

Beleuchtung am Arbeitsplatz: Visuelle und biologische Effekte

Ir. W.J.M. van Bommel

Ir. G.J. van den Beld

Dipl.-Ing. M. Fassian

April 2004

Philips Lighting, Eindhoven, Niederlande

Philips AEG Licht GmbH, Springe, Deutschland

PHILIPS

AEG

Autoren

Ir. W. J. M. van Bommel und Ir. G. J. van den Beld

Die beiden Autoren (Ir. van Bommel ist studierter Physiker, Ir. van den Beld Elektrotechniker) arbeiten seit Anfang der 70er Jahre bei Philips Lighting. Seit dieser Zeit waren sie an der Grundlagenforschung im Bereich der Beleuchtungs-anwendung beteiligt und hatten auch eine Reihe verschiedener Positionen im Unternehmen inne. Außerdem nehmen sie aktiv teil an der Arbeit des 'Comité International de l'Eclairage' (CIE) sowie in der Technischen Kommission "Licht und Beleuchtung" des europäischen Normenkomitees ('Comité Européen de Normalisation', CEN TC 169) und haben beide Referate für viele nationale und internationale Kongresse verfasst. Ihre Artikel wurden in namhaften Fachzeitschriften auf dem Gebiet der Beleuchtung veröffentlicht.

Wout van Bommel wurde zum Vorsitzenden der CIE für den Zeitraum 2003 – 2007 gewählt.

Gerrit van den Beld ist der niederländische Vertreter der CIE-Division 6: "Photobiologie und Photochemie" sowie Vorstandsmitglied der niederländischen Stiftung "Verlichting en Gezondheid" (Beleuchtung und Gesundheit), die sich für eine breitere medizinisch-wissenschaftliche Erforschung des Einflusses von Licht auf den Menschen einsetzt.

Der Artikel "Beleuchtung am Arbeitsplatz: visuelle und biologische Effekte" (April 2004) schießt mit seinen Inhalten an den im August 2002 durch die Autoren Ir. W.J.M. van Bommel, Ir. G.J. van den Beld und Ir. M.H.F. van Ooyen veröffentlichten Atrikel "Industriebeleuchtung und Produktivität" an. Die neuesten Forschungsergebnisse im Bereich der biologischen Effekte des Lichtes und der Beleuchtung auf Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen wurden eingearbeitet. Detaillierte Informationen zum Thema "Beleuchtung und Produktivität" entnehmen Sie bitte dem entsprechenden Kapitel der Veröffentlichung "Industriebeleuchtung und Produktivität" vom August 2002.

Inhalt

Zusammenfassung

Einleitung

Drei Typen von Photorezeptor-Zellen im Auge

Beleuchtung und visuelle Effekte

 Sehleistung

 Visuelle Umgebung

 Sehrelevante Qualitätsaspekte von Beleuchtungsanlagen

Beleuchtung und biologische Effekte

 Licht und Körperrhythmen

 Beleuchtung, Aufmerksamkeit, Stimmung und Stress

 Gesundheitsbezogene Qualitätsaspekte von Beleuchtungsanlagen

Schlussfolgerungen

Beleuchtung am Arbeitsplatz: Visuelle und biologische Effekte

Zusammenfassung

Die Entdeckung eines bisher unbekanntem Photorezeptor-Zellentyps im Auge im Jahr 2002 ermöglicht ein besseres Verständnis der biologischen Effekte des Lichts auf den Menschen. Aus den inzwischen durchgeführten Forschungsarbeiten zur Untersuchung des neu entdeckten Zellentyps ging hervor, dass blaues Licht biologisch einen stärker aktivierenden Effekt als rotes Licht hat.

Es wurden zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt, in denen die Effekte auf Gesundheit, Wohlbefinden und Aufmerksamkeit von Menschen untersucht wurden, die unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen arbeiten. Wie die in diesem Artikel zusammengefassten Ergebnisse zeigen, hat eine gute Beleuchtung tatsächlich wichtige positive Effekte, und zwar nicht nur visuell, sondern auch biologisch. Aus der Untersuchung der biologischen Effekte des Lichts geht deutlich hervor, dass die Richtlinien für den Entwurf einer guten und gesunden Beleuchtung in einigen Punkten von den konventionellen Regeln abweichen. Beispielsweise konnten wir zeigen, dass es sich positiv auswirken kann, sowohl das Niveau als auch die Farbe des Lichts regelbar zu gestalten. Nicht nur das Licht für die Erfüllung der Sehaufgabe, sondern auch das Licht, das das Auge erreicht, bestimmt die Beleuchtungsqualität.

In einer Arbeitsumgebung sind die Vorteile in Bezug auf Aspekte wie Gesundheit und Wohlbefinden nicht nur für den Mitarbeiter selbst wichtig, sie führen auch zu einer besseren Arbeitsleistung, weniger Fehlern, größerer Sicherheit sowie zu einer geringeren Abwesenheitsquote. Ein Beispiel aus der Industrie demonstriert, dass die Gesamtproduktivität durch Änderung des Beleuchtungsniveaus von 300 auf 500 Lux ohne weiteres um 8 Prozent gesteigert werden kann.

EINLEITUNG

Die visuellen Effekte der Beleuchtung werden schon seit über 500 Jahren untersucht. Schon Leonardo da Vinci (1452-1519) beschrieb Ideen über "Straßenbeleuchtung". Christiaan Huygens (1629-1695) formulierte die Wellentheorie des Lichts, während Sir Isaac Newton (1642-1727) die Teilchentheorie des Lichts entwickelte. Johann Wolfgang Goethe (1749-1832) analysierte die Farbeffekte und die Wirkung des Lichts.

Nach der Einführung der Gasbeleuchtung und des elektrischen Lichts Anfang bis Mitte des 19. Jahrhunderts richtete sich die Untersuchung der visuellen Beleuchtungseffekte immer mehr auf praktische Beleuchtungsanwendungen.

Hinsichtlich der mechanischen Vorgänge, die den visuellen Effekten zugrunde liegen, entdeckte der Holländer Antony van Leeuwenhoek schon im Jahr 1722 die Anwesenheit von zwei Zellentypen, den 'Stäbchen- und Zapfen', in der Netzhaut. Ihre Existenz wurde 1834 von dem Deutschen Gottfried Treviranus als "die lichtempfindlichen Photorezeptoren" bestätigt. Diese Entdeckung ermöglichte ein besseres Verständnis von zahlreichen visuellen Effekten des Lichts, die schon früher beschrieben wurden, sowie eine konkrete Erforschung der visuellen Effekte des Lichts mit dem Ziel, effektivere Beleuchtungsanlagen zu entwerfen.

Für mehr als 150 Jahre hielten die Wissenschaftler die Stäbchen und Zapfen für die einzigen Photorezeptor-Zellen im Auge. Geschichtlich gesehen war es darum eine Sensation, dass David Berson et al. [1] von der Brown University (USA) einen neuartigen, dritten Photorezeptortyp in der Netzhaut von Säugetieren im Jahr 2002 entdeckte. Dieser neuartige Photorezeptor bildet das "fehlende Glied" in der Beschreibung der Mechanismen hinter den von Licht und Dunkel gesteuerten biologischen Effekten. Dass die Beleuchtung bedeutende biologische Effekte hat, wurde in den letzten fünfundzwanzig Jahren bereits in umfassenden Untersuchungen in der biologischen und medizinischen Wissenschaft bewiesen. Daraus haben wir gelernt, dass die Wirkung einer guten Beleuchtung weit über die rein visuellen Effekte hinausreicht: biologisch gesehen hat eine gute Beleuchtung einen positiven Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden, Aufmerksamkeit und sogar die Schlafqualität [2], [3], [4], [5]. Gleichzeitig bedeutet dies, dass die Gütemerkmale, mit denen sich eine gute Beleuchtung beschreiben lässt, dringend überarbeitet werden müssen.

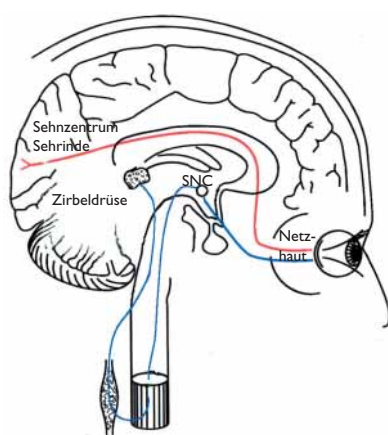
Ausgehend von den drei Photorezeptoren im Auge beschreibt dieser Artikel zunächst die den visuellen und biologischen Effekten zugrunde liegenden Mechanismen. Nacheinander wird auf die visuellen Effekte und auf die biologischen Effekte der Beleuchtung eingegangen. Der erste Teil wird abgeschlossen mit einer Zusammenfassung der "sehrelevanten" Qualitätsaspekte der Beleuchtung, während der zweite Teil mit einer Beschreibung der "gesundheitsbezogenen" Qualitätsaspekte der Beleuchtung schließt.

DREI TYPEN VON PHOTOREZEPTOR-ZELLEN IM AUGE

Die Photorezeptor-Zellen in der Netzhaut des Auges – die Zapfen und Stäbchen – steuern die visuellen Effekte. Wenn Licht auf diese Zellen trifft, setzt eine komplexe chemische Reaktion ein. Dabei wird eine chemische Substanz (aktiviertes Rhodopsin) gebildet, die elektrische Impulse im Sehnerv auslöst, der die Photorezeptor-Zellen mit dem Sehzentrum im Gehirn (Sehrinde) verbindet. In der Sehrinde des Gehirns werden diese elektrischen Impulse als “Bild” interpretiert.

Abbildung 1 zeigt die Nervenverbindung zwischen den Zapfen und Stäbchen im Auge und der Sehrinde des Gehirns (rot).

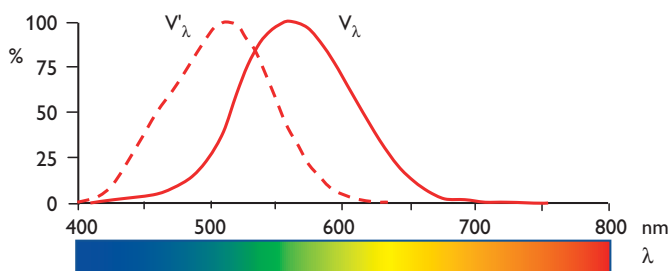
Abbildung 1 Visuelle und biologische Bahnen im Gehirn: Nervenverbindungen zwischen der Netzhaut des Auges mit ihren Zapfen und Stäbchen und der Sehrinde einerseits (rot), sowie zwischen der Netzhaut mit der neu entdeckten Photorezeptor-Zelle und dem suprachiasmatischen Nukleus (SNC) und der Zirbeldrüse (blau).



In Situationen mit sehr wenig Licht sind die Stäbchen aktiv (skotopisches Sehen oder Stäbchensehen). Eine Farberkennung ist nicht möglich. Die Zapfen sind für die Detailschärfe und das Farbsehen zuständig. Darum spielen die Zapfen in der Innenbeleuchtung die wichtigste Rolle.

Die Empfindlichkeit des Zapfen- und Stäbchen-Systems variiert in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts, und somit auch bei unterschiedlichen Lichtfarben. Dies ist in Abbildung 2, die die Kennlinien der spektralen Empfindlichkeit für das Zapfensystem V_λ und für das Stäbchensystem V'_λ zeigt, dargestellt. Die V_λ -Kennlinie bildet die Grundlage für alle lichttechnischen Einheiten wie Lumen, Lux und Candela. Dies wird als photopisches System (Tagesehen oder Zapfensehen) bezeichnet. Wie aus der V_λ -Kennlinie ersichtlich ist, ist das Auge nicht besonders empfindlich für extremes blaues und rotes Licht, hat aber seine maximale Empfindlichkeit im grün-gelben Bereich des Lichts.

Abbildung 2 Kennlinien der spektralen Empfindlichkeit des Auges, V_λ für das Zapfensystem (photopisches Sehen, durchgezogene Linie) und V'_λ für das Stäbchensystem (skotopisches Sehen, gestrichelte Linie).

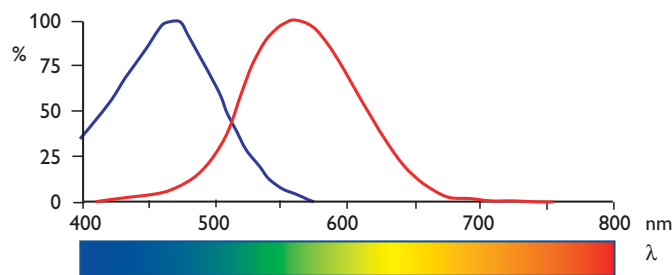


Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass verschiedene Lichtfarben durch verschiedene Mischungen von Wellenlängen erzeugt werden können. Auch weißes Licht besteht aus einer solchen Mischung. Darum wird der (visuelle) Wirkungsgrad einer Lichtquelle in hohem Maße von der spektralen Empfindlichkeit des Auges für die Wellenlängen bestimmt, die in dem erzeugten Licht enthalten sind.

Der neue Photorezeptorzellentyp in der Retina des Auges, der von David Berson et al. [1] im Jahr 2002 entdeckt worden ist, steuert biologische Effekte¹. Wenn das Licht auf diese Zellen trifft, dann kommt es zu einer komplexen chemischen Reaktion (hier ist auch das Photopigment Melanopsin eingebunden [6]), wodurch elektrische Impulse entstehen. Diese Zellen haben ihre "eigenen" Nervenverbindungen zu zwei Stellen im Gehirn, dem Suprachiasmatic Nucleus (SCN), der biologischen Uhr im Gehirn, und der Zirbeldrüse. Abbildung 1 zeigt ebenfalls die Nervenverbindung zwischen den neu entdeckten Photorezeptor-Zellen im Auge und diesen Punkten im Gehirn.

Die Empfindlichkeit dieser neuen Photorezeptorzelle variiert ebenfalls in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts, und somit auch bei unterschiedlichen Lichtfarben. Auf Grundlage des biologischen Faktors "Melatonin-Unterdrückung", war Brainard [7] in der Lage, die spektrale Kurve der "biologischen Empfindlichkeit"² zu bestimmen. Diese Kennlinie ist in Abbildung 3, zusammen mit der visuellen Augen-Empfindlichkeitskurve der Zapfen dargestellt.

Abbildung 3 Spektrale Kurve der „biologischen Empfindlichkeit“ (basierend auf der Melatonin-Unterdrückung) in blau (Quelle: Brainard [7]), und die visuelle Augenempfindlichkeitskurve V_{λ} in rot.



Beim Vergleich der beiden Kurven wird sofort deutlich, dass sich die "biologische Empfindlichkeit" sehr von der Kurve der visuellen Empfindlichkeit für verschiedene Wellenlängen des Lichts unterscheidet. Während die maximale visuelle Empfindlichkeit im gelb-grünen Wellenlängenbereich liegt, befindet sich die maximale "biologische Empfindlichkeit" im blauen Bereich des Spektrums. Dieses Phänomen hat eine wichtige Bedeutung für die Spezifikation einer "gesunden" Beleuchtung.

¹ Wahrscheinlich spielen Stäbchen und Zapfen darin ebenfalls eine Rolle

² Wie später in diesem Artikel erklärt werden wird, ist eines der biologischen Effekte des Lichts die Unterdrückung des Hormons Melatonin. Wahrscheinlich haben viele andere biologische Faktoren, die durch Beleuchtung gesteuert werden, ein ähnliches Aktions-spektrum wie das, das auf Grundlage der Melatonin Unterdrückung bestimmt wurde.

BELEUCHTUNG UND VISUELLE EFFEKTE

Sehleistung

Die Arbeitsplatzbeleuchtung erstreckt sich auf viele verschiedene Arbeitsumgebungen und Aufgaben: von Büros und kleinen Werkstätten bis hin zu riesigen Werkhallen, und von Aufgaben wie Lesen, Schreiben und PC-Arbeit bis hin zu feinsten Präzisionsarbeiten oder schweren Industriearbeiten.

Die Beleuchtungsqualität sollte dabei immer so hoch wie möglich sein, um eine ausreichende Sehleistung zur Ausführung der jeweiligen Aufgaben zu garantieren. Die tatsächliche Sehleistung einer Person ist jedoch nicht nur von der Qualität der Beleuchtung, sondern auch ihrem eigenen "Sehvermögen" abhängig. In dieser Hinsicht ist auch das Alter ein wichtiges Kriterium, da die Anforderungen an die Beleuchtung bei steigendem Alter ebenfalls zunehmen. Abbildung 4 zeigt die relative Lichtmenge, die – in Abhängigkeit vom Alter – zum Lesen eines gut gedruckten Buchs benötigt wird. Diese Untersuchung wurde mit Versuchspersonen ausgeführt, die erforderlichenfalls die richtige Lesebrille trugen. Aus dieser Kennlinie geht eindeutig hervor, dass das Alter einen sehr großen Einfluss auf den Lichtbedarf hat. Einer der vielen Gründe für diesen Effekt ist die Abnahme der Lichtdurchlässigkeit der Augenlinsen: mit zunehmendem Alter tritt allmählich eine Trübung der Linsen ein (siehe Abbildung 5). Diese Trübung ist dafür verantwortlich, dass die Netzhaut in steigendem Alter immer weniger Licht empfangen kann. Es bedeutet auch, dass immer weniger kurzwelliges (blaues) Licht durchgelassen wird. Folglich sieht das alternde Auge eine weniger blaue Welt.

Abbildung 4 Zusammenhang zwischen dem Alter und der relativ benötigten Lichtmenge zum Lesen eines gut gedruckten Buchs (Quelle: Fortuin [8])

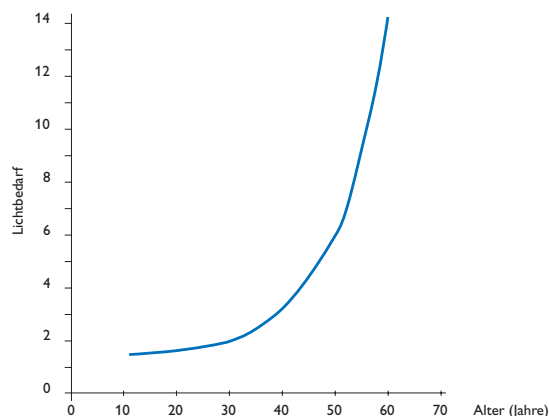


Abbildung 5 Lichtdurchlässigkeit der Augenlinsen für verschiedene Altersgruppen. Die Werte sind ausgedrückt in % des 560 nm-Punkts für Neugeborene (Quelle: angepasst nach Brainard et al. [9]).

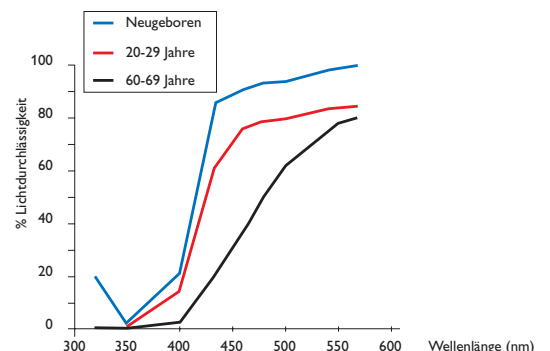
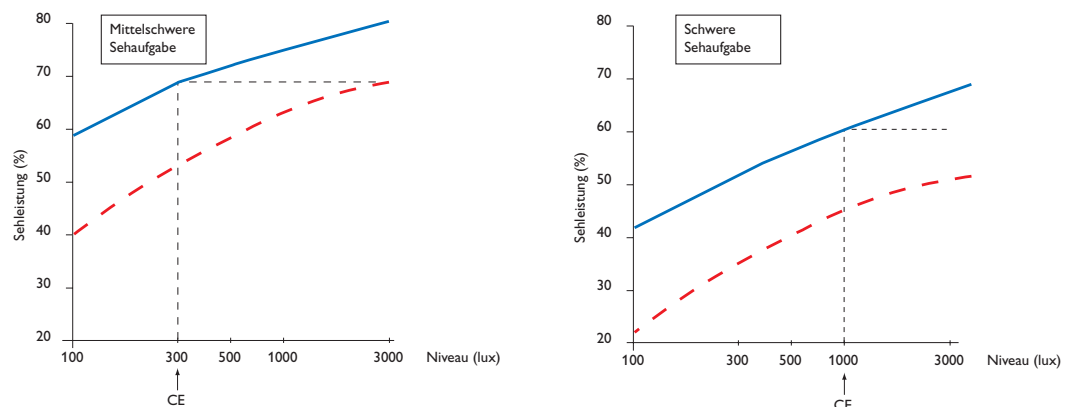


Abbildung 6 dient zur Illustration der zahlreichen Forschungsergebnisse in Bezug auf den Einfluss der Beleuchtungsqualität auf die Sehleistung. Sie zeigt die relative Sehleistung in Abhängigkeit vom Beleuchtungsniveau für verschiedene visuelle Aufgabenschwierigkeiten: eine für eine mittelschwere Sehaufgabe (z.B. Büroarbeit oder allgemeine Maschinenarbeiten in einer Industrieumgebung), eine andere für eine schwierige Aufgabe (z.B. Farbinspektion oder feine Montagearbeiten). Alle Aufgaben zeigen eine deutliche Zunahme der Sehleistung bei besserer Beleuchtungsqualität – in diesem Beispiel einem höheren Beleuchtungsniveau. In der Graphik sind auch die vorgeschriebenen Beleuchtungsniveaus (EN) für Industriearbeitsplätze angegeben, die in vielen Fällen in der Europäischen Norm für die Beleuchtung von Arbeitsplätzen [10] spezifiziert sind.

Abbildung 6 Zusammenhang zwischen der relativen Sehleistung (in %) und dem Beleuchtungsniveau (in Lux). durchgezogene blaue Linie: Junge Personen, gestrichelte Linie: ältere Personen (Quelle: CIE [11] EN: Beleuchtungsniveaus entsprechend der EN- Norm)



Aus dieser Graphik wird ersichtlich, dass die in der europäischen Norm festgelegten Anforderungen für jüngere Personen tatsächlich gut geeignet sind. Die Sehleistung von älteren Mitarbeitern liegt jedoch wesentlich niedriger. Zum Glück kann dies für die mittelschwere Aufgabe vollständig mit einer höheren Beleuchtungsstärke ausgeglichen werden. In der Praxis setzt dies zusätzlich zu der von den EN-Normen vorgeschriebenen Beleuchtung eine regelbare Beleuchtung für diejenigen Momente voraus, in denen das Tageslicht nicht ausreicht, um die für die älteren Arbeitskräfte benötigten höheren Beleuchtungsniveaus zu bieten.

Natürlich bewirkt eine Verbesserung der Sehleistung wiederum eine Verbesserung der Aufgaben- bzw. Arbeitsleistung, die sich in einer höheren Produktivität und weniger Fehlern ausdrückt. Aber der Grad, in dem die gute Beleuchtung die Arbeitsleistung steigert, hängt selbstverständlich von der visuellen Komponente der Aufgabe ab. Eine Aufgabe mit hohen Sehanforderungen lässt sich durch gute Sehbedingungen wesentlich besser bewältigen als eine Aufgabe mit geringen Sehanforderungen.

Visuelle Umgebung

Neben ihrem Effekt auf die visuelle Leistung kann die Beleuchtung ebenfalls einen starken Einfluss auf die Atmosphäre und den visuellen Eindruck, den man von einem Arbeitsplatz erhält, haben. Richtig geplant, kann die gesamte Arbeitsumgebung einen stimulierenden Effekt auf die Menschen haben, die in ihr arbeiten [12]. Heutzutage wird viel Aufmerksamkeit auf das Layout und die Einrichtung des Arbeitsplatzes verwendet. Gute Beleuchtung kann diesen Eindruck eines gut gestalteten Arbeitsplatzes verstärken, schlecht geplante Beleuchtung hingegen kann den gewünschten Effekt vermindern oder sogar "zerstören". Ein Aspekt, der in diesem Zusammenhang wichtig ist, ist eine kontrollierte Helligkeit der Oberflächen, die die physikalischen Grenzen des Raumes bilden, wie Wände, Fußboden und Decke. Die Helligkeit dieser Raumbegrenzungsflächen bestimmt in großem Maße, wie der gesamte Raum erfahren wird. Ein anderer Faktor ist eine angemessene Begrenzung der Blendung und unerwünschter Lichtreflexionen. Blendung ist die Empfindung, die durch Helligkeitsniveaus innerhalb des visuellen Bereiches hervorgerufen wird, welche beträchtlich größer sind als die Helligkeit, an die sich das Auge angepasst hat. Infolge der begrenzten Adaptationsfähigkeit des Auges, können abrupte Helligkeitsänderungen zu verminderter visueller Leistung sowie zu visuellem Stress und Unbehagen führen.

Den Farbeigenschaften des Lichtes sollte man ebenfalls eine angemessene Beachtung schenken. Die Beleuchtung sollte es zulassen, die "echten" Farben zu sehen. Eine korrekte Farbwiedergabe der menschlichen Haut ist besonders wichtig, da eine Beleuchtung, die die Haut blass und ungesund aussehen lässt, oftmals zu Beschwerden führt. Auch der Farbeindruck des Lichts selbst spielt eine Rolle, wenn man in einem Raum eine bestimmte Atmosphäre kreieren will. Es kann sogar einen emotionalen Einfluss haben. Ein neutralweißes Licht vermittelt beispielsweise einen kühlen Eindruck, der oftmals als "businesslike" erfahren wird, während glühlampenähnliches Licht einen warmen Eindruck hinterlässt, der als „gemütlich“ und „entspannend“ empfunden wird.

Schließlich ist der Tageslichteinfall in den Raum ein weiterer sehr wichtiger Faktor, der die Qualität der Arbeitsumgebung bestimmt. Zum Glück dringt Tageslicht in vielen Fällen zumindest für einige Stunden pro Tag ins Gebäude ein und erhöht das gesamte Beleuchtungsniveau erheblich. Aber Tageslicht erleichtert nicht nur die visuelle Leistung bei der Erfüllung der visuellen Aufgabe, indem es zur Beleuchtung dieser Aufgabe beiträgt. Aufgrund seines dynamischen, veränderlichen Charakters, was sowohl Intensität als auch Farbe angeht, trägt es, wenn richtig kontrolliert (z.B. durch geeignetes Fenster- und Sonnenschutzdesign), auch viel zu einer guten Arbeitsumgebung bei. Die dynamischen Veränderungen des Tageslichts haben einen positiven Einfluss auf Stimmung und Motivation. Eine umfangreiche Studie von Büroarbeitsplätzen hat ergeben, dass die arbeitenden Menschen bei einer künstlichen Beleuchtung in Verbindung mit dem normalen Tageslicht, das in einer Büroumgebung vorhanden ist, durchschnittlich 800 Lux zusätzlich zum vorherrschenden Tageslichteinfall bevorzugen [13].

Schwerepunkte und Qualitätsaspekte von Beleuchtungsanlagen

Zahlreiche (inter)nationale Empfehlungen und Normen spezifizieren Zahlenwerte für die meisten der oben aufgelisteten visuellen Qualitätsmerkmale sowie für eine umfangreiche Reihe von Innenräumen und Aktivitäten.

Tabelle 1 zeigt die visuellen Qualitätsaspekte sowie die wichtigsten Parameter, die in der Europäischen Norm für die Beleuchtung von Arbeitsplätzen genannt werden.

Dabei sei besonders darauf hingewiesen, dass der Farbeindruck des Lichts selbst in der Europäischen Norm nicht festgelegt ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dieser Farbeindruck vorerst als eine psychologische und ästhetische Frage und somit als 'Geschmackssache' eingestuft wird.

Tabelle 1 Visuelle Qualitätsaspekte von Beleuchtungsanlagen mit den dazugehörigen Qualitätsparametern, wie sie in der Europäischen Norm für die Beleuchtung von Arbeitsplätzen spezifiziert werden [10].

Aspekt der Bildqualität	Qualitätsparameter
Beleuchtungsniveau	Durchschnittliches Beleuchtungsniveau, E_{mittel}
Räumliche Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> { Gleichmäßigkeit: $E_{\text{min}} / E_{\text{mittel}}$ { Blendungsbegrenzung: UGR
Farbwiedergabe	R_a

Die Tabellen 2 und 3 zeigen Beispiele für die in der EN-Norm vorgeschriebenen Werte für Büros und Industrieumgebungen (Chemische Industrie, Kunststoff- und Gummiindustrie)³. Die darin angegebenen Werte erfüllen für die Mehrheit der Mitarbeiter die Anforderungen, die an die visuellen Leistungen und den Sehkomfort an Arbeitsplätzen gestellt werden. Aber wie oben bereits erwähnt, hat der Alterseffekt einen so großen Einfluss, dass zusätzlich zur EN-Standardbeleuchtung eine regelbare Beleuchtung erforderlich ist, wenn das Tageslicht nicht die erforderlichen höheren Beleuchtungsniveaus realisieren kann, die für das ältere Auge benötigt werden.

Tabelle 2 Beleuchtungsanforderungen für Büros (Quelle: EN 12 464 [10]).

3 Büros					
Ref.-Nr.	Art Innenraum,Aufgabe/Aktivität	\bar{E}_m	UGR _L	R _a	Bemerkungen
3.1	Ablage, Kopieren,Verkehrszonen usw.	300	19	80	
3.2	Schreiben, Scheibmaschineschreiben, Lesen, Datenverarbeitung	500	19	80	Bildschirmarbeit: siehe Abschnitt 4.11.
3.3	Technisches Zeichnen	750	16	80	
3.4	CAD-Arbeitsplätze	500	19	80	Bildschirmarbeit: siehe Abschnitt 4.11.
3.5	Konferenz- und Besprechungsräume	500	19	80	Beleuchtung sollte regelbar sein.
3.6	Empfangstheke	300	22	80	
3.7	Archive	200	25	80	

Tabelle 3 Beleuchtungsanforderungen für die chemische Industrie, die Kunststoff- und Gummiindustrie (Quelle: EN 12 464 [10]).

2.5 Chemische Industrie, Kunststoff- und Gummiindustrie					
Ref.-Nr.	Art Innenraum/Aufgabe/Aktivität	\bar{E}_m	UGR _L	R _a	Bemerkungen
2.5.1	Verfahrenstechnische Anlagen mit Fernbedienung	50	-	20	Sicherheitsfarben müssen erkennbar sein.
2.5.2	Verfahrenstechnische Anlagen mit gelegentlichen manuellen Eingriffen	150	28	40	
2.5.3	Ständig besetzte Arbeitsplätze in verfahrenstechnischen Anlagen	300	25	80	
2.5.4	Präzisionsmessräume, Laboratorien	500	19	80	
2.5.5	Arzneimittelherstellung	500	22	80	
2.5.6	Reifenproduktion	500	22	80	
2.5.7	Farbprüfung	1000	16	90	T _{CP} ≥ 4000 K.
2.5.8	Zuschneiden, Nachbearbeiten, Kontrollarbeiten	750	19	80	

³ Die angegebenen Werte für die mittlere Beleuchtungsstärke sind "Wartungswerte der Beleuchtungsstärken": d.h. Mindestwerte, die für die mittlere Beleuchtungsstärke auf der spezifizierten Oberfläche niemals unterschritten werden dürfen. Der für die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich angegebene Wert ist immer derselbe: E_{min} / E_{mittel} = 0.7.

BELEUCHTUNG UND BIOLOGISCHE EFFEKTE

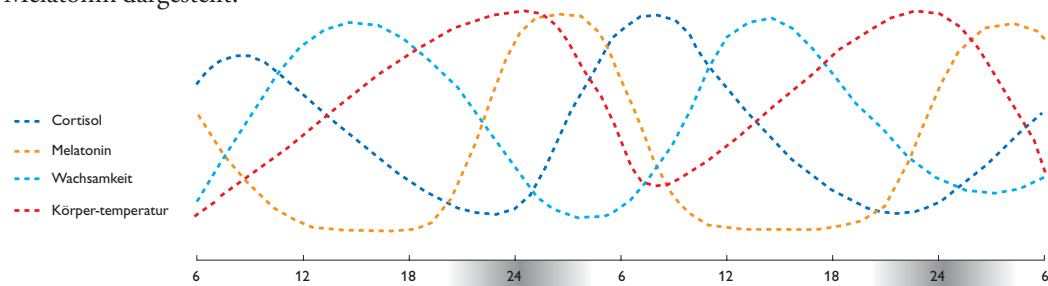
Schon seit der Antike ist der heilsame Effekt des (Tages-)Lichts bekannt. Beispiele dafür sind die Heliotherapie bzw. die Behandlung von Krankheiten, indem der Körper Sonnenstrahlen ausgesetzt wird. Lichttherapie zur Behandlung von Gesundheitsproblemen war bis in die dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts sehr populär, wobei die Einführung des Penicillins später dazu führte, dass die pharmazeutische Industrie die führende Rolle übernahm. In den letzten 20 bis 30 Jahren ist die Wertschätzung des Lichts als wichtiger Beitrag zu Gesundheit und Wohlbefinden dank zahlreicher Entdeckungen in der biologischen und medizinischen Forschung wieder aufgelebt.

Normalerweise betrachten wir das Auge als Sehorgan. Aber seitdem vor kurzem die neuen Photorezeptorzellen im Auge und deren Nervenverbindungen zum Gehirn entdeckt wurden, verstehen wir jetzt auch, wie das Licht eine große Anzahl von biochemischen Prozessen im menschlichen Körper reguliert und steuert. Die wichtigsten Ergebnisse beziehen sich auf die Steuerung der biologischen Uhr und einiger wichtiger Hormone über regelmäßige Hell-Dunkel-Rhythmen. Das bedeutet wiederum, dass die Beleuchtung einen wesentlichen Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden und Aufmerksamkeit hat.

Licht und Körperrhythmen

Über die neu entdeckten Photorezeptorzellen sowie ein separates Nervensystem sendet das Licht Signale an unsere biologische Uhr, die wiederum die zirkadianen (täglichen) und zirkannuellen (jahreszeitlichen) Rhythmen vieler körpereigener Prozesse steuert. In Abbildung 7 werden einige typische zirkadiane Rhythmen beim Menschen wie Körpertemperatur, Aufmerksamkeit sowie die Hormone Cortisol und Melatonin dargestellt.

Abbildung 7 Doppel-
Aufzeichnung (2 x 24 Std.) von
typischen zirkadianen
Rhythmen der
Körpertemperatur, Melatonin,
Cortisol und Aufmerksamkeit
beim Menschen für einen
natürlichen 24-Stunden-Hell-
Dunkel-Zyklus.



Die Hormone Cortisol ("Stresshormon") und Melatonin ("Schlafhormon") spielen eine wichtige Rolle bei der Steuerung von Aufmerksamkeit und Schlaf. Cortisol lässt unter anderem den Blutzuckerspiegel ansteigen, um den Körper mit Energie zu versorgen und stärkt das Immunsystem. Wenn jedoch die Cortisolwerte über einen zu langen Zeitraum zu hoch sind, ermüdet das System und wird uneffizient. Das Niveau des Cortisols steigt am Morgen an und bereitet den Körper auf die Aktivitäten des bevorstehenden Tages vor. Es bleibt im Verlauf des hellen Tages auf einem ausreichend hohen Niveau und sinkt schließlich um Mitternacht auf ein Minimum ab. Der Spiegel des Schlafhormons Melatonin fällt morgens ab, wodurch das Gefühl der Schläfrigkeit sinkt. Der Melatoninspiegel steigt wieder an, wenn es dunkel wird, so dass ein gesunder Schlaf möglich wird, das entspricht dem Zeitpunkt an dem sich das Cortisol auf dem Mindestniveau befindet. Für die Gesundheit des Menschen ist es wichtig, dass diese Rhythmen nicht zu oft unterbrochen werden. Falls der Rhythmus trotzdem gestört wird, trägt helles Licht am Morgen dazu bei, den normalen Rhythmus wiederherzustellen.

In einer natürlichen Umgebung synchronisiert das Licht, speziell das Morgenlicht, die innere Uhr auf den 24-Stunden Hell-/Dunkel-Rhythmus der Erde. Ohne den normalen 24-Stunden Tag-Nacht-Rhythmus würde die biologische Uhr frei laufen, beim Menschen mit einer durchschnittlichen Dauer von ca. 24 Stunden und 15 bis 30 Minuten. Dies würde zur Folge haben, dass von Tag zu Tag immer größere Abweichungen bei unserer Körpertemperatur, dem Cortisol- und dem Melatonin-niveau gegenüber dem normalen 24-Stunden Tag-Nacht-Rhythmus entstehen [14]. Diese Deregulierung in Abwesenheit des "normalen" Hell-Dunkel-Rhythmus würde zu einem falschen Rhythmus von Aufmerksamkeit und Schläfrigkeit führen, und letztendlich eine Munterkeit in den dunklen Stunden und Schläfrigkeit in den hellen Stunden zur Folge haben. Die gleichen Symptome, und tatsächlich auch aus den gleichen Gründen, werden mit dem Jetlag nach einer Reise über mehrere Zeitzonen in Verbindung gebracht [15]. Auch Arbeitnehmer, die in rotierenden Schichten arbeiten, zeigen nach jedem Schichtwechsel aus oben genanntem Grund mehrere Tage lang diese Symptome [16].

Beleuchtung, Aufmerksamkeit, Stimmung und Stress

Es wurden zahlreiche Forschungen durchgeführt, in denen die Wirkungen des Lichts auf Gesundheit, Wohlbefinden und Aufmerksamkeit von Menschen, die unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen arbeiten, untersucht wurden. In diesem Absatz wird nur auf einige wenige, aber typische solcher Untersuchungen eingegangen.

Küller und Wetterberg [17] untersuchten die Gehirnaktivität (EEG) von Probanden in einem Labor, das wie ein Büro eingerichtet war. Zum einen mit einem relativ hohen (1700 lux) und zum anderen mit einem relativ niedrigen Beleuchtungsniveau (450 lux). Die EEGs zeigen einen ausgeprägten Unterschied: das höhere Beleuchtungsniveau führt zu weniger Delta-Wellen (die Delta-Aktivität des EEGs ist ein Anzeichen für Schläfrigkeit), was bedeutet, dass helles Licht einen aufmerksamkeitssteigernden Einfluss auf das Zentralnervensystem hat (siehe Abbildung 8).

Zahlreiche Untersuchungen der Effekte des Lichts auf Aufmerksamkeit und Stimmung wurden unter Nachtschicht-Bedingungen durchgeführt, weil dann die stärksten Effekte erwartet werden. Abbildung 9 zeigt den Effekt von zwei Beleuchtungsniveaus auf die Wachsamkeit in Abhängigkeit von der Arbeitsdauer für Schichtarbeiter [15]. Bei beiden Beleuchtungsniveaus tritt im Laufe der Nacht ein Rückgang der Wachsamkeit auf; bei dem höheren Beleuchtungsniveau ergibt sich jedoch ein signifikant verbesserter Wachsamkeitsgrad, und damit eine bessere Aufmerksamkeit und Stimmung.

Abbildung 8 Delta-Aktivität im EEG von Büroangestellten unter Beleuchtungs-niveaus von 450 Lux und 1700 Lux (Quelle: Küller and Wetterberg [17]).

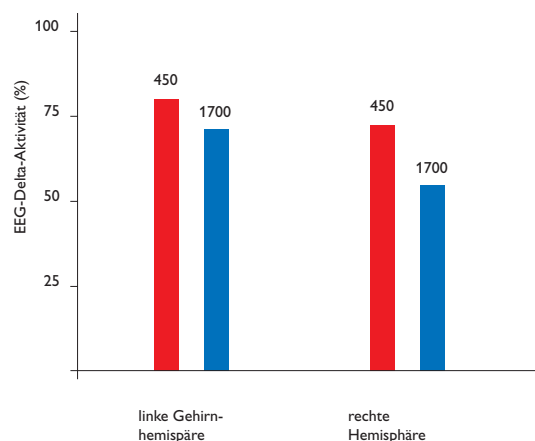
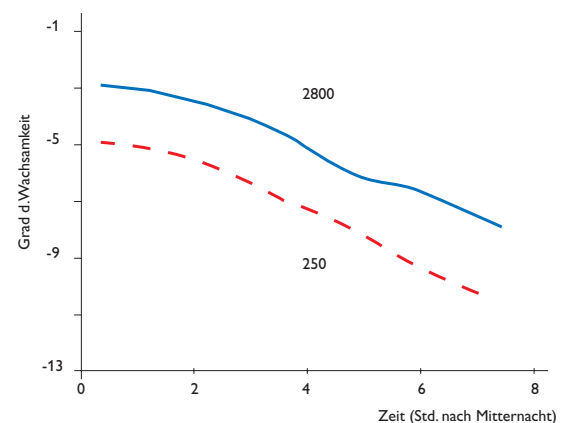
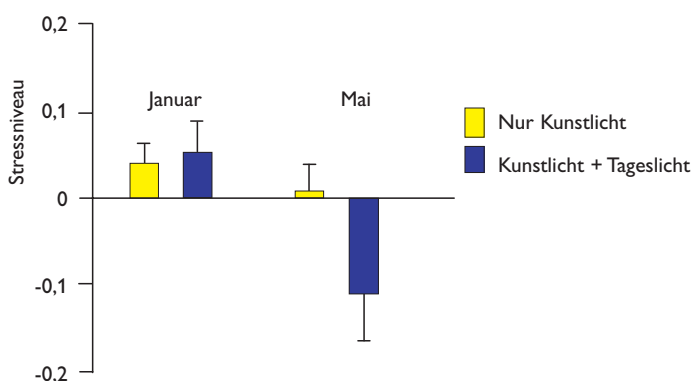


Abbildung 9 Aufmerksamkeit und Stimmung, ausgedrückt als Wachsamkeitsniveau bei Beleuchtungs-niveaus von 250 Lux und 2800 Lux in Abhängigkeit von den Arbeitsstunden nach Mitternacht (Quelle: Boyce et al. [18]).



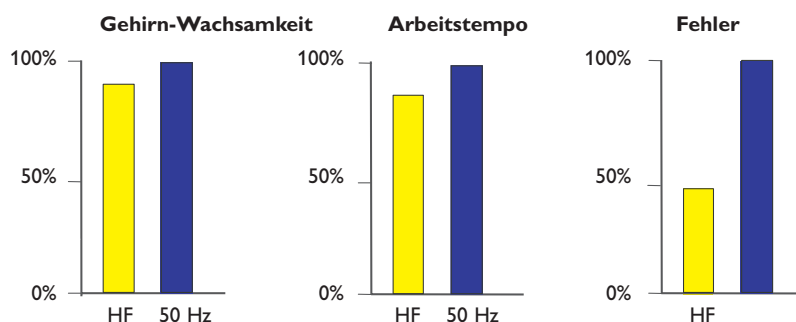
Andere Studien zeigen, dass die Anwendung höherer Beleuchtungsniveaus zur Unterdrückung der Müdigkeit dazu führt, dass die Probanden tatsächlich länger aufmerksam bleiben [19], [20], [21]. Untersuchungen von Stressniveaus und Beschwerden von Arbeitnehmern, die in Innenräumen arbeiten, wurden so ausgeführt, dass eine Gruppe von Arbeitnehmern, die nur bei Kunstlicht arbeiteten, mit einer Gruppe, die bei einer Kombination von Kunst- und Tageslicht arbeiteten, verglichen wurde [22]. Wie Abbildung 10 zeigt, liegt im Januar, wenn die Tageslichtkomponente nicht ausreichend ist, um einen bedeutenden Beitrag zum Beleuchtungsniveau zu leisten, kaum ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen vor. Im Mai dagegen, wenn das Tageslicht tatsächlich einen Beitrag leistet, zeigt die Gruppe, die in den Genuss von Tageslicht kommt, wesentlich weniger Stressbeschwerden. Eine andere Studie zeigt, dass sich ein hohes Beleuchtungsniveau im Winter positiv auf Stimmung und Vitalität auswirkt [23].

Abbildung 10 Stressniveaus (mit statistischer Streuung) bei einer Gruppe von Beschäftigten, die entweder nur bei Kunstlicht oder bei einer Kombination von Kunstlicht und Tageslicht arbeiteten (Quelle: Kerkhof [23]).



Einige Menschen bekommen durch das Flimmern des Lichts von Leuchtstofflamen, die mit elektromagnetischen Vorschaltgeräten betrieben werden, Kopfschmerzen, verursacht durch die Frequenz von 50 Hz der Spannungsversorgung. Leuchtstofflampen, die mit modernen elektronischen Vorschaltgeräten betrieben werden, haben eine Betriebsfrequenz von ca. 30 kHz und zeigen dieses Flimmerverhalten nicht. Wie eine vergleichende Studie zeigt, tritt bei der Verwendung von elektronischen Vorschaltgeräten tatsächlich signifikant weniger Kopfschmerz auf [24]. Küller und Laike [25] haben das EEG bei Personen gemessen, die in einer Büroumgebung mit einer Leuchtstofflampenbeleuchtung mit elektromagnetischen Vorschaltgeräten (50 Hz) bzw. mit elektronischen Vorschaltgeräten gearbeitet haben. Gleichzeitig haben Sie die Geschwindigkeit und die Fehler, die bei der Aufgabenstellung eines Probelesens gemacht wurden, gemessen. Abbildung 11 zeigt, dass der Reziproke Wert der Alpha-Aktivität des EEGs, und somit die Erregung des Gehirns ("Stress") bei der mit 50 Hz betriebenen Beleuchtung höher ist. Die Arbeitsgeschwindigkeit ist leicht erhöht, aber die Anzahl der Fehler ist dramatisch höher (mehr als doppelt so hoch). Dieser kombinierte Effekt bedeutet, dass es klug ist, sowohl vom Gesichtspunkt des Wohlbefindens als auch von dem der Produktivität, Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten anstatt mit elektromagnetischen Vorschaltgeräten einzusetzen, um die Erregung des Gehirns oder Stress einzuschränken.

Abbildung 11 Die Erregung des Gehirns gemessen über den reziproken Wert der Alpha-Aktivität von EEGs bei Personen in einer Büroumgebung unter Leuchtstofflampen-beleuchtung mit elektromagnetischen Vorschaltgeräten (50 Hz) und unter Beleuchtung mit elektronischen Vorschaltgeräten (30 kHz). Die Arbeitsgeschwindigkeit und Fehler bei der Aufgabenstellung eines Probelesens werden ebenfalls angegeben (Diagramm übernommen von: Küller und Laike [25]). Probandengruppe: hohe Flimmerempfindlichkeit



Gesundheitsbezogene Qualitätsaspekte von Beleuchtungsanlagen

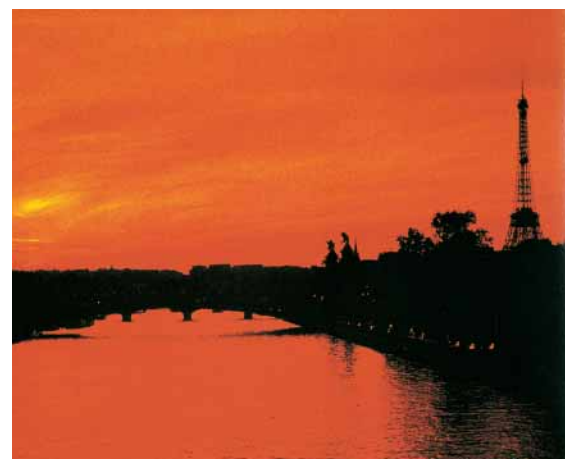
Die Aspekte der visuellen Qualität von Beleuchtungsanlagen, die in einem vorherigen Abschnitt aufgeführt wurden, (Beleuchtungsniveau, räumliche Verteilung des Lichts und Farbwiedergabe) müssen detailliert und erweitert werden, wenn man Kriterien für "gute und gesunde" Beleuchtungsanlagen entwickeln will. Der biologische Effekt des Lichts wird nicht direkt von der Beleuchtung der Arbeitsfläche, sondern von dem in das Auge eintretende Licht gesteuert. Derzeit werden Untersuchungen durchgeführt, mit deren Hilfe festgestellt werden soll, wie dieser Unterschied zwischen "visuellem Beleuchtungsniveau für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe" und "biologischen Beleuchtungsniveaus" berücksichtigt werden kann [26]⁴. Es wurde bereits aufgezeigt, dass das Beleuchtungsniveau, speziell wegen der Alterungseffekte der Augen, anpassungsfähig sein muss.

Tageslicht hat von Natur aus eine große Dynamik. Es liegen Erkenntnisse vor, dass sich variable Beleuchtungsbedingungen positiv auf das Aktivierungsniveau von Arbeitskräften in einer Büroumgebung auswirken [28]. Wo keine ausreichenden Möglichkeiten bestehen, die Dynamik des Tageslichtes zu nutzen, kann sich dynamische künstliche Beleuchtung als vorteilhaft erweisen.

Zwei völlig neue Aspekte beziehen sich auf Zeitpunkt und Dauer der Beleuchtung. Visuell ist Licht selbstverständlich nur dann erforderlich, wenn und solange man eine Sehaufgabe ausführt. Biologisch spielt dagegen auch der Zeitpunkt, zu dem das Licht (bzw. die Dunkelheit) empfangen wird, und die Dauer eine wesentliche Rolle, wie aus dem Rhythmusdiagramm in Abbildung 7 deutlich hervorgeht.

Schon immer waren wir uns darüber im Klaren, dass die Farbe des Lichts selbst eine emotionale Bedeutung hat und darum eine wichtige Rolle für die Atmosphäre eines Raums spielt. Jetzt verstehen wir allerdings auch, dass das Spektrum des Lichtes und daraus resultierend die Lichtfarbe eine wichtige biologische Bedeutung hat. Wie bereits im Abschnitt über die neue Photorezeptorzelle beschrieben, ist blaues, kühles Licht biologisch aktiver als wärmere Lichtfarben, während rotes Licht biologisch nicht wirksam ist (Abbildung 3). Die Tageslichtsituationen der in Abbildung 12 gezeigten Photos rufen nicht nur ein unterschiedliches emotionales Gefühl hervor, sondern haben auch einen anderen biologischen Effekt.

Abbildung 12
Umgebungslichtfarbe am
frühen Morgen und am frühen
Abend in Paris.



⁴ Jüngste Untersuchungen zeigen, dass Licht auf dem oberen und unteren Teil der Netzhaut eine unterschiedliche Bedeutung hat, insofern es sich auf den biologischen Effekt bezieht [27]. Dies lässt vermuten, dass auch die räumliche Verteilung des Lichts vom Gesundheitsstandpunkt aus eine Rolle spielt.

Das blaue Morgenlicht hat biologisch einen aktivierenden (wach machenden) Effekt, während der rote Himmel am frühen Abend einen entspannenden Effekt hat. In einer Arbeitsumgebung muss es sowohl aktivierende als auch entspannende Momente geben. Farbe und Beleuchtungsstärke der künstlichen Beleuchtung können zusammen dazu beitragen, solche Momente zu schaffen. Untersuchungen zu der bevorzugten Lichtfarbe in einer Büroumgebung haben gezeigt, dass es in dieser Hinsicht keine festen Werte der von einzelnen Probanden bevorzugten Lichtfarben gibt. Jede Person hat ihre eigene, persönliche Vorliebe (Abbildung 13).

Abbildung 13 Bevorzugte Lichtfarben bei Kunstlicht in einem Büro mit Fenstern (Tageslichteinfall), ausgedrückt in Abhängigkeit von der Farbtemperatur des Lichts T_k für verschiedene Altersstufen sowie für Männer und Frauen (Quelle: Tenner [29]).

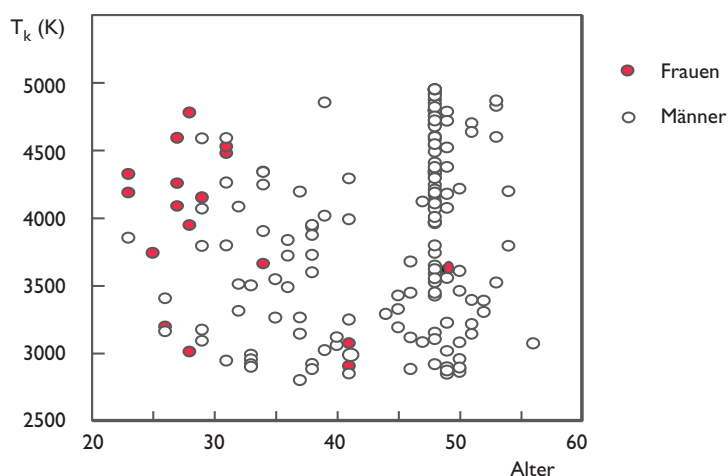


Tabelle 4 fasst die sehrelevanten (aus Tabelle 1) und gesundheitsrelevanten Qualitätsparameter von Beleuchtungsanlagen zusammen, die gemeinsam eine "gute und gesunde" Beleuchtung bestimmen.

Tabelle 4 Visuelle und gesundheitsbezogene Qualitätsaspekte von Beleuchtungsanlagen

Qualitätsaspekte von Beleuchtungsanlagen	
Visuell bezogen	Gesundheitsbezogen
Beleuchtungsniveau anpassbar <i>an den Ort der Aufgabe</i> Räumliche Verteilung Farbwiedergabe	Beleuchtungsniveau anpassbar <i>in den Augen</i> Räumliche Verteilung anpassbare Lichtfarbe Zeitpunkt Dauer

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Dank der Entdeckung des neuen Photorezeptors im Auge, sind wir jetzt viel besser in der Lage zu verstehen, warum die Vorteile einer guten Beleuchtung bei der Arbeit unter Berücksichtigung sowohl der visuellen als auch der biologischen Auswirkungen, wie Gesundheit, Wohlbefinden und Aufmerksamkeit, so wichtig sind. Neben den Vorteilen für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Mitarbeiter selbst, führt gute Beleuchtung auch zu einer höheren Arbeitsleistung, zu weniger Fehlern und Ausschuss, höheren Sicherheit, weniger Unfällen und zu geringeren Ausfallzeiten. Dies zeigt sich in einer insgesamt höheren Produktivität. Wir haben in einer industriellen Umgebung (mittelschwere visuelle Tätigkeit) den möglichen Produktivitätsanstieg als Folge eines verbesserten Beleuchtungsniveaus untersucht [30]. Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Tabelle 5 Zunahme der Produktivität in der metallverarbeitenden Industrie bei einer mittelschweren Sehaufgabe infolge einer gesteigerten Arbeitsleistung, Reduzierung von Fehlern/Ausschuss und Unfallreduzierung (Quelle: van Bommel et al. [30]).

Verbesserung des Beleuchtungsniveaus	Zunahme der Produktivität
Von 300 auf 500 Lux	8 %
Von 300 auf 2000 Lux	20 %

Zur Bestätigung dieser Ergebnisse führen wir derzeit praxisgerechte Produktivitätsuntersuchungen in der Industrie durch, bei denen die Beleuchtung vor kurzem erneuert wurde. Dabei sind wir uns voll und ganz der Tatsache bewusst, dass die biologische Komponente zur Produktivitätszunahme beiträgt, weshalb wir glauben, dass vergleichbare Zunahmewerte auch in einer Büroumgebung möglich sind. Weiterhin sind wir davon überzeugt, dass diese Produktivitätsvorteile noch eindrucksvoller ausfallen werden, wenn unsere Empfehlung von flexiblen und regelbaren Beleuchtungsniveaus und Farben in die Praxis umgesetzt wird.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Berson, D.M., Dunn, F.A., Motoharu Takao; "Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock", Science, February 8; (2002).
- [2] van den Beld, G.J., "Licht und Gesundheit", Licht 2002-Tagung, Maastricht, (2002).
- [3] van den Beld, G.J., "Healthy lighting, recommendations for workers", Symposium healthy lighting at work and at home, Technische Universität Eindhoven, (2002).
- [4] Veith, J.A., "Principles of healthy lighting: highlights of CIE TC 6-11's forthcoming report", Fifth International LRO lighting research symposium, Orlando, (2002).
- [5] NSVV Empfehlung: "Licht uns Gesundheit für arbeitende Menschen", ISBN 90-76549-20-6, Haarlem (2003).
- [6] Berson, D.M.; "Melanopsin and phototransduction by retinal ganglion cells", Fifth International LRO lighting research symposium, Orlando, (2002).
- [7] Brainard, G.C., "Photoreception for regulation of melatonin and the circadian system in humans", Fifth International LRO lighting research symposium, Orlando, (2002).
- [8] Fortuin, G. J., "Visual power and visibility", Philips Research Report 6, (1951).
- [9] Brainard, G.C. et al. "Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor", Journal of Neuroscience (2001).

-
- [10] Europäische Norm DIN EN 12464-1, "Beleuchtung von Arbeitsstätten", (Comité Européen de Normalisation, CEN), (2003).
- [11] CIE Publication 29.2: "Guide on interior lighting", (1986).
- [12] Clements-Croome, D., et al., "An assessment of the influence of the indoor environment on the productivity of occupants in offices", Design, constructions and operations of healthy buildings, ASHRAE, (1998).
- [13] Begemann, S.H.A., et al., "Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses", International Journal of Industrial Ergonomics, (1997).
- [14] Czeisler, C.A., et al., "Stability, precision and near-24-hour period of the human circadian pacemaker", Science 284, 2177-2281, (1999).
- [15] Boulos, Z., et al., "Light treatment for sleep disorders", Consensus Report VII Jet lag. Journal of biological rhythms, Vol.10, (1995).
- [16] Akerstedt, T., "Adjustment of physiological circadian rhythms and the sleep-wake cycle to shiftwork", Hours of work, Wiley, (1985).
- [17] Küller, R., Wetterberg, L., "Melatonin, cortisol, EEG, ECG and subjective comfort in healthy humans: impact of two fluorescent lamp types at two light intensities", Lighting Research and Technology, (1993).
- [18] Boyce, P.R., et al., "Lighting the graveyard-shift: the influence of a daylight-simulating skylight on the task performance and mood of night-shift workers", Lighting Research and Technology, (1997).
- [19] Daurat, A., et al., "Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-hour constant routine", Physics and behaviour, (1993).
- [20] Grunberger, J., et al., "The effect of biologically-active light on the noopsyche and thymopsyche on psycho-physiological variables in healthy volunteers", Int. J. of Psychophysiology, (1993).
- [21] Tops, M., et al., "The effect of the length of continuous presence on the preferred illuminances in offices", Proceedings CIBSE Conference, (1998).
- [22] Kerkhof, G.A., "Licht en prestatie", Proceedings. Symposium Licht en Gezondheid, Amsterdam, (1999).
- [23] Partonen, T., et al., "Bright light improves vitality and alleviates distress in healthy people", Journal of Affective disorders, (2000).
- [24] Wilkens, A. J., Nimmo-Smith, I., Slater, A., Bedocs, L., "Fluorescent lighting, headaches and eyestrain", Lighting Research and Technology, (1989).
- [25] Küller, R., Laike, T., "The impact of flicker from fluorescent lighting on well-being, performance and physiological arousal", Ergonomics, (1998).
- [26] Aries, M.B.C., Begemann, S.H.A., Zonneveldt, L., Tenner, A.D., "Retinal illuminance from vertical daylight openings in office spaces", Right Light 5, Nice, (2002).
- [27] Glickman, G., Hanifin, J.P., Rollag, M.D., Wang, J., Cooper, H., Brainard, G.C., "Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans", Journal of biological rhythms, (2003).
- [28] Vallenduuk, V., "The effect of variable lighting on mood and performance in an office environment", Promotion Technische Universiteit Eindhoven (1999).
- [29] Tenner, A.D., unveröffentlichte Forschungsdaten aus: Begemann, S.H.A., Beld, G.J. van den, Tenner, A.D., "Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses", International Journal of Industrial Ergonomics, 20 (3), 231-239, (1997).
- [30] van Bommel, W.J.M., van den Beld, G.J., van Ooyen, M.H. F., "Industrielle Beleuchtung und Produktivität", Licht 2002-Tagung, Maastricht, (2002).

