

Glasprofile in der Fassade

Entwicklung einer solar optimierten Systemfassade

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde einer
Doktor - Ingenieurin (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Bettina Volz

geboren in Aalen

Hauptberichter: Prof. Stefan Behling

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adam

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Juni 2006

Institut für Baukonstruktion und Entwerfen,
Lehrstuhl 2, Universität Stuttgart,
2006

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Assistentin am Institut für Baukonstruktion und Entwerfen, L2 der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Stefan Behling für die thematische Anregung zu dieser Arbeit, für seine fachliche Begleitung sowie für die Bereitschaft, die akademische Betreuung der Arbeit in Form des Hauptreferats zu übernehmen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Adam danke ich ebenfalls sehr für die fachliche Unterstützung dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Ich möchte mich außerdem bei allen Institutionen und Personen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, herzlich bedanken.

Der Bau des Prototypen wurde finanziell von der Firma Metallbau Früh in Umkirchen getragen - hierfür möchte ich mich ebenfalls bedanken.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Aktivierung der Fassade zur Einsparung von elektrischer Energie und zur aktiven Nutzung von Solarenergie.

Sie soll als Beitrag zur Ressourcenschonung und aktiver Nutzung erneuerbaren Energien dienen und das Interesse von Industrie und Architekten für die Nutzung der Fassadenflächen vor allem von Bürogebäuden wecken.

Neben den Bemühungen der Architekten und Energieplaner, den Energieverbrauch von Gebäuden, hier im Speziellen von Verwaltungsgebäuden, durch eine konsequente Dämmung der Gebäudehüllen und den Einsatz von geeigneten Sonnenschutzmaßnahmen zu minimieren, gibt es die parallele Entwicklung von verschiedenen Systemen zur Tageslichtnutzung. Diese sollen einerseits den Verbrauch an elektrischer Energie reduzieren und andererseits die Behaglichkeit der Nutzer erhöhen.

Die Reduzierung von elektrischer Energie wird in dieser Arbeit durch die Nutzung des Tageslichts mit Hilfe von Glasprofilen und -rohren erfolgen. Zur aktiven Solarenergienutzung werden Vakuumröhren in die Fassade integriert. Es gibt die Vision einer transparenten Fassade, die Energie spart, nutzt und sammelt.

Hierbei werden die Glasprofile und -rohre, die sich auf der Grundlage der Untersuchungen als funktionsfähige Profile zur Tageslichtnutzung herausgestellt haben, mit auf dem Markt erhältlichen Vakuumröhren zu einem Fassadensystem gefügt und in Fassadenkonstruktionen integriert.

Es wird ein Fassadensystem entwickelt, das jeder Büroeinheit ermöglicht, ihre Fassade solartechnisch zu aktivieren bei gleichzeitigem Presti-

gewinn für den Nutzer.

Die Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass hinsichtlich Nutzung des Tageslichts der Einsatz der Glasprofile als transparenter Sonnenschutz bei gleichzeitiger Diffuslichtlenkung am sinnvollsten ist. Diffuses Licht steht im Gegensatz zur direkten Strahlung auch bei bewölktem bzw. bedecktem Himmel zur Verfügung. Systeme, die mit direktem Licht arbeiten funktionieren gerade dann nicht, wenn der Bedarf am größten ist.

In Zukunft wird die aktive Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden eine zentrale Rolle spielen.

Die Diskrepanz zwischen dem weltweiten Bedarf an Energie und den Vorkommen der fossilen Rohstoffe wird in den nächsten Jahren immer größer werden. Diese Lücke muss durch die Nutzung erneuerbarer Energien geschlossen werden.

Für Solarthermie ist eine ähnliche Entwicklung wie bei Photovoltaikanlagen zu erwarten. Die Photovoltaik betreffend wurden auf politischer Ebene deutliche Signale gesetzt, die eine aktive Solarenergienutzung in der Gebäudehülle unterstützen. So bringt der im Moment vorliegende Entwurf zum EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) zum Ausdruck, dass gebäudeintegrierte Anlagen eine erhöhte Vergütung und die fassadenintegrierten Systeme den Höchstsatz bekommen. Ein Entwurf für das EEG die Solarthermie betreffend ist in Arbeit.

Abstract

The present work is about utilizing the building façade in order to reduce the consumption of electricity by actively using solar energy. This work aims to contribute to the conservation of scarce resources and to be proactive in the use of renewable energies. Hopefully this initiative will awaken the interest of both industry and architects for the energy efficient use of building facades. This initiative is particularly relevant to office buildings.

Besides the efforts of architects and energy-planners to minimize the energy consumption of buildings with the insulation of building surfaces along with adequate sun protection measures, there is a parallel development of alternative systems aiming to utilize the daylight. These systems have the dual benefit of a reduction in the consumption of electric energy as well as an increase in the comfort of the users.

The added benefits from the active use of solar energy are achieved by incorporating both glass sections and glass pipes into the façade. Glass profiles and pipes have already proved themselves as well-working profiles for the exploitation of daylight. This technology combined with vacuum-tubes that are already on the market, creates an integrated façade system that gives the impression of a transparent surface while it actively saves, uses and collects energy. Thus a system is being developed that makes it possible for each office unit to activate their façade solar-technically. As well as increasing the utility of the individual user, the system offers added prestige.

The results within the framework of this work show that with regard to the utilization of daylight, the use of

glass profiles as transparent sun protection with simultaneous steering of diffuse light is the most sensible. Unlike direct radiation, diffuse light is available also when the sky is clouded. Systems working with direct light are least efficient when they are most needed.

In future the active use of renewable energies in buildings will have a central role. The discrepancy between the worldwide need of energy and the existing fossil energies will continue to broaden in the next years. This gap must be closed by using more renewable energies.

As for solar thermal energy one has to expect a similar development as with photovoltaic installations. Concerning the photovoltaic, on a political level, photovoltaic technologies have been given clear signals supporting the active use of solar energy for building-surfaces. The current existing draft for the EEG (law concerning renewable energies) shows that installations integrated into the building are sponsored by a higher reimbursement and the systems integrated into the facades receive the maximum rate. The draft for the EEG concerning solar thermal energy is currently in preparation.

- 1.0 Einleitung**
 - 1.1 Problemstellung
 - 1.2 Zielsetzung der Arbeit

- 2.0 Fassadenkonzepte**
 - 2.1 Anforderungen an die Fassade
 - 2.1.1 Grundlagen
 - 2.1.2 Lichtlenkung bei klarer Durchsicht
 - 2.2 Untersuchung möglicher Einbausituationen
 - 2.3 Konzepte für Systemfassaden vor geschosshoher Verglasung
 - 2.3.1 Lineare Anordnung
 - 2.3.2 Lineare Anordnung mit horizontalem light-shelf in der Systemfassade
 - 2.3.3. Transluzente Fassade mit 90°-Prismen
 - 2.3.4 Glasröhren kombiniert mit einem light-shelf aus Photovoltaikelementen
 - 2.3.5 Vakuumröhren mit light-shelf
 - 2.3.6 Transluzente Fassade mit geschosshoch angeordneten Vakuumröhren
 - 2.4 Zusammenfassung

- 3.0 Allgemeine Grundlagen**
 - 3.1 Tageslicht
 - 3.1.1 Bedeutung des Tageslichts
 - 3.1.2 Das Tageslichtangebot in Mitteleuropa
 - 3.1.3 Anforderungen an die Tageslichtbeleuchtung von Räumen
 - 3.1.4 Tageslichtquotient
 - 3.1.5 DIN-Norm + Definitionen
 - 3.2 Konventionelle Beleuchtungssituation
 - 3.3 Tageslicht als Substitut für Kunstlicht
 - 3.4 Tageslicht am Arbeitsplatz
 - 3.5 Kriterien zu Beurteilung der Blendschutzeigenschaften
 - 3.6 Führen von Licht
 - 3.7 Normen und Richtlinien

- 4.0 Tageslichtsysteme allgemein**
 - 4.1 Physikalische Grundprinzipien
 - 4.1.1 Grundlagen
 - 4.1.2 Reflexion
 - 4.1.3 Brechung
 - 4.1.4 Totalreflexion
 - 4.1.5 Lichtlenkung
 - 4.1.6 Lichtstreuung
 - 4.1.7 Interferenz und Beugung
 - 4.2 Anforderungsprofil an ein Tageslichtsystem
 - 4.2.1 Grundlagen
 - 4.2.2 Bezug zur Umwelt
 - 4.2.3 Gleichmäßigkeit

- 4.2.4 Farbwiedergabe
- 4.2.5 Tageslichtautonomie
- 4.2.6 Blendschutz
- 4.2.7 Reduktion der Kühllasten
- 4.2.8 Wirtschaftlichkeit
- 4.2.9 Nutzerakzeptanz

5.0 Analyse existierender Tageslichtsysteme

- 5.1 Streuende Systeme
 - 5.1.1 Helioran
 - 5.1.2 Kapilux-T
 - 5.1.3 Ecos honeycomb
 - 5.1.4 Ecos D
- 5.2 Lichtlenkung
 - 5.2.1 Lumitop
 - 5.2.2 Ecos T
 - 5.2.3 Ecos W
 - 5.2.4 y-Inglas
 - 5.2.5 Fisch
 - 5.2.6 Isolette
- 5.3 Transparenter Sonnenschutz
 - 5.3.1 Micro-Sonnenschutzraster
 - 5.3.2 Okasolar
 - 5.3.3 Ecos Louver
 - 5.3.4 Prismenplatten
 - 5.3.5 Hüppe Prismenlamellen
 - 5.3.6 Hologramme
- 5.4 Zusammenfassung

6.0 Profile und Rohre aus Glas

- 6.1 Eigenschaften von Glas
 - 6.1.1 Transparenz
 - 6.1.2 Festigkeit
 - 6.1.3 Chemische Beständigkeit
 - 6.1.4 Physikalische Eigenschaften
- 6.2 Herstellung und Anwendung

7.0 Glasprofile als Tageslichtsysteme

- 7.1 Untersuchung vorhandener Profile
 - 7.1.1 Einleitung
 - 7.1.2 Versuchsbeschreibung im Modellraum
 - 7.1.3 60° - Prisma
 - 7.1.3.1 Einbausituation 1
 - 7.1.3.2 Einbausituation 2
 - 7.1.3.3 Einbausituation 3
 - 7.1.3.4 Einbausituation 4
 - 7.1.4 Glashalbzylinder
 - 7.1.5 Teilverspiegeltes Glasrohr - Lichtlenkung
 - 7.1.6 Teilverspiegeltes Glasrohr - Sonnenschutz
 - 7.1.7 Teilverspiegelter Glasstab

- 7.2 Neues Profil 90°-Prisma
 - 7.2.1 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz
 - 7.2.2 90°-Prisma zur Lichtlenkung
 - 7.2.3 60°- und 90°-Prismen als winkelselektiver Sonnenschutz
 - 7.2.4 60°- und 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz
- 7.3 Vergleich zwischen existierenden Lichtlenksystemen und Schott-Profilen
 - 7.3.1 Halbzylinder aus Glas im Vergleich mit Lumitop
 - 7.3.2 Teilverspiegelte Glasstäbe im Vergleich mit ECOSS D
 - 7.3.3 90° Prisma im Vergleich mit Prismenplatten von Hüppe
- 7.4 Absorber/Reflektor/Antischmutzbeschichtung
 - 7.4.1 Allgemein
 - 7.4.2 Folien
 - 7.4.3 Lacke
 - 7.4.4 Ätzung
 - 7.4.5 Antischmutzbeschichtung
- 7.5 Neues Profil „Konzentrator“ als transparenter Sonnenschutz
 - 7.5.1 Einleitung
 - 7.5.2 Konzentrator aus Glas shape 1
 - 7.5.3 Konzentrator aus Glas shape 2
 - 7.5.4 Konzentrator aus Glas shape 3
- 7.6 Zusammenfassung

8.0 Raytracing - Strahlenverfolgung

- 8.1 Grundlagen
 - 8.1.1 Erläuterung - Definition
 - 8.1.2 Referenzsystem
 - 8.1.3 Raytracing für bestehende Tageslichtsysteme
 - Fisch
 - y-Inglas
 - Lumitop
 - Okasolar
 - Prismenplatten - Lichtlenkung
 - Prismenplatten - Sonnenschutz
- 8.2 Raytracing für Glasprismen
 - 8.2.1 90°-Prisma zur Lichtlenkung
 - 8.2.2 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz
- 8.3 Auswertung der Simulationen
- 8.4 Vorgaben, Randbedingungen für das Raytracing für Glasprismen von Optis & Energy Concepts
 - 8.4.1 Einleitung
 - 8.4.2 Sonnenschutzsystem aus 90°-Prismen mit Diffuslichtlenkung
 - 8.4.3 Zieldefinierung für das 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz
- 8.5 Ergebnisse der ersten lichttechnischen Untersuchungen

- 8.5.1 Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90°-Prismen, Systembeschreibung
- 8.5.2 Richtungsabhängige Transmission durch einzelne Prismen
 - 8.5.2.1 mit perfekten Kanten
 - 8.5.2.2 mit perfekten Kanten + Reflektor/Absorberschicht
 - 8.5.2.3 mit kleinem Radius
 - 8.5.2.4 mit kleinem Radius + Reflektor/Absorberschicht
 - 8.5.2.5 mit großem Radius
 - 8.5.2.6 mit großem Radius + Reflektor/Absorberschicht
 - 8.5.2.7 mit perfekten Kanten 87°
 - 8.5.2.8 mit perfekten Kanten 93°
- 8.5.3 Definition Testraum
- 8.5.4 Transmission von Diffusstrahlung
- 8.5.5 Transmission von Direktstrahlung
- 8.5.6 Lichtverteilung im Raum
- 8.5.7 Strahlenverteilung, Konfiguration 7 und 15
- 8.5.8 Synopsis
- 8.6 Ergebnisse der zweiten lichttechnischen Untersuchung [OEC 2002]
 - 8.6.1 Transmission von Direktstrahlung am Sonnenschutzsystem aus 90°-Prismen
 - 8.6.2 Konzepte zur optischen Passivierung der unteren Kathete
 - 8.6.2.1 Diffuse Aufrauung
 - 8.6.2.2 Graue Farbe mit Spiegelbeschichtung
 - 8.6.2.3 Verformung
 - 8.6.3 Ergebnisse
 - 8.6.3.1 Quantitative Analyse der Transmission
 - 8.6.3.2 Transmissionswerte im Vergleich
 - 8.6.3.3 Richtungsverteilung bei hoher Transmission
 - 8.6.4 Zusammenfassung
- 8.7 Einfluss der Ergebnisse auf den Einsatz der 90°-Prismen
 - 8.7.1 90°-Prisma ohne Behandlung der unteren Kathete
 - 8.7.2 90°-Prisma mit diffuser Aufrauung
 - 8.7.3 90°-Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete
- 8.8 Zusammenfassung

9.0 Integration von Solarthermie in die Fassade

- 9.1 Problemstellung
- 9.2 Ziele der Systemfassade
 - 9.2.1 Gesamtziel
 - 9.2.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen
 - 9.2.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele
- 9.3 Stand der Wissenschaft und Technik
 - 9.3.1 Einleitung

- 9.3.2 Vakuumröhrenkollektoren
- 9.4 Architektonische und technische Anforderungen, Klärung der Grundlagen
 - 9.4.1 Baurechtliche Grundlagen
 - 9.4.2 Analyse vorhandener Pilotprojekte
 - Friedrichshafen
 - Chemnitz
- 9.5 Die Vakuumröhre in der Fassade
 - 9.5.1 Alternative Sammlerkonzepte
 - 9.5.2 Integration in Fassadensysteme
 - 9.5.3 Modelluntersuchungen
 - 9.5.4 Problematik: verschiedene Büroraster
- 9.6 Prototyp-Entwicklungen

10.0 Prototyp

- 10.1 Modelle für die Profiluntersuchungen
- 10.2 Modellstudie für Glasprismen in der Fassade
- 10.3 Mock-up medienführender Fassadenpfosten
- 10.4 Modellstudie Vakuumröhre mit Kammprinzip
- 10.5 Systemfassade als Prototyp
 - 10.5.1 Planung
 - 10.5.2 Realisierung
- 10.6 Zusammenfassung

11.0 Schlussbetrachtung

Literaturverzeichnis
Bildquellenverzeichnis

1.0 Einleitung

1.1 Problemstellung

Licht im Gebäude ist von großer, oft unterschätzter Bedeutung für Architektur, Energiebilanz und nicht zuletzt für das Wohlbefinden der Nutzer. Eine spezielle Rolle spielt dabei das Tageslicht, da es ständiger Veränderung unterworfen ist (sowohl im Tages- als auch im Jahresrhythmus).

Bedeutung des Tageslichts für Architektur: Erst Licht gibt jedem Objekt seine Form, seine Farbe und seine Ästhetik. Die Beschäftigung mit Licht ist sowohl für das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes, als auch für die Gestaltung der Innenräume von immenser Bedeutung für den planenden Architekten. In der Architektur spricht man häufig von drei Arten des Lichts: Licht zum Sehen, Licht zum Hinsehen und Licht zum Ansehen. Ersteres betrifft die Erfüllung der Sehaufgabe, die zweite Lichtart soll führen, lenken oder aufmerksam machen. Licht zum Ansehen ist letztendlich Selbstzweck.

Bedeutung des Tageslichts für die Energiebilanz: In den meisten Büro- und Verwaltungsgebäuden macht die Energie für künstliche Beleuchtung einen wesentlichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch aus. Darüber hinaus bestehen enge Wechselwirkungen zwischen Beleuchtungsenergie einerseits und thermischem Energiebedarf für Heizung und Kühlung andererseits. Transparente Flächen in der Gebäudehülle verringern den Elektrizitätsbedarf für künstliche Beleuchtung, solange sie zur Deckung der Beleuchtungsanforderungen genutzt werden können und das Kunstlicht tageslichtabhängig geschaltet oder gedimmt wird. Da Tageslicht eine höhere Lichtausbeute hat als die meisten künstlichen Leuchtmittel (mehr Licht bei gleichem Energieeintrag),

steigt auch der Heizbedarf an (sofern ein solcher überhaupt existiert), da sich die internen Lasten verringern. Im Sommer dagegen nimmt mit dem sinkendem Strombedarf für Beleuchtung auch der Kühlbedarf ab. Der Gesamtenergiebedarf des Gebäudes sinkt dann solange, bis weitere Verglasungsflächen keine beleuchtungs-technische Relevanz mehr haben.

Bedeutung des Tageslichts für die Behaglichkeit: Es gibt vielfältige Untersuchungen, die die positiven Aspekte von Tageslicht auf die Psyche des Menschen belegen. Im Vergleich zu künstlich beleuchteten Räumen steigen in Räumen mit Tageslicht das Wohlbefinden, die Kreativität und die Produktivität. Aus eigener Erfahrung kennt jeder das Unbehagen, wenn man sich für viele Stunden am Tag in einem fensterlosen Raum aufhält, das Gefühl für die Tageszeit und das herrschende Wetter verliert und mit erhöhter Müdigkeit zu kämpfen hat. Ein Expertenstreit, ob das nun an der Höhe der Beleuchtungsstärke, an der Verteilung des Lichts, an der Lichtfarbe bzw. dem Spektrum oder dem Außenkontakt liegt, ist unnötig. Es braucht nicht versucht zu werden, das als angenehm empfundene Tageslicht mit hohem technischem Aufwand zu kopieren (was ohnehin nur unzureichend geschehen kann), denn das Tageslicht ist natürlicher Bestandteil unserer Umwelt. Man muss es nur nutzen. Eine ausgewogene, angenehme Helligkeitsverteilung im Raum kann sehr anregend sein. Aber: Licht kann auch stören, z.B. durch Blendung oder Bildschirmreflexe, die die Lesbarkeit einschränken. Diese Aspekte können nur durch eine Leuchtdichte basierte Lichtplanung bewertet werden. Das geht über die übliche Bestimmung von Beleuchtungsstärken oder Tageslichtquotienten hinaus. [Sick 2000]

Das Einsparpotential von elektrischer Energie ist gerade im Verwaltungsbau erheblich. Sofern hinsichtlich des Energiebedarfes für die Beheizung ein zeitgemäßer Standard erreicht ist, geht sogar der größte Teil des Energieverbrauchs in die Beleuchtung.

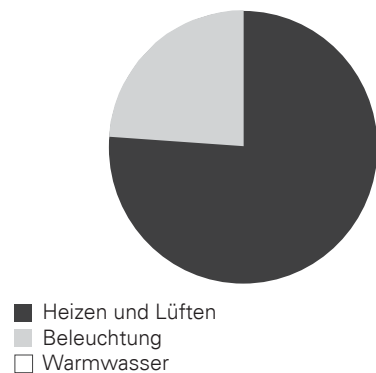


Abb. 1.01
Anteile am Jahres-Primärenergiebedarf eines typischen Bürogebäudes (Dämmstandard Niedrigenergiehaus, keine aktive Kühlung, kein Warmwasserbedarf) [DETAIL_A]

Die Nutzung erneuerbarer Energie ist im Zusammenhang mit Gebäuden nichts Neues. Relativ jung hingegen ist die Integration von Systemen zur aktiven Nutzung erneuerbarer Energie, deren Entwicklung sich fast vollständig auf dem Gebiet der Energieerzeugung vollzog. Die Energiediskussion im baulichen Bereich wird von grundsätzlichen Auseinandersetzungen im energiewirtschaftlichen

Sektor begleitet. In Deutschland ist es erklärter politischer Wille, neben der Förderung von Maßnahmen zur Energieeinsparung, insbesondere den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen zu unterstützen. Das konkrete Ziel sieht eine Verdoppelung des Anteils erneuerbarer Quellen an der Energieerzeugung bis zum Jahr 2010 gegenüber dem Stand von 1999 vor [STAISS 2002]. Neben zahlreichen Fördermaßnahmen kommt in diesem Zusammenhang dem am 01. April 2000 in Kraft getretenen "Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)" die größte Bedeutung zu [BMWl 2000 B]. Es ist offensichtlich, dass insbesondere in Deutschland eine Strukturänderung des derzeitigen Energieversorgungssystems hin zu einer dezentralen, auf erneuerbaren Quellen basierend Erzeugung in Gang gebracht werden soll [STARK 2003]. Das technische Potenzial zur Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland ist sehr hoch. Die derzeitige Nutzung liegt bisher unter 3 %.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Neben den Bemühungen der Architekten und Energieplaner den Energieverbrauch von Gebäuden, hier im Speziellen von Verwaltungsgebäuden, durch eine konsequente Dämmung der Gebäudehüllen und den Einsatz von geeigneten Sonnenschutzmaßnahmen zu minimieren, gibt es in den letzten Jahren die parallele Entwicklung von verschiedenen Systemen zur Tageslichtnutzung. Diese sollen einerseits den Verbrauch an elektrischer Energie reduzieren und andererseits die Behaglichkeit der Nutzer erhöhen.

Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung einer Systemfassade für Verwaltungsgebäude zur Reduzierung von elektrischer Energie durch

Nutzung des Tageslichts und zur aktiven Solarenergienutzung zum Ziel. Es gibt die Vision einer transparenten Fassade, die Energie spart und sammelt.

Hierbei sollen die Glasprofile und -rohre, die sich auf der Grundlage der Untersuchungen als funktionsfähige Profile zur Tageslichtnutzung herausgestellt haben, mit auf dem Markt erhältlichen Vakuumröhren zu einem Fassadensystem gefügt und in Fassadenkonstruktionen integriert werden.

Auf Basis grundlegender Untersuchungen zum Thema Tageslicht, Tageslichtsysteme und mögliche physikalische Grundprinzipien zur Funktionsweise von Tageslichtsystemen sollen folgende Ziele verfolgt werden:

- **Ermittlung eines geeigneten Glasprofils für den Einsatz als Tageslichtsystem und/oder als transparenter Sonnenschutz aus dem vorhandenen Fundus.**

Grundlage für die Untersuchungen sind Glasprofile und -rohre der Schott Rohrglas GmbH in Mitterteich, die für diese ein neues Einsatzgebiet in der Architektur sucht. Den Untersuchungen liegen 4 verschiedene Profiltypen zugrunde, die auf Ihre Funktionalität für o. g. Einsatz untersucht

werden sollen.

- **Optimierung einer geeigneten Profilform für den Einsatz zur Tageslichtlenkung oder als transparenter Sonnenschutz.**

Auf der Grundlage der Untersuchungen soll die Form eines geeigneten Profils durch Änderungen der Geometrie hinsichtlich ihrer Funktionsweise optimiert werden.

- **Generierung und Findung einer neuen Profilform, die die Anforderungen an diese Systeme besser erfüllt.**

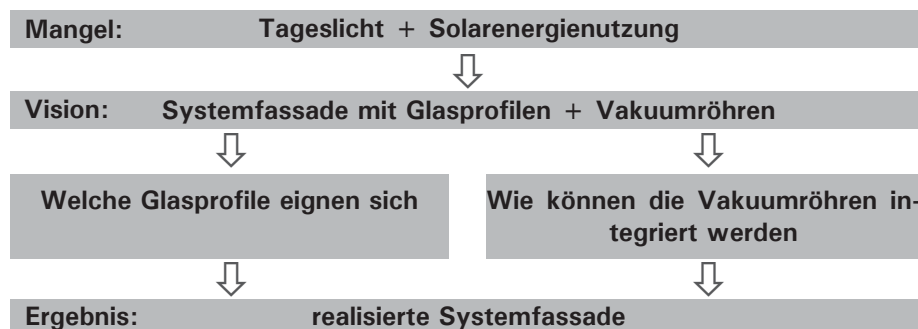
Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen soll in Fortführung zu den Geometrieuntersuchungen eine evtl. funktionsfähigere Form gefunden werden, die mit denselben Herstellungsprozessen generiert werden kann.

- **Die Kombination eines geeigneten Profils mit Vakuumröhren zu einer Systemfassade, die zum einen Energie gewinnt zum anderen Energie einspart.**

Im Büro- und Verwaltungsbau steht zum Einsatz von Solaranlagen nicht genügend Dachfläche zur Verfügung. Es soll ein System entwickelt werden, das jeder Büroeinheit ermöglicht ihre Fassade solartechnisch zu akti-

Abb. 1.02

Darstellung der systematischen Vorgehensweise



2.0 Fassadenkonzepte



2.1 Anforderungen an die Fassade

2.1.1 Grundlagen

Im Winter und in der Übergangszeit führt die Sonneneinstrahlung zu Wärme- und Tageslichtgewinnen, welche neben der Senkung der Wärmeverluste durch eine geeignete Verglasung, zu einer Verminderung des Verbrauchs an Primärenergie führt.

Im Sommer sind solche Gewinne weniger erwünscht und müssen durch wirksame Sonnenschutzmaßnahmen kontrolliert werden. Lichtumlenkende Elemente können hingegen den Bedarf an künstlicher Beleuchtung durch die Umlenkung des Tageslichts in die Raumtiefe reduzieren, die im Sommer einen großen Teil der Kühllasten verursacht.

Sie nutzen optische Gesetzmäßigkeiten wie Reflexion, Transmission oder Brechung, um einerseits das direkte Sonnenlicht

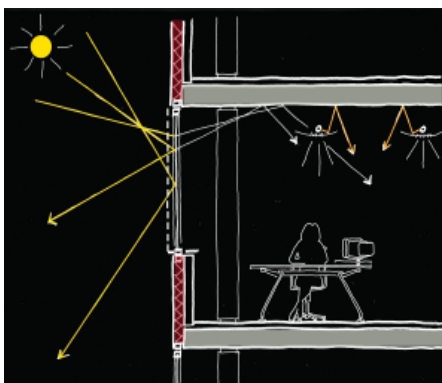


Abb. 2.01
Arbeitsplatzsituation mit Darstellung der Anforderung an die Fassade: Wärmeschutz, Sonnenschutz, Lichtlenkung.

auszublenken,

andererseits das diffuse Tageslicht in den Innenraum durchzulassen oder sogar in die Raumtiefe zu lenken.

Folgende Konzepte sind denkbar:

Tageslicht

Drehbar gelagerte Glasprofile können zur Tageslichtlenkung herangezogen werden.

Sonnenschutz

Durch entsprechende Einstellung der Profile kann durch Totalreflexion direkt einfallendes Sonnenlicht abgehalten werden. Der übrige Teil wird hindurchgelassen und gestreut. Eine möglichst gleichmäßige, blendungsfreie Tageslichtversorgung wird hierbei angestrebt.

Beleuchtung

Mit Hilfe der eingesetzten Tageslichtsysteme kann der Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduziert werden. Um nicht nur den Bedarf an künstlicher Beleuchtung zu reduzieren, sondern auch die auftreffende Sonnenstrahlung aktiv zu nutzen, sollen die Glasprofile mit Vakuumröhren in der Fassade kombiniert werden. Zusammen bilden sie die sogenannte "Systemfassade".

Im diesem Kapitel sollen architektonische Ziele und mögliche Einbausituationen dieser beiden Komponenten untersucht werden.

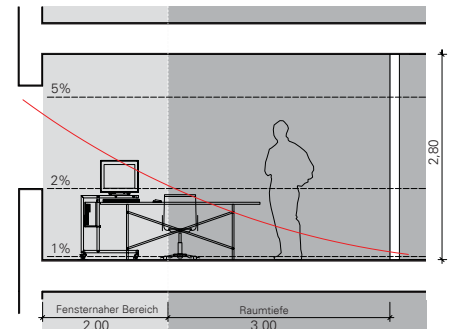


Abb. 2.02
Büroschnitt mit Darstellung des Verlaufs des Tageslichtquotienten

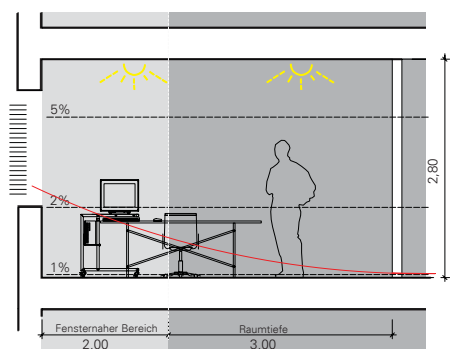


Abb. 2.03
Büroschnitt mit Sonnenschutz und Darstellung des Verlaufs des Tageslichtquotienten

2.1.2 Lichtlenkung bei klarer Durchsicht

Die auf dem Markt vorhandenen, Tageslichtsysteme zeichnen sich in der Hauptsache durch starke Integration, z. T. sogar in die Isolierverglasung, aus. Viele Systeme vernachlässigen den Wunsch nach einem freien Ausblick zu Gunsten anderer Kriterien. In den Abbildungen 2.04 bis 2.06 werden skizzenhaft Konzepte dargestellt, die bei gleichzeitiger Funktion als Lichtlenk- bzw Sonnenschutzsystem den freien Ausblick gewährleisten.

Folgende Ziele werden definiert:

- Raumausleuchtung durch Totalreflexion direkten Sonnenlichtes an die Decke
- Ausblendung der energiereichen Strahlung bei gleichzeitiger Diffuslichtlenkung
- nahezu unbeeinträchtigtger Aussenbezug
- Rahmenlose Oberlichtbereiche in der Verglasung
- Lichtgestaltung mit hohem Energieeinsparpotential



Abb. 2.07
Feststehender Sonnenschutz aus Aluminiumrohren am Reichstag in Berlin. [Foster1]



Abb. 2.08
Feststehender Sonnenschutz aus Aluminiumrohren am Reichstag in Berlin, Blick von innen nach aussen. [Foster1]

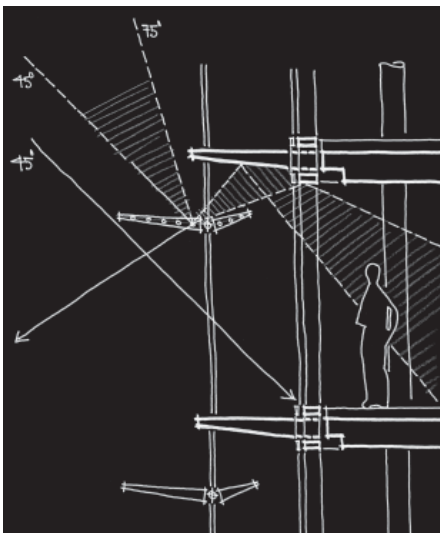


Abb. 2.04
Winter: 30° Sonne wird zugelassen, Zenitlicht wird in den Raum reflektiert.

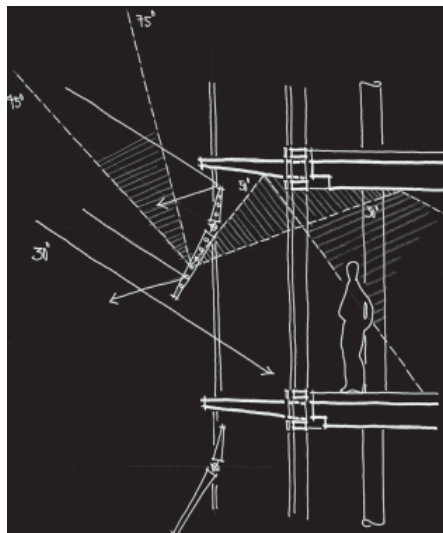


Abb. 2.05
Übergangszeit: Ausblendung der 45° Sonne, Zenitlicht wird in den Raum

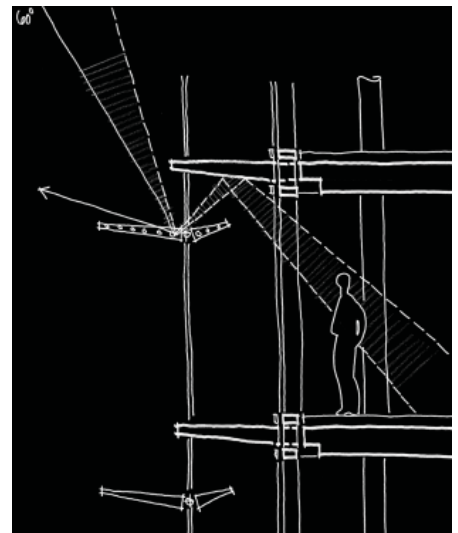


Abb. 2.06
Sommer: Ausblendung der 60° Sonne. Zenitlicht wird in den Raum reflektiert

2.2 Untersuchung möglicher Einbausituationen

In Kapitel 2.2 werden verschiedene architektonische Konzepte dargestellt, bei denen Glasprofile zur Tageslichtnutzung und Vakuumröhren zur aktiven Solarenergienutzung eingesetzt werden.

Sie sollen ein ganzheitliches Fassadenkonzept bilden und werden im folgenden mit Systemfassade bezeichnet.

Einbausituation 1: Systemfassade vor einer konventionellen Bürofassade

Die Abbildung 2.09 zeigt einen Vertikalschnitt durch eine konventionelle Bürofassade mit Brüstungsbereich.

Dem von aussen opak erscheinenden Brüstungsbereich werden Vakuumröhren zur aktiven Solarenergienutzung vorgeschaltet. Damit der freie Ausblick bei gleichzeitigem Sonnenschutz möglich ist, wird bei dieser basic-Variante ein auskragender horizontaler Sonnenschutz aus Vakuumröhren angeordnet.

Mit Hilfe dieses Sonnenschutzes wird die energiereiche Sommersonne (60°-Sonne) ausgeblendet und zur Energiegewinnung genutzt. Die flacheren Sonnenstände werden hineingelassen.

Eine aussenliegende Jalousie kann von den einzelnen Mitarbeitern je nach Bedarf als Sonnenschutz selbst geregelt werden.

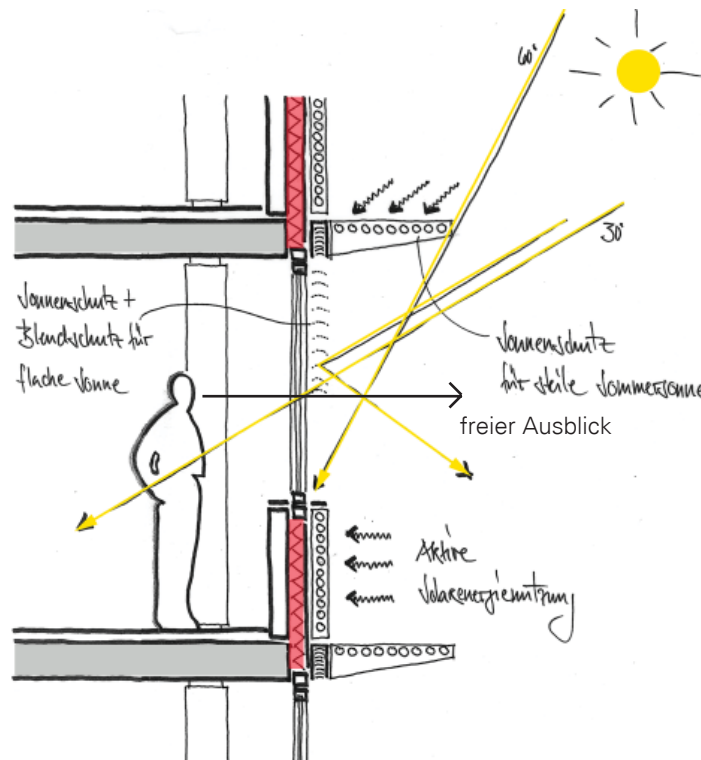


Abb. 2.09

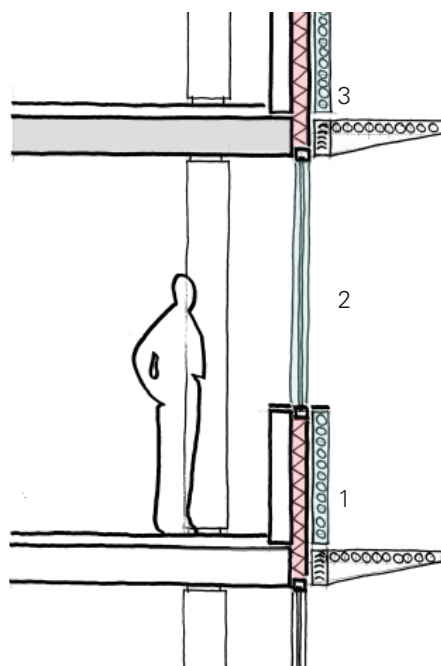


Abb. 2.10
Vertikalschnitt und Teilansicht des in Abb. 2.09 dargestellten Fassaden-

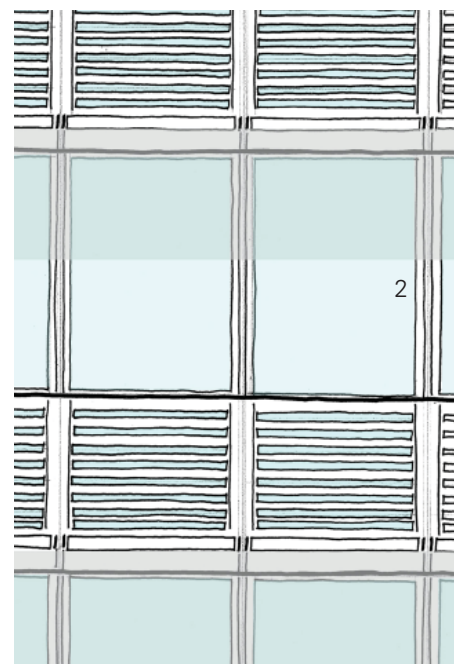


Abb. 2.09

Vertikalschnitt einer konventionellen Bürofassade mit Vakuumröhrenkollektoren und feststehendem Sonnenschutz.

- 1 Vakuumröhren vor Betonbrüstung
- 2 Glasfassade aus Standard-Fensterelementen (aneinander gereiht)
- 3 Vakuumröhren als auskragender

**Einbausituation 2:
Systemfassade vor geschosshoher
Verglasung**

Die Abbildung 2.11 zeigt einen Vertikalschnitt durch eine Bürofassade mit geschosshoher Verglasung und vorgehängter "Systemfassade".

Die thermische Gebäudehülle besteht aus geschosshohen Fassadenelementen, die vor die Stahlbeton-Skelettkonstruktion gehängt werden und von Decke zu Decke spannen. Öffnungsflügel sind in die Elemente integriert. Sie bestehen aus Standard-Fensterrahmen. Die 2. vorgehängte Schicht dient der Verschattung, Tageslichtlenkung und aktiven Solarenergiegewinnung. Für die Tageslichtlenkung (vertikale "Blende" im Sturzbereich) werden Glasprofile verwendet. Zur solaren Energieerzeugung werden Vakuumröhrenkollektoren im Brüstungsbereich und als feststehende, horizontaler Sonnenschutz eingesetzt. In Kombination mit einer Absorptionskältemaschine soll mit Hilfe des hierdurch erzeugten heißen Wassers eine solare Kühlung der Büroräume ermöglicht werden. Der horizontale Sonnenschutz aus Vakuumröhren wird so ausgebildet, dass er Sonnenstände ab 40° ausblendet bei gleichzeitiger aktiver Solarenergieerzeugung. Alle niedrigeren Sonnenstände werden zugelassen. Um Blendung zu vermeiden gibt es einen innenliegenden Blendschutz. Der freie Ausblick für die Mitarbeiter ist gegeben.

Abb. 2.11
Vertikalschnitt einer Bürofassade mit geschosshoher Verglasung und vorgehängter "Systemfassade".

- 1 Vakuumröhre im Brüstungsbereich vor geschosshoher Verglasung
- 2 Feststehender horizontaler Sonnenschutz aus Vakuumröhren
- 3 Senkrecht übereinander angeordnete Glasprofile im Sturzbereich zur Tageslichtlenkung

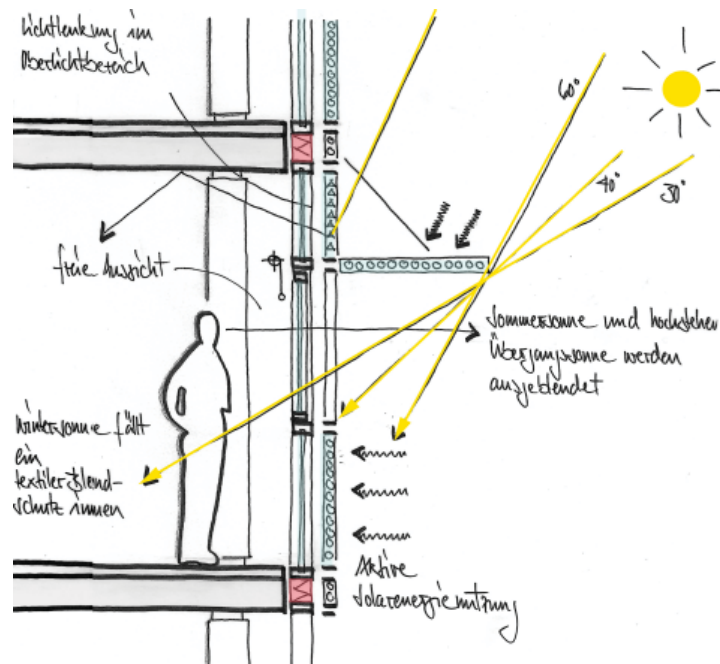


Abb. 2.11

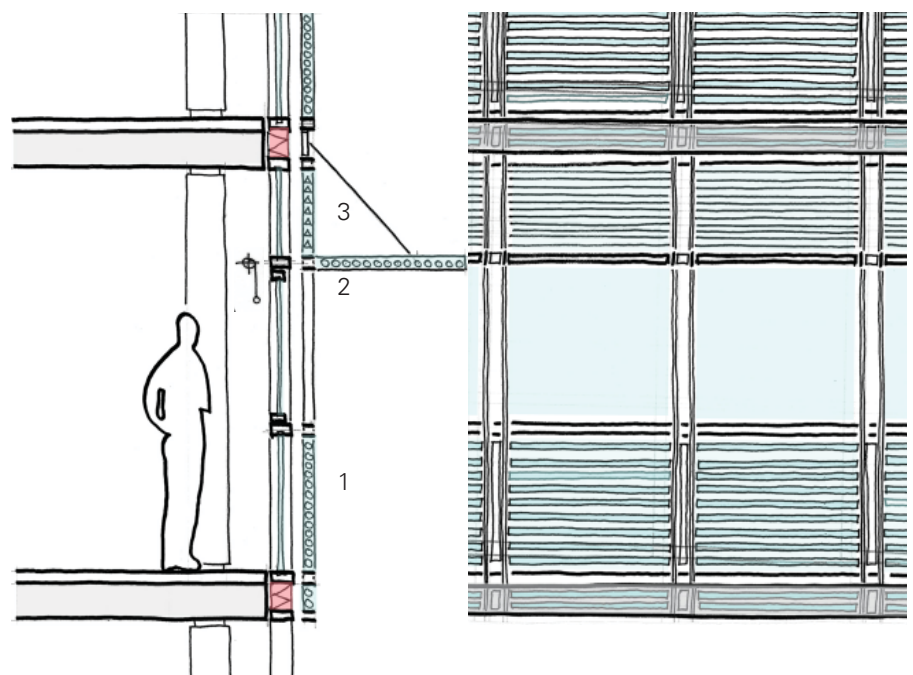


Abb. 2.12
Vertikalschnitt und Teilansicht des in Abb. 2.11 dargestellten Fassadenprinzips.

**Einbausituation 3:
Systemfassade vor geschosshoher
Verglasung mit Wartungsbalkon**

Die Abbildung 2.13 zeigt einen Vertikalschnitt einer Bürofassade mit Wartungsbalkon und vorgelagerter "Systemfassade".

Prinzipiell ist der Aufbau der Fassade ähnlich wie beim vorherigen Beispiel. Zwischen der ersten und zweiten Schicht befindet sich ein Wartungsteg (unter anderem für Reinigungsarbeiten). Aufgrund des Abstandes zur Glashülle kann die obere "Blende" aus Glasprofilen gleichzeitig als Sonnenschutz eingesetzt werden.

Auch hier dienen die Vakuumröhren zur aktiven Solarenergienutzung bei gleichzeitiger Funktion als Absturzsicherung. Der freie Ausblick für die Mitarbeiter ist gegeben.

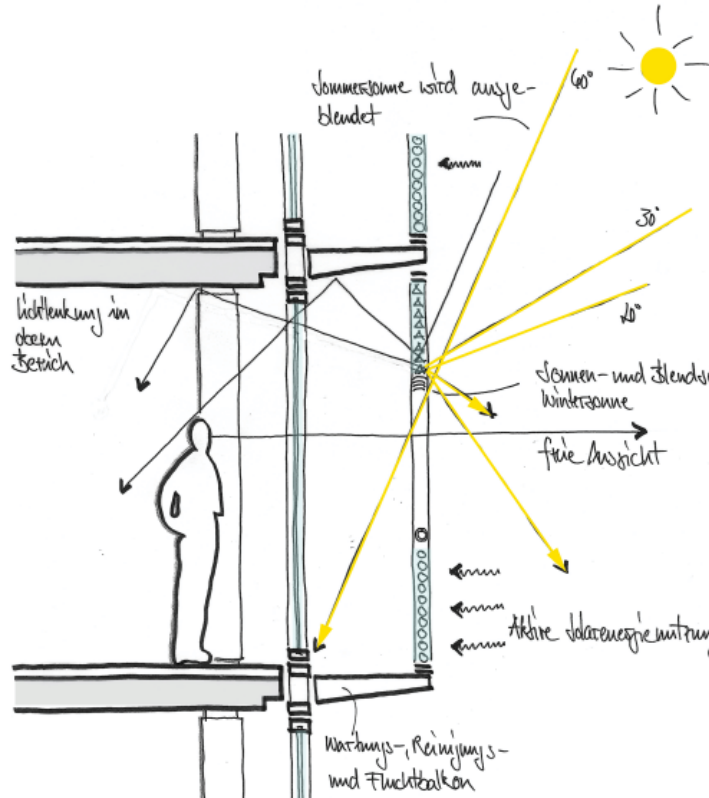


Abb. 2.13

Abb. 2.13
Vertikalschnitt einer Bürofassade mit geschosshoher Verglasung, Wartungsbalkon und vorgelagerter

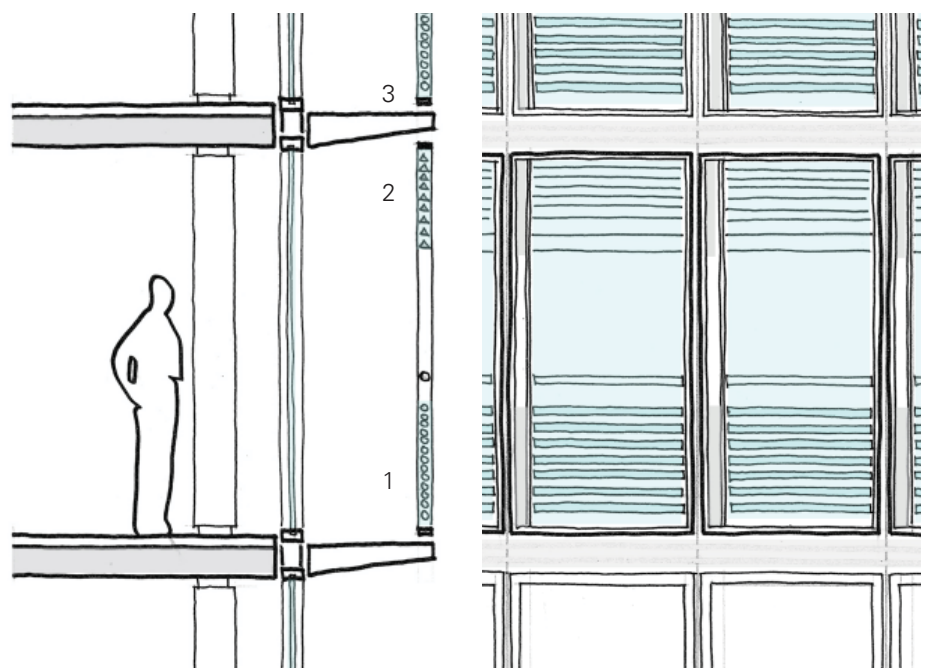


Abb. 2.14 Vertikalschnitt und Teilansicht des in Abb. 2.13 dargestellten Fassaden-

- 1 Vakuumglasrohre in der 2. Schicht vor Wartungsbalkon mit gleichzeitiger Funktion als Absturzsicherung
- 2 Glasprofile im Oberlichtbereich zur Lichtlenkung bzw. als transparenter Sonnenschutz
- 3 Ausragender Wartungsbalkon

Abb. 2.14

2.3 Konzepte für Systemfassaden

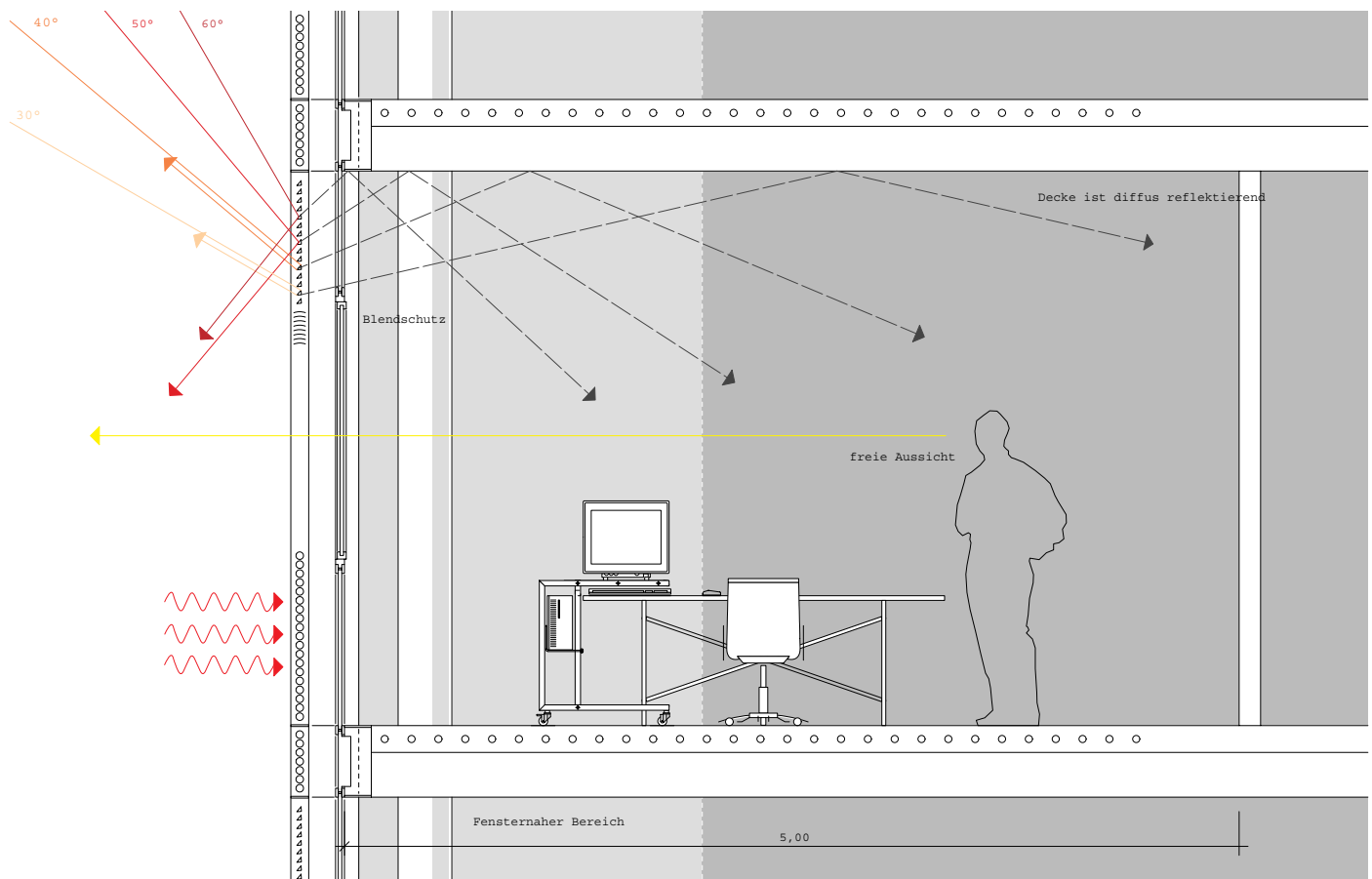


Abb. 2.15
Vertikalschnitt einer Bürosituation mit linearer Anordnung der Systemfassade.

2.3.1 Lineare Anordnung

Das Tageslichtkonzept:

Integrierte Vollglasprofile reflektieren einen Teil des direkt einfallenden Sonnenlichts, der übrige Teil wird hindurchgelassen und gestreut. Eine möglichst gleichmäßige, blendfreie Tageslichtversorgung wird hierbei angestrebt. Das Funktionsprinzip von Tageslichtlenkung basiert auf einer Umlenkung des Sonnenlichts sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Die Vertikalumlenkung wird durch Glasprofile bewirkt. Diese sorgen dafür, dass das auf die Verglasung auftreffende Sonnenlicht an die Decke und von dort aus dann auf die

Arbeitsfläche reflektiert wird. Durch den Einsatz von Glasprofilen im Oberlichtbereich kann bei Sonnenbestrahlung der Fassade die Raumbelichtung mit Tageslicht erfolgen, auch wenn der Sonnenschutz des Fensters unterhalb des Oberlichts geschlossen ist. Die im Brüstungsbereich angeordneten Vakuumröhren dienen der aktiven Solarenergienutzung.

Vorteile des Einsatzes von Tageslichtlenkprofilen:

- Bei Sonneneinstrahlung, Ausleuchtung des Arbeitsplatzes mit Tageslicht (trotz geschlossenen Sonnenschutzes).
- In Verbindung mit einer selbstregelnden Kunstlichtsteuerung können unter optimalen Bedingungen bis zu 70% der Beleuchtungsenergie eingespart werden.
- Sämtliches Licht wird an die Decke gelenkt, man hat nahezu blendfreie Arbeitsbedingungen.

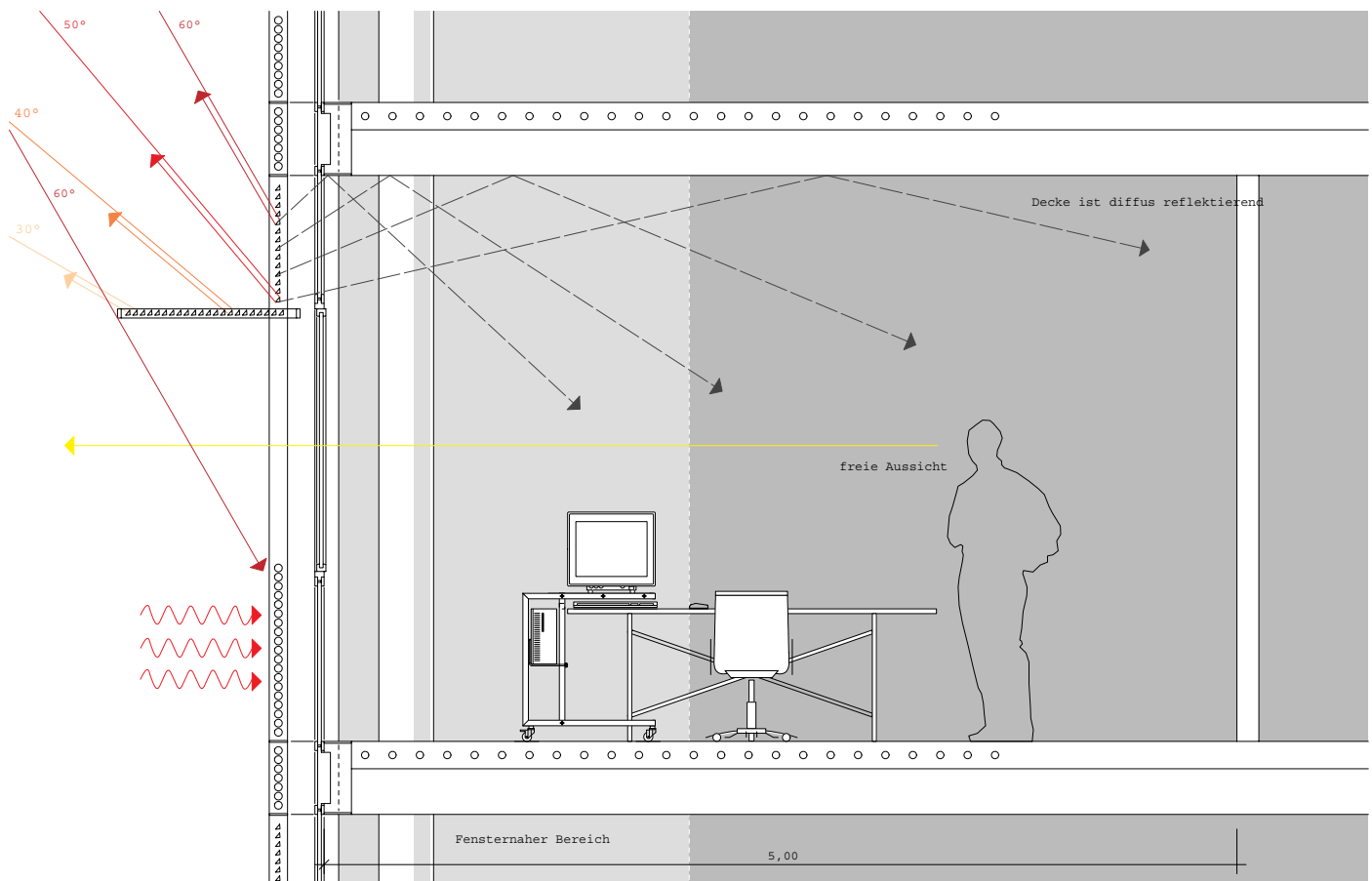


Abb. 2.16
Lineare Anordnung der Systemfassade
mit horizontalem light-shelf

2.3.2 Lineare Anordnung mit horizontalem light-shelf in der Systemfassade

Ergänzend zu den unter 2.3.1 bereits angeordneten Systemen wird ein horizontales "light-shelf" eingesetzt, das in diesem Fall allerdings nicht die Aufgabe hat direktes Licht in den Raum zu lenken. Die dort angeordneten Glasprismen werden so ausgerichtet, dass die direkte Strahlung totalreflektiert und die diffuse Strahlung in den Raum gelenkt wird.

Beide Systeme, die horizontale "light-shelf" Konstruktion sowie die

Prismen im Oberlichtbereich, funktionieren als transparenter Sonnenschutz.

Dieses System hat den Vorteil, dass der freie Ausblick erhalten werden kann.

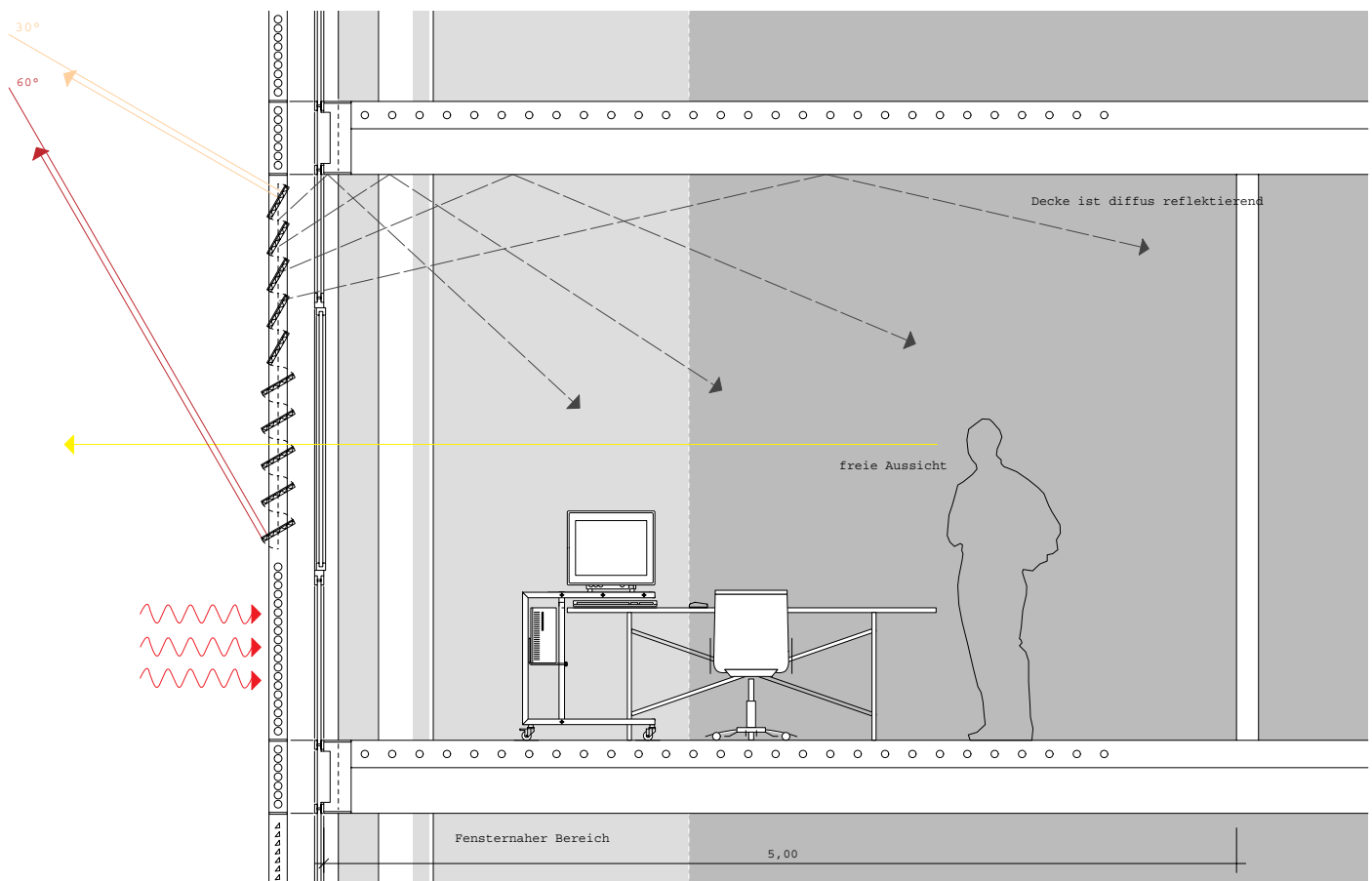


Abb. 2.17
Vertikalschnitt einer Bürosituation mit horizontalen Lamellen aus 90°-Glasprismen.

2.3.3 Transluzente Fassade mit 90°-Prismen

Die als transparenter Sonnenschutz fungierenden Glasprofile werden nun nicht mehr einzeln gedreht, sondern zu Gruppen von jeweils fünf Profilen zusammengeschaltet.

Dies hat den Vorteil, dass durch das Schalten in Gruppen der Aufwand für die erforderliche Mechanik reduziert und das Maß an Teildurchsicht deutlich erhöht wird.

Auf Grund der größeren Teildurchsicht besteht nun die Möglichkeit die Prismenlamellen über die ganze Fassade und nicht nur den Oberlichtbereich anzuordnen.

Alternativ könnten "Glasplatten" als transparenter Sonnenschutz fungieren. Die einfallende Strahlung wird durch die vorhandene Geometrie der Glasprofile gebündelt und nach außen reflektiert. Die diffuse Strahlung gelangt in das Rauminnere.

Die "Glasplatten" könnten in unterschiedlichen Breiten gewählt werden. Je nach Breite ändert sich das Maß an Teildurchsicht.

In Abbildung 2.17 werden die Lamellen im Brüstungsbereich mit Vakuumröhren kombiniert. Eine Reduzierung

dieser Elemente auf den Deckenbereich wäre denkbar.

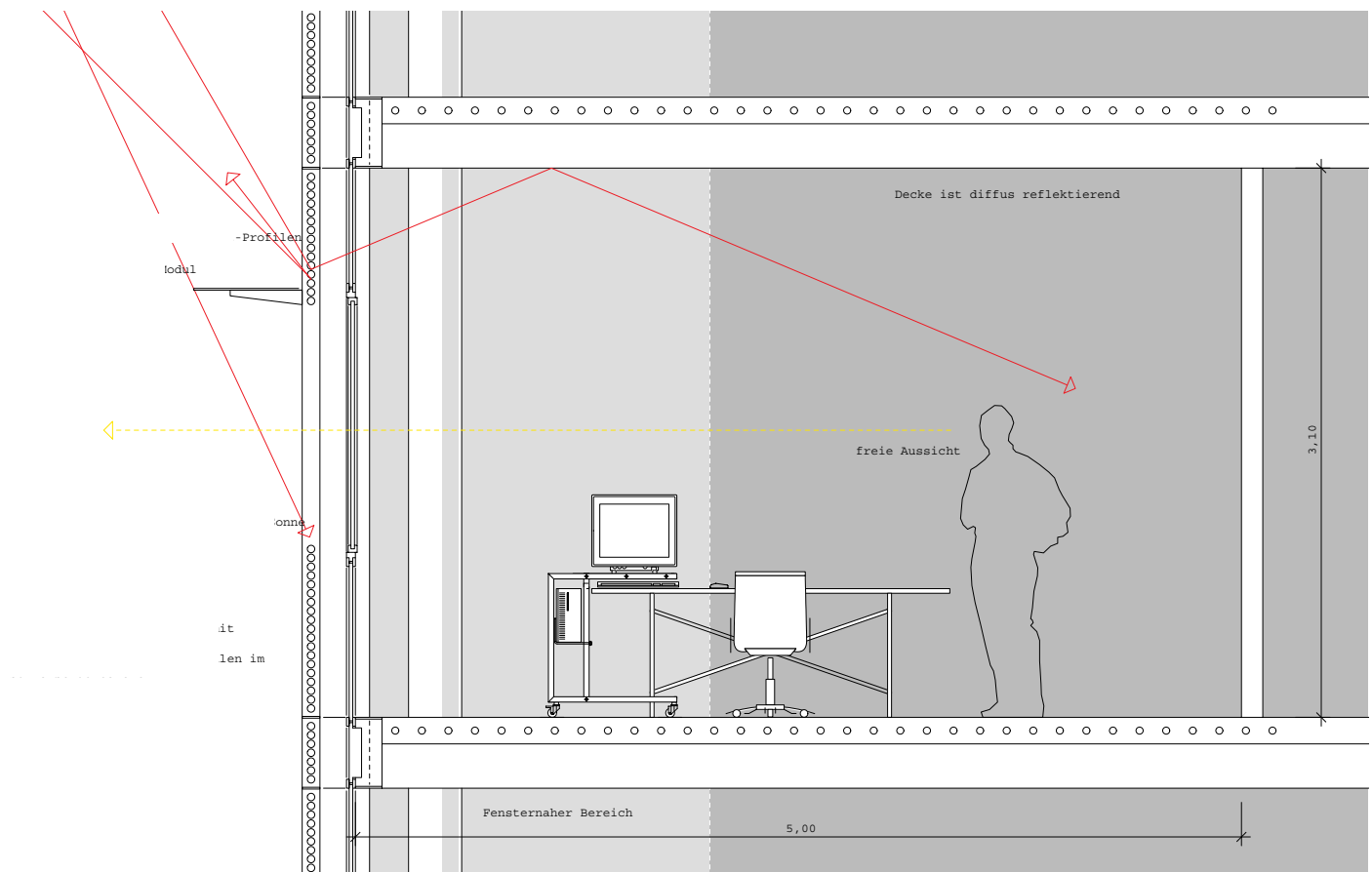


Abb. 2.18
Vertikalschnitt einer Bürosituation mit lichtlenkenden Glasröhren (siehe Kapitel 7.1.5) im Oberlichtbereich und Vakuumröhren zur Solarenergienutzung im Brüstungsbereich.

2.3.4 Glasröhren kombiniert mit einem light-shelf aus Photovoltaikelementen

Abbildung 2.18 zeigt ein Fassadenkonzept, welches zum Ziel hat neben der Einsparung von Energie durch Lichtlenkung im Oberlichtbereich auch aktive Solarenergienutzung zu betreiben.

Vorgesehen sind zu diesem Zweck Vakuumröhrenkollektoren im Brüstungsbereich und ein auskragender Sonnenschutz aus Photovoltaikelementen, der die direkte Sommersonne (ca. 65°) ausblendet.

Im Oberlichtbereich befinden sich Glasrohre, die je nach Bedarf Licht in

die Raumtiefe lenken oder als transparenter Sonnenschutz mit Diffuslichtlenkung eingesetzt werden können. Der Mitarbeiter kann somit den Tageslichtanteil im Innenraum selbst regulieren. Störende Sonnenschutzmaßnahmen im Blickfeld entfallen. Ein zusätzlicher Blendschutz für Computerarbeitsplätze muss innen angebracht werden.

Durch die Verwendung derselben Glasrohrdurchmesser im Oberlicht- und Brüstungsbereich bei unter-

schiedlicher Funktion, findet eine Vereinheitlichung des äußeren Erscheinungsbildes des Gebäudes statt.

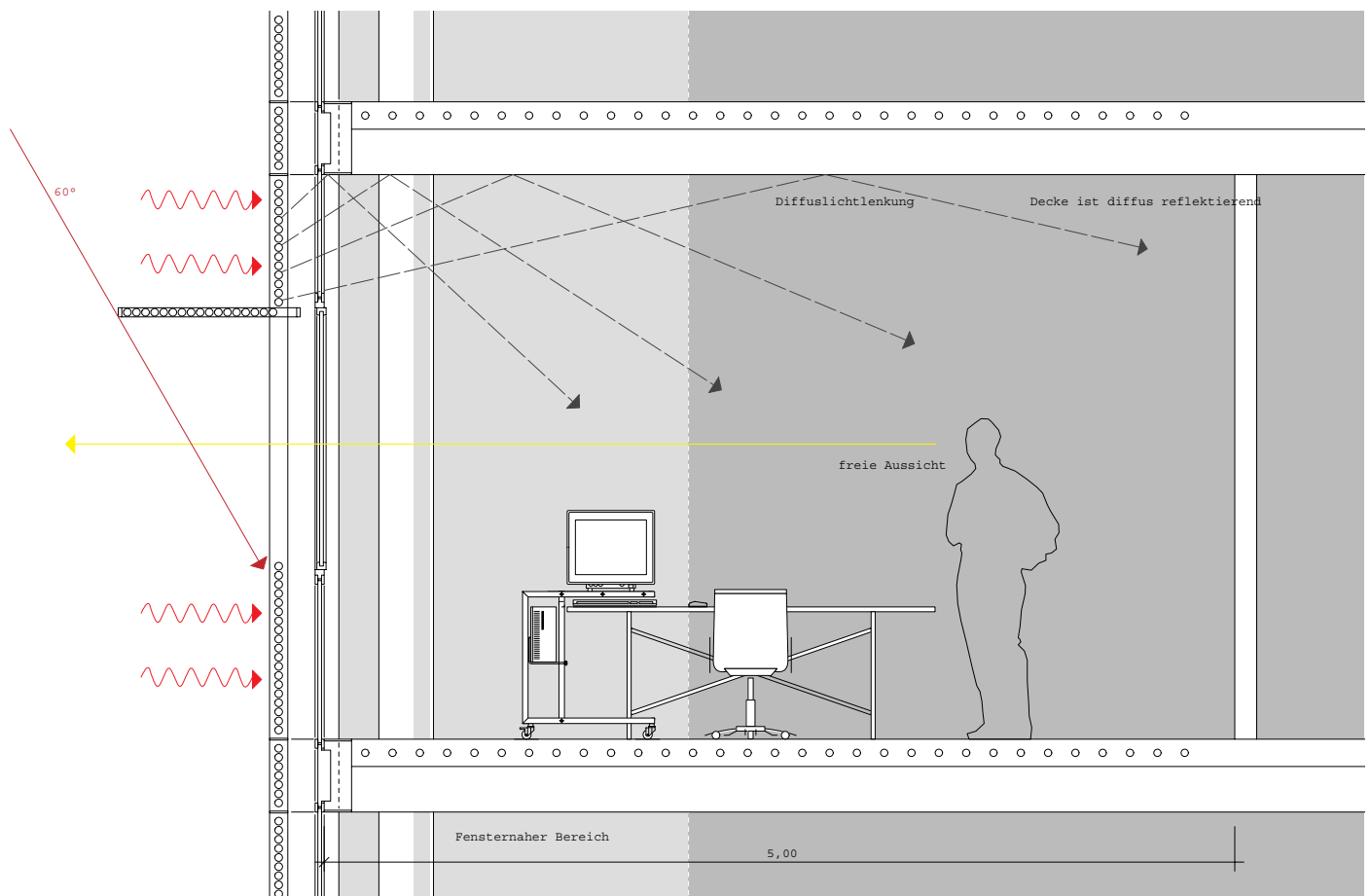


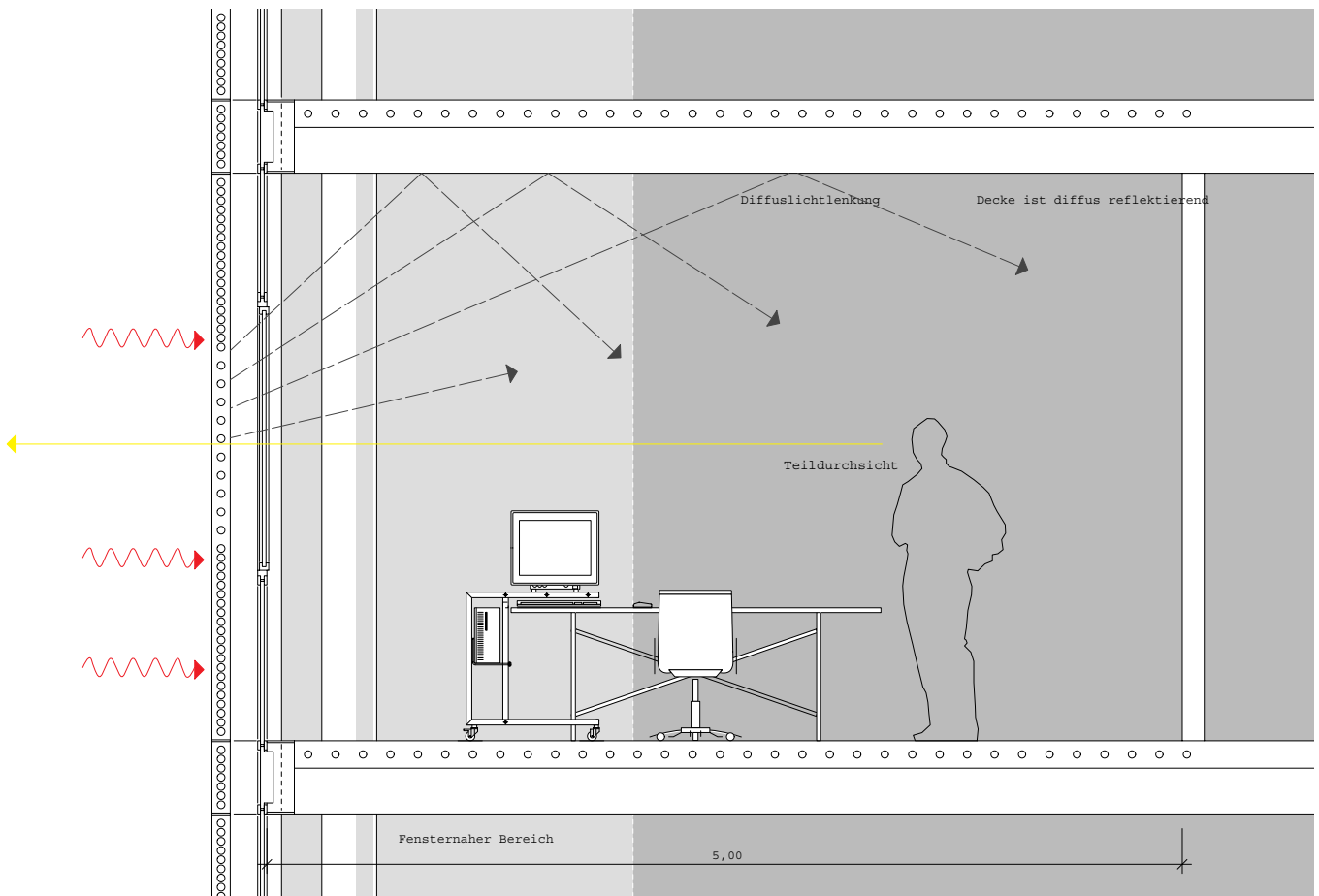
Abb. 2.19
Vertikalschnitt einer Bürosituation mit
Vakuurröhren zur Solarenergienutzung.

2.3.5 Vakuurröhren mit light-shelf

Auch hier werden wie in 2.3.4 ausschließlich Röhren verwendet, allerdings nur Vakuurröhren zur aktiven Solarenergienutzung. Das light-shelf wird bei dieser Variante ebenfalls aus Vakuurröhren gebildet. Diese werden so ausgerichtet, dass sie gleichzeitig auch als Sonnenschutz für die Fassade fungieren. Auch der Oberlichtbereich wird nach dem gleichen Prinzip mit Vakuurröhren bestückt. Wieviel diffuses Licht in den Raum gelenkt wird gilt es zu klären. Die Vakuurröhren wirken, neben der Energiegewinnung, als Sonnenschutz.

Dieses System hat den Vorteil, dass der freie Ausblick erhalten werden kann.

Das äußere Erscheinungsbild ist ebenfalls homogen.

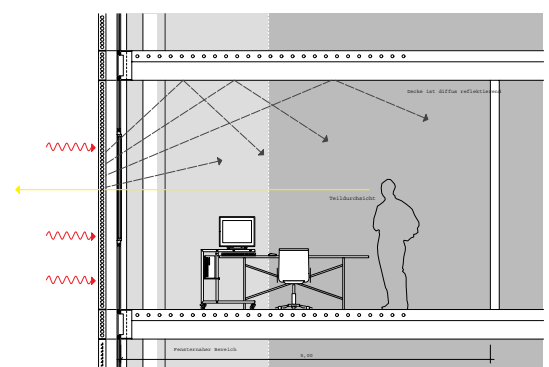


2.3.6 Transluzente Fassade mit geschosshoch angeordneten Vakuumröhren

Wünscht sich der Gestalter ein von außen und innen homogen erscheinendes Fassadenbild, so besteht die Möglichkeit, die Vakuumröhren über die gesamte Fassade anzuordnen. Die Abstände können flexibel gewählt werden. In Augenhöhe ist es sinnvoll, die Anordnungsabstände zu vergrößern, um eine bessere Teildurchsicht zu ermöglichen. Die Röhren dienen der aktiven Solar-energienutzung, bei gleichzeitiger Ausblendung der Direktstrahlung.

Abb. 2.20
 Vertikalschnitt einer Bürosituation mit geschosshoch angeordneten Vakuumröhren und einer geringeren

Abb. 2.21
 Vertikalschnitt einer Bürosituation mit geschosshoch angeordneten Vakuumröhren bei gleichbleibender Dichte.





2.4 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wurden verschiedene Konzepte für Systemfassaden dargestellt. Die Schwerpunkte wie freier Ausblick, Lichtlenkung, aktive Solarenergienutzung und architektonisches Erscheinungsbild sind unterschiedlich gewichtet. Zusammenfassend gilt folgendes festzuhalten:

- Ein gewünschter freier Ausblick macht, falls baulich kein Wartungsbalkon vorgesehen ist, eine Art "light-self" erforderlich. Dieses kann zur Lichtlenkung oder als transparenter Sonnenschutz mit Glasprofilen und zur aktiven Solarenergienutzung mit Vakuumröhren oder Photovoltaikmodulen bestückt werden. Eine Teildurchsicht erlaubt das System mit Glasprofilen, die zu Gruppen geschaltet, wie Lamellen vor der Fassade angeordnet sind.

- Lichtlenkende Glasprofile können im Oberlichtbereich oder als transparenter Sonnenschutz im "light-self" integriert werden. Zur architektonischen Vereinheitlichung der Fassadeansicht können die Profile zu Gruppen geschaltet in Lamellenform auch bis zum Brüstungsbereich bzw. auch geschosshoch angeordnet werden.

- Abhängig von der Gewichtung des Aspektes der aktiven Solarenergienutzung kann im Extremfall die Fassade geschosshoch mit Vakuumröhren bestückt werden. Im Sichtfeld ist eine reduzierte Dichte sinnvoll.

- Aus architektonischer Sicht ist eine Vereinheitlichung des äußeren Erscheinungsbildes wünschenswert. Die Fassadenkonzepte mit durchlaufenden Vakuumröhren bzw. zu Lamellen zusammengefassten Glasprofilen werden dieser Sichtweise am meisten gerecht.



Abb. 2.21

Blauer Himmel:
4000 cd/m²

3.0 Allgemeine Grundlagen

Bedeckter Himmel:
6000 cd/m²

Sonne:
1 600 000 000 cd/m²

Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel:
5000–20000 lx

Beleuchtungsstärke bei Sonne:
20000–100000 lx



3.1 Tageslicht

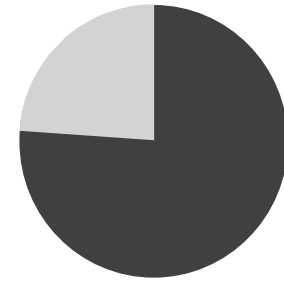


Abb. 3.02
Anteile am Jahres-Primärenergiebedarf eines typischen Bürogebäudes (Dämmstandard Niedrigenergiehaus, keine aktive Kühlung, kein Warmwasserbedarf) [DETAIL_A]

■ Heizen und Lüften
■ Beleuchtung
□ Warmwasser

3.1.1 Bedeutung des Tageslichts

Das natürliche Licht der Sonne ist eine der wichtigsten Grundlagen des Lebens. Neben weitreichenden biologischen (Bildung organischer Substanzen, biochemische Prozesse etc.) und physikalischen Wirkungen (Strahlungsenergie, Wärmetransport/-umwandlung) ist das Tageslicht verantwortlich für die visuelle Wahrnehmung des Menschen.

Das Spektrum des Tageslichtes besitzt eine relativ gleichmäßige Verteilung über den gesamten sichtbaren Frequenzbereich. Aus diesem Grund sehen wir unsere Umwelt nur bei Tageslicht in seiner natürlichen Farbe. Das natürliche Licht ist kostenlos, auch wenn es nicht ständig in ausreichender Qualität und Quantität vorhanden ist. Seine Nutzung zahlt sich stets ökonomisch und ökologisch aus.

Neben den positiven Aspekten sind

mit dem Tageslicht auch unangenehme Einflüsse verbunden, die insbesondere während der Arbeitszeit stören können: Das direkte Sonnenlicht führt, vor allem im Sommer, zu einer unangenehmen Raumerwärmung und stört damit die Raumklimatisierung und den Energiehaushalt des Gebäudes. [SITECO]

Das Auge ist hochempfindlich in der Bewertung von Lichtsituationen. Tageslicht wird im Vergleich zum Kunstlicht in der Regel als schöner und angenehmer empfunden. Dies hat mehrere Gründe:

- Das von der Sonne kommende Licht überdeckt ein weites Spektrum von Frequenzen (Farben). Die Mischung dieser Farben ergibt das weiße Tageslicht. Kunstlichtquellen können dieses Farbspektrum der Sonne nicht perfekt wiedergeben. Das Auge spürt dies und reagiert entsprechend mit schnellerer Ermüdung.

- Tageslicht ist dynamisch, es variiert mit der Jahres- und Tageszeit, mit der Position der Sonne und mit der Bewölkung. Kunstlicht ist statisch.

- Die Menge an Kunstlicht in Räumen orientiert sich am minimalen Komfort. Ins Innere der Räume einfallendes Tageslicht erreicht oft erheblich größere Lichtmengen und wird als angenehmer empfunden.

- Tageslicht kommt von der allseitig strahlenden Halbkugel des Himmels und von der Sonne. Seine Verteilung führt zu einer Beleuchtung der Umgebung, die vom Auge als sehr angenehm empfunden wird.

Ein weiterer Vorzug von Tageslicht ist sein Potenzial zur Energieeinsparung. Jeder Zugewinn an Tageslicht bedeutet nicht nur eine Steigerung des visuellen Komforts, sondern auch eine Einsparung an Strom für Kunstlicht. Das Einsparpotenzial ist gerade im Verwaltungsbau erheblich. Sofern hinsichtlich des Energiebedarfes für die Beheizung ein zeitgemäßer Standard erreicht ist, geht sogar der größte Teil des Energieverbrauchs in die Beleuchtung (Abb. 3.02).

Dieser Sachverhalt ist bisher kaum wahrgenommen worden. Darum bedeutet energiesparendes Bauen bei Bürogebäuden heute nicht mehr verbesserte Wärmedämmkonzepte, sondern intelligente Tageslichtplanung. [DETAIL_1]

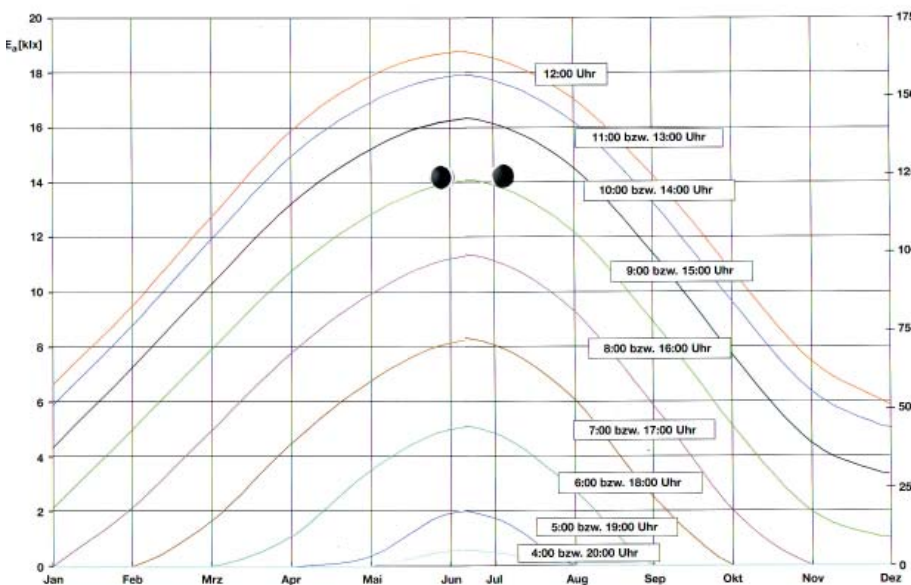


Abb. 3.01
Horizontale Beleuchtungsstärke E_v und horizontale Bestrahlungsstärke E_s bei bedecktem Himmel für 51° nördliche Breite in Abhängigkeit von Jahres- und Tageszeit [DIN 5034] [HEW 1997_1]

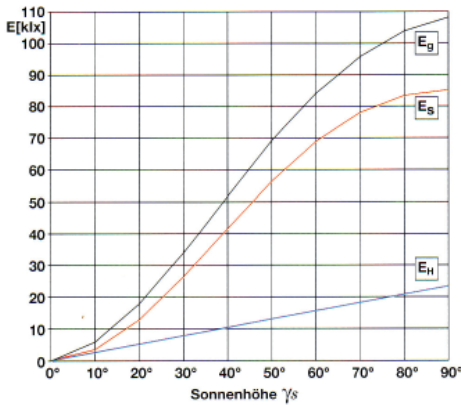


Abb. 3.03 Horizontale Beleuchtungsstärke E_s durch die Sonne E_H durch den Himmel und E_g durch Sonne und Himmel in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_s bei klarem Himmel und einem Trübungsfaktor (nach Linke) von $T_L = 4,9$ [DIN 5034] [HEW 1997_1]

Die Innenraumbelichtung mit Tageslicht ist eine Grundvoraussetzung für die Nutzung durch Menschen. Architektur und Innenraumgestaltung werden durch Tageslicht überhaupt erst erlebbar und die Nutzung von Aufenthaltsräumen erfordert ausreichend Tageslicht sowie die notwendige Sichtverbindung nach außen. In Abhängigkeit von der Art der Nutzung sind geeignete Beleuchtungsverhältnisse für die Sehaufgaben zu schaffen. Die künstliche Beleuchtung kann kein Ersatz für die natürliche Beleuchtung sein, da der menschliche Organismus auf Helligkeit, spektrale Zusammensetzung, zeitliche Veränderungen und andere Qualitäten des Tageslichts eingestellt ist. Die Außenhelligkeit ist abhängig vom Sonnenstand, das heißt von der Tages- und Jahreszeit, sowie vom Bedeckungsgrad des Himmels. Abbildung 3.01 zeigt die Außenbeleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel, den in unserer Klimazone vorherrschenden Zustand, während Abbildung 3.03 die Beleuchtungsstärken bei klarem Himmel und Sonnenschein wiedergibt. Es wird deutlich, dass Sonnenschein Außenbeleuchtungsstärken bis zu 100.000 Lux hervorrufen kann, etwa zehn mal so hoch wie das Jahresmittel bei bedecktem Himmel. Neben der geographischen Lage des Gebäudes nimmt auch die örtliche Trübung der Atmosphäre Einfluss auf die Außenbeleuchtungsstärken. [HEW 1997_1]

Blendung

Das Auge verarbeitet ohne Probleme sowohl kleine als auch sehr große angebotene Lichtmengen. Aber damit ist noch nicht gesagt, dass der Mensch auch seine gewünschte Sehaufgabe komfortabel erfüllen kann. Ein Beispiel erklärt das Prinzip: Es ist Nacht, die Pupille hat sich auf ein helles Objekt im Blickfeld, eine Straßenlaterne (die Blendquelle) eingestellt (adaptiert). Der Sehbereich mit der eigentlichen Sehaufgabe, ein Straßenschild neben der Laterne, erscheint dann so dunkel, dass die Buchstaben nicht erkennbar sind. Eine Blendung ist eine Störung der Sehaufgabe, verursacht durch ein helles Objekt im Gesichtsfeld. Für das Ohr wäre die vergleichbare Situation ein störendes, lautes Geräusch (Verkehr), das die zur Höraufgabe gehörende Geräusch (Sprache) beeinträchtigt. Blendung ist eine Art von visuellem Lärm, Lärm ist akustische Blendung.

Bei der physiologischen Blendung wird die Sehaufgabe nachweisbar beeinträchtigt. Sieht man gegen ein helles Fenster (blauer Himmel genügt!), kann man die Information an der Wand daneben (Tafel, Bild) kaum erkennen. Steht vor dem Fenster eine Person, sieht man nur die dunkle Silhouette, aber nicht das Gesicht. Die Reflexe der Deckenleuchten auf dem Bildschirm machen ein Lesen des Inhaltes schwer oder sogar unmöglich. Aber auch wenn die gewünschte Information erkannt wird, können zu starke (oder auch zu geringe) Kontraste als unangenehm, ablenkend, störend empfunden werden. Diese psychologische Blendung wird bei geringer Beeinträchtigung nicht mehr bewusst empfunden, sondern ist nur indirekt über eine ver-

ringerte Leistungsfähigkeit nachweisbar. Wesentlich für die Sehaufgabe ist die Feinabstimmung zwischen dem eigentlich zu bewertenden Objekt (Bildschirm, Papier) und seiner Umgebung.

Für eine gute Wahrnehmung sollte der Kontrast, also das Verhältnis der Leuchtdichten benachbarter Objekte etwa zwischen 3 und 10 liegen, im direkten Arbeitsbereich unter 3.

Ein Fenster spiegelt sich auf einem Bildschirm. Um eine Überblendung der Information zu verhindern, muss die Leuchtdichte des Reflexes deutlich unter der Eigenleuchtdichte des Bildschirms liegen: das Fenster benötigt einen Blendschutz, der die Leuchtdichte im Fensterbereich entsprechend reduziert. Hierfür ist in der Bildschirmarbeitsplatzrichtlinie gegenwärtig ein Grenzwert von $L_{max} = 400 \text{ lm/m}^2\text{sr}$ vorgeschrieben.

Dieser Wert wird von verfügbaren Verschattungssystemen nicht oder nur dann erreicht, wenn die Verschattung nahezu zur Verdunklung wird. In der Praxis zeigt sich, dass sich der vorgegebene Grenzwert auf Röhrenmonitore mit geringer Eigenleuchtdichte bezieht. Moderne Flachbildschirme haben eine größere Helligkeit und sind besser entspiegelt. Zudem ist es für den Nutzer offensichtlich komfortabler, den Blendschutz weiter zu öffnen, um Tageslicht und mehr visuellen Kontakt zur Außenwelt zu haben. Damit werden Leuchtdichten oberhalb des Grenzwertes akzeptiert. Beide Sachverhalte sprechen dafür, den Grenzwert in der Normung anzupassen und ein Verschattungssystem anzubieten, das zwar ausreichend abdunkelt, aber vor allem dem Nutzer die individuelle Möglichkeit zur Regelung gibt.

Im Unterschied zur Leuchtdichte

Uhrzeit	3:00 Uhr	6:00 Uhr	9:00 Uhr	12:00 Uhr	15:00 Uhr	18:00 Uhr	21:00 Uhr
Sonnenposition	NO	O	SO	S	SW	W	NW
	Sonnenhöhe						
Winter	-	-	0	15	0	-	-
Übergangszeit	-	0	25	40	25	0	-
Sommer	0	20	45	60	45	20	0

Abb. 3.04

Tageslänge und Sonnenposition in Mitteleuropa (Werte gerundet; Maßeinheit: Grad) [DETAIL_B]

summiert die Beleuchtungsstärke die gesamte Lichtmenge, die auf eine Fläche trifft. Ist die räumliche Verteilung des Lichtes im Raum einigermaßen homogen, kann sie zur Definition der für eine Sehaufgabe mindestens erforderliche Lichtmenge und für Festlegungen zur Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung verwendet werden. Zu beachten ist jedoch, dass bei ungünstiger Lichtverteilung trotz erfüllter Anforderungen an die Beleuchtungsstärke Blendung entstehen kann.

Einige Zahlen zum Verständnis: Im Außenraum liegen in der Mittagszeit bei klarem Himmel und Sonnenschein Beleuchtungsstärken von 10000 lx (Winter) bis maximal 100 000 lx oder knapp darüber (Sommer) vor. Ist dagegen der Himmel bedeckt, sind die Werte erheblich niedriger: 2 000 lx im Winter bis 20 000 lx im Sommer. Die meisten Menschen fühlen sich bei Beleuchtungsstärken ab 2 000 lx wohl. Dies ist nicht verwunderlich, entspricht es doch der Lichtmenge, die man im Außenraum tagsüber auch bei den ungünstigsten Verhältnissen vorfindet.

Wie schon beschrieben, genügt dem Auge bereits ein kleiner Anteil dieses Lichtes, um im Inneren der Räume arbeiten zu können. Untersuchungen zeigen, dass erst bei Beleuchtungsstärken unter 75 lx das Kunstlicht eingeschaltet wird. Der Grund hierfür ist, dass dann das Farbsehen beeinträchtigt wird.

Die Empfehlungen und Vorschriften aus der Normung setzen bei höheren Werten an. So gibt die Nennbeleuchtungsstärke die vorgeschriebene Beleuchtungsstärke für Kunstlicht nach DIN 5035 in Abhängigkeit von der Sehaufgabe an. Für Büroarbeitsplätze beispielsweise liegt die Nennbeleuchtungsstärke bei 500 lx bzw. bei 300 lx

für "tageslichtorientierte Arbeitsplätze". [DETAIL_2]

3.1.2 Das Tageslichtangebot in Mitteleuropa

Die solare Einstrahlung kommt auf zwei Wegen zur Erdoberfläche:

- Als direkte Strahlung von der Sonne. Direkte Strahlung ist sehr energiereich und lässt sich sehr gut umlenken und konzentrieren (ideal für jede Art von aktiver Solarenergienutzung). Zur Entlastung der Heizung im Winter soll die Sonne ausdrücklich in das Gebäude einfallen (passive Solarenergienutzung). Ein Übermaß an solarem Durchgang führt im Sommer jedoch zur Überhitzung des Gebäudes und erfordert Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz.

- Als diffuse Einstrahlung vom Himmel. Bei bedecktem, teilweise bewölktem oder blauem Himmel tritt diffuse Strahlung auf. Sie wird für die üblichen Sehaufgaben als sehr angenehm empfunden und ist ideal für die Versorgung von Räumen mit Tageslicht geeignet.

In Mitteleuropa ist die Sonne an 55% der Tagesstunden durch Wolken bedeckt. Dies bedeutet, dass Systeme zur Tageslichtlenkung, die mit dem direkten Licht von der Sonne arbeiten, bei uns an eben 55% der Tagesstunden gar nicht arbeiten können - gerade dann ist aber wegen des trübigen Himmels der Bedarf nach Tageslicht in den Räumen am größten. Die Tageslänge und die Position der Sonne sind in Mitteleuropa wegen der großen Entfernung zum Äquator sehr unterschiedlich. Für erste, grobe Abschätzungen genügen die auf glatte Zahlen gerundeten Werte der Tabelle (Abb. 3.04).

Eine genauere Analyse der mitteleu-

ropäischen Klimadaten zeigt für den Sommer, dass wegen der tief stehenden Sonne Fassaden mit West- oder Ostorientierung mehr solare Einstrahlung und damit mehr Wärme erhalten als eine südorientierte. Während zusätzlich die hochstehende Sonne auf der Südseite wesentlich leichter ausgeblendet werden kann (beispielsweise mit den Lamellen einer Jalousie), ist das bei einer west- oder ostorientierten Fassade mit der annähernd horizontal liegenden Sonne nur schwer möglich (Lamellen der Jalousie vollständig geschlossen; damit wird der Überhitzungsschutz zur Verdunklung und zur Lüftungsbremse).

Deshalb gilt vor allem im Verwaltungsbau: Süd- und nordorientierte

Tageslichtorientierter Arbeitsplatz

Nach der Formulierung der DIN 5035 (EN 12464) ein Arbeitsplatz in unmittelbarer Fensternähe. Eine genauere Definition ist aus dem Leitfadenelektrische Energie (LEE) ableitbar:

Ein tageslichtorientierter Arbeitsplatz hat eine Tageslichtautonomie von mindestens 70%. Das bedeutet, dass an wenigstens 70% der Nutzungsstunden ausreichend Tageslicht vorhanden ist und kein Kunstlicht zugeschaltet werden muss. Dies entspricht bei Büroräumen einem Tageslichtquotienten von etwa 3%. [DETAIL_C]

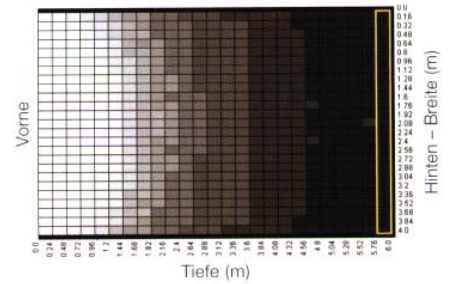


Abb. 3.05
Simulation eines typischen Büroraumes
(4 x 6 x 2,7 m, Fensterband 1,85 m hoch
über Brüstung 0,85 m) [DETAIL_D]

Büros sind besser als ost- und westorientierte. [DETAIL_3]

3.1.3 Anforderung an die Tageslichtbeleuchtung von Räumen

Neben der Sichtverbindung zwischen Innen- und Außenraum ist die Güte der Beleuchtung von Innenräumen mit Tageslicht von wesentlicher Bedeutung, die im Einzelnen durch die Beleuchtungsstärke und die Blendungsbegrenzung bestimmt wird. Aufgrund der ständig schwankenden Helligkeit wird kein absoluter Soll- oder Mindestwert für die Raumbeleuchtungsstärke vorgegeben, sondern ein Verhältnis zwischen Innen- und Außenbeleuchtungsstärke (Tageslichtquotient entsprechend DIN 5034) für die Qualitätsbestimmung der Tagesbeleuchtung verwendet.

Für bestimmte Nutzungsarten von Räumen werden Mindestwerte für den Tageslichtquotienten in DIN 5034 empfohlen. Es wird vorausgesetzt, dass die Tageslichtbeleuchtung zeitweise durch Kunstlicht ergänzt wird, um die für bestimmte Sehaufgaben erforderliche Helligkeit in Räumen zu erzielen. Je seltener Kunstlicht während der Nutzungsdauer zugeschaltet werden muss, desto größer ist die Qualität der Raumbeleuchtung, desto geringer sind Stromverbrauch und Umweltbelastung und desto niedriger ist die Wärmeabgabe in den Raum. Somit beeinflusst die Tageslichtbeleuchtung nicht nur Wohlbefinden, Leistungsfähigkeit und Gesundheit des Nutzers sondern auch Energieverbrauch, Umweltschutz und Betriebskosten des Gebäudes.

Blendung durch die Sonne oder durch besonnte Flächen muss durch geeignete Maßnahmen verhindert werden können. Im Einzelnen kommen starre oder bewegliche Verschattungsvorrichtungen oder stark lichtstreuende Elemente in Frage. Blendschutzvorrichtungen müssen nicht identisch

sein mit Sonnenschutzvorrichtungen, die gegen die Überwärmung von Räumen durch Sonneneinstrahlung eingesetzt werden. Weder Blend- noch Sonnenschutzvorrichtungen sollten die Tageslichtbeleuchtung und die

3.1.4 Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient D ist eine Größe, die sehr gut geeignet ist, die Qualität der Tageslichtversorgung an einem bestimmten Arbeitsplatz darzustellen. Er beschreibt das Verhältnis der Beleuchtungsstärke auf einer im Raum gelegenen Arbeitsfläche in Bezug zur Beleuchtungsstärke außen für den bedeckten Himmel.

Dieser Tageslichtquotient D hängt ausschließlich ab von den geometrischen Verhältnissen (Raumabmessungen, Lage und Größe der Fenster, abschattende Verbauungen) und der Lichttransmission der Verglasung, aber eben nicht von der momentanen Beleuchtungsstärke außen. Er ist für jeden Arbeitsplatz eine Konstante, variiert aber als 2D-Feld natürlich im Raum selbst.

Ein Beispiel zum Verständnis: Wenn die Beleuchtungsstärke außen 50000 lx ist und der Tageslichtquotient D am Arbeitsplatz 1,5% beträgt, dann ist die Beleuchtungsstärke dort

$$E = 50\,000 \text{ lx} \cdot 1,5\% / 100\% = 750 \text{ lx}$$

Es ist also hell genug. Gibt es dagegen einen anderen Arbeitsplatz mit $D = 0,4\%$, beträgt die Beleuchtungsstärke dagegen nur 200 lx, Kunstlicht müsste zugeschaltet werden.

Bezüglich der Beleuchtungsstärke zeigt die Klimastatistik für den Standort Mitteleuropa diese Häufigkeiten: Bei bedecktem Himmel wird außen

- eine Beleuchtungsstärke von
- 2500 lx überschritten an 90% der Tagesstunden im Jahr (also fast immer)
- 5000 lx überschritten an 75% der Tagesstunden im Jahr
- 10 000 lx überschritten an 50% der Tagesstunden im Jahr.

Um auf einem Arbeitsplatz 300 lx (Mindestgrenze für tageslichtorientierte Arbeitsplätze nach DIN 5035 / EN 12464) bzw. wenigstens 75 lx (subjektive Einschaltgrenze für Kunstlicht) zu erreichen, ist je nach Beleuchtungsstärke E_e außen folgender Tageslichtquotient D erforderlich: Man erkennt, dass der auch in der

$$\text{außen } E_e \quad \text{innen } E_i = 75 \text{ lx} \quad \text{innen } E_i = 300 \text{ lx}$$

2 500 lx	D = 3,0 %	D = 12 %
5 000 lx	D = 1,5 %	D = 6 %
10 000 lx	D = 0,75 %	D = 3 %

DIN 5034 genannte Tageslichtquotient D von 1 % eine Grenze für das absolute Minimum ist. Während des überwiegenden Teils der Nutzungsstunden wird zumindest die Einschaltgrenze von 75 lx erreicht, der Raum wirkt nicht zu düster. Dieser Wert von $D = 1\%$ ist bei nicht zu tiefen Räumen und nicht zu starker Abschattung durch Nachbargebäude auf den wesentlichen Teilen der Hauptnutzflächen immer zu erreichen.

Bei einem Tageslichtquotienten D von 3 % werden an 90 % der Tagesstunden 75 lx erreicht, an 50 % der Tagesstunden sogar 300 lx. Ein solcher Arbeitsplatz (mit $D \geq 3\%$) wird tageslichtorientiert genannt.

Allerdings ist eine solche hohe Qualität der Belichtung nur noch im fensternahen Bereich der Hauptnutzflächen zu erzielen. Abbildung 3.05 zeigt, dass bei Büroräumen (frei stehendes Gebäude) in etwa bis zu einer Raumtiefe

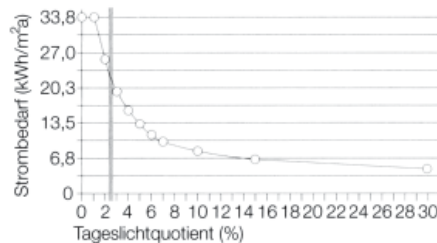
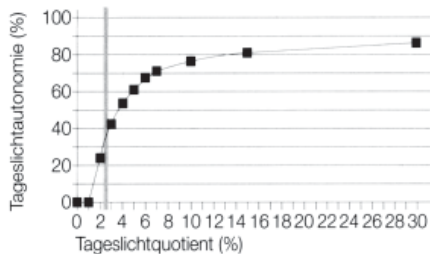


Abb. 3.06
Zusammenhang von Tageslichtquotient, Strombedarf für Kunstlicht und Tageslichtautonomie. Die graue Linie gibt exemplarisch den erreichten Tageslichtquotienten für Kunstlichtschaltung im Büroraum aus Abb. 2.05 [DETAIL_E]

von einmal der lichten Raumhöhe $D = 3\%$ erreicht wird.

Ein noch höherer Tageslichtquotient ist theoretisch durch größere Fenster und höhere Räume zu erreichen, jedoch wenig praktikabel. Außerdem würde dies den Strombedarf für Kunstlicht nicht wesentlich reduzieren, sondern viel mehr die Probleme beim sommerlichen Wärmeschutz vergrößern.

Es ist zu beachten, dass der Strombedarf zunächst mit anwachsendem Tageslichtquotienten absinkt. Dann wird ein Niveau der Lichtversorgung erreicht, bei dem beim überwiegenden Teil der Nutzungsstunden die Einschaltgrenze für das Kunstlicht (also z. B. 300 lx) überschritten wird. Eine darüber hinaus gehende Erhöhung des Tageslichtquotienten kann keinen weiteren Strom einsparen. Ein verbleibender Rest an Strombedarf resultiert aus Nutzungszeiten, die in der Nacht liegen.

Das direkt vom Himmel kommende Tageslicht bestimmt primär die Lichtverteilung und die Lichtmenge im Raum. Zusätzlich führt die Reflexion des Lichtes an den (hellen) Umgebungflächen des Raumes zu einer Erhöhung der Lichtmenge um etwa 10-20 % in der mittleren Raumtiefe (d.h. dass durch diese Reflexionen ein Tageslichtquotient von 1 % auf 1,1-1,2 % anwächst). Fehlt die primäre Lichtversorgung vom Himmel, bekommt man allerdings durch Reflexionen alleine kaum Licht in die Räume. Es ist also kaum möglich, tief im Gebäude liegende Räume z. B. über einen weiß gehaltenen Lichtschacht oder über ein Atrium spürbar aufzuhellen.

Andererseits ist das an den Umfassungsflächen reflektierte Licht die einzige Quelle für Tageslicht in größte-

ren Raumtiefen, die Aufhellung der Decke usw. Es sorgt für eine angenehme gleichmäßige Belichtung des Raumes und mindert zu starke Hell-Dunkel-Kontraste.

Die zu erreichende Qualität der Tageslichtversorgung an Arbeitsplätzen im Verwaltungsbau kann auch durch die Tageslichtautonomie beschrieben werden (Abb. 3.06).

Bei tageslichtorientierten Arbeitsplätzen ($D \geq 3\%$) werden Werte über 70% erreicht. Da es aber nicht möglich ist, diese hohe Qualität für jede Hauptnutzfläche zu realisieren, sollte der Mittelwert der Tageslichtautonomie über allen Arbeitsplätzen wenigstens 30 % betragen. Weitere Empfehlungen zur Tageslichtversorgung finden sich in der DIN 5034 - Tageslicht in Innenräumen; sie sind jedoch aus heutiger Sicht unzureichend, da sie darauf abzielen, ein Mindestmaß an Tageslicht im Wohnungsbau zu garantieren. Für Arbeitsplätze fehlen weiterführende Kriterien wie Strombedarf für Kunstlicht, Tageslichtautonomie und Tageslichtorientierung.

3.1.5 DIN-Norm + Definitionen

DIN 5034 - Tageslicht in Innenräumen

Empfehlungen für Tageslichtquotient und Gleichmäßigkeit der Raumausleuchtung:

- Räume mit Seitenlicht:

Der Tageslichtquotient D wird bestimmt an Bezugspunkten, die in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von der Seitenwand und in 85 cm Höhe liegen.

- nur ein senkrechtes Fenster:

$$D \geq 0,75\%$$

(am ungünstigeren Bezugspunkt)

$$D \geq 0,9\%$$

(Mittelwert beider Bezugspunkte)

- Fenster in zwei angrenzenden Wänden:

$$D \geq 1,0\%$$

(am ungünstigeren Bezugspunkt)

- Räume mit Oberlicht:

$$D_{\text{mittel}} \geq 4\%$$

(für angenehme Ausleuchtung, 2% werden als zu dunkel empfunden)

$$D_{\text{mittel}} \leq 10\%$$

(zur Vermeidung zu großer thermischer Lasten)

Empfehlung für die Gleichmäßigkeit der Raumausleuchtung:

$$- D_{\text{min}} / D_{\text{max}} \geq 0,67$$

$$- D_{\text{min}} / D_{\text{mittel}} \geq 0,5$$

[DETAIL_4]

Bewertungsgrößen der Tageslichtbeleuchtung

Beleuchtungsstärke E [lux]:

Maß für die Leistung des auf eine Fläche fallendes Lichtes.

Die Beleuchtungsstärke E [$\text{lm}/\text{m}^2 = \text{lx}$] gibt an, wie groß die aus allen Raumwinkeln auf eine Fläche auftreffende Lichtmenge insgesamt ist. Sie entspricht dem Quotienten aus der auf eine Fläche treffenden Lichtmenge und der beleuchteten Fläche.

Leuchtdichte [cd/m^2]:

Maß für die Helligkeit einer Fläche. Ein Objekt wird vom Auge dadurch wahrgenommen, dass es Licht in das Auge sendet. Die Leuchtdichte L [$\text{lm}/\text{m}^2\text{sr}$] ist die Menge an Licht, die von einem Punkt dieses Objektes in eine bestimmte Richtung (Raumwinkelbereich, in sr) abgegeben wird. Liegt das Auge in dieser Richtung, ist dies

Tageslichtautonomie

Der prozentuale Anteil an jährlichen Nutzungsstunden, an denen ausreichend Tageslicht vorhanden ist, also kein Kunstlicht zugeschaltet werden muss. [DETAIL_F]

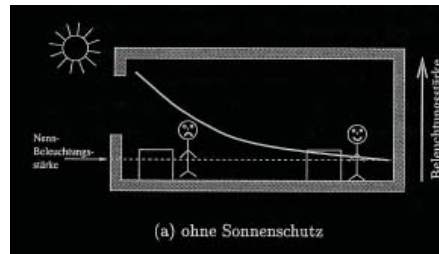


Abb 3.07 Tageslichtverteilung in einem Seitenbelichteten Raum

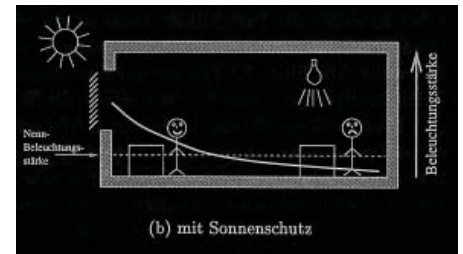


Abb 3.08 Tageslichtverteilung in einem Seitenbelichteten Raum mit Sonnenschutz

die Helligkeit, mit der das Objekt gesehen wird.

Eine andere geläufige Maßeinheit für die Leuchtdichte ist $[cd/m^2]$, wobei gilt $[cd = lm/sr]$

Nennbeleuchtungsstärke:

Beleuchtungsstärke auf der Nutzfläche (z.B. Schreibtisch), die von künstlicher Beleuchtung erreicht werden muss. Die Höhe der Nennbeleuchtungsstärke legt DIN EN 12464 in Abhängigkeit von der Nutzung fest.

Bei einer integralen Betrachtung von Kunst- und Tageslicht wäre das Kunstlicht zuzuschalten, wenn das Tageslicht alleine diese Nennbeleuchtungsstärke nicht mehr erbringt.

[DETAIL_5]

Tageslichtquotient [%] = Daylight Factor [D]:

Quotient der Beleuchtungsstärke am Messpunkt und der Beleuchtungsstärke unter freiem Himmel bei bedecktem Himmel.

In tageslichtbeleuchtenden Räumen mit Seitenlicht anzustrebender Wert D etwa 2 %.

In tageslichtbeleuchtenden Räumen mit Oberlicht gem. DIN 5034 anzustrebender Wert: D größer 4 % jedoch kleiner als 10 %.

Hinsichtlich der psychologischen Bedeutung des Tageslichts gem. DIN 5034 als ausreichend hell eingestuft Raum: In halber Raumtiefe bei einem Abstand von jeweils einem Meter von beiden Seitenwänden Mittelwert von D größer 0,9 %.

Relative Nutzungsdauer:

Anteil der Zeit an der Betriebszeit während der eine Beleuchtungsaufgabe durch Tageslicht erfüllt wird.

Relative Nutzbelichtung:

Anteil des Tageslichts an dem zur Erfüllung der Beleuchtungsaufgabe benötigten Licht.

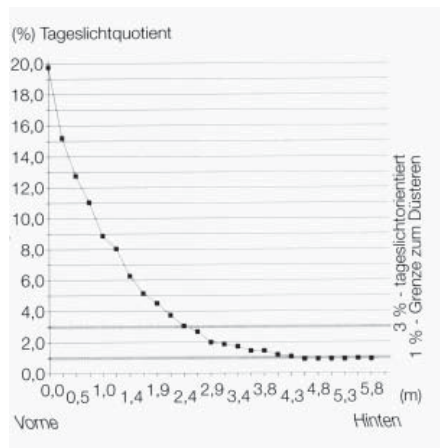


Abb. 3.09 Zusammenhang zwischen Tageslichtquotienten und Raumtiefe [DETAIL_G]

Tageslichtquotient

$$D = \frac{\text{Beleuchtungsstärke [lx] auf einer im Raum gelegenen Arbeitsfläche (meistens horizontal auf einer Höhe von 0,85 m)}}{\text{Beleuchtungsstärke [lx] auf einer horizontalen Fläche außen unter freiem, aber bedecktem Himmel}} \times 100 \%$$

D = Tageslichtquotient

[DETAIL_H]

3.2 Konventionelle Beleuchtungssituation

Die qualitative Tageslichtverteilung in einem seitenbelichteten Raum ist in der Abbildung 3.07 dargestellt. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die notwendige Beleuchtungsstärke, die auf einer Arbeitsoberfläche benötigt wird. Nach den beleuchtungstechnischen Normen beträgt diese zum Beispiel 500 lx.

Wichtig ist, dass die Beleuchtungsstärke typischerweise sehr stark mit der Raumtiefe abnimmt. Somit ist das Beleuchtungsangebot in Fensternähe zu groß und führt zu Blendungsproblemen. Im Gebäudeinneren dagegen ist es zu niedrig und führt zur Benutzung von Kunstlicht. Durch konventionelle Sonnenschutzmaßnahmen wird in der Regel die Lichttransmission des Fensters als Ganzes verringert. Somit sinkt die Beleuchtungsstärkekurve links oben ab und führt zum Einsatz von Kunstlicht (Abb. 3.08).

Eine ähnliche Situation ergibt sich bei bewölktem Himmel. Eigentlich fällt auch bei dieser Himmelsverteilung ausreichend Licht auf die Fassade ein.

Nach einer groben Abschätzung genügt theoretisch nur eine Fassadenöffnungsfläche von ca. 5% der Grundfläche des nutzenden Raumes. Denn auch bei schlechten Beleuchtungsbedingungen steht an der Fassade häufig eine vertikale Beleuchtungsstärke von 10 000 lx zur Verfügung. Soll überall im Raum eine Nennbeleuchtungsstärke von 500 lx erreicht werden, genügt obiger Anteil. Eine ähnliche Argumentation findet man auch in [Bartenbach '96] wonach 60% Verlust noch 800 lx überall im Raum zu normalen Nutzungszeiten zur Verfügung stehen.

Das Problem ist aber die gleichmäßige Verteilung des Lichtes im Raum. Auch bei diffusem Himmel verläuft die Beleuchtungsstärkekurve in Abhängigkeit von der Raumtiefe stark abfallend. Durch Umlenkung soll erreicht werden, dass das an der Fassade auftreffende Licht gleichmäßig im Raum verteilt wird und somit größere Raumtiefenbereiche besser ausgeleuchtet werden.

3.3 Tageslicht als Substitut für Kunstlicht

Das photometrische Strahlungsäquivalent des Tageslichts liegt nach DIN 5034 bei bedecktem Himmel bei 115 lm/W. Das intensitätsstarke direkte Sonnenlicht erreicht in Abhängigkeit der Sonnenhöhe Werte bis ca. 100 lm/W. Durch die Selektivität, d. h. das Verhältnis Lichttransmissionsgrad zum Gesamtenergiedurchlassgrad von Verglasungssystemen, erhöht sich das photometrische Strahlungsäquivalent im Innenraum je nach Tageslichtart auf Werte über 150 lm/W.

Die in Bürogebäuden gebräuchlichen Kunstlichtsysteme aus Lampe, Vorschaltgerät und Leuchte erreichen heutzutage bei hochwertiger Ausführung Lichtausbeuten bis etwa 5 lm/W für direkt/indirekt strahlende Leuchten und 7 lm/W für rein direktstrahlende Leuchten. Mit dem gleichen in den Raum eingebrachten Lichtstrom ist somit beim Tageslicht ein deutlich geringerer Wärmeeintrag verbunden. Energetische Motivation der Tageslichtnutzung ist somit die höhere Effizienz der Lichtquelle Tageslicht gegenüber im Bürobereich verfügbaren Kunstlichtsystemen. Die kostenbezogene Motivation ist die freie Verfügbarkeit des Tageslichts als Energiequelle.

Bei einem Tageslichtorientierten Ar-

beitsplatz sollte in einer Raumtiefe von ca. 2,50 m noch ein Tageslichtquotient von ca. 3% vorhanden sein. Untersuchungen haben gezeigt, dass höhere Beleuchtungsstärken bei der Arbeit am Computer eher bei hohem Indirektanteil akzeptiert werden.

3.4 Tageslicht am Arbeitsplatz

Licht am Arbeitsplatz, in der Verwaltung oder der Produktion sollte eine gesunde, sichere und komfortable Arbeitsumgebung gewährleisten. Nach Maßgabe dieser drei Faktoren lassen sich für eine gute und effiziente Ausführung der Sehaufgabe folgende Beleuchtungskriterien für Tages- und Kunstlicht bestimmen:

- Beleuchtungsstärke
- Gleichmäßigkeit (am Arbeitsplatz)
- Leuchtdichten-Verhältnisse innerhalb des Sehfeldes
- Vermeidung von Blendung
- Lichtverteilung (im Raum)
- Farbeigenschaften des Lichtes

Unfallhäufigkeit, Fehlerquote und Arbeitsleistung sind unmittelbar abhängig von der Beleuchtungsqualität. Der arbeitende Mensch benötigt für eine gleichmäßig hohe Produktivität kurze Entspannungsphasen als Ausgleich, in denen er sich durch andere sensorische Reize Abwechslung verschaffen kann, um körperliche und geistige Ermüdungserscheinungen zu vermeiden. Im tagesbelichteten Büro besteht in der Regel die Möglichkeit, sich durch ein Fenster mit einer genügend großen Lichtmenge zu versorgen. Nacht- bzw. Schichtarbeit erfordert dagegen ein Arbeiten gegen den natürlichen Biorhythmus. Amerikanische Wissenschaftler konnten belegen, dass sich mit einer Beleuchtungsstärke ab 2000 lx die Melatoninausschüttung (Melatonin: Schlafhormon) unterdrücken bzw. verschieben

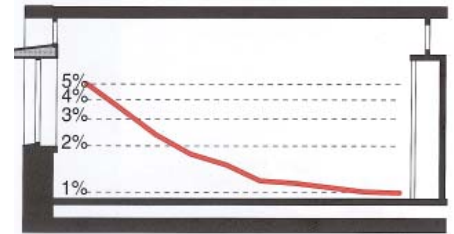


Abb. 3.10
Vertikalschnitt und Grundriss eines Büroraumes mit Darstellung des Verlaufes des Tageslichtquotientens

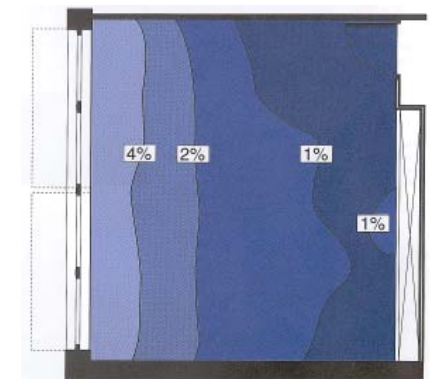


Abb. 3.11
Vertikalschnitt und Grundriss eines Büroraumes mit Darstellung des Verlaufes des Tageslichtquotientens

lässt, während das übliche Beleuchtungsniveau von 500 lx am Büroarbeitsplatz keine Auswirkungen auf das körperliche Wohlbefinden hatte. Eine helle Arbeitsumgebung erhöht die Körperaktivität und trägt dadurch zu einer Leistungssteigerung bei. Andererseits kann ein Übermaß an Aktivität das Gegenteil bewirken und der Ermüdung Vorschub leisten. Je nach Arbeitssituation sollten daher individuelle Beleuchtungsbedürfnisse und übergeordnete Interessen berücksichtigt werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen. [DETAIL_6]

In Bürogebäuden wird im Durchschnitt während 60 % der Nutzungszeit künstliche Beleuchtung eingeschaltet, obwohl selbst bei bewölktem Himmel an der Gebäudeoberfläche genug Tageslicht vorhanden ist, um Räume ausreichend natürlich zu beleuchten. Ein grosses Problem besteht darin, dass direktes Sonnenlicht zur Blendung besonders an Bildschirmplätzen führt und herkömmliche Verschattungselemente die Räume zu sehr verdunkeln.

Aufgabe von Tageslichtsystemen ist es also, die Dynamik der Licht-

einstrahlung auf ein Behaglichkeitsniveau einzuschränken. Durch die Lichtlenkung soll eine verbesserte Tageslichtausbeute des Innenraumes und eine bessere Belichtung in die Raumtiefe erzielt werden.

Die Lichtausblendung sollte primär der direkten Sonne gelten, thermische Lasten im Sommer weitgehend ausschließen, jedoch passiven Solarenergiegewinn im Winter zulassen.

Das primäre Ziel der Tageslichtplanung ist die ausreichende und blendfreie Versorgung der Arbeitsplätze mit natürlichem Licht. Die Minimalanforderungen sind durch die DIN 5034-1 und die Bildschirmarbeitsplatzverordnung vorgegeben. Eine gute Planung zielt darauf, die Minimalwerte (0,9 % in halber Raumtiefe) zu übertreffen, um den visuellen Komfort zu maximieren. [LPI 2004]

3.5 Kriterien zu Beurteilung der Blendschutz Eigenschaften

Die Bildschirmarbeitsverordnung (BildscharbV) vom 20.12.96 fordert in §4: "Der Arbeitgeber hat geeignete Maßnahmen zu treffen damit die Bildschirmarbeitsplätze den Anforderungen des Anhangs und sonstiger Rechtsvorschriften entsprechen". Mit der Erwähnung von sonstigen Rechtsvorschriften wird auf DIN und CEN Normen verwiesen, die den Stand der Technik festschreiben. Im Vorwort der Verordnung wird explizit gesagt, dass "die Anforderungen in der Regel bei Beachtung von Sicherheitsregeln der Unfallversicherungsträger und entsprechenden DIN-Normen erfüllt werden".

Die Schwierigkeit liegt darin, dass die neueste Version der auf Bildschirmarbeitsplätze anzuwendenden DIN 66234, Teil 7 von 1984 stammt und deshalb nicht die neuesten Entwick-

lungen berücksichtigt, die im Bereich Bildschirmarbeitsplätze stattgefunden haben. Die DIN 66234 fordert eine Begrenzung der mittleren Leuchtdichte auf 200 cd/qm und der maximalen Leuchtdichte auf 400 cd/qm. Neue Entwicklungen im Bereich Bildschirmarbeitsplätze betreffen vor allem Bildschirme mit höheren Leuchtdichte- und besseren Entspiegelungseigenschaften. Höhere Leuchtdichten der Bildschirme führen zu einer Entschärfung des Problems.

Man kann die Diskussion folgendermaßen zusammenfassen: Wie die neuen Entwürfe zeigen, entsprechen die Anforderungen der DIN 66234 nicht mehr dem neuesten Stand der Technik bei Bildschirmarbeitsplätzen. Es gibt momentan keine fertige Richtlinie, die in Europa verbindlich neue Richtwerte festlegt. Es erscheint wahrscheinlich, dass die neue Richtlinie die maximal zulässige mittlere Leuchtdichte an der Innenseite der Fassade auf 1000 cd/qm begrenzen wird und dass die maximale Leuchtdichte auf einen Wert begrenzt wird, der nicht wesentlich höher ist als 1000 cd/qm.

3.6 Führen von Licht

Eine große, klare, möglichst viel Licht durchlassende Verglasung erlaubt den besten Ausblick und liefert die maximale Menge an Tageslicht. Allerdings entspricht die im Raum entstehende Lichtsituation nicht immer den Anforderungen, um die gewünschte (Seh-) Aufgabe optimal auszuführen. Deshalb ist ein zusätzliches System erforderlich, das den Lichtdurchgang regelt. Seine Aufgaben sind äußerst vielfältig und teilweise auch gegensätzlich:

- Die direkte Sonne ausblenden (Blendschutz),

- die Helligkeit des Himmels reduzieren (gleichfalls Blendschutz, vor allem bei PC-Arbeitsplätzen),
- bei geschlossenem System noch ausreichend Tageslicht in den Raum einlassen und es angenehm verteilen (Stromeinsparung, Komfort),
- bei geschlossenem System den ungestörten Ausblick gewährleisten,
- Wärmeeintrag im Sommer verhindern (Überhitzungsschutz),
- bei geschlossenem System die natürliche Belüftung des Raums ungestört ermöglichen,
- Regelbarkeit für jede mögliche Situation außen und jede Arbeitssituation innen.

Ein "ideales" System zur Führung von Tageslicht, das alle genannten Anforderungen erfüllt, gibt es beim derzeitigen Stand der Technik nicht. Aber es gibt doch Systeme, die zumindest die meisten dieser Funktionen erfüllen können und der Lösung nahe kommen.

Um unter diesen nun die geeignete Lösung für eine konkrete Bauaufgabe zu finden, werden weitere Kriterien relevant:

Wie ist das System zu bewerten hinsichtlich Einfachheit (Herstellung, Betrieb, formal), Nachhaltigkeit und Angemessenheit (in Bezug auf die Gebäudenutzung, den architektonischen Ausdruck, das Gesamtbudget)? Und letztlich: dient es dem Anliegen von Architektur, Räume zu schaffen, in denen sich Menschen wohlfühlen?

Funktionsprinzipien

Systeme zur Führung des Tageslichtes sind Elemente, die in den geradlinigen Durchgang des Lichtes durch Fassadenöffnungen eingreifen, indem sie das Licht oder auch nur einzelne Bereiche des Lichtspek-

trums reduzieren, ausblenden, umlenken oder streuen. Die verschiedenen Systeme können hierbei ein Funktionsprinzip allein oder mehrere gleichzeitig nutzen, sie können einzeln eingesetzt werden oder in Kombination, als Teil eines komplexen Fassadensystems, das sämtliche Funktionen der Gebäudehülle bausteinartig erfüllt.

Sie unterscheiden sich außerdem darin, ob sie im Bereich der Fassade / Fenster oder der Dächer / Oberlichter eingesetzt werden, ob sie direktes Sonnenlicht oder diffuses Himmelslicht nutzen, ob sie starr oder beweglich sind und ob sie vor, hinter oder in der Verglasungsebene angeordnet sind.

Wärmetechnisch am günstigsten ist natürlich eine Anordnung des Systems möglichst weit außen vor der Verglasung. Die Sonnenstrahlung wird "ganz vorne" bereits abgefangen und das sich unter der Sonne oft stark aufheizende Verschattungssystem (40 °C sind keine Seltenheit) kann direkt mit Außenluft gekühlt werden, so dass nur wenig Wärmestrahlung in den Raum gelangt. Außen liegende Systeme haben (lösbare) Probleme in Bezug auf Verrottung und Windstabilität.

Wenn die zur Sonne gewandte Seite des Systems metallisch beschichtet ist, kann die Solarstrahlung nicht nur im sichtbaren, sondern auch im unsichtbaren Infrarot-Bereich reflektiert werden. Das System selbst heizt sich nur noch gering auf und kann bei entsprechender Winkeleinstellung Tageslicht weit in die Raumtiefe lenken. Weil jede Verschmutzung diese Wirkung beeinträchtigt, muss ein solches System geschützt im Scheibenzwischenraum, in der Doppelfassade, im Kastenfenster oder im

Innenraum angeordnet werden.

Es ist zu erkennen, dass die Lage der Verschattung stark bestimmt wird durch die Funktion Überhitzungsschutz. Für das Tageslicht hingegen ist die Lage eigentlich ohne Bedeutung. [DETAIL_7]

3.7 Normen und Richtlinien

Tageslicht und Kunstlicht

DIN 5032: Lichtmessung
DIN 5033: Farbmessung
DIN EN 12464: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten; Ersatz für DIN 5035-2, DIN 5035-8, DIN 5035-3, DIN 5035-4 und teilweise für DIN 5035-1, DIN 5035-7

Tageslicht

DIN 5034-1 Ausgabe: 1990-10
Tageslicht in Innenräumen - Teil 1:
Allgemeine Anforderungen

DIN 5034-2 Ausgabe: 1985-02
Tageslicht in Innenräumen - Teil 2:
Grundlagen

DIN 5034-3 Ausgabe: 1994-09
Tageslicht in Innenräumen - Teil 3:
Berechnung

DIN 5034-4 Ausgabe: 1994-09
Tageslicht in Innenräumen - Teil 4:
Vereinfachte Bestimmung von Mindestfenstergrößen für Wohnräume

DIN 5034-5 Ausgabe: 1993-01
Tageslicht in Innenräumen - Teil 5:
Messung

DIN 5034-6 Ausgabe: 1995-06
Tageslicht in Innenräumen - Teil 6:
Vereinfachte Bestimmung zweckmäßiger Abmessungen von Oberlichtöffnungen in Dachflächen

4.0 Tageslichtsysteme allgemein



4.1 Physikalische Grundprinzipien

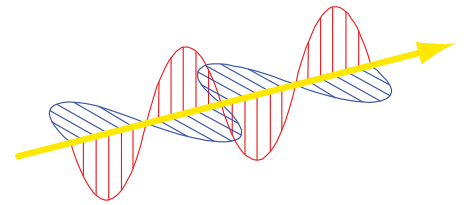


Abb. 4.01 Darstellung 17
Elektromagnetische Welle mit elektrischen (rot) und magnetischen (blau)

4.1.1 Grundlagen

Um das Phänomen Licht zu beschreiben gibt es im Wesentlichen drei Grundmodelle, die alle ineinander greifen:

1. Die geometrische Optik
2. Die Wellenoptik
3. Die Quantenoptik

In der geometrischen Optik wird Licht in Form von Lichtstrahlen beschrieben, die nach einfachen geometrischen Regeln die (geradlinig angenommene) Lichtausbreitung beschreiben. Die geometrische Optik beschäftigt sich mit allen Erscheinungen des Lichts, zu deren Verständnis die Betrachtung dieser Lichtstrahlen genügt. Im Wesentlichen sind dies die Wechselwirkungen des Lichts mit Objekten, die wesentlich größer sind, als die Wellenlänge des Lichts (ca. 1/2000 mm). [FALK_1]

Wenn Licht mit Objekten, deren Ausdehnung Bruchteile eines Millimeters beträgt in Wechselwirkung tritt, so tritt seine Wellennatur zutage. Die Welleneigenschaften des Lichts sind natürlich auch bei der Wechselwirkung des Lichts mit größeren Objekten inhärent. Sie lassen sich dort nur nicht direkt beobachten. Daraus folgt, dass die geometrische Optik im Grunde nur ein Spezialfall der Wellenoptik ist. [FALK_2]

In der Wellenoptik wird Licht als elektromagnetische Welle beschrieben. [MAXWELL]

Elektromagnetische Wellen haben im Gegensatz zu Wasser- oder Schallwellen die Eigenschaft, dass sie sich auch im Vakuum ausbreiten können. Sie brauchen also kein Medium zur Übertragung. Die verschiedenen Erscheinungsformen von elektromagnetischen Wellen (Röntgenstrahlung, Radiowellen, sichtbares Licht)

unterscheiden sich nur durch ihre Frequenz (bzw. ihre Wellenlänge). Abbildung 4.02 zeigt das elektromagnetische Spektrum, in dem das sichtbare Licht nur einen sehr kleinen Ausschnitt darstellt. [FALK_3]

Zur quantitativen Beschreibung elektromagnetischer Wellen gibt es mehrere Größen. Die wichtigsten sind die Wellenlänge λ [m] und die Frequenz ν [1/s = Hz] (Zahl der Schwingungen pro Sekunde an einem festen Raumpunkt).

Die Frequenz einer elektromagnetischen Welle bestimmt im sichtbaren Bereich die wahrgenommene Lichtfarbe. Die Geschwindigkeit v [m/s] einer Welle lässt sich durch den Zusammenhang

$$v = \lambda \nu \quad (\text{Gleichung 1})$$

beschreiben. Diese Formel gilt für die Ausbreitung von Licht in jeglichem Medium. Dabei ist zu beachten, dass sich die Lichtgeschwindigkeit mit dem Medium ändert (sie ist nur im Vakuum konstant mit $c = 300\,000\,000$ km/s). Licht bewegt sich zum Beispiel in Glas nur 2/3 mal so schnell, wie in Luft. Dabei bleibt die Frequenz des Lichts gleich, während sich die Wellenlänge ändert.

Die Amplitude einer elektromagnetischen Welle beschreibt die Stärke des elektrischen Feldes und ist beim sichtbaren Licht ein Maß für seine Helligkeit. Die übermittelte Energie einer Welle ist dabei proportional zum Quadrat der Amplitude. Die Ausbreitungsrichtung einer elektromagnetischen Welle wird durch den Wellenausbreitungsvektor (Lichtstrahl) beschrieben. Dieser Lichtstrahl muss natürlich auf das Auge gerichtet sein, damit er gesehen wird. [FALK_4]
Die Quanteneigenschaften des Lichts

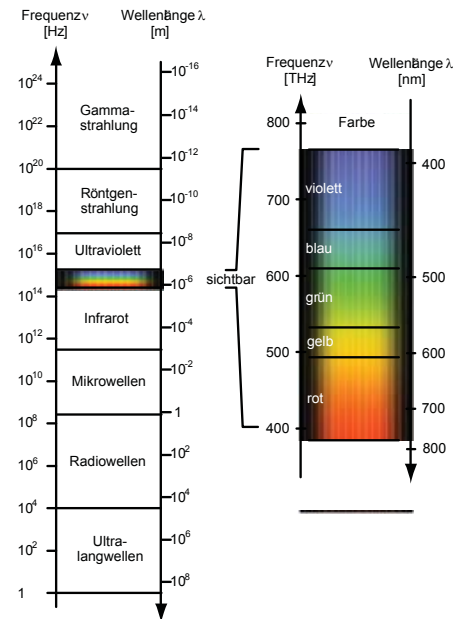


Abb. 4.02 Darstellung 18
Spektrum der elektromagnetischen Wellen. Der sichtbare Bereich ist auf der rechten Seite vergrößert dargestellt [WALTHER_A]

seien hier nur der Vollständigkeit wegen erwähnt, da der Teilchencharakter des Lichts in den physikalischen Vorgängen, die den in Kapitel 7.0 betrachteten TLS zugrunde liegen keine Rolle spielt. Die Quantenoptik beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen von Licht mit Atomen und den dort stattfindenden Absorptions- und Emissionsvorgängen. Diese sind nicht mehr durch die Wellentheorie, sondern nur durch die Annahme von Lichtteilchen (Photonen) erklärbar. [WALTHER_1]

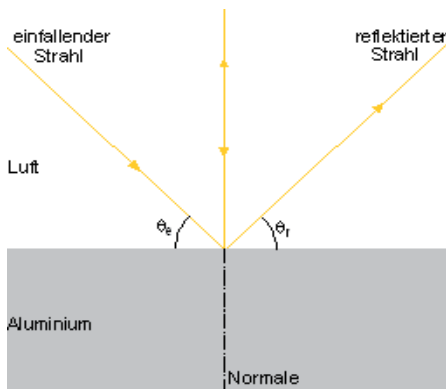


Abb. 4.03 Darstellung 19
Reflexion eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche zwischen Luft und Aluminium

4.1.2 Reflexion

Reflexionen aller Wellenarten (einschließlich Lichtwellen) erfolgen, wenn sich das Ausbreitungsmedium abrupt ändert. Ausschlaggebend ist hierfür die Veränderung der Lichtgeschwindigkeit in einem anderen Medium (siehe Abb. 4.03). Ist diese Änderung groß, so wird ein Großteil der einfallenden Strahlung reflektiert. Bei einer geringfügigen Änderung ist der durchgelassene (transmittierte) Anteil hoch und der reflektierte Anteil nur sehr schwach. Entscheidend ist aber neben der Beschaffenheit der beiden angrenzenden Medien auch der Winkel des einfallenden Lichtstrahls zur Normalen ihrer Grenzfläche. Je größer dieser Winkel wird, d. h. je flacher der Lichtstrahl einfällt, um so mehr Licht wird reflektiert. In jedem Fall ist der Winkel des einfallenden Lichtstrahls zur Normalen der Grenzfläche zwischen beiden Medien gleich. Diese Tatsache wird durch das Reflexionsgesetz ausgedrückt:

$$\theta_r = \theta_e \quad (\text{Gleichung 2})$$

mit: θ_r Winkel zwischen der Flächennormalen und dem gespiegelten Strahl
 θ_e Winkel zwischen der Flächennormalen und dem einfallenden Strahl

Beide Winkel haben den gleichen Betrag, liegen aber auf entgegengesetzten Seiten der Normalen.

Die Fähigkeit eines Materials Licht zu reflektieren hängt von der Anzahl der frei beweglichen Elektronen an der Materialoberfläche, sprich von seiner elektrischen Leitfähigkeit, ab.

Glas ist z. B. ein sehr schlecht reflektierendes Material. Ein Lichtstrahl, der senkrecht auf eine Glasoberfläche fällt, wird nur zu etwa vier Prozent reflektiert. Der Grund hierfür ist, dass an der Materialoberfläche ein elektrisches Feld aufgebaut werden muss, das der ankommenden elektromagnetischen Welle entgegensteht, um diese zurückzuwerfen. Dazu müssen Elektronen innerhalb des Materials beweglich sein, was beim Glas nicht der Fall ist. Aus diesem Grund sind Metalle sehr gute Reflektoren. Da die Elektronen für ihre Bewegungen Raum benötigen (wenn auch nur sehr wenig), dringt das Licht etwas in die Metalloberfläche ein (ca. $1/50$ der Wellenlänge des Lichts = 10 nm). Hinreichend dünne Metallschichten sind daher transparent. Wenn man eine dünne Metallschicht z. B. auf eine Glasoberfläche aufbringt, so erhält man einen teiltransparenten Spiegel (Anwendungsbeispiel: verspiegelte Sonnenschutzgläser).

Die Widerstandsfähigkeit des elektrischen Feldes an der Materialoberfläche gegen die einfallende elektromagnetische Welle hängt auch von deren Frequenz ab. Das bedeutet, dass jedes Material ab einer bestimmten Frequenz (Plasmafrequenz) durchlässig für elektromagnetische Strahlung wird.

Bei Silber und Aluminium liegt diese Plasmafrequenz gerade über dem sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Daher sind diese beiden Metalle im sichtbaren Bereich nahezu perfekte Reflektoren (fast 100%). [FALK_5]

4.1.3 Brechung

Die Richtung eines Lichtstrahls ändert sich, wenn er in ein anderes Medium eintritt (sofern er nicht senkrecht auftrifft), da sich dort die Lichtgeschwindigkeit ändert. Der Lichtstrahl wird an der Grenzfläche gebrochen. Die Ursache hierfür erkennt man aus Abbildung 4.04.

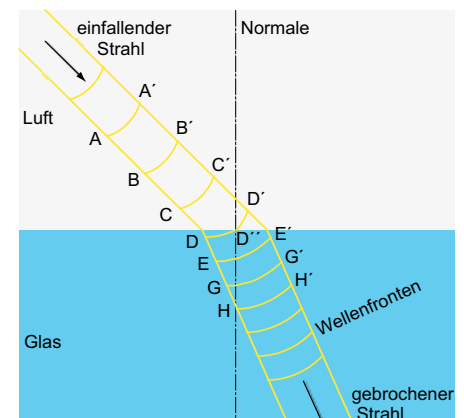


Abb. 4.04 Darstellung 20
An den Wellenfronten eines Lichtstrahls, der in ein dichteres Medium eintritt, lässt sich ablesen, warum der Strahl gebrochen wird. [FALK_B]

Zu sehen sind die ankommenden Wellenfronten A-A', B-B', C-C' im Medium Luft. Die Wellenfront D-D' dringt bei D zuerst in das neue Medium Glas ein. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit verlangsamt sich an dieser Stelle, bleibt aber bei D' gleich. Dies führt zu einer Brechung der Wellenfront D-D' am Punkt D'. Die transmittierten Wellenfronten E-E', F-F' und G-G' pflanzen sich im Glas in einer um den Brechungswinkel veränderten Richtung mit gleicher Frequenz aber kürzerer Wellenlänge wieder geradlinig fort. Die Lichtgeschwindigkeit v in einem Medium ist das entscheidende Kriterium dafür, wie stark ein Lichtstrahl an seiner Oberfläche gebrochen wird. Bezogen

auf die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum, die mit 100 % angesetzt ist, ergibt sich die Brechzahl n als materialspezifische Kennzahl:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{(Gleichung 3)}$$

Die Brechzahl beschreibt die Dichte eines Mediums in Bezug auf Licht.

Das Snelliussche Gesetz

Aus den oben angestellten Betrachtungen ergibt sich die qualitative Formulierung des Snelliusschen Gesetzes [FALK_6]:

„Licht, das von einem dünnen Medium (kleineres n) in ein dichteres Medium (größeres n) übergeht, wird zum Lot hin gebrochen. Licht, das von einem dichteren Medium in ein dünneres übergeht, wird vom Lot weg gebrochen“ [FALK_7]

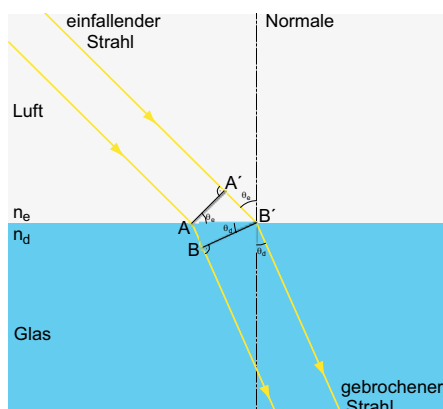


Abb. 4.05

Licht tritt in einem Winkel θ_e aus einem optisch dünneren Medium in ein optisch dichteres ein ($n_e < n_d$). Der gebrochene Strahl wird zur Normalen hin gebrochen, also ist $\theta_d < \theta_e$. AA' und BB' veranschaulichen zwei Wellenfronten [FALK_C]

Die mathematische Form des Snelliusschen Gesetzes lautet:

Die Wellenfront $A-A'$ verläuft senkrecht zum einfallenden Lichtstrahl in einem Medium mit der Brechzahl n_e , der in einem Winkel θ_e auf eine Grenzfläche zu einem Medium mit der Brechzahl n_d trifft. Es gilt:

$$\sin \theta_e = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB'}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{\overline{AB'}} = \frac{1}{\overline{A'B'}} \sin \theta_e \quad \text{(Gleichung 4)}$$

Für die Wellenfront $B-B'$, die senkrecht zum durchgelassenen Strahl verläuft gilt die gleiche Überlegung:

$$\frac{1}{\overline{AB'}} = \frac{1}{\overline{AB}} \sin \theta_d \quad \text{(Gleichung 5)}$$

Mit den Gleichungen 4 und 5 ergibt sich:

$$\frac{1}{\overline{A'B'}} \sin \theta_e = \frac{1}{\overline{AB}} \sin \theta_d \quad \text{(Gleichung 6)}$$

Das Licht braucht um von A' nach B' und von A nach B zu kommen die Zeit T . Wenn das Licht auf der einen Seite die Geschwindigkeit $v_e = c/n_e$ hat und auf der durchgelassenen $v_d = c/n_d$ erhält man:

$$\overline{A'B'} = v_e T = \frac{cT}{n_e} \quad \text{und} \quad \overline{AB} = v_d T = \frac{cT}{n_d} \quad \text{(Gleichung 7)}$$

Setzt man diese Ergebnisse in Gleichung 5 ein, ergibt sich:

$$\frac{n_e}{cT} \sin \theta_e = \frac{n_d}{cT} \sin \theta_d \quad \text{(Gleichung 8)}$$

oder das Snelliussche Gesetz:

$$\text{(Gleichung 9)} \quad n_e \sin \theta_e = n_d \sin \theta_d$$

Der Ausdruck $\sin \theta_d$ kann keine Werte

annehmen, die größer sind als 1. Daraus folgt, dass sich beim Erreichen des Grenzwertes $\sin \theta_d = 1$ ein kritischer Einfallswinkel (Grenzwinkel) θ_g ergibt, bei dem kein Lichtstrahl mehr durchgelassen wird. Man spricht dann von Totalreflexion. [FALK_8]

4.1.4 Totalreflexion

Totalreflexion tritt auf, wenn ein Lichtstrahl von einem optisch dichteren Medium in einem größeren Winkel zur Flächennormalen auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium trifft. Der Lichtstrahl müsste dann um mehr als 90° von der Normalen weg gebrochen werden, was wie oben beschrieben unmöglich ist. Es gibt also in diesem Fall keinen transmittierten Anteil. Der Strahl wird zu 100% reflektiert. Abbildung 4.07 zeigt am Beispiel einer Grenzfläche zwischen Glas und Luft, wie ein immer größer werdender Einfallswinkel θ_e zu Totalreflexion führt. Der Grenzwinkel θ_g liegt hier bei 42° .

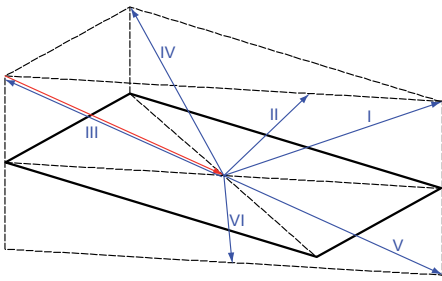


Abb. 4.06
Arten der Lichtlenkung durch unterschiedliche Materialien / Bauteile

- I symmetrische Reflexion (Reflexionsgesetz)
- II asymmetrische Reflexion
- III Retroreflexion ohne Ablenkung
- IV Retroreflexion mit Ablenkung
- V Transmission ohne Ablenkung (Transparenz)
- VI Transmission mit Ablenkung (Brechung, Beugung)

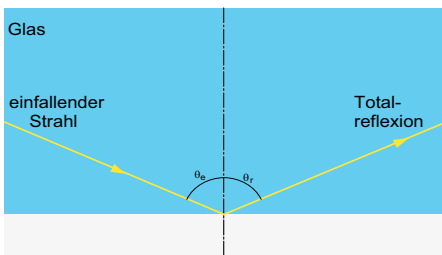
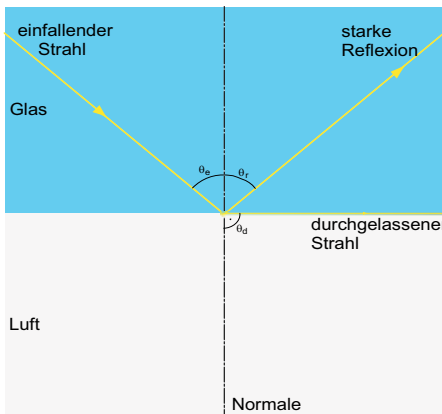
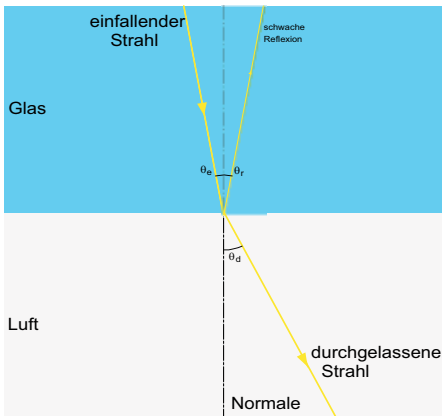


Abb. 4.07
Reflektierter und gebrochener Lichtstrahl, wenn der Einfallswinkel kleiner ist als der Grenzwinkel (oben), gleich dem Grenzwinkel ist (Mitte) und größer ist als der Grenzwinkel (unten) [FALK_D]

4.1.5 Lichtlenkung

Lichtlenkung in Transmission oder Reflexion erfolgt durch Bauteile mit reflektierenden und/oder lichtbrechenden Eigenschaften. Die gerichtete Transmission und Reflexion kann je nach materialspezifischen Eigenschaften folgende Formen annehmen (vgl. Abbildung 4.06):

4.1.6 Lichtstreuung

Streuung ist in der Lichttechnik die Ablenkung eines Lichtstrahlenbündels durch die Oberfläche und/oder das Volumen eines Materials. Dabei wird gerichtetes Licht in diffuses Licht umgewandelt. Die Wellenlänge des ankommenden Lichtstrahls bleibt unverändert. Licht unterschiedlicher Wellenlänge kann jedoch unterschiedlich stark gestreut werden. Der gestreute Lichtstrahl hat eine kontinuierliche räumliche Verteilung. Streut ein Material unabhängig von der Richtung des einfallenden Lichtstrahls gleichmäßig mit in alle Richtungen konstanter Leuchtdichte, so kann die Streuung dieses Materials als Lambert-Verteilung charakterisiert werden.

Ein Lambert'scher Strahler mit vollkommen diffuser Reflexion oder Transmission hat eine Leuchtdichteverteilung, die von der Ausstrahlungsrichtung unabhängig ist und eine Lichtstärkeverteilung, die mit $\cos \epsilon$ abnimmt. [FISCHER_1]
Licht kann durch ein Material gleichmäßig verteilt (isotrop) oder in eine Vorzugsrichtung (anisotrop) gestreut werden. Die Streuung kann von flächiger oder räumlicher Ausdehnung sein.

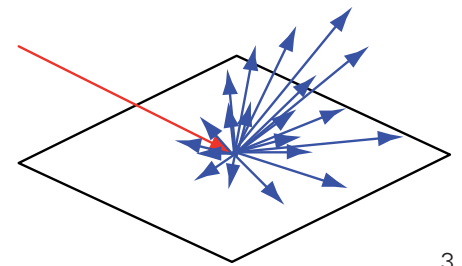
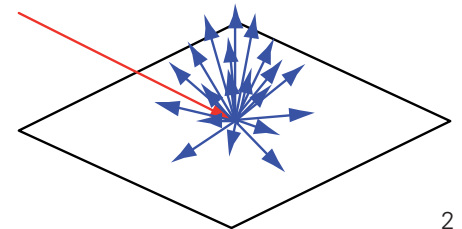
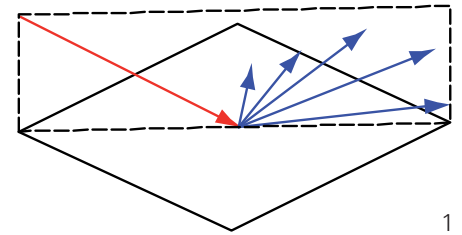


Abb. 4.08
Arten der Lichtstreuung durch verschiedene Materialien

- 1. flächig anisotrop
- 2. räumlich isotrop
- 3. räumlich anisotrop

[KLEIN 2000_B]

4.1.7 Interferenz und Beugung

Interferenz ist ein Phänomen der Wellenoptik und bedeutet Überlagerung zweier Wellen mit gleicher Frequenz. Die Überlagerung zweier Wellen beliebiger Frequenz ergibt komplizierte und schnell wechselnde Überlagerungsmuster. Zwei Wellen mit gleicher Frequenz (kohärente Wellen) können sich hingegen entweder verstärken wenn sie in Phase sind, d. h. wenn die Wellenberge beider Wellen zusammentreffen (konstruktive Interferenz), oder schwächen, wenn sie gegenphasig sind, d. h. wenn Wellenberge auf Wellentäler treffen (destruktive Interferenz).

Abbildung. 4.09 zeigt die Interferenz von Wasserwellen, die von zwei Spalten in einer Sperrplatte ausgehen. Lichtwellen, die auf ein Gitter aus vielen engen, regelmäßig angeordneten Spalten (Beugungsgitter) treffen verhalten sich ähnlich (vgl. Abb. 4.10).

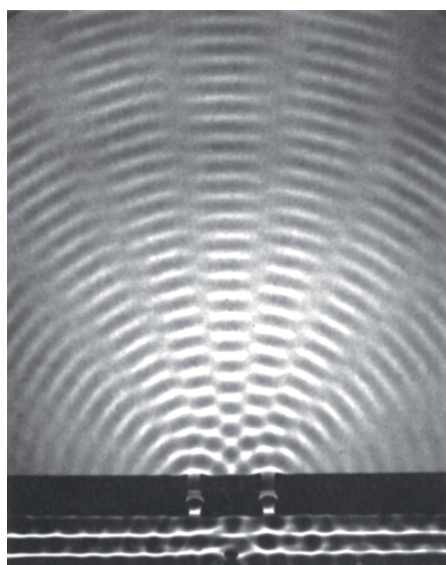


Abb. 4.09
Interferenz von Wasserwellen, die von zwei Spalten in einer Sperrplatte ausgehen [FALK_E]

Die Lichtwellen werden an den Gitterspalten gebeugt. Beugungseffekte entstehen durch die Interferenz innerhalb eines einzigen Lichtbündels. Dadurch entsteht der Effekt, dass Licht sich hinter einem sehr schmalen Spalt ausbreitet.

Das Licht, das in breiten Wellenfronten ankommt (vgl. Abbildung 4.09) wird durch das Gitter durch Beugung in viele einzelne kohärente Lichtquellen aufgespalten. Diese einzelnen Lichtquellen interferieren miteinander. Stellt man in großer Entfernung einen Schirm auf, so sind darauf Streifen konstruktiver und destruktiver Interferenz zu sehen. Der mittlere Streifen (nullter Ordnung) ist weiß, da der Abstand zu allen Punkten, die auf der einen Seite der Mittelachse des Gitters liegen den gleichen Abstand hat wie zu den Punkten auf der anderen Seite. Daher interferieren alle Wellenlängen innerhalb dieses Streifens konstruktiv und mischen sich zu weiß. Bei den danebenliegenden Streifen erster, zweiter und höherer Ordnungen interferiert das blaue Licht aufgrund der kürzeren Wellenlänge zuerst. Dadurch entsteht eine spektrale Auffächerung der höheren Beugungsordnungen. Die Bereiche zwischen den hellen Streifen sind Bereiche destruktiver Interferenz und daher dunkel [FALK_9].

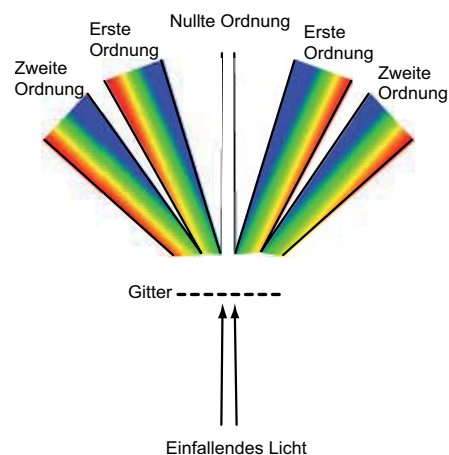


Abb. 4.10
Schematische Darstellung der Beugung an einem Transmissionsgitter [FALK_F]

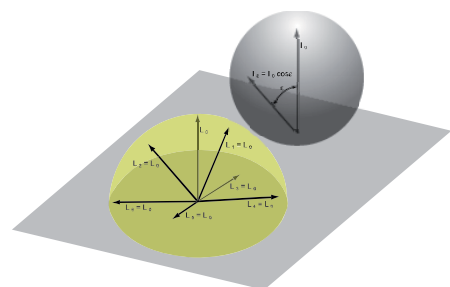


Abb. 4.11
Leuchtdichte- und Lichtstärkeverteilung eines Lambert'schen Strahlers [KLEIN 2000_C]

4.2 Anforderungsprofil an ein Tageslichtsystem

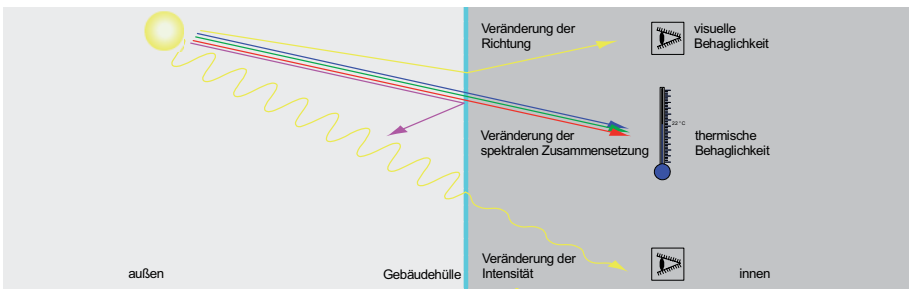


Abb. 4.13: Arten der Einstrahlungsregulierung schematisch dargestellt. [KLEIN 2000 TLS_2]

4.2.1 Grundlagen

Tageslichtsystem (TLS)

Gesamtheit aller technischen Einrichtungen zur Regulierung der Sonneneinstrahlung auf die Gebäudehülle oder in das Gebäudeinnere (Einstrahlungsregulierung). Die einfallende Solarstrahlung wird durch TLS kontrolliert in der Intensität, der Richtung und der spektralen Zusammensetzung verändert (vgl. Abbildung 4.12). Die Einstrahlungsregulierung kann schützender oder versorgender Art sein. Ein Tageslichtsystem kann nach dieser Definition also entweder ein Tageslichtlenksystem, ein Sonnenschutzsystem, oder eine Kombination aus beiden sein (vgl. Abb. 4.13).

Neben der Sicherung der thermischen und visuellen Behaglichkeit in den Innenräumen als wichtige Voraussetzung für Gesundheit und Produktivität der Nutzer steht vor allem die Minimierung des Energieverbrauchs der Haustechnik in Form von Einsparungen bei Heizung im Winter, Kühlung im Sommer und beim Einsatz von Kunstlicht im Vordergrund.



Abb. 4.12 Schema der Systeme zur Einstrahlungsregulierung [KLEIN 2000 TLS_1]

Tageslichtlenksystem

Gesamtheit aller technischen Einrichtungen, die durch Lichtreflexion, Lichtbrechung, Lichtbeugung oder deren Kombination Tageslicht in die Raumtiefe bzw. an die Decke umlenken. Dadurch soll eine Reduzierung der hohen Beleuchtungsstärken in Fensternähe zugunsten einer höheren Beleuchtungsstärke in der Raumtiefe und einer besseren Gleichmäßigkeit der Raumausleuchtung erreicht werden. [DIN 5034_10]

Tageslichtlenksysteme haben also eine Versorgungsfunktion in Bezug auf die Bereitstellung von Tageslicht im Innenraum.

Sonnenschutzsystem

Gesamtheit aller technischen Einrichtungen gegen störende Auswirkungen einfallender Sonnenstrahlung. Zu diesen Auswirkungen gehört die Aufheizung des Innenraums zu einem unerwünschten Zeitpunkt. [DIN 5034_11]

Sonnenschutzsysteme haben also eine Schutzfunktion in Bezug auf die Sicherung der thermischen Behaglichkeit der Nutzer im Innenraum. Viele Systeme kombinieren Sonnenschutz und Blendschutz und können

somit auch die visuelle Behaglichkeit sicherstellen.

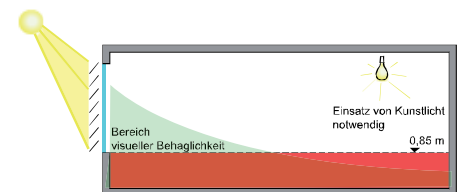
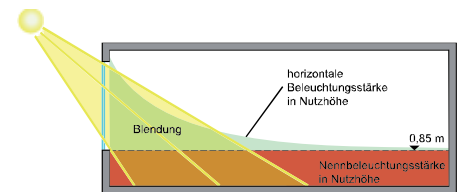


Abb. 4.14: Schematische Darstellung des Konflikts zwischen Schutz- und Versorgungsfunktion [KLEIN 2000 TLS_3]

Anforderungen an Tageslichtsysteme

Tageslichtsysteme sollen die Sonneneinstrahlung auf ein Gebäude gezielt kontrollieren und regulieren.

Daraus ergeben sich Anforderungen an die Schutzfunktion (Blendschutz und thermische Abschirmung) und an die Versorgungsfunktion (Beleuchtung mit Tageslicht, Bezug zur Umwelt und Wärmegewinne im Winter). Die Anforderungsprofile für Schutz- und Versorgungsfunktion stellen teilweise große Gegensätze dar. Daher werden diese kontrastierenden Anforderungsprofile hier getrennt betrachtet.

Um die in der Praxis meist kombinierten Anforderungsprofile aus Schutz- und Versorgungsfunktionen zu erfüllen, wird man also immer einen Kompromiss eingehen müssen. Das klassische Dilemma zwischen Sonnenschutz und Versorgung mit

Tageslicht wird in Abbildung 4.14 aufgezeigt. Ohne Sonnenschutz ist die Ausleuchtung der Raumtiefe über der Nennbeleuchtungsstärke. Gleichzeitig herrschen in Fensternähe durch die direkte Sonneneinstrahlung extrem hohe Leuchtdichten. Außerdem sind die thermischen Raumlasten sehr hoch. Bei aktiviertem Sonnenschutz ergibt sich die umgekehrte Situation. Nun ist der fensternahe Bereich zwar blendfrei, die Beleuchtungsstärken in den hinteren Raumbereichen fallen aber so stark ab, dass der Einsatz von Kunstlicht erforderlich wird. Außerdem ist die Sichtverbindung nach außen durch den Sonnenschutz stark beeinträchtigt.

Ein System, das für alle Beleuchtungssituationen optimalen visuellen und thermischen Komfort bereitstellt gibt es derzeit nicht.

Allgemeinere Anforderungen an TLS betreffen die Wirtschaftlichkeit und die Nutzerakzeptanz. Ihre Erfüllung hängt sehr eng mit der Erfüllung der zuvor genannten Anforderungen zusammen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Gliederung der verschiedenen Anforderungen an TLS:

Schutzfunktion:

- Blendschutz
- Vermeidung von Direktblendung
- Vermeidung von Reflexblendung

Reduktion von Kühllasten im Sommer

Wirtschaftlichkeit
Nutzerakzeptanz

4.2.2 Bezug zur Umwelt

Das wichtigste Qualitätsmerkmal für die Beleuchtung eines Innenraums mit Tageslicht ist die Sichtverbindung nach aussen. [prEN 12464-7] Diese Sichtverbindung muss möglichst klar, verzerrungsfrei und farbneutral sein. [prEN 12464-8] TLS, die im Durchsichtsbereich (max. 0,95 m bis min. 2,20 m über dem Fußboden) eingesetzt werden, müssen in Bezug auf ihre Transparenz höchste Anforderungen erfüllen. Wenn diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind müssen sie wegfahrbar sein, da sonst die Durchsicht dauerhaft beeinträchtigt wird. Im Oberlichtbereich (h > 2,20 m über dem Fußboden) bestehen keine direkten Anforderungen an die Transparenz der eingesetzten Bauteile. Jedoch wird zum Beispiel ein transparentes Glasdach, durch das man den Himmel beobachten kann, einen Innenraum zu einem Erlebnisraum machen.

Versorgungsfunktion:

- Beleuchtung mit Tageslicht
- Tageslichtautonomie
- Gleichmäßigkeit
- Farbwiedergabe

Bezug zur Umwelt

Wärmegewinne im Winter

4.2.3 Gleichmäßigkeit

Als Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke g_1 bezeichnet man das Verhältnis der minimalen zur mittleren horizontalen Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene (h = 0,85 m). Dies wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$(Gleichung 10) \quad g_1 = \frac{E_{min}}{E}$$

mit:

E_{min} = Minimalwert der horizontalen Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche

E = arithmetischer Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [DIN 5035_10]

Hohe Unterschiede in der Beleuchtungsstärke können sowohl innerhalb des Arbeitsbereiches bzw. innerhalb seiner näheren Umgebung, als auch zwischen dem Arbeitsbereich und der Umgebung zu einer visuellen Überlastung führen. Für Kunstlicht sind die erforderlichen Gleichmäßigkeiten innerhalb des Arbeitsbereiches und seiner unmittelbaren Umgebung, sowie die Verhältnisse der Beleuchtungsstärken dieser beiden Bereiche untereinander in der prEN 12464 definiert: [prEn 12464-3]

Beleuchtungsstärke des Arbeitsbereiches:

- [lx]
- ≥ 750
- 500
- 300
- ≤ 200

Gleichmäßigkeit ≥ 0,7

Beleuchtungsstärke der unmittelbaren Umgebung:

- [lx]
- 500
- 300
- 200

Gleichmäßigkeit ≥ 0,5

Der Arbeitsbereich sollte mit der größtmöglichen Gleichmäßigkeit ausgeleuchtet sein. Bei der Beleuchtung mit Tageslicht darf die Gleichmäßigkeit geringer sein. [prEN 12464-5]
Dieser größere Freiheitsgrad, der sehr stark mit der Qualität der Umgebung und der Architektur verbunden ist, kann auch auf den Einsatz von TLS übertragen werden. Dennoch sollte die Tageslichtbeleuchtung von Innenräumen mit Hilfe von TLS ein gewisses Grundniveau an Gleichmäßigkeit erfüllen.

4.2.4 Farbwiedergabe

Die „Lichtfarbe“ einer Lichtquelle wird durch ihre ähnlichste Farbtemperatur beschrieben. Dabei werden folgende Kategorien unterschieden:

Lichtfarbe	ähnlichste Farbtemperatur
- Warmweiß unter 3300 K	
- Neutralweiß von 3300 K bis 5300 K	
- Tageslichtweiß über 5300 K	

[prEN 12464-5]

Für die Sehleistung und die Behaglichkeit ist eine natürliche Farbwiedergabe wichtig. Die Farbwiedergabe einer Lichtquelle wird durch den Allgemeinen Farbwiedergabe-Index Ra beschrieben. Ra kann maximal den Wert 100 annehmen und nimmt bei sinkender Farbwiedergabequalität ab. Der Farbwiedergabeindex sollte in Innenräumen, die dem längeren Aufenthalt von Menschen dienen (z. B. Büroräume) nicht kleiner als 80 sein. Diese Anforderung muss auch von TLS erfüllt werden. [prEN 12464-6]

4.2.5 Tageslichtautonomie

Tageslichtsysteme mit Versorgungsfunktion müssen in erster Linie einen entscheidenden Anteil zur Anhebung des Tageslichtquotienten vor allem in der Raumtiefe beitragen. Die Mindestwerte des Tageslichtquotienten für Wohn- und Arbeitsräume sind nach DIN festgelegt [DIN 5035-1]:

	D [%]
- Wohnräume und Arbeitsräume (bis 50m ² , Raumtiefe bis 6 m, Raumhöhe bis 3,5 m)	> 0,9 (im Mittel) > 0,75 (am ungünstigsten Punkt)
- Wohnräume mit Fenstern in zwei Aneinandergrenzenden Wänden	> 1,0
- Arbeitsräume mit Obrelicht	> 4,0
- andere Arbeitsräume mit Fenstern	bisher keine Anforderung

[DIN 5035_11]

Ein Raum, der durch Oberlichter mit Tageslicht beleuchtet wird, wirkt dunkel, wenn der Mindestwert des Tageslichtquotienten < 2% beträgt. [FISCHER 3]

Je nach Tätigkeit sind bestimmte Beleuchtungsstärken erforderlich, um die damit verbundenen Sehaufgaben zu erfüllen. Diese Mindestbeleuchtungsstärken dienen der Arbeitssicherheit und der Sehleistung. Sie sind in DIN 5035 bzw. in prEN 12464 festgelegt [DIN-5035-7] und in der Tabelle in Abb. 4.15 auszugsweise zusammengefasst.

Abb. 4.15

Auszugsweise Auflistung der Nennbeleuchtungsstärken E_n nach DIN 5035 (blau), der Mindestbeleuchtungsstärken für die Beleuchtung durch Tageslicht allein E_d (rot) und der Wartungswerte der Beleuchtungsstärke E_m nach prEN 12464

Art des Raums, Sehaufgabe oder Tätigkeit	E_n	E_d [lux]	E_m
- Empfangsräume	100	60	300
- Räume mit Publikumsverkehr	200	120	
- Büroräume (tageslichtorientierte Arbeitsplätze ausschließlich in Fensternähe)	300	180	
- Büroräume	500	300	
- Besprechungsräume	300	180	500
- Datenverarbeitung	500	300	500
- CAD-Arbeitsplätze			500
- Technisches Zeichnen	750	450	
- Großraumbüros hohe Reflexionsgrade (Decke > 0,7 Wände > 0,5)	750	450	
- Großraumbüros mittlere Reflexionsgrade	1000	600	

E_n : [DIN 5035_12], E_m : [prEN 12464_9]

Das Tageslicht hat grundsätzlich andere spezifische Eigenschaften als Kunstlicht und kann daher bezüglich der Beleuchtungsbedingungen auch anders bewertet werden. In der mittleren Spalte von Abbildung 4.15 sind die um den Faktor 0,6 abgeminderten Beleuchtungsstärken aus der ersten Spalte für die Beleuchtung von Arbeitsräumen mit Fenstern durch Tageslicht allein aufgelistet. [DIN 5034-3] Diese Werte können allerdings nicht zu allen Zeiten des Jahres erreicht werden, da die täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen, die durch astronomische und meteorologische Gegebenheiten entstehen, keine ausreichende Kontinuität der Tageslichtversorgung zulassen.

Der Prozentsatz, zu dem während der Nutzungszeit eines ganzen Jahres (zum Beispiel Verwendung von Testreferenzjahren) hinweg betrachtet die Mindestbeleuchtungsstärke auf der Nutzfläche erreicht wird, wird als Tageslichtautonomie bezeichnet.

Die Tageslichtautonomie ist für die Bewertung der Effizienz von TLS Kunstlicht einzusparen die entscheidende Größe.

Um eine hohe Tageslichtautonomie zu erreichen, muss vor allem an be-

deckten Tagen eine ausreichende Versorgung mit diffusem Tageslicht vorhanden sein, um den Tageslichtquotienten vor allem in der Raumtiefe anzuheben. Beim Diffuslichteintrag in den Raum über eine Umlenkung an die Decke entstehen ziemlich große Verluste in Bezug auf die Lichtintensität. Um dies auszugleichen sollten TLS mit vorwiegender Versorgungsfunktion einen hohen diffusen Transmissionsgrad aufweisen.

Im Raum entstehen weitere Verluste, da normale Decken das auftreffende Licht in der Regel mit Lambert'scher Verteilung reflektieren. Dadurch wird das in den Raum gelenkte Licht wieder zur Hälfte nach außen reflektiert. In Abbildung 4.16 ist diese Problematik schematisch dargestellt.

Abhilfe kann zum Beispiel durch eine gerichtet reflektierende Metalldecke geschaffen werden. Dabei ist allerdings der hohe Aufwand an Primärenergie zu beachten und dass Metalldecken Spiegelungseffekte aufweisen, die auf den Nutzer durchaus irritierend oder sogar störend wirken können.

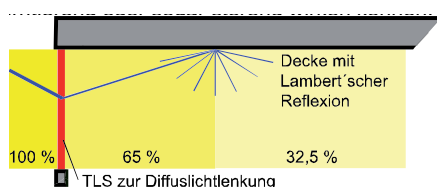


Abb. 4.16 Problematik der Diffuslichtlenkung am Beispiel eines TLS mit einem diffusen Transmissionsgrad von 65 % [KLEIN 2000 TLS_4]

4.2.6 Blendschutz

Blendung ist eine visuelle Störung, die im Gesichtsfeld „durch zu hohe Leuchtdichten und/oder zu große Leuchtdichteunterschiede“ (Kon-

trastblendung) hervorgerufen wird. [DIN 5035-1]

Blendungserscheinungen können auf zwei Ebenen wahrgenommen werden:

1. die physiologische Blendung reduziert das Sehvermögen
2. die psychologische Blendung ist rein subjektiv und hängt von der individuellen Bewertung der visuellen Störung ab. [DIN 5035-2]

Eine physiologische Blendung muss jedoch nicht zwingend als unangenehm empfunden werden. Ebenso muss eine als unangenehm empfundene Leuchtdichte bzw. Leuchtdichteverteilung nicht unbedingt gleichzeitig eine physiologische Blendung bedeuten. [FISCHER 2] Aus diesem Grund lassen sich Blendungserscheinungen nicht messen.

Hinsichtlich der Blendquellen sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Direktblendung:

Blendung, die unmittelbar durch Lichtquellen jeglicher Art (z. B. direktes Sonnenlicht, diffuses Himmelslicht oder Kunstlicht) im Gesichtsfeld verursacht wird. Das Ausmaß der Blendung nimmt zu, je größer die Leuchtdichte und/oder der Raumwinkel der jeweiligen Lichtquelle ist und je näher diese in der Blickrichtung des Geblendeten liegt.

2. Reflexblendung:

Blendung, die durch Reflexion hoher Leuchtdichte von Lichtquellen auf einer Oberfläche verursacht wird. Reflexblendung entsteht vor allem durch glänzende Oberflächen, kann aber ebenso bei hellen, streuenden Oberflächen, die einer hohen Beleuchtungsstärke ausgesetzt sind, auftreten. Ein klassisches Beispiel für Reflexblendung ist die Spiegelung heller Oberflächen (z. B. einer sonnenbeschienenen Wand) auf Bild-

schirmen.

Die häufigste Blendungsform ist die Kontrastblendung. Dabei erscheint das Blickziel relativ zu seinem visuellen Umfeld um ein vielfaches dunkler. Kontrastblendung kann als Direktblendung (z. B. Bildschirm vor einem ungeschützten Fenster) oder als Reflexblendung (wie o. g. Beispiel eines Bildschirms vor einer sonnenbeschienenen Wand) auftreten. TLS können vor allem durch eine Reduktion der hohen Leuchtdichten im Fensterbereich (und evtl. gleichzeitiger Umlenkung des Lichts in die Raumtiefe) einen Beitrag zur Verminderung der Kontrastblendung leisten.

Um die Konzentration auf das Arbeitsfeld (Infeld) zu richten, muss dieses heller sein, als die Umgebung. In der DIN sind Richtwerte für das Verhältnis der Leuchtdichten zwischen Infeld und dem näheren Umfeld bzw. zwischen Infeld und fernem Umfeld angegeben. [DIN 5035-3]

Aus Untersuchungen geht jedoch hervor, dass bis zu einem Leuchtdichteverhältnis von 20:1 noch keine Verminderung der Arbeitsleistung zu beobachten ist [KOKOSCHKA].

Zur Begrenzung der Reflexblendung bei Bildschirmarbeitsplätzen (BAP) stellt die DIN Anforderungen an die Leuchtdichten der Leuchten im Raum. Nach DIN 5035 darf die mittlere Leuchtdichte dieser Flächen einen Wert von 200 cd/m² nicht überschreiten. Die maximale Leuchtdichte darf nicht größer sein als 400 cd/m² [DIN 5035-4]. In der prEN 12464 (die künftig die DIN 5035 ersetzen wird) sind folgende Werte angegeben [PrEN 12464-1]:

Bildschirmoberfläche	Grenzwert [cd/m ²]
- unbehandelt, Negativdarstellung	200
- unbehandelt, Positivdarstellung	500
- nicht reflektierend, Negativdarstellung	500
- nicht reflektierend, Positivdarstellung	1000

Diese Grenzwerte sind jedoch kritisch zu hinterfragen, da die Reflexblendung schon durch eine günstige Anordnung der BAP im Raum eingeschränkt werden kann. Bei Fenstern wirkt eine solche Anforderung an die maximale Leuchtdichte kontraproduktiv, da sich als Folge schon in einer Raumtiefe von ca. 2 m eine Beleuchtungsstärke von unter 200 lx ergibt. TLS müssen in dieser Hinsicht differenzierter betrachtet werden, als ein normales Fenster. Da Tageslichtlenksysteme die einfallende Strahlung umlenken, wird die Beleuchtungsstärke in der Raumtiefe erhöht. Dabei sollte die Leuchtdichte des Tageslichtlenkelements innerhalb des visuellen Behaglichkeitsbereichs bleiben, da die Lichtstrahlen im Optimalfall vollständig aus der Blickrichtung des Betrachters abgelenkt werden. Die Obergrenze des visuellen Behaglichkeitsbereichs (und damit die Schwelle eintretender Blendung) ist ein maximal tolerierbarer Leuchtdichtewert beziehungsweise Raumwinkelwerteter Leuchtdichtewert, dessen Schwellwert erst durch vielfältige Untersuchungen ermittelt werden muss. Die oben genannten DIN-Werte sind somit allenfalls Anhaltspunkte. Zu der Schwierigkeit, eine absolute Leuchtdichteschwelle für Blendung anzugeben, kommt noch hinzu, dass Tageslicht als Blendquelle den zum Teil sehr hohen Schwankungen der Him-

melsleuchtdichten unterworfen ist und dass Tageslichtöffnungen eine viel größere Fläche haben, als Kunstlichtquellen. Eine psychologische oder physiologische Blendung, die beispielsweise durch die zu hohe Leuchtdichte einer vertikalen Tageslichtöffnung entsteht, kann durch den vorhandenen Bezug zur Umwelt oder durch die architektonische Qualität der Tageslichtöffnung ganz oder teilweise kompensiert werden.

4.2.7 Reduktion von Kühllasten im Sommer

Diese Anforderung bezieht sich hauptsächlich auf die Ausblendung hoher Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung, welche die Ursache für die Überhitzungsgefahr im Sommer sind. Die direkte Sonnenstrahlung, die ins Gebäudeinnere gelangt, ist der größte Störfaktor für die thermische Behaglichkeit. Die entscheidende Materialkennzahl zur Quantifizierung der solaren Energiegewinne ist der vom Einstrahlungswinkel abhängige g-Wert. Im Speziellen ist q_i , die sekundäre Wärmeabgabe nach innen eine wichtige Teilkomponente des g-Werts. Die Wärme, die von einem Bauteil bei hohen Außentemperaturen und niedrigen Innentemperaturen über Strahlung ins Rauminnere abgegeben wird, ist neben der Lufttemperatur die entscheidende Einflussgröße für die sogenannte gefühlte Raumtemperatur und somit für die thermische Behaglichkeit.

Der g-Wert von TLS mit Sonnenschutzfunktion sollte also für hohe Einstrahlungswinkel so niedrig wie möglich sein. Eine totale Ausblendung der direkten Sonnenstrahlung hat allerdings auch eine drastische Reduzierung der Beleuchtungsstärken vor allem in der Raumtiefe zur Folge, so dass diese Anforderung in

Konflikt mit der Anforderung der Beleuchtung mit Tageslicht steht. Eine Lösung dieses Konflikts bieten TLS mit Sonnenschutzfunktion und Diffuslichtdurchlass.

4.2.8 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit von TLS lässt sich nicht eindeutig bewerten. Grundsätzlich besteht bei TLS ein hohes Einsparpotential an Energie. So können TLS durch die Ausblendung hoher Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung entscheidend zur Verminderung von Kühllasten im Sommer beitragen. Umgekehrt kann im Winter durch den Einsatz von TLS der Bedarf an Heizenergie über solare Wärmegegewinne ganz oder teilweise gedeckt werden. Ein hohes Einsparpotential liegt auch bei der Reduzierung des Kunstlichtbedarfs in Gebäuden, wenn diese durch TLS mit mehr Tageslicht versorgt werden. Um seriöse Aussagen zur Amortisation der Mehrkosten für TLS über die Einsparung von Strom für Kunstlicht zu machen, muss man die Tageslichtautonomie ermitteln. Eine Amortisation über die Einsparung von thermischer Energie erscheint nur für Systeme möglich, die zumindest für die hohen Sonnenstände im Sommer, die so problematisch für den Energiebedarf zur Abkühlung des Gebäudes sind, einen sehr niedrigen g-Wert erzielen.

Eine exakte Berechnung aller Faktoren würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Dazu wären gekoppelte thermische und tageslichttechnische Simulationen auf Stundenbasis notwendig. Für diese Simulationen müssten genaue Simulationsmodelle der zu untersuchenden Systeme erstellt werden, da solche Modelle aufgrund der Komplexität derzeit noch nicht existieren. Bei den Simulationen müssten insbesondere das

winkelabhängige Verhalten und die Lichtlenkeigenschaften der Tageslichtsysteme berücksichtigt werden. Ein weites Feld stellen bei den Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit von TLS auch die monetär schwer einschätzbaren Faktoren dar. Dazu gehören zum Beispiel die günstigen Einflüsse der höheren Qualität einer Tageslichtbeleuchtung mit TLS gegenüber Kunstlicht auf das Wohlbefinden und die Motivation der Nutzer. Die architektonische Qualität von Räumen kann durch eine technisch versierte Tageslichtführung entscheidend verbessert werden und ähnliche günstige Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Nutzer haben. Darüberhinaus lassen sich gewisse Architekturkonzepte, wie zum Beispiel repräsentative Eingangshallen mit sehr großen verglasten Flächen nur verbunden mit dem Einsatz von TLS verwirklichen, da ansonsten kein ausreichender Sonnen- und Blendenschutz vorhanden wäre.

4.2.9 Nutzerakzeptanz

Nicht zuletzt ist es von Bedeutung, dass ein Tageslichtsystem vom Nutzer akzeptiert wird. Bei Tageslichtsystemen sollte darauf geachtet werden, dass der Nutzer stets Einfluss auf die Einstrahlungsregulierung nehmen kann, da der Bedarf an Tageslichtbeleuchtung oder Sonnenschutz individuell sehr unterschiedlich sein kann und mitunter stark von der momentanen Befindlichkeit des einzelnen abhängt.

Ein Beleg hierfür ist das Ergebnis einer Nutzerbefragung zum Thema Blendung (vgl. Abbildung 4.17). Aus der Grafik ist keinerlei Tendenz zu erkennen. Viele der Befragten fühlten sich entweder extrem geblendet oder überhaupt nicht geblendet. Aus diesen Erkenntnissen heraus

sind bezüglich der Nutzerakzeptanz auf jeden Fall flexible, das heißt regelbare Systeme zu bevorzugen. Solche Systeme sollten außerdem einfach in der Handhabung sein. Im allgemeinen ist die Nutzerakzeptanz um so größer, je geringer der Wartungsaufwand eines Tageslichtsystems ist.

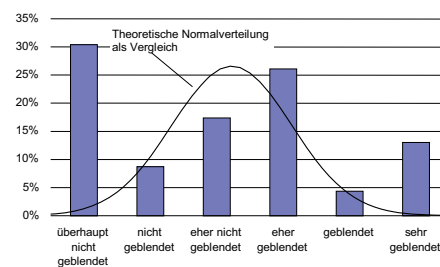
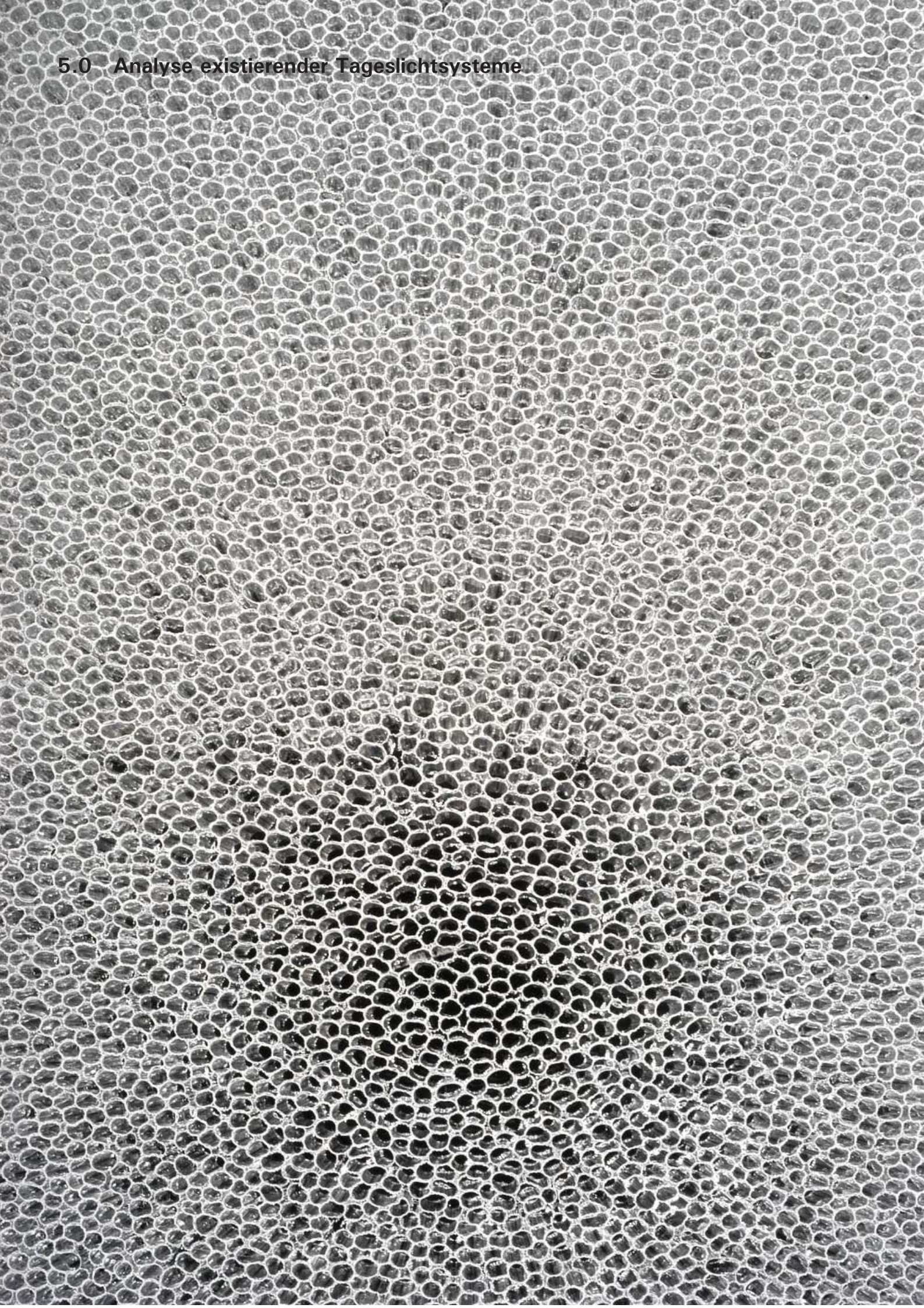


Abb. 4.17 Relative Häufigkeit auf die Frage „Fühlen Sie sich im Raum geblendet“ bei klarem Himmel mit Direktlichteinfall und aktiviertem Blendschutz (Jalousie)

5.0 Analyse existierender Tageslichtsysteme



5.0 Tageslichtsysteme

Tageslichtsysteme lassen sich hinsichtlich ihrer Anordnung in der Fassade, ihrer Beweglichkeit, der Betriebsweise sowie ihrer Funktion unterscheiden. Weiter werden sie durch ihr Funktionsprinzip sowie ihre lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kennzahlen gekennzeichnet.

Nachfolgend werden die auf dem Markt vorhandenen Systeme entsprechend ihres Funktionsprinzips gruppiert und analysiert, um eine Vergleichbarkeit zu erhalten.

Unterschieden wird in streuende und lichtlenkende Systeme und Systeme, die als transparenter Sonnenschutz funktionieren.

5.1 Streuende Systeme

5.1.1 Helioran

Funktionsprinzip

Lichtstreuendes System mit Röhren- oder Wabenstruktur.

Das Licht wird durch die Röhren mehrfach gebrochen und gestreut (Lichtleiterfunktion).

Die Lichtleiterfunktion ist eine Totalreflexion des Lichts, so dass einfallendes Licht erst am anderen Ende wieder austritt.

Verwendung

Als Vertikal- und Schrägverglasung bzw. als Isolierverglasung.

Aufbau

Feine Glasröhren im Scheibenzwischenraum.

Vorteile

Das System ist wartungs- und störungsfrei, weist eine gute Schalldämmung auf und ist im Scheibenzwischenraum vor Verschmutzung geschützt.

Nachteile

Durchsicht und gezielte Lichtlenkung sind nicht möglich.

Technische Werte

U-Wert = 1,1 W/m²K
g-Wert = 82% (direkt)
g-Wert = 69% (diffus)

Lichttransmission direkt 83%
Lichttransmission diffus 65%
Schalldämmmaß 50 dB

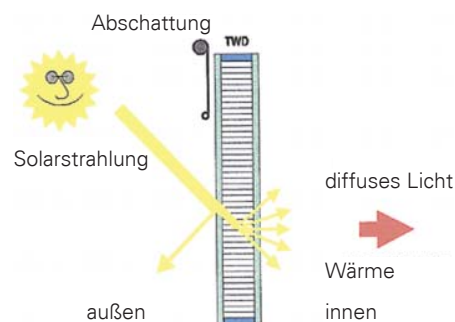
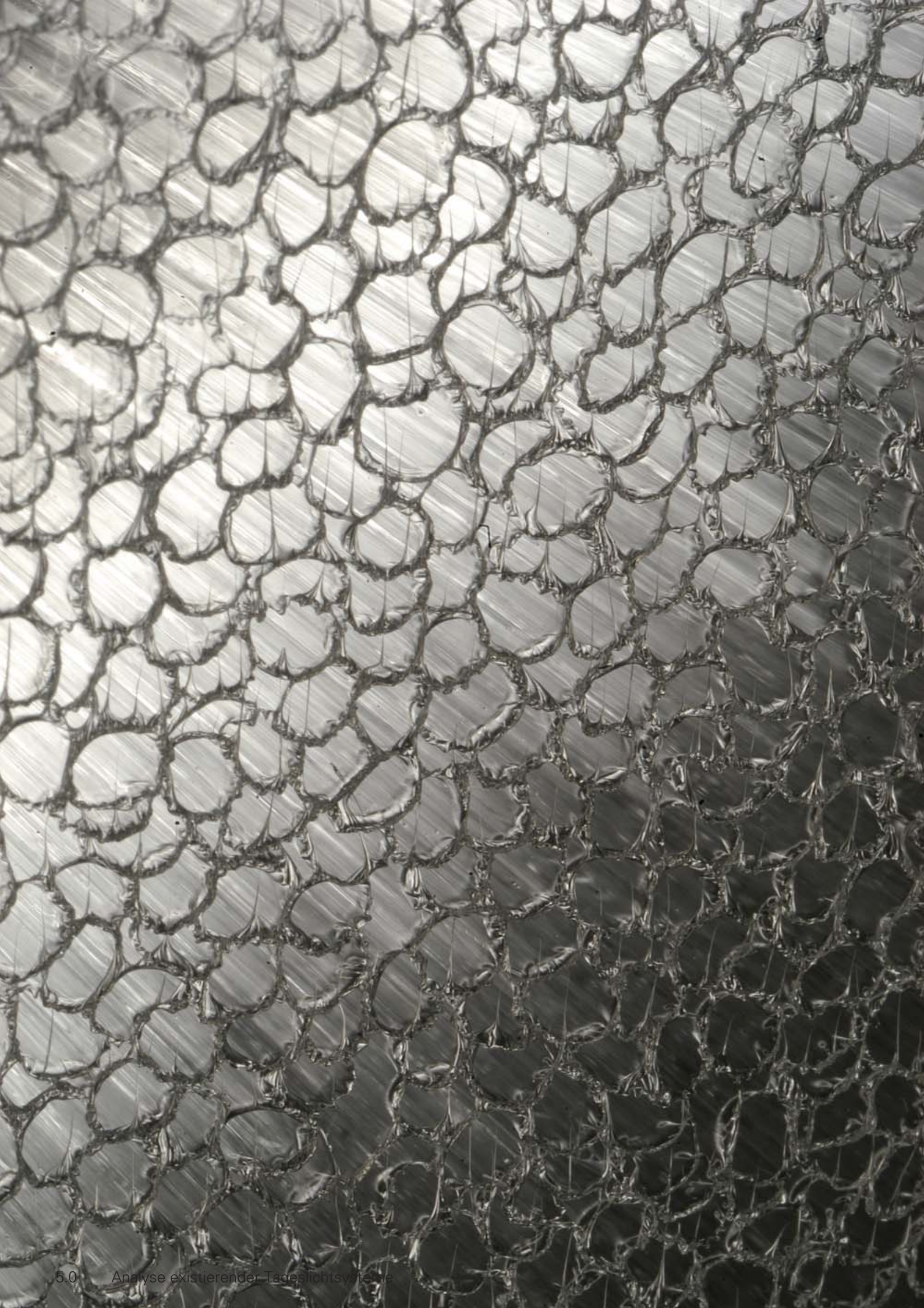


Abb. 5.01
Funktionsweise von Helioran [SCHOTT]

Hersteller

Schott [SCHOTT]



5.1.2 Kapilux-T

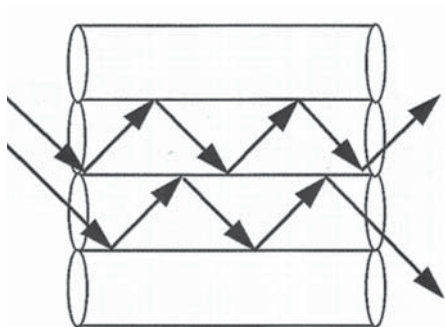


Abb. 5.03
Funktionsweise Kapilux-T [OKALUX]

Funktionsprinzip

Lichtstreuendes System bestehend aus einem Isolierglas mit integrierter Kapillarplatte. Die Typenbezeichnung "T" steht für eine Kapillarplatte aus transparentem Material.

Licht wird durch die Kapillaren mehrfach gebrochen und gestreut (Lichtleiterfunktion).

Lichtleiterfunktion ist eine Totalreflexion des Lichtes, so dass einfallendes Licht erst am anderen Ende wieder austritt.

Verwendung

Kapilux kann in Vertikal- und Schrägverglasung als Isolierverglasung eingebaut werden.

Es eignet sich gut für Lichtdecken in Hallen und Museen. Zu beachten sind mögliche Dickenabweichungen der Gesamtstärke im Vergleich zu Standardisoliergläsern.

Aufbau

Kapilux ist ein hermetisch abgedichtetes Isolierglas mit Glasdicken gemäß statischen Erfordernissen. Der Standardaufbau (dreifach) besteht aus einer Außenscheibe, beschichtet auf Pos. 2, einem ersten Scheibenzwischenraum von 8 mm, der mit Luft oder Gas gefüllt ist, einer Zwischenscheibe, einem zweiten Scheibenzwischenraum mit zwei versetzten KAPIPANE-Platten und einer Innenscheibe.

Die Kapillarplatte besteht aus Röhrchen aus PMMA, $d=3,5$ mm, Länge von 8 - 40 mm. Diese werden selbst hergestellt.

Die max. Abmessungen betragen 2,0 m x 3,00 m.

Die Kapillarplatte wird beidseitig mit

Glasvlies belegt.

Kapilux wird als fertiges Produkt mit allen Glasarten geliefert.

Vorteile

Das Produkt ist wartungs- und störungsfrei.

Die gleichmäßige Lichtstreuung wird durch Glasvliese verbessert und erlaubt somit eine schlagschatten- und blendfreie Ausleuchtung.

Kapilux bietet gleichzeitig eine gute Schalldämmung, ist leicht zu reinigen und funktioniert als ein relativ guter Sonnenschutz.

Kapilux wird wie ein normales Fenster montiert.

Nachteile

Es ist nur eine partielle Durchsicht entlang der Kapillarachse möglich.

Keine gezielte Lichtlenkung.

Aufgrund der hohen Leuchtdichte der Innenflächen kommt es in Fassadennähe zu Blendung.

Technische Werte

U-Wert = 0,9 - 1.1 W/m²K

g-Wert = 0,40 (Oberlicht)

Lichttransmission senkrecht: 0,58%

Lichttransmission diffus: 0,42 % (einstellbar)

Beispiele

Hallen und Museen

Hersteller

Okalux [glasklar1]

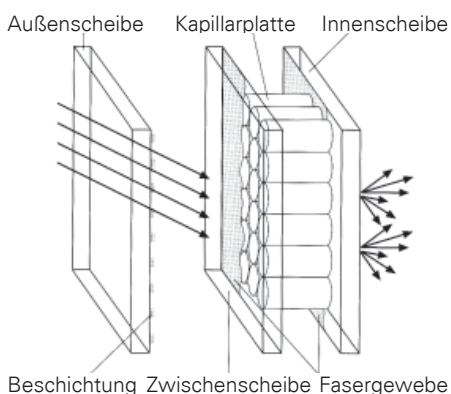
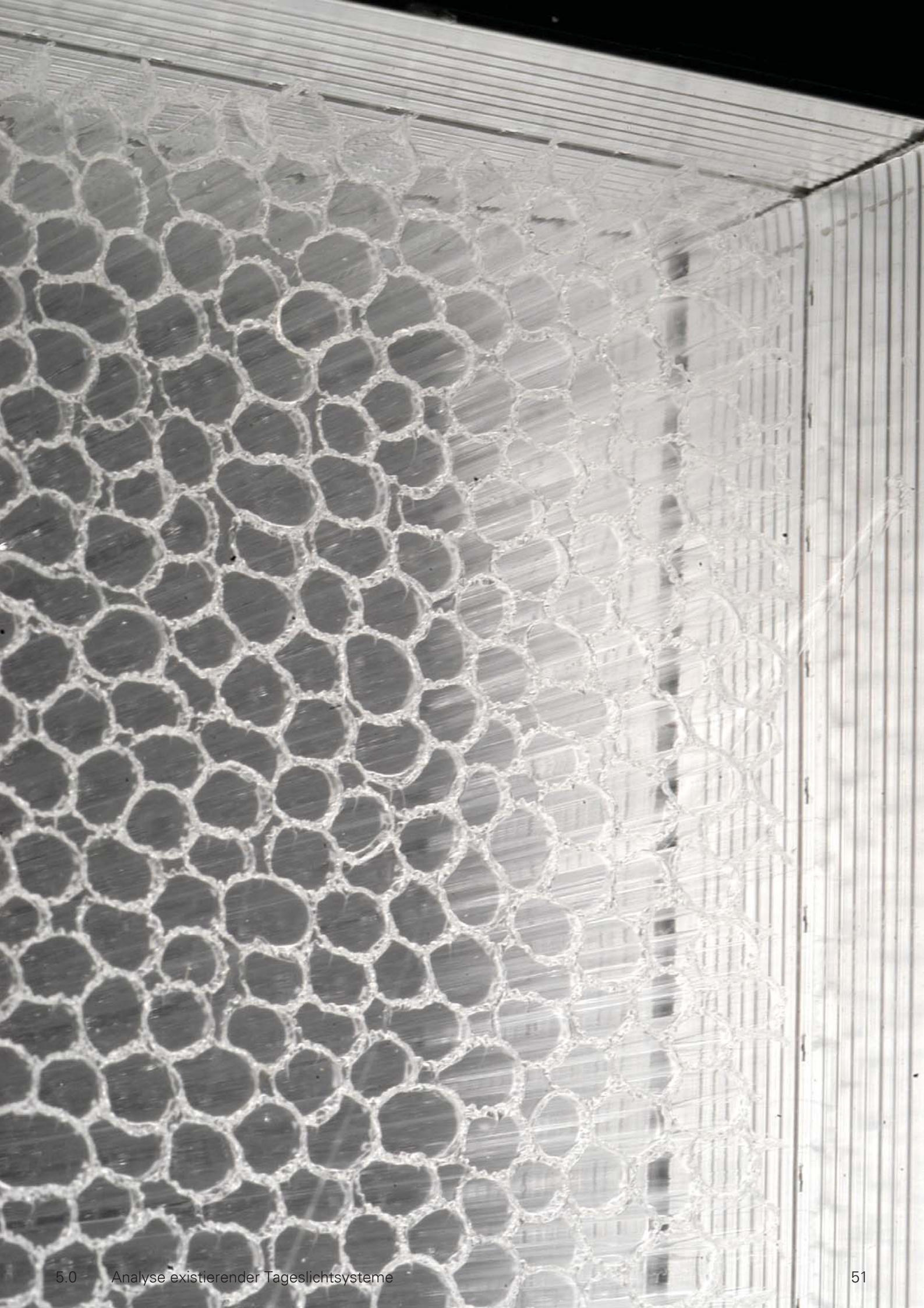


Abb. 5.04
Schematischer Aufbau KAPILUX [GLASKLAR_A]

Abb. 5.05
rechte Seite
KAPILUX-T [LUTZ]



5.1.3 Ecos honeycomb

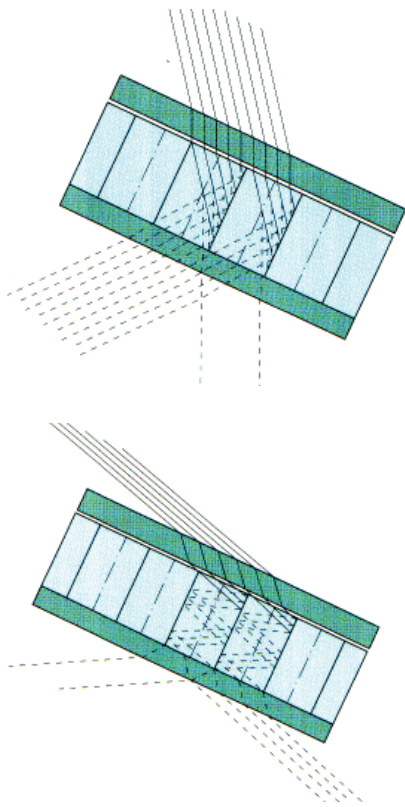


Abb. 5.06
Schematische Darstellung der
Lichtstreuung von Ecos honeycomb
[ECOSS H]

Funktionsprinzip

Lichtstreuendes System mit horizontalen Metallwaben.
Die direkte Sonneneinstrahlung wird durch mehrfache Reflexion diffus gestreut.

Verwendung

Als Paneel im Scheibenzwischenraum von Isoliergläsern.
Als Horizontalverglasung und zur Verschattung.
Bei transparenter innerer Glasscheibe wird das Licht in die Spektralfarben aufgespalten.

Aufbau

Das Paneel kann in alle Isolierglas-scheiben eingebaut werden.
Die zum Innenraum gewandte Glasscheibe ist mattiert damit das Licht gleichmäßig gestreut wird, da es sonst in seine Spektralfarben aufgespalten wird.
Das gesamte Produkt (Metallwaben + Isolierglas) wird von Figla hergestellt.
Metallgewebe mit $d = 6,12 \text{ mm}$
Gesamtstärke $d = 12,92 \text{ mm}$
Die max. Glasgrößen liegen bei $1.20 \text{ m} \times 2.40 \text{ m}$.

Vorteile

Die Metallwaben sind wartungs- und störungsfrei im Scheibenzwischenraum gelagert.

Nachteile

Es handelt sich um ein starres System, das nicht der jeweiligen Einbausituation angepasst werden kann.

situation angepasst werden kann.

Technische Werte

U-Wert = $2,4 \text{ W/m}^2$
g-Wert = $10,1 - 43,8 \%$
[ECOSS D]

Beispiele

Büro- und Verwaltungsgebäude, Industriebau

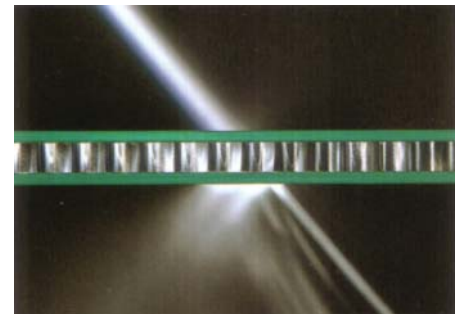


Abb. 5.07
Detailaufnahme Ecos honeycomb
[ECOSS H]

Hersteller

Figla [FIGLA]

5.1.4 Ecos D

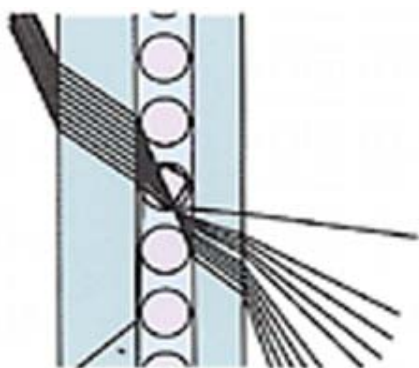


Abb. 5.08
Schematische Darstellung der
Lichtstreuung von Ecos D
[ECOSS H]

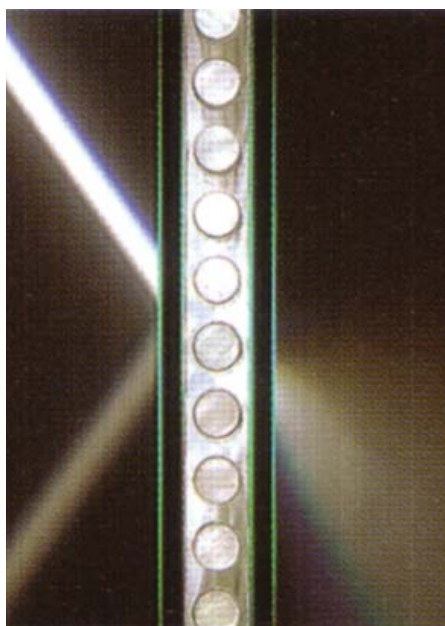


Abb. 5.09
Detailaufnahme Ecos D
[ECOSS H]

Funktionsprinzip

Lichtstreuendes System mit Acrylstäben.

Im Scheibenzwischenraum befinden sich Reihen von Acrylstäben, die frei beweglich sind.

Ein Teil der direkten Sonnenstrahlung wird reflektiert, der Rest wird in den Stäben gebrochen und nach innen gelenkt.

Verwendung

Als Paneel im Scheibenzwischenraum von Isoliergläsern.

Als Horizontal - und Vertikalverglasung, im Oberlichtbereich, für dekorative Zwecke.

Bei transparenter innerer Glasscheibe wird das Licht in die Spektralfarben aufgespaltet.

Die Abkürzung "D" im Produktnamen steht für Diffusion.

Aufbau

Horizontale PMMA-Stäbe bis zu einer Länge von 2,40 m stecken in vertikalen Halterungen, die alle 35 -45 mm angebracht sind.

Das Standardformat beträgt 2.40 m x 1.80 m.

Das Paneel kann in alle Isolierglasscheiben eingebaut werden.

Die zum Innenraum gewandte Glasscheibe ist mattiert damit das Licht gleichmäßig gestreut wird, da es sonst in seine Spektralfarben aufgespaltet wird.

Das gesamte Produkt (Acrylpaneel + Isolierglas) wird von Figla hergestellt.

Vorteile

Das Produkt ist wartungsfrei und im Scheibenzwischenraum vor Verschmutzung geschützt.

Es erzeugt diffuses Licht und ermöglicht dadurch blendfreie Arbeitsflächen.

Nachteile

Es erlaubt keine Durchsicht. Eine gezielte Lichtlenkung ist nicht möglich und es kann bei Fassaden aufgrund von auftretender Blendung nur im Oberlichtbereich eingebaut werden.

Die auftreffende Wärmestrahlung wird durchgelassen.

Technische Werte

U-Wert = 2,4 W/m²K

g-Wert = 10,1-43,8 % [ECOSS D]

Beispiele

Museen, Galerien, Konferenzsäle

Hersteller

Figla [FIGLA]

5.2 Lichtlenkung

5.2.1 Lunitop

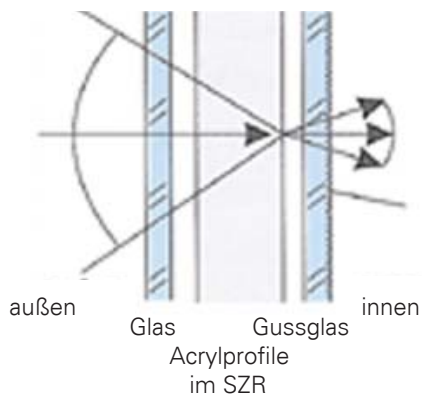


Abb. 5.10
Schematische Darstellung der Umwandlung des direkten Sonnenlichts in diffuses Licht in der Ebene des Gussglases

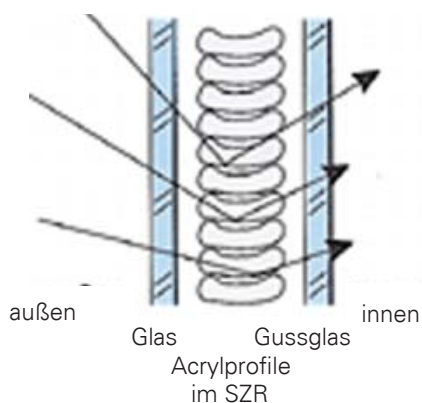


Abb. 5.11
Schematische Darstellung der Lichtumlenkung innerhalb der Acrylprofile durch Totalreflexion

Funktionsprinzip

Sonnenlichtlenkung ohne Sonnenschutz.

Übereinander gestapelte Acrylprofile im Scheibenzwischenraum lenken das direkte Sonnenlicht zur Decke. Schräg einfallendes Sonnenlicht wird über ein spezielles Gußglas (sinusförmige Oberflächenstrukturierung) horizontal in den Raum gelenkt.

Verwendung

Beim Einsatz in einer vertikalen Fassade werden die Elemente im Oberlichtbereich eingebaut. Die Sonnenstrahlung wird an die Decke gelenkt und von dort reflektiert.

Bei horizontalem Einbau über Innenhöfen oder hohen Räumen wird das direkte Licht senkrecht bis nach unten auf den Boden gelenkt. Die Elemente sollten um 20° zur Horizontalen geneigt und zur Hauptsonnenrichtung (Süden) ausgerichtet sein.

Aufbau

Lunitop wird standardmäßig als Isolierglas mit einem Abstandhalter von 24 mm und einer Kryptonfüllung ausgeführt. Die Höchstmaße betragen 2600 x 600 mm mit Sgg Planilux oder einem Ornamentglasverbund als Innenscheibe und 1600 x 600 mm mit einem monolithischen Ornamentglas. Ab einer Breite von 1500 mm muss LUMITOP mit einer mittigen vertikalen Verstrebung ausgeführt werden.

Vorteile

Das System ist wartungs- und

störungsfrei.

Die auftreffende direkte Strahlung wird zu 100% in diffuses Licht umgewandelt.

Nachteile

Keine Durchsicht

Es ist ein zusätzlicher Sonnenschutz notwendig.

Technische Werte

U-Wert = 1,2 W/m²K

g-Wert = 30%

Beispiele

Bürogebäude ADO Köln
Deutsches Institut für angewandte Lichttechnik (DIAL) Lüdenscheidt

Hersteller

5.2.2 Ecos T

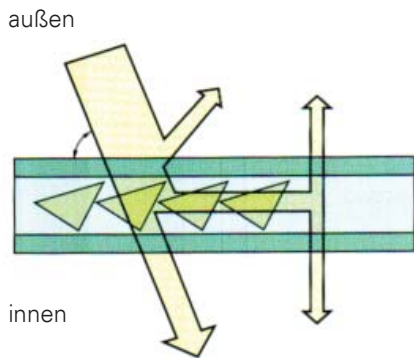


Abb. 5.12
Verteilung der einfallenden Strahlung
[FIGLA]

Funktionsprinzip

Sonnenlichtlenkung ohne Sonnenschutzfunktion

Im Scheibenzwischenraum befinden sich Reihen von Acrylprismen.

Direktes Licht bei hohem Sonnenstand (Sommer) wird reflektiert, diffuses Licht und direktes Licht bei niedrigem Sonnenstand wird mehrfach gebrochen und nach unten umgelenkt.

Verwendung

Als Paneel im Scheibenzwischenraum von Isoliergläsern.
Die Abkürzung "T" im Produktnamen steht für Toplight. Der Einsatzbereich sind Horizontalverglasung.

Aufbau

Horizontale PMMA-Prismen bis zu einer Länge von 2,40 m stecken in vertikalen Halterungen, die alle 35 bis 45 mm angebracht sind.

Die zum Innenraum gewandte Glasscheibe ist mattiert, damit das Licht gleichmäßig gestreut wird. Wäre diese Scheibe klar, so käme es zu einer Aufspaltung des Lichts in die Spektralfarben.

Das Standardformat liegt bei 2,40 m x 1,80 m.

Das gesamte Produkt (Acrylpaneel + Isolierglas) wird von Figla hergestellt.

Vorteile

Das Produkt ist wartungsfrei. Es ist

eine gezielte Lichtlenkung möglich. Das Tageslicht wird besser genutzt, wodurch Energieeinsparungen möglich sind.

Eine Anpassung an die Einbausituation ist möglich.

Die direkte Sommersonne wird reflektiert: Wärmestrahlung bleibt draußen!

Nachteile

keine Durchsicht

Die Lichtdurchlässigkeit ist eventuell reduziert.

Technische Werte:

U-Wert = 2.4 W/m²K

g-Wert = 10.1 - 43.8%

Beispiele

Büro- und Verwaltungsgebäude, Industriebau

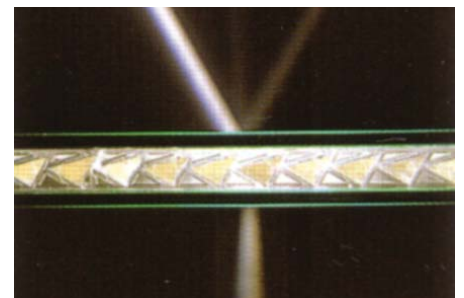


Abb. 5.14
Ecos-T [FIGLA]

Hersteller

Figla [FIGLA]

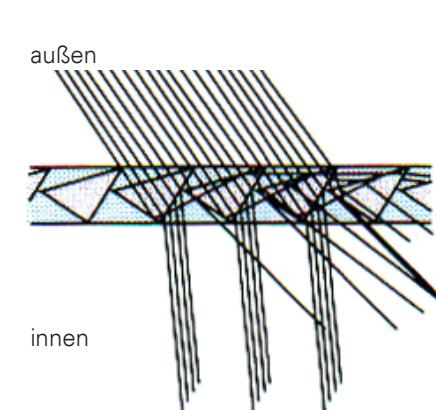


Abb. 5.13
Strahlengang durch Ecos T [FIGLA]

5.2.3 Ecos W

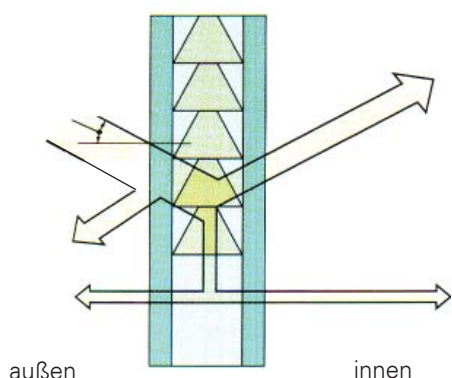


Abb. 5.15
Verteilung der auftreffenden Strahlung [FIGLA]

Funktionsprinzip

Direkte Lichtlenkung ohne Sonnenschutzfunktion.

Horizontale Reihen aus Acrylprismen liegen im Scheibenzwischenraum. Das direkte Licht bei hohem Sonnenstand (Sommer) wird reflektiert. Diffuses und direktes Licht bei niedrigem Sonnenstand werden mehrfach gebrochen und an die Decke des Raumes umgelenkt. Es findet eine direkte Lichtlenkung ohne Sonnenschutzfunktion statt.

Verwendung

Als Paneel im Scheibenzwischenraum von Isoliergläsern
Die Abkürzung "W" im Produktnamen steht für Window. Das Produkt kann in vertikalen Verglasungen oder als Oberlicht eingesetzt werden. Durch eine Kombination mit einer reflektierenden Decke, kann der Tageslichtfaktor erhöht werden.

Aufbau

Horizontale PMMA-Prismen bis zu einer Länge von 2,40 m stecken in vertikalen Halterungen, die alle 35 - 45 mm angebracht sind.

Das Paneel kann in alle Isolierglasscheiben eingebaut werden. Die Anordnung und Form der Prismen wird je nach Einbausituation festgelegt.

Die zum Innenraum gewandte Glasscheibe ist mattiert, damit das Licht gleichmäßig gestreut wird, da sonst das Licht in seine Spektralfarben zerlegt wird.

Die Standardgröße beträgt 2.40 m x 1.80 m.

Das gesamte Produkt (Acrylpaneel

+ Isolierglas) wird von Figla hergestellt.

Vorteile

Das Produkt ist wartungsfrei. Eine gezielte Lichtlenkung ist möglich, so dass das Tageslicht besser genutzt werden kann und ein Energieeinsparen möglich ist. Eine Anpassung an die Einbausituationen ist möglich.

Nachteile

Es erlaubt keine Durchsicht. Wegen auftretender Blendung ist ein Einbau nur im Oberlichtbereich sinnvoll. Die Lichtdurchlässigkeit ist eventuell reduziert.

Technische Werte

U-Wert = 2.4 W/m²K
g-Wert = 10.1 - 43.8%

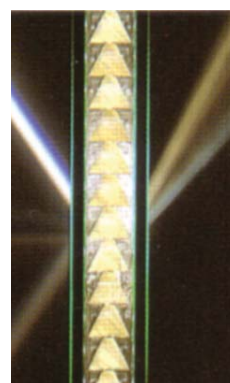


Abb. 5.17
ECOSS W [FIGLA]

Beispiele

Büro- und Verwaltungsgebäude, Industriebau

Hersteller

Figla [FIGLA]

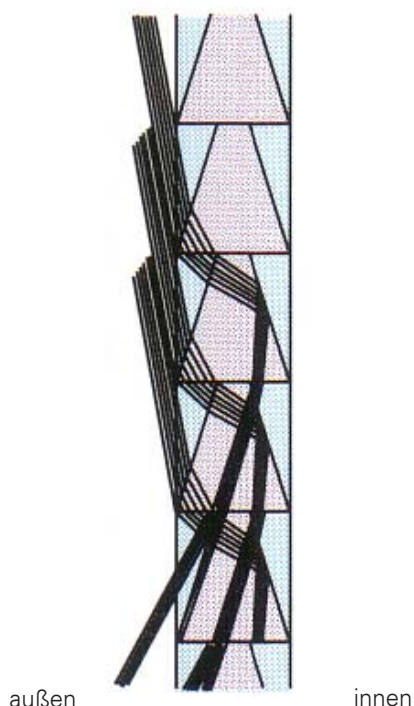


Abb. 5.16
Strahlengang durch ECOSS W [FIGLA]

5.2.4 Inglas-Y

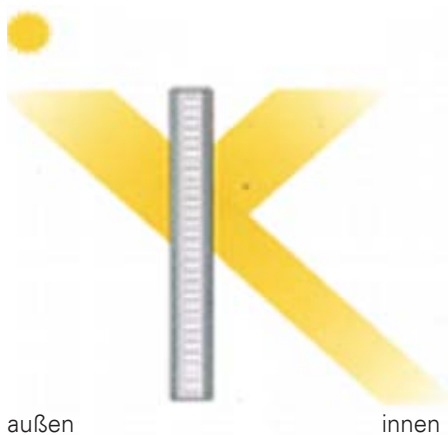


Abb. 5.18
Funktionsweise von Inglas-Y beim Einbau
in eine vertikale Verglasung

Funktionsprinzip

System mit Sonnenlichtlenkung ohne Sonnenschutzfunktion. An den Kanten der Einschnitte der Plexiglas-Daylightplatte findet eine Totalreflexion des Lichtes statt.

Bei hochstehender Sonne wird bis zu 80% des direkt auftreffenden Sonnenlichts umgelenkt, bei niedrigem Sonnenstand wird ein hoher Anteil an direktem Licht ungehindert durchgelassen, bei diffusem Tageslicht wird das hohe Zenithlicht umgelenkt und das flache Horizontlicht direkt in den Raum transmittiert.

Verwendung

In Vertikal- und Schrägverglasungen Zur Lichtumlenkung im Oberlichtbereich.

In Isoliergläsern als Inlet oder im Isolierglasverbund mit beidseitiger Glasscheibe oder als außenliegender Sonnenschutz in Form eines Light-Shelf.

Aufbau

Die hochtransparente Plexiglas-Daylightplatten hat Luftschlitze, die um 7° geneigt sind. Die Funktionsbreite beträgt 400 mm, die Dicke 8 mm. Der Längenzuschnitt ist variabel.

Vorteile

Das System ist vor Verschmutzung geschützt. Es ermöglicht eine Durchsicht, sowie eine einfache Reinigung.

Es kann als Isolierglasscheibe ausgeführt werden, dann befindet sich die Daylightplatte als "Scheibe" im

Innenraum, oder im Zwischenraum einer Isolierverglasung.

Nachteile

Bei niedrigem Sonnenstand wird direktes Licht ungehindert durchgelassen. Deshalb ist ein zusätzlicher Blendschutz notwendig. Die Wärmestrahlung wird ebenfalls durchgelassen.

Technische Werte

U-wert = 1,2 W/m²K
g-Wert = 0.51
Lichtdurchgang 92%

Beispiele

Bürogebäude, Messe- und Ausstellungshallen, Museen, Schulen



Abb. 5.19
Funktionsweise von Inglas-Y beim Einbau
in eine Schrägverglasung

Hersteller

Inglas [INGLAS]

5.2.5 Fisch

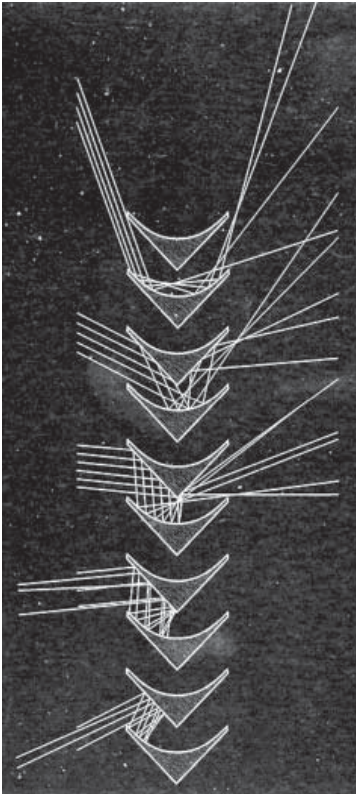


Abb. 5.20
Vertikalschnitt durch das System
FISCH [BARTHENBACH]

Funktionsprinzip

Es handelt sich um ein Sonnenstand abhängiges Lichtlenk-/Sonnenschutzsystem, das mit Reflexion an den Spiegelprofilen arbeitet.

Das Sonnenlicht wird bei niedrigem Sonnenstand durchgelassen und in die Raumtiefe umgelenkt.

Bei hohem Sonnenstand wird das Sonnenlicht an die Decke reflektiert.

Verwendung

Als horizontales, starres, alu-bedampftes Lamellensystem in Isolierglas eingebaut, wird es in vertikalen Verglasungen, im Oberlichtbereich, oder in Dachverglasungen eingesetzt.

Aufbau

Systemintegrierte Kunststofflamellen aus Präzisions-spritzgußteilen werden als Einbauelemente hergestellt.

Die Lamellen werden mit Reinstaluminium bedampft und mit einer Siliziumoxydschicht vor Oxydation geschützt.

Größen:

Ohne vertikale Stütze in der Mitte:

max. 1.60 m x 1.20 m

min. 0.40 m x 0.20 m

Mit vertikaler Stütze in der Mitte

max. 3.20 m x 1.20 m

min. 0.40 m x 0.20 m

Vorteile

Das System ist wartungs- und störungsfrei. Es führt zu einer gleichmäßigen Tageslichtverteilung, speziell bei großer Raumtiefe.

Nachteile

Keine Durchsicht
Reduzierung der Lichttransmission
starres System

Technische Werte

U-Wert: 1.6 W/m²K

g-Wert: 23 - 43 %

Lichtdurchgang: 4-33%

Beispiele

Sparkasse Bludenz

Hersteller

Bartenbach [BARTENBACH]

5.2.6 Isolette



Abb. 5.21
ISOLETTE mit horizontal/vertikal gestellten Lamellen [GLASKLAR_A]

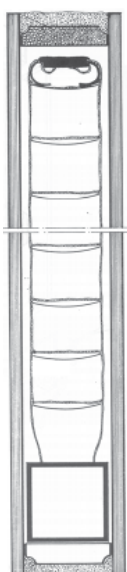


Abb. 5.22
Vertikalschnitt durch das System ISOLETTE [INGLAS]

Funktionsprinzip

Die Jalousien werden für Sonnen- und Blendschutz in den Scheibenzwischenraum des Isolierglases montiert.

Verwendung

Das Produkt kann in Vertikal- und Schrägverglasung eingesetzt werden.

Eine automatische Sonnennachführung wäre sinnvoll.

Aufbau

Die Jalousien sind im Scheibenzwischenraum des Isolierglases hermetisch eingebaut.

Die Minimalmaße liegen bei ca. 500 x 600 mm; Die Maximalmaße bei ca. 3.200 x 3.000 mm (ab 4 m² ist ein Doppelgehänge für die Jalousie erforderlich!). Die Standard-Gesamtdicke der Isolierglaseinheit beträgt 37 mm (Hardcoating) bzw. 42 mm (Softcoating), die Kombination mit jedem handelsüblichen Glas ist möglich. Als bauphysikalische Werte werden 1,2 W/m²K als U-Wert und 13% als g-Wert genannt.

Vorteile

Das System ist vor Verschmutzung geschützt. Es weist eine bessere Schalldämmung auf: Schallschutzklasse 4 (bei geschlossener Jalousie)

Nachteile

Störungsanfällig
Im Schadensfall ist der Austausch des ganzen Elementes erforderlich. Das System ist nicht so effektiv wie ein außenliegender Sonnenschutz.

Technische Werte

U-Wert: 1.2 W/m²K
g-Wert Lamellen oben = 72 %
Lamellen unten = 13 %

Beispiele

Industrie- und Verwaltungsbauten, Krankenhäuser

Bsp.
Wissenschaftsministerium NRW
Düsseldorf

Hersteller

Inglas [INGLAS]

5.3 Transparenter Sonnenschutz



5.3.1 Micro - Sonnenschutzraster

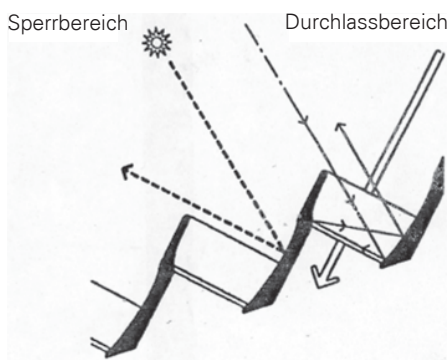


Abb. 5.23
Funktionsprinzip Micro-Sonnenschutzraster [SITECO]

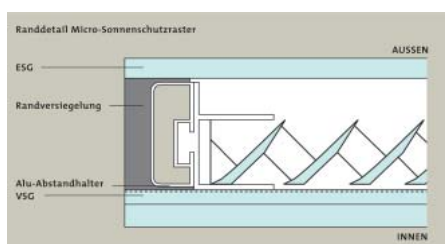


Abb. 5.24
Schemaschnitt Micro-Sonnenschutzraster [SITECO]

Funktionsprinzip

Stationäres Sonnenschutzsystem mit Diffuslichtdurchlass, das für den Einsatz in flachgeneigte Glasdächer und Lichtkuppeln entwickelt wurde. Das Raster besitzt ein richtungsabhängiges Transmissionsverhalten. Seine Wirkung beruht auf der Nutzung der Reflexionseigenschaft eines mit Reinstaluminium verspiegelten Kunststoffrasters. Der Sperr- und Durchlassbereich des Sonnenschutzrasters wird durch die speziell geformten Quer- und Längslamellen erreicht. Im eingebauten Zustand ist das Micro-Sonnenschutzraster nach Süden geschlossen, so dass die von Süden auftreffende direkte Sonneneinstrahlung nach außen reflektiert wird. Die Öffnungen des Rasters sind nach Norden gerichtet. Das intensive Zenitlicht und das aus den übrigen Richtungen auftreffende diffuse Tageslicht gelangt fast ungehindert in den Innenraum.

Verwendung

Das Kunststoffraster eingebaut in den Scheibenzwischenraum von Isoliergläsern, eignet sich für flachgeneigte Glasdächer und Lichtkuppeln.

Aufbau

Die Abmessungen der Isoliergläser mit dem Micro-Sonnenschutzraster sind frei wählbar. Die maximalen Abmessungen betragen ca. 2.20 x 3.0 m bzw. 1,50 x 4.0 m.

Vorteile

Das System ist wartungs- und störungsfrei. Die direkte Sonneneinstrahlung und Infrarotstrahlung werden ausgeblendet. Die Raumausleuchtung ist gleichmäßig und blendfrei. Der g-Wert liegt bei 14 %. Dadurch fallen verringerte Kühllasten an. Die Montage erfolgt wie bei einem normalen Fenster.

Nachteile

Eine Durchsicht ist nur nach Norden möglich. Es handelt sich um eine Einzelanfertigung.

Technische Werte

U-Wert: abhängig von der Verglasung
g-Wert = 0,14

Beispiele

Messehallen, Museen
Design-Center Linz
Kunstmuseum Bern

Hersteller

SITECO Beleuchtungstechnik GmbH

Abb. 5.25
linke Seite
Micro-Sonnenschutzraster [Lutz]



5.3.2 Okasolar

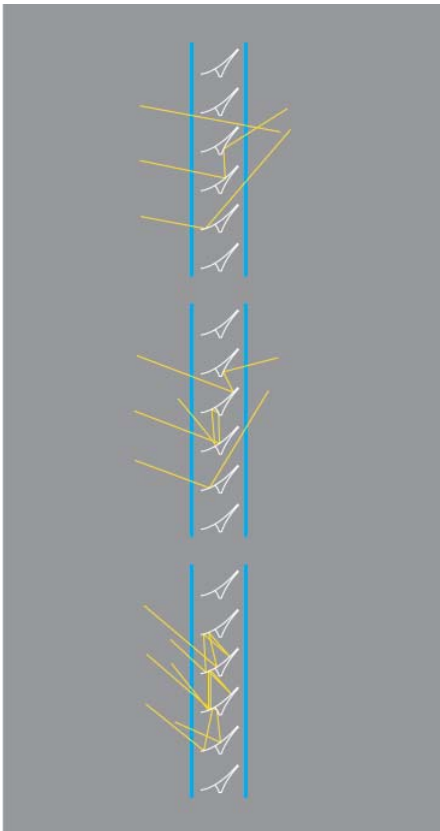


Abb. 5.26
Funktionsprinzip OKASOLAR [OKALUX]

Funktionsprinzip

Winkelselektives, starres Sonnenschutzsystem mit Direktlichtlenkung für niedrige Sonnenstände und Komplettausblendung für hohe Sonnenstände.

Direktes Licht wird bis zu einem Winkel von 35° in den Raum transmittiert. Alle höheren Profilwinkel werden nahezu komplett ausgeblendet.

Bei niedrigen Sonnenständen wird das Licht sehr effektiv in die Raumtiefe umgelenkt. Da aber auch direktes Licht zwischen den Lamellen hindurch dringt, besteht die Gefahr der Blendung.

- Bei 60° Sonnenhöhe ist die Ausblendung sehr effektiv. Es besteht nur geringe Blendungsgefahr.
- der Transmissionsgrad für diffuses Licht beträgt 38,9 %.

Verwendung

Das Produkt kann in senkrechten Fassaden als auch im Überkopfbereich eingesetzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass als innere Scheibe ein VSG aus Floatglas zum Einsatz kommt. Der Hersteller unterscheidet je nach Verwendung zwischen OKASOLAR W für den Vertikalen und OKASOLAR D für den horizontalen Einbau.

Aufbau

Der Scheibenaufbau beginnt außen mit einer ESG-Scheibe mit einer Schicht auf Pos. 2, dann folgen ein Scheibenzwischenraum von 22 mm mit der Profileinlage, ein dreidimensional geformtes Spiegelprofil, und ein Floatglas als innere Scheibe.

Abb. 5.27
linke Seite
OKASOLAR [LUTZ]

Vorteile

Das Produkt ist wartungsfrei und im Scheibenzwischenraum vor Verschmutzung geschützt. In Südfassaden ist die Schutzfunktion sehr gut.

Nachteile

Bei widrigen Sonnenständen besteht durch den Einfall von direktem Licht Blendungsgefahr.

Technische Werte

U-Wert = 1.1 - 1,2 W/m²K

g-Wert Fassade = 12 %

g-Wert Dach = 9 %

Transmission = 60 %

Beispiele

Fassaden mit direkter Sonneneinstrahlung (Südfassade).

Hersteller

Okalux [OKALUX]

5.3.3 Ecosse Louver

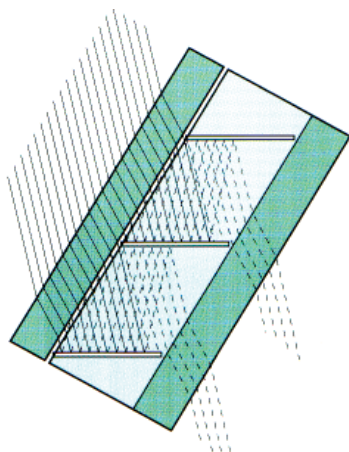


Abb. 5.28
Funktionsweise von ECOSS LOUVER bei 65° Einfallswinkel [FIGLA]
Direktes Sonnenlicht wird reflektiert, diffuses wird in den Raum gelenkt.

Funktionsprinzip

Sonnenlichtlenkung mit Sonnenschutzfunktion
Im Scheibenzwischenraum befinden sich horizontale Metalllamellen.

Das direkte Sonnenlicht wird bei hohem Sonnenstand reflektiert, diffuses in den Raum umgelenkt. Diffuses und direktes Licht bei niedrigem Sonnenstand werden durchgelassen.

Verwendung

Als Paneel im Scheibenzwischenraum von Isoliergläsern
Als Horizontal- und Vertikalverglasung

Aufbau

12 mm breite Metalllamellen werden alle 72 mm von vertikalen Metallträgern gehalten.

Das maximale Format beträgt 2.40 x 3.00 m.

Das gesamte Produkt (Metalllamellen + Isolierglas) wird von Figla hergestellt.

Vorteile

Das Produkt ist wartungsfrei. Es erlaubt eine Durchsicht bei senkrechtem Blickwinkel.
Sonnenschutzfunktion bei hohen Sonnenständen

Nachteile

Eine Anpassung des Lamellenwinkels an die Einbausituation ist erforderlich.

Technische Werte

U-Wert = 2,4 W/m²K
g-Wert = 10,1-43,8%

Beispiele

Büro- und Verwaltungsgebäude, Industriebau

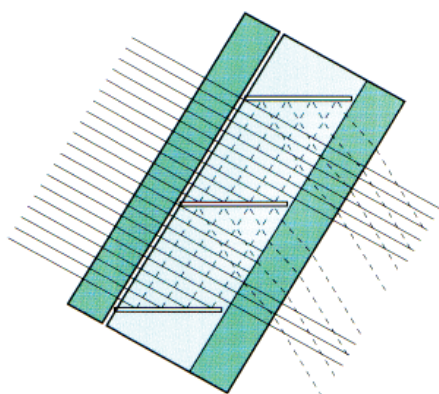


Abb. 5.29
Funktionsweise von ECOSS LOUVER bei 30° Einfallswinkel [FIGLA]
Direktes und diffuses Sonnenlicht wird durchgelassen

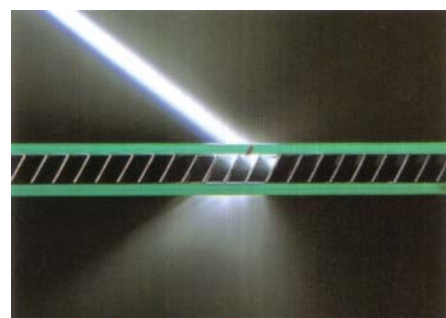


Abb. 5.30
ECOSS LOUVER [FIGLA]

Hersteller

Figla [FIGLA]

5.3.4 Prismenplatten

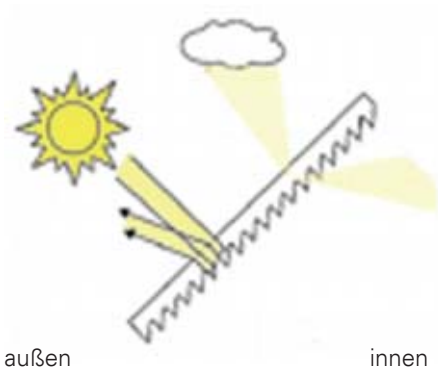


Abb. 5.31
Funktionsweise Prismenplatte

Funktionsprinzip

Sonnenschutzsystem mit Diffuslichtdurchlass.

Prismensysteme ermöglichen über Reflexionen und Brechungen des einfallenden Lichtes die Reflexion der einfallenden Direktstrahlung nach außen.

An den Kanten der auf der Unterseite liegenden Prismen wird das Sonnenlicht totalreflektiert und nach außen zurückgeworfen.

Diffuses Licht wird gleichzeitig so umgelenkt, dass es über die Decke möglichst tief in den Raum gelangt.

Nachteile

Die erforderliche Nachführungseinrichtung ist regelmäßig zu kontrollieren.

Ungeschützte Acrylprismen im Außenbereich bedürfen einer sorgfältigen Reinigung.

Technische Werte

U-Wert und g-Wert von Verglasung abhängig

Verwendung

Die glatte Seite der Elemente wird immer der Sonne zugewandt.

Die Elemente können starr oder beweglich eingebaut werden.

Der bewegliche Einbau mit Sonnennachführung hat den Vorteil, dass der Ausblendungswinkel für Direktstrahlung klein gehalten werden kann, so dass die Diffuslichtausbeute größer ist.

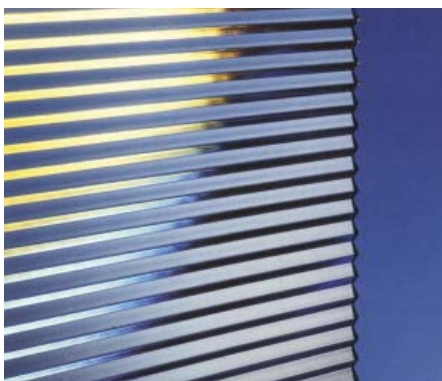


Abb. 5.32
Prismenplatte [Glasklar_B]

Aufbau

Acrylplatten

Vorteile

Sonnenschutzfunktion ohne Verdunklung.

Eine passive Solarbeheizung der Räume im Winter ist durch das Drehen der Elemente parallel zum Sonneneinfall möglich.

Hersteller

Hüppe [HÜPPE1]

5.3.5 Hüppe Prismenlamellen

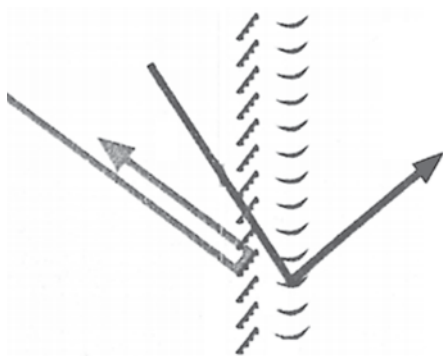


Abb. 5.33
Funktionsweise Hüppe Prismenlamelle
[HÜPPE]

Funktionsprinzip

Innenliegendes Sonnenschutzsystem mit Diffuslichtlenkung. Raumseitig werden 2 Elemente hintereinander montiert: transparente Prismen und Aluminiumlamellen. Die Prismenplatten reflektieren das direkte Sonnenlicht durch Brechung und Totalreflexion an ihrer Unterseite nach außen und wirken so als Sonnenschutzsystem. Diffuses Licht gelangt durch die Prismenplatte auf die nach oben gebogenen Metalllamellen und wird von diesen an die Decke gelenkt.

Verwendung

Systembedingt findet der Einsatz in Vertikalverglasungen statt.

Aufbau

Die Metalllamellenjalousie hat einen festgelegten Neigungswinkel, die Prismenlamellen werden über eine Astrosteuerung mit eingebautem Computer kontinuierlich zum direkten Sonnenlicht rechtwinklig ausgerichtet. Beide Elemente können unabhängig voneinander bedient werden. Prismenplatten aus Acryl $b = 80$ mm. Metalllamellen $b = 25, 50$ und 80 mm.

Vorteile

Durch die Nachführung ist eine gezielte Lichtlenkung möglich. Die Sonnenschutzfunktion ist individuell steuerbar.

Nachteile

Das System ist nicht wartungs- und störungsfrei, sondern verschmutzungsanfällig. Die Durchsicht ist eingeschränkt. Ein innenliegender Sonnenschutz ist weniger effektiv als ein außenliegender.

Technische Werte

Verglasung (Climaplust N)
U-Wert = $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$
g-Wert = 0.62
Jalousie (verspiegelt u. teilperforiert)
 $z = 56\%$
g-Wert ges = 35%

Beispiele

Büro-, Verwaltungsbau
Konzerthaus Karlsruhe
VEBA Immobilien Bochum
Landeszentralbank Leipzig

Hersteller

Hüppe [HÜPPE2]

5.3.6 Hologramme

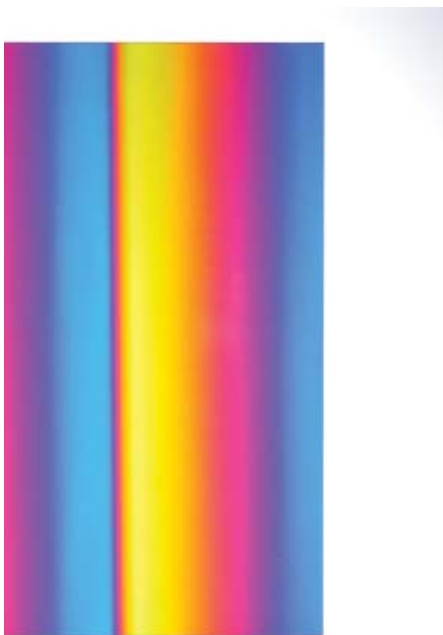


Abb. 5.34
Hologramm [GLB]



Abb. 5.35
Hologramm mit freier Durchsicht [GLB]

Funktionsprinzip

Sonnenschutzsystem mit Diffuslichtdurchlass

Durch den physikalischen Effekt der Beugung ermöglichen die HOE (Holographisch-Optische Elemente) unterschiedliche Formen der Lichtlenkung, vergleichbar mit denen von Prismen, Linsen, Spiegeln und anderen optischen Elementen.

Das optische Gitter auf dem Film bewirkt eine Umlenkung des aus einem bestimmten Winkelbereich einfallenden Lichtes an die Decke des Raumes.

Verwendung

Zur Nordlichtumlenkung mit HOE:

diffuses Zenitlicht wird umgelenkt
Die Elemente können vertikal als Oberlicht in die Fassade integriert werden oder vor dem Oberlicht in einem bestimmten Winkel ausgestellt werden.

Bsp.: Bürogebäude ADO Köln, Rodenkirchen

Zur Konzentration durch HOE:

senkrecht einfallendes Licht wird auf einen opaken Streifen umgelenkt und konzentriert (in Kombination mit PV)
Bsp.: Einfamilienreihenhäuser, IGA Stuttgart

Zur Totalreflexion mit HOE: transparente Glaslamellen, die nur direktes Sonnenlicht reflektieren, Diffuslicht jedoch durchlassen.

Aufbau

Der anwendungsspezifische Entwurf der HOE sowie die Herstellung durch Belichtung eines besonderen Films mit Laser und anschließende chemische Entwicklung wird am ILB

durchgeführt.

Die Filmeinbettung in VSG wird von der Glasindustrie übernommen.

Vorteile

Die freie Durchsicht in alle Richtungen außer dem aktiven Winkel des transparenten Sonnenschutzes.

Durch Ausblenden der direkten, energiereichen Sonnenstrahlung wird eine Überhitzung verhindert:

- Reduzierung der Kühllasten
- geringerer Kunstlichtbedarf

Bei Verwendung von Lamellen mit HOE können diese dem Sonneneinfall nachgeführt werden.

Nachteile

sehr teuer

Technische Werte

U-Wert ist von der Verglasung abhängig

g-Wert der Verglasung kann mit Abminderungsfaktor $z=0.2$ errechnet werden.

Beispiele

REWE Hauptverwaltung, Köln

Hersteller

GLB [GLB]

5.4 Zusammenfassung

Ein Hauptnutzen innovativer Tageslichtsysteme für die Anwendung in unserem Klima besteht in ihrer Fähigkeit, unter veränderlichen Himmelsverhältnissen die Innenraumbelichtung mit Tageslicht bezüglich des Tageslichtniveaus, der Tageslichtverteilung sowie der Leuchtdichte am Fenster, kontrollieren zu können. Dieses kann durch die selektive Ausblendung der Direktstrahlung der Sonne oder durch eine Steuerung der Lichttransmission der Fassade geschehen. Die kontrollierte Nutzung des Tageslichtes ist ein wichtiger Bestandteil einer Strategie zur Reduzierung von Kühllasten, die ihrerseits notwendig ist, um Gebäude mit natürlichen Lüftungsstrategien ohne herkömmliche Klimatisierung errichten zu können. Der Nutzen innovativer Tageslichttechniken kann daher nicht allein durch die Einsparungen an Energie für künstliche Beleuchtung beziffert werden, sondern das thermische Gebäudeverhalten sowie die Möglichkeit, die Haustechnik insgesamt zu reduzieren, muss ebenfalls berücksichtigt werden.

Dabei rechtfertigen die neuen Tageslichtsysteme nicht tiefere Räume zu bauen, als dies ohne solche Systeme vernünftig ist. Innovative Tageslichtsysteme können ein entwurflich ausgearbeitetes Tageslichtkonzept sinnvoll ergänzen, jedoch nicht ersetzen.

Die Kontrolle der Tageslichtbeleuchtungsverhältnisse im Innenraum ist der eigentliche Nutzen innovativer Tageslichttechnik. Es geht nicht um die bloße Erhöhung der Tageslichtmenge.

6.0 Profile und Rohre aus Glas



In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Profile der Firma Schott Rohrglas in Mitterteich auf ihre Eignung als Tageslicht- und Sonnenschutzsystem untersucht. Hinsichtlich dieses möglichen, neuen Anwendungsgebietes ist es unabdingbar die Rahmenbedingungen wie das Herstellungsverfahren und die Eigenschaften des verwendeten Rohstoffes zu kennen.

6.1 Eigenschaften von Glas

Glas ist einer der ältesten Werkstoffe, der die Entwicklung der Menschheit sehr unspektakulär aber kontinuierlich mit einer steigenden Bedeutung in unserer technischen Zivilisation begleitet hat. Zu Beginn des neuen Jahrtausend erhält Glas mit wachsenden technologischen Herausforderungen eine immer größere Bedeutung. Trotz der Komplexität und Vielschichtigkeit der möglichen Applikationen steht die Bedeutung dieser Werkstoffklasse für unsere Zivilisation weiterhin in einer Diskrepanz zur Wahrnehmung in der Bevölkerung. [GLASS_1]

6.1.1 Transparenz

Von überragender Bedeutung ist von den Eigenschaften des Glases seine Durchlässigkeit für das sichtbare Licht. Materie mit üblichem strukturellem Aufbau absorbiert die Lichtenergie dadurch, dass diese Energie die freien Teilchen in der Materie zum Schwingen anregt. Metalle mit ihren vielen freien Elektronen sind daher lichtundurchlässig. Dies gilt beispielweise auch für schwarz gefärbtes Glas. Schwarzglas enthält die färbenden Ionen des Kobalts, des Eisens oder Mangans, und deren Elektronen absorbieren Energie des sichtbaren Lichts. Aufgrund seiner atomaren

Struktur absorbiert Glas die Energie es sichtbaren Lichts nicht, und da im Inneren des Glases auch keine reflektierenden Grenzflächen vorhanden sind, lässt es Licht hindurchtreten. Im Vergleich zum sichtbaren Licht hat das unsichtbare UV-Licht sehr viel mehr Energie. Bei normalem Glas hat es genügend Energie, um Elektronen im Glas zum Schwingen anzuregen. Somit ist es für UV-Licht nicht durchlässig. Gebrochenes Glas ist undurchsichtig, weil es viele Grenzflächen enthält, an denen das auftretende Licht reflektiert wird. Diese Eigenheit lässt sich beim Zerschlagen einer ESG-Scheibe beobachten: Die Scheibe wird undurchsichtig und weiß. [GLASSKLAR_1]

6.1.2 Festigkeit

Für Härte und Festigkeit, gleichzeitig aber auch für die Sprödigkeit des Werkstoffs Glas, ist der hohe Anteil an Siliziumdioxid maßgebend. Die Sprödigkeit führt bereits bei einer minimalen Überschreitung der elastischen Verformung zum Bruch einer Glasscheibe, weil im Bereich der Bruchdehnung praktisch keine Verformungen möglich sind. [GLASSKLAR_1]

6.1.3 Chemische Beständigkeit

Gläser besitzen durch ihre silikatreiche Zusammensetzung gegenüber den meisten Medien eine sehr gute chemische Beständigkeit. Gegenüber Wasser sind die überwiegend eingesetzten Kalk-Natrongläser gut beständig. Stehendes Wasser auf Glasoberflächen kann jedoch zu Auslaugungen und auf Dauer zu einer Korrosion der Glasoberfläche, zu fleckenartigem Erblinden des Glases führen.

Säuren und Laugen gegenüber sind Kalk-Natrongläser beständig. Eine Ausnahme stellt die Flusssäure dar, die Glas und andere Silikate angreift und zum Erblinden führt. Dieser Umstand wird beim »Satinieren« (Ätzen) genutzt, um Glasoberflächen zu mattieren.

Laugen sind für Glasoberflächen in der Regel nur schädlich, wenn sie über einen längeren Zeitraum einwirken.

Ammoniakhaltige Industrieabgase, der Kontakt von Glas mit Mineralputzen, frischem Beton oder mit extrem alkalischen Reinigungsmitteln können ebenfalls zu korrosiven Erscheinungen führen. [GLASSKLAR_1]

Kenngroße	Kalk-Natronglas	Stahl	Aluminium	Beton
Dichte $\rho(10^3\text{kg/m}^3)$	2,5	7,9	2,5	2,5
Elastizitätsmodul $E(10^3\text{N/mm}^2)$	70	210	70	20-40
Temperaturausdehnungskoeffizient $\alpha(10^{-6}/\text{K})$	9	12	23	10-12

Abb. 6.01 Physikalische Eigenschaften von Glas im Vergleich zu anderen Werkstoffen [GLASSKLAR_B]

6.1.4 Physikalische Eigenschaften

Für die Planung im konstruktiven Glasbau besonders wichtige physikalische Eigenschaften des Werkstoffs Glas sind seine Dichte und die Kenngrößen, die sein Verformungsverhalten kennzeichnen, der Elastizitätsmodul- und der Temperaturexpansionskoeffizient. [GLASSKLAR_1]

Für die folgenden lichttechnischen Untersuchungen ist die Brechungszahl n von Glas, hier im speziellen von Borosilikatglas, von Bedeutung. In der Literatur wird für Glas im allgemeinen die Brechungszahl $n = 1,5$ angegeben, für Borosilikatglas, aus dem die Profile und Rohre von Schott gefertigt werden, gilt $n = 1,47$. Borosilikatgläser enthalten anstelle von CaO zwischen 7 und 15 % Boroxid und zeichnen sich durch den niedrigen Ausdehnungskoeffizienten

(ca. 1/3 gegenüber Floatglas) und der dadurch wesentlich geringeren Empfindlichkeit gegen Temperaturwechsel sowie durch ihre hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen aus. [GLASSKLAR_1]

Die Brechungszahl n ist in diesem Fall wichtig, da mit Hilfe des Snelliusschen Gesetzes [$\sin \beta = (\sin \alpha)/n$, siehe Kapitel 3.1.3] der Durchgang des Lichts durch die Glasprofile berechnet werden kann.

Da die Brechungszahl von Glas größer ist als 1 bedeutet dies für $\sin \beta$ und darum auch für den Winkel β stets, dass dieser kleiner ist, als der Winkel α .

Da ein Lichtstrahl nur unter einem Winkel α kleiner als 90° zum Lot auf die Grenzfläche eines Glasprofils treffen kann, gilt.

$$\sin \beta < \sin 90^\circ/n = 1/n$$

Für den Verlauf des Lichtstrahls im Glas gibt es demnach einen Grenzwinkel β_g , der nicht überschritten werden kann und es gibt dafür $\sin \beta_g = 1/n$. Für Borosilikatglas mit $n = 1,47$ erhält man $\beta_g = 42,8^\circ$. Beim Übergang von Glas nach Luft bedeutet dies, dass bei einem Winkel ab $42,8^\circ$ Totalreflektion stattfindet. [SCHROEDEL_1]

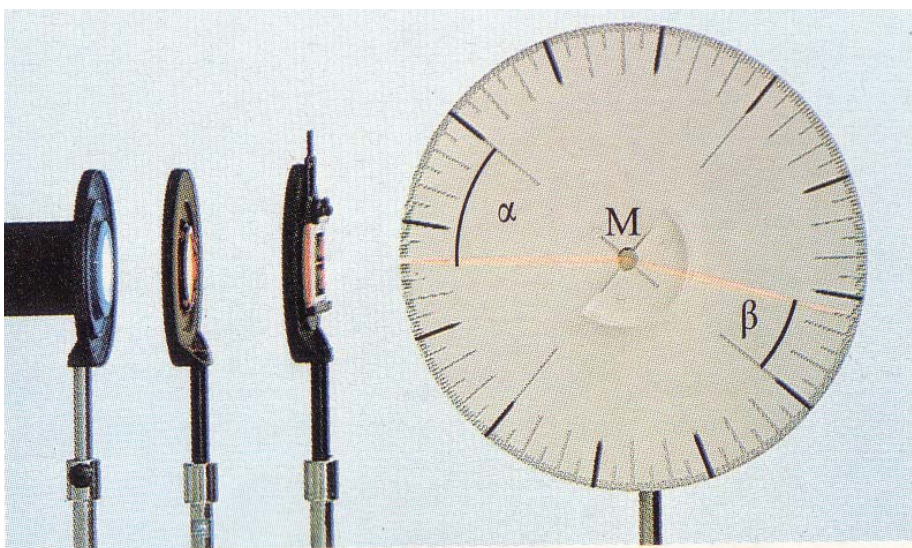


Abb. 6.02
Der Lichtstrahl wird beim Übergang von Luft in den Glaskörper gebrochen. [SCHROEDEL_A]

6.2 Herstellung und Anwendung

Die profilierten Röhren und Stäbe werden im Ziehverfahren hergestellt. In einer Stahlwanne, gefüllt mit flüssigem Glas, befindet sich bodenseitig ein Abfluss. Das flüssige Glas läuft der Schwerkraft folgend durch diesen Abfluss, in dem sich eine Ziehnadel befindet, die die Geometrie bestimmt. Es ist fast jeder gewünschte Querschnitt machbar. Die Formbarkeit von Glas kennt diesbezüglich kaum Grenzen. Nur technische Produktionsgegebenheiten schränken die Realisierbarkeit ein. Innerhalb des Außendurchmesserspektrums von 3 bis 200 mm, abhängig vom Profiltyp, sind nahezu keine Grenzen gesetzt.

Das verwendete Glas erhält einen Zusatz von ca. 7 bis 15 % an Boroxid. Borosilikatglas kann heute wie Float- und Fensterglas, aber auch wie gewalztes und gegossenes Glas hergestellt werden. Das Bruchbild von Borosilikat entspricht dem von Floatglas.

Die unterschiedlichen geometrischen Spezialglasprofile können mit den üblichen Bearbeitungsverfahren wie Absprengen, Sägen, Schleifen, Sandstrahlen, Bohren, oder Verformen individuell weiter bearbeitet werden. Aufgrund der Verwendung von Duranglas ist die Farbe glasklar, transparent, ohne Grünfärbung. Die maximale Länge der Glasprofile beträgt herstellungsbedingt 1.500 mm.

Geringe Maßabweichungen aus fertigungstechnischen Gründen sind möglich. Die Profile können auf einer Länge von 1.500 mm einen Stich von bis zu 5 mm aufweisen. Aus herstellungstechnischen Gründen können keine scharfen Kanten gezogen

werden. Der Mindestradius beträgt 2,5 mm. Das Gewicht eines 90°-Glasprismas liegt bei 800 g/lfm. [GLASKLAR_3]

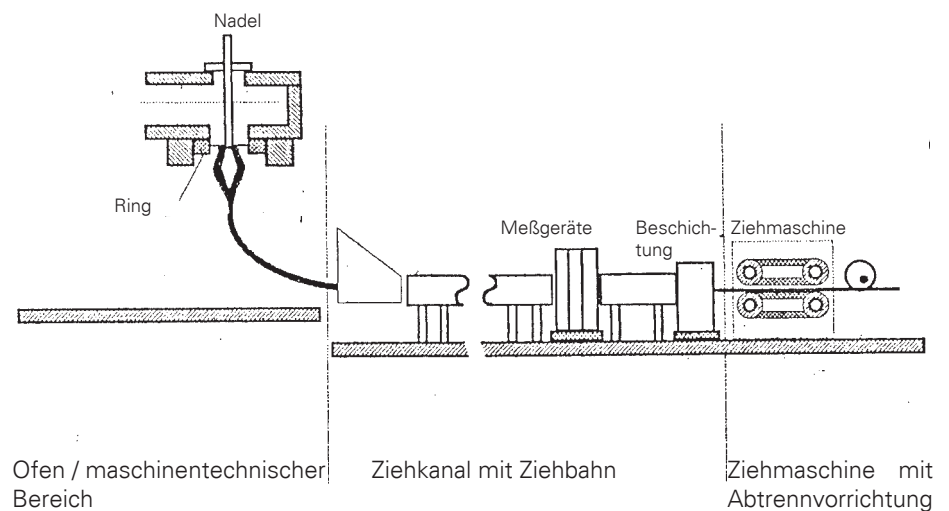
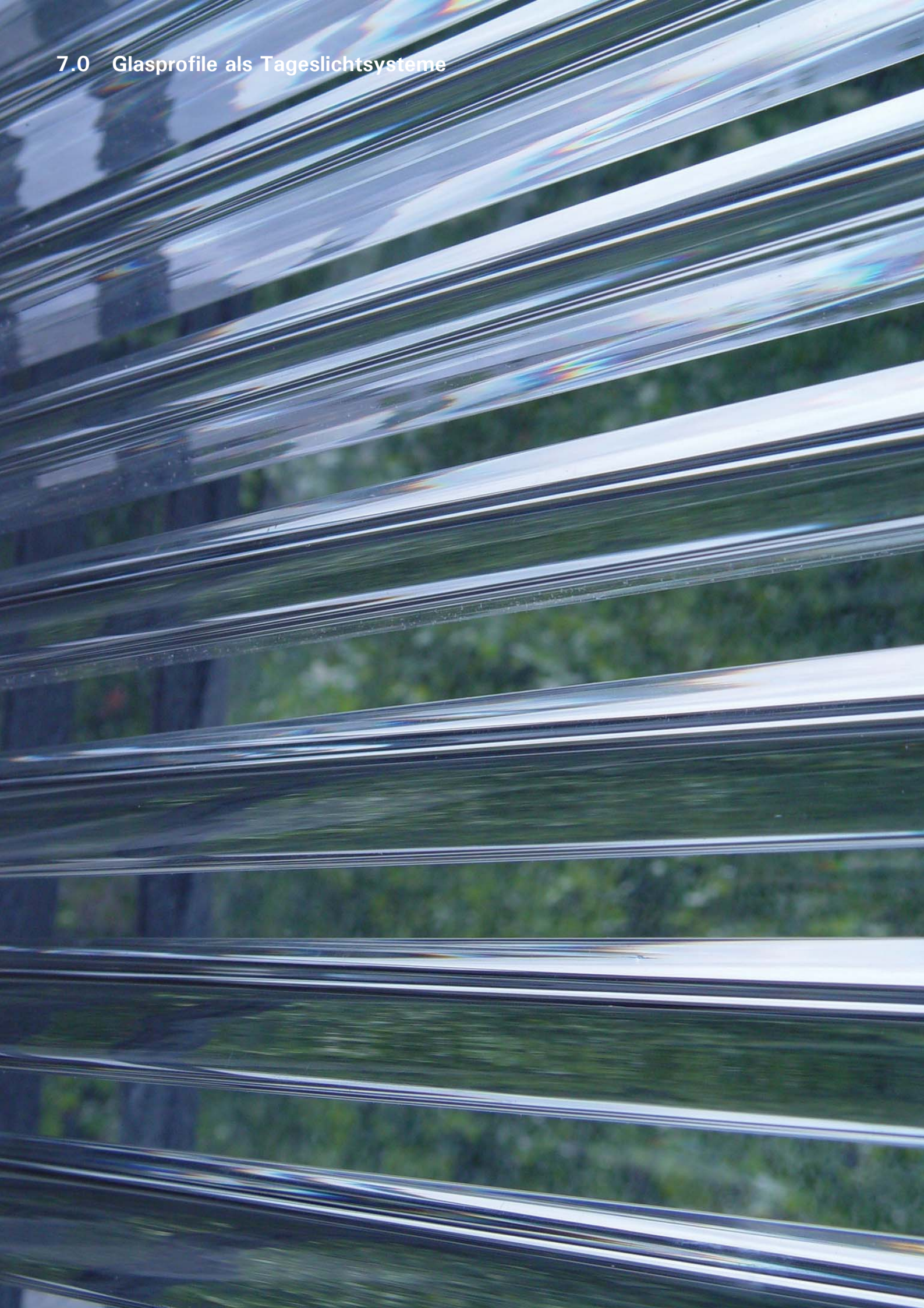


Abb. 6.03
Herstellung von Glasprofilen im Ziehverfahren

7.0 Glasprofile als Tageslichtsysteme



7.1 Untersuchung vorhandener Profile

7.1.1 Einleitung

In diesen Kapiteln werden verschiedene Profile von Schott via Strahlverfolgung und Messung der Helligkeitsverteilung in einem Modellraum unter künstlicher Sonne untersucht. Der Versuchsaufbau wird unter Punkt 7.1.2 erläutert.

Die Strahlverfolgung erfolgt "von Hand". Mit Hilfe des Snelliusschen Gesetzes, siehe Kapitel 4.1.3 Brechung, werden die Winkeländerungen der auftretenden Strahlung und deren Durchgang durch das Profil berechnet.

Folgende Werte werden festgelegt:
 n_1 für Luft = 1,0
 n_2 für Glas = 1,52

somit gilt: $n_1 \times \sin a_{1a} = n_2 \times \sin b_{1a}$

a_{1a} = der Winkel zwischen Lichteinfall und dem am auftreffenden Punkt auf der Profiloberfläche eingezeichneten Lot

b_{1a} = Winkel zwischen dem Lot und dem gebrochenem Lichtstrahl im Profil

Beim Erreichen des Grenzwertes $b_{1a} = 1$ ergibt sich ein kritischer Einfallswinkel, bei dem kein Licht mehr durchgelassen wird. Man spricht dann von Totalreflexion. [FALK 11]

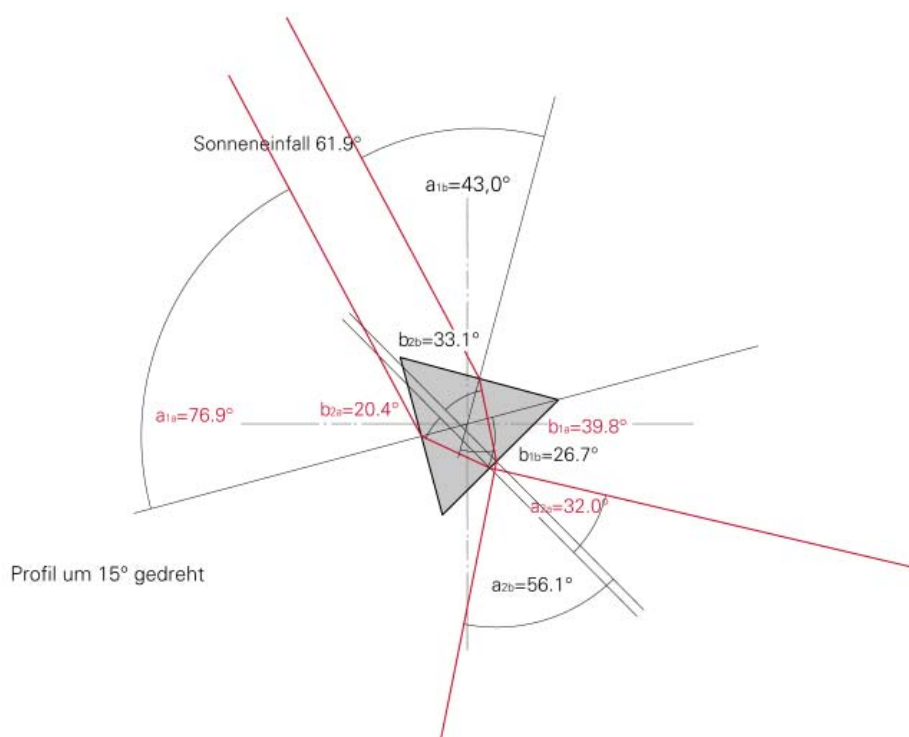
Der Winkel der Totalreflexion ist abhängig vom Brechungsindex.

hier mit n für Glas = 1,52:

Es gilt: $\sin a = 1/n$ (a = Winkel zum Lot)

$a = 41^\circ$

Daraus folgt, dass Strahlen mit einem flachen Winkel von 0° bis 41° zur Glasfläche total reflektiert werden.



Sommer 12h

$$a_{1a} = 76,9^\circ$$

$$b_{1a} = \frac{(1 \times \sin 76,9^\circ)}{1,52} = 39,8^\circ$$

$$b_{2a} = 20,4^\circ$$

$$a_{2a} = \frac{(1,52 \times \sin 20,4^\circ)}{1} = 32,0^\circ$$

$$a_{1b} = 43,0^\circ$$

$$b_{1b} = \frac{(1 \times \sin 43,0^\circ)}{1,52} = 26,7^\circ$$

$$b_{2b} = 33,1^\circ$$

$$a_{2b} = \frac{(1,52 \times \sin 33,1^\circ)}{1} = 56,1^\circ$$

Abb. 7.01 Strahldurchgang der einfallenden Sommersonne durch ein 60°-Prisma

7.1.2 Versuchsbeschreibung im Modellraum

In einem Modellraum werden vor die Fensteröffnung zur Bewertung und Überprüfung der zeichnerischen Ergebnisse der Lichtlenkeigenschaften unterschiedlicher Profilgeometrien die jeweiligen Fassadenmodelle eingebaut und mit Hilfe einer künstlichen Sonne unter den Höhenwinkeln 15°, 30°, 45° und 60° besonnt.

Die unterschiedlichen Belichtungssituationen werden photographisch festgehalten und ausgewertet. Zusätzlich zum optischen, photographisch festgehaltenen Eindruck, werden mit Hilfe eines Lichtmessers aus der Phototechnik die Lichteinheiten der entsprechenden Situationen zur objektiveren Beurteilung der Ergebnisse gemessen und ausgewertet.

Es werden Lichtlenkuntersuchungen für folgende, bereits existierende Profilgeometrien durchgeführt (s. Abb. 7.02):

- 60° Prisma aus Glas
- Halbzylinder aus Glas
- Glasrohr mit Spiegelfolie
- Runder Vollstab aus Glas mit Verspiegelung

Auf der Grundlage der Untersuchungen wird das 60°-Prisma in das 90°-Prisma "umgewandelt", bzw. wird am Ende des Kapitels ein neuer Typ Glasprofil, der Konzentrator, entwickelt.

Modellraum

Die Aufnahme des Modellraums als Referenz zeigt die schnelle Abnahme der Leuchtdichte mit zunehmender Entfernung vom Fenster deutlich auf. Dieser Effekt soll mit Hilfe der

gewählten Profilgeometrien kompensiert werden, so dass eine gleichmäßige Ausleuchtung bis in die Bürotiefe stattfindet.

Der Testraum im Maßstab 1:10 entspricht einem Büroraum mit den Abmessungen $b = 4,00$ m, $t = 4,50$ m und $h = 2,90$ m, die Brüstung ist 90 cm und der Sturz ca. 30 cm hoch. Es werden jeweils zwei Messungen der Lichtwerte pro Belichtungssituation durchgeführt.

Der erste Wert wird ca. 2,00 m nach der Fassadenöffnung genommen, der zweite in einer Raumtiefe von ca. 4,00 m.

Es wird eine Skala für den Lichtwert von 1 bis 7 eingeführt. Mit steigender Zahl nimmt die Helligkeit zu.

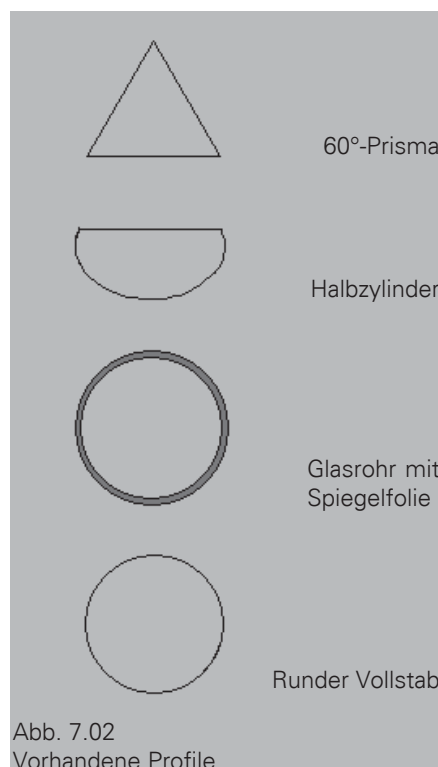


Abb. 7.02
Vorhandene Profile

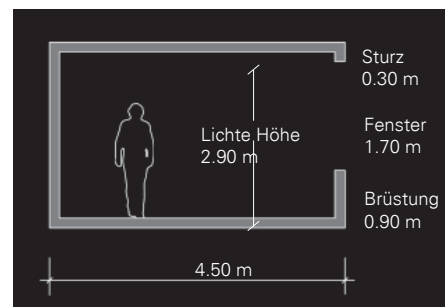


Abb. 7.04
Querschnitt des Modellraums



Abb. 7.05
Modellraum ohne Lichtlenkelement als Referenz

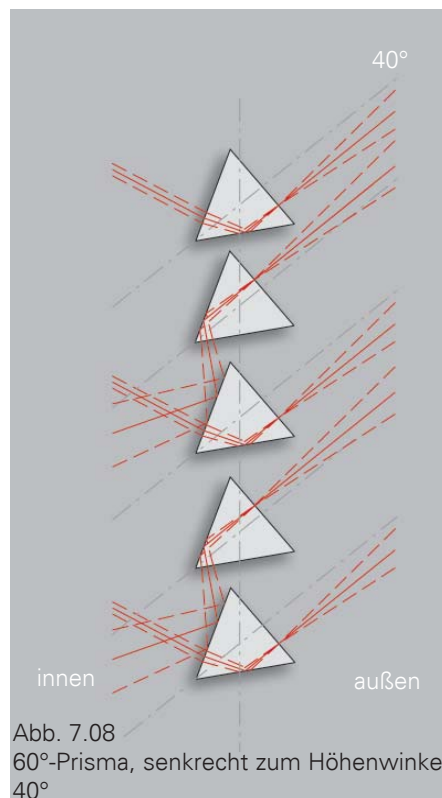
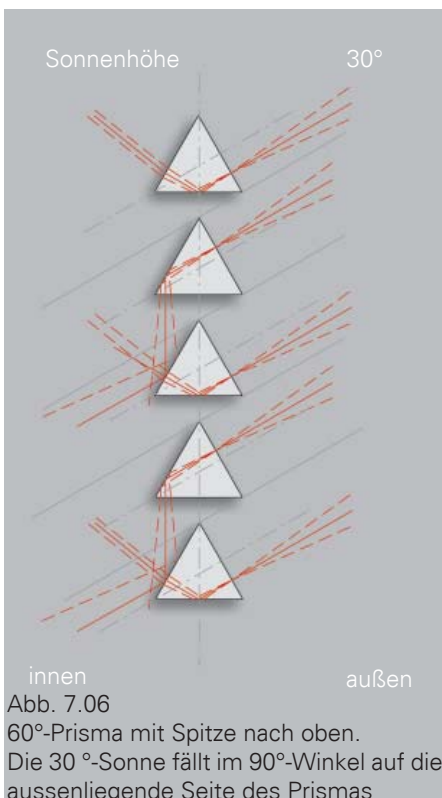


Abb. 7.03
Neue Profile

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

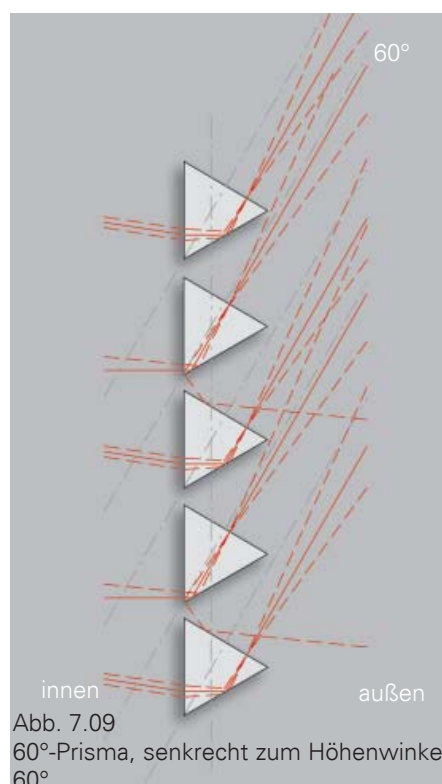
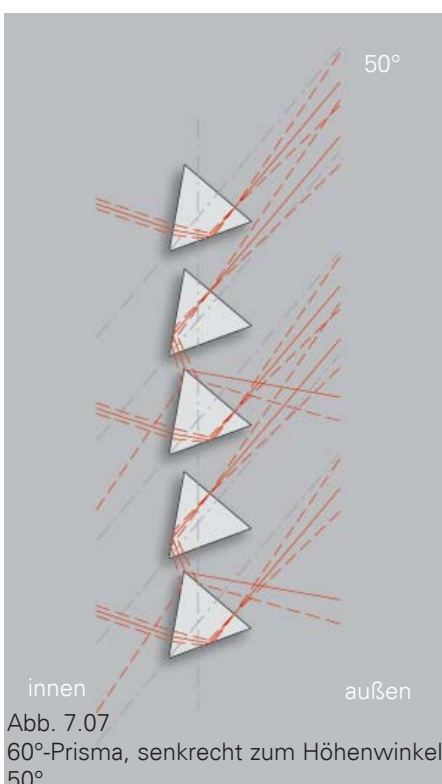
Strahlverfolgung

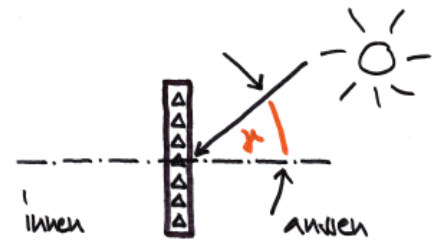


7.1.3 60° - Prisma

Die 60°-Prismen als nachgeführtes, also aktives System, werden in einachsiger Nachführung auf den Sonnenwinkel so eingestellt, dass die außenliegende Seite immer senkrecht zum einfallenden Höhenwinkel steht. Die Abb. 7.06 bis 7.09 zeigen, dass beim 60°-Prisma eine deutliche Lichtlenkung für alle Sonnenhöhen in die Raumtiefe stattfindet.

Leider ist der Winkel zwischen der auftreffenden 60°-Sonne und den Profilstellungen bei 30°, 40° und 50° jeweils höher als der für Glas geltende Winkel von 48° für Totalreflexion, so dass hier kein System vorliegt, das die steile 60° - Sonne ausblenden kann.





60°- Glasprisma Profilstellung



Abb. 7.10
Sonnenhöhe 15°

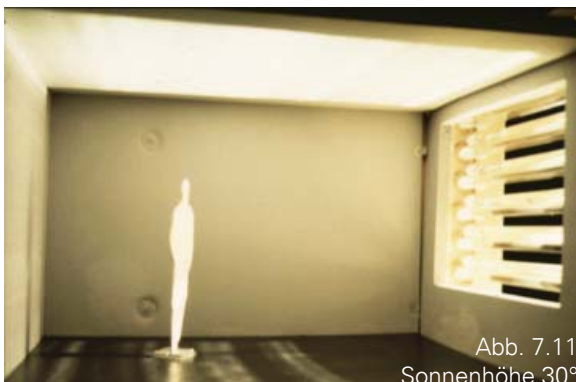


Abb. 7.11
Sonnenhöhe 30°



Abb. 7.12
Sonnenhöhe 45°

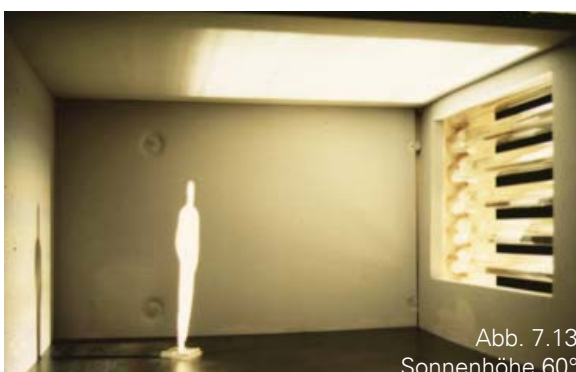


Abb. 7.13
Sonnenhöhe 60°

7.1.3.1 Einbausituation 1 Spitze nach oben - Lichtlenkung

Die Abbildungen 7.10 bis 7.13 zeigen die Effekte der Modelluntersuchungen in einer künstlichen Sonne für das 60°-Prisma, mit nach oben gerichteter Spitze.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimuthwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit 60° - Prisma, Spitze nach oben:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
5,5 / 5	6 / 5,5	7 / 3	6,5 / 3

Bei den Höhenwinkeln 15° und 30° ist eine deutliche Anhebung der natürlichen Ausleuchtung raumtiefer Bereiche über die Decke festzustellen. Hierdurch kann der Kunstlichteinsatz und damit auch der Stromverbrauch reduziert werden.

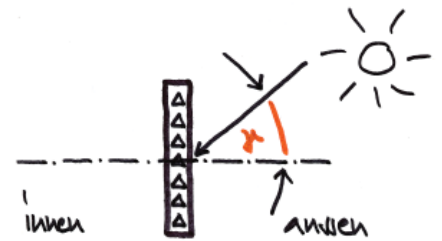
Die Profilstellung, 60°-Prisma mit Spitze nach oben, erreicht bei einer Sonnenhöhe von 30° die höchsten gemessenen Werte von den untersuchten Situationen.

Sonnenhöhe 15°/30°: deutliche Erhöhung der gemessenen Lichtwerte, sowohl vorne als auch hinten

Sonnenhöhe 45°: keine Verbesserung der Lichtsituation in der Raumtiefe

Sonnenhöhe 60°: geringe Erhöhung der gemessenen Lichtwerte, sowohl vorne als auch hinten

Versuchsreihe im Modellraum mit Oberlicht



60°- Glasprisma Profilstellung

Exemplarisch werden für diese Einbausituation unter der Sonnenhöhe von 15° und 60° die möglichen Belichtungen des Büroraumes über den Oberlichtbereich untersucht.

Die Abb. 7.15 lässt erkennen, dass das Lichtlenkelement in der Lage ist, das direkte Sonnenlicht bei steil stehender Sonne vollständig in Richtungen oberhalb der unteren Systemeinkante umzulenken, so dass keine Direktstrahlung auf die Arbeitsebene fällt.

Bei flach einfallender Sonne (s. Abb. 7.14) wird die untere Systemeinkante unterschritten, was auf die zu groß gewählten Profilabstände zurück zu führen ist.

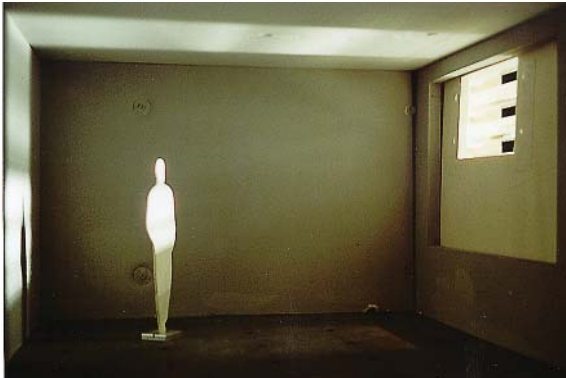
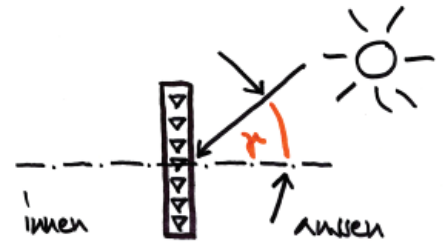


Abb. 7.14
Oberlichtsituation unter
Sonnenhöhe 15°



Abb. 7.15
Oberlichtsituation unter
Sonnenhöhe 60°



60°- Glasprisma Profilstellung

**7.1.3.2 Einbausituation 2
Spitze nach unten - Lichtlenkung**

Die Abbildungen 7.16 bis 7.19 zeigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen unter der künstlichen Sonne für das 60°-Prisma, mit nach unten gerichteter Spitze.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimuthwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.



Abb. 7.16
Sonnenhöhe 15°



Abb. 7.17
Sonnenhöhe 30°

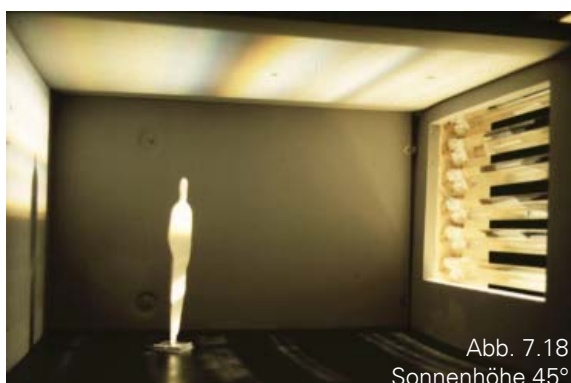


Abb. 7.18
Sonnenhöhe 45°



Abb. 7.19
Sonnenhöhe 60°

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit 60° - Prisma:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
6 / 5,5	5 / 5	5 / 3	4 / 2,5

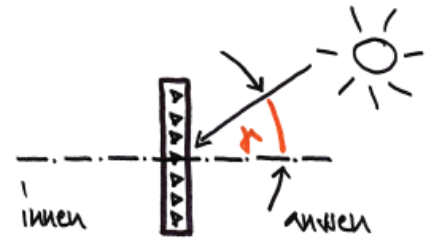
Bei den Höhenwinkeln 15° und 30° ist eine deutliche Anhebung der natürlichen Ausleuchtung raumtiefer Bereiche über die Decke festzustellen. Hierdurch kann der Kunstlichteinsatz und damit auch der Stromverbrauch reduziert werden.

Die Profilstellung, 60°-Prisma mit Spitze nach unten, erreicht bei einer Sonnenhöhe von 15° die höchsten gemessenen Werte von den untersuchten Situationen.

Sonnenhöhe 15°/30°: deutliche Erhöhung der gemessenen Lichtwerte, sowohl vorne als auch hinten

Sonnenhöhe 45°: keine Verbesserung der Lichtsituation

Sonnenhöhe 60°: Reduzierung der gemessenen Lichtwerte im vorderen Teil des Raumes durch das Fassadenelement



60°- Glasprisma Profilstellung

7.1.3.3 Einbausituation 3 Spitze nach innen gedreht - Lichtlenkung

Die Abbildungen 7.20 bis 7.23 zeigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen unter der künstlichen Sonne für das 60°-Prisma, mit um 20° nach innen gedrehter Spitze.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimutwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.



Abb. 7.20
Sonnenhöhe 15°



Abb. 7.21
Sonnenhöhe 30°



Abb. 7.22
Sonnenhöhe 45°



Abb. 7.23
Sonnenhöhe 60°

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit 60° - Prisma, Spitze nach innen:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
6,5 / 4,5	5 / 4	4,5 / 3	4 / 3

Fazit:

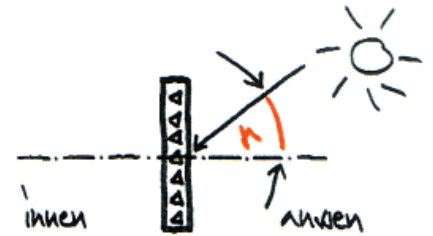
Bei den Höhenwinkeln 15° und 30° ist eine Anhebung der natürlichen Ausleuchtung vorne und hinten über die Decke festzustellen. Hierdurch kann der Kunstlicheinsatz und damit auch der Stromverbrauch reduziert werden.

Die Profilstellung, 60°-Prisma mit Spitze nach innen, erreicht bei einer Sonnenhöhe von 60° die ausgewogensten Werte von den untersuchten Situationen.

Sonnenhöhe 15°/30°: deutliche Erhöhung der gemessenen Lichtwerte, sowohl vorne als auch hinten

Sonnenhöhe 45°: keine Verbesserung der Lichtsituation

Sonnenhöhe 60°: gleichmäßigere und somit verbesserte Ausleuchtung des Büroraumes



60°- Glasprisma Profilstellung

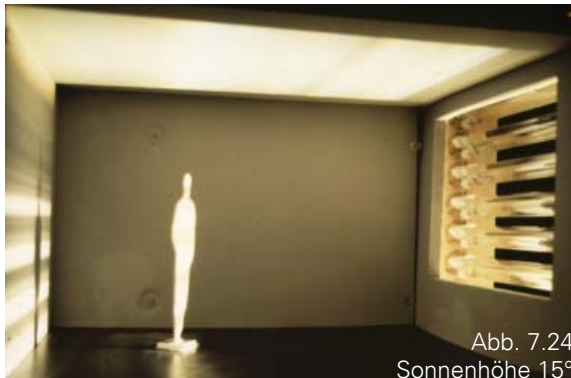


Abb. 7.24
Sonnenhöhe 15°

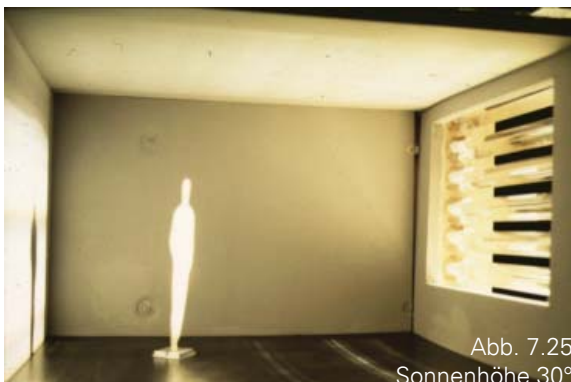


Abb. 7.25
Sonnenhöhe 30°

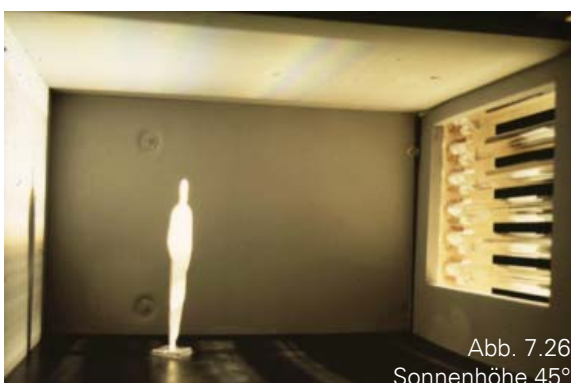


Abb. 7.26
Sonnenhöhe 45°



Abb. 7.27
Sonnenhöhe 60°

7.1.3.4 Einbausituation 4 Spitze nach außen gedreht - Lichtlenkung

Die Abbildungen 7.24 bis 7.27 zeigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen unter der künstlichen Sonne für das 60°-Prisma, mit um 20° nach außen gedrehter Spitze.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimutwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit 60° - Prisma, Spitze nach aussen:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4,5 / 5	5 / 4	5 / 3,5	4 / 3

Fazit:

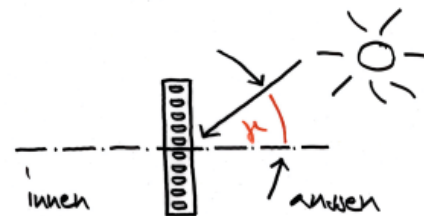
Bei allen Höhenwinkeln ist eine Anhebung der natürlichen Ausleuchtung raumtiefer Bereiche über die Decke festzustellen. Hierdurch kann der Kunstlichteinsatz und damit auch der Stromverbrauch reduziert werden.

Die Profilstellung, 60°-Prisma mit Spitze nach aussen, erreicht bei einer Sonnenhöhe von 15° die ausgewogensten Werte von den untersuchten Situationen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Einbausituation 4 die besten Ergebnisse erzielt. Die Raumausleuchtung ist hier über den Tag gesehen am gleichmäßigsten.

Sonnenhöhe 15°/30°: deutliche Erhöhung der gemessenen Lichtwerte, sowohl vorne als auch hinten

Sonnenhöhe 45°: Verbesserung der Lichtsituation hinten

Sonnenhöhe 60°: gleichmäßigere und somit verbesserte Ausleuchtung des Büroraumes



Glashalbzyylinder Profilstellung

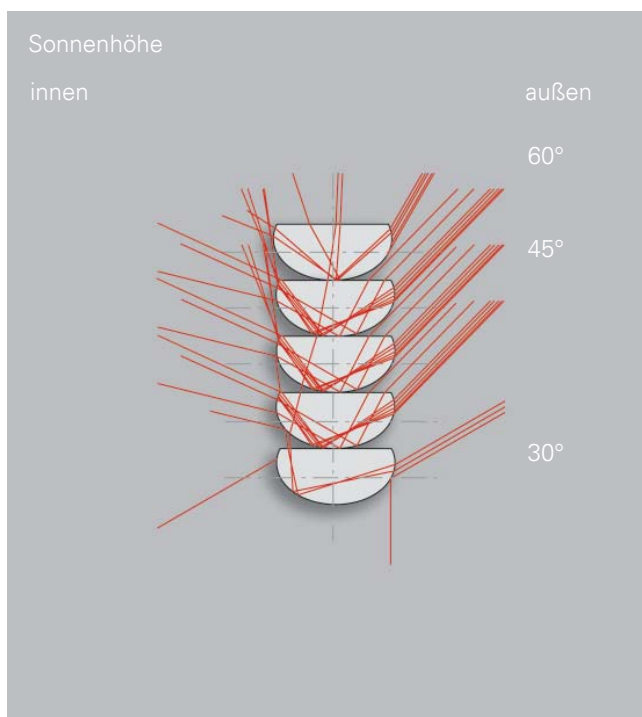


Abb. 7.28
Strahlverfolgung Glashalbzyylinder,
Höhenraster 15 mm

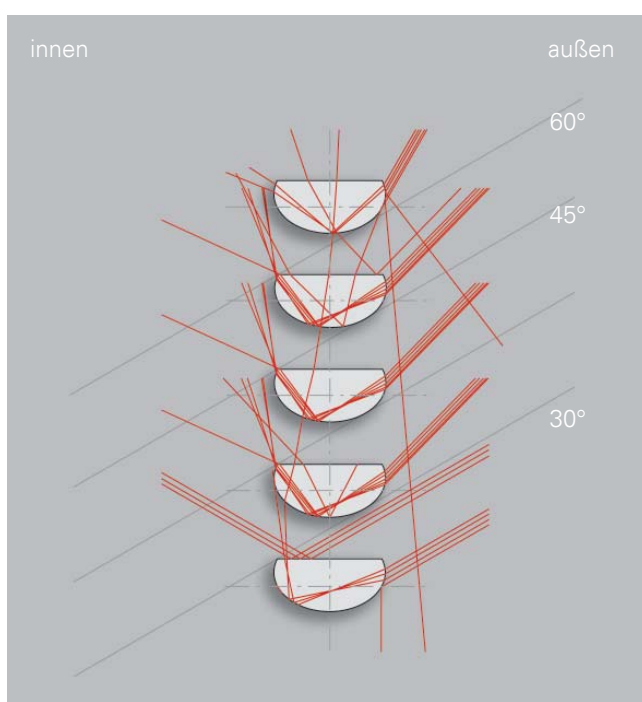


Abb. 7.29
Strahlverfolgung Glashalbzyylinder,
Höhenraster 30 mm

7.1.4 Glashalbzyylinder - Lichtlenkung

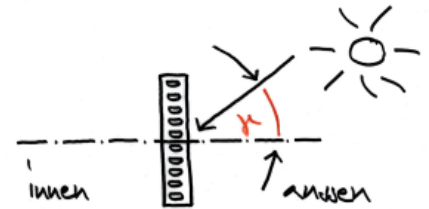
Abbildung 7.28 zeigt die Strahlenverfolgung bei den Einfallswinkeln 30°, 45° und 60° für das Profil Halbzyylinder aus Glas.

Die Profilrundung im Strahleneintrittsbereich wirkt wie eine Linse und fokussiert das einfallende Licht auf einen Brennpunkt, allerdings mit ungleichmäßiger Rundung. Das Licht wird danach durch Totalreflexion ins Rauminnere gelenkt.

Bei einem Höhenwinkel von 60° ist eine gute Lichtlenkwirkung ins Rauminnere erkennbar. Der Strahlenaustritt bei 45° ist zu steil, was auf die Profilrundung im Austrittsbereich zurückzuführen ist. Noch deutlicher wird dieser Effekt bei einem Höhenwinkel von 30°. Beim Strahlenaustritt aus dem Profil wird das Licht fast senkrecht zur Decke gebrochen.

Es besteht die Möglichkeit die Profile auf Abstand zu setzen ohne eine Verschlechterung der Wirkungsweise zu erhalten. Der Abstand der Profile wird durch die Sonnenhöhe von 30° definiert. Die auf die obere Fläche auftreffende Strahlung wird durch Totalreflexion ins Rauminnere gelenkt (s. Abb. 7.29).

Versuchsreihe im Modellraum



Glashalbzyylinder Profilstellung

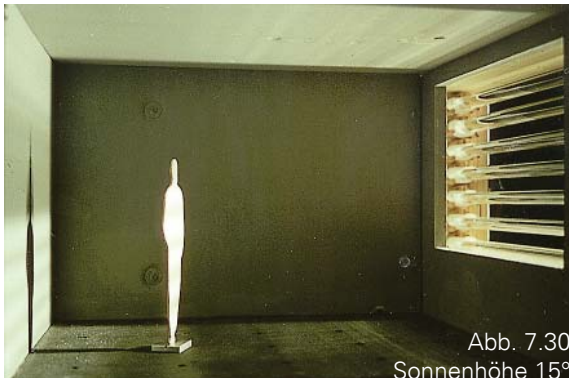


Abb. 7.30
Sonnenhöhe 15°



Abb. 7.31
Sonnenhöhe 30°



Abb. 7.32
Sonnenhöhe 45°



Abb. 7.33
Sonnenhöhe 60°

Die Abbildungen 7.30 bis 7.33 zeigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen unter der künstlichen Sonne für das Profil Halbzyylinder.

Das Höhenraster beträgt 30 mm.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimuthwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit dem Profil Halbzyylinder:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
6 / 5	4,5 / 4,5	5 / 4,5	5 / 4

Fazit:

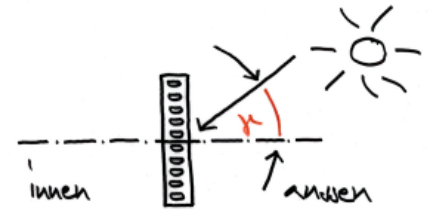
Bei allen vier simulierten Höhenwinkeln ist eine deutliche Anhebung der natürlichen Ausleuchtung raumtiefer Bereiche über die Decke festzustellen. Hierdurch kann der Kunstlichteinsatz und damit auch der Stromverbrauch reduziert werden.

Das Profil Halbzyylinder erzielt deutlich bessere Ergebnisse, sowohl vorne als auch hinten, als die Einbausituation 4 des 60°-Prismas.

Sonnenhöhe 15°/30°: deutliche Erhöhung der gemessenen Lichtwerte, sowohl vorne als auch hinten

Sonnenhöhe 45°/60°: Erhöhung der Lichtwerte v.a. in der Raumtiefe, somit gleichmäßigere Raumausleuchtung

Versuchsreihe im Modellraum mit Oberlicht



Glashalbzyylinder Profilstellung

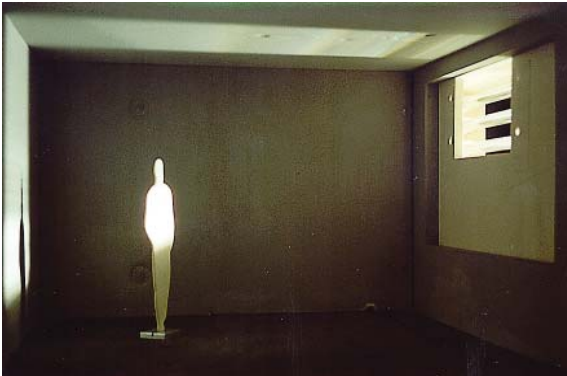


Abb. 7.34
Einbausituation Oberlicht bei einer Sonnenhöhe von 15°

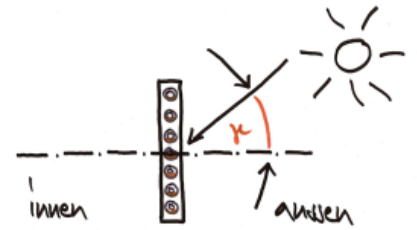
Exemplarisch werden in den Abbildungen 7.34 und 7.35 unter den Sonnenhöhen von 15° und 60° die möglichen Belichtungen des Büroraumes über den Oberlichtbereich gezeigt.

Die Abbildungen 7.34 und 7.35 lassen erkennen, dass das Lichtlenkelement in der Lage ist das direkte Sonnenlicht vollständig in Richtungen oberhalb der unteren Systemeinkante umzulenken, so dass keine Direktstrahlung auf die Arbeitsebene fällt, wodurch der visuelle Komfort der Arbeitnehmer und die damit verbundene Produktivität gesteigert wird.

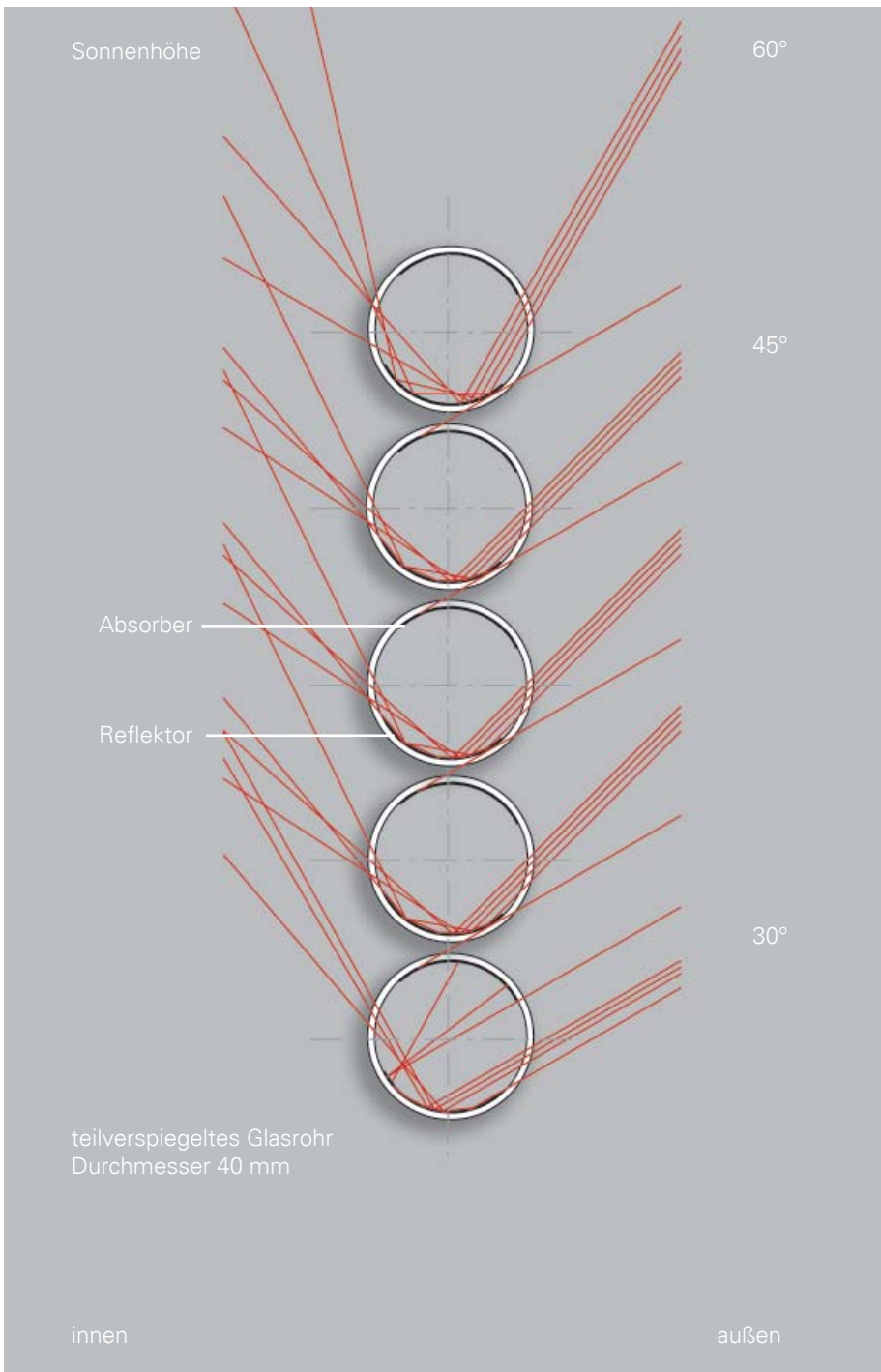


Abb. 7.35
Einbausituation Oberlicht bei einer Sonnenhöhe von 60°

Strahlverfolgung



Teilverspiegeltes Glasrohr Profilstellung



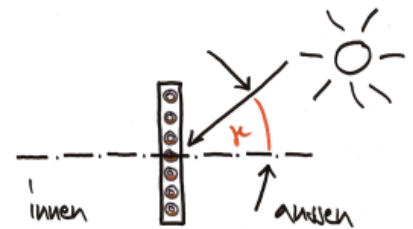
7.1.5 Teilverspiegeltes Glasrohr Lichtlenkung

Teilverspiegelte Glasrohre ermöglichen in horizontaler Anordnung eine gezielte Lichtlenkung in die Raumtiefe für alle in Abbildung 7.36 aufgezogenen Höhenwinkel.

Durch die Aufbringung der Verspiegelung innerhalb des Glasrohres wird diese vor Verschmutzung geschützt.

Der hier gewählte Glasrohrdurchmesser bedingt eine zusätzliche Anordnung eines Absorbers auf der gegenüberliegenden Seite des Reflektors, oder man nimmt in Kauf, dass ein gewisser Anteil der Strahlung direkt, ohne eine Lenkung zu erfahren, ins Rauminnere gelangt.

Abb. 7.36 Strahlverfolgung für das Profil teilverspiegeltes Glasrohr zur Lichtlenkung



Teilverspiegeltes Glasrohr Profilstellung



Abb. 7.37
Sonnenhöhe 15°

Die Abbildungen 7.37 bis 7.40 zeigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen unter der künstlichen Sonne für das Glasrohr mit Spiegelfolie.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimuthwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.

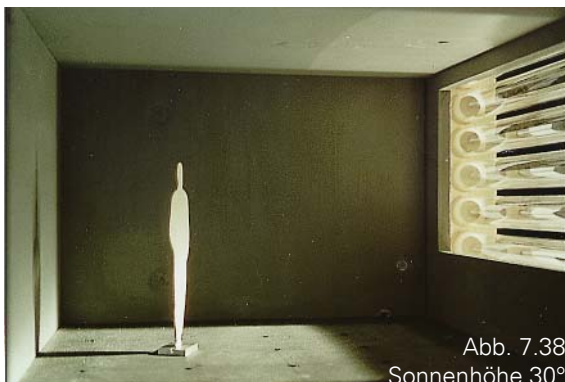


Abb. 7.38
Sonnenhöhe 30°

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit verspiegeltem Glasrohr:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4,5 / 4,5	4,5 / 3,5	5 / 3	5 / 4



Abb. 7.39
Sonnenhöhe 45°

Fazit:

Bei den Höhenwinkel 15°, 30° und 60° ist eine Anhebung der natürlichen Ausleuchtung raumtiefer Bereiche über die Decke festzustellen. Hierdurch kann der Kunstlichteinsatz und damit auch der Stromverbrauch reduziert werden.

Bemerkung: Herstellungstechnisch war es nicht möglich, die verspiegelte Fläche breiter auszuführen, wodurch die Ergebnisse im Vergleich zu der theoretischen Untersuchung schlechter ausfallen.



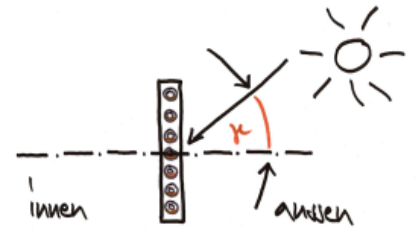
Abb. 7.40
Sonnenhöhe 60°

Sonnenhöhe 15°/30°: Erhöhung der gemessenen Lichtwerte, sowohl vorne als auch hinten

Sonnenhöhe 45°: keine Verbesserung der Lichtsituation

Sonnenhöhe 60°: Deutliche Erhöhung der gemessenen Lichtwerte in der Raumtiefe
Gleichmäßigere Raumausleuchtung und somit verbesserte Belichtungssituation

Versuchsreihe im Modellraum mit Oberlicht



Teilverspiegeltes Glasrohr Profilstellung

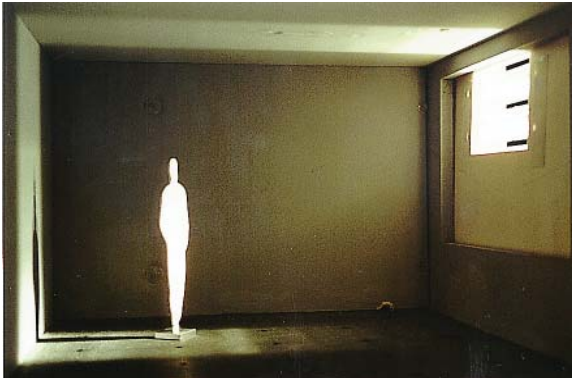


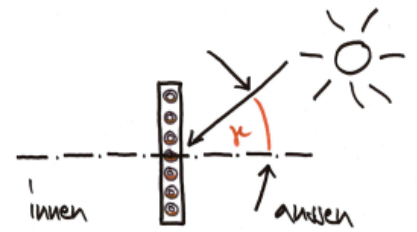
Abb. 7.41
Einbausituation Oberlicht bei einer Sonnenhöhe von 15°



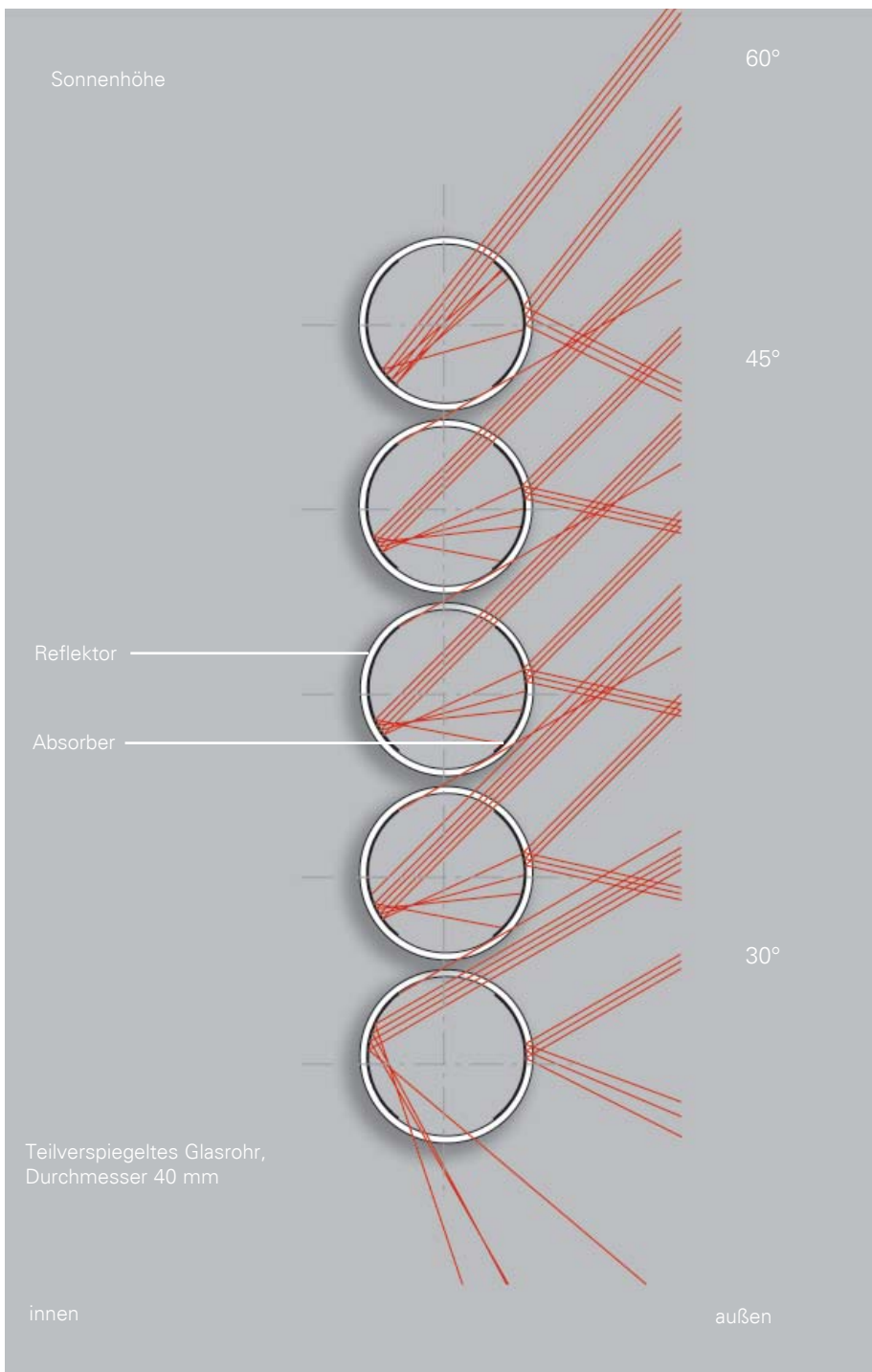
Abb. 7.42
Einbausituation Oberlicht bei einer Sonnenhöhe von 60°

Exemplarisch werden in den Abbildungen 7.41 und 7.42 unter der Sonnenhöhe von 15° und 60° die möglichen Belichtungen des Büroraumes über den Oberlichtbereich gezeigt. Die Abbildungen machen deutlich, dass das Lichtlenkelement einen zu hohen Anteil Direktstrahlung auf die Arbeitsfläche fallen lässt. Zusätzliche Blendschutzmaßnahmen, die den Effekt der Lichtumlenkung teilweise wieder aufheben, werden somit erforderlich.

Zu klären gilt, ob dieser Effekt auf die zu schmale Breite der verspiegelten und absorbierenden Flächen zurück zu führen ist, oder ob es grundsätzlich am System liegt.



Teilverspiegeltes Glasrohr Profilstellung



7.1.6 Teilverspiegeltes Glasrohr Sonnenschutz

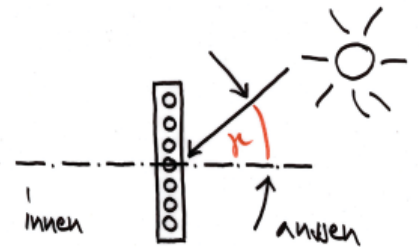
Das unter Punkt 7.1.5 beschriebene Profil wird nun auf seine Funktionstüchtigkeit als transparenter Sonnenschutz untersucht.

Dreht man die horizontal angeordneten verspiegelten Flächen um 90°, so erhält man einen gut funktionierenden Sonnenschutz, der zwischen den verspiegelten bzw. absorbierenden Flächen noch ausreichend diffuses Licht in das Rauminnere lässt. Bei der Anordnung in Abbildung 7.43 kann das System alle Höhenwinkel von 30° bis 60° ausblenden.

Auch hier gilt, dass die Verspiegelung und der Absorber im Inneren des Rohres geschützt vor Verschmutzung angeordnet sind.

Abb. 7.43
Strahlverfolgung für das Profil teilverspiegeltes Glasrohr als transparenter Sonnenschutz

Versuchsreihe im Modellraum



Teilverspiegeltes Glasrohr Profilstellung



Abb. 7.44
Sonnenhöhe 15°



Abb. 7.45
Sonnenhöhe 30°



Abb. 7.46
Sonnenhöhe 45°



Abb. 7.47
Sonnenhöhe 60°

Die Abbildungen 7.44 bis 7.47 zeigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen unter der künstlichen Sonne für den Vollstab aus Glas mit verspiegelter Fläche.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimutwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit verspiegeltem Vollstab:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
3 / 2	3 / 2	3 / 2	3 / 2

Fazit:

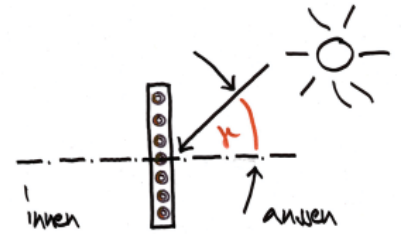
Bei allen Höhenwinkeln ist eine gut funktionierende Sonnenschutzwirkung bei gleichzeitiger Diffuslichtlenkung erkennbar. Ob die gemessenen Werte ausreichend sind, um auf einen Kunstlichteinsatz verzichten zu können, kann im Moment nicht beurteilt werden.

Sonnenhöhe 15°/30°: Sonnenschutzfunktion erfüllt

Sonnenhöhe 45°: Sonnenschutzfunktion eventuell durch zu große Abstände leicht beeinträchtigt

Sonnenhöhe 60°: Sonnenschutzfunktion erfüllt

Versuchsreihe im Modellraum mit Oberlicht



Teilverspiegeltes Glasrohr Profilstellung



Abb. 7.48
Einbausituation Oberlicht bei
einer Sonnenhöhe von 15°

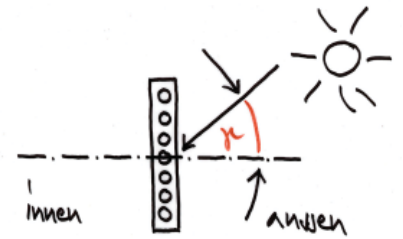


Abb. 7.49
Einbausituation Oberlicht bei
einer Sonnenhöhe von 60°

Exemplarisch werden in den Abbildungen 7.48 und 7.49 unter der Sonnenhöhe von 15° und 60° die Sonnenschutzwirkungen im Oberlichtbereich gezeigt.

Die Abbildungen machen deutlich, dass die Sonnenschutzfunktion auch bei der Einbausituation Oberlicht gut funktioniert. Auch hier findet eine Aufhellung der Decke statt.

Strahlverfolgung



Teilverspiegelter Glasstab Profilstellung

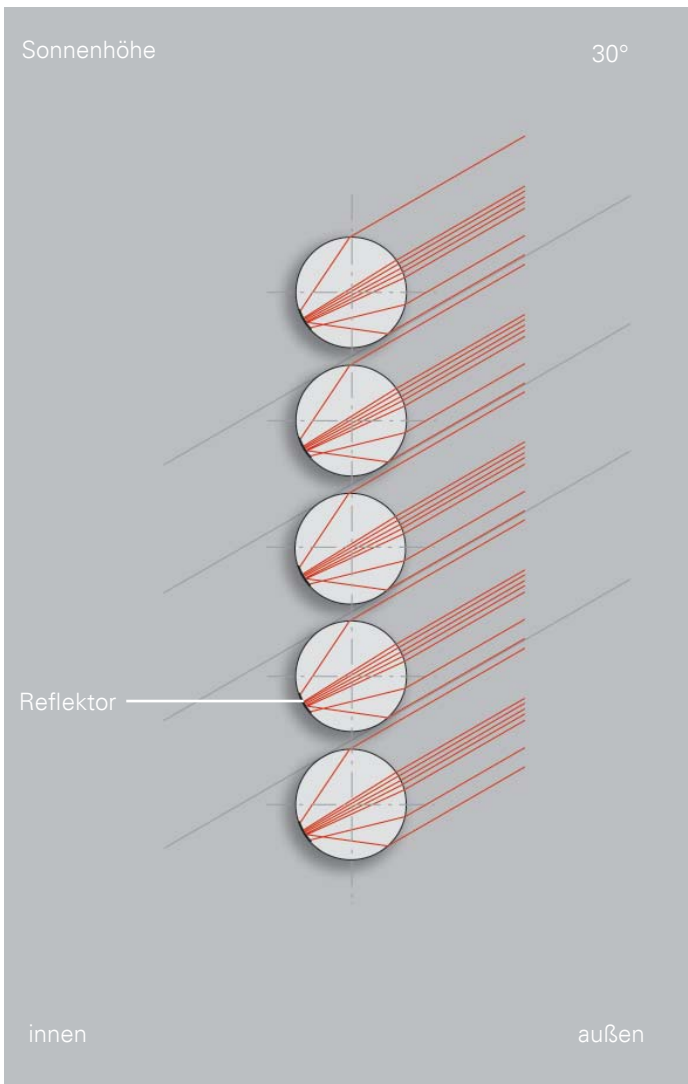


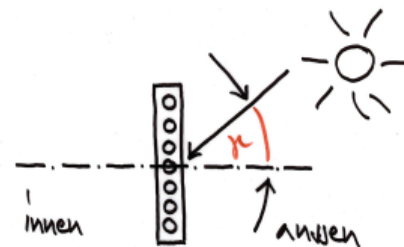
Abb. 7.50
Strahlverfolgung für das Profil
teilverspiegelter Glasstab

7.1.7 Teilverspiegelter Glasstab Sonnenschutz

Wie bei einer Linse, wird beim Profiltyp Glasstab die direkte Strahlung zu einem Punkt hin gebrochen, der sich außerhalb des Profils befindet. Der Bereich an welchem die Strahlen wieder aus dem Profil austreten würden, wird verspiegelt, so dass es wieder nach außen reflektiert wird, während das diffuse Licht den Raum immer noch beleuchten kann ohne zu blenden oder zu überhitzen. Der teilverspiegelte Glasstab wirkt als transparenter Sonnenschutz.

Werden die Stäbe nachführbar gelagert kann die verspiegelte Fläche sehr klein ausfallen, da durch den Linseneffekt die Strahlung zur Mitte hin gebrochen wird.

Versuchsreihe im Modellraum



Teilverspiegelter Glasstab Profilstellung



Abb. 7.51
Sonnenhöhe 15°



Abb. 7.52
Sonnenhöhe 30°



Abb. 7.53
Sonnenhöhe 45°



Abb. 7.54
Sonnenhöhe 60°

Die Abbildungen 7.51 bis 7.54 zeigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen unter der künstlichen Sonne für den Vollstab aus Glas mit verspiegelter Fläche.

Der Höhenwinkel der Sonne variiert zwischen 15° und 60°. Im Azimutwinkel steht die Sonne normal auf der Fassade. Die Profile werden nicht nachgeführt.

Gemessene Werte im Modellraum ohne Lichtlenkelement:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
4 / 4	4 / 3	5 / 3	6 / 2

Gemessene Werte im Modellraum mit verspiegeltem Vollstab:

15°	30°	45°	60°
vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten	vorne / hinten
3 / 2	3 / 2	3 / 2	3 / 2

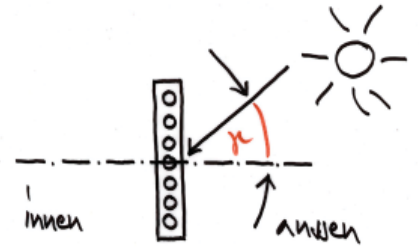
Fazit: Bei allen Höhenwinkeln ist eine gut funktionierende Sonnenschutzwirkung bei gleichzeitiger Diffuslichtlenkung erkennbar. Ob die gemessenen Werte ausreichend sind, um auf einen Kunstlichteinsatz verzichten zu können, kann im Moment nicht beurteilt werden.

Sonnenhöhe 15°: Sonnenschutzfunktion erfüllt

Sonnenhöhe 30°/45°: Sonnenschutzfunktion erfüllt

Sonnenhöhe 60°: Sonnenschutzfunktion erfüllt

Versuchsreihe im Modellraum mit Oberlicht



Teilverspiegelter Glasstab Profilstellung



Abb. 7.55
Einbausituation Oberlicht bei
einer Sonnenhöhe von 15°

Exemplarisch werden in den Abbildungen 7.55 und 7.56 unter der Sonnenhöhe von 15° und 60° die Sonnenschutzwirkungen im Oberlichtbereich gezeigt.

Die Abbildungen machen deutlich, dass die Sonnenschutzfunktion auch bei der Einbausituation Oberlicht gut funktioniert. Auch hier findet eine Aufhellung der Decke statt.



Abb. 7.56
Einbausituation Oberlicht bei
einer Sonnenhöhe von 60°

7.2 Neues Profil 90° - Prisma Strahlverfolgung

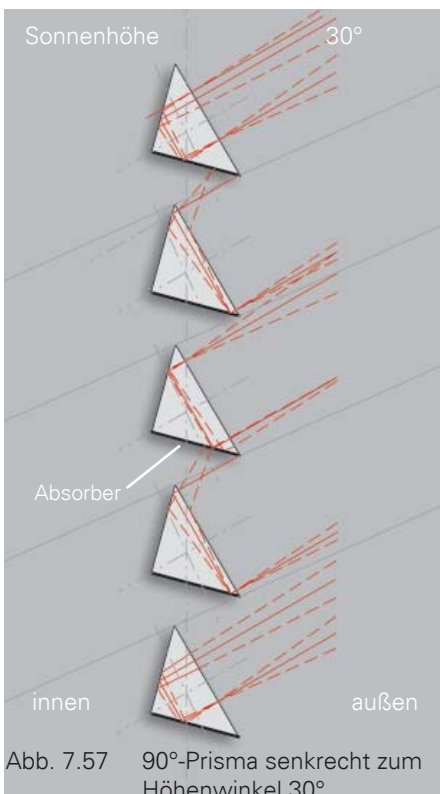


Abb. 7.57 90°-Prisma senkrecht zum Höhenwinkel 30°

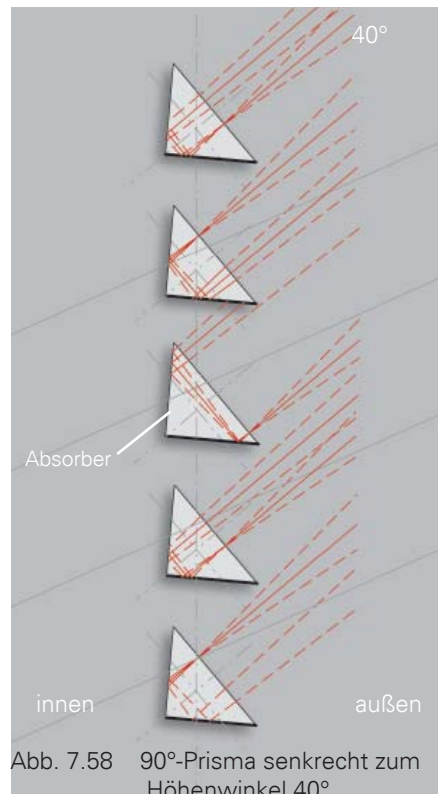


Abb. 7.58 90°-Prisma senkrecht zum Höhenwinkel 40°

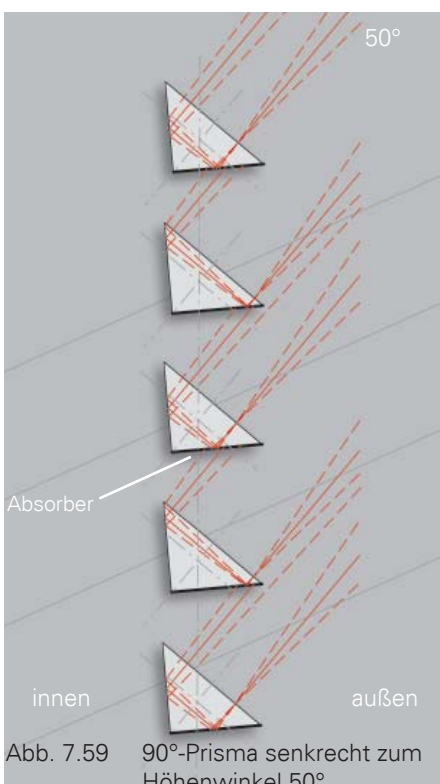


Abb. 7.59 90°-Prisma senkrecht zum Höhenwinkel 50°

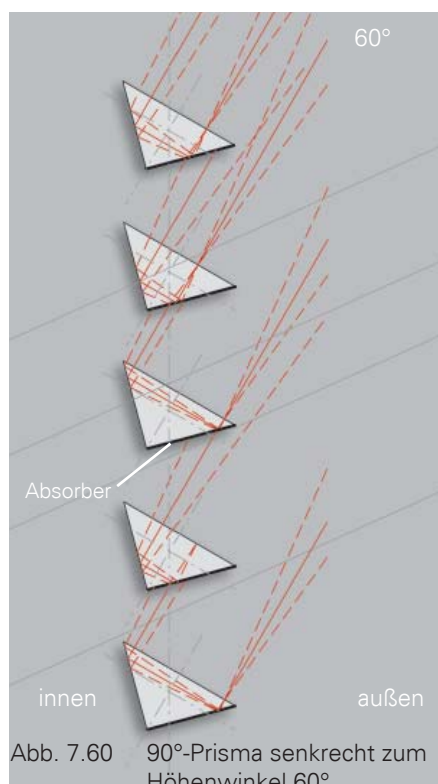


Abb. 7.60 90°-Prisma senkrecht zum Höhenwinkel 60°

7.2.1 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz

Bei den Untersuchungen des 60°-Prismas fiel auf, dass es nicht möglich ist, die auf das Prisma treffende Strahlung durch Totalreflexion wieder nach außen zu reflektieren, sobald diese im Prisma verläuft und somit als transparenter Sonnenschutz funktionieren zu können. Deshalb wurde den weiteren Untersuchungen ein 90°-Prisma zu Grunde gelegt, das es allerdings im momentanen Sortiment von Schott nicht gibt.

90° - Prisma:

Die 90° - Prismen als nachgeführtes, also aktives System werden in einachsiger Nachführung auf den Sonnenwinkel so eingestellt, dass die auftreffende Strahlung im 90°-Winkel einfällt. In den Abbildungen 7.57 bis 7.60 stellt die rote Linie die entsprechenden Sonnenstrahlen dar. Der Sperrbereich beträgt +/- 2,2° bezogen auf den momentanen Höhenwinkel und wird mit roter, gestrichelter Linie dargestellt.

Durch die vertikale Anordnung übereinander wird an der horizontalen Kathetenfläche ein Absorber notwendig, damit das vom darunter liegenden Prisma total reflektierte Licht nicht als von außen wahrgenommene Blendung erscheint.

Die so ausgerichteten Prismen reflektieren durch zweimalige Reflexion das direkte Sonnenlicht zurück, lassen aber diffuses Tageslicht aus anderen Richtungen in den Raum. Dieses System erfüllt also die Forderung nach dem winkelselektiven Sonnenschutz.

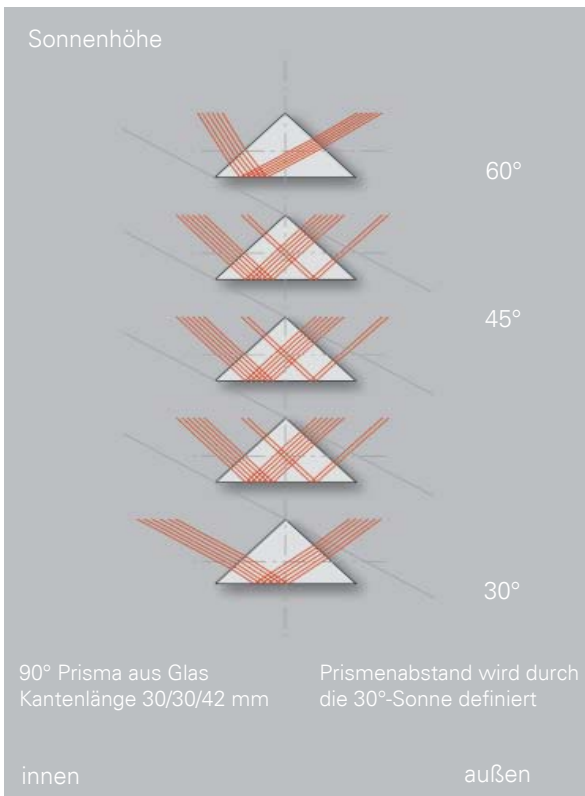


Abb. 7.61
90°-Prisma senkrecht über einander zur Lichtlenkung bei unterschiedlichen Sonnenhöhen

7.2.2 90° - Prisma zur Lichtlenkung

Nachfolgend soll das 90°-Prisma auf seine Tauglichkeit zur Lichtlenkung untersucht werden. Hierfür werden die 90°- Prismen aus Glas senkrecht übereinander angeordnet. Der Abstand zwischen den Profilen wird durch die Sonnenhöhe von 30° bestimmt. Bei einer Kantenlänge von 30 mm Katheten- und 42 mm Hypotenusenlänge ist die Fuge zwischen den Profilen 12 mm groß. Dadurch erhält man eine Teildurchsicht.

Die Lichtlenkung funktioniert für alle Höhenwinkel annähernd gleich gut. Auch die hoch stehende Sommer-sonne wird in die Raamtiefe gelenkt, was zu einer Erhöhung der Kühl-lasten führt.

Ab dem Höhenwinkel 45° wird ein Teil der aus dem Prisma austretenden Strahlung an der Hypothense des darüber liegenden Profils nach unten in den Raum gebrochen. Dadurch kann es zu Blendungen kommen.

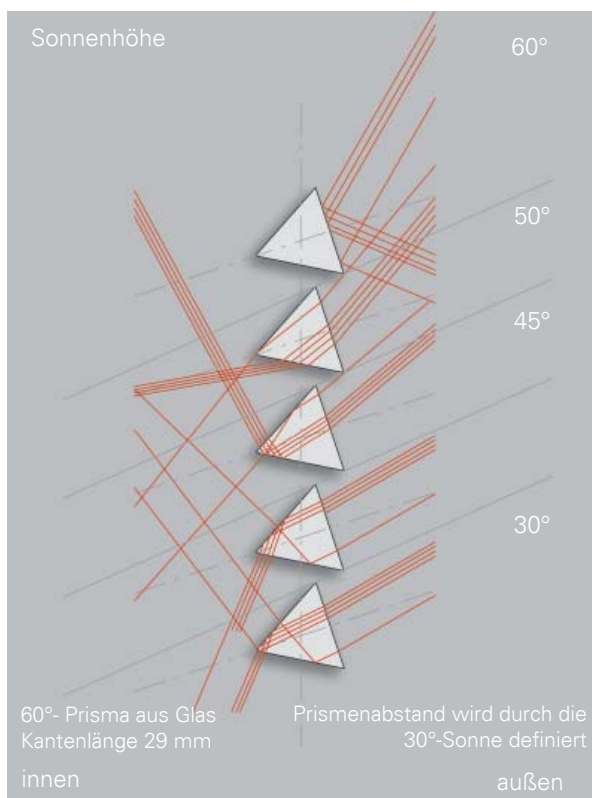


Abb. 7.62
60°-Prisma um 13° aus der Vertikalen gedreht, starr eingebaut

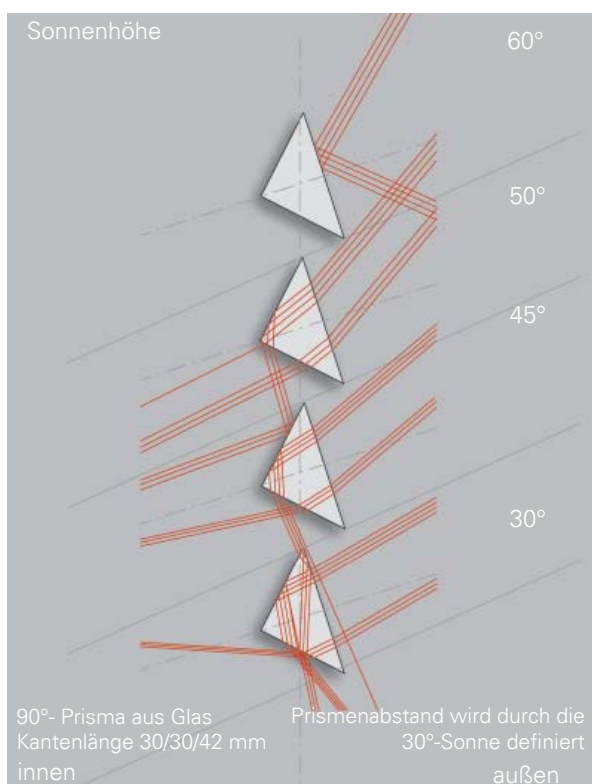


Abb. 7.63
90°-Prisma um 18° aus der Vertikalen gedreht, starr eingebaut

7.2.3 60°- und 90°-Prismen als winkelselektiver Sonnenschutz

Da nachführbare Systeme in der Anschaffung und Wartung kostenintensiver sind als starre Systeme werden nachfolgend starre Einbausituationen der 60°- und 90°-Prismen im Vergleich untersucht.

Ziel ist ein winkelselektiver Sonnenschutz, der die energiereiche Sommersonne ausblendet und die niedrigen Sonnenstände hindurch lässt.

60° - Prismen

Die 60°-Prismen werden senkrecht übereinander angeordnet und starr gelagert.

Bei einer Drehung des Profiles um ca. 13° aus der vertikalen Achse erhält man ein System, welches als winkelselektiver Sonnenschutz funktioniert. Die steil stehende Sommersonne wird durch Totalreflexion ausgeblendet, alle anderen niedrigeren Höhenwinkel werden durch Lichtbrechung und Totalreflexion in das Rauminnere gelenkt. Eine besonders gute Lichtlenkung findet bei einem Höhenwinkel von 45° statt. Der Abstand der Profile wird so festgelegt, dass die 30°-Sonne immer auf ein Profil trifft.

90° - Prismen

Die 90°-Prismen werden senkrecht übereinander angeordnet und starr gelagert. Dreht man die Hypotenuse des Prismas um ca. 18° aus der Vertikalen so erhält man ein System, welches als transparenter, winkelselektiver Sonnenschutz funktioniert.

Die hoch stehende Sommersonne wird an der Hypotenuse totalreflektiert wodurch eine Überhitzung im Sommer vermieden wird.

Die untersuchten Höhenwinkel bis 45° sowie das diffuse Licht werden durch Lichtbrechung ins Rauminnere gelenkt. Diese können allerdings aufgrund ihrer Richtung zu Blendung führen. Der Abstand der Profile wird durch die 30°-Sonne festgelegt.

Strahlverfolgung bei starrem Einbau

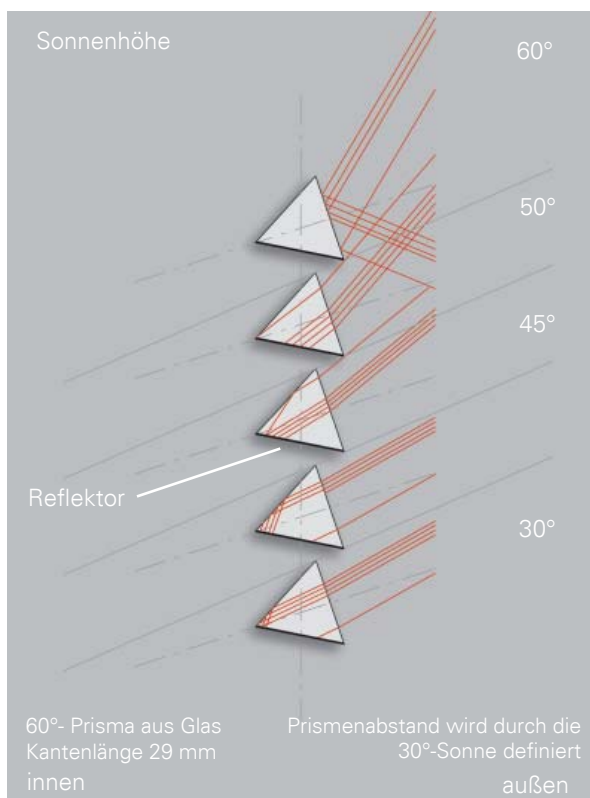


Abb. 7.64
60°-Prisma um 18° aus der Vertikalen gedreht, starr eingebaut

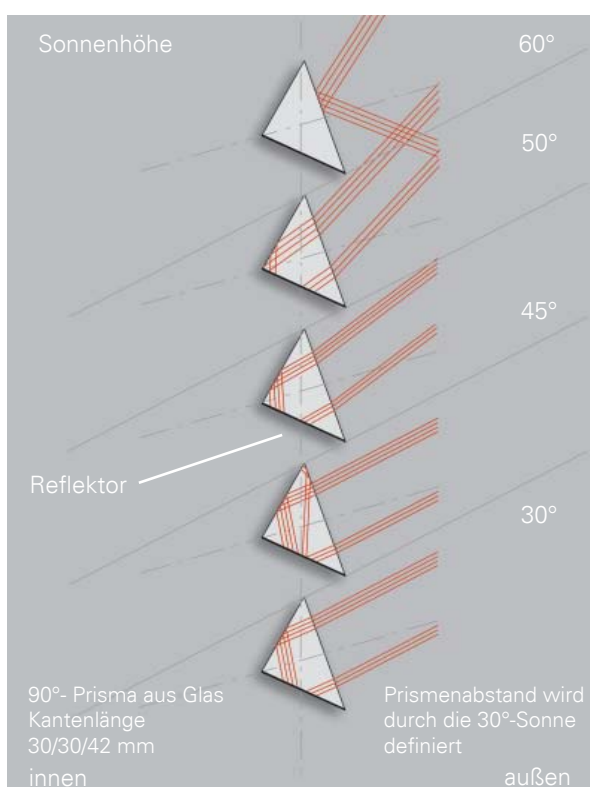


Abb. 7.65
90°-Prisma um 18° aus der Vertikalen gedreht, starr eingebaut

7.2.4 60°- und 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz

Die Strahlverfolgung in 7.2.3 zeigt, dass bei niedrigeren Sonnenhöhen die Strahlen über die untere Kathete bzw. untere Seite des 60°-Prismas wieder eingekoppelt werden. Durch die Passivierung dieser Profelseite kann ein transparenter Sonnenschutz für alle Sonnenhöhen erzielt werden.

60° - Prismen

Die 60°-Prismen werden senkrecht übereinander angeordnet und starr gelagert. Die untere Profelseite wird mit einem Reflektor versehen.

Bei einer Drehung des Profiles um ca. 13° aus der vertikalen Achse erhält man ein System, welches als transparenter Sonnenschutz funktioniert.

Die steil stehende Sommersonne wird durch Totalreflexion ausgeblendet, alle anderen niedrigeren Höhenwinkel werden mit Hilfe des Reflektors nach außen gespiegelt.

90° - Prismen

Die 90°-Prismen werden senkrecht übereinander angeordnet und starr gelagert.

Die Hypotenuse des Prismas wird, wie beim winkelselektiven Sonnenschutz, um ca. 18° aus der Vertikalen gedreht.

Die nach unten orientierte Kathete wird mit einem Reflektor versehen, so dass die komplette Direktstrahlung ausgeblendet und nur noch diffuses Licht ins Rauminnere gelangen kann.

Dieses System funktioniert perfekt als starrer, transparenter Sonnenschutz.

7.3 Vergleich zwischen existierenden Lichtlenksystemen und Schott-Profilen

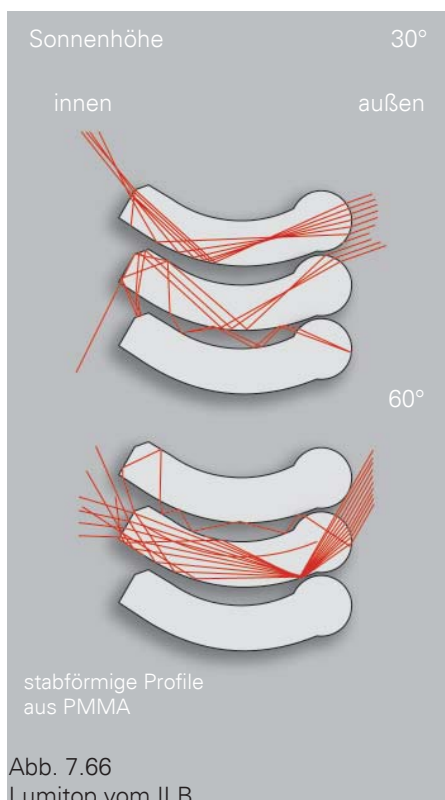


Abb. 7.66
Lumitop vom ILB

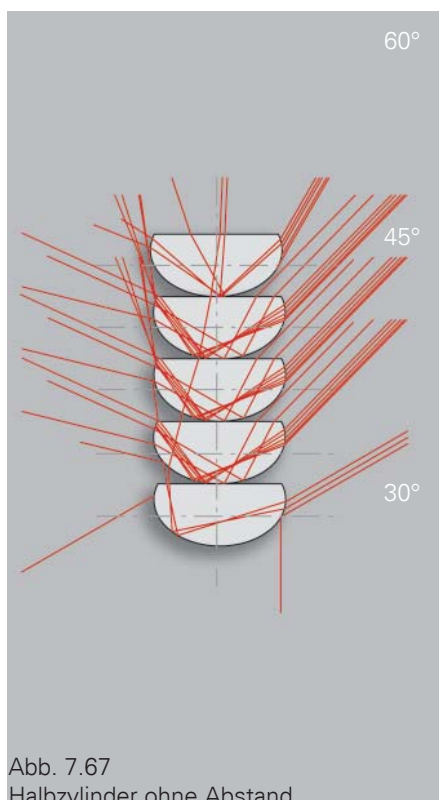


Abb. 7.67
Halbzyylinder ohne Abstand

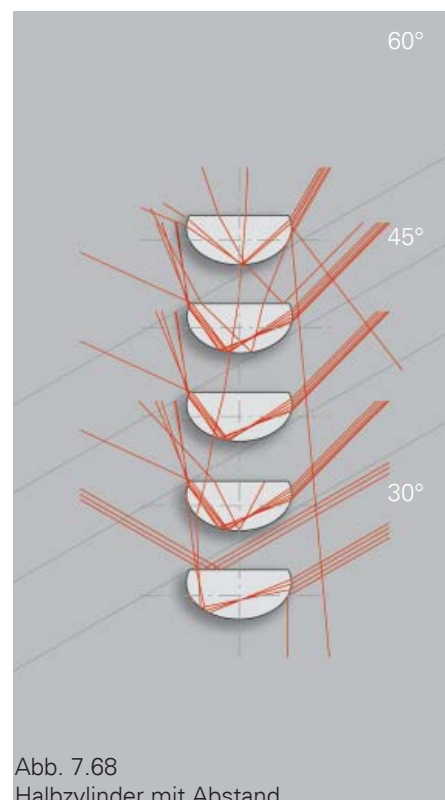


Abb. 7.68
Halbzyylinder mit Abstand

7.3.1 Halbzyylinder aus Glas im Vergleich mit Lumitop

Acryl-Umlenkprofil, Lumitop:

Vom Institut für Licht- und Bautechnik (ILB) an der Fachhochschule Köln wurde ein Lichtumlenksystem aus stabförmigen Profilen aus PMMA entwickelt. Die linke Abbildung zeigt die Strahlverfolgung bei den Sonnenhöhen 30° und 60°. Aus einer Richtung einfallendes Licht wird mit Hilfe einer Linse auf einen Brennpunkt fokussiert und fällt dann auf die gekrümmte totalreflektierende Fläche. Durch die Krümmung der Reflexionsfläche entsteht ein sogenanntes konfokales System, d.h. das ausfallende Licht ist wieder annähernd parallel. Dies ist im Prinzip ein paraxialer Ansatz. Es zeigt sich, dass die Strahlen, die die Mitte der Linse treffen, sich nach diesem Prinzip verhalten. Werden die Elemente aber gestapelt,

fallen auch viele Strahlen an den Rändern der Linse ein. Diese Strahlen verhalten sich nicht nach dem obigen Prinzip, da sie nicht durch den Brennpunkt verlaufen. Die Umlenkung im Winkelbereich zwischen 20° und 70° ist sehr gut. Ein gewisser Anteil wird allerdings auch in alle Raumrichtungen gestreut.

Halbzyylinder aus Glas:

Die Abbildungen 7.65 und 7.66 zeigen mit Hilfe der Strahlverfolgung bei den Einfallswinkeln von 30°, 45° und 60° die Lichtbrechung des Profils Halbzyylinder. Die Profiltrümmung im Strahleneintrittsbereich wirkt ähnlich wie bei Lumitop wie eine Linse und fokussiert das einfallende Licht auf einen Brennpunkt. Allerdings fehlt die gleichmäßige Rundung. Das Licht wird danach ebenfalls durch Totalreflexion ins Rauminnere gelenkt.

Bei einem Höhenwinkel von 60° ist eine gute Lichtlenkwirkung ins Rauminnere erkennbar. Der Strahlenaustritt bei 45° ist zu steil, was auf die ebenfalls vorhandene Rundung im Austrittsbereich zurückzuführen ist. Noch deutlicher wird dieser Effekt bei einem Höhenwinkel von 30°. Beim Strahlenaustritt aus dem Profil wird das Licht fast senkrecht zur Decke gebrochen.

Es besteht die Möglichkeit, die Profile auf Abstand zu setzen, ohne eine Verschlechterung der Wirkungsweise zu erhalten. Der Abstand der Profile wird durch die Sonnenhöhe 30° definiert. Die auf die obere Fläche auftreffende Strahlung wird durch Totalreflexion ins Rauminnere gelenkt.

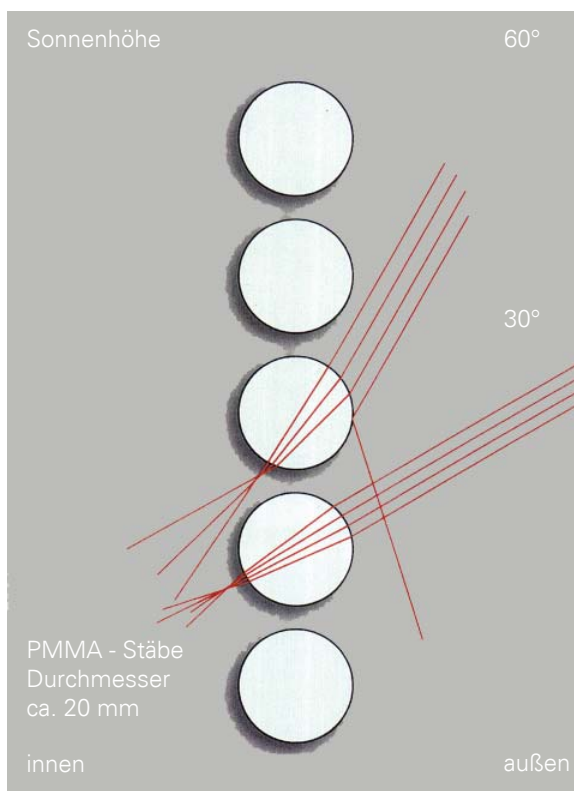


Abb. 7.69
ECOSS D von Figla

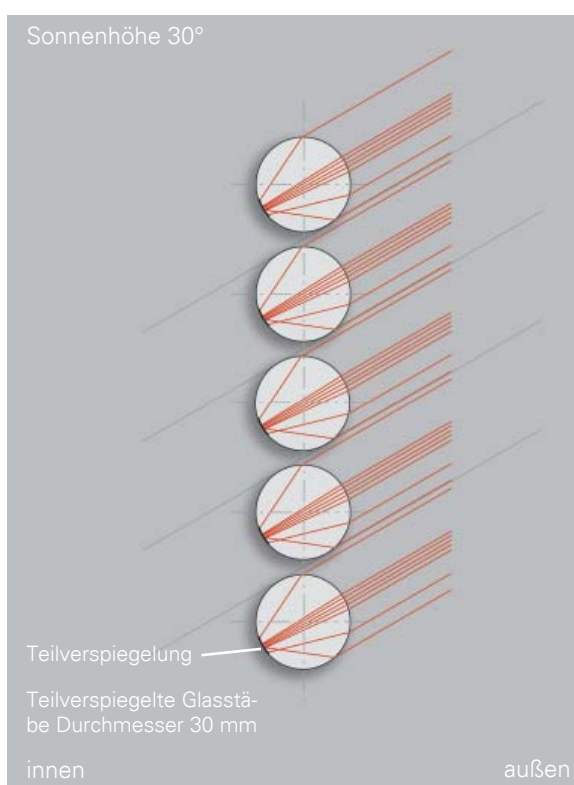


Abb. 7.70
Teilverspiegelte Glasstäbe
von Schott

7.3.2 Teilverspiegelte Glasstäbe im Vergleich mit ECOSS D

ECOSS D (Ecology Sun System; D = -diffusion) :

Die Acrylstäbe der Firma Figla sind senkrecht übereinander im Scheibenzwischenraum angeordnet. Lichtstrahlen aus beliebigen Einfallswinkeln werden in diffuses Licht mit gleichmäßiger Helligkeitsverteilung verwandelt. Die dem Luftzwischenraum zugewandte Oberfläche der inneren Scheibe ist mattgeätzt und fungiert als Diffusor. Es ist keine gezielte Lichtlenkung möglich. Blendung ist nicht auszuschließen. Die Wärmestrahlung wird durchgelassen. Das System eignet sich für Verglasungen, Oberlichter in Galerien, Museen, Konferenzhallen oder Industriebauten.

Teilverspiegelte Glasstäbe:

Das direkte Sonnenlicht wird auf die Teilbeschichtung gelenkt während das diffuse Licht den Raum immer noch beleuchten kann ohne zu blenden oder zu überhitzen. Werden die Stäbe nachführbar gelagert kann die verspiegelte Fläche sehr klein ausfallen, da durch den Linseneffekt die Strahlung zur Mitte hin gebrochen wird.

Durch die Anordnung der Teilverspiegelung ändert sich die Funktionsweise im Vergleich zu ECOSS D. Die Glasstäbe funktionieren als transparenter Sonnenschutz.

7.3.3 90°-Prisma im Vergleich mit Prismenplatten von Hüppe

Sonnenschutzprismen aus Acryl von Hüppe:

Die PMMA-Platten als nachgeführtes, also aktives System, bestehend aus 90°-Prismenstäben, werden in einachsiger Nachführung auf den Sonnenwinkel eingestellt. Der Sperrbereich beträgt +/- 5,8° bezogen auf den momentanen Sonnstandswinkel. Die so ausgerichteten Platten reflektieren durch zweimalige Totalreflexion das direkte Sonnenlicht zurück, lassen aber diffuses Tageslicht aus anderen Richtungen in den Raum. Dieses System erfüllt also die Forderung eines winkelselektiven Sonnenschutzes. Die Funktionsweise ist in Abb. 7.71 dargestellt. Hierbei wurde das Element beispielhaft auf einen Winkel von 45° ausgerichtet. Das Licht wird durch die Prismen umgelenkt. Die PMMA-Platten kommen auch als feststehendes System mit verspiegelter Flanke zum Einsatz. Die einfallenden Lichtstrahlen werden von der verspiegelten Flanke reflektiert und entsprechend umgelenkt bzw. zurückreflektiert, diffuses Licht wird durchgelassen. Dieses Element kommt in der Regel nur bei Dachverglasungen zum Einsatz.

Lichtlenkung:

Lichtlenkung der transmittierten diffusen Himmelsstrahlung und der tiefstehenden Sonne erfolgt über eine vertikal angeordnete Prismenplatte mit der rauhen Seite der Sonne zugewandt.

90° - Prismen aus Glas:

Werden die 90°-Prismen senkrecht übereinander, einachsrig nachführbar gelagert, so erzielt man eine vergleichbare Wirkung, wie bei den oben beschriebenen PMMA-Platten. Auf der Unterseite der horizontal liegenden Kathete wird ein Absorber notwendig, um Blendungserscheinungen im Außenbereich zu vermeiden.

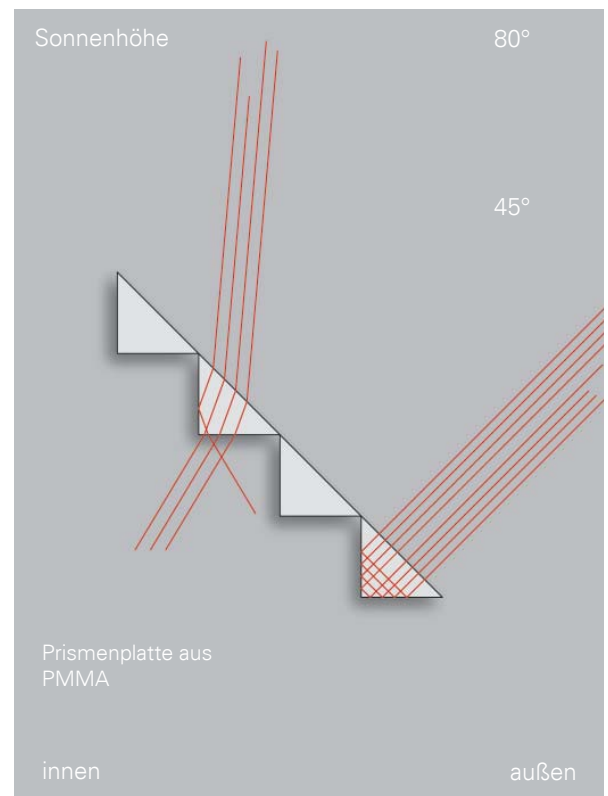


Abb. 7.71
Prismenplatten von Hüppe

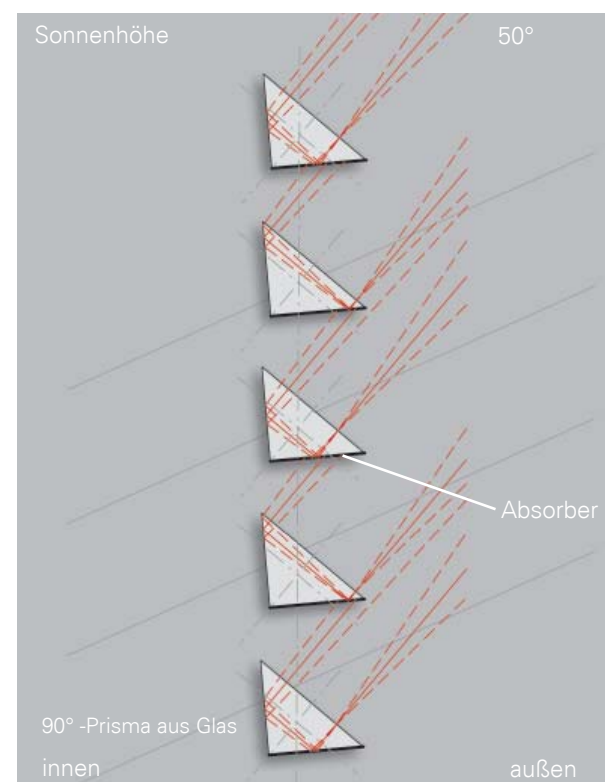


Abb. 7.72
90°-Prisma aus Glas von Schott

7.4 Absorber/Reflektor/Antischmutzbeschichtung

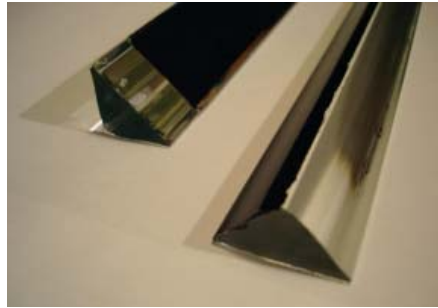


Abb. 7.73
Mit Folie (links) und Lack (rechts) beschichtete Glasprofile

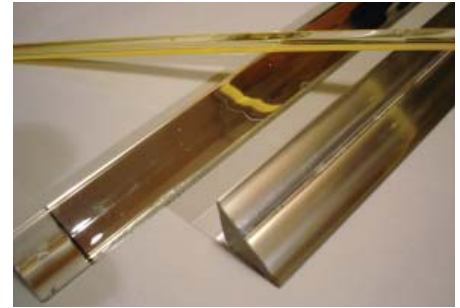


Abb. 7.74
Unterschiedliche Reflektionseigenschaften mit Folie (links) und Lack

7.4.1 Allgemein

Versucht man das Problem der Wiedereinkoppelung von Licht durch die Beschichtung der über dem Profil liegenden Kathete zu vermeiden, gilt es folgendes zu beachten:

- Ist die Absorberschichtdicke kleiner als 200 Nanometer, so findet im Profil noch eine Totalreflexion statt.
- Das Licht muss "spüren", dass das Glas an Luft grenzt. Dafür reichen 500 Nanometer Zwischenraum z.B. zwischen Profil und Absorberfolie.
- Eine weitere Möglichkeit könnte eine Doppelfolie sein.

7.4.2 Folien

In Zusammenarbeit mit der Firma 3M wird eine Möglichkeit entwickelt, den Absorber mit Hilfe einer Kunststoffolie herzustellen.

Es sind zunächst zwei Varianten möglich:

- Es wird eine schwarze, absorbierende Folie mit einem Luftpolster von mindestens 500 Nanometer aufgebracht. Der Luftzwischenraum wird durch eine dünne Rasterfolie erreicht, die nur punktuelle Verbindungen zwischen Absorber und Glas schafft. Auf diese Art und Weise wird die Reflexionsfähigkeit des Glases nicht eingeschränkt.
Die Problematik dieser Variante liegt darin, dass der Luftzwischenraum durch Kapillarwirkung Wasser ansaugt und dadurch die optischen Eigenschaften des Prismas verändert.

Die zweite Variante besteht in

einem Verbund aus Spiegelfolie und Absorberfolie.

Zunächst wird mit einem optisch klaren Klebstoff eine hochreflektierende Folie aufgebracht. Darauf wird eine schwarze, absorbierende

Kunststoffolie geklebt.

7.4.3 Lacke

Die Absorberfläche kann in Form einer Lackierung mit schwarzer Farbe erfolgen. Auch wenn der Reflexionsgrad der einzelnen Lacke im einzelnen noch genauer betrachtet werden muss, kann bei einer schwarz lackierten Fläche von einem Absorptionsgrad von etwa 97-98% ausgegangen werden.

Eine solche Beschichtung kann in fol-

- genden Verfahren erfolgen:
Keramische Lacke werden auf das Glas aufgebracht und danach bei etwa 600° C eingebrannt. Diese Art der Lackierung ist verhältnismäßig kostenintensiv, hat allerdings den Vorteil einer großen Dauerhaftigkeit.
Die Einsatzbereiche für keramische Lacke sind vor allem in der Möbelindustrie und in der Fassade.
Nachteil: Durch die hohen Temperaturen beim Einbrennen des Lackes kann eine Verformung des Prismas eintreten.
- Zweikomponentenlacke werden nach dem Aufbringen bei geringen Temperaturen von etwa 80-90°C in das Glas eingebrannt. Dadurch kann keine Verformung der Glasprismen erfolgen. Sie sind im Außenbereich nur bedingt einsetzbar, da die Feuchteresistenz nicht besonders hoch ist.
- UV-Lacke sind nur für eine Dauer von etwa 8 min. gegen Feuchte-

resistent und daher nicht im Fassadenbereich einsetzbar. Die Lackierung mit UV-Lacken ist vergleichsweise preiswert. Der Einsatz erfolgt in erster Linie in der Möbelindustrie.

- Eine konventionelle Lackierung von Glas ist für alle Anwendungsbereiche möglich. Sie zeichnet sich durch eine hohe Dauerhaftigkeit aus.

Diese Methode scheint für den gewünschten Einsatzbereich die vielversprechendste zu sein.

7.4.4 Ätzung

Generell bringt die Ätzung einer Glasoberfläche, den Verlust der Totalreflexion mit sich.

Es werden von nun an ca. 50% des Lichtes ausgekoppelt und ca. 50% reflektiert.

7.4.5 Antischmutzbeschichtung

Der Clear-Shield Oberflächenschutz bewirkt eine Reduzierung des Reinigungsaufwandes und soll die Korrosion durch Umwelteinflüsse und sonstige Schadstoffe auf dem Glas verhindern.

Das Produkt ist auf Floatglas, ESG-Glas, sandgestrahltem Glas und bei Sonderanwendungen wie PV-Elementen einsetzbar.

Clear-Shield wird auf die Oberfläche aufgesprüht und verbindet sich mit der Glasoberfläche molekularartig. Hierdurch wird eine lange Haltbarkeit erreicht. In der Regel wird eine Gewährleistung von 5 Jahren übernommen.

Wichtig für die Anwendung im gegebenen Fall ist die Tatsache, dass die Beschichtung UV-beständig, farbneutral und absolut lichtdurchlässig ist.

7.5 Neues Profil "Konzentrator" als transparenter Sonnenschutz

7.5.1 Einleitung

In Kapitel 7.1.7 wurde das Profil "teilverspiegelter Glasstab" untersucht. Hierbei war aufgefallen, dass durch den Linseneffekt des Profils alle auftreffenden Strahlen zu einem Punkt hin gebrochen werden. Dieser Effekt hat den Vorteil, dass nur ein kleiner Bereich des Profils passiviert werden muss, im Gegensatz zum 90°-Prisma, bei welchem der Großteil der unteren Kathete einer Passivierung bedarf.

Die Firma Schott stellt Glasröhrchen für Fieberthermometer her, die mit Hilfe innenliegender Quecksilbersäule die gemessene Temperatur anzeigen. Damit diese Temperatur besser abgelesen werden kann, wird der für das Quecksilber vorgesehene Hohlraum farblich beschichtet. Die Fähigkeit, einen beschichteten Hohlraum innerhalb eines Glasprofils technisch herstellen zu können, soll bei den nachstehenden Geometrieüberlegungen eine Rolle spielen.

Versucht man, das Profil "teilverspiegelter Glasstab" zu optimieren, so kommt man zu einer Profilgeometrie, die derjenigen des menschlichen Auges ähnelt.

Was beim menschlichen Auge die Netzhaut ist, auf der sich alles in einem Brennpunkt trifft, soll bei dem in Abb. 7.77 dargestellten Profil, ähnlich dem zuvor beschriebenen Fieberthermometer, ein Rohreinschluss sein, dessen Rückseite verspiegelt ist.

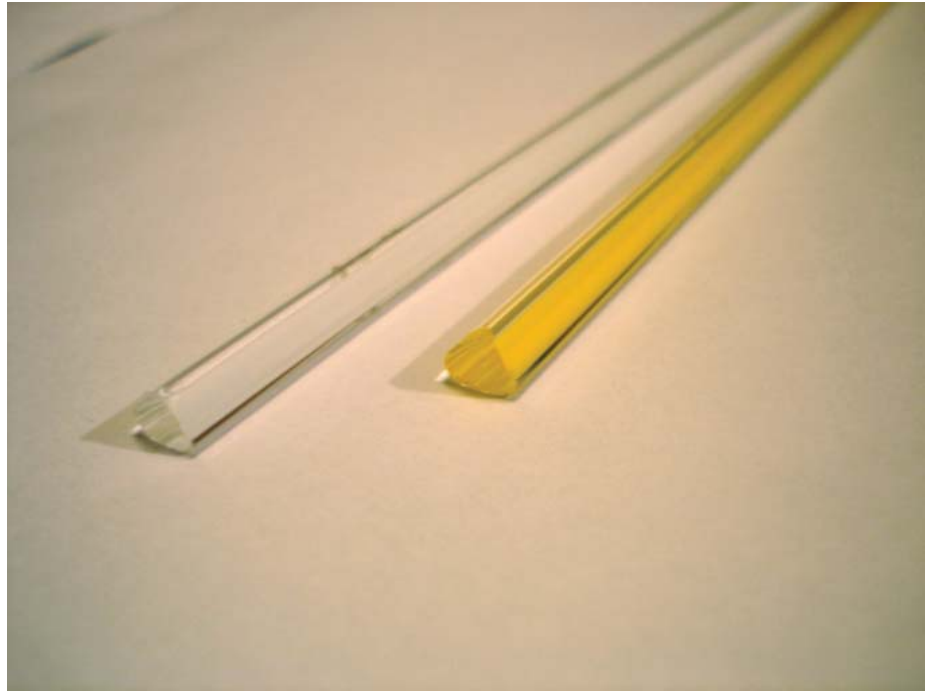


Abb. 7.75
Rohlinge für Fieberthermometer der Firma Schott Rohrglas GmbH, Mitterteich

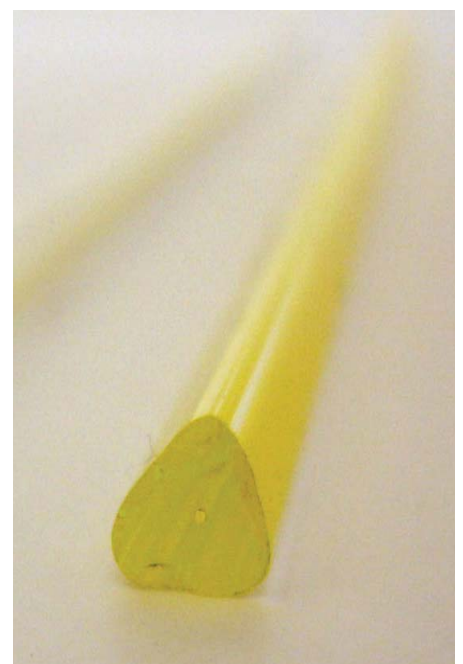


Abb. 7.76
Rohling mit Luftabschluss für Quecksilbersäule

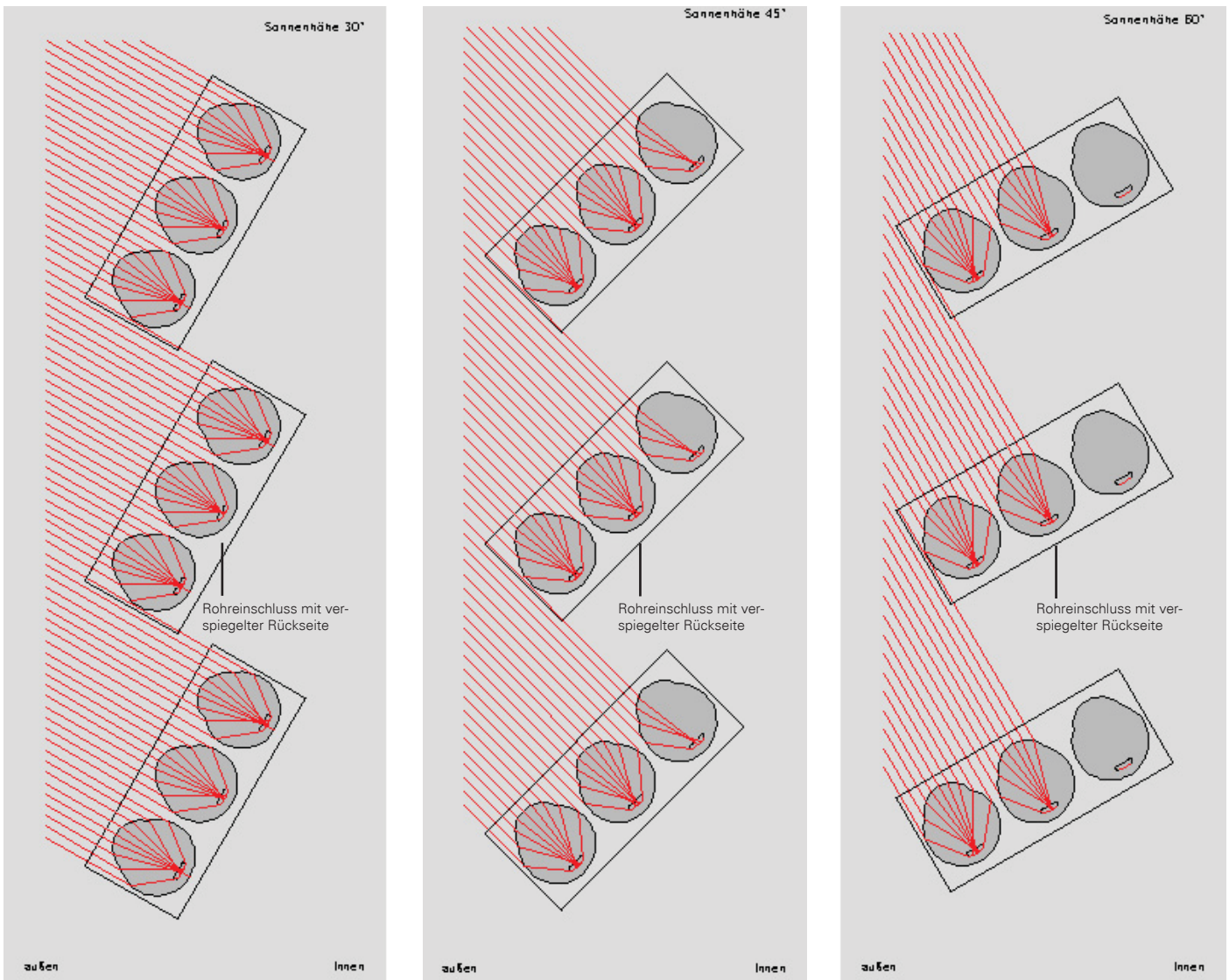


Abb. 7.77
 Profiltyp Konzentrator 1 bei einer Sonnenhöhe von jeweils 30°, 45° und 60°

7.5.2 Konzentrator aus Glas shape 1

Das direkte Sonnenlicht wird durch den Linseneffekt so gebrochen, dass es auf die sich im Profil befindende verspiegelte Fläche trifft, die ähnlich wie bei einem Fieberthermometer (s. Kapitel 7.5.1) mit Quecksilbersäule hergestellt wird. Das diffuse Licht kann den Raum weiterhin beleuchten

ohne zu blenden oder zu überhitzen. Werden die Stäbe nicht nachgeführt, muss der beschichtete Bereich vergrößert werden, so dass die Sommersonne immer ausgeblendet wird. Hiermit erhält man einen perfekt funktionierenden transparenten Sonnenschutz, der in Abhängigkeit von

der Spiegelbreite auch starr eingebaut werden kann.

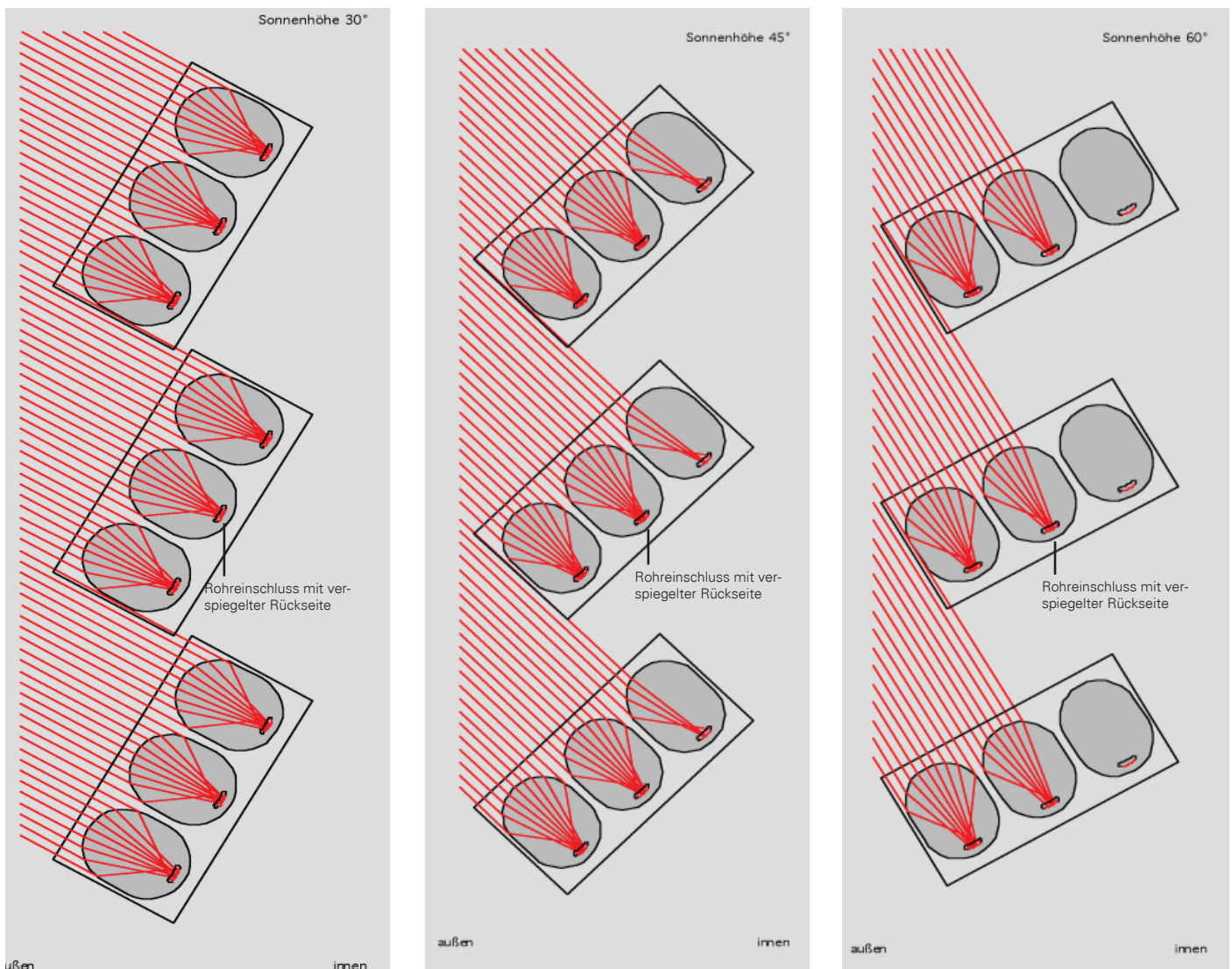


Abb. 7.78
 Profiltyp Konzentrator 2 bei einer Sonnenhöhe von jeweils 30°, 45° und 60°

7.5.3 Konzentrator aus Glas shape 2

Ergänzend zu den Untersuchungen in 7.5.2 wurde eine Profilgeometrie untersucht, die einem Oval nahe kommt. Auch hier wird das direkte Sonnenlicht so gelenkt, dass sie auf eine sich im Profil befindende verspiegelte Fläche trifft. Das diffuse Licht kann auch hier den

Raum weiterhin beleuchten, ohne zu blenden oder zu überhitzen. Werden die Stäbe nicht nachgeführt, muss auch hier der beschichtete Bereich vergrößert werden, so dass die Sommersonne immer ausgeblendet wird.

7.5.4 Konzentrador aus Glas shape 3

In den vorherigen Beispielen wurden Einzelprofile untersucht.

Da Einzelprofile, die nachgeführt werden sollen, einen höheren technischen Aufwand bedeuten, soll nachfolgend die Möglichkeit der "Gruppenbildung" untersucht werden.

So genannte "Glasplatten" fungieren in Abbildung 7.79 als transparenter Sonnenschutz. Die im Kapitel 7.5.3 ermittelte Geometrie liegt den "Glasplatten" zugrunde.

Die einfallende Strahlung wird durch die vorhandene Geometrie in einem Punkt gebündelt und von dort aus reflektiert. Die diffuse Strahlung gelangt in das Rauminnere.

Die "Glasplatten" können in unterschiedlichen Breiten gewählt werden. Je nach Breite ändert sich die Teildurchsicht.

Aufgrund der größeren Teildurchsicht besteht ebenfalls die Möglichkeit, die "Glasplatten" nicht nur im Oberlichtbereich, sondern über die gesamte Fassadenhöhe anzuordnen.

Durch die Bildung von größeren Einheiten kann bei drehbarer Lagerung der Wartungs- und Kostenaufwand reduziert werden.

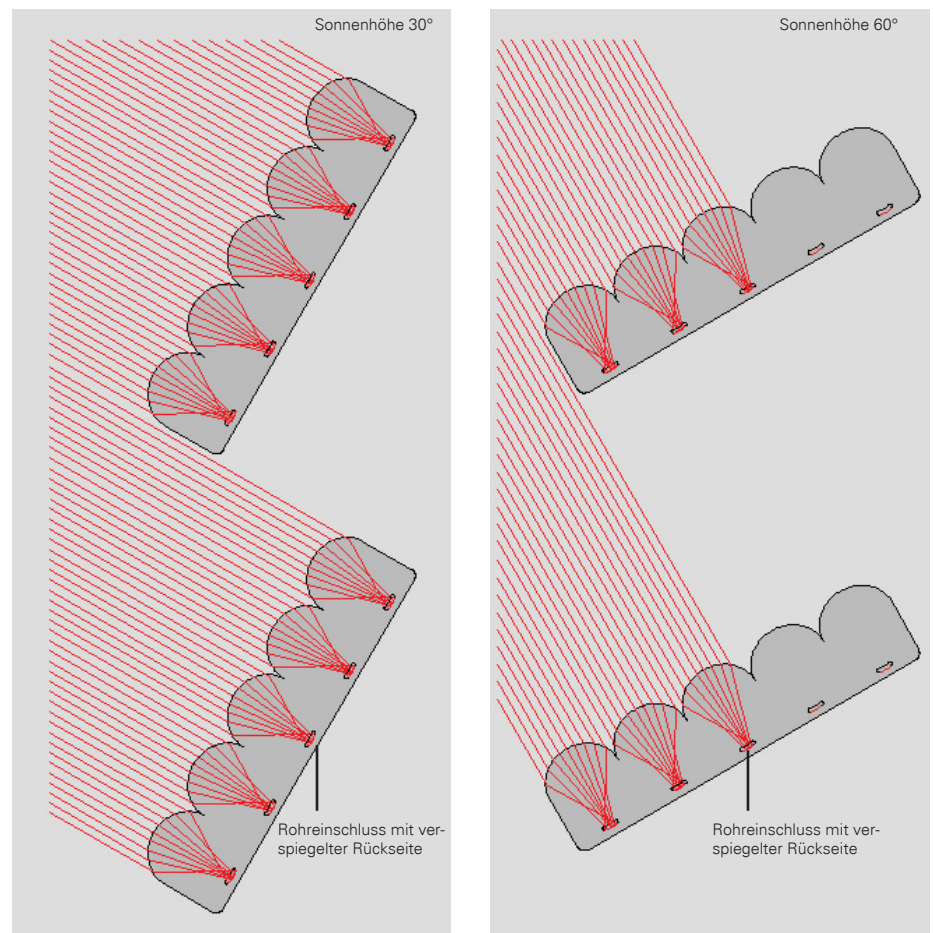


Abb. 7.79
Profiltyp Konzentrador 3 bei einer Sonnenhöhe von jeweils 30° und 60°

7.6 Zusammenfassung

Im **Kapitel 7.1** werden vorhandene Glasprofile der Firma Schott mit Hilfe von Strahlverfolgung und Untersuchungen im Modellraum auf ihre Tauglichkeit zur Lichtlenkung überprüft. Auf der Grundlage der Untersuchungen ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Das 60°-Prisma, der auf Abstand gesetzte Glashalbzyylinder und der teilverspiegelte Glasstab erscheinen aufgrund der Strahlverfolgung vielversprechend.

- Vergleicht man allerdings die erzielten Lichtwerte der einzelnen Profile im Modellraum, so liegen die gemessenen Werte bei der Versuchsreihe Glashalbzylinder deutlich höher, was durch den visuellen Eindruck bestärkt wird.

Sowohl der teilverspiegelte Glasstab, als auch das teilverspiegelte Glasrohr in der Funktion als transparenter Sonnenschutz, blenden das direkte Sonnenlicht bei gleichzeitiger Diffuslichtlenkung hervorragend aus.

In **Kapitel 7.2** wird ein bisher nicht vorhandenes Profil, das 90°-Prisma, generiert und per Strahlverfolgung auf dessen Funktionsfähigkeit bzgl. Lichtlenkung und Sonnenschutz untersucht, bzw. mit dem 60°-Prisma verglichen. Die Betrachtung zeigt dabei folgende Ergebnisse:

- Das 90°-Prisma eignet sich hervorragend als transparenter Sonnenschutz. Durch zweimalige Totalreflexion innerhalb des Prismas wird die ankommende Strahlung nach außen reflektiert. Werden mehrere Profile senkrecht übereinander angeordnet, wird die totalreflektierte Strahlung ab einer Sonnenhöhe von 50° über die untere Kathete des darüber liegenden Profils wieder eingekoppelt. Mit Hilfe eines Absorbers an dieser Profilstseite

kann dieser negative Nebeneffekt eliminiert werden.

- Betrachtet man das 90°-Prisma singular, so funktioniert auch das Prinzip der Lichtlenkung. Werden wieder mehrere Profile senkrecht übereinander angeordnet, so nimmt der Anteil der über die Hypothense eingekoppelten Strahlung unverhältnismäßig zu, so dass weitere Untersuchungen diesbezüglich nicht sinnvoll erscheinen.

- Der Vergleich von 60°- und 90°-Prismen via Strahlenverfolgung zeigt die deutlich kontrollierbare Lichtumlenkung im 90°-Prisma aufgrund des 90°-Winkels, so dass den weiteren Untersuchungen nur noch das 90°-Prisma zu Grunde gelegt wird.

In **Kapitel 7.3** werden das Profil Halbzylinder, der teilverspiegelte Glasstab und das 90°-Prisma mit vorhandenen Systemen zur Lichtlenkung, bei denen es eine geometrische Verwandtschaft gibt, verglichen.

- Das Profil Halbzylinder wird mit dem System Lumitop verglichen. Ähnlich wie bei Lumitop wird die auftreffende Strahlung durch Totalreflexion im Profil umgelenkt. Bei der Sonnenhöhe 60° funktioniert die Lichtlenkung gut. Bei abnehmender Sonnenhöhe wird die Strahlung zu steil in den Raum reflektiert, so dass die gewünschte Erhöhung der Leuchtdichte in der Raumtiefe ausbleibt. Die Geometrie von Lumitop, aus PMMA, ist optimiert und funktioniert bei allen Sonnenhöhen. Diese Geometrie in Glas nachzubilden ist technisch nicht möglich.

- Der verspiegelte Glasstab ist bzgl. Geometrie und Funktionsweise dem System von Figla, ECOSS D, sehr ähnlich. Durch die Anordnung der Teil-

verspiegelung ändert sich allerdings die Funktionsweise. Ein Nachteil der Glasstäbe ist das größere Gewicht im Vergleich zu den Acrylstäben.

- Das 90°-Prisma wird mit den Prismenplatten von Hüppe verglichen. Da die Geometrie beider Systeme gleich und nur das Material ein anderes ist, PMMA und Glas, gilt bei gleicher Anordnung dieselbe Funktionsweise. Das Material Glas hat gegenüber PMMA den Nachteil, dass kein rechter Winkel und keine spitzen Winkel ausgeführt werden können. Die Ecken sind nicht scharfkantig, sondern abgerundet. Die sich daraus ergebenden Folgen werden im Kapitel 8.0 untersucht.

In **Kapitel 7.4** wurden verschiedene Systeme, die die Funktion eines "Absorbers" übernehmen könnten, untersucht. Als erfolversprechendste Möglichkeit erscheinen die Lacke.

In **Kapitel 7.5** wird ein neu generiertes Profil "Konzentrator" mit folgenden Ergebnissen untersucht:

- Das in Anlehnung an das Profil teilverspiegelter Glasstab entwickelte Profil "Konzentrator" funktioniert in allen drei gewählten Geometrien als transparenter Sonnenschutz sehr gut. Nach Auskunft der Firma Schott gibt es herstellungstechnisch für die gewählten Geometrien keine Einschränkungen. Das Profil "Konzentrator" als transparenter Sonnenschutz erfüllt die gestellten Erwartungen von allen untersuchten Profilen mit Abstand am besten und erschien deshalb am erfolversprechendsten für den Einsatz in der Fassade. Geplant war auch für dieses Profil eine Untersuchung durch das Lichttechnische Institut OEC in München. Leider wurde das Projekt nicht verlängert, so dass die lichttechnischen Messungen nicht mehr durchgeführt werden konnten.

8.0 Raytracing - Strahlenverfolgung



8.1 Grundlagen

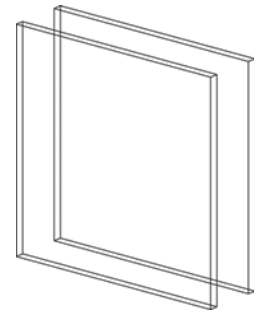


Abb. 8.01
OptiCAD-Modell für eine Isolierverglasung [KLEIN 2000_A1]

8.1.1 Erläuterung - Definition

Raytracing

Um das optische Verhalten geometrischer Strukturen zu bestimmen reicht geometrische Optik aus, wenn diese Strukturen viel größer als die Wellenlänge des verwendeten Lichts sind. Das Verhalten der Strahlung kann von Computern durch sogenannte Strahlverfolgungsprogramme oder auch Raytracingprogramme berechnet werden. Dabei werden Lichtstrahlen durch das gesamte optische System verfolgt. An jeder Grenzfläche zwischen Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes wird ein Strahl zum Teil reflektiert und zum Teil transmittiert. Die entsprechende Intensität der neuen Strahlen ist durch die Fresnel'schen Formeln bekannt. Zur Bestimmung der Grenzschicht auf die der Strahl als nächstes trifft, werden die Schnittpunkte des Strahls mit allen vorhandenen Grenzflächen ermittelt. Der Schnittpunkt mit dem kleinsten Abstand zum aktuellen Startpunkt kennzeichnet die nächste Grenzschicht und gleichzeitig den neuen Startpunkt. Die Richtung der neuen Strahlen kann dann mit dem Reflexionsgesetz bestimmt werden.

Transmission

Allgemein ist die Transmission durch eine Probe definiert als der Quotient aus durchgelassener und einfallender Strahlungsleistung. Soll die Transmission gemessen werden, geschieht dies mit Hilfe eines Detektors. Dieser registriert in der Regel eintreffende Strahlung, die aus einem bestimmten Raumwinkelbereich kommt und auf eine Fläche, zum Beispiel die Fläche einer Solarzelle, trifft. Ist diese Fläche und der Raumwinkel klein genug, kann man die mittlere Strahldichte messen.

8.1.2 Referenzsystem

Als Referenzsystem wurde eine Isolierverglasung mit 2x4 mm Floatglas und 16 mm Scheibenzwischenraum ohne Beschichtung simuliert (vgl. Abb. 8.01). Für das Floatglas wurde ein Brechungsindex von 1,59 angesetzt.

Die Transmission ist beim Isolierglas am stärksten für senkrecht einfallendes Licht (ca. 82 %). Die für flacher werdende Einfallswinkel abnehmende Transmission hängt mit dem zunehmenden Reflexionsanteil zusammen (vgl. Kapitel 4.1.2 Reflexion).

Um die Auswirkungen der für jedes TLS (Tageslichtsystem) spezifischen winkelabhängigen Verteilung der transmittierten Strahlung auf die Lichtverhältnisse im Raum vergleichend untersuchen zu können wurde angenommen, dass alle Systeme im Oberlichtbereich eingebaut sind. Dieser erstreckt sich von der Decke bis ca. 1 m darunter. Zur Bewertung der Lichtlenkeigenschaften wurden drei Winkelbereiche unterschieden:

1. direkt-hemisphärische Transmission nach oben:

Lichtlenkung von der Mitte des TLS in den fensternahen Bereich bis ca. 2 m von der Fassade entfernt. Aus dieser Definition ergibt sich für eine Winkelauflösung von 5° ein Bereich von 0° bis 75° zur Vertikalen. Eine Umlenkung in diesen Bereich trägt nur wenig zur Beleuchtung der Raumtiefe bei. Im fensternahen Bereich wirkt das umgelenkte Licht kaum, da hier ohnehin genügend Helligkeit vorhanden ist.

2. direkt-hemisphärische Transmission zur Raumtiefenausleuchtung:

Lichtlenkung in einen Bereich von 0° bis 15° von der Horizontalen. Licht, das in diesen Bereich umgelenkt

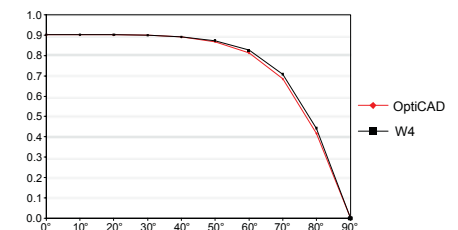


Abb. 8.02
Validierung für die Simulation einer 4 mm Floatglasscheibe. Auf der y-Achse sind die Werte für die direkt-hemisphärische Transmission abgetragen, auf der x-Achse die Einfallswinkel [INGLAS A1]

wird beleuchtet die Decke (und damit indirekt den Raum) ab ca. 2 m Entfernung von der Fassade bis in die Raumtiefe.

3. direkt-hemisphärische Transmission nach unten:

Lichtlenkung in den gesamten Bereich unterhalb der Horizontalen. Bei Systemen, die im Oberlichtbereich eingebaut sind besteht in diesem Winkelbereich Blendungsgefahr. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich hier in Bezug auf die Blendung keine präzisen Aussagen treffen lassen. Blendungserscheinungen sind bis zu einem gewissen Grad subjektiv und vom jeweiligen Blickpunkt abhängig. Das heißt für Büros, dass die Position der Arbeitsplätze eine große Rolle spielt.

Die Verteilung der transmittierten Strahlung auf die drei Umlenkbereiche wird exemplarisch jeweils für einen niedrigen (0° Azimut, 10° Höhenwinkel), einen mittleren (0° Azimut, 30° Höhenwinkel) und einen hohen Sonneneinfallswinkel (0° Azimut, 60° Höhenwinkel) angegeben. Die Summe der Prozentangaben für die einzelnen Winkelbereiche entspricht der gesamten direkt-hemisphärischen Transmission. Der Rest der Strahlung wird nach dem Energieerhaltungsgesetz

satz durch die einzelnen Elemente absorbiert oder reflektiert. Die umgelenkten Anteile werden über einen Strahlengang durch das jeweilige TLS visualisiert. Bei den gezeigten Strahlengängen ist zu beachten, dass die Unterschiede in der Energie der einzelnen Strahlen nicht dargestellt sind. Außerdem werden aus Gründen der Anschaulichkeit lediglich einige exemplarische Strahlengänge gezeigt. Für die Berechnungen wurden wesentlich mehr Strahlen ausgewertet. Das diffuse Tageslicht wird ausschließlich in den unteren Viertelraum transmittiert. Dabei nimmt die Intensität des transmittierten diffusen Lichts von der horizontalen Blickrichtung nach unten kontinuierlich ab. Die Simulation der direkt-hemisphärischen Transmission mit OptiCAD wurde durch den Vergleich mit Berechnungen des Programms Window 4.0 [FINLAYSON1] validiert. Die Ergebnisse stimmen sehr gut überein (vgl. Abb. 8.02). [KLEIN 2000_1]

Der Lichttransmissionsgrad direkt-hemisphärisch ist das Verhältnis des gerichteten Lichtstroms zum hemisphärisch verteilten, durchgelassenen Lichtstroms und daher winkelabhängig. Die dargestellten Transmissionsgrade wurden mit einer Lichtquelle ermittelt. (siehe Abb. 8.05)

Lichttransmissionsgrad direkt-hemisphärisch nach der solaren Einstrahlung bewertet (W/m²)

Die in Abbildung 8.05 ermittelten Transmissionswerte werden mit den jährlichen Werten für die vertikale Bestrahlungsstärke auf eine Südfassade multipliziert. (siehe Abb. 8.06)

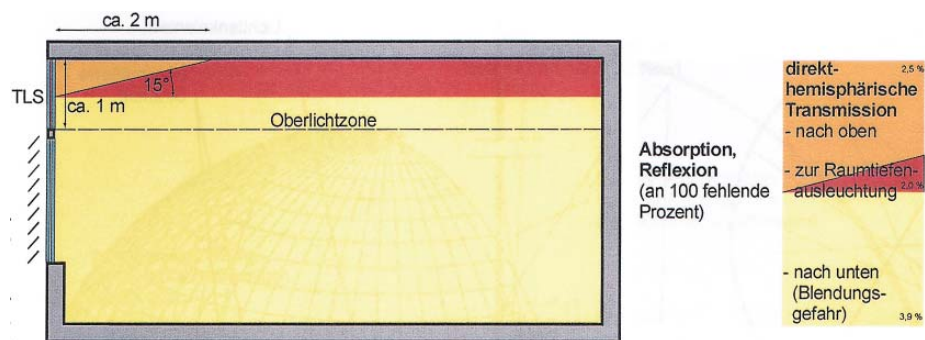


Abb. 8.03 Einteilung der drei unterschiedlichen Bereiche für die Lichtlenkung [KLEIN 2000_A2]

Abb. 8.04 farbige Hinterlegung der Strahlengänge zur Kennzeichnung der Umlenkbereiche mit prozentualer Angabe des dorthin umgelenkten Anteils. [KLEIN 2000_A3]

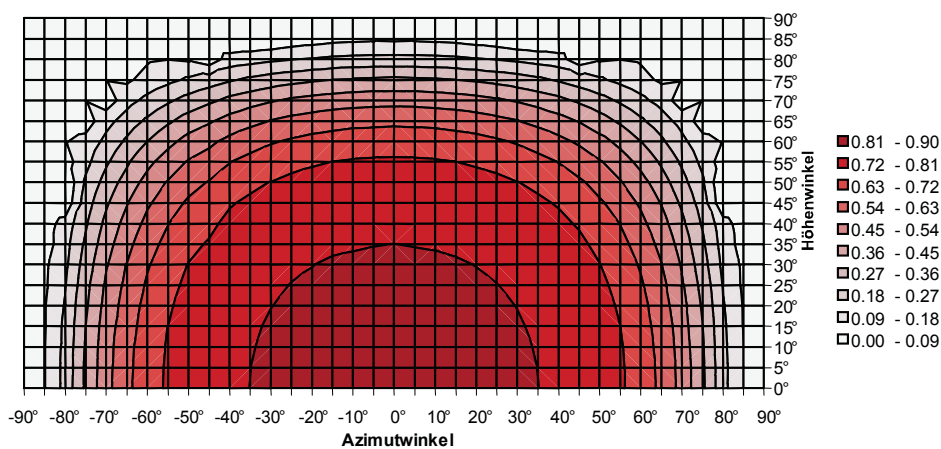


Abb. 8.05 Transmission (direkt-hemisphärisch) [KLEIN 2000 A4]

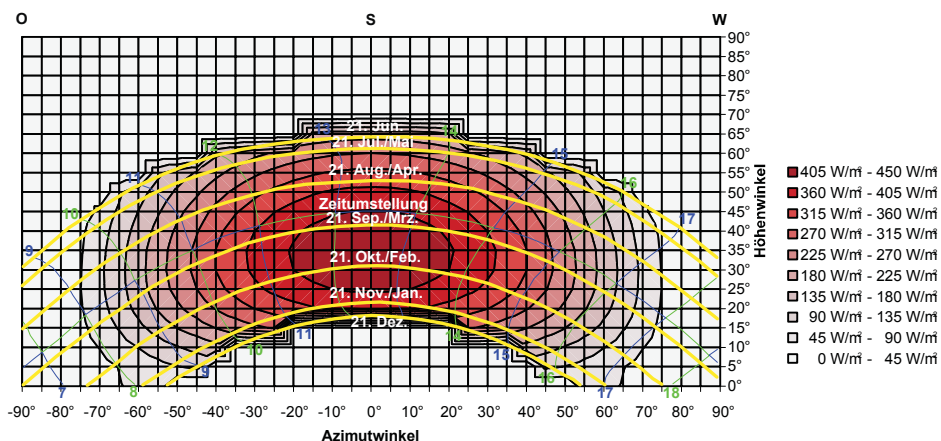


Abb. 8.06 Absolute Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade (für 48° nördl. Breite) [KLEIN 2000 A5]

8.1.3 Raytracing für bestehende Tageslichtsysteme Fisch

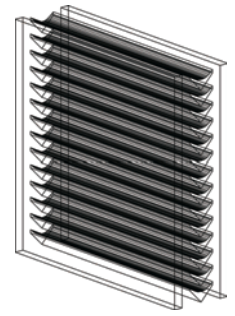


Abb. 8.08
OptiCAD-Modell des Systems Fisch
[KLEIN 2000 F1]

Funktion:

- Geringe Sonnenschutzfunktion
- Lichtlenkwirkung für direktes Licht

Regelung:

Keine, feststehend

Durchsicht:

Keine

Erscheinungsbild:

Strukturierte Metallfläche

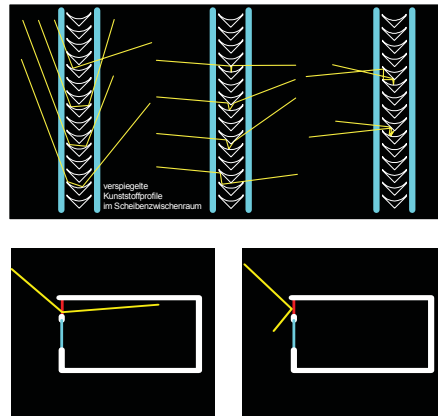


Abb. 8.09
Funktionsschema des Systems Fisch [KLEIN 2000 F2]

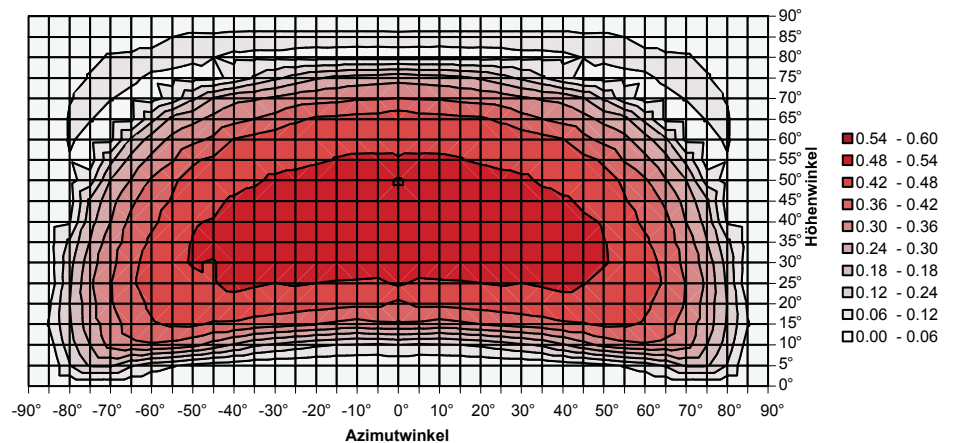


Abb. 8.10
Transmission (direkt-hemisphärisch) [KLEIN 2000 F3]

Das OptiCAD-Modell des Systems Fisch wurde nach der Vorlage eines Original Elements erstellt, dessen Schnittfläche mit Hilfe eines Scanners in den Computer eingelesen wurde. Die Umrisse der Kunststoffprofile wurden mit einem CAD-Programm nachgezeichnet und in einzelne Koordinaten aufgelöst, die dann in OptiCAD eingelesen werden konnten. Die Auflösung der oberen konkaven Fläche in Polygone ist auf Darstellung 8.08 zu erkennen.

Für die Reinaluminiumschicht auf den Kunststoffprofilen wurde ein nach Herstellerangaben Reflexionsgrad von 85 % angesetzt. Das System wurde ohne die konstruktiven Verbindungsstege modelliert. Daher liegen die simulierten Transmissionsgrade leicht höher, als beim realen Produkt.

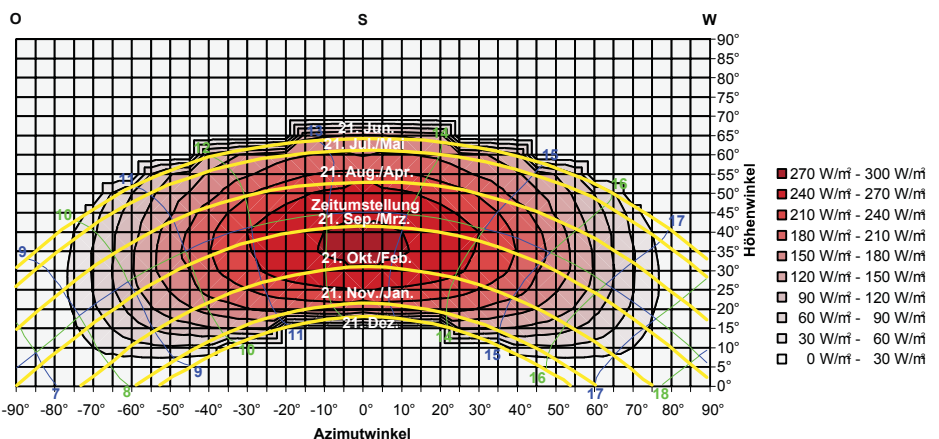


Abb. 8.11
Absolute Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade (für 48° nördl. Breite) [KLEIN 2000 F4]

Eine geringe Sonnenschutzwirkung ergibt sich durch die relativ niedrigen Transmissionsgrade.

Für flache Sonnenprofilwinkel (vgl. Abb. 8.12) zeigt das System eine gute Lichtlenkung in die Raumtiefe. Allerdings kann dabei in manchen Raumbereichen Blendung auftreten. Bei Profilwinkeln über 30° wandert der Anteil des nach oben umgelenkten Lichts immer weiter in Fensternähe, so dass die Effizienz der Raumtiefenausleuchtung abnimmt. Der nach unten umgelenkte Anteil weist eine breite Streuung über nahezu den gesamten unteren Winkelbereich auf. Es ergibt sich dadurch ein sehr heller Streifen mit hohen Leuchtdichten in Blickrichtung Sonne auf dem Element. Daher besteht für alle höheren Profilwinkel erhöhte Blendungsgefahr im gesamten Raum (vgl. auch Abb. 8.15).

Die Verteilung des transmittierten diffusen Tageslichts ist zwar günstig für die Ausleuchtung der Raumtiefe, aber der simulatorisch ermittelte diffuse Transmissionsgrad von 34,9 % ist für eine effektive Raumbeleuchtung sehr niedrig. Am Fraunhofer ISE wurde für dieses System eine diffuse Transmission von 31,0 % gemessen. [Heyder1] Der höhere Simulationswert hängt mit der oben erwähnten vereinfachten Modellierung zusammen. Trotzdem stimmen die Werte noch gut überein. [KLEIN 2000_2]

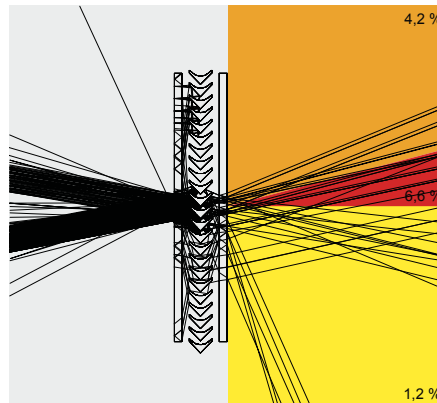


Abb. 8.12 Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 10° [KLEIN 2000 F5]

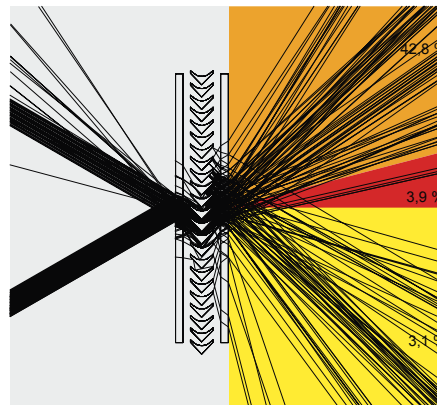


Abb. 8.13 Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 30° [KLEIN 2000 F6]

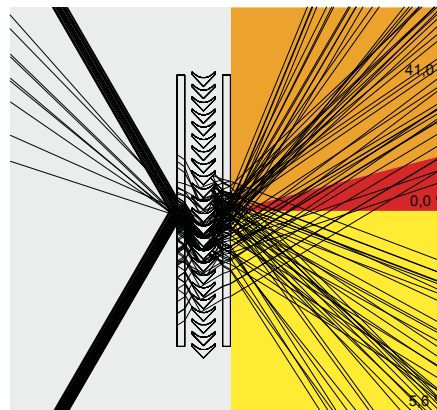


Abb. 8.14 Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 60° [KLEIN 2000 F7]

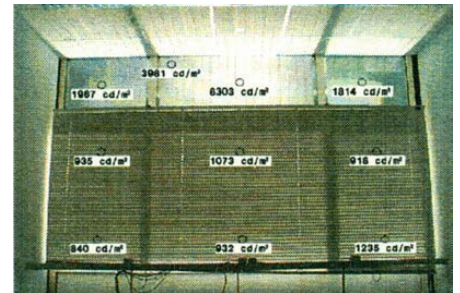


Abb. 8.15 Innenaufnahme des Systems Fisch im eingebauten Zustand. [HEYDER2] Die Blendung ist auf dem Foto (und an den gemessenen Leuchtdichtewerten) deutlich zu erkennen. [KLEIN 2000 F8]



Abb. 8.16 Sparkasse, Bludenz
Das Fisch-System ist im Durchsichtsbereich in Form von Öffnungsflügeln eingebaut. Außen ist ein nachführbarer Sonnenschutz aus vertikalen Prismenlamellen angebracht. [KLEIN 2000 F9]



Abb. 8.17 Projektbeispiel:
Sparkasse, Bludenz
Innenansicht [KLEIN 2000 F10]

y-Inglas

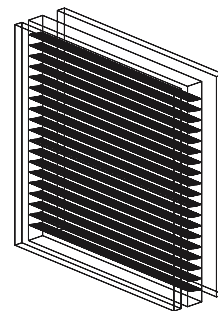


Abb. 8.18
OptiCAD-Modell des Inglas[®] Y Standard Systems [KLEIN 2000 Y1]

Funktion:

Reines Lichtlenksystem ohne Sonnenschutzwirkung

Regelung:

Keine, feststehend

Durchsicht:

Das Acrylglas-Inlet wirkt sehr transparent. Die Aussicht wird durch leichte optische Verzerrungen etwas vermindert

Erscheinungsbild:

Leichte, transparente Lamellenstruktur

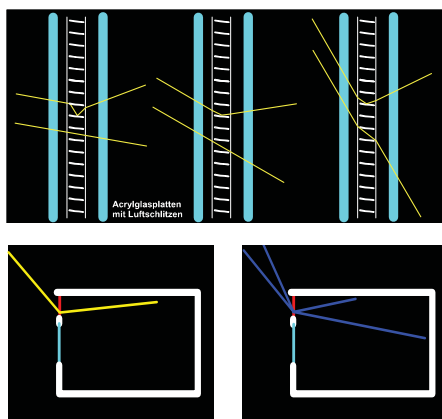


Abb. 8.19
Funktionsschema des Inglas[®] Y Standard Systems [KLEIN 2000 Y2]

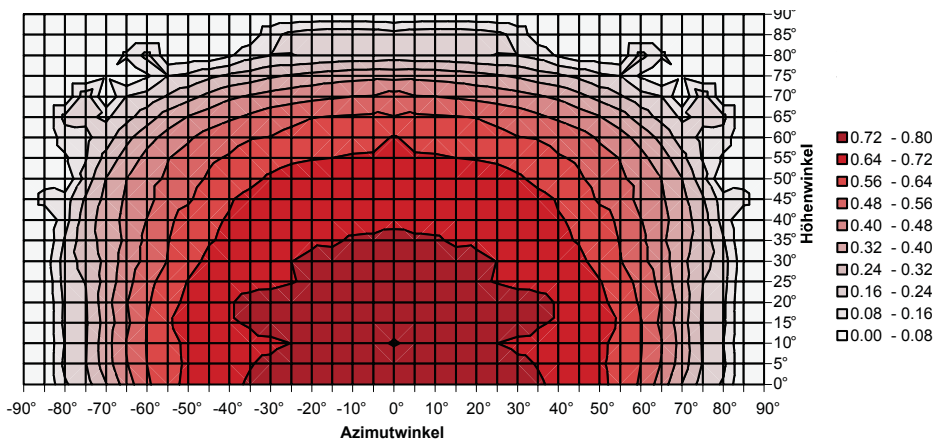


Abb. 8.20
Transmission (direkt-hemisphärisch) [KLEIN 2000 Y3]

Das Plexiglas Daylight[®] Inlet wurde mit einer Dicke von 8 mm und einem Neigungswinkel der Kavernen von 7° nach innen modelliert. Die leicht konkave Form und die runden Kanten der Kavernen wurden in das OptiCAD-Modell implementiert. Als Vorlage diente ein Original Plexiglas Daylight[®] Inlet, dessen Schnittfläche mit Hilfe eines Scanners in den Computer eingelesen wurde. Die Umrisse des Inlets wurden mit einem CAD-Programm nachgezeichnet und in einzelne Koordinaten aufgelöst, die dann in OptiCAD eingelesen werden konnten. Für das Acrylglas wurde ein Brechungsindex von 1.45 angesetzt.

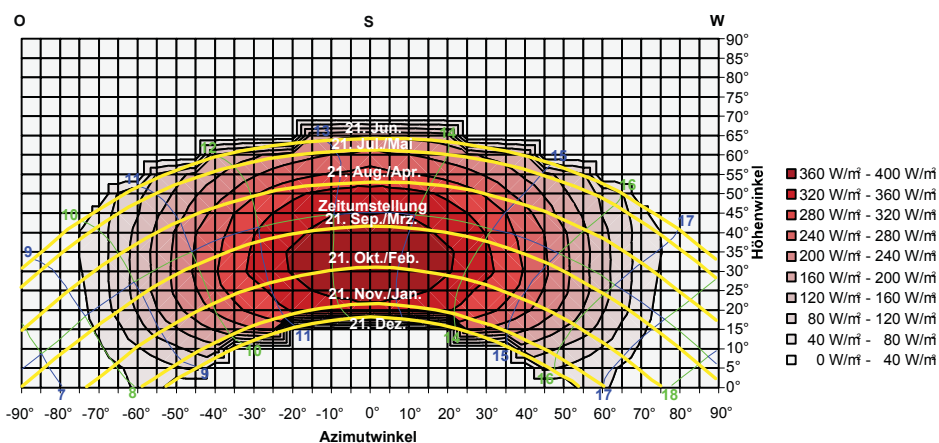


Abb. 8.21
Absolute Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade (für 48° nördl. Breite) [KLEIN 2000 Y4]

An den hohen direkten Transmissionsgraden (vgl. Abb. 8.25 für die Validierung) ist leicht zu erkennen, dass es sich bei diesem System um ein reines Lichtlenksystem ohne Sonnenschutzwirkung handelt (vgl. Abb. 8.20+8.21). Bei flachen Sonneneinfallswinkeln wird das direkte Licht fast ausschließlich nach unten transmittiert. Das System lenkt nur sehr wenig Licht an die Decke um (vgl. Abb. 8.22). Bei mittleren Einfallswinkeln (um 30°) weist das System zwar eine sehr gute Lichtlenkung in die Raumtiefe auf, damit verbunden ist aber auch eine sehr hohe direkte Transmission nach unten. Dies bedeutet eine erhöhte Blendungsgefahr vor allem in Blickrichtung zur Sonne (vgl. Abb. 8.23). Für die hohen Einfallswinkel beschränkt sich die Umlenkung fast ausschließlich auf den fensternahen Bereich der Decke. Ein geringer Teil wird in die Raumtiefe umgelenkt, der Rest wird breit gestreut nach unten transmittiert, wodurch fast überall im Raum Blendung entstehen kann (vgl. Abb. 8.24). Dieses Lichtlenksystems weist eine hohe diffuse Transmission auf. Bei fast klarer Durchsicht durch das Lichtlenkelement ist der diffuse Transmissionsgrad mit 67,6 % fast so hoch wie beim Referenzsystem. Die Verteilung des transmittierten diffusen Lichts ist ähnlich wie beim Referenzsystem, jedoch mit einer erkennbaren Umlenkung nach oben. Aufgrund der guten Diffuslichteigenschaften inklusive Diffuslichtlenkung kann dieses System insbesondere in verbauten Situationen ohne direkte Sonneneinstrahlung zur Verbesserung der Lichtsituation eingesetzt werden. [KLEIN 2000_3]

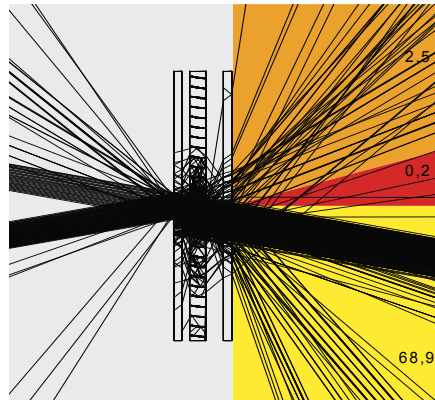


Abb. 8.22 Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 10° [KLEIN 2000 Y5]

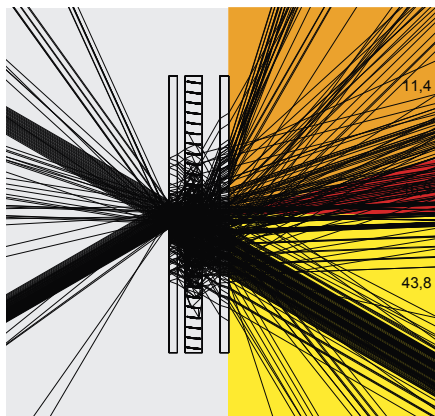


Abb. 8.23 Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 30° [KLEIN 2000 Y6]

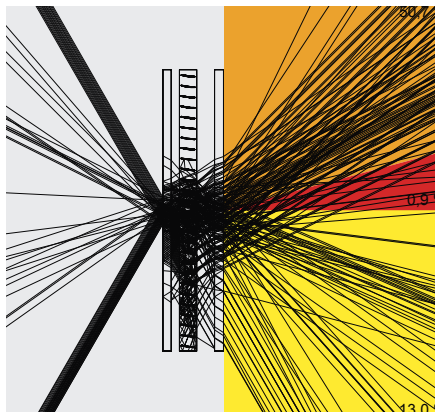


Abb. 8.24 Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 60° [KLEIN 2000 Y7]

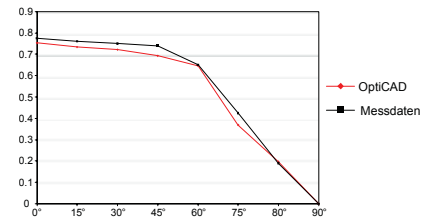


Abb. 8.25 Vergleich von gemessenen Daten [PLATZER1] mit den Simulationsergebnissen aus OptiCAD. Auf der y-Achse sind die Werte für die direkt-hemisphärische Transmission abgetragen, auf der x-Achse die Einfallswinkel. [KLEIN 2000 Y8]



Abb. 8.26 Verwaltungsgebäude Baiersdorf – Lilly, Hamburg
Das Y-Glas wird eingesetzt, um Zenitlicht eines überdachten Atriums in die Büroräume umzulenken. [KLEIN 2000 Y9]

Lumitop

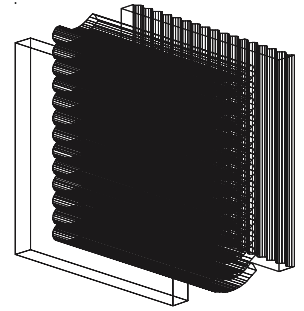


Abb. 8.27
OptiCAD-Modell des Lumitop®-Elements
[KLEIN 2000 L1]

Funktion:

Reines Lichtlenksystem für direktes Licht ohne Sonnenschutzwirkung

Regelung:

Keine, feststehend

Durchsicht:

Keine

Erscheinungsbild:

Translucent

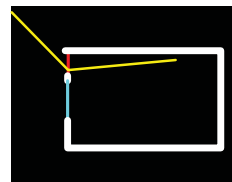
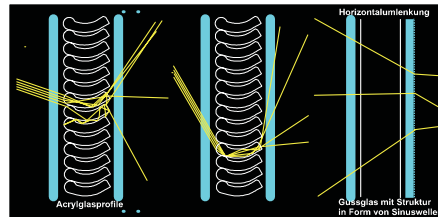


Abb. 8.28
Funktionsschema des Lumitop®-Elements [KLEIN 2000 L2]

Die Acrylglasprofile wurden mit einem Brechungsindex von 1,45 nach einer Zeichnung modelliert [JUNGJOHANN_1]. Die strukturierte Oberfläche des Gussglases in Form einer Sinuswelle wurde aus einer Materialprobe herausgemessen.

Generell bereitete die große Menge an Einzelkoordinaten bei der Modellierung Probleme, die für eine ausreichend genaue Auflösung der runden Schnittfigur der Acrylglasprofile notwendig war. Die sehr kleine Sinusstruktur musste ebenso genau aufgelöst werden (vgl. Abb. 8.27). Deshalb musste das Modell aus Gründen der Rechenleistung in seiner Breite reduziert werden. Somit entstand eine Fehlerquelle vor allem für die von 0° abweichenden Azimutwinkel. Die Werte für die direkt-hemisphärische Transmission sind daher in diesen Bereichen zu hoch (vgl. Abb. 8.29 und 8.30). Die Werte für 0° Azimut wurden allerdings validiert und zeigten eine gute Übereinstimmung (vgl. Abb. 8.35). Der simulierte diffuse Reflexionsgrad ist aus dem gleichen Grund deutlich zu hoch. Der Transmissionsgrad für diffuses Tageslicht beträgt 58,1%.

Das Ergebnis einer Messung am Frauenhofer ISE ergab 34,4%.

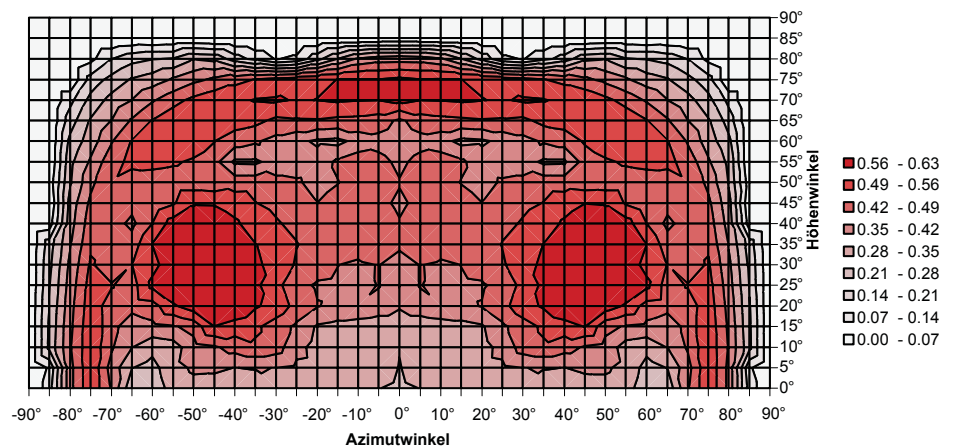


Abb. 8.29
Transmission (direkt-hemisphärisch) [KLEIN 2000 L3]

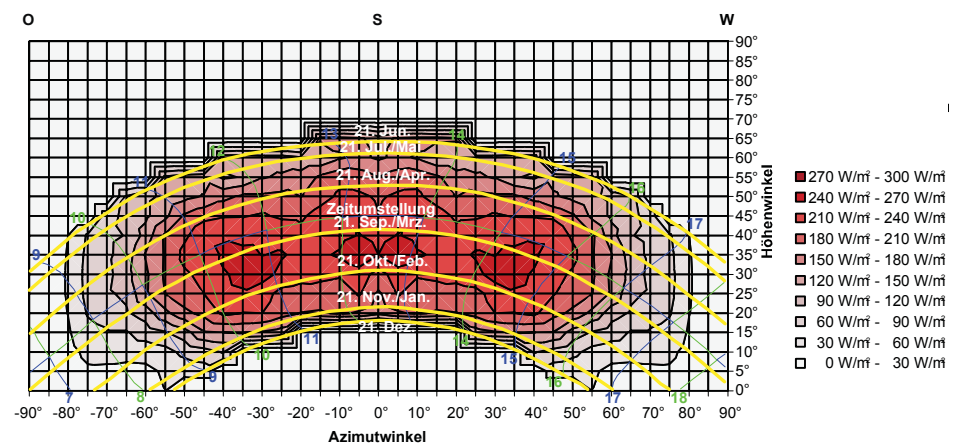


Abb. 8.30
Absolute Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade (für 48° nördl. Breite) [KLEIN 2000 L4]

Die berechneten Werte für die direkt-hemisphärische Transmission liegen zu hoch, um eine Sonnenschutzwirkung zu erreichen. Lumitop® ist daher ein reines Lichtlenksystem das sich durch ein über alle Höhenwinkel der Sonne sehr ähnliches breit streuendes Umlenkverhalten auszeichnet. Ein guter Teil des transmittierten Lichts wird dabei in die Raumtiefe umgelenkt. Der größte Anteil direkt nach oben (und geht damit für die Raumtiefenausleuchtung verloren), ein weiterer recht großer Anteil nach unten (vgl. Abb. 8.32, 8.33 und 8.34). Das transmittierte Licht wird zusätzlich horizontal aufgefächert (vgl. Abb. 8.31). Diese gleichmäßige Lichtstreuung in beide Richtungen lässt aus jeder Blickrichtung auf das System hohe Leuchtdichten erwarten. Das transmittierte diffuse Tageslicht wird in die Raumtiefe umgelenkt. Das spielt aber bei der gemessenen niedrigen direkt-hemisphärischen Transmission von 34,4 % für die Erhöhung des Tageslichtquotienten in den hinteren Raumbereichen praktisch keine Rolle. [KLEIN 2000_4]

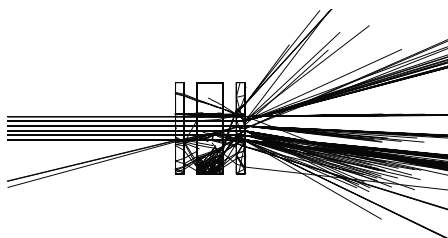


Abb. 8.31
Horizontalschnitt durch das Element mit horizontaler Aufweitung [KLEIN 2000 L5]

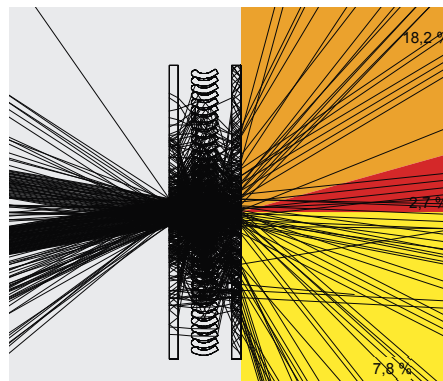


Abb. 8.32
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 10° [KLEIN 2000 L6]

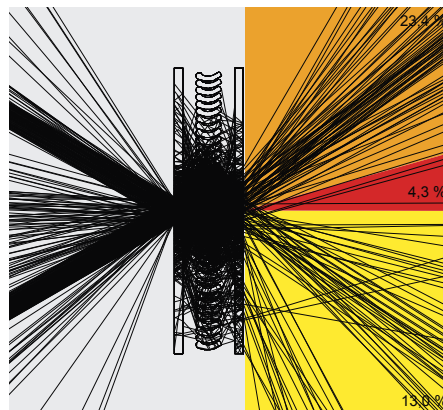


Abb. 8.33
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 30° [KLEIN 2000 L7]

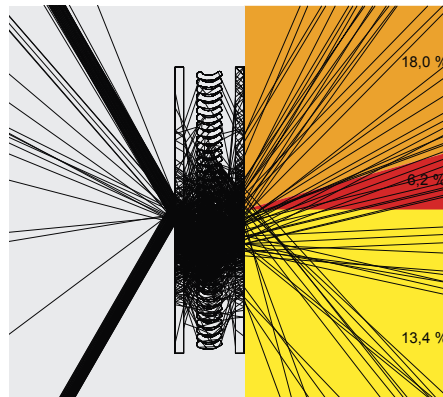


Abb. 8.34
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 60° [KLEIN 2000 L8]

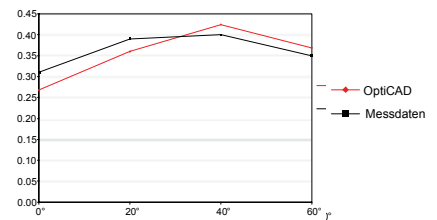


Abb. 8.35
Vergleich von gemessenen Daten [HEYDER3] mit den Simulationsergebnissen aus OptiCAD. Auf der y-Achse sind die Werte für die direkt-hemisphärische Transmission abgetragen, auf der x-Achse die Einfallswinkel. [KLEIN 2000 L9]



Abb. 8.36
Projektbeispiel:
Oben: Lumitop®-Elemente im Oberlichtbereich.
Unten: Innenansicht bei aktiviertem Sonnenschutz [KLEIN 2000 L10]

Okasolar

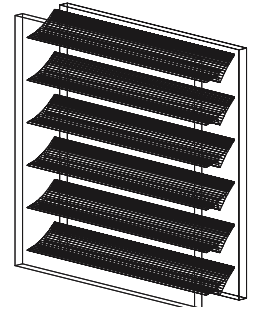


Abb 8.37
OptiCAD-Modell des Okasolar®-Elements
[KLEIN 2000 O1]

Funktion:

Winkelselektives Sonnenschutzsystem mit Direktlichtlenkung für niedrige und Komplettausblendung für hohe Sonnenstände.

Regelung:

Keine, feststehend

Durchsicht:

Eingeschränkt durch die Spiegelprofile – je nach Blickrichtung mehr oder weniger groß

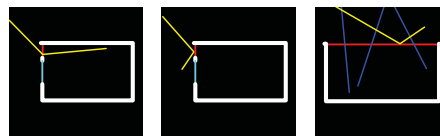
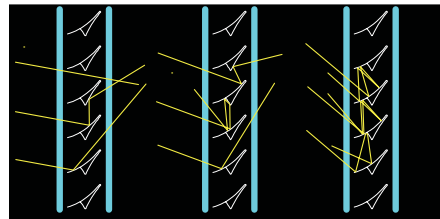


Abb 8.38
Funktionsschema des Okasolar®-Elements [KLEIN 2000 O2]

Erscheinungsbild:

Lamellenartige Struktur aus spiegelnden Metallprofilen.

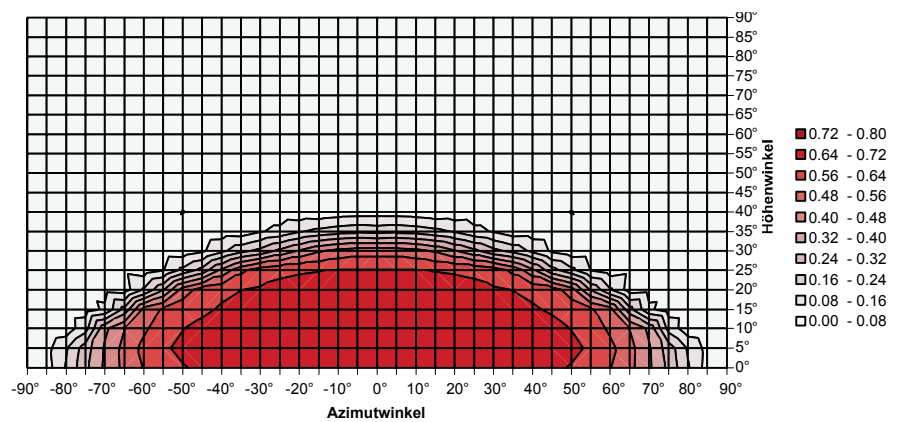


Abb 8.39
Transmission (direkt-hemisphärisch) [KLEIN 2000 O3]

Die Firma Okalux stellte freundlicherweise eine Konstruktionszeichnung zur Verfügung, auf deren Grundlage das OptiCAD-Modell dieses Systems erstellt wurde. Der Reflexionsgrad der Aluminiumprofile wurde mit 85 % angesetzt.

Der Transmissionsgrad für diffuses Tageslicht beträgt 38,9 %.

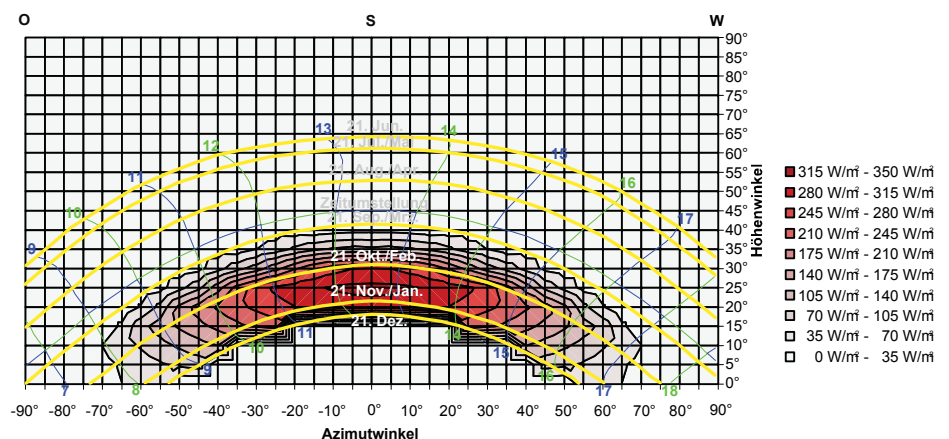


Abb 8.40
Absolute Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade (für 48° nördl. Breite) [KLEIN 2000 O4]

Das Okasolar®-System weist eine selektive Sonnenschutzwirkung auf. Dies lässt sich gut an den Diagrammen zur direkt-hemisphärischen Transmission erkennen. Für Sonnenprofilwinkel bis ca. 35° (Wintersonne) transmittiert das System relativ viel direktes Licht in den Raum. Alle höheren Profilwinkel werden nahezu komplett ausgeblendet (vgl. Abb. 8.39 und 8.40). Das System ist so konzipiert, dass für alle Sonnenprofilwinkel über 30° keine Lichtstrahlen mehr ohne Umlenkung in den Raum transmittiert werden (cut off). Bei niedrigen Sonnenständen lenkt das System das Licht sehr effektiv in die Raumtiefe um. Da aber auch eine beträchtliche Menge zwischen den Lamellen direkt durchdringt oder nach unten gestreut wird, herrscht in einigen Raumbereichen, vor allem in Richtung der Sonne Blendungsgefahr (vgl. Abb. 8.41).

Bei 60° Sonnenhöhe ist die Ausblendung sehr effektiv. Es besteht nur geringe Blendungsgefahr.

Die Transmission für diffuses Tageslicht liegt bei 38,9 % nicht besonders hoch, so dass in der Raumtiefe keine Erhöhung des Tageslichtquotienten zu erwarten ist. [KLEIN 2000_5]

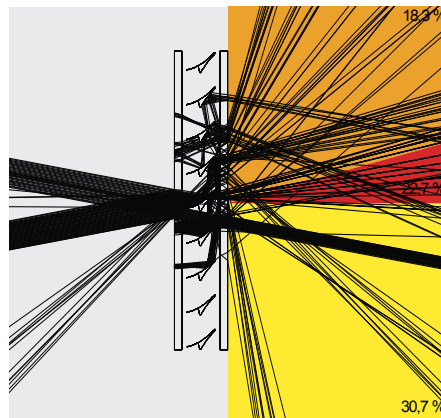


Abb 8.41
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 10° [KLEIN 2000 O5]

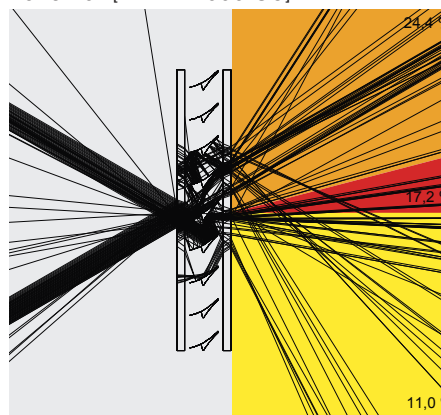


Abb 8.42
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 30° [KLEIN 2000 O6]

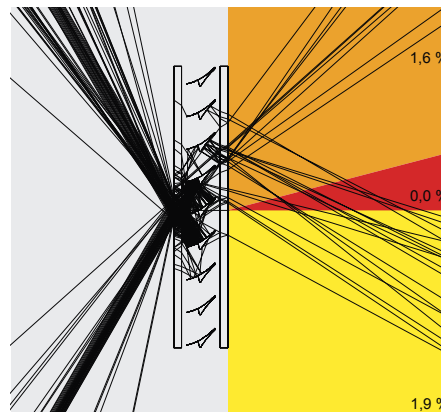


Abb 8.43
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 60° [KLEIN 2000 O7]



Abb 8.44
Projektbeispiel:
Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb+Automatisierung, Magdeburg [KLEIN 2000 O8]



Abb 8.45
Projektbeispiel:
Swanley Secondary School Whitechapel, London [KLEIN 2000 O9]

Prismenplatten zur Lichtlenkung

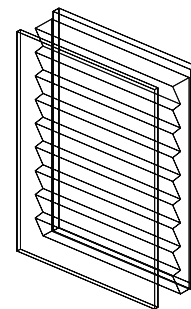


Abb. 8.46
OptiCAD-Modell der Lichtlenk-Prismen
[KLEIN 2000 P1]

Funktion:

Reines Lichtlenksystem für diffuses Licht ohne Sonnenschutzwirkung

Regelung:

Keine, feststehend

Durchsicht:

Eingeschränkte Durchsicht mit Brechungs- und Farbeffekten

Erscheinungsbild:

Leichte, transparente Lamellenstruktur

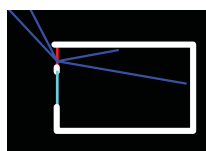
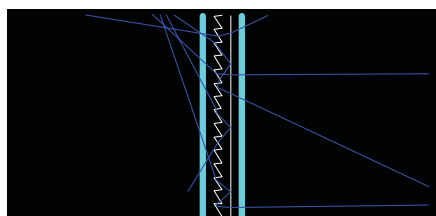


Abb. 8.47
Funktionsschema der Lichtlenkprismen [KLEIN 2000 P2]

Die Lichtlenk-Prismen wurden nach dem Aufmaß einer Original Materialprobe modelliert. Für das Acrylglas wurde ein Brechungsindex von 1,45 angesetzt. Dieses TLS ist ausschließlich für die Umlenkung von diffusem Tageslicht konzipiert. Daher wurde nur die hemisphärisch-hemisphärische Transmission simuliert. Zur Visualisierung wurde ein Strahlengang für diffuses Licht aus dem oberen Viertelraum dargestellt.

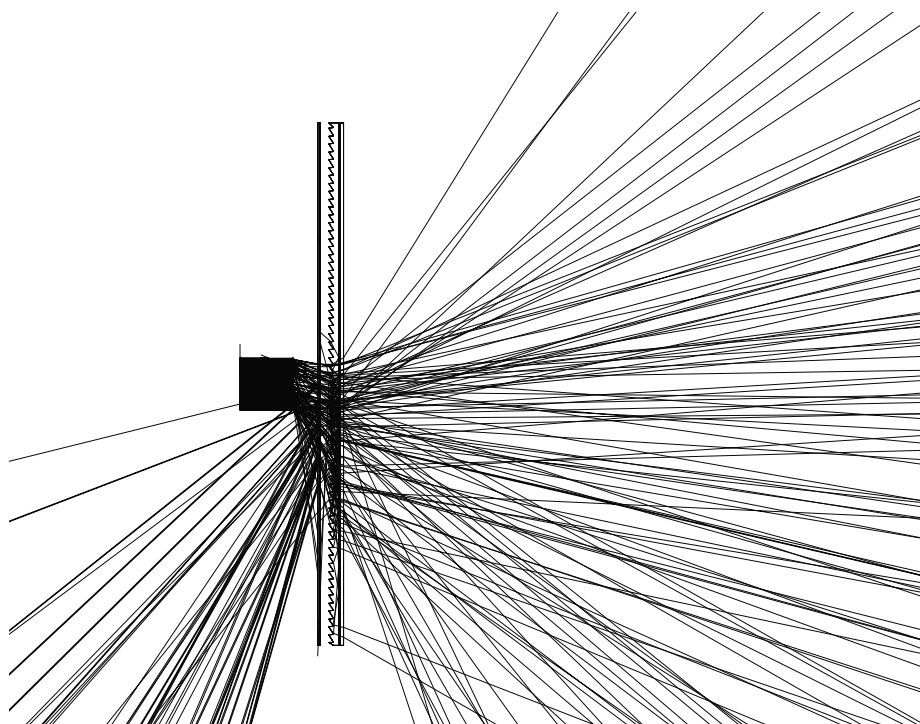


Abb. 8.48
Strahlengang der Lichtlenk-Prismen für diffuses Tageslicht. Der Transmissionsgrad beträgt 66,8 % [KLEIN 2000 P3]

Gegenüber dem Referenzsystem zeigt sich eine deutliche Umlenk-
wirkung in die Raumtiefe. Dabei ist der
diffuse Transmissionsgrad für Tages-
licht kaum geringer als beim Isolier-
glas, was auf eine gute Umlenkeffizi-
enz hindeutet.

Wie weit allerdings der Tageslicht-
quotient in der Raumtiefe tatsächlich
angehoben werden kann lässt sich
aus diesem Simulationsergebnis he-
raus nicht beantworten.

Bei diesem System ist zu beachten,
dass es nur in reinen Nordfassaden
oder hinter einem Sonnenschutzsys-
tem eingesetzt werden sollte.

[KLEIN 2000_6]

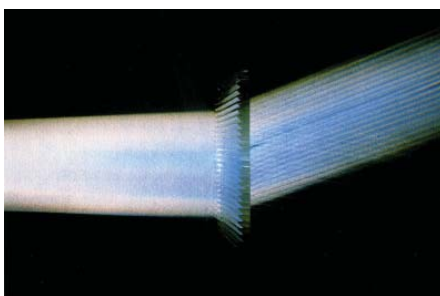


Abb. 8.49

Diffuslichtumlenkung durch Lichtlenk-
Prisma [KLEIN 2000 P4]



Abb. 8.50

Projektbeispiel:
Sportartikelgeschäft Voucher, Bern
Auskragende Oberlichter blenden über
außenliegende Sonnenschutz-Prismen
direktes Licht aus. Das diffuse Licht wird
durchgelassen und trifft über einen Spie-
gel, der auf der Unterseite angebracht ist
auf die in Fassadenebene liegenden Lich-
tlenkprismen. Diese lenken das diffuse
Tageslicht an die Decke um.

[KLEIN 2000 P5]

Prismenplatten zum Sonnenschutz

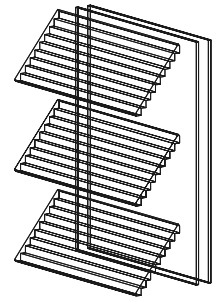


Abb 8.51
OptiCAD-Modell der unverspiegelten Sonnenschutz-Prismen [KLEIN 2000 S1]

Sonnenschutz-Prismen, unverspiegelt:

Funktion:

Reines Sonnenschutzsystem mit Diffuslichtdurchlass

Regelung:

Computergesteuerte einachsige Nachführung erforderlich

Durchsicht:

Die Prismenplatten lassen keine direkte Durchsicht zu. Die Durchsicht ist nur in geöffneter Stellung zwischen den Lamellen möglich

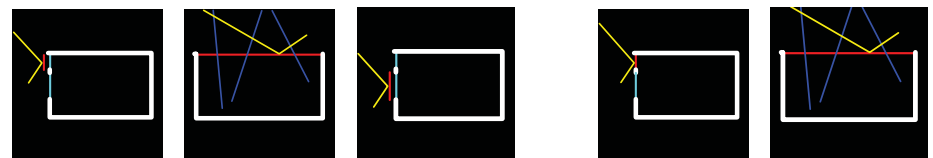
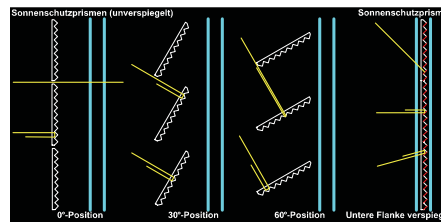


Abb. 8.52
Funktionsschema der Sonnenschutz-Prismen [KLEIN 2000 S2]

Erscheinungsbild:

Transparent strukturierte Lamellen. Durch die Dispersion der Prismen können Farbeffekte auftreten.

Sonnenschutz-Prismen, verspiegelt:

Funktion:

Reines Sonnenschutzsystem mit Diffuslichtdurchlass

Regelung:

Keine, feststehend

Durchsicht:

Keine

Erscheinungsbild:

Glasartige Struktur mit teilweiser Verspiegelung. Farbnuancen, ähnlich wie bei bedampften Isoliergläsern, können auftreten.

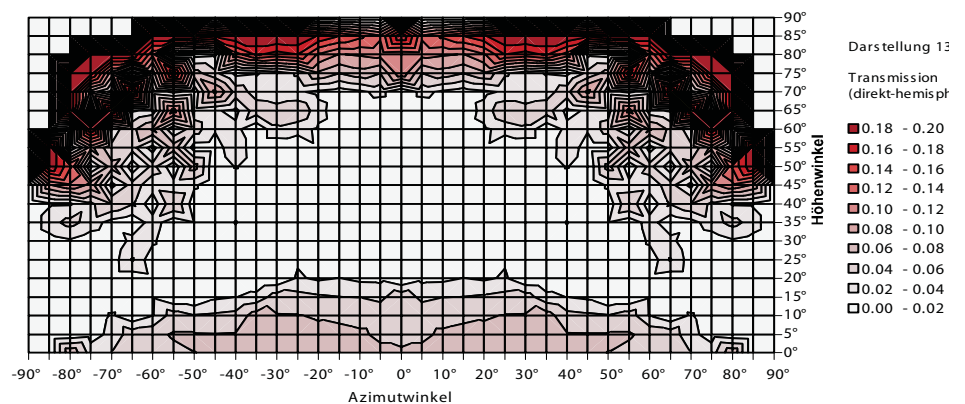


Abb. 8.53
Transmission (direkt-hemisphärisch) [KLEIN 2000 S3]

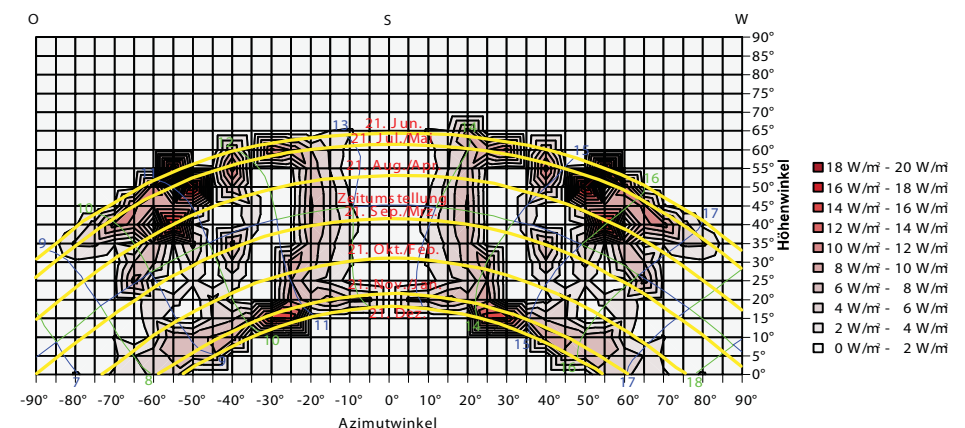


Abb 8.54
Absolute Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade (für 48° nördl. Breite) [KLEIN 2000 S4]

Die unverspiegelten Prismenelemente aus Acrylglas (Brechungsindex 1,45) wurden ideal, das heißt mit scharfen Kanten modelliert. Beim realen Produkt treten herstellungs-

bedingt verrundete Kanten auf. Das Simulationsmodell wurde mit einer Genauigkeit von 5° dem Profilwinkel der Sonne nachgeführt. Diese Nachführgenauigkeit wurde aus Zeitgründen gewählt, da sich der Prozess in OptiCAD nicht automatisieren lässt und daher für jeden einzelnen Sonnenprofilwinkel von Hand ausgeführt werden muss. Dieser Winkelbereich entspricht aber ungefähr dem Fangwinkel eines 90° Prismas. Das Ergebnis wird daher kaum beeinträchtigt.

Bei den Sonnenschutz-Prismen handelt es sich um ein reines Sonnenschutzsystem ohne Lichtlenkung (erkennbar an den niedrigen Werten für die direkt-hemisphärische Transmission in den Abb. 8.53 + 8.54). Die Sonnenschutzwirkung ist mit direkten Transmissionswerten zwischen 0 % und ca. 10 % sehr gut. Nur für sehr hohe Sonnenprofilwinkel (über 80°) lässt der Sonnenschutz deutlich nach (vgl. Abb. 8.53). Bei flachen Sonnenprofilwinkeln wird noch ein gewisser Anteil des einfallenden Lichts zwischen den einzelnen Lamellenelementen durchgelassen (vgl. Abb. 8.55). Dies kann zu Blendung führen. Die verrundeten Kanten (in der Simulation nicht berücksichtigt) verursachen eine Auffächerung der transmittierten Lichtstrahlen und können ebenfalls Blendung verursachen. Die Sonnenschutzwirkung wird davon allerdings kaum beeinträchtigt. Da es sich hier um ein außenliegendes System handelt, muss beachtet werden, dass eine witterungsbedingte Verschmutzung die Eigenschaften beeinflussen kann.

Das System hat mit 64,4 % einen relativ hohen Diffuslichteintrag. Das ist aus tageslichttechnischer Sicht zu begrüßen. In der thermischen Auslegung muss man diesem Phänomen allerdings Rechnung tragen. [KLEIN 2000_7]

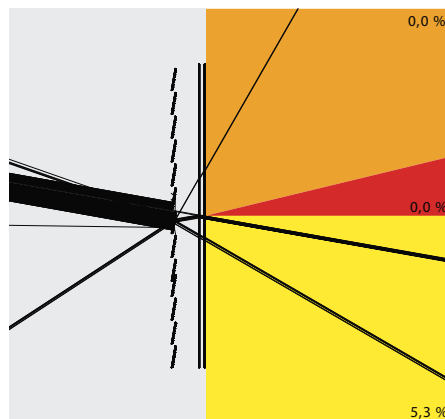


Abb. 8.55
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 10° [KLEIN 2000 S5]

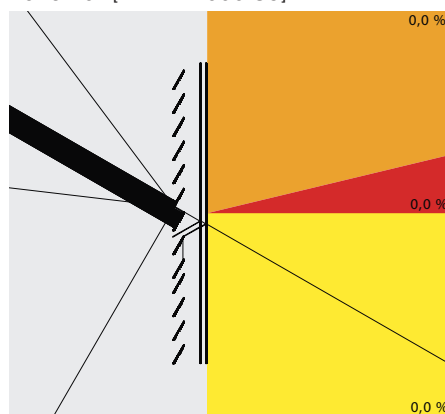


Abb 8.56
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 30° [KLEIN 2000 S6]

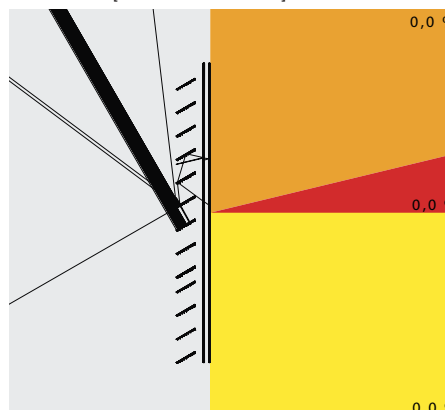


Abb 8.57
Verteilung der direkt-hemisphärischen Transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 60° [KLEIN 2000 S7]



Abb 8.58
Projektbeispiel:
Sparkasse, Fürstfeldbruck
Oben:
Außenansicht der Fassade
Mitte und unten:
Innenansicht, Büroraum [KLEIN 2000 S8]

8.2 Raytracing für Glasprismen

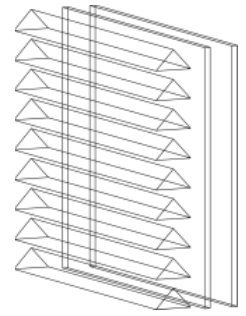


Abb. 8.59
OptiCAD-Modell der 90°-Prismen zur Lichtlenkung [KLEIN 2000 LL1]

8.2.1 90°-Prisma zur Lichtlenkung

Funktion:

Keine Sonnenschutzfunktion
Lichtlenkwirkung für direktes und diffuses Licht

Regelung:

Keine, feststehend

Durchsicht:

Die Glasprismen selbst lassen keine Durchsicht zu. Für ungefähr horizontale Blickrichtungen ist eine eingeschränkte Durchsicht durch die Zwischenräume der Elemente möglich

Erscheinungsbild:

Glasstruktur - durch die Dispersion der Prismen können Farbeffekte auftreten

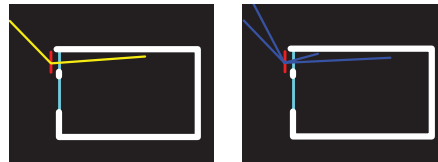
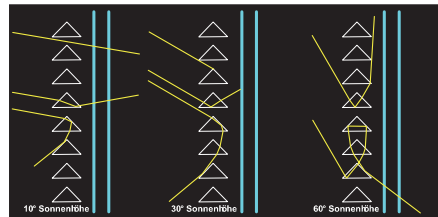


Abb. 8.60
Funktionsschema der 90°-Prismen zur Lichtlenkung. [KLEIN 2000 LL2]

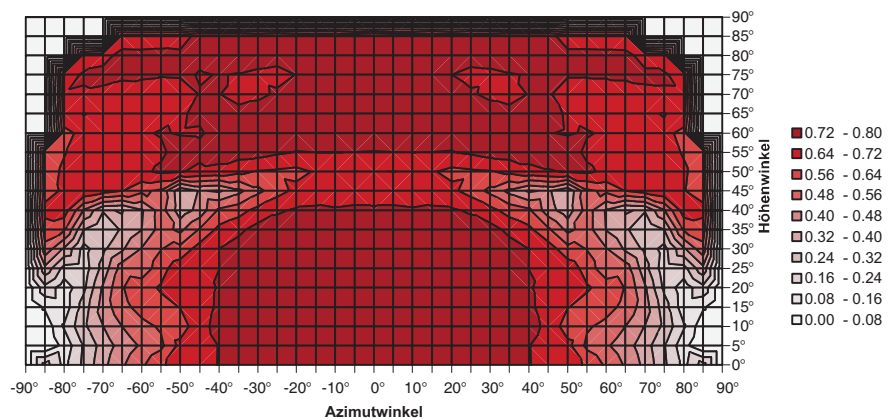


Abb. 8.61 Lichttransmissionsgrad direkt-hemisphärisch
Transmissionsgrad für 90°-Glasprismen, die feststehend, übereinander angeordnet sind. Das System hat einen sehr hohen Transmissionsgrad für alle Höhenwinkel. [KLEIN 2000 LL3]

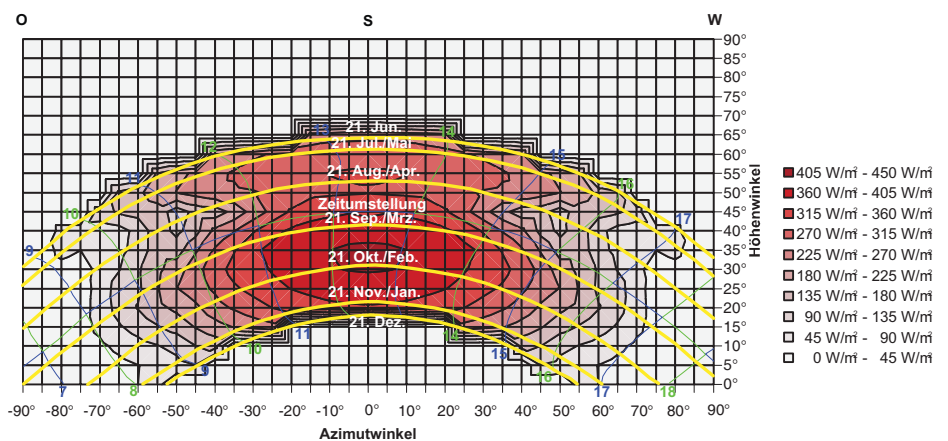


Abb. 8.62 Lichttransmissionsgrad direkt-hemisphärisch nach der solaren Einstrahlung bewertet (W/qm). [KLEIN 2000 LL4]

Hier wurde von feststehenden 90° Prismen, ohne zusätzliche Absorberschicht, zur Lichtlenkung ausgegangen.

Bei flachen Einfallswinkeln der Sonne wird ein großer Anteil des transmittierten Lichts in die Raumtiefe umgelenkt. Durch die fehlende Absorberschicht wird ein Teil des Lichts nach unten umgelenkt, so dass im Raum Blendungsgefahr besteht.

Bis zu einer Sonnenhöhe von 30° findet eine gute Raumbtiefausleuchtung statt. Diese nimmt mit zunehmender Sonnenhöhe ab. Der umgelenkte Anteil bleibt auf den fensternahen Bereich der Decke beschränkt. Bei 60° Sonnenhöhe wird fast kein Licht mehr an die Decke umgelenkt.

Um die Lichtlenkwirkung des Systems bei großen Sonnenhöhen zu verbessern, müssen die Profile nachgeführt werden. Ein starrer Einbau ist wenig sinnvoll. Das System hat eine sehr hohe Transmission für diffuses Tageslicht (71,4 %). Der größte Teil davon wird an die Decke gelenkt. Daher sind die feststehenden Glasprismen besser für den Einsatz in Nordfassaden geeignet.

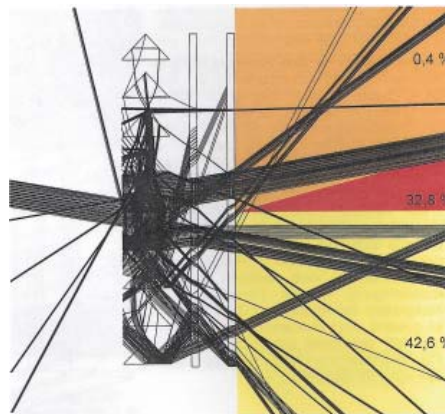


Abb. 8.63
Verteilung der direkt-hemisphärischen transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 10° [KLEIN 2000 LL5]

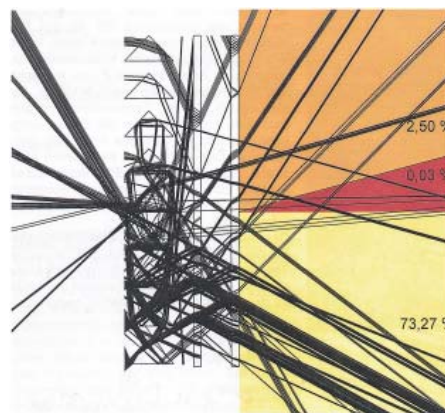


Abb. 8.64
Verteilung der direkt-hemisphärischen transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 30° [KLEIN 2000 LL6]

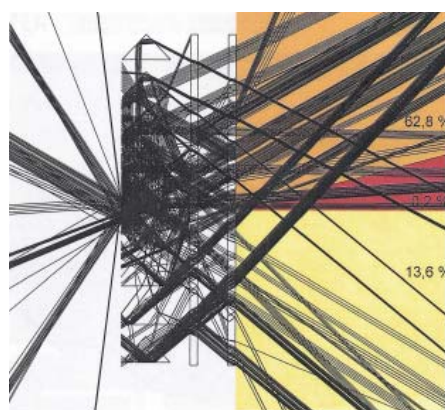


Abb. 8.65
Verteilung der direkt-hemisphärischen transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 60° [KLEIN 2000 LL7]

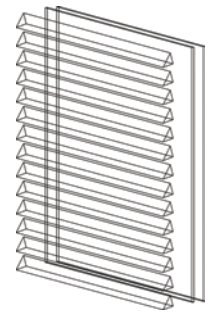


Abb. 8.66
OptiCAD-Modell der 90°-Prismen zur
Lichtlenkung [KLEIN 2000 TS 1]

8.2.2 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz

Funktion:

Reines Sonnenschutzsystem mit Diffuslichtdurchlass

Regelung:

Computergesteuerte einachsige Nachführung erforderlich

Durchsicht:

Die Glasprismen selbst lassen keine Durchsicht zu. Für ungefähr horizontale Blickrichtungen ist eine eingeschränkte Durchsicht durch die Zwischenräume der Elemente möglich.

Erscheinungsbild:

Glasstruktur - durch die Dispersion der Prismen können Farbeffekte auftreten

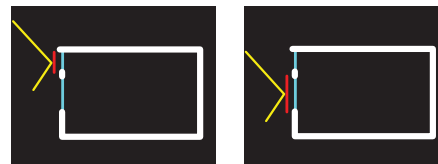
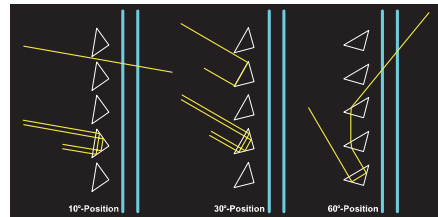


Abb. 8.67
Funktionsschema der 90°-Prismen zur
Lichtlenkung [KLEIN 2000 TS 2]

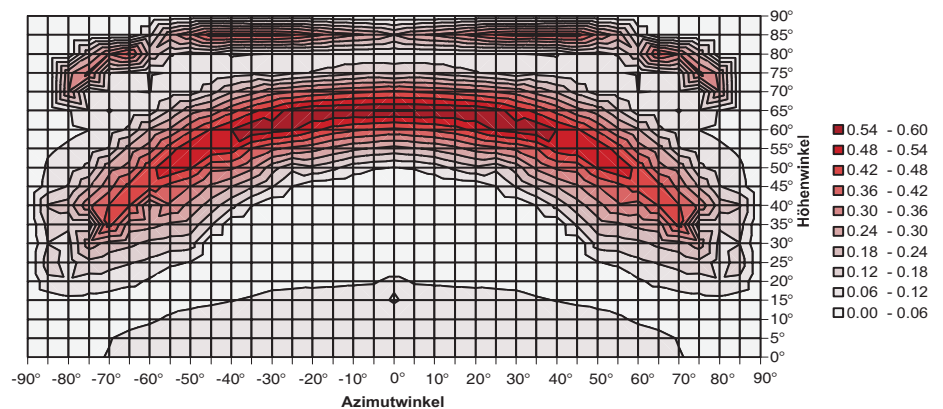


Abb. 8.68 Lichttransmissionsgrad direkt-hemisphärisch [KLEIN 2000 TS 3]

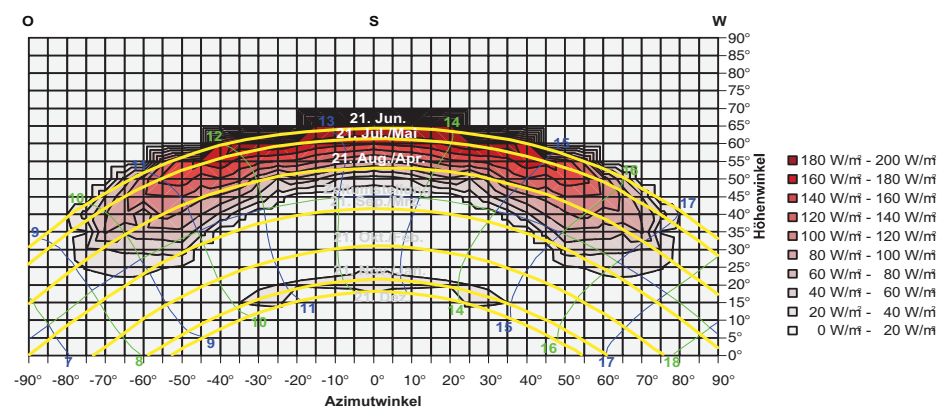


Abb. 8.69 Lichttransmissionsgrad direkt-hemisphärisch nach der solaren Einstrahlung bewertet (W/qm) [KLEIN 2000 TS 4]

Hier handelt es sich um ein System aus drehbar gelagerten, nachgeführten 90°-Prismen, die als aussenliegender und transparenter Sonnenschutz eingesetzt werden sollen. Die 90°-Glasprismen werden dem Höhenwinkel der Sonne so nachgeführt, dass die einfallende Strahlung senkrecht auf die Hypotenuse der Prismen trifft. Die nach unten zeigende Kathete wird mit einer absorbierenden Beschichtung versehen. Diese ist für die nicht vorhandene Transmission bei Sonnenhöhen bis 50° verantwortlich. Für Sonnenhöhen bis 20° dringt direktes Licht zwischen den Prismenelementen durch. Dies kann zu Blendungen führen. Im Bereich mittlerer Sonnenprofilwinkel (20° bis 45°) funktioniert der Sonnenschutz gut.

Ab einer Sonnenhöhe von ca 50° lässt die Sonnenschutzwirkung deutlich nach. Das transmittierte Licht wird überwiegend an die Decke umgelenkt, gleichzeitig wird auch ein beträchtlicher Teil nach unten gelenkt. Dies hat Blendung zur Folge. Durch das Aufbringen eines Absorbers auf der nach unten gerichteten Kathete kann die Umlenkung des Lichtes nach unten verhindert werden, so dass auch für größere Höhensonnen die Sonnenschutzwirkung gut funktioniert.

Auch die dazugehörige winkelabhängige, jährliche solare Einstrahlung im Tagesverlauf zeigt die sehr gute Wirkungsweise der 90°-Prismen als transparenter Sonnenschutz.

Der Transmissionsgrad für diffuses Licht ist gleichzeitig sehr hoch mit 72,2%. Das System weist gute Diffuslichtlenkeigenschaften auf (s.Abb. 8.69).

Bei den Glasprismen müssen herstellungsbedingt verrundete Kanten in Betracht gezogen werden (in der Simulation nicht berücksichtigt). Durch solche Ungenauigkeiten wird eine Auffächerung der transmittierten

Lichtstrahlen verursacht, was zu Blendung führen kann. Die thermische Sonnenschutzwirkung wird davon allerdings kaum beeinträchtigt.

Neben der Blendungsgefahr ist die hohe Gesamttransmission im Sommer aus thermischer Sicht bedenklich.

Da es sich hier um ein außenliegendes System handelt, muss beachtet werden, dass eine witterungsbedingte Verschmutzung die Eigenschaften beeinflussen kann.

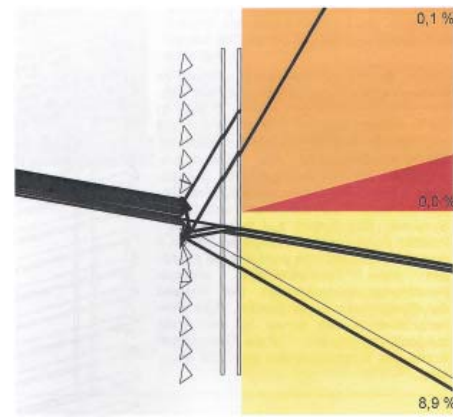


Abb. 8.70 Verteilung der direkt-hemisphärischen transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 10° [KLEIN 2000 TS 5]

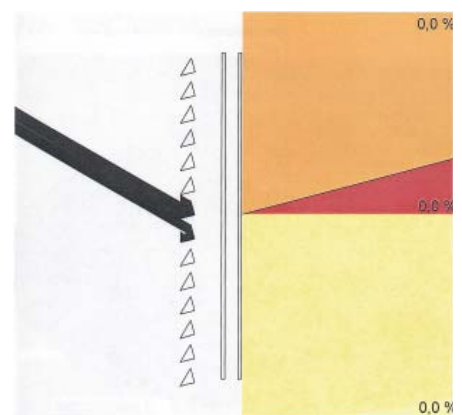


Abb. 8.71 Verteilung der direkt-hemisphärischen transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 30° [KLEIN 2000 TS 6]

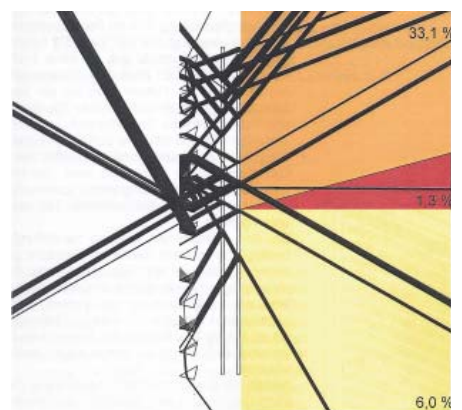


Abb. 8.72 Verteilung der direkt-hemisphärischen transmission für Azimut 0° und Sonnenhöhe 60° [KLEIN 2000 TS 7]

8.3 Auswertung der Simulationen

In nachstehender Tabelle sind die im Kapitel 8.1 und 8.2 untersuchten TLS mit numerischen Angaben zur direkthemisphärischen-, zur absoluten Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade bei Azimut 0° und die Verteilung der direkt hemisphärischen Transmission im Raum tabellarisch dargestellt.

Die Betrachtungen zeigen dabei folgende Ergebnisse:

- Für die direkthemisphärische Transmission bei Azimut 0° und den Sonnenhöhen 30°, 55° und 65°, dass ausgenommen von den 90°-Prismen und dem System Y-Inglas, die Werte aller anderen Systeme deutlich unter denen der Referenz (normale Isolierverglasung) liegen. Das bedeutet, dass in der Summe weniger "Licht" in den Innenraum gelangt, allerdings ohne eine Aussage zur Verteilung im Raum.

- Für die absolute Transmission für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade bei Azimut 0° erhält man erwartungsgemäß ähnliche Ergebnisse, wie für die direkthemisphärische Transmission.

Das 90°-Prisma zur Lichtlenkung weist in den Monaten von Januar bis Mai annähernd dieselben hohen Wattzahlen wie das Referenzsystem auf, was einen hohen Wärmeeintrag zur Folge hat.

Das 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz hingegen lässt wenig direkte Strahlung und damit Wärme in den Raum. Seine Funktion als Sonnenschutz ist dadurch bestätigt. Die direkthemisphärische Transmission nimmt bei hohen Sonnenständen durch die Wiedereinkopplung der reflektierten Strahlung über das darüber liegende Prisma zu. Dieser Effekt kann durch eine Reflektor-Absorber-

Schicht eliminiert werden.

- Ziel aller TLS sollte eine gute Raumentiefenausleuchtung (ab 2 m vom Fenster) sein.

Von den auf dem Markt vorhandenen Systemen weisen die Produkte Okasolar und Y-Inglas die besten Ergebnisse mit Werten zwischen 16% und 22% auf. Bei diesen Produkten wird abhängig von der Sonnenhöhe ein sehr großer Teil nach unten gelenkt, 13% - 70% bei Y-Inglas und 2% -30% bei Okasolar.

Die Ergebnisse für das 90°-Prisma zur Lichtlenkung sind nicht befriedigend (13% - 73%, abhängig von der Sonnenhöhe werden nach unten gelenkt).

Dies hat zur Folge, dass der Einsatz des 90°-Prismas zur Tageslichtlenkung nicht weiter verfolgt wird.

	Direkthemisphärische Transmission bei Azimut 0° und			Absolute Transmission für Azimut 0° (in W/m²) für direkte Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade							Verteilung der Direkthemisphärische Transmission:											
	30°	55°	65°	Jun	Jul/Mai	Aug/Apr	Sep/Mrz	Okt/Feb	Nov/Jan	Dez	10°	30°	60°	zur Raumentiefenausleuchtung	10°	30°	60°	10°	30°	60°		
Referenz	0,81-0,90	0,72-0,81	0,54-0,63	280-225	225-270	315-360	405-450	405-450	360-405	225-270												
Fisch	0,54-0,60	0,54-0,60	0,48-0,54	120-150	150-180	240-270	270-300	240-270	180-210	120-150	4,2	42,8	41,0	6,6	3,9	0,0	1,2	3,9	5,6			
Y-Inglas	0,72-0,80	0,64-0,72	0,56-0,64	160-200	200-240	280-320	360-400	360-400	320-360	160-200	2,5	11,4	50,7	0,2	16,9	13,0	68,9	43,8	13,0			
Lumitop	0,35-0,42	0,35-0,42	0,42-0,49	90-120	120-150	180-210	240-270	210-240	180-210	120-150	18,2	23,4	18,0	2,7	4,3	0,2	7,8	13,0	13,4			
Okasolar	0,56-0,64	0	0	0-35	0-35	0-35	0-35	245-280	245-280	245-280	18,3	24,4	1,6	22,7	17,2	0,0	30,7	11,0	1,9			
Prismenplatten-Sonnenschutz	0	0	0	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
90°-Prisma-Lichtlenkung	0,72-0,80	0,64-0,72	0,72-0,80	180-225	225-270	315-360	360-405	405-450	360-405	180-225	0,4	2,5	65,8	32,6	0,03	0,2	42,6	73,3	13,6			
90°-Prisma-transparenter Sonnenschutz	0,00-0,06	0,18-0,24	0,54-0,60	180-200	160-180	60-80	0-20	0-20	20-40	0-20	0,1	0,0	31,1	10,0	0,0	1,3	8,9	0,0	6,0			

8.4 Vorgaben, Randbedingungen für das Raytracing für Glasprismen für Optis & Energy Concepts

8.4.1 Einleitung

Die Ergebnisse der Profilstudien via Modelle, Strahlverfolgung von Hand und die Raytracing Untersuchungen im Rahmen der in Kapitel 8.1 bis 8.3 gezeigten Diplomarbeit [Klein 2000] sollen nun von einem unabhängigen wissenschaftlichen Institut belegt werden. Mit dieser Aufgabe wurde das lichttechnische Institut Optics & Energy Concepts (OEC) beauftragt, deren Ergebnisse in Kapitel 8.5 dargestellt sind. Als Grundlage für deren Arbeit stand OEC die nachfolgende Zieldefinierung zur Verfügung.

8.4.2 Sonnenschutzsystem aus 90°-Prismen mit Diffuslichtlenkung, Systembeschreibung

Die 90° - Prismen als nachgeführtes, aktives System werden vertikal übereinander angeordnet und in einachsiger Nachführung auf den Sonnenwinkel so eingestellt, dass die Hypotenuse des Profils senkrecht zu dem einfallenden Sonnenwinkel steht und durch Totalreflexion die Strahlen nach aussen reflektiert.

Durch die vertikale Anordnung übereinander wird an der nach unten zeigenden Kathetenfläche ein Absorber notwendig, damit das vom darunter liegenden Prisma total reflektierte Licht nicht in den Raum bzw. nach aussen reflektiert wird und zu Blendung führt.

Die so ausgerichteten Prismen reflektieren das direkte Sonnenlicht durch zweimalige Reflexion zurück, lenken aber diffuses Tageslicht aus anderen Richtungen in den Raum.

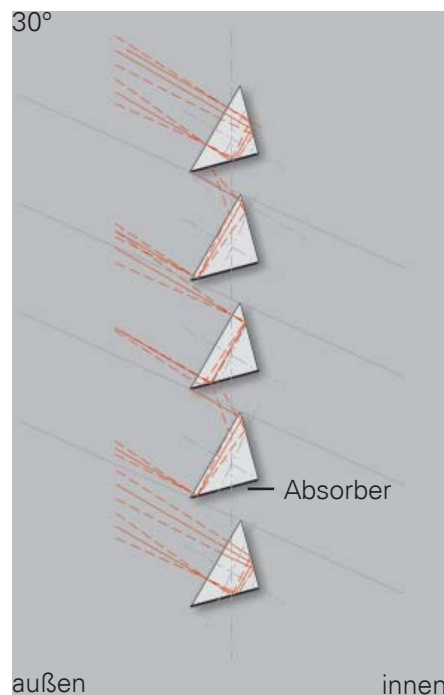


Abb. 8.73 Funktionsschema Sonnenschutz mit Sonnenhöhe 30°

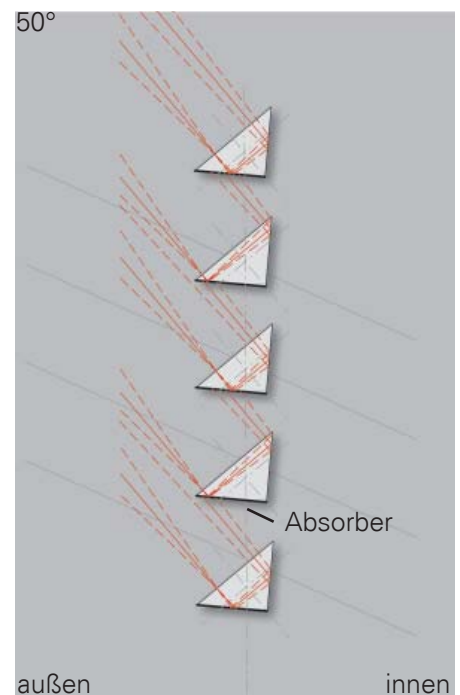


Abb. 8.75 Funktionsschema Sonnenschutz mit Sonnenhöhe 50°

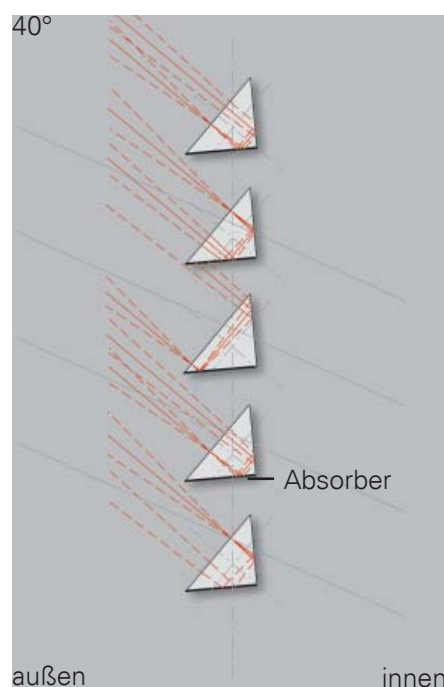


Abb. 8.74 Funktionsschema Sonnenschutz mit Sonnenhöhe 40°

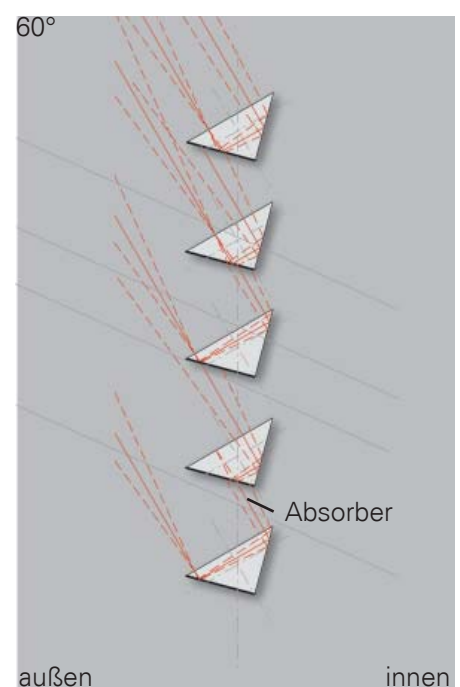


Abb. 8.76 Funktionsschema Sonnenschutz mit Sonnenhöhe 60°

8.4.3 Zieldefinierung für das 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz

Ziel des Projektes ist die Optimierung des oben beschriebenen Sonnenschutzsystems für den Oberlichtbereich eines Fensters in einer vertikalen Südfassade.

Es sollen möglichst niedrige Werte für die direkt-hemisphärische Transmission erreicht werden (0% - 10%). Zunächst soll eine Ermittlung der Eigenschaften des vorhandenen Systems erfolgen.

In einem zweiten Schritt sollen dann Maßnahmen zur Verbesserung des Systems vorgeschlagen werden. Folgende Punkte sollten untersucht werden:

1. Beurteilung des optischen Verhaltens des oben beschriebenen Systems durch analytische Berechnung und Strahlverfolgung

Das beschriebene Sonnenschutzsystem soll hinsichtlich der folgenden Aspekte untersucht werden:

- Überprüfung der "totalen" Ausblendung der direkten Strahlen. Die zu prüfenden Sonnenhöhen sollen nach Absprache festgelegt werden. (evtl. 20°/30°/45°/60°)
- Der Transmissionsgrad für diffuses Licht
- Die vertikale und horizontale Verteilung des transmittierten diffusen Lichts im Raum.
- Toleranzangaben für die Glasprofile bzgl. Kantenverrundung und 90°-Winkel

2. Untersuchung von Möglichkeiten zur Optimierung der Sonnenschutzfunktion

Bei der Optimierung sollen die folgenden Parameter überprüft werden:

- Geometrie der Glasprismen
- Gegenseitiger Abstand der Einzelprofile
- Profilorientierung bzw. Entwicklung einer Regelungsstrategie für die Reaktion des Sonnenschutzsystems auf die stündliche Veränderung der Einstrahlungsbedingungen an klaren Tagen im Verlauf eines Jahres.

3. Darstellung der Ergebnisse in Diagrammen und einem Bericht.

8.5 Ergebnisse der ersten lichttechnischen Untersuchungen [OEC 2001]

8.5.1 Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90°-Prismen, Systembeschreibung

Prismenstäbe aus Glas mit gleichschenkelig dreieckigem Profil und einem 90° Winkel werden parallel übereinander im Oberlichtbereich einer Fensteröffnung angeordnet. Die einzelnen Prismen sind um die Längsachse im Schwerpunkt drehbar gelagert und werden so nachgeführt, dass die Hypotenuse mit der Sonnenelevation zur Horizontalen ange stellt wird. In einer Konfiguration wird die untere Kathete jedes Prismas als von der Glasseite reflektierend von der Außenseite aussen hin absorbierend modelliert (entsprechend etwa der Beschichtung eines Badezimmer spiegels).

Mit den Prismen soll das direkte Sonnenlicht durch Retroreflexion aus dem Raum ausgeblendet werden. Diffuse Umgebungs- und Himmelsstrahlung jedoch in hohem Maße in den Raum transmittiert werden.

Für das Material Glas wurde ein Brechungsindex von 1.47 angenommen. Das Verhalten eines Lichtstrahls an den Grenzflächen zwischen Glas und Luft wurde entsprechend den Fresnelschen Formeln unter Mittelung beider Polarisierungen berechnet. Die Entscheidung über Transmission oder Reflexion an der Grenzfläche wurde statistisch gemäß den jeweiligen Koeffizienten gefällt. So werden alle möglichen Lichtwege korrekt repräsentiert und gleichzeitig die Ausgewogenheit der Leistungsbilanz gewährleistet. [OEC 2001_1]

8.5.2 Richtungsabhängige Transmission durch einzelne Prismen

Die Transmission von Strahlung, die parallel auf die Eintrittsfläche des Prismas (im Querschnitt die Hypotenuse des Dreiecks) ein fällt wurde in Abhängigkeit der zweidimensionalen Einfallrichtung untersucht.

Hierdurch kann der Richtungsbereich identifiziert werden, aus dem kom mend die Strahlung ausgeblendet wird. Außerdem wird der Einfluss von endlichen Kantenradien auf die Qualität der Ausblendung erfasst.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Transmission von paralleler Strahlung als Höhenliniendarstellung im Richtungsraum. Es sind 5%-Höhenlinien beginnend mit 5% gezeigt. Die Koordinaten k_{axial} und $k_{\text{transversal}}$ sind die Projektionen des Einheits richtungsvektors der Strahlung in die Ebene der Eintrittsfläche. Der Schnitt bei $k_{\text{axial}}=0$ entspricht Direktstrahlungs richtungen mit Azimutwinkel=0, Der Schnitt bei $k_{\text{Transversal}}=0$ entspricht Direktstrahlungs richtungen mit Elevationswinkel=0. Zusätzlich ist ein Punktgitter für Azimutwinkel zwischen 0° und 360° und Elevationswinkel zwischen 0° und 90° in 10° Schritten eingetragen. [OEC 2001_1]

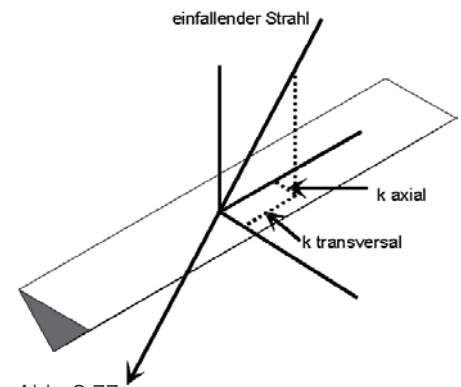


Abb. 8.77 Richtungsraum auf dem einzelnen Prisma [OEC_A1]

8.5.2.1 mit perfekten Kanten

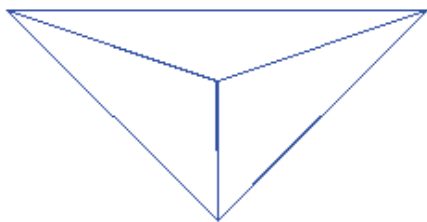


Abb. 8.78
Profil des 90°-Prismas mit perfekten Kanten [OEC_A2]

8.5.2.2 mit perfekten Kanten + Reflektor-Absorber-

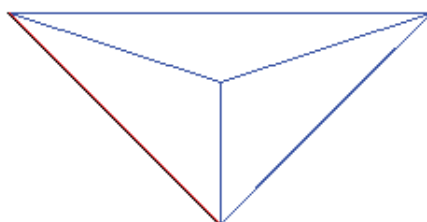


Abb. 8.79
Profil des 90°-Prismas mit perfekten Kanten und Reflektor-Absorber-Schicht. [OEC_A3]

8.5.2.3 mit kleinem Radius

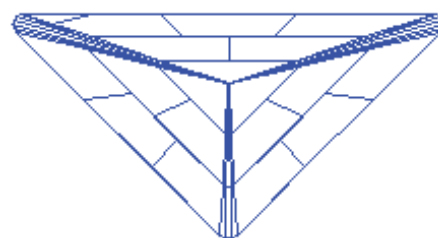
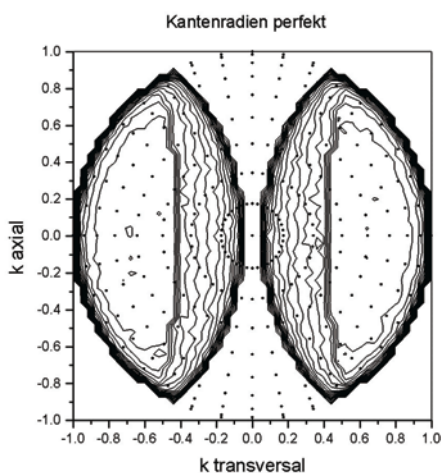
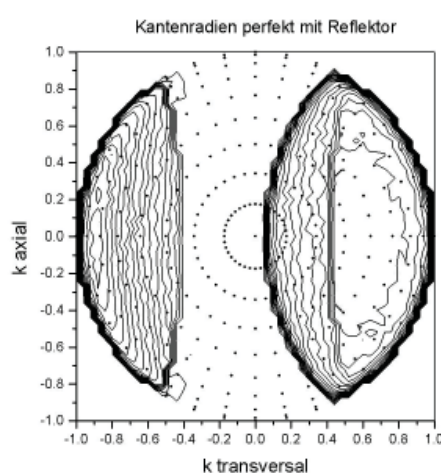


Abb. 8.80
Prisma mit ‚kleinen Kantenradien‘ (0.8 mm in den 45°-Kanten und 1.0 mm in der 90°-Kante) [OEC_A4]

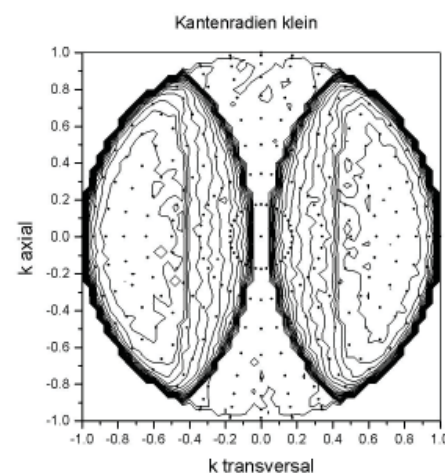


Transmission der Direktstrahlung durch das 90°-Prisma mit perfekten Kanten. Man erkennt deutlich den Ausblendbereich bei kleinen Werten von $k_{\text{transversal}}$ (k_{t}).

Im Ausblendbereich ist die Transmission unterhalb von 5%. Die Transmission beginnt bei Werten von $k_{\text{t}} = 0.046$, was einem Winkel von $\text{Asin}(0.046) = 2.6^\circ$ in Elevations-Richtung entspricht. Bei $k_{\text{t}} = 0.07$ (4°) beträgt die Transmission bereits 25%. Das Ausmaß des Ausblendbereichs, insbesondere die Ausdehnung in k_{t} -Richtung, lässt direkt auf die notwendige Nachführgenauigkeit des Systems schließen. Die Nachführfehler müssen immer innerhalb des Ausblendbereiches liegen. [OEC2001_2]



Transmission der Direktstrahlung durch das Prisma mit perfekten Kanten und Reflektor-Absorber-Schicht. Man erkennt die deutliche Erweiterung des Ausblendbereichs in einer Richtung von k_{t} . Durch den Reflektor muss auf einer Seite des Prismas die Totalreflexionsbedingung nicht mehr erfüllt werden. Dieser breitere Ausblendbereich tritt bei allen Systemen mit Reflektor-Absorber-Schicht auf und ermöglicht auch im Gesamtmodul sehr hohe Nachführtoleranzen, die allerdings asymmetrisch um die Senkrechte sind. [OEC2001_3]



Transmission der Direktstrahlung durch das Prisma mit kleinen Kantenradien (0,8 mm in den 45° Kanten, 1,0 mm in der 90° - Kante). Man erkennt die erhöhte Transmission im Ausblendbereich mit Werten zwischen 5% und 10% bedingt durch die Kantenverrundung. Ansonsten ist die Charakteristik identisch mit der für perfekte Kantenradien. [OEC2001_4]

8.5.2.4 mit kleinem Radius + Reflektor/Absorberschicht

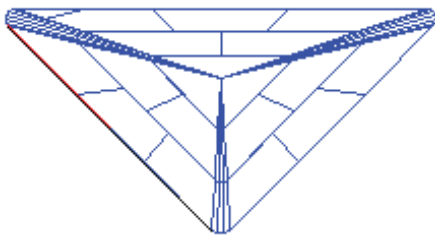


Abb. 8.81
Prisma mit kleinen Kantenradien und Reflektor-Absorber-Schicht. [OEC_A5]

8.5.2.5 mit großem Radius

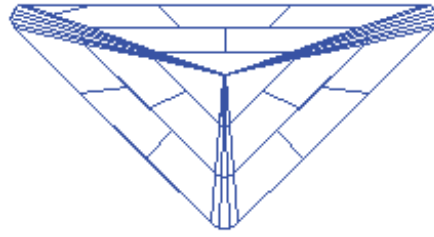


Abb. 8.82
Prisma mit ‚großen Kantenradien‘ (1.0 mm in den 45°-Kanten und 1.5 mm in der 90°-Kante) [OEC_A6]

8.5.2.6 mit großem Radius + Reflektor/Absorberschicht

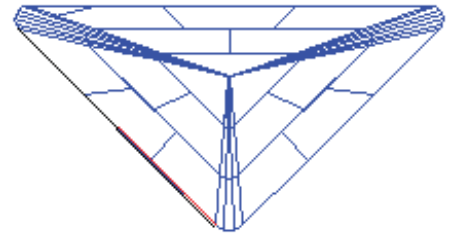
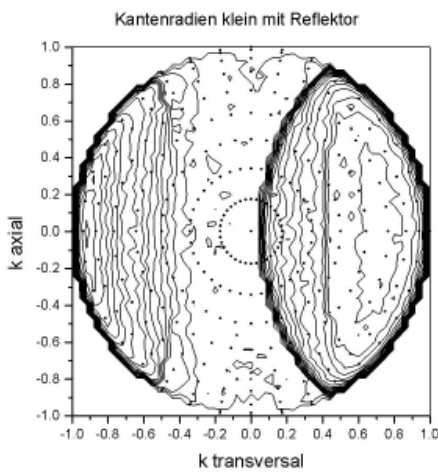
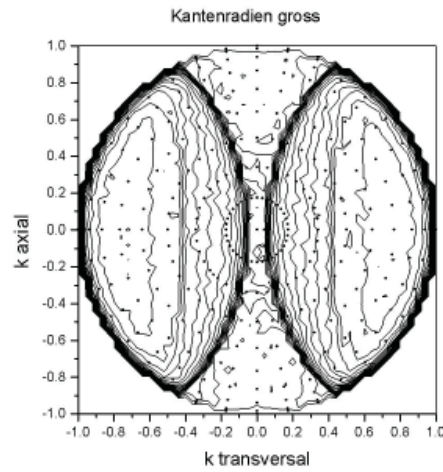


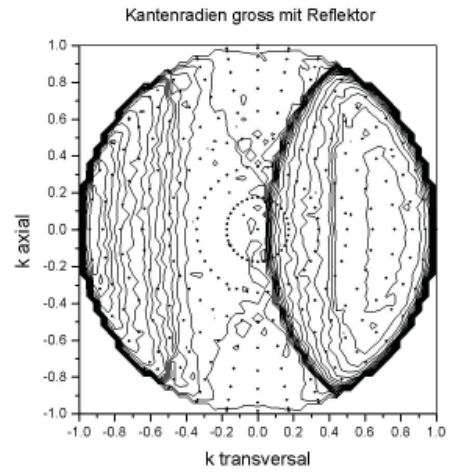
Abb. 8.83
Prisma mit großen Kantenradien und Reflektor-Absorber-Schicht. [OEC_A7]



Transmission der Direktstrahlung durch das Prisma mit kleinen Kantenradien (0,8 mm in den 45°-Kanten, 1,0 mm in der 90°-Kante) und Reflektor-Absorber-Schicht. Man erkennt die erhöhte Transmission im Ausblendbereich mit Werten zwischen 5% und 10% bedingt durch die Kantenverrundung. Ansonsten ist die Charakteristik identisch mit der für perfekte Kantenradien. [OEC2001_5]



Transmission der Direktstrahlung durch das Prisma mit großen Kantenradien (1,0 mm in den 45°-Kanten, 1,5 mm in der 90°-Kante). Man erkennt die erhöhte Transmission im Ausblendbereich mit Werten zwischen 5% und 15% bedingt durch die Kantenverrundung. Ansonsten ist die Charakteristik identisch mit der für perfekte Kantenradien. [OEC2001_6]



Transmission der Direktstrahlung durch das Prisma mit großen Kantenradien (1,0 mm in den 45°-Kanten, 1,5 mm in der 90°-Kante) und Reflektor-Absorber-Schicht. Man erkennt die erhöhte Transmission im Ausblendbereich mit Werten zwischen 10% und 15%, bedingt durch die Kantenverrundung. Ansonsten ist die Charakteristik identisch mit der für perfekte Kantenradien. [OEC2001_7]

8.5.2.7 mit perfekten Kanten und 87°-Winkel

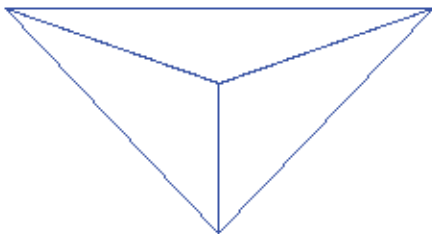


Abb. 8.84
Prisma mit perfekten Kanten und 87°-Winkel [OEC_A8]

8.5.2.8 mit perfekten Kanten und 93°-Winkel

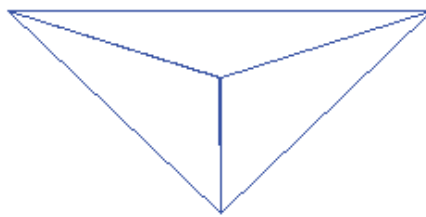
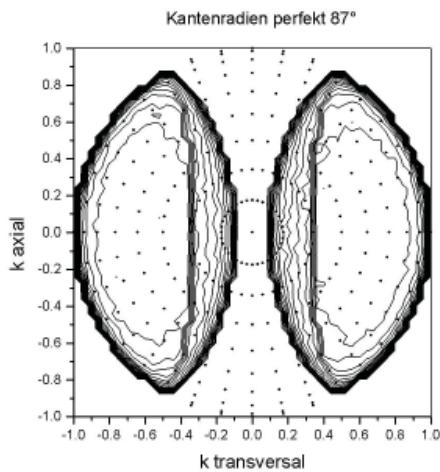
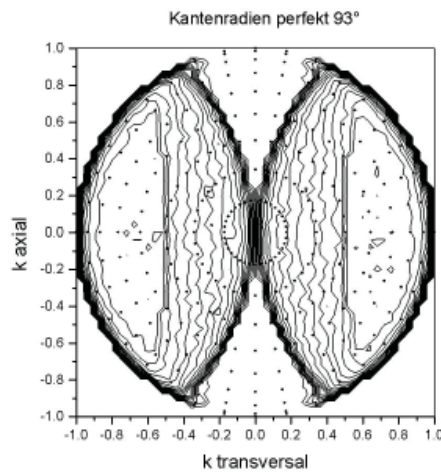


Abb. 8.85
Prisma mit perfekten Kanten und 93°-Winkel [OEC_A9]



Transmission der Direktstrahlung durch das Prisma mit perfekten Kanten und einem "rechten" Winkel von nur 87°. Man erkennt den im Vergleich zum 90°-Prisma größeren Ausblendbereich. Die Nachführung in Elevationsrichtung muss also weniger genau sein. [OEC2001_8]



Transmission der Direktstrahlung durch das Prisma mit perfekten Kanten und einem "rechten" Winkel von 93°. Man erkennt den im Vergleich zum 90°-Prisma verschwundenen Ausblendbereich. Die Totalreflexion geht verloren. [OEC2001_9]

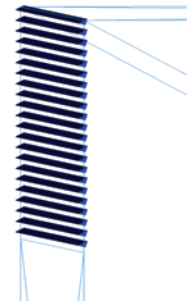


Abb. 8.86
Oberlichtbereich mit Prismenstäben in perspektivischer Darstellung [OEC_A10]

8.5.3 Definition Testraum

Die Abbildung 8.87 zeigt schematisch den Testraum mit den Abmessungen 5,00 m x 3,10 m im Querschnitt. Hellblau erscheint der Querschnitt des Raumes, links oben das Modul aus Prismenstäben dunkelblau, zwischen zwei rot gekennzeichneten Detektorflächen für die Strahlverfolgung. Ebenfalls rot ist horizontal eine weitere Detektorebene auf Tischhöhe angebracht. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich links unten in der Raumecke. Nach rechts weist die x-Achse, nach oben die z-Achse. Die y-Achse weist senkrecht in die Bildebene hinein.

aufgeschlüsselt nach Auftreffort der Strahlung:

- Gesamttransmission in den Raum
- Transmission zur Raumdecke
- Transmission auf die Tisch-Ebene
- Transmission zur Rückwand
- Transmission auf die Seitenwände

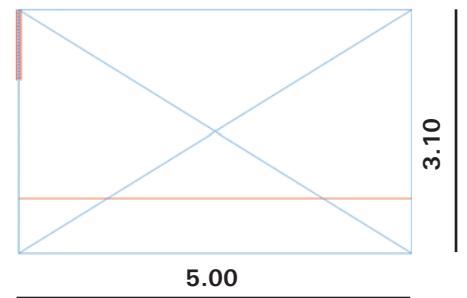


Abb. 8.87
Querschnitt durch den simulierten Testraum [OEC_A11]

Für exemplarische oder kritische Fälle werden außerdem die Richtungsverteilung der Strahlung beim Eintritt in den Raum (direkt hinter dem Modul) und die Ortsverteilung der Strahlung (Bestrahlungsstärkeverteilung) auf der Tisch-Ebene, an der Decke und auf den Wänden dargestellt. [OEC2001_10]

Abb. 8.88: Tabelle für die untersuchten Konfigurationen [OEC_A12]

Untersuchte Konfigurationen

Um den Einfluss verschiedener konstruktiver Parameter und des Sonnenstandes zu untersuchen wurden folgende Größen in verschiedenen Konfigurationen untersucht:

- Die Kantenradien der Prismenstäbe
- Der Abstand der Prismenstäbe zu einander
- Das Vorhandensein der Reflektor-Absorber-Schicht.
- Der Sonnenstand
- Der Nachführwinkel

Die Tabelle rechts zeigt die untersuchten Konfigurationen. [OEC Bericht 2001]

Für die Konfigurationen 1-20 wurde sowohl die direkte Sonnenstrahlung als auch separat die Transmission von Strahlung einer vor dem Modul befindlichen diffusen Strahlungsquelle untersucht.

Die Ergebnisse der Strahlverfolgungsrechnungen werden in unterschiedlicher Weise dargestellt. Die Transmissionswerte für die jeweilige Strahlung und Konfiguration werden

Kantenradius			Abstand (mm)		Absorber		Soll-Sonnenstand (Elevation/Azimet)				Abweichung der Elevation				Nr.
Perfekt	Klein	Groß	36	41	Ja	Nein	20/0	40/0	60/0	40/45	-8	-4	4	8	
	x		x		x		x								1
	x		x		x			x							2
	x		x		x				x						3
	x		x		x					x					4
	x			x	x		x								5
	x			x	x			x							6
	x			x	x				x						7
	x			x	x					x					8
	x		x			x	x								9
	x		x			x		x							10
	x		x			x			x						11
	x		x			x				x					12
	x			x		x	x								13
	x			x		x		x							14
	x			x		x			x						15
	x			x		x				x					16
		x		x	x			x							17
		x		x		x		x							18
x				x	x			x							19
x				x		x		x							20
	x				x			x			x				21
	x				x			x				x			22
	x				x			x					x		23
	x				x			x						x	24
	x					x		x			x				25
	x					x		x				x			26
	x					x		x					x		27
	x					x		x						x	28

8.5.4 Transmission von Diffusstrahlung

Die Abbildung 8.89 zeigt die Transmission von Diffusstrahlung für alle untersuchten Konfigurationen. Die Konfigurationen 21-28 berücksichtigen Effekte der Nachführung und sind somit für die Diffustransmission irrelevant, bzw. identisch mit den Konfigurationen 6 und 14. Die Diffustransmission der Module mit Reflektor-Absorber-Schicht liegt in der Regel um ca. 20 Prozentpunkte niedriger als die Transmission der Module ohne Reflektor-Absorber-Schicht. Sie liegt im Durchschnitt bei über 70%.

Der größte Teil der Strahlung wird jeweils auf die Decke und die Tischebene gelenkt.

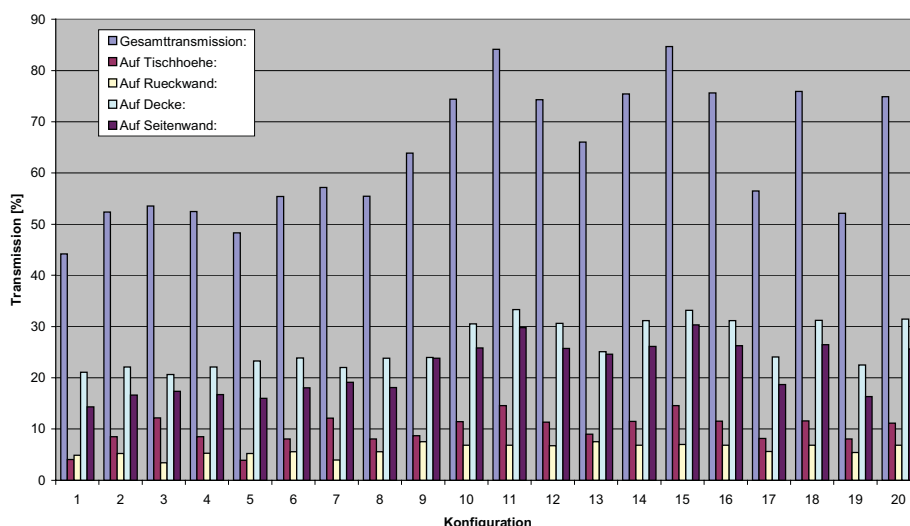


Abb. 8.89 Transmission von Diffusstrahlung in den Raum für alle untersuchten Konfigurationen [OEC_A13]

8.5.5 Transmission von Direktstrahlung

Die Abbildung 8.90 zeigt die Transmission von Direktstrahlung für alle untersuchten Konfigurationen. Man erkennt die deutliche Verringerung der Transmission durch die Absorber-Reflektor-Schicht. Ohne Absorber (9-14) treten bei höheren Sonnenständen Lichtwege auf, die sehr viel Direktstrahlung in den Raum transportieren können. Man erkennt auch die hervorragende Wirkungsweise des Systems bei perfekten Kantenradien (19,20), wo bei 40° Elevationswinkel praktisch keine Transmission entsteht.

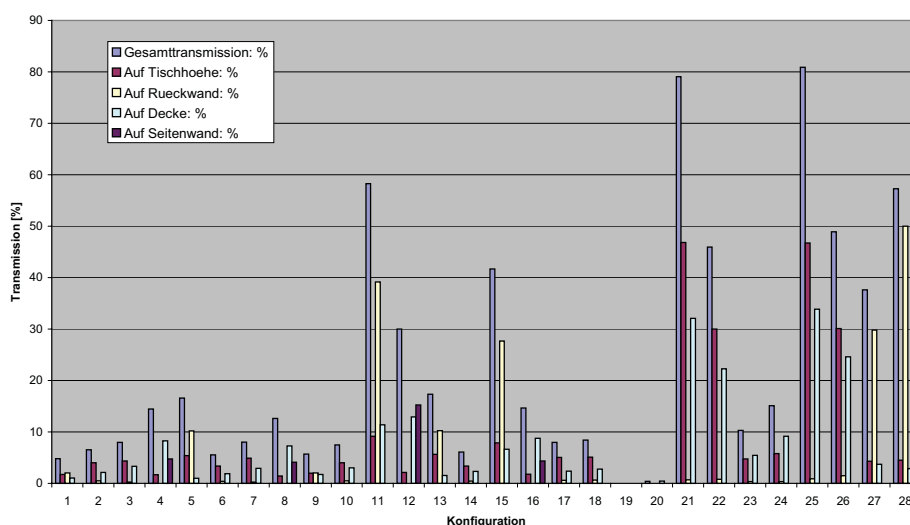


Abb. 8.90 Transmission der direkten Sonnenstrahlung in den Raum für alle untersuchten Konfigurationen [OEC_A14]

8.5.6 Lichtverteilung im Raum

Exemplarisch wird für die Konfiguration 6 (Sonnenstand 40° mit Absorber, kleinem Radius und einem Profilabstand von 41 mm) die transmittierte Diffusstrahlung auf die Decke, die Rückenwand und die Tischebene ab einer Höhe von 70 cm dargestellt. [OEC_2001_12]

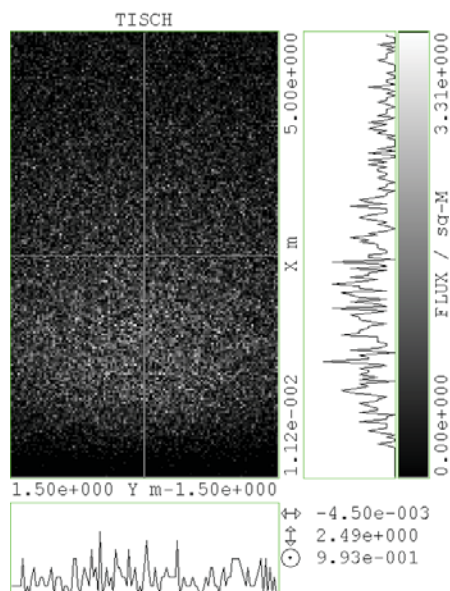


Abb. 8.91
Bestrahlungsstärkeverteilung in Tischebene [OEC_A15]

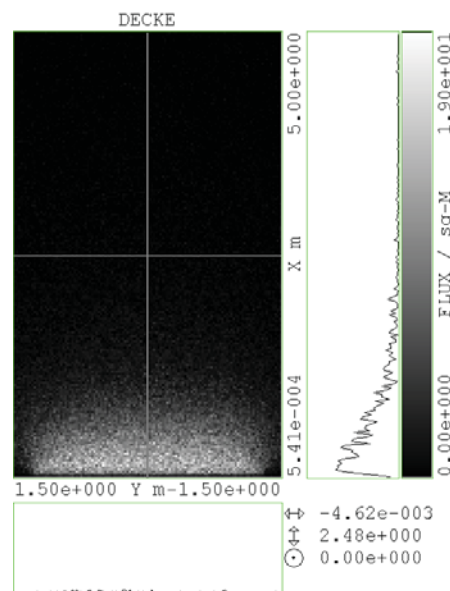


Abb. 8.93
Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Decke [OEC_A17]

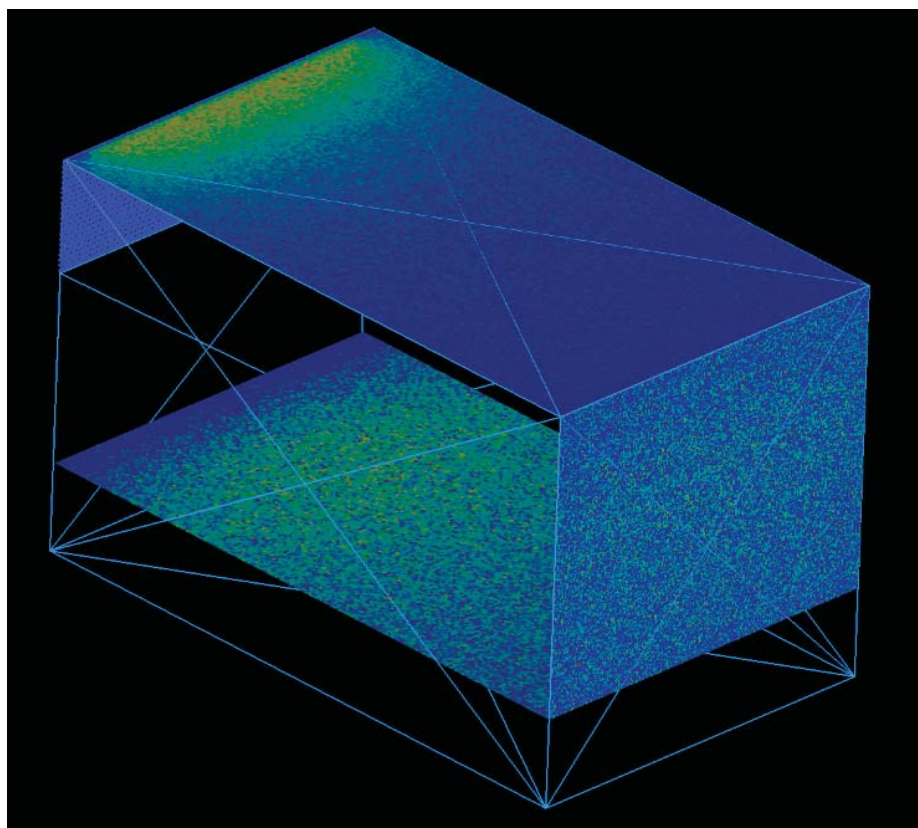


Abb. 8.92
Perspektivische Gitternetzdarstellung zusammen mit den Bestrahlungsstärkeverteilungen auf der Decke, der Rückenwand und der Tischebene [OEC_A16]

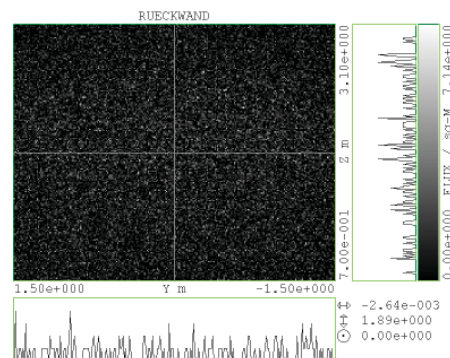


Abb. 8.94
Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Rückenwand [OEC_A18]

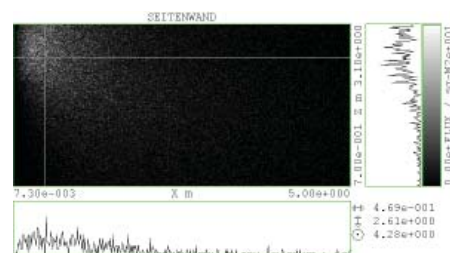


Abb. 8.95
Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Seitenwand [OEC_A19]

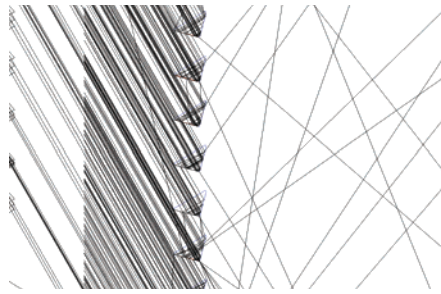


Abb. 8.98
Strahlengang der Direktstrahlung in Konfiguration 7. Man erkennt, dass die Absorber auf der untere Kathete die Strahlen ausblenden, die bei hohem Sonnenstand über mehrere Prismen wieder in den Raum gelenkt werden können [OEC_A22]

8.5.7 Strahlenverteilung, Konfiguration 7 und 15

- Sonnenstand $60^\circ/0^\circ$
- kleiner Kantenradius
- großer Profilabstand
- ohne Absorber - mit Absorber

Der Querschnitt des Raumes (siehe Abb. 8.96) als auch das Detail des Strahlenganges (siehe Abb. 8.97) zeigen, dass ein wesentlicher Anteil der zurückreflektierten Strahlung über weiter oben liegende Module wieder in den Raum eingekoppelt werden. Ein großer Anteil dieser Strahlung wird nach unten in den Raum umgelenkt und führt zur Blendung. Dieser Effekt motiviert zum Einsatz der Reflektor-Absorber-Schicht (Konfiguration 7), welcher in Abb. 8.98 dargestellt ist und zeigt, dass nun nur noch eine geringe Transmission aufgrund der Kantenverrundung stattfindet. [OEC_2001_13]

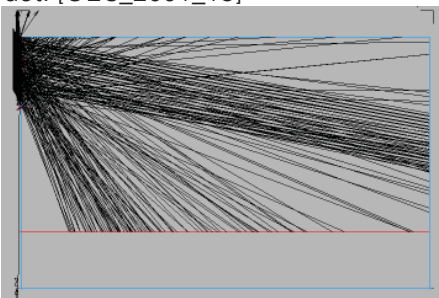


Abb. 8.96
Querschnitt des Raumes mit einigen Strahlen für die Konfiguration 15 [OEC_A20]

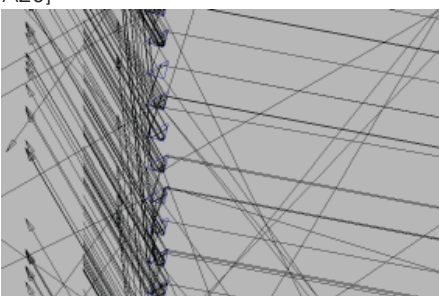


Abb. 8.97
Detail des Strahlengangs im Modul für die Konfiguration 15 [OEC_A21]

8.5.8 Synopsis

Im folgenden wird das untersuchte System auf Basis der Simulationsergebnisse und aus Sicht des geometrisch-optischen Designs zusammenfassend beurteilt.

Funktionsfähigkeit des untersuchten Systems:

- Das System kann zuverlässig als Sonnenschutz eingesetzt werden.
- Der Abstand zwischen den Stäben muss sorgfältig auf tolerierbare Direkttransmission bei niedrig stehender Sonne ausgelegt werden.
- Der Einsatz der Reflektor-Absorber-Schicht vermeidet zuverlässig Blendung bei hohen Sonnenständen
- Der Reflektor ermöglicht zudem eine tolerante Nachführung durch die deutliche Aufweitung des Ausblendbereiches, vermindert aber deutlich die Transmission von Diffusstrahlung.
- Auch die größeren untersuchten Werte für die Kantenradien führen zu keiner deutlichen Verschlechterung. Die Direkttransmission im Modul steigt nicht dramatisch.
- Eine Überschreitung des 90° -Winkels ist kritisch für die Funktion. Toleranzen sollten auf jeden Fall in Richtung kleinerer Winkel ausgelegt werden (wie z.B. $88^\circ \pm 2^\circ$)

Veränderungsvorschläge am System:

- Aufgrund der Untersuchungsergebnisse, insbesondere der Effekte, die zur Transmission von Direktstrahlung bei hohen

Sonnenständen ohne Einsatz der Reflektor-Absorber-Schicht führen, erscheinen aus unserer Sicht folgende Veränderungen am System erwägenswert:

- Bei unveränderter Geometrie könnte die Transmission der Strahlung bereits verhindert werden, wenn nur der vordere Teil der unteren Kathete beschichtet wird. In den untersuchten Fällen passieren alle nach der Retroreflektion in den Raum umgelenkten Strahlen diesen Bereich (s.Abb. 8.98). Auf diese Weise könnte die Diffustransmission bei Einsatz der Reflektor-Absorber-Schicht erhöht werden.
- Ein Modul aus dicht aneinandergesetzten Profilen ohne Beschichtung könnte einen vollständigen Sonnenschutz gewähren, wenn nicht die einzelnen Stäbe drehbar gelagert werden, sondern stattdessen das gesamte Modul beweglich ausgeführt würde, wie ein klassischer, ausstellbarer Sonnenschutz.
- Der Effekt des Wiedereintritts von eigentlich bereits reflektierter Direktstrahlung könnte auch durch eine andere Querschnittsform der Prismenstäbe vermieden werden. Wenn man die flachen Katheten gezielt designen würde, könnte man erreichen, dass das direkte Sonnenlicht in eine Richtung nach außen gelenkt würde, welches die Umlenkung in den Raum hinein ausschließt. Ein solches Design könnte zum Beispiel mittels ‚double tailoring‘ erstellt werden (Ries, H. and J. Muschaweck. Double-tailored microstructures. in Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer V. 1999. San Diego, Ca.: Proc. SPIE.). [OEC_2001_14]

8.6 Ergebnisse der zweiten lichttechnischen Untersuchung [OEC 2002]

8.6.1 Transmission von Direktstrahlung am Sonnenschutzsystem aus 90°-Prismen

Der untersuchte Effekt

Prismenstäbe aus Glas mit gleichschenkelig dreieckigem Profil und einem 90°-Winkel werden parallel übereinander im Oberlichtbereich einer Fensteröffnung angeordnet. Die einzelnen Prismen sind um die Längsachse drehbar gelagert und werden so nachgeführt, dass die Hypotenuse mit der Sonnenelevation zur Horizontalen angestellt wird.

Mit den Prismen soll das direkte Sonnenlicht durch Retroreflexion aus dem Raum ausgeblendet werden. Diffuse Umgebungs- und Himmelsstrahlung soll jedoch in hohem Maße in den Raum transmittiert werden.

In einer früheren Untersuchung wurde festgestellt, dass bei hohem Sonnenstand ein Teil des Lichtes, das eigentlich von einem Prisma bereits umgekehrt wurde, in das darüberliegende Prisma einfällt und über weitere Prismen in den Raum gelenkt werden kann.

Im folgenden wurde dieser Effekt für einen Prismenabstand von 38 mm und mehrere Sonnenstände untersucht, um herauszufinden, ob durch gezielte Unterbindung des Eintritts von Strahlung in einem bestimmten Bereich der Prismen die Einführung der Direktstrahlung unterbunden werden kann.

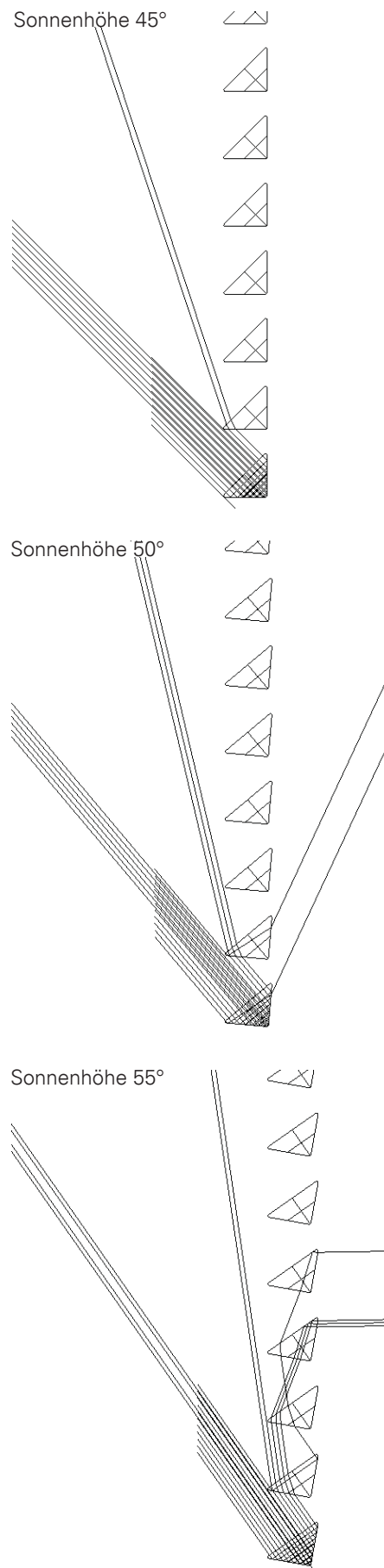


Abb. 8.99

Lichtweg bei Elevation 45°. Man sieht, dass erste Strahlen das obere Prisma von der Rückseite erreichen, aber noch nicht wieder in den Raum gelenkt werden. [OEC_B₁]

Abb. 8.100

Lichtweg bei Elevation 50°. Man sieht im wesentlichen dasselbe Bild wie bei 45° jedoch mit mehr eingebrochener Strahlung. Die Strahlung verlässt das Prisma unter steilerem Winkel nach oben. [OEC_B₂]

Abb. 8.101

Lichtweg bei Elevation 55°. Die ersten Strahlen werden wieder in den Raum eingekoppelt. Man erkennt das Zusammenarbeiten verschiedener Prismen oberhalb des eigentlichen Umkehrprismas. Alle in den Raum geführten Strahlen passieren das äußerste Drittel der unteren Prismen. [OEC_B₃]

Lichtpfade für verschiedene Sonnenstände

In den Abbildungen 8.99 bis 8.104 werden die Lichtwege durch eine Prismenanordnung dargestellt. Strahlung fällt jeweils so ein, dass sie vom untersten Prisma umgelenkt werden sollte. So werden die Effekte der darüberliegenden Prismen für diese Strahlung isoliert sichtbar.

Die Analyse zeigt deutlich, dass für eine Vermeidung der Einführung von Direktstrahlung bis zu Sonnenhöhen von 60° die äußere Hälfte der unteren Kathete jedes Prismas passiviert werden müsste. Zur Berücksichtigung noch höherer Sonnenstände müsste die gesamte Länge der unteren Kathete gegen den Eintritt von Strahlung von unten zum Beispiel durch eine – teilweise- absorbierende Farbe gesichert werden, da hier alle Bereiche dieser Kathete bei transparentem Material beitragen. [OEC_2002_1]

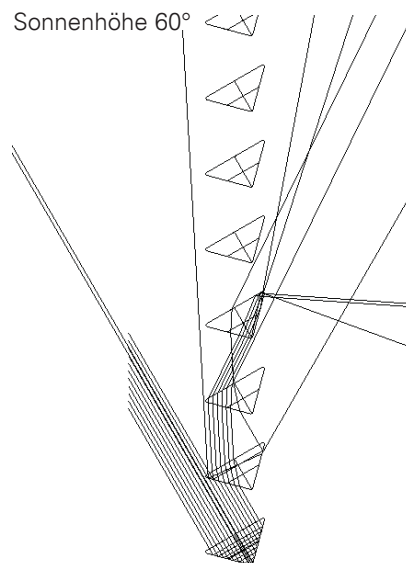


Abb. 8.102

Lichtweg bei Elevation 60 °: Etwa ein Drittel der Strahlung wird wieder in den Raum eingekoppelt. Alle in den Raum geführten Strahlen passieren die äußere (rechte) Hälfte der unteren Kathete des dritten Prismas von unten.[OEC_B₄]

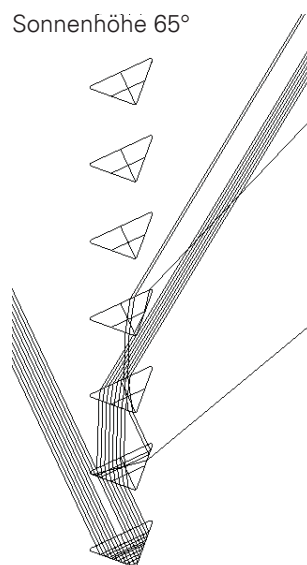


Abb. 8.103

Lichtweg bei Elevation 65 °: Alle Strahlen werden wieder in den Raum eingeführt. Alle in den Raum geführten Strahlen passieren den zentralen Bereich der unteren Kathete des dritten Prismas von unten. [OEC_B₅]

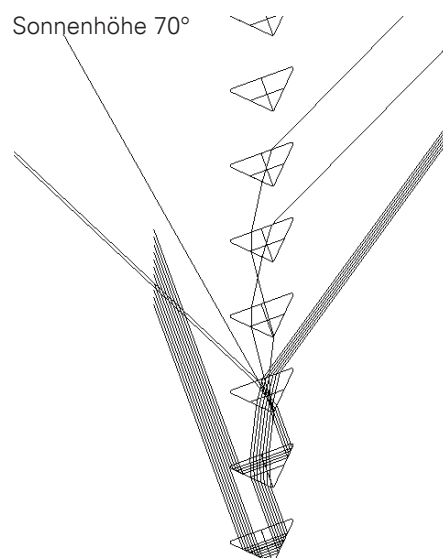


Abb. 8.104

Lichtweg bei Elevation 70 °: Fast die gesamte Strahlung wird wieder in den Raum eingeführt. Alle in den Raum geführten Strahlen passieren die innere (linke) Hälfte der unteren Kathete des dritten Prismas von unten. [OEC_B₆]

8.6.2 Konzepte zur optischen Passivierung der unteren Kathete

Transmission von weiteren Prismenkonzepten

In Kapitel 8.6.1 wurde festgestellt, dass bei hohem Sonnenstand ein Teil des Lichtes, das eigentlich von einem Prisma bereits umgekehrt wurde, auf die untere Kathete des darüberliegenden Prismas trifft und dann über weitere Prismen in den Raum eingelenkt werden kann. Das Licht tritt wegen der regelmäßigen Anordnung der Prismen parallel in den Raum ein und hat deswegen dieselbe Blendwirkung wie Direktstrahlung derselben Intensität. Der Effekt der Einlenkung von Direktstrahlung über mehrere Prismen kann verhindert werden, indem die untere Kathete der Prismen verspiegelt und nach außen absorptiv beschichtet wird. Diese Maßnahme ist wirksam, aber mit deutlichen Änderungen im ästhetischen Erscheinungsbild und zusätzlichen Schritten in der Fertigung verbunden.

In dieser Studie werden nun weitere Maßnahmen untersucht, welche die Blendung durch eingelenkte Direktstrahlung vermeiden sollen. Die Maßnahmen sollen mit weniger fertigungstechnischen oder ästhetischen Einbußen verbunden sein.

Die untersuchten Formen

Folgende veränderte Prismenstäbe wurden in der Anordnung mit 40 mm Prismenabstand untersucht:

Diffuse Aufrauung des äußeren Teils der unteren Kathete. Die diffuse Aufrauung soll das eintreffende Licht streuen und somit den Blendeffekt der parallel eingelenkten Strahlung vermeiden.

Die aufgeraute Fläche wurde so simuliert, dass sie die Strahlung zu gleichen Teilen reflektiert und transmittiert. Zusätzlich wird die Strahlung

mit Gauss'scher Charakteristik aufgeweitet (Sigma 25°).

Diese relativ geringe Aufweitung soll in dieser Konzeptstudie einen möglichen Effekt der Blendungsvermeidung nach unten abschätzen.

Verformung des unteren Teils der äußeren Kathete. Die Verformung soll das parallele Einlenken und somit die Blendung verhindern. Die in Abbildung 8.109 dargestellte Verformung stellt das Ergebnis eines Variationsprozesses dar, in dem verschiedene Verformungen und ihre optische Wirkung bei 60° Anstellwinkel verglichen wurden. Die Form ist nicht Ergebnis eines vollständigen Designprozesses mit gezielter Berechnung oder numerischer Optimierung.

Teilweise Verspiegelung der unteren Kathete mit diffus grau reflektierender Außenschicht. Die Teilweise Verspiegelung und die graue Farbe sollen eine leichtere ästhetische Wirkung erzielen als die völlig schwarze Rückseite der unteren Kathete. Die Einlenkung soll weitgehend verhindert werden.

Um die Funktionsweise der neuen Ansätze darzustellen, werden im folgenden die Strahlengänge durch die drei Systeme bei jeweils 40° und 60° Elevation gezeigt.

Bei 40° tritt beim bisherigen System ohne Verspiegelung noch kein Effekt der Einleitung von Direktstrahlung auf. Die Direkttransmission ist sehr gering und nur durch die endlichen Kantenradien verursacht.

Bei 60° tritt beim bisherigen System ohne Verspiegelung eine deutliche gerichtete Einlenkung von Direktstrahlung auf.

[OEC 2002_2]

8.6.2.1 Diffuse Aufrauung

Die teilweise diffus aufgeraute untere Kathete soll das eintreffende Licht streuen und somit den Blendeffekt der parallel eingelenkten Strahlung vermeiden.

Bei 40° und bei 60° wird am diffusen Teil einige Strahlung in den Raum gelenkt. Diese Strahlung ist wegen der diffusen Beschichtung nicht gerichtet und somit blendfrei. Im Vergleich zur unbeschichteten geraden Kathete ist quantitativ eine höhere Direkttransmission bei 40° zu erwarten sowie eine leicht verminderte blendfreie Einlenkung bei höheren Sonnenständen. [OEC 2002_3]

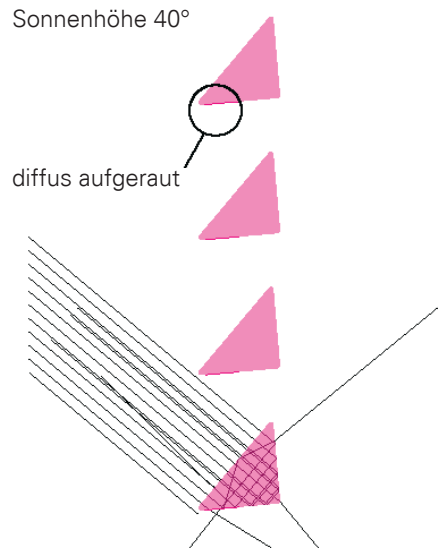


Abb. 8.105
Lichtweg bei 40° Elevation für Prismenstäbe mit teilweise angerauter unterer Kathete. [OEC_B7]

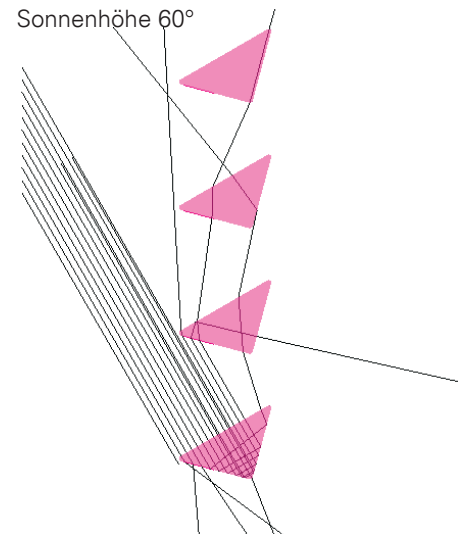


Abb. 8.106
Lichtweg bei 60° Elevation für Prismenstäbe mit teilweise angerauter unterer Kathete. [OEC_B8]

8.6.2.2 Graue Farbe mit Spiegelbeschichtung

Die teilweise Verspiegelung der unteren Kathete mit diffus grau reflektierender Außenschicht soll das eintreffende Licht streuen oder absorbieren und somit den Blendeffekt der parallel eingelenkten Strahlung vermeiden. Die Verspiegelung ist erforderlich, da durch das farbliche Beschichten der Kathete die Reflexionseigenschaften des Glasprofils verloren gehen. Die teilweise Verspiegelung und die graue Farbe sollen eine leichtere ästhetische Wirkung erzielen als die völlig schwarze Rückseite der unteren Kathete (siehe Kapitel 7.4). Die Einlenkung soll weitgehend verhindert werden.

Bei 40° ist die Direktlichtausblendung erwartungsgemäß gut. Bei 60° ist die Lichteinlenkung reduziert. Die restlichen Anteile sind weiterhin gerichtet. [OEC 2002_4]

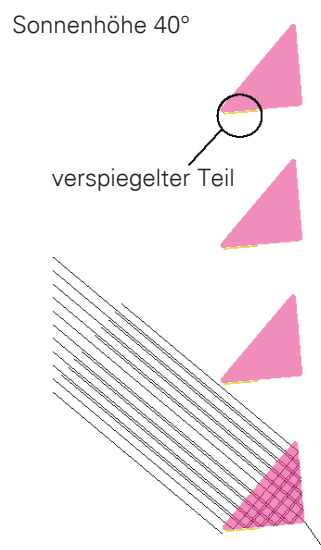


Abb. 8.107
Lichtweg bei 40° Elevation für Prismenstäbe mit teilweise verspiegelter unterer Kathete. [OEC_B9]

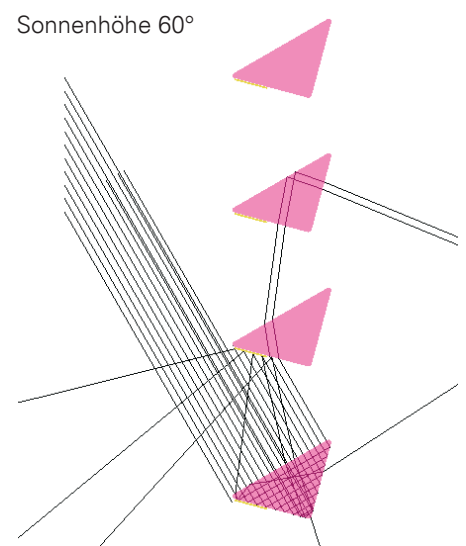


Abb. 8.108
Lichtweg bei 60° Elevation für Prismenstäbe mit teilweise verspiegelter unterer Kathete. [OEC_B10]

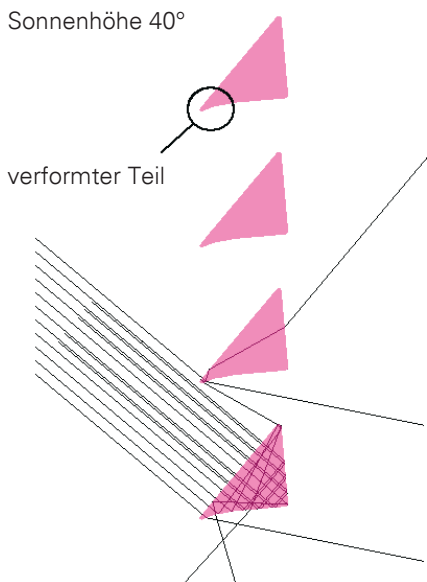


Abb. 7.109
Lichtweg bei 40° Elevation für Prismenstäbe mit teilweise verformter unterer Kathete. [OEC_B11]

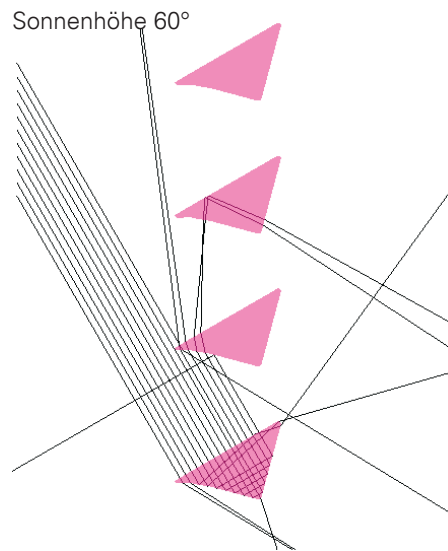


Abb. 7.110
Lichtweg bei 60° Elevation für Prismenstäbe mit teilweise verformter unterer Kathete. [OEC_B12]

8.6.2.3 Verformung

Die Verformung des vorderen Bereichs der unteren Kathete soll das parallele Einlenken des eintreffenden Lichts und somit Blendung verhindern.

Bei 40° und bei 60° wird am verformten Teil einige Strahlung in den Raum gelenkt. Diese Strahlung ist wegen der nicht ebenen Form nicht gerichtet und somit blendfrei. Im Vergleich zur unbeschichteten geraden Kathete ist quantitativ eine höhere Direkttransmission bei 40° zu erwarten, sowie eine weniger blendende Einlenkung bei höheren Sonnenständen. [OEC 2002_5]

8.6.3 Ergebnisse

8.6.3.1 Quantitative Analyse der Transmission

Um die Transmission der verschiedenen Konzepte quantitativ zu analysieren wurden Monte-Carlo [CARLO] Simulationen für gerichtete und diffuse Strahlung von außen durchgeführt. Die drei Konzepte mit den veränderten unteren Katheten wurden für drei Anstellwinkel entsprechend Sonnenständen mit 20°, 40° und 60° Elevation berechnet. Der Abstand der Prismenstäbe untereinander beträgt 40 mm. [OEC 2002_6]

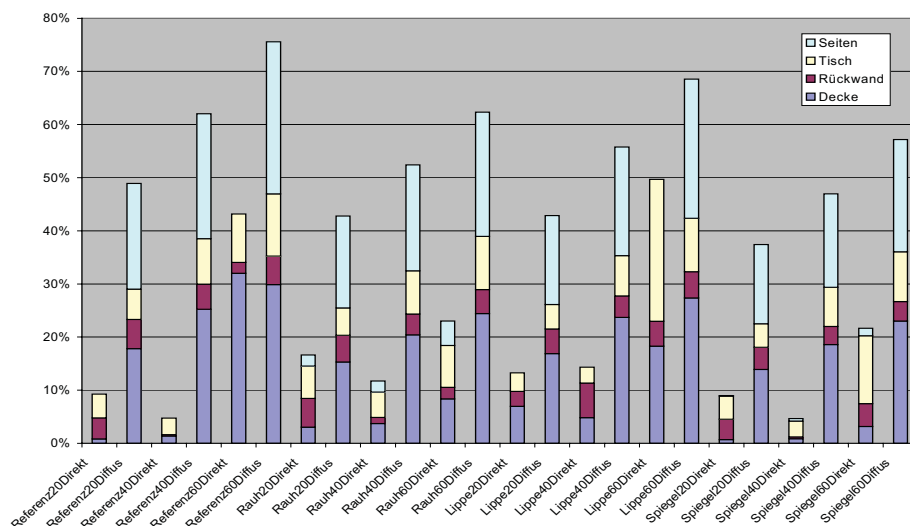


Abb. 8.111

Transmission von Direkt- und Diffusstrahlung für verschiedene Anstellwinkel und alle untersuchten Konzepte im Vergleich. Kumulativ sind die Transmission der Einstrahlung auf die Raumdecke, die Tischebene, die Rückwand und die Seitenwände aufgezeigt. In der Beschriftung sind das Prismenkonzept, der Anstellwinkel und die Art der Strahlung (diffus oder direkt) zusammengefasst. [OEC_B13]

8.6.3.2 Transmissionswerte im Vergleich

Die Abbildung 8.111 zeigt die Transmissionswerte der verschiedenen Konzepte im Vergleich mit dem Referenzsystem ohne Manipulation der unteren Kathete für Sonnenstände von 20°, 40° und 60° Elevation. Der direkte Vergleich zeigt eine wirksame Unterdrückung der Wiedereinkopplung durch die teilweise Verspiegelung oder Aufrauung. Das Konzept mit den verformten unteren Katheten wirkt eher kontraproduktiv. Bei 60° Elevation wird deutlich mehr Strahlung in den Raum gelenkt als beim Referenzkonzept mit geraden Prismenseiten. [OEC 2002_7]

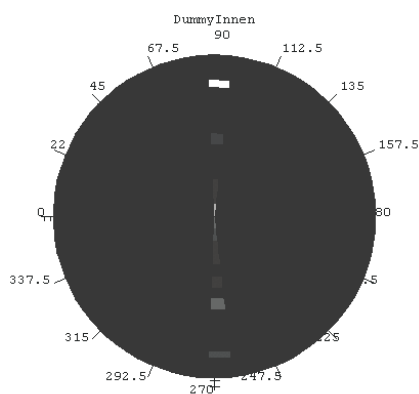


Abbildung 8.112

Lichtstärkeverteilung der transmittierten Direktstrahlung für 60°, Elevation beim Referenzsystem. [OEC_B14]

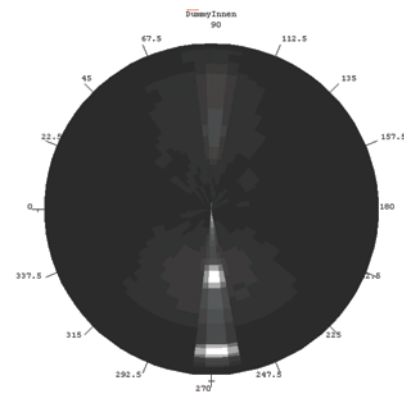


Abbildung 8.113

Lichtstärkeverteilung der transmittierten Direktstrahlung für 60°, Elevation bei teilweise aufgerauten Katheten. [OEC_B15]

8.6.3.3 Richtungsverteilungen bei hoher Transmission

In den folgenden Abbildungen werden die Richtungsverteilungen der transmittierten Direktstrahlung bei 60° Elevation dargestellt. Als Darstellung ist eine Graustufendarstellung im 2-D-Richtungsraum und ein Profil der Lichtstärke im senkrechten Schnitt in Polarkoordinaten dargestellt.

In der 2D-Darstellung Abb. 8.112 entspricht das Zentrum des Richtungskreises einer horizontalen Einstrahlung, der obere Bereich entspricht Strahlung nach oben, der untere Bereich entspricht Strahlung nach unten. Im Lichtstärkeprofil entspricht die Richtung horizontal nach links der Strahlung in den Raum hinein. Im Vergleich erkennt man die sehr gerichtete Strahlung beim Referenzkonzept an dem einen scharfen Maximum, das die an die Decke gerichtete Strahlung repräsentiert. Die Lichtstärke des nach oben gerichteten Hauptmaximums im Profil ist ca 2.3 (willkürliche Einheiten), (s. Abb. 8.112).

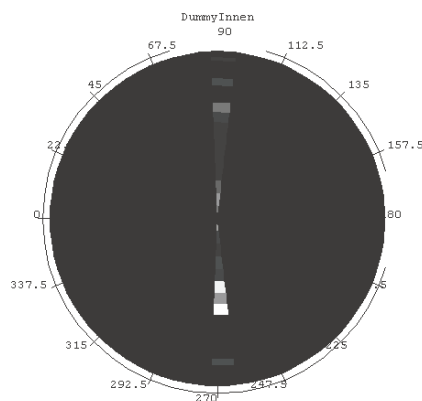


Abb. 8.114 Lichtstärkeverteilung der transmittierten Direktstrahlung für 60° Elevation bei verformten Katheten. [OEC_B16]

Beim System mit teilweise ange-rauter Kathete erkennt man die Aufweitung der Strahlung, die sich ja auch in Transmission auf die Wände zeigt. Bei diesem System ist durch relativ niedrige Transmission und die Aufweitung der Strahlung in viele Richtungen wenig Blendung zu erwarten. Die maximale Lichtstärke im Profil beträgt 0,25, ist also ca einen Faktor 10 geringer als beim Referenzsystem (s. Abb. 8.113).

Das System mit verformter unterer Kathete lenkt die meiste Strahlung nach unten in Richtung des Tisches. Der Rest wird in den Raum verteilt. Aufgrund der hohen Transmission bei 60° Elevation ist eine deutliche Blendung zu erwarten. Im Profil sind Lichtstärken bis zu 1.8 zu erkennen, die nach unten gerichtete Strahlung repräsentieren (s. Abb. 8.114).

Beim System mit teilweise verspiegelten Katheten erkennt man die parallele Einlenkung in den Raum. Die Strahlung, die eingelenkt wird ist gerichtet und kann deswegen blenden. Die maximale Lichtstärke im Profil ist ähnlich hoch wie beim Referenzsystem (s. Abb. 8.115). [OEC 2002_8]

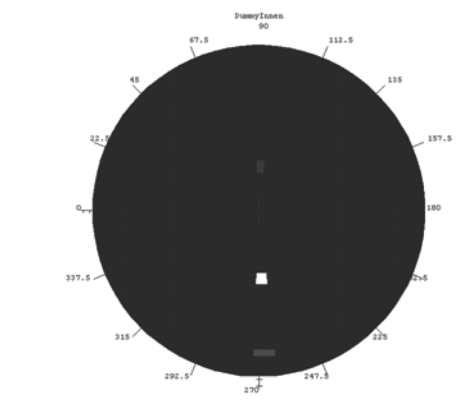


Abb. 8.115 Lichtstärkeverteilung der transmittierten Direktstrahlung für 60° Elevation bei teilweise verspiegelten Katheten. [OEC_B17]

8.6.4 Zusammenfassung der Untersuchungen weiterer Prismenkonzepte

Prisma, bei dem die untere Kathete spiegelnd und grau absorbierend beschichtet ist

Die Direktlichtausblendung funktioniert beim einzelnen Prisma perfekt. Betrachtet man die Anordnung mehrerer Prismen übereinander, so findet vor allem bei höheren Sonnenständen eine Wiedereinkoppelung statt. Das Licht tritt wegen der regelmäßigen Anordnung der Prismen parallel in den Raum ein und hat deswegen dieselbe Blendwirkung wie Direktstrahlung derselben Intensität.

Wird nun die untere Kathete wie oben angegeben behandelt, so wird die Einkoppelung von Direktstrahlung erfolgreich verhindert. Wie die letzten Untersuchungen gezeigt haben, nimmt gleichzeitig die Transmission der Diffusstrahlung um ca. 20% ab.

Prisma mit diffus aufgerauter unterer Kathete

Die quantitativen Ergebnisse sind überraschend gut. Diese Variante weist eine höhere Direkttransmission als das Prisma mit Absorber auf.

Das eingekoppelte Licht blendet nicht, da es durch die Aufrauung ungerichtet im Raum verteilt wird und deshalb nicht blendet. Die Transmission der Diffusstrahlung ist nur um ca. 10% reduziert.

Prisma mit Verformung

Das Prisma mit Verformung galt als Favorit, hat jedoch am schlechtesten abgeschlossen. Es scheint nicht möglich zu sein, das Prisma mit einer einfachen Geometrieänderung so zu verformen, dass es die Wiedereinkoppelung vermeidet.

Prisma mit einem Spiegelbereich

Bei niedrigen Sonnenständen funktioniert dieses System erwartungsgemäß gut. Die Direkttransmission bei höheren Sonnenständen ist erhöht, das eingekoppelte Licht blendet, es wird parallel eingelenkt.

8.7 Einfluss der Ergebnisse auf den Einsatz der 90° -Prismen

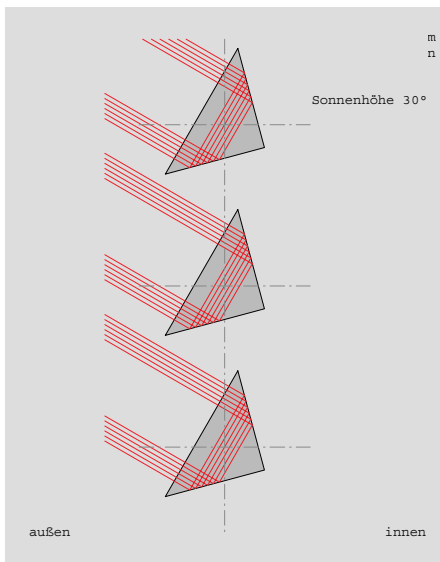


Abb 8.116
90°-Prisma bei einer Sonnenhöhe von 30°, die Hypotenuse steht senkrecht zur einfallenden Sonne

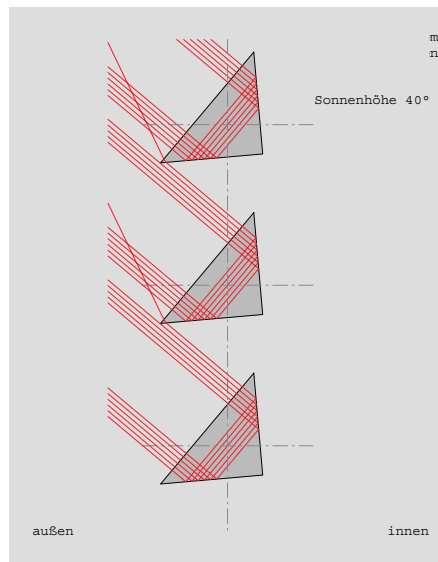


Abb 8.117
90°-Prisma bei einer Sonnenhöhe von 40°, die Hypotenuse steht senkrecht zur einfallenden Sonne

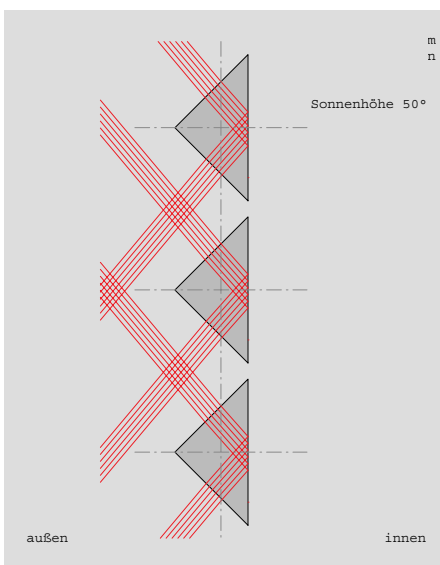


Abb 8.118
90°-Prisma bei einer Sonnenhöhe von 50°. Senkrechtstellung der Hypotenuse zur Vermeidung der Wiedereinkoppelung von reflektierter Strahlung über das darüber liegende Prisma.

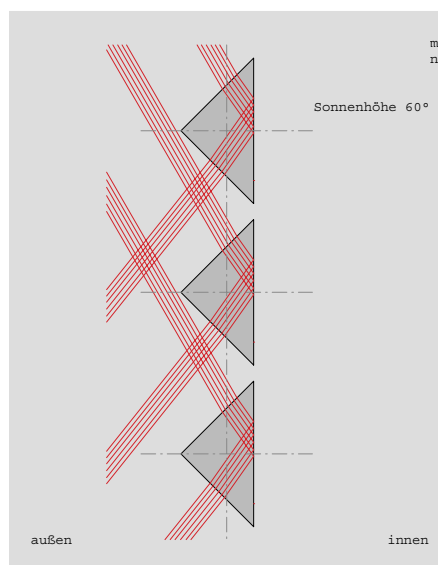


Abb 8.119
90°-Prisma bei einer Sonnenhöhe von 60°. Senkrechtstellung der Hypotenuse zur Vermeidung der Wiedereinkoppelung von reflektierter Strahlung über das darüber liegende Prisma

8.7.1 90°-Prisma ohne Behandlung der unteren Kathete

Die 90°-Prismen blenden das direkte Sonnenlicht durch Retroreflexion aus dem Raum aus. Die diffuse Umgebungs- und Himmelsstrahlung wird jedoch in hohem Maße in den Raum transmittiert.

Bis zu einer Sonnenhöhe von 50° werden die vertikal übereinander angeordneten 90°-Prismen in einachsiger Nachführung auf den Sonnenwinkel so eingestellt, dass die Hypotenuse des Profils senkrecht zu den einfallenden Sonnenwinkeln steht und die Strahlen durch Totalreflexion nach aussen reflektiert werden.

Ab 50°-Sonnenhöhe werden die totalreflektierten Strahlen über die Kathete des darüberliegenden Profils wieder eingekoppelt und unkontrolliert im Raum verteilt. Um diesen Effekt auszuschalten, muss entweder eine Passivierung der unteren Kathete erfolgen oder wie links dargestellt eine Drehung des Profils, Hypotenuse senkrecht, so dass eine Lichtumlenkung nach außen erfolgt. Diese Lichtlenkung kann allerdings zu Blendungen in der Umgebung führen.



Abb 8.120
90°-Prisma ohne Behandlung der unteren Kathete

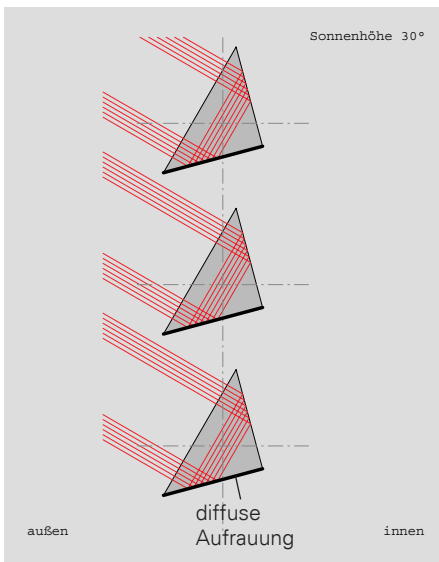


Abb 8.121
90°-Prisma mit diffuser Aufrauung der unteren Kathete bei einer Sonnenhöhe von 30°

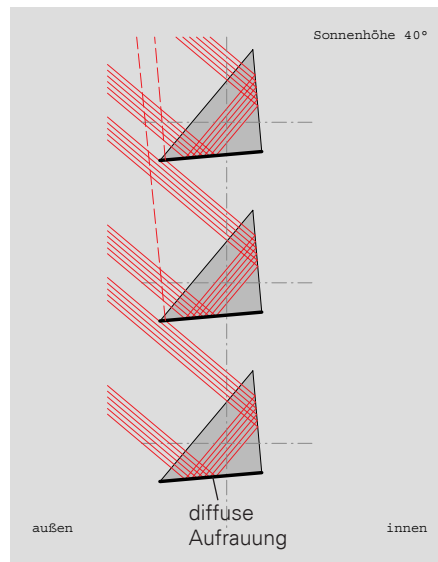


Abb 8.123
90°-Prisma mit diffuser Aufrauung der unteren Kathete bei einer Sonnenhöhe von 40°

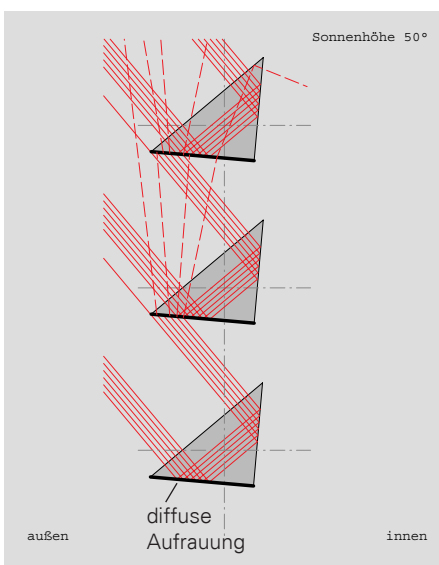


Abb 8.122
90°-Prisma mit diffuser Aufrauung der unteren Kathete bei einer Sonnenhöhe von 50°

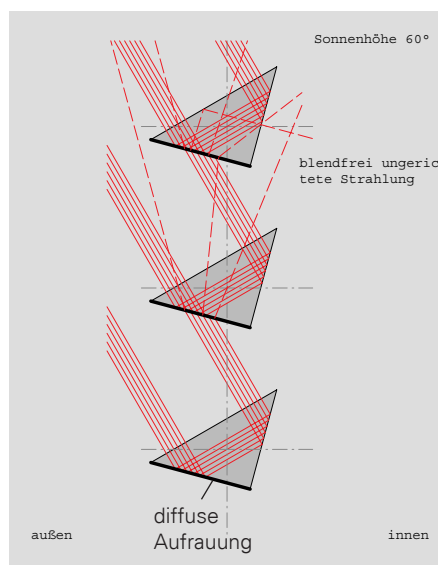


Abb 8.124
90°-Prisma mit diffuser Aufrauung der unteren Kathete bei einer Sonnenhöhe von 60°

8.7.2 90° -Prisma mit diffuser Aufrauung

Die Fläche der nach unten zeigenden Kathete wird diffus aufgeraut.

Das über das darunter liegende Prisma einfallende Licht wird an dieser Fläche gestreut, so daß der Blendeffekt der parallel auftreffenden Strahlung vermieden wird.

Diesen Effekt kann man ab einem Sonnenstand von 50° beobachten. Die gerichtet auftreffende Strahlung wird z.T. eingekoppelt. Durch die diffuse Beschichtung wird aus der gerichteten Strahlung eine ungerichtete Strahlung, die blendfrei ist.

Durch die Wiedereinkoppelung ist eine erhöhte Direkttransmission, sowie eine leicht verminderte blendfreie Einlenkung bei höheren Sonnenständen zu erwarten.

Die quantitativen Ergebnisse sind überraschend gut.



Abb 8.125
90°-Prisma mit diffuser Aufrauung



Abb 8.126
90° -Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete bei einer Sonnenhöhe von 30°

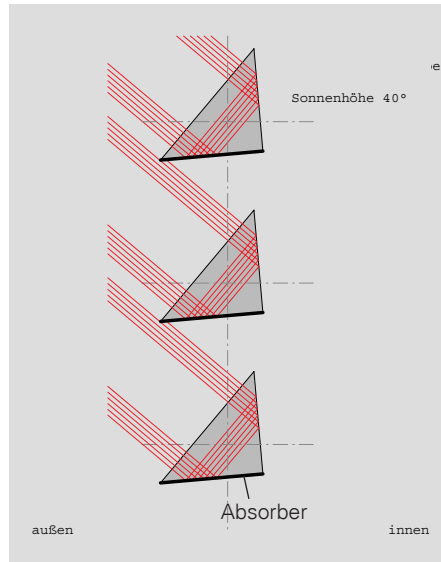


Abb 8.128
90° -Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete bei einer Sonnenhöhe von 40°

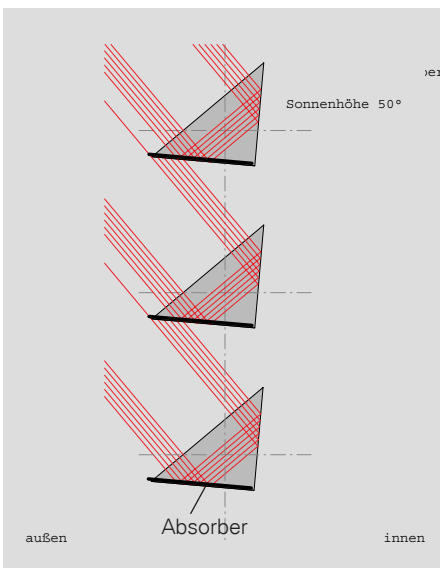


Abb 8.127
90° -Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete bei einer Sonnenhöhe von 50°

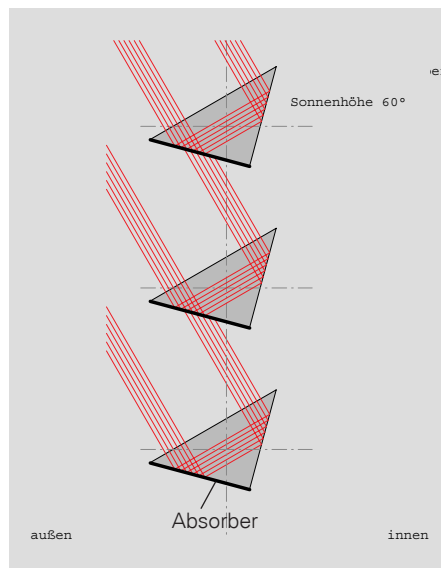


Abb 8.129
90° -Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete bei einer Sonnenhöhe von 60°

8.7.3 90° -Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete

Die nach unten zeigende Kathete wird in diesem Fall mit einem Spiegelabsorber, nach innen spiegelnd, nach aussen grau absorbierend, beschichtet.

Die Wiedereinkoppelung der vom darunterliegenden Prisma totalreflektierten Strahlung soll somit vermieden werden.

Mit diesem System erreicht man eine sehr gute Direktlichtausblendung bei leicht reduzierten Werten für die Diffrustransmission.



Abb 8.130
90°-Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete



Abb 8.131
90°-Prisma ohne Behandlung der unteren Kathete



Abb 8.132
90°-Prisma mit diffuser Aufrauung



Abb 8.133
90°-Prisma mit einer matt grau absorbierenden Kathete

8.8 Zusammenfassung

In **Kapitel 8** wurden im Rahmen einer Diplomarbeit verschiedene, auf dem Markt vorhandene Tageslichtsysteme sowie die 90°-Prismen des IBK 2 auf deren lichttechnische Eignung untersucht, um den Wirkungsgrad der 90°-Prismen mit sich bewährten Systemen vergleichen zu können.

Ergänzend dazu wurden von einem lichttechnischen Institut auf der Grundlage der bisher gewonnenen Erkenntnisse Untersuchungen für das 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz durchgeführt.

Die Betrachtungen zeigen dabei folgende Ergebnisse:

- Die Gegenüberstellung der Messergebnisse der Diplomarbeit zeigen, dass der Einsatz des 90°-Prismas als Lichtlenksystem wenig sinnvoll ist. Ab 30° Sonnenhöhe ist für dieses System keine Raumtiefenausleuchtung mehr festzustellen. Der umgelenkte Teil bleibt auf den fensternahen Bereich der

Decke beschränkt. Deshalb beschränkten sich die fortführenden Untersuchungen auf den Einsatz des 90°-Prismas als transparenter Sonnenschutz.

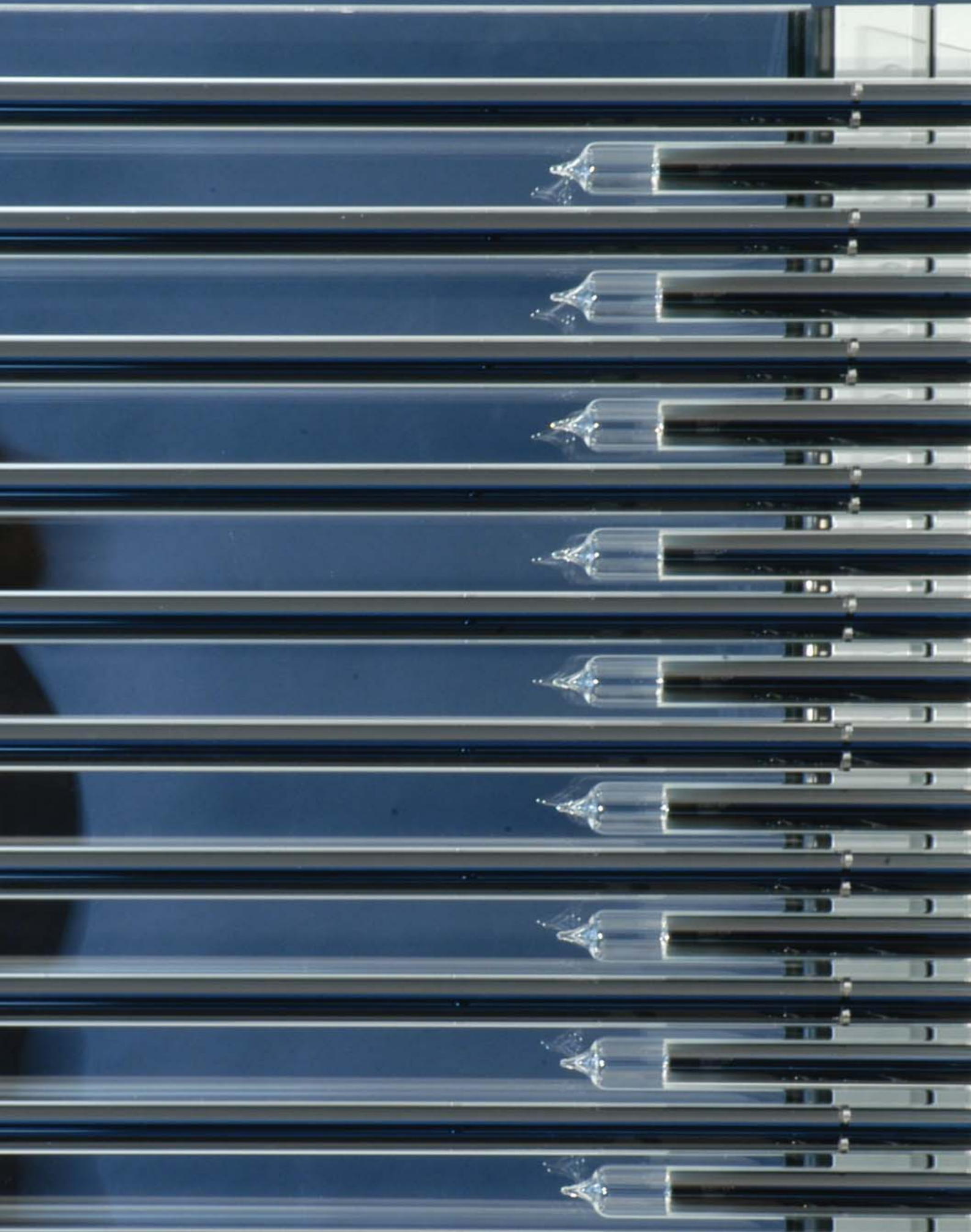
- Als transparenter Sonnenschutz kann das System zuverlässig eingesetzt werden.
- Der Einsatz der Reflektor-Absorber-Schicht vermeidet zuverlässig Blendung bei hohen Sonnenständen.
- Der Reflektor ermöglicht zu dem eine tolerante Nachführung durch die deutliche Aufweitung des Ausblendbereiches, vermindert aber deutlich die Transmission von Diffusstrahlung.
- Die Auswertung der drei untersuchten Konzepte zur Passivierung der unteren Kathete: diffus aufgeraut, graue Farbe mit Spiegelbeschichtung und Verformung ergaben, dass die besten

Ergebnisse mit der aufgerauten Lösung erzielt wurden.

Das auftreffende direkte Sonnenlicht wird nicht wie beim Prisma mit Spiegelabsorber absorbiert, sondern durch die Aufrauung ungerichtet im Raum verteilt. Dies führt dazu, dass die Transmission der Diffusstrahlung nur um 10% reduziert ist. Bei höheren Sonnenständen ist allerdings eine leicht verminderte blendfreie Einlenkung zu erwarten.

Unter Berücksichtigung mehrerer Aspekte ist die Inkaufnahme der leicht verminderten blendfreien Einlenkung bei höheren Sonnenständen, gegenüber der grauen Absorberfläche der unteren Kathete im Sichtbereich optisch vorzuziehen.

9.0 Integration von Solarthermie in die Fassade



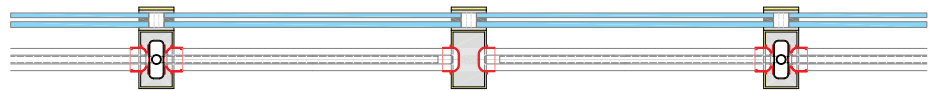


Abb. 9.01
Möglicher Horizontalschnitt einer Fassade mit integriertem Vakuumröhrenkollektor

Medienführender
Fassadenpfosten

Fassadenpfosten
mit reiner Haltefunktion

9.1 Problemstellung

In den letzten Jahren haben sich solarthermische Systeme insbesondere zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung am Markt etabliert. Im Jahr 2001 wurden in der Branche rund 1 Million qm Kollektorfläche umgesetzt. Hauptsächlich werden die Kollektoren hierbei auf das Dach montiert oder in dieses integriert.

Solaranlagen zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung mit rund 5 qm Kollektorfläche decken zwischen 5 und 12% des Gesamtwärmebedarfs eines Einfamilienhauses. Zur Erzielung höherer solarer Deckungsanteile werden Kombianlagen eingesetzt. Hierzu sind größere Kollektorflächen von über 10 qm notwendig, die aufgrund des Sonnenstandes und der benötigten Wärmemengen am sinnvollsten in die Fassade integriert werden. Der Markt bietet nur auf die Fassade montierbare, adaptive Systeme an. Einzig die Wärmedämmverbundsystem-Hersteller haben schon erste Lösungen entwickelt, wie Flachkollektoren in deren System integriert werden können.

Der Nichtwohnungsbau, insbesondere der Büro- und Verwaltungsbau, beginnt sich erst jetzt für thermische Solaranlagen zu interessieren - nicht zuletzt aufgrund des damit verbundenen positiven Images. Da in solchen Gebäuden kaum Dachflächen zur Verfügung stehen, müssen solarthermische Anlagen in die Fassade integriert werden. Nur in der Fassade ist die solarthermische Anlage von aussen und ggf. auch von innen sichtbar und dadurch als Imagegewinn nutzbar. Die seitherige Zurückhaltung, in Büro- und Verwaltungsbauten solarthermische Energie zur Trinkwassererwärmung, für die haus-eigene Kantine oder Cafeteria, zur

solaren Kühlung oder ggf. auch zur Heizungsunterstützung zu nutzen, ist unter anderem darin begründet, dass am Markt kein System existiert, mit dem eine Solaranlage in übliche Fassadensysteme integriert werden kann.

Eine ähnliche Entwicklung haben Photovoltaikanlagen hinter sich. Ursprünglich nur auf Dachflächen montiert bzw. integriert, haben diese im Gegensatz zur Solarthermie den Sprung in die „Architekturwelt“ geschafft. Mittlerweile gibt es eine große Zahl von preisgekrönten Bauten (meist Verwaltungsgebäude), bei denen diese Systemtechnik erfolgreich in der Gebäudehülle eingesetzt wird. Die Photovoltaik betreffend werden auf politischer Ebene deutliche Signale gesetzt, die eine aktive Solarenergienutzung in der Gebäudehülle unterstützen. So bringt der im Moment vorliegende Entwurf zum EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) zum Ausdruck, dass gebäudeintegrierte Anlagen eine erhöhte Vergütung und die fassadenintegrierten Systeme den Höchstsatz bekommen. Ein Entwurf für das EEG die Solarthermie betreffend ist in Arbeit.

Entsprechend den Modulen einer Photovoltaikanlage sind bei solarthermischen Systemen die Kollektorflächen die optisch in Erscheinung tretenden Elemente. Für sie gelten prinzipiell dieselben geeigneten Flächen in der Gebäudehülle, wobei eine Teilabschattung der Kollektoren nicht von so großer Bedeutung ist wie bei Photovoltaikmodulen.

Für Flachkollektoren gibt es bereits Systeme, die eine Integration in die Gebäudehülle ermöglichen. Eine Integration von Vakuumröhren gibt es bisher noch nicht. Sie bietet aber aufgrund ihrer ästhetischen Struktur große Potentiale für Gebäudefassa-

9.2 Ziele Systemfassade

9.2.1 Gesamtziel

Ziel ist die Entwicklung eines Fassadenbauteils, welches die Funktionen Sonnenschutz, Energiegewinnung und Tageslichtnutzung übernimmt und in Fassadensysteme vollständig integriert und flexibel angewandt werden kann. Hierzu sollen die von der Schott-Rohrglas GmbH entwickelten solarthermischen Anlagen, Vakuumröhren, in Fassadensysteme integriert werden. Die Fassadenpfosten sollen neben ihrer konstruktiven Funktion die Funktion des Sammlers übernehmen.

Wichtig ist hierbei, eine einwandfreie technische Funktion, hohe Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit und flexible Gestaltungsmöglichkeiten mit hoher architektonischer Qualität zu verbinden. [IBK/SWT]

9.2.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Die Förderung der erneuerbaren Energien durch das BMWA und BMU möchte eine längerfristige Entwicklung hin zu einer wirtschaftlichen Alternative für die Primärenergieversorgung in Deutschland einleiten. Ziel der Energieforschungsprogramme ist, neben der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit, die nachhaltige Umweltverträglichkeit, d.h. umweltfreundliche und kostengünstige Deckung des künftigen Energiebedarfes am Standort Deutschland unter Ausnutzung aller technisch und wirtschaftlich in Betracht kommenden Optionen, Ersatz der begrenzten Ressourcen an Kohle, Erdöl und Erdgas und Vermeidung umwelt- und klimarelevanter Emissionen, allen voran CO₂.

Übergreifendes Ziel der Systemfassade ist die Reduzierung des Einsatzes endlicher Energieträger für die Versorgung von Bürostrukturen mit Heizwärme und Warmwasser und damit die Minimierung des Ausstoßes von Treibhausgasen, insbesondere von CO₂. [IBK/SWT]

9.2.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Es soll ein System entwickelt werden, das eine Zukunft in Solarenergienutzung im Fassadenbereich findet. Verglichen mit den zur Verfügung stehenden Dachflächen zur Solarenergienutzung, stellen die bisher meist ungenutzten Fassadenflächen ein großes Potential dar.

9.3 Stand der Wissenschaft und Technik

9.3.1 Einleitung

Die Entwicklung einer Vakuumröhre zur solarthermischen Energiegewinnung durch die Schott-Rohrglas GmbH hat zu einem Produkt geführt, das durch seine Produktästhetik schon jetzt große Beachtung in der Architekturbranche gefunden hat.

Zur Integration des Produktes in solarthermische Systeme hat die Schott-Rohrglas GmbH einen Kollektor entwickelt, der zur Anwendung der Vakuumröhren vorwiegend auf Dächern von Wohngebäuden gedacht ist. Die gewünschte Integration in die Fassade gilt es noch zu erarbeiten.



Abb. 9.02
Vakuumröhrenkollektor
Fa. Schott, Dachmontage



Abb. 9.03
Vakuumpöröhrenkollektor
Fa. Schott

getisch nicht nutzbar. Beim Einbau in die Fassadenfläche werden 100% der auftreffenden Solarstrahlung genutzt. Gleichzeitig ermöglicht der Abstand zwischen den Röhren die gewünschte Teildurchsicht von innen nach außen bzw. umgekehrt.

Schott ICR Kollektorrohr

Das innovative ICR-Kollektorrohr besteht fast ausschließlich aus dem korrosionsfreien, leicht wieder verwertbaren Rohstoff Glas. Bei geringem Materialeinsatz wird eine hohe Druckbeständigkeit erreicht, die den Kollektorherstellern den Verzicht auf eingeschobene Metallanzern ermöglicht.

Wie bei einer Thermoskanne isoliert das evakuierte, doppelwandige Kollektorrohr die durchströmende Flüssigkeit. Durch seine hermetische Abdichtung ist das ICR-Kollektorrohr kondensationsfrei und schützt so die hauchdünnen innenliegenden Beschichtungen.

Der im Inneren des Hüllrohres aufgebraute kreisrunde Silberspiegel (ICR: Internal Circular Reflector) lenkt die gesamte auf die Querschnittsfläche des Hüllrohres einfallende Strahlung, auf das Absorberrohr. Der Spiegel kann nicht verschmutzen und altert nicht. Sein Reflexionsgrad bleibt dadurch dauerhaft hoch.

Die strahlungsselektive Absorberschicht wird per Magnetron-Sputtern auf das innere Glasrohr aufgebracht. Diese Schicht wandelt die Solarstrahlung hocheffizient in Wärme und sorgt zum anderen für niedrige thermische Abstrahlung. [Schott]

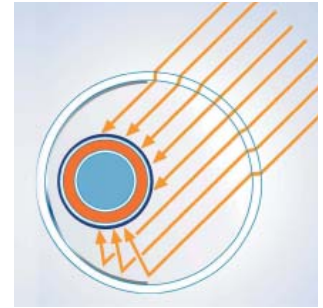


Abb. 9.04
ICR-Kollektorrohr im Querschnitt
[SCHOTT_A1]

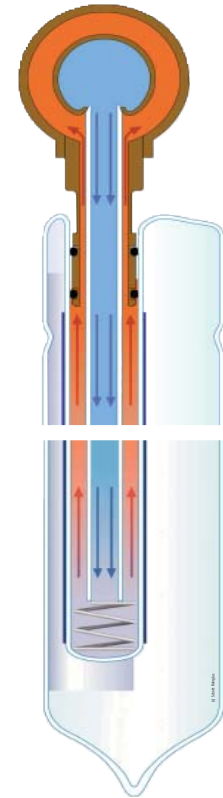


Abb. 9.05
ICR-Kollektorrohr im Längsschnitt
[SCHOTT_A2]

Abb. 9.06
Verschmelzung Absorberrohr und Hüllrohr



9.4 Architektonische und technische Anforderungen Klärung der Grundlagen

9.4.1 Baurechtliche Grundlagen

Der Einbau von Röhrenkollektoren in die Fassade erfordert eine Zulassung im Einzelfall. Bisher wurden vergleichbare Anlagen nur auf dem Dach installiert. Existierende Anlagen vor der Fassade wurden ohne Genehmigung gebaut.

Die Röhren vor der Fassade werden bei einer Prüfung wie eine Glasfassade behandelt. Bruchverhalten, Glasstärke und Befestigungsmechanismus gehen in die Betrachtung ein.

Wartung und Reinigung

Röhrenkollektoren werden typischerweise nicht gereinigt, zeigen aber auch nach längerer Zeit keine wesentlichen Leistungseinbußen. Die Wartung und Auswechslung von Röhren kann bei größeren Gebäuden über eine Befahranlage geschehen. Eine Reinigung im Wartungsintervall reicht völlig aus.

9.4.2 Analyse vorhandener Pilotprojekte

Wohnsiedlung Friedrichshafen, 1996

- Prestigeprojekt von Dornier
- 30 m² Kollektorfläche vor der Fassade, 60 m² auf dem Dach
- Investitionskosten: € 1000,-/m²
- Die Module sind durch eine Stahlkonstruktion vor die geschlossene Außenwand gehängt
- Die Sammlerkästen wurden durch eine Blecheinfassung ersetzt.
- Keine Einzelzulassung
- "Keine schlafenden Hunde wecken"
- Wurden bisher nicht gereinigt
- Allerdings keine messbaren Leistungseinbußen
- Gute Luft am Bodensee, Schlagregen, Nebel und Schnee reinigen die Röhren



Abb. 9.07
Treppenhaus mit Modulen verkleidet



Abb. 9.08
Wohnsiedlung Friedrichshafen



Abb. 9.09
Treppenhaus mit davor montierten Röhrenkollektoren

Sanierung Studentenwohnheim in Chemnitz, 2000

- Verwendeter Kollektor: Viessmann Vitosol 200
- 100 m² Kollektorfläche an der Fassade
- Kosten: € 1170,-/m²
- Das Förderprogramm Solarthermie 2000 erforderte neuartige Planung Fassadenkollektoren sind weithin sichtbar und damit publikumswirksam
- Mit Stahlkonstruktion vorgehängt Dahinter befindet sich eine geschlossene Wand
- die Leitungsführung findet in 2 großen Schächten statt
- Keine Einzelzulassung
- Laut Viessmann „prinzipbedingt selbstreinigend“ - Bisher nicht gereinigt, Leistung wird überwacht



Abb. 9.10
Studentenwohnheim Chemnitz mit thermischer Solaranlage vor der Fassade



Abb. 9.11
Messstation für die Kollektorfläche im Rahmen des Förderprogramms "Solarthermie 2000"

Abb. 9.12
Vitosol 200, Viessmann

9.5 Die Vakuumröhre in der Fassade

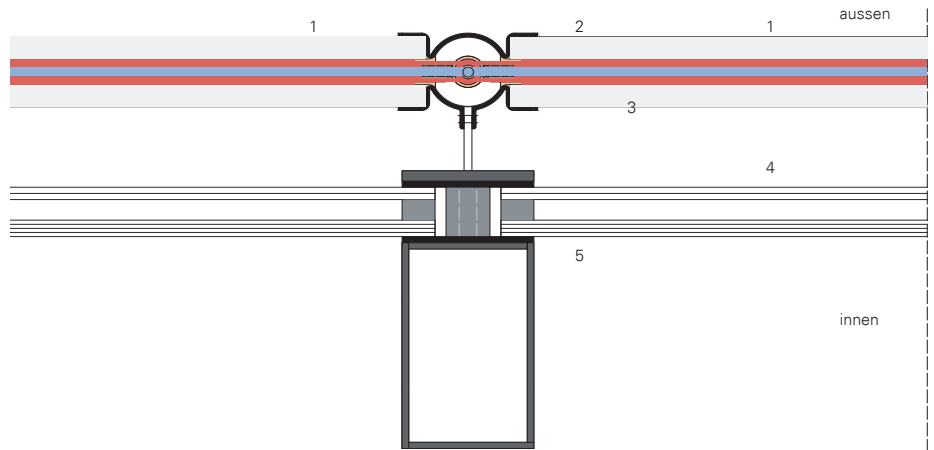


Abb. 9.13
Horizontalschnitt Clipsystem

- | | |
|---|-------------------|
| 1 | Vakuumröhre |
| 2 | Clipsystem |
| 3 | Sammler aus Glas |
| 4 | Isolierverglasung |
| 5 | Fassadenpfosten |

9.5.1 Alternative Sammlerkonzepte

Zur Integration der Vakuumröhre in die Fassade muss die dämmende Verkleidung aus Aluminium ersetzt werden. Durch die Wahl eines geeigneten Materials für den Sammler könnte dies gelingen.

Vakuumröhrenkollektor mit Sammler aus Kunststoff und Glas

Der hier dargestellte Ansatz zeigt den Vakuumröhrenkollektor mit einem Sammler komplett aus Glas, ohne störende Wärmedämmung. Die Dämmung des Sammlerrohrs soll, wie beim Kollektor, durch ein Vakuum hergestellt werden (s. Abb. 9.15).

Der Sammler verläuft also sichtbar vor den Fassadenpfosten und wird auf diesen mit einem Clipsystem befestigt (s. Abb. 9.13). Der Übergang zwischen Sammler und Vakuumröhre könnte, wie dargestellt, in Glas oder Kunststoff ausgeführt werden.

Eine weitere Möglichkeit auf die dämmende Endkappe verzichten zu können, wäre der Einsatz eines hochwertigen Kunststoffes, der diese überflüssig macht. Dadurch kann die Pfostenbreite der Fassade reduziert werden. Anzustreben ist eine Breite von ca. 50 mm (s. Abb. 9.16).

Interessant in diesem Zusammenhang sind auch die gängigen Fassadenraster von 1200 mm bis 1500 mm, auf die die Kollektorrohrängen abgestimmt werden müssen.

Die Vakuumröhren werden zur Zeit nur mit einer Länge von 1580 mm hergestellt.



Abb. 9.14
Standardsammler aus Kupfer, der gedämmt werden muß

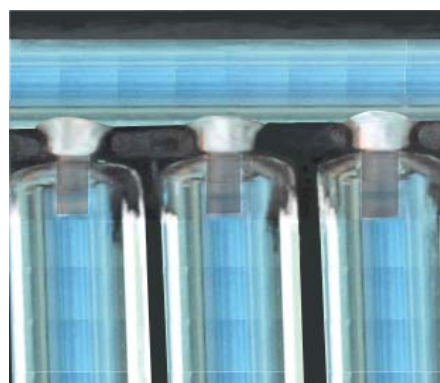
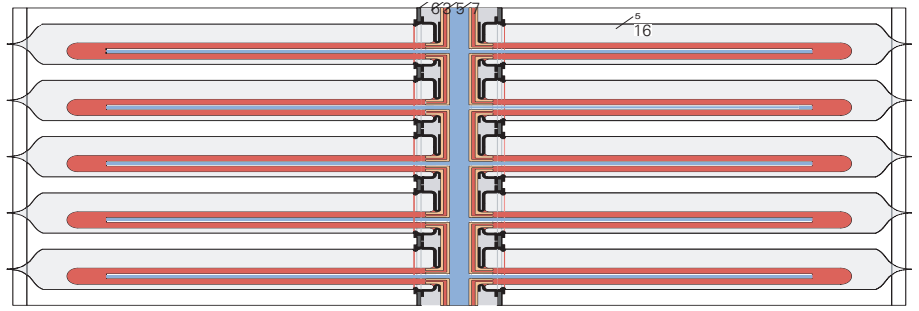


Abb. 9.15
Sammler aus Glas



Abb. 9.16
Sammler aus Kunststoff

Abb. 9.17
Vertikalschnitt durch integrierte
Vakuurröhren



9.5.2 Integration in Fassadensysteme

Integrierter Vakuurröhrenkollektor

Neben der Möglichkeit das Material des Sammlers zu ändern, gibt es die Möglichkeit der Integration, um auf die gedämmte Endkappe verzichten zu können. Die außenliegenden, gedämmten Fassadenpfosten übernehmen die Funktion des Sammlers. Im Fassadenpfosten befindet sich ein Rohr-im-Rohr-System, an welches die Kollektoren mit Hilfe von Kunststoffendkappen direkt angeschlossen werden sollen.

Jeder zweite Fassadenpfosten würde als Sammler fungieren, da rechts und links ein Kollektorrohr angeschlossen

werden kann, was unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit sicher von Interesse sein könnte. Zwischen zwei Sammlerpfosten gibt es dann jeweils einen Pfosten ohne sammelnde Funktion.

Dieser soll den einfachen Ein- und Ausbau z. B. im Schadensfall von Glasrohren ermöglichen, in dem er durch Stellfedern erlaubt, das Glasrohr so weit in den Pfosten hinein zu schieben, bis es auf der Sammlerseite ausgefädelt werden kann (s. Abb. 9.18)

Der dargestellte Zu- und Rücklauf sind in ihren Proportionen ungünstig. Ihre Flächen sollten annähernd gleich groß sein.

Wichtig ist bei diesem System eine einwandfreie technische Funktion, hohe Zuverlässigkeit, Wartungs-

freundlichkeit und flexible Gestaltungsmöglichkeiten mit hoher architektonischer Qualität zu verbinden.

- | | |
|----|--------------------------------|
| 01 | Isolierverglasung |
| 02 | Fassadenpfosten 60x100 mm |
| 03 | Wärmedämmung |
| 04 | Kupferrohr außen |
| 05 | erwärmter Rücklauf |
| 06 | Anschlusskappen aus Kunststoff |
| 07 | "kalter" Zulauf |
| 08 | Kupferrohr innen |
| 09 | Fassadenpfosten 60x100 mm |
| 10 | Absorberrohr |
| 11 | Führungsrohr |
| 12 | Kollektorrohr |
| 13 | ungedämmter Fassadenpfosten |
| 14 | Stellfeder |
| 15 | Endkappe aus Kunststoff |
| 16 | Vakuurröhre |

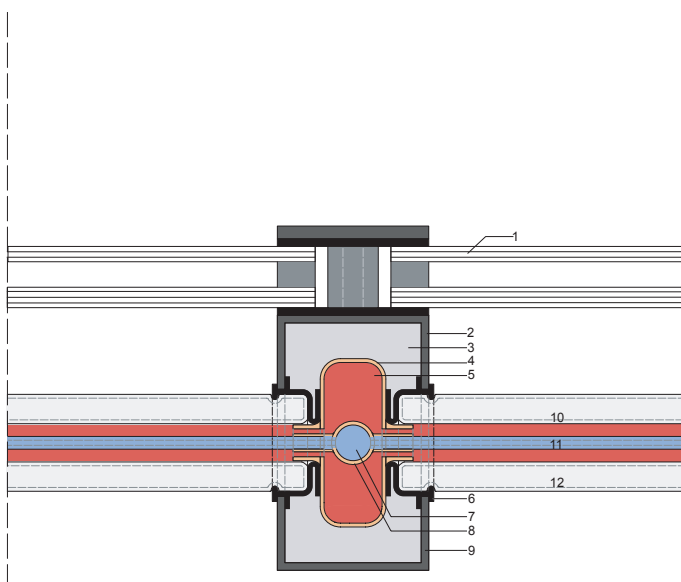


Abb. 9.18
Horizontalschnitt durch integrierte Vakuurröhren

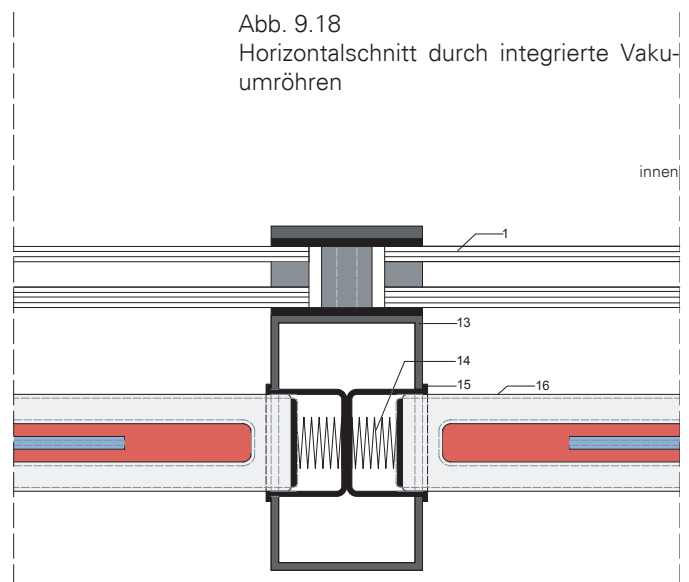




Abb. 9.19
Mock-up M 1:1 mit Teildurchsicht

9.5.3 Modelluntersuchungen

Es wurde ein Modellausschnitt im Maßstab 1:1 angefertigt, um das in der Theorie überlegte und zeichnerisch untersuchte genauer überprüfen zu können.

Hierbei ging es neben dem technischen Anschluss der Rohre an den sammelnden Pfosten auch um den visuellen Eindruck der vertikal angeordneten Vakuumröhren aus Glas. Das Modell wurde als Schnittmodell in der Anschlussebene der Glasrohre ausgeführt.

Es zeigt die mögliche Ausformung der Anschlussklappe (s. Abb. 9.21), in Anlehnung an die von der Schott Rohrglas GmbH bereits entwickelte Anschlußtechnik.

So könnte der in der Werkstatt vorgefertigte Fassadenpfosten mit integrierter

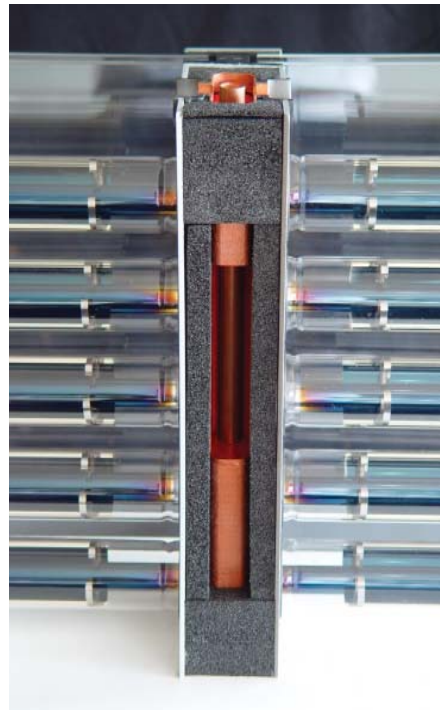


Abb. 9.20
Fassadenpfosten mit integrierter Medieführung

tegrierter Medientechnik und eingelassenen Anschlussklappen auf die Baustelle geliefert und dort montiert werden.

Dank der Stellfedertechnik in den Achsen der nicht sammelnden Fassadenpfosten, wie in 9.5.4 beschrieben, können die Glasrohre so spät wie möglich, um Schadensfälle während des Bauablaufes zu vermeiden, montiert werden. Als bisher noch größtes Problem bleiben die unterschiedlichen Büroraster der einzelnen Planer. Es bleibt unklar, ob die Firma Schott jemals unterschiedliche Rohrlängen produzieren wird.

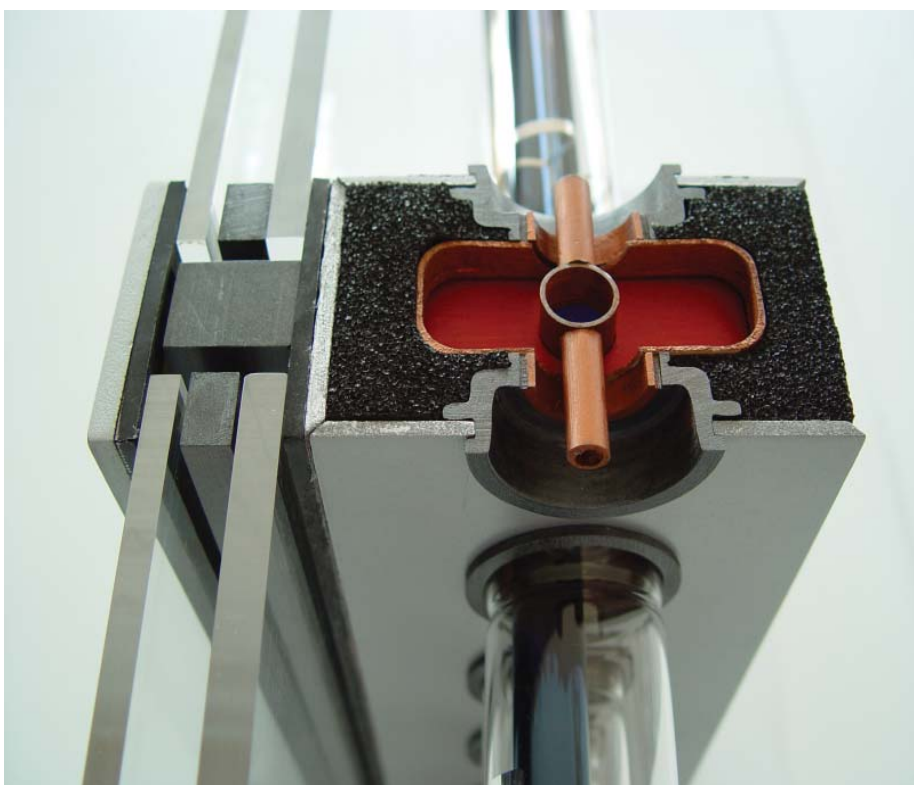
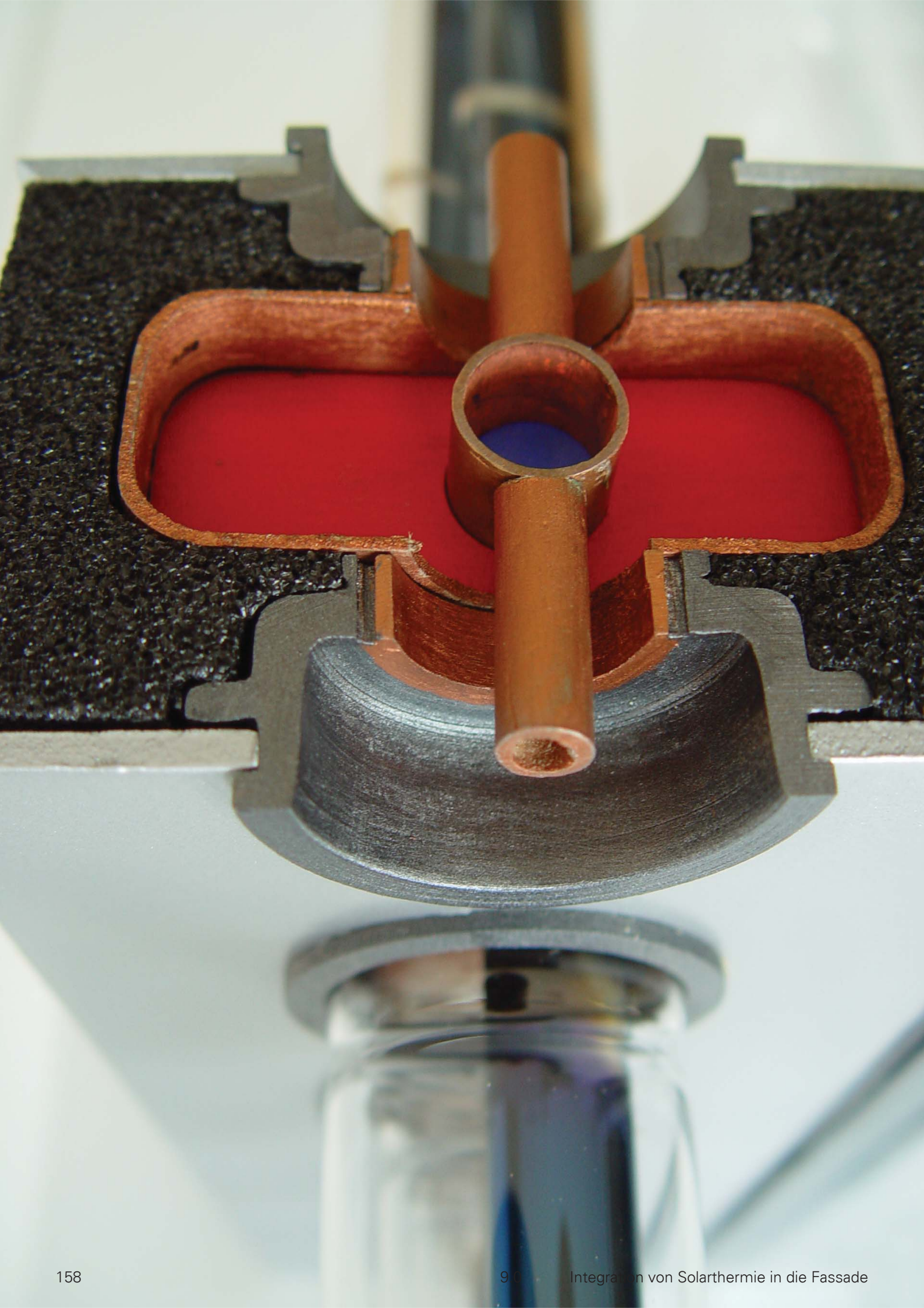


Abb. 9.21
Fassadenpfosten horizontal geschnitten

Abb. 9.22 (nächste Seite)
Anschlussdetail Vakuumröhren an den Fassadenpfosten



9.5.4 Problematik: Verschiedene Büroraster



Abb. 9.23
Anordnung der Vakuumröhren in "Kammstruktur"

Im Laufe der Untersuchungen kristallisiert sich immer mehr heraus, dass aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Anpassung der Rohrlängen an verschiedene Büroraster nicht passieren wird.

Um dieses Problem umgehen zu können, wurde eine Art "Kammprinzip", wie in Abb. 9.23 bis 9.27 dargestellt, entwickelt [MANGOLD].

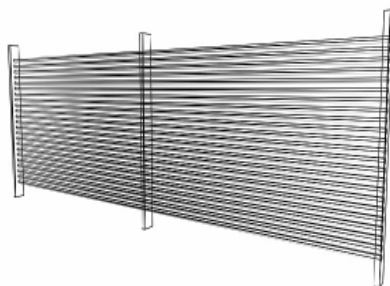


Abb. 9.24
Jede vertikale Rasterachse ist mit einer Röhre belegt

Wie Abb. 9.25 zeigt, wird im vertikalen Raster der Glasrohre nur jede zweite Achse belegt. Verschiebt man diese um ein Höhenraster zueinander, wie in Abb. 9.26 dargestellt, so kann man den Abstand der integrierten Pfosten frei von einander wählen. Die Veränderung des Pfostenabstandes drückt sich in dem Maß der Überschiebung der von links und rechts kommenden Glasrohre aus (s. Abb. 9.27). Dies bedeutet, dass an den Fassadenpfosten, wie in Abb. 9.27 dargestellt, nur in jedem zweiten Höhenraster eine Vakuumröhre angeschlossen wird, dafür aber beidseitig. Mit dem entwickelten "Kammprinzip" kann die Systemfassade auf jedes beliebige Büroraster angepaßt werden.

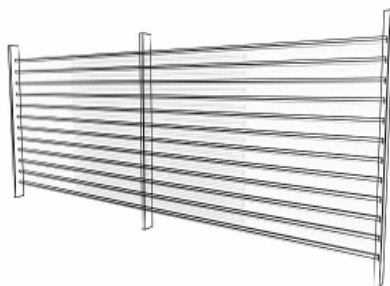


Abb. 9.25
Jede zweite Achse des Rasters bleibt frei

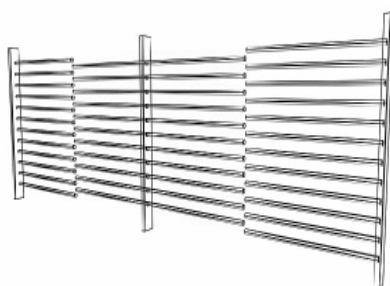


Abb. 9.26
Verschiebung der Röhren um ein Höhenraster zueinander

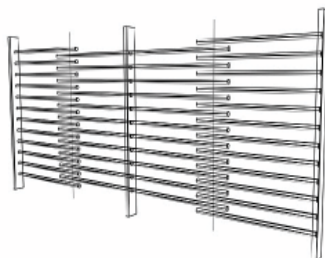


Abb. 9.27
Das "Kammprinzip" ermöglicht die freie Wahl des Fassadenpfostenabstands

9.6 Prototyp-Entwicklung

Das in Kapitel 9.5.4 erläuterte "Kammprinzip" muss weniger technisch als optisch überprüft werden. Zu diesem Zweck wurde ein Fassaden mock-up mit "Kammprinzip" im Maßstab 1:1 gebaut.

Es zeigt einen Fassadenpfosten, bei welchem nur von einer Seite angeschlossen wird, ein Vakuumröhrenfeld mit "Kammprinzip" und einen Fassadenpfosten, bei dem beidseitig Vakuumröhren angeschlossen werden.

Der Wechsel zwischen 50% und 100% Belegung mit Vakuumröhren ist spannungsvoll.

Im Bereich einer 50% Belegung wird es im Gegensatz zur Vollbelegung den Einfall von direkter Sonne geben.

Die Systemfassade fungiert nur in den Bereichen mit Vollbelegung zu

100% als gekühlter, transparenter Sonnenschutz.

Voraussetzung dafür ist, dass die in der Vakuumröhre erzeugte Energie kontinuierlich abgeführt wird. Das bedeutet für den Sommerfall, dass die Kombination mit einem Kühlsystem zwingend erforderlich ist.



Abb. 9.28
Überschiebungsbereich beim "Kammprinzip" [HEYER]



Abb. 9.29
Mock-up mit Teildurchsicht [HEYER]

Abb. 9.30
M 1:1 mit "Kammprinzip" [HEYER]



10.0 Prototyp





Abb. 10.01
60°-Prisma

In den vorausgehenden Kapiteln wurden die einzelnen Komponenten der Systemfassade analysiert. Sie erlauben dank ihrer Materialität die Vision einer transparenten Fassade, die Energie spart und sammelt zu realisieren. Die Fassade wurde grundsätzlich in drei transparente Bereiche eingeteilt: den Oberlichtbereich der Lichtlenkung bzw. des transparenten Sonnenschutzes, den freien Sichtbereich und den gläsernen Sammelbereich.

Ergänzt man dieses System mit einer 3-fach Verglasung (U-Wert: 0,5 W/qmK) so erhält man eine perfekte Solarenergiefassade.

Die nachfolgend gezeigten Modelle, die von verschiedenen Themenschwerpunkten in den unterschiedlichsten Größen jedoch immer im Maßstab 1:1 gebaut wurden, verdeutlichen neben ihrer Funktionsweise den transparenten Charakter der einzelnen Komponenten. Diese Studien dienten als Grundlage für die Erstellung des Prototypen der Systemfassade und sollen hier in ihrer Gesamtheit dargestellt werden.

10.1 Modelle für die Profiluntersuchungen

Für die in Kapitel 7.0, Untersuchung vorhandener Profile, durchgeführten Messungen im Modellraum wurden kleine Holzmodelle, deren Größe auf den am Fraunhofer ISE in Vaihingen zur Verfügung stehenden Modellraum abgestimmt wurde, angefertigt. Neben den möglichen Messungen erlauben die Modelle auch einen optischen Eindruck der verschiedenen Profile, wenn auch nur in einem kleinen Ausschnitt, für eine mögliche Einbausituation in der Fassade.

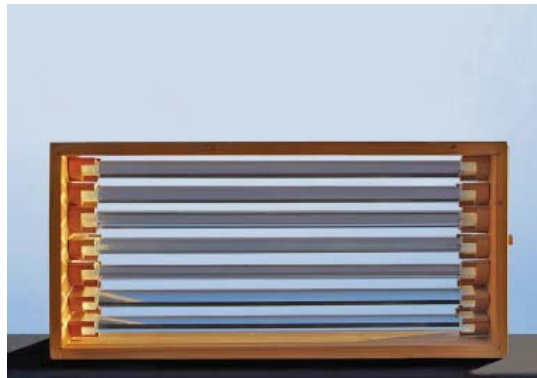


Abb. 10.02
Halbzylinder



Abb. 10.03
Glasrohr



Abb. 10.04
Glasstab



Abb. 10.05
90°-Prisma

10.2 Modellstudie für Glasprismen in der Fassade



Abb. 10.07
Detailaufnahme der Teildurchsicht

Da zum damaligen Zeitpunkt das 90°-Prisma noch nicht in ausreichender Stückzahl lieferbar war, wurde um die Funktionweise in einer realen Arbeitssituation überprüfen zu können und um einen besseren optischen Eindruck zu erhalten ein Modell im Maßstab 1:1 mit drehbar gelagerten 60°-Profilen angefertigt.

In einem Büroraum des Institutes für Baukonstruktion mit den Abmessungen 3.95 m x 5.75 m wurde im Innenraum ein fensterhohes Fassaden mock-up mit drehbar gelagerten 60°-Profilen mit der Größe 1.50 m x 1.80 m montiert.

Abb. 10.08 zeigt die Lichtlenkung des Fassaden mock-ups bis in die Raumtiefe, bei gleichzeitiger Teildurchsicht (siehe Abb. 10.09).

Allerdings zeigt das Modell im Maßstab 1:1 auch die von diesem ausgehende Blendungsgefahr (siehe Abb. 10.06).



Abb. 10.08
Bürraum mit fensterhohem Fassaden mock-up mit drehbar gelagerten 60°-Prismen



Abb. 10.06
Seitenansicht Fassaden mock-up



Abb. 10.09
Fassaden mock-up mit Teildurchsicht

10.3 Mock-up medienführender Fassadenpfosten

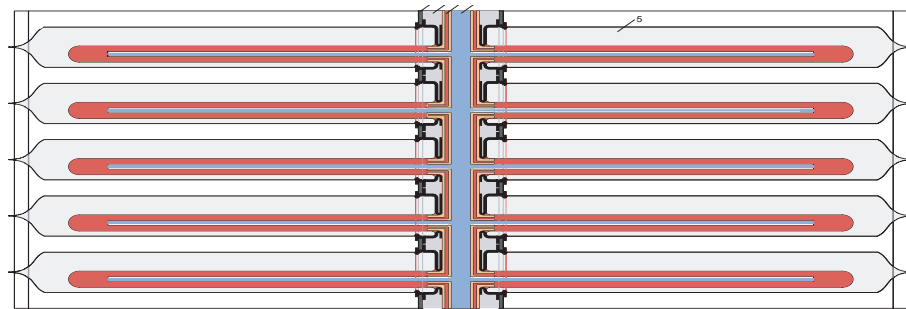


Abb. 10.10
Vertikalschnitt durch integrierte Vakuumröhren im Fassadenpfosten

Ein wichtiges Vormodell für den Bau des Prototypen war das für den integrierten Vakuumröhrenkollektor gebaute Schnittmodell (s. Kapitel 9.5.2) zur Überprüfung der Idee des medienführenden Fassadenpfostens. Hierbei soll die vorhandene vertikale Struktur der Fassade, bestehend aus den Pfosten einer Pfosten-Riegel-Fassade, die Rolle des Sammlers übernehmen.

Der schwierig in die Fassade zu integrierende Sammler der Vakuumröhrenkollektoren (s. Kapitel 9.3.2) wird durch die gedämmten, medienführenden Fassadenpfosten (s. Abb. 10.15) ersetzt. Diese Integration ermöglicht ein hohes Maß an Transparenz beim Einsatz der Vakuumröhren in der Fassade.

Bei der Einbindung in die Pfosten sollen Anschlusskappen aus Kunststoff, ähnlich den Kunststoffkappen des bestehenden Kollektors beim Anschluss der Vakuumröhren an den wärmegeprägten Sammler im Alugehäuse, verwendet werden. Da diese beim Einbau in die Fassade keine aussteifende Funktion übernehmen müssen, sondern nur den technischen Anschluss von Glasrohr an Kupferrohr leisten, können sie entsprechend kleiner dimensioniert werden, so dass sie von außen nur als schwarzer Rand sichtbar sind (s. Abb. 10.12).



Abb. 10.11
Mock-up M 1:1 mit Teildurchsicht

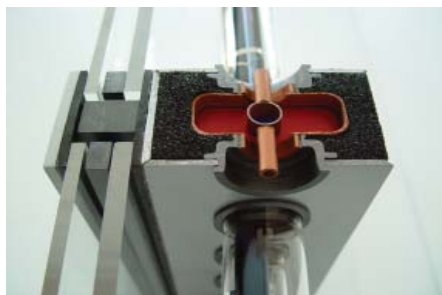


Abb. 10.12
Fassadenpfosten horizontal geschnitten

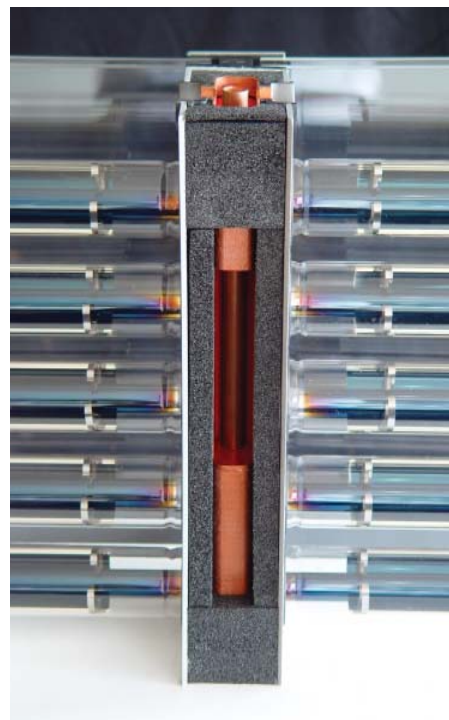
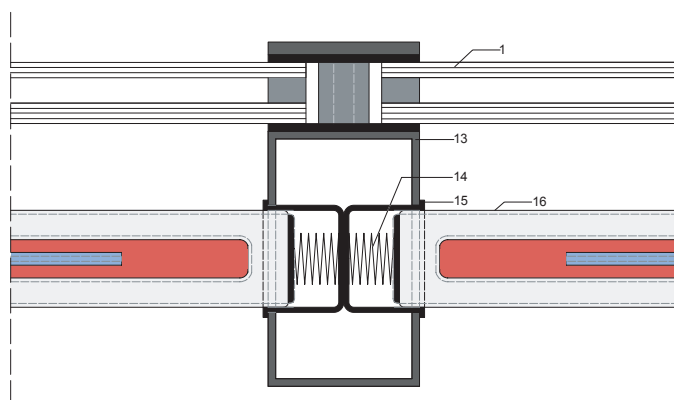
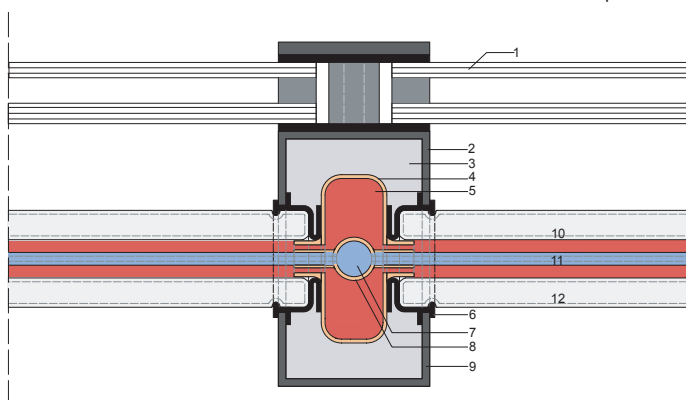


Abb. 10.14 Fassadenpfosten mit integrierter Medienführung

Abb. 10.15
Horizontalschnitt durch integrierte Vakuumröhren

- 01 Isolierverglasung
- 02 Fassadenpfosten 60x100 mm
- 03 Wärmedämmung
- 04 Kupferrohr außen
- 05 erwärmter Rücklauf
- 06 Anschlusskappen aus Kunststoff
- 07 "kalter" Zulauf
- 08 Kupferrohr innen

- 09 Fassadenpfosten 60x100 mm
- 10 Absorberrohr
- 11 Führungsrohr
- 12 Kollektorrohr
- 13 ungedämmter Fassadenpfosten
- 14 Stellfeder
- 15 Endkappe aus Kunststoff
- 16 Vakuumröhre



10.4 Modellstudie Vaku- umröhre mit Kammprin- zip

Für das in Kapitel 9.5.4 erläuterte "Kammprinzip" wurde ein Fassaden mock-up im Maßstab 1:1 mit den Abmessungen 1.00 m x 3.62 m gebaut. Auf der Grundlage der in Abbildung 10.17 dargestellten technischen Zeichnungen wurden die Fassadenprofile aus Aluminium einschließlich der Öffnungsflügel bei einer Fassadenfirma bestellt, um einen möglichst naturgetreuen Eindruck der Fassade zu erhalten. Öffnungsflügel sind hinter jeder Achse mit Vakuumröhren erforderlich, da die Scheiben von außen sonst nicht zu reinigen sind. Anstelle einer Isolierverglasung wurde Plexiglas verwendet. Die Vakuumröhren wurden direkt vom Hersteller geliefert.

Das Fassaden mock-up wurde in erster Linie zur optischen Beurteilung des Kammprinzips gebaut. Dieses ermöglicht den Einbau der Vakuumröhren in jedes beliebige Büroraster. Abhängig vom jeweiligen Raster ändert sich die Breite der überlagernden Bereiche und der Bereiche mit Belegung durch nur jede zweite Röhre.

Das mock-up zeigt deutlich die Fassadenabschnitte mit 50% und 100% Belegung durch Vakuumröhren bei einer Überlagerung von 54 cm. Nebenbei macht es auch deutlich, dass in den Bereichen mit 50% Belegung direkte Sonne einfallen wird. Wie groß bzw. wie störend der thermische Eintrag bzw. die von der direkt einfallenden Sonne eventuell ausgehende Blendung sein werden, gilt es noch zu klären.

Abb. 10.18
Fassadenausschnitt mit 50% Belegung
[HEYER]

Abb. 10.19
Überschiebungsbereich beim "Kammprinzip" mit 100% Belegung [HEYER]



Abb. 10.16
Mock-up mit Teildurchsicht [HEYER]

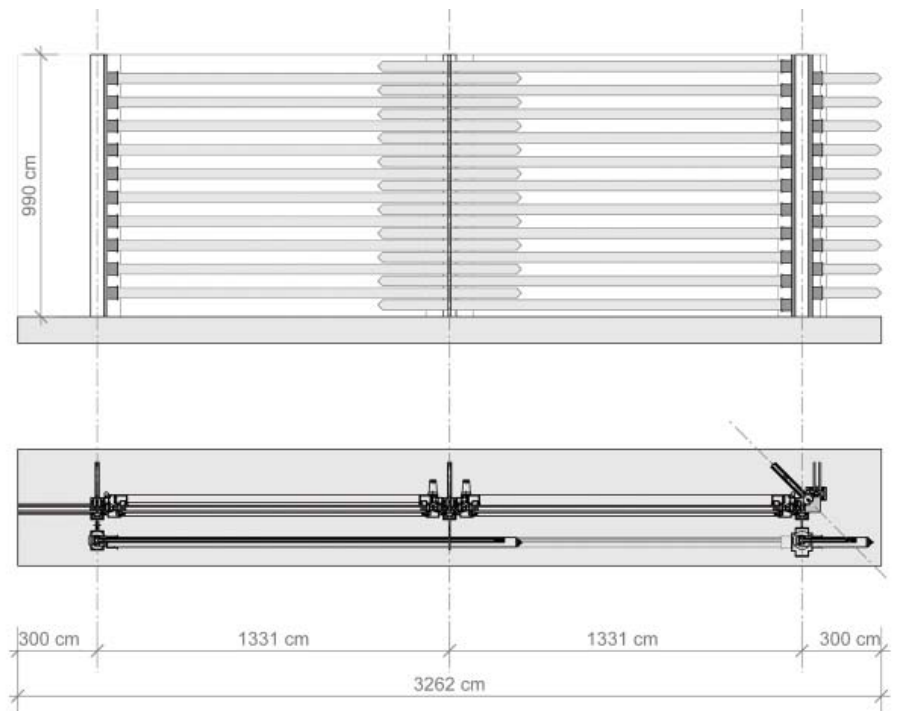


Abb. 10.17
Horizontalschnitt und Ansicht des mock-ups



10.5 Systemfassade als Prototyp

10.5.1 Planung

Auf der Grundlage des Fassaden mock-up für die 60°-Prismen (s. Abb. 10.09), die drehbar gelagert sind, soll zum ersten Mal die Systemfassade in ihrer Gesamtheit realisiert werden. Als Profil für den Oberlichtbereich wurde auch dieses Mal das 60°-Prisma verwendet, da das 90°-Prisma, das in seiner Funktionsweise zu bevorzugen ist (s. Kapitel 7.2), nicht in ausreichender Stückzahl zur Verfügung stand.

Die Prismen können dem Sonnenverlauf so nachgeführt werden, dass die einfallende Strahlung, bei den für den Oberlichtbereich vorgesehenen 90°-Prismen durch zweimalige Totalreflektion innerhalb des Profils, nach außen gelenkt wird. Die Prismen funktionieren als transparenter Sonnenschutz bei gleichzeitiger Diffuslichtlenkung.

Im Brüstungsbereich kommen die in Kapitel 9.0 erläuterten Vakuumröhren zum Einsatz. Als raumseitiger Abschluss dient eine geschosshohe Isolierglasscheibe. Abbildung 10.20 zeigt die Ansicht des Prototypen. Das Fassadenraster, hier 1580 mm, wurde auf die im Moment zur Verfügung stehende Vakuumröhrlänge von 1580 mm angepaßt. Das bedeutet für das mock-up eine Belegung mit Vakuumröhren im Brüstungsbereich von 100%. Der Abstand der Röhren wird so gewählt, dass 100% der auftreffenden Strahlung von den Vakuumröhren absorbiert werden, was einer maximalen Ausnutzung der Sonnenenergie entspricht. Eine Teildurchsicht sowie eine ausreichende Transparenz bleiben sowohl im Oberlicht als auch im Brüstungsbereich erhalten. Der Sichtbereich ist frei von Elementen, so dass für die Benutzer die freie Sicht nach außen möglich ist. Im Sichtfeld wird ein zusätzlicher Blendschutz erforderlich.

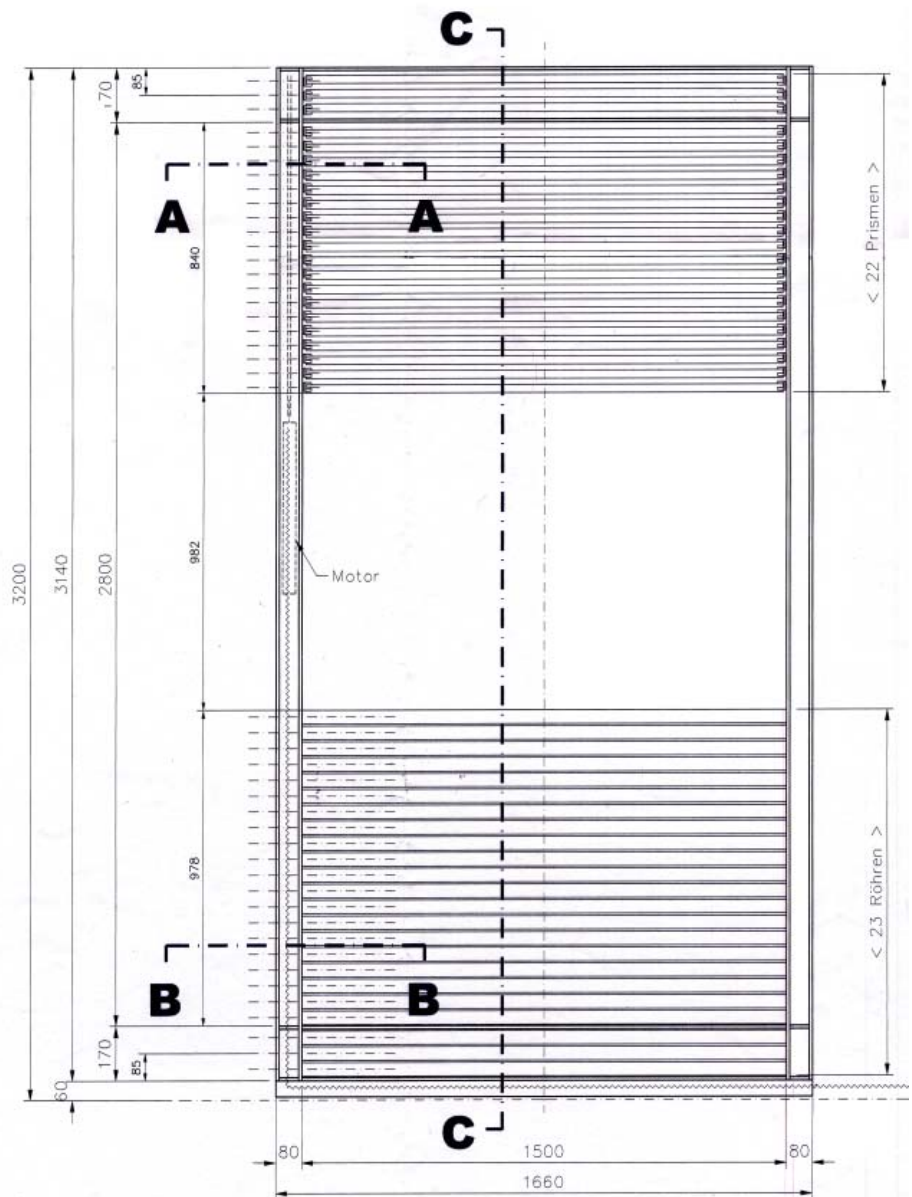


Abb. 10.20
Ansicht Prototyp mit Schnitfführung [FRÜH]

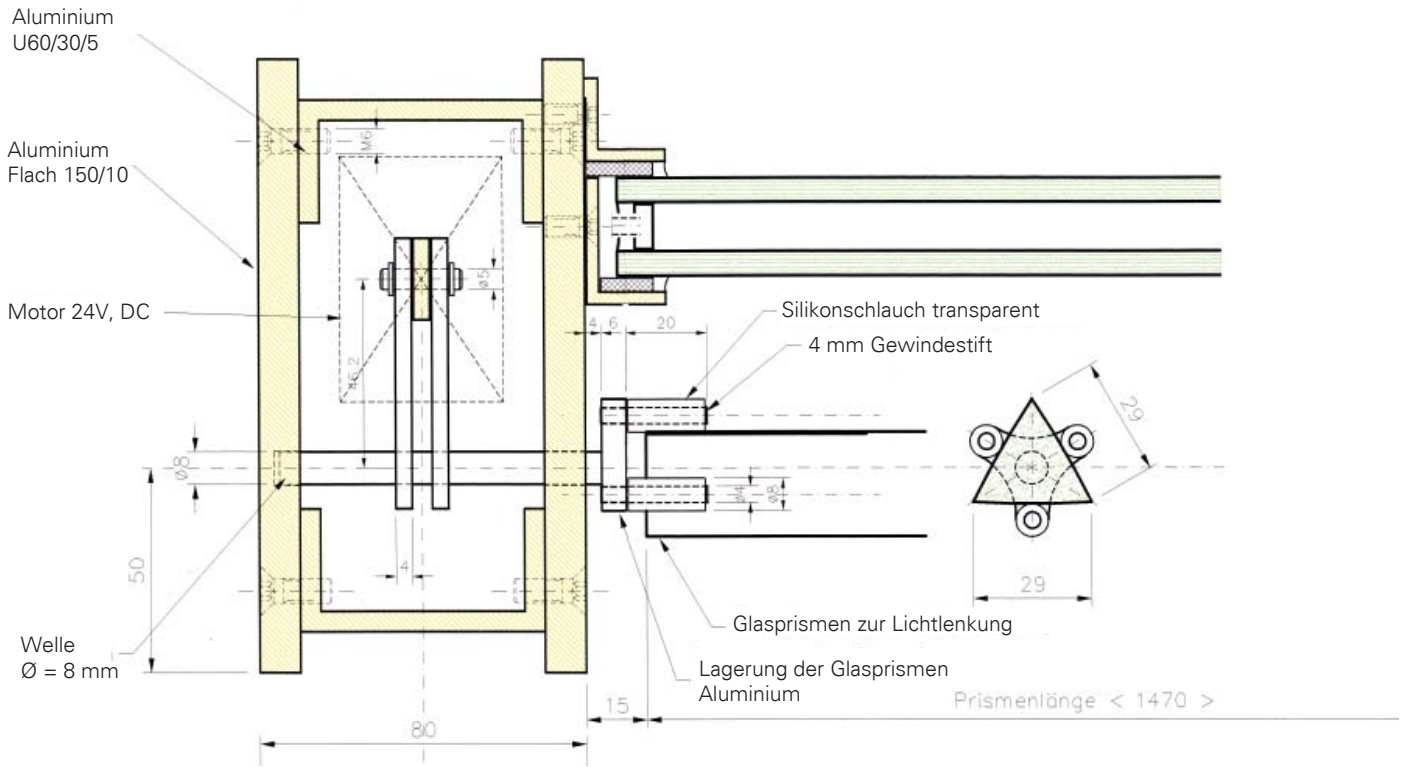


Abb. 10.21
Horizontalschnitt A-A [FRÜH]

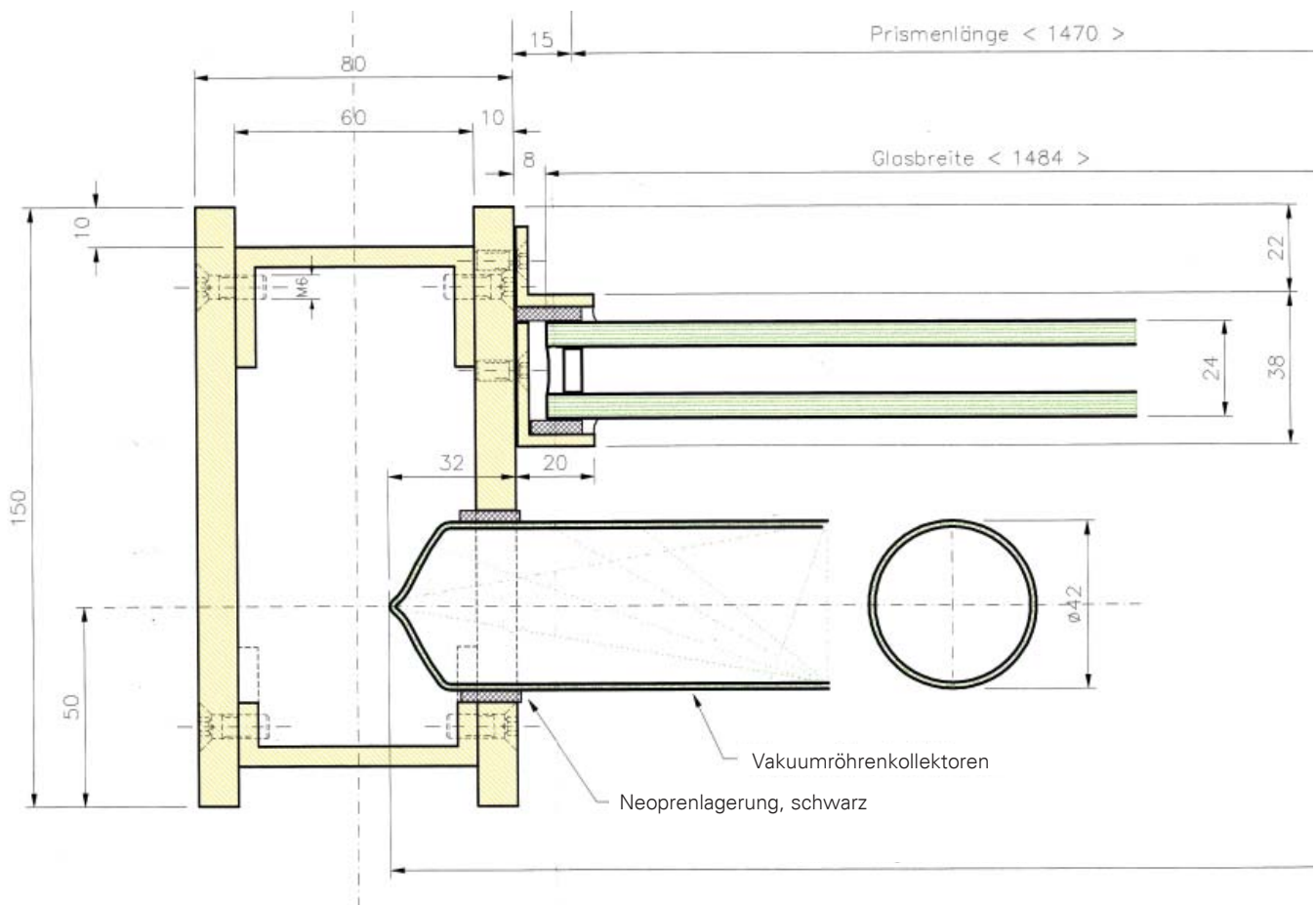


Abb. 10.22
Horizontalschnitt B-B [FRÜH]

Varianten zur Prismenhalterung

Variante 1

Die Welle wird direkt mit der Stirnseite des Glasprismas verklebt.

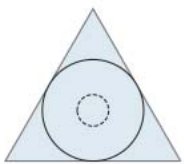


Abb. 10.24: Querschnitt Variante 1

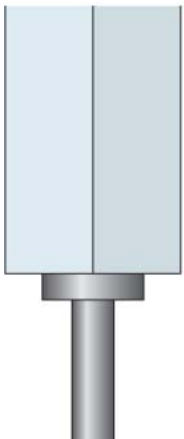


Abb. 10.25: Ansicht Variante 1

Die Abbildungen 10.24 bis 10.31 zeigen Varianten zur Prismenhalterung. Variante 2 kam zur Ausführung, da sie neben guter Funktionalität das Prisma am Haltepunkt in seiner Gläsernheit nicht beeinträchtigt.

Variante 2

In die dreieckige Grundplatte sind Stahlstifte eingelassen, die mit einem Silikonschlauch überzogen sind. Diese halten das Glasprisma von drei Seiten. Ein Stahlstift ist demontierbar, um das Glasprisma einfach entfernen zu können.

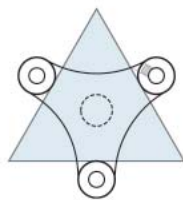


Abb. 10.26: Querschnitt Variante 2

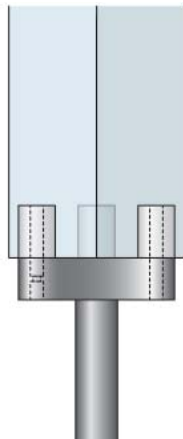


Abb. 10.27: Ansicht Variante 2



Abb. 10.28: 3d-Darstellung Variante 2 zur Prismenhalterung

Variante 3

Das Prisma wird an drei Seiten von Halteelementen fixiert, die mit Imbusschrauben befestigt sind. Zwischen Halteelement und Glas wird Silikon eingelegt.

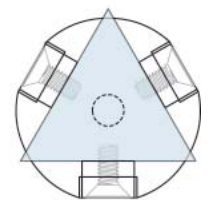


Abb. 10.29: Querschnitt Variante 3

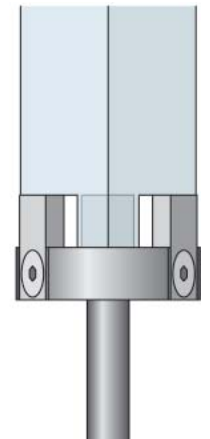


Abb. 10.30: Ansicht Variante 3

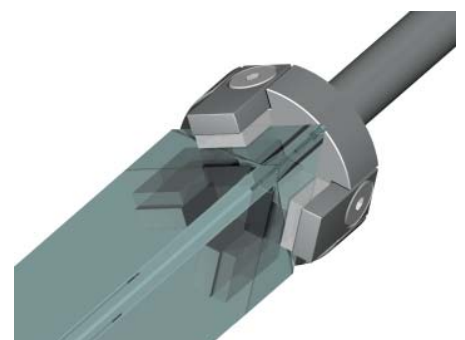


Abb. 10.31: 3d-Darstellung Variante 3 zur Prismenhalterung



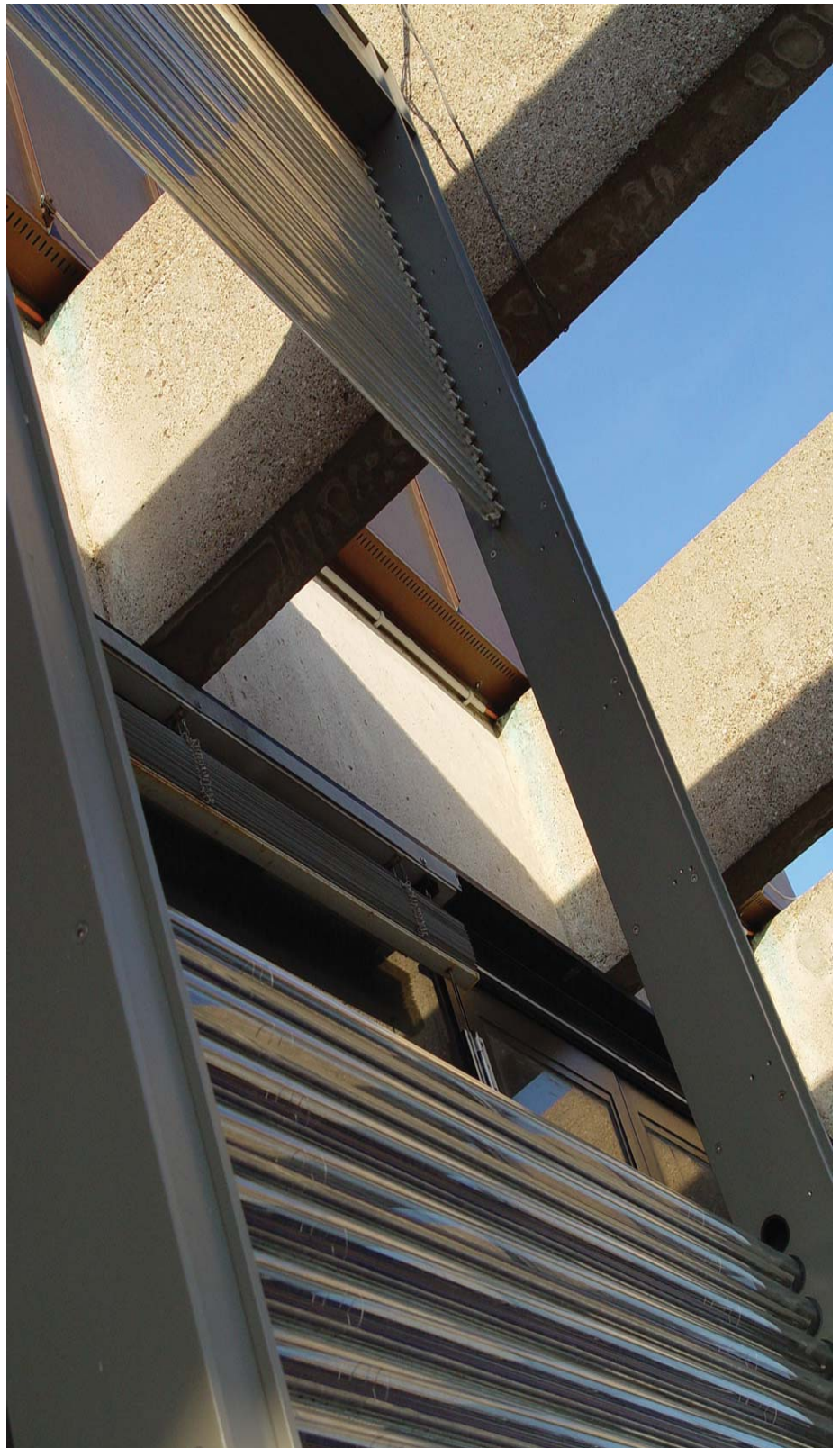
Abb. 10.32
(linke Seite)
Prototyp vor der zurückgesetzten Fassade
des 11. Stockwerks der Universität
Stuttgart, K1

Abb. 10.33
Prototyp mit zusätzlicher Befestigung
gegen Windkräfte

10.5.2 Realisierung

Ausgehend von der unter Punkt 10.5.1 beschriebenen und dargestellten Planung wurde die Systemfassade im Maßstab 1:1 gefertigt. Bei der Realisierung war in diesem Fall im Gegensatz zu allen bisher entstandenen Modellen, die in der Werkstatt der Universität Stuttgart gebaut wurden, professionelle Unterstützung notwendig. Mit Hilfe und großzügigem finanziellen Einsatz der Firma Metallbau Früh [FRÜH] konnte das mock-up als Glas/Stahlkonstruktion mit den Abmessungen 1.65 m x 3.20 m ausgeführt werden. Für die Fassadenpfosten wurden keine Standard Rechteckrohre sondern Flachstähle, die über C-Profile miteinander verbunden wurden, verwendet. Dies hat den großen Vorteil, dass im Inneren des Fassadenpfostens auf einfache Art und Weise die Welle und der Motor für die drehbare Lagerung der Glasprofile, jederzeit zugänglich, untergebracht werden konnte. Auch die Montage der Vakuumröhren wurde dadurch erleichtert. Zum Einführen der Rohre kann mit wenigen Handgriffen das vordere C-Profil entfernt werden. Einen integrierten Sammler für die Kollektoren, wie in Kapitel 10.3 gezeigt, gibt es nicht. Der Kollektor ist nicht angeschlossen und nicht durchströmt. Zur Überprüfung des visuellen Eindrucks war dies nicht erforderlich. Abgesehen davon hätte dies den finanziellen Rahmen gesprengt. Das realisierte mock-up wurde auf dem Dach der Universität Stuttgart, Keplerstrasse 11 vor dem Forschungsraum des Institutes für Baukonstruktion, L2, aufgebaut und dort zur weiteren Beobachtung belassen.

Um die Standsicherheit des mock-up's zu gewährleisten bekam der untere Rahmen des Fassadenelements zwei schwere Stahlfüße. Da die auf-



tretenden Windkräfte auf dem Dach der Hochschule schwer abzuschätzen waren, wurde das Element zusätzlich an der Pergolaartigen Betonstruktur des zurückgesetzten Dachgeschosses mit Stahlseilen gesichert.

Die Glasprismen im Oberlichtbereich sind drehbar gelagert, so dass sie optimal zum einfallenden Sonnenstand ausgerichtet werden können, um ihre Funktion als transparenten Sonnenschutz zu erfüllen. Hier galt es nicht nur den visuellen Eindruck sondern auch die Funktionalität zu überprüfen, was aufgrund der verwendeten Profile nur eingeschränkt möglich ist. Im Brüstungsbereich befinden sich Vakuumröhren im für den senkrechten Einbau optimierten Abstand, so dass keine gegenseitige Verschattung der Röhren erfolgt und die Ertragsmenge maximiert wird, bei gleichzeitiger Durchsicht zwischen den Röhren (s. Abb. 10.35).

Durch die freie Bewitterung des mock-up über einen Zeitraum von einem Jahr, ohne dass das Element gereinigt wurde, kann der Aspekt des Reinigungsaufwandes besser beurteilt werden. Alle in Kapitel 10.0 gezeigten Aufnahmen der Systemfassade wurden ohne vorherige Reinigung der Glaselemente vorgenommen. Abbildung 10.39 zeigt eine Detailaufnahme der Vakuumröhren, die den Verschmutzungsgrad deutlicher zeigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine zweimalige Reinigung der Systemfassade im Turnus der Fensterreinigung für die Funktionsweise der Glasprofile und Vakuumröhren ausreichend ist.

Das mock-up zeigt deutlich den gewünschten transparenten Charakter bei gleichzeitiger Energiespar- und Energiesammelfunktion. Die Vision der transparenten Solarenergiefassade ist greifbar nahe.



Abb. 10.34
Glasprismen mit Teildurchsicht



Abb. 10.35
Vakuumröhren mit Teildurchsicht

10.6 Zusammenfassung

In Kapitel 10 werden die verschiedenen Stufen der durchgeführten Modelluntersuchungen dargestellt. Zusammenfassend lässt sich folgendes festhalten:

- Eine Anordnung der Glasprofile im Sichtbereich ist unbefriedigend. Diese darf auf keinen Fall stationär, sondern muss nach Bedarf wegklappbar sein (siehe Kapitel 2.3.2).
- Eine Ausleuchtung der Decke bis in die Raumtiefe konnte festgestellt werden, wodurch die Untersuchungen in Kapitel 7.1.3 und 7.2.2 bestätigt wurden.
- Das Schnittmodell zur Untersuchung der Integration der Vakuumröhren war unter anderem auch für Gespräche mit Fachleuten sehr hilfreich. Es diente als Grundlage für den Bau des Prototypen.
- Die Modellstudie Vakuumröhren mit Kammprinzip zeigte zum ersten Mal die Einbausituation der Vakuumröhren in der Fassade im großen Maßstab. Die Bereiche mit unterschiedlichen Belegungs-dichten werden veranschaulicht.
- Der Prototyp der Systemfassade, aufgebaut auf dem Dach der Universität Stuttgart, K 1, zeigt eine Büroachse mit Glasprofilen im Oberlichtbereich, einem freien Sichtbereich und Vakuumröhren im Brüstungsbereich. Der transparente Charakter der Energiesparfassade wird deutlich. Durch die freie Bewitterung kann das Alterungs- bzw. Verschmutzungsverhalten gut beobachtet werden. Die Verschmutzung nach einem Jahr ist erstaunlich gering.



Abb. 10.36
Fassaden mock-up mit Teildurchsicht

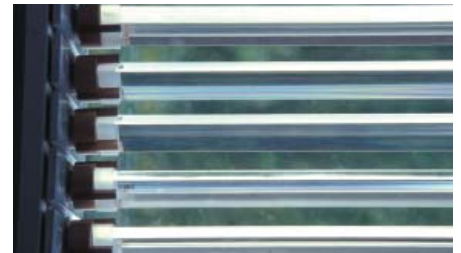


Abb. 10.40
Detailausschnitt der Teildurchsicht

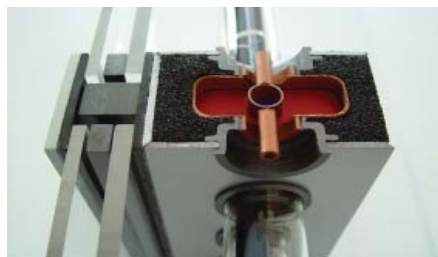


Abb. 10.37
Fassadenpfosten horizontal geschnitten



Abb. 10.41
Mock-up mit Teildurchsicht [HEYER]

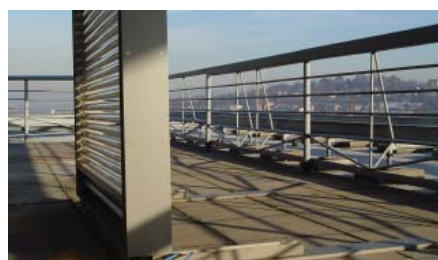


Abb. 10.38
Prototyp auf den Dach des K1



Abb. 10.42
Oberlichtbereich mit Glasprofilen

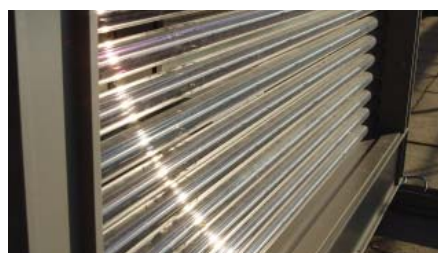


Abb. 10.39
Detailaufnahme Vakuumröhren nach einem Jahr Bewitterung

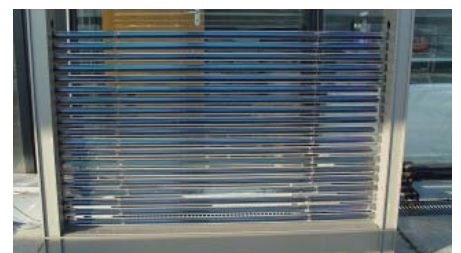


Abb. 10.43
Prototyp vor geschosshoher Verglasung

11.0 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Aktivierung der Fassade zur Einsparung von elektrischer Energie und zur aktiven Nutzung von Solarenergie.

Sie soll als Beitrag zur Ressourcenschonung und aktiver Nutzung erneuerbaren Energien dienen und das Interesse von Industrie und Architekten für die Nutzung der Fassadenflächen vor allem von Bürogebäuden wecken.

In Kapitel 2 werden verschiedene Fassadenkonzepte und Einbausituationen zum Thema Systemfassade dargestellt und erläutert.

Das Kapitel schließt mit einer Visualisierung der transparenten Solarenergiefassade ab.

Die Ausführungen in Kapitel 3 behandeln die Grundlagen zum Thema Tageslicht angefangen vom Tageslicht allgemein bis hin zur konkreten Situation am Arbeitsplatz. Zur besseren Verständigung werden die wichtigsten Begriffe und Definitionen und deren Einheiten erläutert.

In Kapitel 4 geht es um Systeme, die das Tageslicht nutzen. Um die verschiedenen Funktionsweisen einzelner auf dem Markt vorhandener Tageslichtsysteme nachvollziehen bzw. beurteilen zu können, beginnt dieses Kapitel mit den zur Verfügung stehenden physikalischen Grundprinzipien zur Lichtlenkung. Neben der Differenzierung der Systeme durch die verschiedenen Funktionsweisen kann grundsätzlich jedes System dem Prinzip Lichtlenkung oder Sonnenschutz zu geordnet werden. Unabhängig von diesen Unterscheidungen wird ein Anforderungskatalog für solche Systeme erstellt.

Auf der Grundlage dieser Analyse werden 16 auf dem Markt vorhandene Tageslichtsysteme hinsicht-

lich Funktionsweise, Einsatzgebiet und Aufbau in Kapitel 5 untersucht. Sie werden in drei Gruppen entsprechend ihrer Funktionsweise eingeteilt: Streuende, lichtenkende und Systeme zum Sonnenschutz.

Ein Hauptnutzen aller Systeme besteht in ihrer Fähigkeit unter veränderten Himmelsverhältnissen die Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht bezüglich des Tageslichtniveaus, der Tageslichtverteilung sowie der Leuchtdichte am Fenster, kontrollieren zu können. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Funktionsweisen kann ein direkter, ausschliessender Vergleich nur in einer konkreten Einbausituation mit definierten Randbedingungen und Anforderungen erfolgen.

Nur wenige der untersuchten Tageslichtsysteme sind aus dem Material Glas. Da es sich bei den in dieser Arbeit untersuchten Profilen um Glasprofile handelt gibt es zur Grundlagenenerweiterung eine kurze Abhandlung zum Thema Glas und dessen Eigenschaften.

Im Kapitel 7 werden auf der Grundlage der Untersuchungen von vorhandenen Tageslichtsystemen zur Einsparung von elektrischer Energie und den allgemeinen Randbedingungen zur Tageslichtnutzung Glasprofile und -rohre der Schott Rohrglas GmbH auf deren Einsatz hin zur Tageslichtnutzung und/oder als transparenter Sonnenschutz überprüft.

Aus dem Fundus der Schott Rohrglas GmbH wurden 4 Profile, die auf den ersten Blick sinnvoll erschienen, ausgewählt: die Profile 60°-Prisma, Halbzylinder, Glasstab und Glasrohr.

Die Untersuchungen wurden in drei Schritten durchgeführt.

Die o. g. Profile wurden zunächst über

eine Strahlverfolgung, die von Hand durchgeführt wurde, untersucht. Zur Unterstützung dieser Ergebnisse wurden kleine Modelle gebaut, die im Fraunhofer ISE in Vaihingen in einen Modellraum unter künstlicher Sonne eingebaut und vermessen wurden. Das Profil Halbzylinder lieferte die besten Ergebnisse.

Ein 90°-Prisma ist im Bestand der Schott Rohrglas GmbH zwar nicht vorhanden, aber die theoretischen Untersuchungen zeigen, dass dieses Profil deutlich besser funktioniert als das gleichseitige Dreieck.

Schott Rohrglas läßt es herstellen. Aufgrund der theoretischen Ergebnisse wird nur das 90°-Prisma weiter untersucht.

Im zweiten Schritt wird im Rahmen einer Diplomarbeit am ISE in Freiburg das 90°-Prisma hinsichtlich seiner Funktion als transparenter Sonnenschutz und zur Lichtlenkung untersucht.

Die Ergebnisse von Hand werden bestätigt. Das 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz funktioniert gut. Die konkrete Rolle des Absorbers, der bereits in den ersten Untersuchungen mit berücksichtigt wurde, gilt es noch zu klären.

Im dritten Schritt wird das 90°-Prisma als transparenter Sonnenschutz von einem lichttechnischen Institut vermessen. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf den Einfluß von herstellungsbedingten Kantenverrundungen, herstellungsbedingten Abweichungen vom 90° Winkel und auf unterschiedliche Ausformungen der Absorberschicht gelegt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das 90°-Prisma mit grauem Absorber perfekt funktioniert. Aber auch das Prisma mit diffus aufgerauter unterer Kathete funktioniert überraschend gut. Beim Abwägen aller Vor- und Nachteile ist

aus architektonischen Gesichtspunkten die Variante mit geätzter Kathete vorzuziehen.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus den Kapiteln 3 bis 7 wird ein neues Glasprofil, ähnlich der Geometrie des Menschlichen Auges entwickelt und von Hand per Strahlverfolgung überprüft. Es funktioniert mit Abstand am Besten.

Zum Ziehen dieses Profils bei Schott Rohrglas kommt es nicht mehr, da sich die Firmenstruktur geändert hat und dem Ansprechpartner vor Ort dadurch die Hände gebunden sind.

Die lichttechnischen Untersuchungen durch das Institut in München werden aus dem gleichen Grund nicht mehr durchgeführt, wären aber sehr sinnvoll.

Der zweite Aspekt der Arbeit, die aktive Nutzung der Solarenergie, konzentriert sich auf den Einsatz von Vakuumröhren der Schott Rohrglas GmbH in der Fassade. Kombiniert mit den Glasprofilen sollen sie ein neues Fassadenkonzept, die Systemfassade, bilden.

Die in Kapitel 9.0 dargestellten Überlegungen und Untersuchungen zur Integration von Solarthermie in die Fassade dienen als Grundlage für die Antragstellung eines Forschungsprojektes beim Bundesministerium für Umwelt in Berlin.

Dieser Forschungsantrag ist mittlerweile genehmigt. Der Projektstart war am 01.11.2005.

Es ist zu erwarten, dass nach der Vorhabenslaufzeit von zwei Jahren ein marktfähiges Fassadensystem zur aktiven Solarenergienutzung zur Verfügung steht, das zum einen additiv zur Aufrüstung im Bestand als auch integrativ für Neubauten eingesetzt werden kann.

In Zukunft wird die aktive Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden eine zentrale Rolle spielen.

Für Solarthermie ist eine ähnliche Entwicklung wie bei Photovoltaikanlagen zu erwarten. Die Photovoltaik betreffend wurden auf politischer Ebene deutliche Signale gesetzt, die eine aktive Solarenergienutzung in der Gebäudehülle unterstützen. So bringt der im Moment vorliegende Entwurf zum EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) zum Ausdruck, dass gebäudeintegrierte Anlagen eine erhöhte Vergütung und die fassadenintegrierten Systeme den Höchstsatz bekommen. Ein Entwurf für das EEG die Solarthermie betreffend ist in Arbeit.

Literaturverzeichnis

- [BARTENBACH]: Brüder Eckelt & Co. Glastechnik GmbH, Resthofstr. 18A, 4400 Steyr, Herr Söllinger, Tel.0043-7252-894-294, Fax. 0043-7252-894-24
- [BINE 1/00] BINE Informationsdienst, profinfo 1/2000 S.3
- [DETAIL_1] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 16
- [DETAIL_2] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 17-19
- [DETAIL_3] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 19
- [DETAIL_4] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 22-24
- [DETAIL_5] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 18
- [DETAIL_6] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 12-13
- [DETAIL_7] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 29-30
- [DETAIL_8] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 103
- [DIN 5034] DIN 5034, S. 38
- [DIN 5034-1] Vgl. DIN 5034, Teil 1, 1985, S.3
- [DIN 5034-2] Vgl. DIN 5034, Teil 1, 1985, S.6
- [DIN 5034-3] Vgl. DIN 5034, Teil 1, 1999, S.5
- [DIN 5034_10] Vgl. DIN 5034, Teil 1, 1985, S.3
- [DIN 5034_11] Vgl. DIN 5034, Teil 1, 1985, S.6
- [DIN 5035-1] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.2
- [DIN 5035-2] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.2
- [DIN 5035-2] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.4
- [DIN 5035-3] Vgl. DIN 5035, Teil 7, 1990, S.3
- [DIN 5035-3] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.4
- [DIN 5035-4] Vgl. DIN 5035, Teil 7, 1990, S.3
- [DIN 5035-5] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.2
- [DIN 5035-6] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.2
- [DIN 5035-7] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.4
- [DIN 5035-8] Vgl. DIN 5035, Teil 2, 1990, S.3
- [DIN 5035-9] Vgl. DIN 5035, Teil 2, 1990, S.3
- [DIN 5035_10] Vgl. DIN 5035, Teil 2, 1990, S.3
- [DIN 5035_11] Vgl. DIN 5035, Teil 1, 1990, S.2
- [DIN 5035_12] Vgl. DIN 5035, Teil 2, 1990, S.2
- [ECOSS H] Firmenunterlagen der Firma Figla, Adresse s. [FIGLA] [ECOSS D], Firmenunterlagen der Firma Figla, Adresse s. [FIGLA]
- [FALK_1] Vgl. Falk, D. S./Brill, D.R./Stork, D. G., Blick, 1990, S. 29
- [FALK_2] Vgl. Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.333
- [FALK_3] Vgl. Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.14
- [FALK_4] Vgl. Falk, D. / Brill, D. R. / Stork, D. G., Blick, 1990, S.11-14
- [FALK_5] Vgl. Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.37-43
- [FALK_6] Vgl. Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.52-53
- [FALK_7] Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick,1990, S.53
- [FALK_8] Vgl. Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.446
- [FALK_9] Aus: Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.339
- [FIGLA] Figla, U.S.A. Corporation,13 Lancaster Ave, Pine Brook NJ 07058, Mr. Mike Morybayashi, Tel. 001-973-882-8015, Fax 001-973-882-8038
- [FISCHER_1] Vgl. Fischer, U., Tageslichttechnik,1982, S.22, S.36-37
- [FISCHER 2] Vgl. Fischer, U., Tageslichttechnik, 1982, S.13
- [FISCHER 3] Vgl. Fischer, U., Tageslichttechnik, 1982, S.13
- [FRÜH] Metallbau Früh GmbH, Postfach 1249, 79224 Umkirch, Deutschland
- [GLASS_1] VDMA, Messe Düsseldorf, GLASS Edition II, 2002, S.8
- [glasklar1] Okalux, Kapillarglas GmbH, 97828 Markttheidenfeld, Tel. 09391-900-0, Fax 09391-900-100
- [GLASKLAR_1] Achilles, Braun, Fuchs, Seger, Volz, Glasklar, 2003, S.16-18
- [GLASKLAR_2] Achilles, Braun, Fuchs, Seger, Volz, Glasklar, 2003, S.18
- [GLASKLAR_3] Achilles, Braun, Fuchs, Seger, Volz, Glasklar, 2003, S.126-127
- [GLB] Gesellschaft für Licht-u. Bautechnik mbH, Gremberger Str.151a, 51105 Köln, Tel.0221-8879130, Fax 0221-9833773
- [HEW 1997_1] HEW, Prof. Dr. Ing. H. Müller, Dipl. Ing M. Kischkoweit-Lopin, Architektur auf der Sonnenspur, 1997, S. 4

- [HEW 1997_2] HEW, Prof. Dr. Ing. H. Müller, Dipl. Ing M. Kischkoweit-Lopin, Architektur auf der Sonnenspur, 1997, S. 5
- [HEYDER 2] Aus: Heyder, J., Tageslichtlenksysteme, 1998, S. 88
- [HEYDER 3] Aus: Heyder, J., Tageslichtlenksysteme, 1998, S. 83
- [Hüppe1] Hüppe Form Sonnenschutz GmbH, Cloppenburg Str. 200.
26133 Oldenburg, Tel. 0441-402-493 (H. Schäfer), Fax 0441-402-579
Bomin Solar GmbH, Industrie Str. 8, 79541Lörrach,
Tel 07621-95960, Fax 07621-54368
- [Hüppe2] Hüppe Form, Sonnenschutz GmbH, Cloppenburg Str. 200,
26133 Oldenburg, Herr Schäfer, Tel.0441-402-493, Fax 0441-402-579
- [INGLAS] Inglas, Im Winkel 4/1, 88048 Friedrichshafen, Dr. R.
Braun, Tel. 07544-9547-12, Fax 07544-9547-25
- [JUNGJOHANN_1] Jungjohann, J., Untersuchung, 1996, S. 60
- [KLEIN 2000_1] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 33-34
- [KLEIN 2000_2] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 47, 50
- [KLEIN 2000_3] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 59, 62
- [KLEIN 2000_4] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 66, 69
- [KLEIN 2000_5] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 70, 73
- [KLEIN 2000_6] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 63, 65
- [KLEIN 2000_7] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 74-78
- [KOKOSCHKA] Vgl. Kokoschka, S. / Haubner, P., Luminace, 1985, S.138-144; vgl. auch: DIN 5035, Teil 7, 1990, S.2
- [LPI 2004] LPI, Christian Reise, Tageslicht und Sonnenschutz im Verbund, 2004, S. 12
- [MAXWELL] Den Beweis lieferte James Clerk Maxwell 1873 durch die Formulierung der Maxwellschen Gleichungen, die ergaben, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmt, woraus folgt, dass Licht ebenfalls eine elektromagnetische Welle ist; vgl. Walther, T., Walther, H., Licht, 1999, S.14-15
- [OEC] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen; der komplette Ergebnisbericht kann am Institut für Baukonstruktionslehre und Entwerfen, L2 der Universität Stuttgart eingesehen werden
- [OEC2001_1] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S1, 2
- [OEC2001_2] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 3
- [OEC2001_2] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 4
- [OEC2001_3] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 5
- [OEC2001_4] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 6
- [OEC2001_6] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 7
- [OEC2001_7] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 8
- [OEC_2001_8] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 9
- [OEC_2001_9] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 10
- [OEC_2001_10] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 1-14
- [OEC_2001_11] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 14-15
- [OEC_2001_12] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 43-44
- [OEC2002_1] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 1, 2
- [OEC2002_2] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 3
- [OEC2002_3] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 5
- [OEC2002_4] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 7
- [OEC2002_5] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 8
- [OEC2002_6] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 9
- [OEC2002_7] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 10-14
- [PLATZER 1] Aus: Platzer, W./Apian-Bennewitz, P., ermessung, Frauenhofer ISE, 2000, S. 9
- [prEN 12464-1] Vgl. prEN 12464, 1998, S.9
- [prEN 12464-2] Vgl. prEN 12464, 1998, S.23
- [prEN 12464-3] Quelle: prEN 12464, 1998, S.5
- [prEN 12464-4] Vgl. prEN 12464, 1998, S.5
- [prEN 12464-5] Quelle: prEN 12464, 1998, S.7
- [prEN 12464-6] Vgl. prEN 12464, 1998, S.5
- [prEN 12464-7] Vgl. prEN 12464, 1998, S.5

- [prEN 12464-8] Vgl. prEN 12464, 1998, S.5
 [prEN 12464-9] Vgl. prEN 12464, 1998, S.23
 [prEN 12464-1] Quelle: prEN 12464, 1998, S.5
 [prEN 12464-2] Quelle: prEN 12464, 1998, S.7
 [prEN 12464-3] Vgl. prEN 12464, 1998, S.9
 [prEN 12464-4] Vgl. prEN 12464, 1998, S.23
- [STARK 2003]
 [SCHOTT] Schott-Rohrglas über: Glaswerke Arnold GmbH&Co.KG
 Neuseser Str.1, 91732 Merkendorf, Tel. 09826-656-151
 Fax 09826-656-490, Herr Seefried/ Herr Schmidt
- [SCHROEDEL_1] Dorn, Bader, Physik, 1989, S.213+214
 [SEMINAR 2001] IBK 2, Seminar Lichtlenkung, 2001, S. 2-3
 [Sick 2000] Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Januar 2000, S. 136
 [SITECO] Sitecokatalog, Tageslichtsysteme, S.3
- [VEGLA] Vegla Gmbh, Viktoriaallee 3-5, 52066 Aachen, Tel. 0241-5160, Fax 0241-516 2224
- [WALTHER_1] Vgl. Walther, T. / Walther, H., Licht, 1999, S.1448
 [WIENOLD] Aus: Wienold, J. / Schossig, P., Nutzerakzeptanz, 1999, S.60

Bildquellenverzeichnis

- [DETAIL_A] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 16
[DETAIL_B] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 18
[DETAIL_C] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 18
[DETAIL_D] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 23
[DETAIL_E] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 23
[DETAIL_F] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 23
[DETAIL_G] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 23
[DETAIL_H] DETAIL Praxis 2005 - Tageslicht, Kunstlicht - Grundlagen, Ausführungen, Beispiele, S. 23
- [FALK_A] Nach: Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.8
[FALK_B] Nach: Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.53
[FALK_C] Nach: Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.446
[FALK_D] Nach: Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.56
[FALK_E] Vgl. Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.333-358
[FALK_F] Nach: Falk, D. S./Brill, D. R./Stork, D. G., Blick, 1990, S.344
[FOSTER_1] Vgl: Foster and Partners, S. 93-99
[GLASKLAR_A] Achilles, Braun, Fuchs, Seger, Volz, Glasklar, 2003, S.117
[GLASKLAR_B] Achilles, Braun, Fuchs, Seger, Volz, Glasklar, 2003, S.18
- [HEYER] H.-J. Heyer, B. Miklautsch; Institut für Darstellen und Gestalten, Universität Stuttgart
- [INGLAS A1] mit freundlicher Genehmigung der Firma Inglas
- [KLEIN 2000 A1-A6] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 34, 38, 39
[KLEIN 2000_B] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 34, 38, 20
[KLEIN 2000_C] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 34, 38, 20
[KLEIN 2000 F1-F10] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 47-50
[KLEIN 2000 L1-L10] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 66-69
[KLEIN 2000 LL1-LL7] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 51-53
[KLEIN 2000 O1-O9] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 70-73
[KLEIN 2000 P1-P5] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 63-65
[KLEIN 2000 S1-S8] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 74-78
[KLEIN 2000_TLS_1] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 34, 38, 22
[KLEIN 2000_TLS_2] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 34, 38, 22
[KLEIN 2000_TLS_3] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 34, 38, 23
[KLEIN 2000_TLS_4] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 34, 38, 26
[KLEIN 2000 TS1-TS7] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 55-57
[KLEIN 2000 Y1-F9] Vgl: Matthias Klein, Tageslichtsysteme, Diplomarbeit 2000, S. 59-62
- [LUTZ] Martin Lutz, Akademie der Bildenden Künste, Stuttgart
- [OEC] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen; der komplette Ergebnisbericht kann am Institut für Baukonstruktionslehre und Entwerfen, L2 der Universität Stuttgart eingesehen werden
- [OEC_A1] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 2
[OEC_A2] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 3
[OEC_A3] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 4
[OEC_A4] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 5
[OEC_A5] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 6
[OEC_A6] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 7
[OEC_A7] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 8
[OEC_A8] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 9
[OEC_A9] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 10
[OEC_A10] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 12
[OEC_A11] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 11
[OEC_A12] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 10
[OEC_A13] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 16
[OEC_A14] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 15
[OEC_A15] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 28
[OEC_A16] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 31
[OEC_A17] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 27

- [OEC_A18] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 29
- [OEC_A19] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 30
- [OEC_A20] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 40
- [OEC_A21] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 40
- [OEC_A22] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Ergebnisbericht: Sonnenschutzsystem aus 90° -Prismen, S. 41
- [OEC_B1] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 3
- [OEC_B2] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 4
- [OEC_B3] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 5
- [OEC_B4] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 6
- [OEC_B5] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 7
- [OEC_B6] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 8
- [OEC_B7] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 9
- [OEC_B8] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 11
- [OEC_B9] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 12
- [OEC_B10] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 13
- [OEC_B11] Vgl: OEC Optics & Energy Concepts, Transmission von weitem Prismenkonzepten, S. 14
-
- [SCHROEDEL_A] Dorn, Bader, Physik, 1989, S.213, Abb. 213.2
- [SCHOTT_A1] Firmenprospekt Vakuumröhrenkollektor, Fa. Schott, Erich-Schott-Str. 14, 95666 Mitterteich (D)
- [SCHOTT_A2] Firmenprospekt Vakuumröhrenkollektor, Fa. Schott, Erich-Schott-Str. 14, 95666 Mitterteich (D)
-
- [WALTHER_A] Nach: Walther, T., Walther, H., Licht, 1999, S.18