

Simulation und Kunstlichthimmel in der Planungspraxis:

# Dem Tageslicht auf der Spur

Kai Babetzki

*Lohnt sich die Tageslichtnutzung in Gebäuden? Diese Frage stellt sich häufig bei der Planung von Neubauten oder bei der Umnutzung im Gebäudebestand. Die Bedeutung von Tageslicht vermögen Menschen erst dann richtig einzuschätzen, wenn sie es für längere Zeit in einem fensterlosen Raum entbehren müssen. Schon nach kurzer Zeit stellt sich Unbehagen ein, das Gefühl für die Tageszeit geht verloren, die Nutzer werden orientierungslos und ermüden schneller. Selbst eine sehr sorgfältig geplant Raumbelichtung kann letztlich kein vollständiger Ersatz für Tageslicht sein.*

Was wir in reinen Kunstlichträumen am meisten vermissen, sind die Veränderungen in der Helligkeit und Lichtfarbe des Tageslichts. Diese Eigenschaften stimulieren unseren Organismus, steigern das Wohlbefinden und regen unsere Kreativität an. Wir fühlen uns wohler, arbeiten effektiver und konzentrierter und machen so weniger Fehler. Die Kosten einer Tageslichtplanung amortisieren sich daher bereits nach kurzer Zeit.

Eine solche Planung darf dann als gelungen angesehen werden, wenn trotz großer Schwankungen, etwa bei einem plötzlichen Anstieg der Außenhelligkeit, nicht gleichzeitig

der Sonnenschutz aktiviert und das Kunstlicht eingeschaltet werden muß.

## *Erschwerte Nutzung*

Das einzigartige am Tageslicht ist die große, nicht vorhersagbare Bandbreite in der Änderung des Erscheinungsbilds der Lichtquelle, das gilt sowohl für die Sonne, als auch für den Himmel. Mit diesen Schwankungen ändert sich auch die Darstellung der Gegenstände, die vom Tageslicht beleuchtet werden. Diese Tageslicht-Dynamik stellt aber gleichzeitig das wesentliche Problem bei der Nutzung des natürlichen Lichts dar.

Bei bedecktem Himmel hat eine diffus beleuchtete Fläche im Freien eine Beleuchtungsstärke von etwa 10 000 Lux. Wird dieselbe Fläche jedoch direkt von der Sonne beschienen, steigt deren Beleuchtungsstärke auf das 10- bis 15fache und erreicht Werte von bis zu 150 000 Lux. Im Vergleich dazu besitzt die Sonne eine Leuchtdichte von 1 500 000 000 cd/m<sup>2</sup>.

### *Beispiel:*

*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. Von Sonnenauf- bis Untergang vergehen im Sommer 17 und im Winter 7 Stunden. Bei flachem Einfallswinkel muß das Licht mehr Atmosphäre durchdringen, die Lichtintensität nimmt ab und die Lichtfarbe wird wärmer.*

Da die Sonne ihre Position im Verlauf des Tages und Jahres permanent wechselt, sind die Blendungen, die der Himmelskörper auslöst, ständigen Änderungen unterworfen. Diese Veränderungen werden durch die Neigung der Erdachse verursacht. 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, da 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 Lichts im Raum, ist planbar.

Die wesentliche Aufgabe der Tageslichtplanung besteht darin, die Tageslicht-Dynamik in hellen, fassaden-nahen Bereichen auf ein notwendiges Maß zu reduzieren, das Niveau in dunkleren Bereichen mit geeigneten Maßnahmen anzuheben und den Raum ausreichend, gleichmäßig und blendfrei auszuleuchten. Helligkeits-, Blendungs- und Gleichmäßigkeitsanalysen sollten Bestandteil der Untersuchungen zur Tageslichtautonomie sein. Darüber hinaus können Helligkeits-, Blendungs- und Gleichmäßigkeitsanalysen zum Außenbezug und zur Regelbarkeit Bestandteil einer solchen Untersuchung sein.

## Vorgehensweise

Die Planung erfolgt in zwei Schritten: Im ersten Schritt geht es um die Helligkeit im Raum bei diffusem Himmel. Hier handelt es sich um den sogenannten „Worst-Case“, also den „schlimmsten Fall“ der eintreten kann, da der Himmel dunkler ist, als bei unbewölktem Wetter.

Da die Außenhelligkeit in der Regel schwankt, wird die Helligkeit von Räumen nicht mit Beleuchtungsstärken, sondern mit Hilfe von Tageslichtquotienten beschrieben. Der Quotient definiert das Verhältnis von der horizontalen Außenbeleuchtungsstärke zu einer horizontalen Beleuchtungsstärke im Raum. Ein Raum, dessen mittlerer Tageslichtquotient bei 3 % liegt, kann als hell bezeichnet werden.

Im nächsten 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.  $80 \text{ cd/m}^2$ . Weiße Flächen im Raum, die direkt besonnt werden, können Leuchtdichten von über  $4000 \text{ cd/m}^2$  aufweisen. Spiegeln sich diese hellen Flächen im Monitor, herrscht im Gesichtsfeld des Betrachters ein Leuchtdichteunterschied von 1:50. Um ermüdungs- und irritationsfrei 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 menschliche Auge kann nur Leuchtdichten wahrnehmen, jedoch keine Beleuchtungsstärken. 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 das Licht unsichtbar.

Die Beleuchtungsstärke beschreibt die Intensität des Lichts vor einer Interaktion mit der Oberfläche eines Gegenstandes, die Leuchtdichte nach einer Interaktion. Blendungsuntersuchungen sollten daher auf Leucht-

dichten anstelle von Beleuchtungsstärken basieren. Für die optische Wahrnehmung brauchen wir beides: Licht und Gegenstände.

Im zweiten Schritt ist die Untersuchung komplexer und zeitintensiver, da meistens mehrere Situationen mit unterschiedlichen Sonnenständen untersucht und bewertet werden müssen.

Sind die beiden Hauptforderungen nach ausreichender Helligkeit und Blendfreiheit gewährleistet, kann ein Raum als gut tagesbelichtet angesehen und genutzt werden. Die hohe Effizienz des Tageslichts beträgt ca.  $115 \text{ lm/W}$ . Dem gegenüber besitzen hoch effiziente Leuchtstofflampen nur eine Lichtausbeute von ca.  $95 \text{ lm/W}$  und das bei schlechterer Farbwiedergabe.

Positiv wirkt sich das Tageslicht besonders im Sommer aus, denn bei natürlich belichteten Räumen ist im Vergleich zu künstlich belichteten Räumen die Kühllast bei gleicher Helligkeit geringer.

## Verschiedene Verfahren

Unsere Erfahrung sagt uns, daß ein großes Fenster einen Raum heller macht, als ein kleines Fenster. Es können also durchaus qualitative Abschätzungen gemacht werden, die mit einfachen Formeln präzisiert werden können. Sobald aber komplexere Raumgeometrien oder Sonnenschutzmaßnahmen zu berücksichtigen sind, und vorher definierte Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken penibel eingehalten werden müssen, ist die Verwendung von zusätzlichen Werkzeugen dringend zu empfehlen. Es können zwei Verfahren angewendet werden: Die rechnergestützte Simulation oder die Vermessung von Modellen in einem künstlichen Himmel. Ein künstlicher Himmel ist notwendig, um Meßergebnisse reproduzierbar zu machen und Varianten unter denselben Bedin-

gungen miteinander vergleichen zu können.

Beide Verfahren erlauben eine mehr oder weniger komplette Tageslichtuntersuchung durchzuführen. In den meisten Fällen ist es jedoch sinnvoll, die Vorteile der einzelnen Verfahren zu nutzen und sie zu kombinieren. Die Schnelligkeit der Computersimulation in Verbindung mit der Anschaulichkeit eines Modells liefern bei Tageslichtuntersuchungen die besten und verlässlichsten Ergebnisse.

## Sinnvolle Simulation

Mit der Verwendung eines rechnergestützten Tageslichtsimulationsprogramms können die für die Ausbreitung des Tageslichtes relevanten Parameter schnell variiert werden. Relevant sind dabei die Verglasungsart, der Sonnen- und der Blendschutz sowie die Tageslichtlenkungsmaßnahmen, die Nachbarbebauung, die Raum- und Fenstergeometrie und die Baustoffmaterialien. Simulationsprogramme eignen sich 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 so die Grundlagen erarbeitet worden sind und mit keinen wesentlichen Änderungen mehr zu rechnen ist, sollten die Ergebnisse der Computersimulation mit Tageslichtmeßmodellen im künstlichen Himmel überprüft werden.

## Simulation bei diffusem Himmel

Beispiel: Die folgenden Abbildungen sollen verdeutlichen, warum sich in Räumen mit einer Fensterwand ein typischer Wert für den mittleren Tageslichtquotienten (TQ) von 2,0 – 3,0 % einstellt. Sie veranschaulichen die fortschreitende Reduzierung des Tageslichtquotienten von anfänglich 100 % durch Hinzufügen von Wänden, Decke und Fassade.

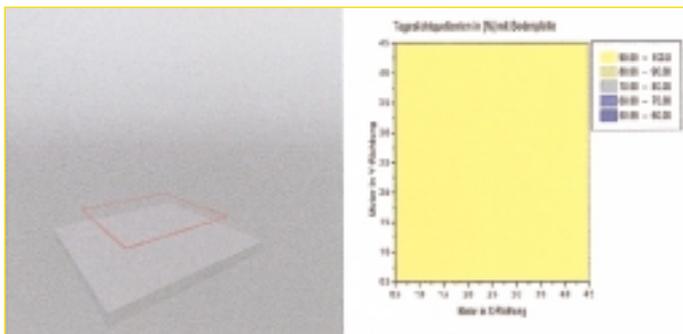


Bild 1: Vom Haus ist nur die Bodenplatte und das rot umrahmte Rechengebiet zu sehen. Der mittlere TQ liegt, wie erwartet, bei 100 %. Die Bodenplatte hat auf den Rechenbereich keinen Einfluß

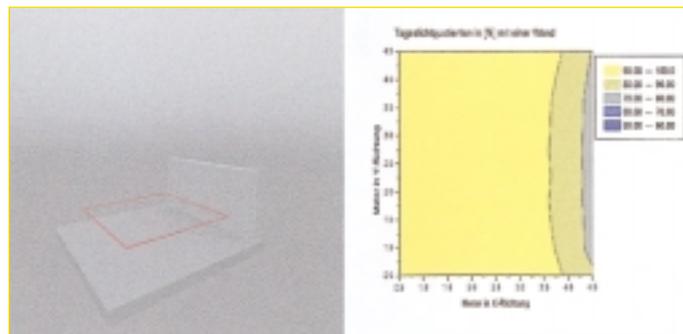


Bild 2: Der Einbau einer Wand ist deutlich im Tageslichtquotientendiagramm zu erkennen. Der mittlere TQ sinkt auf 93,8 %. Schon eine einzige Wand verringert den TQ

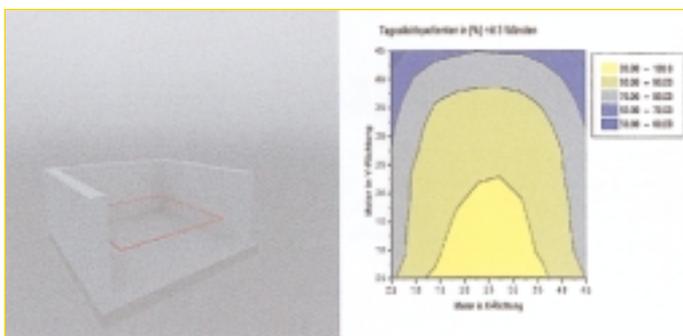


Bild 3: Den Einfluß der Wände zeigt das dieses Bild. Nachdem die Wände bis auf die Fensterwand errichtet sind, beträgt der mittlere TQ 84,4 %

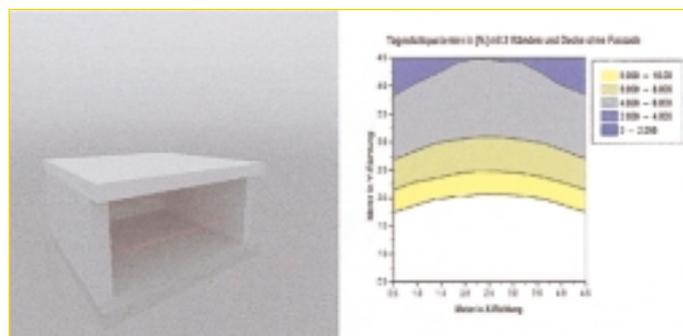


Bild 4: Den negativsten Einfluß auf den TQ hat die Decke. Der mittlere TQ-Wert beträgt jetzt nur noch 10,5 %. Deshalb mußte eine Skalierung um den Faktor 10 verringert werden. Das Bild zeigt, daß die Decke den größten Einfluß auf den TQ besitzt

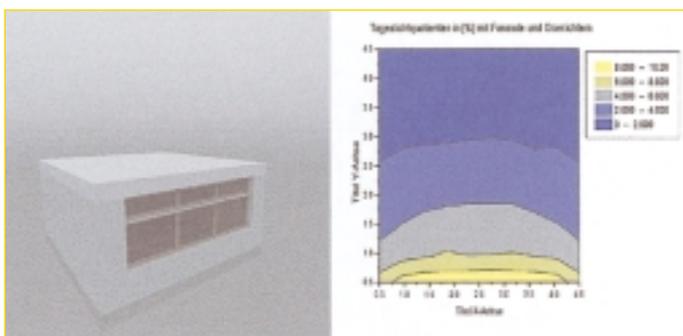


Bild 5: Die eingesetzte Fassade verdunkelt den fertigen Raum weiter. Der mittlere Tageslichtquotient liegt jetzt bei 3,3 %

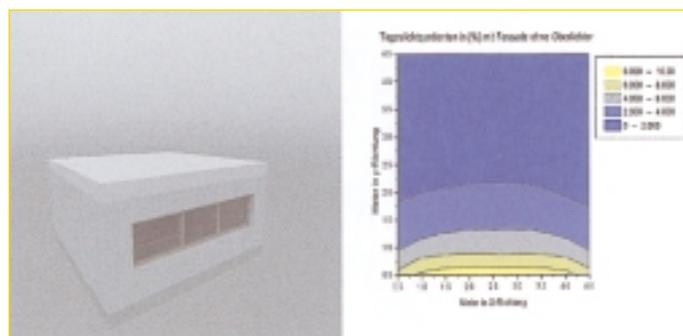


Bild 6: Der Verzicht auf ein Oberlicht führt besonders im hinteren Raumbereich zur Abnahme des TQ um 1 %. Der mittlere TQ beträgt jetzt 2,5 %. Ohne Oberlicht wird es besonders in der Raumtiefe dunkler

### Simulation bei klarerem Himmel

Hier ein Beispiel für die Simulation bei klarem Himmel mit Direktstrahlung: ein Büroraum im Dachgeschoß eines denkmalgeschützten Industriegebäudes in Hamburg (Bild 7). Zur Verbesserung der Tageslichtsituation sind Oberlichter in Giebelhöhe geplant, die in der Darstellung zu erkennen sind. Es stellte sich die Frage, ob die geplanten Oberlichter zu Blendungserscheinungen

führen würden und verschattet werden müßten, obwohl sie in ein nach Nord-nordosten gerichtetes Schrägdach eingebaut sind. Das Bild 7 zeigt deutlich, daß im Juni, kurz vor 10 Uhr, eine massive Blendung im Bereich des Monitors und des Schreibtischs einsetzt. Der Leuchtdichteunterschied zwischen besonntem und unbesonntem Schreibtisch ist mit 1:33 doppelt so hoch wie

der maximal empfohlene Wert für den fernem Gesichtsbereich von 1:15.

### Die Untersuchung mit Modellen

Wann sind lichttechnische Modelle im künstlichen Himmel der Computersimulation überlegen? Bei Aussagen wie „... der Kontrast ist doppelt so hoch wie der maximal zulässige Wert ...“ zeichnen sich die Grenzen der rechnergestützten Simulation ab.

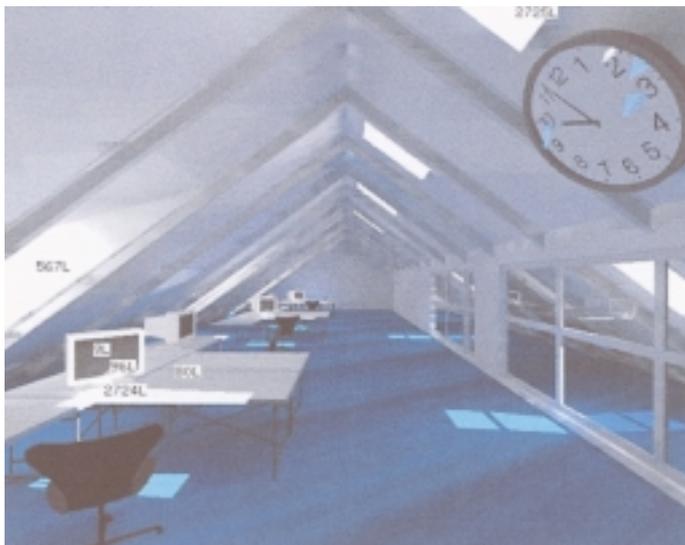


Bild 7: Computersimulation eines Büroraums im Dachgeschoß. Links vorne sind die Blendungen am Computerarbeitsplatz zu sehen



Bild 8: Innenraumaufnahme des Kieler Plenarsaales im Modell. Hier wurden die Reflexionsbedingungen in Abhängigkeit der verwendeten Materialien exakt nachgestellt

Wenn es noch gelingt, Helligkeitseindrücke mit photorealistischen Bildern zu vermitteln, versagt diese Methode bei der Beurteilung und Einschätzung von Blendungserscheinungen. Das anschaulichste Ergebnis einer Simulation ist eine zweidimensionale photorealistische Darstellung. Moderne Monitore können maximale Kontraste von 1:15, Fotos sogar nur von 1:10 darstellen. Das Auge muß sich beim Betrachten von Photos weder auf unterschiedliche Helligkeiten, noch sich bei der Änderung der Blickrichtung auf unterschiedliche Helligkeiten einstellen. Das sind jedoch die Hauptmerkmale des Sehens, auf die es beim dreidimensionalen Sehen im Raum ankommt. Soll ein realistisch erlebbarer Eindruck der Tageslichtverhältnisse in einem geplanten Gebäude erzeugt werden, muß ein Modell in einem passenden Maßstab angefertigt werden. Alle Oberflächeneigenschaften der später verwendeten Materialien, die für die Ausbreitung des Lichts relevant sind, müssen im Modell nachgebildet und mit Hilfe eines künstlichen Himmels überprüft werden. Der künstliche Himmel ist mit 1428 dimmbaren Leuchtstofflampen von höchster Farbwiedergabequalität und einer dem Tageslicht entsprechenden Lichtfarbe von 6000 Kelvin ausgerüstet; er kann von 0% – 100% stufenlos reguliert werden. So können alle diffusen Himmelszustände künstlich erzeugt werden, die für eine Messung relevant sind. Das parallele Sonnenlicht wird

mittels einer Halogenglühlampe mit Parabolreflektor nachgebildet. Sie ist an einem um 90° schwenkbaren Bügel befestigt, mit der der Sonnenhöhenwinkel abgefahren wird. Die Veränderung des Azimut wird mit einer um 360° drehbaren Scheibe im Boden des künstlichen Himmels realisiert. Der Himmel ermöglicht die Simulation jeder Sonnenbahn, jedes Datums und Orts der Erde. Auch Extremsituationen wie die sehr kurze Dämmerungsphase in Äquatornähe oder der 24-Stunden-Tag des Polarsommers können mit dem künstlichen Himmel nachbildet werden.

### Reflexionsbedingungen am Modell

Für den neuen Plenarsaal in Kiel ist eine Streckmetalldecke mit bevorzugter Reflexionsrichtung geplant. Es war mit dem Simulationsprogramm nicht möglich, die exakten Reflexionsbedingungen der Decke nachzubilden. Um verlässliche Aussagen zur Tageslichtsituation machen zu können, wurde ein Modell mit maßstabsverkleinerter Streckmetalldecke gebaut. Bild 8 zeigt eine Innenaufnahme des Plenarsaalmodells im künstlichen Himmel. Untersucht wurden verschiedene Blendschutzsysteme. Dabei zeigte sich, daß der linke Blendschutz nach wie vor zu starken Blendungserscheinungen führt, da die hellen Reflexionen auf dem Blendschutz Leuchtdichten von über 60 000 cd/qm aufweisen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stellt die Tageslichtplanung eine Sonderleistung dar, deren Wert häufig nur daran bemessen wird, wieviel Stunden mit künstlicher Beleuchtung eingespart werden können. Dabei sind jedoch die Effekte für die Gebäudenutzer, wie Komfortgewinn, Steigerung des Wohlbefindens und die damit verknüpfte verbesserte Effizienz, jedoch deutlich höher zu bewerten. Diese Wirkungen sind allerdings schwieriger zu bilanzieren, als die Einsparungen an elektrischer Energie für die Beleuchtung.

Mit Simulationen und Modellmessungen im künstlichen Himmel ist es möglich für jedes Gebäude ein maßgeschneidertes Tageslichtkonzept zu entwickeln. Nur so kann gewährleistet werden, daß die Öffnungsflächen genau so dimensioniert werden, wie es zur Erfüllung ihrer Funktion sinnvoll ist.

Zu große Fensteröffnungen haben keine bessere Tageslichtbeleuchtung, sondern eine stärkere Aufheizung, einen gesteigerten Kühlenergieverbrauch und höhere Betriebskosten zur Folge.

Planer und Bauherr sollten die Möglichkeiten moderner Lichtsimulationswerkzeuge nutzen, da so Beleuchtungskonzepte optimiert werden können. Dadurch lassen sich deutlich Kosten einsparen und die Nutzerqualitäten von Gebäuden erhöhen. Dem gegenüber ist eine nachträgliche Integration eines funktionierenden Tageslichtkonzepts in ein bereits erstelltes Gebäude oft nur mit sehr hohem Aufwand und entsprechenden Mehrkosten verbunden. □