

Medizinische Beurteilungsgrundlagen der Passiven Blendung

**Doz. Dr. Hanns Moshhammer
Univ.-Prof. Dr. Michael Kundi
Institut für Umwelthygiene, ZPH
Medizinische Universität Wien**

Version Dezember 2013

Passive Blendung

Im Auftrag von: Amt der Kärntner Landesregierung, Unterabteilung Sanitätswesen

Institut für Umwelthygiene, ZPH
Medizinische Universität Wien
Kinderspitalgasse 15
1090 Wien

Für den Inhalt verantwortlich:

Doz. Dr. Hanns Moshhammer, Univ.-Prof. Dr. Michael Kundi

Wien, im Dezember 2013

Autoren:

Cem Ekmekcioglu
Peter Heilig
Hans-Peter Hutter
Michael Kundi
Hanns Moshhammer
Verena Spertini
Peter Wallner
Manfred Winkler

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Physiologische Grundlagen von Licht und Blendung	6
2.1	Licht und Leuchtdichte	6
2.2	Retinale Verarbeitung	6
2.3	Adaptation	7
2.4	Visus	8
2.5	Sehen im Alter	9
2.6	Blendung	9
2.6.1	Definition der Blendung	10
2.6.2	Arten der Blendung	10
2.6.3	Blendungsbewertung	15
2.6.4	Klinische Untersuchung	20
2.6.5	Gegenmaßnahmen	20
2.6.6	Zusammenfassung	20
3	Psychologische Grundlagen (Mechanismen der Belästigung)	22
4	Licht und zirkadiane Rhythmik	24
4.1	Das zirkadiane System	24
4.2	Einfluss von Licht auf das zirkadiane System	24
4.3	Zusammenfassung	26
5	Farbe und Frequenzspektrum: physiologische und psychologische Bedeutung	28
6	Toxische Effekte von Licht	30
7	Exkurs 1: Zirkadiane Rhythmen	31
7.1	Einfluss von Licht auf den zirkadianen Rhythmus	31
7.2	Der Einfluss einer vorausgegangenen Lichtexposition	32
7.3	Entrainment	32
8	Exkurs 2: Blendung aus augenärztlicher Sicht	33
8.1	Einleitung	33
8.2	Physiologische Grundlagen von Licht und Blendung	33
8.3	Wirkungsvolle Abhilfe?	34
9	Positive Wirkungen von Licht	36
10	Bestehende Regelungen	38
10.1	Lichtimmissionen – Messung und Beurteilung ÖNORM O 1052:2012 10 01	38
10.1.1	Raumaufhellung durch Beleuchtungen für verkehrsfremde Zwecke	39
10.1.2	Gleichmäßigkeit	39
10.1.3	Korrekturfaktoren	39
10.1.4	Blendung	39
10.1.5	Psychologische Blendung	40

10.1.6	Physiologische Blendung	40
10.2	Arbeitsmedizinische Regelungen	41
10.2.1	Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates	41
10.2.2	Kommentar	43
10.3	Blendung im Straßenverkehr	44
10.3.1	RVS 05.06.12	44
10.3.2	Kommentar	45
11	Untersuchungen zur Beurteilung der optischen Störung durch Windkraftanlagen	47
12	Empfehlungen zur Begutachtung sekundärer Lichtimmissionen	49
12.1	Vorgaben für den technischen Sachverständigen	50
12.2	Vorgangsweise bei der medizinischen Begutachtung	52
12.3	Kriterien der medizinischen Beurteilung	52
12.3.1	Absolutblendung	52
12.3.2	Empfindliche Personen / empfindliche Situationen	53
12.3.3	Häufigkeit	53
12.3.4	Dauer	53
12.3.5	Farbwidergabe	54
12.3.6	Zeitliche Variabilität (bis hin zu Flackerlicht)	54
12.4	Zusammenfassende Beurteilung	54
13	Literatur	56

1 Einleitung

Das Amt der Kärntner Landesregierung, Unterabteilung Sanitätswesen, hat um ein medizinisches Grundsatz-Gutachten zu „Blendung ausgehend von Solaranlagen, Glasfassaden etc.“ angefragt. In den Beilagen zum Auftrag wird auch die Thematik von wechselndem Schattenwurf am Beispiel von Windrädern angesprochen.

Zu dieser Fragestellung existieren in Österreich keine Richtlinien. In der Verfahrenspraxis werden die Behörden jedoch mit Fragen zu Blendung und anderen mit der Lichtreflexion zusammenhängenden Fragen konfrontiert. Aus diesem Grund erscheint ein Leitfaden für die Beurteilung erforderlich.

Zu künstlichem Licht existieren sowohl für Störungen von Anrainer/innen als auch für Arbeitsplätze einschlägige Regelungen. Diese Konzepte lassen sich teilweise auch auf das angesprochene Problem anwenden. Für Blendung gibt es aber bisher keine umfassenden allgemeinen Empfehlungen, die über die Gestaltung von Beleuchtungsanlagen hinausgehen. Daher mussten entsprechende Empfehlungen erarbeitet bzw. abgeleitet werden. Diese Arbeiten erfolgten in diesem Grundsatzgutachten nicht durch eine Einzelperson, sondern durch eine Expertengruppe.

Bei der Beurteilung von Reflexionen muss das unterschiedliche Reflexionsverhalten verschiedener Materialien berücksichtigt werden. Oberflächenstruktur, Farbe und Lichtabsorption bzw. Durchlässigkeit der reflektierenden Fläche beeinflussen, wie viel Licht reflektiert wird und welchen qualitativen Änderungen das reflektierte Licht unterliegt. Bei Bauwerken sind vor allem hochreflektierende Materialien wie insbesondere Gläser und diverse metallische Oberflächen relevant. Bei großen Flächen (Fassaden) kann sogar eine raue Oberfläche (Stein, Putz, Beton) deutlich zur Aufhellung in der Nachbarschaft beitragen und unter Umständen je nach Farbe der Fassade zu einer unnatürlichen Spektralverteilung des Lichtes führen.

Einrichtungen zur Solarenergie-Gewinnung umfassen unterschiedliche Technologien. Unter anderem sind Solarpaneele in Entwicklung, welche in Fassaden integriert werden. Bei diesen ist die räumliche Ausrichtung weitgehend durch die Orientierung der Fassade vorgegeben. Ähnlich verhält es sich mit Paneelen, die auf Dächern montiert sind. Paneele, welche im Freien aufgestellt werden, sind entweder starr ausgerichtet, wobei sie in der Regel nach Süden orientiert sind. Andere Systeme werden der Sonne nachgeführt.

Moderne Solarpaneele erfüllen das Ziel einer effizienten Energieausbeute, indem sie einen großen Anteil des Sonnenlichtes absorbieren. So schreiben Klinger und Partner [2012]: „Auf den Modulen ist die Reflexion des einfallenden Lichtes unerwünscht, da die Reflexion die energetische Ausbeute verringert. Die Reflexion ist aber nicht vollständig vermeidbar. Etwa 5-8 % des einfallenden Lichtes wird an die Umgebung reflektiert, bei reflexionsarmen Modulen noch ca. 1 %.“ Dies trifft auf senkrechten Sonneneinfall zu. Bei schrägem Einfallswinkel der Sonnenstrahlen ist der reflektierte Anteil deutlich größer. Klinger und Partner meinen dazu: „Bezüglich der Spiegelungseffekte ist anzumerken, dass Reflexionen nur in Grenzfällen, bei tiefem Sonnenstand, möglich sind.“ Gerade in diesen Fällen ist allerdings auch davon auszugehen, dass die Sonne selbst oft die sekundäre (reflektierte) Lichtquelle überstrahlt [BfUNR 2007].

Für dieses Grundsatzgutachten wurden Experten aus verschiedenen medizinischen Fachgebieten rekrutiert (Umwelthygiene, Arbeitsmedizin, Augenheilkunde, Physiologie), um die unterschiedlichen Aspekte der Wirkung von Licht, Sonnenstrahlung und optischen Signalen auf die Augen, die

Körperoberfläche sowie auf hormonelle, kognitive und psychische Regelmechanismen darzustellen. Die unterschiedlichen Ausgangspunkte ergaben teilweise eine unterschiedliche Einschätzung der Faktenlage, die sich auch in Unterschieden in der Einschätzung der Möglichkeit, praktikable Kriterien für die Beurteilung schädigender und/oder belastigender Lichteinwirkungen und die Anwendung von Schutzmaßnahmen zu entwickeln, niederschlägt. Es bleibt dem Fachgutachter im Einzelfall überlassen für seine spezifische Fragestellung zu prüfen, welche der angesprochenen Aspekte für seinen „Fall“ am ehesten zutreffen und daher in sein eigenes Gutachten integriert werden können.

Den unterschiedlichen Zugängen der einzelnen Experten wurde derart Rechnung getragen, dass einzelne Aspekte als „Exkurse“ in die Grundlagenkapitel eingefügt wurden. Damit werden dem Anwender weitere mögliche Textbausteine und zusätzliche Literaturangaben geboten, die er je nach Bedarf im Einzelfall verwenden kann.

2 Physiologische Grundlagen von Licht und Blendung

2.1 Licht und Leuchtdichte

Licht ist der Ausschnitt der elektromagnetischen Strahlung, den wir sehen. Dabei stellen Wellenlängen in einem Bereich von etwa 380-400 nm als untere und etwa 750-780 nm als obere Grenze den adäquaten Reiz für das Sehen dar [EG 2006; Reidenbach et al. 2008; Schmidt und Lang 2007]. Kürzere (ultraviolett) bzw. längere (infrarot) Wellenlängen sind für das menschliche Auge unsichtbar. Jedoch zählen auch UV und IR zur optischen Strahlung. Sie verhalten sich hinsichtlich Reflexion, Brechung und Streuung ähnlich wie sichtbares Licht und sind daher hinsichtlich der Reflexion und/oder Abschattung von Sonnenlicht eventuell auch relevant.

Das Sehen basiert dabei vor allem auf der Wahrnehmung von Farb- und Hell-Dunkel-Kontrasten mit unterschiedlichen Leuchtdichten. Die Leuchtdichte (L) stellt ein Maß für die gesehene Helligkeit einer Fläche dar. Sie ist gegeben als Lichtstärke pro Flächeneinheit mit der SI-Einheit Candela pro Quadratmeter (cd/m^2). Daraus ergibt sich eine hohe Leuchtdichte bei großer Lichtstärke in Verbindung mit einer kleinen Fläche. Umgekehrt nimmt die Leuchtdichte bei größer werdenden Flächen, und gleichbleibender Lichtstärke, ab. Der Einfluss der Leuchtdichte auf den Helligkeitseindruck ist nicht linear [Sutter 1999/2002]. Aus diesem Grund muss eine Quelle mit einer doppelten Leuchtdichte dem Auge nicht unbedingt als doppelt so hell erscheinen.

Die Lichtstärke einer Lichtquelle ist definiert als Lichtstrom (in Lumen, lm), der in ein Raumwinkelelement (Steradian, sr) ausgestrahlt wird. Der Raumwinkel ist dabei die Fläche eines Kugelsegments dividiert durch das Quadrat des Kugelradius (d.h. 1 sr ist jener Raumwinkel, der aus einer Kugel mit dem Radius r ein Kugelsegment mit der Kalottenfläche r^2 ausschneidet).

Die Leuchtdichte ist ein wesentlicher Faktor, der bei der Blendung durch Lichtquellen eine Rolle spielt. Die Leuchtdichte ist unabhängig vom Abstand des Beobachters, im Gegensatz zur Beleuchtungsstärke (in Lux bzw. lm/m^2) auf einer Fläche, deren Intensität, bei gegebener Lichtstärke, quadratisch mit der Entfernung von der Lichtquelle abnimmt [Reidenbach et al. 2008].

Ob eine Lichtquelle blendet, hängt sowohl vom Adaptationszustand des Auges als auch von der Leuchtdichte der Umgebungsflächen und anderen Faktoren ab. Bei einem auf dunkel adaptiertem Auge kann bereits der Vollmond zu einer Blendung führen. Im Alltag treten Leuchtdichten im Bereich von ca. 10^{-11} bis $5 \times 10^9 \text{ cd}/\text{m}^2$ auf. In Tabelle 1 sind Beispiele für Leuchtdichten angeführt [SSK 2006].

Unsere Augen können sich einem Leuchtdichtebereich von etwa $10^{-6} \text{ cd}/\text{m}^2$ bis etwa 10^4 - $10^5 \text{ cd}/\text{m}^2$ relativ gut anpassen.

2.2 Retinale Verarbeitung

Licht gelangt über den dioptrischen Apparat des Auges, der von der Hornhaut, dem Kammerwasser, der Linse und dem Glaskörper gebildet wird, auf die Netzhaut. Der Hauptanteil der Gesamtbrechkraft wird durch die Cornea verursacht. Physiologische Korrekturmechanismen können dabei verschiedene optische Abbildungsfehler korrigieren. Randstrahlen werden z.B. stärker gebrochen als Strahlen in der Nähe der optischen Achse [Schmidt und Schaible 2006]. Außerdem wird kurzwelliges Licht stärker gebrochen als langwelliges.

Die vielschichtige Netzhaut besteht aus verschiedenartigen Zellen. Dabei besitzen die Augen zwei Arten von Sensorzellen, die für das Sehen verantwortlich sind. Das Hell-Dunkel-Sehen wird über die Stäbchen vermittelt, und das Farbsehen über die Zapfen. Etwa 120 Mio. Stäbchen und 6 Mio. Zapfen befinden sich in der Retina. Diese konvergieren auf etwa 1 Mio. Ganglienzellen, über welche die Signale ins Gehirn weitergeleitet werden. In den Stäbchen findet sich der Sehfärbstoff Rhodopsin, welcher aus dem Glykoprotein Opsin und dem 11-cis-Retinal besteht. Das Absorptionsmaximum des Rhodopsins liegt bei 500 nm. Nachts erscheint daher grünblaues Licht heller als rotes oder blaues Licht. Die drei Zapfentypen haben andere Sehfärbstoffe, die auf unterschiedliche Wellenlängen im Bereich des Farbspektrums unterschiedlich stark ansprechen. Die Zapfen sind dabei deutlich unempfindlicher als die Stäbchen und reagieren auf Licht erst ab ca. 3 cd/m^2 .

Licht adäquater Wellenlänge bewirkt eine photochemische Reaktion im Rhodopsin (Umlagerung von 11-cis-Retinal zu all-trans Retinal). Durch Aktivierung von G-Protein gekoppelten sekundären Botenstoffen entsteht in weiterer Folge ein Sensorpotenzial, aus dem schlussendlich Aktionspotentiale generiert werden.

Das all-trans-Retinal muss wieder in die 11-cis-Form zurückgeführt werden, damit der Phototransduktionsprozess erneut stattfinden kann. Starker Lichteinfall verschiebt das Gleichgewicht massiv auf die Seite des all-trans-Retinals (Helladaptation). Im Gegensatz dazu bewirkt längerer Aufenthalt im Dunkeln ein Überwiegen der 11-cis-Form (Dunkeladaptation) und eine vermehrte Sensibilität der Stäbchen. Nach einer sehr hellen Beleuchtung der Retina kann der Resyntheseprozess über eine Stunde dauern. Ein Umstand, der u.U. bei einer kurzen, starken Beleuchtung im dunkel-adaptierten Auge in der Nacht relevant ist.

2.3 Adaptation

Das menschliche Auge kann extrem unterschiedliche Leuchtdichten in einem Ausmaß von 1 zu 10^{12} , wie einen Stern am Nachthimmel bis zu einem Blitz erkennen. Um sich an eine große Bandbreite von Leuchtdichten anzupassen, spielen verschiedene Adaptationsprozesse im Auge eine Rolle.

Adaptation erfolgt sowohl auf Pupillen- als auch auf Netzhautebene. Beteiligt sind zusätzlich auch neuronale Prozesse. Die Iris ist die Blende des Auges und die Pupille die Blendenöffnung. Eine Zunahme der Leuchtdichte bewirkt eine reflexartige Verkleinerung der Pupille wodurch die Netzhaut vor Blendung geschützt wird. Die ins Auge einfallende Lichtmenge ist linear abhängig von der Pupillenfläche. Die Fläche, und damit verbunden die eintretende Lichtmenge, verringert sich um das 25 fache, wenn der Pupillendurchmesser von 7,5 auf 1,5 mm abnimmt. Die Verkleinerung der Pupille nach Lichtexposition beginnt nach etwa 0,2-0,5 s und dauert je nach Größe des Helligkeitssprungs zwischen 0,5 s bis über 1 s [Klinke et al. 2010].

Adaptation kann in beide Richtungen (Hell- Dunkel) erfolgen, wobei die Dunkeladaptation länger dauert. In einem Zeitbereich von 30-60 Minuten ist man üblicherweise vollständig dunkel-adaptiert [Silbernagl und Despopoulos 2003]. Dabei sind 2 Phasen nachweisbar. Die Erregbarkeit der Zapfen (photopisches Sehen am Tag) ist bis zum sogenannten Kohlrausch-Knick gegeben, der etwa nach 8-10 Minuten auftritt. Danach geht es zunehmend in skotopisches Sehen (Nachtsehen) durch Stäbchen über.

Die Helladaptation verläuft schneller als die Dunkeladaptation mit einem Soforteffekt durch die reflektorische Pupillenverengung und dem anschließenden Übergang vom Stäbchen- zum Zapfensehen, der einige Minuten in Anspruch nehmen kann.

Tabelle 1. Beispiele für Leuchtdichten. Aus SSK [2006]

Lichtquelle	Leuchtdichte in cd/m ²
sternklarer Nachthimmel	ca. 10 ⁻¹¹ ... 0,02
Fußgänger im Abblendlicht	0,05 ... 1
Straße mit künstlicher Beleuchtung	0,2 ... 5
Straßenmarkierungen (angeleuchtet)	3 ... 30
von Scheinwerfer beleuchtetes Verkehrszeichen	5 ... 100
Schriftzeichen auf einem PC-Schirm	10 ... 200
Fußgänger bei Tag	20... 200
weißes Papier (Beleuchtungsstärke 5 - 500 lx)	2,5 ... 250
Selbstleuchtende Verkehrszeichen	30 ... 300
Wand, Decke (bei Innenbeleuchtung 100 - 500 lx)	1 ... 500
Fahrzeug bei Tag	50 ... 500
rotes Begrenzungslicht an Fahrzeug	500
Fahrbahnoberfläche bei Tag	10 ² ... 10 ³
Vollmond	2,5·10 ³ ... 5·10 ³
Bedeckter Himmel (Tag)	2·10 ³ ... 8·10 ³
Verkehrsampel	2·10 ³ ... 8·10 ³
von der Sonne beschienene Wolken	10 ⁴
Leuchtstofflampen	3·10 ³ ... 3·10 ⁴
Blauer Himmel	5·10 ³ ... 3·10 ⁴
Abblendlicht eines Fahrzeugs (ohne direkten Blick in Leuchtquelle)	10 ⁴ ... 3·10 ⁴
Kompaktleuchtstofflampen	9·10 ³ ... 7·10 ⁴
Kerzenflamme	6·10 ³ ... 8·10 ⁴
Hg-Dampf-Hochdrucklampen	7·10 ⁴ ... 1·10 ⁵
Glühlampe, matt (25 - 500 W)	10 ⁴ ... 5·10 ⁵
Weißlicht-LED	3·10 ⁵ ... 3·10 ⁶
Na-Dampf-Niederdrucklampe	7·10 ⁴ ... 6,2·10 ⁶
Na-Dampf-Hochdrucklampe	10 ⁵ ... 6,5·10 ⁶
Halogenlampe	8·10 ⁶ ... 1,6·10 ⁷
Glühlampe, Wolframwendel	10 ⁶ ... 5·10 ⁷
Xe-Hg-Autoscheinwerfer	6,5·10 ⁷
Schweißen (Al-MIG; 100AX18V)	8·10 ⁷
Halogen-Metaldampf-Hochdrucklampe	10 ⁵ ... 4·10 ⁸
Fotoblitzlampe	1,6·10 ⁸ ... 4·10 ⁸
Xe-Hochdrucklampe	1,5·10 ⁸ ... 9,5·10 ⁸
Keramiklampe	3·10 ⁸ ... 10 ⁹
„Schwarz-Körper“- Strahler 6500K	3·10 ⁹
Kohlebogenlampe	2·10 ⁸ ... 1,8·10 ⁹
Sonne (je nach Sonnenstand)	6·10 ⁵ ... 2,25·10 ⁹
Xenon-Kurzbogenlampe (Hochdrucklampe)	2·10 ⁵ ... 5·10 ⁹
Blitz (Gewitter)	10 ¹¹

2.4 Visus

Die Sehschärfe ist definiert als Kehrwert des in Winkelminuten angegebenen räumlichen Auflösungsvermögens des Auges [Schmidt und Schaible 2006].

Visus = $1/\alpha$ (Winkelminute⁻¹)

[1]

Wenn zwei unter einem Sehwinkel von 1 Winkelminute (α) betrachtete Punkte getrennt wahrgenommen werden beträgt der Visus 1.

Die Sehschärfe ist in der Fovea, wo die Zapfendichte am höchsten ist, am größten. Sie nimmt zur Peripherie der Netzhaut hin ab. Parafoveal ist die Stäbchendichte am höchsten. Zur Peripherie nehmen die Sensordichte ab und der Sensorabstand zu, was mit einer geringeren Sehschärfe assoziiert ist.

Der Visus hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören: Kontrast, Brechungsfehler (Unschärfe auf der Retina bei Fehlsichtigkeit) des Auges, Pupillengröße (Sehschärfe bei kleinem Durchmesser größer), Umgebungsbeleuchtung (Sehschärfe nimmt mit abnehmender Beleuchtung ab), Dauer der Bestrahlung des anvisierten Objektes, Projektionsort auf der Retina, Adaptationszustand des Auges (Sehschärfe optimal bei Helladaptation) sowie Augenbewegungen.

2.5 Sehen im Alter

Im Alter kommt es zu charakteristischen Veränderungen in der Sehleistung. Die Hellempfindlichkeit nimmt (möglicherweise aufgrund einer Abnahme der parafovealen Stäbchen im Alter) insbesondere im skotopischen Bereich (Nachtsehen) ab. Das kann dazu führen, dass sich ältere Menschen in dunkler Umgebung u.U. schlechter orientieren können [Mainster und Sparrow 2003; Curcio et al. 1993].

Außerdem kann nach einem „sonnenreichen“ Tag die Dunkeladaptation verzögert sein und u.U. die volle Nachtsichtempfindlichkeit für mehrere Stunden nicht erreicht werden [Reidenbach et al. 2008].

Im Alter steigt, aufgrund von Trübungen im Bereich der brechenden Medien (v.a. Linse bei Katarakt, aber auch Hornhaut und Glaskörper), auch die Blendungsempfindlichkeit und die Sehleistung nimmt bei schlechter Beleuchtung ab. Außerdem ist häufig die Kontrast- und Unterschiedsempfindlichkeit herabgesetzt.

2.6 Blendung

Die Informationen für dieses Kapitel wurden vor allem aus folgenden Publikationen entnommen und adaptiert:

- Reidenbach HD, Dollinger K, Ott G, Janssen M, Brose M [2008] Blendung durch optische Strahlungsquellen. Projektnummer: F 2185. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Dortmund-Berlin-Dresden.
- SSK [2006]: 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.
- Wittlich M [2010] Blendung - Theoretischer Hintergrund. Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der DGUV. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA): Sankt Augustin. Mai 2010.

Zusätzlich wurden verschiedene Übersichtsarbeiten und wissenschaftliche Publikationen herangezogen.

2.6.1 Definition der Blendung

Es sind mehrere Definitionen für Blendung verfügbar, deren Kernaussage jedoch ähnlich ist. Blendung wird einerseits als ein Sehzustand definiert, 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 [SSK, 2006]. Eine andere Definition nach DIN EN 12665 [2011] ist „ein unangenehmer Sehzustand durch ungünstige Leuchtdichteverteilung oder zu hohe Kontraste“.

DIN 5340 definiert Blendung als eine durch zu hohe Leuchtdichte oder Leuchtdichteunterschiede ausgelöste visuelle Störimpfindung mit oder ohne einer nachweisbaren Minderung von Sehfunktionen [Reidenbach et al. 2008; DIN 1998].

Zu Blendung kommt es demzufolge bei zu großer absoluter Leuchtdichte, zu großer Leuchtdichteunterschiede oder aufgrund einer ungünstigen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld bzw. Leuchtdichten, die für den jeweiligen Adaptationszustand zu hoch sind. Daneben hat auch die Dauer der Einstrahlung in die Augen einen Einfluss. Weitere beeinflussende Faktoren sind die scheinbare Größe der Blendlichtquelle bzw. deren Raumwinkel sowie der Projektionsort der jeweiligen Blendlichtquelle auf der Netzhaut. Letzterer bezieht sich auf den Winkel zwischen Blendlichtquelle und Blickrichtung.

Blendung entsteht vor allem dann, wenn es zu einer Diskrepanz zwischen der Helligkeit bzw. Leuchtdichte der Objekte im Gesichtsfeld und dem Adaptationszustand des Auges kommt. Daher ist der Effekt der Blendung in der Nacht stärker als am Tag.

Der Raumwinkel aus dem die Lichtquelle gesehen wird, hat ebenfalls einen Einfluss auf die Blendung [Wittlich 2010]. Der Grund dafür ist, dass sich die Augen reflexartig zur Quelle der Blendung hinwenden, wenn das Licht an Randbezirken der Netzhaut abgebildet wird. Hier befinden sich v.a. die Licht- und blendungsempfindlichen Stäbchenzellen.

2.6.2 Arten der Blendung

1925 wurde Blendung als „Licht, das in das Auge eintritt aber nicht zur Bildgebung beiträgt, da es zu hell oder zu variabel ist“ definiert [Luckiesh und Holladay 1925] und 1929 wurde erstmalig zwischen physiologischer und psychologischer Blendung unterschieden [Stiles 1929].

Physiologische Blendung verursacht eine messbare Beeinträchtigung der Sehleistung während psychologische Blendung nicht mit einer solchen Beeinträchtigung einhergehen muss, aber den Drang zum Abwenden des Blickes auslöst [Schreuder 2008; Vos 2003b]. Diese beiden Formen können gleichzeitig oder unabhängig voneinander auftreten [Schreuder 2008]. (Hinsichtlich der Problematik dieser Begriffe siehe weiter unten.)

Auf Vos (1999) geht eine Einteilung in acht Typen von Blendung zurück. Blitzverblindung (ein vorübergehender Zustand kompletter Ausbleichung retinaler Photopigmente durch Exposition gegenüber einer extrem hellen Lichtquelle z.B. einer nuklearen Explosion), paralyisierende Blendung (ein Zustand des Einfrierens in der Bewegung durch plötzliche Exposition gegenüber einer hellen Lichtquelle), Blendung mit retinaler Schädigung (Exposition gegenüber Licht, das geeignet ist, die Netzhaut zu schädigen), Ablenkungsblendung (verursacht durch raschen Wechsel zwischen hellen und dunklen Phasen), Sättigungsblendung (tritt auf, wenn ein großer Teil des Gesichtsfelds eine hohe Leuchtdichte aufweist), Adaptationsblendung (tritt auf, wenn die Umgebungsleuchtdichte hoch im

Verhältnis zum Adaptationszustand des Auges ist), Streulichtblendung (tritt ein, wenn durch Streulicht die optischen Medien aufgehellt werden, sodass die Diskriminationsleistung abnimmt) und Unbehaglichkeitsblendung (tritt ein durch – gegenüber der Sehaufgabe – zu große Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld). Im deutschen Sprachraum sind andere Einteilungen gebräuchlich, die im Folgenden näher erläutert werden. Die häufige Unterscheidung zwischen physiologischer und psychologischer Blendung halten wir wegen der falschen Interpretationen, die dabei nahegelegt werden, für wenig geeignet. Physiologische Blendung ist dann gegeben, wenn die Sehleistung messbar abnimmt, während psychologische Blendung eine Abwendungsreaktion auslöst, aber nicht notwendig eine Beeinträchtigung der Sehleistung auftritt. Dabei handelt es sich bei physiologischer Blendung keineswegs um eine Blendung, die keine Schädigung nach sich ziehen kann (wie die Bezeichnung ‚physiologisch‘ suggeriert), und bei psychologischer Blendung keineswegs um ein bloß subjektives Phänomen.

Adaptationsblendung

Die Adaptationsblendung ist das Resultat einer Störung des Adaptationszustandes. Adaptionsblendung beschreibt einen temporären Zustand inadäquater Adaption [Luckiesh und Holladay 1925; Vos 2003b; Bell et al. 1922]. Diese Art der Blendung entsteht, wenn die Adaptation mit einer plötzlichen und starken Leuchtdichteänderung nicht mithalten kann. Besonders ausgeprägt ist sie bei dunkel adaptierten Augen. Beispiele für Adaptationsblendung sind: Das Einschalten des Lichts im dunklen Schlafzimmer oder das Verlassen eines dunklen Tunnels oder z.B. Kinos an einem hellen Tag.

Relativblendungen

Zu Relativblendungen kommt es, wenn in dem betroffenen Gebiet der Netzhaut eine lokal begrenzte Störung der Adaptation auftritt. Dies kann der Fall sein, wenn im Gesichtsfeld zu große Lichtdichteunterschiede auftreten. In dem betroffenen Gebiet kann es zu einer Veränderung der Unterschiedsempfindlichkeit als auch einer Störung des Farbsehens und der Sehschärfe kommen. Durch die lokale Störung mit veränderter Erregbarkeit einzelner Sehzellen adaptiert nur ein Teil der Fotorezeptoren. Dies kann zur Folge haben, dass die Zurückbildung der Blendwirkung eine relativ lange Zeit in Anspruch nehmen kann [Reidenbach et al. 2008]. Auch eine Behinderung des Sehvermögens kann auftreten. Relativblendung ist vor allem ein Problem bei Autofahrten in der Nacht durch entgegenkommende Fahrzeugscheinwerfer. Eine u.U. zu lange Regenerationsphase nach einem Blick in einen Scheinwerfer geht mit einem höheren Gefahrenpotenzial einher.

Absolutblendung

Von Absolutblendung spricht man, wenn die Adaptionsfähigkeit des Auges aufgrund zu hoher Leuchtdichtewerte permanent überschritten wird. Darunter wird eine Blendung durch eine zu hohe absolute Leuchtdichte verstanden, so dass eine Adaptation nicht möglich ist. Die Absolutblendung ist im Extremfall auch mit einem gesteigerten Tränenfluss verbunden.

Absolutblendung tritt in/ab einem Bereich von 10^4 cd/m² auf, da ab 10^4 cd/m² die Adaptation nicht mehr ausreicht [SSK 2006]. Daher muss ab dieser Leuchtdichte mit einer zunehmenden direkten (thermischen) Gefährdung des Auges gerechnet werden. Absolutblendung tritt z.B. ein, wenn man direkt in die Sonne blickt. Hohe Leuchtdichten bewirken auch das Auslösen von Schutzreflexen, wie den Lidschluss oder das Wegneigen des Kopfes.

Direkt- und indirekte Blendung

Eine Direktblendung liegt vor, wenn eine Blendung durch die leuchtende Fläche einer Lichtquelle selbst hervorgerufen wird. Die Indirekte Blendung wird durch spiegelnde Oberflächen (z.B. Solaranlagen) verursacht, die von einer Lichtquelle angestrahlt werden.

In- und Umfeldblendung

Befindet sich die blendende Lichtquelle in der eigenen Blickrichtung wird die Blendung Infeldblendung genannt, während bei deren Lage am Rand bzw. außerhalb des Gesichtsfeldes diese als Umfeldblendung bezeichnet wird.

Simultan- und Sukzessivblendung

Unter Simultanblendung versteht man jene Blendung, die zeitgleich mit der Einwirkung des blendenden Agens erfolgt. Im Anschluss an die direkte Blendzeit tritt die sogenannte Sukzessivblendung auf, die u.U. mit Nachbildern assoziiert ist.

Streulichtblendung (physiologische Blendung)

Die Ursache für physiologische Blendung liegt in einer Verminderung des Kontrasts auf der Retina durch intraokulare Streuung von Licht [Voss 2003b, 1984, 1999; van den Berg 1995; Franssen und Coppens 2007]. Durch die unterschiedliche Kontrastempfindlichkeit von Zapfen und Stäbchen ist die Auswirkung in Dunkelheit ausgeprägter als bei Tageslicht [Pokorny und Smith 2006; Schreuder 2008; Wordenweber et al. 2010; Smith 2003]. Es besteht eine Abhängigkeit der Blendwirkung von der Leuchtdichte und dem Einfallswinkel des Lichtstrahls sowie vom Alter und der Pigmentierung der Iris. Diese Faktoren werden in der Formel (siehe unten) der CIE berücksichtigt [Voss 2003b, 1999; Franssen und Coppens 2007].

In Abhängigkeit von der Größe der die Streuung verursachenden Partikel kommt es zu Rayleigh-, Rayleigh-Gans- oder Mie-Typ Streuung [Minnaert 1974]. Partikel kleiner als die Wellenlänge von sichtbarem Licht verursachen eine ungerichtete Streuung, die umso stärker auftritt je kürzer die Wellenlänge ist (Rayleigh-Typ). Partikel größer als die Wellenlänge verursachen eine vorwärts gerichtete Streuung (Mie-Typ), unabhängig von der Wellenlänge. [Minnaert 1974].

Im Auge des alternden Menschen tritt Streuung vom Rayleigh-Typ, verursacht durch Kornea und Linse und Streuung vom Mie-Typ, verursacht durch Iris, Retina, Choroidea und Skleren auf, wobei die Zunahme der Streuung hauptsächlich durch große (1-4 μm) Partikel in der Linse hervorgerufen wird [Vos 1984, 1999; van den Berg et al. 2007; Costello et al. 2010; Komatsu et al. 2003; Matsushima et al. 2011].

Die Punktspreizfunktion beschreibt die Abbildung einer idealisierten punktförmigen Lichtquelle auf der Retina. Hierbei sind Aberrationen im optischen System für Abweichungen im Bereich von 0.1° und Streuphänomene für den Bereich ab 1° als ursächlich anzusehen [van den Berg 1995; Franssen und Coppens 2007; Pinero et al. 2010].

Der additive Einfluss von optischen Aberrationen und neuronaler Signalverarbeitung vermindert die Aussagekraft dieser Untersuchungstechnik bezüglich physiologischer Blendung [Vos 2003b, 1984, 1999; Franssen und Coppens 2007].

Streulichtblendung entsteht wie gesagt durch Streuung des Lichts in den Augenmedien bzw. an deren Grenzflächen [Reidenbach et al. 2008].

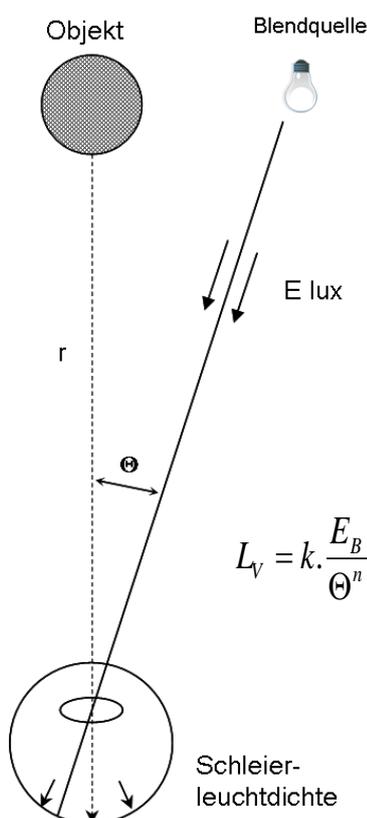
Dabei kommt es zu einer messbaren Herabsetzung der Sehleistung bzw. des Sehvermögens. Gründe dafür können sein: eine Minderung der Unterschiedsempfindlichkeit, der Sehschärfe, des Form- bzw. Gestalterkennungsvermögens, der Tiefenwahrnehmung sowie der Wahrnehmungsgeschwindigkeit.

Die Unterschiedsempfindlichkeit ist die Feinheit der Auffassung von Empfindungsunterschieden. Sie wird auch als Reziprokwert des Schwellenkontrastes bezeichnet. Der Schwellenkontrast ist dabei der geringste wahrnehmbare Kontrast. Nach dem Weberschen Gesetz ist die relative Unterschiedsempfindlichkeit konstant, d.h. $K = (L_o - L_u) / L_u$. Dabei entspricht K der Weber Konstanten, L_u der Umgebungsleuchtdichte, L_o der Objektleuchtdichte.

Die Unterschiedsempfindlichkeit hängt im Wesentlichen von der Größe des Sehobjektes, von der mittleren Leuchtdichte, der Größe des Umfeldes und von der Betrachtungsdauer ab. Die Unterschiedsempfindlichkeit ist grundsätzlich die Fähigkeit des Auges Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen. Dabei wurde beschrieben, dass ab einer Verschlechterung der Unterschiedsschwelle um etwa 2 % auch eine Verminderung der Empfindlichkeit zur Formenerkennung beginnt [Hartmann 1958]. Die Unterschiedsempfindlichkeit wird häufig allein zur Beschreibung einer Blendwirkung herangezogen [Reidenbach et al. 2008].

Die Verminderung des Sehvermögens kommt insbesondere durch Streulicht an der Hornhaut, Linse und am Glaskörper sowie an deren Grenzflächen zustande.

Infolge der Aufhellung kommt es zu einer Verminderung der Erkennbarkeit vor allem kontrastarmer Objekte. Die betroffene Person bekommt den Eindruck, dass sich ein Schleier vor die Augen legt oder sie sich im Nebel befindet. In diesem Zusammenhang ist die Schleierleuchtdichte relevant. Sie wird mit der sogenannten Stiles-Holladay Formel berechnet (s. dazu auch Abb.1) [Reidenbach et al. 2008; Wittlich 2010; Holladay 1926; Stiles und Crawford 1937].



L_v ist die durch Streulicht bewirkte Leuchtdichte. E_B ist die Beleuchtungsstärke in Lux, die von einer blendenden Lichtquelle auf der Hornhautebene verursacht wird; Θ (Grad) ist der Winkel zwischen Blickrichtung und Blendlichtquelle, k eine dimensionslose Konstante (ungefähr 10 für $\Theta > 5^\circ$). n ist ein Exponent (ungefähr 2 für $\Theta > 2^\circ$ und $n \sim 2,3 - 0,7 \times \log\Theta$ für $0,2^\circ < \Theta < 2^\circ$) [Mace et al. 2001].

Diese Formel gilt vor allem für Winkelgrade größer als 4-5° und kleiner als 60° (Schreuder 1999). Bei vielen Gegebenheiten ist der Winkel kleiner als 4°, z.B. im Straßenverkehr (Gegenlicht, Eintritt in den Tunnel, etc.)

Abbildung 1. Blendung durch Streulicht in Abhängigkeit vom Winkel der Blendquelle zur Sehachse (nach [Murray2007]).

Die Blendung fällt demnach umso stärker aus je näher die Blendlichtquelle an der Fixierungsachse, sprich der Blickrichtung, liegt.

Die angegebene Formel gilt für junge Personen. Mit zunehmendem Alter nimmt die Streuung in den optischen Medien des Auges zu. Bei Winkeln über etwa 30° wird auch die Irisfarbe bedeutsam. Menschen mit blauen Augen sind stärker betroffen als Personen mit braunen Augen (Vos 1999; CIE 2002). Für große Flächen der Blendquelle muss die Formel über die Fläche integriert werden.

Die Abnahme der Sehleistung kann direkt aus den Formeln der Unterschiedsempfindlichkeit durch Einsetzen der Streulichtleuchtdichte in die Formel vorhergesagt werden. Für die Blendung selbst sind wahrscheinlich Sättigungseffekte in den Sehpigmenten mit Ausbleichvorgängen verantwortlich [Reidenbach et al 2008].

Streulichtblendung hängt normalerweise nicht von der Lichtfarbe ab [Wittlich 2010; Hartmann 1958].

Streulicht muss nicht die einzige Ursache für Symptome durch Blendung sein. Es ist möglich, dass bei kleinen Winkeln eine neuronale Hemmung auf Netzhautebene zur Symptomatik beiträgt [Vos 2003a].

Unbehaglichkeitsblendung (psychologische Blendung)

Psychologische Blendung wird durch Licht hervorgerufen, dessen Leuchtdichte individuell als zu hoch empfunden wird, abhängig von der Person, dem Ort und dem Zeitpunkt.

Die Schwelle und ebenso die Symptome (Blinzeln, Tränen, Blickabwendung, Schielen) dieser natürlichen Reaktion auf ungewöhnliche Lichtsituationen sind individuell sehr unterschiedlich [Boyce 2009; Vos 2003b; Narisada und Schreuder 2004; Fekete et al. 2010; Bullough 2009].

Eine Sonderform stellt die Photophobie dar, die als übersteigerte Reaktion auf Lichtsituationen angesehen wird und u.a. mit Trauma, okulärer Infektion, Migräne oder Trigeminusneuralgie vergesellschaftet ist [Lebensohn 1951; Miller et al. 2004].

Psychologische Blendung wird durch die Anzahl und Helligkeit der Blendquellen und den Blickwinkel beeinflusst, nicht jedoch durch das Alter des Individuums [Wordenweber et al. 2010; Boyce 2009; Schreuder 1999; Narisada und Schreuder 2004; Bourassa und Wirtschafter 1966]. Allerdings spielen Unterschiede in der Verarbeitung eine Rolle und eine große Bedeutung kommt auch dem Thalamus mit seinen Projektionen zu somatosensorischen und visuellen Zentren zu. Dies spiegelt sich in der Tatsache wider, dass Patienten mit Migräne während einer Schmerzattacke eine messbar geringere Schwelle für Blendung aufweisen [Turner und Mainster 2008; Brown et al. 2010; Amini et al. 2006; Nosedo und Burstein 2011; Howarth et al. 1993; Nosedo et al. 2010; Main et al. 2000; Cummings und Gittinger 1981; DuPasquier et al. 2000].

Die größte Blendwirkung tritt bei Wellenlängen zwischen 510-550 nm und einem Einfallswinkel bis 5° außerhalb der Sehachse auf [Fekete et al. 2010; Bullough 2009; Stringham et al. 2003].

Das Fechner Paradoxon gibt einen Hinweis darauf, dass Blendung nicht alleine durch die Leuchtdichte bestimmt wird, da bei Betrachtung eines Bildes und Abdecken eines Auges mit einem Neutraldichtefilter die Helligkeit beim Schließen des abgedeckten Auges im kontralateralen Auge

subjektiv zunimmt, obwohl die absolute Lichtmenge sinkt [Wirtschaftler und Bourassa 1966; Plainis et al. 2006; Hopkinson 1957; Lennie et al. 1993; Rea et al. 2011].

2.6.3 Blendungsbewertung

2.6.3.1 Vorhersage der Wahrnehmungsstörung

Die physiologische Blendung wird als umso geringer eingeschätzt, je besser das jeweilige Sehobjekt, dessen Wahrnehmung durch die Blendquelle gestört wird, sichtbar ist. Die Sichtbarkeit des Objekts hängt dabei direkt mit dem fotometrischen Kontrast zusammen. Dieser ist wichtig für die Erkennung von Details. Bei dunklerer Umgebung ist daher ein höherer Kontrast notwendig, um Objekte zu erkennen. Der Kontrast verringert sich außerdem mit zunehmender Streulichtleuchtdichte. Im Extremfall (dunklere Umgebung und hohe Streulichtdichte durch Blendung) ist das Objekt evtl. gar nicht zu sehen. Die physiologische Blendung wird außerdem als umso stärker wahrgenommen, je näher die Blendquelle der eigenen Blickrichtung liegt (s. oben). Wenn mehrere blendende Lichtquellen im Gesichtsfeld liegen, kommt es zu einer Summation hinsichtlich der Blendwirkung.

Die Blendempfindlichkeit ist die Verringerung der Sehleistung und resultiert v.a. durch das Ausmaß der Schleierleuchtdichte aufgrund von retinalem Streulicht durch blendende Lichtquellen außerhalb des Fixationspunktes [Reidenbach et al. 2008] (s. auch Abb. 1). Die Beeinträchtigung der Sehleistung fällt stärker aus, wenn die Leuchtdichte der Umgebung relativ gering ist, also v.a. bei Dämmerung und in der Nacht [Reidenbach et al. 2008]. Die Beeinträchtigung der Sehfunktionen wird demnach bei hoher Blendlichtquelle und geringer Helligkeit des Sehobjektes stärker ausfallen. Auch ein kleiner Winkel zwischen Sehobjekt und Blendlichtquelle ist hinsichtlich Sehleistung ungünstig zu bewerten.

Der Blendungsgrad bzw. die durch die Blendung verursachte Reduktion der Sehfunktionen, kann zur physiologischen Blendungsbewertung herangezogen werden [Reidenbach et al. 2008]. Der Blendungsgrad definiert sich als der Quotient der Kontrastempfindlichkeit ohne und mit Blendung (K_0 bzw. K_{Bl}) [Reidenbach et al. 2008].

$$n_{BL} = \frac{K_{Bl}}{K_0} \quad [2]$$

Der Kontrast ohne Blendung (s. auch oben) definiert sich dabei als

$$K = \frac{L_O - L_U}{L_U} = \frac{\Delta L}{L_U} \quad [3]$$

Dabei steht L_O für die Leuchtdichte des Sehobjektes und L_U für die Leuchtdichte der Umgebung bzw. des Hintergrunds.

Bei einer Blendung reduziert die Schleierleuchtdichte L_V den Kontrast, gemäß der Formel:

$$K_n = \frac{(L_O + L_V) - (L_U + L_V)}{L_U + L_V} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_V} = K \cdot \frac{L_U}{L_U + L_V} \quad [4]$$

Steigt also die Schleierleuchtdichte an, so kommt es zu einer Abnahme des Kontrastes, was wiederum bewirkt, dass das Objekt schlechter gesehen wird.

Ältere Menschen sind aufgrund bereits bestehender Beeinträchtigungen (Trübungen) in gewissen Teilen des Auges, wie z.B. der Linse beim Katarakt, für physiologische Blendung empfindlicher als jüngere. SeniorInnen können daher eine deutlich gesteigerte Blendungsempfindlichkeit aufweisen.

Ab dem 60. Lebensjahr nimmt die Sehbeeinträchtigung durch eine Blendung deutlich zu [Aslam et al. 2007; L'Eclairage 2002].

Nicht nur die Größe der Pupille sondern auch die Irisfarbe hat einen Einfluss auf die Einstrahlung von Licht auf die Netzhaut. Eine helle, z. B. blaue, Iris lässt deutlich mehr Licht durch als eine dunkler gefärbte, so dass es bei Person mit blauen Augen auch bei höherem Blendlichtwinkel zu einer nennenswerten Blendung kommen kann.

Unter Berücksichtigung des Alters und der Augenfarbe lässt sich die verallgemeinerte äquivalente Schleierleuchtdichte bei physiologischer Blendung im Bereich von 0,1 Grad bis 100 Grad laut CIE [2002] wie folgt angeben (aus [Reidenbach et al. 2008]):

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

Dabei steht: Θ für den Blendwinkel, E_B für Beleuchtungsstärke in Lux, p_i für Pigmentierung der Augen (Werte zwischen 0 für dunkle Augen und 1,2 für sehr helle Augen) an.

Eine vereinfachte Variante wurde von der CIE auch für kleinere Winkel in einem Bereich $0,1^\circ < \Theta < 30^\circ$ angegeben [CIE 2002], vgl. [Vos 2003b].

$$L_{eq,overall,kleineWinkel} = E_B \cdot \left\{ \frac{10}{\Theta^3} + \left[\frac{5}{\Theta^2} \right] \cdot \left\langle 1 + \left(\frac{\text{Alter}}{62,5} \right)^4 \right\rangle \right\} \quad [6]$$

Die Schleierleuchtdichte ist auch bei Erkrankungen der lichtbrechenden Medien (insbesondere der Kornea und der Linse) erhöht. Auch geringfügige Beeinträchtigungen der Hornhaut, wie sie bei Kontaktlinsenträgern gelegentlich vorkommen, können die Streuung stark erhöhen (Mitchell & Elliott 1991).

Die Angabe von Schwellen- bzw. Grenzwerten zur Blendung ist aufgrund verschiedener Einflussfaktoren schwierig. Pulling und Mitarbeiter z.B. beschrieben als Schwelle der Blendung diejenige Helligkeit beider Frontscheinwerfer von entgegenkommenden Fahrzeugen, bei der potenzielle Gefährdungen auf der Straße nicht abgeschätzt werden können [Reidenbach et al. 2008; Pulling et al. 1980].

Diesbezüglich relevant könnte auch sein, dass in der Normung zum Augenschutz eine Leuchtdichte von 730 cd/m^2 für eine noch „annehmbare“, d. h. blendungsfreie Betrachtung einer Lichtquelle angesetzt wurde und insbesondere im Zusammenhang mit Schweißerschutzfiltern empfohlen wird [Sutter 1999/2002; SSK 2006].

2.6.3.2 Vorhersage der Unbehaglichkeit

Tabelle 2: Zusammenfassung der in diesem Abschnitt verwendeten Bezeichnungen

Formelsymbol/ Akronym	Bedeutung
BS	Blendungswahrnehmung für eine einzelne Quelle
CC	Anteil der Blendquellenfläche an der Deckenfläche
E_d	Direkte Beleuchtungsstärke durch die Blendquelle in der Augenebene (lx)
E_i	Indirekte Beleuchtungsstärke durch die Blendquelle in der Augenebene (lx)
E_v	Vertikale Beleuchtungsstärke in der Augenebene (lx)
F	Mittlere Gesichtsfeldleuchtdichte (einschließlich Blendquelle) (cd/m^2)
L_b	Hintergrundleuchtdichte ohne Blendquelle (cd/m^2)
L_s	Leuchtdichte der Quelle S (cd/m^2)
n	Anzahl Blendquellen
P	Guths Positionsindex
P_m	Modifizierter Positionsindex (auch für Blendquellen im unteren Halbraum)
TBW	Tageslichtblendungswahrscheinlichkeit
UBR	Universelles Blendungsrating
UBR _G	Universelles Blendungsrating für große (>1,5 m ²) Flächen
UR	Unbehaglichkeitsrating
VBW%	Visuelle Behaglichkeitswahrscheinlichkeit (in %)
W_s	Blendwinkel der Quelle S (sr)

Außerdem können die verschiedenen Indices der Unbehaglichkeitsblendung („psychologische Blendung“) herangezogen werden. Diese wurden insbesondere zur Beurteilung von Beleuchtungssystemen entwickelt, aber sie können mit gewissen Korrekturen auch zur Beurteilung größerer Blendquellen, als Leuchtkörper normalerweise darstellen, eingesetzt werden.

Es sind verschiedene solche Indices entwickelt worden. Die visuelle Behaglichkeitswahrscheinlichkeit (VCP, hier als VBW bezeichnet) wurde in Nordamerika verwendet. Sie beruht auf den Untersuchungen von Guth (1963). Es wird zuerst die Blendungswahrnehmung für jede Quelle ermittelt, diese dann zu einem Unbehaglichkeitsrating zusammengefasst. Dieses Rating wird dann in die visuelle Behaglichkeitswahrscheinlichkeit umgewandelt, die als der erwartete Anteil der Betrachter, die die Beleuchtungssituation akzeptabel finden, definiert ist.

Für eine einzelne Blendquelle wird die Blendungswahrnehmung wie folgt ermittelt:

$$BS = \frac{L_s \cdot (20,4 \cdot W_s + 1,52 \cdot W_s^{0,2} - 0,075)}{2 \cdot P \cdot F^{0,44}} \quad [7]$$

Dabei ist L_s die Leuchtdichte der Quelle (cd/m^2), W_s der Blendwinkel (sr), P ist Guths Positionsindex (gibt einen Wert für die Position der Blendquelle hinsichtlich der Blickrichtung an) und F ist die mittlere Leuchtdichte des Gesichtsfelds (cd/m^2 inklusive der Blendquelle).

Guths Positionsindex wird wie folgt berechnet:

$$P = \exp[(35,2 - 0,31889\alpha - 1,22e^{-2\alpha/9})10^{-3}\beta + (21 + 0,26667\alpha - 0,002936\alpha^2)10^{-5}\beta^2] \quad [8]$$

Dabei bezeichnet α den Winkel zwischen der vertikalen Ebene, die die Blendquelle enthält und der Blickrichtung und β den Winkel zwischen der Linie vom Betrachter zur Blendquelle und der Blickrichtung (beide in Winkelgraden).

Da Guths Positionsindex nur für Quellen, die sich im oberen Halbraum befinden, entwickelt wurde, sind Anpassungen erforderlich, wenn sich die Blendquelle im unteren Halbraum befindet (diese üben einen stärkeren Blendeffekt aus). Eine solche Erweiterung wurde von Kim und Kim (2010) entwickelt. Daraus ergibt sich der modifizierte Positionsindex:

$$P_m = \exp[(\beta - (-0,000005\alpha^3 + 0,0009\alpha^2 + 0,0556\alpha + 13,573)) * (-0,00001\alpha^3 + 0,0016\alpha^2 + 0,1037\alpha + 13,413)^{-1}] \quad [9]$$

Die BS-Werte für verschiedene Blendquellen im Gesichtsfeld werden dann zum Unbehaglichkeitsrating (UR) zusammengefasst:

$$UR = (\sum BS_i)^{\frac{1}{n^{0,0914}}} \quad [10]$$

Dabei bezeichnen die BS_i die Werte der Blendungswahrnehmung für die n verschiedenen Blendquellen.

Der UR-Wert kann dann gemäß folgender Formel in die visuelle Behaglichkeitswahrscheinlichkeit (VBW) umgerechnet werden.

$$VBW\% = \frac{100}{1 + \left(\frac{UR}{119}\right)^{2,2671}} \quad [11]$$

Eine VBW von 70% oder höher wird meist als akzeptabel angesehen. Das Hauptproblem mit diesem System liegt darin, dass es zur Beurteilung von Beleuchtungsanlagen entwickelt wurde und für andere Anwendungen nicht ohne weiteres übernommen werden kann. Dasselbe gilt für den britischen Blendungsindex, das Europäische Blendungsratingverfahren und ähnliche Systeme. Da diese Systeme nur schwach korrelierende Ergebnisse für einen weiten Bereich unterschiedlicher Beleuchtungsanlagen erbrachten, bemühte man sich um eine Vereinheitlichung. Eine mathematische Vereinheitlichung wurde mit dem universellen Blendungsrating (UBR) erreicht (diese von Sorensen 1987 entwickelte Formel passt die verschiedenen Systeme mathematisch optimal an und löst das Problem mehrerer Blendungsquellen, die einander anliegen, was bei den früheren Methoden gegenüber einer Quelle, die die gleiche Fläche einnimmt, unterschiedliche Ratings ergab).

$$UBR = 8 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{4 \cdot L_b}\right) \sum \frac{L_s^2 \cdot W_s}{P^2} \quad [12]$$

Dabei sind L_s und W_s wie oben definiert. L_b ist die Hintergrundleuchtdichte ohne die Blendquellen (entspricht der Beleuchtungsstärke der indirekten Beleuchtung in der Augenebene des Betrachters dividiert durch π).

Für große Blendquellen von mehr als 1,5 m² hat die CIE (2002) eine Anpassung vorgeschlagen:

$$UBR_G = UBR + \left(1,18 - \frac{0,18}{CC}\right) \cdot 8 \cdot \log_{10}\left(2,55 \cdot \frac{1 + \frac{E_d}{220}}{1 + \frac{E_d}{E_i}}\right) \quad [13]$$

Dabei bezeichnet CC den Anteil der durch die Blendquelle eingenommene Deckenfläche, E_d die direkte Beleuchtungsstärke in der Augenebene durch die Blendquelle (lx) und E_i die indirekte Beleuchtungsstärke der Blendquelle (lx). Diese Formel war für große Deckenpaneele und ähnliche Installationen gedacht, kann aber für andere Anwendungen entsprechend angepasst werden.

Das Grundproblem der Berechnung und Beurteilung der Unbehaglichkeitsblendung („psychologischen Blendung“) liegt aber darin, dass der Mechanismus nur unzulänglich bekannt ist und die verschiedenen Maße auf den empirischen Zusammenhängen zwischen Ratings von Betrachtern und den Charakteristika der Beleuchtungsinstallationen beruhen. Andere Systeme mit den gleichen Problemen wurden für Straßenbeleuchtungssysteme entwickelt. Diese sind aber auf die gegenständliche Thematik nicht anwendbar.

Eine eher geeignete Methode stellen Verfahren dar, die zur Beurteilung von Gebäuden hinsichtlich ihrer geographischen Ausrichtung und ähnliche Anwendungen entwickelt wurden. Sie basieren auf ähnlichen Grundlagen sind jedoch speziell für Tageslicht geeignet. Die von Wienold und Christoffersen (2006) vorgestellte Tageslichtblendungswahrscheinlichkeit (TBW) scheint für den Zweck der Vorhersage der Blendung durch direkt oder indirekt in Gebäude einstrahlende Quellen besonders geeignet.

$$TBW = 5,87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 0,918 \cdot \log_{10} \left(1 + \sum \frac{L_s^2 \cdot W_s}{E_v^{1,87} \cdot P^2} \right) + 0,16 \quad [14]$$

Dabei bezeichnet E_v die vertikale Beleuchtungsstärke in der Augenebene (lx). Ein TBW über 0,45 wird als unerträglich angesehen.

Tabelle 3. Blendungsarten, Untersuchungsmöglichkeiten und Gegenmaßnahmen

Art der Blendung	Mechanismus	Untersuchung	Gegenmaßnahmen
Physiologische Blendung (Streulichtblendung)	Intraokuläres Streulicht vermindert den retinalen Kontrast	Klinische Tests: Kontrastsensitivitäts- oder Visustests Streulicht-Tests: Kompensationsvergleichstest, Hartmann-Shack-Instrument	Neutralfilter/Graufilter führen zu keiner Kontrastanhebung auf der Retina und sind wirkungslos; Polarisationsfilter können Streulicht von horizontalen Flächen selektiv filtern und führen bei Tageslicht zu einer verbesserten Wahrnehmung
Psychologische Blendung (Unbehaglichkeitsblendung)	Lichtreize, die zu intensiv oder unterschiedlich sind werden als beeinträchtigend empfunden	Ratingskalen (z.B. de Boer Index) Algorithmische Berechnungen	Neutral-/Graufilter führen unter Tageslichtbedingungen zu einer Verminderung der Beeinträchtigung, unter schlechten Lichtbedingungen ist Sehleistung vermindert
Absolut- und Adaptionsblendung	Licht mit hoher Leuchtdichte überflutet die Retina	Ratingskalen (z.B. de Boer Index) Elektromyografie des M. orbicularis oculi	Neutral-/Graufilter führen unter Tageslichtbedingungen zu einer Verminderung der Beeinträchtigung, die Sehleistung unter schlechten Lichtbedingungen ist vermindert
Blitzblindheit, Photostress	Licht mit hoher Leuchtdichte führt zur Übererregung fokaler Bezirke der Retina	Bestimmung der Zeit, die zur Erholung der Fotopigmente nach Exposition durch eine helle Lichtquelle erforderlich ist	Gegenmaßnahmen existieren im militärischen Bereich, im zivilen Leben ist das fortgesetzte Starren in eine helle Lichtquelle eine unphysiologische Verhaltensweise

2.6.4 Klinische Untersuchung

Messungen des Auflösungsvermögens und der Kontrastempfindlichkeit stellen nach wie vor Standarduntersuchungstechniken dar, die, obwohl Aberrationen und neuronale Signalverarbeitung zu verzerrten Ergebnissen führen, gegenüber anderen Testverfahren (z.B. Harmann-Shack) bevorzugt werden [Aslam et al. 2007; Whitaker et al. 1994].

Psychologische Blendung, Absolutblendung und Photostress werden nicht mit klinischen Untersuchungstechniken bewertet.

2.6.5 Gegenmaßnahmen

Da die Spektren des Umgebungslichtes und der durch sie hervorgerufenen Blendung sehr ähnlich sind, kommt es beim Einsatz von getönten Filtern zu einer nichtselektiven Leuchtdichteverringering mit vermindertem retinalen Kontrast [Vos 2003a; Dickinson 1991; Steen et al. 1993; Stringham und Hammond 2007; Mainster und Turner 2011, 2010].

Unter Laborbedingungen ist es möglich, Blendlicht, das sich spektral von der Umgebungsbeleuchtung unterscheidet, selektiv mit einfachen Farbfiltern abzuschirmen [Hammond et al. 2010, 2009; Mainster und Turner 2013].

Unter Tageslichtbedingungen gibt es die Möglichkeit, durch Polarisationsfilter Streulicht von glatten horizontalen Flächen, das zu physiologischer Blendung führt, zu unterdrücken.

Durch eingefärbte oder Neutralfilter kann die Leuchtdichte reduziert und psychologische Blendung gemildert werden. Diese Verminderung der Leuchtdichte ist allerdings bei schlechten Lichtbedingungen kontraproduktiv [Mainster und Timberlake 2003; Mainster und Turner 2010; Mace et al. 2001].

Die Fähigkeit Teilgebiete der Retina an unterschiedliche Leuchtdichten anzupassen, kommt beim nächtlichen Lenken eines KFZ zur Anwendung: während die zentralen Zapfen die Straße im Lichtkegel der Scheinwerfer abbilden werden die peripheren Stäbchen zur Wahrnehmung der dunklen Randbereiche benutzt [Aulhorn und Harms 1972; Gegenfurtner et al. 1999; Rubin et al. 2007; Owsley und Mc Gwin 2010].

2.6.6 Zusammenfassung

Blendung ruft 3 Effekte hervor. 1. Es entsteht eine physikalische Schleierleuchtdichte. 2. Es resultiert (u.U.) eine Einschränkung der Sehfunktion (physiologische Blendung). 3. Es kommt (u.U.) zur Auslösung von intolerablem Unbehagen, zu Aufmerksamkeitsstörungen und zu Ablenkungen von der eigentlichen Sehaufgabe (Unbehaglichkeitsblendung oder ‚psychologische Blendung‘).

Das Ausmaß der Blendung ist von verschiedenen Faktoren abhängig, dazu gehören:

- Je höher die Beleuchtungsstärke in Lux, die von einer blendenden Lichtquelle auf Hornhautebene verursacht wird und je kleiner der Winkel zwischen Blickrichtung und Blendlichtquelle, desto höher fällt die Schleierleuchtdichte aus. Diese ist maßgeblich für eine Blendung verantwortlich. Die Blendung fällt demnach umso stärker aus, je näher die Blendlichtquelle an der Fixierungsachse, sprich der Blickrichtung, liegt. Dieser Umstand ist auch bei Passivblendung zu berücksichtigen.

- Steigt die Schleierleuchtdichte an, so kommt es zu einer Abnahme des Kontrastes für die Sehaufgabe, was wiederum bewirkt, dass das Objekt schlechter gesehen wird.
- Die Blendung durch eine Lichtquelle fällt bei einem auf Dunkel adaptierten Auge stärker aus (Bsp. Autoscheinwerfer in der Nacht). Daher sind Unterschiede in der Blendung und Blendungsbewertung in Abhängigkeit von der Tageszeit (Dämmerung vs. Mittag) sowie Umgebungsbeleuchtung (Raumlicht vs. Sonnenlicht) zu berücksichtigen.
- Die physiologische Blendung wird als umso geringer wahrgenommen, je besser das jeweilige Sehobjekt sichtbar ist. Die Beeinträchtigung der Sehfunktionen wird demnach bei starker Blendlichtquelle und bei geringer Helligkeit des Sehobjektes größer ausfallen.
- Ältere Menschen zeigen eine stärkere Blendungsempfindlichkeit.
- Personen mit Trübungen in den Augenmedien und Brechungsanomalien, z.B. Katarakt-Brechungsanomalien, zeigen eine stärkere Blendungsempfindlichkeit
- Personen mit heller Iris/Augenfarbe zeigen eine stärkere Blendungsempfindlichkeit
- Auch bei Erkrankungen der Netzhaut ist mit einer stärkeren Blendungsempfindlichkeit zu rechnen.

3 Psychologische Grundlagen (Mechanismen der Belästigung)

Die Unbehaglichkeitsblendung, häufig als ‚psychologische Blendung‘ bezeichnet, ist hinsichtlich des Mechanismus ihrer Entstehung unzulänglich erforscht. Das gilt zwar auch für die sogenannte physiologische Blendung, ist aber bei der Unbehaglichkeitsblendung von größerem Nachteil, weil bei der physiologischen Blendung das Ausmaß durch die Einschränkung der Sehleistung leichter erfasst werden kann. Bei der Unbehaglichkeitsblendung wird das Ausmaß über Ratingskalen ermittelt. Dabei sind verschiedene in Gebrauch. Die deBoer Ratingskala ist eine 9-Punkt Skala, die von ‚gerade wahrnehmbar‘ bis ‚unerträglich‘ reicht [deBoer 1973]. Andere Skalen sind die 6-Punkt Skalen von Hemion [1968] und Fisher [1974]. Man darf aber nicht davon ausgehen, dass physiologische und psychologische Blendung Ergebnisse unterschiedlicher Beleuchtungssituationen darstellen müssen. In der Regel handelt es sich um unterschiedliche Auswirkungen ein und derselben Reizsituation, die sowohl Effekte auf die optische Wahrnehmungsleistung besitzen, als auch auf der Bewertungsebene als unangenehm bis unerträglich, insgesamt gesehen als unbehaglich eingestuft werden kann.

Obwohl der Mechanismus, der die Unbehaglichkeitsblendung bedingt, unbekannt ist, sind die Faktoren, die sie beeinflussen, gut untersucht, zumindest was die häufigsten Problemfälle betrifft, nämlich Blendung im Straßenverkehr und Blendung am Arbeitsplatz und im Wohnbereich durch Beleuchtungsanlagen. Die wichtigsten Faktoren sind:

- Die Leuchtdichte der Blendquelle
- Die Position der Blendquelle im Gesichtsfeld
- Die Größe und Zahl der Blendquellen
- Der Adaptationszustand der Augen des Betrachters

Zahlreiche weitere Faktoren sind identifiziert worden, haben aber nicht Eingang in die zur Vorhersage eingesetzten Formeln gefunden (siehe voriger Abschnitt).

Damit eine Situation oder ein Objekt eine Belästigung hervorrufen kann, ist es notwendig, dass die Situation oder das Objekt als distinkt vor dem Hintergrund anderer Objekte oder der Erfahrung hervortritt. Sobald ein Unterschied wahrgenommen werden kann, ist auch eine Belästigung möglich. Dadurch entsteht ein Dilemma bei der umwelthygienischen Beurteilung, weil es nicht möglich und sinnvoll ist, jede von irgendjemand als unbehaglich und als Belästigung eingeschätzte Umweltsituation zu verhindern. Aus diesem Grund bedient man sich unterschiedlicher Schwellenwerte, was den Anteil belästigter Personen in einer gegebenen Situation betrifft. Diese Schwellenwerte für den Anteil ‚unzufriedener‘ oder ‚belästigter‘ Personen können nicht wissenschaftlich festgelegt werden, sondern müssen auf einem gesellschaftlichen Konsens beruhen. Bei der thermischen Unbehaglichkeit hat man oft 15% als Schwelle angesetzt, bei Fluglärm 20-25% und bei Blendung 30%.

Ein weiteres Problem stellt die Zahl der Stimulusereignisse dar. Ein einzelner Stimulus, der selbst keine Belästigung hervorruft, kann, wenn er immer wieder auftritt, eine sogar unerträgliche Belästigung hervorrufen („chinesische Tropfenfolter“).

Grundsätzlich ist die Belästigung ein Phänomen, das auf der subjektiven Bewertung einer Wahrnehmungssituation beruht. Obwohl dabei der Erfahrungshintergrund der Person eingeht, ist es keineswegs so, dass das Belästigungserleben nicht in gewissen Grenzen vorhergesagt werden kann. Dabei ist die Qualität der Vorhersage oft nicht schlechter als die einer physiologischen Reaktion (wie

z.B. der aufgrund der Schleierleuchtdichte vorhergesagten Einschränkung der visuellen Diskriminationsleistung). Es gibt eine Reihe von Faktoren, die für das Belästigungserleben relevant sind. Dazu gehören Stimulusmerkmale sowie Situations- und Personenmerkmale. Im Zusammenhang mit Blendung sind die Stimulusmerkmale oben angeführt worden, als Personenmerkmale sind Alter und Augenfarbe sowie andere mit den optischen Medien zusammenhängende Faktoren bedeutsam (z.B. Erkrankungen der Hornhaut). Auch der Adaptationszustand der Augen des Betrachters zählt streng genommen zu den Personenmerkmalen, weil Personen unterschiedlich rasch an die Beleuchtungssituation adaptieren. Bei den Situationsmerkmalen kann man davon ausgehen, dass die folgenden Bedingungen einen wesentlichen Einfluss besitzen:

- Unkontrollierbarkeit: Im Allgemeinen werden Situationen, in denen man auf den Stimulus keinen Einfluss hat und bei denen man kaum Maßnahmen zur Vermeidung treffen kann, als besonders belästigend empfunden
- Interferenz: Wenn die Reizsituation zu einer Störung der intendierten Handlungen führt (z.B. wenn die Blendung verhindert, dass man das Fernsehbild gut erkennen kann), wird sie als belästigend empfunden
- Erholungsstörung: Wird die Reizsituation als Unterbrechung einer intendierten Erholung empfunden, dann entsteht Belästigung
- Vermeidbarkeit: Wird die Stimulussituation als eine Folge vermeidbarer Fehler in der Planung technischer oder anderer Einrichtungen, als Folge unnötiger technischer Eingriffe etc. aufgefasst, dann wird sie eher als Belästigung empfunden
- Zyklizität: Treten Stimuli in regelmäßigen Abständen mit kurzen Intervallen auf, dann wird die Situation stärker belästigend erlebt
- Unvorhersehbarkeit: Bei langen Interstimulusintervallen sind Situationen lästiger, bei denen das Eintreten aufgrund unterschiedlicher Intervalle nicht vorhersehbar ist.

Physiologisch betrachtet stellt das Belästigungserleben einen Schutzmechanismus vor potenziell schädigenden Einflüssen dar und wurde vermutlich zunächst für den Geruchssinn entwickelt. Unangenehme Gerüche rufen ein Vermeidungsverhalten hervor, das den Zweck hat, uns vor der Einnahme verdorbener Nahrung zu schützen. Im Wesentlichen dieselben Mechanismen laufen auch bei der Bewertung der Wahrnehmung aus anderen Sinnesmodalitäten ab. Deshalb können starke und wiederkehrende Belästigungserlebnisse das physiologische Gleichgewicht stören und sich nachteilig auf das Wohlbefinden und letztlich auch die Gesundheit auswirken.

4 Licht und zirkadiane Rhythmik

4.1 Das zirkadiane System

Das Zentrum für die Steuerung des zirkadianen Systems liegt im suprachiasmatischen Nucleus (SCN) des Hypothalamus. In der Terminologie der Chronobiologie wird der SCN als Hauptoszillator bezeichnet, in der englischsprachigen Literatur wird von *master clock* gesprochen und in der populärwissenschaftlichen Ausdrucksweise wird der Begriff *innere Uhr* verwendet. Der endogene, autonome Rhythmus, der von der inneren Uhr ausgeht, weist bei den meisten Menschen eine Periodenlänge von etwa 24-24,5 Stunden auf. Durch sogenannte Zeitgeber, insbesondere dem Hell/Dunkel Wechsel, aber auch die regelmäßige Nahrungsaufnahme oder soziale Aktivitäten, wird der Rhythmus des SCN auf exakt 24 Stunden eingestellt. Vom SCN werden die Information an die diversen peripheren Organe sehr wahrscheinlich über das vegetative Nervensystem, aber auch verschiedene Peptide und Hormone, u.a. das Melatonin, übermittelt. Auf molekularer Ebene kommt es zu einer rhythmischen Expression einer Reihe von *clock genes*. Diese finden sich wahrscheinlich in allen Zellen und beeinflussen dort die Ausschüttung von Transkriptionsfaktoren, Hormonen und Neurotransmittern und sind somit für diverse zelluläre Funktionen verantwortlich.

Man kann heute davon ausgehen, dass alle physiologischen Funktionen zeitabhängige Veränderungen zeigen. Dabei werden Rhythmen mit einer Periodenlänge, die kürzer als 24 Stunden ist, als *ultradiane* (z.B. EEG-Rhythmen, Herzrhythmus, Atemrhythmus) und Rhythmen mit einer Periodenlänge über 24 Stunden als *infradiane* (z.B. Menstruationszyklus, zirkannuale Veränderungen) Rhythmen bezeichnet. Am bekanntesten und besten untersucht sind zirkadiane Rhythmen, die eine Periodenlänge im Bereich von etwa 24 Stunden aufweisen. Dazu gehören z.B. Veränderung der Körperkerntemperatur, Blutdruckverhalten aber auch endokrine zirkadiane Sekretionsmuster, wie die des Cortisols oder des Melatonins [Haus 2007].

Ein normales Funktionieren der inneren Uhr ist wichtig für die Gesundheit, v.a. aufgrund ihrer Bedeutung für z.B. das Schlaf-Wachverhalten, die Hormonausschüttung, aber auch metabolische Faktoren. Eine chronische Störung des Rhythmus der inneren Uhr, in der Fachsprache Chronodisruption genannt, kann mit verschiedensten Krankheiten, wie z. B. dem metabolischen Syndrom, Schlafstörungen, höherem Cortisolspiegel oder u.U. sogar Krebs assoziiert sein. Bezüglich Letzterem wird seit Jahren ein Zusammenhang zwischen Licht in der Nacht v.a. bei Schichtarbeitern, Suppression der Melatoninsekretion und höherem Risiko für v.a. Brustkrebs diskutiert (Erren et al. 2003).

4.2 Einfluss von Licht auf das zirkadiane System

Der wesentlichste „Zeitgeber“ für die innere Uhr ist der Hell/Dunkel Wechsel. In der Netzhaut befinden sich neben den Stäbchen und Zapfen u.a. auch lichtempfindliche Ganglienzellen, die das Photopigment Melanopsin enthalten. Diese verarbeiten die Photonen und leiten die Information von der Netzhaut über den retinohypothalamische Trakt zur inneren Uhr im SCN weiter.

Am empfindlichsten ist das zirkadiane System auf Licht in der Nacht [Duffy und Czeisler 2009] und weniger bis gar nicht sensitiv auf Licht in der Mitte des biologischen Tages. Die Wirkung von Licht auf die biologische Rhythmik hängt jedoch nicht nur von der Tageszeit ab, sondern auch von der Intensität und Dauer sowie der spektralen Zusammensetzung und der räumlichen Verteilung des Lichtes.

Bisher wurde in einigen Studien der Effekt eines Lichtstimulus auf die Periodik der inneren Uhr bzw. deren Effektoren untersucht. Dabei bewirkte ein Lichtstimulus in den späten Nachmittagsstunden/frühen Abendstunden eine Verschiebung der Periodik nach hinten zu einer späteren Uhrzeit (phase delay), wohingegen eine Lichtexposition während der frühen Morgenstunden/späten Nachtstunden das Gegenteil auslöste, also eine Verschiebung zu einer früheren Uhrzeit (phase advance). Da die Phasenverschiebung innerhalb des SCN beim Menschen nicht direkt bestimmt werden kann, werden üblicherweise die Rhythmen von Melatonin, aber auch der Körperkerntemperatur und des Stresshormons Cortisol als Variablen herangezogen [Turner et al. 2010].

Nicht nur die Periodik, sondern auch die Amplitude (Max-Min Unterschiede) verschiedener physiologischer Parameter kann durch einen Lichtreiz verändert werden. Diesbezüglich zeigte sich z.B., dass ein Lichtstimulus zu einer deutlichen Senkung der Amplitude der Rhythmen der Körpertemperatur und des Cortisols führt [Jewett et al. 1991].

Während man in den ersten Studien noch mit langen (> 6 h), sehr hellen (9000 lux) Lichtreizen experimentierte (zusammengefasst in Duffy und Czeisler [2009]), wurde später herausgefunden, dass auch mit etwa 1% dieser Lichtmenge (etwa 100 lux) eine Phasenverschiebung erzielt werden kann, deren Intensität immerhin noch 50% der maximalen Verschiebung erreicht [Zeitzer et al. 2000]. Dieser Effekt tritt aber vor allem dann auf, wenn die Testperson sich vorher im Dunklen oder bei sehr niedrigen Beleuchtungsstärken aufgehalten hat, und daher sensibilisiert war.

Eine weitere nicht unwesentliche Erkenntnis betrifft die wellenlängenabhängige Sensitivität der spezialisierten retinalen Rezeptoren. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass kurzwelliges Licht (460 nm) einen größeren chronobiologischen Effekt auslösen kann als Licht mittlerer Wellenlänge (555 nm). Dies äußert sich v.a. in deutlicheren Phasenverschiebungen des Melatoninrhythmus und der Suppression der Melatoninsekretion [Lockley et al. 2003].

Außerdem stuften sich in Untersuchungen Testpersonen während einer 6,5 h dauernden Lichtexposition bei 460 nm als wacher ein, und zeigten schnellere Reaktionszeiten, einen geringeren Leistungsabfall in der Aufmerksamkeit und mehr Alphawellen im EEG im Vergleich zu denjenigen die gegenüber Licht der Wellenlänge 555 nm exponiert wurden [Lockley et al. 2003, 2006a].

Grundsätzlich kann mit Licht der Wachheitsgrad einer Testperson erhöht werden. Ab etwa 100 lx Beleuchtungsstärke am Auge sinkt die subjektive Ermüdung bzw. steigt die subjektive Wachheit. Der größtmögliche Effekt ist etwa bei 300 lx am Auge erzielbar [Cajochen 2007]. Der Grund warum Licht von 460 nm Wellenlänge effizienter wach hält als 555 nm, liegt wahrscheinlich in einer stärkeren Suppression der Ausschüttung des Melatonins, welches bekannter Weise eine schlafinduzierende Wirkung aufweist [Lewy et al. 1980].

Der Melatoninspiegel im Blut (oder im Speichel oder Urin) ist grundsätzlich ein wichtiger Indikator für den Zustand der inneren Uhr. Die höchsten Melatoninspiegel finden sich dabei gegen 2-4 Uhr. Melatonin wird über den Blutkreislauf zu den Körperzellen transportiert und ist wahrscheinlich an der Synchronisation physiologischer und biochemischer Parameter beteiligt.

Bereits kurze helle Lichtpulse von 5 s Länge bewirken nachweisbare Effekte auf die Melatoninsuppression bei Nagern. Bei Menschen wurde eine Melatoninsuppression durch Licht

allerdings erst nach 10 Minuten messbar, und die Rückkehr zu nächtlichen Werten nach Ausschalten des Lichts dauerte mindestens 15 Minuten (review: [Rea 2013]).

Die Suppression der Melatoninsekretion hängt v.a auch von der Beleuchtungsstärke ab. Beleuchtungsstärken auf dem Auge von mehr als 1.000 lx bewirken eine Melatoninsuppression von 25% in weniger als 20 Minuten. Wenn die Beleuchtungsstärke unter 500 lx gesenkt wird, dauerte dies bis zu einer Stunde. Geringere Beleuchtungsstärken unter 200 lx am Auge bewirken maximal eine Melatoninsuppression von 25%, unabhängig von der Expositionsdauer [Rea 2013].

Die Effekte eines Lichtstimulus auf die innere Uhr werden auch vom Adaptationsgrad bzw. der Lichtintensität, der man vorher exponiert war, beeinflusst. In einer Untersuchung wurden Testpersonen 6,5 h einer Lichtquelle von 200 Lux in der Nacht ausgesetzt und die Melatoninsekretion wurde bestimmt. Vor dem Lichtstimulus befanden sich die Testpersonen für 15h entweder in einem sehr schwach beleuchteten Raum mit 0,5 Lux oder in einem Raum mit 200 Lux. Dabei zeigte sich eine stärkere Melatoninsuppression nach der 0,5 Lux-Exposition [Smith et al. 2004].

Es kann vermutet werden, dass die 24h Hell/Dunkel Exposition einen Einfluss auf einen nachfolgenden Lichtstimulus und damit die innere Uhr aufweist. Das zirkadiane System von Menschen, die sich in nicht sehr hellen Räumen aufhalten (was auf viele zutrifft), könnte sensibler auf starke Lichtreize reagieren.

Weiters existieren einzelne Hinweise, dass verschiedene Netzhautbereiche unterschiedlich empfindlich auf Lichteinwirkungen reagieren. Licht von oben (mit Illumination des v.a. unteren Netzhautbereichs) scheint dabei effektiver Melatonin zu unterdrücken als Licht von unten [Glickman et al. 2003].

Neuere Untersuchungen zeigten ferner, dass bereits eine kurze Lichtexposition ausreicht, um eine Phasenverschiebung der inneren Uhr zu bewirken. Beschrieben wurde diesbezüglich, dass eine starke Lichtexposition (etwa 10000 lx) von 0.2 h ausreicht, um eine Phasenverschiebung des Melatoninrhythmus von mehr als 1h auszulösen [Chang 2012]. Für Blendung relevant ist v.a. auch eine neuere Untersuchung, die zeigen konnte, dass eine Sequenz von kurzen Blitzlichtern in der Dauer von 2 msec (60 Mal pro Stunde) und einer moderaten Stärke von etwa 473 Lux, mit denen Testpersonen in der Nacht konfrontiert wurden, in der Lage waren, die Phase der inneren Uhr um fast 45 min zu verzögern [Zeitzer et al. 2011]. Denkbar wäre daher, dass wiederholte Blendungen in kürzeren Intervallen v.a. in den Nachmittagsstunden/frühen Abendstunden oder in der Früh, einen Einfluss auf die innere Uhr aufweisen könnten.

4.3 Zusammenfassung

Licht hat einen Einfluss auf die innere Uhr und die Melatoninausschüttung:

- Ein Lichtstimulus in der Nacht, aber auch in den späten Nachmittagsstunden/frühen Abendstunden bzw. in den frühen Morgenstunden/späten Nachtstunden kann eine Phasenverschiebung der inneren Uhr bewirken (Verschiebung der Periodik von Rhythmen verschiedener physiologischer Parameter zu einer späteren oder früheren Uhrzeit). Auch eine Veränderung (Verkleinerung) der Amplitude physiologischer Parameter kann die Folge sein.
- Dabei können auch geringere Lichtintensitäten in einem Bereich von 100-200 Lux einen messbaren Effekt auf die innere Uhr ausüben.

- Kurzwelligeres Licht (460 nm) hat einen stärkeren Einfluss auf die innere Uhr als langwelligeres (555 nm), was teilweise mit einer potenteren Suppression der Melatoninsekretion erklärbar ist.
- Interessant ist, dass auch mehrere kurze, intensive Lichtreize innerhalb eines kurzen Zeitintervalls eine Phasenverschiebung der inneren Uhr bewirken können. Daher kann vermutet werden, dass wiederholte Blendung in einem kürzeren Zeitraum einen Einfluss auf die innere Uhr aufweisen könnte.
- Die Beleuchtungsintensität der vorangegangenen Stunden und evtl. Tage könnte einen Einfluss auf die Melatonin-supprimierende Wirkung des Lichts aufweisen.

Hinsichtlich des Einflusses von Blendung(en) auf die innere Uhr ist in der wiss. Literatur nichts bekannt. Grundsätzlich sind möglicherweise längere Lichtexpositionen oder wiederholte Blendungen in einem kürzeren Zeitraum zu bestimmten Tageszeiten (v.a. später Nachmittag, u.U. Vormittag) notwendig, um die Phase und die Amplitude verschiedener physiologischer Parameter zu beeinflussen. Der Effekt von wiederholten Blendungen wird dabei bei Personen, die sich in dunkleren(r) Räumen/Umgebung aufhalten möglicherweise stärker ausfallen.

5 Farbe und Frequenzspektrum: physiologische und psychologische Bedeutung

Das Hinzufügen der Farbinformation bei der optischen Wahrnehmung erhöht die Diskriminationsleistung um das etwa 10.000-fache. Es besteht also kein Zweifel, dass die Farbwahrnehmung einen bedeutenden Beitrag zur Orientierung in der Umwelt leistet. Wie oben ausgeführt sind elektromagnetische Wellen im Wellenlängenbereich von etwa 380 bis 780 nm in der Lage, eine optische Wahrnehmung hervorzurufen. Der wesentlich lichtempfindlichere Stäbchenapparat (skotopisches Sehen) wird bei steigender Gesichtsfeldleuchtdichte (ab etwa 0,01 cd/m²) zunehmend vom Zapfenapparat (photopisches Sehen) abgelöst. Die Phase, in der beide Systeme aktiv sind, nennt man mesopisches Sehen. Bei Tageslicht wird das Rhodopsin der Stäbchen parafoveal ausgebleicht und es kann keine Reaktion auf Licht mehr erfolgen, außerdem erfolgt eine Hemmung der Stäbchen durch spezielle dopaminerge Amakrinzellen. Die drei Zapfentypen (L-, M- und S-Zapfen, für langwellig, mittelwellig und kurz(short)wellig) übernehmen dann die Sehaufgabe. Alle Zapfentypen reagieren auf Wellenlängen im gesamten Spektrum, aber mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima. L-Zapfen haben ihr Absorptionsmaximum bei 564 nm (Gelb-Rot), die M-Zapfen bei 534 nm (Grün) und die S-Zapfen bei 420 nm (Blau). Die S-Zapfen kommen in der Fovea praktisch nicht vor, sondern haben ihre größte Dichte an deren Rand. Das Verhältnis der L-, M- und S-Zapfen ist etwa 32:16:1 [Walraven 1974]. Darüber hinaus ist die Empfindlichkeit der Zapfentypen sehr unterschiedlich, wobei die S-Zapfen weniger als ein Zehntel der Empfindlichkeit der L-Zapfen besitzen. Durch spezifische Schaltelemente (rezeptive Felder mit unterschiedlichen On-Off Elementen) wird bereits in der Retina eine Vorverarbeitung zur Farbdekodierung vorgenommen, die dann aber erst im parvozellulären Bereich des Corpus geniculatum laterale durch differenzielle Auswertung des Inputs verschiedener Zapfenarten und in der primären Sehrinde erfolgt. Dies erklärt, dass sowohl Phänomene der additiven wie der subtraktiven Farbmischung vorkommen und auch das Phänomen der Farbkonstanz, dass Objekte bei unterschiedlichen Lichtbedingungen und daher objektiv unterschiedlichen Wellenlängen, die das Auge treffen, dennoch als farbgleich wahrgenommen werden.

Die Farbwahrnehmung ist so differenziert, dass es bislang noch nicht gelungen ist, die unterschiedliche Wahrnehmung von Farben mittels eines einfachen Systems von wenigen Parametern zu beschreiben. So hängt z.B. die Farbtonunterscheidung von der Leuchtdichte ab (Bezold-Brücke Effekt). Gewöhnlich werden neben dem Farbton die Helligkeit und Sättigung als zusätzliche Größen berücksichtigt. Hunt [1991] hat ein Modell mit 9 Parametern vorgelegt, das gut mit den physiologischen und psychologischen Phänomenen der Farbwahrnehmung im Einklang steht. Dieses und andere Modelle [z.B. Nayatani et al. 1994] hat die CIE veranlasst, 1998 ein vorläufiges Modell zur Beschreibung des Farbeindrucks vorzulegen, aber die Entwicklung ist nach wie vor nicht abgeschlossen. Insbesondere bei der Ableitung von Größen und Methoden zur Beschreibung der Farbwiedergabeeigenschaften von Beleuchtungssystemen wird der differenzierten Beschreibung der Farbwahrnehmung eine große Bedeutung zukommen.

Für die Orientierung in der Umwelt spielt die Farbwahrnehmung eine besondere Rolle. Bei Tageslicht ist die Diskriminationsleistung am besten und auch die Einordnung der Farbeindrücke in die Erfahrung (z.B. beim Erkennen von Farbabweichungen) ist optimal. Bei zu starker Helligkeit wird aber ebenso wie der Visus die Farbdiskrimination herabgesetzt.

Farben haben neben ihren Eigenschaften als Orientierungshilfen in der Umwelt psychologische Bedeutung. Diese farbpsychologischen Eigenschaften werden bei der Innenraumgestaltung genutzt. Dabei spielt einerseits eine Rolle, dass Unbehagen ausgelöst wird, wenn Objekte ihre gewohnte Farbe verändern, andererseits dass bestimmte Farben (Rot, Orange) eine aktivierende und andere (Grün, Hellblau) eine beruhigende Wirkung besitzen. Daneben besteht der Gegensatz zwischen „warmen“ und „kalten“ Farben. Wobei Farben von Gelb bis Rot als warm und Blau bis Grün als kalt angesehen werden. Dies trifft aber insbesondere bei höherer Sättigung zu. Ein wesentlicher Anteil der psychologischen Farbwirkung hat mit den Assoziationen zu Naturvorgängen und mit der Erfahrung mit Farben zu tun. Diese assoziative Relation zu Alltagserfahrungen ist allerdings so stark, dass sie verhaltenssteuernd wirkt. Dementsprechend sind farbige Einstrahlungen oder farbige Reflexe in den Wohn- und Arbeitsbereich insbesondere dann belästigend, wenn sie gewohnte Farben verändern oder inkongruente Assoziationen hervorrufen (z.B. Rot=Feuer).

6 Toxische Effekte von Licht

Wielgus und Roberts [2012] haben in einem aktuellen Review die Kenntnisse zu retinalen Lichtschäden zusammengefasst. Doch nicht nur die Netzhaut, sondern alle Teile des optischen Apparates des Auges können durch intensives Licht geschädigt werden. Neben der Haut ist somit das Auge ein wichtiges Effektor-Organ von Fotoschäden. Diese Schäden können nicht nur durch direktes Sonnenlicht ausgelöst werden, sondern schon reflektiertes Licht oder diffuses Licht unter einer Wolkendecke ist wirksam. Bekannt ist die „Schneeblindheit“ im Sinne einer Photokeratitis [Lucas 2011] durch von Schneeflächen reflektiertes Sonnenlicht. Individuelle Sensitivitätsfaktoren (wie Alter und Vorschäden der Netzhaut) und die Kombination mit anderen (chemischen) Belastungsfaktoren für die Netzhaut (Medikamente, Umweltschadstoffe, welche oxidativen Stress bewirken können) beeinflussen die Wirkschwellen für temporäre und permanente Netzhautschädigungen. Protektive Faktoren sind vor allem Antioxidantien, wobei für die Netzhaut vor allem Lutein, Zeaxanthin, Vitamin C und E, sowie Zink bedeutsam sind [Khachik et al., 1997]. Oxidativer Stress begünstigt die Makuladegeneration [Beatty et al. 2000; Winkler et al. 1999]. Neben der Makulopathie [Tomany et al. 2004] wird beispielsweise auch das Pterygium conjunctivae [Rashima et al. 2012] sowie Katarakt [Robman und Taylor 2005] mit UV-Strahlung in Zusammenhang gebracht.

Selbst „natürliche“ Strahlenintensitäten sind insbesondere hinsichtlich ihres UV-Anteils bekanntermaßen bedeutende Risikofaktoren für diverse Schädigungen der unbedeckten Haut. Dies betrifft die Hautalterung [dos Santos Silva et al. 2009; Thomas et al. 2010] und Nävi [Pettijohn et al. 2009; Harrison et al. 2008; Dulong et al. 2002; Newton-Bishop et al. 2010]. Ganz umfangreich und daher hier nicht im Einzelnen zu behandeln ist allerdings die Literatur zu UV-Strahlung und Melanom sowie auch zu anderen Hauttumoren [IARC 1992, 2005, 2006].

Hinsichtlich des Auges existieren diverse Schutzmechanismen gegenüber zu intensiver Strahlenbelastung: Grelles Licht führt zu einem reflektorischen Lidschluss, zur Pupillenverengung und zu einem unwillkürlichem Abwenden des Kopfes. Wenn allerdings durch Filterung und/oder Reflektion nur bestimmte Anteile des Lichtes auf das Auge treffen, dann sind diese wichtigen Schutzmechanismen eventuell nicht funktionsfähig. Zur Beurteilung einer Lichtimmission sollte daher unbedingt auch das Frequenzmuster bzw. der Wellenlängenbereich dargestellt sein, wobei die energiereicheren hochfrequenten Anteile (blaues Licht, UV-Bänder) bezüglich toxischer Augenschäden jedenfalls bedeutsamer sind.

7 Exkurs 1: Zirkadiane Rhythmen

7.1 Einfluss von Licht auf den zirkadianen Rhythmus

Seit den frühen 70er Jahren ist bekannt, dass sich im Hypothalamus der Sitz des übergeordneten Taktgebers befindet, der auf hormonellem Wege die ihm untergeordneten Körperfunktionen steuert [Moore und Lenn 1972; Stephan und Zucker 1972; Ralph et al. 1990; Klein et al. 1990; Weaver 1998]. Der genetisch determinierte Rhythmus der Zellen im suprachiasmatischen Nucleus entspricht ungefähr der Tageslänge von 24 Stunden [Weaver 1998; Welsh et al. 1995].

Um eine Adaptation des Rhythmus auf veränderte äußere Bedingungen zu ermöglichen (s.g. entrainment) besitzen die Zellen eine direkte Verbindung zu spezialisierten Ganglienzellen innerhalb der Retina [Moore 1973; Sadun et al. 1984; Moore et al. 1995]. Diese Gruppe von Photorezeptoren, die nicht an der Bildverarbeitung beteiligt sind, ist in der Lage mittels eines eigenen Pigments, genannt Melanopsin, den Einfall von Licht an den Hypothalamus zu übermitteln. Daraus ergibt sich die Vorreiterrolle des Lichts als Schrittmacher zur Steuerung des zirkadianen Rhythmus [Berson et al. 2002; Hattar et al., 2002, 2003; Gooley et al. 2001; Berson 2007; Revell und Skene 2007; Güler et al. 2008; Lydic et al. 1980; Stopa et al. 1984; Friedman et al. 1991; Moore und Speh 1994; Dai et al. 1997, 1998; Provencio et al. 2000; Zaidi et al. 2007].

In zahlreichen Studien wurden seither die Auswirkungen von gezielt gesetzten Lichtreizen auf die innere Uhr des Menschen untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind in die moderne Lichttherapie zur Behandlung von saisonalen depressiven Störungen, Jet-Lag oder Beschwerden bei Schichtarbeitern eingeflossen [Jones et al. 1999; Wyatt et al. 2006; Czeisler et al. 1990; Terman et al. 1995; Boulos et al. 1995; Eastman et al. 1995; Sack et al. 2007; Horowitz et al. 2001; Santhi et al. 2005a, 2005b; Baehr et al. 1999; Smith et al. 2008]. Rasch wurde klar, dass der Zeitpunkt des Lichtreizes einen wesentlichen Einfluss auf die Größe und die Richtung der Phasenverschiebung hat [Hastings und Sweeney 1958; DeCoursey 1960; Pittendrigh 1960; Daan und Pittendrigh 1976].

Die größte Sensibilität für Lichtreize zeigt der suprachiasmatische Nucleus während der Nachtstunden. Dabei kommt es während der frühen Abendstunden zu einer Verschiebung nach hinten (phase delay), eine Lichtexposition während der frühen Morgenstunden führt zu einer Beschleunigung (phase advance) [Wever 1970; Aschoff et al. 1971; Czeisler et al. 1986, 1989; Allan und Czeisler 1994; Jewett et al. 1997, 1991; Johnson 1992; Winfree 1970, 1973, 1980; Kronauer et al. 1993; Lakin-Thomas 1993; Khalsa et al. 2003; Lockley et al. 2006b; Peterson 1980; Czeisler und Wright 1999; Pohl 1982; Khalsa et al. 2000; Johnson und Nashville 1990].

Während man in den ersten Studien noch mit langen (6-7h), sehr hellen (9000 lux) Lichtreizen experimentierte, hat man später herausgefunden, dass man auch mit 1% der Lichtmenge (100 lux) eine Phasenverschiebung erzielen kann, deren Intensität immerhin noch 50% der maximalen Phasenverschiebung erreicht [Hastings und Sweeney 1958; Brainard et al. 1983; Takahashi et al. 1984; Joshi und Chandrashekar 1985; Nelson und Takahashi 1991a, 1991b; Bauer 1992; Sharma et al. 1999; Lewy et al. 1980; Bojkowski et al. 1987; Brainard et al. 1988; McIntyre et al. 1989; Allan et al. 1988; Boivin et al. 1994, 1996; Zeitzer et al. 2000, 2005; Czeisler et al. 1999; Duffy et al. 1996, 2007; Cajochen et al. 2000].

In einer weiteren Studie wurde die Wirkung von gepulstem Licht auf den übergeordneten Taktgeber untersucht. Auch hier zeigte sich, dass Lichtimpulse, die in ihrer Summe 63% des kontinuierlichen

Lichtreizes ausmachten, eine Phasenverschiebung im Ausmaß von 90% erzielen konnten [Peterson 1980; Nelson und Takahashi 1991; Duffy et al. 1996; van den Pol et al. 1998; Rimmer et al. 2000; Gronfier et al. 2002, 2004, 2007; Kronauer et al. 1999, 2000; Cole et al. 1995; Hébert et al. 1998; Laffan undDuffy 2002; Kawinska et al. 2005; Scheuermaier et al. 2006; Illnerová et al. 1993; Vondrasová et al. 1997; Louzada et al. 2004].

Auch zeigte sich ein sehr direktes Ansprechverhalten der Melatoninspiegel im Serum, die bereits 5 min nach Beginn der Exposition deutlich erniedrigt waren und 10 min nach Beendigung schon wieder messbar im Steigen begriffen waren [Gronfier et al. 2002].

Eine weitere nicht unwesentliche Erkenntnis betrifft die wellenlängenabhängige Sensitivität der spezialisierten retinalen Rezeptoren. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass kurzwelliges Licht (460 nm) einen größeren biologischen Effekt auslösen konnte als langwelliges (555 nm). Dies äußerte sich in einer deutlicheren Melatoninunterdrückung, schnelleren Reflexen, mehr Alphawellen im EEG und einer größeren Phasenverschiebung der zirkadianen Rhythmik [Foster et al. 1991; Freedman et al. 1999; Lucas et al. 1999a, 1999b; Thapan et al. 2001; Brainard et al. 2001; Czeisler et al. 1995; Klerman et al. 2002; Lockley et al. 2003, 2006a; Zeitzer et al. 1997; Czeisler und Gooley 2007].

7.2 Der Einfluss einer vorausgegangenen Lichtexposition

Wird der Organismus für 6,5h einer schwachen Lichtquelle (0,5 Lux) ausgesetzt, resultiert eine ausgeprägte Melatoninunterdrückung und eine größere Phasenverschiebung verglichen mit einer Exposition mit 200 Lux [Meijer et al. 1992; Owen und Arendt 1992; Nelson und Takahashi 1999; Aggelopoulos und Meissl 2000; Refinetti 2001; Hébert et al. 2002; Wong et al. 2005; Smith et al. 2004; Chang et al. 2008]. Der Grund für dieses Phänomen dürfte in der unterschiedlichen Empfindlichkeit der retinalen Ganglienzellen für Lichtreize nach vorheriger Exposition liegen [Wong et al. 2005].

Da die meisten Menschen in der westlichen Welt ihre Wachphasen unter relativ schwacher künstlicher Beleuchtung verbringen und somit sehr empfindlich auf nächtliche Lichtreize reagieren, haben diese Erkenntnisse einen großen Einfluss auf unser tägliches Leben [Cole et al. 1995; Hébert et al. 1998; Laffan undDuffy 2002; Kawinska et al. 2005; Scheuermaier et al. 2006].

7.3 Entrainment

Bei den meisten Individuen ist der natürliche zirkadiane Rhythmus länger als 24h und bedarf eines täglichen solaren Stimulus um mittels einer vorwärtsgerichteten Phasenverschiebung mit der Umwelt zu synchronisieren [Czeisler et al. 1999; Gronfier et al. 2007; Wyatt et al. 1999, 2004; Waterhouse et al. 1998; Kelly et al. 1999; Carskadon et al. 1999; Middleton et al. 1996; Wright et al. 2001, 2005]. Alternativ kommt es bei einem kürzeren Rhythmus zu einer lichtinduzierten Phasenverzögerung [Duffy JF, Wright 2005].

In Abhängigkeit von der Stärke des Signals kommt es zu einer mehr oder weniger großen Phasenverschiebung in den Schrittmacherzellen des SCN [Pittendrigh und Dann 1976; Hoffmann 1963; Sharma et al. 1998. Während das Entrainment in einen 24h Rhythmus für die meisten Individuen möglich ist, stellen sich 23,5h und 24,5 h Rhythmen schon als problematisch dar. Auch hat die Phasenlänge des genetisch determinierten, individuellen zirkadianen Rhythmus selbst einen Einfluss auf die Größe der Phasenverschiebung [Duffy et al. 1998, 1999, 2001; Baehr et al. 2000].

8 Exkurs 2: Blendung aus augenärztlicher Sicht

8.1 Einleitung

Arten, Ausmaß und die Grade von Blendung werden von Lichttechnikern, Sinnesphysiologen, Ophthalmologen, Neuro-Ophthalmologen und Kognitionspsychologen nach verschiedenen Kriterien eingeteilt. Entscheidend jedoch ist der subjektive Eindruck, beziehungsweise die tatsächliche Beeinträchtigung des durch Blendung betroffenen Individuums. Das Ausmaß aller sensorischen und funktionellen Störungen durch „überdosiertes“ Licht („Photo-Toxizität“) [Heilig et al. 2009], von Technikern auch als „Überbelichtung“ bezeichnet, lässt sich unter diesem Aspekt kaum quantifizieren. Die Bandbreite interindividueller Unterschiede [Hammond et al. 2003] ist so groß, dass allgemein gültige Schwellenwerte nicht sicher angegeben werden können: Ab welcher Intensität, bei welchem Spektrum, welchem Strahlengang etc. ist zweifelsfrei mit Blendung und dadurch möglicher (objektivierbarer) Ablenkung oder Beeinträchtigung zu rechnen? Diese Fragen spielen bei Rechtsstreitigkeiten, Verschuldensfragen (Straßenverkehr), „Light-Trespassing“ etc. eine nicht zu unterschätzende Rolle.

8.2 Physiologische Grundlagen von Licht und Blendung

Ein einziges Photon, die per definitionem geringste Lichtmenge, ist imstande, in einem retinalen Rezeptor elektrophysiologisch registrierbare und reproduzierbare Antworten auszulösen [Rieke 2000; Doan et al. 2006]. Dies illustriert ein extrem hohes Ausmaß an retinaler Sensibilität. Neugeborene Mäuse lassen schon ein hohes Maß an Blendungs-Empfindlichkeit erkennen, bevor ihre Zapfen und Stäbchen soweit ausgereift sind, dass sie Licht-Stimuli in Erregung umsetzen können.

Eltern wären gut beraten, ihr neugeborenes Kind nicht aus nächster Nähe mit Blitzlicht zu fotografieren - die weiten Pupillen, die kristallklaren optischen Medien der Kinderaugen und die hochempfindliche, noch lange nicht ausgereifte Netzhaut sprächen dafür, jegliche überdosierte Lichtbelastung tunlichst zu vermeiden.

Dies leitet über zu dem „dritten“ retinalen Rezeptor, zu Melanopsin-expressing, intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs). Non-image-forming Funktionen, wie Lichtempfindlichkeit der Netzhaut, die komplexe Steuerung zirkadianer Rhythmen, Pupillenreaktion, Zusammenhänge mit Photophobie bei Migräne, SAD etc. werden mit diesem System in Verbindung gebracht [La Morgia et al. 2011]. Die ipRGCs oder mRGCs erweisen sich als besonders widerstandsfähig gegen Neurodegeneration und Apoptose in mitochondrialen zur Erblindung führenden Erkrankungen: Leber's hereditary optic neuropathy und dominant optic atrophy. Diese Beobachtung erklärt die scheinbar widersprüchlichen Resultate von Untersuchungen der sogenannten Chronodisruption mit einer (homogenen) Vergleichsgruppe blinder Probanden. Eine direkte Beteiligung der ipRGCs an visuellen Funktionen wird postuliert.

Sicher ist jedenfalls, dass die ipRGCs im Zusammenhang mit Blendung und den diffizilen Zusammenhängen aller retinaler Rezeptoren und dem Zusammenspiel ihrer Funktionen eine Schlüsselstelle einnehmen. Unkenntnis derartig komplexer Interaktionen und deren Auswirkungen kann zu unzulässigen Vereinfachungen und in der Folge zu Fehlschlüssen führen [Erren et al. 2010].

In diesem Zusammenhang drängt sich Kritik an der im Grunde widersprüchlichen und unlogischen Bezeichnung „Physiologische Blendung“ auf. Wie „Lichtfallen“ fangen hochempfindliche Rezeptoren der Netzhaut Lichtreize ein. Diese physiologischen Stimuli setzen Kaskaden von biochemischen und

elektrophysiologisch messbaren Ereignissen in Gang. Unphysiologische, das heißt massiv überdosierte Lichtreize, verursachen Sehstörungen, bewirken Lidverengungen bis zum Lidschluss, Pupillenkonstriktion, können Ausweich- (Bulbus) und Abwehr-Bewegungen (Kopfwendung, schützende Hand vor der blendende Lichtquelle etc.) auslösen, stören retinale Adaptationsvorgänge und beeinflussen die Wiedererholungszeiten der Netzhaut (retinal recovery time) ungünstig.

Der Terminus technicus „Physiologische Blendung“ ist ein Widerspruch in sich. Physiologie kommt von φύσις - „die Natur“ und λόγος - „die Lehre, Vernunft“; Blendungen sind überdosierte, unphysiologische Stimulationen. Gleißend helles Licht kann ablenken, reizen und Schmerz auslösen (Blendung bei Verhören als Folter).

Das „Bestandpotential“ des menschlichen Auges braucht nach Lichtstimulation mit einer Intensität, welche weit unterhalb der heutzutage üblichen Blendungen durch „moderne“ Autoscheinwerfer liegt, an die zwei Stunden (!), um wieder in einen „Steady State“ zu gelangen [Thaler und Heilig 1974]. Bei aufmerksamer Selbstbeobachtung fällt auf, dass man nach Gletschertouren oder Aufenthalt im Schnee in großen Höhen während nächtlicher Autofahrten unter schwer zu definierenden Sehproblemen leidet. Erst nach Tagen bessert sich diese Situation allmählich.

Die Intensitäten vieler künstlicher Lichtquellen sind in einem Maß angestiegen, dass Licht-Techniker die Wirkung mancher High-Intensity-LED - Leuchten (HI-LED) mit der von aggressiven („phototoxischen“) Lasern vergleichen.

Licht fällt auf Photorezeptoren als Stimuli - innerhalb physiologischer Grenzen. Diese Grenzen sind, wie oben ausgeführt, von Individuum zu Individuum sehr verschieden. Apparative Messungen tragen kaum zu verfeinerter Differentialdiagnostik bzgl. Art der Blendung bei. Mess-Instrumente beantworten Inputs monoton und vergleichbar. Ganz anders ist die Situation beim Menschen: Im Extremfall kann für bestimmte Patienten mit genetischer „Belastung“ [Cideciyan et al. 2005; Osborne et al 2006], bei vorgeschädigter Netzhaut (Lichtschäden z.B.) oder nach Einnahme von Photosensitizern (Medikamente, welche die Licht-Empfindlichkeit und damit Verletzlichkeit der Netzhaut massiv erhöhen) der Photoblit einer Funduskamera überdosierte sein: Eine solche Lichtbelastung könnte bleibende Schäden verursachen.

Objektivierbare Licht-Läsionen sollten nicht als „psychologische“ Blendungseffekte bezeichnet werden. Es könnte der Verdacht der Simulation entstehen, wenn in der Terminologie der irreführende und durch nichts gerechtfertigte Begriff „psychologisch“ verwendet wird.

Erworbene Dyschromatopsie („Colours appear somehow desaturated, 'whashed out', faded, black seems to be slightly greyish, white appears somehow „dirty“ when being compared with the image from the other eye“ [Heilig et al. 2009]) wäre das erste (subklinische, sub-biomikroskopische) Symptom einer Lichtschädigung. Viele Erwachsene weisen am führende Auge diskrete stärkere UV- und Lichtschäden als am Partnerauge auf. Die Lider des Partnerauges werden bei hellem Kunstlicht oder gleißender Sonne häufig verengt bzw. komplett geschlossen [Jensen 1982].

8.3 Wirkungsvolle Abhilfe?

Intensitätsreduktion aller blendenden und somit ablenkenden Lichter im Straßenverkehr: Dies betrifft Werbung, zu helle Verkehrslichter, PKW-Scheinwerfer, extrem helles Springlicht und Blaulicht der Einsatzfahrzeuge etc.

Reduktion des hohen Blauanteils vieler „moderner“ Leuchten: Blau blendet stärker, streut messbar stärker, lenkt mehr ab. Im menschlichen Netzhaut-Zentrum fehlen „blaue“ Zapfen (S-cones). Gelbfilter erhöhen den Kontrast durch Reduktion des blue blur - eines chromatischen Aberrationshofes [Rieger 1992]. Von Kindergärten über Einkaufszentren bis zu Altersheimen sich schrankenlos ausbreitendes bläuliches hell gleißendes (unphysiologischer Stimulus) Licht wird möglicherweise via „epigenetic imprinting“ ungünstigen Einfluss auch auf kommende Generationen haben [Jablonka und Raz 2009].

Blendungsschmerz verhindert üblicherweise ein „Anstarren“ der Sonne. Das Betrachten einer (partiellen) Sonnenfinsternis mit dem ungeschützten Auge oder mit untauglichen, insuffizienten Schutzfiltern bewirkt innerhalb von Augenblicken irreversible Netzhautschäden [Heilig et al. 2009]. Tiefstehende Sonne kann bei längeren Auto- bzw. Motorrad-Fahrten zur Qual werden. Jungen US-Ophthalmologen rät man, die Adresse ihrer künftigen Ordination so zu wählen, dass sie nicht zweimal am Tag „gegen die Sonne“ fahren müssen. An Kuppen kann direkte Blendung durch Sonnenlicht zum Kausalfaktor bei Unfällen werden.

Reflektiertes Sonnenlicht (Reflexionen von weißen oder spiegelnden Flächen wie Tischtuch oder Papier einerseits, Glas, Lack, Wasser, Schnee oder Eis andererseits) birgt häufig nicht viel weniger potentiell schädigende Energie als die Intensität direkter Strahlung. Der Reflexionsgrad wird in Albedo (zwischen Eins und Null) gemessen: Totale Reflexion: ein Albedo; völlige Absorption: null; Angabe der Wellenlänge bzw. des Gesamtspektrums ist obligat. Lesen bei Sonnenlicht ohne entsprechende Lichtschutzbrille ist nicht zu empfehlen. UV im Übermaß kann Lider, Hornhaut und Linse schädigen, sichtbares Licht (vor allem kurzwelliges) die Retina. Blaues Licht hat etwa doppelt so viele ElektronenVolt (eV) wie das längerwellige Energie-ärmere rote Licht.

Light Trespassing: Blendungen durch reflektiertes Sonnenlicht (Glasfassade, Solaranlage) müssen von betroffenen Grundstückseigentümern oder Wohnungsinhabern nicht toleriert werden; vor allem dann, wenn die Blendung und ihre Dauer eine „erhebliche Störung“ darstellen.

Abhilfe versprechen Antireflex-Schichten und nicht bzw. geringer reflektierende Oberflächen. Allerdings führen Antireflex-Schichten dazu, dass eine größere Fläche eventuell über einen längeren Zeitraum störend hell wahrgenommen wird. Vor- und Nachteile von Antireflex-Schichten sind daher in jedem Einzelfall sorgfältig abzuwägen.

9 Positive Wirkungen von Licht

Licht ist prinzipiell auf mehrerlei Art biologisch wirksam. Zum einen ist es wichtig als Informationsträger. Das Auge ist eines unserer wichtigsten Sinnesorgane mit dem wir uns unmittelbar in unserer Umwelt orientieren. Zweitens wirkt Licht als biologischer Zeitgeber, der wesentliche hormonelle Rhythmen steuert. Zuletzt haben die Randbereiche des sichtbaren Lichtes weitere spezielle Wirkungen. So ist die wärmende Wirkung des Infrarots (Wärmestrahlung) zu nennen. Besonders potent ist jedoch das UV-Licht. Neben schädigenden Wirkungen der schon relativ energiereichen Strahlung an Haut und Auge sind auch positive Wirkungen zu berücksichtigen. Hier ist vor allem an die Induktion der Bildung von Vitamin D zu denken, aber auch an die bakteriziden Eigenschaften der Strahlung.

Lichtentzug führt nicht unmittelbar und sofort zu gesundheitlichen Problemen. Menschen können evolutionär bedingt in der Nacht, die jahreszeitlich unterschiedlich lange dauert, ohne Tageslicht auskommen und mussten in früheren Jahrhunderten auch oft weitgehend auf künstliches Licht verzichten. Jenseits des Polarkreises dauert die Nacht fast ein halbes Jahr und trotzdem war eine Besiedlung dieser Regionen möglich. Tatsächlich aber zeigt die Erforschung der Lebensverhältnisse und der Vergleich von Bevölkerungen verschiedener geografischer Breiten, dass die längere Dunkelheit im Norden nicht ohne Folgen bleibt. So ist eine besondere saisonale Form der Depression in höheren geografischen Breiten häufiger. „Nordische“ Völker sind in der Regel hellhäutiger und ihre Darmschleimhaut ist in der Regel lebenslang in der Lage Milchzucker zu spalten, während Menschen aus tropischen und subtropischen Regionen diese Fähigkeit in der Regel nach der frühen Kindheit verlieren, da sie nicht auf die Zufuhr von tierischer Milch als zusätzlicher Kalziumquelle angewiesen sind. Trotz der evolutionären Anpassung an ihre Klimazone entwickelten aber viele Europäer und Europäerinnen vor allem im 19. Jahrhundert Rachitis. Das ist eine Knochenerkrankung als Folge eines Kalziummangels, der wiederum auf einem Mangel an Vitamin D beruht. Das zunehmende Leben in Städten in beengten und somit schlecht mit Tageslicht versorgten Wohnungen trug dazu ebenso bei wie die Luftverschmutzung in den damaligen Industriegebieten. Der Londoner Nebel (Smog) war ebenso berühmt-berüchtigt wie die Bezeichnung „Englische Krankheit“ für die Rachitis.

Rachitis und Depression sind somit die wichtigsten chronischen Schadwirkungen einer langfristigen Lichtdeprivation. Beide Folgen sind nicht unvermeidbar. Der Störung der Hormonregulation, die zur Depression führt, kann durch ausreichend helles künstliches Licht vorgebeugt werden („Lichttherapie“) und die Rachitis kann durch vorbeugende Gabe von Vitamin D verhindert werden. Wohnverhältnisse sollten allerdings, wo es die geografischen Bedingungen zulassen, nicht dergestalt sein, dass sie therapeutische bzw. prophylaktische Begleitmaßnahmen erforderlich machen.

Auch der Informationscharakter des Lichtes soll nicht unterschätzt werden. In fast allen unseren täglichen Tätigkeiten sind wir auf das Auge angewiesen und oft auch auf eine gute Sicht. Das Auge ist in der Lage sich in weiten Bereichen an die vorhandene Lichtintensität zu adaptieren. Erweiterung der Pupille und Einsatz der lichtempfindlicheren Stäbchen in der Netzhaut geht allerdings mit einem deutlichen Verlust an Farbsehen und Sehschärfe einher. Mit zunehmendem Alter nimmt die Adaptationsfähigkeit des Auges zusätzlich ab.

In der Nacht und in der Dämmerung werden wir daher künstliches Licht verwenden. Am Tage jedoch ist dies eher unüblich. Bei schlechter Beleuchtung durch die ungünstige Lage der Wohnung werden die Augen sich an diese Lichtverhältnisse adaptieren, so dass bei vielen Tätigkeiten der Mangel an

ausreichendem Licht gar nicht bewusst wahrgenommen wird. Wenn bei diesen Tätigkeiten jedoch ein höheres Maß an Sehschärfe gefordert wird, so werden unsere Augen überanstrengt bzw. ist diese Sehschärfe nicht gegeben. Längere Überanstrengung der Augen führt beispielsweise zu Muskelverspannungen, Kopfschmerzen und Konzentrationsstörungen. Wenn bei einer Tätigkeit, die routinemäßig auch bei mäßigen Lichtverhältnissen durchgeführt werden kann, einmal eine gute Sehschärfe erforderlich wäre, kann dies eventuell zu gefährlichen Situationen führen. Beispielsweise sei an das Kochen erinnert: Die üblichen Handgriffe können sicher „fast im Dunkeln“ durchgeführt werden, so dass dafür wahrscheinlich am Tage kein künstliches Licht eingeschaltet werden muss. Allerdings kann bei schlechter Beleuchtung etwa übersehen werden, wenn ein Lebensmittel verdorben, z.B. verschimmelt ist. Dies zu übersehen und dann z.B. ein verschimmeltes Brot zu essen kann langfristig schwere gesundheitliche Folgen haben.

10 Bestehende Regelungen

10.1 Lichtimmissionen – Messung und Beurteilung

ÖNORM O 1052:2012 10 01

Ziel der ÖNORM ist es, maximal zulässige Grenzwerte für die Lichteinwirkungen auf Mensch und Umwelt festzulegen, die durch Licht emittierende Anlagen hervorgerufen werden. Im Wesentlichen geht es um durch Licht hervorgerufene Irritationen, wie etwa Blendungen. Licht emittierende Anlagen im Sinne dieser ÖNORM sind künstliche Lichtquellen aller Art, aber auch etwa beleuchtete Fassaden oder Schilder. Beleuchtungsanlagen von Kraftfahrzeugen und eine für Wohnzwecke übliche Innenbeleuchtung unterliegen nicht den Bestimmungen dieser ÖNORM.

Generell sind Anlagen zur Erzeugung von künstlichem Licht bzw. künstliches Licht emittierende Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt unter Berücksichtigung des Standes der Technik vermieden werden. Bei der rechnerischen Ermittlung der beurteilungsrelevanten Immissionswerte ist von den maximalen Emissionswerten der Lichtquelle auszugehen. Unter Berücksichtigung der räumlichen Gegebenheiten sind dann die Immissionswerte an den exponiertesten Stellen zu berechnen. Bei bestehenden zu beurteilenden Anlagen erfolgt die Ermittlung durch Messung bei typischen Immissionssituationen (Jahreszeit, Zeitpunkt, Temperatur, Beschattung, Verschmutzung u. dgl.).

Die im Folgenden angegebenen Werte dienen dazu, unerwünschte Aufhellungen von Räumlichkeiten, in denen sich Menschen überwiegend aufhalten (Aufenthaltsräume), insbesondere jene für Wohn- und Schlafbereiche, zu begrenzen. Balkone, Loggien und Terrassen sind keine Aufenthaltsräume im Sinne dieser ÖNORM. Die maximal zulässigen Beleuchtungsstärken unterscheiden sich je nach Bewertungsgebiet.

Tabelle 3. Definition der Bewertungsgebiete für Raumaufhellungen (in Abhängigkeit von den üblicherweise vorhandenen Umgebungshelligkeiten)

Gebietsbezeichnung	Beschreibung des zu beurteilenden Gebietes
Gebiet A	Bebautes Gebiet mit besonderem Schutzbedürfnis, z. B. Bereich um Kurgelände, Spitäler, Pflegeanstalten
Gebiet B	Wohngebiet, Bereiche, die überwiegend dem Wohnen dienen, nur vereinzelt Geschäftslokale, Kleinsiedlungsgebiete
Gebiet C	Mischgebiete, Geschäftslokale und Wohnungen, Einkaufsstrassen lokaler Bedeutung
Gebiet D	Kerngebiete, Betriebs- und Industriegebiete, Geschäftsstraßen übergeordneter Bedeutung

Grenzwerte für Zeiträume sind nur für Dunkelstunden¹ anzuwenden, da das Tageslicht im Allgemeinen um ein Vielfaches heller ist und eine Beschränkung daher nicht erforderlich ist. Es werden folgende Zeiträume unterschieden: Zeitraum 1: 06:00 Uhr bis 20:00 Uhr, Zeitraum 2: 20:00 Uhr bis 22:00 Uhr, Zeitraum 3: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr

¹ Zeit, in der die horizontale Beleuchtungsstärke (in 20 cm Höhe über der Fahrbahn gemessen) weniger als 100 lx beträgt, alleinig durch natürliches Licht hervorgerufen, bei freier Himmelssicht, mit einem Öffnungswinkel von mindestens 120° nach oben

10.1.1 Raumaufhellung durch Beleuchtungen für verkehrsfremde Zwecke²

Die Summe aller Immissionswerte darf die in Tabelle 4 angeführten Werte nicht überschreiten.

Tabelle 4. Maximal zulässige mittlere vertikale Beleuchtungsstärke (Lux) in der Fensterebene des zu beurteilenden Raumes

Bewertungsgebiet	Beleuchtungsstärke (Lux)		
	Zeitraum 1	Zeitraum 2	Zeitraum 3
Gebiet A	1	1	1
Gebiet B	5	3	1
Gebiet C	10	5	1
Gebiet D	25	15	5

10.1.2 Gleichmäßigkeit

Es ist nachzuweisen, dass die Lichtimmissionen ausreichend gleichförmig über die Fensterfläche verteilt sind. Dies trifft zu, wenn das Verhältnis zwischen mittlerer und maximaler Beleuchtungsstärke über der Fensterfläche je nach Gebiet nicht weniger beträgt als 0,1 für die Gebiete A bis C und 0,2 für Gebiet D. Die Autoren dieser Norm begründen allerdings nicht, warum die Lichtimmissionen im Gebiet D, also Betriebs- und Industriegebieten, gleichmäßiger als in den anderen Gebieten sein müssen. Immissionen, die diese Gleichmäßigkeitskriterien nicht erfüllen, sind über die in dieser ÖNORM beschriebenen Beurteilungskriterien hinaus zusätzlich individuell zu beurteilen.

10.1.3 Korrekturfaktoren

Intensiv farbiges Licht wird als besonders lästig erachtet und mit einem Korrekturfaktor von 2 versehen. Ebenso wird blinkendes Licht als störender empfunden, so dass für blinkende und modulierte Lichtquellen ebenfalls Korrekturfaktoren in Abhängigkeit von der Blink- bzw. Modulationsfrequenz vergeben werden: Blinklicht (alle 0,1 bis 3 Minuten) wiegt demnach 4-mal so störend, rasch blinkendes (alle 0,05 bis 0,1 Sekunden) und langsam blinkendes Licht (alle 3 bis 5 Minuten) wiegt weniger störend und erhält den Korrekturfaktor 2. Statisches Licht (über 5 Minuten) und quasi-statisches Licht unterhalb der Verschmelzungsfrequenz von 18 Hz muss nicht korrigiert werden. Diese Werte gelten, wenn sich die Intensität um mindestens 70% ändert. Bei weniger als 70% Änderung spricht man von „teilmoduliertem Licht“ mit entsprechend niedrigeren Korrekturfaktoren.

10.1.4 Blendung

Verursacht wird die Blendung durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld sowie durch zu große Hell-Dunkel-Kontraste. Blendungen, die durch Reflexionen von Sonnenlicht auftreten, werden in dieser ÖNORM nicht behandelt.

Die angeführten Grenzwerte und Verfahren sind nur dann anzuwenden, wenn vom Immissionsort aus – bei nutzungstypischem Verhalten – der unbeabsichtigte, direkte Blick zur Blendquelle möglich ist. Die Störwirkung ist für jede einzelne Blendlichtquelle allein zu betrachten. Falls mehrere Leuchten (Array) vom Beobachterstandpunkt als eine Blendlichtquelle gesehen werden, kann dieses Array als eine einzige Blendlichtquelle betrachtet werden.

² Beispielsweise Beleuchtungen von Sportstätten, Eventbeleuchtungen, beleuchtete Werbeträger, Effektbeleuchtungen oder Anstrahlungen

Blendungen können prinzipiell durch folgende Maßnahmen reduziert oder verhindert werden:

- geeignete Anordnung der Leuchten,
- Oberflächengestaltung (z. B. matte Oberflächen),
- Leuchtdichtebegrenzung (Abschirmung, Filterung u. dgl.).

10.1.5 Psychologische Blendung

In der Praxis handelt es sich im Allgemeinen bei Beschwerden über Lichtimmissionen nicht um eine tatsächliche Herabsetzung der Sehleistung (physiologische Blendung), sondern um die Störung des Wohlbefindens. Die Störung entsteht u.a. durch die ständige und ungewollte Ablenkung der Blickrichtung zur Lichtquelle hin. Bei einem großen Unterschied der Leuchtdichte der Lichtquelle zur Umgebungsleuchtdichte wird eine ständige Adaptation des Auges ausgelöst. Das subjektive Blendurteil³ kann mittels lichttechnischer Parameter abgebildet werden.

Berechnung der zulässigen mittleren Leuchtdichte L_{zul} einer Blendlichtquelle:

$$L_{zul} \leq k \sqrt{(L_u / \Omega_s)} \text{ (cd/m}^2\text{)} \quad [15]$$

- L_{zul} zulässige mittlere Leuchtdichte einer Blendlichtquelle, in cd/m^2
- L_u maßgebende Leuchtdichte der Umgebung der Blendlichtquelle, in cd/m^2 (Details zur Ermittlung gemäß Messung der physiologischen Blendung)
- k Proportionalitätsfaktor gemäß Tabelle 5
- Ω_s Raumwinkel der vom Immissionsort aus gesehenen Blendlichtquelle, in sr

Die Gleichung ist nur bei Werte von $L_u < 10 \text{ cd/m}^2$ und $10^{-6} \text{ sr} < \Omega_s < 10^{-2} \text{ sr}$ gültig.

Tabelle 5. Proportionalitätsfaktor k

Bewertungsgebiet	Proportionalitätsfaktor k		
	Zeitraum 1	Zeitraum 2	Zeitraum 3
Gebiet A	32	32	32
Gebiet B	96	64	32
Gebiet C	160	96	32
Gebiet D	-	-	160

Bei Blendlichtquellen mit $\Omega_s \leq 10^{-6}$ ist die Grenzauflösung des menschlichen Auges annähernd erreicht. Kleinere Lichtquellen gehen daher mit diesem Raumwinkel in die Berechnung ein. Für große Blendlichtquellen $\Omega_s > 10^{-2} \text{ sr}$ wird der Immissionsgrenzwert eine vom Raumwinkel unabhängige Konstante. Die Formel lautet daher:

$$L_{zul} \leq k \sqrt{L_u} \text{ (cd/m}^2\text{)} \quad [16]$$

Der Raumwinkels Ω_s einer Blendlichtquelle wird rechnerisch wie folgt ermittelt:

$$\Omega_s = A_p / r^2 \text{ (sr)} \quad [17]$$

- r kürzester Abstand zwischen Lichtquelle und Immissionsort, in Meter
- A_p „scheinbare Leuchtengröße“; das ist die Projektion der lichtabstrahlenden Fläche, in m^2 , am Immissionsort der Leuchte, auf eine Ebene normal auf die Verbindungsgerade zwischen Immissionsort und Leuchte.

10.1.6 Physiologische Blendung

Bei der physiologischen Blendung wird das Sehvermögen durch Licht, das im Auge gestreut wird, vermindert. Durch das Streulicht kommt es zu einer Adaptierung des Auges an den helleren Zustand.

³ Durch Untersuchung der als subjektiv empfundenen Blendungsbewertung verschiedener Beobachter

Da die Grenzwerte der psychologischen Blendung bei Auftreten einer physiologischen Blendung jedenfalls bereits weit überschritten sind, wird in dieser ÖNORM nicht näher auf die physiologische Blendung eingegangen. Grenzwerte sowie Details zur Ermittlung der physiologischen Blendung finden sich z. B. in ÖNORM EN 12193, ÖNORM EN 12464-2, ÖNORM CEN/TR 13201-1 und den ÖNORMEN EN 13201-2 bis 4.

10.2 Arbeitsmedizinische Regelungen

10.2.1 Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates

Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor künstlicher optischer Strahlung

Diese Richtlinie zählt zu jenen europäischen Regelungen, die ein Dumping bei Fragen des Arbeitnehmerschutzes verhindern sollen: Kein Mitgliedsstaat darf weniger streng als diese Richtlinie sein. Hat ein Mitgliedsstaat bereits arbeitsrechtliche Vorschriften erlassen, welche strenger sind als diese Richtlinie, dann dürfen diese nicht mit Hinweis auf diese Richtlinie aufgeweicht werden:

„In dieser Richtlinie werden Mindestvorschriften festgelegt, so dass die Mitgliedstaaten die Möglichkeit haben, unter dem Aspekt des Arbeitnehmerschutzes strengere Bestimmungen beizubehalten oder zu erlassen, insbesondere niedrigere Expositionsgrenzwerte festzulegen. Die Umsetzung dieser Richtlinie darf nicht als Begründung für eine Verschlechterung der bestehenden Situation in jedem einzelnen Mitgliedstaat herangezogen werden.“

Diese Richtlinie bezieht sich auf künstliche Strahlung, und zwar sowohl auf kohärente Strahlung (Laser), als auch auf inkoherente Strahlung, welche in unserem Zusammenhang relevant ist. Auch wenn die Expositionsgrenzwerte der Richtlinie nur für künstliche Strahlungsquellen und nur für den Arbeitsplatz gelten, so lassen sie sich doch analog auch auf andere Bereiche anwenden. Die Richtlinie ist auch deshalb interessant, weil sie in ausführlichen Tabellen im Anhang die Gewichtungsfaktoren für bestimmte Wellenlängen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit angibt.

Die Richtlinie umfasst elektromagnetische Felder der Wellenlängen von 100 nm bis 1 mm, also den gesamten Bereich der optischen Strahlung, das sind ultraviolette Strahlung (UV-C: 100-280 nm, UV-B: 280-315 nm, UV-A: 315-400 nm), sichtbares Licht (380 bis 780 nm, besonders hervorgehoben „Blaulicht“ von 300 bis 700 nm) und Infrarotstrahlung von 780 nm bis 1mm (IR-A: 780-1.400 nm, IR-B: 1.400-3.000 nm, IR-C: 3.000 nm – 1 mm).

(Anmerkung: Der Bereich von 300 bis 700 nm deckt Teile der UV-B-Strahlung, die gesamte UV-A-Strahlung und den größten Teil der sichtbaren Strahlung ab; die damit verbundene Gefährdung wird gemeinhin als Gefährdung durch „Blaulicht“ bezeichnet. Blaulicht deckt jedoch streng genommen nur den Bereich von ca. 400 bis 490 nm ab.)

Die verschiedenen Grenzwerte schützen vor folgenden Gesundheitsschäden durch die entsprechenden Anteile der optischen Strahlung:

a) Auge und Haut vor Photokeratitis, Konjunktivitis, Kataraktogenese, Erythem, Elastose und Hautkrebs durch ultraviolette Strahlung: 30 J/m² als kumulative Dosis über einen Arbeitstag von 8 Stunden. Die Feldfrequenzen sind gemäß der erythemalen Wirksamkeit der UV-Strahlung von 180 bis 400 nm gewichtet, wobei die höchste erythemale Wirksamkeit bei 280 nm bzw. im UV-B-Bereich liegt

(Gewichtungsfaktor = 1), während UV-A nur sehr schwach wirksam ist (Gewichtungsfaktor zwischen 365 und 370 nm ungefähr 0,000.1, bei 315 nm gleich 0,003 und bei 400 nm gleich 0,000.03).

b) Auge vor Kataraktogenese durch UV-A (ohne Gewichtung): 10.000 J/m² als kumulative Dosis über einen Arbeitstag von 8 Stunden.

c und d) Auge vor Photokeratitis durch Blaulicht: 100 W/m².sr, wenn die Belastung länger als 10.000 s einwirkt, ansonsten 10 MW/m².sr.s [Megawatt pro Quadratmeter, Steradian und Sekunde], gewichtete Werte (1 und die maximale Wirksamkeit zwischen 435 und 440 nm, 0,01 von 300 bis 380 nm, 0,001 zwischen 600 und 700 nm).

Bei stetiger Fixierung von sehr kleinen Quellen mit einer Winkelausdehnung von weniger als 11 mrad sind andere Formeln (e und f) anzuwenden. Dies ist normalerweise nur bei ophthalmischen Instrumenten oder einer Augenstabilisierung während einer Betäubung der Fall. Wegen der Augenbewegungen wird bei normalen visuellen Anforderungen eine Starrzeit von 100 s nicht überschritten:

e und f) Anstelle der effektiven Strahldichte [Watt pro Quadratmeter, Steradian] wird bei Fixierung kleiner Quellen die effektive Bestrahlungsstärke [Watt pro Quadratmeter, gleiche Gewichtung der Frequenzen] begrenzt: Bei einer Einwirkzeit von mehr als 10.000 Sekunden mit 0,01 W/m², ansonsten mit 100 W/m².s [Watt pro Quadratmeter und Sekunde].

g bis i) Augennetzhaut vor Verbrennung durch sichtbares Licht und IR-A (380-1.400 nm): Bei mehr als 10 Sekunden Exposition beträgt der Expositionsgrenzwert 28 MW/m².sr [Megawatt pro Quadratmeter und Steradian] dividiert durch einen Kalibrierungsfaktor, bei weniger als 10 Mikrosekunden 889 MW/m².sr dividiert durch einen Kalibrierungsfaktor, bei Belastungen zwischen 10 Mikrosekunden und 10 Sekunden 50 MW/m².sr dividiert durch einen Kalibrierungsfaktor sowie durch die Expositionszeit in Sekunden hoch 0,25. Der Kalibrierungsfaktor hängt von Ausdehnung der Quelle ab: bis 1,7 mrad beträgt er 1,7. Darüber bis 100 mrad ist der Kalibrierungsfaktor zahlenmäßig gleich der Winkelausdehnung. Oberhalb von 100 mrad bleibt der Faktor wieder konstant bei 100.

j bis l) Augennetzhaut vor Verbrennung durch IR-A (780-1.400 nm): die gleichen Formeln wie oben (g bis i) in Abhängigkeit von den gleichen Schranken der Einwirkzeit mit einer Ausnahme: Bei mehr als 10 Sekunden Exposition beträgt der Expositionsgrenzwert 6 (statt 28) MW/m².sr dividiert durch einen Kalibrierungsfaktor. Auch der Kalibrierungsfaktor ist etwas anders definiert mit konstant 11 bis 11 mrad, dann weiter wie oben der Winkelausdehnung folgend bis 100 mrad und ab dann wieder konstant mit 100.

Für alle Formeln zum Schutz der Netzhaut vor Verbrennung (g bis l) gilt der gleiche frequenzabhängige Gewichtungsfaktor für die effektive Strahldichte hinsichtlich der thermischen Schädigung. Dieser Gewichtungsfaktor beträgt 1 für 400 nm und 0,1 bei 380 nm. Er hat sein Maximum von 10 von 435 bis 440 nm und fällt dann wieder ab (1 von 500 bis 700 nm und zuletzt 0,02 bei 1.400 nm).

m und n) Hornhaut und Linse vor Verbrennung und Katarakt durch IR-A und IR-B (780-3.000 nm): bei mehr als 1000 Sekunden Einwirkzeit beträgt der Expositionsgrenzwert für die Bestrahlungsstärke (ungewichtet) 100 W/m², bei kürzeren Einwirkzeiten 18 kW/m² dividiert durch die Einwirkzeit in Sekunden hoch 0,75.

o) Haut vor Verbrennung durch sichtbares Licht und IR-A und -B (380-3.000 nm): Hier gibt es nur einen Expositionsgrenzwert für Einwirkzeiten kürzer als 10 Sekunden: 20 kJ/m² [Kilojoule pro Quadratmeter] mal der Einwirkzeit in Sekunden hoch 0,25.

Als erstes fällt auf, dass diese Richtlinie zwar für den gesamten Bereich optischer Strahlung gilt, dass aber zumindest für die inkohärente Strahlung kein Grenzwert für die langwellige IR-C Strahlung definiert ist. Die Wärmestrahlung der meisten Objekte erfolgt vornehmlich im langwelligen Bereich. Nur wenn ein Objekt bereits glüht, also auch schon im sichtbaren Spektrum zu emittieren beginnt, sendet es auch einen wesentlichen Anteil der Wärmestrahlung im kurzwelligen Bereich. Wenn man IR-C reglementierte, würde man damit jeden Heizkörper umfassen. Diese sollten jedoch besser über die Parameter Raumluft- und Oberflächentemperatur geregelt werden.

Die Richtlinie gibt keine Hinweise worauf sich die Ableitung der in ihr genannten Grenzwerte gründet. Der parallel mit der Richtlinie von der Kommission herausgegebene praktische Leitfaden („Ein unverbindlicher Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung“) ist diesbezüglich etwas ausführlicher: Die Grenzwerte beruhen auf Empfehlungen der ICNIRP, welche diese in mehreren Publikationen in der Zeitschrift „Health Physics“ (1996a, 1996b, 1997, 2000, 2004) veröffentlicht hat.

„Die Expositionsgrenzwerte (EGW) basieren auf den von der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) veröffentlichten Leitlinien. Weitere Informationen zu den Grundlagen für die jeweiligen EGW finden sich in diesen Leitlinien, die über die Website www.icnirp.org abgerufen werden können. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die ICNIRP ihre Leitlinien ändern kann. In diesem Fall würden anschließend auch die EGW in der Richtlinie abgeändert.“

10.2.2 Kommentar

Es ist schon eigentümlich, dass die Kommission in einem offiziellen Leitfaden ankündigt, dass die von ihr erlassenen Gesetze jetzt und in Zukunft ungeprüft den Empfehlungen eines privaten Vereins folgen werden, dessen Empfehlungen auch von Industrieinteressen beeinflusst sind. Dabei sind die derzeit empfohlenen Grenzwerte in ihrer Größenordnung durchaus plausibel und sinnvoll. Der Anschein einer exakten wissenschaftlichen Ableitung aller Werte und die Abdeckung aller genannten Schutzziele ist allerdings etwas irreführend, wie am Beispiel von UV-Strahlung gezeigt werden soll:

Die Richtlinie gibt vor, dass die Grenzwerte bzw. die Gewichtung der Strahlungsenergie Auge und Haut vor Photokeratitis, Konjunktivitis, Kataraktogenese, Erythem, Elastose und Hautkrebs schützen. Die Gewichtungsfaktoren sind jedoch lediglich für die akute Wirkung der Erythembildung (Sonnenbrand) abgeleitet. Allein schon, dass zusätzliche Grenzwerte für UV-A zum Schutz vor Grauem Star festgelegt werden müssen zeigt, dass die Wichtungformel nicht für den Schutz der Augenlinse entwickelt wurde. Die Behauptung, dass diese Werte auch vor chronischen Hautschäden (Elastose, Krebs) schützen, beruht allein auf der unbewiesenen Annahme, dass minimale Schäden mindestens so stark sein müssen, dass sie zu einer sichtbaren entzündlichen Reaktion (Erythem) führen, damit sie nicht sicher reversibel sind. Für Melanom gibt es Hinweise, dass häufige Sonnenbrände in der Kindheit [Glanz et al. 2003; Williams et al. 2011] ein besseres Maß des Risikos darstellen als die kumulative UV-Belastung einschließlich jener Einwirkungen, die nicht zu Sonnenbränden geführt haben. Andererseits zeigen gefährdete Populationen, also zum Beispiel hellhäutige Personen in sonnenreichen Gegenden (Australien) nicht nur an üblicherweise

sonnenexponierten Körperteilen ein erhöhtes Melanomrisiko, sondern auch an üblicherweise bedeckten Arealen. Nicht nur die lokale Schädigung durch UV (im Sinne von Sonnenbränden) erhöht somit das Melanom-Risiko, sondern auch schon die Induktion und Stimulierung von Melanozyten, die bei entsprechender Einwirkung von UV-Strahlung auch an nicht exponierten Hautarealen und übrigens auch bei Einwirkung der weit weniger erythemal wirksamen UV-A Strahlung beobachtet wird. Gerade hinsichtlich der UV-A Strahlung ist auch im Hinblick auf Regelungen zu Solarien ein heftiger wissenschaftlicher Streit zum Melanomrisiko im Gange [Bennett 2008; De Fabo et al 2004; Godar et al. 2009; Sage et al. 2012; Woo and Eide 2010]. Dies zeigt, dass die Gewichtung zum Schutz vor Erythemen nur sehr unzulänglich vor dem Melanomrisiko schützt.

Für andere Arten von Hautkrebs (Plattenepithelkarzinom und Basaliom) spielt die UV-Strahlung ebenfalls eine Rolle. Der Zusammenhang ist aber noch komplizierter, als einerseits Schäden durch UV-Strahlung tatsächlich das Risiko (gerade an exponierten Hautpartien) erhöhen, andererseits aber durch UV-Licht auch die Vitamin-D-Produktion angeregt wird. Es gibt jedoch Hinweise, dass eine ausreichende Versorgung mit Vitamin A mit einem reduzierten Krebsrisiko (sowohl generell als auch für diverse Arten von Hautkrebs) assoziiert ist [Boscoe and Schymura 2006; Kenborg et al. 2010; Surdu et al. 2013; Yang et al. 2011]. Für die Vitamin-D-Wirksamkeit gelten jedoch deutlich andere Gewichtungsfaktoren als für die erythemale Dosis.

10.3 Blendung im Straßenverkehr

10.3.1 RVS 05.06.12

Die Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV) erstellt Richtlinien für Verkehr und Straße (RVS). In der Reihe „Blend- und Lärmschutz“ ist im November 2003 das Merkblatt RVS 05.06.12 „Beeinträchtigungen der Verkehrssicherheit, Visuelle Informationsträger für verkehrsfremde Zwecke“ erschienen. Hauptaufgabe dieser Richtlinie ist es, Regeln für Werbeplakate und dergleichen im Straßenraum aufzustellen, die geeignet sein könnten, die Verkehrssicherheit herabzusetzen. „Unzulässige ablenkende Wirkungen ergeben sich, wenn die Auffälligkeit von Einrichtungen zur Regelung und Sicherung des Verkehrs (...) herabgemindert und damit die Aufmerksamkeit hinsichtlich des Verkehrsgeschehens reduziert wird. Darüber hinaus kann eine Verringerung der Erkennbarkeit gegeben sein (Blendwirkung, Maskierung).“ Die angesprochenen Probleme betreffen aber offensichtlich nicht nur „Informationsträger“, sondern ebenso spiegelnde Flächen ohne intendierten Informationsgehalt. Die für die passive Blendung relevanten Inhalte der Richtlinie werden hier referiert. Empfehlungen, die speziell für die Situation in der Nacht gedacht sind, werden jedoch nicht wiedergegeben.

In der Einleitung der Richtlinie wird festgestellt, „dass vor allem intermittierende und/oder bewegte lichttechnische Darstellungen (reflektorische) Blickzuwendungen und folglich eine Blickabwendung vom Verkehrsgeschehen auslösen und damit zur Unfallgefahr werden können.“

In den „Begriffsbestimmungen“ wird das „Umfeld einer Straße“ als jener Raum definiert, „der im erweiterten Sichtfeld (30° Kegel) des Lenkers eines Kraftfahrzeuges während der gesamten Fahrt liegt.“

Bei der Beurteilung der Gefahren durch Blendung und/oder Ablenkung sind folgende situative Kriterien zu beachten: Verkehrsgeschwindigkeit, Informationsdichte, Verkehrsstärke, Verkehrsablauf

und Sichtverhältnisse. Letztere beziehen sich aber im Wesentlichen auf die Ausstattung mit der nächtlichen Straßenbeleuchtung und werden daher hier nicht näher ausgeführt.

Für die Tagzeit hingegen sind folgende Regelungen relevant:

- Bei Tageslicht ist bis zu einer leuchtenden Fläche von 7 m² eine Leuchtdichte von 1500 cd/m² und darüber eine Leuchtdichte von 650 cd/m² erlaubt.
- Der spezifische Rückstrahlwert von Informationsträgern darf 15 mcd/lx m² (Milli-Candela pro Lux und Quadratmeter) nicht überschreiten.

„Eine Maskierung ist dann gegeben, wenn Lichtzeichen oder Verkehrszeichen im Blickfeld des sich annähernden Fahrzeuglenkers vor dem Informationsträger und innerhalb seiner Umgrenzung zu liegen kommen. Inwieweit eine unzulässige Beeinträchtigung des Verkehrszeichens durch Maskierung vorliegt, ist abhängig von der Bedeutung des Verkehrszeichens für die Verkehrssicherheit und den Verkehrsverlauf, vom Kontrast hinsichtlich der Farbe bzw. der Helligkeit, und vom Zeitpunkt und von der Dauer der optischen Überdeckung. Eine zulässige Beeinträchtigung durch Maskierung ist nur dann gegeben,

- Wenn das Verkehrszeichen nur dem ruhenden Verkehr dient,
- Wenn die Maskierung zu einem Zeitpunkt auftritt, der für die Kraftfahrer keine Beeinträchtigung des sicheren Fahrverhaltens bewirkt,
- Wenn die Zeitspanne der optischen Überdeckung im Vergleich zu der für die Wahrnehmung der Lichtzeichen oder Verkehrszeichen zur Verfügung stehenden Zeit nicht von Bedeutung ist und die Einleitung und Umsetzung der notwendigen Handlungen daher ungestört erfolgen kann.“

10.3.2 Kommentar

Die Ausführungen des Merkblattes sind teilweise auch für Fragen der passiven Blendung relevant. Besonders hervorgehoben sei, dass sowohl die unmittelbare Sichtbehinderung durch Blendung und/oder Maskierung als auch die Ablenkung (im Sinne einer „psychologischen Blendung“) berücksichtigt werden. Der Hinweis auf situative Faktoren, welche bei der Beurteilung jedenfalls berücksichtigt werden müssen, gilt analog unmittelbar auch für andere Störeinflüsse wie etwa für Quellen passiver Blendung.

Während für die Absolutblendung und Maskierung besonders Störquellen relevant sind, die sich im Sichtkegel des Fahrzeuglenkers befinden, müssten hinsichtlich der Ablenkung aber auch Störsignale berücksichtigt werden, die sich am Rande des Blickfeldes abspielen, da gerade Signale vom Rande eine unwillkürliche Hinwendungsreaktion auslösen können. Zwar ist es grundsätzlich schwierig, diese Art der Störung zu formalisieren. Jedenfalls sind es vor allem unerwartete und plötzlich auftretende Signale, die zu einer heftigen Ablenkung führen, welche eine besondere Gefahr darstellt. Bei der Beurteilung einer reflektierenden Fläche in Bezug auf die Verkehrssicherheit wird daher insbesondere zu prüfen sein, ob der Lichtstrahl völlig unvorbereitet auf das Auge des Lenkers trifft, wenn er zum Beispiel um eine Kurve oder über eine Bergkuppe fährt oder eine Gebäudekante passiert.

Die Leuchtdichte und der spezifische Rückstrahlwert von Flächen sind zwar für jede reflektierende bzw. strahlende Fläche relevant. Das Merkblatt beschreibt allerdings konkret Störquellen, die sich im unmittelbaren Straßenraum befinden. Daher fehlen Angaben zum Abstand des Informationsträgers

bzw. der Störquelle. Für entferntere reflektierende Flächen sind diese Regeln daher nicht wörtlich anzuwenden. Vielmehr ist statt der tatsächlichen Größe die scheinbare Größe der Fläche zu berücksichtigen, wobei die Maßangaben des Merkblattes typischer Weise für Abstände von 15 bis 20 m gelten.

11 Untersuchungen zur Beurteilung der optischen Störung durch Windkraftanlagen

In Schleswig-Holstein wurde von den Umweltbehörden aufgrund von Erfahrungswerten und Plausibilitätsüberlegungen eine Maximaldauer des Schattenwurfes durch Windkraftanlagen in sensiblen Bereichen von 30 Minuten pro Tag und 30 Stunden pro Jahr als Grenze für die Vorgabe von Minderungsmaßnahmen angewandt. Der Länderausschuss für Immissionsschutz [2003] hat diese Empfehlung übernommen und auch auf eine Felduntersuchung und Laborstudie der Universität Kiel gegründet:

„In der Laborstudie der Universität Kiel [Pohl et al., 2000] wurde festgestellt, dass bereits eine einmalige Einwirkung des Schattenwurfs von 60 Minuten zu Stressreaktionen führen kann. Aus Vorsorgegründen wird daher die tägliche Beschattungsdauer auf 30 Minuten begrenzt.“

Diese „Laborstudie“ wurde vom Institut für Psychologie der Universität Kiel durchgeführt, nachdem eine Feldstudie der gleichen Arbeitsgruppe [Pohl et al., 1999] bereits erhebliche Belästigungen in einer Fragebogenerhebung von Anrainer/innen von Windkraftanlagen ergeben hatte. In der Zusammenfassung schreiben sie:

„Die zentrale Frage war, ob bei einer Entscheidung nach einer Regel, die einen Berechnungswert von 30 min/Tag bzw. 30 h/Jahr astronomischer periodischer Schattendauer als Kriterium zur Einleitung von Minderungsmaßnahmen zugrunde legt, eine erhebliche Belästigung ausgeschlossen werden kann.“

Diese Feldstudie konnte allerdings nicht zwischen den Effekten von Lärm, Störung des Landschaftsbildes und Schattenwurf unterscheiden. Es liegt auf der Hand, dass ein Windrad, welches durch seinen Schattenwurf zu einer Belästigung im Wohnumfeld führt, sehr nahe an Wohnobjekten stehen muss, so dass auch die anderen Einflussfaktoren eine nicht unerhebliche Rolle spielen. In Österreich werden Windräder in der Regel mehr als 1 km von Wohnobjekten entfernt errichtet. Da diese Räder eine Höhe von 100 m (mit Rotorradius auch etwas mehr) haben, erscheinen sie vom nächsten Wohnobjekt aus in einem Winkel von ca. $\arcsin\frac{1}{10} \approx 6^\circ$, also relativ klein und geben kaum mehr Anlass zu Schattenwurf. Allerdings kann bei einem Sonnenstand mit dem Windrad zwischen Sonne und Immissionspunkt ein rhythmisches Blitzen auftreten, das ebenfalls erheblich belästigen kann.

In größerer Nähe, wo nach derzeitiger österreichischer Planungspraxis keine Wohnbebauung anzutreffen ist, kann der Schattenwurf sehr bedrohlich und stark belästigend wirken. In dieser Nähe wirkt aber auch die Größe des Rades dominierend und zumindest fallweise ist das Windrad deutlich zu hören. Um diese unterschiedlichen Belastungsfaktoren besser differenzieren zu können, wurde vom Institut für Psychologie eine Laborstudie in Angriff genommen. Deren Ergebnis fassen die Autoren wie folgt zusammen:

„Im Mittelpunkt der Untersuchung stand die Frage, ob periodischer Schattenwurf als alleinige Einflussgröße bei einer Dauer von mehr als 30 min und einmaliger Darbietung zu Stresseffekten führt.“

Untersucht wurden zwei Gruppen unterschiedlichen Alters, nämlich 32 Studierende (durchschnittliches Alter 23 Jahre) und 25 Berufstätige (durchschnittliches Alter 47 Jahre), die

jeweils auf zwei Versuchsbedingungen zufällig verteilt wurden. In jeder Bedingung war die gleiche Anzahl von Frauen. Die Experimentalgruppe (EG) bekam 60 min lang einen periodischen Schatten mit 80 %igem Kontrast dargeboten. Für die Kontrollgruppe (KG) galten die gleichen Lichtverhältnisse wie bei der EG, jedoch ohne periodischen Schattenwurf.

Der Hauptteil der Untersuchung bestand in einer Abfolge von sechs Test- und Messphasen, von denen je zwei vor dem Einschalten des Scheinwerfers, je drei im Abstand von 20 min während der Zusatzbeleuchtung und je eine nach Abschalten des Scheinwerfers stattfanden. Zu den erhobenen Größen zählten Stressindikatoren der allgemeinen Leistungsfähigkeit (Rechnen, visuelle Suchaufgaben), der psychischen und körperlichen Befindlichkeit, der kognitiven Streßverarbeitung und des vegetativen Nervensystems (Herzfrequenz, Blutdruck, Hautleitfähigkeit und Fingertemperatur).

Systematische Stresseffekte des periodischen Schattenwurfs auf verschiedenen Ebenen des Erlebens und Verhaltens konnten bei beiden Stichproben in vergleichbarer Weise nachgewiesen werden.

Studierende und Berufstätige der EG zeigten in den ersten 20 min der Scheinwerferphase Leistungsbeeinträchtigungen. Bei den Berufstätigen traten in dieser Phase breitere Streßeffekte auf, da neben der Leistung auch das körperliche Befinden beeinträchtigt war und eine stärkere kognitive Auseinandersetzung mit der Situation stattfand. In den folgenden 40 min kam es zur Kompensation bzw. sogar zu einer gegenüber der KG gesteigerten Leistung.

Dieses Kompensieren bzw. Überkompensieren kostete Energie auch in Form körperlicher Anstrengung, was sich bei der EG-Studierende in der reduzierten Fingertemperatur und bei den Berufstätigen zusätzlich in erhöhter Schweißdrüsenaktivität äußerte....

Der in dieser Laborstudie unter speziellen Bedingungen untersuchte periodische Schattenwurf führte insgesamt betrachtet nicht zu Belästigungen, die als erheblich angesehen werden können. Jedoch sind die nachgewiesenen erhöhten Anforderungen an psychische und physische Ressourcen ein Hinweis darauf, dass kumulative Langzeitwirkungen die Kriterien einer erheblichen Belästigung erfüllen könnten.“

Die Untersuchung der Universität Kiel liefert zwar keine direkte Unterstützung der angeführten Beurteilungspraxis von Windkraftanlagen, zeigte aber, dass schon nach einer Dauer von 20 Minuten Leistungsbeeinträchtigungen auftreten. Obwohl diese zwar im Anschluss kompensiert werden, legen die Ergebnisse nahe, dass diese kompensatorische Leistungssteigerung psychische und physische „Kosten“ verursacht. Deshalb scheint es naheliegend, dass Personen die derartigen Expositionen ausgesetzt sind, diese aktiv zu vermeiden suchen. Daher kann man von einer Einschränkung der Nutzbarkeit der Wohnung, des Arbeitsraums, der eigenen Freiflächen etc. ausgehen, die hinzunehmen nur nach Interessensabwägung und Überlegungen zur Zumutbarkeit verlangt werden kann. Die Zumutbarkeit ist auf Basis einer gesellschaftlichen Übereinkunft und durch Anwendung von Analogiebetrachtungen abzuleiten und kann nicht wissenschaftlich ermittelt werden. So gesehen erscheinen die von einigen deutschen Bundesländern und dem LAI [2003] vorgesehenen Grenzen der Zumutbarkeit als plausibel und angemessen.

12 Empfehlungen zur Begutachtung sekundärer Lichtimmissionen

Schierz [ohne Jahreszahl] erwähnt in seinem Beitrag zur Blendungsbewertung von Photovoltaik-Anlagen:

„Solche Anlagen sollen zwar Licht absorbieren, ein nicht unerheblicher, mehr oder weniger gerichteter Anteil wird aber in die Umgebung reflektiert. Dadurch kann das Spiegelbild der Sonne in der Nachbarschaft solcher Anlagen zu erheblicher Blendung von Anwohnern und gegebenenfalls auch von Verkehrsteilnehmern führen. Besonders kritisch sind östlich oder westlich zum Beobachtungspunkt gelegene Anlagen. Unproblematisch sind Solarkraftwerke, welche die Strahlung mit Spiegeln auf einen Absorber fokussieren und Photovoltaikanlagen, deren Ausrichtung der Sonne nachgeführt wird. Letztere reflektieren das Licht in Richtung Sonne zurück und können daher nicht zu Blendung in der Umgebung führen.“

Zur Bewertung der Blendung durch Photovoltaik-Elemente fehlen bislang einheitliche Bewertungsgrundlagen. In dem Beitrag werden erste Grundlagen für die Bewertung der Blendwirkung von Dach- und Freiflächensolaranlagen bei vorgegebenem Beobachterort dargestellt.“

Hinsichtlich der „Kriterien zur Beurteilung der Blendwirkung“ unterscheidet Schierz die Kriterien der Dauer der Einwirkung von sonstigen Kriterien. Hinsichtlich der Dauer merkt er an, dass sich in Analogie zum Schattenwurf von Windrädern eine zulässige (astronomisch mögliche) maximale tägliche Dauer von 30 Minuten als Richtwert eingebürgert hätte („Beurteilungsgrenze für eine erhebliche Belästigung“). Zusätzlich gelte gemeinhin „kumuliert höchstens 30 Stunden im Jahr“. Er merkt an, dass es keine Studien als Beleg für diese Richtwerte gebe, dass aber „bislang die Akzeptanz für diese Werte bei den Betroffenen offenbar gegeben“ sei.

An sonstigen Kriterien führt er an: Intensität und Größe des Sonnen-Spiegelbildes, der Winkel zwischen Sonne und reflektierender Fläche aus Sicht des Betrachters, Unebenheiten, Verschmutzung und Oberflächenrauheit (z.B. durch Entspiegelungsmaßnahmen), welche zu einer mehr oder weniger starken diffusen Reflexion des Sonnenlichts führen:

„Für die Bewertung der Blendung bedeutet dies, dass die Leuchtdichte des „Rest-Spiegelbildes“ und des blendenden Streifens geringer wird als diejenige eines reinen Spiegelbildes. Hingegen wird gleichzeitig die leuchtende Fläche und damit der Raumwinkel vergrößert. Da der Raumwinkel in die Formeln zum Blendungsindex nur mit halb so großem Exponent eingeht, wie die Leuchtdichte der Blendquelle, würde dies eine Reduktion der Blendwirkung bedeuten. Aber es bleibt fraglich, ob der Blendungsindex bzw. seine Exponenten bei den hohen Leuchtdichten noch gültig sind. Zudem kann sich bei kleinen Anlagen mit der Lichtstreuung die Expositionszeit verlängern.“

Bisher existieren nur wenige Richtlinien für die Bewertung von Lichtimmissionen. Die bestehenden Regelungen beziehen sich zumeist auf künstliche Beleuchtung. So legt die ÖNORM O 1052 beispielsweise für Wohngebiete bzw. Gebiete mit hohem Schutzanspruch eine maximal zulässige Aufhellung in der Fensterebene von 1 Lux in der Dunkelperiode fest. Dieser Wert wird nicht näher begründet, aber es entspricht ungefähr der Aufhellung bei Vollmond. Die Regelung folgt somit der Annahme, dass eine Einwirkung, welche auch aus natürlichen Quellen gegeben sein kann, wohl zumutbar bzw. akzeptabel wäre. Es ließe sich argumentieren, dass diese Aufhellung mit

astronomischer Regelmäßigkeit zu erwarten ist und dass daher der Betroffene ohnedies gezwungen sei, gegen eine Aufhellung dieses Ausmaßes, so er einen empfindlichen Schlaf hat, adäquate Gegenmaßnahmen zur Abschattung des Raumes zu treffen. Allerdings kann das nicht vollständig befriedigen, weil zunächst abzuwägen ist, ob eine gelegentliche Störung durch natürliche Quellen wie dem Mondlicht bei klarer Nacht der regelmäßigen Störung durch Straßenbeleuchtung und andere Beleuchtungsinstallationen gleichwertig angesehen werden kann. Weiters ist fraglich, ob Maßnahmen, die man gegebenenfalls gegen eine unvermeidbare Störung durch natürliche Quellen treffen muss, auch zumutbar sind, wenn es sich um vermeidbare künstliche Quellen handelt. Dennoch könnte es eine vernünftige Bewertungsstrategie mit einiger Aussicht auf gesellschaftliche Akzeptanz sein, wenn man sich auf natürlich vorkommende und allgemein akzeptierte Immissionen bezieht.

In den wenigen Gutachten, die es bisher im deutschen Sprachraum zu Blendwirkungen durch Photovoltaik-Anlagen gibt, werden zumeist die Kriterien „astronomisch mögliche Blenddauer von 30 Minuten pro Tag“ und „kumuliert höchstens 30 Stunden im Jahr“ zitiert. Diese beruhen allerdings nicht auf Untersuchungen zum Belästigungsempfinden durch Blendungen, sondern sind im Analogieschluss von Empfehlungen des Länderausschusses für Immissionsschutz [LAI 2003, 2012] zur Beurteilung des Schattenwurfs von Windkraftanlagen abgeleitet.

Im Folgenden wird die Frage sekundärer Lichtimmissionen allgemein behandelt. Sekundäre Lichtimmissionen entstehen durch Reflexion des Sonnenlichts an Flächen. Diese Flächen können Photovoltaikanlagen, Glas- oder Metallfassaden oder andere ausreichend reflektierende Oberflächen, die durch Baute hervorgerufen werden, sein. Natürliche Flächen wie Schneefelder, Seenoberflächen etc. können zwar ebenfalls zu Störungen und sogar Schädigungen des visuellen Systems führen, sind aber nicht Gegenstand dieser Empfehlungen.

Glatte Oberflächen der erwähnten Art können unter Umständen hohe Leuchtdichten über 10^4 cd/m² hervorrufen, was bei Betroffenen eine Absolutblendung auslösen kann. Da die Betroffenen sich in diesem Fall hinsichtlich der Nutzung des Bereiches, der von der Reflexion erreicht wird, einschränken müssen, ist eine Analogieüberlegung der erwähnten Art ohne weitere Erwägungen angemessen. D.h. eine maximale Zeitdauer von 30 Minuten pro Tag und eine Maximaldauer von 30 Stunden pro Jahr kann in diesem Fall als Kriterium festgelegt werden. Dies gilt gleichfalls für den Schattenwurf von Windkraftanlagen.

Derartige Einwirkungen im öffentlichen Raum, d.h. Fahrbahnen von Straßen und Radwegen, können eine Gefährdung des Lebens und der Gesundheit hervorrufen und sind daher in jedem Fall zu vermeiden.

Einwirkungen von Lichtreflexionen unterhalb der Schwelle für Absolutblendungen bieten größere Probleme bei der Beurteilung. Es wird dafür ausgehend von den Kriterien der Absolutblendung und unter Anwendung der Maße der Streulicht- und Unbehaglichkeitsblendung ein System entwickelt, das auch für den allgemeinen Fall anwendbar ist.

12.1 Vorgaben für den technischen Sachverständigen

Der technische Sachverständige sollte die Immissionspunkte, für die er seine Immissionsprognosen erstellt, gemeinsam mit dem medizinischen Sachverständigen auswählen. Grundsätzlich wird dabei, in Analogie zur ÖNORM O 1052, so vorzugehen sein, dass jene Immissionspunkte und

Betriebssituationen ausgewählt werden, die zu den höchsten zu erwartenden Immissionen führen. Dabei sollen diese Immissionspunkte so gewählt werden, dass ein Aufenthalt von Menschen dort realistisch angenommen werden kann. Je nachdem, ob es sich im konkreten Fall um ein noch in Planung befindliches Projekt handelt oder ob eine Anrainerbeschwerde zu einem bereits bestehenden Projekt untersucht wird, beruhen die vom technischen Sachverständigen zu liefernden Daten entweder auf Berechnungen oder auf Messergebnissen, wobei letztere detailliertere Angaben ermöglichen. Für die gewählten Immissionspunkte sind folgende Angaben für das darauf aufbauende medizinische Gutachten erforderlich:

- Zeitdauer der Einwirkung, die zu einer Absolutblendung und/oder Streulichtblendung führt: Hierbei soll die astronomisch mögliche Einwirkdauer, und zwar die maximale tägliche sowie die gesamte jährliche Einwirkung angegeben werden sowie jene Zeitspanne im Jahr, in der mit der maximalen Einwirkdauer zu rechnen ist. Bei streifendem Sonnenlichteinfall auf die Blendfläche sind nur solche Zeiten in die Berechnung einzubeziehen, in denen sich die Sonnenposition von der Blendflächenposition horizontal um mindestens 10° unterscheidet.
- Winkel des Lichtstrahles zur Horizontalen (bei großen Blendquellen vom deren unterem Rand gemessen, wenn sich die Quelle im oberen Halbraum befindet, vom oberen Rand für Blendquellen im unteren Halbraum)
- Im Planungsfall kann zusätzlich angegeben werden, ob für bestimmte Immissionspunkte die Gefahr besteht, dass sie über eine längere Zeitdauer einer Immission ausgesetzt sind, die zu einer psychologischen Blendung führt. Im Gegensatz zur Absolutblendung, bei der vor allem Anrainer im Osten oder Westen, also bei niedrigem Sonnenstand, betroffen sind, betreffen Immissionen geringerer Intensität (durch diffusere Reflexion) besonders die südlich der Blendlichtquelle gelegene Immissionspunkte. Wegen des höheren mittäglichen Sonnenstandes sind als Abhilfe in diesen Fällen häufig auch noch im Nachhinein Blendschutzmaßnahmen umsetzbar, so dass es vertretbar erscheint, eine genauere Quantifizierung erst im Beschwerdefall mittels Messung vorzunehmen.

Folgende Daten können in der Regel erst bei bestehenden Anlagen mittels Messung erhoben werden:

- Scheinbare Größe der reflektierenden Fläche bzw. deren Raumwinkel
- Leuchtdichte der Blendquelle
- Vertikale Beleuchtungsstärke in Augenhöhe in der Augenebene

In Sonderfällen, wenn entsprechende Basisdaten der geplanten Anlage vorliegen, können bereits im Planungsfall folgende Informationen geliefert werden:

- Zeitliche Variabilität: Hierbei sind vor allem kurzfristige Änderungen („Flackerlicht“) bedeutsam, wie sie etwa durch bewegte Objekte auftreten, die sich zeitweise in den Lichtstrahl schieben. Bei regelmäßigen Bewegungen der Blendquelle kann die Periodendauer oder die Frequenz angegeben werden. Bei unregelmäßigen Änderungen sind kürzeste und längste Periodendauer (Zeitabstand zwischen zwei Leuchtdichtemaxima) anzugeben.
- Abweichung der spektralen Zusammensetzung vom natürlichen Licht. Idealerweise ist ein Spektrogramm beizufügen. Bei intensiv farbllichem Licht im Sinne der ÖNORM O 1052 reicht auch die Angabe des/der Maxima und der Peakbreite.

Aus diesen Angaben kann der technische Sachverständige auch unmittelbar die Tageslichtblendungswahrscheinlichkeit (TBW) nach der Formel [14] oder ein Maß für die individuelle Unbehaglichkeit (z.B. Formel [7] nach Guth) berechnen. Ebenso lässt sich die Schleierleuchtdichte für die realistisch ungünstige Annahme einer betroffenen Person mit hellen Augen und einem Alter von 60 oder 70 Jahren (gemäß den Überlegungen in Abschnitt 12.3.2) nach den Formeln [5] oder [6] berechnen.

Da die Sonne bei tiefem Stand noch immer eine Leuchtdichte von über 10^8 cd/m² aufweisen kann, ist selbst bei einem Reflexionsgrad von nur 1% die Schwelle der Absolutblendung überschritten. Der technische Sachverständige soll jene Zonen ausweisen, in denen eine Überschreitung einer Leuchtdichte von 10^4 cd/m² für 30 Minuten pro Tag (für den ungünstigsten Zeitpunkt des Jahres) auftreten kann. Dabei können im Allgemeinen Immissionspunkte, die weiter als 100 m entfernt sind, außer Betracht bleiben. In Ausnahmefällen, wenn die reflektierende Fläche in dieser Entfernung einen Raumwinkel über $3,4 \cdot 10^{-4}$ sr aufweist⁴, sind auch größere Entfernungen (bis zur angegebenen Raumwinkelgrenze) zu berücksichtigen. Die Grenze von 100 m wurde zur Vereinfachung des Verfahrens gewählt, alternativ kann aber auch ein Radius bestimmt werden, der die Grenze bestimmt, unter der die reflektierende Fläche einen Raumwinkel von $3,4 \cdot 10^{-4}$ sr unterschreitet. Immissionspunkte nördlich der Blendquelle müssen nur berücksichtigt werden, wenn diese annähernd horizontal ausgerichtet ist. Südlich gelegene Immissionspunkte müssen nur bei senkrechten Blendquellen einbezogen werden.

12.2 Vorgangsweise bei der medizinischen Begutachtung

Der medizinische Gutachter sollte wenn möglich den Ortsaugenschein gemeinsam mit dem technischen Sachverständigen durchführen und insbesondere mit ihm gemeinsam die relevanten Immissionspunkte festlegen. Diese sollen repräsentativ für die realistisch ungünstigste Belastung an Wohn- und Arbeitsorten sowie auch auf (öffentlichen) Verkehrsflächen sein. Wenn es Punkte im Freien gibt, für die ein Aufenthalt realistisch angenommen werden kann (Balkon, Terrasse, Garten), dann sind solche ebenfalls zu berücksichtigen. In Innenräumen sollten Immissionspunkte in der Fensterfläche gewählt werden, wobei die Immissionsprognosen für geöffnete Fenster zu erstellen sind (ansonsten kann gemäß ÖNORM O 1052 mit Faktoren gearbeitet werden). Im Außenraum sind Immissionspunkte häufigen Aufenthaltes, zum Beispiel Balkone oder Terrassen, zu wählen, sowie jene Immissionspunkte, wo allenfalls auch kurzfristige Blendungseffekte ein erhöhtes Gefährdungspotential bedeuten, wie Straßen, Radwege und dergleichen.

12.3 Kriterien der medizinischen Beurteilung

12.3.1 Absolutblendung

Der technische Sachverständige ermittelt die Zeitdauer (täglich, jährlich bzw. jahreszeitlich) der Absolutblendung an den vereinbarten Immissionspunkten sowie die Regionen in der Umgebung der zu beurteilenden Anlage, an denen es zu einer Überschreitung von 30 min/Tag der Blenddauer kommen kann. Diese Informationen sind geeignet eine Beurteilung der Notwendigkeit von Minderungsmaßnahmen vorzunehmen. Dabei sind folgende Kriterien anzuwenden:

⁴ Die hier angegebene Grenze resultiert aus der scheinbaren Größe eines 30° geneigten Paneels von 7 m² in dem die sich spiegelnde Sonne eine leuchtende Fläche von etwa 3,2 m² einnimmt.

1. Für Wohn und Arbeitsräume sowie für die warme Jahreszeit für die als relevant eingeschätzten Freiflächen gilt ein Maximalwert von 30 min/Tag sowie 30 h/Jahr als Grenze
2. Entlang von Fahrbahnen von Straßen und Radwegen gilt für die Blickrichtung (analog zu RVS 05.06.12 in einem Sichtkegel entlang der Fahrbahn von 30°) bei der Steuerung von Fahrzeugen auf diesen Wegen, dass eine Absolutblendung dort auszuschließen ist. Zur Vermeidung einer gefährdenden Ablenkung ist gemäß RVS 05.06.12 bei leuchtenden Flächen über 7 m² eine maximale Leuchtdichte von 650 cd/m² einzuhalten. Bei kleineren Flächen kann die Leuchtdichte bis 1500 cd/m² betragen. Dabei ist der ungünstigste Immissionspunkt entlang des Verkehrswegs zur Beurteilung heranzuziehen⁵.

12.3.2 Empfindliche Personen / empfindliche Situationen

Die Blendungsempfindlichkeit (Streulichtblendung) ist unter anderem vom Alter und der Irisfarbe abhängig. Eine Beurteilung wird daher für Personen mit heller Iris und 60 Jahren vorzunehmen sein, wenn es sich um Arbeitsplätze handelt. Für Blendungsbeurteilungen im Wohn- und Freizeitbereich ist zu berücksichtigen, dass die Schleierleuchtdichte gemäß Formel [5] und [6] ab einem Alter von 62,5 Jahren stark zunimmt. Deshalb ist für solche Fälle ein höheres Alter für die Berechnung anzusetzen. Dabei kann man sich an den AnrainerInnen orientieren oder ein Alter von 70 Jahren annehmen.

Einstrahlungen in Erholungsbereiche und Bereiche, in denen Tätigkeiten ausgeübt werden, bei denen es auf optische Diskrimination (Lesen, Computerarbeit etc.) ankommt, sind besonders kritisch zu beurteilen.

Für Personen mit zunehmender höherer Schleierleuchtdichte (höhere Blendempfindlichkeit) und für Situationen, die zum Zeitpunkt der Blendeinwirkung als empfindlich einzustufen sind und die an der Stelle, wo sie ausgeübt werden, zu erheblichen Blendungen führen (Blendungswahrscheinlichkeiten von mehr als 30% oder Schleierleuchtdichten, die zu einer 75%igen Kontrastreduktion führen) ist das gleiche Kriterium wie für die Absolutblendung heranzuziehen.

12.3.3 Häufigkeit

Hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens an den einzelnen Immissionspunkten wird bei ebenen Photovoltaikanlagen nur ein- bis zweimal pro Tag eine Blendung auftreten können. Bei architektonischen Objekten mit großen stark reflektierenden Oberflächen kann es durch deren unterschiedliche räumliche Orientierung auch öfter der Fall sein. Die Gesamtbeeinträchtigung ist dabei nicht allein durch die Dauer bestimmt, sondern - bei Zeitdauern von mindestens einigen Minuten - ist die Beeinträchtigung durch mehrere Einwirkungen pro Tag als stärker anzunehmen als eine der gleichen Gesamtdauer, wenn sie nur einmal pro Tag eintritt.

Im Falle von mehreren mindestens durch 30 Minuten getrennten Intervallen am selben Immissionsort auftretenden Blendungsphasen wird die zumutbare Zeitdauer um 15% reduziert.

12.3.4 Dauer

Die optische Störung durch Blendung im Wohn-, Erholungs- oder Arbeitsbereich darf im Fall von Absolutblendungsphasen weder 30 Minuten pro Tag noch 30 Stunden pro Jahr nicht überschreiten. Die gleichen zeitlichen Begrenzungen sind auch unterhalb der Grenze für Absolutblendung

⁵ Der ungünstigste Immissionspunkt muss nicht notwendigerweise der räumlich nächste Punkt sein. Es ist vielmehr die Richtung der Reflexion ins Kalkül zu ziehen.

anzuwenden, wenn die Tageslichtblendungswahrscheinlichkeit mehr als 0,45 beträgt. Beträgt sie weniger als 0,1, so ist eine unbegrenzte Einwirkungsdauer zulässig. Im Fall von Leuchtdichten unterhalb der Grenze für Absolutblendung und einer Tageslichtblendungswahrscheinlichkeit (TBW) zwischen (einschließlich) 0,1 und 0,45 ist die zulässige Zeitdauer nach folgender Formel zu bestimmen:

$$\text{Zeitdauer [min]} = \frac{30}{\log_{10}\left\{\frac{63 \cdot TBW - 3,85}{2,45}\right\}} \quad 0,1 \leq TBW \leq 0,45 \quad [18]$$

Für Situationen, in denen auch eine Streulichtblendung angenommen werden kann, ist die Schleierleuchtdichte zu beurteilen. Sofern diese mehr als doppelt so groß wie die Umgebungsleuchtdichte ist, ist eine maximale Zeitdauer von 45 Minuten anzusetzen, diese Zeitdauer reduziert sich auf 30 Minuten, wenn die Schleierleuchtdichte das Dreifache der Umgebungsleuchtdichte erreicht. Diese Festlegung orientiert sich an der Reduktion des Kontrastes auf 33% bzw. 25% des Kontrastes ohne die Blendquelle, was zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Diskriminationsleistung führen würde.

12.3.5 Farbwiedergabe

Die Empfindlichkeit des Auges ist am Rande des optischen Spektrums weitaus geringer als im mittleren Bereich. So ist eine etwa 1000-fache Strahlungsenergie bei einer Wellenlänge von 700 nm notwendig, um den gleichen Intensitätseindruck zu haben wie zwischen 500 und 600 nm. Die zentralnervöse Verarbeitung von Farbeindrücken zielt unter anderem darauf ab, Farbverfälschungen auszugleichen, um ein gleichbleibendes Bild der umgebenden Welt zu ermöglichen. Dieser physiologische Ausgleich erfordert einen gewissen Arbeitsaufwand, der natürlich umso mehr erschwert ist, wenn die Farbbedingungen stetig wechseln.

Zu Fragen der Beleuchtung und des Farbkontrastes existieren v.a. arbeitsmedizinische Vorgaben: Besonders feinmechanische Arbeiten, die auch auf Farbkontraste zur Strukturerkennung angewiesen sind, benötigen eine neutrale Beleuchtung. Klare Anforderungen existieren beispielsweise für ärztliche Ordinationen oder Operationsräume, in denen die Farbe von Hautveränderungen oder von Geweben erkannt werden muss. Gleichzeitig sollen für (fein-)mechanische Arbeiten scharfe Hell-Dunkel-Kontraste (Blendungen) vermieden werden. Störungen der Farbwiedergabe durch einfallende Reflexionen sind als besonders belästigend zu beurteilen und reduzieren die akzeptable Zeitdauer der Einwirkung um 10%.

12.3.6 Zeitliche Variabilität (bis hin zu Flackerlicht)

Für die zeitliche Stabilität ist nach der ÖNORM O 1052 Tabelle 5 (Korrekturfaktoren, Kapitel 10.1.3) vorzugehen. Die Referenzdauer ist durch die Quadratwurzel der Korrekturfaktoren zu dividieren. Dies ergibt die pro Tag zulässige Expositionsdauer. Für bloße rhythmische Abschattung (etwa durch ein Windrad) ohne zusätzliche Blendungseffekte gilt die oben angeführte Regelung (30 min/d und 30 h/Jahr).

12.4 Zusammenfassende Beurteilung

Unter Berücksichtigung des technischen Gutachtens muss der medizinische Sachverständige folgende Punkte darstellen:

1. Die Personen und Personengruppen, die von den Lichtimmissionen betroffen sind
 - a. Gibt es besonders schutzwürdige Gruppen (z.B. Kranke, Senioren)?

- b. Gibt es relevante Tätigkeiten, bei denen es zu besonderen Störungen kommen kann (z.B. in Ordinationen, Schulklassen, an Grafikarbeitsplätzen)?
2. Die Orte, an denen es zu relevanten Immissionen kommt
3. Die Zeitdauer relevanter Einwirkungen
4. Die Häufigkeit (täglich, pro Jahreszeit) mit der relevante Einwirkungen auftreten
5. Die Beurteilungsgrenzen der Einwirkdauer gemäß der Unterscheidung in Einwirkungen
 - a. die zu Absolutblendung führen
 - b. die zu Streulicht- und/oder Unbehaglichkeitsblendung führen
 - c. bei denen es wegen zeitlicher Variation oder Farbveränderungen zu besonderen Belästigungen kommt
6. Der Vergleich der erwarteten Zeitdauer mit den Beurteilungsgrenzen
 - a. Werden diese Grenzen erreicht oder überschritten?
 - b. Bei erwarteten Belastungsdauern unter 10% der Beurteilungsgrenze kann man von einem Bagatellfall ausgehen
 - c. Wird die Beurteilungsgrenze nicht überschritten aber annähernd erreicht, dann ist in einer Gesamtschau der Fall im Sinne der Vorsorge abzuwägen und es sind allenfalls entsprechende Maßnahmen vorzuschlagen
7. Erforderliche Schutz- und Abhilfemaßnahmen
 - a. Hier kann man sich an den Empfehlungen des LAI [2012] orientieren
 - b. Prävention an der Quelle muss Vorrang haben (z.B. Verwendung anderer Materialien, Paneele mit niedrigerem Reflexionsgrad)
 - c. Erst in zweiter Linie kommt Prävention durch Behinderung der Ausbreitung zum Immissionsort in Frage (z.B. für ausreichend abschattenden Pflanzenbewuchs sorgen)
 - d. Zuletzt ist an Maßnahmen am Immissionsort zu denken (z.B. Jalousien)

13 Literatur

Aggelopoulos NC, Meissl H 2000: Responses of neurones of the rat suprachiasmatic nucleus to retinal illumination under photopic and scotopic conditions. *J Physiol* 523(1):211–222.

Allan JS, Czeisler CA, Duffy JF, et al. 1988: Non-linear dose response of the human circadian pacemaker to light. 154th Annual AAAS Meeting, AAAS Publication No.897-30, 101.

Allan JS, Czeisler CA 1994: Persistence of the circadian thyrotropin rhythm under constant conditions and after light-induced shifts of circadian phase. *J Clin Endocrinol Metab* 79:508–512.

Amini A, Digre K, Couldwell WT 2006: Photophobia in a blind patient: An alternate visual pathway. Casereport. *J Neurosurg* 105(5):765–768.

Aschoff J, Fatranská M, Giedke H, et al. 1971: Human circadian rhythms in continuous darkness: entrainment by social cues. *Science* 171:213–215.

Aslam TM, Haider D, Murray IJ 2007: Principles of disability glare measurement: an ophthalmological perspective. *Acta Ophthalmologica Scandinavica* 85:354-360.

Aulhorn E, Harms H 1972: Visual perimetry. In: Jameson D, Hurvich LM, eds. *Visual Psychophysics*. Berlin, Germany: Springer-Verlag 102–145.

Baehr EK, Fogg LF, Eastman CI 1999: Intermittent bright light and exercise to entrain human circadian rhythms to night work. *Am J Physiol* 277(6 Pt 2):R1598–R1604.

Baehr EK, Revelle W, Eastman CI 2000: Individual differences in the phase and amplitude of the human circadian temperature rhythm: with an emphasis on morningness-eveningness. *J Sleep Res* 9:117–127.

Bauer MS. Irradiance responsivity and unequivocal type-1 phase responsivity of rat circadian activity rhythms. *Am J Physiol* 1992;263:R1110–R1114.

Beatty S, Koh H, Phil M, Henson D Boulton M 2000: The role of oxidative stress in the pathogenesis of age-related macular degeneration. *Surv. Ophthalmol.* 45(2): 115–134.

Bell L, Troland LT, Verhoeff FH 1922: Report on the sub-committee on glare of the research committee I.E.S. *Trans Illuminating Engineering Soc New York* 17:743–750.

Bennett DC 2008: Ultraviolet wavebands and melanoma initiation. *Pigment Cell Melanoma Res.* 21:520–524.

Berson DM, Dunn FA, Takao M 2002: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295:1070–1073.

Berson DM. Phototransduction in ganglion-cell photoreceptors. *Pflügers Arch* 2007;454(5):849–855.

BfUNR (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorschutz): Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen. Stand 2007.

Boivin DB, Duffy JF, Kronauer RE, et al. Sensitivity of the human circadian pacemaker to moderately bright light. *J Biol Rhythms* 1994;9(3–4):315–331.

- Boivin DB, Duffy JF, Kronauer RE, et al. 1996: Dose-response relationships for resetting of human circadian clock by light. *Nature* 379:540–542.
- Bojkowski CJ, Aldhous ME, English J, et al. 1987: Suppression of nocturnal plasma melatonin and 6-sulphatoxymelatonin by bright and dim light in man. *Horm Metab Res* 19:437–440.
- Boscoe FP, Schymura MJ 2006: Solar ultraviolet-B exposure and cancer incidence and mortality in the United States, 1993–2002. *BMC Cancer* 6:264
- Boulos Z, Campbell SS, Lewy AJ, et al. 1995: Light treatment for sleep disorders: consensus report. VII. Jet lag. *J Biol Rhythms* 10(2):167–176.
- Bourassa CM, Wurtschafter JD 1966: Mechanism of binocular increase of discomfort to high luminance. *Nature* 212(5069):1503–1504.
- Boyce PR 2009: *Lighting for Driving: Roads, Vehicles, Signs and Signals*. Boca Raton, Florida: CRC Press 1–371.
- Brainard GC, Richardson BA, King TS, et al. 1983: The suppression of pineal melatonin content and N-acetyltransferase activity by different light irradiances in the Syrian hamster: a dose-response relationship. *Endocrinology* 113(1):293–296.
- Brainard GC, Lewy AJ, Menaker M, et al. 1988: Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of plasma melatonin in human volunteers. *Brain Res* 454:212–218.
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, et al. 2001: Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci* 21(16):6405–6412.
- Brown TM, Gias C, Hatori M, et al. 2010: Melanopsin contributions to irradiance coding in the thalamo-cortical visual system. *PLoS Biol* 8(12):e1000558.
- Bullough JD 2009: Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. *J Modern Optics* 56(13):1518–1522.
- Cajochen C, Zeitzer JM, Czeisler CA, et al. 2000: Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behav Brain Res* 115(1):75–83.
- Cajochen C 2007: Alerting effects of light. *Sleep medicine reviews* 11:453-464.
- Carskadon MA, Labyak SE, Acebo C, et al. 1999: Intrinsic circadian period of adolescent humans measured in conditions of forced desynchrony. *Neurosci Lett* 260:129–132.
- Chang A-M, Scheer FA, Czeisler CA. Adaptation of the human circadian system by prior light history. *Sleep* 2008;31(S):A45–A46.
- Chang AM, Santhi N, St Hilaire M, Gronfier C, Bradstreet DS, Duffy JF, Lockley SW, Kronauer RE, Czeisler CA: Human responses to bright light of different durations. *The Journal of physiology* 2012; 590:3103-3112.

Cideciyan AV, Jacobson SG, Aleman TS, Gu D, Pearce-Kelling SE, Sumaroka A, Acland GM, Aguirre GD (2005) In vivo dynamics of retinal injury and repair in the rhodopsin mutant dog model of human retinitis pigmentosa. *Proc Natl Acad Sci USA* 102 (14): 5233–5238

CIE: L'Eclairage CID: CIE equations for disability glare. CIE report #146. Vienna, Austria; 2002.

Cole RJ, Kripke DF, Wisbey J, et al. 1995: Seasonal variation in human illumination exposure at two different latitudes. *J Biol Rhythms* 10(4):324–334.

Costello MJ, Johnsen S, Metlapally S, Gilliland KO, Frame L, Balasubramanian D 2010: Multilamellar spherical particles as potential sources of excessive light scattering in human age-related nuclear cataracts. *Exp Eye Res* 91(6):881–889.

Cummings JL, Gittinger JW Jr. 1981: Central dazzle. A thalamic syndrome? *Arch Neurol* 38(6):372–374.

Curcio CA, Millican CL, Allen KA, Kalina RE 1993: Aging of the human photoreceptor mosaic: evidence for selective vulnerability of rods in central retina. *Investigative ophthalmology & visual science* 34:3278-3296.

Czeisler CA, Allan JS, Strogatz SH, et al. 1986: Bright light resets the human circadian pacemaker independent of the timing of the sleep-wake cycle. *Science* 233:667–671.

Czeisler CA, Kronauer RE, Allan JS, et al. 1989: Bright light induction of strong (type 0) resetting of the human circadian pacemaker. *Science* 244:1328–1333.

Czeisler CA, Johnson MP, Duffy JF, et al. 1990: Exposure to bright light and darkness to treat physiologic maladaptation to night work. *N Engl J Med* 322:1253–1259.

Czeisler CA, Shanahan TL, Klerman EB, et al. 1995: Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light. *N Engl J Med* 332(1):6–11.

Czeisler, CA.; Wright, KP, Jr. 1999: Influence of light on circadian rhythmicity in humans. In: Turek, FW.; Zee, PC., editors. *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms*. New York: Marcel Dekker, Inc. p. 149-180.

Czeisler CA, Duffy JF, Shanahan TL, et al. Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker. *Science* 1999;284:2177–2181.

Czeisler CA, Gooley JJ 2007: Sleep and circadian rhythms in humans. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* 72:579–597.

Daan S, Pittendrigh CS 1976: A functional analysis of circadian pacemakers in nocturnal rodents. II. The variability of phase response curves. *J Comp Physiol [A]* 106:253–266.

Dai J, Swaab DF, Buijs RM 1997: Distribution of vasopressin and vasoactive intestinal polypeptide (VIP) fibers in human hypothalamus with special emphasis on suprachiasmatic nucleus efferent projections. *J Comp Neurol* 383:397–414.

Dai J, van der Vliet J, Swaab DF, et al. 1998: Human retinohypothalamic tract as revealed by in vitro postmortem tracing. *J Comp Neurol* 397:357–370.

Dayhaw-Barker P 2002: Retinal Pigment Epithelium Melanin and Ocular Toxicity. *Intern J of Toxicology* 2:451-454.

de Boer JB 1973: Quality criteria for the passing beam of motorcar headlights. Presented at the GTB Meeting in Walldorf, BRD.

DeCoursey PJ 1960: Daily light sensitivity rhythm in a rodent. *Science* 131:33–35.

De Fabo EC, Noonan FP, Fears T, Merlino G 2004: Ultraviolet B but not Ultraviolet A Radiation Initiates Melanoma. *Cancer Research* 64:6372–6376.

Dickinson CM 1991: Optical aids for low vision. In: Charman WN, ed. *Visual Optics and Instrumentation*. Boca Raton, Florida: CRS Press, Inc. 183–228.

DIN EN 5340 1998: Begriffe der physiologischen Optik. Deutsches Institut für Normung e.V. In.: Beuth Verlag.

DIN EN 12665 2011: Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung. Deutsches Institut für Normung e.V. In.: Beuth Verlag.

Doan T, Mendez A, Detwiler PB, Chen J, Rieke F 2006 Multiple phosphorylation sites confer reproducibility of the rod's single-photon responses. *Science* 313(5786):530-533.

Dos Santos Silva I, Higgins CD, Abramsky T, Swanwick MA, Frazer J, et al. 2009: Overseas Sun Exposure, Nevus Counts, and Premature Skin Aging in Young English Women: A Population-Based Survey. *Journal of Investigative Dermatology* 129, 50–59.

Duffy JF, Kronauer RE, Czeisler CA. Phase-shifting human circadian rhythms: influence of sleep timing, social contact and light exposure. *J Physiol (Lond)* 1996;495(1):289–297.

Duffy JF, Dijk DJ, Klerman EB, et al. 1998: Later endogenous circadian temperature nadir relative to an earlier wake time in older people. *Am J Physiol* 275:R1478–R1487.

Duffy JF, Dijk DJ, Hall EF, et al. 1999: Relationship of endogenous circadian melatonin and temperature rhythms to self-reported preference for morning or evening activity in young and older people. *J Investig Med* 47:141–150.

Duffy JF, Rimmer DW, Czeisler CA. Association of intrinsic circadian period with morningness-eveningness, usual wake time, and circadian phase. *Behav Neurosci* 2001;115(4):895–899.

Duffy JF, Wright KP Jr. 2005: Entrainment of the human circadian system by light. *J Biol Rhythms* 20(4):326–338.

Duffy JF, Zeitzer JM, Czeisler CA 2007: Decreased sensitivity to phase-delaying effects of moderate intensity light in older subjects. *Neurobiol Aging* 28:799–807.

Duffy JF, Czeisler CA 2009: Effect of Light on Human Circadian Physiology. *Sleep medicine clinics* 4:165-177.

- Duke-Elder S 1957: Sir John Herbert Parsons, 1868-1957. Br J Ophthalmol 41(12):705–708.
- Dulon M, Weichenthal M, Blettner M, Breitbart M, Hetzer M, Greinert R, Baumgardt-Elms C, Breitbart EW 2002: Sun exposure and number of nevi in 5- to 6-year-old European children . Journal of Clinical Epidemiology 55: 1075–1081.
- DuPasquier RA, Genoud D, Safran AB, Landis T 2000: Monocular central dazzle after thalamic infarcts. J Neuroophthalmol 20(2):97–99.
- Eastman CI, Boulos Z, Terman M 1995: Light treatment for sleep disorders: consensus report VI, et al. Shift Work. J Biol Rhythms 10(2):157–164.
- EG: 19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG. 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). In., vol. ABl. EG L 114 vom 27.4.2006: S. 38 – 59.
- Erren TC, Reiter RJ, Piekarski C 2003: Light, timing of biological rhythms, and chronodisruption in man. Die Naturwissenschaften 90:485-494.
- Erren TC, Falaturi P, Reiter RJ. 2010: Research into the chronodisruption-cancer theory: the imperative for causal clarification and the danger of causal reductionism. Neuro Endocrinol Lett. 31(1):1-3.
- Fekete J, Sik-Lanyi C, Schanda J 2010: Spectral discomfort glare sensitivity investigations. Ophthalmic Physiol Opt 30(2):182–187.
- Fisher AJ 1974: The luminous intensity requirements of vehicle front lights for use in towns. Ergonomics 17(1): 87-103.
- Foster RG, Provencio I, Hudson D, et al. 1991: Circadian photoreception in the retinally degenerate mouse (rd/rd). J Comp Physiol [A] 169:39–50.
- Franssen L, Coppens JE 2007: Stray light at the retina: scattered papers. Amsterdam: University of Amsterdam 1–302.
- Friedman DI, Johnson JK, Chorsky RL, et al. 1991: Labeling of human retinohypothalamic tract with the carbocyanine dye, Dil. Brain Res 560:297–302.
- Freedman MS, Lucas RJ, Soni B, et al. 1999 Regulation of mammalian circadian behavior by non-rod, non-cone, ocular photoreceptors. Science 284:502–504.
- Gaster L 1910: List of queries for: glare, its causes and effects. Illuminating Engineer, London 3:98.
- Gegenfurtner KR, Mayser H, Sharpe LT 1999: Seeing movement in the dark. Nature 398(6727):475–476.
- Glanz K, Schoenfeld, Weinstock MA, Layi G, Kidd J, Shigaki DM 2003: Development and reliability of a brief skin cancer risk assessment tool. Cancer Detection and Prevention 27: 311–315.

Glaser JS, Savino PJ, Summers KD, McDonald SA, Knighton RW. The photostress recovery test in the clinical assessment of visual function. *Am J Ophthalmol* 1977;83(2):255–260.

Glickman G, Hanifin JP, Rollag MD, Wang J, Cooper H, Brainard GC 2003: Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans. *Journal of biological rhythms* 18:71-79.

Godar DE, Landry RJ, Lucas AD 2009: Increased UVA exposures and decreased cutaneous Vitamin D3 levels may be responsible for the increasing incidence of melanoma. *Medical Hypotheses* 72:434–443.

Gooley JJ, Lu J, Chou TC, et al. 2001: Melanopsin in cells of origin of the retinohypothalamic tract. *Nat Neurosci* 4(12):1165.

Graham ER, Burke DM 2011: Aging increases inattentive blindness to the gorilla in our midst. *Psychol Aging*; 26(1):162-166.

Gronfier C, Wright KP Jr, Czeisler CA 2002: Time course of melatonin suppression in response to intermittent bright light exposure in humans. *J Sleep Res* 11(S1):86–87.

Gronfier C, Wright KP Jr, Kronauer RE, et al. 2004: Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans. *Am J Physiol* 287:E174–E181.

Gronfier C, Wright KP Jr, Kronauer RE, et al. 2007: Entrainment of the human circadian pacemaker to longer-than-24h days. *Proc Natl Acad Sci USA* 104(21):9081–9086.

Güler AD, Ecker JL, Lall GS, et al. 2008: Melanopsin cells are the principal conduits for rod-cone input to non-image-forming vision. *Nature* 453(7191):102–105.

Hammond BR, Bernstein B, Dong J 2009: The effect of the AcrySof natural lens on glare disability and photostress. *Am J Ophthalmol* 148(2):272–276.

Hammond BR, Renzi LM, Sachak S, Brint SF 2010: Contralateral comparison of blue-filtering and non-blue-filtering intraocular lenses: glare disability, heterochromatic contrast, and photostress recovery. *Clin Ophthalmol* 4:1465–1473.

Hammond BR Jr, Fletcher LM, Elliott JG 2013: Glare disability, photostress recovery, and chromatic contrast: relation to macular pigment and serum lutein and zeaxanthin. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 54(1):476-481.

Harrison SL, MacLennan R, Buettner PG 2008: Sun Exposure and the Incidence of Melanocytic Nevi in Young Australian Children. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 17:2318-2324.

Hartmann E 1958: Was wir heute über Blendung wissen. *Der Augenoptiker* H 5:9-15.

Hastings JW, Sweeney BM 1958: A persistent diurnal rhythm of luminescence in *Gonyaulax polyedra*. *Biol Bull* 115:440–458.

Hattar S, Liao H-W, Takao M, et al. 2002: Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 295:1065–1070.

Hattar S, Lucas RJ, Mrosovsky N, et al. 2003: Melanopsin and rod-cone photoreceptive systems account for all major accessory visual functions in mice. *Nature* 424(6944):76–81.

Haus E 2007: Chronobiology in the endocrine system. *Advanced drug delivery reviews* 59:985-1014.

Hébert M, Dumont M, Paquet J 1998: Seasonal and diurnal patterns of human illumination under natural conditions. *Chronobiol Int* 15(1):59–70.

Hébert M, Martin SK, Lee C, et al. 2002: The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *J Pineal Res* 33:198–203.

Heilig P 2007: Arbeitsplatz Lenkrad Österr Forum Arb Med 1, 16-19.

Heilig P 2008: Arbeitsplatzbeleuchtung. Österr Forum Arb Med 3/08, 11–16.

Heilig P, Rozanova E, Godnic-Cvar J 2009: Retinal Light Damage Spektrum Augenheilkd 23:240-248.

Heilig P, Rieger G 2012: Künstliches Licht. Unerwünschte Nebenwirkungen auf Natur und Gesundheit – Lichthygiene als Prophylaxe. *Arzneimittel-, Therapie-Kritik & Medizin und Umwelt* (2012/1 pp 1- 15)
Hans Marseille München

Hemion RH 1968: The effect of headlight glare on vehicle control and detection of highway vision targets. (Technical Report No. AR 640/ HRB 11-4126). San Antonio, Texas: Southwest Research Institute.

Hoffmann K 1963: Zur Beziehung zwischen Phasenlage und Spontanfrequenz bei der endogenen Tagesperiodik. *Z Naturforsch* 18:154–157.

Holladay LL 1926: The fundamentals of glare and visibility. *Journal of the Optical Society of America* 12:271-319.

Hopkinson RG 1957: Light energy and brightness sensation. *Nature* 179(4568):1026–1027.

Horowitz TS, Cade BE, Wolfe JM, Wolfe JM, et al. 2001: Efficacy of bright light and sleep/darkness scheduling in alleviating circadian maladaptation to night work. *Am J Physiol* 281:E384–E391.

Howarth PA, Heron G, Greenhouse DS, Bailey IL, Berman SM 1993: Discomfort from glare: The role of pupillary miosis. *Int J Lighting Res Technology* 25(1):37–44.

IARC 2005: Exposure to Artificial UV Radiation and Skin Cancer. IARC Working Group Reports, Volume 1. IARC, Lyon, France. ISBN 92 832 2441 8

IARC 1992: Solar and ultraviolet radiation. IARC Monographs, Volume 55. IARC, Lyon, France. ISBN 92 832 1255 X

IARC 2006 (The International Agency for Research on Cancer Working Group on artificial ultraviolet (UV) light and skin cancer): The association of use of sunbeds with cutaneous malignant melanoma and other skin cancers: A systematic review. *Int. J. Cancer* 120, 1116–1122

ICNIRP 2004: Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation), in *Health Physics* 87 (2): 171-186.

ICNIRP 2000: Revision of the Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 400 nm and 1.4 μm , in *Health Physics* 79 (4): 431-440.

ICNIRP 1997: Guidelines on Limits of Exposure to Broad-Band Incoherent Optical Radiation (0.38 to 3 μm), in *Health Physics* 73 (3): 539-554.

ICNIRP 1996a: Guidelines on UV Radiation Exposure Limits, in *Health Physics* 71 (6): 978.

ICNIRP 1996b: Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1 mm, in *Health Physics* 71 (5): 804-819.

Illnerová H, Buresová M, Nedvídková J, et al. 1993: Maintenance of a circadian phase adjustment of the human melatonin rhythm following artificial long days. *Brain Res* 626:322–326.

Jablonka E, Raz G 2009: Transgenerational epigenetic inheritance: prevalence, mechanisms, and implications for the study of heredity and evolution; *Q Rev Biol* 84(2):131-176.

Jensen OL 1982: Pterygium, the dominant eye and the habit of closing one eye in sunlight. *Acta Ophthalmol* 60(4):568-574.

Jewett ME, Kronauer RE, Czeisler CA 1991: Light-induced suppression of endogenous circadian amplitude in humans. *Nature* 350:59-62.

Jewett ME, Rimmer DW, Duffy JF, et al. 1997: Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients. *Am J Physiol* 273:R1800–R1809.

Johnson, CH. Nashville, TN 1990: Department of Biology, Vanderbilt University. An atlas of phase response curves for circadian and circatidal rhythms.

Johnson, CH. Phase response curves: what can they tell us about circadian clocks?. In: Hiroshige, T.; Honma, K., editors. *Circadian clocks from cell to human*. Sapporo: Hokkaido Univ. Press; 1992. p. 209-249.

Jones CR, Campbell SS, Zone SE, et al. Familial advanced sleep-phase syndrome: a short-period circadian rhythm variant in humans. *Nat Med* 1999;5(9):1062–1065.

Joshi D, Chandrashekar MK 1985: Light flashes of different durations (0.063–3.33 msec) phase shift the circadian flight activity of a bat. *J Exp Zool* 233:187–192.

Kawinska A, Dumont M, Selmaoui B, et al 2005: Are modifications of melatonin circadian rhythm in the middle years of life related to habitual patterns of light exposure? *J Biol Rhythms* 20(5):451–460.

Kelly TL, Neri DF, Grill JT, et al. 1999: Nonentrained circadian rhythms of melatonin in submariners scheduled to an 18-hour day. *J Biol Rhythms* 14(3):190–196.

Kenborg L, Dahl Jørgensen A, Budtz-Jørgensen E, Knudsen LE, Hansen J 2010: Occupational exposure to the sun and risk of skin and lip cancer among male wage earners in Denmark: a population-based case–control study. *Cancer Causes Control* 21:1347–1355.

Khachik F, Bernstein PS, Garland DL 1997: Identification of lutein and zeaxanthin oxidation products in human and monkey retinas. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 38:1802–1811.

Khalsa SBS, Jewett ME, Cajochen C, et al. 2003: A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. *J Physiol (Lond)*;549(Pt 3):945–952.

Khalsa SBS, Jewett ME, Duffy JF, et al. 2000: The timing of the human circadian clock is accurately represented by the core body temperature rhythm following phase shifts to a three-cycle light stimulus near the critical zone. *J Biol Rhythms* 15(6):524–530.

Klein DC, Moore RY, Reppert SM, editors 1991: *Suprachiasmatic nucleus: the mind's clock*. New York: Oxford University Press.

Klerman EB, Shanahan TL, Brotman DJ, et al. 2002: Photic resetting of the human circadian pacemaker in the absence of conscious vision. *J Biol Rhythms* 17:548–555.

Kline DW 1991: Light, ageing and visual performance. In: Marshall J, ed. *The Susceptible Visual Apparatus*. London: Macmillan Press 150–161.

Klinger und Partner 2012: Programm „Alte Lasten – Neue Energien“. Machbarkeitsstudien zu Photovoltaikanlagen auf Deponien in der Nachsorge. Gesamtbericht. Im Auftrag von Bayerisches Landesamt für Umwelt. 27.11.2012.

Klinke R, Pape HC, Kurtz A, Silbernagl S (eds.) 2010: *Physiologie*. 6. Aufl. Stuttgart-New York: Thieme Verlag.

Koivisto M, Revonsuo A 2006: The role of unattended distractors in sustained inattention blindness. *Psychol Res*.

Komatsu H, Kamura Y, Ishi K, Kashima Y 2003: Fine structure and morphogenesis of asteroid hyalosis. *Med Electron Microsc* 36(2):112–119.

Kremers JJM, van Norren D 1988: Two classes of photochemical damage of the retina. *Lasers and Light in Ophthalmology* 2:41-52.

Kronauer RE, Jewett ME, Czeisler CA 1993: Commentary: The human circadian response to light – Strong and weak resetting. *J Biol Rhythms* 8:351–360.

Kronauer RE, Forger DB, Jewett ME. Quantifying human circadian pacemaker response to brief, extended, and repeated light stimuli over the photopic range. *J Biol Rhythms* 1999;14(6):500–515.

Kronauer RE, Forger DB, Jewett ME 2000: Errata: Quantifying human circadian pacemaker response to brief, extended, and repeated light stimuli over the photopic range. *J Biol Rhythms* 15(2):184–186.

La Morgia C, Ross-Cisneros FN, Hannibal J, Montagna P, Sadun AA, Carelli V 2011: Melanopsin-expressing retinal ganglion cells: implications for human diseases. *Vision Research* 51 (2), pp. 296-302

LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) 2003: Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise). Länderausschuss für Immissionsschutz, Arbeitskreis Lichtimmissionen.

LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) 2012: Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen. Beschluss der LAI vom 13.09.2012

- Laffan AM, Duffy JF 2002: Light exposure patterns in healthy young and older adults. *Sleep* 25:A307–A308.
- Lakin-Thomas PL 1993: Commentary: Strong or weak phase resetting by light pulses in humans? *J Biol Rhythms* 8(4):348–350.
- Lavie N 2006: The role of perceptual load in visual awareness. *Brain Res* 29;1080(1):91-100.
- Lebensohn JE. 1951: Photophobia: mechanism and implications. *Am J Ophthalmol*; 34(9):1294–1300.
- Lennie P, Pokorny J, Smith VC. Luminance 1993. *J Opt Soc Am A* 10(6):1283–1293.
- Lewy AJ, Wehr TA, Goodwin FK, Newsome DA, Markey SP 1980: Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science* 210:1267-1269.
- Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 2003;88(9):4502–4505.
- Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D 2006a: Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep* 29:161-168.
- Lockley SW, Gooley JJ, Kronauer RE, et al. 2006b: Phase response curve to single one-hour pulses of 10,000 lux bright white light in humans. Abstracts, *Soc Res Biol Rhythms*.
- Louzada F, Inacio AM, Souza FHM, et al. 2004: Exposure to light versus way of life: effects on sleep patterns of a teenager-case report. *Chronobiol Int* 21(3):497–499.
- Lucas RJ, Freedman MS, Muñoz M, et al. 1999a: Regulation of the mammalian pineal by non-rod, non-cone, ocular photoreceptors. *Science* 284:505–507.
- Lucas RJ, Foster RG 1999b: Neither functional rod photoreceptors nor rod or cone outer segments are required for the photic inhibition of pineal melatonin. *Endocrinology* 140(4):1520–1524.
- Lucas RM 2011: An epidemiological perspective of ultraviolet exposure--public health concerns. *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice* 37(4):168-75.
- Luckiesh M, Holladay LL. 1925: Glare and visibility: a resume of the results obtained in investigations of visual and lighting conditions involving these factors. *Trans Illuminating Engineering Soc New York* 20(3):221–247.
- Lydic R, Schoene WC, Czeisler CA, et al. 1980: Suprachiasmatic region of the human hypothalamus: homolog to the primate circadian pacemaker? *Sleep* 2(3):355–361.
- Mace D, Garvey P, Porter RJ, Schwab R, Adrian W (eds.) 2001: Countermeasures for Reducing the Effects of Headlight Glare. Washington, DC: American Automobile Association Foundation for Traffic Safety.
- Main A, Vlachonikolis I, Dowson A 2000: The wavelength of light causing photophobia in migraine and tension-type headache between attacks. *Headache* 40(3):194–199.

Mainster MA 1972: Retinol transport and regeneration of human cone photopigment. *Nature New Biol* 238(85):223–224.

Mainster MA, Sparrow JR 2003: How much blue light should an IOL transmit? *British journal of ophthalmology* 87:1523-1529.

Mainster MA, Timberlake GT 2003: Why HID headlights bother older drivers. *Br J Ophthalmol* 87(1):113–117.

Mainster MA, Turner PL 2006: Retinal injuries from light: mechanisms, hazards and prevention, Chapter 109. In: Ryan SJ, Hinton DR, Schachat AP, Wilkinson P, eds. *Retina*. 4th ed. London: Elsevier Publishers 1857–1870.

Mainster MA, Turner PL 2010: Blue-blocking IOLs decrease photoreception without providing significant photoprotection. *Surv Ophthalmol* 55(3):272–289.

Mainster MA, Turner PL. Blue-blocking IOLs vs. short wavelength visible light: Hypothesis-based vs. evidence-based medical practice. *Ophthalmology* 2011;118(1):1–2.

Mainster MA, Turner PL 2012: Blue light's benefits vs blue-blocking intraocular lens chromophores. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 250(8):1245-1246.

Matsushima H, Katsuki Y, Mukai K, Nagata M, Senoo T 2011: Observation of whitening by cryo-focused ionbeam scanning electron microscopy. *J Cataract Refract Surg* 37(4):788–789.

McIntyre IM, Norman TR, Burrows GD, et al. 1989: Human melatonin suppression by light is intensity dependent. *J Pineal Res* 6:149–156.

Meijer JH, Rusak B, Ganshirt G 1992: The relation between light-induced discharge in the suprachiasmatic nucleus and phase shifts of hamster circadian rhythms. *Brain Res* 598:257–263.

Middleton B, Arendt J, Stone BM 1996: Human circadian rhythms in constant dim light (8 lux) with knowledge of clock time. *J Sleep Res* 5:69–76.

Miller NR, Newman NJ 2004: *Walsh and Hoyt's Clinical Neuroophthalmology*, vol.2. 6th ed. Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins 1540.

Minnaert MGJ 1974: *Light and Color in the Outdoors*. Berlin, Germany: Springer-Verlag 259–262.

Moore RY, Lenn NJ 1972: A retinohypothalamic projection in the rat. *J Comp Neurol* 146:1–14.

Moore RY 1973: Retinohypothalamic projection in mammals: a comparative study. *Brain Res* 49:403–409.

Moore RY, Speh JC. A putative retinohypothalamic projection containing substance P in the human. *Brain Res* 1994;659:249–253.

Moore RY, Speh JC, Card JP 1995: The retinohypothalamic tract originates from a distinct subset of retinal ganglion cells. *J Comp Neurol* 352:351–366.

Murray I 2007: Glare. *Optician* 12:24-27.

- Narisada K, Schreuder DA 2004: Light pollution handbook. Dordrecht, The Netherlands: Springer 190–326.
- Nelson DE, Takahashi JS 1991a: Comparison of visual sensitivity for suppression of pineal melatonin and circadian phase-shifting in the golden hamster. *Brain Res* 554:272–277.
- Nelson DE, Takahashi JS 1991b: Sensitivity and integration in a visual pathway for circadian entrainment in the hamster (*Mesocricetus auratus*). *J Physiol* 439:115–145.
- Nelson DE, Takahashi JS 1999: Integration and saturation within the circadian photic entrainment pathway of hamsters. *Am J Physiol* 277(46):R1351–R1361.
- Newton-Bishop JA, Chang Y-M, Iles MM, Taylor JC, Bakker B, Chan M, et al. 2010: Melanocytic Nevi, Nevus Genes, and Melanoma Risk in a Large Case-Control Study in the United Kingdom. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 19:2043-2054.
- Nosedá R, Kainz V, Jakubowski M, et al. 2010: A neural mechanism for exacerbation of headache by light. *Nat Neurosci* 13(2):239–245.
- Nosedá R, Burstein R 2011: Advances in understanding the mechanisms of migraine-type photophobia. *Curr Opin Neurol* 24(3):197–202.
- Oliva A, Torralba A 2006: Building the gist of a scene: the role of global image features in recognition. *Prog Brain Res*. 155:23-36.
- Osborne N, et al 2006: A hypothesis to suggest that light is a risk factor in glaucoma and the mitochondrial optic neuropathies. *Br J Ophthalmol* 90:237–241.
- Owen J, Arendt J 1992: Melatonin suppression in human subjects by bright and dim light in Antarctica: time and season-dependent effects. *Neurosci Lett* 137:181–184.
- Owsley C, Mc Gwin G Jr. 2010: Vision and driving. *Vision Res* 50(23):2348–2361.
- Parsons JH 1910: Glare, its causes and effects. *Illuminating Engineer*, London 3:99–103.
- Peterson EL 1980: A limit cycle interpretation of a mosquito circadian oscillator. *J Theor Biol* 84:281–310.
- Pettijohn KJ, Asdigian NL, Aalborg J, et al. 2009: Vacations to Waterside Locations Result in Nevus Development in Colorado Children. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 18:454-463.
- Pinero DP, Ortiz D, Alio JL 2010: Ocular scattering. *Optom Vis Sci* 87(9):E682–696.
- Pittendrigh CS 1960: Circadian rhythms and the circadian organization of living systems. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* 25:159–184.
- Pittendrigh CS, Dann S 1976: A functional analysis of circadian pacemakers in nocturnal rodents. IV. Entrainment: pacemaker as clock. *J Comp Physiol [A]* 106:291–331.
- Plainis S, Murray IJ, Carden D 2006: The dazzle reflex: electrophysiological signals from ocular muscles reveal strong binocular summation effects. *Ophthalmic Physiol Opt* 26(3):318–325.

- Pohl H 1982: Characteristics and variability in entrainment of circadian rhythms to light in diurnal rodents. In: Aschoff J, Daan S, Groos GA, editors. Vertebrate circadian systems: Structure and physiology. Berlin: Springer-Verlag 339-346.
- Pohl J, Faul F, Mausfeld R 1999: Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen, Feldstudie, Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Pohl J, Faul F, Mausfeld R 2000: Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen, Laborpilotstudie, Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Pokorny J, Smith VC 2006: Visual acuity and contrast sensitivity, Chapter10. In: Ryan SJ, Hinton DR, Schachat AP, Wilkinson P, eds. Retina. 4th ed. London: Elsevier Publishers 209–225.
- Provencio I, Rodriguez IR, Jiang G, et al. 2000: A novel human opsin in the inner retina. *J Neurosci* 20(2):600–605.
- Pulling NH, Wolf E, Sturgis SP, Vaillancourt DR, Dolliver JJ 1980: Headlight glare resistance and driver age. *Human factors* 22:103-112.
- Ralph MR, Foster RG, Davis FC, Menaker M 1990: Transplanted suprachiasmatic nucleus determines circadian period. *Science* 247:975–978.
- Rashima A, Ramesh S Ve, Lokapavani V, Vijaya L, George R 2012: Prevalence and associated factors for pterygium and pinguecula in a South Indian population. *Ophthalmic Physiol Opt* 32:39–44.
- Rea MS, Radetsky LC, Bullough JD 2011: Toward a model of outdoor lighting scene brightness. *Lighting Res Technol* 43(1):7–30.
- Rea MS 2013: Light – Much More Than Vision. Im Internet gefunden im März 2013 unter: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/pdf/moreThanVision.pdf>.
- Refinetti R 2001: Dark adaptation in the circadian system of the mouse. *Physiol Behav* 74:101–107.
- Reidenbach HD, Dollinger K, Ott G, Janssen M, Brose M 2008: Blendung durch optische Strahlungsquellen. Projektnummer: F 2185. In. Dortmund-Berlin-Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Revell VL, Skene DJ 2007: Light-induced melatonin suppression in humans with polychromatic and monochromatic light. *Chronobiol Int* 24(6):1125–1137.
- Rieger G 1992: Improvement of contrast sensitivity with yellow filter glasses. *Can J Ophthalmol.* 27(3): 137–138.
- Rieke F 2000: Mechanisms of single-photon detection in rod photoreceptors. *Methods Enzymol.* 316:186-202.
- Rimmer DW, Boivin DB, Shanahan TL, et al. 2000: Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light. *Am J Physiol* 279(5):R1574–R1579.
- Robman L, Taylor H 2005: External factors in the development of cataract. *Eye* 19:1074–1082.

- Rubin GS, Ng ES, Bandeen-Roche K, Keyl PM, Freeman EE, West SK 2007: A prospective, population-based study of the role of visual impairment in motorvehicle crashes among older drivers: the SEE study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 48(4):1483–1491.
- Sack RL, Auckley D, Auger RR, et al. 2007: Circadian rhythm sleep disorders: part I, basic principles, shift work and jet lag disorders. An American Academy of Sleep Medicine review. *Sleep* 30(11):1460–1483.
- Sadun AA, Schaechter JD, Smith LEH 1984: A retinohypothalamic pathway in man: light mediation of circadian rhythms. *Brain Res* 302:371–377.
- Sage E, Girard P-M, Francesconi S 2012: Unravelling UVA-induced mutagenesis. *Photochem. Photobiol. Sci.* 11:74.
- Santhi N, Duffy JF, Horowitz TS, et al. 2005a: Scheduling of sleep/darkness affects the circadian phase of night shift workers. *Neurosci Lett* 384(3):316–320.
- Santhi N, Duffy JF, Horowitz TS, et al. 2005b: Erratum to Scheduling of sleep/darkness affects the circadian phase of night shift workers. *Neurosci Lett* 390:187.
- Scheuermaier K, Laffan AM, Duffy JF 2006: Light exposure patterns in healthy older people living in New England, USA. *J Sleep Res* 15(S1):94.
- Schierz C: Über die Blendungsbewertung von reflektiertem Sonnenlicht bei Solaranlagen. TU Ilmenau, FG Lichttechnik, PF 100565, 98684 Ilmenau (ohne Jahreszahl, wahrscheinlich 2012)
- Schmidt RF, Schaible H-G 2006 (eds.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*, 5. Auflage. Berlin-Heidelberg: Springer.
- Schmidt RF, Lang F 2007 (eds.): *Physiologie des Menschen*, 30. Auflage. Wien-Heidelberg: Springer.
- Schreuder DA 2008: *Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception*. Berlin: Springer Science Business Media 250–311.
- Schreuder DA 1999: *Road Lighting for Safety*. London: Thomas Telford Ltd.
- Severin SL, Harper JY Jr, Culver JF 1963: Photostress test for the evaluation of macular function. *Arch Ophthalmol* 70(Nov):593–597.
- Sharma VK, Chandrashekar MK, Singaravel M 1998: Relationship between period and phase angle differences in *Mus booduga* under abrupt versus gradual light-dark transitions. *Naturwissenschaften* 85:183–186.
- Sharma VK, Chandrashekar MK, Singaravel M, et al. 1999: Relationship between light intensity and phase resetting in a mammalian circadian system. *Journal of Experimental Zoology* 283:181–185.
- Silbernagl S, Despopoulos A 2003 (eds.): *Taschenatlas der Physiologie*. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme Verlag.
- Smith G 2002: Disability glare and its clinical significance. *Optom Today (London)* 42(Apr):34–37.

Smith KA, Schoen MW, Czeisler CA 2004: Adaptation of human pineal melatonin suppression by recent photic history. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 89:3610-3614.

Smith MR, Cullnan EE, Eastman CI 2008: Shaping the light/dark pattern for circadian adaptation to night shift work. *Physiol Behav* 95(3):449–456.

SSK 2006: 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.

Steen R, Whitaker D, Elliott DB, Wild JM 1993: Effect of filters on disability glare. *Ophthalmic Physiol Opt* 13(4):371–376.

Stephan FK, Zucker I 1972: Circadian rhythms in drinking behavior and locomotor activity of rats are eliminated by hypothalamic lesions. *Proc Natl Acad Sci USA* 69:1583–1586.

Stiles WS 1929: The nature and effects of glare. *Illuminating Engineer, London* 22(12):304–309.

Stiles WS, Crawford BH 1937: The effect of a glaring light source on extrafoveal vision. *Proceedings Royal Society London Ser. B* 122:255-280.

Stopa EG, King JC, Lydic R, et al. 1984: Human brain contains vasopressin and vasoactive intestinal polypeptide neuronal subpopulations in the suprachiasmatic region. *Brain Res* 297:159–163.

Stringham JM, Fuld K, Wenzel AJ 2003: Action spectrum for photophobia. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 20(10):1852–1858.

Stringham JM, Hammond BR Jr. 2007: The glare hypothesis of macular pigment function. *Optom Vis Sci* 84(9):859–864.

Surdu S, Fitzgerald EF, Bloom MS, Boscoe FP, Carpenter DO, et al. 2013: Occupational Exposure to Ultraviolet Radiation and Risk of Non-Melanoma Skin Cancer in a Multinational European Study. *PLoS ONE* 8(4):e62359.

Sutter E 1999/2002 (ed.): *Schutz vor optischer Strahlung – Laserstrahlung, inkohärente Strahlung, Sonnenstrahlung*. Berlin-Offenbach: VDE-VERLAG.

Takahashi JS, DeCoursey PJ, Bauman L, et al. 1984: Spectral sensitivity of a novel photoreceptive system mediating entrainment of mammalian circadian rhythms. *Nature* 308:186–188.

Terman M, Lewy AJ, Dijk DJ, et al. 1995: Light treatment for sleep disorders: consensus report. IV. Sleep phase and duration disturbances. *J Biol Rhythms* 10(2):135–147.

Thaler A, Heilig P 1974: The steady state in EOG. XIth ISCERG Symposium (1973) in Bad Nauheim *Docum Ophthalmol Proc Ser IV*, 211-216.

Thapan K, Arendt J, Skene DJ 2001: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 535(1):261–267.

Thomas NE, Krickler A, From L, et al. 2010: Associations of Cumulative Sun Exposure and Phenotypic Characteristics with Histologic Solar Elastosis. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 19:2932-2941.

- Tomany SC, Cruickshanks KJ, Klein R, Klein BEK, Knudtson MD 2004: Sunlight and the 10-Year Incidence of Age-Related Maculopathy. The Beaver Dam Eye Study. *Arch Ophthalmol*. 122:750-757.
- Turner PL, Mainster MA 2008: Circadian photoreception: ageing and the eye's important role in systemic health. *Br J Ophthalmol* 92(11):1439-1444.
- Turner PL, Van Someren EJ, Mainster MA 2010: The role of environmental light in sleep and health: effects of ocular aging and cataract surgery. *Sleep medicine reviews* 14:269-280.
- Van den Berg TJ 1995: An alysis of intraocular stray light, especially in relation to age. *Optom Vis Sci* 72(2):52-59.
- Van den Berg TJ, van Rijn LJ, Michael R, et al. 2007: Stray light effects with aging and lens extraction. *Am J Ophthalmol* 144(3):358-363.
- Van den Pol AN, Cao V, Heller HC 1998: Circadian system of mice integrates brief light stimuli. *Am J Physiol* 275:R654-R657.
- Vondrasová D, Hájek I, Illnerová H 1997: Exposure to long summer days affects the human melatonin and cortisol rhythms. *Brain Res* 759:166-170.
- Vos JJ 1984: Disability glare – a state of the art report. *Commission Internationale del' Eclairge J* 3(2):39-53.
- Vos JJ, van den Berg TJ 1999: Report on disability glare. *CIE Collection on Vision and Color* 135:1-9.
- Vos JJ 2003a: On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation. *Clinical & experimental optometry journal of the Australian Optometrical Association* 86:363-370.
- Vos JJ 2003b: Reflections on glare. *Lighting Research and Technology* 35:163-175.
- Waterhouse J, Minors D, Folkard S, et al. 1998: Light of domestic intensity produces phase shifts of the circadian oscillator in humans. *Neurosci Lett* 245:97-100.
- Weaver DR 1998: The suprachiasmatic nucleus: a 25-year retrospective. *J Biol Rhythms* 13(2):100-112.
- Welsh DK, Logothetis DE, Meister M, et al. 1995: Individual neurons dissociated from rat suprachiasmatic nucleus express independently phased circadian firing rhythms. *Neuron* 14:697-706.
- Wever R 1970: Zur Zeitgeber-Stärke eines Licht-Dunkel-Wechsels für die circadiane Periodik des Menschen. *Pfluegers Arch* 321:133-142.
- Wielgus AR, Roberts JE 2012: Retinal Photodamage by Endogenous and Xenobiotic Agents. *Photochemistry and Photobiology* 88:1320-1345.
- Williams LH, Shors AR, Barlow WE, Solomon C, White E 2011: Identifying Persons at Highest Risk of Melanoma Using Self-Assessed Risk Factors. *J Clin Exp Dermatol Res* 2:129.

- Whitaker D, Elliott DB, Steen R 1994: Confirmation of the validity of the psychophysical light scattering factor. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 35(1):317–321.
- Winfree AT 1970: Integrated view of resetting a circadian clock. *J Theor Biol* 28:327–374.
- Winfree AT 1973: Resetting the amplitude of *Drosophila*'s circadian chronometer. *J Comp Physiol* 85:105–140.
- Winfree, AT 1980: *The geometry of biological time*. New York: Springer-Verlag.
- Winkler BS, Boulton ME, Gottsch JD, Sternberg P 1999: Oxidative damage and age-related macular degeneration. *Mol. Vis.* 5:32.
- Wirtschaftler JD, Bourassa CM 1966: Binocular facilitation of discomfort with high luminances. *Arch Ophthalmol* 75(5):683–688.
- Wittlich M 2010: *Blendung - Theoretischer Hintergrund*. Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der DGUV. Sankt Augustin: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA).
- Wolf E 1960: Glare and age. *Arch Ophthalmol* 64(Oct): 502–514.
- Wong KY, Dunn FA, Berson DM 2005: Photoreceptor adaptation in intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. *Neuron* 48(6):1001–1010.
- Woo DK, Eide MJ 2010: Tanning beds, skin cancer, and vitamin D: an examination of the scientific evidence and public health implications. *Dermatologic Therapy* 23: 61–71.
- Wordenweber B, Wallaschek J, Boyce P, Hoffman D 2010: *Automotive Lighting and Human Vision*. Berlin: Springer-Verlag 265–300.
- Wright KP Jr, Hughes RJ, Kronauer RE, et al. 2001: Intrinsic near-24-h pacemaker period determines limits of circadian entrainment to a weak synchronizer in humans. *Proc Natl Acad Sci USA* 98(24):14027–14032.
- Wright KP Jr, Gronfier C, Duffy JF, et al. 2005: Intrinsic period and light intensity determine the phase relationship between melatonin and sleep in humans. *J Biol Rhythms* 20(2):168–177.
- Wyatt JK, Ritz-De Cecco A, Czeisler CA, et al. Circadian temperature and melatonin rhythms, sleep, and neurobehavioral function in humans living on a 20-h day. *Am J Physiol* 1999; 277:R1152–R1163.
- Wyatt JK, Cajochen C, Ritz-De Cecco A, et al. 2004: Low-dose, repeated caffeine administration for circadian-phase-dependent performance degradation during extended wakefulness. *Sleep* 27(3):374–381.
- Wyatt JK, Stepanski EJ, Kirkby J 2006: Circadian phase in delayed sleep phase syndrome: predictors and temporal stability across multiple assessments. *Sleep* 29(8):1075–1080.
- Yang L, Veierød MB, Lof M, Sandin S, Adami H-O, Weiderpass E 2011: Prospective Study of UV Exposure and Cancer Incidence Among Swedish Women. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 20(7):1358–1367.

Zaidi FH, Hull JT, Peirson SN, et al. 2007: Short-wavelength light sensitivity of circadian, pupillary, and visual awareness in humans lacking an outer retina. *Curr Biol* 17(24):2122–2128.

Zeitzer JM, Dijk DJ, Kronauer R, Brown E, Czeisler C 2000: Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *The Journal of physiology* 526(3):695-702.

Zeitzer JM, Kronauer RE, Czeisler CA 1997: Photopic transduction implicated in human circadian entrainment. *Neurosci Lett* 232:135–138.

Zeitzer JM, Dijk DJ, Kronauer RE, et al. 2000: Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *J Physiol (Lond)* 526(3):695–702.

Zeitzer JM, Khalsa SB, Boivin DB, et al. 2005: Temporal dynamics of late-night photic stimulation of the human circadian timing system. *Am J Physiol* 289(3):R839–R844.

Zeitzer JM, Ruby NF, Fiscaro RA, Heller HC 2011: Response of the human circadian system to millisecond flashes of light. *PloS one* 6:e22078.