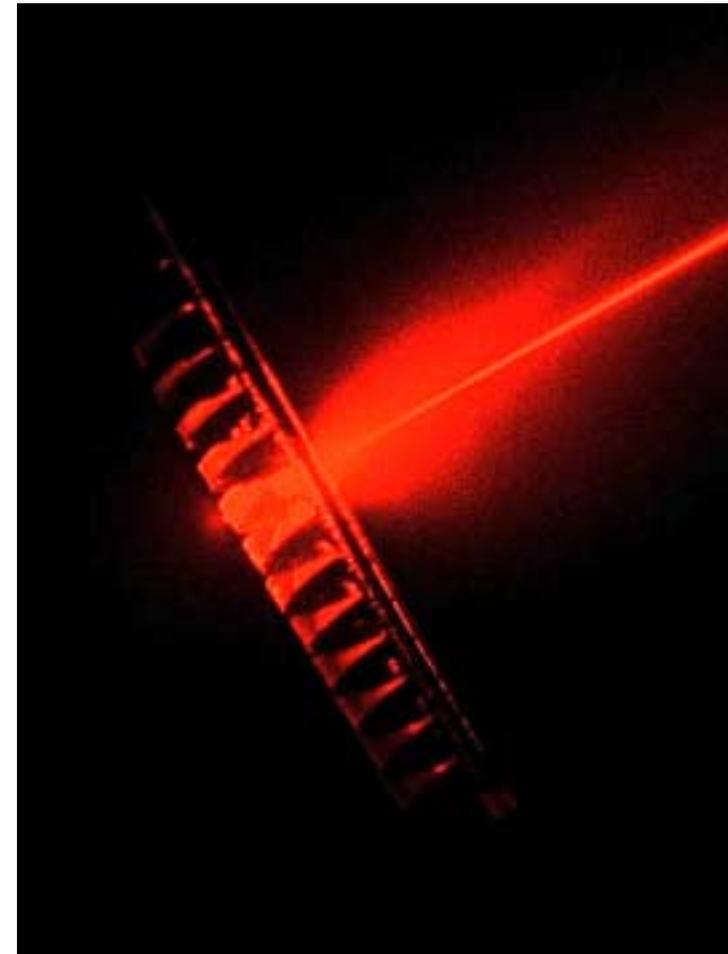


Fakultät für Architektur  
Institut für Entwerfen und Bautechnik  
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie  
Univ.-Prof. Dr./Univ. Rom Thomas Herzog

Thomas Kuckelkorn

**Nichtabbildende Konzentratoren für den  
Sonnenschutz in Gebäuden**

Dissertation



Institut für Entwerfen und Bautechnik  
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie

**Nichtabbildende Konzentratoren für den Sonnenschutz in Gebäuden**

**Thomas Kuckelkorn**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen  
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor Ingenieurs (Dr. -Ing.)**

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. (Univ. Tokyo) Thomas Bock

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog
2. Hon.-Prof. Dr. rer. nat. Adolf Goetzberger,  
Albert Ludwigs-Universität Freiburg

Die Dissertation wurde am 28.11.2001 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät am 24.04.2002 angenommen

Viele Freunde und Kollegen haben auf verschiedene Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Bei allen möchte ich mich herzlich bedanken. Namentlich seien hier nur einige genannt. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr./Univ. Rom Thomas Herzog für die Bereitschaft, bei der Betreuung dieser Arbeit das Hauptreferat zu übernehmen und mir zudem im Rahmen der Lehrstuhlätigkeit die Mitarbeit an vielen interessanten Projekten zu ermöglichen.

Herrn Prof. Dr. rer.nat. Adolf Goetzberger für die Übernahme des Koreferats sowie für die zahlreichen fachlichen Anregungen und Diskussionen.

Dr. Andreas Timinger für seine Unterstützung bei Raytracing-Berechnungen mit dem Programm ASAP und die Möglichkeit, an einem Schulungskurs in Tucson teilzunehmen.

Georg Mischler, Dr. Peter Apian-Bennewitz und Greg Ward für viele Tips im Zusammenhang mit dem Simulationspaket Radiance

Charles Ehrlich für die Einladung zu einem Gaststudienaufenthalt am LBNL.

Christine Müller-Hillebrandt für den unermüdlichen Einsatz beim Formenbau, der Herstellung von Abgüssen und dem Modellbau .

Philipp Schrammek für viele fachliche Diskussionen, einige hilfreiche C++-Programme und seine konstant gute Laune.

Roland Krippner für viele wertvolle Literaturhinweise.

Dr. Werner Lang für seine Hilfe bei vielen organisatorischen Fragen.

Meiner Frau Larissa und meinem Bruder Jens, besonders für die vielen Stunden, die sie in die Rechtschreibung und Zeichensetzung investiert haben.

Meinen Eltern, die mich immer nach ganzen Kräften unterstützt und in meinen Zielen bestärkt haben.

## Zeichentabelle

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	m <sup>2</sup>	Fläche
b	m	Lamellenbreite
C		Konzentrationsfaktor
C <sub>max,2d</sub>		Maximaler Konzentrationsfaktor in 2 Dimens.
C <sub>max,3d</sub>		Maximaler Konzentrationsfaktor in 3 Dimens.
d	m	Lamellendicke
D	%	Tageslichtquotient
dε	sr	Raumwinkelement
dΩ	sr	Raumwinkelement
dΩ*		Projiziertes Raumwinkelement
E	W/m <sup>2</sup>	Bestrahlungsstärke
E <sub>v</sub>	lx	Beleuchtungsstärke
g		Gesamtenergiedurchlassgrad
h	m	Lamellenabstand
H <sub>e</sub>	Ws/m <sup>2</sup>	Bestrahlung
H <sub>v</sub>	lx s	Belichtung
I <sub>e</sub>	W/sr	Strahlstärke
I <sub>v</sub>	Cd	Lichtstärke
k	W/m <sup>2</sup> K	Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert, u-value)
L <sub>e</sub>	W/m <sup>2</sup> sr	Strahldichte
L <sub>v</sub>	lm/m <sup>2</sup>	Leuchtdichte
M <sub>e</sub>	W/m <sup>2</sup>	Spez. Ausstrahlung
M <sub>v</sub>	Cd/m <sup>2</sup>	Spez. Lichtausstrahlung

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$n$		Brechzahl
$q_i$	$W/m^2K$	(Sekundärer) Wärmeabgabegrad
$S$		Selektivitätskennzahl
$T_s$	$K$	Oberflächentemperatur der Sonne
$\alpha$	$^\circ$	Anstellwinkel
$\alpha$	$^\circ$	Azimutwinkel
$\alpha_{cut}$	$^\circ$	Cut-Off-Winkel
$\alpha_e$		Solarer Absorptionsgrad
$\gamma$	$^\circ$	Höhenwinkel der Sonne
$\delta$	$^\circ$	Deklination
$\theta_{in}$	$^\circ$	Einfallswinkel
$\theta_{aus}$	$^\circ$	Ausfallswinkel
$\theta_{max}$	$^\circ$	Maximaler Akzeptanzhalbwinkel (bei konischen Konzentratoren)
$\vartheta$	$^\circ$	Höhenwinkel
$\eta$		Lichtausbeute
$\lambda$	$nm$	Wellenlänge
$\rho$	$\%$	Reflexionsgrad
$\rho_e$	$\%$	Solarer Reflexionsgrad
$\tau$	$\%$	Transmissionsgrad
$\tau_e$	$\%$	Solarer Transmissionsgrad
$\tau_{ger-hem}$	$\%$	Gerichtet-Hemisphärischer Transmissionsgrad
$\tau_{hem-hem}$	$\%$	Hemisph.-Hemisphärischer Transmissionsgrad
$\psi$	$^\circ$	Akzeptanzhalbwinkel
$\Phi_0$	$W$	Strahlungsfluss
$\Phi_v$	$lm$	Lichtstrom

Zeichentabelle II

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\varphi$	°	Geographischer Breitengrad
$\omega$	°	Stundenwinkel der Sonne

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AM	Air mass
ASAP	Advanced System Analysis Program
BTDF	Bidirectional Transmission Distribution Function
BRDF	Bidirectional Reflection Distribution Function
BRTDF	Bidir. Reflection Transmission Distribution Function
CIE	Comission Internacional de Éclairage
CPC	Compound Parabolic Concentrator
TQ	Tageslichtquotient

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>0 Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Solare Strahlung und Tageslicht</b> .....	<b>4</b>
1.1 Die Sonne als Strahlungsquelle.....	4
1.2 Strahlungsphysikalische und lichttechnische Kenngrößen und Einheiten.....	5
1.3 Blendung .....	6
1.3.1 Physiologische Blendung.....	6
1.3.2 Psychologische Blendung.....	6
1.3.3 Visueller Komfort .....	7
1.4 Materialkennwerte.....	8
1.4.1 Transmission, Reflexion und Absorption.....	8
1.4.2 Gesamtenergiedurchlassgrad: der g-Wert.....	8
1.4.3 Sonnenschutz: der z-Wert.....	8
1.5 Phasenraum und Etendue.....	9
1.6 Winkelprojektionen.....	10
1.7 Solargeometrie .....	12
1.8 Solares Strahlungsangebot und Tageslichtnutzung.....	13
1.9 Meßdaten solarer Strahlung .....	15
1.10 Mathematische Modelle der Strahldichteverteilung des Himmels.....	15
1.11 Lichtberechnung.....	16
1.11.1 Materialmodelle .....	18

1.11.2 Einbindung lichtlenkender Elemente in Tageslichtberechnungen.....	19
1.11.3 Das Programmpaket Radiance.....	21
1.11.4 Die Forward-Raytracing-Software ASAP.....	22
<b>2 Sonnenschutz und Tageslichtnutzung.....</b>	<b>23</b>
2.1 Wirkungsweise und Selektivität von Sonnenschutzsystemen.....	24
2.1.1 Spektrale Selektivität.....	24
2.1.2 Zeitliche Selektivität.....	24
2.1.3 Richtungsselektivität.....	24
2.2 Geometrie richtungsselektiver Systeme.....	25
2.2.1 Geometrieebenen.....	25
2.2.2 Struktur und Materialeigenschaften.....	25
2.3 Quellenstruktur der Sonne.....	27
2.4 Stationärer Sonnenschutz .....	28
2.5 Lamellensysteme.....	29
2.5.1 Profilwinkel und Cut-Off-Winkel.....	29
2.5.2 Nachführung und Regelstrategien.....	33
2.5.3 Gesamtenergiedurchlassgrad.....	34
2.6 Prismenplatten.....	35
2.7 Lichtumlenkung und Diffuslichtnutzung.....	38
<b>3 Nicht abbildende Konzentratoren für den Sonnenschutz.....</b>	<b>42</b>
3.1 Konzentration von Strahlung .....	42
3.2 Konische Konzentratoren.....	43
3.3 Parabolische Konzentratoren.....	44
3.3.1 Der 2-D- CPC .....	45
3.3.2 Lineare CPC-Konzentratoren aus metallischen Reflektorprofilen.....	47

3.3.3 Der lineare dielektrische Massiv-CPC.....	48
3.4 Dielektrische CPC-Arrays als Sonnenschutzelemente .....	53
3.4.1 CPC mit spiegelnd reflektierender Beschichtung auf der Ausgangsapertur.....	53
3.4.2 CPC mit diffus reflektierender Beschichtung auf der Ausgangsapertur.....	54
3.4.3 Rückstrahlung in den Eintrittshalbraum.....	54
3.4.4 Transmission.....	56
3.5 CPC-Arrays mit opaken Zwischenflächen.....	58
3.5.1 Transmission.....	58
3.5.2 Reflexion.....	61
3.5.3 Durchsicht von Innen nach Außen.....	66
<b>4 Einsatzpotential von CPC-Elementen in der Gebäudehülle.....</b>	<b>69</b>
4.1 Stationärer Sonnenschutz in der Fassaden- und Dachebene.....	69
4.1.1 Horizontale Dachflächen.....	69
4.1.2 Nach Süden geneigte Dachflächen.....	70
4.1.3 Vertikale Flächen.....	71
4.1.4 Asymmetrische Konzentratoren.....	72
4.2 Lamellensysteme.....	73
4.2.1 Nachführbare Lamellensysteme .....	75
4.2.2 Einsebene in der Fassade.....	78
4.3 CPC-Systeme in Kombination mit Transparenter Wärmedämmung .....	81
4.4 Fassadenintegrierte Solarkomponenten.....	82
4.5 Modifizierte CPC-Elemente.....	83
4.5.1 Symmetrisch gekoppelte CPC's.....	83
4.5.2 CPC mit opaken Ausgangsaperturen und gerundeter Profilform .....	84

<b>5 Herstellung von Funktionsmustern.....</b>	<b>86</b>
5.1 Herstellungsprozeß.....	86
5.2 Fassadenmodell.....	89
5.3 CPC-Elemente aus Glasstäben.....	90
<b>6 Ausblick.....</b>	<b>93</b>
<b>Anhang</b>	
<b>A Konstruktionsprinzip des asymmetrischen CPC.....</b>	<b>94</b>
<b>B Kenndaten stationärer Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme.....</b>	<b>95</b>
<b>C Veröffentlichungen und Patentanmeldungen.....</b>	<b>97</b>

## Zusammenfassung

Der großflächige Einsatz von Glas in der Fassade spiegelt häufig den Wunsch nach Transparenz, direktem Außenbezug und natürlicher Belichtung der Innenräume wider. Da zu hohe solare Strahlungseinträge jedoch zu Blendung und im Sommer auch zur Überhitzung der Innenräume führen, muß die Strahlungstransmission durch Sonnen- und Blendschutzsysteme reguliert werden.

Konventionelle Sonnenschutzsysteme wirken gleichermaßen auf die direkten und die diffusen Strahlungsanteile, wodurch das Tageslichtniveau im Innenraum bei geschlossenem System in der Regel stark reduziert wird.

Der Ansatzpunkt dieser Arbeit liegt in der Trennung der Diffus- und Direktstrahlungsanteile durch richtungsselektive optische Strukturen. Der Grundgedanke dieses Ansatzes besteht darin, bei sonnigem Wetter nur den Direktanteil der Solarstrahlung vom Gebäude abzuhalten und somit im Innenraum eine ähnliche Belichtungssituation wie bei einer unbesonnenen Fassade zu erzielen.

Ausgehend von den Prinzipien der nicht abbildenden Optik werden richtungsselektive Strukturen untersucht, die nur für bestimmte Einfallsrichtun-

gen reflektierend wirken. Dadurch kann Licht aus einem Teilbereich des Himmels reflektiert und gleichzeitig aus anderen Bereichen transmittiert werden. Durch Anpassung des Reflexionsbereiches an die Sonnenbahnen wird Direktstrahlung abgeblockt und Diffusstrahlung hindurchgelassen. Die optischen Strukturen basieren auf der Grundform des Compound Parabolic Concentrators (CPC), eines nicht abbildenden Konzentrators, der heute in vielen Bereichen der technischen Optik und Solarenergienutzung eingesetzt wird.

Im ersten Teil der Arbeit werden Grundlagen zur Solarstrahlung und zum Tageslichtangebot dargestellt und in Relation zur Orientierung der Fassade gestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der Betrachtung der zeitlichen Verfügbarkeit und Richtungsverteilung des direkten und diffusen Tageslichtes. Es werden außerdem Methoden zur Tageslichtberechnung erläutert und auf Jalousie- und Lamellensysteme angewendet. Abschließend werden die Möglichkeiten der Diffuslichtumlenkung anhand einer exemplarischen Raumsituation diskutiert.

Im zweiten Teil der Arbeit wird zunächst die Funktionsweise nicht abbildender massiver Konzentratoren aus transparenten Materialien beschrieben. Es werden anwendungsspezifisch unterschiedliche

Varianten und Optimierungsmöglichkeiten dieser Systeme vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Untersuchung der funktionalen Zusammenhänge zwischen der optischen Formgebung, der Orientierung und der Solargeometrie. Erstmals wird auch ein System beschrieben, das gleichzeitig Sonnenschutz und Durchsicht ermöglicht. Die Ergebnisse stützen sich sowohl auf geometrische Grundüberlegungen als auch auf Simulationsrechnungen mit Raytracingalgorithmen.

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Untersuchung der Winkelverteilung der transmittierten und reflektierten Strahlung, die für die bisher untersuchten energietechnischen Anwendungen nur von untergeordneter Bedeutung war. Die Rückwirkung auf das Erscheinungsbild und die Einsatzmöglichkeiten in Gebäuden werden in dieser Arbeit erstmalig systematisch untersucht.

Das visuelle Erscheinungsbild der Systeme, das von bisher bekannten Systemen stark abweicht, wird in photorealistischen Simulationen und in Modellaufnahmen dargestellt. Es wird gezeigt, daß die Elemente auch zur Lichtumlenkung und in Kombination mit thermischen Kollektoren oder passiven Solarkomponenten sinnvoll eingesetzt werden können. Abschließend werden Möglichkeiten und Konsequenzen einer bautechnischen Umsetzung diskutiert.

## Einleitung

In dieser Arbeit wird ein neues Prinzip für richtungsselektive Sonnenschutzsysteme untersucht. Die in diesem Zusammenhang behandelten Themenbereiche lassen sich im Wesentlichen in drei Punkten zusammenfassen: Dem Einsatz lichtdurchlässiger Materialien und Systeme in der Gebäudehülle, der optimierten Nutzung solarer Strahlung im Gebäude, insbesondere in Form von Tageslicht und dem Gebiet der nicht abbildenden Optik bzw. der Strahlungskonzentration.

Auf den folgenden Seiten wird der Ausgangspunkt dieser Arbeit, die sich neben den funktionalen und gestalterischen Aspekten des richtungsselektiven Sonnenschutzes auch mit der technischen Umsetzbarkeit der formulierten Ansätze beschäftigt, aus den drei genannten Themenbereichen entwickelt.

## Transparente Gebäudehüllen

Die Herstellung und Umformung von Glas läßt sich, nicht zuletzt auch durch die inerten Eigenschaften des Werkstoffes, bis in die Frühzeit der menschlichen Kulturgeschichte zurückverfolgen. Die Glasherstellung ist über Jahrtausende ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor und zugleich streng gehütetes Geheimnis gewe-

sen, für dessen Preisgabe beispielsweise noch bis ins 19. Jh. hinein in England die Todesstrafe drohte [KS81].

In der europäischen Baukultur ist der Einsatz von Glas seit der Gotik vielfach mit visionären Architekturvorstellungen verbunden, für deren Umsetzungen die Grenzen des bautechnisch Machbaren zu erforschen und häufig auch zu erweitern waren. Während die Verwendung des Materials Stein den baukonstruktiven Möglichkeiten noch enge Grenzen setzte, löste die Kombination von Eisen und Glas im 19. Jh. eine „Epoche der Glashäuser“ aus, die 1851 in der Errichtung des Crystal Palace durch den Engländer J. Paxton ihren Höhepunkt erreichte. Das Grundraster des Bauwerkes wurde noch durch das maximale Scheibenmaß von 120 cm x 25 cm bestimmt, das bereits eine deutliche Vergrößerung gegenüber den zu dieser Zeit üblichen Formaten darstellte [Ul89].

Im frühen 20. Jh. folgten mit der Verbreitung des Stahlbetons und der Erfindung neuer Glasziehverfahren zur Herstellung größerer Scheibenformate zwei weitere materialspezifische Entwicklungsschritte, die revolutionäre Veränderungen in der Bautechnik und Baukultur auslösten.

Durch Einführung der Skelettbauweise war die Außenwand als statisches Element für das Gebäude

nicht mehr zwingend erforderlich. Die neuen konstruktiven Freiheiten wurden in der klassischen Moderne aufgenommen und gestalterisch in der „Befreiung der Wand“ und der „Auflösung des kubischen Raumes“ formuliert. Hierbei wurde der Einsatz großformatiger Gläser zum prägenden Stilelement und Ausdruck des neuen Denkens.

Konstruktive Aspekte standen beim Einsatz von Glasflächen zunächst im Vordergrund, während die klimatischen und schallschutztechnischen Auswirkungen auf das Gebäude häufig unterschätzt wurden [BS98].

Weitere Entwicklungsschritte folgten in der 2. Hälfte des 20. Jh. mit der Erfindung des Floatglasverfahrens durch Pilkington im Jahre 1959, dem Mehrscheiben-Isolierglas und der Entwicklung spektral selektiver Beschichtungen.

Gläserne Vorhangfassaden dominieren heute in weiten Bereichen das Erscheinungsbild von Bürogebäuden und Hochhäusern. Nach einer langen Epoche des „international style“, der in der zweiten Hälfte des 20. Jh. aus heutiger Sicht vielfach durch Uniformität und stereotype Bauformen geprägt wird, ist in neueren Entwicklungen wieder eine starke Diversifikation der Fassadentypen zu beobachten, die sich auch aus einer Veränderung des Leistungsbildes der Gebäudehülle entwickelt. Die

Fassade wird nicht mehr als Grenze zur Vermeidung der äußeren Einflüsse auf ein weitgehend künstlich geschaffenes Innenraumklima, sondern als regulierbare Austauschfläche zwischen Innen und Außen verstanden. Die Unterschiedlichkeit nutzungsbedingter, funktionaler, konstruktiver und gestalterischer Anforderungen führt zu einer großen Variationsbreite technischer Umsetzungen. Durch den Typus der mehrschaligen Fassaden wird die Gebäudehülle von der Grenzfläche zu einer räumlichen Austauschzone erweitert, die Raum für eine Vielzahl neuer Belichtungs- und Belüftungskonzepte bietet.

Die Regulierung der Stoff- und Energieströme durch die Gebäudehülle stellt jedoch ein sehr komplexes Aufgabengebiet dar. Durch die Vielzahl der Einflußfaktoren kann ein gewünschtes Leistungsbild auch mit hohem technischen Aufwand häufig nur näherungsweise erreicht werden. Das steigende Bedürfnis nach direktem Außenbezug und einem hohen Anteil natürlicher Belichtung steht hier häufig konträr zu der Notwendigkeit einer klimatechnischen Optimierung. Die Regulierungsmöglichkeiten erweitern sich mit der Entwicklung leistungsfähiger Komponenten. Hierzu zählen neben Verschattungs- und Blendschutzvorrichtungen auch Systeme zur Lichtlenkung, zur transparenten Wärmedämmung oder zur solar unterstützten Lüftung.

## Direkte Solarenergienutzung im Gebäude

Die Einsicht, daß eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen die zwingende Voraussetzung zur Vermeidung weiterer Erderwärmung und damit verbundener Klimaverschiebungen ist, hat im Kontext der Energiepolitischen Diskussion auch zu einem Umdenken im Bausektor geführt.

In der Bundesrepublik Deutschland, in der ca. 25% des Primärenergiebedarfes für die Raumheizwärme benötigt werden, hat dies zunächst zu einer erheblichen Verbesserung des Wärmeschutzes geführt. Ein wesentlicher Beitrag hierzu ist auch die Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften von Verglasungen.

Das Fenster ermöglicht als älteste „Solarkomponente“ die direkte Nutzung von Tageslicht und solarer Wärme. Das Potential der als Wärme nutzbareren Solarenergie wird natürlicherweise dadurch beschränkt, das der überwiegende Teil solarer Einträge außerhalb der Heizperiode anfällt. In den Sommermonaten fallen hingegen zu hohe solare Strahlungseinträge als Wärmelasten an und müssen durch Lüftung oder Kühlung abgeführt oder durch geeignete Verschattungsmaßnahmen vermieden werden. Besonders im Bereich der Büronutzung hat sich durch den verbesserten Wärme-

schutz in Verbindung mit dem Anstieg innerer Wärmelasten das Kühlproblem verschärft. Der Tageslichteintrag ist hingegen ganzjährig erwünscht und wird nur durch die Notwendigkeit, zu hohe Strahlungseinträge aufgrund der Gefahr von Überhitzung oder Blendung zu vermeiden, begrenzt. Die Regulierung des Strahlungseintrages ist somit zwingende Voraussetzung für eine effiziente Tageslichtnutzung.

Viele der heute verfügbaren Sonnenschutzsysteme haben den Nachteil, daß die Durchsicht und die Diffuslichttransmission im geschlossenen Zustand stark gemindert und die Möglichkeit der Tageslichtnutzung dadurch eingeschränkt wird. Neuere Entwicklungen im Bereich des Sonnenschutzes basieren auf richtungsselektiven Strukturen oder Materialien zur gezielten Ausblendung der Direktstrahlung. Diese ermöglichen auch bei stationärem Einsatz in großflächigen Verglasungen den Schutz vor sommerlicher Überhitzung und gleichzeitig eine ausreichende Belichtung [HE94].

Bisher sind in diesem Bereich Systeme mit metallischen Reflektoren - als Lamellen oder dreidimensionale retroreflektierende Rasterstrukturen -, durch innere Totalreflektion wirkende Prismensysteme und sogenannte Holographisch-optische Elemente (HOE) bekannt. In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz

verfolgt, der auf dielektrischen Konzentratoren basiert.

## Sonnenschutz durch Konzentration von Strahlung

Die Grundlagen zur nicht abbildenden Optik und Konzentration von Strahlung wurden in den 70'er Jahren von W.T. Welford und R. Winston [WW78] formuliert. Die erste Anwendung des Compound Parabolic Concentrators (CPC), der die Grundform für die in dieser Arbeit untersuchten Konzentratorstrukturen darstellt, bestand in der Signalverstärkung von Photomultipliern zur Erfassung von Cerenkov-Strahlung. Weitere Anwendungsmöglichkeiten wurden zunächst im Bereich der solaren Energiegewinnung durch thermische Kollektoren, Solarkraftwerke und Photovoltaik gesucht.

In dieser Arbeit wird der Einsatz von CPC-Strukturen für den Sonnenschutz in Gebäuden untersucht. Die Konzentratoren bestehen aus einem transparenten (dielektrischen) Material und nutzen das Phänomen der inneren Totalreflexion für den Strahlungstransport. Sonnenschutzsysteme aus transparenten Materialien sind bereits in Form von Prismen, holographischen Filmen oder Linsenstrukturen bekannt. Der hier verfolgte Ansatz des Sonnenschutzes durch dielektrische CPC-Elemente

wurde erstmals von A. Goetzberger [Goe98] formuliert.

CPC-Sonnenschutzsysteme unterscheiden sich in ihrer Funktion und visuellen Wirkung stark von konventionellen Sonnenschutzsystemen aus opaken Materialien. Die Transmissions- und Reflexionseigenschaften sind stark richtungsabhängig. Daraus resultiert auch ein richtungsabhängiges Erscheinungsbild der Elemente in der Fassade. Die visuelle Wirkung der hier untersuchten Systeme variiert auch stark mit der Lichtsituation. Sie kann zwischen einer transparenten, transluzenten, spiegelnd oder diffus reflektierenden Erscheinungsform wechseln. Die in der Mikrostruktur festgelegten Richtungseigenschaften werden so im Maßstab der Fassade ablesbar. Neben der funktionalen Untersuchung stellt der Aspekt der visuellen Wahrnehmung einen Schwerpunkt der folgenden Arbeit dar.

# 1 Solare Strahlung und Tageslicht

In diesem Kapitel werden zunächst einige Grundbegriffe und Kenngrößen erläutert, die im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit untersuchten Systemen und Anwendungen von Bedeutung sind. Hierzu zählen Begriffe aus der Strahlungsphysik, der Lichttechnik und der geometrischen Optik sowie die Beschreibung der Solargeometrie. Es werden anschließend Aussagen zur Quantität und Qualität, zur meßtechnischen Erfassung und zur mathematischen Modellierung der solaren Strahlung und insbesondere des Tageslichtes gemacht. Bei den Betrachtungen stehen die Richtungseigenschaften der Strahlung im Vordergrund. Am Ende des Kapitels werden die Möglichkeiten und Methoden der Strahlverfolgung zur Tageslichtberechnung diskutiert. Strahlverfolgungsberechnungen bilden die Grundlage der in den folgenden Kapiteln gezeigten Simulationsergebnisse.

## 1.1 Die Sonne als Strahlungsquelle

Die Sonne bestrahlt die Erde mit einer extraterrestrischen Strahlungsleistung von  $1367 \text{ W/m}^2$ . Diese Größe, die sich nur mit der

Sternenentwicklung der Sonne über Milliarden von Jahren langsam verändert, wird üblicherweise als Solar-konstante bezeichnet.

Von der Umlaufbahn der Erde aus wird die Sonne unter einem mittleren, im Jahresverlauf geringfügig variierenden Öffnungswinkel von  $0,27^\circ$  gesehen. Dieser Winkel ist durch den Abstand zwischen Sonne und Erde von ca.  $1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$  und dem Sonnendurchmesser von ca.  $1.4 \cdot 10^9 \text{ m}$  gegeben. Die Sonne ist damit im Mittel nur etwas mehr als 100 Sonnendurchmesser von der Erde entfernt.

Das Strahlungsspektrum der Sonne entspricht näherungsweise dem Spektrum eines schwarzen Strahlers mit einer Oberflächentemperatur von  $T=5777 \text{ K}$  [WSV91].

Beim Durchdringen der Erdatmosphäre wird die Solarstrahlung durch verschiedene Wechselwirkungsprozesse in den atmosphärischen Schichten teilweise absorbiert und gestreut. Die Absorption von Strahlung tritt besonders im nahen Infrarotbereich in spektralen Banden auf und wird durch Wasser- und Kohlendioxidmoleküle verursacht [GW93]. Die Verminderung der Strahlungsleistung durch Absorption und Streuung wird auch als Extinktion bezeichnet.

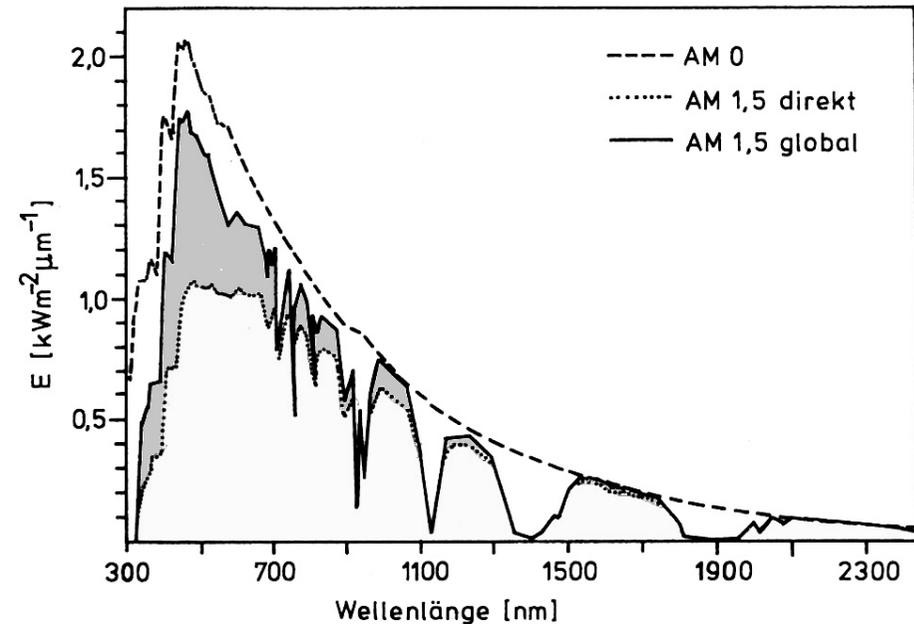


Abb. 1.1: Extraterrestrisches Solarspektrum (AM 0) und terrestrische (AM 1.5) Global- und Direktstrahlungsanteile, aus [GW93]

Streuungsprozesse treten bei klarem Himmel verstärkt im Wellenlängenbereich zwischen  $\lambda=300 \text{ nm}$  und  $\lambda=700 \text{ nm}$  auf und nehmen mit kürzerer Wellenlänge zu, wodurch der Himmel seine blaue Färbung erhält. Neben der Rayleigh-Streuung, die mit einem Faktor von  $1/\lambda^4$  ansteigt, unterscheidet man die Mie-Streuung, die mit  $1/\lambda$  ansteigt und stark vorwärts gerichtet wirkt.

Die Extinktion ist abhängig von der Weglänge der Solarstrahlung durch die Erdatmosphäre, die von einem ortsfesten Koordinatensystem auf der Erdoberfläche aus betrachtet

wiederum in erster Näherung von der Sonnenhöhe abhängt. Die Weglänge wird durch die air mass oder AM-Zahl angegeben, wobei AM 0 das extraterrestrische Spektrum bezeichnet. Durch die Extinktion beträgt die maximale solare Strahlungsleistung ohne Konzentration auf der Erdoberfläche ca.  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Die Strahlungsanteile, die nach Durchdringung der Atmosphäre auf die Erdoberfläche auftreffen, werden nach ihren Richtungseigenschaften verschiedenen Begriffen zugeordnet.

Als Direktstrahlung wird der Anteil der Solarstrahlung bezeichnet, der die Erdatmosphäre ungehindert durchdringt und als gerichtete, quasiparallele Strahlung auf die Erdoberfläche auftrifft. Der Strahlungsanteil, der die Erdoberfläche nach Streuung in der Atmosphäre erreicht, wird als Diffusstrahlung bezeichnet. Die Summe dieser beiden Strahlungsanteile heißt Globalstrahlung. In Abbildung 1.1 ist das extraterrestrische Solarspektrum (AM 0) sowie die Direkt- und Diffusstrahlungsanteile nach Durchdringung von 1,5 Erdatmosphären, einem Einfallswinkel der Sonne von 45° entsprechend dargestellt.

In bestimmten Wettersituationen (z.B. Cirrusbewölkung oder Dunst) tritt eine stark gerichtete Vorwärtstreuung der Solarstrahlung auf, wodurch sich in der Strahldichteverteilung des Himmels eine Intensitätserhöhung im sonnennahen Winkelbereich des Himmels ergibt.

Diese Intensitätserhöhung wird als Zirkumsolarstrahlung oder Aureola [Bru96] bezeichnet. Sie tritt typischerweise innerhalb eines Öffnungswinkels von 3° bis zu 10° um den Sonnenmittelpunkt auf. Bei klaren Sichtverhältnissen beträgt der Zirkumsolaranteil gewöhnlich unter 1%, bei Cirrusbewölkung und tiefen Sonnenständen können Werte über 50% erreicht werden [Bru96].

Der sichtbare Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm wird als Tageslicht bezeichnet, Wellenlängen von 780 nm bis 3 µm als nahes Infrarot und Wellenlängen unter 380 nm als UV-Strahlung. Der Anteil des Tageslichtes beträgt nach [Wa00], [RSS99] ca. 50% der die Erdoberfläche erreichenden Strahlungsenergie, der UV-Anteil 6% und der infrarote Anteil 44%.

Aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit der Streuung variieren die relativen Verteilungen mit dem Streuanteil der Strahlung. Die Diffusstrahlung hat aufgrund der stärkeren Streuung kurzer Wellenlängen einen geringeren Infrarotanteil und einen höheren sichtbaren Strahlungsanteil als die Direktstrahlung. Für eine detaillierte Betrachtung sei hier auf Heusler [HEU91] verwiesen.

## 1.2 Strahlungsphysikalische und lichttechnische Kenngrößen und Einheiten

Im Folgenden werden die im Zusammenhang mit dieser Arbeit wichtigen physikalischen Kenngrößen benannt und der Zusammenhang zwischen radiometrischen (strahlungsphysikalischen) und photometrischen (lichttechnischen) Kenngrößen erläutert. Die mathematischen Zusammenhänge sind hier nur stark verkürzt wiedergegeben. Für eine ausführliche

Herleitung der Kenngrößen und ihrer Umrechnung sei an dieser Stelle auf [BW93], [DIN5031] verwiesen.

Die Stärke einer Licht- oder Strahlungsquelle wird durch die Strahlungsleistung  $\Phi_o$  mit der Einheit Watt [W] beschrieben. Eine zur Strahlungsleistung äquivalente Größe ist der Strahlungsfluß, der ebenfalls in Watt angegeben wird. Die zur Strahlungsleistung analoge lichttechnische Kenngröße ist der Lichtstrom  $\Phi_v$  mit der Einheit Lumen [lm].

Die im Winkel  $\vartheta$  ausgestrahlte Energie pro Flächenelement  $dA$  und Raumwinkelement  $d\Omega$  einer ausgedehnten Strahlungsquelle mit der Strahlungsleistung  $\Phi_o$  bezeichnet man als Strahldichte  $L$ :

$$L = \frac{1}{\cos \vartheta} \frac{d}{d\Omega} \frac{d}{dA} \Phi_o \quad (1.1)$$

Das lichttechnische Äquivalent zur Strahldichte ist die Leuchtdichte  $L_v$  mit der Einheit Candela/m<sup>2</sup> [Cd/m<sup>2</sup>]. Sie korreliert als visuell direkt wahrnehmbare Größe mit dem Helligkeitsempfinden des Menschen.

Die pro Flächenelement  $dA$  aus dem Halbraum einfallende Strahlungsleistung  $\Phi_o$  wird als Bestrahlungsstärke  $E$  bezeichnet:

$$E = \frac{d\Phi_o}{dA} \quad (1.2)$$

Die analoge lichttechnische Größe ist die Beleuchtungsstärke  $E_v$ , die in der Einheit Lux [lx] angegeben wird. Die Bestrahlungsstärke und die Beleuchtungsstärke sind flächenbezogene Größen und daher von der Orientierung abhängig. Zur Beschreibung von Lichtverteilungen im Raum wird in der Lichttechnik im Regelfall die Beleuchtungsstärke auf horizontalen Flächen angegeben.

Eine weitere wichtige Größe in der Tageslichtplanung ist der Tageslichtquotient  $D$ , der aus dem Verhältnis der horizontalen Beleuchtungsstärke an einem Punkt im Gebäudeinneren zur Außenbeleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel nach CIE-Norm berechnet wird und in Prozent angegeben wird:

$$D = \frac{E_{v,innen}}{E_{v,aussen}} \cdot 100 \quad (1.3)$$

Durch Messungen unter realen Wetterbedingungen kann der Tageslichtquotient nur näherungsweise bestimmt werden, da die richtungsabhängigen Helligkeitsunterschiede des Himmels nie exakt der durch die CIE-Norm definierten Verteilung entsprechen. Die CIE-Verteilung kann jedoch in Simulationsprogrammen abgebildet oder unter Laborbedin-

gungen zur Untersuchung einzelner Komponenten oder Maßstabsmodelle in einem künstlichen Himmel eingestellt werden. Die Umrechnung strahlungsphysikalischer Kenngrößen in lichttechnische Größen erfolgt durch Multiplikation mit dem photometrischen Strahlungsäquivalent  $K_m = 683 \text{ lm/W}$  und der Hellempfindlichkeitsfunktion des menschlichen Auges  $V_\lambda$  und Integration über den gesamten Wellenlängenbereich:

$$\phi_{vis} = K_m \cdot \int_0^\infty V_\lambda \phi_{0,\lambda} d\lambda \quad (1.4)$$

Im Zusammenhang mit energetischen Betrachtungen ist die Lichtausbeute  $\eta$  des Tageslichtes als Maß für die nutzbare Lichtmenge pro eingestrahler Leistung von Bedeutung. Die Lichtausbeute ist abhängig von den Integrationsgrenzen und der spektralen Verteilung der Strahlung:

$$\eta = \frac{M_v}{M_e} = \frac{K_m \int M_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int M_{e\lambda} d\lambda} \quad (1.5)$$

Für den Diffusanteil der Solarstrahlung ist die Lichtausbeute aufgrund der geringeren langwelligen Strahlungsanteile höher als für den Direktanteil. In neueren Quellen werden Werte zwischen 110 und 130 lm/W für den Diffusanteil und 90 Lumen/Watt für den Direktanteil angegeben. Die Lichtausbeute des

Diffusanteiles ist damit deutlich höher als beispielsweise die von Leuchtstofflampen [Si94]. Für sehr klaren Himmel gibt [Rob86] sogar einen Maximalwert von 175 lm/W für den Diffusanteil an. Durch exakte Trennung der sichtbaren und nicht sichtbaren Spektralanteile läßt sich ein theoretischer Wert von 204 lm/W erreichen.

### 1.3 Blendung

Im Gegensatz zu den meßtechnisch erfaßbaren lichttechnischen Größen beschreibt der Begriff Blendung primär eine subjektiv empfundene Beeinträchtigung des Sehvermögens aufgrund zu hoher Leuchtdichten oder Leuchtdichtekontraste. Da Blendwirkungen durch verschiedene Ursachen ausgelöst und subjektiv sehr unterschiedlich empfunden werden, fällt eine Definition allgemeingültiger Blendkriterien schwer. Zur Unterscheidung der Blendsituationen und deren Wirkung werden verschiedene Begriffe wie psychologische Blendung, Absolutblendung, Kontrastblendung, Reflexblendung und Direkt- oder Indirektblendung verwendet. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sollen hier folgende Fälle unterschieden werden:

Radiometrie			Photometrie		
Größe	Symbol	Einheit	Größe	Sym- bol	Einheit
Strahlungsfluß	$\phi_e$	W	Lichtstrom	$\phi_v$	lm
Strahldichte	$L_e$	W/m <sup>2</sup> sr	Leuchtdichte	$L_v$	Cd/m <sup>2</sup>
Bestrahlungsstärke	$E_e$	W/m <sup>2</sup>	Beleuchtungsstärke	$E_v$	lx=lm/m <sup>2</sup>
Spez. Ausstrahlung	$M_e$	W/m <sup>2</sup>	Spez. L.-ausstrahlung	$M_v$	lm/m <sup>2</sup>
Strahlstärke	$I_e$	W/sr	Lichtstärke	$I_v$	Cd
Strahlungsmenge	$Q_e$	kWh	Lichtmenge	$Q_v$	lm s
Bestrahlung	$H_e$	Ws/m <sup>2</sup>	Belichtung	$H_v$	lx s

Tabelle 1.1: Radiometrische und Photometrische Kenngrößen, aus [Si94]

#### 1.3.1 Physiologische Blendung

Ist die Leuchtdichte einer Fläche so hoch, daß der auf die Lichtrezeptoren der Netzhaut gelangende Lichtstrom durch das Adaptionsvermögen des Auges (Schließen der Iris) nicht ausreichend reduziert werden kann, so entsteht eine direkte Überreizung des sensorischen Augenapparates. Diese Situation entsteht nur bei direkter Betrachtung sehr heller Lichtquellen. In diesem Fall kann die Blendempfindung nur durch das Schließen der Augenlider oder die Veränderung der Blickrichtung vermieden werden.

#### 1.3.2 Psychologische Blendung

Wird die Sehleistung durch ungünstige Leuchtdichteverhältnisse im Sichtbereich beeinträchtigt, ohne das eine direkte sensorische Überreizung vorliegt, so wird dies als Kontrastblendung oder als psychologische Blendung [Si94] bezeichnet. Hierbei wird häufig zwischen Direkt- und Indirekt- oder Reflexblendung unterschieden. Direktblendung tritt beispielsweise in Situationen auf, in denen Adaptionsschwierigkeiten durch helle Punktlichtquellen oder Flächen (Fenster) im Sichtfeld entstehen. Wird durch Reflexion eines hellen Objektes oder einer Licht-

quelle auf einer Fläche (z.B. einem Bildschirm) die Kontrastwahrnehmung gestört, wird dies als Reflexblendung oder Indirektblendung bezeichnet. Der Begriff psychologische Blendung bezieht sich hier auf den Umstand, daß die Irritation oder Sehstörung bei der Verarbeitung der Lichtreize zu einer Bildinformation entsteht. Die Kontrastwahrnehmung und Blendempfindlichkeit kann individuell sehr verschieden sein und durch andere psychologische Faktoren beeinflusst werden. Die aus dauerhafter Blendung resultierende erhöhte Anstrengung führt zur Ermüdung und Abnahme der Seh- und Arbeitsleistung. Die physiologische Ermüdung des Auges ist in diesem Fall nach [CA97] jedoch durch wissenschaftliche Methoden kaum nachweisbar.

Die in [DIN5035] geforderte Gewährleistung eines blendfreien Arbeitsbereiches impliziert eine Überprüfung durch Methoden, die reproduzierbare Ergebnisse liefern oder die meßtechnische Erfassung der Blendsituation.

Zur Verknüpfung der Blendempfindung mit quantitativen Größen wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen. Die vermutlich am weitesten verbreitete Definition ist der CIE (Commission internationale d'Éclairage) glare index [CIE83], der auf eine Untersuchung von Petherbridge und Hopkinson aus dem Jahr 1950

[PH50] und den daraus abgeleiteten Building Research Glare Index zurückgreift. Die hier verwendeten Bewertungskriterien und Kennzahlen wurden zunächst nur für Kunstlichtquellen entwickelt. Später wurde von Hopkinson eine als Cornell index oder daylight index bezeichnete Modifizierung für ausgedehnte Leuchflächen wie Fenster abgeleitet. Ein neuerer Ansatz hierzu wird in [TKMK91] entwickelt. Ein Verfahren zur meßtechnischen Erfassung des glare index wird in [Na01] vorgeschlagen.

Die starke Abhängigkeit der visuellen Wahrnehmung von biologischen und psychologischen Faktoren, z.B. der sich im Tagesverlauf verändernden Reizempfindlichkeit, dem Wachheitszustand, der Trübung der Hornhaut oder dem mit dem Lebensalter abnehmenden Sehvermögen, bedingt, daß die Aussagekraft solcher Kenngrößen beschränkt bleibt.

In der Praxis der Kunst- und Tageslichtplanung steht das Thema Blendwirkung zudem häufig im Zusammenhang mit Fragestellungen zur räumlichen Anordnung von Lichtquellen oder von Möblierungsvarianten. In diesem Fall können häufig auch durch qualitative Bewertungen der Lichtsituation und der sich daraus ergebenden Konsequenzen für das Sehvermögen Entscheidungskriterien entwickelt werden.

### 1.3.3 Visueller Komfort

Der Begriff des visuellen Komforts schließt neben den blendungsspezifischen Kriterien die Aspekte der Lichtverteilung in Richtung und Raum, der Lichtfarbe und der Farbgebung der Wandoberflächen ein. Ebenso besteht eine starke Wechselwirkung zur Anordnung von Volumen und Öffnungsflächen (Fenster). In diesem Zusammenhang wird von Bartenbach auch der Begriff „Lichtmilieu“ verwendet [Ba98]. Planungshilfen zur Gewährleistung visueller Komfortbedingungen werden in [DIN5035] durch die Angabe maximal zulässiger Leuchtdichtewerte der Raumbegrenzungsflächen sowie Empfehlungen für die Oberflächengestaltung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen gegeben. Bartenbach führt seit einigen Jahren Untersuchungen mit Testpersonen zur Minimierung der visuellen Belastung an Bildschirmarbeitsplätzen durch und unterscheidet zwischen dem Infeld und dem Umfeld des visuellen Erfassungsbereiches, entsprechend dem zentralen und peripheren Gesichtsfeld. Zur Gewährleistung maximalen Sehkomforts werden Leuchtdichtewerte von 100-150 cd/m<sup>2</sup> im Infeld und von 20-80 cd/m<sup>2</sup> im Umfeld abgeleitet [Ba99].

Neben der Einstufung von Lichtsituationen auf der Grundlage von Leistungskriterien sollte im Zusammenhang mit dem Begriff des visuellen

Komforts auch die emotionale Wahrnehmung von Licht berücksichtigt werden. Der starke Einfluß des Lichtes hierauf manifestiert sich auch im Gebrauch des Begriffes „Lichtstimmung“. Unabhängig von den absoluten Beleuchtungsstärken wird bei stark gerichtetem Licht häufig der Begriff „hartes Licht“, bei hohem Diffusanteil der Begriff „weiches Licht“ oder „sanftes Licht“ verwendet. Eine durch vertikalen Lichteinfall geprägte Lichtsituation wird häufig als eng, privat oder räumlich abgeschlossen empfunden, Seitenlicht hingegen als raumerweiternd.

Anforderungen an das natürliche Licht, die aus den Bedürfnissen nach Orientierung im Raum, der Wahrnehmung zeitlicher Abläufe und des Sichtbezuges entstehen, werden von Lam [La77] als „biological needs“ den meßtechnisch erfaßbaren Komfortkriterien (Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke) gegenübergestellt.

Die Einsicht, daß die Qualität einer Beleuchtungssituation nicht ausschließlich durch lichttechnisch meßbare Kennzahlen charakterisiert werden kann, hat auch zur Entwicklung neuer wissenschaftlicher Methoden geführt, die auf Akzeptanzstudien basieren. Wienhold beschreibt ein neues Verfahren zur Untersuchung von Tageslichtsystemen durch Akzeptanzstudien in einem virtual reality - Testaufbau [WBARR98].

## 1.4 Materialkennwerte

### 1.4.1 Transmission, Reflexion und Absorption

Die strahlungsphysikalischen Eigenschaften von Materialien werden durch die wellenlängenabhängigen Größen des Reflexionsgrades  $\rho_\lambda$ , des Transmissionsgrades (oder der Durchlässigkeit)  $\tau_\lambda$  und des Absorptionsgrades  $\alpha_\lambda$  beschrieben. Für nicht absorbierende Materialien gilt:

$$\rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (1.6)$$

Die Durchlässigkeit im sichtbaren Wellenlängenbereich wird als Lichttransmission  $\tau_{\text{vis}}$  bezeichnet. Häufig wird in diesem Zusammenhang auch begrifflich etwas unschärfer von Transparenz oder bei Licht streuenden Materialien von Transluzenz gesprochen. Durch den Begriff Transparenz wird jedoch auch das wahrnehmungsphysiologische Phänomen der Durchsichtigkeit eines Materials bezeichnet, das neben den material-spezifischen Eigenschaften auch von der Lichtsituation und der Fähigkeit des Betrachters, aus den visuellen Informationen ein Bild zu erstellen, abhängt. Die Definition des spektralen Transmissions- und Reflexionsgrades und der Lichttransmission sowie der entsprechenden Meßverfahren zu ihrer Bestimmung werden in [DIN67507] und [DIN5036-3] gegeben.

Die Lichttransmission kann für gerichteten und ungerichteten Lichteinfall bestimmt werden. Zur Bestimmung des gerichtet-hemisphärischen Transmissionsgrades  $\tau_{\text{ger-hem}}$  erfolgt die Einstrahlung quasiparallel und nahezu senkrecht zur Probenebene. Zur Ermittlung des hemisphärisch-hemisphärischen Transmissionsgrades  $\tau_{\text{hem-hem}}$  erfolgt die Einstrahlung isotrop aus dem Halbraum. In Meßaufbauten wird dies durch Positionieren der Probe zwischen zwei Ulbrichtkugeln realisiert, von denen eine als Lichtquelle dient und die andere den Detektor enthält.

### 1.4.2 Gesamtenergiedurchlassgrad: der g-Wert

Eine weitere wichtige Kenngröße zur Charakterisierung der Solarenergietransmission durch Materialien oder Bauteile ist der Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$ , der auch kurz als g-Wert bezeichnet wird. Die Transmission der Strahlungsenergie kann auf verschiedenen Transportmechanismen wie direkter Transmission, Absorption und Reemission, Wärmeleitung oder Konvektion beruhen. Auch bei strahlungsdurchlässigen Bauteilen wird in der Regel ein Teil der Energie absorbiert und teilweise durch sekundäre Prozesse weitertransportiert.

Der g-Wert ist von den Einstrahlungs- und Umgebungsbedingungen (Temperaturdifferenz, Luftfeuchtigkeit, Anströmung) abhängig und somit keine stoff- oder systemfeste Größe.

Für planparallele Mehrscheiben-Verglasungen wird in [DIN EN 410] eine Definition zur Bestimmung des g-Wertes bei festen Randbedingungen gegeben. Der g-Wert setzt sich in diesem Fall aus dem solaren Transmissionsgrad  $\tau_s$  und dem sekundären Wärmeabgabegrad  $q_i$  zusammen:

$$g = \tau_s + q_i \quad (1.7)$$

In mehrschichtigen Systemen (z.B. einem Sonnenschutz mit Verglasung) ist der resultierende g-Wert des Gesamtsystems  $g_{\text{total}}$  auch von der Schichtenfolge und dem Abstand der Schichten zueinander abhängig.

Die Bestimmung von  $g_{\text{total}}$  kann durch kalorimetrische Messung oder durch Verwendung einer sogenannten Komponentenmethode bestimmt werden. Hierfür müssen bestimmte Werte der Einzelkomponenten verfügbar sein. In [IFT96] wird ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung des g-Wertes für außen-, innen- und im Zwischenraum von Verbundfenstern liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien und Sonnenschutzrollos) beschrieben, das

auf dem Arbeitspapier [CEN96] der Adhoc-Arbeitsgruppe TC 89 WG7 (SLT) basiert.

Allgemeine Verfahren zur Bestimmung des g-Wertes mehrschichtiger Bauteile, insbesondere unter Einbeziehung richtungselektiver oder lichtlenkender Elemente sind bisher noch nicht verfügbar. Die Entwicklung geeigneter Meßverfahren ist Bestandteil laufender Projekte [KPE00].

### 1.4.3 Sonnenschutz: der z-Wert

Zur Bewertung der Sonnenschutzwirkung von Fassadenkomponenten wird in [DIN 4108-2] der Abminderungsfaktor  $z$  definiert. Der z-Faktor beschreibt den Einfluß eines Sonnenschutzes auf den g-Wert einer Verglasung:

$$g_{\text{total}} = z \cdot g_{\text{verglasung}} \quad (1.8)$$

Der z-Wert ist somit kein systemfester Kennwert des Sonnenschutzelementes, sondern auf eine spezielle Sonnenschutz-Verglasungskombination bezogen. Bei gleichem Sonnenschutz und unterschiedlichen Verglasungen können sich daher verschiedene z-Werte ergeben. Als Vergleichsgröße wird der z-Faktor von Sonnenschutzelementen für Standard-2-Scheiben-Isolierverglasungen

angegeben. Auch in diesem Fall ist der z-Wert jedoch keine systemfeste Größe, da er mit der relativen Lage und dem Abstand des Sonnenschutzes zur Verglasung variiert.

### 1.5 Phasenraum und Etendue

Da die Begriffe des Phasenraumes und der Etendue aus der geometrischen Optik von zentraler Bedeutung für das Verständnis der in dieser Arbeit behandelten konzentrierenden Systeme sind, soll an dieser Stelle eine kurze Erklärung dieser zunächst etwas abstrakt erscheinenden physikalischen Begriffe gegeben werden, die stärker auf eine Veranschaulichung als eine strenge naturwissenschaftliche Definition abzielt:

Der Phasenraum ist ein physikalischer Zustandsraum. Er beinhaltet alle physikalisch möglichen (hypothetischen) Zustände einer als Strahlung vorliegenden Energiemenge. Der Phasenraum der geometrischen Optik hat in seiner allgemeinen Formulierung eine Orts- und eine Richtungskomponente sowie eine spektrale und eine zeitliche Komponente [Rie82].

Da die zeitliche und die spektrale Veränderung hier nicht in Betracht gezogen werden, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Orts- und die Richtungskomponente.

Der bezeichnete (Unter-)Raum hat je zwei Orts- und zwei Richtungsdimensionen. Ein (vierdimensionaler) Punkt in diesem Raum beschreibt die Lage und Orientierung eines beliebigen, unendlichen Strahls im (dreidimensionalen) Raum. Das Volumen dieses vierdimensionalen Raumes wird als Etendue  $\epsilon$  bezeichnet.

Eine ausgedehnte Quelle der Größe  $dA$ , die im Medium mit der Brechzahl  $n$  innerhalb eines Raumwinkелеlementes  $d\Omega$  abstrahlt, füllt das Volumen

$$d\epsilon = n^2 \cdot dx \cdot dy \cdot dk_x \cdot dk_y = dA \cdot d\Omega^* \quad (1.9)$$

wobei die Komponenten  $dk_x$  und  $dk_y$ , die in die  $xy$ -Ebene projizierten orthogonalen Winkelkomponenten sind und  $d\Omega^*$  das Produkt der projizierten Winkelkomponenten ist.

Beim Durchgang eines Strahlenbündels durch ein optisches System ist das Etendue nach [WW89] eine Erhaltungsgröße, solange nur ideale Reflexion oder Transmission und

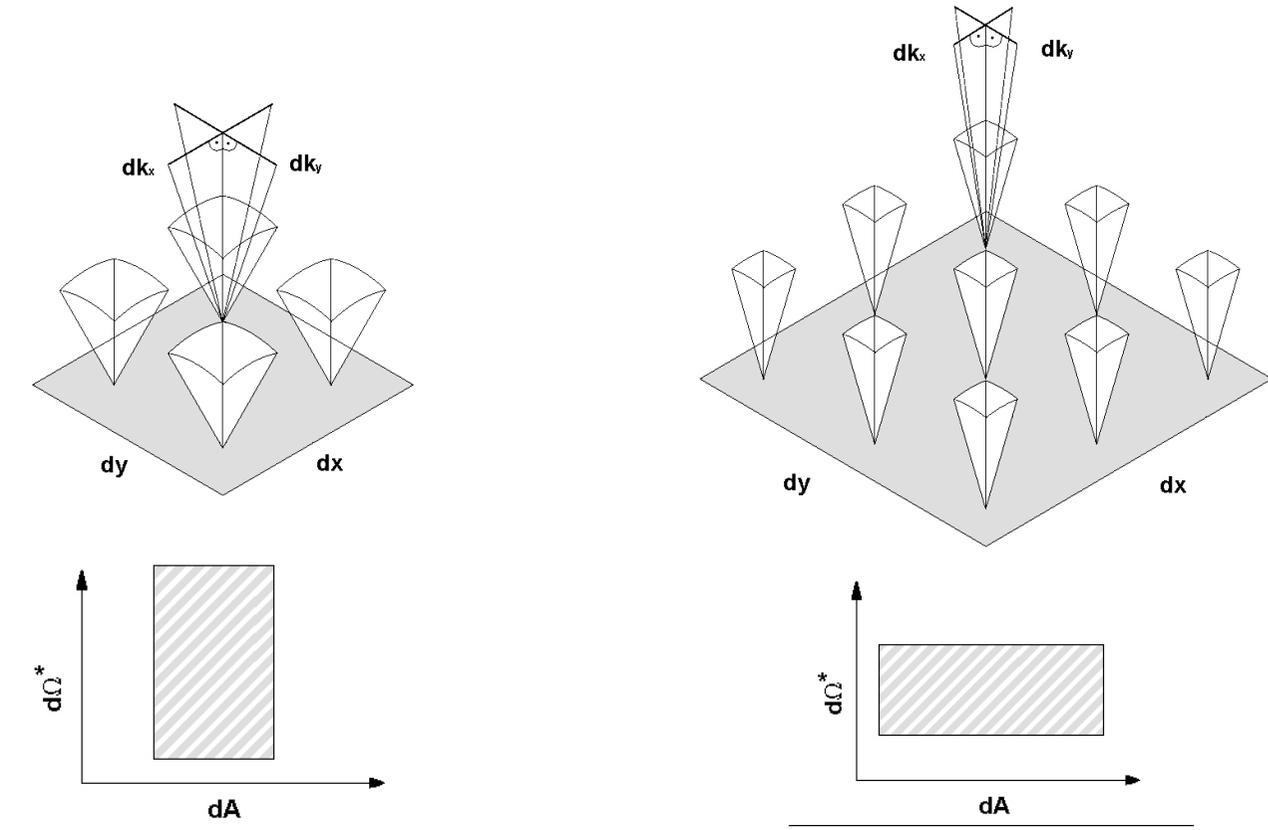


Abb. 1. 2 : Schematische Darstellung der Etendue-Erhaltung bei Transformation einer Quelle. Die schraffierten Bereiche stellen das Phasenraumvolumen vor (l.) und nach der Transformation (r.) dar. Bei Etendue-erhaltenden Transformationen wird nur die Form, jedoch nicht die Fläche des Bereiches verändert.

keine Streuung oder Strahlaufspaltungen vorkommen. Andernfalls vergrößert sich das Etendue. Eine Verkleinerung des Etendue ohne Verminderung der Energiemenge, zum Beispiel durch Umwandlung in eine andere Energieform, ist physikalisch nicht möglich.

Anschaulich bedeutet dies, das Strahlung, die aus einem begrenzten Raumwinkel  $d\Omega$  auf einer Fläche  $a$  auftritt, auf einer kleineren Fläche  $a'$  nur durch Vergrößerung des Einstrahlraumwinkels von  $d\Omega$  auf  $d\Omega'$  verlustfrei konzentriert werden kann. Umgekehrt kann der Ausstrahlungswinkel einer Flächenquelle bei Erhaltung der Strahlungsleistung nur dadurch verringert werden, daß die ausstrahlende Fläche vergrößert wird.

Die Etendue-Erhaltung bildet eine Randbedingung und theoretische Grenze für Aufgabenstellungen, in denen es um die Konzentration oder Umlenkung von Strahlung oder Licht geht. Die geometrische Konzentration von Strahlung kann in diesem Kontext als Austauschprozeß oder Fluß im Phasenraum verstanden werden. Die Aussage, daß diffuse Strahlung nicht konzentriert werden kann, läßt sich in der Syntax des Etendue in diesem Zusammenhang etwa folgendermaßen formulieren:

Strahlung, die isotrop aus dem gesamten Halbraum auf eine Fläche auftritt, läßt sich nicht ohne Verluste auf einer kleineren Fläche innerhalb desselben Mediums sammeln. Um das Volumen, das die Strahlung im Ortsraum einnimmt, zu verkleinern, müßte das Volumen im Richtungsraum vergrößert werden. Dieses ist

bei isotroper Strahlung jedoch schon vollständig ausgefüllt. Durch den Wechsel in ein Medium höherer Brechzahl  $n'$  kann die Fläche maximal um  $n^2/n'^2$  verkleinert werden. Die Brechzahl wirkt in diesem Zusammenhang wie ein Skalierungsfaktor, durch den das Volumen des Phasenraumes verkleinert oder vergrößert werden kann.

## 1.6 Winkelprojektionen

Da in dieser Arbeit zahlreiche Flächendarstellungen von Winkelräumen in Form von Isolinien- oder Farbverlaufsdiagrammen enthalten sind, wird an dieser Stelle eine kurze Zusammenstellung der unterschiedlichen Darstellungsarten gegeben. Dies soll auch dem Ziel dienen, den Vergleich mit Darstellungen aus anderen Quellen zu erleichtern.

In den meisten Fällen werden in den nachfolgenden Kapiteln Daten über zweidimensionalen Winkelhalbräumen, einen Zenit- oder Höhenwinkelbereich von  $90^\circ$  und einem Azimutwinkelbereich von  $360^\circ$  umfassend dargestellt. In einigen Fällen werden nur Teilmengen dieses Halbraumes dargestellt, da bei einachsig symmetrischen Datensätzen die Darstellung des Viertelraumes und bei zweiachsig symmetrischen Datensätzen die Darstellung des Achtelraumes bereits die gesamte darzustellende Information enthält. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in speziellen Fällen auch symmetrische Datensätze im gesamten Halbraum dargestellt.

Abb. 1.3 zeigt den Halbraum in kartesischer Koordinatendarstellung mit dem Azimut als x-Achse und dem Zenitwinkel als y-Achse. Die einge-

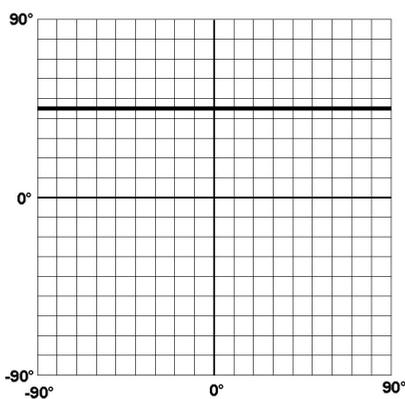


Abb. 1.3: Winkeldiagramm des Halbraumes in Kartesischer Koordinatendarstellung

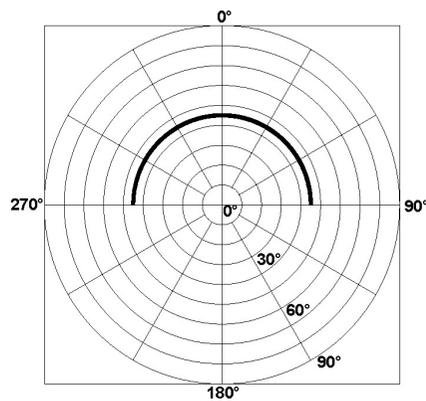


Abb. 1.4: Kreisdiagramm in Polarkoordinatendarstellung mit äquidistanter Unterteilung

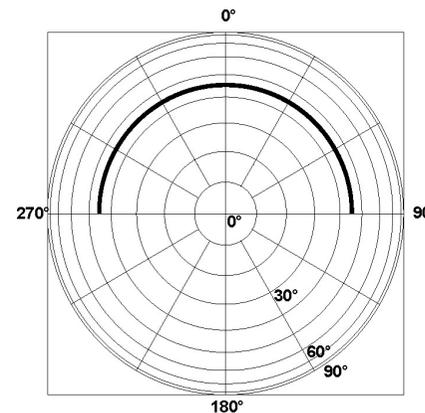


Abb. 1.5: Kreisdiagramm mit  $\cos \gamma$ -Unterteilung der Zenitachse

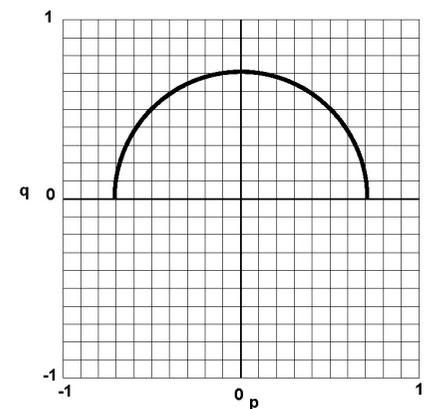


Abb. 1.6: p-q-Diagramm in kartesischer Koordinatendarstellung

gezeichnete Linie beschreibt eine 180°-Drehung um den Ursprung bei festem Höhenwinkel  $\gamma=45^\circ$ . Häufig wird zur Darstellung von Sonnenbahnen auch das in Abb. 1.4 dargestellte Kreisdiagramm mit äquidistanter Zenitwinkelunterteilung verwendet. Dieselbe Bewegung erscheint in diesem Diagramm als Halbkreis mit dem halben Maximalradius  $r_{\max}$ .

Die Abbildungen 1.5 und 1.6 zeigen die für Winkeldarstellungen in dieser Arbeit gewählte Form des Kreisdiagrammes, in der die Unterteilung des Höhenwinkels  $\gamma$  nicht äquidistant, sondern durch die Skalierung

$$r'(\gamma) = r(\gamma=90^\circ) \cdot \cos(\gamma) \quad (1.10)$$

erfolgt. Hierdurch verändert sich der Radius der eingezeichneten 45°-Linie im Vergleich zur äquidistanten Darstellung von  $0.5 \cdot r_{\max}$  auf  $0.71 \cdot r_{\max}$ . Die Darstellung entspricht einer flächentreuen Darstellung des projizierten Winkelteilraumes  $d\Omega^*$ , sodaß Winkelbereiche gleicher Fläche bei isotroper Einstrahlung denselben Energieeintrag bedeuten.

Abb. 1.6 zeigt prinzipiell die gleiche Diagrammform wie Abb. 1.5. Der Unterschied besteht darin, daß in Abb. 1.6 die kartesischen Koordinaten  $p$  und  $q$  verwendet werden, die aus dem Azimut- und Zenitwinkel durch die Transformation

$$p = \sin \gamma \sin \alpha$$

bzw.

$$q = \sin \gamma \cos \alpha$$

$$(1.11)$$

hervorgehen.

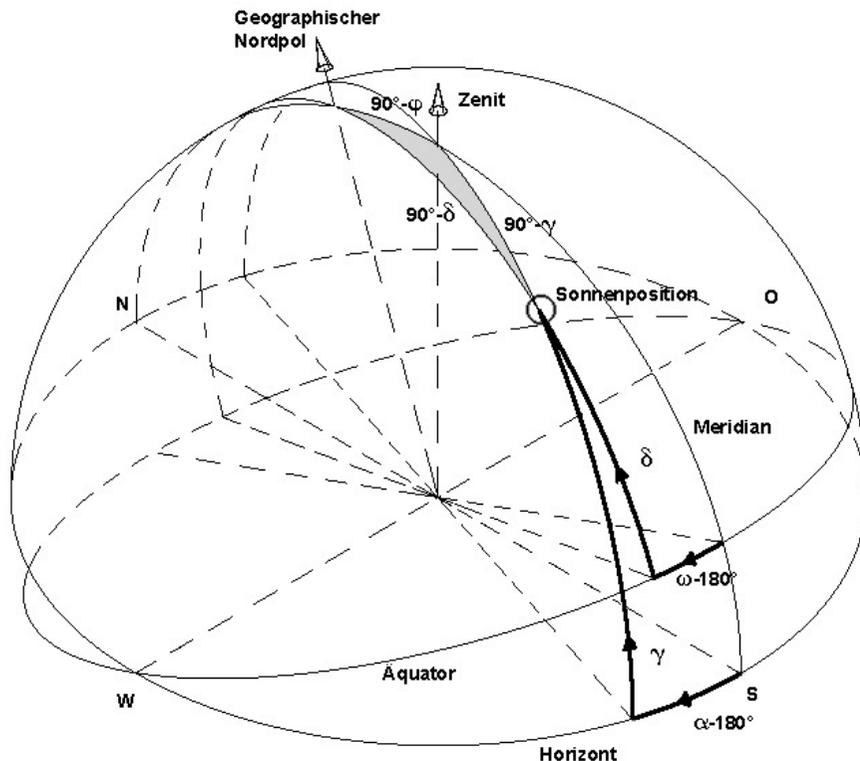


Abb. 1. 7: Sphärische Koordinatensysteme zur Umrechnung der Sonnenposition vom Äquatorialsystem auf nicht äquatoriale Horizontalsysteme

## 1.7 Solargeometrie

Die Beschreibung der tages- und jahreszeitabhängigen Position des Sonnenmittelpunktes am Himmel erfolgt in einem sphärischen Koordinatensystem.

Die Ermittlung der Sonneneinfallswinkel auf eine beliebig orientierte, geneigte Fläche an einem bestimmten geographischen Ort lässt sich in drei Berechnungsschritten unterteilen:

1. Die Berechnung der Sonnenbahnen im Äquatorialsystem
2. Die Transformation der Koordinaten auf das Horizontalsystem für einen bestimmten Ort
3. Die Transformation auf das Bezugssystem der geneigten Fläche

In Abb. 1.7 sind die Winkelverhältnisse für die Transformation vom

Deklination  $\delta$ :

$$\text{Gl. (1.12): } \delta = 23.44 \sin [P(N - 82.3 + 1.93 \sin [P(N - 2.4)])]$$

mit  $P = 2\pi / 365.25$

Sonnenhöhenwinkel  $\gamma$ :

$$\text{Gl. (1.13): } \sin \gamma = \sin \varphi \cdot \sin \delta - \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$

Azimutwinkel  $\alpha$ :

$$\text{Gl. (1.14): } \cos \alpha = \frac{\sin \delta - \sin \gamma \cdot \sin \varphi}{\cos \gamma \cdot \cos \varphi}$$

Äquatorialsystem zum horizontalen Bezugssystem des geographischen Ortes, für den die Sonnenposition zu bestimmen ist, dargestellt. Hierbei bezeichnet  $\omega$  den Stundenwinkel der Sonne im Äquatorialsystem,  $\delta$  die Deklination,  $\varphi$  den geographischen Breitengrad,  $\gamma$  den Höhenwinkel und  $\alpha$  den Azimutwinkel des Horizontalsystems. Im Äquatorialsystem kann die Sonnenposition durch den Deklinationwinkel  $\delta$  und den Stundenwinkel  $\omega$  beschrieben werden.

Eine Näherung für den Deklinationwinkel mit einer maximalen Abweichung von  $0.3^\circ$  ist nach [WSV91] durch Gleichung 1.12 gegeben. Hierbei bezeichnet  $N$  den Tag, wobei  $N=1$  der erste Januar in einem Schaltjahr ist und die Zählung entsprechend über einen vollständigen Schaltjahreszyklus von 4 Jahren erfolgt.

Der Stundenwinkel  $\omega$  in der Äquatorialebene ergibt sich aus der lokalen

Sonnenzeit  $t_s$  :

$$\omega = t_s * 360 / 24 \quad (1.15)$$

Die Koordinatentransformation erfolgt über das in Abb. 1.7 grau unterlegte sphärische Dreieck, das durch den Zenit, die Sonnenposition und den Nordpol aufgespannt wird und auch als „Nautisches Dreieck“ bezeichnet wird. Nach [SMU95] ergibt sich über den Seitenkosinus-

satz der sphärischen Geometrie die Winkelrelation für den Höhenwinkel der Sonne  $\gamma$  in Gleichung 1.13 und die Relation für den Azimutwinkel  $\alpha$  des Bezugskordinatensystems in Gleichung 1.14.

Die Umrechnung vom Horizontalsystem auf die geneigte Fläche erfolgt durch eine weitere sphärische Projektion, wobei an Stelle des Zenit und des Nordpols der Zenit und die Flächennormale als Achsen zu ver-

wenden sind. Liegt die Achse des geographischen Nordpols in der Ebene der ausgerichteten Fläche, so bilden die projizierten Sonnenbahnen gerade Linien. Dieser Fall tritt beispielsweise bei Süd-Orientierungen, deren Neigungswinkel dem geographischen Breitengrad entspricht (Abb 1.9) und bei vertikalen Ost- und West-Orientierungen (Abb.1.10) ein.

### 1.8 Solares Strahlungsangebot und Tageslichtnutzung

Die Jahressumme solarer Strahlungseinträge auf horizontale Flächen beträgt in Deutschland typischerweise ca. 900 - 1200 kWh/m<sup>2</sup>a. Im südeuropäischen Raum liegen die Werte um den Faktor 1,5 bis 2 höher, beispielsweise in Rom bei 1680 kWh/m<sup>2</sup>a, in der Sahara bei bis zu 2500 kWh/m<sup>2</sup>a [Wag94]. Die Verfügbarkeit solarer Strahlung ist

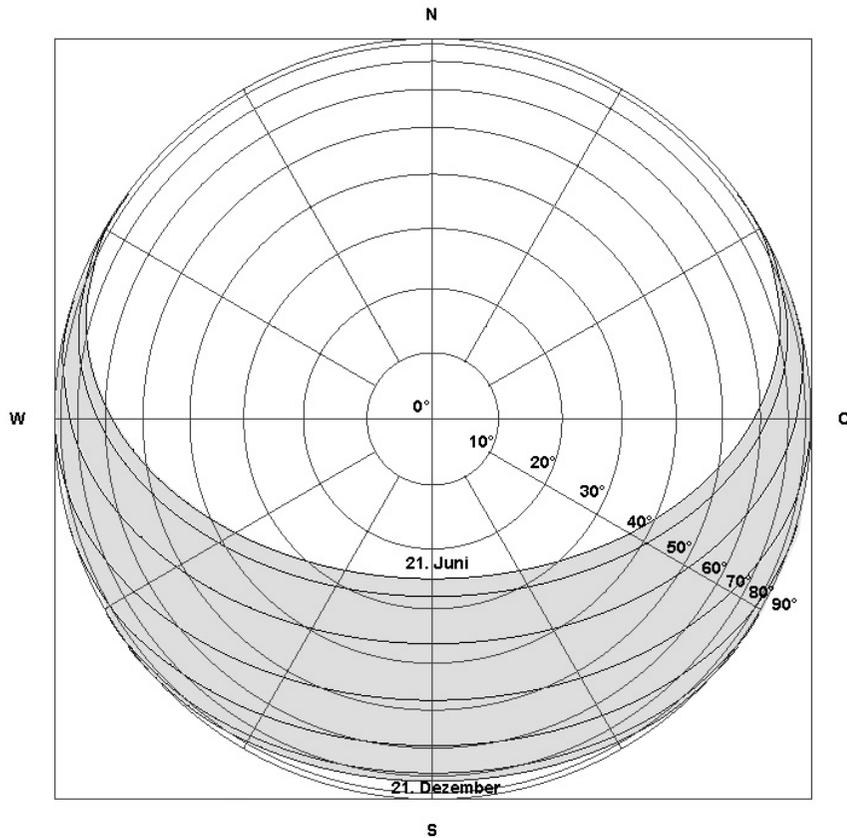


Abb 1. 8: Sonnenstandsdiagramm für horizontale Flächen, Breitengrad 48°

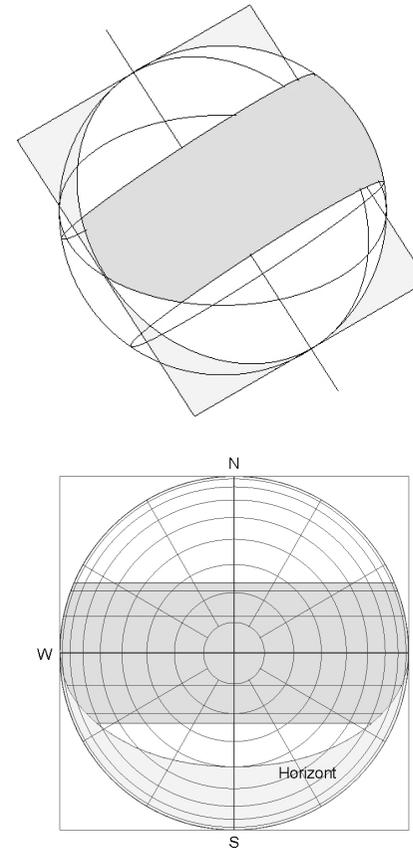


Abb. 1.9 Projektion auf eine nach Süden um den Breitengrad geneigte Fläche

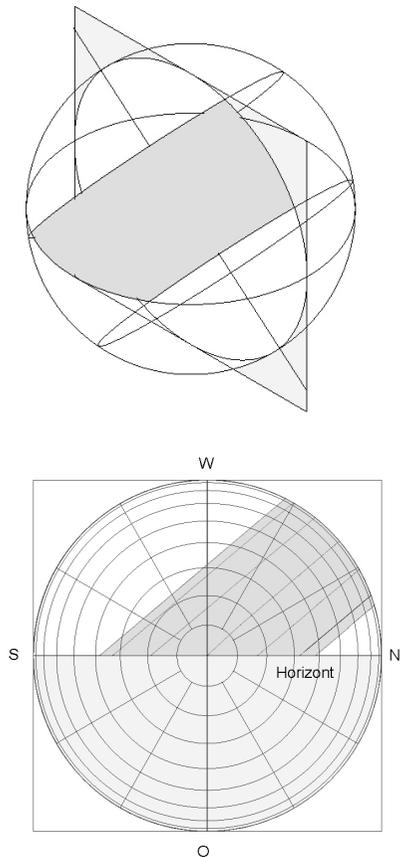


Abb.1.10 Projektion auf eine vertikale Ostfläche

jedoch auch von geographischen, meso- und mikroklimatischen Bedingungen abhängig.

Der Anteil der Diffusstrahlung liegt in Deutschland für horizontale Flächen über das Jahr gemittelt bei 50-60%, der Direktstrahlungsanteil liegt entsprechend bei 40-50% der Globalstrahlung [GW93].

Im Hinblick auf das nutzbare Potential solarer Strahlung im Gebäude in Form von Tageslicht müssen in die Betrachtung auch die Verfügbarkeit in Abhängigkeit von den Jahres- und tageszeitlichen Veränderungen sowie die Abhängigkeit von der Fassadenorientierung einbezogen werden.

Die Solarstrahlung ist zur Beleuchtung von Räumen in der Regel nur bis zu einem bestimmten Anteil und in einem bestimmten Tageszeitintervall nutzbar. Überschüssige Strahlungsenergie bei Direkteinstrahlung führt hingegen häufig eher zu Blen-

dungsproblemen und ist daher zu vermeiden. Die Optimierung der Tageslichtbeleuchtung beinhaltet also einerseits die Gewährleistung eines ausreichenden Beleuchtungsniveaus und andererseits die Reduzierung zu hoher Lichteinträge auf ein den Komfortbedingungen entsprechendes Niveau.

Die Diffus- und Direktanteile des Tageslichtes unterscheiden sich stark in ihrer zeitlichen Verfügbarkeit und damit in ihrer Nutzbarkeit zur Beleuchtung. In den untenstehenden Stapeldiagrammen sind die monatlichen Mittelwerte der Direkt- und Diffusstrahlung für den Standort München für verschiedene Flächenorientierungen dargestellt. Die Höhe der einzelnen Säulen gibt den monatlichen Mittelwert der Globalstrahlung an. Während der verfügbare Diffusanteil für alle Flächenorientierungen in derselben Größenordnung liegt, ist der Direktanteil stark orientierungsabhängig. Der große Unter-

schied der Gesamtstrahlung zwischen den Sommer- und Wintermonaten für horizontale Flächen wird zum Teil durch die unterschiedlichen Tageslängen und zum Teil durch die niedrigeren Sonnenstände verursacht. (Im Winter sind die Tage kürzer und dunkler.)

Bei vertikaler Südexposition übersteigt der Direktanteil den Diffusanteil im Winterhalbjahr. Dies gilt jedoch nur für den Fall, dass keine Horzonterhöhungen durch umgebende Bebauung, Vegetation oder geographische Faktoren bestehen.

Bei anderen Orientierungen ist der Direktanteil im Winter grundsätzlich geringer als der Diffusanteil. Auch die relative zeitliche Verfügbarkeit der Direktstrahlung im Verhältnis zur möglichen Sonnenscheindauer ist in den Wintermonaten deutlich geringer. Abb. 1.14 zeigt diesen Sachverhalt für den Standort Stuttgart. Während im Sommer im Durch-

schnitt knapp die Hälfte des Tages die Sonne scheint, beträgt die mittlere Sonnenscheindauer im Winter nur ein Viertel bis ein Fünftel der Tageslänge.

Direktes Sonnenlicht ist daher in den Wintermonaten zur Belichtung nur geringfügig nutzbar, in den Sommermonaten ist der direkte Strahlungseintrag in das Gebäude mit der Gefahr zu hoher Wärmeeinträge verbunden. Der mit Direktlichteinträgen verbundene Aspekt der Blendung ist ganzjährig relevant.

Bei der Bewertung von Tageslichtkonzepten, die durch Einlenkung von direktem Sonnenlicht zu höheren Lichteinträgen führen, sollte die zeitliche Komponente der Lichtverteilung berücksichtigt werden. Eine Ausrichtung auf die Nutzung des diffusen Tageslichtanteiles erscheint in unserer Klimaregion ganzjährig betrachtet gewinnversprechender.

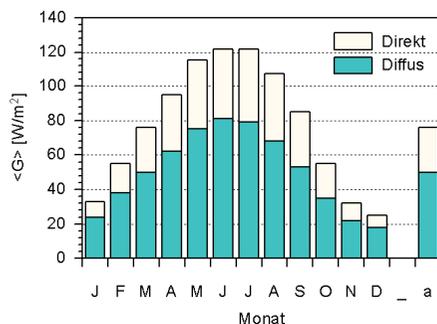


Abb. 1.11: Monatliches Mittel der Direkt- und Diffusstrahlung, vertikal west, München

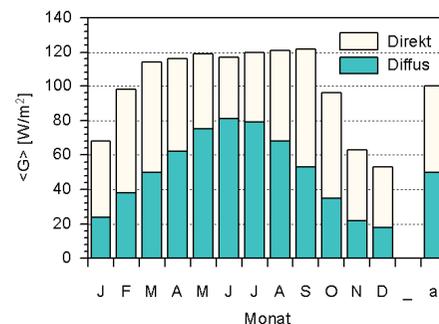


Abb. 1.12: Monatliches Mittel der Direkt- und Diffusstrahlung, vertikal süd, München

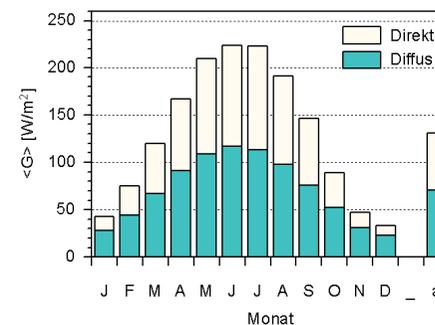


Abb. 1.13: Monatliches Mittel der Direkt- und Diffusstrahlung, horizontal, München

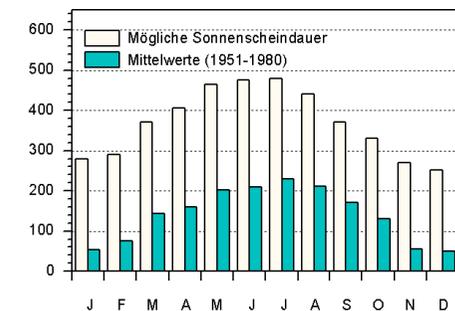


Abb. 1.14: Mittel und erreichbare Maximalwerte der monatlichen Sonnenscheindauer, Stuttgart

## 1.9 Meßdaten solarer Strahlung

Da sich die Transmissions- und Reflexionseigenschaften der in dieser Arbeit untersuchten Sonnenschutzprinzipien und -systeme durch eine scharf ausgeprägte Winkelabhängigkeit auszeichnen, ist ihre strahlungsphysikalische und lichttechnische Wirkung stark von der winkelabhängigen Intensitätsverteilung der solaren Einstrahlung abhängig.

Die in den folgenden Kapiteln durch geometrische Überlegungen und mit Hilfe von Strahlberechnungsverfahren hergeleiteten Aussagen basieren teilweise auf den in Kapitel 1.11 beschriebenen mathematischen Modellen der Strahldichteverteilung des Himmels. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit und unter welchen Randbedingungen diese Aussagen durch meßtechnische Verfahren überprüfbar sind.

Bei thermischen Messungen wird häufig die Diffus- und Globalstrahlung in horizontaler und eventuell zusätzlich in vertikaler Ausrichtung erfaßt.

Die Bestimmung des Direkt- und Diffusanteiles erfolgt häufig durch Verwendung mehrerer Pyranometer, wobei an mindestens einem der Pyranometer durch Aufsetzen eines Schattenringes die Direktstrahlung

ausgeblendet und nur der Diffusanteil gemessen wird. Aus der Differenz der Meßwerte der Globalstrahlung und der Diffusstrahlung ergibt sich die Direktstrahlung.

Dieses Meßverfahren ermöglicht eine grobe Abschätzung der Direkt- und Diffusstrahlungsanteile, es bietet jedoch keine Möglichkeit zur Erfassung der winkelabhängigen Intensitätsverteilung der Strahlung. Inwieweit bei diesem Meßverfahren der zirkumsolare Anteil der Strahlung dem Diffusanteil oder dem Direktanteil zugerechnet wird, hängt von verschiedenen Faktoren wie der Wittersituation, der Geometrie und der Einstellung des Schattenringes sowie von dem jeweiligen Sonnenstand ab.

Für Simulationsrechnungen wird ein mathematisches Modell verwendet, das aus den Direkt- und Diffusstrahlungswerten und dem Zeitpunkt der Einstrahlung eine Winkelverteilung errechnet.

Abweichungen in der Winkelverteilung der Einstrahlung können sich bei winkelselektiven Systemen beim Vergleich zwischen Messung und Simulation wesentlich stärker auf die Ergebnisse auswirken, als bei nicht oder nur geringfügig richtungselektiven Systemen. Dadurch können große Abweichungen zwischen Messung und Simulation entstehen.

Die winkelaufgelöste Erfassung der Strahldichteverteilung des Himmels ermöglicht eine wesentlich genauere Analyse der Meßergebnisse und die Überprüfung der Korrelation zwischen dem mathematischem Himmelsmodell und den realen Gegebenheiten.

Die Messung der Strahldichteverteilung erfolgt durch ein- oder zweiachsig bewegte Detektoren (Himmelsscanner), die in kurzer Zeit eine bestimmte Anzahl von Himmelspositionen erfassen. Der Detektoröffnungswinkel beträgt üblicherweise  $2,5^\circ$  [Bru96]. Winkelaufgelöste Messungen sind technisch aufwendig und mit der Generierung großer Datenmengen verbunden.

Einen Öffnungswinkel in derselben Größenordnung weisen sogenannte Pyrheliometer auf, die der Sonnenposition nachgeführt werden und einen genaueren Wert der Direktstrahlung liefern.

Strahlungswerte, die Wetterdatensätzen wie beispielsweise den Testreferenzjahren entnommen oder durch Datengenerationsprogramme wie Meteororm [Me97] erzeugt werden können, beziehen sich auf Stundenmittelwerte der Direkt- und der Globalstrahlung. Für die Untersuchung richtungselektiver Tageslichtsysteme ist eine höhere Auflösung der zeitlichen Dynamik wünschenswert, da sich die Vorteile die-

ser Systeme besonders in der Dämpfung der Tageslichtdynamik manifestieren. Durch die Stundenmittelung wird beispielsweise die relative Häufigkeit von Beleuchtungszuständen mit hohen Beleuchtungsstärken systematisch unterbewertet [Go00], da die hohe Dynamik des Tageslichtes bei stark veränderlichen Wittersituationen (schnellziehende Wolken) nicht abgebildet wird.

Eine Quelle für Tageslichtdaten stellt das Projekt Satellight [Re99] dar, das im Internet eine Datenbank für den gesamten europäischen Raum derzeit unter der Adresse <http://satellight.entpe.fr> bereitstellt. Die Datensätze werden durch Auswertung von Satellitenbildern berechnet.

## 1.10 Mathematische Modelle der Strahldichteverteilung des Himmels

Sowohl für thermische Simulationsprogramme als auch für Tageslichtberechnungsprogramme werden mathematische Modelle der Strahl- bzw. Leuchtdichteverteilung des Himmels benötigt.

Während die Modelle in thermischen Simulationsprogrammen zur Umrechnung der Einstrahlungswerte von horizontalen auf geneigte Flächen unterschiedlicher Orientierung ver-

wendet werden, geht bei der Tageslichtsimulation das mathematische Modell direkt in die Definition des Himmels als winkelabhängige Strahlenquelle ein.

Für vollständig bedeckte Himmelszustände wurde bereits 1955 ein ursprünglich von Moon und Spencer entwickeltes Modell von der CIE als Standard festgelegt [WS97]. Dieses Modell basiert auf einer um die zenitale Achse rotationssymmetrischen Verteilung, die vom Maximum im Zenit auf 1/3 des Maximalwertes am Horizont abnimmt (Abb. 1.15). Der Verlauf der Leuchtdichte vom Zenit zum Horizont in Abhängigkeit vom Zenitwinkel  $\zeta$  wird durch folgende Funktion beschrieben:

$$L(\zeta) = \frac{L_{Zenit}(1 + 2 \cos \zeta)}{3} \quad (1.16)$$

Zur Validierung dieses Modells wurden verschiedene Vergleiche mit Meßdaten von bedeckten Himmelszuständen durchgeführt [KV93]. Die Beschreibung von Himmelsverteilungen mit Direktstrahlungsanteil erfordert komplexere Modelle. Hierzu wurde von der CIE ein Modell für klaren Himmel [CIE73] und für teilweise bedeckten Himmel als Standard festgelegt.

Ein detaillierteres Modell, das verschiedene Wettersituationen einschließt, ist das „All Weather“-Modell

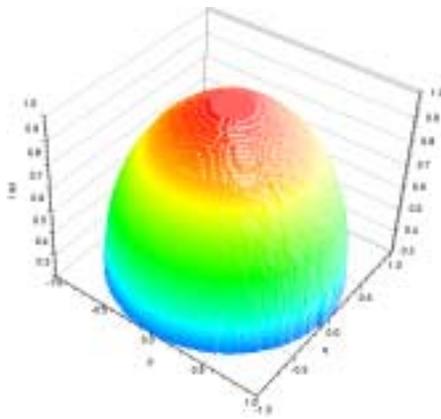


Abb. 1.15: Leuchtdichteverteilung des CIE Overcast Sky Modells. Die Leuchtdichte am Horizont beträgt 1/3 des Maximalwertes im Zenit

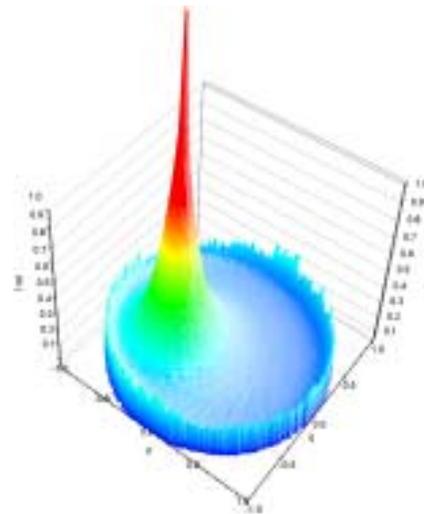


Abb. 1.16: Leuchtdichteverteilung des Perez Sky Modells für Direktstrahlung. (Das Leuchtdichtemaximum der Sonne ist um den Faktor  $1.5 \times 10^2$  reduziert dargestellt)

von Perez [PSM93], das häufig auch kurz als „Perez Sky“ bezeichnet wird (Abb.1.16).

Dieses Modell generiert eine Leuchtdichteverteilung auf der Basis der geographischen Lage und Uhrzeit sowie der angegebenen horizontalen Direkt- und Diffusstrahlungswerte. In dem Modell wird sowohl eine Aufhellung der Himmelsleuchtdichte im sonnennahen Bereich als auch eine Horizontaufhellung durch die Direktstrahlung berücksichtigt.

Das Perez-Modell wird in verschiedenen thermischen Simulationsprogrammen verwendet und ist auch für das Lichtberechnungsprogramm Radiance verfügbar.

### 1.11 Lichtberechnung

Zur Berechnung der Ausbreitung von Licht im Raum sind verschiedene Algorithmen entwickelt worden. Hierbei wird zwischen der Methode des Radiosity und des Raytracing unterschieden. Der deutsche Begriff für Raytracing ist Strahlverfolgung. Durch Radiosity-Verfahren wird die Lichtausbreitung betrachterunabhängig durch Austauschkoefizienten zwischen einzelnen Flächensegmenten berechnet. Die Einzelsegmente werden dabei als diffus streuend angenommen. Richtungsabhängige Lichteefekte wie spiegelnde Reflexio-

nen können in dieser Methode nicht berücksichtigt werden.

Raytracing basiert auf der Verfolgung einzelner Lichtstrahlen. Durch die Berechnung einer großen Anzahl einzelner Strahlen in einer geometrischen Szenerie können strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen sowie Lichtverteilungen in Richtung und Raum auch unter Berücksichtigung richtungsabhängiger Effekte bestimmt werden.

In der Computergaphik wird Radiosity und Raytracing auch zur Visualisierung dreidimensionaler Körper und Raummodelle sowie zur Datenvisualisierung eingesetzt.

Der Einsatz von Raytracingmethoden für lichttechnische Berechnungen setzt voraus, daß sich die zu untersuchenden physikalischen Phänomene mit dem Formalismus der geometrischen Optik beschreiben lassen. Die Dimension der geometrischen Strukturen muß hierzu groß gegenüber der den Strahlen zugeordneten Wellenlänge sein.

Wellenoptische Effekte wie Beugung oder Streuung, die durch mikroskopische Strukturen verursacht werden, können durch Raytracingmethoden nur bedingt abgebildet werden. Streueigenschaften von Oberflächen müssen durch numerische Modelle beschrieben und in Form von Materialeigenschaften den geometrischen

Elementen zugeordnet werden. Zur Erstellung einer Raytracing-Szenerie müssen folgende Elemente definiert werden :

- Die räumliche Geometrie in Form einer zwei- oder dreidimensionalen Beschreibung zueinander angeordneter Hüllflächen
- Die Transmissions- und Reflexionseigenschaften der Oberflächen und der sie umgebenden Medien
- Die Positionen, die räumliche Ausdehnung und die Strahldichteverteilung der Quellen
- Der Zielpunkt oder die Zielfläche

Die Raytracingaufgabe besteht darin, durch Strahlenberechnungen innerhalb der räumlichen Geometrie die Lichttransportpfade zwischen den Quellen und dem Ziel zu finden (Abb.1.17). Hierfür können folgende methodische Ansätze unterschieden werden:

1. Der Startpunkt und die Richtung der Strahlen wird an der Quelle definiert. Der Strahlengang wird von der Quelle ausgehend in die Szenerie hinein verfolgt. Die Berechnung des Strahlengangs wird beendet, wenn die Zielfläche erreicht ist oder ein Abbruchkriterium der Strahlverfolgung erfüllt

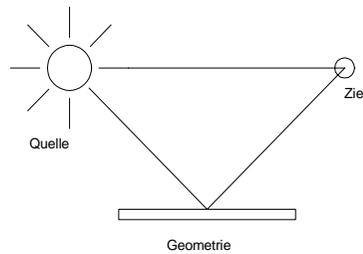


Abb. 1. 17: Prinzip und Grundelemente der Strahlverfolgung

ist. Ein Abbruchkriterium kann z.B. durch die Anzahl der berechneten Reflexionen oder die Abschwächung der Energie des Strahls definiert werden. Dieses Verfahren wird als Forward Raytracing bezeichnet.

2. Der Strahlengang wird, vom Zielpunkt oder der Zielfläche ausgehend, rückwärts bis zum Erreichen einer Quelle oder eines Abbruchkriteriums verfolgt. Dieses Verfahren wird als Backward Raytracing bezeichnet.

Welche der Methoden sich im Einzelfall zur Berechnung eines Raytracingproblems besser eignet, hängt von der Aufgabenstellung und den Eigenschaften der Quellen, der Geometrie und der Materialeigenschaften ab. Wie später gezeigt wird, ist häufig auch eine Kombination der Verfahren sinnvoll. Dies soll anhand der folgenden Beispiele verdeutlicht werden:

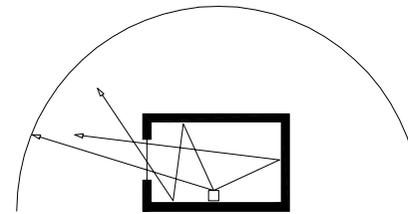


Abb. 1. 18: Backward-Raytracing bei Einstrahlung aus dem Halbraum

Beispiel 1: Berechnung der Beleuchtungsstärke in einem Raum bei bedecktem Himmel

Abbildung 1.18 und 1.19 zeigen schematisch die Strahlenverläufe bei Forward- und Backward-Raytracing für einen Raum mit einer Fensteröffnung und der Himmelshalbkugel als ausgedehnter Strahlenquelle.

Im Fall des Backward-Raytracing (Abb. 1.18) werden die Strahlen am Zielort definiert und gelangen von dort direkt oder nach Reflexion an den Raumboflächen durch die Fensteröffnung zur Quelle. Einige der Strahlen gelangen erst nach mehreren Reflexionen durch die Fensteröffnung nach außen. Die Wahrscheinlichkeit, das die Strahlen den Raum durch die Fensteröffnung verlassen und zur Quelle gelangen, erhöht sich mit der Anzahl der berechneten Reflexionen und mit der Größe der Fensteröffnung. Strahlen, die auch nach der maximal erlaubten Anzahl von Reflexionen nicht die

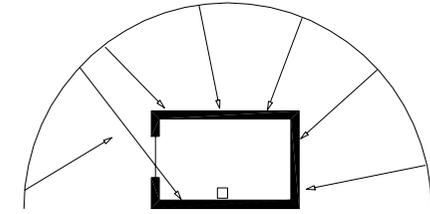


Abb. 1. 19: Forward-Raytracing bei Einstrahlung aus dem Halbraum

Quelle erreicht haben, werden nicht weiter verfolgt.

Zur Berechnung derselben Szenerie durch Forward Raytracing werden die Anfangspositionen der Strahlen auf einer die Geometrie umschließenden Fläche außerhalb des Raumes definiert (Abb. 1.19). Die Verteilung der Anfangspositionen und Richtungen erfolgt als Zufallsverteilung.

Bei der Strahlverfolgung treffen nun viele der von der Quelle ausgehenden Strahlen im ersten Berechnungsschritt auf die Außenflächen des Raumes, ohne das Fenster zu erreichen oder verfehlen die Raumelemente. In großen Geometriemodellen erreichen viele Strahlen Regionen, die für den Lichttransport zum Zielpunkt unbedeutend sind. Dadurch wird ein großer Teil der Rechenzeit für Strahlen aufgewendet, die keinen Beitrag zur Berechnung der Aufgabenstellung liefern. Je größer das geometrische Modell

ist, desto geringer wird die Wahrscheinlichkeit, daß ein von der Quelle ausgehender Strahl den Zielpunkt erreichen. Für die Berechnung von Lichtverteilungen in geometrischen Räumen mit großen Aperturflächen und (in Raum und Richtung) ausgedehnten Lichtquellen kann die Methode des Backward Raytracing effizienter als die des Forward Raytracing eingesetzt werden, da so a priori nur Strahlengänge berechnet werden, die einem Pfad zum Zielpunkt entsprechen.

Verkleinern sich die Aperturflächen oder die Ausdehnung der Lichtquellen, so verringert sich bei zufälliger Verteilung der Strahlrichtungen die Wahrscheinlichkeit, eine Lichtquelle zu treffen. In diesem Fall müssen zusätzliche Suchkriterien definiert werden, um das Berechnungsverfahren effizienter zu machen.

Beispiel 2: Berechnung optischer Systeme mit spiegelnd reflektierenden Flächen

Eine grundlegend andersartige Aufgabenstellung stellt die Berechnung der Transmission durch eine spiegelnd reflektierende Lamelle bei gerichtetem Strahleneinfall dar. Hier wird eine Quelle angenommen, die räumlich begrenzt ist und stark gerichtet ausstrahlt. Die Zielfläche ist hingegen ein ausgedehnter Bereich

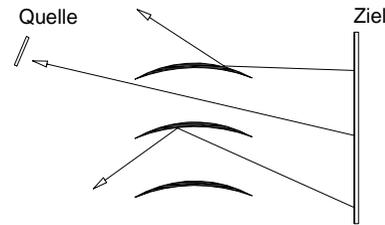


Abb.1 20: Backward-Raytracing durch eine spiegelnde Lamelle

hinter der Lamelle. Die beim Backward Raytracing von der Zielfläche ausgehenden Strahlen werden hier teilweise umgelenkt und verfehlen die Quelle oder erreichen sie unter Winkeln, in denen keine Strahlungsemission von der Quelle aus erfolgt. Dadurch werden viele Pfade berechnet, die für den Strahlungstransport unbedeutend sind. Bei spiegelnder Reflexion kann ein großer Anteil der transportierten Energie auf komplizierten Pfaden von der Quelle zum Ziel gelangen. Es ist daher auch durch die Definition von Suchkriterien kaum möglich, diese Strahlengänge rückwärts zu finden.

Durch Forward-Raytracing werden in diesem Fall hingegen nur Strahlen von der Quelle aus verfolgt, die innerhalb des Ausstrahlungsbereiches der Quelle liegen und deren Pfad durch die Lamellengeometrie dem Strahlungstransportweg entspricht. Dadurch ist die Erfolgsquote der Strahlen, die einen tatsächlichen Transportweg zwischen Quelle und

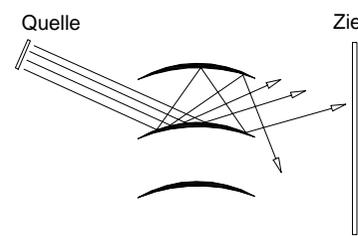


Abb. 1. 21: Forward-Raytracing durch eine spiegelnd reflektierende Lamelle

Ziel finden, wesentlich höher.

Raytracing-Aufgabenstellungen zu Tageslichtberechnung stellen häufig Grenzfälle zwischen den beschriebenen Szenarien (z.B. Räume mit kleinen Aperturen) oder Kombinationen aus diesen (z.B. Jalousien in den Fenstern) dar. In diesem Fall erscheint eine Kombination der Methoden sinnvoll. Die Kombinationsmöglichkeiten der Methoden werden in Abschnitt 1.11.2 näher erläutert.

### 1.11.1 Materialmodelle

Bei jedem Auftreffen eines Strahles auf eine Fläche müssen die reflektierten und transmittierten Anteile und Richtungskomponenten der weiterlaufenden Strahlen berechnet werden. Hierzu muß ein mathematisches Modell zur Verfügung stehen, das die Materialeigenschaften beschreibt. Diese mathematischen

Funktionen werden allgemein als BSDF (Bidirectional Scatter Distribution Function) bezeichnet. Für opake Flächen wird auch der Begriff BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Function) und für transmittierende Flächen BTDF (Bidirectional Transmission Distribution Function) verwendet. Diese sind jeweils über dem gesamten zweidimensionalen Ein- und Ausfallwinkelraum definiert. Ward faßt die BRDF und die BTDF verallgemeinernd in der BRTDF (Bidirectional Reflection and Transmission Distribution Function) zusammen[WS97].

In der Computergrafik und auch für lichttechnische Berechnungen werden aufgrund der hohen Anzahl der zu berechnenden Strahlen und des damit verbundenen Rechenaufwandes häufig sehr einfache mathematische Modelle zur Beschreibung der Materialeigenschaften verwendet. Die einfachsten Modelle gerichteter und diffuser Reflexion werden im folgenden kurz erläutert.

#### Spiegelnde Reflexion

Die spiegelnde Reflexion erfolgt ohne Richtungsstreuung. Einfallender und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene. Die Winkelbeziehung zwischen einfallendem und reflektiertem Strahl ist idealerweise durch die Beziehung

Einfallswinkel = Ausfallswinkel

gegeben, der Reflexionsgrad ist im einfachsten Fall konstant. Die mathematische Formulierung der BRDF ist in diesem Fall durch eine sogenannte  $\delta$ -Distribution gegeben, die eine Singularität in der Richtungsverteilung beschreibt [AB95].

### Lambertsch diffuse Reflexion

Die diffuse Reflexion erfolgt gleichmäßig in den gesamten Halbraum ohne Vorzugsrichtung. Im einfachsten Fall ist auch hier der Reflexionsgrad unabhängig vom Einfallswinkel des Strahles. Dieser Fall wird als Lambertsche Reflexion bezeichnet. Beim Raytracing werden zur Berechnung diffuser Reflexionen mathematische Zufallsverteilungsmodelle verwendet. Trifft ein Strahl auf eine diffus streuende Fläche, so werden ein oder mehrere neue Strahlen berechnet, deren Richtungskomponenten durch einen Zufallsalgorithmus bestimmt werden (Monte-Carlo-Raytracing).

Für detaillierte BRDF-Modelle, die auch nicht-isotrope Streuung berücksichtigen, werden häufig aus der Streutheorie hergeleitete Funktionen verwendet [Nay91], [TS67]. Die Einbindung in Raytracingberechnungen erfolgt häufig über Gewichtungsfunktionen, die zur Bevorzugung

bestimmter Winkelbereiche bei der Festlegung der reflektierten Strahlrichtung führen.

### 1.11.2 Einbindung lichtlenkender Elemente in Tageslichtberechnungen

Während die Berechnung der Tageslichtverteilung in umfangreichen und komplexen Raumgeometrien heute mit verschiedenen Programmen möglich ist und die Berechnungszeiten durch die Computerentwicklung drastisch reduziert werden konnten, stellt die Einbindung spezieller, lichtlenkender Elemente eine Problemstellung dar, die noch durch kein Programm zufriedenstellend gelöst wird. Die Problematik dieser Berechnungsaufgabe soll anhand der folgend dargestellten Ansätze verdeutlicht werden:

#### Ansatz 1: Forward-Raytracing mit geometrischem Modell

Das lichtlenkende Element wird in Form eines geometrischen Modelles eingebunden. Die Berechnung erfolgt durch Forward Raytracing, da durch Backward-Raytracing die Pfade zu den Quellen nicht gefunden werden. Diese Methode hat den bereits erwähnten Nachteil, daß

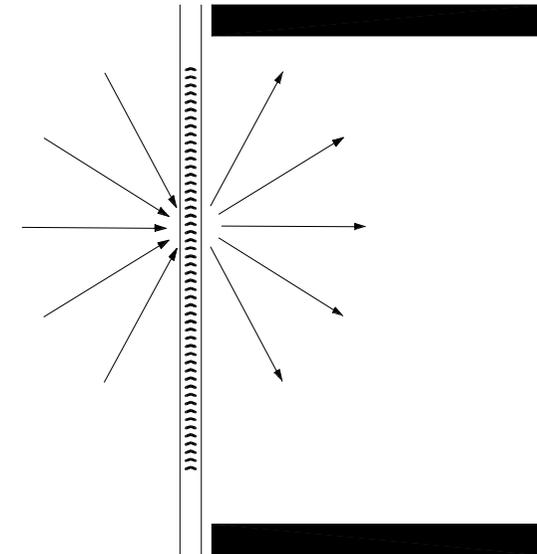
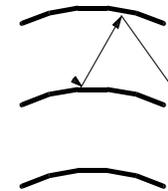


Abb. 1.22: Forward Raytracing mit Einbindung eines geometrischen Modelles

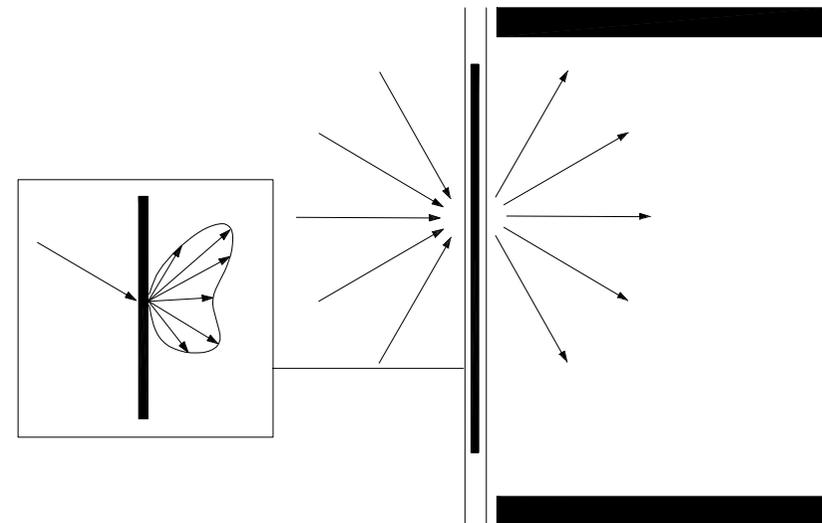


Abb.1.23: Forward-Raytracing mit BTDF-Einbindung

häufig nur ein geringer Teil der erzeugten Strahlen die transmittierenden Fassadenflächen trifft. Außerdem sind die lichtumlenkenden Strukturen häufig um einige Größenordnungen kleiner als die Ausdehnung des Raumes. Daher müssen sehr viele Strahlen erzeugt werden, um die Struktureigenschaften des lichtlenkenden Elementes richtig abzubilden.

Ein weiterer Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, daß die Geometrie gekrümmter Flächen in den meisten lichttechnischen Berechnungsprogrammen in plane Einzelsegmente zerlegt werden muß. Um eine hinreichende Genauigkeit zu erreichen, muß eine sehr große Anzahl von Segmenten verwendet werden. Die Segmentierung führt bei paralleler Einstrahlung (direktes Sonnenlicht) zu einer Diskretisierung der Raumrichtungen, in denen Transmission erfolgt.

### Ansatz 2: Forward-Raytracing mit BTDF-Modell

Die durch die Segmentierung und den Maßstabssprung auftretenden Probleme können vermieden werden, indem an Stelle des geometrischen Modelles ein Materialmodell des Lichtlenkelementes verwendet wird, dessen BRTF die Transmissionseigenschaften des Elementes

beschreibt. Die Eigenschaften müssen in diesem Fall im voraus durch Messungen bestimmt oder mithilfe geeigneter Verfahren berechnet und in Form einer Datenstruktur oder einer mathematischen Beschreibung aufbereitet werden. Hierfür sind verschiedene Verfahren bekannt. Während für eine vollständige Beschreibung der BTDF durch Einzelwerte sehr große Datenmengen benötigt werden, besteht bei einer mathematischen Modellierung die Schwierigkeit darin, geeignete Stützfunktionen zu finden, durch die sich die Transmissionsverteilung hinreichend genau annähern läßt.

Ein geeignetes Verfahren ist die Verwendung sogenannter wavelets. Die Implementierung eines solchen Verfahrens in das Programm Radiance ist Bestandteil eines laufenden Forschungsprojektes und wird zur Zeit am Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg bearbeitet.

### Ansatz 3: Kombiniertes Forward-Backward-Raytracing mit externem Forward-Raytracer

Ein weitere Möglichkeit besteht darin, die Berechnung auf zwei unterschiedliche Programme zu verteilen, wobei das erste Programm die Raumgeometrie beinhaltet und das zweite die Beschreibung des Lichtlenksystems. Der erste Berech-

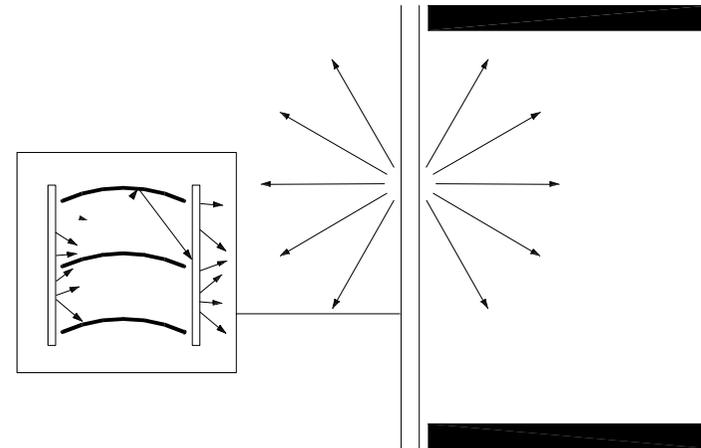


Abb. 1.24: Kombiniertes Forward-Backward-Raytracing mit geometrischem Modell

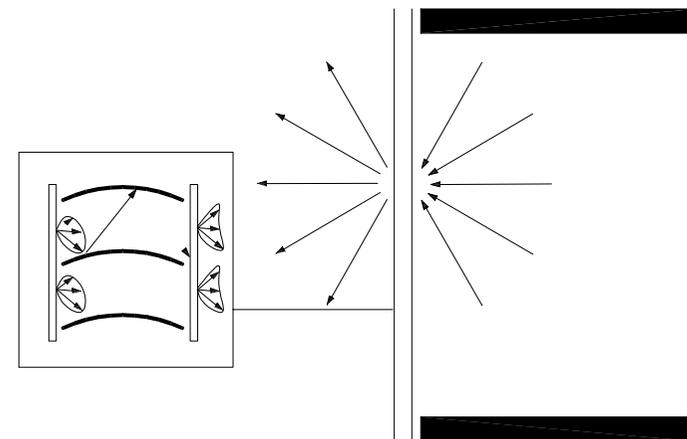


Abb. 1.25: Backward-Raytracing mit geometrischem Modell und externem Forward-Raytracer

nungsschritt ist im Raummodell zunächst nur für die Außenflächen der transmittierenden Fassadenelemente durchzuführen. Die Berechnung der auf die Flächen einfallenden Strahlen erfolgt durch Backward Raytracing, wodurch die Berechnung von Strahlengängen, die nicht von den außenliegenden Quellen in den Innenraum führen, vermieden wird. Die Daten der berechneten Strahlen werden an eine externe Forward-Raytracing - Software übergeben, die nun die Berechnung durch ein separates geometrisches Modell durchführt. Die resultierenden Strahlen-Daten werden nun wieder an das erste Programm übergeben. Die Berechnung muß nun mit einem weiteren Forward-Raytracing-Schritt fortgeführt werden. Der Ansatz hat den Vorteil, daß zur Berechnung des Lichtlenksystems eine spezielle Forward-Raytracing-Software verwendet werden kann, die für diese Art von Berechnungen optimiert ist.

#### **Ansatz 4: Backward-Raytracing mit externem Forward-Raytracer**

Diese Methode stellt eine Vereinfachung des in Ansatz 3 beschriebenen Verfahrens dar.

Unter der Voraussetzung, daß die Einstrahlungsverteilung auf der Außenseite des Fassadenelementes und die Ausstrahlung auf der Innen-

seite homogen sind, kann statt der gesamten Strahlendaten nur die Einstrahlungs- bzw. Ausstrahlungsverteilung für einen Punkt der Fläche zwischen den Programmen ausgetauscht werden. Variiert die Verteilung auf der Fläche nur geringfügig, so kann eine geeignete Verteilung durch Mittelung über mehrere Punkte der Fläche berechnet werden. Unter der Voraussetzung, daß die extern durch Forward-Raytracing berechnete Ausstrahlungsverteilung keine Singularitäten aufweist, können beide im Raummodell durchzuführenden Berechnungsschritte durch Backwardraytracing erfolgen. Dadurch ist keine direkte Kombination von Backward- und Forward-Raytracing innerhalb eines Simulationsprogrammes erforderlich. Hierdurch wird die Datenübergabe zwischen den einzelnen Berechnungsschritten erheblich vereinfacht.

#### **1.11.3 Das Programmpaket Radiance**

Das am Lawrence Berkeley National Laboratory (LNBL) von G. Ward in den Achtziger Jahren entwickelte Backward-Raytracing-Softwarepaket Radiance besteht aus einer Anzahl von Programmen zur Erstellung von Raytracing-Szenarien, zur Berechnung von Lichtverteilungen sowie zur Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse. Die Unix-

Version des Programmes kann inklusive des Source-Codes als Shareware über einen Server des LNBL aus dem Internet geladen werden.

Der dem Berechnungsteil zugrundeliegende Algorithmus basiert auf einem physikalischen Strahlungstransportmodell. Die Berechnung erfolgt in zwei getrennten Schritten für direkte und indirekte Strahlungsanteile:

In der Direktberechnung werden Strahlen vom Zielpunkt zu den Quellen und Strahlen, die durch spiegelnde Reflexion vom Zielpunkt zur Quelle gelangen, berechnet. Hierzu werden die Lichtquellen in einer Liste verwaltet und während der Berechnung in der Reihenfolge ihrer potentiellen Beiträge durch Suchstrahlen auf ihre Sichtbarkeit vom Zielpunkt aus überprüft. Dieses Verfahren wird auch als shadow testing bezeichnet. Ist die Anzahl der Quellen sehr hoch, so kann zur Reduzierung des Rechenaufwandes ein Abbruchkriterium definiert werden, damit sehr schwache oder sehr weit entfernte Lichtquellen nicht getestet werden. In die Direktberechnung können auch nicht isotrope Reflexionsmodelle integriert werden.

Die Indirektberechnung basiert auf einem vereinfachtem Materialmodell, in dem alle opaken Flächen als lambertsch streuend behandelt werden. In diesem Berechnungsteil werden

nur spezielle Diffuslichtquellen mit lambertscher Ausstrahlung berücksichtigt. Die Strahlrichtungen bei diffuser Reflexion an einer Oberfläche werden durch ein gerichtetes Monte-Carlo-Verfahren (Stratified Monte Carlo) berechnet. Die Beschreibung des bedeckten Himmels erfolgt als Diffuslichtquelle.

Um auch in Räumen mit kleinen Aperturen die Lichtverteilung hinreichend genau zu berechnen, kann das Prinzip der Definition sekundären Lichtquellen angewendet werden. Hierfür ist ein zusätzlicher Vorberechnungsschritt erforderlich. Zunächst wird die Einstrahlungsverteilung auf der Außenfläche des Fensters berechnet und daraus unter Berücksichtigung der Transmissions-eigenschaften des Fenstermaterials die Lichtverteilung auf der Innenseite berechnet. In der Hauptberechnung wird das Fenster nun als Lichtquelle definiert. Dies entspricht im Prinzip dem in Abschnitt 1.11.2 in Ansatz 4 beschriebenen Verfahren, mit dem Unterschied, das hier die Ausstrahlungsverteilung aus der Einstrahlungsverteilung analytisch bestimmt wird.

Eine ausführliche Beschreibung des Programmpaketes und der Anwendungsmöglichkeiten ist in [WS97] dokumentiert. Für das Programm Radiance existieren verschiedene Interface-Anbindungen an Auto-cad14 bzw. AD2 von Autodesk, bei-

spielsweise die Programme Desktop Radiance, Sieview und Rayfront.

#### **1.11.4 Die Forward-Raytracing-Software ASAP**

Das Programm ASAP (Advanced System Analysis Programm) ist ein kommerzielles Produkt der Fa. Breault Research aus Tucson, Arizona. Es wurde zur Analyse komplexer optischer Systeme durch Forward-Raytracing entwickelt. Das Programm ermöglicht die Erstellung beliebiger axialer und nichtaxialer geometrischer Strukturen. Die Erstellung der Geometrie und der Lichtquellen sowie die Festlegung des Berechnungsablaufes erfolgt durch eine programmeigene Skriptsprache. Gekrümmte Flächen können dabei durch mathematische Funktionen ohne Segmentierung in plane Einzelelemente (Polygonisierung) definiert werden.

Zur Erstellung des geometrischen Modelles können Daten aus CAD-Programmen importiert werden. Die Definition von Quellen erfolgt durch Festlegung von Rastern oder durch Angabe einzelner Strahlenpunkte im Orts-Richtungsraum. Durch Verwendung analytischer Funktionsmodelle oder durch Interpolation zweidimensionaler Datensätze kann eine Anpassung der Orts- oder Richtungsverteilung (Apodization) durch-

geführt werden. Die Einbindung komplexer BRTDF-Modelle erfolgt mit derselben Methode. Innerhalb des Programmes steht eine umfangreiche Werkzeugpalette zur Analyse und graphischen Darstellung von Daten zur Verfügung. Der Export zu anderen Programmen erfolgt in Form von Textdateien.

## 2 Sonnenschutz und Tageslichtnutzung

Die gleichzeitige Gewährleistung des Sonnenschutzes und einer ausreichenden Tageslichtversorgung bildet den thematischen Mittelpunkt dieses Kapitels. Hierzu werden zunächst die Möglichkeiten und Grenzen, Strahlung durch Selektionsprozesse zu filtern, beschrieben. Die Geometrieigenschaften und die sich hieraus ergebende Symmetrien von Sonnenschutzsystemen sowie das Nutzungspotential des Diffuslichtanteiles bei richtungselektivem Sonnenschutz wird anschließend dargestellt. Exemplarisch wird die Funktionsweise opaker Sonnenschutzlamellen und retroreflektierender Prismenplatten untersucht. Abschließend wird der Aspekt der Lichtumlenkung behandelt.

Transparente Bauteile müssen in der Fassade eine Vielzahl von Funktionen erfüllen, die sich aus den veränderlichen Außenbedingungen und den Nutzeranforderungen im Inneren, teilweise auch aus konstruktiven und gestalterischen Aspekten der Fassade ergeben. Der Schutz vor solarer Strahlung und die Versorgung von Räumen mit Tageslicht stellen in diesem Wirkungszusammenhang Teilaspekte dar, die eng miteinander verknüpft sind. Gleichzeitig weisen diese Funktionen Abhängigkeiten zu anderen Anforderungen wie dem Sichtbezug nach außen oder dem Blendschutz auf.

derungen wie dem Sichtbezug nach außen oder dem Blendschutz auf.

Im Zusammenhang mit heutigen Bauaufgaben ergeben sich durch die Vielzahl veränderlicher Faktoren und deren Wechselwirkungen häufig sehr differenzierte Anforderungsprofile für die solare Strahlungstransmission durch die Gebäudehülle. Auch innerhalb eines Gebäudes können sich durch unterschiedliche Nutzung, Flächenorientierung oder Aperturen große Unterschiede im Anforderungsprofil ergeben. Die durch den Nutzer definierten Anforderungen an den thermischen und lichttechnischen Komfort stehen häufig im Vordergrund, sind aber nicht unbedingt deckungsgleich zu den Anforderungen, die sich aus der energetischen Optimierung des Gebäudes ergeben.

Insbesondere die gleichzeitige Gewährleistung des Überhitzungs- und Blendschutzes einerseits und des kontrollierten Tageslichteintrages zur Beleuchtung andererseits stellen zueinander konträr wirkende Aufgabenstellungen dar. Die Wirkungsweise des Sonnenschutzes ist besonders im Bereich der Büronutzung und bei Fassaden mit hohem Verglasungsanteil ein wesentlicher Faktor für den Energiehaushalt von Gebäuden, da ein erhöhter Kühlbedarf sich wesentlich stärker auf den Energieverbrauch auswirkt als ein erhöhter Wärmebe-

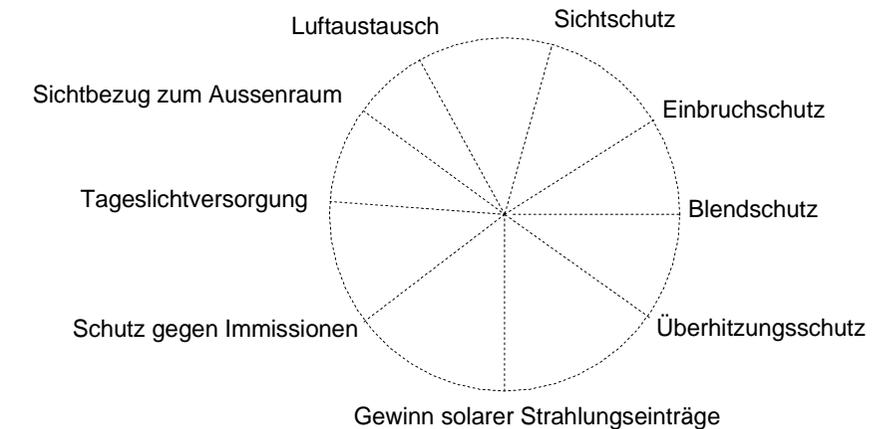


Abb. 2.1: Funktionen transparenter Bauteile in der Fassade

darf gleicher Größenordnung.

Bereits seit einigen Jahrzehnten werden entsprechende Studien zur Wirkungsweise und Wirtschaftlichkeit von Sonnenschutzsystemen durchgeführt [TBR84]. Zur Vermeidung von Blendung müssen Jalousie- oder Rollosysteme häufig vollständig geschlossen werden, sodaß weder das Diffuslicht noch ein Teil des Direktlichtes zur Beleuchtung genutzt werden kann. Hier stellt sich die Frage, warum gleichzeitiger Sonnenschutz und eine ausreichende Tageslichtversorgung mit konventionellen Techniken so schwer realisierbar erscheint.

Die Ursache hierfür ist unter anderem auch darin zu suchen, daß

heute üblicherweise eingesetzte Sonnenschutzsysteme zwar häufig mit einem hohem Aufwand an Steuerung und Regelungstechnik installiert werden, die Sonnenschutzelemente selbst jedoch in der Regel aus einfachen Metall- oder Kunststofflamellen bestehen. Dadurch werden die Möglichkeiten, den Strahlungseintrag ganz oder teilweise durch die Materialeigenschaften der verwendeten Elemente selbst zu regulieren, nicht ausgeschöpft.

Die technische Lösung dieses Konfliktes wird heute häufig in der Kombination verschiedener Systeme gesucht. Hierdurch vergrößert sich die Variationsbreite möglicher Einstellungen, es steigen aber auch die Gesamtkosten der Fassade. Mögli-

che Kombinationen sind beispielsweise ein außenliegender Sonnenschutz und ein innenliegender Blendenschutz, oder ein Sonnenschutzelement im Fensterbereich und ein Element zur Lichtumlenkung oder Lichtstreuung im Überkopfbereich. Auf die Wirkung lichtumlenkender Elemente wird in Abschnitt 2.7. gesondert eingegangen.

## 2.1 Wirkungsweise und Selektivität von Sonnenschutzsystemen

Im Folgenden werden die unterschiedlichen physikalischen Prinzipien zur Steuerung des Strahlungstransportes durch die Fassade mittels Selektionsprozessen betrachtet. Um das natürliche Strahlungsangebot optimal im Sinne einer Maximierung möglicher thermischer und lichttechnischer Gewinne und einer Minimierung möglicher thermischer Lasten zu nutzen, werden zur Regulierung des Licht- und Strahlungseintrages Systeme benötigt, die an die hohe Dynamik der veränderlichen Außenbedingungen im Sinne der Nutzerbedürfnisse angepaßt werden können. Hierzu stehen folgende Selektionsmechanismen zur Verfügung:

- spektrale Selektivität
- zeitliche Selektivität

- Richtungsselektivität

### 2.1.1 Spektrale Selektivität

Spektral selektive Materialien werden für den Sonnenschutz in Form von Sonnenschutzgläsern oder Sonnenschutzfolien eingesetzt. Die als Wärmestrahlung anfallenden, nicht sichtbaren Teile des solaren Spektrums werden durch die Beschichtung der Folie oder des Glases reflektiert oder absorbiert, während Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich zu einem bestimmten Grad transmittiert wird. Die Eigenschaft, im visuellen Spektralbereich anteilig mehr Strahlung zu transmittieren als im Mittel über den gesamten Spektralbereich unter Einbeziehung des sekundären Wärmetransportes, wird durch die Selektivitätskennzahl  $S$  beschrieben, die als Quotient der Lichttransmission  $\tau_v$  und des Gesamtenergiedurchlassgrades  $g$  definiert ist:

$$S = \frac{\tau_{vis}}{g} \quad (2.1)$$

Aufgrund des hohen Strahlungsanteils im visuellen Spektralbereich wird durch Reduzierung des  $g$ -Wertes ab einer Größenordnung von ca. 0.5 zwangsläufig auch der Lichteintrag reduziert [PI97]. Dadurch sind nicht beliebig hohe Selektivitätskenn-

zahlen erreichbar. Typische Werte für Sonnenschutzverglasungen liegen bei einem  $g$ -Wert von 0.3 bei einer Lichttransmission von 0.6 und damit einer Selektivitätskennzahl von 2. Eine Trennung zwischen Diffus- und Direktstrahlung ist durch spektral selektiv wirkende Materialien nicht zu erreichen.

### 2.1.2 Zeitliche Selektivität

Unter zeitlicher Selektivität wird in diesem Zusammenhang die tages- oder jahreszeitliche Veränderlichkeit von Sonnenschutzelementen verstanden. Neben der mechanischen Verstellbarkeit ist die zeitliche Anpassung auch durch die Veränderung der Material- oder Oberflächeneigenschaften möglich. Schaltbare oder selbstschaltende Verglasungen sind Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte und werden bereits in ersten Pilotprojekten eingesetzt. Hierzu zählen unter anderem thermochrome und thermotrope Schichten sowie elektrochrome und gasochrome Verglasungen. Einen Überblick zum Entwicklungsstand und den technischen Eigenschaften schaltbarer Schichten geben [PI97], [Wi00].

### 2.1.3 Richtungsselektivität

Mit dem Einsatz richtungsselektiver Materialien wird das Ziel einer Trennung von Diffus- und Direktanteilen der solaren Strahlung verfolgt. Dabei erfolgt die Strahlungsselektion selten ausschließlich unter thermischen Gesichtspunkten.

In vielen Fällen wirken sich direkte Solarstrahlungseinträge auch aus lichttechnischer Hinsicht störend aus, während Diffuslichteinträge häufig erwünscht sind.

Die Effizienz richtungsselektiver Elemente ist im wesentlichen davon abhängig, wie gut der Transmissionsbereich des Systems an die Form der Strahlungsquelle, also in diesem Fall der möglichen Sonnenpositionen, angepaßt werden kann, und wie scharf der Übergangsbereich zwischen Transmission und Reflexion ist.

Richtungsselektive Systeme können stationär oder zeitlich veränderlich ausgelegt werden. Prinzipiell haben auch konventionelle Jalousien und bewegliche Lamellensysteme richtungsselektive Eigenschaften, die zeitlich veränderbar sind. Die richtungsselektive Trennschärfe von Lamellensystemen mit diffus reflektierender Oberfläche ist jedoch gering.

Bei kompletten Fassadensystemen liegen in der Regel richtungs- und spektral selektive Eigenschaften sowie Aspekte der zeitlichen Veränderung durch die Kombination von Funktionsgläsern und Sonnenschutzsystemen vor. Zum Verständnis der Strahlungstransportprozesse ist daher besonders bei mehrschaligen Fassaden eine genaue Analyse der Schichtenfolge und die Kenntnis der selektiven Eigenschaften notwendig.

Im Bereich der beweglichen Sonnenschutzsysteme gibt es heute von der einfachen Innenjalousie bis zu zentral gesteuerten, vollautomatischen Sonnenschutzanlagen ein weites Spektrum verschiedenster Systemlösungen.

## 2.2 Geometrie richtungsselektiver Systeme

### 2.2.1 Geometrieebenen

Die bauliche Umsetzung von Sonnenschutzmaßnahmen kann in sehr unterschiedlichen Maßstäben erfolgen. Diese reichen von der Ausbildung eines konstruktiven Sonnenschutzes (Brise solair, Dachauskragung, Vordach) über den Einsatz von starren oder beweglichen Verschattungselementen in der Fassade

bis zur Integration von mikrostrukturierten Elementen im Scheibenzwischenraum oder dem Aufbringen von Funktionsschichten auf Glasoberflächen.

Die resultierende richtungsabhängige Wirkung eines Systems ergibt sich häufig erst aus der konkreten Einbausituation durch Überlagerung verschiedener geometrischer Faktoren. Hierzu können die Ausrichtung des Gesamtsystems zur Fassade, die Positionierung einzelner Elemente (z.B. verstellbarer Lamellen) zur Systemebene und richtungsselektive Material- und Mikrostruktureffekte oder auch die spezielle Formung einzelner Lamellen zählen (Abb. 2.2). Die Abhängigkeit von der Einbausituation und dem Einstellwinkel ist bei spiegelnd reflektierenden oder lichtlenkenden Systemen stärker ausgeprägt als bei Systemen mit diffusen Oberflächen.

### 2.2.2 Struktur und Materialeigenschaften

Im folgenden Abschnitt soll anhand von Symmetrieüberlegungen geklärt werden, wie sich die Überlagerung von Element- und Systemeigenschaften auf die Richtungsabhängigkeit der Transmission und Reflexion auswirkt. Verkürzend wird hier zunächst nur die Reflexion betrachtet, die Aussagen sind jedoch auf den Fall der Transmission übertragbar.

Der geometrisch einfachste Fall des Sonnenschutzes ist durch ein planes Element (z.B. einem Sonnenschutzrollo) in der Fassadenebene mit richtungsunabhängigem Reflexionswert gegeben. Die meisten Materialien weisen jedoch zumindest eine geringfügige Richtungsabhängigkeit der Reflexion auf.

Besteht der Sonnenschutz aus Einzелеlementen, so überlagern sich die Materialeigenschaften mit der durch die geometrische Anordnung der Elemente gegebenen Symmetrie. Hierbei werden rotationsinvariante, translationsinvariante und zweiachsig Geometrien unterschieden. Für diese Geometrien ergeben sich folgende Symmetriefälle:

- rotationsinvariant
- linear-(achsen)symmetrisch
- linear-asyymmetrisch
- zweiachsig symmetrisch-symmetrisch
- zweiachsig symmetrisch-asyymmetrisch
- zweiachsig asyymmetrisch

Ist durch die geometrische Anordnung oder die Struktur der Elemente einer der genannten Symmetriefälle vorgegeben, so bildet sich dieser auch in der richtungsabhängigen Wirkung

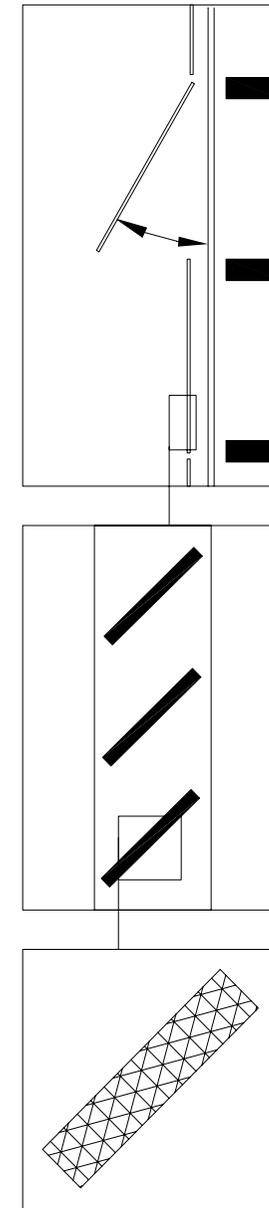


Abb. 2.2: Geometrieebenen von Sonnenschutzsystemen: Einsatzebene (rel. zur Fassade), Systemebene, Elementebene

ab, wenn die Materialeigenschaften der Strukturen lambertsch diffus oder ideal spiegelnd reflektierend sind (s. Abschnitt 1.11.1).

Für rotationsinvariante Strukturen kann in diesem Fall die Winkelabhängigkeit der Transmission und Reflexion in eindimensionaler Form in Abhängigkeit vom Höhenwinkel  $\theta$  angegeben werden. Für lineare Strukturen kann die Winkelabhängigkeit auf den in die Profilschnittebene (xz-Ebene in Abb. 2.3) projizierten Höhenwinkel  $\theta_p$ , der im folgenden auch als Profilwinkel bezeichnet wird, dargestellt werden, da der Transmissionsgrad bzw. Reflexionsgrad invariant zu dem in die Längsschnittebene projizierten Höhenwinkel  $\theta_l$  ist. An dieser Stelle sei erwähnt, daß die Profilwinkeldarstellung nicht der in Abschnitt 1.7 gezeigten Darstellung des Winkelraumes in kartesischen Koordinaten entspricht. Der Unterschied wird in Kapitel 2.5 anhand eines Beispiels verdeutlicht.

Reale Materialien weisen auch näherungsweise nur selten die Eigenschaft winkelunabhängiger, ideal spiegelnder Reflexion oder lambertscher Streuung auf. Winkelabhängigkeiten entstehen hauptsächlich durch Mikrostrukturierung und Oberflächenrauheit und können folgende Effekte verursachen:

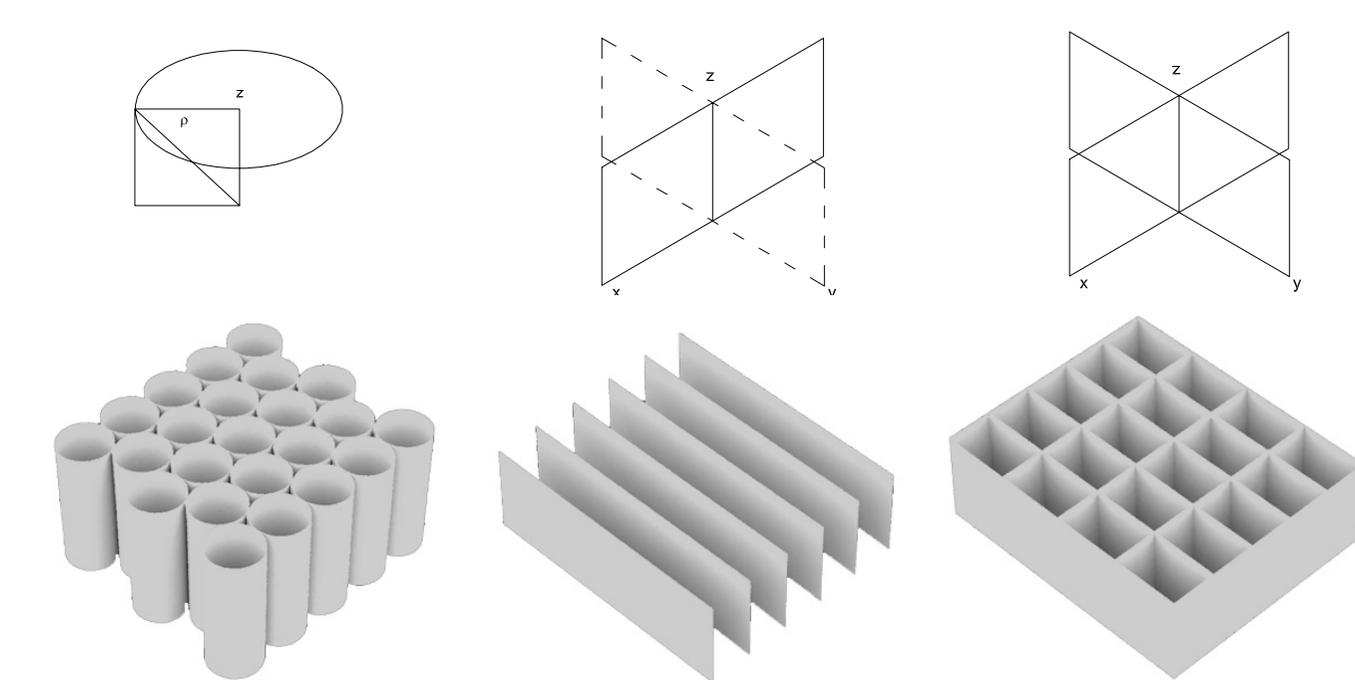


Abb. 2.3: Grundgeometrien von Sonnenschutzstrukturen: Rotationsinvariant (l.), linear (m.), zweiachsig (r.)

- Die Zu- oder Abnahme des Reflexionsgrades in Abhängigkeit vom Einfallswinkel zur Fläche
- Die Veränderung der Streuerverteilung für unterschiedliche Winkel zur Flächennormalen
- Die Abhängigkeit des Reflexionsgrades und der Steuerverteilung vom Azimutwinkel, beispielsweise durch fertigungstechnisch bedingte Texturen (z.B. bei gerollten Blechen).

Bei rotationssymmetrischen Strukturen bleibt die Symmetrie der Reflexionscharakteristik durch die Überlagerung der Materialeigenschaften erhalten. Dies gilt auch für materialbedingte Effekte, die nicht rotationssymmetrisch zur Normalenachse anisotrope Streuung. Durch die Erhaltung der Rotationssymmetrie kann der Reflexions- und Transmissionsgrad eindimensional in Abhängigkeit vom Höhenwinkel  $\theta$  beschrieben werden.

Lineare Systeme gewinnen durch die Überlagerung winkelabhängiger Materialeigenschaften einen Freiheitsgrad, wodurch die Winkelabhängigkeit der Reflexion und Transmission zu einem zweidimensionalen Datensatz erweitert wird. Die Symmetrie zu den Hauptachsen bleibt bei Rotationssymmetrie der Materialeigenschaften oder, für texturbedingte Effekte, bei Ausrichtung zu den Hauptachsen) erhalten. Sonnenschutzlamellen sind selten exakt horizontal zur Systemebene ausgerichtet und weisen häufig eine einseitige Profilkrümmung auf. Dadurch

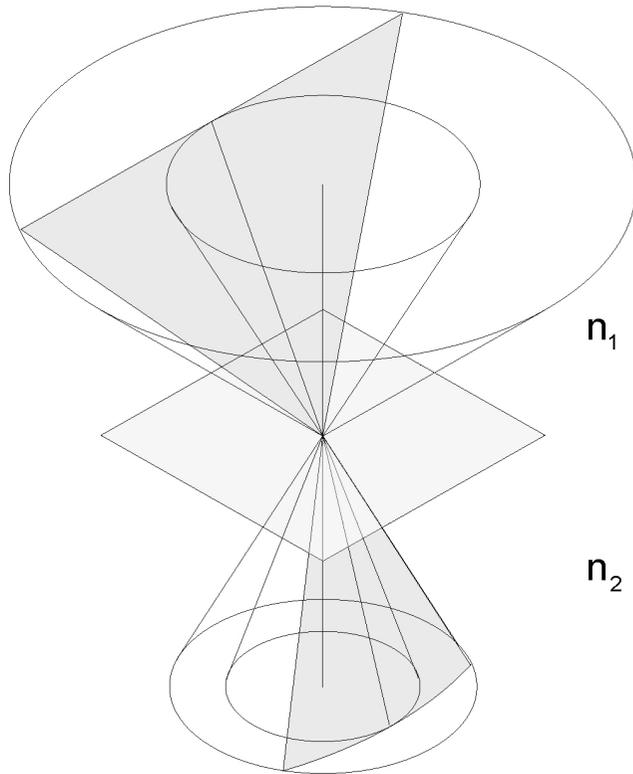


Abb 2.4: Strahlengang beim Eintritt in ein dielektrisches Medium ( $n_2 > n_1$ )

ergibt sich der linear asymmetrische Fall.

Die Eigenschaften zweiachsiger Strukturen sind grundsätzlich zweidimensional zu beschreiben. In Abhängigkeit von der Symmetrie wird zur vollständigen Beschreibung der Achterraum, der Viertelraum oder der gesamte Halbraum benötigt.

Eine weitere Richtungsabhängigkeit ergibt sich bei der Lichttransmission durch strukturierte transparente

Materialien (Glas oder Kunststoffe).

Beim Eintreten eines Lichtstrahles von einem Medium mit Brechzahl  $n_1$  in ein Medium höherer Brechzahl  $n_2$  erfolgt eine Umlenkung zur Flächennormalen. Der Zusammenhang zwischen äußerem Winkel  $\theta_1$  und innerem Winkel  $\theta_2$  der Strahlrichtung zu Flächennormalen wird durch das Snellius'sche Brechungsgesetz beschrieben:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

Durch die Umlenkung liegen Strahlen, die innerhalb einer Ebene unter verschiedenen Winkeln zur Normalenachse in das dielektrische Medium eintreten, innerhalb des Mediums nicht mehr in einer Ebene (Abb.2.4).

Treten die Strahlen durch eine planparallele zweite Fläche aus, so erhalten sie wieder ihre ursprünglichen Richtungskomponenten. Ist die zweite Fläche jedoch beispielsweise mit einer linearen Struktur versehen, so ist die Winkelverteilung der Transmissionsverteilung nicht translationsinvariant, da die Struktur beim Austritt an verschiedenen Profilverpunkten durchlaufen wird.

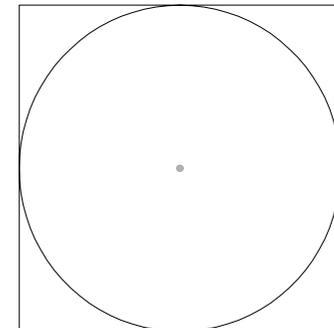
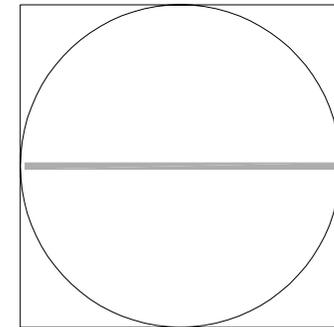
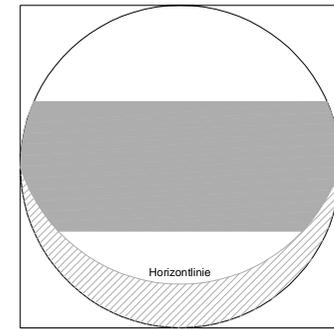


Abb.2.5 : Quellenstruktur für statische und nachgeführte Systeme als p-q-Diagramm nach [BRU96], oben: Statisch nach Süden in der Äquatorialebene ausgerichtet, mitte: Einachsiger nachgeführt horizontal O-W, unten: Zweiachsiger nachgeführt

### 2.3 Quellenstruktur der Sonne

Im Zusammenhang mit der Fragestellung, zu welchem Anteil diffuses Tageslicht bei gleichzeitiger Vermeidung von Direkteinstrahlung durch einen winkelselektiven Sonnenschutz transmittiert und zur Beleuchtung genutzt werden kann, stellt sich die Frage nach der Größe des zur Gewährleistung des Sonnenschutzes auszublenzenden Winkelraumes. Diese Frage ist mit der Orientierung und den Nachführmöglichkeiten des Sonnenschutzes verknüpft.

Grundsätzlich ist zwischen unbeweglichen (oder stationären), einachsigen nachführbaren und zweiachsigen nachführbaren Systemen zu unterscheiden. Für bewegliche Systeme ist das nutzbare Diffuslichtpotential grundsätzlich wesentlich höher als für stationäre Systeme, da sich der auszublendende Himmelsausschnitt im systemfesten Bezugssystem extrem verringert.

Bei exakter einachsiger Nachführung und Ausrichtung zur Deklination ergibt sich ein zur Drehachse orthogonal verlaufendes Band. Die Breite des Bandes entspricht dabei mindestens dem Aperturwinkel der Sonne, unter Berücksichtigung der Circumsolarstrahlung erscheint jedoch eine Breite, die einem Halbwinkel von mindestens 5° entspricht, für einen wirksamen Sonnenschutz notwendig. Im Fall zweiachsiger Nachführung reduziert sich der auszublendende Winkelbereich auf einen Punkt mit dem Durchmesser der Sonnenscheibe. Während zweiachsige Nachführungen für Sonnenschutzsysteme sicher auch aufgrund des hierfür notwendigen hohen technischen Aufwandes bisher keine bautechnische Bedeutung haben, gilt der einachsige nachführbare Sonnenschutz heute in weiten Bereichen als technischer Standard. Stationäre Systeme werden aufgrund der starken Einschränkung anderer Funktionen vorzugsweise in schwer zugänglichen Fassadenbereichen

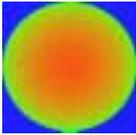
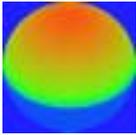
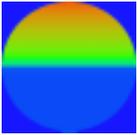
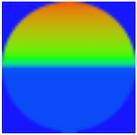
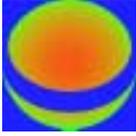
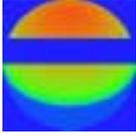
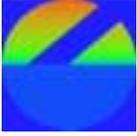
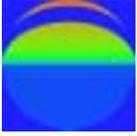
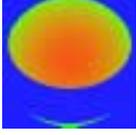
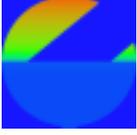
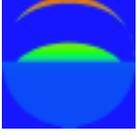
	Horizontal		50° geneigt Süd		Vertikal Ost/West		Vertikal Süd	
<b>unverschattet</b>	100%		75%		40%		40%	
<b>saisonal</b>	78%		51%		28%		25%	
<b>ganzjährig</b>	69%		34%		22%		9%	

Abb. 2.6: Relativer Diffuslichteintrag bei OCS-Verteilung und Ausblendung der Sonnenbahnen für unterschiedliche Orientierungen

oder in Dächern eingesetzt. Dabei steht planerisch häufig der sommerliche Überhitzungsschutz im Vordergrund.

#### 2.4 Stationärer Sonnenschutz

Dient der Einsatz eines stationären Sonnenschutzes ausschließlich der Funktion des sommerlichen Überhitzungsschutzes, so kann der auszu-

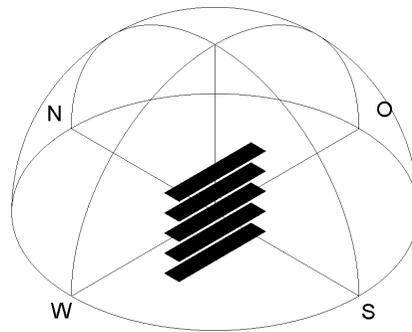
blendene Winkelbereich auf den Bereich der Sonnenbahnen in den Sommermonaten reduziert werden, wodurch sich das Potential für die Diffuslichtnutzung gegenüber einer ganzjährigen Verschattung erhöht. Diese Einschränkung kann bei Fassaden von Gebäuden mit Büronutzung beispielsweise auch durch Einsatz eines zusätzlichen innenliegenden in den Wintermonaten wirksamen Blendschutzes in Kauf genommen werden. Die erhöhten Wärme-

einträge innenliegender Systeme können in den Wintermonaten zudem teilweise thermisch genutzt werden.

Sowohl für den Fall saisonaler als auch für den Fall ganzjähriger Verschattung variiert das Potential nutzbarer Diffusstrahlung stark mit der Fassadenorientierung.

Zur Abschätzung des maximal erreichbaren Diffuslichteintrages sta-

tionärer Systeme bei bedecktem Himmel sind in Abb. 2.6 die mit dem OCS-Himmelsmodell (s. a. Abschnitt 1.10) gewichteten Flächenanteile für saisonale und ganzjährig wirksame Systeme unterschiedlicher Orientierung gegenübergestellt. Die Einstrahlung auf eine unverschattete horizontal ausgerichtete Fläche ist als Referenzgröße auf 100% gesetzt worden. Aufgrund der Helligkeitsverteilung des Himmels und der Horizontverschiebung nimmt das Nutzungspotential für (unverschattete) geneigte Flächen ab. Die Diffuslichteinstrahlung auf eine unverschattete, um den Breitengrad von  $50^\circ$  geneigte Fläche beträgt 75% und die Einstrahlung auf eine vertikale Fläche 40% des Referenzwertes.



Die Werte für saisonalen Sonnenschutz wurden für einen Verschattungszeitraum vom 21. März bis zum 21. September berechnet. Für vertikale Ost- und Südorientierung ergeben sich bei saisonaler Auslegung Werte gleicher Größenordnung, wobei die Richtung der Sonnenbahnen für den Einsatz horizontal oder vertikal ausgerichteter Sonnenschutzsysteme bei Ost- und Westorientierungen aufgrund der Verkippung ungünstiger als bei Südorientierung ist. Bei ganzjährigem Sonnenschutz bietet die Südorientierung aufgrund der ungünstigen Geometrieverhältnisse das geringste Potential für Diffuslichtnutzung.

## 2.5 Lamellensysteme

Im folgenden Abschnitt wird exemplarisch die lichttechnische Wirkung eines Lamellensystems betrachtet. Hierfür wurden folgende Parameter festgelegt:

Das Verhältnis der Lamellenbreite zum Lamellenabstand  $b/h$  beträgt 1.

Der Reflexionsgrad  $R$  der Lamellenoberfläche wird auf 50% festgelegt. Dies entspricht einem für Außenjalousien üblicherweise verwendeten

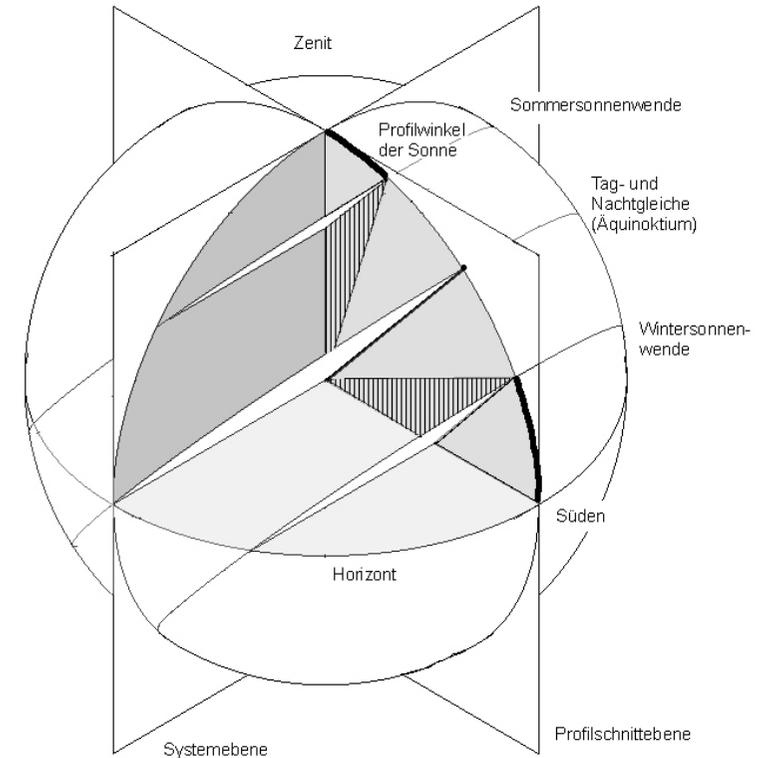


Abb. 2.7: Sonnenbahnen und Projektionsfläche des Profilwinkels für vertikale Südflächen

mittleren Grauwert (mattsilber) [Lan00].

Die Berechnungen wurden durch Strahlverfolgung unter der Annahme lambertsch diffuser Streuung an der Lamellenoberfläche durchgeführt.

### 2.5.1 Profilwinkel und Cut-Off-Winkel

In Abhängigkeit von den Lamellenparametern  $b$  und  $h$  und dem projizierten Einfallswinkel (Profilwinkel) der Strahlung lässt sich der Grenzwinkel bestimmen, für den Direktstrahlung nicht mehr gerichtet, sondern nur durch Interreflexion an den Lamellenoberflächen transmittiert wird. Dieser Winkel wird als Cut-Off-Winkel  $\alpha_{cut}$  bezeichnet.

Für den hier betrachteten Fall mit  $b=h$  vereinfachen sich die geometrischen Verhältnisse wie in Abb. 2.8 dargestellt, sodaß der Cut-Off-Winkel sich direkt aus dem Profilwinkel  $\theta_p$  ergibt:

$$\alpha_{cut} = 90 - 2\theta_{proj} \quad (2.3)$$

Der Profilwinkel der Sonnenpositionen ergibt sich, wie in Abschnitt 2.2 bereits erwähnt, aus der Projektion der Sonnenwinkel in die Profilschnittebene des Lamellensystems. In Abb. 2.7 sind die geometrischen Verhältnisse für die Sonnenprofilwinkel auf einer vertikalen Südfläche dargestellt. Die schraffierten Bereiche markieren jeweils den Profilwinkelbereich, den die Sonne an

den Tagen der Winter- und der Sommersonnenwende durchläuft. Zur Tag- und Nachtgleiche (Herbst- und Frühlingsanfang) liegt der Koordinatenursprung (Kugelmittelpunkt) in der Ebene der Sonnenbahn. Die Projektion der Sonnenbahn auf die Profilschnittebene ergibt die schwarz hervorgehobene gerade Linie zwischen den schraffierten Bereichen in Abb. 2.7, der Profilwinkel nimmt zu diesem Zeitpunkt den über den Tag konstanten Wert  $90-\varphi$  ein. In Abb. 2.9 und 2.10 ist der zeitliche Verlauf des Profilwinkels und des Cut-Off-Winkels an den Tagen der Winter- und Sommersonnenwende sowie dem Äquinoktium (Tagundnachtgleiche) für einen Breitengrad von  $48^\circ$  (München) dargestellt.

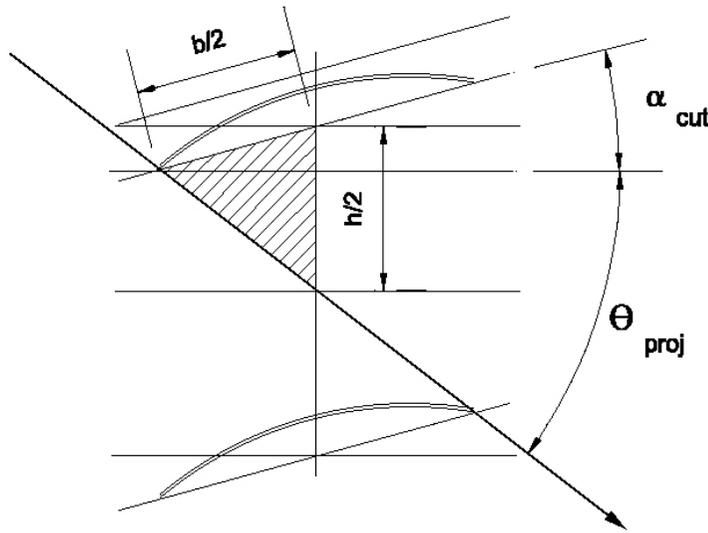


Abb. 2.8: Lamellengeometrie und Cut-Off-Winkel

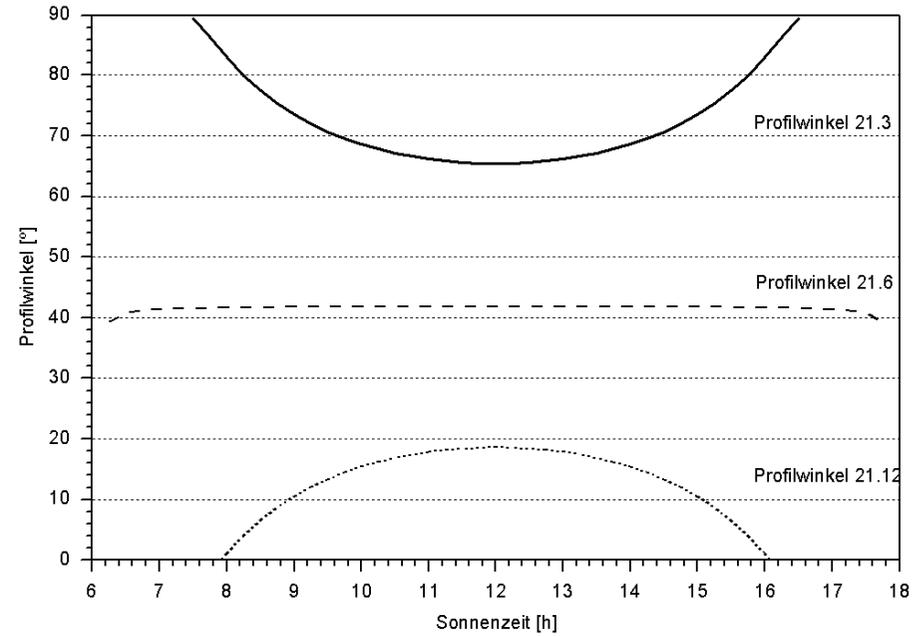


Abb. 2.9: Profilwinkel der Sonnenbahnen für vertikale Südflächen, Breitengrad  $48^\circ$

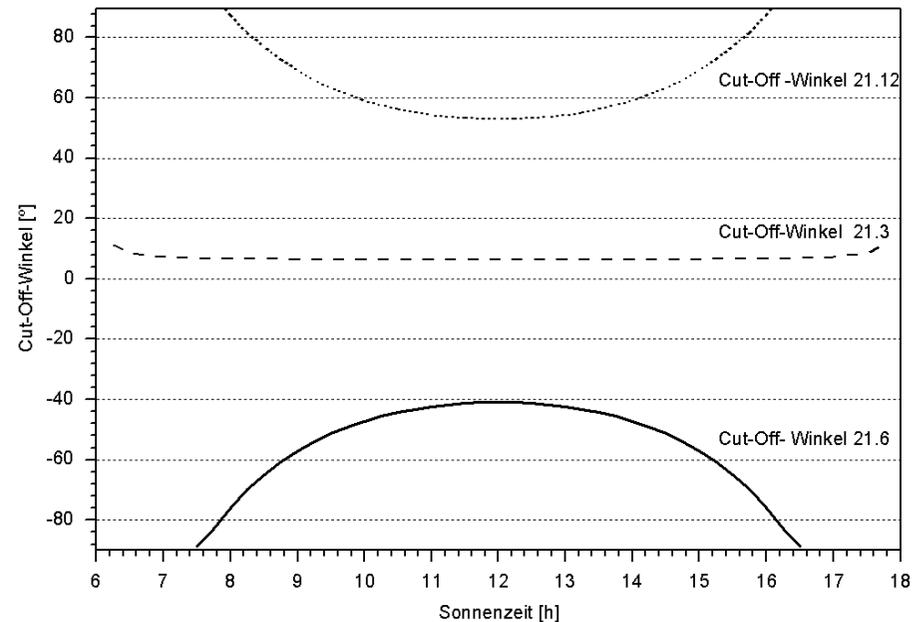


Abb. 2.10: Cut-Off-Winkel eines Horizontallamellensystems für vertikale Südflächen

Für vertikale südorientierte Fassaden liegt der Profilwinkel im Sommerhalbjahr im gesamten Tagesverlauf über  $40^\circ$  und erreicht am Mittag das Tagesminimum. Durch nahezu horizontale Lamellenstellung kann so im gesamten Halbjahr Vollverschattung des Direktanteiles erreicht werden.

Der negative Wert des Profilwinkels in diesem Zeitraum bedeutet, daß auch durch Verkippung der Lamellenaußenränder nach oben (negativer Drehwinkel) bis zum Cut-Off-Winkel noch Vollverschattung des Direktanteiles erreicht wird. In der Praxis werden Lamellen selten über die horizontale Position hinaus nach oben geneigt, da sich dadurch zum einen der Sichtbezug nach außen verschlechtert und zum anderen bei direkter Einstrahlung die Leuchtdichten im Fensterbereich stark ansteigen, da die direkt bestrahlten Bereiche der Lamelle aus dem Innenraum sichtbar werden. Zudem erhöht sich auch der Energieeintrag. Eine erhöhte Direktlichttransmission kann in Teilbereichen des Fensters erwünscht sein, um ein höheres Beleuchtungsniveau im Innenraum und besonders in der Raumtiefe zu erreichen. Dies kann zum Beispiel bei niedrigen Sonnenständen, bei denen die Jalousie als Blendschutz vollständig geschlossen werden muß, der Fall sein. In den Wintermonaten müssen die Lamellen durch die flachen Sonnenwinkel zur Vollverschattung grundsätzlich

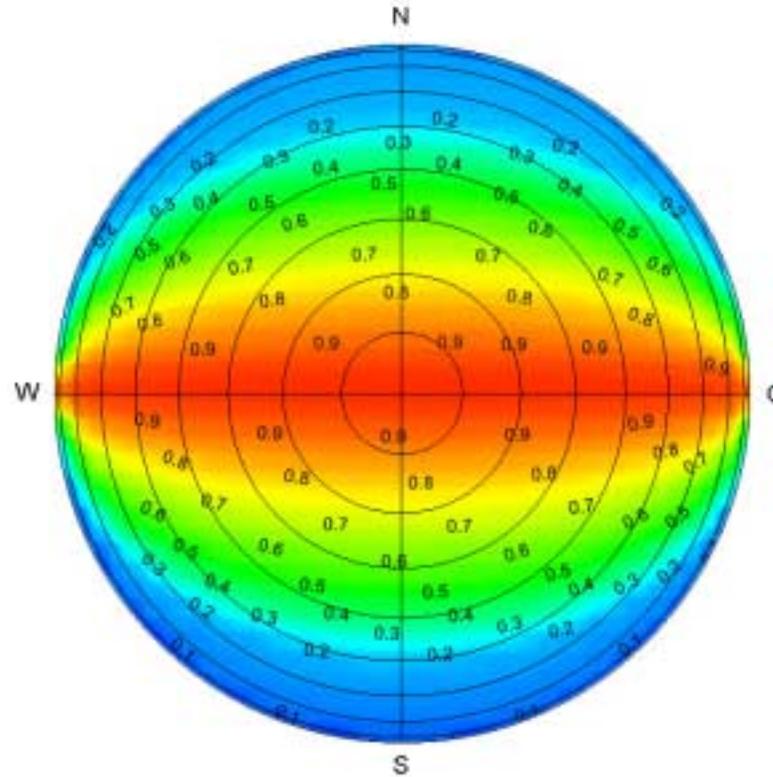


Abb.2.11: Richtungsabhängige Transmission eines Lamellensystems, Anstellwinkel  $0^\circ$  (horizontal), Reflexionsgrad der Lamellenoberfläche 0.5

weiter geschlossen werden als im Sommer. Um Blendung im Sichtbereich zu vermeiden und gleichzeitig einen Teil des Direktlichtes zu nutzen, bieten einige Jalousiehersteller heute Systeme an, die im Sichtbereich und im Überkopfbereich getrennt einstellbar sind. Dadurch kann auch bei flachen Einfallswinkeln ein Teil der Direktstrahlung ohne Blendung im Sichtbereich transmittiert werden.

### Lichttransmission

Bei der Betrachtung des Lichttransportes durch das Lamellensystem können folgende Transmissionsanteile unterschieden werden:

- der gerichtet transmittierte Anteil der Direktstrahlung

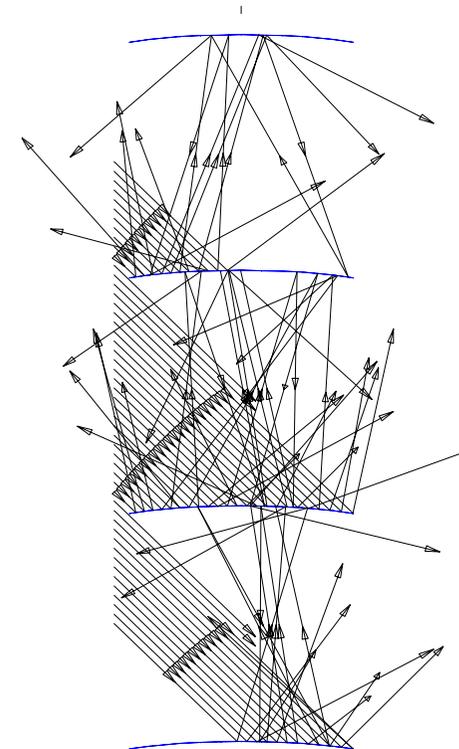


Abb. 2.12: Streuung und Interreflexion der gerichteten Direktstrahlung an den Lamellenflächen

- der ungerichtet (gestreut) transmittierte Anteil der Direktstrahlung
- der direkt transmittierte Anteil der Diffusstrahlung
- der gestreut transmittierte Anteil der Diffusstrahlung.

In Abb. 2.11 ist die winkelabhängige Transmission des beschriebenen Systems bei horizontaler Lamellen-

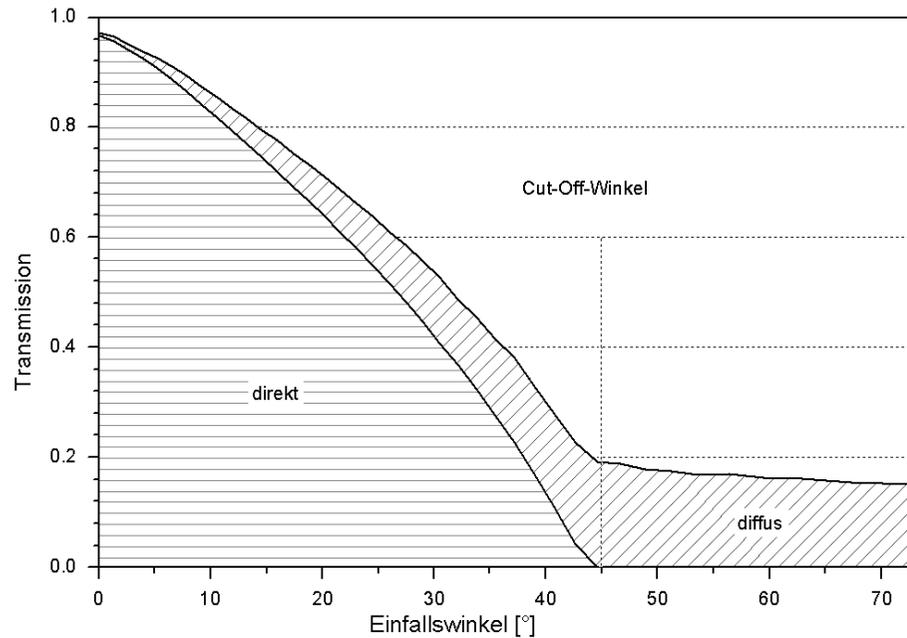


Abb.2.13. Gerichtete (direkte) und gestreute (diffuse) Transmissionanteile bei Direkteinstrahlung für verschiedene Einstrahlwinkel bei horizontaler Ausrichtung der Lamellen (ASAP-Berechnung)

Systems bei horizontaler Lamellenausrichtung über dem Halbraum dargestellt.

Das Maximum der achsensymmetrischen Verteilung liegt in der Ost-West-Achse des systemfesten Bezugssystems, die bei vertikaler Ausrichtung der Lamellenebene dem realen Horizont entspricht. Mit steigendem Zenitwinkel nimmt die Transmission bis zum Cut-Off-Winkel, der hier auf der NS-Achse bei 45° erreicht wird, auf ca. 0.2 ab. Dabei verringert sich der gerichtet transmittierte Anteil des Direktlichtes, während der gestreut transmittierte Anteil ansteigt.

Nach Überschreiten des Cut-Off-Winkels wird die Strahlung vollständig diffus über Interreflexion an der Lamellenoberfläche transmittiert. Mit steigendem Einfallswinkel nimmt die Transmission in diesem Bereich nur noch geringfügig ab.

In Abb. 2.13 ist der gerichtet und der gestreut transmittierte Direktanteil über dem Profiwinkel aufgetragen. Die einhüllende Kurve entspricht einem Schnitt vom Zenit zum Nordpol in Abb. 2.11, wobei die Winkelskalierung in Abb. 2.12. äquidistant gewählt wurde. Aus Abb. 2.11 wird ersichtlich, dass bei horizontaler Lamellenstellung nur ein geringer

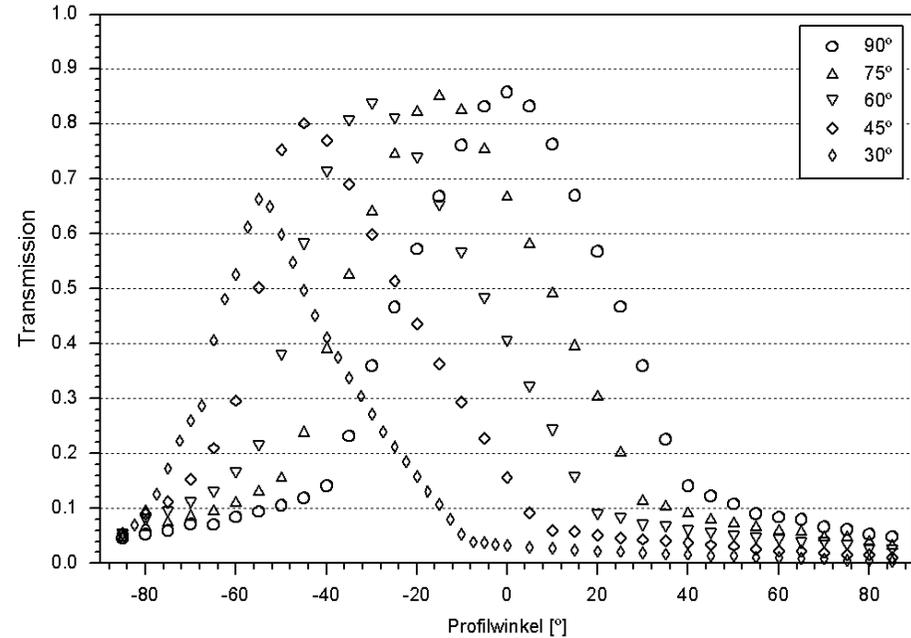


Abb. 2.14: Richtungsabhängige Transmission für verschiedene Neigungswinkel der Lamelle bei gerichteter Einstrahlung (ASAP-Berechnung), horizontal = 90°

Anteil des Diffuslichtes genutzt werden kann. Für den Zenitbereich, der dem Nordpol im systemfesten Bezugssystem (Abb.2.11) entspricht, ist die Transmission am geringsten.

Bei stärkerer Lamellenneigung verringert sich die Transmission auch im Horizont-nahen Bereich, sodass die Belichtung des Innenraumes fast ausschließlich durch gestreutes Direktlicht erfolgt. Dadurch wird die hohe Lichtdynamik aus dem Außenraum ungedämpft auf den Innenraum übertragen.

Bei Massivlamellen nimmt die richtungsabhängige Transmission

zudem aufgrund der Verminderung der maximalen Aperturfläche mit wachsendem Neigungswinkel ab. Mit der Lamellendicke  $d$  und dem Lamellenabstand  $h$  ergibt sich das Verhältnis der Aperturflächen  $a'/a$  (s. Abb. 2.15):

$$\frac{a'}{a} = \frac{h \cdot \cos \alpha - d}{h - d} \quad (2.4)$$

In Abb. 2.14 ist die winkelabhängige Transmission für ein Lamellensystem mit einer Lamellendicke  $d=0.15 h$  und einem  $b/h$ -Verhältnis von 0.9 (10% Überlappung) dargestellt. Der Cut-Off-Winkel beträgt bei horizonta-

ler Lamellenstellung  $40^\circ$ . Die Transmission erreicht bei horizontaler Lamellenstellung und senkrechter Einstrahlung einen Maximalwert von 0.85. Durch Neigen der Lamelle verringert sich der Maximalwert der richtungsabhängigen Transmission mit dem Kosinus des Neigungswinkels.

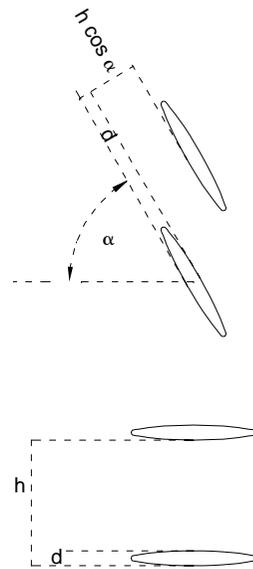


Abb. 2.15: Verkleinerung der Aperturfäche bei geneigten Lamellen mit Dicke  $d$

Der Maximalwert wird neben den genannten Parametern auch von der Form der Lamelle bestimmt, da ein Teil der Strahlen durch mehrfache Interreflexionen an den Lamellenoberflächen transmittiert werden. Die Durchlässigkeit für diffuses Licht wird bei Tageslichtelementen und Verschattungsvorrichtungen häufig durch Angabe des hemisphärisch-hemisphärischen Lichttransmissionsgrades  $T_{\text{vis, hem-hem}}$  gekennzeichnet (s. a. Abschnitt 1.4.1). In Abb. 2.16. sind die bei isotroper Einstrahlung berechneten Transmissionswerte den Werten bei vertikaler Ausrichtung und OCS-Einstrahlungsverteilung (Bodenreflexion=0.15) gegenübergestellt. Für OCS-Einstrahlung ergibt sich erwartungsgemäß ein asymmetrischer Kurvenverlauf. Das Maximum von ca 0.6 wird bei einem Winkel von  $30^\circ$  (nach oben geneigt) erreicht. Bei horizontaler Ausrichtung ( $0^\circ$ ) liegt der Transmissionsgrad für OCS-Verteilung um ca.  $20^\circ$  niedriger als bei isotroper Einstrahlung.

### 2.5.2 Nachführung und Regelstrategien

Motorisch nachgeführte Sonnenschutzsysteme sind heute in vielen Gebäuden ein technischer Standard. Die Steuerung solcher Verschattungsanlagen erfolgt dabei häufig computergestützt über ein hauseigenes Datenbussystem, über das neben den meteorologischen Daten einer Wetterstation häufig auch Meßgrößen im Gebäudeinneren durch Helligkeitssensoren, Temperaturfühler oder Bewegungsmelder erfaßt werden. Zur energetischen Optimierung der Regelkriterien müssen sowohl lichttechnische als auch

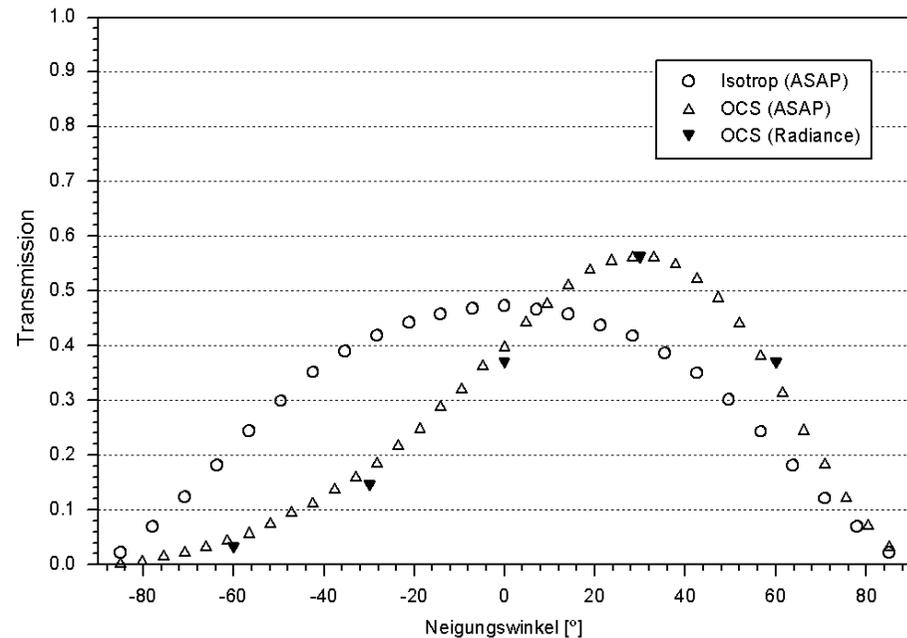


Abb. 2.16: Transmission bei Isotroper Einstrahlung und bei OCS-Verteilung vertikal

thermische Aspekte berücksichtigt werden. Da lichttechnische und thermische Regelkriterien häufig konträr zueinander sind, müssen zusätzliche Steuergrößen durch logische Verknüpfungen festgelegt werden, die bestimmen, wann nach lichttechnischen und wann nach thermischen Kriterien geregelt werden soll. So kann der Sonnenschutz beispielsweise bis zum Erreichen einer maximal zulässigen Innen- oder Außenlufttemperatur nach lichttechnisch optimierten Kriterien gesteuert werden, bei Überschreiten eines Grenzwertes folgt die Steuerung hingegen thermischen Kriterien.

In Gebäuden mit sensorischer Aufenthaltserfassung können in ungenutzten Räumen oder in Zeiten, in denen das Gebäude generell nicht genutzt wird, im Sommer durch vollständiges Schließen der Verschattungsanlagen thermische Lasten vermieden und im Winter durch Öffnung der Südfächen solare Gewinne erzielt werden.

Ein weiteres Regelkriterium ergibt sich bei außenliegendem Sonnenschutz häufig aufgrund der begrenzten Resistenz gegen hohen Winddruck. Auch bei niedrigen Gebäuden muß für konventionelle Jalousiesysteme in den meisten Regionen

Deutschlands mit Ausfallzeiten von bis zu 8% der Betriebszeit aufgrund zu hoher Windgeschwindigkeiten gerechnet werden [Kra91].

Neben den energetischen und funktionalen Kriterien ist die Berücksichtigung nutzerspezifischer Bedürfnisse ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Steuerung von Sonnenschutzanlagen. Besonders bei vollautomatisierten Anlagen kann eine in kurzen zeitlichen Intervallen erfolgende motorische Nachführung des Sonnenschutzes für den Nutzer ein hohes Störungspotential darstellen, zumal die Steuerkriterien häufig nicht nachvollziehbar sind und daher als Funktionsstörung oder als Übertechnisierung empfunden werden können. Mit steigender Komplexität der Einstellkriterien wächst zudem die Wahrscheinlichkeit für tatsächliche Steuerungsfehler. Eine Optimierung der Selektivität zur Verringerung des Steuerungsaufwandes erscheint bei der Entwicklung neuer Sonnenschutzsysteme daher auch unter dem Aspekt der Nutzerakzeptanz als sinnvoller Ansatz.

### 2.5.3 Gesamtenergiedurchlassgrad

Die bisher und auch in späteren Kapiteln mit Raytracing-Methoden berechneten Transmissions- und Reflexionswerte schließen keine

	$\tau_e$	$\alpha_e$	$\rho_e$	g	k
Verglasung	0.5			0.61	1.4
Lamellensystem geschlossen	0.05	0.4	0.55		
Lamellensystem außenliegend + Verglasung				<b>0.05</b>	
Lamellensystem innenliegend + Verglasung				<b>0.39</b>	

mit  $\tau_e$ : Solarer Transmissionsgrad,  $\alpha_e$ : Solarer Absorptionsgrad,  $\rho_e$ : Solarer Reflexionsgrad, g: Gesamtenergiedurchlassgrad, k: k-Wert der Verglasung

Tabelle 2.1: Gesamtenergiedurchlassgrad eines Lamellensystems in Kombination mit einer Isolierverglasung bei außenliegender und bei innenliegender Position der Lamelle nach [IFT99]

sekundären Energietransporteffekte ein und sind daher zunächst nur im Zusammenhang mit lichttechnischen Fragestellungen interpretierbar.

Zur Bestimmung des richtungsabhängigen g-Wertes müssen zusätzlich zu den direkt und durch Reflexion transmittierten Strahlungsanteilen die an der Lamelle absorbierten und durch sekundäre Wärmeabgabe transmittierten Anteile berücksichtigt werden. Die Berechnung des richtungsabhängigen g-Wertes eines isolierten Lamellensystems ist für praktische Anwendungen jedoch nicht besonders aussagekräftig, da

die Lage in der Fassade und die Kombination mit anderen Fassadenelementen erheblichen Einfluß auf den g-Wert des Gesamtsystems hat (s. a. Abschnitt 1.4.2). Für ein vollständig geschlossenes Lamellensystem mit einem Reflexionsgrad von 0.55 in Kombination mit einer Isolierverglasung werden in [IFT96] die in Tabelle 2.1 angegebenen Werte berechnet. Die Berechnung winkelabhängiger g-Werte für verschiedene Lamellenstellungen erscheint mit dem dort angewendeten, sehr einfachen Komponentenverfahren jedoch nicht sinnvoll. Die Entwicklung geeigneter Berech-

nungsverfahren durch Kombination von Raytracing mit Strömungssimulation und thermischen Simulationsprogrammen bietet hier eine interessante Perspektive.

Die Berechnung mehrdimensionaler g-Wert-Datensätze wirft die Frage auf, wie diese in einer in der Planungspraxis verwertbaren Form aufbereitet werden können. Neben graphischen Darstellungsmethoden besteht eine Möglichkeit darin, durch thermische Gebäudesimulationen effektive monatliche g-Werte für bestimmte Orientierungen und Einbausituationen zu berechnen [KP00].

## 2.6 Prismenplatten

Ansätze zur Nutzung prismatischer Strukturen als Tageslicht lenkende Elemente reichen bis in das 19. Jh. zurück [Mei97]. Kunststoffplatten mit linearen Prismenstrukturen für den Sonnenschutz sind heute bereits seit einigen Jahren in Form von Lamellen oder von im Scheibenzwischenraum eingelegten Plattenelementen erhältlich. Mikrostrukturierte Prismenfolien zum Einsatz in der Tages- und Kunstlichttechnik werden seit einigen Jahren von der Firma 3M, (3M Deutschland GmbH in Neuss), angeboten.

Als optische Elemente mit stark richtungsabhängigen Eigenschaften können Prismen sowohl für den Sonnenschutz als auch zur Lichtumlenkung eingesetzt werden. Die Funktionsweise einer einseitig strukturierten 45°-Prismenplatte ist in Abb. 2.18 dargestellt. Die aus bestimmten Winkelbereichen auf der unstrukturierten Seite einfallende Strahlung wird durch Totalreflexion ganz oder teilweise zurückreflektiert, während bei anderen Einfallswinkeln hohe Transmissionswerte erreicht werden. Abb. 2.19 zeigt die durch Raytracing berechnete winkelabhängige Transmission einer 45°-Prismenplatte mit Brechzahl  $n = 1.55$ . Absorptionseffekte wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Die p-Achse liegt in der Profilschnittebene (Abb. 2.17). In der Transmissioncharakteri-

stik sind drei Winkelbereiche zu unterscheiden:

1. Innerhalb eines um die q-Achse zentrierten achsensymmetrischen Bereiches (in Abb. 2.19 blau gefärbt) erfolgt nahezu vollständige Rückstrahlung in den Außenraum. In der Profilschnittebene hat dieser Bereich im Zentrum (Zenit) eine Breite von ca. 8° und nimmt nach außen zu.
2. Innerhalb des in Abb. 2.19 grün gefärbten Bereiches beträgt die Transmission zwischen 0.5 und 0.65. In Richtung der p-Achse erstreckt sich dieser Winkelbereich bis zu einem Profilwinkel von ca. 35°.
3. In den rot gefärbten Bereichen (Profilwinkel > 35°) erfolgt nahezu vollständige Transmission. Der Transmissionsgrad beträgt über 0.9.

Bei vollständiger Transmission (roter Bereich) werden die Strahlen in zwei Richtungskomponenten aufgespalten (Abb. 2.22).

Der Einsatz dielektrischer Prismenelemente als Sonnenschutz erfordert aufgrund des schmalen Ausblendbereiches um den Zenit eine genaue Nachführung.

Durch rückseitige Verspiegelung einer Prismenseite kann der Aus-

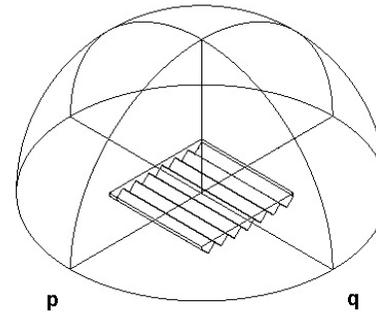


Abb 2.17: Koordinatenachsen der Prismenplatte

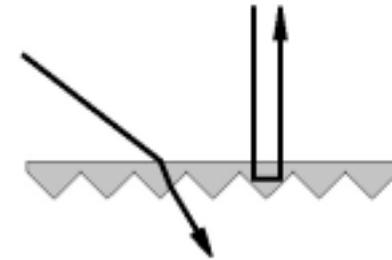


Abb 2.18: Transmission und Rückstrahlung an einer Prismenplatte.

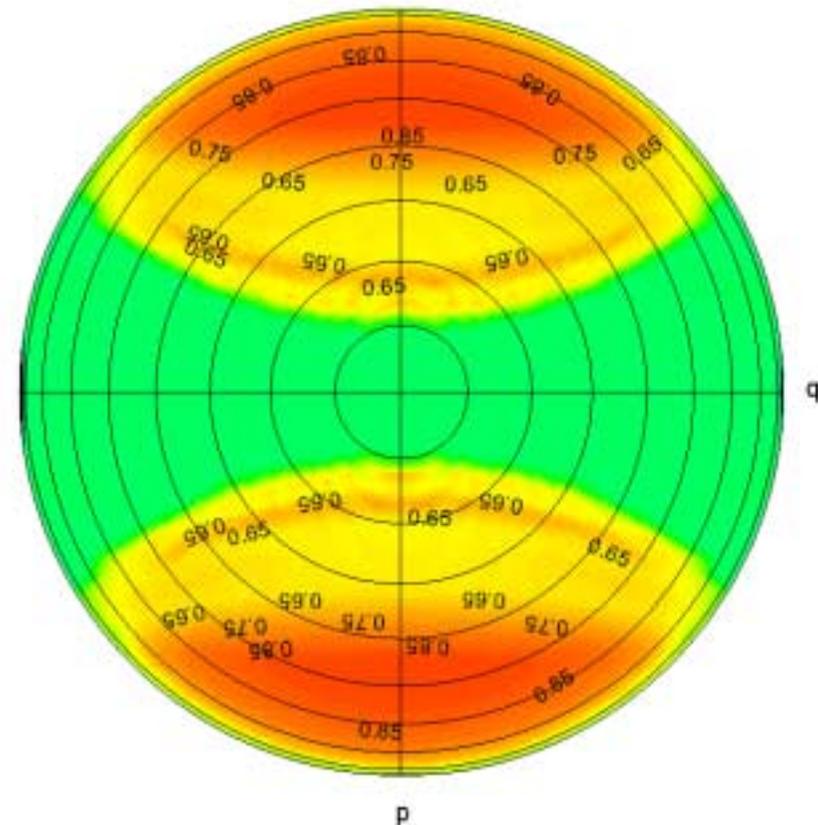


Abb 2.19: Winkelabhängige Transmission einer dielektrischen 45°-Prismenplatte, Brechzahl  $n = 1.55$ , Raytracingberechnung

blendbereich vergrößert werden, wodurch auch stationäre Anwendungen möglich sind. Durch die Verspiegelung muß jedoch auch eine Verminderung des diffusen Transmissionsgrades sowie ein höherer Absorptionsgrad in Kauf genommen werden. Die Strahlengänge für die drei genannten Fälle sowie für senkrechten Strahleneinfall von der Rückseite sind in Abb. 2.20 –2.24 dargestellt.

Auch innerhalb des Winkelbereiches, in dem keine Transmission auftritt (Abb.2.20), verlassen bei geringer Abweichung von der senkrechten Einfallrichtung einige Strahlen das Prisma nicht mehr auf direktem Weg durch die Eintrittsfläche, da sie die zweite Prismenflanke verfehlen (Abb. 2.20). Diese Strahlen werden teilweise aufgrund der großen optische Weglänge, die sie im dielektrischen Medium zurücklegen, absorbiert, und teilweise auf der Prismenunterseite ausgekoppelt. In

dieser Hinsicht stellt das Prisma trotz sehr hoher Reflexionswerte innerhalb des Ausblendbereiches kein ideales optisches System dar.

Durch Modifizierung der Prismengeometrie kann eine Anpassung für bestimmte Anwendungen erreicht werden. Dadurch können verschiedene stationäre Einsatzmöglichkeiten [WBW99] oder auch der Sonnenschutz vertikaler Fassaden bei waagrecht ausgerichteten Lamellen [KLP00] realisiert werden.

Unter energetischen Gesichtspunkten eignen sich Prismenelemente aufgrund ihrer Transmissionscharakteristik zunächst gut für den Sonnenschutz mit gleichzeitiger Diffuslichtnutzung im Gebäude. Gleichzeitig müssen im Hinblick auf den Einsatz in der Fassade auch einige Aspekte, die mit der visuellen Wahrnehmung verknüpft sind, berücksichtigt werden:

- Die Betrachtung strukturierter, Licht brechender Objekte beansprucht die Sehleistung generell stärker als die Betrachtung diffus streuender Gegenstände oder hochtransparenter Glasflächen. Aufgrund der komplexen und veränderlichen Lichtreflexionsmuster wird lichtbrechenden Flächen häufig das Attribut eines „unruhigen“ Erscheinungsbildes zugeordnet.

Komplexe visuelle Leistungen basieren auch auf der Auswertung von Mustern und „Seherfahrungen“ zur Erkennung oder Rekonstruktion eines dreidimensionalen (Vorstellungs-)Bildes des wahrgenommenen Gegenstandes. Durch die Zerlegung in Teilbilder und die Überlagerung einzelner Bildteile aus unterschiedlichen Richtungen (Abb.2.24 und Abb. 2.25) kann die Geometrie selbst nur ungefähr (etwa als „periodisch struktu-

rierte Fläche“) erkannt werden. Sehwinkelabhängig werden teilweise Bereiche, die räumlich vor dem Element liegen, und räumlich hinter dem Element liegende Bereiche wahrgenommen. Dadurch entsteht eine Beeinträchtigung des Orientierungsvermögens, die entfernt der Wahrnehmungssituation bei starkem Nebel (Verlust der räumlichen Orientierung) vergleichbar ist.

- Durch die Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge (Dispersion) entsteht bei der Transmission eine spektrale Aufspaltung des Lichtes. Dadurch werden Farbigkeitseffekte sichtbar, deren Ausprägung von der Lichtsituation und dem Betrachtungswinkel abhängig sind.
- Bei der Transmission des direkten Sonnenlichtes wird die Lichtaufspaltung auch auf den Oberflächen des Innenraumes sicht-

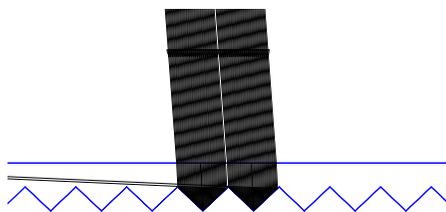


Abb. 2.20: Retroreflexion

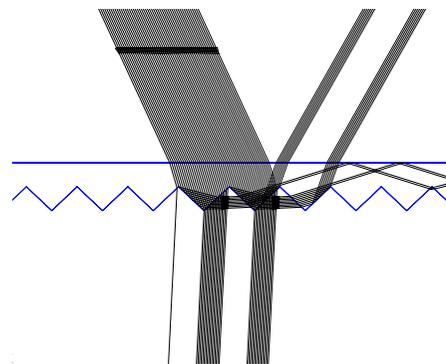


Abb.2.21: Teilreflexion

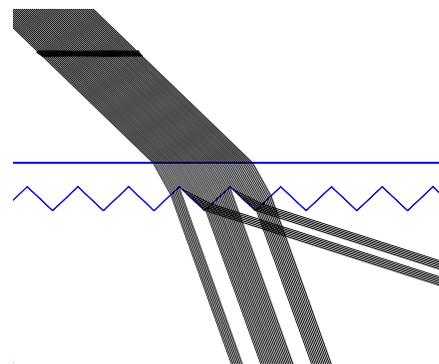


Abb.2.22: Transmission

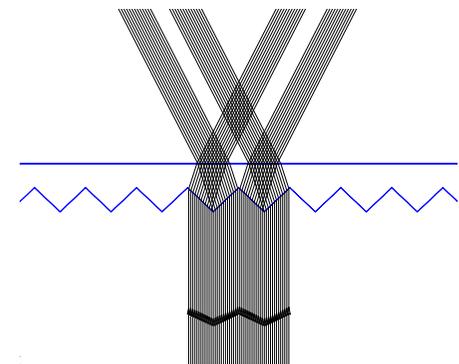


Abb. 2. 23: Strahlerlegung



Abb. 1.24 Bildzerlegung und Überlagerung bei Durchsicht von innen nach außen

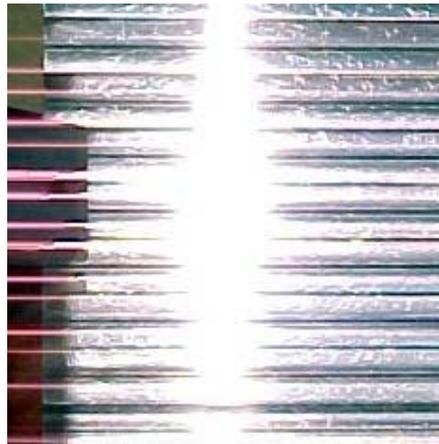


Abb. 3.25: Spiegelnde Außenreflexion bei Direkteinstrahlung

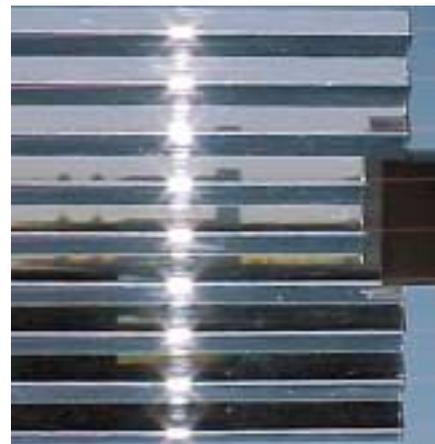


Abb. 2.26: Blendstreifen auf der Innenseite durch Kantenrundung

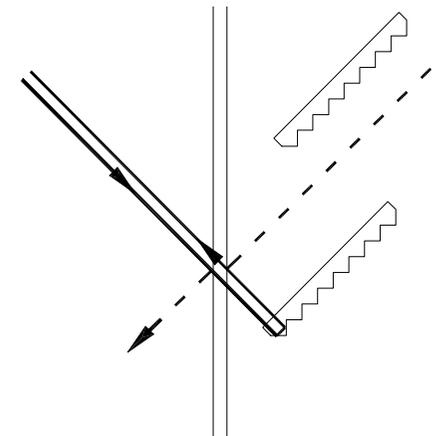


Abb. 2.27 : Reflexion an der Glasscheibe bei innenliegendem Einsatz

bar. Zur Vermeidung dieses Effektes müssen die Spektral-komponenten des Lichtes nach Durchlaufen der Prismen wieder durchlaufen der Prismen wieder durchmischt werden. Dies kann beispielsweise durch innenseitige Streugläser oder zusätzliche Reflexionsflächen realisiert werden. Durch diese Maßnahmen wird jedoch auch die Lichttransmission sowie die Möglichkeit der Durchsicht gemindert.

- Der Einsatz spiegelnd reflektierender Sonnenschutzelemente in Fassaden kann zu starker Blendwirkung im Außenraum und in umliegenden Gebäuden führen. Dies läßt zumindest eine Untersuchung der örtlichen Gegebenheiten vor dem Einsatz von Prismen in der Fassade ratsam erscheinen. Der Einsatz im

Dachbereich erscheint in diesem Zusammenhang aufgrund der geringeren Blendungsgefahr weniger problematisch.

- Während Labor-Prismen für Anwendungen in der Optik in Bezug auf die Formhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit höchsten Qualitätsansprüchen genügen, müssen bei der Herstellung von Sonnenschutzelementen als Massenprodukt fertigungstechnisch bedingte Toleranzen in Kauf genommen werden. Durch die spiegelnden inneren und äußeren Reflexionen an den Prismenflächen werden visuell bereits sehr geringe Formabweichungen und Fehlstellen wahrgenommen.

- Ein weiteres Problem ergibt sich durch die in der Kunststoffverarbeitung nicht zu vermeidenden Kantenrundungen. Diese verursachen bei Direktlichteinfall eine divergente Strahlauskopplung, die als Lichtstreifen hoher Intensität sichtbar wird (Abb. 2.26). Diese Lichtstreifen sind vergleichbar mit den bei Kapillarstrukturen zu beobachtenden ringförmigen Blenderscheinungen.

- Bei innenliegenden Prismenelementen wird das Licht nach Retroreflexion im Prisma gerichtet zur Verglasung zurückgelenkt. An der Verglasung entsteht bei der Transmission eine spiegelnde Reflexion an der Innenoberfläche in der gleichen Größenordnung wie die Außenreflexion (gestrichelte Linien in Abb. 2.27). Der

Reflexionsanteil beträgt bei einer 2-Scheibenverglasung bereits ca. 8% der zurückgestrahlten Energie. Dadurch ist bei nicht-vertikaler Ausrichtung der Lamelle zur Fassade nicht nur eine signifikante g-Wert Erhöhung zu erwarten, sondern auch eine starke Spiegelung sichtbar, die den Außenbezug einschränken kann.

## 2.7 Lichtumlenkung und Diffuslichtnutzung

Zur Belichtung tiefer im Gebäude liegender Raumzonen kann das Tageslicht gezielt umgelenkt werden. Eine Übersicht der Möglichkeiten und am Markt erhältlichen Lichtumlenksysteme geben Kischkoweit-Lopin [KL99] bzw. Wagner [Wag00].

In den meisten Fällen hat der Einsatz eines lichtlenkenden Systemes die Umlenkung des solaren Direktlichtanteiles zum Ziel. Bei direkter Sonneneinstrahlung wird in der Regel nur ein geringer Teil des auf die Fassade auftreffenden Lichtes zur Raumbeleuchtung benötigt. Direktlicht umlenkende Systeme werden daher häufig nur in einem Teilbereich der Fassade eingesetzt. Um den meistens gewünschten Sichtbezug nach außen durch die Umlenkelemente nicht einzuschränken, wird der Einsatz vorzugsweise im Ober-

lichtbereich vorgenommen.

Zur Vermeidung von Blendung und zur besseren Tiefenausleuchtung wird das Licht von der Fassade zunächst an die Decke umgelenkt und von dort in den Raum gestreut oder gezielt auf die Arbeitsebene gelenkt (Abb.2.28). Eine Lichtumlenkung in die Raumtiefe ist auch für Einfallrichtungen mit flachem Azimutwinkel zur Fassade gewünscht (Abb. 2.29). Dies kann durch Begrenzung des inneren Austrittswinkels in Azimutrichtung oder durch Lichtstreuung (z.b. durch Strukturierung der inneren Glasoberfläche) erfolgen. Die Begrenzung des inneren Lichtaustrittswinkels bedingt bei nicht nachgeführten Systemen aufgrund der in Abschnitt 1.5 dargestellten Zusammenhänge im Mittel über alle Einfallrichtungen zwangsläufig eine Verminderung der Transmission, da durch die Transformation der Einfallswinkelbereiche der Sonne

auf kleinere Ausfallswinkelbereiche mehr Fläche benötigt würde, also nur ein Teil des außen vorhandenen Lichtes innerhalb des vorgegebenen Winkelbereiches transmittiert werden kann.

Durch gleichmäßige Streuung in den gesamten Winkelbereich kann eine ausgeglichene Lichtverteilung erreicht werden. Die gezielte Lenkung des Lichtes in die Raumtiefe ist durch streuende Elemente nicht möglich.

Ein weiterer Anwendungsbereich für Direktlicht umlenkende Systeme sind verglaste Dachflächen wie beispielsweise Überdachungen von Atrien.

Die in den Wintermonaten unter flachen Winkeln einfallenden Sonnenstrahlen werden zur Vertikalen umgelenkt und erreichen dadurch tiefere Raumzonen (Abb. 2.30).

Sowohl für den Fassaden- als auch für den Dachbereich ist zwischen ganzjährig transmittierenden und saisonal ausgelegten Systemen, die das Licht nur im Winterhalbjahr in den Raum lenken und im Sommer als Sonnenschutz wirken, zu unterscheiden.

Die Umlenkung des Diffusanteiles der Solarstrahlung erscheint aus lichttechnischer Sicht nur in seltenen Fällen sinnvoll. Eine Verbesserung der Lichtverteilung durch Diffuslichtumlenkung kann sich ergeben, wenn zur Belichtung nur ein eingeschränkter Winkelbereich des Himmels verfügbar ist und die Beleuchtungsstärke im Raum dadurch mit steigendem Abstand vom Fenster sehr schnell abfällt. Diese Situation kann bei einer starker Horzonterhöhung durch umgebende Bebauung oder bei den innenliegenden Fassaden eines Atriums (Abb.2.31) gegeben sein.

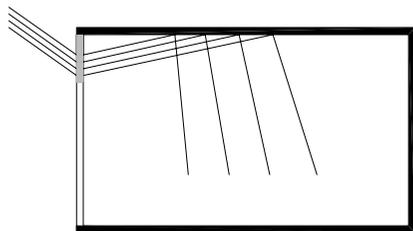


Abb 2.28: Direktlichtumlenkung im Oberlichtbereich der Fassade (Schnittdarstellung)

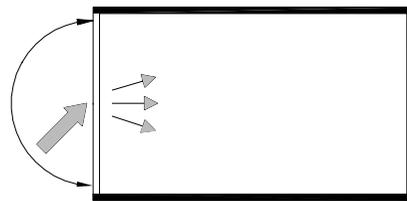


Abb.2.29: Umlenkung der Azimutrichtung des Direktlichtes (Grundrissdarstellung)

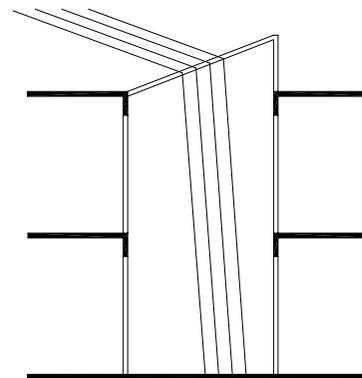


Abb. 2.30: Direktlichtumlenkung in der Dachfläche eines Atriums

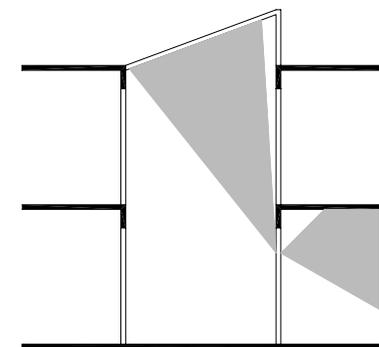


Abb. 2 31: Diffuslichtumlenkung an der Innenfassade eines Atriums

Da durch die Addition eines tageslichtlenkenden Elementes die Diffuslichttransmission durch die Fassade im Vergleich zur Situation ohne Lichtumlenkelement in der Regel erheblich reduziert wird, sollten die durch die Umverteilung des Lichtes erzielten Gewinne sorgfältig gegen die Transmissionsverluste abgewogen werden. Dies gilt vor allem für den heute üblichen Einsatz Direktlicht umlenkender Systeme im Oberlichtbereich. Da dieser Fassadenbereich bei diffuser Einstrahlung stärker zur Belichtung der tiefen Raumzonen beiträgt als der Fenster- und Brüstungsbereich, erscheint eine Direktlichtumlenkung nur dann sinnvoll, wenn auch bei bedecktem Himmel eine ausreichende Tageslichtversorgung durch das System oder durch die restlichen Fassadenflächen gewährleistet ist. Andernfalls können aus lichttechnischer Sicht die Diffuslichtverluste bei bedecktem Himmel die Direktlichtgewinne bei sonnigem Wetter in der Gesamtjahresbilanz leicht überwiegen.

Da die Diffuslichttransmission von Tageslichtsystemen, wie bereits erwähnt, unter Laborbedingungen bei isotroper Einstrahlung bestimmt wird, kann die reale Transmission bei vertikalem Einsatz in der Fassade von den angegebenen Laborwerten aufgrund der anisotropen Lichtverteilung unter realen Bedingungen stark abweichen. Dies gilt besonders für saisonal verschat-

tende Systeme, die einen großen Teil des Himmels ausblenden und deren Diffuslichttransmission aus den in Abschnitt 2.3 dargestellten Zusammenhängen auch potentiell wesentlich geringer ist als die ganzjährig transmittierender Systeme.

Die Transmissionsverluste entstehen bei Systemen aus opaken Materialien durch Absorption an den Oberflächen und durch Strahlumkehrung im System. Die Höhe des Absorptionsanteiles ist sowohl von den Materialeigenschaften als auch von der Anzahl der Reflexionen im System abhängig und kann mit dem Einfallswinkel variieren. Der Reflexionsgrad anodisch beschichteter Aluminiumoberflächen beträgt ca. 90% [KUC94], durch spezielle Dünnschichtverfahren werden für Aluminium Reflexionsgrade bis zu 95% erreicht. Durch neue Materialentwicklungen im Kunststoffbereich werden inzwischen auch wesentlich höhere Reflexionsgrade erreicht. So geben Weber et al. [WSG00] für Multilayerfolien aus Schichten mit unterschiedlicher Brechzahl Reflexionswerte bis zu 99% im sichtbaren Bereich an. Die Markteinführung solcher Materialien, die auch den Lichttransport über Vielfachreflexionen und über längere Strecken ermöglichen, kann bereits für 2001 erwartet werden.

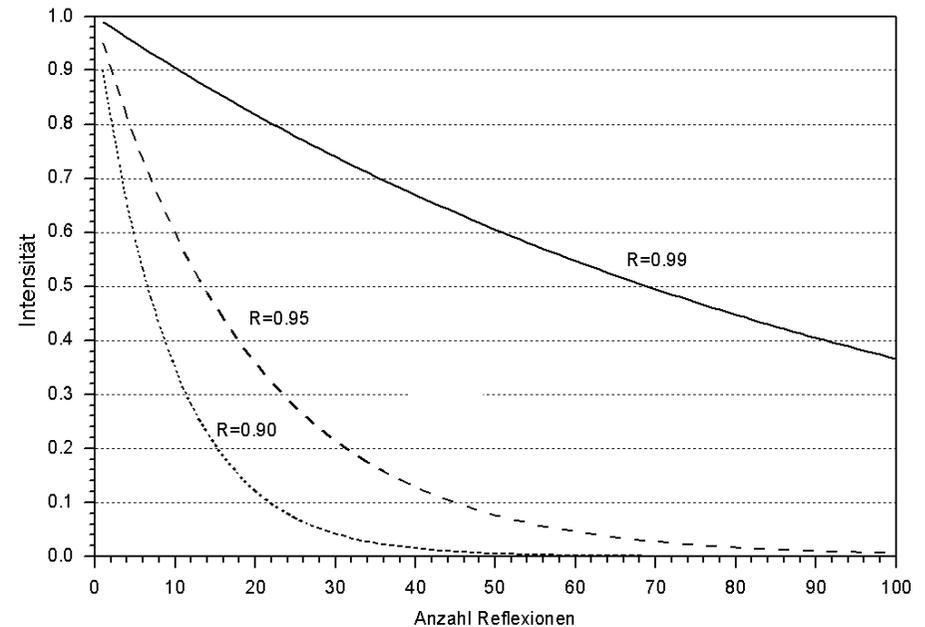


Abb. 2.32: Intensitätsabnahme des Lichtes bei steigender Anzahl der Reflexionen für verschiedene Reflexionsgrade

Bei Systemen aus dielektrischen Materialien, die Licht transmittieren und dabei durch innere Totalreflexion umlenken, entstehen die Verluste hauptsächlich durch die spiegelnden Reflexionsanteile bei der Ein- und Auskoppelung der Strahlung, während die Volumenabsorption bei hochtransparenten Werkstoffen sehr gering und die innere Totalreflexion bei hochwertigen Oberflächen verlustfrei ist. Strukturen aus dielektrischen Materialien können auch als Reflexionsflächen eingesetzt werden und erreichen winkelabhängig Reflexionsgrade bis nahezu 100%. Um die möglichen Gewinne durch Diffuslichtlenkung und Umverteilung des Lichtes im

Innenraum genauer zu untersuchen, wird im folgenden Abschnitt exemplarisch der in Abb. 2.33 dargestellte Raum betrachtet, der mit einer Breite von 3,6 m und einer Tiefe von 5 m einem zweiachsigem Büroraum entspricht. Die Fassade wird in einen Oberlichtbereich mit einer Höhe von 75 cm, einen Fensterbereich (150 cm) und einen Brüstungsbereich (75 cm) unterteilt. Dabei wird eine vollflächige Verglasung (Verglasungsanteil 90%, Rahmenanteil 10%) mit einem Transmissionsgrad der Verglasung von 0.75, entsprechend einer unbeschichteten 2-Scheiben-Verglasung angenommen. Für die Oberflächen wurden folgende Reflexionsgrade angenommen:

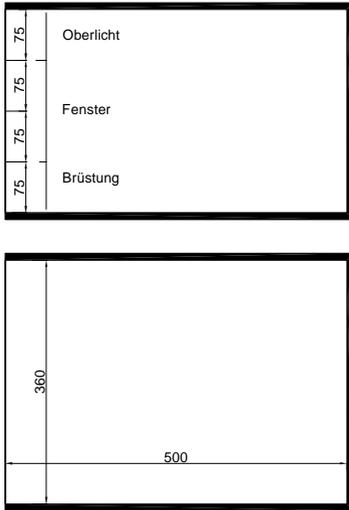


Abb. 2.33: Grundriss und Schnitt der exemplarischen Bürozeile

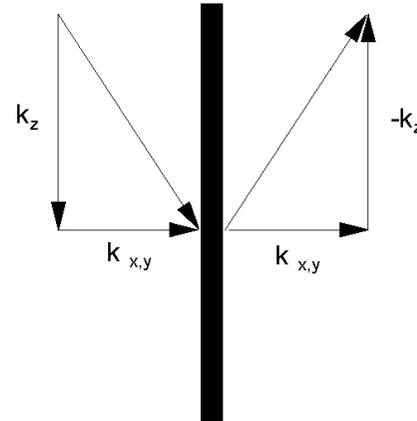


Abb. 2.34: Umkehrung der Vertikalkomponente des Lichtes

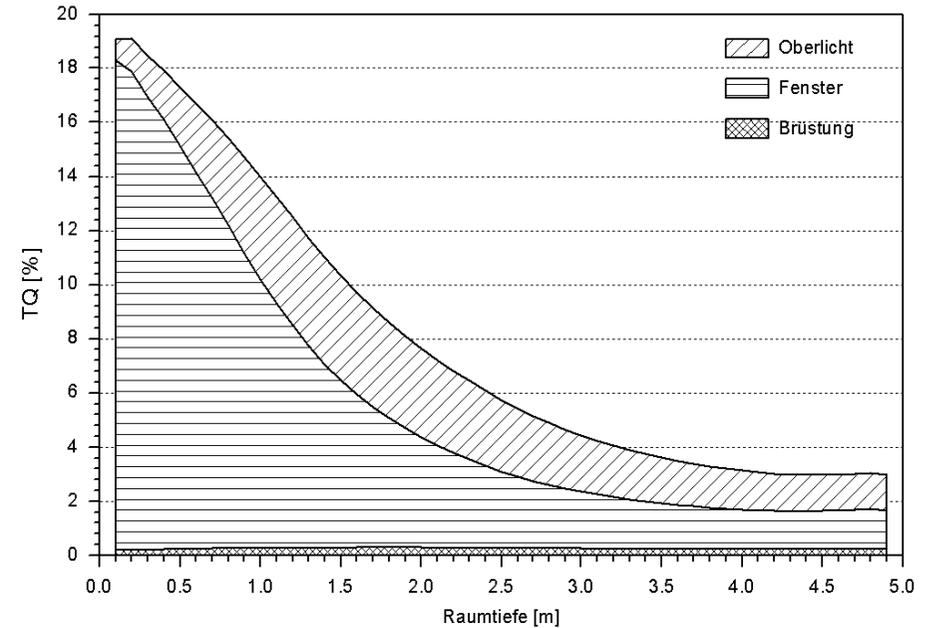


Abb. 2.35: Verlauf des Tageslichtquotienten

Decke und Wand :	0.85
Boden :	0.4
Außenreflexion :	0.2

Dies entspricht einem sehr hell gestalteten Raum und ergibt somit eine obere Abschätzung des Tageslichtquotienten.

In Abb. 2.35 ist der Verlauf des Tageslichtquotienten (TQ) bei bedecktem Himmel getrennt für die Teilbeiträge der einzelnen Fassadenabschnitte aufgetragen. Die Berechnungsebene liegt in einer Höhe von 75 cm, der dargestellte Schnitt liegt in der Raummitte. Der

Brüstungsbereich befindet sich unterhalb der Arbeitsebene und trägt dadurch nur über Mehrfachreflexionen an den Innenoberflächen zur Horizontalbeleuchtungsstärke in der Arbeitsebene bei. Da das durch den Brüstungsbereich eintretende Licht zudem überwiegend zuerst an der dunkleren Bodenfläche reflektiert wird, ist der TQ-Beitrag sehr gering (unter 1%). Bis zu einer Raumtiefe von 2,5 m dominiert im TQ-Verlauf der Beitrag des Fensters, das die Hälfte der verglasten Gesamtfläche umfaßt.

In der zweiten Raumhälfte liegen die Beiträge des Oberlichtes und des Fensters in derselben Größenordnung. (Der Flächenanteil des Oberlichtes entspricht dabei der halben

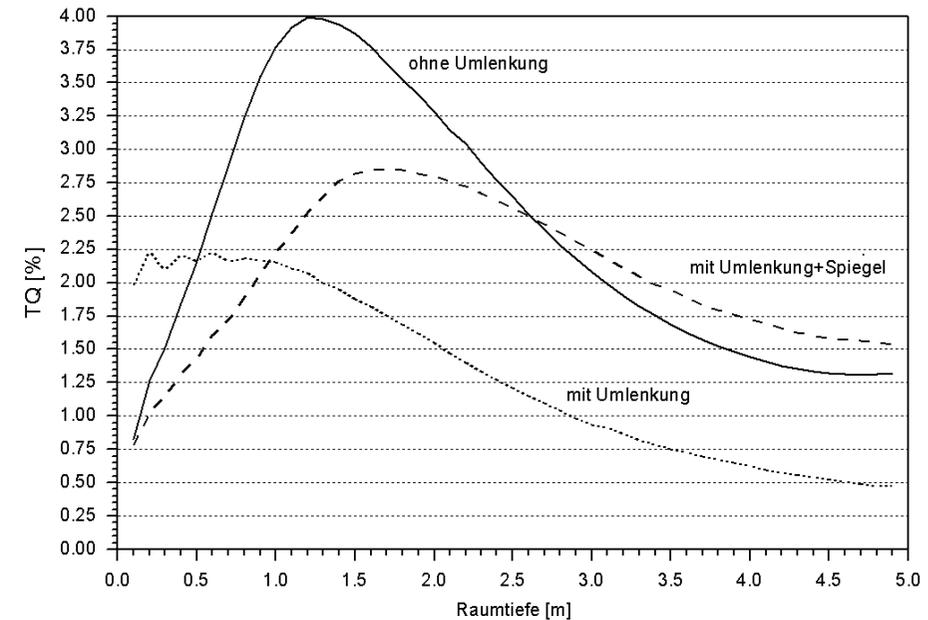


Abb. 2.36: TQ-Beiträge des Oberlichtes ohne und mit Lichtumlenkung

Fensterfläche.) Hieraus wird die Bedeutung des Oberlichtes für die Belichtung der tieferen Raumzonen deutlich. Um die möglichen Gewinne durch eine Umlenkung des Diffuslichtes im Oberlichtbereich zu betrachten, wird im Folgenden ein System angenommen, das die vertikale Richtungskomponente des einfallenden Lichtes verlustfrei umkehrt (Abb. 2.34). Dies entspricht den Umlenkeigenschaften eines perfekten horizontal ausgerichteten Spiegels, die hier auf eine vertikale Fläche angewendet wird.

In Abb. 2.36 sind nur die TQ-Beiträge des Oberlichtes dargestellt. Der Verlauf der blauen Kurve (mit durchgezogener Linie) beschreibt hierbei den TQ-Beitrag des Oberlichtes ohne Umlenkung und entspricht dem in Abb. 2.34 blau (diagonal) schraffierten Bereich. Die rote (gepunktete) Kurve zeigt den Beitrag mit Umlenkung durch das beschriebene System und mit diffus reflektierender (weißer) Decke. Durch die Umlenkung des Lichtes an die Decke nimmt der TQ im Vergleich zur Variante ohne Umlenkung in allen Raumbereichen ab. Dabei vermindert sich der TQ im fensternahen Bereich auf ca. 50% und nimmt in der Raumtiefe leicht zu.

Die Abnahme des TQ ist zum einen auf die Verluste durch diffuse Mehrfachreflexionen und zum anderen dadurch zu erklären, das ein Teil des

eintretenden und an die Decke gelenkten Lichtes wieder durch das Fenster nach außen gestreut wird.

Die gestrichelte Linie beschreibt den relativen TQ-Verlauf für das Umlenkensystem mit einer zusätzlichen Spiegelfläche an der Decke bis in einer Raumtiefe von 2 m, für die ideale Reflexion (100% spiegelnd) angenommen wird. Hierdurch wird das Intensitätsmaximum weiter in die Raumtiefe verschoben und um ca. 30% reduziert. Dadurch ergibt sich eine gleichmässige Verteilung und ein leichte Erhöhung des TQ in der Raumtiefe um ca. 20%. Unter realen Bedingungen ist jedoch zu erwarten, daß aufgrund der Reflexionsverluste auch durch diese Variante im Vergleich zur einfachen Isolierverglasung ohne Lichtumlenkung keine Erhöhung der Beleuchtungsstärke in der Raumtiefe erzielt werden kann.

Zur Verdeutlichung sind in Abb. 2.37 die relativen Anteile des TQ im Verhältnis zum Referenzsystem ohne Umlenkung aufgetragen.:

$$I_{rel} = \frac{TQ_{system}}{TQ_{Referenz}} \quad (2.5)$$

Ein leichte Verbesserung kann bei realen Systemen gegenüber der berechneten Variante durch die Optimierung der Abstrahlverteilung und eine damit verbundene tiefere Einlenkung oder durch Vergrößerung

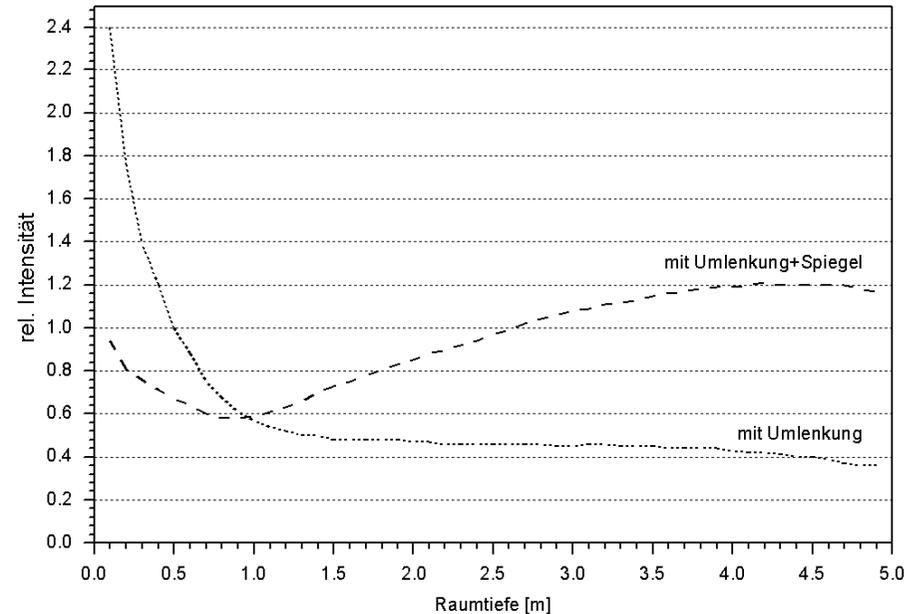


Abb 2.37: Relativer TQ-Verlauf der Variante „Umlenkensystem“ und der Variante „Umlenkensystem +Spiegel“ zum Referenzsystem (ohne Umlenkung)

der Umlenkfläche (Miteinbeziehung der Fensterfläche) erreicht werden.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß die Umlenkung des diffusen Himmelslichtanteiles in der Fassade in vielen Situationen nicht zu der gewünschten Verbesserung der Beleuchtungsverhältnisse im Innenraum führt.

### 3 Nicht abbildende Konzentratoren für den Sonnenschutz

Im folgenden Kapitel wird gezeigt, wie das bisher formulierte Ziel einer Trennung von Direkt- und Diffusanteil der solaren Strahlung durch konzentrierende dielektrische Strukturen erreicht werden kann. Hierzu werden zunächst einige Grundlagen der geometrischen Strahlungskonzentration formuliert. Anschließend werden die Konstruktionsprinzipien konischer und parabolischer Konzentratoren beschrieben. Der zweite Teil des Kapitels befaßt sich mit den Richtungseigenschaften dielektrischer CPC's (Compound Parabolic Concentrators). Hierbei werden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für den Sonnenschutz und Variationen der Konzentradorform untersucht.

#### 3.1 Konzentration von Strahlung

Die im folgenden betrachtete Grundaufgabe der geometrischen Strahlungskonzentration besteht darin, die gesamte Strahlung, die aus einem bestimmten Bereich des Winkelraumes  $\Delta\Omega$ , dem Akzeptanzbereich, auf eine Eintrittsfläche  $a$  einfällt, auf eine kleinere Fläche  $a'$  umzulenken. Im zweidimensionalen (Abb. 3.1) oder rotationssymmetrischen Fall kann

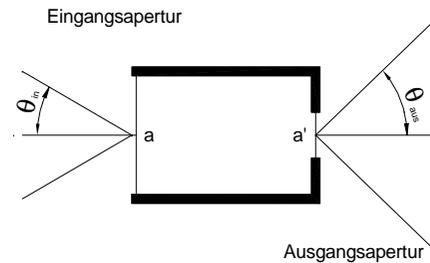


Abb. 3.1: Funktionsprinzip eines Konzentratoren

der Akzeptanzbereich durch den Akzeptanzwinkel  $\theta_{in}$  beschrieben werden. Die Eintrittsfläche wird im folgenden als Eingangsapertur, die Zielfläche als Ausgangsapertur bezeichnet. Die optische Apparatur wird zunächst nicht genauer festgelegt. Die Umlenkung kann durch reflektierende Flächen oder durch Totalreflexion in einem brechenden Medium erfolgen.

Der Konzentrationsfaktor  $C$  wird als Verhältnis der Eingangsaperturfläche zur Ausgangsaperturfläche definiert. Aus dem in der klassischen Mechanik formulierten Satz der Erhaltung des Phasenraumvolumens, der auch als „Satz von Liouville“ oder „Erhaltung der étendue“ bezeichnet wird (siehe Abschnitt 1.5), kann die folgende Relation zwischen dem Konzentrationsfaktor, den Brechzahlen der Medien (bei dielektrischen Konzentratoren) und dem Akzeptanzwinkel und Austrittswinkel der Strahlung hergeleitet werden [WW 78]:

$$C = \frac{a}{a'} \leq \frac{n' \sin \theta_{aus}}{n \sin \theta_{in}} \quad (3.1)$$

Aus der Relation zwischen den Aperturflächen und dem Ein- und Austrittswinkel der Strahlung folgt, daß sich durch Verkleinerung der Ausgangsaperturfläche der Konzentrationsfaktor und der Winkel, unter dem die Strahlung aus der Ausgangsapertur austritt, vergrößert. Ein Konzentrador wird als ideal bezeichnet wenn in oben genannter Relation die Gleichheit erfüllt ist.

Die austretende Strahlung kann maximal den gesamten Halbraum auf der Austrittsseite ausfüllen. Dies entspricht in der in Abb. 3.1 dargestellten Skizze einem Austrittshalbwinkel  $\theta_{aus}$  von  $90^\circ$ . Hieraus ergibt sich die maximale Konzentration  $C_{max,2d}$  für den linearen Fall

$$C_{max,2d} = \frac{n'}{n \sin \theta_{in}} \quad (3.2)$$

und analog für die Konzentration in zwei Raumrichtungen:

$$C_{max,3d} = \left( \frac{n'}{n \sin \theta_{in}} \right)^2 \quad (3.3)$$

Aus der Definition des Konzentrationsfaktors ist auch die in Abschnitt

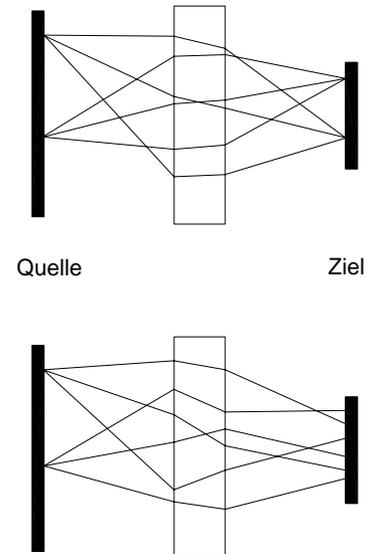


Abb. 3.2: Strahlengang für abbildende (o.) und nicht abbildende Systeme (u.)

1.5 bereits gemachte Aussage ablesbar, daß diffuse Strahlung nur durch den Wechsel in ein Medium höherer Brechzahl konzentriert werden kann: Bei einem Akzeptanzwinkel von  $\theta_{in} = 90^\circ$  und gleichen Brechzahlen  $n, n'$  kann  $C$  maximal den Wert 1 erreichen.

In der geometrischen Optik wird zwischen abbildenden und nicht abbildenden Systemen unterschieden. Als abbildend wird ein optisches System bezeichnet, bei dem alle

Strahlen, die von einem beliebigen Punkt einer Quelle innerhalb eines bestimmten Öffnungswinkels das optische System durchlaufen, auf einer gegebenen Zielfläche wieder genau in einem Punkt zusammen treffen. Dieser Punkt wird als Bildpunkt bezeichnet. Bildpunkt und Quellpunkt werden als zueinander fokal bezeichnet. Die Bildfläche, auf der alle Bildpunkte liegen, ist im Allgemeinen gekrümmt und nur im achsennahen Bereich des Systems eben. Bei optischen Systemen ohne Abberationen (Abbildungsfehler) liegt eine stigmatische Abbildung vor. Durch das Fermatsche Prinzip wird gezeigt, daß die beschriebene Situation genau dann gegeben ist, wenn alle Strahlen zwischen Quellpunkt und Bildpunkt die gleiche (minimale) optische Weglänge durchlaufen [He89]. Nicht abbildende Systeme erfüllen diese Bedingung nicht oder nur für einzelne Punkte (s. Abb. 3.2). Für die Konstruktion eines optischen Systems bedeutet die Nichterfüllung der Abbildungsbedingung einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Für eine detailliertere Darstellung der Zusammenhänge sei hier auf [Bru96] verwiesen.

### 3.2 Konische Konzentratoren

Die geometrisch einfachste Konzentratorenform ist der in Abb. 3.3 dargestellte konische Konzentrator, der

hier nur für den 2-dimensionalen Fall und als ideal spiegelnd (100% Reflexion, keine Streuung) betrachtet wird. Das Konzentratorenprofil wird durch die geradlinige Verbindung der Eingangsapertur mit der Breite  $2a$  und der Ausgangsapertur mit der Breite  $2a'$  gebildet. Die Länge des Konzentrators ist dabei so gewählt, daß der unter dem Winkel  $\theta_{max}$  einfallende Strahl gerade die jeweils gegenüberliegenden Randpunkte der Ein- und Ausgangsaperturen durchläuft. Der Winkel  $\theta_{max}$  ist in Anlehnung an die Definition des Konzentrationsfaktors nach [WW89] so gewählt, daß er folgende Gleichung erfüllt:

$$a' = a \cdot \sin \theta_{max} \quad (3.4)$$

In Abb. 3.4 sind die Strahlengänge in einem konischen Konzentrator für verschiedene Einfallsrichtungen dargestellt. Strahlen, die innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches einfallen, durchlaufen den Konzentrator und gelangen zur Ausgangsapertur, während flach einfallende Strahlen zur Eingangsapertur zurückgelenkt werden. Sie werden dabei mehrmals an den Konzentratorwänden reflektiert. Da innerhalb eines bestimmten Übergangsbereiches um den Akzeptanzwinkel Strahlen einer Einfallsrichtung zum Teil transmittiert und zum Teil reflektiert werden, ergibt sich der in Abb. 3.5 dargestellte Verlauf der winkelabhängigen Transmis-

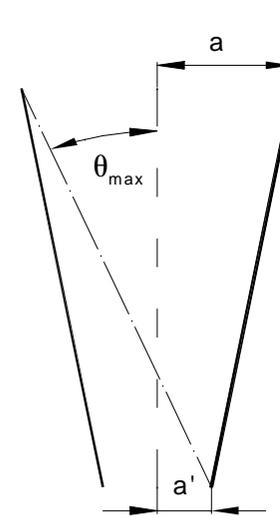


Abb. 3.3: Aperturen und Akzeptanzwinkel des konischen Konzentrators

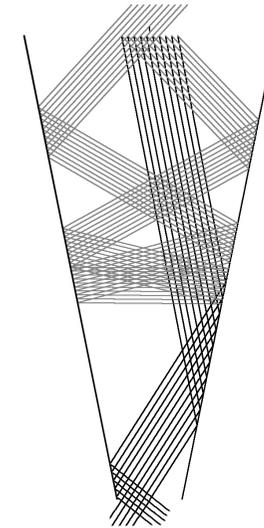


Abb. 3.4: Strahlengang in einem konischen Konzentrator

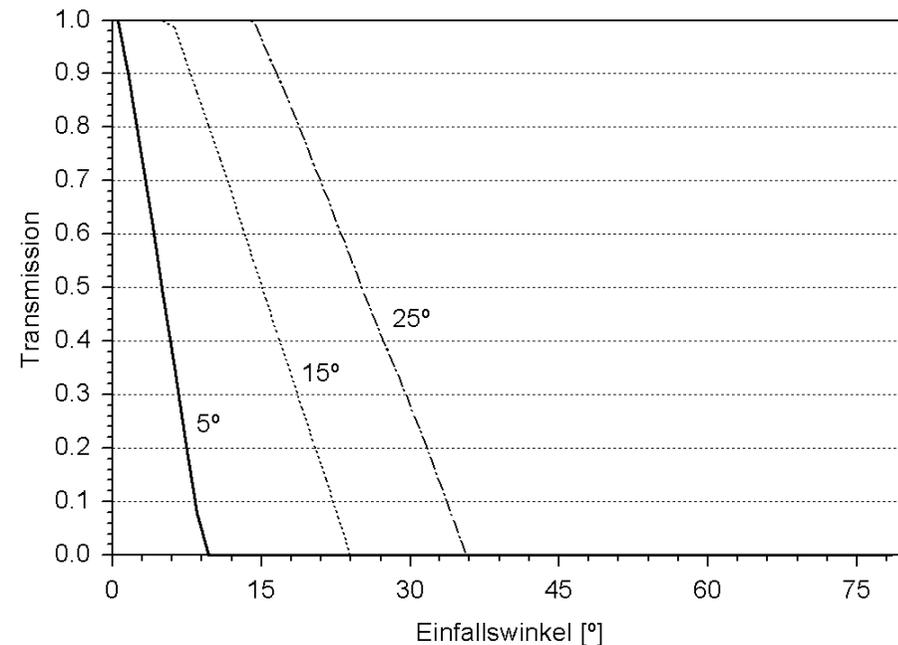


Abb. 3.5: Winkelabhängige Transmission konischer Konzentratoren

lauf der winkelabhängigen Transmission. Für größere Akzeptanzwinkel nimmt die Breite des Übergangsbereiches zu. Durch Verlängerung des Profils bei gleichbleibendem Aperturverhältnis  $a/a'$  wird der Übergang schärfer, jedoch erhöht sich hierdurch auch die Anzahl der Reflexionen der transmittierten Strahlen im Konzentrator, wodurch bei realen Systemen die Absorptionsverluste steigen.

### 3.3 Parabolische Konzentratoren

Der auf R. Winston zurückgehende Begriff „Compound Parabolic Concentrator (CPC)“ bezeichnet einen parabolischen Konzentratortyp, dessen Grundform durch zwei gegenüberliegende parabolisch geformte Profile gebildet wird. Die gegenüberliegenden Endpunkte der Profile definieren die Randpunkte der planen Ein- und Ausgangsaperturen.

Der CPC zeichnet sich durch einen „scharfen“ Übergang zwischen Transmissions- und zu Reflexionswinkelbereich aus. Er erfüllt außerdem (streng genommen jedoch nur im zweidimensionalen Fall) die in Abschnitt 3.1 formulierte Definition für maximale Konzentration und ist somit im physikalischen Sinn eine geometrische Idealform. Im Folgenden werden nur symmetrische Formen behandelt. Die Konstruktion

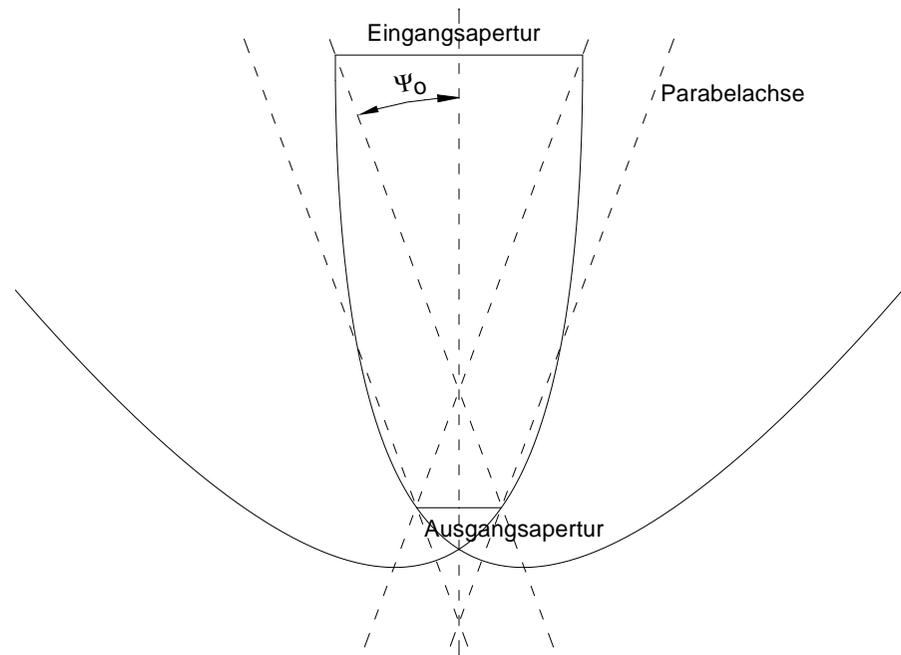


Abb. 3.6: Konstruktionsprinzip des CPC- Profils aus zwei um den Akzeptanzhalbwinkel  $\Psi_0$  zur Normalenachse des Konzentrators verkippten Parabelästen

asymmetrischer Konzentratoren wird in Anhang A beschrieben.

Parabolisch geformte Konzentratoren werden heute in vielen Bereichen der Technik zur Intensitätserhöhung von Strahlung eingesetzt. Das Spektrum reicht von wenigen Millimeter großen optischen Elementen in der Lasertechnologie über Anwendungen in der Lichttechnik (z.B. der Darklight-Technik) bis zu Parabolantennen.

Im Bereich der Solarenergienutzung wurden parabolische Konzentratoren

zuerst in Anlagen zur thermischen Prozeßwärmegewinnung verwendet, sowohl zur schwachen Strahlungskonzentration in Parabolrinnenkraftwerken oder Röhrenkollektoren, als auch für Endstufen von Turmkraftwerken mit hohen Konzentrationsfaktoren [Tim99].

Desweiteren wurden verschiedene Anwendungen in Kombination mit Photovoltaik-elementen untersucht. Die Möglichkeit, durch das Vorsetzen dielektrischer Konzentratoren die elektrische Leistung von Photovoltaikzellen zu steigern, wird bereits 1978

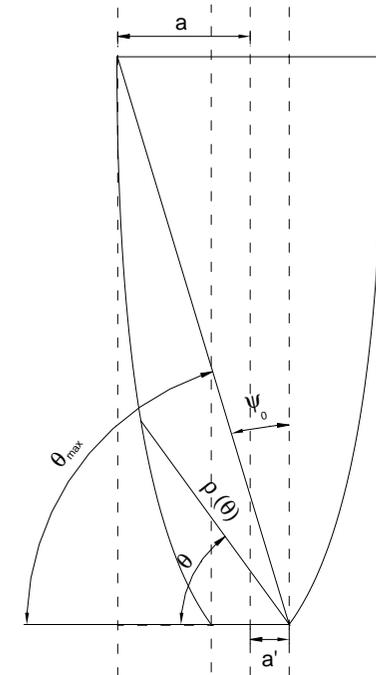


Abb. 3.7 : Parabeläste und Polarkoordinatensystem

durch Welford und Winston beschrieben [WW78]. Brunotte beschreibt Systeme aus metallischen Primärkonzentratoren und dielektrischen Sekundärstufen [Bru96]. Zacharopoulos e.a. beschreiben ein System aus asymmetrischen dielektrischen Massiv-CPC-Strukturen in Kombination mit Photovoltaikzellen für den Einsatz in vertikalen Fassaden [ZELN00]. Bei der Entwicklung von Konzentratorgeometrien zur Energiegewinnung steht die Maximierung des Wirkungsgrades der Gesamtanlage im Vordergrund.

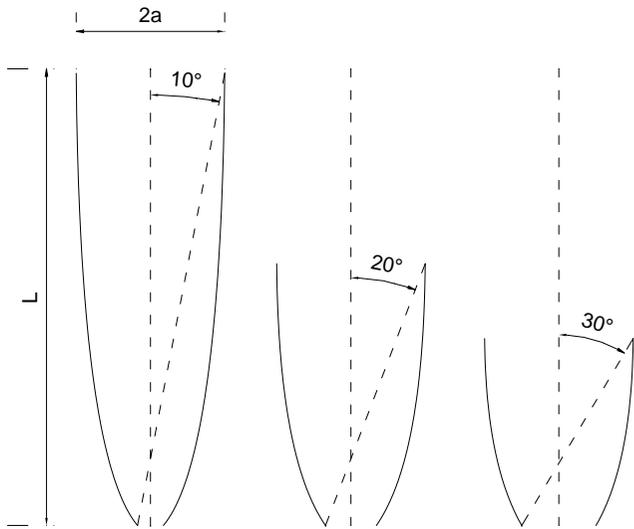


Abb. 3.8: CPC-Geometrie und Aspektverhältnis für verschiedene Akzeptanzwinkel

Im Bereich der Tageslichtnutzung wurden bereits einige Arbeiten mit CPC-Konzentratoren aus metallischen Reflektoren durchgeführt, beispielsweise für den Einsatz in Fassaden [CSP94] oder Oberlichtöffnungen [CPS96].

### 3.3.1 Der 2-D- CPC

Die Profilform des symmetrischen 2D-CPC wird durch zwei gegeneinander um jeweils den halben Akzeptanzwinkel zur Konzentradorachse verkippte Parabeln definiert, deren Brennpunkte gleichzeitig die Randpunkte der Ausgangsapertur bilden.

Der Parabelarm endet auf der Eingangsaperturseite an dem Punkt, an dem ein unter dem Akzeptanzhalbwinkel vom Brennpunkt des Parabelarmes ausgehender Strahl den Parabelarm schneidet (Abb. 3.6). Mathematisch lässt sich der Parabelast in einfacher Form in Polarkoordinaten beschreiben.

Mit dem Proportionalitätsfaktor P

$$P = a \cdot (1 + \sin \Psi_0) \quad (3.5)$$

ergibt sich für die Parabeläste die Koordinatengleichung:

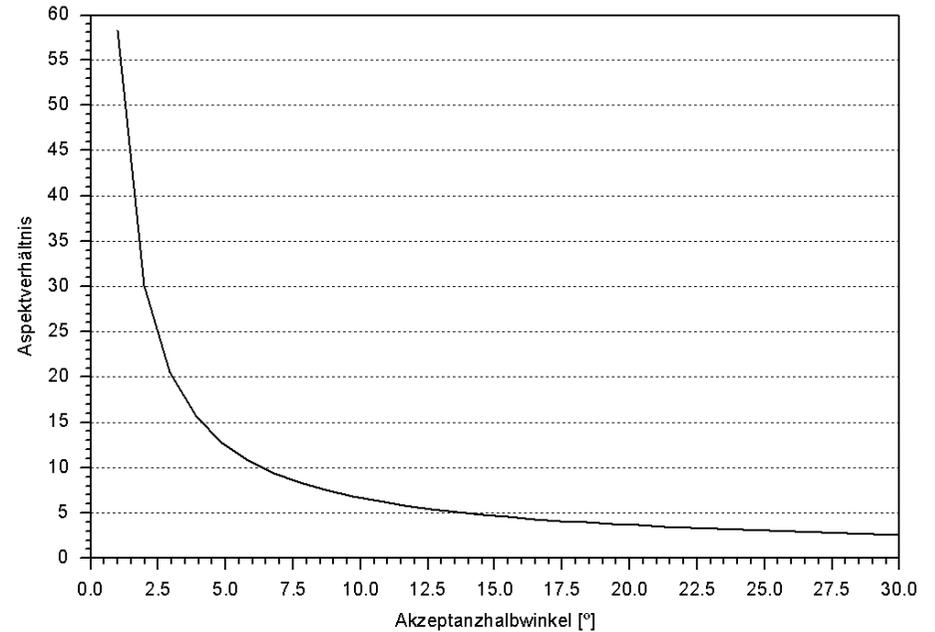


Abb. 3.10: Aspektverhältnis für ungekürzte CPC-Konzentratoren

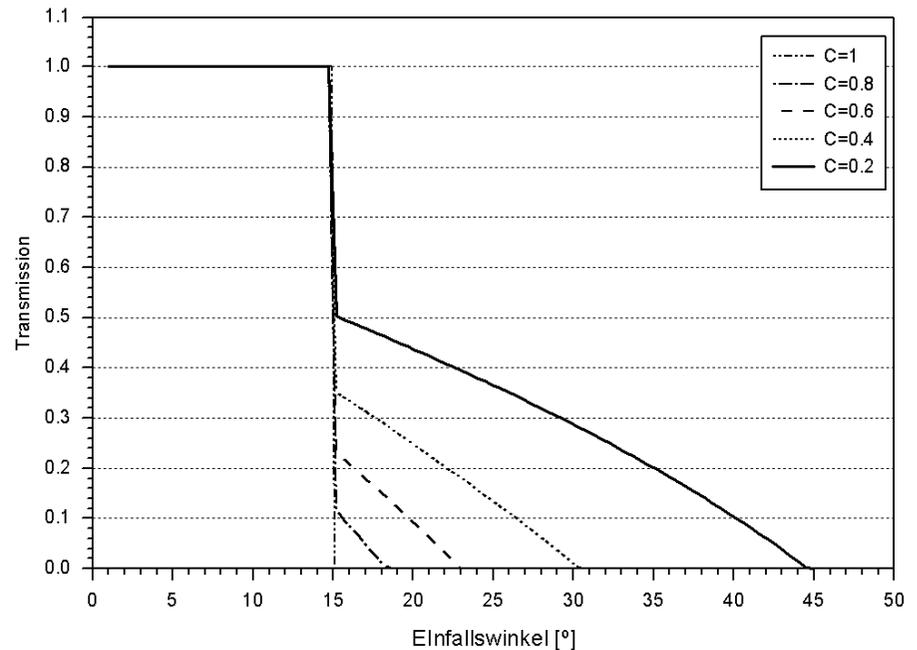


Abb. 3.9: Winkelabhängige Transmission eines 15°-CPC für verschiedene Verkürzungsfaktoren

$$\rho(\theta) = \frac{\pm P}{1 - \sin(\theta - \Psi_0)}$$

$$\theta_{min} = 0^\circ$$

$$\theta_{max} = 90^\circ - \Psi_0 \quad (3.6)$$

Die Profilform wird somit durch den Akzeptanzwinkel  $\Psi_0$  und die Aperturbreite  $a$  festgelegt. Die Abhängigkeit des Aspektverhältnisses der Höhe  $L$  des Konzentradorprofils zur Aperturbreite  $2a$  vom Akzeptanzhalbwinkel ist in Abb. 3.8 und 3.9 dargestellt. Für kleine Akzeptanzwinkel nimmt das Aspektverhältnis stark zu, sodaß sehr schmale Profilformen entstehen. Für einen  $20^\circ$ -CPC beträgt das Aspektverhältnis 3.6, für einen  $10^\circ$ -CPC bereits 6.5.

Mit steigendem Aspektverhältnis und gleichbleibender Eingangsaperturfläche ergibt sich ein höherer Materialaufwand pro CPC. Das Aspektverhältnis kann verringert werden, indem der CPC auf der Eingangsaperturseite verkürzt wird. Da die Krümmung des Parabelsegmentes von CPC-Profilen mit kleinem Akzeptanzwinkel an der Eingangsaperturseite sehr gering ist, kann das Profil bis zu einem gewissen Grad verkürzt werden, ohne daß der Konzentrationsfaktor sich durch die Verkürzung wesentlich verschlechtert. Die Verkürzung des Profils bewirkt jedoch eine Verbreiterung des

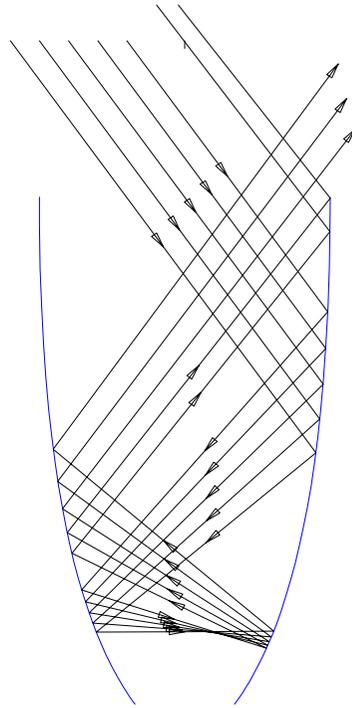


Abb.3.11: Strahlengang in einem CPC-Profil für eine Einfallrichtung außerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches

Akzeptanzbereiches, da nun auch Strahlungsanteile aus Winkelbereichen außerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches auf die Ausgangsapertur gelangen. Die Transmissionscharakteristik eines  $15^\circ$ -CPC ist in Abb. 3.10 für verschiedene Verkürzungsfaktoren dargestellt. Die unverkürzte Konzentradorform des 2D-CPC erfüllt die von R. Winston formulierte Bedingung des Randstrahlenprinzi-

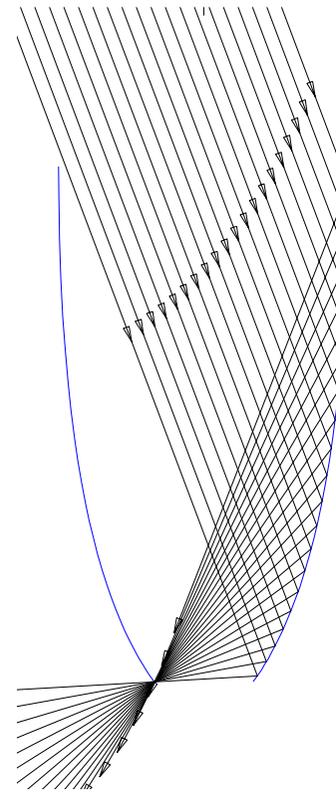


Abb.3.12: Strahlengang in einem CPC-Profil bei Einfall im Akzeptanzhalbwinkel

pes (edge ray principle) für ideale nichtabbildende Konzentratoren [WW78], [Rie94], indem für die Einfallrichtung des Akzeptanzhalbwinkels  $\Psi_0$  alle Strahlen auf den Randpunkt der Ausgangsapertur konzentriert werden [Abb. 3.12]. Strahlen, die innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches einfallen, werden auf die Ausgangsapertur gelenkt (Abb. 3.13), während Strahlen aus dem

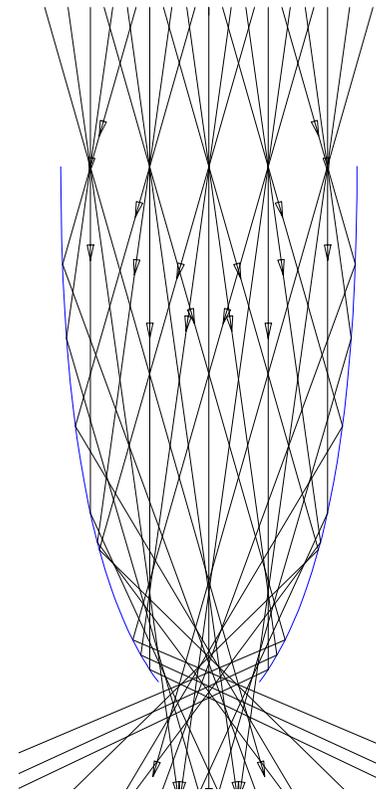


Abb. 3.13: Strahlengang in einem CPC-Profil für versch. Einfallrichtungen innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches

Winkelbereich außerhalb des Akzeptanzwinkels nach mehreren Reflexionen in den Eintrittshalbraum zurückgeworfen werden (Abb. 3.11). In den Abbildungen 3.10 - 3.12. sind die Strahlengänge für die drei beschriebenen Fälle des Strahlungseinfall innerhalb, exakt im Akzeptanzwinkel und außerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches dargestellt.

### 3.3.2 Lineare CPC-Konzentratoren aus metallischen Reflektorprofilen

Bisher wurden nur Aussagen zur zweidimensionalen Profilform des CPC gemacht. Der 2D-CPC lässt sich durch Rotation um die Normalenachse oder durch Extrusion entlang der Längsachse zu einem dreidimensionalen Körper erweitern. Weitere dreidimensionale Körper können durch mehrachsige Verschneidung der linearen Form konstruiert werden. In dieser Arbeit werden nur lineare, aus der einachsigen Extrusion hervorgehende Körper behandelt.

Für den Übergang zum dreidimensionalen Körper wird zunächst der etwas einfachere Fall des metallischen CPC-Konzentrators betrachtet. Abb. 3.14 zeigt ein solches, aus Aluminiumblechen zusammengesetztes Element, das für den Einsatz in einer Oberlichtöffnung entwickelt wurde.

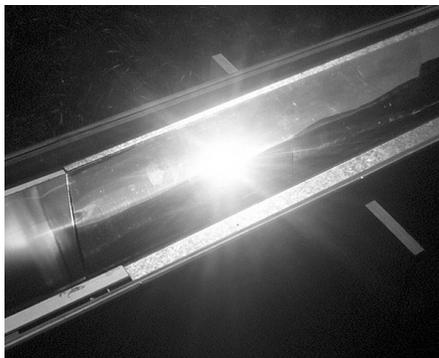


Abb. 3.14: Metallischer CPC-Reflektor

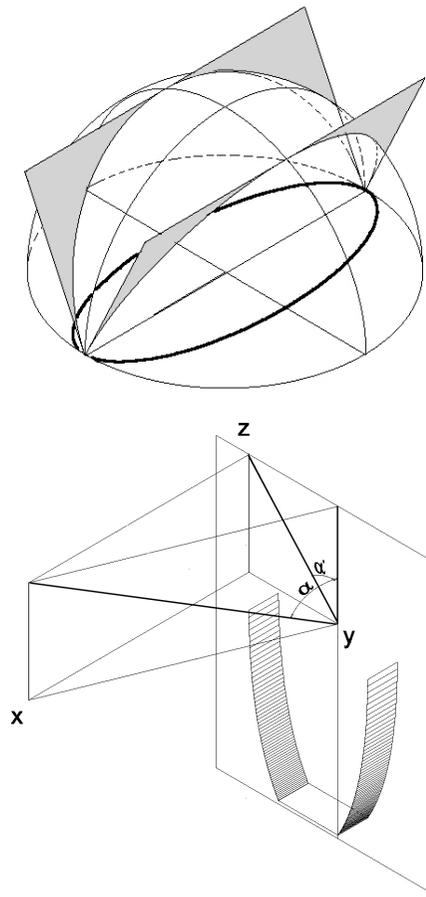


Abb. 3.15: Zenitwinkel  $\alpha$  und Profilwinkel  $\alpha'$  für lineare CPC-Elemente

Für den linearen CPC lassen sich die in 3.3.1 gezeigten Strahlengänge unter der Voraussetzung, daß durch das Reflektormaterial keine Winkelabhängigkeiten gegeben sind, auch auf Einfallswinkel außerhalb der Profilschnittebene übertragen. Die geometrische Konstruktion des Akzeptanzbereiches ist in Abb. 3.16 skizziert. Die (außerhalb der Halbkugel)

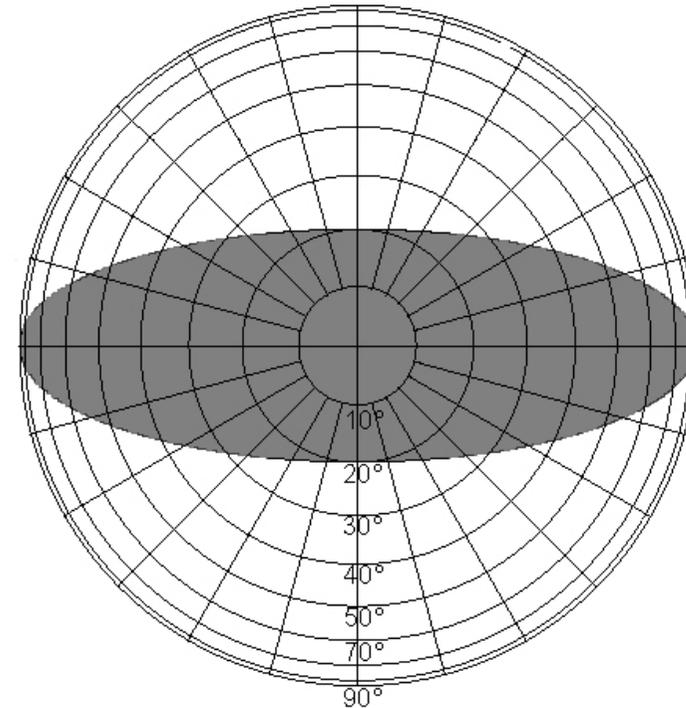


Abb. 3.16: Akzeptanzbereich eines metallischen 20°-CPC

gel) grau angelegten Flächen werden jeweils um den halben Akzeptanzwinkel in entgegengesetzter Richtung aus der Längsschnittebene des CPC-Profils verkippt. Durch Projektion der Kugelschnittlinien in die xy-Ebene ergibt sich der ellipsenförmige Akzeptanzbereich in Abb. 3.15, der hier für eine Akzeptanzhalbwinkel von 20° dargestellt ist. Bei metalli-

schen CPC-Konzentratoren ist die Anzahl der Reflexionen, die zwischen Eintritt und Austritt der Strahlung im Konzentrator stattfinden, eine für die Funktionsweise der Elemente signifikante Größe.

Da auch sehr hochwertige Reflektormaterialien (wie in Abschnitt 2.7 erwähnt) einen Reflexionsgrad unter 95% aufweisen, kann bei einer hohen Anzahl von Reflexionen innerhalb des Konzentrators ein erheblicher Teil der Strahlung beim Durchlaufen des Konzentrators absorbiert werden.

Aus den Abbildungen 3.11-3.13 ist ersichtlich, das sich die Anzahl der Reflexionen für die dargestellten Fälle der Einstrahlung innerhalb und außerhalb des Akzeptanzbereiches stark unterscheidet. Der Teil der Strahlung, der innerhalb des Akzeptanzwinkels einfällt, erreicht die Ausgangsapertur direkt oder spätestens nach einer Reflexion an den Konzentratordwänden. Der Fall, daß jeder Strahl genau einmal reflektiert wird, ist genau für den Akzeptanzhalbwinkel gegeben. Strahlung, die außerhalb des Akzeptanzbereiches einfällt, tritt hingegen erst nach 3-4 Reflexionen wieder aus dem CPC in den Eintrittshalbraum aus (Abb.3.11). Dabei wird ein erheblicher Teil der Strahlung am Reflektormaterial absorbiert. Während die Absorption außerhalb des Akzeptanzbereiches bei Anwendungen zur Energiegewinnung von untergeordneter Bedeutung ist, kann dieser Aspekt im Zusammenhang mit Sonnenschutzanwendungen relevant sein.

Wird das Element als Sonnenschutz so ausgerichtet, daß nur Diffuslicht

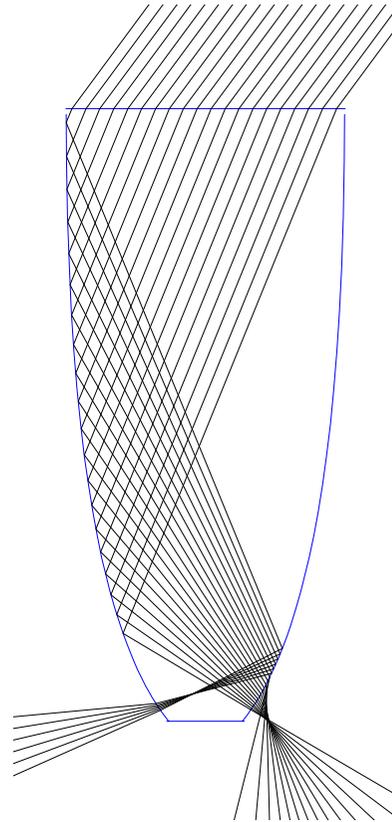


Abb. 3.17: Strahlengang in einem linearen dielektrischen Massiv-CPC bei Einfallrichtung außerhalb des Akzeptanzbereiches

aus dem Akzeptanzwinkelbereich eintritt und direkte Sonnenstrahlung nur aus Richtungen außerhalb des Akzeptanzbereiches einfällt und zurückgeworfen wird, so führt die Mehrfachreflexion und die damit verbundene Strahlungsabsorption zur Erwärmung des Konzentrators. Der absorbierte Anteil der Strahlung muß in diesem Fall als Wärmelast durch geeignete Maßnahmen abgeleitet werden. Zur Verminderung der

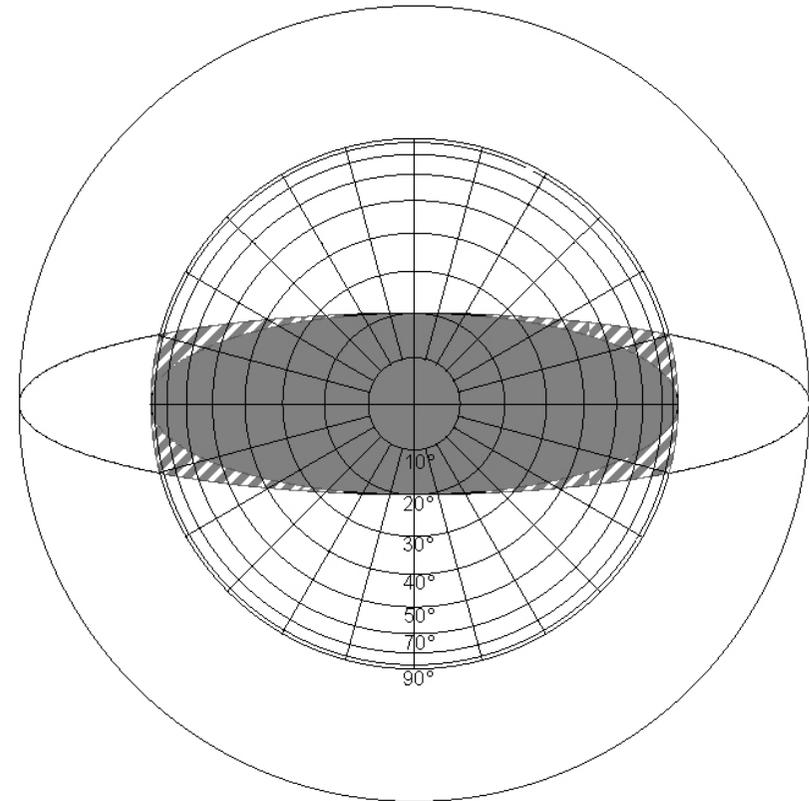


Abb. 3.18: Vergrößerung des Akzeptanzbereiches eines dielektrischen CPC's mit äußerem Akzeptanzhalbwinkel  $\theta=20^\circ$  und Brechungsindex  $n'=1.5$  gegenüber einem Metallreflektor-CPC mit gleichem Akzeptanzhalbwinkel

Absorption werden sehr hochwertige Reflektoren benötigt.

### 3.3.3 Der lineare dielektrische Massiv-CPC

Die Eigenschaften dielektrischer Massiv-CPC-Konzentratoren unterscheiden sich in zwei wesentlichen Punkten von den im Vorhergehenden beschriebenen metallischen Konzentratoren:

Zum einen werden die Strahlen beim Eintritt in ein Medium höherer Brechzahl (beim Durchlaufen der Eingangsapertur) nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz zur Flächennormalen umgelenkt (Abb. 3.17). Hierdurch ergibt sich die Beziehung zwischen dem äußeren Akzeptanzwinkel  $\Psi_{luft}$  und dem inneren Akzeptanzwinkel  $\Psi_{diel}$ :

$$\sin(\Psi_{luft}) = n_{diel} \cdot \sin(\Psi_{diel}) \quad (3.7)$$

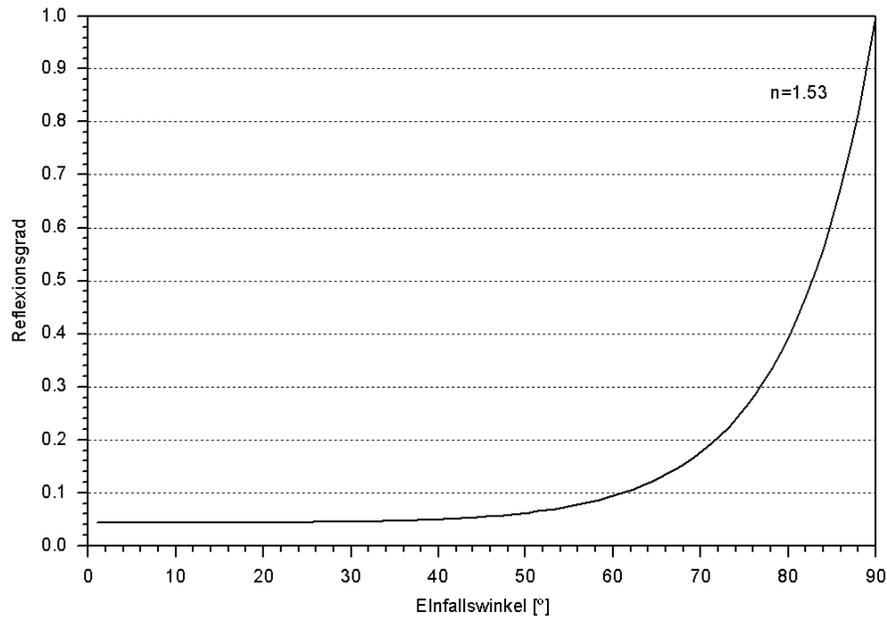


Abb. 3.19: Reflexion an der Außenseite der Eingangsapertur in Abhängigkeit vom Einfallswinkel  $\theta$

Nach dem Eintritt der Strahlung in das dielektrische Medium werden die Strahlen innerhalb des Akzeptanzbereiches durch Totalreflexion an den Konzentratorwänden auf die Austrittsapertur gelenkt. Da das Snelliussche Brechungsgesetz, wie bereits in Abschnitt 2.2 dargestellt, keinen linearen Zusammenhang zwischen dem Eintrittswinkel und der im Medium fortlaufenden Strahlrichtung beschreibt, vergrößert sich der Akzeptanzbereich des dielektrischen CPC mit innerem Akzeptanzhalbwinkel  $\Psi_{\text{diel}}$  im Vergleich zu dem des metallischen CPC mit gleichem Akzeptanzhalbwinkel  $\Psi_0$ . Die entsprechenden Winkelbereiche sind in Abb. 3.18 schraffiert dargestellt.

Zum anderen koppeln Strahlen, die aus Winkelbereichen außerhalb des Akzeptanzbereiches einfallen, größtenteils nach Unterschreiten des für die Totalreflexion notwendigen Grenzwinkels aus den Parabelästen aus (siehe Abb. 3.17). Einige Strahlen werden nach mehreren Totalreflexionen auch in den Eintrittshalbraum zurückgeworfen werden, ohne aus den Konzentratorwänden auszukoppeln oder die Ausgangsapertur zu erreichen. Dieser Fall wird später noch genauer untersucht werden.

Für Einfallswinkel innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches erreichen alle Strahlen wie beim metallischen

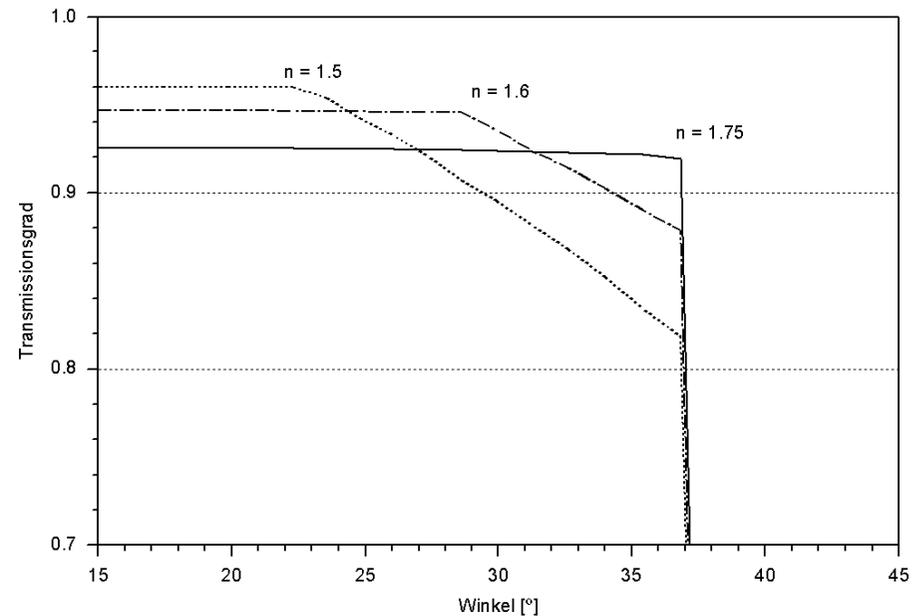


Abb. 3.20: Abflachung der Transmissionskurve durch Auskoppelung von Strahlung für einen 37°-CPC und unterschiedliche Brechzahlen  $n$

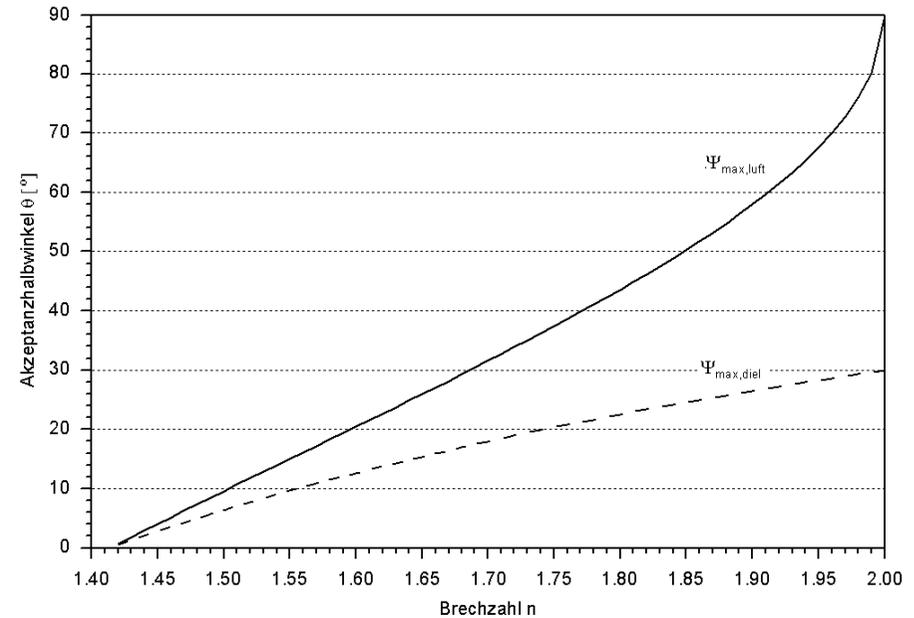


Abb. 3.21: Maximaler innerer und äußerer Akzeptanzwinkel in Abhängigkeit von der Brechzahl  $n$  des Konzentratormediums

CPC direkt oder nach Totalreflexion an den Parabelflanken die Ausgangsapertur, insofern der Grenzwinkel der Totalreflexion nicht überschritten wird. Es kann gezeigt werden, daß dieses Kriterium erfüllt ist, wenn für jeden Punkt des Konzentratorenprofils die folgende Bedingung erfüllt wird [Bru96/2]:

$$\theta_{aus} = 180 - \theta' - 2\alpha_{Tot} \quad [3.8]$$

wobei sich der Grenzwinkel der Totalreflexion direkt aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz mit  $\theta=90^\circ$  ergibt:

$$\alpha_{tot} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad [3.9]$$

Da der Grenzwinkel der Totalreflexion von der Brechzahl  $n_2$  des Konzentratormediums abhängig ist, ergibt sich ein maximal möglicher Akzeptanzwinkel  $\Psi_{max}$ , für den die gesamte Strahlung innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches durch Totalreflexion auf die Ausgangsaperturfläche gelenkt wird (s. Abb. 3.20). Wird die Brechzahl unterschritten, bzw. der Akzeptanzwinkel für ein Medium bestimmter Brechzahl  $n$  überschritten, so koppelt ein Teil der Strahlung am unteren Ende des CPC-Profiles aus. Für ein Medium der Brechzahl 1,5 beträgt der innere Grenzwinkel  $\Psi_{max,die}$   $6,38^\circ$ , der äußere Grenzwinkel  $\Psi_{max,luf}$   $9,5^\circ$ .

Wird der Grenzwinkel überschritten, so wirkt sich dies in einer Abflachung der Transmissionscharakteristik des CPC im Bereich des Akzeptanzwinkels aus (Abb 3.20). Während dieser Effekt für die energetische Wirkungsweise des Elementes in den meisten der im folgenden betrachteten Fälle von untergeordneter Bedeutung ist, kann die Auskoppelung zu Blendungserscheinungen führen, die das visuelle Erscheinungsbild der Elemente beeinträchtigen können. Bei Direkteinstrahlung kann ein ausgekoppelter Anteil von wenigen Prozent bereits starke Blendstreifen verursachen. Da der Winkel der Totalreflexion nur um wenige Grad unterschritten wird, koppelt die Strahlung unter sehr flachen Winkeln aus dem CPC aus. Für nicht zu große Überschreitungen des Grenzwinkels ist die Divergenz der Strahlung gering, sodaß die ausgekoppelten Strahlen nur innerhalb eines engen Winkelbereiches gestreut werden.

Die Auskopplung von Strahlung innerhalb des Akzeptanzbereiches kann nach [WW78] durch eine Korrektur der Profilform vermieden werden, indem das Profil auf der Ausgangsaperturseite ab einem Winkel von  $(\theta_{aus} - \theta')/2$ , den die Tangente des Profils mit der Normalenachse der Aperturfläche bildet, als Gerade weitergeführt wird (s. Abb. 3.22). Für kleine Korrekturen ergibt sich hierdurch nur eine geringfügige Verminderung des Flächenverhältnisses

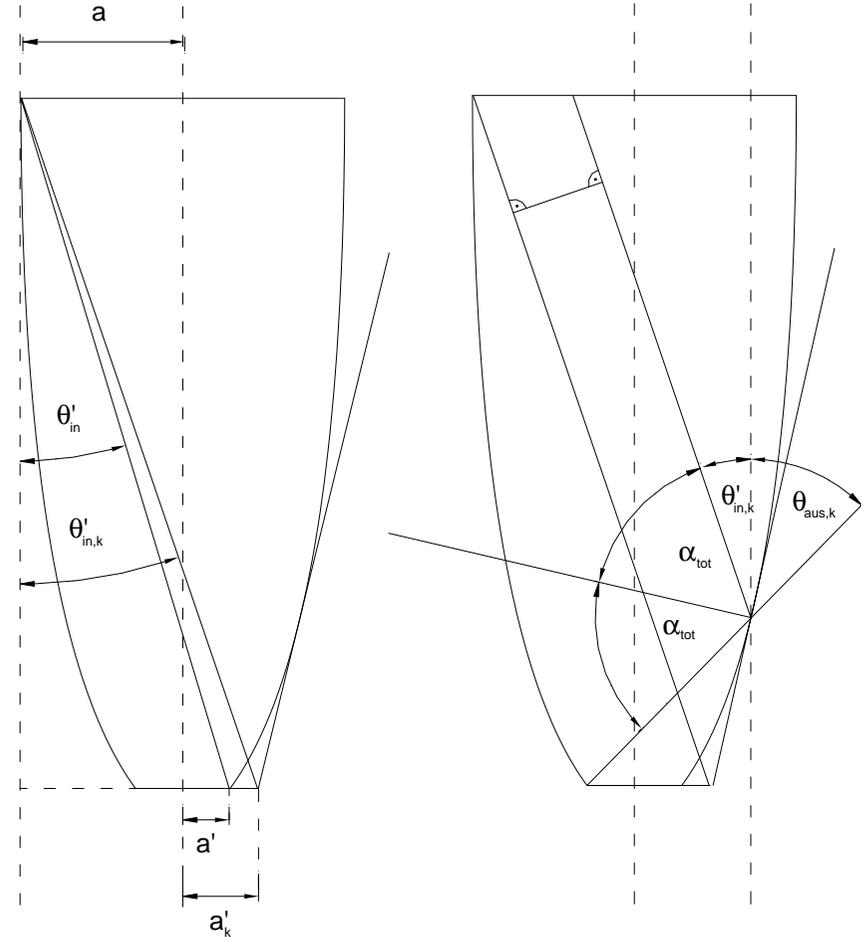


Abb. 3.22: Formkorrektur der Konzentratorwand auf der Ausgangsaperturseite zur Einhaltung der Totalreflexionsbedingung

$a/a'$  der Aperturflächen und somit der Konzentrationsfaktor um den Faktor  $[\sin(\theta_{aus})]^{-1}$ .

Gleichzeitig vergrößert sich der Akzeptanzhalbwinkel nach Abb. 3.22 auf  $\theta_{in,k}$  und es verringert sich der maximale Einfallswinkel der Strah-

lung auf die Aperturfläche von  $90^\circ$  auf  $\theta_{aus,k}$ . Dies bedeutet, daß die Strahlen auf der Ausgangsaperturfläche nicht hemisphärisch, sondern in der Profilschnittebene maximal unter dem Halbwinkel  $\theta_{aus,k}$  einfallen.

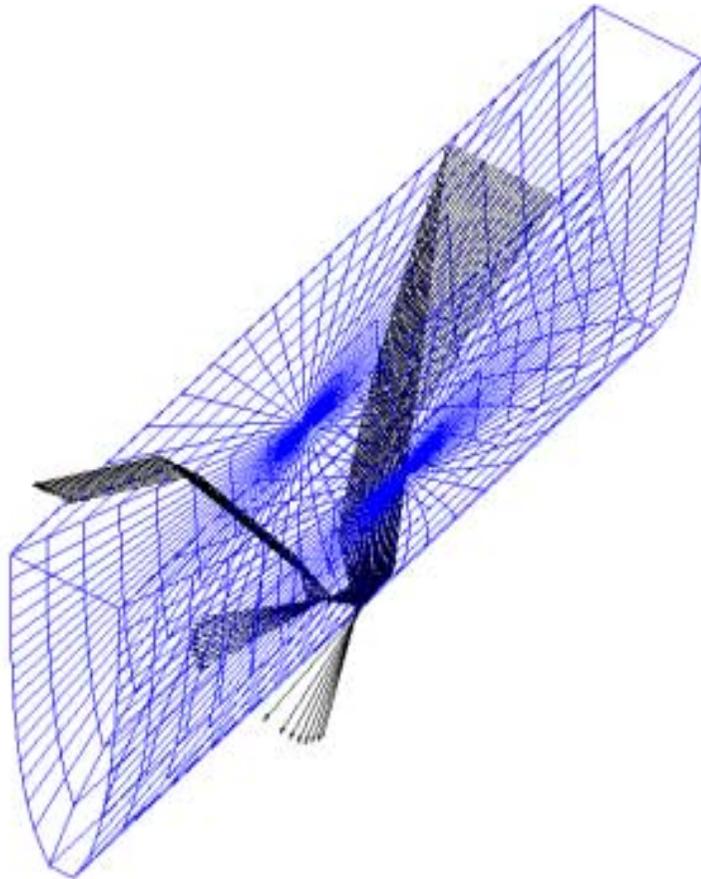


Abb. 3.23: Strahlumkehrung, 3d

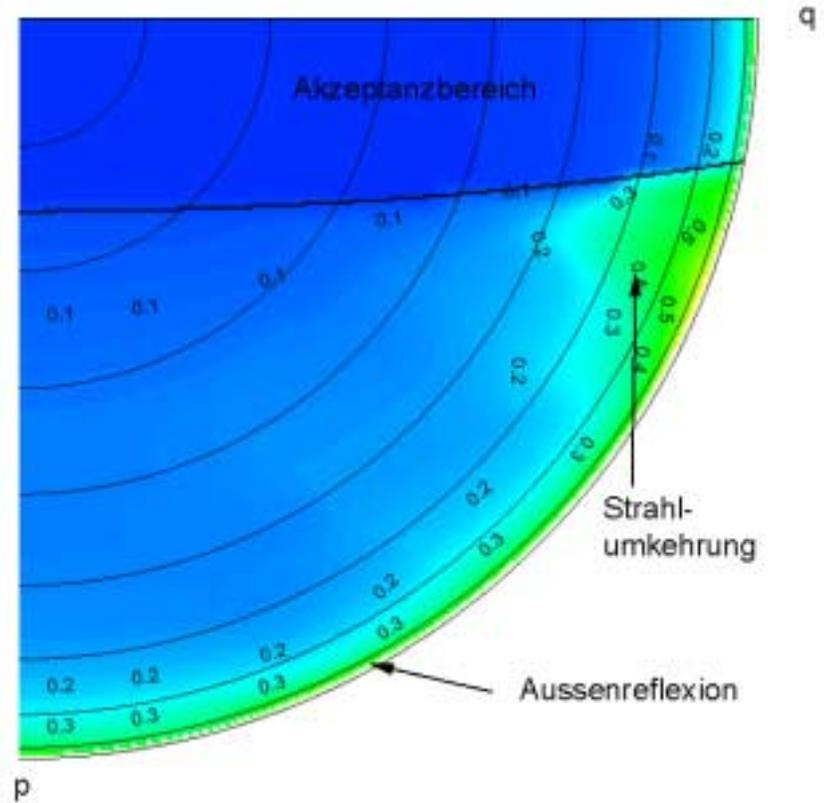


Abb. 3.26: Winkelabhängige Rückreflexion in den Eintrittshalbraum durch innere Totalreflexion und Außenreflexion

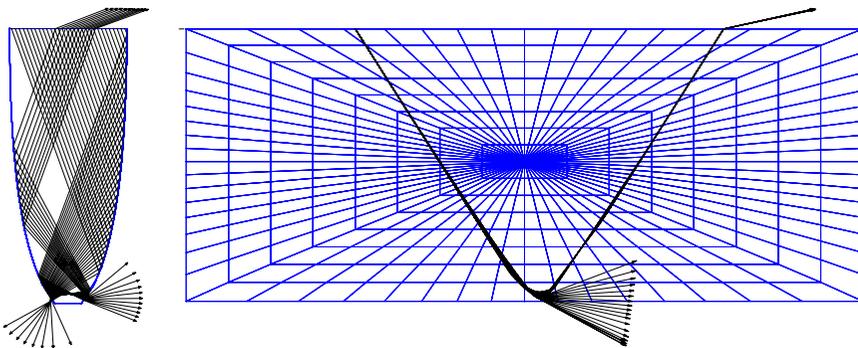


Abb. 3.24 und Abb. 3.25: Strahlumkehrung, Profil- und Längsschnitt

Aufgrund dieser Eigenschaft wird die Form auch als  $\theta_{in}/\theta_{aus}$ -Konverter oder  $\theta_{in}/\theta_{aus}$ -Konzentrator bezeichnet [RW76]. Der Winkel  $\theta_{aus}$  bezeichnet hierbei den maximalen inneren Auftreffwinkel (im Dielektrikum). Wie bereits im Vorangegangenen erwähnt, tritt nicht die gesamte Strahlung, die aus Winkelbereichen außerhalb des Akzeptanzwinkels auf die Eingangsapertur fällt, nach

Durchlaufen des CPC an den Parabelwänden aus.

Durch die spiegelnde Reflexion an der Eingangsapertur wird bereits ein Teil der Strahlung vor dem Eintreten in den CPC reflektiert. Dieser Anteil beträgt für senkrechten Einfall zur Eingangsapertur abhängig von der Brechzahl des CPC-Mediums ca. 4%-5%. Für flache Winkel nimmt

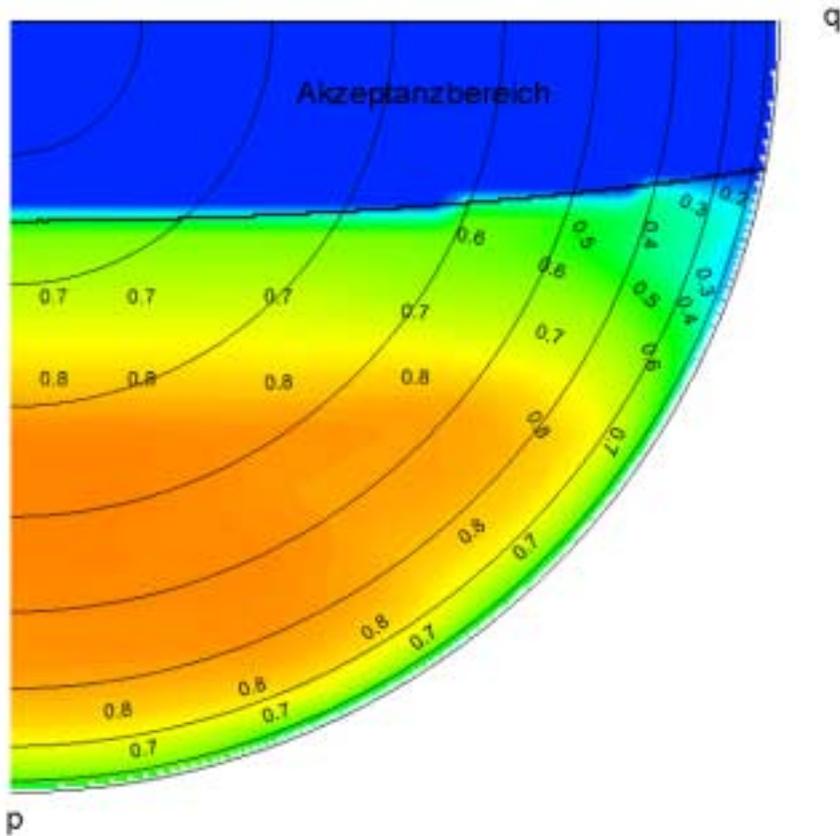


Abb.3.27: Auskopplung aus den Seitenwänden des Konzentrators

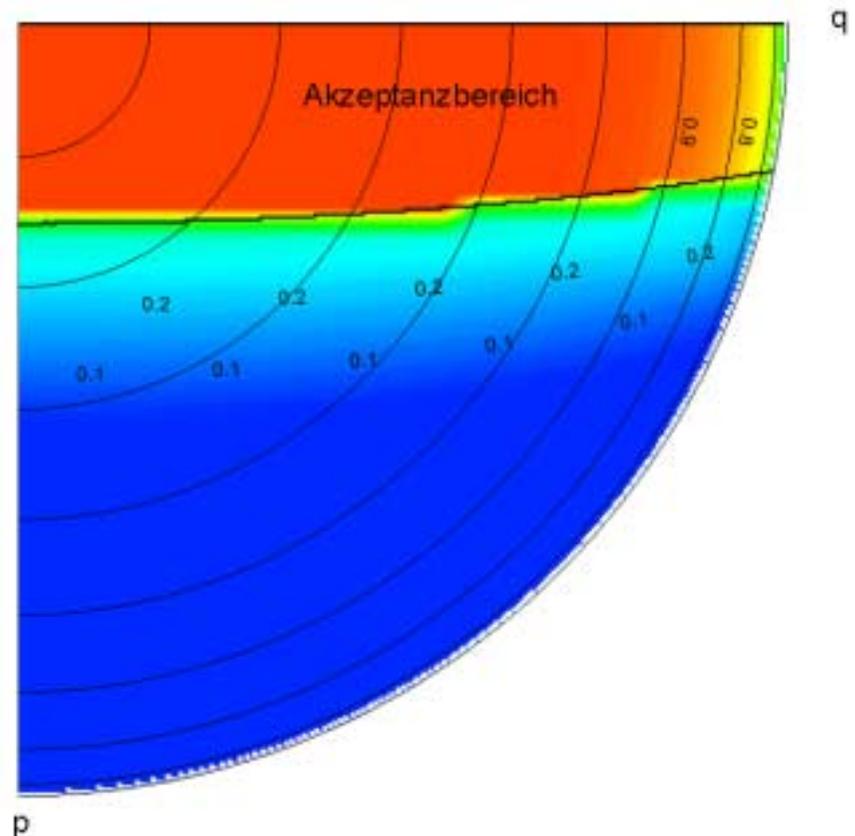


Abb. 3.28: Transmission auf die Ausgangsapertur in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung

der Reflexionsanteil zu (s.a. Abb. 3.19). Darüberhinaus werden einige Strahlen, die außerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches unter flachen Winkeln zur Längsachse des Konzentrators einfallen, innerhalb des Konzentrators durch Totalreflexion zur Eingangsapertur zurückgelenkt. In Abb. 3.23, 3.24 und 3.25 ist dieser Fall für einen 15°-CPC mit einem

Verkürzungsfaktor von 0.4 dargestellt. Die Einfallsrichtung liegt außerhalb des Akzeptanzbereiches. Ein Teil der Strahlen tritt beidseitig am unteren Ende des Konzentratordprofils aus. Einige Strahlen überschreiten jedoch nicht den Grenzwinkel der Totalreflexion und werden in den Konzentratort zurückgelenkt. Diese Strahlen koppeln nach mehreren

inneren Reflexionen an der Ausgangsapertur aus. Im Hinblick auf die Wirkungsweise der CPC-Elemente als Sonnenschutzelemente sind drei Strahlungsanteile zu unterscheiden:

1. Die durch direkte Reflexion an der Außenseite oder durch mehrfache innere Totalreflexion in den

Eintrittshalbraum zurückgelenkten Strahlen

2. Strahlen, die direkt oder nach Totalreflexion an den Konzentratortwänden die Ausgangsapertur erreichen
3. Die aus den Seitenwänden des Konzentrators ausgekoppelten

## Strahlen

In den Abbildungen 3.26, 2.27 und 3.28 sind diese winkelabhängigen Anteile für ein CPC-Element mit einem Akzeptanzhalbwinkel von  $15^\circ$  und einem Verkürzungsfaktor von 0.4 dargestellt. (Die Addition der Diagramme ergibt für jeden Diagrammpunkt den Wert 1.) Aufgrund der vorhandenen Symmetrien beschränkt sich die Darstellung auf den Achtelraum.

Außerhalb des Akzeptanzbereiches wird aufgrund der Verkürzung des Profiles zunächst noch ein Teil der Strahlen auf die Ausgangsapertur gelenkt. Die Transmission ist in diesem Fall für den Einzel-CPC jedoch noch deutlich höher als bei einem Prisma. Die bei CPC-Arrays zu berücksichtigenden Wiedereinkopplungseffekte zwischen benachbarten Konzentratoren werden im nächsten Abschnitt behandelt. Die Stufung der Transmissionskante in den Abbildungen 3.27 und 3.28 ist ein auflösungsbedingter Artefakt.

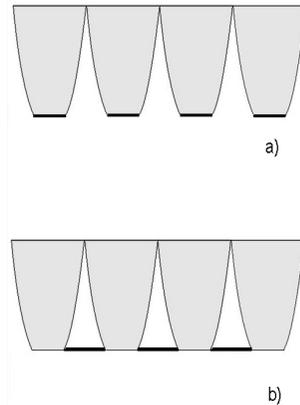


Abb. 3.29: CPC-Array mit opak beschichteten Akzeptanzflächen (a) und mit opaken Zwischenflächen (b)

### 3.4 Dielektrische CPC-Arrays als Sonnenschutzelemente

Bisher wurden nur einzelne lineare CPC-Elemente betrachtet. Durch Aneinanderfügen mehrerer CPC-Elemente zu einer Fläche erhält man eine Struktur, die ähnlich den bekannten Prismenplatten als Sonnenschutz und Lichtumlenkelement eingesetzt werden kann. Zum Einsatz der CPC-Elemente als Sonnenschutz müssen die CPC-Elemente auf der Austrittsseite mit einer reflektierenden Fläche versehen werden, da die Strahlumkehrung nicht wie bei Prismen rein durch Totalreflexion erfolgen kann. In Abhängigkeit vom auszublenkenden Winkelbereich kann diese Fläche direkt auf den Ausgangsaperturen (Abb.3.29a) oder

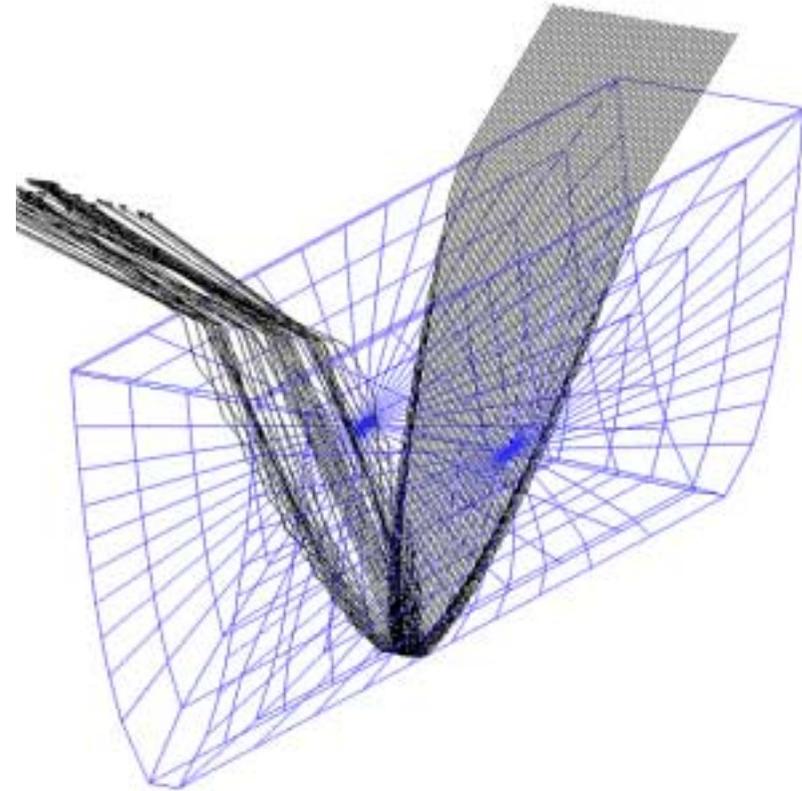


Abb. 3.30: Strahlengang in einem dielektrisch gefüllten CPC mit verspiegelter Ausgangsapertur

in den Zwischenräumen der Ausgangsaperturen (Abb. 3.29b) liegen. Die Reflexionseigenschaften der Beschichtung sind maßgeblich für die Funktion und das optische Erscheinungsbild der Elemente.

#### 3.4.1 CPC mit spiegelnd reflektierender Beschichtung auf der Ausgangsapertur

Durch eine spiegelnde Beschichtung der Ausgangsapertur erfolgt für alle Strahlrichtungen innerhalb des Akzeptanzbereiches eine teilgerichtete Rückstrahlung in den Außenraum. Abb. 3.28 zeigt den Strahlengang in einem CPC mit einem Akzeptanzhalbwinkel von  $12^\circ$  und

verspiegelter Ausgangsapertur. Die Strahlen fallen in der Längsschnitt-ebene unter einem Winkel von  $60^\circ$  ein. Die Divergenz der zurückge-lenkten Strahlen entsteht durch die Totalreflexion an den Konzentrorflanken. Sie ist in der Ebene des Pro-filschnittes stärker ausgeprägt als in der Längsschnittebene. Die Refle-xion an der opaken Reflektorfläche ist in diesem Fall nicht verlustfrei. Es erscheint daher unter funktionalen Gesichtspunkten zur Erhöhung der Reflektivität sinnvoll, die Beschichtung nicht optisch an die dielektri-sche Grenzfläche anzukoppeln, damit ein Teil der Strahlen durch innere Totalreflexion zurückgelenkt wird. Eine Kontaktbeschichtung ist technisch jedoch wesentlich einfacher herstellbar.

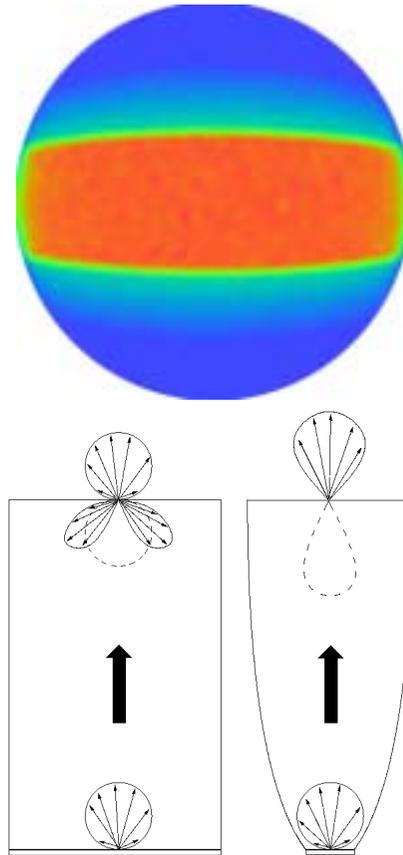


Abb. 3. 31: Ausstrahlung in den Außenraum und innere Reflexion bei isotroper Ausstrahlung an der Eingangsapertur

### 3.4.2 CPC mit diffus reflektieren-der Beschichtung auf der Aus-gangsapertur

Die Blendung durch spiegelnde Reflexion kann weitgehend vermieden werden, indem die Beschichtung mit einem diffus streuenden Material erfolgt (Diese Aussage wird im Fol-genden weiter präzisiert). Die

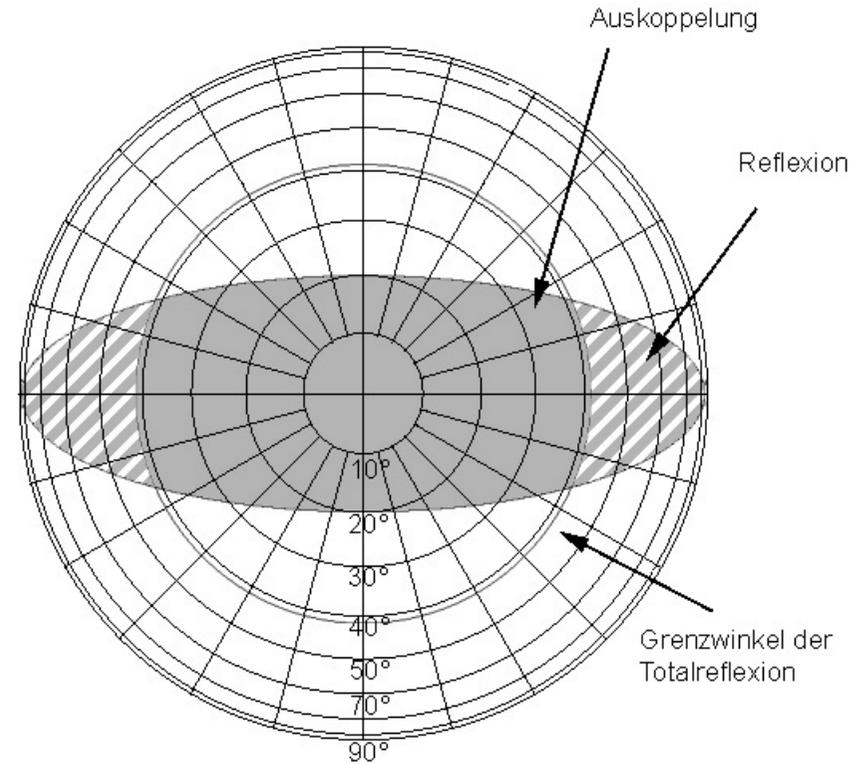


Abb. 3. 32: Einstrahlungsverteilung an der Innenseite der Eingangsapertur bei isotroper Ausstrahlung an der Ausgangsapertur, transmittierter (grau unterlegt) und in den CPC durch Totalreflexion zurückreflektierte Winkelbereiche (schraffiert), Totalreflexionswinkel  $41,7^\circ$

Beschichtung muß hierzu optisch an die Ausgangsapertur koppeln, da andernfalls ein Teil der auftreffenden Strahlen durch innere Totalreflexion zurückgelenkt wird, ohne aus dem Konzentror auszutreten und die Streufläche zu erreichen. Durch die Ankoppelung an die Ausgangsapertur wird die einfallende Strahlung dif-fus zurückgestreut. Da mit diffus

streuenden weißen Oberflächen generell höhere Reflexionsgrade erreicht werden können als mit metallisch (spiegelnd) reflektierenden Beschichtungen, kann der Absorptionsanteil durch die streuende Beschichtung gegenüber einer spiegelnd reflektierenden Beschichtung verringert werden. Ob der resul-tierende Reflexionsgrad des Elemen-

tes mit streuender Beschichtung höher oder niedriger als mit spiegelnd reflektierenden Beschichtung ist, hängt davon ab, zu welchem Anteil die reflektierten Strahlen das Element durch die Eingangsapertur verlassen. Dieser Aspekt wird im folgenden Abschnitt genauer betrachtet.

### 3.4.3 Rückstrahlung in den Eintrittshalbraum

Zur Vereinfachung werden zunächst nur Strahlen betrachtet, die von der Ausgangsaperturfläche ausgehen (die also bereits reflektiert wurden). Die Ausgangsapertur wird hierzu als gleichmäßig diffus abstrahlend angenommen (Abb. 3.31). Die Strahlen erreichen die Innenseite der Eingangsapertur direkt oder nach Totalreflexion am Konzentratorprofil. Die isotrope Ausstrahlungsverteilung wird beim Durchlaufen des Konzentrators in die in Abb. 3.32 dargestellte Verteilung transformiert. Strahlen, die aus den schraffierten Winkelbereichen auf die Innenseite der Ausgangsapertur gelangen, werden durch Totalreflexion zur Ausgangsapertur zurückgelenkt.

Durch die Mehrfachreflexionen verlängert sich die durchschnittliche optische Weglänge und die Anzahl nicht verlustfreier diffuser Reflexionen innerhalb des Konzentrators, wodurch sich generell der Absorptionsanteil erhöht. Die in Abschnitt

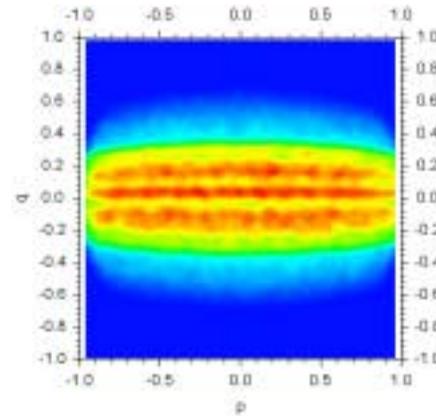


Abb. 3. 33: Rückstrahlung bei gerichteter Einstrahlung unter einem Einfallswinkel von 2°

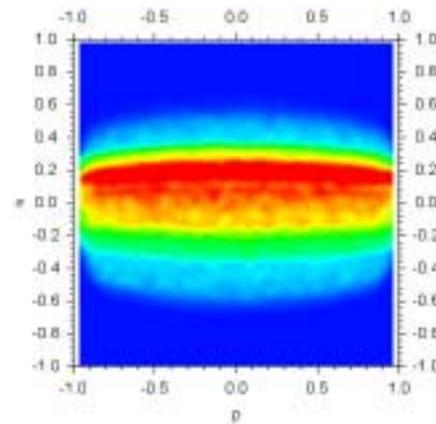


Abb. 3. 34: Rückstrahlung bei gerichteter Einstrahlung unter einem Einfallswinkel von 10°

FLUX / UNIT-AREA for Z=-29.3

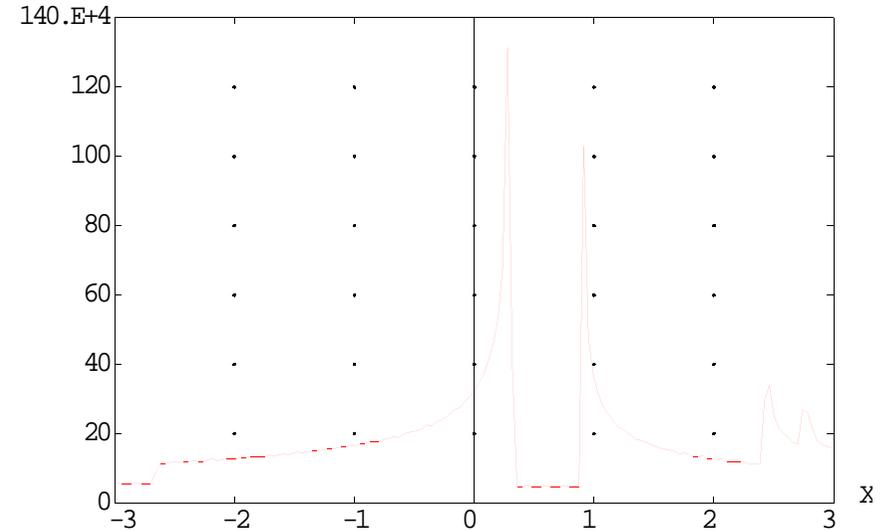


Abb. 3. 35: Räumlicher Intensitätsverteilung auf der Ausgangsaperturfläche bei einem Einfallswinkel von 2°,  $\Psi=15^\circ$ ,  $a'=3$

FLUX / UNIT-AREA for Z=-29.3

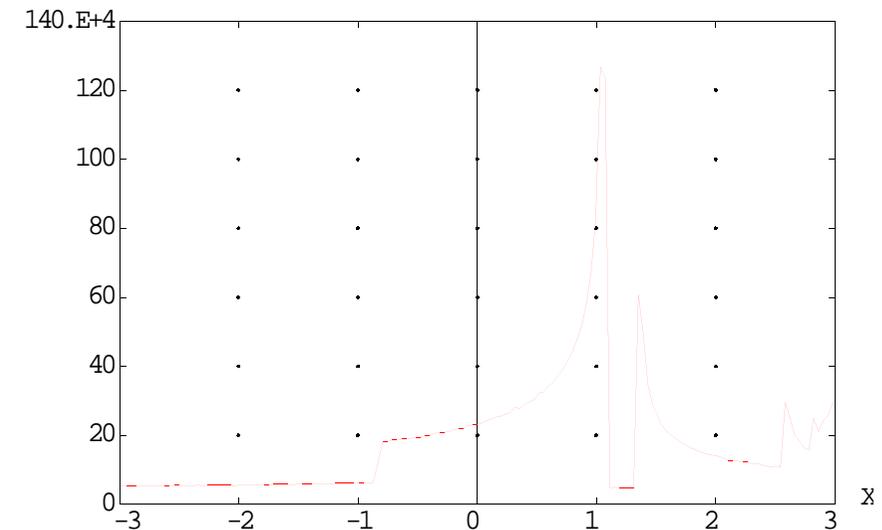


Abb. 3. 36: Räumlicher Intensitätsverteilung auf der Ausgangsaperturfläche bei einem Einfallswinkel von 10°,  $\Psi=15^\circ$ ,  $a'=3$

3.3.3 beschriebene Formkorrektur zur Vermeidung von Strahlauskoppelung innerhalb des Akzeptanzbereiches führt bei diffus rückstreuenden Aperturflächen zu einer partiellen Auskoppelung der rückgestreuten Strahlung. Da die Rückreflexion an der Ausgangsapertur diffus erfolgt, überschreiten die auf dem geraden Abschnitt der Konzentratorwände auftreffenden Strahlen teilweise den Totalreflexionswinkel.

Fällt die Strahlung nicht isotrop ein, so weist auch die räumliche Verteilung auf der Ausgangsapertur und die Winkelverteilung der Rückstrahlung in den Außenraum eine Anisotropie auf. Bei gerichteter Einstrahlung ist die Winkelverteilung der Rückstrahlung stark vom Einfallswinkel abhängig. In Abb. 3.33-3.34 ist die berechnete Rückstrahlungsverteilung eines 15°-CPC für die Einfallswinkel 2° und 10° und in Abb. 3.35 und 3.36 die räumliche Intensitätsverteilung auf der Ausgangsaperturfläche dargestellt. Mehrfache Reflexionen an der Ausgangsapertur wurden bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Durch Mehrfachreflexionen ist eine gleichmäßige Erhöhung im gesamten Rückstrahlungsbereich zu erwarten. Je näher der Eintrittswinkel am Akzeptanzwinkel des CPC liegt, desto stärker bildet sich in der Intensitätsverteilung auf der Ausgangsapertur und in der Rückstrahlungsverteilung ein Maximum aus. Die Elemente wirken so in

Abhängigkeit von der Einfallsrichtung breit streuend oder stark vorwärtsgerichtet streuend. Liegt die Einstrahlrichtung sehr nah am Akzeptanzhalbwinkel, so ist die Rückstrahlung zu einem Teil quasiparallel. Die visuelle Wirkung der Elemente im Außenraum ist dadurch stark abhängig von der Position des Betrachters bzw. dem Sichtwinkel, unter dem der Betrachter den Konzentrator sieht, und von der Einstrahlungsrichtung der Sonne. Hierbei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

1. Betrachterwinkel und Einstrahlwinkel der Sonne liegen innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches (Fall a in Abbildung 3.37). Auf den Betrachter wirkt das CPC-Element als diffus leuchtende Fläche in der Farbe der Eingangsaperturbeschichtung. Die Flächenhelligkeit kann dabei in Abhängigkeit von der Betrachterposition und dem Sonnenwinkel stark variieren.
2. Der Betrachter befindet sich innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches, der Einstrahlungswinkel der Sonne liegt außerhalb des Akzeptanzbereiches (Fall b). Die beschichteten Aperturflächen werden nur durch die Diffusstrahlung des Himmels beleuchtet, während die Direktstrahlung durch das CPC-Element transmittiert wird. Der Beobachter nimmt

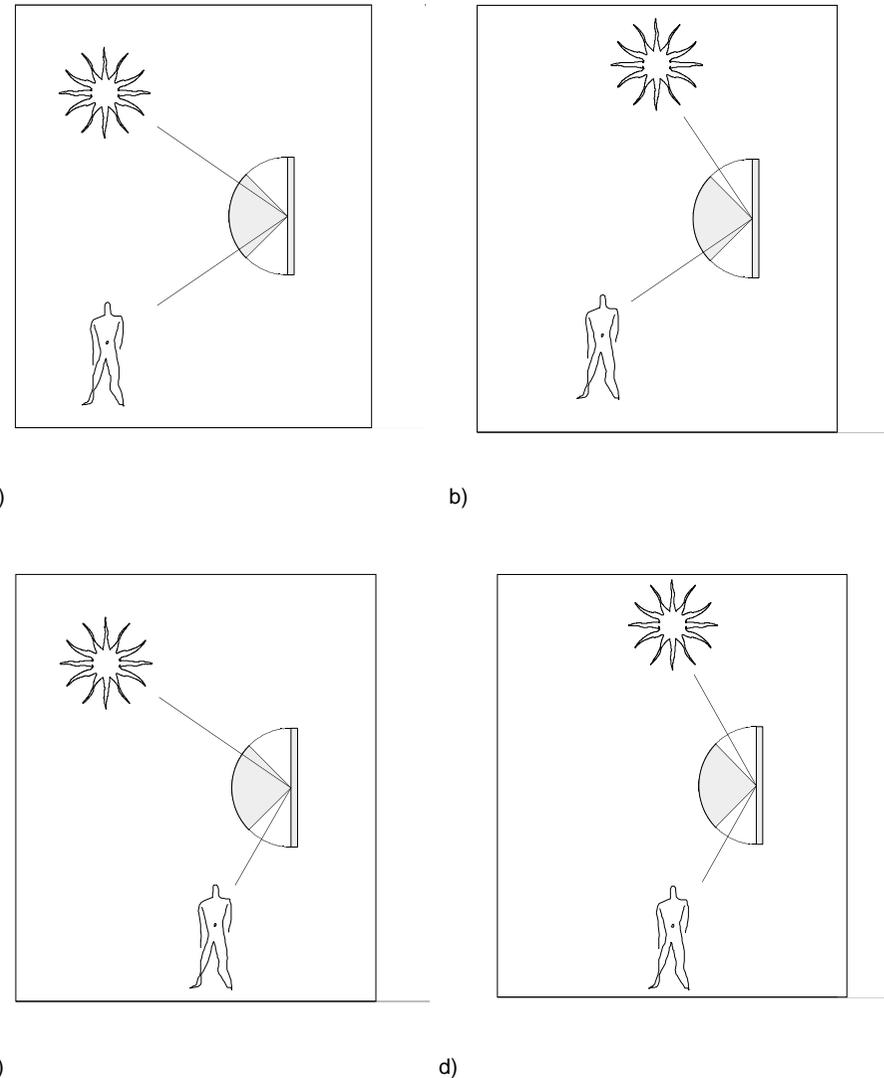


Abb. 3.37: Relative Position der Sonne zum CPC-Element und Betrachterposition (grau: Akzeptanzbereich)

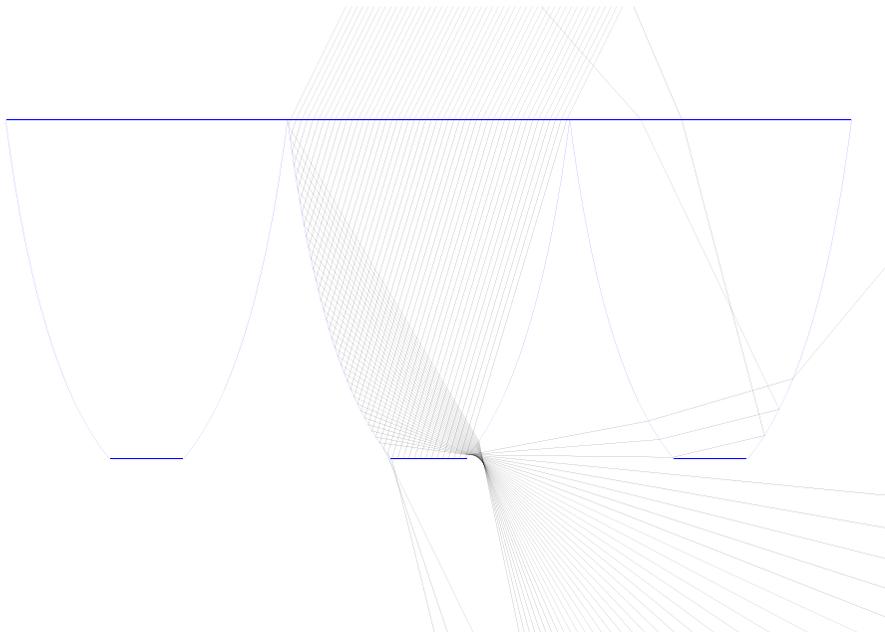


Abb. 3.38: Einkoppelung transmittierter Strahlen in benachbarte CPC-Elemente eines Arrays

die Fassade als farbige Fläche wahr, wobei der direkte Strahlungseintrag nicht an der Oberflächenhelligkeit ablesbar wird. Der Eindruck gleicht daher eher einer unbesonnenen Fläche.

- Der Betrachter befindet sich außerhalb des Akzeptanzbereiches (Fall c und d). In diesem Fall ist die Beschichtung der Aperturflächen nicht sichtbar. Das Element erscheint als transluzente Fläche, durch die je nach Ausrichtung die Helligkeit des Innenraumes oder des Himmels wahrgenommen wird.

### 3.4.4 Transmission

Die aus Winkelbereichen außerhalb des Akzeptanzbereiches einfallende Strahlung koppelt, wie bereits beschrieben, nach einer oder mehreren Totalreflexionen an den Konzentratorwänden aus dem CPC aus. Parallel einfallende Strahlen werden dabei durch die Krümmung der Konzentratorwände in divergente Strahlenbündel aufgespalten. Bei arrayförmig angeordneten CPC-Elementen koppelt für bestimmte Einfallrichtungen ein Teil der transmittierten Strahlen in den benachbarten CPC ein (Abb. 3.38). Dies führt zu einer Verminderung der Transmission, da die wieder eingekoppelten Strahlen

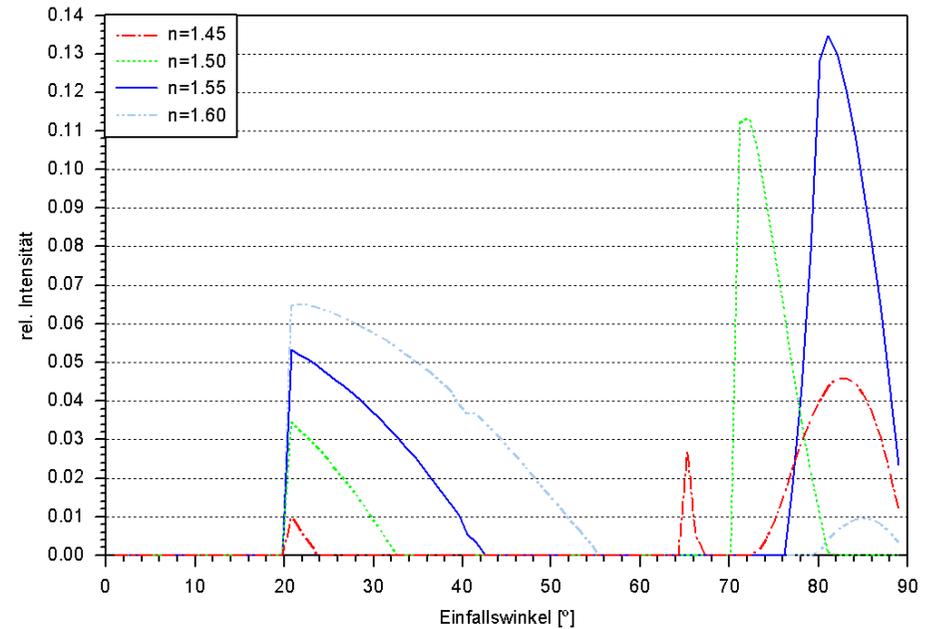


Abb. 3.39: Relative Intensität der wiedereingekoppelten Strahlung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel für verschiedene Brechzahlen

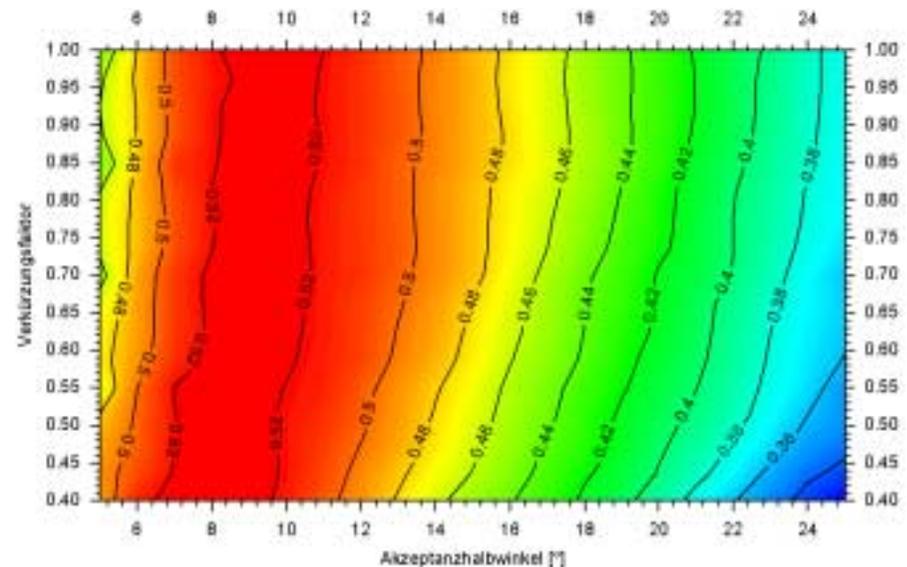
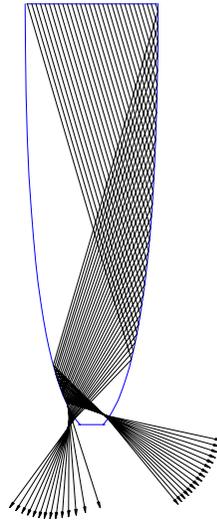


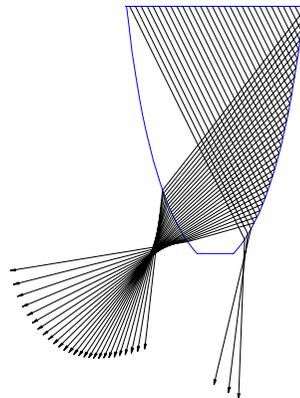
Abb.3.40: Hemisphärisch-hemisphärischer Transmissionsgrad einer CPC-Platte in Abhängigkeit vom Akzeptanzhalbwinkel und Verkürzungsfaktor für  $n = 1.53$

überwiegend aus der Eingangsaper-  
tur austreten. Die Größenordnung  
dieses Effektes ist von den Konzen-  
tratorparametern und der Einfall-  
richtung abhängig. Der Effekt tritt  
verstärkt für Einfallswinkel nahe des  
Akzeptanzwinkels und für flache  
Winkel ab  $70^\circ$  auf.

In Abb.3.39 ist die relative Intensität  
der wiedereingekoppelten Strahlung  
für verschiedenen Brechzahlen eines  
CPC mit  $\Psi_{\text{Luff}}=20^\circ$  über dem Einfall-  
winkel der Strahlung aufgetragen.  
Der hemisphärisch-hemisphärische  
Transmissionsgrad  $\tau_{\text{hem-hem}}$  der dielek-  
trischen Plattenstruktur ist vom  
Akzeptanzhalbwinkel  $\Psi$ , der Brech-  
zahl  $n$  des Dielektrikums und dem  
Verkürzungsfaktor  $N_{\text{cut}}$  abhängig. In  
Abb. 3.40. ist  $\tau_{\text{hem-hem}}$  gegen den  
Akzeptanzhalbwinkel und den Ver-  
kürzungsfaktor für eine feste Brech-  
zahl  $n=1.53$  aufgetragen. Für Akzep-  
tanzhalbwinkel zwischen  $7^\circ$  und  $10^\circ$   
erreicht die Transmission ein Maxi-  
mum von ca. 0.53. Für größere  
Akzeptanzhalbwinkel vermindert sich  
der Transmissionsgrad aufgrund des  
größeren Ausblendbereiches, für  
kleinere Winkel dominieren die  
beschriebenen Effekte der Stralum-  
kehrung durch Totalreflexion sowie  
der Strahlwiedereinkoppelung, die  
ebenfalls eine Verminderung des  
Transmissionsgrades bewirken. Die  
Richtungsverteilung der transmittier-  
ten Strahlen ist von der Konzentra-  
torgeometrie und dem Einfallswinkel  
abhängig.



Strahlengang ohne Verkürzung



Strahlengang mit Verkürzung

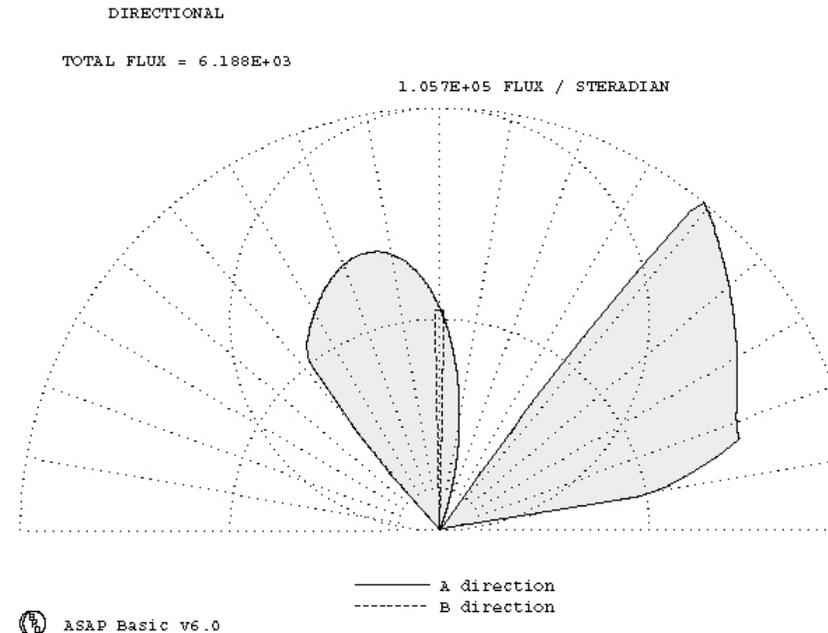


Abb. 3. 41: Richtungsverteilung der Ausstrahlung eines  $15^\circ$ -CPC, Verkürzungsfaktor 1

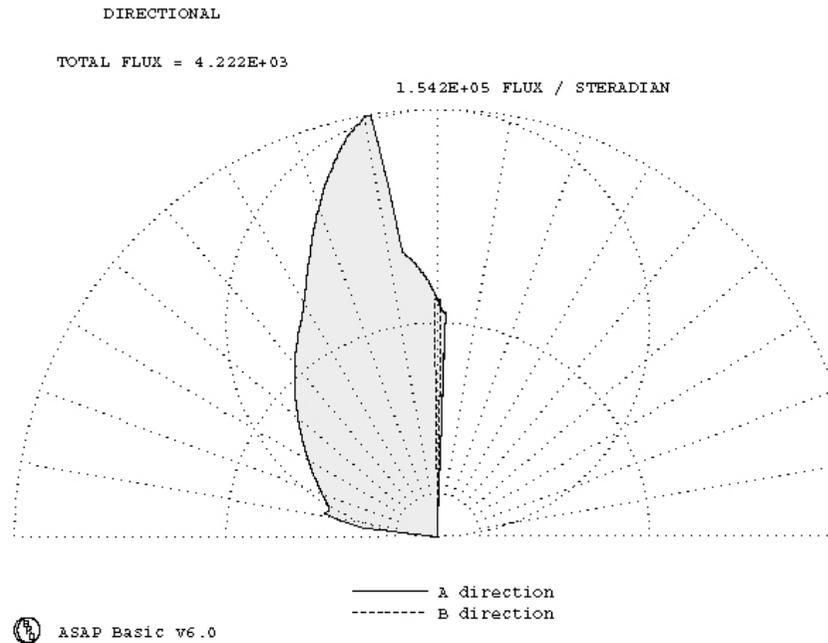


Abb. 3. 42: Richtungsverteilung der Ausstrahlung eines  $15^\circ$ -CPC, Verkürzungsfaktor 0.4

Durch lange Konzentratorenformen wird das Strahlenbündel in zwei Komponenten aufgespalten, deren Hauptrichtungen in verschiedene Halbraumsegmente gerichtet sind (Abb. 3.41). Für die Direktlichtumlenkung ist die Beschränkung der Ausstrahlung auf einen Viertelraum wünschenswert, damit das Element beispielsweise blendfrei im Überkopfbereich eingesetzt werden kann. Dies kann durch Verkürzung der Profilform erreicht werden, wie in Abb. 3.42 für einen 15°-CPC mit einem Verkürzungsfaktor von 0.4 gezeigt wird.

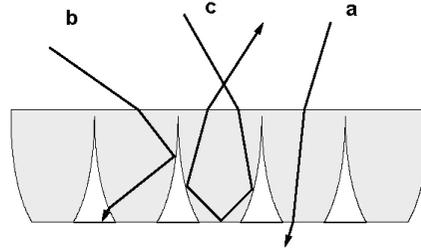


Abb. 3.43: Strahlengänge in einem CPC-Array mit opaken Zwischenflächen: Transmission durch die Aperturflächen (a), Auskopplung durch die Seitenwände (b) Retroreflexion durch innere Totalreflexion (c).

### 3.5 CPC-Arrays mit opaken Zwischenflächen

Wie am Beginn des Abschnitts 3.4 erwähnt, können an Stelle der Ausgangsaperturen auch die Aperturzwischenflächen durch ein opakes Material geschlossen werden. Dadurch werden nur Strahlen innerhalb des Akzeptanzbereiches transmittiert, während andere Richtungen auf die opaken Zwischenflächen gelenkt und reflektiert oder absorbiert werden. Da der Lichteintritt und Lichtaustritt der transmittierten Strahlen an planen und zueinander parallelen Flächen erfolgt, ist zudem die Durchsicht durch das Element möglich.

#### 3.5.1 Transmission

Die CPC-Form mit einem inneren Austrittswinkel  $\theta_{\text{aus}}$  von 90° hat für diese Art der Anwendung den Nachteil, daß ein Teil der innerhalb des Akzeptanzbereiches einfallenden Strahlen an der Ausgangsapertur durch Totalreflexion umgelenkt wird (Fall c in Abb. 3.43). Dadurch verringert sich die Transmission innerhalb des Akzeptanzbereiches. Der entsprechende Strahlengang in einem 25°/90°-CPC ist in Abb. 3.44 dargestellt. Bei Nichterfüllung des in Abschnitt 3.3 formulierten Totalreflexionskriteriums, also für zu große Akzeptanzwinkel bzw. nicht ausreichend hohe Brechzahl  $n$ , koppelt außerdem ein Teil der Strahlen vor Erreichen der Austrittsapertur an den Seitenwänden aus. Die Transmission des Elementes im Akzeptanzberei-

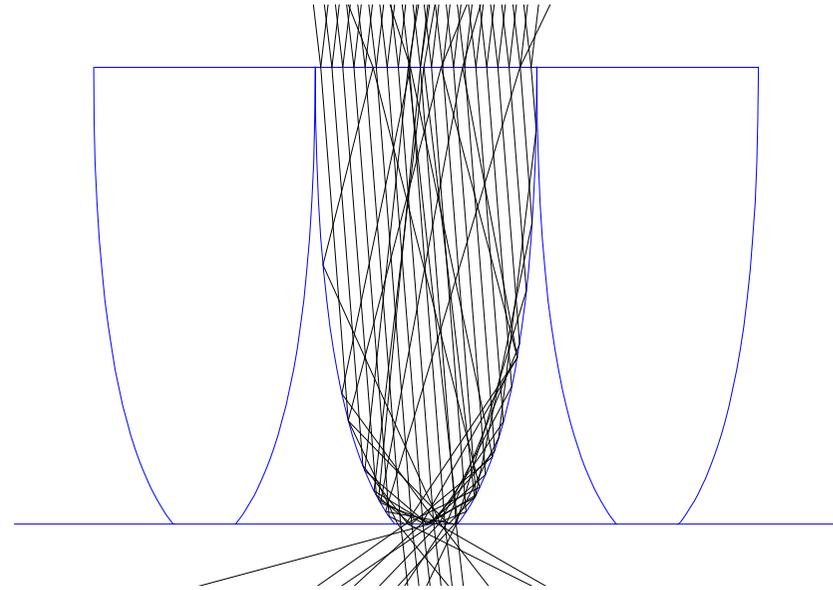


Abb.3 44: Transmission durch einen CPC ohne Formkorrektur bei Strahleinfall in der Profilebene. Einige Strahlen werden durch innere Totalreflexion in den Eintrittshalbraum zurückgelenkt

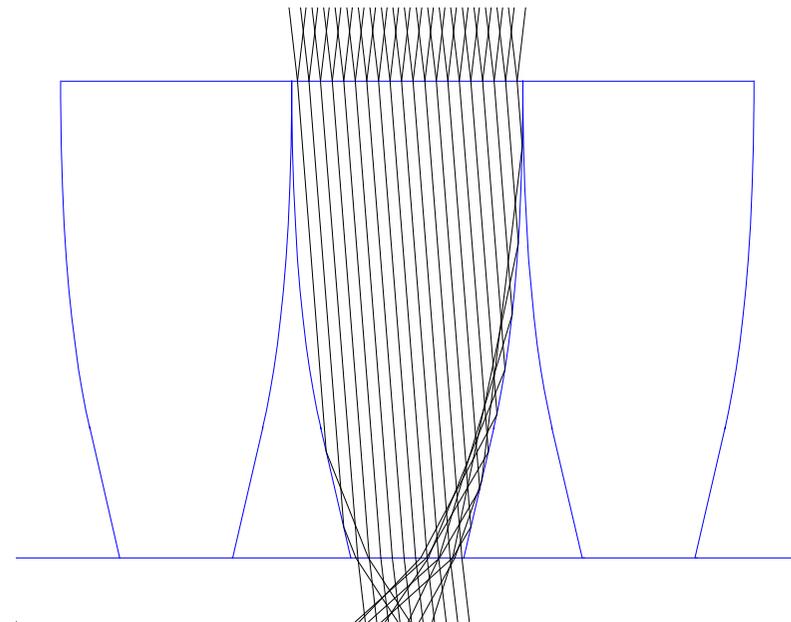


Abb.3 45: Transmission bei Strahleinfall in der Profilebene durch ein CPC-Profil mit Formkorrektur. Alle eintretenden Strahlen koppeln an der Ausgangsapertur aus

ches kann dadurch erhöht werden, daß eine Formkorrektur analog zu dem in Abschnitt 3.3 beschriebenen Verfahren durchgeführt wird, durch den ein  $\theta_{in}/\theta_{aus}$ -Konzentrator mit  $\theta_{aus} < 90^\circ$  entsteht. Da hier der innere Auftreffwinkel auf der Aperturfläche nicht größer als der Totalreflexionswinkel werden soll, lautet die Bedingung für den maximalen Winkel  $\theta_{aus,k}$  in der Profilebene:

$$\theta_{aus,k} = 90^\circ - \alpha_{tot} \quad (3.9)$$

Die Formkorrektur bewirkt, daß in der Profilebene alle Strahlen innerhalb des Akzeptanzbereiches transmittiert werden, da der Totalreflexionswinkel an der Ausgangsapertur nicht erreicht wird (Abb.3.45). Außerhalb der Profilebene liegende Strahlen können jedoch unter bestimmten Bedingungen zurückgeworfen werden (siehe auch Abschnitt 3.3). Gleichzeitig führt die Formkorrektur zu einer Vergrößerung der Ausgangsapertur, wodurch sich das Konzentrationsverhältnis verringert und ein größerer Akzeptanzbereich ergibt. Für eine exakte Herleitung dieses Zusammenhanges sei hier auf [WW89] verwiesen.

Durch die Formkorrektur ist der Akzeptanzhalbwinkel, der zur Konstruktion des CPC verwendet wird, nicht mehr identisch mit dem sich ergebenden tatsächlichen Akzeptanzhalbwinkels der Transmission.

Zur Unterscheidung wird der Winkel, der gemäß Abschnitt 3.3.1 zur Konstruktion des Profiles verwendet wird, im folgenden als Konstruktionshalbwinkel  $\Psi_{kon}$  bezeichnet.

In Abbildung 3.47 ist die Erhöhung der hem.-hem. Transmission bei gleichem Konstruktionswinkel durch die beschriebene Formkorrektur ersichtlich. Abbildung 3.46 zeigt die winkelabhängige Transmission ohne und mit Formkorrektur für einen  $25^\circ$ -CPC. Zur Verdeutlichung des Unterschiedes zwischen Konstruktionswinkel und resultierendem Akzeptanzhalbwinkel sind beide Fälle dargestellt. In beiden Fällen ist die Formkorrektur so gewählt, das die Bedingung  $\theta_{aus} = 90^\circ - \alpha_{Tot}$  erfüllt ist, wobei  $\alpha_{Tot}$  hier  $41,8^\circ$  beträgt. Der Konstruktionswinkel des CPC mit Formkorrektur und einem Akzeptanzhalbwinkel von  $25^\circ$  (blau) beträgt  $20^\circ$ . Bei der unkorrigierten CPC-Form wird die Transmission bei gerichteter Einstrahlung für die dargestellten Einfallsrichtungen um ca 30% vermindert. Dies entspricht auch der Verminderung bei hemisphärischer Einstrahlung (Abb.3.47).

Bis zu einem Einfallswinkel von ca.  $17^\circ$  überwiegt in Abb. 3.48 der Verlust durch innere Totalreflexion an der Ausgangsapertur, für größere Winkel wird der Verlust überwiegend durch Auskoppelung verursacht, was zu der bereits in Abschnitt 3.3 erläuterten Abschrägung der Transmissi-

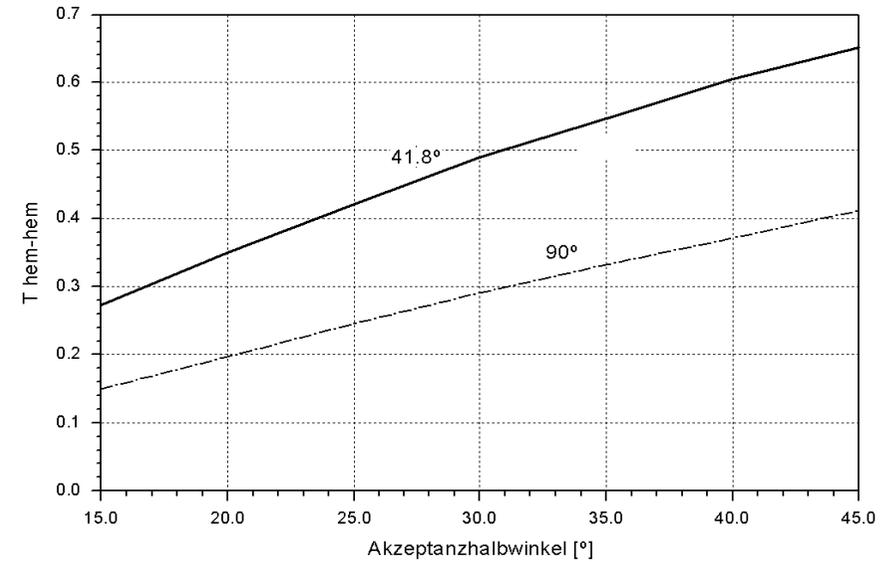


Abb. 3.46: Hemisphärisch-hemisphärische Transmission für  $\theta_{out} = 90^\circ$  und  $\theta_{out} = 41,8^\circ$  in Abhängigkeit vom Konstruktionshalbwinkel  $\Psi_{kon}$

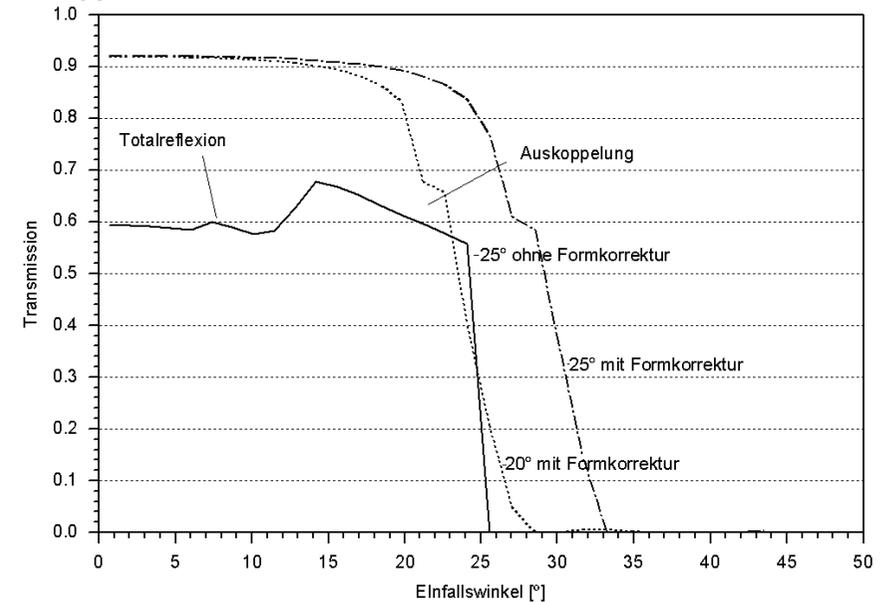


Abb. 3.47: Winkelabhängige Transmission eines  $25^\circ$ -CPC in der Profilebene ohne und mit Formkorrektur (Punkte: Konstruktionshalbwinkel  $20^\circ$ , Akzeptanzhalbwinkel  $25^\circ$ , Strichpunkte: Konstruktionshalbwinkel  $25^\circ$ , Akzeptanzhalbwinkel  $34^\circ$ )

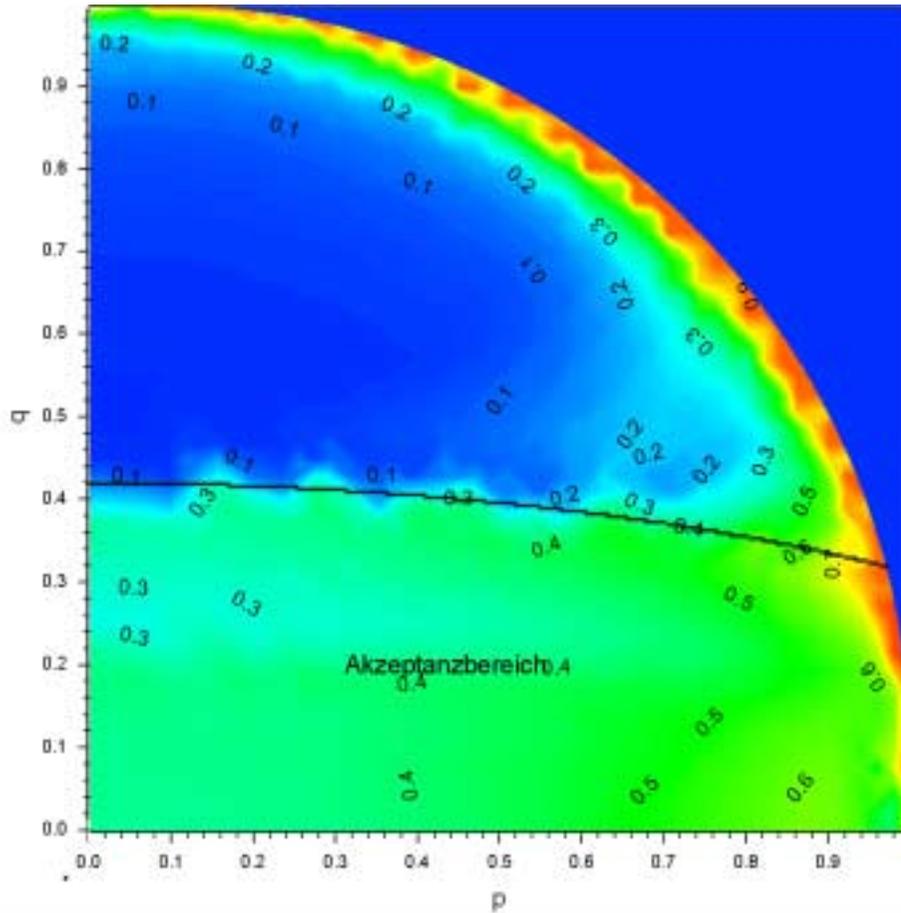


Abb. 3. 48: Winkelhängige Reflexion eines 25°/90°-CPC-Arrays mit opaken Zwischenflächen, Strahlen der Kategorie 1 und 2

onskurve führt. Durch die Formkorrektur verbreitert sich der Übergangsbereich von Transmission zu Reflexion auf ca. 10°.

### 3.5.2 Reflexion

Die Strahlengänge, die zu Reflexionsbeiträgen in den Außenraum beitragen, können auch hier in drei Kategorien eingeteilt werden (s. a. Abb. 3.50):

1. Spiegelnde Reflexion an der planen Außenseite der Eingangsoberflächen

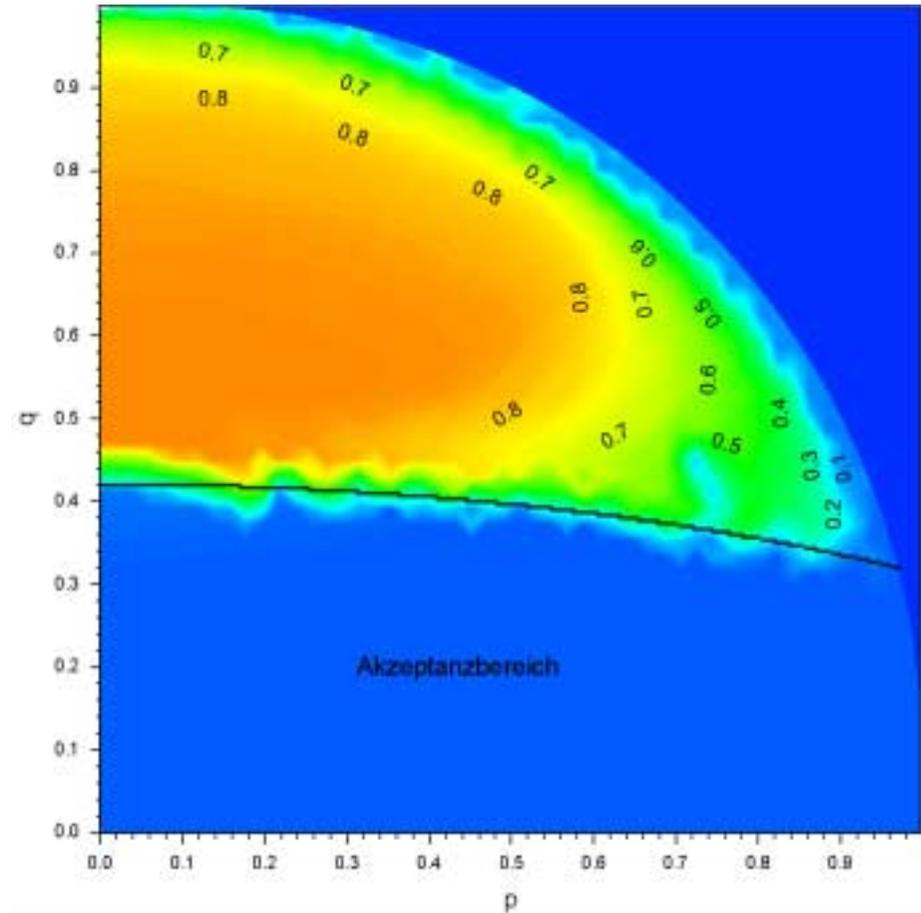


Abb. 3.49: Winkelhängige Reflexion eines 25°/90°-CPC-Arrays mit opaken Zwischenflächen, Strahlen der Kategorie 3

2. Innere Totalreflexion an den Seitenwänden und der Ausgangsoberfläche
3. Auskoppelung an den Konzentratortflächen, Rückstreuung an den Zwischenflächen und Wiedereinkoppelung an den Konzentratortwänden

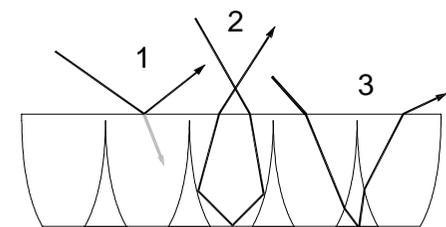


Abb. 3.50: Strahlengänge, die zu Reflexionsbeiträgen führen

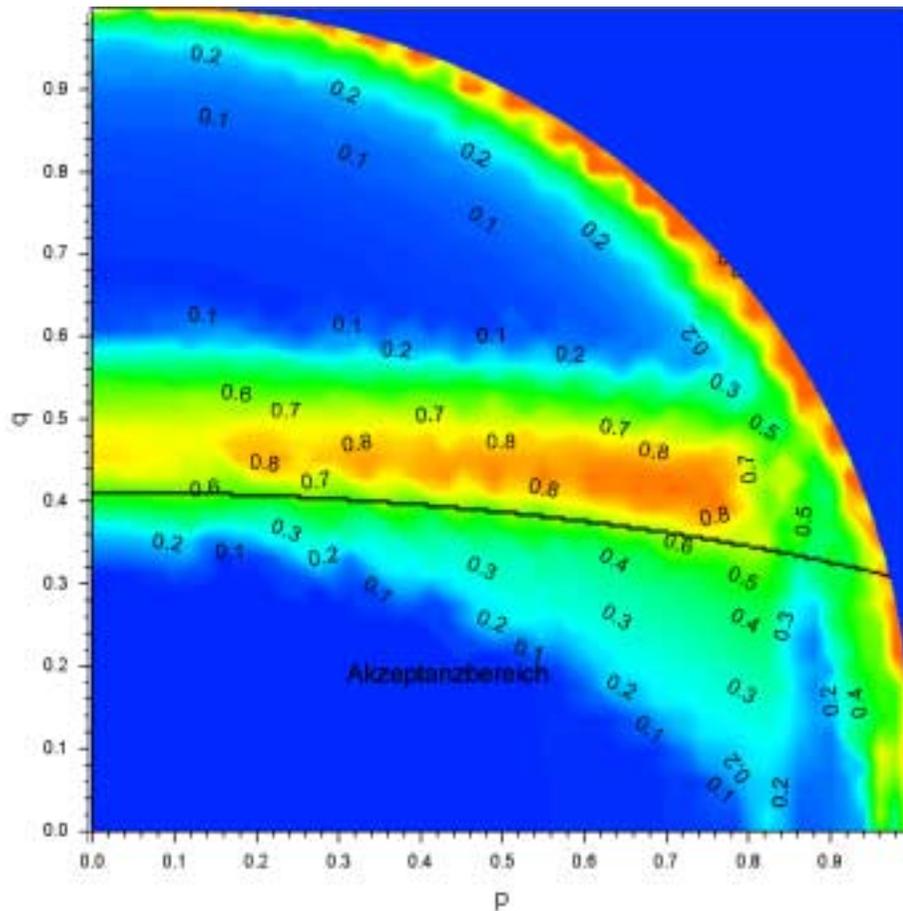


Abb. 3.51: Winkelhängige Reflexion des 25°-41.8°-CPC durch Strahlen der Kategorie 1, 2 (Spiegelnde Reflexion)

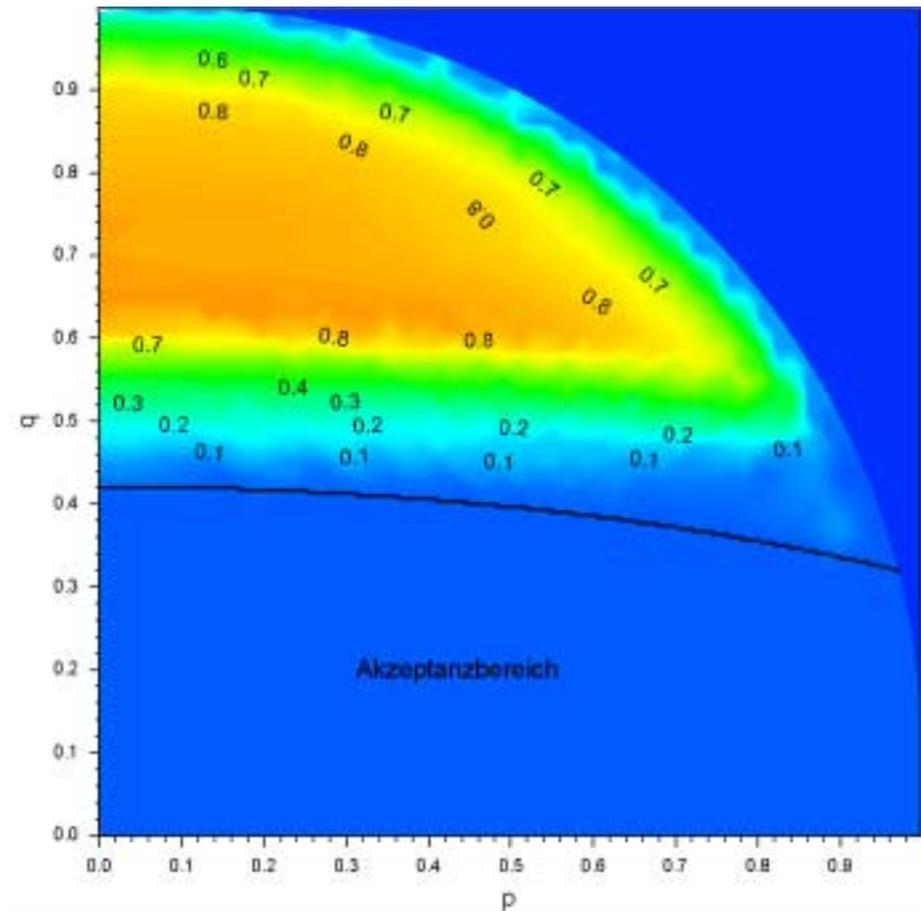


Abb. 3.52: Winkelhängige Reflexion eines 25°-41.8°-CPC durch Strahlen der Kategorie 3 (Diffuse Reflexion)

Da nur bei den zu Kategorie 3 zählenden Strahlengängen ein Streuprozeß innerhalb des Strahlenganges stattfindet, erscheint das Element aus Winkelbereichen, in denen bei der Rückstrahlung die beiden ersten Reflexionsprozesse überwiegen, in Teilbereichen spiegelnd. Für eine genauere Betrachtung sind in Abbildung 3.48 die winkelabhängigen

Strahlenanteile aus Kategorie 1 und 2 und in Abb. 3.49 der Anteil, der die Zwischenflächen erreicht und diffus reflektiert wird (Kategorie 3), dargestellt.

Innerhalb des Akzeptanzbereiches wird bei der bereits beschriebenen 25°/90°-CPC-Variante ein Anteil von 0.4-0.5 spiegelnd reflektiert. Da die

Reflexion in diesem Bereich nicht durch direkte innere Totalreflexion an der Ausgangsapertur, sondern über die Konzentratorwände erfolgt, erscheinen nur die sichtbaren Bereiche der Seitenwände von außen als spiegelnde Flächen.

Bei normalen Tageslichtverhältnissen ist aufgrund der wesentlich

höheren Außenleuchtdichten zu erwarten, daß die Durchsicht von außen nach innen durch die Reflexion dennoch stark beeinträchtigt wird. Insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung im Akzeptanzwinkelbereich entsteht bei dieser Konzentratorgeometrie auf der Außenseite ein Blendstreifen sehr hoher Leuchtdichte.

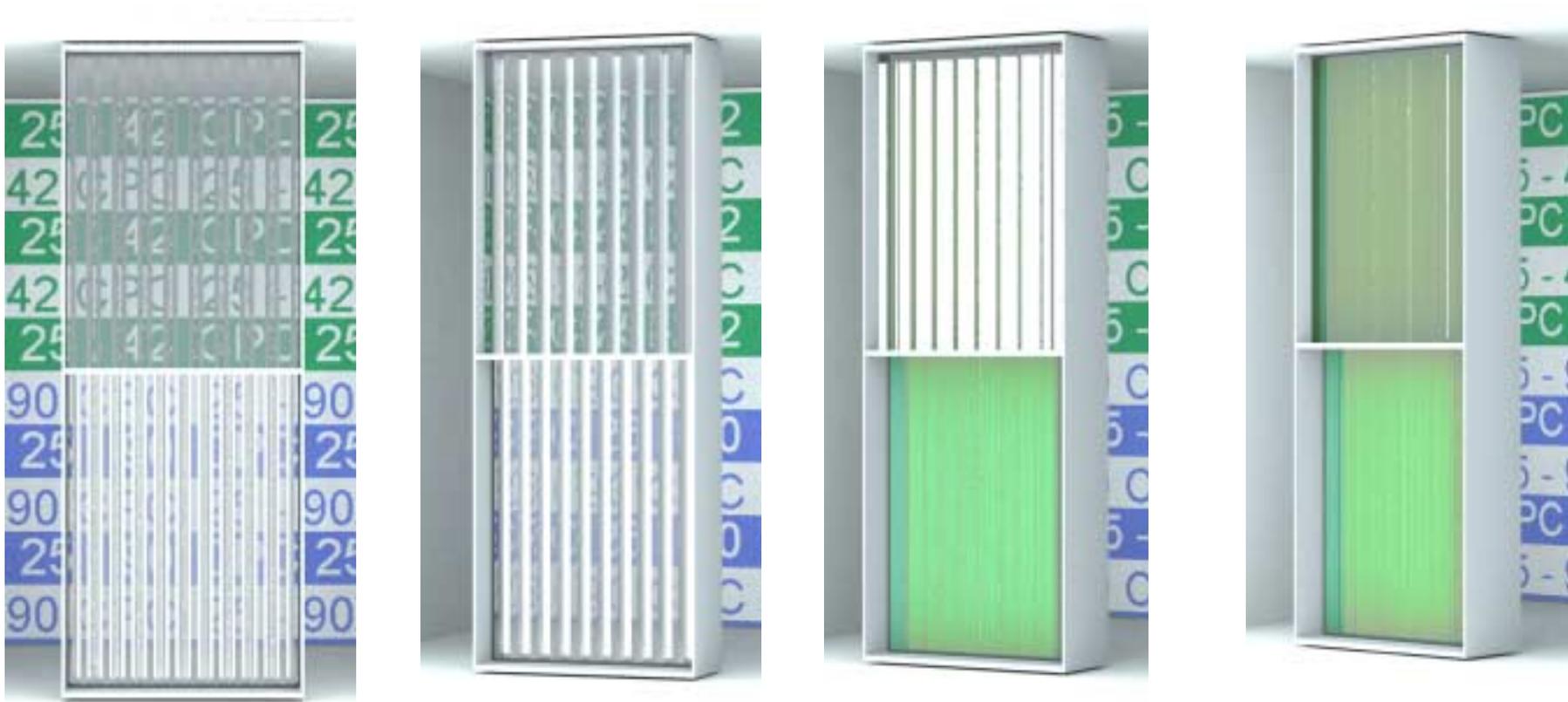


Abb. 3.53: 25°-41,8°-CPC-Array (obere Hälfte) und 25°-90°-CPC-Array (untere Hälfte): Durchsicht, spiegelnde und diffuse Reflexion bei verschiedenen Betrachtungswinkeln, Drehwinkel 0°, 20°, 30°, 40°

Außerhalb des Akzeptanzbereiches wird die Reflexion hauptsächlich durch Strahlen der Kategorie 3 verursacht, spiegelnde Reflexion der Kategorie 2 entsteht nur bei flachen Einfallswinkeln in Richtung der Längsachse. Aus Betrachtungswinkeln außerhalb des Akzeptanzbereiches erscheint das Element dadurch in der Farbe der opaken Zwischenflächen. Durch die Begrenzung des Austrittswinkels wird die spiegelnde Reflexion innerhalb des Akzeptanz-

bereiches des 25°/41,8°-CPC-Arrays stark reduziert. Außerhalb des Akzeptanzbereiches nimmt die spiegelnde Reflexion für q-Werte zwischen 0.4 und 0.6 auf Werte über 0.8 zu. Der hohe Reflexionsanteil entsteht in diesem Bereich durch Strahlengänge der Kategorie 3, also durch Strahlen, die im unteren begradigten Teil des Konzentrators umgelenkt werden, ohne den Grenzwinkel der Totalreflexion zu überschreiten. Für q-Werte über 0.6 kop-

peln alle eintretenden Strahlen wie bei der 25°/90°-Variante aus und erreichen die Zwischenflächen.

Abb. 3.53 zeigt eine Computervisualisierung der beschriebenen CPC-Elemente für verschiedene Sichtwinkel. In der oberen Rahmenhälfte befindet sich das 25°/41,8°-CPC-Array, in der unteren Hälfte das 25°/90°-CPC-Array. Für die opaken Zwischenflächen wurden zur besseren Unterscheidung von den spie-

gelnden Reflexionen (weiß) eine grüne Färbung gewählt.

Bei frontaler Betrachtung tritt spiegelnde Reflexion nur bei der 25°/90°-Variante auf. Im Akzeptanzbereich wird die Totalreflexion durch Strahlen der Kategorie 2 verursacht. Dadurch wirken nur die sichtbaren Teile der Konzentratordwände von außen stark spiegelnd, während die Ausgangsaperturflächen durchsichtig bleiben. Für den hier dargestellten Fall hoher

Außenhelligkeit und geringerer Innenhelligkeit wird die Durchsichtsmöglichkeit durch die spiegelnde Reflexion stark eingeschränkt. Bei Dunkelheit erhöht sich die Transparenz durch die Umkehrung des Verhältnisses zwischen Innen- und Außenhelligkeit. Die 25°/42°-Variante ermöglicht auch dadurch eine bessere Durchsicht, daß die Ausgangsaperturflächen größer sind als bei der 25°/90°-Variante. Bei einem Drehwinkel von 20° ist für beide Varianten eine starke Bildzerlegung zu beobachten, da der Sehstrahl nur noch zu einem geringen Anteil von der Eingangsapertur direkt zur Ausgangsapertur gelenkt und zu einem größeren Anteil an den Konzentratoren umgelenkt wird. Der Flächenanteil der spiegelnden Reflexion vergrößert sich bei der 25°/90°-Variante gegenüber der frontalen Blickrichtung. Auch bei der 25°/42°-Variante sind die Profillflächen bereits deutlicher zu erkennen, der Anteil der spiegelnden Reflexion liegt jedoch noch unter 10%. Bei einem Drehwinkel von 30° liegt der Beobachterpunkt bereits außerhalb des Akzeptanzbereiches. Hier erreicht die spiegelnde Reflexion der 25°/42°-Variante das Maximum von ca. 0.7-0.8, sodaß nahezu die gesamte Fläche spiegelnd wirkt.

Bei der 25°/90°-Variante koppelt der Sehstrahl bereits vollständig auf die opaken Zwischenflächen aus, sodaß ein gleichmäßige Farbwirkung ent-

steht. Bei einem Betrachtungswinkel von 40° wird der Sehstrahl für beide Varianten vollständig ausgekoppelt. (Aufgrund des perspektivischen Öffnungswinkels ist auf der rechten Seite der 25°/42° - Variante noch ein schmaler Reflexionsstreifen sichtbar.) Die 25°/42° - Variante

wirkt aus diesem Sichtwinkel dunkler als die 25°/90°-Variante, da durch den hohen spiegelnden Reflexionsanteil im Ausblendbereich weniger Licht die opaken Zwischenflächen erreicht als bei der 25°/90°-Variante. In Abb. 3.54 ist ein vertikales Fassadenelemente der 25°/42° - Vari-

ante bei verschiedenen Lichtsituationen und aus verschiedenen Beobachter-Standpunkten visualisiert. Bei Annäherung an die Fassade entsteht der visuelle Eindruck, daß sich die Fassade zur Mitte schließt. Dieser Effekt ist im Prinzip auch von herkömmlichen Lamellensystemen



Abb. 3.54: Außenwirkung eines 25°/42°-CPC-Elementes mit opaken Zwischenflächen bei bedecktem Himmel für verschiedene Entfernungen zwischen Beobachterposition und Fassade. Bei Verkürzung der Distanz (r.) schließt sich die Fassade optisch von der Mitte nach oben und unten.



Abb. 3.55: Außenwirkung eines 25°/42°-CPC-Sonnenschutzes mit opaken Zwischenflächen bei direkter Besonnung

links: der Neigungswinkel der Sonnenschutzelemente beträgt 15°. Im unteren Bereich der Fassade liegt der Blickwinkel im Akzeptanzbereich der CPC-Elemente. Die Fassadenstruktur und der Inneraum werden von außen wahrgenommen. Die obere Reihe der Elemente liegt für den gewählten Standpunkt außerhalb des Akzeptanzbereiches im Winkelbereich der spiegelnden Reflexion. Oben rechts im Bild ist der Übergang zu diffuser Reflexion erkennbar

rechts: der Neigungswinkel beträgt 45°, die Sonnenschutzelemente werden vollständig aus Sichtwinkeln außerhalb des Akzeptanzbereiches wahrgenommen. Dadurch wird der Übergang zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion sichtbar

bekannt, mit dem Unterschied, das sich hier eine sehr viel schärfere Trennlinie zwischen Durchsichtbereichen und geschlossenen Bereichen abbildet. Der Verlauf und die Breite des Übergangsbereiches ist auch von der Ausrichtung des CPC-Elementes in der Fassade abhängig. Dieser Aspekt soll durch die Visualisierung in Abbildung 3.55 verdeutlicht werden.

### 3.5.3 Durchsicht von Innen nach Außen

Die Durchsicht von innen nach außen wird durch die äußere Totalreflexion nicht beeinflusst. Die direkte Durchsicht von innen ist jedoch (aufgrund des Prinzips der Umkehrbarkeit des Strahlenganges) auch nur für Sichtwinkel innerhalb des Akzeptanzwinkelbereiches möglich.

Für größere Winkel erfolgt die Transmission des Sehstrahls vollständig durch innere Reflexion an den Konzentratorwänden. Nähert sich der Sichtwinkel der Normalenachse, so nimmt der Anteil der am Konzentratorprofil umgelenkten Strahlen ab, bis der Sehstrahl den Grenzwinkel  $\beta$  erreicht, bei dem alle Strahlen direkt von der Ausgangsapertur zur Eingangsapertur gelangen (Abb. 3.56). Für unverkürzte Konzentratoren ist der Winkel durch die folgenden Gleichungen gegeben:

$$L_0 = (a + a') \cot \Psi_0 \quad (3.10)$$

$$a = \frac{a'}{\sin \Psi_0} \quad (3.11)$$

$$\tan \beta_{diel} = \frac{a - a'}{L_0} \quad (3.12)$$

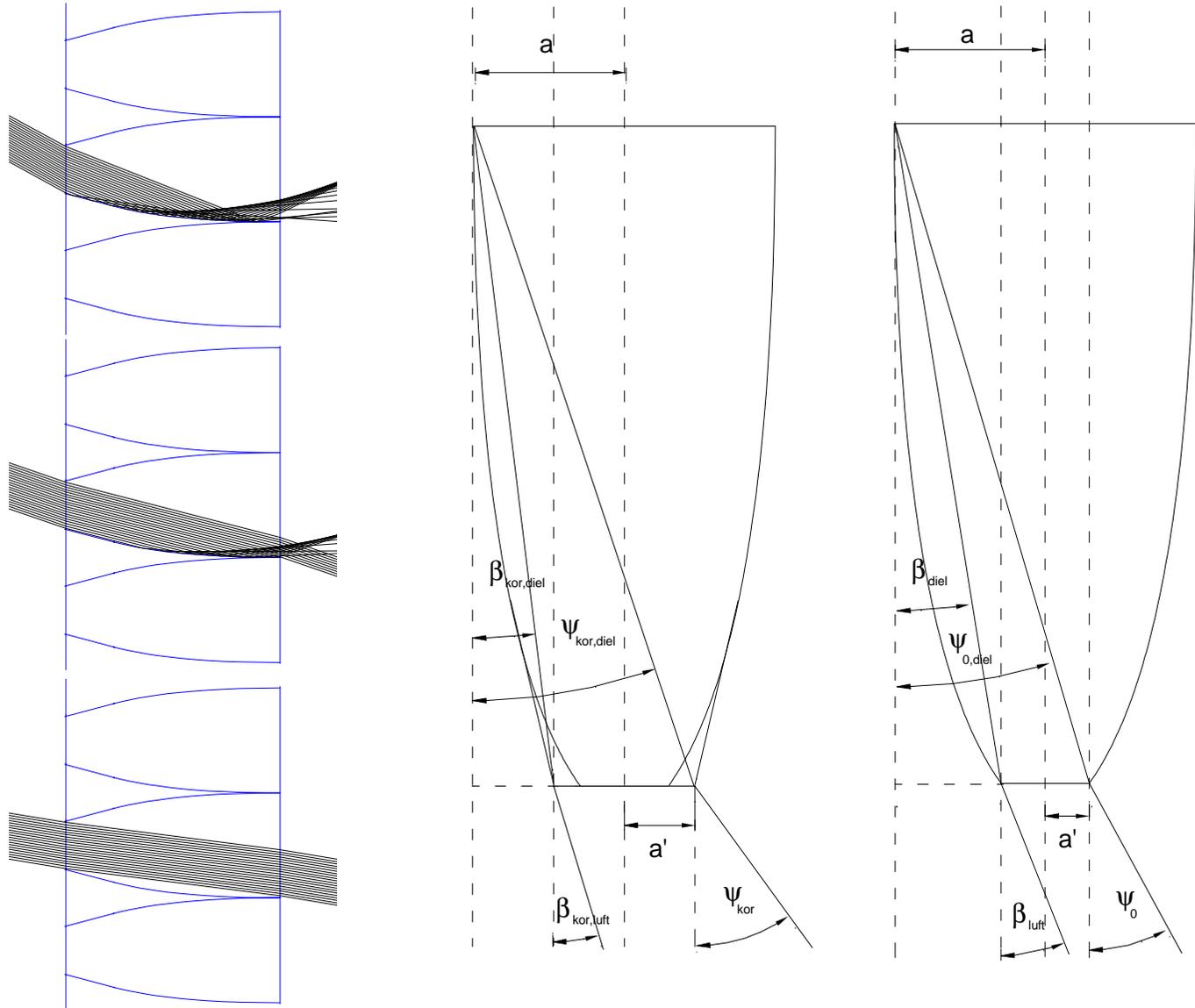


Abb. 3.56: Grenzwinkel für Voll- und Teildurchsicht von der Ausgangsapertur

Hieraus folgt:

$$\tan \beta_{diel} = \tan \Psi_0 \cdot \frac{a-a'}{a+a'} \quad (3.13)$$

und aus dem Snellius'schem Brechungsgesetz:

$$\beta_{luft} = \arcsin\left(\frac{\sin \beta_{diel}}{n_{diel}}\right) \quad (3.14)$$

Ist der Sehwinkel zur Flächennormalen kleiner als  $\beta$  werden die Konzentratorwände von innen nicht mehr wahrgenommen, sodaß ein ähnlicher visueller Eindruck wie beim Durchblick durch eine mit opaken Streifen bedruckte Scheibe entsteht. Bei Verkürzung des Konzentrators vergrößert sich der Winkelbereich, in dem Durchsicht möglich ist. Aus der Koordinatengleichung in Abschnitt 3.3.1 folgt:

$$L(\theta) = \frac{(1 + \sin \Psi_0) \cdot \sin \theta}{(1 - \sin(\theta - \Psi_0))} \quad (3.15)$$

$$a(\theta) = \frac{(1 + \sin \Psi_0) \cdot \cos \theta}{(1 - \sin(\theta - \Psi_0))} \quad (3.16)$$

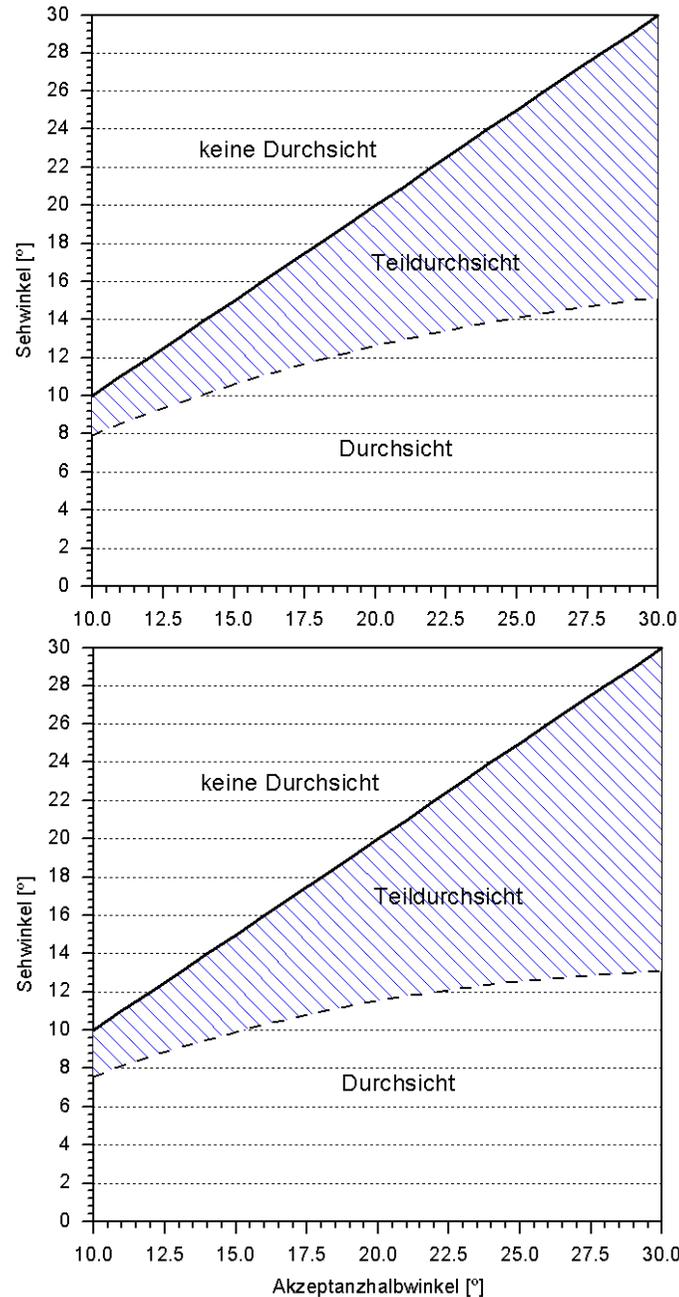


Abb. 3.57: Durchsichtwinkelbereich von CPC-Elementen ohne (o.) und mit Formkorrektur (u.) für unverkürzte 25°/41,8°-CPC-Arrays



Abb. 3.58: Visualisierung der Innenansicht eines 25°/42°-CPC-Arrays. Der Brüstungsabschnitt liegt vom Betrachterstandpunkt aus im Winkelbereich der Teildurchsicht.

und analog zu Gl. 2.12:

$$\tan \beta_{diel} = \frac{a(\theta) - a'}{L(\theta)} \quad (3.17)$$

Der Verkürzungsfaktor  $N_{cut}$  ist gegeben durch:

$$N_{cut} = \frac{L(\theta)}{L_0} \quad (3.18)$$

Durch Korrektur der Profilform vergrößert sich die Ausgangsapertur um den Faktor  $1/\sin \theta_{aus}$  (s. Abschnitt 3.5.1) Dadurch vergrößert sich auch der Teildurchsichtsbereich geringfügig (s. Abb. 3.57). Ein wesentlicher Unterschied zur Durchsicht von außen liegt darin, daß von innen nur Bereiche des Außenraumes wahrgenommen werden, die innerhalb des Akzeptanzbereiches liegen. Die Visualisierung in Abbildung 3.58 zeigt die Innenansicht eines  $25^\circ/41,8^\circ$ -CPC-Arrays in vertikaler Ausrichtung. Im Durchsichtsbereich entsteht wie bereits erwähnt der Eindruck einer bedruckten Scheibe. Im unteren Bereich der Verglasung (Teildurchsicht) werden auch Teile des Himmels, die innerhalb des Akzeptanzbereiches liegen, sichtbar.

## 4 Einsatzpotential von CPC-Elementen in der Gebäudehülle

Aus der Vielfalt möglicher CPC-Geometrien ergeben sich unterschiedlichste Einsatzmöglichkeiten in der Fassade. Sonnenschutz und Lichtlenkung sind sowohl mit beweglichen als auch mit stationären Systemen erreichbar. Bei stationären Systemen ergeben sich aus der Sonnengeometrie jedoch zwangsläufig orientierungsabhängige Einschränkungen der Einsatzmöglichkeiten. Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von CPC-Sonnenschutzsystemen geben. Der zweite Teil des Kapitels behandelt einige Aspekte, die im Zusammenhang mit den bautechnischen Umsetzungsmöglichkeiten stehen.

### 4.1 Stationärer Sonnenschutz in der Fassaden- und Dachebene

#### 4.1.1 Horizontale Dachflächen

Zur Gewährleistung des Sonnenschutzes muß der Ausblendbereich des CPC-Elementes mit den Sonnenbahnen saisonal bzw. ganzjährig zur Deckung gebracht werden. In

unseren Breitengraden ergeben sich durch die starke Krümmung der Sonnenbahnen für horizontale Flächen für den Einsatz linearer Strukturen ungünstige Geometrieverhältnisse. Bei horizontaler Ausrichtung kann durch die bisher beschriebenen CPC-Varianten auch für saisonale Auslegungen keine ausreichende Überdeckung mit den Sonnenbahnen erzielt werden (Abb.4.1). Erfolgt die Transmission im Akzeptanzbereich des CPC, so müssen in den Sommermonaten auch bei kleinen Akzeptanzwinkeln Strahlungseinträge in den Vormittags- und Nachmittagsstunden in Kauf genommen werden.

Bei Retroreflexion im Akzeptanzbereich ist eine Teilüberdeckung mit den Sonnenbahnen nur für sehr große Akzeptanzwinkel möglich, die den Diffuslichteintrag stark reduzieren und so gegenüber konventionellen Sonnenschutzanlagen keine Vorteile aufweisen würden.

In äquatornahen Regionen verbessert sich die Übereinstimmung der Sonnenbahnen mit dem Akzeptanzbereich der CPC-Strukturen aufgrund der höheren Sonnenstände. In Abb. 4.2. sind die Sonnenbahnen für den Ort Bogota, Kolumbien, und der Akzeptanzbereich eines 30°-CPC aufgetragen. Hierbei ergibt sich eine vollständige Überdeckung der Sonnenbahnen mit dem Akzeptanzbereich des CPC, die den in tropischen

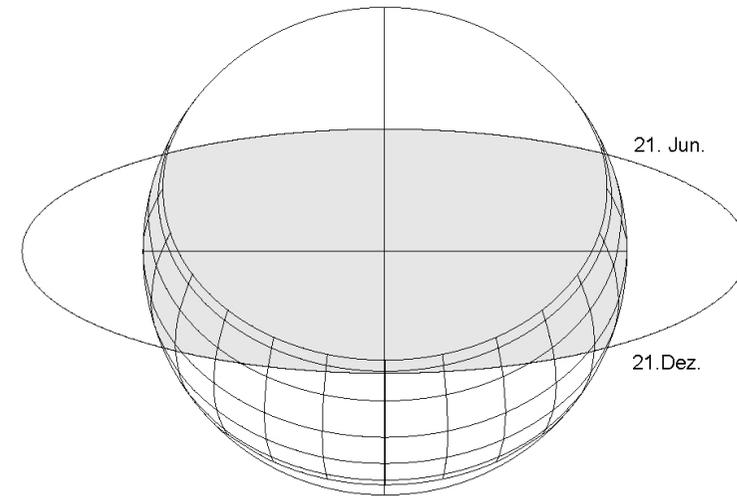


Abb. 4.1: Akzeptanzbereich eines 30°-CPC und Sonnenbahnen für den Standort Frankfurt (geographische Breite 50°), horizontal

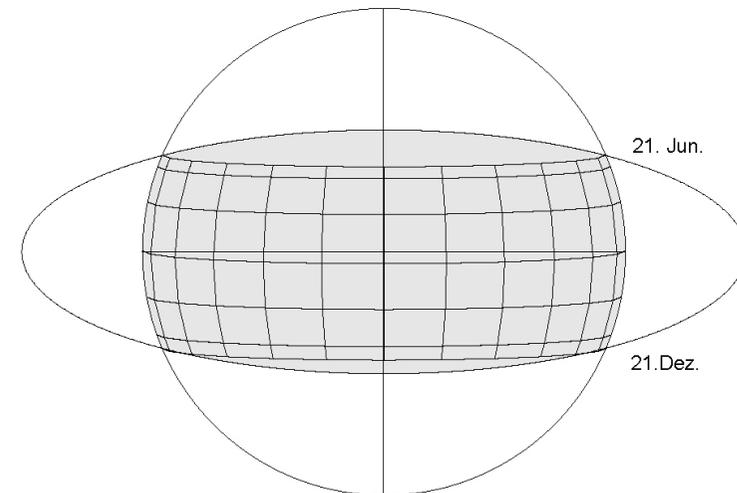


Abb. 4.2: Akzeptanzbereich eines 30°-CPC und Sonnenbahnen für den Standort Bogota (geographische Breite 4°), horizontal

Regionen bestehenden Anforderungen eines ganzjährigen Sonnenschutzes entspricht.

In unserer geographischen Lage liegt es nahe, den Akzeptanzbereich durch Neigen des CPC-Elementes nach Süden an die Sonnenbahnen anzupassen.

#### 4.1.2 Nach Süden geneigte Dachflächen

Im folgenden wird zunächst die Integration der CPC-Elemente in die Ebene der geneigten Dachfläche betrachtet.

Bei einer Neigung der Dachfläche von 30° nach Süden kann mit einem 15°-CPC ein stationärer saisonaler Sonnenschutz erzielt werden, der von Mitte April bis Mitte September wirksam ist. In den Sommermonaten muß analog zur horizontalen Fläche ein Direktstrahlungseintrag in den Randzeiten in Kauf genommen werden. Die Situation ist hier jedoch deutlich günstiger.

Die Sonnenbahnen liegen in den Monaten Juni und Juli nur in den Zeiträumen vor 9 Uhr (Sommerzeit) und nach 17 Uhr außerhalb des Akzeptanzbereiches, in dem Rückstrahlung erfolgt. Zu diesen Zeitpunkten beträgt der relative Zenitwinkel der Sonne über 55°. Durch

den flachen Einfallswinkel ist der Strahlungseintrag auf die geneigte Fläche verhältnismäßig gering.

Bei einer Neigung zwischen 45° und 55° und Verwendung eines 30°-CPC kann ein ganzjähriger Sonnenschutz ähnlich wie in Abb. 4.2 für äquatornahe Standorte realisiert werden. Durch den Horizonteinfluß wird in diesem Fall der zur Diffuslichttransmission nutzbare Himmelsbereich verringert. Im zenitnahen Himmelsbereich kann die Diffusstrahlung jedoch nahezu vollständig genutzt werden.

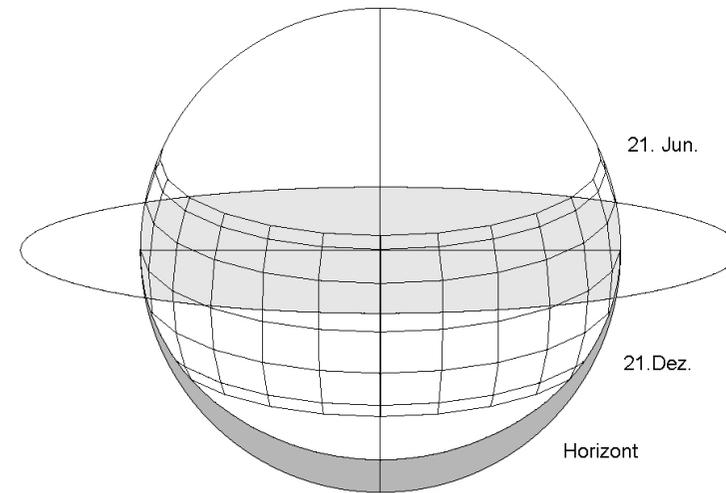


Abb. 4.3: Akzeptanzbereich eines 15°-CPC und Sonnenbahnen für den Standort Frankfurt (geographische Breite 50°), Neigung 30° nach Süden

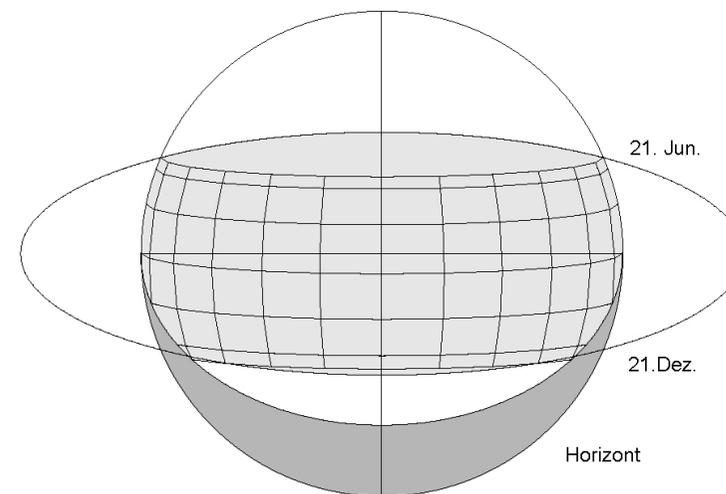


Abb. 4.4: Akzeptanzbereich eines 30°-CPC und Sonnenbahnen für den Standort Frankfurt (geographische Breite 50°), Neigung 45° nach Süden

### 4.1.3 Vertikale Flächen

In den Abb. 4.5 sind die geometrischen Verhältnisse für eine vertikale Südfassade und in Abb. 4.6 für eine vertikale Ostfassade dargestellt. Der Horizont erreicht hier die Mitte des Kreisdiagrammes. Die Sonnenbahnen liegen bei vertikaler Südorientierung nahe am Flächennordpol, der dem Zenit im Horizontalbezugssystem entspricht.

Zur saisonalen Verschattung von Südfassaden bietet sich daher die Verwendung von CPC-Elementen mit opaken Zwischenflächen an. Bei Verwendung einer 30°-CPC-Geometrie werden so die Sonnenbahnen von Mitte April bis Mitte August vollständig ausgeblendet.

Vollständige Transmission erfolgt allerdings erst ab Ende Oktober bis Ende Februar. In den Zwischenzeiten werden die Sonnenbahnen nur innerhalb eines variierenden Zeitraumes um die Tagesmitte ausgeblendet. Zur thermischen Nutzung der Solarstrahlung wäre in diesem Fall eine bessere Anpassung des Akzeptanzbereiches an die Sonnenbahnen in den Übergangszeiten wünschenswert.

Durch Verdrehung der Fasadenebene aus der Südrichtung ergibt sich ein asymmetrischer Verlauf der projizierten Sonnenbahnen. Der Akzeptanzbereich der CPC-Elemente

kann an die Sonnenbahnen durch Drehung um die Normalenachse der Fasadenebene angepaßt werden. Dies ist in Abbildung 4.6 für eine Ost-Ausrichtung dargestellt. Ein saisonaler Sonnenschutz ist hier jedoch nur durch zusätzliche Verkippung der Elemente aus der Fasadenebene oder durch Verwendung einer asymmetrischer CPC-Form möglich.

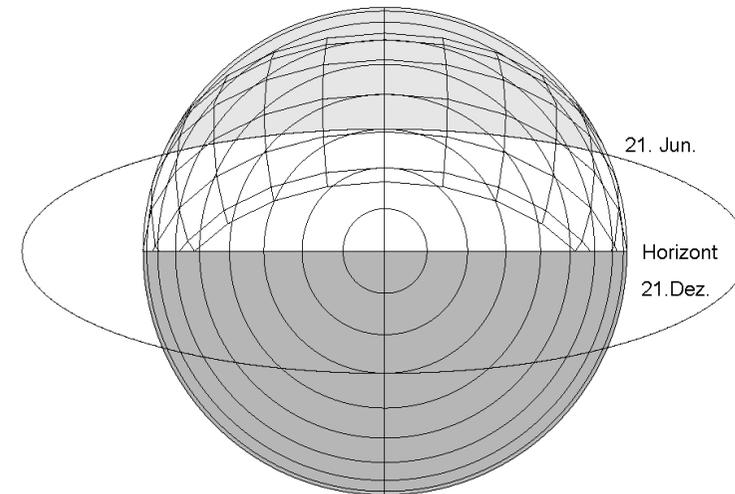


Abb. 4.5: Akzeptanzbereich eines 15°-CPC und Sonnenbahnen für den Standort Frankfurt (geographische Breite 50°), vertikal, Ausrichtung nach Süden

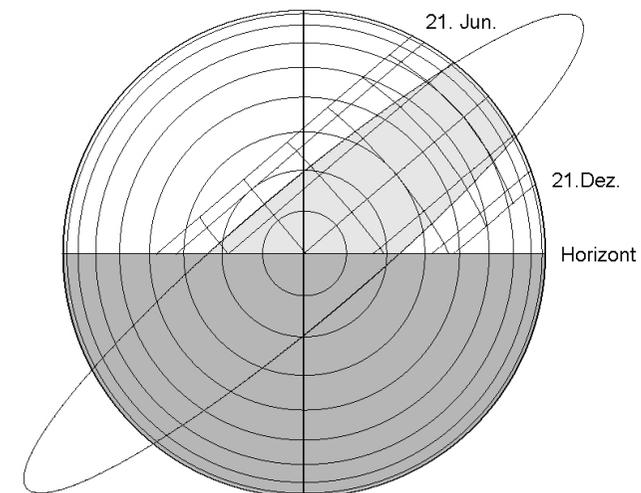


Abb. 4.6: Akzeptanzbereich eines 15°-CPC und Sonnenbahnen für den Standort Frankfurt (geographische Breite 50°), vertikal, Ausrichtung nach Osten, CPC-Achse in die Ekliptik

#### 4.1.4 Asymmetrische Konzentratoren

Durch Verwendung einer asymmetrischen CPC-Geometrie kann die Anpassung des Akzeptanzbereiches an die Sonnenbahnen in einigen Fällen optimiert werden. Die Akzeptanzhalbwinkel eines asymmetrischen CPC können bei einer Flächenneigung von  $30^\circ$  beispielsweise so gewählt werden, daß die Sonnenbahnen in den Sommermonaten vollständig innerhalb des Akzeptanzbereiches liegen (Abb. 4.7). Dadurch wird im Vergleich zur symmetrischen  $15^\circ$ -CPC-Variante auch die Direkteinstrahlung vor 9 Uhr und nach 17 Uhr vermieden. In diesem Fall wird jedoch gleichzeitig auch die Diffuslichttransmission vermindert.

Bei Neigungswinkeln, die größer als der geographische Breitengrad sind, ergibt sich eine Krümmung der projizierten Sonnenbahnen nach Norden (oben), wodurch eine bessere Überdeckung des Akzeptanzbereiches mit den Sommersonnenbahnen erreicht werden kann. Eine ausführliche Beschreibung eines asymmetrischen CPC-Sonnenschutzelementes für den stationären, saisonalen Einsatz wird von Bühler [Büh99] gegeben.

Eine weitere Möglichkeit der Anpassung des Akzeptanzbereiches besteht nach [Bru96/2] in der Aufbringung einer Prismenstruktur auf

der Außenseite des CPC-Elementes.

Durch das Prisma wird die Krümmungsrichtung der Sonnenbahnen geändert, wodurch auch für Neigungswinkel unterhalb des geographischen Breitengrades eine gute Übereinstimmung mit dem Akzeptanzbereich erreicht wird. Einschränkung ist hierbei anzumerken, daß sich durch das Aufsetzen der Prismen eine zweiseitige Strukturierung des Elementes ergibt, die im Vergleich zu einseitig strukturierten Elementen vermutlich einen erheblich höheren Herstellungsaufwand bedeutet.

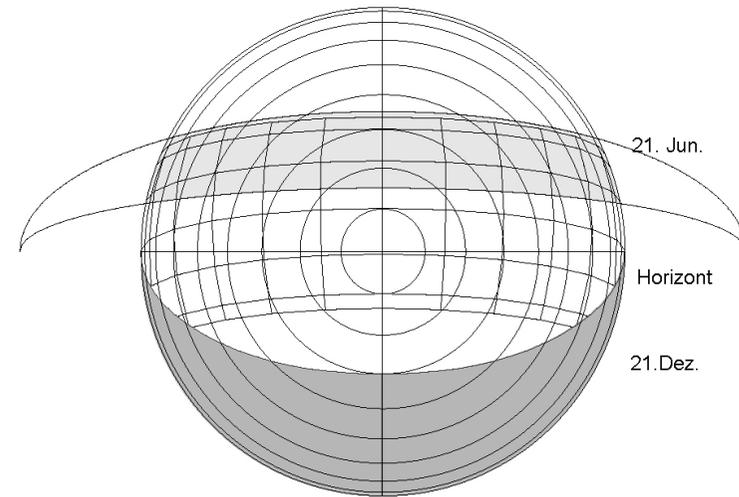


Abb. 4.7: Sonnenbahnen und Akzeptanzbereich eines asymmetrischen CPC mit Akzeptanzhalbwinkeln  $\theta_1=35^\circ$  und  $\theta_2=15^\circ$  für den Standort Frankfurt (geographische Breite  $50^\circ$ ), Neigung  $60^\circ$  nach Süden

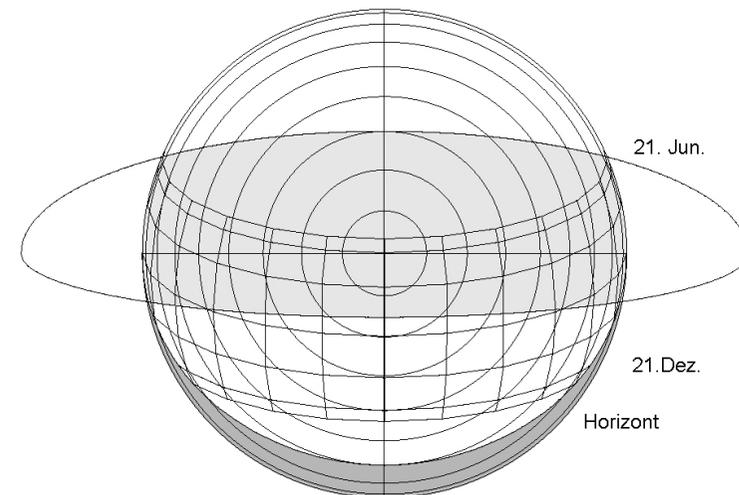


Abb. 4.8: Sonnenbahnen und Akzeptanzbereich eines asymmetrischen CPC mit Akzeptanzhalbwinkeln  $\theta_1=30^\circ$  und  $\theta_2=-15^\circ$  und Sonnenbahnen für den Standort Frankfurt (geographische Breite  $50^\circ$ ), Neigung  $30^\circ$  nach Süden

## 4.2 Lamellensysteme

Bisher wurden nur flächige Anordnungen des Sonnenschutzes in der Fassadenebene betrachtet. Durch die Auflösung in Lamellen ergeben sich einige zusätzliche Aspekte:

Zunächst wird ein Freiheitsgrad in der Ausrichtung gewonnen, der zur Anpassung des Akzeptanzbereiches an die Sonnenbahnen genutzt werden kann. Gleichzeitig ergeben sich gegenüber flächigen Anordnungen zusätzliche Effekte durch gegenseitige Teilverschattung, Blockade, und direkte Transmission durch die Zwischenbereiche der Lamellen. Bei der Verschattung horizontaler und geneigter Flächen kann außerdem der Fall eintreten, das sich die Position der Sonne unterhalb des Horizontes der Lamellenebene befindet

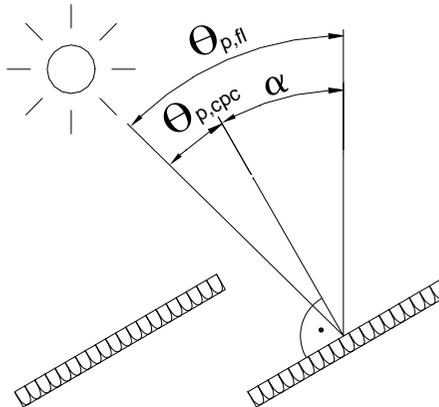


Abb. 4.9: Anstellwinkel  $\alpha$  der Lamelle, projizierter Sonnenwinkel  $\theta_{p,fl}$  zur Fassadenebene und projizierter Sonnenwinkel  $\theta_{p,cpc}$  zur Systemebene der CPC-Lamelle

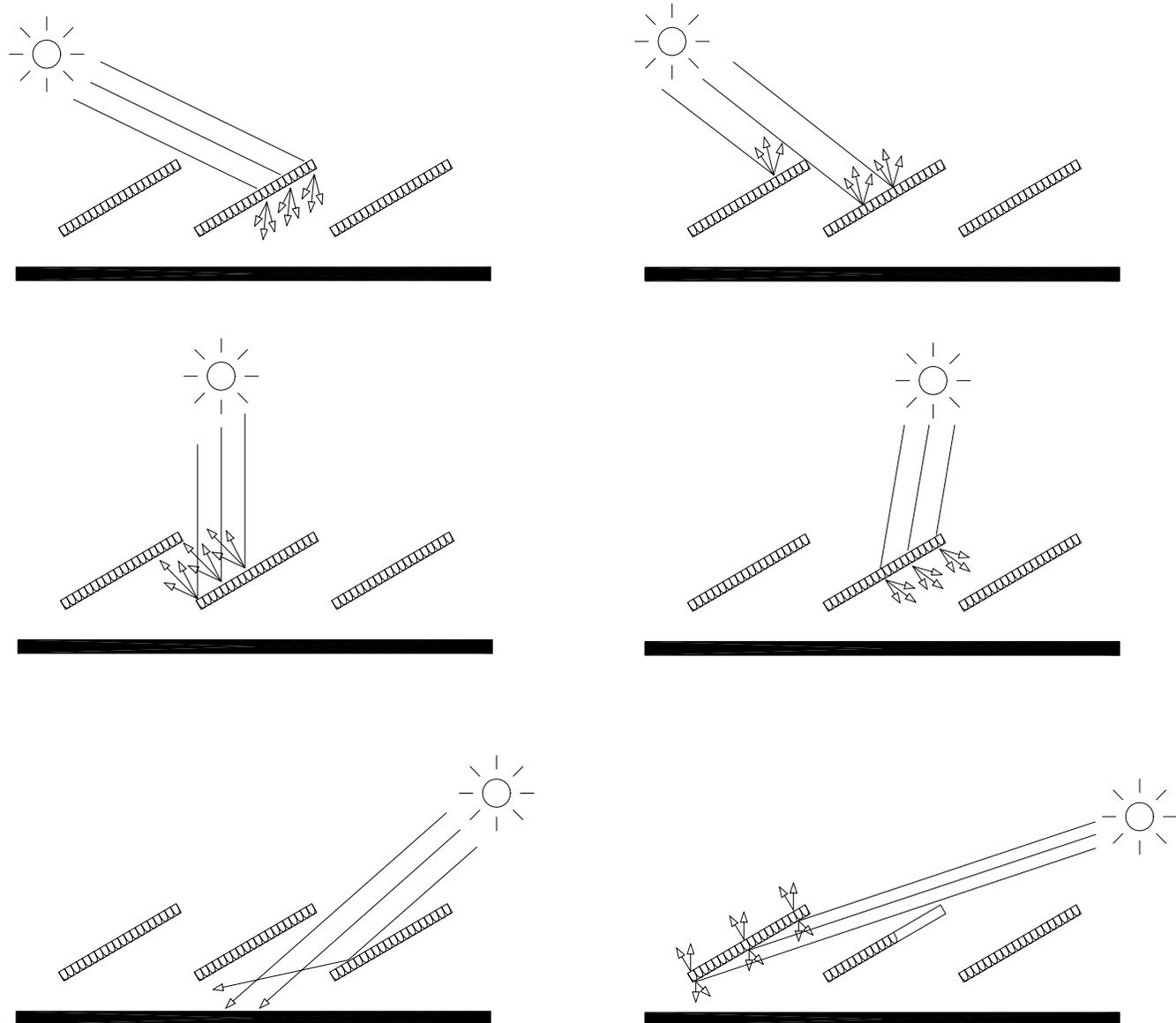


Abb. 4.10: CPC-Lamellensystem: gegenseitige Teilverschattung bei Reflexion (o.l.) und Transmission (o.r.), Blockade bei Reflexion (m.l.) und Transmission (m.r.), Direktr Transmission (u.l.) und Bestrahlung der Lamellenunterseite (u.r.)

und die Direktstrahlung auf die Lamellenrückseite trifft. Eine Blockade durch benachbarte Lamellenelemente kann sowohl bei der Rückreflexion innerhalb des Akzeptanzbereiches als auch bei der Transmission vorliegen. In Abb. 4.11 sind die Strahlengänge durch ein um  $30^\circ$  (nach Süden) geneigtes Lamellensystem mit einem Akzeptanzhalbwinkel von  $15^\circ$  auf einer horizontalen Dachfläche für verschiedene Sonnenpositionen dargestellt.

Für große projizierte Einfallswinkel  $\theta_{p,cpc}$ , also z.B. für flachen Strahleneinfall aus Südrichtung, treten die Strahlen durch die CPC-Lamelle hindurch und werden dabei überwiegend zur Vertikalen umgelenkt (Abb. 4.11 oben). Dadurch ergibt sich für diesen Winkelbereich nur ein geringer Einfluß der Blockade durch die dahinterliegende Lamelle und ein hoher Transmissionsgrad.

Erreicht die Sonne eine Position innerhalb des Akzeptanzbereiches, so werden die Strahlen am CPC-Element reflektiert (Abb. 4.11 mittig). Da die Rückreflexion bei Strahleneinfall innerhalb des Akzeptanzbereiches vorwärts streuend in Richtung der Normalenachse des CPC-Elementes erfolgt, werden zunächst nur wenige reflektierte Strahlen durch die vorgelagerte Lamelle blockiert.

Mit abnehmenden Winkel  $\theta_{p,cpc}$  und damit auch abnehmender Teilver-

schattung der Lamelle erhöht sich die Blockadewirkung, wobei ein Teil der Strahlen die vorgelagerte Lamelle zwischen den Aperturflächen trifft und transmittiert wird (ohne Abb.).

Bei der gewählten Lamellen-Geometrie ist der Grenzwinkel des Akzeptanzbereiches gleichzeitig der Cut-Off-Winkel des Lamellensystems, sodaß bei Überschreiten des Grenzwinkels ein Teil der Strahlen direkt zwischen den Lamellen und ein Teil durch die CPC-Elemente transmittiert wird. In diesem Fall werden die Strahlen überwiegend zur Horizontalen umgelenkt (Abb. 4.11 unten). Dadurch koppeln einige Strahlen in das benachbarte Element ein und erfahren bei der Transmission durch dieses eine zweite Umlenkung, die in diesem Fall überwiegend zur Senkrechten erfolgt.

Durch die zweifache Transmission entstehen bei den hier ohne Absorption und Streuung berechneten Werten nur geringe Verluste durch die zusätzlichen Außenreflexionen. Bei realen Lamellensystemen ist hier ein höherer Transmissionsverlust einzukalkulieren.

In Abbildung 4.12 werden die winkelabhängige Transmission eines CPC-Lamellensystems und eines opaken Lamellensystems mit einem Reflexionsgrad von 0.5 gegenüber-

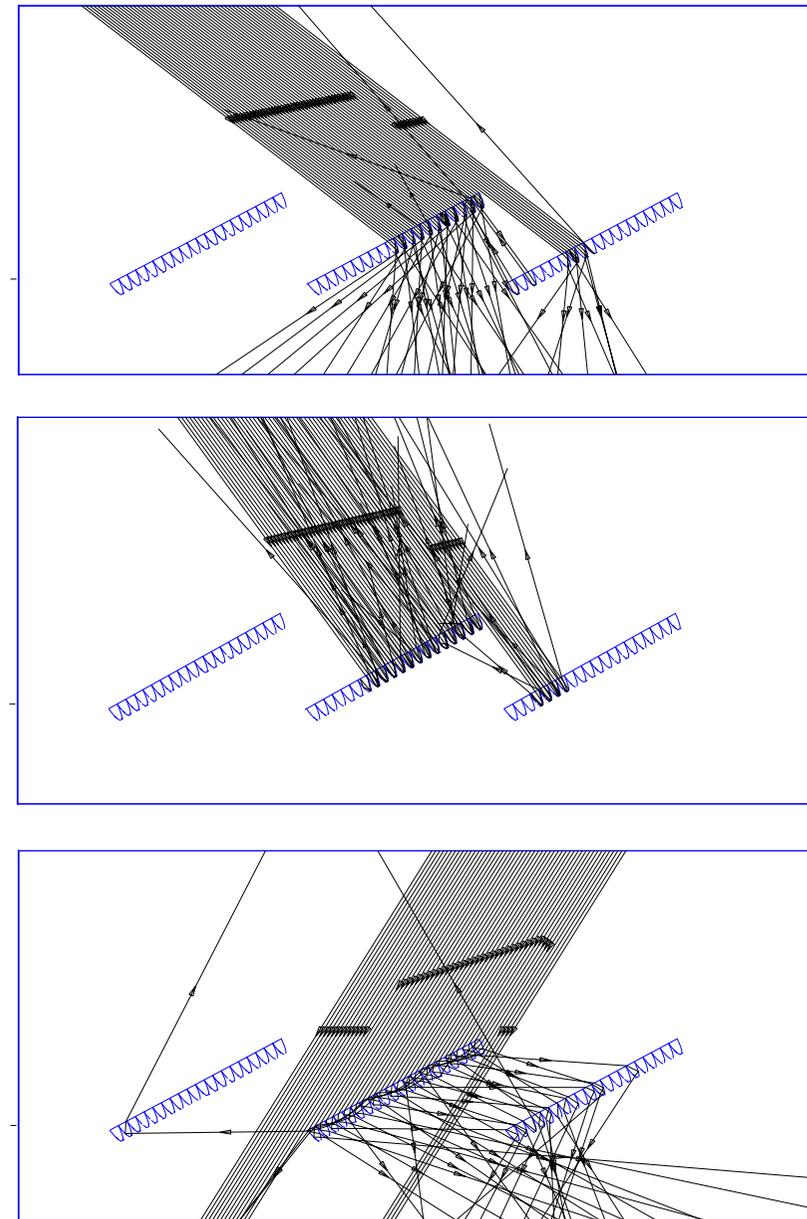


Abb. 4.11: Strahlengänge durch ein CPC-Lamellenelement mit opaken Aperturflächen, Umlenkung bei flachen Einfallswinkel (o.), Reflexion (m.), zweifache Umlenkung durch Wiedereinkoppelung bei hohen Einfallswinkeln (u.)

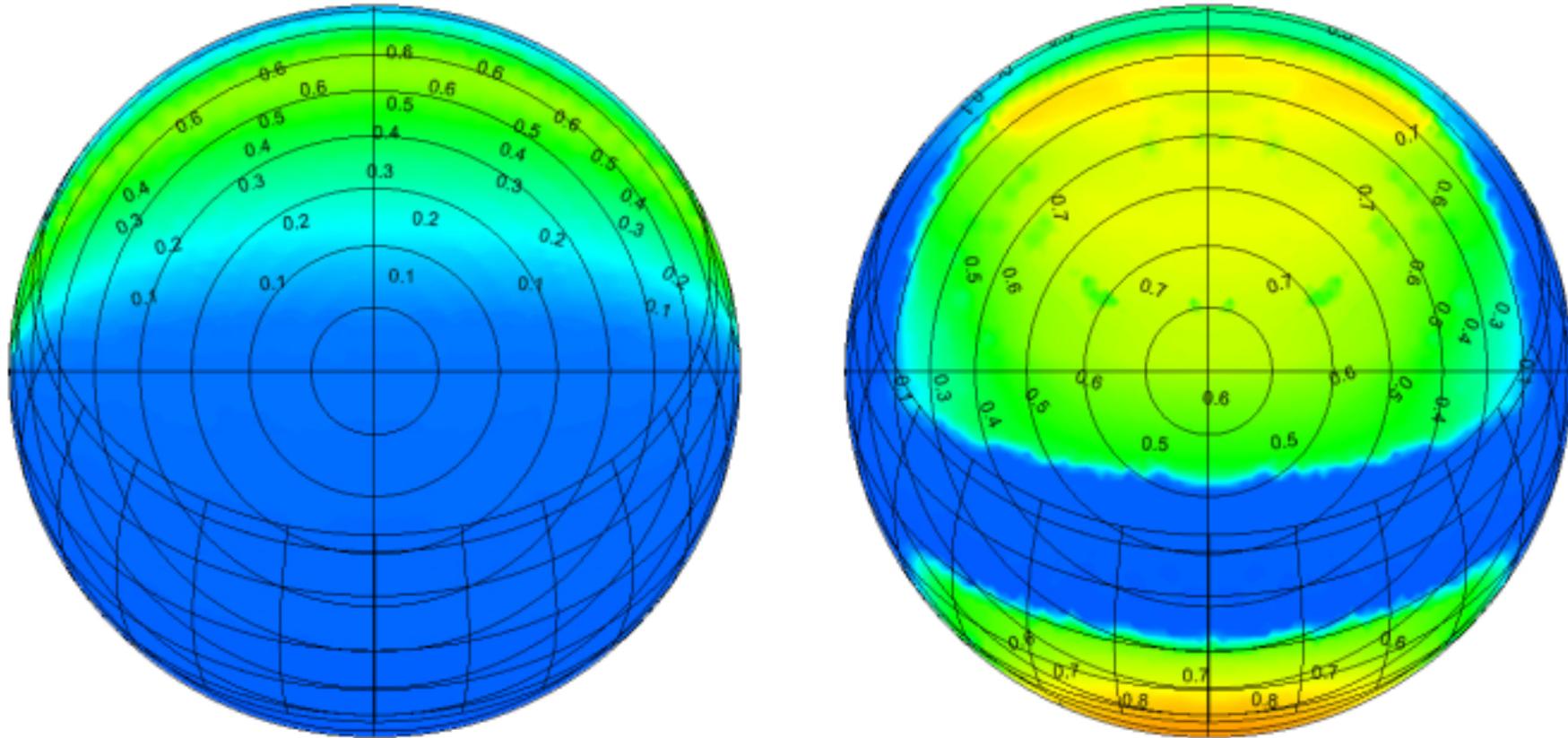


Abb. 4.12: Richtungsabhängige Transmission durch ein System aus opaken Aluminium-Lamellen (l.) und aus 15°-CPC-Lamellen (r.), Dachfläche horizontal, Lamellenneigung 30° nach Süden

gestellt. Während durch die opaken Lamellen nur ein geringer Teil der diffusen Strahlung auf der Nordseite transmittiert werden kann, liegt der Reflexionsbereich des CPC-Systems in guter Übereinstimmung mit den Sommersonnenbahnen. Die Transmission erreicht im Bereich der Wintersonnenbahnen mit Werten über 0.8 ihr Maximum. Die Umlenkung der transmittierten Strahlen im Winter wirkt sich dann besonders günstig

aus, wenn der Dachaufbau eine gewisse Höhe erreicht und dadurch flach einfallende Strahlen ohne Umlenkung durch die Konstruktion blockiert würden, oder im Fall sehr hoher Räume, in denen das Licht durch die Umlenkung in die Raumtiefe geführt werden kann. Die Transmission für niedrige Sonnenstände wird außerdem bei Dachaufbauten, in die Wabenmaterialien zur transparenten Wärmedämmung inte-

griert sind, deutlich erhöht. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 4.5 ausführlicher dargestellt.

#### 4.2.1 Nachführbare Lamellensysteme

Durch verstellbare Systeme können die Eigenschaften der CPC-Elemente in breiterem Umfang und auf unterschiedliche Weise genutzt werden. So kann die Orientierung des Systems weitgehend unabhängig von der Himmelsrichtung und damit auch der Richtung der Sonnenbahnen gewählt werden. Mit bewegli-

chen Systemen können auch auf beliebig orientierten Flächen durch Ausrichtung der Lamellen ganzjährig wahlweise Sonnenschutz oder Lichtlenkung realisiert werden. Für horizontale Flächen und für Südfassaden kann das CPC-Element auch so ausgelegt werden, daß die Nachführung nur saisonal oder im Abstand mehrerer Wochen erfolgen muß. Bei einachsig drehbaren Systemen im Dachbereich können die Lamellen auch in senkrechter oder nahezu senkrechter Stellung Sonnenschutz bieten, indem sie die Direktstrahlung bei der Transmission in den Außenraum zurücklenken (Abb. 4.13). Durch die senkrechte Stellung kann der Sichtbezug maximiert und die Diffuslichttransmission erhöht werden. Ein vollständiger Sonnenschutz kann in dieser Stellung nur erfüllt werden, solange der Cut-Off-Winkel nicht unterschritten wird und der Einfallswinkel außerhalb des Akzeptanzbereiches liegt.

Bei einem Verhältnis von Lamellenbreite zu Lamellenabstand von 1 wird diese Bedingung für Sonnenstände mit projiziertem Höhenwinkel unter  $45^\circ$  erfüllt. Ein geringer Teil der Strahlung wird durch die Reflexion auf der Lamellenvorderseite in den Raum gelenkt. Die Öffnung der Lamellen ermöglicht den Luftaustausch durch die Dachfläche, während bei geschlossenen Lamellen und Lichteinlenkung im Winterhalbjahr eine zusätzliche Grenzfläche mit

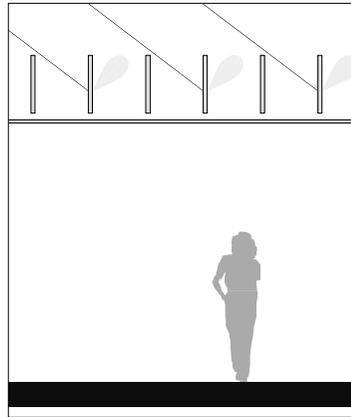


Abb. 4.13: Sonnenschutz bei geöffneten Lamellen

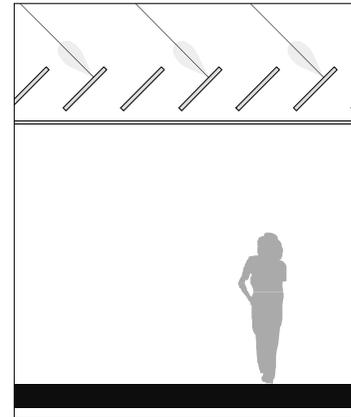


Abb. 4.14: Sonnenschutz bei halb geöffneten Lamellen

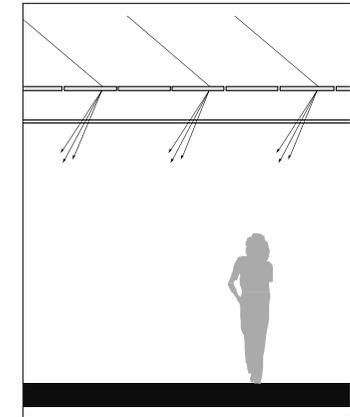


Abb. 4.15: Transmission bei geschlossenen Lamellen

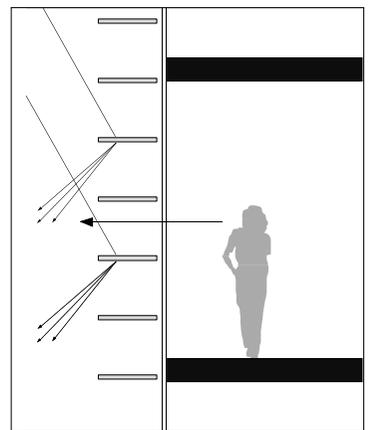


Abb. 4.16: Sonnenschutz und Lichtlenkung nach unten

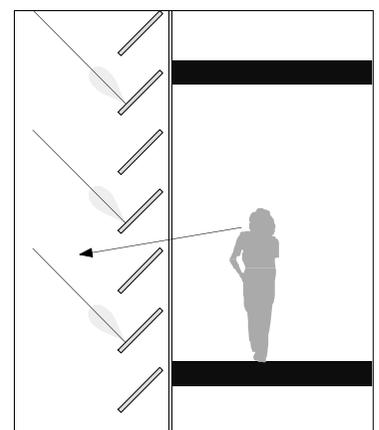


Abb. 4.17: Sonnenschutz bei halb geöffneten Lamellen

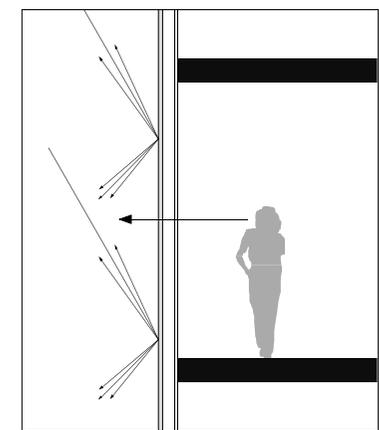


Abb. 4.18: Sonnenschutz und Durchsicht bei geschlossenen CPC-Lamellen mit opaken Zwischenflächen

einem geschlossenen Luftraum entsteht, der zur Verbesserung des Wärmeschutzes beiträgt.

Wie bereits dargestellt, hängt die Notwendigkeit der Nachführung von Lamellensystemen bei vertikalen Fassaden von der Ausrichtung der Fassade ab. Bei Südexposition kann das Lamellensystem über längere Zeiträume stationär betrieben werden, da eine gute Überdeckung der Sonnenbahnen mit dem Ausblendbereich der CPC-Elemente gegeben ist. Die Umstellung kann in Abhängigkeit von der Breite des Akzeptanzbereiches beispielsweise halbjahres oder quartalsweise erfolgen. Die Lichtumlenkung im Dach oder in der Fassade kann zur Belichtung tiefer Räume genutzt werden.

Zur Verschattung von Ost- und Westfassaden ist bei Verwendung von CPC-Elementen mit opaken Ausgangsaperturen als Horizontal- oder Vertikallamellen eine Nachführung mit dem Tageslauf der Sonne erforderlich. Für Ost- und Westfassaden eignen sich horizontale und vertikale Lamellensysteme gleichermaßen, wobei vertikale Systeme nicht die Möglichkeit bieten, direktes Sonnenlicht an die Decke umzulenken.

Beim Einsatz von CPC-Elementen mit opaken Zwischenflächen ist zu beachten, das die Lamellen bei gleichzeitiger Einhaltung des Cut-

Off-Winkels mindestens um den halben Akzeptanzwinkel des CPC zum projizierten Höhenwinkel der Sonne verkippt sein müssen, um eine Vollverschattung der Fassade zu gewährleisten. Um diese Bedingung bis zu einem projizierten Höhenwinkel von  $0^\circ$  (Sonnenaufgang) zu erfüllen, muß zwischen dem  $b/h$ -Verhältnis und dem Akzeptanzhalbwinkel die Relation

$$\frac{b}{h} = \frac{1}{\cos \theta_{ac}} \quad (3.19)$$

erfüllt sein (s. Abb. 4.19). Dies bedeutet für eine  $25^\circ$ -CPC-Lamelle beispielsweise eine notwendige Überlappung von 10%.

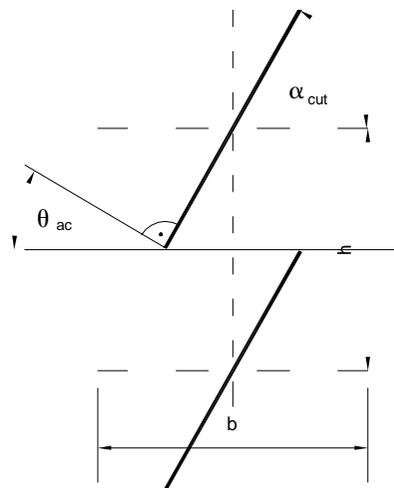


Abb. 4.19: Cut-Off-Winkel, Akzeptanzhalbwinkel und  $b/h$ -Verhältnis von CPC-Lamellen

#### 4.2.2 Einsatzebenen in der Fassade

Der durch Sonnenschutzsysteme erreichbare z-Faktor ist wie in Abschnitt 1.4.3 dargestellt, von der Lage des Systems in der Fassade abhängig. In Abhängigkeit von der Lage ergeben sich auch unterschiedliche Beanspruchungen des Systems und Materialanforderungen. Für CPC-Elemente werden im folgenden einige mit der Einbausituation und der Lage in der Fassade zusammenhängende Aspekte diskutiert. Hierbei werden die folgenden Fälle unterschieden:

- Außenliegender Sonnenschutz
- Sonnenschutz im Zwischenraum von Doppelfassaden
- Im Zwischenraum von Mehrscheibenverglasungen integrierte stationäre Sonnenschutzelemente
- Innenliegender beweglicher Sonnenschutz

##### Außenliegender Sonnenschutz

Der Fassade vorgelagerte Systeme unterliegen den größten Beanspruchungen in Hinsicht auf Bewitterung und mechanischer Beanspruchung. Nicht wegnehmbare Systeme müssen statisch für hohe Windlasten ausge-

legt werden. Für CPC-Lamellen aus Kunststoff können hier als notwendige Materialstärken ähnliche Werte wie für fest installierten Prismenplatten angesetzt werden. Üblicherweise werden solche Prismenelemente für den Außenbereich aus PMMA in einer Materialstärke von ca. 12 mm gefertigt. Während die Stabilität in Längsrichtung durch die Rippenstruktur verstärkt wird, ergeben sich durch die tiefen und sehr schmalen Profileinschnitte bei CPC-Elementen in Querrichtung potentielle Bruchstellen. Bei langen Elementen können auch Torsionsmomente zu kritischen Bruchspannungen führen. Die Verformung in Querrichtung kann durch Beschränkung der Lamellenlänge und durch entsprechende Einspannung der Platte an den Längskanten begrenzt werden. Eine weitere Möglichkeit der Stabilisierung bieten flächige Verbundsysteme.

Ein wichtiger Aspekt beim Einsatz im Außenbereich ist die Verschmutzung der Elemente, da hierdurch die Totalreflexion und damit die Funktion stark beeinträchtigt werden kann. Durch die spitz zulaufende Verengung zwischen den einzelnen Konzentratoren wird auch die Reinigung im Vergleich zu Prismenelementen deutlich erschwert. Die Notwendigkeit regelmäßiger Reinigung ist bei außenliegenden Systemen vorhersehbar. Eine interessante Entwicklung stellen in diesem Zusammenhang neue Oberflächenbeschichtun-

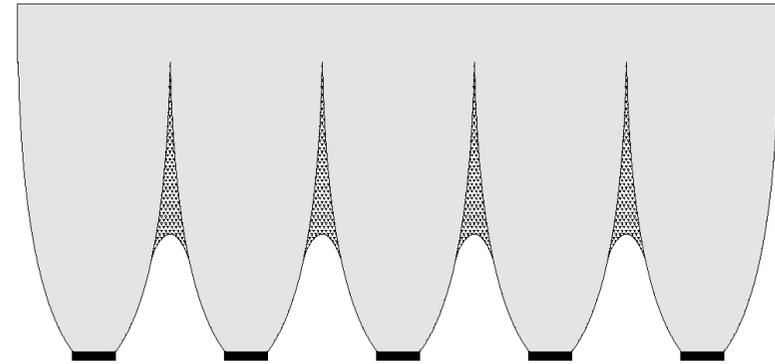


Abb. 4.20: Verkürzung des Konzentradorprofils durch Anlagerung von Wasser

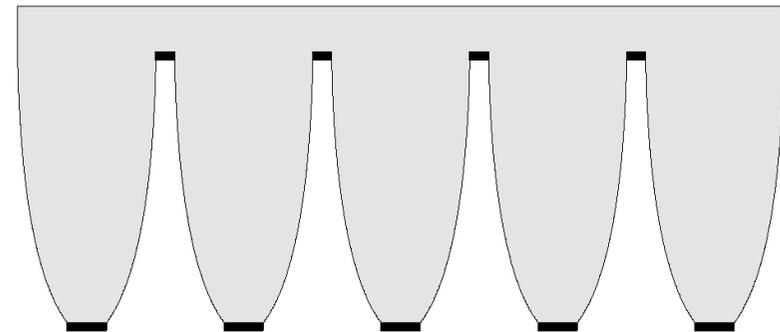


Abb. 4.21: CPC-Platte mit Abstandsflächen

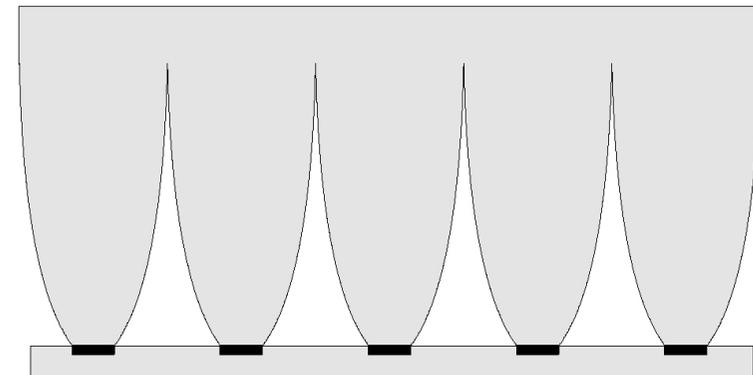


Abb. 4.22: Geschlossene CPC-Platte

gen dar, die einen hohen Selbstreinigungseffekt bewirken, der häufig auch als „Lotuseffekt“ bezeichnet wird. Solche Beschichtungen werden bisher überwiegend im Sanitärbereich verwendet.

Durch die Anlagerung von Feuchtigkeit in den Zwischenspalten der Konzentratoren können sich ebenfalls Funktionsstörungen ergeben, da die Profilform durch die optische Ankopplung des Wassers an das dielektrische Konzentratormaterial stark verkürzt wird. Die Anlagerung von Wasser in diesem Bereich kann im Winter zudem zu Frostschäden durch führen. Durch Vereisung der Lamelle wird die Funktionalität ebenfalls stark eingeschränkt.

Der Reinigungsaufwand und die dargestellten Probleme im Zusammenhang mit Feuchtigkeitseinwirkung können durch Auseinanderrücken der CPC-Profile und Aufbringen einer zusätzlichen opaken Beschichtung in den Zwischenräumen verringert werden (Abb. 4.21). Die Herstellung der Grundform wird hierdurch einfacher, dafür ist die Beschichtung aufwendiger und herstellungstechnisch auch komplizierter. Die Transmission verschlechtert sich dabei prozentual um den Flächenanteil der Zwischenbereiche. Im Gegenzug verringert sich durch einen größeren Abstand der Anteil transmittierter und in benachbarte Konzentratorenprofile wiedereingekop-

pelter Strahlen (s. Abschnitt 3.4.4).

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Rückseite mit einer zusätzlichen Kunststoffplatte zu verschließen. Dadurch entsteht eine beidseitig ebene Platte, die wesentlich unempfindlicher und auch statisch wesentlich stabiler ist. Da die meisten Kunststoffe hydrophile Eigenschaften aufweisen, kann sich durch dauerhafte Feuchtigkeitseinwirkung in den Luftschlüssen Wasser ansammeln. Um dies zu vermeiden, muß das Element vollständig versiegelt werden, beispielsweise durch einen beidseitigen Glasverbund und zusätzliche diffusionsdichte Kantenverklebungen, wodurch sich sowohl der Herstellungsaufwand als auch das Flächengewicht der Elemente deutlich erhöhen dürfte. Ein ähnliches Sandwichsystem mit Lichtlenk-Element als Kunststoffkern wird u.a. von der Firma Glas Schuler, Rednitzhembach, vertrieben (s. Anhang B). Die Glasstärke der aufgeklebten Scheiben beträgt bei diesem Produkt jeweils 1,5 mm.

#### **Einsatz im Scheibenzwischenraum**

Im Zwischenraum von Mehrscheibenverglasungen integrierte Sonnenschutzsysteme sind heute von verschiedenen Herstellern erhältlich. Der Scheibenzwischenraum bietet

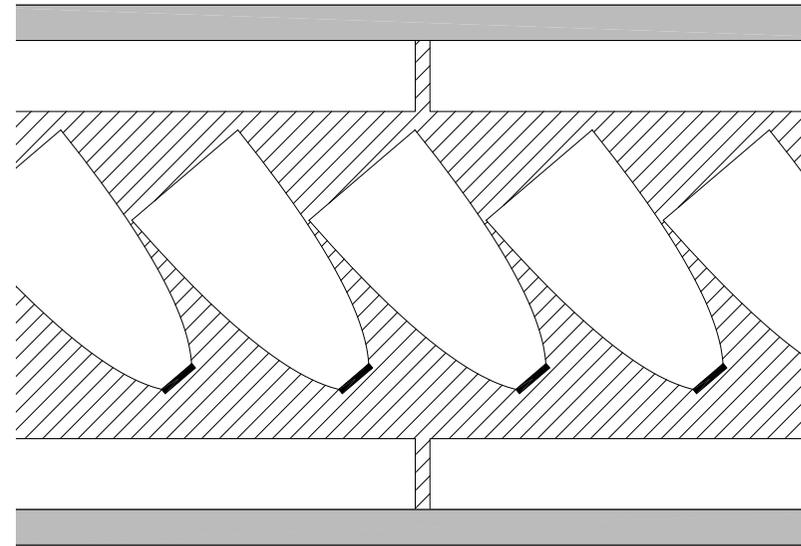


Abb. 4.23: Ausgerichtete CPC-Einzelstäbe mit Abstandshalter im Scheibenzwischenraum

einerseits den bestmöglichen Schutz der teilweise sehr empfindlichen Systeme vor Verschmutzung und Feuchtigkeitseinflüssen und andererseits eine deutliche Verringerung des g-Wertes gegenüber innenliegendem Einbau. Dem steht allerdings ein hoher Aufwand für den Austausch der Elemente bei Beschädigung oder Degradationerscheinungen entgegen. Obwohl seit einigen Jahren auch im Scheibenzwischenraum integrierte, motorisch oder magnetisch verstellbare Systeme angeboten werden, ist aufgrund der schwierigen Wartung und der hohen Gesamtkosten auch in Zukunft nur mit einem geringen Marktanteil derartiger Produkte zu rechnen. Statische CPC-Elemente

können als Folien oder in Form einzelner, durch Profilstreifen gehaltener Stäbe eingesetzt werden. Für den Dachbereich bietet sich auch der Einsatz dreidimensionaler Strukturen an.

#### **Einsatz im Zwischenraum von Doppelfassaden**

Mehrschalige Fassaden aus Glas haben in den letzten Jahren besonders in Gebäuden mit Büronutzung weite Verbreitung gefunden. Sie bieten neben der schallschutztechnischen Verbesserungen gegenüber einschaligen Fassaden für hohe Gebäude auch die Möglichkeit der natürlichen Belüftung. Der Sonnenschutz kann im vollständig oder

zumindest weitgehend witterungs- und windgeschützten Fassadenzwischenraum untergebracht werden. Die zusätzliche Hülle birgt im Sommerfall tendenziell die Gefahr unerwünschter Wärmelasten. Zur Ablüftung der im Fassadenzwischenraum absorbierten Strahlungsenergie muß eine ausreichende Durchströmung gewährleistet werden. Der Absorptionsgrad des Sonnenschutzes hat daher einen stärkeren Einfluß auf den g-Wert der Fassade als bei außenliegenden Systemen.

Die Erwärmung des Fassadenzwischenraumes ist im Sommer auch unter dem Aspekt, daß die sich dort anstauende Wärme durch eine natürliche Raumbelüftung in das Gebäude geleitet wird (andernfalls müßten die Fenster im Sommer geschlossen bleiben), nicht erwünscht. Gleichzeitig ist der hohe Verglasungsanteil der Fassade in der Regel auch mit dem Wunsch nach einer guten Tageslichtversorgung verbunden. Unter diesen Aspekten erscheint der Einsatz von Sonnenschutzsystemen mit hoher Richtungsselektivität und geringer Eigenabsorption für diesen Fassadentyp besonders geeignet. Der Schutz vor Witterungseinflüssen durch die Außenhülle der Fassade erweitert zudem das Spektrum technischer Umsetzungsmöglichkeiten für CPC-Systeme.

### **Innenliegender Sonnenschutz**

Auch innenliegende Sonnenschutzsysteme führen nur bei geringer Eigenabsorption und hohem Reflexionsgrad zu einer deutlichen g-Wert-Reduzierung. Der mit CPC-Elementen erreichbare Reflexionsgrad für Direktstrahlung ist vom Absorptionsgrad des dielektrischen Materials und dem Reflexionsgrad der Beschichtung abhängig. Durch den Einsatz hochreflektierender Beschichtungen können ähnliche g-Werte wie durch Prismenelemente erreicht werden. Aufgrund der komplexen Winkelabhängigkeiten zwischen Ein- und Ausstrahlungsverteilung, können hierzu jedoch keine genauen Angaben gemacht werden. Die in Abschnitt 2.6 beschriebenen Blendungsprobleme, die bei Prismen durch Lichtauskoppelung an den Kanten und innere Reflexion an der Verglasung auftreten, können durch CPC-Elemente jedoch weitgehend vermieden werden.

### 4.3 CPC-Systeme in Kombination mit Transparenter Wärmedämmung aus Wabenmaterial

Die bei der Transmission durch CPC-Elemente auftretende Lichtumlenkung kann genutzt werden, um die Direktlichttransmission durch Wabenmaterialien zur transparenten Wärmedämmung erhöhen.

Da die Transmission durch Wabenmaterialien mit flachen Einfallswinkeln stark abnimmt (Sc95), sind bei horizontaler Ausrichtung (z.B. beim Einsatz in Dächern) bei niedrigen Wintersonnenständen nur geringe solare Direktgewinne möglich. Die Umlenkung durch eine vorgelagerte CPC-Lamelle erhöht die Transmission durch die Wabenstruktur aufgrund der veränderten Winkelverteilung der Strahlung (s. Skizze in Abb. 4.24).

Die Winkelverteilung in Abb. 4.24 ist hier nur für den zweidimensionalen Fall dargestellt, in dem die Einfallsebene der Sonne der Profilschnittebene des Lamellensystems entspricht. Da der Azimutwinkel in den Wintermonaten im Tagesverlauf jedoch nicht so stark variiert und die nutzbare Strahlung für horizontale Flächen zu einem großen Teil in den Mittagsstunden anfällt, kann sich durch die Umlenkung eine deutliche Erhöhung der solaren Einträge im Winter ergeben. Die Umlenkung

kann auch lichttechnisch genutzt werden. Die Strahlaufspaltung bei der Transmission durch die Lamelle führt auch zur Verminderung der bei Wabenmaterialien bekannten (ringförmigen) Blenderscheinungen.

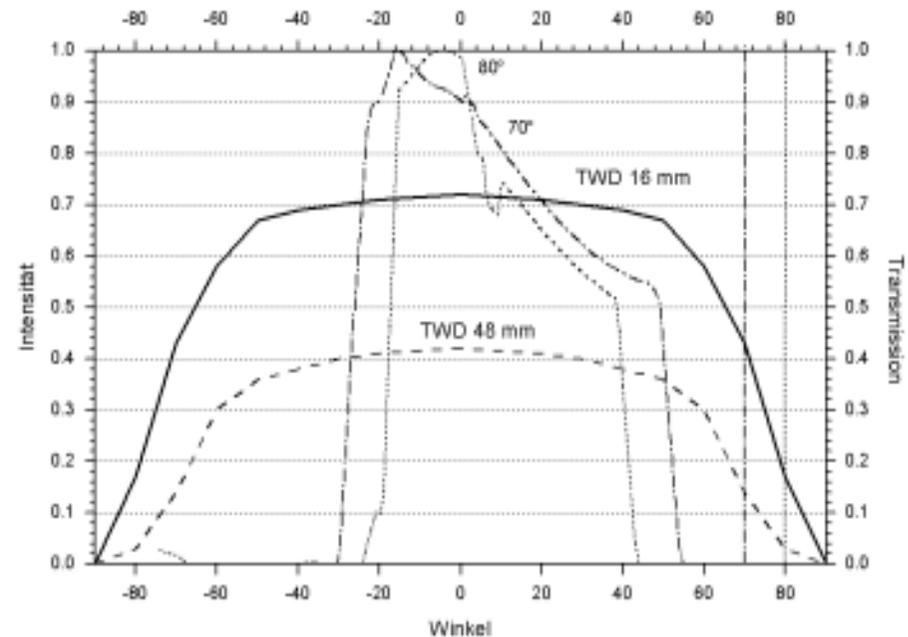
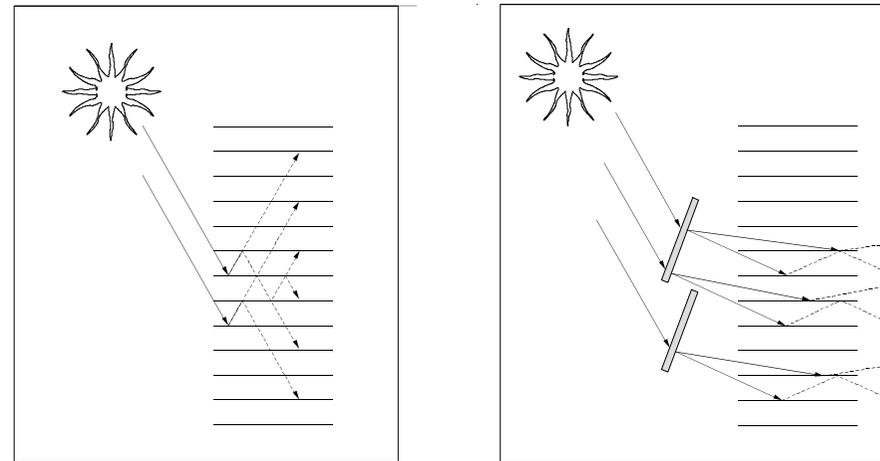


Abb. 4.24: Winkelabhängige Transmission von TWD-Wabenmaterial unterschiedlicher Dicke (aus [Sc95] und Richtungsverteilung der durch eine CPC-Lamelle transmittierten Strahlen ( $\Psi=15^\circ$ ,  $N_{cut}=0.4$ , Anstellwinkel  $15^\circ$ ) für die Einfallswinkel  $70^\circ$  und  $80^\circ$

#### 4.4 Fassadenintegrierte Solar-komponenten

Die Installation beweglicher Verschattungseinrichtungen vor passiven Solarkomponenten in der Fassade (wie TWD-Systemen oder Kurzzeitspeichern) führt zu einer deutlichen Erhöhung der Kosten und des Wartungsaufwandes. Hier erscheint der Einsatz stationärer Verschattungssysteme mit hohem Transmissionsgrad im Durchlassbereich sinnvoll.

Eine integrierte saisonale Verschattung kann auch eine technische Verbesserung für Fassadenluftkollektoren darstellen. Obwohl Geräte zur solar unterstützten Lüftung in den

Sommermonaten üblicherweise auf Direktlüftungsbetrieb ohne Luftvorwärmung umschalten, ergeben sich im Sommer ohne Verschattung hohe Stillstandstemperaturen im exponierten Kollektorbereich des Systems, die zu Materialdegradation und anderen Schäden führen können.

Eine starke Erwärmung des Kollektors birgt im Sommer auch die Gefahr zusätzlicher Wärmelasten durch sekundäre Wärmeleitung nach innen, die nur durch eine sehr gute, mit hohem konstruktiven Aufwand verbundene thermische Trennung der Systemkomponenten vermieden werden kann. Da viele der marktüblichen Systeme mit einer transparenten Außenabdeckung ausgestattet

sind, können CPC-Elemente zur saisonalen Verschattung geschützt im Luftraum zwischen der Außenabdeckung des Elementes und dem Absorber eingesetzt werden. Die Integration kann in Form einzelner CPC-Stäbe wie in Abb. 4.23 oder durch flächige Elemente erfolgen. Durch optische Ankoppelung einer CPC-Platte an die Außenabdeckung können zusätzliche Reflexionsflächen vermieden und die Transmissionsverluste im Durchlassbereich minimiert werden. Abbildung 4.25 zeigt die Visualisierung eines Fassadenkollektors mit CPC-Abdeckung unter verschiedenen Sichtwinkeln. Der Akzeptanzbereich ist hier asymmetrisch auf einen projizierten Höhenwinkel von  $0^\circ$  (Horizont) bis

$50^\circ$  ausgelegt. Die Kollektorfläche ist nur innerhalb des Akzeptanzbereiches sichtbar, im Übergangsbereich wirkt die Abdeckung teilweise spiegelnd, außerhalb des Akzeptanzbereiches in der Farbe der Beschichtung. (Dies ist in Abb. 4.25 in der Ansicht von unten dargestellt.) Die spiegelnde Reflexion, die besonders bei CPC-Elementen mit Formkorrektur außerhalb des Akzeptanzbereiches auftritt (s. a. Abschnitt 3.5.3), kann zu Blendungsproblemen führen und daher unerwünscht sein. Gerichtete Reflexionsanteile können durch Kombination von zwei spiegelsymmetrisch angeordneten Elementen vermieden werden, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

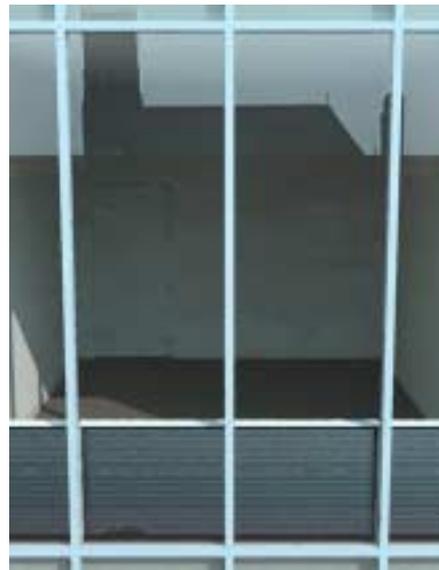
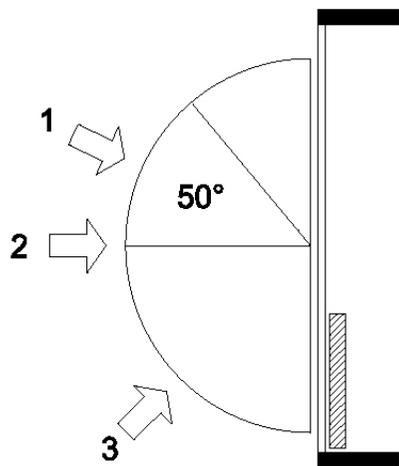


Abb. 4.25: Außenansicht eines Fassadenkollektors mit CPC-Abdeckung (opake Zwischenflächen,  $\Psi_0=25^\circ$ , Neigungswinkel  $25^\circ$ ), Blickwinkel von oben im Akzeptanzbereich (l.), frontal im Grenzwinkel (m.) und von unten außerhalb des Akzeptanzbereiches (r.).

## 4.5 Modifizierte CPC-Elemente

### 4.5.1 Symmetrisch gekoppelte CPC's

Durch Koppelung von zwei CPC-Elementen in der in Abb. 4.26 dargestellten Form entsteht ein symmetrisches Element, das gegenüber einfachen CPC-Strukturen folgende Vorteile bietet:

1. Das Element hat auf beiden Seiten plane Oberflächen und ist dadurch wesentlich unempfindlicher als offene Strukturen.
2. Der entgegengesetzt angekoppelte CPC bewirkt bei der Transmission eine Rücktransformation der Strahlrichtungen in den Akzeptanzbereich. Dadurch koppeln die transmittierten Strahlen vollständig auf der Austrittsseite

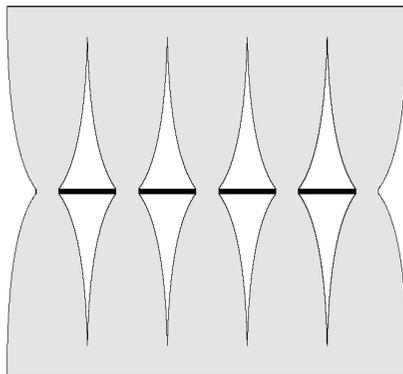


Abb 4.26: Symmetrisch gekoppelte CPC-Elemente

aus. Die in Abschnitt 3.5 erläuterte Formkorrektur zur Vermeidung von Transmissionsverlusten durch Totalreflexion an der Austrittsfläche ist somit nicht erforderlich.

Dadurch kann die spiegelnden Reflexion in den Außenraum, die bei einfachen Konzentratoren auftritt, weitgehend vermieden werden. Reflexion durch Strahlumkehrung, die für flache Einfallrichtungen zur Längsachse des Konzentrators außerhalb des Akzeptanzbereiches entsteht, muß jedoch auch bei dieser Variante in Kauf genommen werden.

Die Begrenzung des Austrittswinkels auf den Akzeptanzbereich kann zur Direkt- oder Diffuslichtlenkung in tiefere Raumzonen genutzt werden.

Beim Einsatz im Oberlichtbereich einer vertikalen Fassade sollte der Austrittswinkel der transmittierten Strahlen auf den oberen Viertelraum begrenzt werden, um Blendung zu vermeiden (s.a. Abschnitt 2.7). Die Winkelbegrenzung kann durch Verwendung asymmetrischer Konzentratoren realisiert werden.

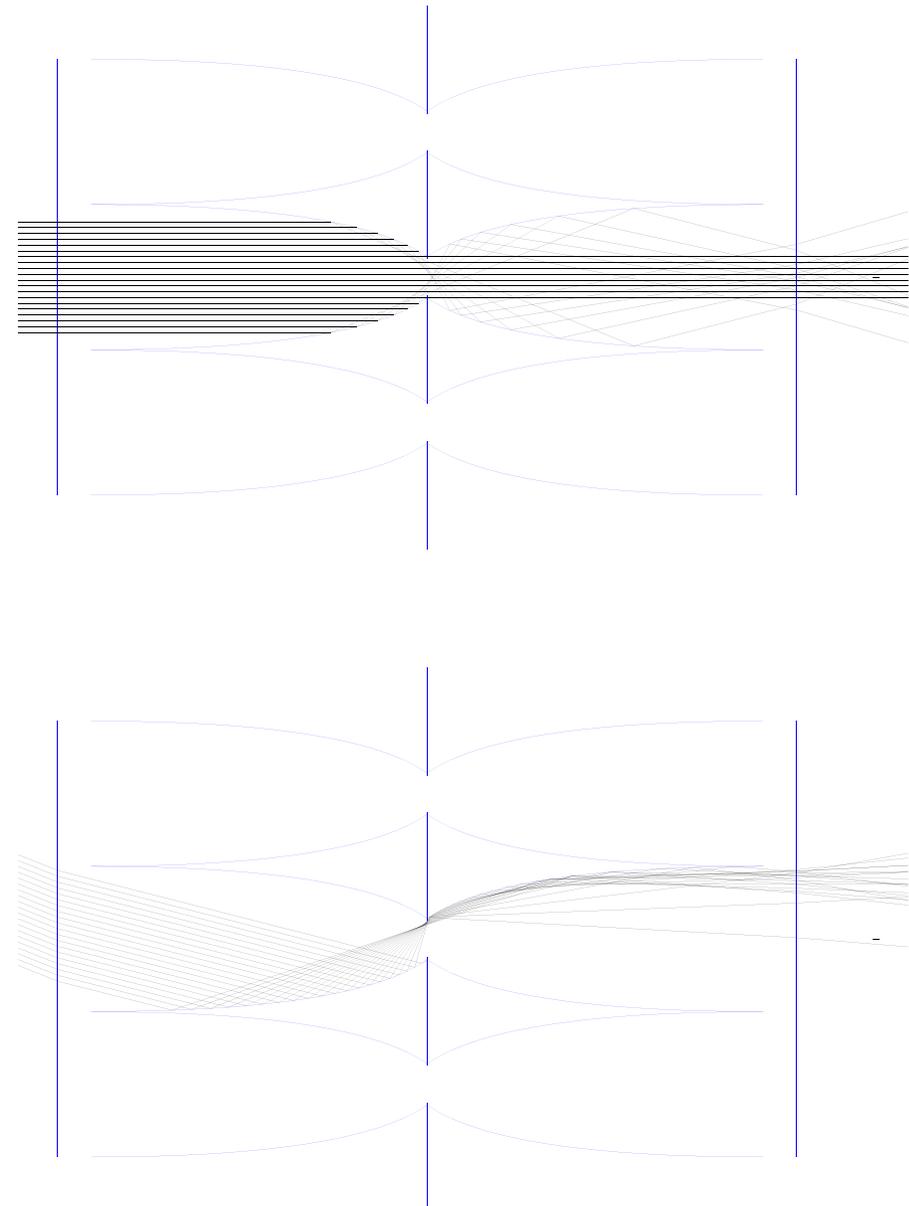


Abb 4.27: Strahlengang durch symmetrisch gekoppelte CPC-Elemente

#### 4.5.2 CPC mit opaken Ausgangsaperturen und gerundeter Profilform

Die hier beschriebene Variante steht im Zusammenhang mit den im nächsten Kapitel behandelten Aspekten der Herstellung von CPC-Elementen. Die Kanten am Rand der Ausgangsapertur und der spitz zulaufende Raum zwischen den Profilen sind fertigungstechnisch schwierig umzusetzen. Der enge Zwischenraum bedingt auch die bereits in 4.4.2. beschriebenen Effekte der Wasseranlagerung und Verschmutzung.

Daher wird hier ein modifiziertes Profil betrachtet, das mit einer runden Ausgangsapertur und mit einem Abstand  $b$  zwischen den Profilen versehen ist. Die Profiltwischenräume werden durch ein Kreissegment mit dem Radius  $b/2$  verbunden (Abb.4.28). Die Ausgangsaperturen werden mit einem Kreissegment geschlossen, sodaß das CPC-Profil stetig weitergeführt wird. Der Radius  $r$  des Kreissegmentes ergibt sich aus Abb.4.29:

$$r = a' \cdot \cos\left(\frac{90 - \Psi_{0,die}}{2}\right) \quad (4.1)$$

Die Beschichtung wird auf die runde Ausgangsapertur aufgebracht. Bei vollständiger Beschichtung des Kreissegmentes unterscheidet sich

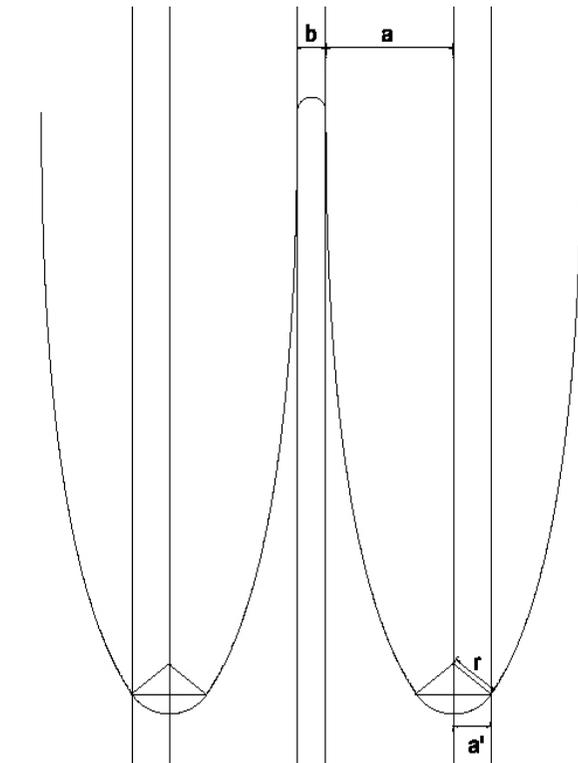


Abb 4.28: CPC mit gerundeten Aperturflächen und Abstand  $b$

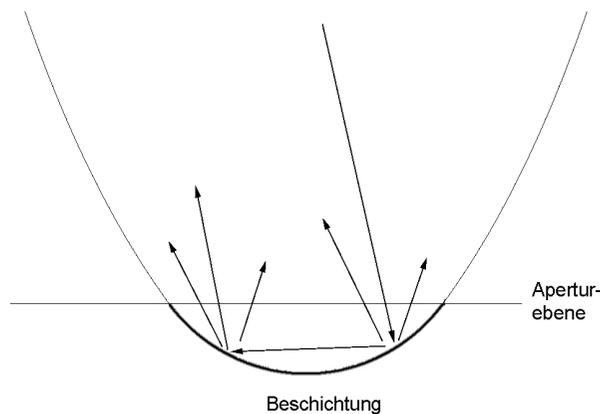


Abb 4.29: Interreflexion an der Aperturbeschichtung

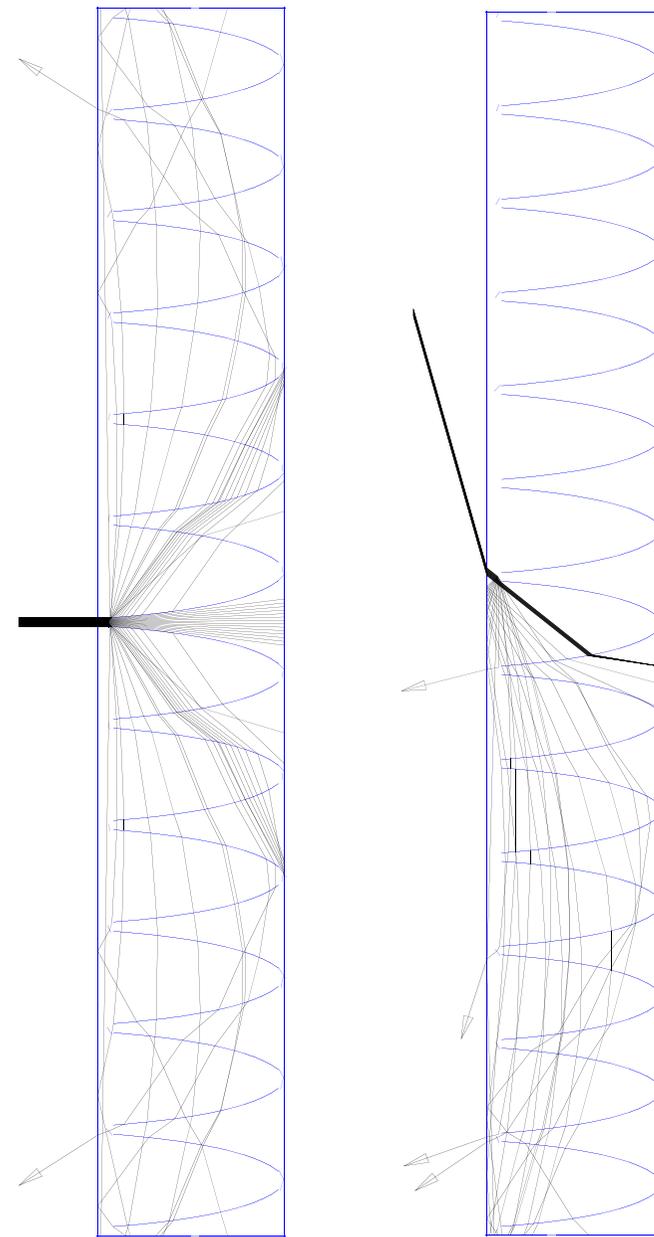


Abb 4.30: Strahlumlenkung durch Kantenrundung für Einfallswinkel  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 75^\circ$ , Akzeptanzwinkel  $\Psi_{r,\Lambda_{0b,r}} = 15^\circ$ ,  $N_{cut} = 0.4$ ,  $b = 0.1 \cdot a$

der CPC in seiner Funktion nur geringfügig von der ursprünglichen CPC-Form, da alle innerhalb des Akzeptanzbereiches eintretenden Strahlen durch die Aperturebene treten und reflektiert werden. Durch Interreflexionen an der Ausgangsapertur ist eine leichte Erhöhung der Absorption zu erwarten (Abb. 4.29). Bei Beschichtungen mit einem Reflexionsgrad über 90% ist die Absorptionserhöhung für die meisten Profilverformen zu vernachlässigen.

Durch die Rundung an den Verbindungspunkten der Profile werden die Strahlen divergent aufgespalten (Abb. 4.30) Hierbei bilden sich in Abhängigkeit vom Einfallswinkel Vorzugsrichtungen aus. Bei senkrechtem Strahleneinfall tritt direkte Transmission in einem engen Winkelbereich um die Flächennormale auf, bei flachem Einfallswinkel wird die Normalenrichtung aller Strahlen nach Durchlaufen mehrerer benachbarter CPC-Elemente umgekehrt.

Wird die Ausgangsaperturfläche asymmetrisch beschichtet, so ergibt sich auch eine asymmetrische Winkelverteilung der Transmission. Dieser Fall ist in Abb. 4.31 und Abb. 4.32 für einen 15°-CPC mit  $n=1.5$  und Verkürzungsfaktor  $N_{cut}=0.4$  dargestellt. Der Skalierungsfaktor  $s$  gibt die Asymmetrie der Beschichtung an. Für den Kreissegmentwinkel  $\nu$  folgt aus Abb. 4.31:

$$\sin \nu = \frac{s \cdot a'}{r}$$

$$s \in [0; 1] \quad (4.2)$$

Für  $s$ -Werte von 0.75 - 1, also bei nicht zu großer Asymmetrie der Beschichtung, resultiert eine ähnliche Trennschärfe der winkelabhängigen Transmission wie bei symmetrischer Beschichtung (Abb. 4.32). Für kleinere  $s$ -Werte flacht die Kurve im Ausblendbereich stark ab.

Durch asymmetrische Beschichtung kann der Transmissionswinkelbereich auf eine bestimmte Einbausituation für ein stationäres Sonnenschutzelement angepaßt werden, ohne die geometrische Grundform des Elementes zu verändern. Dies kann fertigungstechnische Vorteile bieten, da die Werkzeugkosten für eine geometrische Grundform häufig sehr hoch sind und daher nur eine oder wenige Grundgeometrien herstellbar sind. Die Berechnung zeigt außerdem, dass die Funktion des CPC-Elementes auch bei geringfügig ungleichmäßiger Beschichtung (z.B. bei Variation der Beschichtungsbreite um einige Prozent) noch weitgehend gewährleistet ist.

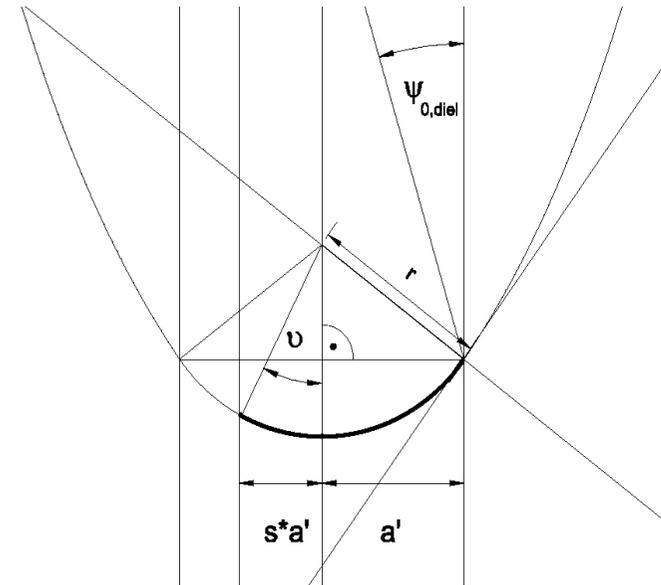


Abb 4.31: Asymmetrische Beschichtung der Ausgangsapertur mit Skalierungsfaktor  $s$  und Kreissegmentwinkel  $\nu$

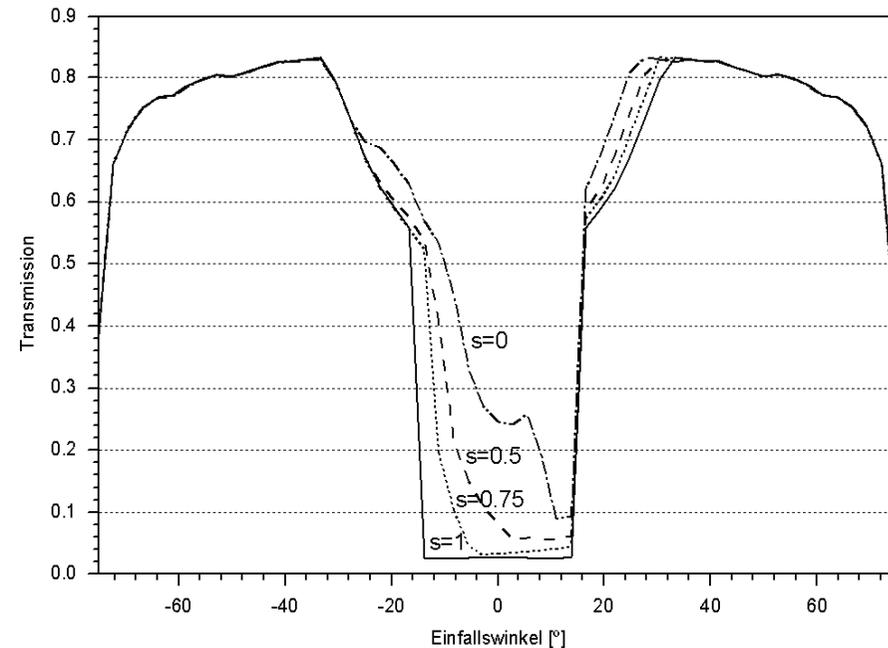


Abb 4.32: Winkelabhängiger Transmissionsgrad für verschiedene  $s$ -Werte, (Strahleneinfall in der Profilschnittebene)

## 5 Herstellung von Funktionsmustern

Im letzten Kapitel dieser Arbeit wird die Herstellung verschiedener CPC-Muster erläutert. Da sich aufgrund des sehr aufwendigen Herstellungsverfahrens nur kleine Musterelemente herstellen ließen, und für ihre exakte Beschichtung der Elemente kein geeignetes Verfahren gefunden werden konnte, wurde auf eine lichttechnische Vermessung der Muster verzichtet. Die Funktion und visuelle Wirkung eines CPC-Lamellensystems konnte anhand eines Maßstabsmodells einer Fassade photographisch dokumentiert werden.

### 5.1 Herstellungsprozess

Für die Funktionsmuster wurde ein äußerer Akzeptanzwinkel von  $15^\circ$  mit einem Verkürzungsfaktor  $N_{cut}=0.4$  gewählt. Die Breite der Ausgangsapertur wurde auf 1 mm festgelegt, woraus sich eine Breite der Eingangsapertur von ca. 5.1 mm und eine Länge von ca. 8.4 mm ergab.

Zur Herstellung der Muster wurden zunächst verschiedene Fertigungsverfahren aus Kunststoff geprüft. Für die Herstellung ergaben sich folgende Randbedingungen:

- Ein industrielles Fertigungsverfahren (z.B. Extrusion oder Spritzguß) mußte aufgrund der hohen Grundkosten für den Werkzeugbau ausgeschlossen werden.
- Die Mikrorauheit der Oberflächen sollte minimal sein, um eine ungestörte Totalreflexion an den CPC-Seitenwänden zu gewährleisten. Kantenrundungen sollten ebenfalls vermieden werden.
- Die Oberflächenqualität sollte ohne weitere Nachbehandlung (z.B. Polieren oder Lackieren) erreicht werden, da diese zum einen technisch schwierig und zum anderen mit zusätzlichen Formtoleranzen verbunden ist.

Die direkte Abformung eines CPC-Plattenelementes aus einer Negativ-Stahlform wurde ausgeschlossen, da die ungünstigen Geometrieverhältnisse die Ausformung (Trennen des Gießlings von der Form) sehr schwierig erscheinen ließen. Außerdem erschien eine Oberflächen-Nachbearbeitung einer Metall-Negativform technisch nicht möglich. Ebenso wurde die direkte Herstellung einzelner Positivformen aus Kunststoff durch spanhebende Verfahren (CNC-Fräsen) verworfen, da die Schwierigkeit, mit derartigen Verfahren optisch glatte Oberflächen zu erzielen, bereits aus [Bru96] bekannt war. Anstelle dessen wurde ein zweistufiges Kunststoff-Gießver-

fahren gewählt. Hierfür waren die folgenden Arbeitsschritte notwendig:

### Formenbau

Zunächst wurde eine offene Halbschalen-Gießform für einzelne CPC-Stäbe angefertigt. Die Form wurde aus einem Hartmetallstab durch ein spezielles Profilschleif-Verfahren hergestellt. Dadurch konnte eine Mikrostrukturierung (Riefenbildung) der Oberfläche, wie sie bei Fräsprozessen auftritt, vermieden werden. Der Schleifprozeß erfolgte in zwei Stufen. Die mittlere Oberflächenrauheit betrug nach dem Feinschliff  $1 \mu\text{m}$ . Die Profilflächen wurden anschließend manuell auf Hochglanz poliert.

### Gießverfahren

In der Metallform wurden einzelne CPC-Stäbe hergestellt. Als Gießharz wurde ein niedrig viskoses 2-Komponenten-Harz der Firma CIBA GEIGY (Araldit) verwendet. Das Gießharz eignete sich u.a. auch wegen seiner hohen Brechzahl von  $n=1.553$  (gegenüber Plexiglas mit  $n=1.491$ ) für die CPC-Muster. Die einzelnen Stäbe wurden vor dem Auslösen aus der Form auf der Vorderseite plangefräst. Die Einzelstäbe wurden anschließend auf einer Kunststoffplatte zu einem Array zusammen-

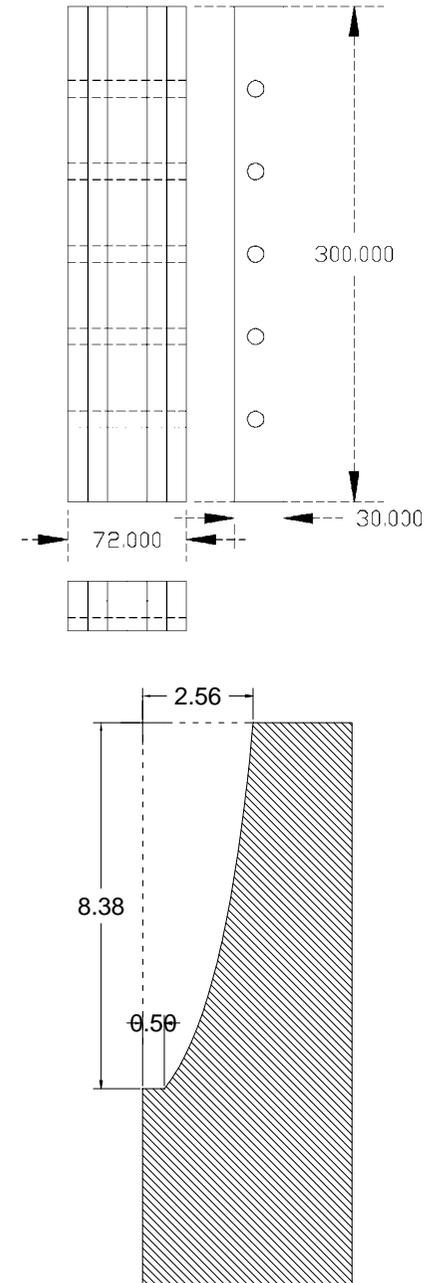


Abb. 5.1: Halbschalen der Metallgießform

montiert, das als Positiv für den zweiten Abformschritt verwendet wurde. Von diesem Array wurde ein Abguß mit einem Kautschukmaterial erstellt. Die Kautschuk-Negativform konnte nun für mehrere Abgüsse verwendet werden. Diese wurden als geschlossene Form mit einer Kunststoffabdeckung auf der Vorderseite hergestellt, um eine plane Außenfläche zu erhalten. Die gegossenen Elemente hatten optisch glatte Oberflächen, sodaß keine weiteren Bearbeitung notwendig war.

### Beschichtung der Ausgangsaperturen

Als kritischer Punkt für die Funktion und die visuelle Erscheinung der Muster erwies sich bei der Musterherstellung die Beschichtung der Ausgangsaperturen. Da hierfür kein maschinelles Verfahren gefunden werden konnte, wurde der Farbauftrag manuell vorgenommen. Durch Ungleichmäßigkeiten des Farbauftrages ergaben sich im Übergangsbereich zwischen Transmission und Rückreflexion ausgeprägte Schliereneffekte. Dieser Effekt ist visuell besonders stark wahrnehmbar, da die optische Wirkung des Elementes bei Betrachtung aus dem Grenzwinkel des Akzeptanzbereiches durch die Fokussierung auf den Randpunkt der Ausgangsapertur einer stark vergrößerten Lupe entspricht. Da eine

gleichmäßige Opazität und eine exakte Auftragung der Farbflächen mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht erreicht werden konnte, erschien eine lichttechnische Vermessung der Muster aufgrund der geringen Aussagekraft der Messungen im Hinblick auf industriell hergestellte Elemente nicht sinnvoll.

Auf der folgenden Seite ist die Funktionsweise und die visuelle Wirkung der Muster photographisch dokumentiert.

Die Laserphotographien in Abb. 5.9 und 5.10 wurden in einer Nebelkammer mit Belichtungszeiten von mehreren Minuten aufgenommen. In der Rückreflexion (Abb.5.10) ist deutlich die Vorwärtsstreuung des Lichtes erkennbar.

Die Ausgangsapertur des in Abbildung 5.11 gezeigten Elementes ist nur zur Hälfte beschichtet. Auf der unbeschichteten Seite wird die spiegelnde Wirkung durch innere Totalreflexion sichtbar, während die beschichtete Seite opak wirkt.

Bei direkter Besonnung ist durch die hohe Leuchtdichte auf der Aperturfläche die Inhomogenität der Beschichtungsdicke sichtbar (rechte Hälfte von Abbildung 5.11, Blick auf die Rückseite).

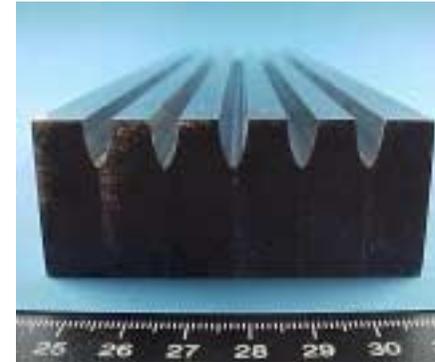


Abb. 5.2: Gießform aus gehärtetem Stahl



Abb. 5.4: Plangefräste Gießrohlinge (Positive) nach dem Auslösen aus der Stahlform



Abb. 5.3: Silikon- Negativform für Plattenabguß

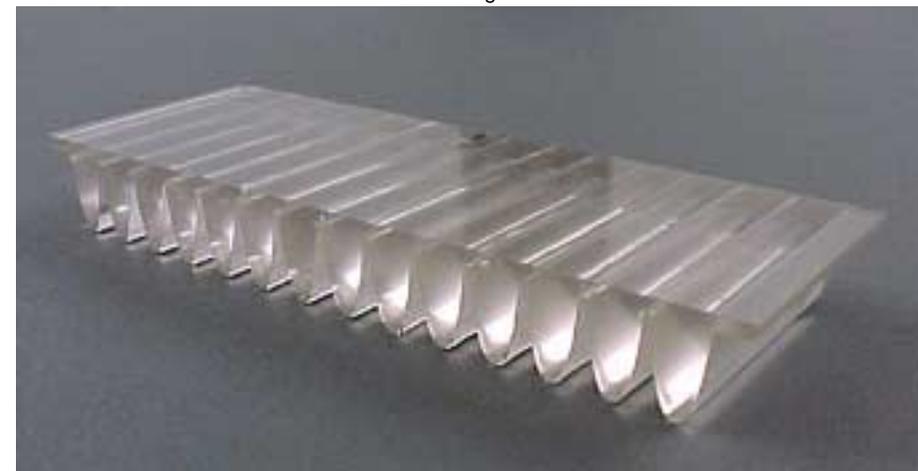


Abb. 5.5: Gegossene CPC-Platte (Abschnitt)

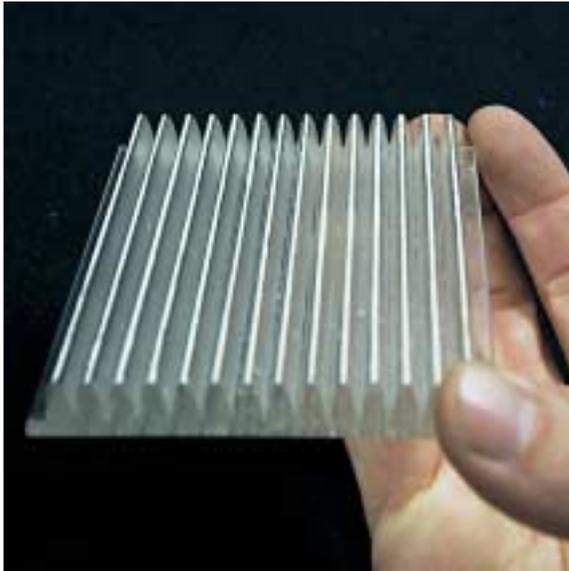


Abb. 5.6: Rückseite mit Beschichtung

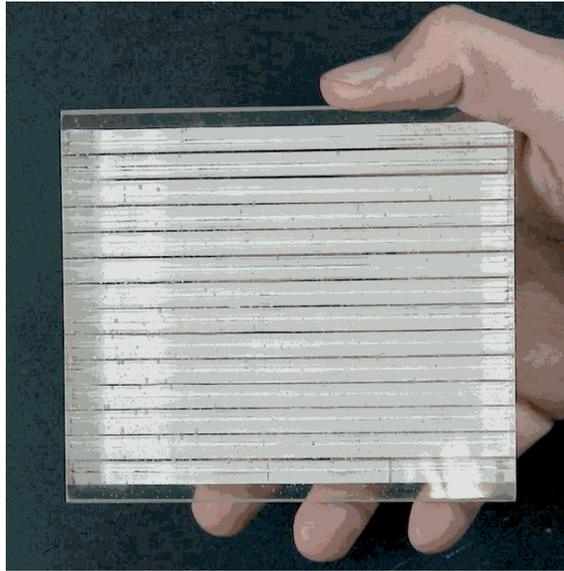


Abb. 5.7: Blickwinkel innerhalb des Akzeptanzbereiches



Abb. 5.8: Blickwinkel außerhalb des Akzeptanzbereiches

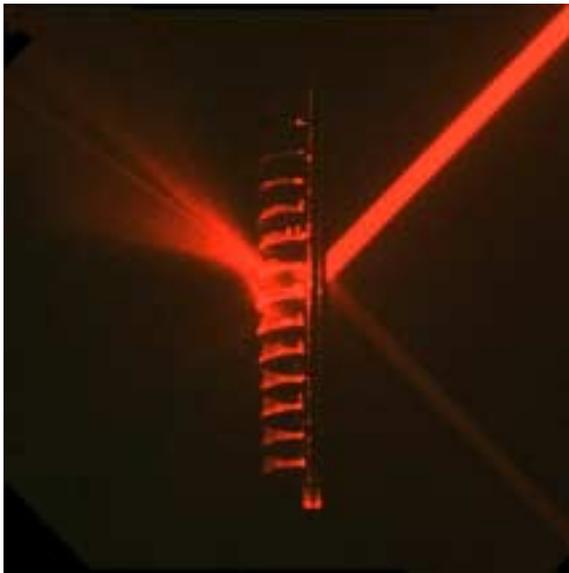


Abb. 5.9: Transmission und Strahlumlenkung bei gerichteter Einstrahlung außerhalb des Akzeptanzbereiches

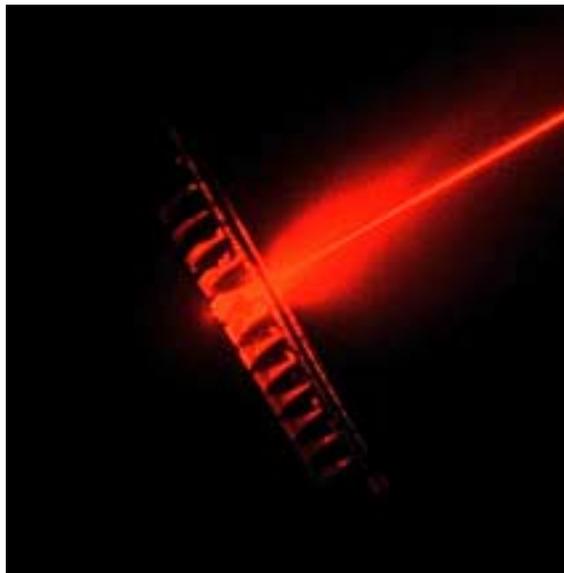


Abb. 5.10: Vorwärts gerichtete Rückstrahlung bei gerichteter Einstrahlung innerhalb des Akzeptanzbereiches

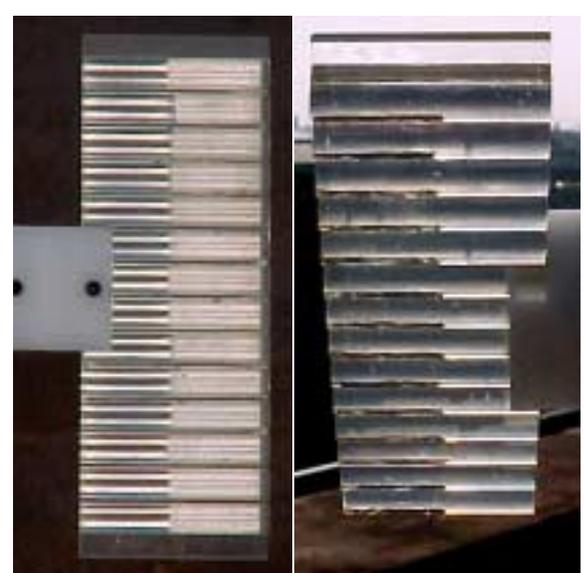


Abb. 5.11: Vorderseite (l) und Rückseite ohne Beschichtung und mit Beschichtung



Abb. 5.12: CPC- Fassade, Modell 1:10, Außenansicht bei direktem Sonnenlichteinfall. Der Sichtwinkel liegt außerhalb des Akzeptanzbereiches.



Abb. 5.13: CPC- Fassade, Modell 1:10, Außenansicht bei direktem Sonnenlichteinfall. Der Sichtwinkel liegt außerhalb im Akzeptanzbereiches der unteren Lamellenreihe.

## 5.2 Fassadenmodell

An einem Fassadenmodell im Maßstab 1:10 wurden die Einstellmöglichkeiten und die lichttechnische Wirkung eines Horizontallamellensystems unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen untersucht. Da die Größe der CPC-Muster durch den Herstellungsprozeß festgelegt war, sind durch den Maßstabsprung zum 1:10-Modell der Realitätsnähe zu einer 1:1-Fassade natürlicherweise Grenzen gesetzt. Die

Außenwirkung der CPC-Elemente und die Lichtwirkung im Innenraum lassen sich jedoch an dem Modell bereits gut verdeutlichen.

Die Ausgangsaperturflächen der Elemente wurden mit einem Streifen aus weißem Kunststoff belegt. Dadurch konnte eine gleichmäßige Opazität der Aperturflächen erreicht werden. Da die Steifen jedoch nicht überall optisch an die Aperturflächen ankoppeln, werden im Modellphoto

in Abb. 5.13 in den weißen Bereichen einige Störungen sichtbar.

Abbildung 5.12 zeigt die Fassade aus einem Sichtwinkel außerhalb des Akzeptanzbereiches. Die Beschichtung ist aus dieser Perspektive nicht sichtbar, sodaß ein transluzenter Eindruck der Elemente entsteht.

Abbildung 5.13 zeigt die Fassade aus einer erhöhten Betrachterposi-

tion. Der Sichtwinkel auf die zwei unteren Lamellenreihen liegt im Akzeptanzbereich. Dadurch wirken die Elemente von außen weiß. Die obere Reihe ist gegen die unteren Reihen leicht verkippt, sodaß diese noch außerhalb des Akzeptanzbereiches gesehen wird. Die Streifigkeit der weißen Elemente in den unteren Reihen wird dadurch verursacht, das zwischen den einzelnen CPC-Profilen ein geringfügiger Abstand ein-



Abb. 5.14: Innenansicht, Sonnenschutz bei Einstrahlung im Akzeptanzbereich. Die Streifenbildung entsteht durch Licht, das durch die Abstandsflächen zwischen den CPC-Profilen transmittiert wird.



Abb. 5.15: Innenansicht, Lichtumlenkung an die Decke bei leicht nach außen geneigter Lamellenstellung und flachem Einfallswinkel außerhalb des Akzeptanzbereiches



Abb. 5.16: Innenansicht, Sonnenschutz bei leicht geneigten Lamellen und Einfallsrichtung außerhalb des Akzeptanzbereiches. Die Direktstrahlung wird durch die Lamelle transmittiert und umgelenkt (s. Abb. 5.17)



Abb. 5.17: Außenansicht, Lichtumlenkung außen bei horizontal ausgerichteter Lamelle und Einstrahlung außerhalb des Akzeptanzbereiches.

gehalten werden mußte. Hierdurch wird auch die Streifenbildung in der Lichtwirkung im Innenraum in Abbildung 5.14 verursacht.

In Abb. 5.15 sind die Elemente leicht nach unten verkippt, wodurch das Direktlicht transmittiert und an die

Decke umgelenkt wird. Abb. 5.16 zeigt die geöffneten Lamellen bei Lichteinfall außerhalb des Akzeptanzbereiches. Das Licht wird durch die Lamelle transmittiert und dabei von der Fassade weggelenkt. Im Innenraum ergibt sich bei dieser Einstellung eine blendfreie Lichtsitua-

tion, im Außenraum ergeben sich in der Untersicht der Elemente hohe Leuchtdichten (Abb. 5.17).

### 5.3 CPC-Elemente aus Glasstäben

Der Werkstoff Glas weist im Vergleich zu Kunststoffen eine härtere Oberfläche und dauerhafte Resistenz gegenüber Strahlung und Witterungseinflüssen auf. Glas ist außerdem im Gegensatz zu Kunststoffen nicht brennbar.



Abb. 5.22: Profilform der Glasstäbe

Mit den heute industriell verfügbaren Guß- oder Preßglastechniken können jedoch keine flächigen Elemente mit den für eine CPC-Struktur benötigten Profiltiefen und Oberflächenqualitäten hergestellt werden. Eine mechanische Bearbeitung von Floatglas zur einseitigen Strukturierung erscheint zwar grundsätzlich möglich, scheidet für großflächige Anwendungen jedoch aus Kostengründen aus (s. a. Abschnitt 6). Einzelne stabförmige CPC-Elemente können jedoch in Stranggußverfahren hergestellt und zu flächigen Elementen montiert werden. Die nebenstehenden Abbildungen zeigen ein solches Element, das aus Glasstäben der Firma SCHOTT Rohrglas, Mitterteich angefertigt wurde. Die



Abb. 5.18: Ansicht von vorne bei Einstrahlung im Akzeptanzbereich.



Abb. 5.19: Ansicht der Rückseite bei direkter Besonnung



Abb. 5.20: Ansicht der Rückseite ohne Direkteinstrahlung

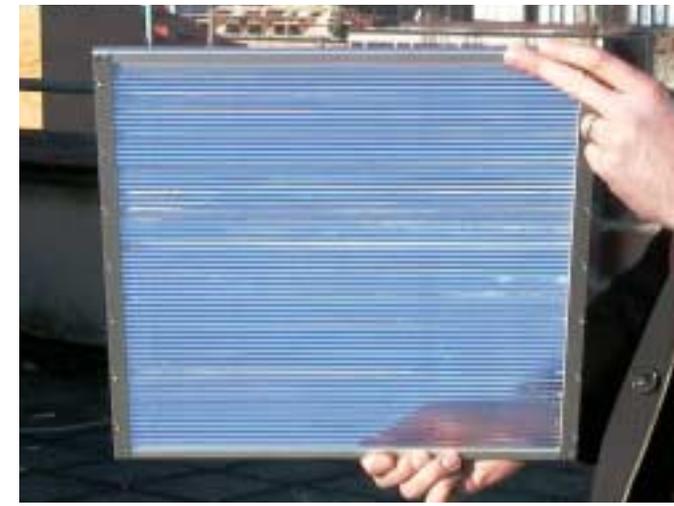


Abb. 5.21: Transmission im Durchlassbereich (Blick auf die Außenseite), die Blaufärbung entsteht durch das umgelenkte Zenitlicht

Profilform der Stäbe entspricht näherungsweise einem konischen Konzentratoren mit gewölbter Eingangsapertur. Im Zentrum des Glasstabes befindet sich eine Kapillare. Die Beschichtung wurde auch hier manuell aufgetragen. Durch die Wölbung der Aperturfläche und die eingeschlossene Kapillare ergibt sich bei direkter Einstrahlung in der Reflexion ein Blendstreifen (s. Abb. 5.18). Im Transmissionsbereich ist das visuelle Erscheinungsbild des Elementes vergleichbar mit dem einer profilierten Glasplatte.

Die Verwendung von dünnen Glasstäben in der Fassade, besonders im Außenbereich, wirft die Frage der Bruchsicherheit bzw. der Verletzungsgefahr bei Zerstörung der Elemente auf.

Die Bruchsicherheit kann durch Einbringen eines Stahldrahtes ohne wesentliche Beeinträchtigung der Funktion deutlich verbessert werden. Bei Totalversagen des Glasstabes haften die Bruchstücke so perlenket-

tenartig am Stahldraht. Durch den Stahldrahteinschluß kann eventuell auch eine Vorspannung auf das Glas (z.B. durch Einkleben des Drahtes unter Zugspannung) gebracht werden, wodurch die Belastbarkeit des Stabes erhöht wird.



Abb. 5.23: Glasstäbe mit Stahlseele

## 6 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Einsatzpotential linearer Konzentratoren für den Sonnenschutz im Gebäude aufgezeigt werden. Gleichzeitig wurde deutlich, daß die fertigungstechnischen Möglichkeiten zur Herstellung optisch strukturierter Elemente in großen Stückzahlen heute noch sehr beschränkt sind. Hier existiert ein großes Entwicklungspotential, sowohl im Bereich der Kunststoffverarbeitung als auch in der Glasherstellung und –bearbeitung. Die Entwicklungen in anderen Technologiesektoren eröffnen hier bereits verschiedene Perspektiven:

Optische Strukturen aus Glas werden für neue Bildschirm- und Projektionstechnologien benötigt. Für Plasmabildschirme werden mikrostrukturierte Glasoberflächen mit Profilschleifverfahren hergestellt. Dieses Verfahren wird jedoch vermutlich auch in Zukunft sehr kostenintensiv bleiben. Für Beamer-Rückprojektionsflächen werden Folien und Kunststoffoberflächen durch Heißprägeverfahren strukturiert. Geprägte Prismenfolien werden bereits auch in der Lichttechnik für Lichtleitrohre (light tubes) eingesetzt. Im Leuchtensektor gibt es außerdem einige Neuentwicklungen flacher Leuchtentypen, die mit massiven Lichtleitern und mit optischen Strukturen zur flächigen Lichtauskoppelung ausgestattet werden. Als Bei-

spiel sei hier die Eldecon-Technik der Firma Siteco GmbH, Traunreut erwähnt. Bei diesem Leuchtentyp werden Kunststoffstrukturen, deren Grundelement einer abgeschnittenen vierseitigen Pyramide entspricht, zur blendfreien Lichtauskoppelung verwendet. Für den Einsatz von LED-Technik im Leuchtenbereich werden ebenfalls Mikro-Optiken benötigt.

Weitere Verfahren zur Profilierung transparenter Flächen eröffnen sich durch die Lasertechnik. Lasergeschnittene Lichtumlenkelemente sind bereits als „Laser Cut Panels“ bekannt. Ein ähnliches, durch ein spezielles zweikomponentiges Extrusionsverfahren hergestelltes Produkt wird unter der Bezeichnung „Plexiglas Daylight“ von der Röhm GmbH, Darmstadt angeboten. Nähere Angaben hierzu werden in Anhang B gegeben.

Durch den Einsatz von Lichtleitern oder LED-Technik entstehen neue Kombinationsmöglichkeiten von Tages- und Kunstlichttechnik. So sind Lichtlösungen denkbar, bei denen flächige Elemente gleichzeitig die Funktion eines Fenster und einer Kunstlichtquelle erfüllen.

Für die bautechnische Umsetzung eines CPC-Sonnenschutzsystems wurden in Kapitel 5 bereits einige Perspektiven aufgezeigt. Von außenliegenden Lamellensystemen

oder großflächigen stationären Sonnenschutzelementen über Systeme, die im Scheibenzwischenraum von Isolierverglasungen integriert werden, bis zu Folienstrukturen ergibt sich eine große Bandbreite möglicher Systemlösungen.

Eine weiteres Anwendungsgebiet für nicht abbildende Mikrostrukturen ist die selektive Lichtlenkung. Durch maßgeschneiderte Mikrostrukturen können Materialien erzeugt werden, die für bestimmte Winkelbereiche spiegelnd und für andere Bereiche transparent, absorbierend oder diffus streuend wirken. Durch mikrostrukturierte Flächen können Strahlungsanteile gezielt zwischen definierten Winkelbereichen ausgetauscht werden. So ist beispielsweise ein Dekenelement vorstellbar, das nur für die Einfallswinkelbereiche der Fensterzone spiegelnd in einen bestimmten Raumabschnitt wirkt und anderen Winkeln weiß oder transparent erscheint. Ein theoretischer Ansatz hierfür wird durch Ries und Muschaweck in [RM99] formuliert .

## Anhang A

### Konstruktionsprinzip des asymmetrischen CPC

Der in Kapitel 3 behandelte symmetrische CPC kann als Sonderfall des allgemeiner formulierten CPC mit für beide Konzentradorflanken frei wählbarem Akzeptanzhalbwinkel angesehen werden. Bei der Wahl unterschiedlicher Akzeptanzhalbwinkel, also im asymmetrischen Fall, haben die Konzentradorflanken unterschiedliche Höhen, wodurch die Aperturflächen im Gegensatz zum symmetrischen CPC nicht parallel zueinander ausgerichtet sind.

Da sich die Akzeptanzhalbwinkel  $\Psi_{0,l}$  und  $\Psi_{0,r}$  auf die Normale der Eingangsapertur beziehen, das in Abschnitt 3.3.1 beschriebene Polarkoordinatensystem sich jedoch auf die Ausgangsaperturfläche bezieht, erscheint es zweckmässig, die Konstruktionswinkel  $\Psi_{k,l}$  und  $\Psi_{k,r}$  einzuführen (s. Abb. A1). Für die Koordinatengleichung

$$\rho(\theta) = \frac{\pm P}{1 - \sin(\theta - \Psi_{k,lr})}$$

ergeben sich die maximalen Winkelkoordinaten der Profildpunkte  $P_1, P_2$  an den Randpunkten der Eingangsapertur:

$$\theta_{max,r} = 90^\circ - \Psi_{k,l}$$

$$\theta_{max,l} = 90^\circ - \Psi_{k,r}$$

Das Verhältnis zwischen Eingangsapertur  $P_1P_2$  und Ausgangsapertur  $P_3P_4$  ergibt, wie bereits für den symmetrischen CPC in Kapitel 4 beschrieben, den Konzentrationsfaktor  $C$ .

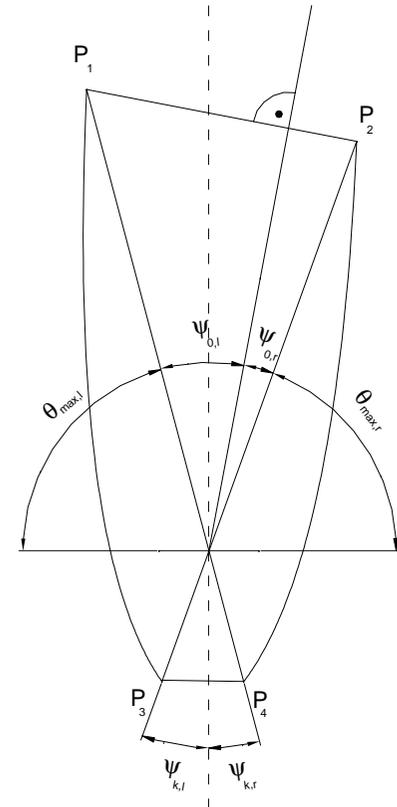


Abb. A 1: Konstruktion des asymmetrischen CPC

## **Anhang B**

### **Kenndaten<sup>1</sup> Tageslichtsysteme:**

#### **PRISMENGROßPLATTE (Hersteller: Fa. Siteco GmbH, Traunreut)**

Dicke 12 mm, Flächengewicht 11 kg/m<sup>2</sup>

System 1: Im Scheibenzwischenraum integriertes Prismenelement mit einseitig verspiegelten Prismenflanken

(für den stationärer Sonnenschutz)

Aufbau: 8mm ESG / 20mm ZWR/10 mm VSG:

Flächengewicht 56 kg/m<sup>2</sup>

Preis: ca. EUR 900,-

System 2: Außenliegende Sonnenschutzlamellen

g-Wert: 0.15 –0.17 (in Ausblendrichtung)

Lichttransmission orientierungsabhängig bis max 45%

Preis:ca. EUR 600.- bis EUR 700.- (incl. Antrieb)

#### **MIKRORASTER (Hersteller: Fa. Siteco GmbH, Traunreut)**

Kunststoffraster mit metalischer Beschichtung

Integration im Scheibenzwischenraum von Isolierverglasungen

Reflexionsgrad der Beschichtung ca. 92%-93%

Flächengewicht des Rasters: 3 kg/m<sup>2</sup>

Zur Integration benötigter SZR: 24 mm

Preis: ca. EUR 500.-

g-Wert: 0.14 –0.17 (im Ausblendrichtung)

---

<sup>1</sup>Kenndaten nach Herstellerangaben, alle Preise beziehen sich auf 1qm Fläche ohne Einbau in Euro, die Angaben sind als grobe Richtwerte zu verstehen

**PLEXIGLAS DAYLIGHT (Hersteller: Röhm GmbH, Weiterstadt ):**

Kunststoffplatte aus Plexiglas zur Lichtlenkung

Dicke 8 mm, max. Breite ca. 40 cm

Flächengewicht 10 kg/m<sup>2</sup>

Preis: ca. EUR 300.- bis 400.-

Ausführungen mit beidseitig auflaminiertem Floatglas sind von verschiedenen Firmen erhältlich,  
u.a. Fa. Glas Herzog, Fa. Glas Schuler, Fa. Inglas

Flächengewicht Laminat mit 2 x 1,5 mm Floatglas: 17 kg/m<sup>2</sup>

Flächengewicht Laminat mit 2 x 3 mm Floatglas: 25 kg/m<sup>2</sup>

Preis: > EUR 500.-

**OKASOLAR ( Hersteller: Okalux GmbH, Marktheidenfeld-Altfield)**

Im Scheibenzwischenraum integrierte lineare Kunststofflamelle mit  
metallischer Beschichtung für den saisonalen Sonnenschutz

System 1 (Fassade):

Aufbau: 6mm (Float) -18mm SZWR - 6 mm (Float)

k-Wert (mit Verglasung): 1.4 W/m<sup>2</sup>K ,

g-Wert 60°-0° : 0.15 – 0.43

Preis ca. EUR 390,-

System 2 (Dach):

Aufbau 6mm (ESG) -16mm SZWR - 2x4 mm (VSG)

g-Wert: winkelabhängig 0.35-0.1

Preis: EUR 430.-

## **Anhang C**

### **Veröffentlichungen**

Hartwig, H., Krippner, R., Kuckelkorn, T.: Zu Planungs- und Vorgehenstrategien interdisziplinärer Arbeitsgruppen. Erste Erfahrungen aus Arbeiten mit transparenten und transluzenten Materialien in der Gebäudehülle, Viertes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden. Kloster Banz, Staffelstein. Tagungsband. Regensburg: Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), 1998

Kuckelkorn, T., Goetzberger, A., Herzog, T, CPC-Strukturen zur Tageslichtnutzung, 6.Symp. Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden. Kloster Banz, Staffelstein. Tagungsband. Regensburg: Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), 2000

Kuckelkorn, T., Goetzberger, A., Herzog, T, Nonimaging optics for Daylighting Devices, Proc. of the third ISES-Europe Solar Congress, EUROSUN 2000, June 19-22, 2000, Copenhagen, Denmark

### **Patentanmeldungen**

Deutsche Patentanmeldung 100 53 095.8 :

Anmelder: Fraunhofer Patentstelle

Erfinder: A. Goetzberger, T. Kuckelkorn

Titel: Vorrichtung zur Lichtumlenkung sowie und –ausblendung für den stationären Einsatz bei einer transluzenten Gebäudefassade zur gezielten Beleuchtung des Innenraumes

Deutsche Patentanmeldung 100 53 092.3::

Anmelder: Fraunhofer Patentstelle

Erfinder: A. Goetzberger, T. Kuckelkorn

Titel: Vorrichtung zur Lichtumlenkung sowie und –ausblendung für den stationären Einsatz bei einer transluzenten Gebäudefassade zur gezielten Beleuchtung des Innenraumes

## Literaturverzeichnis

- [AB95] Apian-Bennewitz, P., Messung und Modellierung von lichtstreuenden Materialien zur Computersimulation von Tageslichtbeleuchtung, Dissertation, Fakultät für Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Breisgau 1995
- [Ba98] Bartenbach, Ch., Identität eines Verwaltungsgebäudes durch Licht, 4.Symp. Innovative Lichttechnik im Gebäude, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 1998
- [Ba99] Bartenbach, Ch., Beleuchtung für Bildschirmarbeitsplätze, 5.Symp. Innovative Lichttechnik im Gebäude, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 1999
- [BS98] Balkow, I., et al. , Glasbau-Atlas, Birkhäuser-Verlag, Biel-Benken, 1998
- [BW93] Born, M., Wolf, E.: Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford 1993
- [Bru96] Brunotte, M., Nichtabbildende Optik für einachsig nachgeführte Konzentratorsysteme, Fortschrittsberichte VDI Reihe 6, Nr. 337, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996
- [Bru96/2] Brunotte, M., Stationäre Einrichtung zur Abschattung des direkten Sonnenlichtes, Interne Studie im Auftrag des Fraunhofer-Institutes für Solare Energiesysteme, 1996
- [Büh99] Bühler, Ch., Nichtabbildende Optik für Diffuslichtnutzung und Sonnenschutz, Diplomarbeit, Fak. Physik der Albert- Ludwigs-Universität Freiburg 1999
- [Ca97] Cakir, A., Physiologische und psychologische Auswirkungen der Beleuchtungsqualität, 3. Symp. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 1997
- [CEN96] CEN7TC 89/WG7 N85 rev 7, Solar and light transmittance - Solar protection devices combined with glazing – Part 1: simplified method, Arbeitspapier, 05.12.1996
- [CIE83] Discomfort glare in the interior working environment, CIE Report No. 55, 1983
- [CSP94] Compagnon, R., Sartezzini, J.L., Paule, B., Application of Nonimaging Optics to the Development of New Daylighting Systems, Proc. of the ISES Solar World Congress, Budapest, 23.-27. August 1993
- [CPS96] Courret, G., Paule, B., Scartezzini, J.L., Anidolic zenithal openings: Daylighting and shading, Lighting Res. Technol. 28(1), S. 11-17, GB 1996
- [DIN EN 410] Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, Europäische Norm, Brüssel 1998

- [DIN 5031] Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik, Beuth-Verlag, Berlin 1982
- [DIN 5035] Beleuchtung mit künstlichem Licht, Messung und Bewertung, T. 1-7, Beuth-Verlag, Berlin 1990
- [DIN 5036-3] Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien-Teil 3: Meßverfahren, Beuth-Verlag, Berlin 1977
- [DIN 67507] Lichttransmissionsgrade, Strahlungstransmissionsgrade und Gesamtenergiedurchlassgrade von Verglasungen, Beuth Verlag, Berlin 1980
- [DUM97] D.Dumortier, Evaluation of luminous efficacy models according to sky types and atmospheric conditions, Progress Report SATELLIGHT, EC Contract JOR-CT95-0041, 1997
- [Go00], Goller,M., Über die Veränderlichkeit des Tageslichtes, 6.Symp. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 2000
- [Goe98] Goetzberger, A., Zwei neue Konzepte zum Blend- und Sonnenschutz, Internationales Sonnenforum, Köln 1998
- [GW93] Goetzberger, A., Wittwer, V., Sonnenenergie, Physikalische Grundlagen und thermische Anwendungen, B.G. Teubner Stuttgart, 1993, ISBN 3-519-13081-5
- [He89] Hecht, Eugene, Optik, Addison Wesley, München 1989, ISBN 3-925118-86-1
- [He94] Herzog, T. (Hrsg.), Design Center Linz, Verlag Gerd Hatje, Ostfildern-Stuttgart 1994
- [Heu91] Heusler, W. , Experimentelle Untersuchung des Tageslichtangebotes und dessen Auswirkungen auf die Innenraumbelichtung, Dissertation am FB Umwelttechnik der TU Berlin 1991
- [IFT96] Institut für Fenstertechnik, Innovative Verbundfensterkonstruktionen mit geklebten Glaselementen (structural glazing) und integrierten Lichtleit- und Verschattungselementen, Forschungsbericht T 2831, Fraunhofer IRB Verlag 1996
- [KI99] Kischkoweit-Lopin, M., Überblick über die Möglichkeiten tageslichtlenkender Bauteile, 5.Symp. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 1999
- [KLP00] Kohlmann, A., Lang, U.,Pleiner, F., Die Retrolamelle,- ein transparenter Sonnenschutz mit Durchsicht, 6.Symp. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 2000
- [KP00] Kuhn, T., Platzer, W., Evaluation of Overheating with Sun Shading Systems, Proc. of the third ISES-Europe Solar Congress, EUROSUN 2000, Kopenhagen 2000

- [KPE00] Kuhn, T., Platzer, W. , Eder, K.-H. u. a., Entwicklung einer Referenzmethode zur kalorimetrischen Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades von transparenten und transluzenten Systemen, 6.Symp. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 2000
- [Kra91] Kraus, R., Energietransport durch transparente und nicht transparente Außenwandkonstruktionen, Bauphysik 6 , S.239-242, 1991
- [KS81] Kohlmaier, G., v. Satori, B. , Das Glashaus, Prestel-Verlag, München 1981
- [Kuc94] Kuckelkorn, T., Reflexionsmessungen zur Charakterisierung anodisch beschichteter Aluminiumoberflächen, Diplomarbeit, Sektion Physik, LS Sizmann (Prof. H. Ries), Ludwig-Maximilians-Universität München 1994
- [KV93] Kittler,R., Valko,P. Radiance Distribution on Densely Overcast Skies: Comparison with CIE Luminance Standard. Solar Energy, 51(5), S. 349-355, Elsevier Verlag, New York 1993
- [La77] Lam, W.M.C., Perception and Lighting as Formgivers for Architecture, Mc Graw Hill, New York 1977
- [Lan00] Lang, W. , Wärme- und Sonnenschutzsystem aus Holz für Doppelfassaden, Dissertation, Fak. f. Architektur, TU München, 2000
- [Lit88] Littlefair, P.,Measurement of the Luminous Efficacy of Daylight, Lighting Res. Technol.,20(4),177-188,1988
- [Me97], Meteotest (Hrsg.), Meteororm - Global meteorological database for solar energy and applied climatology,Handbuch, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1997
- [Mei97] Meiggs Ewen, J. , Glasplatte mit aufgesetzten Prismen, Patentschrift (Deutsches Reich), 14.Juli 1897
- [Nay91] Nayar,S.K.,Surface Reflection: Physikal and geometrical perspectives, IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Vision, Vol. 13, Nr. 7, S. 611-634, 1991
- [Na01] Nazzal, Ali A. , A new Daylight glare evaluation method, Energy and Buildings 33, S. 257-265, Elsevier Verlag, New York 2001
- [PI97] Platzer, W., Fenster und Verglasungen, in: Marko, A., Braun, P. (Hrsg.), Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden f. Ingenieure und Architekten, S. 37-74, Springer Verlag, Berlin 1997
- [PH50] Petherbridge,P. Hopkinson, R. G., Discomfort glare and lighting of buildings, Trans. Illum. Eng. Soc.,15, S. 39-79, New York 1950
- [PSM93] Perez, R.,Seals,R., Michalsky, R.J., All-Weather Model for Sky Luminance Distribution-Preliminary Configuration and Validation, Solar Energy, 50(3), 235 - 245, Elsevier Verlag, New York 1993

- [Re99] Reise, Ch., Satellight:Tageslichtdaten für Europa im Internet, 5.Symp. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 1999
- [Rie82] Ries, H., Thermodynamic limitations of the concentrations of electromagnetic radiation, Journal of the Optical Society of America A Vol. 72(3), S. 380-385, 1982
- [RM99] Ries, H., Muschaweck, J., Double tailored microstructures, V. Proc. SPIE 3781 (Vordruck), Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer, 1999
- [RoB86] Robbins, C. L., Daylighting, Design and Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, S. 255, New York 1986
- [RW76] Rabl, A., Winston, R., Ideal Concentrators for finite sources and restricted exit angles, Applied Optics, 15, 2880-2883, Washington DC 1976
- [RSS99] Recknagel, H., Sprenger, E., Schrammek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Verlag München 1999, ISBN 3-527-30254-9
- [Sc95] Schmid, J., Transparente Wärmedämmung in der Architektur, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 1995, ISBN 3-7880-7485-X
- [Si94] Sick, F. Tageslichtnutzung, in: Marko, A., Braun, P. (Hrsg.), Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden, S. 149-186, Fraunhofer-ISE, Freiburg 1994
- [SMU95] Skiba, M., Mohr, M., Unger, H., Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben IV B3 - 25212296: Quantifizierung der solaren Einstrahlung infolge von Horizonteinschränkungen bzw. Erweiterungen, RUB E-168, Ruhr Universität Bochum 1996
- [TBR84] Treado, S., Barnett, J., Remmert, W. Effectiveness of Solar Shading for an Office Building, NBS Building Science Series 161, Mai 1984
- [Tim99] Timinger, A., Sekundärreflektoren für Solarturmkraftwerke, Dissertation, Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1999
- [TKMK91] Toshi, I., Ken-Ichi, K., Masanori, S., Kyosuke T., Discomfort Caused by Wide-source Glare, Energy and Buildings, 15-16, S.391-398, Elsevier Verlag, New York 1991
- [TS67] Torrance, K., Sparrow, E.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, Journal of the Opt. Soc. of America, N. 57, S. 1105-1114, 1967
- [Ul89] Ulrich, Ruth-Maria, Glas- und Eisenarchitektur, Pflanzenhäuser des 19. Jahrhunderts, Wernersche Verlagsgesellschaft, Worms 1989

- [Wa92] Ward, G., Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, Computer Graphics, Chicago, IL, July 1992
- [Wag94] Wagner, A., in : Marko, A., Braun, P. (Hrsg.), Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden , S. 1-18, Fraunhofer-ISE, Freiburg 1994
- [Wag00] Wagner, A., Energieeffiziente Fenster und Verglasungen, Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.), TÜV-Verlag Köln 2000, ISBN 3-8249-0608-2
- [WBW99] Wirth, H., Bühler, Ch., Wittwer, V. Statischer Sonnenschutz, Vergleichende Bewertung, 5.Symp. Innovative Lichttechnik in Gebäuden, OTTI Technologie Kolleg, Regensburg 1999
- [WBARR98] Wienold, J.; Beckinger, K.; Apian-Bennewitz, P.; Reetz, C.; Reinhart, C., Stationary Virtual Reality (SVR) A New Method for Predicting User Acceptance of Daylighting Systems , Proceedings CIE Symposium 'Lighting Quality', Ottawa, Canada, 9./10.05.1998
- [WS97] Ward Larson, G., Shakespeare, R. e.a., Rendering with Radiance, Morgan Kaufmann Publishers San Francisco, CA, 1997, ISBN 1-55860-499-5
- [Wi00] Wilson, H. R., Solar Control Coatings for Windows, Euromat 99, Vol.13 (Functional Materials), Wiley-VCH, Weinheim 2000, ISBN 3-527-30254-9
- [WSV91] Winter, C.-J., Sizmann, R.L., Vant-Hull, L.L., Solar Power Plants, S. 23, Springer Verlag, Berlin 1991, ISBN 3-540-18897-5
- [WSG00] Weber, M. F., Stover, C.A., Gilbert, L.R., Nevitt, T.J., Ouderkerk, A.J., Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors, Science, Vol. 287, No. 5462, P. 2365-2568, März 2000
- [WW78] Welford, W. T., Winston, R. , The Optics of Nonimaging Concentrators, Light and Solar Energy, Academic Press Inc., London 1978, ISBN 0-12-745350-4
- [WW89] Welford, W. T. , Winston, R. , High Collecting Non Imaging Optics, Academic Press Inc., San Diego, CA 1989, ISBN 0-12-742885-2,
- [ZELN00] Zacharopolous, A., Eames, P.C., McLarnon, D., Norton, B., Linear Dielectric Non Imaging Covers for PV Integrated Building Facades, Solar Energy, Vol. 68, No. 5, S. 439 –452, Elsevier Verlag, New York 2000