwahrnehmung

Versuchsreihe	Probandenanzahl	Strahl als hell empfunden		Vom Strahl geblendet		Nachbild wahrgenommen	
1	26	12	46,2%	9	34,6%	19	73,1%
2	14	6	42,9%	2	14,3%	5	35,8%
3	11	6	54,5 %	5	45,5 %	7	63,6%
1 – 3	51	24	47,1%	16	31,4%	31	60,8%
4	24	19	79,2%	17	70,8%	14	58,3%
5	14	14	100%	12	85,7%	7	50,0%
4 + 5	38	33	86,8%	29	76,3%	21	55,3%
gesamt	89	57	64%	45	50,6%	52	58,4%

Bei diesen Untersuchungen war auffallend, dass unter den zuvor über das Versuchsvorhaben aufgeklärten Testpersonen immerhin 33 von 38, d. h. 86,8 %, das Ereignis als hell ansahen und sich nur 9 von 38, d. h. 23,7 %, nicht geblendet fühlten.

Im Gegensatz dazu empfanden nur 24 von 51, d. h. 47,1 %, eine Laserbestrahlung als hell, wenn sie nicht vorher informiert worden waren, und es fühlten sich unter diesen Testpersonen auch nur 16 von 51, d. h. 31,4 % geblendet. Diese Teilergebnisse lassen darauf schließen, dass eine Vorabinformation unter Umständen eine Erwartungshaltung suggeriert, die zu entsprechend stärkerer subjektiver Bewertung bzw. Empfindung führt. Klarheit darüber kann nur eine objektivierte Beurteilung, d. h. letztlich eine entsprechende Messung, bei der auch die Nachbilderscheinung erfasst wird, ergeben.

Insbesondere die geringe prozentuale Angabe einer Nachbilderscheinung überrascht in diesem Zusammenhang, da ein solcher Laserstrahl durchaus ein sehr helles Ereignis darstellt.

Unter denjenigen, die ein Nachbild wahrnahmen, wurde dieses überwiegend als grüner Punkt beschrieben. In 2 Fällen wurde ein grüner Strich angegeben und jeweils einmal von einem hellen Punkt, einem hellen Fleck, einem weiß-blauen Punkt oder von einem roten Punkt gesprochen. Eine Person konnte die Erscheinung nicht beschreiben, die sie wahrgenommen hatte.

Bereits eine solche einfache Untersuchung zeigt, dass selbst die Wahrnehmung eines Nachbildes und das Empfinden einer Blendung nicht selbstverständlich sind und auch dann nicht in Erscheinung treten müssen, wenn dies eigentlich aufgrund vorhandener Leuchtdichteänderungen im Gesichtsfeld erwartet werden kann.

4.3.7 Farberkennbarkeit und Kontrastempfindlichkeit

Auf die nahe liegende Frage warum bei den Untersuchungen mehr Wert auf die Farbsehempfindlichkeit gelegt wurde als auf die Sehschärfe, lässt sich feststellen, dass es bekannt ist [205], dass in der Ophthalmologie zwar seit vielen Jahren die auf SNELLEN aus dem Jahre 1862 basierenden Sehtafeln zur Bestimmung der Sehschärfe benutzt werden, daraus aber insbesondere wegen des großen Kontrastes der verwendeten Buchstaben in vielen Fällen eigentlich keine brauchbaren Aussagen bezüglich der Sehfähigkeiten in bestimmten Situationen abgeleitet werden können. Es kann z. B. die Sehschärfe, die in einem verdunkelten Raum ermittelt wurde, normal sein, andererseits aber die Sehfunktion der betreffenden Person dennoch für bestimmte Tätigkeiten nicht ausreichend sein. Daher wird bei den Untersuchungen zur Auswirkung einer Blendung insbesondere Wert gelegt auf die Veränderung der Kontrast- und Farbsehempfindlichkeit.

Die Unterschieds- bzw. Kontrastempfindlichkeit ist die elementarste Grundfunktion des visuellen Systems. Es ist im Prinzip unabhängig davon ob ein Gegenstand heller oder dunkler ist als der Hintergrund, die bewirkte Schleierleuchtdichte verringert den Kontrast des Gegenstandes. Gerade da aber ein entsprechender Kontrast zur Wahrnehmung eines Gegenstandes erforderlich ist, macht es eine Reduktion des Kontrastes unter Umständen in gewissen Situationen schwieriger, Gegenstände zu entdecken.

Der photometrische Kontrast wird durch eine definierte Beziehung zwischen örtlich oder zeitlich unterschiedlichen Leuchtdichten im Gesichtsfeld beschrieben.

Zur Berechnung kleiner Sehobjekte der Leuchtdichte L_I , welche dem Infeld (Fläche eines Sehobjektes im Gegensatz zum Umfeld) entsprechen und sich im großen Umfeld (Umgebung eines Sehobjektes) der Leuchtdichte L_U befinden, wird zweckmäßig der sogenannte WEBER-Kontrast benutzt:

$$K = \frac{L_I - L_U}{L_U} \quad (4.8)$$

Die Kontrastschwelle bezeichnet den geringsten wahrnehmbaren photometrischen Kontrast. Ihrem Kehrwert entspricht die Kontrastempfindlichkeit. Die Leuchtdichteunterschiedsschwelle stellt den kleinsten, unter gegebenen Bedingungen noch wahrnehmbaren Leuchtdichteunterschied $L_{max} - L_{min}$ dar. Sie wird hauptsächlich durch die Leuchtdichte des Umfeldes, welche für den Adaptationszustand verantwortlich ist, bestimmt. Das Minimum befindet sich bei einer etwa dem Mittelwert von L_{max} und L_{min} entsprechenden Umfeldleuchtdichte.

Der physiologische Kontrast ist ein durch die zeitliche oder örtliche Reizverteilung auf der Netzhaut bedingtes Phänomen, das beim Betrachten von Feldern ungleicher Leuchtdichten oder ungleicher Farben auftritt und damit einen Empfindungsunterschied hervorruft. Dabei wird nach der Art der Empfindung in dem Helligkeitskontrast (vorwiegend in der Helligkeit empfundener Kontrast) und dem Farbkontrast (vornehmlich im Buntton und/oder der Sättigung empfunden) unterschieden. Bezogen auf örtliche und zeitliche Reize wird zwischen dem Simultankontrast, dem Sukzessivkontrast und dem Metakontrast unterschieden.

Eine gleichzeitige unterschiedliche Reizung von benachbarten Netzhautstellen durch benachbarte Felder kennzeichnet den sogenannten Simultankontrast oder physiologischen Kontrast.

Sehschärfetests dienen dagegen dazu, um die Fähigkeit zur Auflösung feiner Details unter Bedingungen maximalen Kontrastes zu bestimmen. Dies ist aber eine Situation, die sich im normalen Leben nur selten findet.

4.3.7.1 Farbunterscheidungsfähigkeit nach Blendung mit farbigen LEDs

Für die Ausübung bestimmter Tätigkeiten am Arbeitsplatz ist ein funktionierendes Sehvermögen unabdingbar. Eingeschränkte Sehfähigkeit kann in bestimmten Situationen zu Gefährdungen führen. Beispiele dafür sind das Führen von Fahrzeugen zu Land und in der Luft sowie die Überwachung sicherheitskritischer Anlagen.

Für das Führen von Fahrzeugen sowie auch für die Überwachung von Anlagen spielt die Farbwahrnehmung eine besondere Rolle. Dabei ist das Erkennen von Signalen, die durch Verwendung unterschiedlicher Farben, und zwar insbesondere Rot, Grün und Gelb, gekennzeichnet sind, von größter Bedeutung. Das Nichterkennen von Warnsignalen kann fatale Folgen haben.

Einen summarischen Überblick zu in der Literatur existierenden Beschreibungen von Versuchen, die Änderungen der Farbempfindung nach Blendung oder Adaptation feststellten, gibt [243]. Messungen des Einflusses einer Blendung durch farbige LEDs

im Hinblick auf die Farbunterscheidungsfähigkeit sind darunter bislang nicht berichtet worden.

Um hierzu mehr Informationen zu erhalten, wurden zwei Versuchsszenarien realisiert, und zwar zum einen ein Versuch zur Farbdiskriminierung und zum anderen ein solcher zum Farbvergleich.

a.) Im Versuch zur Farbunterscheidung wurde den Probanden eine Erkennungsaufgabe gestellt, und zwar wurde nach der Blendung mit einer farbigen LED ein Signal dargeboten, das aus einer der drei Farben Rot, Gelb oder Grün bestand. Hierzu wurden kleine LEDs benutzt. Beim Erscheinen einer vorher festgelegten Farbe sollte hierauf mit einer bewussten Handlung reagiert werden. Die Handlung selbst bestand darin, dass möglichst schnell ein Taster gedrückt wurde. Als gesuchte Farbe wurde entweder Rot oder Gelb ausgewählt, wobei dann bei den beiden anderen Farben keine Reaktion verlangt wurde. Das jeweils zu erkennende Signallämpchen wurde den Probanden nur für eine begrenzte Zeit „angeboten“. Nach Ablauf dieser Zeit wurde die nächste zufällig ausgewählte Signalfarbe dargeboten, und zwar solange, bis keine signifikanten Fehler mehr auftraten.

Abb. 4.93 vermittelt einen Eindruck des hier verwendeten Versuchsaufbaus. Nach der Blendung durch eine farbige LED versucht der Proband, die im Gesichtsfeld vor ihm befindliche, jeweils aktivierte LED aus insgesamt 5 Anzeige-LEDs hinsichtlich ihrer Farbe zu erkennen. Verwendet wurden dazu 5 zweifarbige 3 mm-LEDs in den Farbkombinationen Grün/Rot, Grün/Gelb und Gelb/Rot (in Abb. 4.93 auf einem Board zu sehen), während zur Blendung eine HB-LED vom Typ Luxeon Star III in einer der Farben Royal Blue, Green, Amber oder Red eingesetzt wurde. Eine solche HB-LED ist in Abb. 4.93 in der Mitte einer optischen Schiene hinter einer Kondensorlinse mit einer Brennweite von 16 mm angeordnet.

Der erfolgte (oder auch nicht erfolgte) Druck auf den Taster wird protokolliert und in Abhängigkeit von der Zeit zusammen mit den Farbinformationen gespeichert. Durch die mehrfache Durchführung des Versuchs können Statistiken über die Häufigkeit und den Zeitpunkt von Fehlern bei der Farberkennung nach der Blendung erstellt werden.

Um die Versuchsdurchführung zu kontrollieren, wurde ein Programm mit LabView entworfen. Auf der Benutzeroberfläche des Programms können Einstellungen für den LED-Diodenstrom, die Expositionsblenddauer, die Anzeigezeitdauer sowie die Wahl der jeweils gesuchten Farbe zwischen Gelb und Rot vorgenommen werden.

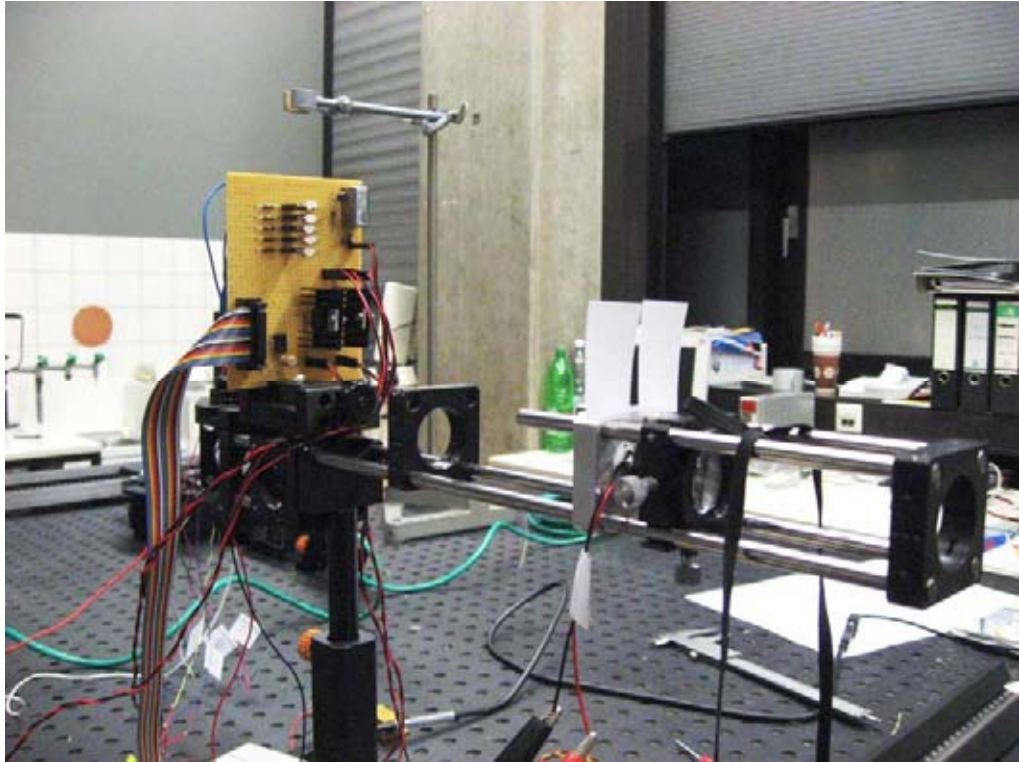


Abb. 4.93 Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Farbunterscheidungsfähigkeit nach Blendung mit einer farbigen LED

Die Expositionen der Versuchspersonen wurden bei einer optischen Leistung von 0,5 mW durchgeführt. Dabei handelte es sich um eine Leistung, die in einer 7 mm-Blende gemessen wurde, und zwar am Ort des Auges. In diesem Fall betrug die Hornhautbestrahlungsstärke $1,28 \text{ mW/cm}^2$. Damit lag die Bestrahlungsstärke in einem Bereich, der auch mit Lasereinrichtungen der Klasse 1 erreicht wird. Die Expositionsdauer wurde zu 1,25 s, 2,5 s oder 5 s gewählt.

Insgesamt wurden 118 Messungen in diesem Untersuchungsprogramm mit unterschiedlichen Farben der Blendlichtquellen durchgeführt. Dabei wurde die jeweilige Aufgabe von den Probanden gut verstanden und umgesetzt.

Die Auswertung dieser Untersuchungen erfolgte so, dass neben der gesamten Erfolgsquote auch diejenige nach Farben und insbesondere der Zeitpunkt des endgültigen Überschreitens einer Erfolgsquote von 80 % über der Zeit dargestellt wurde, und zwar jeweils für eine Gesamtdauer von 300 s.

Dargestellt wurde jeweils der relative Anteil richtiger Reaktionen. Bei den Diagrammen für den Gesamterfolg wurde zum Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Zeitpunkt eingezeichnet, an dem erstmals eine Reaktionsquote von 0,2 erreicht wurde, und der Zeitpunkt, an dem der Anteil erfolgreicher Reaktionen die Schwelle von 0,8 dauerhaft überschreitet.

Abb. 4.94 zeigt als Beispiel die Erfolgsergebnisse bei der Suche nach der Farbe Gelb nach einer Rotblendung während einer Dauer von 5 s, während Abb. 4.95 die Ergebnisse derselben Aufgabe nach einer Exposition von 2,5 s Dauer wiedergibt und

in Abb. 4.96 die Verhältnisse bei der kürzesten hier verwendeten Expositionsdauer von 1,25 s zeigt.

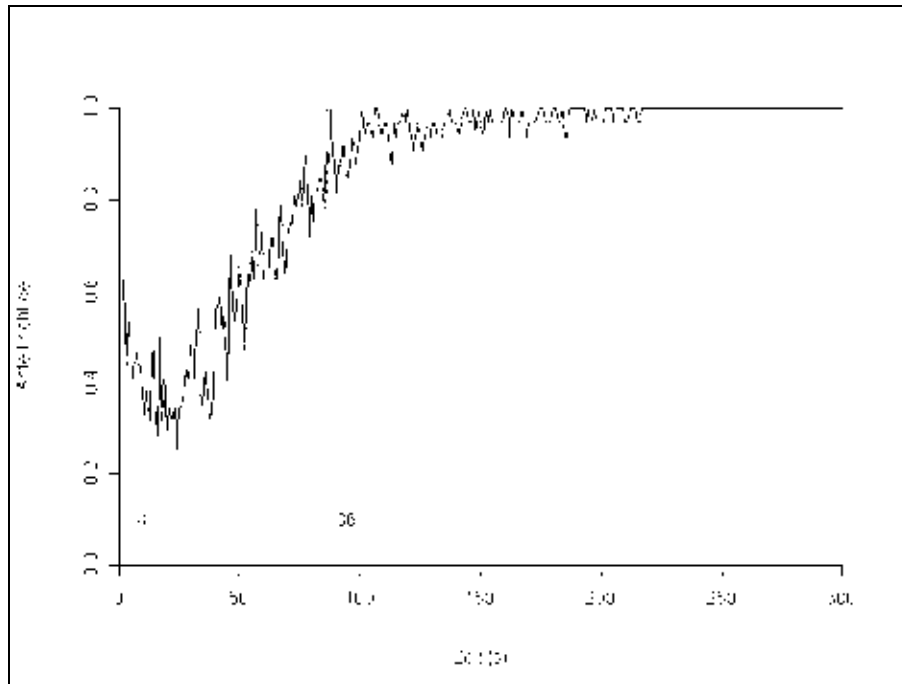


Abb. 4.94 Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, 0,5 mW und 5 s)

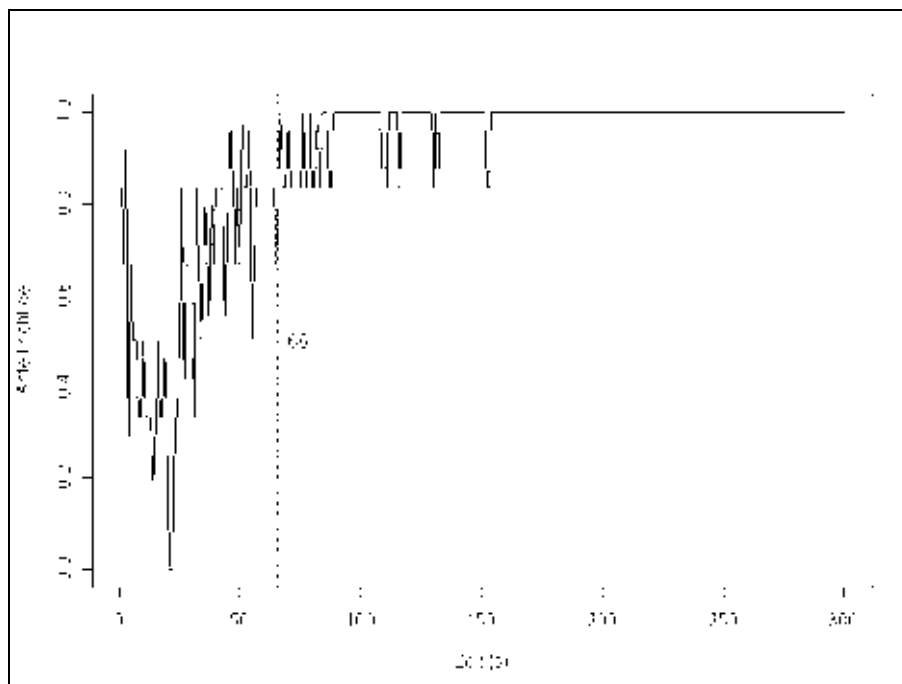


Abb. 4.95 Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, 0,5 mW und 2,5 s)

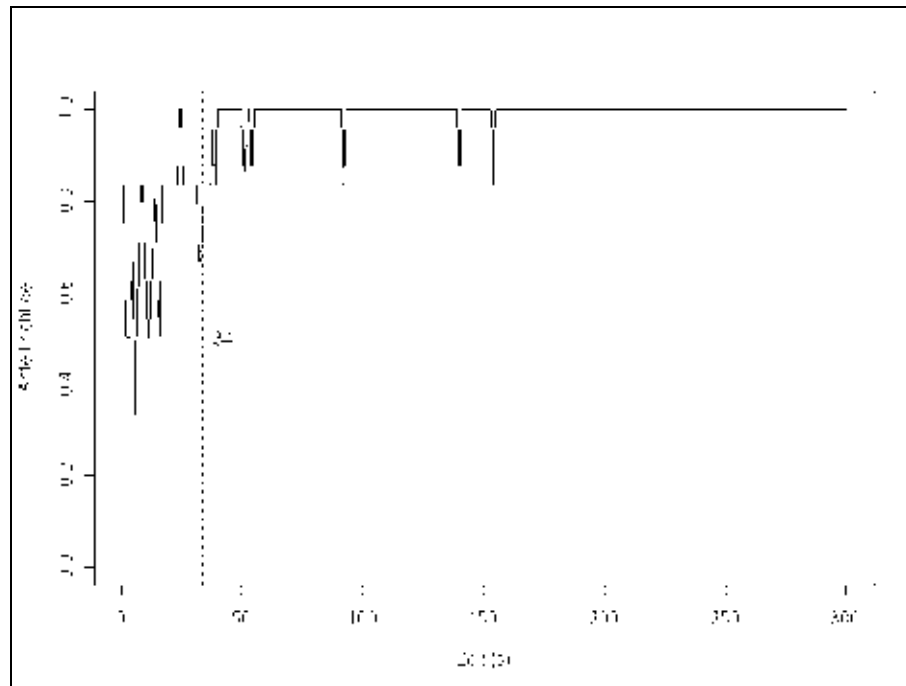


Abb. 4.96 Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, 0,5 mW und 1,25 s)

Ein Vergleich der 3 Abb. 4.94 bis 4.96 zeigt, dass bei kürzerer Expositionsdauer die Zeitdauer der Farbfehlererkennung entsprechend vermindert wird. Es ist allerdings kein linearer Zusammenhang zu erkennen.

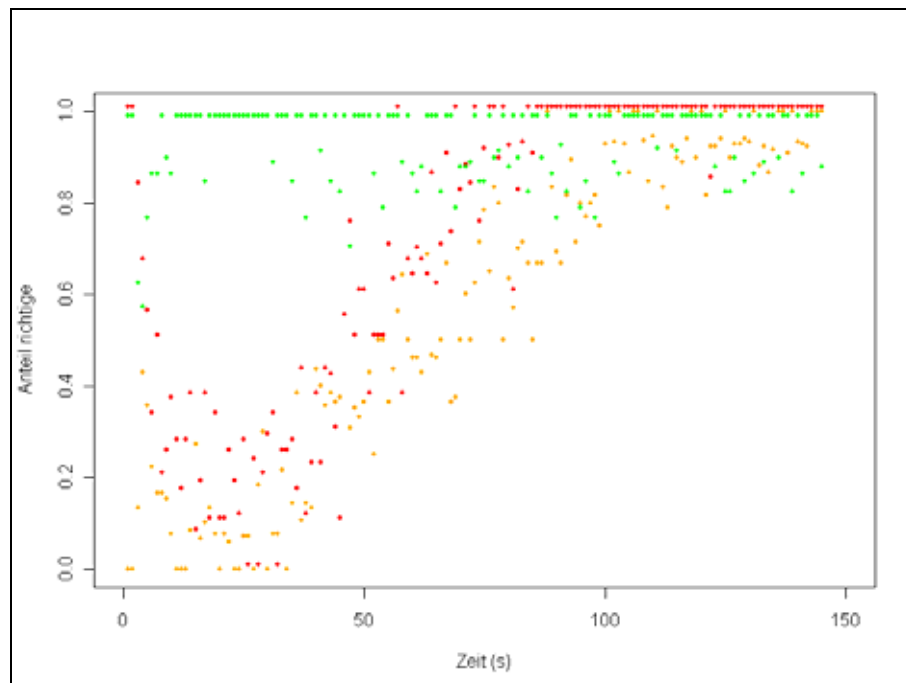


Abb. 4.97 Anteil richtiger Angaben nach Farben bei der Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, 0,5 mW und 5 s)

In Abb. 4.97 ist dargestellt, wie sich die Angaben der Farben als Funktion der Zeit nach der Exposition verteilt haben. Dabei ist zu erkennen, dass häufig Rot und Gelb verwechselt wurden.

In den Abb. 4.94-4.97 wird deutlich, dass die meisten Fehler bei roter Blendung bei der Erkennung von Rot und Gelb passieren. Rot wird fälschlicherweise für Gelb gehalten, während Gelb für Grün gehalten wird. Grün wird auch als Grün erkannt, allerdings ist anfangs kein Unterschied zwischen Gelb und Grün erkennbar. Die Erkennung von Rot scheint etwas früher wieder möglich als die Erkennung von Gelb.

Bei einer Expositionsdauer von 5 s können noch nach 150 s vereinzelt Fehler in der Erkennung von Gelb auftreten. Bei einer Expositionsdauer von 2,5 s ist die Erkennung nach 100 s weitgehend fehlerfrei.

Ähnliche Ergebnisse wurden bei Blendung mit anders farbigen LEDs erzielt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.15 zusammengefasst.

Tab. 4.15 Zeitdauer nach der 80 % der gesuchten Farbe nach Blendung richtig angegeben wird (Blendleistung: 0,5 mW) (n. [243])

Wellenlänge	Zeitdauer in s bei der 80 % richtig sind nach 5 s Exposition	Zeitdauer in s bei der 80 % richtig sind nach 2,5 s Exposition	Zeitdauer in s bei der 80 % richtig sind nach 1,25 s Exposition
638 nm	86		
638 nm		66	
638 nm			34
593 nm	44		
593 nm		71	
593 nm			102
520 nm	110		
520 nm		84	
520 nm			59
455 nm	66		
455 nm		45	
455 nm			118

Trägt man die Ergebnisse aus Tab. 4.15 graphisch auf, so erhält man eine Darstellung gemäß Abb. 4.98.

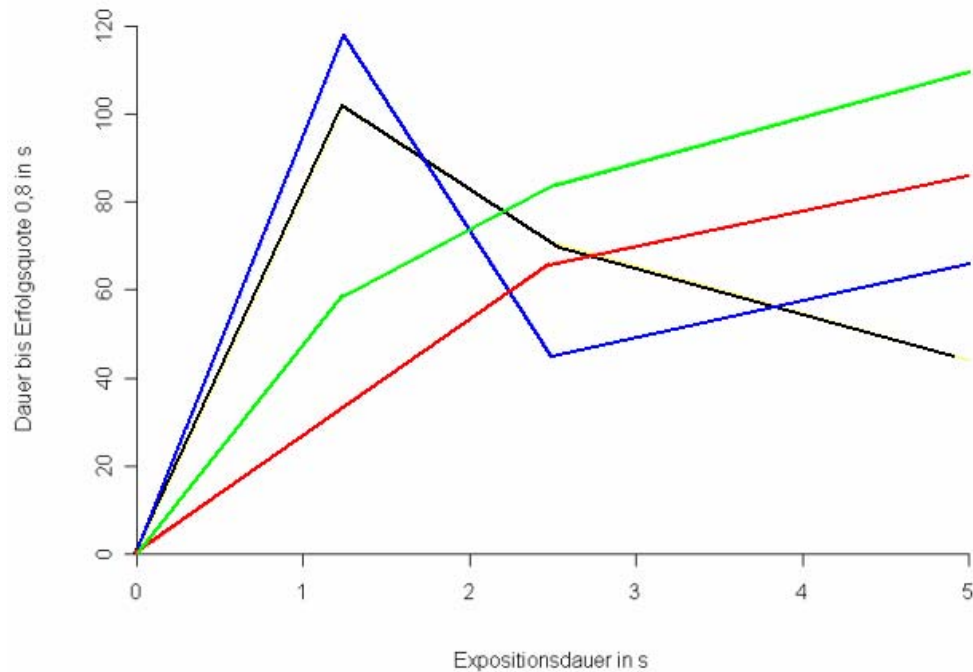


Abb. 4.98 Dauer der Beeinträchtigung in der Farbwahrnehmung als Funktion der Expositionsdauer (Werte gemäß Tab. 4.15)

Außerdem wird darin auch sichtbar, dass die Dauer der Blendung die Fehlerrate beeinflusst. Ob für Blau der abweichende Verlauf für geringe Expositionsdauern tatsächlich zutrifft, ist bei näherer Betrachtung, wie dies anhand der Ergebnisse, die in Abb. 4.99 u. 4.100 dargestellt sind, möglich ist, ist zumindest mit einem Fragezeichen zu versehen. Dagegen scheinen die Ergebnisse bei Gelbblendung tatsächlich eine abweichende Charakteristik aufzuweisen.

In den Diagrammen zum farbabhängigen Erfolg, die in [243] detailliert dargestellt sind, ist sichtbar, dass bei grüner Blendung die meisten Fehler bei der Erkennung von grünen Reizen gemacht werden. Rot scheint relativ schnell wieder erkennbar zu sein, darauf folgt Gelb.

Für Grün können bei einer Expositionszeit von 5 s noch nach 100 s vereinzelt Fehler auftreten. Für eine Expositionszeit von 2,5 s sind die Probanden nach ca. 84 s in ihren Angaben weitgehend fehlerfrei. Bei einer Expositionszeit von 1,25 s liegt die Fehlergrenze etwa bei 59 s. Der Grund für die wieder auftretenden Fehler nach 100 s ist nicht bekannt (s. [243]).

Bei gelber Blendung ist eine direkte Abhängigkeit der Dauer der Farbfehlererkennung von der Expositionsdauer nicht aus den Diagrammen zu entnehmen. Probanden berichteten von einem Effekt, wonach nach einer Zeit der subjektiven Verbesserung

des Farbsehens noch eine Phase mit schlechterer Farberkennung folgte. Dieser Effekt erwies sich allerdings als nicht kontrolliert reproduzierbar.

Wie problematisch im Einzelfall die Ermittlung der Dauer, nach der die zu suchende Farbe zu 80 % richtig erkannt wird, sein kann, zeigt Abb. 4.99 im Fall von blauer Blendung.

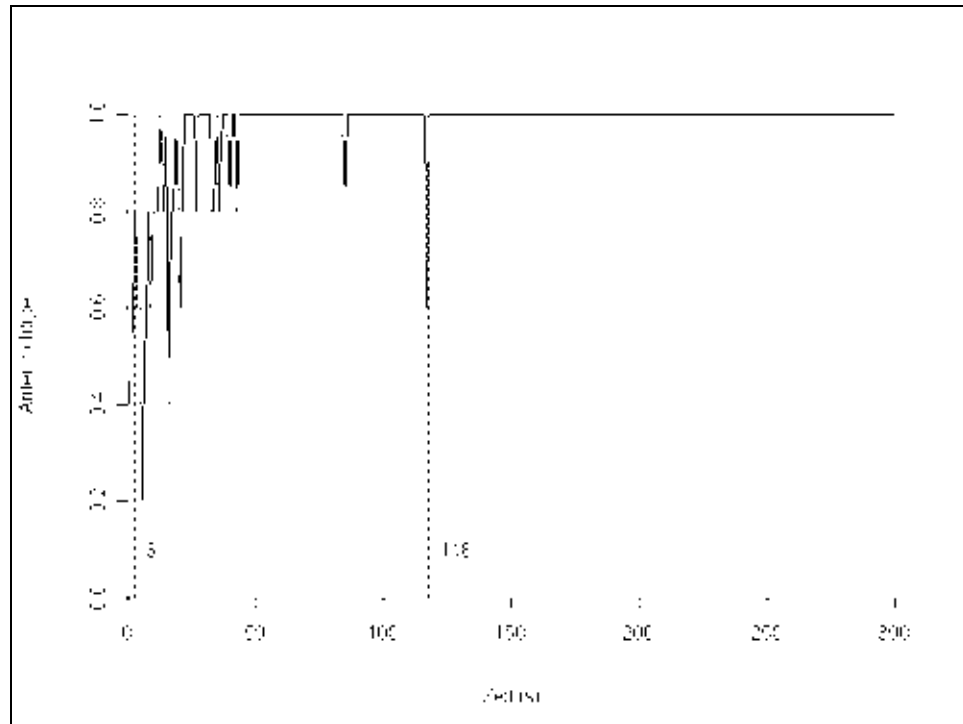


Abb. 4.99 Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit blauer LED, 0,5 mW und 1,25 s)

Es ist zu erkennen, dass die Zeitdauer von 118 s (vgl. auch Tab. 4.15) lediglich das Ergebnis von zu diesem Zeitpunkt neu aufgetretenen Fehlern ist, da eigentlich bereits nach ca. 25 s die Erfolgsquote 80 % war. Dies zeigt noch deutlicher die Darstellung der Erfolgsquote, wenn dabei die einzelnen Farben betrachtet werden, wie dies in Abb. 4.100 geschehen ist.

Auffallend ist, dass eine Blaublendung eine relativ starke Farbverfälschung nach Pink verursacht. Wie sichtbar ist, scheint die Erkennung von Rot bei Blaublendung wenige Probleme zu bereiten. Probleme ergeben sich dagegen bei der Erkennung von Gelb und Grün.

In den vorstehenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, welche Farben hauptsächlich falsch wahrgenommen werden, wenn zuvor eine Blendung mit einer farbigen LED statt gefunden hat. Die daraus resultierenden Zusammenhänge sind in Tabelle 4.16 dargestellt.

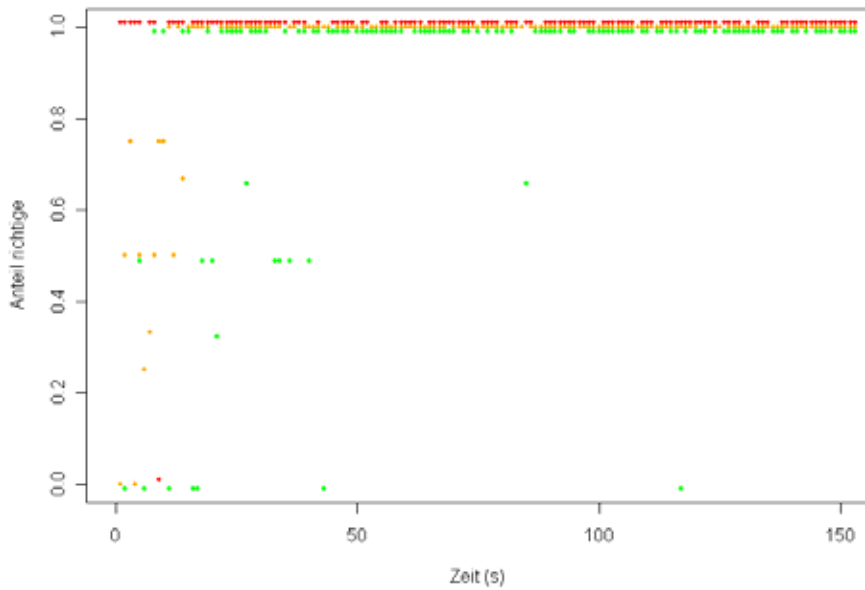


Abb. 4.100 Anteil richtiger Angaben nach Farben bei der Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit blauer LED, 0,5 mW und 1,25 s)

Tab. 4.16 Besonders häufig verwechselte Farben je nach Blendungsfarbe

Blendfarbe	hauptsächlich Fehler bei
Rot	Gelb, Rot
Gelb	Rot, Grün, Gelb
Grün	Grün, Gelb
Blau	Gelb, Grün

Tab. 4.17 Farben, die unter Blendungsbedingungen unverändert wahrgenommen werden

Blendfarbe	Unverändert wahrgenommene Farben
Rot	Gelb, Grün
Gelb	Gelb (bei längerer Exposition)
Grün	Grün, Gelb
Blau	Rot

Farben, die unter Blendung durch farbige LEDs im Wesentlichen gleich wahrgenommen werden, sind in Tabelle 4.17 aufgeführt.

Faktoren, die die Ergebnisse mehr oder weniger stark beeinflussen können, sind auch darin zu sehen, dass zu Beginn der Messung mit einer Reaktionszeit gerechnet werden muss, dass Verwirrung über die auftretenden Farben auftreten kann und das anfangs noch fehlende Sehvermögen dazu führt, dass es je nach Blendung einige Sekunden dauert, bis die LEDs überhaupt als Objekte erkennbar sind. Als Verzögerungszeit bis überhaupt eine Reaktion mit einer Erfolgsquote von 0,2 bis 0,4 erreicht wird, wurden durchschnittliche Werte von 3 s bis 6 s festgestellt.

b.) In einem zweiten Versuchsdesign wurden die Probanden angeleitet, nach der Blendung durch eine farbige LED die Verschiebung der Rot/Grünwahrnehmung gewissermaßen „nachzuzeichnen“.

Dazu wurde ein Aufbau realisiert, der im Prinzip einem Anomaloskop nachempfunden war, und aus zwei gleichhellen von innen mit LEDs beleuchteten als Hohlkugeln fungierenden Tennisbällen bestand, wovon der eine in spektral echtem Gelb leuchtete, während der andere eine einstellbare Mischung aus Rot und Grün aufwies. Das spektrale Gelb wurde mit einer LED vom Typ „Luxeon Star III Amber“ (Wellenlänge 590 nm) erzielt, während zur Mischung eine LED vom Typ „Osram OSTAR Projection“ verwendet wurde. Bei dieser speziellen LED lassen sich die Farben Amber (Maximum bei 617 nm) und True Green (Maximum bei 525 nm) ansteuern. Den gesamten Aufbau für diesen Versuch zeigt Abb. 4.101.

Vor der eigentlichen Messung wurde die Leuchtdichte der beiden Hohlkugeln des Anomaloskops mit einem Leuchtdichte-Messgerät gemessen und dazu wurden die maximalen Ströme für die beiden Ausgangskanäle so eingestellt, dass beide Kugeln die gleiche Helligkeit aufwiesen.

Die Probanden mussten nach der Blendung das Mischungsverhältnis so einstellen, dass aus ihrer Sicht eine weitestgehende Übereinstimmung der Farben zu jedem Zeitpunkt gewährleistet war. Die sich daraus ergebende Kurve wurde gespeichert.

Ziel dieser Untersuchung war es, Rückschlüsse auf die Farbverfälschung nach der erfolgten Blendung ziehen zu können.

Auch diese Untersuchung wurde mit Unterstützung eines LabView-Programmes unter Verwendung der vorstehend benannten Benutzeroberfläche durchgeführt. Auf dieser konnten Einstellungen für die Ströme des Anomaloskops, des HB-LED-Diodenstroms und der Expositionsblenddauer vorgenommen werden.

Bei diesem Versuch wurde sofort im Anschluss an die Blendung das Anomaloskop mit beiden Ausgängen angesteuert und die Stellung des vom Probanden einzustellenden Potentiometers in Abständen von 50 ms eingelesen, und entsprechend danach die Ausgangskanäle gesetzt. Alle dabei aufgenommenen Messwerte wurden mit der zugehörigen Zeitinformation als Tabelle in einer Textdatei gespeichert.

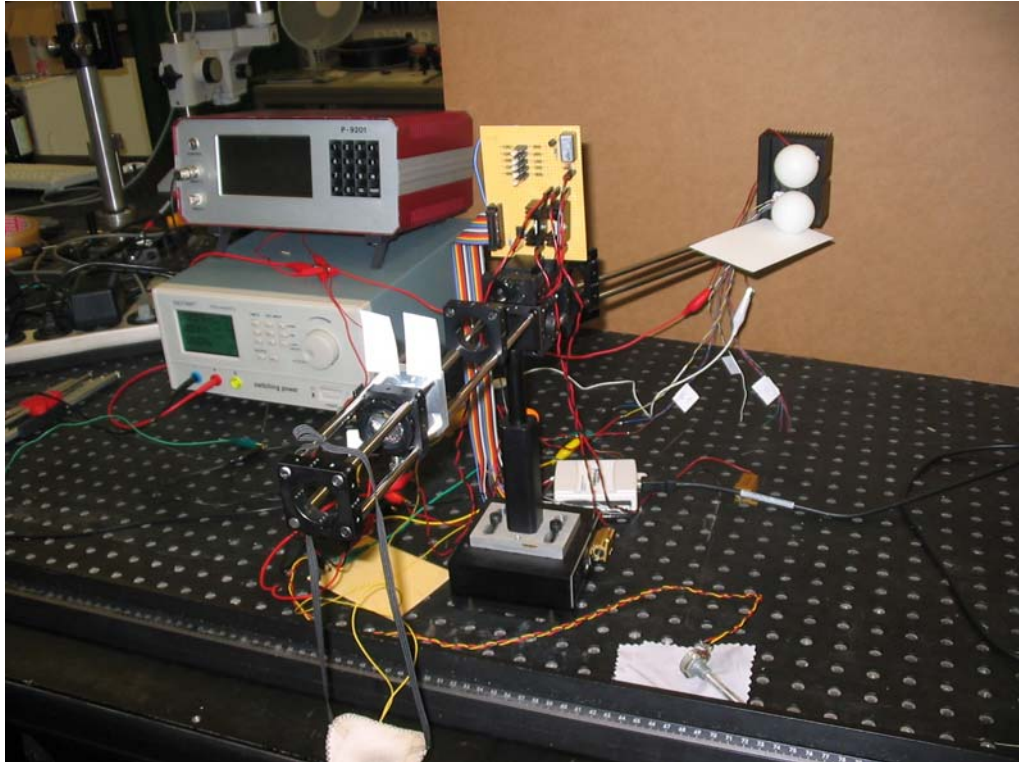


Abb. 4.101 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Farbvergleichs

Die optische Leistung, die von der als Blendlichtquelle verwendeten LED abgegeben wurde, betrug 0,5 mW. Als Expositionsdauern wurden 1,25 s, 2,5 s oder 5 s eingestellt.

Insgesamt wurden 23 Messungen in dieser Teiluntersuchung durchgeführt, und zwar vorwiegend mit einer rot-emittierenden LED, aber auch einige Versuche mit allen anderen Wellenlängen. Dabei zeigte sich aber, dass die Wahrnehmungen der verschiedenen Testpersonen sehr unterschiedlich waren. Gerade bei der hier zu bewältigenden Aufgabe zeigte sich, dass einige Probanden relativ gut durch kleine Anpassungsschritte einen Verlauf wiedergeben konnten. Andere brauchten dagegen sehr weite „Ausschläge“, um das Optimum der Darstellung zu finden, während wieder andere sich überhaupt außerstande sahen, die Aufgabe zu erfüllen, da auf sie Farben nach der Blendung zu unterschiedlich wirkten, und es für sie daher nicht möglich war, eine Ähnlichkeit überhaupt herzustellen. Der von den Probanden erzeugte Verlauf stellt daher nur die größtmögliche Ähnlichkeit zwischen den leuchtenden Hohlkugeln dar.

Aufgrund der unterschiedlichen Reaktionen der Probanden auf diesen Versuch wurden in die Auswertung schließlich nur die Daten des Versuchsleiters aufgenommen [243].

Bei diesem Untersuchungsteil erfolgte die Auswertung durch Bestimmung des Maximalwerts des gemittelten Verlaufs, und zwar für jede Farbe in einer Grafik. Darüber hinaus wurden die Maximalwerte in Abhängigkeit von der Expositionsdauer, der Erregungsdifferenz der L-Zapfen zu den M-Zapfen und als V-Lambda-bewertete Leistung dargestellt.

Abb. 4.102 zeigt die Verschiebung bei roter, Abb. 4.103 bei grüner Blendung als Funktion der Zeitdauer bei jeweils 3 verschiedenen Expositionsdauern.

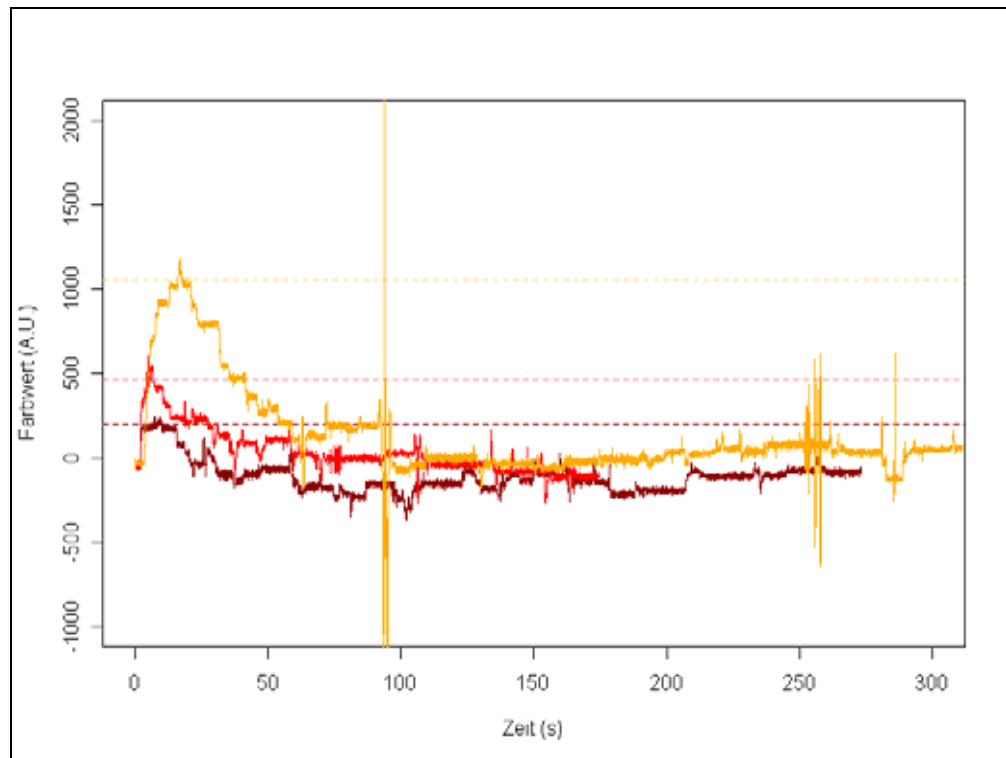


Abb. 4.102 Farbwertverschiebung in beliebigen Einheiten durch Rotblendung ($P = 0,5 \text{ mW}$; Expositionsdauer, von oben nach unten: 5 s, 2,5 s und 1,25 s)

Ähnlich wie bei der Verschiebung der Farbwerte bei Grünblendung ist auch der Verlauf bei Gelbblendung. Lediglich eine Blaublendung zeigte hier einen deutlich geringeren Einfluss.

Bei diesem Versuch ist zu sehen, dass die vorher gleich oder zumindest sehr ähnlich erscheinenden Farben nach der Blendung mit Rot, Grün oder Gelb nicht mehr übereinstimmen. Teilweise konnten sie auch durch beliebige Überlagerung von Rot und Grün nicht zur exakten Übereinstimmung gebracht werden.

Stellt man die maximale Rotverschiebung bei Rotblendung graphisch wie in Abb. 4.104 dar, so erkennt man, dass sich diese bei roter Blendung zur Expositionsdauer annähernd linear verhält.

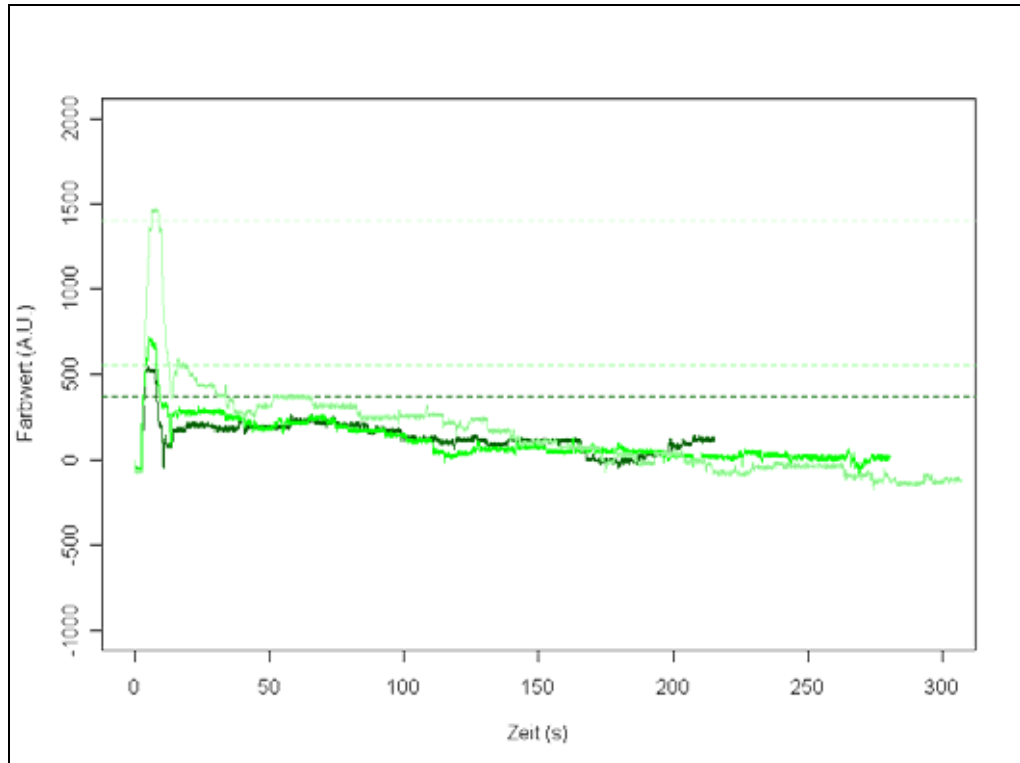


Abb. 4.103 Farbwertverschiebung in beliebigen Einheiten durch Grünblendung ($P = 0,5 \text{ mW}$; Expositionsdauer, von oben nach unten: 5 s, 2,5 s und 1,25 s)

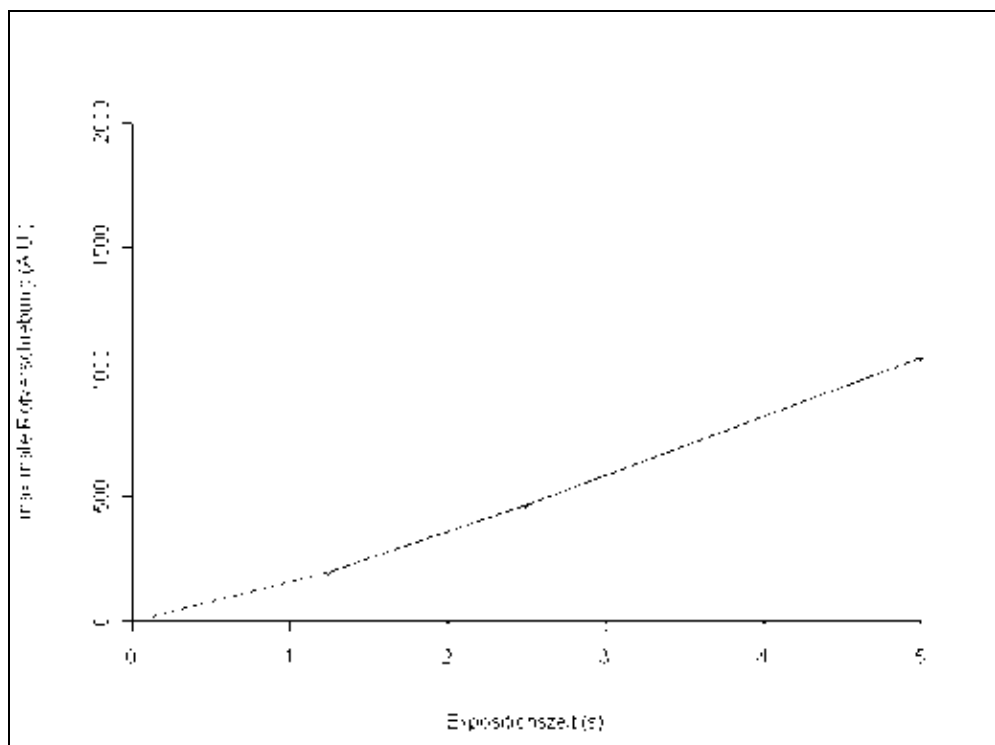


Abb. 4.104 Maximale Rotverschiebung bei roter Blendung

Auch bei grüner (s. Abb. 4.103) und gelber Blendung [243] ist ebenfalls eine lineare Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu erkennen, während sich bei blauer Blendung eine – wenn überhaupt – nur sehr geringe Beeinflussung zeigte.

Auf die Frage nach der Ursache einer Rotverschiebung kann man von einer unterschiedlichen Empfindlichkeit der verschiedenen Zapfen bei den Sehzellen ausgehen. Unter Berücksichtigung der spektralen Leistungsverteilung der hier eingesetzten LEDs mit Maxima bei 455 nm (Blau), 520 nm (Grün), 593 nm (Gelb) und 638 nm (Rot), und unter der Annahme, dass die spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen so sind, dass die L-Zapfen in einem weiten Bereich des Spektrums die empfindlichsten Zapfen sind, und zwar insbesondere oberhalb von etwa 500 nm, könnte die Rotverschiebung der Farbwahrnehmung eine Folge einer unterschiedlichen Bleichung der M- und L-Zapfen sein. Eine entsprechende Analyse wurde in [243] durchgeführt, konnte aber diese Annahme als Ergebnis bewerteter Leistungsspektren nicht bestätigen. Andererseits könnte die Ursache auch in der Bewertung der Helligkeit der Lichtquelle liegen.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass unter normalen Bedingungen annähernd metamere Farben nach der Blendung durchaus nicht mehr metamer sein müssen.

Zusammenfassend lässt sich zu diesen Teiluntersuchungen feststellen, dass es sich im Gegensatz zur Sehschärfe, deren Verschlechterung im ersten Moment nach der Blendung wohl mit dem gebleichten Pigment zusammenhängt, bei der Farbwahrnehmung, aufgrund der hier vorgestellten Messungen und auch aufgrund der Beschreibungen in der Literatur, nicht allein um Ausbleichvorgänge handeln kann. Wahrscheinlicher ist eine Auslösung oder zumindest Mitauslösung dieses Phänomens durch andere Faktoren, wie neuronale Adaptation.

Es kann aus diesen Aussagen aufgrund der eingeschränkten Leistungswerte und Expositionsauern aber keine direkte Vorhersage darüber gemacht werden, ob nicht doch wesentlich hellere Signalleuchten besser unterschieden werden können, aber zumindest ist große Vorsicht geboten, wenn entsprechende Blendlichtquellen in der Nähe von Signalanzeigen usw. vorkommen können.

Bislang gibt es zu der vorstehend genannten Thematik nur wenige Untersuchungen aus länger zurückliegender Zeit. BRINDLEY berichtete über Untersuchungen, bei denen oft noch 6 – 8 Stunden nach der Exposition noch Nachbilder zu sehen waren und sogar 8 Monate nach seinen Experimenten nahm BRINDLEY noch ein schwaches Bild des verwendeten Adaptationsfeldes wahr [344]. Die verwendeten Adaptationsleuchtdichten lagen in diesen Versuchen zwischen ca. 2 800 cd/m² und ca. 44 000 cd/m² und die Expositionsauern zwischen 10 s und 30 s. BRINDLEY beschrieb die Entstehung künstlicher Tritanopie, und zwar durch Adaptation auf Violett bei 438 nm bei einer Leuchtdichte von 3 500 cd/m² nach einer Exposition über 30 s. Künstliche Protanopie erzielte er durch Adaptation auf Rot (ca. 38 000 cd/m², 20 s). Dabei war die Empfindlichkeit für Rot im Vergleich zu derjenigen bei Grün deutlich verringert und Wellenlängen zwischen 540 nm und 600 nm waren nicht zu unterscheiden, wenn die Helligkeiten geeignet angepasst wurden. Sie erschienen dann in einem ungesättigten Blau-Grün.

Dabei konnte BRINDLEY einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte des Adaptationsfeldes und der Störung feststellen, indem sich der ungestörte Wellenlängenbereich mit abnehmender Leuchtdichte über 600 nm hinaus bis 630 nm erstreckte.

Eine künstliche Deuteranopie konnte BRINDLEY durch Adaptation nicht erzeugen. Dagegen war die Erzeugung unterschiedlicher künstlicher Monochromasie möglich, und zwar mit Adaptation auf Violett und Blau-Grün, Violett und Rot, sowie auf Gelb.

Bei niedrigeren Helligkeiten waren bei der Einstellung des Mischungsverhältnisses von Rot und Gelb-Grün zur Erreichung der Übereinstimmung mit Licht der Wellenlänge 580 nm ein erhöhter Rotanteil und ein erniedrigter Gelb-Grün-Anteil notwendig. Brindley schloss aus seinen Versuchen, dass das Ausmaß der Verschiebung keine direkte Abhängigkeit von der Wellenlänge des zur Adaptation verwendeten Lichts besitzt, sondern dass es allein von der Helligkeit abhängt.

Bei den zum Teil sehr hohen Leuchtdichten war es BRINDLEY, der sich selbst testete, nicht immer möglich, die auftretenden Nachbildfarben sehr leicht zu benennen. Dabei vermisste er auch die Möglichkeit eines gleichzeitigen Farbvergleiches.

Eine Erklärung für seine Ergebnisse sah BRINDLEY darin, dass durch die Adaptation wenigstens eine Sorte von Rezeptoren sich dadurch in ihrer spektralen Empfindlichkeit geändert haben musste.

Obwohl diese Experimente zur Erzeugung künstlicher Farbenblindheit nicht zuletzt den Einfluss einer Adaptation auf eine große Leuchtdichte beweisen, ist diese künstliche Farbenblindheit nur von vorübergehender Dauer. Entsprechende Angaben wurden von BRINDLEY dazu nicht gemacht.

4.3.7.2 Farb- und Kontrastsehen nach Blendung durch farbige LEDs

Hierzu wurde ein auf den Pelli-Robson-Farbtafeln basierendes Verfahren entwickelt und der zeitliche Verlauf des Farbkontrastsehens nach einer Blendung an Versuchspersonen bestimmt. Dazu wurde ein Messplatz entwickelt, bei dem unter definierten Normlichtbedingungen konstante Beleuchtungsverhältnisse vorliegen.

Da bei den Farbkontrastsehtafeln nicht auf kommerziell erhältliche Produkte zurückgegriffen werden konnte, musste eine „Eigenentwicklung“ solcher Tafeln durchgeführt werden. Dabei erwies sich die Herstellung entsprechend abgestufter Farbkontrastsehtafeln als drucktechnisch relativ schwierig. Die Probandenuntersuchungen wurden unter Laborbedingungen durchgeführt.

Eine wesentliche Erkenntnis vorangegangener Untersuchungen war, dass die Farbwahrnehmung nach Blendung gestört ist. Dabei ist die Dauer und Ausprägung der Störung abhängig von der Expositionsdauer und dem verwendeten Licht selbst.

Um diese Art der Störung quantitativ ausreichend genau zu kennen, wurde eine Untersuchung des Kontrastsehens mittels Darbietung farbiger Sehzeichen nach einer Blendung durchgeführt. Außerdem wurde das Farbsehen nach einer Blendung getrennt betrachtet, und zwar hinsichtlich der Dauer der Farbsinnstörung und abschließend bezüglich der subjektiven Empfindung farbiger Vorlagen und deren Verlauf. Alle drei Testverfahren wurden sowohl in Druck- als auch in Monitordarstellung verwirklicht.

Für die Untersuchungen wurden 4 HB-LEDs ausgewählt, deren Kennlinien in Abb. 4.105 dargestellt sind.

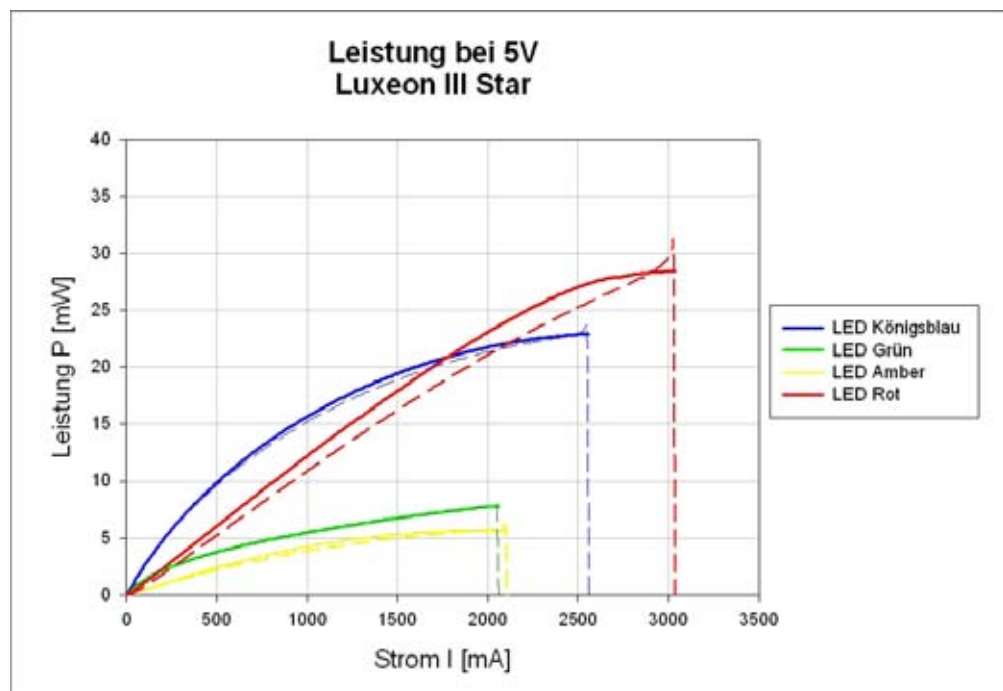


Abb. 4.105 Kennlinien der 4 verwendeten HB-LEDs

Die Wellenlängen der in Abb. 4.105 gezeigten LEDs betragen wie bereits in Abschnitt 4.3.7.1 angegeben 455 nm (Königsblau), 520 nm (Grün), 593 nm (Amber) und 638 nm (Rot). Zur Realisierung einer ausreichend großen Blendlichtquelle wurden die LEDs im Brennpunkt eines Kollimators mit einer Brennweite von $f = 16$ mm angebracht, um ein paralleles Strahlenbündel zu erzeugen. So entsteht das Bild der Quelle im Unendlichen. In diesem Fall muss dann der Kollimator als scheinbare Quelle betrachtet werden und nicht die LED selbst.

Da alle Expositionen in diesen Untersuchungen mit einer Dauer von 5 s durchgeführt wurden, ergab sich eine maximal zulässige Leistung von 30,9 mW. Die obere Leistungsgrenze ist durch die grüne und gelbe LED gegeben, wie aus Abb. 4.105 zu ersehen ist, da man mit diesen HB-LEDs maximale Leistungswerte von etwa 5 mW erreichen kann. Für die Versuche wurde eine Leistung von 4 mW hinter der Blende für alle LEDs gewählt. Die maximal zulässige Leistung war damit etwa um den Faktor 7,7 unterschritten.

Abb. 4.105 zeigt den hier verwendeten Expositionsaufbau und in Abb. 4.107 ist die Blendvorrichtung im Detail dargestellt.

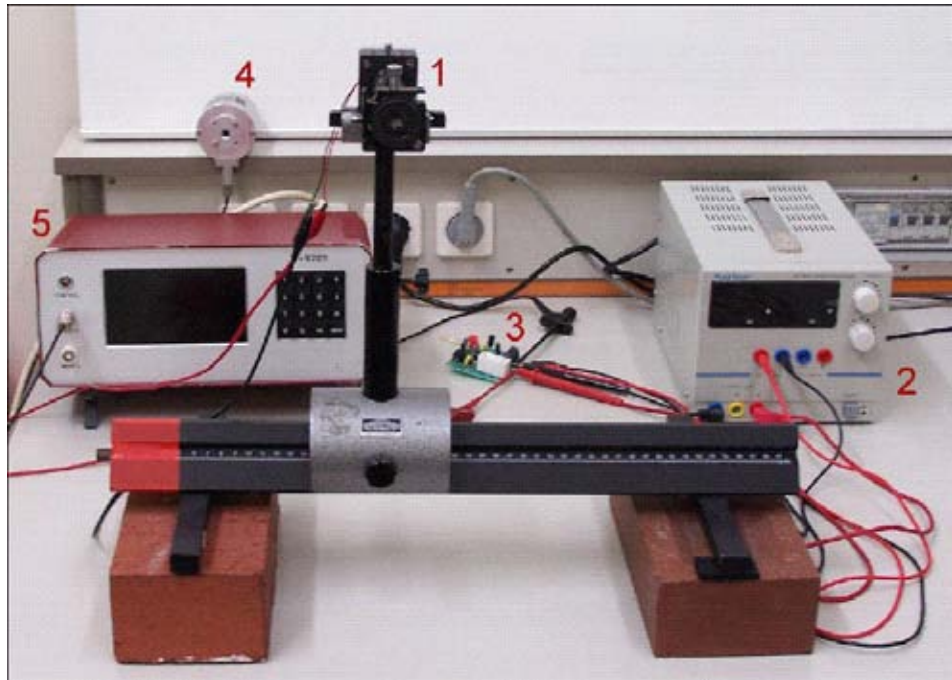


Abb. 4.106 Technischer Aufbau der gesamten Blendeinrichtung: (1) Blendvorrichtung mit LED und Blende, (2) Digitales Netzgerät, (3) Präzisionszeitschalter, (4) Messkopf mit 7 mm-Blende, (5) Leistungs-Messgerät

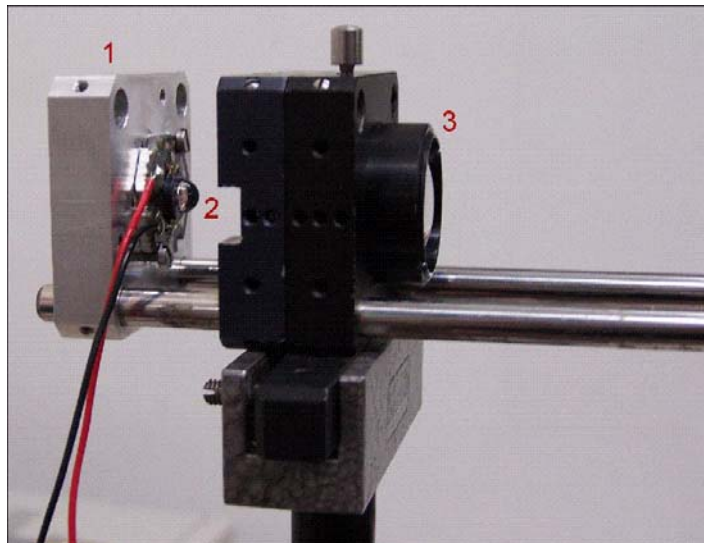


Abb. 4.107 Detaildarstellung der Blendvorrichtung - (1) Halterung und Wärmeleitplatte, (2) LED, (3) Kollimator

In Abb. 4.108 ist der Kollimator als Blendlichtquelle zu sehen und der Vorgang der Blendung für einen Beispielfall dargestellt.

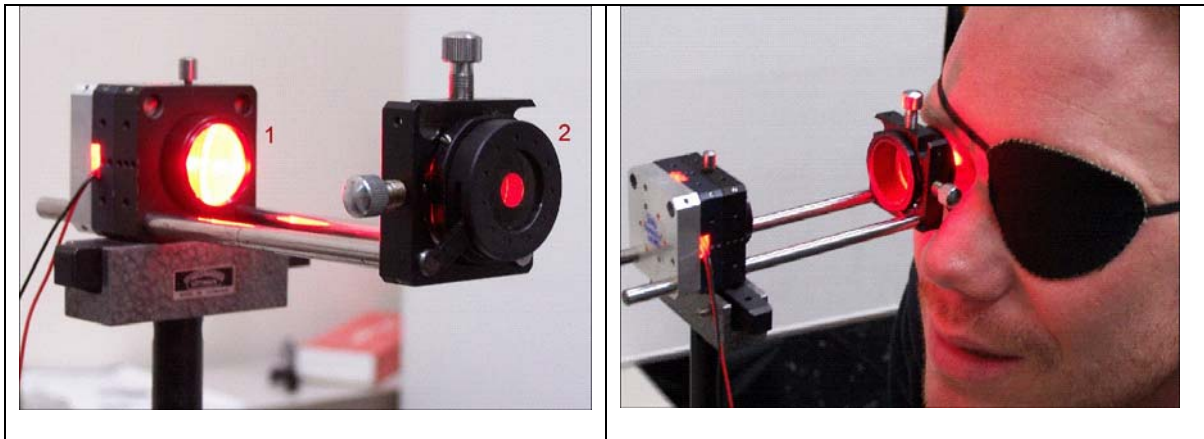


Abb. 4.108 Kollimator als scheinbare Quelle bzw. Blendlichtquelle (1), (2) 7 mm-Blende, rechts: Blendung eines Probanden mit einer roten LED (nicht geblendetes Auge abgedeckt)

In Abb. 4.108 dient die 7 mm-Blende der korrekten Positionierung des Probanden in 10 cm Abstand von der Blendlichtquelle.

Die in diesen Versuchsreihen durchgeführte Blendung ist als direkte Infeldblendung zu bezeichnen und nach physiologischen Gesichtspunkten eine Relativblendung.

Die Probandengruppe bestand hauptsächlich aus Labormitarbeitern und Studierenden der Fachhochschule Köln im Alter von 20 bis 40 Jahren. In dieser Altersgruppe kann von einer „normalen“ Kontrastempfindlichkeit ausgegangen werden. Alle Probanden wurden zunächst auf ihr Farbsehvermögen getestet und Fehlsichtige trugen zum Zeitpunkt der Messung ihre Brillen oder Kontaktlinsen. Vor der jeweiligen Untersuchung wurden die Probanden bezüglich der Ziele und des Ablaufes der Untersuchung sowie der zu erwartenden Effekte, wie z. B. ein länger anhaltendes Nachbild, aufgeklärt.

Die Versuchsteilnehmer wurden auch bei diesen Tests dazu angehalten, eventuell auftretende Probleme, wie z. B. einen Druck auf den Augen oder Kopfschmerzen, die auch noch über den Zeitpunkt der Versuchsdurchführung hinaus auftreten konnten, den Projektleitern zu melden. Mit ihrer Unterschrift auf einer Einverständniserklärung wurde die freiwillige Teilnahme an den Untersuchungen bestätigt. Festzustellen ist in diesem Zusammenhang, dass bislang aus dem Kollektiv der Teilnehmenden an diesem Teilprojekt keine Meldungen über aufgetretene Nachwirkungen oder gar gesundheitlichen Beeinträchtigungen vorliegen.

Es erscheint daher aufgrund des Standes der Untersuchungen so zu sein, dass Blendungen zwar unter Umständen als unangenehm empfunden werden können, dass aber eine Nachwirkung ausbleibt. Trotzdem muss darauf hingewiesen werden, dass sich im Zusammenhang mit den verschiedenen Untersuchungsszenarien, die im Zuge des Gesamtprojektes durchgeführt wurden, bei einzelnen Personen ein nicht genau beschreibbares Druckgefühl nach einer Exposition einstellte, das auch einige Zeit danach anhielt. Die entsprechenden, jedoch meist sehr vagen Beschreibungen stimmten weitgehend mit denjenigen überein, die Versuchsteilnehmer auch sehr vereinzelt nach Expositionen bei Untersuchungen zum Vorhandensein des Lid-

schlussreflexes berichteten. Hier waren es von insgesamt ca. 2.500 Personen etwa 5, die unklare Symptome angaben. Eine längere Persistenz lag aber in keinem Fall vor. Insbesondere eine mehrmalige Blendung in relativ kurzen Zeitabständen oder aber auch unter Beachtung einer Readaptation während eines z. B. halben Tages, sollte dann möglichst unterbleiben, wenn dabei „Überanstrengungen“ verbunden sein können.

Nach Beendigung des Lichtreizes in Form einer Blendung wurde die Zeitmessung mittels einer Stoppuhr gestartet und der betreffende Versuchsteilnehmer in die für den jeweiligen Test vorgesehene Position gebracht. Die Zeitdauer zwischen dem Blendungsende und der richtigen Positionierung betrug stets weniger als 3 s. Diese Dauer lag immer unter derjenigen der ersten Objekterkennbarkeit bei den durchgeführten Tests. Um sicherzustellen, dass die Messungen nicht durch noch bestehende Nachbilder aus vorangegangenen Blendungen verfälscht wurden, wurde zwischen zwei Messungen eine Pause von mindestens 30 Minuten eingehalten. Wie in Vorversuchen experimentell ermittelt wurde, entspricht diese Zeitspanne einer für die Zwecke dieser Versuchsreihen ausreichenden Readaptationszeit. Allerdings hatte dies zur Folge, dass die Untersuchungen in diesem Teilprojekt sehr zeitaufwändig waren.

Zur Bestimmung der Farb- und Kontrastempfindlichkeit unter dem Einfluss von Blendlichtquellen wurde ein auf den Pelli-Robson-Farbtafeln basierendes Verfahren entwickelt und der zeitliche Verlauf des Farbkontrastsehens nach einer Blendung an Versuchspersonen festgehalten. Der Kontrastempfindlichkeitstest nach Pelli-Robson hat den Vorteil einer hohen Reproduzierbarkeit von etwa 90 % und eines konstanten Abbruchkriteriums. Als ein entscheidender Nachteil der Pelli-Robson-Tafel wurde hier die Möglichkeit gesehen, dass die Probanden die Buchstabenfolge auswendig lernen könnten, insbesondere da der jeweilige Test mehrfach wiederholt werden musste. Speziell zur Beurteilung des Kontrastsehens nach einer Blendung mit farbigen HB-LEDs wurde daher ein Testverfahren entwickelt, bei dem die Grundfarben der dargebotenen farbigen Vorlagen mit abnehmendem Kontrast dargestellt werden. Statt der üblicherweise beim Pelli-Robson Verfahren verwendeten sogenannten Sloan-Buchstaben (Standard-Buchstaben O, S, N, Z, C, H, V, D, K, R in logarithmischer Darstellung mit 5 Buchstaben pro Zeile) wurden die in der DIN EN ISO 8596 [134] empfohlenen Normsehzeichen, nämlich Landoltringe, verwendet, da deren Orientierungen der Öffnung im Landolt-C weniger einprägsam sind.

Durch eine D65-Raumbeleuchtung wurde für definierte Normlichtbedingungen mit konstanten Beleuchtungsverhältnisse gesorgt.

Nach dem Emmertschen Gesetz ergab sich für den vorstehend angegebenen Versuchsaufbau bei einer Testentfernung von 3 m ein etwa 600 mm großes Nachbild. Auf dieser Basis wurde die Größe der Sehtafeln mit 594 mm x 420 mm (DIN A2 Querformat) ausgewählt.

In diesen Versuchsreihen kamen nur die Kontraststufen 11,0 %, 7,9 %, 5,6 %, 4,0 %, 2,8 %, 2,0 %, 1,4 % und 1,0 % zur Anwendung. Diese werden in den Messungen und Ergebnissen mit den neu bezeichneten Kontraststufen 1 bis 8 für die prozentualen Abstufungen von 11,0 % bis 1,0 % bezeichnet. Abb. 4.109 zeigt ein Beispiel

einer verwendeten Farbkontrastsehtafel mit roten Landoltring-Seezeichen, wobei jeweils in einer Zeile zwei Kontraststufen à 3 Zeichen angeordnet sind.

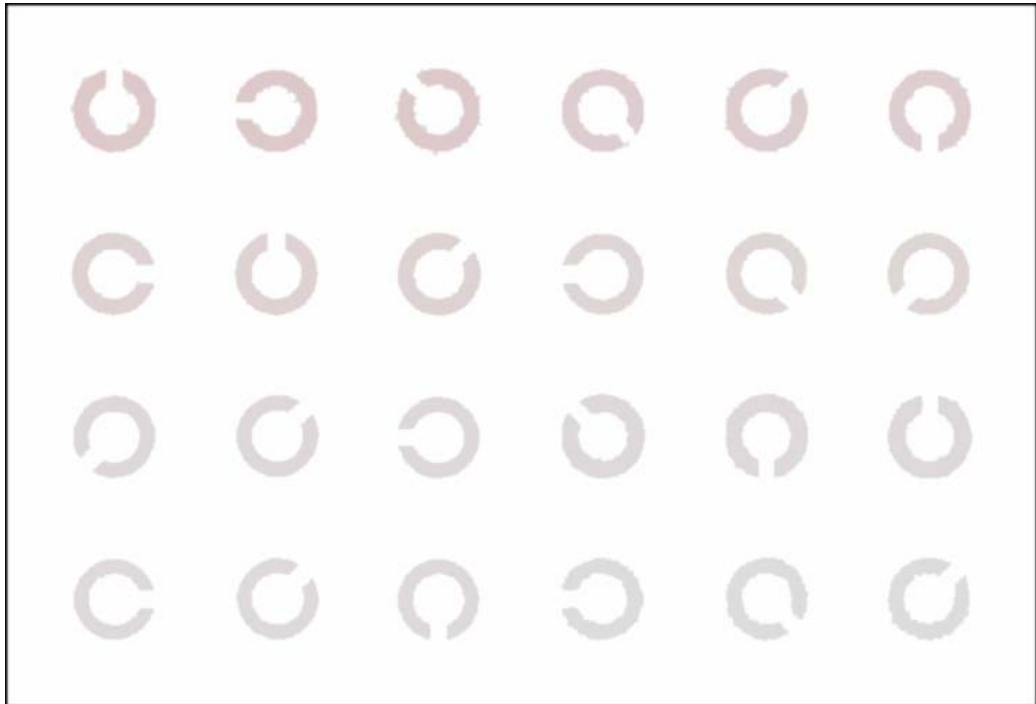


Abb. 4.109 Landoltring-Test mit roten Seezeichen in 8 Kontraststufen

Insgesamt wurden mittels Photoshop sieben Charts in den Farben Rot, Grün, Blau, Cyan, Magenta und Gelb sowie als Referenz in Schwarz mit unterschiedlicher Verteilung der Landoltringöffnungen im TIFF-Format angelegt. Diese Landoltring-Charts waren aufgrund ihrer geringen Kontraste drucktechnisch schwer zu verwirklichen. Dementsprechend waren mehrere Probedrucke erforderlich bis die WEBER-Kontraste jeder Stufe den Vorgaben entsprachen. Die Landoltringe aller Charts wurden bezüglich ihres Kontrastes zum weißen Hintergrund und ihrer Farbwiedergabe mit Hilfe eines Leuchtdichte-Messgerätes vermessen. Zusätzlich wurden die Farben der Kontraststufe 1 jedes Charts noch spektralphotometrisch bestimmt und im CIELAB-Farbenraum dargestellt (Nähere Angaben dazu finden sich in [244, 245]).

Gemäß der Vorgabe des Pelli-Robson Kontrasttests wurde eine mittlere Leuchtdichte von 85 cd/m^2 auf dem Chart sichergestellt; die Beleuchtungsstärke lag bei etwa 310 lx .

Neben der Realisierung von Drucktafeln wurde der entsprechende Test auch am Monitor durchgeführt. Dabei entsprachen die Landoltringe im Wesentlichen denjenigen in Druckdarstellung. Jedoch wurde der Ringdurchmesser von 52 mm im Druck auf 12 mm am CRT-Monitor reduziert, was einem vollen Sehwinkel von 1° und einem Betrachtungsabstand von 70 cm entsprach. Die Betrachtung des Monitors erfolgte bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von 310 lx bei einer mittleren Leuchtdichte von 112 cd/m^2 .

Bedingt durch die zeitintensive Durchführung dieser Versuchsreihe, war es nur 3 Probanden möglich, alle Tests komplett zu durchlaufen. Insgesamt umfasste die

Versuchsreihe für jeden Probanden die Beurteilung von 6 Charts in den Farben Gelb, Rot, Magenta, Cyan, Grün und Blau und eines schwarzen Charts, und zwar ohne und nach Blendung durch je 4 LEDs, auf zwei Darstellungsmedien, d. h. in Druckdarstellung und am Monitor. Somit absolvierte jeder der drei Probanden 56 Tests, die aus einem Trockentest und dem Durchlauf nach Blendung bestanden.

Um zu bestimmen, wie sich eine farbige Blendung auf das Farbsehvermögen auswirkt und wie lange eine eventuell auftretende Sehstörung anhält, wurden Farbtests auf ihre Anwendbarkeit hin geprüft. Eine für die Zielsetzung dieser Untersuchungen aussagekräftige Methode stellten die Pseudoisochromatischen Tafeln dar. Da den Probanden die einzelnen dargebotenen Tafeln nicht bekannt waren, war die Zeit zwischen Blendung und Identifikation des in dem Farbmosaik enthaltenen Symbols messbar. Zum Einsatz kamen die Tafeln zur Prüfung des Farbensinns nach VELHAGEN UND BROSCHMANN [246] (s. Abb. 4.110).

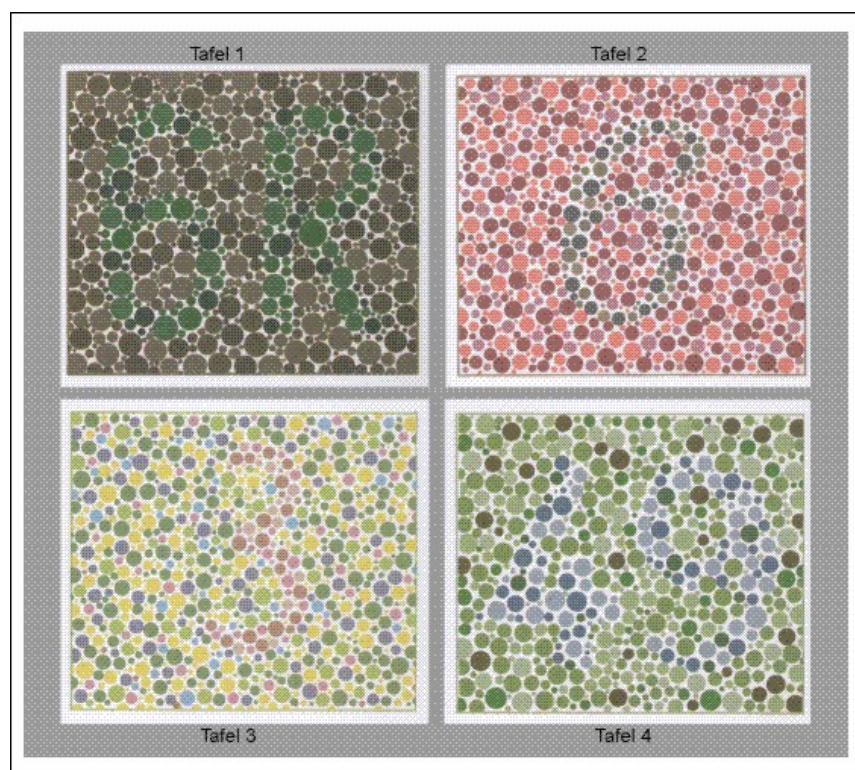


Abb. 4.110 Im Test verwendete 4 Pseudoisochromatische Tafeln

Bei der Auswahl, der zum Einsatz kommenden Tafeln, wurde berücksichtigt, dass jeweils eine, für bestimmte Farbsinnstörungen spezifische Tafel in die Versuchsreihe mit einbezogen wurde.

Da der Wiedererkennungswert solcher Tafeln wie in Abb. 4.110 dargestellt, relativ hoch ist, konnte allerdings jede Tafel jeweils nur einmal einem Probanden gezeigt werden. Nach erfolgter Blendung wurden die Zeitpunkte, zu denen die Probanden sich bezüglich der Farben der Kreise oder zu vermeintlich erkannten Symbolen äußerten, aufgenommen und als Erkennungszeit dokumentiert. Die Zeitmessung wurde gestoppt, sobald das betreffende Symbol korrekt identifiziert wurde (Identifikationszeit). Auch für diesen Test erfolgte die Darstellung neben derjenigen in Druck-

darstellung, d. h. in Form des Originals, also des Buches [46], auch anhand eingescannter Darstellungen auf einem Monitor.

Neben diesen beiden Methoden zur Ermittlung des Kontrastsehens nach Blendung bei Darbietung farbiger Vorlagen und der Ermittlung der Dauer der Farbsinnstörung wurde ein weiterer Test entwickelt, welcher Aussagen darüber ermöglicht, wie Probanden Farben nach Blendung empfinden und benennen.

Um die subjektive Farbwahrnehmung zu ermitteln, wurden sechs Farbfelder in den Grundfarben erstellt, die nach Blendung identifiziert werden sollten. Erstellt wurden sechs Quadrate der Größe 35 mm x 35 mm in den Farben Rot, Grün, Blau, Cyan, Magenta und Gelb. Die Ausmaße der Farbfelder ließen eine vollständige Überlagerung mit dem Nachbild zu. Die Reihenfolge der Farben wurde so gewählt, dass diejenigen, die häufig miteinander verwechselt wurden, nicht unmittelbar nacheinander präsentiert wurden. Entsprechend wurde in der Darbietung die Abfolge auf Rot, Gelb, Blau, Grün, Magenta und Cyan festgelegt. Die Farbfelder waren mittig auf weißen DIN A5-Kartons angeordnet.

Dieser Versuch wurde so durchgeführt, dass den Versuchspersonen nach der Blendung die Farbfolgen so lange dargeboten wurde, bis alle sechs Farben korrekt benannt wurden. Dabei dauerte ein Durchlauf etwa 15 s.

Auch bei dieser Versuchsdurchführung wurde neben der Druckdarstellung eine solche am Monitor in Form einer Slideshow erstellt.

a.) Identifikationszeiten der einzelnen Kontraststufen

Nachfolgend werden einige Beispiele zu den erzielten Ergebnissen dargestellt. Zunächst zeigt Abb. 4.111 die Mittelwerte aller Messergebnisse vor und nach einer Blendung bezüglich der Identifikationszeiten der einzelnen Kontraststufen.

Die Stufenzeiten vor Blendung, also die hier so bezeichneten „Trockenzeiten“, weisen eine leichte Steigung zu niedrigeren Kontrasten, entsprechend höheren Kontraststufen, hin auf. Nach Blendung durch eine farbige LED benötigten die Probanden durchschnittlich etwa 20 s, um die Landoltringlücken der Kontraststufe 1 zu identifizieren. Für die Kontraststufen 2 bis 4 ergaben sich nahezu konstante Identifikations-Stufenzeiten. Zu niedrigen Kontrasten hin steigt die Kurve steiler als die der Trockenzeiten an. Auffällig sind der Peak bei Kontraststufe 5 und die hohe Standardabweichung an dieser Stelle.

Wie eine genauere Analyse der Messwerte zeigt, wurde diese Unregelmäßigkeit durch die hohen Identifikationszeiten bedingt, die sich bei der Beurteilung der gelben Charts ergaben. Die Messwerte, die bei der Darbietung der gelben Testtafel auftraten, weisen innerhalb der Testreihen und auch bei den einzelnen Probanden große Schwankungen auf.

Die Eliminierung der Stufenzeiten der gelben Charts bewirkt eine Glättung der Kurve für die Mittelwerte sowie eine Verringerung der Standardabweichung bei Kontraststufe 5 (s. [244, 245]).

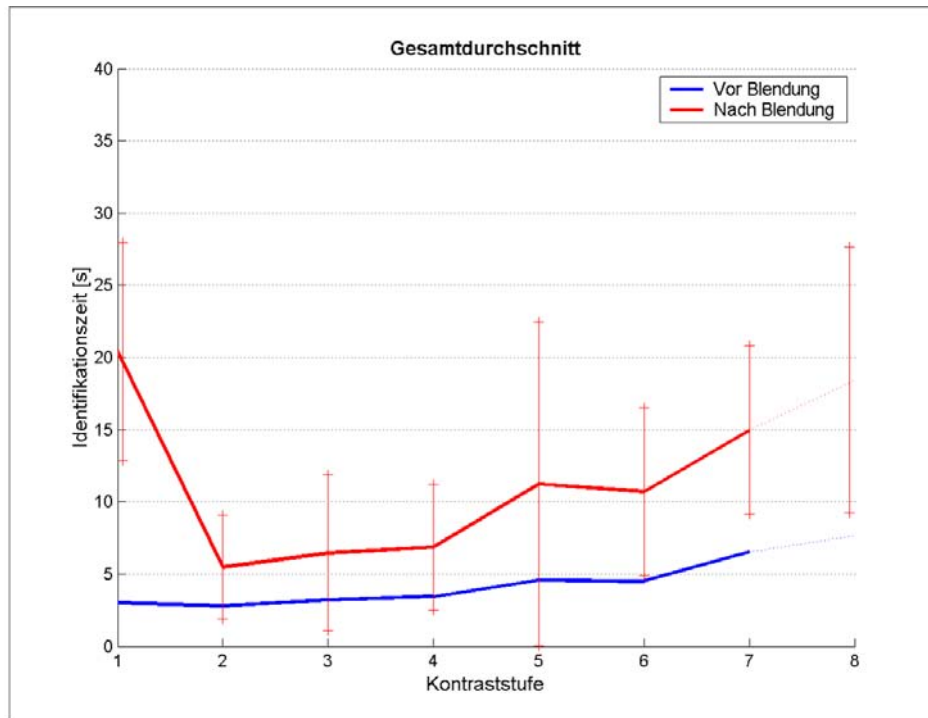


Abb. 4.111 Mittelwerte aller Messergebnisse zur Identifikationszeit für die 8 Kontraststufen vor und nach einer Blendung einschließlich der Standardabweichung

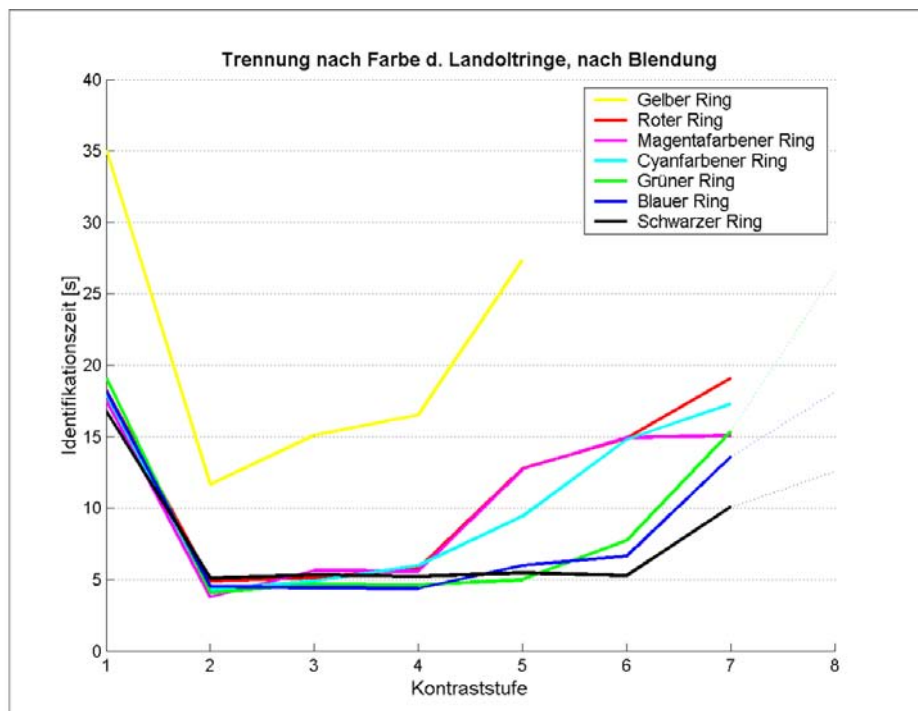


Abb. 4.112 Einzeldarstellung der Messergebnisse zur Identifikationszeit für die 8 Kontraststufen der farbigen Charts nach Blendung

In Abb. 4.112 sind die Ergebnisse für alle Farben einschließlich Schwarz einzeln dargestellt, um einmal den Unterschied in den Ergebnissen herauszustellen und zum andern, wie im Fall der schwarzen Testzeichen, um eine Referenz zu haben.

Der Verlauf der Kurven zeigt, dass sich eine Blendung durch farbige LEDs stärker auf das Kontrastsehen bei Darbietung farbiger Sehzeichen auswirkt, als bei der Darbietung schwarzer Sehzeichen, und zwar insbesondere bei größeren Kontraststufen.

Den Einfluss der Blendung zeigt eindeutig der Vergleich der Ergebnisse nach einer Blendung (s. Abb. 4.112) mit denjenigen ohne Blendung, wie sie in Abb. 4.113 dargestellt sind.

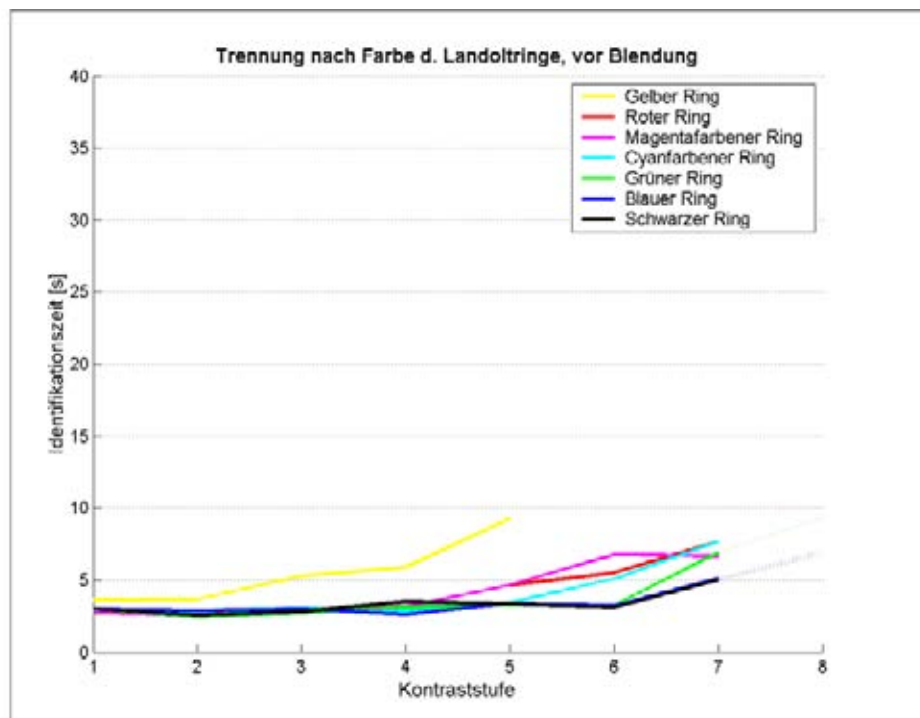


Abb. 4.113 Einzeldarstellung der Messergebnisse zur Identifikationszeit für die 8 Kontraststufen der farbigen Charts ohne Blendung

Eine genauere Betrachtung der Abb. 4.112 und 4.113 zeigt, dass offenbar eine Verringerung des Kontrastes bei den einzelnen Farben unterschiedlich „früh wirkt“. Es fällt dabei auf, dass die Identifikationszeit – von der anfänglichen „generellen Störung der Sehleistung“ abgesehen – fast immer bis zu einer gewissen Kontraststufe relativ konstant bleibt. Diese Stufe ist zwar von der Farbe abhängig, nicht aber davon, ob vorher eine Blendung stattgefunden hat oder nicht. Eine Ausnahme bildet lediglich die Testfarbe Gelb. Hier erhöhen sich die Identifikationszeiten nach Blendung zum einen bereits ab der zweiten Kontraststufe deutlich und zum anderen liegen sie im Mittel um 10 s über denjenigen der anderen Farben (s. Abb. 4.112).

Die durch Blendung bedingte Anfangsidentifikationszeitverzögerung beträgt gegenüber derjenigen ohne Blendung bei nahezu allen Farben etwa 14 s bis 16 s, wie ein Vergleich der Abb. 4.112 und 4.113 zeigt. Für Gelb sind es sogar ca. 30 s.

Aus den erhaltenen Messergebnissen kann man nur bedingt darauf schließen, dass sich die Konstanz in den Identifikationszeiten für Kontraststufen ab 2 auch nach unten, d. h. für z. B. 1,5, also einen Wert zwischen 11 % und 7,9 %, fortsetzen lässt. Sicherlich kommt aber in den Kurven der Anfangsverzögerung, und zwar unabhängig davon, welche Kontraststufe nach einer Blendung zuerst betrachtet wird, eine besondere Bedeutung zu. In jedem Fall ist sie nicht kleiner als die hier für Kontraststufe 1 angegebenen Werte.

Als Identifikationsreihenfolge kann man Schwarz - Blau - Grün – Magenta - Cyan - Rot und Gelb sowohl ohne als auch mit Blendung angeben, wobei zum Teil relativ geringe Unterschiede vorliegen. Demzufolge kann vermutet werden, dass dieser Effekt durch den Farbkontrast zwischen der Sehzeichen- und der weißen Hintergrundfarbe bedingt ist und nicht durch die Blendwirkung. Die Blendung durch farbige LEDs verstärkt diesen Effekt lediglich.

Der direkte Vergleich der beiden Darstellungsmedien zeigte, dass die Identifikationszeit der Landoltringöffnungen der Kontraststufe 1, mit der Ausnahme von Gelb, nach Blendung durch farbige LEDs, in Druckdarstellung etwa 20 s bis 21 s und in Monitor-darstellung etwa 15 s bis 18 s beträgt (s. [244, 245]).

Außerdem zeigt eine detailliertere Betrachtung, dass die mittlere Identifikationszeit der Landoltringöffnungen der Kontraststufe 1 nach Blendung in Druckdarstellung etwa 4 s länger dauert als in Monitor-darstellung. Ein Anstieg der Stufenzeiten erfolgt bei beiden Darstellungsformen ab Kontraststufe 5, ist jedoch in Monitor-darstellung ausgeprägter. Betrachtet man statt der Farben der Kontrasttafeln die Farben der 4 LEDs, so ergibt sich der in Abb. 4.114 dargestellte Zusammenhang.

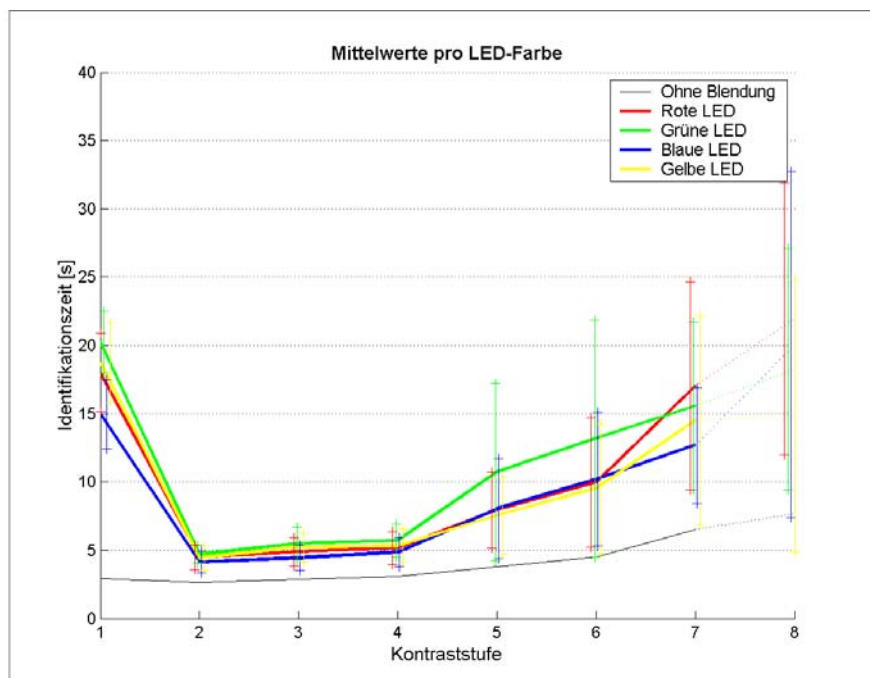


Abb. 4.114 Mittelwerte aller Messergebnisse zu den Identifikationszeiten in Abhängigkeit von der Farbe der Blendlichtquelle

Die Kurven in Abb. 4.114 legen die Vermutung nahe, dass das Kontrastsehen bei Darbietung farbiger Sehzeichen durch die Blendung mit der grünen LED stärker beeinflusst wird als durch Blendung mit der blauen LED. Die Stufenzeiten bei Kontraststufe 3 liegen nach Blendung durch diese beiden Blendquellen um etwa 1 s auseinander, bei Kontraststufe 6 sind es etwa 4 s.

Noch detaillierter lassen sich die Einzelergebnisse für alle 6 farbigen Kontrastsehtafeln aus Abb. 4.115 erkennen.

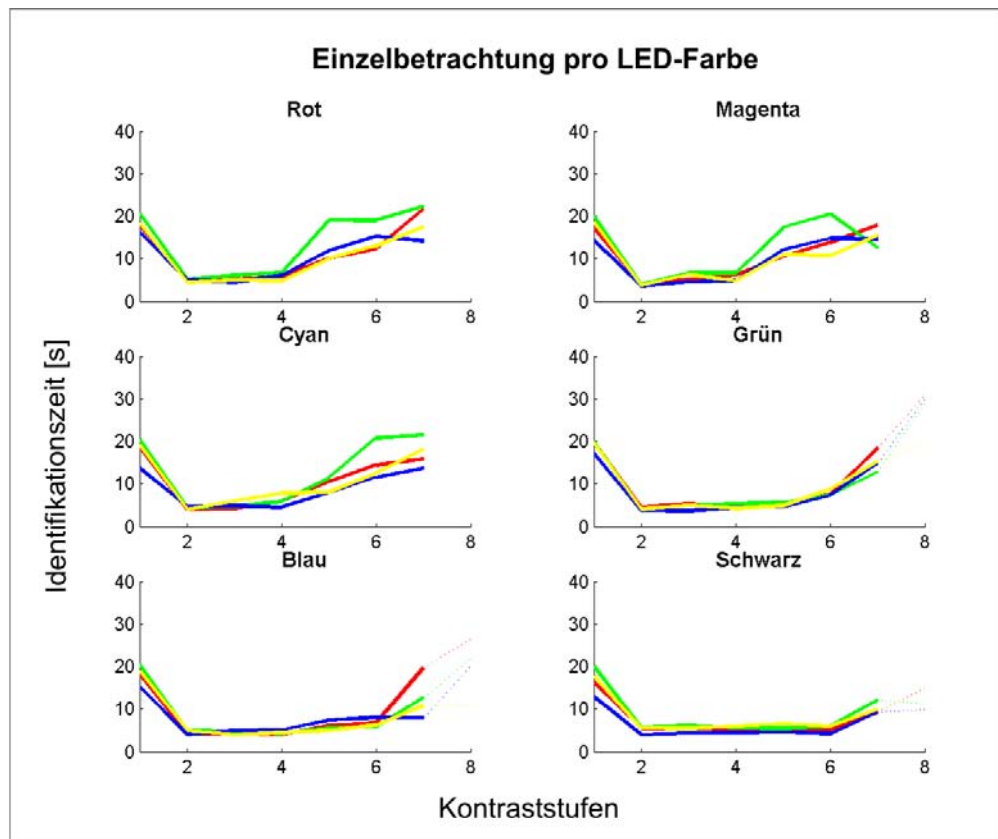


Abb. 4.115 Messergebnisse der Identifikationszeiten für alle 6 Farbkontrastsehtafeln in Abhängigkeit von der Farbe der Blendlichtquelle

Ein prinzipieller Zusammenhang zwischen der Blendlichtfarbe und dem Kontrastsehen bei Darbietung farbiger Vorlagen konnte innerhalb dieser Versuchsreihen nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Auswirkung der Blendung durch die grüne LED erscheint geringfügig markanter, was mit der bei Grün vorliegenden größeren spektralen Hellempfindung zusammen hängen könnte.

In allen bisher präsentierten Abbildungen ist ein Bereich relativ konstanter Stufenzeiten zu erkennen. Dieser Bereich zeigt sich für die gemittelten Werte aller farbigen Vorlagen, mit Ausnahme von Gelb, bis zur Kontraststufe 4 und für die schwarzen Landoltring-Charts bis Kontraststufe 6. In diesem „Plateau“ ist die Identifikationszeit nicht signifikant vom Kontrast abhängig. Um die Gesamtauswirkung einer Blendung durch farbige Blendlichtquellen auf das Kontrastsehen zu beurteilen, wurden die Stufenzeiten, die sich zur Identifikation der Landoltringöffnungen bei Darbietung aller farbigen und schwarzen Sehzeichen aus allen gemittelten Variablen ergaben, insbe-

sondere im Hinblick auf ihren Anstieg im Bereich größerer Kontraststufenwerte, d. h. bei geringeren Kontrastwerten, miteinander in einem Diagramm verglichen (s. Abb. 4.116).

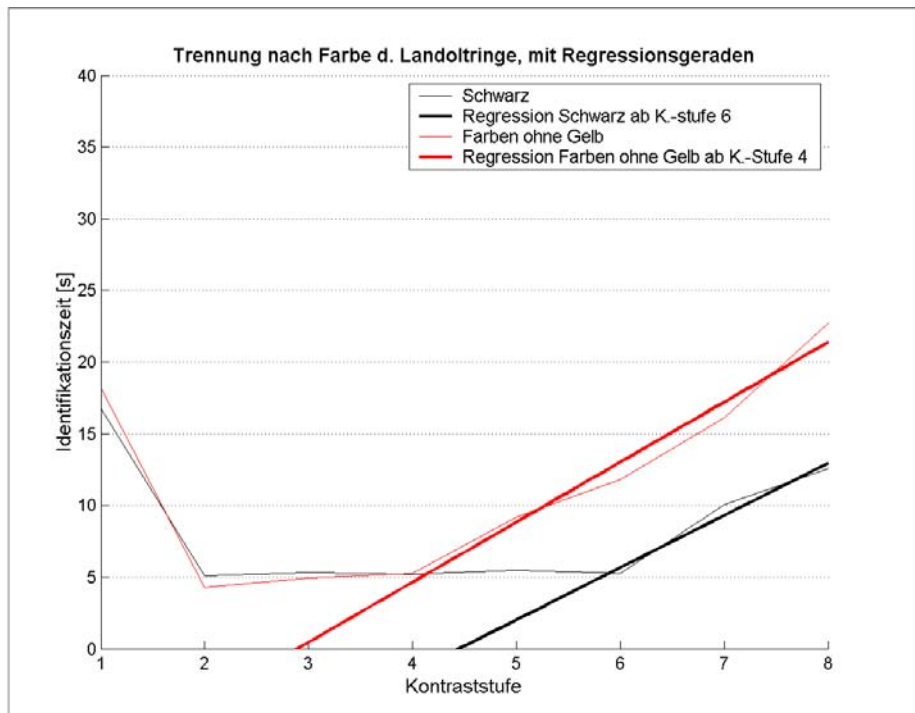


Abb. 4.116 Stufenzeiten aller farbigen Landoltring-Charts im Vergleich zu denen der schwarzen, sowie Regressionsgeraden im Bereich des Anstiegs

Wie aus Abb. 4.116 zu sehen ist, verlaufen die Regressionsgeraden annähernd parallel zueinander. Die berechnete Steigung beträgt für die schwarzen Charts etwa 3,6 pro Kontraststufe und für die farbigen Kontrastsehtafeln etwa 4. Eine Kontrastverringern um eine Stufe zieht folglich eine Erhöhung der Identifikationszeit von 4 s nach sich.

Den lediglich auf die Blendung durch farbige LEDs zurückzuführenden Effekt auf das Kontrastsehen bei Darbietung aller farbigen Vorlagen (ohne Gelb) kann man dadurch veranschaulichen, dass man alle gemittelten Trockenzeiten von den Identifikationszeiten der farbigen Charts nach Blendung subtrahiert und die Differenz in einem Diagramm aufträgt, wie dies in Abb. 4.117 geschehen ist.

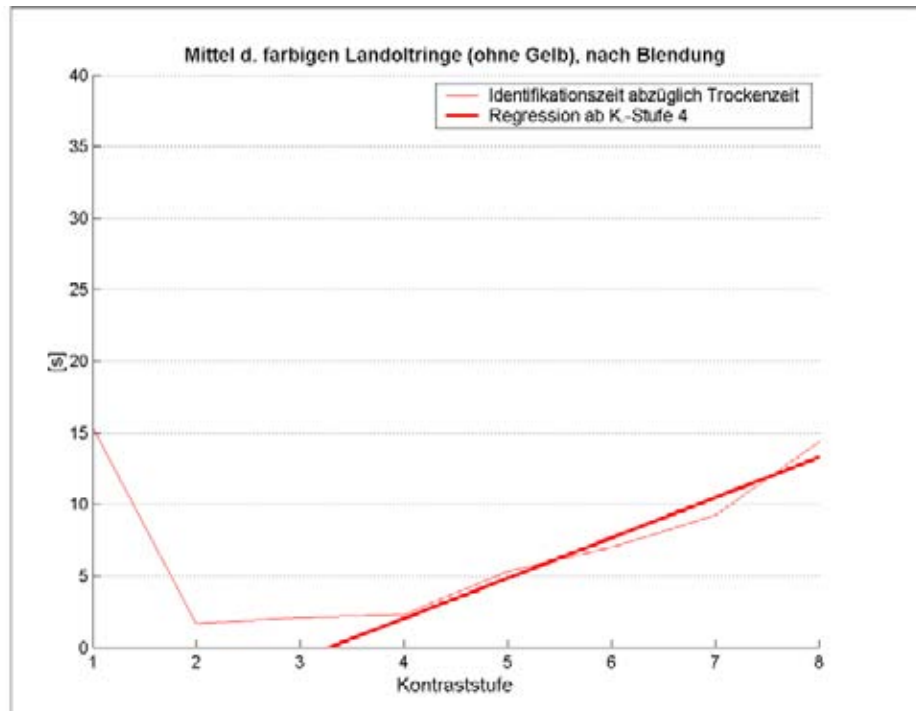


Abb. 4.117 Allein auf Blendung auf das Kontrastsehen bei Darbietung farbiger Vorlagen (ohne Gelb) zurückzuführender Effekt

Auffällig ist, dass das „Plateau“ erhalten bleibt. Das bedeutet, dass die Identifikationszeiten für die Kontraststufen 2 bis 4 und somit vermutlich auch für höhere Kontraste, zwar nahezu kontrastunabhängig sind, aber durchaus eine Abhängigkeit bezüglich einer vorangegangenen Blendung zeigen. Die Auswirkung der Blendung beträgt in diesem Bereich etwa 2 s. Die für den Bereich des Anstiegs der Stufenzeiten bestimmte Regressionsgerade weist eine Steigung von etwa 3 pro Kontraststufe auf. Der isolierte Effekt einer Blendung bei Betrachtung niedriger Kontraste (\leq etwa 4 %) bedingt eine Verlängerung der Identifikationszeit um etwa 3 s für jede Kontrastverringerng um den Faktor $1/\sqrt{2}$, also um eine Stufe.

b.) Farbsehstörungenbestimmung mit Pseudoisochromatischen Tafeln

Anhand der Darbietung von Pseudoisochromatischen Tafeln nach einer farbigen Blendung sollte in einer zweiten Versuchsreihe ermittelt werden, wie lange die Farbsehstörung andauert. Auch sollte ein eventueller Bezug zwischen der Blendfarbe und den dargebotenen, für bestimmte Farbsehdefizite spezifische Tafeln, untersucht werden. Möglich erschien ein Zusammenhang zwischen roter bzw. grüner Blendung und den Farbtafeln zur Aufdeckung von Rot-Grün-Farbschwächen bzw. blauer oder gelber Blendung und den Tafeln zur Abgrenzung von Blau-Gelb-Schwächen.

Aufgrund der Tatsache, dass jedem Probanden jede Tafel nur einmal gezeigt werden konnte, war es bei diesem Testverfahren nicht möglich, dass jede Testperson alle Tafeln für jede Blendfarbe beurteilte. Insgesamt wurden 40 Probanden getestet, woraus sich Mittelwerte der Messergebnisse von 5 Probanden pro Tafel und Blendfarbe ergaben, d. h. 10 Probanden wurden mit allen 4 LED-Farben geblendet. Die Zeiten,

die sich bis zur Identifikation des auf der Tafel befindlichen Symbols ergaben, wurden in Säulendiagrammen für jede Blendfarbe aufgetragen.

Die Ergebnisse sowohl der Druck- als auch der Monitordarbietung sind in Abb. 4.118 zusammenfassend dargestellt.

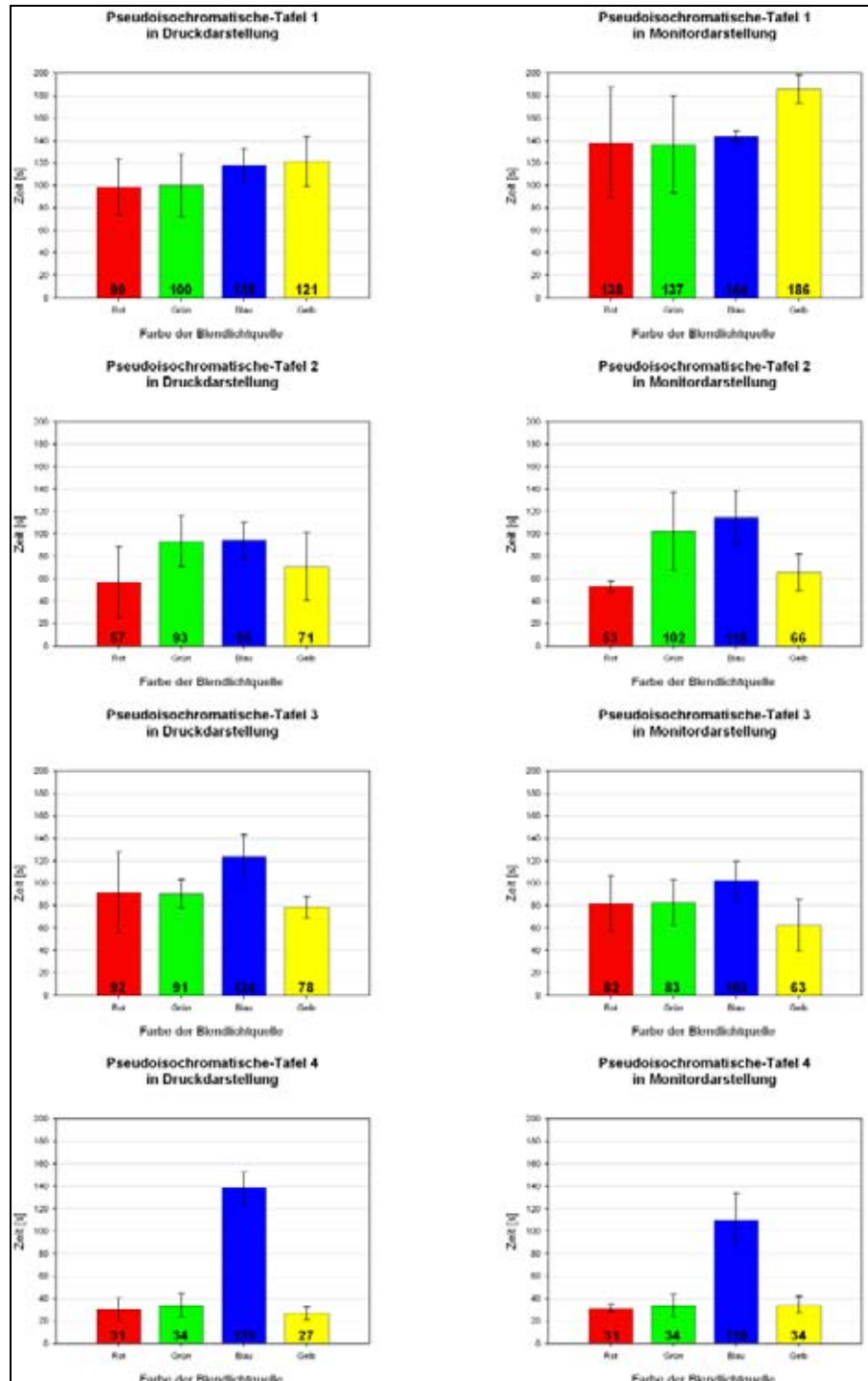


Abb. 4.118 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Tests mit 4 Pseudoisochromatischen Tafeln in Druck- und Monitordarstellung

Ein Vergleich zeigt, dass sich die Identifikationszeiten pro Tafel und Blendfarbe bei Druck- und Monitorarstellung ähnlich verhalten. Keines der beiden Darstellungsmedien weist generell kürzere oder längere Identifikationszeiten auf. Betrachtet man beispielsweise Tafel 1 (s. Abb. 4.110), so dauert die Identifikationszeit des Symbols auf dem Monitor etwa um den Faktor 1,4 länger. Im Gegensatz dazu dauert die Identifikation von Tafel 3 in Druckdarstellung etwa um den Faktor 1,2 länger. Wiederum anders verhalten sich die Tafeln 2 und 4. Rote und grüne Blendung verursachen eine nahezu gleiche Identifikationszeit. Die Zeiten zur Identifikation der Zeichen bzw. Symbole auf den Ishihara-Tafeln betragen zwischen 27 s und 139 s bei Druckdarstellung und zwischen 31 s und 186 s bei Monitorarstellung. Eine genauere Analyse der Ergebnisse findet sich in [244, 245]. Eine Korrelation von etwa 95 % zwischen der Darbietung in Druck- und Monitorarstellung spricht dafür, dass die Farbsehstörung nach Blendung offenbar unabhängig von der Art der Darbietung ist.

In dieser Versuchsreihe zur Bestimmung der Auswirkung einer farbigen Blendung auf das Farbsehvermögen und auf die Dauer der auftretenden Sehstörung stellte sich heraus, dass die Blendung durch eine blaue LED die augenscheinlich längste Störzeit bezüglich des Farbsehens verursacht. Inwieweit dies durch die Auswahl der Farbtafeln bedingt wurde oder auf erhöhte Streuung bei kürzeren Wellenlängen zurückzuführen ist, kann nicht abschließend gesagt werden. Festgestellt wurde aber, dass die meisten Probanden die Blendung durch die blaue LED, sowohl während der Blendung als auch in den Minuten bis zum Abklingen des Nachbildes, am „unangenehmsten“ empfanden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Farbkontrastsehvermögen durch Blendung durchaus für Zeiten von mehr als 2 Minuten, im Einzelfall sogar für 3 Minuten (vgl. Abb. 4.118), deutlich beeinträchtigt werden kann. Es besteht daher die Möglichkeit, dass bestimmte farbige Objekte in andersfarbiger Umgebung bis zu 3 Minuten nicht sicher abgegrenzt werden können.

c.) Farbsehstörungsbestimmung mit Farbfeldern

Die Versuchsreihen mit dem Farbfeld-Test dienten der Ermittlung der subjektiven Farbwahrnehmung nach einer Blendung durch farbige LEDs sowie der Zeitdauer zur Identifikation der dargebotenen Farbe. Es sollte geklärt werden, ob zwei oder mehrere Farben durch die Auswirkung einer Blendung miteinander verwechselt werden und wie sich die Farbempfindung während der Readaptationszeit verändert. Auch stellte sich die Frage, ob die Zeit bis zur Identifikation der dargebotenen Farbe abhängig von der Farbe der Blendquelle ist.

In die Auswertung gingen insgesamt 40 Messungen ein. Im Anschluss an die Messwerterfassung wurden die Mittelwerte der Identifikationszeiten pro Farbfeld und Blendung aus jeweils 5 Messungen gebildet und zusammen mit den jeweiligen Standardabweichungen in Säulendiagrammen aufgetragen.

Die Benennung der Farbfelder mit den Farben Rot, Grün, Blau und Gelb durch die Probanden war eindeutig. Jedoch fiel es manchen schwer, eine Bezeichnung für die Farbfelder Magenta und Cyan zu finden. Aufgrund von Erfahrungen aus Vortests war

bekannt, dass Magenta auch als Pink, Cyan oft als Hellblau oder Türkis wahrgenommen und entsprechend bezeichnet wurde.

Es stellte sich heraus, dass es nicht möglich war, die von den Probanden benannten und empfundenen Farben zeitlich miteinander in Deckung zu bringen. Abb. 4.119 gibt ein Beispiel an, welche Farben von den Versuchsteilnehmern im Laufe der Nachbilddauer bei der Farbdarbietung in Druckform angegeben wurden.



Abb. 4.119 Farbwahrnehmung der 6 Farbfelder in Druckdarstellung nach Blendung durch 4 farbige LEDs

Eine ähnliche Farbwahrnehmung fand auch statt, wenn die 6 Farbfelder am Monitor als Slideshow dargeboten wurden.

Abb. 4.120 zeigt alle einzelnen Messergebnisse im direkten Vergleich zwischen Druck- und Monitordarstellung.

Festzustellen ist, dass sich die „Reihenfolge“ der Identifikation der einzelnen Farbfelder pro Blendung für die beiden Darstellungsmedien nahezu identisch verhält. Wie aus dem direkten Vergleich der einzelnen Diagramme ersichtlich, ist die Identifikationszeit der einzelnen Farbfelder in Druckdarstellung in nahezu allen Fällen länger als in Monitorarstellung.

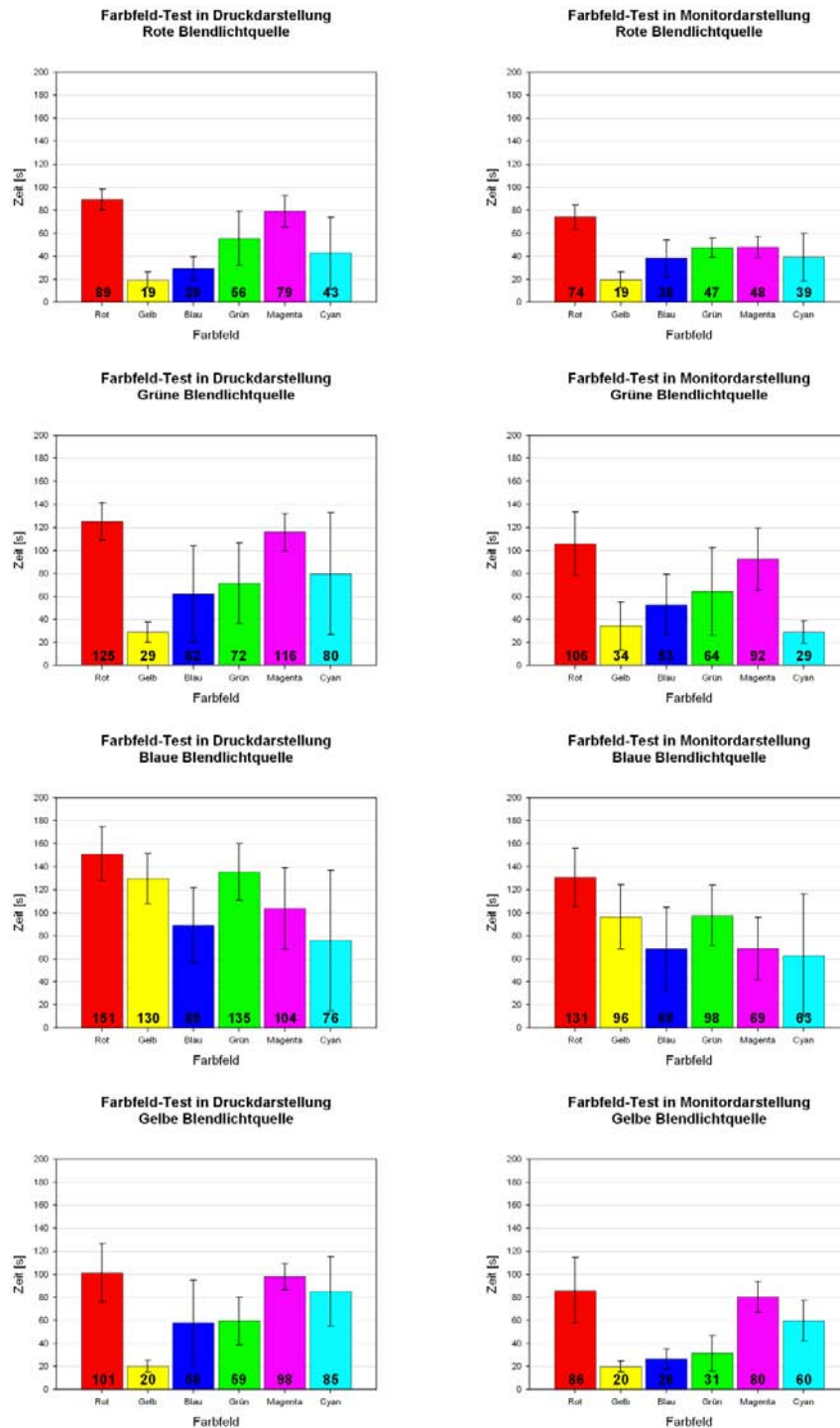


Abb. 4.120 Gegenüberstellung der Ergebnisse des Farbfeld-Tests in Druck- und Monitorarstellung

Die von den Probanden genannten, empfundenen Farben weisen für die einzelnen Farbfelder nach Blendung für beide Darstellungsformen ähnliche Abfolgen auf. Insgesamt wurden die Farbfelder in Monitordarstellung jedoch durch die Probanden weniger stark verändert wahrgenommen, d. h. in Druckdarstellung wurden meist mehr „Farbphasen“ empfunden bzw. genannt. In wieweit zwischen den wahrgenommenen Farben der Farbfelder und den jeweiligen Farbphasen des Nachbildes eine Korrelation z. B. im Sinne einer Farbmischung zur Erklärung herangezogen werden kann, lässt sich durch die vorliegenden Ergebnisse nicht genauer feststellen. Abb. 4.121 gibt ein Beispiel dazu an, wie die Nachbildphasen bei der Blendung durch die verschiedenen farbigen LEDs wahrgenommen wurden. Dabei sind die Zeitangaben nur als ein grobes Raster anzusehen und reichen im Einzelfall nicht aus, um eine Korrelation mit der Wahrnehmung eines bestimmten Farbfeldes oder der Beeinträchtigung der Identifikation bei der Darbietung pseudoisochromatischer Tafeln zu erzeugen.

t [s]	BL R	BL G	BL B	BL Y
0	Red	Green	Blue	Yellow
10	Magenta	Cyan	Magenta	Magenta
20	Magenta	Magenta	Magenta	Magenta
30	Magenta	Magenta	Magenta	Magenta
40	Blue	Magenta	Magenta	Magenta
50	Blue	Magenta	Magenta	Blue
60	Blue	Magenta	Yellow	Blue
70	Blue	Cyan	Yellow	Magenta
80	Cyan	Magenta	Yellow	Magenta
90	Cyan	Magenta	Yellow	Magenta
100	Cyan	Light Green	Yellow	Magenta
110	Yellow	Magenta	Yellow	Magenta
120	Yellow	Magenta	Yellow	Magenta
130	Yellow	White	Yellow	Magenta
140	White	White	Yellow	Magenta
150	White	White	Yellow	White
160	White	White	Yellow	White

Abb. 4.121 Schematische Darstellung der zeitlichen Nachbildphasen nach Blendung durch farbige LEDs

Mit Hilfe des Farbfeld-Tests war es möglich, die im Wesentlichen subjektiv empfundenen Farben, die sich beim Betrachten eines Farbfeldes nach Exposition durch eine farbige LED während der Readaptation ergaben, zu ermitteln. Allerdings kann auf

der Basis dieses Tests keine allgemeingültige Aussage über Beginn und Fortdauer der einzelnen farbigen „Phasen“ getroffen werden. Wie sich herausstellte, setzten diese „Phasen“ bei den Probanden zu sehr unterschiedlichen Zeiten ein und dauerten ebenso unterschiedlich lange an. Daraus ergaben sich große zeitliche Überlappungen in den genannten, von den Probanden empfundenen Farben.

In den meisten Fällen sind die Identifikationszeiten nach Blendung durch die blaue LED am längsten. Auch wird speziell das gelbe Farbfeld nur durch diese Blendlichtfarbe beeinflusst (vgl. Abb. 4.119), und zwar sowohl in der Farbempfindung als auch in der Länge der Identifikationszeiten. Die empfundene Farbabfolge des roten Farbfeldes weist die längsten Identifikationszeiten auf (Abb. 4.119).

Die aufgrund von Vortests erwartete Farbverwechslung des roten und grünen Farbfeldes konnte hier nur für das Betrachten des roten Farbfeldes beobachtet werden. Dieses wurde nach Blendung durch die grüne und gelbe LED für eine gewisse Zeit als Grün benannt. Eine vergleichbare Verwechslung anderer Gegenfarbenpaare oder Komplementärfarben konnte nicht nachgewiesen werden. Insbesondere dieses Ergebnis muss mit demjenigen verglichen werden, das in Abschnitt 4.3.7.1 im Zusammenhang mit der Farbdiskriminierung von Leuchtfarben erzielt wurde.

Im Vergleich der Darstellung im Druck oder am Monitor ergab sich ein Korrelationsfaktor, der über die relativen Identifikationszeiten bei allen Blendlichtquellen und Farbfeldern erhoben wurde, von etwa 0,88, was dafür spricht, dass das Darstellungsmedium auch hier keinen wesentlichen Einfluss auf die Reihenfolge der Identifikation der einzelnen Farben hat.

Dass die Farbfelder in Monitordarbietung meist schneller identifiziert werden, ist darauf zurückzuführen, dass die Probanden die gesättigten Farben der Felder in Monitordarstellung im Vergleich zur Druckdarstellung als „leuchtender und klarer“ empfanden. Diese werden vermutlich auch durch das von der Blendung verursachte Nachbild hinweg früher wahrgenommen.

Die in dieser Versuchsreihe ermittelten Identifikationszeiten der Farbfelder, in Druck- und Monitordarstellung, lagen insgesamt etwa zwischen 20 und 150 Sekunden. Der direkte Blick in eine farbige Blendlichtquelle kann daher aufgrund der daraus resultierenden veränderten Farbwahrnehmung dazu führen, dass bestimmte Farben für bis zu 2 1/2 Minuten nicht korrekt empfunden bzw. benannt werden.

Der Gesamtvergleich dieser 3 verschiedenen Testreihen zeigt, dass eine Blendung durch eine blaue LED im Vergleich zu den anderen farbigen Blendlichtquellen eine augenscheinlich größere Auswirkung auf das Farbsehen als auf das Kontrastsehen hat. Eine mögliche Parallele könnte zum Farbfeld-Test nach dieser Blendung bestehen, da nur nach dieser zusätzlich das gelbe und grüne Farbfeld lange beeinflusst waren und mehrere „Farbphasen“ durchliefen. Hat also die Blendung durch die blaue LED einen großen verfälschenden Einfluss auf viele Farben, so könnte dies die längere Identifikationszeit der auf den Pseudoisochromatischen Tafeln enthaltenen Symbolen erklären.

Nicht eindeutig geklärt werden konnten Fragen bezüglich möglichen Parallelen zwischen Farbdiskriminierung und -identifikation, es scheint aber so zu sein, dass geblendeten Personen die Farbdifferenzierung schneller gelingt als die Farbidentifikation.

4.3.8 Übersicht der Untersuchungsergebnisse

Im Einzelnen wurden insbesondere folgende Effekte untersucht:

- Visusbeeinträchtigung als Funktion der Expositionsdauer und der Quellengröße bei Verwendung einer High-brightness Weißlicht-LED
- Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit der Nachbilddauer
- Zeitlicher Verlauf der Nachbildfarben für verschiedenfarbige High-Brightness LED (HB-LED) und dessen Auswirkungen auf Farbverfälschungen
- Farbkontrastempfindlichkeit unter dem Einfluss von Blendlichtquellen

a.) Nachbildgröße als Funktion der Zeitdauer nach einer Blendung

Es zeigte sich ein leichter Trend zu einem mit wachsender Zeit nach der Blendung abnehmenden Nachbilddurchmesser, und zwar ergab sich sowohl unter Annahme einer linearen als auch einer exponentiellen Regression bei Mittelung über alle Messwerte der 3 Probanden – trotz individueller Unterschiede – eine Abnahme von ca. 9 % des Nachbilddurchmessers innerhalb einer Zeitdauer von 10 Minuten.

b.) Beeinträchtigung der Sehschärfe

In dieser Teil-Untersuchung wurde an 3 Personen ermittelt, nach welcher Zeitdauer die Sehschärfe nach einer Blendung mit einer grünen HB-LED wieder auf einen bestimmten Wert zurückkehrt, und zwar bei verschiedenen „Intensitäten“ und Expositionsdauern. Mit den verwendeten LEDs wurden optische Ausgangsleistungen von 0,12 mW bis maximal 1,5 mW erzielt und die Expositionsdauer betrug 1 s, 2 s, 4 s oder 8 s. Die Zeitdauer bis zur Rückkehr des normalen Visus wurde hier als Visuszeit bezeichnet und mittels eines Binoptometers gemessen. Als Ergebnis wurde der Zusammenhang

$$\text{Visuszeit/s} \approx 3,7 \cdot \ln(\text{Energie}/\mu\text{J}) - 16,2 \text{ s}$$

ermittelt, d. h. dass bei einer Blendenergie von z. B. 10 mJ eine Zeitdauer (Visuszeit) von 15 s bis 20 s benötigt wird, um den personenspezifischen Visus wieder zu erlangen.

c.) Lesefähigkeit als Sehschärfekriterium nach Blendung

Als Störungszeit der Sehschärfe (Lesestörzeit) ergaben sich bei einer Expositionsdauer von 5 s Werte zwischen ca. 10 s und ca. 25 s mit einer individuellen Schwankungsbreite von ca. 10 s, und zwar unabhängig von der optischen Leistung der blendenden Weißlicht-LED. Andererseits konnte eine leichte Zunahme der Lesestörzeit

mit wachsender Expositionsdauer gemessen werden, wobei aber im Bereich einer relativ langen Expositionsdauer von ca. 20 s eine Sättigung einzutreten scheint.

d.) Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit

Für eine Expositionsdauer von 5 s betrug z. B. die Nachbilddauer bei zentraler Blendung nur noch etwa dreiviertel des Wertes bei 10 s und bei einer Exposition der Dauer von 1 s nur noch etwas über die Hälfte. Bei 10 s Expositionsdauer betrug die Nachbilddauer bei 30 μW und zentraler Blendung ca. 300 s.

Für die Nachbilddauer t_{nb} als Funktion von Laserstrahlleistung P und Expositionsdauer t_{exp} ergab sich bei einem Blendwinkel von 5° der Zusammenhang

$$\frac{t_{nb}}{s} \approx 25,3 \cdot \ln\left(\frac{P \cdot t_{exp}}{\mu\text{J}}\right) - 6,7$$

bzw.
$$\frac{t_{nb,fov}}{s} \approx 50,6 \cdot \ln\left(\frac{P \cdot t_{exp}}{\mu\text{J}}\right) - 13,4$$

bei zentraler, fovealer Blendung.

e.) Zeitlicher Verlauf der Nachbildfarben

Die Nachbilddauern betragen bei optischen Energien von 0,25 mJ bis 2,5 mJ typisch zwischen 140 s und 250 s.

Bei diesen Teiluntersuchungen zeigte sich, dass

- die Blendfarbe aufgrund der angewandten „Reizstärke“ stark anteilig an der Nachbildfarbe ist und deren Anteil mit fortschreitender Zeitdauer sinkt,
- eine Energieverringerng zu einer zeitlichen Verschiebung bzw. Stauchung des Farbverlaufes im Nachbild führt,
- die Verschiebung wellenlängenabhängig ist, insbesondere bei Rot- und Blaublendung, und zwar bei einer Leistungs- und Blendzeitreduzierung, während für Grün- und Amberblendung kaum Abweichungen erkennbar sind,
- eine Intensitätsreduzierung zu einer Verkürzung der Nachbilddauer führt und
- dass Farbübergänge in Form von Ringen erfolgen.

f.) Farberkennbarkeit und Kontrastempfindlichkeit

Ermittelt wurde bei welchen Farben hauptsächlich eine Fehlwahrnehmung erfolgte und welche dagegen unverändert wahrgenommen wurden. Die Zeitdauer, die verging bis eine 80%ige Richtigwahrnehmung erfolgte, betrug je nach Farbe der LED zwischen 44 s und 110 s und war darüber hinaus expositionsdauerabhängig.

Außerdem konnte gezeigt werden, dass unter normalen Bedingungen annähernd metamere Farben nach einer Blendung durch eine farbige LED durchaus nicht mehr metamer sein müssen, da es zu einer Farbwertverschiebung kommt.

Die durch Blendung bedingte Anfangsidentifikationszeitverzögerung beträgt gegenüber derjenigen ohne Blendung bei nahezu allen Farben etwa 14 s bis 16 s. Für Gelb sind es sogar ca. 30 s. Als Identifikationsreihenfolge kann man Schwarz - Blau - Grün – Magenta - Cyan - Rot und Gelb sowohl ohne als auch mit Blendung angeben, wobei zum Teil relativ geringe Unterschiede vorliegen. Demzufolge kann vermutet werden, dass dieser Effekt durch den Farbkontrast zwischen der Sehzeichen- und der weißen Hintergrundfarbe bedingt ist und nicht durch die Blendwirkung.

Eine Kontrastverringerng um eine Stufe zieht eine Erhöhung der Identifikationszeit von 4 s nach sich. Der isolierte Effekt einer Blendung bei Betrachtung niedriger Kontraste (\leq etwa 4 %) bedingt eine Verlängerung der Identifikationszeit um etwa 3 s für jede Kontrastverringerng um den Faktor $1/\sqrt{2}$, also um eine Stufe.

Die Zeiten zur Identifikation der Zeichen bzw. Symbole auf den Ishihara-Tafeln betragen zwischen 27 s und 139 s bei Druckdarstellung und zwischen 31 s und 186 s bei Monitordarstellung. In dieser Versuchsreihe zur Bestimmung der Auswirkung einer farbigen Blendung auf das Farbsehvermögen und auf die Dauer der auftretenden Sehstörung stellte sich heraus, dass die Blendung durch eine blaue LED die augenscheinlich längste Störzeit bezüglich des Farbsehens verursacht. Inwieweit dies durch die Auswahl der Farbtafeln bedingt wurde oder auf erhöhte Streuung bei kürzeren Wellenlängen zurückzuführen ist, kann nicht abschließend gesagt werden. Festgestellt wurde aber, dass die meisten Probanden die Blendung durch die blaue LED, sowohl während der Blendung als auch in den Minuten bis zum Abklingen des Nachbildes, am „unangenehmsten“ empfanden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit Ishihara-Tafeln zeigen, dass das Farbkontrastsehvermögen durch Blendung durchaus für Zeiten von mehr als 2 Minuten, im Einzelfall sogar für 3 Minuten, deutlich beeinträchtigt werden kann. Es besteht daher die Möglichkeit, dass bestimmte farbige Objekte in andersfarbiger Umgebung bis zu 3 Minuten nicht sicher abgegrenzt werden können.

Bei Tests zur Erkennung von vorgegebenen Farbtafeln lagen die ermittelten Identifikationszeiten der Farbfelder, in Druck- und Monitordarstellung, insgesamt etwa zwischen 20 und 150 Sekunden. Der direkte Blick in eine farbige Blendlichtquelle kann daher aufgrund der daraus resultierenden veränderten Farbwahrnehmung dazu führen, dass bestimmte Farben für bis zu 2 1/2 Minuten nicht korrekt empfunden bzw. benannt werden.

4.3.9 Einordnung der Versuchsbedingungen in typische Expositionssituationen

Die einzelnen Untersuchungen zur Visusbeeinträchtigung als Funktion der Expositionsdauer und der Quellengröße bei Verwendung einer High-brightness Weißlicht-LED, zur Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit der Nachbilddauer, zum zeitlichen Verlauf der Nachbildfarben für verschiedenfarbige High-

Brightness LED (HB-LED) und deren Auswirkungen auf Farbverfälschungen sowie zur Farbkontrastempfindlichkeit unter dem Einfluss von Blendlichtquellen wurden unter Versuchsbedingungen durchgeführt, wie sie z. B. beim Einsatz von Lasern der Klasse 1 vorkommen können. Diese expositionsmäßige Einschränkung wurde aus der Überlegung heraus gewählt, dass es sich dabei um den Expositionsbereich handelt, der nicht durch Grenzwerte zulässiger Bestrahlung geregelt ist, andererseits aber Blendung als sicherheitsrelevanter Effekt untersucht werden sollte.

So wurde bei der Untersuchung der Lesefähigkeit in einem Abstand von 10 cm, der demjenigen des Probanden von der Blendlichtquelle entsprach, als maximale Expositionsleistung, bezogen auf den Messaufbau, eine Leistung von 4 mW gemessen. Der gesamte Leistungsbereich erstreckte sich von 4,5 μ W bei einer Blendenöffnung von 0,3 mm bis zu 3,96 mW bei 18 mm und entsprach damit demjenigen einer Lasereinrichtung der Klasse 1.

Die Ermittlung der Orts-, Expositionsdauer- und Strahlleistungsabhängigkeit erfolgte mit Expositionsauern 0,25 s bis 10 s bei Leistungen von 10 μ W bis 30 μ W, d. h. bei maximal etwa 1/10 des Grenzwertes der Laserklasse 1. Abb. 4.122 zeigt diese Zusammenhänge für die Laserstrahlexposition.

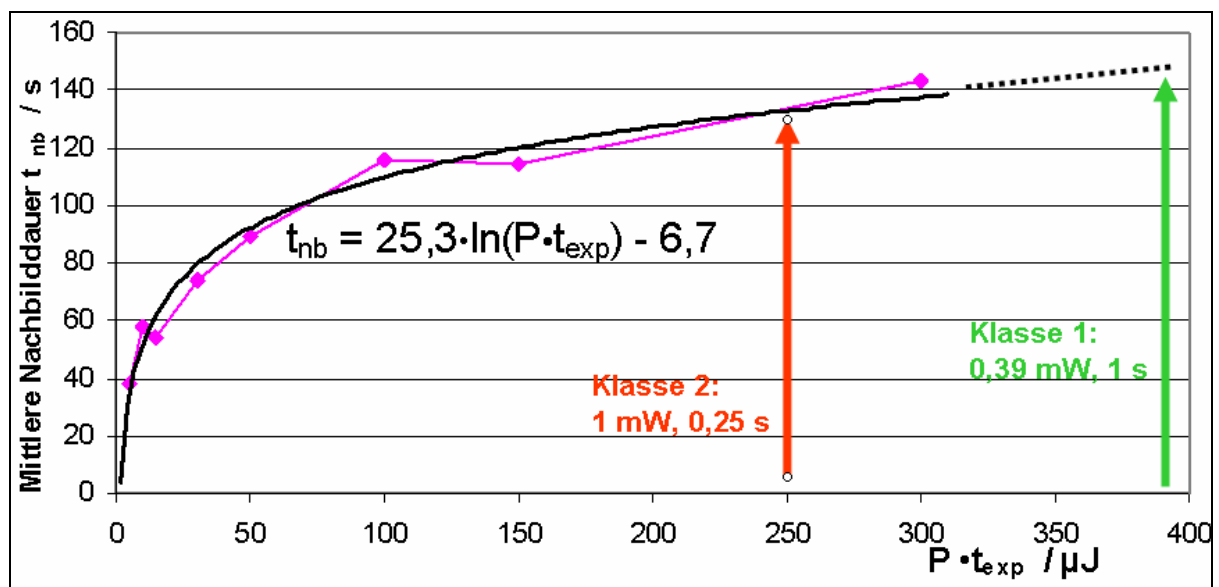


Abb. 4.122 „Dosisbeziehung“ und Einordnung der Expositionssituation

Farberkennbarkeit und Kontrastempfindlichkeit wurden entweder bei einer optischen Leistung von 0,5 mW durchgeführt, d. h. bei einer Leistung, die in einer 7 mm-Blende gemessen wurde. Dabei betrug die Hornhautbestrahlungsstärke 1,28 mW/cm^2 und die Bestrahlungsstärke lag damit in einem Bereich, der auch mit Lasereinrichtungen der Klasse 1 erreicht wird. Die Expositionsdauer wurde zwischen 1,25 s und 5 s gewählt.

4.4 Ermittlung von Schwellwerten

Blendung kann auf vielfältige Art und Weise zu einer Beeinträchtigung des Sehvermögens führen.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass dem Grad der Blendung eine große Bedeutung zukommt. Es ist daher sinnvoll, diesen Grad gewissermaßen in verschiedene Stufen einzuteilen, wobei sowohl kurzzeitige als auch länger andauernde Auswirkungen berücksichtigt werden sollten.

Im Einzelnen handelt es sich um

- Ablenkung
- Geblendetsein
- Blitzlichtblindheit.

Ablenkung kann bereits bei sehr geringen Bestrahlungswerten auftreten. Dabei muss es nicht zu einer Blendung im üblichen Sinne gekommen sein.

Geblendet fühlt man sich dagegen erst oberhalb derjenigen Bestrahlungswerte, die nur zu einer Ablenkung von einer Tätigkeit, d. h. zu einer Beeinträchtigung der Aufmerksamkeit, führen.

Dabei tritt der Effekt der Blendung im Allgemeinen dann ein, wenn eine Sichtbehinderung auf einen Gegenstand im Gesichtsfeld einer Person durch eine helle Lichtquelle vorliegt.

Blitzlichtblindheit ist dagegen ein Effekt, der zwar während der Blendung einsetzt, aber dann noch weiter besteht, wenn sich entweder die Lichtquelle schon nicht mehr im Gesichtsfeld befindet oder nicht mehr strahlt. Dabei kommt es dann zu einer unmittelbaren Beeinflussung der Sehfunktionen.

In diesem Zusammenhang ist das Auftreten von Nachbildern zu sehen, die nach einer Exposition durch eine helle Lichtquelle wahrgenommen werden.

Bei einer Betrachtung des Einflusses einer blendenden Lichtquelle auf das Auge sollte diese auch unter dem Aspekt photometrischer Größen erfolgen. Dies könnte durch Berücksichtigung eines Korrekturfaktors erfolgen. Ein solcher Vorschlag wurde auch bereits gemacht [250], und zwar auf der Basis der photometrischen Wirkungsfunktion. Hierzu wurden verschiedene Laser mit Emissionen im sichtbaren Spektralbereich gewissermaßen photometrisch bewertet. Gleichzeitig wurde vorgeschlagen, die Verhältnisse aus der photometrischen Bewertung in die gegenwärtig akzeptierten Bestrahlungsgrenzwerte von $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ und $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (entsprechend der empfindlichen und kritischen Zone, vgl. in Abschnitt 1.3) als Korrektur einzubeziehen. Einen solchen Weg kann man aber nur gehen, wenn die Annahme der Gültigkeit der $V(\lambda)$ -Kurve nachgewiesen ist.

Außerdem muss Berücksichtigung finden, dass ein von einem Laserstrahl erzeugter relativ kleiner Fleck auf der Netzhaut, diesen dort zwar lokal durchaus stark beeinträchtigt, aber die Sehschärfe dadurch nur gering beeinflusst wird. So kann ein Fleck von 20 μm bis 100 μm zwar durchaus – wie gezeigt – ein nachhaltiges Nachbild erzeugen, aber die nicht betroffene Netzhaut kann diesen Verlust ausgleichen.

Untersuchungen haben auch gezeigt, dass z. B. 5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ unter Laborbedingungen „kein Problem“ darstellen, während in Feldversuchen bereits 1,5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ als „wirklich hell“ empfunden wurden. Hierfür ist maßgeblich die durch Vorwärtsstreuung in der Atmosphäre bedingte Vergrößerung der blendenden Fläche verantwortlich, denn die Empfindung der Helligkeit ist sowohl eine Funktion der Beleuchtungsstärke als auch der Fläche.

Es muss daher auch der Einfluss, den eine ausgedehnte Quelle im Vergleich zur Punktquelle ergibt, in einer quantitativen Analyse berücksichtigt werden, da die größere Fläche auf der Netzhaut zu einer stärkeren Reduzierung der Sehfähigkeit führt. Bislang wurden noch keine Untersuchungen zum Einfluss der Blendlichtquellenfläche auf den quantitativen Blendungsverlauf durchgeführt. Aus der Literatur ist allerdings bekannt, dass sich eine zunehmende leuchtende Fläche auf den Nachbildverlauf auswirkt wie eine Zunahme der Belichtungsintensität [100].

Dazu kommt noch, dass der Grad der physiologischen Störung beim Auge von der aufgefangenen Strahlungsenergie abhängt und auch die psychologische Blendung bei einem länger andauernden Blendereignis als stärker empfunden wird. Dies wird nicht nur im Vergleich der Expositionen durch einen einfachen Photoblink mit derjenigen durch einen Kamerascheinwerfer deutlich.

Die Ermittlung von Schwellen, wie z. B. der Beginn bzw. das erstmalige Auftreten eines Nachbildes im Hinblick auf optische Leistung und Expositionsdauer können als Suche nach Grenzwerten für eine Blendung betrachtet werden. Darüber hinaus gilt es, noch weitere funktionale Zusammenhänge bezüglich der Dauer eines Nachbildes und der damit verbundenen Sehstörungen bzw. Beeinträchtigung der Farbdiskriminierung experimentell zu ermitteln.

Der Ermittlung von Schwellwerten bei der Blendung kommt neben der Bestimmung funktionaler Zusammenhänge eine ganz zentrale Rolle zu. Da die durchgeführten Untersuchungen aber nicht auf dieses Ziel fokussiert waren, können die vorgestellten Ergebnisse auch nur dazu beitragen, bei entsprechenden Überlegungen insoweit Berücksichtigung zu finden, dass die daraus ableitbaren funktionalen Zusammenhänge einfließen. Dabei ist aber in jedem Falle zu bedenken, dass gerade Untersuchungen an einer zu suchenden Schwelle besonders umfangreich, zeitaufwändig und genau durchgeführt werden müssen. Es liegt dabei in der Natur der Sache, dass dann Fehlermöglichkeiten besonders beachtet werden müssen.

Abb. 4.123 zeigt anschaulich, dass sich aus den bisher vorliegenden messtechnischen Ergebnissen, wie hier im Falle einer unter 5° temporal durchgeführten Exposition mit einem Laserstrahl der Wellenlänge 632,8 nm, nicht zwangsläufig eine Schwelle extrapolieren lässt. Dabei müssen korrekterweise alle relevanten Parameter der Versuchsbedingungen, wie z. B. Laserwellenlänge (632,8 nm), Expositions-

dauer (0,5 s bis 10 s), Laserstrahlleistung (10 μW bis 30 μW), Laserstrahlparameter (z. B. Strahldurchmesser auf der Hornhaut und Strahldivergenz), Umgebungshelligkeit usw. in eine genauere Betrachtung einfließen.

Ein Blick auf Abb. 4.123 lässt aber bereits so erkennen, dass man zur Ermittlung einer Blendschwelle eigentlich auch eine Festlegung benötigt, was darunter verstanden werden soll.

Wenn darunter z. B. der Wert der Laserstrahlleistung verstanden werden soll, bei dem kein Nachbild auftritt, d. h. bei dem die Nachbilddauer Null ist, dann wäre dies – zumindest näherungsweise – bei der Leistung 0 mW der Fall. Es kann auch nicht Absicht sein, im Falle einer Schwelle bei Blenderscheinungen wie dem Nachbild dort zu suchen, wo es darum geht, die Mindestzahl der Photonen anzugeben, die für die Wahrnehmung eines Lichteindrucks erforderlich sind und die oft bei 1 – 6 Photonen angegeben wird. Zu einer Schwelle dieser Art wäre es erforderlich, die Abhängigkeiten eines solchen Schwellenreizes unter anderem von dessen Fläche auf der Netzhaut, von seiner Dauer, von seinem Ort auf der Netzhaut, von der Wellenlänge des Stimulus und auch von der durch Adaptation ausgedrückten Empfindlichkeit des Auges im Augenblick des Reizes zu berücksichtigen.

Wird aber z. B. der Wert gesucht, bei dem die Nachbilddauer mindestens 10 s beträgt, weil man diesen Wert mit einer Lesezeitstörung von 1 s gleichsetzen möchte, wie dies aus den vorliegenden Ergebnissen in Verbindung mit den Betrachtungen zu den Blendgruppen abgeleitet werden könnte (vgl. Abschn. 5.), dann ließe sich auch Abb. 4.124, die eine Detailvergrößerung von Abb. 4.123 darstellt, z. B. eine Energie von 2 μJ bis 5 μJ ablesen.

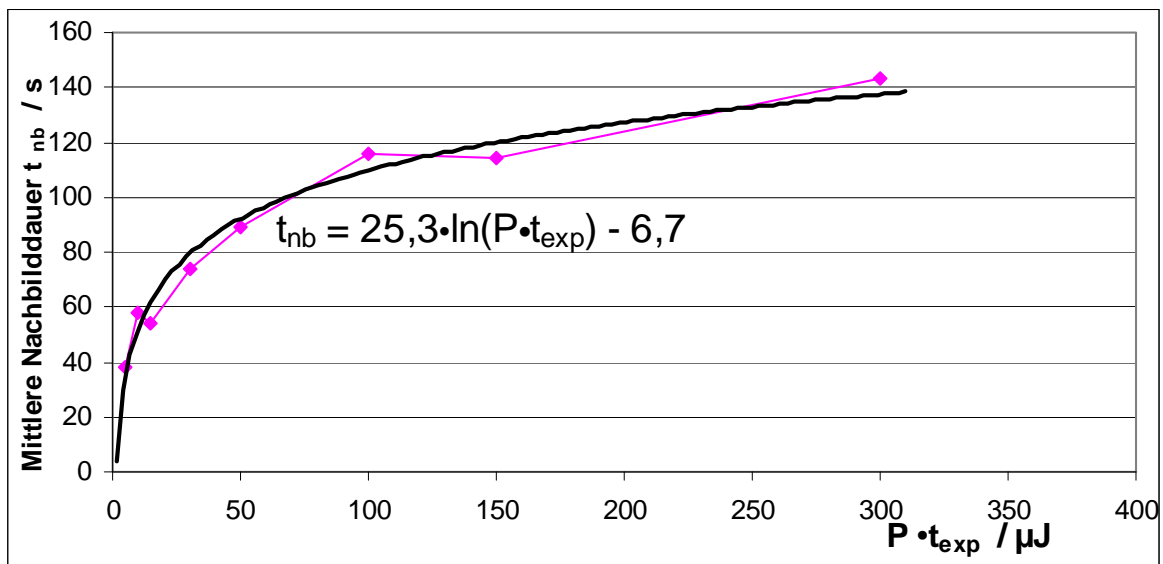


Abb. 4.123 Nachbilddauer gemäß Abb. 4.53 und Abb. 4.122

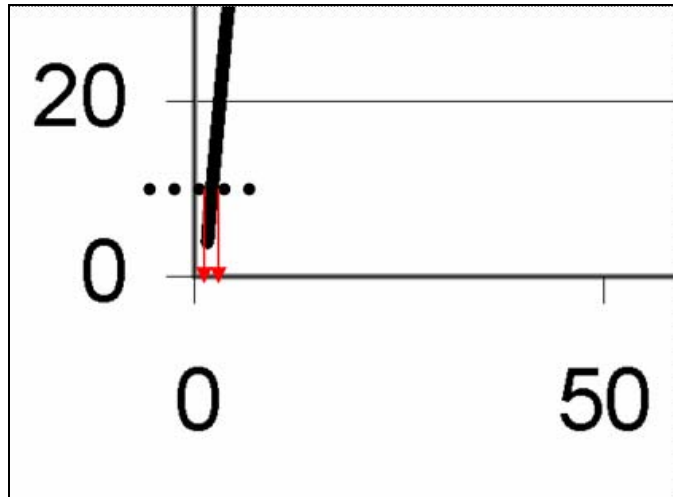


Abb. 4.124 Nachbilddauer in s (Ordinate) als Funktion der Laserstrahlenergie in μJ (Abszisse) gemäß Abb. 4.123 (Detailvergrößerung)

Durch Umformung des Zusammenhanges gemäß Gl. (4.4) erhält man bei 5° temporalen Exposition mit einem Laserstrahl der Wellenlänge 632,8 nm eine Laserstrahlenergie $Q = P \cdot t_{\text{exp}}$, die erforderlich ist, um eine Nachbilddauer t_{nb} zu erzielen.

$$\frac{Q_{5^\circ}}{\mu\text{J}} = \frac{P_{5^\circ} \cdot t_{\text{exp},5^\circ}}{\mu\text{J}} \approx \exp\left(\frac{t_{\text{nb}} + 6,7}{25,3}\right) \quad (4.9)$$

bzw. durch Berücksichtigung von Gl. (4.5) für foveale Bestrahlung

$$\frac{Q_{\text{fov}}}{\mu\text{J}} = \frac{P_{\text{fov}} \cdot t_{\text{exp, fov}}}{\mu\text{J}} \approx \exp\left(\frac{t_{\text{nb}} + 13,4}{50,6}\right). \quad (4.10)$$

Aus Gl. (4.9) lässt sich für $t_{\text{nb}} = 10$ s ein Energiewert von $1,93 \mu\text{J} \approx 2 \mu\text{J}$ errechnen, d. h. eine solche Nachbilddauer wäre theoretisch mit den Wertepaaren $10 \mu\text{W}$ und $0,2$ s, $20 \mu\text{W}$ und $0,1$ s, $30 \mu\text{W}$ und $0,067$ s, $4 \mu\text{W}$ und $0,5$ s, $2 \mu\text{W}$ und 1 s, $0,4 \mu\text{W}$ und 5 s, sowie $0,2 \mu\text{W}$ und 10 s möglich, wobei aber keines dieser Wertepaare in den experimentellen Untersuchungen eingesetzt wurde. Insofern müsste zumindest der experimentelle Nachweis zur Erweiterung der Bereichsgrenzen erbracht werden, bevor sich auf rein analytischem Wege Voraussagen machen lassen.

Da beim Lesen in erster Linie aber die foveale Exposition bedeutsam ist, müsste Gl. (4.10) angewandt werden, wodurch sich für $t_{\text{nb}} = 10$ s ein Energiewert von $1,59 \mu\text{J} \approx 1,6 \mu\text{J}$ ergeben würde, der noch um ca. 20 % geringer wäre als unter einem Winkel von 5° . Auch hierfür müssten selbstverständlich Untersuchungen zur Bestätigung der Extrapolation durchgeführt werden.

Aber auch ohne vorliegende experimentelle Untersuchungen lässt sich eine entsprechende Vermutung dergestalt aussprechen, dass z. B. der Blick in einen sichtbaren Laserstrahl der Klasse 1 nach DIN EN 60825-1 während einer Dauer von ca. 5 s dann zu einer Lesezeitstörung von ca. 1 s führt, wenn die Laserleistung nicht mehr als ca. 1/1000 des in dieser Laserklasse erlaubten Wertes von 0,39 mW im Bereich von 500 nm bis 700 nm beträgt bzw. von maximal 1/10 des Klassengrenzwertes, wenn die Laserstrahlleistung im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm nicht länger als ca. 70 ms auf das Auge einwirkt.

Eine Exposition während 1 s bei einem Laserstrahlwert von 1/10 der Klassengrenze, also von ca. 39 μW würde dagegen bereits zu einer Nachbilddauer von 172 s (nach Gl. (4.5)) führen und damit die Lesefähigkeit während einer Dauer von mehr als ca. 20 s so stark beeinträchtigen, dass sie als nicht voll gegeben zu betrachten wäre. Noch längere Störzeiten ergeben sich bei solchen Laserleistungen für längere Expositionszeiten von 10 s bzw. 20 s, wie ein Vergleich mit Tab. 4.12 zeigt.

Wichtig ist auch die Antwort auf die Frage, über welchen Bereich sich ein funktionaler Zusammenhang zwischen der optischen Leistung der Blendlichtquelle und der Einwirkungsdauer angeben lässt.

In den hierzu durchgeführten Untersuchungen mit einem Laserstrahl aus einer Lasereinrichtung der Klasse 1 wurde nur der Zeitbereich von 0,25 s bis 10 s und der Leistungsbereich von 10 μW bis 30 μW eingestellt. In der Literatur sind Untersuchungen zu solch langen Zeitdauern nicht zu finden, wenn es dort um die Frage geht, über welche Zeitdauern und „Intensitäten“ Lichtbestrahlungen gleich hell erscheinen. Es wird berichtet, dass das Sehsystem eine zeitliche Summierung bzw. Integration vornimmt [351], wobei dieser Effekt aber auf kurze Zeitdauern begrenzt ist. Dabei geht man davon aus, dass während kurzen Zeitdauern alle einfallenden Photonen aufsummiert werden, d. h. Licht wird bis zu einem kritischen Wert bei gleicher Energie gleich hell empfunden, während die Helligkeit bei längeren Zeitdauern nur noch von der „Intensität“ – und damit von der Leistung – abhängt [351].

Die Reziprozität von Zeitdauer t und Intensität ist unterhalb eines kritischen Zeitdauerwertes als Blochsches Gesetz bekannt. Dabei folgen alle Neurone der Beziehung $i_s \cdot t = q_{\text{krit}}$, und zwar für kurze Reize mit einem kontinuierlichen Übergang zu einer konstanten Schwelle. Die auf eine Hintergrundbeleuchtung bezogene Zentrumsempfindlichkeit für kurze Reize ist vereinbar mit einer Schwellenerregung, die im Mittel für alle rezeptiven Felder als gleich groß angesehen werden kann. Man kann dieses Zeitsummutationsverhalten auch in Analogie aus der Summation über räumlich rezeptive Felder mit dem Konzept zeitlich rezeptiver Felder folgern [352].

Das BLOCHSCHE Gesetz drückt im Wesentlichen aus, dass ein weniger intensiver Reiz länger vorliegen muss, um genauso entdeckt werden zu können [157]. Die Verallgemeinerung vom Neuronenniveau auf den Summenreiz könnte man daher gemäß $I_s \cdot T = Q_{\text{krit}}$ durch einen kritischen Betrag an Licht-Energie Q_{krit} zum Überschreiten der Schwelle beschreiben. Die größte Zeitdauer T stellt dabei eine Zeitkonstante dar. Gewissermaßen kann diese Gesetzmäßigkeit als eine Erweiterung des BUNSEN-ROSCOE Gesetzes der Fotochemie [159] angesehen werden.

R. W. BUNSEN und H. E. ROSCOE hatten während ihrer zehnjährigen Zusammenarbeit in den Jahren 1855 – 1862 insbesondere photoinduzierte Gasreaktionen in HCl untersucht und dabei das Reziprozitätsgesetz für photochemische Prozesse definiert. Sie hatten dabei die Bildung von HCl aus gleichen Mengen gasförmigen Wasserstoffs und Chlors unter dem Einfluss von Sonnenlicht – genauer „mit den vom Zenith eines wolkenlosen Himmels ausgehenden Strahlen“ – untersucht. Dabei wiesen BUNSEN und ROSCOE aber bereits 1857 daraufhin, „dass es schon DRAPER nicht entgangen ist, dass die Wirkungen des Lichtes auf ein Gemisch von Chlor und Wasserstoff nicht momentan eintreten – und der als Erster nicht ohne Erfolg versucht hat, die chemischen Wirkungen auf ein vergleichbares Maaß zurückzuführen“ (eine Beschreibung des von DRAPER zu diesem Zweck angegebenen Instrumentes erschien im Jahre 1843 in dem „London, Edin. And Dublin Philos. Magazine, T. XXIII, p. 401“, zit. in ([159], 100 (1857), S. 43). Für BUNSEN und ROSCOE gingen von der Lichtquelle „chemische Strahlen“ aus, die zu einem „allmählichen Anwachsen der Wirkungen bei constant erhaltener Bestrahlung“ führten [159]. Die Zeitdauern lagen bei diesen ersten Versuchen durchaus im Bereich von mehreren Minuten. An anderer Stelle wird von kurzen Zeitintervallen gesprochen, innerhalb derer die Volumenverminderung eines Gemisches aus Wasserstoff und Chlor unter Bestrahlung infolge Bildung und Absorption von Salzsäure der Lichtstärke proportional war und als photochemisches Maß benutzt wurde. 1859 benutzten BUNSEN und ROSCOE „Flammen, die durch einen Gasstrom von bestimmter gleichförmiger Geschwindigkeit gespeist wurden“ und umgingen damit die Probleme, die sie in der Verwendung sowohl von gewöhnlichen Lampen und Kerzen, aber auch in zum Glühen gebrachten Drähten aufgrund von Schwankungen „ihrer physiologischen und chemischen Helligkeit“ fanden ([159], 108 (1859), S. 194).

Der von ihnen gefundene Zusammenhang wird gelegentlich auch als Reizmengesetz bezeichnet. Aufgrund dieser Gesetzmäßigkeit ergeben sich aus gleichen Produkten von Beleuchtungsstärke und Einwirkungsdauer (Belichtungszeit), d. h. aus gleichen Belichtungen (Belichtungsprodukt H), immer die gleichen photochemischen Wirkungen. Reziprozität ist aber sowohl im Kurzzeitgebiet, d. h. bei Einwirkungsauern von weniger als etwa $1/1000$ s und den dann erforderlichen großen Beleuchtungsstärken, aber auch im Gebiet der Langzeiteinwirkungen, d. h. bei Expositionsdauern von mehr als 1 s und bei kleinen Beleuchtungsstärken, nicht in allen Fällen erfüllt. Man spricht dann auch von einem Reziprozitätsfehler, der meist durch eine Veränderung der Empfindlichkeit des betrachteten Systems gegenüber einer äußeren Einwirkung begründet ist.

Mit dem BUNSEN-ROSCOE-Gesetz hat sich BRINDLEY bei Zeiten bis herunter zu $4,41 \cdot 10^{-7}$ s befasst und bei entsprechender Intensität immer noch gleiche Helligkeitsempfindung festgestellt [192]. Für die hier zur Blendung durchgeführten Untersuchungen ist dagegen der langzeitigere Bereich der Expositionsdauern interessant. Dabei lässt sich eine Reziprozität allenfalls bei Zeiten von weniger als ca. 0,1 s bis ca. 1 s aus den Ergebnissen ableiten.

Das BUNSEN-ROSCOE-Gesetz gilt nur in einem eingeschränkten Bereich. So muss z. B. ein Mindestbetrag an Licht vorhanden sein, um eine Reaktion auszulösen und eine darüber hinausgehende weitere Steigerung der Lichtintensität führt nicht ohne

weiteres zu einem Anstieg in der jeweiligen phototropen Reaktion, sondern kann sogar zu einer Unterdrückung derselben beitragen.

Man kann aber aus den Ergebnissen zugleich ableiten, dass oberhalb einer bestimmten Zeitdauer und oberhalb einer zugehörigen optischen Leistung bzw. oberhalb einer für die jeweilige Expositionssituation charakteristischen optischen Energie ein zweiter Zusammenhang existiert, der ebenfalls eine Reziprozität beinhaltet, allerdings mit einem anderen Reziprozitätsfaktor.

Ein zum Blochschen Gesetz analoger Zusammenhang findet sich im sogenannten Riccoschen Gesetz insofern, dass ein weniger intensiver Reiz großflächiger dargeboten werden muss, wenn er genauso wahrgenommen werden soll wie ein kleinflächiger intensiverer.

Ähnlich wie man eine kritische Zeitdauer als eine Zeitkonstante angeben kann, lässt sich die Reziprozität auch durch eine kritische Intensität beschreiben, wobei aber die Stimulation (Reiz) oberhalb eines gewissen Leistungswertes sein muss. Dann wenn die Helligkeit unabhängig von der Zeitdauer wahrgenommen wird, ergibt sich in einer doppeltlogarithmischen Darstellung, bei der die Leistung als Funktion der Einwirkungsdauer aufgetragen wird, eine Horizontale parallel zur Zeitachse. Ein solcher Fall wird weder durch Gln. (4.4, 4.5) noch durch Gln. (4.9, 4.10) beschrieben. In wie weit eine Zeitunabhängigkeit bei sehr kleinen Energiewerten bzw. bei sehr kleinen Einwirkungsdauern vorliegt, kann aus den vorhandenen Ergebnissen nicht geschlossen werden.

Bislang wird berichtet, dass kleinere Lichtquellenflächen zu längeren Zeitdauern führen [351]. Dabei ergaben sich kritische Zeitdauern von bis zu ca. 100 ms. Andere Untersuchungen ergaben, dass das kurzwelligere Zapfensystem längere Integrationszeiten besitzt als das langwellige [351]. Außerdem integriert das Sehsystem über längere Zeitdauern, wenn der Adaptationsvorgang voranschreitet. Dabei kann sich die kritische Zeit von ca. 30 ms bis 40 ms in der Anfangsphase der Dunkeladaptation auf ca. 100 ms bis 200 ms nach vollständiger Dunkeladaptation ausdehnen [351]. Der Reziprozitätsbereich erstreckt sich insgesamt von ca. 100 μ s bis etwa 10 ms und geht anschließend fließend in einem Übergangsbereich in die zeitliche Unabhängigkeit bezüglich der Helligkeitswahrnehmung über. Eine Reziprozität oberhalb von 1 s wurde bisher an keiner Stelle zitiert, und zwar auch keine partielle. Unterhalb von 100 μ s wurde bislang auch keine Reziprozität ermittelt; sollte jedoch das Blochsche Gesetz auch im Bereich von einigen hundert Nanosekunden gelten, dann wäre dies auch für die Reziprozität anzunehmen.

Im Bereich von einigen zehn Millisekunden bis Sekunden wurde Reziprozität lediglich in den späteren Phasen der Dunkeladaptation, d. h. nachdem 10 s bis 100 s vergangen waren, gefunden [351]. Diese Ergebnisse weisen eigentlich daraufhin, dass es unterschiedliche Mechanismen in der Dunkeladaptation gibt, die verschiedene Zeitkonstanten besitzen.

Es kann zur Interpretation bzw. Übertragung von Helligkeitserscheinungen auf Nachbilddauern und Sehstörungen ohnehin allenfalls in einem ersten Ansatz von einem Zusammenhang ausgegangen werden. Sollte es aber zutreffen, dass die „idealen“

Integrations-eigenschaften des Auges unterhalb von ca. 100 ms von Bedeutung sind, so hilft dies in den praktischen Fällen einer Blendung auch nur bei Kurzzeitexposition.

Das Produkt der „Intensität“ in „Millilambert“ und der Zeit in Sekunden wurde erstmals von BERRY und IMUS [113] als „I-T-Produkt“ aufgeführt, und zwar im Zusammenhang mit dem „flight of colors“. Die Umrechnung der angegebenen Einheiten führt zu „cd·m⁻²·s“. BERRY und IMUS fanden, dass die mittlere Dauer des „Flight of colors“ mit einer Potenzfunktion mit dem Logarithmus aus dem „IT-Produkt“ anstieg [113]. Als genaueren analytischen Zusammenhang gaben sie bei den verwendeten Einheiten die Beziehung „Mittlere Dauer in Sekunden“ = $6,51 \cdot \exp(-699 \cdot \text{IT-Produkt})$ an. Damit wurde erstmals ein Zusammenhang zwischen der Zeitdauer des „Flight of colors“ und dem Produkt der Intensität des Stimulus sowie der Einwirkungsdauer der Exposition angegeben. Dabei zeigte sich, dass eine Exposition von 60 Sekunden Dauer bei relativ geringer Intensität eine farbige Nachbilderscheinung („flight of colors“, farbiges Abklingen der Nachbilder nach HELMHOLTZ) aufwies, die genau so lange anhielt, wie eine Exposition bei höherer Intensität, die nur während einer Sekunde erfolgte. Die damals durchgeführten Untersuchungen erfolgten bei Leuchtdichten zwischen 0,2 cd/m² und 8.562 cd/m², wobei von einer Fläche von ca. 250 µm auf der Netzhaut ausgegangen wurde. Die Expositionsdauern betragen 0,0087 s bis 60 s.

BERRY und IMUS drücken den gefundenen Zusammenhang so aus: „Wenn das „IT-Produkt“ arithmetisch ansteigt, steigt die Dauer der farbigen Nachbilder geometrisch an.“

Ein Vergleich der von BERRY und IMUS mit den hier im Wesentlichen aufgeführten Ergebnissen ist nicht einfach zu machen, da die hier durchgeführten Untersuchungen bei höheren Leuchtdichtewerten erfolgten und sich daher keine Potenzfunktion zur Beschreibung der Zusammenhänge ergab, sondern davon ausgegangen wird, dass dieser Zusammenhang nur für relativ geringe „Leuchtdichten-Einwirkungsdauer-Produkte“ gilt, während bei größeren Werten nach einem Wendepunkt in der Kurve des funktionalen Zusammenhanges (vgl. Abb. 4.123) eine Beschreibung gemäß Gl. (4.9, 4.10) die Nachbilddauer charakterisiert. BERRY und IMUS weisen in ihrem Beitrag daher auch ausdrücklich darauf hin, dass die von ihnen angegebenen Zusammenhänge nur für die von ihnen untersuchten Parameterbereiche gelten. Dies gilt in gleichem Maße auch für die hier berichteten Ergebnisse.

Die Rolle der Adaptationshelligkeit durch die jeweilige Umgebung ist dabei noch nicht berücksichtigt. Man kann aber davon ausgehen, dass Reziprozität außer für kurze Zeiten auch nur für geringe Adaptationshelligkeitswerte gilt. So wird die Schwelle angehoben wenn sich die Adaptationshelligkeit erhöht [351]. Daher sind langanhaltende Expositionen in der Anfangsphase der Dunkeladaptation weniger wirkungsvoll als in der Spätphase. Dies könnte mit der Regeneration der Pigmente zusammenhängen, die dabei in etwa mit der gleichen Zeitkonstante vonstatten geht wie die Bleichung.

Zu Fragen inwieweit andere Faktoren die Nachbilddauer z. B. über eine veränderte Regeneration beeinflussen können, kann aus den vorliegenden Ergebnissen keine Aussage abgeleitet werden, es ist aber aus der Literatur bekannt, dass die Zeitdauer

der Lichtadaptation nach einer intensiven Lichtbestrahlung durch Alkohol, Marihuana und durch eine Kombination beider Agenzien stark verzögert werden kann [194].

4.5 Einsatz von Fragebögen

Zur Dokumentation und zum Zwecke der Analyse im Hinblick auf mögliche physiologische und psychische Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen und den personenspezifischen Eigenschaften wurden verschiedene Fragebögen entwickelt und bei den verschiedenen Teiluntersuchungen eingesetzt. Dabei wurde auch auf die Erfahrungen in zwei vorangegangenen Forschungsvorhaben [152, 153] zurückgegriffen, d. h. es wurden entweder bereits bewährte Fragebögen verwendet oder diese entsprechend modifiziert. Darüber hinaus wurden auch neue Fragebögen entwickelt, und zwar dann, wenn damit die spezielle Fragestellung besser erfasst werden konnte.

Abb. 4.125 enthält ein Beispiel für den allgemeinen Fragebogen für praktisch alle Teiluntersuchungen. Hierin wurden verschiedene Probandendaten erfasst und Angaben zu dem jeweiligen Blendungsereignis abgefragt.

Es wurden aber auch spezielle Fragebögen eingesetzt, die direkt auf die jeweilige Blendungsquelle zugeschnitten waren. Abb. 4.126 zeigt ein entsprechendes Beispiel.

Die schriftliche Einverständniserklärung war entweder Bestandteil des Fragebogens, wie im Beispiel der Abb. 4.126 oder es erfolgte separat eine Information der Testpersonen mit entsprechender Abfrage zur Einverständniserklärung. Hierzu wurde ein ausführliches Informationsblatt an potenzielle Testpersonen verteilt, wie es in Abb. 4.127 im Anschluss an das Formblatt zur Einverständniserklärung dargestellt ist.

Bei den zu untersuchenden Personen wurden die möglichen personenbezogenen Einflussparameter, insbesondere das Alter, das Geschlecht und der Beruf, erfasst sowie eventuelle im Fragebogen erfasste Sehbeeinträchtigungen entweder akzeptiert und in die Auswertung einbezogen oder führten andererseits zum Ausschluss von einer Untersuchung, da deren Einfluss entweder das Ergebnis unvorhersagbar beeinflussen oder eventuell verfälschen könnte. Hierzu wurden Farbsehschwächen bzw. Farbenblindheit und erhebliche Sehkorrekturen sowie Akkommodationsstörungen usw. gerechnet.

Fragebogen zum Forschungsvorhaben

" Untersuchungen zu arbeitsplatzbezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen "

 Projektleiter: Prof. Dr. Hans-D. Reidenbach, Fachhochschule Köln
 Forschungsbereich Medizintechnik/HLT

Laufende Nummer:

Geschlecht: männlich weiblich

Nationalität:.....

Alter:.....

Augenfarbe: blau grün grau braun

Beruf:.....

Vorwiegend ausgeübte Tätigkeiten:

Büro Labor Werkstatt Arbeiten im Freien andere

Fehlsichtigkeit: ja nein

Art der Fehlsichtigkeit: kurzsichtig (myop) weitsichtig (hyperop)
 Astigmatismus

Brillenträger: ja nein

Kontaktlinsenträger: ja nein

Totale Farbenblindheit

Farbenfehlsichtigkeit rotblind grünblind blaublind
 (Protanopie) (Deutanopie) (Tritanopie)

Grauer Star/Katarakt

Staroperation

Andere Augenerkrankung:.....

Sind Sie besonders lichtempfindlich? ja nein

Welche Lichtquellen stören Sie am meisten?.....

Haben Sie Probleme mit Blendung bei Nachtfahrten? ja nein

In welcher Situation ist Ihnen Blendung in Erinnerung?

War das Ereignis sehr hell?	ja ___	nein ___
Fühlen Sie sich geblendet?	ja ___	nein ___
Haben Sie ein Nachbild?	ja ___	nein ___
Welche Farbe hatte das Nachbild unmittelbar nach der Bestrahlung?.....		
Welche Farbe hatte das Nachbild nach ca. 30 Sekunden?.....		
War die Bestrahlung	<u>unmerklich</u>	
	gerade wahrnehmbar	___
	befriedigend begrenzt (akzeptabel)	___
	bereits auffallend	___
	<u>gerade zulässig</u> (zwischen annehmbar und störend)	___
	bereits etwas zuviel	___
	<u>störend</u>	___
	sehr störend	___
	<u>unerträglich</u> (unzumutbar)	___
Zusätzliche Bemerkungen/Ihr Eindruck:		
.....		
.....		
.....		

Abb. 4.125 Allgemeiner Fragebogen für praktisch alle Teiluntersuchungen

Untersuchung zu arbeitsplatzbezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen			
Projektleiter: Prof. Dr. Hans-D. Reidenbach, Fachhochschule Köln Forschungsbereich Medizintechnik/HLT			
Quelle:	Luxeon III Star	Bez.:	
Personendaten:			
Geschlecht:	männlich	weiblich	Alter:
Fehlsichtigkeit:	ja	nein	
Brillenträger:	ja	nein	
Kontaktlinsenträger:	ja	nein	
Farbsehfehler:	rotblind	grünblind	blaublind total
Sind Sie besonders lichtempfindlich?	ja	nein	
Probleme mit den Augen:			
Bei Nachtfahrten / Probleme mit Blendung: ja nein			
Beschreibung:.....			
Nach Versuch:			
War das Ereignis sehr hell? ja nein			
Fühlen Sie sich geblendet? ja nein			
Zusätzliche Bemerkungen Eindruck:.....			
.....			
<ul style="list-style-type: none"> • Ich wurde vom unterzeichnenden Projektleiter bzw. von dessen Stellvertreter mündlich und schriftlich über die Ziele, den Ablauf des Forschungsvorhabens, über die zu erwartenden Wirkungen sowie über eventuelle Risiken informiert. Meine Fragen im Zusammenhang mit der Teilnahme am Forschungsvorhaben sind mir zufriedenstellend beantwortet worden. • Ich bin einverstanden, dass die zuständigen Fachleute der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) als Auftraggeber des Projektes zu Prüf- und Kontrollzwecken in meine Originaldaten Einsicht nehmen dürfen, jedoch unter strikter Wahrung des Datenschutzes. 			
Nummer:			
Name / Vorname		Unterschrift	
Ort / Datum		Unterschrift Projektbeauftragter	

Abb. 4.126 Spezieller Fragebogen für Teiluntersuchungen mit einer bestimmten Blendungsquelle

Schriftliche Einverständniserklärung der Testpersonen zur Teilnahme an einem Forschungsvorhaben

- *Bitte lesen Sie dieses Formular sorgfältig durch.*
- *Bitte fragen Sie, wenn Sie etwas nicht verstehen oder wissen möchten.*

Nummer des Forschungsvorhabens: **F 2185**

Titel des Forschungsvorhabens:

" Untersuchungen zu arbeitsplatzbezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen "

Ort der Durchführung von Messungen zum Forschungsvorhaben:

Projektleiter

Vorname und Name: Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach /**Vertreter:** Mitarbeiter des Forschungsteams

Testperson

Name und Vorname:

Laufende Nummer:

- Ich wurde vom unterzeichnenden Projektleiter bzw. von dessen Stellvertreter mündlich und schriftlich über die Ziele, den Ablauf der Untersuchung, über die zu erwartenden Wirkungen sowie über eventuelle Risiken informiert. Meine Fragen im Zusammenhang mit der Teilnahme an diesem Forschungsvorhaben sind mir zufriedenstellend beantwortet worden.
- Ich bin einverstanden, dass die zuständigen Fachleute der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) als Forschungsauftraggeber zu Prüf- und Kontrollzwecken in meine Originaldaten Einsicht nehmen dürfen, jedoch unter Wahrung des Datenschutzes.

Ort, Datum

Unterschrift der Testperson

Unterschrift des Stellvertreters des Projektleiters (wenn von diesem beauftragt)

Probandeninformation umseitig

Information für Testpersonen/Probanden

Forschungsvorhaben: "Untersuchungen zu arbeitsplatzbezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen" (Nr. F 2185)

Projekträger und -förderer: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

H.-D. Reidenbach; K. Dollinger, E. Hild, Ch. Dahmen

Fachhochschule Köln/Forschungsbereich Medizintechnik: Hochfrequenz- und Lasertechnik

Ausgangslage:

Festlegungen von Grenzwerten bei der Exposition durch optische Strahlung basieren im Wesentlichen auf Erkenntnissen zu möglichen Schädigungen als Folge thermischer oder fotochemischer Wirkungen auf die Augen oder auf die Haut. Hierzu liegen sowohl internationale Empfehlungen von Grenzwerten für Laserstrahlung als auch für inkohärente optische Strahlung vor. Diese wurden 2006 nun auch in einer europäischen Richtlinie zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch künstliche optische Strahlung in der Europäischen Union festgeschrieben. Gemäß dieser Richtlinie, die Deutschland jetzt in eine nationale Regelung umzusetzen hat, müssen auch indirekte Gefährdungen durch Blendung hinsichtlich des quantitativen Ausmaßes genauer bestimmt werden, um daraus gewisse Grenzen ableiten zu können, die bei einer Gefährdungsbeurteilung benötigt werden.

Ziel und Versuchsdurchführung:

Da bislang nur unzureichende Kenntnisse bezüglich der Auswirkungen einer Blendung vorliegen, sollen die verschiedenen Effekte, die bei einer Blendung durch moderne Lichtquellen auftreten bzw. damit verbunden sein können, näher untersucht werden.

Vordringliches Ziel der Forschung ist es, den Grad bzw. das Ausmaß einer Blendung qualitativ und quantitativ zu ermitteln, um daraus in erster Linie eine Bewertung der Beeinträchtigungen bzw. Belästigungen bei Tätigkeiten am Arbeitsplatz vornehmen zu können.

In Feldversuchen soll dazu insbesondere untersucht werden, welchen Einfluss Blendung auf die Sehschärfe und im Hinblick auf Farbverfälschungen und Kontrastempfindlichkeit hat. Als wesentliches Untersuchungskriterium sind dazu das Auftreten und die Dauer eines Nachbildes zu ermitteln.

Hierzu werden Testpersonen/Probanden beiderlei Geschlechts und aus den verschiedensten Altersstufen mittels einer in Laborversuchen mehrfach getesteten Einrichtung für kurze Dauer exponiert und im Anschluss daran einer Messung der verschiedenen Sehfunktionen unterzogen.

Erste Ergebnisse:

In ersten Untersuchungen an Probanden konnte gezeigt werden, dass die Sehschärfe für ca. 1 Minute nach einer Blendung verringert war und dass das Farbkontrastsehvermögen durchaus noch länger beeinflusst wurde. Alle Versuchsteilnehmer bestätigten das Auftreten vorübergehender Farbsehbeeinträchtigungen.

Sicherheitsvorkehrungen:

Bei allen Tests werden die derzeit geltenden Grenzwerte für eine Exposition durch optische Strahlung in keinem Falle überschritten, so dass nach dem Stand von Wissenschaft und Technik davon ausgegangen werden kann, dass eine potenzielle Schädigung ausgeschlossen werden kann. Darüber hinaus werden die Untersuchungen in Anlehnung an die Helsinki Erklärung durchgeführt, wonach Gesundheit von Menschen Vorrang vor den Interessen der Wissenschaft und der Gesellschaft hat.

Projektleiter: Prof. Dr. Hans-D. Reidenbach

Abb. 4.127 Informationsblatt und Formblatt zur Einverständniserklärung

Neben den Fragebögen wurden jeweils für die einzelnen Teiluntersuchungen Protokollblätter erstellt und zur Dokumentation eingesetzt. Die Abb. 4.128 bis 4.131 zeigen entsprechende Beispiele des Landolt-C-Sehtests, für eine Nachbildmessung, für den Farbfeldtest und für den Test mit pseudoisochromatischen Tafeln.

<u>Landolt</u>									
Proband-Nr : _____ Datum: _____ 2006 Uhrzeit: _____									
Auge: rechts <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/>									
<u>Bedingungen:</u>									
Chart Papier <input type="checkbox"/> Monitor <input type="checkbox"/> Farbe: <u>BLAU</u> _____									
Blendung Zeit: <u>5</u> s Farbe: _____ LED									
<u>Messung:</u>									
Kontrastschwelle ohne Blendung: _____									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> 1.1 R L RU </td> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: top;"> 1.2 LO O LU </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> 2.1 O LU LO </td> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> 2.2 R RO L </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> 3.1 LU RO L </td> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> 3.2 LU U O </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> 4.1 R RO U </td> <td style="text-align: center; vertical-align: top;"> 4.2 O RU RO </td> </tr> </table>	1.1 R L RU	1.2 LO O LU	2.1 O LU LO	2.2 R RO L	3.1 LU RO L	3.2 LU U O	4.1 R RO U	4.2 O RU RO	
1.1 R L RU	1.2 LO O LU								
2.1 O LU LO	2.2 R RO L								
3.1 LU RO L	3.2 LU U O								
4.1 R RO U	4.2 O RU RO								
<u>Sonstiges:</u>									

Abb. 4.128 Protokollblatt für Sehtest nach Blaublendung (analog für alle 5 anderen LED-Farben)

Nachbild

Datum: _____ 2006 Uhrzeit: _____

Auge: rechts links

Bedingungen:

Chart Papier Monitor auf Weiß

Blendung Zeit: 5 s Farbe: _____ LED

Messung:

	Farbe NB	Zeit [s]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

Sonstiges:

Abb. 4.129 Protokollblatt für Nachbild

Protokoll - Farbfeld

Proband-Nr : _____ Datum: _____ 2006 Uhrzeit: _____

Auge: rechts links

Bedingungen:

Chart Papier Monitor

Blendung Zeit: 5 s Farbe: _____ LED

Messung:

Durch -lauf	Rot	Gelb	Blau	Grün	Magenta	Cyan	Zeit [s]
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							

Sonstiges:

Abb. 4.130 Protokollblatt für Farbfeld

Protokoll - Pseudoisochromatische Tafel

Proband-Nr : _____ Datum: _____ 2006 Uhrzeit: _____

Auge: rechts links

Bedingungen:

Chart Papier Monitor Tafel-Nr.: _____

Blendung Zeit: 5 s Farbe: _____ LED

Messung:

	Farbe HG	Farbe Zahl	Genannte Zahl	Zeit [s]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Sonstiges:

Abb. 4.131 Protokollblatt für Pseudoisochromatische Tafeln

5 Bewertung und Ausblick

Die Auswertung der Untersuchungen sollte sich insbesondere an den nachstehenden Fragen orientieren:

Welches Gefährdungspotenzial stellt Blendung durch die Beeinträchtigung des Sehvermögens am Arbeitsplatz dar?

Wie lassen sich die Erkenntnisse in die gesetzlichen Festlegungen und Regelwerke einordnen bzw. welche Maßnahmen lassen sich aus den Erkenntnissen unmittelbar für den Arbeitsschutz ableiten?

Welche Anforderungen sollten Eingang in die Normung finden?

Für optische Quellen besteht im Falle eines Lasers bereits seit vielen Jahren die Verpflichtung einer Klassifizierung nach DIN EN 60825-1 [151], d. h. einer Einteilung entsprechend dem von ihnen ausgehenden Gefährdungspotenzial im Hinblick auf die emittierte optische Strahlung.

Darüber hinaus werden auch Lampen und Lampensysteme seit ein paar Jahren in Risikogruppen eingeteilt, die sich auf die photobiologischen Gefährdungen abstützen [247]. In dieser Norm stellen die Messverfahren gemeinsam mit dem beschriebenen Risikogruppen-Klassifizierungssystem sowohl für Lampenhersteller wie auch für Anwender die Basis für eine Beschreibung der spezifischen photobiologischen Gefahren jeglicher Lampen und/oder Lampensysteme dar.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens legen es darüber hinaus nahe, Lichtquellen in ihrer Eigenschaft als Blendlichtquellen in sogenannte Blendgruppen einzuteilen. Es wird daher folgende Einteilung vorgeschlagen (Tabelle 5.1):

Tab. 5.1 Einteilung von Blendlichtquellen in Blendgruppen

Blendgruppe	Maximale Störung von Sehfunktionen in s	Zusatzangabe (optional)
B0	1 – 2	
B1	10	
B2	> 10	Maximale Störzeit: in s

Nach Tabelle 5.1 werden Lichtquellen als Blendlichtquellen dann in Blendgruppe B0 eingeteilt, wenn sie kein Nachbild erzeugen, das zu einer Störung von Sehfunktionen führt, die länger als 1 s bis 2 s dauert. Blendgruppe B1 beinhaltet solche Lichtquellen, die das Potenzial für eine Störung der Sehfunktionen besitzen, die zu einer maximalen Dauer der Störung von 10 s führen kann und solche bei denen längere Störungen zu erwarten sind, könnten einer Blendklasse B2 zugeordnet werden. Dabei sollte der Hersteller bzw. Inverkehrbringer solcher Lichtquellen die Möglichkeit ha-

ben, die maximale Störzeit zusätzlich zur Gruppe angeben zu können, z. B. B2/20s (Blendgruppe 2, maximale Störzeit 20 s).

Um Sinn und Zweck der Einteilung von Lichtquellen in Blendgruppen zu verdeutlichen, soll deren Einteilung an einem Beispiel erläutert werden. Wie in Abschn. 4.4 dargelegt, kann der Blick in einen sichtbaren Laserstrahl der Klasse 1 nach DIN EN 60825-1 während einer Dauer von ca. 5 s lediglich zu einer Lesezeitstörung von ca. 1 s führen, wenn die Laserleistung nicht mehr als ca. 1/1000 des in dieser Laserklasse erlaubten Wertes von 0,39 mW im Bereich von 500 nm bis 700 nm beträgt. Derselbe Effekt stellt sich ein, wenn der Blick in einen solchen Laserstrahl erfolgt, dessen Leistung maximal 1/10 des Klassengrenzwertes beträgt, und zwar im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm, wenn dieser Laserstrahl nicht länger als ca. 70 ms auf das Auge einwirkt. Unter diesen Bedingungen läge daher nur dann eine Blendlichtquelle der Blendgruppe 0 vor, wenn deren Exposition konstruktiv oder technisch auf die jeweils angegebene Zeitdauer begrenzt wäre.

Bei einer der Laserklasse entsprechenden maximalen Leistung von 390 μW im Wellenlängenbereich von 500 nm bis 700 nm würde sich dagegen selbst bei einer Expositionsdauer von 100 s, was der kürzesten „Bewertungszeitbasis“ dieser Laserklasse im sichtbaren Spektralbereich entspricht, theoretisch aus Gl. (4.5), d. h. bei fovealer Exposition, eine Nachbilddauer von 522 s ergeben und damit eine Lesestörzeit von mehr als 50 s, d. h. in jedem Falle eine Zuordnung nach Blendgruppe B2 erfolgen müssen, was sicherlich auch ohne weiteres aus der Erfahrung im Umgang mit solchen Lasern als sinnvoll erachtet wird, da es zu relativ langanhaltenden Nachbildern mit entsprechender Beeinträchtigung des Sehvermögens kommt.

Würde man dagegen die Laserstrahlleistung auf 1/10 des Klassengrenzwertes begrenzen, würde sich unter Annahme der Gültigkeit des logarithmischen Funktionszusammenhanges gemäß Gl. (4.5) immerhin noch eine Nachbilddauer von ca. 400 s ergeben, d. h. auch in diesem Falle würde die Einordnung nach B2 erfolgen müssen. Allerdings könnte hier bereits eine Angabe einer maximalen Störzeit von ca. 40 s, entsprechend B2/40s, dem Anwender klarere Angaben zur Verfügung stellen, was ihn im Umgang mit der entsprechenden Lichtquelle im worst-case-Fall in Bezug auf eine Blendung erwarten könnte.

An dieser Stelle müssen dann aber weitere Annahmen bei einer Gefährdungsbeurteilung insofern angestellt werden, dass praktische Expositionsdauern von 100 s als unrealistisch anzusehen sind, da aufgrund der vorliegenden Erfahrungen Testpersonen nicht bereit waren, länger als 10 s, nur in Ausnahmefällen auch 20 s, in einen Laserstrahl mit 30 μW hineinzublicken. In diesem Fall ergeben sich dann foveale Nachbilddauern von ca. 275 s und damit praktische Zuordnungen, die einer Störzeit von ca. 27,5 s entsprechen.

Diese Beispiele zeigen, dass Laser der Klasse 1 unter den vorstehend genannten Bedingungen nicht in die Blendgruppe B1 eingeordnet werden können, solange sie nicht auf Leistungen von ca. 1 μW begrenzt werden, wenn technisch von einer Expositionsdauer von 10 s ausgegangen werden muss. Lässt sich dagegen konstruktiv die Emissionsdauer auf 1 s begrenzen bzw. durch technische Maßnahmen eine La-

sereinrichtung entsprechend einer maximalen Expositionsdauer von 1 s einsetzen, dann wären auch 10 μW erlaubt und dennoch die Blendgruppe B1 möglich.

Wie das Beispiel in Abschn. 4.4 zeigt würde dagegen eine Exposition während 1 s bei einem Laserstrahlwert von 1/10 der Klassengrenze, also von ca. 39 μW bereits zu einer Nachbilddauer von 172 s (nach Gl. (4.5)) führen und damit die Lesefähigkeit während einer Dauer von mehr als ca. 20 s so stark beeinträchtigen, dass sie als nicht voll gegeben zu betrachten wäre. Noch längere Störzeiten ergeben sich bei solchen Laserleistungen für längere Expositionszeiten von 10 s bzw. 20 s, wie ein Vergleich mit Tab. 4.12 zeigt.

Sollte aber ein Laser der Klasse 1 in jedem Falle der Blendgruppe B0 zugeordnet werden, dann dürfte er unter Anwendung von Gl. (4.10) bei einer maximalen Nachbilddauer von $t_{\text{nb}} = 10$ s, entsprechend einer Störzeit von 1 s, einen Energiewert von ca. 1,6 μJ nicht überschreiten, d. h. eine solche Nachbilddauer wäre theoretisch mit den Wertepaaren 32 μW und 0,05 s, 16 μW und 0,1 s, 8 μW und 0,2 s, 4 μW und 0,4 s, 2 μW und 0,8 s, 1 μW und 1,6 s, sowie 0,5 μW und 3,2 s möglich, wobei aber keines dieser Wertepaare bislang in den experimentellen Untersuchungen eingesetzt wurde. Insofern müsste zumindest der experimentelle Nachweis zur Erweiterung der Bereichsgrenzen erbracht werden, bevor sich auf rein analytischen Wege Voraussagen machen lassen und eine definitive Blendgruppeneinordnung erfolgen dürfte.

Statt der Buchstaben- und Zahlenkombination mit arabischen Ziffern könnte auch eine solche mit römischen Ziffern erfolgen, und zwar mit den Äquivalenzen I = B0, II = B1 und III = B2. Außerdem könnte man auch eine Beschreibung durch Worte wählen, wie z. B. „praktisch nicht blendend“, „gering blendend“ oder „stark blendend“.

Unabhängig von der Wahl der Bezeichnung wird eine solche Einteilung als eine geeignete Unterstützung für die Durchführung einer Gefährdungsanalyse betrachtet.

Damit dürfte der Nutzen die Bedenken relativieren, die sich daraus ergeben könnten, dass mit der Einführung von Blendgruppen zusätzlich zu bereits bestehenden Forderungen wie bei Lasereinrichtungen nach DIN EN 60825-1 und für Lampen und Lampensysteme nach DIN EN 62471 noch eine weitere Klassifizierung gefordert würde. Die hier vorgeschlagene Einteilung ist bewusst einfach gehalten und als reine praktische Hilfe gedacht, da ansonsten nur eine – unter Umständen – mehr oder weniger umfangreiche Einzelfallbetrachtung dem Erfordernis aus der neuen EU-Richtlinie gerecht werden kann, potenzielle Gefährdungen aus Sekundäreffekten, wie vorübergehender Blendung, zu ermitteln und zu berücksichtigen.

Auch wenn optische Strahlung nicht zur ionisierenden Strahlung gehört, so könnte man ähnlich wie bei ionisierender Strahlung und bei radioaktiven Stoffen im Falle der Blendung durch sichtbare optische Strahlung (Licht) auch eine Abwägung in Betracht ziehen, bei der der Nutzen der Anwendung der physikalischen Einwirkung, also hier des Lichtes, mit dem mit der Anwendung verbundenen Risiko verglichen wird, d. h. eine Rechtfertigung zu erfolgen hat, und zwar in Bezug auf den Einzelnen und auf die Bevölkerung. Dabei könnte dann auch gefordert werden, dass Überlegungen anzustellen sind, und zwar dergestalt, dass diese darauf abzielen, die jeweilige Anwendung – und mithin das Ziel – auch ohne blendendes Licht zu erreichen.

Dieser Gedanke findet sich in gewisser Weise bereits im Text der neuen Richtlinie zu künstlicher optischer Strahlung [17], in dem es dort in Nr. 8 der Präambel heißt: *„Eine Verringerung der Exposition gegenüber optischer Strahlung lässt sich wirksamer erreichen, wenn bereits bei der Planung der Arbeitsplätze Präventivmaßnahmen ergriffen werden und die Arbeitsmittel sowie die Arbeitsverfahren und -methoden so gewählt werden, dass die Gefahren vorrangig bereits am Entstehungsort verringert werden.“* Außerdem steht in Art. 4 Abs. 3 *„Nach Artikel 6 Absatz 3 der Richtlinie 89/391/EWG berücksichtigt der Arbeitgeber bei der Risikobewertung insbesondere Folgendes:*

...

c) alle Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit von Arbeitnehmern, die besonders gefährdeten Risikogruppen angehören; ...

f) die Verfügbarkeit von Ersatzausrüstungen, die so ausgelegt sind, dass das Ausmaß der Exposition gegenüber künstlicher optischer Strahlung verringert wird; ...“

Ob es für die Anwendung blendenden Lichtes eine Rechtfertigung gibt, kann primär als Aufgabe des Staates gesehen werden, diesbezüglich die dafür erforderlichen gesetzlichen Grundlagen zu schaffen. Vor dem Hintergrund der europäischen Einzel-Richtlinie zur künstlichen optischen Strahlung ist hierzu eindeutig die Risikoermittlung und -bewertung durch den Arbeitgeber im Falle einer Blendung als sekundäre Einwirkung als eine Maßnahme zur Verbesserung von Sicherheit und Gesundheit im Arbeitsschutz vorgesehen. Eine entsprechende Regelung für die Allgemeinbevölkerung ist zurzeit nicht in der Diskussion.

Insgesamt war es ein vordringliches Ziel der Untersuchungen, den bisherigen Wissens- und Kenntnisstand bezüglich Blendungseffekten zu erweitern und sowohl quali-, aber insbesondere auch quantitativ deren Auswirkungen zu ermitteln, und zwar unter besonderer Berücksichtigung technischer Gegebenheiten und arbeitsplatzbezogener Tätigkeiten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse sich auch in entsprechenden Benutzerinformationen und Sicherheitshinweisen bei Arbeitsmitteln, Geräten und Verbraucherprodukten niederschlagen werden.

6 Literatur

- [1] IEC 60825-1 - Ed. 2.0: 2007-03: Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements; International Electrotechnical Commission; Geneva, Switzerland
- (vorangegangene Ausgabe der internationalen Norm: IEC 60825-1:2001-08 (Consol. Ed. 1.2, incl. am1 + am2) "Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide"; International Electrotechnical Commission; Geneva, Switzerland)
- [2] Schumacher, B.: Entwicklung und Einsatz eines Messaufbaus zur Ermittlung des Zeit-/Größenverhaltens von Nachbildern nach Exposition mit einer Hochleistungs-LED; Diplomarbeit DA 154, FH Köln/HLT, 17.08.2005
- [3] SSK: Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren - Wissenschaftliche Begründung zur Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 205. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Februar 2006 (Veröffentlichung erfolgt im Bundesanzeiger)
- [4] DIN 5340:1998-04: Begriffe der physiologischen Optik; Beuth-Verlag
- [5] Reidenbach, H.-D.: Local Susceptibility of the Retina, Formation and Duration of Afterimages in the Case of Class 1 Laser Products and Disability Glare Arising from HB-LEDs; ILSC 2007, Conference Proceedings p. 102 – 111; Journ. Laser Appl. 2007, zur Veröffentlichung eingereicht
- [6] Hartmann, E: Was wir heute über Blendung wissen; Der Augenoptiker H. 5 (1958), 9 – 15
- [7] Holladay L. L: The fundamentals of glare and visibility; Journal of the Optical Society of America 12 (1926), 271-319
- [8] Hentschel H.J. (Hrsg.): Licht und Beleuchtung; 5. Auflage, Hüthig GmbH & Co. KG; Heidelberg 2002
- [9] DIN 5035-2, Ausgabe: 1990-09: Beleuchtung mit künstlichem Licht; Richtwerte für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien; 1990
- [10] SSK: Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren - Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 205. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Februar 2006 (Veröffentlichung erfolgt im Bundesanzeiger)
- [11] Den Brinker, B.P.L.M.; Bruggeman, H.: Visual requirements for reading: The importance of a large field of view in reading with a magnifier; Journal of Videology 1 (1996), 27-38

- [12] CIE 117: Discomfort glare in interior lighting, Internationale Beleuchtungskommission, Wien; 1995
- [13] Hesse J, Müller T, Stozenberg K: Blendungsbewertungsverfahren und UGR- System. Forschungsbericht Fb807, Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin 1998
- [14] Fachausschuss „Innenbeleuchtung“ der Lichttechnischen Gesellschaft LiTG (Hrsg.): Das UGR-Verfahren zur künstlichen Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen, LiTG-Publikation Nr. 20; 2003
- [15] Roddewig W, Schmitts PW: UGR-Blendungsbewertung für die Innenraumbeleuchtung, Licht 5: S. 540-543; 2004
- [16] DIN EN 12464-1: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten. Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; März 2003
- [17] Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG), ABI. EG L 114 vom 27.4.2006 S. 38 – 59
- [18] Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge; v. 15. März 1974; BGBl I 1974, 721, neugefasst durch Bek. v. 26. 9.2002 I 3830; zuletzt geändert durch Art. 1 G. v. 25. 6.2005 I 1865
- [19] LAI (Länderausschuss für Immissionsschutz): "Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen", Beschluss des Länderausschusses für Immissionsschutz vom 10.5.2000
- [20] WHO: Environmental health criteria 23, Lasers and optical radiation; WHO Geneva 1982
- [21] BROWN, J.L.: Experimental investigations of flash blindness. Hum. Factors, 6 (1973): 503-516
- [22] Young, T.: On the theory of light and colors; Phil. Trans. R. Soc. London 92 (1802), 20 – 71
- [23] Gouras, P.: Color vision; in: Progress in Retinal Research; vol. 4 (N. Osborne; G. Chader eds.), Pergamon Press, Oxford 1984, pp. 227 – 261
- [24] Enoch, J. M.; Stiles, W.S.: The colour change of monochromatic light with retinal angle of incidence; Optica Acta 8 (1961), 329 – 358

- [25] Helmholtz, H. v.: Ueber Hr. D. Brewster's neue Analyse des Sonnenlichts; Ann. Phys. u. Chemie 86 (1852), 501 – 523
- [26] Vos, J. J.; Boogard, J.: Contribution of the cornea to entoptic scatter; Journ. Optical Soc. Am. 53 (1963), 869 – 873
- [27] De Mott, D. N.; Boynton, R. M.: Sources of entoptic straylight; Journ. Opt. Soc. Am. 48 (1958), 120 – 125
- [28] Boynton, R. M.; Clarke, F. J. J.: Sources of Entoptic Scatter in the Human Eye; Journ. Opt. Soc. Am. 54 (1964), 110 – 119
- [29] Gilliland, K. O.; Freel, C. D.; Johnsen, S.; Fowler, W. C.; Costello, M. J.: Distribution, spherical structure and predicted Mie scattering of multilamellar bodies in human age-related nuclear cataracts; Exp. Eye Research 79 (2004), 563 – 576
- [30] Mie, G.: Beitrag zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen; Ann. d. Physik 25 (1908), 377 – 452
- [31] Roorda, A.; Williams, D. R.: The arrangement of the three cone classes in the living human eye; Nature 397 (1999), 520-522
- [32] Roorda, A.; Metha, A. B.; Lennie, P.; Williams, D. R.: Packing Arrangement of the Three Cone Classes in the Primate Retina; Vision Research 41 (2001), 1291 – 1306
- [33] Roorda, A.: Human visual system – image formation; in: Vol. 1 of The Encyclopedia of Imaging Science and Technology, Editor Joseph P. Hornak, (John Wiley & Sons, New York), 2002, pp 539 – 557
- [34] Luckiesh, M.; Holladay, L. L.: Glare and Visibility; Trans. Illum. Engng. Soc. N. Y. 20 (1925), 221 – 250
- [35] Stiles, W. S.: The effect of glare on the brightness difference threshold; Proc. Roy. Soc. B 104 (1929), 322 – 355
- [36] Holladay, L. L.: Action of a light-source in the field of view in lowering visibility; J. Opt. Soc. Am. 14 (1927), 1 – 15
- [37] Crawford, B. H.; Stiles, W. S.: A brightness difference threshold meter for the evaluation of glare from light sources; J. Sci. Instrum. 12 (1935), 177 – 185
- [38] Stiles, W. S.; Crawford, B. H.: Equivalent adaptational levels in localized retinal areas. In Report of a Joint Discussion on Vision (1932), pp. 194-211. Physical Society of London. Cambridge University Press, Cambridge. (Reprinted in Stiles, W. S. (1978). Mechanisms of Colour Vision. Academic, London)

- [39] Stiles, W. S.; Crawford, B. H.: The liminal brightness increment for white light for different conditions of the foveal and parafoveal retina; Proc. Roy. Soc. B 116 no. 797 (1934), 55 – 102
- [40] Stiles, W. S.; Crawford, B. H.: The effect of a glaring light source on extrafoveal vision; Proc. Roy. Soc. London, Ser. B 122 (1937), 255 – 280
- [41] Kremers, J. J. M.; van Norren, D.: Two classes of photochemical damage of the retina; Lasers and Light in Ophthalmology 2 (1988), 41 – 52
- [42] Rapp, L. M.; Williams, T. P.: A parametric study of retinal light damage in albino and pigmented rats: In: Williams, T. P.; Baker, B. N. (eds.) The effects of constant light on visual processes; Plenum Press, New York, London 1980, pp 135 – 159
- [43] Pulling, N. H.; Wolf, E.; Sturgis, S. P.; Vaillancourt, D. R.; Dolliver, J. J.: Headlight glare resistance and driver age; Human factors 22 (1980), 103 – 112
- [44] Yolton, R. L.; Citek, K.; Schmeiser, E.; Reichow, A. W.; Griffith, T.: Laser pointers: toys, nuisance, or significant eye hazards?; J. Am. Optom. Assoc. 70 (1999), 285 – 289
- [45] Bullough, J.D.; Fu, Z.; Van Derlofske, J.: Discomfort and disability glare from halogen and HID headlamp systems; Society of Automotive Engineers World Congress, Detroit, MI: (SAFE technical Paper 2002-01-0010), Advanced Lighting Technology for Vehicles (SP-1668), SAE 2002 World Congress, Detroit, March 4-7, 2002
- [46] Lachenmayr, B.; Buser, A.; Keller, O.; Berger, J.: Sehstörungen als Unfallursache; Berichte d. BAST, Mensch und Sicherheit, Heft M65, Berg. Gladbach 1997
- [47] Mace, D.; Garvey, P.; Porter, R.J.; Schwab, R.; Adrian, W.: Countermeasures for Reducing the Effects of Headlight Glare. Washington, DC: American Automobile Association Foundation for Traffic Safety (2001)
- [48] van Rijn, L. J.; Völker-Dieben, H. J.: Assessment of vision impairment in relation to driving safety: A literature study; final report EU (1999), Amsterdam
- [49] van Rijn, L. J.: New standards for the visual functions of drivers; Report of the Eyesight Working Group; Brussels 2005
- [50] von Hebenstreit, B.: Sehvermögen und Verkehrsunfälle; Klin. Monatsbl. Augenheilk. 185 (1984), 86 – 90
- [51] von Hebenstreit, B.: Untersuchungen zur Sehschärfe unter nächtlichen Fahrbedingungen im Straßenverkehr (Dämmerungssehschärfe); Bayern: Unternehmensgruppe TÜV (1995)

- [52] Lachenmayr, B.; Berger, J.; Buser, A.; Keller, O.: Reduziertes Sehvermögen führt zu erhöhtem Unfallrisiko im Straßenverkehr; *Ophthalmologie* 95 (1998), 44 – 50
- [53] van den Berg, T. J. T. P.; van Rijn, J.; Grabner, G.; Wilhlem, H.: Assessment of visual function of driving license holders; Joint research EU project: I- TREN E 3 200/7/SI2.282826, 2003
- [54] Wood, J. M.; Higgins, K. E.: How well does high contrast acuity predict driving performance? In: Gale, A. G.; Brown, I. D.; Haslegrave, C. M.; Taylor, S. P. (eds.): *Vision in Vehicles VII*; Elsevier, London 1999, pp 33 – 42
- [55] Hills, B. L.: Vision, visibility, and perception in driving; *Perception* 9 (1980), 183 – 216
- [56] Charman, W. W.: Vision and driving in a literature review and commentary; Report for Ministry of Transport, Department of Optometry & Vision Sciences, UMIST 1996
- [57] Sloane, M. E.; Owsky, C.; Alvarez, S. L.: Aging, senile miosis and spatial contrast sensitivity at low luminance; *Vision Research* 28 (1988), 1235 – 1246
- [58] Richards, O. W.: Vision at levels of night road illumination; In: *Night Visibility*; Highway Research Board; Washington, DC; Bulletin No. 56 (1952), 36 – 65
- [59] Allen, M. J.: Vision and driving; *Traffic Safety*, Sept. 8 – 9 (1969), 38 – 40
- [60] Johnson, C. A.: Effect of luminance and stimulus distance on accommodation and visual resolution; *J. Opt. Soc. Am.* 66 (1976), 138 – 142
- [61] Campbell, F. W.; Rothwell, S. E.; Perry, M. J.: Bad light stops play; *Ophthalmol. Physiol. Optics* 7 (1987), 165 – 167
- [62] Theeuwes, J.; Alferdinck, J. W.; Perel, M.: Relation between glare and driving performance; *Human Factors* 44 (1) (2002), 95 – 107
- [63] 91/439/EWG Europäische Richtlinie über Fahrerlaubnis v. 29. Juli 1991; OJ L 237, Bd. 34, 24. August 1991
- [64] Stiles, W. S.: The scattering theory of the effect of glare on the brightness difference threshold; *Proc. Roy. Soc. London (Biol.)* 105 B (1929), 131 – 141
- [65] Remé, C. E.; Grimm, C.; Hafezi, F.; Wenzel, A.: Apoptosis in the Retina: The Silent Death of Vision; *News Physiological Sciences* 15 (2000), 120 – 140

- [66] Rich, K. A.; Zhan, Y.; Blanks, J. C.: Aberrant expression of c-Fos accompanies photoreceptor cell death in the rd Mouse; *J. Neurobiol.* 32 (1997), 593 – 612
- [67] Hafezi, F.; Abegg, M.; Grimm, C.; Wenzel, A.; Munz, K.; Stürmer, J.; Farber, D. B.; Remé, C. E.: Retinal degeneration in the rd-mouse in absence of c-fos; *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 39 (1998), 2239 – 2244
- [68] Boettner, E. A.; Wolter, J. R.: Transmission of the ocular media; *Invest. Ophthalmol.* 1 (1962), 776 – 783
- [69] van Norren, D.; Vos, J. J.: Spectral transmission of the human ocular media; *Vis. Res.* 14 (1974), 1237 – 1244
- [70] Weale, R. A.: Age and the transmittance of the human crystalline lens; *J. Physiol.* 395 (1988), 577 – 587
- [71] Mellerio, J.: Yellowing of the human lens: Nuclear and cortical contributions; *Vis. Res.* 27 (1987), 1581 – 1587
- [72] Bron, A. J.; Vrensen, G. F.; Koretz, J.; Maraini, G.; Harding, J.J.: The ageing lens; *Ophthalmologica* 214 (2000), 86 – 104
- [73] Crescitelli, F.; Dartnall, H. J. A.: Human visual purple; *Nature* 172 (1952), 195-200
- [74] Mainster, M. A.; Sparrow, J. R.: How much blue light should an IOL transmit?; *Br. J. Ophthalmol.* 87 (2003), 1523 – 1525
- [75] Curcio, C. A.; Millican, L.; Allen, K. A.; Kalina, R.E.: Aging of the human photoreceptor mosaic: evidence for selective vulnerability of rods in central retina; *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 34 (1993), 3278 – 3296
- [76] Jackson, G. R.; Owsley, C.; McCrwin, G. J.: Aging and dark adaptation; *Vis. Res.* 39 (1999), 3975 – 3982
- [77] Scheffrin, B. E.; Bieber, M. L.; McLean, R.; Werner, J.S.: The area of complete scotopic spatial summation enlarges with age; *J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis.* 15 (1998), 340 – 348
- [78] Knighton, R. W.; Jacobson, S. G.; Roman, M. I.: Specular reflection from the surface of the retina; *SPIE Laser Surgery: Advanced Characterization, Therapeutics and Systems* 1066 (1989), 10 – 17
- [79] Gorrand, J. M.; Delori, F. C.: Reflectance and curvature of the inner limiting membrane at the foveola; *J. Opt. Soc. Am. A* 16 (1999), 1229 – 1237
- [80] Delori, F. C.; Pflibsen, K. P.: Spectral reflectance of the ocular fundus; *Appl. Opt.* 28 (1989), 1061 – 1077

- [81] Hammer, M.; Roggan, A.; Schweitzer, D.; Müller, G.: Optical properties of ocular fundus tissue – an in vitro study using double-integrating-sphere technique inverse Monte-Carlo simulation; *Phys. Med. Biol.* 40 (1995), 963 – 978
- [82] Preece, S. J.; Claridge, E.: Monte Carlo modelling of the spectral reflectance of the human eye; *Phys. Med. Biol.* 47 (2002), 2863 – 2877
- [83] Reidenbach, H.-D.: Some quantitative aspects of temporary blinding from high brightness LEDs; *Proc. SPIE Vol. 6426 Ophthalmic Technologies XVII*, Manns, F.; Söderberg, P. G.; Ho, A.; Stuck, B. E.; Belkin, M. (eds.), 2007, 642629-1–642629-10.
- [84] King-Smith, P.E.: The optical density of erythrolabe determined by retinal densitometry using the self-screening method; *J. Physiol.* 230 (1973), 535 – 549
- [85] Schmidt, R. F.; Thews, G.; *Physiologie des Menschen*; 22. Auflage 1985; Springer-Verlag; ISBN 3-540-15014-5
- [86] Sachsenweger, M.: *Augenheilkunde*; 2. Auflage 2003; Thieme Verlag; ISBN 3-13-128312-2
- [87] Nkwetchou, J.-L.: Entwicklung eines Messaufbaus und Bestimmung der Sehschärfe anhand der Fähigkeit einen Text nach Bestrahlung durch eine helle Weißlicht-LED als Funktion von Leistung und Zeitdauer lesen zu können; Diplomarbeit DA 157, Fachhochschule Köln, 2006
- [88] Rushton, W.A.H.: The density of chlorolabe in the foveal cones of the primate; *J. Physiol.* 168 (1963), 360 – 373
- [89] Aulhorn, E.: Das Verhalten der Netzhautempfindlichkeit im Nachbildbereich; XVIII Concilium Ophthalmologicum, Acta vol. II, Belgica 1958, Impr. Med. et Scientif., Bruxelles 1959, S. 1605 – 1609
- [90] Paulson, L.-E. ; Sjöstrand, J.: Contrast sensitivity in the presence of a glare light; *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 19 (1980), 401 – 406
- [91] Thaug, J.; Beckman, C.; Abrahamsson, M.; Sjöstrand, J.: The 'light scattering factor', importance of stimulus geometry, contrast definition, and adaptation; *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 36 (1995), 2313 – 2317
- [92] Purkinje, J.: *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne*; Beiträge zur Kenntnis des Sehens in subjectiver Hinsicht, I, 1823, S. 97
- [93] Dittler, R.; Eisenmeier, J.: Über das erste positive Nachbild nach kurzdauernder Reizung des Sehorgans mittels bewegter Lichtquelle; *Pflüg. Arch. d. ges. Physiol.* 126 (1909), 610 – 647

- [94] Fröhlich, F.W.: Über den Einfluss der Hell- und Dunkeladaptation auf den Verlauf der periodischen Nachbilder; Zsch. f. Sinnesphysiologie 53 (1922), 79-107
- [95] Hamaker, H.G.: Ueber Nachbilder nach momentaner Helligkeit; Zsch. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 21 (1899), 1 – 44
- [96] Judd, D.B.: A quantitative investigation of the Purkinje after-image; Amer. J. Psychol. 38 (1927), 507 – 523
- [97] Hering, E.: Eine Methode zur Beobachtung und Zeitbestimmung des ersten positiven Nachbildes kleiner bewegter Objekte; Arch. f. d. ges. Physiol. 126 (1909), 604 – 609
- [98] Plateau, J.: Ueber das Phänomen der zufälligen Farben; Ann. d. Phys. u. Chemie XXXII, 108 (1834), 543 – 554
- [99] Bidwell, S.: On the recurrent images following visual impressions; Proc. Roy. Soc., London 56 (1894), 132 – 145
- [100] Fröhlich, F.W.: Untersuchungen über periodische Nachbilder; Zsch. f. Sinnesphysiologie 52 (1921), 60 – 88
- [101] Munk, H.: Die Erscheinungen bei kurzer Reizung des Sehorgans; Zsch. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 23 (1900), 60 – 100
- [102] Karwoski, T.F.; Crook, M.N.: Studies in the peripheral retina: I. The Purkinje after-image; J. Gen. psychol. 16 (1937), 323 – 356
- [103] Fechner, G.T.: Ueber die subjectiven Nachbilder und Nebenbilder I.; Pogendorffs Ann. Phys. Chem. 50 (1840), 193 – 221
- [104] Fechner, G.T.: Ueber die subjectiven Nachbilder und Nebenbilder II., Pogendorffs Annalen der Physik und Chemie 50 (1840), 427 – 470
- [105] Fechner, G.T.: Ueber die subjectiven Complementarfarben; Ann. d. Phys. u. Chemie XXXIV, 120 (1838), 513 – 535
- [106] Stamper, D.A.; Lund, D.J.; Molchany, J.W.; Stuck, B.E.: Laser-induced afterimages in humans; Perceptual and Motor Skills 91(1) (2000), 15-33
- [107] Brown, J.L.: Afterimages. In: C.H. Graham (Ed.), Vision and visual perception; Wiley, New York, London, 479 – 490
- [108] Fröhlich, F.W.: Ueber die Abhängigkeit der periodischen Nachbilder von der Dauer der Belichtung; Zsch. f. Sinnesphysiol. 53 (1922), 108 – 121
- [109] Buffon de, G.-L. L.: Sur les couleurs accidentelles et les ombres colorées; Mémoires de l'Acad. royale des sciences de Paris (1743) (Dissertation), 147 – 158

- [110] Smith, V.C.; Pokorny, J.; van Norren, D.: Densitometric measurement of human cone photopigment kinetics; *Vision Res.* 23(5) (1983), 517 – 524
- [111] Coolen, A.C.; van Norren, D.: Kinetics of human cone photopigments explained with a Rushton-Henry model; *Biol. Cybern.* 58(2) (1988), 123 – 128
- [112] Rushton, W.A.H.; Henry, G.H.: Bleaching and regeneration of cone pigments in man; *Vision Research* 8 (1968), 617 – 631
- [113] Berry, W.; Imus, H.: Quantitative aspects of the flight of colors; *American Journal of Psychology* 47 (1935), 449 – 457
- [114] Baumgartner, G.; Bornschein, H.; Hanitzsch, R.; Jung, R.; Kornhuber, H.H.; Rentschler, I.; Schober, H.; Thoden, U.: *Sehen, Sinnesphysiologie III*; Urban & Schwarzenberg, München 1978
- [115] Arduini, A.: The tonic discharge of the retina and its central effects; *Progr. Brain Res.* 1(1963), 184 – 206
- [116] Purkinje, J.: *Beiträge zur Kenntnis des Sehens in subjectiver Hinsicht*; J.G. Calve, Prag 1819
- [117] Borschke, A.: Über die Ursachen der Herabsetzung der Sehleistung durch Blendung; *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane* 35 (1904), 161 – 194
- [118] Cobb, P.W.: The influence of illumination of the Eye on Visual Acuity; *Am. J. Physiol.* 29 (1911), 76 – 99
- [119] Vos, J.J.: On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation; *Clin. Exp. Optometry* 86 (2003), 363 – 370
- [120] Vos, J.J.; Bouman, M.A.: Contribution of the retina to entoptic scatter; *J. Opt. Soc. Am.* 54 (1964), 95 – 100
- [121] Ijspeert, J.K.; De Waard, P.W.T.; Van den Berg, T.J.T.P.; De Jong, P.T.V.M.: The intraocular stray-light function in 129 healthy volunteers: dependence on angle, age and pigmentation; *Vision Res.* 30 (1990), 699 – 707
- [122] Crawford, B.H.: The integration of the effects from a number of glare sources; *Proc. Phys. Soc. London* 48 (1936), 35 – 37
- [123] Vos, J.J.: Disability glare – a state of the art report; *Comm. Int. Eclairage Journal.* 3 (2) (1984), 39 – 53
- [124] Wesemann, W.: Die Grenzen der Sehschärfe, Teil 4: Wie misst man die Sehschärfe richtig? Regeln und Probleme; *DOZ* 2 (2002), 32 – 38

- [125] Le Grand, Y.: Recherches sur la diffusion de la lumière dans l'oeil humain ; Revue d'optique théorique et instrumentale 16 (1937), 201 – 214 und 241 – 266
- [126] Vicario, G.: Visual acuity and stimulus area; Psychological Research 35 (1971), 17 – 26
- [127] Sakata, K.: Afterimage colour affected by colour constancy; Journal of Vision 3(12) (2003), 64a (<http://journalofvision.org/3/12/64/>)
- [128] v.Goethe,J.W.: Farbenlehre; Ungekürzte Ausgabe 5 Bände; Einleitung und Erläuterungen von R. Steiner; Verlag Freies Geistesleben; ISBN: 3-7725-0593- 7
- [129] Segal, J.: Mechanismus des Farbensehens: Physiologie-Pathologie; Mit e. Vorw. von H. Piéron. Aus d. Franz. übertr. von Hans Gehne; Fischer, 1957
- [130] Willmer, E. N.: An interpretation of normal central foveal colour vision and an analysis of some further experiments suggested by the interpretation; Documenta Ophthalmologica 9 (1955), 271 – 313
- [131] Haas, E.: Méthode pour l'étude des images accidentelles positives. Production de spectres consécutifs. Premiers resultants. Compt. rend. Acad. Sc.; Paris 228 (1949), 710-711
- [132] Beck, A.: Ueber künstlich hervorgerufene Farbenblindheit; Archiv für die gesammte Physiologie des Menschen und der Thiere 76 (1899), 634-640
- [133] Mosso, A.: Der Mensch auf den Hochalpen; Veit, Leipzig, 1899
- [134] DIN EN ISO 8596: Sehschärfepfung. Das Normsehzeichen und seine Darbietung (ISO 8596:1994); Beuth Verlag, Berlin 1996
- [135] DIN EN ISO 8597: Sehschärfepfung. Verfahren zum Anschluss von Sehzeichen (ISO 8597:1994, eibschließlic Technische Korrektur 1); 1995; Deutsche Fassung EN ISO 8597:1996; Beuth Verlag, Berlin 1996
- [136] Rinner, O.; Gegenfurtner, K.R.: Beitrag der Zapfen zur Farbkonstanz; TWK 2000, Beiträge zur 3. Tübinger Wahrnehmungskonferenz, (Eds.) H.H. Bülthoff, M. Fahle, K.R. Gegenfurtner, H.A. Mallot. Knirsch, Kirchentellinsfurt, 49 (2000)
- [137] Lakowski, R.: A critical evaluation of colour vision tests; British Journ. Physiolog. Opt. 23 (1966), 186 – 209
- [138] Dain, S.J.: Clinical colour vision tests; Clin. Exp. Optometry 87 (2004), 276 – 293
- [139] Lakowski, R.: Colorimetric and photometric data fort he 10th edition of the Ishihara plates; Brit. Journ. Physiolog. Opt. 22 (1965), 195 – 207

- [140] <http://www.richmondproducts.com/ColorPlateComparisonChart.htm>, zuletzt besucht am 19.08.2006
- [141] <http://www.richmondproducts.com/HRR.htm>, zuletzt besucht am 19.08.2006
- [142] Adrian, W.: Spectral sensitivity of the pupillary system; Clin. Exp. Optometry 86 (2003), 235 – 238
- [143] Müller, G. E.: Zur Psychophysik der Gesichtsempfindungen. [Kapitel 1, 2–3]; Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane 10 (1896), 1-82, 321-413 und Zur Psychophysik der Gesichtsempfindungen [Kapitel 4 und 5 (Schluss)]; Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane 14 (1897), 1-76, 161-196
- [144] Hardy, L. H.; Rand, G.; Ritter, M. C.: Tests for the detection and analysis of color-blindness, I. The Ishihara-Test: An Evaluation; Journ. Opt. Soc. Am. 35 (1945), 268 – 275
- [145] Sakata, K.: Psychophysical investigation of the role of photochemical bleaching in chromatic afterimages; Perception, ECVF 2005 abstracts
- [146] Sakata, K.: The influence of chromatic adaptation on colour afterimage; Perception 33 (2004), Supplement 62
- [147] Miles, P.W.: Visual effects of pink glasses, green windshields and glare under night driving conditions; American Medical Association Archives - Ophthalmology 51 (1954), 15-23
- [148] Bullough, J.D.: Effects of headlamp color on visual perception through perturbed atmospheres; Master thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy 1999
- [149] Flannagan, M.J.: Subjective and objective aspects of headlamp glare: effects of size and spectral power distribution; Report No. UMTRI-99-36, University of Michigan, Transp. Res. Inst., Ann Arbor, MI 1999
- [150] Fotios, S.A.; Levermore, G.J.: Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces II, Lighting research and technology 30 (1998), 97 – 110
- [151] DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1):2003-10: Sicherheit von Laser-Einrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien (IEC 60825-1:1993 + A1:1997 + A2:2001), Deutsche Fassung EN 60825- 1:1994 + A1:2002 + A2:2001, Okt. 2003, VDE u. Beuth-Verlag
Vorläuferfassung: DIN EN 60825-1 (VDE 0837 Teil 1):2001-11 "Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien (IEC 60825-1:1993 + A2:2001), Deutsche Fassung EN 60825-1:1994 + A11:1996 + A2:2001"; DIN und VDE; Beuth Verlag GmbH, Berlin bzw. DIN EN 60825-1:2003-10

- [152] Reidenbach, H.-D., Dollinger, K., Hofmann, J.: Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes, Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; Fb 985, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2003
- [153] Reidenbach, H.-D., Hofmann, J., Dollinger, K., Ott, G.: Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung, Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2006
- [154] BGI 832 bzw. GUV-I 832: Betrieb von Lasereinrichtungen. Anwendung der Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ BGV B 2 auf neue Laserklassen und MZB-Werte nach DIN EN 60825-1(VDE 0837-1): 2001-11, April 2003
- [155] Anmerkung: Aufgrund der Veröffentlichung der „Aktualisierten Nachdruckfassung vom April 2007“ der BGV B 2 „Laserstrahlung“ wurde die BGI 832 zurückgezogen (siehe [154, 163]).
- [156] Blackwell, H. R.: Contrast thresholds of the human eye; J. Opt. Soc. Am. 36 (1946), 624 – 643
- [157] Bloch, A. M.: Expériences sur la vision, Soc. Biol. Mem. (Paris) 37 (1885), 493
- [158] siehe [10]
- [159] Bunsen, R.; Roscoe, H.E.: Photochemische Untersuchungen; Poggen-dorff's Annalen der Physik und Chemie 96 (1855), 373-394; Maaßbestimmung der chemischen Wirkungen des Lichts 100 (1857), 43-88 und 100 (1857) 2. Erscheinungen der photochemischen Induction 481-516, 101 (1857), 235-263, Die Sonne 108 (1859), 193-273, 117 (1862), 529-562
- [160] Binoptometer 3, Fa. Oculus
- [161] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) vom 07.08.1996, zuletzt geändert am 19.12.1998, BGBl I S. 2843
- [162] Sozialgesetzbuch (SGB) Siebtes Buch (SGB VII) Gesetzliche Unfallversicherung vom 7. August 1996; (BGBl. I 1996 S.1254 als Artikel 1 UVEG)
- [163] UVV BGV B 2 bzw. GUV-V B 2: Unfallverhütungsvorschrift "Laserstrahlung" vom 1. April 1988 in der Fassung vom 1. Januar 1997 mit Durchführungsanweisungen vom Oktober 1995; Carl Heymanns Verlag KG, Köln
- [164] UVV BGV B 9: Unfallverhütungsvorschrift "Künstliche Optische Strahlung", abgestimmter Fachausschussentwurf vom Januar 2003, Stand: 21. Juli 2003, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften

- [165] DIN EN 60825-2 (VDE 0837-2):2005-06: Sicherheit von Laser-Einrichtungen – Teil 2: Sicherheit von Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen (LWLKS) (IEC 60825-2:2004); Deutsche Fassung EN 60825-2:2004, Juni 2005, VDE u. Beuth-Verlag
- [166] DIN EN 60825-12 (VDE 0837 T 12):2004-12: Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 12: Sicherheit von optischen Freiraumkommunikationssystemen für die Informationsübertragung (IEC 60825-12:2004); Deutsche Fassung EN 60825-12:2004, VDE u. Beuth-Verlag
- [167] ICNIRP: Guidelines on Limits of Exposure to Broad-Band Incoherent Optical Radiation (0.38 to 3 μm). Health Physics 73 (1997), 539 – 553
- [168] ICNIRP: Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 1000 μm . Health Physics 71 (1996), 804 – 819
- [169] ICNIRP: Revision of guidelines on limits for laser radiation of wavelengths between 400 nm and 1,400 nm. Health Physics 79 (2000), 431 – 440
- [170] ICNIRP: Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). Health Physics 87 (2004) 171 – 186
- [171] Salovski, G.: Ermittlung der winkelabhängigen Nachbilddauer bei Blendung mit einem Laser der Klasse 1; Diplomarbeit DA 158; Fachhochschule Köln 2007
- [172] Barry, H.; Bousfield, W.A.: Implications of the flight of colors; Psychological review 41 (1934), 300 – 305.
- [173] Preamble to the Constitution of the World Health Organization as adopted by the International Health Conference, New York, 19-22 June, 1946; signed on 22 July 1946 by the representatives of 61 States (Official Records of the World Health Organization, no. 2, p. 100) and entered into force on 7 April 1948
- [174] BGI 5006: Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung; Fachausschuss „Elektrotechnik“ der BGZ, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Oktober 2004
- [175] BGR B 9: Künstliche optische Strahlung (BG-Regel zum abgestimmten FA-Entwurf der BGV B 9, Januar 2003, Stand: 17.09.2003, redaktioneller Stand September 2003), HVBG
- [176] Fachverband für Strahlenschutz: Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“ Laserstrahlung; FS-05-133-AKNIR, Redaktion und Bezug: H.-D. Reidenbach, FH-Köln, Stand: 25.02.2005

- [177] DIN 58126 - Teil 6 (1981-04): Sicherheitstechnische Anforderungen für Lehr-, Lern- und Ausbildungsmittel; Laser
- [178] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Stellungnahme zur Risikobewertung von Lasern und LED der Klassen 2, 2M und 3A im sichtbaren Wellenlängenbereich (400 nm bis 700 nm); Dortmund, 18.01.05
- [179] Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Hofmann, J.: A Proposal how to Deal with Low Power Laser in the New European Directive on Artificial Optical Radiation; ILSC 2007, Conference Proceedings p. 77 – 85
- [180] Richtlinie 89/391/EWG des Rates über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit (ArbeitsschutzRahmenRL) vom 12. Juni 1989 (ABl. EG Nr. L 183 S. 1) zuletzt geändert am 29. September 2003 (ABl. EG. L 284 S. 27), daraus abgeleitet: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) vom 07.08.1996, zuletzt geändert am 19.12.1998, BGBl I S. 2843
- [181] 1999/519/EG: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz — 300 GHz), ABl. L 199/59
- [182] ABl. C 205 vom 25.7.1994, S. 439
- [183] ANSI Z136.6:2005, American National Standard for the Safe Use of Lasers in Outdoor Environment, Laser Institute of America, Orlando USA
- [184] Nakagawara, van B.; Montgomery, R. W.; Dillard, A.; McLin, L.; Connor, C. W.: The effects of laser illumination on operational and visual performance of pilots during final approach; Federal Aviation Administration, Office of aerospace medicine, Report No. DOT/FAA/AM-04/09, June 2004
- [185] Leitlinie des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen (Licht Leitlinie) vom 18. Januar 2001 (veröffentlicht im Amtsblatt für Brandenburg Nr. 7 vom 14. Februar 2001)
- [186] SSK-Empfehlung zur "Weiterentwicklung der Forschung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung", Strahlenschutzkommission (verabschiedet in der 178. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 11./12. April 2002), Veröffentlicht im BAnz Nr. 151 vom 15.08.2002
- [187] Cornsweet, T.N., ed.: Visual perception; New York, Academic Press 1966
- [188] World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects; adopted by the 18th WMA General Assembly, Helsinki, Finland, June 1964, 9.10.2004

- [189] Reidenbach, H.-D.: Investigations of the blink reflex as a physiological means to protect the eyes against bright light especially from LEDs: Some psychophysical results have been achieved, but the search goes on; ICMP/BMT05 Proc., Biomed. Techn. (Biomedical Eng.) vol. 50 (2005), suppl. vol. 1, part 1, 415 – 416
- [190] Reidenbach, H.-D.: Some psychological considerations on the behaviour of the human eye in the case of an irradiation from a monochromatic optical device; SPIE Vol. 5688B Ophthalmic Technologies XV, Manns, F.; Söderberg, P. G.; Ho, A.; Stuck, B. E.; Belkin, M. (eds.), 2005, 448 – 457
- [191] Reidenbach, H.-D.: Psychophysiologische Betrachtung des Lidschlussreflexes als Funktion der Wellenlänge, (in German; Psychophysiological considerations of the blink reflex as a function of wavelength), In: Reidenbach, H.-D., Dollinger, K., Hofmann, J. (Eds.) Nichtionisierende Strahlung NIR2004, Publ. Ser. Progress in Radiation Protection FS-04-128-T, Bd. II, Köln 2004, 643 – 655
- [192] Brindley, G.S.: The Bunsen-Roscoe law for the human eye at very short durations; J. Physiol. 118 (1952), 135-139
- [193] Hild, E.: Farblicher Nachbildverlauf nach Blendung durch LEDs; Master-Thesis, MA 4, Fachhochschule Köln, 2007
- [194] Adams, A. J.; Brown, B.; Haegerstrom-Portnoy, G.; Flom, M. C.; Jones, R.T.: Marijuana, alcohol, and combined drug effects on the time course of glare recovery; Psychopharmacology 56 (1978), 81-86
- [195] ISO/IEC Guide 51: 1999; Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards
- [196] Reidenbach, H.-D.: Aversion responses including the blink reflex: Psychophysical behaviour and active protection reactions as an additional safety concept for the application of low power lasers in the visible spectrum, ILSC 2005, Conf. Proc., 67 – 76
- [197] Hild, E.: Entwicklung und Einsatz eines Testaufbaus zur Bestimmung physiologischer Reaktionen bei Bestrahlung durch eine Hochleistungs-LED; Diplomarbeit DA 152, FH Köln/HLT, 2005
- [198] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV), BG BL I 1996, S. 1966
- [199] Berry, W.: Color sequences in the after-image of white light; Am. J. Psychol. 38 (1927), 584 – 596
- [200] DIN 58220: Sehschärfenbestimmung Teil 3, 5 und 6; Beuth-Verlag, Berlin, Köln; Januar 1997

- [201] Bach M.; Kommerell G.: Sehschärfebestimmung nach Europäischer Norm: wissenschaftliche Grundlagen und Möglichkeiten der automatischen Messung in Augenheilkunde 212/1998; Heft 4; S. 190-195 (Art. 340); (1998)
- [202] Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft (DOG): Empfehlungen der DOG zur Qualitätssicherung bei sinnesphysiologischen Untersuchungen und Geräten; Der Ophthalmologe; 94 (1997), 836-862 und Der Ophthalmologe 97 (2000), 923-964, <http://www.dog.org/publikationen/empfehlungen.html>, http://www.dog.org/publikationen/sinnesphysiologie_kopie_anfordern.html, Januar 2001, letzte Aktualisierung: 14.6.2006, zuletzt besucht: 02.08.2007
- [203] Petersen, J.: Die Zuverlässigkeit der Sehschärfenbestimmung mit Landolt-Ringen; Copythek, Enke Verlag; Stuttgart, 1993
- [204] Sutter, E: Schutz vor optischer Strahlung – Laserstrahlung, inkohärente Strahlung, Sonnenstrahlung, VDE-Verlag Berlin Offenbach; 1999/2002
- [205] Nadler, M.P.; Miller, D.; Nadler, D.J. (eds.): Glare and Contrast sensitivity for Clinicians; Springer Verlag, New York 1990
- [206] Müller, G.E.: Über die Farbenempfindungen – Psychophysische Untersuchungen; Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane; Erg. Bd. 17, Band I; Teil I (1930) 1 – 430; Von den achromatischen Erregungen, S. 99 – 151, 177 – 226
- [207] Ebbecke, U.: Über zentrale Hemmung und die Wechselwirkung der Sehfeldstellen; Pflügers Arch. ges. Physiol. 186 (1921), 200 – 219
- [208] Comberg, W.: Untersuchungen zur Frage der „Periodizität“ bei langdauernden Nachbildern; Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology 108 (1922), 295-358
- [209] Hering, E.: Zur Lehre vom Lichtsinn; Carl Gerolds Söhne, Wien 1878 (Hering, E.: Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn; Verlag von Julius Springer, Berlin 1920)
- [210] Aubert, H.: Physiologie der Netzhaut; Morgenstern, Breslau 1865
- [211] Ebbecke, U.: Über positive und negative Nachbilder, ihre gegenseitige Beziehung und den Einfluß der lokalen Adaptation; Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere 221 (1929), 160 – 188
- [212] Ebbecke, U.: Über eine neue Nachbildphase, das positive Hellbild; Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere 221 (1929), 189 – 197
- [213] McDougall, W.: Some new observations in support of Thomas YOUNG'S theory of light-and colour-vision; Mind 10 (1901), 52 – 97, 210 – 245 und 347 – 382

- [214] McDougall, W.: The sensations excited by a single momentary stimulation of the eye; *The British J. of Psychol.* 1 (1904), 78 – 113, 279 – 301
- [215] Bidwell, S.: On the negative after-images following brief retinal excitation. *Proc. Roy. Soc. Lond.* 61 (1897), 268 – 271
- [216] Fröhlich, F.W.: Über oszillierende Erregungsvorgänge im Sehfeld; *Zsch. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* 52 (1921), 52 – 59
- [217] Hess, C.: Untersuchungen über den Erregungsvorgang im Sehorgan bei kurz- und länger dauernder Reizung; *Pflügers Arch.* 101 (1904), 226 – 262
- [218] Monjé, M.: Die Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufes der Gesichtsempfindung vom zeitlichen Verlauf des Lichtreizes und dem Adaptationszustand; *Pflügers Arch.* 209 (1925), 562-604
- [219] Helmholtz, H. v.: *Handbuch der physiologischen Optik*; 2. Aufl., L. Voss, Hamburg u. Leipzig 1896
- [220] Schultze; M.: Zur Anatomie und Physiologie der Retina; *Arch. f. mikr. Anatomie*; II (1866), 175 – 286
- [221] Parinaud, H.: De l'héméralopie dans les affections du foie et de la nature de la cécité nocturne ; *Arch. Gén. Méd.* 1 (1881), 403 – 414
- [222] Hess, C.: Experimentelle Untersuchungen über die Nachbilder bewegter, leuchtender Punkte; *Albrecht von Graefes Archiv für Ophthalmologie* 44 (1897), 445 – 480
- [223] Kries, J. v.: Ueber die functionellen Verschiedenheiten des Netzhaut-Centrums und der Nachbartheile; *Graefes Arch. f. Ophthal.* 42 (1896), 95 – 133
- [224] Müller, J.: *Handbuch der Physiologie des Menschen*; Verlag J. Hölscher, Coblenz 1844
- [225] Hess, C.: Untersuchungen zur Lehre von der Wechselwirkung der Sehfeldstellen; *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* 179 (1920), 50 – 72
- [226] Osann, G.: Ueber Ergänzungsfarben; *Poggendorff's Annalen* 37 (1836), 287 – 300
- [227] Barlow, H.B.; Sparrock, J.M.B.: The role of afterimages in dark adaptation; *Science* 144 (1964), 1309 – 1314
- [228] Purdy, D. M.: Spectral hue as a function of intensity; *American Journal of Psychology* 43 (1931), 541 – 559

- [229] Cornsweet, T.N.; Fowler, H.; Rabedeau, R.G.; Whalen, R.E.; Williams, D.R.: Changes in the perceived color of very bright stimuli; *Science* 128 1958, 898 – 899
- [230] Bosscha, H.P.: Primäre, secundäre und tertiäre Netzhautbilder nach momentanen Lichteindrücken; *Albrecht Graefes Archiv für Ophthalmologie* 40 Abt. I (1894), 22 – 42 (“Primaire, secondaire en tertiaire netvliesbeelden na momentane lichtsindrukken” im 34. Jahresbericht von “Het Nederlandsch Gasthuis voor behoeftige en min vermogende ooglijders te Utrecht”)
- [231] D'Arcy Chevalier : Mémoire sur la durée de la sensation de la vue; *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris* (1765), 439 – 451
- [232] Aubert, H.: Ueber die durch den elektrischen Funken erzeugten Nachbilder; *Moleschott's Untersuchungen* 1859, 279 – 314
- [233] Exner, S.: Ueber die zu einer Gesichtswahrnehmung nöthige Zeit. *Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften* 58 (1868), 601 – 632
- [234] Hess, C.: Über den Ablauf des Erregungsvorganges nach kurzdauernder Reizung des Sehorganes beim Normalen und beim total Farbenblinden; *Arch. f. Ophthalmol.* 51 (1900), 229 – 255
- [235] Hess, C.: Untersuchungen über das Abklingen der Erregung im Sehorgan nach kurzdauernder Reizung; *Pflüger's Arch.* 95 (1903), 1 – 16
- [236] Purkinje, J.E.: Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne, *Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjektiver Hinsicht*, Bd. 2, Reimer Berlin 1825, S. 110f
- [237] Kries, J. v.: Über die Wirkung kurzdauernder Lichtreize auf das Sehorgan; *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane* 12 (1896), 81 – 101
- [238] De Boer, J.B.: The application of sodium lamps to public lighting; *Illum. Eng.* 56 (1961), 293 – 312
- [239] De Boer, J.B.; Burghout, F.; van Heemskerck Veeckens, J.F.T.: Appraisal of the quality of public lighting based on road surface luminance and glare; *Proceedings of the CIE, Brussels 1959*, P-59.23., 529 – 538
- [240] Fotios, S.A.: Chromatic adaptation and the relationship between lamp spectrum and brightness; *Lighting Res. Technol.* 38 (2006), 3 – 17
- [241] De Boer, J.B.; Schreuder, D.A.: Glare as a Criterion for Quality in Street Lighting; *Transactions of the Transportation Illuminating Engineering Society (London)* 32 (1967), 117 – 135

- [242] "Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes", Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) vom 27. September 2002 (BGBl. I S. 3777), zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261)
- [243] Dahmen, Ch.: Untersuchung der menschlichen Fähigkeit zur Farbdiskriminierung und der Farbabweichung nach Blendung mit farbigen LEDs; Master-Thesis, MA 5, Fachhochschule Köln, 2007
- [244] Bischof, M.: Auswirkungen von Blendung durch farbige LEDs höherer elektrischer Leistung auf das Farb- und Kontrastsehen; Diplomarbeit, DA 159, Fachhochschule Köln, 2007
- [245] Peters, S.: Auswirkungen von Blendung durch farbige LEDs höherer elektrischer Leistung auf das Farb- und Kontrastsehen; Diplomarbeit, DA 160, Fachhochschule Köln, 2007
- [246] Velhagen, K.; Broschmann, D. (Hrsg.): Tafeln zur Prüfung des Farbensinnes; 33. Aufl.; Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2003
- [247] E DIN EN 62471; VDE 0837-471:2007-01: Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen (IEC 62471:2006); Deutsche Fassung prEN 62471:2006
- [248] Nakagawara, Van B.; Montgomery, R. W.; Wood, K.J.: Aircraft accidents and incidents associated with visual disturbances from bright lights during nighttime flight operations, DOT/FAA/AM-06/28, Final Report, FAA, Nov. 2006
- [249] NTSB Identification No. LAX96IA032. (zitiert in [248]) (http://www.nts.gov/ntsb/brief2.asp?ev_id=20001207X04715&ntsbo=LAX96IA032&akey=1) zuletzt besucht am 24.05.2007
- [250] -: Factors in the evaluation of laser beam effects upon pilot performance; Lighting Systems Design, Inc. 1998
- [251] Hess, C.: Studien über Nachbilder; Albrecht v. Graefes Archiv Ophthalmol. 40 (1894), 259 – 279
- [252] Bullough, J.D.; Van Derlofske, J.; Dee, P.; Chen, J.; Akashi, Y.: An investigation of headlamp glare: Intensity, spectrum and size; Report No. DOT HS 809 672, U.S. Department of Transportation, NHTSA Washington, October 2003
- [253] Hemion, R.H.: A preliminary cost-benefit study of headlight glare reduction; Report AR-683, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, 1969

- [254] Bergström, S.: Visible distances during night driving; In: Lighting problems in highway traffic, vol. 2, Pergamon Press, New York 1963
- [255] Johansson, G.; Bergström, S.; Jansson, G.; Ottander, C.; Rumar, K.; Ornborg, G.: Visible distances in simulated night driving conditions with full and dipped headlights; *Ergonomics* 6 (1963), 171 – 179
- [256] Schwab, R.: Night visibility for opposing drivers with high and low headlight beams; *Highway research record* 70 (1965), 87 – 88
- [257] Hemion, R.H.: Night visibility improvement through headlight glare reduction; report AR-696, Southwest Research Institute, San Antonio TX, 1969
- [258] Mortimer, R.G.; Becker, J.M.: Some operational considerations affecting the performance of current and proposed head-lamp beams; *Transportation research record*, No. 502 (1974), 34 – 40
- [259] Bhise, V.D.; Farber, E.I.; Saunby, C.S.; Troell, G.M.; Walunas, J.B.; Bernstein, A.: Modeling vision with headlights in a systems context; Society of Automobile Engineers Congress and Exposition, Detroit, paper 770238, 1977
- [260] Rumar, K.: Intensity of high-beam headlights; *Progress in Automobile Lighting Symposium*, Darmstadt 2001, p. 829 – 848
- [261] Schmidt-Clausen, H.J.; Bindels, J.T.H.: Assessment of discomfort glare in motor vehicle lighting; *Lighting research and technology* 6 (1974), 79 – 88
- [262] Olson, P.L.; Sivak, M.: Discomfort glare from automobile headlights; *J. Illumin. Eng. Soc.* 13 (1984), 296 – 303
- [263] Flannagan, M.J.; Sivak, M.; Ensing, M.; Simmons, C.J.: Effect of wavelength on discomfort glare from monochromatic sources; Report UMTRI-89-30, Univ. of Michigan Transp. Res. Inst., Ann Arbor, MI 1989
- [264] Flannagan, M.J.; Sivak, M.; Battle, D.S.; Sato, T.; Traube, E.C.: Discomfort glare from high-intensity discharge headlamps: Effects of context and experience; UMTRI-93-10; Univ. of Michigan Transp. Res. Inst., Ann Arbor, MI 1993
- [265] Flannagan, M.J.; Sivak, M., Gellatly, A.W., Luoma, J.: A field study of discomfort glare from high-intensity discharge headlamps; Report UMTRI-92-16; Univ. of Michigan Transp. Res. Inst., Ann Arbor, MI 1992
- [266] Sivak, M.; Simmons, C.J.; Flannagan, M.J.: Effect of headlamp area on discomfort glare; *Lighting Res. Technol.* 22 (1990), 49 – 52
- [267] Sivak, M.; Flannagan, M.J.; Traube, E.C.; Kojima, S.: The influence of stimulus duration on discomfort glare for persons with and without visual correction; *Transport. Human Factors* 1 (1999), 147 – 158

- [269] Alferdinck, J.W.A.M.; Varkevisser, J.: Discomfort glare from D1 headlamps of different size; Report IZF 1991 C-21; Soesterberg, Netherlands: TNO Institute for Perception, 1991
- [270] Lehnert, P.: Disability and discomfort glare under dynamic conditions: The effect of glare stimuli on human vision; Progress in Automobile Lighting Symposium, Darmstadt, Germany: Darmstadt University of Technology 2001, pp. 582-592
- [271] De Boer, J.B.: Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist; In: Public Lighting; Philips Technical Library, Eindhoven, Netherlands 1967
- [272] Alferdinck, J.W.A.M.; Padmos, P.: Car headlamps: Influence of dirt, age and poor aim on glare and illumination intensities; Lighting Research and Technology 20(4) (1988), 195 – 198
- [273] Moleschott, J. (Ed.): Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen und der Thiere; Vierter Band, Frankfurt a. M., Meidinger Sohn Comp., 1858
- [274] Theeuwes, J.; Alferdinck, J.W.A.W.: The relation between discomfort glare and driving behavior; Report DOT HS 808 452; Soesterberg, Netherlands: TNO Human Factors Research Institute
- [275] Schreuder, D.A.: White or yellow lights for vehicle head-lamps?; Technical Report 1976-2E; Voorburg, Netherlands: Institute for Road Safety Research SWOV
- [276] Jehu, V.J.: A comparison of yellow and white headlamp beams; Light and Lighting 4(10) (1954), 287-291
- [277] Bouma, P.J.: The problem of glare in highway lighting; Philips Technical Review 1 (1936), 225-229
- [278] Bullough, J.D.; Boyce, P.R.; Bierman, A.; Hunter, C.M.; Conway, K.M.; Nakata, A.; Figueiro, M.G.: Traffic signal luminance and visual discomfort at night; Transportation Research Record No.1754 (2001), 42-47
- [279] Manz, K.: The influence by size of headlamp on discomfort glare; Progress in Automobile Lighting Symposium, Darmstadt, Germany: Darmstadt University of Technology (2001), pp. 618-634
- [280] Fry, G.A.: Evaluating disability effects of approaching automobile headlights; Highway Research Bulletin 89 (1954), 38-42
- [281] Hills, B.L.: Visibility under night driving conditions. III Derivation of (ΔL , A) characteristics and factors in their application; Lighting Research and Technology 8 (1976), 11 – 26.

- [282] Van Derlofske, J.; Bullough, J.D.; Hunter, C.M.: Evaluation of high-intensity discharge automotive forward lighting; Society of Automotive Engineers World Congress, Detroit, MI: Society of Automotive Engineers (Paper 2001-01-0298) 2001
- [283] Van Derlofske, J.; Bullough, J.D.; Hunter, C.M.: Visual benefits of high-intensity discharge forward lighting; Society of Automotive Engineers World Congress, Detroit, MI: Society of Automotive Engineers (Paper 2002-01-0259) 2002
- [284] FAA Order 7400.2D: Procedures for Handling Airspace Matters; Part 8, Miscellaneous Procedures; Chapter 34, Outdoor Laser Demonstrations, (<http://www.faa.gov>)
- [285] National aviation reporting center on anomalous phenomena: The eye and night vision; <http://www.narcap.org/TheEyeandNightVision.htm> (zuletzt besucht 22.05.2007)
- [286] Reidenbach, H.-D.: Blendung durch optische Strahlungsquellen – Vorstellung der Forschungsergebnisse; Optische Strahlung – EU-Richtlinie und aktuelle Forschungsergebnisse; Tagungsdokumentation BauA, 12. Juni 2007, Dortmund 2007, S. 46 – 56
- [287] IEC 62471: 2006-07 (CIE S 009:2002): Photobiological safety of lamps and lamp systems; International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland
- [288] Sewall, H.: On the physiological effects of light which enters the eye through the sclerotic coat; J. Physiol. 5 (1884), 132 – 139
- [289] CIE Technical report, CIE 1988 2° spectral luminous efficiency function for photopic vision ; CIE Publ. No. 86 (1990)
- [290] Principales Décisions de la Commission Internationale de l'Eclairage (6^e session, 1924), Voeux ; Compte Rendu des Séances, Genève (1924), 67 – 70
- [291] Schanda, J.: Current CIE work to Achieve Physiologically Correct Colour Metrics; In: Backhaus W.G.K., Kliegl R., Werner J.S. (Eds.) Color Vision: Perspectives from different disciplines; Walter de Gruyter, Berlin - New York, 1998
- [292] Stockman, A.; MacLeod, D. I. A.; Johnson, N. E.: Spectral sensitivities of the human cones; J. Opt. Soc. Am. A 10 (1993), 2491 – 2521
- [293] Hofer, H.; Singer, B.; Williams, D. R.: Different sensations from cones with the same photopigment; Journal of Vision 5 (2005), 444 – 454

- [294] Schanda, J.; Morren, L.; Rea, M.; Rositani-Ronchi, L.; Walraven, P.: Does lighting need more photopic luminous efficiency functions?; *Lighting Research and Technology* 34 (2002), 69 – 76
- [295] Abney, W. de W.: *Researches in colour vision and the trichromatic theory*; Longman, Green & Co, London 1913
- [296] Kries, J. v.: Über die Funktion der Netzhautstäbchen; *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane* 9 (1896), 81 – 123
- [297] Mefford, M. L.; Flannagan, M. J.; Bogard, S. E.: Real-World use of high-beam headlamps; Report UMTRI-2006-11, University of Michigan, Ann Arbor 2006
- [298] Sivak, M.; Schoettle, B.; Minoda, T.; Flannagan, M. J.: Blue content of LED headlamps and discomfort glare; Report UMTRI-2005-2, University of Michigan, Ann Arbor 2005
- [299] Sivak, M.; Schoettle, B.; Flannagan, M. J.: LED headlamps: Glare and color rendering; Report UMTRI-2003-39; University of Michigan, Ann Arbor 2003
- [300] Rumar, K: Functional requirements for daytime running lights; Report UMTRI-2003-11; University of Michigan, Ann Arbor 2003
- [301] Nakagawara, van B.; Montgomery, R. W.: Laser pointers: Their potential affects on vision and aviation safety; Federal Aviation Administration, Office of Aerospace Medicine; Report No. DOT/FAA/AM-01/7, April 2001
- [302] Elias, B.: Lasers Aimed at Aircraft Cockpits: Background and Possible Options to Address the Threat to Aviation Safety and Security; CRS report for congress, Order code RS22033, Jan. 26, 2005 (updated December 21, 2005)
- [303] Nakagawara, Van B.; Montgomery, R. W.; Dillard, A.; McLin, L.; Connor, C. W.: The Effects of Laser Illumination on Operational and Visual Performance of Pilots Conducting Terminal Operations; Federal Aviation Administration, Office of Aerospace Medicine. Report Number DOT/FAA/AM-03/12. August 2003
- [304] BGI 504-25 (Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 25): Fahr-, Steuer- und Überwachungstätigkeiten, Fassung 1998, Nachdruck 2004, Heymanns Verlag, Köln
- [305] Friedburg, C.: Sehen in der Dämmerung: Physiologische Grundlagen und Untersuchungsmethoden; *Klin Monatsbl Augenheilkd* 221 (2004), 570 – 576
- [306] van den Berg, T.J.T.P.; Boltjes, B.: The point-spread function of the eye from 0° to 100° and the pattern electroretinogram; *Doc. Ophthalmologica* 67 (1988), 347 – 354

- [307] Lie, I.: Visual detection and resolution as a function of retinal locus; *Vision research* 20 (1980), 967 – 974
- [308] Chan, D.; Crutch, S.J.; Warrington, E.K.: A disorder of colour perception associated with abnormal colour after-images: a defect of the primary visual cortex; *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 71 (2001), 515 – 517
- [309] Vos, J.J.: Reflections on glare; *Lighting Res. Technol.* 35 (2003), 163 – 176
- [310] Commission Internationale de l'Eclairage: Glare and uniformity in road lighting installations; CIE publication No. 31, 1976
- [311] Commission Internationale de l'Eclairage: Discomfort glare in the interior working environment; CIE publication No. 55, 1983
- [312] Commission Internationale de l'Eclairage: International Lighting Vocabulary Publication CIE 17.4–1987 und IEC 60050-845 Ed. 1.0: 1987-12-15, International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 845: Lighting, siehe auch: <http://www.electropedia.org/>, zuletzt besucht: 03.08.2007
- [313] Veitch, J. A.; Newsham, G. R.: Determinants of lighting quality II: Research and recommendations; ERIC Document reproduction service No. ED408543, presented at the 104th Annual Conv. Am. Psychol. Ass., Toronto, Canada, Aug. 1996 (<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/fulltext/nrcc40343.pdf>), zuletzt besucht: 03.08.2007
- [314] Sivak, M.; Flannagan, M.J.; Schoettle, B.; Adachi, G.: Driving with HID headlamps: A review of research findings; 2003-01-0295, SAE International, In: Holt, D. J. (ed.) *Recent Developments in Automotive Safety Technology*, PT-119, September 2004
- [315] Perel, M.; Olson, P.; Sivak, M.; Medlin, J.W.: Motor vehicle forward lighting SAE Technical Paper Series No. 830567, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1983
- [316] Sivak, M.; Flannagan, M.J.; Schoettle, B.; Nakata, Y.: Performance of the first generation of HID headlamps in the U.S.; Report No. UMTRI-2002-14, Ann Arbor, MI: The University of Michigan, Transportation Research Institute, 2002
- [317] Grimm, M.: ECE headlamp performance status and potential for improvement; In: Schmidt-Clausen, H.-J. (ed.) *Proceedings of the Conference on Progress in Automobile Lighting*, Darmstadt University of Technology, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2001, 348 – 354.
- [318] Flannagan, M.J.; Sivak, M.; Gellatly, A.W.: Joint effects of wavelength and ambient luminance on discomfort glare from monochromatic and bichromatic sources; Report No. UMTRI-91-42, Ann Arbor, MI; The University of Michigan Transportation Research Institute, 1991

- [319] Flannagan, M.J.; Sivak, M.; Gellatly, A.W.; Luoma, J.: A field study of discomfort glare from high-intensity discharge headlamps; Report No. UMTRI-92-16, The University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI 1992
- [320] Schieber, F.: Analytic study of daytime running lights as potential sources of disability and discomfort glare under ambient illumination conditions ranging from dawn through dusk; Heimstra Human Factors Laboratories, University of South Dakota, October 26, 1998, <http://www.usd.edu/~schieber/pdf/drl.pdf>, zuletzt besucht: 03.08.2007.
- [321] Blackwell, H.R.: Contrast thresholds of the human eye; *Journal of the Optical Society of America* 36 (1946), 624 – 643
- [322] Rushton, W.A.H.: Visual pigments in the intact human eye; *Proc. N.A.S.* 45 (1959), 114 – 115
- [323] Geisler, W.S.: Evidence for the equivalent-background hypothesis in cones; *Vision research* 19 (1979), 799 – 805
- [324] Alpern, M.; Wake, T.: Cone pigment in human deutan colour vision defects; *J. Physiol. Lond.* 266 (1977), 595 – 612
- [325] Alpern, M.; Ohba, N.: The effect of bleaching and backgrounds on pupil size; *Vision research* 12 (1972), 943 – 951
- [326] Porter, R.J.; Hankey, J.M.; Binder, S.C.; Dingus, T.A.: Enhanced night visibility series, vol. VII: Phase II-Study 5: Evaluation of discomfort glare during nighttime driving in clear weather; Report No. FHWA-HRT-04-138, Virginia Tech Transportation Institute, Blacksburg 2005
- [327] Alpern, M.; Holland, M.G.; Ohba, N.: Rhodopsin bleaching signals in essential night blindness; *Journal of physiology* 225 (1972), 457 – 476
- [328] Gregory, R. L.; Wallace, J. G.; Campbell, F. W.: Changes in the size and shape of visual after-images observed in complete darkness during changes of position in space; *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 11 (1959), 54 – 55
- [329] Weve, H.: The colours of after-images, following strong light-stimuli; *Brit. J. Ophthalmol.* 9 (1925), 627 – 638
- [330] Taylor, F. V.: Change in size of the afterimage induced in total darkness; *J. Exp. Psychol.* 29 (1941), 75 – 80
- [331] Mon-Williams, M.; Tresilian, J.R.: The size-distance paradox is a cognitive phenomenon; *Exp. Brain Res.* 126 (1999), 578 – 582
- [332] Bayer, L.: Die periodischen Nachbilder nach kurzdauernder Belichtung mit farbigen Reizlichtern; *Zeitschrift für Biologie* 85 (1926), 299 – 324

- [333] Kühne, W.: Ueber den Sehpurpur; Untersuchungen aus dem Physiologischen Institut der Universität Heidelberg, Bd. I, Heft 1 (1878), 15 – 103
- [334] Kühne, W.: Zur Photochemie der Netzhaut; Untersuchungen aus dem Physiologischen Institut der Universität Heidelberg, Bd. I, Heft 1 (1878), 1 – 14
- [335] Haab, O.: Der Sehpurpur und seine Beziehungen zum Sehact; Korrespondenz-blatt für Schweizer Ärzte IX (1879), 641 – 647
- [336] Preece, S.J.; Claridge, E.: Monte Carlo modelling of the spectral reflectance of the human eye; *Phys. Med. Biol.* 47 (2002), 2863 – 2877
- [337] Sagawa, K.: Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision; *Ophthal. Physiol. Opt.* 26 (2006), 240 – 245
- [338] Dawson, W.; Nakanishi-Ueda, T.; Armstrong, D.; Reitze, D.; Samuelson, D.; Hope, M.; Fukuda, S.; Matsuishi, M.; Ozawa, T.; Ueda, T.; Koide, R.: Local fundus response to blue (LED and Laser) and infrared (LED and Laser) sources; *Exp. Eye Res.* 73 (2001), 137 – 147
- [339] Taya, R.; Ohinata, S.: Afterimage oscillation after a brief light flash; *Japanese Psychol. Res.* 44 (2002), 99 – 106
- [340] Franze, K.; Grosche, J.; Skatchkov, S. N.; Schinkinger, S.; Foja, Ch.; Schild, D.; Uckermann, O.; Travis, K.; Reichenbach, A.; Guck, J.: Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina; *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (2007), 8287 – 8292
- [341] Walraven, J.: Spatial characteristics of chromatic induction: the segregation of lateral effects from straylight artefacts; *Vision Res.* 13 (1973), 1739 – 1753
- [342] Vos, J.J.; Walraven, J.; van Meteren, A.: Light profiles of the foveal image of a point source; *Vision Res.* 16 (1976), 215 – 219
- [343] Den Brinker, B.P.L.M.; Bruggeman, H.: Visual requirements for reading: The importance of a large field of view in reading with a magnifier; *Journ. Videology* 1 (1996), 27 – 38.
- [344] Brindley, G.S.: The effects on colour vision of adaptation to very bright lights; *J. Physiol.* 122 (1953), 332 – 350
- [345] Rushton, W.A.H.: Densitometry of pigments in rods and cones of normal and color defective subjects; *Invest. Ophthalmol.* 5 (1966), 233 – 241
- [346] Changizi, M. A. ; Zhang, Q. ; Shimojo, S.: Bare skin, blood and the evolution of primate colour vision; *Biol. Lett.* 2 (2006), 217 – 221

- [347] Bichão, I.C.; Yager, D.; Meng, J.: Disability glare: effects of temporal characteristics of the glare source and of the visual-field location of the test stimulus; *J. Opt. Soc. Am. A* 12 (1995), 2252 – 2258
- [348] Troland, L. T.: Preliminary note: The influence of changes of illumination upon after-images; *Am. J. Psychol.* 28 1917, 497-513
- [349] Vos, J.J.: Contribution of the fundus oculi to entoptic scatter; *J. Opt. Soc. Am.* 53 (1963), 1449 – 1451
- [350] Ackermann, R.: LED headlamps – possibilities and problems; *Progress in Automotive Lighting (PAL) 2003 Symposium*; Darmstadt University of Technology, S. 1 – 10
- [351] Kosnik, W.: Reciprocity of intensity and duration on the dark adaptation effects of light pulses; AFRL-HE-BR-TR-2002-0107, United States Air Force Research Lab., Brooks AFB, TX, Nov. 2002
- [352] Fischer, B.; Krause, D.; May, H. U.: Threshold, temporal summation and impulse-response function in the cat retina: Temporal receptive fields of ganglion cells; *Experimental Brain Research* 15 (1972), 212-224
- [353] Winkler, M. E.: An initial investigation of the effect of repeated high intensity flashes on man's performance of a tracking task; Report ITC-02-08-76-115, Dept. Mainten. Eff. Texas A&M University, Texarkana, TX March 1976
- [354] Clark, J.; Gibbons, R. B.; Hankey, J., M.: Enhanced night visibility series, vol. XV: Phase III – Study 3: Influence of beam characteristics on discomfort and disability glare; U.S. Dept. Trspt., Federal Highway Administration Publ. No. FHWA-HRT-04-146, Dec. 2005
- [355] Legge, G.E.; Pelli, D.G.; Rubin, G.S.; Schleske, M.M.: Psychophysics of reading: I. Normal vision; *Vision Research* 25 (1985), 239 – 252
- [356] Legge, G.E.; Rubin, G.S.; Luebker, A.: Psychophysics of reading: V. The role of contrast in normal vision; *Vision Research* 27 (1987), 1165-1177

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Darstellung der mit der Leuchtdichte zusammenhängenden Verhältnisse und Blendung durch eine Leuchtfläche	48
Abb. 2.2	Blendungstyp und -grad als Funktion der Blendlichtquelle und deren Eigenschaften	77
Abb. 2.3	Unterteilung physiologischer Blendung in direkte und indirekte physiologische Blendung	78
Abb. 2.4	Beispiel zur Demonstration des Auftretens der Komplementärfarben im Nachbild.....	94
Abb. 2.5	a: Testbildfarben vor schwarzem Hintergrund b: Demonstration der Nachbildfarben	95
Abb. 2.6	Unterdrückung und Verstärkung durch Sukzessiv-Kontrast.....	96
Abb. 2.7	Schematische Darstellung der Nachbildphasen 1 bis 3.....	117
Abb. 2.8	Alle Nachbildphasen	118
Abb. 2.9	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach 5 Sekunden Blendung durch von der Sonne beschienenes weißes Papier nach GOETHE [128].....	138
Abb. 2.10	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach 5 Sekunden Blendung durch von der Sonne beschienenes weißes Papier nach GOETHE (Betrachtung auf hellgrauem Hintergrund).....	139
Abb. 2.11	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach HAAS (Abb. 2.11 entspricht hierbei Abb. 2.10.)	143
Abb. 2.12	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach HAAS	144
Abb. 4.1	Auswahl einiger Nachbildfarbtafeln.....	203
Abb. 4.2	Demonstration des Verlaufes farbiger Nachbilder	203
Abb. 4.3	Verlauf des kreisrunden Nachbildes bei Blendung mit einer grünen LED.....	206

Abb. 4.4	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer grünen LED mit 600 mA.....	207
Abb. 4.5	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer blauen LED mit 600 mA	209
Abb. 4.6	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer blauen LED mit 10 mA	212
Abb. 4.7	Farbverlauf des Nachbildes im CIE-Farbraum nach Blendung mit einer roten LED mit 25 mA.....	216
Abb. 4.8	Relative Leistungsdichteverteilung beispielhafter LED-Blendquellen, als Schwarz-Weiß-Bild und farblich kodiert.....	218
Abb. 4.9	Reduziertes Auge und Abbildungsgröße auf der Netzhaut ([2, 85])	222
Abb. 4.10	Versuchsaufbau zur Blendung (modifizierter Aufbau aus [152])	223
Abb. 4.11	Strahlprofil der LED-Blendlichtquelle ([2])	224
Abb. 4.12	Hilfe- und Bedienungsformular zum Programm zur Nachbilderfassung ([2]).....	225
Abb. 4.13	Messplatzaufbau zur Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Nachbildgröße ([2])	225
Abb. 4.14	Testmessungen (Werte auf den Startdurchmesser normiert, aus [2]).....	226
Abb. 4.15	Darstellung von durch Tabellenkalkulation erzeugten Trendlinien der Testmessungen aus Abb. 4.14 (aus [])	226
Abb. 4.16	Ergebnisse zweier Messungen eines Probanden (aus [2])	227
Abb. 4.17	Alle bei einem Probanden erzielten Messergebnisse	227
Abb. 4.18	Messergebnisse bei einem Probanden (als Anfangswert wurde ein solcher entsprechend einem Durchmesser auf dem Messbildschirm, siehe Abb. 4.13, von 134 mm ermittelt).....	228

Abb. 4.19	Zusammenfassung aller Ergebnisse der Nachbildgrößenmessungen.....	228
Abb. 4.20	Lineare und exponentielle Regression aller Messwerte der Probanden (aus [2])	229
Abb. 4.21	Psychometrische Funktionen bei einer Sehschärfe von 1,6 [201].....	232
Abb. 4.22	Ansicht des Binoptometers (links Rückseite, rechts Vorderseite)	236
Abb. 4.23	Durchführung des Sehtests vor oder nach einer Blendung	238
Abb. 4.24	Blendung des Probanden bei heruntergeklapptem Einblickspegel	238
Abb. 4.25	Zeitdauer bis zur Wiederkehr der individuellen Sehschärfe nach einer Blendung als Funktion der individuellen linearen Regression für 3 Probanden	239
Abb. 4.26	Visuszeit als Funktion der LED-Leistung bei einer Expositionsdauer von 2 s.....	240
Abb. 4.27	Visuszeit als Funktion der optischen LED-Leistung für verschiedene Expositionsauern	241
Abb. 4.28	Visuszeit als Funktion der Expositionsdauer bei $P = 118 \mu\text{W}$	241
Abb. 4.29	Visuszeit als Funktion der Expositionsdauer bei $P = 1\,505 \mu\text{W}$	242
Abb. 4.30	Visuszeit für alle Messungen als Funktion der optischen Strahlungsenergie (Expositionsdauer: 1 s – 4 s)	242
Abb. 4.31	Relatives Spektrum (spektrale Leistungsverteilung, SPD) der verwendeten HB-LED	245
Abb. 4.32	Leistung als Funktion des Blendendurchmessers.....	246
Abb. 4.33	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Lesestörzeit nach Blendung durch eine weiße HB-LED	246
Abb. 4.34	Schematische Darstellung und realer Messaufbau zur Blendung.....	247

Abb. 4.35	Dauer der Lesestörung als Funktion des Blendendurchmessers.....	249
Abb. 4.36	Mittelwerte der Lesezeitstörung bei zwei verschiedenen Blendendurchmessern	250
Abb. 4.37	Dauer der Lesestörung als Funktion der LED-Leistung bei einer Blendenöffnung von 18 mm	250
Abb. 4.38	Dauer der Lesestörung als Funktion der Expositionsdauer bei einer LED-Leistung von 1,69 mW entsprechend einer Blendenöffnung von 10 mm	251
Abb. 4.39	Experimental-Versuchsaufbau zur winkelabhängigen Blendung. Komponenten: 1.) Zieleinrichtung („Siemensstern“ und Lochblende); 2.) Netzteil; 3.) Blendlichtquelle (He:Ne-Laser der Klasse 3B mit $P_{\max}=10$ mW bei $\lambda = 632,8$ nm, Gaußstrahl (TEM ₀₀); 4.) Optischer Abschwächer (zur Einstellung der Laserleistung auf Klasse 1); 5.) Shutter (zeitgesteuert); 6.) Ausleger der Länge $l = 450$ mm (drehbar gelagert auf einer Drehscheibe mit Winkelmaßstab und einer Stützrolle) als Träger für die Blendeinrichtung aus Laser, Abschwächer und Shutter; 7.) Drehteller (halbkreisförmig aus Plexiglas, zum Stützen des Auslegers); 8.) Kinn-/Kopfstütze; 9.) Oszilloskop zur Überprüfung der Zeitsteuerung; 10.) Dreikantschiene; 11.) Zeitsteuerschaltung, bestehend aus einem Zeitrelais; 12.) Stoppuhr (zur Messung der Nachbilddauer); 13.) höhenverstellbarer Tisch.....	254
Abb. 4.40	Versuchsaufbau aus der Sicht des Probanden.....	254
Abb. 4.41	Laser mit Abschwächer- und Shuttereinheit	254
Abb. 4.42	Nachbilddauer als Funktion des Blendwinkels für Proband 1, 2 und 3 ($t_{\text{exp}} = 10$ s; bei $P = 30$ μ W), („temporal“ steht für „schläfenwärts“ von lat. Tempus = Schläfe und „nasal“ steht für „zur Nase hin“)	257
Abb. 4.43	Nachbilddauer als Funktion des Blendwinkels bei 3 verschiedenen Expositionsdauern für Proband 1 ($t_{\text{exp}} = 1$ s; 5 s und 10 s bei $P = 30$ μ W)	258

Abb. 4.44	Winkel- und expositionsdauerabhängige Nachbilddauer	259
Abb. 4.45	Winkelabhängige Nachbilddauer als Funktion der Blendzeit für die Probanden 1, 2 und 3 ($t_{\text{exp}} = 1 \text{ s}$, 5 s und 10 s bei $P = 30 \mu\text{W}$).....	259
Abb. 4.46	Nachbilddauer als Funktion der Expositionsdauer bei 5° nasaler Blendung ($t_{\text{exp}} = 0,25 \text{ s}$, $0,5 \text{ s}$, 1 s , 3 s , 5 s , 7 s und 10 s bei $P = 10 \mu\text{W}$, $20 \mu\text{W}$ und $30 \mu\text{W}$).....	260
Abb. 4.47	Nachbilddauer als Funktion der Expositionszeit bei 5° temporaler Blendung ($t_{\text{exp}} = 0,5 \text{ s}$; 1 s ; 5 s und 10 s bei $P = 30 \mu\text{W}$)	261
Abb. 4.48	Mittelwertkurven der Nachbilddauern für $P = 10 \mu\text{W}$ und $30 \mu\text{W}$	261
Abb. 4.49	Trendverlauf der Nachbilddauer als Funktion der Expositionsdauer (gemittelt für 2 verschiedene Strahlleistungswerte)	262
Abb. 4.50	Nachbilddauer als Funktion der Laserstrahlleistung für verschiedene Expositionsauern	262
Abb. 4.51	Nachbilddauer als Funktion der Laserstrahl-Energie für 8 Probanden	263
Abb. 4.52	Nachbilddauer als Funktion der Laserstrahl-Energie für 8 Probanden	263
Abb. 4.53	Mittelwert und Trend der Nachbilddauer als Funktion der Energie	264
Abb. 4.54	Psychologische Blendungsbewertung in Abhängigkeit des Blendwinkels für 3 Probanden bei einäugiger Blendungsbewertung	265
Abb. 4.55	Psychologische Blendungsbewertung in Abhängigkeit des Blendwinkels für 3 Probanden bei beidäugiger Blendungsbewertung	266

Abb: 4.56	Vergleich der Blendungsempfindung und der Nachbilddauer als Funktion des Blendwinkels	267
Abb .4.57	Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels (Testweise gemessen für vertikale Auslenkung von +/-15°)	269
Abb. 4.58	Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels (Testweise gemessen für vertikale Auslenkung von +/-15°)	269
Abb. 4.59	Theoretische Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels.....	270
Abb. 4.60	Theoretische Nachbilddauer als Funktion des horizontalen und vertikalen Blendwinkels.....	270
Abb. 4.61	Untersuchung der Form und Ausdehnung des blinden Flecks	271
Abb. 4.62	Ausgewählte Farben	274
Abb. 4.63	Beispiele zur Farbkreisdarstellung	275
Abb. 4.64	Zwei unterschiedliche Farbkreisdarstellungen	275
Abb. 4.65	Verfügbare Darstellungen des Farbkreises.....	276
Abb. 4.66	Zoomfunktion	276
Abb. 4.67	Vergleich von jeweils drei identischen Messungen (1, 2 u. 3) bei Betrachtung kontinuierlicher und diskreter Farbkreis-Darstellung, aufgeteilt in Rot-, Grün- und Blauanteil von 0 bis 256 (RGB-Werte) bei Blendung mit einer roten LED als Funktion der Zeitdauer in ms (benutzte Farbkreise gemäß Abb. 4.63 rechts).....	277
Abb. 4.68	Vergleich von jeweils drei identischen Messungen (1, 2 u. 3) bei Betrachtung kontinuierlicher und diskreter Farbkreis-Darstellung, aufgeteilt in Rot-, Grün- und Blauanteil von 0 bis 256 (RGB-Werte) bei Blendung mit einer grünen LED als	

	Funktion der Zeitdauer in ms (benutzte Farbkreise gemäß Abb. 4.63 rechts).....	278
Abb. 4.69	Vergleich von jeweils drei identischen Messungen (1, 2 u. 3) bei Betrachtung kontinuierlicher und diskreter Farbkreis-Darstellung, aufgeteilt in Rot-, Grün- und Blauanteil von 0 bis 256 (RGB-Werte) bei Blendung mit einer blauen LED als Funktion der Zeitdauer in ms (benutzte Farbkreise gemäß Abb. 4.63 rechts).....	279
Abb. 4.70	Schematischer Messaufbau.....	280
Abb. 4.71	Verwendeter Labor-Messaufbau mit Blendeinrichtung und Bedienoberfläche mit Farbkreisdarstellung auf Monitor.....	281
Abb. 4.72	Bedienoberfläche Messprogramm.....	281
Abb: 4.73	Eingabe der Probandendaten und Probandendaten Textdatei.....	283
Abb. 4.74	HP E3632A-Steuerung.....	283
Abb. 4.75	Optische Leistungen (in mW) der LEDs über dem Strom (in mA).....	285
Abb. 4.76	Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Rotblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$).....	287
Abb. 4.77	Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Rotblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$) für 3 Einzelmessungen.....	287
Abb. 4.78	Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Grünblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$).....	289
Abb. 4.79	Verlauf der einzelnen Farbanteile (RGB-Werte) bei Blaublendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$).....	290
Abb. 4.80	Anteile der Blendfarbe an den Nachbildfarben als Funktion der Zeit.....	290
Abb. 4.81	Verlauf der Farbanteile in Abhängigkeit von der Energie bei Rotblendung.....	291

Abb 4.82	Verlauf des Rotanteils in Abhängigkeit von der Energie bei Rotblendung für Proband 1	292
Abb. 4.83	Verlauf des Grünanteils in Abhängigkeit von der Energie bei Grünblendung für Proband 1	292
Abb. 4.84	Verlauf des Blauanteils in Abhängigkeit von der Energie bei Blaublendung für Proband 1	293
Abb. 4.85	Vergleich der Helligkeit aus den RGB-Werten bei Rotblendung für alle Probanden	294
Abb. 4.86	Vergleich der Helligkeit aus den RGB-Werten bei Grünblendung für alle Probanden.....	294
Abb. 4.87	Farbangabe des Nachbildes durch die Probanden 1 – 5 bei Rot- und Grünblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$)	296
Abb. 4.88	Farbangabe des Nachbildes durch die Probanden 1-5 bei Blau- und Amberblendung ($Q = 2,5 \text{ mJ}$).....	297
Abb. 4.89	Vergleich der Nachbild-Farbverläufe bei Grünblendung für Proband 1 und 3 bei unterschiedlichen Einstellungen von Leistung und Expositionsdauer	298
Abb. 4.90	Verlauf der Nachbildfarben im CIE-Diagramm für Grünblendung bei $2,5 \text{ mJ}$ (Proband 1)	299
Abb. 4.91	Verlauf der Nachbildfarben im CIE-Diagramm für Grünblendung bei $0,25 \text{ mJ}$ ($0,5 \text{ mW} / 0,5 \text{ s}$; Proband 1)	299
Abb. 4.92	Verlauf der Nachbildfarben im CIE-Diagramm für Grünblendung bei $0,25 \text{ mJ}$ ($0,05 \text{ mW} / 5 \text{ s}$; Proband 1)	300
Abb. 4.93	Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Farbunterscheidungsfähigkeit nach Blendung mit einer farbigen LED.....	308
Abb. 4.94	Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, $0,5 \text{ mW}$ und 5 s)	309

Abb. 4.95	Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, 0,5 mW und 2,5 s)	309
Abb. 4.96	Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, 0,5 mW und 1,25 s)	310
Abb. 4.97	Anteil richtiger Angaben nach Farben bei der Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit roter LED, 0,5 mW und 5 s)	310
Abb. 4.98	Dauer der Beeinträchtigung in der Farbwahrnehmung als Funktion der Expositionsdauer (Werte gemäß Tab. 4.15)	312
Abb. 4.99	Anteil richtige Angaben bei Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit blauer LED, 0,5 mW und 1,25 s).....	313
Abb. 4.100	Anteil richtiger Angaben nach Farben bei der Suche nach gelber LED-Anzeige (Blendung mit blauer LED, 0,5 mW und 1,25 s).....	314
Abb. 4.101	Versuchsaufbau zur Ermittlung des Farbvergleichs.....	316
Abb. 4.102	Farbwertverschiebung in beliebigen Einheiten durch Rotblendung ($P = 0,5 \text{ mW}$; Expositionsdauer, von oben nach unten: 5 s, 2,5 s und 1,25 s)	317
Abb. 4.103	Farbwertverschiebung in beliebigen Einheiten durch Grünblendung ($P = 0,5 \text{ mW}$; Expositionsdauer, von oben nach unten: 5 s, 2,5 s und 1,25 s)	318
Abb. 4.104	Maximale Rotverschiebung bei roter Blendung	318
Abb. 4.105	Kennlinien der 4 verwendeten HB-LEDs	321
Abb. 4.106	Technischer Aufbau der gesamten Blendeinrichtung: (1) Blendvorrichtung mit LED und Blende, (2) Digitales Netzgerät, (3) Präzisionszeitschalter, (4) Messkopf mit 7 mm-Blende, (5) Leistungs-Messgerät	322
Abb. 4.107	Detaildarstellung der Blendvorrichtung - (1) Halterung und Wärmeleitplatte, (2) LED, (3) Kollimator	322

Abb. 4.108	Kollimator als scheinbare Quelle bzw. Blendlichtquelle (1), (2) 7 mm-Blende, rechts: Blendung eines Probanden mit einer roten LED (nicht geblendetes Auge abgedeckt)	323
Abb. 4.109	Landoltring-Test mit roten Sehzeichen in 8 Kontraststufen	325
Abb. 4.110	Im Test verwendete 4 Pseudoisochromatische Tafeln	326
Abb. 4.111	Mittelwerte aller Messergebnisse zur Identifikationszeit für die 8 Kontraststufen vor und nach einer Blendung einschließlich der Standardabweichung	328
Abb. 4.112	Einzeldarstellung der Messergebnisse zur Identifikationszeit für die 8 Kontraststufen der farbigen Charts nach Blendung	328
Abb. 4.113	Einzeldarstellung der Messergebnisse zur Identifikationszeit für die 8 Kontraststufen der farbigen Charts ohne Blendung	329
Abb. 4.114	Mittelwerte aller Messergebnisse zu den Identifikationszeiten in Abhängigkeit von der Farbe der Blendlichtquelle.....	330
Abb. 4.115	Messergebnisse der Identifikationszeiten für alle 6 Farbkontrastsehtafeln in Abhängigkeit von der Farbe der Blendlichtquelle.....	331
Abb. 4.116	Stufenzeiten aller farbigen Landoltring-Charts im Vergleich zu denen der schwarzen, sowie Regressionsgeraden im Bereich des Anstiegs	332
Abb. 4.117	Allein auf Blendung auf das Kontrastsehen bei Darbietung farbiger Vorlagen (ohne Gelb) zurückzuführender Effekt.....	333
Abb. 4.118	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Tests mit 4 Pseudoisochromatischen Tafeln in Druck- und Monitordarstellung	334
Abb. 4.119	Farbwahrnehmung der 6 Farbfelder in Druckdarstellung nach Blendung durch 4 farbige LEDs	336
Abb. 4.120	Gegenüberstellung der Ergebnisse des Farbfeld-Tests in Druck- und Monitordarstellung.....	337

Abb. 4.121	Schematische Darstellung der zeitlichen Nachbildphasen nach Blendung durch farbige LEDs	338
Abb. 4.122	„Dosisbeziehung“ und Einordnung der Expositionssituation	343
Abb. 4.123	Nachbilddauer gemäß Abb. 4.53 und Abb. 4.122	346
Abb. 4.124	Nachbilddauer in s (Ordinate) als Funktion der Laserstrahlenergie in μJ (Abszisse) gemäß Abb. 4.123 (Detailvergrößerung).....	347
Abb. 4.125	Allgemeiner Fragebogen für praktisch alle Teiluntersuchungen	354
Abb. 4.126	Spezieller Fragebogen für Teiluntersuchungen mit einer bestimmten Blendungsquelle	355
Abb. 4.127	Informationsblatt und Formblatt zur Einverständniserklärung	
Abb. 4.128	Protokollblatt für Sehtest nach Blaublendung (analog für alle 5 anderen LED-Farben)	358
Abb. 4.129	Protokollblatt für Nachbild	359
Abb. 4.130	Protokollblatt für Farbfeld	360
Abb. 4.131	Protokollblatt für Pseudoisochromatische Tafeln	361

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	MZB-Werte für Laserstrahlung als Funktion der Einwirkungsdauer für Wellenlängen zwischen 500 nm und 700 nm.....	18
Tab. 2.1	Übersicht über Effekte und Mechanismen bei Blendung	76
Tab. 2.2	Begriffe und deren Beschreibung	99
Tab. 2.3	Beschreibung der Begriffe in zeitlicher Reihenfolge bei Nachbildern.....	100
Tab. 2.4	Abhängigkeit des PURKINJE-Nachbildes von der Leuchtdichte.....	102
Tab. 2.5	Zeitlicher Verlauf der Nachbildphasen nach GOETHE	137
Tab. 2.6	Entwicklung des positiven Nachbildes, das von einem kurzen weißen Reiz herrührt. (Nach HAAS 1949)	142
Tab. 2.7	Zeitlicher Verlauf des Nachbildes nach HAAS	142
Tab. 2.8	Einteilung und Bewertung der psychologischen Blendung nach der DE BOER-Skala (unter Berücksichtigung von [239], * nach [261])	157
Tab. 2.9	Vergleich der DE BOER-Skala mit den GI-Werten nach CIE-Publikation No. 55 und mit der UGR-Skala.....	163
Tab. 2.10	Vergleich einiger Merkmale bei Farbsehtests (modifiziert n. [140])	171
Tab. 2.11	Auf gutes bzw. ausreichendes Farbsehvermögen angewiesene Berufe [141]	189
Tab. 4.1	Übersicht der durchgeführten Untersuchungen	198
Tab. 4.2a	Merkmale und Parameter der verschiedenen Teiluntersuchungen	199
Tab. 4.2b	Anzahl der Versuchspersonen in den einzelnen Teiluntersuchungen	200

Tab. 4.3	Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer grünen LED mit 600 mA.....	207
Tab. 4.4	Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer blauen LED mit 600 mA.....	209
Tab. 4.5	Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer blauen LED mit 40 – 50 mA.....	210
Tab. 4.6	Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer blauen LED mit 10 mA.....	211
Tab. 4.7	Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer grünen LED mit 25 mA	213
Tab. 4.8	Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer roten LED mit 25 mA	214
Tab. 4.9	Zeitlicher Farbverlauf des Nachbildes nach Blendung mit einer roten LED mit 25 mA - 2. Messung.....	215
Tab. 4.10	Vorschriften zur Durchführung der normgerechten Sehschärfestimmung nach DIN EN ISO 8596 und Empfehlungen der DOG zur Fahreignungsbegutachtung.....	233
Tab. 4.11	Beispiel einer Testscheibe mit 6 Visusstufen (Landoltringe sind als Pfeile dargestellt)	237
Tab. 4.12	Vergleich der Nachbilddauer mit der Lesestörzeit und der Zeitdauer bis zur Wiederkehr des normalen Visus	272
Tab. 4.13	Über die Bedienoberfläche des Messprogramms ausführbare Funktionen.....	282
Tab. 4.14	Ergebnisse von 5 Versuchsreihen mit einem Laserlinienstrahl zur Bestimmung des Blendungsempfindens und der Farbwahrnehmung.....	304
Tab. 4.15	Zeitdauer nach der 80 % der gesuchten Farbe nach Blendung richtig angegeben wird (Blendleistung: 0,5 mW) (n. [243])	311
Tab. 4.16	Besonders häufig verwechselte Farben je nach Blendungsfarbe	314

Tab. 4.17	Farben, die unter Blendungsbedingungen unverändert wahrgenommen werden	314
Tab. 5.1	Einteilung von Blendlichtquellen in Blendgruppen	362

Im Rahmen des Projektes wurden folgende Diplomarbeiten durchgeführt.

Mitwirkende Diplomanden/-innen und Masterthesis-Kandidaten/-innen:

Dipl.-Ing. Jean Louis Nkwetchou (bis 05.12.2006);

Dipl.-Ing. Gadafi Salovski (bis 12.01.2007),

Dipl.-Ing. Miriam Bischof (bis 04.04.2007),

Dipl.-Ing. Sabine Peters (bis 04.04.2007);

Dipl.-Ing. Birger Schumacher (bis 17.08.2005).