

PETER ANDRES
BERATENDE INGENIEURE FÜR LICHTPLANUNG

Detail Sonderdruck 2001

Simulation und Kunstlichthimmel – Werkzeuge der Tageslichtplanung

Simulation and Artificial Sky – Instruments of Daylight Planning

Kai Babetzki

Fotos: Anja Andres



Warum brauchen wir Tageslicht?

Die Bedeutung des Tageslichtes vermögen wir Menschen erst dann richtig einzuschätzen, wenn wir es für längere Zeit in einem fensterlosen Raum entbehren müssen. Schon nach kurzer Zeit stellt sich Unbehagen ein, wir verlieren das Gefühl für die Tageszeit, werden orientierungslos, schneller müde und ärgern uns, wenn wir abends erfahren, dass es ein schöner, sonniger Tag war. Doch selbst wenn ein Kunstlichtplaner die Raumbeleuchtung noch so sorgfältig geplant hat, sie kann letztlich kein vollständiger Tageslichtersatz sein. Was wir in reinen Kunstlichträumen am meisten vermissen, sind die Veränderungen in der Helligkeit und Lichtfarbe des Tageslichtes. Diese Eigenschaften stimulieren unseren Organismus, steigern das Wohlbefinden und regen unsere Kreativität an. Wir fühlen uns wohler, arbeiten effektiver und konzentrierter und machen weniger Fehler. Die Tageslichtplanung ist gelungen, wenn trotz großer Schwankungen, beispielsweise bei einem plötzlichen Anstieg der Außenhelligkeit, nicht gleichzeitig der Sonnenschutz aktiviert und das Kunstlicht eingeschaltet werden müssen.

Warum ist Tageslicht keine konstante Größe?

Die Einzigartigkeit des Tageslichtes besteht in der großen, nicht vorhersagbaren Bandbreite der Änderungen des Erscheinungsbildes der Lichtquellen – sowohl der Sonne, als auch des Himmels – und der damit einhergehenden Änderung in der Darstellung der Gegenstände, die vom Tageslicht beleuchtet werden. Diese Dynamik stellt aber gleichzeitig das wesentliche Problem bei der Tageslichtnutzung dar. Bei bedecktem Himmel hat eine diffus beleuchtete Fläche im Freien eine Beleuchtungsstärke von ca. 10000 Lux. Wird dieselbe Fläche jedoch direkt von der Sonne beschienen, steigt deren Beleuchtungsstärke auf das 10- bis 15-fache und erreicht Werte von bis zu 150000 Lux. Jeder Kunstlichtplaner würde sich schlichtweg weigern, eine Leuchte, die auch nur annähernd an die Kenndaten der Sonne heranreicht, einzuplanen. Die Sonne hat eine Leuchtdichte von 1.500.000.000 cd/m² ohne jegliche Abschirmung, wobei sich Position, Ausstrahlungsrichtung und sogar die Lichtfarbe ständig än-

dern. Das Licht wäre nicht beherrschbar, und der direkte Blick in diese Leuchte würde zur raschen Erblindung führen. Da die Sonne ihre Position im Verlauf des Tages und Jahres ständig ändert, sind auch die durch sie verursachten Blendungen einem ständigen Wechsel unterworfen. Die Änderungen im Verlauf eines Jahres werden durch die Neigung der Erdachse von 23° verursacht (Abb. 4). Am 21. Juni hat die Sonne in Hamburg (51. Breitengrad) mittags einen maximalen Sonnenhöhenwinkel von $90^\circ - 51^\circ + 23^\circ = 62^\circ$. Am 21. Dezember misst dieser Winkel zur gleichen Zeit nur $90^\circ - 51^\circ - 23^\circ = 16^\circ$. Die Differenz der Winkel entspricht genau dem doppelten Erdneigungswinkel. Vom Sonnenaufgang bis -untergang vergehen im Sommer siebzehn und im Winter sieben Stunden. Bei flachem Einfallswinkel muss das Licht mehr Atmosphäre durchdringen, die Intensität nimmt ab und die Lichtfarbe wird wärmer. Ohne die Neigung der Erdachse gäbe es keine Jahreszeiten und die Tageslichtplanung würde sich stark vereinfachen.

Ist Tageslicht planbar?

Der Begriff Tageslichtplanung ist insofern irreführend, als dass der Planer weder Einfluss auf die Neigung der Erdachse, noch auf das Wetter hat, welche die ursächlichen Größen für die Art des Tageslichtes sind. Nicht das Tageslicht, sondern die Ausbreitung des Lichtes im Raum ist planbar. Die wesentliche Aufgabe der Tageslichtplanung besteht darin, die Dynamik des Tageslichtes in hellen fassadennahen Bereichen auf ein notwendiges Maß zu reduzieren, das Niveau in dunkleren Bereichen mit geeigneten Maßnahmen anzuheben und den Raum ausreichend gleichmäßig und blendfrei ausleuchten. Helligkeits-, Blendungs- und Gleichmäßigkeitsuntersuchungen sollten, Untersuchungen zur Tageslichtautonomie, zum Außenbezug und zur Regelbarkeit können Bestandteil einer Tageslichtuntersuchung sein.

Die Planung erfolgt in zwei Schritten: Im ersten Schritt geht es um die Helligkeit im Raum bei diffusem Himmel. Der diffuse Himmel ist der dunklere Fall, weshalb diese Untersuchung als eine »Worst Case«-Abschätzung angesehen werden darf.

Da die Außenhelligkeit schwankt, wird die Helligkeit von Räumen nicht mit Beleuchtungsstärken, sondern mit Hilfe des Tageslichtquotienten beschrieben. Der Quotient D (engl.: daylight factor) definiert das Verhältnis der horizontalen Außenbeleuchtungsstärke zu einer horizontalen Beleuchtungsstärke im Raum. Ein Raum, dessen mittlerer Tageslichtquotient bei 3% liegt, kann als hell bezeichnet werden. (Abb. 5–10)

Weshalb ist die Blendungsuntersuchung schwieriger?

Im zweiten Schritt wird die Direktstrahlung in die Überlegungen miteinbezogen. Es geht darum, mögliche Blendungsrisiken zu erkennen, zu bewerten und zu unterbinden. Besonders sensibel sind in diesem Zusammenhang Bildschirmarbeitsplätze. Die Eigenleuchtdichte moderner Bildschirme liegt bei ca. 80 cd/m². Weiße Flächen im Raum, die direkt besonnt werden, können Leuchtdichten von über 4000 cd/m² aufweisen. Spiegeln sich diese hellen Flächen im Monitor, herrscht im Gesichtsfeld des Betrachters ein Leuchtdichteunterschied von 1:50. Um ohne Ermüdungserscheinungen störungsfrei sehen zu können, sollte der Kontrast im nahen Gesichtsfeld 1:5 nicht übersteigen. Im fernen Gesichtsfeld, wie zwischen Bildschirm und Bildschirmumgebung, sollte ein Kontrast von 1:15 nicht überschritten werden. Das Auge des Menschen kann nur Leuchtdichten, jedoch keine Beleuchtungsstärken wahrnehmen. Wir nehmen das Licht erst wahr, nachdem es an Oberflächen reflektiert, absorbiert oder transmittiert wurde. Bevor es zu einer Interaktion zwischen Licht und Gegenstand kommt, ist es unsichtbar. Die Beleuchtungsstärke beschreibt die Intensität des Lichtes vor, die Leuchtdichte nach einer Interaktion mit der Oberfläche eines Gegenstandes. Blendungsuntersuchungen sollten daher auf Leuchtdichten anstelle von Beleuchtungsstärken basieren. Für die optische Wahrnehmung brauchen wir beides: Licht und Gegenstände.

Die Untersuchung der Blendung ist komplexer und zeitintensiver, weil meistens mehrere Situationen mit unterschiedlichen Sonnenständen und Blendschutzvorrichtungen durchgespielt und bewertet werden müssen.

- 1 Künstlicher Himmel:
Entsprechend den natürlichen Verhältnissen nimmt die Himmelsleuchtdichte in Zenitrichtung zu. Die Diffusorkuppel aus weißem Acrylglas hat einen Durchmesser von 432 cm. Die 1026 Leuchtstofflampen (18 W/Lichtfarbe 965) werden über ISYGLT-Bus angesteuert. Die maximal erreichbare Horizontalbeleuchtungsstärke auf der Messebene von einem Meter Höhe beträgt ca. 31000 Lux.
- 2 Künstliche Sonne:
Das parallele Sonnenlicht wird mittels Halogen-glühlampe (1000 W/3400 K/33000 lm) mit Parabolreflektor (Spiegeldurchmesser 65 cm) nachgebildet. Die Ansteuerung der Sonne und des Antriebsmotors erfolgt über ISYGLT-Bus. Die maximale Horizontalbeleuchtungsstärke beträgt 40000 Lux.
- 3 Blendungsuntersuchung am Modell:
Innenaufnahme des neuen Plenarsaals für den Schleswig-Holsteinischen Landtag in Kiel, Architekten: Pax Hadamczik Arndt Brüning, Hannover

- 1 Artificial sky
In accordance with natural conditions, the luminance of the sky increases towards the zenith. The white perspex diffusion dome has a diameter of 432 cm. The 1,026 fluorescent lamps (18 W/coloration 965) are controlled via an ISYGLT busbar. The maximum attainable illuminance horizontally on a measuring plane at 1 m height is roughly 31,000 lux.
- 2 Artificial sun
Parallel rays of sunlight are simulated by a halogen lamp (1,000 W/3,400 K/33,000 lm) with a parabolic reflector (diameter of mirror: 65 cm). The course of the sun and the operation of the motor are controlled via an ISYGLT busbar. The maximum illuminance horizontally is 40,000 lux.
- 3 Investigation of glare on a model
Photo of interior of new debating chamber in the state parliament of Schleswig-Holstein in Kiel. Architects: Pax Hadamczik Arndt Brüning, Hanover

Literatur, Normen

DIN 5034 Tageslicht in Innenräumen
DIN 5035 Beleuchtung mit künstlichem Licht
Reto P. Miloni: Selektive Lichtmodulation in polyvalenten Gebäudehüllen, in: Tagungsband des 4. Symposiums für innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz 1998
Greg Ward Larson, Rob Shakespeare: Rendering with Radiance, The Art and Science of Lighting Visualization, San Francisco 1997

Sind die beiden Hauptforderungen, ausreichende Helligkeit und Blendfreiheit, gewährleistet, kann ein Raum in lichttechnischer Hinsicht als gut tagesbelichtet angesehen werden. Die hohe Effizienz des Tageslichtes von ca. 115 lm/W (hoch effiziente Leuchtstofflampen haben eine Lichtausbeute von ca. 95 lm/W bei schlechterer Farbwiedergabe) kann genutzt werden. Dieser Sachverhalt wirkt sich besonders im Sommer vorteilhaft aus, denn im Vergleich zu künstlich belichteten Räumen ist die Kühllast bei gleicher Helligkeit geringer.

Welche Planungsinstrumente gibt es?

Unsere Erfahrung sagt uns, dass ein größeres Fenster einen Raum heller erscheinen

lässt als ein kleineres Fenster. Auch ohne aufwändige Hilfsmittel können also durchaus qualitative Aussagen getroffen und mit einfachen Formeln präzisiert werden. Sobald aber komplexere Raumgeometrien oder Sonnenschutzmaßnahmen zu berücksichtigen sind und definierte Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken penibel eingehalten werden müssen, ist die Verwendung zusätzlicher Planungsinstrumente dringend zu empfehlen. Es können prinzipiell zwei Verfahren angewendet werden: Die rechnergestützte Simulation und die Vermessung von Modellen in einem künstlichen Himmel. Der künstliche Himmel, eine transluzente Halbkugel von 4,32 m Durchmesser, ist mit 1026 von 1–100% stufenlos dimmbaren Leuchtstofflampen von

höchster Farbwiedergabequalität und einer dem Tageslicht entsprechenden Farbtemperatur von 6000 Kelvin bestückt. Dies erlaubt alle für die Messung relevanten, diffusen Himmelszustände künstlich herzustellen. Eine Halogen-glühlampe mit Parabolreflektor bildet das parallele Sonnenlicht nach. Sie ist an einem um 100° schwenkbaren Bügel befestigt, mit dem der Sonnenhöhenwinkel abgefahren wird. Mit Hilfe einer um 360° drehbaren Scheibe im Boden des künstlichen Himmels wird die Veränderung des Azimuts berücksichtigt. Der Versuchsstand ermöglicht die Simulation jeder Sonnenbahn, jedes Datums und Ortes der Erde. Er kann die sehr kurze Dämmerungsphase in Äquatornähe und den 24-Stunden-Tag während des Polarsommers



Foto: Anja Andres

Typische Lichtstärken, Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten bei natürlicher und künstlicher Beleuchtung

Lichtstärke I in Candela (cd)	Beleuchtungsstärke E in Lux (lx)	Leuchtdichte L in Candela pro m ² (cd/m ²)
Sonne	Sonnenlicht	Sonne
3.000.000.000.000.000.000.000.000 = 3×10^{27}	150.000	1.500.000.000
100-W-Glühlampe	bedeckter Himmel	100-W-Glühlampe klar
100	10.000	13.000.000
1	500	100-W-Glühlampe mattiert
	100	100.000
	10	besonnte Wolken
	1	10.000
		blauer Himmel
		5.000
		bedeckter Himmel
		2.000
		weißes Papier bei 500 lx
		100
		weißes Papier bei 5 lx
		1

Typical lighting intensities, illuminances and luminances under natural and artificial lighting conditions

Lighting intensity in candela (cd)	Illuminances E in lux (lx)	Luminance L in candela per m ² (cd/m ²)
sun 3,000,000,000,000,000,000,000,000 = 3×10^{27}	sunlight	sun
100 W light bulb	overcast sky	100 W plain light bulb
100	10,000	13,000,000
1	500	100 W pearl light bulb
	100	100,000
	100	sunlit clouds
	10	10,000
	1	5,000
		overcast sky
		2,000
		white paper exposed to 500 lx
		100
		white paper exposed to 5 lx
		1

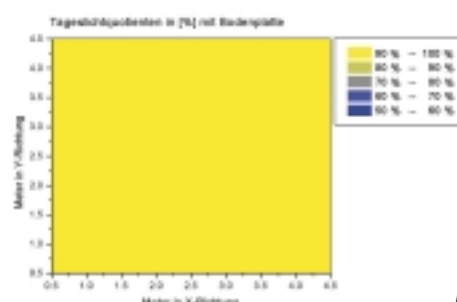
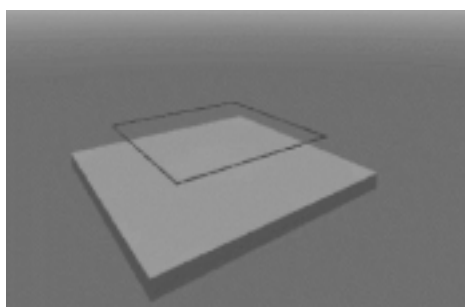
darstellen. Ein künstlicher Himmel ist notwendig, um Messergebnisse reproduzieren und Varianten unter denselben Bedingungen miteinander vergleichen zu können.

Wann ist eine Simulation sinnvoll?

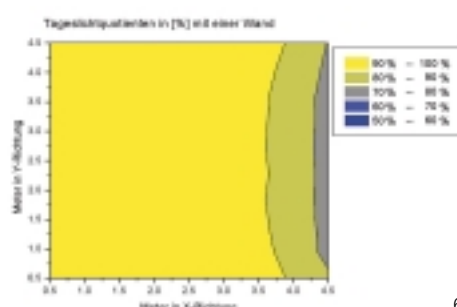
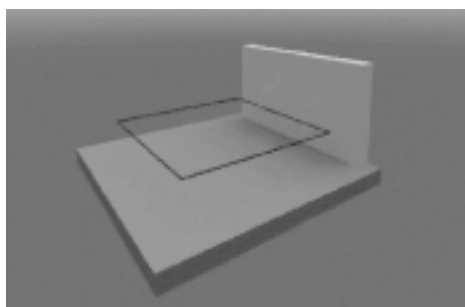
Durch den Einsatz eines rechnergestützten Tageslichtsimulationsprogramms können die für die Ausbreitung des Tageslichtes relevanten Parameter wie die Verglasungsart, der Sonnen- und Blendschutz, Tageslichtlenkungsmaßnahmen, die Nachbarbebauung, die Raum- und Fenstergeometrie und die Materialien der verwendeten Baustoffe schnell variiert werden. Insofern eignen sich Simulationsprogramme besonders zur Optimierung in den frühen Planungsphasen. Neben Aussagen zur Helligkeit und Blendung ermöglichen sie auch detaillierte Angaben zu energetischen Fragen. So können die Einschaltzeiten des Kunstlichtes und der damit verbundene Energieverbrauch verglichen und bewertet werden. Nachdem die Grundlagen erarbeitet worden sind und mit keinen wesentlichen Änderungen mehr zu rechnen ist, sollten die Ergebnisse der Simulation mit Tageslichtmessmodellen im künstlichen Himmel überprüft werden.

Wann ist die Untersuchung von lichttechnischen Modellen im künstlichen Himmel der Simulation überlegen?

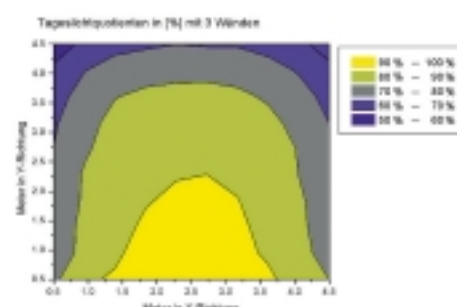
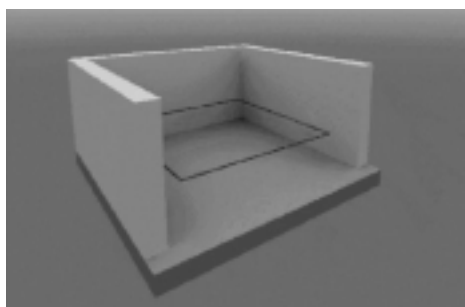
Bei Aussagen wie »... der Kontrast ist doppelt so hoch wie der maximal zulässige Wert ...« zeichnen sich die Grenzen der rechnergestützten Simulation ab. Oft gelingt es noch, Helligkeitseindrücke mit fotorealistischen Bildern zu vermitteln, bei der Beurteilung und Einschätzung von Blendungserscheinungen jedoch versagt diese Methode. Das anschaulichste Ergebnis einer rechnergestützten Simulation ist eine zweidimensionale fotorealistische Darstellung. Moderne Monitore können maximal Kontraste von 1:15, Fotos sogar nur von 1:10 darstellen. Das Auge muss sich beim Betrachten von Fotos weder auf unterschiedliche Helligkeiten, noch auf wechselnde Blickrichtungen zu unterschiedlichen Lichtquellen hin einstellen. Das sind jedoch die Hauptmerkmale, auf die es beim dreidimensionalen Sehen im Raum ankommt. Wünscht man einen realistischen und erleb-



5



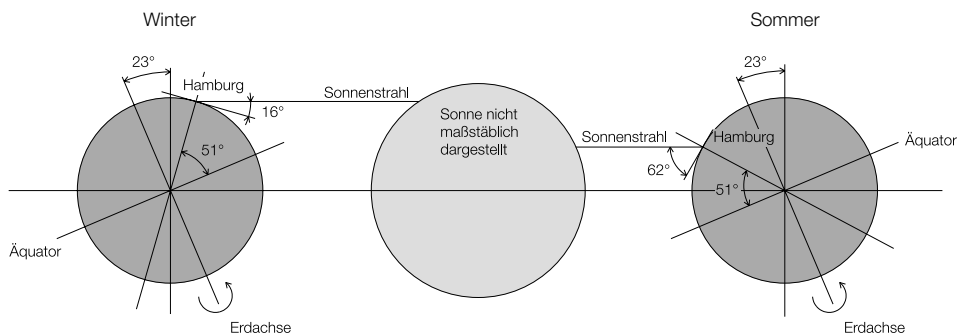
6



baren Eindruck von den Tageslichtverhältnissen im zukünftigen Gebäude, muss ein Modell in einem passenden Maßstab angefertigt werden. In ihm sollten alle Oberflächeneigenschaften der später verwendeten Materialien, die für die Ausbreitung des Lichts relevant sind, nachgebildet sein. Bei der Blendungsuntersuchung am Beispiel des neuen Plenarsaals für den Schleswig-Holsteinischen Landtag in Kiel (Abb. 1, 3) war es nicht möglich, mit Hilfe eines Simulationsprogrammes die exakten Reflexionsbedingungen der geplanten Streckmetalldecke nachzubilden. Um verlässliche Aussagen zur Tageslichtsituation machen zu können, wurde ein Modell im Maßstab 1:12,5 mit verkleinerter Streckmetalldecke gebaut. Unter dem künstlichen Himmel

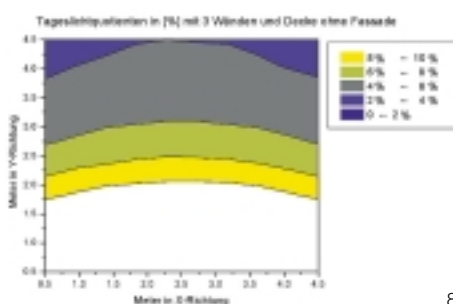
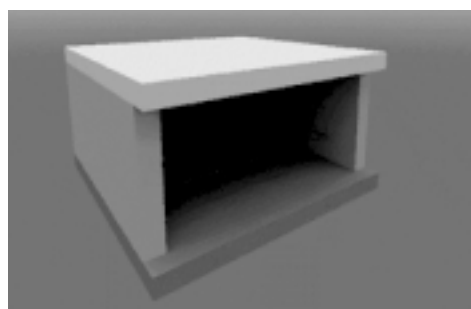
wurden verschiedene Blendschutzsysteme untersucht. Dabei zeigte sich, dass die hellen Reflexionen auf dem Blendschutz Leuchtdichten von über 60000 cd/m² aufweisen, es also nach wie vor zu Blendungserscheinungen kommt. Auch mit dunklen Raumbegrenzungsflächen ist es sehr schwierig einen hellen und freundlichen Raumeindruck zu verwirklichen, selbst wenn die Anzahl von Leuchten eine untergeordnete Rolle spielt und sehr groß sein darf. Schon ein dunkler Fußbodenbelag in Kombination mit dunklem Mobiliar bedingt, im Vergleich zu hellen Materialien, die Verdopplung der Leuchtenanzahl, um einen annähernd ähnlichen Raumeindruck zu erhalten. Das erstaunliche hierbei ist, dass die Beleuchtungs-

- 4 Winkelbeziehungen der Sonne für Hamburg (51. Breitengrad)
- 4 Angles of incidence of sunlight in Hamburg (51° north)



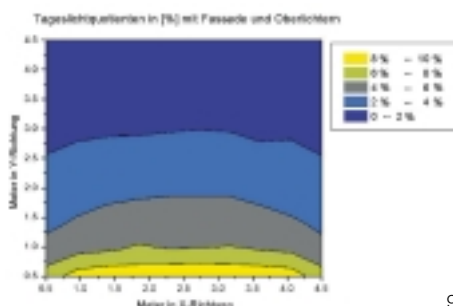
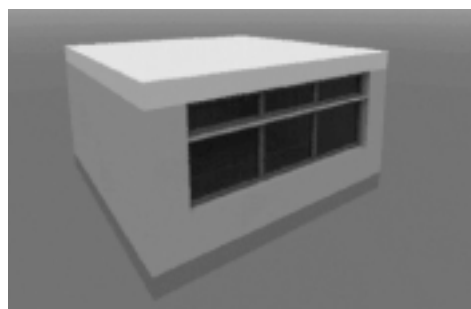
Der Autor war nach seinem Physikstudium in Siegen Mitarbeiter der Firma Transsolar Energietechnik in Stuttgart und ist seit Oktober 2000 Leiter der Fachgruppe Tageslichtnutzung im Ingenieurbüro Peter Andres Beratende Ingenieure für Lichtplanung VBI, Hamburg.

After studying physics in Siegen, the author was an assistant at the Transsolar Energietechnik company in Stuttgart. Since October 2000, he has been in charge of the specialist group for daylighting in the office of Peter Andres, Beratende Ingenieure für Lichtplanung VBI (consulting engineers for light planning), Hamburg.



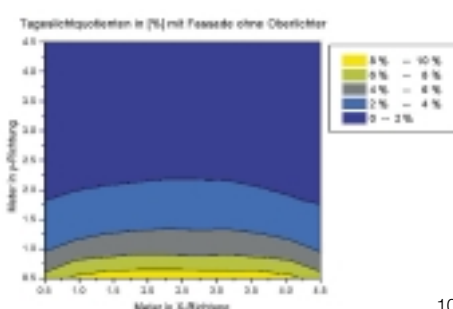
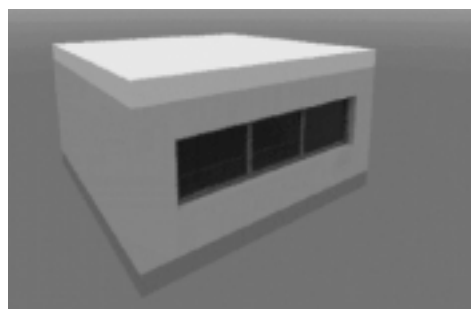
Beispiel für eine Simulation bei diffusem Himmel. Die Abbildungen veranschaulichen die fortschreitende Reduzierung des mittleren Tageslichtquotienten (Daylight-Factor) D von anfänglich 100% bis sich der typische Wert von 2–3% einstellt.

- 5 Als Ausgangswert wird der Raum nur mit Bodenplatte und dem rot umrahmten Berechnungsbereich dargestellt. Der mittlere Tageslichtquotient D liegt bei 100%.
- 6 Eine Wand verringert D auf 93,8%.
- 7 Drei Umfassungswände führen zu einem mittleren Tageslichtquotienten von 84,4%.
- 8 Den gravierendsten Einfluss hat das Hinzufügen der Decke. Da D jetzt nur noch 10,5% beträgt, musste die Skalierung um den Faktor 10 verringert werden.
- 9 Die Glasfassade verdunkelt den Raum auf 3,3%.
- 10 Der Verzicht auf ein Oberlicht in der Fassade führt besonders im hinteren Bereich des Raumes zur Abnahme von D um 1% auf 2,5%.



Example of a simulation with a diffuse sky. The illustrations show the progressive reduction of the mean daylight factor D from 100 per cent initially to a typical value of 2–3 per cent.

- 5 As a base value, the room is depicted with only the floor slab and the area to be calculated (within the red frame). The mean daylight factor D is about 100 per cent.
- 6 A single wall reduces D to 93.8 per cent.
- 7 Three enclosing walls result in a mean daylight factor of 84.4 per cent.
- 8 The addition of the ceiling has the most serious effect. Since D is now only 10.5 per cent, the scale had to be reduced by a factor of 10.
- 9 The glazed facade darkens the room to 3.3 per cent.
- 10 The removal of the top-light strip in the facade glazing results in a reduction of D in the rear area of the room by about 1 per cent to 2.5 per cent.



stärken im Gegensatz zu den Raumeindrücken in beiden Fällen, zumindest bei direkter Beleuchtung, z. B. mit Downlights, identisch sind. Desgleichen sind die oft gestellten Forderungen von Architekten nach der Auflösung von Begrenzungsflächen, wie sie etwa durch spiegelnde polierte Fußböden realisiert werden können, am besten im Modell zu überprüfen. Diese Effekte lassen sich mit Simulationsprogrammen nur sehr ungenügend erzeugen.

Ausblick

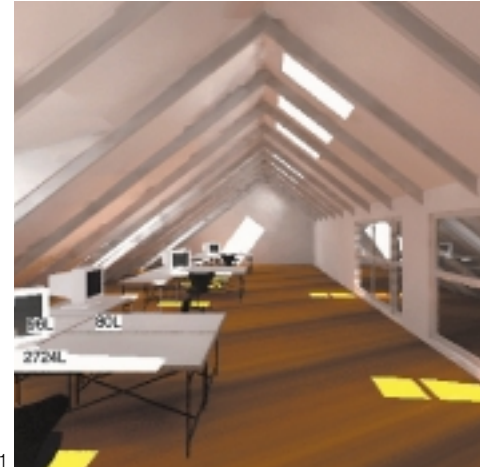
Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stellt die Tageslichtplanung eine Sonderleistung dar. Der Wert einer Tageslichtuntersuchung wird häufig nur daran gemessen, wie viele Be-

triebsstunden an künstlicher Beleuchtung eingespart werden. Dabei sind der Komfortgewinn, die Steigerung des Wohlbefindens und die damit verknüpfte verbesserte Effizienz der Nutzer als deutlich höher zu bewerten. Doch diese Wirkungen sind schwierig zu bilanzieren. Mit Simulationen und Modellmessungen im künstlichen Himmel ist es möglich, für jedes Gebäude ein maßgeschneidertes Tageslichtkonzept zu entwickeln. Nur so kann man gewährleisten, dass die Öffnungsflächen genau so dimensioniert werden, wie es zur Erfüllung ihrer Funktion sinnvoll ist. Zu große Öffnungen haben schließlich nicht eine bessere Tageslichtbeleuchtung, sondern lediglich eine stärkere Aufheizung, mehr Kühlenergieverbrauch und höhere Betriebskosten

zur Folge. Mit Computersimulation oder Modellversuch kann eine mehr oder weniger komplette Tageslichtuntersuchung durchgeführt werden. In den meisten Fällen ist es jedoch sinnvoller, die Vorteile jedes einzelnen Verfahrens zu nutzen und beide zu kombinieren. Die Schnelligkeit der Simulation in Kombination mit der Anschaulichkeit eines Modells führt bei Tageslichtuntersuchungen zu den besten und verlässlichsten Ergebnissen. Die Möglichkeiten, die die modernen Planungswerkzeuge heutzutage Planern und Bauherren bieten, sollten sie nutzen, da die nachträgliche Integration eines funktionierenden Tageslichtkonzeptes in ein bereits erstelltes Gebäude meistens mit sehr hohem Aufwand und erhöhten Kosten verbunden ist.

11 Beispiel für eine Simulation bei klarem Himmel mit Direktstrahlung.
Mit Hilfe einer rechnergestützten Simulation wurde ermittelt, ob die geplanten Oberlichter, obwohl sie in ein nach Nord-Nordosten gerichtetes Schrägdach eingebaut sind, zu Blendungserscheinungen führen würden und deshalb verschattet werden sollten. Die Darstellung zeigt deutlich, dass es im Juni, kurz vor 10 Uhr, zu massiver Blendung im Bereich des Monitors und des Schreibtisches kommt. Der Leuchtdichteunterschied zwischen besonntem und unbesonntem Schreibtisch ist mit 1:33 doppelt so hoch wie der maximal empfohlene Wert von 1:15 für den fernen Gesichtsbereich.

11 Example of a simulation, assuming a clear sky with direct radiation.
With the help of a computer-aided simulation, a calculation was made to determine whether the planned roof lights in the north-east-facing pitched roof would result in glare and would therefore require sunshading. The depiction shows quite clearly that in June, shortly before 10 a.m., serious glare occurs at the workplace and in the computer area.
The difference in luminance between the areas of the desk exposed to sunlight and the shaded areas is 1:33 – twice as great as the maximum recommended value (1:15) for areas removed from the immediate field of vision.



11

Human beings come to appreciate the true value of natural light after they have been enclosed for some time in a room without windows. Even the most carefully planned artificial lighting is no substitute for daylight. One misses the variations in lighting intensity and coloration, factors that stimulate the human organism, that help to create a sense of well-being and that increase creativity and efficiency. The costs of daylight planning, therefore, are a sound investment.

The dynamics of daylight reflect the wide range of conditions that can occur within a given period, depending on the appearance of the light source – the sun and the sky – and the objects it illuminates. When the sky is overcast, for example, a diffusely lighted outdoor area will have an illuminance of roughly 10,000 lux. The same area exposed to direct sunlight can have a value of up to 150,000 lux.

Since the position of the sun changes in the course of the day and the year, the source of the glare it causes also shifts. The changes of the sun's position during the year result from the 23° angle at which the earth is tilted on its axis. At midday on 21 June at a latitude of 51° north (Hamburg), the sun reaches its maximum angle of inclination ($90^\circ - 51^\circ + 23^\circ = 62^\circ$). On 21 December, the angle of inclination will be $90^\circ - 51^\circ - 23^\circ = 16^\circ$. In summer, there is a difference of 17 hours between sunrise and sunset; in winter, the difference is only 7 hours. When the angle of inclination of the sun is flatter, its rays have to penetrate more of the earth's atmosphere to reach a given position, with the result that the lighting intensity decreases, while the coloration becomes warmer. The term "daylight planning" is misleading because the lighting engineer has no control over the tilt of the earth nor over the weather, the two main factors that determine the quality of daylight. All the engineer can plan is the diffusion of light in a space. His main task is to reduce the dynamics of daylight, damping excessive brightness in areas near the facade and increasing the level of illumination in darker areas. Planning measures of this kind should be implemented in two stages. The first involves the degree of brightness in a room when the sky is overcast – in other words, a "worst case" scenario. Since the outdoor brightness fluctuates, indoor lighting intensity is not assessed in terms

of illuminance, but with the aid of daylight factors. A room with a mean daylight factor of 3 per cent may be regarded as brightly lit. In the second step, direct radiation is considered. In this case, one is concerned with recognizing and avoiding potential sources of glare. Workplaces with computers are especially sensitive in this respect. The luminance or radiant intensity of modern computer screens is around 80 cd/m². White surfaces exposed to direct sunlight can have a luminance of more than 4,000 cd/m². If they cast reflections on to a computer screen, a luminance ratio of 1:50 can exist in the field of vision. To avoid fatigue and visual irritation, the contrast in the immediate field of view should not exceed 1:5.

The human eye can perceive differences of radiant intensity, but not of illuminance. Light is perceived only after interacting with an object; i.e. when it is reflected from a surface or absorbed or transmitted by it. Illuminance is the intensity of light before it interacts with a surface; luminance describes the intensity after interaction with a surface. Investigations of glare will therefore be based on the latter.

Where aspects such as complex spatial geometry or sunshading have to be considered, daylight planning for internal spaces will require the aid of computer-based simulations and measurements taken from models, using an artificial sky. The best results are obtained from a combination of the two methods.

Experience shows that large windows allow more light into a room. On the other hand, they also lead to greater heat gains and increased costs for cooling. Using computer-based daylight simulation programs, it is possible to vary the parameters that determine the diffusion of daylight (e.g. the type of glazing, sunshading, daylight deflection measures, neighbouring buildings, spatial and window geometry, and materials).

Simulations are, therefore, particularly relevant in the early phase of planning. They also provide valuable information on energy use. Once the basic parameters have been fixed, though, the data obtained in the simulation should be tested and measured by means of daylight models.

The office in ill. 11 is in the attic storey of a listed industrial building in Hamburg, where roof lights were planned to improve the daylight

values. The illustration shows quite clearly that shortly before 10 a.m. in June, serious glare would be caused at the workplace and in the computer area.

Even if it is possible to convey an impression of brightness with two-dimensional, photo-like depictions, simulations have their limits in assessing the effects of glare. Modern computer screens can depict a maximum contrast of 1:15; photos only 1:10. To obtain a realistic impression of daylight conditions in a future building, it will be necessary to make a model to an appropriate scale, reproducing all surface qualities of the specified materials.

Ill. 1 shows how the luminance of the sky increases towards the zenith. The artificial sky installation is equipped with 1,026 fluorescent lamps of best colour-reproduction quality. The lamps can be dimmed continuously from 0 to 100 per cent and have a coloration equivalent to a daylight value of 6,000 kelvin. This allows the reproduction of all diffuse sky conditions necessary for the measurements. Parallel rays of sunlight are simulated by means of a halogen lamp with a parabolic reflector. Fixed to an arm that can rotate through an angle of 100° and to a disc that revolves through 360°, the lamp can recreate any angle of inclination of the sun and the changes in the azimuth position for any place on earth at any date and time of day. An expanded metal mesh soffit was planned for the new debating chamber in Kiel. It was not possible to reproduce the precise reflection conditions with a simulation program. A model was, therefore, constructed with expanded metal reduced in scale. Ill. 3 shows an interior view of the daylight model under the artificial sky. Various anti-glare systems were investigated. It was found that the left-hand screen caused excessive glare, with a luminance of more than 60,000 cd/m².

Daylight investigations are often judged simply by the number of hours of artificial lighting that can be saved. Greater value should be attached to the improvements in comfort, the enhanced sense of well-being and the increased efficiency to which such investigations can lead. Unfortunately, these factors are difficult to quantify. Nevertheless, simulations and measurements taken from models under artificial sky conditions allow a bespoke daylight concept to be drawn up for any building.