



Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



# Lichtimmissionen



Fachtagung am 17. Oktober 2012





Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



# Lichtimmissionen

Fachtagung am 17. Oktober 2012

UmweltSpezial

## Impressum

Lichtimmissionen  
Fachtagung des LfU am 17.10.2012

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Tel.: 0821 9071-0  
Fax: 0821 9071-5556  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Redaktion:

LfU Referat 12

### Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt / Autoren

### Druck:

Eigendruck Bayer. Landesamt für Umwelt  
Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

### Stand:

Oktober 2012

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Lichttechnische Grundlagen, Aktuelles und Hinweise zur Beurteilung von Lichtimmissionen</b>	<b>5</b>
Dr. Thomas Kurz, Andrea Wellhöfer, LfU	
<b>Licht, Beleuchtung und die menschliche Gesundheit</b>	<b>21</b>
Dr. Barbara Knab, München	
<b>Blendung am Büroarbeitsplatz</b>	<b>26</b>
Dr.-Ing. Jan Wienold, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Thermal Systems and Buildings 26	
<b>Lichtimmissionen durch Sonnenlichtreflexionen – Blendwirkung von Photovoltaikanlagen</b>	<b>30</b>
Jens Teichelmann, IBT Ingenieurbüro Teichelmann	
<b>Tagungsleitung / Referenten</b>	<b>55</b>



# Lichttechnische Grundlagen, Aktuelles und Hinweise zur Beurteilung von Lichtimmissionen

Dr. Thomas Kurz, Andrea Wellhöfer, LfU

## 1 Physikalische Grundlagen und Begriffe

Licht besteht physikalisch betrachtet aus elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen von 380 nm (Grenzbereich zur UV-Strahlung) bis 780 nm (Grenzbereich zur Infrarot-Strahlung). Das Auge ist in der Lage, diesen Wellenlängenbereich wahrzunehmen und interpretiert

- die Amplitude der elektromagnetischen Welle (Feldstärke, Leistungsdichte) als Helligkeit (Stärke, „Intensität“),
- die Frequenz bzw. Wellenlänge als (Licht)Farbe.

Das Auge ist dabei in der Lage, auf Leuchtdichten (siehe Abschnitt 1.5) in Größenordnungen zwischen  $10^{-5}$  cd/m<sup>2</sup> und  $10^5$  cd/m<sup>2</sup> zu adaptieren. Die Empfindlichkeit des Auges ist auch von der Wellenlänge des Lichts (Farbe) abhängig. Man unterscheidet zwischen photopischem Sehen (Tagsehen) und skotopischem Sehen (Nachtsehen). Tagsüber besitzt das Auge seine größte Empfindlichkeit für Licht der Wellenlänge 555 nm (grün-gelb), nachts bei etwa 507 nm (grün-blau).

### 1.1 Photometrisches Strahlungsäquivalent und Hellempfindlichkeitskurve (V-Lambda-Kurve)

Während für ein Radiometer Licht konstanter Strahlungsleistung unabhängig von seiner Wellenlänge bei ansonsten gleichen Bedingungen die gleiche Bestrahlungsstärke (in W/m<sup>2</sup>) hervorruft, nimmt das Auge Licht verschiedener Wellenlängen verschieden hell wahr. Neben den physikalischen, radiometrischen Größen (ausgehend von der Strahlungsleistung in Watt) wurden daher physiologische, photometrische Größen eingeführt (ausgehend vom Lichtstrom in Lumen), die diesem Umstand Rechnung tragen. Unter sonst gleichen Bedingungen nimmt das Auge Licht verschiedener Wellenlängen bei konstantem Lichtstrom (und dadurch variabler Strahlungsleistung) gleich hell wahr.

Das photometrische Strahlungsäquivalent  $K(\lambda)$  gibt für das Tagsehen an, welchen Lichtstrom Licht einer bestimmten Wellenlänge bei einer Strahlungsleistung von 1 W aufweist (Abb. 1). Für das Nachtsehen besteht mit  $K'(\lambda)$  eine analoge Kurve.

Das photometrische Strahlungsäquivalent ist der Proportionalitätsfaktor zwischen radiometrischen und photometrischen Größen. Zur Kennzeichnung photometrischer Größen wird meist der Index *v* (für *visual*) an das Formelzeichen angefügt.

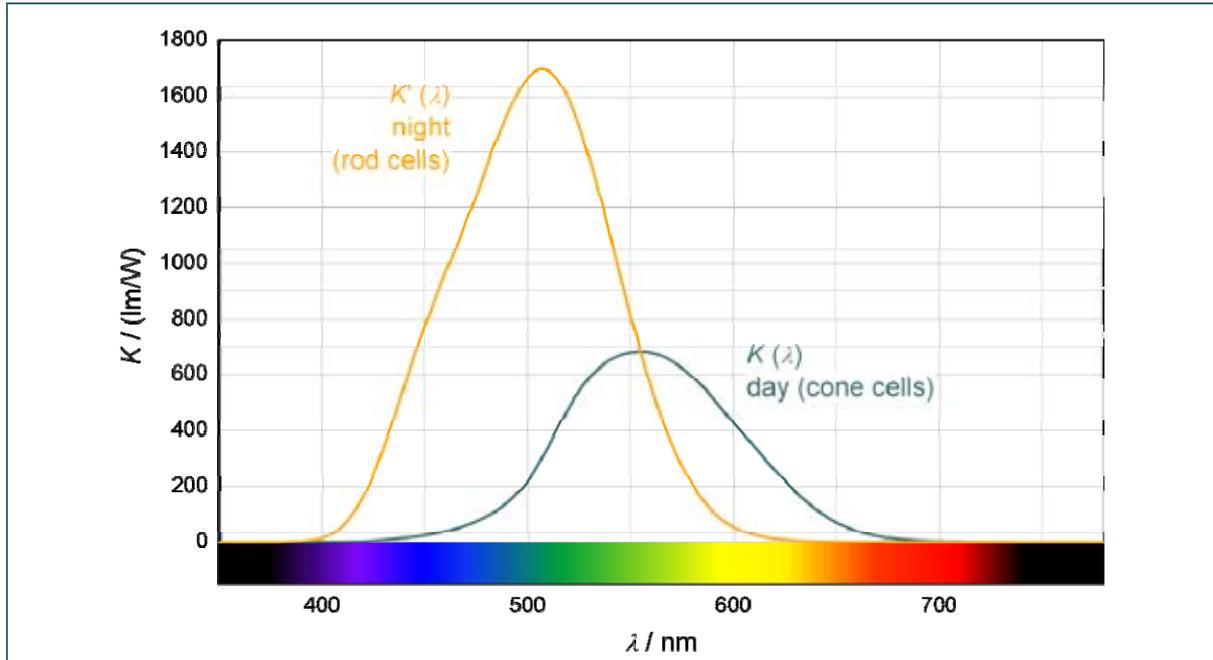


Abb. 1: Photometrische Strahlungsäquivalente  $K(\lambda)$  für Tagsehen und  $K'(\lambda)$  für Nachtsehen. (Datenquelle: DIN 5031-2 [1]; Bild: Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Die auf maximale Empfindlichkeit normierten, dimensionslosen Kurven  $V(\lambda) = K(\lambda) / K(555 \text{ nm})$  bzw.  $V'(\lambda) = K'(\lambda) / K(507 \text{ nm})$  werden als V-Lambda- oder Hellempfindlichkeitskurven bezeichnet. Sie beschreiben die spektrale Hell-Empfindlichkeit des menschlichen Auges.

## 1.2 Raumwinkel $\Omega$

Der Raumwinkel bezeichnet die Fläche  $S$ , die ein Raumbereich auf einer Einheitskugeloberfläche aufspannt (Abb. 2). Allgemein entspricht der Raumwinkel dem Quotienten der Projektionsfläche  $S$  dividiert durch das Quadrat des Kugelradius  $r$ . Zur Kennzeichnung des Raumwinkels dient die (eigentlich dimensionslose) Einheit Steradian ( $1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ).

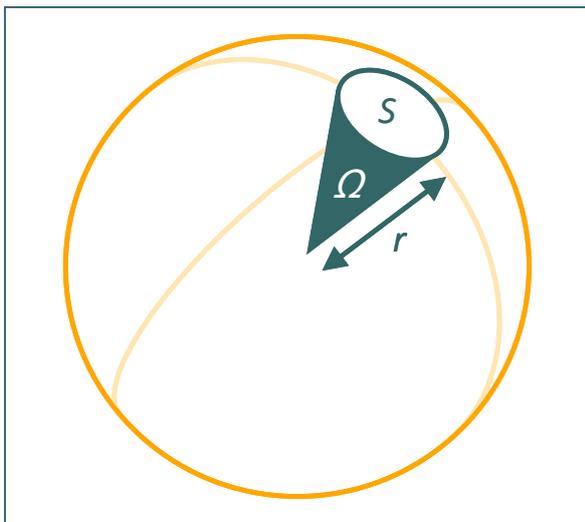


Abb. 2:  
Raumwinkel  $\Omega = S / r^2$ .  
(Bild: Bayerisches  
Landesamt für Umwelt)

Der volle Raumwinkel beträgt  $4\pi \text{ sr} \approx 12,57 \text{ sr}$ .

Ein Kegel mit dem Öffnungswinkel  $\alpha$  deckt den Raumwinkel  $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos(\alpha / 2))$  ab.

### 1.3 Lichtstrom $\Phi_v$

Der Lichtstrom ist die photometrische Entsprechung zur Strahlungsleistung (Strahlungsleistung einer Lichtquelle, bewertet mit  $V(\lambda)$ ). Er ist eine emissionsbezogene Größe und wird angegeben in der Einheit Lumen (1 lm).

### 1.4 Lichtstärke $I_v$

Die Lichtstärke ist die Strahlungsleistung einer Lichtquelle pro Raumwinkel, gewichtet mit  $V(\lambda)$ . Sie gibt damit den Lichtstrom an, den eine Lichtquelle in einen bestimmten Raumwinkel abstrahlt. Sie ist eine emissionsbezogene Größe und wird angegeben in der Einheit Candela (1 cd = 1 lm/sr).

### 1.5 Leuchtdichte $L_v$

Die Leuchtdichte ist die Strahlungsleistung einer Lichtquelle pro Raumwinkel und auf die Größe der leuchtenden Fläche bezogen, gewichtet mit  $V(\lambda)$ . Sie ist das photometrische Maß für das, was das Auge als Helligkeit einer Fläche wahrnimmt. Sie ist eine emissionsbezogene Größe und wird angegeben in der Einheit Candela pro Quadratmeter (1 cd/m<sup>2</sup>).

### 1.6 Beleuchtungsstärke $E_v$

Die Beleuchtungsstärke ist das photometrische Analogon zur Bestrahlungsstärke (Einheit: Watt/Quadratmeter). Sie gibt an, welche Strahlungsleistung auf eine Empfängerfläche trifft und gewichtet diesen Wert mit  $V(\lambda)$ , d. h. den Lichtstrom pro Flächenelement. Sie ist eine immissionsbezogene Größe und wird in der Einheit Lux angegeben (1 lx = 1 lm/m<sup>2</sup>).

Bei schrägem Lichteinfall trägt nur die senkrecht auf die Empfängerfläche auftretende Komponente des einfallenden Lichtstroms zur Beleuchtung bei ( $\alpha$  ist hier der Winkel zwischen Lichteinfallrichtung und Flächennormale,  $r$  der Abstand zwischen Leuchtquelle und Empfänger):

$$E_v = \cos \alpha \cdot d\Phi_v / dA = I_v \cdot \cos \alpha / r^2 \quad (1)$$

## 2 Immissionsquellen

Immissionsquellen sind künstliche, technische Lichtquellen, die auf den Immissionsort einwirken, sowie bauliche und technische Anlagen, die die Beleuchtungssituation am Immissionsort durch natürliche Lichtquellen verändern. Dazu zählen:

- Scheinwerfer zur Beleuchtung von Sport- und Freizeitstätten
- Straßenleuchten
- Lichtreklamen (einschließlich LED-Plakatwände, Videowände, etc.)
- beleuchtete Gebäudefassaden
- Fenster von stark ausgeleuchteten Arbeitsräumen
- Wachstumsbeleuchtung von Gewächshäusern
- bewegte Lichtstrahler wie Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen oder Skybeamer
- technische Einrichtungen wie z. B. Schweißanlagen oder Hochfackeln
- reflektierende Gebäudeelemente (z. B. Photovoltaikanlagen)
- bewegte Anlagenelemente (z. B. Rotorblätter von Windenergieanlagen)

Die in der Nachbarschaft von Beleuchtungsanlagen auftretenden Lichteinwirkungen bewegen sich im Bereich der Belästigung. Physische Schäden können in der Regel ausgeschlossen werden. Laser, deren Anwendung spezielle Vorschriften zum Schutz der Beschäftigten regeln, bleiben hier außer Betracht.

### 3 Auswirkungen von Lichtquellen

Je nach Art der Immissionssituation können sich Lichtimmissionen als Umwelteinwirkungen für einen Betroffenen auf folgende Art bemerkbar machen:

#### 3.1 Raumaufhellung durch künstliche Lichtquellen

Hierunter wird die Aufhellung des Wohnbereiches, insbesondere Schlafzimmer, aber auch Wohnzimmer, Terrasse oder Balkon, durch in der Nachbarschaft vorhandene Beleuchtungsanlagen oder Leuchtkörper verstanden. Bei übermäßiger Aufhellung ergibt sich eine eingeschränkte Nutzung dieser Wohnbereiche.

Die Aufhellung wird durch die mittlere Beleuchtungsstärke  $\bar{E}_F$  in der Fensterebene beschrieben.

#### 3.2 Blendung durch künstliche Lichtquellen

Bei der Blendung durch Lichtquellen wird zwischen der physiologischen und psychologischen Blendung unterschieden. Während die physiologische Blendung, bei der das Sehvermögen durch Streulicht im Glaskörper des Auges vermindert wird, bei Immissionssituationen im allgemeinen nicht auftritt, werden die Anwohner häufig durch psychologische Blendung belästigt, selbst wenn sich die Lichtquelle in größerer Entfernung befindet, so dass sie im Wohnbereich keine nennenswerte Aufhellung erzeugt.

Die Belästigung entsteht durch die ständige und ungewollte Ablenkung der Blickrichtung zur Lichtquelle hin, die bei großem Unterschied der Leuchtdichte der Lichtquelle zur Umgebungsleuchtdichte eine ständige Adaptation des Auges auslöst. Für die Störwirkung sind daher die Leuchtdichte  $\bar{L}_S$  der Lichtquelle S im Verhältnis zur Umfeldleuchtdichte  $\bar{L}_U$  und der Raumwinkel  $\Omega_S$  der Lichtquelle, vom Betroffenen (Immissionsort) aus gesehen, maßgebend.

#### 3.3 Blendung durch Sonnenlicht

Die Sonne erreicht Leuchtdichten von bis zu  $1,6 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$ . Selbst bei niedrigen Sonnenständen von  $3^\circ$  über dem Horizont treten noch Leuchtdichten um  $0,3 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$  auf. Anders als bei der Blendung durch künstliche Lichtquellen kommt es bei diesen Leuchtdichten zu physiologischer Blendung, mit der eine Reduktion des Sehvermögens durch Streulicht im Glaskörper einhergeht (Leuchtdichte bis ca.  $10^5 \text{ cd/m}^2$ ), oder zu Absolutblendung (Leuchtdichte ab ca.  $10^5 \text{ cd/m}^2$ ).

Bei Absolutblendung treten im Gesichtsfeld so hohe Leuchtdichten auf, dass eine Adaptation des Auges nicht mehr möglich ist. Da eine direkte Gefährdung des Auges eintreten kann, kommt es zu Schutzreflexen wie dem Lidschlussreflex oder dem Abwenden des Kopfs. [2]

#### 3.4 Bewegte Lichtstrahler

Zu Werbezwecken werden auch bewegte Lichtstrahler (sogenannte Skybeamer) eingesetzt. Sie sind am Nachthimmel weithin sichtbar und können zu Irritationen und Ablenkungen der Autofahrer, ver-

bunden mit einer Erhöhung des Unfallrisikos führen. Außerdem ist eine ungestörte Betrachtung des Sternenhimmels in einem weiten Bereich nicht mehr möglich. Die Lichtstrahler bewirken aber weder eine Aufhellung ihrer Umgebung noch lösen sie eine Blendung aus, soweit die Lichtquellen selbst nicht einsehbar sind. Sie entziehen sich damit den in den Abschnitten 3.1. und 3.2. genannten Beurteilungskriterien. Die für derartige Anlagen erforderliche baurechtliche Genehmigung kann versagt werden, wenn die Sicherheit des Verkehrs gefährdet ist, oder die Kommunen von ihrem Gestaltungsrecht Gebrauch machen und solche Werbeanlagen per Satzung verbieten.

### **3.5 Schatten und Lichtblitze bewegter Anlagenelemente (insbesondere Windenergieanlagen)**

Beleuchtungs- und Abschattungssituationen, die durch natürliche Lichtquellen wie die Sonne entstehen, werden durch die Baugesetze geregelt (Mindestabstand von Gebäuden zum Nachbargrundstück oder maximale Bauhöhe).

Windenergieanlagen können zwei verschiedene Immissionsarten hervorrufen:

- Periodischer Schattenwurf ist die wiederkehrende Verschattung des direkten Sonnenlichtes durch die Rotorblätter einer Windenergieanlage. Der Schattenwurf ist dabei abhängig von den Wetterbedingungen, der Windrichtung, dem Sonnenstand und den Betriebszeiten der Anlage. Vom menschlichen Auge werden Helligkeitsunterschiede größer als 2,5 % wahrgenommen.
- Unter dem Begriff Disco-Effekt werden Lichtblitze verstanden. Es handelt sich um periodische Reflexionen des Sonnenlichtes an den Rotorblättern. Sie sind abhängig vom Glanzgrad der Rotoroberfläche und vom Reflexionsvermögen der gewählten Farbe. Bei Verwendung mittelreflektierender Farben und matter Glanzgrade stellt der Disco-Effekt heutzutage i. d. R. kein Problem mehr dar.

Durch Windenergieanlagen, die zunehmend auch in der Nähe von Wohngebäuden betrieben werden, ergeben sich bewegte Schatten im Zeitraum von einigen Minuten bis über eine Stunde, die eine Wohn- oder auch Büronutzung erheblich stören und zum Teil fast unmöglich machen. Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) hat in seinem Unterausschuss „Recht“ festgestellt, dass der periodische Schattenwurf und die Lichtblitze (Disco-Effekt) als "ähnliche Umwelteinwirkungen" im Sinne des § 3 Abs. 2 BImSchG [3] einzustufen sind.

### **3.6 Reflektierende Gebäude- und Anlagenelemente**

Durch Reflexion des Sonnenlichtes an glatten Fassaden oder Gebäudeelementen wie Jalousien, Metallverkleidungen, aber unter Umständen auch an den Fensterflächen selbst, treten in der Nachbarschaft zum Teil Flächen mit hohen Leuchtdichten auf, die mit  $10^4$  cd/m<sup>2</sup> bis  $10^5$  cd/m<sup>2</sup> eine Absolutblendung auslösen können. Wenn diese Blendung über einen längeren Zeitraum vorhanden ist, werden Abhilfemaßnahmen für erforderlich gehalten.

Gemäß [4] ist die Absolutblendung in ihrer Auswirkung auf die Nachbarschaft (Lästigkeit) wie der periodische Schattenwurf zu betrachten und die Schwellenwerte für eine zulässige Einwirkdauer sind entsprechend festzusetzen.

In den vergangenen zehn Jahren hat Blendung durch Reflexionen an Bedeutung gewonnen, weil sie im Rahmen des exzessiven Ausbaus von Photovoltaikflächen – insbesondere innerhalb oder in unmittelbarer Nähe von Wohngebieten – verstärkt auftritt.

## 4 Beurteilung von Lichtimmissionen technischer Lichtquellen

Im Folgenden werden Beurteilungsverfahren und Anhaltswerte entsprechend der Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz angegeben, die bei Lichteinwirkungen von Beleuchtungsanlagen in der Nachbarschaft nicht überschritten werden sollen. Bei deren Unterschreitungen ist im Allgemeinen die Lichteinwirkung nicht als erhebliche Belästigung im Sinne des BImSchG anzusehen.

### 4.1 Raumaufhellung

Mess- und Beurteilungsgröße für die Raumaufhellung ist die mittlere Beleuchtungsstärke in der Fenserebene (Vertikal-Beleuchtungsstärke) von Wohnungen. Für Balkone oder Terrassen ist der Bereich maßgeblich, in dem Wohnnutzung als allgemein üblich anzusehen ist.

Die Raumaufhellung wird bei ausgeschalteter Zimmerbeleuchtung gemessen und ergibt sich als Differenz der Beleuchtungsstärken zwischen ein- und ausgeschalteter Lichtquelle bzw. Beleuchtungsanlage.

Als Grenzwert für die Raumaufhellung bei einer üblichen Wohnraumnutzung wurde von Hartmann et al. [5] eine Aufhellung um 3 lx in der Fensterebene im Rahmen einer Feldstudie ermittelt. Bei sensibler Nutzung der Räume (Ruhe- und Schlafraum) wurde eine Absenkung auf 1 lx für erforderlich gehalten [6], [7], [8]. Bei der Begutachtung von Beschwerdefällen über Raumaufhellung hat sich gezeigt, dass bei Beachtung der Regeln der Lichttechnik in den meisten Fällen der Wert von 3 lx eingehalten werden kann. Bei 1 lx kann ein größerer Aufwand an Schutz- und Minderungsmaßnahmen erforderlich werden.

Aufgrund zahlreicher Untersuchungen von Beschwerdefällen wurde nachstehendes Beurteilungsschema entwickelt. Dabei erschien es sinnvoll, wie bei den Regelwerken des Lärm- und Erschütterungsschutzes – z. B. TA Lärm [9] – die Anhaltswerte nach der Gebietsnutzung zu differenzieren.

#### Anhaltswerte für die Vertikal-Beleuchtungsstärke bei Beleuchtungsanlagen von gewerblichen Anlagen, Freizeit- und Sportanlagen

Anhaltswerte der Vertikal-Beleuchtungsstärke  $\bar{E}_F$ , die von einer Beleuchtungsanlage in ihrer Nachbarschaft nicht überschritten werden sollen, sind in Tabelle 1 enthalten. Eine Beleuchtungsanlage kann auch aus mehreren Einzelleuchten oder Leuchtengruppen bestehen. Beiträge von Lichtquellen anderer Betreiber sind getrennt zu erfassen und in die Beurteilung mit einzubeziehen. Bei dieser Beurteilung wird von üblichen Umgebungsbeleuchtungsverhältnissen in den jeweiligen Gebieten ausgegangen.

Tabelle 1 bezieht sich auf zeitlich konstantes und weißes oder annähernd weißes Licht, das mehrmals in der Woche jeweils länger als eine Stunde eingeschaltet ist. Wird die Anlage seltener – z. B. bei Sportstätten oder bei Ladevorgängen auf Betriebshöfen – oder kürzer betrieben, sind Einzelfallbetrachtungen anzustellen.

Beleuchtungsanlagen mit intensiv farbigem Licht oder mit zeitlich veränderlichen Betriebszuständen<sup>1</sup> hinsichtlich Helligkeit oder Farbe sind im Allgemeinen lästiger als zeitlich konstante Lichtquellen. Bei Beleuchtungsanlagen mit auffälligem Wechsellicht (z. B. schnelle Hell-Dunkel-Übergänge, blitzlichtartige Vorgänge usw.), ist in Abhängigkeit von der Periodendauer oder der Frequenz die maximale Beleuchtungsstärke  $E_F$  mit einem Faktor zu multiplizieren und mit den Immissionsrichtwerten der Tabelle 1 zu vergleichen. Der Lästigkeitsfaktor kann Tabelle 2 entnommen werden.

<sup>1</sup> Die Betriebszustände wechseln in weniger als fünf Minuten.

Bei Lichanlagen, die intensiv farbiges Licht aussenden, wird empfohlen, die mittlere Beleuchtungsstärke einem Faktor 2 zu multiplizieren, der die subjektiv empfundene Störwirkung berücksichtigt. Der nach der Multiplikation erhaltene Wert ist mit den Immissionsrichtwerten der Tabelle 1 zu vergleichen.

Die Faktoren gelten jedoch nicht kumulativ; es ist der höhere Wert heranzuziehen.

Tab. 1: Immissionsrichtwerte der mittleren Beleuchtungsstärke  $\bar{E}_F$  in der Fensterebene von Wohnungen bzw. bei Balkonen oder Terrassen auf den Begrenzungsflächen für die Wohnnutzung, hervorgerufen von Beleuchtungsanlagen während der Dunkelstunden (ausgenommen öffentliche Straßenbeleuchtungsanlagen).

Immissionsort; Gebietsart nach BauNVO [10]	mittlere Beleuchtungsstärke $\bar{E}_F$	
	06:00 Uhr bis 22:00 Uhr	22:00 Uhr bis 06:00 Uhr
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten <sup>1</sup>	1 lx	1 lx
reine Wohngebiete (§ 3), allgemeine Wohngebiete (§ 4), besondere Wohngebiete (§ 4a), Kleinsiedlungsgebiete (§ 2), Erholungsgebiete (§ 10)	3 lx	1 lx
Dorfgebiete (§ 5), Mischgebiete (§ 7)	5 lx	1 lx
Kerngebiete <sup>2</sup> (§ 7), Gewerbegebiete (§ 8), Industriegebiete (§ 9)	15 lx	5 lx
<sup>1</sup> Wird die Beleuchtungsanlage regelmäßig weniger als eine Stunde pro Tag eingeschaltet, gelten die Richtwerte für reine Wohngebiete. <sup>2</sup> In Einzelfällen können Kerngebiete bei geringer Umgebungsbeleuchtung wie Mischgebiete beurteilt werden.		

Tab. 2: Faktor bei Wechsellicht<sup>2</sup>

Periodendauer	Faktor	Frequenz	Faktor
≥ 5 min	1	> 0,67 bis 18 Hz	5
5 min bis 4 s	1,5	19 bis 24 Hz	3
4 s bis 2 s	2	25 bis 30 Hz	2
2 s bis 1,5 s	3	> 30 Hz	1
Fortsetzung rechte Spalten			

### Zeit und Ort der Messung; Messdurchführung

Für die Messung ist ein Zeitraum auszuwählen, der für die zu beurteilende Lichtsituation typisch ist. Werden die Messwerte z. B. durch Regen, Schnee oder Nebel beeinflusst, sind die Messergebnisse nicht repräsentativ für die Immissionssituation.

Messort bei der Beurteilung ist für schutzwürdige Räume bei geöffneten Fenstern die jeweilige Fensterebene; bei Balkonen oder Terrassen sind es sinngemäß die Begrenzungsflächen für die Wohnnutzung. Es sollte das am stärksten betroffene Fensters von Aufenthaltsräumen in Wohnungen für die Messung ausgewählt werden. Bei Terrassen oder Balkonen soll die Vertikal-Beleuchtungsstärke

<sup>2</sup> Bei sinusförmigen Schwankungen ± 15%, nächst niedrigen Tabellenwert verwenden.

ebenfalls im Bereich der stärksten Aufhellung gemessen werden, soweit in diesem Bereich eine Wohnnutzung als allgemein üblich anzusehen ist. Bei örtlich unterschiedlicher Beleuchtungsstärke ist gegebenenfalls an mehreren, für die Aufhellung maßgebenden Punkten zu messen und aus den Messwerten der arithmetische Mittelwert zu bilden.

Die mittlere Beleuchtungsstärke wird vor dem geöffneten Fenster oder unmittelbar vor der Scheibe ermittelt. Wird abweichend davon innen hinter der Fensterscheibe gemessen, so muss der Einfluss der Scheibe berücksichtigt werden. Bei sauberen Scheiben sind dabei die Messwerte mit folgenden Korrekturfaktoren (Näherungswerte) zu multiplizieren:

- Einfachverglasung: Faktor 1,1
- Doppelverglasung: Faktor 1,25
- Dreifachverglasung: Faktor 1,4
- beschichtete Wärmeschutzverglasung: Faktor 1,7.

Beleuchtungsstärkeanteile von nicht zu beurteilenden Fremdlichtquellen aus der Umgebung sind z. B. durch Ausblendung oder Differenzmessung zu eliminieren.

Das Beleuchtungsstärkemessgerät („Luxmeter“) muss es gestatten, 0,1 lx zu messen, d. h. seine Auflösung muss 0,01 lx betragen. Die Geräte müssen mindestens den Anforderungen der Klasse B nach DIN 5032, Teil 7 [11] mit einem Gesamtfehler unter 10 % genügen.

## 4.2 Blendung durch einzelne Lichtquellen im Gesichtsfeld

Die psychologische Blendwirkung einer Lichtquelle lässt sich nach [4], [12] durch das Blendmaß  $k_S$  beschreiben<sup>3</sup>:

$$k_S = \frac{\bar{L}_S}{\text{cd/m}^2} \cdot \sqrt{\frac{\Omega_S}{\bar{L}_U / (\text{cd/m}^2)}} \stackrel{(*)}{=} \frac{\Omega_M \cdot \bar{L}_M / (\text{cd/m}^2)}{\sqrt{\Omega_S \cdot \bar{L}_U / (\text{cd/m}^2)}}; \quad \text{wobei } \bar{L}_S = \begin{cases} L_M \cdot \Omega_M / \Omega_S & \text{falls } \Omega_M > \Omega_S \\ L_M & \text{sonst} \end{cases}. \quad (2)$$

Hierin sind:

- $k_S$  das Blendmaß (siehe Tab. 3).
- $\bar{L}_S$  die mittlere Leuchtdichte der zu beurteilenden Blendlichtquelle in  $\text{cd/m}^2$ .
- $\bar{L}_M$  die mittlere Leuchtdichte im Messfeld des Leuchtdichtemessgeräts in  $\text{cd/m}^2$ .
- $\bar{L}_U$  die maßgebende Leuchtdichte der Umgebung der Blendlichtquelle in  $\text{cd/m}^2$ ; falls die aus Messungen ermittelte Umgebungsleuchtdichte kleiner als  $0,1 \text{ cd/m}^2$  ist, wird mit  $\bar{L}_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$  gerechnet.
- $\Omega_S$  der Raumwinkel der vom Immissionsort aus gesehenen Blendlichtquelle in sr. Für kleinere Raumwinkel als  $10^{-6} \text{ sr}$  liegt eine Punktquelle vor, die durch  $\Omega_S = \text{---}^6 \text{ sr}$  beschrieben wird. Für größere Raumwinkel als  $10^{-2} \text{ sr}$  liegt eine Flächenquelle vor, für die  $\Omega_M = \Omega_S = \text{---}^2 \text{ sr}$  eingesetzt werden sollte.
- $\Omega_M$  der Raumwinkel der Messfeldblende des Leuchtdichtemessgeräts.

<sup>3</sup> Eine entsprechende Vorgehensweise wurde auch schon in [13] vorgeschlagen.

Das Blendmaß soll die Immissionsrichtwerte  $k$  für Blendung gemäß Tabelle 3 nicht überschreiten.

Das Beurteilungsverfahren gilt für zeitlich konstantes Licht, das mehrmals in der Woche jeweils länger als eine Stunde eingeschaltet ist. Vom Immissionsort aus muss zudem bei üblicher Position der Blick zur Blendquelle hin möglich sein.

Die Blendung von zeitlich veränderlichem Licht wird im Allgemeinen als lästiger empfunden als zeitlich konstantes Licht. Die stärkere Störfempfindung von Wechsellicht kann bei der Beurteilung der Blendung näherungsweise durch einen Faktor bis zu 5 berücksichtigt werden, um die die Messwerte oder Berechnungsergebnisse vor dem Vergleich mit den Immissionsrichtwerten erhöht werden.

Tab. 3: Immissionsrichtwerte  $k$  zur Festlegung der maximal zulässigen Blendung durch technische Lichtquellen während der Dunkelstunden.

Immissionsort; Gebietsart nach BauNVO [10]	Immissionsrichtwert $k$		
	06:00 Uhr bis 20:00 Uhr	20:00 Uhr bis 22:00 Uhr	22:00 Uhr bis 06:00 Uhr
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten <sup>1</sup>	32	32	32
reine Wohngebiete (§ 3), allgemeine Wohngebiete (§ 4), besondere Wohngebiete (§ 4a), Kleinsiedlungsgebiete (§ 2), Erholungsgebiete (§ 10)	96	64	32
Dorfgebiete (§ 5), Mischgebiete (§ 7)	160	160	32
Kerngebiete <sup>2</sup> (§ 7), Gewerbegebiete (§ 8), Industriegebiete (§ 9)	—	—	160
<sup>1</sup> Wird die Beleuchtungsanlage regelmäßig weniger als eine Stunde pro Tag eingeschaltet, gelten die Richtwerte für reine Wohngebiete. <sup>2</sup> In Einzelfällen können Kerngebiete bei geringer Umgebungsbeleuchtung wie Mischgebiete beurteilt werden.			

Als Ausgangspunkt zur Festlegung des Zahlenwertes  $k$  wird nach [5], [8] eine tolerable Leuchtdichte  $L_{\max} = 1000 \text{ cd/m}^2$  für  $\Omega_S = 1 \cdot 10^{-4} \text{ sr}$  und  $\bar{L}_U = 0,1 \text{ cd/m}^2$

angesehen. Daraus ergibt sich ein Wert für  $k = 32$ . Mit dieser Festlegung werden die in Tabelle 3 angegebenen Zahlenwerte abgeleitet, die nach der baulichen Nutzung des Gebietes, in dem ein Immissionsort liegt, und nach Tages- und Nachtzeiten gestaffelt sind. Auf Grund von umfangreichen Untersuchungen an Sportanlagen zeigte es sich als erforderlich, eine weitere Unterscheidung der Zeiträume in frühe und späte Abendstunden einzuführen.

Für Straßenleuchten ist die Einhaltung der Anhaltswerte in Verbindung mit den  $k$ -Werten aus Tabelle 3 anzustreben.

### Zeit und Ort der Messung; Messdurchführung

Für die Bestimmung des Blendmaßes  $k_S$  sind die mittlere Leuchtdichte  $\bar{L}_S$  der zu beurteilenden Blendlichtquelle, der zugehörige Raumwinkel  $\Omega_S$  und die Umgebungsleuchtdichte  $\bar{L}_U$  zu ermitteln und mit den Immissionsrichtwerten  $k$  für Blendung nach Tabelle 3 zu vergleichen.

Die Messung erfolgt bei Dunkelheit und klarem Wetter vom Immissionsort aus, z. B. vom Aufenthaltsraum bei geöffnetem Fenster, vom Balkon oder von der Terrasse aus. Es sollten möglichst mehrere Messfeldblenden mit Winkeldurchmessern im Bereich von ca.  $10'$  bis ca.  $10^\circ$  zur Verfügung stehen.

Die Wahl der Messblende (Raumwinkel  $\Omega_M$ ) ist in weiten Grenzen beliebig. Bedingung ist nur, dass die Blendquelle repräsentativ ist und kein Fremdlicht erfasst wird. Ist die Blende kleiner als die Lichtquelle, dann besteht die Gefahr, dass die Messwerte nicht repräsentativ für die gesamte leuchtende Fläche sind, was durch mehrere Messwerte an verschiedenen Stellen zu prüfen ist. Wegen der mit sehr kleinen Blenden verbundenen Richtungsunsicherheiten sollte mit möglichst großen Blenden gearbeitet und die mittlere Leuchtdichte der zu beurteilenden Lichtquelle aus

$$\bar{L}_S = \begin{cases} L_M \cdot \Omega_M / \Omega_S & \text{falls } \Omega_M > \Omega_S \\ L_M & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

berechnet werden. Wesentlich ist, dass bei der Messung der Leuchtdichte keine Fremdquellen erfasst werden.

Die Raumwinkel zu den Messblenden werden für Kreiskegel mit dem vollen Öffnungswinkel  $\alpha$  wie folgt berechnet:

$$\Omega_M = 2\pi \cdot (1 - \cos(\alpha / 2)). \quad (4)$$

Das Leuchtdichtemessgerät muss es gestatten, von  $0,01 \text{ cd/m}^2$  bis  $10^6 \text{ cd/m}^2$  zu messen (in mehreren Stufen). Seine Auflösung muss 1 % des Skalenendwerts des jeweiligen Messbereichs betragen. Eine beleuchtete Digitalanzeige ist empfehlenswert. Die Geräte müssen mindestens den Anforderungen der Klasse B nach DIN 5032, Teil 7 [11] entsprechen und einem Gesamtfehler unter 15 % genügen. Entsprechendes gilt auch für Leuchtdichtemesskameras. Bei der Messung ist auf genaue Fokussierung und Ausrichtung des Messgeräts zu achten.

### Umgebungsleuchtdichte

Die Leuchtdichte  $\bar{L}_U$  der Umgebung ist die durch Messung ermittelte mittlere Leuchtdichte in einem Winkelbereich von  $\alpha_U = \pm 10^\circ$  um die zu beurteilende Lichtquelle.

Messungen in schutzwürdigen Räumen sind bei geöffnetem Fenster durchzuführen. Bei der Messung ist die Zimmer- bzw. Terrassen- oder Balkonbeleuchtung auszuschalten. Die zu beurteilende Lichtquelle bleibt jedoch eingeschaltet, da diese die Umgebungsleuchtdichte beeinflussen kann.

Die Umgebungsleuchtdichte kann mit einem Leuchtdichtemessgerät mit möglichst großer Messfeldblende (Winkeldurchmesser etwa  $> 1^\circ$ ) ermittelt werden, indem räumlich repräsentativ an mehreren Punkten im Winkelbereich von  $\pm 10^\circ$  um die zu beurteilende Lichtquelle gemessen wird. Die zu beurteilende Lichtquelle und eventuelle weitere Blendquellen im  $\pm 10^\circ$ -Feld bleiben dabei ausgespart. Die Umgebungsleuchtdichte  $\bar{L}_U$  ist der arithmetische Mittelwert der einzelnen Messwerte.

Die als Ersatzverfahren angegebene Bestimmung von  $\bar{L}_U$  [6], [7] durch einen Beleuchtungsstärkemesser mit einem  $20^\circ$ -Tubus ist wegen zu großer Ungenauigkeiten ungeeignet.

### Raumwinkel der Blendlichtquelle

Der Raumwinkel  $\Omega_S$  einer Lichtquelle wird bei direkt abstrahlenden Lampen durch die vom Immissionsort aus sichtbaren Lampenabmessungen aufgespannt. Wenn das Licht durch Reflexion, Refraktion oder Streuung an der Leuchte zum Immissionsort gelenkt wird, sind die vom Immissionsort aus sichtbaren Licht abstrahlenden Leuchtenflächen zu Grunde zu legen<sup>4</sup>.

Die Ermittlung des Raumwinkels  $\Omega_S$  kann rechnerisch aus den Abmessungen der Blendlichtquelle, den Neigungswinkeln relativ zum Beobachter und dem Abstand zwischen der Blendlichtquelle und

<sup>4</sup> „scheinbare“ Leuchtengröße, d. h. die Flächenprojektion auf eine Ebene senkrecht zur Verbindungsgeraden zwischen Immissionsort und Leuchte.

dem Immissionsort durchgeführt werden. Im Allgemeinen ist es jedoch einfacher, den Raumwinkel aus photographischen Aufnahmen auszumessen, die vom Immissionsort aus mit Hilfe einer Teleoptik aufgenommen wurden. Wird eine digitale Kamera dazu verwendet, muss sie über eine ausreichende Bildauflösung (Pixelzahl) verfügen. Dieses Verfahren wird im Detail in [7] beschrieben. Da bei Lichtquellen mit hohen Leuchtdichten auf Grund der Lichtbrechung in der Kameraoptik ein Strahlenkranz um die Lichtquelle entsteht, wird der Raumwinkel häufig zu groß ermittelt.

### 4.3 Blendung durch mehrere Lichtquellen im Gesichtsfeld

Bei mehreren räumlich getrennten Beleuchtungsanlagen im Sichtbereich ist grundsätzlich jede für sich zu beurteilen. Besteht eine Beleuchtungsanlage aus mehreren, dicht beieinander stehenden einzelnen Leuchten, so darf jede einzelne Leuchte die Immissionsrichtwerte für Blendung nicht überschreiten.

Bei dieser Vorgehensweise wird die Störwirkung unter Umständen zu gering eingestuft, da die Belästigung durch die Gesamtanlage stärker ist als die durch eine einzelne Leuchte allein. Gesicherte Ergebnisse über die Summenwirkung mehrerer Leuchten liegen jedoch bisher nicht vor.

### 4.4 Anforderungen an die Gestaltung und den Betrieb von Beleuchtungsanlagen

Die Beleuchtungsanlagen sind nach dem Stand der Beleuchtungstechnik zu errichten und zu betreiben:

- Notwendigkeit der Beleuchtung abklären.
- Klärung des Lichtbedarfs/Beleuchtungsniveaus nach Stärke, Gleichmäßigkeit auf den gewünschten Flächen.
- Geeignete Auswahl, Anzahl, Platzierung und Ausrichtung der Leuchten, z. B. Planflächenstrahler.
- Lichtlenkung ausschließlich in die Bereiche, die künstlich beleuchtet werden müssen.
- Technische Maßnahmen (Abschirmblenden, optische Einrichtungen wie Spiegel und Reflektoren, Leuchten mit begrenztem Abstrahlwinkel).
- Ausrichtung grundsätzlich von oben nach unten. Direkte Blickverbindung zur Leuchte sollte vermieden werden. Ist dies nicht möglich, sind zum Schutz der Nachbarschaft Blenden vorzusehen.
- Beleuchtungen sollten nur nach unten und maximal 80° schräg zur Seite strahlen. Sie sollten möglichst niedrig angebracht sein, sodass z. B. nur der zu beleuchtende Fußweg hell wird.
- Für größere Plätze, die gleichmäßig ausgeleuchtet werden sollen (z. B. Lager- und Sportplätze) sind Scheinwerfer mit asymmetrischer Lichtverteilung zu verwenden, die oberhalb von 80° Ausstrahlungswinkel (zur Vertikalen) kein Licht abgeben, z. B. Strahler mit horizontaler Lichtaustrittsfläche.
- Bodenreflexion: kein heller oder stark reflektierender Boden. Absolut vermieden werden müssen Beleuchtungen von unten nach oben, z. B. Bodeneinbauleuchten.
- Unabgeschirmte unnötige Lichtabstrahlungen in den oberen Halbraum sollen grundsätzlich vermieden werden.
- Optimierte Lichtpunkthöhen.

- Es sollten möglichst niedrige Flutlichtmasten für Sportstätten und Lagerplätze installiert werden. Bei der Planung und Ausführung ist darauf zu achten, dass nur die notwendige Fläche beleuchtet wird. Streubereiche sind zu vermeiden. UV-arme Leuchtmittel oder UV-Filter sind empfehlenswert. Bei Flutlichtanlagen im Freien sind jedoch gerade höhere Masten in Verbindung mit asymmetrischen Planflächenstrahlern zur Immissionsminimierung vorteilhaft.
- Begrenzung der Betriebsdauer auf die nötige Zeit. Insbesondere während des Beurteilungszeitraums „nachts“ kann eine Abschaltung oder Reduzierung des Beleuchtungsniveaus sinnvoll sein.
- Wenn der Beleuchtungsbedarf in den Nachtstunden nur selten besteht, kann die Nutzung eines Bewegungsmelders vorteilhaft sein. Bei häufigem Ein- und Ausschalten kann dagegen die Störwirkung in der Nachbarschaft überwiegen. Die Ansprechempfindlichkeit, Einschaltdauer und der Ausleuchtungsbereich der Beleuchtungsanlage sind hierbei zu beachten.
- Indirekte Beleuchtungssysteme wie Wandfluter oder Metallspiegel sind zu vermeiden.
- Lampentypen (Bauart der Lichtquelle).
- Umrüstung von Altanlagen.
- Ersetzen von beweglichen und zeitlich schwankenden Lichtquellen durch stationäre und konstante Lichtquellen.
- Abdunkeln großer, von innen beleuchteter Fensterflächen (z. B. beleuchtete Arbeitsräume, Gewächshäuser, etc.) durch Jalousien oder Rollos.
- Zeitlich veränderliches Licht (z. B. bei Leuchtreklamen) sollte durch gleich bleibendes Licht ersetzt werden, soweit dies mit dem Zweck der Anlage zu vereinbaren ist.



Abb. 2: Beispiele für empfehlenswerte und nicht empfehlenswerte Varianten von Leuchten.  
(Bild: Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz)

## 5 Beurteilung von Anlagen, die die natürliche Beleuchtungssituation wesentlich ändern

### 5.1 Schattenwurf von Windenergieanlagen

Der Arbeitskreis „Lichtimmissionen“ des LAI hat eine Beurteilungsrichtlinie für diese Umwelteinwirkungen erstellt [14]. Als Kriterium für eine erhebliche Belästigung oder Beeinträchtigung wird hier die maximal auftretende Schattenwurfdauer pro Tag und die Summe der maximal möglichen Schattenwurfzeiten durch die Windenergieanlage (WEA) während eines Jahres verwendet. Dabei werden folgende Schwellenwerte für eine erhebliche Belästigung angesehen:

- 30 Minuten pro Tag
- 30 Stunden im Jahr.

Für die Berechnung der Einwirkzeiten wird vorausgesetzt, dass während der Schattenwurfperiode immer die Sonne scheint, die Windkraftanlage bei ausreichendem Wind in Betrieb ist und die Windrichtung in der Verbindungsgeraden von Windkraftanlage und Immissionsort verläuft. Durch eine Feldstudie in Schleswig-Holstein wurden diese als Richtwerte für eine erhebliche Belästigung bestätigt [15], [16].

Können an einem Standort der WEA diese Einwirkzeiten nicht eingehalten werden, müssen durch Maßnahmen wie eine gezielte Abschaltung der Anlage (Schattenwurf-Abschaltmodul) die *tatsächlichen* Schattenwurfzeiten auf 30 Minuten pro Tag und 8 Stunden pro Jahr begrenzt werden.

Lichtblitze beim Betrieb der WEA können durch matt ausgeführte Oberflächen der Rotorblätter vermieden werden.

### 5.2 Blendwirkung von Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen erfreuen sich seit einigen Jahren wachsender Beliebtheit. Sie finden sich auf Dächern vieler Privathaushalte, öffentlicher oder landwirtschaftlicher Gebäude, sowie in Form großer Photovoltaikparks auf Landwirtschaftsflächen. Probleme können sich ergeben, wenn in geringem Abstand Wohnbebauung besteht, denn dort kann es durch Reflexionen der Sonne an Photovoltaikmodulen zu Blendungen kommen. Betroffen sind vor allem (süd)westlich oder (süd)östlich gelegene Immissionsorte mit Abständen unter 100 m zur Photovoltaikanlage.

Auf Grund der hohen Leuchtdichte der Sonne (siehe Abschnitt Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) kommt es bereits dann zu einer Absolutblendung, wenn durch ein Photovoltaikmodul auch nur ein geringer Bruchteil (weniger als 1 %) des einfallenden Sonnenlichts zum Immissionsort hin reflektiert wird. Deshalb führen auch Module mit Anti-Reflex-Beschichtung noch zur Absolutblendung.

Die konkreten Tages- und Jahreszeiten, zu denen es zu einer Blendung kommen kann, hängen von der relativen Lage des Immissionsorts zur betreffenden Photovoltaikanlage, deren Ausrichtung und Abmessungen, sowie der geographischen Lage des Immissionsorts ab. Pauschale Angaben zur Blendwirkung sind nicht möglich; es ist stets eine Einzelfallbetrachtung erforderlich. Gerade bei größeren Anlagen sollte daher im Rahmen der Bauplanung ein lichttechnisches Gutachten vorgelegt werden.

Im Gegensatz zum Schattenwurf von Windenergieanlagen gibt es keine belastbaren Untersuchungen über die psychologischen Wirkungen, insbesondere die Lästigkeit der Immissionen, die durch Sonnenlichtreflexionen an Photovoltaikanlagen hervorgerufen werden. Daher gibt es auch keine konkre-

ten Angaben darüber, ab welchen Zeiträumen der Durchschnittsbürger die Immissionen einer Photovoltaikanlage als erheblich belästigend empfindet. Es wird jedoch angenommen, dass die Lästigkeit der Immissionen von Photovoltaikanlagen nicht geringer als die des Schattenwurfs von Windenergieanlagen ist.

Die neuen Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der LAI [4] enthalten einen Anhang 2 der Empfehlungen zur Ermittlung, Beurteilung und Minderung der Blendwirkung von Photovoltaikanlagen im Einzelfall gibt.

Danach kann die Absolutblendung in ihrer Auswirkung auf die Nachbarschaft in Anlehnung an die des periodischen Schattenwurfs von Windenergieanlagen betrachtet werden. Folgende Einwirkzeiten an Immissionsorten werden als zumutbar angesehen:

- 30 Minuten pro Tag
- 30 Stunden im Jahr.

Die Beurteilung der Blendwirkung erfolgt auf Basis der astronomisch möglichen Immissionsdauer, d. h. unter der Annahme einer 100-%-igen Sonnenscheindauer. Folgende vereinfachende Annahmen können für die Berechnung verwendet werden:

- Die Sonne ist punktförmig.
- Das Photovoltaikmodul ist ideal verspiegelt, d. h. es kann das Reflexionsgesetz "Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel" angewendet werden.

### **Mögliche Maßnahmen zur Verminderung oder Vermeidung von Blendwirkungen**

Bei der Maßnahmenplanung gibt es kein allgemein gültiges Vorgehen. Art und Umfang geeigneter Maßnahmen hängen immer von der konkreten Standortsituation vor Ort ab. In jedem Fall ist eine sorgsame Planung im Vorfeld sinnvoll, da Maßnahmen im Nachhinein – beispielsweise eine Veränderung des Neigungswinkels bei Dachanlagen oder die Installation einer Abschirmung – kostenaufwändig sind. Mögliche Maßnahmen umfassen:

- Sorgsame Planung vor der Errichtung der Anlage;
- Unterbindung der Sicht auf die Photovoltaikanlage in Form von beispielsweise Jalousien am Immissionsort, Wällen oder blickdichtem Bewuchs in Höhe der Moduloberkante;
- Änderung von Modulausrichtung oder -neigung;
- Ausreichender Abstand zur Wohnbebauung (bei Photovoltaikparks, die über ausgedehnt lange Reihen von Photovoltaikmodulen verfügen, häufig mindestens 100 m).

## **5.3 Blendwirkung durch sonstige reflektierende Gebäude- und Anlagenelemente**

Ob und in welchem Umfang es zu einer Blendung durch Gebäude- oder Anlagenelemente kommt, hängt von den Reflexionseigenschaften des jeweiligen Materials, seiner Größe und Orientierung, sowie seiner Lage zum Immissionsort ab. Bei stark reflektierenden Materialien, beispielsweise großflächigen Glasfassaden von Gebäuden, können wie bei Photovoltaikanlagen lange Einwirkzeiten möglich werden.

Generell ist eine Einzelfallprüfung erforderlich. Ist materialbedingt eine Absolutblendung am Immissionsort möglich, kann sich die Bewertung der Belästigung am Vorgehen bei Photovoltaikanlagen orientieren.

## 5.4 Maßgebliche Immissionsorte

Maßgebliche Immissionsorte sind schutzwürdige Räume, die als

- Wohnräume, einschließlich Wohndielen
- Schlafräume, einschließlich Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten und Bettenräume in Krankenhäusern und Sanatorien
- Unterrichtsräume in Schulen, Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen
- Büroräume, Praxisräume, Arbeitsräume, Schulungsräume und ähnliche Arbeitsräume

genutzt werden. Direkt an Gebäuden beginnende Außenflächen (z. B. Terrassen und Balkone) sind schutzwürdigen Räumen tagsüber zwischen 06:00 Uhr und 22:00 Uhr gleichgestellt.

Ferner zählen zu maßgeblichen Immissionsorten unbebaute Flächen in einer Bezugshöhe von 2 m über Grund an dem am stärksten betroffenen Rand der Flächen, auf denen nach Bau- oder Planungsrecht Gebäude mit schutzwürdigen Räumen zulässig sind.

## Literatur

- [1] DIN 5031, Teil 2: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik: Strahlungsbewertung durch Empfänger. März 1982, Beuth Verlag.
- [2] Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 205. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Februar 2006.
- [3] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) vom 15. März 1974 (BGBl. I, S. 721, 1193) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I, S. 880), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. Juni 2012 (BGBl. I, S. 1421, 1423).
- [4] Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen, 124. Sitzung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) 12. und 13. September 2012 in Mannheim (noch nicht veröffentlicht)
- [5] E. HARTMANN, M. SCHINKE, K. WEHMEYER, H. WESKE: Messung und Beurteilung der Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen; Forschungsbericht des Instituts für medizinische Optik, im Auftrag des Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München 1984.
- [6] J. ASSMANN, A. GAMBER, H. M. MÜLLER: Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen; Licht 7(1987), S.509-515.
- [7] J. ASSMANN: Lichtimmissionen, Licht 88, Tagungsberichte, Band 1 der 8. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft Deutschlands, der Niederlande, Österreich und der Schweiz, Berlin 1988.
- [8] J. ASSMANN: Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen - Anwendung in der Praxis; Tagungsband "Nichtionisierende Strahlung" der 21. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz 1988 in Köln; Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 1988.

- [9] 6. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 26.08.1998, Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 26.
- [10] Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung) in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 1990 (BGBl. I, S. 133), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 22. April 1993 (BGBl. I, S. 466).
- [11] DIN 5032, Teil 7: Lichtmessung; Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten. Dezember 1985, Beuth Verlag.
- [12] Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen; LiTG-Publikation Nr. 12, 3. Auflage (2011), ISBN 978-3-927787-85-3
- [13] Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) 10. Mai 2000, Erich Schmidt Verlag, ISBN 978-3503059867
- [14] Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise), Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) 28.01.2002.
- [15] J. POHL, F. FAUL, R. MAUSFELD, Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen, Feldstudie, Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 31.07.1999.
- [16] J. POHL, F. FAUL, R. MAUSFELD, Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen, Laborpilotstudie, Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 15.05.2000.

### Weitere Literatur

- [17] DIN 5031, Teil 1: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik. März 1982, Beuth Verlag.
- [18] DIN 5031, Teil 3: Strahlungsphysik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik. März 1982, Beuth Verlag.
- [19] DIN 5340 Begriffe der physiologischen Optik, April 1998.
- [20] Handbuch für Beleuchtung, 5. Auflage, 2. Ergänzung11/98 ecomed-Verlag, Landsberg.

# Licht, Beleuchtung und die menschliche Gesundheit<sup>5</sup>

**Dr. Barbara Knab, München**

## 1 Vorbemerkung

Im Jahr 1878 stellte Thomas Alva Edison die erste funktionierende elektrische Glühbirne vor. Der Erfolg war so grandios, dass sich heute zumindest Europas Geographie anhand der Beleuchtung problemlos aus dem All erkennen lässt – wir leben und arbeiten Tag und Nacht im künstlichen Licht. Edison wünschte nicht nur mit dem elektrischen Licht die optischen Beschränkungen der Nacht zu überwinden; er hoffte, damit die Menschheit von etwas zu befreien, was er selbst für reine Zeitverschwendung hielt: vom Schlaf.

## 2 Licht und biologische Rhythmen

Damit lag der Erfinder falsch. Bis heute schlafen Menschen im Verlauf von 24 Stunden mindestens einmal, und das für viele Stunden. Dieser Rhythmus ist endogen und wird von einer inneren Uhr gesteuert. Da er ungefähr im Rhythmus der 24 Stunden der Erdumdrehung schwingt, heißt er „zirkadian (von dies, lat., der Tag).

Bei den meisten Menschen dauert ein endogener zirkadianer Durchgang von Schlafen und Wachen etwas länger als 24 Stunden. Die genaue "Periodenlänge" hängt neben der Genetik unter anderem vom Lebensalter und sozialen Faktoren ab. Sie bestimmt, welchem „Chronotyp“ eine Person aktuell entspricht: Die meisten Leute sind zwar keine ausgeprägten Typen, aber es gibt Abendtypen (sehr lange Periode) und Morgentypen (sehr kurze Periode). Dass wir schließlich (fast) alle im 24-Stunden-Rhythmus leben, wird von äußeren Ereignissen bewirkt, die „Zeitgeber“ heißen.

Hier kommt das Licht ins Spiel, allerdings etwas anders, als Edison sich das vorgestellt hatte. Nicht nur Schlafen und Wachen sind zirkadian getaktet. Einem zirkadianen Rhythmus unterliegen auch Merkmale wie Körperkerntemperatur, Kreislaufstabilität und diverse Hormone, kognitive Leistungen und emotionale Befindlichkeit. Die Zeitgeber nun sorgen dafür, dass der Schlaf-Wach-Rhythmus nicht nur mit dem Tag der Erdumdrehung synchron verläuft, sondern auch mit den anderen Rhythmen. Der wichtigste zirkadiane Zeitgeber ist das Sonnenlicht bzw. – genauer – der Wechsel von Tag und Nacht bzw. Licht und Dunkelheit. Seine Funktion ist sogar stark genug, um unsere Zirkadian-Rhythmen an völlig andere Zeitzonen anzupassen, etwa, wenn wir nach Amerika oder Indien fliegen.

Zwischen dem Äquator und den Wendekreisen wechseln sich Hell und Dunkel über das ganze Jahr so ab, so dass die Sonne die inneren Uhren zuverlässig „stellen“ kann. Mit zunehmendem Abstand zu den Wendekreisen unterscheiden sich die Tageslängen im Verlauf des Jahres immer stärker, bis die Sonne in Skandinavien oder gar am Nordkap in 24 Stunden im Winter kaum mehr scheint und im Sommer kaum noch untergeht. Spätestens dann verliert sie ihre Zeitgeberfunktion.

<sup>5</sup> neu bearbeitete Fassung meines Beitrags „Lichtverschmutzung und die menschliche Gesundheit“. In: Bundesamt für Naturschutz (Hg.) (2012 in Vorbereitung): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft. Grundlagen, Folgen, Handlungsansätze und Beispiele guter Praxis. Bearbeitung Martin Held, Franz Hölker und Beate Jessel. BfN Skripten, Bonn.

In solchen Fällen kann man heute auch helles elektrisches Licht als Zeitgeber einsetzen. Es kann auch Rhythmen stabilisieren, was vor allem ausgeprägten Abend- oder Morgentypen hilft. Und es kann zirkadiane Rhythmen sogar gegen die Sonne verschieben. Dafür benötigt man Lichtstärken von mindestens 2000 Lux. Das ist immer noch weniger, als die Sonne bereits an einem ziemlich trüben Tag liefert.

### 3 Schlafen, Licht und Dunkelheit

All das belegt, dass der zirkadiane Wechsel zwischen Schlafen und Wachen biologisch normal ist. Es belegt aber nicht unbedingt, dass er auch nötig ist, genauer: Es belegt weder, dass wir den Schlaf als solchen brauchen, um gesund zu sein, noch, dass dieser vorzugsweise nachts erfolgen sollte. Doch genau das scheint der Fall zu sein.

Der Schlaf ist zunächst eine typische Aktivität des Gehirns, das während des Schlafs langsamer und anders arbeitet als im Wachsein. Diese Aktivität folgt selbst einem 90- Minuten-Rhythmus, in dem sich Tiefschlaf, Leichtschlaf und paradoxer Schlaf (REM, „rapid eye movement“) abwechseln. Schlafen wir über längere Zeit gar nicht, zu wenig oder qualitativ zu schlecht – all das ist letztlich „Schlafdeprivation“ –, dann können Lebensfunktionen entgleisen. Dazu gehören etwa Immunsystem, Verdauung oder Zuckerstoffwechsel, aber auch Stressverarbeitung, emotionale Stabilität und geistige Leistungsfähigkeit, allen voran Reaktionszeiten und Aufmerksamkeit. Letztere sind diejenigen, die schon bei moderatem Schlafmangel besonders schnell beeinträchtigt sind.

Wirklich gut ist der Schlaf allerdings nur nachts. Das liegt daran, dass er nur nachts parallel zu den übrigen zirkadianen Rhythmen stattfindet, vor allem zum Rhythmus des Melatonins, des „Dunkelhormons“, und der Körperkerntemperatur. Letztere erreicht am Nachmittag ihren höchsten Wert, und zwischen zwei und vier Uhr morgens den tiefsten. Nach dieser Zeit, die auch „biologische Mitternacht“ heißt, ist die Tiefschlafzeit weitgehend vorbei. Ab diesem Zeitpunkt reduziert sich das Melatonin und damit die Fähigkeit zum Einschlafen; gleichzeitig beginnt der Organismus, das Stresshormon Kortisol auszuschütten.

Normalerweise endet der Schlaf von selbst, meist nach sieben bis acht Stunden, wenn das Kortisol den Tagesspiegel erreicht hat. Man kann aber auch erwachen, ehe man ausgeschlafen ist; evolutionär ist das nötig, weil ein schlafender Mensch sich keiner Gefahr erwehren kann. Starke sensorische Reize sind deshalb gleichzeitig starke Weckreize. Einer der wichtigsten potenziellen Weckreize neben Schmerzen, Berührung und Lärm ist das Licht.

Generell stört Licht den Schlaf umso stärker und nachhaltiger, je heller es ist. Es weckt auch nachts, eher während des Einschlafens und im Leichtschlaf, nicht so schnell im Tiefschlaf. Allerdings reagieren Menschen verschieden intensiv auf Licht; einige sind empfindlicher, vor allem beim Einschlafen, andere wachen erst bei stärkeren (Licht)-Reizen auf. Insgesamt gibt es jedoch keinen Zweifel daran, dass Licht einen schlafenden Menschen irgendwann weckt.

Wenn wir tagsüber schlafen (müssen), sollte der Raum wenigstens ausreichend dunkel sein. Doch auch in einem verdunkelten Raum findet Tagschlaf zu einem Zeitpunkt statt, der außerhalb des optimalen Schlafensters liegt, dem Tiefpunkt der Körpertemperatur. Deshalb ist der Tagschlaf selbst nach einer Nacht, in der man keine Sekunde geschlafen hat, kürzer und schlechter, unruhiger und erheblich weniger tief als normal.

## 4 Nachtaktivität und Desynchronisierung

Laufen die Rhythmen von Temperatur und „Schlafen-und-Wachen“ auseinander, schwingen also nicht synchron, dann nennt man das „Desynchronisierung“. Wer desynchronisiert, schläft kürzer, leidet unter schlechter Schlafqualität und entwickelt in der Folge mit hoher Wahrscheinlichkeit regelrechte Schlafstörungen. Im Normalfall desynchronisieren ausgeprägte Morgen- oder Abendtypen besonders leicht. Sie können der Gefahr aber begegnen, indem sie aktiv dafür sorgen, dass sie im Takt bleiben. Praktisch bedeutet das vor allem, dass sie sich gut mit Zeitgebern versorgen, allen voran mit Licht, aber auch mit den beiden nächststarken: Regelmäßigkeit und soziale Kontakte.

Eine andere Gruppe desynchronisiert leicht, auch wenn die Individuen keine ausgeprägten Chronotypen sind: Menschen, die regelmäßig Schicht arbeiten. Vor allem Nachtschichten ziehen fast immer starke Müdigkeit und Schlafstörungen nach sich. Schließlich müssen Nachtarbeiter tagsüber schlafen, zum chronobiologisch „unpassenden“ Zeitpunkt; deshalb erholen sie sich dabei weniger. Da die Sonne nur eingeschränkt als Zeitgeber wirken kann, wenn Menschen tagsüber schlafen und nachts arbeiten, und dann auch keine Regelmäßigkeit die biologischen Rhythmen synchronisieren könnte, desynchronisieren die Betroffenen. Schichtarbeiter, deren Rhythmen desynchronisiert sind, leiden nicht nur unter Schlafstörungen, sondern gehäuft auch unter Herz-Kreislaufstörungen, Substanzmissbrauch und Fettleibigkeit. 2007 hat die WHO die Desynchronisierung als Ursache dafür anerkannt, dass sie mit höherer Wahrscheinlichkeit als andere an Krebs erkranken, vor allem der Brust, der Prostata und des Dickdarms. In Dänemark werden diese Krebsarten bei Schichtarbeitern sogar als Berufskrankheit akzeptiert.

Generell kommen Abendtypen leichter mit Nachtschichten zurecht als andere, weil sie chronobiologisch flexibler sind. Da Nachtarbeit aber grundsätzlich den Gegebenheiten der sozialen Realität und des Hell-Dunkel-Wechsels widerspricht und neben Schlafproblemen auch Desynchronisierungen hervorruft, kann sich dennoch niemand wirklich problemlos daran gewöhnen.

## 5 Licht in der Nacht

Sonnenlicht bzw. künstliches helles Licht am Tag synchronisiert die inneren Uhren, es hält direkt wach und geistig fit. Das ist besonders wirksam, wenn es viel kurzwelliges, „blaues“ Licht enthält (460 - 480 nm). Inzwischen gibt es erste Belege, dass die kognitive Leistung nicht nur von Arbeitenden, sondern auch von Schulkindern steigt, wenn die Arbeits- bzw. Klassenzimmer heller beleuchtet sind. Darüber hinaus hebt Licht die Stimmung und scheint sogar dazu beizutragen, dass Kranke schneller gesund werden.

Analoges kann auch nachts geschehen: Ist die Umgebung beleuchtet, verringert das die typischen Fehler, die Menschen nachts machen, insbesondere wenn der Blaulichtanteil hoch ist. Außerdem schlafen die Leute dann seltener (beinahe) ein. Es wird deshalb empfohlen, Schichtarbeitende auch nachts mit hellem Licht zu versorgen.

Das kann eine Kehrseite haben: Gerade die für die Arbeit optimale Beleuchtung könnte direkt dazu beitragen, dass die Rhythmen der Nachtarbeiter desynchronisieren und die Betroffenen in der Folge krank werden. Einen Beleg für diese Annahme liefern Befunde, die zeigen, dass selbst LED-Bildschirme mit hohem Blauanteil Rhythmen ein wenig nach hinten verschieben können, obwohl sie gerade nicht sehr hell sind. Es dürfte daran liegen, dass blaues Licht ab 100 Lux das Gehirn daran hindert, Melatonin auszuschütten – und schon schaltet das Gehirn nur verzögert auf „Nacht“.

Nun stellte Richard Stevens (USA) Anfang des Jahrtausends die LAN-Hypothese auf. LAN bedeutet „light at night“, und die Hypothese besagt, dass die zirkadiane Rhythmik bereits beeinträchtigt wird – samt allen gesundheitlichen Folgen –, wenn Menschen in Gebieten leben, die nachts beleuchtet sind.

Das sind vor allem städtische Gebiete in industrialisierten Ländern, wobei eine normale Straßenbeleuchtung mit 10 Lux 40mal so hell ist wie Vollmond. Erste Studien waren epidemiologisch und untersuchten vor allem Krebsraten. Die zeigen tatsächlich: Je heller Gebiete nachts beleuchtet sind, umso mehr Brustkrebs gibt es bei Frauen und umso mehr Prostatakrebs bei Männern. Den Mechanismus vermutet man beim Melatoninstoffwechsel, da Melatonin bei Licht vermindert ausgeschüttet wird: Melatonin hemmt nämlich das Wachstum einiger Krebszellen. Experimentelle Daten gibt es dazu bisher allerdings nicht. Die wichtigsten Argumente gegen die LAN-These sind: a) die Beleuchtung korreliert allgemein mit dem Lebensstil (je heller, umso hektischer), b) LAN lässt keine Aussage darüber zu, welcher Lichtintensität das einzelne Individuum nachts ausgesetzt ist und c) die Chronotypen werden dabei außer acht gelassen.

Genau zu Punkt c) hat aber soeben eine Gruppe um Christian Vollmer aus Heidelberg eine Studie publiziert. Sie untersuchten Chronotypen Jugendlicher, und zwar geographisch sehr genau in den Regionen Rhein-Neckar, Mannheim und Heidelberg. Dabei fanden sie nicht nur, dass sich der Chronotyp im Laufe der Adoleszenz Richtung Abendtyp verschiebt. Dieser Befund ist bekannt und galt bisher meist als naturgegeben. Sie konnten aber zusätzlich belegen, dass die Verschiebung intensiver ist, wenn die Jugendlichen in einer helleren städtischen Umgebung leben als auf dem Land. Es spricht einiges dafür, dass das tatsächlich durch die nächtliche Beleuchtung verursacht wird, der Befund blieb nämlich auch dann erhalten, wenn andere Variablen kontrolliert wurden, etwa Eltern, Alter, Bildschirmnutzung, Stimulantiengebrauch etc.

## 6 Folgerungen

Wir haben Leben und Arbeiten auf 24 Stunden pro Tag erweitert. Dafür leuchten wir die Nächte aus (LAN) und ziehen uns tagsüber in Kunstlicht-Räume zurück. Biologisch bleibt der wichtigste Zeitgeber dennoch die Sonne bzw. helles Licht, während die Dunkelheit Melatonin und Müdigkeit triggert.

Wirken Zeitgeber schlecht oder gar nicht, bahnt das Schlafstörungen und bringt zirkadiane Rhythmen in die Gefahr zu desynchronisieren; das kann weitere Krankheiten nach sich ziehen. Die häufigste äußere Ursache dafür ist Schicht- und Nachtarbeit. Es gibt gute Gründe anzunehmen, dass auch dabei der Umgang mit dem Licht eine Rolle spielt. Möglicherweise kann aber auch die nächtliche Außenbeleuchtung dazu beitragen (LAN), zumindest über den Umweg, Menschen Richtung Abendtyp zu schieben.

Wir haben die Nacht zum Tage gemacht und wollen alles zu jeder Tageszeit haben und tun. Wir halten das für normal, aber es hat seinen Preis. Der besteht in diversen gesundheitlichen Problemen, wobei psychische Fragen wie Leistungsfähigkeit und emotionale Stabilität noch nicht einmal angesprochen sind. Wie weit das uns alle trifft, überprüft die LAN-Hypothese. Menschen, die nachts arbeiten, „zahlen“ allemal dafür. Insgesamt treiben wir alle die Kosten in die Höhe, wenn wir rund um die Uhr funktionierende Verkehrsmittel erwarten, Tankstellen, Pizzadienste, Gastronomie, Gesundheitsversorgung und Sicherheit. Wir können uns aber auch anders entscheiden.

## Literatur

CAJOCHEN, C. (2011): Alerting effects of light. *Sleep Medicine Reviews*, 11: 453-464,

KANTERMANN, T., ROENNEBERG, T. (2009): Is light-at-night a health risk factor or a health risk predictor? *Chronobiology international*, 26: 1069-1074

VOLLMER, C., MICHEL, U., RANDLER, C. (2012): Outdoor Light at Night (LAN) is correlated with eveningness in adolescents. *Chronobiology international*, 29: 502-508

STEVENS, R. (2011): Testing the LAN-theory for breast cancer causation. Chronobiology international, 28: 653-656

ZULLEY, J., KNAB, B.: Unsere Innere Uhr. Natürliche Rhythmen nutzen und der Non-Stop-Belastung entgegen. Frankfurt/Main: mabuse-Verlag, 2009

ZULLEY, J., KNAB, B.: Wach und fit. Mehr Energie, Leistungsfähigkeit und Ausgeglichenheit. Frankfurt/Main: mabuse-Verlag, 2009

## Blendung am Büroarbeitsplatz

**Dr.-Ing. Jan Wienold, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Thermal Systems and Buildings**

Das Thema Blendschutz am Arbeitsplatz ist extrem mit den auszuführenden Tätigkeiten verknüpft. Waren früher Lesen, Schreiben und Telefonieren die dominierenden Tätigkeiten eines Büroarbeitsplatzes, so hat sich dies in den letzten Jahrzehnten deutlich in Richtung Bildschirmarbeit gewandelt. Bis zur Einführung von Bildschirmen mit sehr guter Entspiegelung waren Reflexblendungen auf der Bildschirmoberfläche die Hauptursache, warum Blendschutzsysteme zum Einsatz kamen. Entsprechend streng waren die damals festgelegten Richtwerte zur Begrenzung der mittleren Fensterleuchtdichte. Mit dem flächendeckenden Einsatz von Flachbildschirmen verschiebt sich die Blendungsproblematik in Richtung Direktblendung von der Fassade.

Dies gilt zumindest bei parallel zum Fenster angeordneten Bildschirmen und wenn sich die Fassade darin nicht spiegeln kann. Das ändert die Anforderungen an Blendschutzsysteme grundlegend. Bei Reflexblendung spielt die allgemeine Helligkeit des Raumes eine entscheidende Rolle („veiling reflections“), somit musste früher ein effektives Blendschutzsystem auch die allgemeine Helligkeit im Raum maßgeblich reduzieren. Beim Arbeiten am gut entspiegelten Bildschirm muss das System nun „lediglich“ die Fassadenleuchtdichte auf ein akzeptables Maß reduzieren, ohne dabei die allgemeine Raumhelligkeit zu reduzieren.

Grenzwerte, der die mittlere Leuchtdichte von Fensterflächen begrenzen, sind nur bedingt geeignet. Bisherige Untersuchungen zu Blendungserscheinungen (auch im Kunstlichtbereich) zeigen, dass auch die „gesehene Größe“ (= Raumwinkel) der leuchtenden Fläche eine große Rolle spielt. Gestützt wird diese These durch Untersuchungen, die im Rahmen eines Europäischen Verbundprojektes durchgeführt wurden [WIENOLD 2010]. Dabei zeigte sich, dass die Fensterleuchtdichte allein keine signifikante Korrelation mit dem Blendungsempfindender Testpersonen aufweist.

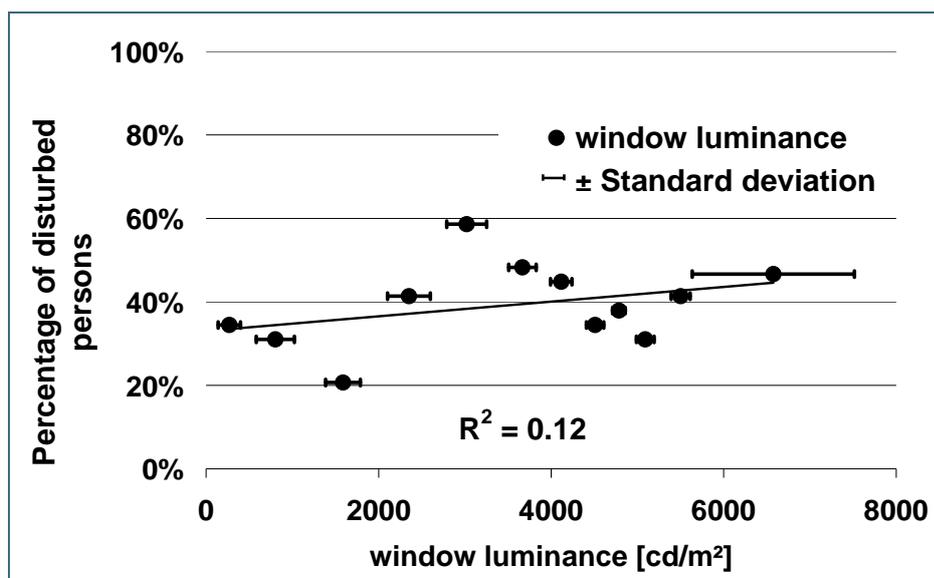


Abb. 1: Ergebnisse von Nutzerversuchen am Fraunhofer ISE. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl, der durch Blendung gestörten Personen und mittlerer Fassadenleuchtdichte für unterschiedliche Fassadentypen.

In diesem Forschungsvorhaben wurde ein neues, wissenschaftliches Blendungsbewertungsverfahren entwickelt. Dieses basiert auf der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge, sowie der Größe, Leuchtdichte und Lage der einzelnen Blendquellen [WIENOLD 2006]:

$$DGP = 5.87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 9.18 \cdot 10^{-2} \cdot \log\left(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} \cdot P_i^2}\right) + 0.16$$

- Ev: vertikale Beleuchtungsstärke am Auge [lux]  
 Ls: Leuchtdichte der Blendquelle [cd/m<sup>2</sup>]  
 ωs: Raumwinkel der Blendquelle [-]  
 P: Positionsindex

Der dabei eingeführte Index „daylight glare probability DGP“ zeigt eine wesentlich verbesserte Korrelation zum Blendungsempfinden:

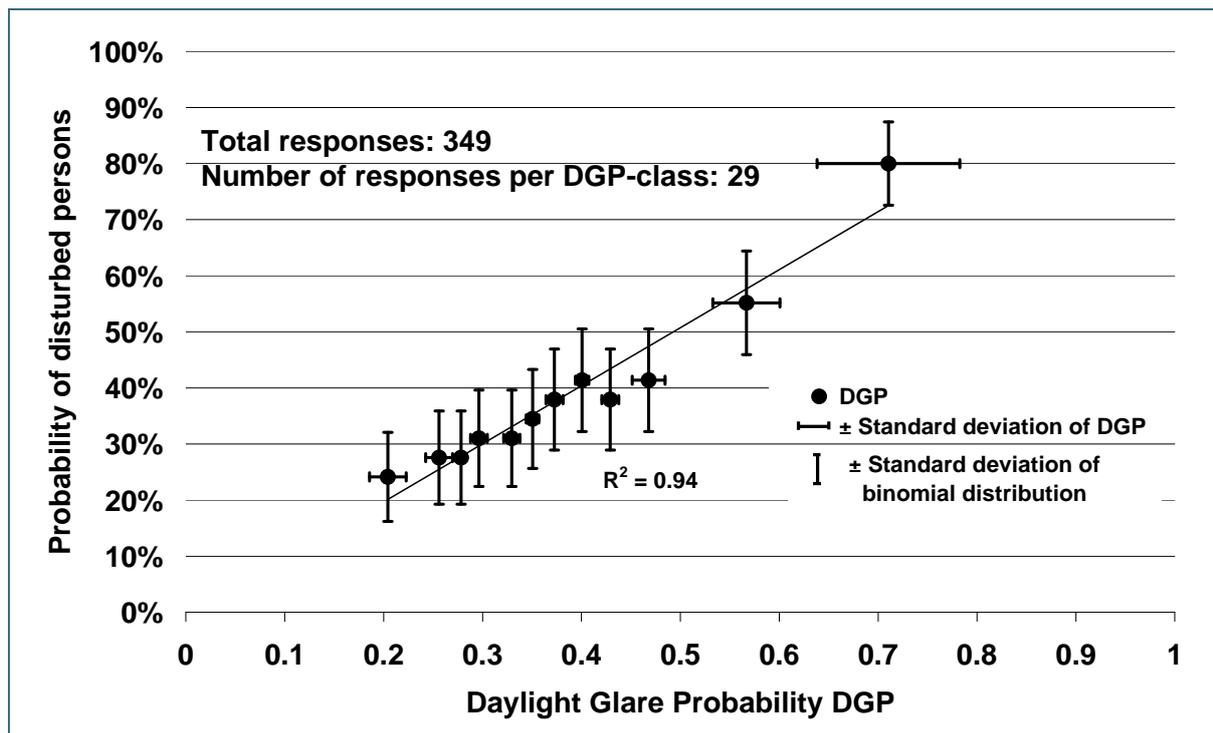


Abb. 2: Ergebnisse von Nutzerversuchen am Fraunhofer ISE. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl, der durch Blendung gestörten Personen und des dgp für unterschiedliche Fassadentypen.

Für die Planungspraxis wurde auch ein vereinfachtes Verfahren entwickelt [WIENOLD 2009], das anhand von Simulationen zu jedem Zeitschritt (zum Beispiel in Stundenschritten) den DGP berechnet.

Um Blendsituationen für Büroähnliche Arbeitsplätze zu vermeiden, sollte der DGP bei aktiviertem Blendschutz den Wert von 0.45 in nicht mehr als 5 % der Arbeitszeit überschreiten. Ein Wert kleiner als 0.35 deutet auf einen guten Blendschutz hin. DGP-Werte zwischen 0.35 und 0.45 in mehr als 5 % der Arbeitszeit erhöhen das Blend-Risiko, insbesondere bei blendungsempfindlichen Personen. Die Blendempfindlichkeit steigt mit steigendem Alter an.

Generell führen kleinere DGP-Werte zu einer höheren Akzeptanz bei den Nutzern.

Der Adaptionszustand des Auges spielt eine weitere wichtige Rolle beim Blendungsempfinden. Die Erfahrung ist bekannt, dass Kerzenlicht mit einer Leuchtdichte von etwa 5 cd/m<sup>2</sup> bei absoluter Dunkelheit blenden kann, während man bei Tag die Flamme kaum erkennt. Das menschliche Auge ist in der Lage, sich den unterschiedlichsten Lichtverhältnissen anzupassen, sich somit an die Hintergrundleuchtdichte zu „adaptieren“. Je häufiger sich das Auge anpassen muss, desto ermüdender sind die

dabei ausgeführten Tätigkeiten. Aus diesem Grund sollten die Kontrastverhältnisse am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung nicht zu hoch sein. In der Literatur [IESNA ] werden maximale Kontrastverhältnisse von 1:3:10:40 (Arbeitsaufgabe : Arbeitsplatz : Arbeitsumgebung : Maximum) empfohlen. Wendet man die neuen Forschungsergebnisse auf diese Empfehlungen an, so erkennt man schnell, dass der Monitor auch hier kein begrenzender Faktor mehr ist. Bei einer Positivdarstellung – Schwarze Schrift auf weißem Hintergrund – erreichen moderne Flachbildschirme Leuchtdichten von 200 - 400 cd/m<sup>2</sup>. Die „optimalen“ Leuchtdichte-Kontrastverhältnisse würden also bei 200 : 600 : 2000 : 8000 cd/m<sup>2</sup> liegen. Diese Kontrastempfehlungen sind allerdings aus Laboruntersuchungen mit künstlicher Beleuchtung entwickelt worden. Ist Tageslicht eine mögliche Blendquelle, so zeigt sich, dass eine noch höhere Akzeptanzschwelle beim Menschen vorhanden ist. Der Grund dafür ist, dass Tageslicht neben der Lichtversorgungsfunktion andere, sehr wichtige Funktionen erfüllt. Eventuelle Nachteile (Blendung) werden nur abgeschwächt empfunden. Die wichtigste dieser „Zusatzfunktionen“ ist der Sichtkontakt nach draußen.

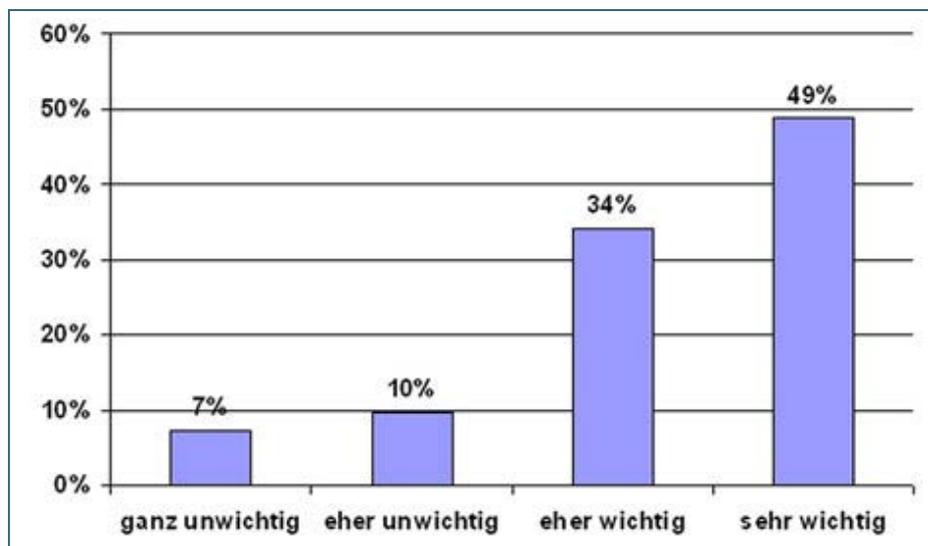


Abb. 3: Bedeutung der Aussicht: Im Rahmen von Nutzerversuchen bezüglich Blendung wurden 41 Testpersonen zur Wichtigkeit des Sichtkontaktes nach Außen befragt.

Die Sichtverbindung nach außen ist die zentrale Aufgabe eines Fensters und ist deswegen auch verbindlich für Arbeitsplätze in den Normen vorgeschrieben [DIN 5034-1, EN12464-1]. Ein Blendschutz steht also immer vor dem Optimierungsproblem, einerseits vor störenden Blendquellen – beispielsweise die Sonne – zu schützen und andererseits den Kontakt nach Außen zu gewährleisten. Quantitative Untersuchungen, um wie viel höher die „Blendakzeptanz“ bei Tageslicht ist, gibt es bislang kaum. Die Frage ist Bestandteil von Forschungsvorhaben. Gestützt wird diese These jedoch jetzt bereits durch Ergebnisse aus Projekten, die das Bedienen von Sonnenschutzsystemen näher untersucht haben [REINHART 2003]. Darin wird deutlich, dass der signifikante auslösende Faktor für das Bedienen eines Sonnenschutzes die Eindringtiefe der Sonne ist. Interpretiert man diese Ergebnisse, so kann man davon ausgehen, dass im Wesentlichen die Sonne als Blendquelle gesehen wird, der (helle) Himmel wird in der Praxis weitaus weniger als störend empfunden.

Dass die Sonne „die“ Blendquelle schlechthin ist, ist jedem aus eigener Erfahrung bekannt. Die Sonne weist Leuchtdichten in Größenordnungen  $2 \times 10^9$  cd/m<sup>2</sup> auf und nimmt einen Öffnungswinkel von 0.54° ein. Darüber hinaus ist die Sonne von einem sehr hellen Bereich („zirkumsolar“) umgeben, der je nach Atmosphärenzustand und Bewölkungsgrad mehrere 100000 cd/m<sup>2</sup> erreichen kann. Um diese hohen Leuchtdichten entscheidend zu reduzieren bietet es sich an, den Sichtkontakt zu diesem Bereich zu unterbrechen. Methoden, basierend auf Transmissionsminderung wie z. B. Folien, können nach Ansicht des Autors die Leuchtdichten nur dann auf ein akzeptables Maß reduzieren, wenn die Transmission sehr niedrig ist und somit die Tageslichtversorgung entscheidend verschlechtert.

Das Blendungsempfinden vom Menschen ist subjektiv, individuell und auch von der Tagesform abhängig. Beispielsweise ist der Mensch bei Erkältungen um ein vielfaches blendungsempfindlicher als im gesunden Zustand. Aus diesem Grund sollte ein Blendschutz individuell einstellbar sein und große Variabilität aufweisen. Ebenso bietet es sich an, dass sich der Blendschutz lokal (fensterweise) und nicht nur für die gesamte Fassade aktivieren lässt. Damit kann der Nutzer in einem Fenster die Direktblendung der Sonne unterbinden, während ihm das andere Fenster einen ungestörten Ausblick gewährleistet.

## Literatur

- DIN 5034-1     DIN Norm 5034-1, Tageslicht in Innenräumen
- REINHART 2003     Reinhart C F and Voss K. Monitoring Manual Control of Electric Lighting and Blinds. Lighting Research & Technology 35, 2003
- IESNA     Rea, M. S., ed. Lighting Handbook: Reference and Application. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). 8th edition, 1993.
- EN12464-1     DIN EN 12464-1, Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsstätten in Innenräumen, 2003
- WIENOLD 2006     Wienold, Christoffersen: Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras, Energy and Buildings, 2006
- WIENOLD 2009     Wienold, J., 2009. Dynamic Daylight Glare evaluation, Building Simulation, Glasgow, pp. 944-951.
- WIENOLD 2010     Wienold J., Daylight glare in offices, Dissertation, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, ISBN: 978-3-8396-0162-4 (2010)

## Lichtimmissionen durch Sonnenlichtreflexionen – Blendwirkung von Photovoltaikanlagen

**Jens Teichelmann, IBT Ingenieurbüro Teichelmann**

Die Sonne als Hauptenergiewandler für die Erde findet im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien in immer mehr modernen Technologien Nutzung. Diese Technologien sind entscheidend, um in Zukunft unabhängig von klimaschädigenden oder problematischen Technologien zur Energieerzeugung zu werden.

Jedoch sind auch bei der Nutzung von Sonne und Wind einige Aspekte zu beachten, um eventuell mögliche negative Auswirkungen auszuschließen.

Eine Störwirkung kann durch Blendung durch Sonnenlichtreflexionen entstehen.

### Blendung durch Sonnenreflexionen an spiegelnden Oberflächen

Licht gehört zu den Emissionen bzw. Immissionen im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes. Sofern Immissionen „nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen“, so gelten sie im Sinne dieses Gesetzes als schädliche Umwelteinwirkungen.

Dies betrifft neben anderen Immissionsarten auch die Lichtimmissionen.

Laut Bundesimmissionsschutzgesetz sind sowohl bei genehmigungsbedürftigen als auch bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen mit Ausnahme der Anlagen des öffentlichen Straßenverkehrs geeignete Maßnahmen nach Stand der Technik zu treffen, um Lichtimmissionen zu vermeiden bzw. auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Dies trifft insbesondere auf Kunstlicht zu.

Technische oder bauliche Anlagen, die das Sonnenlicht reflektieren, sind nach Baurecht zu behandeln und so auszuführen, dass durch die Sonnenlichtreflexionen keine Störungen bei Anwohnern oder auf Verkehrswegen erzeugt werden.

Der Mensch hat sich im Laufe der Evolution zwar an die Sonne als Licht- und Blendquelle angepasst, jedoch sind zusätzliche Störungen durch Blendung durch Sonnenreflexionen an reflektierenden Flächen zu vermeiden.

Die Sonnenscheibe hat bei klarem oder leicht bewölktem Wetter und bei hohen Sonnenständen mit ca. 1,0 ... 1,6 Mrd. cd/m<sup>2</sup> eine sehr hohe Leuchtdichte. Bei tieferen Sonnenständen können dies immer noch mehrere Mio. cd/m<sup>2</sup> sein.

Der direkte Blick in eine solche Blendquelle hoher Leuchtdichte führt zu Blendwirkungen, ggf. auch zur Absolutblendung, also einer u. U. auch nachwirkenden Störung der Sehfähigkeit.

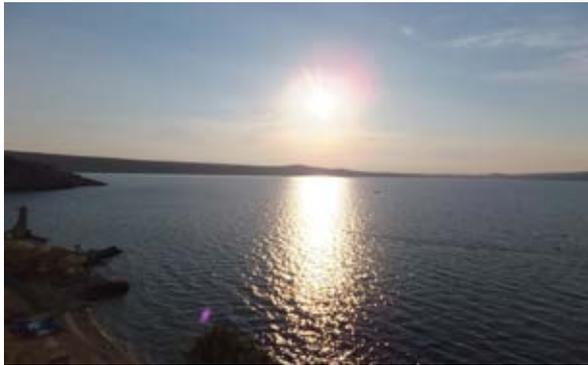
Die Grenze der Absolutblendung liegt beim Menschen je nach individueller Physiologie und Umgebungshelligkeit bei ca. 100.000 cd/m<sup>2</sup>. Bei diesen hohen Leuchtdichten werden Rezeptoren im Auge überlastet und im Augeninneren erfolgt eine Aufhellung (Schleierleuchtdichte), was das Sehvermögen teilweise oder auch ganz beeinträchtigen kann. In der Regel ist diese Störung temporär. Wir kennen diesen Effekt z. B. aus Situationen, in denen nach dem Blick in die Sonne oder in eine helle Leuchte virtuell helle oder farbige Punkte im Blickfeld auftauchen und das Sehen behindern.

Bei sehr stark gebündelten Lichtquellen mit extrem hohen Leuchtdichten wie z. B. bei Lasern oder Kurzbogenlampen können die Rezeptoren durch den Abbildungsapparat des Auges u. U. auch dauerhaft zerstört werden.

Bei Blendung durch Blendquellen mit hohem Kontrast und Leuchtdichten unterhalb der Schwelle zur Absolutblendung, die als störend wahrgenommen wird, spricht man von psychologischer Blendung oder Relativblendung.

Blendwirkungen durch Sonnenreflexionen an spiegelnden Oberflächen begegnen uns bei Sonnenschein häufig.

Jeder kennt solche Situationen, wenn sich die Sonne in ungünstigen Winkeln an gekippten Fenstern, glänzenden Jalousien, Autos usw. spiegelt.



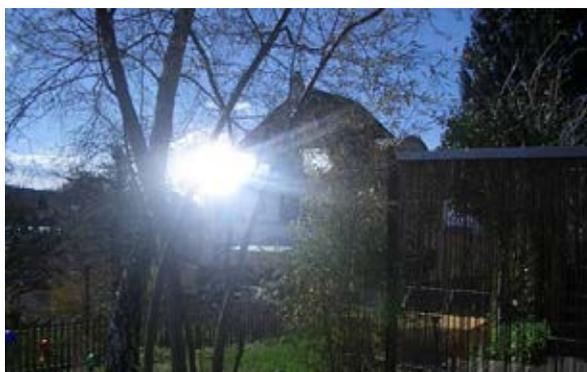
In natürlichen Situationen wie z. B. bei der Reflexion auf Wasserflächen wird dies oft als angenehm oder schön empfunden.

Anders ist dies bei Reflexionen an Bauwerksteilen oder Anlagen, die jedoch häufig nur kleine Flächen betreffen.

Solche kleinflächigen Reflexionen treten durch die Bahn der Sonne und die kleine Reflexionsfläche in der Regel nur kurzzeitig, in einem engen Blickwinkelkorridor und bei fixen Flächen oft nur an wenigen Tagen im Jahr auf, werden jedoch teilweise bereits als lästig empfunden.

Bei größeren reflektierenden Flächen steigt die Häufigkeit der möglichen Reflexionen und deren Verweildauer im Blickfeld eines Betrachters entsprechend stark an und führt damit ggf. auch in großer Entfernung zu stärkeren Belastungen betroffener Beobachter.

Besonders zu beachten ist dieser Aspekt z. B. bei Fassaden aus glänzenden Materialien wie Glas, Aluminium oder glänzend lackierten bzw. polierten Flächen, bei Photovoltaikmodulen oder bei Dachflächen mit glasierten Dachziegeln.



(Beispielfotos – Blendwirkungen werden in der Realität üblicherweise störender wahrgenommen als dies auf Fotografien dargestellt werden kann)

Durch die Reflexion der Sonnenscheibe können auch auf vermeintlich reflexionsarmen Materialien wie z. B. den Oberflächen kristalliner Photovoltaikmodule mit Antireflexionsschicht Leuchtdichten auftreten, die die Schwelle der Absolutblendung des menschlichen Auges um ein Vielfaches überschreiten.

Auftreten, Häufigkeit, Intensität und Verweildauer des Blendreflexes hängen von verschiedenen Einflussgrößen ab wie z. B.:

- der geometrischen Anordnung der Reflexionsfläche
- dem geografischen Standort der Reflexionsfläche
- den Reflexions- und Streueigenschaften der Oberfläche (partieller Reflexionsgrad, Reflexionsindikator, Verschmutzung...)
- den möglichen Einblickwinkeln des Beobachters auf die Fläche
- usw.

Die Bewertung des direkt oder gestreut reflektierten Sonnenlichtes erfolgt über entsprechende Winkelberechnungen unter Berücksichtigung der Anordnung und Ausrichtung der reflektierenden Fläche, deren Reflexionseigenschaften, den von der Jahres- und Tageszeit abhängigen möglichen Sonnenständen sowie der geografischen Lage der festgelegten zu betrachtenden möglichen Immissionsorte.

Für die korrekte Berechnung des bei der Reflexion von der Oberfläche gestreuten Lichtes werden Angaben zum Reflexionsverhalten des Materials – insbesondere der integrale und partielle Reflexionsgrad und die Reflexionsindikator – benötigt.

Die Reflexion erfolgt an keinem real existierenden Material rein spiegelnd nach dem Prinzip Einfallswinkel = Ausfallswinkel.

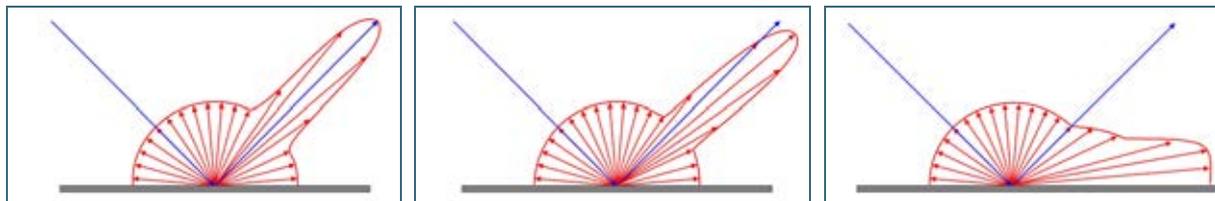
Bei realen Materialien findet eine gemischte Reflexion statt, bei der nur ein Teil des eingestrahlen Lichtes in Hauptreflexionsrichtung reflektiert wird. Durch Strukturen der Oberfläche, Verschmutzungen usw. wird ein weiterer Teil in einem von der Oberfläche abhängigen Winkelkorridor gestreut reflektiert. Diese Bündelaufweitung ist für die Bewertung der Blendung eine wichtige Größe.

Bei Oberflächen mit größeren Strukturen oder Auflagerungen findet darüber hinaus oft eine atypische Reflexion statt, bei der die Reflexion in einem oder mehreren Maxima erfolgt.

An solchen Oberflächen ist in der Regel auch eine Bündelverschiebung festzustellen, durch die der Hauptreflex teilweise stark abweichend der Regel Einfallswinkel = Ausfallswinkel reflektiert wird. Dies kann die Situation bzgl. der Blendwirkung u. U. völlig ändern.

Ein bei vorwiegend gerichtet reflektierenden Oberflächen meist sehr kleiner Teil des Lichtes wird diffus in alle anderen Richtungen reflektiert.

Prinzipiskizzen (nicht maßstabsgetreu):



typische Reflexion

Reflexion mit Bündelverschiebung

atypische Reflexion

Diese Daten unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Materialien auch bei subjektiv ähnlich wirkenden Oberflächen teilweise sehr deutlich. Bei Messungen der Reflexionsdaten verschiedener Photovoltaikmodule wurden unerwartet große Unterschiede sowohl im Reflexionsgrad als auch in der Bündelaufweitung festgestellt.

Die Reflexionsdaten der Oberflächen müssen ggf. durch eine Messung für die relevanten Bereiche ermittelt werden.

Die Reflexionseigenschaften einer Oberfläche sind abhängig vom Einfallswinkel des Lichtes. Bei flachen Einstrahlwinkeln steigt der Reflexionsgrad stark an und die Streuung nimmt zu.



Geometrische Formen durch blickwinkelabhängige Maxima bei atypischer Reflexion an einem Photovoltaikmodul mit mikrostrukturierter Oberfläche

Die jeweils ermittelten, durch die Sonnenlichtreflexion in Richtung der Immissionsorte verursachten Leuchtdichten werden mit der Leuchtdichte der Umgebung relativiert und mit Erfahrungswerten der Absolutblendung und der Relativblendung bei auf Tageslicht adaptiertem Auge abgeglichen.

Eine zusätzliche Belastung des Beobachters durch Reflexblendung der Sonnenscheibe an einer solchen Oberflächen ist dann gegeben, wenn der Blendreflex in Richtung des Beobachters mit einer entsprechend hohen Leuchtdichte, einem entsprechend hohen Kontrast zum Hintergrund und mit einer Winkeldifferenz zwischen Blendreflex und Sonnenscheibe größer  $10^\circ$  zu sehen ist.

Bei kleineren Winkeldifferenzen werden Blendreflex und Sonnenscheibe meist gleichzeitig auf der Netzhaut des Beobachters abgebildet. In dieser Situation wird die Blendung durch die Reflexion von der unvermeidbaren und in der Regel deutlich stärkeren Direktreflexion der Sonne überlagert und stellt somit in vielen Situationen keine zusätzliche Belastung dar.

In den meisten Fällen treten Störwirkungen durch Blendung durch Sonnenreflexionen vorrangig im Bereich von wenigen 100 m Entfernung zur Reflexionsfläche, nur bei freien Sichtachsen zum Blendreflex und bei klarem oder leicht bewölktem Himmel auf.

In größeren Entfernungen kann die Leuchtdichte in Richtung des Betrachters zwar immer noch sehr hoch sein, jedoch wird die Verweildauer des Blendreflexes im Beobachterblickfeld durch den kleiner werdenden Blickwinkelkorridor deutlich kürzer und die ins Auge eintretende Lichtmenge ist durch die Entfernung stark reduziert.

Bei Anlagen großer räumlicher Ausdehnung oder in kritischen Situationen sollten jedoch auch die möglichen Immissionsorte in größerer Entfernung mit berücksichtigt werden.

In Abhängigkeit der Schutzwürdigkeit wird bei typischen Immissionsorten wie Anwohnern oder Arbeitsstätten in der Regel eine zeitliche Begrenzung der Blendung auf die astronomisch maximal mögliche Einwirkzeit der Blendreflexionen von 30 Stunden pro Jahr festgelegt, wobei eine tägliche Einwirkzeit von maximal 30 Minuten nicht überschritten werden darf.

An sicherheitsrelevanten Immissionsorten wie Autobahnen und Straßen, Start- und Landebahnen von Flughäfen, Bahngleisen usw. muss in der Regel jegliche Beeinträchtigung des Verkehrs durch Blendung vermieden werden.

In juristischen Auseinandersetzungen wurden teilweise auch von diesen Vorgaben abweichende Entscheidungen getroffen.

## **Blendung durch Sonnenreflexionen an Photovoltaikmodulen**

Durch die Änderung der Fördermöglichkeiten in Deutschland verlagert sich der Einsatz von Photovoltaikmodulen stark in kritische Bereiche auf brachliegenden Flächen in der Nähe von Autobahnen, Flughäfen, Bahngleisen usw.

In diesen Bereichen ist der Aspekt der Blendung durch Sonnenreflexionen sicherheitsrelevant und damit besonders zu berücksichtigen.

Darüber hinaus werden solche Anlagen vielfach auf Dachflächen montiert, die durch ihre Ausrichtung oder Neigung sowie die oft nahe und hoch liegenden Immissionsorte in der Nachbarschaft häufig ebenfalls problematisch sind.

Vor allem bei Anlagen, die genehmigungsfrei und ohne vorherige Prüfung der möglichen Blendung realisiert werden, kann dies zu Beschwerden und juristischen Auseinandersetzungen führen.



(Beispielfotos – Blendwirkungen werden in der Realität üblicherweise störender wahrgenommen als dies auf Fotografien dargestellt werden kann)

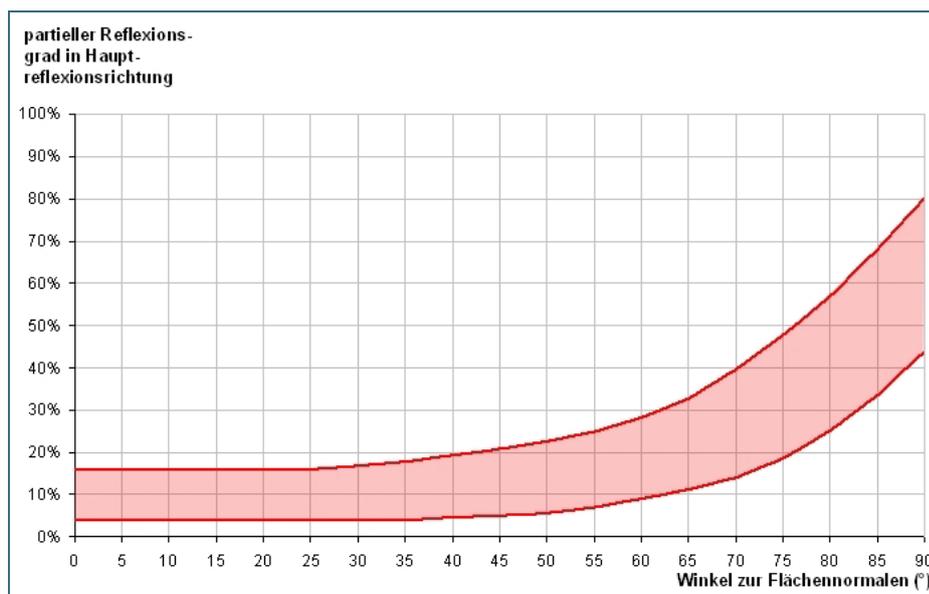
Insofern ist das Thema Blendung durch Sonnenreflexionen an Photovoltaikmodulen eine aktuell häufig anzutreffende Fragestellung.

Wie bereits erwähnt unterscheiden sich die am Markt erhältlichen Photovoltaikmodule deutlich hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften.

Die integralen Reflexionsgrade der Oberflächen liegen bei den in unseren Messungen untersuchten Modultypen bei steilen Einstrahlwinkeln im Bereich zwischen ca. 5...16 %. Die Aufteilung in die jeweiligen partiellen Reflexionsgrade erfolgt nach der jeweiligen Reflexionsindikatrix.

Bei flachen Einstrahlwinkeln steigt der Reflexionsgrad bei Totalreflexion theoretisch bis 100 % an. Messtechnisch wurden in unseren Untersuchungen bei flachen Einstrahlwinkeln relevante Reflexionsgrade bis ca. 80 % ermittelt.

Dieser Anstieg des Reflexionsgrades bei flachen Einstrahlwinkel ist in der Praxis für jeden auch dann gut wahrnehmbar, wenn keine direkte Reflexion der Sonnenscheibe erfolgt: bei sehr flachen Blickwinkeln ändern die Photovoltaikmodule scheinbar ihre Farbe und erscheinen meist silbrig-bläulich. Dies wird dadurch verursacht, dass durch den erhöhten Reflexionsgrad eine meist unscharfe Abbildung des Himmels erfolgt.

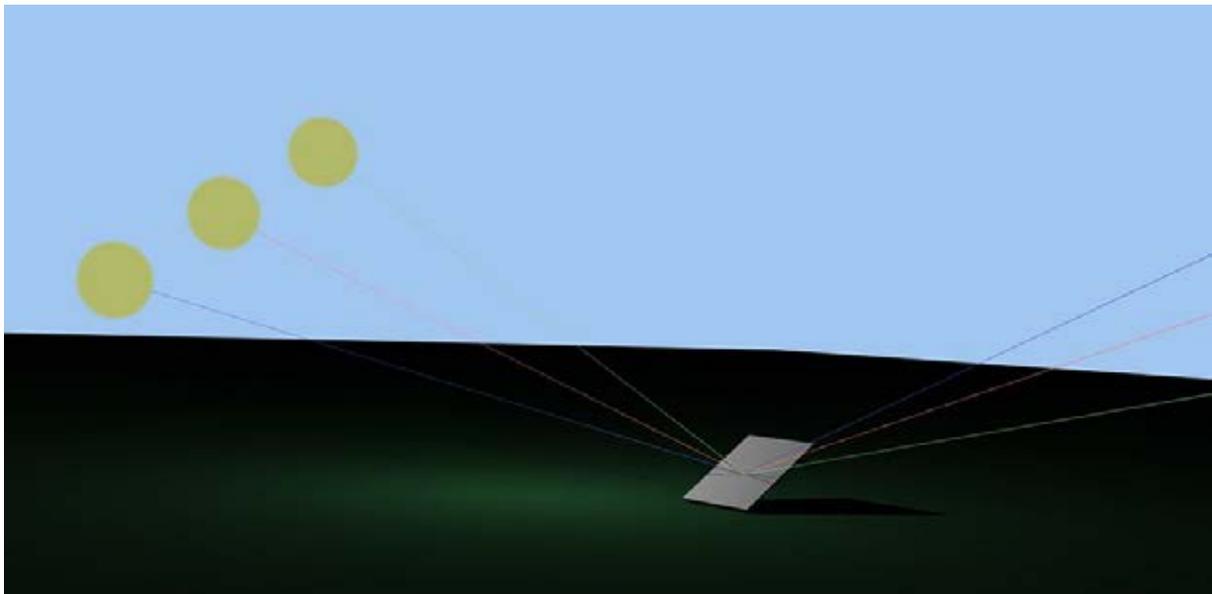


Gleichzeitig ist die Bündelaufweitung der Reflexion durch die Streuung neben den Eigenschaften der Oberfläche ebenfalls abhängig vom Einstrahlwinkel. Je nach Modultype und Technologie betrug die Bündelaufweitung bei den vermessenen Modulen bei steilen Einstrahlwinkeln ca. 1...7° Halbwinkel. Bei flachen Einstrahlwinkeln wurde bei einigen Modulen eine Bündelaufweitung von mehr als 20° ermittelt, bei der immer noch nennenswerte partielle Reflexionsgrade erreicht werden.

Diese Ergebnisse beziehen sich auf Messungen, die im Rahmen diverser Untersuchungen zu diesem Thema von uns durchgeführt wurden. Sie geben lediglich Tendenzen und keinen vollständigen Marktüberblick wieder.

Eine stärkere Bündelaufweitung bewirkt eine optische Vergrößerung des Blendreflexes, eine längere Verweildauer im Blickfeld und einen größeren möglichen Einblickwinkelkorridor des Beobachters bei entsprechend stark reduzierter, jedoch teilweise noch deutlich über der Grenze zur Absolutblendung liegender Intensität der Reflexion.

Gleiche Einstrahlwinkel auf die Moduloberfläche können bei verschiedenen Azimut- und Elevationswinkeln der Sonne und somit auch zu unterschiedlichen Jahres- und Tageszeiten und bei unterschiedlichen Leuchtdichten der Sonnenscheibe auftreten.



Flache Einstrahlwinkel mit höherem Reflexionsgrad und stärkerer Bündelaufweitung treten häufig bei tieferen Sonnenständen auf, so dass teilweise gerade diese Konstellationen trotz der geringeren Leuchtdichte der Sonnenscheibe zu Problemen führen können.

Diese komplexen veränderlichen Parameter müssen für die Bewertung der Blendung an den einzelnen Immissionsorten in der entsprechenden geometrischen Situation und unter den spezifischen Randbedingungen Berücksichtigung finden.

Im Ergebnis der Untersuchungen werden die kritischen Sonnenstände und die entsprechenden Jahres- und Tageszeiten für den geographischen Standort ermittelt, bei denen Reflexionsblendung in Richtung des Beobachters auftritt.

Bei Freiflächenanlagen mit einer Süd-Ausrichtung sind erfahrungsgemäß meist Immissionsorte in den Winkelbereichen Süd-West bis West und Ost bis Süd-Ost von Blendwirkungen durch Sonnenlichtreflexionen an den Moduloberflächen betroffen. Teilweise können auch höher gelegene Immissionsorte

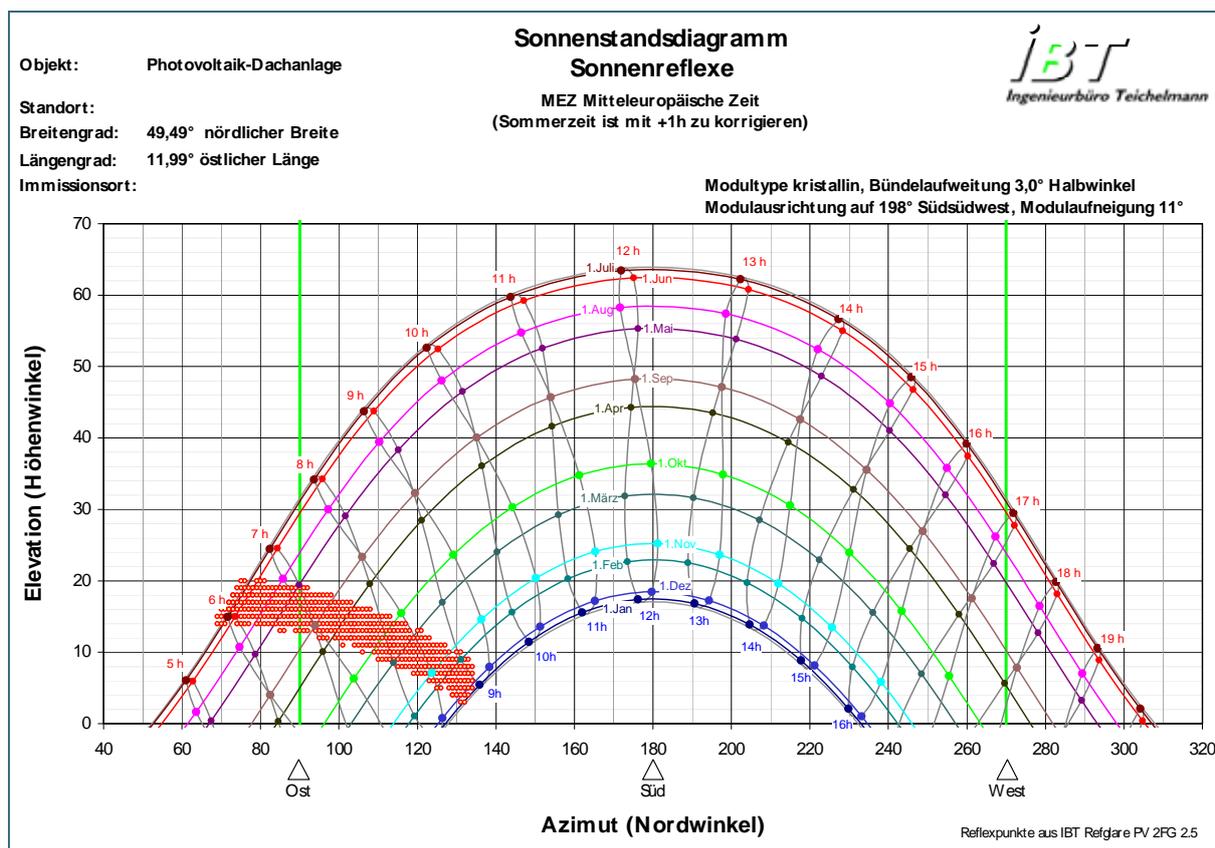
mit südlicherer oder nördlicherer Ausrichtung kritisch sein.

Sofern in diesen Richtungen mögliche Immissionsorte liegen ist eine Untersuchung der möglichen Blendwirkungen zu empfehlen.

Bei Photovoltaik-Dachanlagen können durch die oft ungünstige Drehung und Neigung der Module sowie die teilweise nahe und hoch gelegenen möglichen Immissionsorte u. U. sehr problematische Konstellationen vorliegen, die auch von Fachleuten ohne eine rechnerische Bewertung nur schwer einzuschätzen sind.

Eine Besonderheit solcher Dachanlagen in Deutschland ist es, dass für diese teilweise keine Baugenehmigung erforderlich ist und eine Überprüfung meist nicht gefordert wird. Dies kann dazu führen, dass problematische Blendwirkungen erst nach der Realisierung der Anlage erkannt werden und möglicherweise Nachbarschaftsstreit oder sogar juristische Auseinandersetzungen verursachen. Hier ist eine Untersuchung der Blendwirkung im Zweifelsfall dringend zu empfehlen.

In diesem Beispiel einer kleineren Dachanlage mit polykristallinen, relativ schwach streuenden PV-Modulen und einem in etwa 35 m Entfernung befindlichem Immissionsort können unter Berücksichtigung dieser Kriterien am betrachteten Immissionsort ganzjährig Reflexionen entstehen, die durch geeignete Maßnahmen vermieden werden müssen.



Eventuell auftretende Blendung durch Sonnenreflexion kann durch geeignete Maßnahmen vermieden oder gemindert werden:

- Vermeiden der Sichtachsen durch Schutzwände, Bepflanzung, Sichtschutzbleche usw.
- Optimierung der Ausrichtung und Neigung der Module bzgl. der Reflexionen

- ggf. Vermeiden der kritischen Einstrahlwinkel durch Schatterbleche (nur bei sehr flachen Einstrahlwinkeln sinnvoll)
- Auswahl einer Modultype mit optimalem Reflexionsverhalten (je nach Situation kann eine stärker streuend oder eine stärker gerichtet, eine typisch oder eine atypisch reflektierende Oberfläche sinnvoll sein)

Bei Bewertung und Berücksichtigung der möglichen Blendung bereits in der Planungsphase kann in der Regel ein guter Kompromiss zwischen Vermeidung der Blendung und gutem Ertrag der Module gefunden werden.

Bei entsprechender Planung kann die auftretende Blendung nach unserer Erfahrung in nahezu allen Fällen auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

## Fazit

Blendung durch Sonnenreflexionen ist ein Aspekt, der beim Verarbeiten reflektierender Materialien im Außenbereich Berücksichtigung finden sollte.

Eine Regelung zur Begrenzung dieser Blendwirkungen ist erforderlich und sinnvoll, um die Rechte der Mitmenschen zu respektieren und die Störungen durch diese Effekte auf ein Minimum zu begrenzen.

Hiervon sind z. B. Fassaden- oder Dachflächen aus reflektierenden Materialien wie Glas, glänzenden Metallen oder glänzend lackierten bzw. polierten Flächen sowie Photovoltaikanlagen betroffen.

Insbesondere die mögliche Blendung an Photovoltaikmodulen ist in Deutschland durch verschiedene Faktoren vielfach zu untersuchen.

Die Blendwirkungen durch Reflexion an Photovoltaikanlagen treten bei Freiflächenanlagen mit Südausrichtung meist nur bei tieferen Sonnenständen auf.

Bei Dachanlagen sind mögliche Blendwirkungen nur schwer vorauszusagen.

Sowohl bei Freiflächenanlagen mit möglichen Immissionsorten im östlichen bis süd-östlichen und westlichen bis süd-westlichen Bereich als auch bei Dachanlagen mit nahe gelegenen Immissionsorten mit freier Sichtachse zu den Modulen ist eine Bewertung der möglicherweise auftretenden Blendwirkungen durch Sonnenlichtreflexionen zu empfehlen.

Bei Bewertung und Optimierung eines Bauwerks oder einer Photovoltaikanlage hinsichtlich der Blendung bereits in der Planungsphase kann in der Regel eine gute technische Lösung gefunden werden. Insbesondere bei Photovoltaikanlagen ist eine Optimierung zwischen Minimierung der Blendung und gutem Ertrag bereits in der Planung oft ohne oder mit sehr geringem Mehraufwand realisierbar.

Das Überprüfen, Optimieren und Umrüsten von bereits realisierten Anlagen ist dagegen meist mit hohem Aufwand und starken Einschränkungen verbunden.

Bitte berücksichtigen Sie diese Punkte bei Ihren Projekten.

Die Überprüfung der Blendung durch Sonnenlichtreflexionen ist ein komplexer Vorgang und sollte fachmännisch und neutral gemäß dem Stand der Technik erfolgen.

Fürth, den 01.10.2012

The logo for Ingenieurbüro Teichelmann (IBT) features the letters 'IBT' in a stylized, bold font. The letter 'I' is black, 'B' is green, and 'T' is black.

**Ingenieurbüro Teichelmann**

Ingenieur- und Sachverständigenbüro  
für Licht- und Beleuchtungstechnik

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jens Teichelmann'.

Jens Teichelmann  
Dipl.-Ing. Lichttechnik

A business card for Ingenieurbüro Teichelmann. It features the IBT logo and contact information for Jens Teichelmann, a Dipl.-Ing. in lighting technology. The card includes the address Kronacher Str. 19, D-90765 Fürth, and provides telephone, fax, and mobile numbers, as well as email and website addresses.

**IBT Ingenieurbüro Teichelmann**  
Jens Teichelmann  
Dipl.-Ing.  
Kronacher Str. 19 - D-90765 Fürth  
Tel: +49 (0) 911-7903-288 - Fax: +49 (0) 911-7903-289  
Mobile: +49 (0) 177-1980807  
IBT@IB-Teichelmann.de - www.IB-Teichelmann.de

Urheberschutz:

Alle Rechte vorbehalten. Diese Angaben sind nur in kompletter Form zur allgemeinen Information und zur Klarstellung des beschriebenen Sachverhaltes zu verwenden.

Eine Vervielfältigung, Veröffentlichung, Weitergabe oder Verwertung des Materials durch Dritte ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Urhebers gestattet.

### Beispiele für Blendung durch Sonnenlichtreflexionen:



Entfernung zum Reflex ca. 60 m



Entfernung zum Reflex ca. 115 m



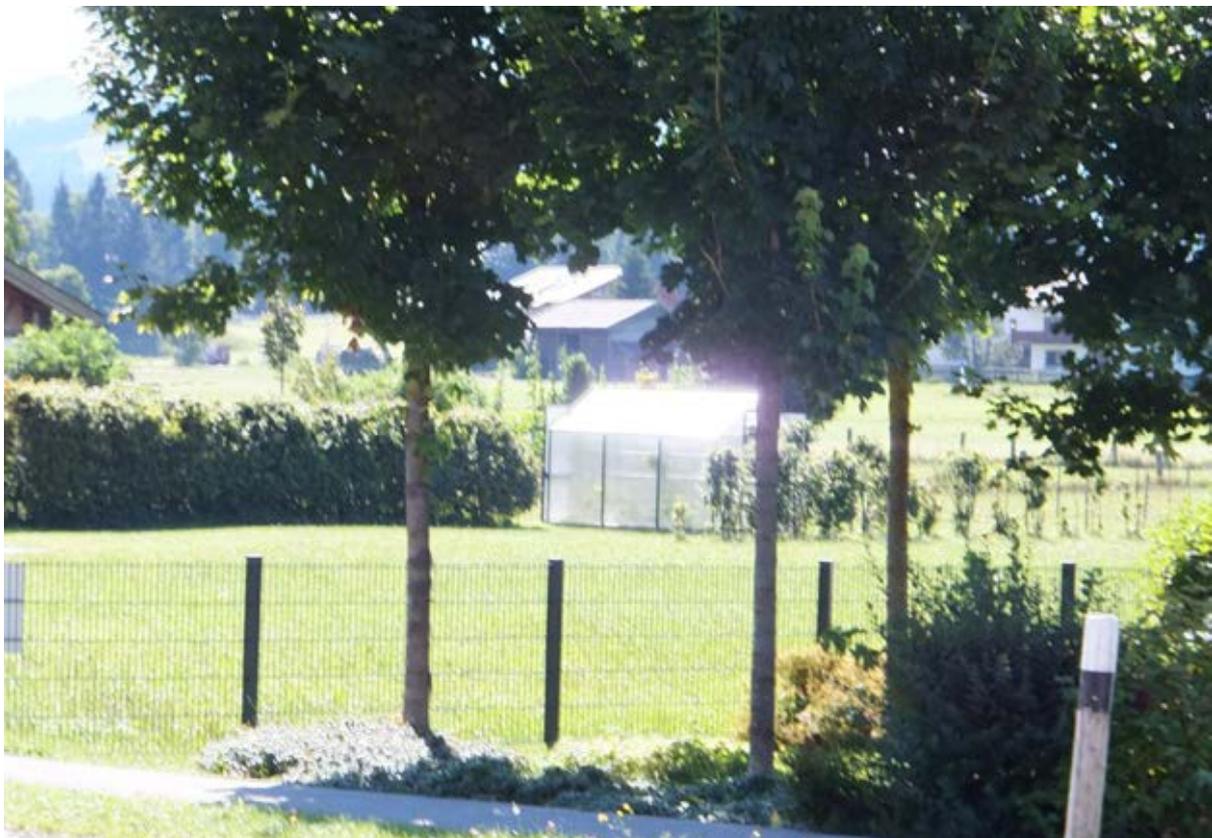
Entfernung zum Reflex ca. 270 m



Entfernung zum Reflex ca. 600 m



Sonnenreflex auf einem Gewächshaus



Sonnenreflex auf einem Gewächshaus



Sonnenreflex in ca. 20 m Entfernung



Sonnenreflex in ca. 38 m Entfernung







Sonnenlichtreflexionen auf einer Sonnenkollektoranlage



Sonnenlichtreflexionen auf einer Sonnenkollektoranlage



Blendwirkungen auf einer Terrasse und im Garten



Blendwirkungen auf einer Terrasse und im Garten



Blick aus einem Schlafzimmer



Blick aus einem Schlafzimmer



Blick aus einem Wohnzimmer



Blick aus einem Wohnzimmer



Blick aus der Tiefe eines Wohnraumes



Blendreflexion im Straßenverkehr



Blendreflex auf einem Lärmschutzwall an der Autobahn



Blendreflexion in Blickrichtung des Fahrers auf der Autobahn



Reflex auf einem polykristallinen PV-Modul im Nahbereich



Reflex auf dem gleichen polykristallinen PV-Modul in ca. 50 m Entfernung, scheinbare Vergrößerung des Reflexes durch Bündelaufweitung

### Worst case: Blendung auf der Autobahn:



als Notbehelf mit Gewebe abgedeckte PV-Module einer PV-Anlage neben der Autobahn A14  
(mit blauem Gewebe abgedeckte Module im Hintergrund, Module ohne Abdeckung im Vordergrund)



wegen Blendwirkung abgedeckte Module einer PV-Anlage an der Autobahn A14



## Tagungsleitung / Referenten

Dr. Richard Fackler  
Vizepräsident des LfU  
Bayer. Landesamt für Umwelt  
Dienststelle Hof  
Hans-Högn-Str. 12  
95030 Hof  
Tel.: 09281 1800–4500  
E-Mail: [Richard.Fackler@lfu.bayern.de](mailto:Richard.Fackler@lfu.bayern.de)

Andrea Wellhöfer  
Bayer. Landesamt für Umwelt  
Dienststelle Hof  
Referat 28 – Elektromagnetische Felder und  
Freizeitlärm  
Hans-Högn-Str. 12  
95030 Hof  
Tel.: 09281 1800–4689  
E-Mail: [Andrea.Wellhoefer@lfu.bayern.de](mailto:Andrea.Wellhoefer@lfu.bayern.de)

---

Joachim Bittner  
Müller-BBM GmbH  
Robert-Koch-Str. 11  
82152 Planegg bei München  
Tel.: 089 85602–172  
E-Mail: [Joachim.Bittner@muellerbbm.de](mailto:Joachim.Bittner@muellerbbm.de)

Raymund Hammer  
Geschäftsführer  
LMT Lichtmesstechnik GmbH  
Helmholtzstraße 9  
10587 Berlin  
Tel.: 030 3934028  
E-Mail: [Info@lmt.de](mailto:Info@lmt.de)

Dr. Barbara Knab, Dipl.-Psych.  
Wissenschaftspublizistin und Psychotherapeutin  
Ismaninger Straße 84  
81675 München  
Tel.: 089 985582  
E-Mail: [Barbara.Knab@gmx.de](mailto:Barbara.Knab@gmx.de)

Dr. Thomas Kurz  
Bayer. Landesamt für Umwelt  
Dienststelle Hof  
Referat 28 – Elektromagnetische Felder und  
Freizeitlärm  
Hans-Högn-Str. 12  
95030 Hof  
Tel.: 09281 1800–4688  
E-Mail: [Thomas.Kurz@lfu.bayern.de](mailto:Thomas.Kurz@lfu.bayern.de)

Christian Merz  
OSRAM AG  
Hellabrunner Straße 1  
81543 München  
Tel.: 089 6213–3211  
E-Mail: [C.Merz@osram.com](mailto:C.Merz@osram.com)

Dipl.-Ing. Jens Teichelmann  
IBT Ingenieurbüro Teichelmann  
Kronacher Str. 19  
90765 Fürth  
Tel.: 0911 7903–288  
E-Mail: [ibt@ib-teichelmann.de](mailto:ibt@ib-teichelmann.de)

Dr.-Ing. Jan Wienold  
Head of Team Passive Systems and Daylighting  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme  
Thermal Systems and Buildings  
Heidenhofstr. 2  
79110 Freiburg  
Tel.: 0761 4588–5133  
E-Mail: [Jan.Wienold@ise.fraunhofer.de](mailto:Jan.Wienold@ise.fraunhofer.de)

