

Zukunftsmärkte, Visionen – aber schon heute Realität

Prof. Dr.-Ing. Helmut Müller

Im Rahmen der Rosenheimer Fenstertage schilderte Prof. Dr.-Ing. Helmut Müller seine Konzepte moderner und künftiger Lichtlenksysteme. In diesem sehr bemerkenswerten Vortrag erfuhren die stauenden Zuschauer viel über trickreiche Methoden der Lichtlenkung und die beachtliche Wirkung auf Raumklimata und Energiebilanzen der so ausgestatteten Gebäude. Zwischenzeitlich sind auch visionäre Konzepte wie die Lichtlenkung mittels holographischer Elemente praxisreif, wie Müller mit seiner „Gesellschaft für Licht- und Bautechnik mbH“ in Köln beweist.

Tageslichtentwurf

Das Fenster dient als transparentes Element der Gebäudehülle primär der Beleuchtung des Innenraumes mit Tageslicht und dem Ausblick des Nutzers. Diese Hauptfunktion des Lichttransports wird ergänzt durch Zusatzfunktionen wie natürliche Lüftung, Steuerung der solaren Strahlungsgewinne (Passivheizung, Sonnenschutz) sowie Wärme-, Schall- und Witterungsschutz. Die vergleichsweise komplexe Aufgabe dieses Bauteils, das den dynamischen Energie- und Stoffaustausch zwischen Innen- und Außenraum regelt, spielt eine wichtige Rolle im Gebäudeentwurf, da sowohl die Qualität des Raumklimas als auch der Energieverbrauch des Gebäudes maßgebend beeinflusst werden.

Im Einzelnen wird die Tageslichtbeleuchtung durch folgende Entwurfsparameter bestimmt:

- Geometrie des Baukörpers mit Geschoßzahl, Geschoßhöhe und -tiefe, Fremd- und Eigenverschattung,



Diffuslichtlenkung kann mit Sonnenschutz kombiniert werden

- Größe und Anordnung der Fensteröffnungen, Fensterorientierung zur Sonne,
- Reflektionsgrad von Raumboberflächen und Außenflächen, Transparenz von Trennwänden (und Decken),
- Fensterentwurf mit Rahmenanteil, Lichttransmission des Glases, Lichtdurchlaß von Blend- und Sonnenschutzvorrichtungen,
- besondere Lichtlenk- und Lichtleit-systeme.

Damit wird deutlich, daß besondere Lichtlenksysteme nur eine Maßnahme unter vielen ist und daß die Geometrie des Baukörpers sowie die Größe und Anordnung der Fenster von ausschlaggebender Bedeutung für die natürliche Raumbeleuchtung sind.

Ziele der Tageslichtbeleuchtung

Die Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht ist kein Selbstzweck, sondern dient den übergeordneten Zielen der

Qualität des Raumklimas, dem Umweltschutz und der Wirtschaftlichkeit:

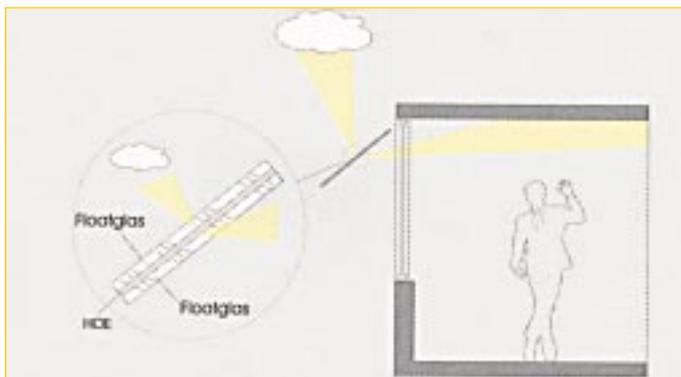
- Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen durch weitestgehende Innenraumbeleuchtung mit natürlichem Licht am Tage (Leuchtdichten, Blendungsbegrenzung, Beleuchtungsstärken, Spektrum, zeitliche Schwankungen, Richtung, Schatten u. a.), durch möglichst geringe beleuchtungsbedingte Wärmelasten (sommerliche Raumtemperaturen) sowie durch Sichtverbindung nach außen.
- Nachhaltige Schonung der Umwelt durch geringen Energieverbrauch (Strom für Kunstlicht, beleuchtungsbedingte Kühllasten).
- Wirtschaftlicher Gebäudebetrieb durch geringe Energie- und Instandhaltungskosten.

Resultierend ergeben sich einerseits Forderungen an den tageslichtoptimierten Entwurf von Gebäude, Raum und Fenster einschließlich Maßnahmen zur temporären Beeinflussung von Wärmeertrag sowie Lichtmenge und Lichtrichtung (Sonnenschutz und Blendschutz). Andererseits werden auch Forderungen an eine automatische Regelfähigkeit der künstlichen Beleuchtung in Abhängigkeit vom Tageslicht erkennbar.

Prinziplösungen

Neben den Entwurfsparametern des Gebäudes und des Raumes sowie der Größe und Anordnung von Fenstern bieten Fensterkomponenten Verbesserungsmöglichkeiten der natürlichen Raumbeleuchtung. Tabelle 1 zeigt eine systematische Übersicht von Lösungsprinzipien der Tageslichtbeleuchtung. Nachfolgend werden die Hauptgruppen erläutert und hinsichtlich der Er-

Prinzipskizze zur Diffuslichtlenkung



füllung der wichtigsten Forderungen vergleichend überprüft. Innovative Einzelsysteme werden erläutert und exemplarisch in der Anwendung gezeigt.

Diffuslichtlenkung

Die Helligkeit des gleichmäßig bedeckten Himmels (DIN 5034) fällt vom Zenit zum Horizont deutlich ab (auf etwa $1/3$). Um das vergleichsweise große Lichtangebot aus dem Zenitbereich in die Raumtiefe zu bringen, können Fensterelemente für eine Diffuslichtumlenkung eingesetzt werden. Da der bedeckte Himmel der kritische Fall für die natürliche Raumbeleuchtung ist, sollten Umlenssysteme den Gesamt-Lichteintrag in den Raum nicht reduzieren, wie das z. B. beim Lichtschwert (Lightshelf) geschehen kann. Bei klarem Himmel werden die Systeme mit einem beweglichen Sonnenschutz kombiniert, der bei Nordorientierung entfallen kann. Eine hohe Transparenz und Durchsichtigkeit ist nur bei holographisch-optischen Elementen (HOE) gegeben.

Diffuslichtumlenkung mit holographisch-optischen Elementen (HOE) besteht aus transparenten Glaselementen, die den Ausblick nicht stören. Sie lenken diffuses Licht aus dem erweiterten Zenitbereich des Himmels in die Raumtiefe und verbessern damit die Raumausleuchtung mit Tageslicht. Da direkte Sonneneinstrahlung bei bestimmten Einfallswinkeln zu Farbzerlegungen führen kann, wird der Einsatz regulärer holographischer Gitter nur für Nordorientierung empfohlen. Bei besonnten Fassaden sind für eine farbneutrale Raumbeleuchtung Weiß-

lichthologramme zu verwenden, deren gebeugtes Licht wieder zu Weiß gemischt wird. Zwei Einbauvarianten für Fassaden sind möglich: Die Elemente können vertikal als Oberlicht in die Verglasung integriert werden oder vor dem Oberlicht in einem Winkel ausgestellt werden. Letztere Lösung bietet eine größere Empfangsfläche für Zenitlicht und bewirkt größere Helligkeiten im Raum. Das optische Gitter bewirkt eine Umlenkung des aus einem bestimmten Winkelbereich (z. B. 45° Höhenwinkel $\pm 5^\circ$) einfallenden Lichtes an die Decke des Raumes.

Richtungsselektive Verschattung mit Diffuslichtdurchlaß

Zur Vermeidung von Blendung und Raumüberwärmung ohne Beeinträchtigung von Tageslichtbeleuchtung und Aussicht wird nur das direkte Licht der Sonne ausgeblendet, während das diffuse Licht von Himmel und Erdoberfläche durchgelassen wird. Viele Systemlösungen basieren auf diesem Prinzip der richtungsselektiven, d. h. auf den Sonnenstand bezogenen Verschattung. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Funktion wie folgt: Einachsige Sonnennachführung ist erforderlich für Lamellen mit Prismenstruktur oder mit holographisch-optischen Elementen (HOE), die das Licht der Sonne positionsscharf ausblenden. Starr im Scheibenzwischenraum von Isolierglas eingebaute Spiegellamellen oder -raster und Prismenplatten erkaufen sich den Verzicht auf Sonnennachführung durch wesentlich größere Winkelbereiche der Verschattung und entsprechend kleinere Diffuslichttransmission. Eine Durchsichtigkeit der Verschattungselemente ist nur bei To-

Hauptgruppe	System
1 Diffuslichtlenkung	1.1 Holographisch-optische Elemente 1.2 Anidolische Systeme
2 Richtungsselektive Verschattung mit Diffuslichtdurchlaß	2.1 Prismenplatten 2.2 Sonnenschutz-Spiegelraster 2.3 Konzentration mit holographisch-optischen Elementen 2.4 Totalreflektion mit holographisch-optischen Elementen
3 Sonnenlichtlenkung	3.1 Laser Cut Panels (LCP) 3.2 Lichtlenkglas mit Acrylprofilen 3.3 Lichtschwert (Lightshelf) 3.4 Drehbare Spiegellamellen 3.5 Jalousien mit Lichtlenkstellung 3.6 Lichtlenkglas mit Weißlicht-hologrammen 3.7 Heliostat
4 Lichttransport	4.1 Lichtrohr (Lightpipe), Lichtdecke 4.2 Lichtwellenleiter, Glasfaser
5 Sonnenstandsabhängige Sonnenschutz-/Lichtlenksysteme	5.1 Verglasung mit Spiegelprofilen
6 Lichtstreuende Systeme	6.1 Lichtstreuendes Glas 6.2 Transparente Wärmedämmung

Systematische Übersicht von Tageslichtsystemen

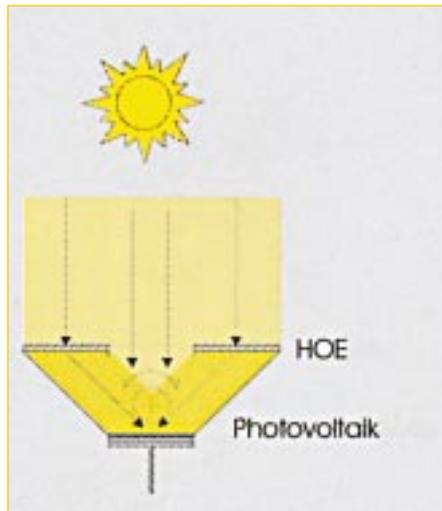
talreflexion oder Konzentration des direkten Sonnenlichts durch HOE gegeben.

Konzentration mit holographisch-optischen Elementen (HOE) ermöglicht das Auffangen des Sonnenlichts auf opaken Streifen im Fokus des Elements (30 % der Sonnenschutzfläche). Die einachsig nachgeführte Glaslamelle wird horizontal oder senkrecht vor der Lichtöffnung montiert. Durch die Winkelselektivität der HOE wird das diffuse Licht fast ungehindert durchgelassen und der Ausblick ermöglicht.



HOE können auch zur Leistungssteigerung bei Photovoltaikanlagen genutzt werden

Die undurchsichtigen opaken Streifen mit nur 30 % der Gesamtfläche können auch für die photovoltaische Stromerzeugung genutzt werden. Die Spannweite der ca. 60 cm breiten Elemente kann bis 700 cm betragen, bei gebogenen Glaslamellen bis 400 cm. Die Elemente werden vor Fassaden oder oberhalb von Glasdächern eingesetzt. In Doppelfassaden empfiehlt sich der Einbau in Form von Öffnungslamellen in der äußeren Verglasung, so daß im Kühlfall Sonnennachführung und Öffnen des Fassadenzwischenraumes mit Wärmeablüftung zusammenfallen. Der in Verbundglas eingebettete Film mit HOE bewirkt die Umlenkung und



Einsatzbeispiel HOE/Photovoltaik in Kombination



Sonnenlichtlenkung hat gerade bei Büroräumen viele Vorteile: Energieeinsparung, blendfreie Ausleuchtung

Konzentration des senkrecht einfallenden Lichtes auf einen opaken Streifen. Bei einer Belegung des opaken Streifens mit Solarzellen wird durch die Strahlungskonzentration eine Steigerung der Stromausbeute je Zelle um den Faktor 1,3 bewirkt. Im Winter wird durch Parallelstellung zum Sonnenlicht eine passive Solarheizung ermöglicht.

Sonnenlichtlenkung

Diese Systeme richten direktes Sonnenlicht gezielt und unter Vermeidung von Blendung in die Raumtiefe. Da die Beleuchtungsstärke infolge des direkten Sonnenlichts etwa zehnmals so hoch ist wie infolge des indirekten Himmelslichts, reichen kleine Flächenanteile der Fenster für die Raumbeleuchtung. Die restlichen Fensterflächen können konventionell verschattet werden. Das macht diese Systemgruppe wirtschaftlich und besonders interessant. Die Vermeidung von Blendung und unnötigen Kühl-

lasten erfordert eine hocheffiziente Lenkung und Verteilung des Sonnenlichts und eine genaue Dimensionierung der Elemente. Die wesentlichen Funktionsunterschiede der verschiedenen Systeme bestehen in der Sonnennachführung, im Blendschutz und in der Durchsichtigkeit: Reflektierende Blech- oder Glaslamellen bedürfen der einachsigen Nachführung, Heliostaten sogar der zweiachsigen Nachführung. Starrer Einbau ist möglich bei Laser Cut Panels (LCP), Lichtlenkglas mit Acrylprofilen oder Weißlichthologrammen und Lichtschwertern. Blendschutz ist gegeben bei Lichtlenkglas mit Acrylprofilen bei Jalousien und Spiegellamellen ohne Lichttransmission (in der Regel Blechlamellen). Ein zusätzlicher Blendschutz ist erforderlich bei

Spiegellamellen aus Sonnenschutzglas, Lichtschwertern, LCP und Lichtlenkglas mit Weißlichthologrammen.

Lichtlenkglas mit Acrylprofilen bietet die Möglichkeit, Sonnenlicht aus einem großen Bereich von Höhen- und Azimutwinkeln einzufangen und definiert in den Raum abzustrahlen. Bei Einbau in Fassaden wird die Sonneneinstrahlung von Lichtlenkglas an die Decke gelenkt und von dort blendfrei auf die Arbeitsplätze reflektiert. Bei Einbau in Dachfenstern über Atrien, Treppenhäusern und engen Lichthöfen wird das Sonnenlicht senkrecht nach unten gelenkt. In Fassaden wird das Lichtlenkglas im Oberlichtbereich oberhalb der Augenhöhe eingesetzt, um Blendungserscheinungen zu vermeiden. Die Höhe der Elemente sollte etwa 10 % der Raumhöhe betragen, um einen 6 m tiefen Raum zu beleuchten. Die Scheibenbreite

sollte 1,8 m nicht überschreiten. Im Scheibenzwischenraum übereinander gestapelte Profile aus Acryl lenken das direkte Sonnenlicht vertikal um. Auch horizontal wird das Licht umgelenkt, um für alle Sonnenpositionen parallel zu den Trennwänden bis in die Tiefe des Raumes zu gelangen. Die Horizontalumlenkung wird durch eine sinusförmige Oberflächenstrukturierung der rückseitigen Isolierglasscheibe erreicht. Die Elemente sind nicht durchsichtig. Der Wärmeschutz variiert von Zweischeiben-Isolierglas ($k = 2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) bis Zweischeiben-Wärmeschutzglas mit IR-reflektierender Beschichtung und Krypton-Füllung ($k = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Wenn das Oberlicht nicht durch ein horizontales Rahmenprofil von der unteren Fensterverglasung getrennt werden soll, ist auch der „schwimmende“ Einbau der Acryllamellen im oberen Teil der Fensterverglasung möglich.

Stromverbrauchsmessungen in Gebäuden mit Lichtlenkglas und automatischer tageslichtabhängiger Kunstlichtregelung zeigten 80 % Energieeinsparung, wovon etwa die Hälfte auf die Tageslichtlenkung entfielen. Bei Einsatz in Werkstatträumen eines Ausbildungszentrums in Köln wird das Sonnenlicht bis zu 20 m Raumtiefe umgelenkt.

Lichtlenkglas mit Weißlichthologrammen ermöglicht die Umlenkung von direkter Sonnenstrahlung in die Raumtiefe, ohne daß die für Hologramme charakteristischen Regenbogenfarben im Raum auftreten. Die Vielzahl der einzelnen holographisch-optischen Elemente (Größe ca. 20 mm \times 40 mm) mischt das zunächst spektral zerlegte Licht in einem geringen Abstand hinter der Glasscheibe mit dem Licht der Nachbarelemente wieder zu farbneutralem, d. h. weißem Licht. Die Hologramme sind als trans-

parenter und durchsichtiger Film in Verbundglas eingebettet, welches in Mehrscheibenisoliervglas verwendet werden kann. Diese Lichtlenkgläser können in Dach- und in Fassadenverglasungen, hier auch in Doppelfassaden, eingesetzt werden. Bei Seitenfenstern empfiehlt sich die Anordnung über Augenhöhe, um Blendung zu vermeiden. In Büros sollte raumseitig der Hologramme ein Blendschutz angeordnet werden, da ein kleiner Teil des Sonnenlichts durch die HOE nicht umgelenkt wird. Auch in Dachöffnungen können lichtlenkende Hologramme eingebaut werden. Sofern Farbfefekte des umgelenkten Lichts erwünscht sind, z. B. in Eingangsbereichen, werden HOE mit deutlich sichtbarer Farbzerlegung eingesetzt.

Lichttransport

Sollen Kernzonen des Gebäudes, die weiter als 10 m von Fenstern entfernt sind, natürlich beleuchtet werden, dann müssen besondere Maßnahmen für den Lichttransport ergriffen werden. Hier kommen Rohre, Kanäle oder Schächte in Frage, deren Innenwandung hochreflektierend ausgekleidet ist, z. B. mit Prismenfolie, oder sogenannte Lichtwellenleiter, wie z. B. Glasfasern. Die Art der Lichteinkopplung und die Güte des Reflektors sind entscheidend für die Effizienz des Systems. Eine Integration der Lichtempfangs- und -Einkopplungselemente in Fassaden ist bezüglich Besonnung und Architektur schwierig, Dachflächen sind in der Regel besser geeignet.

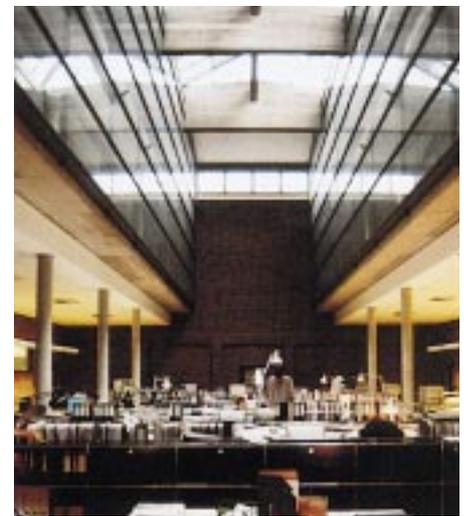
Sonnenstandsabhängige Lichtlenk-/Sonnenschutzsysteme

Diese Lösungsgruppe zeichnet sich durch starren, unbeweglichen Einbau

aus und nutzt die jahreszeitliche Veränderung des Sonnenstandes (Höhenwinkel), um direktes Sonnenlicht entweder auszublenden (Sommer) oder in die Raumtiefe umzulenken (Winter). In den Übergangsjahreszeiten ist die Effizienz der Systeme eingeschränkt.

Lichtstreuende Systeme

Solche Gläser bewirken eine gleichmäßige Verteilung des Lichts in den Halbraum. Dies ist für besondere Gebäudearten, wie z. B. Museen oder Hallen mit Lichtdecken erwünscht. An Arbeitsplätzen können solche Gläser, wenn sie besonnt sind, aufgrund ihrer



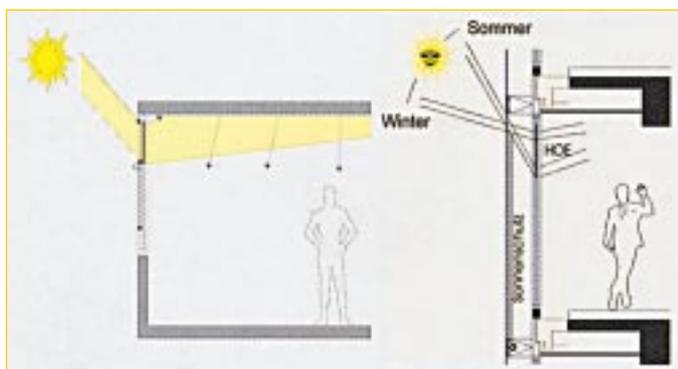
Anwendungsbeispiel für den Lichttransport in tiefergelegene Räumlichkeiten

hohen Leuchtdichte zu Blendung führen. Während lichtstreuende Glasscheiben zu allen Arten von Funktionsgläsern (Wärmeschutz, Schallschutz, Sonnenschutz) verarbeitet werden können, sind Gläser mit lichtstreuender Füllung im Scheibenzwischenraum durch einen niedrigen k -Wert bei hoher Transmission von Licht und Sonnenenergie ausgezeichnet (Transparente Wärmedämmung). Eine Durchsicht ist bei lichtstreuenden Gläsern in der Regel nicht möglich.

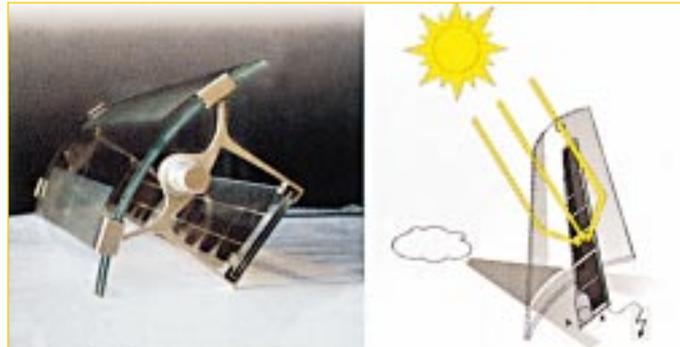
Schlußfolgerungen

Neue Tageslichtsysteme bieten eine Lösung des Konflikts der Forderung nach natürlicher Raumbeleuchtung

Prinzipskizze zur Lichtlenkung in Büroräumen



und Aussicht einerseits und Verschattung für Sonnen- und Blendschutz andererseits. Die wesentlichen Prinzipien beruhen auf der selektiven Lenkung von direktem Sonnenlicht, sei es für die Raumbelichtung oder für die kontrollierte Ausblendung. Die Qualität des Raumklimas bezüglich Licht und Wärme kann erheblich verbessert werden, da der Kunstlichteinsatz weitgehend auf die dunkle Tageszeit begrenzt wird. Der Energieverbrauch und die Betriebskosten des Gebäudes werden deutlich reduziert, wie das Beispiel eines mehrgeschossigen Bürogebäudes mit konventioneller Beleuchtung und Heizung zeigt: Der jährliche Stromverbrauch für die Beleuchtung beansprucht mit 25 bis 35 kWh/m² Nutzfläche einen erheblichen Anteil des Gesamtenergiever-



Eine trickreiche Kombination aus Abschattungs- und Photovoltaiksystem

brauchs, wie auch von Szermann ausführlich dargestellt. Umgerechnet in Primärenergie entfallen auf die Heizung eines Büroneubaus z. B. ca. 75 kWh (m²a), auf die Beleuchtung bei konventioneller Ausführung 74 bis 103 kWh (m²a). Damit beträgt der Primärenergieverbrauch für die

Beleuchtung 50 bis 58 % der Summe von Heizung und Beleuchtung. Es wird deutlich, daß die Reduzierung des Stromverbrauchs für die Beleuchtung in diesem Gebäudesektor ein bedeutsames Potential der wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Energieeinsparung darstellt. □