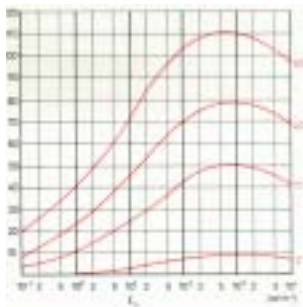
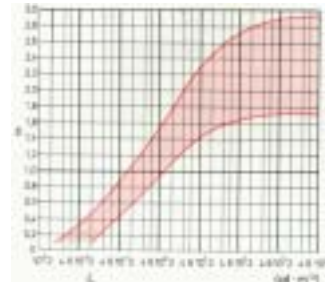


LICHT UND ERGONOMIE

Projekt TAGESLICHT
Dr. A.E. Çakir
Dipl.-Ing. Gisela Çakir



ERGONOMIC INSTITUT
für Arbeits- und Sozialforschung
Berlin

Teilbericht Licht und Ergonomie

**Dr.-Ing. Ahmet Çakir
Dipl.-Ing. Gisela Çakir**

**ERGONOMIC Institut
für Arbeits- und Sozialforschung
Forschungsgesellschaft mbH
Berlin**



nach Ernst Haas /E.26/

ERGONOMIE IM PROJEKT "TAGESLICHT"

"Lux vita est", Licht ist Leben, hieß es, noch bevor unsere Zeitrechnung begann. Auch ohne Bibellektüre fällt es leicht zu glauben: Erst wurde Licht, dann Leben auf Erden. Von dem Tag an, als die Menschen die ersten Gebäude zum Wohnen und Arbeiten bauten, bis etwa zum Jahre 1950 bestand **lux** fast ausschließlich aus Sonnen- und Tageslicht. Und das, obwohl die Geschichte der künstlichen Beleuchtung fast so alt ist wie die der Baukunst. Deren Nutzung beschränkte man allerdings gerne auf das Notwendigste, denn sie war teuer, mit diversen unangenehmen Effekten wie Wärme und Rauch verbunden und nicht selten "anrühlich" wie die Karbidlampe. Selbst Goethe hat den etwa im Jahre 1950 wahr gewordenen Zustand herbeigesehnt: *"Sie könnten nichts besseres erfinden, als wenn die Lampen ohne zu putzen brenneten."*

Mit der Verfügbarkeit der Leuchtstofflampe als billige Lichtquelle, die man nur selten putzen muss, wurden nicht nur Träume der Lichttechnik wahr. Die Architektur hat in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit atemberaubender Geschwindigkeit von ihren Traditionen Abschied genommen, zu deren ausgeprägtesten die Konzeptionierung der Gebäude nach Tageslichtnutzung gehörte. Kaum war aber die Leuchtstofflampe wirtschaftlich nutzbar geworden, schon wurden die ersten fast tageslichtlosen Großraumbüros gebaut. Zum Ende der 60er Jahre plante und baute man bereits fensterlose Schulräume und Zellenbüros. Das Zentralgestirn unserer Galaxie hatte seine Rolle als Dreh- und Angelpunkt für die Architektur von Arbeitsstätten (vorerst) verloren. Zum Beleuchten brauchten wir die Sonne nicht mehr.

Die *elektrische* Beleuchtung bildete einst sogar den Türöffner für die Energiewirtschaft: Mangels sonstiger Abnehmer von Strom forcierte man die künstliche Beleuchtung und hatte alle guten Argumente auf seiner Seite. *"Hell wie der lichte Tag"* konnte nicht nur die Nacht werden, sondern auch der tiefste Keller. Die Augen von Büromenschen sollten durch viele Lux aus vielen Lampen vor Ermüdung geschont, Maschinen in der Fabrik rund um die Uhr besetzt werden. Die Gebäude brauchten nicht mehr für die optimale Ausnutzung des Tageslichts gestaltet werden wie früher.

Die Technik hat nicht nur die Architektur geprägt, sondern auch eine Begriffswelt. Für Tausende von Betriebsorganisatoren, Betriebsräten, Sicherheitsingenieuren oder Architekten ist Lux nicht mehr das Licht, auch nicht Leben, sondern eine quantitative Größe, mit deren Hilfe man eine Beleuchtung plant



bzw. die später installierte Beleuchtungsanlage misst. Punkt! Die Technik hat nicht nur *Lux* für sich vereinnahmt, sondern sich eine ganze Begriffswelt geschaffen, die - nicht überraschenderweise - auf sie zugeschnitten ist, so z.B. die Gütekriterien für Beleuchtung. Wenn man die künstliche und natürliche Beleuchtung eines beliebigen Raums in Deutschland nach diesen Gütekriterien beurteilt, steht der Gewinner von vornherein fest.

Das Projekt "Tageslicht" soll dazu dienen, eine ganzheitliche und auf den Menschen und seine Arbeit bezogene Bewertungsweise von Licht in Innenräumen, ungeachtet dessen Herkunft, zu entwickeln. Hierzu kann auch auf die konventionelle Denkweise der Gütekriterien zurückgegriffen werden, die aber auch im Lichte neuer Erkenntnisse zurechtgerückt bzw. durch neue Kriterien ergänzt werden sollen, so z.B. durch Faktoren, die die gesundheitliche Wirkung von Licht und Beleuchtung beschreiben. Dies scheint deswegen angezeigt, weil die Beschwerden über die übliche Leuchtstofflampenbeleuchtung fast so alt sind wie diese, und weil man immer mehr positive Wirkungen von Tageslicht (wieder)entdeckt.

Die Nutzung von Tageslicht kann aus unterschiedlichen Gründen vorgenommen werden, so z.B. um elektrische Energie für die Beleuchtung zu sparen oder bestimmte Raumteile mit Tageslicht besser zu "belichten". Bei jeglicher Beeinflussung der Beziehung zwischen einem umbauten Raum und der Außenwelt treten neben den beabsichtigten Effekten auch unbeabsichtigte ein. Im Rahmen des vom Fachverband Lichtkuppel, Lichtband und RWA e.V. ins Leben gerufenen Projekts soll eine ganzheitliche Betrachtungsweise entwickelt werden, bei der technische, ergonomische und raumgestalterische Aspekte der Tageslichtnutzung integriert behandelt werden sollen.

Ziel des Projekts ist das Aufzeigen von Synergieeffekten zwischen der Raumarchitektur einerseits und der (Tageslicht-)Technik andererseits, wobei funktionalen, gesundheitlichen sowie emotionalen Bedürfnissen der Nutzer Rechnung getragen wird. Diese Zielsetzung entspricht der Dualität der Aufgaben des Sehapparates:

- Zielgerichtetes Erkennen von Sehobjekten
- Wahrnehmung der Umwelt als bewusstes oder unbewusstes Erleben. Der umbaute Raum wird durch Licht erlebbar und beeinflusst direkt oder indirekt psychische wie physische Vorgänge im menschlichen Körper.

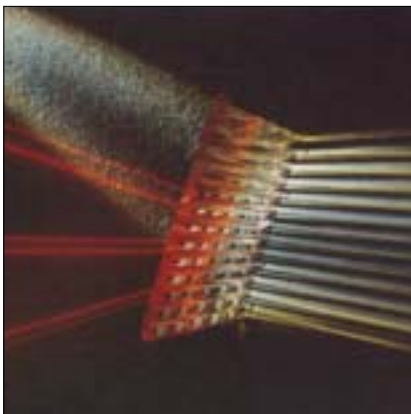
Die in den letzten Jahren in der Ergonomie, Arbeitspsychologie und Medizin gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass das magische Ziel, Ergonomie, Gesundheit, Anmutungsqualität und Ökologie durch geeignete Techniken gleichzeitig zu fördern, erreichbar ist.

Eine Synergie entwickelt sich aus dem Gleichklang unterschiedlicher Faktoren, die sich in einer bestimmten Hinsicht verstärken und dadurch einen Effekt hervorrufen, der höher ist als die summierte Wirkung der Einzelfaktoren. Anders als bei einer Symbiose, bei der beide Partner aufeinander angewiesen sind, können Synergiepartner auch allein erfolgreich sein. Die Synergie steigert den Erfolg über das summierte Vermögen beider Partner hinaus. Ein Beispiel für einen Synergieeffekt liefert die stürmische Entwicklung des Internet, die weder die Fortschritte in der Computertechnik, noch die in der Fernmeldetechnik allein oder in der Summe hätten bewirken können. Vielmehr haben sich beide Techniken gegenseitig befruchtet und die Entwicklung der anderen beschleunigt. So profitierte die Computertechnik zunächst von der Datenfernübertragung, die wiederum mit Hilfe der Computertechnik verbessert wurde, wovon wiederum die Computertechnik profitierte ...

Die bei dem Projekt "Tageslicht" denkbaren Synergien können wie folgt aussehen:

- Ergonomische Studien weisen nach, dass und ggf. mit Hilfe welcher Techniken das Tageslicht zur Arbeitsqualität beiträgt.
- Hieraus ergeben sich Entwicklungsrichtungen für die Techniken, die der Tageslichtnutzung dienen.
- Diese wiederum ermöglichen eine bessere Raumgestaltung aus architektonischer Sicht,
- woraus sich ein vermehrtes Interesse an Tageslichtsystemen ergibt,
- die eine bessere Arbeitsqualität realisieren helfen
- und somit eine Verbesserung in ergonomischem Sinne ermöglichen ...

Die hier skizzierte Verstärkungsspirale stellt nicht etwa ein theoretisches Gebilde dar, sie ist vielmehr in Teilen bereits Realität. Dass man sie dennoch mit Forschungsergebnissen belegen muss, ergibt sich aus der Tatsache, dass sich unsere Zivilisation, wie bereits angeführt, in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in der Architektur von Arbeitsstätten fast schlagartig von Jahrtausende alten Gestaltungsprinzipien verabschiedet hat. Die treibende Kraft für diese Entwicklung war die Leuchtstofflampe und die relative Verbilligung elektrischer Energie. Der lichttech-



aus /E.47/

nischen Industrie ist es gelungen, den Preis für das symbolische "1 Lux" über Jahrzehnte in Pfennigbeträgen konstant zu halten, was zu einer beispiellosen (relativen) Verbilligung von künstlicher Beleuchtung geführt hat.

Die große ergonomische Bedeutung des Tageslichts lässt sich auch daran erkennen, dass sich die Bürohausarchitektur bereits auf dem Höhepunkt der Großraumbüroeuphorie in den 70er Jahren neuen Konzepten zugewandt hat, die sich durch mehr Tageslicht in den Arbeitsräumen auszeichnen (z.B. Komfortzellenbüros, Kombibüros). Später konnte ein Nachweis mit psychophysischen Methoden geführt werden.

"Tageslicht" zeichnet sich nicht nur dadurch aus, dass es jahreszeit- und tageszeitabhängig in unterschiedlicher Qualität und Quantität verfügbar ist, sondern auch durch die technischen Mittel, mit deren Hilfe es in die umbaute Umwelt (Wohnung, Arbeitsstätte, Freizeiteinrichtung) gelangt. Die konventionellen, weil altbekannten, Techniken sind seitliche Raumöffnungen (Fenster) und Deckenöffnungen (Oberlichter). Diese können sowohl einzeln als auch in Kombination realisiert werden. Die drei Möglichkeiten der Realisierung führen zu drei grundsätzlich unterschiedlichen Raumsituationen jeweils mit spezifischen Vor- und Nachteilen.

Zu den "konventionellen" Tageslichttechniken, die seit mehreren Tausend Jahren bekannt sind, haben sich in den letzten Jahrzehnten neue hinzugesellt, die teilweise die Nachteile der älteren Techniken mildern sollen (z.B. Lichtlenkung für seitlich einfallendes Licht für eine gleichmäßigere Verteilung im Raum), teilweise aber neue Möglichkeiten eröffnen (z.B. "light pipes" in Verbindung mit Lichtkuppeln, um das Tageslicht in tiefere Etagen des Gebäudes zu leiten).

Die alten und neuen Techniken eröffnen dem Architekten bzw. Bauherren eine Reihe von Möglichkeiten, Tageslicht zu nutzen. Der beabsichtigte *Nutzeffekt* kann sehr unterschiedlich ausfallen, z.B. Energieeinsparung, Schaffung erwünschter Sehbedingungen, Realisierung eines bestimmten Raumkonzepts. Die Realisierung eines bestimmten Nutzeffekts wird in der Regel einen gewissen Aufwand erfordern und häufig mit gewissen Nachteilen für andere Aspekte verbunden sein. So mindern z.B. an Fenstern angebrachte Umlenkprismen den Tageslichtquotienten in Fensternähe und behindern teilweise die Sichtverbindung nach außen; Glasvorbauten, die zur Einsparung von Heizenergie dienen sollen, können die Belichtung eines Raums empfindlich verringern und dadurch den

Einsatz von elektrischer Energie für Beleuchtungszwecke erhöhen.

Die Bewertung einer bestimmten Technik bzw. einer Kombination von Techniken setzt einerseits voraus, dass man die Zielsetzung des Anwenders kennt und andererseits den Aufwand, den er dazu treiben muss bzw. will. Angesichts der Vielfalt der vorhandenen bzw. denkbaren architektonischen und technischen Lösungen würde jede Pauschalierung einer Bewertung vermutlich zu einem gewissen Grade scheitern. Aus diesem Grund wird in diesem Bericht neben der Bewertung von Seiten der Autoren auch eine Methode angegeben, mit der man eine eigene Bewertung bei einem Projekt unter vorgegebenen Randbedingungen durchführen kann. Die Methode, die Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit einer Lösung (siehe "Gebrauchstauglichkeit und ihre Maße" auf Seite E.16), ist als eine Qualitätsbestimmungsmethode international genormt worden.

Das Projekt wird sich aus den dargestellten Gründen insbesondere mit folgenden Aspekten beschäftigen:

- Entwicklung von Bewertungskriterien für Licht im umbauten Raum
- Rolle des Tageslichts in Architektur und Ergonomie
- Bewertung von Baueinrichtungen bzw. Bauteilen zur Tageslichtnutzung.

Beabsichtigt ist eine integrierte Betrachtung nach technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten.

Dieser Teil umfasst die ergonomische Sicht der Projektziele. Eine gewisse Überlappung mit den anderen zwei Teilen ist inhaltlich bedingt, wurde aber im Text, soweit möglich, vermieden.

E.1 EINLEITUNG

E.1.1 Ziel

Dieses Kapitel beschreibt das Fachgebiet Ergonomie und die Bedeutung des Lichts und der Beleuchtung für die Ergonomie.

Durch diese Beschreibung sollen die Zusammenhänge zwischen Erkenntnissen, die im Rahmen der Ergonomie gewonnen worden sind, und solchen, die aus anderen Fachdisziplinen stammen, deutlich gemacht werden.

E.1.2 Begriffsbestimmungen

In diesem Bericht werden bestimmte Begriffe benutzt, die auch in der Umgangssprache üblich sind, jedoch von Fachgebiet zu Fachgebiet und sogar von Mensch zu Mensch unterschiedlich verstanden werden. Daher werden diese, allen voran die "Ergonomie", in dem Sinne definiert, wie sie hier benutzt werden.

Ergonomie. Ergonomie ist die Lehre von der Anpassung der Arbeit an den Menschen.

Bei der Betrachtung der Arbeit beschränkt sich die Ergonomie nicht auf die organisierte Arbeit allein. Vielmehr beschäftigt sie sich mit jedem zielgerichteten Handeln und den dazu benötigten bzw. eingesetzten Mitteln.

Licht. Licht ist sichtbare elektromagnetische Strahlung.

Licht umfasst nur einen sehr kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums, den das menschliche Auge wahrzunehmen imstande ist. Die von praktisch allen Lichtquellen als "Beiprodukt" mit emittierte Strahlung kürzerer und längerer Wellenlänge (UV- bzw. IR-Strahlung) ist definitionsgemäß kein Licht.

Helligkeit. Helligkeit ist eine Gesichtsempfindung, wonach ein Teil des Gesichtsfeldes mehr oder weniger Licht auszusenden scheint.

Helligkeit ist eine Empfindung und keine physikalisch messbare Größe. Es existiert keine physikalische Größe, mit deren Hilfe sich Helligkeit beschreiben bzw. messen lässt.

Lichtstärke. Die Lichtstärke ist das Maß für die Lichtausstrahlung in einer bestimmten Richtung.

Die Lichtstärke entspricht dem physikalischen Maß Intensität. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass die Intensität in der Physik unbewertet gemessen wird, während sie in der Lichttechnik durch die spektrale Empfindlichkeitskurve des Auges bewertet

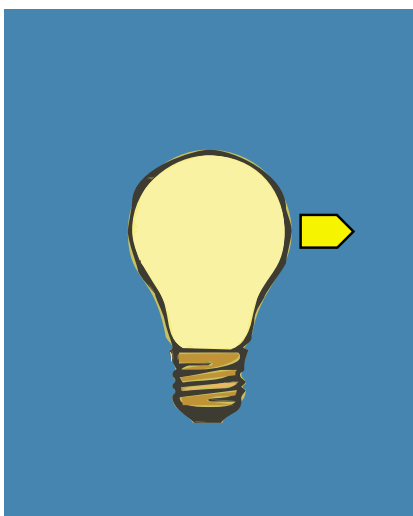


Bild E.1 Lichtstärke

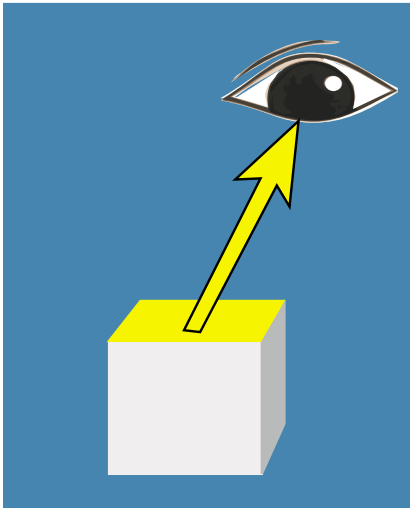


Bild E.2 Leuchtdichte

wird. So besitzen zwei Strahlungsquellen, die die gleiche Menge Energie in einer bestimmten Richtung abstrahlen, die gleiche Intensität unabhängig von der Wellenlänge. Allerdings hat unter diesen Bedingungen eine "rote" Lichtquelle eine viel geringere Lichtstärke als eine "grüne".

Leuchtdichte. Die Leuchtdichte ist die Lichtstärke, bezogen auf die gesehene Fläche der Strahlungsquelle.

Die Leuchtdichte kann, wie die Lichtstärke auch, physikalisch gemessen werden. Viele Sehfunktionen (z.B. Kontrastempfindlichkeit, Wahrnehmungsgeschwindigkeit) werden vornehmlich durch die Leuchtdichte bestimmt. Dennoch ist und bleibt sie eine lichttechnische Größe, die von einer physikalischen abgeleitet wird. Dies gilt auch für die wichtigste Wirkung der Leuchtdichte, für den Helligkeitseindruck: Im gleichen Umfeld erscheint eine Fläche höherer Leuchtdichte heller als eine mit einer geringeren Leuchtdichte. Der Helligkeitseindruck hängt von der Umgebung ab und ist daher nicht absolut bestimmbar. Unter Umständen wird dieser sogar eher von unserem Erfahrungswissen bestimmt als von irgendeinem physikalischen Maß. So sieht Kohle bei Tage dunkler aus als Schnee in der Nacht, obwohl ihre Leuchtdichte um Größenordnungen höher liegt.

Kontrast (photometrischer). Relativer Leuchtdichteunterschied zwischen benachbarten Feldern mit unterschiedlichen Leuchtdichten.

Der Kontrast ist die für die Wahrnehmung von Objekten wichtigste lichttechnische Größe. Die Lesbarkeit von Text wird bei gleicher Schrift und Schriftgröße fast ausschließlich vom Kontrast bestimmt. Die Farbe spielt eine eher untergeordnete Rolle.

Kontrastwiedergabefaktor. Der Kontrastwiedergabefaktor (für eine Beleuchtungseinrichtung) ist das Verhältnis des Kontrasts einer Sehaufgabe zu dem Kontrast unter vollkommen diffuser Beleuchtung.

Der Kontrastwiedergabefaktor liegt in der Praxis fast immer unter 1, d.h., real existierende Beleuchtungssituationen mindern den Kontrast um einen gewissen Faktor. Diese Minderung fällt in dem Maße höher aus, in dem das Licht gerichtet einfällt und in dem das Sehobjekt und/oder sein Hintergrund gerichtet reflektieren. Da der Kontrast die wichtigste Größe für die Erkennbarkeit der Schrift ist, leidet z.B. die Lesbarkeit von Text dramatisch unter einem ungünstigen Kontrastwiedergabefaktor. So hat Hartmann (1970) /E.27/ ermittelt, dass die Informationsaufnahme vom Papier bei glänzender Druckfarbe und

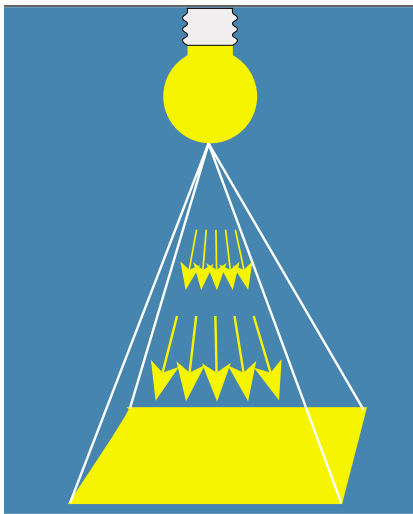


Bild E.3 Beleuchtungsstärke

glänzendem Papier gegenüber matter Farbe auf mattem Papier etwa um den Faktor 10 zurückgeht.

Beleuchtungsstärke. Die *Beleuchtungsstärke* ist der Quotient aus dem auf eine Fläche auftreffenden *Lichtstrom* und der beleuchteten Fläche.

Die Beleuchtungsstärke ist eine lichttechnische Größe, die aus einer physikalischen Größe abgeleitet wird. Man kann sie nicht sehen, d.h., es gibt keine Empfindung oder Reaktion des Körpers auf die Beleuchtungsstärke. Somit besitzt sie keine physiologische Bedeutung an sich.

Die Leuchtdichte einer Fläche, die von Licht getroffen wird, erhöht sich proportional zur Beleuchtungsstärke. Da eine höhere Leuchtdichte im Allgemeinen zu einer Verbesserung von Sehfunktionen führt, wird eine höhere Beleuchtungsstärke günstiger angesehen als eine geringere.

Die Beleuchtungsstärke ist - da sich Licht nur geradlinig ausbreiten kann - richtungsabhängig. Man kann sie in jeder beliebigen Richtung bestimmen. Dort, wo die sinnvolle Richtung bekannt ist (z.B. Zeichentische in Zeichensälen), plant und misst man sie in der relevanten Ebene. Für Arbeitsstätten wird in der Regel sowohl die Berechnung als auch die Messung in der Horizontalen vorgenommen. Dies ist zwar für viele Arbeitsplätze (z.B. Bildschirmarbeitsplätze, Drehbank) unbedeutend oder teilweise falsch, für manche sogar unsinnig (Autoreparaturwerkstätten), aber dennoch üblich.

Die an einem Punkt gemessene Beleuchtungsstärke ist Ergebnis einer Integration des Lichteinfalls im Halbraum um diesen Punkt. Man kann ihr nicht entnehmen, ob das Licht gleichmäßig aus allen Richtungen oder vollkommen gerichtet aus einer einzigen einfällt.

Belichtung. Die Belichtung ist das Produkt aus der Beleuchtungsstärke und der Zeit bei gleichbleibenden Beleuchtungsbedingungen. Bei veränderlichen Beleuchtungsbedingungen muss die Belichtung als Zeitintegral berechnet werden.

Der Begriff Belichtung wird hauptsächlich bei Wechselwirkungen zwischen Materie und Licht gebraucht, z.B. in der Fotografie. In der Architektur bedeutet er so viel wie die mittlere empfangene Tageslichtmenge für einen Raum bzw. für ein Gebäude.

Tageslichtquotient. Der sogenannte Tageslichtquotient ist ein fiktives Maß für die Kennzeichnung der "Tageslichtversorgung" eines Raums. Er ist in jedem betrachteten Punkt des Raums eine konstante Größe.



Bild E.4 Wirkungweise unterschiedlicher Schattigkeit auf dreidimensionale Objekte wie Gesichter /E.47/

Der Tageslichtquotient beruht auf einer Betrachtung der horizontalen Beleuchtungsstärke und benachteiligt daher das Tageslicht (z.B. aus Fenstern) gegenüber dem Kunstlicht, das fast immer von oben nach unten gerichtet ist und von einer Quelle mit relativ geringer Ausdehnung und relativ hoher Leuchtdichte stammt.

Der Tageslichtquotient wird für den bedeckten Himmel berechnet, der in Mitteleuropa, nach der jährlichen Dauer gemessen, das häufigste Erscheinungsbild des Himmels am Tage repräsentiert.

Der Tageslichtquotient ist ein integrales Maß, das über den oberen Halbraum integriert. Dieses Maß berücksichtigt daher nicht die Wirkung von ganz oder teilweise gerichtetem Licht. Es sagt wenig über die Wiedergabe von räumlichen Objekten aus.

Schattigkeit. Schattigkeit ist die durch die Lichteinfallrichtung auf einem Objekt verursachte Schatteneinwirkung. Die Schattigkeit wird als Maß für die Modellierung, d.h. für die Wiedergabe der räumlichen Struktur eines Körpers benutzt. Zur Kennzeichnung der Schattigkeit bei der Innenraumbeleuchtung wird das Verhältnis der zylindrischen Beleuchtungsstärke zur horizontalen in 1,20 m Höhe (Augenhöhe bei sitzender Haltung) herangezogen.

Die Schattigkeit gehört - wie auch der Kontrastwiedergabefaktor - zu den ergonomisch wichtigsten lichttechnischen Größen, da sie das Erscheinungsbild der Sehobjekte und der Umgebung beschreibt. Der Kontrastwiedergabefaktor erlaubt es, die Güte der Erkennbarkeit zu berechnen.

Bei der Beleuchtung von Arbeitsräumen mit tiefstrahlenden Leuchten, wie sie häufig für Bildschirmarbeitsplätze verwendet werden, entstehen ähnliche Effekte wie in Bild E.4, die allerdings weniger auffällig sind als bei den gestellten Aufnahmen.

E.2 BETRACHTUNGSGEGENSTÄNDE DER ERGONOMIE

E.2.1 Interaktion von Fachdisziplinen

Die Ergonomie als eine Wissenschaft mit einer ganzheitlichen Betrachtungsweise unterscheidet sich von Fachdisziplinen wie Medizin, Physik oder Chemie dadurch, dass ihr Betrachtungshorizont und somit ihr Wirkungsbereich nicht durch externe oder selbstgewählte Vorgaben eingegrenzt ist. Beispielsweise wird ein Mediziner, der bei einem Patienten eher psychische Ursachen für ein körperliches Leiden vermutet, diesen zu einem Psychotherapeuten schicken, der wiederum nur die Mittel anwenden kann und darf, die seiner Kompetenz entsprechen. Das Betätigungsfeld der Ergonomie ist hingegen weniger fest abgesteckt. So kann man z.B. versuchen, durch mangelhafte Ergonomie des Arbeitsplatzes verursachte Probleme (z.B. Rückenschmerzen) auf verschiedenartigste Weise in den Griff zu bekommen, wenn die Mittel der Arbeitsplatzgestaltung unwirksam sind oder vermutlich bleiben werden, an die zuerst gedacht werden sollte. Da dies nicht immer möglich bzw. sinnvoll ist, muss bzw. kann der Ergonom auf das Wissen zurückgreifen, das spezialisierte Fachdisziplinen erarbeitet haben, soweit sie im Sinne des zu lösenden Problems nützlich erscheinen oder es tatsächlich sind.

Hinsichtlich der Beleuchtung oder des Lichts im Allgemeinen können die Fachdisziplinen, auf die zurückgegriffen wird, z.B. Lichttechnik, Sehphysiologie, Ergophthalmologie oder Arbeitsmedizin heißen. Da das Licht bekanntermaßen einen der wichtigsten Umweltfaktoren bildet, die das Funktionieren des menschlichen Körpers und damit auch die Gesundheit beeinflussen, gehören auch die allgemeine Medizin und die Epidemiologie dazu.

Einen besseren Nutzen als die Betrachtungsweise der Fachdisziplin kann die Ergonomie erzielen, wenn die übergeordnete und ganzheitliche Betrachtungsweise bessere Lösungen erzielt als die (einseitig) fachorientierte. Umgekehrt kann das Vorgehen nach dem Wissen einer Fachdisziplin sinnvoller sein, wenn das zu betrachtende Problem eindeutig oder überwiegend in dessen Kompetenzbereich fällt.

E.2.2 Das magische Viereck

Die Ergonomie behandelt die relevanten Betrachtungsgegenstände nur bei Bedarf isoliert, im Allgemeinen jedoch ganzheitlich. Bei der ganzheitlichen Betrachtungsweise werden vier Grundfaktoren (Bild E.5) nach dem Vorbild des magischen Dreiecks



Bild E.5 Das magische Viereck der Grundfaktoren für die Arbeit /E.57/

in der Wirtschaftspolitik in gegenseitiger Abhängigkeit behandelt. Diese Faktoren sind

- menschliche *Leistungsfähigkeit*
- *Zuverlässigkeit*
- *Arbeitssicherheit*
- *Wirtschaftlichkeit*.

Die isolierte Betrachtung eines Einzelfaktors kann allerdings unter bestimmten Voraussetzungen zwingend sein. So wird z.B. bei Tätigkeiten, die die Allgemeinheit gefährden können, die Zuverlässigkeit der Arbeitshandlungen gegenüber der Wirtschaftlichkeit bevorzugt. Das ist beispielsweise im zivilen Luftverkehr der Fall. Umgekehrt kann die Wirtschaftlichkeit gegenüber der Zuverlässigkeit bevorzugt werden, wenn die verfügbaren Ressourcen knapp sind und eventuelle Fehler erträglich erscheinen. Ein Beispiel hierzu ist die Faxübertragung von Texten, die zwar sehr viel unsicherer ist als die Übertragung durch Telex, was aber aufgrund anderer Vorteile in Kauf genommen wird.

Die Beleuchtung, ob künstlich oder natürlich, kann alle vier Faktoren entscheidend beeinflussen. So wird die Leistungsfähigkeit des Menschen bei der Arbeit in den meisten Umgebungen durch die Beleuchtung überhaupt erst realisiert. Welche Bedeutung ihr bei der Arbeitssicherheit beigemessen wird, lässt sich leicht an der Vielzahl der *Arbeitsschutzvorschriften* ablesen, die sich auf die Beleuchtung beziehen. Ebenso viele Beispiele existieren zum Einfluss der Beleuchtung auf die Zuverlässigkeit des menschlichen Arbeitshandelns. Von einfachen Arbeiten wie das Aufziehen von Perlen bis zum Führen von komplexen Industrieanlagen lässt sich zeigen, dass Fehler mit der Beleuchtung zusammenhängen können. In welchem Maße die Wirtschaftlichkeit der Arbeit von der Beleuchtung beeinflusst wird, lässt sich mit vielen Beispielen belegen, nicht zuletzt dadurch, dass moderne Arbeitsorganisation ohne eine preiswerte und leistungsfähige Beleuchtung gar nicht denkbar ist.

Bei dieser Betrachtungsweise darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die angeführten Effekte der Beleuchtung von Arbeitssicherheit bis Wirtschaftlichkeit in der lichttechnischen Literatur vergrößert zusammengefasst und unzulässig verkürzt wiedergegeben werden. So beruhen die Vorstellungen, dass mit einer höheren Beleuchtungsstärke eine höhere Leistung verbunden sei, auf Versuchen mit Perlenaufziehen aus dem Beginn des Jahrhunderts. Dass eine höhere Beleuchtungsstärke zu einer Minderung der Ermüdung führt, ist eine Behauptung, die auf dem gleichen Versuch beruht.

Allerdings herrschte zum Zeitpunkt dieses Versuchs in der Arbeitswelt ein Zustand, bei dem mancher Arbeitsmediziner um jedes Lux kämpfen musste und ein Beleuchtungsniveau von 50 lx als echter Luxus galt. Spätere Untersuchungen (Bodmann, 1962 /E.3/; Bodmann, 1963 /E.4/) haben gezeigt, dass bei der Büroarbeit eine ausreichende Sehleistung bei etwa 50 lx erreicht wird und darüber hinaus nicht mehr gesteigert wird, es sei denn, es handelt sich um spezielle Arbeitsplätze.

Die gleiche Untersuchung hat aber auch gezeigt, dass die Sehleistung im Büro nicht das ausschlaggebende Kriterium darstellt, sondern eine helle, anregende Umgebung. Diese hat mit der genormten Beleuchtungsstärke nur bedingt etwas zu tun.

Im Bereich der Produktion existieren heute sowohl solche Arbeitsplätze, bei denen die Sehleistung und somit die Beleuchtung eine ausschlaggebende Rolle spielt (z.B. Montage von Miniaturelektronik), als auch Arbeitsplätze, an denen der Beleuchtung der Sehaufgabe selbst keine Bedeutung mehr zukommt.

Daher ist es sinnvoll, dass die Einzeleinflüsse der Beleuchtung und des Lichts getrennt betrachtet und erst danach in der Summe dargestellt werden.

E.2.3 Gesundheitliche Auswirkungen von Licht und Beleuchtung

Die gesundheitlichen Wirkungen von Licht und Beleuchtung werden in der Ergonomie (und in der Arbeitsmedizin) in der Regel im Sinne der Arbeitssicherheit betrachtet. Diesbezügliche Untersuchungen haben ihren Niederschlag im Forschungsprojekt "*Licht und Gesundheit*" (Çakir, A. und Çakir, G., 1990, 1994, 1998 /E.9/) gefunden. Hierbei hat sich u.a. gezeigt, dass die künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten eine der wichtigsten Ursachen des sogenannten *Sick Building Syndromes* darstellt, während die natürliche Beleuchtung die Gesundheit auch dann positiv beeinflusst, wenn sie unübersehbare Störungen verursacht (Wärme, Blendung durch Spiegelungen auf dem Bildschirm usw.).

In den letzten Jahren haben sich aber auch die Humanbiologie, die Allgemeinmedizin und die Psychologie zunehmend stärker mit den Auswirkungen von Licht auf den Menschen befasst. Da sich die Einflüsse allgemeiner Art und solche, die mit der organisierten Arbeit verbunden sind, wegen der Wechselwirkung zwischen dem Arbeitsleben und dem Privatleben nicht trennen lassen, werden sie hier als ein gemeinsamer Betrachtungsgegenstand der Ergonomie angeführt. Die neuen Erkenntnisse erweitern unseren

Wissenshorizont weit über die Kenntnisse in der Photobiologie und Medizin hinaus, die noch vor einem Jahrzehnt existiert haben.

Die wesentlichen Impulse, die zu den angeführten Forschungen geführt haben, kamen von drei Quellen. Die ersten beiden Quellen sind der Amerikaner John Ott und der deutsche Augenmediziner Hollwich /E.34/. Ott hat im Wesentlichen behauptet, die Qualität des Lichts (z.B. Farbe, *spektrale Zusammensetzung*) würde viele physiologische Veränderungen beim Menschen verursachen. Man solle daher auch in künstlich beleuchteten Umgebungen versuchen, das Tageslicht und seine Veränderung nachzuahmen.

Hollwich hat einige dieser *physiologischen Wirkungen* in den 60er Jahren untersucht und die Theorie aufgestellt, dass die vom Auge wahrnehmbare sichtbare Strahlung nicht nur das Sehen der Umgebung ermöglicht, sondern über das Zwischenhirn den gesamten Organismus des Menschen beeinflusst. Die letztere Wirkung würde über einen "*energetischen Anteil der Sehbahn*" erfolgen, während man in der Sehphysiologie nur dessen "optischen" Anteil kennen würde. Hollwichs Thesen waren sehr lange umstritten, bis man sie ernst nahm.

In der Zwischenzeit hat die Wissenschaft Hinweise dafür gefunden, dass die Beeinflussung der *circadianen Rhythmik* durch Licht sowohl über die Augen als auch über die Haut erfolgt.

Der dritte Anlass, der die Forschung im Sinne von Licht und Gesundheit angetrieben hat, war die Forschung über die circadiane Rhythmik des Menschen, von der man lange annahm, sie sei durch externe Einflüsse wie künstliches Licht nur wenig beeinflussbar. Im Wesentlichen würde der Gang der Sonne den entscheidenden Zeitgeber spielen. Diese Vorstellungen beruhten z.T. auf Höhlenforschungen, bei denen die künstliche Beleuchtung die Rhythmik nicht hat ändern können. Es wurde jedoch nachgewiesen, dass bei diesen Untersuchungen die Dosis zu gering gewesen ist und dass bei entsprechender Bestrahlung von ca. 10.000 lx Änderungen der circadianen Rhythmik verursacht werden können. Diese Wirkung wird auf die Veränderung der *Melatoninproduktion* zurückgeführt.

Die erfolgreiche Behandlung der Winterdepression (SAD = seasonal affective disorders) mit starken Lichtduschen zeigt, dass mehr gesundheitliche Effekte dahinter stehen als einst angenommen. In dem Buch "Biologic effects of light 1998" (Holick, 1999) /E.32/ werden beispielsweise epidemiologische Erkenntnisse diskutiert, die darauf hinweisen,

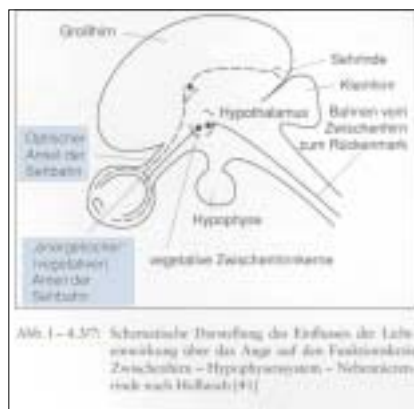


Bild E.6 Schematische Darstellung der theoretischen Überlegungen von Hollwich über physiologische Wirkungen des Lichts, das durch die Pupille eintritt. /E.49/

dass von Bluthochdruck bis Brustkrebs eine Reihe von gesundheitlichen Problemen und Risiken vom Licht beeinflusst werden können.

Noch nicht bekannt sind die Wirkungsmechanismen. So wird diskutiert, ob künstliches Licht selbst oder seine Nutzung in der Dunkelzeit oder aber auch der Mangel an starken Lichteinflüssen die Ursache sein können.

E.2.4 Psychophysiologische Wirkungen von Licht

Psychophysiologische Wirkungen von Umweltfaktoren können direkt und indirekt alle ergonomischen Grundfaktoren beeinflussen, so auch die von dem Umweltfaktor Licht.

Das Licht ruft bekanntlich eine Reihe von Effekten auf, die die Psyche des Menschen betreffen. Sie werden teils bewusst herbeigeführt (z.B. "Festbeleuchtung"), zum Teil muss man sie erleiden (z.B. "Novemberstimmung"). Küller (Küller, 1987 /E.39/) hat nachgewiesen, dass die Beschaffenheit von Licht nicht nur die *Hormonproduktion* wie z.B. Cortisol kurzfristig beeinflusst, sondern in Verbindung damit auch den jahreszeitlichen Verlauf der Stimmungen des Menschen. Beleuchtung mit unterschiedlicher *Spektralverteilung* (Lampen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5500 K bzw. 3000 K) mit und ohne Tageslichtanteil (mit und ohne Fenster bzw. Oberlichter) hat nach seinen Untersuchungen bei Schulkindern die Hormonproduktion unterschiedlich beeinflusst.

Bei Büromitarbeitern haben bei diesem Versuch Lampen mit einer höheren ähnlichsten Farbtemperatur die *Melatoninproduktion* im Winter stärker unterdrückt als übliche Leuchtstofflampen und die Stimmung positiv beeinflusst.

E.2.5 Ästhetische Wirkung von Licht

Ästhetische Wirkungen von Licht und Beleuchtung, wie sie in der Lichtarchitektur bzw. überhaupt in der Architektur angestrebt werden, um die Anmutungsqualität von Räumen zu erhöhen oder zu realisieren, stellen nur mittelbar einen Gegenstand für die Ergonomie dar, so z.B. im Hinblick auf die Akzeptanz der Arbeitsumgebung und deren Wirkung auf die Arbeitsbelastung. In besonders erfolgreichen Fällen gelingt es, neben der Realisierung einer beabsichtigten Anmutungsqualität auch eine gute Funktionalität zu erreichen (Beispiel s. Bild E.7). In der dargestellten Schalterhalle hat man ein hohes Beleuchtungsstärkeniveau mit einer höheren Gleichmäßigkeit erreichen können als bei vielen Räumen mit künstlicher Beleuchtung.



Bild E.7 Erscheinungsbild einer Schalterhalle einer Bank, der durch ein Wechselspiel von Kunst- und Tageslicht ein bestimmter Charakter verliehen werden sollte. /E.16/

Dies hängt u.a. damit zusammen, dass die Architektur mit Helligkeit und Farbe in Kombination arbeitet, um den Raum erlebbar zu machen, während man in der Ergonomie nicht einmal den Umgang mit der Helligkeit souverän beherrscht. Dies wiederum rührt daher, dass sich Qualitätsmerkmale der visuellen Kommunikation einer verbalen Beschreibung und gar einer Skalierung und Bewertung entziehen. Die gleiche Zurückhaltung wie in diesem Fall herrscht im Falle der Typografie, die zwar unleugbar funktionale Aspekte behandelt (z.B. Lesbarkeit), sich aber dennoch nicht mit der Methodik der Ergonomie behandeln bzw. bewerten lässt.

Bild E.7 lässt erkennen, wie wichtig es ist, nicht-funktionale Aspekte der Beleuchtung selbst in Projekten zu berücksichtigen, bei denen es um Funktionales geht.

Welche Aspekte bei einer Gestaltung Priorität genießen sollten und welche eher als zweitrangig behandelt werden können, lässt sich per se nicht aussagen, es sei denn, es geht um Extreme wie die Beleuchtung eines Festsaals auf der einen und die eines Uhrmacherarbeitsplatzes auf der anderen Seite. Für übliche

Anwendungen kann die obige Frage an Hand des Konzepts der Gebrauchstauglichkeit beantwortet werden, das im nächsten Abschnitt erläutert wird.

E.2.6 Gebrauchstauglichkeit und ihre Maße

E.2.6.1 Definition

Die Gebrauchstauglichkeit wird in der Norm DIN EN ISO 9241-11 "Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeit mit Bildschirmgeräten - Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze" /E.15/ wie folgt definiert:

*"**Gebrauchstauglichkeit:** Das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und mit Zufriedenheit zu erreichen."*

Die Gebrauchstauglichkeit kann anhand folgender Kriterien ermittelt werden:

Die **Effektivität** beschreibt den Erreichungsgrad von Benutzerzielen. Wenn eine Beleuchtung beispielsweise als Zweckbeleuchtung vorgesehen werden soll, kann die Effektivität daran gemessen werden, wie gut Arbeitsobjekte beleuchtet werden. Werden sie zur Erreichung einer bestimmten Anmutungsqualität des Raums eingesetzt, wird die Effektivität an dem Grad der Erreichung dieses Ziels gemessen.

Die **Effizienz** beschreibt den Aufwand des Nutzers, der zum Erreichen einer bestimmten Effektivität eingesetzt werden muss. Das Maß lässt sich z.B. aus dem Zeitaufwand für die Erledigung einer bestimmten Aufgabe, aber auch aus dem Grad der Ermüdung des Nutzers einer bestimmten Beleuchtung bzw. der Augenbeschwerden, die eine bestimmte Sehaufgabe verursacht, ermitteln. Die Effizienz stellt ein vorwiegend funktionales Kriterium dar.

Die **Zufriedenstellung** von Bedürfnissen beschreibt einerseits die Freiheit von Beeinträchtigungen (z.B. Blendfreiheit) und andererseits die Akzeptanz des Betrachtungsgegenstands, so z.B. die Zufriedenheit mit der Lesbarkeit von Sehobjekten bei Zweckbeleuchtung oder die Zufriedenheit mit der Raumgestaltung bei Einsatz von Leuchten als Gestaltungselement.

E.2.6.2 Bedeutung des Nutzungskontexts

Wie eine Beleuchtung nach diesen Kriterien beurteilt wird, entscheidet sich am Nutzungskontext. So kann eine Beleuchtung z.B. für Kinder (Schulen), Kranke (Heilstätten), Festteilnehmer (Ballsaal, Disco) oder eben für Arbeitsstätten ausgelegt werden, in denen Menschen einer bestimmten Altersgruppe einer be-



Bild E.8 Beispiel für eine (nicht systematische) Berücksichtigung des Nutzungskontexts bei der Auslegung einer Beleuchtung /E.47/

stimmten Tätigkeit nachgehen. Zweifelsohne wird sich eine für einen bestimmten Zweck gestaltete Beleuchtung von anderen stark unterscheiden, ohne dass man behaupten kann, ob sie allgemein richtig oder falsch sei. Die Richtigkeit, d.h. die Eignung der künstlichen Beleuchtung bestimmt sich an dem *Nutzungskontext*, zu dem u.a. die vorgesehenen Benutzer, ihre Sehauaufgaben und Arbeitsmittel sowie die Raumarchitektur gehören. Die Bedeutung des Nutzungskontexts anzuerkennen fällt nicht schwer, wenn dieser stark unterschiedlich ausfällt, hier Disco, dort Krankenhaus. Ungemein schwieriger ist es indes, feiner zu differenzieren, z.B. verschiedene Altersstufen der Benutzer, unterschiedliche Sehauaufgaben innerhalb des Bürobereichs, unterschiedliche Raumformen in Bürohäusern u.ä. als bedeutsamen Unterschied im Nutzungskontext anzuerkennen und angemessen zu berücksichtigen.

Nach dem Konzept der Gebrauchstauglichkeit ist es unerheblich, ob eine Beleuchtung für eine Disco oder für ein Krankenhaus *bestimmt* ist, es kommt lediglich darauf an, ob ihre Benutzer "bestimmte Ziele" nach den drei Kriterien, Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung, erreichen. Die Gebrauchstauglichkeit stellt somit eine benutzerzentrierte Betrachtungsweise von Objekten dar.

Die Gebrauchstauglichkeit eines Objektes beschreibt daher seine Eignung bezüglich der für die Nutzung gestellten Anforderungen. Diese wiederum stellen einen Teil aller an das Produkt gestellten Anforderungen dar. So muss ein Betrachtungsgegenstand wie Beleuchtung nicht nur genutzt, sondern auch geplant, installiert, gewartet und irgendwann wieder entsorgt werden. Die diesbezüglichen Anforderungen richten sich an andere Personen als die Benutzer, ihre Erfüllung bedingt andere Qualitätsmerkmale als die in der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigten.

Somit ist die *Gebrauchstauglichkeit* ein Merkmal für *Qualität*, beschreibt jedoch nicht die gesamte Qualität. Diese ist definiert als "*Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produkts oder einer Tätigkeit, die sich auf die Eignung zur Erfüllung gegebener Erfordernisse beziehen.*" (DIN 55350 Teil 1 /E.14/) Die Unterscheidung zwischen der (Gesamt)Qualität und der Gebrauchstauglichkeit ist hilfreich, um zu erkennen, warum verschiedene Menschen in einem Unternehmen zu unterschiedlichen Ergebnissen bei dem gleichen Sachverhalt kommen. Während für den Benutzer die im Rahmen der Gebrauchstauglichkeit wichtigen Aspekte der künstlichen Beleuchtung von Bedeutung sind, muss beispielsweise der Planer sowohl diese als auch die zusätzlichen Qualitätsmerkmale und darüber

hinaus noch die Kosten berücksichtigen. Der Betreiber wird noch weitergehende Anforderungen stellen, z.B. einen geringen Wartungsbedarf bzw. eine leichte Wartbarkeit.

Die Qualität von technischen Produkten seitens des Nutzers zu definieren, bedeutet zweifellos eine neue ungewohnte Denkweise, da man doch stets davon ausging, dass Produkte eine ihnen innewohnende Qualität besäßen. Indes gibt es nur sehr wenige Produkte, die tatsächlich eine vollkommen vom Nutzungskontext unabhängige Qualität aufweisen. Selbst ein Universalmittel wie das Rad, das unsere technische Zivilisation vorangebracht hat wie kaum ein anderes, kann völlig nutzlos, ja zuweilen hinderlich sein, wenn man z.B. ein Fahrzeug über morastigen Grund bewegen will. Deswegen muss ja seit einigen Jahrtausenden buchstäblich die ganze Welt mit Wegen gepflästert werden, um den richtigen Nutzungskontext für das runde Rad herzustellen. Manche Räder brauchen wiederum eiserne Schienen, um gut rollen zu können. Sie sind weder richtig noch falsch gestaltet, sondern für die Schienen der Bahn gebrauchstauglich und für die Straße eben nicht.

E.2.6.3 Der Bezug zur "objektiven" Produktqualität?

Das Konzept der Gebrauchstauglichkeit wäre wertlos ohne ein Gegenstück, das die Produktqualität für den Hersteller beschreibt, sozusagen "objektiv". Hersteller können im Allgemeinen keine Produkte gestalten, wenn sie nur von Anforderungen ausgehen, die nachträglich durch den Anwender aufgestellt werden. Vielmehr müssen sie diese möglichst gut vorhersehen. In der gleichen Lage befindet sich auch der Planer, der ein Produkt für eine Reihe von Betriebsstätten aussuchen muss bzw. will. Bei einem langlebigen Investitionsobjekt wie der Beleuchtung wäre es zudem unpraktisch, sich an dem jeweiligen Nutzungskontext zu orientieren, z.B. an dem neuen Nutzer eines Arbeitsplatzes, der wesentlich älter oder jünger ist als sein Vorgänger.

Der Hersteller kann im Allgemeinen eine der folgenden Strategien wählen, wenn er die aus seiner Sicht bestmögliche Eignung zwischen den objektiven Produktmerkmalen und dem Nutzungskontext anstrebt:

- Versuch, den Nutzungskontext derart zu ändern, dass eine gegebene Qualität des Produktes sich als richtig erweisen wird. Dies entspricht der Vorgehensweise, eine Straße oder einen Schienenweg zu bauen, damit das Rad funktioniert.

- Beschreibung desjenigen Nutzungskontexts, unter dem ein gegebenes Produkt richtig eingesetzt werden kann. Dies entspricht der Vorgehensweise, die "bestimmungsgemäße" Verwendung festzulegen. Anwender, die das Produkt anderweitig einsetzen, können eine mangelhafte Qualität des Produktes nicht reklamieren.
- Flexible Gestaltung des Produkts, so dass es auch unter nicht vorhersehbaren Einsatzbedingungen vermutlich die Anforderungen des Benutzers erfüllen kann. Ein Beispiel hierfür ist eine dimmbare Beleuchtung. Zu einer solchen Strategie kann allerdings ein Hersteller aus verständlichen Gründen nicht allgemein verpflichtet werden. Es handelt sich um eine freiwillige Leistung.

Nach der ersten Strategie kann ein Planer, der aus welchen Gründen auch immer eine bestimmte Leuchte oder Beleuchtungsart einsetzen will, dafür sorgen, dass die Räume entsprechend gestaltet werden. Diesen Weg ging man z.B. beim Bau sogenannter "intelligent buildings", bei denen viele Gegebenheiten der Gebäude weltweit standardisiert wurden. Ähnlich hat man beim Bau der Hauptverwaltung eines großen Fahrzeugherstellers "Standardräume" geplant und realisiert.

Wer Produkte für den allgemeinen Markt realisiert, wird hingegen häufig nach der zweiten Strategie fahren müssen. So verfährt z.B. ein Hersteller von Leuchten in seinem Katalog, in dem für jeden Leuchtentyp der Abstand von Lichtbändern angegeben wird, der eingehalten werden muss, damit bei einer gegebenen Raumhöhe die gewünschte Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke eingehalten werden kann. Andere Gesichtspunkte, die der Anwender zusätzlich berücksichtigen muss, sind der Normung zu entnehmen. Somit kennt der Anwender die "bestimmungsgemäße" Verwendung der Produkte dieses Herstellers.

Die letzte Strategie, die flexible Produktgestaltung, wird bei vielen technischen Objekten mehr oder weniger ausgeprägt verfolgt, so z.B. bei Fahrrädern, bei denen der Benutzer den Sattel und das Lenkrad seinen Bedürfnissen entsprechend verstellen kann. Noch flexibler ist das Fahrrad hinsichtlich der Kraftübertragung gestaltet, der Benutzer kann diese bei Änderung seiner Bedürfnisse (z.B. Übergang von der Ebene zu einer Steigung) unmittelbar anpassen, indem er die Gangschaltung betätigt. Noch günstiger ist eine automatische Gangschaltung. Beispiel für die Strategie einer flexiblen Produktgestaltung in der Beleuchtungstechnik ist eine verstellbare Arbeitsplatzleuchte.

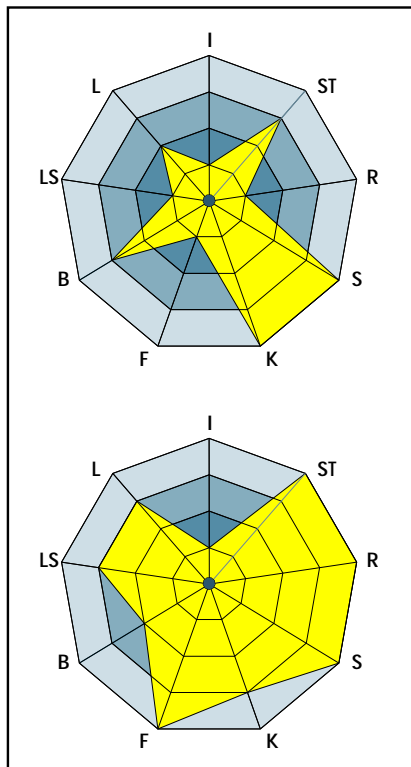


Bild E.9 Mehrdimensionaler Vergleich der Gebrauchstauglichkeit zweier Techniken nach neun unabhängigen Kriterien /E.57/

Flexibilität ist allerdings kein Allheilmittel, da die erforderlichen Maßnahmen ein Produkt nicht nur verteuern, sondern auch verschlechtern können. Die oben als Beispiel für Flexibilität genannte dimmbare Beleuchtung erfordert eine Regelschaltung, die neben den unvermeidlichen Kosten zusätzliche Nachteile wie erhöhten Energieverbrauch bewirken und Abstrahlung von Störfrequenzen nach sich ziehen kann. Der Realisierung der Flexibilität sollte daher stets eine Aufwand/Nutzen-Analyse sowie eine Betrachtung von unerwünschten Nebenwirkungen vorausgehen.

E.2.6.4 Bezug zu Tageslichtnutzung im Hinblick auf Oberlichter

Das Konzept der *Gebrauchstauglichkeit* bietet die Möglichkeit, die objektiven Qualitätsmerkmale einer Tageslichttechnik auf die Erfüllung der Anforderungen eines bestimmten Objekts zu prüfen. Das Prüfergebnis ist nicht eindimensional wie z.B. im Sinne von "geeignet - ungeeignet", vielmehr differenziert es nach drei Kriterien. Ein Ergebnis in einem fiktiven Projekt kann wie folgt lauten:

- **Effektivität:** 80% der Arbeitsplätze erhalten über 70% der Arbeitsstunden eine für die Sehaufgaben hinreichend hohe Beleuchtungsstärke.
- **Effizienz:** Der Krankenstand geht bei Arbeitsstätten mit Tageslichtbeleuchtung um 10% gegenüber ausschließlicher Kunstlichtbeleuchtung zurück.
- **Zufriedenstellung:** Die Zufriedenheit der Benutzer des Hauses mit den räumlichen Gegebenheiten beträgt bei der Technik 1 70%, bei Technik 2 hingegen nur 40%.

Naturgemäß kann es mehr als nur ein Maß für Effizienz und Zufriedenstellung geben. Beispielsweise kann unter Zufriedenstellung betrachtet werden, in welchem Maße ein Bauobjekt den Bedürfnissen von Mietern, deren Mitarbeitern oder deren Kunden entspricht. Unter Effizienz kann berücksichtigt werden, welchen Installations- und Wartungsaufwand verschiedene Techniken verursachen.

Das Konzept bietet den Entscheidern die Möglichkeit, die objektive Qualität von Techniken unter den Randbedingungen ihres Projekts mehrdimensional zu bewerten. Bild E.9 zeigt das Ergebnis einer solchen Bewertung nach neun unabhängigen Kriterien.

Der Vorteil eines solchen Vorgehens liegt darin, dass man einerseits die Gesamtbewertung erkennt und andererseits die Stärken und Schwächen jeder Lösung bei jedem Kriterium.

E.3 ERGONOMISCHE BEDEUTUNG LICHTTECHNISCHER GRÖßEN

E.3.1 Beziehung lichttechnischer und strahlungs- physikalischer Größen

E.3.1.1 Strahlung und Licht

Lichttechnische Größen wie Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte können zwar mit physikalischen Methoden gemessen werden, sie stellen aber selbst keine physikalischen Größen dar. Diese Unterscheidung ist bedeutsam, wenn man die Wirkungen von Umgebungsbedingungen auf den Menschen betrachtet, da sich nur physikalische Faktoren auf den Menschen direkt auswirken können.

Licht entsteht als eine Rechengröße aus der sog. "*optischen Strahlung*", das ist derjenige Teil der elektromagnetischen Strahlung, der zwischen der Röntgenstrahlung (Wellenlänge etwa 1 nm und kürzer) und den Radiowellen (Wellenlänge ca. 1 mm und länger) liegt. Das Auge kann nur einen geringen Teil dieser Strahlung in eine Sehempfindung umsetzen (Bild E.10).

Die Lichtquellen, künstliche wie natürliche, erzeugen nicht nur vom Auge verwertbare Strahlung, sondern in der Regel auch *IR-Strahlung* und *UV-Strahlung*. Zudem können Leuchten im Zusammenwirken mit Lampen diverse andere Strahlungsarten erzeugen. Man kann dies absichtlich erzielen, z.B. für Zwecke der Lichttherapie. In der Regel entsteht die zusätzliche Strahlung unbeabsichtigt, was allerdings nicht heißt, dass sie ohne Wirkung bleibt.

Wie aus Bild E.10 hervorgeht, verwendet die Lichttherapie sowohl IR-Strahlung als auch UV-Strahlung. Beide bedürfen in Arbeitsumgebungen wegen ihrer biologischen Wirkungen, die sie für die Lichttherapie wertvoll machen, einer Kontrolle. In der Natur wirken Strahlungen aller oben dargestellten Wellenlängenbereiche auf den Menschen ein. Das Fehlen bestimmter Strahlungsarten kann, wie man bereits im 19. Jahrhundert festgestellt hat, zu schweren *Gesundheitsschädigungen* (z.B. *Rachitis*) führen.

Menschen, Tiere und Pflanzen nehmen optische Strahlung unterschiedlich wahr. Allerdings orientiert sich alles Leben auf der Erde an dem Spektralbereich, wo das Auge seine größte Empfindlichkeit aufweist, da dies mit der *Spektralverteilung des Sonnenlichts* zusammenfällt.

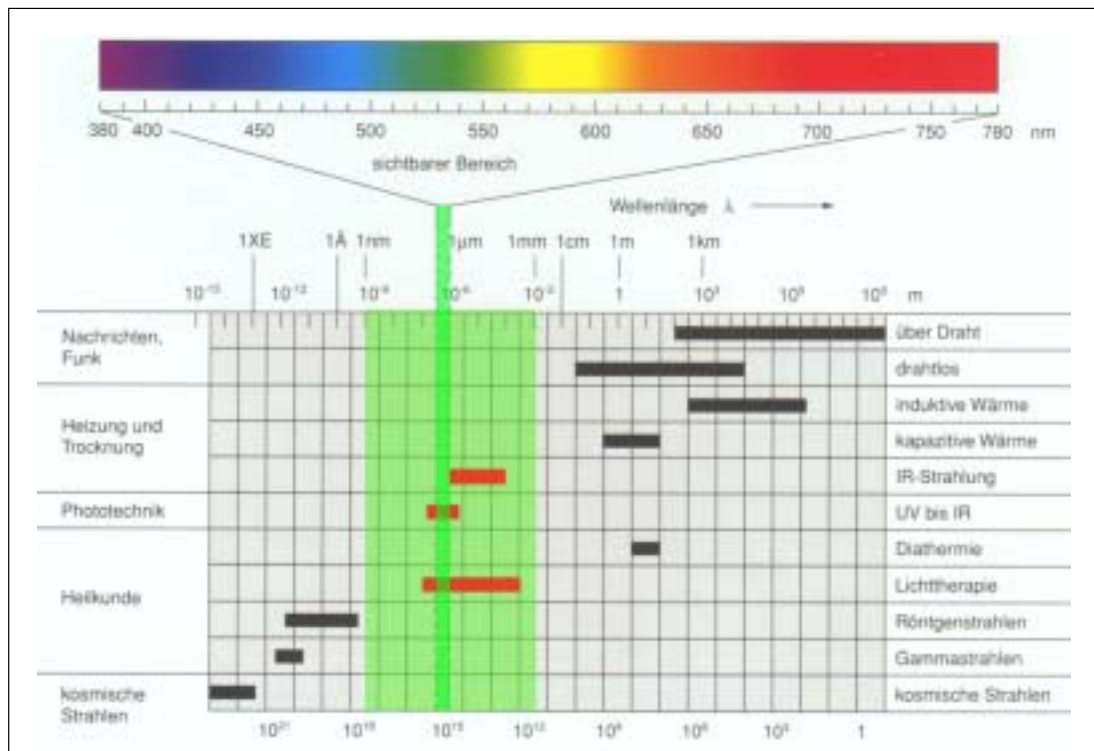


Bild E.10 Sichtbare Strahlung (grün) und optische Strahlung (hellgrün) /E.40/

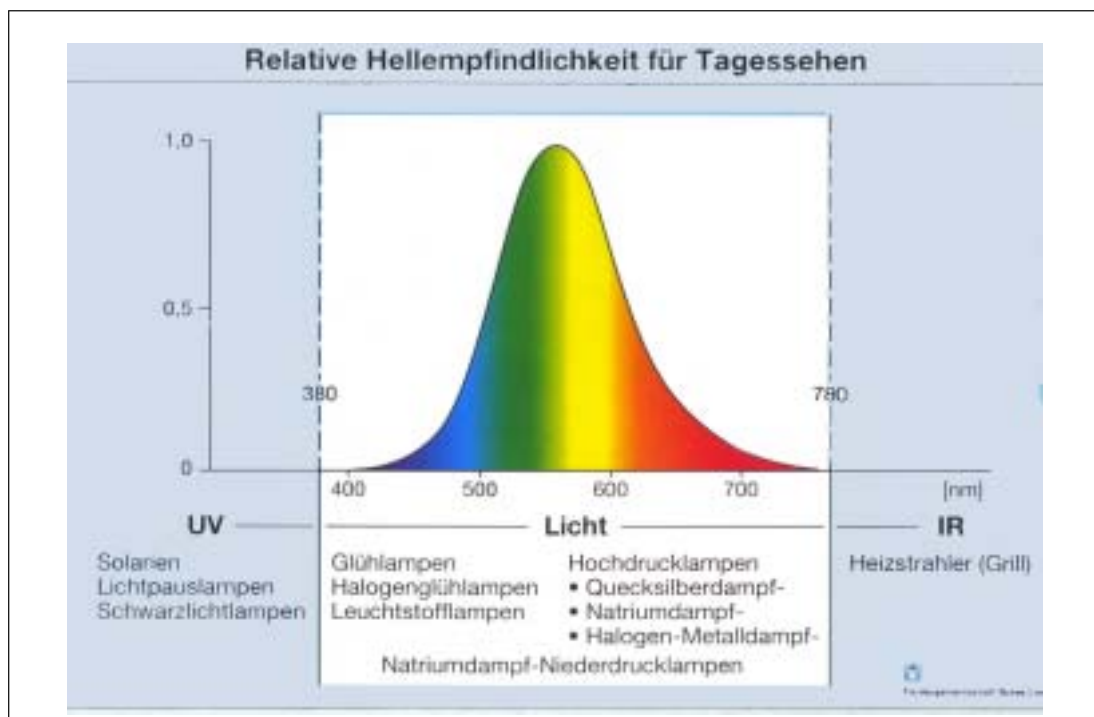


Bild E.11 Die Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges für Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen. Strahlung im gelb-grünen Bereich wird mit dem Faktor 1 bewertet, im roten bzw. blauen Bereich sinkt der Faktor erheblich. /E.21/

E.3.1.2 Wie aus Strahlung Licht wird

Physikalische Strahlung aus dem sichtbaren Bereich wirkt sich auf den Menschen unterschiedlich aus. Die naturgemäß wichtigste Wirkung besteht in der *Sehempfindung*, die bei Eintreten von Strahlung ins Auge entsteht.

Für die reine Helligkeitsempfindung wird Strahlung in einer bestimmten Art und Weise gefiltert. Die Filterfunktion ist die Funktion der relativen Hellempfindlichkeit (Bild E.11). Gemäß dieser Funktion wird Strahlung im gelb-grünen Bereich am höchsten bewertet, im roten bzw. blauen am ungünstigsten. Wenn es lediglich auf die Helligkeit ankommt, sind Lichtquellen, die nur diese Wellenlängen abstrahlen, am wirksamsten. Die Wirkung wird an der sog. *„Lichtausbeute“* gemessen. Diese gibt an, wieviel Licht aus 1W elektrischer Energie gewonnen wird.

Da Helligkeit nur eine begrenzte Bedeutung für das Sehen hat, muss man eine relativ *„schlechte“* Lichtausbeute in Kauf nehmen, wenn man nicht nur grünes Licht erzeugen möchte. Um wieviel sie gegenüber dem denkbaren Maximum geringer ausfällt, hängt von dem Spektrum ab, das die Lichtquelle erzeugen kann bzw. soll. Dieses wiederum wird bestimmt über die vermutlich wichtigste visuelle Wirkung des Lichts, über die Farbwiedergabe. Im Allgemeinen gilt, je besser die Farbwiedergabe, desto geringer die Lichtausbeute.

Diese Beziehung wird in den Daten der Hersteller geschickt getarnt. So weisen bestimmte Lampenarten, obwohl deren Farbwiedergabe sich gravierend unterscheidet, die Farbwiedergabeeigenschaft *„sehr gut“* auf. Erst bei genauerem Hinsehen erkennt man, dass noch eine *„Farbwiedergabestufe“* angegeben wird, in der sich dann die Lampen, scheinbar geringfügig, unterscheiden (1A und 1B).

Wenn die Unterschiede tatsächlich gering wären, müsste man sich wundern, warum die Lampen mit der Farbwiedergabestufe 1A überhaupt eingesetzt werden, da ihre *Lichtausbeute* etwa 60% (*DeLuxe-Leuchtstofflampen*) bzw. 15% (*Glühlampen*) der Lampen mit der *Farbwiedergabestufe* 1B beträgt. D.h., man muss etwa zwei- bis sechsmal so viele Lampen betreiben, um die gleiche Lichtmenge zu erzeugen (Bild E.12).

Die häufig ins Feld geführte Wirtschaftlichkeit neuer Lampen verdanken diese nicht selten einer *„Rechenkunst“*, die nur dann funktionieren würde, wenn die Helligkeit die maßgebliche Größe wäre.

Das natürliche Licht weist zwar je nach Tageszeit und Wetter wechselndes Spektrum auf, jedoch ist seine

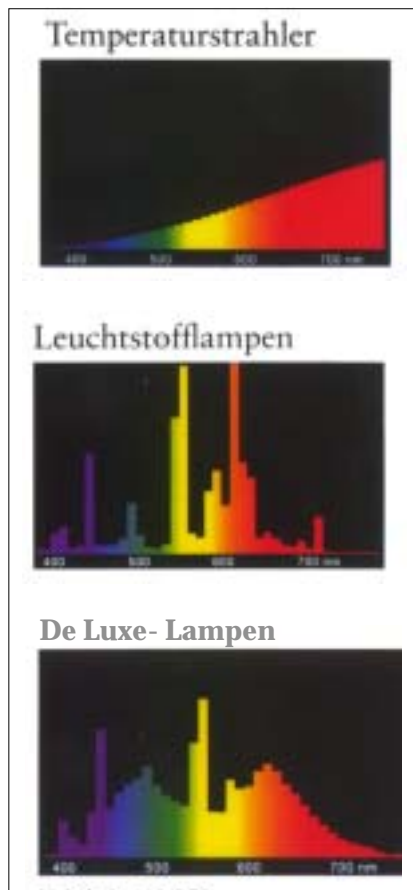


Bild E.12 Spektrum der Glühlampe (kontinuierlich) im Vergleich zu den üblichen Leuchtstofflampen (*„Dreibanden-Lampen“*) und den Leuchtstofflampen mit einem *„aufgefüllten“* Spektrum (*DeLuxe-Lampen*) /E.40/

Farbwiedergabe fast immer besser als bei der künstlichen Beleuchtung.

E.3.1.3 Unterschiede in der Wirkung

Wenn die Wirkungen des "Lichts" diskutiert werden, kommt der getrennten Betrachtung von *Licht und Strahlung* eine große Bedeutung zu. Der Grund hierfür ist, dass das natürliche Licht Teil der Strahlung aus dem gesamten optischen Spektrum ist, während man in Innenräumen nur "gefiltertes" Licht bekommt. Das geschieht z.T. ungewollt, weil das übliche Fensterglas einen Großteil von UV-Strahlung nicht durchlässt, und z.T. absichtlich, wenn man Teile der Strahlung wegfiltert, um z.B. die thermische Belastung von Arbeitsstätten zu mindern.

Während es für die Hellempfindung unerheblich ist, ob sie durch Strahlung im blauen, grünen oder roten Bereich des *Spektrums* entsteht, hängen viele physiologische und psychologische Wirkungen vom Spektrum ab. So wusste man schon vor Jahrhunderten, dass das Auge bei bläulichem Licht kurzsichtiger wird und bei rötlichem weitsichtiger. Die eine Wirkung machte man sich bei Sakralbauten zunutze, während die andere Wirkung z.B. für profane Zwecke eingesetzt wird, in Nachtbars.

Photobiologische Wirkungen können besser mit strahlungsphysikalischen Größen erklärt werden, während man zur Betrachtung von emotionalen Wirkungen sowohl lichttechnische (Helligkeit) als auch strahlungsphysikalische Eigenschaften (Farbspektrum) heranziehen muss.

Seit sehr langer Zeit umstritten und immer noch nicht schlüssig geklärt ist die Rolle des Spektrums in sekundären Wirkungen. So wird behauptet, dass sich zwei unterschiedliche Lichtarten, die die gleiche *Farbempfindung* hervorrufen, unterschiedlich auf den Menschen auswirken würden. Die meisten Sehphysiologen und Lichttechniker sind aber der Ansicht, das Auge könne das empfangene Licht nicht spektral zerlegen. Daher fände eine integrale Bewertung statt.

Es ist bekannt, dass das Ohr empfangene Geräusche in ihre Bestandteile zerlegen und z.B. aus einer Musik, die ein großes Orchester gleichzeitig erzeugt, einzelne Instrumente heraushören kann. Man hört sogar in einer großen Menschenansammlung gezielt einzelne Personen heraus, die man sich anschaut (sog. Cocktail-Party-Effekt). Ob es hierfür Analogien beim Sehen gibt, ist umstritten.

E.3.2 Beleuchtungsstärke und ihre Bedeutung

E.3.2.1 Wichtige Eigenschaften

Die Beleuchtungsstärke (Definition siehe "Begriffsbestimmungen" auf Seite E.6) weist mehrere ergonomisch relevante Eigenschaften auf:

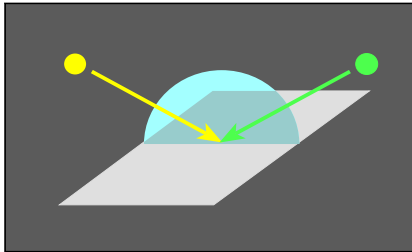


Bild E.13 Richtungsunabhängigkeit der Beleuchtungsstärke (Die rechte und die linke Lichtquelle erzeugen die gleiche Beleuchtungsstärke.) /E.57/

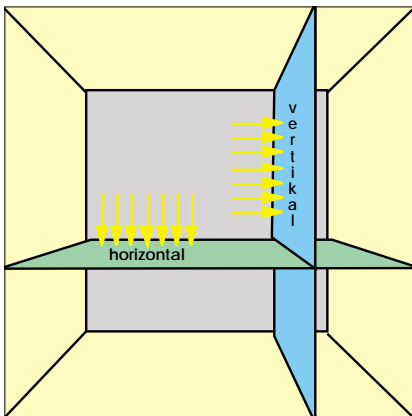


Bild E.14 Messebenen für die Beleuchtungsstärke. Horizontal gemessene Werte sind für Sehobjekte bedeutsam, die auf dem Tisch liegen, vertikal gemessene für Gesichter, Wände u.ä. (nach /E.21/)

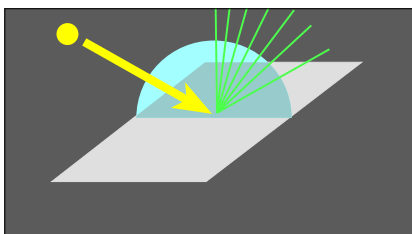


Bild E.15 Gerichteter und gestreuter Lichteinfall auf eine Ebene (Die rechte und die linke Lichtquelle erzeugen die gleiche Beleuchtungsstärke.) /E.57/

- **Richtungsunabhängigkeit.** Beleuchtungsstärke ist eine fiktive Größe, die die Menge des Lichts beschreibt, die auf eine Fläche fällt. Allerdings geht bei der Ermittlung der Beleuchtungsstärke eine der wichtigsten Eigenschaften von Licht (*Richtungsabhängigkeit* auf Grund geradliniger Ausbreitung des Lichts) verloren (Bild E.13).
- **Messung in der horizontalen Ebene.** Beleuchtungsstärke im Innenraum wird fast immer in der horizontalen Ebene gemessen, die für die *Helligkeitsempfindung* kaum eine Bedeutung hat, weil sich die dafür maßgeblichen Objekte in der Vertikalen erstrecken. (Bild E.14)
- **Unabhängigkeit von der Größe der erzeugenden Fläche.** Die Beleuchtungsstärke auf einem Objekt ist eine fiktive Größe, aus der die Leuchtdichte des Objekts berechnet werden kann, die wiederum für das Sehen bedeutsam ist. Für die Berechnung ist unerheblich, ob das Licht aus einer einzigen Richtung einfällt oder vollkommen gestreut (Bild E.15).

Für Sehvorgänge ist die Beleuchtungsstärke daher nur dann aussagefähig, wenn die Objekte matt sind und sich - quasi zwei-dimensional - in dieser Ebene befinden.

In der Regel muss man mit körperlichen Sehobjekten rechnen, die zudem nicht matt sind. Wenn ein Sehobjekt keine matte Oberfläche aufweist, kann das Licht aus einer bestimmten Richtung die Wirkung des Lichts aus einer anderen mindern bzw. vernichten (Bild E.16).

In diesem Bild ist eine Buchseite abgebildet, die bei gestreutem Lichteinfall einen hohen Kontrast aufweist, bei gerichtetem hingegen einen sehr geringen. Bei sehr ungünstigem Lichteinfall kann es sogar zur *Kontrastumkehr* kommen, die Schrift erscheint weiß, das Papier hingegen schwarz. Mehr Licht bedeutet aus dem hier dargestellten Grunde nicht notwendigerweise bessere Beleuchtung.

Die *Störwirkung* hängt in starkem Maße davon ab, ob die Quelle, die eine Beleuchtungsstärke erzeugt, groß ist und gleichmäßig leuchtet oder klein ist bzw. ungleichmäßig leuchtet.

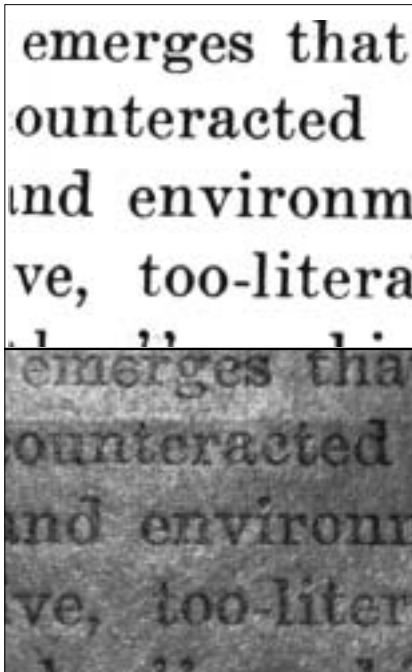


Bild E.16 Erscheinungsbild eines gedruckten Textes unter gestreutem (oben) und gerichtetem Licht (unten) /E.9/

Künstliches Licht in Innenräumen stammt in der Regel aus kleinflächigen Quellen mit hoher Leuchtdichte, während sich das natürliche Licht meistens durch eine große Fläche (Fenster, Oberlichter) mit relativ geringer Leuchtdichte auszeichnet.

Um den tatsächlichen Nutzeffekt einer gegebenen Beleuchtungseinrichtung zu ermitteln, hat die amerikanische IES (Illuminating Engineering Society) das Konzept der "äquivalenten" Beleuchtungsstärke entwickelt. Hierbei wird die erzeugte bzw. gemessene Beleuchtungsstärke oder die dadurch erzeugte Leuchtdichte des Sehobjekts bestimmt, aus der man nach einer psychophysiologischen Funktion die Sehleistung ermittelt, die ohne Störwirkungen unter idealen Bedingungen erzielt werden kann (Bedeutung der *Sehleistung* s. E.4.2 "Was ist Sehleistung?" auf Seite E.37). Hiervon werden Störeffekte wie z.B. die Wirkung der oben gezeigten Kontrastminderung abgezogen und die der geminderten Sehleistung "äquivalente" Leuchtdichte bzw. Beleuchtungsstärke berechnet. Wie man Bild E.17 entnehmen kann, kann die so berechnete Beleuchtungsstärke um eine Größenordnung geringer sein als die gemessene. Die berechnete Größe aber gibt die wahre Leistung der Beleuchtung wieder.

Berechnet man in dieser Weise eine weitgehend störungsfreie Beleuchtung mit Oberlichtern und eine künstliche Beleuchtung mit Lampen hoher Leuchtdichte, die beide die gleiche gemessene Beleuchtungsstärke erzeugen, kann die "äquivalente" Größe bei der natürlichen um den Faktor zwei bis drei höher liegen. Daher sind Vergleiche zwischen natürlicher und künstlicher Beleuchtung auf der Basis von Beleuchtungsstärken allein aus diesem Grunde irreführend.

E.3.2.2 Wirksamkeit

Die *Beleuchtungsstärke* selbst kann keine Wirkung auf den Menschen ausüben, sofern sie nicht direkt auf das Auge auftrifft. Betrachtet man die in der Pupillenebene gemessene Größe, sind mehrere Sehempfindungen eine Funktion der Beleuchtungsstärke. Allerdings spricht man nur bei bestimmten Sachverhalten von der Beleuchtungsstärke, die auf das Auge trifft, beispielsweise beziehen sich die Angaben bezüglich der Wirkung des Lichts in der Melatoninproduktion auf diese.

In der Beleuchtungstechnik benutzt man diese Größe weitaus häufiger zur Kennzeichnung der Menge des Lichts, die auf beleuchtete Sehobjekte fällt. Wenn eine solche Fläche Licht reflektiert, wird sie für das Auge sichtbar. Je nach Beleuchtungsstärke und Re-

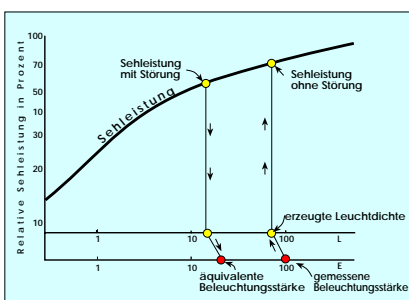


Bild E.17 Berechnung der äquivalenten Beleuchtungsstärke unter Berücksichtigung möglicher Störeffekte (nach /E.36/)

flexionsvermögen entsteht eine "Leuchtdichte", die einen wichtigen Faktor für die "Sehleistung" darstellt (siehe "Was ist Sehleistung?" auf Seite E.37).

Da mit der *Beleuchtungsstärke* eine *Energieeinwirkung* verbunden ist, erzeugt sie auf der Haut zumindest eine Wärmewirkung. Diese ist bei üblichen Beleuchtungsanlagen allerdings relativ unbedeutsam. Weitere Wirkungen, die mit der Beleuchtungsstärke verbunden sind, die nicht das Sehorgan trifft, sind denkbar geworden, seit man entdeckt hat, dass Empfänger, die die *Tagesrhythmik* des Körpers bestimmen (Zeitgeber-Gen), bei Tieren über den ganzen Körper verteilt sein können. Im Jahre 1998 haben Campbell und Murphy /E.7/ die Ergebnisse eines Experiments veröffentlicht, bei dem sie die Tagesrhythmik eines Menschen durch Beleuchtung der Kniekehlen verändert haben. Falls sich dieser Effekt einwandfrei belegen lässt, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Beleuchtungsstärke nicht nur auf das Sehen auswirkt.

E.3.3 Leuchtdichte und ihre Bedeutung

E.3.3.1 Wie Leuchtdichte entsteht

Die *Leuchtdichte* ist die einzige sichtbare lichttechnische Größe. Sie gibt an, wieviel Licht eine Flächeneinheit einer sichtbaren Fläche in die Richtung des Empfängers abstrahlt. Sie entsteht bei *Selbstleuchtern* dadurch, dass diese Licht erzeugen, während sie bei anderen Objekten durch Reflexion des auftreffenden Lichts erzeugt wird.

Bei trivialen Berechnungen nimmt man an, dass das Licht diffus einfällt und die Reflexion ebenso diffus erfolgt. In diesem Fall ist die Leuchtdichte zur Beleuchtungsstärke direkt proportional und in allen Betrachtungsrichtungen gleich groß. Dieser Idealfall tritt zwar in der Realität selten auf, dennoch reicht eine solche Berechnung für viele Fälle.

In der Praxis kann die *Reflexion* unterschiedlich nach *Lichteinfallrichtung* erfolgen. Ebenso ist eine unterschiedliche Reflexion nach Lichtausfallrichtung möglich. Die Unterschiedlichkeit kann sich sowohl auf die Stärke als auch auf die Farbänderung beziehen. Die beiden Extreme aus dem Alltag bilden weißer Samt und Spiegel. Während weißer Samt in fast allen Einfallrichtungen und unter fast allen Beobachtungswinkeln die gleiche Leuchtdichte besitzt, weist ein Spiegel nur in einer Richtung eine Leuchtdichte auf. (Bild E.18)

Beispiel für einfache Farbänderungen bei der Reflexion sind alle Oberflächen, die unter weißem Licht "farbig" erscheinen. Beispiel für räumliche Änderungen

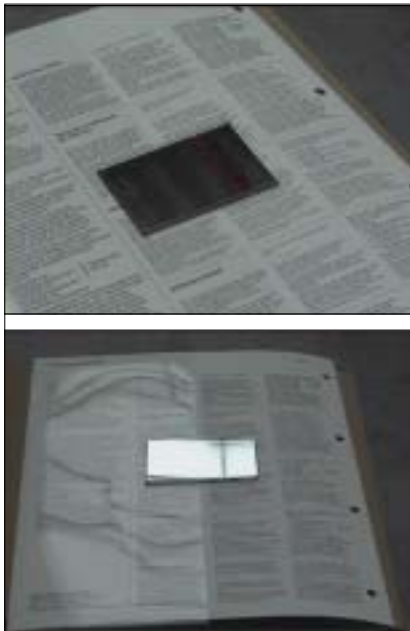


Bild E.18 *Leuchtdichten von matten und spiegelnden Objekten unter der gleichen Beleuchtung /E.57/*

der reflektierten Farbe ist die irisierende Farberscheinung von Ölfilm auf dem Wasser. Jede "farbliche" Veränderung ist zwar mit einer unterschiedlichen Leuchtdichte verbunden, jedoch steckt in der Leuchtdichte keine Farbinformation.

E.3.3.2 Wirksamkeit

Die wichtigste Wirkung der Leuchtdichte besteht darin, dass sie einen Helligkeitseindruck vermittelt. Allerdings ist sie kein Maß für Helligkeit, weil diese kein physikalisches Phänomen darstellt.

Es stellt aber ein relatives Maß für die Helligkeit räumlich benachbarter Objekte dar. Dieses Maß, der *Kontrast*, ist die ausschlaggebende Größe für die *Erkennbarkeit von Objekten* bzw. die nahezu allein bestimmende Größe für die Lesbarkeit von Schrift (Anm.: bei sonst gleichen Formeigenschaften).

Die Leuchtdichte bestimmt viele Sehfunktionen in erheblichem Maße mit (siehe "Beeinflussung der Sehleistung durch Umweltfaktoren" auf Seite E.39). Hierzu zählen beispielsweise die Sehschärfe, die Unterschiedsempfindlichkeit und das Akkommodationsvermögen des Auges.

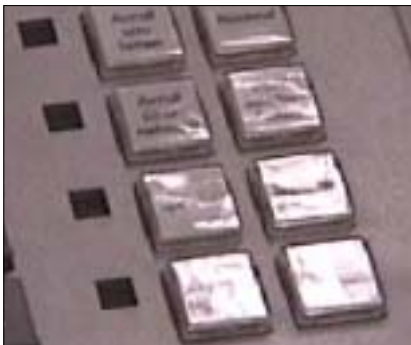


Bild E.19 Reflexblendung auf einer Telefontastatur mit glatten Tastenkappen /E.57/

Die bei der Innenraumbeleuchtung wichtigste Störwirkung der Beleuchtung, die *psychologische Blendung*, hängt von der Leuchtdichte in höherem Maße ab als von jeder anderen physikalischen bzw. lichttechnischen Eigenschaft. Auch für die *Reflexblendung* (Bild E.19) ist sie die wichtigste Bestimmungsgröße. Das Bild zeigt, wie eine Beleuchtung, die das Sehen ermöglichen soll, genau das Gegenteil bewirkt. Was nach diesem Bild negativ wirkt, der Glanz, wird bei vielen Anwendungen gezielt erzeugt. Auch hierbei spielt die Leuchtdichte eine wichtige Rolle.

Flächen sehr hoher Leuchtdichte können allein durch die Höhe Blendung verursachen, was z.B. bei der Sonne bzw. bestimmten Lampentypen der Fall ist. Aber auch unterschiedliche Leuchtdichten, die in zeitlicher bzw. örtlicher Nachbarschaft erscheinen, können blenden, beispielsweise ein helles Fenster hinter einem dunklen Bildschirm.

Bei so viel Wirkung müsste die Leuchtdichte eigentlich die maßgebliche Planungsgröße in der Beleuchtungstechnik sein. Das ist sie auch, nämlich dort, wo man die Sehleistung genauer berechnen muss, bei der Straßenbeleuchtung. In der allgemeinen Beleuchtungstechnik hat man sich allerdings bislang nicht auf diesen theoretisch nahe liegenden Schritt entschließen können, der in der Straßenbeleuchtung etwa 30 Jahre zurückliegt.

E.3.4 Lichtstärke und ihre Bedeutung

E.3.4.1 Wichtige Eigenschaften

Die *Lichtstärke* ist die Menge des Lichtes, die eine bestimmte leuchtende Fläche in eine Richtung abstrahlt. Ihre Einheit Candela ist die vierte Grundgröße des internationalen Mess- und Einheitensystems, dessen andere Größen Meter, Kilogramm und Sekunde sind. Anders als die Leuchtdichte, die aus der Lichtstärke rechnerisch ermittelt werden kann, ist die Lichtstärke nicht "sichtbar".

Dennoch spielt die Lichtstärke mittelbar eine wichtige Rolle, weil man damit die *Abstrahlungscharakteristik* von allen Licht aussendenden Flächen kennzeichnet, darunter als wichtigste die von Leuchten. Die üblichen Darstellungen sind zwar nur für den Fachmann leicht verständlich, dennoch geben sie auch dem Laien ein Gefühl über die Lichtabstrahlung.

Aus diesen Kurven kann man bei bekannter Raumgeometrie und Position der leuchtenden Fläche unmittelbar die Beleuchtungsstärke berechnen, die an einem bestimmten Punkt direkt erzeugt würde. (Beispiele s. Bild E.20)

Besonders wichtig ist die Lichtstärke für Leuchten, mit denen man Licht gezielt in eine Richtung aussendet (Scheinwerfer, Blitze etc.). Ihre Leistungsfähigkeit wird mit ihrer Lichtstärke gekennzeichnet.

E.3.4.2 Wirksamkeit

Die *Lichtstärke* entspricht dem physikalischen Maß der Intensität. Überall, wo man eine Lichtstärke messen kann, kann man ebenso eine Strahlungsintensität feststellen, die sich zumindest als Wärme bemerkbar macht.

Mit der Lichtstärke ist unmittelbar die sog. "*physiologische*" *Blendung* verbunden, die eine messbare Abnahme der Sehleistung infolge des Lichteinfalls ins Auge kennzeichnet.

E.3.5 Kontrast und seine Bedeutung

E.3.5.1 Kontrastbegriff

Jedes *Objekt* muss sich in mindestens einer Eigenschaft von seiner Umgebung unterscheiden, damit es wahrgenommen werden kann. So kann sich ein Ton z.B. vom Geräuschpegel im Raum durch seine Tonhöhe oder durch seine Lautstärke oder beides bemerkbar machen. Bei jedem der fünf Sinne gibt es relevante Merkmale, die eine bestimmte Bezeichnung tragen, beim Gesichtssinn wird dieses Merkmal Kontrast genannt. Ein Objekt muss sich, um gesehen zu

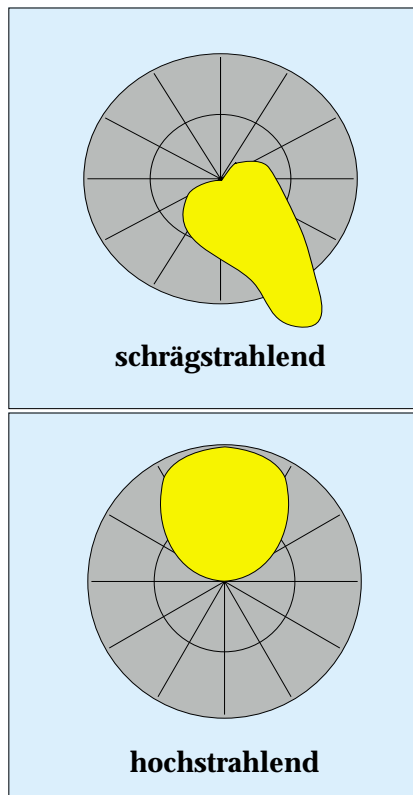


Bild E.20 Lichtstärkeverteilungskurven und ihre Bezeichnung (Beispiele) /E.9/

werden, mindestens in seiner Farbe oder Leuchtdichte von seiner Umgebung unterscheiden.

In der Regel wird in der Beleuchtungstechnik mit dem *Leuchtdichtekontrast* gearbeitet, der relativ leicht einer Messung zugänglich ist und daher "photometrischer" Kontrast heißt. Er besitzt den Vorteil, dass Menschen bestens mit ihm als Begriff und mit seinen Wirkungen vertraut sind, selbst wenn der Begriff nicht in ihren aktiven Wortschatz gehört.

Der Begriff Kontrast besitzt neben seiner physiologischen Bedeutung ("laut", "gut lesbar") auch eine rein psychologische: Kontrastreiche Objekte werden als "wichtig" eingestuft, während man kontrastarme nicht so sehr wichtig nimmt. Objekte mit hohem Kontrast werden auch für "zuverlässiger" gehalten als solche mit geringem Kontrast. Diese semantischen Beziehungen sind keineswegs von nur theoretischer Bedeutung. Vielmehr führen sie insbesondere dort, wo Betrachtungsgegenstände auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften eine scheinbare Bedeutung erlangen, die ihnen aber nicht zusteht. Das ist z.B. der Fall, wenn eine grelle Beleuchtungsanlage (hoher Kontrast zur Umgebung) die Aufmerksamkeit auf sich lenkt, wodurch die von ihr beleuchteten Gegenstände im Raum in den Hintergrund rücken.

Durch den (falschen) semantischen Gehalt von Objekten können sogar Sicherheitsprobleme entstehen. So werden auf Bildschirmen die wichtigsten Warnungen (rot) weniger schnell wahrgenommen als die zweitwichtigsten (gelb), weil gelbe Signale eine größere Leuchtdichte haben. Anweisungen, denen man z.B. in Verkehrsleitzentralen folgen muss, stehen in der Reihenfolge der Bedeutung sogar den unwichtigen "gut"-Meldungen nach, weil sie in kontrastarmem Blau, die letzteren aber in leuchtendem Grün abgebildet werden. Wenn Arbeitsplätze mit Bildschirmen falsch beleuchtet werden, wird der beschriebene Effekt verstärkt. Dies kann sogar so weit gehen, dass man die wichtigsten Meldungen nur noch mühsam wahrnimmt.



Bild E.21 Falsche Bedeutungszuordnung durch zu hohen Kontrast der unwichtigeren Objekte (weiße Lampen) gegenüber den wichtigeren (Blaue Anzeigen, die beachtet werden müssen.) /E.17/

In der *Schriftgestaltung* wird als Kontrast die Änderung der Strichdicke innerhalb eines Zeichens bezeichnet. Wie hier dargestellt, reicht der Kontrastbegriff weit über die physikalischen bzw. lichttechnischen Größen hinaus. In der Beleuchtungstechnik wird nur mit dem physikalischen Kontrastbegriff (photometrischer Kontrast) gearbeitet. In der Informationsgestaltung kommt zusätzlich der Begriff *Farbkontrast* hinzu.

E.3.5.2 Wirksamkeit

Der photometrische *Kontrast* ist bei der Lesbarkeit von Schrift praktisch die alleinbestimmende lichttechnische Größe. Er bestimmt darüber hinaus praktisch jede Form der Sehleistung (siehe "Was ist Sehleistung?" auf Seite E.37). Wie in diesem Abschnitt gezeigt wird, muss man, um die gleiche Wirkung wie eine relativ geringe Kontraststeigerung zu erzielen, die Leuchtdichte unter Umständen um eine oder gar zwei Größenordnungen erhöhen (Bild E.31 auf Seite E.40). Das bedeutet bei einem beleuchteten Objekt, dass die Beleuchtungsstärke um das 10- bis 100fache erhöht werden muss.

Aus diesem Grunde kommt den *Kontrastwiedergabeeigenschaften* einer Beleuchtung eine sehr große Bedeutung zu. Wie stark dies ins Gewicht fällt, kann auch aus Bild E.17 (s. Seite E.25) abgeleitet werden. Eine quantitative Angabe über die tatsächlich erzielbare Sehleistung und deren Beeinflussung durch Kontrastverlust findet sich bei Hartmann (1970) /E.27/. Hier zeigt sich, dass beim Lesen im günstigsten Fall eine *Informationsaufnahme* von 5 Bit in der Sekunde erfolgt (matte Schrift auf mattem Papier), beim ungünstigsten (glänzende Schrift auf glänzendem Papier) hingegen nur ein Zehntel davon. Der letztere Fall tritt bei verhältnismäßig wenigen Arbeitsplätzen (z.B. in Werbeagenturen, Druckereien u.ä.) auf, während der Normalfall in Büros etwa in der Mitte des Diagramms liegt. Die *Informationsaufnahme-geschwindigkeit* liegt dann bei etwa 40% des günstigsten Falls. (Bild E.22)

Um eine bessere *Lesbarkeit* zu erreichen, muss man entweder alles matt gestalten, was man weitgehend erfolglos versucht hat, oder die Beleuchtungsqualität verbessern. Hierin liegt einer der wichtigsten Pluspunkte für die Beleuchtung mit Oberlichtern.

Während man in Büros etwas Abhilfe schaffen kann, indem man glänzende Sehobjekte, soweit möglich, vermeidet, lassen sich solche Maßnahmen in vielen anderen Arbeitsumgebungen nicht vermeiden, weil Arbeitsobjekte wie Arbeitsmittel nicht matt gemacht werden können.

E.3.6 Schattigkeit und ihre Bedeutung

E.3.6.1 Schattigkeitsbegriff

Der *Schattigkeitsbegriff* ist aus ergonomischer Sicht etwas unglücklich gewählt, weil man im allgemeinen unter Schatten das Gegenteil von Licht versteht, daher meistens etwas Negatives. Glücklicher wäre der Begriff "*Modellierung*" gewesen, der wiederum den Nachteil hat, nur mit psychologischen Verfahren

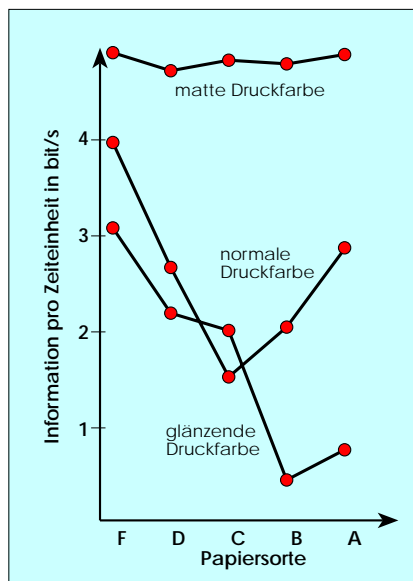


Bild E.22 Leseleistung bei unterschiedlich mattem Papier und matter Druckfarbe (nach /E.27/, Quelle: /E.10/)

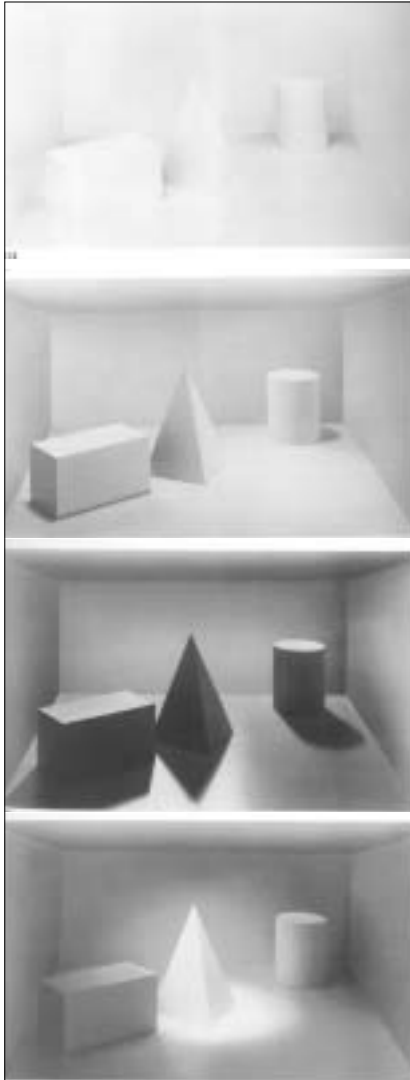


Bild E.23 Schattigkeit: Wiedergabe von Formen (von oben nach unten zunehmende Schattigkeit, letztes Bild: Akzentuierung) /E.47/

messbar zu sein. Daher hat man sich auf den Begriff Schattigkeit festgelegt, der allerdings international kaum anerkannt wird, zumal eine englische Übersetzung des Wortes nicht gefunden wurde. Man muss sich dennoch mit dem Phänomen beschäftigen, das sich hinter dem Begriff verbirgt, weil es sich um eine Eigenschaft von grundlegender Bedeutung handelt. Die Schattigkeit umschreibt die Verteilung des Lichteinfalls und die Fähigkeit einer vorhandenen Beleuchtung, körperliche Formen wiederzugeben. Sie kennzeichnet daher eine wichtige Komponente der Sehleistung. Dass man sie häufig nicht unter dem Begriff Sehleistung subsumiert, liegt daran, dass Schattigkeit bzw. Modellierung schwerer zu beschreiben und noch schwerer zu messen sind als z.B. das Erkennen von Kontrasten. In dieser Hinsicht geht es ihr nicht besser als dem Farberkennen, an das man ebenfalls nicht gleich denkt, wenn von Sehleistung die Rede ist.

Folgende Bilder demonstrieren, was der Begriff Schattigkeit bedeutet (Bild E.23, Quelle: Schricker, 1994) /E.47/. Die ersten drei Bilder zeigen Stufen für Schattigkeit, das vierte eine absichtliche Akzentuierung. Nach den Vorstellungen in der Beleuchtungstechnik für Arbeitsstätten wird eine mittlere Schattigkeit angestrebt (zweites Bild). Eine hohe Schattigkeit (drittes Bild) soll ebenso vermieden werden wie eine geringe (oben). Dies gilt nicht für Inszenierungen, bei denen alle Mittel erlaubt sind, so z.B. bei Schaufenster-, Gaststätten- oder Wohnraumbeleuchtung.

E.3.6.2 Wirksamkeit

Die Wirkung von *Schattigkeit*, besser gesagt von Lichtrichtung bzw. Gerichtetheit von Licht, lässt sich auf unterschiedlichste Weise darstellen. So kann man sie z.B. damit demonstrieren, dass bei ungünstigem Lichteinfall gewünschte Details verschwinden oder ungewünschte erst recht in Erscheinung treten (Bild E.24).

Wie sich Beleuchtung auswirkt, die sich durch unterschiedliche Schattigkeit auszeichnet, kann man den Bildern der nächsten Seiten entnehmen (Bild E.26). Hierbei handelt es sich um zwei Hallen, von denen die eine mit schmalen Lichtbändern hoher Leuchtdichte beleuchtet wird (hoher gerichteter Anteil) und die andere durch den Himmelsausschnitt, großflächig und mit geringer gleichmäßiger Leuchtdichte.

Will man einen ähnlichen Effekt wie rechts in Bild E.26 dargestellt mit künstlicher Beleuchtung erzielen, muss man sehr aufwendige Lichtdecken realisieren. Das ist vermutlich der ausschlaggebende Grund dafür, dass bei hohen Anforderungen an die



Bild E.24 Wiedergabe von Oberflächenbeschaffenheit bei unterschiedlicher Lichtrichtung /E.47/



Bild E.25 Wiedergabe von Sehobjekten bei günstiger Schattigkeit /E.57/

Formerkennung und Modellierung von Sehobjekten, ganze Gebäude nach Tageslichtnutzung durch Oberlichter ausgelegt werden. Man sieht es u.a. daran, dass die besten Beispiele für Tageslichtarchitektur Museums- und Ausstellungsräume sind. Das jüngst zum Jahrhundertbauwerk in Deutschland gekürte Vitra Design Museum in Weil am Rhein wurde von seinem Architekten Frank O. Gehry fast ausschließlich nach diesem Gesichtspunkt entworfen. Naturgemäß wird man nicht immer die Chance haben, ein Gebäude wunschgemäß bauen zu können wie in diesem Fall.

Einer der wichtigsten Vorteile des Lichteinfalls durch *Oberlichter* gegenüber dem Tageslicht aus seitlich angeordneten Fenstern besteht darin, dass ein unerwünschter Modellierungseffekt unterbleibt, der Silhouetteneffekt. Dieser entsteht dadurch, dass das durch *Fenster* einfallende Licht stark gerichtet ist. Schaut man aus dem Rauminnern in Fensterrichtung, so sieht man nur die Silhouette des Sehobjekts. Dies ist nur unter bestimmten Umständen erwünscht, in der Regel aber eher problematisch, insbesondere dann, wenn es sich um Gesichter handelt. Die große *Gerichtetheit des Lichteinfalls* kann aber auch dazu führen, dass die Sehbedingungen insgesamt unbefriedigend werden.

Oberlichter ergeben in der Regel bessere Sehbedingungen und werden daher häufig bevorzugt, wenn besonders günstige Sehbedingungen realisiert werden sollen. So ist der Raum in Bild E.26 (rechts) eine Kunsthalle, in der Bilder und Skulpturen beobachtet werden sollen. Er würde sich allerdings auch für den Zweck der links abgebildeten Halle sehr gut eignen, hätte man bei deren Bau an Sehverhältnisse gedacht. Wie sich eine gute Schattigkeit auf die Sichtbarkeit alltäglicher Gegenstände wie die einer Kreissäge in einer Werkstatt auswirkt, zeigt Bild E.25. Die dargestellte Wirkung wurde mit Oberlichtern in Verbindung mit Fenstern erzielt.

Mit dem relativ stark gerichteten Lichteinfall ist ebenfalls die Gefahr einer *Reflexblendung* verbunden, die in Bild E.27 (links) dargestellt wird. Hier wird die *Reflexblendung* im Rauminnern durch die Tischlampen, in Fensternähe durch den Himmel erzeugt. In diesem Bibliothekssaal wird niemand ein hochwertig gedrucktes Buch jemals problemlos betrachten bzw. lesen können. Hingegen kann man mit Oberlichtern (rechts) für optimale Sehverhältnisse sorgen. Sie sind nicht selten jeder anderen Beleuchtung überlegen. (Allerdings ist der Kontakt zur Außenwelt bei Fenstern besser.)



Bild E.26 Erscheinungsbilder von zwei Hallen
Links: Eine übliche Industriehalle unter künstlicher Beleuchtung mit *Lichtbändern*
Rechts: Eine natürlich beleuchtete Halle mit großen leuchtenden Flächen /E.43/



Bild E.27 Hallenförmige Räume und *Reflexblendung*
Auf der linken Seite mit deutlich betontem seitlichen Lichteinfall machen sich Reflexe auf allen nicht vollständig matten Flächen störend bemerkbar (links, Tische und Decke), während dies bei entsprechend gestalteten Oberlichtern nur punktuell vorkommt (rechts, Fußboden auf der linken Seite).
Die Reflexe auf den Tischen im linken Bild würden sich bei einer Decke mit Oberlichtern nicht mehr störend bemerkbar machen. (links /E.20/, rechts /E.37/)

E.4 BEEINFLUSSUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT UND LEISTUNGSBEREITSCHAFT

E.4.1 Allgemeines

Die Beleuchtung kann die *Leistungsfähigkeit* des Menschen direkt durch die *Sehleistung* beeinflussen (funktionale Aspekte), aber auch indirekt über psychophysiologische Vorgänge, die nicht zuletzt auch das Wohlbefinden bestimmen.

Für eine Reihe von Arbeitsplätzen dürften die funktionalen Aspekte ausschlaggebend für die Tageslichtnutzung sein. In dieser Hinsicht sind Tageslichtöffnungen (z.B. Fenster, *Lichtkuppeln*, Tageslichtlenksysteme u.ä.) als Äquivalent zu Leuchten zu betrachten und lassen sich nach den gleichen Maßstäben beurteilen.

Bei den indirekten Wirkungen ist die Vergleichbarkeit von künstlicher und natürlicher Beleuchtung wesentlich geringer. Während man z.B. den Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte und der Sehleistung (z.B. *Sehschärfe*) recht genau kennt und in eine mathematische Formel fassen kann, streitet man sich darüber, wie eine ungünstige Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld, die mit Sicherheit langfristig zur Ermüdung beiträgt, nach einem Maßstab für die Sehleistung bewertet werden könnte.

Die Komplexität der Wirkungsmöglichkeiten des Lichts auf die menschliche Leistung schematisiert Bild E.28.

Die wirklichen Beziehungen sind wesentlich komplexer, was angesichts der Entwicklungsgeschichte des Menschen, die eng mit dem Licht der Sonne verknüpft ist, nicht weiter verwunderlich sein dürfte. Beispielsweise erhöht eine helle Umgebung die Aktiviertheit des Körpers und die Sehleistung und trägt dadurch indirekt und direkt zu einer Leistungssteigerung bei. Sie kann aber u.U. auch der *Ermüdung* Vorschub leisten, z.B. direkt durch Blendung und Wärmestrahlung und indirekt durch "zu viel" Aktiviertheit.

Wann die positiven und wann die negativen Effekte überwiegen, kann nicht pauschal vorhergesagt werden. Zuweilen treten positive und negative Wirkungen gleichzeitig ein, so z.B. wenn man eine hohe Sehleistung durch hohe Leuchtdichten der Sehobjekte und ihrer Umgebung erzielen will. Ein erheblicher Teil der Wirkungen von Licht rührt von dem Bestreben her, die biologische *Tagesrhythmik* (Bild E.29) während des Tages durch künstliche Maßnahmen überlisten zu wollen, um so zu einer möglichst konstanten

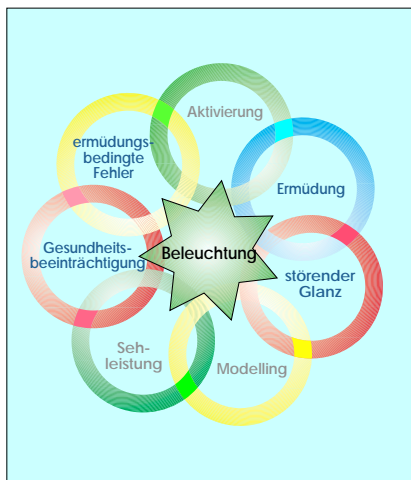


Bild E.28 Die wichtigsten Wirkungspfade, über die Licht die menschliche Arbeitsleistung beeinflusst. (grau beschriftet = positive Wirkungen, blau beschriftet = negative Wirkungen) /E.57/

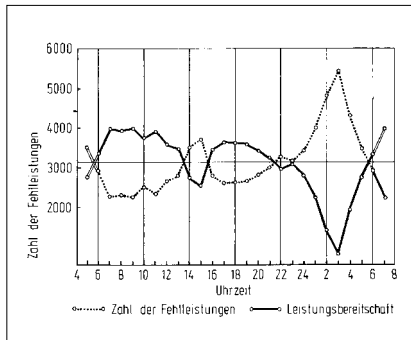


Bild E.29 Biologische Tagesrhythmik und Leistungsbereitschaft (/E.9/, in Anlehnung an Graf nach Werten von Bjerger, Holm und Swensson)

Arbeitsleistung zu kommen. D.h., sie würden unter sonst gleichen Umständen zur Nachtzeit nicht eintreten. Nutzt man künstliche Beleuchtung, um in der dunklen Tageshälfte arbeiten zu können, kann, neben der beabsichtigten Wirkung, eine negative Wirkung in Form einer Ermüdung eintreten, so z.B. durch Schlafentzug. Langfristig sollen durch nächtliche Beleuchtung nicht nur solche reversiblen Effekte entstehen, sondern nach neueren Erkenntnissen mittelbar auch *Brustkrebserkrankungen* bei Frauen (Stevens und Anderson, 1998 /E.50/). Diesbezüglichen Theorien soll in neuen Forschungsprojekten nachgegangen werden.

Neben den Wirkungen des Lichts auf den Menschen müssen auch die Einflüsse betrachtet werden, die durch "*Lichtentzug*" bewirkt werden. Dieser entsteht durch die modernen Arbeits- und Lebensweisen bei Industriegesellschaften, die sich weitgehend in geschlossenen Räumen abspielen. Untersuchungen aus den USA zeigen, dass sich viele Menschen in Umgebungen aufhalten, in denen verhältnismäßig wenig Licht vorhanden ist. So sollen sie weniger als eine Stunde täglich *Beleuchtungsstärken* über 10.000 lx ausgesetzt sein. In natürlichen Umgebungen, in denen die Menschheit entstanden ist, beträgt die Beleuchtungsstärke maximal 100.000 lx mit einer Exposition zu Beleuchtungsstärken zwischen 5.000 und 100.000 lx von etwa 12 Stunden täglich. Das bedeutet, dass der Mensch bei der Arbeit und in der Freizeit nur einen Bruchteil der Strahlungsmenge erhält, die bei natürlichen Lebensweisen auf ihn einwirken und seine Körperfunktionen steuern würden.

Das bedeutet auch, dass bestimmte Wirkungen von künstlicher Beleuchtung durch "zu wenig Licht" verursacht werden. Das gilt auch für Menschen, die ihre Arbeitsumgebung "zu hell" finden. Dieselben Menschen, die 500 lx in Arbeitsräumen als zu hell empfinden, empfinden 5.000 lx im Freien als eine Art Dunkelheit.

Es scheint möglich, nachzuweisen, dass dies mit der Qualität des Lichts zusammenhängt und dass man mit Tageslichtsystemen, welcher Art auch immer, Arbeits- und Lebensbedingungen schaffen kann, bei denen nicht nur die Quelle des Lichts "natürlich" ist. Hierzu muss man allerdings von der rein funktionalen Betrachtungsweise über das Licht teilweise Abschied nehmen und eine ganzheitliche Betrachtungsweise ansetzen. Die Bereitschaft scheint in allen Bevölkerungsschichten vorhanden, da die Unzufriedenheit mit der Beleuchtung von Arbeitsstätten in allen Industriestaaten zumindest latent vorhanden ist.

E.4.2 Was ist Sehleistung?

Die *Sehleistung* ist eine nicht hinreichend genau festgelegte Größe. In dem ansonsten sehr präzisen "Internationalen Wörterbuch der Lichttechnik" wird sie als "Leistung des visuellen Systems, wie sie beispielsweise durch die Geschwindigkeit und die Genauigkeit gemessen wird, mit welcher eine *Sehaufgabe* gelöst wird", definiert. Aus dieser wenig aussagefähigen Definition lässt sich unschwer erkennen, warum man in der Praxis sehr unterschiedliche Vorstellungen über die Sehleistung entwickelt. So ist "Sehleistung" für manche Fachleute eine feste Größe für eine Person, die man mit einem Gerät messen kann, z.B. die Sehschärfe. Die Sehschärfe kennzeichnet aber das Auflösungsvermögen des Auges unter vorgegebenen Bedingungen.

In Wirklichkeit ist die Sehschärfe, wie jeder Mensch aus eigener Erfahrung kennt, keine feste Größe, sondern Ergebnis einer Wechselwirkung zwischen dem Sehapparat und der Umgebung (Leuchtdichteniveau, Farbe, Adaptation, Blendung etc.). Die mit einem Gerät messbare Größe ist die "Sehschärfe unter definierten Randbedingungen". Dies ist eine, aber nicht die ausschließliche Beschreibung der Sehleistung.

Weitere physiologische Größen, die die Sehleistung kennzeichnen, sind u.a. die *Unterschiedsempfindlichkeit*, die *Formempfindlichkeit*, die *Wahrnehmungsgeschwindigkeit* und die *Akkommodationsgeschwindigkeit*. Hierbei bedeutet

- *Wahrnehmungsgeschwindigkeit*
die Schnelligkeit, mit der ein bestimmtes Sehobjekt unter definierten Bedingungen wahrgenommen werden kann. Sie wird wesentlich von der Größe des Sehobjekts, seinem Kontrast zum Hintergrund und von dem Leuchtdichteniveau (Adaptation) bestimmt. Je stärker diese Größen ausgeprägt sind, desto größer ist die Wahrnehmungsgeschwindigkeit.
- *Unterschiedsempfindlichkeit*
das Unterscheidungsvermögen des Sehapparats für Leuchtdichteunterschiede bzw. Kontraste. Sie hängt im Wesentlichen von der Objektgröße und dem Leuchtdichteniveau ab. Bei geringen Leuchtdichten (z.B. bei Nacht) ist sie sehr gering, nimmt mit zunehmender Leuchtdichte im Gesichtsfeld zu, bis diese in Blendung über geht und die Unterschiedsempfindlichkeit wieder herabsetzt.
- *Akkommodationsgeschwindigkeit*
die zeitliche Änderung der Fähigkeit des Auges, sich auf eine bestimmte Sehentfernung einzu-

stellen. Die Akkommodation bezeichnet die Änderung der Brennweite der Augenlinse für die Scharfeinstellung auf eine bestimmte Objektentfernung. Die mögliche Einstellung (Akkommodationsbreite) ist sehr stark vom Alter abhängig, ebenso die Geschwindigkeit. Die Akkommodationsgeschwindigkeit wird wesentlich vom Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld beeinflusst.

- *Formempfindlichkeit*
die Gestaltwahrnehmung. Die Formempfindlichkeit stellt die heute noch am wenigsten erforschte Sehleistung dar, weil sie sehr stark von der Gestalt der wahrzunehmenden Objekte abhängt. Die Erkennungsgüte von Schriftzeichen (z.B. Lesbarkeit) stellt eine der Formempfindlichkeit verwandte Sehleistung dar.

E.4.3 Mittelbare Beeinflussung der Leistungsfähigkeit

Während die Sehleistung bzw. einzelne Faktoren, die eine bestimmte Komponente der Sehleistung bilden, sich direkt auf die *Arbeitsleistung des Menschen* auswirken können, existieren andere nicht minder wirksame Einflussmechanismen, die sich aber nur indirekt auswirken. So kann Licht, wie eine Reihe anderer Umweltfaktoren, die Aktivierung des Menschen beeinflussen, diese wiederum die Leistungsfähigkeit.

Dieser Wirkungsmechanismus wird in der Lichttechnik bewusst eingesetzt, um physiologische Funktionen des Körpers zu manipulieren, so z.B. um dem Mittagstief entgegen zu wirken. Eine andere, gegenteilige Nutzung des gleichen Wirkungsmechanismus besteht darin, dass man bei der künstlichen Beleuchtung eine Veränderlichkeit realisiert, die Phasen aus dem natürlichen Gang des Tageslichts entsprechen, um bestimmte Nachteile des künstlichen Lichts auszugleichen.

Die psychisch wie physisch wichtigste Wirkung des Lichts als mittelbarer Einflussfaktor besteht in der Steuerung hormoneller Funktionen (siehe "Psychophysiologische Wirkungen von Licht" auf Seite E.14). Während sich Größen wie Unterschiedsempfindlichkeit oder Akkommodationsgeschwindigkeit auf den bewussten Sehvorgang beziehen und nur dort wirksam werden, wo Sehleistung gefordert ist, kann die indirekte Beeinflussung des Organismus durch das Licht jegliche für die Leistungsabgabe notwendige Körperfunktion positiv oder negativ beeinflussen. Sie ist zwar schlechter erfassbar, aber ungleich wirksamer. Ob man eine der wichtigsten Faktoren der Arbeitsumwelt und des Lebensraums allgemein an der

Leichtigkeit der Erfassung beurteilen sollte, ist mehr als fraglich.

Bei einer Vielzahl von Arbeitsplätzen besitzt die "Sehleistung" keine Bedeutung als solche hinsichtlich der Auslegung der Beleuchtung, weil die Arbeitsumgebungen aus anderen Gründen hinreichend hell sind. Das gilt z.B. für Büroarbeitsplätze, an denen ein Beleuchtungsniveau von ca. 50 lx zum Lesen der Dokumente (funktionaler Aspekt) hinreichen würde. Von der Sehleistung her gesehen brauchen Räume mit reinen Bildschirmarbeitsplätzen gar keine Beleuchtung mehr, es sei denn aus Sicherheitsgründen. Räume mit geringen *Beleuchtungsniveaus* um 50 lx ohne Fenster wirken allerdings nicht nur triste, sondern auch "einschläfernd", sofern man diese Trennung überhaupt vornehmen darf. Sind die Räume mit Fenstern ausgestattet, wirken sich diese, aus der Raumtiefe gesehen, als Blendquellen aus und belasten den Menschen dadurch, wenn aus anderen Gründen.

Die hier diskutierten Wirkungen des Lichts sind tageszeitabhängig und hängen vermutlich, dort wo die Sehleistung keine wichtige Rolle spielt, nur unbedeutend von lichttechnischen Größen ab. Ob ein Raum als "triste" und "einschläfernd" bezeichnet wird, hängt von seiner Nutzung ab. So kann ein Wohnraum mit durchschnittlich 50 lx abends "zu hell" wirken, während man bei einem Großraumbüro bei diesem Niveau keine Arbeitsatmosphäre verspürt. Man vermutet eher eine Orientierungsbeleuchtung für den Nachtwächter für seinen Rundgang als eine Arbeitsbeleuchtung. Die psychische Komponente ist selbst dann erheblich, wenn man von der Motivation absieht, die ebenfalls wesentlich von der visuellen Umgebung abhängt.

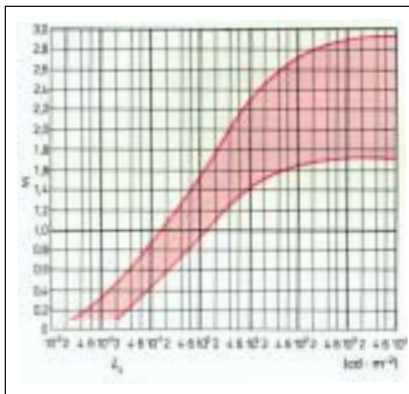


Bild E.30 Abhängigkeit der Sehschärfe von der Adaptationsleuchtdichte bei sehr hohem Kontrast /E.30/

E.4.4 Beeinflussung der Sehleistung durch Umweltfaktoren

E.4.4.1 Sehschärfe

Die Sehschärfe, die als eine bedeutsame Kenngröße für die Sehleistung angesehen wird, wird hauptsächlich von der Leuchtdichte und dem Kontrast des Sehobjekts bestimmt.

Die Beziehung zwischen der Sehschärfe und der Leuchtdichte geht aus Bild E.30 hervor (Hartmann, 1992) /E.30/. Es ist zu bemerken, dass sich der gezeigte Verlauf über sechs Zehnerpotenzen der Leuchtdichte ändert. Die größten Veränderungen finden sich hierbei bei Leuchtdichten von $0,01 \text{ cd/m}^2$ bis 1 cd/m^2 , d.h. in einem Bereich, der für die Arbeitsumwelt üblicherweise recht uninteressant ist.

Die Sehschärfe steigt bei relativ geringen Leuchtdichten unter 1 cd/m^2 stark an, um bei etwa 100 cd/m^2 in eine Sättigung überzugehen, d.h. die Zunahme der Sehschärfe mit der Leuchtdichte bei sehr hohen Leuchtdichten ist nur noch geringfügig. (Anm.: Eine Leuchtdichte von 100 cd/m^2 entspricht etwa dem Erscheinungsbild von weißem Papier unter einer Beleuchtungsstärke von ca. 400 lx .)

Die in Bild E.30 dargestellte Relation herrscht nur bei hohen Kontrasten (schwarz auf weiß). Üblicherweise weisen Sehobjekte weitaus geringere Kontraste auf. Die Beziehung zwischen der Sehschärfe und dem Kontrast unter Einbeziehung von der (Adaptations)-Leuchtdichte ist von Fortuin in eine Formel gefasst worden (Çakir u.a., 1978 /E.11/). Die nach dieser Formel berechneten Abhängigkeiten zeigt Bild E.31. Diesem Bild lässt sich unschwer entnehmen, welche der beiden Größen wichtiger und mächtiger ist. Während man bei einem Kontrast von 3 (entspricht etwa Stenoblock mit Bleistiftschrift) bei einer Verzehnfachung der Leuchtdichte von 10 auf 100 cd/m^2 die Sehschärfe gerade mal um 8% steigert, kann man bei einer Änderung des Kontrasts auf 9 (entspricht etwa gutem Schreibmaschinendruck, Laserdrucker erreichen ca. 20) die Sehschärfe fast verdoppeln.

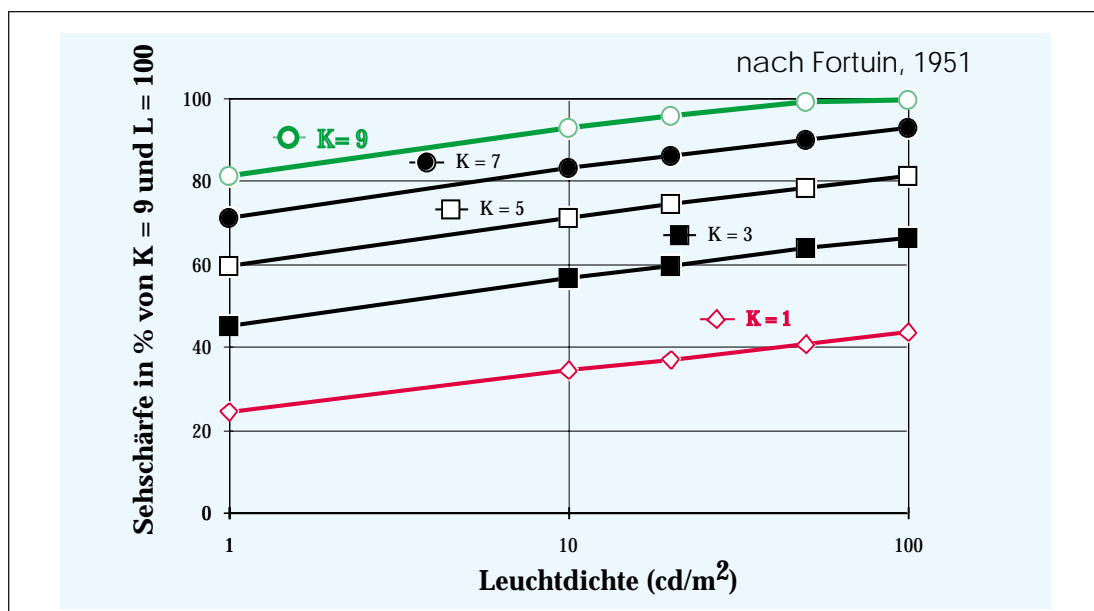


Bild E.31 Sehschärfe in Abhängigkeit von der Leuchtdichte und dem Kontrast /E.11/ (nach Fortuin, 1951)

Eine solche Betrachtungsweise ist naturgemäß nur dann sinnvoll, wenn man die Wahl hat, welche Größe man ändern will. In der Praxis besteht eine solche Wahl zuweilen nicht, so z.B. im Operationssaal oder in der Uhrmacherei. Dann muss eben die Beleuchtung verstärkt, d.h. die Beleuchtungsstärke erhöht werden.

Die weitaus wichtigere Aussage, die sich aus Bild E.31 ableiten lässt, ist aber eine andere: Führt eine Erhöhung der *Beleuchtungsstärke*, die man zum Zwecke einer höheren Sehleistung vornehmen will, zu einem auch nur geringfügigen Kontrastverlust, so kann sich der vermeintliche Gewinn eher als Verlust an Sehschärfe erweisen. Aus diesem Grund stellt die Kontrastwiedergabe bzw. der *Kontrastwiedergabefaktor* eine ungleich wichtigere Größe als die Leuchtdichte dar.

Wieviel Sehschärfe bei der Arbeit tatsächlich gebraucht wird, hängt naturgemäß von den Sehobjekten ab. Die für eine Sehaufgabe notwendige Sehleistung kann bei den meisten heute üblichen *Sehaufgaben* bei relativ niedrigen Beleuchtungsstärken erbracht werden, die weit unter den genormten Werten liegen. Hierzu gehören auch die meisten Büroaufgaben. Dies ist nicht nur durch die Arbeiten von Bodmann aus den 60er Jahren belegt (Bodmann, 1962 /E.3/), sondern auch berechenbar, wenn man übliche Sehaufgaben nimmt und die dafür aufzubringende Sehschärfe, d.h. das erforderliche Auflösungsvermögen des Auges, ermittelt.

Die in diesem Abschnitt angeführten Beziehungen zwischen der Sehleistung und den Umweltbedingungen bilden den geistigen Hintergrund für die meisten Anforderungen in der Lichttechnik, so auch dafür, dass man die Beleuchtungsstärke für die wichtigste Kenngröße für eine Beleuchtung hält und sogar die Tageslichtversorgung von Arbeitsstätten und sonstiger umgebauer Umgebung an diesem Maßstab bewertet. Diese Betrachtungsweise ist nur noch für einen geringen Teil der Arbeitsstätten bedeutsam. Ob sie jemals für Wohnungen, Küchen oder Tagungsräume eine Bedeutung besessen hat, darf angezweifelt werden.

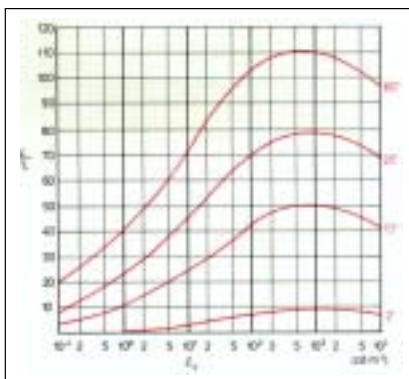


Bild E.32 Unterschiedsempfindlichkeit für verschieden große Sehobjekte in Abhängigkeit von der Leuchtdichte /E.30/

E.4.4.2 Unterschiedsempfindlichkeit

Diese Größe gibt an, welche minimalen Kontraste das Auge noch zu erkennen vermag. Sie ist also diejenige Größe, die das *Auflösungsvermögen des Auges* für Kontraste kennzeichnet. Ebenso wie die Sehschärfe ist auch die Unterschiedsempfindlichkeit eine Funktion der Leuchtdichte. Sie hängt aber auch von der Größe des gesehenen bzw. zu sehenden Objekts ab.

Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges nimmt bis etwa 1.000 cd/m^2 mit der Leuchtdichte zu, um danach wieder abzunehmen, weil eine Umgebung mit höherer Leuchtdichte eher zu einer Blendung führt als zu einer Förderung der Sehleistung.

Legt man wieder die Leuchtdichte eines weißen Papiers als Maßstab zu Grunde, nimmt die Unterschiedsempfindlichkeit oberhalb von etwa 4.000 lx

ab. Dieser Wert markiert aber nicht eine scharfe Grenze, sondern den Wendepunkt einer fiktiven Kurve (Bild E.32).

Es existiert eine Reihe von Sehaufgaben, bei denen die Unterschiedsempfindlichkeit eine erhebliche Rolle spielt, z.B. bei der Betrachtung von Röntgenbildern, im Straßenverkehr, bei der Montage von Kleinstteilen, bei bestimmten Sportarten usw.

Dort bestimmt die Unterschiedsempfindlichkeit, was sichtbar ist und was unsichtbar. Für übliche Sehaufgaben im Büro spielt diese Größe keine wichtige Rolle, weil die Sehobjekte groß bzw. kontrastreich genug sind.

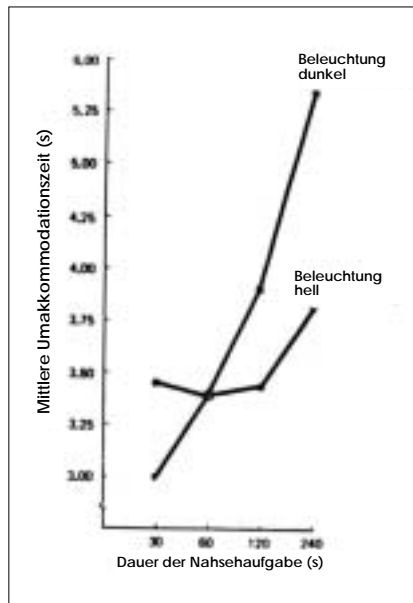


Bild E.33 Verlängerung der Akkommodationszeit durch ungünstige Beleuchtung /E.38/

E.4.4.3 Akkommodationsvermögen

Die Akkommodation, d.h. die Fähigkeit des Auges, unterschiedlich entfernte Gegenstände scharf wahrzunehmen, hängt in zweifacher Weise von Umweltbedingungen ab. Zum einen verlängert sich die für eine bestimmte Entfernungseinstellung erforderliche Zeit durch ungünstige Beleuchtungsbedingungen (Bild E.33). Zum anderen nimmt die maximal mögliche Veränderung (Akkommodationsbreite) mit abnehmender Leuchtdichte ab. Diese ermüdungsähnlichen Effekte treten zwar altersunabhängig auf, wirken sich aber bei Personen über 40 Jahre besonders störend aus, weil das Sehvermögen ab diesem Alter merklich zurückgeht.

Bei ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen wird die *Akkommodationsbreite* dahingehend verändert, dass der Nahpunkt vom Auge weg wandert, während sich der Fernpunkt zum Auge hin bewegt (Bild E.34), d.h., das Auge wird gleichzeitig kurz- und weitsichtiger. Dieser Effekt ist aus nächtlichen Umgebungsbedingungen wohl bekannt. Unter üblichen Arbeitsbedingungen dürfte er allerdings nicht stark in Erscheinung treten, es sei denn bei Personen, deren Akkommodationsfähigkeit anderweitig beeinträchtigt ist.

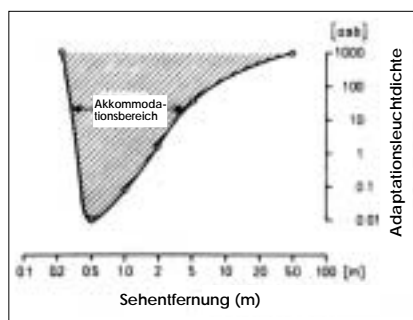


Bild E.34 Der Zusammenhang zwischen der Adaptationsleuchtdichte und der Akkommodationsbreite (Anm.: Die Leuchtdichten sind in asb, der früher gebräuchlichen Einheit, angegeben. Ein asb entspricht etwa $1/3 \text{ cd/m}^2$.) /E.38/

E.4.5 Beeinflussung der Leistungsbereitschaft

Die *Leistungsbereitschaft des Menschen* kann - neben den bekannten Motivationsfaktoren - auch durch physiologische Vorgänge beeinflusst werden, die wiederum teilweise durch Umgebungsbedingungen gesteuert werden.

Der bekannteste Effekt der Umgebungsbedingungen, die Steuerung der *Circadianrhythmik* der Leistungsbereitschaft durch das Tageslicht, wurde von Graf beschrieben und später durch weitere Forschungsarbeiten belegt. Dieser Effekt wird in der Lichttechnik auf zweierlei Art berücksichtigt:

- Für die Auslegung der künstlichen Beleuchtung in manchen Arbeitsstätten werden hohe Beleuchtungsstärken mit der Begründung gefordert, man müsse dem "Nachmittagstief" entgegen wirken, damit die Leistungsbereitschaft hoch genug bleibt.
- Sowohl für die natürliche als auch für die künstliche Beleuchtung wird eine dem Tagesgang des Sonnenlichts angepasste Veränderlichkeit angestrebt, damit man den "physiologischen Gegebenheiten" Rechnung trägt.

Ein Analogon in der Arbeitswelt findet man bei der Gestaltung der akustischen Umwelt: Bei bestimmten Arbeitsumgebungen wird versucht, die Arbeitsleistung mit Hintergrundmusik mit bestimmter Rhythmik über den ganzen Tag konstant zu halten. Das Bemühen, die Arbeitsumwelt in gewissen Grenzen der natürlichen anzupassen, scheint erfolgreicher, da es von den Betroffenen eher akzeptiert wird.

Eine ungewollte Beeinflussung der Leistungsbereitschaft findet durch die künstliche Beleuchtung statt. Dies wird aber von vielen Benutzern abgelehnt. Unter anderem deswegen versuchen sie, solange es geht, mit Tageslicht auszukommen, und schalten die Beleuchtung eher notgedrungen ein. Dieses Phänomen haben wir sowohl in Deutschland als auch in vielen anderen Ländern festgestellt. Es ist durch zahlreiche Veröffentlichungen belegt. Hieraus folgt, dass die in Abschnitt E.4.1 "Allgemeines" auf Seite E.35 dargestellten Einflüsse des "Lichtentzugs" stärker zur Geltung kommen, als es aufgrund der unnatürlichen Arbeitsbedingungen notwendigerweise geschehen müsste. Welcher Einflussmechanismus auch dahinter stehen mag, alle Phänomene des *Sick Building Syndrome* wie "vorzeitige Ermüdung" oder "Benommenheit" treten in dem Maße verstärkt auf, in dem die künstliche Beleuchtung dominiert (Bild E.35). Hieraus lässt sich indirekt ableiten, dass die Tageslichteinwirkung eine leistungssteigernde Folge hat.

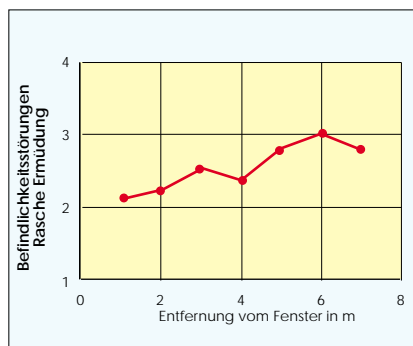


Bild E.35 Abhängigkeit der Gesundheitsstörungen von der Entfernung des Arbeitsplatzes vom nächsten Fenster, hier "Rasche Ermüdung" /E.9/

Aus heutiger Sicht lässt sich die oben angeführte Wirkung in dem von uns festgestellten Ausmaß nicht begründen. Die Erhöhung der Leistungsbereitschaft geht allerdings mit Sicherheit nicht auf die "Sehleistung" zurück, weil sie auch unter Bedingungen feststellbar war, unter denen die Sehleistung eher leiden würde als gefördert.

Heute wird im Allgemeinen angenommen, dass die wichtigste Wirkung der Arbeitsumwelt dadurch entsteht, dass eine eher zu dunkle Umgebung geschaffen wird, unter der der Körper bereits am Tage mit der Produktion des Hormons *Melatonin* anfängt, das den Organismus auf die Schlafphase vorbereitet. Diesem Effekt kann erfolgreich begegnet werden, wenn

eine hellere Umgebung geschaffen werden kann, die allerdings die spezifischen Nachteile der künstlichen Beleuchtung nicht aufweisen darf. So ließe sich vermutlich nachweisen, dass höhere Beleuchtungsstärken, die sich mit künstlicher Beleuchtung nicht störungsfrei realisieren lassen (Bild E.36), mit der Tageslichtbeleuchtung mühelos über einen großen Teil des Arbeitstages hinweg gewährleistet werden könnten.

Bild E.36 zeigt einen Zusammenhang, den es theoretisch eigentlich nicht geben dürfte. Beleuchtungsstärken kann man mit unterschiedlichen Mitteln, sprich Leuchten, realisieren, deren Blendwirkungen theoretisch unabhängig von dieser lichttechnischen Größe sind.

Da die *psychologische Blendung* seit etwa 1970 als ein Faktor gilt, der nicht nur die Befindlichkeit beeinträchtigt, sondern auch zur Ermüdung beiträgt, kann die positive Wirkung des Tageslichts darauf zurückgeführt werden, dass es erlaubt, ungeachtet sonstiger positiver Wirkungen, eine helle Umgebung mit zeitweilig hohen Beleuchtungsstärken zu schaffen, die man mit künstlicher Beleuchtung nicht realisieren kann. Dies bedeutet u.a., dass die relativ hohe Verlässlichkeit der künstlichen Beleuchtung gegenüber der natürlichen in der Summe ihre Nachteile nicht ausgleichen kann. Es bedeutet auch, dass die Förderung der Leistungsbereitschaft durch das Tageslicht die Arbeitsleistung in höherem Maße fördert als die Konstanz der Sehleistung, die die künstliche Beleuchtung eher zu gewährleisten vermag.

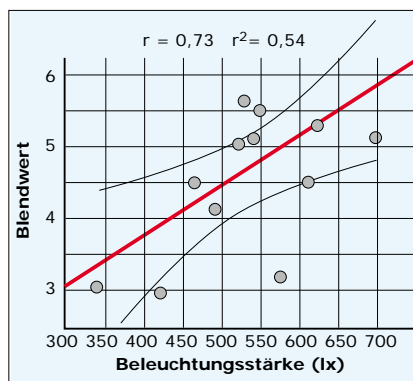


Bild E.36 Empirischer Zusammenhang zwischen der psychologischen Blendung bei künstlicher Beleuchtung und der erzeugten Beleuchtungsstärke. Die Korrelation ist ungewöhnlich hoch für derartige Studien. /E.57/

Im Übrigen stellt die psychologische Blendung den Ausdruck einer subjektiv empfundenen Störung durch die Beleuchtung dar, die bei physikalischen Größen in der gleichen Größenordnung (z.B. gleiche Leuchtdichte, gleicher Kontrast) bei Tageslicht anders ausfällt als bei künstlichem Licht. Die Ursachen hierfür sind nicht bekannt. Das Phänomen spricht allerdings eindringlich dafür, Kunstlicht und Tageslicht nicht nach gleichen Kriterien zu bewerten, ohne zuvor zu untersuchen, ob dies zulässig ist.

E.5 GESUNDHEITLICHE WIRKUNGEN

E.5.1 Allgemeines

Die Menschen haben seit jeher die Sonne angebetet. Selbst im Alten Ägypten wurde sie als eine freundliche Gottheit ("Ra") verehrt und nicht als eine strafende, als die sie in der Wüste hätte eigentlich empfunden werden können bzw. müssen. Im Zuge der Industriellen Revolution und der dadurch ausgelösten Verstädterung wurden die Wirkungen des Tageslichts auf den Menschen, z.T. drastisch schmerzhaft durch Verbindungen zu Rachitis und Tuberkulose, allen bewusst. Zu Beginn unseres Jahrhunderts wurde die "Heliotherapie" geboren, die Heilmethode, die sich des Sonnenlichts bediente. Kaum einhundert Jahre zuvor wählte man noch, die Bräunung der Haut durch die Sonne beruhe auf der Hitzewirkung, die sie verursacht (Holick, 1999) /E.32/. Die eigentliche Wirkung musste damals noch experimentell nachgewiesen werden.

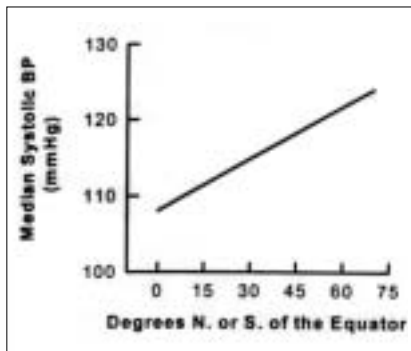


Bild E.37 Systolischer Blutdruck in Abhängigkeit vom Lebensmittelpunkt nördlich und südlich des Äquators /E.32/

Die Chemie, die Medizin und die Fotobiologie haben seitdem große Fortschritte in der Erforschung und der Nutzung der Wirkungen des Lichts auf den Menschen erzielt. Im Wesentlichen beruhen diese Erfolge auf der Erforschung von Vitamin D und seiner Beziehung zum Sonnenlicht. Dennoch sind viele Fragen offen geblieben, so z.B. die Frage, auf welchem Wege die Herzaktivität i.S. eines höheren Blutdrucks durch Licht beeinflusst wird (Bild E.37).

Das Überraschende in der Aussage dieses Bildes ist, dass man die Umwelt am Äquator gewöhnlich als lebensfeindlich einstuft und die gemäßigten Zonen als freundlicher. Weiterhin bemerkenswert ist die Tatsache, dass der Verlauf nördlich und südlich des Äquators gleich ausfällt, obwohl die vergleichbaren Lebensumstände sehr unterschiedlich sind. Wie käme man auf die Idee, dass es in Deutschland und in Neuseeland bzw. Argentinien ähnliche Lebens- und Arbeitsumstände gäbe, die sich gleichermaßen auf die Physiologie des Menschen auswirken?

E.5.2 Einflüsse des Lichts mit unspezifischen Auswirkungen

Die gesundheitlichen Auswirkungen des Lichts, die unspezifische Beschwerden wie *Kopfschmerzen* oder *Augenbeschwerden* einschließen, subsumiert man unter dem Begriff "*Sick Building Syndrome*". Dieser Begriff, den die Weltgesundheitsorganisation im Jahre 1983 geprägt hat, umfasst alle negativen Wirkungen der umbauten Umwelt, die sich nicht als eine organisch feststellbare Erkrankung bemerkbar machen. Hierzu gehören beispielsweise vorzeitige *Ermü-*

ding, Benommenheit, Allergien, Kopfschmerzen, Lustlosigkeit usw., allerdings nur dann, wenn die Betroffenen sie während der Arbeitszeit erleben und ansonsten nicht.

Hedge (Hedge, 1991 /E.31/) hat durch umfangreiche Untersuchungen in Großbritannien und in den USA nachgewiesen, dass die künstliche Beleuchtung nach der Klimatisierung die zweitwichtigste Ursache von Sick Building Syndrome (SBS) darstellt. Da diese Untersuchungen wegen der in den Ursprungsländern üblichen *Fensterlosigkeit* die Wirkung des Tageslichts nicht einbezogen haben, sagen die Untersuchungen von Hedge wenig hierüber aus.

Çakir, A. und Çakir, G. (1990) /E.9/ haben bereits vor etwa zehn Jahren gezeigt, dass die Wirkung des Tageslichts selbst dann positiv ist, wenn die natürliche Beleuchtung mit leicht nachweisbaren Problemen behaftet ist (z.B. Blendung durch Fenster, zu starke Wärmeeinwirkung aufgrund fehlenden Sonnenschutzes etc.). Alle untersuchten Symptome des Sick Building Syndrome hängen nach dieser Studie mit der Tageslichtversorgung des Arbeitsraums zusammen (Bild E.38). Je weiter der Arbeitsplatz im Rauminnern liegt, desto größer fallen die Beschwerden aus. Benutzer von Maschinen (Bildschirmgeräte, Schreibmaschinen) erleben häufiger Probleme, obwohl dies nach lichttechnischen Erkenntnissen eigentlich umgekehrt sein sollte.

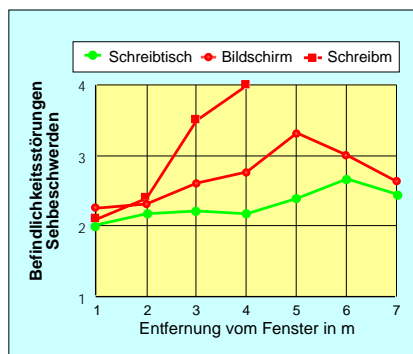


Bild E.38 Auftreten gesundheitlicher Probleme in Abhängigkeit von der Beleuchtung des Arbeitsplatzes (hier Sehbeschwerden). Je näher der Arbeitsplatz am Fenster platziert ist, desto geringer fallen die Probleme aus. /E.57/

Nach Karnstedt (<http://ionlight.com>, 1999 /E.34/) lässt sich SBS erfolgreich mit "richtigem" Licht bekämpfen, da er eine der Ursachen in mangelhafter Beleuchtung von Arbeits- und Lebensräumen sieht. Karnstedt beruft sich hierbei auf Dr. Richard Wurtman, einen Endokrinologen vom Massachusetts Institute of Technology (MIT), der eine Steuerung vieler Körperfunktionen von der Verdauung bis hin zur Immunabwehr mit Licht in Verbindung sieht, insbesondere mit Tageslicht, wobei dieses nicht unbedingt direkt durch Fenster einfallen muss, sondern auch durch Oberlichter, light pipes u.ä. in die Umgebung gelangen kann.

Eine bestimmte gesundheitliche Wirkung des Lichts, *SAD = seasonal affective disorder* bzw. *Winterdepression*, die bei bestimmten Personen als eine echte Erkrankung infolge des Lichtmangels auftritt, dürfte bei einem wesentlich größeren Kreis unspezifische Erscheinungen hervorrufen. Man spricht von etwa einem Viertel der Bevölkerung mittel- und nordeuropäischer Länder! Obwohl *saisonale Depressionen* bereits 400 v.Chr. bekannt waren, wurde die Ursache von SAD erstaunlicherweise erst im Jahre 1984 mit einer Veröffentlichung von Rosenthal et al. bekannt

(Rosenthal u.a., 1984) /E.42/. Da sich SAD erfolgreich mit Licht therapieren lässt, kann man davon ausgehen, dass sich seine Entstehung mit hinreichendem Licht natürlichen Ursprungs vermeiden lässt. Hierbei ist wichtig, dass man bei der Therapie mit Simulationen der Veränderung des Tageslichts in den Morgen- bzw. Abendstunden arbeitet, d.h. mit Umweltbedingungen, die Fenster und Oberlichter nebenbei liefern.

Im Jahre 1986 gelang es Czeisler und Kollegen, die Wirkung des Lichts als *Zeitgeber für die Tagesrhythmik* experimentell nachzuweisen (Czeisler u.a., 1986 /E.12/).

Neuere Forschungsarbeiten der Firma Philips, Eindhoven, zeigen einerseits, wie wichtig die Veränderung des Lichts für Wohlfühlen und Leistungsfähigkeit ist (Tenner, 1999 /E.51/, s. E.5.4 "Dynamik des Lichts als Einflussfaktor" auf Seite E.50). Andererseits zeigen sie auch die große Bedeutung des Tageslichts allgemein. Boyce (Boyce, 1998 /E.5/) stellt dar, dass es in dieser Hinsicht nicht gleichgültig ist, ob man künstliche oder natürliche Beleuchtung ändert, da eine Veränderung der künstlichen Beleuchtung (mit Hilfe einer geeigneten technischen Einrichtung) für den Benutzer vorhersehbar ist, während die Veränderung des Tageslichts einen Überraschungseffekt mit sich bringt und daher für den Menschen wesentlich interessanter ist. (Anm.: Dieses Verhalten ähnelt dem Verhalten von Menschen, die einen Unterschied darin sehen, ob sie ein gerngehörtes Musikstück zufällig im Radio hören oder selbst kaufen und auf eigenen Wunsch spielen.)

Boyce stellt auch dar, dass man durch sinnvolles Nutzen von Tageslicht belastende Sehvorgänge erleichtern kann, ohne dass unerwünschte Störwirkungen parallel auftreten, die eine Belastung für den Benutzer darstellen.

E.5.3 Künstliche Beleuchtung und Kopfschmerzen

Bereits in den 50-er Jahren war behauptet worden, dass künstliche Beleuchtung mit Leuchtstofflampen diverse Beschwerden, darunter auch Kopfschmerzen, verursache. Diesbezügliche Veröffentlichungen wurden in der Lichttechnik und Arbeitsphysiologie mit derartiger Empörung aufgenommen, dass bereits der Titel der (Gegen)Publikation eine grundlegende Ablehnung signalisierte. So betitelte der Sehphysiologe Prof. Schober seine Veröffentlichung vom Jahre 1950 "Die angeblichen Sehstörungen bei Beleuchtung durch Entladungslampen" (Schober, 1950 /E.44/). Einige Jahre später musste der gleiche Autor in der

gleichen Zeitschrift aufgrund der weiterhin bestehenden Klagen einen viermal so langen Artikel mit dem gleichen Titel schreiben (Schober, 1954 /E.45/), später sogar eine ganze "Gutachtliche Denkschrift zur Verträglichkeit des Leuchtstofflampenlichts" (Schober, 1971 /E.46/).

Zehn Jahre nach dieser Denkschrift haben Hartmann (der Nachfolger von Schober) und Müller-Limmroth, ein bekannter Arbeitsphysiologe, ihren Inhalt vollständig abgesegnet und bestätigt, dass die behaupteten Erscheinungen zwar nicht gelehnet werden können, aber auf "lichttechnische und arbeitshygienische Fehler" zurückzuführen sind, was immer man darunter auch verstehen mag (Hartmann und Müller-Limmroth, 1981 /E.29/). Im Vorwort dieser Schrift wird auf "*angebliche* Sehbeschwerden" verwiesen. Es wird u.a. ausgeführt: "Bei gleicher Lichtfarbe gibt es keinen Grund für eine unterschiedliche biologische Wirkung von Glühlampenlicht und Leuchtstofflampenlicht."

Hingegen hatten Çakir und Reuter (Çakir und Reuter, 1978 /E.11/) bei Untersuchungen an 1021 Arbeitsplätzen eine starke visuelle Belastung von Büromitarbeitern, insbesondere bei den am Bildschirm arbeitenden Personen, festgestellt. Sehbeschwerden als eine Erscheinungsform *asthenopischer Beschwerden*, die durch die Beleuchtung verursacht werden können, wiesen eine sehr hohe Korrelation zu körperlichen Beschwerden auf (0,59), wie sie in Feldstudien sehr selten vorkommt (Çakir, 1981 /E.8/). Zwischen *Augenbelastung* und *Kopfschmerzen* war bei jeder der untersuchten Tätigkeiten eine signifikante Korrelation feststellbar, ebenso zwischen der verwendeten Beleuchtung (Leuchtentyp) und der Belastung.

Diese Untersuchungen waren allerdings nicht geeignet, den Einfluss der verwendeten Lampenart zu ermitteln, weil praktisch alle untersuchten Arbeitsplätze mit Leuchtstofflampen beleuchtet waren. Den experimentellen Nachweis hat eine Doppelblind-Studie aus England (Wilkins u.a., 1989 /E.55/) erbracht.

In dieser Studie war zunächst festgestellt worden, dass das Auftreten von Augenbeschwerden und Kopfschmerzen kontinuierlich abnahm, je höher der Arbeitsraum im Gebäude angesiedelt war. Hieraus wurde festgestellt, dass der hierfür maßgebliche Faktor das *Tageslicht* war.

Die Studie von Wilkins u.a. hat weiterhin nachgewiesen, dass man durch Verwendung von elektronischen Vorschaltgeräten das Auftreten von Kopfschmerzen etwa halbieren kann. Somit haben sie den Beweis er-

bracht, dass die Aussage "Bei gleicher Lichtfarbe gibt es keinen Grund für eine unterschiedliche biologische Wirkung von Glühlampenlicht und Leuchtstofflampenlicht." falsch ist. (*Anm.: Es wäre interessant nachzufragen, wie solch eine Schlussfolgerung entstehen konnte.*)

Da der Anteil von verkauften Leuchten mit elektronischen Vorschaltgeräten lange Jahre sehr gering war und auch heute noch gering ist (ca. 25 - 30%), stellt die vorhandene künstliche Beleuchtung schon aus diesem Grund eine nachgewiesene Gesundheitsbelastung dar. Eine zusätzliche Versorgung mit Tageslicht mindert diese negative Wirkung.

Die Aussagen von Wilkins u.a. decken sich voll mit den Ergebnissen der Studie "Licht und Gesundheit" des ERGONOMIC Instituts (Çakir und Çakir, 1990, 1994, 1998 /E.11/), z.B. wie sie in Bild E.38 dargestellt werden. Die in diesem Bild dargestellte positive Wirkung des Tageslichts durch Seitenfenster kann demnach in ähnlicher Weise auch durch Oberlichter eintreten.

Während man die in "*Licht und Gesundheit*" festgestellte Wirkung zumindest teilweise auch auf die bessere Kommunikation mit der Umwelt infolge der besseren *Sichtverbindung* an fensternahen Arbeitsplätzen zurückführen könnte, ist der Nachweis der Tageslichtwirkung bei Wilkins u.a. schlüssiger, weil mit zunehmender Höhe über dem Boden die kommunikative Wirkung der Sichtverbindung abnimmt. Das bedeutet, dass der festgestellte Effekt eindeutig auf die visuelle Umgebung zurückzuführen ist, d.h. auf die *Lichtqualität*. Während Oberlichter hinsichtlich der Kommunikation mit der Außenwelt gegenüber Fenstern im Nachteil sind, können sie bei sachgerechter Ausführung hinsichtlich der Lichtqualität häufig vorteilhafter sein. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Rolle von Fenstern im *Arbeitsschutz* (s. Opfermann/Streit, 1999 /E.41/) primär nicht als Beleuchtung gesehen wird, sondern als ein Kontakt zur Außenwelt. Die Wirkung von Fenstern als Beleuchtung ist auf wenige Meter beschränkt, woran auch die vielfältigen Bemühungen um die Lichtlenkung ins Rauminnere wenig ändern können werden. Man nimmt hierbei einen Teil der Fensterfläche in Anspruch, die der Kommunikation mit der Außenwelt dient. Manche Konzepte nehmen sogar einen Großteil der Fensterfläche in Anspruch, um das Licht in das Rauminnere lenken zu können.

Mit *Oberlichtern* lassen sich auch beliebig tiefe Räume beleuchten, und dies mit wesentlich besserer Qualität und Quantität, als es je mit künstlicher Beleuchtung möglich werden kann. Der wesentliche

Nachteil besteht naturgemäß hinsichtlich einer ständigen Verfügbarkeit. Diese altbekannte Tatsache kann aber nicht herangezogen werden, um die künstliche Beleuchtung als die alleinige Lichtquelle für eine ordnungsgemäße Beleuchtung von Arbeitsstätten heranzuziehen, wie es selbst die obersten Arbeitsschützer getan haben: *“Da eine gleichmäßige und stets gleichbleibende Beleuchtung der Arbeitsplätze, Arbeitsbereiche und Verkehrswege über den gesamten Tag nur durch künstliche Beleuchtung zu erreichen ist, wird in der Arbeitsstättenverordnung die allgemeine Forderung des § 120 a Abs. 2 GewO nach genügendem Licht nur für die Beleuchtung mit künstlichem Licht im einzelnen präzisiert.”* (Opfermann/Streit, 1999) /E.41/ Eine solche Anforderung, eine gleichmäßige und stets gleichbleibende Beleuchtung über den ganzen Tag, ließe sich erstens durch nichts rechtfertigen und zweitens mühelos als Unsinn entlarven: Da man eine stets gleichbleibende Beleuchtung über den ganzen Tag nur mit Hilfe der künstlichen Beleuchtung realisieren kann, müsste nachgewiesen werden, welcher Gewinn an *Gesundheit und Sicherheit* hierdurch entsteht, wenn man die *“bessere”* Sicherheit mit Kopfschmerzen für jeden zweiten Mitarbeiter erkaufen muss.

E.5.4 Dynamik des Lichts als Einflussfaktor

Die Diskussion um den Fragenkomplex *“Licht und Gesundheit”* hat ein bestimmtes Thema ins Zentrum des Interesses gerückt, das bereits einmal in den 70-er Jahren im Rahmen der Entstehung von Großraumbüros diskutiert worden war: die *Konstanz der Umgebungsbedingungen*. Diese ist nicht etwa zufällig entstanden, vielmehr wurde sie als Teil des Gesamtkonzepts absichtlich eingeführt. Der Mensch als Arbeitnehmer sollte ungestört von widrigen Umgebungsbedingungen seiner Arbeit nachgehen. Hierzu sollte nicht nur eine wohltemperierte Umgebung geschaffen werden, sondern auch eine ständig in gleicher Art und Weise beleuchtete.

Die Idee ist nicht neu gewesen, sie wurde bereits in den 20er Jahren diskutiert, als man die Büroarbeit rationalisieren wollte. Es war die Hoch-Zeit des *“Office Management”*, man wollte mit allen Mitteln die Leistung der Mitarbeiter erhöhen. Eines der ersten Mittel, zu denen gegriffen wurde, war die Beleuchtung. Man hat in den 20er Jahren nicht nur fortwährend experimentiert, sondern in manchen Ländern die Angelegenheit sogar zur Staatsache erklärt, so auch in Deutschland. Die Vorstellungen aus dem ersten Drittel des 20. Jahrhunderts beschreibt Fritz wie folgt: *“Das Regulieren der Beleuchtungsverhältnisse in Ar-*

beitsräumen wird der freien Verfügung der Arbeitenden entzogen. An die Stelle der individuell handhabbaren Einzelplatzbeleuchtung tritt die zentral gesteuerte Allgemeinbeleuchtung. Über ihre Anzahl und zweckmäßige Verteilung verfügen nun Organisations- und Beleuchtungsspezialisten ... Mit der Einführung der zentralgesteuerten Allgemeinbeleuchtung im Arbeitssaal wird der Prozeß der Zentralisierung arbeitsräumlicher Verfügungsmacht vervollständigt. Die Fremdbestimmung der räumlichen Arbeitsbedingungen ist umfassend. Die persönliche Aneignung der unmittelbaren Arbeitsumwelt ist nun ganz und gar eingeschränkt. Die für die Büroarbeit notwendige Anpassbarkeit an individuelle Beleuchtungsbedürfnisse fehlen. Individuelle Unterschiede der Sehstärken, die Altersabhängigkeit der Lichtbedürfnisse, sowie krankhafte Sehstörungen bleiben unberücksichtigt und der rigiden Uniformität der künstlichen Raumbelichtung ausgesetzt." (Fritz, 1982 /E.22/).

Bei genauerem Hinsehen stellt man fest, dass die gleichen Mittel auch bei der Hühnerzucht angewendet werden. Selbst eine fundierte und später sehr häufig zitierte Publikation des Direktors des Ophthalmologischen Instituts der Universität von London, Weston, konnte in dieser Hinsicht nicht viel anrichten. Weston (Weston, 1954 /E.56/) führte in seiner Arbeit zur *Augenermüdung* u.a. Folgendes aus: "*Unterschiedliche Helligkeitsverteilungen, unterschiedliche Helligkeitsniveaus gelten als ermüdend und einschläfernd. Um dies zu vermeiden, unterdrückt man visuell stimulierende Veränderungen in der Umgebung. **Aber Veränderung ist sogar mehr als die Würze des Lebens, sie ist die unverzichtbare Bedingung bewussten Lebens.***" Er fährt fort: "*Befürworter des in Mode gekommenen Helligkeits-Engineering haben empfohlen, dass ideale visuelle Bedingungen dann herrschen, wenn eine gleichförmige Helligkeit im Gesichtsfeld hergestellt wird. Es gibt nichts in der Physiologie, was diese Vorstellung unterstützt. ... Es gibt eine inhärente Eigenschaft der modernen künstlichen Beleuchtung, die nicht anstrebenswert ist. Das ist ihre Konstanz - eine viel gelobte Eigenschaft, von der behauptet wird, sie begründe die Überlegenheit der künstlichen Beleuchtung gegenüber der wechselhaften natürlichen Beleuchtung. Jedoch, **auch wenn Konstanthaltung von Bedingungen für einige kritische Sehaufgaben anstrebenswert ist, Konstanz ist eine nervtötende und abstumpfende Eigenschaft der künstlichen Beleuchtung.***" (Übersetzung aus dem Englischen durch den Verfasser)

Erst in den letzten Jahren wurden in der Lichttechnik Schritte eingeleitet, die bereits seit einem halben Jahrhundert bekannten Probleme anzugehen. So ha-

ben zwei Leuchtenhersteller Projekte eingeleitet, um Wirkungen des "dynamischen" Lichts zu erforschen. Die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich untersucht Wege, wie man durch "Harmonisches Licht" eine Steigerung des Wohlbefindens und der Produktivität erzielen kann (Fleischer u.a., 1998 /E.18/). In den Forschungslaboratorien von Philips in den Niederlanden werden seit dem Anfang der 90-er Jahre veränderliche Lichtsituationen untersucht (Begemann u.a., 1994 /E.1/; Begemann u.a., 1996 /E.2/). Diese Studien haben u.a. ergeben, dass die Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene von sehr untergeordneter Bedeutung ist (Fleischer u.a., 1998 /E.18/) und dass das Ausbalancieren der räumlichen Leuchtdichteverhältnisse wichtig ist (s. E.3.3 "Leuchtdichte und ihre Bedeutung" auf Seite E.27).

Die jetzt untersuchten Effekte sind in der Psychologie längst bekannt gewesen: Veränderlichkeit der Umgebung gilt ohne Zweifel als Stimulans. Die Aussagen von Weston zeigen nicht zuletzt, dass dies auch in der Physiologie der Fall gewesen ist.

Die hier diskutierten Erkenntnisse zeigen, dass Oberlichter allein durch die Veränderlichkeit der von ihnen erzeugten Beleuchtung als Stimulans angesehen werden können und zum Wohlbefinden und zur Gesundheit beitragen. Dass das Licht nicht immer in ausreichender Quantität zur Verfügung steht, macht es zwar erforderlich, dass man sie mit künstlicher Beleuchtung koppeln muss. Dies erlaubt aber andererseits, reizvolle Umgebungen zu realisieren (s. z.B. die Lichtsituation in Bild E.7 auf Seite E.15).

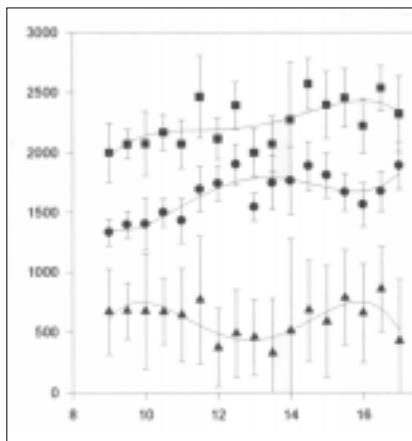


Bild E.39 Beleuchtungsstärkeverlauf in einem experimentellen Arbeitsraum /E.52/

E.5.5 "Lichtmangel" als Einflussfaktor

E.5.5.1 Zur Lichtquantität

Dass Licht unser ganzes Wesen als Mensch beeinflusst, d.h. sowohl Körperfunktionen als auch die Psyche, ist seit langem bekannt. Jeder Mensch erlebt Licht am eigenen Leibe, allerdings i. Allg. mehr unbewusst als bewusst. Auf welche Art und in welchem Maße Beleuchtung, d.h. die zielgerichtete Anwendung von Licht, den Menschen beeinflusst, ist indes noch wenig bekannt. Feststellbar ist, dass die Benutzung der künstlichen Beleuchtung während des Tages in den meisten Arbeitsumgebungen mit einem Mangel an natürlichem Licht, genauer gesagt, natürlicher Strahlung einhergeht. Da die künstliche Beleuchtung, so überdimensioniert die Beleuchtungsanlage vielen Benutzern auch erscheinen mag, selten die Quantität an Licht erzeugt, die aus der natürlichen Quelle stammt (s. Bild E.39), kann man berechtigterweise von einem Lichtmangel sprechen. Und Licht-

mangel selbst kann die gesuchte Ursache für die negativen Wirkungen der Beleuchtung sein.

Eine Untersuchung aus einer Umgebung, die man gewöhnlich mit Sonnenschein assoziiert, aus dem Süden von Kalifornien, hat gezeigt, dass heutige Menschen nur weniger als eine Stunde am Tag Beleuchtungsstärken über 10.000 lx ausgesetzt sind (Boyce, 1998 /E.5/). Sollte dies für große Bevölkerungsteile stimmen, kann die eigentliche Ursache der scheinbar von der künstlichen Beleuchtung verursachten Probleme im Fehlen der natürlichen Beleuchtung bzw. Strahlung liegen, da in natürlichen Umgebungen, in denen die Menschheit entstanden ist, die Beleuchtungsstärke Maximalwerte um 120.000 lx aufweist, mit einer Exposition zu Beleuchtungsstärken zwischen 5.000 und 100.000 lx von etwa 12 Stunden täglich. Das bedeutet, dass der Mensch bei der Arbeit und in der Freizeit nur einen Bruchteil derjenigen *Strahlungsmenge* erhält, die bei natürlichen Lebensweisen auf ihn einwirken und seine Körperfunktionen steuern würden. Die Beleuchtungsstärken, mit denen man die Produktion von Melatonin während des Tages verhindern kann, liegen bei 2.500 lx und höher. Ob man dies auch mit geringeren Beleuchtungsstärken erzielen kann, ist fraglich. Gemeint sind Beleuchtungsstärken auf der Pupille.

Das bedeutet aber auch, dass bestimmte Wirkungen von künstlicher Beleuchtung durch "zu wenig Licht" verursacht werden. Das gilt auch für Menschen, die ihre Arbeitsumgebung "zu hell" finden. Wie bereits erwähnt, können dieselben Menschen, die 500 lx in Arbeitsräumen als zu hell empfinden, 5.000 lx im Freien als eine Art Dunkelheit erleben.

E.5.5.2 Lichtquantität in Arbeitsumgebungen

Wenn man davon ausgeht, dass Arbeitsplätze normgerecht beleuchtet und betrieben werden, liegt die *Beleuchtungsstärke* in künstlich beleuchteten Arbeitsstätten bei 500 lx (horizontal). Wenn man weiterhin davon ausgeht, dass die Blickrichtung etwa horizontal ist, beträgt die Beleuchtungsstärke auf der Pupille maximal 250 lx, in der Regel aber 150 lx bis 200 lx.

In der Regel muss man davon ausgehen, dass diese Annahmen nach unten korrigiert werden müssen. Beispielsweise betragen die in der Norm empfohlenen Werte für viele Arbeitsbereiche nur 300 lx bzw. 250 lx. Da Beleuchtungsanlagen entgegen der Annahme in der Projektierung sehr selten gewartet werden, sind die tatsächlichen Beleuchtungsstärken weitaus geringer.

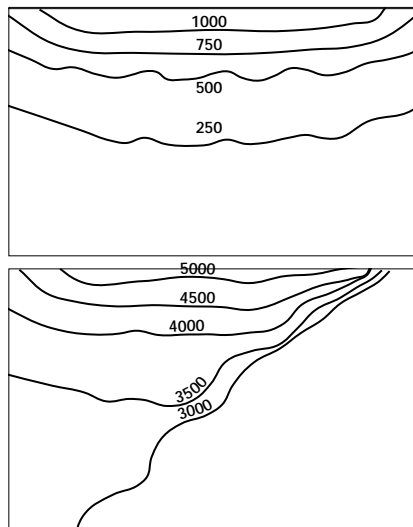


Bild E.40 Beleuchtungsstärken in einem nördlich (oben) und östlich (unten) ausgerichteten Raum am 21. Jan., morgens um 09.00, nördliche Breite 40° (nach /E.54/)

In der Praxis muss man zudem damit rechnen, dass Benutzer das Einschalten des künstlichen Lichts gerne vermeiden, wenn sie es als unangenehm erleben. Nach den Untersuchungen von Wilkins u.a. (Wilkins u.a., 1989 /E.55/) wurde die als unangenehm erlebte Beleuchtung mit üblichen Leuchten um 30% weniger in Anspruch genommen als die als angenehmer empfundene. Nach unseren Erfahrungen könnte dieser Prozentsatz sogar höher sein. Das bedeutet, dass die Arbeitnehmer in den meisten künstlich beleuchteten Umgebungen Beleuchtungsstärken ausgesetzt sind, die im zeitlichen Durchschnitt etwa bei 100 lx auf der Pupille liegen. Dennoch behaupten viele Menschen, das Licht sei "zu hell", was vermutlich eher an der Blendung liegt.

Mit der *natürlichen Beleuchtung* können Beleuchtungsstärken in völlig anderen Dimensionen erzeugt werden (Bild E.40). Es ist zu berücksichtigen, dass die abgebildeten Werte durch Fenster (vertikal) erzeugt, aber horizontal gemessen werden. Der wahre Wert ist daher größer.

Aus diesen Daten wird unmittelbar ersichtlich, dass das Versprechen der *künstlichen Beleuchtung*, "Hell wie der lichte Tag", auch ein halbes Jahrhundert nach seinem Entstehen nicht eingelöst ist. Sie wird in nächster Zukunft auch nicht eingelöst werden können, weil ökologische Überlegungen eher eine Energieeinsparung nahelegen als eine Vergrößerung der installierten Leistung.

Bei gleichem Energieaufwand eine höhere Lichtleistung zu erzielen, stößt an physikalische Grenzen. So ist bei der Leuchtstofflampe die Grenze bei der doppelten der heute erreichten *Lichtausbeute* vorgegeben, wenn das Licht "weiß" sein soll. Ob man dann noch von Farbwiedergabe sprechen kann, sei dahingestellt. Mit natürlichem Licht wird man daher eher in der Lage sein, helle und stimulierende Umgebungen zu realisieren. Wir wissen ja mittlerweile, dass sie nicht ständig gleich hell sein müssen. Es gibt sichere Anzeichen dafür, dass die positive Wirkung der hellen Umgebung nicht von ihrer ständig gleichbleibenden Helligkeit abhängt, sondern vielmehr von der "*Lichtdosis*", die auf den Menschen einwirkt. Diese könnte man naturgemäß auch durch eine einstündige Wanderung im Stadtpark mittags bekommen, dazu müsste aber die längst abgeschaffte Siesta in neuer Form wieder eingeführt werden.

Die hier diskutierte Wirkung des Lichts wird nicht durch die Beleuchtungsstärke, d.h. die momentane Größe der Lichtintensität, ausgelöst, sondern vermutlich durch die "*Belichtung*". Diese setzt keineswegs voraus, dass die Lichteinwirkung stets gleich-

bleibend erfolgen müsse. Vielmehr genügt es, dass eine bestimmte Beleuchtungsstärke über einen bestimmten Zeitraum überschritten wird. Die künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten kann die erforderlichen Werte unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien nicht erbringen. Ob es überhaupt Sinn machen kann, das frei verfügbare Tageslicht auszusperrern und mit einem hohen Energieaufwand ein hohes Niveau mit künstlicher Beleuchtung zu realisieren, sei dahingestellt. Mit *Oberlichtern* lässt sich die erforderliche "Dosis" Licht wirtschaftlich realisieren, auch wenn nicht in jedem Gebäude. Nach Luftbildern zu urteilen hat man in Deutschland diese Chance noch nicht wahrgenommen, da bislang etwa 1% der potentiell geeigneten Fläche mit Oberlichtern ausgestattet ist.

E.5.6 Einflüsse des Lichts mit spezifischen Auswirkungen

Wie wissenschaftliche und praktische Erkenntnisse z.B. aus den Gebieten *Photobiologie*, Heliotherapie oder *SAD-Therapie* zeigen, besitzt Licht vielfältige Einwirkungsmechanismen auf den menschlichen Körper, die sich positiv auswirken. Im Umkehrschluss kann man annehmen, dass unterbliebene positive Einwirkungen zu Erkrankungen führen können. Dass eine solche Annahme zu Recht erfolgt, kann man z.B. aus der Historie der Rachitis und ihrer Abhängigkeit vom Licht ableiten, die etwa ein Jahrhundert gedauert hat.

Die derzeit diskutierten Wirkungen betreffen z.B. die Entstehung von Brust-, Dickdarm- und Prostatakrebs, bei denen man eine geografische Abhängigkeit festgestellt hat (Holick, 1999 /E.32/). Diese Wirkungen sollen indirekt mit der *Vitamin D-Produktion* zusammenhängen, mit einem Wirkstoff, für den Krebszellen verschiedener Art Rezeptoren besitzen.

Es ist nachgewiesen worden, dass z.B. die Überlebensrate bei Brustkrebs dort höher ist, wo mehr Sonnenlicht auf den Menschen einwirkt (Bild E.41). Ähnliche Ergebnisse haben epidemiologische Untersuchungen aus der früheren Sowjetunion gezeigt (Garland u.a., 1999 /E.23/).

Ein zweiter Wirkungspfad besteht über die *Melatoninproduktion*, die durch *Lichteinwirkungen* gefördert, aber auch behindert werden kann. So behindert künstliche Beleuchtung die natürliche Melatoninproduktion, wenn sie in den Dunkelstunden genutzt wird. Dieser Effekt, über längere Zeit wirksam, bewirkt eine Minderung der Östrogenproduktion bei Frauen und kann hierdurch eine Erhöhung des *Brust-*

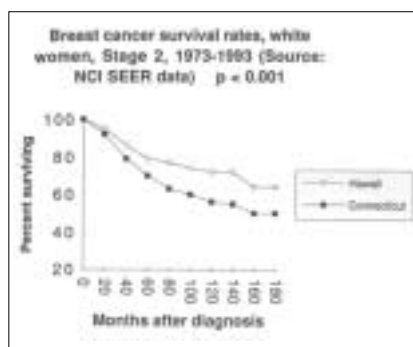


Bild E.41 Überlebensrate von krebskranken weißen Frauen in unterschiedlichen geografischen Regionen der USA /E.33/

krebsrisikos nach sich ziehen (Hahn, 1991 /E.25/; Stevens und Anderson, 1998 /E.50/).

Diesbezügliche Wirkungen des Lichts stehen derzeit im Mittelpunkt des Interesses sowohl in der Medizin als auch in der Arbeitsmedizin. Die noch vor wenigen Jahrzehnten von Arbeitsmedizinern vertretene Ansicht, dass der Ausschluss von *Tageslicht* keine negativen Wirkungen auf die Gesundheit haben könne (s. hierzu Çakir, A. und Çakir, G., 1998 /E.9/), wird heute ebenso wenig Gehör finden wie die Behauptung, man könne mit künstlichen Lichtquellen tageslichtähnliche Situationen schaffen. Vielmehr ist damit zu rechnen, dass die medizinische Forschung noch mehr Erkenntnisse über die positive Wirkung des Tageslichts zu Tage fördern wird, als es bislang geschehen ist.

Obwohl die Entdeckung der Wirkung des Tageslichts auf die Gesundheit sowohl in therapeutischer als auch in prophylaktischer Hinsicht fast zwei Jahrhunderte zurück liegt und bereits vor einem Jahrhundert ein Nobelpreis für Medizin an einen deutschen Forscher wegen des Nachweises bestimmter Lichtwirkungen auf die menschliche Biologie verliehen wurde, ist man heute weit davon entfernt, zu behaupten, man habe alle bedeutsamen Wirkungen des Lichts auf den Menschen zweifelsfrei identifiziert. Ein Symposium, das am 25. Februar 2000 an der Technischen Universität Berlin zum Thema "*Licht und Gesundheit*" abgehalten wurde, machte deutlich, dass sich die Forschung über die Auswirkungen der Beleuchtung auf die Gesundheit erst am Anfang befindet.

Ein solcher Befund verträgt sich zwar nicht mit unserer Vorstellung, dass sich die Welt stets so schnell wie möglich neue Erkenntnisse erarbeite, und dass sich so wichtige und dringende Sachverhalte wie Gesundheit ganz oben auf der Prioritätenliste fänden, dennoch lassen sich viele Parallelen zur Behandlung von Licht in der Industriegesellschaft finden. Man muss sich, zuweilen widerstrebend, damit abfinden, dass so grundlegende Dinge wie *saisonale Depressionen* bereits 400 v.Chr. bekannt waren, aber die Ursache von SAD erstaunlicherweise erst im Jahre 1984 mit einer Veröffentlichung von Rosenthal et al. bekannt wurde (Rosenthal et al., 1984 /E.42/).

E.6 KUNSTLICHT UND TAGESLICHT

E.6.1 Zur Notwendigkeit einer Synergie

Anders als in der Antike, als man - nicht gerade freiwillig - menschliche Siedlungen nach der günstigsten Nutzung des Tageslichts als Licht- und Energiequelle anlegen konnte, leben Menschen heute zu einem großen Teil in dichtbesiedelten Städten. Daher werden wir in vielen Umgebungen nicht ohne künstliche Beleuchtung auch bei Tage auskommen können. In manchen Umgebungen besitzt diese sogar unschlagbare Vorteile, z.B. dort, wo man eine bestimmte Wirkung unabhängig von der Zeit stets beherrschbar erzielen möchte.

Da der Weg zu einer 24-Uhr-Gesellschaft in der Arbeitsorganisation vorgezeichnet ist, wird die Verwendung von künstlicher Beleuchtung noch zunehmen. Es ist daher unsinnig, sich auf "natürliche" Lebensweisen einzustellen, die es übrigens bereits zu Zeiten unserer Eltern und Großeltern nicht mehr gegeben hat.

Auf der anderen Seite wurde nicht nur in diesem Bericht dargestellt, dass die weitgehend künstliche Umwelt, in der es kein Tageslicht oder keine natürliche Belüftung gibt, zumindest in Europa auf scharfen Widerstand gestoßen ist. Dieses Verhalten wird, da Menschen in den USA angeblich anders reagieren sollen, nicht selten auf unsere etwas altmodische Einstellung zurückgeführt. Dort sind tatsächlich etwa 60% der Büroarbeitsplätze in Großraumbüros, bzw. besser gesagt als Bürozellen in Hallen, untergebracht. Zudem hat man in einem Großteil der Bürohäuser in den USA eine Lösung bezüglich des *Tageslichts* gefunden, über die nicht nur Europäer den Kopf schütteln (DeMarco und Lister, 1991 /E.13/): Da es ungerecht wäre, manchen Mitarbeitern ein Fenster zuzugestehen, werden die Fensterzonen als Gang benutzt, alle Arbeitsplätze nach innen verlegt. Es handelt sich hierbei ausdrücklich nicht um Realsatire, sondern, wie die Autoren DeMarco und Lister sie bezeichnen, um "Die einheitliche Plastiketage".

Man sollte sich allerdings davor hüten, dies als ein generelles Bild vom amerikanischen Leben und Arbeiten zu verstehen. Ein Großteil der USA ist Agrarland bzw. unendliche Prärie, viele Städte bestehen aus ein- bzw. zweistöckigen Häusern, und die meisten Amerikaner arbeiten nicht in "Plastiketagen". Man muss auch verstehen, dass dort die natürliche Umwelt zuweilen regelrecht menschenfeindlich ist. So war die Hauptstadt Washington bis zur Erfindung des "air conditioning", also der Klimaanlage, für mehrere Monate im Jahr wegen klimatischer Verhältnisse "arbeitsfeindlich". In diesen Monaten hielten es nur wenige dort aus.

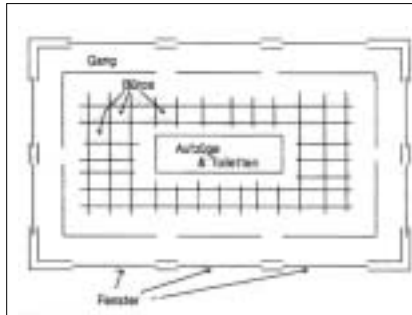


Bild E.42 "Die einheitliche Plastiketage" nach DeMarco und Lister. Die Bürozellen werden zu den Fenstern hin durch hohe Stellwände abgeschottet, in der Fensterzone befinden sich keine Arbeitsplätze (mit Ausnahme von eventuell dort beschäftigten Sekretärinnen). /E.13/

In vielen anderen Teilen der Welt sieht es auch nicht anders aus als in den USA. Problem dabei ist, dass "Die einheitliche Plastiketage" in Kanada, Thailand, Japan, Australien oder Südafrika gleich aussieht und auch in Deutschland gelegentlich anzutreffen ist. Sie wurde in den 80er Jahren in Deutschland sogar als besondere Errungenschaft propagiert, als "Intelligent Buildings". Da die besondere "Intelligenz" dieser Gebäude darauf ausgelegt war, alle Umgebungsbedingungen, soweit möglich, konstant zu halten, ist der Ruf nach ihnen recht schnell verhallt. Nomen war eben nicht omen.

Schlecht war die Idee indes nicht, wenn man sie richtig ausformuliert hätte: Wie kann man in einem gegebenen Kontext den jeweiligen menschlichen Bedürfnissen unter sparsamer Verwendung von Ressourcen möglichst effektiv Genüge leisten? Das Konzept der *Gebrauchstauglichkeit* (E.2.6 "Gebrauchstauglichkeit und ihre Maße" auf Seite E.16) bietet hierzu den notwendigen theoretischen Hintergrund.

Legt man die Bedürfnisse bezüglich des Sehens und einer gesunden Umgebung unter sparsamer Verwendung von Ressourcen zu Grunde, wird man vermutlich nicht um ein Konzept herumkommen, das eine gegenseitige Ergänzung von Kunst- und Tageslicht zum Gegenstand hat. Allzu neu ist die Idee indes nicht, war sie doch für Tausende von Jahren maßgeblich für die Architektur. Sie ist nur in der Euphorie um die künstliche Beleuchtung für etwa 50 Jahre in Vergessenheit geraten.

Eine gegenseitige Ergänzung könnte im Trivialfall bedeuten, dass man notgedrungen elektrisches Licht einschaltet, wenn natürliches nicht mehr ausreicht. Sie kann aber auch heißen, dass alle umbauten Umgebungen nach bester Nutzung von natürlichen und sonstigen Ressourcen ausgelegt werden. Von Synergie wird gesprochen, wenn sich einzelne Effekte nicht nur addieren, sondern gegenseitig verstärken. Gebäude, in denen man Synergien realisiert, wären echte Kandidaten für "Intelligent Buildings".

E.6.2 Wie weit kann ein Gebäude "tageslichtautonom" werden?

Unter "Tageslichtautonomie" versteht man die Emanzipation eines Gebäudes in seiner Nutzung von künstlicher Beleuchtung. Die triviale Antwort auf die Frage wäre, dass diese im Jahresdurchschnitt maximal etwa 11 Stunden täglich wäre, weil der helle Teil des Tages im Mittel genau 12 Stunden dauert. Mit dieser Auskunft kann man überhaupt nichts anfangen, da ein Mitteleuropäer nicht immer während des

Wie weit kann ein Gebäude "tageslichtautonom" werden?

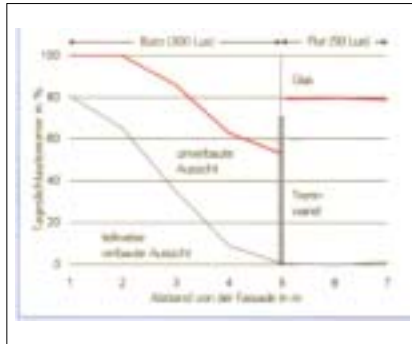


Bild E.43 Rechnerische Tageslichtautonomie eines nach Tageslichtnutzung optimierten Gebäudes /E.53/

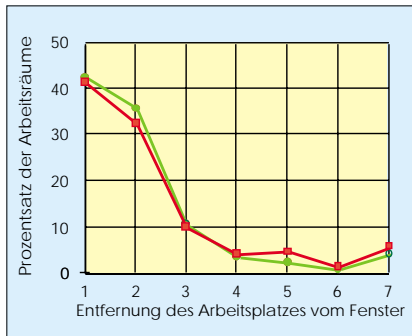


Bild E.44 Häufigkeit der Entfernung von Büro- bzw. Bildschirmarbeitsplätzen vom nächsten Fenster /E. 9/

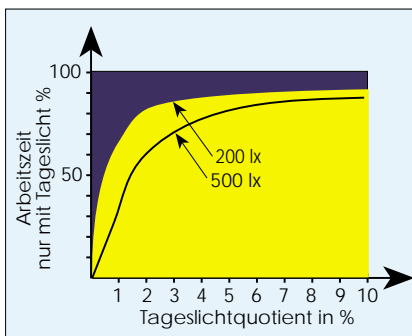


Bild E.45 Arbeitszeit nur mit Tageslicht in Abhängigkeit vom Tageslichtquotienten (Ort: Berlin, Arbeitszeit 07.00 bis 16.00) (nach /E.19/)

hellen Tages arbeitet und sein Arbeitsplatz auch nicht immer am Fenster untergebracht ist.

Dennoch ist die Frage nicht ohne besonderen Reiz, weil unsere Arbeitszeiten im Wesentlichen - nicht ohne Grund - mit dem hellen Teil des Tages zusammenfallen. Falls man z.B. Oberlichter nach der Daumenregel auf 4% bis 10% Tageslichtquotient auslegt und eine Arbeitszeit von acht Stunden zwischen 08.00 und 18.00 zu Grunde legt, ist eine recht hohe Tageslichtautonomie auch in Deutschland keine Utopie.

Auch bei seitlich befensterten Räumen ist die Tageslichtautonomie keineswegs so gering, wie man gemeinhin annimmt. Wie groß diese sein kann, zeigt Bild E.43 (Voss u.a., 1999 /E.53/).

Wenn das Gebäude ohne Verbauung in der Landschaft steht, können alle Arbeitsräume bis zwei Meter von der Fassade zu etwa 100% der Arbeitszeit mit ausreichendem Tageslicht versorgt werden. Wie viele das z.B. in Deutschland sein werden, kann man Bild E.44 entnehmen: ca. 70% der Büroarbeitsplätze. Es wäre eine Überlegung wert, warum genauso viele Menschen in konventionellen Büros dicht am Fenster sitzen wie in Büros mit Bildschirmgeräten, wo doch das Tageslicht so viele negative Wirkungen ausüben soll.

Man kann also, ohne eine Widerlegung befürchten zu müssen, behaupten, dass ein deutscher Büroarbeitsplatz ein *Tageslichtarbeitsplatz* ist, der zu bestimmten Zeiten künstlich beleuchtet werden muss.

Wie es an anderen Arbeitsplätzen aussieht, wäre eine genaue Betrachtung wert, da z.B. viele Industriearbeitsplätze aus statischen Gründen in eingeschossigen Gebäuden untergebracht sind. Dort eine Tageslichtautonomie für einen Großteil des Jahres zu erreichen, wäre zumindest theoretisch kein Problem.

Wie Bild E.45 zeigt, kann beispielsweise ein Industriebetrieb in Berlin (Arbeitszeiten 07.00 bis 16.00) ab einem *Tageslichtquotienten* von 2% über 80% der Jahresarbeitszeit ohne künstliche Beleuchtung auskommen, wenn keine besonderen Anforderungen an die Sehleistung gestellt werden (Beleuchtungsstärke ~ 200 lx). Bei höheren Anforderungen (z.B. 500lx) benötigt man einen Tageslichtquotienten von ca. 5%, um über 80% des Jahres ohne Kunstlicht arbeiten zu können.

E.6.3 Wie man Kunstlicht und Tageslicht "verheiratet"

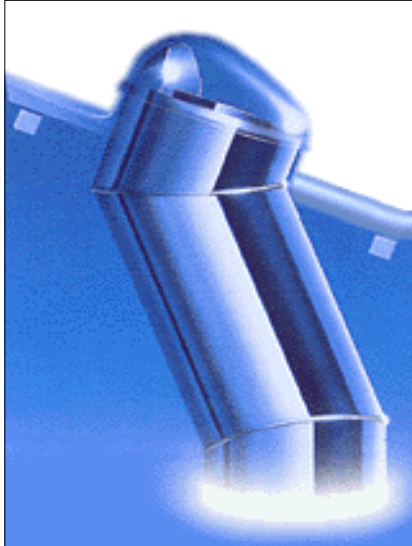


Bild E.46 Ein Lichtschlauch bzw. "light pipe", der das Himmelslicht einfängt und weiter transportiert /E.48/.



Bild E.47 Oberlichter am San Diego Airport /E.48/

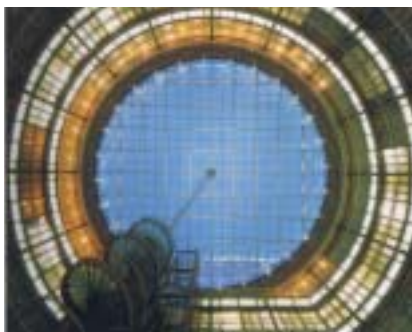


Bild E.48 Beispiel für eine Verbindung von Oberlichtern mit künstlicher Beleuchtung /E.24/

Es ist recht einfach zu demonstrieren, wie man künstliche und natürliche Beleuchtung in Synergie bringen kann, weil sie z.T. ähnliche physikalische Eigenschaften besitzen. Am einfachsten kann dies mit dem "Lichtschlauch" erfolgen, der dazu dient, das eingefangene Tageslicht dorthin zu leiten, wo es gebraucht wird (Bild E.46). Das obere Ende von der Einrichtung stellt eine Art Lichtkuppel dar, während das untere Ende einer Leuchte entspricht, die das Licht den jeweiligen Bedürfnissen entsprechend in den Raum lenkt. Technisch gesehen ist es eine Kleinigkeit, die künstliche Beleuchtung an die Tageslichtbeleuchtung anzukoppeln, da man ähnlichen Wirkungen nachgeht. So lässt sich z.B. ein solches *Oberlicht* wie in Bild E.47 ohne weiteres mit Leuchten für künstliche Beleuchtung kombinieren. Eine Dimmschaltung übernimmt den Übergang zwischen Tag- und Nachtsituationen. Wie dies in der Praxis realisiert werden kann, zeigt Bild E.48, wo Leuchten mit einem Oberlicht kombiniert sind.

Während man bei den dargestellten Beispielen eine gleichartige Wirkung durch Tageslicht und künstliche Beleuchtung erzielen will bzw. kann, wäre es reizvoll, unterschiedliche Umgebungen zu schaffen, die dem Menschen zeigen, wo er sich gerade in der Zeitachse befindet. Ein hervorragendes Beispiel hierzu sind die Räume des deutschen Parlaments in Berlin, bei deren Gestaltung das Tageslicht eine herausragende Rolle gespielt hat. So ist das Symbol der neuen deutschen Republik eine Kuppel, die tagsüber das Sonnenlicht in den Raum lenkt, wo die oberste Instanz der Demokratie, das Plenum des Deutschen Bundestags, zusammentritt (Bild E.49). Dieselbe Kuppel sendet aber in der dunklen Tageshälfte Signale nach außen. Sie ist das "Ober-Oberlicht". Auch viele andere Räume der neuen Parlamentsgebäude in Berlin werden durch *Oberlichter* natürlich beleuchtet. Es bleibt zu erwähnen, dass auch der letzte Plenarsaal des deutschen Parlaments in Bonn ein Tageslichtbau gewesen ist.

Wie erfolgreich man Oberlichter mit künstlicher Beleuchtung koppeln und dabei nicht nur *Funktionalität* und *Gesundheit* als Ziel verfolgt, zeigt Bild E.50. Die Leuchten für die künstliche Beleuchtung sind nicht als bloße technische Elemente ausgebildet, sondern auch als raumbildende Objekte.

In der Regel stellt eine Kopplung von Oberlichtern mit künstlicher Beleuchtung keine besonderen Probleme, weil Deckenleuchten und Oberlichtöffnungen ähnliche Funktionen erfüllen können.

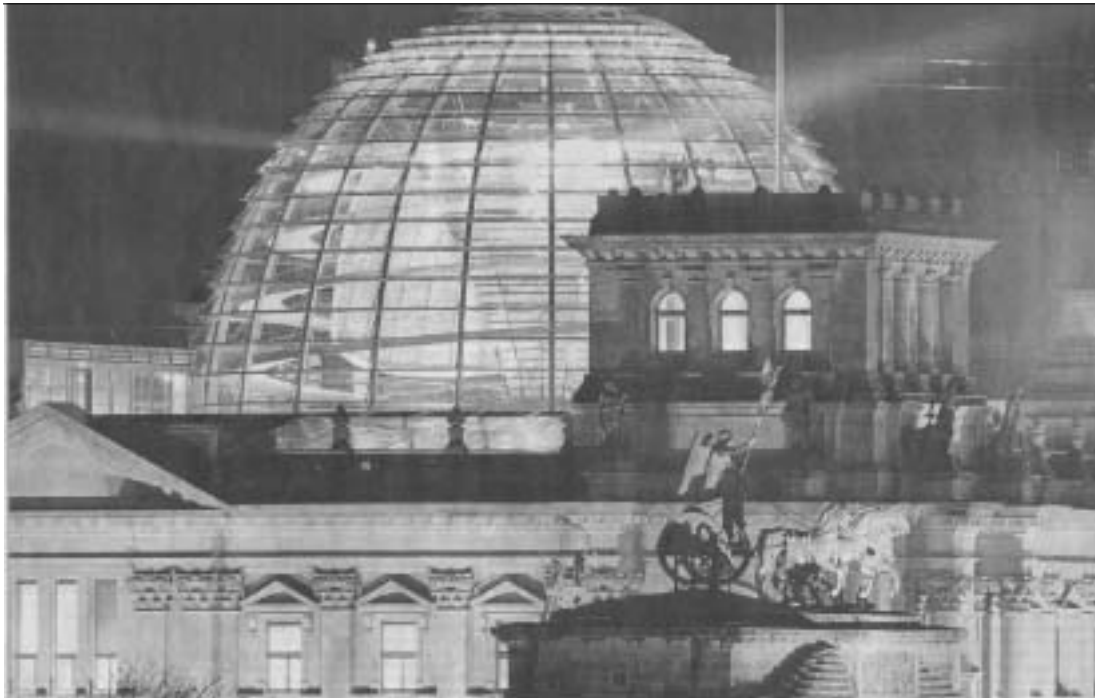


Bild E.49 Kuppel des Reichstags in Berlin bei Nacht
Bei Tage sammelt ein Lichtleitsystem das Tageslicht ein, um es in den Plenarsaal zu leiten. Nachts kann die Kuppel Botschaften aussenden, wie die Laserstrahlen in diesem Bild. (Der Tagesspiegel, Berlin)



Bild E.50 Beispiel für eine Kombination von Kunstlicht und Tageslicht
Ein Lichthof bei Nacht und bei Tage. Die Effekte lassen sich über die beiden Situationen hinaus fortsetzen, so z.B. mit einer Lichtdecke nachts bzw. künstlicher Beleuchtung der Wandelgänge tagsüber. /E.20/

E.7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wie in diesem Bericht dargelegt, ist das *Tageslicht* sowohl in funktionaler Hinsicht als auch in emotionaler sowie medizinischer Sicht der künstlichen Beleuchtung überlegen. Dass seine Wechselhaftigkeit nicht nur einen Nachteil gegenüber einer konstanten künstlichen Beleuchtung bedeutet, war bereits in der Mitte des 20. Jahrhunderts belegt worden. Neuere Forschungsvorhaben zum "dynamischen" Licht, die in den letzten 10 Jahren angestoßen worden sind, greifen diese Erkenntnisse auf und wenden diese auf die künstliche Beleuchtung an.

In funktionaler Sicht kann ausgesagt werden, dass der schon immer bekannte Mangel des Tageslichts, die fehlende Steuerbarkeit, zwar überall dort eine beeinträchtigte bzw. nicht vorhandene *Gebrauchstauglichkeit* bedeutet, wo die Sehaufgabe präzise Anforderungen stellt. Sie berechtigt aber nicht zu der Annahme, dass das besser beherrschbare Kunstlicht in funktionaler Sicht dem Tageslicht etwa überlegen sei, sofern man den helleren Teil des Tages betrachtet. In mehreren Punkten lässt sich eher das Gegenteil zeigen. Dies wird heute sogar von Firmen anerkannt, die Jahrzehnte lang das Bewusstsein aller Beteiligten geprägt haben. So ist heute im Internet-Angebot der Firma OSRAM zu lesen:

"Licht bedeutet Energie, Leben, Information.

Das Tageslicht gibt Qualitäten und Gesetzmäßigkeiten vor, die als Richtwerte bei der Optimierung von künstlichem Licht gelten." (s. auch Bild E.51)

In funktionaler Sicht lässt sich neben einer teilweise besseren Unterstützung von Sehfunktionen durch das Tageslicht bzw. durch Oberlichter (z.B. günstigere Kontrastwiedergabe, bessere Modellierung, zeitweilig höhere Beleuchtungsstärken als mit Kunstlicht erreichbar) auch die mittelbare Erhöhung der Leistungsfähigkeit durch die Dynamik des Lichts nachweisen. Das Letztere versuchen Leuchten- bzw. Lampenhersteller mühsam mit technischen Mitteln zu realisieren, während es bei Tageslicht kostenlose Dreingabe ist.

Das "*Beleuchtungsniveau*", das von allen Lichttechnikern als ein sehr wichtiges Kriterium angesehen wird, lässt sich mit natürlichem Licht zwar nicht über 24 Stunden, stets abrufbar, konstant halten. Aus Sicht des arbeitenden Menschen ist dies aber genauso unerheblich wie in der Privatsphäre, bei der auch niemand wünscht, dass sein Haus in der Nacht genauso beleuchtet ist und aussieht wie tagsüber. Eher der Wechsel, die *Dynamik* ist gewünscht. Allerdings ist Voraussetzung, dass bei Bedarf das erforderliche Ni-



Bild E.51 Illustration im *www* zur Frage "Was ist Licht" auf der Seite "[http://ES GIBT LICHT UND ES GIBT OSRAM](http://ES.GIBT.LICHT.UND.ES.GIBT.OSRAM)"

veau realisiert werden kann, was für eine Synergie von natürlicher und künstlicher Beleuchtung spricht, aber nicht für eine Bevorzugung der Letzteren.

Es konnte gezeigt werden, dass das *Beleuchtungsniveau* durch das *Tageslicht* sowohl bei seitlich befensterten Räumen als auch bei mit *Oberlichtern* beleuchteten Räumen für einen großen Teil des Tages das der künstlichen Beleuchtung weit übersteigt. Der besondere Vorteil der Oberlichter liegt darin, dass man damit auch tiefere Räume beliebiger Abmessungen beleuchten und hierbei eine Beleuchtungsplanung analog zu einer Planung mit Leuchten durchführen kann. Fenster hingegen sind als Beleuchtung tieferer Räume weniger geeignet.

Der tägliche und jährliche Zeitraum, in dem die natürliche Beleuchtung für hinreichende *Sehleistung* sorgt, wird nach den Beleuchtungsstärkewerten berechnet, die für eine horizontale Arbeitsebene gelten. Diese Werte entbehren nicht nur jeglicher wissenschaftlicher Grundlage, sondern beruhen noch dazu auf falschen Zielvorstellungen. So ist bereits 1960 von Bodmann gezeigt worden, dass die erforderliche Sehleistung im Büro bei etwa 50 bis 100 lx vorhanden ist und nicht mehr gesteigert werden kann. Ähnlich hohe Beleuchtungsstärken, wie sie heute in den Normen verlangt werden (500 lx), wurden von Bodmann empfohlen, um eine helle und angenehme Umgebung zu realisieren. Hierzu bedarf es aber nicht einer bestimmten Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene.

Mit der heute üblichen Betrachtung des *Tageslichtquotienten* bestimmt man zwar eine bestimmte Größenordnung für die Tageslichtversorgung von Räumen, diese kann jedoch unter Umständen irreführend sein, weil sie auf einer Betrachtung der Horizontalbeleuchtungsstärke beruht. Diese Betrachtungsweise diskriminiert die Tageslichtbeleuchtung.

Hinsichtlich der gesundheitlich relevanten Werte für das *Beleuchtungsniveau*, z.B. für die Steuerung der Tagesrhythmik des Menschen, ist die Tageslichtbeleuchtung nicht nur quantitativ weit überlegen, sie gibt vielmehr die natürliche Rhythmik selbst vor. Da es hierbei vorwiegend auf die Lichtmenge und die Veränderung ankommt, sind seitliche Fenster und Oberlichter in dieser Hinsicht etwa gleichwertig.

Die *Tageslichtbeleuchtung* kann auch hinsichtlich funktionaler Aspekte dem Kunstlicht weit überlegen sein. Dies gilt insbesondere für Lichtrichtung und Schattigkeit sowie für die Kontrastwiedergabe. Diese Aspekte sind in höherem Maße maßgeblich für das Sehen als die fiktive Größe Beleuchtungsstärke. Nicht ohne Grund werden Gebäude, in denen ein gutes Se-

hen von körperlichen Objekten angestrebt werden soll, als Tageslichtgebäude erstellt, so z.B. Museen und Ausstellungshallen.

Hinsichtlich der *Farbwiedergabe* ist zu beachten, dass man diese in der Beleuchtungstechnik nicht unbedingt mit der Sehleistung in Verbindung sieht. Die Wirtschaftlichkeit der künstlichen Beleuchtung geht häufig zu Lasten der Farbwiedergabe, da die Lampen, die eine sehr gute Farbwiedergabe erreichen, in ihrer Lichtausbeute weit hinter jenen zurück bleiben, die eine schlechtere Farbwiedergabe aufweisen. Die Differenz in der *Lichtausbeute* ist mit 40% bis 50% mehr als nur beachtlich. Allerdings fällt die Verschlechterung des Farberkennens auch mehr als nur beachtlich aus: Braun (Braun, 1998 /E.6/) gibt an, dass beim Einsatz von Spiegelrasterleuchten mit Leuchtstofflampen ca. 30% aller Farbtöne nicht mehr authentisch wahrgenommen werden.

Daher können sich vergleichende *Wirtschaftlichkeitsberechnungen* dramatisch zugunsten von Tageslicht ändern, wenn man gleiche bzw. ähnliche Farbwiedergabeeigenschaften zu Grunde legt: Eine Beleuchtung mit Vollspektrum ähnlich wie Tageslicht kann etwa doppelt so teuer werden wie eine heute übliche. Warum die übliche Beleuchtung üblich ist und warum man sich in Büros und vielen sonstigen Arbeitsplätzen mit der dritten Klasse der *Farbwiedergabe* (2A, nach 1A und 1B) begnügen muss, wissen nur eine Handvoll Fachleute. Gefragt haben diese die Benutzer nie, ob sie sich lieber eine bessere Farbwiedergabe ihrer Umwelt oder mehr Helligkeit wünschen. Hätte man dies getan, würde die Antwort vermutlich lauten: Beides. Und diesem Wunsch kann man mit Tageslicht weitaus besser genügen.

Auch die Ökobilanz für die künstliche Beleuchtung kann sich erheblich verschieben. Man muss sich zwar fragen, ob sich der Aufwand lohnt und ob man in Innenräumen sehr gute Farbwiedergabeeigenschaften benötigt. Allerdings darf man den Nutzern auch nicht hohe Lichtausbeuten und somit eine hohe Wirtschaftlichkeit vorrechnen und dabei einen wichtigen Qualitätsfaktor verschweigen.

Der positive Beitrag des Tageslichts zur Architektur der umbauten Umwelt - ob Arbeitsstätte oder sonstige Umgebung -, der in diesem (Teil)Bericht nicht zur Diskussion steht, stellt einen weiteren Pluspunkt dar. (s. Einzelbericht "*Licht und Architektur*")

Nicht zuletzt lassen sich ökologische Aspekte mit den erstgenannten Punkten gemeinsam betrachten. Die Grundhaltung der Allgemeinheit ist bezüglich aller Aspekte positiv einzuschätzen.

E.8 LITERATUR

- /E.1/ Begemann, S.H.A.; Tenner, A.; Aarts, A.: *Daylight, artificial light and people*, IES November 1994, Australia, S. 1-5
- /E.2/ Begemann, S.H.A.; van den Beld, G.J.; Tenner, A.: *Daylight, artificial light and people in an office environment*, Advances in Occupational Ergonomics and Safety I, Vol 2, S. 192-198
- /E.3/ Bodmann, H.W.: *Beleuchtungs niveaus und Sehtätigkeit*, Int. Licht Rundschau, 1962, S. 41
- /E.4/ Bodmann, H.W.: *Kriterien für optimale Beleuchtungs niveaus*, Lichttechnik, 15. Jahrg. Nr. 1/1963, S. 24-26
- /E.5/ Boyce, P.R.: Why daylight? In: *Proceedings of Daylighting '98*, 1998
- /E.6/ Braun, T.: *Licht - Empfinden - Wahrnehmen*, Licht '98, LICHT '98, Bregenz, 1998, S. 717-720
- /E.7/ Campbell, S.S.; Murphy, P.J.: *Extraocular circadian phototransduction in humans*. Science 1997; 278: 1632-1634
- /E.8/ Çakir, A.: Belastung und Beanspruchung bei Bildschirmtätigkeiten. In: Frese, M. (Hrsg.) *Streß im Büro*, Hans Huber, Bern Stuttgart Wien, 1981
- /E.9/ Çakir, A.; Çakir, G.: *Licht und Gesundheit - Eine Untersuchung zum Stand der Beleuchtungstechnik in deutschen Büros*, 1., 2. und 3. erweiterte Auflage, ERGONOMIC, Berlin, 1990, 1994, 1998
- /E.10/ Çakir, A.; Hart, D.J.; Stewart, T.F.M.: *The VDT Manual*, John Wiley & Sons, Chichester New York Brisbane Toronto, 1980
- /E.11/ Çakir, A.; Reuter, H.J.: *Bildschirmarbeitsplätze - Anpassung der Eigenschaften von Datensichtarbeitsplätzen an die physische und psychische Arbeitsweise des Menschen*, Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung, Bonn, 1978
- /E.12/ Czeisler, Ch.A.; Allan, J.S.; Strogatz, St.H.; Ronda, J.M.; Sanchez, R.; Rios, D.; Freitag, W.Q.; Richardson, G.S.; Kronauer, R.E.: *Bright Light Resets the Human Circadian Pacemaker Independent of the Timing of the Sleep-Wake Cycle*, Science, Vol 233 (4764), S. 667-671, 1986
- /E.13/ DeMarco, T.; Lister, T.: *Wien wartet auf Dich!*, Hanser, München, Wien, 1991
- /E.14/ DIN 55350: *Begriffe der Qualitätssicherung und der Statistik*
- /E.15/ DIN EN ISO 9241-11: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeit mit Bildschirmgeräten - Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze*
- /E.16/ Der Facility Manager, 6, 1999
- /E.17/ Erke, H.; Henken, H.-M.; Kirchner, J.-H.; u.a.: *Optische Strukturierung der Arbeitsumgebung*, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1988
- /E.18/ Fleischer, S.; Schierz, C.; Krueger, H.: *Forschungsvorhaben "Harmonisches Licht"*, Licht '98, Bregenz, LiTG, 1998

-
- /E.19/ Fischer, U.: *Hilft die Sommerzeit beim Sparen von Energie*, Licht 5, 52. Jahrgang, S. 574-577
- /E.20/ Flagge, I. (Hrsg.): *Jahrbuch Licht und Architektur 2000*, Müller, Köln, 2000
- /E.21/ FGL Fördergemeinschaft Gutes Licht
- /E.22/ Fritz, H.-J.: *Menschen in Büroarbeitsräumen*, Heinz Moos Verlag, Gräfelfing, 1982
- /E.23/ Garland, C.F.; McEligot, A.; Shanks, T.; Garland, F.C.; Gorham, E.D.: Epidemiology and the role of sunlight. In: Holick M.F.; Jung, E.G.: *Biologic effects of light 1998: proceedings of a symposium*, Basel, Schweiz, 1998, Kluver Academic Publishers, Norwell, 1999
- /E.24/ Gerkan, M. von : Die Gestaltkraft des Lichts in der Architektur. In: Flagge, I. (Hrsg.): *Jahrbuch Licht und Architektur 2000*, Müller, Köln, 2000
- /E.25/ Hahn, R.A.: *Profound bilateral blindness and the incidence of breast cancer*, Epidemiology 2: S. 208-210, 1991
- /E.26/ Haas, E.: *Die Schöpfung*, Econ, Düsseldorf, Wien, 1971
- /E.27/ Hartmann, E.: *Beleuchtung und Sehen am Arbeitsplatz*, Goldmann Verlag, München, 1970
- /E.28/ Hartmann, E.: *Optimale Beleuchtung am Arbeitsplatz*, Friedrich Kiehl Verlag GmbH, Ludwigshafen/Rh., 1977
- /E.29/ Hartmann, E.; Müller-Limmroth, W.: *Stellungnahme zur Frage der Verträglichkeit des Leuchtstofflampenlichtes*, LiTG, Karlsruhe, 1981
- /E.30/ Hartmann, E.: Licht und Mensch. In: Lange, H.: *Handbuch für Beleuchtung*, ecomed Verlag, Landsberg am Lech, 1992
- /E.31/ Hedge, A.; Erickson, W.A.; Rubin, G.: VDT use, job stress, job satisfaction and the sick building syndrome in offices. In: *Designing for Everyone, Proceedings of the 11th Congress of the IEA*, Taylor and Francis, London, 1991
- /E.32/ Holick, M.F.: Biological effects of light: Historical and new perspectives. In: Holick M.F., Jung, E.G.: *Biologic effects of light 1998: proceedings of a symposium*, Basel, Schweiz, 1998, Kluver Academic Publishers, Norwell, 1999
- /E.33/ Holick M.F.; Jung, E.G.: *Biologic effects of light 1998: proceedings of a symposium*, Basel, Schweiz, 1998, Kluver Academic Publishers, Norwell, 1999
- /E.34/ Hollwich, F.: *The influence of ocular light perception on metabolism in man and animal*, Springer Verlag, New York, 1979
- /E.35/ Karnstedt: <http://ionlight.com>, 1999
- /E.36/ Kaufmann, C. (Hrsg.): *IES Lighting Handbook*, Illuminating Engineering Society, Baltimore, 1972
- /E.37/ Klein, J.G.: *The Office Book*, Quarto Marketing Ltd., London, 1982
- /E.38/ Kraiss, K.F.: Vision and visual displays. In Kraiss, K.F., Moraal, J.: *Human Engineering*, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1976

-
- /E.39/ Küller, R.: *The effects of indoor lighting on well-being and the annual rhythm of hormones*. CIE 21st session. Venice 1987, Vol. 1, No. 601, S. 342 - 345
- /E.40/ Lange, H.: *Handbuch für Beleuchtung*, 4. Ergänzungslieferung, ecomed-Fachverlag, Landsberg, 1999
- /E.41/ Opfermann, R.; Streit, W.: *Arbeitsstätten - Arbeitsstättenverordnung und Arbeitsstätten-Richtlinien mit ausführlicher Kommentierung*, Lo-seblattsammlung, Forkel Verlag, 1999
- /E.42/ Rosenthal, N.E.; Sack, D.A.; Gillin, J.C.; Levy, M.; Goodwin, F.K.; Davenport, Y.; Mueller, P.S.; Newsome D.A.; Wehr, T.A.: *Seasonal affective disorder: a description of the syndrome and preliminary findings with light therapy*, Arch Gen Psychiatry, 1984 (41), S. 72-80
- /E.43/ Schneider, A. (Hrsg.): *Solararchitektur für Europa*, Birkhäuser Verlag für Architektur, Basel, 1996
- /E.44/ Schober, H.: *Die angeblichen Sehstörungen bei Beleuchtung durch Entladungslampen*, Lichttechnik 2, 1950, S. 103
- /E.45/ Schober, H.: *Die angeblichen Sehstörungen bei Beleuchtung durch Entladungslampen*, Lichttechnik 6, 1954, S. 215-218
- /E.46/ Schober, H.: *Gutachtliche Denkschrift zur Verträglichkeit des Leuchtstofflampenlichts*, LiTG Karlsruhe, 2. Auflage, 1971
- /E.47/ Schricker, R.: *Licht-Raum Raum-Licht*, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1994
- /E.48/ Solatube: <http://www.solatube.com/>, 1999
- /E.49/ Steck, B.: Photobiologie. In: Lange, H.: *Handbuch für Beleuchtung*, ecomed Verlag, Landsberg am Lech, 1999
- /E.50/ Stevens, R.G.; Anderson, L. E.: The role of light in breast cancer. In: Holick M.F., Jung, E.G.: *Biologic effects of light 1998: proceedings of a symposium*, Basel, Schweiz, 1998, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1999
- /E.51/ Tenner, A.: *Einfluss der Beleuchtung auf Wohlfühlen und Leistungsfähigkeit*, Vortrag an der Universität Karlsruhe, 6. Oktober, 1999
- /E.52/ Tops, M.; Tenner, A.D.; van den Beld, G.J.; Bege-
mann, S.H.A.: *The effect of the length of continuous presence on the preferred illuminance in offices*, CIBSE, 1998
- /E.53/ Voss, K.; Herkel, S.; Geber, A.; Wienold, J.: *Ein Haus für die Sonne*, Bundesbaublatt 48 (11), 1999, S. 22-26
- /E.54/ Yener, A.K.: *Ein Modell zur Bestimmung natürlicher Beleuchtungsstärke in Innenräumen*, LICHT '98, Bregenz, 1998, S. 190-197
- /E.55/ Wilkins, A.J.; Nimmo-Smith, I.; Slater, A.I.; Bedocs, L.: *Fluorescent lighting, headaches and eyestrain*, Lighting Research and Technology, 1989, S. 11-18

- /E.56/ Weston, H.C.: *Visual Fatigue*, Illuminating Engineering, Vol 49(2), S. 63-76
- /E.57/ Çakir, A.; Çakir, G.: *Licht und Ergonomie* - Teilbericht des FVLR-Projekts "*Tageslicht*", August 2000