

Karl Fischer Glasgroßhandlung

**„Entwicklung komfort- und energieoptimierter
transluzenter Systeme für die Gebäudehülle“
-Kurzbezeichnung „KOMET“-**

**Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az. 24673 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)**

Federico Giovannetti, Karl H. C. Fischer

März 2010



Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse, die im Rahmen des Projektes erzielt wurden. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Antragsteller:

GLASFISCHER Glasgroßhandlung
Ansprechpartner: Karl H.C. Fischer



Gottlieb Daimler-Str.46-48
D-71711 Murr
Tel: 07144-82630
Fax: 07144-826333
Mail: www.glasfischer.de

Kooperationspartner:

Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH)
Abteilung Solarthermie
Ansprechpartner: Federico Giovannetti



Am Ohrberg 1
D-31860 Emmerthal
Tel: 05151-999-100
Fax: 05151-999-500
Mail: www.isfh.de

FRESNEL OPTICS
Ansprechpartner: Jürgen Zosel



Flurstedter Marktweg 13
D-99510 Apolda, Germany
Tel.: +49 3644 50110
Fax: +49 3644 501150
Mail: www.fresnel-optics.de

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	4
Zusammenfassung	7
1 Einleitung.....	9
1.1 Zielsetzung des Vorhaben: Vorarbeiten und Lösungskonzept	9
2 Voruntersuchungen an Folienmaterialien (AP2).....	12
2.1 Anforderungen an Folienmaterialien	12
2.2 Mikrostrukturierung.....	13
2.3 Mechanische Eigenschaften	14
2.3.1 Haftungstests	15
2.3.2 Schrumpftests	17
2.4 Optische Eigenschaften	20
2.4.1 UV-NIR Bereich.....	20
2.4.2 IR-Bereich	21
2.5 UV-Alterungstests	23
3 Modellierung (AP3).....	30
3.1 Optische Modellierung.....	30
3.1.1 Optische Modellierung Prismenfolie.....	32
3.1.2 Optische Modellierung Glasscheiben.....	38
3.1.3 Optische Modellierung Gesamtsystem.....	43
3.2 Thermische Modellierung	46
3.2.1 Thermisches Modell der Verglasung.....	46
3.2.2 Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)	49
3.2.3 Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades (g-Wert)	52
3.2.4 Thermisches Modell der TWD-Wand	58
3.3 Thermische Gebäudesimulationen.....	60
3.3.1 Simulationsumgebung.....	60
3.3.2 Simulationsergebnisse	62
4 Herstellung der strukturierten Folie (AP4)	67
5 Verglasungsintegration (AP5).....	69
5.1 Fertigung der Prototypen.....	69

5.2	Isolierglasbeständigkeit der Prototypen.....	71
5.2.1	Feuchtigkeitsaufnahme und Gasdichtheit	71
5.2.2	Fogging-Test.....	72
6	Messung von Verglasungskomponenten und –systemen (AP6)	75
6.1	Optische Charakterisierung.....	75
6.1.1	Spektrometrische Messungen.....	76
6.1.2	Goniophotometrische Messungen.....	81
6.2	Thermische Charakterisierung	87
6.2.1	Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)	87
6.2.2	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	95
6.3	UV-Beständigkeit der Prototypfolie.....	98
7	Test im Gebäude (AP7).....	102
7.1	Transparente Wärmedämmung.....	102
7.1.1	Messaufbau.....	102
7.1.2	Messergebnisse	104
7.2	Lichtelemente	117
7.2.1	Messaufbau.....	117
7.2.2	Messergebnisse	120
8	Veröffentlichungen und Präsentationen.....	131
9	Literatur	132
	Anhang A: Mess- Sensoren.....	134

Nomenklatur

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m ²
c	spezifische Wärmekapazität	J/kgK
D(λ)	relative spektrale Verteilung der Normlichtart D ₆₅ (Tageslicht)	-
E	Beleuchtungsstärke	lx
F'	Kollektorwirkungsgradfaktor	-
F _c	wolkenloser Anteil des Himmels	-
F _{sky}	Sichtfaktor Verglasung/Himmel	-
g	Gesamtenergiedurchlassgrad	-
h	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
I	Bestrahlungsstärke	W/m ²
k	Absorptionskoeffizient	-
k _{int}	interner thermischer Leitwert	W/m ² K
k _v	thermischer Verlustkoeffizient	W/m ² K
L ¹	Länge	m
L ¹	Leuchtdichte	cd/m ²
m	Massenstrom	kg/m ³
n	Brechungsindex	-
q ¹	Leuchtdichtekoeffizient	sr ⁻¹
q ¹	Wärmestromdichte	W/m ²
Q	Wärmestrom	W
q _i	sekundäre Wärmeabgabe nach innen	-
R _a	allgemeiner Farbwiedergabekoeffizient	-
s	Dicke	m
S(λ)	relative spektrale Verteilung	-

¹ Je nach Kontext

T	Temperatur	°C
t	Zeit	s
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m ² K
U _{äq}	Äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient	W/m ² K
V(λ)	spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für phototopisches Sehen des Normalbeobachters	-
YI	Yellowness index	-

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Absorptionsgrad	-
γ	Einstrahlwinkel	Grad
ε	Emissionsvermögen	-
θ	Höhenwinkel	Grad
λ ¹	Wellenlänge	nm
λ ¹	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
ρ ¹	Reflexionsgrad	-
ρ ¹	Dichte	kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante = 5.67·10 ⁻⁸	
τ	Transmissionsgrad	-
φ	Azimutwinkel	Grad

Indizes

Abs	Absorber
aus	Austritts-
b	rückseitig
ber	berechnet
diff	diffus
dir	direkt
e	außen
E	solarenergetischer Wellenlängenbereich (300-2500 nm)

ein	eintritts-
exp	gemessen
f	frontseitig
g	Glas/Verglasung
glob	global
i, in	innen
IR	infraroter Wellenlängenbereich
Konv	konvektiv
std	Standard
Str	radiativ
UV	ultravioletter Wellenlängenbereich (300-380 nm)
V	sichtbarer Wellenlängenbereich (380-780 nm)
W	Wand

Abkürzungen

low-e	niedrigemittierende Glasscheibe
low-l	eisenarme Glasscheibe
PC	Polycarbonat
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PVB	Polyvinylbutyral
RH	relative Feuchte
RMS	root-mean-squared
SZR	Scheibenzwischenraum
VSG	Verbundsicherheitsglas

Zusammenfassung

Das Projekt KOMET hatte zum Ziel, ein kostengünstiges, hoch wärmegeprägtes Verglasungssystem mit einer integrierten saisonalen Verschattungseinrichtung auf Basis von Prismenstrukturen zu entwickeln und zu bewerten. Dazu waren in einem innovativen Fertigungsverfahren geeignete mikrostrukturierte Folien in Isolierverglasungen zu integrieren, großformatige Prototypen zu fertigen und auf Leistungsfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit zu testen. Damit das System sowohl als transparente Wärmedämmung als auch als Fensterelement eingesetzt werden kann, wurde als weiteres Ziel eine lichttechnische Optimierung definiert: Als Maßnahme zur Vermeidung von visuellen Störungen (Lichtzerlegung, Verzerrung und Blendung), die von prismatischen Strukturen verursacht werden, wurde der Einsatz von lichtstreuenden Gläsern als Innenscheibe der Verglasung untersucht.

Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

- Ein geeigneter Folienaufbau wurde definiert und die mikrostrukturierte Folie erfolgreich hergestellt.
- Mit der Preisangabe für die hergestellte Folie von 20 €/m² wurde das wesentliche Projektziel der Kostenreduktion der Sonnenschutzvorrichtung erreicht.
- Die Folie wurde in eine Isolierverglasung integriert, wobei ein thermisches Schrumpfverfahren erstmalig auf strukturierte Folien angewandt wurde. Die Isolierglasbeständigkeit (Gasdichtheit, Feuchtigkeitsaufnahme) hat sich als ausreichend erwiesen, mit Testergebnissen die vergleichbar oder sogar besser als von konventionellen 3fach-Verglasungen sind. Zunächst auftretende Fogging-Effekte konnten anhand einer Konditionierung der Folie vor dem Einbau beseitigt werden.
- Großformatige Prototypen bis 1800 x 680 mm wurden in beiden Konfigurationen transparente Wärmedämm-Module und Lichtelemente erfolgreich gefertigt.
- Die energetischen Kennwerte der Prototypen wurden experimentell bestimmt: Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) für direkte Strahlung variiert von 0.62 bei tiefstehender Sonne (Winter) bis 0.10 bei hochstehender Sonne (Sommer) in der Ausführung als transparente Wärmedämmung und von 0.51 bis 0.10 in der Ausführung als Lichtelement. Damit wurden die Simulationsergebnisse bestätigt und der effektive Schalteffekt nachgewiesen. Der gemessene U-Wert von 0.5 bis 0.8 W/m²K (in Abhängigkeit von Gasfüllung und Glasbeschichtung) ist vergleichbar mit dem Dämmstandard von herkömmlichen 3fach- Verglasungen. Gegenüber den vor Projektbeginn vorliegenden Verglasungsmodellen mit Prismenplatte wurde etwa eine Halbierung des U-Werts erzielt.
- Im Rahmen der Langzeituntersuchungen im Gebäude als transparente Wärmedämmung wurde das energetische Verhalten der Prototypen (Dämmwirkung und saisonale Abhängigkeit der solaren Gewinne) bestätigt und ihre Gebrauchstauglichkeit erfolgreich geprüft. Aus den Testergebnissen von zwei

aufbaugleichen Verglasungen mit eingelegter Prismenplatte und eingespannten Prismenfolie konnte außerdem die Vergleichbarkeit des Schalteffekts zwischen Mikro- und Makrostrukturen nachgewiesen werden.

- Im Rahmen der Langzeituntersuchungen im Gebäude als Lichtelement wurde verdeutlicht, dass der Einsatz von lichtstreuenden Scheiben die Schaltungsmechanismen der Prismenverglasung nicht beeinträchtigt und eine effektive Sonnenschutzfunktion erzielt werden kann. Die positive Auswirkung der Prototypen sowohl auf den thermischen als auch auf den visuellen Komfort konnte ebenso gezeigt werden. Aufgrund der hohen Leuchtdichten, die im Winter am Fenster auftreten, kann aber ein uneingeschränkter Blendschutz nicht ganzjährig gewährleistet werden.
- Mit Hilfe einer dynamischen thermischen Simulation an einem vereinfachten Gebäudemodell konnte zum einen das Potential des TWD-Systems zur Einsparung von Heizwärme als platzsparende Alternative zur konventionellen opaken Dämmung, zum anderen die Effektivität der sonnenstandsabhängigen Verschattung als Maßnahme zur Vermeidung von sommerlichen Überhitzungseffekten belegt werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass Verglasungen mit im SZR eingespannten mikrostrukturierten Folien sowohl in ihrer Funktion als Lichtelement als auch als TWD- Modul entwickelt, hergestellt und in ihren realen Anwendungen erfolgreich getestet wurden. Das untersuchte Verfahren lässt sich auf Folien mit unterschiedlichen Strukturen und entsprechenden Lichtlenkfunktionen übertragen. Für das weitere Vorgehen ist die Herstellung von großformatigen Prägewerkzeugen für die Fertigung von Folien mit Fensterüblichen Abmessungen notwendig.

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Vorhaben: Vorarbeiten und Lösungskonzept

Die Projektidee ist aus Vorarbeiten entstanden, die am Institut für Solarenergieforschung in Hameln geleistet wurden. Hier ist eine prismatische Struktur entwickelt worden, die den Effekt der Totalreflexion nutzt und winkelselektiv wirkt. Sie wurde als saisonales Verschattungssystem für die Steuerung der direkten Sonnenstrahlung konzipiert. In Vergleich zu ähnlichen Vorrichtungen besitzt sie keine beweglichen Teile, somit tritt kein Verschleiß auf, und es werden weder Wartung noch Hilfsenergie benötigt.

Eine 3fach-Wärmeschutzverglasung mit integrierter Prismenscheibe wurde im Rahmen eines früheren Forschungsprojektes als Prototyp hergestellt und charakterisiert. Dieses Projekt, gefördert unter dem Az. 16853 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, wurde vom ISFH in Kooperation mit dem Antragsteller INGLAS durchgeführt [1]. Die Verglasung stellt heute unter dem Produktnamen INGLAS PRISM einen festen Bestandteil des innovativen, tageslichttechnischen Produktbereichs von INGLAS dar. Als Komponente des multifunktionalen Fassadenelements GLASSXcrystal mit integrierten PCM Modulen der Firma GLASSX wurde sie in verschiedenen architektonisch repräsentativen Gebäuden eingesetzt.

Trotz des Erreichens der damaligen Projektziele steckt heute im System noch ein beträchtliches Optimierungspotential, das sich mit neuen konstruktiven und funktionellen Ansätzen erschließen lässt.

Im Rahmen des aktuellen Vorhabens soll daher das System weiterentwickelt werden, um folgende Ziele zu erreichen:

Kostensenkung des Systems: Teure Rohstoffe und Herstellungsverfahren sind für die hohen Preise makroskopischer Prismenplatten verantwortlich. Hinzu kommt die arbeitsaufwendige und kostenintensive Realisierung von Sonderprofilen für eine geeignete Verglasungsintegration. Mikrozerspanende Prozesse ermöglichen heute eine hochpräzise Reduktion der Strukturstärke von den aktuellen 6 mm bis zu 100 μm herab. In Verbindung mit einem reduzierten Materialaufwand (was zusätzlich einen bedeutsamen Beitrag zur Umweltentlastung darstellt) können die etablierten kostengünstigen Replikationsverfahren den Preis prismatischer Systeme erheblich senken. Nach ersten Schätzungen können die Kosten von 100-150 €/m² auf rund 20-30 €/m² gesenkt werden. Dadurch wird die Wirtschaftlichkeit erheblich verbessert und der Einsatz in der Baupraxis beschleunigt, was insbesondere für eine Anwendung als Verschattung für transparente Wärmedämmung von großer Bedeutung ist.

Energetische Verbesserung des Systems: Herkömmliche Prismenplatten werden aus PMMA hergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Acrylglas (Glas: $7.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,

PMMA: $90 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) können die Platten nicht optimal integriert werden, sondern müssen in den Scheibenzwischenraum (SZR) eingelegt werden. Die besondere Konstruktion führt zu bedeutsamen Wärmeverlusten: ein U-Wert von $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$, deutlich höher als der theoretisch berechnete U-Wert einer aufbaugleichen 3fach-Verglasung, wurde experimentell gemessen.

Eine Folie könnte im Gegensatz dazu optimal in das Verglasungssystem integriert werden. Als Alternative zu der üblicherweise verwendeten Lamination wird im Rahmen des Projektes die „Heat Mirror“-Technologie, die Ende der 70er Jahre von der amerikanischen Firma Southwall Technologie eingeführt wurde, untersucht. Die strukturierte Folie wird am Randverbund befestigt und über einen Wärmebehandlungsprozess gespannt, um eine optimale Stabilität und Planarität zu erreichen. Damit werden die Vorteile der Mikrostrukturierung vollständig genutzt: Mit einer im SZR eingespannten Folie werden zudem die energetischen Eigenschaften einer 3fach-Verglasung erreicht, das hohe Gewicht und die große Dicke einer solchen aber vermieden.

Lichttechnische Optimierung des Systems: Das saisonale Schaltverhalten der Prismenscheibe gewährleistet im Sommer durch das Ausblenden direkter Sonnenstrahlung sowohl eine Sonnenschutz- als auch eine Blendschutzfunktion. Im Winter und in der Übergangszeit, wenn die Strahlung von der Struktur durchgelassen wird, kann aber die Blendungsgefahr nicht beseitigt werden. Obwohl ursprünglich auch für den Einsatz als Lichtelement gedacht, wurde aus diesem Grund bis heute das Produkt INGLAS PRISM fast ausschließlich als TWD-Modul vor einer opaken Wand eingesetzt.

Allgemein sind prismatische Strukturen nicht in der Lage, die vielfachen Anforderungen an Tageslichtsysteme zu erfüllen, da sie zu ungünstigen Lichtverhältnissen und störenden Effekten (hohe Leuchtdichte, spektrale Lichtzerlegung) führen können. Um diese Problematik zu lösen, werden sie in aufwendiger Weise mit statischen (z. B. teilverspiegelte Systeme von SITECO) oder schaltbaren Beschichtungen (laufendes Forschungsprojekt am Fraunhofer ISE /2/) kombiniert. Außerdem wird eine effektive Reduktion der Blendungsgefahr nur durch eine entsprechend starke Reduktion der Transmission erreicht. Eine zusätzliche Alternative bieten bewegliche Systeme, die mit kostenintensiven Unterkonstruktionen auf die Fassade aufgebracht werden und den Witterungsbelastungen ausgesetzt sind.

Im Gegensatz zu diesen Maßnahmen können lichtstreuende Elemente (z. B. mit Siebdruck bedruckte Gläser oder Verbundsicherheitsgläser mit transluzenten Zwischenlagen) auf einfache Weise Blendungseffekte unterdrücken, ohne das Beleuchtungsniveau und die Energiegewinne zu stark zu vermindern. Im Rahmen des Projektes soll die Effektivität der Streuung als Blendschutzmaßnahme sowie ihr Einfluss auf die passive Solarenergienutzung und Tageslichtversorgung theoretisch und experimentell untersucht werden.

Das Projekt ist praxisnah orientiert und zielt auf die Entwicklung und Herstellung von Prototypen sowohl einer neuartigen, preisgünstigen transparenten Wärmedämmung als auch eines energetisch effektiven und blendungsarmen transluzenten Lichtelementes.

Außer den schon erwähnten niedrigen Fertigungskosten sind durch den Aufbau in Form eines Standard-„Heat Mirror“-Systems weitere technische und wirtschaftliche Vorteile für die Ausführung als TWD zu erwarten: Zum einen sind alle neuen Entwicklungen aus der Glas- und Fensterindustrie (bessere Beschichtungen, thermisch optimierte Abstandhalter, hochwärmedämmende Rahmenkonstruktionen, usw.) direkt einsetzbar. Zum anderen ist mit einem hohen Vorfertigungsgrad zu rechnen, was eine schnelle Anbringung und eine kurze Montagezeit ermöglicht.

Bei weiter steigendem Interesse für Glasfassaden soll die Einsatzmöglichkeit als Lichtelement das Marktpotential des Systems erheblich erweitern. Als Anwendungsbereiche bieten sich Sport- und Industriehallen, Ausstellungsräume, Büro- und Verwaltungsgebäude sowie alle Fassaden an, bei denen eine freie Sicht nach draußen nicht notwendig ist und die Integration transluzenter Bauteile aus ästhetischen oder lichttechnischen Gründen erwünscht ist. Das System ist nicht nur für Neubauten attraktiv, sondern auch für eine energetische Bausanierung geeignet.

2 Voruntersuchungen an Folienmaterialien (AP2)

2.1 Anforderungen an Folienmaterialien

Anhand der geplanten Anwendung sowie der ausgewählten Verglasungsintegration wurde zum Projektanfang ein detailliertes Anforderungsprofil der zu entwickelnden Folie erstellt und ihre Eigenschaften definiert:

- **Mikrostrukturierung:** Die mikrostrukturierte Folie soll eine hohe geometrische Genauigkeit aufweisen, damit eine mindestens vergleichbare Funktionalität mit der zu ersetzenden makrostrukturierten Platte gewährleistet wird. Für die Verglasungsintegration sind außerdem großflächige Formate notwendig. Geeignete Materialien, Aufbauten und Herstellungsverfahren sollen diesbezüglich identifiziert werden.
- **Optische Eigenschaften:** Die Folie wird als Komponente einer Verglasung für die passive Solarenergienutzung eingesetzt und erfordert damit eine hohe Transmission sowohl im sichtbaren (380-780 nm) als auch im nahen infraroten Bereich (bis 2,5 μm). Außerdem soll die Folie eine gute Farbneutralität besitzen, vergleichbar mit der von üblichen Architekturgläsern.
- **Mechanische Eigenschaften:** Aufgrund des besonderen Verfahrens, das für die Integration der Folie in die Verglasung im Projekt untersucht wird, sind neben hervorragenden optischen Eigenschaften auch geeignete mechanische Eigenschaften gefragt, damit eine dauerhafte und faltenfreie Einspannung realisierbar ist.
- **Temperaturbeständigkeit:** Die Folie soll sowohl als Fensterelement als auch in einer transparenten Wärmedämmung eingesetzt werden und damit ihre Funktionalität über einen weiten Temperaturbereich (-10 bis 80 °C) langfristig beibehalten. Eine kurzzeitige Beständigkeit bei noch höheren Temperaturen muss außerdem bei der Fertigung der Verglasung gewährleistet werden.
- **UV-Licht-Beständigkeit:** Die Folie kann je nach Verglasungsaufbau unterschiedlich hohen UV-Bestrahlungsstärken ausgesetzt werden. Insbesondere für den Einsatz als saisonaler Sonnenschutz für transparente Wärmedämmung ist die Zusammenwirkung von UV-Strahlung und hohen Temperaturen zu beachten.
- **Wirtschaftlichkeit:** Ein Hauptgrund für den Ersatz einer Prismenplatte mit einer Prismenfolie besteht darin, die Kosten so stark wie möglich zu reduzieren. Diese Anforderung muss bei der Auswahl der verwendeten Materialien und Herstellungsverfahren berücksichtigt werden.

Die einzelnen Aspekte und entsprechenden Untersuchungen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.2 Mikrostrukturierung

Der Einsatz einer mikrostrukturierten Folie als saisonales Verschattungselement soll zum einen die Kosten der vorhandenen Platte reduzieren und zum anderen die Verglasungsintegration bautechnisch und energetisch optimieren. Die Mikrostrukturierung war im Projekt keine Forschungsaufgabe. Das Vorhaben hat sich diesbezüglich als Ziel gesetzt, die Eignung kommerzieller Produkte zu prüfen und eine Prototypfolie eigenen Designs nach der am besten geeigneten Fertigungstechnologie herstellen zu lassen.

An die herzustellende Folie wurden zwei klare Anforderungen gestellt: Eine vergleichbare Funktionalität mit der vorhandenen Prismenplatte und eine großflächige Ausführung, damit Verglasungsprototypen mit fensterüblichen Abmessungen gefertigt und getestet werden könnten.

Die Effizienz der Schaltung hängt bei Mikroprismen nicht nur von der geometrischen Genauigkeit der Abformung, sondern auch von ihren absoluten Dimensionen ab. Bei einer zu starken Miniaturisierung treten nämlich Beugungseffekte auf, die die Funktionalität der Struktur beeinträchtigen können. Anhand der Ergebnisse von aktuellen Studien über das optische Verhalten von Mikrostrukturen im Übergangsbereich zwischen geometrischer und diffraktiver Optik [2] sowie von eigenen Voruntersuchungen wurde die untere Grenze des Rillenabstandes der Prismen auf 100 μm gesetzt. Unter diesen Randbedingungen konnte die Anforderung an die Genauigkeit des Industriepartners Fresnel-Optics unbedenklich erfüllt werden: Mit den zur Verfügung stehenden Technologien konnten schon zu Projektbeginn Prägwerkzeuge mit einer Kanterundung kleiner als 2 μm sowie einer Oberflächenrauigkeit kleiner als 15 nm hergestellt werden, was eine sehr konturtreue Replikation ermöglicht.

Die großflächige Ausführung der Folie wurde auch als unproblematisch bewertet.

Von Fresnel-Optics wurden zwei mögliche Folienkonfigurationen vorgeschlagen, die sich in Aufbau, Ausgangsmaterialien und Herstellungsverfahren deutlich von einander unterscheiden und im Rahmen der ersten Projektphase untersucht wurden. Die Konfigurationen sind in **Abbildung 2.1** schematisch dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

- **Homogene Folien:** Dabei handelt es sich um mikrostrukturierte Folien, die aus Granulat oder Foliensubstraten durch Heißprägen abgeformt werden. Als Ausgangsmaterial können unterschiedliche Thermoplasten verwendet werden, aus wirtschaftlichen Gründen sind aber Massenwerkstoffe wie Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polycarbonat (PC) zu empfehlen. Das Verfahren ist diskontinuierlich und wird standardmäßig von Fresnel-Optics für die Herstellung von optischen Komponenten (Linsen, Strahlteiler, etc.) eingesetzt. Die minimale Stärke der Endprodukte ist nach dem heutigen Stand der Technik auf ca. 0.3 mm begrenzt, die maximalen Abmessungen auf ca. 400 x 400 mm. Eine

Erweiterung des Formates kann durch einen von Fresnel-Optics schon erfolgreich eingesetzten „Step-and-Repeat“-Prozess erzielt werden

- **Verbundfolien:** Dabei handelt es sich um 2-Komponenten-Folien, die von der amerikanischen Mutterfirma von Fresnel-Optics, Reflexite², mittels UV-Reaktiosgießen hergestellt werden. In einem kontinuierlichen „Roll-to-roll“-Prozess wird Lack auf eine Kunststoffolie aufgetragen, im nassen Zustand mit einer Prägewalze strukturiert und anschließend mit UV-Licht bestrahlt und gehärtet. Als Lack wird ein modifiziertes Acryl mit anpassbaren optischen Eigenschaften verwendet, als Substrat können Folien unterschiedlicher Stärke und aus unterschiedlichen Materialien eingesetzt werden, wobei Polyethylenterephthalat (PET) aus wirtschaftlichen Gründen zu empfehlen ist. Aufgrund der Fertigungsgeschwindigkeit eignet sich das Verfahren für die kostengünstige Herstellung großflächiger Folien in hoher Stückzahl.

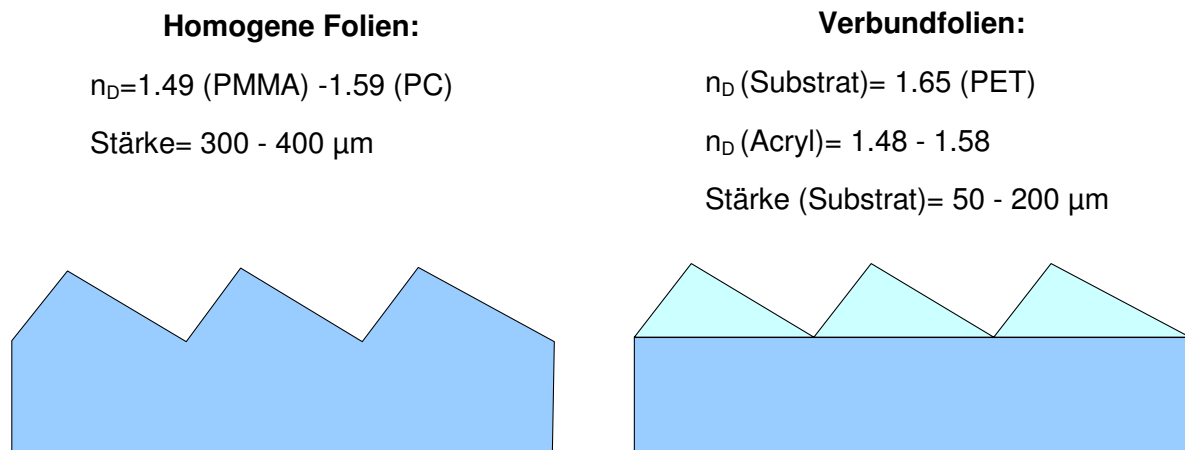


Abbildung 2-1: Untersuchte Folienaufbauten für die Verglasungsintegration durch thermische Einspannung

2.3 Mechanische Eigenschaften

Nach dem vom Antragsteller verwendeten „Thermur-HM“-Verfahren wird eine wärmeschrumpfbar, transparente Kunststoffolie am Randverbund einer Doppelverglasung zwischen zwei Abstandhaltern eingespannt und befestigt. Die gesamte Einheit wird in einem Heißluftofen auf eine bestimmte Temperatur und über eine definierte Zeit erhitzt, damit die Folie schrumpft und straff wird, und anschließend auf Umgebungstemperatur abgekühlt (s. **Abbildung 2-2**). Aufgrund der Schrumpfkraft, die sich beim Erwärmen entwickeln, ist die Folie im Endzustand straff und unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen, die sonst zu einer Änderung ihrer Dimensionen führen würden. Die Folie bleibt so dauerhaft faltenfrei.

² Reflexite Display Optics- 500 Lee Road Suite 500 - Rochester, New York, 14606

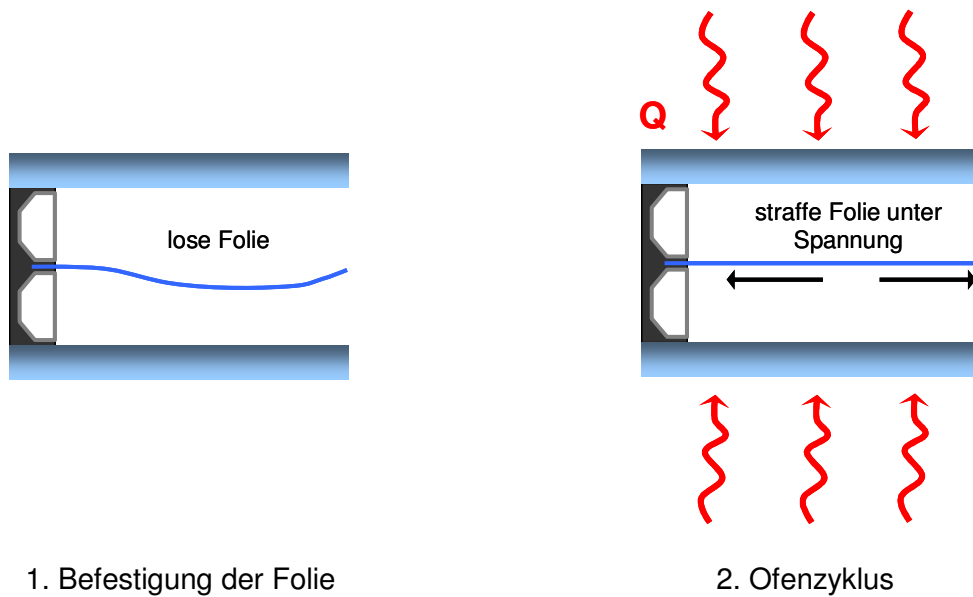


Abbildung 2-2: Fertigungsschritte bei der Herstellung von Verglasungen mit eingespannten wärmeschrumpfbaren Folien

Eine erfolgreiche Verglasungsintegration hängt hauptsächlich von zwei mechanischen Eigenschaften der Folie ab. Die Haftung am Dichtungsmaterial gewährleistet eine dauerhafte Verbindung und bestimmt die Isolierglasbeständigkeit der gesamten Einheit mit. Ein geeignetes Schrumpfverhalten sorgt für das Erscheinungsbild der Verglasung, damit die Folie unsichtbar zwischen den zwei Scheiben eingespannt bleibt.

Das Verfahren wird üblicherweise mit glatten Polyester-Folien eingesetzt und im THERMUR-HM System der Fa. Glasfischer produziert. Nach Kenntnis der Autoren wurde dieses Verfahren im Rahmen dieses Projekt erstmalig mit strukturierten Folien untersucht.

2.3.1 Haftungstests

Die Haftung zwischen Folie und Sekundärdichtstoff am Randverbund einer Verglasung entsteht durch die molekulare Wechselwirkung in der Grenzschicht der beteiligten Materialien und hängt somit von ihren physikalischen Oberflächeneigenschaften ab. Um den Einfluss vom Material sowie Beschaffenheit der Oberfläche auf die Adhäsion der Folie zu untersuchen, wurden vom Antragsteller Haftungsversuche an folgenden Proben durchgeführt:

- Homogene, unstrukturierte PMMA-Folien unterschiedlicher Stärke
- Homogene, strukturierte PMMA-Folien
- PET-Substrate von mikrostrukturierten Verbundfolien unterschiedlicher Stärke
- PET-Substrate von mikrostrukturierten Verbundfolien mit UV-Schutzschicht

- Mikrostrukturierte Verbundfolien
- Mikrostrukturierte Verbundfolien mit UV-Schutzschicht

UV-Licht-stabilisierte Verbundfolien wurden zusätzlich aufgrund einer vom Hersteller angegebenen Empfindlichkeit gegenüber kurzwelliger Strahlung des Acryl-Harzes, das für die Mikrostrukturen verwendet wird³, getestet.

Getestet wurden insgesamt 30 zwischen Abstandhaltern eingespannte Proben (5 Proben pro Folientyp), die mit zwei unterschiedlichen Dichtstoffen (Polyurethan und Silikon) gefertigt wurden. Die Bewertung erfolgte nach Ofenzyklus durch eine qualitative Prüfung der Adhäsionskraft der Folien am Dichtungsmaterial mittels Abzugstest und einer visuellen Inspektion (s. **Abbildung 2-3**).

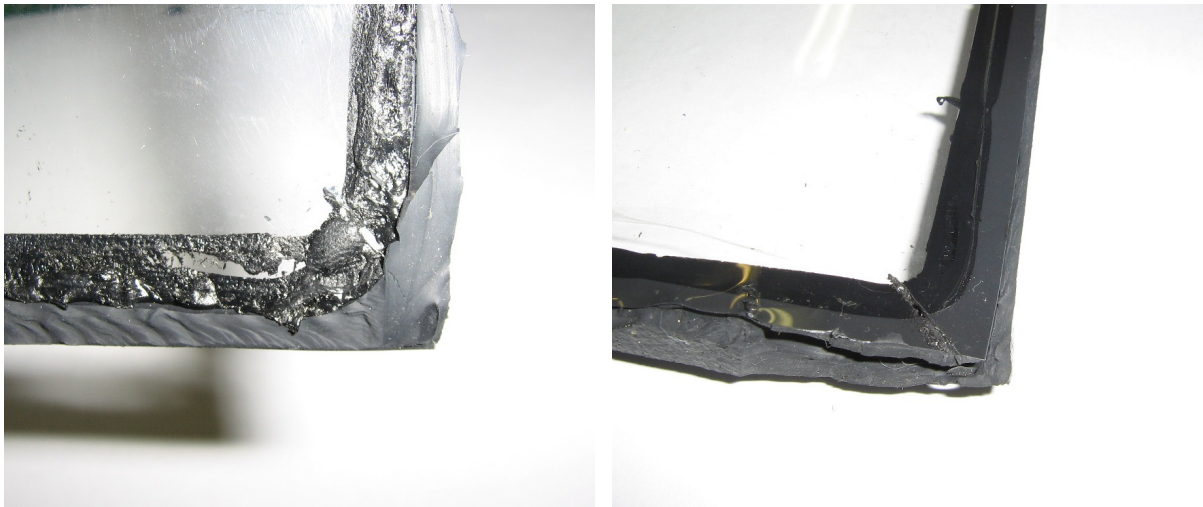


Abbildung 2-3: Prüfung der Haftung durch visuelle Inspektion der Proben nach Abzugstest: die Verteilung des Dichtstoffes über die Ränder belegt die gute (links) oder schlechte (rechts) Adhäsion der Folien

Die Ergebnisse sind in **Tabelle 2-1** dargestellt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Unstrukturierte PMMA-Folien zeigen unabhängig vom Dichtungsmaterial eine schlechte Haftung. Schon bei der Fertigung der Testscheiben hat sich außerdem die Einspannung und Befestigung dieser Folien aufgrund ihrer Stärke als sehr schwierig erwiesen, was als Ausschlusskriterium für die Integration gewertet wurde. Damit sind die teilweise guten Ergebnisse, die an strukturierten PMMA-Folien erzielt wurden, von keiner weiteren Bedeutung im Projekt. Aus dem selben Grund wurden die geplanten Tests an Polycarbonatfolien ähnlicher Stärke nicht durchgeführt
- PET-Substrate weisen dagegen eine sehr gute Haftung auf, vergleichbar mit der von Polyester-Folien, die konventionell beim THERMUR-HM-System eingesetzt werden.

³ Die UV-Beständigkeit der Verbundfolien wird experimentell untersucht und in den Kapiteln 2.5 (Voruntersuchungen Folienmaterial) und 6.3 (Prototypfolie) dargestellt.

- Die Strukturierung beeinflusst wie erwartet die Adhäsion der Folie, die auf der strukturierten Seite nur streckenweise am Dichtungsmaterial haftet. Eine einseitige Haftung der Folie wird aber nach früheren Erfahrungen der Fa. Glasfischer als unkritisch bewertet.
- Beim Abzugtest an Verbundfolien spalten sich sowohl die UV-Schutzschicht als auch zum Teil die Mikrostrukturen, d.h. die Adhäsionskräfte innerhalb der Verbundfolie sind niedriger als die zwischen Folie und Dichtungsmaterial. Wie bei der Haftung wird aber die Spaltung als unkritisch bewertet. Ob und in wie fern einseitige Haftung und Spaltung die Funktionalität des gesamten Systems beeinflussen können, kann nur im Rahmen einer Prüfung zur Isolierglasbeständigkeit festgestellt werden (s. Kap. 5).

Tabelle 2-1: Ergebnisse der Haftungsversuche.

Folientyp	Randverbund	
	Polyurethan	Silikon
PMMA, unstrukturiert	--	--
PMMA, strukturiert	+	++
PET-Substrat	++	++
PET-Substrat mit UV-Schutzschicht	+V	+V
Mikrostrukturierte Verbundfolie	+V	+V
Mikrostrukturierte Verbundfolie mit UV-Schutzschicht	+V	+V

Legende: -- Schlechte Haftung beidseitig + Gute Haftung einseitig ++ Gute Haftung beidseitig V Folie spaltet sich

2.3.2 Schrumpftests

Im Vergleich zu Folien aus PMMA oder PC werden wärmeschrumpfbare Folien (z. B. aus PET) nach der Extrusion durch Flachfoliendüse mehrfach uniaxial oder biaxial gereckt. Der Reckgrad der Folie lässt sich bei der Fertigung in Abhängigkeit der Kristallinität des eingesetzten Polymers einstellen. Dieser Zustand bleibt nach der Abkühlung erhalten. Werden solche Folien erneut auf die Herstellungstemperatur erwärmt, ziehen sie sich durch Freisetzen der Spannung, die bei der Herstellung eingebracht wurde, zusammen. Diese Eigenschaft wird beim THERMUR-HM-Verfahren verwendet, um die Folie faltenfrei im Scheibenzwischenraum einer Verglasung einzuspannen.

Zum Schrumpfverhalten liegen bei den untersuchten Kunststofffolien entweder keine technischen Daten vor, oder die Testergebnisse wurden unter unterschiedlichen und damit nicht vergleichbaren Randbedingungen erzielt.

Das Schrumpfverhalten wurde von der Fa. Glasfischer parallel zu den Haftungsversuchen an den gleichen Proben getestet: Die Bewertung erfolgte zum einem durch eine visuelle Inspektion der Folie (Faltenbildung), zum anderen durch eine qualitative Prüfung der Spannungskraft, die sich aufgrund des Schrumpfs der Folie entwickelt. Außerdem wurde im Rahmen von Vergleichuntersuchungen mit konventionellen Polyester-Folien sowohl bei den mikrostrukturierten Verbundfolien als auch bei den entsprechenden PET-Substraten ein niedriger Schrumpf festgestellt.

Um die Ergebnisse näher zu untersuchen und eine quantitative Aussage zu treffen, wurden am ISFH zusätzliche Schrumpftests in Ahnlehnung an die Norm ISO 11501 /3/ durchgeführt, wobei das Verfahren an die spezifischen Einsatzbedingungen (Temperatur und Testdauer) angepasst wurde:

- Konditionierung der Folien über 2 Stunden (23 °C, 50% RH)
- Messung der Anfangslänge L_0 der Folien in longitudinaler und transversaler Richtung
- Exposition der Testfolien (120 x 120 mm²) in einem Heißluftofen unter den gleichen Bedingungen wie bei der Fertigung der Verglasung
- Konditionierung der Folien über 30 Minuten (23 °C, 50% RH)
- Wiederholung der Messung der Länge L der Folien in longitudinaler und transversaler Richtung

Die Vergleichstests wurden an konventionellen PE-Folien, mikrostrukturierten Verbundfolien und entsprechenden PET-Substraten durchgeführt. Pro Folientyp wurden 10 Proben getestet. Für die Untersuchung wurde ein Wärmeschrank ULP 400 der Fa. Memmert mit Temperaturregelung und zeitlichen Temperaturschwankungen von ± 0.5 °C sowie räumliche Temperaturschwankungen von ± 6 °C verwendet. Um die Homogenität der Temperatur zu erhöhen, wurden die Proben auf ein Kaolin-Bett gelegt.

Der Schrumpf der Probe wird auf einfacher Weise nach folgenden Beziehung berechnet:

$$\Delta L = \frac{L - L_0}{L_0} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Die Ergebnisse sind in **Abbildung 2-4** zusammengefasst. Da kein deutlicher Unterschied im Schrumpfverhalten zwischen den zwei Richtungen festgestellt wurde, werden im Diagramm die Mittelwerte dargestellt.

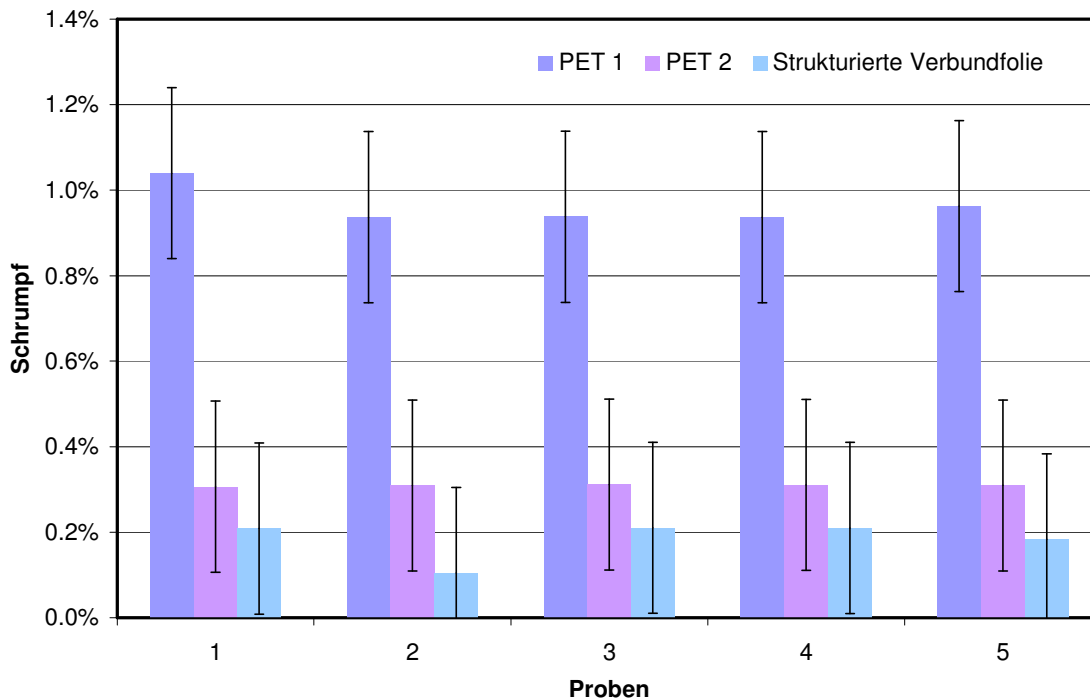


Abbildung 2-4: Ergebnisse der Schrumpftests an Kunststoffolien

Die Ergebnisse beweisen den deutlichen Unterschied im Schrumpfverhalten der zwei verschiedenen Polyethylenterephthalat-Folien, die auf die Herstellung und unterschiedliche Stärke zurückzuführen ist. Die aufgetragene mikrostrukturierte Schicht reduziert den Schrumpf weiter, so dass bei der Fertigung der Verglasung mit einer ca. 5 Mal kleineren Verringerung der Probekörperlänge im Vergleich zu konventionellen Folien zu rechnen ist. Dies könnte eine faltenfreie Einspannung beeinträchtigen. Während bei der Fertigung von Thermur-HM-Systemen mit glatten Folien das Erscheinungsbild und die visuellen Anforderungen sehr hoch gestellt sind, stellt sich die Frage, ob eine nicht optimale Straffung bei einer strukturierten Folie akzeptabel ist (auch mit Bezug auf den geplanten Aufbau und Anwendung).

Die Möglichkeit, weitere PET-Substrate mit günstigeren Schrumpfverhalten zu verwenden, konnte im Projekt durch den Industriepartner Fa. REFLEXITE nicht eröffnet werden.

2.4 Optische Eigenschaften

Die optischen Eigenschaften der untersuchten Folien in beiden ausgewählten Aufbaukonfigurationen wurden im kurzwelligigen (UV-NIR, 300-2500 nm) und langwelligigen spektralen Bereich (IR, 3-50 μm) bestimmt. Damit konnte ihr Einfluss sowohl auf die solaren Gewinne als auch auf die temperaturinduzierten Wärmeverluste der Verglasung bei den Berechnungen bewertet werden. Messmethodik und Ergebnisse bezüglich der entsprechenden Wellenlängenintervalle sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

2.4.1 UV-NIR Bereich

Die Untersuchung hat sich zum Ziel gesetzt, die Auswirkung der verschiedenen Parameter, die bei der Herstellung der strukturierten Folie frei wählbar sind (Materialien, Aufbau, Dicke und Kosmetik), auf die visuelle und solare Transmission zu bewerten und festzustellen, ob bestimmte Konfigurationen für die geplante Anwendung zu bevorzugen oder auszuschließen sind. Aus den Messungen von homogenen Folien konnten außerdem die optischen Konstanten der entsprechenden Materialien gewonnen werden, die für die optischen Simulationen verwendet wurden⁴.

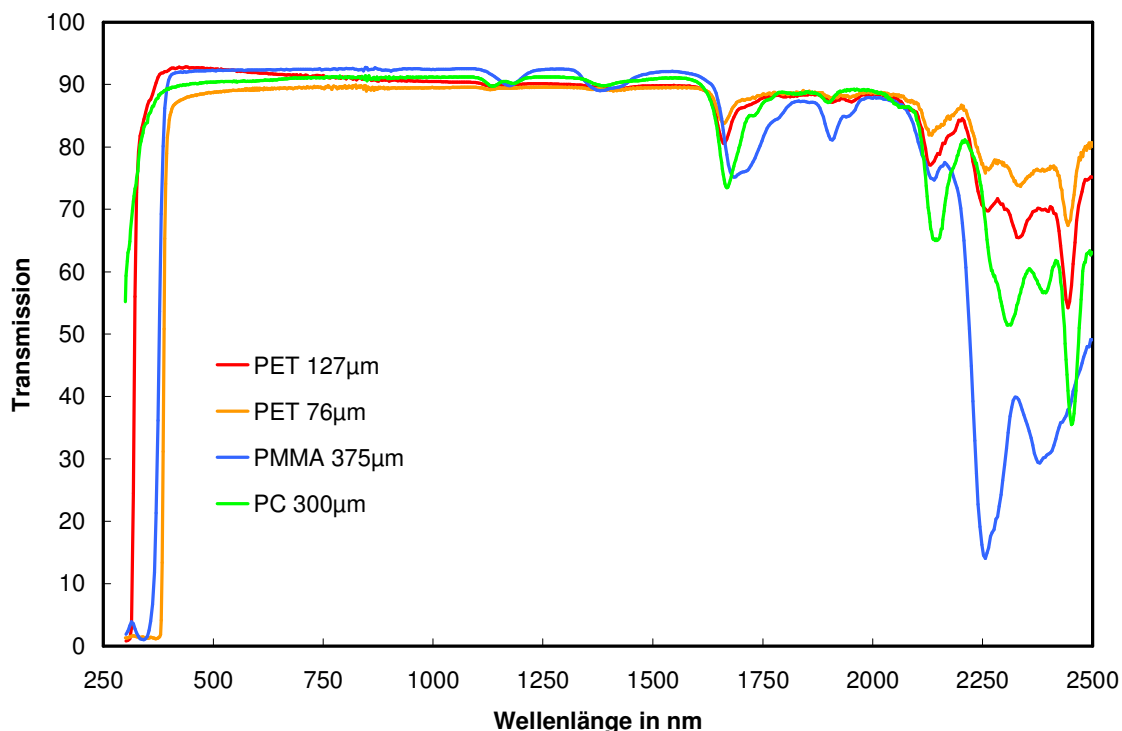


Abbildung 2-5: Repräsentative UV-NIR Transmissionsspektren von unterschiedlichen Kunststofffolien

⁴ Das Verfahren lässt sich allgemein für dicke, homogene Materialien, für die man Interferenzeffekte vernachlässigen kann, verwenden.

Die Messungen wurden mit einem Spektrometer CARY 5000 der Fa. Varian mit integrierter Ulbrichtkugel durchgeführt. Transmissions- und Reflexionsspektren repräsentativer Folien sind in **Abbildung 2-5** dargestellt.

Aus spektral aufgelösten Messdaten wurden die integralen Werte solare und visuelle Transmission gemäß EN 410 /4/ nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\tau_E = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500\mu m} \tau(\lambda)S(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} S(\lambda)\Delta\lambda} \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$\tau_V = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780\mu m} D(\lambda)\tau(\lambda)V(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D(\lambda)V(\lambda)\Delta\lambda} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Lichtes, $\Delta\lambda$ der Wellenlängenintervall für den der Messpunkt repräsentativ ist, $\tau(\lambda)$ der spektrale Transmissionsgrad der Probe, $S(\lambda)$ die relative spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung, $D(\lambda)$ die relative spektrale Verteilung der Normlichtart D_{65} (Tageslicht) und $V(\lambda)$ der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für photopisches Sehen des Normalbeobachters.

Alle untersuchten Folien erfüllen die gefragten Anforderungen, mit solaren Transmissionen zwischen 0.86 und 0.90, d.h. im gleichen Bereich von eisenhaltigen oder sogar eisenarmen Gläsern, und visuelle Transmissionen zwischen 0.90 und 0.92. Die Differenzen lassen sich mit unterschiedlichem Brechungsindex ($n_D^5=1.49-1.65$) sowie Absorptionen im UV- und IR-Bereich erklären.

2.4.2 IR-Bereich

Im Gegensatz zu konventionellen Gläsern, die im Architekturbereich eingesetzt werden, können Kunststofffolien im infraroten Wellenlängenbereich durchlässig sein. Damit werden die Wärmetransportmechanismen durch Strahlung innerhalb einer Verglasung beeinflusst und insbesondere ihre Dämmwirkung beeinträchtigt. Aus diesem Grund wurden im Projekt spektrometrische Messungen in dem entsprechenden Bereich an Folienkandidaten unterschiedlichen Aufbaus und Stärke durchgeführt.

Die IR-optischen Eigenschaften der Folien wurden mit Hilfe eines Fourier-Transformations-IR-Spektrometers (FTIR) mit integrierter Ulbrichtkugel der Fa. Brüker im Wellenlängenbereich 3 bis 17 μm bestimmt.

⁵ n_D ist der Brechungsindex eines Materials bei 589 nm (Natrium-D-Linie).

Die integralen Werten τ_{IR} und ρ_{IR} werden aus einer Faltung der gemessenen Spektren mit dem Schwarzkörperspektrum für die Referenztemperatur 283 K nach folgender Beziehung bestimmt:

$$\tau_{IR} = \frac{\sum_{\lambda=3}^{17\mu m} \tau(\lambda)S(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=3}^{17\mu m} S(\lambda)\Delta\lambda}, \quad \rho_{IR} = \frac{\sum_{\lambda=3}^{17\mu m} \rho(\lambda)S(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=3}^{17\mu m} S(\lambda)\Delta\lambda} \quad \text{Gl. 2-4}$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Lichtes, $\Delta\lambda$ der Wellenlängenintervall für den der Messpunkt repräsentativ ist, $\tau(\lambda)/\rho(\lambda)$ die spektrale Transmission/Reflexion der Probe und $S(\lambda)$ die spektrale Strahlungsenergiedichte der Schwarzkörperstrahlung

Der Emissionskoeffizient der Proben ergibt sich schließlich wie folgt aus dem kirchhoffschen Strahlungsgesetz:

$$\varepsilon_{IR} = 1 - \rho_{IR} - \tau_{IR} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Die infraroten optischen Eigenschaften von Architekturgläsern werden standardmäßig /5/ aus Messungen in dem Wellenlängenintervall 5 bis 50 μm bestimmt, da dieser Bereich für den Wärmetransport durch Strahlung bei Umgebungstemperatur relevant ist.

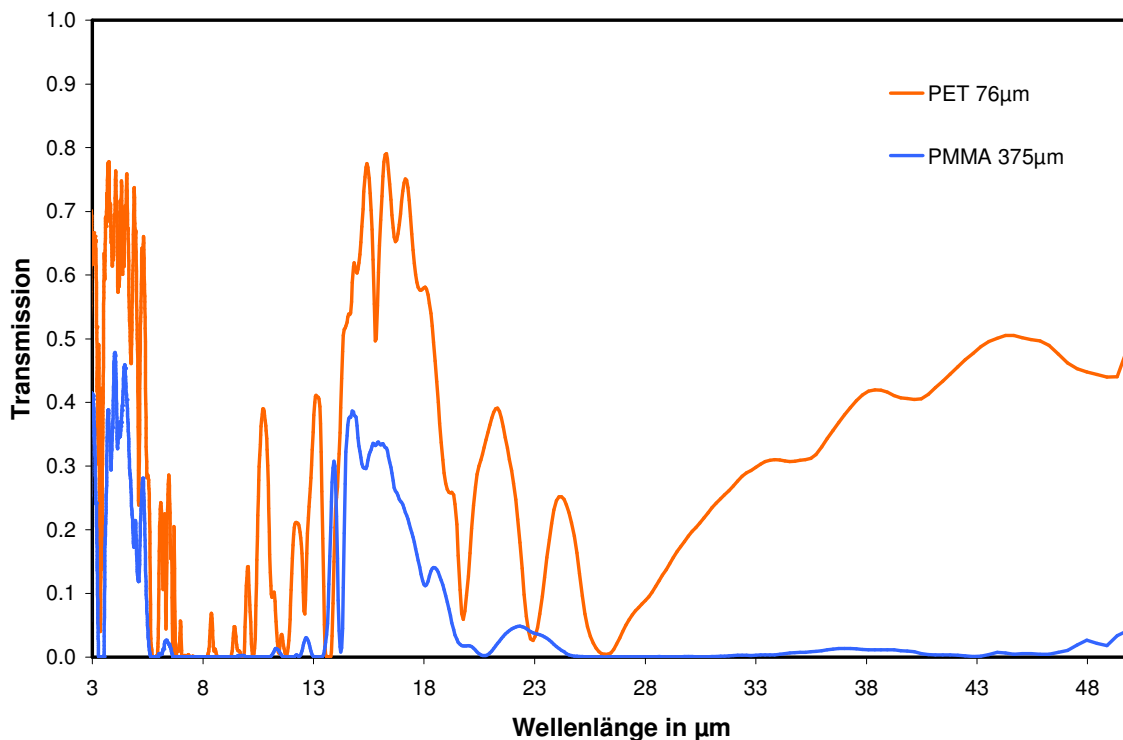


Abbildung 2-6: IR-Transmissionspektren ausgewählter nicht-strukturierter Kunststofffolien

Um den Fehler bei unserer Annahme zu schätzen wurden zusätzliche Messungen an nicht-strukturierten Folien ohne Ulbrichtkugel in dem erweiterten spektralen Bereich durchgeführt (s. **Abbildung 2-6**) und die entsprechenden integralen Werte berechnet. Aufgrund der kleinen Abweichung, die bei der Vergleichsmessung festgestellt wurde (2-3 Prozentpunkte), wurde die Annahme als berechtigt bewertet und die danach berechneten Werte für die spätere Modellierung verwendet⁶.

Die Ergebnisse bestätigen die vermutete partielle IR-Durchlässigkeit der untersuchten Folien, die hauptsächlich materialunabhängig mit zunehmender Stärke der Proben abnimmt, von 0.25 bei dünnen PET-Folien auf 0.06 bei dickeren PMMA-Folien. Der Einfluss der optischen Eigenschaften der Folien im Infraroten auf die Wärmetransportmechanismen in der Verglasung hängt sehr stark vom Systemaufbau ab und wird im Kapitel 3.2 detailliert untersucht.

2.5 UV-Alterungstests

Die zu entwickelnde Lichtlenkfolie wird im Scheibenzwischenraum einer Verglasung eingebaut und ist damit von Bewitterungseffekten mit der Ausnahme von UV-Strahlung (300-400 nm) geschützt. Architekturgläser sind in diesem Wellenlängenbereich sehr unterschiedlich durchlässig (0% bis 80%, s. **Abbildung 2-8**), dadurch werden die Folien je nach Verglasungsaufbau unterschiedlichen UV-Bestrahlungsanteilen ausgesetzt, die materialabhängig zu Abbauprozessen führen und die Systemfunktionalität beeinträchtigen können

Die UV-Beständigkeit von konventionellen Kunststoffen ist in der Solarbranche schon mehrfach sowohl im Labor als auch im Freien geprüft worden. Auch bezüglich einiger Materialien, die im Projekt untersucht werden, liegen Literaturdaten vor /6/: PMMA hat sich in mehreren Tests als sehr beständiger Kunststoff erwiesen, während Polycarbonat etwas kritischer ist. Um das Problem zu beseitigen wurden spezielle Polycarbonate mit Additiven entwickelt, ihre Stabilität wird aber nicht über 10 Jahre hinaus vom Hersteller gewährleistet. Diese Informationen lassen sich auf unsere homogenen Folien übertragen, da Änderungen der Beständigkeit aufgrund der Strukturierung auszuschließen sind, denn die Molekülstruktur der Kunststoffe wird während der Herstellung durch das Heißprägen nicht modifiziert.

Die im Projekt untersuchten Verbundfolien werden in der Display-Industrie verwendet und sind dagegen laut Projektpartner Reflexite nicht UV-beständig. Das gelte sowohl für das Substrat als auch für das aufgetragene Material für die Mikrostrukturen. Für Outdoor-Anwendungen (retroreflektierende Folien für Verkehrs- und Fahrzeugsicherheit) wurde vom Hersteller eine spezielle UV-Schutzschicht

⁶ Die alternative, praxisübliche Methode, die Messergebnisse bis 50 µm zu extrapolieren und damit die integralen Werte zu berechnen hat sich in unserem Fall als ungeeignet erweisen, da aufgrund der Komplexität der Spektren die IR-Transmission der Folien stark überbewertet wird.

entwickelt, wobei keine detaillierten Informationen (quantitative Ergebnisse oder Modalitäten der UV-Tests) zur Verfügung gestellt wurden. Die in diesem Kapitel dokumentierten Voruntersuchungen an Materialien haben sich deswegen zum Ziel gesetzt, die Beständigkeit der Verbundfolien und die Notwendigkeit einer Schutzschicht im Bezug auf die vorgesehene Anwendung zu prüfen. Die Kosmetik einer Folie hat einen entscheidenden Einfluss auf den Endpreis des Produkts. Eine geeignete Frontscheibe könnte kostensparend die Funktion der zusätzlichen UV-Schutzschicht übernehmen.

Die Tests wurden an stabilisierten und nicht stabilisierten Musterfolien in Anlehnung an die Norm EN 4892-1 /7/ durchgeführt, wobei das Verfahren an die spezifische Anwendung angepasst wurde:

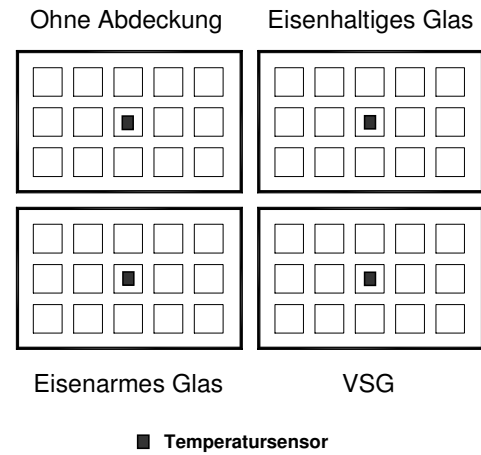
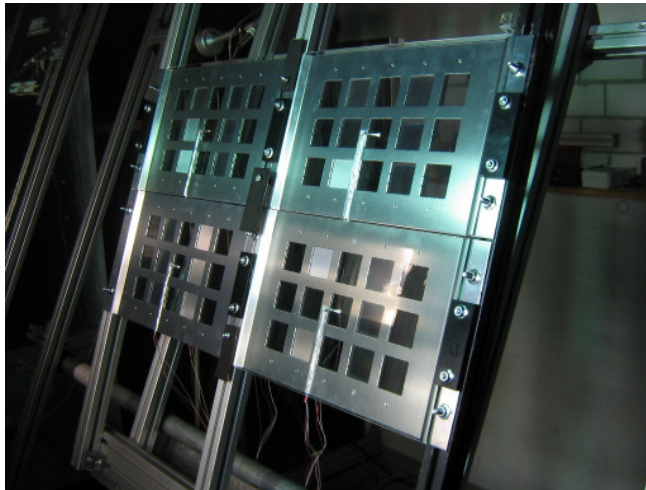
- Bestrahlungsquelle: 4 Metallhalid-Lampen, 1200 W
- Intensität der UV-Bestrahlungsstärke auf der Probenebene: $(75 \pm 5) \text{ W/m}^2$ ⁷
- Homogenität der UV-Bestrahlungsstärkeverteilung über das Messfeld: 90%
- Lufttemperatur: $(22 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$
- Oberflächentemperatur der Referenzfolie während der Bestrahlung: $(33 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$
- Relative Feuchte: $(40 \pm 10) \%$
- Anzahl der Proben: 3 pro Typ
- Referenzprobe mit bekannter guter UV-Beständigkeit: PMMA-Folie
- Referenzprobe mit bekannter schlechter UV-Beständigkeit: PET-Folie
- Keine Feuchtebeanspruchung
- Wechsel von Bestrahlungs- und Dunkelphasen

Um die schützende Wirkung der Vorderscheibe der Verglasung auf die Folie zu prüfen, wurden 4 Konfigurationen mit unterschiedlichen Abdeckungen parallel getestet:

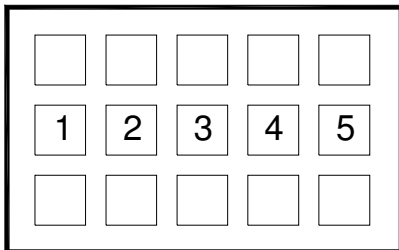
- Ohne Abdeckung
- 4 mm eisenarmes Glas
- 4 mm eisenhaltiges Glas
- 8 mm Verbundsicherheitsglas (VSG)

Insgesamt ergeben sich 60 Proben, deren Beständigkeit anhand von periodischen Messungen der Transmission bewertet wurde. Probenanordnung und Messaufbau sind in **Abbildung 2-7** dargestellt.

⁷ Der Wert entspricht der Bestrahlungsstärke der Referenzsolarstrahlung AM 1.0 /8/ und wurde mit einem Strahlungssensor CUV3 der Firma Kipp&Zonen gemessen



Untersuchte Proben



1. PMMA unstrukturiert (Referenz)
2. PET unbeschichtet (Referenz)
3. PET mit UV-Schutzschicht
4. Modifiziertes Acryl auf PET
5. Modifiziertes Acryl auf PET mit UV Schutzschicht

Abbildung 2-7: Probenanordnung und Messaufbau zur UV-Alterung von Folien

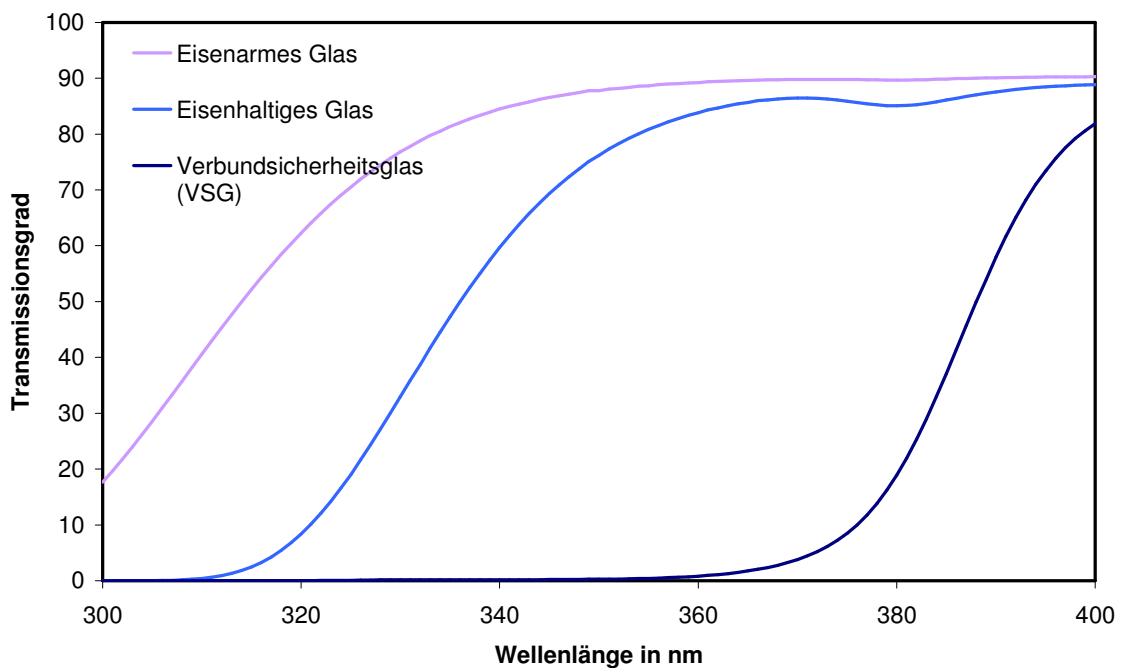


Abbildung 2-8: UV-Transmissionsspektren der verwendeten Glasabdeckungen

Die Alterungstests wurden nach 400 Stunden abgeschlossen, da trotz konservativer Beanspruchung (Strahlungsdosis vergleichbar mit nur 6 Monaten Alterung im Freien) schon ausreichende Informationen aus den Ergebnissen der optischen Messungen gewonnen wurden. Sie sind in den **Abbildungen 2-9 bis 2-13** dargestellt und im Folgenden zusammengefasst:

- Ungeschützte, strukturierte Folien ohne Abdeckung zeigen eine deutliche Abnahme der Transmission, und zwar noch stärker als von den nicht-beständigen Referenzfolien.
- Sowohl eisenarme als auch eisenhaltige Glasscheiben sind nicht in der Lage, die Wirkung der UV-Strahlung auf die Folien vollständig zu unterdrücken. Das Transmissionsspektrum bleibt sogar in Kombination mit der VSG-Abdeckung nicht unverändert, was für die besondere Lichtempfindlichkeit der Folie spricht.
- Strukturierte, UV-stabilisierte Folien weisen eine bessere Beständigkeit auf, obwohl bei der Konfiguration ohne Abdeckung eine Änderung des Spektrums noch zu festzustellen ist. Aus dem Vergleich mit den gealterten UV-stabilisierten, nicht strukturierten PET-Folien lässt sich die unterschiedliche Wirkung der Schutzschicht auf die beiden Substrate feststellen. Dies soll im Folgenden näher untersucht werden.

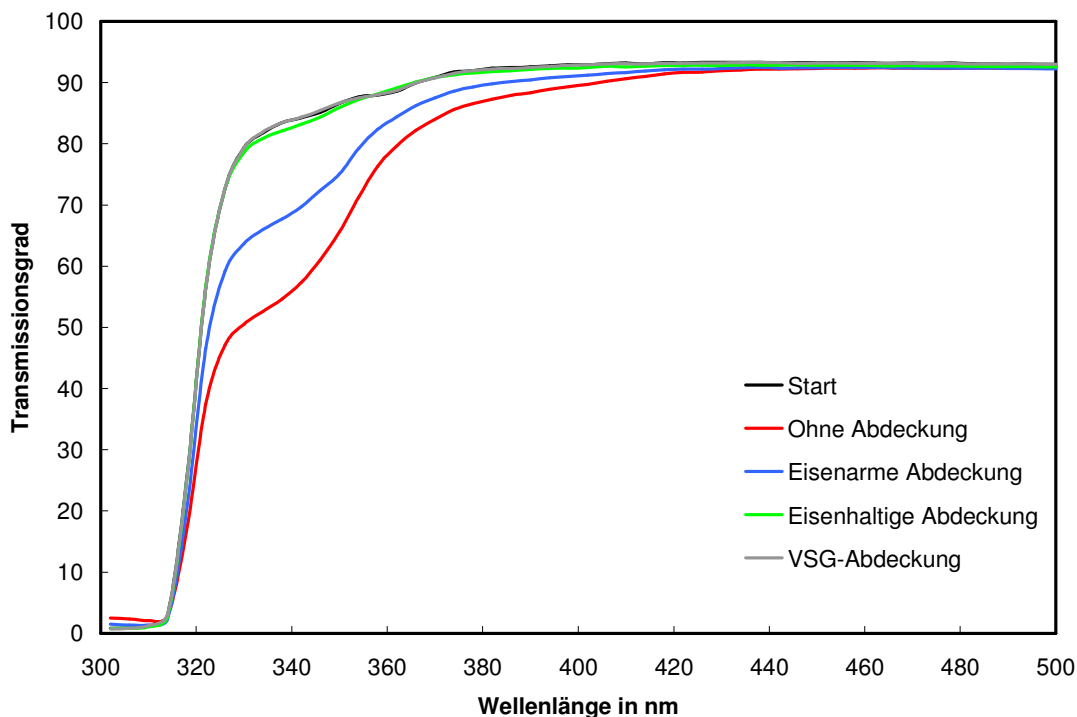


Abbildung 2-9: Transmissionspektren von nicht-beständigen Referenzfolien (PET) vor und nach der Alterung unter unterschiedlichen Glasabdeckungen.

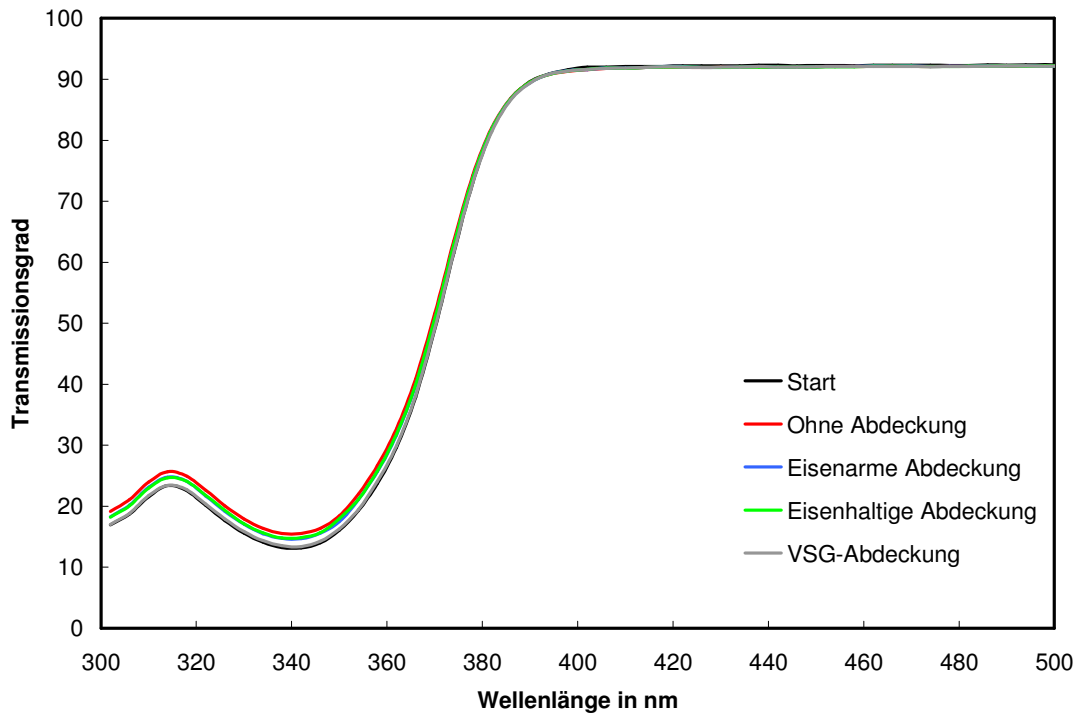


Abbildung 2-10: Transmissionsspektren von UV-beständigen Referenzfolien (PMMA) vor und nach der Alterung unter unterschiedlichen Glasabdeckungen

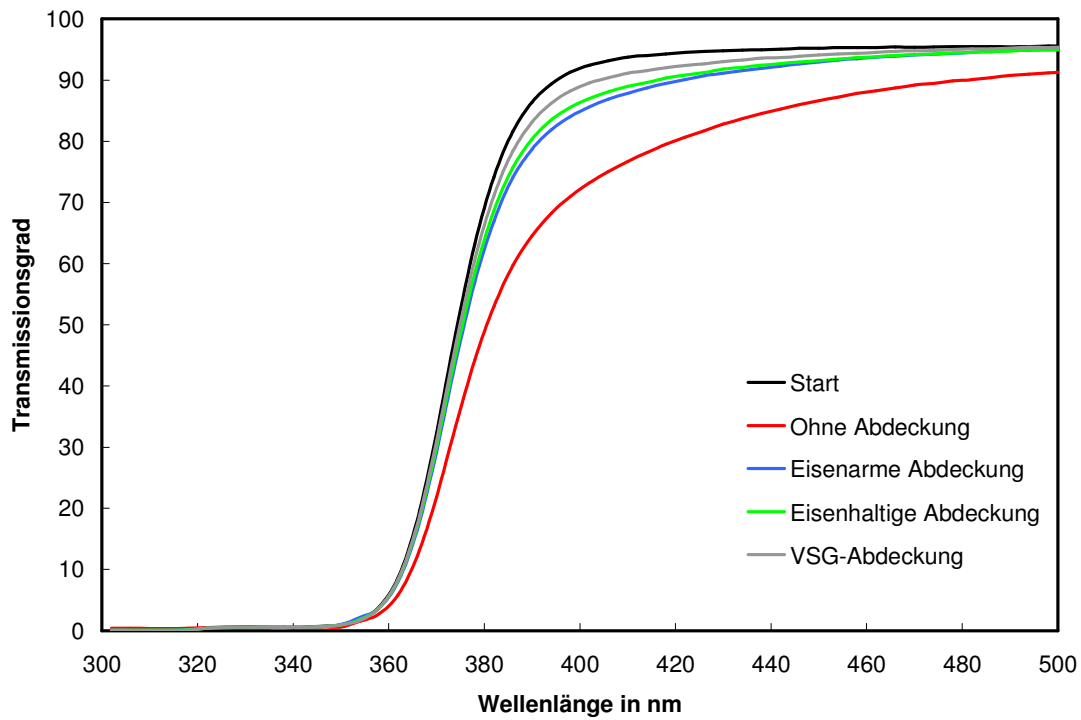


Abbildung 2-11: Transmissionsspektren von nicht-stabilisierten Verbundfolien vor und nach der Alterung unter unterschiedlichen Glasabdeckungen

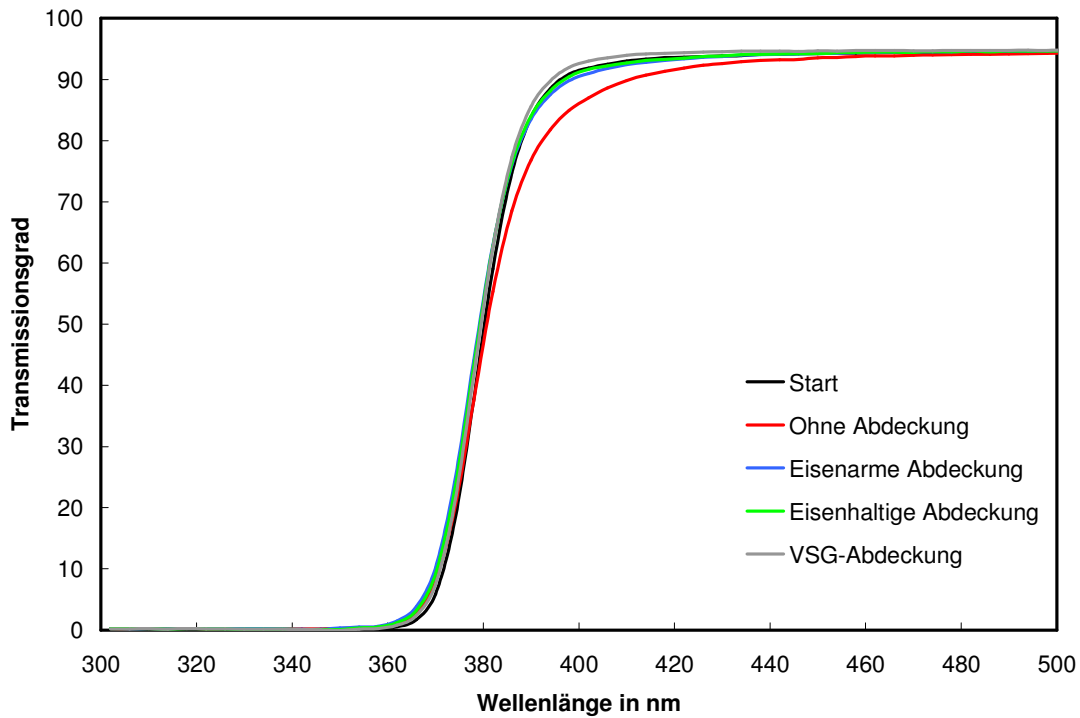


Abbildung 2-12: Transmissionsspektren von UV-stabilisierten Verbundfolien vor und nach der Alterung unter unterschiedlichen Glasabdeckungen

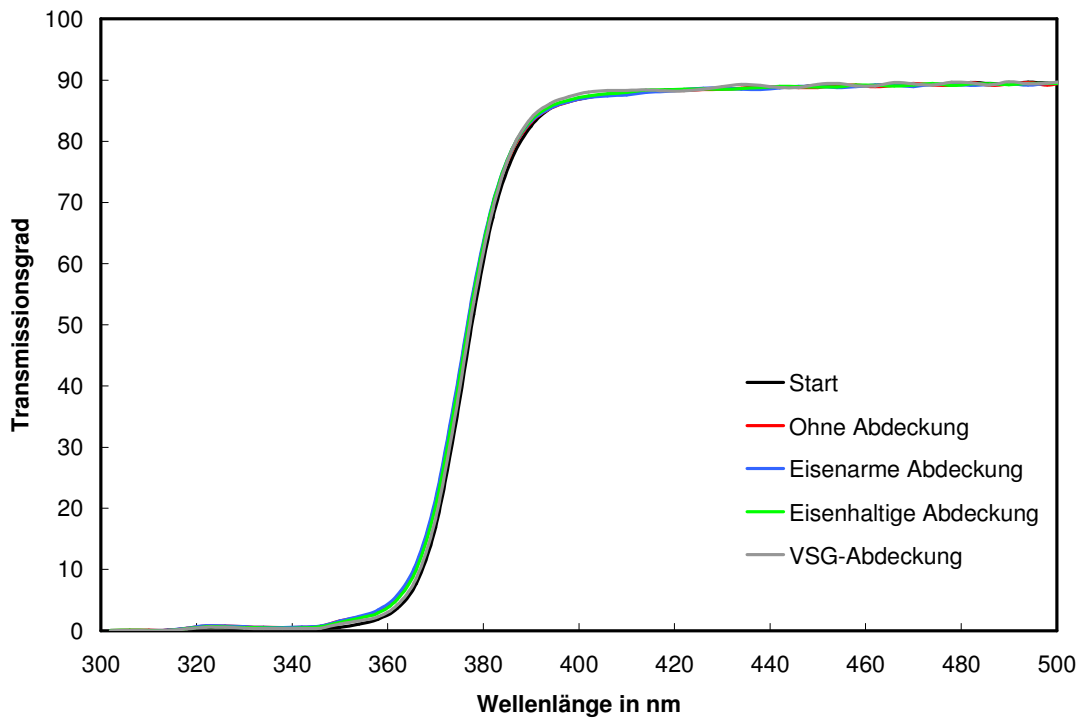


Abbildung 2-13: Transmissionsspektren von UV-stabilisierten PET-Substraten der Verbundfolien vor und nach der Alterung unter unterschiedlichen Glasabdeckungen

Anhand der Messergebnisse wurde die nicht stabilisierte Verbundfolie für die geplante Anwendung als nicht geeignet bewertet, da die Notwendigkeit einer VSG-Vorderscheibe, mit ihrem Gewicht und ihrer reduzierten solaren Transmission, eine starke Einschränkung für das Design und die Leistungsfähigkeit der Verglasung darstellt. Die Eignung und Langzeitstabilität der UV-Schutzschicht wird im Rahmen der Untersuchungen an Prototypfolien getestet, die in Kapitel 6.3 dokumentiert sind.

3 Modellierung (AP3)

Das energetische Verhalten von Verglasungen wird im Wesentlichen durch die Kenngrößen Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) bestimmt, die die temperaturinduzierten Wärmeverluste und die strahlungsinduzierten Gewinne beschreiben.

Diese Kenngrößen werden für Standard-Isoliergläser nach normierten Berechnungsverfahren bestimmt (EN 410, EN 673). Da sowohl die zugrunde gelegten Strahlung- und Wärmetransportmodelle als auch die Randbedingungen der Normen nicht allgemeingültig sind, war es im Projekt notwendig ein detailliertes Verfahren zu verwenden, das ein optisches und thermisches Modell nach dem in **Abbildung 3-1** dargestellten Schema kombiniert.

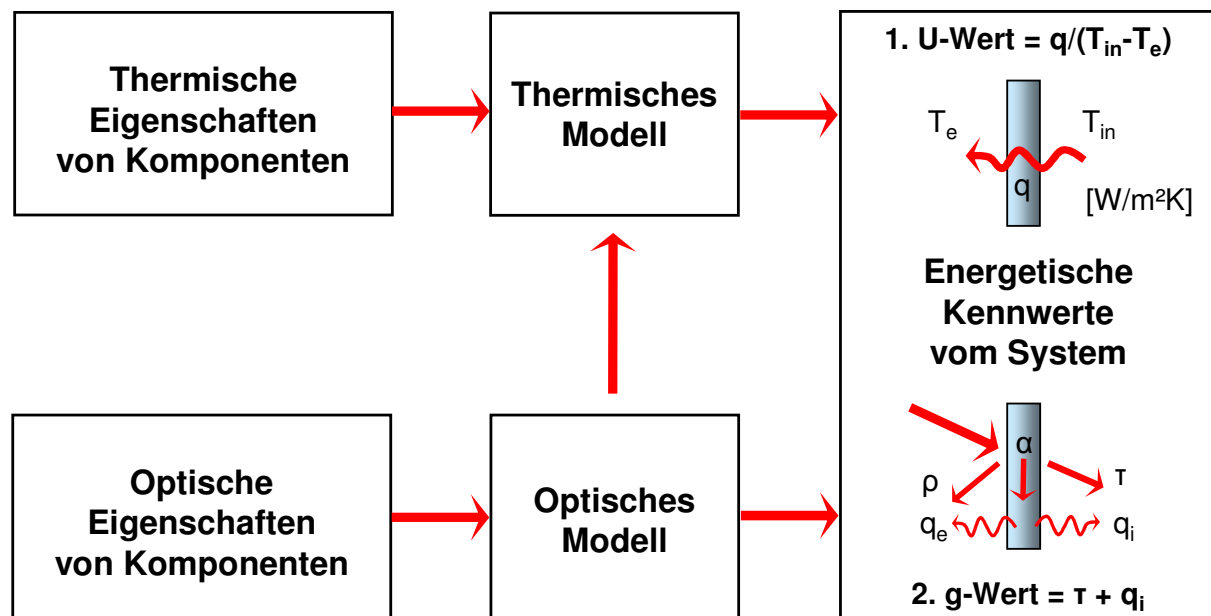


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des verwendeten Berechnungsverfahrens zur Bestimmung der energetischen Kennwerte des Verglasungssystems

Die entsprechenden Modelle werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.1 Optische Modellierung

Das optische Verhalten komplexer Verglasungssysteme, die die Richtung der einfallenden Strahlung modifizieren (durch Umlenkung, wie bei Jalousien und Prismen, oder durch Streuung, wie bei Diffusoren) kann nicht mit den Standard-Gleichungen für planparallele Mehrfachisoliergläser beschrieben werden.

Für die Modellierung der prismatischen Folie sowie des gesamten Systems wurde aus diesem Grund das kommerzielle Berechnungsprogramm SPRAY der Fa. Theiss, das auf der Raytracing-Methode basiert, verwendet /9/.

Bei dieser Methode handelt es sich um ein numerisches Verfahren im geometrisch-optischen Grenzfall verschwindend kleiner Wellenlängen ($\lambda \ll$ Strukturperiode), das ursprünglich zur Bestimmung des Strahlungstransportes in optischen Systemen

entwickelt worden ist, aber auch schon für die Solarenergienutzung erfolgreich eingesetzt wurde. Das Verfahren wird eingesetzt, wenn die Einzelschritte physikalisch bekannt ist, die Summe aller optischen Wechselwirkungen und Mehrfachprozesse aber bei einer vollständig analytisch durchgeführten Rechnung zu einer unüberschaubaren Datenmenge und damit zu erheblichem Rechenaufwand führen würde. Die Iteration der Einzelrechnungen für die Verfolgung eines Strahls und seiner Tochterstrahlen wird mit modernen Prozessoren und sinnvollen Abbruchskriterien problemlos gelöst.

Nach dem verwendeten Forward-Raytracing werden virtuelle Strahlen aus einer Lichtquelle (die in unserem Fall die Sonne simuliert) durch das System so lange verfolgt, bis eines der Abbruchkriterien zur Beendigung der Teilrechnung (die maximale Anzahl der Interaktionen oder das Erreichen des Detektors) erfüllt wird. An jeder Grenzfläche zwischen Materialien unterschiedlicher Brechungsindizes wird ein Strahl teilweise transmittiert, teilweise reflektiert. Winkel und Intensitäten werden durch die Snellius'schen und Fresnel'schen Formeln, bzw. nach einer bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilung (nach dem Monte-Carlo-Verfahren) bestimmt. Die Strahlen werden vom Detektor registriert und aufsummiert und ergeben damit die gesamte Transmission bzw. Reflexion des untersuchten Systems.

SPRAY eignet sich für die Auslegung und spektral aufgelöste Analyse von dreidimensionalen optischen Systemen. Damit können unterschiedliche Objekte (Lichtquellen, Detektoren, optische Komponenten) in einem 3D-Raum frei definiert, dimensioniert und orientiert werden. Das Programm verfügt außerdem über eine reiche und erweiterbare Datenbank von optischen Konstanten von Materialien (Brechungsindizes und Absorptionskoeffizienten), die den verschiedenen zu untersuchenden Objekten zugeordnet werden können. Damit konnten bei der Modellierung auch die aus eigenen spektrometrischen Messungen (s. Kap. 2.4) gewonnenen Konstanten verwendet werden.

Anders als bei konventionellen Raytracing-Programmen, die per-Definition die Wellennatur des Lichtes vernachlässigen, ermöglicht SPRAY eine Unterscheidung zwischen optisch dicken und dünnen Medien und damit die Berücksichtigung von Interferenzeffekten. Diese wichtige Eigenschaft wurde bei der Simulation beschichteter Scheiben verwendet.

Zusätzlich lässt sich das Programm als OLE-Objekt durch Anweisungsmakros von externen Programmen steuern. Auf dieser Weise konnten im Projekt geeignete Schnittstellen zur Tabellenkalkulation EXCEL realisiert werden, die eine flexible Eingabe der Objektgeometrie und eine Automatisierung der Einstrahlung aus einem vorzugebenden Winkelnetz zur Bestimmung der einstrahlwinkelabhängigen optischen Eigenschaften von Verglasungskomponenten und -systemen ermöglichen. Für die winkelabhängige Berechnung wurden eine räumliche Auflösung des Netzes von 5° Grad sowohl in die azimutale als auch in die longitudinale Richtung gewählt. Die häufig verwendete Verteilung von Tregenza /10/ hat sich für den spezifischen Fall als nicht geeignet erwiesen, da die für die Schaltungsmechanismen der

prismatischen Strukturen relevanten Winkelbereiche durch Interpolation nicht genau abgebildet werden können.

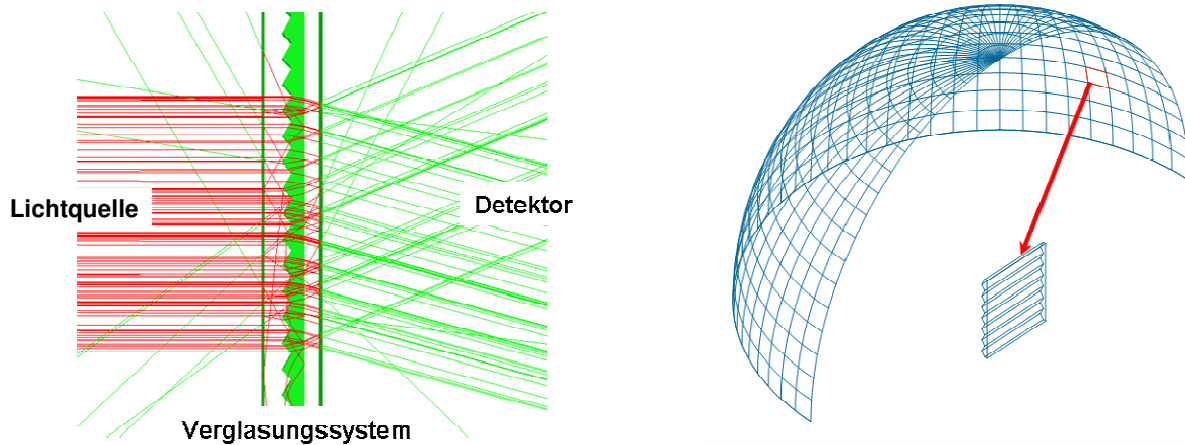


Abbildung 3-2: Snapshot einer Raytracing-Simulation (l.) und verwendetes Winkelnetz zur Bestimmung der winkelabhängigen optischen Eigenschaften von Verglasungskomponenten und -systemen (r.)

3.1.1 Optische Modellierung Prismenfolie

Kommerziell erhältliche prismatisch strukturierte Platten für den Einsatz im Architekturbereich (z. B. die Produkte der Fa. INGLAS oder der Fa. Siteco Beleuchtungstechnik) werden üblicherweise aus PMMA hergestellt und haben damit definierte optische Eigenschaften. Wie schon im Kap. 2 erwähnt erweitern sich die Möglichkeiten beim Einsatz von strukturierten Folien, da Strukturen mit unterschiedlichen Aufbauten (Einfach- und Verbundfolien) sowie aus Materialien mit sehr unterschiedlichen optischen Eigenschaften (Brechungsindex und Absorptionskoeffizient) potentiell verwendbar sind. Die folgenden Parameter wurden bei den Simulationen untersucht:

- Brechungsindex bei homogenen Folien: $n=1.49 - 1.59$
- Brechungsindex bei Verbundfolien: $n_{\text{Substrat}}=1.65$, $n_{\text{Acryl}}=1.48 - 1.58$
- Dicke der Folie
- Prismenwinkel

Der Einfluss der Parameter wurde nicht nur für die einstrahlwinkelabhängigen (Azimut- und Höhenwinkel der Sonne) Verläufe von Transmission bzw. Reflexion der Prismen untersucht, sondern auch für die Jahresverläufe der monatlichen Mittelwerte für eine nach Süden ausgerichtete Fassade. Während der erste Ansatz das physikalische Verhalten des Systems voranschaulicht, ermöglicht der zweite eine praxisrelevante Bewertung der Parameter.

Als Eingangsdaten für die Jahressimulationen wurden die stundenbasierten Datensätze des Test-Referenz-Jahres TRY 7 des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) verwendet [11]. Sonnenstands- und Einstrahlwinkel sowie direkte und diffuse

Einstrahlung auf die Südfassade wurden mit Hilfe des Strahlungsprozessors vom Simulationsprogramm TRNSYS berechnet /12/, das im Projekt für die thermischen Gebäudesimulationen eingesetzt wurde (s. Kapitel 3.3). Die Ergebnisse der Simulationen sind in den **Abbildungen 3-3 bis 3-12** dargestellt.

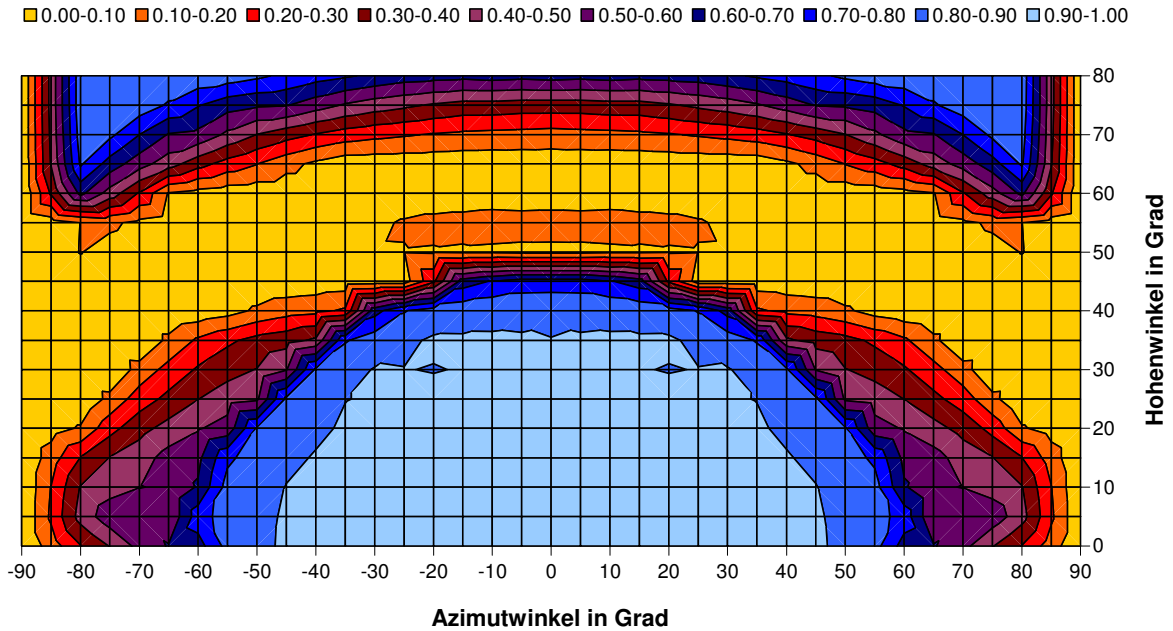


Abbildung 3-3: Einstrahlwinkelabhängige Transmission einer prismatischen Struktur (Prismenwinkel $30^\circ/42^\circ$, Brechungsindex $n=1.49$, Absorptionskoeffizient $k=0$)

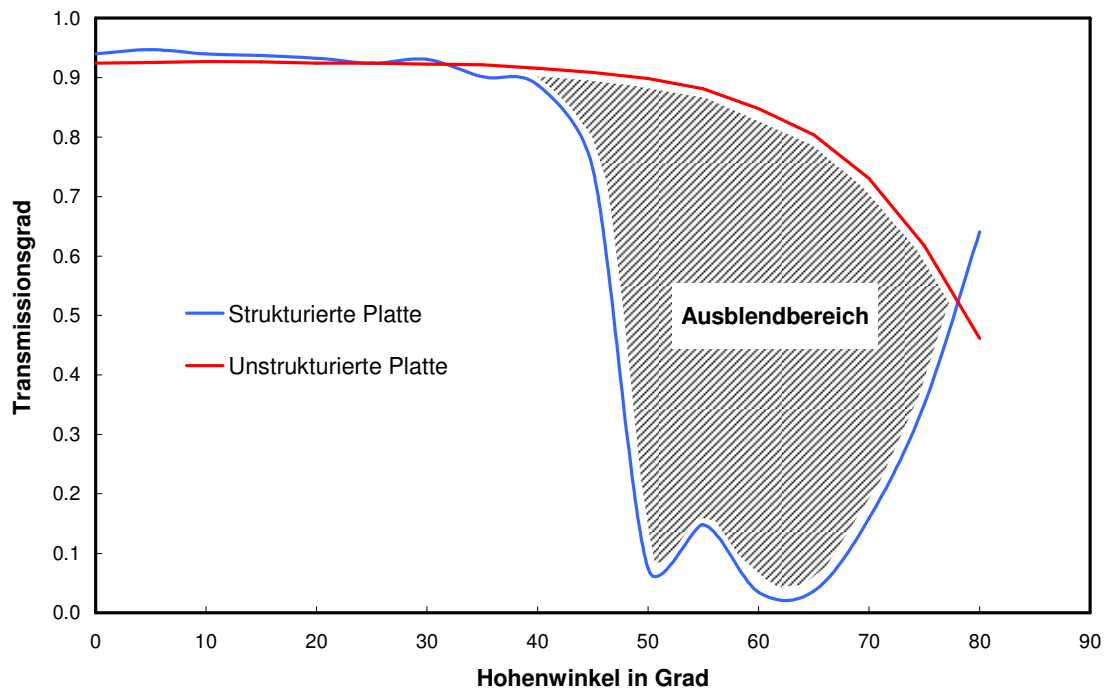


Abbildung 3-4: Vergleich der einstrahlwinkelabhängigen (höhenwinkelabhängigen bei Azimutwinkel=0) Transmission der Prismenstruktur mit einer unstrukturierten Platte gleicher optischer Eigenschaften.

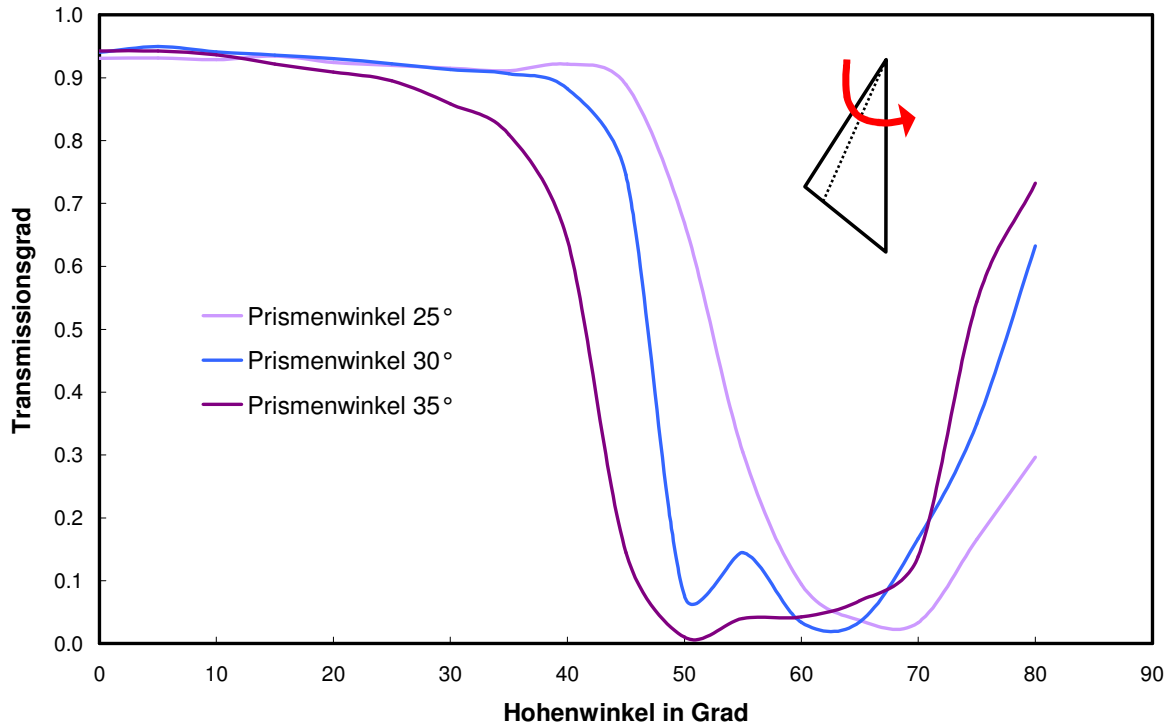


Abbildung 3-5: Einfluss der Variation des oberen Prismenwinkels auf die Transmission der Struktur ($n=1.49$, $k=0$)

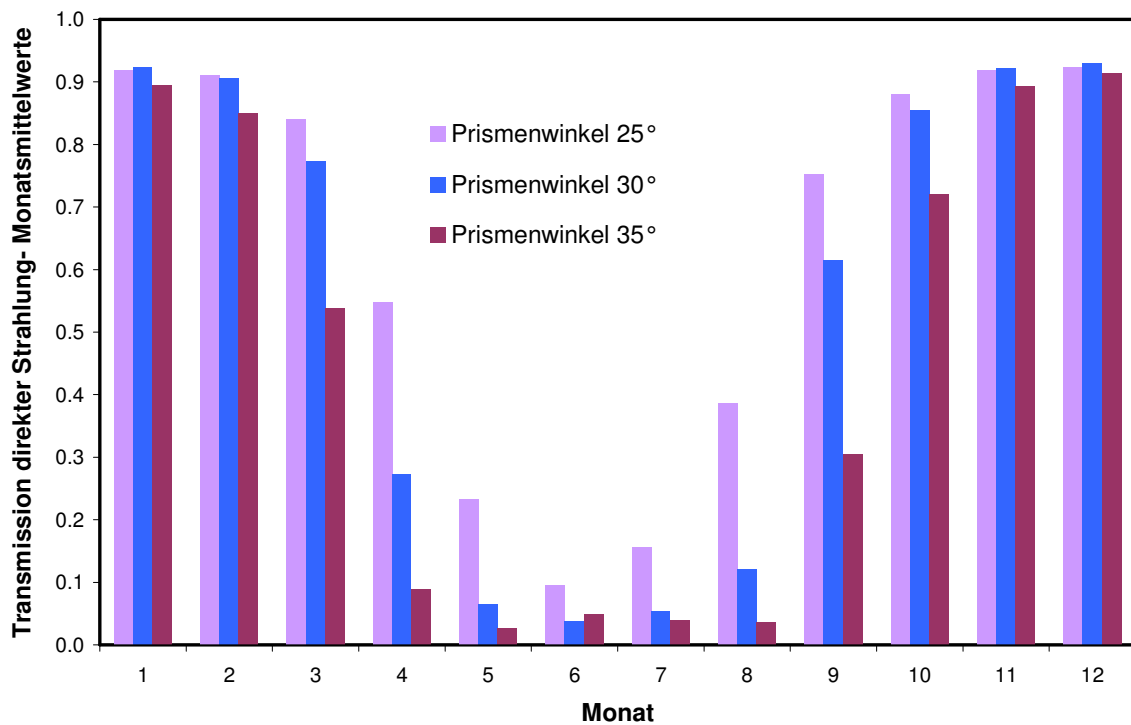


Abbildung 3-6: Einfluss der Variation des oberen Prismenwinkels auf den Jahresverlauf der monatlichen Mittelwerte der Transmission ($n=1.49$, $k=0$) – TRY 7

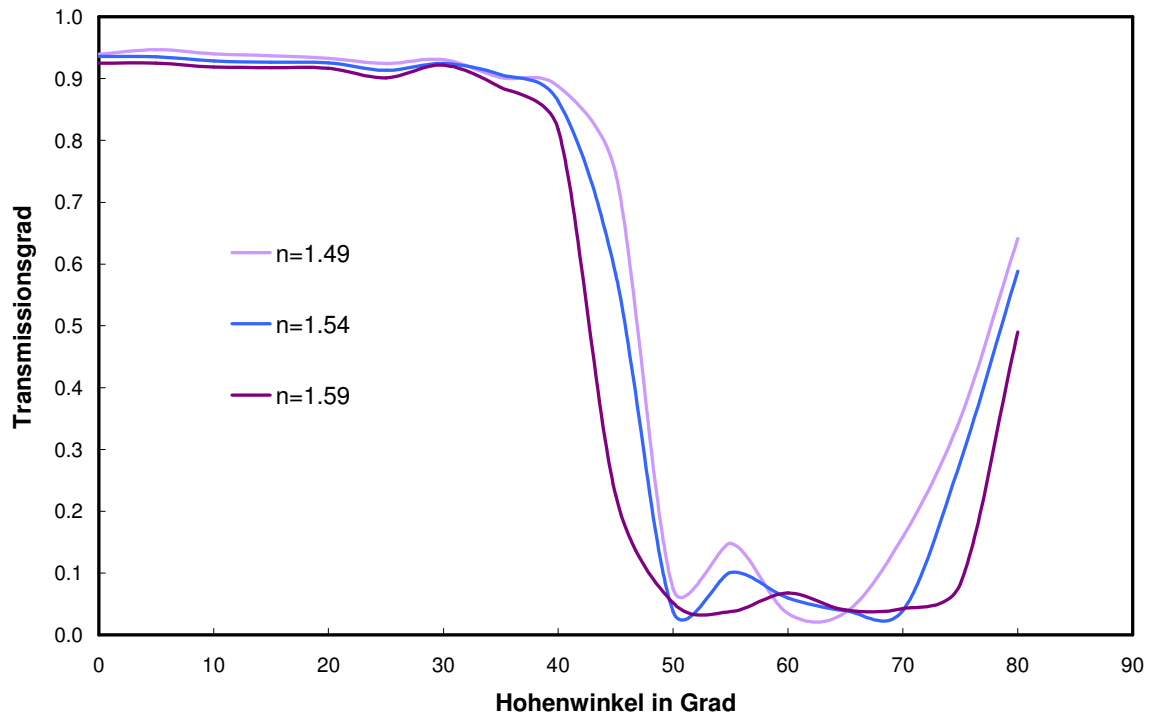


Abbildung 3-7: Einfluss der Variation des Brechungsindex des Materials auf die Transmission der Struktur (Prismenwinkel 30°/42°; $k=0$)

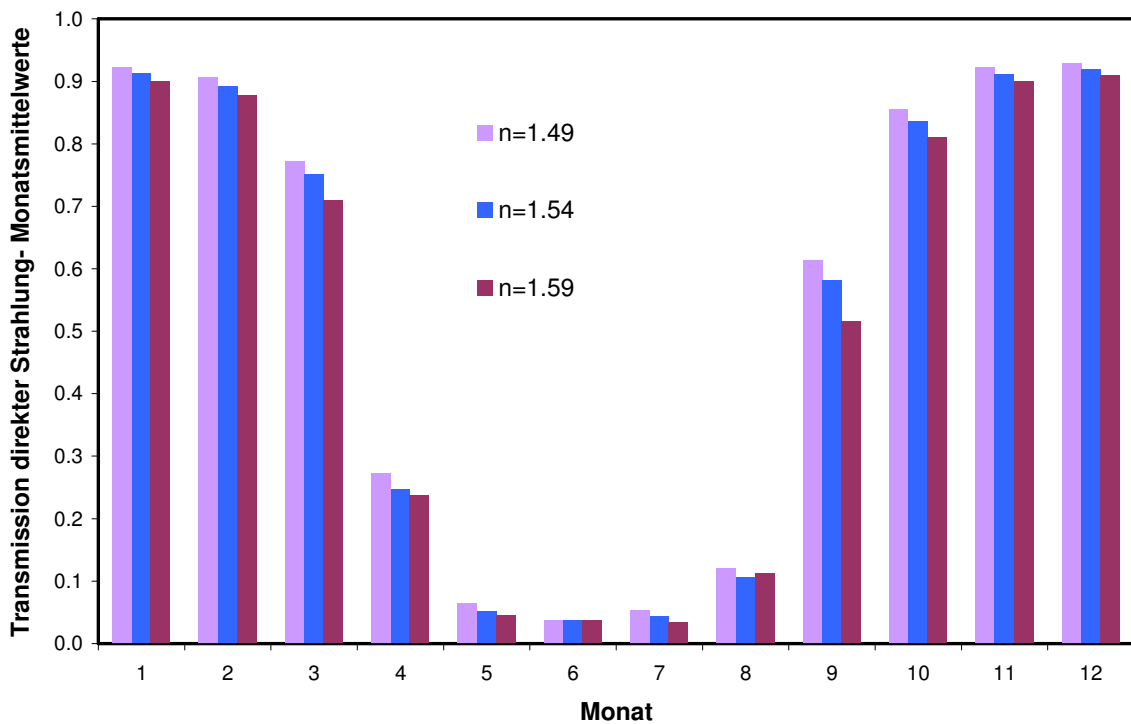


Abbildung 3-8: Einfluss der Variation des Brechungsindex des Materials auf den Jahresverlauf der monatlichen Mittelwerte der Transmission (Prismenwinkel 30°/42°; $k=0$)

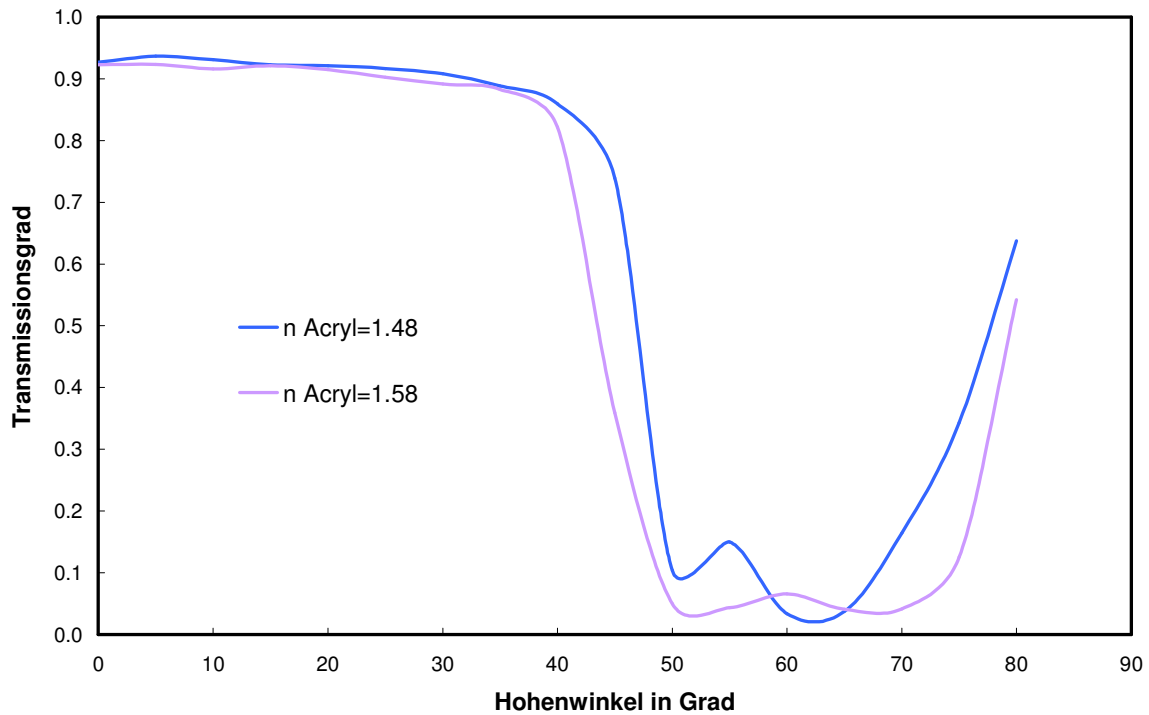


Abbildung 3-9: Einfluss der Variation des Brechungsindizes des aufgetragenen Acrylmaterials bei festgelegtem Substrat auf die winkelabhängige Transmission der Struktur bei Verbundfolien (Prismenwinkel $30^\circ/42^\circ$; $k=0$)

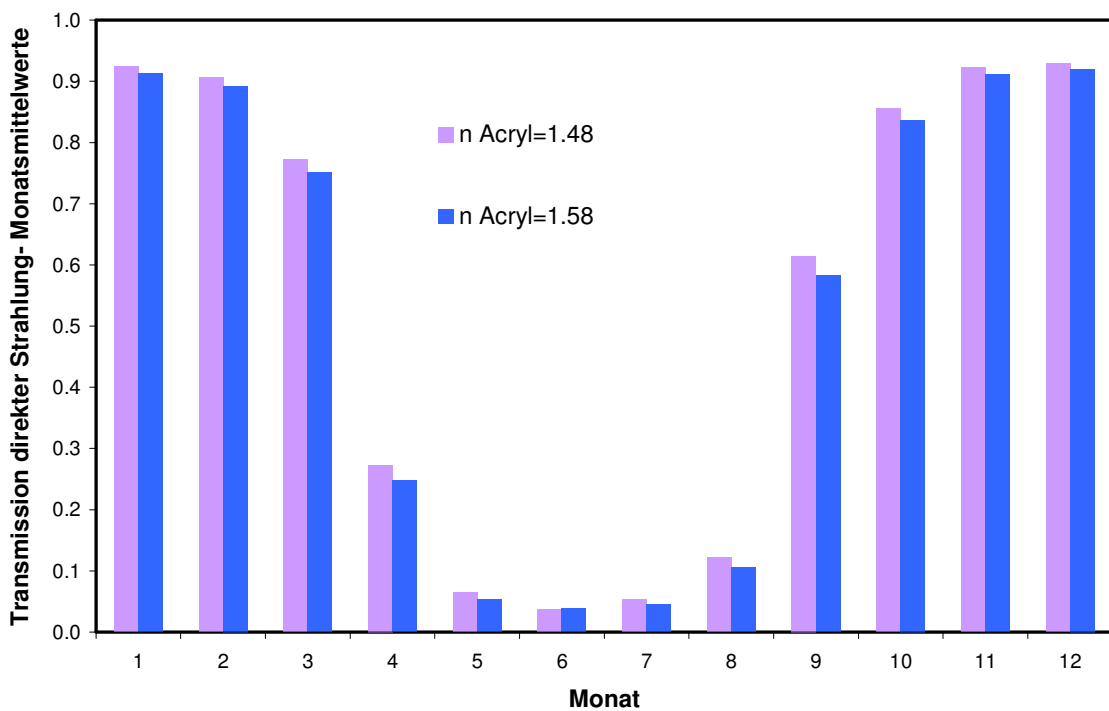


Abbildung 3-10: Einfluss der Variation des Brechungsindizes des aufgetragenen Acrylmaterials auf den Jahresverlauf der monatlichen Mittelwerte der Transmission bei Verbundfolien (Prismenwinkel $30^\circ/42^\circ$; $k=0$)

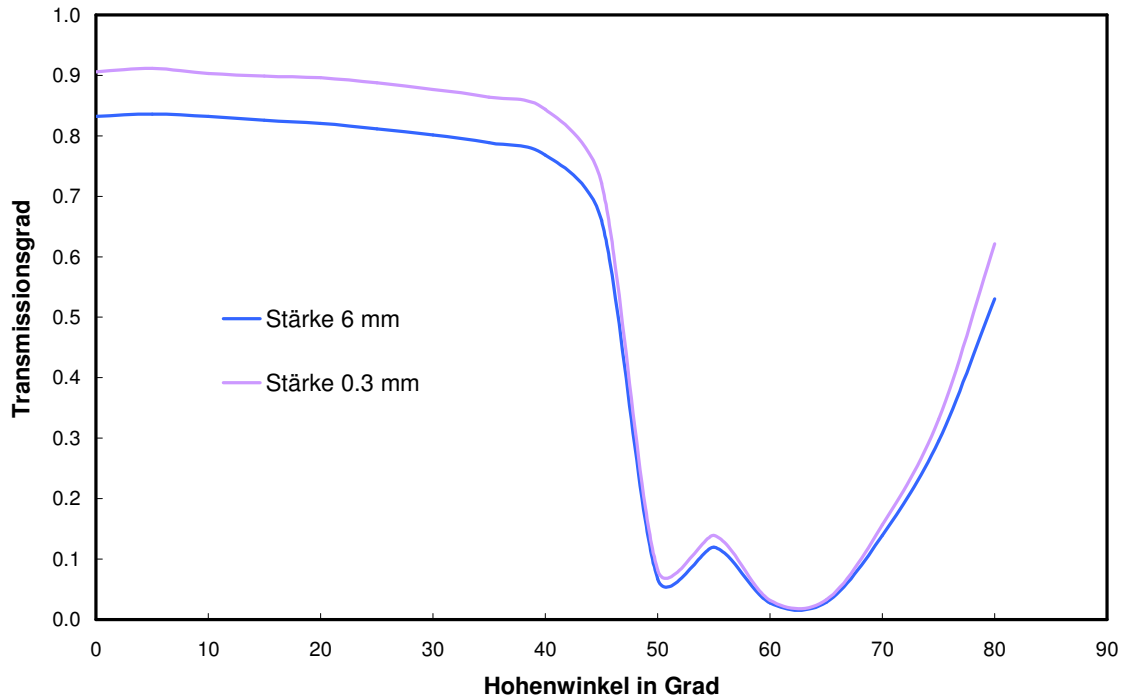


Abbildung 3-11: Einfluss von Dispersion und Absorptionkoeffizient sowie Dicke des Materials auf die winkelabhängige solare Transmission der Struktur (Prismenwinkel 30°/42°; optische Konstanten von PMMA)

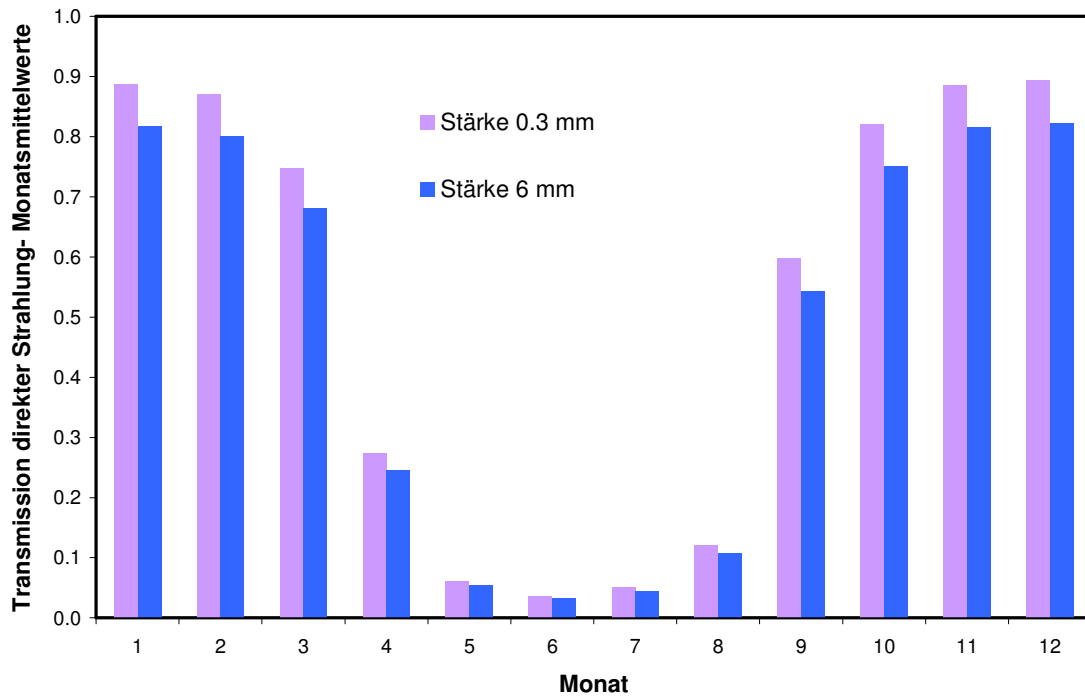


Abbildung 3-12: Einfluss von Dispersion und Absorptionkoeffizient sowie Dicke des Materials auf den Jahresverlauf der monatlichen Mittelwerte der Transmission (Prismenwinkel 30°/42°; optische Konstanten von PMMA)

Für eine Systemauslegung lassen sich aus den Simulationsergebnissen die folgenden Schlussfolgerungen schließen:

- **Prismengeometrie:** Die Variation des oberen Prismenwinkels ermöglicht eine Verschiebung des Grenzwinkels der Totalreflexion der einfallenden Strahlung sowie eine Erweiterung des Ausblendbereiches. Damit kann entweder die Sonnenschutzfunktion gegenüber den passiven solaren Gewinnen verstärkt werden oder die Schaltungsmechanismen auf den Breitengrad der geographischen Lage (d.h. auf die lokale solare Geometrie) optimal angepasst werden. Nicht dargestellt ist die davon abhängige Variation der Transmission für diffuse Strahlung, die sich mit steigenden Winkeln verringert und damit die Transmission für Globalstrahlung beeinflusst. Der untere Winkel spielt eine nicht vernachlässigbare Rolle bei Einstrahlwinkeln, die höher als der Grenzwinkel sind. Er muss bei einer optimalen Auslegung korrekt eingestellt werden, um die Funktionalität der Struktur nicht zu beeinträchtigen.
- **Brechungsindex:** Durch den Einsatz von Materialien mit einem höheren Brechungsindex als PMMA werden bei homogenen Folien ähnliche Effekte wie bei der Änderung der Prismengeometrie erzielt, wobei der breitere Ausblendbereich gegenüber der Verschiebung des Grenzwinkels im Vordergrund steht und die Variationen keine so starke Auswirkung haben, insbesondere wenn die Jahresverläufe betrachtet werden. Mit Verbundfolien verringert sich der Spielraum bei der Wahl des Brechungsindex für eine gezielte Anpassung noch weiter.
- **Strukturstärke:** Mit Bezug auf die simulierte Prismenstruktur aus PMMA erzielt eine Reduktion der Dicke von 6 mm (vorhandene Platte) auf 0.3 mm (realistischer Wert für eine nach dem heutigen Stand der Technik strukturierbare Folie, s. Kap. 2.2) eine Steigerung der solaren Transmission bei niedrigem Einfallswinkel um ca. 0.08 aufgrund der Absorption des Materials im nahen infraroten Bereich. Ähnliche Ergebnisse werden durch den Einsatz von homogenen Folien sowie Verbundfolien unterschiedlicher Materialien erreicht. Im gesamten Verglasungsaufbau wird dieser Effekt zwar geringer. Trotzdem zeigt die Miniaturisierung einen guten Ansatz, um die winterlichen Gewinne deutlich zu erhöhen. Die Effektivität der Schaltung der Prismen zeigt dagegen wie erwartet fast keine Abhängigkeit von der Strukturstärke.

3.1.2 Optische Modellierung Glasscheiben

Für die Modellierung und entsprechende Auslegung des gesamten Verglasungssystems war es im Projekt notwendig, die einzelnen Komponenten und damit auch die Glasscheiben zu modellieren. Dafür wurde das kommerzielle Berechnungsprogramm SCOUT der Fa. Theiss zur Simulation und Analyse von optischen Spektren verwendet /13/.

Mit dem Ziel, die optische Wechselwirkung zwischen Scheiben und Prismenfolie zu untersuchen und Verglasungen mit unterschiedlichen Eigenschaften für

entsprechend unterschiedliche Anwendungen zu entwickeln, wurden drei Arten von Gläsern modelliert:

- Eisenhaltige und eisenarme unbeschichtete Scheiben
- Niedrigemittierende (low-e) beschichtete Scheiben
- Antireflex beschichtete Scheiben

Bei unbeschichteten Scheiben wurden die für die Simulation notwendigen optischen Konstanten aus eigenen Transmissions- und Reflexionsmessungen oder Literaturdaten nach dem gleichen Verfahren, das schon für Kunststofffolien eingesetzt wurde, direkt ermittelt.

Bei low-e beschichteten Scheiben war es notwendig, ein eigenes Modell zu erstellen, da zum einen die für homogene Scheiben verwendete Methode nicht einsetzbar ist und zum anderen geometrische sowie optische Daten der Schichtaufbauten von Herstellern normalerweise nicht erhältlich sind. Es wurden ausschließlich Beschichtungen auf Basis vom Silber modelliert, da sie den größten Marktanteil im Architekturbereich darstellen. Beschichtungen auf Basis von Metalloxiden können aufgrund der höheren Emissivität und entsprechenden reduzierten Wärmedämmwirkung mit Silber-Beschichtungen nicht konkurrieren. Der komplexe Aufbau dieser Beschichtungen, die aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Funktionen bestehen (s. **Abbildung. 3-13**) wurde bei der Modellierung vereinfacht und auf drei (Wärmeschutzverglasungen) bzw. fünf (Sonnenschutzverglasungen) Schichten reduziert. Die optischen Wechselwirkungen der verschiedenen Zusatzschichten werden damit in einzelnen Schichten mit „effektiven“ optischen Eigenschaften zusammengefasst. Dieser „semi-physikalische“ Ansatz, der die echte Natur des Schichtaufbaus nur teilweise abbildet, wurde bei optischen Simulationen von Glasscheiben schon erfolgreich verwendet /14/.

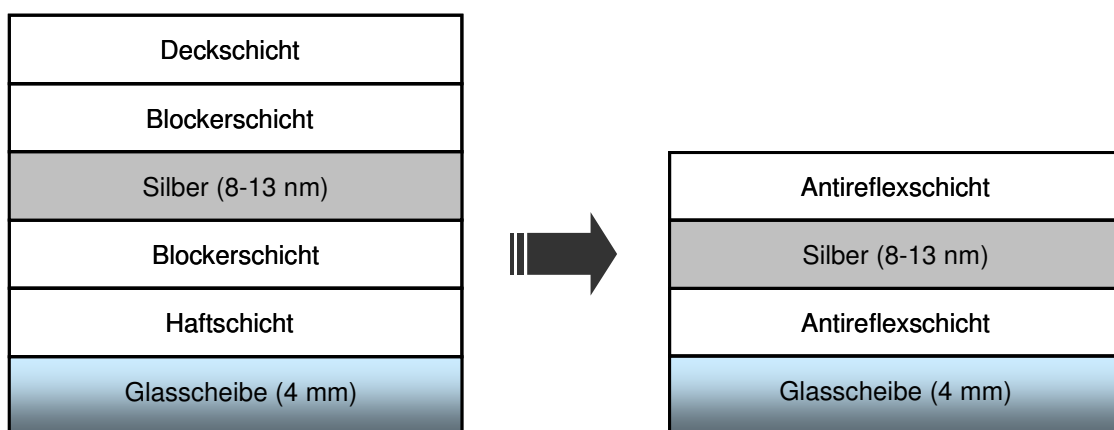


Abbildung 3-13: Typischer (links) und modellierter Schichtaufbau einer low-e beschichteten Glasscheibe

Für die Simulation wurden 2 Materialien eingesetzt, deren Modelle aus der Literatur stammen: Silber als aktive, niedrigemittierende Schicht /14/ und ein allgemeines Modell für Metalloxide als Antireflexbeschichtung /15/.

Nach der Definition des optischen Modells werden die freien Parameter der Modelle über einen bestimmten Gültigkeitsbereich variiert und die simulierten Transmissions- und Reflexionskurven an die Referenzspektren, die aus eigenen Messungen oder Literaturdaten gewonnen wurden, gefittet. Für das Fitten wird vom Programm SCOUT der „downhill simplex“ Optimierungs- Algorithmus verwendet.

Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden zusätzlich die winkelabhängigen Kurven der integralen Werte mit einem in der Branche anerkannten und experimentell validierten empirischen Modell verglichen /16/. Als Beispiel zeigen die **Abbildungen 3-16** und **3-17** die sehr gute Übereinstimmung für eine beschichtete Scheibe mit erhöhter solarer Transmission.

Antireflexbeschichtungen auf Glas wurden in der Simulation als poröse Schichten auf Basis von Siliziumdioxid mit einem effektiven Brechungsindex und vernachlässigbarer Absorption modelliert. Damit werden die herkömmlichen Einfachschichten zur Breitbandentspiegelung (über das gesamte Sonnenlichtspektrum) abgebildet. Der entsprechende reduzierte Brechungsindex wird vom Programm nach der Bruggeman-Theorie („Effective-Medium-Approximation“) berechnet /17/.

Um das Potential der Prismenverglasung für die beiden geplanten Anwendungen als transparente Wärmedämmung und als Fensterelement zu untersuchen, wurden anschließend für die verschiedenen Verglasungsaufbauten die folgenden beschichteten Glasscheiben verwendet:

- Eisenhaltige Scheiben mit einer Beschichtung mit erhöhter solarer Transmission (im Folgenden als low-E high-T bezeichnet), die gezielt für die passive Solarenergienutzung mit 3fach-Verlasungen in der letzten Zeit entwickelt wurden
- Eisenarme Scheiben mit einer Beschichtungen mit erhöhter solarer Transmission und einer Antireflexbeschichtung (im Folgenden als low-E high-T auf low-I bezeichnet). Eine solche Scheibe ist zurzeit auf dem Markt nicht verfügbar, ihre Herstellung aber nach dem heutigen Stand der Technik möglich
- Eisenhaltige Glasscheiben mit einer Beschichtung mit stärkerer spektraler Selektivität (d.h. mit hoher visueller Transmission und reduzierter solarer Transmission, im Folgenden als low-e bezeichnet).

Die Simulationenergebnisse repräsentativer Glasscheiben (Substrate und Beschichtungen) sind in den **Abbildungen 3-14** und **3-15** dargestellt.

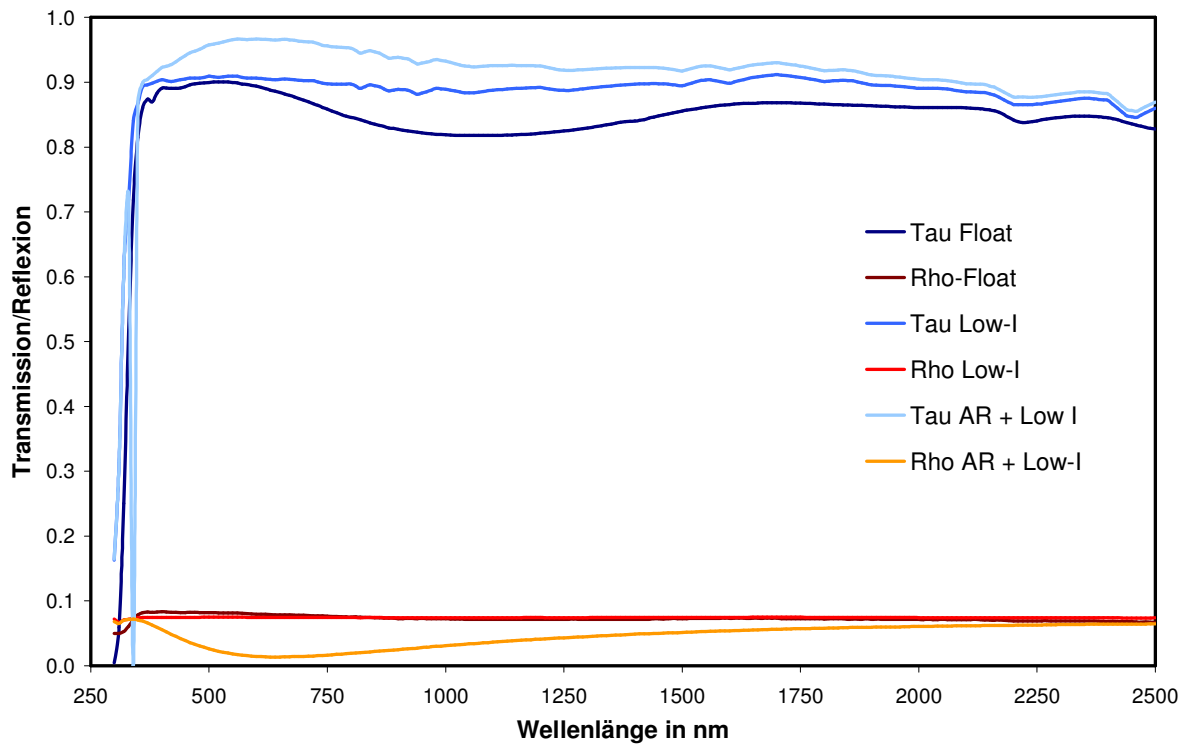


Abbildung 3-14: Spektrale Transmission und Reflexion der simulierten unbeschichteten und AR-beschichteten Scheiben

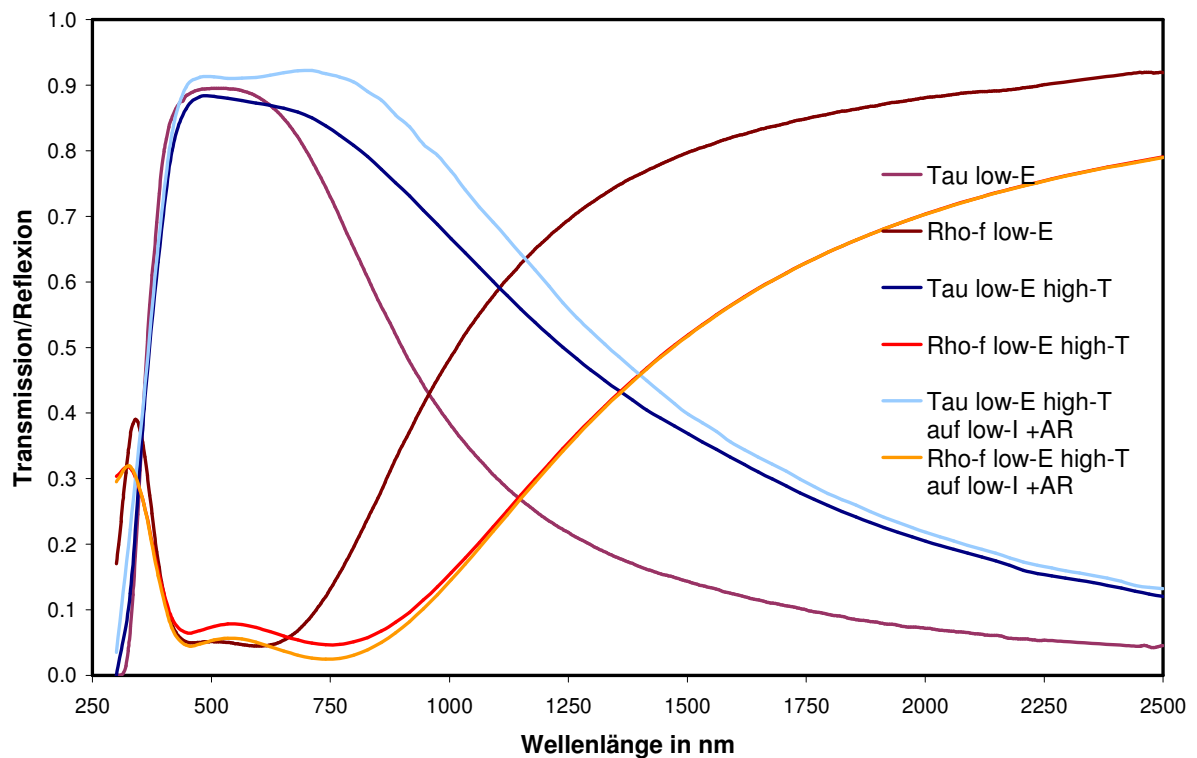


Abbildung 3-15: Spektrale Transmission und Reflexion der simulierten niedrigemittierenden Scheiben

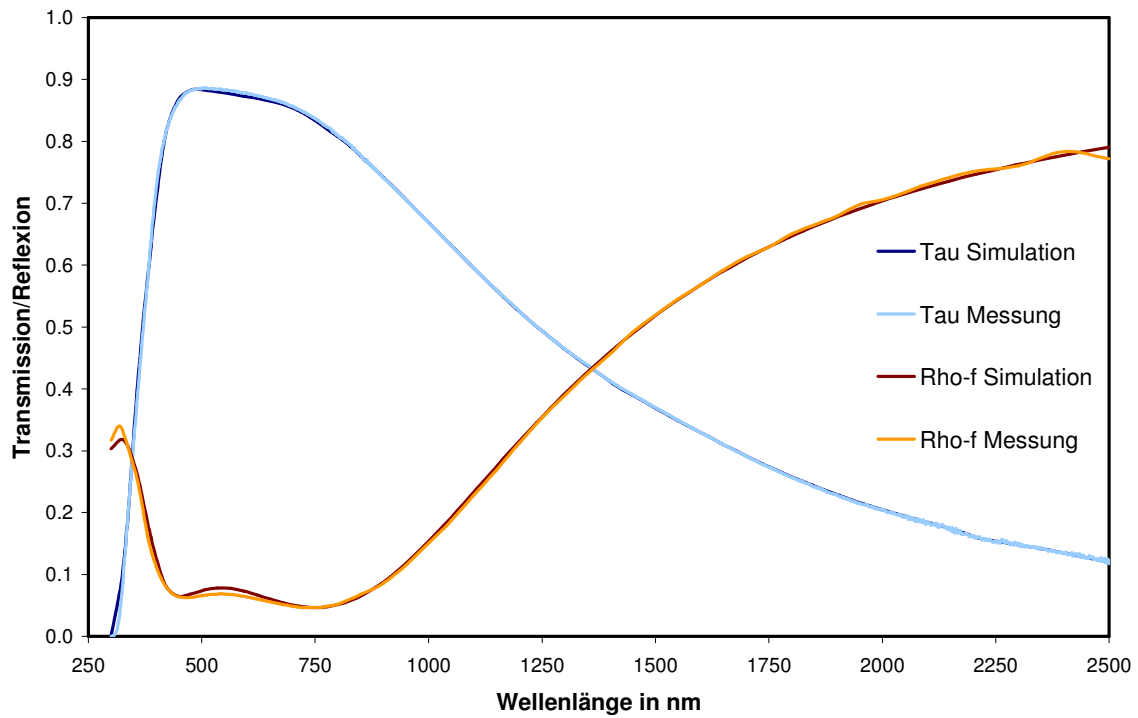


Abbildung 3-16: Vergleich zwischen simulierten und gemessenen spektralen Transmissions- und Reflexionskurven einer low-e Scheibe

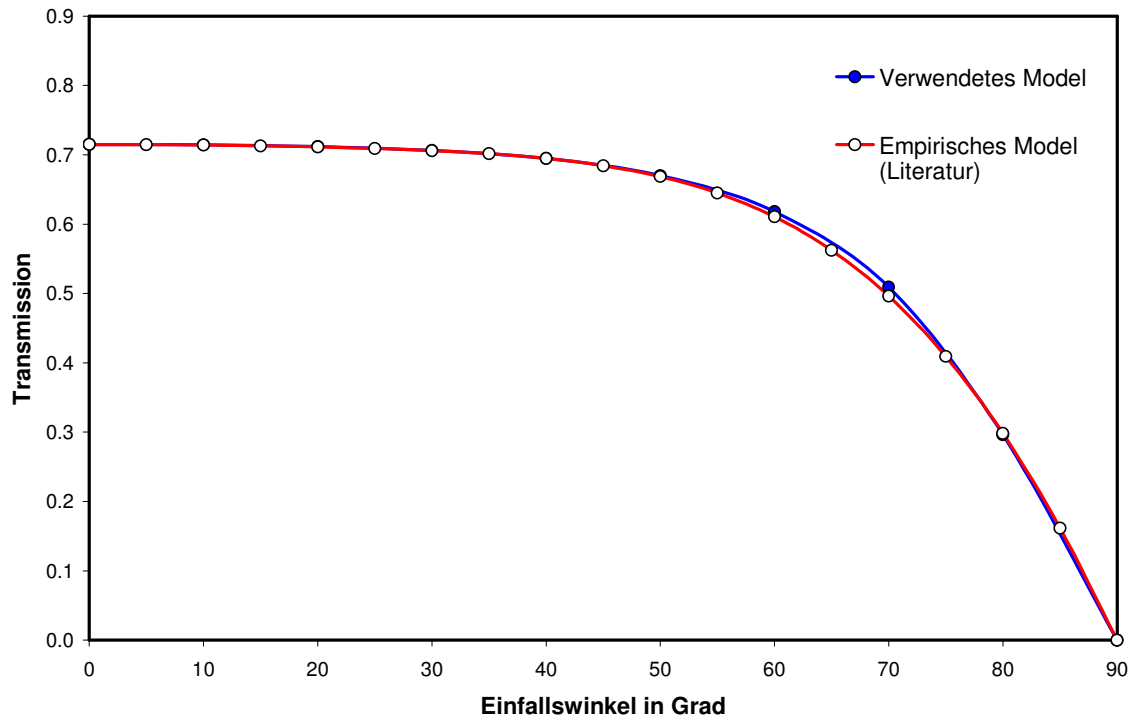


Abbildung 3-17: Vergleich der winkelabhängigen Transmissionskurve zwischen dem verwendeten Modell und einem empirischen Modell aus der Literatur /14/

3.1.3 Optische Modellierung Gesamtsystem

Die winkelabhängigen optischen Eigenschaften des gesamten Verglasungssystems wurden mit dem schon beschriebenen Ray-Tracing-Programm SPRAY modelliert. Als Simulationsergebnisse werden Transmission und Reflexion sowie Absorption in den einzelnen Scheiben geliefert, die für die Berechnung der energetischen Kenngrößen der Verglasung weiter verwendet werden. Für die Modellierung der TWD-Fassade wird die solare Absorption der Wand und die an der Wand entstehenden Reflexionen inklusive Mehrfachreflexionen mitberücksichtigt, wobei die optischen Daten aus der spektrometrischen Messung eines schwarz gestrichenen Kalksandsteines gewonnen wurden ($\alpha_E=0.05$). Seitliche Lichtverluste aufgrund der endlichen Ausdehnung des abgebildeten Systems werden durch den Einsatz zusätzlicher Detektoren und verspiegelter Ränder in der Simulation korrigiert

Bei der Berechnung wurden die folgenden Konfigurationen untersucht, die auf die im vorherigen Kapitel schon dargestellten beschichteten Scheiben basieren:

- PROTO1: 3fach-Verglasung mit integrierter Prismenfolie und 2 low-e Beschichtungen (Pos. 2 und 5⁸) mit erhöhter solarer Transmission auf eisenhaltigem Glas), in beiden Ausführungen Fenster und TWD.
- PROTO2: 3fach-Verglasung mit integrierter Prismenfolie, 2 low-e Beschichtungen mit erhöhter solarer Transmission auf eisenarmem Glas (Pos. 2 und 5) und 2 low-e Antireflexbeschichtungen (Pos. 1 und 6), in beiden Ausführungen Fenster und TWD.
- PROTO3: 3fach-Verglasung mit integrierter Prismenfolie und 2 low-e Beschichtungen (Pos. 2 und 5) mit stärkerer spektraler Selektivität für den Einsatz als Fensterelement.
- REF: 3fach-Verglasung mit integrierter Prismenplatte aus PMMA und 2 low-e Beschichtungen (Pos.2 und 5) mit erhöhter solarer Transmission

Aufgrund des gewünschten Dämmstandards der zu entwickelnden Verglasung wurden Aufbauten mit einer einzigen low-e Beschichtung nicht in Erwägung gezogen (s. Kapitel 3.2.2).

Die Ergebnisse in Form von winkelabhängigen solaren Transmissionen sind in **Abbildungen 3-18 bis 3-20** dargestellt. Die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Prototypen auf Heiz- und Kühllasten werden im Kapitel 3.2.3 bei der Bewertung der gesamten solaren Gewinne näher untersucht.

⁸ Die Position bezeichnet die Nummer der Grenzfläche im Verglasungsaufbau, die von außen kommend gezählt wird. Pos 2 ist damit die Innenseite der äußeren Glasscheibe.

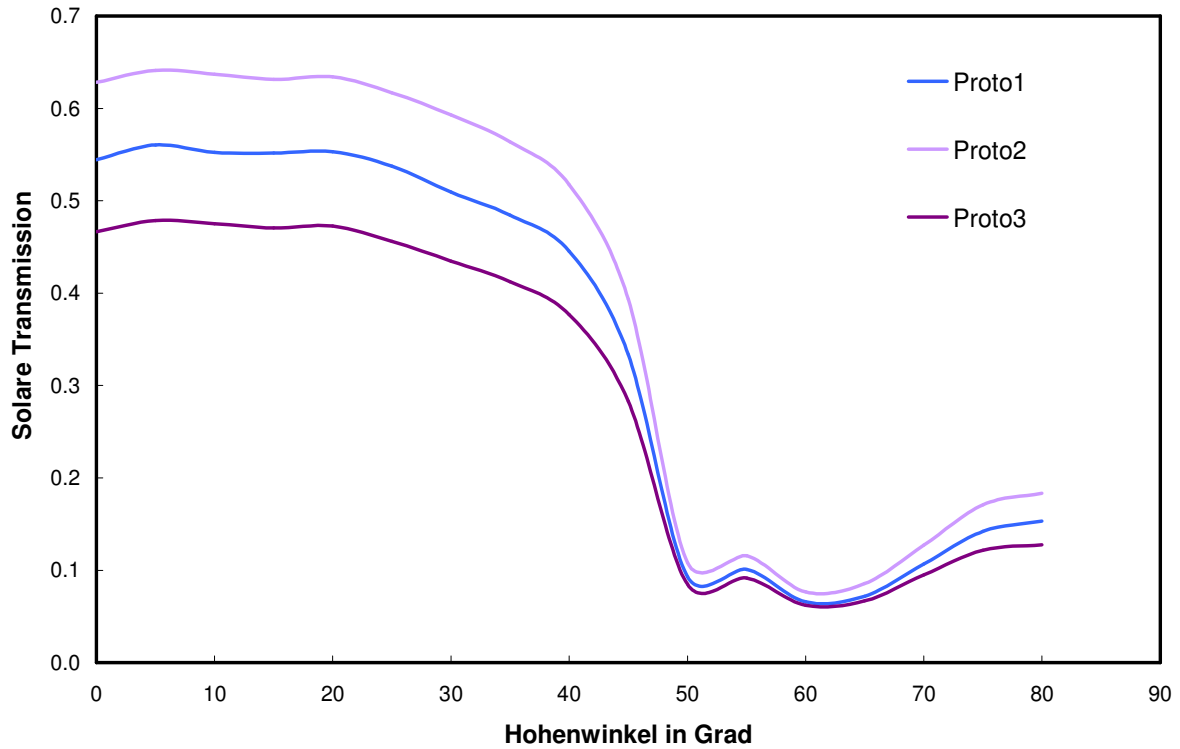


Abbildung 3-18: Berechnete winkelabhängige solare Transmission ausgewählter Verglasungsprototypen mit integrierter Prismenfolie

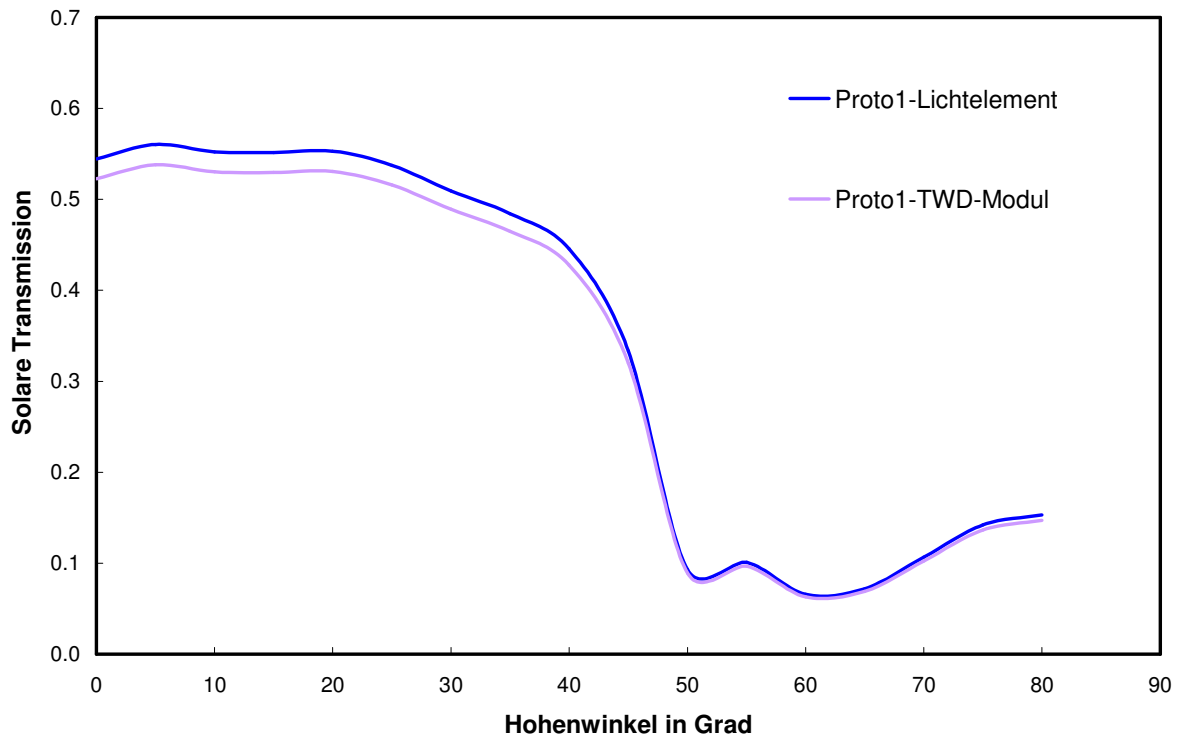


Abbildung 3-19: Einfluss der nicht-idealen Absorption der Wand auf die winkelabhängige solare Transmission der Prototypen für den Einsatz als TWD

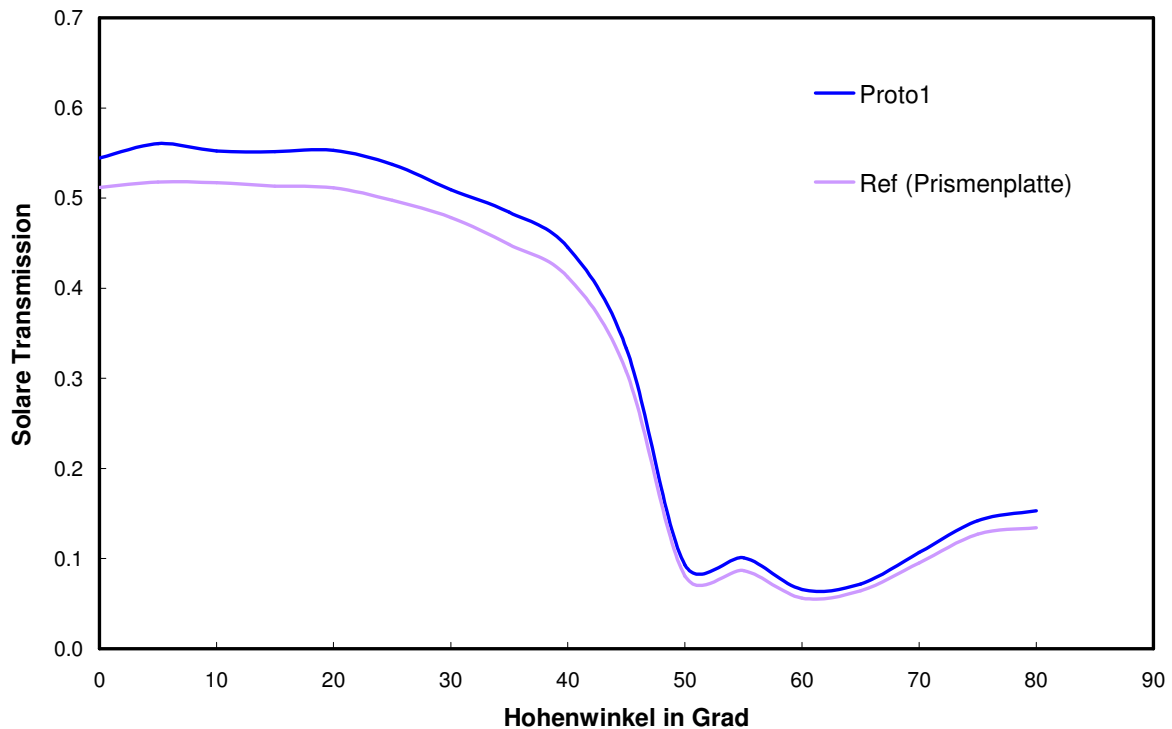


Abbildung 3-20: Berechnete winkelabhängige solare Transmission zwei aufbaugleicher Verglasungen mit integrierter Prismenfolie und Prismenplatte

Aus den Diagrammen lässt sich die optische Wechselwirkung zwischen Scheiben und Prismenfolie wie folgt zusammenfassen:

- Die Mehrfachreflexionen zwischen prismatischer Struktur und Vorderscheibe scheinen die Schaltungsmechanismen und damit die Sonnenschutzfunktion der Verglasungen nicht zu beeinträchtigen. Somit werden in Abhängigkeit vom Aufbau sehr effektive Schaltungen der Transmission von 0.46-0.63 bei tiefstehender Sonne auf 0.07-0.09 bei hochstehender Sonne erzielt.
- Bei der Anwendung als transparente Wärmedämmung führt die nicht-ideale Absorption des schwarzen Anstriches, mit Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen zwischen Verglasung und Wand, zu einer durchschnittlichen Reduktion der tatsächlich absorbierten Strahlung von 4%.
- Aufgrund der spektralen Selektivität der low-e Scheiben, die im IR-Bereich die solare Strahlung stark reflektieren, verringert sich der Unterschied in der Transmission zwischen Prismenplatte und Prismenfolie von 0.08 auf 0.035.

3.2 Thermische Modellierung

3.2.1 Thermisches Modell der Verglasung

Das Projekt hat sich als Aufgabe gestellt, ein flexibles Simulationswerkzeug zu entwickeln, das sowohl für die Auslegung der Verglasung als auch für die Überprüfung und Korrektur der experimentellen Ergebnisse aus Labormessungen oder Tests im Gebäude eingesetzt werden kann. Für die Modellierung der Wärmetransportmechanismen wurde die Netto-Energiefluss-Methode verwendet [18]. Das Verfahren besitzt den Vorteil, dass damit auch Systeme berechnet werden können, deren Komponenten im fernen Infrarotbereich durchlässig sind und ermöglicht somit eine korrekte Abbildung der strukturierten Kunststoffolie. Solche Systeme, bei denen auch nichtbenachbarte Einzelkomponenten einen Energieaustausch über Strahlung besitzen (s. **Abbildung 3.21**), lassen sich mit einfachen Verfahren (z. B. nach der Norm EN 673) nicht behandeln, weil damit die verschiedenen Wärmewiderstände für die Berechnung auf einfacher Weise in Serie geschaltet werden. Nach dem Modell der Netto-Energiefluss-Methode kann außerdem im Vergleich zu konventionellen Methoden die solare Einstrahlung in die Energiebilanz korrekt einbezogen werden, indem die Rückwirkung der jeweiligen Temperaturniveaus auf die einzelnen Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt wird. Damit lassen sich also Temperaturen und Wärmeströme unter anwendungsnahen Randbedingungen bestimmen.

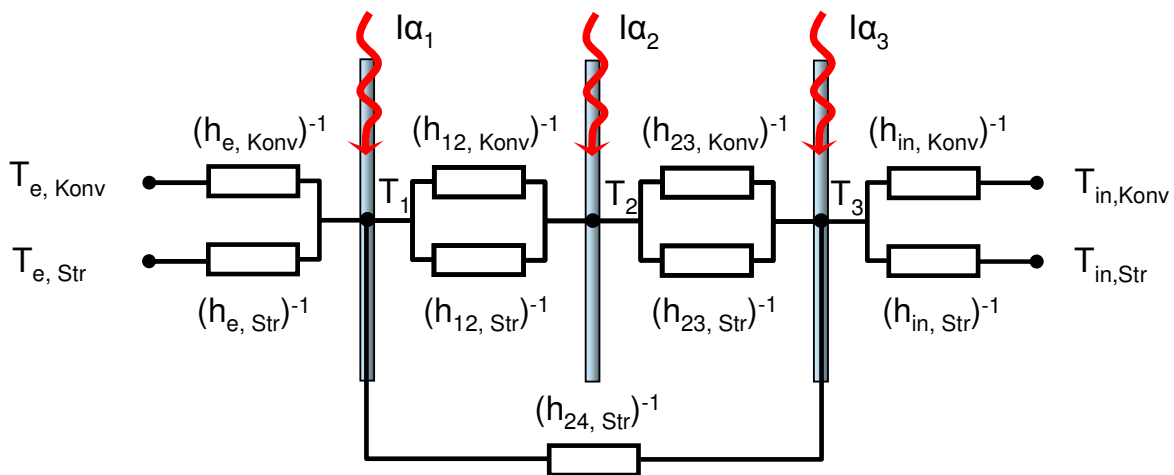


Abbildung 3-21: Ersatzschaltbild des thermischen Modelles der untersuchten Verglasung

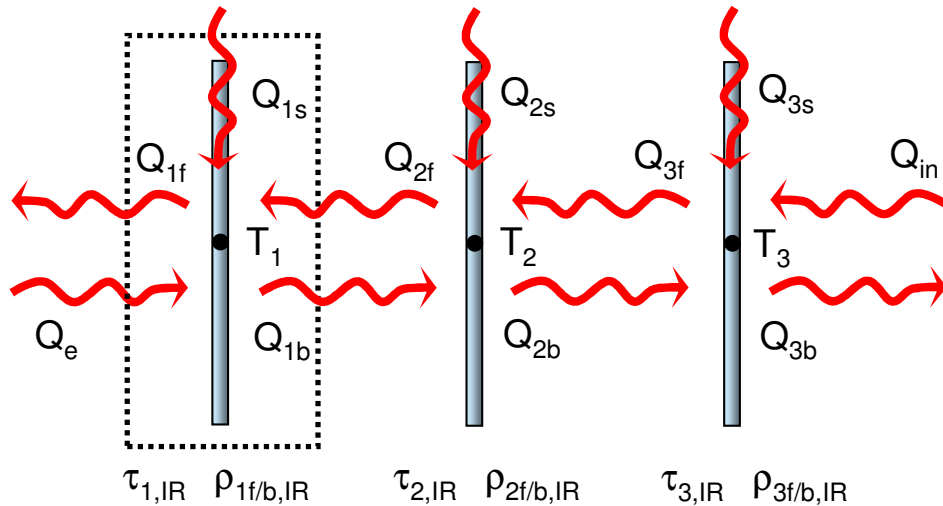


Abbildung 3-22: Schematische Darstellung der verwendeten Netto-Energiefluss-Methode zur Berechnung des Wärmetransportes durch die untersuchte Verglasung

Nach der verwendeten Methode wird für jede Verglasungskomponente (Scheibe oder Folie) eine Energiebilanz aufgestellt. Im stationären Gleichgewicht entspricht der absorbierte Solarenergiefluss den dort anfallenden Netto-Energieflüssen, die aufgrund des Wärmeaustausches durch Strahlung, Konvektion und Leitung mit benachbarten Komponenten oder mit der Umgebung entstehen (s. **Abbildung 3.22**).

Beim IR-Strahlungstransport setzen sich die Netto-Einzelflüsse Q^{Str} aus einem emittierten, einem reflektierten und einem transmittierten Anteil zusammen:

$$Q_{i,b}^{Str} = S_{i,b} + \rho_{IR,i,b} Q_{i+1,f}^{Str} + \tau_{IR,i} Q_{i-1,b}^{Str} \quad \text{Gl. 3-1}$$

$$Q_{i,f}^{Str} = S_{i,f} + \rho_{IR,i,f} Q_{i-1,b}^{Str} + \tau_{IR,i} Q_{i+1,f}^{Str} \quad \text{Gl. 3-2}$$

Der Index i bezieht sich auf die betrachtete Scheibe, die Indices f und b auf die front- bzw. rückseitige Oberfläche der Scheibe. $\rho_{IR,i}$ und $\tau_{IR,i}$ sind dabei der IR-Reflexions- und Transmissionsgrad der i -ten Komponente und werden als bekannt vorausgesetzt (aus Literaturdaten oder eigenen Messungen). Die von der Oberfläche emittierte Wärmestrahlung S_i wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$S_{i,f/b} = \varepsilon_{i,f/b} \sigma T_i^4 \quad \text{Gl. 3-3}$$

mit $\varepsilon_{i,f/b}$: Emissionsvermögen der front- bzw. rückseitigen Oberfläche der i -ten Scheibe, ebenso aus Literaturdaten oder eigenen Messungen bekannt

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante

T_i : Temperatur der i -ten Scheibe

Dabei wird angenommen, dass beide Oberflächen der Scheibe die gleiche Temperatur aufweisen und somit der Wärmewiderstand der Glasscheiben vernachlässigt wird. Aufgrund ihrer relativ hohen Wärmeleitfähigkeit führt bei hoch wärmegeprägten Verglasungen diese Vereinfachung für die Berechnung der energetischen Kennwerte nicht zu Fehlern.

Als Randbedingung wird beim Innenraum die Emissivität gleich 1.0 für den Fall Fenster und gleich 0.9 für den Fall TWD gesetzt. Die effektive Emissivität der Umgebung ε_e wird durch eine gewichtete Mittelung nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\varepsilon_e = F_{sky} F_c \varepsilon_{sky} + (1 - F_{sky} F_c) \quad \text{Gl. 3-4}$$

mit F_{sky} : Sichtfaktor Verglasung/Himmel (= 0.5 für senkrechte Verglasungen, ohne Berücksichtigung von Vorbauten oder weiteren Hindernissen)

F_c : Wolkenloser Anteil des Himmels

ε_{sky} : Emissivität des wolkenlosen Himmels (berechnet aus der Umgebungstemperatur nach /19/)

Bei Konvektion und Leitung werden die für die Berechnungsmethode benötigten Netto-Einzelflüsse Q^{Konv} die jede Scheibenoberfläche verlassen aus den üblichen Beziehungen zur Beschreibung des konvektiven Wärmetransportes gewonnen:

$$Q_{i,f/b}^{Konv} = h_{i,f/b}^{Konv} T_i \quad \text{Gl. 3-5}$$

Die unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion h^{Konv} werden in Abhängigkeit der Scheibentemperatur nach den konventionellen Gleichungen für eine vertikale Lage bestimmt. An dieser Stelle wird für eine detaillierte Beschreibung auf die Literatur verwiesen /19/.

Anschließend lässt sich die energetische Bilanzierung für jede Komponente nach folgender Gleichung darstellen:

$$\Delta Q_{Scheibe-i} = Q_{i,f}^{Str} + Q_{i,b}^{Str} - Q_{i-1,b}^{Str} - Q_{i+1,f}^{Str} + Q_{i,f}^{Konv} + Q_{i,b}^{Konv} - Q_{i-1,b}^{Konv} - Q_{i+1,f}^{Konv} - \alpha_i I = 0 \quad \text{Gl. 3-6}$$

mit $i = 1,2,3$

Dabei ist α_i der nach dem optischen Modell berechnete Absorptionsgrad der i-ten Scheibe und I die Einstrahlung auf die Fassade.

Ausgehend von einer Anfangstemperaturverteilung wird das nicht-lineare Gleichungssystem iterativ gelöst. Die Iteration wird abgebrochen, wenn das Konvergenzkriterium (maximal gewünschte Änderung der Scheibentemperatur zwischen zwei Iterationsschritten) erfüllt wird.

Aus den berechneten Temperaturen lassen sich die einzelnen Wärmeströme und damit auch die energetischen Kenngrößen der Verglasung ermitteln. Der U-Wert wird aus der raumseitigen Netto-Bilanz im unbestrahlten Zustand bestimmt:

$$U - \text{Wert} = \frac{(Q_{3,b}^{\text{Str}} + Q_{3,b}^{\text{Konv}} - Q_{\text{in}}^{\text{Str}} - Q_{\text{in}}^{\text{Konv}})_{I=0}}{\Delta T} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Die sekundäre Wärmeabgabe q_i , die für die Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades benötigt wird, ergibt sich aus der Differenz der raumseitigen Energiebilanz mit und ohne Einstrahlung:

$$q_i = \frac{(Q_{3,b}^{\text{Str}} + Q_{3,b}^{\text{Konv}} - Q_{\text{in}}^{\text{Str}} - Q_{\text{in}}^{\text{Konv}})_{I \neq 0} - (Q_{3,b}^{\text{Str}} + Q_{3,b}^{\text{Konv}} - Q_{\text{in}}^{\text{Str}} - Q_{\text{in}}^{\text{Konv}})_{I=0}}{I} \quad \text{Gl. 3-8}$$

3.2.2 Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)

Die Durchlässigkeit für Infrarotstrahlung einer Verglasungskomponente kann wie oben schon erwähnt die Dämmwirkung des gesamten Verglasungssystems reduzieren. Dieser Effekt hängt nicht nur von der IR-Durchlässigkeit der Komponente selber, sondern auch sehr stark von den IR-Eigenschaften der benachbarten Innen- und Außenscheiben.

Die Effekte der IR-Durchlässigkeit auf die Dämmwirkung einer Verglasung bei einfachen oder 2fach-Systemen sind aus der Literatur bekannt. Unsere Studie hat sich als Ziel gesetzt, den Einfluss bei 3fach-Verglasungen zu untersuchen. Für die Studie wurden 4 unterschiedliche Aufbauten gewählt, die für das gesamte Spektrum der heutzutage kommerziell erhältlichen Architekturglasscheiben repräsentativ sind und damit für die Integration einer Folie in Frage kommen könnten:

- Zwei unbeschichtete Scheiben mit $\varepsilon=0.84$
- Eine unbeschichtete und eine niedrigemittierende beschichtete Scheibe mit $\varepsilon=0.03$ (Standard-Scheibe für den Einsatz in Wärmeschutzverglasungen)
- Eine unbeschichtete und eine niedrigemittierende beschichtete Scheibe mit $\varepsilon=0.15$ (pyrolitisch beschichtete, in nicht-europäischen Ländern noch verbreitete Scheibe für den Einsatz in Wärmeschutzverglasungen).
- Zwei beschichtete Scheiben mit $\varepsilon=0.05$ (Scheibe mit erhöhter solarer Transmission für den Einsatz in 3fach-Verglasungen)

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in **Abbildungen 3-23** und **3-24** dargestellt. Die in den Diagrammen dargestellten Kurven sind Linien gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten. Die Wärmedurchgangskoeffizienten bezogen auf die gemessenen IR-Eigenschaften einer typischen strukturierten Verbundfolie (s. Kapitel 2.4.2) werden für die verschiedenen Aufbauten im Diagramm markiert.

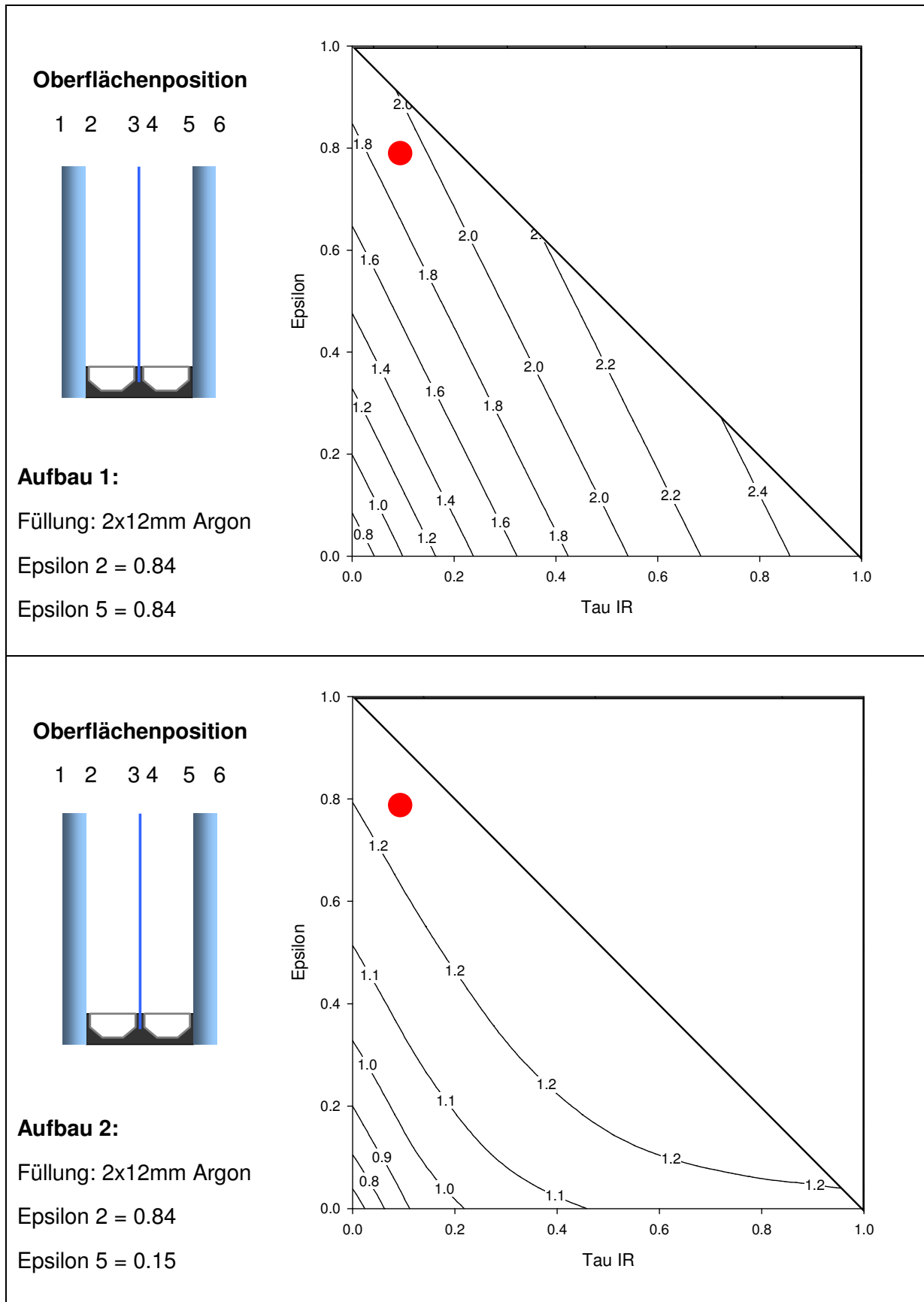


Abbildung 3-23: Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von den IR-Eigenschaften der mittleren Scheibe/Folie – Aufbauten 1 und 2

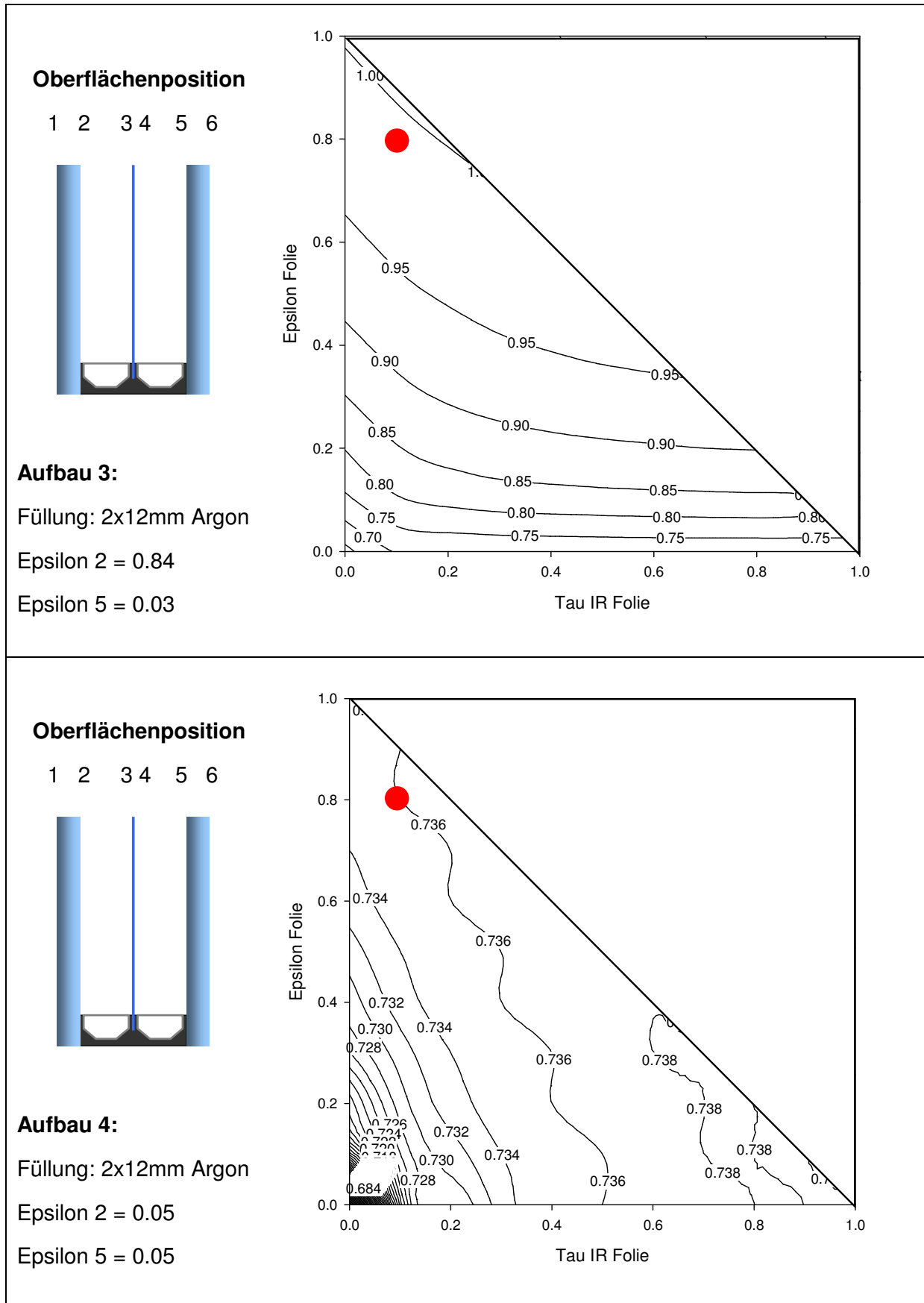


Abbildung 3-24: Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von den IR-Eigenschaften der mittleren Scheibe/Folie – Aufbauten 3 und 4

Anhand der Ergebnisse wird die Integration einer teilweise IR-durchlässigen Folie in einer 3fach-Verglasung mit mindestens einer niedrigemittierenden Oberfläche (Pos. 2 oder 5) als unkritisch bewertet (siehe Aufbau 3). Aufgrund des gewünschten Dämmstandards der zu entwickelnden Verglasung, wurden im Projekt ausschließlich Aufbauten mit zwei Beschichtungen ausgewählt und weiter untersucht (siehe Aufbau 4).

3.2.3 Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades (g-Wert)

Anhand der eingesetzten optischen und thermischen Modelle wurde der einfallswinkelabhängige g-Wert repräsentativer Verglasungsprototypen nach folgender Gleichung berechnet:

$$g(\varphi, \theta) = \tau(\varphi, \theta) + qi(\varphi, \theta) \quad \text{Gl. 3-9}$$

$\tau(\alpha, \varphi)$ ist dabei der winkelabhängige Transmissionsgrad der Verglasung und $qi(\alpha, \varphi)$ die winkelabhängige sekundäre Wärmeabgabe (die Winkelabhängigkeit entsteht durch die winkelabhängige Strahlungsabsorption in den Scheiben bzw. der Folie). Als Randbedingungen für die Berechnungen wurde die äußeren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten $h_i=3.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $h_e=23 \text{ W/m}^2\text{K}$ gesetzt. Die Ergebnisse sind in **Abbildungen 3-25** bis **3-31** dargestellt. Neben den g-Werten werden zusätzlich die mittleren monatlichen solaren Gewinne der Prototypen und konventionellen Verglasungen verglichen. Für den Vergleich wurde eine 3fach-Verglasung mit den gleichen low-e beschichteten Scheiben wie der Prototyp und einer mittlere Glasscheibe sowie eine Sonnenschutzverglasung mit starker spektraler Selektivität ausgewählt. Die Kennwerte (73/61 bzw. 68/34) beziehen sich auf die visuelle Transmission und auf den g-Wert. Die verwendeten Einstrahlungsdaten wurden wie bei den vorherigen Simulationen aus dem Test-Referenz-Jahr TRY 7 mit dem Strahlungsprozessor vom Simulationsprogramm TRNSYS berechnet.

Die maximalen und minimalen g-Werte, die jeweils bei den Einfallswinkeln 0° und 60° erreicht werden und für das Schaltungspotential der Prismenverglasung repräsentativ sind, werden in **Tabelle 3-1** mit den entsprechenden U-Werten zusammengefasst. Für eine erste vom System Gebäude unabhängige Bewertung des gleichzeitigen Einflusses von Dämmwirkung und solaren Gewinnen wurde zusätzlich der äquivalente U-Wert bezüglich des winterlichen g-Wertes, nach dem Energiekriterium vom Passivhaus-Institut, für eine nach Süden ausgerichtete Fassade ermittelt /20/:

$$U_{\text{äq(PHI)}} = U - 1.6 \cdot g \quad \text{Gl. 3-10}$$

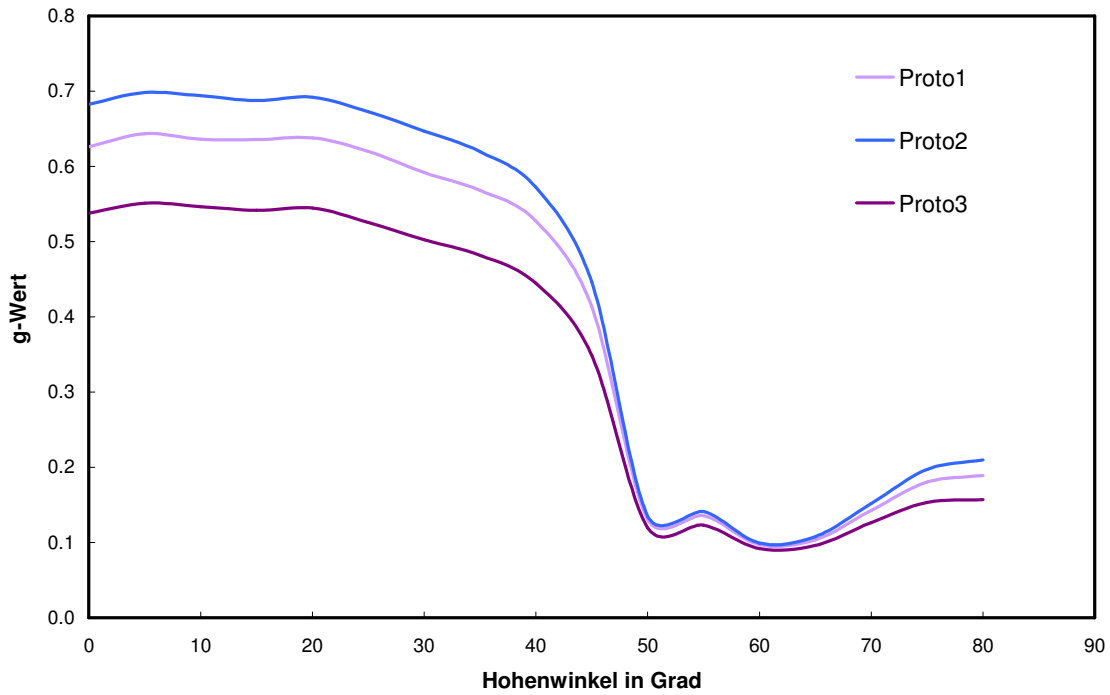


Abbildung 3-25: Einfallswinkelabhängige Gesamtenergiedurchlassgrade ausgewählter Verglasungsprototypen (für die Definition der Prototypen s. Kapitel 3.1.3)

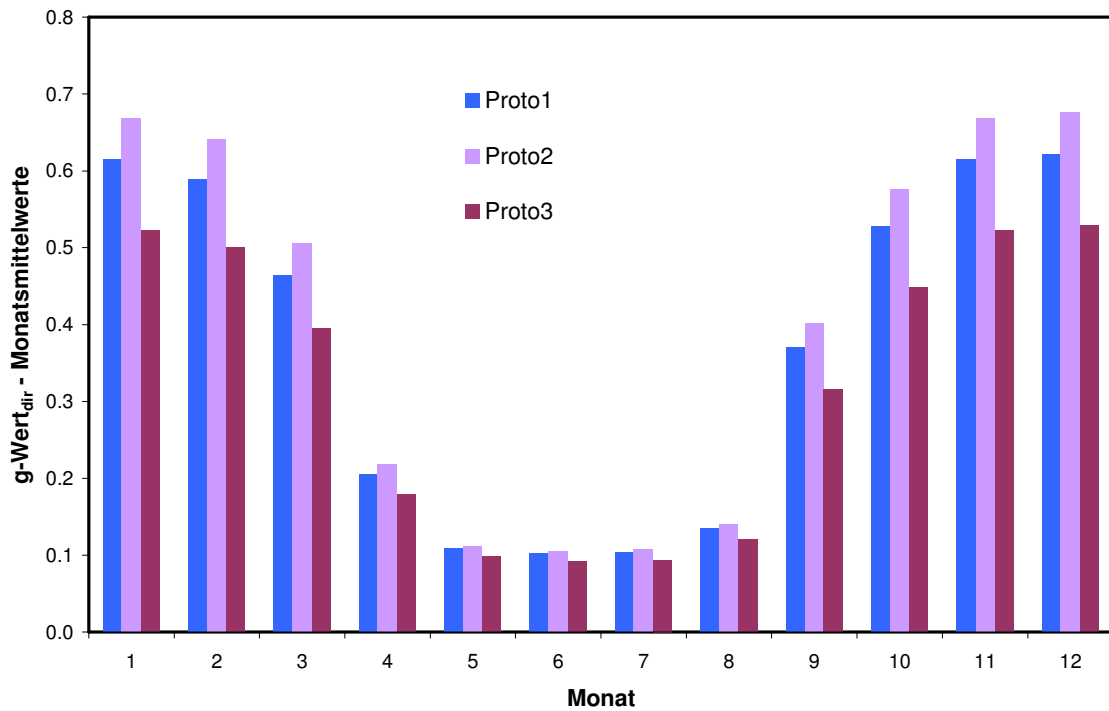


Abbildung 3-26: Jahresverlauf der monatlichen Mittelwerte des g-Wertes für direkte Strahlung ausgewählter Verglasungsprototypen

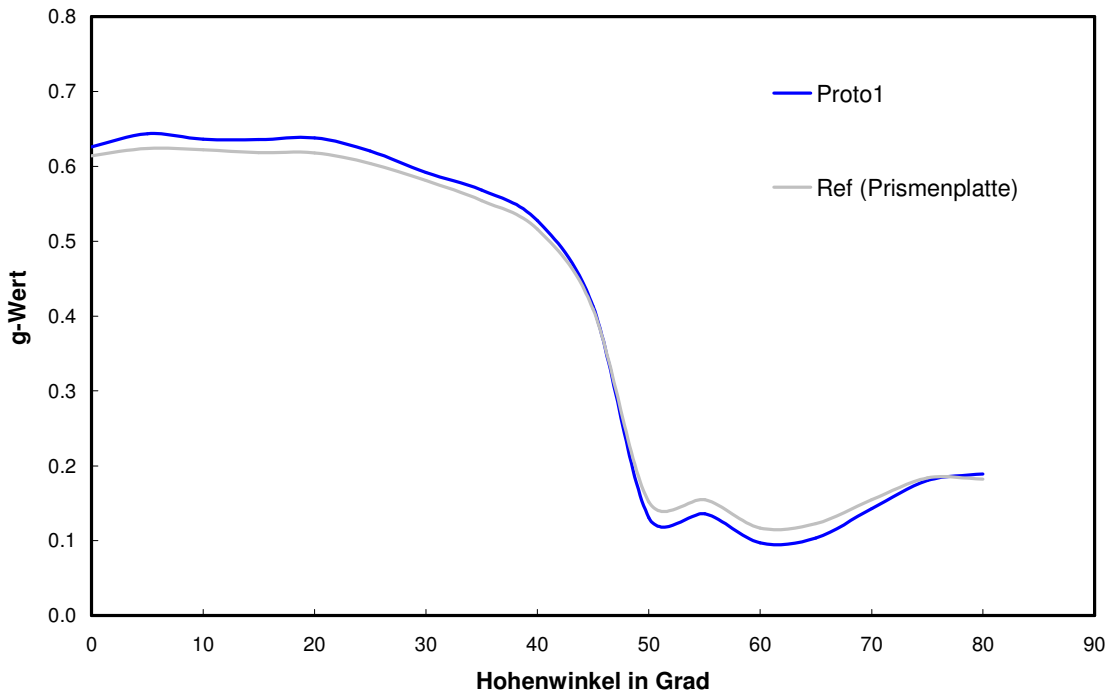


Abbildung 3-27: Einfallswinkelabhängiger Gesamtenergiedurchlassgrad von zwei Verglasungsprototypen mit integrierter Prismenfolien und Prismenplatte

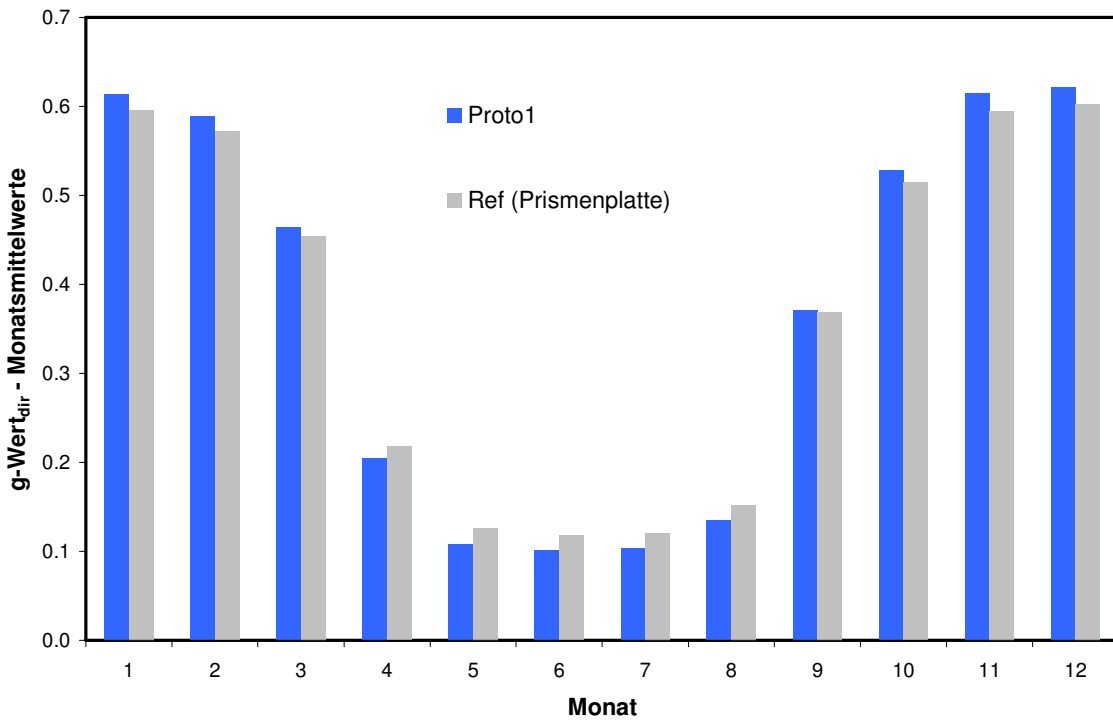


Abbildung 3-28: Jahresverlauf der monatlichen Mittelwerte des g-Wertes für direkte Strahlung – Vergleich zwischen Verglasungen mit integrierter Prismenfolie und Prismenplatte

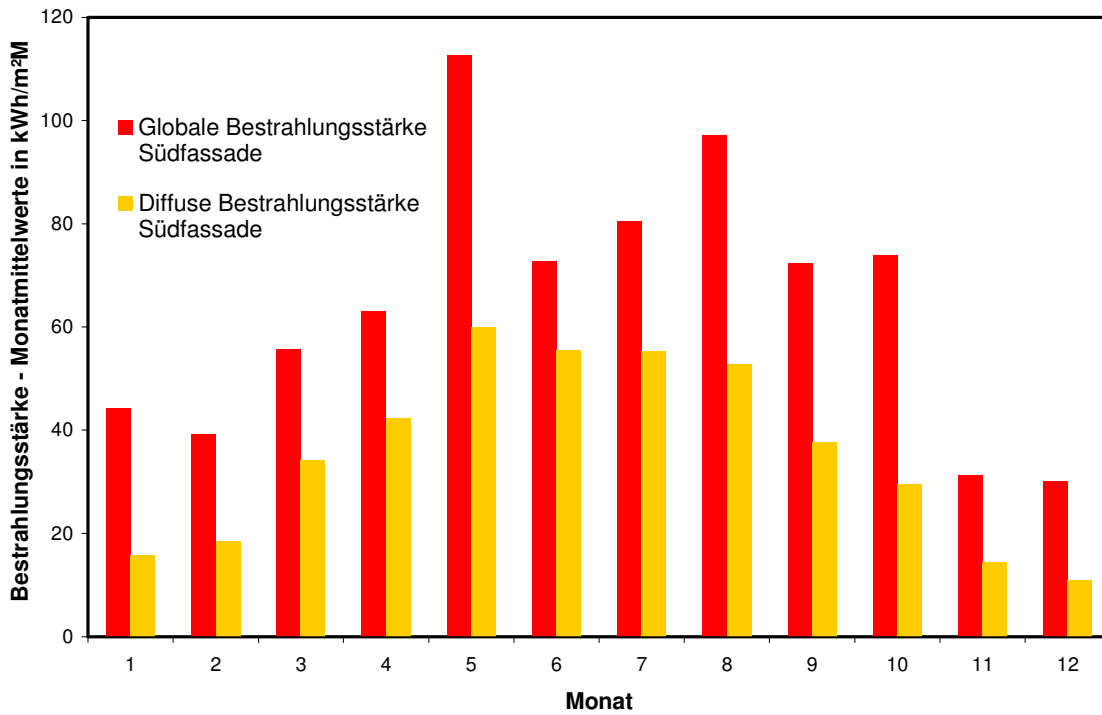


Abbildung 3-29: Globale und diffuse Einstrahlung auf eine Südfassade, berechnet aus dem Datensatz des Testreferenzjahres TRY 7

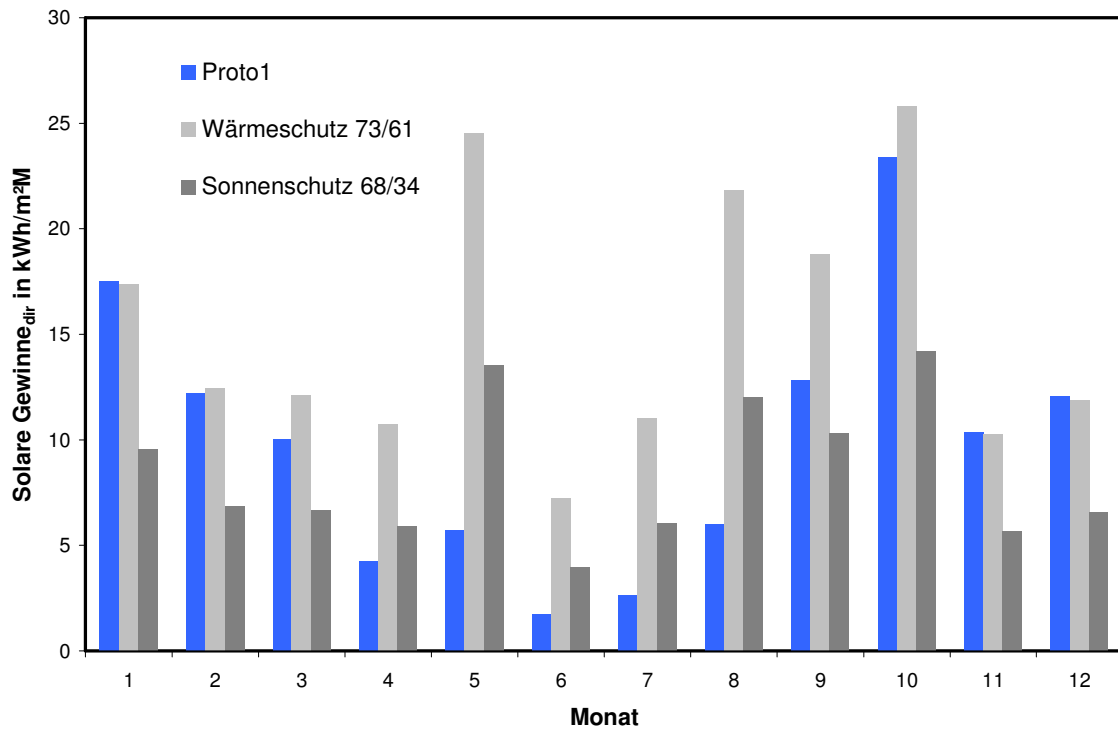


Abbildung 3-30: Jahresverlauf der monatlichen solaren Gewinne aus Direktstrahlung – Vergleich zwischen Prototyp und konventionellen Verglasungen

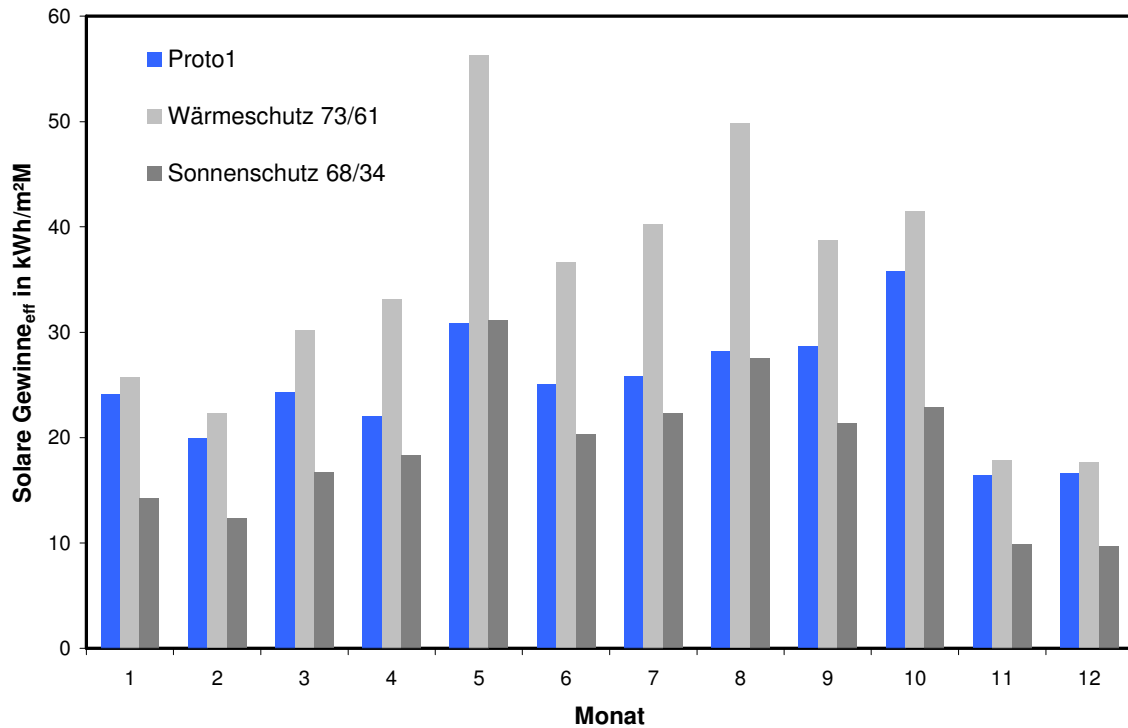


Abbildung 3-31: Jahresverlauf der monatlichen solaren Gewinne aus Globalstrahlung – Vergleich zwischen Prototyp und konventionellen Verglasungen

Tabelle 3-1: Berechnete energetische Kennwerte repräsentativer Verglasungsprototypen – Zusammenfassende Darstellung

Prototyp	U-Wert	g-Wert (0°)	g-Wert (60°)	U-äq (PHI)
PROTO1-L ⁹ (Argon/Krypton)	0.8 / 0.6	0.63	0.10	-0.21 / -0.41
PROTO1-TWD (Argon/Krypton)	0.8 / 0.6	0.60	0.10	-
PROTO2-L (Argon/Krypton)	0.8 / 0.6	0.68	0.10	-0.29 / -0.49
PROTO2-TWD (Argon/Krypton)	0.8 / 0.6	0.65	0.10	-
PROTO3-L (Argon/Krypton)	0.7 / 0.5	0.53	0.09	-0.15 / -0.35
REF-L (Argon/Krypton)	1.0 / 0.7	0.61	0.12	0.02 / -0.28
REF-TWD (Argon/Krypton)	1.0 / 0.7	0.59	0.12	-

9 L steht für das Fensterelement (Lichtelement), TWD für das TWD-Element vor einer opaken schwarzen Fassade.

Die gesamten Ergebnisse der Simulationen bezüglich der energetischen Performance der Verglasung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Saisonale Verschattung:** Eine Verglasung mit integrierter Prismenfolie und 2 kommerziell erhältlichen low-e Beschichtungen mit erhöhter solarer Transmission erzielt eine sehr effektive Schaltung des g-Wertes für direkte Strahlung von 0.63 bei niedrigen Einfallswinkeln auf 0.10 bei hohen Einfallswinkeln (s. **Abbildung 3-25**). Wie bei allen starren, winkelselektiven Systemen verringert sich der Schaltheub wenn die Globalstrahlung und damit auch die Transmission für diffuses Licht betrachtet werden. Trotz dieser Dämpfung des saisonalen Effektes ist immer noch ein deutlicher Schalteffekt vorhanden. So wird im Vergleich zur Referenz-3fach-Verglasung im Winter über 90% und im Sommer zwischen 35 und 45% - abhängig vom Diffusanteil- der gesamten Solarenergie durchgelassen. Damit werden gleichzeitig eine hohe passive Solarenergienutzung gewährleistet und sommerliche Werte erreicht, die vergleichbar mit der Referenz-Sonnenschutzverglasung sind, was einen deutlichen Vorteil im Bezug auf die Überhitzungsproblematik von konventionellen Produkten darstellt.
- **Einsatzspektrum:** Der Einsatz von Scheiben mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften erweitert das Anwendungsspektrum der Verglasung. Die Kombination von low-e Beschichtungen auf eisenarmen Glassubstraten und Antireflexbeschichtungen (diese Scheiben sind nicht kommerziell erhältlich, ihre Herstellung ist aber nach dem heutigen Stand der Technik möglich) ermöglicht eine weitere Steigerung des g-Wertes im Winter, was für die Anwendung als transparente Wärmedämmung von Vorteil ist. Die Kombination mit low-e Scheiben mit ausgeprägter spektraler Selektivität verstärkt dagegen die Sonnenschutzfunktion der Verglasung, was für die Anwendung als Fensterelement bei Nicht-Wohngebäuden zu bevorzugen ist.
- **Vergleich Prismenfolie/Prismenplatte:** Der deutliche Unterschied in der solaren Transmission zwischen der vorhandenen Prismenplatte und einer Prismenfolie (ca. 0.08) bedingt durch die solare Absorption in der Struktur verringert sich drastisch, wenn die entsprechenden g-Werte verglichen werden (s. **Abbildungen 3-27** und **3-28**). Verantwortlich dafür ist zum einem die schon erwähnte Wechselwirkung mit den selektiven Glasscheiben, zum anderen der unterschiedliche Beitrag der sekundären Wärmeabgabe q_i . Bei einem symmetrischen Aufbau fließt etwa die Hälfte der absorbierten Energie in den Innenraum, was die niedrigere Transmission bei der Platte teilweise kompensiert. Auf Basis der theoretischen Berechnung ist bezüglich der solaren Gewinne keine signifikante Verbesserung durch den Ersatz der Platte mit der Folie zu erwarten. Entscheidend dabei ist neben dem schlankeren Aufbau und der erwarteten Kostensenkung viel mehr die Reduzierung der Wärmeverluste, die durch eine optimierte Integration erzielt werden kann.

3.2.4 Thermisches Modell der TWD-Wand

Für die Anwendung als Lichtelement lässt sich die Leistungsfähigkeit der Prismenverglasung durch ihre energetischen Kennwerte sowie statische jährliche Simulationen bewerten und mit herkömmlichen Produkten vergleichen. Für die Anwendung als transparente Wärmedämmung können aber die wärmekapazitiven Effekte des gesamten Systems nicht vernachlässigt werden, weil die Zeitverzögerung der Wärmeeinträge durch die Massivwand und die Kombination mit direkten solaren Gewinnen durch Fenster bezüglich sowohl des Energieeinsparpotentials als auch der Überhitzungsgefahr eine entscheidende Rolle spielen. Im Hinblick auf die Durchführung einer dynamischen Gebäudesimulation wurde aus diesem Grund im Rahmen des Projekts ein instationäres Modell der TWD-Wand erstellt (s. **Abbildung 3-32**).

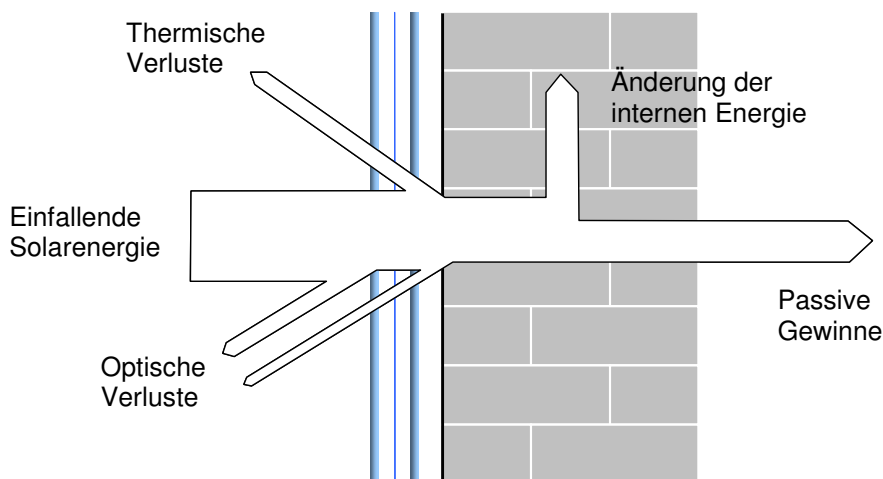


Abbildung 3-32: Schematische Darstellung der Energiebilanz bei instationärem thermischem Verhalten der TWD-Wand

Zur Abbildung des optischen und thermischen Verhaltens der TWD-Verglasung wurden die entsprechenden, in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Modelle verwendet, ohne Berücksichtigung von kapazitiven Effekten. Das instationäre thermische Verhalten der Massivwand wurde durch das Fourier'sche Gesetz beschrieben, wobei der Fall der eindimensionalen Wärmeleitung ohne innere Wärmequellen betrachtet wurde:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Dabei ist $\theta(x, t)$ das zeit- und ortabhängige Temperaturfeld in der Wand, λ die Wärmeleitfähigkeit, c die spezifische Wärmekapazität und ρ die Dichte der Wand. Die Stoffwerte werden bei der Berechnung als zeitunabhängig angenommen. Das resultierende Differenzialgleichungssystem wurde numerisch anhand des impliziten

Differenzenverfahrens gelöst. Dabei wird die analytische Lösungsfunktion $T(x, t)$ durch ihre Werte an diskreten Punkten x_i innerhalb der Wand und zu diskreten Zeitpunkten t_n ersetzt (s. **Abbildung 3-33**). Zeitliche und örtliche Diskretisierungen wurden so gewählt um eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen. Der Diskretisierungsfehler wurde anhand einer Sensitivitätsanalyse bezüglich des Einflusses der Gitterdichte auf die Innenoberflächentemperatur der Wand geschätzt und minimiert.

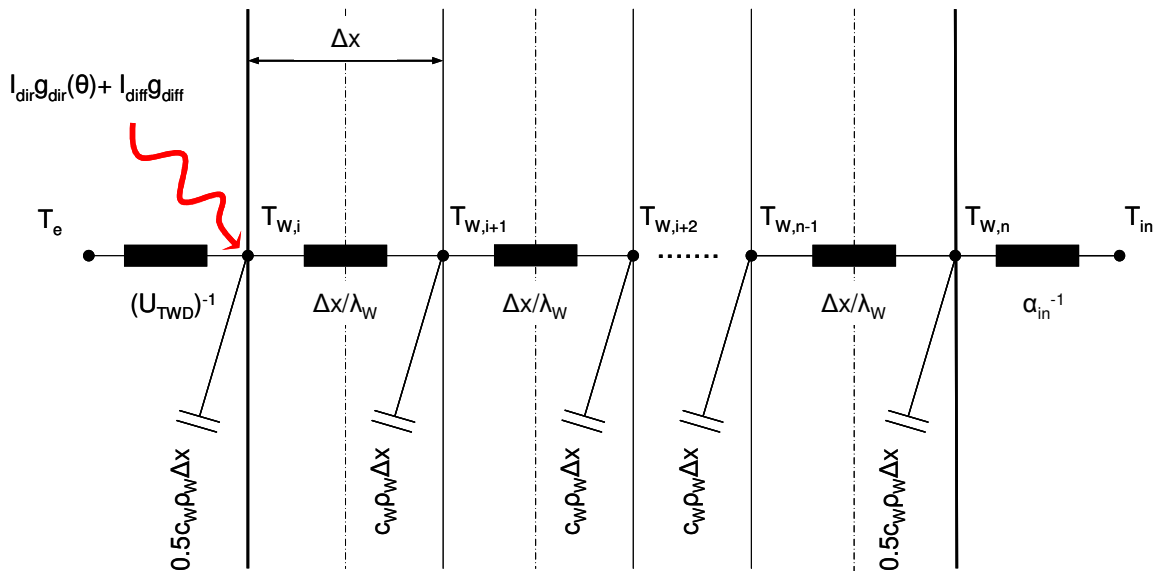


Abbildung 3-33: Thermisches Ersatzschaltbild der modellierten TWD-Wand

Bei der Berechnung wurden die folgenden Randbedingungen verwendet:

- Die Seitenflächen des Bauteiles werden als thermisch adiabat angenommen, d.h. die Wärmestromdichte in Richtung der jeweiligen Außenflächen ist null.
- An der frontseitigen Massivwandoberfläche wird der Wärmetransport durch die zugeführte gesamte Solarenergie und die temperaturinduzierten Wärmeverluste der TWD-Verglasung beschrieben.
- An der an den Innenraum grenzenden Oberfläche der Massivwand erfolgt der Wärmetransport durch natürliche Konvektion und Strahlungsaustausch mit den anderen Raumumhüllungsflächen.

Als Eingangsgrößen fließen in die Berechnung die energetischen Kennwerte der TWD (g-Wert und U-Wert), die Dicke sowie die Stoffwerte der Massivwand (λ , ρ , c), die Klimabedingungen (Lufttemperaturen, direkte sowie diffuse Bestrahlungsstärke) und die Raumlufttemperatur ein.

Als Ergebnis liefert das Modell die zeitabhängige Temperaturverteilung in der Wand, wobei die Innenoberflächentemperatur für die Bewertung des Einflusses der TWD-Prismenverglasung auf Energieeinsparung und thermischen Komfort von besonderer Bedeutung ist und weiterverwendet wird.

3.3 Thermische Gebäudesimulationen

3.3.1 Simulationsumgebung

Für die Bewertung des energetischen und ergonomischen Verhaltens der Prismenverglasung als TWD-Modul wurde das Simulationsprogramm TRNSYS verwendet. Dabei handelt es sich um ein Standard-Werkzeug zur Durchführung von dynamischen Gebäudesimulationen, das sich aufgrund seiner modular aufgebauten und offenen Struktur besonders gut für die definierte Aufgabestellung eignet. Das Programm verfügt über eine große Standard-Bibliothek zur Abbildung von physikalischen und nicht-physikalischen Komponenten (so genannten Types), die über geeignete Schnittstellen zu einem System verknüpft werden, ermöglicht aber zusätzlich die Implementierung von eigenen Komponenten.

Als Kern-Komponente der Simulation wurde das Mehrzonen-Gebäudemodell (Type 56) eingesetzt. Außer einer detaillierten Beschreibung der Gebäudegeometrie, dem Aufbau sowie bauphysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Bauteile und der Anlagentechnik ermöglicht der Type eine thermische Zonierung, d.h. eine Aufteilung des untersuchten Gebäudes in Bereichen mit unterschiedlichen Temperaturen.

Die Integration der TWD-Wand in das System erfolgt über die Definition einer TRNSYS-kompatiblen Komponente mit Inputs (zeitabhängigen Eingangsgrößen), Outputs (zeitabhängigen Ausgangsgrößen) sowie Parameter (zeitunabhängige Eigenschaften) und die anschließende Anbindung an das Gebäudemodell. Dabei handelt es sich um eine interaktive Kopplung: Die Innentemperatur der TWD-Massivwand wird als Eingangsgröße vom Type 56 verwendet, um den Wärmetransport mit den restlichen Zoneschließungsflächen zu berechnen. Die damit ermittelten konvektiven und radiativen Wärmestromdichten werden wiederum von der TWD-Wand-Komponente als Randbedingungen zur Bestimmung des Temperaturfeldes in der Wand eingesetzt. Die Berechnung erfolgt im Programm über einen iterativen Prozess.

Anstatt eines kompletten Bauobjektes (konkretes Ein- oder Mehrfamilienhaus) wurde exemplarisch ein Gebäudemodell mit klarem und einfachem Aufbau verwendet, damit die Auswirkung der untersuchten Einflussgrößen nachvollziehbar ist und die Interpretation der Ergebnisse überschaubar bleibt. Das Testgebäude besteht aus drei Räumen, die in Nord-Süd-Orientierung angeordnet sind, und ist im thermischen Austausch mit der Umgebung durch die südliche und nördliche Außenwand, beide mit einem Fensterflächenanteil von 25% vorgesehen. Die Innenwände wurden dagegen als adiabatisch angenommen. Bei dieser Annahme wird vorausgesetzt, dass in den untersuchten und angrenzenden Räumen die gleichen Temperaturen beherrschen. Damit werden die Randbedingungen eines mittleren Wohnungsabschnittes eines Mehrfamilienhauses abgebildet (s. **Abbildung 3-34**).

In der Simulation wurde in der Heizsaison für alle drei Räume eine Soll-Lufttemperatur von 20°C vorgegeben, ohne Berücksichtigung einer Nachtabsenkung.

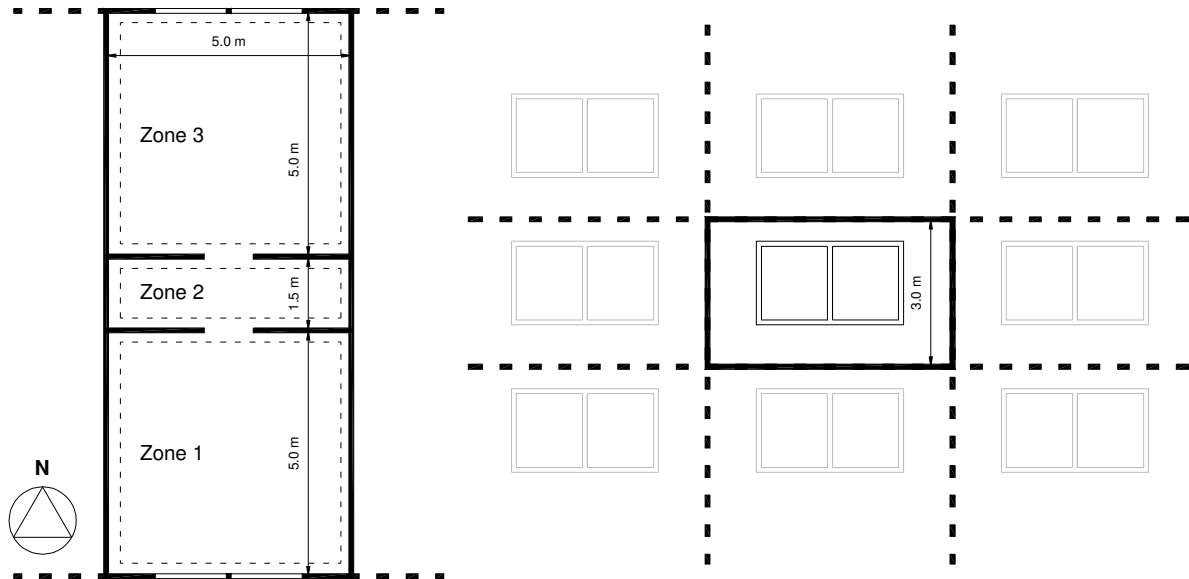


Abbildung 3-34: Grundriss und Südansicht des zur Durchführung der thermischen Simulationen verwendeten Gebäudemodells.

Tabelle 3-2: Aufbau und bauphysikalische Kennwerte der verschiedenen Bauteile

Bauteil	Aufbau	Dicke s in m	Dichte ρ in kg/m ³	Wärmekapazität c in kJ/kgK	Lambda in W/mK
Außenwand	Außenputz	0.020	1800	1.10	0.90
	Mauerwerk	0.240	1600	0.94	0.79
	Innenputz	0.015	1400	0.90	0.70
Fenster	2fachverglasung.	0.024	-	-	1.4 (U_w)
Innenwand	Innenputz	0.015	1400	0.90	0.70
	Mauerwerk	0.115	1600	0.94	0.79
	Innenputz	0.015	1400	0.90	0.70
Boden und Decke	Estrich	0.040	2000	1.00	1.40
	Trittschalldämmung	0.020	30	1.50	0.04
	Normalbeton	0.200	2400	1.00	2.00
	Innenputz	0.015	1400	0.90	0.70

Die thermische Zonierung (Südseite, Nordseite und Flur) wurde verwendet, um den Einfluss der TWD-Wand lokal zu untersuchen. Für die Heizung wurde das im Type 56 schon implementierte idealisierte Modell eingesetzt: Damit werden die Raumtemperaturen in jedem Zeitschritt ohne Zufuhr vom Heizwärmestrom berechnet. Am Ende des Zeitschrittes wird die Ist-Temperatur mit der Soll-Temperatur verglichen. Bei Unterschreitung wird aus dem Temperaturunterschied der notwendige Heizwärmestrom berechnet um die gewünschte Temperatur zu gewährleisten. Dabei wird der Wärmebedarf unterbewertet, da der Heizwärmestrom verlustfrei und ohne Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens realer Heizungsanlagen zugeführt wird. Für die Lüftung wird im Winter für alle Räume eine konstante Luftwechselrate von 0.5 h^{-1} , die gleichzeitig die Anforderungen bezüglich Hygiene und Energieeinsparung erfüllt, angenommen. Im Sommer werden dagegen variable Luftwechselraten eingestellt, um den Einfluss einer natürlichen Lüftung als passiver Maßnahme zur Reduzierung der Überhitzungsgefahr zu untersuchen.

Als zusätzliche Eingangsgrößen wurden die Wetterdaten des DWD-Test-Referenzjahres (TRY) 7 verwendet.

3.3.2 Simulationsergebnisse

In der Simulation wurden unterschiedliche Kombinationen von opaker (EPS, WLS 035) und innovativer sowie konventioneller transparenter Wärmedämmung untersucht (s. **Tabelle 3-3**). Als Prismenverglasung wurden sowohl die Standard Ausführung (PROTO 1 mit Argonfüllung) als auch die optimierten Varianten (PROTO 2 und Kryptonfüllung) eingesetzt. Als Referenz-TWD wurde eine 3fach-Verglasung mit den gleichen low-e beschichteten Scheiben wie der Prototyp aber einer üblichen mittleren Glasscheibe simuliert¹⁰.

Tabelle 3-3: In der TRNSYS-Simulation untersuchte Fassadenkonfigurationen

Konfiguration	Opake Dämmung		Transparente Dämmung	
	Stärke Nord/Süd in cm	Anteil opaker Südfassade %	Typ	Anteil opaker Südfassade %
K0	0....30	100	-	0
K1 (Ar/Kr)	0....16	90-50	PROTO 1 (Ar/Kr)	10-50
K2 (Ar/Kr)	0....16	90-50	PROTO 2 (Ar/Kr)	10-50
K3	0....16	90-50	Ref-TWD	10-50

¹⁰ Der winkelabhängige Gesamtenergiedurchlassgrad der Referenz-TWD wird nach /14/ berechnet.

Als Bewertungskriterien werden für das Energieeinsparpotential der jährliche wohnflächenspezifische Heizwärmebedarf und für den thermischen Komfort die Anzahl der Überhitzungsstunden (Stunden mit Lufttemperaturen im Südraum über 26 °C) verwendet. Die Simulationsergebnisse sind in **Abbildungen 3-35 bis 3-37** dargestellt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Energieeinsparpotential. Abbildung 3-35** vergleicht konventionelle und hybride (d.h. opake und transparente) Dämmmaßnahmen und zeigt, dass die Anwendung von transparenter Wärmedämmung die gleichen Energieeinsparungen bei deutlich schlankeren Gesamtaufbauten ermöglicht. Beispielsweise entspricht eine 8 cm starke hybride Dämmung einer 16 cm starke opake Dämmung und eine 12 cm hybride Dämmung einer konventionellen Lösung mit einer Dicke von 30 cm. Der Einsatz der TWD-Prismenverglasung kann daher bei Neubauten oder Sanierungen von günstig orientierten Fassaden (SSO bis SSW) nicht nur zu erhöhten Einsparungen führen, sondern vor allem eine platzsparende Möglichkeit anbieten, wenn extreme Dämmstärken nicht realisierbar oder nicht erwünscht sind.

Der Einsatz von optimierten TWD-Prismenverglasungen reduziert den berechneten Heizenergiebedarf weiter: Eine Steigerung des g-Wertes von ca. 10% durch die Verwendung von Glasscheiben mit erhöhter solarer Transmission (PROTO 2 - Ar) führt zu 1% Mehreinsparungen im Vergleich zur Standard Ausführung. Eine Verbesserung der Dämmwirkung von ca. 25% durch den Ersatz von Argon mit Krypton (PROTO 1 – Kr) zu 2% Mehreinsparungen. Eine Kombination der beiden Maßnahmen (PROTO 2-Kr) erzielt eine Reduktion des Heizenergiebedarfes von 3%. Die entsprechenden Stärken von energetisch äquivalenter opaker Dämmung lassen sich aus dem Diagramm ablesen.

- **Überhitzungsgefahr.** Die Wirkung der saisonalen Verschattung als Überhitzungsschutzmaßnahme wird aus dem Vergleich zwischen Prismenverglasung und Referenz 3fach-Verglasung bewertet und ist in **Abbildungen 3-36 und 3-37** dargestellt: Den geringen Einsparungen des konventionellen Systems steht eine viel größere Überhitzungsgefahr gegenüber. Schon bei einer Fassadenbelegung von 20% werden fast 1000 Überhitzungsstunden berechnet. Dieser Wert wird mit der Prismenverglasung erst bei 35-40% Fassadenanteil erreicht. Ähnliche Unterschiede werden in Abhängigkeit von Fensteranteil und Luftwechselrate ermittelt.

Bei den energetisch optimierten Varianten steigt aufgrund der höheren Dämmwirkung oder der gesamten Transmission die Gefahr der Überhitzung¹¹, wobei die Anzahl der Überhitzungsstunden deutlich niedriger bleibt als die, die von der Referenz-Verglasung erzielt wird: Bei einer Fassadenbelegung von 30%

¹¹ Eine höhere solare Transmission der Prismenverglasung führt zu einer Steigerung sowohl des g-Wertes für direkte Strahlung, die aufgrund der saisonalen Abhängigkeit zu keiner relevanten sommerlichen Mehrenergieeinträgen verursacht, als auch des g-Wertes für diffuse Strahlung, die hauptsächlich für die erhöhte Überhitzungsgefahr verantwortlich ist.

werden beispielweise vom leistungsstärksten System (PROTO 2-Kr) höhere Einsparungen aber 58% der Überhitzungsstunden (1050 h gegenüber 1800 h) berechnet.

Der Einfluss der saisonalen Verschattung auf die thermische Behaglichkeit wird noch deutlicher wenn auch die Überschreitungszeit von Temperaturen unterhalb und oberhalb 26°C betrachtet wird: **Abbildung 3-38** zeigt exemplarisch für eine Fassadenbelegung von 30%, dass die Kurve der Häufigkeitsverteilung für die Referenz-TWD um 1 bis 1.5 °C in Richtung höherer Temperaturen gegenüber der Kurve der Prismenverglasung in der Standard-Ausführung (PROTO 1-Ar) verschoben ist.

Aufgrund der hohen Kosten der bis jetzt untersuchten Sonnenschutzsysteme für TWD-Module werden in der Praxis um Überhitzungsgefahr zu vermeiden entweder eine geringere Flächenbelegung oder der Einsatz im Bereich vorhandener Vorbauten (z.B. Balkonen) empfohlen. Die integrierte Prismenfolie zeigt sich dagegen als eine effektive und zuverlässige Maßnahme, die mehr Freiheit bei der Fassadengestaltung ermöglicht und ein geringeres Risiko in der Planung gewährleistet.

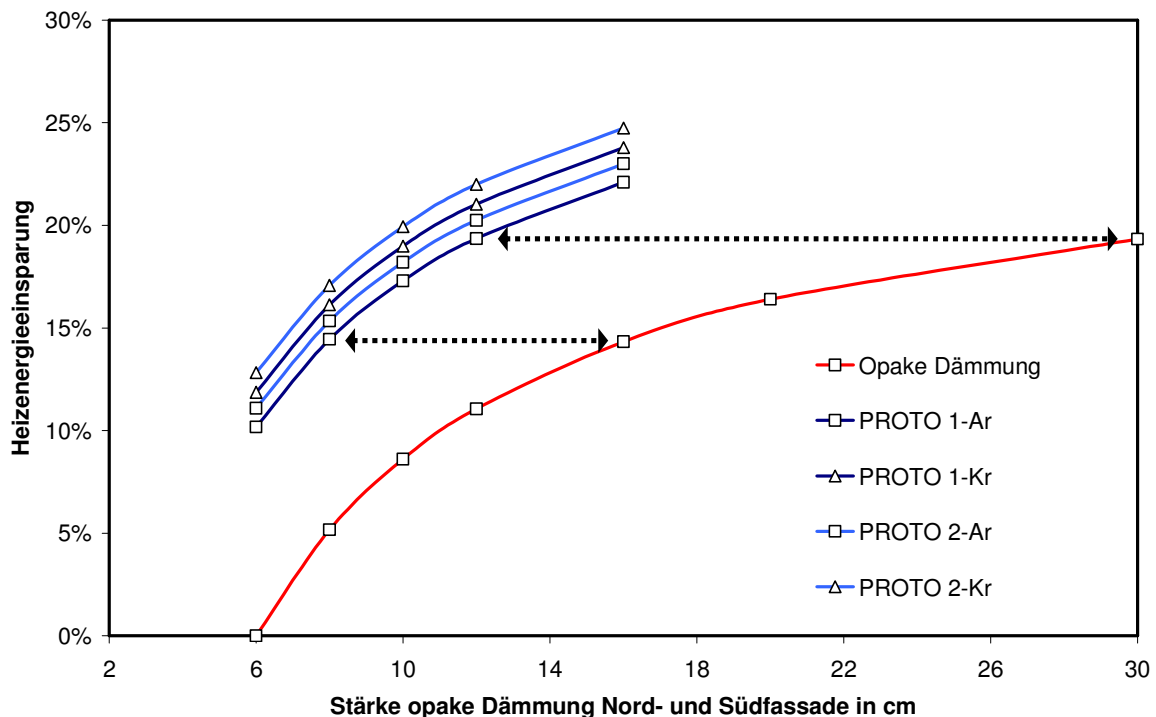


Abbildung 3-35: Berechnete Heizenergieeinsparungen bei opaken und hybriden Dämmmaßnahmen bei einem 30%-igen TWD-Anteil der Südfassade in Abhängigkeit der Stärke der opaken Dämmplatten. Als Referenz gilt eine opake Dämmung mit einer Stärke von 6 cm.

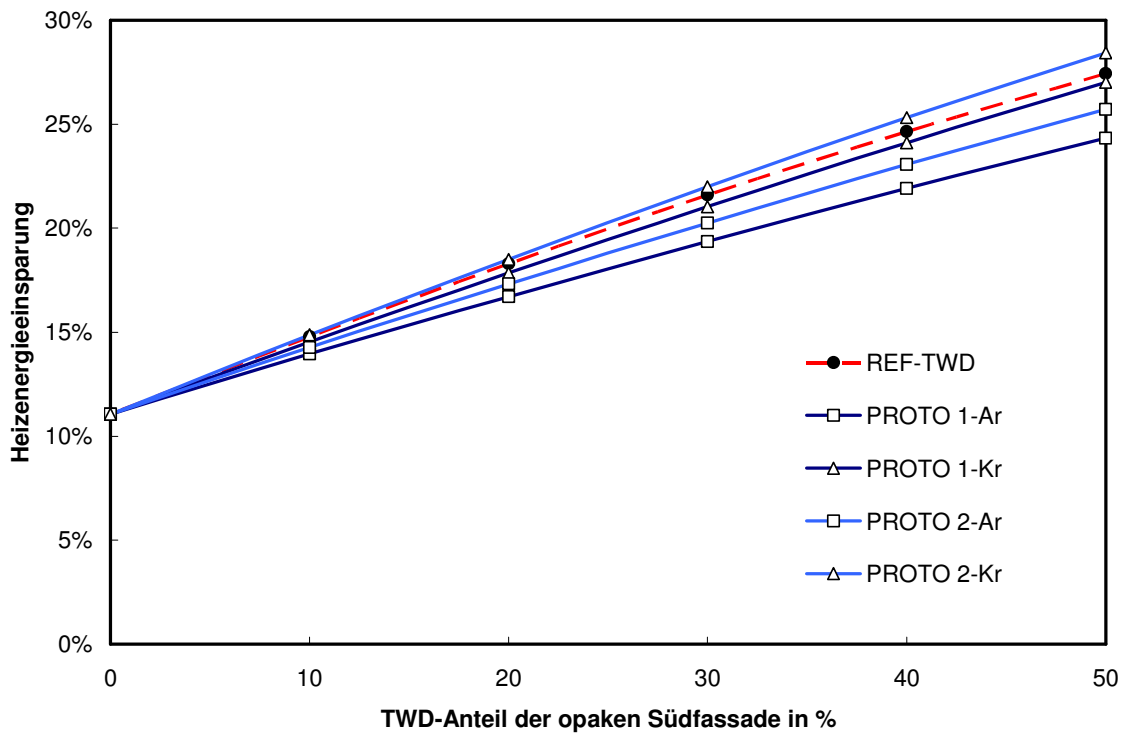


Abbildung 3-36: Berechnete Heizenergieeinsparungen mit TWD-Prismenverglasungen und Referenz-3fach-Verglasung in Abhängigkeit von der Fassadenbelegung. Die opake Dämmstärke beträgt bei den Simulationen 12 cm.

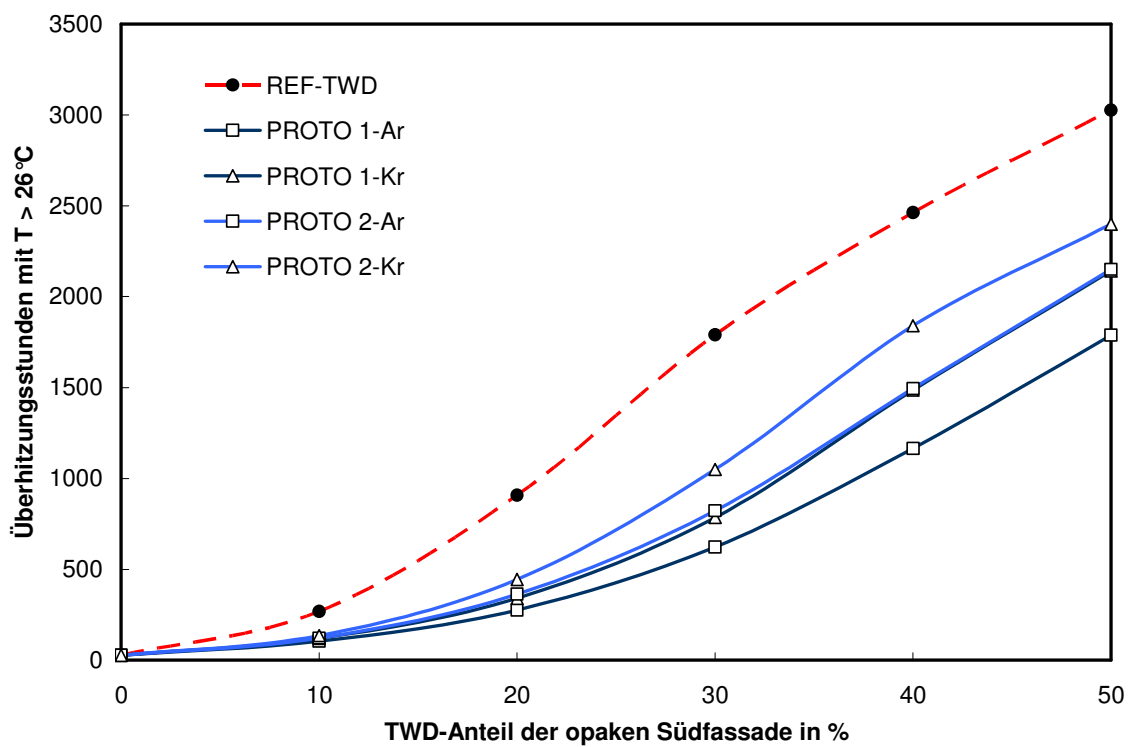


Abbildung 3-37: Überheizungsstunden mit Prismenverglasung und Referenz 3fach-Verglasung in Abhängigkeit der Fassadenbelegung. Die opake Dämmstärke beträgt bei den Simulationen 12 cm, die Luftwechselrate im Sommer 0.8 h^{-1} .

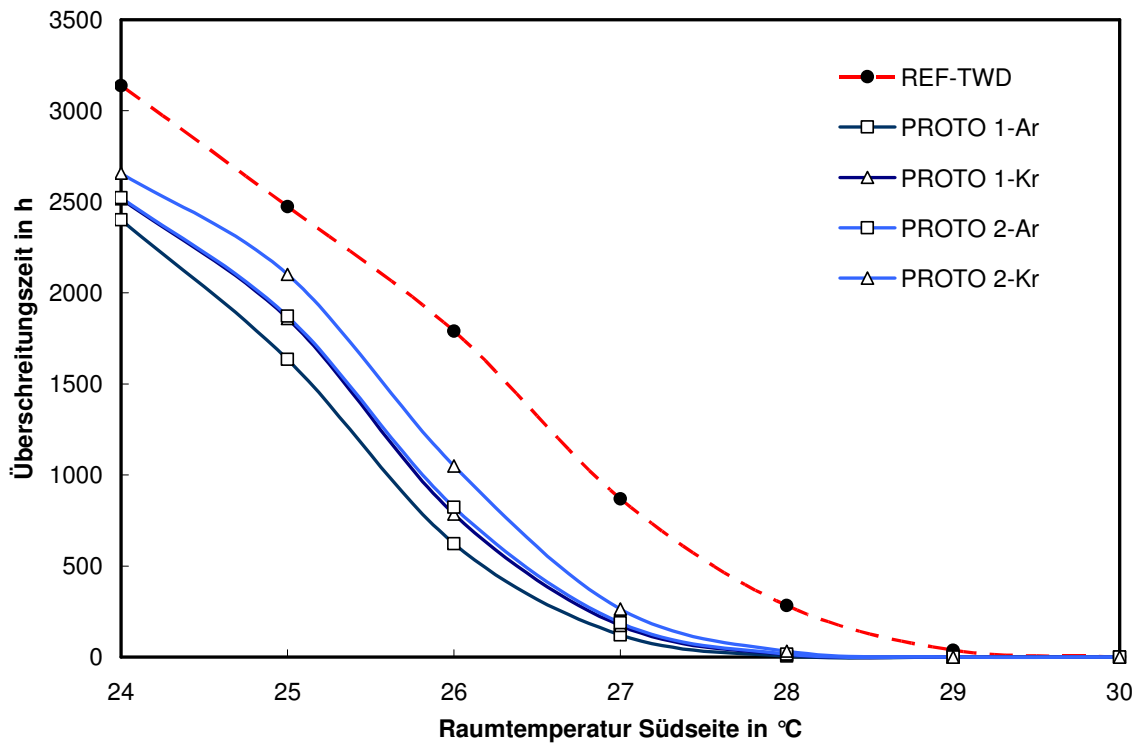


Abbildung 3-38: Überschreitungszeit vs. Raumtemperatur bei einer Fassadenbelegung von 30%. Die opake Dämmstärke beträgt bei den Simulationen 12 cm. Die Luftwechselrate im Sommer 0.8 h^{-1}

4 Herstellung der strukturierten Folie (AP4)

Anhand der Ergebnisse der Voruntersuchungen an Materialien und der optischen Modellierung der prismatischen Struktur wurden der Aufbau und das Design der Folie festgelegt.

Die Anforderungen an die Folie und die entsprechenden Eigenschaften die bei der Definition berücksichtigt wurden sind in **Tabelle 4-1** zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Anforderungen und entsprechende Eigenschaften die bei der Definition der Folienkonfiguration berücksichtigt wurden

Anforderung	Eigenschaften
Gute Haftung am Dichtstoffmaterial der Verglasung	Folienmaterial und -stärke, Oberflächenbeschaffenheit
Geeignetes Schrumpfverhalten	Folienmaterial und -stärke
Hohe visuelle und solare Transmission	Folienmaterial (Brechungsindex und Absorptionsgrad)
Gezielte Schaltung der Transmission	Folienmaterial (Brechungsindex) und Prismenwinkel
Vermeidung von Beugungseffekten	Rillenabstand der Prismen
UV-Beständigkeit	Kosmetik der Folie

Die prismatisch strukturierte Verbundfolie (Acrylharz auf PET-Substrat, mit zusätzlicher UV-Schutzbeschichtung) hat eine Gesamtdicke von ca. 150 μm und eine Rillenteilung von 100 μm .

Um die Effektivität der Schaltung der mikrostrukturierten Prismenfolie zu überprüfen, wurde für den Prototyp die Geometrie einer am ISFH schon vorhandenen Prismenplatte übernommen. Damit konnten im Rahmen von Vergleichsuntersuchungen die Schaltungsmechanismen von makroskopischen und mikroskopischen Strukturen direkt verglichen werden (s. Kap. 7.1).

Eine Optimierung der Geometrie um gezielte Ergebnisse zu erreichen (z. B. eine anwendungsangepasste Sonnenschutzwirkung, wie im Kapitel 3.1 gezeigt wurde), kann nach Projektabschluss aufgrund der erfolgreichen experimentellen Validierung der Modelle bei der Herstellung der nächsten Folien berücksichtigt werden.

Die Folie wurde von der Firma Fresnel-Optics mit den angefragten technischen Spezifikationen über ein kontinuierliches Heißprägverfahren hergestellt und in Form einer 700 m Rolle mit einer Breite von 660 mm geliefert.

Nach Herstellerangaben wurde bei der Fertigung eine maximale Verrundung der Kanten von 2 Mikrometer und eine Oberflächengenauigkeit bis in den Nanometerbereich (RMS < 15 nm) gewährleistet.

Die Geometrie und die sehr gute Konturtreue der Prismenfolie (Dimensionen, Winkel und Kantenrundung) wurden mit Rasterelektronenmikroskop am ISFH überprüft (s. **Abbildung 4.1**)

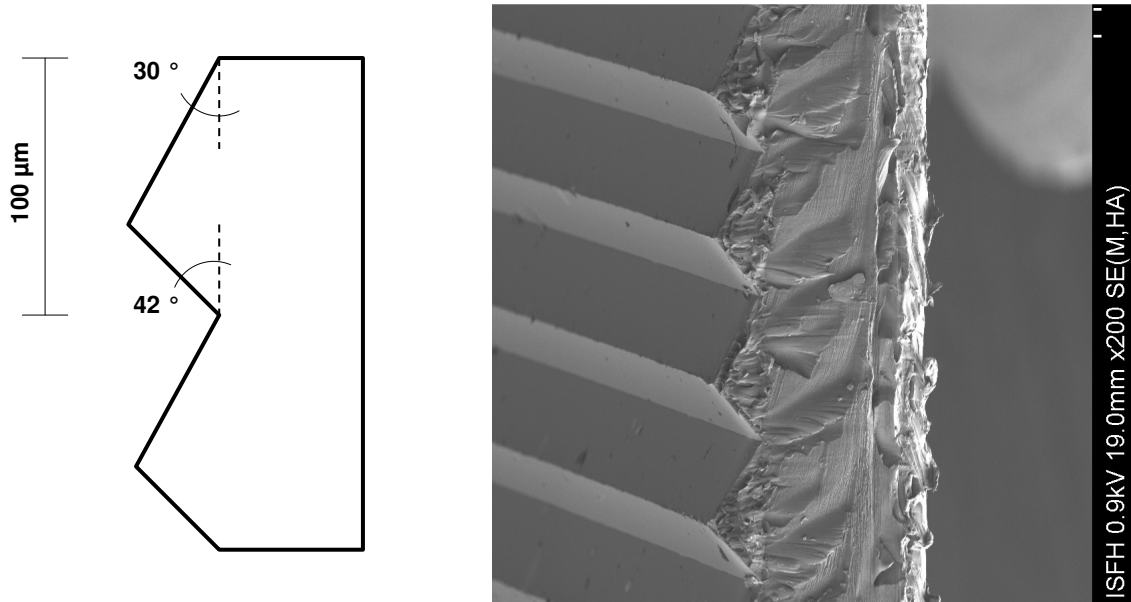


Abbildung 4-1: Geometrisches Modell der Folie (l.) und Rasterelektronenaufnahme des Prototypen (r.)

Die ursprünglich geplante Erweiterung des Folienformates für die Fertigung von höheren Verglasungen (aufgrund des Herstellungsverfahrens entspricht die Breite der Folie der Höhe der Verglasung) konnte nicht realisiert werden.

Die amerikanische Firma REFLEXITE (Hersteller der Folie und Mutterfirma unseres Projektpartners Fresnel Optics) ist entgegen der Zusage zum Zeitpunkt des Projektantrags technisch noch nicht in der Lage, mikrostrukturierte Folien mit fensterüblichen Abmessungen zur Verfügung zu stellen. Die aktuellen Fertigungsmöglichkeiten betragen in der Breite nur 175 mm mehr als die momentan eingesetzte Folie mit einer Breite von 660 mm. Aus der Untersuchung an einer nur geringfügig breiteren Folie sind keine neuen Erkenntnisse zu erwarten.

Die Kooperation mit alternativen Herstellern für die Fertigung großflächiger strukturierter Folien innerhalb der Projektlaufzeit wurde aus zeitlichen Gründen ausgeschlossen. Anhand einer Marktuntersuchung wurde außerdem vom ISFH festgestellt, dass Folien mit vergleichbaren Eigenschaften zu ähnlichen wie den von Reflexite angebotenen Kosten zum heutigen Stand nicht hergestellt werden können.

5 Verglasungsintegration (AP5)

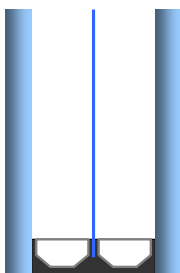
Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird die Fertigung der Verglasungsprototypen mit thermischer Einspannung und der Prüfung ihrer Systemtauglichkeit von der Fa. Glasfischer durchgeführt.

5.1 Fertigung der Prototypen

Im Rahmen der Voruntersuchungen hat der Antragsteller sein standardisiertes Integrationsverfahren über Wärmebehandlungsprozess von glatten, beschichteten PET-Folien an strukturierte Folien angepasst. Dabei wurden unter Berücksichtigung der Haftung, Temperaturbeständigkeit und optimalen Spannung der Folie kleinflächige Muster (bis maximal 350 x 500 mm) mit der Fertigungsqualität von Standard-Verglasungen hergestellt.

Ziel dieser Untersuchungen war die Überprüfung, ob die Fertigungs- Einstellungen an die Integration der Prototypfolie mit einem vergleichbaren Aufbau, jedoch abweichenden Eigenschaften (geometrische Struktur und mechanisches Schrumpfverhalten) übertragbar sind und großformatige Prototypen hergestellt werden können.

Mit einer gezielten Optimierung des Verfahrens ist es gelungen, sowohl kleinflächige Prototypen für die Laborcharakterisierung als auch großformatige Prototypen in unterschiedlichen Aufbauten für die Langzeituntersuchungen an transparenten Wärmedämm-Modulen (**Abbildung 5.1**) und Tageslichtelementen (**Abbildung 5.2**) mit vergleichbarer Fertigungsqualität herzustellen.

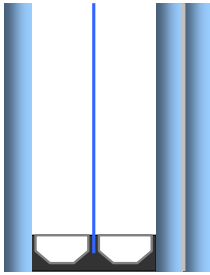


Aufbau:

4mm Float /Prismenfolie/ 4mm Float



Abbildung 5-1: Aufbau und Ansicht eines großformatigen Prototyps (840 x 670 mm) für den Einsatz als TWD-Modul



Aufbau:

4mm Float /Prismenfolie/ 8 mm VSG
mit lichtstreuender Folie



Abbildung 5-2: Aufbau und Ansicht eines großformatigen Prototypes (830 x 570 mm) mit integrierter lichtstreuender Innenglasscheibe für den Einsatz als Lichtelement

Die maximalen Abmessungen der Folien, die im Laufe des Projektes mit einer faltenfreien Einspannung vom Antragsteller in die Verglasungen erfolgreich integriert wurden betragen 1800 x 670 mm (s. **Abbildung 5.3**).



Abbildung 5-3: Ansicht 2 großformatiger Prototypen (1800 x 670 mm)

5.2 Isolierglasbeständigkeit der Prototypen

Die Untersuchungen zur Isolierglasbeständigkeit der Prototypen wurden in Auftrag an die Kömmerling Chemische Fabrik in Pirmasens gegeben, einem international führenden Hersteller von hochwertigen Kleb- und Dichtstoffen für die Verglasungsindustrie, der seit langem mit der Firma Glasfischer zusammenarbeitet. Bei diesen Untersuchungen ging es um die Fragestellung, ob die Prototypen die Anforderungen an Mehrscheiben-Isoliergläsern bezüglich ihrer Systemtauglichkeit erfüllen, damit ihre Funktion über eine wirtschaftlich angemessene Nutzungsdauer erhalten bleibt.

5.2.1 Feuchtigkeitsaufnahme und Gasdichtheit

Das Prüfverfahren basiert auf dem in EN 1279-6 /21/ beschriebenen Langzeitprüfverfahren, nach dem die werkseigene Produktionskontrolle Audit-Prüfungen an Isolierglasscheiben durchführt. Das Verfahren wird im seinem Ablauf folgenderweise ergänzt, um eine Vergleichbarkeit mit den EN 1279-2 und -3 /22/, /23/ zu ermöglichen:

- Bestimmung der Trockenmittel- Vorbeladung, Messung der Gaskonzentration und Dicke an 2 Proben je Serie im Anlieferungszustand.
- Belastung der Proben in einer Klimakammer bei konstanten Prüfbedingungen (58°C und 95% relative Luftfeuchte) über einen Zeitraum von jeweils 3, 6 und 12 Wochen.
- Bestimmung der Trockenmittel-Beladung, Messung der Gaskonzentration und Dickenzunahme (Aufweitung) an 2 belasteten Proben, je Serie nach dem ersten Beanspruchungszyklus.
- Bestimmung der Gaskonzentration an 2 belasteten Proben, je Serie nach dem zweiten und dritten Beanspruchungszyklus.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde von der Fa. Glasfischer der Einfluss der folgenden Parameter bei der Fertigung untersucht:

- Primär- und Sekundärdichtstoff.
- Verschlussart der Gasfüllbohrungen.
- Aufbringungsart der Dichtstoffe an den kritischen Stellen (z. B. an der Abstandhalterstoßstelle).
- Fertigungs- und Schnittkante der Folie bzw. deren Position in der Prüfscheibe
- Breite des Abstandhalters.
- Einstand des Abstandhalters.
- Pressdauer bei der Fertigung der Scheiben.

Bezüglich der Dickenzunahme zeigten alle Serien keine außergewöhnliche und für Probenaufbauten in diesen Gesamtdicken (3fach-Verglasungen) normale

Aufweitung. Eine Überbeanspruchung des Randverbundes konnte daraus nicht abgeleitet werden.

Für die Bewertung der Feuchtigkeitsaufnahme bezieht man sich auf den Faktor I_{req} , einen rechnerischen Wert für die Beladung des Trockenmittels nach der Klimalagerung, der kleiner oder gleich 8.5% sein muss. Die Vorgaben wurden bei allen untersuchten Testscheiben deutlich unterschritten. Anhand dieser Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass Proben in gleicher Fertigungsqualität die Prüfung nach EN 1279-2 bestehen werden.

Für die Bewertung der Gasdichtheit der Prototypen sind insbesondere die Ergebnisse nach 6 Wochen Beanspruchung von Bedeutung. Aus Erfahrung der Fa. Kömmerling sind nämlich diese Werte etwa vergleichbar mit den Anforderungen der EN 1279-3. Von den Prototypen wurde als bestes Ergebnis eine Abnahme der Gaskonzentration von 2.2% gegenüber einem maximal zulässigen Wert von 1% erreicht.

Die Prüfung zur Isolierglasbeständigkeit ist nach EN 1279-3 ausschließlich für 2fach-Verglasungen mit Standard-Aufbauten (4 mm Float/12 mm SZR/4mm Float) normiert und kann aus sachlichen Gründen nicht auf eine 3fach-Verglasung übertragen werden. Aufgrund einer Verdoppelung der Grenzflächen Scheibe/Dichtstoff ist bei 3fach-Verglasungen mit einer höheren Abnahme der Gaskonzentration zu rechnen (theoretisch doppelt so hoch, d. h. 2%). Dieses Thema ist in der Isolierglasbranche aktuell in der Diskussion und umstritten, eine Aktualisierung der Normen ist momentan in Vorbereitung. Aus diesem Grund ist die Überschreitung des zulässigen Werts von 1% nicht als kritisch zu bewerten.

Im Rahmen eines umfangreichen Vergleichstests an Verglasungen mit unterschiedlichen Aufbauten (2fach, 3fach mit mittlerer Scheibe, 3fach mit mittlerer Folie, 3fach mit mittlerer strukturierter Folie) wurden mit den Prismenfolien-Prototypen Ergebnisse erzielt, die mit konventionellen Verglasungen vergleichbar sind.

Daraus kann man schließen, dass sich eine strukturierte Folie mit dem Aufbau und den Eigenschaften unserer Folie in eine Verglasung mittels thermischer Einspannung integrieren lässt und sich bezüglich der Isolierglasbeständigkeit wie eine Standard-3fach-Verglasung verhält.

5.2.2 Fogging-Test

Aufgrund der nicht konventionellen Beschaffenheit der Folie und einer mangelnden Erfahrung mit ähnlichen Aufbauten wurden die Verglasungsprototypen einem zusätzlichen Fogging-Test nach EN 1279-6 Anhang C ausgesetzt.

Bei der Prüfung kann festgestellt werden, ob an den Glasoberflächen, die an den Scheibenzwischenraum grenzen, eine aufgrund von aus der Folie freigesetzter flüchtiger Stoffe unzulässige Kondensation auftritt.

Das Freisetzen gasförmiger Stoffe wird erreicht, indem die zu untersuchende Verglasungskomponente bei einer Temperatur zwischen 50 und 60°C erhitzt wird, die Kondensation wird hingegen durch Abkühlen an einer Stelle der gegenüberliegenden Glasoberfläche erzielt.

Die zu prüfenden Einheiten werden nach Belastung im Durchlicht- und Auflichtverfahren auf Interferenzerscheinungen und Streulicht in einem Beobachtungskasten untersucht (s. **Abbildung 5.4**).

Die Untersuchung wurde von der Fa. Kömmerling an zwei Isoliereinheiten mit eingebauter Prismenfolie (350 x 500 mm) durchgeführt.

Aufgrund des asymmetrischen Aufbaus der Folie wurden die Prototypen in Abhängigkeit der Einbaulage getestet.



Abbildung 5-4: Prüfkammer (l.) und Beobachtungskasten (r.) der Fa. Kömmerling

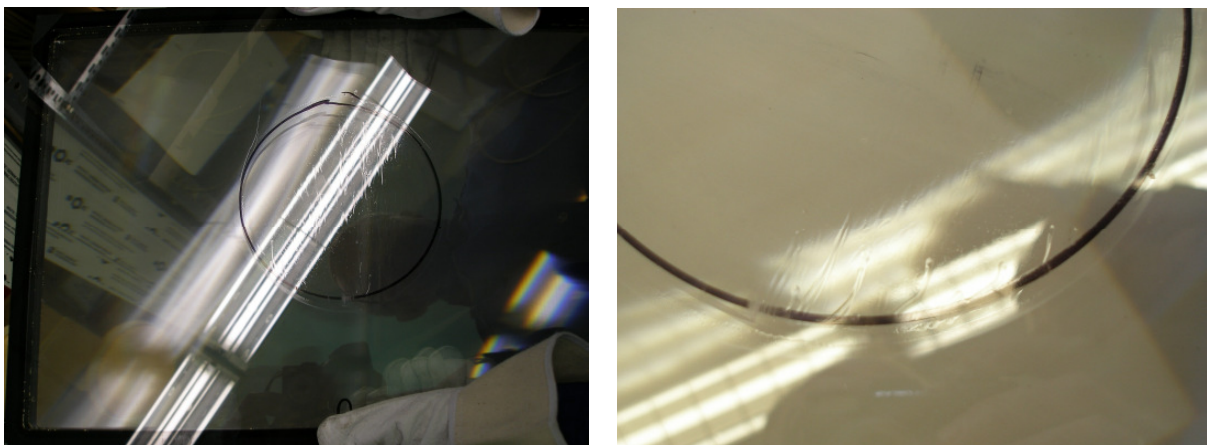


Abbildung 5-5: Fogging- Erscheinungen nach Belastung der Probe (klare Schlieren)

Dabei stellte sich heraus, dass eine starke Kondensatbildung auf der Innenseite der Außenscheibe stattfindet (s. **Abbildung 5-5**). Bei der chemischen Analyse des

Kondensats wurde „Irgacure® 184“ als Hauptbestandteil identifiziert, ein bekannter vergilbungsbeständiger Photoinitiator zur Herstellung von strahlungshärtbaren Beschichtungen, wie er auch bei der Prismenfolie eingesetzt wird.

Als Maßnahme zur Vermeidung der Kondensatbildung wurde eine Konditionierung der Folie vor dem Einbau geprüft. Die Proben wurden am ISFH in einem Klimaschrank bei konstanten Bedingungen (Lufttemperatur 50°C und relative Luftfeuchte 50%) über 12 Stunden konditioniert, sorgfältig eingepackt zum Antragsteller zugesandt und anschließend in Verglasungseinheiten integriert.



Abbildung 5-6: Keine Fogging-Erscheinungen nach Belastung der Probe mit konditionierter Folie

Der Fogging-Test wurde von den konditionierten Proben erfolgreich bestanden (s. **Abbildung 5-6**).

Für eine zukünftige Serienfertigung der Verglasungen wird zurzeit von der Fa. Glasfischer ein praxistaugliches Verfahren für die Konditionierung von großformatigen Folien untersucht.

6 Messung von Verglasungskomponenten und –systemen (AP6)

6.1 Optische Charakterisierung

Ziel der Untersuchung war die Charakterisierung sowohl der hergestellten mikrostrukturierten Prototypfolie als auch der Glasscheiben, die für den Aufbau der Prototypen potentiell einsetzbar sind.

Als beschichtete Gläser wurden Scheiben für konventionelle Wärmeschutzverglasungen (Standard low-e) und Scheiben mit erhöhter solarer Transmission, die im 3fach-Aufbau von Isolierglasfirmen speziell für die passive Solarenergienutzung entwickelt wurden und sich als optimale Kandidaten für die Anwendung der Prismenverglasung als transparente Wärmedämmung eignen, gemessen.

Als lichtstreuende Scheiben wurden die folgenden konventionellen und nicht-konventionelle Produkte getestet:

- **Strukturierte Glasscheiben:** Bei diesen ornamentalen Gläsern wird die Oberflächen chemisch (durch Ätzen mit Flusssäure), mechanisch (durch Sandstrahlen) oder mit einer Kombination der zwei Methoden mattiert. Abhängig von der Einwirkungsdauer der Säure beim Ätzen sowie Größe der Körnchen beim Sandstrahlen können die Mattierung und damit die optischen Eigenschaften der Scheibe variiert werden. Untersucht wurden verschiedene Proben, die mit beiden Verfahren strukturiert wurden.
- **Emaillierte Glasscheiben:** Dabei handelt es sich um thermisch vorgespannte Gläser, in deren Oberfläche während der Herstellung keramische Schichten durch unterschiedliche Verfahren eingebrannt werden. Die Emaille besteht aus einem Glasfluss und einem Farbkörper, damit lassen sich durch eine Variation der Zusammensetzung (Farbe und Anteil der Farbkörper) sowie der Schichtdicke beliebige Muster fertigen und entsprechende optische Eigenschaften einstellen. Untersucht wurden drei Proben mit vollflächiger, farbneutraler Bedrückung unterschiedlicher Stärke
- **Verbundgläser mit integrierten transluzenten Folien:** Dabei handelt es sich um Gläser, die aus mindestens zwei Glasscheiben mit Zwischenlagen aus reißfesten Kunststofffolien wie Polyvinylbutyral (PVB), Ethylenvinylacetat (EVA) oder Polacrylat (PA) in Autoklavierprozessen bei Hitze und kontrolliertem Druck hergestellt werden. Standardmäßig werden transparente Folien verwendet, mit mattweißen, farbigen oder bedruckten Folien lassen sich aber beliebige optische Effekte erzielen. Untersucht wurden Proben mit unterschiedlichen Zwischenlagen bestehend aus einer bis vier farbneutralen (Weiß oder leicht Grau), transluzenten PVB-Folien.
- **Verbundgläser mit integriertem Glasgespinst:** Das kommerzielle Produkt besteht aus mindestens zwei Glasscheiben mit einem zwischenliegenden

Glasgespinst, dessen Glasfäden in bestimmten Winkeln übereinander gelagert sind. Die Verbundscheibe ist durch einen Randverbund nach außen hermetisch abgedichtet und lässt sich problemlos im Isolierglas weiter verarbeiten. Untersucht wurden vier Proben mit unterschiedlich starken Zwischenlagen von 0.5 bis 3 mm.

- **Aerogele:** Diese Materialien werden in Architekturbereich aufgrund ihrer hervorragenden Wärmedämmung eingesetzt. Bei transluzentem Aerogel wird die Dämmwirkung mit einer hohen diffusen Lichtdurchlässigkeit kombiniert, was für den Einsatz als Tageslichtelement vorteilhaft ist. Es liegt in Form von transluzenten Körnchen, die eine Größe zwischen 0.5 und 4 Millimeter haben, vor und kann als Füllmaterial zwischen Glasscheiben oder Kunststoffplatten verwendet werden. Untersucht wurden zwei selbst hergestellte Proben mit einer Schichtdicke von 10 mm und 20 mm.
- **Latentwärmespeichermaterialien (PCM):** Der Einsatz von PCM bei opaken sowie lichtdurchlässigen Beuteilen wird im Architekturbereich aufgrund seiner Wärmespeicherfunktion zur Steigerung des thermischen Komforts untersucht. Integriert als Innenscheibe in der Prototypverglasung könnte dieses Material das Auftreten sowohl von Blendungseffekten als auch von Spitzentemperaturen entschärfen. Die Kombination von saisonaler Verschattung (ISFH-Prismenplatte) und PCM wurde schon in der Praxis bei einem kommerziellen Produkt (GlassX@Crystal der schweizerischen Firma GlassX) eingesetzt, wobei die lichttechnischen Eigenschaften nicht im Vordergrund stehen. Im Projekt wurde eine selbstgebaute Probe bestehend aus einem mit 6 mm farbneutralem PCM gefüllten PMMA-Behälter getestet.

Durchgeführt wurden sowohl spektrometrische als auch goniophotometrische Messungen, die im folgenden Kapiteln dokumentiert werden.

6.1.1 Spektrometrische Messungen

Die Messungen an Prismenfolie und nicht-streuenden, beschichteten Glasscheiben wurden im solaren und infraroten Wellenlängenbereich mit den im Kap. 2.4 schon beschriebenen Spektrometer und Fourier-Interferometer durchgeführt. Für die Charakterisierung von dicken, lichtstreuenden Scheiben wurde ein zweites Spektrometer in Kombination mit einer Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 50 cm und einer Probenöffnung von 10 cm eingesetzt. Damit konnten seitliche Lichtverluste, die bei Messungen mit konventionellen Apparaturen aufgrund der Mehrfachreflexionen auftreten, berücksichtigt werden und die tatsächlichen Kennwerte bestimmt werden. Diese Messungen wurden ausschließlich im sichtbaren Bereich (380-780nm) durchgeführt.

Die Ergebnisse in Form von Transmissions- und Reflexionsspektren sind in den **Abbildungen 6.1 bis 6.7** dargestellt und für die Prismenfolie als integrale Werte in **Tabelle 6-1** zusammengefasst.

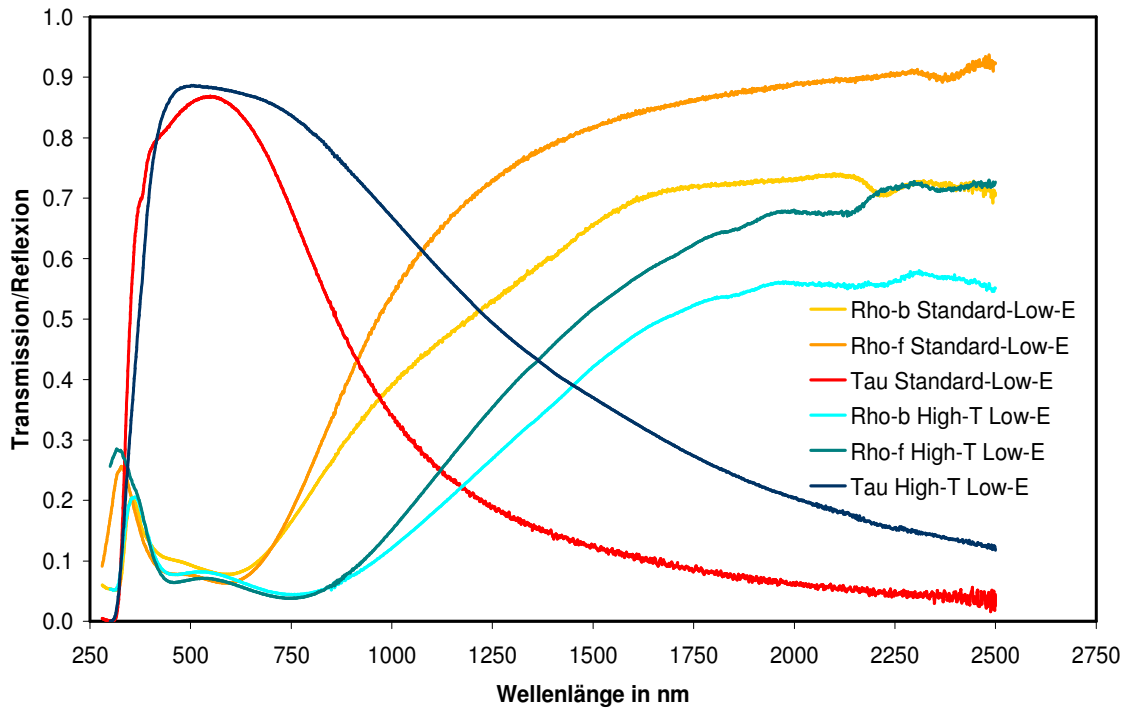


Abbildung 6-1 Gemessene UV-NIR Transmissions- und Reflexionspektren der ausgewählten low-e beschichteten Scheiben für den Einsatz in TWD-Modulen und Lichtelementen.

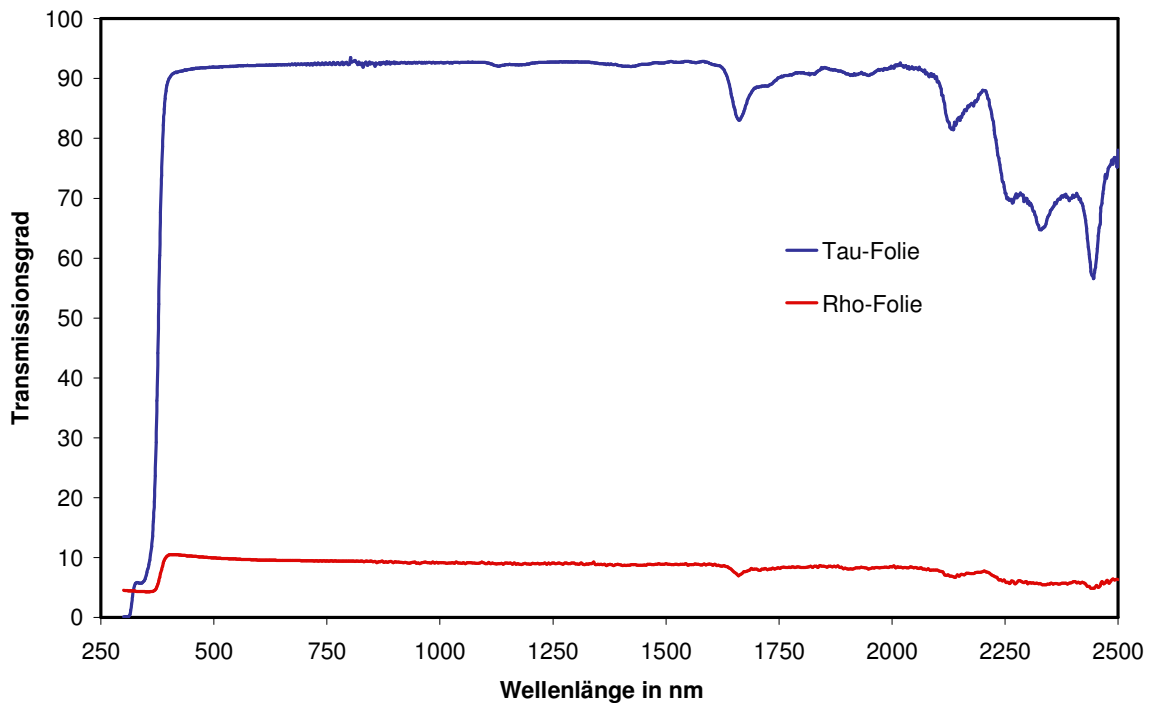


Abbildung 6-2: Gemessene IR-Transmissions- und Reflexionspektren der prismatisch strukturierten Prototypfolie

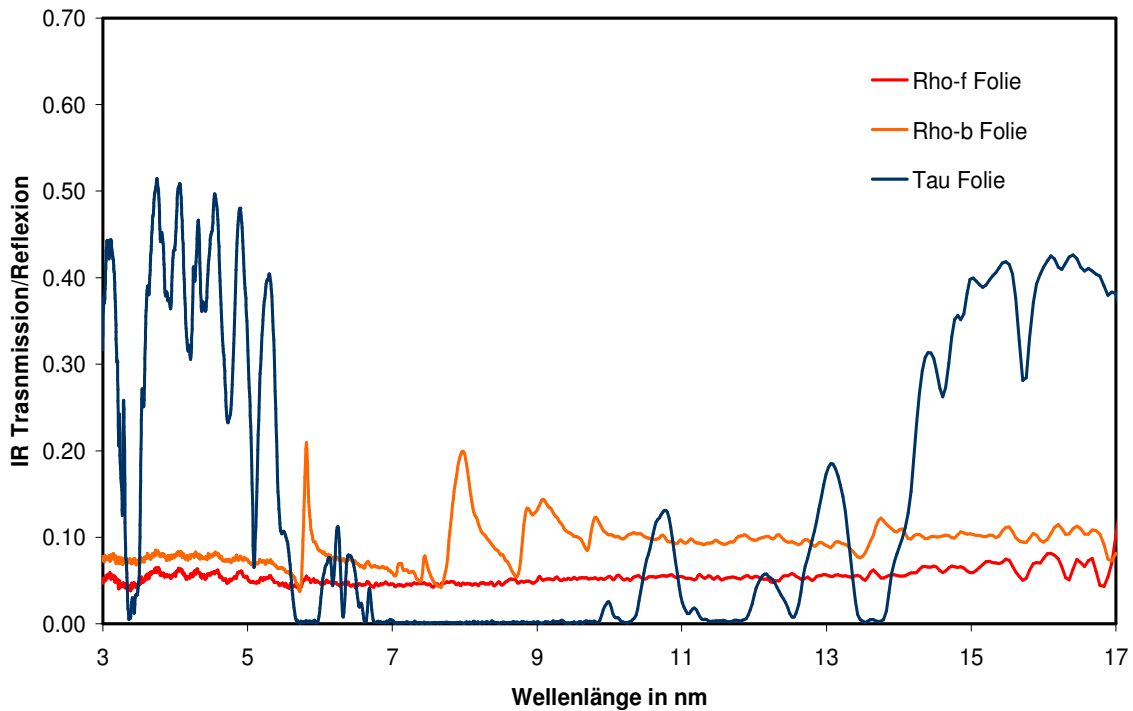


Abbildung 6-3: Gemessene IR-Transmissions- und Reflexionspektren der prismatisch strukturierten Prototypfolie

Tabelle 6-1: Aus spektrometrischen Messdaten berechnete optische Eigenschaften der prismatisch strukturierten Prototypfolie. Die Berechnungen wurden in UV-NIR Bereich nach EN 410 und im IR-Bereich nach den Gleichungen 2-4 und 2-5 (s. Kapitel 2.4) durchgeführt.

τ_V	τ_E	τ_{UV}	τ_{IR}	$\rho_{IR, f}$	$\rho_{IR, b}$	$\epsilon_{IR, f}$	$\epsilon_{IR, b}$
0.92	0.88	0.13	0.12	0.06	0.10	0.82	0.78

Für die low-e beschichteten Scheiben wurden nach EN 410 solare Transmissionen τ_E zwischen 0.58 und 0.72 sowie visuelle Transmissionen τ_V zwischen 0.80 und 0.88 berechnet, die weitgehend die Herstellerangaben bestätigen.

Bei der Folie zeigen die Ergebnisse im sichtbaren Bereich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Simulationsrechnungen. Die niedrigere solare Transmission lässt sich mit der UV-Sperre der zusätzlichen Schutzschicht erklären, die bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurde. Anhand der Voruntersuchungen an aufbaugleichen Verbundfolien (s. Kapitel 2.4) werden auch im infraroten Bereich die Erwartungen getroffen.

Die Ergebnisse bezüglich der lichtstreuenden Scheiben werden bei der Bewertung der goniophotometrischen Messungen näher analysiert.

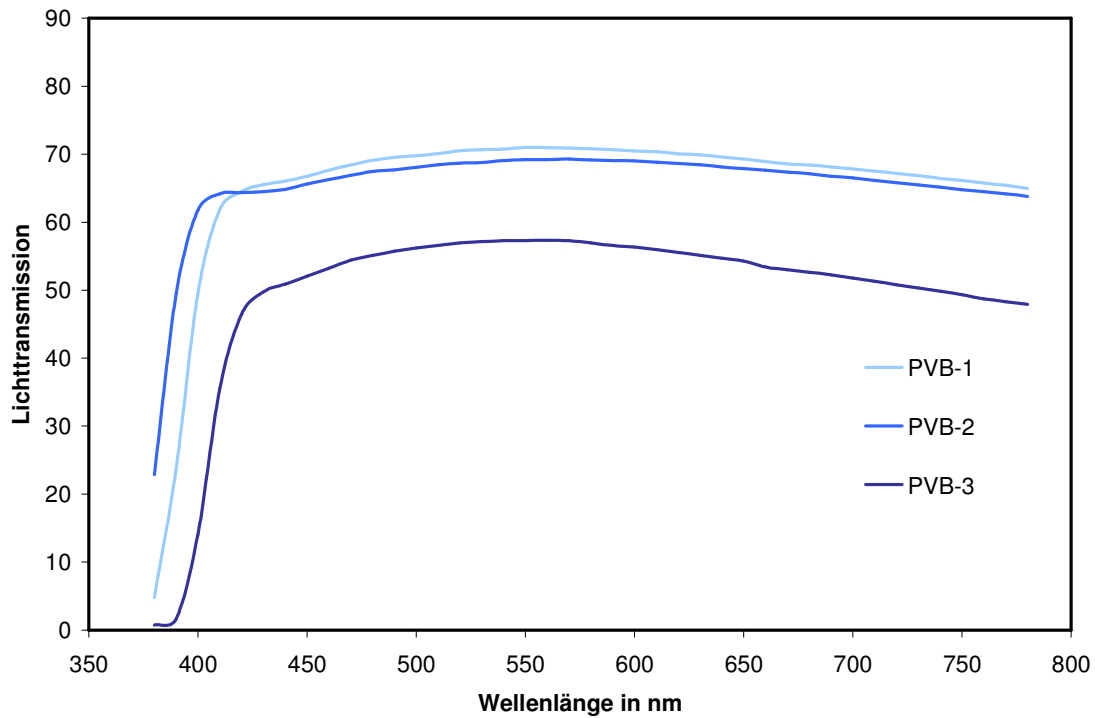


Abbildung 6-4: Gemessene Lichttransmission der untersuchten lichtstreuenden Scheiben mit integrierten PVB-Folien

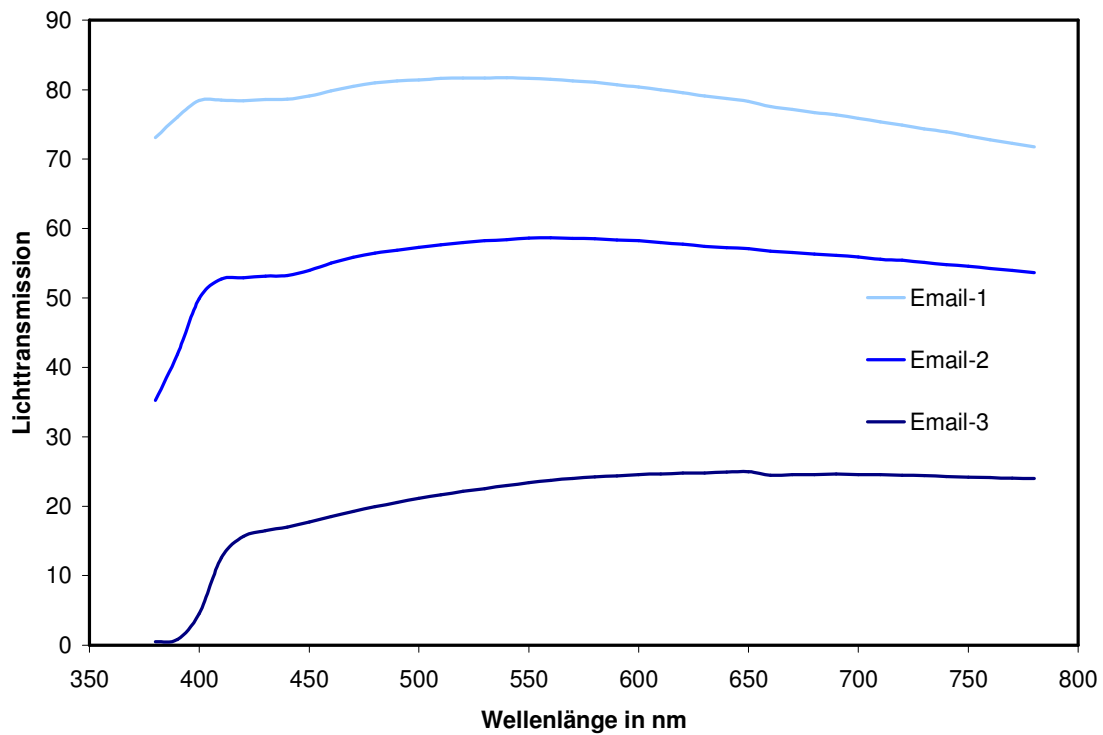


Abbildung 6-5: Gemessene Lichttransmission der untersuchten lichtstreuenden emaillierten Scheiben

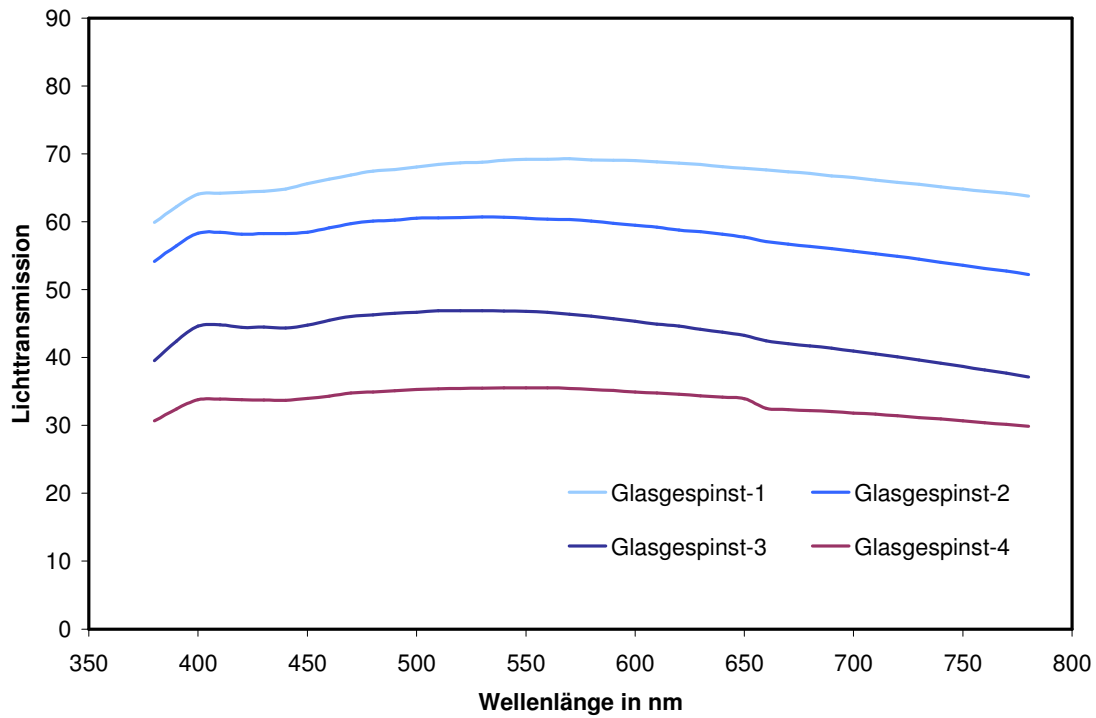


Abbildung 6-6: Gemessene Lichttransmission der untersuchten lichtstreuenden Verbundscheiben mit integriertem Glasgespinst

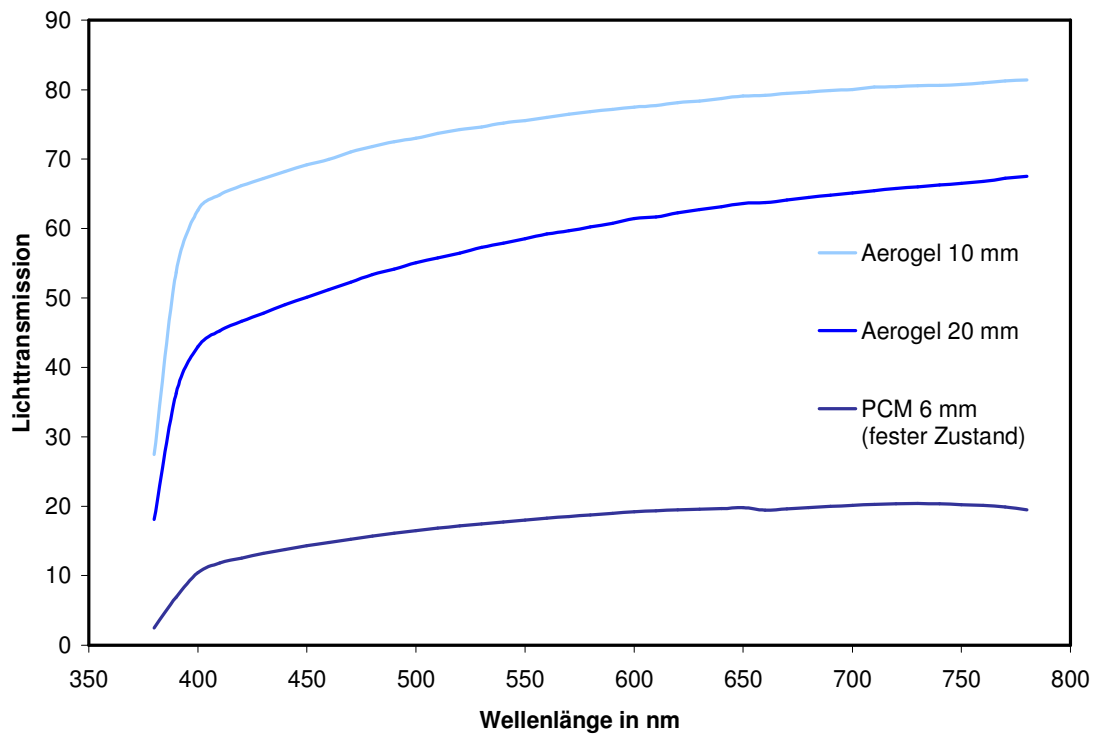


Abbildung 6-7: Gemessene Lichttransmission der untersuchten nicht-konventionellen lichtstreuenden Scheiben (Aerogele, PCM)

6.1.2 Goniophotometrische Messungen

Für die Beschreibung des optischen Verhaltens lichtstreuender Verglasungen ist neben der Bestimmung des Lichttransmissions- bzw. Lichtreflexionsgrads auch die Definition der Leuchtdichteverteilung auf der inneren Oberfläche notwendig. Die Art wie das einfallende Licht von der Verglasung gestreut wird, beeinflusst zum einen die Beleuchtungsverhältnisse im Innenraum und zum anderen die auftretenden Blendungseffekte durch Sonnen- und Tageslicht. Sie ist damit sowohl für die Energieeffizienz als auch für den visuellen Komfort verantwortlich.

Die Leuchtdichteverteilung ist durch die räumliche Verteilung des Leuchtdichtekoeffizienten q in Abhängigkeit vom Einfallswinkel $(\varphi_1; \theta_1)$ gegeben. Der Koeffizient q eines Materials in einer bestimmten Abstrahlrichtung $(\varphi_2; \theta_2)$ ist nach der Norm als Verhältnis der Leuchtdichte des Materials $L(\varphi_2; \theta_2)$ zur Beleuchtungsstärke $E(\varphi_1; \theta_1)$ auf dem Material definiert [24/:

$$q(\varphi_1, \theta_1, \varphi_2, \theta_2) = \frac{L(\varphi_2, \theta_2)}{E(\varphi_1, \theta_1)} \quad \text{Gl. 6-1}$$

Für die Messung des Leuchtdichtekoeffizienten der untersuchten Scheiben wurde das ISFH-Goniophotometer eingesetzt (s. **Abbildung 6-8**). Die am ISFH schon vorhandene Apparatur wurde im Rahmen des Projektes erweitert und automatisiert, um die Durchführung dieser zeitaufwendigen Messungen zu beschleunigen.

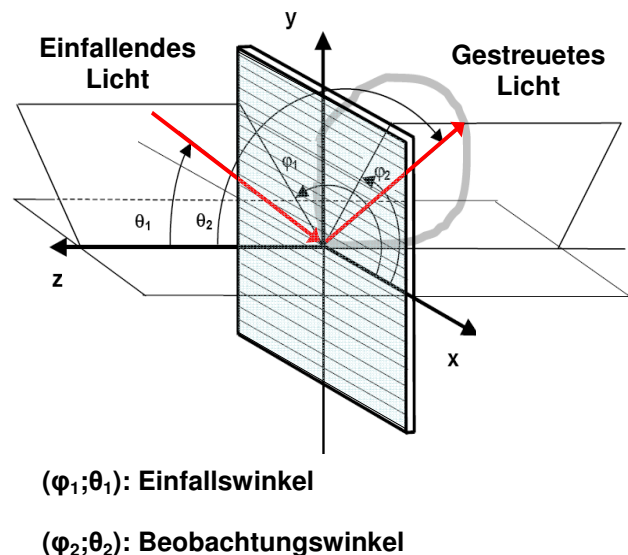


Abbildung 6-8: ISFH-Photogoniometer zur Bestimmung des Leuchtdichtekoeffizienten lichtstreuender Verglasungskomponenten (links) und schematische Darstellung des verwendeten Koordinatensystems (rechts)

Die Messergebnisse bezogen auf die Messkonfiguration $(\varphi_1; \theta_1) = (90^\circ; 0^\circ)$ und $(\varphi_2; \theta_2) = (90^\circ; \theta_2)$ sind in den **Abbildungen 6-9 bis 6-14** dargestellt.

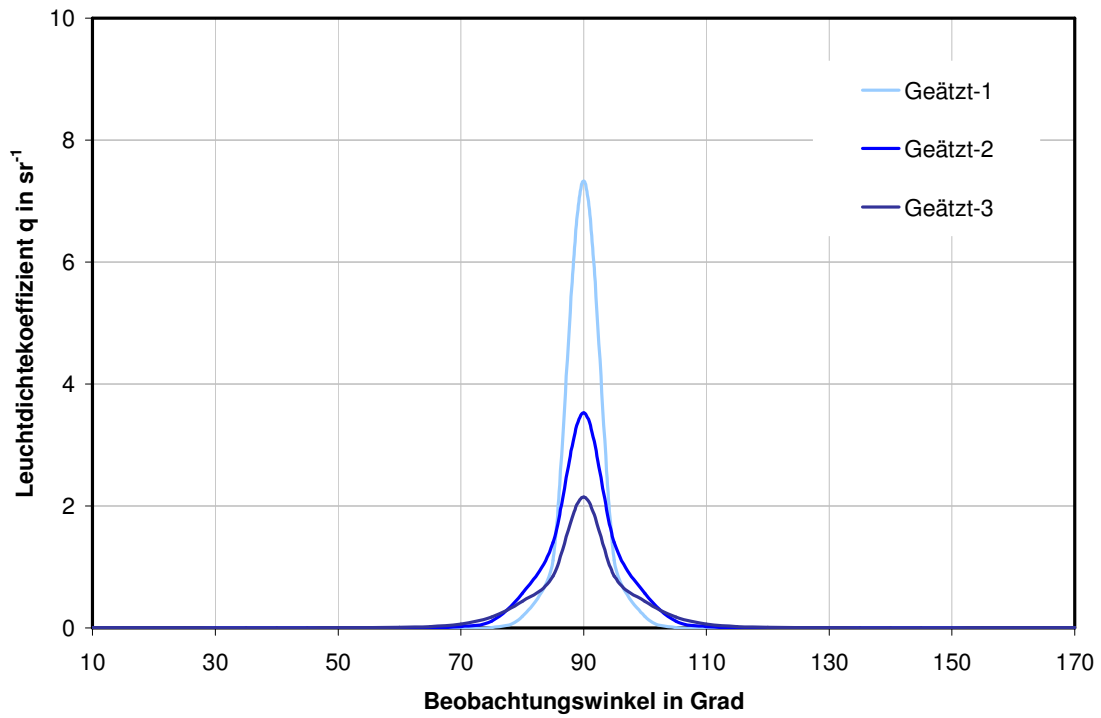


Abbildung 6-9: Gemessener Leuchtdichtekoeffizient oberflächenstrukturierter Glasscheiben

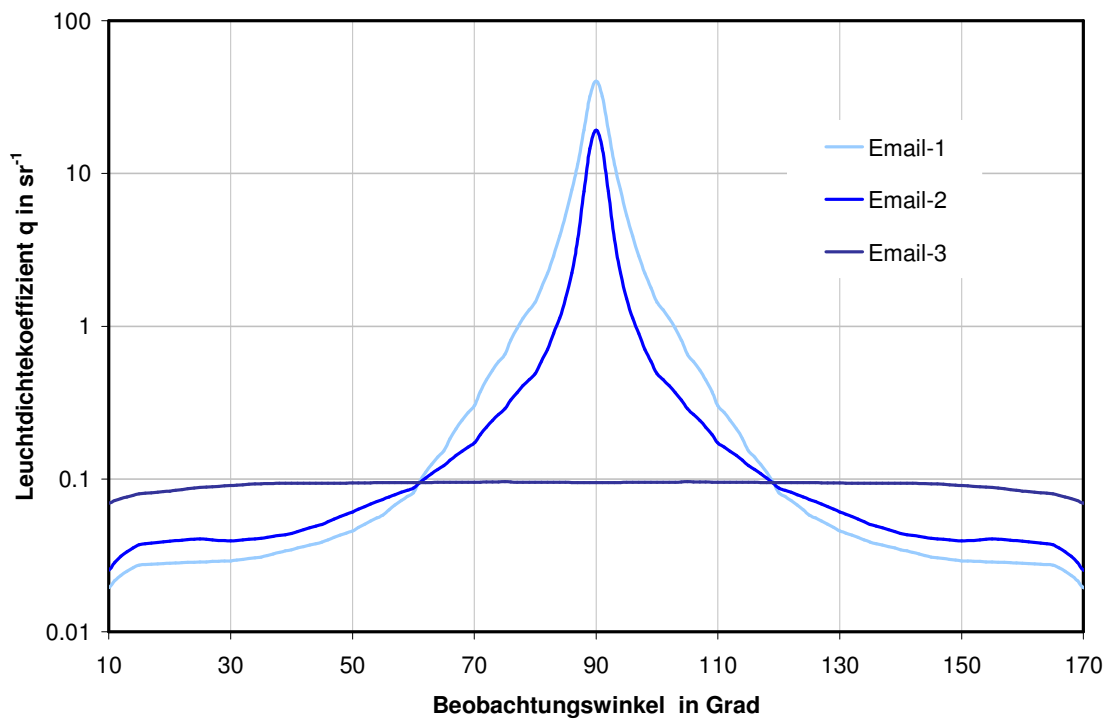


Abbildung 6-10: Gemessener Leuchtdichtekoeffizient emallierter Glasscheiben

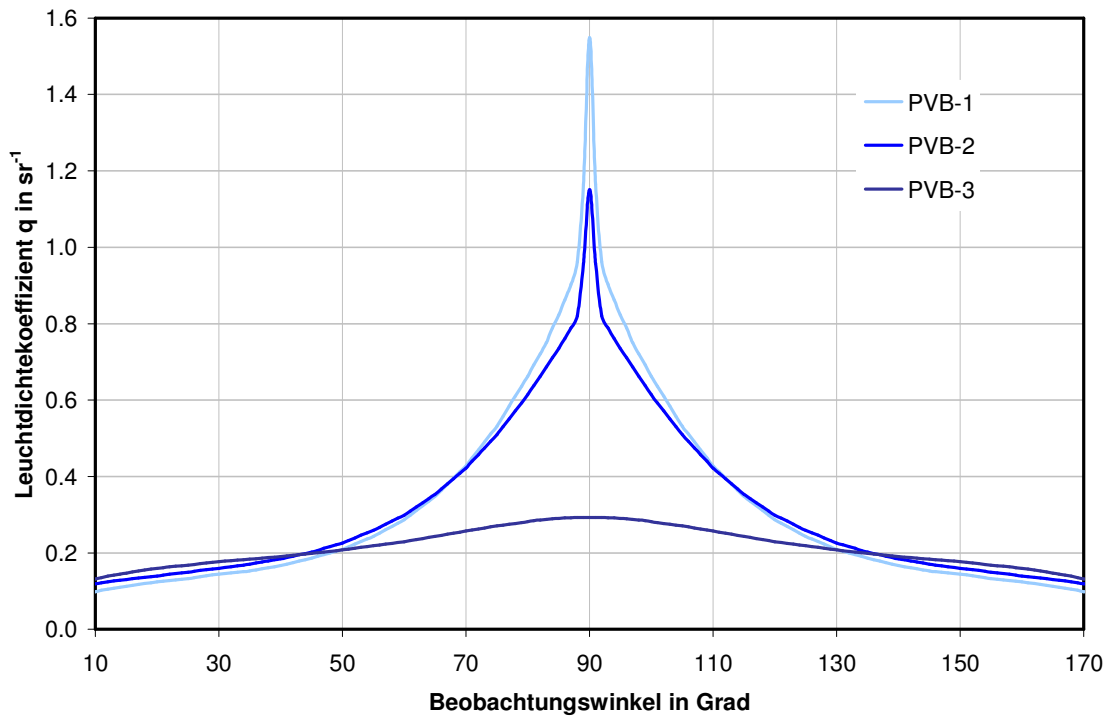


Abbildung 6-11: Gemessener Leuchtdichtekoeffizient von Verbundscheiben mit 1, 2 und 4 integrierten weißen transluzenten PVB-Folien

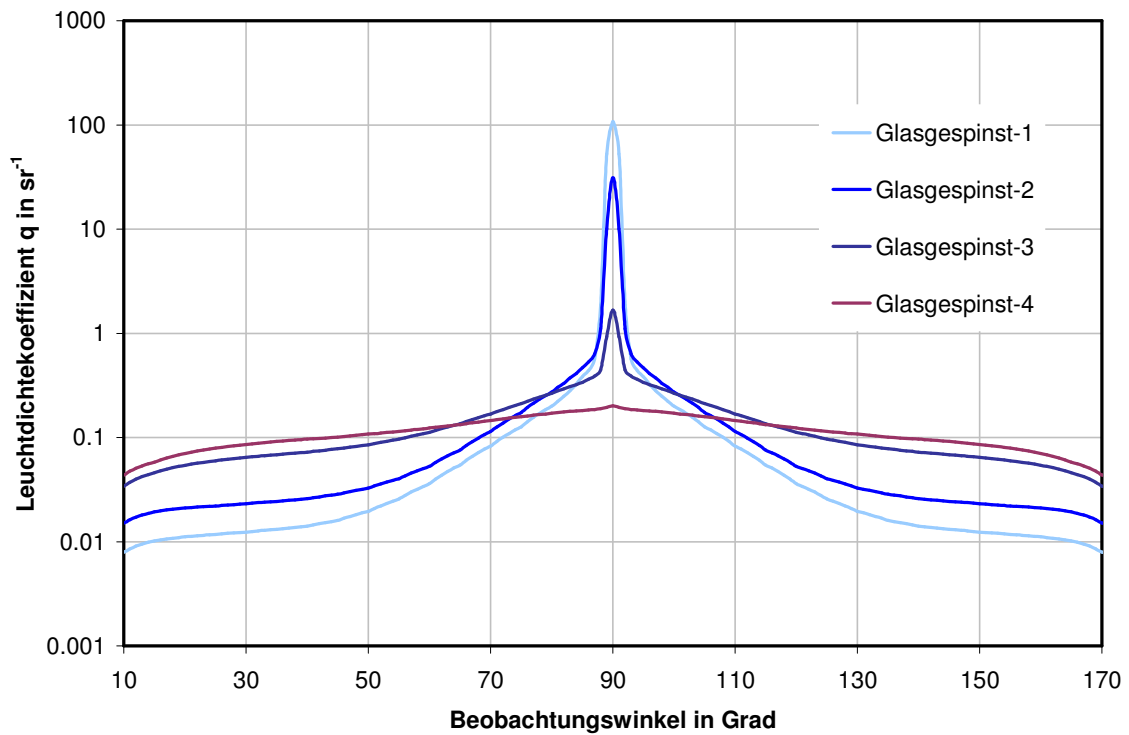


Abbildung 6-12: Gemessener Leuchtdichtekoeffizient von Verbundscheiben mit integriertem Glasgespinst

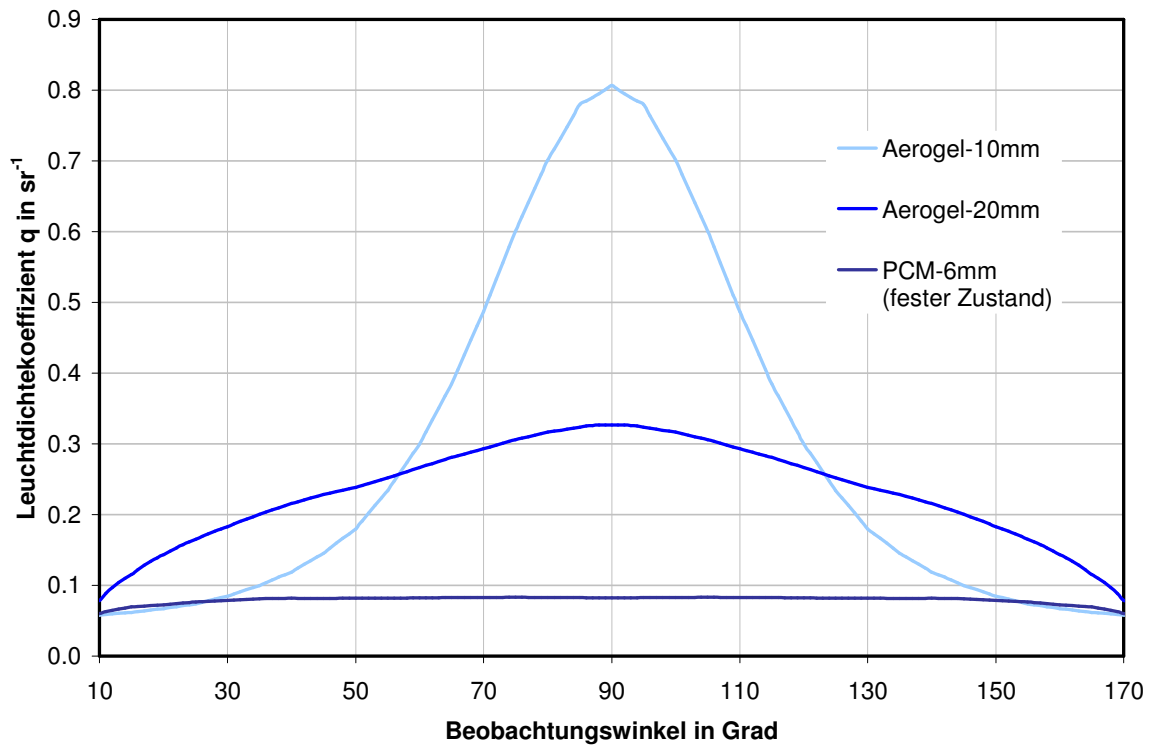


Abbildung 6-13: Gemessener Leuchtdichtekoeffizient lichtstreuender, nicht-konventioneller Scheiben

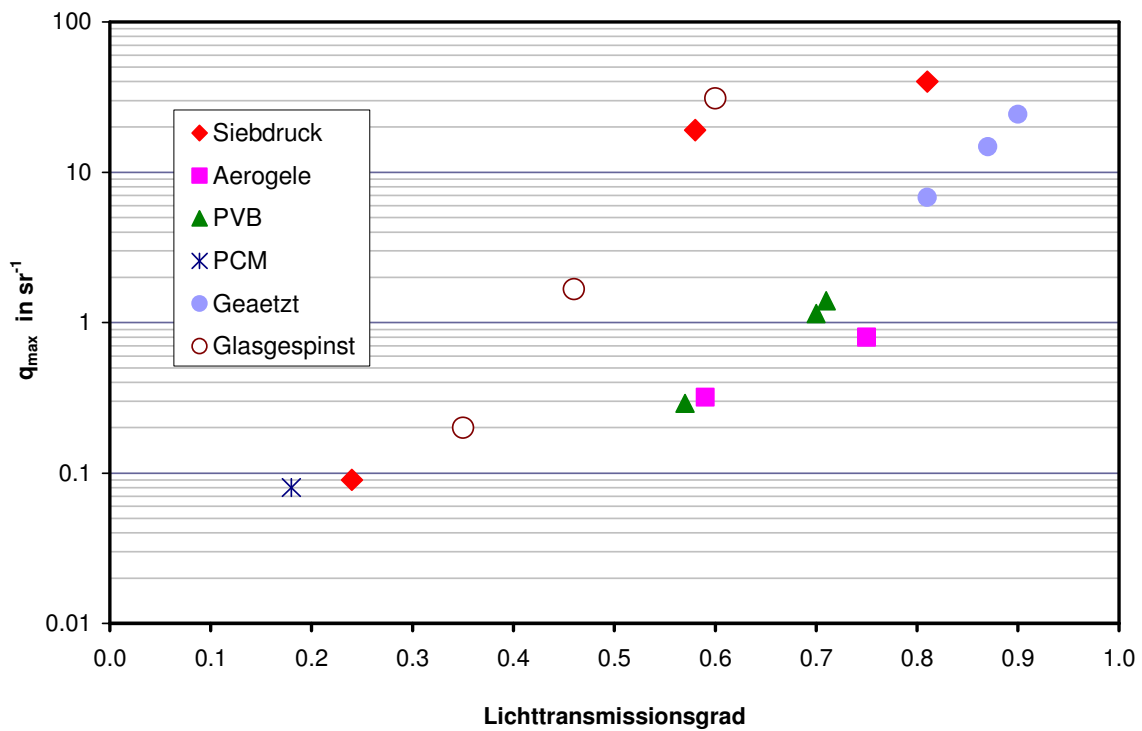


Abbildung 6-14: Gemessene lichttechnische Eigenschaften der untersuchten lichtstreuenden Scheiben für den Einsatz der Verglasung als Tageslichtelement. Zusammenfassende Darstellung.

Aus den Ergebnissen der optischen Charakterisierung der streuenden Scheiben lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen bezüglich des Einsatzes der Prototypen als Tageslichtelemente ziehen:

- Zur Vermeidung von visuellen Störungen wie spektrale Lichtzerlegung oder optische Verzerrung durch die Prismenfolie eignen sich schon einfache, oberflächenstrukturierte Mattscheiben wie sandgestrahlte oder geätzte Gläser. Dabei ist nur mit einer leichten Änderung der optischen Eigenschaften (sichtbaren und solaren Transmission) einer gesamten Verglasung im Vergleich zu dem Einsatz konventioneller Glasscheiben zu rechnen. Erkauft werden diese Vorteile durch das Auftreten von sehr hohen Leuchtdichten im Fensterbereich, sodass je nach Anwendung zusätzliche Blendschutzmaßnahmen benötigt werden
- Bei emaillierten Scheiben lassen sich bei der Herstellung die optischen Eigenschaften über einen sehr breiten Bereich steuern. Dadurch können in Abhängigkeit des verwendeten Musters nicht nur Lichtzerlegung und Verzerrung vermieden werden, sondern auch Blendungseffekte stark unterdrückt werden.
- Bei Verbundgläsern mit integrierten PVB-Folien oder Glasgespinst können im Vergleich zu oberflächenstrukturierten Scheiben auch die Leuchtdichten deutlicher reduziert werden. Aufgrund des Aufbaus ist aber bei beiden Systemen mit doppeltem Gewicht und Stärke zu rechnen.
- Nicht-konventionelle Produkte mit zusätzlichen Eigenschaften wie Aerogele oder Latentwärmespeicher können Leuchtdichten im Fensterbereich sehr effektiv reduzieren (insbesondere PCM) und stellen unter dem wissenschaftlichen Aspekt interessante Lösungen dar. Ihr Einsatz in der Praxis wird aber sehr kritisch bewertet und deswegen im Projekt nicht weiterverfolgt

Die Anschaffung von low-e beschichteten emaillierten Scheiben, die unserer Meinung nach die am besten geeigneten Produkte für die spezifische Anwendung darstellen, war innerhalb des geplanten Zeitraumes nicht möglich. Für die Fertigung der Prototypen wurden stattdessen Verbundscheiben mit PVB-Folien unterschiedlicher Eigenschaften verwendet. Die Ansicht der zwei untersuchten Verglasungen sowie die Ergebnisse der entsprechenden photogoniometrischen Messungen sind in den **Abbildungen 6-15** und **6-16** dargestellt.



Abbildung 6-15: Ansicht der untersuchten Verglasungsprototypen LICHT-2 (links) und LICHT-3 (rechts) für den Einsatz als Tageslichtelemente

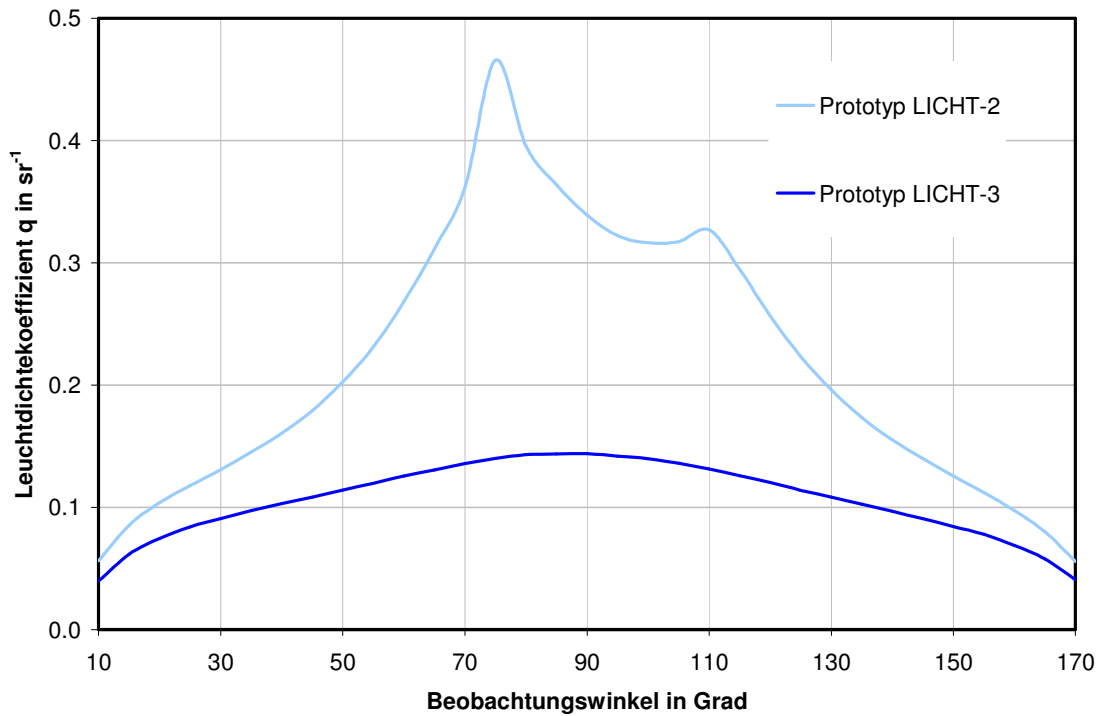


Abbildung 6-16: Gemessener Leuchtdichtekoeffizient der Verglasungsprototypen LICHT-2 und LICHT-3

6.2 Thermische Charakterisierung

Das energetische Verhalten der hergestellten Verglasungen wurde am ISFH experimentell getestet. Die entsprechende Messmethodik und die Messergebnisse an repräsentativen Prototypen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

6.2.1 Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)

Für die experimentelle Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades der Prototypen wurde der Prüfstand des ISFH verwendet. Die Apparatur, die wie ein Sonnenkollektor konzipiert ist, wird auf einem Nachführstand aufgebaut und ermöglicht damit die Outdoor-Messung komplexer Verglasungen unter beliebigen Einstrahlwinkeln (s. **Abbildung 6-17**).

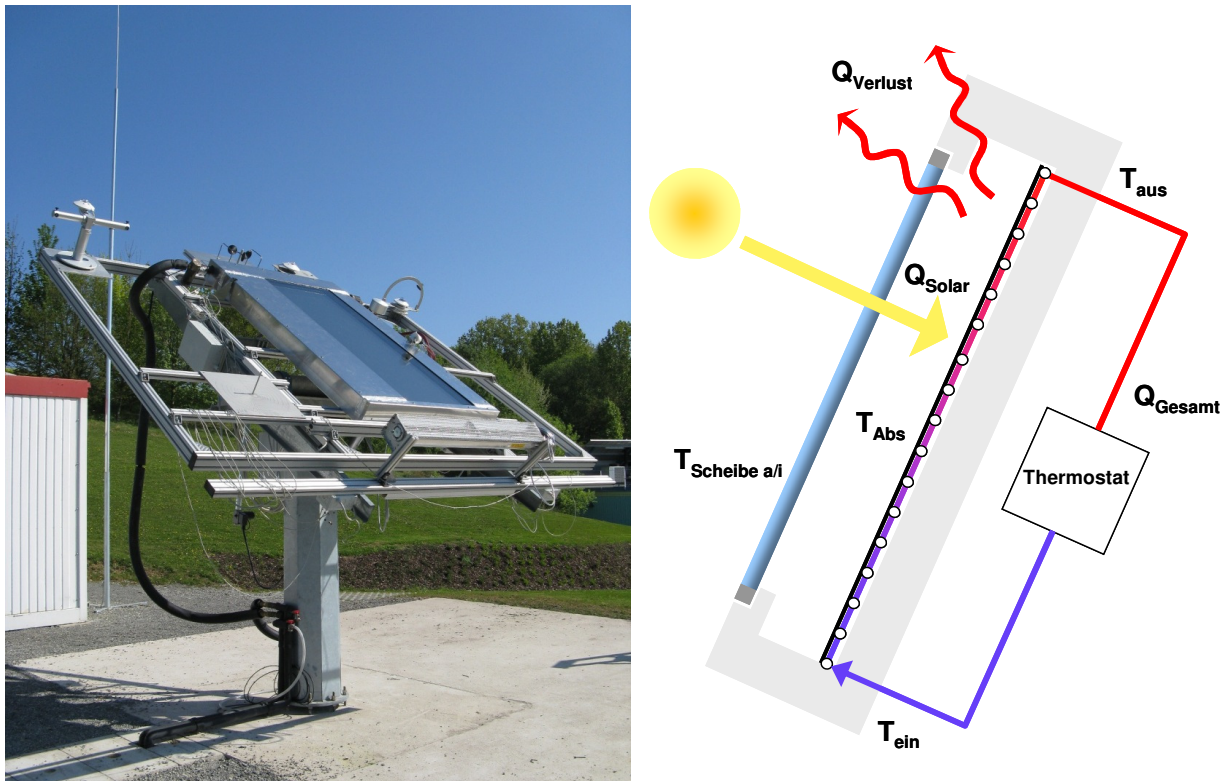


Abbildung 6-17: Ansicht des ISFH-Prüfstandes zur Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades (rechts) und schematische Darstellung des Messprinzips (links)

Die für die Auswertung notwendigen meteorologischen Daten (direkte und diffuse Bestrahlungsstärke sowie IR-Wärmestrahlung auf der Probenebene, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit) werden mit entsprechenden Sensoren erfasst. Zusätzlich werden die Oberflächentemperaturen von Absorber und Probe, die Eintritts- und Austrittstemperatur sowie der Massenstrom des Wärmeträgers gemessen¹².

Bei der Messung wird die Probe (1845 x 670 mm) in die frontseitige Apertur des Prüfstandes eingebaut und die gewünschte relative Position zur Sonne eingestellt.

¹² Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Sensoren ist in Anhang A enthalten.

Die Eintrittstemperatur des Wärmeträgers wird so geregelt, dass sich eine möglichst geringe Temperaturdifferenz vom Absorber zur Umgebung ergibt.

Die Auswertung erfolgt nachdem sich quasi-stationäre Bedingungen eingestellt haben¹³.

Die gesamte durch die Probe transmittierte Solarenergie wird vom Absorber absorbiert und vom Wärmeträger abgeführt. Im stationären Gleichgewicht ergibt sich die Energiebilanz aus thermisch induzierten Verlusten und solaren Gewinnen als:

$$Q_{\text{Gesamt}} = Q_{\text{Solar}} - Q_{\text{Verlust}} \quad \text{Gl. 6-2}$$

Dabei sind Q_{Gesamt} die vom Prüfstand gemessene Leistung, Q_{Solar} die vom Prüfstand absorbierte Leistung und Q_{Verlust} die parasitären Wärmeverluste, die infolge des Temperaturunterschieds zur Umgebung entstehen. Die gemessene Leistung ergibt sich aus der folgenden Bilanzierung.

$$Q_{\text{Gesamt}} = m \cdot (T_{\text{aus}} - T_{\text{ein}}) \cdot c_f \quad \text{Gl. 6-3}$$

Dabei ist m der Massenstrom durch den Prüfstand, c_f die Wärmekapazität des Wärmeträgers (Wasser), T_{ein} und T_{aus} die Eintritts- und Austrittstemperaturen des Fluids. Die solaren Gewinne ergeben sich aus dem Kollektorwirkungsgradfaktor F' des Prüfstands, der Aperturfläche der Probe A und der hemisphärischen Bestrahlungsstärke auf der Probenebene I_{hem} :

$$Q_{\text{Solar}} = F' g_{\text{exp}} \cdot A \cdot I_{\text{hem}} \quad \text{Gl. 6-4}$$

Die Wärmeverluste Q_{Verlust} werden temperaturabhängig aus Messungen im unbestrahlten Zustand bestimmt, wie im Kapitel 6.2.2 detailliert beschrieben wird.

Der Wirkungsgrad F' wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$F' = \frac{k_{\text{int}}}{k_{\text{int}} + k_v} \quad \text{Gl. 6-5}$$

Dabei ist k_v der thermische Verlustkoeffizient bezogen auf die Aperturfläche und k_{int} der interne thermische Leitwert zwischen Absorber und Fluid. k_v lässt sich aus den Wärmeverlusten wie folgt ermitteln:

$$k_v = \frac{Q_{\text{Verlust}}}{A \cdot (T_{\text{Abs}} - T_e)} \quad \text{Gl. 6-6}$$

k_{int} wird in situ während der Messung nach der folgenden Gleichung bestimmt:

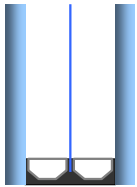
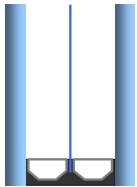
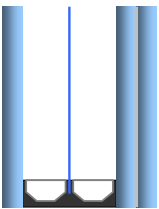
¹³ Die Kriterien der Stationarität werden aus der Norm DIN EN 12975-2 zur Bestimmung der Wärmeleistung von Sonnenkollektoren entnommen und an die spezifische Anwendung angepasst.

$$k_{\text{int}} = \frac{Q_{\text{Gesamt}}}{A \cdot (T_{\text{Abs}} - T_{\text{Fluid}})}$$

Gl. 6-7

Dabei wird der aus der lokal gemessenen mittleren Absorbiertemperatur und mittleren Fluidtemperatur ermittelten Leitwert auf den gesamten Absorber übertragen. Aufgrund der gezielten Positionierung der Temperatursensoren sowie der dafür entwickelten Absorbergeometrie die eine sehr homogene Temperaturverteilung auch bei niedrigen Wärmeeinträgen gewährleistet wird die Annahme als berechtigt bewertet¹⁴. Untersucht wurden sowohl zwei Prototypen für den Einsatz als transparente Wärmedämmung als auch ein Prototyp mit eingebauter lichtstreuender Innenscheibe für den Einsatz als Lichtelement. Die relevanten Eigenschaften sind in **Tabelle 6-2** dargestellt.

Tabelle 6-2: Aufbau und Eigenschaften der untersuchten Prototypen

Prototyp	Geometrie in mm	Low-e Scheiben		SZR (1 und 2)
TWD 1 	Format: 1845 x 680 Aufbau: 4/11/0.15/11/4	Scheibe 1 und 3		Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl
		Glas: Float τ_E : 0.72 Epsilon: 0.08		
TWD 2 	Format: 1845 x 680 Aufbau: 4/11/0.15/11/4	Scheibe 1 und 3		Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl
		Glas: ESG τ_E : 0.59 Epsilon: 0.03		
LICHT 1 	Format: 1845 x 680 Aufbau: 4/11/0.15/11/8	Scheibe 1	Scheibe 3	Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl
		Glas: Float Epsilon: 0.03 τ_E : 0.58	Glas: VSG Epsilon: 0.03 τ_E : - ¹⁵	

¹⁴ Das Verfahren ist am ISFH entwickelt worden und hat sich dort als Standardmethode während Kollektorleistungsmessungen etabliert.

¹⁵ Die solare Transmission der beschichteten VSG-Scheibe konnte nicht gemessen werden.

Um die Schaltungsmechanismen der Proben zu überprüfen wurden die Outdoor-Messungen bei den kritischen Einfallswinkeln 0° und 60° durchgeführt. Die Messergebnisse sind in **Abbildungen 6.18 bis 6.20** dargestellt.

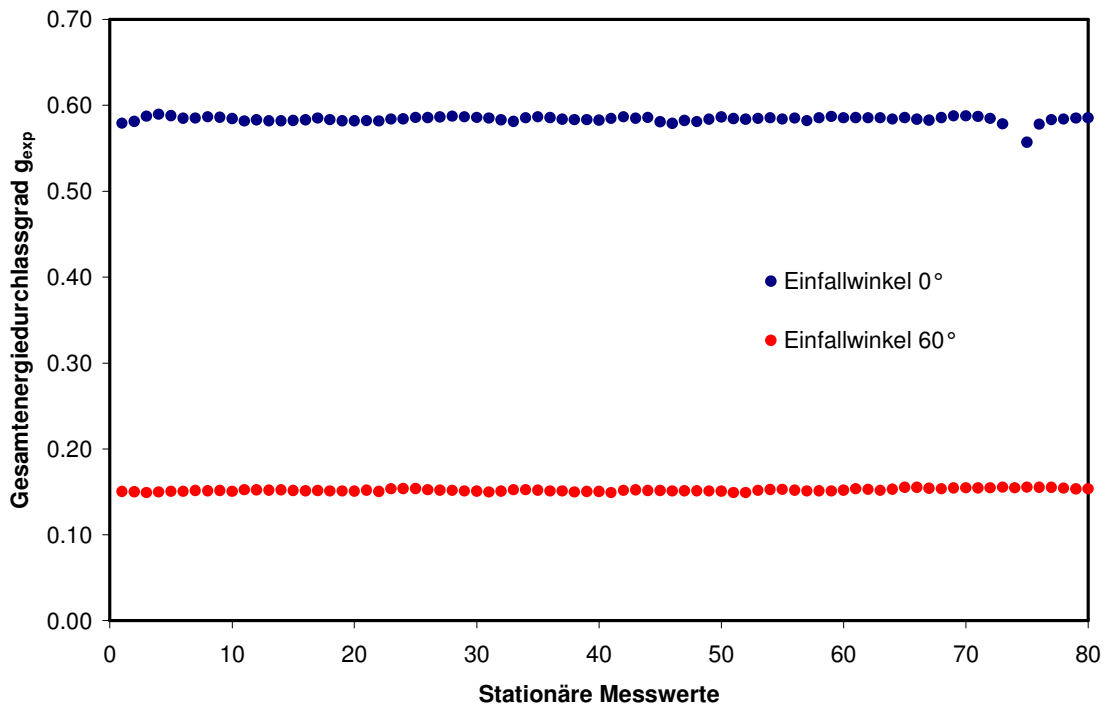


Abbildung 6-18: Experimentell ermittelter Gesamtenergiedurchlassgrad g_{exp} vom Prototyp TWD-1 bei Einfallswinkel 0° und 60°

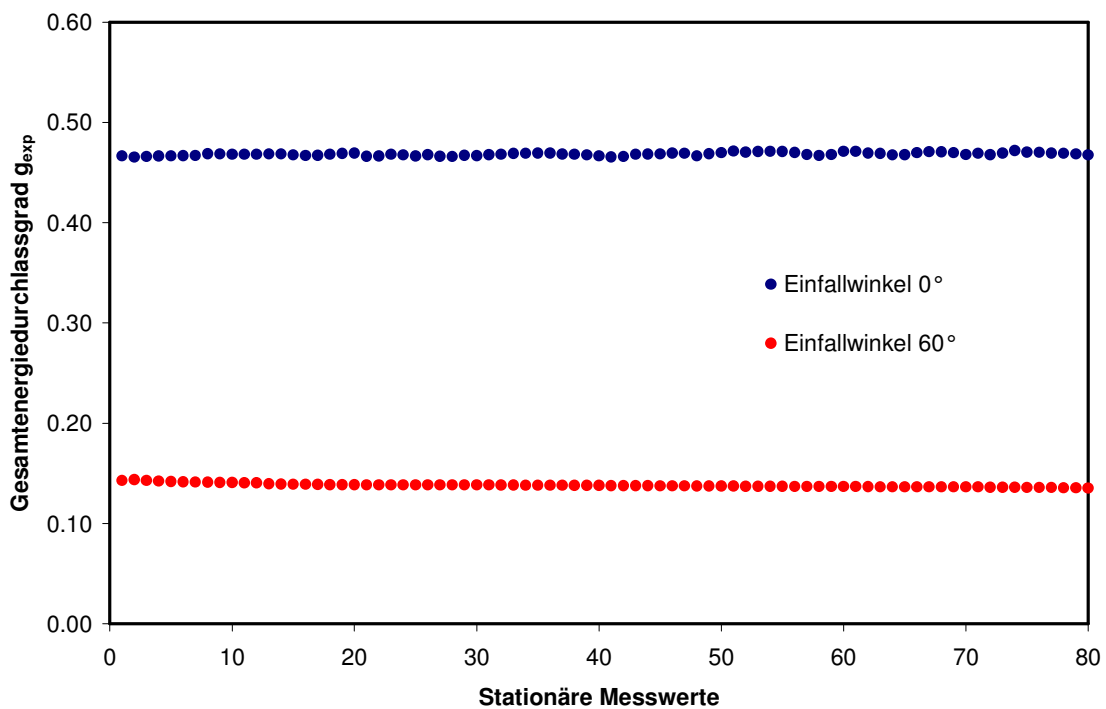


Abbildung 6-19: Experimentell ermittelter Gesamtenergiedurchlassgrad g_{exp} vom Prototyp TWD-2 bei Einfallswinkel 0° und 60°

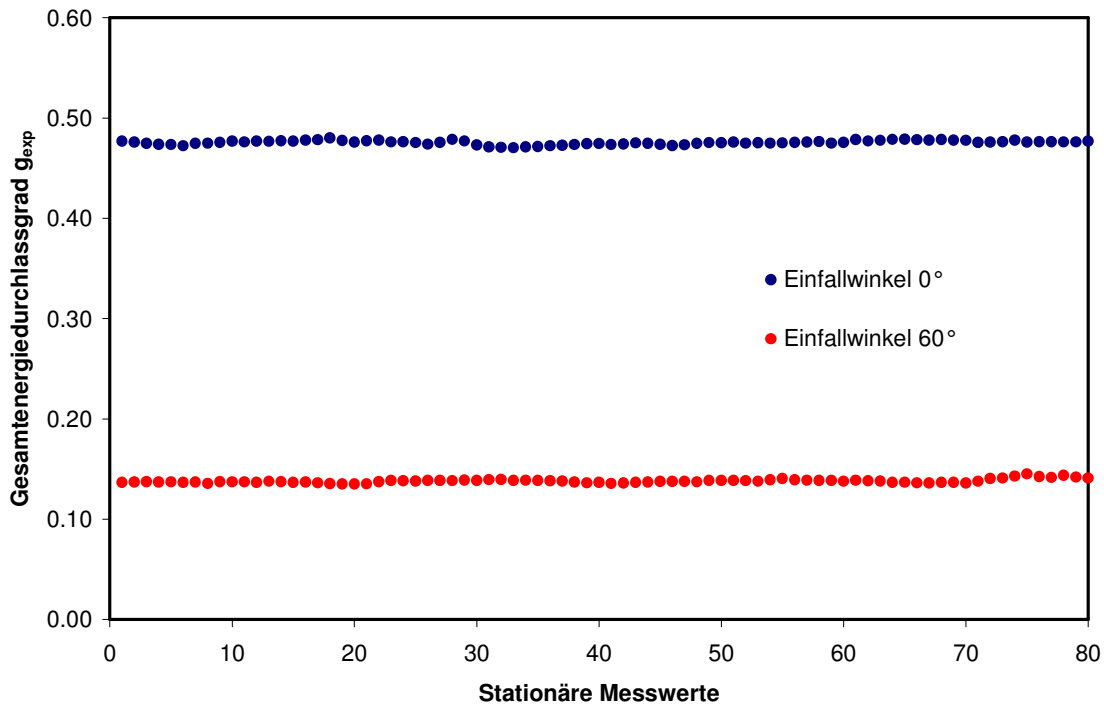


Abbildung 6-20: Experimentell ermittelter Gesamtenergiedurchlassgrad g_{exp} vom Prototyp Licht-2 bei Einfallswinkel 0° und 60°

Der gemessene Wert g_{exp} stellt der Gesamtenergiedurchlassgrad der Prototypen unter den spezifischen experimentellen Bedingungen dar und unterscheidet sich im Folgenden von der nach standardisiertem Verfahren berechneten Größe:

- Der Wert bezieht sich auf die hemisphärische Einstrahlung und berücksichtigt damit je nach Diffusanteil die gesamte Transmission sowohl für direkte als auch für diffuse Solarstrahlung. Aufgrund der Winkelselektivität der untersuchten Prototypen wird dadurch der g-Wert im Vergleich zum Fall rein direkter Einstrahlung mit senkrechtem Einfallswinkel unterbewertet und mit Einfallswinkel 60° überbewertet.
- Der Wert beinhaltet die nicht-ideale solare Absorption des Prüfstandabsorbers und ist daher niedriger als im Standardverfahren¹⁶.
- Der Wert bezieht sich auf die geometrische Konfiguration des Prüfstandes und insbesondere auf eine nicht-senkrechte Lage der Verglasung, d.h. bei der Messung stellen sich Wärmeübergangskoeffizienten ein, die sich von denen die bei der standardisierten Berechnung verwendet werden unterscheiden.

Um die Kennwerten der Prototypen mit denen von konventionellen Produkten vergleichen zu können, wird der g-Wert für direkte Strahlung unter normierten

¹⁶ Das Absorptionsvermögen im Prüfstandsabsorber ist mit 0.97 sehr hoch.

Randbedingungen g_{std} nach dem Verfahren, das im Folgenden erläutert wird, aus dem experimentell bestimmten g-Wert g_{exp} umgerechnet. Dabei wird der Gesamtenergiedurchlassgrad als Summe von direkt transmittierter und sekundär abgegebener Solarstrahlung definiert, mit Berücksichtigung der experimentellen Bedingungen:

$$g_{\text{exp}} = \tau_{\text{exp}} \cdot \alpha_{\text{Abs}} + q_{i,\text{exp}} \quad \text{Gl. 6-8}$$

τ_{exp} ist die effektive Transmission der Verglasung und berücksichtigt zum einem die Aufteilung der Bestrahlungsstärke in direkt und diffus, zum anderen den Einfluss der Mehrfachreflexionen, die aufgrund der nicht-idealen Absorption des Absorbers zwischen Verglasung und Absorber stattfinden:

$$\tau_{\text{exp}} = \left(\tau(\varphi, \theta) \cdot \frac{I_{\text{dir}}}{I_{\text{hem}}} + \tau_{\text{diff}} \cdot \frac{I_{\text{diff}}}{I_{\text{hem}}} \right) \cdot \frac{1}{(1 - \rho_{\text{Abs}} \rho_{b,\text{diff}})} \quad \text{Gl. 6-9}$$

$\tau(\varphi, \theta)$ ist die einfallswinkelabhängige gerichtet-hemisphärische solare Transmission der Verglasung, τ_{diff} und $\rho_{b,\text{diff}}$ die solare Transmission bzw. rückseitige Reflexion der Verglasung bei diffuser Einstrahlung, I_{dir} und I_{diff} die direkte bzw. diffuse Bestrahlungsstärke, α_{Abs} und ρ_{Abs} die solare Absorption bzw. Reflexion des Prüfstandes.

τ_{diff} lässt sich aus der Kenntnis der winkelabhängigen Transmission der Verglasung sowie der Strahldichteverteilung der diffusen Einstrahlung, die sich aus der Himmelstrahlung und der vom Boden reflektierten Strahlung zusammensetzt, ermittelt. Zur Berechnung wird dabei die Hemisphäre in Raumwinkeln Ω aufgeteilt und τ_{diff} in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel je nach Intensität der Strahldichte mit einem Gewichtungsfaktor k berechnet:

$$\tau_{\text{diff}} = \sum_{\theta=0}^{\pi/2} \sum_{\varphi=0}^{\pi} k(\varphi, \theta) \cdot \tau(\varphi, \theta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\gamma) d\gamma \quad \text{Gl. 6-10}$$

Bei unserer Berechnung wird eine isotrope Verteilung der Strahldichte angenommen, d.h. man geht davon aus, dass die Strahldichte für alle Einstrahlwinkel die gleiche Intensität besitzt. Damit lässt sich Gleichung 6.10 folgenderweise vereinfachen:

$$\tau_{\text{diff}} = \sum_{\theta=0}^{\pi/2} \sum_{\varphi=0}^{\pi} \tau(\varphi, \theta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\gamma) d\gamma \quad \text{Gl. 6-11}$$

Die solare Reflexion bei diffuser Einstrahlung wird nach dem gleichen Verfahren bestimmt, wobei anstatt der Transmission die einfallswinkelabhängige Reflexion berücksichtigt wird:

$$\rho_{\text{diff}} = \sum_{\theta=0}^{\pi/2} \sum_{\varphi=0}^{\pi} \rho(\varphi, \theta) \cdot \cos(\gamma) \sin(\gamma) d\gamma \quad \text{Gl. 6-12}$$

Die sekundäre Wärmeabgabe nach innen $q_{i,\text{exp}}$ wird nach der folgenden Formel für 3fach-Verglasungen ermittelt:

$$q_{i,\text{exp}} = \frac{\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{h_{e,\text{exp}}} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{\Lambda_{g,\text{exp}}}}{\frac{1}{h_{i,\text{exp}}} + \frac{1}{\Lambda_{g,\text{exp}}} + \frac{1}{h_{e,\text{exp}}}} \quad \text{Gl. 6-13}$$

Dabei sind α_1 , α_2 und α_3 die solaren Absorptionsgrade der Einzelkomponenten, $\Lambda_{g,\text{exp}}$ der Wärmedurchlassgrad der Verglasung, $h_{i,\text{exp}}$ und $h_{e,\text{exp}}$ die Wärmeübergangskoeffizienten nach innen bzw. nach außen.

Die winkelabhängige Transmission für direkte Strahlung wird aus den Gleichungen 6-8 bis 6-13 gewonnen: für die Berechnung werden die modellierten optischen Daten der Verglasungen (τ_{diff}^{17} , $\rho_{b,\text{diff}}$, α_1 , α_2 und α_3) sowie die experimentell bestimmten optischen Eigenschaften des Prüfstandes (α_{Abs} und ρ_{Abs}) verwendet. Die unterschiedlichen Wärmewiderstände lassen sich in Abhängigkeit der geometrischen Daten (Dicke von Scheibenzwischenräumen und Luftspalt Absorber-Verglasung) und wärmetechnischen Eigenschaften von Probe und Prüfstand nach dem schon erwähnten Formalismus berechnet. Außer einer Anpassung an die experimentellen Randbedingungen werden im Unterschied zu dem im Kap.3 detailliert vorgestellten Berechnungsverfahren die geneigte Lage des Prüfstandes sowie die Richtung des Wärmestroms berücksichtigt.

Anschließend wird die sekundäre Wärmeabgabe nach innen für standardisierte Bedingungen nach EN 410 (senkrechte Lage, $h_i=8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_e=23 \text{ W/m}^2\text{K}$) $q_{i,\text{std}}$ bestimmt und der g-Wert g_{std} wie folgt berechnet:

$$g_{\text{std}}(\varphi, \theta) = \tau(\varphi, \theta) + q_{i,\text{std}}(\varphi, \theta) \quad \text{Gl. 6-14}$$

Die damit ermittelten g-Werte sind in **Tabelle 6-3** zusammengefasst:

Tabelle 6-3: Experimentell bestimmte und nach standardisierten Bedingungen rechnerisch ermittelte g-Werte der untersuchten Prismenverglasungen bei kritischen Einfallswinkeln

Prototyp	$g_{\text{exp}}(0^\circ)$	$g_{\text{std}}(0^\circ)$	$g_{\text{exp}}(60^\circ)$	$g_{\text{std}}(60^\circ)$
TWD-1	0.59	0.62	0.15	0.10
TWD-2	0.47	0.50	0.14	0.10
LICHT-1	0.48	0.51	0.14	0.10

¹⁷ Für die Berechnung von $\tau(\varphi, \theta)$ wird das modellierte Verhältnis $\tau_{\text{diff}}/\tau(\varphi, \theta)$ verwendet, das bei den verschiedenen Verglasungsaufbauten nur leicht variiert.

Die experimentellen Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Simulationen vom Kapitel 3 und bestätigen damit die effektive vom Sonnenstand abhängige Schaltung der solaren Gewinne der Prismenverglasung.

Es wird bestätigt, dass der Einsatz von low-e Glasscheiben mit unterschiedlicher solaren Transmission eine entsprechende Variation des g-Wertes der gesamten Verglasung bei niedrigen Einstrahlwinkeln (Winter) erzielt, aber keine vergleichbare Anpassung bei höher Einstrahlwinkeln (Sommer) aufgrund der Mehrfachreflexionen zwischen Glasscheiben und Prismenfolie ermöglicht.

Die Prototypen TWD-2 und LICHT-1 weisen trotz unterschiedlichen Aufbaus (klarer oder transluzenter Innenscheibe) und solarer Transmission ähnliche g-Werte auf. Verantwortlich für die reduzierte direkte Transmission des Lichtelementes ist nämlich der in der PVB-Folie absorbierte Anteil der einfallenden Sonnenenergie, der aber aufgrund der niedrigen Emissivität der Außenoberfläche der Scheibe (Position 5) fast komplett als sekundäre Wärmestrahlung in den Innenraum abgegeben wird. Inwiefern die optischen Eigenschaften streuender Scheiben auch weitere relevante Größen wie Lichttransmission und Oberflächentemperatur beeinflussen können, wird experimentell im Kapitel 7.2 untersucht.

Weitere Informationen über den g-Wert der Verglasungen unter unterschiedlichen Einstrahlbedingungen lassen sich aus den instationären Auswertungen der Langzeituntersuchungen im Gebäude an TWD-Modulen gewinnen, wie in Kapitel 7.1 beschrieben.

6.2.2 Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)

Für die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Prototypen wurde auf den ursprünglich geplanten Einsatz der Wärmestromplattenapparatur des ISFH verzichtet, da aufgrund der sehr niedrigen Werte der untersuchten Prototypen mit einer zu hohen Messunsicherheit infolge von Wärmebrücken zu rechnen war. Anstatt die Apparatur weiter zu entwickeln, wurde der im vorherigen Kapitel beschriebene Prüfstand zur Bestimmung des g- Werts im unbestrahlten Zustand verwendet (s. **Abbildung 6-21**). Die Messung wird in einem klimatisierten Testlabor des ISFH bei konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt. Gemessen werden Eintritts- und Austrittstemperatur des Wärmeträgers, Oberflächentemperatur vom Absorber und Probe sowie Lufttemperatur. Bei der Messung wird die Eintrittstemperatur des Wärmeträgers so geregelt, dass definierte Temperaturunterschiede vom Absorber zur Umgebung zu erzielen. Bei jedem Temperaturunterschied erfolgt die Bestimmung der Wärmeverlustströme nach Erreichen der Stationarität.

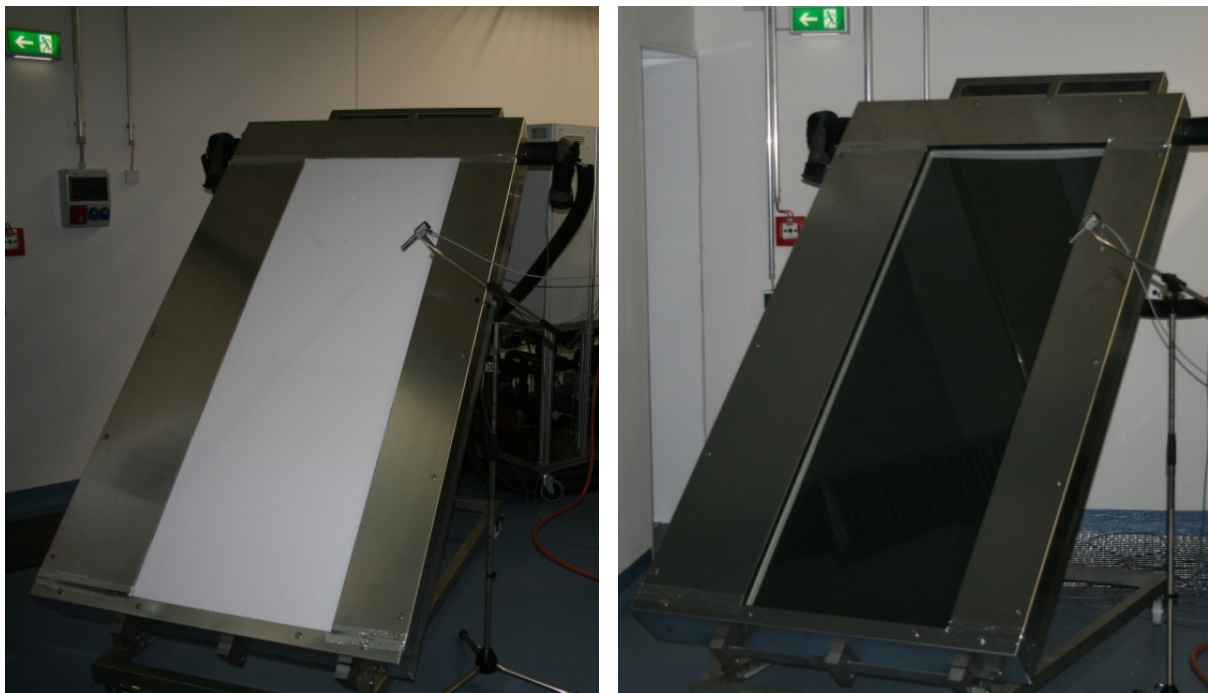


Abbildung 6-21: Ansicht des ISFH-Prüfstandes zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten. Messung vom Kalibrierpanel (links) und Probe (rechts)

Die gesamten Wärmeverluste Q_{Gesamt} ergeben sich aus der nach Gleichung 6-15 berechneten Leistung, und setzen sich aus den Verlusten vom Prüfstand und Prüfling zusammen.

$$Q_{\text{Gesamt}} = Q_{\text{Prüf}} + Q_{\text{Probe}} \quad \text{Gl. 6-15}$$

Die Verluste des Prüfstands wurden im Rahmen einer Kalibriermessung unter identischen Randbedingungen temperaturabhängig bestimmt. Bei der Kalibrierung wurde eine EPS-Platte mit der gleichen Abmessungen der Probe (1845x670 mm)

und einer bekannten Wärmeleitfähigkeit¹⁸ verwendet, damit die entsprechende Leistung $Q_{\text{Probe,kal}}$ sehr genau berechnet werden konnte.

$$Q_{\text{Prüf}} = Q_{\text{Gesamt,kal}} - Q_{\text{Probe,kal}} \quad \text{Gl. 6-16}$$

Der damit ermittelte Wert für $Q_{\text{Prüf}}$ enthält sowohl die reinen Verluste des Prüfstandes als auch eventuelle Verluste, die infolge von geometrischen oder materialbedingten Wärmebrücken am Rand der EPS-Platte entstehen. Aufgrund der vergleichbaren Geometrie von Probe und Kalibrierpanel sowie einer gezielten Positionierung der Ränder der Probe außerhalb des Messbereiches wird von einer Übertragbarkeit der Wärmebrücken ausgegangen.

Der Wärmedurchgangskoeffizient der Probe unter experimentellen Bedingungen U-Wert_{exp} wird aus der folgenden Gleichung gewonnen:

$$U - \text{Wert}_{\text{exp}} = \frac{Q_{\text{Gesamt}} - Q_{\text{Prüf}}}{T_{o,i} - T_{o,e}} \quad \text{Gl. 6-17}$$

Dabei werden die innere und äußere Empfindungstemperatur $T_{o,i}$ und $T_{o,e}$ aus den gemessenen Luft- und Oberflächentemperaturen sowie aus den berechneten Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt¹⁹:

$$T_{o,i/e} = \frac{h_{i/e}^{\text{Konv}} \cdot T_{i/e} + h_{i/e}^{\text{Str}} \cdot T_{\text{Abs}}}{h_{i/e}^{\text{Konv}} + h_{i/e}^{\text{Str}}} \quad \text{Gl. 6-18}$$

Die nach dem im Kapitel 3.2 vorgestellten Modell theoretisch berechneten und experimentell ermittelten Ergebnisse sind in **Tabelle 6-4** zusammengefasst. Dazu wird der nach standardisierten Randbedingungen (mittlere Temperatur der Probe= 10 °C, Temperaturunterschied zwischen Außen- und Innenoberflächen = 15 K, senkrechte Lage, $h_i=8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_e=23 \text{ W/m}^2\text{K}$) umgerechnete Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert_{std} dargestellt

Tabelle 6-4: Experimentell ermittelter und berechneter Wärmedurchgangskoeffizient des untersuchten Verglasungsprototypes

Eigenschaften Prüfling	U-Wert _{ber} [W/m ² K]	U-Wert _{exp} [W/m ² K]	U-Wert _{std} [W/m ² K]
$\epsilon_2 = \epsilon_5 = 0.03$ SZR= 2 x 12 mm Füllung: Argon 90%	0.78	0.80	0.73

¹⁸ Die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten EPS-Charge wurde vom Materialprüfanstalt Hannover nach DIN 52616 bestimmt /24/

¹⁹ Bei der Berechnung wird T_i gleich $(T_{\text{Abs}} + T_{\text{Glas,i}})/2$ gesetzt

Das Messergebnis bestätigt die Zuverlässigkeit des verwendeten Berechnungsmodells und damit den vernachlässigbaren Einfluss der Teildurchlässigkeit der strukturierten Folie im langwelligen Bereich auf den Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung, die in den Simulationen schon nachgewiesen wurde.

Zusätzliche Informationen über die Dämmwirkung der Prototypen lassen sich aus den im Kapitel 7.1 beschriebenen Langzeituntersuchungen im Gebäude für den Einsatz als TWD-Module gewonnen.

6.3 UV-Beständigkeit der Prototypfolie

Im Rahmen der Voruntersuchungen an Folienmaterialien (Kap. 2.5) wurde die Notwendigkeit einer zusätzlichen UV-Schutzschicht für die mikrostrukturierte Verbundfolie festgestellt. Um die Langzeitstabilität gegenüber UV-Strahlung der Materialien zu prüfen, wurde abschließend die mit Schutzfilm hergestellte Prototypfolie getestet. Durchgeführt wurden sowohl Alterungstests unter einer eisenarmen Glassabdeckung mit konservativer Beanspruchung nach dem gleichen Verfahren wie bei den Voruntersuchungen als auch stark beschleunigte Alterungstests. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Die Tests wurden nach den folgenden Verfahren und Bedingungen durchgeführt:

- Bestrahlungsquelle: 2 Metallhalid-Lampen, 2000 W
- Mittlere UV-Bestrahlungsstärke auf der Probenebene: $(400 \pm 25) \text{ W/m}^2$ ²⁰
- Homogenität der UV-Bestrahlungsstärkeverteilung über das Messfeld: über 90%
- Oberflächentemperatur der Referenzfolie während der Bestrahlung: $(50 \pm 2) \text{ °C}$
- Anzahl der Proben: 3 pro Typ
- Referenzprobe mit guter UV-Beständigkeit: PMMA-Folie
- Referenzprobe mit schlechter UV-Beständigkeit: PET-Folie
- Keine Feuchtebeanspruchung
- Kein Wechsel zwischen Bestrahlungs- und Dunkelphasen

Die Alterung der Proben wurde durch periodische Messung der Transmission untersucht. Für die Bewertung wurden die visuelle sowie die solare Transmission für die Leistung der Folie und der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a sowie der Yellowness-Index YI für die Farbneutralität in Abhängigkeit der Expositionsdauer berechnet. Der Index YI beschreibt die Vergilbung von weißen bzw. transparenten Materialien und wird üblicherweise für die Bewertung von Alterungsprozessen infolge von natürlicher oder beschleunigter Bestrahlung in der Kunststoff- und Textilindustrie verwendet. Der Index R_a ist ursprünglich zur Beschreibung der Farbwiedergabe von Lichtquellen entwickelt worden, wird aber auch als Kriterium zur Beurteilung der visuellen Qualität vom durch Glasscheiben und Verglasungen transmittierten Tageslicht eingesetzt.²¹

Die Ergebnisse, die in **Abbildung 6-22** bis **6-25** dargestellt sind, zeigen das vergleichbare Verhalten von Prototyp- und PMMA-Folien und belegen damit die sehr gute UV-Beständigkeit des Produktes.

²⁰ Der Wert entspricht ca. 5fach der Bestrahlungsstärke der Referenzsolarstrahlung AM 1.0 und wurde mit einem Strahlungssensor CUV3 der Firma Kipp&Zonen gemessen.

²¹ Der Farbwiedergabeindex wird in der Norm EN 410 definiert, der Yellowing-Index in der amerikanischen Norm ASTM E313 /26/. Für eine detaillierte Beschreibung des Berechnungsverfahrens wird auf die entsprechende Literatur verwiesen.

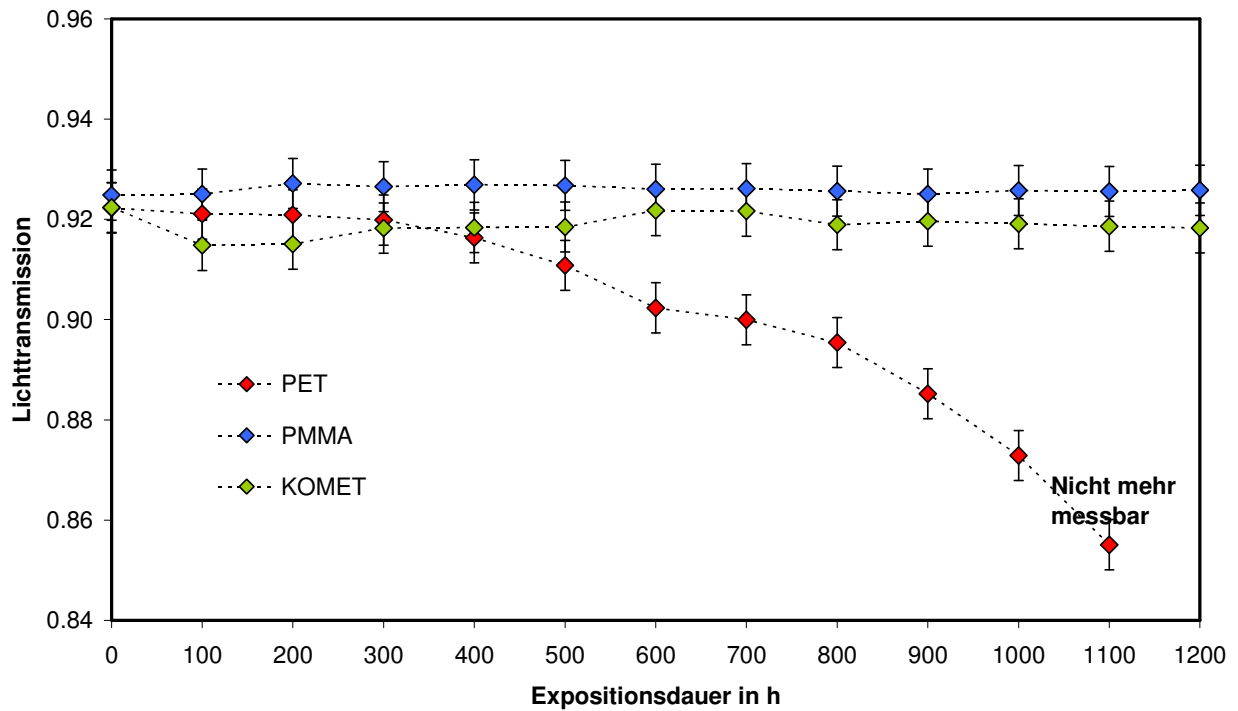


Abbildung 6-22: Bewertung der UV-Stabilität der Prototypfolie: Änderung der Lichttransmission der Proben in Abhängigkeit von Expositionsdauer

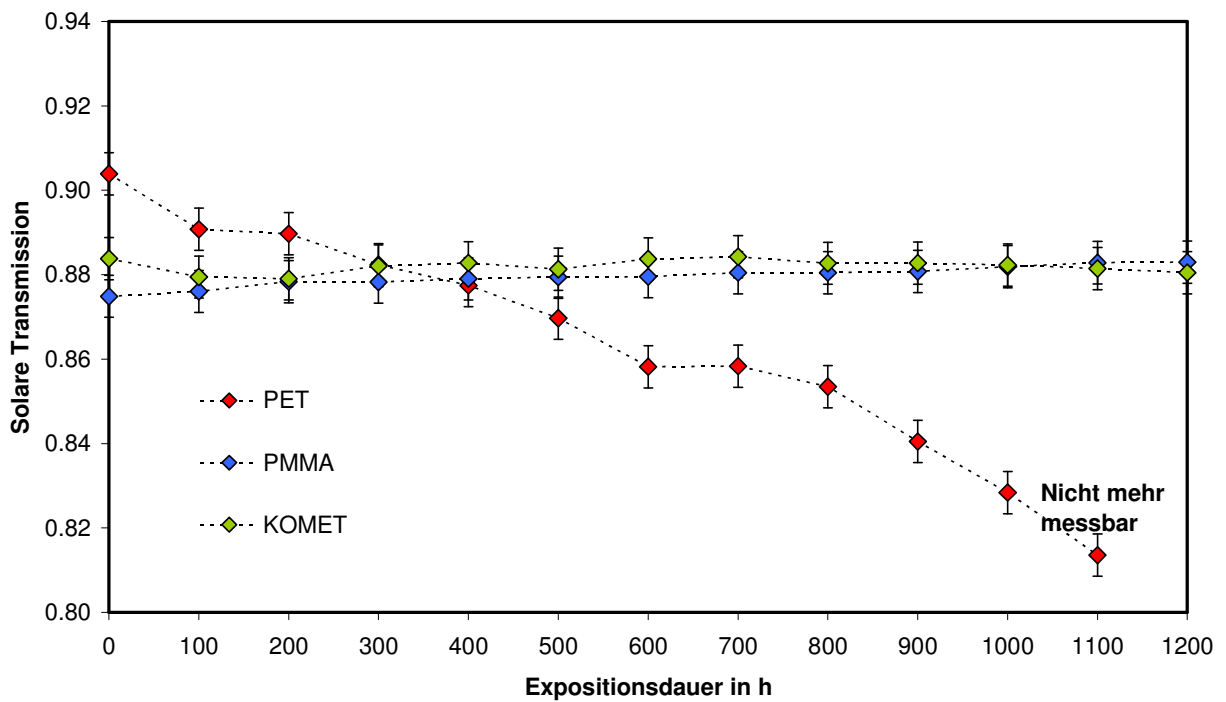


Abbildung 6-23: Bewertung der UV-Stabilität der Prototypfolie: Änderung der solaren Transmission der Proben in Abhängigkeit von Expositionsdauer

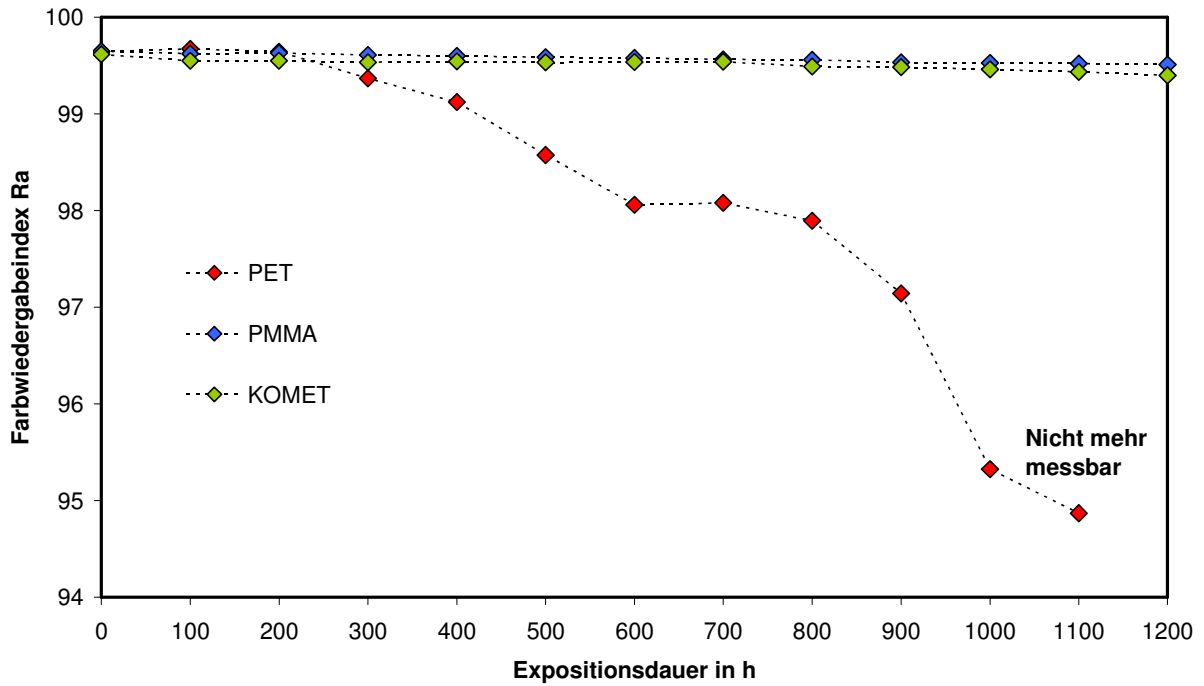


Abbildung 6-24: Bewertung der UV-Stabilität der Prototypfolie: Änderung des allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra der Proben in Abhängigkeit von Expositionsdauer

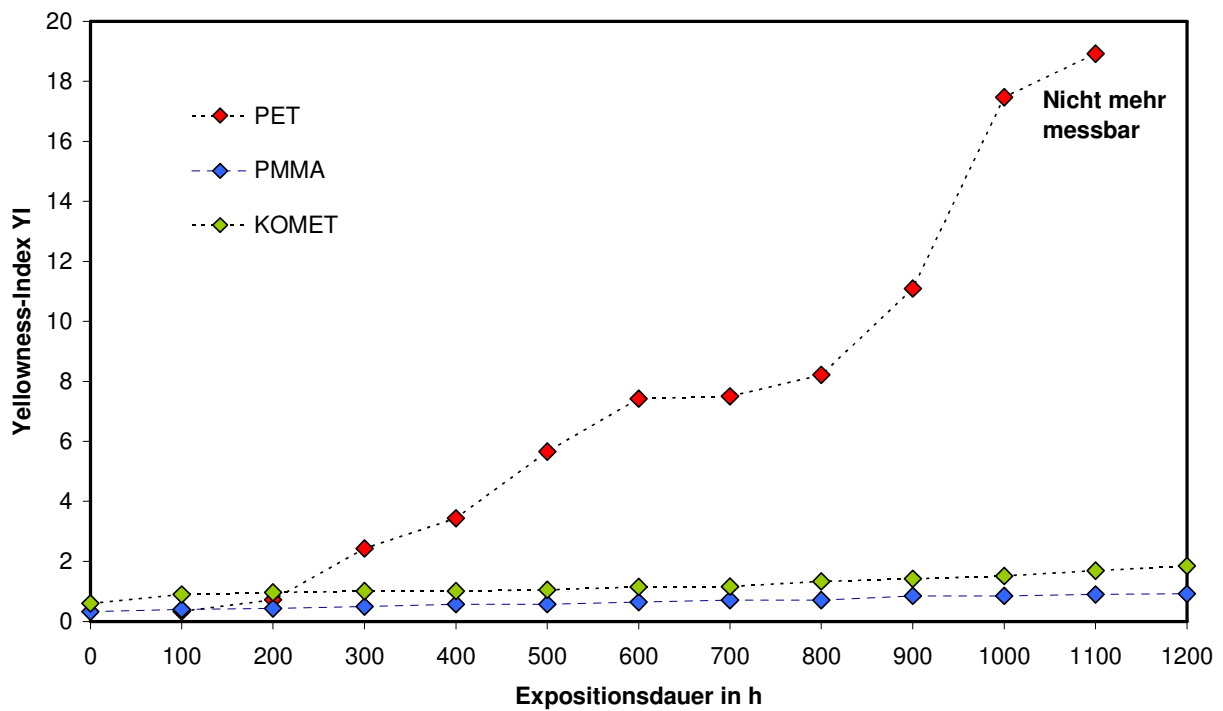


Abbildung 6-25: Bewertung der UV-Stabilität der Prototypfolie: Änderung des Yellowness-Index YI der Proben in Abhängigkeit von Expositionsdauer

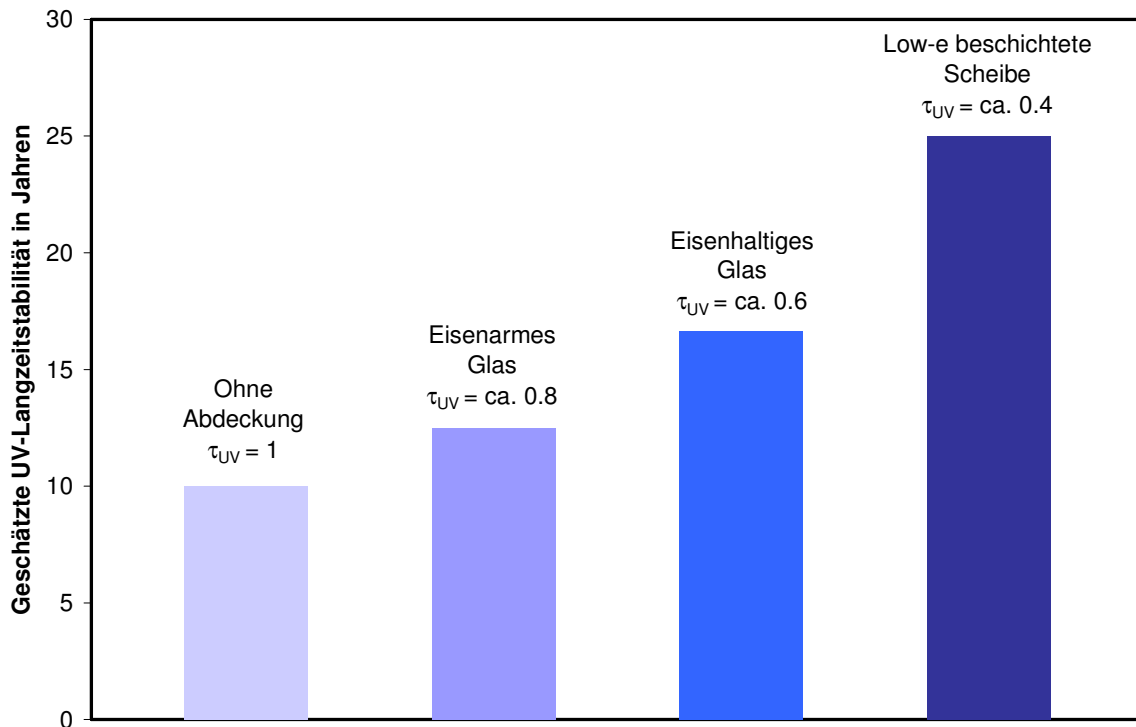


Abbildung 6-26: Schätzung der UV-Langzeitstabilität der Prototypfolie in Abhängigkeit vom Verglasungsaufbau

Bei einer typischen jährlichen Bestrahlungssumme für Deutschland von 800 kWh/m²a auf vertikale Südf Flächen liegen 48 kWh/m²a im UV- Bereich (6%). Bei einer gesamten Strahlungsdosis während der Exposition von 480.000 kWh/m² und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Transmission der UV- Strahlung von herkömmlichen, potentiell einsetzbaren Glasscheiben, wird eine Mindest-UV-Langzeitstabilität in Abhängigkeit vom Verglasungsaufbau von 10 (ohne Abdeckung) bis 25 Jahren (hinter einer low-e beschichteten Scheibe) umgerechnet (s. **Abbildung 6-26**).

Dabei handelt es sich um eine konservative Schätzung, da die hier aufgebrachten Strahlungsdosen in ihrer Wirkung nicht unbedingt vergleichbar zu denen unter natürlichen Randbedingungen sind: Bei einer beschleunigten Alterung können nämlich im Material Abbauprozesse hervorgerufen werden, die unter natürlicher Alterung nicht auftreten. Daher ist der durchgeführte Test als höhere Belastung einzustufen.

7 Test im Gebäude (AP7)

Die Langzeituntersuchungen im Gebäude sind nach der Herstellung der strukturierten Folie und der Fertigung der Verglasungsprototypen die abschließende Phase des Forschungsvorhabens.

Dabei werden die Prototypen sowohl als TWD-Module als auch als Lichtelemente im eingebauten Zustand unter natürlichen Bedingungen auf Leistungsfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit untersucht. Die Feldtests werden am Experimentiergebäude des ISFH durchgeführt. Das Gebäude ist mit einer meteorologischen Messstation sowie zahlreichen Sensoren ausgestattet und ermöglicht damit die schnelle Integration und zuverlässige Bewertung von innovativen Komponenten (Verglasungen, transparente Wärmedämmung, Fassadenkollektoren, etc.). Die Messdaten werden von einem Erfassungssystem alle 30 Sekunden erfasst und in Form von 5-Minuten- Mittelwerten für die weitere Verarbeitung zur Verfügung gestellt.

7.1 Transparente Wärmedämmung

7.1.1 Messaufbau

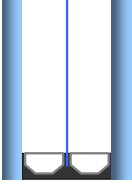
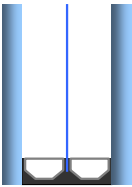
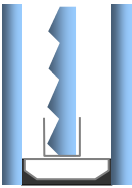
Bei den Untersuchungen für den Einsatz als TWD-Module wurden Verglasungsprototypen mit unterschiedlichen strahlungsphysikalischen sowie wärmetechnischen Eigenschaften in die Südfassade des Experimentiergebäudes installiert. Damit wurde der Wirkung von Glasscheiben mit unterschiedlichen niedrigemittierenden Beschichtungen (Standard- Beschichtungen und Beschichtungen mit erhöhter solarer Transmission) sowie Edelgasfüllung (Argon und Krypton) untersucht. Zusätzlich wurden zwei aufbaugleiche Verglasungen, die eine mit der eingespannten Prototypfolie, die andere mit einer eingelegten Prismenplatte mit gleichen Prismenwinkeln getestet, um die Schaltungsmechanismen von makroskopischen und mikroskopischen Strukturen direkt zu vergleichen und damit die Wirksamkeit der Prototypfolie zu überprüfen.

Die wesentlichen konstruktiven und energetischen Eigenschaften der Prototypen sind in **Tabelle 7.1** zusammengefasst.

Die Verglasungen wurden in Holzrahmen mit einem sehr guten Wärmewiderstand (Holzsorte: Accoya, $\lambda=0.108$ W/mK) eingebaut, um die Effekte der Wärmebrücken zu reduzieren und mit Oberflächentempersensoren bestückt. Zur Erfassung der Wärmeströme wurden Wärmeflussplatten an der Absorberseite geklebt.

Um die relevanten Wetterdaten zu erfassen, wurde die Ausstattung des Testgebäudes mit folgenden Sensoren erweitert: 2 Pyranometer für die Messung von hemisphärischer und diffuser Strahlung auf der Südfassade, 1 Pyrgeometer zur Messung der langwelligen Wärmestrahlung und ein strahlungsgeschirmter, belüfteter Lufttemperatursensor (s. **Abbildung 7.1**).

Tabelle 7-1: Aufbau und Eigenschaften der untersuchten TWD-Prototypen

Prototyp	Geometrie in mm	Low-e Scheiben (1 und 3)	SZR (1 und 2)
TWD 1 	Format: 840 x 680 Aufbau: 4/13/0.1/13/4	Glasart: Float $\tau_E: 0.72$ Epsilon : 0.08	Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl
TWD 2/4²² 	Format: 840 x 680 Aufbau: 4/13/0.15/13/4	Glasart: ESG $\tau_E: 0.59$ Epsilon: 0.03	Gasfüllung: 90 % Krypton Abstandhalter: Edelstahl
TWD 3 	Format: 840 x 840 Aufbau: 4/6/6/12/4	Glasart: ESG $\tau_E: 0.59$ Epsilon: 0.03	Gasfüllung: 90 % Krypton Abstandhalter: Aluminium

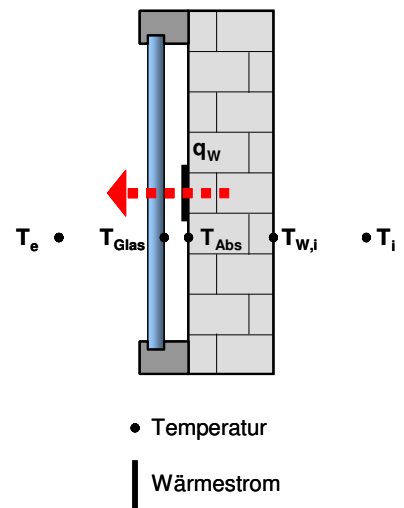
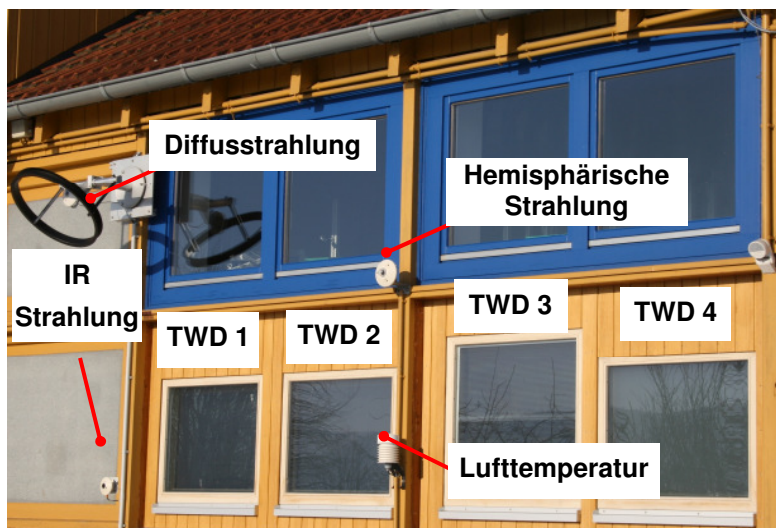


Abbildung 7-1: Verglasungsprototypen eingebaut als TWD-Module in der Testfassade des ISFH

²² TWD 4 unterscheidet sich von TWD 2, indem die Rückseite der Innenscheibe (Pos. 6) sandgestrahlt ist, was den optischen Eindruck verändert.

Im angrenzenden Innenraum (einem nicht bzw. wenig beheizten Laborraum) wurden 4 Wandoberflächentempersensoren so installiert, dass sie jeweils direkt hinter den entsprechenden Sensoren auf der Absorberseite liegen. Ferner wurden innen 2 strahlungsgeschirmte Lufttempersensoren installiert. Auch wenn die Feldtests zur Charakterisierung der Prototypen dienen und nicht unter üblichen Bedingungen für Wohngebäude durchgeführt wurden, lassen sich mit diesem Messaufbau auch die Effekte der solaren Gewinne auf der Raumseite wie Zeitverzögerung der Wärmeeinträge und maximale Wandoberflächentemperaturen beurteilen.

7.1.2 Messergebnisse

Aus den erfassten Messdaten lassen sich sowohl Verläufe von Temperaturen und Wärmeströmen an signifikanten Tagen analysieren (**Abbildungen 7.2 bis 7.5**) als auch Mittelwerte über für die Praxis relevante Zeiträume berechnen (**Abbildungen 7.6 und 7.7**).

Für die Ermittlung der charakteristischen Kennzahlen der Prototypen wird eine energetische Bilanzierung der Absorberwand aufgestellt.

Der Nettowärmestrom durch die TWD (von Absorber nach außen bzw. Richtung Innenraum²³) kann unter stationären Bedingungen durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$q_w = U \cdot (T_{Abs} - T_e) - g \cdot I \quad (\text{Gl. 7-1})$$

mit	q_w	Wärmestromdichte [W/m ²]
	U	Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ² K]
	g	Gesamtenergiedurchlassgrad [-]
	T_{Abs}	Absorberrtemperatur [°C]
	T_e	Außenlufttemperatur [°C]
	I	Einstrahlung auf die Südfassade [W/m ²]

U- und g-Wert lassen sich aus der umgestellten Gleichung ermitteln:

$$\frac{q_w}{\Delta T} = U - \frac{g \cdot I}{\Delta T} \quad (\text{Gl. 7-2})$$

Der Graph dieser Gleichung ist eine Gerade mit dem Ordinatenabschnitt U und der Steigung – g.

²³ In Richtung Innenraum fließende Wärme q erhält ein negatives Vorzeichen.

Die Auswertung erfolgt statisch, d.h. die gemessenen Temperaturen, Einstrahlungen und Wärmeströme werden über geeignete Perioden gemittelt, damit der Einfluss der Wärmekapazitäten der Bauteile heraus fällt. Aus Erfahrung von früheren Untersuchungen am ISFH werden die Kennlinien aus Tagesmittelwerten bestimmt. Die Methode lässt sich mit hoher Genauigkeit für die Heizperiode anwenden (**Abbildungen 7.8** und **7.9**). Aufgrund der ausgeprägten Einfallwinkelselektivität der Prismenverglasungen und der entsprechend starken Variation des g-Wertes für direkte Einstrahlung können die Messwerte mit einer linearen Regression in den sommerlichen Monaten aber nicht angenähert werden.

Für diesen Zeitraum wurden die monatlichen Mittelwerte des U-Wertes in Abhängigkeit der Temperatur der Verglasungen anhand des thermischen Modells rechnerisch korrigiert und die monatlichen Mittelwerte des g-Wertes aus der energetischen Bilanzierung ermittelt.

Mit der Einführung eines Gesamtenergiedurchlassgrades für diffuse Strahlung, die sich aufgrund der vernachlässigbaren kapazitiven Effekte an bewölkten Tagen aus der Kennlinie gut rechnen lässt und als konstant angenommen wird (**Abbildungen 7.10** und **7.11**), werden die mittleren monatlichen g-Werte für direkte Strahlung bestimmt.

Der Jahresverlauf des mittleren monatlichen g-Wertes für globale und direkte Einstrahlung ist in **Abbildungen 7.12** und **7.13** dargestellt.

Die so ermittelten Kennzahlen weichen von den Werten, die unter Standard-Referenzbedingungen entweder theoretisch berechnet oder im Labor experimentell bestimmt werden, ab.

So stellt der U-Wert den tatsächlichen Wärmedurchgangskoeffizient von der Absorberwand zur Außenluft unter den auftretenden Wetterbedingungen (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, etc.) dar, er ist ein Mittelwert über den betrachteten Auswertungszeitraum. Auch wenn die Wärmeströme von der Wärmeflussplatte lokal gemessen werden, spielen je nach Dämmwirkung der Prototypen außerdem auch die Rahmen eine Rolle.

Das gleiche gilt für den g-Wert, der ein Mittelwert über den Auswertungszeitraum sowie über die in diesem Zeitraum auftretenden Einfallwinkel der Sonnenstrahlung darstellt.

Aus den Messdaten lassen sich aber auch momentane Kennzahlen ableiten, die mit Laborergebnissen oder rechnerischen Werten besser vergleichbar sind. Der U-Wert wird über die Nachtstunden unter konstanten Bedingungen nach einem strahlungsarmen Tag gemessen (**Abbildungen 7.14** und **7.15**). In **Tabelle 7.2** werden die experimentellen Daten mit den theoretischen Werten, die nach dem Modell und entsprechenden Randbedingungen berechnet wurden, exemplarisch verglichen.

Für die Berechnung des g-Wertes wird eine effektive Wärmekapazität c_{eff} in die Energiebilanz von Gleichung 7.1 eingeführt, um das instationäre Verhalten des Systems zu berücksichtigen.

$$q = U \cdot (T_{Abs} - T_e) - g \cdot I + c_{eff} \cdot \frac{\partial T_{Abs}}{\partial t} \quad (\text{Gl. 7-3})$$

Typische Verläufe des Gesamtenergiedurchlassgrades der untersuchten Prototypen sind in **Abbildungen 7.16 bis 7.19** dargestellt.

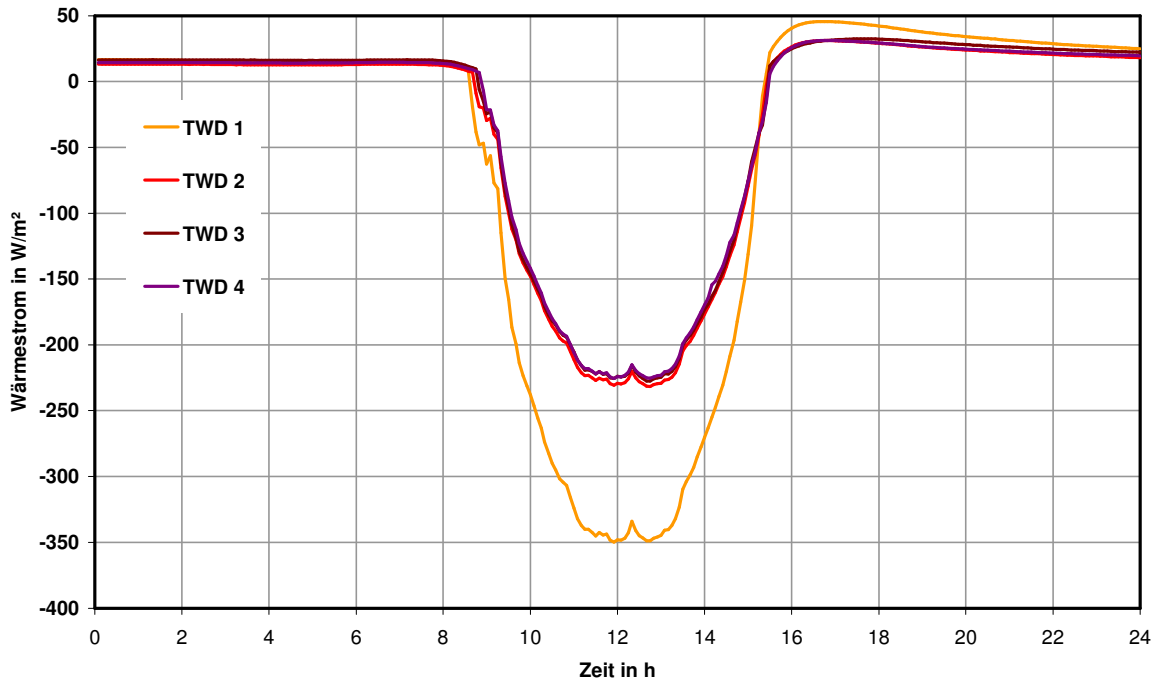


Abbildung 7-2: Wärmeeinträge an einem strahlungsreichen Wintertag

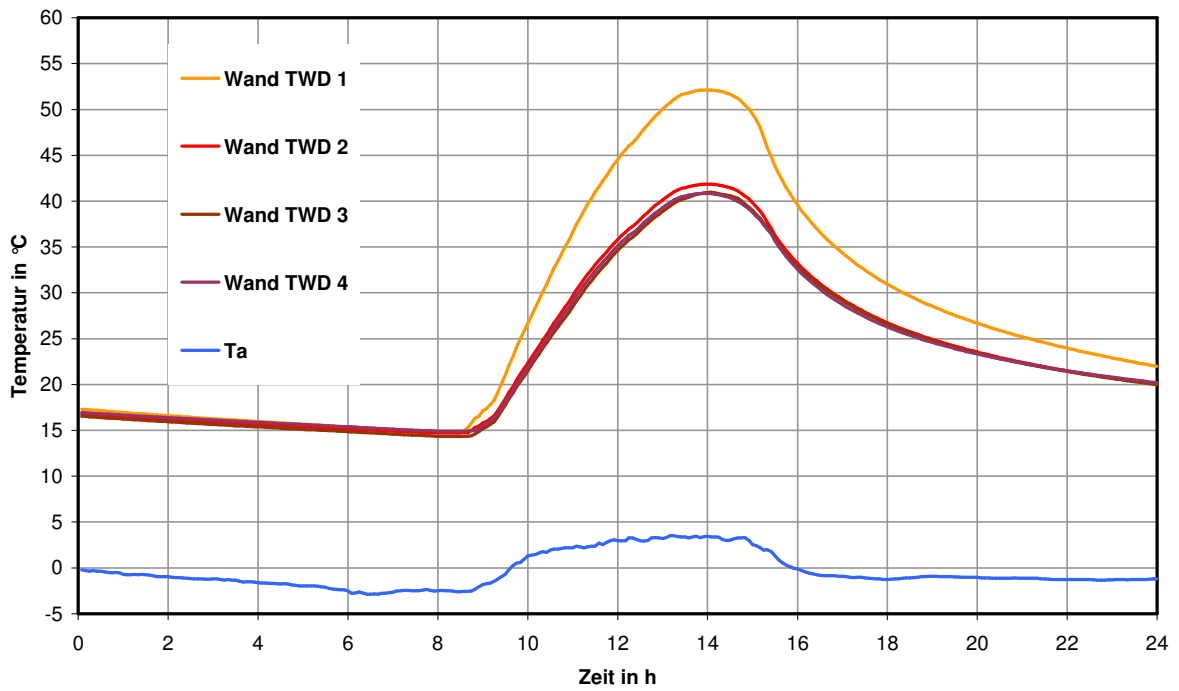


Abbildung 7-3: Luft- und Aussenwandoberflächentemperaturen an einem strahlungsreichen Wintertag

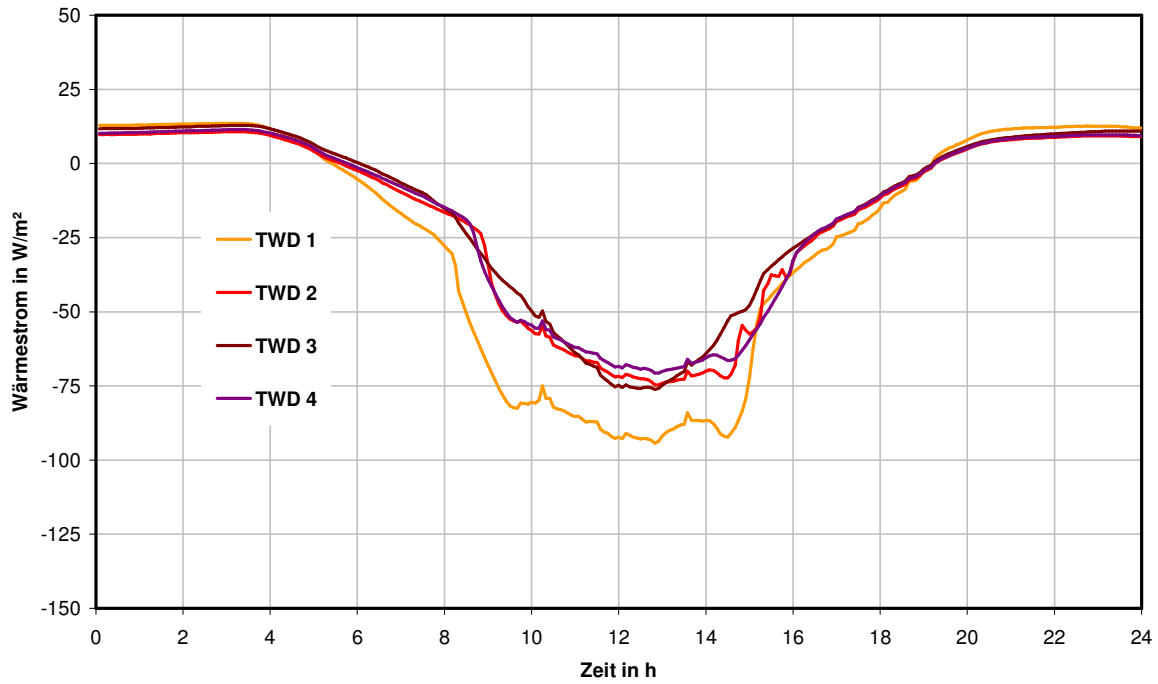


Abbildung 7-4: Wärmeeinträge an einem strahlungsreichen Sommertag

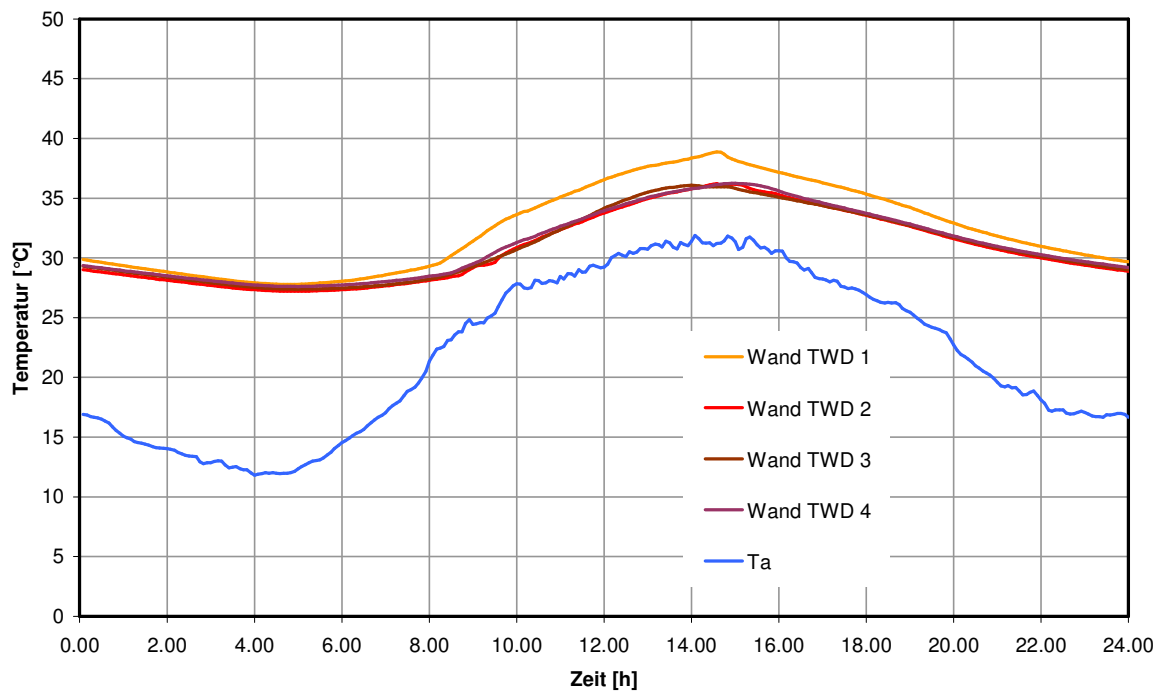


Abbildung 7-5: Luft- und Aussenwandoberflächentemperaturen an einem strahlungsreichen Sommertag

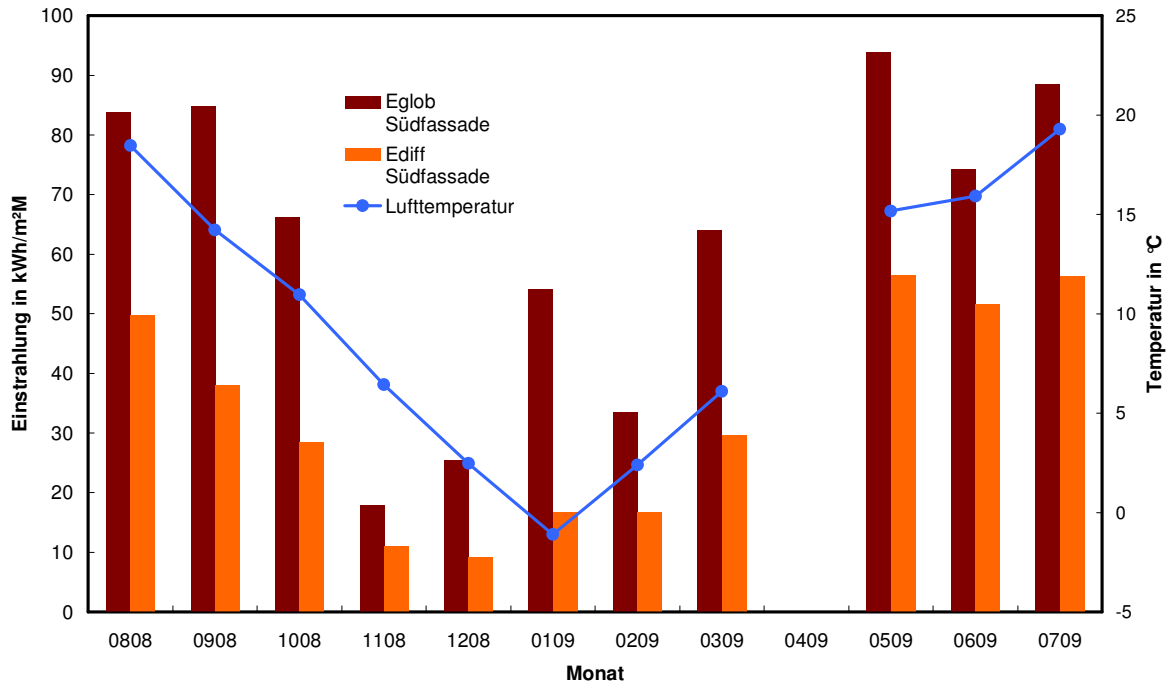


Abbildung 7-6: Monatliche Mittelwerte relevanter meteorologischer Daten (aufgrund einer Messstörung fehlen die Daten für den Monat April)

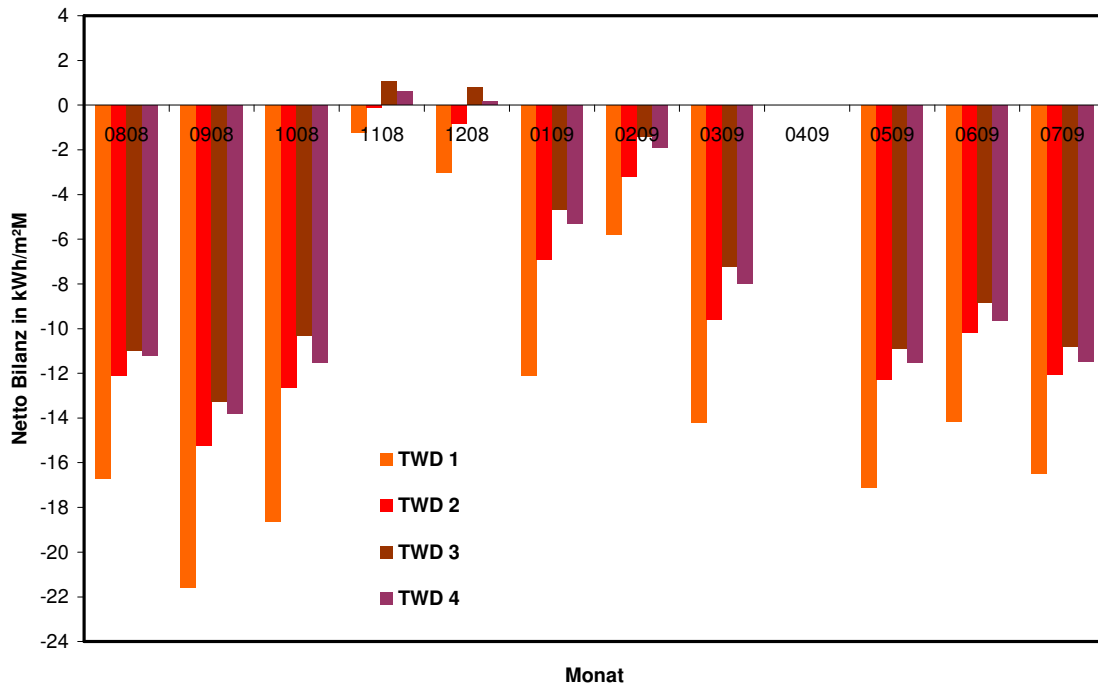


Abbildung 7-7: Monatliche Mittelwerte der Netto-Energiebilanz am Absorber der TWD-Prototypen (aufgrund einer Messstörung fehlen die Daten für den Monat April)

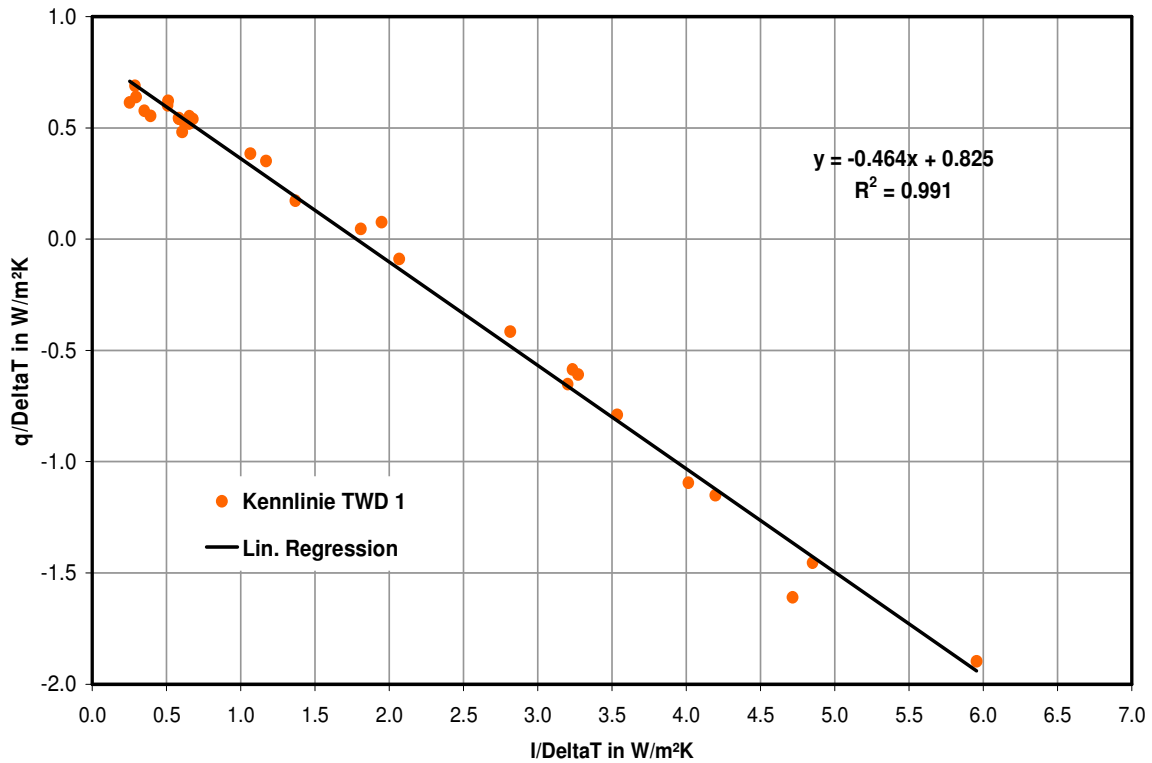


Abbildung 7-8: Kennlinie U/g von TWD 1 für den Monat Dezember

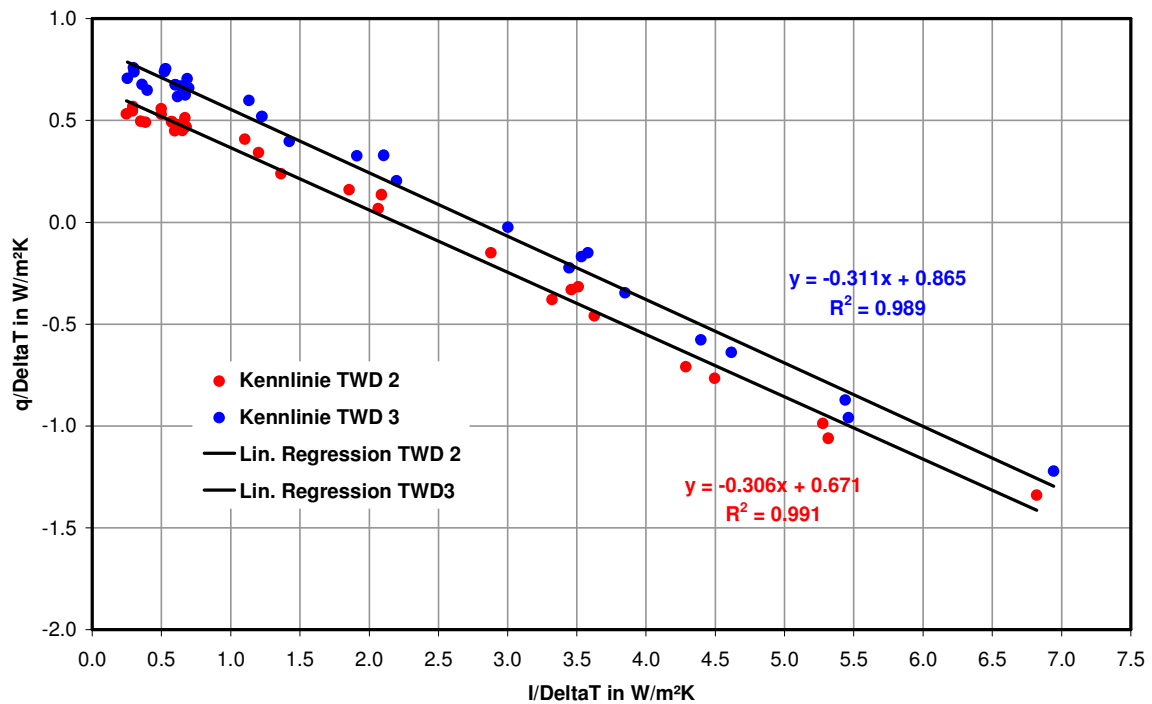


Abbildung 7-9: Kennlinie U/g von TWD 2 und TWD 3 für den Monat Dezember

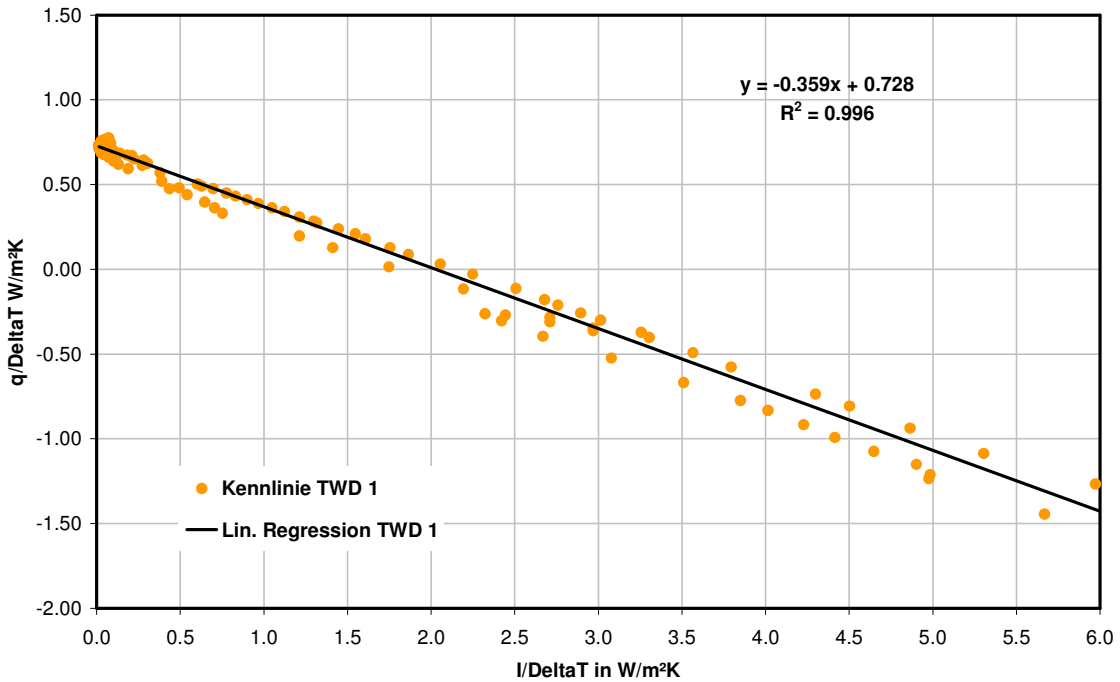


Abbildung 7-10: Beispiel einer Kennlinie U/g aus 5min-Mittelwerten zur Bestimmung des g -Wertes für diffuse Strahlung von TWD 1

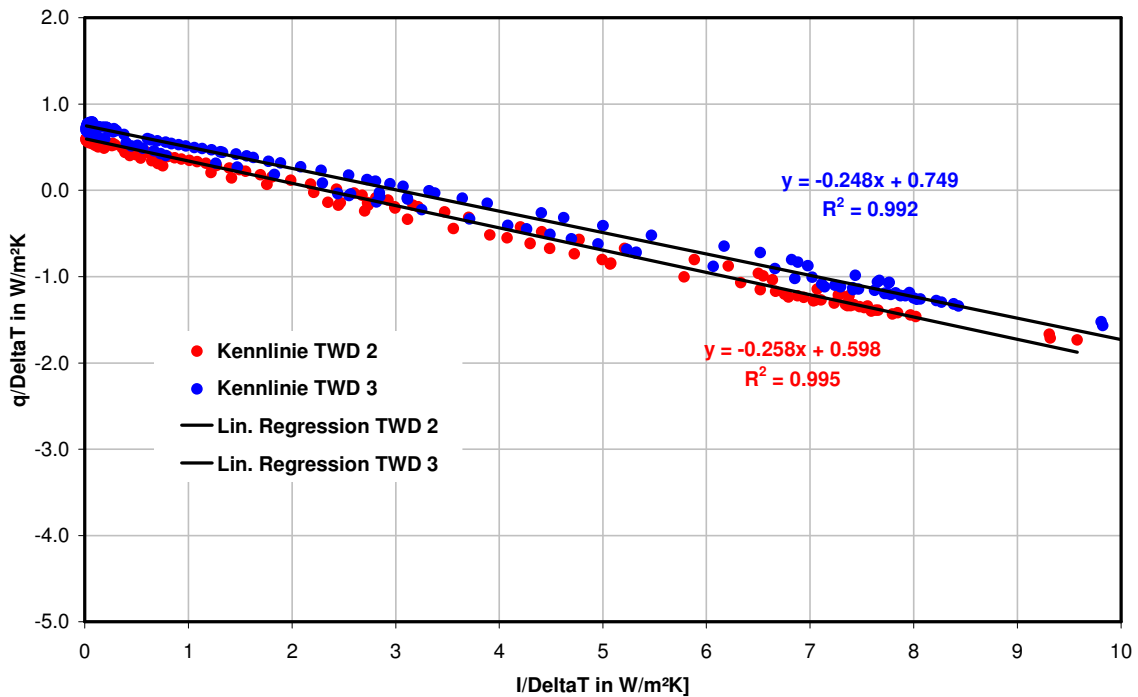


Abbildung 7-11: Beispiel einer Kennlinie U/g aus 5min-Mittelwerten zur Bestimmung des g -Wertes für diffuse Strahlung von TWD 2 und TWD 3

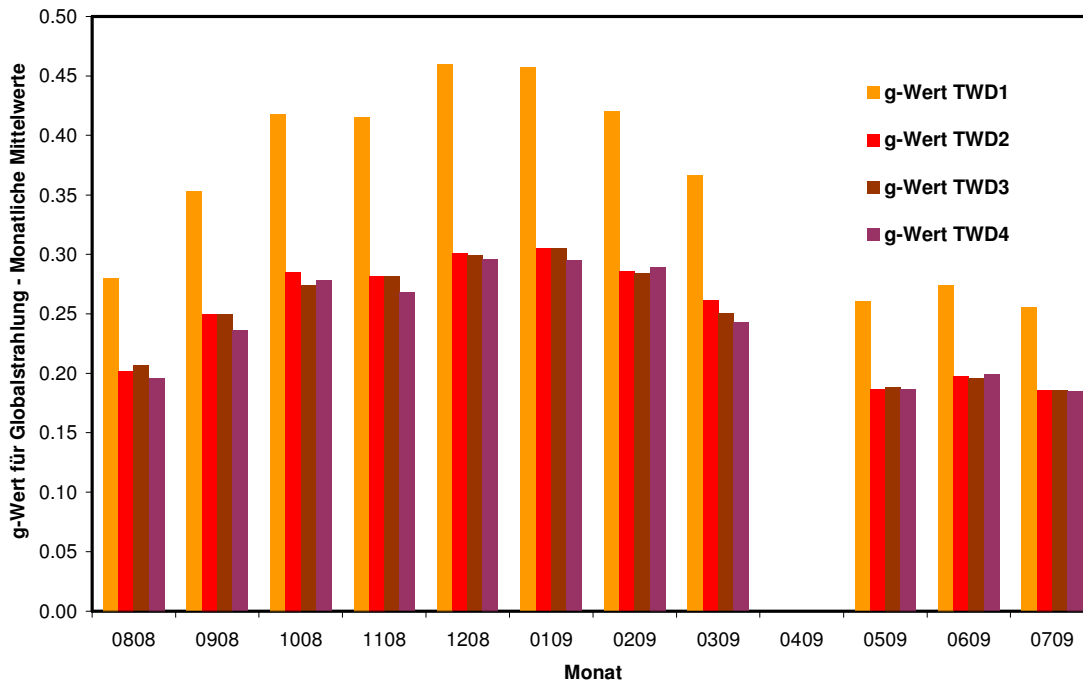


Abbildung 7-12: Monatliche Mittelwerte des g-Wertes für Globalstrahlung von TWD 1, TWD 2 und TWD 3 (aufgrund einer Messstörung fehlt der Monat April)

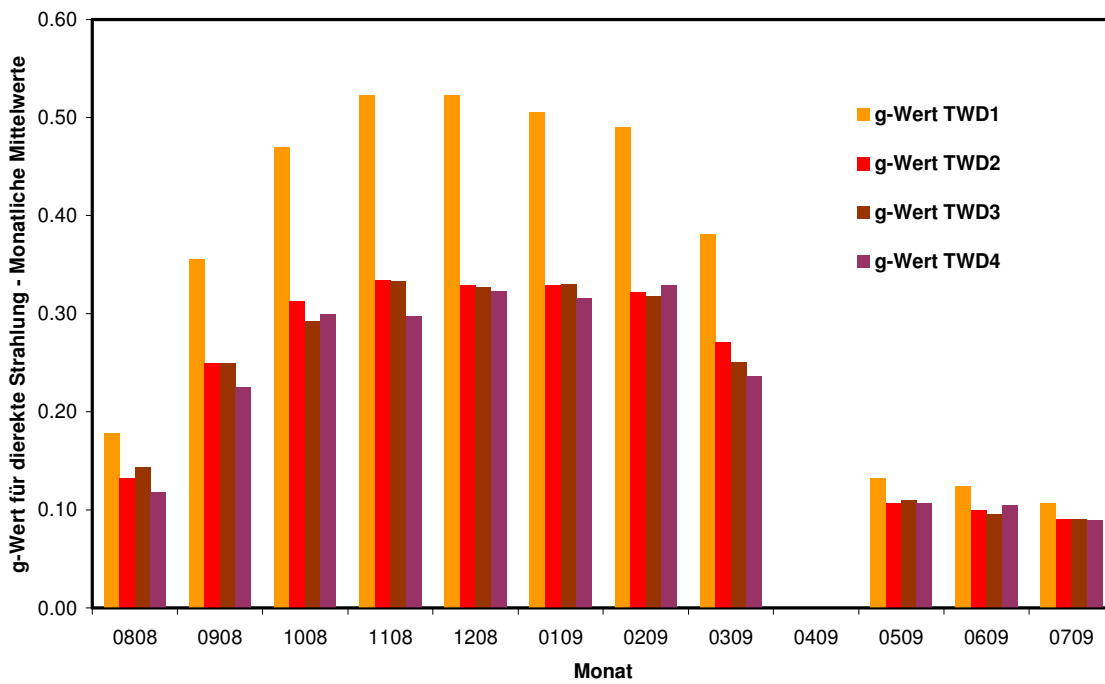


Abbildung 7-13: Monatliche Mittelwerte des g-Wert für direkte Strahlung von TWD 1, TWD 2 und TWD 3 ((aufgrund einer Messstörung fehlt der Monat April)

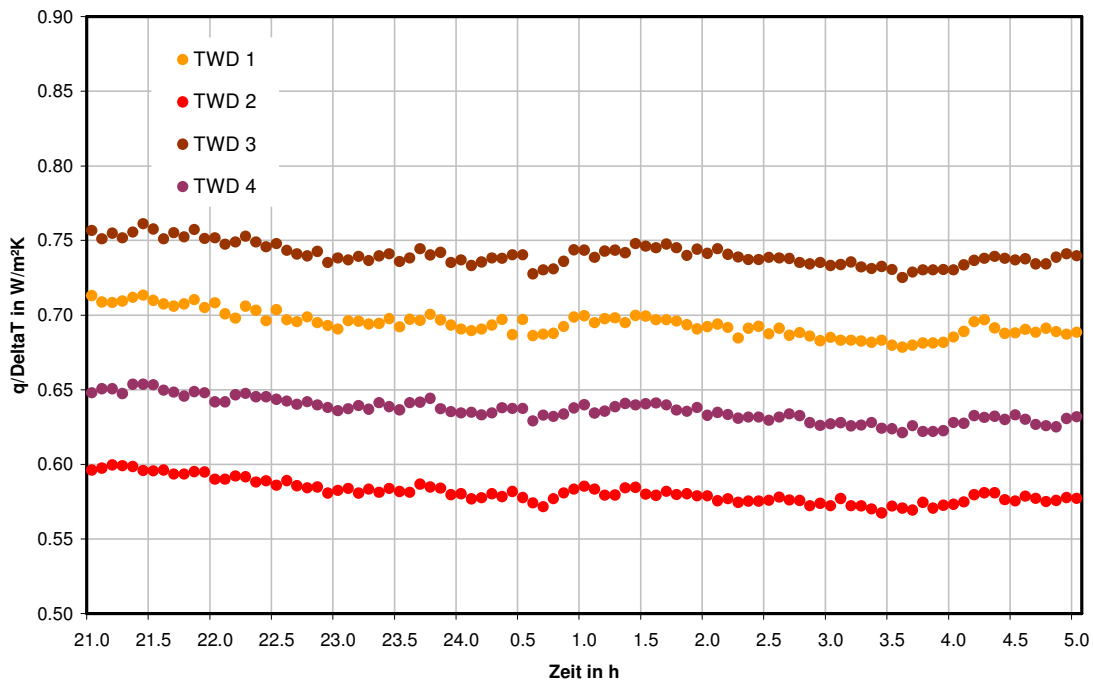


Abbildung 7-14: Experimentell bestimmte Wärmedurchgangskoeffizienten der Prototypen

Tabelle 7-2: Vergleich zwischen berechneten und experimentell bestimmten Wärmedurchgangskoeffizienten der Prototypen. Der U_g -Wert wurde nach dem im Kapitel 3.2 beschriebenen Modell ermittelt, der U_w -Wert (mit Berücksichtigung von Wärmebrücken) anhand von geometrischen und wärmetechnische Eigenschaften der Rahmen nach der Norm DIN EN 10077-1 /27/.

U-Wert in W/m²K	TWD 1	TWD 2	TWD 3	TWD 4
Messung	0.69 ± 0.03	0.57 ± 0.03	0.74 ± 0.04	0.63 ± 0.03
Berechnung U_g	0.71	0.44	0.58	0.44
Berechnung U_w	0.99	0.81	0.88	0.81

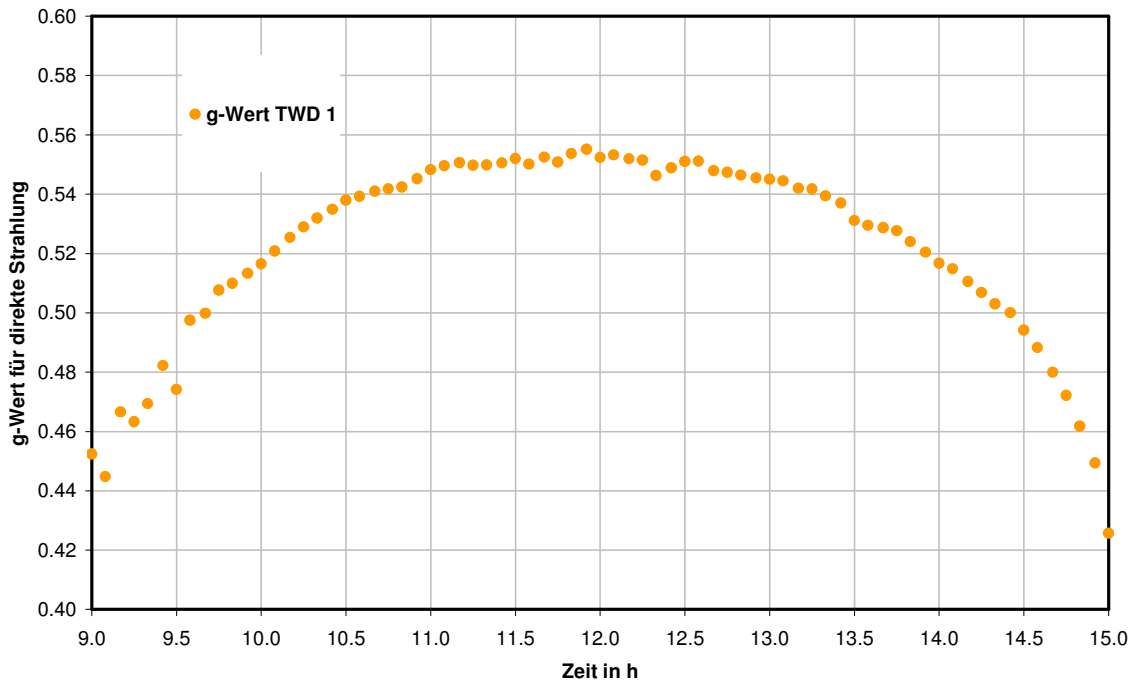


Abbildung 7-15: Tagesverlauf des g-Wertes für direkte Strahlung vom TWD 1 an einem strahlungsreichen Wintertag

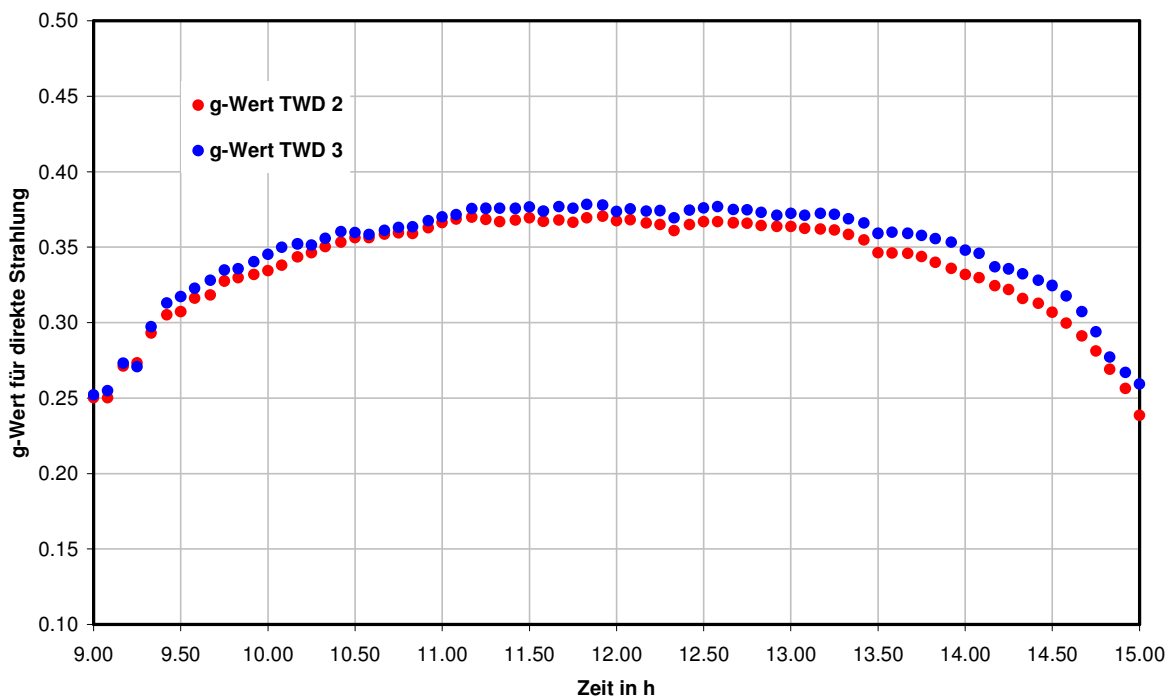


Abbildung 7-16: Tagesverlauf des g-Wertes für direkte Strahlung von TWD 2 und TWD 3 an einem strahlungsreichen Wintertag

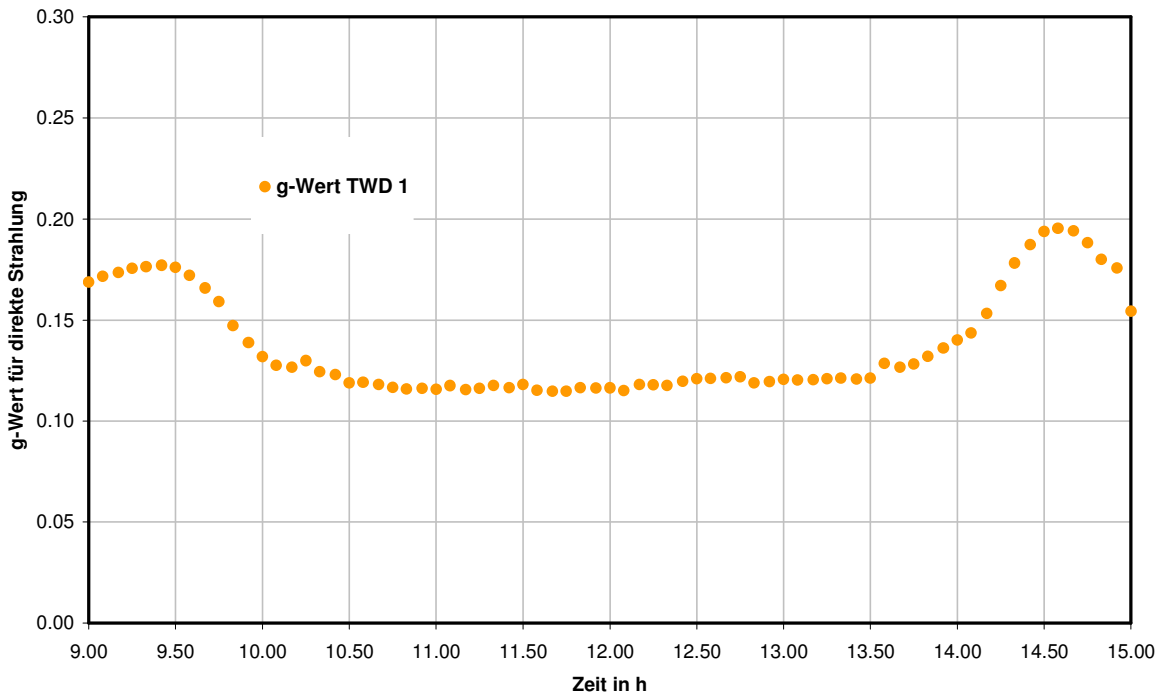


Abbildung 7-17: Tagesverlauf des g-Wertes für direkte Strahlung von TWD 1 an einem strahlungsreichen Sommertag

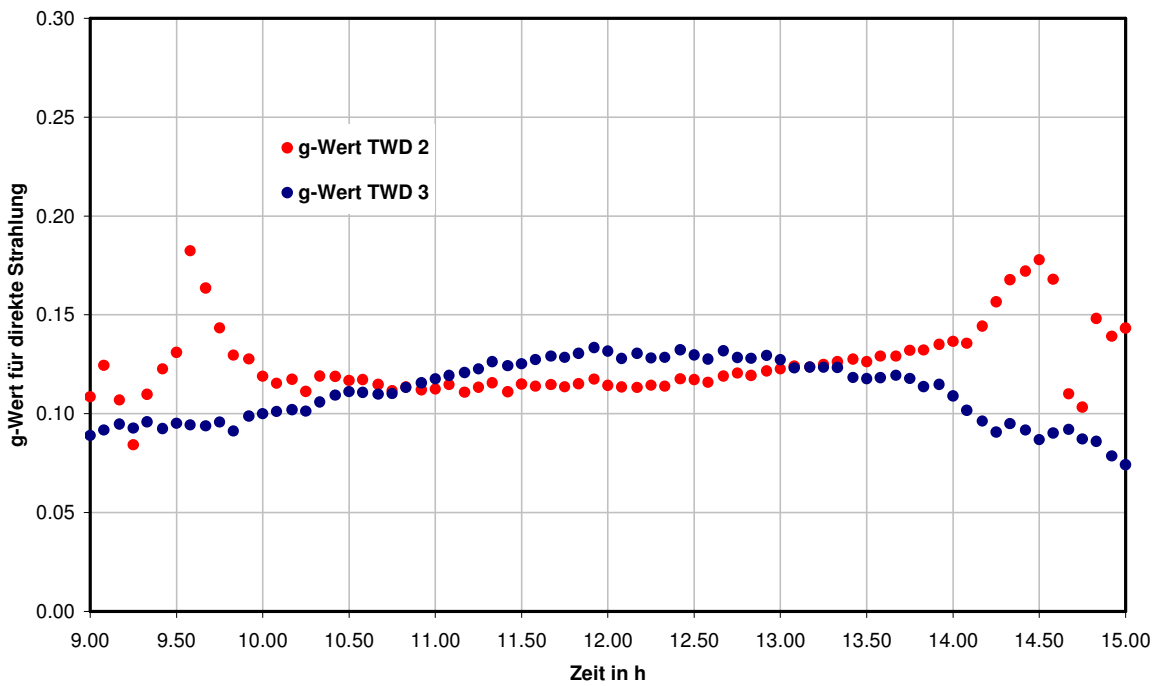


Abbildung 7-18: Tagesverlauf des g-Wertes für direkte Strahlung von TWD 2 und TWD 3 an einem strahlungsreichen Sommertag

Aus den dargestellten Messergebnissen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

Energetische Kennwerte. Der experimentell ermittelte Wärmedurchgangskoeffizient zeigt bei TWD-1 (Aufbau mit Argonfüllung) eine sehr gute Übereinstimmung mit dem berechneten Wert. Bei vergleichbaren Randbedingungen wird ein U-Wert von $0.69 \text{ W/m}^2\text{K}$ bestimmt (s. **Abbildung 7-14**), der dem Dämmstandard einem konventionellen, aufbaugleichen 3-fach-Verglasung und damit dem Zielwert des Projektes entspricht. Der in den Simulationen schon nachgewiesene vernachlässigbare Einfluss der Teildurchlässigkeit der Folie im Infrarot-Bereich wird hier erneut bestätigt. Bei TWD-2 und TWD-4 (sowie bei TWD-3, d.h. bei allen Aufbauten mit Kryptonfüllung) sind dagegen höhere U-Werte gemessen worden als nach Berechnung bestimmt. Wärmebrückeneffekte können je nach Aufbau unterschiedliche Wirkungen haben, erklären jedoch alleine diese Abweichungen nicht (s. **Tabelle 7-2**). Eine weitere mögliche Ursache ist der tatsächliche vorhandene Gasfüllgrad (in der Rechnung mit 90% angenommen), der sich insbesondere bei Krypton sehr stark auswirkt.

Auch bezüglich des Gesamtenergiedurchlassgrades verhalten sich die 2 Aufbauten unterschiedlich. Während der saisonale Effekt bei beiden erkennbar ist, zeigen TWD-2 und TWD-4 im Winter eine niedrigere Transmission als erwartet (ca. 20%) gegenüber sowohl den theoretischen als auch den auf dem Outdoor-Prüfstand des ISFH experimentell bestimmten Werten. Dieser Unterschied lässt sich nicht mit abweichenden Randbedingungen erklären und könnte auf die tatsächlichen solaren Transmissionen der beschichteten Scheiben zurückzuführen sein. Er wurde aber hier nicht näher untersucht.

TWD-1 zeigt dagegen eine sehr effektive Schaltung der Transmission für direkte Einstrahlung ($0.56 / 0.12$ je nach Sonnenstand, s. **Abb. 7.15** und **7-17**), die den Erwartungen entspricht. Zu erkennen ist der bei den Simulationen schon festgestellte starke Einfluss der Transmission für diffuse Strahlung, die die Transmission für Globalstrahlung im Winter reduziert und im Sommer erhöht, was charakteristisch für alle starren Sonnenschutzsysteme ist.

Trotz der Dämpfung des saisonalen Effektes wird im Sommer weniger als die Hälfte der gesamten Einstrahlung im Vergleich zu einem nicht winkelselektiven System (unter Voraussetzung eines identischen g-Werts bei senkrechter Einstrahlung) durchgelassen, was einen erheblichen Vorteil gegenüber konventionellen TWD-Produkten darstellt. Da sich der Einsatz von wirkungsvollen aber wartungsaufwendigen Sonnenschutzvorrichtungen aus wirtschaftlichen Gründen in der Praxis nicht durchgesetzt hat, wird heute die Überhitzungsproblematik mit einer Teilbelegung der Fassade oder in Kombination mit Balkonen und Vorbauten entschärft, was sowohl das energetische Potential des Systems als auch die architektonische Gestaltung der Fassade einschränkt.

Der tatsächliche Einfluss des saisonal abhängigen g-Wertes auf die Heizenergieeinsparung sowie auf den thermischen Komfort wird im Kapitel 3.3 anhand von dynamischen Simulationen an einem Modellgebäude untersucht.

Vergleich Prismenscheibe mit Prismenfolie. Unabhängig von den o.g. Abweichungen zwischen erwarteten und gemessenen g-Werten für die Aufbauten mit Standardschichten ausgestatteten Glasscheiben lässt sich das energetische Verhalten von Prismenscheibe und Prismenfolie sehr gut vergleichen. Aufgrund der unterschiedlichen Integration und Dicke der zwei Strukturen bei gleichem Scheibenzwischenraum weist die Verglasung mit Prismenscheibe wie erwartet einen 30% höheren U-Wert auf. Der g-Wert zeigt sowohl im monatlichen Durchschnitt als auch im Laufe des Tages ähnliche Verläufe, was für die gute Vergleichbarkeit der Funktionalität spricht (s. **Abb. 7-13, 7-16 und 7-18**). Die Abweichungen lassen sich mit den unterschiedlichen Brechungsindizes der Materialien erklären. Die Ergebnisse bestätigen, dass die höhere solare Transmission der Folie (ca. 5%, bedingt durch die niedrige Absorption im nahen IR-Bereich) eine vernachlässigbare Wirkung auf die gesamte Transmission einer Verglasung mit selektiven Beschichtungen hat.

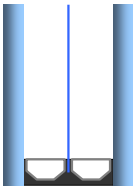
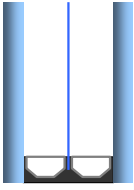
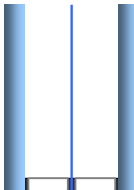
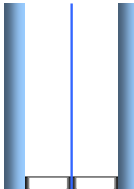
Gebrauchstauglichkeit. Da übliche Langzeitprüfverfahren für Isoliergläser die extremen Bedingungen, denen TWD-Module ausgesetzt sind, nicht berücksichtigen, dienten die Außentests auch der Prüfung der Gebrauchstauglichkeit. Insbesondere wurden die Eignung der Folie und des Integrationsverfahrens für die Anwendung als TWD geprüft. Über den betrachteten Zeitraum (18 Monaten) haben wir trotz der hohen Einstrahlung und der starken Temperaturschwankungen keine sichtbaren Änderungen an den Prototypen wie Fehlstellen am Randverbund, Falten in der Folie, UV-Licht induzierte Vergilbung der Folie, Foggingeffekte, etc. festgestellt.

7.2 Lichtelemente

7.2.1 Messaufbau

Bei den Untersuchungen für den Einsatz der Prismenverglasungen als Lichtelemente wurden Prototypen mit unterschiedlichen Aufbauten und strahlungsphysikalischen Eigenschaften in einem nach Süden ausgerichteten Büroraum des ISFH-Experimentiergebäudes installiert. Getestet wurden sowohl ein Prototyp ohne Diffusor als auch zwei Prototypen mit lichtstreuenden Innenscheiben zur Reduktion von visuellen Störungen (Lichtzerlegung, Verzerrung und Blendung). Als Referenz galt eine Standard-THERMUR-HM 3fach-Verglasung der Fa. Glasfischer mit einer im Scheibenzwischenraum eingespannten, nicht strukturierten Folie. Die wesentlichen konstruktiven und energetischen Eigenschaften der Proben sind in **Tabelle 7.3** zusammengefasst.

Tabelle 7-3: Aufbau und Eigenschaften der untersuchten Prototypen für den Einsatz als Lichtelemente

Prototyp	Geometrie in mm	Komponenten		SZR (1 und 2)
		Scheibe 1/3	Folie	
LICHT-REF (unstrukturierte Folie) 	Format: 830 x 570 Aufbau: 4/11/0.1/11/4	Glas: Float Epsilon: 0.84 τ_E : 0.84	Folie: PET Epsilon: 0.11/0.13 τ_E : 0.54	Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl
LICHT-1 (Prismenfolie) 	Format: 830 x 570 Aufbau: 4/11/0.15/11/4	Scheibe 1 Glas: Float Epsilon: 0.03 τ_E : 0.58	Scheibe 3 Glas: Float Epsilon: 0.03 τ_E : 0.58	Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl
LICHT-2 (Prismenfolie) 	Format: 830 x 570 Aufbau: 4/11/0.15/11/8	Scheibe 1 Glas: Float Epsilon: 0.03 τ_E : 0.58	Scheibe 3 Glas: VSG mit 1 Folie Epsilon: 0.03 τ_E : ⁻²⁴	Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl
LICHT-3 (Prismenfolie) 	Format: 830 x 570 Aufbau: 4/11/0.15/11/8	Scheibe 1 Glas: Float Epsilon: 0.03 τ_E : 0.58	Scheibe 3 Glas: VSG mit 3 Folien Epsilon: 0.03 τ_E : ⁻²⁴	Gasfüllung: 90 % Argon Abstandhalter: Edelstahl

²⁴ Die optischen Eigenschaften der beschichteten VSG-Scheibe konnten nicht gemessen werden

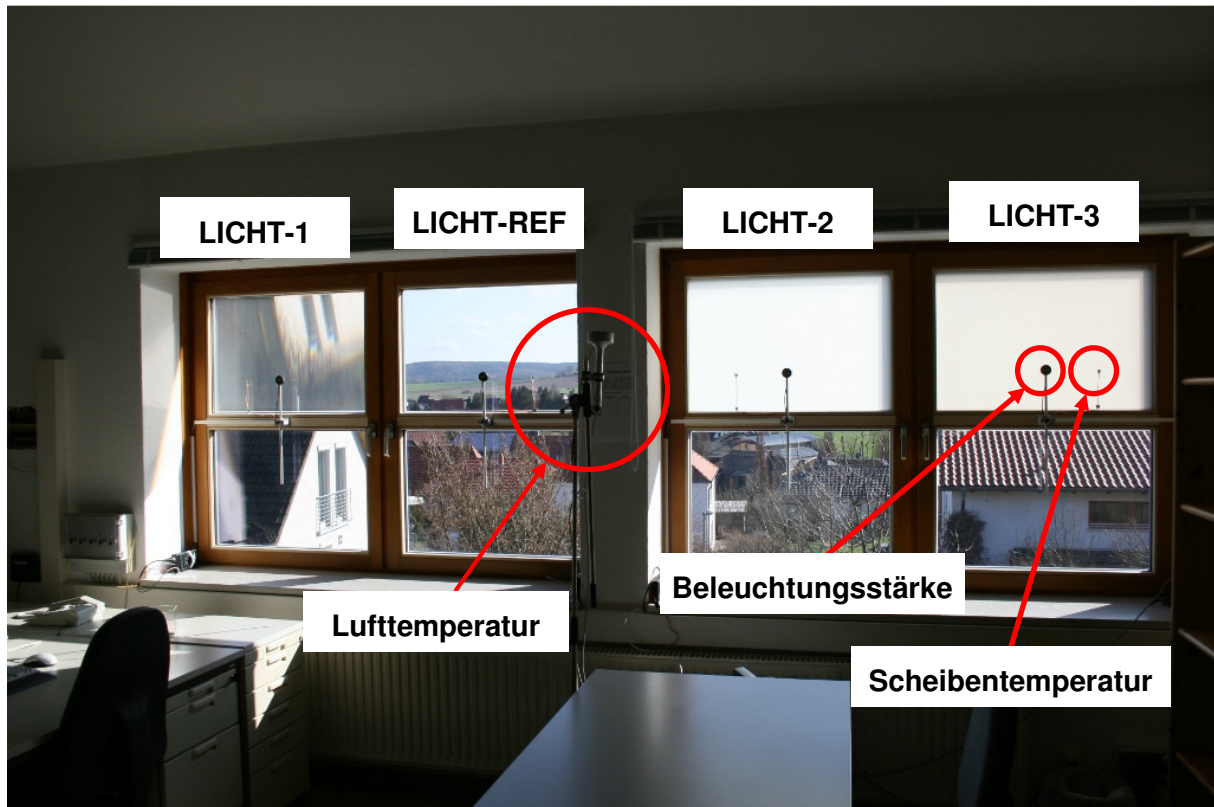


Abbildung 7-19: Verglasungsprototypen eingebaut als Lichtelemente in einem Büroraum des ISFH-Experimentiergebäudes

Ziel der Untersuchung war zum einem die Überprüfung der Schaltungsmechanismen der Prismenverglasung und ihrer Eignung für die Anwendung als Tageslichtelement im Vergleich zu konventionellen Systemen, zum anderen die Überprüfung der Effektivität der Kombination Prismenfolie/Diffusor, mit Bezug sowohl auf die Leistung des Systems als auch auf den visuellen und thermischen Komfort. Bei den ausgewählten lichtstreuenden Scheiben (Verbundscheiben mit transluzenten PVB-Folien) wird die einfallende Strahlung stärker als bei konventionellen Gläsern absorbiert. Der Einsatz unterschiedlicher PVB-Folien beeinflusst damit nicht nur die Lichtverhältnisse im Raum sondern auch die thermische Behaglichkeit.

Für die thermischen Untersuchungen wurde die Oberflächentemperatur der Innenscheibe der verschiedenen Verglasungen mit strahlungsgeschirmten Pt100 vermessen. Vergleichsmessungen mit einer Infrarot-Kamera (Mod. VarioCam der Fa. Infratec) haben gezeigt, dass mit der verwendeten Methode eine Überschätzung der Temperatur bis auf maximal 3 °C an strahlungsreichen Wintertagen in Abhängigkeit vom Verglasungsaufbau stattfindet. Eine Korrekturfunktion wurde in die Auswertungsroutine nicht implementiert, die Abweichungen werden bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Für die lichttechnischen Untersuchungen wurde die vertikale Beleuchtungsstärke unmittelbar hinter der Verglasungen mit geeigneten Messköpfen vermessen. Für die Erfassung der Wetterdaten (Außentemperatur und Einstrahlung) wurden die im vorherigen Kapitel schon beschriebenen Sensoren verwendet. Die apparative Ausstattung wurde mit einem thermostatisierten Messkopf zur Erfassung der vertikalen Außenbeleuchtungsstärke auf der Südfassade erweitert. Damit konnte die effektive Lichttransmission der Verglasungen berechnet werden. Für die Erfassung der Raumlufthtemperatur wurde ein strahlungsgeschirmtes, ventiliertes Pt100 eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Sensoren befindet sich im Anhang A. Um mögliche Störeffekte bei der Messung der Temperatur zu vermeiden, wurden die vor der Fensterbrüstung stehenden Heizkörper während der Messperiode ausgeschaltet und der Raum mit an der gegenüber liegenden Innenwand aufgestellten elektrischen Ölradiatoren beheizt.

7.2.2 Messergebnisse

Das thermische und lichttechnische Verhalten der Verglasungsprototypen wurde aus der Datenanalyse von repräsentativen Messtagen mit unterschiedlichen Klimabedingungen (Sonnenstand, Temperaturen und Bewölkungsgrad) bewertet. Neben den Schaltungsmechanismen wurde der Einfluss auf visuellen und thermischen Komfort untersucht.

Die saisonale Abhängigkeit der optischen Eigenschaften beeinflusst bei Fensterelementen sowohl die Tageslichtversorgung im Raum als auch die Sonnenschutzfunktion. Für die Bewertung kann aus den experimentellen Daten nicht nur die Schaltung der effektiven Lichttransmission direkt ermittelt werden, sondern auch die Schaltung des effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades mit Hilfe der optischen und thermischen Modelle abgeschätzt werden. Die solare Transmission wird aus der visuellen Transmission umgerechnet, die sekundäre Wärmeabgabe nach innen lässt sich nach Gleichung 3-8 aus dem Wärmestrom durch die Verglasung im bestrahlten und unbestrahlten Zustand sowie der Bestrahlungsstärke der einfallenden Solarstrahlung näherungsweise bestimmen. Dabei wird der Wärmestrom im unbestrahlten Zustand aus gemessenen Temperaturen und berechnetem U-Wert der Verglasungen gewonnen, der Wärmestrom im bestrahlten Zustand aus gemessenen Scheiben- und Raumlufthtemperatur sowie berechnetem Wärmeübergangskoeffizient nach innen h_i ermittelt²⁵. Aus den effektiven Kennwerten sowie den Kennwerte für diffuse Strahlung werden anschließend die Kennwerte für direkte Strahlung umgerechnet. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7-4** zusammengefasst.

²⁵ Bei der Berechnung der sekundären Wärmeabgabe wird damit die Instationarität des Wärmetransportes nicht berücksichtigt. Mit einer Mittelung der verwendeten Messdaten über eine längere Zeit ist aber der Einfluss der kapazitiven Effekte auf die Ergebnisse gering.

Der Einsatz der untersuchten Prismenverglasungen als Lichtelemente beeinflusst den thermischen Komfort im Raum nicht nur durch die saisonale Steuerung der solaren Transmission sondern auch durch die Oberflächentemperatur der Innenscheibe. Für die Bewertung wurden als wesentliche Behaglichkeitsindikatoren die operative Temperatur und die Strahlungstemperatur-Asymmetrie verwendet /28, 29/.

Die operative Temperatur bildet näherungsweise bei niedrigen Luftbewegungen den Mittelwert aus der Lufttemperatur und der gemittelten Oberflächentemperatur der Raumumhüllungen und beurteilt damit gleichzeitig den konvektiven und radiativen Wärmeaustausch des menschlichen Körpers mit seiner Umgebung. In Abhängigkeit von Tätigkeit und Bekleidung der Nutzer werden in der Literatur behaglich empfundene Kombinationen von Luft- und Strahlungstemperatur definiert. Für die Bewertung der Messergebnisse wurde ein Büroraum mit einer Ganzglasfassade angenommen und die Strahlungstemperatur als Mittelwert von Scheiben- und Innenwandtemperatur (die gleich der Lufttemperatur gesetzt wurde) berechnet. Dabei handelt es sich um eine Extrembetrachtung, die von einer kompletten Belegung der Glasfassade mit Prismenverglasungen ausgeht und den Einfluss von Boden und Decke nicht berücksichtigt. Für übliche sitzende Bürotätigkeiten ergeben sich damit optimale Scheibenoberflächentemperaturen von 35-40 °C im Winter und von 20-25 °C in Sommer, die als Referenzwerte zu betrachten sind.

Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie wird als zusätzliches Kriterium zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit beim Aufenthalt zwischen gegenüberliegenden Raumflächen stark unterschiedlicher Temperaturen eingesetzt. Nach der Norm /28/ wird bei der Berechnung der untersuchte Raum in zwei Strahlungshalbräume unterteilt, deren Trennfläche parallel zu den Oberflächen mit dem größten Temperaturunterschied liegt und die entsprechenden Strahlungstemperaturen mit Berücksichtigung der Sichtfaktoren ermittelt. Für die Bewertung der Messergebnisse wurden die gleichen extremen Annahmen wie bei der Berechnung der operativen Temperatur getroffen und für jede Verglasung die Innenscheibetemperatur direkt mit der Innenwandtemperatur, die gleich der Raumlufttemperatur angenommen wurde, verglichen. Als Grenzwerte wurden aus der Norm die maximal zugelassenen Temperaturunterschiede für kalte und warme Wandflächen entnommen, die je ± 8 und ± 19 K betragen.

Für die Bewertung des visuellen Komforts wurde neben der Wirkung der optischen Schaltung auf die Tageslichtversorgung die Effektivität der Prototypen zur Reduktion der Blendungsgefahr analysiert. Als Bewertungskriterium wurden die maximal am Fenster auftretenden Leuchtdichten verwendet, die sich nach Gleichung 6.1 aus gemessenen Außenbeleuchtungsstärken und Leuchtdichteindikator der Verglasungen berechnen lassen. Als lichttechnische Größe für die Helligkeit einer Fläche eignet sich die Leuchtdichte für eine vom Einbau unabhängige Bewertung am besten. Als Referenzwerte gelten die Leuchtdichte der Sonne, die an klaren Tagen ca. 2×10^9 cd/lux beträgt und die Leuchtdichte der Himmelstrahlung die je nach Himmelszustand zwischen 1500 und 30000 cd/lux variieren kann.

Das Auftreten von Blendungseffekten hängt nicht nur von den Leuchtdichten der untersuchten Systeme, sondern auch von den geometrischen sowie lichttechnischen Eigenschaften des gesamten Raumes ab. Eine detaillierte Analyse lässt sich nur für jeden spezifischen Fall durchführen. Mit Bezug auf Fassadenorientierung, Raumnutzung und Anordnung des ISFH-Testraums (Südausrichtung, Büro, Blickrichtung der Mitarbeiter parallel zum Fenster) können die Empfehlungen zum Blendschutz aus der Literatur /30/ entnommen werden, nach den mittlere Leuchtdichten im seitlichen Gesichtsfeld bis 2000-4000 cd/lux meist nicht stören.

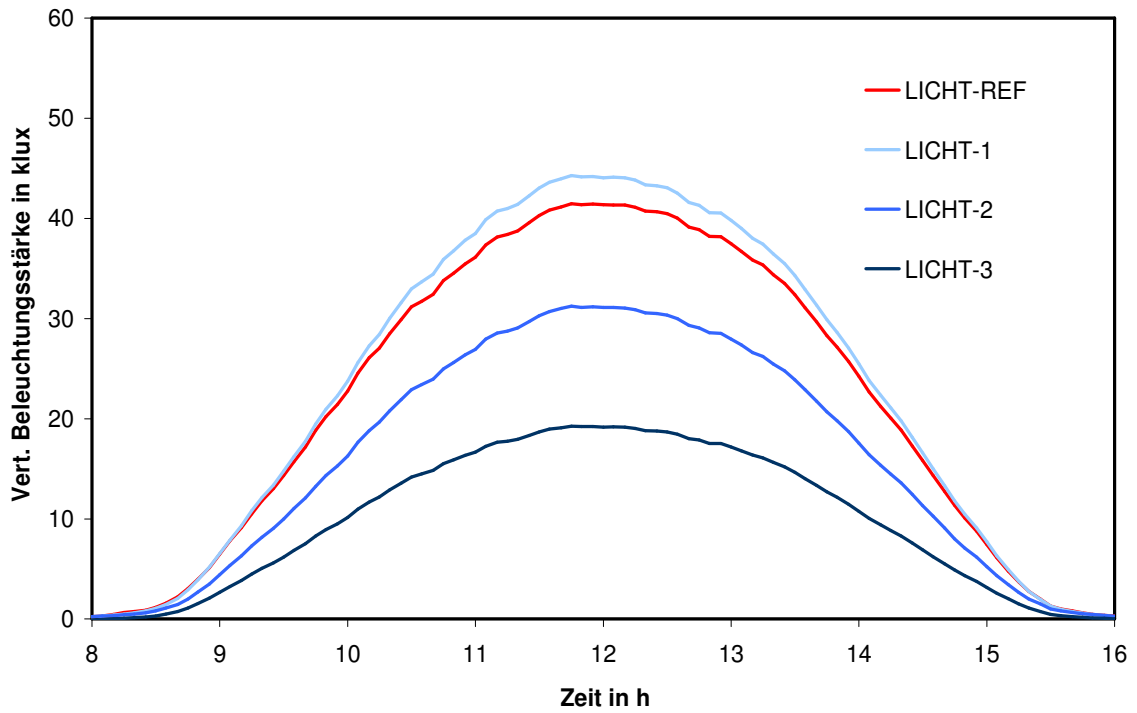


Abbildung 7-20: Tagesverlauf der vertikalen Innenbeleuchtungsstärken an einem strahlungsreichen Wintertag

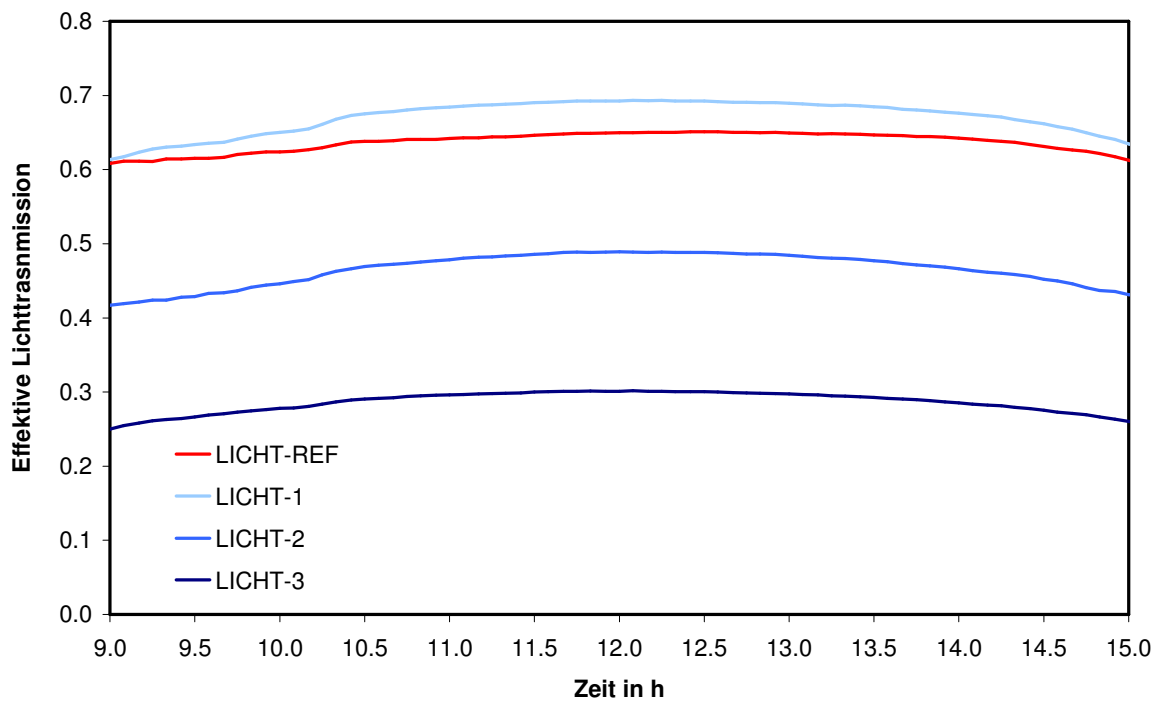


Abbildung 7-21: Tagesverlauf der Lichttransmission von Prototypen an einem strahlungsreichen Wintertag

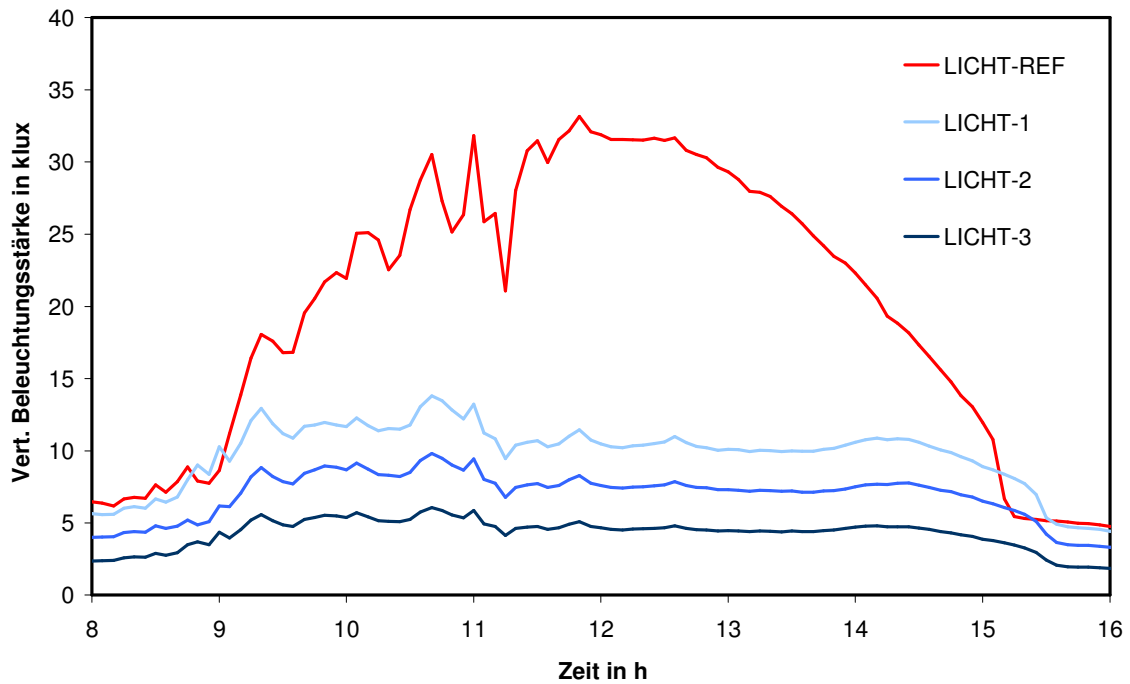


Abbildung 7-22: Tagesverlauf der vertikalen Innenbeleuchtungsstärken an einem strahlungsreichen Sommertag

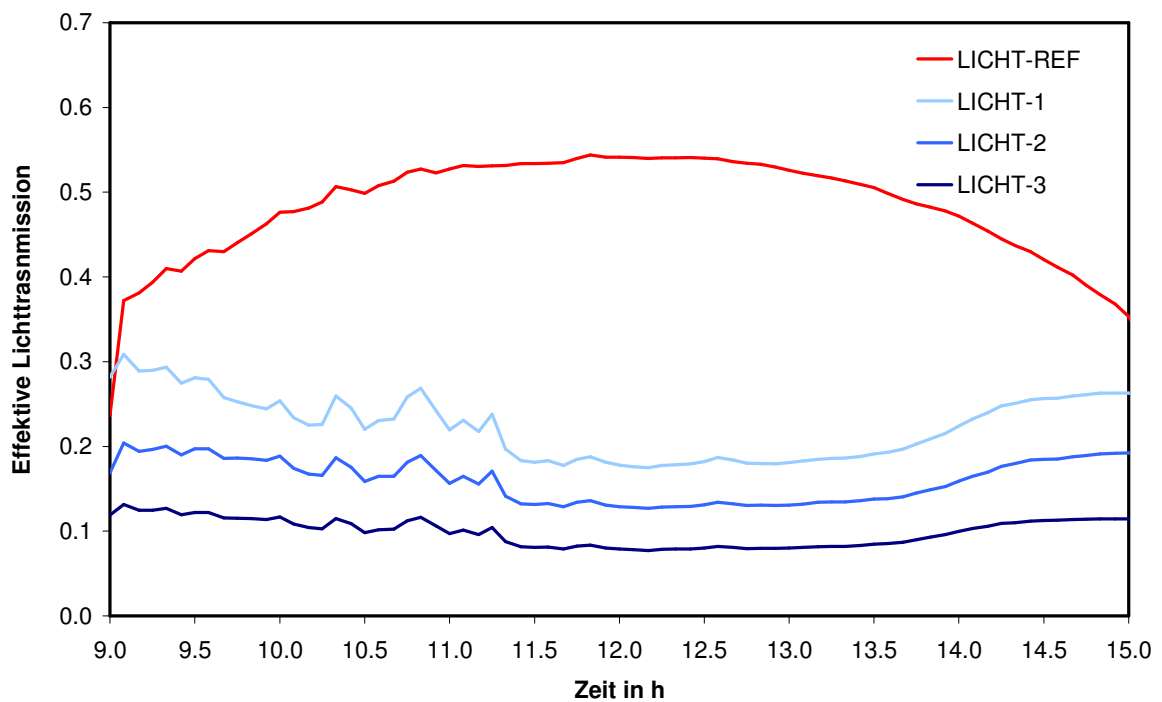


Abbildung 7-23: Tagesverlauf der Lichttransmission von Prototypen an einem strahlungsreichen Sommertag

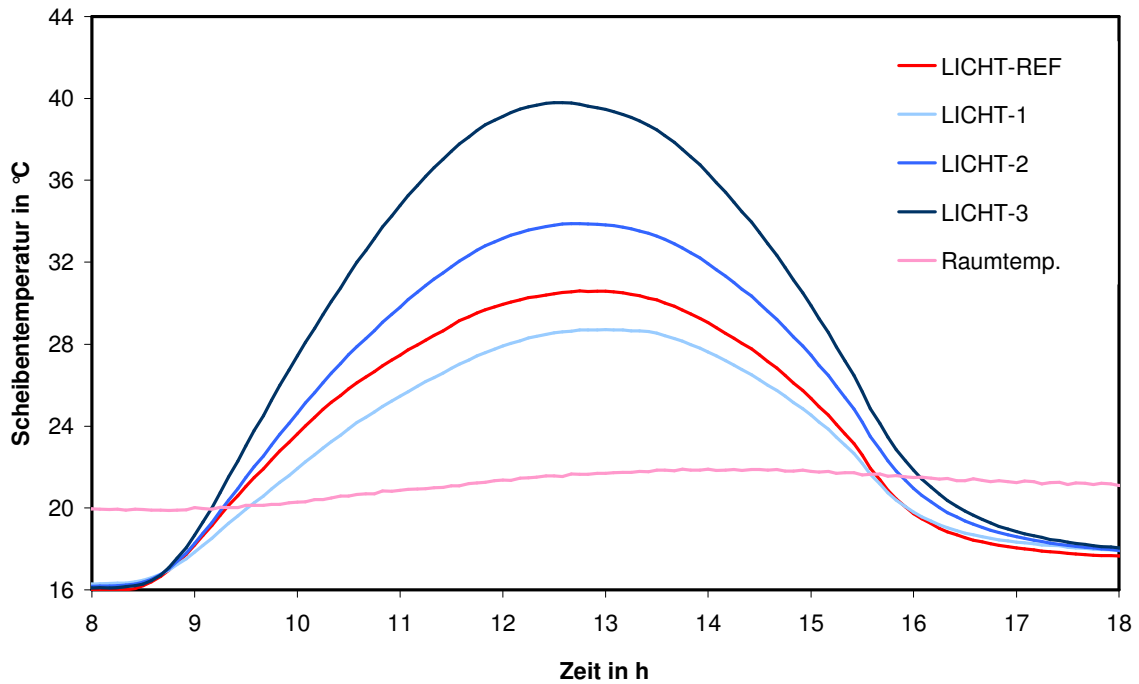


Abbildung 7-24: Tagesverlauf der Innenoberflächentemperatur von Prototypen an einem strahlungsreichen Wintertag

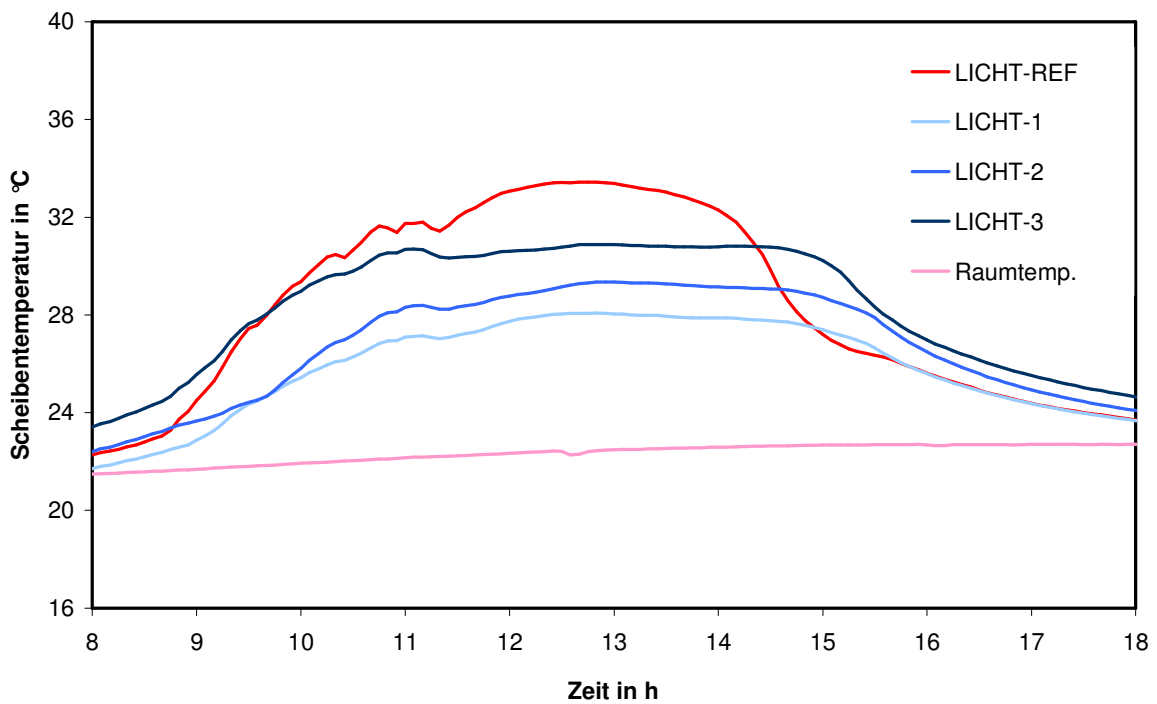


Abbildung 7-25: Tagesverlauf der Innenoberflächentemperatur von Prototypen an einem strahlungsreichen Sommertag

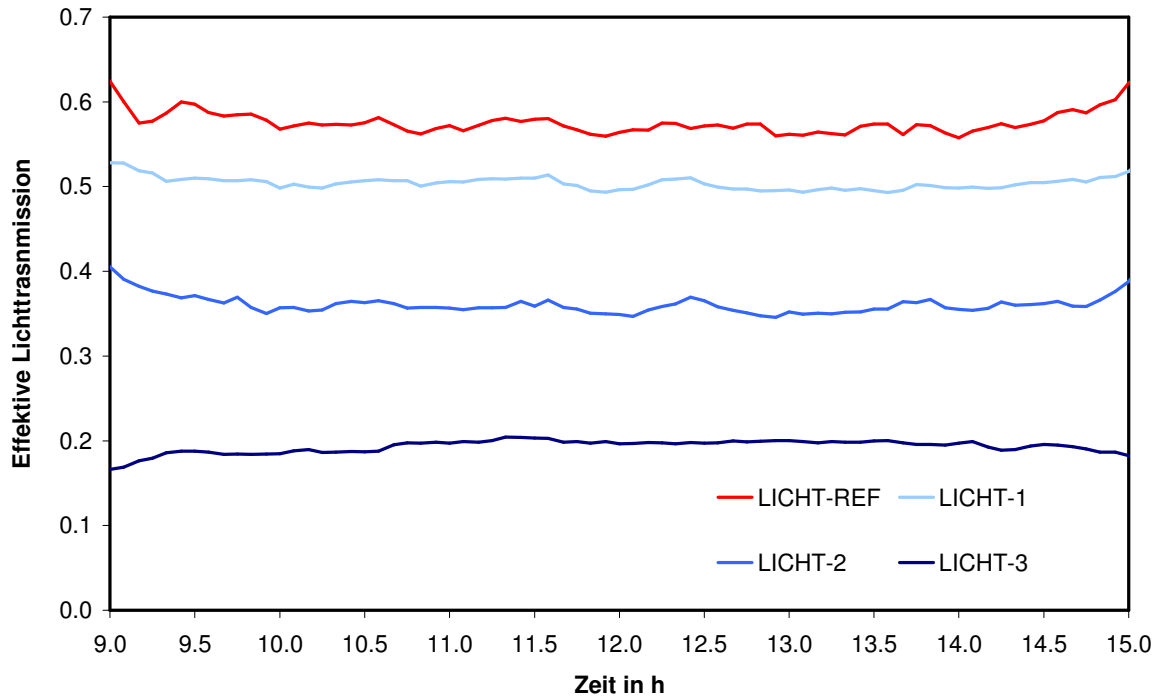


Abbildung 7-26: Tagesverlauf der Lichttransmission von Prototypen an einem bedeckten Wintertag

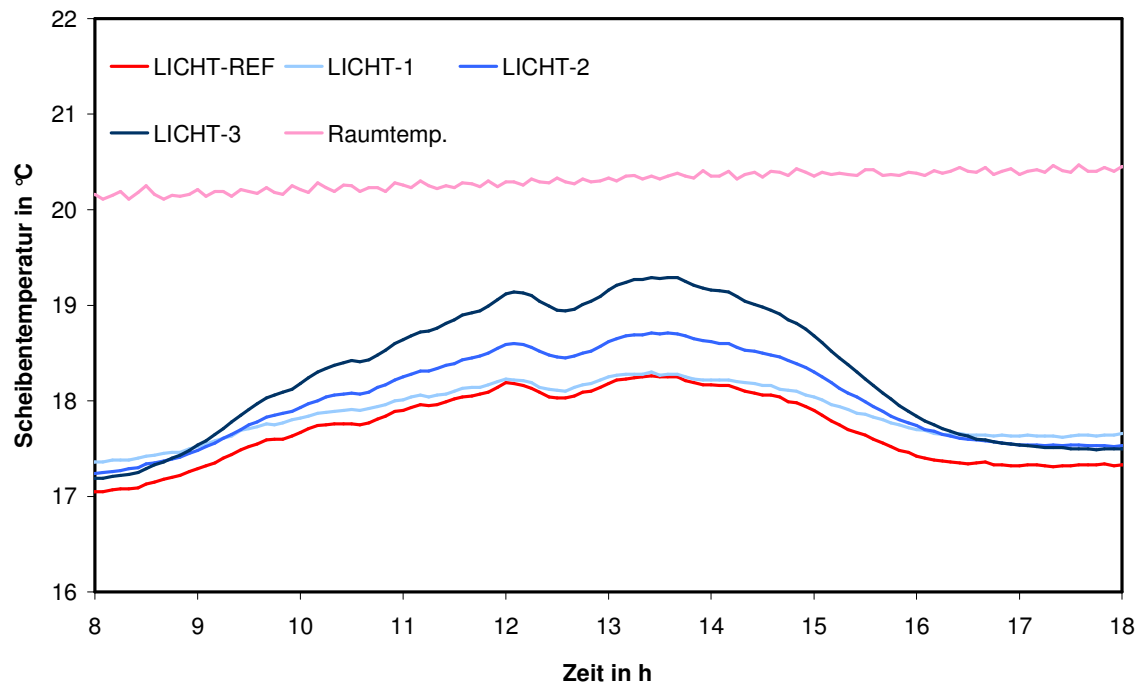


Abbildung 7-27: Tagesverlauf der Oberflächentemperatur der Prototypen an einem bedeckten Wintertag

Tabelle 7-4: Gemessene und rechnerisch ermittelte lichttechnische sowie energetische Kennwerte der untersuchten Prototypen.

Lichttechnische Kennwerte					
	$\tau_{L, \text{diff, exp}}$	$\tau_{L, \text{effektiv, exp}}$ (Winter)	$\tau_{L, \text{dir, ber}}$ (Winter)	$\tau_{L, \text{effektiv, exp}}$ (Sommer)	$\tau_{L, \text{dir, ber}}$ (Sommer)
Referenz	0.55	0.64	0.66	0.54	0.54
LICHT 1	0.47	0.69	0.72	0.18	0.08
LICHT 2	0.35	0.49	0.51	0.13	0.06
LICHT 3	0.20	0.30	0.31	0.08	0.04

Energetische Kennwerte (rechnerisch abgeschätzt²⁶)					
	g-Wert_{diff}	g-Wert_{effektiv} (Winter)	g-Wert_{dir} (Winter)	g-Wert_{effektiv} (Sommer)	g-Wert_{dir} (Sommer)
Referenz	0.42	0.47	0.48	0.42	0.42
LICHT 1	0.34	0.47	0.49	0.16	0.10
LICHT 2	0.33	0.45	0.47	0.15	0.09
LICHT 3	0.32	0.44	0.45	0.14	0.09

Aus den Untersuchungen der Verglasungsprototypen für den Einsatz als Fensterelemente lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- **Saisonale Verschattung.** Im Vergleich zur Referenzverglasung lassen sich aus **Tabelle 7.4** deutlich die sonnenstandsabhängigen Schaltungen von visuellen und energetischen Eigenschaften der Prismenverglasungen erkennen. Bei hochstehender Sonne wird mit effektiven g-Werten von ca. 0.15 eine wirksame Reduktion der Wärmeeinträge erzielt, die nicht nur mit den leistungsfähigeren Sonnenschutzverglasungen, sondern auch mit den konventionellen Kombinationen Wärmeschutzverglasung/Jalousie vergleichbar sind. Das durchgelassene Licht wird diffus in den Innenraum verteilt und gewährleistet damit eine bessere Ausleuchtung als eine nicht-streuende Verglasung, die bei steilen

²⁶ Eine mögliche Überschätzung der Oberflächentemperatur der Innenscheibe aufgrund des verwendeten Messverfahrens (s. Diskussion auf Seite 117) würde sich hauptsächlich auf die Berechnung der winterlichen effektiven g-Werte (bei vollem Einstrahlung) auswirken und würde auf eine Verringerung der g-Werte für direkte Strahlung bis 0.02 führen.

Einstrahlwinkeln nur in der Nähe vom Fenster den Raum ausreichend mit Tageslicht versorgt. Bei der Kombination Verglasung/Jalousie wird bei direkter Besonnung der Fassade die Sonnenschutzvorrichtung teilweise oder ganz geschlossen und damit ein vergleichbares oder niedriges Beleuchtungsniveau im Vergleich zu den Prismenverglasungen erreicht.

Bei tiefstehender Sonne wird die Solarstrahlung von der Prismenfolie durchgelassen. Im energetischen Bereich werden von allen Prototypen g-Werte erreicht, die vergleichbar mit der Referenz-3fach-Verglasung sind (0.45-0.49). Die Arten wie die Energie in den Raum eindringt (als direkt transmittierte Strahlung oder sekundäre Wärmeabgabe) unterschieden sich je nach Absorptionsgrad. Die Lichttransmissionen der Prototypen Licht-2 und Licht-3 reduzieren sich im Vergleich mit der Standard-Verglasung um ca. 25% bzw. 50%, was aber an strahlungsreichen Wintertagen mit vertikalen Außenbeleuchtungsstärken über 50-60 klx für eine ausreichende Tageslichtversorgung unbedenklich ist. Es ist außerdem zu bemerken, dass an solchen Tagen bei konventionellen Systemen die Sonnenschutzvorrichtung üblicherweise ganz geschlossen wird, um Blendungseffekte zu vermeiden. Damit wird auf solare Gewinne in Form von Licht und Wärme verzichtet.

An bewölkten Tagen bei überwiegend diffuser Einstrahlung weisen die Prototypen g-Werte auf (ca. 0.30), die einen guten Kompromiss zwischen sommerlichem Sonnenschutz und winterlicher Solarenergienutzung darstellen. Im Vergleich zu konventionellen Verglasungen werden deutlich niedrigere Lichttransmissionen erzielt (0.35 bzw. 0.20 gegen 0.55), die eine starke Reduktion der schon kritischen Außenbeleuchtungsstärken (5 bis 15 klx) verursachen. Unter solchen Einstrahlungsbedingungen führt der Ersatz von konventionellen Systemen mit Prismenverglasungen zu einer niedrigen Tageslichtautonomie des Raumes und einem verstärkten Einsatz von künstlicher Beleuchtung.

Da die Schaltungsmechanismen vom Sonnenstand, aber nicht von der Außentemperatur abhängig sind, können in der Übergangszeit unerwünschte Wärmeeinträge auftreten. Wenn die Sonnenschutzfunktion bei der spezifischen Anwendung der Prismenverglasung gegenüber der passiven Solarenergienutzung im Vordergrund steht, empfiehlt sich bei der Auslegung eine Struktur mit unterschiedlichen Prismenwinkeln oder Materialien, damit die Ausblendung direkter Strahlung über eine längere Jahreszeit gewährleistet wird.

- **Thermischer Komfort.** Im Winter wird ein Teil der durchgelassenen Solarstrahlung in den Verbundscheiben absorbiert und die Verglasung verwandelt sich in eine Wandheizung. Während aber beim Prototyp LICHT 2 Oberflächentemperaturen erreicht werden, die im optimalen Behaglichkeitsbereich (30-35 °C) liegen, wurden beim Prototyp LICHT 3 während der Messperiode Oberflächentemperaturen über 45 °C gemessen, die sowohl bezüglich der operativen Temperatur als auch der Strahlungstemperatur-Asymmetrie die erwähnten Grenzwerte überschreiten. Im Sommer führt die saisonale

Verschattung sowohl zu einer Reduktion der durchgelassenen Solarstrahlung als auch zu niedrigen Oberflächentemperaturen der Innenscheibe, die trotz der starken Absorption auch bei beiden Prototypen mit integrierten Diffusoren deutlich zu erkennen sind, mit maximalen Unterschieden zur Referenzverglasung in der Mittagszeit von 3 bis 5 K. Damit werden hinsichtlich beider Behaglichkeitskriterien günstigere Raumbedingungen geschaffen. Zu bemerken ist aber bei den Verbundscheiben die Zusammenwirkung von kapazitiven Effekten und hoher solarer Absorption, die unabhängig von unterschiedlichen lokalen Verschattungen der Fensterelemente und der entsprechenden Sensoren eine langsame Senkung der Oberflächentemperatur verursacht, so dass in den späten Nachmittagsstunden die zwei Prototypen um 1 bis 2 K wärmer als die Referenzverglasung werden. Wegen des Einflusses auf den thermischen Komfort wird insgesamt der Einsatz von Verbundscheiben mit PVB-Folien, die eine höhere Absorption als die im Prototyp LICHT 2 eingebaute Standard-Weißfolie aufweisen, als Blendschutzmaßnahme für die Prismenverglasung nicht empfohlen.

- **Visueller Komfort.** Die totale Reflexion direkter Strahlung sorgt bei hochstehender Sonne nicht nur für einen effektiven Sonnenschutz, sondern auch für einen wirksamen Blendschutz. Die zusätzliche Streuung des durchgelassenen Lichtes (mehrfach reflektierte direkter Strahlung oder diffuser Strahlung) entschärft eventuelle hohe Leuchtdichten, die am Fenster auftreten könnten. Bei tiefstehender Sonne ermöglichen die lichtstreuenden Scheiben bei den Prototypen Licht 2 und Licht 3 eine deutliche Reduktion der Leuchtdichten, die sich je nach Effektivität der Streuung unterschiedlich stark auswirkt. An strahlungsreichen Wintertagen, bei gemessenen vertikalen Außenbeleuchtungsstärken von 60 bis 70 klx, lassen sich maximale Leuchtdichten im Bereich von 20.000 bis 25.000 cd/m² für den Prototyp LICHT 1 und von 8.000 bis 10.000 cd/m² für den Prototyp LICHT 2 berechnen. Vergleicht man mit den erwähnten Grenzwerten, stellt man fest, dass ein ganzjähriger passiver Blendschutz mit den untersuchten Verglasungen nicht gewährleistet werden kann. An solchen Tagen ist mit möglichen Störeffekten zu rechnen, wobei die Störungen sehr stark von Größe sowie Einbauposition der Verglasung in der Fassade abhängig sind. Obwohl statistisch nicht relevant kann bei der Bewertung die Meinung der Mitarbeiter, die im Test-Raum während der Messperiode übliche Bürotätigkeit am PC geleistet haben (6 Personen über ein Jahr), mitberücksichtigt werden: Eingebaut im Oberlichtbereich (s. **Abbildung 7-19**) wurden beide Verglasungen als visuell nicht störend empfunden und der Einsatz von zusätzlichen Blendschutzmaßnahmen war nicht notwendig.
- **Gebrauchstauglichkeit.** Wie bei den TWD-Modulen dienten die Langzeituntersuchungen zur zusätzlichen Prüfung der Gebrauchstauglichkeit der Verglasungen. Wenige Wochen nach der Messinstallation wurde beim Prototyp LICHT 3 eine deutliche optische Veränderung auf der Innenseite der niedrigemittierenden Außenscheibe beobachtet (s. **Abbildung 7-38**). Dafür verantwortlich könnte die Kondensatbildung infolge von Foggingeffekten sein, die

bei starken Temperaturunterschieden zwischen Außen- und Innenscheibe an strahlungsreichen Wintertagen aufgrund der hohen solaren Absorption bei diesem Aufbau auftreten. In diesem Fall würden die Testergebnisse der Isolierglasbeständigkeit der Fa. Kömmerling bestätigt, und das Problem könnte mit einer geeigneten Konditionierung der Folie beseitigt werden (wie schon im Kapitel 5-2 dokumentiert).

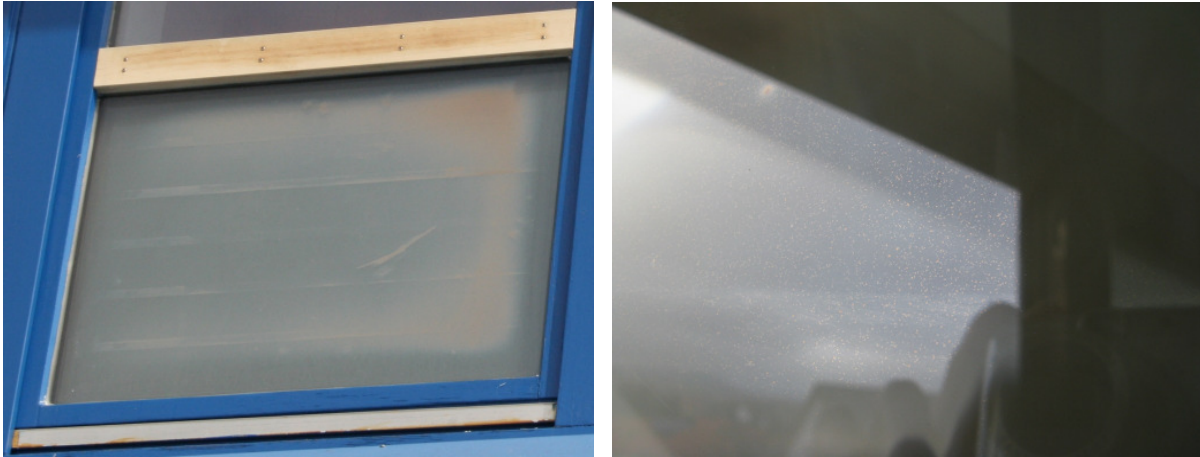


Abbildung 7-28: Auftreten von Oxidationseffekten der low-e Beschichtung beim Prototyp LICHT 3, die möglicherweise mit Fogging in Verbindung zu setzen sind.

Das Zeitstandverhalten der Prismenfolie wurde am Prototyp LICHT 1 (Verglasung ohne Diffusor) untersucht: bis zum Projektabschluss wurden keine Fehlstellen oder Alterungseffekte festgestellt.

8 Veröffentlichungen und Präsentationen

Im Rahmen des Projektes wurden zur Verbreitung der Ergebnisse die folgenden Beiträge bei Fachtagungen präsentiert:

- Giovannetti F., Fischer K.H.C. (2008), Integration of Microstructured Light-Redirecting Films into Glazing Systems, Proceedings Eurosun 2008, Lisbon (elektronische Ausgabe)
- Giovannetti F., Fischer K.H.C. (2008), Integration mikrostrukturierter Lichtlenkungssysteme in Verglasungen. Tagungsband 2. Internationales Anwenderforum „Energieeffizient + Bestand, Bad Staffelstein.
- Nitz P., Giovannetti F., Weidländer H., Wienold J. (2008), Neue Verglasungstechniken für Tageslicht und Wärmedämmung. Tagungsband FVS-Jahrestagung „Energieeffizientes und solares Bauen, Berlin.
- Giovannetti F., Fischer K.H.C. (2009), Isolierverglasungen mit mikrostrukturierten Lichtlenkfolien: Untersuchungen an großformatigen Prototypen. Tagungsband 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein
- Giovannetti F. (2009), Verglasungen mit integrierten Sonnenschutzfolien, Tagung „Zukunftsperspektive im Fassadenbau“, Linz (elektronische Ausgabe)
- Giovannetti F., Glazing systems with light-redirecting prismatic films for seasonal shading (2009). FVEE Jahrestagung “Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien”, Berlin.
- Giovannetti F. (2009), Hochwärmegedämmte Verglasungen mit mikrostrukturierten Lichtlenkfolien zur saisonaler Verschattung direkter Sonnenstrahlung, Tagung „Heizen und Kühlen mit Sonnenenergie“, Hochschule Bremenhaven.
- Giovannetti F., Rockendorf G. (2010), Bewertung innovativer transparenter Wärmedämmung für die Fassadensanierung. Tagungsband 20. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein. Eingereicht.

Des Weiteren wurde in den Zeitschriften „Glaswelt“ und „Glas, Fenster und Fassade“ sowie auf der Internetseite www.bine.info über das Projekt berichtet.

9 Literatur

- (1) Arnold M. (2001), Innovative transparente Wärmedämmung mit integrierter saisonaler Verschattung. Abschlussbericht zum DBU-Forschungsvorhaben Nr. 16853, Friedrichshafen.
- (2) Nitz P. et al. (2007), Entwicklung von Verglasungen mit regelbarem Transmissionsgrad für direktes und diffuses Licht auf Basis von mikrostrukturierten und optisch funktionalen Oberflächen und Materialien. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben Nr. 0327312, Freiburg in Breisgau.
- (3) ISO 11501:1995, Plastics - Film and sheeting - Determination of dimensional change on heating.
- (4) EN 410: 1998, Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen.
- (5) EN 673:2003, Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren.
- (6) Ruesch F., Brunold S. (2008), Langzeituntersuchungen an Abdeckungsmaterialien für thermische Sonnenkollektoren. Abschlussbericht zum BFE-Forschungsvorhaben Nr. 43729, Rapperswil.
- (7) EN ISO 4892-1:2000, Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 1: Allgemeine Anleitung.
- (8) CIE 85:1989, Solar spectral irradiance.
- (9) W.Theiss Hard- and Software, SPRAY Version 2.36, <http://www.wtheiss.com>.
- (10) Tregenza P.R. and Waters I.M. (1983), Daylight coefficients. *Lighting Research and Technology* 15, 2, s. 65-71.
- (11) Christoffers J., Deutschländer T., Webs M. (2004), Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse (TRY). Deutscher Wetter Dienst Verlag, Offenbach a. Main.
- (12) Transolar Energietechnik GmbH, TRNSYS Version 16.1, <http://www.transsolar.com>.
- (13) W.Theiss Hard- and Software, SCOUT Version 2.92, <http://www.wtheiss.com>.
- (14) Roos A. et al. (2000), Angular dependent optical properties of low-e and solar control windows – Simulation versus measurements. *Solar Energy* 69, 1, s.15-26.
- (15) Johnson P. B., Christy R. W. (1972), Optical constants of the noble metals. *Phys. Rev. B*, 6, s. 4370-4379.
- (16) O'Leary S.K., Johnson S.R., Lim P.K. (1997), The relationship between the distribution of electronic states and the optical absorption spectrum of an

amorphous semiconductor: An empirical analysis. J. Appl. Phys. 82, 7, s. 3334-3340

- (17) Bruggeman D.A.G. (1935), Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. Annalen der Physik 24, s. 636-664.
- (18) Rubin M. (1982), Calculating heat transfer through windows. Energy Research, 6, s. 341-349.
- (19) ISO 15099:2003, Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations.
- (20) Feist, W. (1998), Fenster: Schlüsselfunktion für das Passivhaus-Konzept. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 14, Passivhaus-Fenster, Darmstadt, Passivhaus Institut.
- (21) EN 1276-6:2002, Glas im Bauwesen - Mehrscheiben-Isolierglas - Teil 6: Werkseigene Produktionskontrolle und Auditprüfungen.
- (22) EN 1276-2:2002, Glas im Bauwesen - Mehrscheiben-Isolierglas - Teil 2: Langzeitprüfverfahren und Anforderungen bezüglich Feuchtigkeitsaufnahme.
- (23) EN 1279-3: 2002, Glas im Bauwesen - Mehrscheiben-Isolierglas - Teil 3: Langzeitprüfverfahren und Anforderungen an Gasverluste und Grenzabweichungen für die Gaskonzentration.
- (24) DIN 5036-1:1978, Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien - Begriffe, Kennzahlen.
- (25) MPA-BAU Hannover (2007), Prüfbericht Nr. 072074.1.
- (26) ASTM E313:2005, Standard practice for calculating yellowness and whiteness indices from instrumentally measured color coordinates.
- (27) EN 10077-1: 2006, Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 1: Allgemeines.
- (28) EN ISO 7330:2006, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.
- (29) DIN 1946-2:1994, Raumluftechnik – Teil 2: Gesundheitstechnische Anforderungen.
- (30) VBG (2005), Sonnenschutz im Büro - Hilfen für die Auswahl von geeigneten Blend- und Wärmeschutzvorrichtungen an Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen, Schriftreihe Prävention 25 (BGI 827).

Anhang A: Mess- Sensoren

In folgender Tabelle sind die im Projekt verwendeten Mess-Sensoren aufgelistet. Als Genauigkeit werden entweder die vom Hersteller angegebenen Toleranzen oder, bei eigener Kalibrierung, die Standard-Abweichungen σ .

g-Wert und U-Wert Prüfstand

Messgröße	Sensor	Genauigkeit
Globale Bestrahlungsstärke	Pyranometer	$\sigma=1.2-1.4\%$
Diffuse Bestrahlungsstärke	Pyranometer mit Schattenring	$\sigma=1.2-1.4\%$
Umgebungstemperatur	Strahlungsgeschirmter, ventilierter Pt-100	$\sigma=0.097\text{ K}$
Windsensor	Anemometer	0.2 m/s
Oberflächentemperatur	5 Pt100 Klasse A	$(0.15 + 0.002T)\text{ K}$
Fluideintritts- und -austrittstemperatur	Tauchfühlerpaar Pt100	$\sigma=0.037\text{ K}$
Massenstrom	Coriolis-Sensor	$\sigma=0.18\%$

Langzeituntersuchungen an TWD-Modulen

Globale Bestrahlungsstärke	Pyranometer	$\sigma=1.6-1.7\%$
Diffuse Bestrahlungsstärke	Pyranometer mit Schattenring	$\sigma=1.2-1.4\%$
IR-Wärmestrahlung	Pyrgeometer	$\sigma=3.0\%$
Umgebungstemperatur	Strahlungsgeschirmter, ventilierter Pt100	$\sigma=0.100\text{ K}$
Wärmestrom	4 Wärmeflussplatten 10x10 cm	5%
Oberflächentemperatur	12 Pt100	$(0.15 + 0.002T)\text{ K}$

Langzeituntersuchungen an Tageslichtelementen

Außenbeleuchtungsstärke	Thermostatisierter Messkopf	$f_1=1.8\%, f_2=1.2\%$
Innenbeleuchtungsstärke	4 Messköpfe	Klasse B
Raumtemperatur	Strahlungsgeschirmter, ventilierter Pt-100	$\sigma=0.103\text{ K}$
Oberflächentemperatur	4 Pt-100	$(0.15 + 0.002T)\text{ K}$