

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

Helge Hartwig

**Konzepte für die Integration
selbstregelnder, thermotroper Schichten
in moderne Gebäudehüllen zur passiven
Nutzung der Sonnenenergie**

Dissertation



Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Institut für Entwerfen und Bautechnik
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie

**Konzepte für die Integration selbstregelnder,
thermotroper Schichten in moderne Gebäudehüllen zur
passiven Nutzung der Sonnenenergie**

Diplom Physiker Univ. Helge Hartwig

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog
2. Priv.-Doz. Dr. rer. nat. habil. Volker Wittwer,
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Die Dissertation wurde am 10.12.2002 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 13.07.2003
angenommen.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie im Rahmen verschiedener von der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (StmWVT) geförderter Projekte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog für die Bereitschaft zur Übernahme der Betreuung der Arbeit in Form des Hauptreferates, den Rahmen an seinem Lehrstuhl, der die Durchführung der Arbeit ermöglichte und sein Interesse an interdisziplinären Fragestellungen.

Herrn Dr. Volker Wittwer möchte ich sehr danken, für die Anregung zum Thema dieser Arbeit, die eröffneten Möglichkeiten zur Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer-ISE) und für die Begleitung der Arbeit nicht zuletzt als zweiter Referent.

Mein Dank gilt auch Herrn Haruo Watanabe, Firma Affinity Ltd., Japan, der durch die zuverlässige und unkomplizierte Bereitstellung von thermotropen Gläsern die Durchführung der Arbeit in dieser Form möglich machte.

Neben allen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie möchte ich besonders danken:

Herrn Dipl. Ing. Architekt Roland Krippner für die täglich praktizierte interdisziplinäre Zusammenarbeit, der sowohl mit zahlreichen Anregungen und Informationen, als auch durch das Gegenlesen der Arbeit die Durchführung substantiell unterstützt hat.

Herrn Dr.-Ing. Architekt Werner Lang, der mich auch nach seinem Ausscheiden am Lehrstuhl mit Diskussionen und dem Gegenlesen der Arbeit unterstützt hat.

Herrn Robert Rieger, Leiter der Metallwerkstatt, der bei Aufbau und Durchführung der Versuche eine wichtige Hilfe war.

Auch den Mitarbeitern vom ZAE-Bayern, ganz besonders Herrn Dr. Andreas Beck, möchte ich für die gute Zusammenarbeit, die wichtigen Diskussionen und die fachliche Unterstützung danken.

Den Mitarbeitern am Fraunhofer-ISE, insbesondere Herrn Dr. rer. nat. Peter Nitz, gilt mein Dank für die zahlreichen, für die Durchführung der Arbeit wichtigen Informationen, Anregungen und Kontakte.

Herrn Dr. Rolf Blessing von der Firma Interpane Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH & Co. KG möchte ich danken für die Bereitschaft zur Zusammenarbeit, die bereitgestellten finanziellen Mittel und die wichtigen Diskussionen, die unter anderem einen Ausblick auf die industrielle Praxis lieferten.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei meiner Frau Eszter Jökay und meinen Kindern Pablo, Zoe, Celie und Finn bedanken, die durch ihre Unterstützung in verschiedenster Hinsicht die Arbeit möglich gemacht haben.

Helge Hartwig, München, November 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1-1	3	Thermotrope Schichten (TTS).....	3-14
1.1	Vorbemerkung	1-1	3.1	Funktionsweise.....	3-14
1.1.1	Passive Solararchitektur und aktuelle Glasarchitektur	1-1	3.1.1	Grundsätzliche Funktionsweise	3-14
1.1.2	Argumente für eine interdisziplinäre und praxisnahe Forschung	1-1	3.1.2	Hydrogele und Polymermischungen	3-15
1.2	Ziel der Arbeit	1-2	3.1.3	Thermooptische Polymerwerkstoffe.....	3-15
1.3	Methodik der Arbeit.....	1-3	3.2	Grundsätzliche Vor- und Nachteile	3-15
1.3.1	Ablaufstruktur.....	1-3	3.3	Stand der Technik	3-15
1.3.2	Methodik der Studien an thermotropen Verglasungen (TTV).....	1-3	3.3.1	Herstellung	3-15
1.4	Abgrenzung zu anderen Arbeiten.....	1-4	3.3.2	Arbeiten im Rahmen eines Forschungsverbundes, Deutschland.....	3-16
2	Gebäudehüllen zur Energie- und Komfortoptimierung	2-6	3.3.3	Affinity Intelligent Window (AIW), Fa. Affinity Ltd., Japan	3-16
2.1	Vorbemerkungen	2-6	3.3.4	Cloud-Gel, Suntek Inc., U.S.A.....	3-16
2.2	Anforderungskatalog.....	2-6	3.3.5	Temperaturabhängige Lichtdurchlässigkeit (TALD).....	3-16
2.3	Visuelle Aspekte	2-6	3.3.6	T-OPAL, Fa. Okalux, Deutschland	3-17
2.3.1	Lichtsituation.....	2-7	3.3.7	Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften.....	3-18
2.3.2	Visueller Eindruck	2-9	3.4	Muster für experimentelle Untersuchungen	3-21
2.4	Thermische Aspekte	2-9	4	Systematik und Instrumentarium	4-22
2.4.1	Energiebedarf	2-9	4.1	Systematik von Anordnungsmöglichkeiten	4-22
2.4.2	Komfort	2-9	4.1.1	Position in der Gebäudehülle	4-22
2.5	Konstruktive Aspekte	2-10	4.1.2	Raumnutzung	4-22
2.6	Gebrauch und Wartung	2-10	4.1.3	Erweiterung durch zusätzliche Freiheitsgrade	4-22
2.7	Regelungssysteme	2-10	4.2	Experimentelle Einrichtungen.....	4-25
2.8	Zentrale Konflikte.....	2-11	4.2.1	Ziel.....	4-25
2.8.1	Tageslichtnutzung versus Energiebedarf	2-11	4.2.2	Versuchsräume	4-25
2.8.2	Transparent versus transluzent	2-12	4.2.3	Prototypen thermotroper Verglasung (TTV).....	4-26
2.8.3	Einfachheit versus Komplexität	2-12	4.2.4	Station für Solarforschung.....	4-26
2.8.4	Manuell bedienbar – selbstregelnd – automatisiert.....	2-12	4.2.5	Messtechnik.....	4-27
2.9	Zusammenfassung	2-12	4.2.6	Messkonzept	4-28
			4.3	Computersimulation	4-29
			4.3.1	RADIANCE zur Lichtsimulation	4-29
			4.3.2	TRNSYS zur thermischen Simulation	4-30

5	Experimentelle Studien mit thermotropen Verglasungen (TTV)	5–31
5.1	Vorbemerkungen	5–31
5.1.1	Thermische Vorstudien.....	5–31
5.1.2	Voraussetzungen für die experimentellen Untersuchungen	5–32
5.2	Thermotrope Verglasung (TTV) vertikal im Durchsicht- und Überkopfbereich	5–33
5.2.1	Beschreibung der Eintrübungs- und Aufklärungsvorgänge....	5–33
5.2.2	Zeitbedarf für die Veränderungen.....	5–35
5.2.3	Beleuchtungsstärken und Tageslichtquotient.....	5–37
5.2.4	Leuchtdichteverhältnisse	5–41
5.2.5	Temperaturen	5–41
5.2.6	Resultate und Konsequenzen für weitere Versuche	5–41
5.3	Thermotrope Verglasung (TTV) vertikal teilflächig im Durchsicht- und Überkopfbereich	5–43
5.3.1	Raumsituation	5–43
5.3.2	Beleuchtungsstärken - Tageslichtquotient.....	5–44
5.3.3	Referenz Normalglas und Streuglas.....	5–44
5.3.4	Weitere Varianten der teilflächigen Anordnung	5–46
5.3.5	Resultate und Konsequenzen	5–47
5.4	Thermotrope Verglasung (TTV) als Auskrragung	5–48
5.4.1	Auskrragung horizontal	5–48
5.4.2	Auskrragung 30° geneigt	5–50
5.4.3	Zusammenfassende Gegenüberstellung.....	5–52
5.5	Weitere Möglichkeiten mit thermotropen Beschattungen.....	5–55
5.5.1	Horizontale thermotrope Glaslamellen	5–55
5.5.2	Vertikale thermotrope Glaslamellen	5–57
5.5.3	Thermotrope Verglasungen (TTV) in Fenstern unterschiedlicher Orientierung.....	5–57
5.5.4	Kombination von thermotropen Verglasungen (TTV) unterschiedlicher Eintrübungstemperaturen.....	5–57
5.5.5	Wendbare thermotrope Fenster	5–59
5.6	Zusammenfassung	5–60
5.6.1	Wirkung einer thermotropen Verglasung (TTV).....	5–60
5.6.2	Besondere Situationen	5–60
5.6.3	Nutzung als Tageslichtsystem	5–60

5.6.4	Resumè	5–61
6	Studien zu einem gezielten Schattenwurf auf eine thermotrope Verglasung (TTV)	6–63
6.1	Vorstudien	6–63
6.1.1	Grundlegender Ansatz	6–63
6.1.2	Visualisierung in RADIANCE.....	6–63
6.1.3	Kombination mit fixen, opaken Lamellen	6–63
6.1.4	Kombination mit Auskragungen	6–64
6.1.5	Funktionale Einschränkungen	6–65
6.2	Experimentelle Studien zur Kombination bedruckter Gläser mit einer thermotropen Isolierverglasung (TTIV).....	6–65
6.2.1	Spezifischer Ansatz.....	6–65
6.2.2	Mögliche Glasbedruckungen.....	6–66
6.2.3	Stationäre Vorberechnungen	6–68
6.2.4	Bemerkungen zu den experimentellen Studien Stationäre Vorberechnungen	6–71
6.2.5	Schwarze Streifenbedruckung	6–74
6.2.6	Weißer Streifenbedruckung.....	6–76
6.2.7	Silberne Streifenbedruckung.....	6–78
6.2.8	Weißer Punktbedruckung	6–81
6.2.9	Silberne Punktbedruckung	6–83
6.2.10	Schwarz gepunktete Bedruckungen in Form von Streifen.....	6–85
6.2.11	Grau perforierte Bedruckungen in Form von Streifen	6–88
6.3	Zusammenfassung.....	6–90
6.3.1	Erscheinungsbild	6–90
6.3.2	Funktion, Konstruktion.....	6–90
6.3.3	Resumè	6–92
7	Einsatzmöglichkeiten von thermotropen Verglasungen (TTV) an Gebäudebeispielen	7–93
7.1	Vorbemerkungen.....	7–93
7.1.1	Vorgehensweise.....	7–93
7.1.2	Bedeutung der Übergangszustände einer thermotropen Verglasung (TTV)	7–94
7.1.3	Einfluss auf den 'Charakter' des Gebäudes.....	7–94
7.1.4	Systematische Übersicht.....	7–94

7.2	Thermotrope Verglasung (TTV) im Fassadenbereich	7–97	10.3.10	Schwarz gepunktete Streifen	10–125
7.2.1	Konferenzpavillon in Weil am Rhein, D	7–97	10.3.11	Grau gelochte Streifen	10–126
7.2.2	Occidental Chemical Center in Niagara Falls, U.S.A.	7–98	10.4	Resultate der Labormessungen an thermotropen	
7.2.3	Fachhochschule in Kufstein, A	7–99		Glasmustern von Affinity	10–127
7.2.4	Verwaltungsgebäude in Stuttgart, D.....	7–100	10.4.1	Messwerte	10–127
7.2.5	Wohnbebauung in Amsterdam, NL	7–101	10.4.2	Simulation Messwerte	10–127
7.2.6	Verwaltungsgebäude in Saint-Germain-en-Laye, F	7–102	10.4.3	Simulation ‚wahre Größen‘	10–127
7.3	Thermotrope Verglasung (TTV) im Dachbereich.....	7–103	10.4.4	Farbwiedergabe	10–127
7.3.1	Gymnasium in Frejus, F.....	7–103	10.5	Resultate der Labormessungen an den Bedruckungen	
7.3.2	Krankenhaus in Berlin-Marzahn, D.....	7–104		von Interpane	10–128
7.3.3	Wohnhäuser in Wien, A.....	7–105	10.5.1	Schwarze Punkte, M276	10–128
7.3.4	Neue Messe Leipzig, D.....	7–106	10.5.2	Grau perforiert, M425	10–128
7.3.5	Bahnhof in London, GB	7–107	10.6	Erläuterungen zur CD-Beilage	10–129
7.3.6	Bürogebäude in Hoofddorp, NL.....	7–108			
7.4	Zusammenfassung	7–109			
8	Zusammenfassung	8–110			
9	Literatur	9–112			
9.1	Literaturquellen	9–112			
9.2	Eigene Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation.....	9–114			
10	Anhang.....	10–115			
10.1	Begriffsglossar	10–115			
10.2	Verwendete Abkürzungen	10–116			
10.3	Wetterdaten zu den dargestellten Versuchsreihen	10–117			
10.3.1	Vertikal vollflächig	10–117			
10.3.2	Vertikal teilflächig.....	10–119			
10.3.3	Horizontale Auskragung	10–120			
10.3.4	30° geneigte Auskragung	10–121			
10.3.5	Kombination mit schwarzen Streifen	10–122			
10.3.6	Kombination mit weißen Streifen.....	10–122			
10.3.7	Kombination mit silbernem Streifen.....	10–123			
10.3.8	Kombination mit weißen Punkten	10–124			
10.3.9	Kombination mit silbernen Punkten.....	10–124			

1 Einführung

1.1 Vorbemerkung

Im folgenden soll auf zwei Aspekte eingegangen werden, die für die Positionierung der Arbeit sowohl im Hinblick auf den Inhalt als auch die Methodik ausschlaggebend waren.

1.1.1 Passive Solararchitektur und aktuelle Glasarchitektur

Von passiver Solararchitektur spricht man heute bei Gebäuden, die durch Anpassungen wie z.B. Formgebung, Anordnung von lichtdurchlässigen Bauteilen (Fenster, Atrien) oder sonstige bauliche Maßnahmen das natürliche Angebot der Umwelt möglichst umfassend nutzen und damit weniger Fremdenergie benötigen. Dabei ist die Nutzung solarer Direktgewinne durch lichtdurchlässige Bauteile die direkteste und effizienteste Möglichkeit, die zugleich weitere wichtige Bedürfnisse, wie z.B. – im Falle transparenter Bauteile – eine Sichtverbindung nach außen, ermöglichen kann.

Von der Konzeptionierung kann man Gebäude unterscheiden, die (vgl. auch [VOS97])

- geschlossen und gut wärmegeklämt sind und den verbleibenden Heizenergiebedarf zum Großteil durch kleine, südorientierte Fensteröffnungen decken und
- Gebäude mit hohem Anteil lichtdurchlässiger Flächen, die durch die im Vergleich zu opaken Wänden schlechteren Wärmedämmeigenschaften von Fenstern zwar einen höheren Heizenergiebedarf besitzen, aber diesen auch wiederum durch die damit verbundenen solaren Gewinne decken können.

So genannte 'transparente Architektur' findet

heutzutage, durch die Möglichkeit moderner Produktionsmethoden den Baustoff Glas in verschiedensten Bauteilen und Formen massenhaft einzusetzen, die Dauerhaftigkeit von Glas, den Wunsch, die Grenze zwischen 'Innen' und 'Außen' aufzulösen und auch dessen Imagewirkung weite Verbreitung. Beispielsweise werden große Glasflächen bei Banken und Versicherungen auch bildhaft in Anlehnung an die Vorstellung begründet, dass für Passanten die Arbeit mit Geld 'transparent' sein soll. Beim Reichstagsgebäude in Berlin wurde u.a. für die Glaskuppel damit argumentiert, „angemessen einer offenen Demokratie und einem der Zukunft zugewandten Land als Zeichen zu dienen“ (S. 36, [SCH00]). Viele Prestige- und Repräsentationsbauten werden heutzutage in dieser Art ausgeführt. Diese Tendenzen in der Architektur machen deutlich, dass der Umgang mit Licht – Transparenz – Transluzenz auch speziell in gestalterischer Hinsicht in den gegenwärtigen, architektonischen Konzepten ein hoher Stellenwert beigemessen wird. Die Zuordnung zur Solararchitektur im Sinne einer ausgewogenen Energiebilanz oder einer nachhaltigen Gebäudeplanung ist dabei aber keinesfalls immer eindeutig. Häufig handelt es sich um 'Glasarchitektur' mit hohem Kühlenergiebedarf.

Der Einsatz von Regelungssystemen in der Gebäudehülle zur Sicherstellung der hohen Komfortansprüche im Inneren hat dabei eine Schlüsselrolle: Je leistungsfähiger bzw. besser abgestimmt auf das Gebäudeinnere das System ist, desto höher der Raumkomfort bei geringerem Bedarf an Haustechnik und Fremdenergie. Im Gegensatz zu reiner Glasarchitektur und nachträglich 'additiver' Haustechnik wird im Sinne einer gezielten, passiven Nutzung der gratis zur Verfügung stehenden Mengen an Strahlungs-

energien versucht, den Aufwand für den Betrieb und die Haustechnik so gering wie möglich zu halten. Durch entsprechende Maßnahmen kann an Stelle eines reinen *Energiesparens* der großzügige Umgang mit gratis zur Verfügung stehender Strahlung (Wärme und Licht) treten. Die oft so in den Vordergrund gestellte Assoziation des sich Beschränkens, Bescheidens und Sparens, um zeitgemäße Gebäude zu bauen, muss gerade auch im Zusammenhang mit passiver Solararchitektur nicht zutreffen.

1.1.2 Argumente für eine interdisziplinäre und praxisnahe Forschung

Um im oben genannten Sinne schlüssige Gebäudekonzepte zu ermöglichen, muss die strenge Separierung der Disziplinen, mit ihren unterschiedlichen Denkweisen und Zielrichtungen (Abb. 1-1), hin zu einer interdisziplinären Zusammenarbeit, sowohl im Forschungsstadium als auch bei der Planung von Gebäuden, aufgehoben werden. Neuartige Systeme, Komponenten und Bauteile müssen nicht nur in technischer Hinsicht erforscht und optimiert, sondern es müssen auch frühzeitig architektonische Aspekte berücksichtigt werden. Nicht zuletzt kann durch eine solche praxisnahe Forschung die Zeitspanne von der Grundlagenforschung bis zu ersten Anwendungen deutlich verkürzt werden. Der Nutzen interdisziplinärer Zusammenarbeit ist unbestritten und wird wieder vielfach betont herausgestellt. (z.B. [ANDR 00])

Dabei wirkt es erschwerend, dass viele solare Systeme ihren Ausgangspunkt bei technischen Gebäudekomponenten nahmen. (z.B. Warmwasserkollektoren). Technische Aspekte von Systemen und Komponenten werden bis ins Detail erforscht, eine anwendungsbezogene Betrachtung unter ganzheitlicheren Gesichtspunkten

häufig vernachlässigt. Auch diesem Umstand ist es wohl zuzuschreiben, dass viele innovative Systeme bei Anwendungen in der Praxis häufig ausschließlich an ihren Amortisationskosten gemessen werden (Kosten pro kWh). Ganzheitlichere Betrachtungen führen unter Umständen zu anderen Schlussfolgerungen.

1.2 Ziel der Arbeit

Die Arbeit befasst sich in diesem grob skizzierten Umfeld der 'Forschung mit Praxisbezug' mit den Möglichkeiten thermotroper Schichten (TTS) als selbstregelnde Systeme bei lichtdurchlässigen Bauteilen der Gebäudehülle.

Thermotrope Schichten besitzen ein von der herrschenden Temperatur abhängiges Streuverhalten für Strahlung und lassen sich im Prinzip in jede beliebige Verglasung integrieren (Kap. 3). Sie haben mit ihrem selbstregelnden Verhalten einige grundsätzliche Vorteile gegenüber heutigen Verschattungssystemen, die mit beweglichen Teilen oder starren Einrichtungen arbeiten.

Diesen attraktiven Vorteilen steht allerdings die entscheidende Einschränkung gegenüber, dass der Nutzer nicht nach eigenem, subjektiven Empfinden regeln kann. Grundsätzlich kann dieser Nachteil im Hinblick auf eine effiziente Energie- und Tageslichtnutzung aber auch ein Vorteil sein: Die Gebäudehülle 'reagiert' implizit – ohne Regelungstechnik oder Steuerung und ohne bewegliche Teile – auf die Änderung der äußeren Bedingungen, beeinflusst damit maßgeblich den Raumkomfort im Sinne einer selbst-adaptiven Architektur [SOB98].

Im Gegensatz zu häufig geführten Diskussionen zur 'objektiven' (gemeint ist die Vergleichbarkeit mit Hilfe konkreter Zahlen) Bewertung verschie-

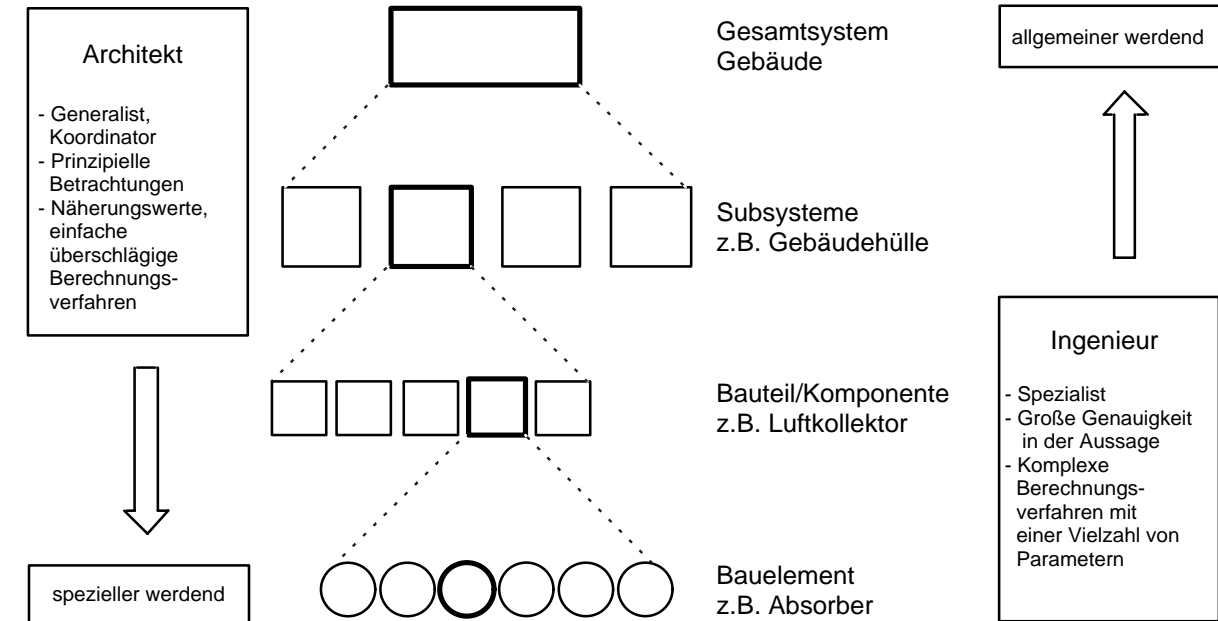


Abb. 1-1: Schematische Gegenüberstellung der Vorgehensweise von Architekt und Ingenieur im Rahmen von Bauprozessen [HART98]

dener Systeme im Sinne von 'gut' oder 'schlecht' (z.B. [GER99]), soll der Kontext für einen sinnvollen Einsatz untersucht und dargestellt werden, so dass auch eine 'subjektive' (gemeint ist eine individuelle Meinung) Bewertung möglich wird.

Primäres Ziel ist es, mithilfe eines Spektrums verschiedener, verfügbarer Methoden eine integrale Sicht fundamentaler Eigenschaften eines sehr speziellen Systems, dessen kennzeichnendes Merkmal die 'Selbstregelung' ist, in Bezug auf eine ganzheitliche Beurteilung und Anwendung in einem baulichen Kontext aufzuzeigen.

Die Ziele dieser Arbeit sind im einzelnen:

- Untersuchung der visuellen Eigenschaften

thermotroper Schichten als integriertes Regelungssystem für lichtdurchlässige Bauteile der Gebäudehülle und deren Bedeutung für die Anwendung.

- Messtechnische Charakterisierung in Bezug auf Tageslichtnutzung, Blend- und Sonnenschutz sowie das thermische Verhalten des Gebäudes.
- Erarbeitung von Konzepten für einen sinnvollen Einsatz unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter, wichtiger Anforderungen.
- Nutzung der impliziten, selbstregelnden Möglichkeiten thermotroper Schichten durch einfache, bauseitige Konzepte.
- Ausblick auf ergänzende Konzepte zum Einsatz in der Gebäudehülle.

- Ansätze zur Bewertung technisch-naturwissenschaftlicher Forschung im Umfeld von Ingenieur-Architekt (Abb. 1-1).
- Berücksichtigung und stärkere Betonung eines im Vergleich zu vielen rein technisch-naturwissenschaftlich orientierten Forschungsarbeiten breiteren Umfeldes: Integration architektonischer, naturwissenschaftlich-technischer und praxisnaher Aspekte.

1.3 Methodik der Arbeit

Um auch schon im Forschungsstadium ganzheitliche, praxis- und gestalterisch relevante Eigenschaften eines Systems darstellen zu können, wurde im interdisziplinären Arbeitsfeld neben experimentellen, messtechnischen Arbeiten großer Wert auf eine bildhafte Darstellung getesteter oder möglicher Anordnungen gelegt. Diese bildhafte Darstellung lässt sowohl eine konkrete Vorstellung von der Wirkung einer TTS, im realen Einsatz als auch eine subjektive Beurteilung zu. Darüber hinaus kann sie als Basis bei Überlegungen zu Weiterentwicklungen dienen.

1.3.1 Ablaufstruktur

Die Ablaufstruktur ist in (Abb. 1-2) dargestellt: Aus einer Zusammenstellung allgemeiner Anforderungen an moderne, innovative Regelungssysteme der Gebäudehülle mit Betonung der skizzierten Themenkreise werden anhand architektonischer Betrachtungskategorien die wichtigen Parameter für das Bauelement TTS abgeleitet. Auf Grundlage einer Systematik (Kap. 4.1) und mit Hilfe von verschiedenen Werkzeugen (Experiment: Kap. 4.2, Simulation: Kap. 4.3) werden detaillierte Studien an ausgewählten TTS-Konstellationen durchgeführt (Kap. 5 und 6). Die Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse hinsichtlich der gesetzten Schwerpunkte führt zu weiteren Konzeptvorschlägen und Beispielen

an konkreten Gebäuden (Kap. 7).

1.3.2 Methodik der Studien an thermotropen Verglasungen (TTV)

Die Studien werden je nach Fragestellung mit unterschiedlichen Werkzeugen durchgeführt (Abb. 1-3).

Der Schwerpunkt liegt auf experimentellen Untersuchungen mit erhältlichen Prototypen. Vorteile dieser Vorgehensweise sind:

- Das Schaltverhalten kann real studiert werden (Raumeindruck, Nutzerakzeptanz, zeitliches Verhalten, Ähnlichkeiten zu bekannten Phänomenen).
- Eine erste, quantitative Bewertung wird möglich.
- Eine Verifizierung der Simulation wird möglich.

Diesen experimentellen Untersuchungen mit bildhafter Aufbereitung kommt wegen der hohen Anschaulichkeit und in Bezug auf die Wichtigkeit ganzheitlicher Bewertungen eine Schlüsselrolle zu.

Ergänzend werden Möglichkeiten der Computersimulation und Bildverarbeitung genutzt, um bestimmte Fragestellungen oder Konzepte zu vertiefen. Die Tageslichtsimulationen und Bildmontagen dienen zur

- Darstellung spezieller Beleuchtungssituationen und Einflussfaktoren auf den Raumkomfort
- Visualisierung von Anwendungsmöglichkeiten
- Erarbeitung von Anhaltspunkten zur Beurteilung der Stimmigkeit eines Konzeptes

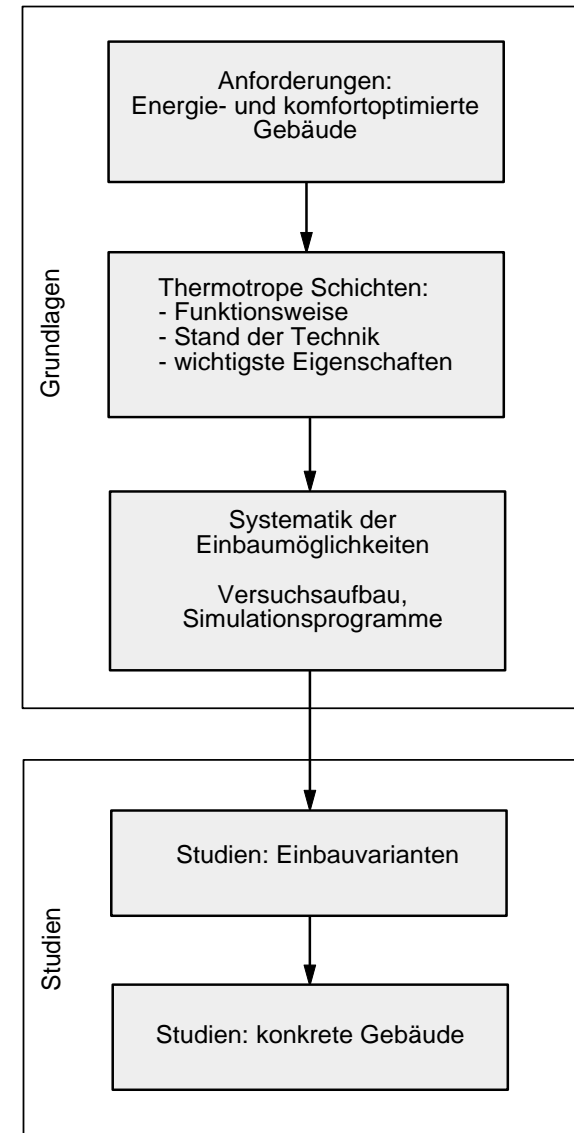


Abb. 1-2: Ablaufstruktur der Arbeit

Die thermischen Simulationen dienen zur Vorabklärung von Randbedingungen und spielen in toto eine untergeordnete Rolle.

Die abgeleiteten Kriterien werden benutzt, um die experimentellen Studien zu bewerten und anhand der Bewertung Bauteilerweiterungen und Einbauvarianten darzustellen, zu beurteilen und damit weitere Möglichkeiten zu erschließen. Bei jedem Schritt zu bestimmten Varianten wird je nach Fragestellung auf eines der Werkzeuge (Experiment, Simulation) zurückgegriffen.

1.4 Abgrenzung zu anderen Arbeiten

Arbeiten zu regelbaren Schichten

Die Regelbarkeit ist in bestimmten Situationen unerlässlich und vom Nutzer erwünscht. Regelbare Schichten haben dadurch auch prinzipielle Vorteile. In dieser Arbeit wird es als Herausforderung verstanden, gerade Möglichkeiten eines selbstregelnden Systems im Sinne einer selbstadaptiven, passiven Solararchitektur zu untersuchen.

Thermotrope Systeme für Verglasungen

In dem Verbundforschungsvorhaben „Thermotrope Systeme für Verglasung von Fenstern, Fassaden und Solarkollektoren“ [BMBF97] bzw. dem Folgeprojekt „Schichtsysteme mit veränderlichem Transmissionsgrad“ [BMBF00] liegen die Schwerpunkte einerseits auf der Entwicklung der Schichten als solcher (Herstellung, Variation wichtiger Eigenschaften) und andererseits auf der Erweiterung der thermischen und optischen Simulationsmöglichkeiten. Als Anwendung werden hauptsächlich Bauteile wie transparente Wärmedämmung (TWD) oder Solarkollektoren anvisiert. Betrachtungen zu Dachverglasungen erfolgen nur am Rande. Thermische Simulationen sollen eine Aussage über den Einfluss auf den Energiebedarf und die Funktion als Überhit-

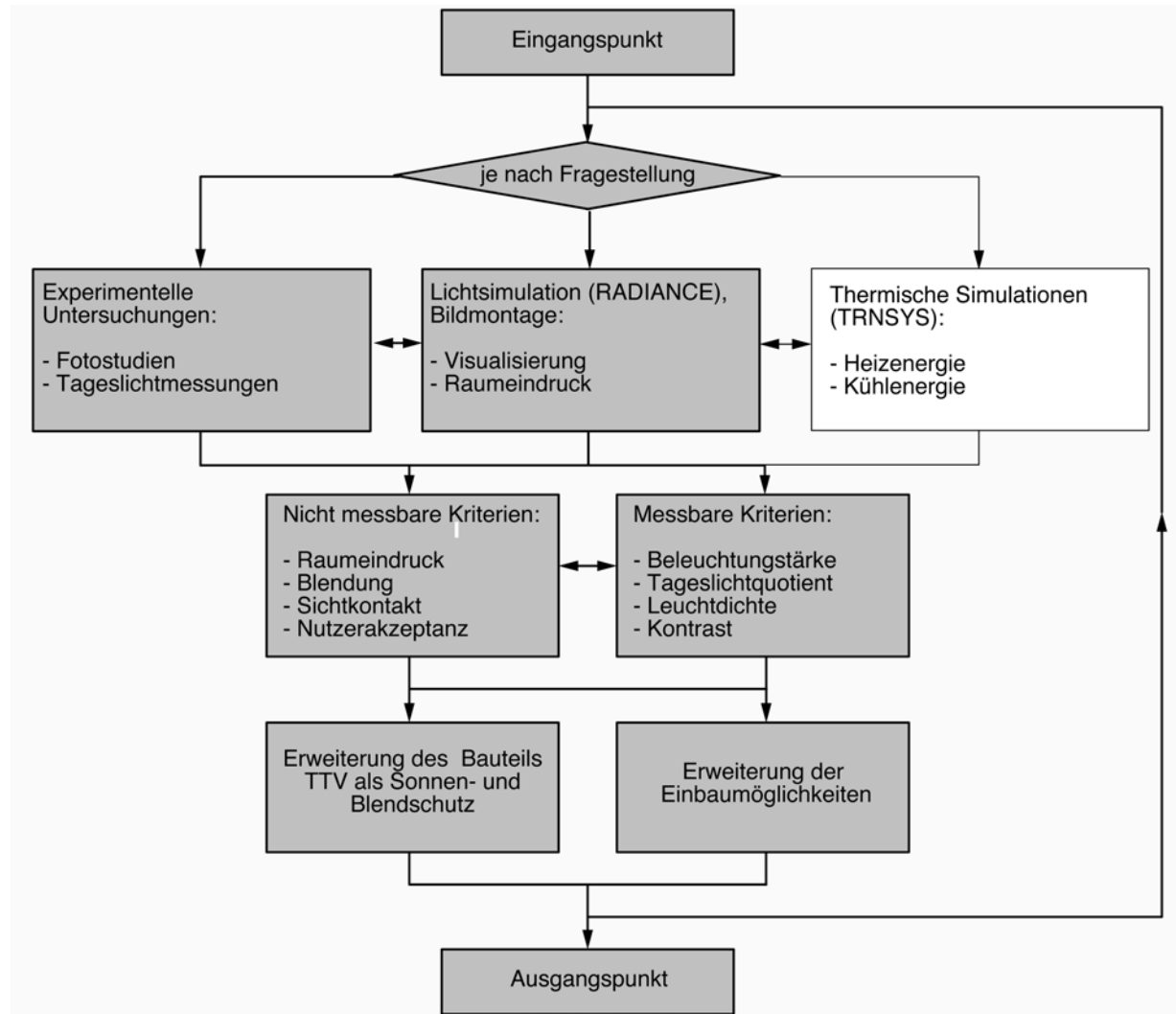


Abb. 1-3: Methodik der Studien an thermotropen Verglasungen (TTV).

zungsschutz liefern. Die optischen Simulationen dienen zur Nachbildung der Streueigenschaften der Schicht selbst, um diese zu charakterisieren und daraus Vorhersagen für Verbesserungen zu erarbeiten. Resultate optischer Simulationen sind Grundlage der vorliegenden Arbeit. Der Einbau in transparente Teile der Gebäudehülle wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Schwerpunkt behandelt und als Herausforderung mit hohem Potential in gestalterischer Hinsicht betrachtet.

Optische Modellierung und Vermessung thermotroper Systeme

Bei der Dissertation [NITZ99] werden mittels verschiedener Streutheorien die Vorgänge, die das Schalten in thermotropen Schichten bewirken, nachgebildet. Dadurch können Kriterien für die Zusammensetzung der Substanzen erarbeitet und Messungen z.B. kleinformatischer Muster an einer Ulbricht-Kugel auf reale Größenverhältnisse übertragen werden. Mess- und Rechenergebnisse dieser Arbeit sind in Kap. 3.3 berücksichtigt.

Kombination von TTS und konzentrierenden Linsen

Die Diplomarbeit „Untersuchung thermotroper Schichten unter konzentrierender Solarstrahlung für selbstschaltende Blendschutzsysteme“ [MÜL99] beschäftigt sich mit einer Kombination aus konzentrierenden Linsen und einer thermotropen Verglasung zur Ausblendung der Direktstrahlung und damit mit einem speziellen, thermischen Überhitzungsschutz. Primäres Ziel der Arbeit ist die computergestützte Modellierung der physikalischen Eigenschaften des Systems und der Test erster Prototypen. Auch hier steht nicht der visuelle Raumeindruck und die Konsequenzen für eine sinnvolle Applikation in der Gebäudehülle im Vordergrund, sondern technisch-physikalische Aspekte des Regelungssystems.

2 Gebäudehüllen zur Energie- und Komfortoptimierung

2.1 Vorbemerkungen

Grundlegende Wechselbeziehungen

Im folgenden Kapitel soll der Bezug der grundlegenden Definition von Architektur nach Vitruv (*firmitas*: Konstruktion, *utilitas*: Funktion, und *venustas*: Ästhetik, S. 26 [VIT83]) erweitert um die Begriffe der Ökologie und Ökonomie (Abb. 2-1) zu den Anforderungen an ein fassadenintegriertes Regelungssystem für den lichtdurchlässigen Bereich der Gebäudehülle aufgezeigt werden. Die zahlreichen Aspekte führen zu unterschiedlichen Schwerpunkten in Forschung, Entwicklung bzw. Umsetzung. Von den Kerneigenschaften des betrachteten Bauelements hängen bei ganzheitlicher Betrachtungsweise die Prioritäten während der Forschung ab.

Büro- und Verwaltungsgebäude

Büro- und Verwaltungsgebäude allgemein und Bildschirmarbeitsplätze im speziellen werden aus folgenden Gründen hier als Startpunkt angenommen (vgl. Abb. 1-3):

- Besonders hohe Anforderungen an den visuellen und thermischen Komfort
- Hohes Sparpotential bei der Beleuchtungsenergie
- Großer Bedarf an nutzungsspezifischen, automatisierten Regelungssystemen
- Verschärfte Überhitzungsproblematik wegen hoher interner Wärmequellen (z.B. Bürogeräte, Computer).
- Häufig hoher Glasanteil an den Fassaden
- Hohe Anforderungen hinsichtlich Imagewirkung

Allgemeine Zielsetzung beim Bauen

Um die Attraktivität von Gebäuden, das Prestige und den Raumkomfort bei einem umsichtigen Einsatz von Energie und Rohstoffen zu steigern, müssen zunehmend folgende Punkte beim Bauen berücksichtigt werden:

- Nutzung von direkten Strahlungsgewinnen durch Fenster
 - Einsatz von Tageslicht zur Beleuchtung (möglichst Vermeidung von Kunstlicht)
 - erhöhter Lichtkomfort und -qualität
 - Beitrag zum Heizwärmebedarf
- Vermeidung von Blendwirkungen oder Überhitzung
- Gezielte Lichtverteilung im Raum

Dadurch können zusätzlich zu einem angenehmen Arbeits- oder Wohnklima Heiz-, Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarf unter Nutzung der Sonnenenergie reduziert werden.

2.2 Anforderungskatalog

Die frühe Berücksichtigung ganzheitlicher Aspekte bei der Forschung und Entwicklung an Bauteilen bzw. -elementen hat folgende Vorteile:

- Die Charakterisierung der Komponente hinsichtlich praxisrelevanter, zentraler Aspekte erfolgt zu einem früheren Zeitpunkt.
- Randbedingungen für einen sinnvollen Praxiseinsatz werden dadurch früh deutlich.
- Die spätere Integrationsarbeit des Architekten wird unterstützt.
- Das Gelingen einer Bauaufgabe – nicht zuletzt in gestalterischer Hinsicht – wird unterstützt.
- Spezifische Wünsche eines Bauherren können gezielter berücksichtigt werden.

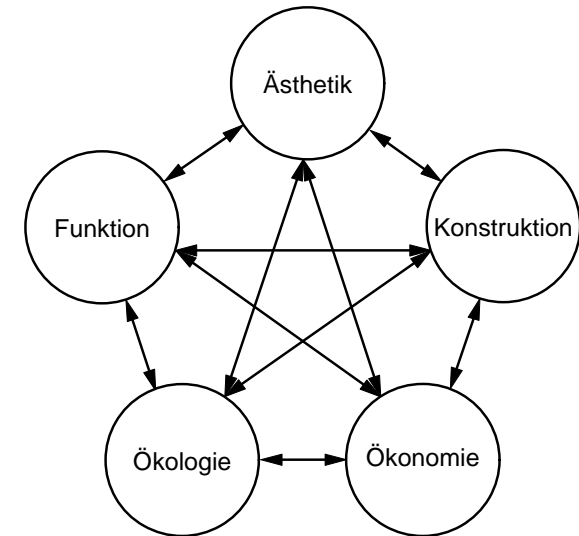


Abb. 2-1: Wechselbeziehung zwischen den grundlegenden Aspekten von Architektur nach Vitruv (S. 26, [VIT83]) erweitert um die Begriffe „Ökologie“ und „Ökonomie“.

Die grundlegenden Aspekte aus Kap. 2.1 führen über die Anforderungen an die Gebäudehülle zu den speziellen an das Regelungssystem (Subsystem: Bauteil, vgl. Abb. 1-1) der lichtdurchlässigen Bereiche (Abb. 2-2). Bei einer Bauaufgabe muss das Regelungssystem auf das Gesamtkonzept abgestimmt werden.

Die Aspekte für ein Regelungssystem der Gebäudehülle lassen sich in visuelle, thermische und konstruktive, sowie Aspekte des Gebrauchs und der Wartung gliedern. Diese Themenkreise sollen in den folgenden Kapiteln in ihrer Bedeutung für TTV kurz erläutert werden.

2.3 Visuelle Aspekte

Da diese Aspekte einerseits eng mit der Gestalt

der Gebäude und deren Erscheinungsbild korrelieren und andererseits die Wirkung einer TTV im lichtdurchlässigen Teil der Gebäudehülle entscheidend charakterisieren, haben sie hier vorrangige Bedeutung.

2.3.1 Lichtsituation

Tageslichtnutzung

Die Bedeutung der Nutzung des Tageslichtes zur gestalterischen Aufwertung, Heizung und Beleuchtung wurde in den vorangegangenen Kapiteln erläutert. Über diese Möglichkeiten hinaus ist die positive Wirkung des Tageslichts auf das Wohlbefinden, die Gesundheit, den Wachheitsgrad und das Konzentrationsvermögen unbestritten. ([SAU00], [VOL01]) Es dient z.B. zur Synchronisierung der 'inneren Uhr' mit dem Rhythmus der Tages- und Jahreszeiten. Zu geringe Beleuchtungsstärken kann Krankheitserscheinungen hervorrufen. Nicht zuletzt deswegen werden in der Diskussion um Tageslichtsysteme zunehmend Aspekte der höheren Produktivität aufgrund des höheren Wohlbefindens diskutiert und zur Rechtfertigung etwaiger höherer Investitionskosten angeführt. So wird z.B. konstatiert: „Höhere Beleuchtungsstärken sind auch betriebswirtschaftlich interessant. Eine um wenige Prozent verbesserte Produktivität überwiegt bereits die Kostensteigerung durch Verdoppelung der Beleuchtungsstärken.“ (S. 223 [HEN94])

Grundsätzlich unterscheiden sich auch hinsichtlich der Anforderungen Räume die primär mit Kunstlicht beleuchtet werden von solchen die mit Tageslicht beleuchtet werden. Während für das Kunstlicht in den Normen sehr konkrete Anforderungen in Form von Kenngrößen ([DIN5035], [EN12464], [VDI6011]) bestehen, ist es beim Tageslicht wesentlich schwieriger diese allgemein gültig fest zu legen. Obwohl bei beiden Formen der Beleuchtung in konkreten Untersuchungen

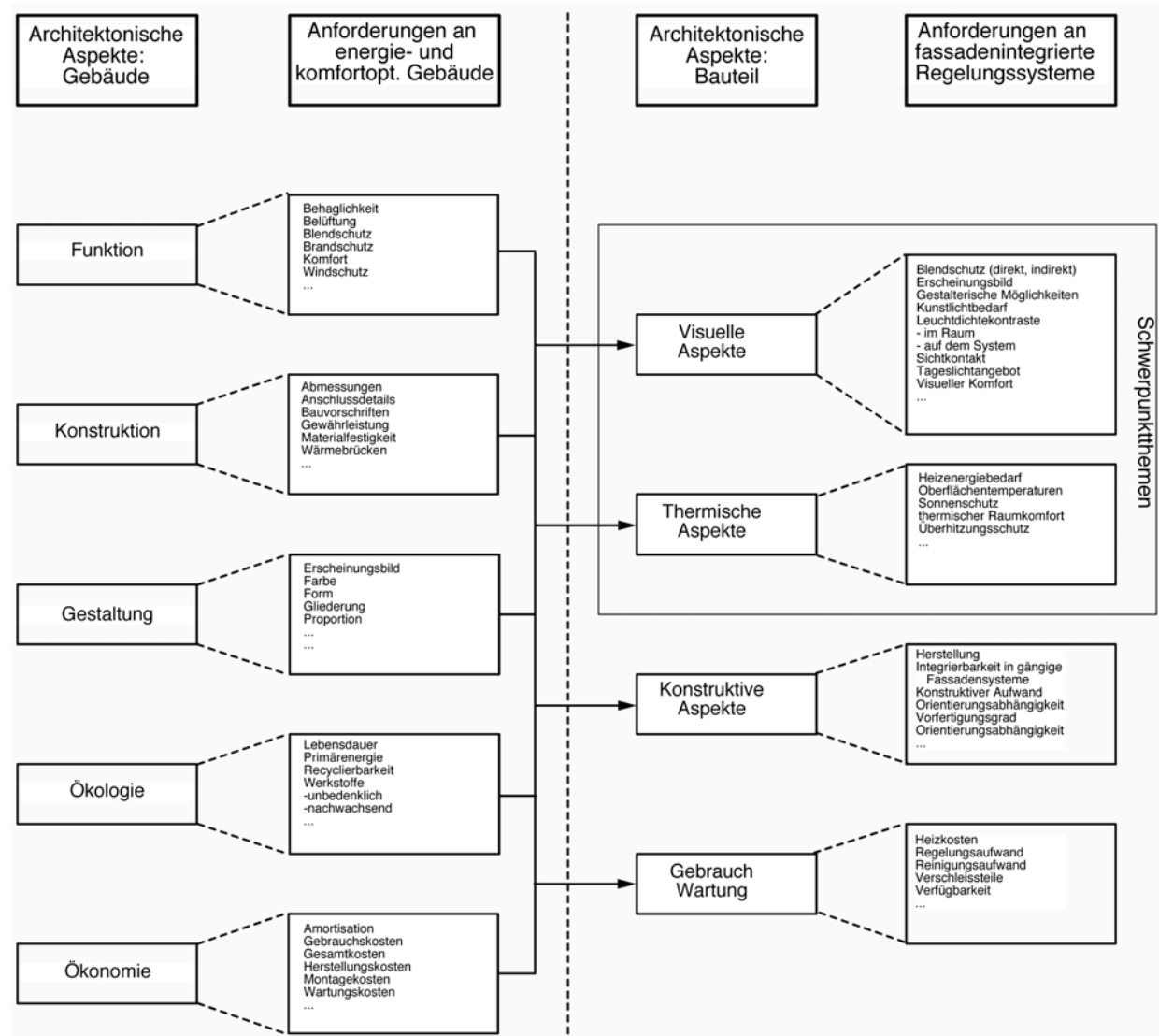


Abb. 2-2: Bezug der grundlegenden architektonischen Aspekte eines energie- und komfortoptimierten Gebäudes zu den Anforderungen an ein fassadenintegriertes Regelungssystem der Gebäudehülle (Bauteil).

mit Nutzerbefragungen immer wieder sehr hohe Bandbreiten einer als ideal empfundenen Lichtsituation festgestellt werden (z.B. [BÜL00], [JOED01]), gilt dies insbesondere für das Tageslicht. Dies ist sicherlich auch auf die sehr subjektive Einstellung zu den Verhältnissen bei natürlicher Beleuchtung zurück zu führen.

Ein weiterer positiver Aspekt des Tageslichtes ist die im Vergleich zu künstlicher Beleuchtung hohe Lichtausbeute: Ein hohes photometrisches Strahlungsäquivalent bedeutet einen hohen Lichtstrom bei geringer umgesetzter Wärmeleistung (Tab. 2-1). Tageslicht steht während gängiger Arbeitszeiten in hohem Maße zur Verfügung! (über 90 %, S. 175, [ROS00])

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke (Einheit lx) gibt an, welcher Lichtstrom von einer bestimmten Fläche empfangen wird. Anhaltspunkte für herrschende Beleuchtungsstärken bei unterschiedlichen Himmelszuständen sind in Tab. 2-2 zusammengestellt. In den Richtlinien werden z.B. für Arbeitsplätze in Fensternähe 300 lx und für Bildschirmarbeitsplätze 500 lx gefordert. Bei Großraumbüros mit hohem Reflexionsgrad der Oberflächen sind es 700 lx, bei mittlerem Reflexionsgrad 1000 lux. Für spezielle Sehaufgaben, wie z.B. chirurgische Operationen, sind 20000 lx oder mehr notwendig. (S. 222-224, [HEN94])

Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient (TQ) oder 'daylight factor' (ohne Einheit oder %) gibt das Verhältnis von innerer, zu äußerer horizontaler Beleuchtungsstärke in unverschatteter Lage an. Durch den Bezug auf die äußere Beleuchtungsstärke werden Werte besser vergleichbar. Normalerweise wird der TQ bei vollständig diffusem Himmel angegeben und ist dann ein Maß für die Tageslicht-

Tageslicht		Kunstlicht	
Klarer Himmel, Diffuslicht	125 lm/W	Leuchtstofflampe	Max. 100 lm/W
Vollständig bedeckter Himmel	115 lm/W	Glühlampe	10 – 18 lm/W
Direkte Einstrahlung	60 – 90 lm/W		

Tab. 2-1: Photometrisches Strahlungsäquivalent (Lichtstrom pro eingestrahlte Leistung in lm/W) im Vergleich von Tageslicht und Kunstlicht (vgl. auch [VDI6011])

	Beleuchtungsstärke horizontal	Leuchtdichte	Globalstrahlung horizontal
Klarer Himmel 20. Dezember 21. Juni	20 klx 100 klx	10 ⁶ kcd/m ² (Sonne direkt)	250 W/m ² 1000 W/m ²
Vereinzelte Wolken		10 – 20 kcd/m ²	
Vollständig bedeckter Himmel 20. Dezember 21. Juni	7.5 klx 20 klx	3 – 8 kcd/m ²	50 W/m ² 170 W/m ²

Tab. 2-2: Typische Werte für Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte und Globalstrahlung bei bestimmten Himmelszuständen [VDI6011]

beleuchtung bei relativ geringem Angebot. So wird in [DIN5034] ein TQ von 0.75 % – 1 % für unterschiedliche Punkte im Raum sowohl bei Wohn- als auch bei Arbeitsräumen gefordert, sofern diese von der Größe vergleichbar sind. Bei vorhandener direkter Strahlung und hohem Tageslichtangebot – Sonnen- und Blendschutz steht im Vordergrund – ergeben sich wesentlich höhere Werte, die auch durch die hohe Richtungsabhängigkeit nicht ohne weiteres vergleichbar sind. Trotzdem kann es sinnvoll sein den Bezug zur Außenbeleuchtungsstärke herzustellen.

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte (Einheit cd/m²) ist ein Maß für den in einer bestimmten Richtung ausgestrahlten Lichtstrom. Sie bestimmt den Adaptionszustand des Auges. Dadurch hängt eine mögliche Blendung mit der Leuchtdichte bzw. deren Verteilung im Raum zusammen. Typische Werte für unter-

schiedliche Himmelszustände sind in Tab. 2-2 enthalten.

Blendung

Zur Blendung können zu hohe Leuchtdichten sowie zu hohe Leuchtdichteunterschiede führen (S. 4, [EN12464]). Bei möglichen Blendeffekten unterscheidet man zwischen (S. 9, [VDI6011])

- Direktblendung: Blick bei Direktstrahlung in die Sonne
- Hintergrundblendung: Durch Strahlung hell beleuchteter Hintergrund überblendet die Sehaufgabe.
- Reflexblendung: Spiegelung einer hell beleuchteten Oberfläche z.B. im Bildschirm

In [DIN5035], S. 9, wird gefordert, dass das Verhältnis der Leuchtdichten im näheren Umfeld zur

Leuchtdichte der Sehaufgabe (z.B. Bildschirm) den Faktor 3 und im ferneren Umfeld den Faktor 10 nicht überschreiten soll. Ob Blendung auftritt ist stark von der Umgebung und z.B. auch der Position von Bildschirmen abhängig. Bisher wurde bei den umgebenden Oberflächen eine mittlere Leuchtdichte von 200 cd/m^2 bis max. 400 cd/m^2 zugelassen. In ISO9241 werden unter der Annahme von hochwertig, entspiegelten Bildschirmen bereits 1000 cd/m^2 geplant (S. 176, [WIEN01]). Häufig ist schon durch eine abgestimmte Aufstellung von Bildschirmen eine Blendung vermeidbar. In [VBG02], S. 21, wird fest gehalten, dass Leuchtdichten bei „... Sonnenschutzvorrichtungen im seitlichen Gesichtsfeld der Mitarbeiter von 2000 cd/m^2 bis 4000 cd/m^2 meist nicht stören.“

Bei restriktiven Anforderungen an die Beleuchtung, die unter anderem notwendig wird, wenn eine beliebige Aufstellung von Bildschirmen möglich sein soll, wird durch die Beschattung gegen Tageslicht häufig Kunstlicht erforderlich. Die Bandbreite der subjektiven Empfindung ist noch bedeutend höher, je nachdem welche innere Haltung der Nutzer zum Tageslicht hat. Dies ist vor allem auch in der Adaptionfähigkeit des Auges begründet. So muss z.B. eine Beleuchtungsstärke der Arbeitsfläche von 10000 lx nicht zur Blendung führen, da sich die Leuchtdichte der Umgebung mit erhöht.

Ferner ist die Einschätzung der Blendwirkung eines vollständig diffusen Nordhimmels umstritten: Durch einen diffusen, d.h. vollständig bedeckten Himmel oder einen Nordhimmel ohne direkte Sonne würden sich in den seltensten Fällen Personen gestört oder geblendet fühlen. Trotzdem kann dies grundsätzlich - und vor allem subjektiv empfunden - unter Umständen der Fall sein.

Farbwiedergabeindex R_a

Der Farbwiedergabeindex (ohne Einheit, maximaler Wert 100) beinhaltet, inwieweit z.B. durch ein Tageslichtsystem oder künstliche Beleuchtung real vorhandene Farben oder Lichtfarben wiedergegeben werden ('farbneutral'). Der Farbwiedergabeindex wird in verschiedene Stufen eingeteilt und bestimmten Anwendungsbereichen zugeordnet bzw. dafür empfohlen. (z.B. 1A: 90 – 100 für Farbabmusterung, 1B: 80 – 89 Wohnung, Hotel, Büro, etc., S. 241, [HEN94]). Im Sinne der Farbneutralität für Tageslicht wird für ein Tageslichtsystem ein möglichst hoher Wert gefordert.

2.3.2 Visueller Eindruck

Zu den Aspekten des visuellen Eindruckes werden hier zahlreiche Kriterien gezählt, die größtenteils sehr schwer objektiv zu fassen sind: der innere und äußere Raumeindruck, das innere und äußere Erscheinungsbild des Bauteils selbst, die gestalterischen Möglichkeiten und die Gebrauchsmkmale des Bauteils. Die Eigenschaften des Bauteils hinsichtlich dieser Anforderungen können nur dokumentiert und beschrieben werden. Lediglich die Forderung der Arbeitsstättenrichtlinien (S. 12, [AVO98]) nach Sichtbezug nach außen muss gewährleistet werden. Dies kann auf unterschiedlichste Art sicher gestellt werden.

2.4 Thermische Aspekte

2.4.1 Energiebedarf

Von den Systemen der Gebäudehülle wird in erster Linie der Energiebedarf für Heizung, Kühlung und Beleuchtung beeinflusst. Der Heizenergiebedarf (HEB) von Gebäuden liegt bei etwa 35 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland. Heiz- und Kühlenergiebedarf (KEB) werden von den Transmissionswärmeverlusten, den Lüf-

tungswärmeverlusten und der inneren Wärmelast (Zugewinn durch installierte Geräte, Abwärme von Personen u.ä.), sowie den direkten Strahlungsgewinnen durch Fenster bestimmt. Anforderungen an den Wärmeschutz werden von [DIN4108] der Wärmeschutzverordnung [WVO95] und neuerdings der Energieeinsparverordnung [ENEV02] fest gelegt.

Mit der zunehmenden Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften heutiger Bauteile können die Transmissionswärmeverluste stark verringert werden. Bei Bürogebäuden wird durch die primäre Nutzung tagsüber (Strahlungsgewinne), den Einsatz zahlreicher Bürogeräte (interne Wärmegewinne) und durch die großflächigen, gut wärmedämmten Fenster der HEB so drastisch reduziert, dass sich Schwerpunkte der Betrachtung vom winterlichen auf den sommerlichen Wärmeschutz verschieben. Häufig liegt der Anteil des Jahreskühlenergiebedarfs bereits im Bereich des Jahresheizenergiebedarfs oder sogar darüber.

Der Beleuchtungsenergiebedarf hängt weitgehend von der Anordnung und Größe von Fensterflächen, der Art des Sonnenschutzes, etwaigen Tageslichtsystemen, den Raumgeometrien, den Oberflächenfarben und den Anforderungen an die Sehaufgabe ab. Die Übersicht über das photometrische Strahlungsäquivalent (Tab. 2-1) macht deutlich, dass durch den hohen Lichtstrom bei geringer Wärmelast die Nutzung von Tageslicht auch ein wichtiger Beitrag zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs sein kann.

2.4.2 Komfort

Den thermischen Raumkomfort beeinflussen die Raumtemperaturen, die Luftbewegung, Luftfeuchte, Bekleidungsgrad etc.. Die Festlegungen in den Normen und Vorschriften basieren auf den Untersuchungen von Fanger [FANG70].

Kernaussagen sind Forderungen nach einer bestimmten operativen Temperatur (Gewichtung aus Raumluft- und Oberflächentemperaturen). Zu beachten ist insbesondere, dass es sich um ein Behaglichkeitsfeld handelt, welches nicht von einer einzelnen Größe, sondern der in Kombination auftretenden Parameter abhängt.

Für die Raumlufttemperatur werden Werte zwischen 20°C und 27°C gefordert. Die Oberflächentemperaturen sollten nicht mehr als 2 – 3 K davon abweichen und nicht zu asymmetrisch sein (3 – 4 K). Bei höheren Temperaturen der Umgebungsflächen werden auch Raumlufttemperaturen von 18°C als angenehm eingestuft (S. 32, [AIT99]). Untersuchungen zeigen aber, dass auch diese Einstufung stark jahreszeitabhängig ist und z.B. nicht auf großflächige Wand- oder Bodenheizsysteme (z.B. transluzente Wärmedämmung, vgl. [HART95]) zutrifft. Für die Luftbewegung werden in Abhängigkeit der mittleren Luftgeschwindigkeit und der Lufttemperatur maximale Turbulenzgrade für einen behaglichen Bereich gefordert (S. 33, [AIT99]). Im Winter störende Luftbewegungen in Räumen können im Sommer als angenehm empfunden werden.

Die Festlegung eines 'Predicted Mean Vote' (PMV) und 'Predicted Percentage of Dissatisfied' für Nutzer zeigt, wie sehr es sich in Realität auch hier um statistische Aussagen handelt (z.B. S. 26, [AIT99]). So liegt das Minimum für den PPD bei 5 %, was bedeutet, dass bei einer optimalen Komfortbewertung immer noch 5 % des Querschnittes von befragten Personen unzufrieden sein können.

2.5 Konstruktive Aspekte

Darunter werden hier Aspekte verstanden, die mit der konstruktiven Ausführung, der Integration in bestimmte Fassaden und dem damit zusammen

hängenden Aufwand verbunden sind. Regelungssysteme die einen geringen konstruktiven bzw. Herstellungsaufwand erfordern, gut integrierbar sind, vorzufertigen und unabhängig von der Fassadenorientierung bzw. genauen Lage sind, haben Vorteile. Dabei gewinnen heutzutage neben gestalterischen Aspekten und Wirtschaftlichkeitserwägungen vor allem ökologische an Bedeutung. Diese Aspekte werden hier ausgeklammert, da die TTV a priori Vorteile bietet, die nicht in Frage gestellt werden.

2.6 Gebrauch und Wartung

Darunter werden sowohl Forderungen nach geringen Energiekosten (Heizung, Kühlung, Beleuchtung), einem geringen Regelaufwand bzw. einer hohen Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit), als auch nach geringem Reinigungs- bzw. Wartungsaufwand (wenige oder wenig anfällige Verschleißteile) zusammengefasst. Im Hintergrund stehen auch hier Forderungen nach Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und einer verträglichen Ökologie an das Gesamtgebäude. Hier sind, abgesehen von der fehlenden Regelbarkeit, die primären Vorteile der TTV ebenso wenig in Frage gestellt.

2.7 Regelungssysteme

In Verwaltungsbauten kommen heutzutage eine Vielzahl von Regelungssystemen im lichtdurchlässigen Fassadenbereich zum Einsatz, die sich vereinfacht in folgende Gruppen einteilen lassen:

- unveränderbar, wie fixe Lamellen, Auskragungen, richtungsselektive Prismen oder andere bauliche Maßnahmen
- bewegliche (manuell oder automatisiert), wie Jalousien, Rollos, Markisen, Storen, etc.
- selbstregelnde Systeme, wie thermotrope Schichten

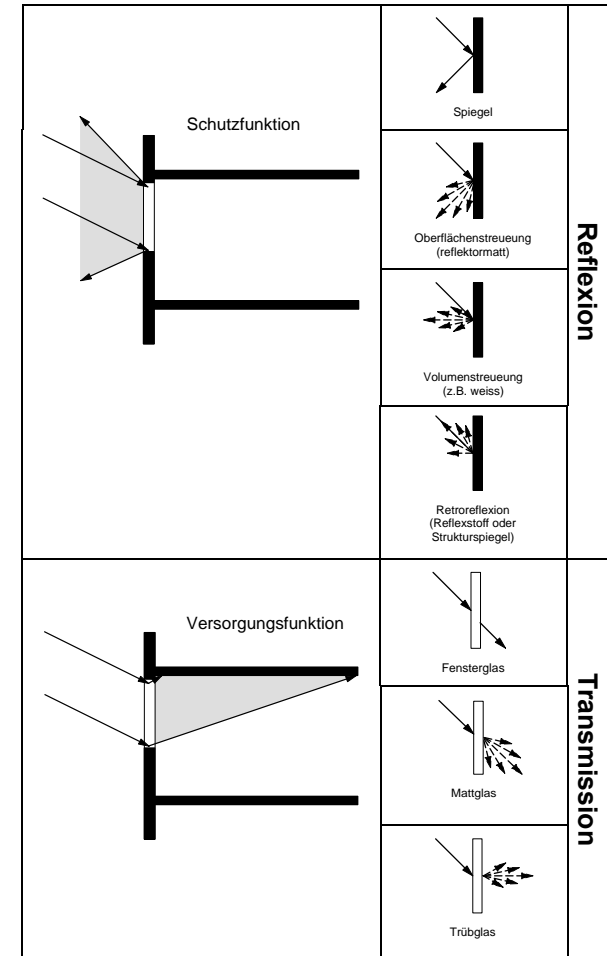


Abb. 2-3: Schutz- und Versorgungsfunktion von Regelungssystemen durch unterschiedliche Art der Reflexion bzw. Transmission in Anlehnung an [VDI01].

Regelungssysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie jahreszeitabhängige oder veränderbare g-Werte haben und somit auf unterschiedliche Klimabedingungen oder geänderte Anforderungen im Innenraum abgestimmt sein können. Ihrer Schutzfunktion (Winterlicher Wärmeschutz, Sommerlicher Wärmeschutz, Blendschutz) und Versorgungsfunktion (Tageslichtversorgung, Durchsicht, Luftaustausch) erfüllen sie durch unterschiedliche Formen der Reflexion bzw. Transmission von Strahlung (Abb. 2-3). Heutzutage kommen bei Verglasungen sehr häufig aufwendige, bewegliche Verschattungssysteme zum Einsatz, die zwar Blendung und Überhitzung vermeiden aber keine optimale Raumausleuchtung ermöglichen (z.B. nur die Optionen 'geschlossen' oder 'offen'). Die natürliche Raumbelichtung wird verhindert. Direktgewinne werden blockiert, auch wenn sie zu Beleuchtungs- oder Heizzwecken eigentlich erwünscht sind. Deswegen werden immer wieder neue Systeme entwickelt, die mit unterschiedlichem Aufwand das Ziel haben, Direktstrahlung auszublenden und Diffusstrahlung zur Tageslichtbeleuchtung zuzulassen.

2.8 Zentrale Konflikte

Im folgenden soll auf widersprüchliche Anforderungen, die eines Kompromisses oder einer klaren Gewichtung bedürfen, hingewiesen werden.

2.8.1 Tageslichtnutzung versus Energiebedarf

Heizenergie-, Kühlenergie- und Kunstlichtbedarf in einem Raum bedingen sich gegenseitig. Hohe Direktgewinne reduzieren den Heizenergiebedarf im Winter, erhöhen aber den Kühlenergiebedarf im Sommer und können zu Blendwirkungen führen. (Abb. 2-4)

Blendschutz kann im Gegensatz zum Sonnenschutz auch im Winter notwendig sein. Die Betätigung einer Beschattungseinrichtung erhöht dann

aber den Heizenergiebedarf. Viele Beschattungseinrichtungen dunkeln den Innenraum so stark ab, dass der Einsatz von Kunstlicht notwendig wird. Auf die Änderung der Wetterlage wird häufig durch den Nutzer nicht angemessen reagiert. Bei allen Versuchen diese Aspekte quantitativ zu erfassen, spielt der Nutzer eine Schlüsselrolle. Die Streubreite für das reale Nutzerverhalten ist so hoch, dass es praktisch unmöglich ist, aus einem 'mittleren' Nutzerverhalten auf ein reales zu schließen. Objektiviert Vergleiche verschiedener Systeme zur Beschattung durch ein angenommenes Nutzerverhalten und die Verknüpfung von Tageslicht- und thermischen Simulationen in Bezug auf die Beeinflussung des Energiebedarfs sind mittlerweile möglich [REIN01]. Das darf aber nicht darüber hinweg täuschen, dass diese Form der Optimierung nur einen von zahlreichen Aspekten aufgreift.

In der Baupraxis bestehen im Allgemeinen aber klare Vorstellungen, was ein Beschattungssystem leisten muss, um dem Gesamtkonzept gerecht zu

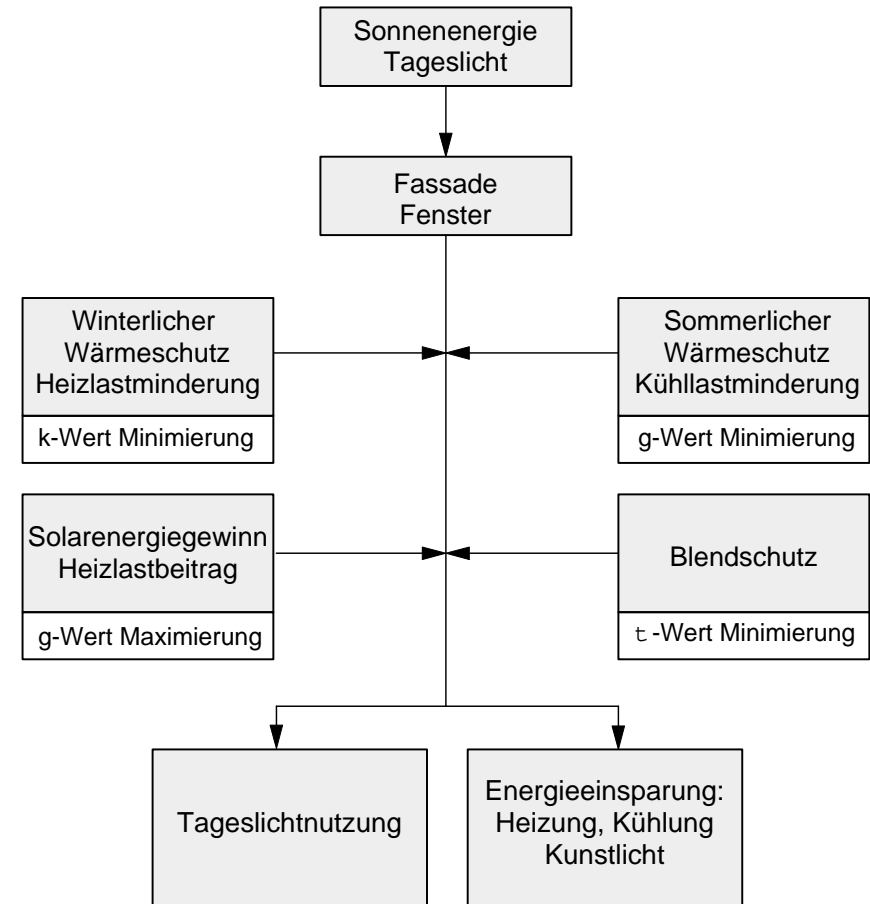


Abb. 2-4: Zusammenfassung wichtiger, teilweise widersprüchlicher Optimierungskriterien zur Gewährleistung der Behaglichkeit bei Nutzung von Tageslicht und Minimierung des Energiebedarfs in Anlehnung an [VDI01].

werden, oder was es nicht unbedingt zu leisten braucht. Im Vordergrund stehen Anforderungen von Benutzern und Bauherren nach einem positiven Raumeindruck oder Situationen die unbedingt verhindert werden können sollen. Rein energetische Argumente werden dadurch häufig in

den Hintergrund gedrängt oder zumindest relativiert.

2.8.2 Transparent versus transluzent

Transparente (durchsichtige) Bauteile lassen im Gegensatz zu transluzenten (durchscheinenden) Bauteilen einen Sichtkontakt zu, während beide einen Raum mit Tageslicht versorgen können. Transluzente Bauteile haben durch ihre Streueigenschaften für Strahlung einerseits eine gleichmäßigere Raumausleuchtung zur Folge, andererseits heben sie die Leuchtdichteunterschiede der Sonne und der diffusen Himmelsstrahlung auf. Dadurch bieten sie einen wesentlich effizienteren Blendschutz im Gegensatz zu transparenten Verglasungen, die durch die Transparenz selbst bei stark vermindertem Strahlungsdurchlass noch eine Blendwirkung haben können.

2.8.3 Einfachheit versus Komplexität

Einfache Systeme zeichnen sich im allgemeinen durch geringere Kosten, eine höhere Verfügbarkeit (geringere Ausfallzeiten) aber auch durch die Notwendigkeit von Kompromissen hinsichtlich der Aspekte Tageslichtversorgung, Blendschutz, Sonnenschutz und Heizenergiebeitrag aus. Komplexere Systeme erlauben eine Optimierung in benutzerspezifischer Hinsicht bezüglich der genannten Aspekte auf Kosten der Investitions-, aber auch der laufenden Kosten (Betrieb, Wartung) und der Verfügbarkeit.

Darüber hinaus gilt auch der Grundsatz: je weniger Reflexionen, zusätzliche Schichten oder sonstige Vorrichtungen notwendig sind, desto höher ist die Effizienz bei der Tageslichtbeleuchtung und desto geringer ist der Aufwand bei der Konstruktion, Wartung etc.. „Aus diesem Grunde sind möglichst einfache Systeme, von denen in Bezug auf die Tageslichtnutzung das Fenster das gängigste und einfachste ist, komplexeren meis-

tens vorzuziehen.“ (S. 5, [FONT99]).

2.8.4 Manuell bedienbar – selbstregelnd – automatisiert

Häufig ist es schon wegen der sehr individuellen Licht- und Blendungswahrnehmung notwendig, benutzerabhängig regeln zu können. Viele Benutzer möchten von vornherein nicht auf eine Einflussmöglichkeit verzichten. Auch belegen Studien, dass bei manueller Bedienung subjektiv andere Beleuchtungssituationen zugelassen werden, als wenn die Raumkonditionierung fremd bestimmt ist.

In einer Studie wurden verschiedene Regelungsmöglichkeiten für die Beleuchtung und Jalousien (manuell, automatisiert mit Eingriffsmöglichkeit und vollständig automatisiert) untersucht. Es wurde fest gestellt, dass bei manuellen Eingriffsmöglichkeiten objektiv höhere und gemessen an gängigen Kennwerten auch zu hohe Werte zugelassen werden. Bei den Nutzerbefragungen schnitt die manuelle Bedienung trotzdem insgesamt am besten ab. Offenbar war die manuelle Beeinflussbarkeit wichtiger und führte zur Toleranz gegenüber Zuständen mit nominal zu hoher Beleuchtung. [VINE98] Dies bestätigt eine weitere Studie, bei der Nutzer einen umfassenden Ausblick favorisierten und dafür lokale Blendquellen in Kauf nahmen. [BÜL00]

Obwohl automatisierte Regelungssysteme eine Optimierung zwischen Energieeintrag, Beschattung und Tageslichtversorgung grundsätzlich zulassen, unterscheiden sie sich in dieser Hinsicht nicht wesentlich von selbstregelnden Systemen. Selbstregelnde Systeme sind automatisierten, die auf Grundlage von nur einem Parameter funktionieren sehr ähnlich. Auch automatisierte Systeme sind immer nur so gut wie die programmierte Logik und können viele auftretende Situationen, die subjektiv bestimmte Reaktio-

nen erfordern oder wünschenswert machen, nicht berücksichtigen.

2.9 Zusammenfassung

TTV als selbstregelndes System bilden eine interessante Alternative zu den fixen, manuellen bzw. regelbaren Verschattungseinrichtungen. Durch eine Umformung einer speziellen Substanz wandeln sie sich oberhalb einer bestimmten Temperatur von transparent zu transluzent/reflektierend. Sie erfüllen die in vielen Klimaregionen zwingende Forderung nach einem variablem g-Wert ohne dazu bewegliche Teile zu benötigen. Damit sind sie in dieser Hinsicht sowohl fixen als auch beweglichen Beschattungen überlegen. Das Gebäude als Ganzes wird durch den Einsatz einem 'funktionierenden Organismus' ähnlicher.

Weiterhin kann eine thermotrope Schicht bei einer entsprechenden Streueigenschaft die Direktstrahlung, die zur Blendung und Überhitzung führen würde, teilweise reflektieren und teilweise in gleichmäßiges Diffuslicht umwandeln. Somit wird beschattet, aber gleichzeitig noch weiterhin blendfreies Diffuslicht zur Raumbeleuchtung zugelassen.

Viele Situationen, die bei manuellen Beschattungen kritisch oder nachteilhaft sind, können nicht auftreten:

Beispiel 1:

Die Sonne beginnt während der warmen Jahreszeit einen Raum bereits sehr früh morgens zu erwärmen. Werden die Beschattungseinrichtungen erst nach Anwesenheit der Nutzer betätigt, ist durch die bereits hohen Energieeinträge eine Überhitzung im Laufe des Tages unter Umständen nicht mehr zu verhindern. TTV würde auch ohne Anwesenheit eines Nutzers auf die Wärme

'reagieren' und kritischen Situationen vorbeugen.

Beispiel 2:

„... in Büro- und Verwaltungsgebäuden wird künstliche Beleuchtung im Durchschnitt bis zu 60% der Nutzungszeit eingeschaltet. Dies jedoch nicht nur während der tages- und jahreszeitlich bedingten Phasen mit einer geringen natürlichen äußeren Beleuchtungsstärke, sondern gerade zu Zeiten, wo Sonnenlicht im Übermaß zur Verfügung steht“ [RUBB01]. Häufig werden bei zu hoher Direktstrahlung Rollos betätigt und das künstliche Licht eingeschaltet. Der Nutzer nimmt im Inneren eine veränderte Situation außen nicht mehr wahr: Selbst wenn sich die Wetterlage geändert hat, werden die Rollos nicht oder nicht sofort geöffnet und das Kunstlicht nicht ausgeschaltet. Im Gegensatz dazu 'öffnet' die TTS von selbst und gibt eine ungehinderte Sicht nach außen frei. Im Idealfall bemerkt dies der Nutzer – oder der automatische Dimmer – und schaltet die künstliche Beleuchtung aus.

Beispiel 3:

Viele Regelungssysteme sind wegen der Nutzungszeit in mitteleuropäischem oder vergleichbarem Klima mit häufig bedecktem Himmel unrentabel: „Es wird dabei schnell klar, dass selbst bei einer optimalen Ausrichtung (Süd) in 45 % der Bürozeit kein direktes Sonnenlicht vorhanden ist, in 63% der Bürozeit liegt die vertikale Bestrahlungsstärke unter 100 W/m^2 . Wesentlich schlechter wird die Nutzungszeit bei nicht-optimaler Orientierung.“ [WIE01] Unter diesen Klimabedingungen hat eine selbstregelnde Beschattung, die durch eine vollständige Integration in eine Verglasung bei bedecktem Himmel nicht in Erscheinung tritt und potentiell kostengünstig ist, wesentliche Vorteile.

Wird für das System ‚thermotrope Verglasung‘ ein guter Kompromiss zwischen für die Charakteristik für den Strahlungsdurchlass und das Wärmedämmvermögen gefunden, so kann ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung des Raumkomforts und der Reduktion des Gesamtenergiebedarfes geleistet werden. Durch die Integration einer thermotropen Verglasung mit variablem g-Wert in die Gebäudehülle könnte die Frage, ob ein geringerer Direktgewinn (niedriger g-Wert) durch einen geringeren Wärmeverlust (niedrigerer U-Wert) gerechtfertigt wird, oder umgekehrt, eine neue Dimension gewinnen. Die Nachteile einer aufwendigen und fehleranfälligen Mechanik bzw. Steuerung müssen nicht in Kauf genommen werden. Deswegen könnte der gezielte Einsatz selbstregelnder Systeme künftig im Bereich der Gebäudehülle einen hohen Stellenwert haben. Sind gezielte Möglichkeiten der Beeinflussung gewünscht oder erforderlich, so können zusätzliche Funktionsmechanismen der TTV, die den Einsatzbereich erweitern, oder eine Kombination mit beweglichen Beschattungen erwogen werden.

3 Thermotrope Schichten (TTS)

3.1 Funktionsweise

3.1.1 Grundsätzliche Funktionsweise

Thermotrope Schichten (TTS, Terminologie siehe Abb. 3-1) haben ein von der Temperatur abhängiges Streuverhalten für Strahlung: Beim Überschreiten einer bestimmten, sog. Schalt- oder Eintrübungstemperatur – meistens handelt es sich um einen Temperaturbereich – wechseln sie von transparent-durchsichtig auf transluzent-streuend und umgekehrt.

Die Schicht als solche kann zur Tageslichtnutzung bzw. als Sonnen- oder Blendschutz zwischen einem Substrat aus Gläsern oder transparenten Folien gelagert bzw. auf ein Substrat aufgebracht werden. Dieses Paneel oder Verbundglas kann dann in jeder beliebigen Ausführung in alle gängigen Verglasungstypen eingebaut werden:

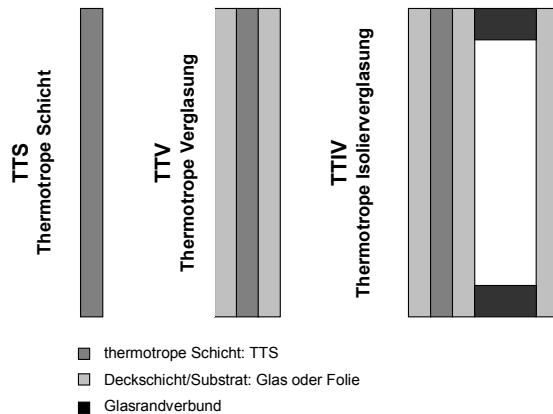


Abb. 3-1: Übersicht zur Terminologie in Verbindung mit thermotropen Schichten.

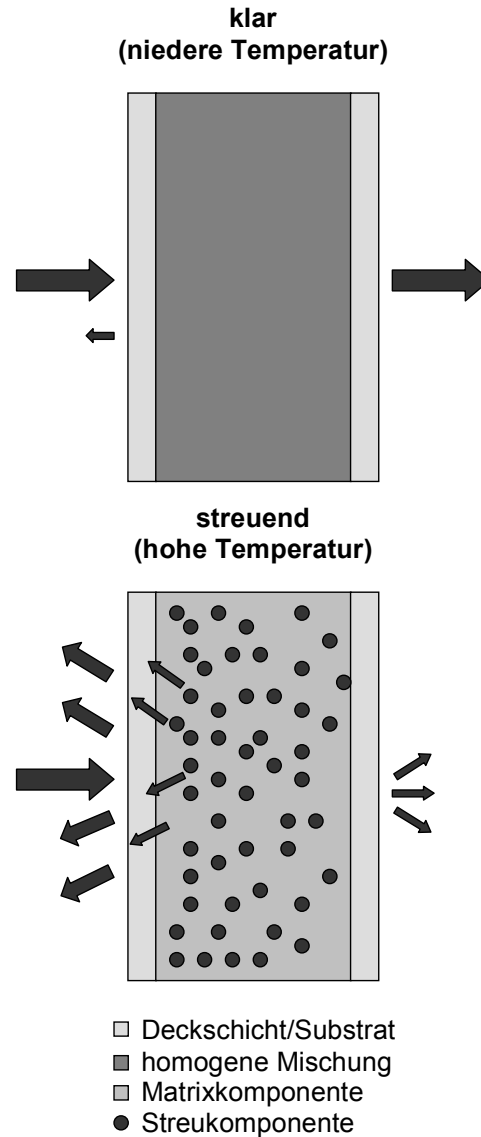


Abb. 3-2: Funktionsweise der TTS aus Kap. 3.3.2, 3.3.3 und 3.3.4 (S. 12, [BMBF97])

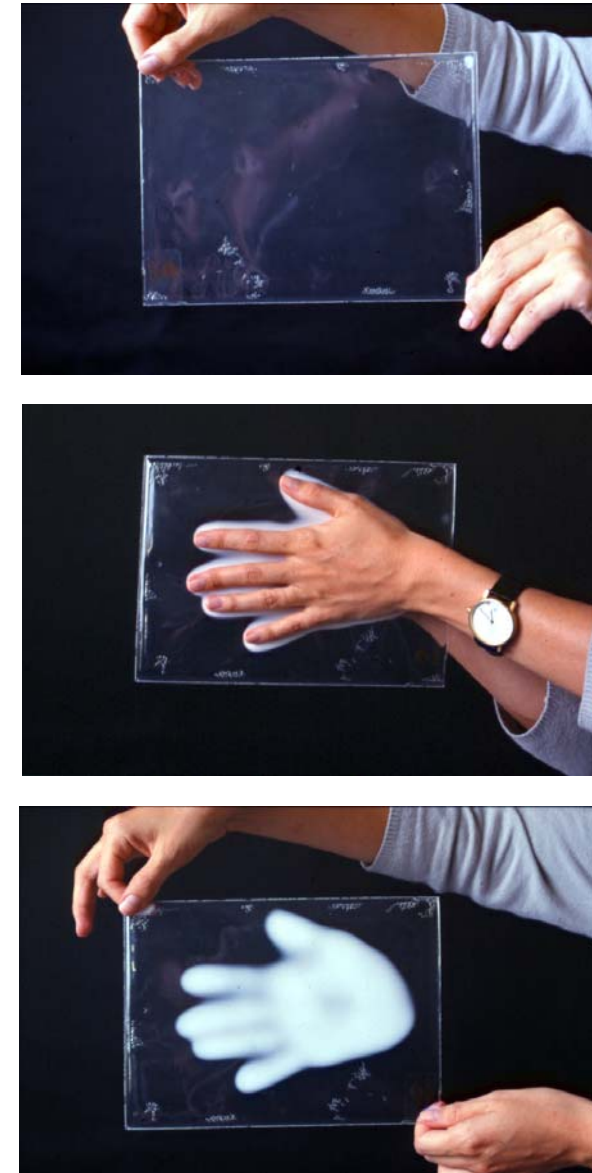


Abb. 3-3: Demonstration der Wirkung einer TTS an einem Folienmuster von Suntek Inc. (Kap. 3.3.4): Bei lokaler Erwärmung wird die Schicht transluzent.

- Verbundsicherheitsglas (VSG): Bei VSG wird zwischen zwei Glasscheiben eine Folie angeordnet, die bei Glasbruch verhindert, dass Splitter heraus fallen.
- Isolierverglasung (IV): IV besteht aus zwei beabstandeten Scheiben mit getrockneter Luft im Zwischenraum zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften.
- Wärmeschutzverglasung (WSV): Eine WSV ist eine IV mit einer Wärmeschutzschicht auf einer der beiden Gläser (metallisch besputtert) und einer Gasfüllung (Argon, Krypton) im Glaszwischenraum
- Stegdoppelplatte (SDP): Eine SDP ist eine Kunststoffplatte (z.B. Polycarbonat) mit einer oder mehreren Luftkammern zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften und Erhöhung der Steifigkeit.

Sowohl die Temperatur des Schaltvorganges als auch dessen Dynamik kann in gewissen Bereichen abhängig von den verwendeten Substanzen, verschiedenen Beimischungen und der Schichtdicke eingestellt werden. Weiterhin hängen diese Charakteristiken von der Einbausituation (Verbundglas, Isolierglas, hinterlüftet, etc.) und deren Einfluss auf die in der TTS herrschende Temperatur ab. (S. 103 – 121, [NITZ99])

3.1.2 Hydrogele und Polymermischungen

Studien des Schaltverhaltens und Vergleiche mit verschiedenen Streutheorien [NITZ99] ergaben, dass der Schaltvorgang bei Hydrogelen und Polymerblends (siehe unten) auf der Separation zweier Substanzen mit unterschiedlichem Brechungsindex beruht (Abb. 3-2): Unterhalb der Schalttemperatur sind die beiden Substanzen gleichmäßig gemischt und transparent, ab einer gewissen Schwelltemperatur beginnen sich die Substanzen zu trennen. Es bilden sich sogenann-

te Streuzentren. Auftreffende, direkte Strahlung wird gestreut. Größe der Streuzentren, Dicke der Schicht (typischerweise in der Größenordnung 1mm) und Differenz der Brechungsindizes sind maßgebliche Parameter für die Winkelverteilung des Streulichtes und den Anteil von vor- zu rückwärts gestreuter Strahlung. In Abb. 3-3 ist die Wirkung einer TTS an einem Handmuster (Folienmuster von Suntek, Kap. 3.3.4) demonstriert.

3.1.3 Thermooptische Polymerwerkstoffe

Bei den zu Gießharzen weiter entwickelten, thermooptischen Polymerwerkstoffen (Kap. 3.3.4) beruht die Eintrübung auf einem sprunghaften Übergang des Brechungsindex einer in ein Gießharz eingebetteten, thermotropen Komponente beim Übergang in den flüssigen Zustand. Unterhalb der Schalttemperatur besitzen beide in etwa den gleichen Brechungsindex, und sind somit transparent, oberhalb ändert die thermotrope Komponente sprunghaft ihren Brechungsindex, das System wird transluzent-streuend. [GERT97]

3.2 Grundsätzliche Vor- und Nachteile

In Verglasungen integrierte TTS besitzen in technischer und bauphysikalischer Hinsicht gegenüber den meisten gängigen Regelungssystemen einige wichtige Vorzüge:

- keine aktive Regelungstechnik erforderlich
- keine beweglichen Teile
- keine zusätzliche Wartung
- keine Betriebskosten
- Verfügbarkeit 100%
- einfache Integration in gängige Glassysteme
- höhere Verglasungsanteile ohne Überhitzung möglich
- keine Sichtbeeinträchtigung im ungeschalteten d.h. transparenten Zustand.

- unabhängig von der Gebäudeorientierung
- im Prinzip unabhängig von der geografischen Breite (Sonnenstand)
- bei Großserien potentiell kostengünstig
- für Gebäudesanierungen geeignet
- ökologisch vielen anderen Beschattungen überlegen (S. 88 – 90, [IBK01])

Die selbstregelnden Eigenschaften einer TTS machen ein kaum veränderbares Gebäude im Sinne moderner Solararchitektur ein Stück weit zu einem 'lebenden Organismus': Sie reagieren lokal auf das herrschende Klima und Klimaveränderungen.

Die Nachteile sind:

- keine Möglichkeit der bedarfsgerechten, individuellen Einflussnahme durch den Raumnutzer
- keine Durchsicht im streuenden Zustand
- Einmal mit der TTS durch die Zusammensetzung eingestellte Eigenschaften nicht mehr veränderbar

Um die TTS als Regelungssysteme in transparente Teile der Gebäudehülle zu integrieren, die spezifischen Vorteile und ihre 'Anpassungsfähigkeit' zu nutzen, müssen Konzepte entwickelt werden, die berücksichtigen, dass TTS primär thermisch schaltet, der Nutzer keine Einflussmöglichkeit hat und im geschalteten Zustand keine Durchsicht besteht.

3.3 Stand der Technik

3.3.1 Herstellung

Zur Herstellung thermotroper Verbundglasscheiben bestehen im Wesentlichen drei Ansätze:

- Eine niedrigviskose Abmischung mit dem thermotropem Polymer, Monomeren des spä-

teren Netzwerks und verschiedenen Materialien zur Vernetzung werden in einen Scheibenzwischenraum gefüllt und durch UV-Bestrahlung ausgehärtet.

- Eine hochviskose Mischung wird auf eine Scheibe aufgebracht und durch Andruck der zweiten Scheibe mit Hilfe von 'spacern' in einem definiertem Abstand verteilt.
- Eine vorgefertigte Folie wird laminiert (VSG-Prozess).
- Gießharze können mit herkömmlichen lacktechnischen Verfahren aufgebracht werden (Rakeln, Spritzen, Fluten).

3.3.2 Arbeiten im Rahmen eines Forschungsverbundes, Deutschland

Verschiedene thermotrope Schichten wurden im Rahmen eines BMBF (heute BMWi) geförderten Verbundprojektes von Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer-ISE), BASF, Interpane, und der Fa. Sto AG entwickelt [BMBF97/BMBF00]. Der Forschungsverbund begann 1994 und beschäftigte sich parallel mit der Entwicklung von Hydrogelen und Polymermischungen als TTS in Glas- oder Foliensubstraten. Die Anstrengungen führten aber bis heute nicht zu einem auf dem Markt verfügbaren Produkt.

Hydrogele, BASF AG

Die hergestellten thermotropen Hydrogele bestehen aus einem in ein wässriges Gel eingelagertem, thermotropen Polymermaterial. Das Netzwerk des Gels verhindert einerseits die Entmischung der beiden Komponenten, andererseits erhält die Schicht eine gewisse mechanische Stabilität. Das optische Verhalten kann u.a. durch die Dichte des Netzwerkes beeinflusst werden. Es wurden zahlreiche Substanzen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt und vermessen. (Bezeichnungen: H650,

H1370,...) Schalttemperaturen können durch die Materialzusammensetzung zwischen 20 – 80°C variiert werden. (S. 6, [NITZ99])

Ein Kernproblem bei Hydrogelen ist die Gefahr der Austrocknung: Der Randverbund muss absolut dicht sein, um eine Diffusion der Wassermoleküle auch über einen im Fassadenbau üblichen, langen Zeitraum zu verhindern. Die Austrocknung würde zu Bläschenbildung führen, die das homogene Aussehen beeinträchtigt.

Trotz aussichtsreicher TTS Eigenschaften bei den Hydrogelen wurde die Entwicklung 1997 wegen technischer Probleme bei der Herstellung bzw. Bedenken für die Gewährleistung (Austrocknung) eingestellt.

Polymermischungen – Polymerblends, BASF AG
Die im Rahmen der Projekte [BMBF97] und [BMBF00] entwickelten thermotropen Polymerblends werden seit 1984 untersucht. Sie bestehen aus Styrol-Copolymeren und Polypropylenoxid (PPO), welche in einem Mischungsverhältnis von (40:60) bis (60:40) Volumenanteilen präpariert werden. Reines Polystyrol (PS) und PPO sind nicht mischbar. Durch die Einlagerung von Hydroxyethyl-Methacrylat-Monomeren und die Ausbildung von Wasserstoffbrücken wird eine Mischung erst ermöglicht, andererseits die Entmischungstemperatur (Eintrübung) maßgeblich bestimmt, obwohl „...das Aufbrechen der Wasserstoffbrückenbindungen eher ein Resultat der Entmischung als ihre Ursache...“ ist. (S. 7, [Nitz99]) Auch hier wurden zahlreiche Substanzen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt und vermessen. (Bezeichnungen: B1276, B929, B1383...)

3.3.3 Affinity Intelligent Window (AIW), Fa. Affinity Ltd., Japan

Die Firma Affinity Ltd., Japan, arbeitet mit thermotropen Hydrogelen [WAT98]. Mit TTS gefüllte Verbundscheiben von AIW (Affinity Intelligent Window) waren zu Beginn der Arbeiten in kleinen Formaten (60 cm x 60 cm) als Prototypen und sind inzwischen auch prinzipiell in größeren Formaten (1 m x 2 m) kommerziell erhältlich. Das technische Know-how stammt aus der LCD-Technologie. Es laufen Verhandlungen mit verschiedenen großen Glasindustriunternehmen zur Herstellung. Schalttemperatur, Schaltheub und die Dynamik des Schaltverhaltens machen das TTS-Glas geeignet für den transparenten Bereich der Gebäudehülle.

3.3.4 Cloud-Gel, Suntek Inc., U.S.A.

Anfang der 90er Jahre beschäftigte sich die amerikanische Firma Suntek Inc. [SUN01] mit thermotropen Hydrogelen in Folien als Überhitzungsschutz für Wintergärten und großflächige Verglasungen. Die Versuche wurden von Folien auf Gläser umgestellt. Die Schalttemperaturen liegen bei 30°C. Obwohl bereits viel versprechende, kleinformatige Muster verfügbar waren (Abb. 3-3), sind keine kommerziellen Produkte erhältlich.

3.3.5 Temperaturabhängige Lichtdurchlässigkeit (TALD), Fraunhofer-IBP

Seit den 80er Jahren forscht das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Stuttgart/Holzkirchen) an der Entwicklung eines thermotropen Hydrogels unter dem Namen TALD (temperaturabhängige Lichtdurchlässigkeit). Üblicherweise wird eine ca. 1 mm dicke Gelschicht zwischen Glasscheiben eingebettet. Es handelt sich um ein noch nicht marktreifes Produkt. Schalttemperaturen können durch die Materialzusammensetzung zwischen 20°C – 80°C variiert werden. (S. 50, [IBK01])

3.3.6 T-OPAL, Fa. Okalux, Deutschland

T-OPAL ist ein bereits auf Messen vorgestelltes Produkt der Firma OKALUX [WIRT02]. Es wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt und sollte Anfang 2002 auf den Markt kommen. Hier werden Gießharze verwendet die in einen Scheibenzwischenraum oder auf Stegdoppelplatten gebracht und mit UV-Strahlung ausgehärtet werden. Nachteil des Funktionsprinzips (Kap. 3.1.3) ist der leichte Schleier im transparenten Zustand. Im Moment sind Muster noch unter Verschluss.

3.3.7 Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften

In Abb. 3-4 bis Abb. 3-7 sind beispielhaft für die oben erwähnten Substanzen folgende Eigenschaften soweit zusammengestellt, wie Messdaten vorhanden und zugänglich waren:

- temperaturabhängige Transmission für Licht und Solarstrahlung von ausgewählten Hydrogelen und Polymerblends im Vergleich.
- temperaturabhängige Reflexion für Licht und Solarstrahlung von ausgewählten Hydrogelen
- spektrale d.h. wellenlängenabhängige Transmission für je zwei ausgewählte Hydrogele und Polymerblends bei charakteristischen Temperaturen.
- bidirektionale Transmissions-Reflexions-Funktion (bidirectional-transmission-distribution-function, BTDF) von Affinity Mustern

Folgende Substanzen wurden herausgegriffen:

Hydrogele

- AIW (Affinity Intelligent Window): 2.75 mm Glas, 1 mm TTS, 2.75 mm Glas [FAR01]
- H650: 1 mm eisenarmes Objektträgerglas, 1.5 mm TTS, 1 mm Objektträgerglas (S. 117 – 119, [NITZ99])
- H1370: 3.9 mm Floatglas, 0.8 mm TTS, 3.9 mm Floatglas (S. 29 – 31, [BMBF97])

Polymerblends

- B1383: 0.65 mm TTS auf 1 mm Objektträgerglas (S. 21, [BMBF00])
- B1276: 1 mm Objektträgerglas, 0.8 mm TTS, mit Glasvlies (S. 117 – 119, [NITZ99])
- B929: 1 mm Objektträgerglas, 0.8 mm TTS, mit Glasvlies [NITZ99]

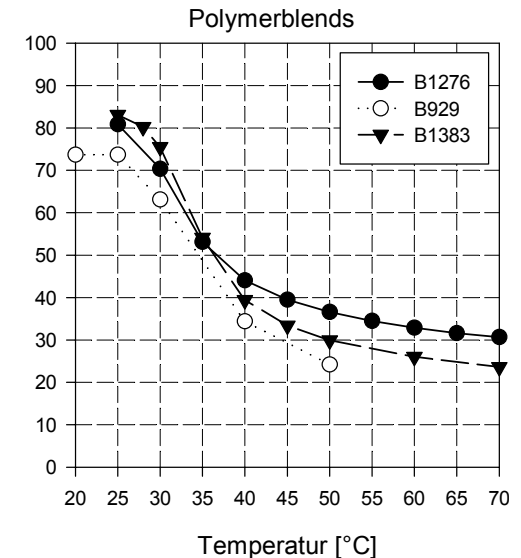
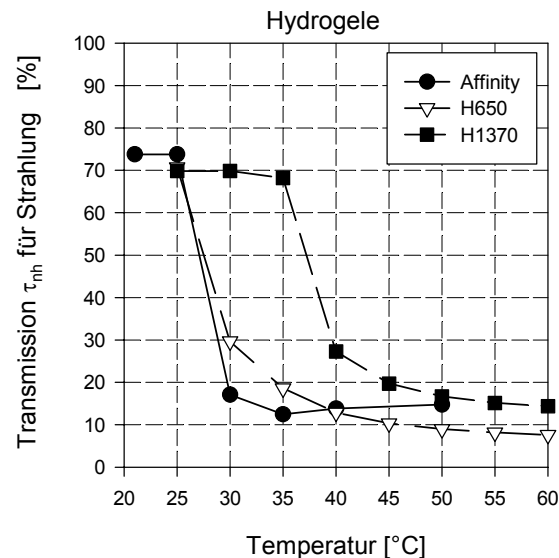
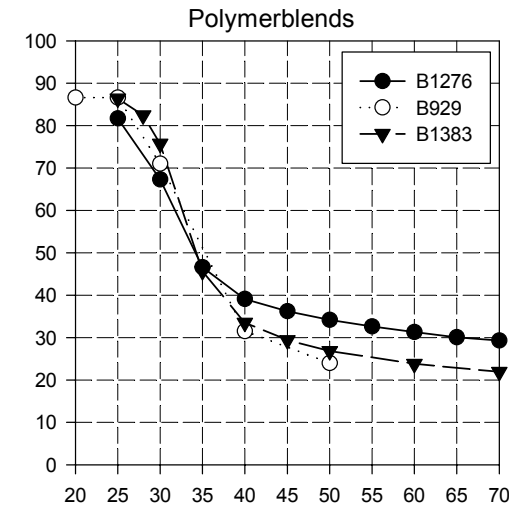
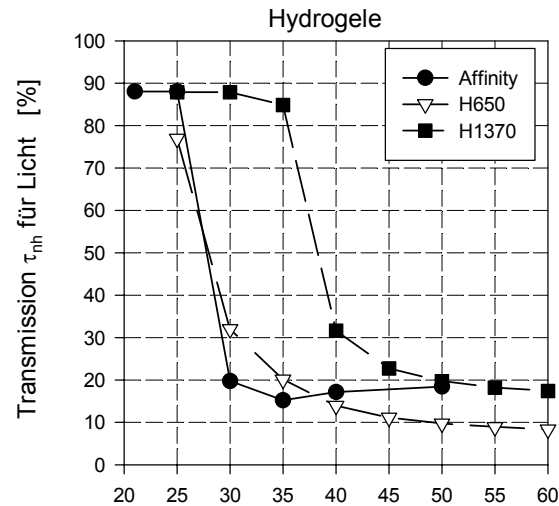


Abb. 3-4: Temperaturabhängige, normal-hemisphärische Transmission für Licht (oben) und Strahlung (unten) von ausgewählten Hydrogelen (links) und Polymerblends (rechts), ([FAR01] [BMBF97] [BMBF00] [NITZ99]).

Die in [BMBF97], [BMBF00] und [NITZ99] zusammengestellten Messdaten zeigen darüber hinaus, wie groß die Bandbreite bei Kompositionsänderungen ist, und welchen großen Einfluss Messfehler bei Handmustern haben (Streuverluste über die Ränder bei kleinen Mustern). Sofern vorhanden wurden die durch Berechnungen korrigierten Daten verwendet. Weiterhin war der genaue Schichtaufbau abhängig von der avisierten Anwendung (z.B. Objektträger, TTS mit Glasvlies für Kombination mit transluzenter Wärmedämmung). Die zusammengestellten Daten können also nur zu einer ersten Einschätzung und nicht zu einer abschließenden Beurteilung herangezogen werden.

Temperaturabhängige Transmission (Abb. 3-4)

Die Transmission der Schichten hat in Bezug auf ihre Funktion eine wichtige Bedeutung, da sie angibt, welcher Anteil des Lichtes bzw. der Strahlung bei verschiedenen Temperaturen noch in den Raum dringt. Dies ist bei der Verwendung in Verglasungen als Blend- oder Überhitzungsschutz fundamental. Bei der Verwendung von Gläsern als Sonnenschutz ist die Transmission in der Größenordnung des schwieriger messbaren, aber letztlich entscheidenden g-Wertes (Gesamtenergiedurchlassgrad). Messungen und Berechnungen ([WIN94]) zeigen, dass der g-Wert ca. 5 – 10 % über den integralen, solaren Transmissionswerten liegt. Für die Funktion als Blendschutz ist der Anteil direkt transmittierter Strahlung von Bedeutung (siehe BTDF): Bei hohen Anteilen direkt transmittierter Strahlung ist das Verhältnis der Leuchtdichte der Sonne zum Rest der Umgebung und damit die Blendefahr hoch. Bei hoher Streuwirkung werden die Leuchtdichteunterschiede aufgehoben und die Gefahr der Blendung deutlich reduziert.

Der Vergleich der Hydrogele (links) und Polymer-

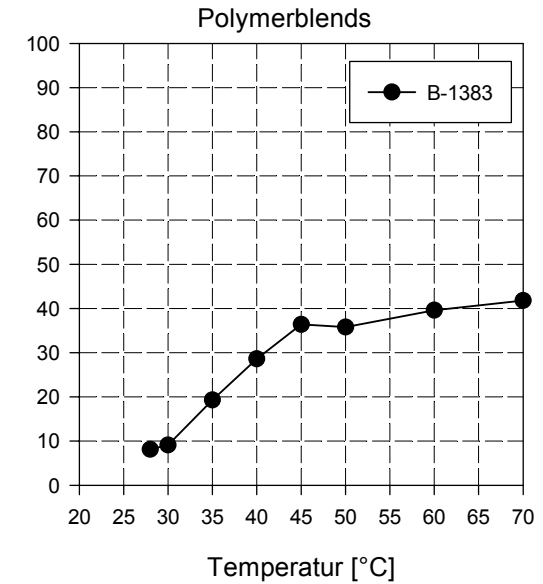
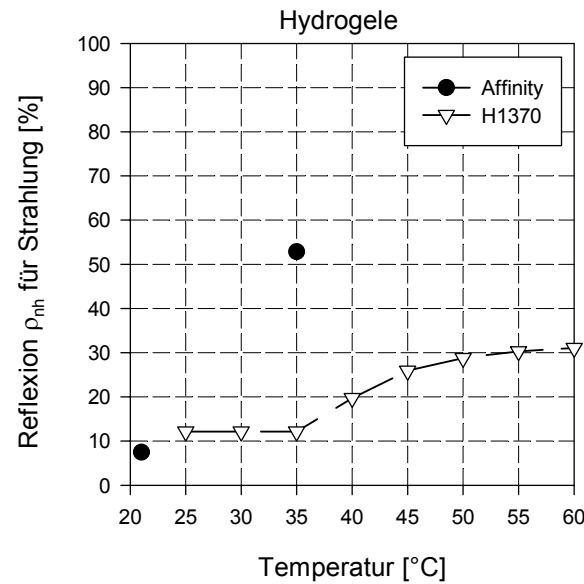
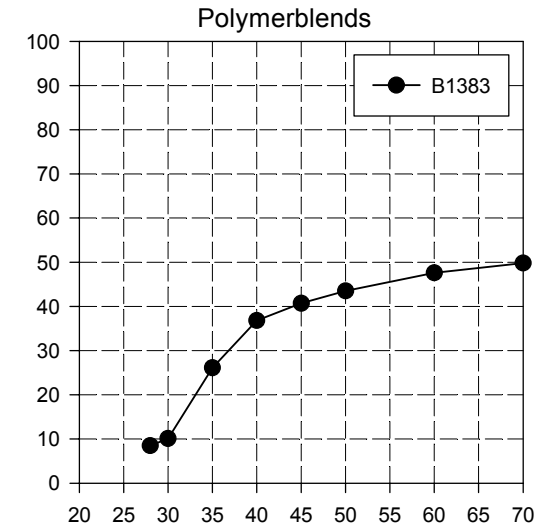
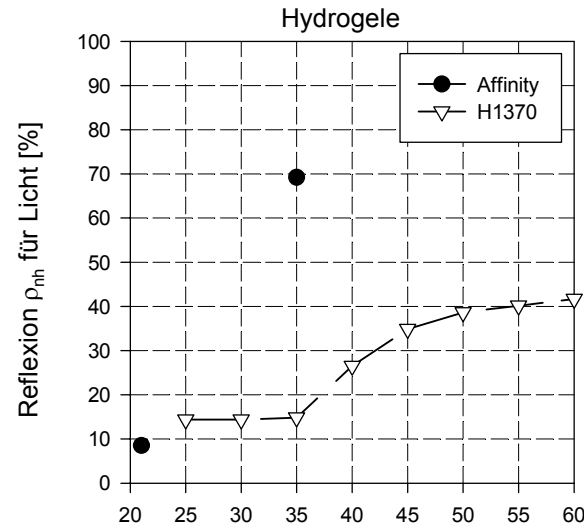


Abb. 3-5: Temperaturabhängige, normal-hemisphärische Reflexion für ausgewählte Hydrogele/Polymerblends ([FAR01] [BMBF97] [BMBF00]).

blends (rechts) verdeutlicht die grundsätzlich unterschiedliche Dynamik der Substanzen. Hydrogele schalten tendenziell bei niedrigeren Temperaturen, haben eine wesentlich schärfere Schaltcharakteristik und erreichen tiefere Grenzwerte sowohl für die Transmission von Licht als auch von Strahlung.

Die Beispiele H650 und H1370 bzw. B1276 und B1383 verdeutlichen, dass mit unterschiedlichen, chemischen Materialzusammensetzungen unterschiedliche Wirkung auf die Transmission erreicht werden kann. Es besteht sowohl bei den Hydrogelen als auch bei den Polymerblends Entwicklungspotential für die Anforderungen bei spezifischen Anwendungen.

Temperaturabhängige Reflexion (Abb. 3-5)

Die Reflexion ist von zentraler Bedeutung für die Eigenschaft als Überhitzungs- und Blendschutz: Je höher die Reflexion desto besser ist die Schicht geeignet, um unerwünschte Strahlungslasten vom Innenraum fern zu halten. Strahlung die nicht reflektiert wird, wird entweder transmittiert (siehe oben) oder absorbiert. Letzteres kann über die sekundäre Wärmeabgabe der Scheibe zu einer unerwünschten Erwärmung des Innenraumes führen. Aus Abb. 3-5 wird insbesondere der hohe Reflexionsunterschied der Schichten der Firma Affinity, Japan, für den transparenten und den streuenden Zustand ersichtlich, was sie attraktiv für die Verwendung in lichtdurchlässigen Bauteilen der Gebäudehülle macht.

Spektrale Transmission (Abb. 3-6)

Die spektrale Transmission bei verschiedenen Temperaturen ist eigentlich die grundlegende Eigenschaft, aus der sich die anderen, oben erwähnten, ergeben bzw. errechnen lassen. Sie wurde hier deswegen explizit aufgeführt, weil sie ein Maß für die Beeinflussung des natürlichen

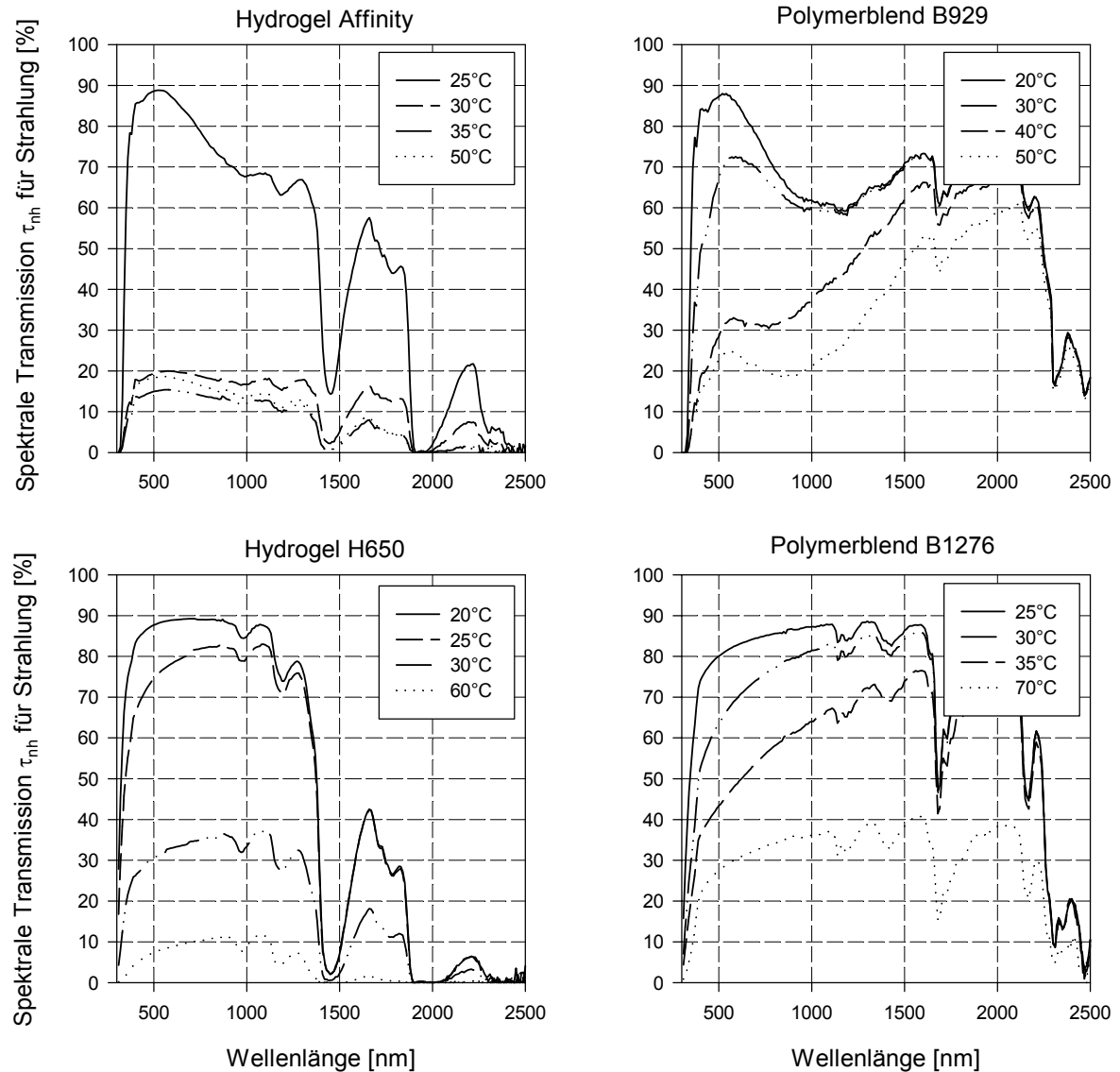


Abb. 3-6: Spektrale, normal-hemisphärische Transmission für ausgewählte thermotrope Schichten [NITZ99]

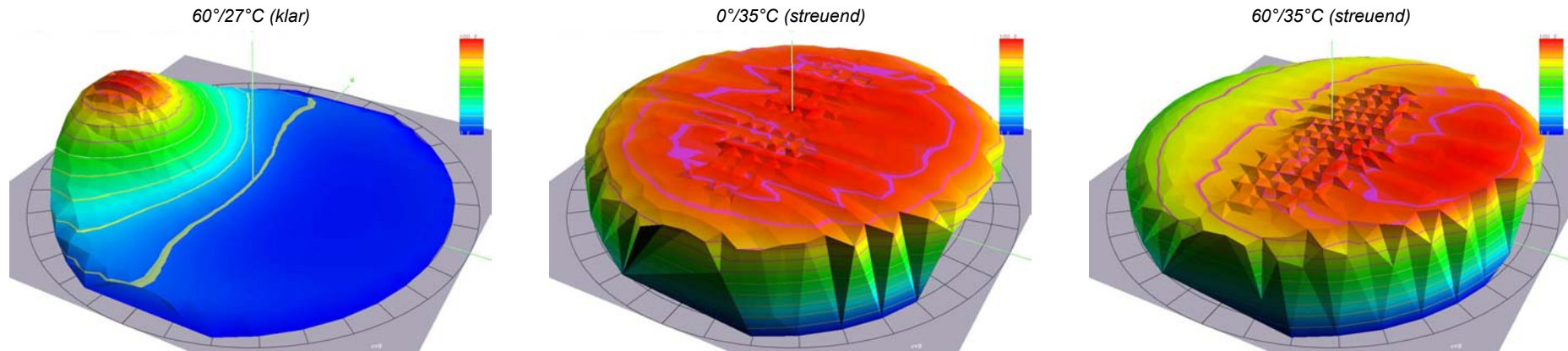


Abb. 3-7: Direkt-hemisphärische BTDF der TTS von Affinity bei bestimmten Einstrahlwinkeln und Temperaturen (von links nach rechts): 60°/27°C (klar), 0°/35°C, und 60°/35°C (streuend), Messungen Fraunhofer-ISE. Darstellung als Projektion des Polarkoordinatensystems auf die Ebene; die Höhe entspricht der winkelabhängigen Transmission.

Tageslichtes ist. Farbverschiebungen oder –tönungen sind ein wichtiger gestalterischer Aspekt, der bei der Nutzung eines Regelungssystems von Wichtigkeit ist.

Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt zwischen 380 und 780 nm, wobei die kleineren Wellenlängen Blaufärbungen und die größeren Rotfärbungen bedeuten. Berechnungen des Farbwiedergabeindex (FWI) aus den spektralen Messwerten für 3 Proben sind in Tab. 3-1 zusammengestellt. Werte im Bereich von 90 – 100% gelten als sehr farbneutral (Bereich 1A, S. 241, [HEN94]). Damit sind zwar alle drei vollständig eingetrübten Substanzen farbneutral, das AIW-Muster zeichnet sich aber durch einen R_a von 98 % bei bereits 35°C aus!

	R_a	Temperatur
AIW	98	35 °C
H650	90	60 °C
B1276	94	70 °C

Tab. 3-1: Farbwiedergabeindex (R_a) für ausgewählte TTS im maximal eingetrübten Zustand.

Bidirektionale Reflexions-Transmissions-Funktion, BTDF (Abb. 3-7)

Die BTDF charakterisiert ein Material im Hinblick auf die Winkelabhängigkeit des Strahlungsdurchlasses bzw. die Anteile diffuser und direkter Strahlung.

In Abb. 3-7 sind Messungen vom Fraunhofer-ISE an Affinity-Mustern wiedergegeben. Die BTDF wird als Projektion des Polarkoordinatensystems auf die Ebene dargestellt; die Höhe entspricht der winkelabhängigen Transmission. Es zeigt sich, dass unterhalb der Schalttemperatur die direkte Strahlung auch als rein direkte Strahlung und oberhalb als praktisch reine Diffusstrahlung transmittiert wird (vgl. Abb. 2-3, Volumenstreuung). Die TTS kann also im streuenden Zustand wie ein normales Streuglas ohne ausgeprägte Vorzugsrichtung betrachtet werden.

3.4 Muster für experimentelle Untersuchungen

Aufgrund folgender Eigenschaften eignen sich die Muster der Firma Affinity, Japan, für den Einsatz in lichtdurchlässigen Bauteilen der Gebäudehülle:

- Hoher Schaltheub für Licht (~80%)
- Hoher Schaltheub für Strahlung (~60%)
- Scharfer Schaltbereich bei 25°C bis 30°C
- Hohe Transparenz im klaren Zustand (~90%)
- Hohes Reflexionsvermögen für Licht (~70%) und Strahlung (~50%) im streuenden Zustand
- Farbneutral: hohe Farbwiedergabe, lediglich beim Übergang transparent/transluzent treten Rotverschiebungen auf
- Sonnenstrahlung im klaren Zustand als reine Direkt- und im streuenden Zustand als reine Diffusstrahlung transmittiert

Die prinzipiellen Überlegungen zu der Verwendung von TTS als Regelungssysteme in lichtdurchlässigen Bauteilen sollen aber nicht deswegen nur an ein Produkt geknüpft bleiben. Es bestehen darüber hinaus Möglichkeiten, mit veränderten Materialzusammensetzungen und verbesserten Schichten auch andere, unter Umständen verbesserte Charakteristika zu erhalten.

4 Systematik und Instrumentarium

4.1 Systematik von Anordnungsmöglichkeiten

4.1.1 Position in der Gebäudehülle

In Abb. 4-1 und Abb. 4-2 sind systematische Übersichten zu möglichen Anordnungen von thermotropen Verglasungen in der Gebäudehülle zusammengefasst. Als wichtigste Unterscheidungsmerkmale sind dabei aufgeführt:

- Die TTS kann im Wand- oder Dachbereich der Gebäudehülle zum Einsatz kommen.
- Beim Wandaufbau wird zwischen ein- oder zweischaligen Wänden unterschieden.
- Der Wandbereich wird in Überkopf- bzw. Oberlicht- (oben), Durchsicht- (mitte) und Brüstungsbereich (unten) gegliedert. Die Bereiche können unterschiedliche Dimensionen haben, sind aber im Allgemeinen auf eine mittlere Augenhöhe, sowie die erforderliche Höhe eines Fensters (~1.20 m) und sich daraus ergebende Brüstungshöhen bzw. Höhen für den Überkopfbereich bezogen. Diese Unterscheidung ist für den Dachbereich irrelevant.
- Die genaue Lage zur wasserführenden Schicht: Die TTS kann außen vor, in oder innen hinter der wasserführenden Schicht angeordnet werden.
- Beim Einbau selbst werden Einbaulagen unterschieden: vertikal ($x = 90^\circ$), horizontal (0°) oder Zwischenstellungen ($0^\circ < x < 90^\circ$)

Die Positionen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Beschattungswirkung bzw. Exposition zur Sonne. So sind einige Anordnungen durch den geringfügigen Schattenwurf im Gebäudeinneren

(z.B. 9a - 9h) oder die geringfügige Bestrahlung (z.B. 4g + 4h) nur bedingt sinnvoll. Denkbar ist aber die Nutzung der TTS nicht als Beschattung sondern auch als Lichtlenkelement, Lichtstreu-element oder als leuchtende Fläche. Eine Lichtlenkfunktion könnte z.B. bei horizontaler Anordnungen zwischen Oberlicht- und Durchsichtbereich erreicht werden. Für Anordnungen im Inneren des Raumes ist die Funktion als Sonnenschutz reduziert. Dies gilt analog für alle innenliegende Beschattungen (Vorhänge, Jalousien etc.). Grundsätzlich sind alle Kombinationen aus den aufgeführten Möglichkeiten aber auch mit z.B. lichtstreuenden Gläsern oder opaken Elementen denkbar. So können z.B. oberer und mittlerer oder auch der komplette vertikale Wandbereich mit thermotropen Gläsern belegt werden.

4.1.2 Raumnutzung

Die Unterscheidung nach der Raumnutzung ist wegen der Anforderungen an Blend- und Sonnenschutz von Bedeutung. Es werden folgende Nutzungen unterschieden:

- Räume mit dauerhafter Nutzung, hohen Anforderungen sowohl an Blend- als auch an Sonnenschutz, z.B. Büroräume mit unterschiedlich hohen Anforderungen an die Sehaufgabe. Die Beschattung wirkt sich direkt auf das Wohlbefinden und die Produktivität der Nutzer aus. Häufig ist die Möglichkeit einer (individuellen) Einflussnahme gefordert.
- Räume mit temporärer Nutzung und hohen Anforderungen an Sonnen- bzw. Blendenschutz, z.B. Sitzungs- oder Vortragsräume. Hier sind TTV auf Grund der fehlenden Regelbarkeit nur in Kombination mit regelbaren Blendschutz- oder Verdunkelungssystemen geeignet.
- Räume mit temporärer Nutzung und hohen Anforderungen an Sonnenschutz ohne Not-

wendigkeit eines Blendschutzes, z.B. Atrien oder Räume mit speziellen Geräten (Drucker, Kopierer, Küchen, etc.) Hier kann die Veränderbarkeit durch eine Selbstregelung der Beschattung vorteilhaft sein. Es entsteht keine gravierende Beeinträchtigung durch begrenzte Phasen einer beschränkten Wirkung.

- Räume mit temporärer Nutzung und geringen Anforderungen an Sonnenschutz ohne Notwendigkeit eines Blendschutzes, z.B. Vordächer von Eingangsbereichen, Treppenhäuser, Gänge etc. Der Einsatz ist unproblematisch.

4.1.3 Erweiterung durch zusätzliche Freiheitsgrade

Grundsätzlich kann die Funktionalität von TTS durch die Möglichkeit einer mechanischen Bewegung erweitert werden. In Abb. 4-3 sind Möglichkeiten zusätzlicher Freiheitsgrade schematisch zusammengestellt [WES02]. Eine Bewegung kann dazu dienen

- den Eintrübungs- oder Aufklärungsvorgang zu beschleunigen oder zu hemmen: Die thermotrope Verglasung wird z.B. in die oder aus der Sonne gedreht.
- die Beschattungswirkung während eines eingetrübten Zustandes der TTS räumlich anders zu positionieren: Die thermotrope Verglasung befindet sich z.B. in einem beweglichen Schiebeladen
- die Durchsicht während eines eingetrübten Zustandes der TTS wieder her zu stellen: wie oben kann die thermotrope Verglasung zur Seite geschoben werden.

Diese zusätzlichen Möglichkeiten sollen hier erst beim Ausblick auf denkbare Erweiterungen behandelt werden. Da dadurch aber ein wichtiger Vorteil der thermotropen Verglasung nämlich die Freiheit von beweglichen Teilen eingeschränkt wird, werden sie hier nachrangig behandelt.

		vertikal $x = 90^\circ$			schräg $0^\circ < x < 90^\circ$			horizontal $x = 0^\circ$			
		oben (1)	mitte (2)	unten (3)	oben (4)	mitte (5)	unten (6)	oben (7)	mitte (8)	unten (9)	
Wandbereich	einschalig	aussen (a)									
		in (b)									
		innen (c)									
	zweischalig	aussen (d)									
		äußere Schale (e)									
		zwischen Schalen (f)									
		innere Schale (g)									
		innen (h)									

Abb. 4-1: Systematische Darstellung der möglichen Positionen einer thermotropen Verglasung im Bereich der Wand eines Gebäudes. Denkbare Varianten können auch aus Kombinationen bestehen. Felder von Varianten, deren Exposition der TTV zur Sonne die Anwendung unsinnig oder konstruktiv unwahrscheinlich machen, wurden frei gelassen. (Hervorgehobene Felder: vgl. Gebäudebeispiele Kap. 7)

		vertikal $x = 90^\circ$			schräg $0^\circ < x < 90^\circ$			horizontal $x = 0^\circ$		
		oben (1)	mitte (2)	unten (3)	oben (4)	mitte (5)	unten (6)	oben (7)	mitte (8)	unten (9)
Dachbereich	aussen (i)									
	in (j)									
	innen (k)									

Abb. 4-2: Systematische Darstellung der möglichen Positionen einer thermotropen Verglasung im Bereich des Daches eines Gebäudes. Denkbare Varianten können auch aus Kombinationen bestehen. Die Zuordnung zum Dachbereich ist nicht immer eindeutig wurde aber im Sinne eines 'Vordaches' mit aufgeführt. (Hervorgehobene Felder: vgl. Gebäudebeispiele Kap. 7)

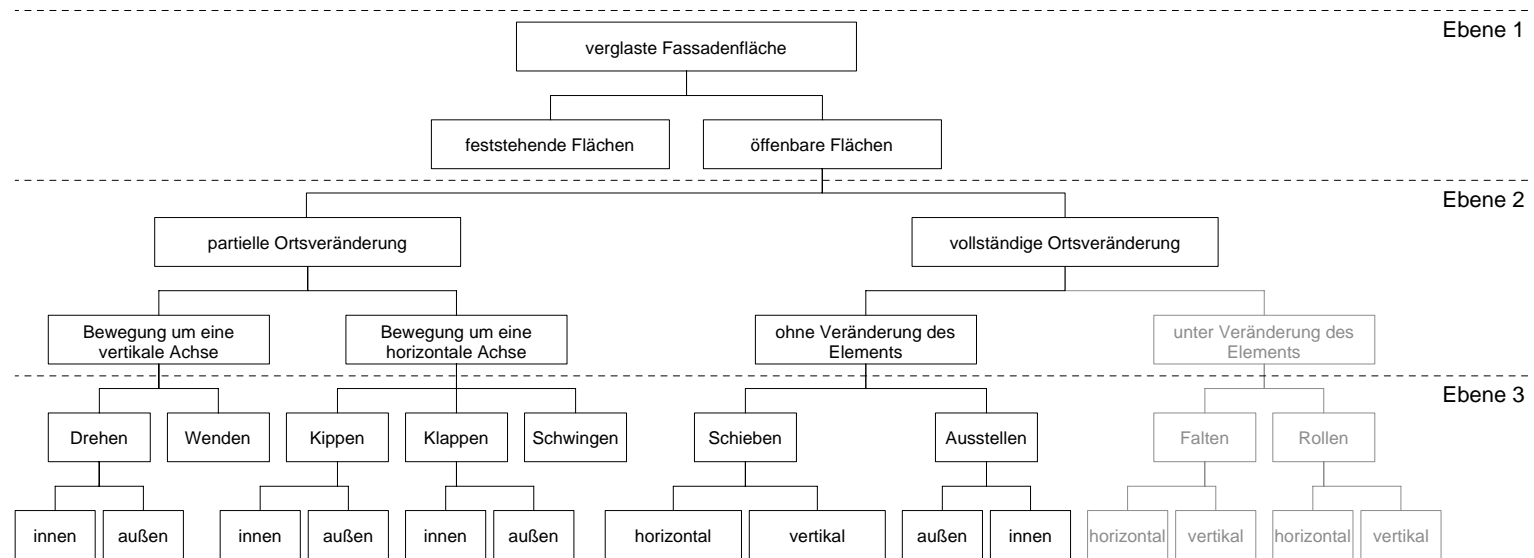


Abb. 4-3: Aufschlüsselung denkbarer Möglichkeiten der Bewegung für verglaste Fassadenflächen nach [WES02] als Ausblick auf weitere Freiheitsgrade mit einer TTV.

4.2 Experimentelle Einrichtungen

4.2.1 Ziel

Für die experimentellen Arbeiten zur Integration thermotroper Verglasungen (TTV) wurden Versuchsräume erstellt. Neben der Möglichkeit praxisrelevante Messungen durchführen zu können, lag der Schwerpunkt auf der Möglichkeit, einen realitätsnahen Raumeindruck vermitteln zu können. Die Untersuchung wichtiger architektonischer Aspekte wie der Gesamteindruck, die optische Raumwirkung und die konstruktive Integration, die Funktionalität stehen im Vordergrund. Mit den Messwerten soll zudem ein Vergleich mit der Simulation ermöglicht werden. Dadurch können experimentelle Resultate auf andere Einbausituationen oder klimatische Verhältnisse übertragen werden.

4.2.2 Versuchsräume

Die Einrichtungen bestehen aus drei Versuchsräumen in den typischen Dimensionen eines Einzelbüroarbeitsplatzes: Eine im Maßstab 1:1 für den Schwerpunkt auf thermischen Fragestellungen und zwei kleinere im Maßstab 1:2.5 mit der Betonung auf Tageslicht Untersuchungen. Diese wurden auf einem den ehemaligen Lehrstuhlräumen angelagerten, temporären Anbau betrieben (Abb. 4-4). Sie haben eine Fassadenfläche von 1.44 m Breite und 1.08 m Höhe (Maßstab 1:2.5) entsprechend einem Achsmaß von 3 mal 1.20 m Breite und 3 mal 90 cm Höhe (Maßstab 1:1). Die Raumtiefe beträgt 1.50 m. Für die Untersuchungen an thermotropen Verglasungen kamen die maßstäblichen Versuchsräume zum Einsatz. Die parallele Messung an zwei Räumen macht den simultanen Vergleich eines Testbauteils (thermotrope Verglasung, Testraum) mit einem Referenzbauteil (z.B. Normalglas, Referenzraum) möglich. Die Versuchs-

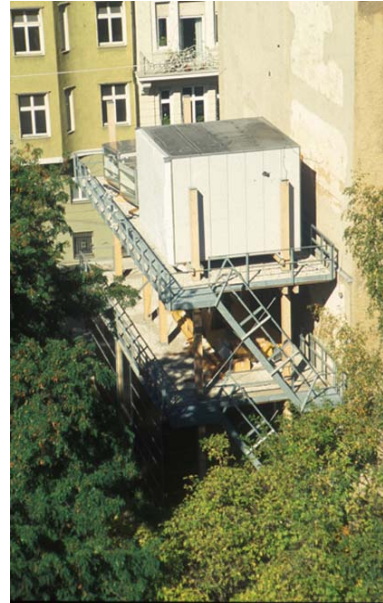


Abb. 4-4: Die Versuchsräume auf dem Forschungsgerüst



Abb. 4-5: Zusammenbau der Versuchsräume im Maßstab 1:2.5



Abb. 4-6: Versuchsräume mit dreh- und schwenkbarem Stahluntergestell



Abb. 4-7: Der maßstäbliche Versuchsraum mit opaker Brüstung nach Einbau der thermotropen Verglasung im Fenster- (Durchsicht-) und Überkopfbereich. Die TTV ist vollständig eingetrübt.



räume wurden nach dem Zusammenbau (Abb. 4-5) auf einem dreh- und schwenkbaren Stahluntergestell montiert (Abb. 4-6). Damit wird auch die Untersuchung unterschiedlicher Orientierungen und richtungsselektiver Regelungssysteme möglich. Entsprechend der Systematik in Kapitel 4.1 wurde die vertikale Südfassade in

- Brüstungsbereich
- Fensterbereich
- Überkopfbereich

eingeteilt. Als Ausgangspunkt dienten Untersuchungen an einer Südfassade mit opaker Brüstung und vollflächiger, thermotroper Verbundverglasung (Begründung siehe Kap. 5.1). Abb.4-7 zeigt den Testraum mit vollständig eingetrübter, thermotroper Verglasung auf dem Forschungsgerüst der ehemaligen Lehrstuhlräume.

4.2.3 Prototypen thermotroper Verglasung (TTV)

Eine thermotrope Verglasung der Firma Affinity, Japan, wurde eingebaut (siehe Kapitel 3.3.3). Sie besteht aus zwei mal 3 mm Floatglas mit einer 1 mm dicken, thermotropen Schicht auf Basis eines Hydrogels. Muster waren nur in kleinen Formaten verfügbar. Alle experimentellen Untersuchungen konzentrieren sich auf die Funktion einer TTS als Regelungs- bzw. Tageslichtsystem. Sie sollen aber über die Versuche mit konkreten Prototypen hinaus berücksichtigen, dass die physikalischen Eigenschaften in bestimmten Grenzen veränderbar sind und bei neueren Entwicklungen und alternativen Materialien auch speziellen Anforderungen angepasst bzw. optimiert sein könnten.

4.2.4 Station für Solarforschung

Nach den ersten Versuchen und dem Umzug (Abb. 4-8) des Lehrstuhls wurden die Versuchsräume auf der 'Station für Solarforschung' mit erweiterter Messtechnik in Betrieb genommen.



Abb. 4-8: Abbau der Versuchseinrichtungen am ehemaligen Forschungsgerüst



Abb. 4-9: Montage der „Station für Solarforschung“ mit den Versuchseinrichtungen



Abb. 4-10: Die „Station für Solarforschung“ auf dem Dach des TU Hauptgebäudes

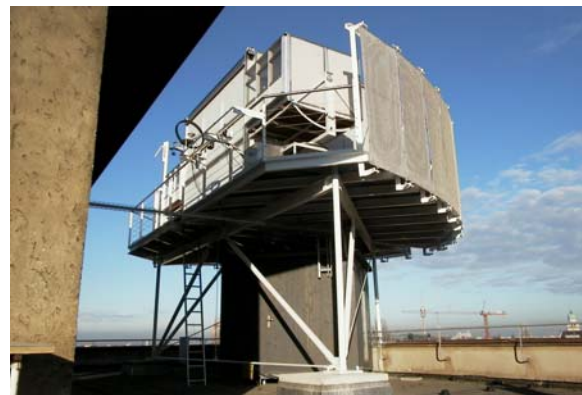


Abb. 4-11: Die „Station für Solarforschung“ auf der Nordterrasse des TU Hauptgebäudes mit den Versuchsräumen

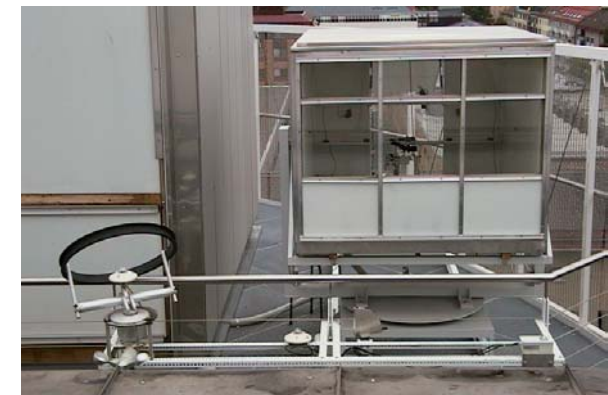


Abb. 4-12: Der maßstäbliche Testraum mit transparenter, thermotroper Verglasung im Fenster- (Durchsicht-) und Überkopfbereich.

Die Station wurde weithin sichtbar auf dem Dach des TU Hauptgebäudes errichtet. Die Form der halben Ellipse auf dem 'Hauptschiff' der TU fasst die vorhandene Dachkante zur Dachterasse hin ein und bildet den Abschluss des großen, verglasten Dachgeschosses nach Norden hin. Sie nimmt die Versuchsräume in verschattungsfreier Lage auf (Abb. 4-9 - Abb. 4-12). Die lineare Achse der halben Ellipse ist um $24^{\circ}11'34''$ (Messung mit Hilfe von GPS-Satelliten) aus der Ost-West-Richtung gedreht.

4.2.5 Messtechnik

Das Flussdiagramm in Abb. 4-13 beschreibt die verwendete Messtechnik. Die wichtigsten Elemente der Messdatenerfassung sind

- Messfühler mit Messverstärkern soweit erforderlich
- Multiplexer mit Steuerung und Stromversorgung für die Messverstärker
- Schrittmotoren mit Schrittmotorsteuerung für die Scanner in den beiden Modellräumen und auf der Wetterstation zur Erfassung einer Himmelsverteilung
- Multimeter mit Scannerkarte zur Digitalisierung anliegender Messwerte von Messpunkten oder Multiplexern

Die verschiedenen Messfühler sind – soweit erforderlich - über Messverstärker an einen sogenannten Multiplexer angeschlossen. Sie können im Raum fixiert oder auf den Raumscannern montiert werden. Die nach Plänen des Zentrums für angewandte Energieforschung (ZAE), Bayern, Abt. 4, im Eigenbau erstellten Multiplexer (Abb. 4-17) und Verstärker (Abb. 4-18) befinden sich in den Versuchsräumen. Sie werden vom PC gesteuert und schalten jeweils einen bestimmten Kanal auf ein qualitativ hochwertiges Multimeter (Keithley 2000, [KEI95]) durch. Eine Scannerkarte im Multimeter stellt PC-gesteuert die Verbin-

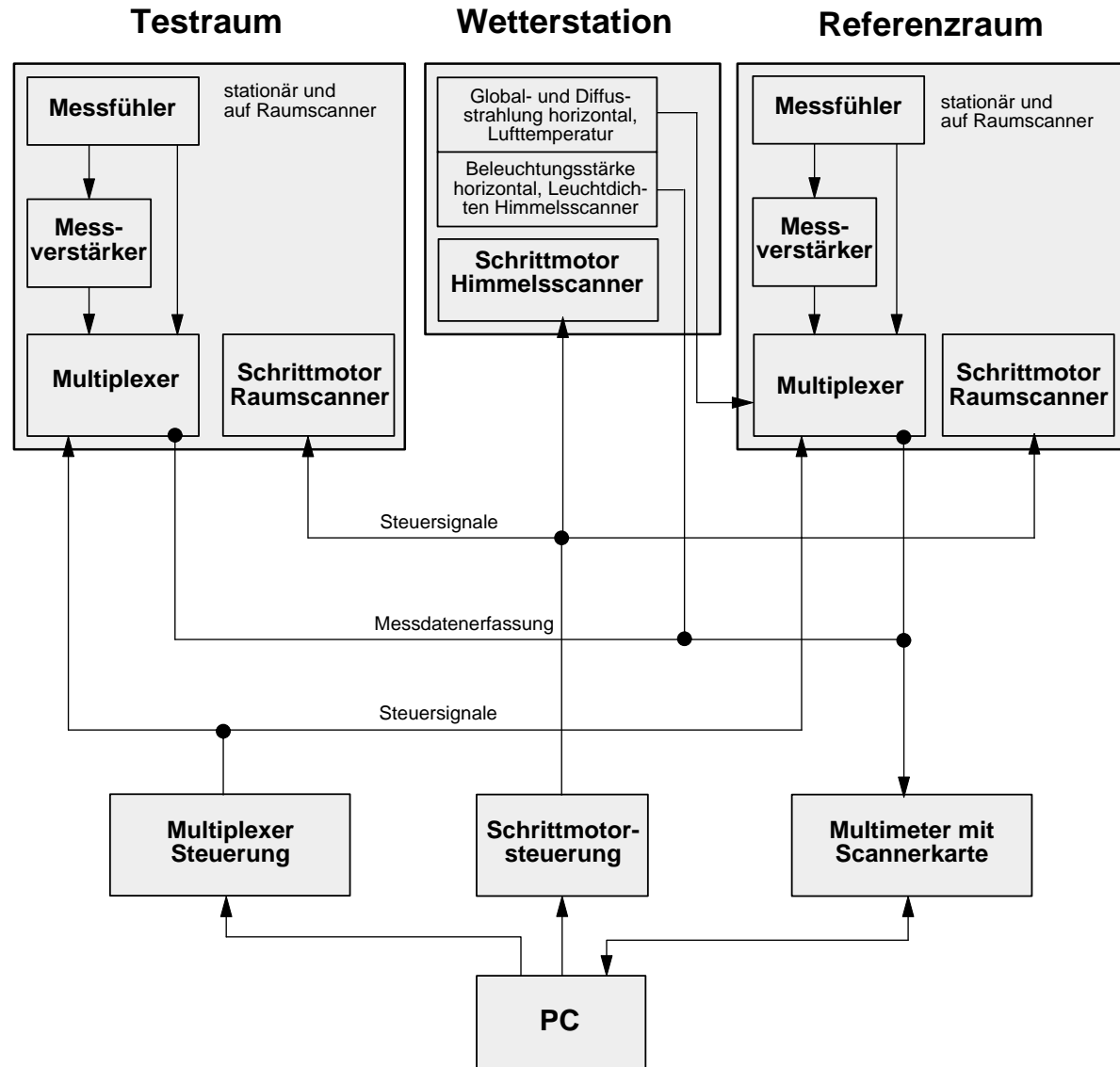


Abb. 4-13: Schematische Darstellung der Hardware-Komponenten und der Datenflüsse bei der Messdatenerfassung

dung seitens des Multimeters her. Die Daten werden an den PC weiter geleitet und in Dateien abgelegt. Im Test- bzw. Referenzraum sind je ein Raumscanner (Abb. 4-15) mit Messfühlern für Beleuchtungsstärke (Abb. 4-14, oben), Leuchtdichte (Abb. 4-14, unten) und Temperatur installiert. Dadurch können die Räume in frei wählbarer Rasterung abgetastet werden. Der Himmels-scanner (Abb. 4-16) liefert eine Verteilung der Leuchtdichte des Himmels als zusätzliche Information, die z.B. bei dem Vergleich mit einem CIE-Normhimmel von Bedeutung sein kann.

4.2.6 Messkonzept

Als Messdaten werden die in Tab 4-1 zusammengestellten Werte erfasst. Die Steuerung erfolgt über ein Programm in LabView, National Instruments [LAB96]. Dieses wurde so konzipiert, dass über einfache Schaltelemente der Bildschirmoberfläche ein Großteil möglicher Messungen abgedeckt werden können, ohne dass eine Anpassung der Software selbst erforderlich ist. Abb. 4-19 zeigt den programmierten Messablauf. Der Messdurchlauf sollte einen möglichst kurzen Zeitraum beanspruchen, um auch bei sehr wechselhaften Bedingungen eine praktisch gleichzeitige Situation wiederzugeben. Bei z.B. je 10 Raumpositionen und 5 Himmelspositionen beträgt die Messrate 3 Minuten. Durch die Dauer der Messperiode können sich bei stark wechselhaftem Wetter Messdaten (z.B. Außenbeleuchtungsstärke) während eines Raumscans ändern und relative Werte (Tageslichtkoeffizient) dann nicht mehr ganz korrekt sein. Außerdem können bei hoher Beleuchtung und vorhandenem Schlagschatten durch die konkrete Position des Raumscanners mit seinen Messfühlern sowohl bei den Messwerten selbst als auch der Interpolation in Linien gleicher Beleuchtungsstärke (Kap. 5 und 6) unerwartete Abweichungen auftreten. Aus



Abb. 4-14: Hagner- (oben) und Krochmann-Messfühler (unten) zur Messung von Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte.

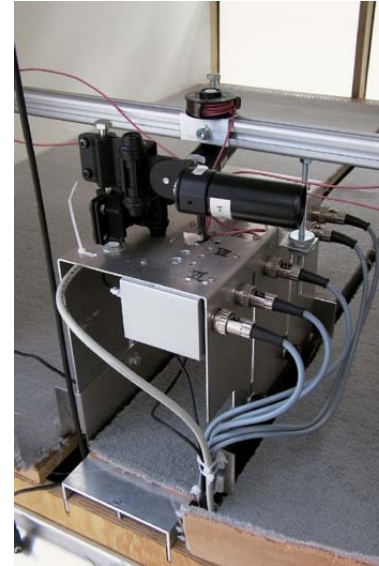


Abb. 4-15: Höhenverstellbarer Raumscanner mit Messfühlern und -verstärkern



Abb. 4-16: Drehschrittmotor mit 5 Leuchtdichtefühlern zur Messung der Verteilung des Himmels

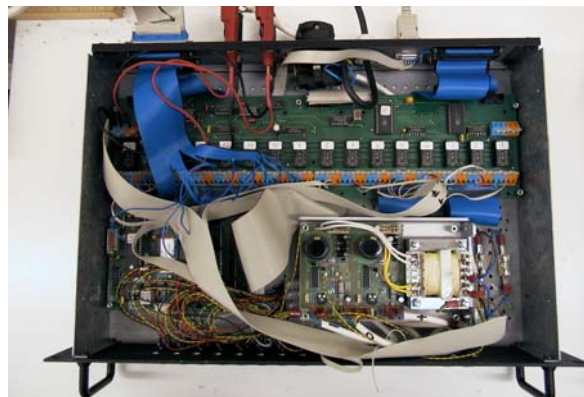


Abb. 4-17: Platine vom Multiplexer (Eigenbau nach Bestückungsplänen) zur Messdatenerfassung für die beiden maßstäblichen Versuchsräume



Abb. 4-18: Je zwei Messverstärker und Multiplexer zur Erfassung von Messdaten in Test- und Referenzraum.

Bezeichnung	Anzahl	Ort	Messfühler
Horizontale Beleuchtungsstärke	5	Testraum	kommerzielle Sensoren [HAG02] mit Verstärkern (Fraunhofer-ISE)
Horizontale Beleuchtungsstärke	5	Referenzraum	
Horizontale Beleuchtungsstärke	1	Wetterstation	kommerzieller Sensor mit integriertem Messverstärker
Vertikale Beleuchtungsstärken	4	Testraum	Eigenbau: Photozellen mit Messverstärkern nach Schaltplan
	2	Referenzraum	
Leuchtdichte	2	Testraum	kommerzielle Sensoren [KRO02] kommerzielle Sensoren [KRO02] Eigenbau: Photozellen mit Linsenaufsatz und Messverstärker nach Schaltplan
	2	Referenzraum	
	5	Himmelsscanner	
Globalstrahlung horizontal	1	Wetterstation	kommerzielles Solarimeter (CM11)
Diffusstrahlung horizontal	1	Wetterstation	kommerzielles Solarimeter (CM11)
Lufttemperatur	1	Wetterstation	Kommerzieller belüfteter Fühler, PT 100
	1	Testraum	
	1	Referenzraum	
Oberflächentemperatur	2	Testraum	PT 100
Allgemeiner Raumeindruck	1	Testraum	digitale Kamera: Canon PowerShot Pro 70

Tab 4-1: Übersicht über die Sensoren zur Datenerfassung

Kostengründen wurden sowohl kommerziell erhältliche Systeme als auch im Eigenbau hergestellte Komponenten verwendet. Die im Eigenbau erstellten Beleuchtungsstärke Sensoren sind aber wegen ihrer vollständig anderen Winkelcharakteristik nur bedingt verlässlich.

Die digitale Kamera ist auf einem höhenverstellbaren Stativ montiert und liefert in wählbaren Abständen Fotos der Raumsituation. Diese können zu Zeitraffern zusammengestellt werden. Um eine Aufnahme des Raumes ohne Raumscanner zu ermöglichen, muss sie mit diesen synchronisiert werden. Über eine Funkuhr im Testraum

kann zu jeder Zeit ein Bezug zwischen Momentaufnahme und Messung hergestellt werden. Wichtige Raumsituationen können identifiziert und dann über die Messdaten detailliert untersucht werden.

4.3 Computersimulation

4.3.1 RADIANCE zur Lichtsimulation

Das public-domain-Programmpaket RADIANCE ist ein international anerkanntes Werkzeug für die Tageslichtsimulation [WARD99]. Im Gegensatz zu vielen anderen Visualisierungsprogrammen

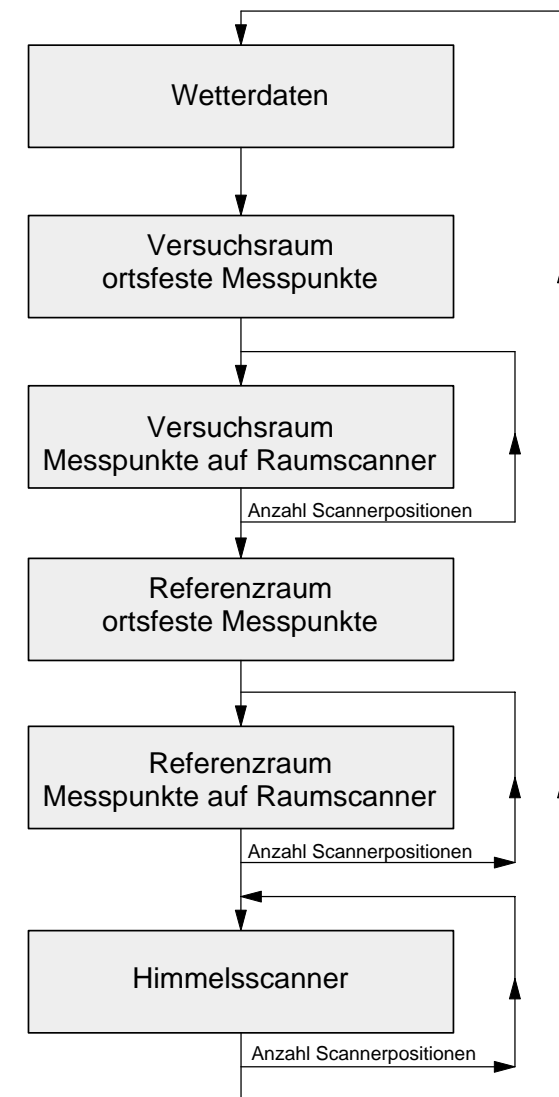


Abb. 4-19: Flussdiagramm des Programmes zur Messdatenerfassung mit LabView [LAB96]

basiert es auf physikalischen Gesetzen und kann somit neben photorealistischen Abbildungen auch Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichtewerte berechnen. In der vorliegenden Arbeit wurde es zur Ergänzung der experimentellen Untersuchungen eingesetzt. Zahlreiche, weiterführende Konzepte zur Integration thermotroper Schichten können dargestellt und beurteilt werden.

Die Darstellung thermotroper Verglasungen in den beiden Zuständen

- 'transparent' als normales Fenster
 - vollständig 'streuend' als Streuglas
- ist nach den BTDF Messungen an den verwendeten Schichten (siehe Kap. 3.3.7) zulässig.

Die Modellierung der möglichen Übergangszustände ist allerdings nicht ohne Änderungen an der Programmstruktur möglich. Dazu müsste eine Koppelung mit einer dreidimensionalen, thermischen Berechnung erfolgen, so dass die Möglichkeit besteht für das Material 'thermotrop' abhängig von der lokal herrschenden Temperatur auch lokal andere Materialparameter in RADIANCE zu setzen. Da dieser Aufwand in keinem Verhältnis zu der Aussage steht, wurde sich hier darauf beschränkt alle Effekte den thermischen Übergang betreffend experimentell zu untersuchen und in den Simulationen zu weiterführenden Anwendungsmöglichkeiten lediglich die Zustände 'transparent' oder 'eingetrübt' darzustellen. Experimentelle Momentaufnahmen können aber benutzt werden, um über eine Bildmontage eine Visualisierung bei realen Gebäuden vorzunehmen (Kap. 7).

4.3.2 TRNSYS zur thermischen Simulation

Ein international anerkanntes Programmpaket zur thermischen Simulation von Gebäuden inklusive haustechnischer Anlagen ist TRNSYS ('Transient

Simulation System') [TRN00]. Für die Gebäudesimulation können Materialien mit ihren thermisch relevanten Eigenschaften definiert, zu mehrschichtigen Wänden verbunden und damit mehrere Räume aufgebaut werden. Die Simulation erfolgt mit Hilfe von ortsspezifischen Wetterdaten in diskreten Zeitschritten über eine definierte Periode, z.B. ein Jahr. Die Modellierung von Fenstern erfolgt mittlerweile über das WINDOW-Programm vom LBL, U.S.A. [WIN94]. Dieses kann aus spektralen und winkelabhängigen Daten (z.B. Messwerte siehe Kap. 3.3) eine detaillierte Ausgabe hinsichtlich der Strahlungsbeeinflussung von Fenstern erzeugen, welche wiederum von TRNSYS importiert und zur thermischen Simulation verwendet werden können.

Die Modellierung von TTS für die Gebäudesimulation mit TRNSYS kann in unterschiedlicher Detaillierung erfolgen:

1. Über die Möglichkeit, eine Beschattung mit spezifischen Eigenschaften in Abhängigkeit von bestimmten Parametern zu aktivieren, kann oberhalb einer bestimmten Temperatur eine TTS simuliert werden. Die Modellierung entspricht einer Stufenfunktion. Diese Beschreibung trifft auf thermotrope Hydrogele bereits relativ gut zu.
2. Über die Möglichkeit Formeln in der Simulation zu berücksichtigen, d.h. bestimmte Parameter in Abhängigkeit umzurechnen, besteht die Möglichkeit eine mehrstufige Funktion zu erzeugen. Dies ist vor allem bei etwas träger schaltenden Schichten mit längeren Zwischenphasen, wie z.B. thermotropen Polymerblends, notwendig.
3. Die aufwendigste und detaillierteste Modellierung erfolgt über die Bereitstellung verschiedener Zustände einer thermotropen Schicht

im WINDOW-Programm. Während der Simulation wird dann in Abhängigkeit der herrschenden Temperatur zwischen Fenstern mit TTS in verschiedenen Zuständen umgeschaltet.

Alle diese Möglichkeiten sind im bekannten Rahmen bei einer Jahressimulation mit TRNSYS zur Ermittlung des Jahresheiz- (HEB) und Kühlenergiebedarfes (KEB) ausreichend. Programmbedingt ist aber eine genaue, geometrische Beschreibung der thermotropen Schicht insbesondere in verschiedenen Übergangszuständen nicht möglich, da das Programm insgesamt nicht mit einem geometrischen Modell des Gebäudes arbeitet.

Die thermischen Simulationen werden im Rahmen der Arbeit lediglich zur Vorabklärung grundlegender Zusammenhänge zwischen HEB/KEB und den physikalischen Eigenschaften der TTV verwendet.

5 Experimentelle Studien mit thermotropen Verglasungen (TTV)

5.1 Vorbemerkungen

5.1.1 Thermische Vorstudien

TTV verändern ihr Streuverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Veränderung wird beim Einbau in lichtdurchlässige Bauteile am direktesten durch die Veränderung der Raumbeleuchtung spürbar. Obwohl sie also als Tageslichtsystem wirksam werden, beeinflussen ihre physikalischen Eigenschaften den Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf (HEB bzw. KEB) maßgeblich. Deswegen sollen vorab sinnvolle Bereiche für geeignete Eintrübungstemperaturen und Transmissionsreduktionen durch eine TTV mit Hilfe von thermischen TRNSYS-Simulationen eingegrenzt werden. Die TTV wurde hierfür mit Hilfe einer einfachen Stufenfunktion (transparent – transluzent) modelliert (Kap. 4.3.2). Abb. 5-1 und Abb. 5-2 zeigen exemplarisch die Simulationsergebnisse für den HEB und KEB des 1:1 Versuchsraumes aus Kap. 4.2.2 bei Variation folgender Parameter:

- Flächenbelegung der Südfassade:
 - Vollflächige Belegung mit einer TTIV (Abb. 5-1)
 - opake Brüstung (1/3) mit TTIV (2/3) (Abb. 5-2)
- Anordnung der TTV in der äußeren bzw. inneren Scheibe der Isolierverglasung: Die für den Zustand der TTV bestimmende Temperatur ist die der Außen- bzw. Innenoberfläche der TTIV
- Einfluss der Schalttemperatur: 15°C bis 35°C
- Einfluss des Schalthubes: Variation 50% bis 100% (solarer Eintrag bei Aktivierung der TTS halbiert bzw. unterbunden)

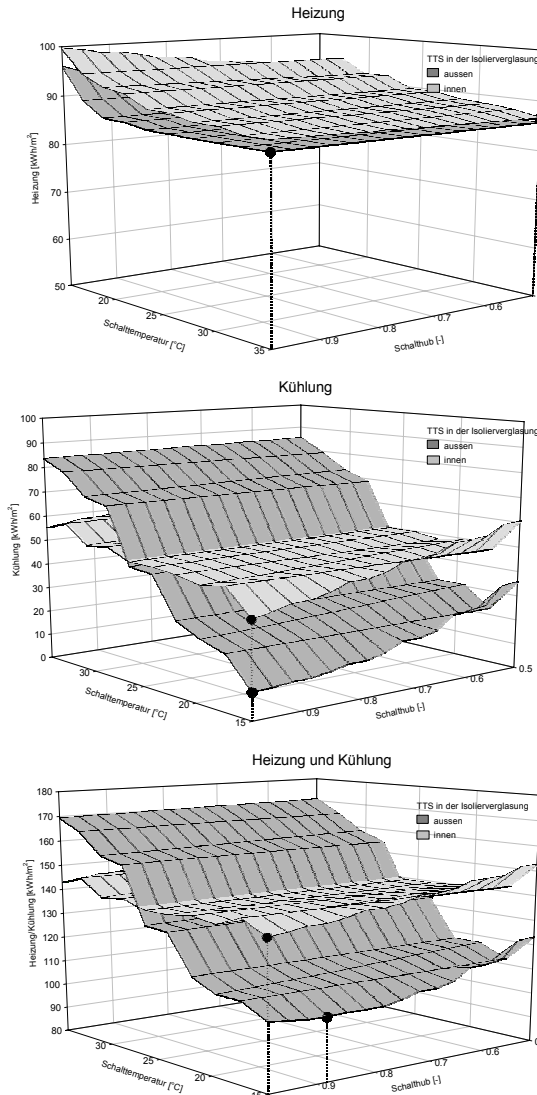


Abb. 5-1: Heiz-, Kühl und Gesamtenergiebedarf in Abhängigkeit der Schalttemperatur und des Schalthubes für eine Südfassade mit vollflächiger TTV Belegung (100% der gesamten Südfassade)

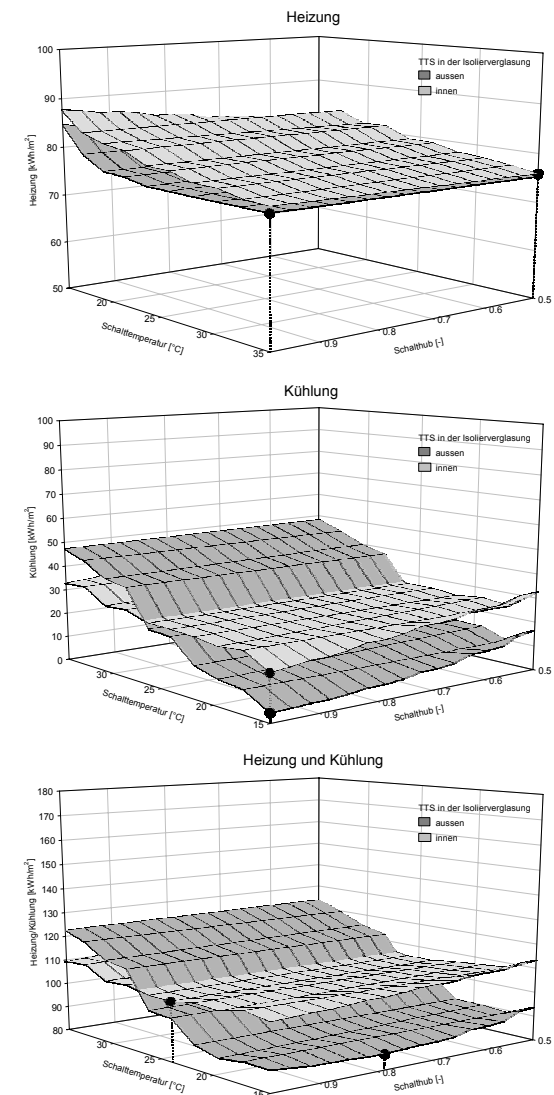


Abb. 5-2: Heiz-, Kühl und Gesamtenergiebedarf in Abhängigkeit der Schalttemperatur und des Schalthubes für eine Südfassade mit opaker Brüstung und TTV Belegung (67% der gesamten Südfassade)

Der allgemein relativ hohe HEB bei der Simulation des Versuchsraumes aus Kap. 4.2.2 ist auf seine Exposition (6 Wetterseiten: 4 Seiten plus Dach und Boden) zurückzuführen. Das Modell für den Versuchsraum wurde im Projekt SOLEG für die Untersuchungen an einem Fassadenluftkollektor validiert (S. 3.2-17, [SOL01]).

Flächenbelegung der Südfassade

Durch eine vollflächige Belegung mit einer thermotropen Isolierverglasung (Abb. 5-1) werden im Gegensatz zu einer teilflächigen Belegung mit opaker, wärmegeämmter Brüstung (Abb. 5-2) sowohl Heiz- als auch KEB erhöht: Der U-Wert einer Isolierverglasung (Annahme $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$) ist deutlich höher als der einer gut gedämmten Wand ($0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$). Dadurch und durch die zeitweise sehr hohen und nicht vollständig nutzbaren solaren Einträge sind sowohl höherer Heiz- als auch KEB zu erklären. Mit einer opaken Brüstung kann der Bedarf gesenkt werden. Qualitativ unterscheiden sich die Graphen nur unwesentlich.

Anordnung der TTS in der Isolierverglasung

Mit der Anordnung der TTS in der Isolierverglasung wird die vorrangige Ankoppelung an Innen- bzw. Außenluft bestimmt. Das Schaltverhalten ist damit saisonal unterschiedlich. Bei Ankoppelung an Innenluft ist das Verhalten unter der Voraussetzung einer konstant geregelten Innentemperatur gleichmäßiger im Verlaufe eines Jahres (Eintrübung auch während der Winterzeit), wohingegen die Ankoppelung an Außenluft eine stark verzögerte bis hin zu einer unterbundenen Eintrübung während kalter Tage zur Folge hat. Energetisch gesehen wirkt sich die Ankoppelung an Außenluft positiv aus: Maximaler solarer Eintrag im Winter und minimaler im Sommer minimieren den Bedarf an Heiz- und Kühlenergie.

Schalttemperatur und Schalthub

Hinsichtlich des HEB ist eine hohe Schalttemperatur bei praktischer Unabhängigkeit vom Schalthub und der Anordnung (Flächenbelegung, innen oder außen) von Vorteil: Solare Gewinne werden vollständig genutzt. Es ist verständlich, dass ohne Beschattung der HEB minimal, dafür aber der KEB maximal ist. (vgl. Kap. 2.7): Je niedriger die Schalttemperatur desto geringer der zusätzliche Kühlbedarf. Hier unterscheiden sich aber die Anordnungen innen/außen maßgeblich: Bei hohen Schalttemperaturen ist die Anordnung innen (ungenügende Funktion während der warmen aber auch kühleren Übergangsjahreszeiten), bei niedrigen außen vorteilhaft (Überhitzung ganzjährig verhindert bzw. abgemildert). Der Schalthub ist vor allem in Bezug auf die Kühlenergie relevant: Ein hoher Schalthub (hohe Differenz der Transmission im transparenten und transluzenten Zustand) ist einem niedrigen vorzuziehen. Bezüglich des HEB ist der Einfluss wesentlich geringer. Ein höherer Schalthub vermindert die solaren Gewinne und wirkt sich dadurch ungünstig aus.

Fazit

Es bestätigt sich die insbesondere bei Verwaltungsgebäuden bekannte Tendenz, dass der KEB einen zunehmend großen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch (HEB, KEB) hat. Aus diesem Grunde ist ein hoher Schalthub zu fordern.

Der Konflikt von idealen Parametern in Bezug auf HEB bzw. KEB lässt sich nicht grundsätzlich auflösen. Die genauen Werte für die Minima sind wegen der zahlreichen Parameter beim Gebäudemodell unter anderem für die nutzungsspezifischen Angaben und die Simulationsannahmen (z.B. Wetterdaten) stark unterschiedlich.

Die rein energetische Betrachtungsweise greift wesentlich zu kurz, da

- sich bei heutigen Gebäuden zeigt, dass allgemein gestalterische Aspekte (z.B. bewusst hoher Verglasungsanteil gewünscht) vorrangig behandelt werden.
- die Funktion als Blendschutz und die Versorgung mit Tageslicht nicht berücksichtigt sind, obwohl sich diese im Gegensatz zum Energieverbrauch sehr direkt spürbar und während des ganzen Jahres auf den Raumkomfort auswirken.
- ein Optimum für den KEB bei niedrigen Schalttemperaturen liegt. Dadurch wäre aber die TTS sehr häufig vollständig eingetrübt, was sich auf HEB negativ auswirkt und die Durchsicht verhindert.
- ein Optimum für den HEB mit einer Normalverglasung ohne Sonnenschutzfunktion erreicht wird.

Folgende Schlüsse werden durch diese Voruntersuchungen bestätigt:

- Der Schwerpunkt im weiteren Verlauf der Arbeit liegt auf gestalterischen (Lichtmilieu, visuelle Raumwirkung) und visuellen Aspekten wie Blendschutz, Sonnenschutz und Tageslichtversorgung. Diese Aspekte haben erfahrungsgemäß nicht zuletzt bei der Umsetzung in die Praxis oder dem Bemühen um eine ansprechende Architektur trotz der Wichtigkeit, Energieverbräuche zu reduzieren, eine höhere Bedeutung.
- Ein hoher Schalthub ist besonders bei Gebäuden mit hohem Kühlanteil vorteilhaft.
- Die ideale Schalttemperatur ist sehr gebäude-, einbausituations- und nutzungsabhängig.

5.1.2 Voraussetzungen für die experimentellen Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit in kleinen Abmessungen verfügbaren, grundsätz-

lich geeigneten, thermotropen Hydrogelen der Firma Affinity durchgeführt (siehe Kap. 3.4). Darüber hinaus soll bedacht werden, dass weitere Entwicklungen und Anpassungen auch weitere Verbesserungen oder Variationen mit veränderten Substanzen denkbar sind.

Wegen der Überlegungen in Kap. 4.1 und Kap. 5.1.1 beginnen die experimentellen Untersuchungen bei einer Testfassade mit einer opaken Brüstung (Heizung, Kühlung) und einer vollflächigen Belegung des Durchsicht- und Überkopfbereiches mit TTV. Damit können Eintrübung, Aufklärung und Raumwirkung vorerst unabhängig von anderen Lichteffekten studiert werden.

Da thermische Untersuchungen im Maßstab 1:2.5 nicht in jeder Hinsicht auf reale Größenverhältnisse übertragbar sind (z.B. thermische Masse der Bauteile) sind Messwerte über die Temperatur der TTV selbst hinaus nur qualitativ interpretierbar. Bei den Testräumen handelt es sich um weder beheizte noch gekühlte Räume.

Anfänglich wurde mit einer thermotropen Verglasung (TTV, vgl. Abb. 3-1) gearbeitet. Dadurch wird das qualitative Schaltverhalten nicht grundsätzlich verändert. Lediglich durch die thermische Ankoppelung an Innen- und Außenraum bzw. die thermischen Verluste auf beiden Seiten wird die Dynamik bei asymmetrischen Lufttemperaturen innen/außen (z.B. Sommer/Winter) zwischen den möglichen Anordnungen im äußeren oder inneren Glas einer Isolierverglasung 'gemittelt'. Insgesamt hingegen wird sie durch die zusätzlichen thermischen Verluste lediglich verlangsamt und weniger abhängig von der Jahreszeit – sofern die Erwärmung durch die Bestrahlung ausreicht, um überhaupt eine Eintrübung zu bewirken. Im Verlaufe der Experimente wurde das Verhalten im Isolier-

glas getestet (Abb. 5-4). Eine Wärmeschutzschicht würde einerseits die Beschattungswirkung für den Raum erhöhen, andererseits bei Anordnung hinter der TTV Teile durchgelassener Strahlung auf die TTV reflektieren, bei Anordnung vor der TTV die Strahlung auf die TTV reduzieren. Auch dadurch kann die Dynamik und die Beschattungswirkung beeinflusst werden. Durch die schnelle Erwärmung der maßstäblichen Versuchsräume bei Besonnung auch über normale Raumlufttemperaturen, sind die Wärmeverluste nach innen bei relevanten Verhältnissen gering.

Die Versuche erfolgten in unterschiedlichem baulichem Umfeld:

- *Situation 1:* Erste Versuche wurden noch auf dem temporären Vorbau (Forschungsgerüst) der früheren Lehrstuhlräumlichkeiten in einer Hofsituation durchgeführt. Der Horizont wurde durch umliegende Gebäude gebildet. Die auf die Versuchsapertur treffende Globalstrahlung kommt dadurch von oben und ist größtenteils proportional zur gemessenen horizontalen Beleuchtungsstärke.
- *Situation 2:* Durch den freien Horizont auf der hauptsächlich für die Versuche genutzten 'Station für Solarforschung' (siehe Kap. 4.2.4) und das vorgelagerte Dach des TU-Hauptgebäudes herrscht eine wesentlich andere Strahlungssituation, die sich in höheren Messwerten der Beleuchtungsstärke widerspiegelt.

5.2 Thermotrope Verglasung (TTV) vertikal im Durchsicht- und Überkopfbereich

Abb. 5-3 und Abb. 5-4 fassen die Zeitspannen transparenter, transluzenter und auftretender Mischzustände zusammen. Abb. 5-5 bis Abb. 5-10 zeigen für die drei unterschiedlichen Versuchsumgebungen

- Forschungsgerüst der ehemaligen Lehrstuhlräume, Orientierung 24° SSW (parallel zur Front des Forschungsgerüsts)
- 'Station für Solarforschung' Orientierung 10° SSO (Blick auf die Münchner Innenstadt)
- 'Station für Solarforschung' Orientierung 24° SSW (parallel zur Front der Solarstation)

korrespondierende typische Raumsituationen fotografisch (links), die horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Höhe der Arbeitsfläche (mitte) und die während der Kernphase der Eintrübung herrschenden Tageslichtquotienten in der Mittelachse von Test- und Versuchsraum im Vergleich. In Abb. 5-11 und Abb. 5-12 sind Messungen von mittlerer Leuchtdichte und Temperatur für Test- und Referenzraum zusammengefasst.

5.2.1 Beschreibung der Eintrübungs- und Aufklärungsvorgänge

Eintrübung

Einige Minuten nachdem eine zur Verglasung senkrechte Komponente der Strahlung auftritt, beginnt die Eintrübung der TTV. An den Rändern der TTV im Bereich der am stärksten von direkter Sonne bestrahlten Rahmenteile der Verglasung beginnt die Trübung. Die Exposition zur Sonne und die sekundäre Wärmeabgabe der Rahmenteile bewirken diese lokal beschleunigte Erwärmung. Der genaue Ort ist von der Orientierung der Testfassade, der Tageszeit und den Vorbedingungen bei Aufklaren des Himmels abhängig. In jedem Fall beginnt die Eintrübung im Bereich der Rahmenstöße bzw. der unteren Rahmen der Verglasung. Von hier aus breitet sich die Eintrübung sukzessive über die gesamte TTV aus. Während die erste Eintrübung nach einer Bestrahlung von typischerweise 10-30 Minuten einsetzt, bei der sich die Verglasung insgesamt zunehmend erwärmt, dauert die vollflächige Ausbreitung dann nur noch wenige Minuten. Der

Grund für die Beschleunigung nach der Eintrübung erster lokaler Bereiche ist die Erhöhung der Absorption in der TTV. Die anfangs auch im eingetrübten, transluzenten Zustand noch vorwärts streuende TTV wird zunehmend reflektierend. Erst jetzt beginnt sie als Blend- und Sonnenschutz zu wirken. Der Übergang von klaren zu eingetrübten Teilbereichen ist bei der verwendeten TTS und den sich ausbildenden Temperaturen fließend. Mit anderen Substanzen sind auch wesentlich schärfere Übergänge denkbar. Die gerundeten Formen des Überganges von transparenten zu transluzenten Bereichen der Verglasung im Bereich der Rahmen sind bei Gebäuden ungewöhnlich und erinnern an natürlich auftretende Phänomene wie Kondensat, welches bei tiefen Temperaturen im Bereich des Glasrandes entstehen kann, oder Eisblumen. Da bei Gebäuden im allgemeinen mit geometrisch klar zuordenbaren Formen gearbeitet wird, sind diese Übergangsformen gewöhnungsbedürftig.

Aufklärung

Die Aufklärung weist starke Ähnlichkeiten mit dem Auflösen von Nebel auf: Die Sicht auf benachbarte Gebäude bzw. die Konturen des Horizonts wird langsam und schleierartig frei. Da diese bei Verschwinden der senkrechten Direktstrahlungskomponente oder Abwesenheit von Direktstrahlung erfolgt, vollzieht sie sich vergleichsweise gleichmäßig über die gesamte Fläche mit einer Priorität für die unteren, kühleren Glasbereiche. Die durch die Auskühlung bewirkte Aufklärung schreitet von unten nach oben fort.

Bedeutung des Hintergrundes

Eine wichtige Komponente für die psychologische Wirkung von Eintrübung und Aufklärung ist der Hintergrund. Bei dunklerem Hintergrund wie z.B. bei sichtbaren Bebauungen der Fall ver-

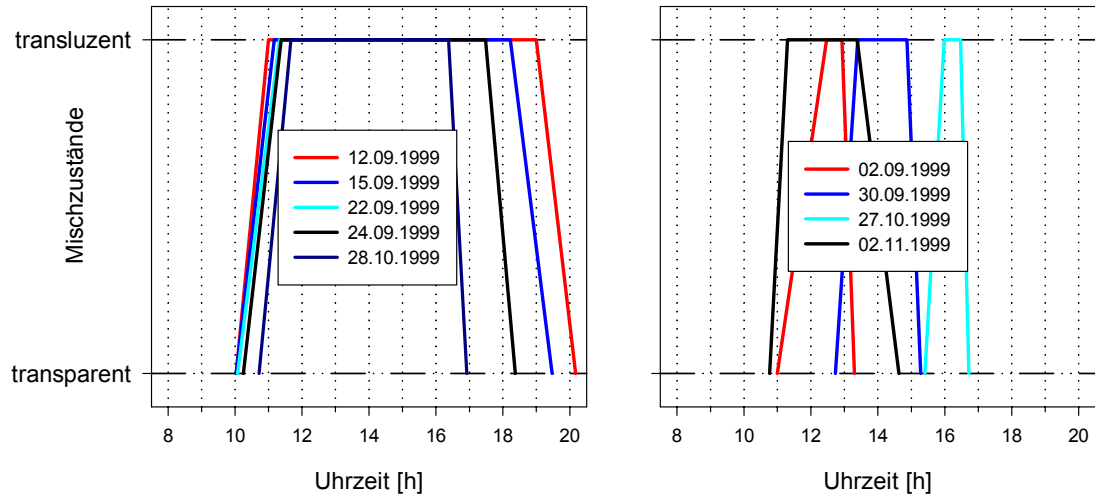


Abb. 5-3: Grobe Übersicht über die Verweildauer der TTV in den Zuständen transparent, transluzent bzw. Mischzuständen bei Versuchsreihen mit opaker Brüstung und TTV im Fenster- und Überkopfbereich: Auf dem früheren Forschungsgerüst und sonnigem (links) bzw. wechselhaftem Wetter (rechts).

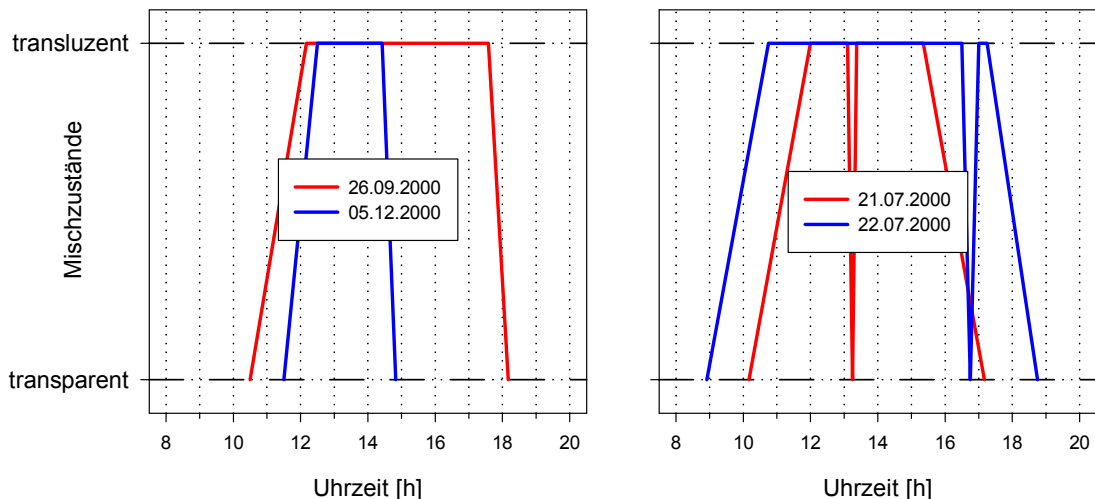


Abb. 5-4: Grobe Übersicht über die Verweildauer der TTV in den Zuständen transparent, transluzent bzw. Mischzuständen bei Versuchsreihen mit opaker Brüstung und TTV bzw. TTIV (05.12.00, TTV raumseitig) im Fenster- und Überkopfbereich: Auf der „Station für Solarforschung“ bei sonnigem Wetter und Orientierung 24° SSW (links) und ab Mittag wechselhaftem Wetter und Südorientierung (rechts).

schwindet der Hintergrund bzw. tritt langsam wieder in Erscheinung. Der Sichtkontakt zur Umgebung geht durch die TTV verloren bzw. wird wieder her gestellt. Bei hellem Hintergrund insbesondere bei Sicht auf den Himmel ist die Auswirkung weniger gravierend, obwohl auch die Wichtigkeit des Sichtkontaktes zum Himmel psychologisch wegen z.B. des Gefühls für die Tageszeit oder Wetterlage nicht unwichtig ist.

5.2.2 Zeitbedarf für die Veränderungen

In Abb. 5-3 und Abb. 5-4 wurde das Zeitverhalten aus den Versuchsreihen in Situation 1 und Situation 2 für eine grobe Einordnung zusammengestellt. Die Abbildungen geben jeweils für sonniges (links) bzw. wechselhaftes bis bedecktes Wetter (rechts) die Zeitspannen wieder, in denen sich die TTV in einem transparenten bzw. transluzenten Zustand (unterhalb bzw. oberhalb der Eintrübungstemperatur) befindet. Die Zeitspannen mit Mischzuständen wurden stark vereinfacht als Geraden wieder gegeben. In Realität beginnt die Eintrübung sehr langsam in Randbereichen der Verglasung (ca. 15 – 30 Minuten) breitet sich dann fast schlagartig über die gesamte Fläche aus (5 – 20 Minuten) und benötigt dann wiederum etwas mehr Zeit bis auch die letzten Randbereiche (z.B. durch Rahmen beschattete) vollständig transluzent/reflektierend geworden sind (15 – 30 Minuten). Während also der gesamte Übergang

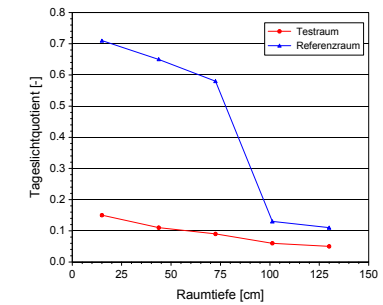
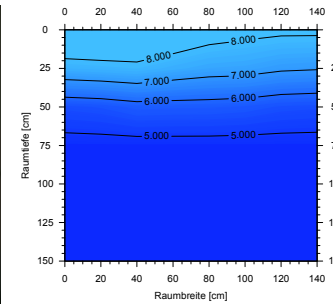
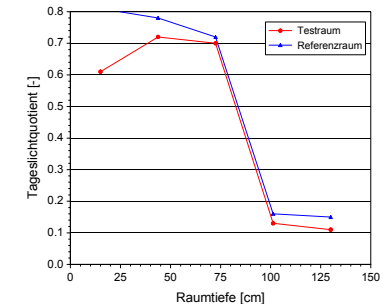
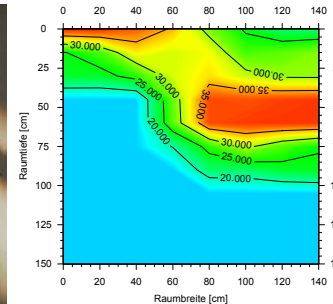
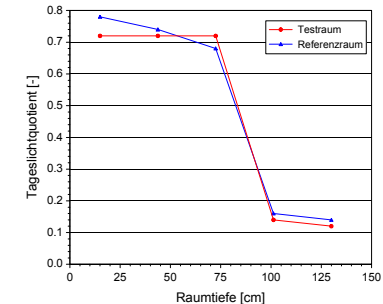
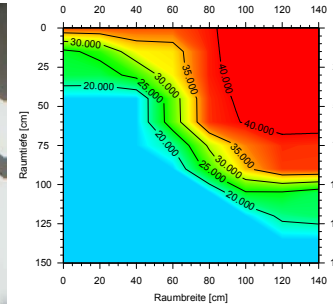
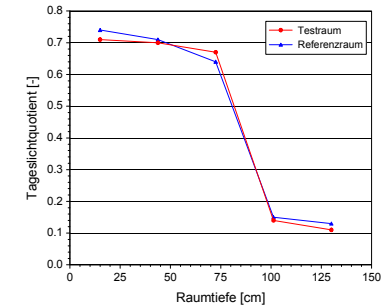
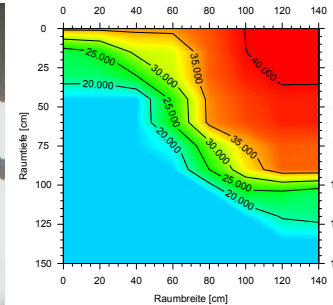


Abb. 5-5: TTV vollflächig im Fenster- und Überkopfbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (mitte) im Testraum sowie in der mittleren Raumachse von Test- (rot) und Referenzraum (Klarglas, blau) im Vergleich (rechts) beim Eintrübungsvorgang vom 02.11.1999 um 11:00, 11:05, 11:10 und 11:15 (von oben nach unten, Situation 1). Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 50279, 51870, 53209 bzw. 55422 lx, Orientierung: 24° SSW.

von vollständig transparent zu vollständig transluzent/reflektierend bei dieser Versuchsanordnung in der Größenordnung 1 – 2 Stunden benötigen kann, findet der optisch relevante Übergang der größten Flächenteile in wenigen Minuten statt. Bei sonnigem Wetter und vergleichbarer Jahreszeit erfolgen Eintrübung und Aufklärung täglich weitgehend zur gleichen Tageszeit. Die Unterschiede vor allem bei der Aufklärung lassen sich durch die unterschiedlichen Außen- und Innenraumtemperaturen bzw. den unterschiedlichen Sonnenstand erklären. Die durch den Sonnenstand bewirkten Unterschiede werden vor allem bei der Aufklärung deutlich: In Situation 1 wird der Zeitraum bei klarem Himmel ausschließlich durch den Zeitpunkt bestimmt, an dem die Sonne hinter den umliegenden Gebäuden verschwindet. In Situation 2 wurde die Aufklärung am 05.12.99 durch den Schattenwurf der aus dem Dach des TU Hauptgebäudes hervorstehenden Sternwarte bewirkt (Abb. 5-47). Der Vergleich der Versuche am 26.09.2000 (TTV) und 05.12.2000 (TTIV mit der TTV auf der Raumseite) zeigt, dass die Eintrübung selbst bei tieferen Außentemperaturen mit TTIV bei direkter Sonne beschleunigt wird. Bei den Versuchen vom 30.09.99 und 27.10.99 klart der Himmel im Verlaufe des Tages auf. Durch die spätere Tages- und Jahreszeit (bei vergleichbaren Lufttemperaturen) steht die Sonne

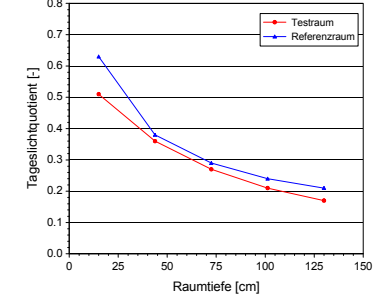
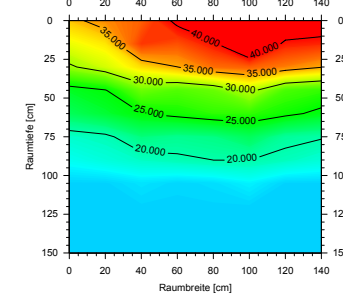
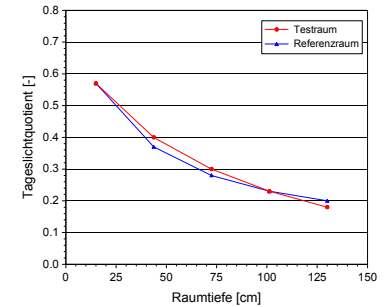
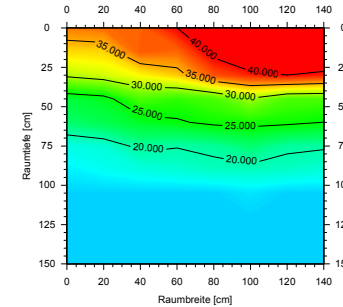
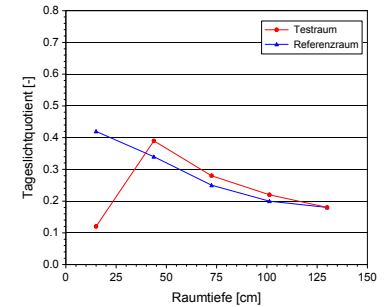
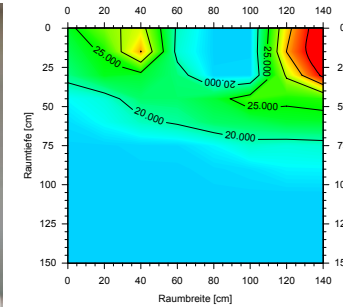
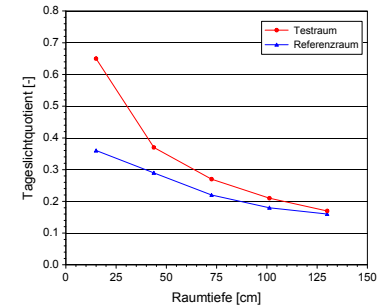
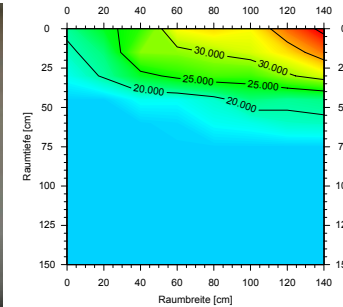


Abb. 5-6: TTV vollflächig im Fenster- und Überkopfbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (mitte) im Testraum, sowie Tageslichtquotient in der mittleren Raumachse von Test- (rot) und Referenzraum (Klarglas, blau) im Vergleich (rechts) beim Eintrübungsvorgang vom 22.07.00 um 09:00, 09:30, 10:00 und 10:30 (von oben nach unten, Situation 2). Horizontale Außenbeleuchtungsstärke 53918, 63662, 73100 bzw. 83068 lx, Orientierung 10° SSO.

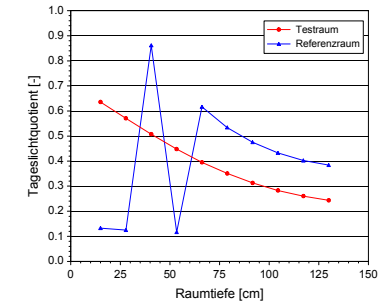
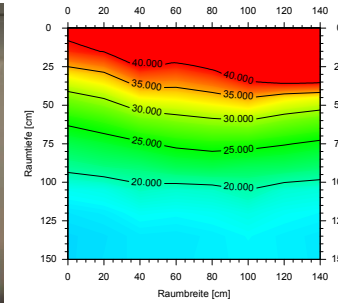
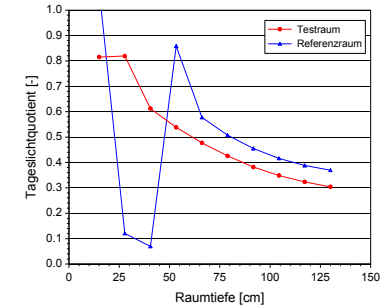
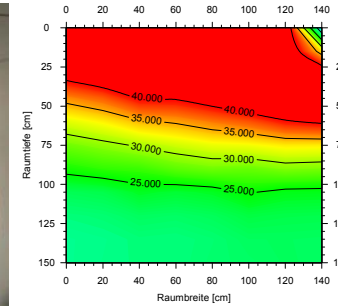
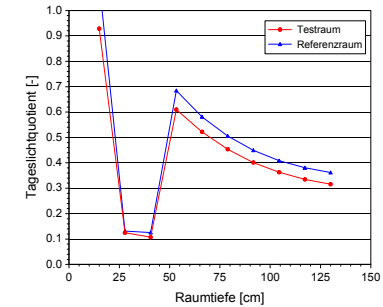
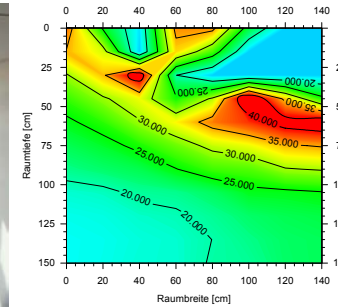
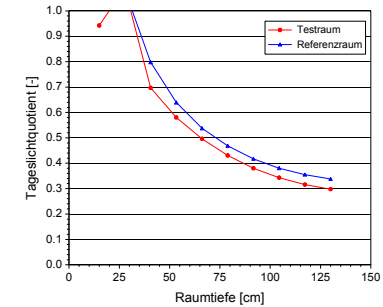
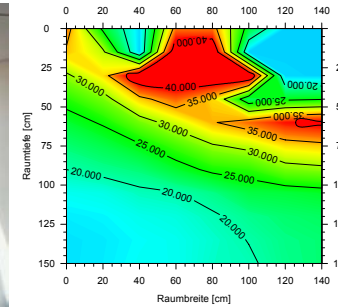
bereits steiler auf der TTV, was zu einer beschleunigten Eintrübung führt. Der Vergleich des Zeitverhaltens unterschiedlicher Orientierungen (Abb. 5-4: links 24° SSW und rechts 10° SSO) zeigt, dass die Eintrübung unabhängig von der Orientierung vergleichbar abläuft und nur von der Kontinuität der Bestrahlung und den Wetterverhältnissen abhängt.

5.2.3 Beleuchtungsstärken und Tageslichtquotient

Eintrübung (Abb. 5-5 -Abb. 5-7)

Im klaren Zustand herrschen bei Bestrahlung durch direkte Sonne und entstehenden Schlagshatten sehr ungleichmäßige Beleuchtungsverhältnisse. Die langsam entstehenden Mischzustände aus transluzenten und transparenten Bereichen während der Eintrübung der TTV verursachen veränderte ungleichmäßige Beleuchtungszustände. Die sich von unten ausbreitende Eintrübung verursacht in Fensternähe reduzierte Beleuchtungsstärken. Sie nimmt mit dem Abstand zum Fenster durch das Eindringen von Direktstrahlung durch resttransparente Bereiche zu und fällt dann wiederum gleichmäßig mit der Raumtiefe. Im vollständig eingetrübten Zustand wird die Beleuchtungsstärke analog zu einem Streuglas homogenisiert. Dieser Vorgang kann in reduzierter Form beim Verlauf des Tageslichtquotienten abgelesen werden. Durch die homogene

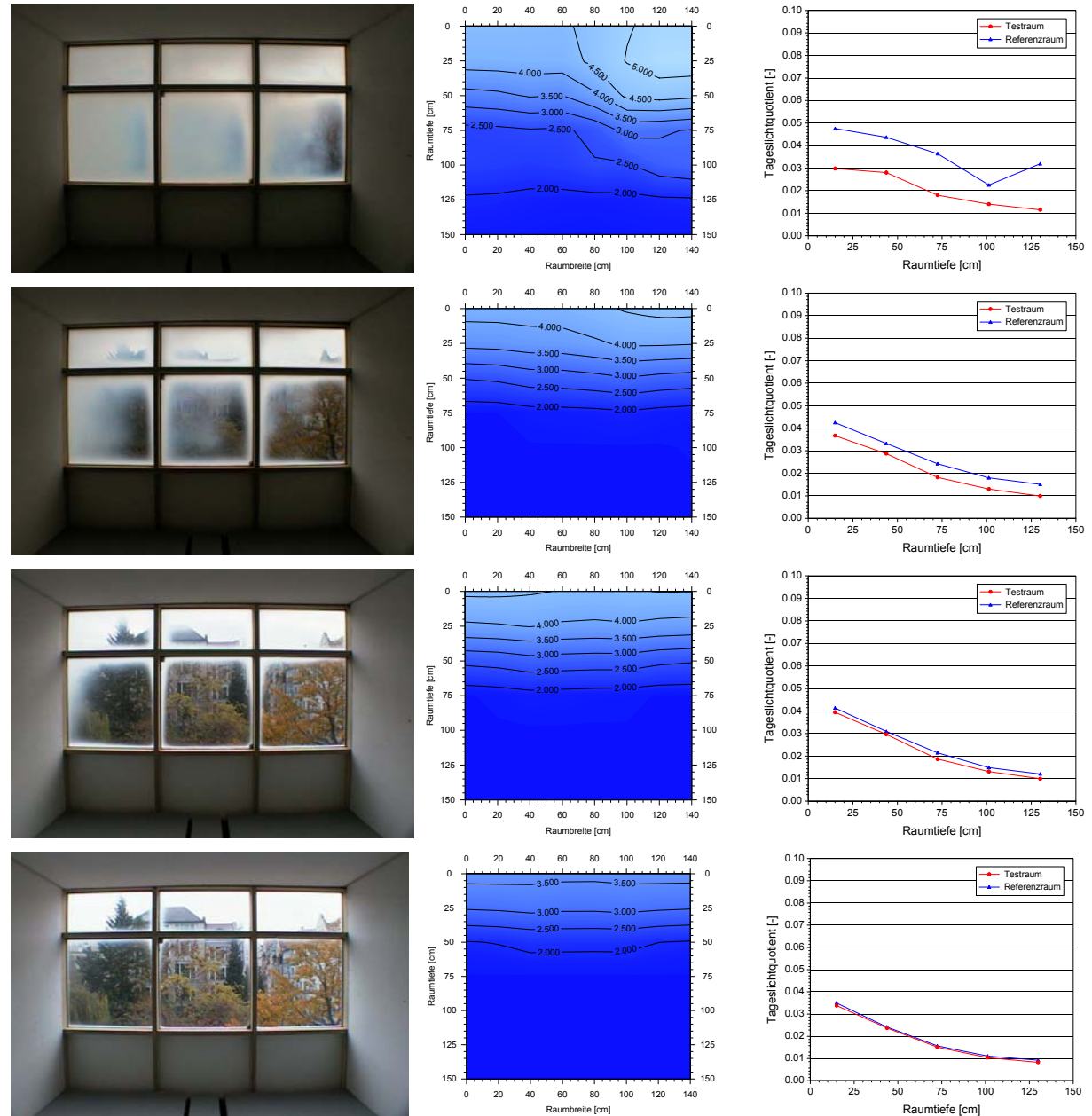
Abb. 5-7: TTV vollflächig im Fenster- und Überkopfbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (mitte) im Testraum sowie Tageslichtquotient in der mittleren Raumachse von Test- (rot) und Referenzraum (Klarglas, blau) im Vergleich (rechts) beim Eintrübungsvorgang vom 26.09.2000 um 11:15, 11:30, 11:45 und 12:00 (von oben nach unten, Situation 2). Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 53918, 63662, 73100 bzw. 83068 lx, Orientierung 24° SSW.



Verteilung, die unabhängig vom Sonnenstand mit dem Abstand zur Fensteröffnung abnimmt, wird die Adaptionsfähigkeit des Auges unterstützt. Es bestehen keine hohen Kontraste, die zur Blendung führen könnten. Die herrschenden Werte liegen für die dargestellten Beispiele bei 3500 – 8500 lx für die Versuche in Situation 1 und bei 20000 – 40000 lx für die ausgewählten Versuche in Situation 2. Auffällig sind dabei die im Vergleich zu Situation 1 hohen Werte in Situation 2. Trotz dieser Unterschiede und wegen der Augenadaptation, sind kaum Unterschiede bei der subjektiven Beurteilung der Beleuchtungsqualität zu erwarten.

Vergleicht man die Tageslichtquotienten der Messung vom 02.11.1999 (Abb. 5-5, Situation 1) und 22.07.2000 und 26.09.2000 (Abb.5-6 und Abb. 5-7, Situation 2 mit unterschiedlichen Orientierungen) so liegen die der Situation 2 deutlich höher. Weiterhin ergibt sich beim Vergleich von Test- und Referenzraum für den 02.11.99 eine klare Schaltfunktion: Die anfangs in einer vergleichbaren Größenordnung liegenden Werte liegen für den TTV Testraum nach vollständiger Eintrübung deutlich tiefer. Bei Situation 2 schwanken die Messwerte stark und zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Referenzraum mit transparenter Verglasung und dem Testraum mit TTV. Allenfalls ist eine leichte

Abb. 5-8: TTV vollflächig im Fenster- und Überkopfbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (mitte) im Testraum sowie Tageslichtquotient in der mittleren Raumachse von Test- (rot) und Referenzraum (Klarglas, blau) im Vergleich (rechts) beim Aufklärungsvorgang vom 02.11.1999 um 14:20, 14:25, 14:30 und 14:35 (von oben nach unten, Situation 1). Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 147824, 116436, 111893 bzw. 1062178 lx, Orientierung 24° SSW.



Absenkung im Vergleich zur Ausgangssituation abzulesen. Diese Schwierigkeit für Beleuchtungsstärke und Tageslichtquotient Situation 2 im Gegensatz zu Situation 1 ein eindeutiges Schaltverhalten der TTV abzulesen, muss auf die Bedeutung des TQ bei vorhandener Direktstrahlung und starker Richtungsabhängigkeit der Strahlung in der anderen Raumsituation zurückgeführt werden:

Die Verschattung des Horizonts durch umliegende Gebäude bewirkt in Situation 1, dass die Globalstrahlung von oben auftrifft und vom Außenbeleuchtungsstärke Messgerät auf der Horizontalen proportional registriert wird. In Situation 2 hat die Globalstrahlung durch den freien Horizont und das vorgelagerte Dach auch eine nennenswerte Komponente in horizontaler Richtung, die nicht beim TQ erfasst wird. Das Dach wirkt als eine Art Konzentrador, der Schwankungen bei der Außenbeleuchtungsstärke verstärkt und bei leichten Änderungen insbesondere der Richtungsabhängigkeit der Strahlung den Zusammenhang zusätzlich verfälscht. Beim Bezug der Innen- auf die Außenbeleuchtungsstärke ergeben sich deswegen undeutliche Zusammenhänge. So ist es z.B. zu erklären, dass die Beleuchtungsstärke vertikal (und damit der für die Versuchsräume durch die vertikale Apertur gelangende, relevante Strahlungseintrag) bei bestimm-

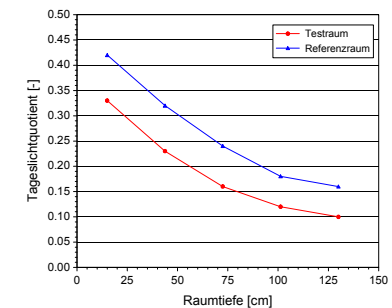
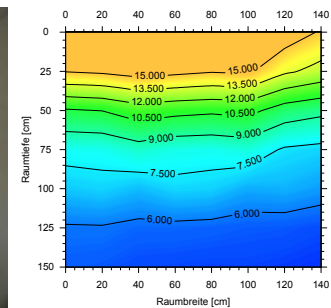
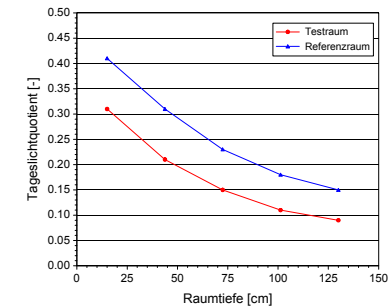
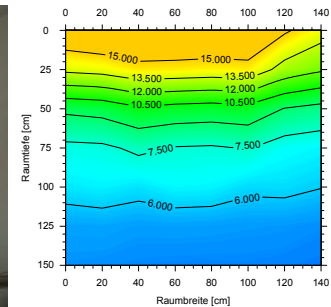
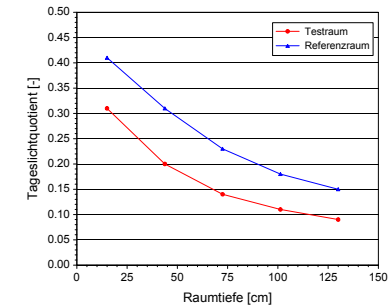
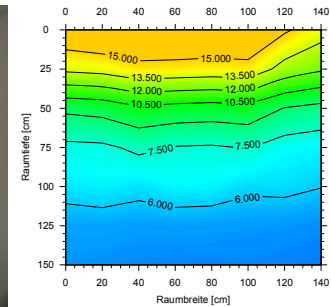
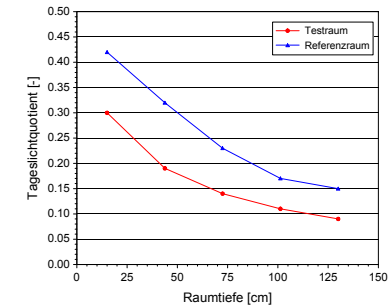
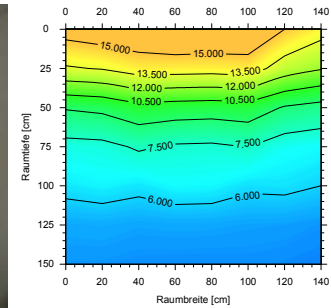


Abb. 5-9: TTV vollflächig im Fenster- und Überkopfbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (mitte) im Testraum sowie Tageslichtquotient in der mittleren Raumachse von Test- (rot) und Referenzraum (Klarglas, blau) im Vergleich (rechts) beim Aufklärungsvorgang vom 22.07.2000 um 17:35, 17:40, 17:45 und 17:50 (von oben nach unten, Situation 2). Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 56174, 55085, 53421 bzw. 53086 lx, Orientierung 10° SSO.

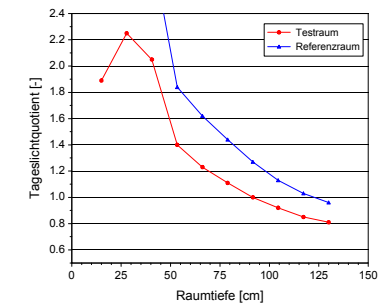
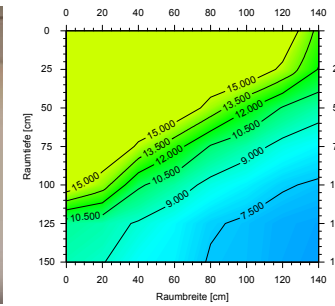
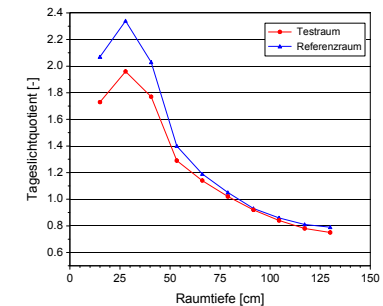
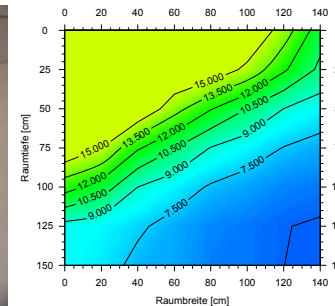
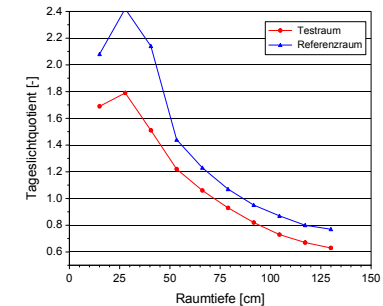
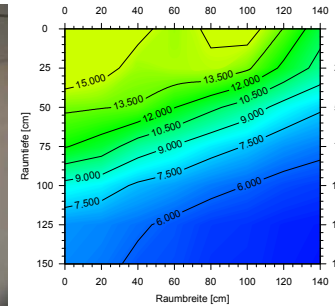
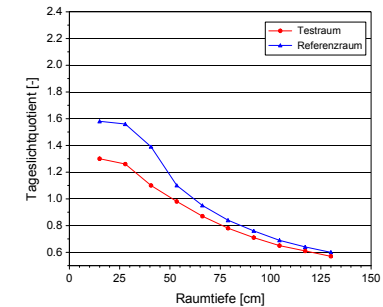
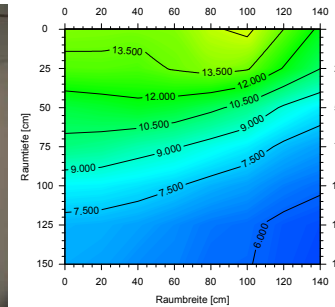
ten Wetterlagen über der horizontal gemessenen liegt (Abb. 5-10). Die Bildung des Tageslichtquotienten mit dem Bezug auf die horizontale Beleuchtungsstärke wird unsinnig. Diese Begründung wird auch durch den Verlauf der Tageslichtquotienten über der Raumtiefe gestützt: Im Falle von Situation 1 fällt der Tageslichtquotient ab einer bestimmten Raumtiefe steil ab (Schatten der Dachkante gegen Strahlung von oben), wohingegen die Messungen des TQ in Situation 2 gleichmäßiger verlaufen.

Darüber hinaus wird durch die unterschiedliche, vorgelagerte Dachschräge bei Test- und Referenzraum bei beiden, getesteten Orientierungen (SSO, SSW) eine nur bedingt vergleichbare Beleuchtungssituation für die beiden Versuchsräume geschaffen.

Aufklärung (Abb. 5-8 - Abb. 5-10)

Die Aufklärung vollzieht sich im allgemeinen beim Verschwinden der Sonne, also bei Abwesenheit von Direktstrahlung (untergehende Sonne, Gebäudeverschattung oder Auftreten von Bewölkung) proportional zum Verschwinden der Direktstrahlung. Die messtechnische Erfassung des Aufklärungsvorganges ist deswegen zur Bewertung der TTV als Blend- oder Sonnenschutzsystem weniger von Bedeutung. Der Einfluss der unterschiedlichen Raumsituation lässt sich aber

Abb. 5-10: TTV vollflächig im Fenster- und Überkopfbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (mitte) im Testraum sowie Tageslichtquotient in der mittleren Raumachse von Testraum (rot) und Referenzraum (blau) im Vergleich (rechts) beim Aufklärungsvorgang vom 26.09.2000 um 17:45, 17:48, 17:50 und 17:53 (von oben nach unten, Situation 2). Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 10794, 8464, 8747 und 9415 lx, Orientierung 24° SSW.



für die drei Beispiele wiederum ablesen. Während auf der Forschungsstation der beschattete Raum sich langsam dem unbeschatteten annähert, überdeckt das vorgelagerte Dach für die Versuchsräume diesen Effekt. Beim Versuch vom 26.09.2000 ist wegen der tiefstehenden Sonne und der Reflexionen auf dem Dach bereits bei Beginn der Aufklärung der horizontale Strahlungsanteil wesentlich höher als der vertikale. Dieser Zustand bleibt bis zur vollständigen Aufklärung erhalten.

5.2.4 Leuchtdichteverhältnisse

Die für die Blendwirkung entscheidende Leuchtdichte zeigt die Wirkung der TTV im Gegensatz zur Beleuchtungsstärke/TQ wesentlich deutlicher. Abb. 5-11 und Abb. 5-12 geben für die Versuche die gemessenen, mittleren Leuchtdichten der Aperturfläche und der seitlichen Begrenzungswände wieder. Während im Referenzraum die mittlere Leuchtdichte im Tagesverlauf in Abhängigkeit von der Einstrahlung der Sonne ansteigt (Abb. 5-14), wird sie beim Testraum mit TTV durch die Eintrübung deutlich reduziert. Die gemessene Leuchtdichte der TTV bewegt sich im Bereich von 5 kcd/m^2 , die der raumbegrenzenden Wand liegt unter 1 kcd/m^2 . Damit liegt die mittlere Leuchtdichte der Fassade gerade am Rande der z.B. in [VBG01] zugelassenen Leuchtdichte bei Anordnung eines Arbeitsplatzes. Die Leuchtdichte der Wand liegt nach dem Entwurf von ISO9241 mit hoch entspiegelten Bildschirmen im vertretbaren Bereich. Reflexblendung durch die Fenster sollte und muss durch die Anordnung der Bildschirme vermieden werden.

5.2.5 Temperaturen

Obwohl die Temperaturen nicht quantitativ interpretiert werden dürfen, soll hier an Hand der qualitativen Auswertung in Abb. 5-13 auf ein paar

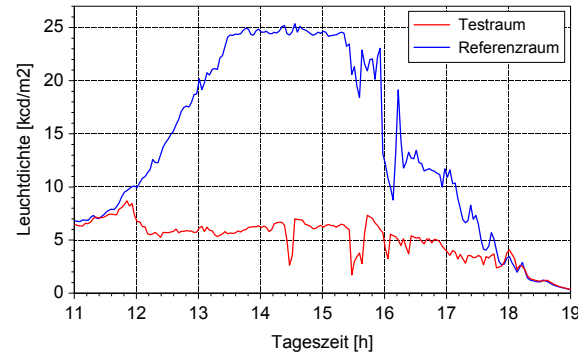


Abb. 5-11: Mittlere Leuchtdichte der Experimentierfassaden (Fenster) im Vergleich von Test- (TTV) und Referenzraum (Klarglas) am 26.09.2000

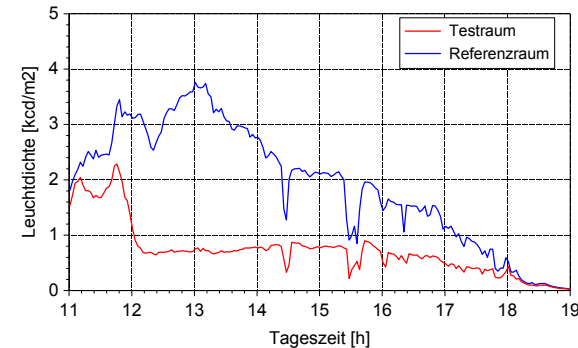


Abb. 5-12: Mittlere Leuchtdichte der besonnten Innenraumwand im Vergleich von Test- (TTV) und Referenzraum (Klarglas) am 26.09.2000

bezeichnende Phänomene hingewiesen werden.

- Die TTV trübt sich ein, obwohl die Außentemperaturen deutlich unter 25°C bleiben.
- Während sich der Referenzraum durch die Strahlung (Abb. 5-14) trotz der moderaten Außentemperaturen bis über 40°C erwärmt, wird der Testraum durch die Eintrübung beschattet und bleibt 10°C kühler. Normale Gebäudemassen, natürliche Luftwechsel und Ankoppelung an Räume in nördlichen

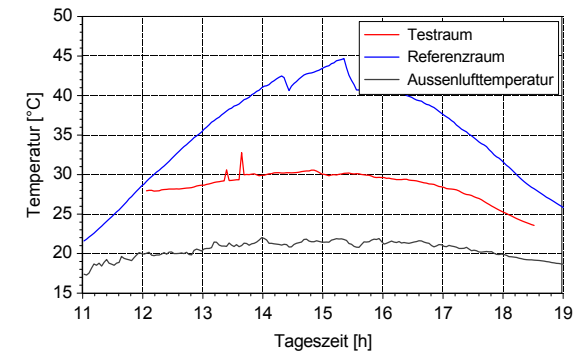


Abb. 5-13: Temperaturen von Testraum (TTV), Referenzraum (Klarglas) und Außenluft während des Versuches vom 26.09.2000

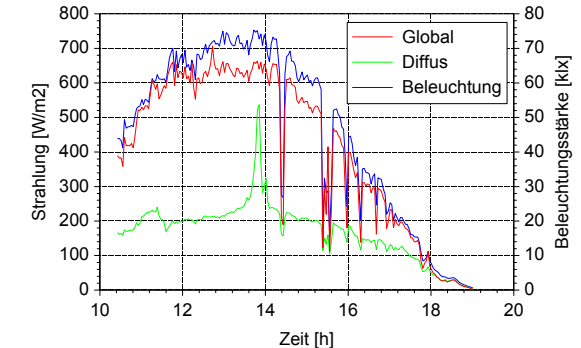


Abb. 5-14: Strahlung und Beleuchtungsstärke zur Messung vom 26.09.2000 mit vertikal vollflächiger TTV

Gebäudezonen würden die Temperaturen im Testraum noch weiter entschärfen.

5.2.6 Resultate und Konsequenzen für weitere Versuche

Vollflächige Anordnung der TTV

- Als Folge des Einsatzes der TTV als Beschattung ist keine Unterversorgung der Räume mit Tageslicht zu erwarten, sofern diese nicht schon ohne die Beschattung be-

steht: Ohne solare Einstrahlung bleibt die TTV transparent und schwächt die Tageslichtversorgung nur unwesentlich. Bei Bestrahlung sind die transmittierten Strahlungsmengen mit realistischen TTS ausreichend, um Räume mit Tageslicht zu versorgen. Die Lichtstreuung bewirkt eine gleichmäßige Beleuchtung ohne Schlagschatten.

- Der Verlust der Sichtbeziehung durch die vollflächige Belegung mit TTV ist u.a. aus Forderungen der Arbeitsstättenverordnung nicht tolerierbar. Verbesserte Varianten müssen diesen Aspekt als Schwerpunkt haben.
- Mit vollständig eingetrübter TTV, mit modernen Bildschirmen und einer flexiblen Anordnung können mit den getesteten TTS Blendwirkungen ausreichend vermieden werden.

Versuchsumgebung

- Beleuchtungsstärken und Tageslichtquotienten (relative Beleuchtungsstärken) liegen auf der Station für Solarforschung bei vorhandener Direktstrahlung wegen der baulichen Umgebung deutlich höher als bei der Hofsituation der ehemaligen Lehrstuhlräumlichkeiten. Die Schaltwirkung kann besser durch die Leuchtdichtemessungen beurteilt werden.
- Der Vergleich von Test- und Referenzraum ist wegen der unterschiedlichen Beleuchtungssituationen auf der Station für Solarforschung bedingt verlässlich.
- Durch die Messung mittels eines Raumscanners und die damit verbundene Zeitverschiebung (Gleichzeitigkeit bei detaillierten Messungen nur mit sehr hohem messtechnisch/finanziellem Aufwand realisierbar) können bei wechselhaftem Wetter und stark schwankender Außenbeleuchtungsstärke Inkonsistenzen auftreten.
- Die fotografische Aufzeichnung bildet wegen

der Wiedergabe eines allgemeinen Raumeindrucks einen Schwerpunkt der Untersuchungen.

Bedeutung der baulichen Situation

Die bauliche Situation (introvertierte Fassade - Hofsituation oder extrovertierte Fassade - freistehend) ist ein wichtiger Einflussfaktor für sinnvolle Anordnungen mit TTV in Bezug auf

- die Wirkung der transparenten und transluzenten Bereiche,
- im Innenraum auftretende Beleuchtungsstärken,
- die Leuchtdichte der streuenden TTV im Vergleich zu einem Klarglas und
- den für die internen Lasten maßgeblichen Strahlungseintrag

Die TTV wird bei einer Hofsituation im Gegensatz zu einer Anordnung mit freiem Horizont die Leuchtdichte der Fassade durch die Streuwirkung erhöhen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Anordnungen, die unter allen Bedingungen einen Sichtkontakt erhalten und dabei trotzdem eine möglichst hohe Beschattungswirkung erzielen.

5.3 Thermotrope Verglasung (TTV) vertikal teilflächig im Durchsicht- und Überkopfbereich

Die folgenden Untersuchungen wurden mit opaker Brüstung aber nur teilflächiger Belegung des Fenster- und Überkopfbereiches mit TTV durchgeführt: Das mittlere Fenster wurde mit normalem Klarglas ausgeführt.

5.3.1 Raumsituation

Die Bildsequenzen aus Abb. 5-15, Abb. 5-16 und Abb. 5-18 verdeutlichen den Qualitätsgewinn durch den Erhalt der Durchsicht. Durch die hohe Sonneneinstrahlung und die Notwendigkeit eines Sonnen- bzw. Blendschutzes wird die Beschränkung auf eines von 6 ansonsten transparenten Feldern nur eine vertretbare Einschränkung für die Nutzer darstellen. Die Eintrübung der 5 Felder führt zu einer stark ungleichmäßigen Beleuchtung mit einem wandernden Lichtkegel (Abb. 5-15, links). Der unbeschattete Bereich der Fensterfront und der Lichtfleck stellen potentielle direkt-indirekt Blendquellen dar. Durch die Position des Arbeitsplatzes im Raum und die Hauptblickrichtung kann indes eine Blendung grundsätzlich vermieden werden. Im gewählten Beispiel eines Einzelbüroarbeitsplatzes sind allerdings bei der Wahl eines relativ großen, unbeschatteten

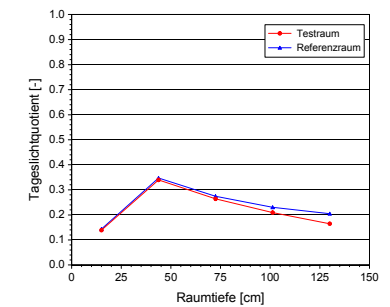
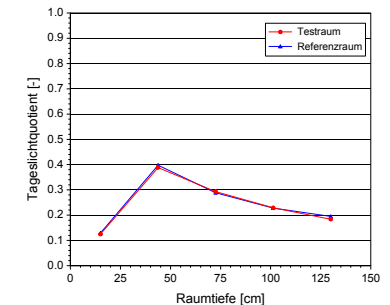
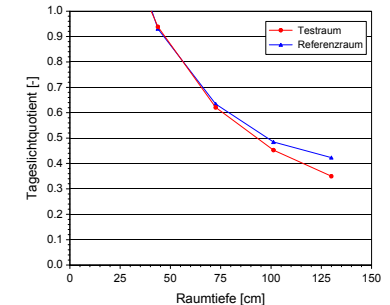
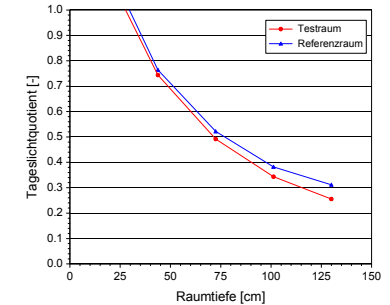
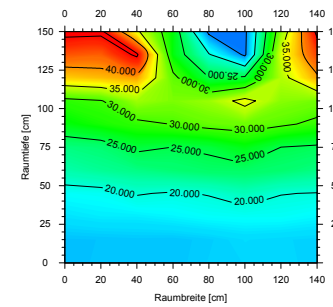
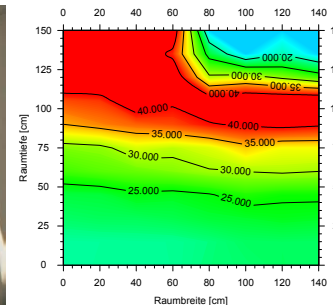
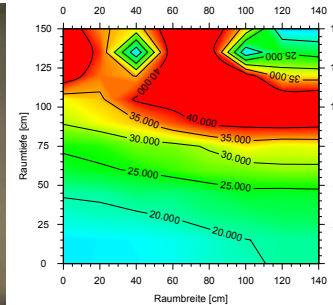
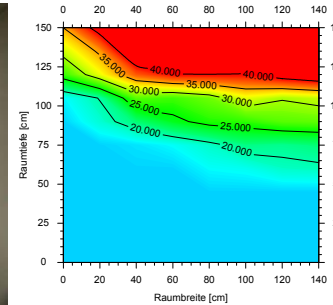


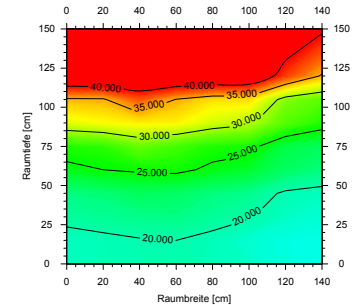
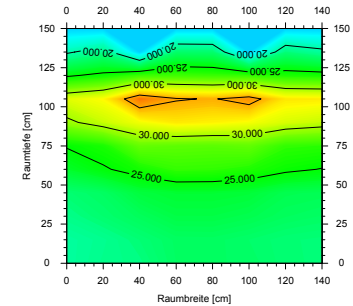
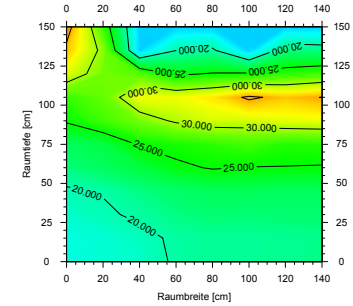
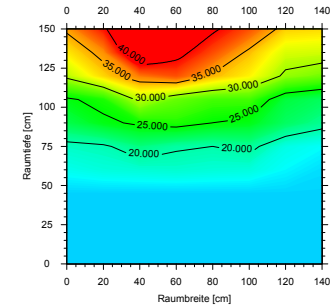
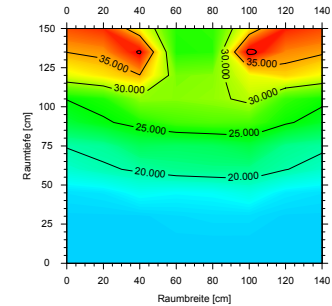
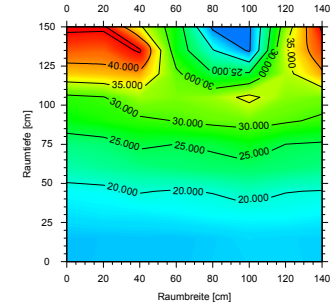
Abb. 5-15: TTV im Überkopf- und teilflächig im Fensterbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (mitte) im Testraum sowie Tageslichtquotient in der mittleren Raumachse von Test- (rot) und Referenzraum (Klarglas, blau) im Vergleich (rechts) beim Aufklärungsvorgang vom 25.07.2000 um 10:30, 10:45, 11:00 und 11:15 (von oben nach unten, Situation 2). Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 41358, 52015, 113112 bzw. 101494 lx, Orientierung: 10° SSO.

Abb. 5-16: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe von Testraum mit TTV (mitte) und Referenzraum mit Klarglas (rechts) beim Versuch vom 25.07.2000 um 11:15, 13:00 und 14:52 (von oben nach unten, Situation 2). Horizontalen Außenbeleuchtungsstärken: 101494, 107123 und 103662 lx, Orientierung 10° SSO.

Bereiches die Möglichkeiten eingeschränkt. Bei größeren Büroraumeinheiten für zwei oder mehr Arbeitsplätze ist aber durchaus denkbar, dass eine adäquate Anordnung von Normalglas und TTV für eine ausreichende Beschattung und Durchsicht gefunden werden kann. Ergänzend könnten z.B. auch im normal verglasten Bereich individuell regelbare Beschattungen oder Sonnenschutzglas zum Einsatz kommen.

5.3.2 Beleuchtungsstärken - Tageslichtquotient

Der Einfall der Direktstrahlung durch die Fensteröffnung erzeugt eine kontrastreiche Beleuchtung des Innenraumes (Abb. 5-15, mitte). Die Maximalwerte liegen – wie in Kapitel 5.2 - bei Beleuchtungsstärken über 40 klx im Fensterbereich. Bei der Eintrübung wird sowohl durch den Schattenwurf als auch durch die anfangs lokal noch stark vorwärts streuende TTV eine Verlagerung der Maxima bewirkt. Der starke Sprung des TQ von 10:45 auf 11:00 hängt einerseits mit der bereits fortgeschrittenen Eintrübung aber auch mit den stark schwankenden Außenbeleuchtungsstärken zusammen: Wie auch bei der Bildsequenz links ersichtlich, wird die Sonne um 10:45 durch leichte Wolkenfelder abgeschwächt ($\cong 200 \text{ W/m}^2$ und 50 klx) und kommt um 11:00 ungehindert zum Vorschein (Erhöhung von 200 auf 850 W/m^2 und 113 klx). Selbst bei vollständig eingetrübter TTV bleibt der kontrastreiche Bereich in Fensternähe (steiler Sonnenstand am 25. Juli) erhalten. Die tiefen Werte des TQ bei den beiden



unteren Grafen ergeben sich durch den Schattenwurf eines Rahmenprofils. Es ist plausibel, dass sich im Bereich der Normalverglasung bei der Räume die TQ's nur unwesentlich unterscheiden. Zu anderen Jahreszeiten kann der Lichtfleck auch wesentlich tiefer im Raum liegen und damit eine direkte oder indirekte Blendquelle sein.

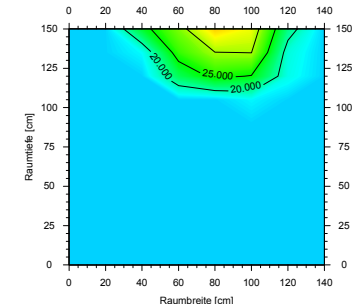
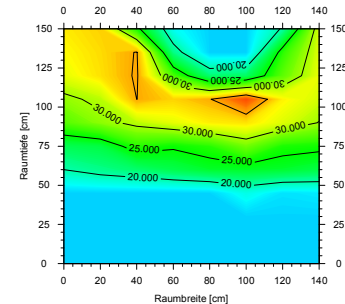
5.3.3 Referenz Normalglas und Streuglas

Abb. 5-16 zeigt die Beleuchtungsstärke zu verschiedenen Tageszeiten des Raumes mit TTV im Vergleich zu einem normal verglasten Raum. Im obersten Bild (11:15) sind beim TTV-Raum noch wegen der Vorwärtsstreuung und dem Lichtwurf der Sonne mehrere Maxima vorhanden. Bei

Abb. 5-17: Gesamtansicht der Solarstation mit den drei Versuchsräumen während der Referenzmessung mit Streuglas (links), sowie dem maßstäblichen Versuchraum mit transluzenter TTV teillächig im Fensterbereich (mitte) und analog eingebautem Streuglas (rechts).



Abb. 5-18: TTV im Überkopf- und teillächig im Fensterbereich mit opaker Brüstung: Raumsituation (links) und horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe von Testraum (mitte) und Referenzraum mit Streuglas (rechts) beim Versuch vom 31.07.2000 um 11:09, 12:48 und 15:07 (von oben nach unten). Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 30612, 119802 bzw. 100510 lx, Orientierung 10° SSO.



senkrechtem Einfall der Sonne (13:00, Sommerzeit) bestehen bei der TTV wegen der Vorwärtstreue (Streuung in Richtung der eintreffenden Strahlung) noch sehr hohe Beleuchtungsstärken in Fensternähe, die den direkten Sonneneinfall noch übertreffen. Das Beispiel um 14:52 zeigt, wie die Beleuchtungsstärken im Raum insgesamt reduziert und die Bereiche der maximalen Bestrahlung eingegrenzt werden.

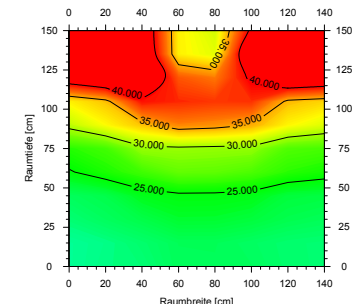
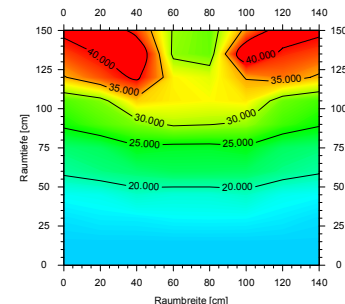
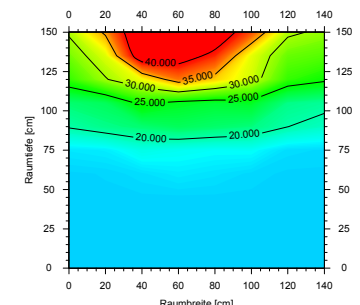
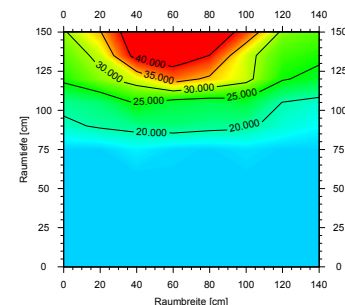


Abb. 5-17 zeigt eine Außenansicht von Test- und Referenzraum auf der Solarstation (links), sowie je eine Außenansicht der beiden Räume mit eingetrübter TTV (mitte) und lichtstreuender Verglasung (rechts). Die Räume sind praktisch nicht zu unterscheiden.



An der Messreihe vom 31.07.2000 wird die Ähnlichkeit der Lichtverhältnisse einer eingetrübten, teillächig vertikalen TTV mit einem analog angeordneten, lichtstreuenden Verglasung der Firma OKALUX [OKA02] deutlich (Abb. 5-18). Die Beleuchtungsstärkeverteilungen sind bei hinreichend eingetrübter TTV nahezu identisch.

5.3.4 Weitere Varianten der teilflächigen Anordnung

Die erläuterten Versuche lassen erkennen, dass weitere Anordnungen den Erhalt des Sichtkontaktes bei guter Beschattungswirkung zum Ziel haben müssen. In Abb. 5-19 wurden weitere Möglichkeiten, dieses Ziel mit einer teilflächig vertikal angeordneten TTV zu erreichen, visualisiert. Es wird deutlich, dass die Gefahr einer Blendwirkung mit abnehmender Normalglasfläche geringer wird. Zudem ist die Gefahr einer Überhitzung reduziert.

Im Fall eines unteren Fensterbandes (Abb. 5-19, links) kann zu bestimmten Tageszeiten sowohl Hintergrund- (vormittags) als auch Reflexblendung (nachmittags) auftreten. Diese Gefahr wird durch die weitere Einschränkung des transparenten Fensterbereiches vermindert. Der bei sonnigem Wetter wandernde Lichtkegel im Bereich des mittleren unteren Fensters ist während des größten Teils des Jahres und bei gewissen Abstand des Bildschirms zum Fenster tolerierbar. Lediglich bei sehr tiefen Sonnenständen wandert er mehr in die Mitte des Schreibtisches und kann dann störend wirken (Abb. 5-20). Wie auch schon bei der Variante mit vollflächiger TTV ist keine vollkommen beliebige Anordnung von Arbeitsplatz und Bildschirm möglich und muss die eingeschränkte Durchsicht in Kauf genommen werden. Unter Umständen sollte der transparente Glasbereich durch eine einfache manuelle Beschattung (z.B. Tischrollo) ergänzt werden.

Anordnungen, die TTV Fenster aber normale Überkopfverglasung vorsehen, reduzieren zwar bei Arbeitsplätzen im Fensterbereich Blenderscheinungen, können aber bei transluzenter TTV keinen Sichtkontakt gewährleisten.



Abb. 5-19: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation mit weiteren Möglichkeiten teilflächiger TTV-Belegung: TTV transparent (oben), 6 Felder mit transluzenter TTV (links) und 8 Felder TTV (rechts) bei unterschiedlichen Blickrichtungen (Fassade: mitte, Arbeitsplatz: unten), 21.09/10:00.



5.3.5 Resultate und Konsequenzen

- Durch ein normales Fenster in Verbindung mit der TTV in der vertikalen Fassade, kann ein verbleibender Sichtkontakt sichergestellt werden. Allerdings ist dieser bei Eintrübung der TTV auf einen Teilbereich beschränkt.
- Es entstehen zusätzliche Blendquellen durch Bereiche mit normalem Fenster.
- Die Beschattung des Raumes ist auch in thermischer Hinsicht reduziert.
- Die transparente Fläche darf aus diesen Gründen nicht zu groß und muss, um kritische Blendquellen im Raum zu reduzieren, im unteren Fensterbereich gewählt werden.
- Blend- und Überhitzungsgefahr könnten z.B. durch Verwendung eines Sonnenschutzglases im nicht thermotropen Fensterbereich - keine direkte Sicht der Sonne bei normaler Sitzhaltung – minimiert werden. Anstelle eines Sonnenschutzglases wäre auch ein einfaches, manuelles (Tisch-)Rollo zur Ergänzung denkbar.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden Anordnungen der TTV vor der vertikalen Verglasungsfläche untersucht, die einen in allen Situationen einen Sichtkontakt erhalten und dabei eine hohe Beschattungswirkung entfalten.



Abb. 5-20: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation bei transluzenter TTV mit einem transparentem Fenster am 21. Dezember 12:00 mittags: Eine Blendwirkung ist bei dieser Arbeitsplatzanordnung nicht jederzeit auszuschließen.

5.4 Thermotrope Verglasung (TTV) als Auskrragung

Eine vorgelagerte Auskrragung aus TTV bietet eine Restdurchsicht auch bei vollständiger Eintrübung. Die Auskrragung kann vertikal in unterschiedlichen Höhen mit unterschiedlichem Winkel zur vertikalen Fassade angeordnet werden (vgl. Abb. 4-1, 4a – 9a). Je höher die Position der Auskrragung desto größere Auskrragungslängen sind besonders für die Beschattung von Arbeitsplätzen in Fensternähe erforderlich. Die folgenden Anordnungen wurden im Experiment getestet:

- TTV im Oberlicht und in einer horizontalen Auskrragung (Abb.5-21)
- TTV im Oberlicht und in einer 30° geneigten Auskrragung (Abb. 5-22)

Da eine thermotrope Auskrragung bei bedecktem Himmel transparent bleibt und analog anderen Glaskonstruktionen mit feinen Tragsystemen (Punkthalterung, Abhängung mit Seilen, o.ä.) und schmalen Rahmenbreiten montierbar sind, beschränkt sie die Aussicht auch bei Anbringung zwischen Überkopf- und Fensterbereich nur unwesentlich. Im transluzenten Zustand wird hingegen die Beschattungswirkung in Kombination mit einem thermotropen Oberlicht maximiert, obwohl in wichtigen Bereichen der Sichtkontakt erhalten bleibt.

Im Gegensatz zur Anordnung der TTV in der Gebäudehülle ist die Auskrragung beidseitig in Kontakt mit Außenluft. Damit bestimmen Außenluft und Einstrahlung primär das Schaltverhalten der TTV. Eine Ankoppelung an die Raumluft besteht nicht. Dadurch eignet sich diese Anordnung tendenziell eher als Sonnenschutz (saisonal abhängig), und weniger als Blendschutz (saisonal unabhängig).

Da die Auskrragung den Räumen vorgelagert ist, kann eine Erwärmung durch die Bestrahlung und

damit die Eintrübung schon erfolgen, bevor die Sonne in den Raum dringt.

5.4.1 Auskrragung horizontal

Die Fotosequenz in Abb. 5-23 gibt wichtige Zustände während der Eintrübung wieder. Fototechnisch ist der gesamte Vorgang nur am Verschwinden der direkten Besonnung im Rauminneren bzw. dem äußeren Brüstungsbereich feststellbar. (Dieser Effekt ist allerdings teilweise auf die Belichtung der Fotos mit Gegenlicht zurückzuführen.) Wäre die Auskrragung als Band über z.B. gesamte Geschosse fortgeführt, dann wäre auch kein Lichtkegel am Boden durch die seitliche Bestrahlung unterhalb der Auskrragung vorhanden.

Wesentlich anders würde sich die Situation mit einer gegenüberliegenden Gebäudefassade darstellen (vgl. Kap. 5.2, Abb. 5-5): Für den Raumnutzer besteht ein Unterschied darin, ob die Sichtbeziehung zu gegenüberliegenden Fassaden- bzw. Gebäudeteilen oder zu einem Bereich des Himmels durch die Eintrübung verloren geht. Der unterbrochene Sichtbezug auf charakteristische Gebäudefassaden ist wesentlich markanter als der zu einem blauen Himmel mit unterschiedlichem Bedeckungsgrad (von tief blau über gleichmäßig weißer Schleier zu markanten Wolken am blauen Himmel).

Die horizontale Auskrragung tritt insgesamt – etwas abhängig von der genauen Raumposition des Betrachters – wenig in Erscheinung und wirkt da-



Abb.5-21: Außenansicht des maßstäblichen Testraumes bei den Versuchen mit Oberlicht und horizontaler Auskrragung aus TTV



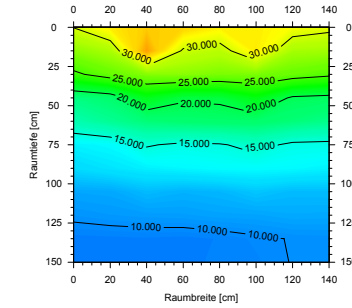
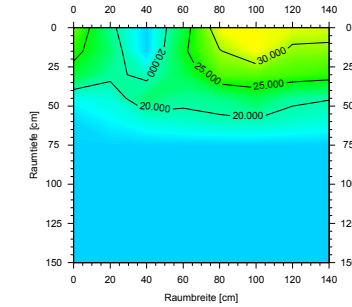
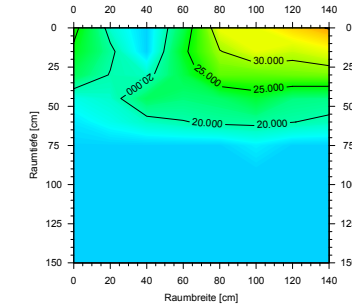
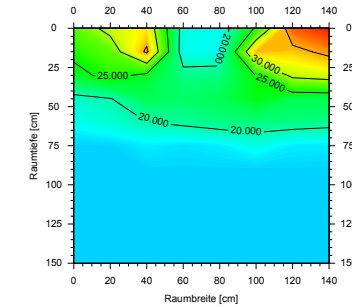
Abb. 5-22: Außenansicht des maßstäblichen Testraumes bei den Versuchen mit Oberlicht und 30° geneigter Auskrragung aus TTV

durch auch während Mischzuständen der TTV aus transparent und transluzent wirken zurückhaltender.

Darüber hinaus fällt die Reihenfolge bei der Eintrübung auf und wird auch bei der Bildfolge der Außenansicht deutlich: Zuerst beginnt sich das Oberlicht einzufärben, erst anschließend findet auch die vollständige Eintrübung der Auskrragung statt. Hierfür sind zwei Effekte maßgeblich: Erstens bewirkt die flache Einstrahlung der morgendlichen Sonne eine bevorzugte Erwärmung des vertikalen Oberlichtes und zweitens erfolgt durch die Reflexionen der flach auf der Auskrragung stehenden Sonne eine Konzentration auf das Oberlicht (vgl. Abb. 5-32). Die Ansicht von außen im vollständig trüben Zustand ist vergleichbar mit einer opak-weißen Oberfläche oder Streuglas und hat keine störenden Reflexe für den Außenbereich zur Folge.

Die zugeordneten, horizontalen Beleuchtungsstärken zeigen wiederum den Wandel von einer Beleuchtung, die sehr inhomogen und damit reich an potentiellen Blendquellen ist, zu einer wesentlich homogeneren Beleuchtungsstärkeverteilung. Diese herrscht nach Eintrüben des Oberlichtes in der Raumtiefe und erst anschließend auch über den größten Teil des Raumes. Lediglich in direkter Fensternähe

Abb. 5-23: Oberlicht und horizontale Auskrragung aus TTV: Außenansicht während der Eintrübung (links), Raumsituation (Mitte) und korrespondierende, horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe im Testraum (rechts) beim Eintrübungsvorgang vom 01.08.2000 um 09:45, 09:55, 10:05 und 10:15 (von oben nach unten, Situation 2). Außenbeleuchtungsstärken: 67447, 70353, 73266 bzw. 75262 lx, Orientierung 10° SSO.



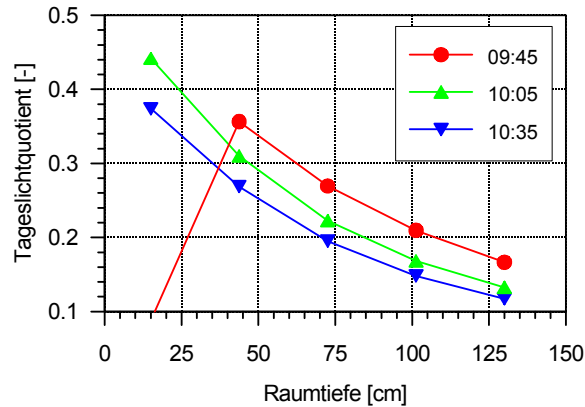


Abb. 5-24: Verlauf des Tageslichtquotienten in der mittleren Raumachse beim Eintrübungsvorgang vom 01.08.2000 mit Oberlicht und einer horizontalen Auskrugung aus TTV.

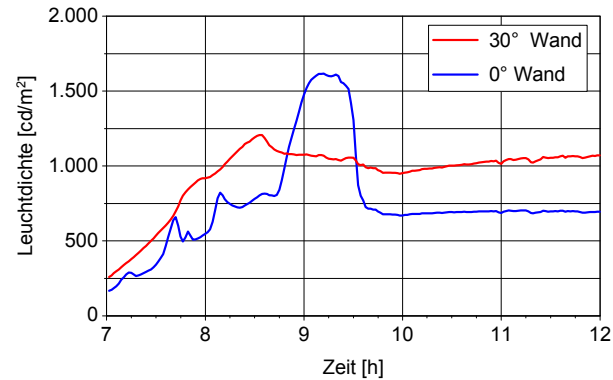


Abb. 5-25: Eintrübungsvorgang vom 15.08.2000 mit Oberlicht und einer horizontalen Auskrugung aus TTV: Verlauf der mittleren Leuchtdichte der besonnenen Wand des Testraumes bei unterschiedlichen Blickwinkeln.

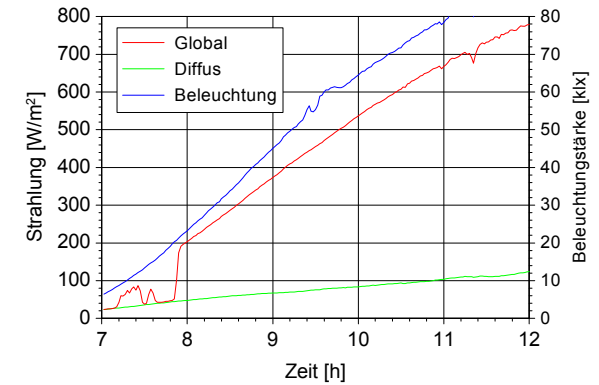


Abb. 5-26: Global- und Diffusstrahlung bzw. horizontale Außenbeleuchtungsstärke während des Eintrübungsvorganges vom 15.08.2000 mit Oberlicht und horizontaler Auskrugung aus TTV.

bleiben durch die transparenten Fenster und die hohe Strahlung der horizontnahen Bereiche des Himmels auf der Solarstation potentielle Blendquellen. Die Beleuchtungsstärken bewegen sich für den homogenisierten Bereich zwischen 10 und 25 klx.

Der im TQ in Fensternähe anfangs noch erkennbare Schlagschatten wird durch die einsetzende Streuwirkung ausgeglichen, der gesamte TQ sinkt während der Eintrübung (Abb. 5-24) und zunehmender Einstrahlung im Außenbereich (Abb. 5-26). Das relativ geringe Absinken ist wiederum mit der Richtungsabhängigkeit des TQ bei direkter Sonne und der speziellen Lichtsituation auf der Station für Solarforschung zu begründen. Die Beschattungswirkung der TTV auf den Versuchsraum wird am Verlauf der mittleren Leuchtdichte der Wand des Versuchsraumes deutlich (Abb. 5-25). Während anfangs die Leuchtdichte mit der zunehmend von vorne in den Raum treffenden Sonne ansteigt, bewirkt die Eintrübung zuerst im oberen Bereich der Wand (30° Ansicht)

und anschließend auch im unteren Bereich (0° Ansicht) eine Überhöhung der Leuchtdichte durch die anfänglich noch stark vorwärts streuende TTV im Oberlicht und der Auskrugung. Nach der vollständigen Einfärbung werden die mittleren Leuchtdichten der Wand trotz weiterhin ansteigender Einstrahlung (Abb. 5-26) auf 500 bis 1000 cd/m^2 begrenzt. Diese Werte würden bei modernen Bildschirmen mit sehr geringen Reflektivitäten ($< 5\%$) und hohen Leuchtdichten (200 cd/m^2) ausreichen, um eine Indirektblendung durch die bestrahlte Wand zu vermeiden.

5.4.2 Auskrugung 30° geneigt

Anstelle der horizontalen Auskrugung sind auch unterschiedliche Neigungswinkel denkbar, die hauptsächlich die Beschattungswirkung verändern und die Abhängigkeit von der Sonnenhöhe (Jahreszeit) reduzieren. Mit Erhöhung des Neigungswinkels zur Horizontalen tritt die Auskrugung und damit auch die spezifischen Effekte bei der Eintrübung wieder verstärkt in Erscheinung.

Die Mischzustände werden im Raum markanter wahrgenommen und größere Bereiche des Umfeldes bzw. Horizontes verschwinden bei Eintrübung. Die Auskrugung nähert sich zunehmend der Wirkung einer senkrecht in der Gebäudehülle eingebauten TTV an.

Experimentell wurde die Anordnung mit einer 30° geneigten TTV Auskrugung untersucht (Abb. 5-27). Selbst im transparenten Zustand wird die Auskrugung vom Raum wahrgenommen, obwohl sie den Sichtkontakt nicht beeinträchtigt. Durch die Eintrübung geht ein größerer Teil des Sichtkontaktes verloren (vgl. Abb. 5-32).

Da die Sonne bei mitteleuropäischen Sonnenständen im Gegensatz zur horizontalen Anordnung Oberlicht und Auskrugung in der Größenordnung gleichermaßen bestrahlt, trüben diese nicht wesentlich zeitversetzt und auch während tiefer Sonnenstände ein (vgl. Abb. 5-32). Die geneigte Auskrugung verursacht im klaren Zu-

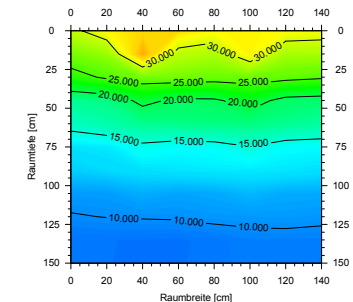
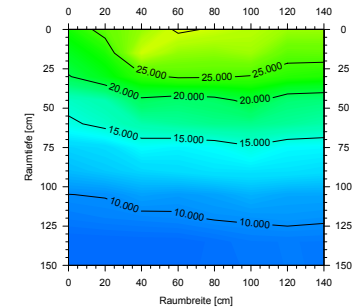
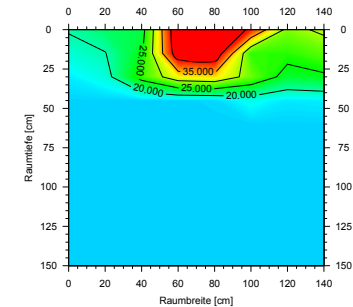
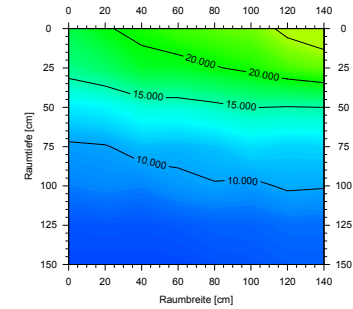
stand praktisch keine und im streuenden Zustand nur eine unwesentliche Konzentration auf das Oberlicht (vgl. Abb. 5-32). Es ist zu erwarten, dass die Anordnung insgesamt besser bei tieferen Sonnenständen z.B. im Winter als Beschattung geeignet ist, da der steilere Einfallswinkel auf die Verglasung besser für die Erwärmung sorgt.

Die den Raumfotos zugeordnete, horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung (Abb. 5-27) verdeutlicht wiederum, die Wirkung der Eintrübung. Der anfangs nur durch diffuses Himmelslicht erhellte Raum (oben) wird nach Einfall direkter Sonnenstrahlung durch die Eintrübung der TTV mit Ausnahme in Fensternähe wiederum diffus beleuchtet. Die inhomogene Beleuchtung in Fensternähe wird auch durch seitlich einfallendes Himmelslicht verursacht, die bei durchgehenden Bändern einer Auskrägung reduziert würden.

Die Eintrübung erfolgt über drei charakteristische Zustände (Abb. 5-28):

- Die Sonne beginnt von vorne den Raum direkt zu bestrahlen.
- Die Eintrübung der TTV bewirkt bei der anfänglich starken Vorwärtsstreuung eine Erhöhung des TQ.
- Die rückwärtsstreuende TTV senkt den TQ

Abb. 5-27: Oberlicht und 30° geneigte Auskrägung aus TTV: Außenansicht während der Eintrübung (links), Raumsituation (Mitte) und korrespondierende, horizontale Beleuchtungsstärkeverteilung in Arbeitshöhe (rechts) beim Eintrübungsvorgang vom 02.08.2000 um 08:45, 08:55, 09:05 und 09:15 (von oben nach unten) auf der Solarstation. Horizontale Außenbeleuchtungsstärken: 47273, 50941, 53972, 57207 und 103.662 lx, Orientierung 10° SSO.



Trotz hoher Strahlungswerte im Außenraum (Abb. 5-29) werden die mittleren Leuchtdichten von Fassadenapertur (Abb. 5-30) und Wand (Abb. 5-31) auch hier durch die eingetrübte TTV deutlich begrenzt. Die Fensteröffnung würde wiederum keine Anordnung eines Bildschirmarbeitsplatzes zulassen. Auf der Wand jedoch herrschen Werte, die mit modernen Computerbildschirmen akzeptabel sind.

5.4.3 Zusammenfassende Gegenüberstellung

Sichtkontakt (Abb. 5-32, oben)

Bei beiden Anordnungsmöglichkeiten ist der Sichtkontakt im klaren Zustand der TTV gut gewährleistet. Die schräge Auskrägung wird allerdings bei horizontaler Blickrichtung bereits sichtbar. Nach der Eintrübung ist der Ausblick mit der schrägen Auskrägung stärker eingeschränkt.

Strahlungsreflexion auf das Oberlicht

(Abb. 5-32, mitte)

Die horizontale Auskrägung und deren Eintrübungsdynamik ist stärker abhängig von der Sonnenhöhe und damit der Jahreszeit: Bei hohem Sonnenstand erfolgt die Eintrübung durch die Erwärmung der auskrägenden TTV sowie des Oberlichtes. Bei flacheren Sonnenständen wird die Erwärmung der Auskrägung verzögert (flacher Einstrahlungswinkel), gleichzeitig aber die des Oberlichtes durch Reflexionen beschleunigt. Bei flachen Sonnenständen und kühler Außenluft wird die horizontale Auskrägung klar bleiben (abhängig von der Eintrübungstemperatur).

Bei der geneigten Auskrägung erfolgen keine Reflexionen auf das Oberlicht, was unter vergleichbaren Verhältnissen zu einer gleichmäßigeren Eintrübung beider Bereiche führt. Außerdem trifft die Strahlung steiler auf die Auskrägung. Dadurch erwärmt sie sich stärker und zeitgleich mit dem Oberlicht. Dadurch ist auch die Abhän-

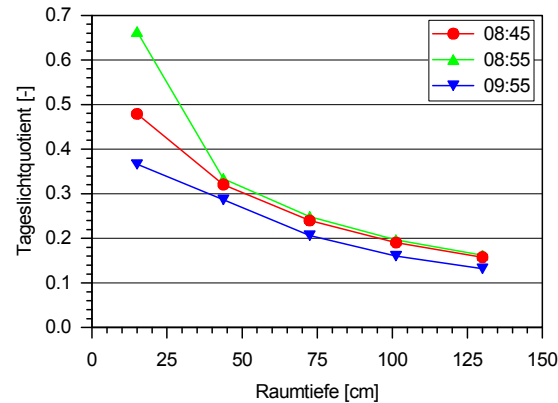


Abb. 5-28: Verlauf des Tageslichtquotienten in der mittleren Raumachse beim Eintrübungsvorgang vom 02.08.2000 mit Oberlicht und einer 30° geneigten Auskrägung aus TTV.

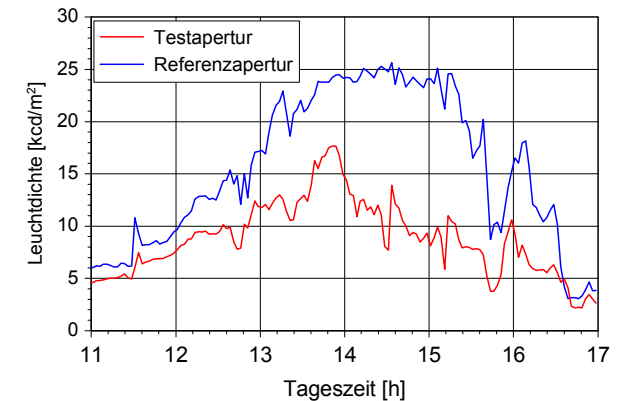


Abb. 5-30: Leuchtdichten der Aperturen von Test- (Oberlicht und 30°geneigte Auskrägung mit TTV) und Referenzraum (Klarglas) am 25.09.2000.

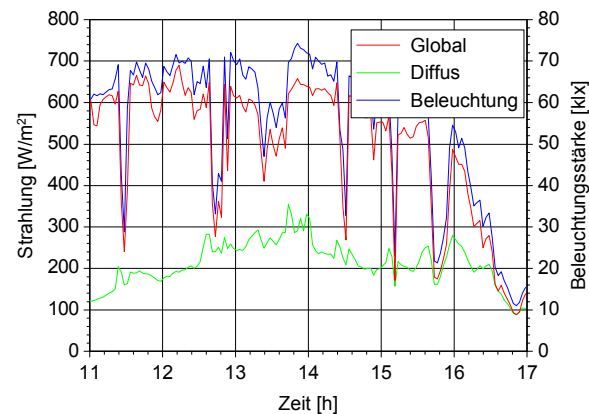


Abb. 5-29: Global-, Diffusstrahlung und äußere, horizontale Beleuchtungsstärke am 25.09.2000.

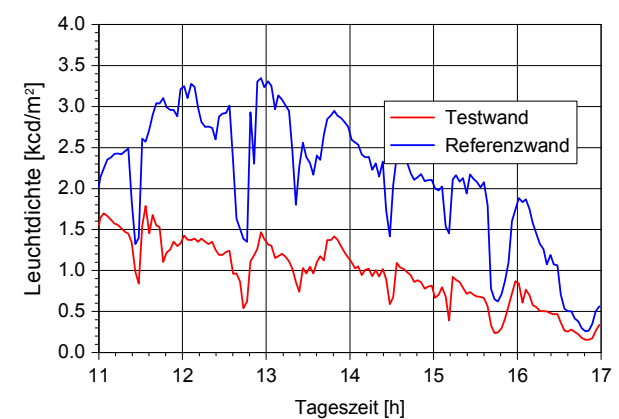


Abb. 5-31: Leuchtdichten der Wände bei horizontaler Blickrichtung und Arbeitsposition von Test- (Oberlicht und 30°geneigte Auskrägung mit TTV) und Referenzraum (Klarglas) am 25.09.2000.

gigkeit von der Außenlufttemperatur geringer.

Streuwirkung ins Rauminnere

(Abb. 5-32, unten)

Sowohl die vorübergehend einsetzende Vorwärtsstreuung bei Beginn der Eintrübung, als auch die Reststreuung im eingetrübten Zustand bewirken höhere Beleuchtungsniveaus bei der geneigten Auskragung. Die vorwärtsgestreute Strahlung erreicht bei der geneigten im Gegensatz zur horizontalen Auskragung das Rauminnere. Dieser Effekt ist bei den Messungen in der Situation 2 teilweise durch die hohen Leuchtdichten des Horizonts ohne Schwächung durch die horizontale Auskragung überdeckt.

Leuchtdichten – Beleuchtungsstärken

In beiden Fällen werden bei den durchgeführten Versuchen die Leuchtdichten der bestrahlten Wand auf Werte zwischen 500 und 1000 cd/m² reduziert. Die Beleuchtungsstärken werden durch die Streuwirkung im Raum ausgeglichen und hängen praktisch nur noch vom Abstand zur Apertur, nicht aber vom Sonnenstand ab. Selbst die auf der Solarstation hohen gemessenen Werte müssen wegen der gleichmäßigen Beleuchtung und der Adaption des Auges nicht unbedingt zu Blendung führen. Allerdings gilt im Prinzip für beide, dass in Fensternähe insbesondere bei tiefen Sonnenständen kein ausreichender Blendschutz möglich ist (vgl. Abb. 5-33 und Abb. 5-34). Beide Anordnungen haben aber den Vorteil gegenüber einer vertikalen TTV in der Gebäudehülle, dass die Eintrübung prinzipiell auch schon bei seitlicher Sonneneinstrahlung, die nicht direkt in den Raum dringt, beginnen kann. Dadurch sind auch vorübergehende Blendeffekte unter der Voraussetzung einer ausreichend hohen Außenlufttemperatur unwahrscheinlicher.

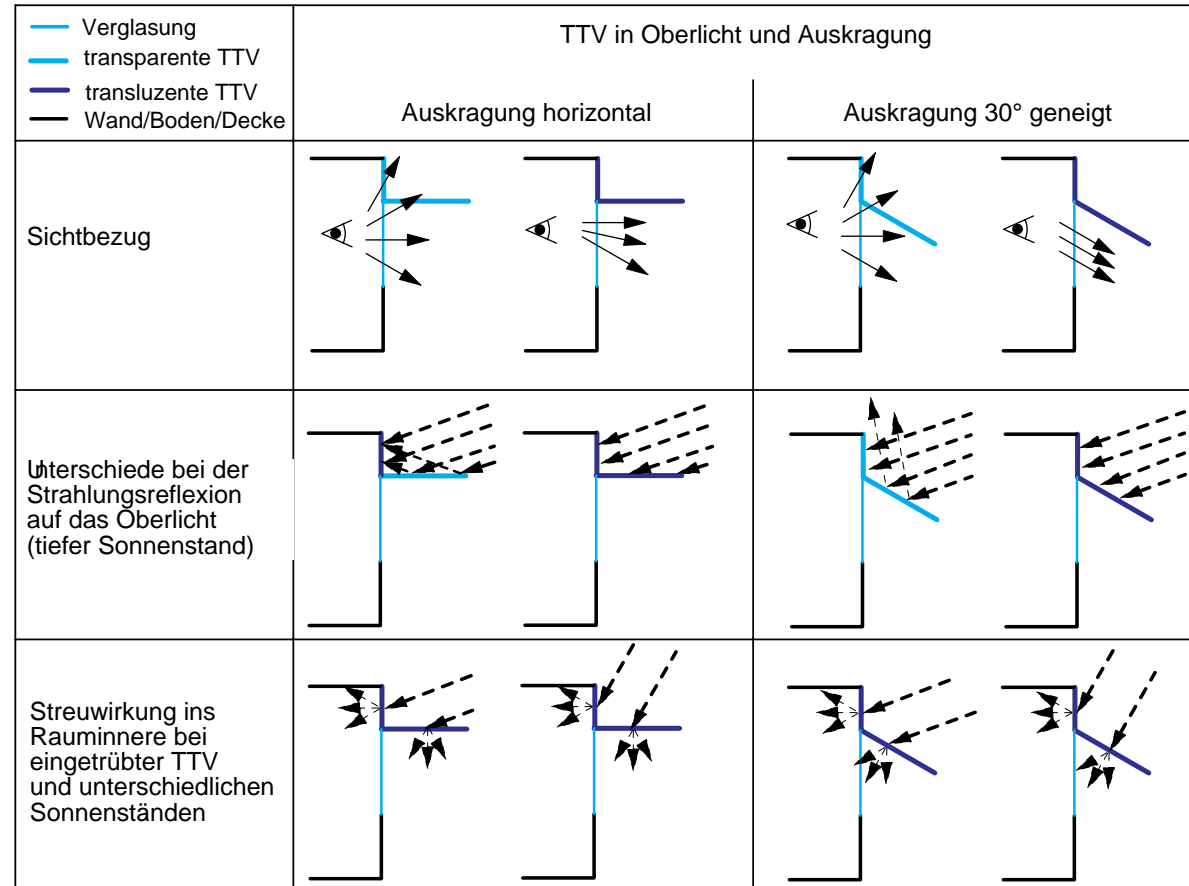


Abb. 5-32: Gegenüberstellung wichtiger Eigenschaften bei Anordnung der TTV im Oberlicht und einer horizontalen bzw. einer geneigten Auskragung. Unterschiede beim Sichtbezug, dem Eintrübungs- und Streuverhalten bei unterschiedlichen Sonnenständen.

Im Gegensatz zur vertikalen Anordnung in der Gebäudehülle sind die Anordnungen mit Auskragung stärker von der Außenlufttemperatur abhängig: Bei tiefen Außenlufttemperaturen ist eine hohe Strahlungsleistung erforderlich, um die Eintrübung zu bewirken. Es besteht auch nicht die Möglichkeit wie bei der Anordnung in einer TTV

eine Ankoppelung an Innenraumlufte zu erreichen. Dadurch eignet sich die Auskragung trotz der Vorteile bei hohen Außentemperaturen nicht als ganzjähriger Blendschutz.

Gemäß Abb. 4-1, 4a – 9a, sind über die getesteten Varianten hinaus zahlreiche weitere Möglich-

keiten denkbar: Höhe der Anordnung (z.B. in Höhe der Dachkante) und Anstellwinkel sind je nach Prioritäten bei der Gebäudenutzung unterschiedlich wählbar. Eine Erweiterung wäre die Möglichkeit einer im Winkel verstellbaren Auskragung im weitesten Sinne ähnlich einer Markise. Obwohl dies allerdings der ursprünglich angestrebten Einfachheit widersprechen und sich nicht zur Beschattung von begehbaren, vorgelagerten Gebäudebereichen (Terrassen) eignen würde, könnte dies eine funktionale Erweiterung der TTV und eine interessante Variante insbesondere zur Verbesserung einer Tageslichtnutzung sein.



Abb. 5-33: TTV Oberlicht und horizontale Auskragung: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation am 21.12. um 9:00 mit transluzenter TTV, Südorientierung und Blickrichtung nach außen (oben) bzw. Blickrichtung auf den Bildschirmarbeitsplatz (unten).

Abb. 5-34: TTV Oberlicht und 30° geneigte Auskragung: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation am 21.12. um 9:00 mit transluzenter TTV, Südorientierung und Blickrichtung nach außen (oben) bzw. Blickrichtung auf den Bildschirmarbeitsplatz (unten).

5.5 Weitere Möglichkeiten mit thermotropen Beschattungen

Im folgenden sollen weitere Möglichkeiten die Stärken einer TTV als Sonnen- und evtl. Blendschutz zu nutzen vorgestellt, visualisiert und bewertet werden. Als Kernaspekt hat sich in den vorangegangenen Untersuchungen der Erhalt des Sichtkontaktes bei transluzenter TTV und maximaler Beschattungswirkung erwiesen. Dies soll nun verstärkt berücksichtigt werden. Daraus sollen weiter Möglichkeiten für die TTV als Bauteil abgeleitet werden. Ausgewählte Beispiele von Einbaumöglichkeiten an Hand von realen Gebäuden sind in Kapitel 7 zusammengestellt.

5.5.1 Horizontale thermotrope Glaslamellen

Lamellenstoren werden sehr häufig als individuell regelbare Beschattung eingesetzt. Oberflächenbeschichtungen sind vielseitig und können von einer farblichen Gestaltung bis hin zu Lichtlenkeigenschaften viele Zwecke erfüllen. Bei aufwendigeren Systemen besteht die Möglichkeit, bestimmte Bereiche unabhängig voneinander einzustellen, sodass Bereiche als Sonnen- und Blendschutz geschlossen und andere Bereiche (z.B. Oberlicht) zur Lichtlenkung in die Raumtiefe verwendet werden. Alle diese Systeme arbeiten mit Hand- oder elektrischem Antrieb und können wahlweise automatisiert und/oder bei individuellem Bedarf aktiviert werden. Sie sind aber aufwendig in Bezug auf Konstruktion, Wartung und Betrieb.

Vorteile

Die Verwendung thermotroper, fixer und horizontal angeordneter Glaslamellen (Abb. 5-35) hätte besondere Vorteile über die Anwendung einer TTV hinaus:

- schmale Ansichtsbreiten - sofern die notwen-

21.9., 10:00, transparent



21.09., 10:00, transluzent



Abb. 5-35: Horizontale TTV Lamellen als externer Überhitzungs- und Blendschutz auf einer südorientierten Bürofassade: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation am 21.9. um 10:00 mit transparenter TTV (oben), und transluzenter TTV (unten). Verhältnis von Lamellenbreite zu -abstand 2:1.

- digen Tragkonstruktionen bei entsprechenden Spannweiten diesem Anspruch auch entsprechen
- sehr gute Durchsicht in allen Richtungen bei kühlem Wetter oder bedecktem Himmel und transparenter TTV

21.12., 09:00, transluzent



21.12.10:00, transluzent



Abb. 5-36: Horizontale, drehbare TTV Lamellen als externer Überhitzungs- und Blendschutz auf einer südorientierten Bürofassade: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation mit transluzenter TTV am 21.12. um 9:00 (oben) und 10:00 (unten). Verhältnis von Lamellenbreite zu -abstand 1:1, Lamellenwinkel -20° .

- gute Durchsicht bei sonnigem Wetter und transluzenter TTV
- Durch die gegenseitige Verschattung der Lamellen wird im Idealfall jeweils nur die direkt bestrahlte (Rest-)Fläche aktiviert. Dadurch wird der Sichtbezug immer nur soweit

als nötig eingeschränkt und die Verschattung der Diffusstrahlung auf ein Minimum reduziert. Dies gilt allerdings nur unter idealen Bedingungen, unter denen sich die Eintrübung nicht über den bestrahlten Bereich hinaus ausdehnt. Bei außen liegenden Lamellen im Kontakt mit Außenluft (Wärmeübergang) und $TLA < TS$ wäre dies erfüllt.

- Die transluzenten TTV Lamellen mit hoher Leuchtdichte befinden sich größtenteils nicht mehr im direkten Blickfeld.
- Die Restbeleuchtung bei transluzenter TTV reicht im Normalfall zur Tageslichtbeleuchtung ohne Kunstlicht aus.

Nachteile

Ein Problem bei der horizontalen Anordnung ist die notwendige Stabilität der Glaslamellen. Ohne die notwendigen Stabilisierungen oder Halterungen würden sie durchhängen. Dadurch wird der ideale Sichtbezug etwas eingeschränkt die Konstruktion aufwendiger.

Weiterhin ist durch die diffuse Streuung zwischen Ober- und Unterseite von je zwei benachbarten Lamellen eine erhöhte Transmission durch die Beschattung insgesamt zu erwarten. Dieser Effekt hängt vom Abstand und Breite der Lamellen ab: Je mehr Reflexionen notwendig sind, um die Strahlung ins Rauminnere zu leiten, umso geringer fällt er wegen der Streueigenschaften (Kap. 3.3.6, Volumenstreuung) aus.

Selbst das in der Visualisierung angenommene Verhältnis von Lamellenbreite zu –abstand von 2:1 würde an Tagen mit tief stehender Sonne keine vollständige Beschattung gegen Direktstrahlung zulassen.

Um zu jeder Jahreszeit eine maximale Beschattung zu erhalten, müsste die Lamellenkonstruktion um die Möglichkeit einer Drehung um die hori-



Abb. 5-37: Vertikale, drehbare TTV Lamellen als externer Überhitzungs- und Blendschutz auf einer südorientierten Bürofassade: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation mit transluzenter TTV am 21.9. um 9:00 (oben), und 15:00 (unten). Verhältnis von Lamellenbreite zu –abstand 1:1, Lamellendrehung 30°.



Abb. 5-38: Vertikale, drehbare TTV Lamellen als externer Überhitzungs- und Blendschutz auf einer südorientierten Bürofassade: Visualisierung (RADIANCE) der Raumsituation mit transluzenter TTV am 21.9. um 13:00 (oben), und 12:00 (unten). Verhältnis von Lamellenbreite zu –abstand 1.3:1, Lamellenwinkel 30° (oben) und 45°(unten).

zontale Achse erweitert werden. Dann könnte das Verhältnis von Lamellenbreite zu –abstand 1:1 ausreichen. (Abb. 5-36) Außerdem könnte die Drehbewegung dazu benutzt werden, um die Erwärmung durch direkte Sonne zu beeinflussen

und dadurch eine individuelle Einflussnahme auf die selbstregelnde Beschattung zu ermöglichen (Beschleunigung oder Hemmung der Eintrübung).

5.5.2 Vertikale thermotrope Glaslamellen

Vertikale Lamellen sind was die Halterungskonstruktion betrifft einfacher und somit konstruktiv weniger aufwendig. Sie können an der Oberseite aufgehängt und müssen lediglich unten geführt werden. Ein Durchhängen durch das Eigengewicht wie im horizontalen Fall möglich wird vermieden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Gewebelamellen sind innen- und außen liegende TTV Lamellen denkbar. Diese würden sich für jede beliebige Orientierung eignen, müssten aber in jedem Fall mit einem Drehmechanismus ausgestattet sein. Abb. 5-37 und Abb. 5-38 zeigen die Stellung der vertikalen TTV Lamellen zu je zwei verschiedenen Tageszeiten. Der Sichtkontakt wird eingeschränkt aber ist in vielen Richtungen möglich. Lediglich bei azimuthal senkrecht einfallender Sonne müssten die Lamellen komplett geschlossen werden und würden damit ebenso den Sichtkontakt unterbinden, wie eine vollflächig angeordnete, vertikale TTV. Umgangen werden könnte dies mit Lamellen, die breiter sind als ihr Abstand untereinander. Durch die Möglichkeit der Überlappung in leicht geöffneter Stellung kann Direktstrahlung abgehalten werden, ohne den Sichtkontakt vollständig zu unterbinden. Auch hier könnte die Drehbewegung zur indirekten Einflussnahme auf den Zustand der TTV genutzt werden.

5.5.3 Thermotrope Verglasungen (TTV) in Fenstern unterschiedlicher Orientierung

Die Verwendung von TTV in vertikalen Fenstern unterschiedlicher Orientierung eines Raumes kann dazu benutzt werden, um einen Sichtkontakt sicher zu stellen. Dazu kommen Fenster gegenüberliegender Orientierung (Ost-West-Fenster) oder angrenzende Fenster mit z.B. Südost-Südwest-Orientierung in Frage (Abb. 5-39 und Abb. 5-40 mit unterschiedlicher Anordnung

von Arbeitsplätzen). Durch die zeitlich versetzte Bestrahlung trüben die Fenster zu unterschiedlichen Zeiten ein. Damit besteht immer mindestens über ein Fenster ein Sichtkontakt nach außen. In der Visualisierung wurden unterschiedliche Varianten der Arbeitsplatz Position wiedergegeben: Wie in Kapiteln 5.2 und 5.3 dargestellt. Bei dem hohen Verglasungsflächenanteil und die damit verbundenen Leuchtdichten, als auch die Vielzahl möglicher Zustände der TTV sind zahlreiche Blendeffekte durch Mehrfach-Spiegelungen möglich.

Die Annahme der zeitversetzten Bestrahlung gilt bei angrenzenden Fensterorientierungen nur bedingt, da bei bestimmten Winkelbereichen beide Fenster gleichzeitig – wenn auch im allgemeinen mit unterschiedlicher Intensität durch den relativen Bestrahlungswinkel – sonnenbeschienen sind (Abb. 5-42). In den Winkelbereichen 1 und 3 für einen Raum oder einen Glaserker wird jeweils nur eines der beiden TTV bestrahlt, im Winkelbereich 2 hingegen beide. Wie aus der Abbildung deutlich wird, nimmt der Winkelbereich 2 mit zunehmend spitzen Anordnungen der Fenster ab. Solche Innenraumgeometrien sind Spezialfälle, für Nischen im Sinne von Glaserkern, Wintergärten oder Atrien ist dies denkbar. Mit thermotropen Verglasungen funktioniert eine solche Anordnung unabhängig von der Orientierung, lediglich mit der Einschränkung der jahreszeitlichen Unterschiede für die auftretenden, azimuthalen Winkel der Sonnenbahnen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass durch die Einstrahlung der Sonne durch den Raum das jeweils gegenüberliegende Fenster auch eintrübt. Sobald das direkt exponierte Fenster vollständig streuend ist, wird bei entsprechender Raum- oder Außentemperatur eine Rückschaltung erfolgen. Die gleichzeitige Eintrübung könnte durch eine erhöhte Eintrübungstemperatur vermieden wer-

den: Bei sehr flachem Auftreffen direkter Sonne klaren TTV-Fenster wieder auf. Soll die Situation einer vollständigen Sichtunterbrechung aber darüber hinaus unter allen Umständen vermieden werden, muss wiederum mit normal verglasten Teilflächen gearbeitet werden, die bei beliebigen Bestrahlungsverhältnissen eine – wenn auch minimale – Restdurchsicht erhalten. (Abb. 5-41) Die Eintrübung einer kompletten Fassadenfläche und der damit verbundene Verlust des Sichtkontaktes zu einer gewohnten Außenumgebung stellt eine markante Einschränkung dar, obwohl diese in der Realität mit anderen Beschattungssystemen auch in Kauf genommen wird, wenn ein Sonnen- bzw. Blendschutz erforderlich ist.

Der Nutzung thermotroper Verglasungen bei unterschiedlichen Orientierungen im Dachbereich soll hier nicht weiter nachgegangen werden: Der Sichtkontakt zum Himmel ist wegen der Einschätzung von Wetterverhältnissen und Tageszeiten zwar von Vorteil, hat aber nicht die gleiche Bedeutung wie bei vertikalen Fenstern.

5.5.4 Kombination von thermotropen Verglasungen (TTV) unterschiedlicher Eintrübungstemperaturen

Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von TTV mit unterschiedlichen Eintrübungstemperaturen. Es sind zahlreiche Varianten denkbar, die folgende Ziele haben:

- Bereiche, die selbst bei direkter Besonnung keine direkten oder indirekten Blendquellen verursachen, werden für einen Sichtkontakt mit normaler Verglasung ausgeführt.
- Im Bereich direkter Arbeitsplätze wird eine TTV mit tieferer Eintrübungstemperatur gewählt, die auch während kalter Tage als Blendschutz aktiviert wird.
- Bereiche, die selbst bei direkter Bestrahlung



Abb. 5-39: TTV in der vertikaler Verglasung mit SO und SW Orientierung: Visualisierung (RADIANCE) des Effektes bei zeitlich versetzter Erwärmung am 21.9. um 10:00 (oben) und 21.9. 14:00 (unten).

keine Überhitzung zur Folge haben, im Winter zur Beheizung beitragen, keine Blendquellen verursachen und für die Beleuchtung in der Raumtiefe nützlich sind, werden mit einer bei höherer Temperatur schaltenden TTV ausgestattet, die im Winter nicht eintrübt.



Abb. 5-40: TTV in der vertikalen Verglasung mit SO und SW Orientierung: Visualisierung (RADIANCE) des Effektes bei zeitlich versetzter Erwärmung am 21.9. um 10:00 (oben) und 21.9. 14:00 (unten) bei alternativer Arbeitsplatzanordnung.

Dazu könnte z.B. bei einer Teilung analog Abb. 5-19 in einem vertikalen unteren Fensterbereich ein einzelnes Normalglas belassen werden. Die verbleibenden fünf Elemente des unteren und mittleren Fensterbereiches würden mit einer TTIV ausgestattet, wobei die z.B. bei 25°C schaltende TTS sich im inneren Glas befinden würde. Durch den

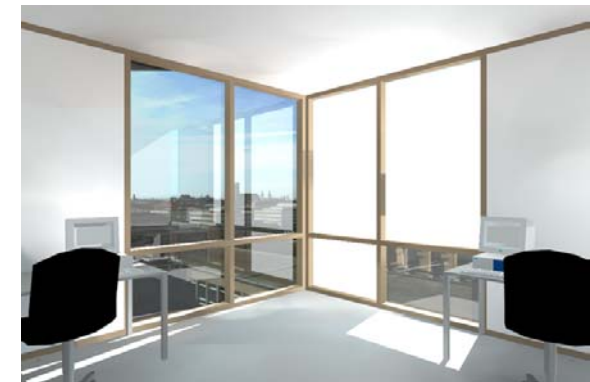


Abb. 5-41: TTV in der vertikaler Verglasung mit SO und SW Orientierung, sowie transparentem Fensterbereich: Visualisierung (RADIANCE) des Effektes bei zeitlich versetzter Erwärmung am 21.9. um 12:00 (oben) und 21.9. 14:00 (unten).

den Kontakt mit Raumtemperatur würde sie auch bei Bestrahlung während kalter Tage aktiviert (Blend- und Sonnenschutz). Der Überkopfbereich könnte mit einer bei 30 – 35°C schaltenden TTS in der äußeren Scheibe der TTIV ausgeführt werden. Durch die Ankoppelung an die Außenluft würde diese an kalten Tagen nicht aktiviert (zu-

sätzlicher Überhitzungsschutz).

Diese Nutzung ist insbesondere bei hohen Räumen mit großem Verglasungsanteil, wie Atrien, Wintergärten, mehrgeschossigen Eingangsbereichen u.ä. denkbar.

Unterschiedliche Eintrübungstemperaturen könnten aber auch aus rein gestalterischen Gründen verwendet werden: Z.B. könnten große Verglasungsflächen mit kleinteiliger Gliederung bei Sonnenbestrahlung ein lebhaftes, sich ständig änderndes Erscheinungsbild der Fassade bewirken.

5.5.5 Wendbare thermotrope Fenster

Durch wendbare TTV Fenster (vgl. Abb. 4-2) könnte die Abhängigkeit der Eintrübung und der Schattenwurf bzw. Sichtkontakt beeinflusst werden. Das Wenden könnte saisonal durch Herausnehmen und umgekehrten Einbau oder entlang einer vertikalen bzw. horizontalen Drehachse erfolgen.

- Ein geschlossenes Fenster mit der TTV auf der Außenseite wirkt als Sonnenschutz. Es trübt in Abhängigkeit von der Außenluft ein und wird während der kalten Jahreszeit nur selten aktiviert.
- Ein geschlossenes Fenster mit raumseitigen TTV wirkt als Blendschutz. Da die Raumtemperatur im Großen und Ganzen unabhängig von der Jahreszeit in einem Bereich von 15-20°C liegt, erfolgt die Eintrübung bei Erwärmung durch Direktstrahlung jahreszeitunabhängig.
- Bei einem ganz oder teilweise geöffneten TTV-Fenster könnten durch die Stellung Bereiche für Schattenwurf und Sichtkontakt variiert werden.

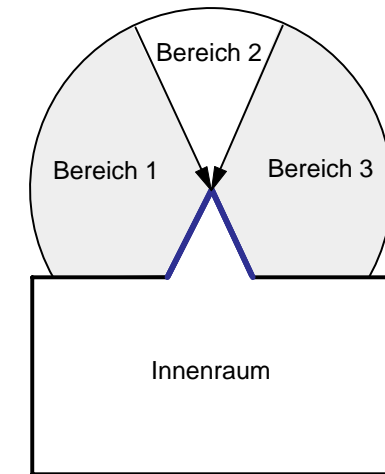
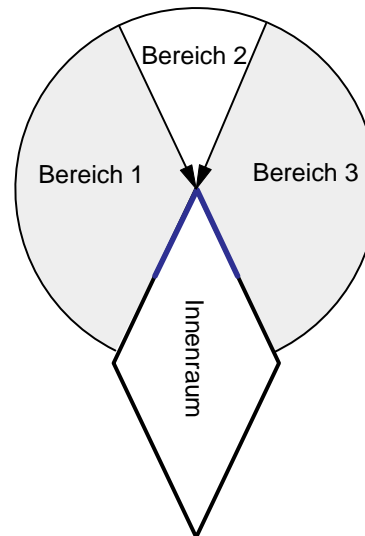
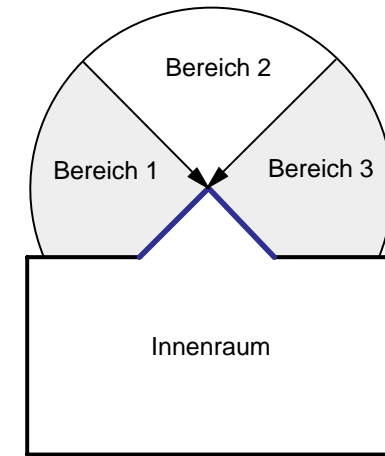
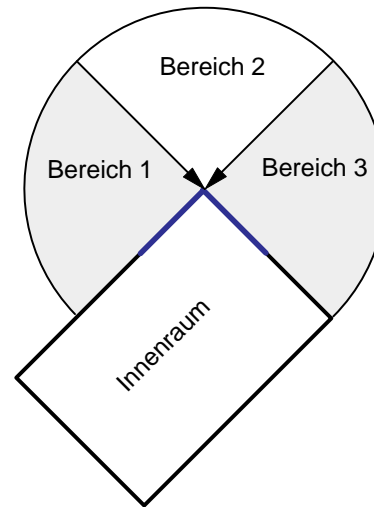


Abb. 5-42: Darstellung des Einflusses der direkten Sonnenbestrahlung aus unterschiedlichen Winkelbereichen für Räume oder Glaserker mit angrenzender TTV auf die Eintrübung: In den Winkelbereichen 1 und 3 wird jeweils nur eine TTV bestrahlt und trübt dadurch ein, wohingegen im Winkelbereich 2 in Abhängigkeit der Wetterlage mit der Eintrübung von beiden TTV gleichzeitig gerechnet werden muss.

5.6 Zusammenfassung

5.6.1 Wirkung einer thermotropen Verglasung (TTV)

- Die Nutzung von TTV stellt in vielen Gebäudebereichen (Aufenthaltsbereiche ohne dauerhafte Belegung, Durchgangsbereich, Pufferbereiche) eine gute Alternative zu gängigen manuellen oder automatisierten Beschattungen dar.
- Gerade auch bei hohen Gebäuden (Windkräfte) bietet die einfache Integration in ein normales Isolierglas ohne jegliche Mechanik wichtige Vorteile.
- Die Schwierigkeit, eine genaue Vorhersage über das Schaltverhalten in verschiedensten Einbausituationen (Klimabedingungen, Gebäudekontext, Bauelement, Bauteil) zu treffen, stellt eine Einschränkung für das einfache System einer thermotropen Beschattung dar.
- Die Wirkung der Eintrübungs- und Aufklärungsvorgänge hängt entscheidend von der Raumsituation der Fassade ab:
 - In einer Hofsituation wirkt sich ein temporär unterbrochener Sichtbezug markanter aus, als bei einem freien Ausblick auf Bereiche des Himmels.
 - Die transluzente TTV erhöht die Leuchtdichte der Fassade bei einem dunklen Hintergrund und verringert sie bei freiem Horizont (Himmel).
- Mit den spezifischen Eigenschaften der verwendeten TTV kann ein guter Sonnenschutz erreicht werden. Durch das Fehlen der Beeinflussbarkeit und die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Muster ist ein ausreichender Blendschutz nur bedingt gegeben.
- Auftretende Zeitverzögerungen durch die

notwendige Zeit zum Erwärmen bzw. Abkühlen der TTV sind bei der Aufklärung weniger störend als bei der Eintrübung (Blendschutz).

- Bei direkter Beschattung eines individuellen Arbeitsplatzes wird im allgemeinen eine manuelle Eingriffsmöglichkeit gewünscht. Diese können die TTV nicht bieten. Es kann aber z.B. eine Kombination mit regelbaren Beschattungseinrichtungen für das direkte Umfeld des Arbeitsplatzes vorgesehen werden.
- Die beim Übergang transparent/transluzent auftretenden Formen erinnern an natürlich auftretende Phänomene die auch negative Assoziationen wecken (z.B. Kondensat oder Eisblumen an Fenstern).

5.6.2 Besondere Situationen

Ähnlichkeiten mit Nebel

Aufklärende TTV ähnelt sich lichtendem Nebel. Mit Gebäuden in der näheren Umgebung ist dieses Phänomen ungewöhnlicher (Abb. 5-44) als bei größerer Entfernung zum baulichen Umfeld und freiem Horizont (Abb. 5-45).

Regen

Plötzlich einsetzender Regen ist ein Beispiel für einen starken Wetterumschwung. Die TTV klart besonders bei direkter Bewitterung schlagartig innerhalb weniger Minuten auf, d.h. sie reagiert ohne die Notwendigkeit einer Steuerung innerhalb kürzester Zeit. Alle anderen Beschattungen erfordern die Reaktion eines Individuums oder einer automatischen Steuerung. Erfahrungsgemäß erfolgt die Reaktion eines (arbeitenden) Individuums Zeit verzögert, da die Aufmerksamkeit anderweitig in Anspruch genommen und höchstens durch die plötzliche Verdunkelung auf die Notwendigkeit eine Beschattung zu öffnen gelenkt wird. In jedem Fall ist eine bewusste Wahrnehmung und eine Reaktion erforderlich.

Temporäre Blendung

Die Eintrübung erfolgt zeitlich verzögert auf die Erwärmung durch direkte Sonnenstrahlung. Extreme Situationen können entstehen, wenn wie im Beispiel (Abb. 5-47) während kalter Außenverhältnisse eine Aufklärung durch eine geometrische Beschattung (Gebäudeteil) erfolgt. Der Schatten wandert und die Sonnenstrahlen treffen anschließend wieder schlagartig frontal auf die Fassade auf. Eine extreme Blendung kann die Folge sein. Es besteht keine Möglichkeit zu reagieren. Im allgemeinen sind diese Erscheinungen zeitlich sehr begrenzt und bei normalen Bebauungen eher selten.

5.6.3 Nutzung als Tageslichtsystem

An Hand der in VDI 6011 [VDI01] genannten Kriterien für Tageslichtsysteme sollen die Stärken und Schwächen der TTV als Tageslichtsystem nochmals im Überblick deutlich gemacht werden:

- *Ausleuchtung der Raumtiefe:* Im transparenten Zustand wird analog einem Fenster, im transluzenten durch die Streuwirkung eine verbesserte Ausleuchtung ohne Schlagschatten erzielt.
- *Begrenzung der Leuchtdichte des Fensters:* Die Leuchtdichte liegt mit den verwendeten Mustern noch im Grenzbereich der durch aktuelle Richtlinien tolerierten Leuchtdichte. In Verbindung mit bestimmten Gläsern (z.B. Wärmeschutzverglasung) kann die Wirkung auch heutzutage schon ausreichen.
- *Sichtverbindung nach außen und Sonnenschutzfunktion bei direkter Sonneneinstrahlung:* Durch die Eintrübung kann ohne ergänzende Bauteile nicht beides gleichzeitig erfüllt werden.
- *Individuelle Bedienung:* Eine individuelle Bedienung ist nicht möglich und kann nur indi-

rekt durch eine Erweiterung des Bauteils möglich werden.

- **Wartungsaufwand:** Es besteht kein Wartungsaufwand über die Reinigung von Verglasungsflächen hinaus.
- **Blendschutz:** Die Nutzung als Blendschutz kann nur mit Einschränkungen erfolgen.
- **Hohe Wärmegewinne im Winter:** Die zahlreiche Anordnungsmöglichkeiten lassen hohe bis ausreichende Wärmegewinne zu.
- **Geringe Kühllasten im Sommer:** Die Kühllasten werden gerade bei hohen Verglasungsflächenanteilen deutlich vermindert. Eine quantitative Aussage auch im Vergleich zu anderen Systemen ist hier nicht möglich.
- **Farbneutral in Bezug auf Tageslicht:** Der Farbwiedergabeindex ist mit 98 sehr hoch. Damit besteht eine ausgezeichnete Farbneutralität in Bezug auf Tageslicht.
- **Behagliche Dynamik des Tageslichtes:** Die Dynamik des Tageslichtes wirkt sich im transparenten Zustand uneingeschränkt, im transluzenten Zustand abgeschwächt auf den Innenraum aus.

5.6.4 Resumé

Thermotrope Gläser können in zahlreichen Einbausituationen als Sonnenschutz aber nur bedingt als Blendschutz verwendet werden.

Die Anwendung als Blendschutz erfordert einerseits eine Ankoppelung der TTV an eine im Jahresverlauf gleichmäßigere Temperatur (z.B. Raumluft), andererseits kann schon die Phase der Eintrübung störend sein. Hier ist die Toleranz für eventuell herrschende Übergangssituationen sehr individuell und abhängig vom Bauherrn/Nutzer. Da Systeme, die eine individuelle Eingriffsmöglichkeit vorhalten, nicht nur regelungstechnisch sondern auch psychologisch Vor-



Abb. 5-44: Aufklarende TTV in der vertikalen Verglasung weist Ähnlichkeiten mit sich lichtendem Nebel auf und ist ungewöhnlich bei nahe liegenden Gebäuden, 02.11.99 um 13:12, Situation 1.



Abb. 5-45: Aufklarende TTV in der vertikalen Verglasung weist Ähnlichkeiten mit sich lichtendem Nebel auf und ist weniger ungewöhnlich bei freiem Horizont und entfernt liegenden Gebäuden, 21.07.00 um 15:55, Situation 2.



Abb. 5-46: Schlagartiges Aufklaren der vertikalen TTV durch plötzlich einsetzenden Regen, 23.07.00 um 15:01, Situation 2.



Abb. 5-47: Blendeffekt durch die tiefstehende Wintersonne nach der Aufklärung der vertikalen TTV durch einen vorübergehenden Schattenwurf, 05.12.00, 15:25, Situation 2.

teile haben, ist der Einsatz in Kombination mit (einfachen) direkt beeinflussbaren Beschattungen empfehlenswert. Durch die hohe Streuwirkung der TTV im eingetrübten Zustand kann eine Blendung gerade im Gegensatz zu transparen-

tem Blendschutz effizient verhindert werden. Allerdings müssen Bereiche für einen Sichtkontakt vorgehalten werden. Die Versorgung mit Tageslicht ist gewährleistet und wird durch den Einsatz einer TTV im Vergleich zu einem Fenster mit den

meisten Beschattungen verbessert.

Weil der Sonnenschutz zur Verhinderung von Überhitzung nicht instantan erfolgen muss, sondern eine gewisse Reaktionszeit zulässt, sind solche Anwendungen mit TTV unkritischer, weit- aus zahlreichere Anordnungsmöglichkeiten denkbar. Eine Teilflächenbelegung, die aus Gründen des Sichtkontaktes erforderlich ist, kann die selbstregelnde Entschärfung der Überhitzungsproblematik bewirken, muss aber durch einen individuell steuerbaren Blendschutz in den verbleibenden Bereichen, insbesondere bei Bildschirmarbeitsplätzen, ergänzt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich bei modernen Gebäuden generell die Frage, wo und in welchem Maße der Nutzer Einfluss haben soll bzw. muss. Zur Senkung von Energiebedarf muss der Nutzereinfluss reduziert, zur individuellen Behaglichkeit in Teilbereichen sicherlich gewährleistet sein.

TTV eignen sich insbesondere bei Sanierungen, weil Verglasungen mit gängigen Dicken hergestellt und in vorhandene Konstruktionen eingebaut werden können. Der Sonnenschutz ist dann integriert und muss nicht additiv ergänzt werden.

Diese Vorteile und die Vorteile beim Gebrauch (keine Regelung, Wartung) machen TTV attraktiv. Allerdings ist das Erscheinungsbild während des Überganges in den streuenden Zustand nicht zuletzt wegen häufig negativer Assoziationen (Tauwasser, Eisblumen, Nebel, Wolken) gewöhnungsbedürftig, kann aber als umweltgesteuertes, selbstadaptives System auch gerade dadurch einen Reiz entfalten.

Besonders in Klimaregionen mit häufig bedecktem Himmel oder nur temporär auftretender Überhitzungsgefahr – in Mitteleuropa herrscht z.B.

während 45% der Bürozeit kein direktes Sonnenlicht, in 63% der Bürozeiten liegt die Beleuchtungsstärke unter 100 W/m^2 (S. 180, [WIEN01]) – können TTV sehr attraktiv sein, weil sie dann nicht in Erscheinung treten und keine Störung des Fassadenbildes verursachen.

6 Studien zu einem gezielten Schattenwurf auf eine thermotrope Verglasung (TTV)

6.1 Vorstudien

6.1.1 Grundlegender Ansatz

Überlegungen zur Erweiterung der gestalterischen Möglichkeiten unter Verwendung einer TTV als Sonnen- und Blendschutz bei Erhalt eines Sichtkontaktes führten zu einem neuen Ansatz [HAR01].

Die grundlegende Idee ist die gezielte Nutzung eines Schattenwurfes auf eine TTV: Bei geeigneten Eigenschaften der TTV und entsprechenden Klimabedingungen verbleiben beschattete Bereiche unterhalb der Eintrübungstemperatur und damit transparent, wohingegen sich bestrahlte Bereiche erwärmen und transluzent werden. Dieser Schattenwurf kann im Prinzip durch beliebige Bauelemente erreicht werden. Die besonderen Vorteile einer solchen Anordnung sind:

- Fast vollständige Beschattung gegen Direktstrahlung: Direktstrahlung wird größtenteils an der Beschattung oder an der TTV reflektiert bzw. absorbiert (nur teilweise transmittiert)
- Erhalt von Durchsichtsbereichen: Da der Einstrahlungswinkel der Sonne ein anderer ist, als der Blickwinkel der Nutzer, decken sich die Bereiche des Bauelementes (Beschattung) und des Schattenwurfes nicht. Dadurch bleibt eine Resttransparenz erhalten (vgl. auch Abb. 6-6).
- Funktion ohne bewegliche Teile und Regelung/Steuerung, 'natürliche' Steuerung

6.1.2 Visualisierung in RADIANCE

Mit dem Programm RADIANCE kann der Effekt

mit Einschränkungen visualisiert werden. Da keine von der lokalen Temperatur abhängigen Parameter für ein und dasselbe Material gewählt werden können, lassen sich die RADIANCE spezifischen Materialeinstellungen nur so wählen, dass entweder der Schattenwurf (kein Schlag Schatten durch die hohe Streuwirkung der TTV) oder der Ausblick (klare Umrisse in Bereichen transparenter TTV, da keine Streuwirkung) korrekt simuliert werden. Alle Visualisierungen für unterschiedliche Beschattungen wurden deswegen durch die Bildmontage je einer Simulation zum Schattenwurf (Innenraum) und der Durchsicht der Fassade (Ausblick) wiedergegeben.

6.1.3 Kombination mit fixen, opaken Lamellen

In Abb. 6-2 und Abb. 6-3 wurde die Möglichkeit, opaker vor der TTV liegender Lamellenbeschattungen visualisiert. Die Lamellen können in einem Doppelfassadenzwischenraum liegen oder aber auch der Gebäudehülle vorgelagert sein. Diese Anordnung hat zwei wichtige Vorteile gegenüber einer einfachen opaken oder thermotropen Lamellenbeschattung:

- Der Abstand zwischen den Lamellen kann vergrößert werden. Im Allgemeinen werden bei konventionellen Lamellenbeschattungen Abstände so gewählt, dass eine möglichst hohe Beschattungswirkung bei beliebigen Sonnenständen erreicht wird. Daraus resultiert das häufig verwendete Verhältnis von Lamellenbreite zu -abstand von 1:1 (Abb. 6-2) bis zu 2:1 (eng liegend). Damit ist aber nicht zu jedem Zeitpunkt eine komplette Beschattung gegen Direktstrahlung gewährleistet.
- Eine Drehbewegung zur vollständigen Beschattung ist nicht erforderlich. Nur mit einer Drehbewegung kann mit Lamellen bei niedrigen Sonnenständen eine vollständige Be-



Abb. 6-1: Effekt des Schattenwurfes eines 30 mm Rundstabes auf eine freistehende TTV bei ca. 22°C Aussenlufttemperatur und sonnigem Wetter.

schattung gegen Direktstrahlung erreicht werden und Sonnenstreifen (vgl. Abb. 5-36) vermieden werden. Bei einem Verhältnis von 1:1 kann dann durch eine Drehbewegung die Fassade komplett geschlossen werden.

Bei der Kombination fixer, opaker Lamellen mit einer TTV kann der Abstand vergrößert werden und auch ohne Drehbewegung Direktstrahlung abgehalten werden. Eine Einschränkung besteht nur temporär für den Zeitraum bis zur Eintrübung. Gerade in Regionen mit häufig bedecktem Himmel wird durch den größeren Abstand und die seltener eingetrübte TTV ein guter Sichtkontakt ermöglicht, der nur durch vertikal verfahrbare Beschattungen übertroffen wird. Selbst im eingetrübten Zustand verbleiben in Abhängigkeit von Lamellengröße und Sonnenstand transparente Bereiche.

Lamellengröße und -abstand können bei dieser Kombination so gewählt werden, dass

- der hauptsächliche Beschattungseffekt durch die Lamellen erreicht wird ($1:1 < x < 1:2$, Abb. 6-2, Abb. 6-3)
- der hauptsächliche Beschattungseffekt durch die TTV erreicht wird ($x \geq 1:2$)
- die Beschattung nur benutzt wird um einen Restbereich transparent zu erhalten. ($x \gg 1:2$)

Welche Anordnung sinnvoll ist, kann von unterschiedlichen Faktoren abhängen. Beweggründe können z.B. das vorherrschende Klima, Gestaltungswünsche (Erscheinungsbild, Aussicht, Beleuchtungssituation) und die Funktionalität in Abhängigkeit der Eigenschaften der verwendeten TTS sein.

Während die Indirektblendung durch die hohe Streuwirkung prinzipiell unkritisch ist, könnte die Direktblendung problematisch sein: Bereiche transluzenter TTV mit hohen Leuchtdichten wechseln sich mit Bereichen niedriger Leuchtdichten (horizontnaher Himmel, sichtbare Bebauung) ab.

6.1.4 Kombination mit Auskragungen

Auskragungen wie Balkone, Vorsprünge oder



Abb. 6-2: Visualisierung (RADIANCE) des Effektes bei Beschattung der inneren thermotropen Verglasung durch opake, horizontale Lamellen mit einem Verhältnis Lamellenbreite zu -abstand von 1:1 (30 cm/ 30 cm).



Abb. 6-4: Visualisierung (RADIANCE) des Effektes bei Beschattung der inneren thermotropen Verglasung durch eine Auskragung.



Abb. 6-3: Visualisierung (RADIANCE) des Effektes bei Beschattung der inneren thermotropen Verglasung durch opake, horizontale Lamellen mit einem Verhältnis Lamellenbreite zu -abstand von 1:2 (30 cm/ 60 cm).



Abb. 6-5: Visualisierung (RADIANCE) des Effektes mit einer Kombination aus bedruckter und thermotroper Verglasung mit einer groben punktförmigen Bedruckung (\varnothing 20 cm, Abstand 10cm, Bedruckungsgrad ca. 38 %).

Servicegänge können auch als Bauteile geeignet sein, um einen größeren zusammenhängenden Bereich der TTV so zu beschatten, dass bei vollständiger Beschattung gegen Direktstrahlung

eine Durchsicht zu allen Zeiten möglich bleibt (Abb. 6-4). Weil die TTV dann weniger in transparente und transluzente Bereiche gegliedert ist, sind die Übergänge und deren gegenseitige Be-

einflussung (z.B. Eintrübung beschatteter Bereiche) weniger kritisch. Die Durchsicht besteht allerdings nicht über die gesamte Fassadenfläche, sondern nur in genau lokalisierten Bereichen, die mit der Sonne wandern. Der Blick wird nicht durch einen häufigen Wechsel transparent/translucent beeinträchtigt.

6.1.5 Funktionale Einschränkungen

'Ideale' TTV

Eine für diese Anwendung ideale TTV hätte eine sehr geringe Querwärmeleitfähigkeit. Dadurch würden sich bestrahlte und nicht bestrahlte Bereiche weniger beeinflussen. Dies ist schon wegen des Einbaus zwischen zwei Gläsern nur bedingt möglich. Sie besitzt eine scharfe Eintrübungstemperatur, die im Sommer ohne Besonnung nicht oder nur selten und im Winter mit Besonnung noch erreicht wird. Sie besitzt eine geringe Wärmekapazität, so dass sie schlagartig transluzent oder transparent wird (Stufenfunktion). Dadurch werden Bereiche mit nicht vollständig transparenten oder transluzenten Zwischenzuständen, sowie fließende Übergänge ausgeschlossen.

Vollständige Eintrübung

Durch die Bestrahlung mit direkter Sonne wird die TTV erwärmt. Je nach herrschenden Temperaturverhältnissen breitet sich diese Erwärmung über die TTV aus. Dadurch besteht die Gefahr einer vollständigen Eintrübung, welche den gewünschten Sichtkontakt unterbindet.

Sommer – Winter

TTV, deren Eintrübungstemperatur und Anordnung so gewählt sind, dass sie auch im Winter aktiviert werden (Blendschutz), bergen immer die Gefahr sich im Sommer vollständig einzutrüben und damit den Sichtkontakt zu blockieren. Diese

Gefahr kann im Prinzip bei entsprechender Wahl nie vollständig ausgeschlossen werden.

Rückschaltung der TTV

Die vollständige Beschattung gegen Direktstrahlung und die Forderung nach einem dauerhaften Sichtkontakt machen es erforderlich, dass bestrahlte Bereiche mit erhöhter Absorption wieder aufklaren, sobald sie anschließend beschattet werden. Dies sollte funktionieren, solange das Verhältnis der Absorption im transparenten zu der im transluzenten Zustand geringer ist als das Verhältnis der Strahlungsenergie mit und ohne Direktstrahlung. Erhöht sich z.B. die Absorption bei Bestrahlung und resultierender Eintrübung von 20 % auf 30 %, so wird die 1.5-fache Energie in der TTS deponiert. Wandert der Schatten und wird die Direktstrahlung von z.B. 900 W/m² blockiert, so findet eine Aufklärung bedingt durch die Abkühlung dann statt, wenn am Ort weniger als 600 W/m² eintreffen und die angrenzend herrschende Temperatur noch ausreichend kühl ist.

Möglichkeiten einer indirekten Einflussnahme

Maßnahmen, die eine bessere Kontrolle der oben genannten Erscheinungen ermöglichen, können erwogen werden. Dies könnten z.B. Möglichkeiten, durch Klappen oder Klappmechanismen eine gezielte Be- oder Hinterlüftung der TTV zu erreichen, sein.

6.2 Experimentelle Studien zur Kombination bedruckter Gläser mit einer thermotropen Isolierverglasung (TTIV)

6.2.1 Spezifischer Ansatz

Eine weitere Möglichkeit, diesen grundlegenden Ansatz zu nützen, ist die Kombination einer bedruckten mit einer thermotropen Verglasung

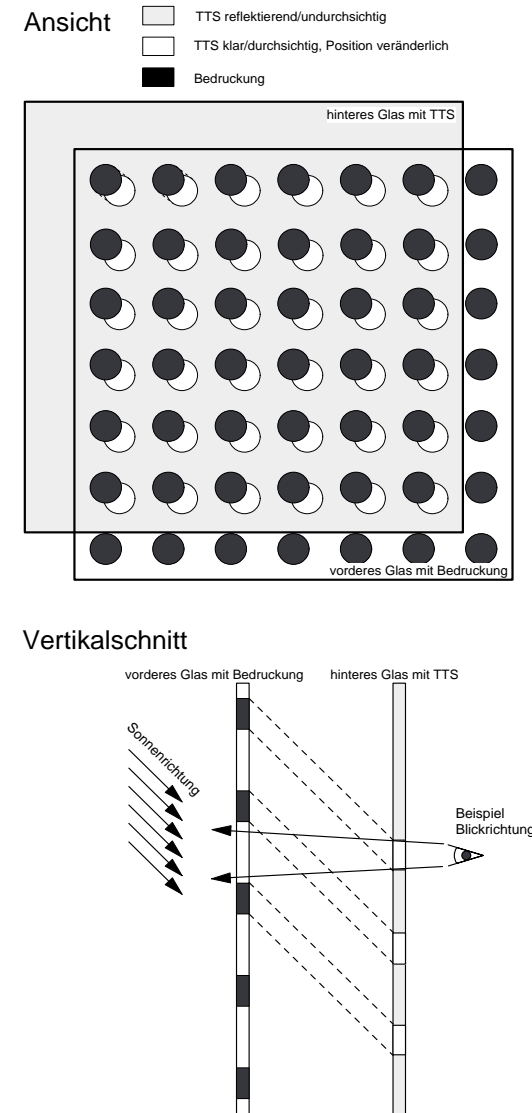


Abb. 6-6: Funktionsprinzip bei der gezielten Nutzung des Schattenwurfes einer kreisförmig bedruckten auf eine thermotrope Verglasung.

(Abb. 6-5 und Abb. 6-6). Die Bedruckung ist dabei nur eine von verschiedenen Möglichkeiten, dem Glas eine lokale Reduktion des g-Wertes aufzuprägen. Diese Kombination würde sich insbesondere für Doppelfassaden eignen. Die wichtigsten Argumente, die Doppelfassaden heutzutage attraktiv machen sind:

- gute Lärmschutzeigenschaften
- zusätzlicher Wetter- und Wärmeschutz
- Zahlreiche Möglichkeiten der Unterbringung von Sonnen-, Blend- und Überhitzungsschutzsystemen
- Besondere Eignung für hohe Häuser, bei denen Öffnen der Fenster zur natürlichen Fensterlüftung möglich sein und Beschattungseinrichtungen geschützt werden sollen.
- Eignung für die Sanierung durch die Möglichkeiten, das ursprüngliche Erscheinungsbild der Fassade nicht zu verändern und funktionale Anforderungen (z.B. Wärmeschutz, Schallschutz) zu verbessern.

Die besonderen Vorteile der Kombination sind:

- Die gestalterischen Möglichkeiten bedruckter Gläser können genutzt und die TTV optisch aufgewertet werden.
- Schalhub und Schaltbereich einer 'Standard'-TTV kann durch eine Bedruckung erweitert bzw. anwendungsspezifisch angepasst werden.
- Durch den wechselnden Kontrast der Bedruckung vor der transluzenten TTV bzw. dem spezifischen Hintergrund bei transparenter TTV können gestalterisch interessante und wirksame Effekte erzielt werden.

6.2.2 Mögliche Glasbedruckungen

Bedruckte Gläser werden bereits aus verschiedenen Gründen eingesetzt. Sie erlauben vorwie-

Variable	Varianten					
Abmessungen der Bedruckung	0 – 10 mm	10 – 200 mm	> 200 mm			
Bedruckungsgrad	0 – 50 %	50 – 75 %	75 – 100 %			
Bereich der Bedruckung	Durchsichtsbereich	Brüstungsbereich	Überkopfbereich	Kombinationen		
Farbe	weiß	schwarz	farbig	Kombinationen		
Flächenbedeckung	vollflächig	teilflächig	verlaufend	Kombinationen		
Formen	Punkte	Kreise	Dreieck	Viereck	Mehreck	Streifen
Lichtdurchlässigkeit der Bedruckung	opak	transluzent	transparent	Kombinationen		
Oberflächenbeschaffenheit	homogen	inhomogen	Kombinationen			
Struktur	Gitter	Raster	Linien	Schriftzüge	Abbildungen	Kombinationen

Tab. 6-1: Übersicht zu möglichen Glasbedruckungen

gend im Büro- und Verwaltungsgebäudebau eine Gestaltung der häufig sehr hohen Glasflächenanteile. Neben dekorativen Zwecken können sie auch dem Sonnen- oder Sichtschutz dienen. Durch eine Bedruckung kann der für die Erwärmung des Innenraumes relevante g-Wert so reduziert werden, dass unter bestimmten klimatischen Bedingungen ein ausreichender Sonnenschutz gegeben ist. Dies kann vollflächig oder gezielt in bestimmten Bereichen erfolgen. Tab. 6-1 gibt eine Übersicht über Möglichkeiten einer Bedruckung. Geometrie, Eigenschaften und Anordnungen von Bedruckungen können prinzipiell

innerhalb eines Glaselementes oder auch der Gesamtfassade miteinander kombiniert werden. Bei den Abmessungen der Bedruckung wurde grob in Bereiche unterteilt, deren Form – in Abhängigkeit von der Entfernung – kaum (0 mm – 10 mm), deutlich (10 mm – 200 mm) oder markant (> 200 mm) in Erscheinung wahr genommen werden.

Der Bedruckungsgrad wurde grob in drei Bereiche unterteilt. Im Bereich 0 % – 50 % handelt es sich um eine relativ lockere Bedruckung, die bei gleichmäßiger Verteilung noch wenig in Erscheinung tritt. Bei 50 % – 75 % belegt sie mehr als

die Hälfte der Fläche und wird – abhängig vom Hintergrund – wahr genommen. Bei 75 % - 100 % wird die Wirkung nicht nur visuell deutlich sondern die Beschattungswirkung auch thermisch relevant.

Beispiel Stockley Park, London, GB, (Abb. 6-7)

Bei der Glasfassade am Stockley Park von Sir Norman Foster, „... kamen drei verschiedene Typen zum Einsatz: Klarglas mit weiß emailliertem Rand, verlaufendes, computerdesigntes Punktraster mit weiß emailliertem Rand sowie – im Bereich der Deckenplatten und Treppenhäuser – eine vollflächig weiße Emailbeschichtung...“ (S. 108, [ARC89]). Während der weiß emaillierte Rand lediglich dazu dient, den Glasrandverbund vor UV-Strahlung zu schützen, wirkt das verlaufende Punktraster im oberen Bereich als Sonnenschutz gegen steil einfallende Sonne, wird im mittleren Bereich durch die Reduktion des Bedruckungsgrades eine Sichtverbindung ermöglicht und dient die dichte Bedruckung im unteren Bereich als Sichtschutz. Bei den Deckenplatten und Treppenhäusern wird durch die Emaillierung aus einem transparenten ein transluzentes Glasbauteil.

Beispiel Spielhalle in Ibaraki, J, (Abb. 6-8)

Bei der Spielhalle 'Kinbasha' der Architektin Kazuyo Sejima dient die Bedruckung neben der reinen Werbung auch der Materialisierung des Werkstoffes Glas. Das von riesengroßen Buchstaben erzeugte Sicht- und Schattenspiel strukturiert den hinter der Fassade liegenden Raum. (S. 46, [SCHIT98])

Ähnliche Effekte und Ziele können prinzipiell mit der Kombination von bedruckten und thermotropen Verglasungen erreicht werden.



Abb. 6-7: Bürogebäude Stockley Park B3 (Architekt Sir Norman Foster, 1989) mit einem weiß emaillierten, verlaufenden Punktraster als Sonnen- und Sichtschutz. (S. 108, [ARC89])



Abb. 6-8: Spielhalle in Ibaraki (Architektin Kazuyo Sejima, 1993) mit einer Bedruckung als Werbung und zur Materialisierung von Glas (S. 46, [SCHIT98])

6.2.3 Stationäre Vorberechnungen

Am ZAE Bayern, Abteilung 2 (Wärmetransport und Wärmedämmung), wurden im Rahmen eines gemeinsamen Projektes [HART02] stationäre Vorberechnungen mit dem Programm HEAT2 durchgeführt [HEAT00]. An Hand eines zweidimensionalen, thermischen Modells wurde vorab geklärt, welche Größenordnungen für die Geometrie der Bedruckung notwendig sind, damit transparente Bereiche der TTV erhalten bleiben. Im Programm wurde die Anordnung der Gläser analog den Versuchsgläsern dargestellt: 3 mm Glas, 1 mm TTS, 3 mm Glas, 8 mm Luftzwischenraum, 4 mm Glas (von außen nach innen) und folgende Annahmen getroffen:

- In einem Abschnitt (Höhe des bestrahlten TTV Segments) wird die Solarstrahlung in Abhängigkeit der Absorption in Wärme umgesetzt.
- Bestrahlte und nicht bestrahlte Abschnitte besitzen die gleiche Größe und wiederholen sich in regelmäßigen Abständen. Es werden symmetrische Randbedingungen angesetzt.
- Es werden stationäre Verhältnisse angenommen.
- Die Eintrübung der thermotropen Verglasung beginnt oberhalb 25°C und erreicht bei 30°C ein Maximum.
- Als Absorption für das bestrahlte Segment wird bis 26°C $\alpha_{\text{rad}} = 17.6\%$ und oberhalb 29.2% angenommen (Werte aus Labormessungen, siehe Kap. 3, Näherung durch Stufenfunktion).
- Die Raumlufttemperatur beträgt 20°C.
- Die Lufttemperatur außen wird variiert und herrscht auch im Fassadenzwischenraum (FZR) zwischen vorgelagertem, bedruckten Glas und raumseitiger TTIV.

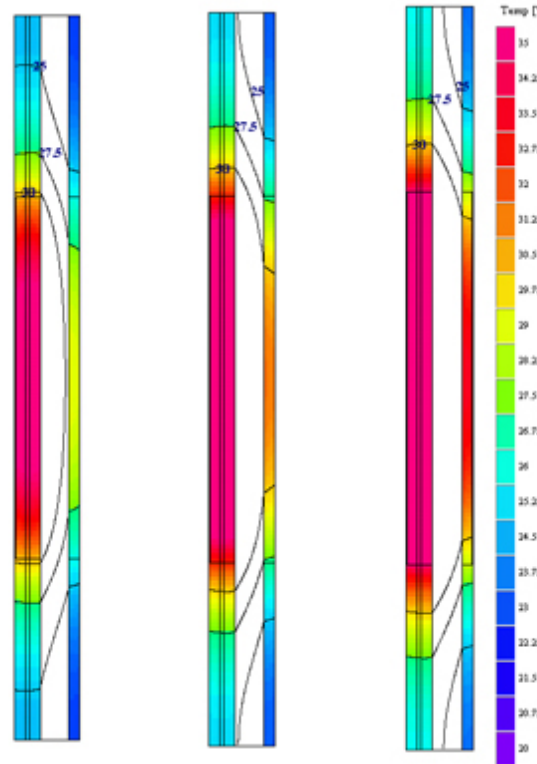


Abb. 6-7: Isothermenverlauf mit je 10 cm bestrahlten und nicht bestrahlten Abschnitten bei einer Strahlungsleistung von 500, 650 und 800 W/m^2 : Berechnung am ZAE-Bayern, Abt. 2.

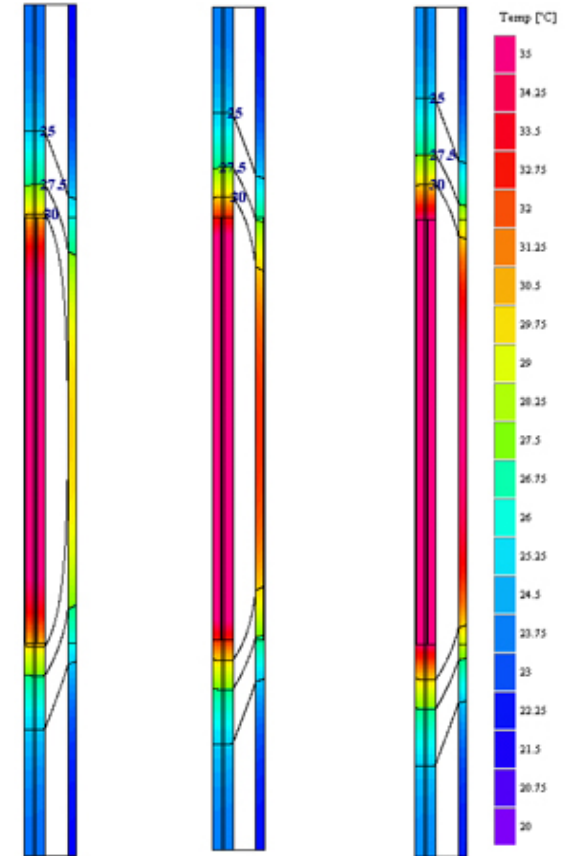


Abb. 6-8: Isothermenverlauf mit je 20 cm bestrahlten und nicht bestrahlten Abschnitten bei einer Strahlungsleistung von 500, 650 und 800 W/m^2 : Berechnung am ZAE-Bayern, Abt. 2.

- Als Wärmeübergangswiderstände der TTV werden raumseitig 0.13 m^2K/W (Normwert) und zum FZR 0.10 m^2K/W angenommen (Schätzwert für einen geschützten aber gut belüfteten FZR)
- Die vorgelagerte Fassade wird lediglich durch den reduzierten Wärmeübergangskoeffizien-

ten und den Schattenwurf berücksichtigt. Strömungsprofil und genaue Temperaturverteilung im FZR werden im Modell vernachlässigt.

Abb. 6-7 und Abb. 6-8 geben für 10 cm bzw. 20cm Abschnitte beispielhaft die Resultate der Berech-

nungen. In Tab.6-1 und Tab. 6-2 wird angegeben, wo die für den Wechsel von transparent zu transluzent relevanten Temperaturen herrschen. Eine Ausdehnung der Isothermen über den direkt bestrahlten Bereich (nach oben und unten!) hinaus, bedeutet eine Einschränkung des transparenten Bereichs (Tabelle Vorzeichen '+'). Erfolgt die Eintrübung über den Symmetrierand hinaus (bei den Tabellen mit 'überall' bezeichnet), bleiben keine transparenten Bereiche erhalten.

Selbst bei sehr großflächigen Bedruckungen mit 20 cm Abschnitten ist ab Außentemperaturen von 27°C bzw. bei 10 cm Abschnitten ab 21°C bei einer Einstrahlung von 800 W/m² eine vollständige Eintrübung zu erwarten (dunkelgrau).

Da die transparenten Bereiche eine bestimmte Mindestgröße haben sollten, wurden in den Tabellen die Bereiche hellgrau markiert, in denen die 25°C Isotherme mehr als die Hälfte der beschatteten Abschnitte bedeckt. Dies bedeutet, dass 10 cm Abschnitte unterhalb von 21°C Außenluft und 20 cm Abschnitte unterhalb 25°C ausreichend funktionieren. Die Vielzahl möglicher Wetterbedingungen macht deutlich, wie schwierig die Auswahl ganzjährig geeigneter Dimensionen für die Bedruckung ist. Als Größenordnung für Demonstrationszwecke lassen aber Abmessungen zwischen 10 und 20 cm einen guten Kompromiss erwarten.

Abstand von der bestrahlten Fläche zur Isotherme	Eingestrahlte Leistung 800 W/m ²			Eingestrahlte Leistung 650 W/m ²			Eingestrahlte Leistung 500 W/m ²		
	25 °C	27.5 °C	30 °C	25 °C	27.5 °C	30 °C	25 °C	27.5 °C	30 °C
Außentemperatur									
19 °C	+ 18 mm	+ 9 mm	+ 2 mm	+ 13 mm	+ 4 mm	- 2 mm	+ 6 mm	- 2 mm	- 13 mm
20 °C	+ 22 mm	+ 12 mm	+ 4 mm	+ 17 mm	+ 6 mm	- 1 mm	+ 10 mm	0	- 9 mm
21 °C	+ 27 mm	+ 14 mm	+ 6 mm	+ 22 mm	+ 9 mm	+ 1 mm	+ 14 mm	+ 2 mm	- 6 mm
22 °C	+ 33 mm	+ 17 mm	+ 8 mm	+ 27 mm	+ 12 mm	+ 3 mm	+ 19 mm	+ 5 mm	- 3 mm
23 °C	überall	+ 20 mm	+ 10 mm	+ 35 mm	+ 15 mm	+ 5 mm	+ 26 mm	+ 8 mm	- 1 mm
24 °C	überall	+ 25 mm	+ 13 mm	überall	+ 18 mm	+ 8 mm	+ 42 mm	+ 12 mm	+ 1 mm
25 °C	überall	+ 31 mm	+ 16 mm	überall	+ 23 mm	+ 10 mm	überall	+ 16 mm	+ 4 mm
26 °C	überall	+ 39 mm	+ 19 mm	überall	+ 30 mm	+ 13 mm	überall	+ 22 mm	+ 7 mm
27 °C	überall	überall	+ 23 mm	überall	+ 42 mm	+ 17 mm	überall	+ 31 mm	+ 10 mm
28 °C	überall	überall	+ 27 mm	überall	überall	+ 21 mm	überall	überall	+ 14 mm
29 °C	überall	überall	+ 34 mm	überall	überall	+ 27 mm	überall	überall	+ 9 mm
30 °C	überall	überall	überall	überall	überall	+ 35 mm	überall	überall	+ 26 mm

Tab.6-1: Bestrahlte/nicht bestrahlte Abschnitte je 10 cm. Stationäre Berechnungen des ZAE-Bayern zur Ausdehnung der eingetrübten TTV-Fläche in Abhängigkeit der Strahlungsleistung und der Aussenlufttemperatur.

Erläuterung: --- : Die Temperatur der Isotherme wird nicht erreicht, Überall (dunkelgrau): Die oben angegebene Isothermentemperatur wird im gesamten Gel überschritten. + x mm: Die angegebene Isotherme liegt x mm im beschatteten Abschnitt. - x mm : Die angegebene Isotherme liegt x mm innerhalb des bestrahlten Abschnittes. Hellgrau: Die 25°C-Isothermen dehnen sich um mehr als die Hälfte in den beschatteten Abschnitt aus.

Abstand von der bestrahlten Fläche zur Isotherme	Eingestrahlte Leistung 800 W/m ²			Eingestrahlte Leistung 650 W/m ²			Eingestrahlte Leistung 500 W/m ²		
	25 °C	27.5 °C	30 °C	25 °C	27.5 °C	30 °C	25 °C	27.5 °C	30 °C
Außentemperatur									
19 °C	+ 17 mm	+ 9 mm	+ 3 mm	+ 12 mm	+ 4 mm	- 2 mm	+ 4 mm	- 4 mm	- 15 mm
20 °C	+ 21 mm	+ 11 mm	+ 4 mm	+ 16 mm	+ 6 mm	0	+ 7 mm	- 1 mm	- 10 mm
21 °C	+ 24 mm	+ 13 mm	+ 6 mm	+ 19 mm	+ 9 mm	+ 2 mm	+ 13 mm	+ 2 mm	- 6 mm
22 °C	+ 28 mm	+ 16 mm	+ 8 mm	+ 23 mm	+ 12 mm	+ 3 mm	+ 18 mm	+ 5 mm	- 3 mm
23 °C	+ 34 mm	+ 19 mm	+ 10 mm	+ 29 mm	+ 14 mm	+ 5 mm	+ 23 mm	+ 8 mm	- 1 mm
24 °C	+ 41 mm	+ 23 mm	+ 12 mm	+ 36 mm	+ 18 mm	+ 7 mm	+ 29 mm	+ 12 mm	+ 1 mm
25 °C	+ 51 mm	+ 26 mm	+ 15 mm	+ 46 mm	+ 22 mm	+ 10 mm	+ 39 mm	+ 15 mm	+ 3 mm
26 °C	+ 70 mm	+ 31 mm	+ 18 mm	+ 64 mm	+ 27 mm	+ 13 mm	+ 58 mm	+ 20 mm	+ 7 mm
27 °C	überall	+ 37 mm	+ 21 mm	überall	+ 33 mm	+ 16 mm	überall	+ 26 mm	+ 10 mm
28 °C	überall	+ 45 mm	+ 24 mm	überall	+ 41 mm	+ 19 mm	überall	+ 34 mm	+ 13 mm
29 °C	überall	+ 58 mm	+ 28 mm	überall	+ 53 mm	+ 24 mm	überall	+ 47 mm	+ 17 mm
30 °C	überall	überall	+ 34 mm	überall	+ 86 mm	+ 29 mm	überall	+ 75 mm	+ 23 mm
31 °C	überall	überall	+ 42 mm	überall	überall	+ 36 mm	überall	überall	+ 30 mm
32 °C	überall	überall	+ 52 mm	überall	überall	+ 46 mm	überall	überall	+ 38 mm

Tab. 6-2: Bestrahlte/nicht bestrahlte Abschnitte je 20 cm. Stationäre Berechnungen des ZAE-Bayern zur Ausdehnung der eingetrübten TTV-Fläche in Abhängigkeit der Strahlungsleistung und der Aussenlufttemperatur.

Erläuterung: --- : Die Temperatur der Isotherme wird nicht erreicht, Überall (dunkelgrau): Die oben angegebene Isothermentemperatur wird im gesamten Gel überschritten. + x mm: Die angegebene Isotherme liegt x mm im beschatteten Abschnitt. - x mm : Die angegebene Isotherme liegt x mm innerhalb des bestrahlten Abschnittes. Hellgrau: Die 25°C-Isothermen dehnen sich um mehr als die Hälfte in den beschatteten Abschnitt aus.

6.2.4 Bemerkungen zu den experimentellen Studien Stationäre Vorberechnungen

Primäre Ziele

Primäre Ziele mit den bestehenden Möglichkeiten waren:

- Demonstration der prinzipiellen Funktion. Es wurde nicht der Anspruch erhoben, bereits ganzjährig funktionsfähige Varianten aufzubauen.
- Dokumentation eines realitätsnahen Erscheinungsbildes von verschiedenen Anordnungen.
- Ausblick auf Möglichkeiten das Erscheinungsbild und die Funktionalität zu verbessern.
- Qualitative Untersuchung der wichtigsten Einflussgrößen.

Einschränkungen durch den Maßstab

Die maßstäbliche Verkleinerung hat Einschränkungen bei der Aussagekraft und die Übertragbarkeit auf einen realen Maßstab (1:1) zur Folge. Thermische und das Verhalten der TTV bestimmt



Abb. 6-9: Montage der zweiten Fassadenebene am maßstäblichen Versuchsraum.

mende Effekte wie Konvektion im Fassadenzwischenraum, Kamineffekt oder zeitliches Temperaturverhalten (thermische Masse) sind verändert. Die Erwärmung eines kleineren Versuchsraumes erfolgt schneller. Für die Funktion als Überhitzungsschutz stellt der maßstäbliche Versuchsraum dadurch den kritischeren Fall dar.

Bedruckungen müssen, um die gewünschte Funktion zu erreichen, so groß gewählt werden, dass transparente und transluzente Bereiche erhalten bleiben (realer Maßstab 1:1). Dadurch kann die Gefahr der vollständigen Eintrübung gering gehalten und die Wirkung demonstriert werden. Allerdings wirken die Bedruckungen größer und der verbleibende Sichtbezug durch die transparenten Bereiche der TTV wird eingeschränkt.

Es muss also ein Kompromiss eingegangen werden, zwischen einer für die Demonstration der Funktion tauglichen Größe und der Darstellung in einer maßstäblichen Verkleinerung.

Belüftung des Fassadenzwischenraumes

Im FZR der Doppelfassade herrscht eine höhere

Lufttemperatur als im Außenraum. Dadurch wird die Gefahr der vollständigen Eintrübung verstärkt. Möglichkeiten den Fassadenzwischenraum immer oder bei Bedarf über natürliche Lüftung auf Außentemperatur zu kühlen, können die lokal begrenzte Eintrübung über ein großen Teil des Jahres sicher stellen (Außenluft- unterhalb Eintrübungstemperatur). Eine bedarfsgerechte Frischluftzuführung über Klappen könnte z.B. saisonal betätigt werden, damit während der kalten Jahreszeit der durch die Doppelfassade verbesserte U-Wert auch zur Wirkung kommt.

Erweiterung der Versuchseinrichtungen

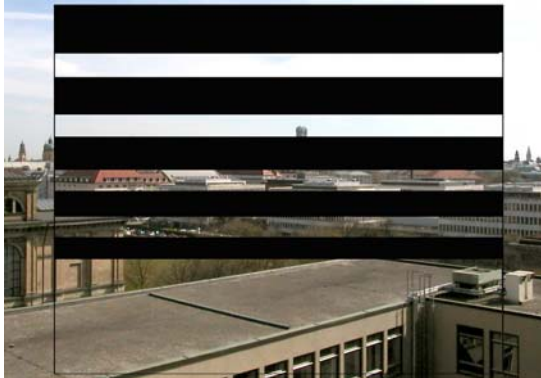
Ein maßstäblicher Versuchsraum (Kap. 4.2.2) wurde mit der Möglichkeit von Anbringung und Austausch einer zweiten Verglasungsebene mit variierbarem Abstand erweitert. (Abb. 6-9 und Abb. 6-10) Für die Versuche wurden die TTV aus Kap. 5 verwendet. Die Gläser wurden mit der TTV zum Fassadenzwischenraum hin eingebaut. Dadurch wurde die Anbindung an die unter relevanten Versuchsbedingungen kühlere Außenluft ermöglicht und ein System, wie es grundsätzlich



Abb. 6-10: Aufklappbare zweite Verglasungsebene mit beklebtem Glas und variierbarem Abstand zur inneren thermotropen Isolierverglasung. Die TTV ist innerhalb der TTV zum Fassadenzwischenraum (FZR) hin angeordnet.



6-11.1: 14/12/10/8/6 cm schwarze Streifen, 8 cm Abstand



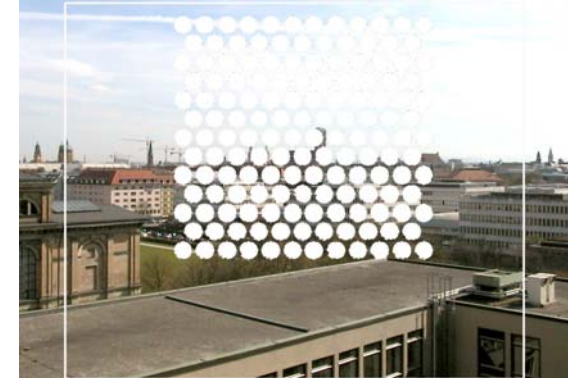
6-11.2: 14/12/10/8/6 cm weiße Streifen, 8 cm Abstand



6-11.3: 20 cm silberner Streifen



6-12.1: Ø 6 cm, Abstand Mittelp. 7 cm, weiß, BG 63 %



6-12.2: Ø 14 cm, Abstand Mittelp. 15 cm, silber, BG 75 %



Abb. 6-11: Darstellung der mit weißen, schwarzen und einem silbernen Streifen beklebten Versuchsgläser zur Beschattung einer inneren TTV vor dem Hintergrundbild der Versuche (10.1 - 10.3).

Abb. 6-12: Darstellung der mit weißen und silbernen Punkten beklebten Versuchsgläser zur Beschattung einer inneren TTV vor dem Hintergrundbild der Versuche (11.1 – 11.2).

auch für die kalte Jahreszeit als Blendschutz in Frage kommt, hergestellt. Zwei Temperatursensoren (PT100) wurden außen auf zwei verschiedenen TTV in unterschiedlicher Höhe und unterschiedlicher Position zum Rahmenprofil angebracht. Sie sollen die Möglichkeit geben, qualitative Schlüsse auf die Temperaturen bei unterschiedlichen Beschattungs- bzw. Besonnungszuständen (Sonnenstand, Schattenwurf von Bedrückung und Abdeckrahmen) zu ziehen. Die Position der beiden Fühler ist auf den Momentaufnahmen zu den folgenden Kapiteln erkennbar.

Der Brüstungsbereich wurde mit OKALUX-Streugläsern [OKA02] belegt. Dadurch wurde der Kontrast zu einer eingetrübten TTV minimiert und eine gleichmäßigere Raumausleuchtung bewirkt. Die Belüftung des FZR mit einem Tangentiallüfter eines kommerziellen Luftkollektors wurde getestet, um die Anbindung an Außenluft zu verbessern, führte aber zu keiner maßgeblichen Änderung der Resultate.

Um anfangs unabhängig vom Hersteller und damit flexibler zu sein, wurden die ersten Gläser von Hand mit Folie beklebt. Die letzten beiden

Gläser wurden von einem industriellen Anbieter (Interpane Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH & Co. KG) gefertigt. Eine Übersicht über die verwendeten Gläser zeigen Abb. 6-11 - Abb. 6-13. Zugehörige Messwerte der Transmission, Reflexion und g-Wert sind in Tab. 6-3 zusammengefasst. Die Gläser wurden primär nach gestalterischen Gesichtspunkten ausgewählt.

Dokumentation der Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Ergebnisse in Form von Temperatur- (Außenluft,

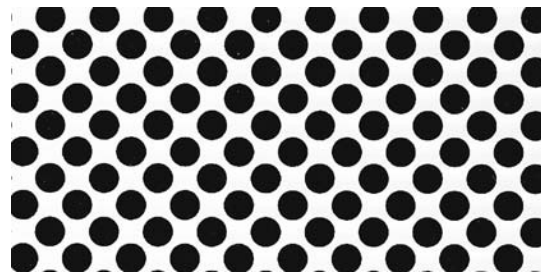
Innenraum, TTV) und Leuchtdichtemessungen (Mittelwerte von Fassadenöffnung und Seitenwand) sowie zugeordneten Momentaufnahmen falltypischer Situationen bei der Eintrübung bzw. Aufklärung zusammengestellt.

Die Tests erfolgten bei unterschiedlichen Wetterlagen (Temperaturen und Himmelszustände). Die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der für die Funktion als Blend- oder Überhitzungsschutz entscheidenden Größen sind zusammengefasst in Tab. 6-4 (S. 6-89) wieder gegeben. In diesem Zusammenhang wurde entweder der Messzeitraum oder der Zeitraum von 08:00 bis 18:00 berücksichtigt. Damit soll ein relevanter Wert für Temperaturen und Leuchtdichten während üblicher Bürozeiten erfasst werden. Im Anhang sind die erfassten Wetterdaten zu den Messreihen, auf der CD-Beilage (vgl. Kap. 10.6) die vollständigen Bildsequenzen zusammengestellt.

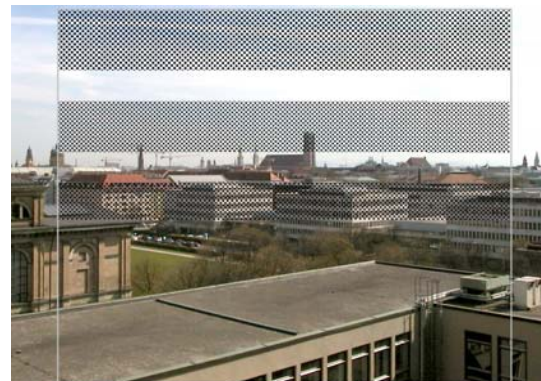
	'schwarz gepunktet' BG 51 %		'grau perforiert' BG 76 %	
	innen	ausen	innen	ausen
bedr. Seite:				
τ_{vis}	45 %	44 %	26 %	26 %
τ_{rad}	42 %	42 %	28 %	29 %
τ_{UV}	28 %	28 %	14 %	14 %
ρ_{vis}	7 %	8 %	18 %	23 %
ρ_{rad}	8 %	8 %	16 %	21 %
ρ_{UV}	8 %	7 %	8 %	7 %
g-Wert	65 %		54 %	
$R_{a-\tau}$	99	99	99	99
$R_{a-\rho}$	98	98	95	95

Tab. 6-3: Zusammenstellung der Messwerte für Transmission (τ), Reflexion (ρ), Farbwiedergabeindex (R_a) und g-Wert der beiden Bedruckungen. Messungen am ZAE-Bayern, Abt. 2, Würzburg.

Ø 4 mm, Abstand Mittelpunkte 5 mm, schwarz, BG 51 %



Streifen 20/16/12 cm im Abstand von 10 cm



Ø 2 mm, Abstand Mittelpunkte 3.6 mm, grau, BG 76 %



Streifen 20/16/12 cm im Abstand von 10 cm



Abb. 6-13: Detail der Bedruckung (1:1), Darstellung der mit Streifenbedruckung ausgeführten Gläser von Interpane vor dem Hintergrund der Versuche und im eingebauten Zustand des Versuchsraums mit Doppelfassade (v.o.n.u.).

6.2.5 Schwarze Streifenbedruckung

Fragestellung

Zunächst sollten im Experiment die Größenordnungen der stationären Berechnungen (Kap. 6.2.3) überprüft und der direkte Strahlungseintrag der Sonne im bedruckten Bereich vollständig unterbunden werden.

Versuchsanordnung

Es wurde ein Glas mit schwarzen Streifen von 14/12/10/8/6 cm und jeweils 8 cm Zwischenraum hergestellt (Abb. 6-14) und im Abstand von 24 cm - entsprechend einem 60 cm Abstand im 1:1 Maßstab (S. 12, Kap. 3.2.3 [LANG00]) - zur TTV angebracht. Das Verhältnis von bestrahlten zu nicht bestrahlten Abschnitten variiert von 8 cm : 14 cm bis 8 cm : 8 cm.

Resultate

Der Eintrübungsvorgang beginnt erwartungsgemäß an den direkt bestrahlten Bereichen (11:26), setzt sich aber fort und führt schon bereits ab ca. 11:30 bei einer Außenlufttemperatur von 22.4°C zu einer vollflächigen Eintrübung. Obwohl aus den Temperaturmesswerten (Abb. 6-14, links unten) ersichtlich wird, dass die Erwärmung ab 12:00 an der TTV proportional zur Außenluft erfolgt, ist die Überhöhung markant. Die Temperaturen an den beiden Messstellen der TTV verlaufen praktisch analog unabhängig vom Schattenwurf. Obwohl um 12:30 beide Messfühler im Schatten der Bedruckung liegen, wurden bei 22°C Außenlufttemperatur. an der TTV-

Abb. 6-14: Versuche mit einer Kombination aus schwarzen Streifen (äußere Schale) und TTV (innere Schale im Abstand 24 cm) am 30.08.2001. Verlauf der Temperaturen (unten links) und Leuchtdichten (unten rechts) mit ausgewählten, charakteristischen Momentaufnahmen. Orientierung 10° SSO.



Uhrzeit 11:26



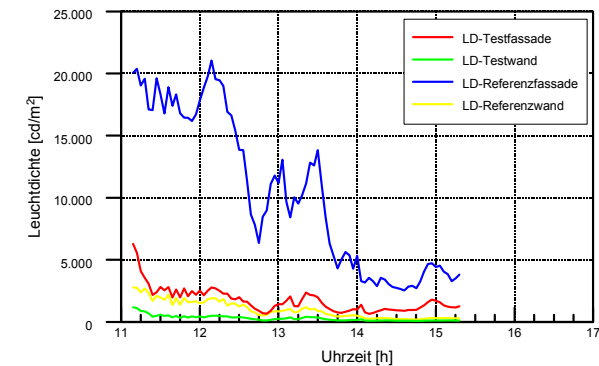
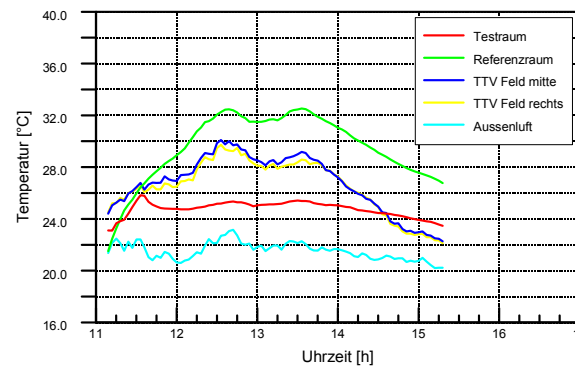
Uhrzeit 14:15



Uhrzeit 12:30



Uhrzeit 14:30



Oberfläche herrschen ca. 29°C

Die Temperatur im Testraum wird im Vergleich zum Referenzraum begrenzt und liegt bei 25°C.

Aus dem zeitlichen Mittel der Leuchtdichte der Fassadenöffnung (1739 cd/m², Tab. 6-4) und der bestrahlten Raumwand (299 cd/m², Tab. 6-4) geht hervor, dass im allgemeinen ein ausreichender Blendschutz gegeben ist, sofern Bildschirme senkrecht zum Fenster angeordnet sind [VBG01]. Lediglich während der Eintrübungsphase werden zulässige Werte temporär überschritten (Maxima 6281 und 1182 cd/m², Tab. 6-4).

Die Aufklärung der TTIV erfolgt erst, nachdem keine direkte Strahlung mehr auf die Fassade trifft. Sie lässt keinen Zusammenhang zwischen durch die Bedruckung beschatteten und nicht beschatteten Bereichen erkennen.

Interpretation

Während die Funktion als Blend- und Sonnenschutz lediglich mit temporären Ausnahmen gegeben ist, ist zu erwarten, dass die Forderung nach Sichtbezug häufig nicht erfüllt wird. Folgende Effekte können dies bei dieser Anordnung erklären:

- Die 'Kühlung' des FZR durch die Außenluft ist nicht ausreichend.
- Die sekundäre Wärmeabgabe (Strahlung aber auch Konvektion) der schwarzen Streifen führt zu einer unerwünschten Erwärmung der TTV im Schattenbereich.

Dadurch erwärmen sich selbst gegen Direktstrahlung beschattete Bereiche zu stark.

6.2.6 Weiße Streifenbedruckung

Fragestellung

Es soll getestet werden, ob mit Hilfe von weißen Streifen (Abb. 6-15) bessere Resultate erzielt werden können. Durch den höheren Anteil reflektierter Strahlung wird die sekundäre Wärmeabgabe reduziert.

Zusätzlich wurde der qualitative Einfluss des FZR getestet. Dieser ist maßgeblich für die Durchströmung mit Außenluft und den für den Temperaturunterschied Außenluft-TTV entscheidenden Wärmeübergang auf die TTV.

Resultate

Die Momentaufnahmen und Messungen bestätigen, dass bei vergleichbaren Außenbedingungen bessere Resultate erzielt werden (Abb. 6-15). Die Momentaufnahmen von 10:20 und 11:20 zeigen, dass bei 24 cm FZR eine kontinuierliche Erwärmung zu einem fast vollständigen Verlust der Transparenz führt. Lediglich ein minimaler Abschnitt im oberen Glasbereich verbleibt um 12:00 noch transparent. Eine wichtige Änderung tritt erst nach der Vergrößerung des FZR von 24 cm auf 50 cm um 12:30 ein: Die Temperaturen an den beiden Messstellen der TTV, die bis dahin im Wesentlichen parallel und oberhalb der Eintrübungstemperatur verlaufen, 'entkoppeln' sich. Der im Schatten liegende Teil der TTV (Messfühler der rechten Verglasung) kühlt sich deutlich ab und wird transparent. Der von der Sonne direkt bestrahlte Bereich bleibt warm und damit translu-

Abb. 6-15: Versuche mit einer Kombination aus weißen Streifen (äußere Schale) und TTIV (innere Schale) im Abstand 24 cm bzw. ab 12:30 50 cm am 28.09.2001. Verlauf der Temperaturen (unten links) und Leuchtdichten (unten rechts) mit ausgewählten, charakteristischen Momentaufnahmen. Orientierung der Fassadenöffnung 10° SSO.



Uhrzeit 10:20



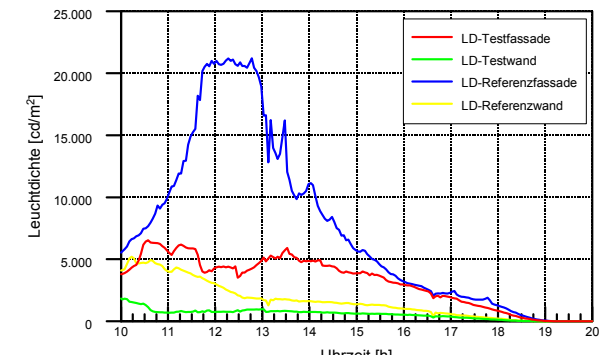
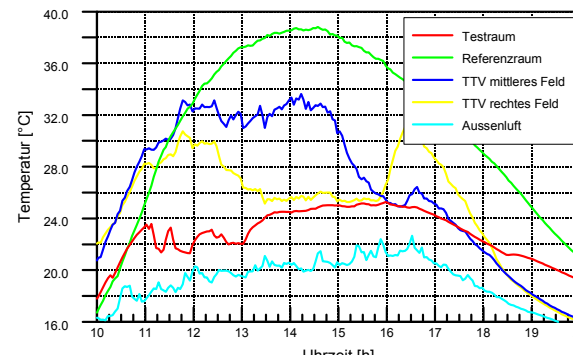
Uhrzeit 14:00



Uhrzeit 11:20



Uhrzeit 16:00



zent. Der Verlauf der Temperaturen an der TTV zwischen 14:00 und 17:00 ist auf den wandernden Schattenwurf zurückzuführen. Um 16:00 liegen beide Temperaturmessstellen auf den TTV-Oberflächen zum FZR im Schatten und bei 25°C. Die Erwärmung durch die seitliche Sonnenbestrahlung der rechten Messstelle nach 16:00 führt zur erneuten Eintrübung. Die Momentaufnahmen von 14:00 und 16:00 zeigen den Schattenwurf und die transparenten Bereiche zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Aus der Bildsequenz der CD-Beilage wird ersichtlich, dass der wandernde Schattenwurf einen wandernden transparenten Bereich der TTV zur Folge hat.

Interpretation

Die verstärkte Durchlüftung in Kombination mit einer höher reflektierenden Farbe führt zu einer wesentlichen Verbesserung. Größere FZR erhöhen die Durchlüftung bei dieser Anordnung durch eine Verstärkung der natürlichen Konvektion. Durch die Erhöhung des FZR erfolgt bei Lufttemperaturen unterhalb 25°C eine für die Funktion nützliche Kühlung, durch die Verringerung des Abstandes eine Erwärmung. Dieser Effekt könnte saisonal zum Aktivieren oder indirekten Beeinflussen eines Blendschutzes genutzt werden. Bei generell höherem Fassadenabstand (wahre Größe) könnten Lüftungsklappen eine saisonale oder bedarfsgerechte, indirekte Einflussnahme ermöglichen.

Die sich erhaltenden, transparenten Bereiche sind teilweise lokal sehr begrenzt und lassen insbesondere durch die davor liegende Bedruckung nur einen eingeschränkten Sichtkontakt zu. Durch die Überlagerung der verschiedenen Weißtöne (weiße Bedruckung, eingetrübte TTV beschattet und unbeschattet in verschieden stark eingetrübten Zuständen) entsteht eine für den Betrachter schwer interpretierbare Abstufung.

Tendenziell ist eine Entzerrung dieser Bereiche vorteilhaft.

Auch bei der maximalen Beschattungsbreite von 14 cm besteht die Gefahr des 'Verlaufens'. Dies deckt sich mit den stationären Berechnungen aus Kapitel 6.2.3.

6.2.7 Silberne Streifenbedruckung

Fragestellung

Mit einem weiteren Glas sollte durch eine großformatige Bedruckung im oberen Glasbereich ein Schattenwurf im Durchsichtsbereich erzeugt werden. Dadurch soll der im Allgemeinen horizontale Ausblick wesentlich verbessert werden.

Versuchsanordnung

Für die Versuche wurde ein Glas mit einem 20 cm breiten, silbernen Streifen im oberen Bereich verwendet (Abb. 6-11.3). Silber oder metallische Oberflächen könnten prinzipiell wegen der reduzierten sekundären Wärmeabgabe eine Alternative zu weiß sein.

Resultate

Die Versuchsreihen am 03.10. (Abb. 6-16) und 05.10 (Abb. 6-17) unterscheiden sich durch die unterschiedlichen Klimabedingungen: Am 05.10. herrschten im Mittel ca. 10°C tiefere Außentemperaturen. Während am 03.10.01 insbesondere nachmittags - wenn auch nur kurzzeitig - eine vollflächige Eintrübung erfolgt und sich resttransparente Bereiche im obersten Bereich der Verglasung befinden, bleibt am 05.10. der Durchsichtsbereich auch nachmittags frei.

Die Bildfolge dokumentiert den Vorteil einer größeren, zusammenhängenden Beschattung. Der Betrachter wird weniger durch die Überlagerung zahlreicher, sich in ihrer relativen Lage verändernder Schichten gestört. Diese besseren Ei-

Abb. 6-16: Versuche mit einer Kombination aus einem silbergrauen Streifen (äußere Schale) und TTV (innere Schale) im Abstand 40 cm am 03.10.2001. Verlauf der Temperaturen (unten links) und Leuchtdichten (unten rechts) mit ausgewählten, charakteristischen Momentaufnahmen. Orientierung der Fassadenöffnung 10° SSO.



Uhrzeit 09:30



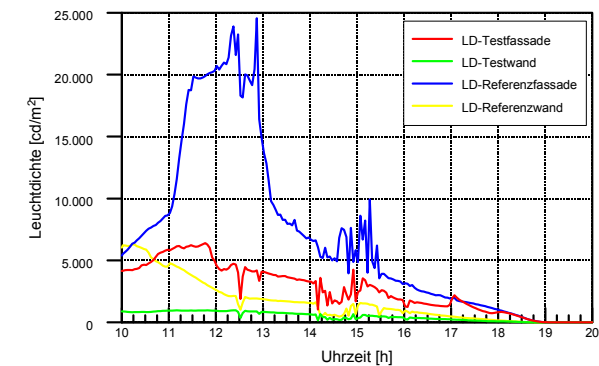
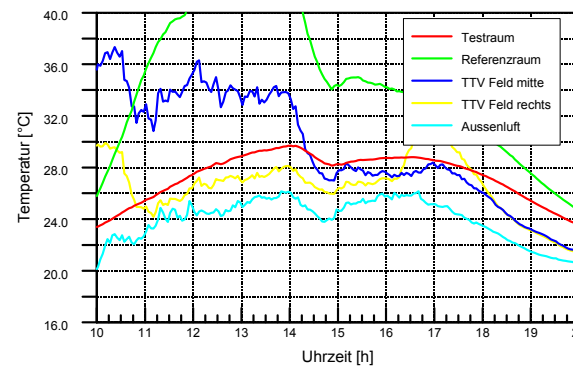
Uhrzeit 14:10



Uhrzeit 11:20



Uhrzeit 15:00



genschaften des Sichtbezuges durch die lokale Eintrübung bewirken allerdings über den temporären Zeitraum der Eintrübung hinaus im gegebenen baulichen Kontext mit freiem Horizont eine abgeschwächte Wirkung als Blendschutz. Aus Richtung der Fassade herrschen durch den sichtbaren, klaren Himmel hohe Leuchtdichten: Mittelwert der Leuchtdichte des Fensterbereichs 6266 cd/m^2 (05.10.) im Gegensatz zu 3197 cd/m^2 (03.10.) und Maximum 16784 cd/m^2 (05.10.) statt 6392 cd/m^2 (03.10.). Die horizontalen Leuchtdichten der Wand in Höhe des Arbeitsplatzes unterscheiden sich nur unwesentlich: ca. 600 cd/m^2 im Mittel und 1600 cd/m^2 maximal (die Unterschiede sind auf den unterschiedlichen Messzeitraum zurückzuführen).

Interpretation

Der Sichtkontakt ist bei dieser Anordnung deutlich verbessert, auch eine großformatige Bedruckung weniger störend. Dennoch ist eine vollständige Eintrübung nicht auszuschließen. Der Vergleich der beiden Messreihen macht die Schwierigkeit deutlich, eine verlässliche Aussage über maximal und im Mittel auftretende Leuchtdichten bei Einsatz einer TTV zu treffen: Bei entsprechender Wetterlage (hohe Leuchtdichten in Horizontnähe) verstärkt durch den baulichen Kontext mit freiem Horizont und dem vorgelagerten Dach können einerseits kurzzeitig sehr hohe Leuchtdichten auftreten andererseits Strahlungsanteile durch transparente Bereiche eine abge-

Abb. 6-17: Versuche mit einer Kombination aus einem silbergrauen Streifen (äußere Schale) und TTV (innere Schale) im Abstand 40 cm am 05.10.2001 bei kühleren Aussentemperaturen. Verlauf der Temperaturen (unten links) und Leuchtdichten (unten rechts) mit ausgewählten, charakteristischen Momentaufnahmen. Orientierung der Fassadenöffnung 10° SSO.



Uhrzeit 14:30



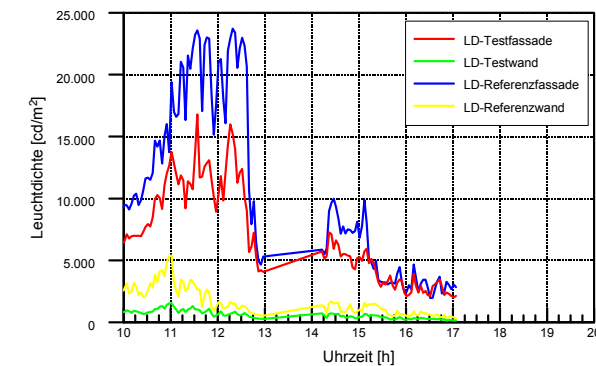
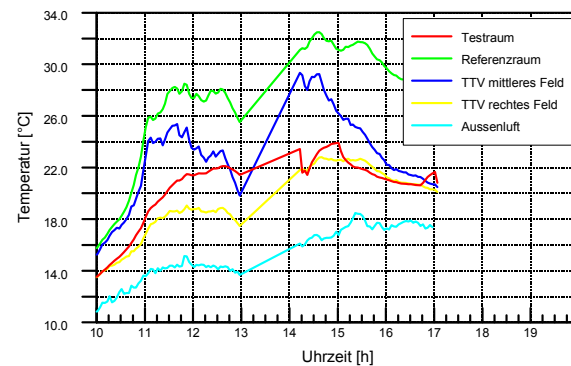
Uhrzeit 16:00



Uhrzeit 15:00



Uhrzeit 16:30



schwächte Beschattungswirkung zur Folge haben.

Bei unterschiedlichen Sonnenhöhen über das Jahr variiert die Breite des bei Besonnung eingetrübten Streifens der TTV im unteren Fensterbereich. Wünschenswert wäre z.B. eine Beschattung, die immer auch den unteren Fensterbereich frei halten würde. Dies hätte für einen Raumnutzer in Sitzposition eine nochmals verbesserte Qualität der Durchsicht zur Folge. Zusätzlich wäre die Gefahr der Ausbreitung der Eintrübung nach oben vermindert.

Der Schattenwurf könnte insbesondere bei dieser Anordnung auch alternativ durch andere Bauteile erzeugt werden und müsste nicht zwingend durch ein bedrucktes Glas erfolgen. Denkbar sind:

- Sonnenschutztönungen im oberen Bereich einer äußeren Verglasung ähnlich der Tönung von Frontscheiben bei PKW's.
- horizontal oder vertikal verfahrbare Lochbleche zur individuellen Festlegung des beschatteten Bereichs.

6.2.8 Weiße Punktbedruckung

Fragestellung

Die Versuchsanordnung mit weißen Punkten wurde gewählt, um die optische Wirkung einer feineren Bedruckung zu zeigen. Darüber hinaus sollte die Überlagerung einer zweidimensionalen Bedruckung (äußeres, mit Kreisen bedrucktes Glas) mit ihrem Negativ (im Lochmuster eingetriebte TTV) getestet und demonstriert werden.

Versuchsanordnung

Dazu wurden in einem Bereich von $82 \times 82 \text{ cm}^2$ Punkte mit 6 cm Durchmesser und einem Mittelpunkt zu Mittelpunkt Abstand von 7 cm angebracht (Abb. 6-12.1). Obwohl schon aus den Vorberechnungen deutlich wird, dass bei diesen Dimensionen unter Wetterbedingungen mit entsprechender Strahlung eine vollständige Eintrübung erfolgt, sollte die Überlagerung Positiv und Negativ getestet werden.

Resultate

Abb. 6-18 zeigt, dass die Eintrübung im Bereich größerer, unbeschatteter Flächen einsetzt, vorübergehend kurzzeitig aufgrund der Beschattung durch die Bedruckung eine Mischung aus transparenter und transluzenter TTV herrscht (Negativ der Bedruckung), die Eintrübung sich aber schon nach wenigen Minuten vollständig ausbreitet. Dies ist auch auf die hohen Außentemperaturen zurückzuführen (Mittelwert 27.7 °C), die keine längerfristigen Zwischenzustände zulassen. Die

Abb. 6-18: Versuche mit einer Kombination aus weißen Punkten (äußere Schale) und TTV (innere Schale) im Abstand 40 cm am 02.10.2001. Verlauf der Temperaturen (unten links) und Leuchtdichten (unten rechts) mit ausgewählten, charakteristischen Momentaufnahmen. Orientierung der Fassadenöffnung 10° SSO .



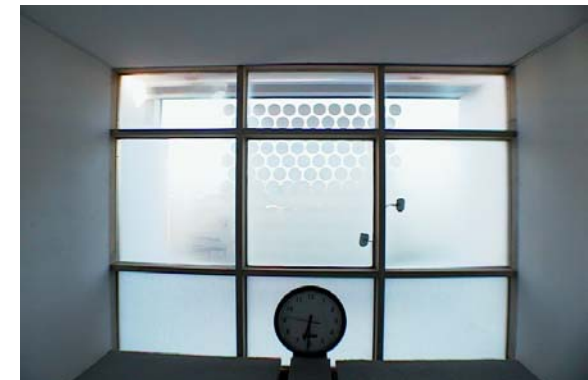
Uhrzeit 10:00



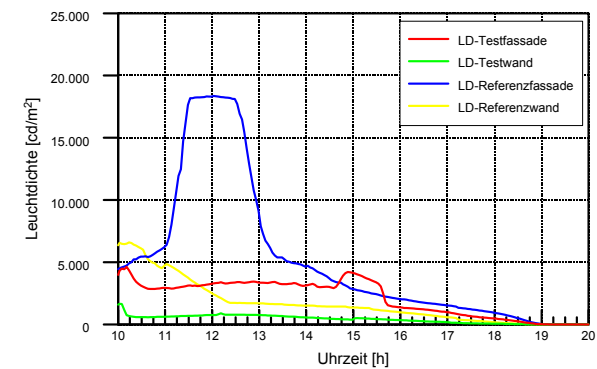
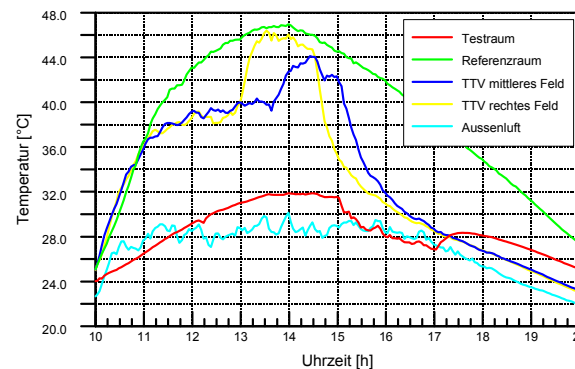
Uhrzeit 10:15



Uhrzeit 10:08



Uhrzeit 18:30



Temperaturen an den TTV Messstellen verlaufen analog und selbst im Zeitraum von 13:00 – 16:00 oberhalb 30°C, so dass keine transparenten Bereiche möglich sind. Das Aufklaren setzt erst bei Sonnenuntergang ein und lässt keinen Zusammenhang zwischen Geometrie der Bedruckung und zuerst aufklarenden Bereichen erkennen.

Die Ausformung im Übergang erinnert an Versuche durch Verwendung eines Negativs und eines Positivs auf innerer bzw. äußerer, bedruckter Verglasungsfläche eine Beschattungswirkung zu erreichen (Beispiel Kantonsspital Basel von Herzog / de Meuron).

Interpretation

Der optische Raumeindruck im Übergang (10:08) hat einerseits hohe Reize durch die feinzeichnende Ausformung der eingetrübten TTV, ist aber andererseits nicht in dem Maße *transparent* für den Betrachter als das z.B. bei sehr feinen Bedruckungen (<10 mm, vgl. Tab. 6-1) der Fall ist, die bei entsprechendem Abstand vom Auge nicht mehr im Einzelnen auflösen sind. Strukturen der Größenordnung < 10 mm sind bei dieser funktionalen Anwendung mit TTV ausgeschlossen. Eine gute Sichtbeziehung herrscht nur in den seitlichen Bereichen ohne davor liegende Bedruckung (rechts und links neben den Punkten).

6.2.9 Silberne Punktbedruckung

Fragestellung

Die folgenden Versuche stellen eine Kombination der Gläser aus Kap. 6.2.8 und 6.2.7 dar: Die Wirkung einer zweidimensionalen Struktur im oberen Fensterbereich auf den Fensterbereich sollte getestet werden.

Versuchsordnung

Es wurde ein Glas mit silbernen Punkten \varnothing 14 cm im oberen Glasabschnitt hergestellt (Abb. 6-12.2) und im Abstand 40 cm angebracht. Damit sollte durch die Bedruckung in einem weniger störenden Bereich ein Schattenwurf im Durchsichtsbereich erzeugt werden, der in seiner Ausformung an das Muster aus Kap. 6.2.8 erinnert, aber durch die größeren Abmessungen eine verbesserte Funktion erwarten lässt.

Resultate

Tatsächlich zeigen die Temperaturmessungen an der TTV (Abb. 6-19), dass

- an den beiden Messstellen abhängig vom Schattenwurf unterschiedliche Temperaturen herrschen
- sich diese im für die Mischung transparenter und transluzenter TTV relevanten Bereich bewegen.

Aus den Momentaufnahmen wird deutlich, dass allerdings sowohl einerseits Situationen entstehen, in denen sich die Eintrübung deutlich über

Abb. 6-19: Versuche mit einer Kombination aus silbernen Punkten (äußere Schale) und TTV (innere Schale) im Abstand 40 cm am 09.10.2001. Verlauf der Temperaturen (unten links) und Leuchtdichten (unten rechts) mit ausgewählten, charakteristischen Momentaufnahmen. Orientierung der Fassadenöffnung 10° SSO.



Uhrzeit 11:00



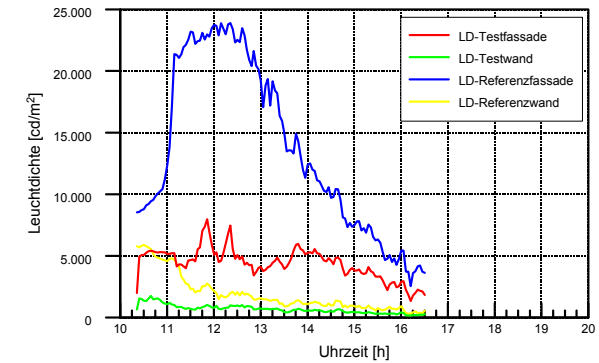
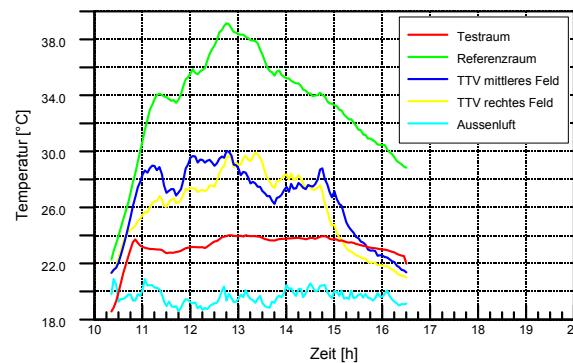
Uhrzeit 13:00



Uhrzeit 11:15



Uhrzeit 14:30



den direkt bestrahlten Bereich ausdehnt (13:00) als auch andererseits solche, in denen die Eintrübung im direkt bestrahlten Bereich nicht vollständig ist und somit die Beschattungswirkung eingeschränkt (14:30). Beim Beispiel um 11:15 jedoch herrscht eine vollständige Beschattung bei einer verbleibenden Durchsicht.

Interpretation

Die Detailaufnahme in Abb. 6-20 verdeutlicht, dass sehr interessante Effekte entstehen können. Die Durchsicht ist aber auch bei dieser Anordnung nur unter bestimmten Blickwinkeln so möglich, dass ein wünschenswerte Sichtbeziehung besteht. Die Gliederung der Fassadenfläche in

- äußeres Glas mit Bedruckung
- äußeres Glas ohne Bedruckung
- inneres Glas mit transparenter TTV besonnt
- inneres Glas mit transparenter TTV beschattet
- inneres Glas mit transluzenter TTV besonnt und
- inneres Glas mit transluzenter TTV beschattet

bewirkt ein vielschichtiges Erscheinungsbild. (Abb. 6-20). Die Vorhersage, wann, wie lange und wie groß Bereiche ein entsprechendes Aussehen haben oder transparent sind, ist wegen der komplexen Randbedingungen nicht möglich.



Abb. 6-20: *Detailansicht bei der Überlagerung von ausfliegender Bedruckung, auf transparentem Glas und innenliegender, teilweise eingetrübter TTV. Im Hintergrund ist die Münchner Frauenkirche zu erkennen.*

6.2.10 Schwarz gepunktete Bedruckungen in Form von Streifen

Fragestellung

Die vorhergehenden Versuche führten im folgenden Schritt zu Gläsern mit resttransparenten Bedruckungen und folgendem Ziel:

- Größere Abmessungen der bedruckten Bereiche sollten für die Durchsicht weniger störend wirken.
- Im vollständig transparenten Zustand sollte der Ausblick nicht nachhaltig gestört werden.
- Selbst beim Blick durch transparente TTV auf bedruckte Bereiche sollte ein Sichtbezug bestehen.

In erster Linie sollte die visuelle Wirkung einer solchen Bedruckung mit kommerziellen Siebdruckmustern getestet bzw. demonstriert werden. Insbesondere war die Wirkung der Farbe der Bedruckung von Interesse. Darüber hinaus sollten Anhaltspunkte für einen notwendigen, minimalen Bedruckungsgrad erarbeitet werden.

Versuchsanordnung

Bei der Firma Interpane wurden Gläser mit vorhandenen Siebdruckmatrizen für Versuchszwecke hergestellt, die in Streifen von 20 cm, 16 cm und 12 cm mit einem Abstand von 10 cm mit schwarzen Punkten bedeckt sind (Abb. 6-13). Die Punkte haben einen Durchmesser von 4 mm und einen Abstand der Mittelpunkte der nächsten Nachbarn von 5 mm. Für die Streifen ergibt sich ein Bedruckungsgrad von 51 %. Die Resultate der Messungen am ZAE-Würzburg sind in Tab. 6-3 zusammengefasst. Obwohl ein g-Wert von 65 % bei starker Besonnung und hohen Außentemperaturen (gerade auch bei den maßstäblichen Versuchen: beschleunigte Erwärmung) keine ganzjährig wirksame Funktion erwarten lassen, sollte anhand des Beispiels für ausgewählte Ver-



Uhrzeit 11:15



Uhrzeit 14:15



Uhrzeit 11:30



Uhrzeit 14:40

Abb. 6-21: Versuche mit einer Kombination aus schwarz-gepunkteten Streifen (20, 16, 12 cm mit 10 Zwischenräumen, Bedruckungsgrad 51%, äußere Schale) und TTV (innere Schale) im Abstand 24 cm am 08.03.2002. Orientierung der Fassadenöffnung 20° SSO.

hältnisse das Potential der optischen Wirkung untersucht werden. Eine Resttransparenz von ca. 10 % reicht im allgemeinen aus, um noch einen Sichtkontakt zu gewährleisten. Der Verwendung vorhandener Siebdrucke zur Demonstration der Wirkung wurde in diesem Kontext die Priorität vor einer ganzjährig, wirksamen Funktion einge-

räumt. Wegen der noch kühlen Außentemperaturen im März wurde der FZR 24 cm gewählt.

Resultate

Die schwarz gepunkteten Streifen gewährleisten einen guten Sichtkontakt im transparenten Zustand der TTV (Abb. 6-21 bis Abb. 6-23). Die

Farbe wird von der hohen Leuchtdichte des Hintergrundes bzw. des Himmels überblendet und tritt nur sekundär in Erscheinung.

Die Eintrübung erfolgt primär an den direkt von Sonne bestrahlten Abschnitten. Die Versuche vom 08.03., 11.03. und 30.05.02 fassen wichtige Aspekte zusammen: Am 08.03. (Abb. 6-21) findet keine vollständige Eintrübung statt. Dies erhöht aber die Gefahr einer Blendung (14:15, 14:40 mit direkter Sonne im Innenraum), weil auch eine verfrühte Rückschaltung nicht auszuschließen ist. Am 11.03. (Abb. 6-22) geht nach einer Übergangsphase (10:00, 10:40) der Verlust des Sichtkontaktes (11:30) mit einem verbesserten Blendenschutz einher. Die Messungen und Momentaufnahmen am 30.05.02 (Abb. 6-23) bestätigen, dass die erwünschte, visuelle Wirkung an Tagen mit entsprechender Wetterlage (kühles leicht wechselhaftes Wetter bei moderaten Außentemperaturen: 19.2°C im Mittel, 23.2°C Maximum, Tab. 6-4) möglich ist. Allerdings treten bedingt durch die Orientierung der Versuchsanordnung und die bauliche Umgebung hohe Leuchtdichten auf.

Interpretation

Der Sichtkontakt ist im Vergleich zu vorangegangenen Versuchen wesentlich verbessert, der Bedruckungsgrad allerdings für eine ausreichende Funktion zu gering. Die Fortführung der Versuche mit vorgelagerten Gläsern deren bedruckte Bereiche noch eine Transparenz aufweisen, bietet sich an. Als Optimierungstendenzen ergeben sich:

- Vergrößerte Abmessung der Bedruckung
- Höherer Bedruckungsgrad
- Ausreichende Resttransparenz der bedruckten Bereiche



Uhrzeit 10:05



Uhrzeit 11:30



Uhrzeit 10:40



Uhrzeit 16:00

Abb. 6-22: Versuche mit einer Kombination aus schwarz-gepunkteten Streifen (20, 16, 12 cm mit 10 Zwischenräumen, Bedruckungsgrad 51%, äußere Schale) und TTIV (innere Schale) im Abstand 24 cm am 11.03.2002. Orientierung der Fassadenöffnung 25° SSO.



Uhrzeit 12:30



Uhrzeit 13:15



Uhrzeit 13:15



Uhrzeit 15:15

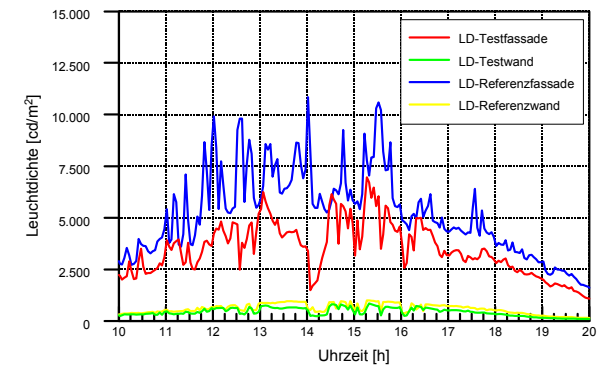
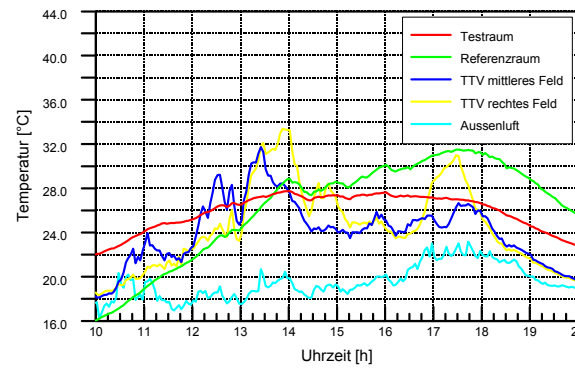


Abb. 6-23: Versuche mit einer Kombination aus schwarzgepunkteten Streifen (20, 16, 12 cm mit 10 Zwischenräumen, Bedruckungsgrad 51%, äußere Schale) und TTV (innere Schale) im Abstand 40 cm am 30.05.2002. Orientierung der Fassadenöffnung 20° SSW.

6.2.11 Grau perforierte Bedruckungen in Form von Streifen

Fragestellung

Bei einem weiteren Glas sollte der Bedruckungsgrad der Streifen erhöht werden. Dabei muss von einem z.B. Punktmuster auf das Negativ nämlich ein Lochmuster übergegangen werden. Die optische Wirkung eines helleren Farbtones sollte getestet werden.

Versuchsordnung

Analog zu dem vorhergehenden Glas wurde eines mit grauen, gelochten Streifen mit 20 cm, 16 cm und 12 cm Breite bei 10 cm Zwischenraum bei Interpane hergestellt (Abb. 6-13.2). Der Bedruckungsgrad beträgt 76 % der g-Wert der Bedruckung 54 % (Tab. 6-3). Um die Durchsicht nicht durch zu hohe Kontraste zu behindern und eine Alternative zur schwarzen Bedruckung zu testen, wurde eine graue Bedruckung verwendet. Der Abstand 24 cm wurde wegen der noch kühlen Jahreszeit (März) gewählt.

Resultate

Die Resultate (Abb. 6-24) der Versuchsreihe unterscheiden sich abgesehen von der Wirkung im Außenbereich (Abb. 6-13) nicht wesentlich von den schwarz gepunkteten Streifen (Kap. 6.2.10). Der Bedruckungsgrad von 76 % und ein g-Wert von 54 % (Tab. 6-3) bewirken keine entscheidenden

Abb. 6-24: Versuche mit einer Kombination aus grauen, gelochten Streifen (20, 16, 12 cm mit 10 Zwischenräumen, Bedruckungsgrad 76 %, äußere Schale) und TTIV (innere Schale) im Abstand 24 cm am 12.03.2002. Verlauf der Temperaturen (unten links) und Leuchtdichten (unten rechts) mit ausgewählten, charakteristischen Momentaufnahmen. Orientierung der Fassadenöffnung 25° SSO.



Uhrzeit 10:30



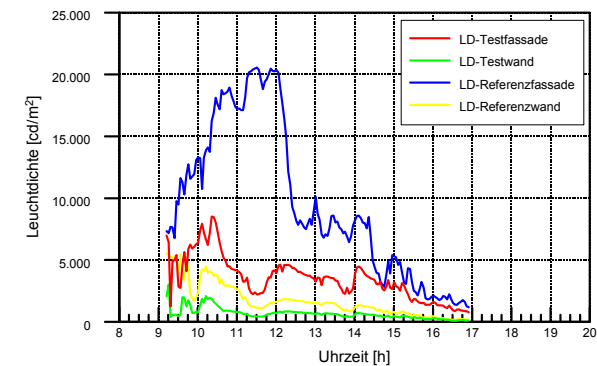
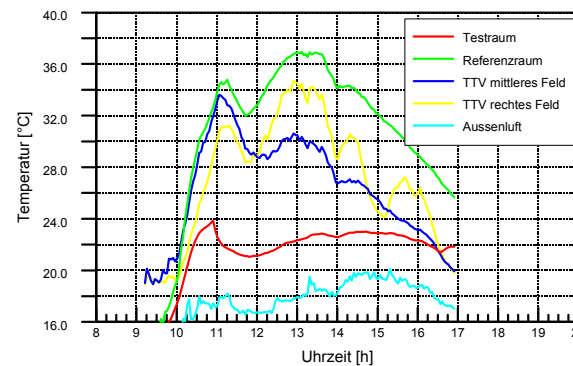
Uhrzeit 14:00



Uhrzeit 10:45



Uhrzeit 15:15



de Verbesserung. Dies ist hängt auch mit der in beiden Fällen hohen Absorption (bei 40 %) zusammen. Im einen Fall ist diese durch hohe Werte der Farbe Schwarz im anderen Fall zwar bessere Werte der Farbe aber dichtere Bedruckung bedingt.

Bei einer mittleren Lufttemperatur von 17.6°C und einem FZR von 24 cm verlaufen die eingetrübten Bereiche und breiten sich auch in den Schatten der Streifenbedruckung aus. Die transparenten Abschnitte sind lokal sehr begrenzt.

Interpretation

Die Art der Bedruckung (Farbe, BG), physikalische Eigenschaften von Glas und Bedruckung (g-Wert, τ), sowie deren Anordnung auf dem Glas bestimmen in ihrer Kombination die

- funktionale Wirkung
- optische Innenraumwirkung
- optische Außenraumwirkung

Die Verwendung eines wärmeschutzbeschichteten Glases in der äußeren Ebene könnte Effekte der sekundären Wärmeabgabe wesentlich verringern.

Versuchsanordnung	Versuchsdatum	Messpunkt	Temperaturen [°C] (Messzeitraum oder max. 08:00 – 18:00)			Messpunkt	Leuchtdichte [cd/m ²] (Messzeitraum oder max. 08:00 – 18:00)		
			Mittel	Max.	Min.		Mittel	Max.	Min.
Schwarzes Streifenmuster	30.08.01	TLA	21.5	23.2	20.2	Fassade Wand	1739 299	6281 1182	663 84
		TLI	24.8	25.8	23.1				
		TTV-mitte	26.8	30.1	22.3				
		TTV-rechts	26.5	29.7	22.1				
Weißes Streifenmuster	28.09.01	TLA	18.8	22.7	10.4	Fassade Wand	3561 661	6529 1984	40 29
		TLI	21.9	25.3	10.8				
		TTV-mitte	27.6	33.6	8.9				
		TTV-rechts	26.4	31.8	9.9				
Silberner Streifen 20 cm	03.10.01	TLA	23.3	26.2	16.4	Fassade Wand	3197 626	6392 1618	740 90
		TLI	26.3	29.7	16.8				
		TTV-mitte	30.0	37.3	16.1				
		TTV-rechts	26.8	31.5	16.6				
	05.10.01	TLA	13.8	18.4	7.8	Fassade Wand	6266 591	16784 1552	1347 91
		TLI	18.0	23.9	9.4				
		TTV-mitte	19.9	29.3	7.8				
		TTV-rechts	17.1	22.8	7.8				
Weiße Punkte 6 cm	02.10.01	TLA	27.7	30.1	21.4	Fassade Wand	2682 573	4624 2398	489 65
		TLI	28.7	31.9	22.8				
		TTV-mitte	35.2	44.1	22.0				
		TTV-rechts	35.1	46.4	22.1				
Silberne Punkte 15 cm	09.10.01	TLA	19.6	20.9	18.6	Fassade Wand	4393 683	7973 1749	1331 157
		TLI	23.2	24.0	18.6				
		TTV-mitte	26.6	30.0	21.3				
		TTV-rechts	25.9	29.9	21.0				
Schwarze Streifen gepunktet 51% Bedruckungsgrad	30.05.02	TLA	19.2	23.2	16.0	Fassade Wand	3666 487	6957 857	1497 238
		TLI	25.6	27.8	18.3				
		TTV-mitte	24.0	31.7	16.9				
		TTV-rechts	24.5	33.4	17.1				
Graue Streifen gelocht 76 % Bedruckungsgrad	12.03.02	TLA	17.6	20.1	11.9	Fassade Wand	3515 680	8512 3009	784 96
		TLI	21.4	23.8	12.9				
		TTV-mitte	26.4	33.6	18.9				
		TTV-rechts	27.1	34.7	18.9				

Tab. 6-4: Zusammenstellung massgeblicher Messwerte (Mittelwert, Maximum, Minimum pro Scannermittelwert) der Versuche zur Kombination einer thermotropen inneren Verglasung mit einem vorgelagerten bedruckten Glas. Es wurden nur Messdaten während hypothetischer Büronutzungszeiten zwischen 08:00 Uhr und 18:00 berücksichtigt. Außenluft : TLA, Testraumluft: TLI, Temperaturmessstelle am mittleren Element der TTV auf der Außenseite: TTV-mitte, Temperaturmessstelle am rechten Element der TTV auf der Außenseite (Position siehe Fotos)

6.3 Zusammenfassung

6.3.1 Erscheinungsbild

Die Untersuchungen zeigen, dass zahlreiche Anordnungen und Varianten denkbar sind, die gestalterisch sehr unterschiedliche Innenraumwirkung haben können und die Ansicht der Fassade stark beeinflussen. Sie erfordern eine gezielte, bauliche Abstimmung und lassen sich unter Umständen in aus anderen Gründen geplante Konstellationen integrieren. Allen Anordnungen ist gemeinsam, dass sie bei bedecktem Himmel das funktionale Prinzip nicht erkennen lassen und bei direkter Sonnenstrahlung eine Überlagerung außen liegender Komponenten mit dem charakteristischen Erscheinungsbild einer sich eintrübenden TTV zeigen.

Bei der Kombination mit bedruckten Gläsern sind a priori aus Gründen der optischen Wirkung Strukturen kleiner als 10 mm, die ab einem gewissen Abstand nicht mehr im einzelnen auflösen sind, oder wesentlich größere Strukturen größer 200 mm, die auch bei einem größeren Abstand noch klar erkennbar sind, denkbar. Strukturen der Größenordnung des Zwischenbereichs (10 mm bis 200 mm) sind für den Betrachter nicht mehr klar zuzuordnen und wirken deswegen häufig störend. Feine Bedruckungsstrukturen bieten sich bei Teilflächenbelegung zum Erhalt einer Resttransparenz für die bedruckten Abschnitte an, können aber in der TTV nicht mehr in transparente oder transluzente Bereiche aufgelöst werden. Diese Bedruckungen lassen noch einen Sichtkontakt zu, was die Verwendung für die Funktion vorteilhafter, großer bedruckter Bereiche ermöglicht.

Das Verlaufen transluzenter Bereiche in den

Schlagschatten, der Verbleib transparenter bei Besonnung und die fließenden Übergänge zwischen transparenten/transluzenten Bereichen erhöhen die optische Komplexität. Je kleiner die Dimension und je größer die Zahl der Beschattungen (Beispiel Punkte) desto unruhiger und schwieriger nachvollziehbar wird das entstehende Bild. Die zentrale Frage ist die subjektive und anwendungsbezogene Bewertung der höheren Komplexität und der 'flüchtigen', ungeometrischen Formen.

Analog zur Wirkung einer resttransparenten Bedruckung sind auch durch Sonnenschutzbeschichtungen, Lochbleche, Gewebe, Folien o.ä. beschattete Teilbereiche denkbar. Durch die heutigen Möglichkeiten der Herstellung mit wenigen Prozent g-Wert bei verbleibender Durchsicht ergibt sich weiterer gestalterischer Spielraum bei verbesserter visueller Wirkung.

6.3.2 Funktion, Konstruktion

Die prinzipielle Möglichkeit zur situations- und jahreszeitunabhängigen Ausblendung der Direktstrahlung

- ohne jegliche bewegliche Teile
- bei Erhalt einer Durchsicht und
- geringfügiger Sichtbeeinträchtigung bei in Mitteleuropa häufigem, bedecktem Himmel besitzt hohe Attraktivität.

Die Versuche zeigen, dass die Funktion als Sonnenschutz mit der Kombination eines bedruckten Glases und einer TTV gewährleistet werden kann.

Es werden aber die Einschränkungen, ohne die Möglichkeit einer gezielten Schaltung oder nutzerabhängigen Beeinflussung einen 'reaktions-schnellen' und ganzjährig funktionsfähigen

Blendschutz bei Erhalt einer Durchsicht zu erreichen, deutlich: Eine optimierte Funktion als Blendschutz (rechtzeitiges Schalten) bei direkter Strahlung hat den häufigen Verlust des Sichtkontaktes zur Folge. Anordnungen zur Verbesserung des Sichtkontaktes bewirken sowohl durch

- ein verzögertes Schalten (Eintrübung),
 - verfrühtes Schalten (Aufklärung) als auch
 - höhere Leuchtdichten durch die transparenten Bereiche
- eine höhere Gefahr einer häufigeren und u.U. länger andauernden Blendung.

Tab. 6-5 gibt einen Überblick über den notwendigen FZR unter der Annahme, dass bei niedrigstem Sonnenstand zur Mittagszeit der Schattenwurf unterhalb des Bauteils liegt und die Durchsicht durch die transparente TTV nicht durch das Bauteil selbst unterbrochen werden soll. Es ist zu beachten, dass bei seitlich einfallender Strahlung (vormittags, nachmittags) auch bei niedrigstem Sonnenstand noch eine Überlagerung statt findet, die aber mit zunehmender Sonnenhöhe abnimmt und bei resttransparenten, größeren Strukturen nicht störend ist.

Bei der Anordnung der TTV innerhalb einer Doppelfassade zum FZR ist die Belüftung des FZR entscheidend. Dauerhafte hohe Durchlüftung hat bei entsprechend hoher Schalltemperatur der TTS einen selteneren Verlust des Sichtkontaktes während warmer und strahlungsreicher Tage, im Gegenzug aber eine reduzierte Funktion als Blendschutz zur Folge. Umgekehrt führt eine geringere Belüftung (höhere Temperaturen im FZR) zu einem häufigeren Verlust des Sichtkontaktes bei verbesserter Blendschutzwirkung auch während kalter Tage.

Einfache Mechanismen zur Beeinflussung der an der TTV herrschenden Temperaturen könnten die Funktionsbereich erweitern und darüber hinaus dem Nutzer die Möglichkeit einer individuellen Einflussnahme geben. Denkbar wären:

- Mechanismen zur unterschiedlichen Belüftung des FZR: Klappen u.ä., veränderbarer FZR
- Mechanismen zur Beeinflussung der TTIV: Dreh-, kipp- oder ausstellbare TTIV, die die Ankoppelung an Innen- oder Fassadenzwischenraumtemperaturen verstärken oder schwächen.
- Mechanismen zur Veränderung der Größe oder Position des Schattenwurfs: Drehbare Lamellen, horizontal oder vertikal verfahrbare Elemente

Häufig kommen heutzutage Fassadenkonstruktionen zum Einsatz, die sich durch eine thermotrope Schicht in Kombination mit einem einfachen, fixen oder beweglichen Beschattungselement und damit der Integration des Sonnenschutzes in die ohnehin vorhandenen Fassaden vereinfachen lassen würden. Denkbare Beispiele hierfür sind:

- Sonnenschutz, Schallschutz und Forderung nach natürlicher Fensterlüftung bei vielgeschossigen Gebäuden führt zu einer Doppelfassade, welche durch die Integration einer TTV in die Verglasung vereinfacht wird.
- Vorgelagerte Pufferzonen oder Verkehrswege mit hohem Verglasungsanteil und schattenspendenden Begrenzungsbauteilen z.B. im Dach lassen durch die Verwendung einer TTV einen klimaabhängigen Schattenwurf zu.

		Vertikale Ausdehnung des beschattenden Elements	Größenordnung für Schalenabstand	Grobe Zuordnung	Kommentar
Größenordnung der Bedruckung (vgl. Tab. 6-1)	Bereich I	2 mm	6 mm	2-fach Isolierglas	Abmessungen zu klein für eine Auflösung in transparente und transluzente Bereiche der TTV
		5 mm	14 mm	2-fach-Isolierglas	
		10 mm	28 mm	3-fach Isolierglas	
	Bereich II	50 mm	138 mm	DF schwer zu reinigen ([LANG00], 3.2.1)	Abmessungen zu klein für eine Auflösung in transparente und transluzente Bereiche der TTV
		100 mm	275 mm	DF schwer zu reinigen ([LANG00], 3.2.1)	Abmessungen ausreichend für eine Auflösung in transparente und transluzente Bereiche, ganzjährige Funktion eingeschränkt.
		150 mm	412 mm	DF gut zu reinigen ([LANG00], 3.2.2)	
		200 mm	550 mm	DF gut zu reinigen ([LANG00], 3.2.2)	
	Bereich III	250 mm	687 mm	DF begehbar ([LANG00], 3.2.3)	Abmessungen ausreichend für eine Auflösung in transparente und transluzente Bereiche der TTV, ganzjährige Funktion eingeschränkt.
		500 mm	1374 mm	DF begehbar ([LANG00], 3.2.3)	Abmessungen geeignet für eine ganzjährige Auflösung in transparente und transluzente Bereiche der TTV, mit resttransparenten Bedruckungen auch geringerer FZR möglich.
		1000 mm	2748 mm	DF begehbar ([LANG00], 3.2.3)	
		2000 mm	5495 mm	DF begehbar ([LANG00], 3.2.3)	Abmessungen groß genug für eine ganzjährige Auflösung in transparente und transluzente Bereiche der TTV, mit resttransparenten Bedruckungen auch geringerer FZR möglich, FZR nur bei Sonderfällen (Wintergarten, Atrium)

Tab. 6-5: Übersicht über den erforderlichen Mindestabstand unter der vereinfachenden Annahme, dass bei 20° Sonnenhöhe (mittags im Winter) keine Überlappung von Struktur und Schattenwurf (beide parallel vertikal) in horizontaler Richtung (Blickrichtung) besteht. Die Bereiche, die sich von der Funktion momentan verfügbarer TTS anbieten, sind hervorgehoben.

6.3.3 Resumé

Die wichtigsten Einflussgrößen sind:

- Temperaturen außen, innen und im FZR
- Strahlungsbedingungen und deren Dynamik
- Tiefe aber auch Breite des FZR (natürliche Konvektion)
- Luftströmung im FZR als Maß für den Wärmeübergangswiderstand auf die TTV
- Physikalische Eigenschaften der Bedruckung: BG, τ , ρ , α , g-Wert
- Physikalische Eigenschaften des bedruckten Glases: mit/ohne Wärmeschutzbeschichtung, τ , ρ , α , g-Wert
- Physikalische Eigenschaften der transparenten und transluzenten TTV: τ , ρ , α , g-Wert
- bauliche Situation der Umgebung

Die durchgeführten Tests zeigen deutlich, dass eine dauerhaft funktionsfähige Anordnung bei der Vielzahl maßgeblicher Parameter schwer zu erreichen ist. Konstruktionen, die über die Anwendung einer einfachen TTV weitere stationäre oder veränderbare Elemente benötigen, relativieren die primären Vorteile einer TTV, stehen in Konkurrenz zu herkömmlichen Beschattungen und sind auf Spezialfälle begrenzt.

Für die standardisierte Anwendung bei größeren Flächen müssen deswegen Anordnungen gefunden werden, die z.B. über einen vorhersagbaren Temperaturbereich funktionieren und lediglich außerhalb Beeinträchtigungen erwarten lassen. Dies kann mit tendenziell größeren, zusammenhängenden Beschattungen erreicht werden.

Unkritischer ist die Anwendung der TTV in einem baulichen Umfeld reduzierter Komplexität, z.B. als Sonnenschutz mit reduzierten Anforderungen an den Blendschutz.

7 Einsatzmöglichkeiten von thermotropen Verglasungen (TTV) an Gebäudebeispielen

7.1 Vorbemerkungen

7.1.1 Vorgehensweise

Im Folgenden soll an Hand von Räumen ausgeführter Gebäuden beispielhaft der Einsatz einer TTV im Bereich der lichtdurchlässigen Gebäudehülle diskutiert werden. Da der Werkstoff Glas und gläserne, hoch transparente Gebäudehüllen heutzutage hohe Attraktivität besitzen, und damit weite Verbreitung besonders auch bei öffentlichen Bauten mit Repräsentationscharakter finden, sollen an diesen Beispielen Kernaspekte für den Einsatz einer TTV thematisiert werden.

Bei allen Beispielen handelt es sich um Gebäudebereiche, bei denen der Baustoff Glas großflächig und in Form fester oder beweglicher Verglasungen eingesetzt wurde. Manche dieser Gebäude wurden mit Sonnen- oder auch Blendschutzsystemen ausgeführt.

Im Vordergrund stehen Aspekte der Sichtbeziehung in Verbindung mit funktionalen Vorteilen hinsichtlich des ursprünglichen Gebäudekonzeptes, da ein wesentliches Gestaltungsmerkmal die hohe Transparenz der Hülle, also auch die Auflösung der klaren Trennung zwischen innen und außen ist. Der Einsatz einer TTV bedeutet in dieser Hinsicht eine Einschränkung. Dies gilt insbesondere für Gebäude, die ohne Sonnenschutz ausgeführt wurden. Hier kann aber unter Umständen die Klarheit der Struktur der Hülle bei einer funktionalen Verbesserung unter Vermeidung zusätzlicher baulicher Maßnahmen erhalten bleiben.

Beim Einsatz als Alternative zu einem vorhandenen Sonnenschutz werden entsprechende, bauli-

che Maßnahmen überflüssig. Die Reduktion der Komplexität der baulichen Gestalt wird insbesondere bei diffusem Himmel deutlich und hat auch ökonomische Vorteile zur Folge.

Die Beispiele in den folgenden Kapiteln werden nach den Anordnungsmöglichkeiten im Wand- oder Dachbereich (Abb. 4-1) gegliedert. Die TTV wird immer in einem vollständig eingetrübten Zustand dargestellt. Vorrangig werden Beispiele behandelt, die während der Studien an einem modellhaften Büroraum mit Bildschirmarbeitsplatz (Kap. 5 und 6) nicht explizit berücksichtigt wurden. Die Nutzung der Gebäude ist unterschiedlich. Darüber hinaus werden Möglichkeiten zusätzlicher Freiheitsgrade (drehen, schieben, Abb. 4-2) aufgezeigt.

Ziel kann nicht eine abschließende Bewertung, sondern muss das Aufzeigen von Aspekten des 'Für' und 'Wider' vor allem im Hinblick auf den Einfluss auf das gestalterische Konzept des Architekten sein (Kap. 7.1.3).



Abb. 7-1: Ostfassade vom Süd-Treppenhaus des Hauptgebäudes der TU München im 5. Stock mit unterschiedlich eingetrübter TTV (Bildmontage).

7.1.2 Bedeutung der Übergangszustände einer thermotropen Verglasung (TTV)

Bei allen aufgeführten Fällen ist es schwierig, die Vielzahl der bei Eintrübung auftretenden Übergangszustände in ihrer Gesamtwirkung vorherzusagen oder zu beurteilen. Der charakteristische Verlauf bei der Eintrübung, der entlang der von direkter Sonne bestrahlten Rahmenteile beginnt und sich vollflächig ausbreitet, wird sich zumindest bei gleicher Orientierung und Exposition der Glasflächen an allen Elementen gleichermaßen vollziehen. Die Aufklärung wiederum, bei geringer Bestrahlung je nach genauer Konstellation und Anordnung, wird ähnlich wie die Auflösung von Nebel mit sehr verschiedenen Vorzugsbereichen erfolgen. Die genaue Form von Eintrübung und Aufklärung ist von zahlreichen Bedingungen abhängig:

- Klimatische Bedingungen und deren Dynamik
- Einbausituation
- Bauliche Umgebung
- Verwendete Glaskombinationen und deren physikalische Eigenschaften
- Verwendete TTS und deren physikalische Eigenschaften
- Bauliche Umgebung

Die korrekte Darstellung möglicher Situationen ist nur mit Hilfe aufwendiger Simulationen möglich. Abb. 7-1 zeigt an einem Beispiel wie dieser Vorgang unter bestimmten Umständen verlaufen könnte. Es wird sofort ersichtlich, dass die Beurteilung dieser oder ähnlicher Situation sehr subjektiv ist, zumal keine exakte Vorhersage möglich ist, wann und wie oft diese auftreten.

7.1.3 Einfluss auf den 'Charakter' des Gebäudes

Durch den Einsatz einer TTV an Stelle einer normalen Verglasung oder einer anderen Beschattung wird in zahlreichen Fällen der (funktionale) 'Charakter' eines Gebäudes verändert. Vielmals werden auch die verwendeten Stilmittel den Einsatz ausschließen. Es wurde versucht, Gebäude auszuwählen, bei denen die TTV sich grundsätzlich in das Konzept einfügen könnte. Eine abschließende Beurteilung ist aber immer sehr subjektiv, in diesem Rahmen auch nicht Ziel der Arbeit und wird im konkreten Anwendungsfall immer durch die beauftragten Entscheidungsträger gefällt werden müssen. Ziel ist es, das Spektrum von Einsatzmöglichkeiten der TTV zu veranschaulichen.

7.1.4 Systematische Übersicht

In Tab. 7-1 und Tab. 7-2 ist eine Übersicht der ausgewählten Beispiele zusammengefasst. Die Tabelle gibt eine Zuordnung gemäß Abb. 4-1 und ordnet den Einsatz einer TTV der primär angestrebten Funktionen zu.

- Blendschutz: Ein Blendschutz ist im allgemeinen an temporären oder dauerhaften Arbeitsplätzen zur wetterunabhängigen Ermöglichung der Aufgabe erforderlich und mit TTV wegen der Zeitverzögerung bei der Eintrübung nur eingeschränkt gewährleistet.
- Sonnenschutz: Ein Sonnenschutz soll ein angenehmes, thermisches Raumklima gewährleisten. Der Schutz gegen die Blendwirkung der Sonne und das instantane Schalten sind nachgeordnet.
- 'leuchtende Fläche': Eine TTV könnte als 'leuchtende Fläche' in Abhängigkeit der Sonnenbestrahlung eingesetzt werden. Streuende Gläser werden in diesem Kontext bereits

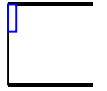
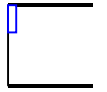
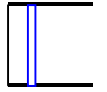
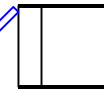
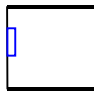
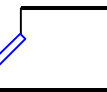
eingesetzt. Die TTV würde diese Funktion analog nur bei direkter Sonnenbestrahlung erfüllen.

Die Funktionen können mit unterschiedlicher Gewichtung auch in Kombination angestrebt werden.

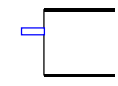
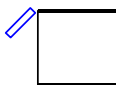
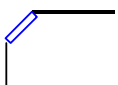
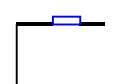
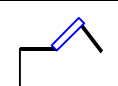
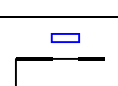
Eine grobe Einschätzung der Eignung des Objektes für den Einsatz einer TTV ist in den letzten Spalten gegeben. Es fließen gestalterische, funktionale, konstruktive und ökonomische Aspekte ein. Die gestalterischen Aspekte geben eine grobe Wertung in Bezug auf die Abstimmung des Einsatzes der TTV auf das Gesamtkonzept.

Bei funktionalen Aspekten wird die Möglichkeit der Erreichung der primär gewünschten Funktion bewertet. Im Allgemeinen wurden Konstruktionen ausgewählt, die keine oder nur geringfügige Anpassungen für den Einsatz einer TTV erfordern. Dadurch und durch die Eigenschaften von TTV ist die konstruktive Eignung a priori positiv.

Bei der ökonomischen Eignung wird lediglich die Notwendigkeit nach einem Blend- bzw. Sonnenschutz interpretiert: Gebäude, bei denen ein solcher nicht erforderlich ist, werden nicht zuletzt ökonomisch aufwendiger, bei vorhandenem Blend- oder Sonnenschutz führt der Einsatz einer TTV tendenziell zu Kostenreduktionen.

		Einbau-situation	Primäres Ziel			Eignung			
			Blendschutz	Sonnen-schutz	„leuchtende Fläche“	gestalterisch	funktional	konstruktiv	ökonomisch
Wand	Konferenzpavillon Weil am Rhein, D			●		●	●	●	
	Occidental Chemical Center Niagara Falls, U. S. A.			●			●	●	●
	Fachhochschule Kufstein, A		●	●		●	●	●	●
	Verwaltungsgebäude Stuttgart, D		●	●		●	●	●	●
	Wohnbebauung Amsterdam, NL			●		●		●	
	Verwaltungsgebäude Saint-Germain-en-Laye, F			●	●	●		●	

Tab. 7-1: Übersicht über die Projektbeispiele für den Wandbereich mit Zuordnung zur Einbausituation, dem primären Einsatz und der Bewertung der Eignung.

		Einbau-situation	Primäres Ziel			Eignung			
			Blendschutz	Sonnen-schutz	'leuchtende Fläche'	gestalterisch	funktional	konstruktiv	ökonomisch
Dach	Gymnasium Frejus, F			●			●	●	●
	Krankenhaus Berlin-Marzahn, D			●		●		●	
	Wohnhäuser Wien, A			●		●	●	●	
	Neue Messe Leipzig, D			●	●	●	●	●	●
	Bahnhof London, GB			●				●	
	Bürogebäude Hoofddorp, NL				●	●	●		●

Tab. 7-2: Übersicht über die Projektbeispiele für den Dachbereich mit Zuordnung zur Einbausituation, dem primären Ziel und der Bewertung der Eignung.

Anmerkung: Die ersten beiden Beispiele wurden im Sinne eines ‚Vordaches‘, das dritte als Beispiel für das Dach eines Wintergartens angeführt. (Abb. 4-1)

7.2 Thermotrope Verglasung (TTV) im Fassadenbereich

7.2.1 Konferenzpavillon in Weil am Rhein, D *Projektskizze (S. 210 ff., [SCHIT98])*

Architekten: Tadao Ando & Associates, Osaka, 1993

Bei dem zweigeschossigen Gebäude auf einem Wiesengelände inmitten von Kirschbäumen gelegen handelt es sich um das Konferenz- und Schulungsgebäude eines Büromöbelfabrikanten. Der strengen Gestaltung des Baukörpers mit Wänden aus Sichtbeton entspricht die reduziert ausgebildete Fassaden-Pfosten-Riegelkonstruktion. Der an das Foyer angrenzende Hof liegt unter dem Geländeniveau (Abb. 7-2). Andos Konferenzpavillon gilt als Beispiel für ein gelungenes Zusammenwirken der Materialien Glas und Beton.

Integrationskonzept

Zu Demonstrationszwecken wurde die obere Verglasungsfläche durch eine TTV als Sonnenschutz ersetzt (Abb. 7-2, Bildmontage rechts). Dadurch werden Bereiche des Foyers und der Treppenaufgang wetter- und jahreszeitabhängig beschattet. Bei bedecktem Himmel ist das Foyer in seiner ursprünglichen Form mit geschosshohem Außenbezug erhalten. Bei direkter Sonnenbestrahlung werden abhängig von der Sonnenhöhe unterschiedlich große Bereiche von Foyer und Treppenaufgang beschattet. Bei hohem Sonnenstand erreicht keine direkte Strahlung die Treppe, was den Nutzern während der warmen Jahreszeit entgegen kommt.

Der Einsatz einer TTV als Beschattung würde dem puristischen Gesamtkonzept des Gebäudes entsprechen. Die weichen Formen beim Über-



Abb. 7-2: Foyer des Konferenzpavillons in Weil am Rhein im ausgeführten Zustand (links) und mit TTV im oberen Fensterbereich (Bildmontage, rechts). (S. 211, [SCHIT98])

gang der TTV bewirken ein lebhaftes Bild innerhalb der klaren Struktur und führen zu einer abwechslungsreichen Modulation der Licht- und Schattenwirkung.

Während für die Nutzer im fensternahen Bereich des unteren Geschosses bei Eintrübung der TTV im wesentlichen lediglich der Sichtbezug zu Teilen des Himmels verloren geht, ist es für alle anderen Personen insbesondere auf dem Aufgang zum Obergeschoss der zu den erhöht liegenden Grünflächen.

Da das Gebäude im ursprünglichen Zustand ohne Beschattung auskommt, ist ein wesentlicher Aspekt bei der Diskussion um den Einsatz einer TTV die Abwägung zwischen der funktionalen Verbesserung durch die Beschattung und der Bewertung der zeitlich bzw. räumlich begrenzten Einschränkung des Bezuges nach Außen.

7.2.2 Occidental Chemical Center in Niagara Falls, U.S.A.

Projektskizze (S. 156 ff., [WIGG96])

Architekten: Canon Design mit Hellmuth Obata und Kassabaum, 1979-1980

Das 'Occidental Chemical Center' mit Blick auf die Niagara Fälle folgt zwei grundlegenden Zielsetzungen: „...ein extrem energie-effizientes...“ und „...ein hochtransparentes Gebäude... das aus seinem Standort mit herrlichem Blick ... Kapital schlagen sollte...“ (S. 156). Dazu wurde eine Doppelfassade mit einem 1.50 m Zwischenraum und dazwischen liegenden, beweglichen Sonnenschutz-/Isolierlamellen geschaffen. Die Außenhaut bildet eine Doppelverglasung, die Innenhaut eine Einfachverglasung. Die Lamellen dienen dem Sonnenschutz und können im geschlossenen Zustand Heizwärmeverluste vermindern (Abb. 7-2, oben).

Integrationskonzept

Die oberen beiden Bänder der inneren Verglasungsebene im Bereich des Zuganges zum mehrgeschossigen Foyer wurden mit einer TTV als Sonnenschutz belegt (Abb. 7-3, Bildmontage unten). Damit wird zusätzlich zu den Lamellen der Doppelfassade eine hohe Beschattungswirkung erzielt. Während der Ausblick auf Eingangsniveau des Foyers nicht beeinträchtigt ist, wird der Blickkontakt in die Höhe unterbrochen. Dies ist für den Treppenbereich weniger entscheidend, weil hier die Raumwirkung der Lamellen vorherrscht und diese bei direkter Sonne so eingestellt sind, dass auf der Treppe dann ohnehin keine oder nur eine eingeschränkte Durchsicht möglich ist. Durch die klimatischen Standortbedingungen (43° nördl. Breite wie Marseille, amerikanisches Kontinentalklima) ist eine häufi-

ger eingetrübte TTV zu erwarten. Eine reduzierte Variante, die den Ausblick aus dem unteren Foyer-Bereich wieder verbessern würde, wäre eine TTV Anordnung nur im obersten Bereich der Verglasung. Dies würde im Allgemeinen nur den hinteren Bereich, insbesondere den Empfangstresen beschatten.

Thermotrope Glaslamellen anstelle der opaken könnte dem gesamten Raum gerade bei eingetrübter TTV ein wesentlich helleres und gleichmäßigeres Beleuchtungsmilieu geben. An die Stelle der Strukturierung durch die Fassadenkonstruktion und die klare Licht- und Schattenwirkung tritt eine facettenreiche Modulation der Lichtwirkung.

Bei der Kombination der im FZR liegenden Lamellen mit einer innen liegenden TTV könnten fixe Lamellen mit größerem Abstand für einen vollständigen Sonnenschutz ausreichen (Abb. 6-3). Bei Wetterlagen mit diffusem Himmel würde ein höhere Transparenz erreicht. Bei eingetrübter TTV ist die transparent gehaltene Fläche derselben abhängig von der Sonnenhöhe und kann sehr unterschiedlich ausgedehnt sein. Die klare Struktur der Fassade und die individuelle Möglichkeit einer Regelung wären eingeschränkt. Das Schließen der Lamellen zur Verminderung der Wärmeverluste wäre nicht mehr möglich.



Abb. 7-3: Eingangshalle des „Occidental Chemical Center“, Niagara Falls, im ausgeführten Zustand (oben) und einer TTV im oberen Fensterbereich (Bildmontage, unten). (S. 159, [WIGG96])

7.2.3 Fachhochschule in Kufstein, A
Projektskizze (S. 777 ff., [DET602])

Architekten: Henke und Schreieck, Wien
Möglichkeiten von Energie- und Kosteneinsparung sollen als Thema des Fachhochschulgebäudes in Kufstein erkennbar sein. Dazu steht es den Studenten aktiv als Forschungsobjekt zu Verfügung. Der experimentelle Charakter ist vor allem an den unterschiedlichen Elementen in der Doppelfassade ablesbar. PC Übungsraum (Abb. 7-3) und Bibliothek sind geschosshoch verglast. Mit Hilfe von verschiedenen Lüftungsöffnungen soll eine bedarfsgerechte, individuelle und vorgewärmte natürliche Lüftung durch die Doppelfassade ermöglicht werden.

Integrationskonzept

Es wurden Teile der geschosshohen Verglasung mit den im FZR liegenden Jalousien des PC-Übungsraumes durch thermotrope Verglasungen ersetzt (Abb. 7-4, Bildmontage unten). Die Wirkung der TTV entspricht dem experimentellen Charakter des Gebäudes und führt den Wechsel zwischen Licht und Schatten fort. Unabhängig von der Anwesenheit der Nutzer beugt die TTV einer möglichen Überhitzung vor und beeinträchtigt den Ausblick bei diffusem Himmel nicht. Der Flächenanteil der TTV kann auf den Nutzerbedarf nach Bereichen mit individuell regelbarer Beschattung und der Notwendigkeit, Temperaturspitzen zu glätten, abgestimmt werden. In diesem Kontext stellt die Anordnung von selbstregelnden und individuell regelbaren Beschattungen einen Lösungsansatz dar, auf die lediglich die Anordnung der PC-Arbeitsplätze abgestimmt werden müsste. Diese würden vorzugsweise im Bereich der individuell regelbaren Jalousien, angeordnet. Die Beschattung hat im Gegensatz zu einer au-

tomatisierten neue Qualitäten und würde dem Thema der Energie- und Kosteneinsparung entsprechen.

Eine Option ist die Ausführung der Glaslamellen aus Sonnenschutzglas in Kombination mit einer TTV in der raumseitigen Verglasungsebene (vgl. Kap. 6). Die Sonnenschutzlamellen können in bestimmten Bereichen die Eintrübung der TTV verhindern und so durch die Drehbewegung 'regelbare' Durchsichtbereiche frei halten (Kap. 6). Ein entsprechendes, funktionales Prinzip könnte mit festen Verglasungen, die nur lokal eine Sonnenschutzbeschichtung besitzen, verwirklicht werden. Durchsichtbereiche wären dann nicht beeinflussbar und lediglich vom Sonnenstand abhängig. Darüber hinaus könnten die vorhandenen Glaslamellen durch thermotrope Lamellen ersetzt werden. Einerseits wird durch die drehbaren Lamellen ein Einfluss der Nutzer auf die Sichtbeziehung ermöglicht. Andererseits bestimmt die Belüftung des FZR die Temperatur im FZR und damit die der thermotropen Lamellen. Dadurch könnte der Eintrübungszustand beeinflusst werden. Ein ausreichender Blendschutz für Arbeitsplätze wäre aber nur bedingt gegeben.



Abb. 7-4: PC Übungsraum der Fachhochschule in Kufstein im ausgeführten Zustand (oben) und mit einer teilflächigen, geschosshohen TTV (Bildmontage, unten). (S. 781, [DET602])

7.2.4 Verwaltungsgebäude in Stuttgart, D

Projektskizze (S. 220 f., [SCHIT98])

Architekten: Behnisch und Sabatke, Stuttgart, 1996

Bei dem Verwaltungsgebäude handelt es sich um die Sanierung eines bereits 1969 durch dieselben Architekten erstellten Gebäudes. Es sollte „...ein angenehmes Raumklima mit möglichst geringem technischen Aufwand geschaffen werden, sowie gute Tageslichtverhältnisse und eine Fassade mit offenbaren Fenstern...“ (S. 220). Die äußere Schicht der zweischalig ausgeführten Fassade besteht aus geschossweise, stufenlos steuerbaren Glaslamellen. Im FZR befinden sich individuell steuerbare Sonnenschutz-Jalousien (Abb. 7-5). „...Die Verschiedenartigkeit der Fassadenelemente und die räumliche Tiefe lassen je nach Lichteinfall ein lebendiges, vielfältiges Bild des Gebäudes entstehen.“ (S. 220)

Integrationskonzept

Durch den Einsatz von Glas-TTV-Lamellen (Abb. 7-5, Bildmontage rechts) könnte ein Sonnen- evtl. auch ein Blendschutz anstelle der im FZR liegenden Jalousien im Sinne eines geringeren technischen Aufwandes gewährleistet und das „lebendige, vielfältige Bild des Gebäudes“ (S. 220, [SCHIT98]) zusätzlich akzentuiert werden. Durch die stufenlose Verstellbarkeit der Lamellen ist eine optimierte Steuerung auf möglichst gute Beschattungswirkung bei maximaler Sichtbeziehung möglich, die allerdings geschossweise erfolgen würde. Eine z.B. raumweise Steuerung würde das Bild der durchgehenden Glaslamellen unterbrechen. Gerade dadurch könnten weitere Akzente gesetzt werden. Bei geschlossener Lamellenstellung ist durch den mit normalen Glaslamellen bedeckten, unteren Fensterbereich der



Abb. 7-5: Verwaltungsgebäude in Stuttgart im ausgeführten Zustand (links) und mit eingetrübten TTV Glaslamellen im oberen Fensterbereich (Bildmontage, rechts). (S. 220, [SCHIT98])

Sichtkontakt möglich. Die Zahl der thermotrop ausgeführten Lamellen (Flächenanteil) könnte auf die Größe des FZR und die Position der Arbeitsplätze abgestimmt werden (ausreichende Schattwirkung für den Raum?).

Als alleiniger Blendschutz wären die TTV Lamellen in der äußeren Haut der Fassade nicht geeignet, weil sie saisonal abhängig von der Außentemperatur eintrüben. Deswegen müsste darüber hinaus in Arbeitsplatzbereichen ein einfacher, individuell einstellbarer Blendschutz vorgesehen

werden. Dieser kann auch innenliegend z.B. in Form einfacher Tischrollos ausgeführt werden. Die Trennung der Blend- (sehr einfach, regelbar) und Sonnenschutzfunktion (selbstregelnd) ist ein gangbarer Weg, die impliziten Möglichkeiten einer TTV ohne Nachteile für den Blendschutz zu nutzen.

7.2.5 Wohnbebauung in Amsterdam, NL

Projektskizze (S. 206 ff., [SCHIT98])

Architekten: Hans Kollhoff, Berlin, und Christian Rapp, Berlin/Amsterdam, 1994

Die Wohnbebauung in Amsterdam besteht aus über 300 Wohnungen und ist Teil eines neuen Stadtquartiers. „Sorgfältig detailliertes Sichtmauerwerk prägt zusammen mit den Lochfassaden und den typisch als Bänder durchlaufenden Wintergartenfenstern an der Südfassade die äußere Erscheinung.“ (S. 206) Von dem kleinteilig gegliederten, einfach verglasten Wintergartenfenster ist das untere Drittel fest verglast, das darüber liegende Fenster lässt sich mittels eines vertikalen Faltmechanismus öffnen. (Abb. 7-6, links)

Integrationskonzept

Der faltbare Bereich des Fensters wurden durch eine TTV ersetzt (Abb. 7-6, Bildmontage rechts). Das Beispiel wurde insbesondere deswegen angeführt, weil es die Möglichkeiten der vertikal dreifachen Fenstergliederung (transparente und transluzente Bereiche) und die funktionale Erweiterung durch den Öffnungsmechanismus für den Einsatz einer TTV verdeutlicht. Durch die Belegung der oberen zwei Drittel der Verglasung mit TTV bleibt der untere Bereich immer für einen Sichtkontakt erhalten. Die erzielbare Beschattung hinsichtlich des Sonnenschutzes ist in diesem Kontext ausreichend. Durch die TTV mit Klappmechanismus wird zum einen das lebendige Fassadenbild (S. 206, [SCHIT98]) zusätzlich akzentuiert werden. Die im Falle direkter Sonneneinstrahlung unterschiedlich eingetrübten Gläser, mit Spiegelbildern in transparenten Teilflächen und unterschiedlich geöffneten Fenstern beleben das Fassadenbild zusätzlich.

Zum anderen besteht die Möglichkeit die TTV

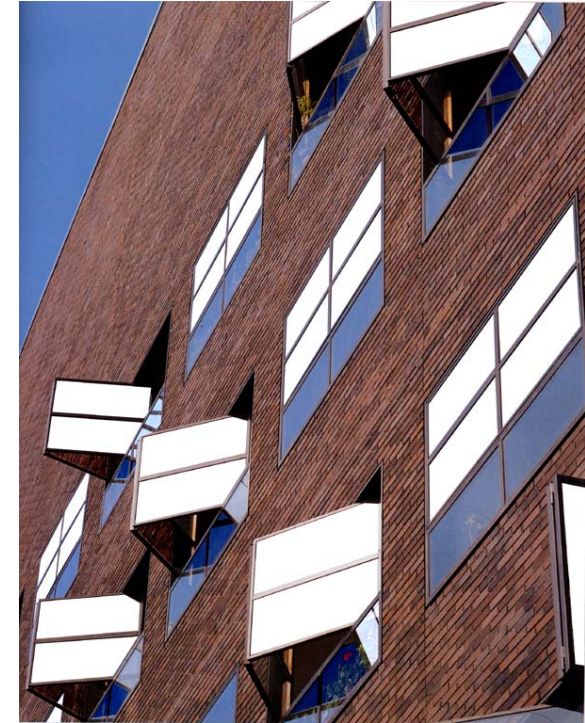
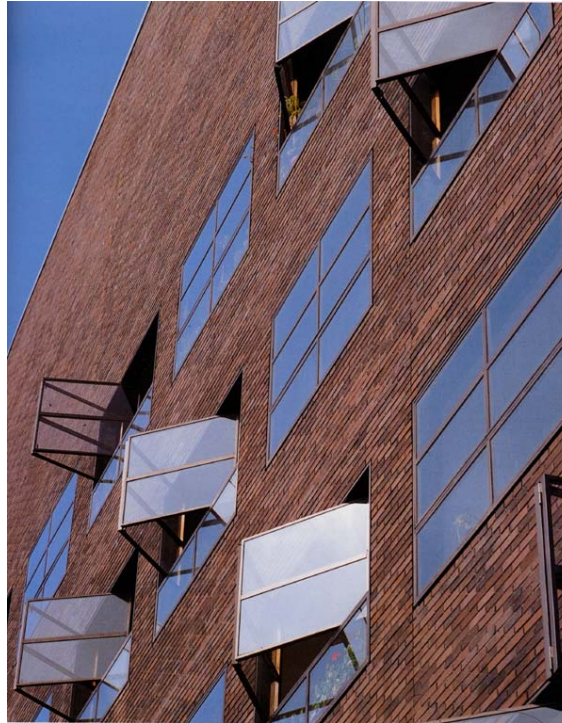


Abb. 7-6: Wohnbebauung in Amsterdam im ausgeführten Zustand (links) und mit einer TTV in den oberen zwei Dritteln der Wintergartenverglasung (Bildmontage, rechts). (S. 209, [SCHIT98])

funktional zu erweitern. Durch das Ausklappen der TTV-Fenster in Richtung der Sonne kann bei vergleichbarer Schattenwirkung der Sichtbezug erweitert werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit durch den Schattenwurf des der Sonne zugewandten Fensters die andere Fensterhälfte transparent zu halten. Dadurch entstehen zusätzliche Sichtbereiche. Für den Fall, dass die Beschattung nicht benötigt oder erwünscht ist, besteht die Möglichkeit, sie vollständig zur Seite zu schieben. Dies ist wegen der Auskühlung des Wintergartens während der kalten Jahreszeit nicht ohne weiteres möglich. Dem kann aber

durch die Eintrübungstemperatur Rechnung getragen werden: Wird diese bei 30°C – 35°C gewählt, so ist in den Breiten von Amsterdam eine Eintrübung im Winter als eher unwahrscheinlich anzunehmen.

7.2.6 Verwaltungsgebäude in Saint-Germain-en-Laye, F

Projektskizze (S. 53 f., [SCHIT98])

Architekten: Brunet und Saunier, 1996

Das Foyer der städtischen Verwaltung von Saint-Germain-en-Laye wurde im Inneren mit Glaswänden ausgeführt, um einen möglichst ungestörten Sichtkontakt innerhalb des gesamten Raumes zu gewährleisten. Ebenfalls in geschosshohem Glas ausgeführt ist die geneigte Fassade zum runden, bepflanzten Innenhof. Die Beschattung des verglasten Dachbereiches wird durch transluzente Gewebepaneele erreicht. (Abb. 7-7, oben)

Integrationskonzept

Zu Demonstrationszwecken wurden Teile der Verglasung zum Innenhof mit einer TTV belegt (Abb. 7-7, Bildmontage unten). Die Einfluss auf den Raum kann mit der Wirkung im Dachbereich verglichen werden und könnte somit das Gesamtkonzept erweitern. Das Beispiel zeigt die Wirkung der TTV bei Besonnung als ‚leuchtende Fläche‘ aufgrund der Lichtstreuung. Durch die Eintrübung der TTV und die daraus resultierende, gleichmäßige Lichtverteilung entsteht ein den Raum auch in seiner Tiefe aufhellendes Bauelement.

Ein weiterer Effekt ist das Wandern dieser leuchtenden Fläche mit dem Sonnenstand durch den Raum: Durch die unterschiedlichen Orientierungen der Glaselemente zur Sonne werden nicht alle gleichzeitig transluzent. Dieses Wechselspiel und der indirekte Bezug zur Bewegung der Sonne könnte gestalterisch ein reizvolles Thema sein. Problematisch ist die Schwierigkeit einer verlässlichen Vorhersage für eingetrübte Bereiche.

Die Unterbrechung des Sichtkontaktes zum begrünten Innenhof für Bereiche des Foyers bedeutet eine spürbare Einschränkung.



Abb. 7-7: Foyer der Städtischen Verwaltung in Saint-Germain-en-Laye im ausgeführten Zustand (oben) und mit einer eingetrübten TTV zum Innenhof (Bildmontage, unten). (S. 54, [SCHIT98])

7.3 Thermotrope Verglasung (TTV) im Dachbereich

7.3.1 Gymnasium in Frejus, F

Projektskizze (S. 82 f., [HER96])

Architekten: Sir Norman Foster, London, 1991-1993

Das Gymnasium in Frejus wurde auf einer Anhöhe mit schönem Blick auf das Meer errichtet. Es nutzt Techniken der traditionellen, arabischen Architektur zur Lüftung und Luftkühlung. 'Brise-soleil' aus gekrümmten Lochblechen werden auf der Südseite zur Beschattung eingesetzt (Abb. 7-8, links). Es wurde als Beispiel für ein Vordach hier aufgeführt.

Integrationskonzept

In Abb. 7-8 (rechts) wurden die Lochbleche der 'Brise-soleil' durch TTV ersetzt. Die frei im Außenraum gelagerten TTV-Flächen lassen eine gute und bedarfsgerechte Beschattungswirkung erwarten. Bei kalten Tagen oder diffusem Himmel ist ein freier Blick auch Richtung Himmel möglich, allerdings auch kein Blendschutz für die angrenzenden Schulräume gegeben. Der ursprünglich durch die Lochbleche spürbare Schutz des vorge-lagerten Außenraums wird reduziert. Bei den häufig hohen Temperaturen und dem sonnigen Wetter in dieser Region wird die Eintrübung zügig erfolgen und häufig ganztags erhalten bleiben. Unterstützt wird dieser Effekt noch durch Reflexionen zwischen Oberseite und Unterseite benachbarter TTV Lagen.

Durch die TTV und ihr Erscheinungsbild bei der Eintrübung wird die klare Zeichnung der metallischen Konstruktion kontrapunktiert. Die Leucht-wirkung der eingetrübten TTV gibt dem Außen-raum eine aufgehellte, freundliche Wirkung bei



Abb. 7-8: Gymnasium in Frejus im ausgeführten Zustand (links) und nach Ersatz der vorgelagerten Beschattungsbleche durch eine eingetrübte TTV (Bildmontage, rechts). (S. 83, [HER96])

gleichzeitiger Beschattung. Allerdings ist sowohl für den Außenbereich als auch vom Gebäudeinneren der Blick in den Himmel eingeschränkt. Die bei Erwärmung der Bodenbereiche entstehenden, angenehmen Luftströmungen werden durch den Einsatz einer vollständig geschlossenen Fläche reduziert. Die genaue Vorhersage des Eintrübungsverhaltens ist durch die Nutzung des vorgelagerten Außenraums als vorübergehender Aufenthaltsbereich mit ausreichendem Sichtbezug zur Umgebung weniger von Bedeutung.

7.3.2 Krankenhaus in Berlin-Marzahn, D

Projektskizze (S. 39 ff., [HOP97])

Architekten: Karl Schmucker und Partner,
Mannheim, 1992

Das Krankenhaus Berlin-Marzahn liegt in dem mit prächtigen Bäumen bestandenen Park. Das Entwurfskonzept sieht eine Integration der neuen Bauanlage in die Parklandschaft vor. Über den Haupteingang erreicht man die „transparent umhüllte Hauptstraße“ (S. 39) entlang der Vegetationsachse inmitten der beiden Gebäudehälften. Insbesondere das weit ausladende Stahl-Glas Vordach am Haupteingang (Abb. 7-9) der Magistrale steht in einem spannungsreichen Wechselspiel mit dem Sichtmauerwerk der Gebäude.

Integrationskonzept

In Analogie zu den schattenspendenden Bäumen des Parks, deren Schattenwurf mit der Sonne wandert und bei z.B. Windbewegungen sich ständig verändert, könnte ein sich häufig wandelndes TTV-Vordach den Übergang vom Park in einen, von geometrischen Formen dominierten, Baukörper bilden.

In Abb. 7-9 (Bildmontage rechts) wurde der Schattenwurf eines eingetrübten TTV-Vordaches wieder gegeben. Durch das Vordach würde der Haupteingang bei entsprechender Sonnenstrahlung in Schatten getaucht. Durch die TTV-Eintrübungstemperatur und den beidseitigen Kontakt des Vordaches mit der Außenluft würde eine Eintrübung tatsächlich nur dann erfolgen, wenn hohe Lufttemperaturen kombiniert mit direkter Sonne einen Schattenwurf wünschenswert machen.

Bei bestimmten Wetterlagen könnte sich evtl. sogar der Schattenwurf der Bäume (siehe Bildvordergrund) auf dem Vordach durch transparen-



Abb. 7-9: Krankenhaus Berlin-Marzahn im ausgeführten Zustand (links) und nach Ersatz der Verglasung im Eingangsbereich durch eine eingetrübte TTV (Bildmontage, rechts). (S. 39, [KLEM97])

te Bereiche der TTV abzeichnen (Kap. 6) und dadurch den Kontext zum Park noch deutlicher machen. Das TTV-Vordach würde dann gerade im ganz oder teilweise eingetrübten Zustand einen sanften Übergang von den Bäumen des Parks ins Gebäudeinnere bewirken.

7.3.3 Wohnhäuser in Wien, A

Projektskizze (S. 60 f., [HER96])

Architekten: Arge – Martin Trebersburg, Georg Reinberg, Erich Raith, Wien 1988-91

Bei den Wohnhäusern handelt es sich um die Siedlung Stadlau am Stadtrand von Wien in der Umgebung von größtenteils im Selbstbau errichteten Häusern. Die Gebäude sind zur Erreichung eines niedrigen Energieverbrauchs streng zониert: Eine Nordzone mit Erschließungen und Versorgungseinrichtungen, eine Mittelzone mit Wohn- und Schlafräumen, sowie eine südliche Sonnensammel- und Beschattungszone (Abb. 7-10). Die passive Nutzung der Sonnenenergie erfolgt u.a. durch die gezielte Nutzung der im Wintergarten vorgewärmten Luft: Automatisch geregelte Lüftungsklappen erlauben in Abhängigkeit von Tag/Nacht bzw. Sommer/Winter die Führung der vorgewärmten Luft aus dem Wintergarten in die Wohnräume, nach außen oder hält sie im Raum.

Integrationskonzept

Der Lüftungsmechanismus ist der einzige Schutz des Wintergartens gegen zu hohe Temperaturen. Bei den verwendeten Lüftungsquerschnitten ist eine unerwünscht hohe Erwärmung zumindest temporär nicht ausgeschlossen. Durch den Einsatz einer TTV im Dach des Wintergartens könnten diese Fälle noch wesentlich entschärft werden (Abb. 7-10, unten). Allerdings müssten zumindest bei den achteiligen Dachverglasungen Teilbereiche mit normalem Glas vorgehalten werden, um von den dahinter liegenden Räumen eine - wenn auch eingeschränkte - Durchsicht zu ermöglichen.

Die eingetrübte TTV ist in ihrer Wirkung mit einer

weißen Markise zu vergleichen. Durch die Möglichkeiten der Lüftungsführung würde die TTV auch lediglich nur dann aktiviert, wenn die Temperatur des Wintergartens im oberen Bereich tatsächlich über einen bestimmten Maximalwert steigt. Nur dann würde die Situation durch die Eintrübung entschärft. Darüber hinaus könnte die gezielte Belüftung aber auch dazu dienen, die TTV in ihrem Schaltverhalten zu beeinflussen: Durch Abführen von Luft unterhalb der Eintrübungstemperatur würde die TTV gekühlt und damit zurück geschaltet.

Von der gewählten Schalttemperatur der TTV hängt es ab, ob diese Rückschaltung auch energetisch sinnvoll erfolgen kann. Eine Temperatur, die die Rückschaltung erreichen soll, muss immer im Bereich oder wenig oberhalb einer als angenehm empfundenen Raumlufttemperatur liegen. So kann z.B. bei einem nominalen Maximalwert der Raumlufttemperatur von 26°C eine TTV mit Eintrübungstemperatur 35°C 'gekühlt' werden.



Abb. 7-10: Siedlung Stadlau in Wien im ausgeführten Zustand (oben) und mit einer TTV teilflächig in der Überkopfverglasung des Wintergartens (Bildmontage, unten). (S. 61, [HER96])

7.3.4 Neue Messe Leipzig, D
Projektskizze (S. 300 ff., SCHIT98)

Architekten: von Gerkan, Marg + Partner, Aachen/Leipzig

Dem Entwurf der Neuen Messe Leipzig liegt die Idee einer weiträumig durchgrünten, künstlichen Parklandschaft zu Grunde. Das Zentrum der Anlage bildet die große lichtdurchflutete Glashalle, die dem Empfang, der Orientierung und der Erschließung dient und in ihrer Formensprache das Motiv der großen mit Bogenbindern überspannten Bahnhofshalle des 19. Jahrhunderts aufnimmt. Die Tragkonstruktion besteht aus Gitterrohrträgern und einer davon abgehängten Sekundärstruktur aus Stahl. Von dieser ist die Glashaut als raumabschließende Schicht abgehängt. Das Problem der Überhitzung im Sommer wird einzig durch natürliche Lüftung (Frischluftzufuhr im Bodenbereich bis 2.50 m Höhe und Auslass der erwärmten Luft über gläserne Öffnungsflügel im Dachfirst) und eine keramische Glasbedruckung (Abb. 7-11) im kritischen Bereich der Sonnenstrahlung begrenzt. An besonders heißen Tagen werden die Glasflächen durch eine äußere Sprinkleranlage mit entkalktem Wasser besprüht, wodurch Verdunstungskälte entsteht.

Integrationskonzept

Die gewünschte hohe Transparenz der Glashalle würde durch den Einsatz einer TTV anstelle der keramisch bedruckten Gläser für Wetterlagen mit diffusem Himmel noch gesteigert. Für den Fall, dass die natürliche Lüftung nicht ausreicht und zu hohe Temperaturen auftreten, würde die Eintrübung der TTV (Abb. 7-11, unten) die Einstrahlung deutlich reduzieren und gleichzeitig durch die hohe Streuwirkung eine leuchtende Fläche in der Gebäudehülle bilden. Unter Umständen könnte

die TTV eine Besprühung der Scheiben ersetzen.

Fraglich ist allerdings grundsätzlich der Einsatz einer TTV in einer Messehalle. Je nach Nutzung kann auch das gezielte und instantane Abdunkeln bei diffusem Himmel erforderlich sein.

Im vorliegenden Beispiel ohne regelbare Beschattung könnte sie also durchaus in Erwägung gezogen werden und raumklimatisch eine Verbesserung bedeuten. Schwer vorher zu sagen ist der Einfluss des Tragwerkes (15 % Bedeckung der bestrahlten Fläche) auf transparente und transluzente Bereiche der TTV.

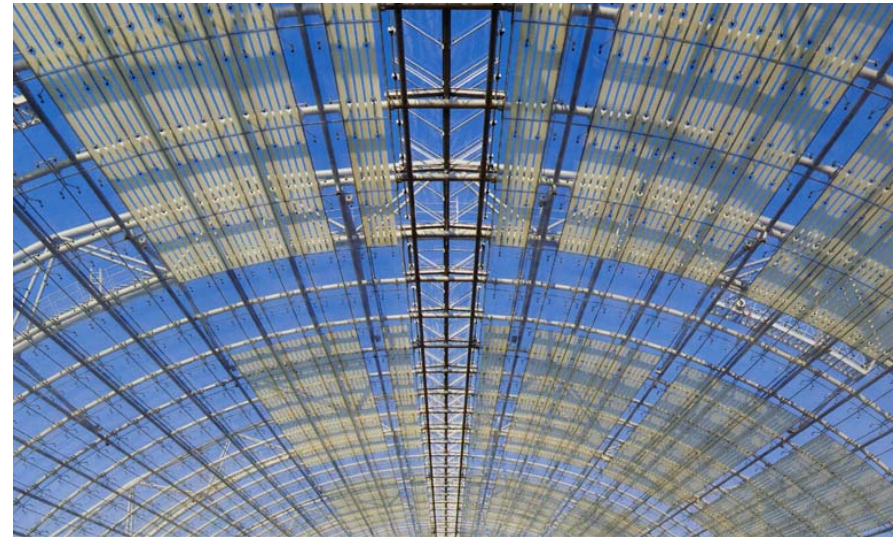


Abb. 7-11: Neue Messe Leipzig im ausgeführten Zustand (oben) und mit einer TTV in der Überkopfverglasung des Wintergartens (Bildmontage, unten). (S. 302, [SCHIT98])

7.3.5 Bahnhof in London, GB

Projektskizze (S. 190 ff., WIGG96)

Architekten: Nicholas Grimshaw and Partners, London, Nick Grimshaw, Neven Sidor, David Kirkland und Ursula Heinemann, 1994

Der Waterloo International Terminal – der Kopfbahnhof der Kanaltunnellinie – knüpft an die Tradition der englischen Bahnhofshallen des 19. Jahrhunderts an. Die beengten städtischen Verhältnisse am Rande des alten Bahnhofs lösten die Architekten mit einer ca. 400 m langen, schlängelförmig dem Verlauf der Schienen folgenden Anlage. Während sich bei der Dachfläche hin zur alten Bahnhofshalle geschlossene Felder mit Oberlichtbändern abwechseln ist die steilere mit westlicher Orientierung vollkommen transparent. (Abb. 7-12) Die Verglasung wurde schuppenförmig und mit Krümmungen in zwei Richtungen ausgeführt.

Integrationskonzept

Das eingefügte TTV-Segment auf der steileren Westseite wirft nachmittags bis abends bei direkter Sonne und entsprechenden Temperaturen einen Schatten auf den Bahnsteig (Abb. 7-12, Bildmontage unten). Dieser Schatten wandert in Abhängigkeit des Sonnenstandes über die Breite des Bahnsteiges und bietet Schutz gegen die Strahlung. Zugreisende können während ihrer Wartezeit zwischen beschatteten und besonnten Bereichen wählen. Durch die normal verglasten Segmente ist der Ausblick auf die Umgebung und den Himmel gewährleistet. Der bandartige Wechsel von transparenten mit transluzenten Verglasungssegmenten lehnt sich an die Gliederung der flacheren Ostseite mit dem Wechsel ebenfalls bandartiger geschlossener und offener Felder

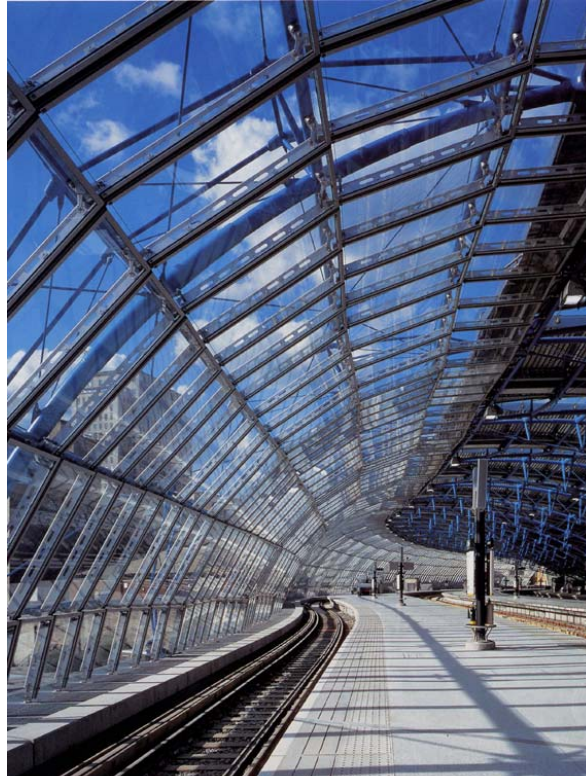


Abb. 7-12: Waterloo International Station in London im ausgeführten Zustand (links) und mit eingetrübter TTV bei einer Sektion der Überdachung (Bildmontage, rechts). (S. 191, [WIGG96])

quer zu den Gleisen an.

Der transparente Charakter des Gebäudes und die Erfahrbarkeit verschiedener Wetterlagen kann durch die TTV neu akzentuiert werden. Analogien ergeben sich beim vorherrschenden, wechselhaften Klima durch den Schattenwurf vorbeiziehender Wolken mit einer in sehr unterschiedlichen Formen und Strukturen vorliegenden TTV während Eintrübungs- bzw. Aufklarungsphasen und dem daraus resultierenden Schattenwurf.

7.3.6 Bürogebäude in Hoofddorp, NL

Projektskizze (S. 57 ff., [HOP97])

Architekten: van Tillburg en partners, Rotterdam, 1997

Das Bürogebäude des Reiseunternehmens 'Vrij Uit' in Hoofddorp wurde zwischen der Bahnlinie Leiden-Schiopol und der van Heuven Goethardlaan mit einem linsenförmigen Grundriss in Anlehnung an die Form eines Schiffes erbaut. Die Form sollte Aufmerksamkeit für das weithin sichtbare Bauwerk erzielen und die stereotypen Bauformen üblicher Häuser durchbrechen. Großflächige Verglasungen sollen Transparenz und weitgehende Offenheit vermitteln. Der linsenförmige Baukörper aus einem rötlichen Naturstein und den Aluminium verkleideten Fenster- und Fassadenkonstruktionen ist mit einem verglasten Deck für Freizeit und Erholung ausgestattet und soll mit dem „fast davon fliegenden Flügel“ (S. 57) auf dem Dach die „Freiheit in der Freizeit“ (S. 60) symbolisieren (Abb. 7-13). Der Flügel ist mit perforiertem Stahl ausgeführt.

Integrationskonzept

Durch eine TTV an Stelle des perforierten Stahlflügels auf dem Dach (Abb. 7-13, unten) könnte die angestrebte Bewegtheit der Konstruktion mit ihrer Signalwirkung noch gesteigert werden. Die zahlreichen möglichen Erscheinungsformen der TTV abhängig von Wetterlage, Temperatur und Sonnenstand könnten in diesem Kontext einen abwechslungsreichen Inhalt vermitteln. Die bei entsprechender Sonne weithin sichtbare weiße TTV könnte einer Analogie zur Gischt rollender Wellen oder zu weißem Segeltuch herstellen und würde zudem gegebenenfalls angenehmen Schatten spenden. Die Wirkung wäre hier vorrangig bildhaft und erst nachgeordnet funktional.



Abb. 7-13: Reiseunternehmen in Hoofddorp im ausgeführten Zustand (oben) und mit einer TTV im „Flügel“ (Bildmontage, unten). (S. 57, [HOP97])

7.4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurden auf die Einsatzmöglichkeiten einer TTV an verschiedenen gebauten Beispielen im Wand- oder Dachbereich aufgezeigt und visualisiert. Die TTV könnte dabei unterschiedliche Funktionen erfüllen:

- Blendschutz (nur sehr bedingt)
- Sonnenschutz
- leuchtende Fläche

Entscheidend für den Einsatz ist immer der bauliche Gesamtkontext bzw. das gestalterische Leitmotiv unter dem das Gebäude entworfen wurde.

Maßgebliche Einschränkung ist der Verlust des Sichtkontaktes für Gebäudeflächen oder Teilflächen im eingetrübten Zustand. Dieser kann aber auch in Analogie zu anderen Segmenten mit Wechsel von opaken und transparenten Elementen stehen.

Die im Vergleich zu normaler Verglasung mit Verschattungssystemen konstruktiv einfache und kostengünstige Verwendung einer TTV legt Konzepte nahe, die

- TTV als Sonnenschutz oder
- separate Blend- (regelbar) und Sonnenschutzsysteme (selbstregelnd)

vorsehen. Ein individuell regelbarer Blendschutz kann dann sehr einfach und räumlich begrenzt ausgeführt sein kann.

Da das reale Schaltverhalten der TTV in der Praxis von sehr vielen Faktoren abhängig ist, ist eine zuverlässige Vorhersage für mögliche, auftretende Situationen schwierig (vgl. auch Kap.7.1.2). Jedes baulich anders geardete Umfeld wirkt sich unterschiedlich aus und kann selten einfach ab-

geschätzt werden. Deswegen müsste für die Praxis ein Verfahren gefunden werden, um mehr Sicherheit über geeignete Parameter (TTS, Glas-kombinationen, Einbausituation) zu geben. Bei Sanierungen könnte z.B. der Aufbau von Prototypen in der realen Situation vor der vollständigen Sanierung sinnvoll sein. Bei neuen Gebäuden ist diese Vorgehensweise mit zusätzlichem Aufwand und Zeitverzögerungen verbunden.

Die generelle Akzeptanz der fließenden Übergangszustände und der optischen Wirkung einer TTV ist nicht ohne Weiteres abzuschätzen.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurden experimentell und mit Werkzeugen der Visualisierung Möglichkeiten untersucht, thermotrope Schichten (TTS) als Bestandteil einer thermotropen Verglasung (TTV) in lichtdurchlässige Teile der Gebäudehülle zur Energie- und Komfortoptimierung zu integrieren. In einem interdisziplinären Arbeitsfeld (Architekt-Ingenieur-Physiker) wurde ein methodischer Ansatz gewählt, der das Bindeglied zwischen naturwissenschaftlich-technischer Grundlagenforschung (z.B. an thermotropen Schichten) und einer gesamtheitlichen und anwendungsbezogenen Entwicklungsarbeit dienen soll. Deswegen lag neben der experimentellen Messung und Auswertung der Schwerpunkt in der Untersuchung der räumlich-gestalterischen Wirkung verschiedener Konzepte. Die wieder gegebenen visuellen Eindrücke sind Basis für die individuelle Beurteilung und die Entwicklung weiter führender Ideen und Konzepte.

Die Strahlung der Sonne durch lichtdurchlässige Teile der Gebäudehülle zu Beleuchtungs- und Heizzwecken, sowie für einen hohen Raumkomfort zu nützen, ist die direkte und effiziente Art der Sonnenenergienutzung. Fensterflächen können bei gut wärmegeprägten Gebäuden ausreichen um den Heizenergiebedarf ganz oder zum größten Teil zu decken. Ferner sind der Bezug zur Außenwelt mit den klimatischen und zeitabhängigen Wetterverhältnissen und/oder die Auflösung der klaren Trennung zwischen 'Innen' und 'Außen' wichtige Aspekte bei zahlreichen Bauvorhaben.

In diesem Zusammenhang ist der variable g-Wert eine Kernforderung zur Sicherstellung des Komforts während jahreszeitabhängiger Wetterbedingungen in vielen Klimaregionen. Aufgrund ihrer

Systemmerkmale besitzen TTV eine hohe Attraktivität, insbesondere wegen der Alternative zu häufig sehr aufwendigen Beschattungssystemen und im Hinblick auf 'klima-aktive' oder 'selbst-adaptive' Gebäudehüllen.

Thermotrope Schichten haben ein temperaturabhängiges Streuverhalten für Strahlung: Während sie unterhalb einer Schalt- oder Eintrübungstemperatur transparent sind, werden sie oberhalb derselben transluzent bzw. reflektierend. Eine etwa 1 mm dicke Schicht lässt sich in beliebige Verglasungen integrieren und erfüllt dadurch funktional, konstruktiv, ökonomisch und ökologisch zahlreiche Anforderungen an fassadenintegrierte Regelungssysteme. Die grundsätzlichen Vorteile sind:

- keine aktive Regelungstechnik erforderlich
- keine beweglichen Teile
- keine zusätzliche Wartung
- keine Betriebskosten
- Verfügbarkeit 100%
- einfache Integration in gängige Glassysteme
- höhere Verglasungsanteile ohne Überhitzung möglich
- keine Sichtbeeinträchtigung im ungeschalteten d.h. transparenten Zustand.
- unabhängig von der Gebäudeorientierung
- im Prinzip unabhängig von der geografischen Breite (Sonnenstand)
- bei Großserien potentiell kostengünstig
- für Gebäudesanierungen geeignet
- ökologisch vielen anderen Beschattungen überlegen

Schlüsselfragen in diesem Zusammenhang sind die visuelle Wirkung von TTV, die Auswirkungen der selbstregelnden Eigenschaften ohne Mög-

lichkeit einer individuellen Einflussnahme und die Einschränkungen bei der Integration durch die Unterbrechung der Sichtbeziehung beim Wechsel von transparent zu transluzent und im eingetrübten Zustand.

Die Forderung nach einer Sichtbeziehung nach außen kann entweder mittels Kombinationen mit transparenten Glasbereichen (z.B. Kap. 5.3, 5.4, 5.5) oder mit Mechanismen zur Erhaltung transparenter Bereiche innerhalb der TTV (Kap. 6) erfüllt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass transparente Bereiche potentielle Blendquellen darstellen, sofern für diese nicht ein alternativer Blendschutz vorgesehen wird.

Es wurden folgende Anordnungen mit thermotropen Mustern der Firma Affinity Ltd., Japan, experimentell untersucht:

- im Fassadenbereich (Kap. 5.2/5.3)
- in horizontalen bzw. geneigten Auskragungen (Kap. 5.4)
- unter der Nutzung des Schattenwurfs von vorgelagerten, bedruckten Gläsern bei Doppelfassaden zum Erhalt von transparenten Bereichen innerhalb der TTV (Kap. 6)

Darüber hinaus wurden folgende Varianten diskutiert und teilweise visualisiert:

- horizontale thermotropen Glaslamellen
- vertikale thermotrope Glaslamellen
- Nutzung unterschiedlicher Orientierungen TTV
- Nutzung unterschiedlicher Eintrübungstemperaturen bei der Anordnung von TTV
- wendbare TTV (drehbar oder gedreht einbaubar)

Zusätzliche Bewegungsmechanismen können eine indirekte Einflussnahme ermöglichen und dadurch das Spektrum der Anwendungsbereiche erweitern. (Kap. 5.5) Allerdings werden dadurch generelle Vorteile relativiert und steht die TTV in Konkurrenz zu zahlreichen alternativen, regelbaren Beschattungen.

In Kontakt mit einer über das Jahr konstanteren Temperatur (z.B. Raumluft) ist eine TTV - mit der Einschränkung der fehlenden Regelbarkeit - auch als Blendschutz geeignet. Die hohe Streuwirkung im trüben Zustand vermindert Kontraste im Raum und entschärft potentielle Blendquellen. Im Kontakt mit einer stark von der Jahreszeit abhängigen Temperatur (z.B. Außenluft) wirkt die TTV als Sonnenschutz: Nur bei höheren Temperaturen ist die Erwärmung durch die Bestrahlung zur Aktivierung der TTV ausreichend. Die Tageslichtnutzung wird durch die TTV unterstützt: Im klaren Zustand ist keine Beeinträchtigung sichtbar (dies gilt zumindest für die im Experiment verwendeten Prototypen), im streuenden Zustand ist die Tageslichtnutzung durch die Versorgung mit gestreutem und dadurch blendfreiem Licht gewährleistet.

Ein Kernaspekt ist die Frage, wo und in welchem Maße der Nutzer Einfluss haben darf/soll und wo der Nutzereinfluss reduziert werden kann. Daraus ergeben sich Bereiche für den potentiellen Einsatz einer TTV. Einerseits steigern Möglichkeiten einer individuellen und in ihrer Wirkung nachvollziehbaren Einflussnahme das Wohlbefinden und das Bewusstsein für resultierende Konsequenzen beim Umgang mit Regelungssystemen, andererseits ist das Nutzerverhalten in der Praxis kaum vorhersagbar und immer wieder der Grund für hohe Energieverbräuche (Heizung, Kühlung, Licht) und Komfortbeeinträchtigungen. Deswegen bietet sich die Nutzung thermotroper Verglasung

als Sonnenschutz und zur Entschärfung von Blendproblematiken in Verbindung mit einem einfachen, individuell regelbaren Blendschutz insbesondere im nahen Umfeld von dauerhaft besetzten (Bildschirm-)Arbeitsplätzen an. In vielen anderen nicht dauerhaft besetzten Bereichen (Durchgangsbereiche, Pufferzonen, Räume mit spezieller Nutzung) mit hohem Verglasungsanteil sind TTV funktionale und gestalterische Alternative. Weiterhin bieten sich Bereiche an, in denen der Sonnenschutz nicht in Erscheinung treten soll, weil er z.B. sich nicht ohne weiteres in das Konzept der Fassadengliederung einfügt oder nur selten oder kurzzeitig benötigt wird.

Durch ihre spezifische visuelle und regelungstechnische Wirkung ist eine Abstimmung auf das gestalterische bzw. funktionale Konzept eines Gebäudes wichtig. In Kap. 7 wurden an Gebäudebeispielen Randbedingungen erörtert, die für oder gegen den Einsatz einer TTV sprechen.

Trotz des primär sehr einfachen Bauteils TTV hängt das Verhalten in einer konkreten Einbausituation von vielen Faktoren ab, die in zahlreichen Kombinationen auftreten können:

- Klimatische Bedingungen und deren Dynamik
- Einbausituation (Ort, Konstruktion)
- Bauliche Umgebung
- Verwendete Glaskombinationen und deren physikalische Eigenschaften
- Verwendete TTS und deren physikalische Eigenschaften

Dadurch wird einerseits eine korrekte Vorhersage möglicher Zustände (Form, Zeitverhalten) für konkrete Einbausituationen, andererseits die Wahl für eine dauerhaft entsprechend herrschender Anforderungen funktionierende TTS, richtige

Glaskombinationen etc. schwierig. Im Hinblick auf die Anwendung in der Praxis gilt:

- Primär sollten einfache Anwendungen von TTV mit einer gewissen Toleranz der Nutzer für die auftretenden Schaltzustände favorisiert werden.
- Es müssen einfache Rahmenbedingungen für die Vorhersage der TTV im baulichen Kontext erarbeitet werden (z.B. maximale bzw. minimale Raum- oder Außentemperaturen, bis zu welcher Blend- und/oder Sonnenschutz gewährleistet sind).
- Voruntersuchungen (mittels Simulationsprogrammen) sind sehr hilfreich zur Klärung der realen baulichen Umgebungsbedingungen. Bei Sanierungen könnte dies z.B. der Einbau von TTV-Prototypen vor der Festlegung auf endgültige Parameter der TTS und Verglasung sein.

9 Literatur

9.1 Literaturquellen

- [AIT99] *Die klima-aktive Fassade*, D. Daner et. al. (Hrsg.), AIT-Edition, Intelligente Architektur, ISBN 3-87422-635-2, 1999
- [ANDR00] *A Multi Criteria Solar Design Method*, Inger Andresen, Tagungsbeitrag EUORSUN 2000, Kopenhagen, Dänemark, 2000
- [ARC89] *Arch+*, Zeitschrift für Architektur und Städtebau, No. 100/101, S. 108, 1989
- [AVO98] *Arbeitsstätten – Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV – und Arbeitsstätten-Richtlinien – ASR*, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1998
- [BMBF00] *Schichtsysteme mit veränderlichem Transmissionsgrad*, BMBF Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben, Dr. E. Jahns et. al., Freiburg i. Brsg. 2000
- [BMBF97] *Thermotrope Systeme für Verglasungen von Fenstern, Fassaden und Solarkollektoren*, BMBF-Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben, Dr. E. Jahns et. al., Freiburg i. Brsg. 1997
- [BÜL00] *Office Worker Preferences of Exterior Shading Devices – A Pilot Study*, H. Bülow-Hübe, Tagungsbeitrag EuroSun 2000, Kopenhagen, Dänemark, 2000
- [DET602] *Detail*, Zeitschrift für Architektur + Baudetail, Serie 2002, 6 Solares Bauen, Juni 2002
- [DIN4108] *DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau*, Beuth-Verlag, 1991
- [DIN5035] *DIN 5035 Teil 1, Beleuchtung mit künstlichem Licht*, Normenausschuss für Licht
- [EN12464] *DIN EN 12464, Beleuchtung von Arbeitsstätten*, Angewandte Lichttechnik, 1998
- [ENEV02] *Energieeinsparverordnung - für die Praxis kommentiert. Wärmeschutz und Energieeinsparung für Neubau und Bestand Begriffe - Methoden – Beispiele*, Hans-Dieter Hegner, Verlag Ernst & Sohn, ISBN-3-4330-1730-1, 2002
- [FANG70] *Thermal Comfort*, P.O. Fanger, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970
- [FAR01] *Fassadenintegrierte Regelungssysteme*, Abschlussbericht zum DFG-Forschungsprojekt, Fraunhofer-ISE, Freiburg (LU 204/10-1) und Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, TU München, (HE 937/5-1), 1998-2001
- [FONT99] *Daylight Performance of Buildings*, Marc Fontoynt ed., ISBN-1-873936-87-7, James & James, 1999
- [GER99] *Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? – Teil 1 Transparente Wärmedämmung*, Karl Gertis et. al., Zeitschrift Bauphysik 21, Ernst & Sohn, Heft 1, 1999,
- [GERT97] *Thermotrope Beschichtungen zur Verschattung von Außenwänden*, Prof. Dr.-Ing. Karl Gertis, Dr.-Ing. H. Gödeke, Internationaler Bau-physikerkongress, S. 137 – 142, TU Berlin, 1997
- [HAG02] *B. Hagner AB, P.O Box 2256, SE-169 02 Solna, Sweden*, <http://www.hagner.se/>, 2002
- [HAR01] *Beschattungssystem für Gebäudefassaden*, Patentanmeldung 101 21 660.2, Mai 2001
- [HART02] *Selbstregelnder Blend- und Sonnenschutz für Doppelfassaden*, H. Hartwig, Schlussbericht zum Verbundvorhaben unter Zusammenarbeit mit Dr. R. Blessing, Interpane Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH, Dr. A. Beck, ZAE-Bayern, Abt. 2, 2002
- [HART95] *Einfluss der Beschattungstechnik von transparent wärmedämmten Massivwänden auf den Raumkomfort*, H. Hartwig et al., Pilot- und Demonstrationsprojekt schweizerisches Bundesamt für Energiewirtschaft EF-P+D(93)134, 1995
- [HART98] *Zu Planungs- und Vorgehensstrategien interdisziplinärer Arbeitsgruppen: Erste Erfahrungen aus Arbeiten mit transparenten und transluzenten Materialien in der Gebäudehülle*, H. Hartwig, R. Krippner, T. Kuckelkorn, Tagungsband "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Februar 1998
- [HEAT00] *HEAT2 – A PC Program for Heat Transfer in Two Dimensions*, T. Blomberg, Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics, 2000
- [HEN94] *Licht und Beleuchtung*, H.-J. Hentschel, ISBN-3-7785-2184-5,

- [HER96] Hüthig-Verlag, 1994
Solar Energy in Architecture and Urban Planning, T. Herzog (Editor), Prestel Verlag, München/New York, 1996
- [HOP97] *Glasarchitektur 1997*, K. Hoppe (Ed.), Pilkington FLACHGLAS AG, 1997
- [IBK01] *Entwicklungsstand, künftige Anwendungen und Nutzen thermotroper Schichten aus Kunststoffen für den Wohnungsbau*, S. Kraft et al., Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V., Darmstadt, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 3-8167-4871-6, 2001
- [JOED01] *Alle Menschen sind nicht gleich – Zur Bedeutung von Mittelwert und Streuung bei psychologischen Untersuchungen in der Lichttechnik*, Prof. Dr. Bernd Jödicke, Tagungsband "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Januar 2001
- [KEI95] *Keithley – Multimeter 2000 Bedienungsanleitung*, Keithley Instruments GmbH, Landsberger Str. 65, D-82110 Germering, 1995
- [KRO02] *PRC Krochmann – Lieferprogramm*, PRC Krochmann GmbH, <http://www.prc-krochmann.de/indexN.htm>, 2002
- [LAB96] *LabView – Graphical Programming for Instrumentation*, National Instruments, 1996
- [LANG00] *Wärme- und Sonnenschutzsysteme aus Holz für Doppelfassaden*, W. Lang, Dissertation Technische Universität München, Fakultät für Architektur, Mai 2000
- [MÜL99] *Untersuchung thermotroper Schichten unter konzentrierender Solarstrahlung für selbstschaltende Blendschutzsysteme*, Michael Müller, Diplomarbeit Fakultät für Physik der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Brsg. 1999
- [NITZ99] *Optische Modellierung und Vermessung thermotroper Systeme*, Peter Nitz, Dissertation Fraunhofer-ISE, Freiburg i. Brsg. 1999
- [OKA02] <http://www.okalux.de/>, OKALUX GmbH, D-97828 Marktheidenfeld-Altfield, Telefon: +49 (0) 9391-900-0, Telefax: +49 (0) 9391-900-100, info@okalux.de
- [REI01] *Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings – Simulation Studies and Analysis of Measurements*, C. Reinhart, Dissertation Technische Universität Karlsruhe, Juli 2001
- [REIN01] *Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings – Simulation Studies and Analysis of Measurements*, C. Reinhart, Fraunhofer IRB-Verlag, ISBN-3-8167-6056-2, 2001
- [ROS00] *Messungen zur lichttechnischen Bewertung von Tageslichtsystemen*, A. Rosemann, A. Sit, S. Aydinli, H. Kaase, S. 175 – 181, Tagungsband "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Januar 2000
- [RUBB01] *Lichtglas – eine Entwicklung für die sinnvolle Tageslichtnutzung in Gebäuden*, Frank Rubber, Tagungsband "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Januar 2001
- [SAU00] *Photobiologische Lichtplanung – Von der Lichttherapie zur Lichthygiene*, Dr. M. Sauer, S. 222-228, Tagungsband "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Januar 2000
- [SCHIT98] *Glasbau Atlas*, C. Schittich et. al., Edition-Detail, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, München, 1998
- [SCHU00] *Der Reichstag – Die Architektur von Norman Foster*, Bernhard Schulz, Prestel-Verlag, 2000
- [SOB98] *Selbstanpassende Systeme der Gebäudehülle*, W. Sobek, W. Haase, S. 70-75, Zeitschrift „Das Bauzentrum“, 5/98, 1998
- [SOL01] *Solargestützte Energieversorgung von Gebäuden*, W. Schölkopf (Hrsg.), Abschlussbericht, Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V., 2001
- [SUN01] *SUNTEK INC. – Energy Materials for Buildings Through Molecular Design*, 6817a Academy Parkway East, Albuquerque, NM 87109, U.S.A., 2001
- [TRN15] *TRNSYS-Handbuch*, TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Stuttgart, Februar 2000
- [VBG02] *Sonnenschutz im Büro*, Broschüre der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft, SP2.5 (BG1827), 2002
- [VDI01] *Entwurf VDI 6011*, Blatt 1, Verein deutscher Ingenieure, Februar 2001
- [VINE98] *Office worker response to an automated venetian blind and electric lighting system: a pilot study*, E.

- [MIT83] Vine et al., S. 205 – 218, Zeitschrift „Energy and Buildings“, Nr. 28, 1998
- [VOL01] *Vitruvius zehn Bücher über Architektur*. Übersetzt und erläutert von Jakob Prestel, Verlag Valentin Koerner, 1983
- [VOL01] *Lichte Momente fürs gute Betriebsklima*, G. Volz, VDI-Nachrichten Nr. 13, S. 27, 2001
- [VOSS97] *Bauen mit der Sonne – Theorie und Praxis der passiven Solarenergienutzung im Wohnungsbau*, Dr. Karsten Voss, 7. Symposium Thermische Solarenergienutzung in Gebäuden, Staffelstein, 1997
- [WAT98] *Intelligent Window Using a Hydrogel Layer for Energy Efficiency*, H. Watanabe, Affinity Co. Ltd., in „Solar Energy Materials & Solar Cells“ Nr. 54, 1998, S. 203 – 211.
- [WES02] *Moving type and characteristic of windows as apertures in the facade*, D. Westenberger, EuroSun 2002, Bologna, Italien, Juni 2002
- [WIEN01] *Tageslichtnutzung versus Energie – Ganzheitliche Bewertung von Tageslicht- und Sonnenschutzsystemen*, Jan Wienold, Tilman Kuhn, Fraunhofer-ISE, Tagungsband „Innovative Lichttechnik in Gebäuden“, OTTI-Energiekolleg, Januar 2001
- [WIGG96] *Glas in der Architektur*, M. Wigginton, Phaidon Press Limited ISBN 3-421-03126-6, 1996
- [WIN94] *WINDOW 4.1 for Analyzing Window Thermal Performance in Accordance with Standard NFRC Procedures*, Lawrence Berkeley

- [WIRT02] Laboratory, California, U.S.A, Mai 1994
- [WIRT02] *Entwicklung von selbstregulierenden Sonnenschutzgläsern*, Dr. H. Wirth, Tagungsband "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Januar 2002
- [WSV95] *Wärmeschutzverordnung*, Dipl. Ing. Peter Rathert, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Köln 1995

9.2 Eigene Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation

Zu Planungs- und Vorgehensstrategien interdisziplinärer Arbeitsgruppen: Erste Erfahrungen aus Arbeiten mit transparenten und transluzenten Materialien in der Gebäudehülle, H. Hartwig, R. Krippner, T. Kuckelkorn, Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Kloster Banz, 1998

Thermotrope Schichten als Regelungssysteme zur Tageslichtnutzung, H. Hartwig, Vortrag und Veröffentlichung an der Tagung "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Kloster Banz, 2000

Performance of Thermotropic Layers For the Regulation of Daylight and Direct Solar Gain, H. Hartwig, T. Herzog, Vortrag und Veröffentlichung an der Tagung "EuroSun 2000", Kopenhagen, Dänemark, 2000

Thermotrope Schichten als Regelungssysteme zur Tageslichtnutzung, H. Hartwig, Vortrag und Veröffentlichung an der Tagung "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Kloster Banz, 2001

Integration von thermotropen Schichten (TTS) in lichtdurchlässige Bauteile, H. Hartwig, S. 196 – 197 in Thomas Herzog, *Architektur + Technologie*, Prestel-Verlag München London New York, ISBN 3-7913-2577-9, und im Rahmen der gleichnamigen Ausstellung im Architekturmuseum Frankfurt, Dez. 2001 – Feb. 2002

Thermotrope Schichten als Regelungssysteme zur Tageslichtnutzung, H. Hartwig, Poster im Rahmen der Ausstellung zur Architekturwoche in München, 22.07. – 29.07.2002

Neue Ansätze zur gestalterischen und funktionalen Optimierung selbstregelnder Beschattungssysteme, H. Hartwig, Vortrag und Veröffentlichung an der Tagung "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", OTTI-Energiekolleg, Kloster Banz, 2002

10 Anhang

10.1 Begriffsglossar

Absorption

Maß für den Anteil von Strahlung, der in einem Material aufgenommen und weder in Form von Transmission oder Reflexion abgegeben wird.

Auskragung

Bauteile die aus der eigentlichen Gebäudehülle heraus stehen.

Brüstungsbereich

Unterer Bereich einer vertikalen Wandfläche

Diffusstrahlung

Strahlung, die ungerichtet also ohne Vorzugsrichtung ist.

Direktstrahlung

Strahlung, wie z.B. die der sichtbaren Sonne, bestehend aus parallelem, gerichtetem Licht.

Durchsichtsbereich

Mittlerer Bereich einer Wandfläche der durch Fenster eine Sichtbeziehung ermöglicht.

Gesamternergiedurchlass, g-Wert

Anteil der auf ein Material auftreffenden Energie, die in Form von Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung durchgelassen wird.

normal-hemisphärisch

Im Zusammenhang mit Transmissions- oder Reflexionsmessungen: Anteil von gerichtet auftretender Strahlung (Direktstrahlung) die unter beliebigen Raumwinkeln (Halbraum) transmittiert oder reflektiert wird.

normal-normal

Im Zusammenhang mit Transmissions- oder Reflexionsmessungen: Anteil von gerichtet auftretender Strahlung (Direktstrahlung) die auch gerichtet transmittiert oder reflektiert wird.

Reflexion

Maß für den Anteil von Strahlung, der von einem Material entgegen der Einfallrichtung zurück geworfen wird.

Rückwärtsstreuung

Auf ein Material auftreffende Strahlung, die vom Material entgegen der Einfallrichtung diffus zurück geworfen wird.

Spektral

Im Zusammenhang mit Transmissions- oder Reflexionsmessungen: Wellenlängenabhängigkeit der Transmission oder Reflexion für die auftreffende Strahlung.

Thermotrope Isolierverglasung

Glaskombination mit Luftzwischenraum zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften, bei der in einer der beiden Gläser die thermotrope Schicht integriert ist.

Thermotrope Schicht

Die eigentliche, auf Temperatur reagierende Schicht.

Thermotrope Verglasung

Gläser als Substrate für die dazwischen liegende, thermotrope Schicht ähnlich eines Verbundglases.

Transluzent

Durchscheinend.

Transmission

Maß für den Anteil von Strahlung, der von einem Material in Einfallrichtung durchgelassen wird.

Transparent

Durchsichtig.

Überkopfbereich

Im weitesten Sinne der Bereich eines Gebäudes, der sich über dem Kopf einer stehenden Person befindet. Meistens ist im Zusammenhang mit Verglasungen der Dachbereich gemeint. Es kann sich aber auch auf den obersten Bereich einer vertikalen Verglasung beziehen.

Vorwärtsstreuung

Auf ein Material auftreffende Strahlung, die vom Material in Einfallrichtung diffus nach Vorne geworfen wird.

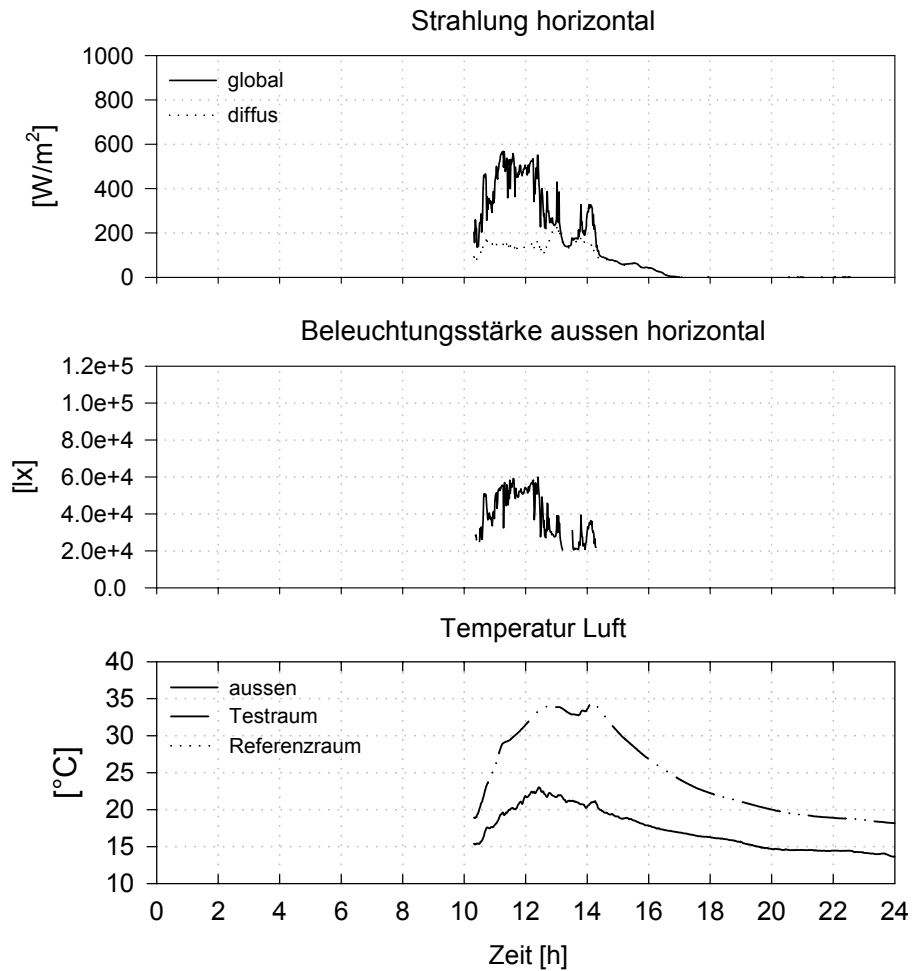
10.2 Verwendete Abkürzungen

α_{rad}	Absorption für Strahlung	TQ	Tageslichtquotient
α_{UV}	Absorption für UV-Strahlung	TTIV	Thermotrope Isolierverglasung
α_{vis}	Absorption für sichtbares Licht	TTS	Thermotrope Schicht
ρ_{rad}	Reflexion für Strahlung	TTV	Thermotrope Verglasung
ρ_{UV}	Reflexion für UV-Strahlung	TWD	Transluzente Wärmedämmung
ρ_{vis}	Reflexion für sichtbares Licht	UV	ultraviolett
τ	Transmission	U-Wert	früherer k-Wert: Wärmedurchgangskoeffizient
τ_{hh}	hemisphärisch-hemisphärische Transmission, Transmission für Diffusstrahlung	ZAE	Zentrum für angewandte Energieforschung (Bayern e.V.)
τ_{nh}	normal-hemisphärische Transmission, integrale Transmission für Direktstrahlung		
τ_{nn}	normal-normale Transmission, Direkttransmission		
τ_{rad}	Transmission für Strahlung		
τ_{vis}	Reflexion für sichtbares Licht		
τ_{UV}	Transmission für UV-Strahlung		
AIW	Affinity Intelligent Window		
BG	Bedruckungsgrad		
BTDF	bi-directional transmission distribution function		
DF	Doppelfassade		
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft		
FZR	Fassadenzwischenraum bei Doppelfassaden		
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad		
HEB	Heizenergiebedarf		
ISE	Institut für solare Energiesysteme		
IV	Isolierverglasung		
KEB	Kühlenergiebedarf		
PMV	Predicted Mean Vote		
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied		
R_a	Farbwiedergabeindex		
SDP	Stegdoppelplatte		
TALD	temperaturabhängige Lichtdurchlässigkeit		
TLA	Temperatur Luft außen		

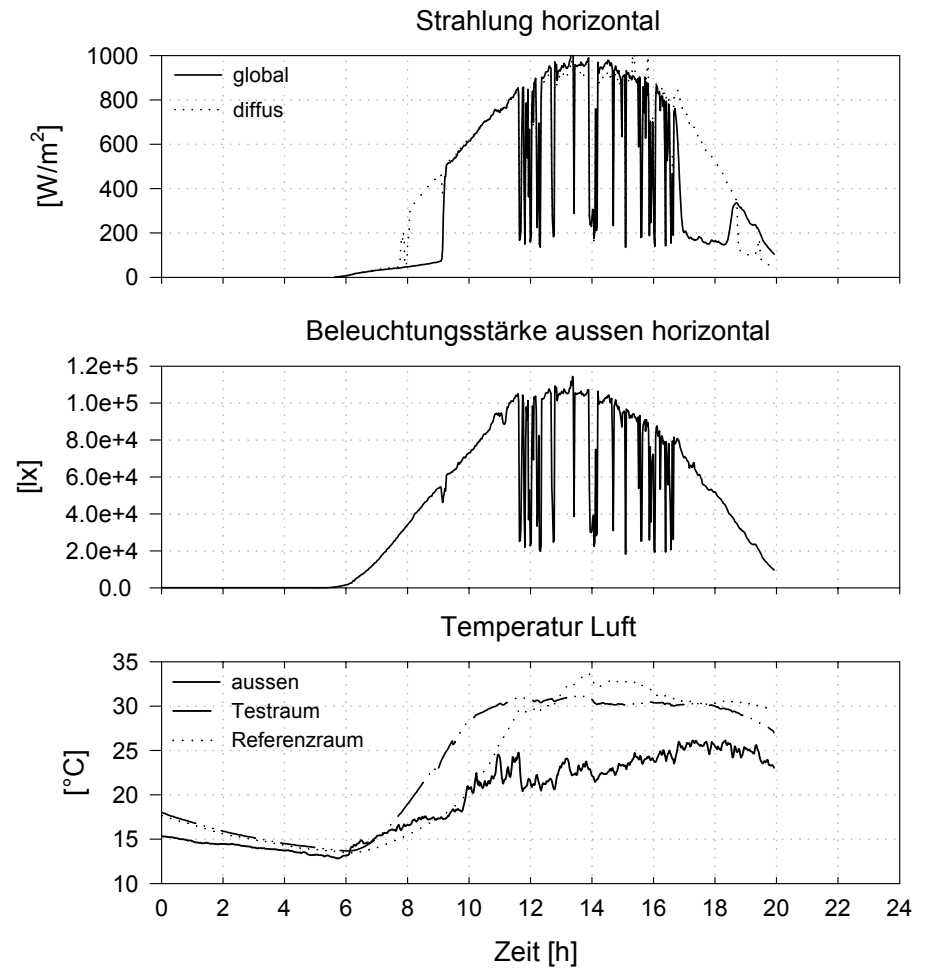
10.3 Wetterdaten zu den dargestellten Versuchsreihen

10.3.1 Vertikal vollflächig

02.11.1999:
Referenz Klarglas, Situation 1

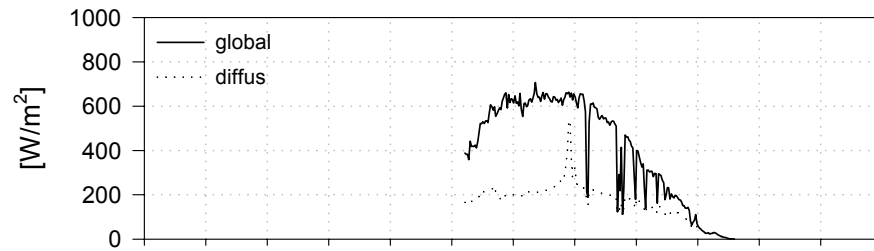


22.07.2000:
Referenz Klarglas, Situation 2

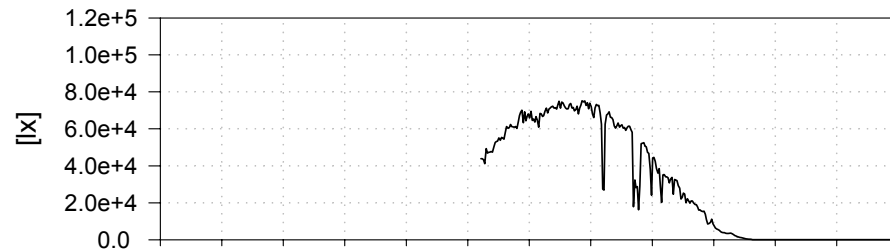


**26.09.2000:
Referenz Klarglas, Situation 2**

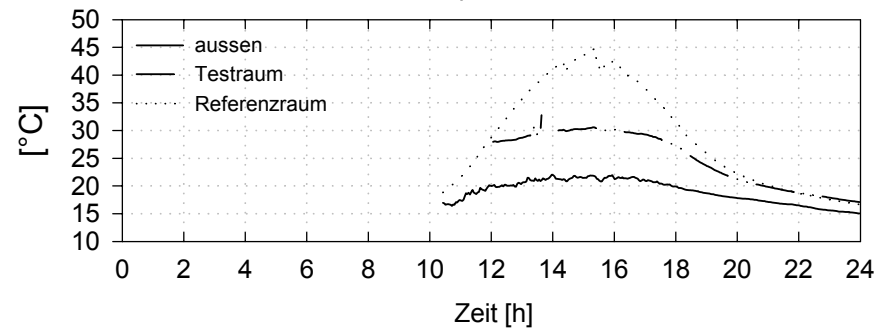
Strahlung horizontal



Beleuchtungsstärke aussen horizontal

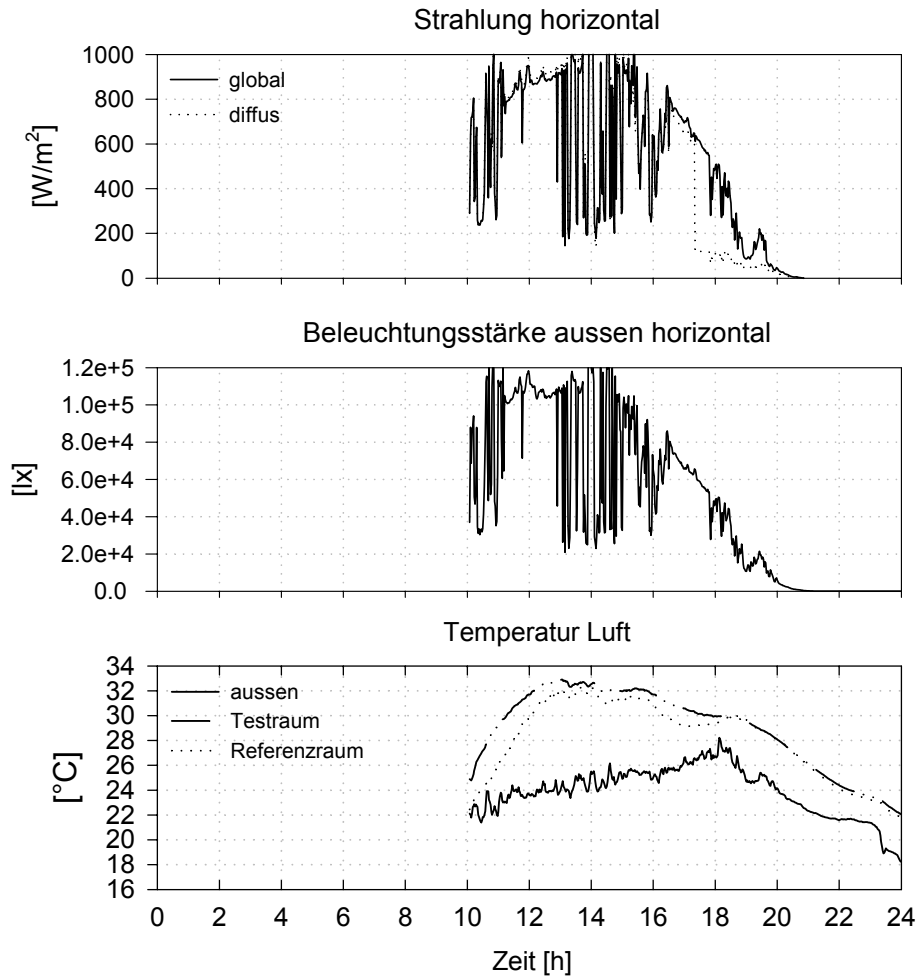


Temperatur Luft

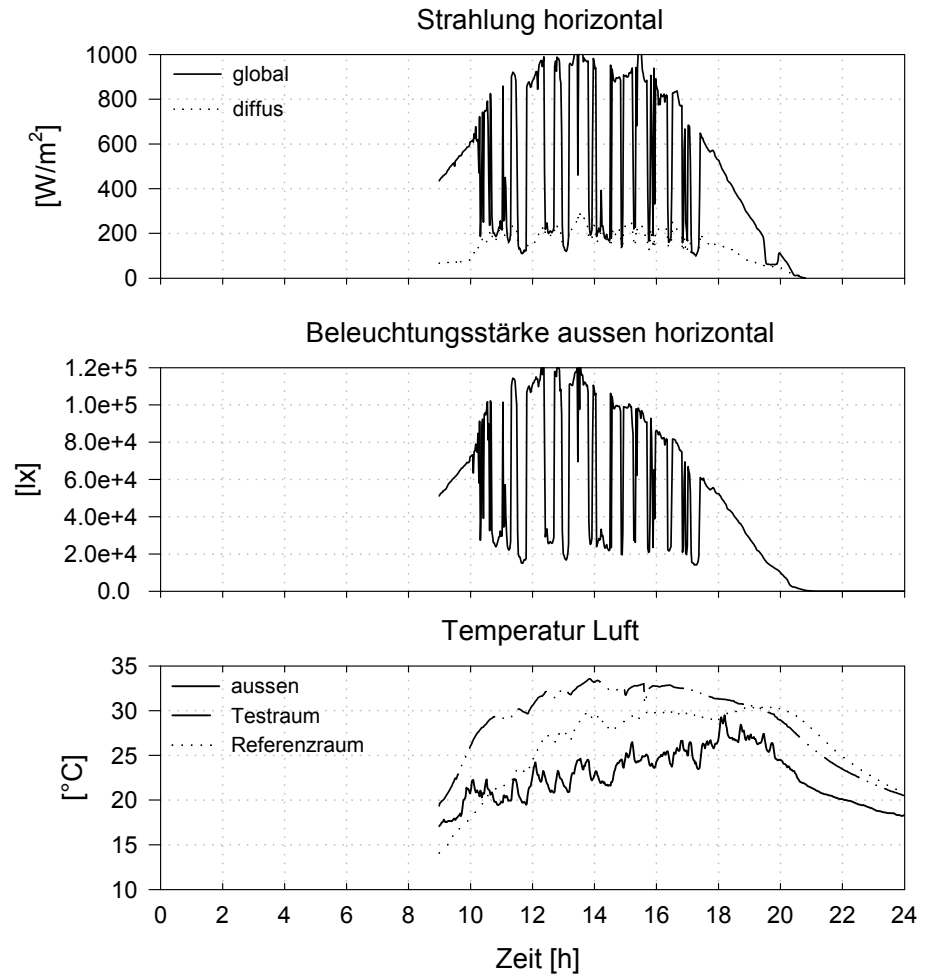


10.3.2 Vertikal teilflächig

25.07.2000:
Referenz Klarglas, Situation 2

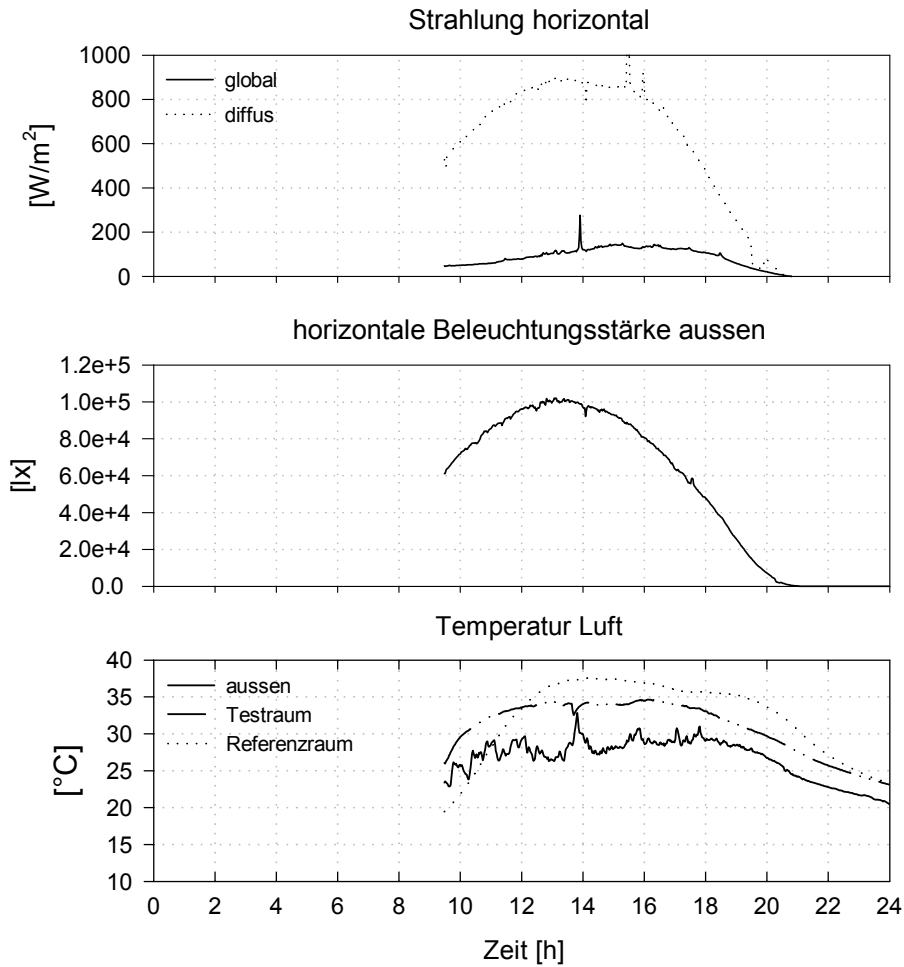


31.07.2000:
Referenz Streuglas, Situation 2

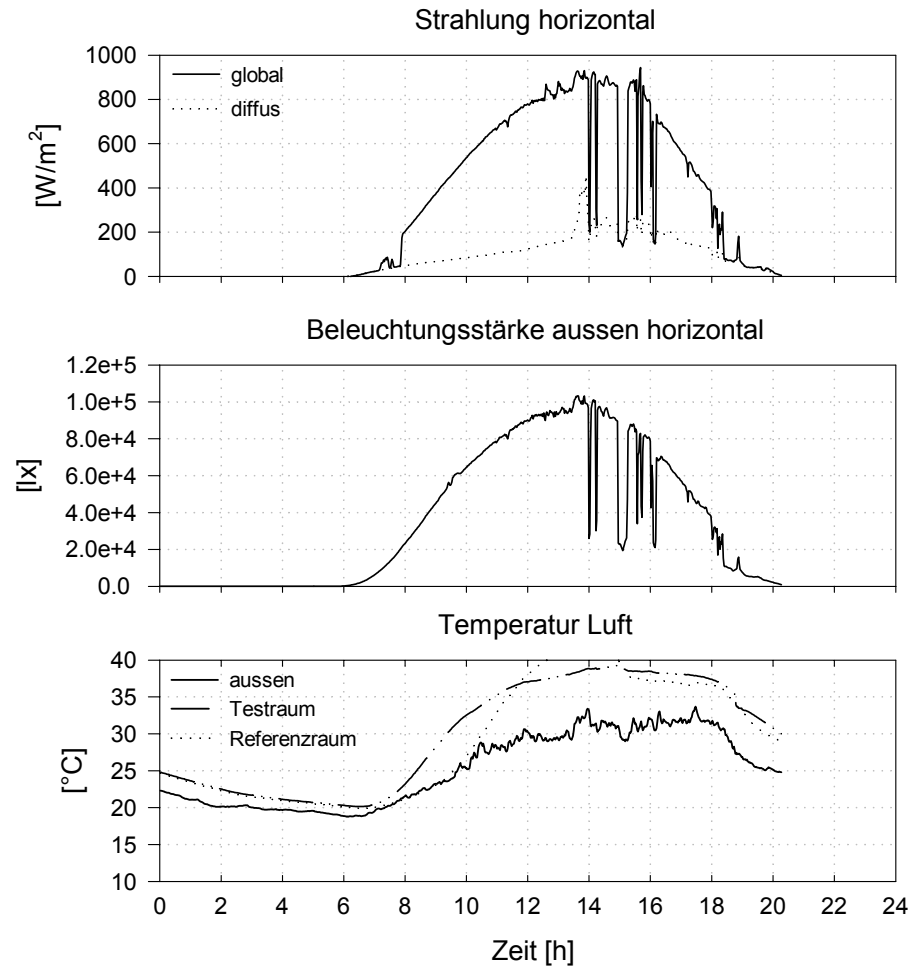


10.3.3 Horizontale Auskragung

01.08.2000:
Referenz Klarglas (Fenster) Streuglas (Oberlicht), Situation 2

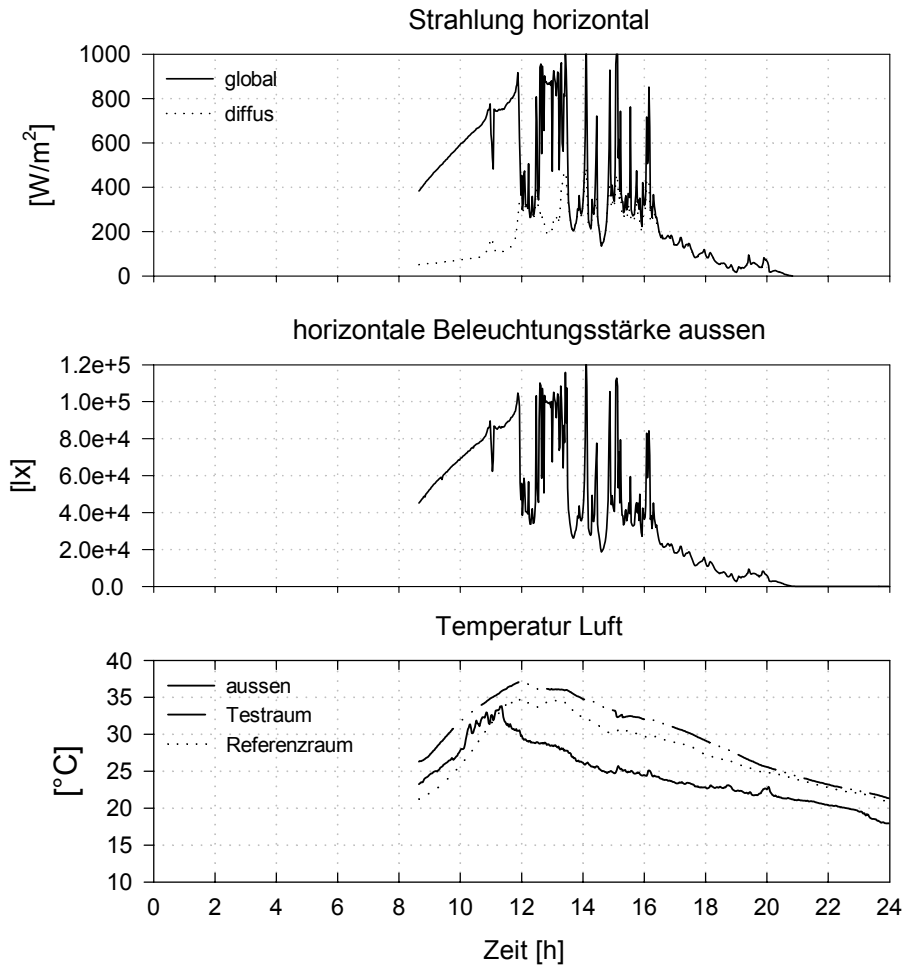


15.08.2000:
Referenz Klarglas, Situation 2

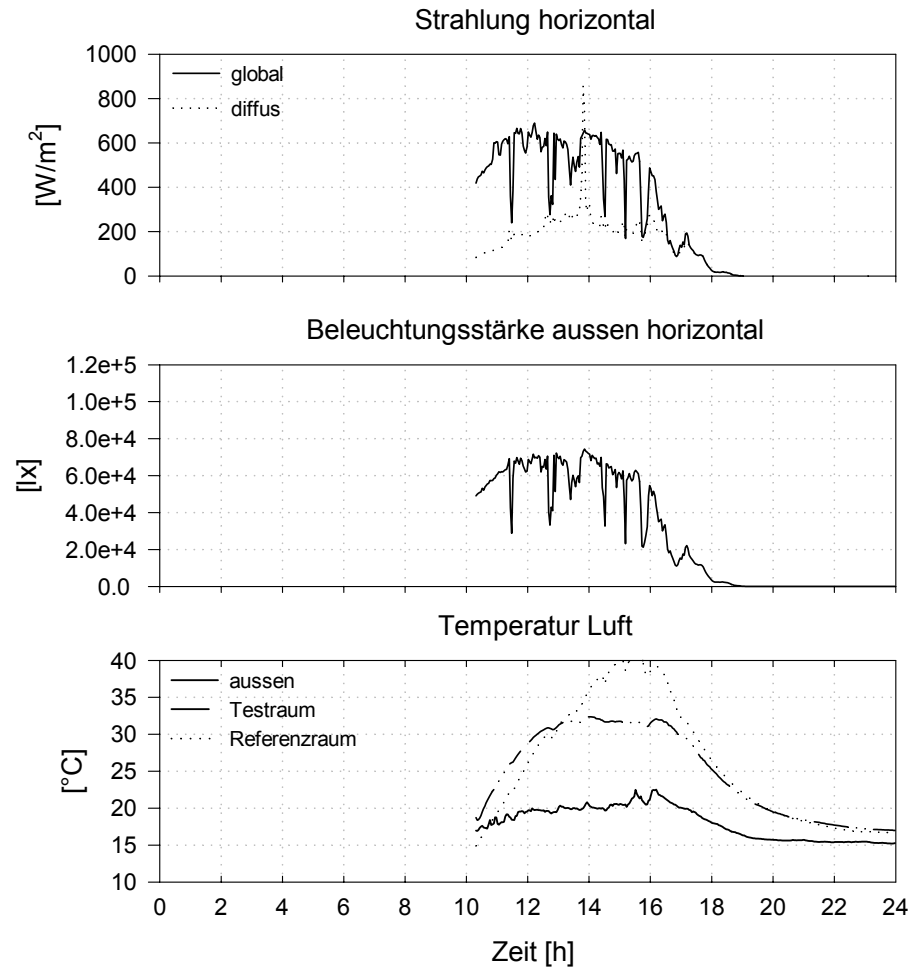


10.3.4 30° geneigte Auskrugung

02.08.2000:
Referenz Klarglas (Fenster) Streuglas (Oberlicht), Situation 2

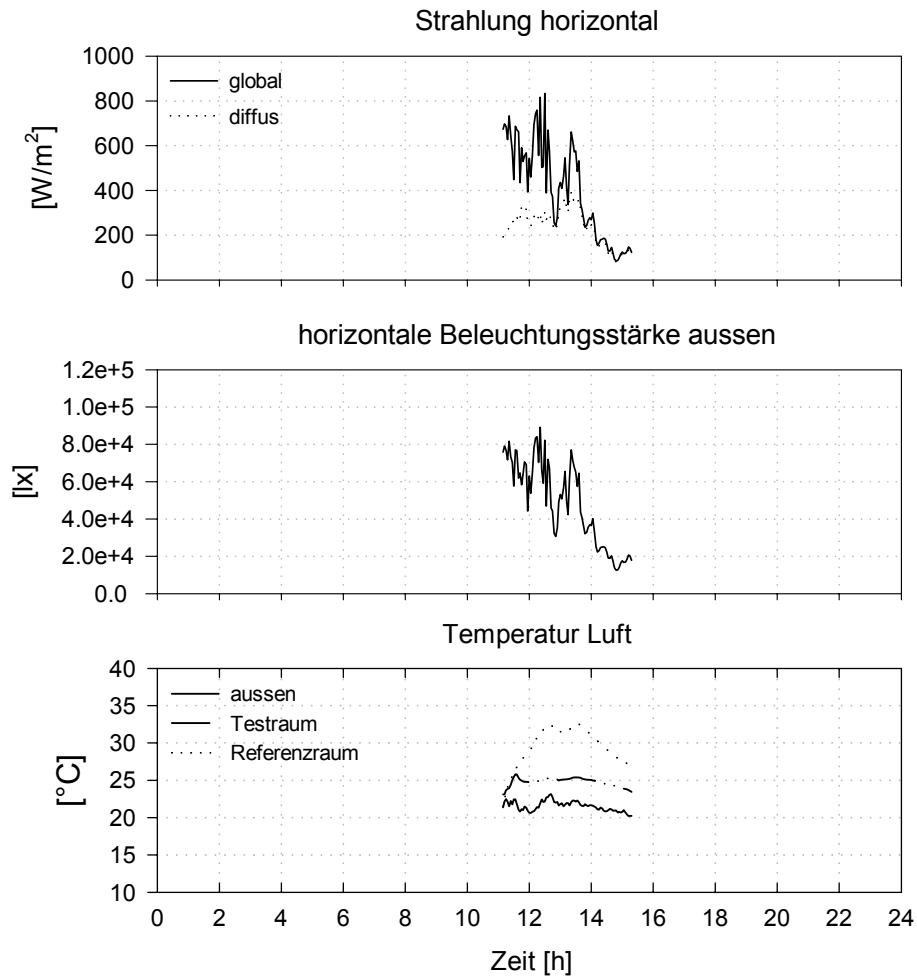


25.09.2000:
Referenz Klarglas, Situation 2



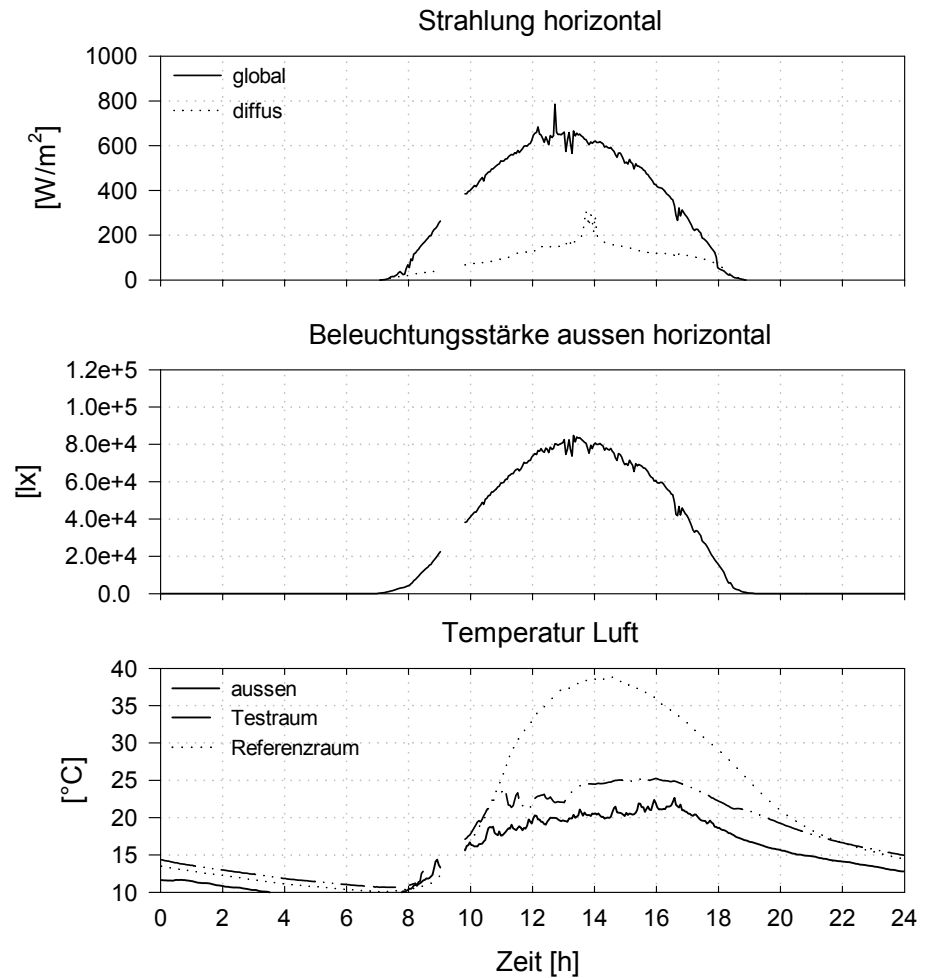
10.3.5 Kombination mit schwarzen Streifen

30.08.2001:
Referenz Klarglas, Situation 2



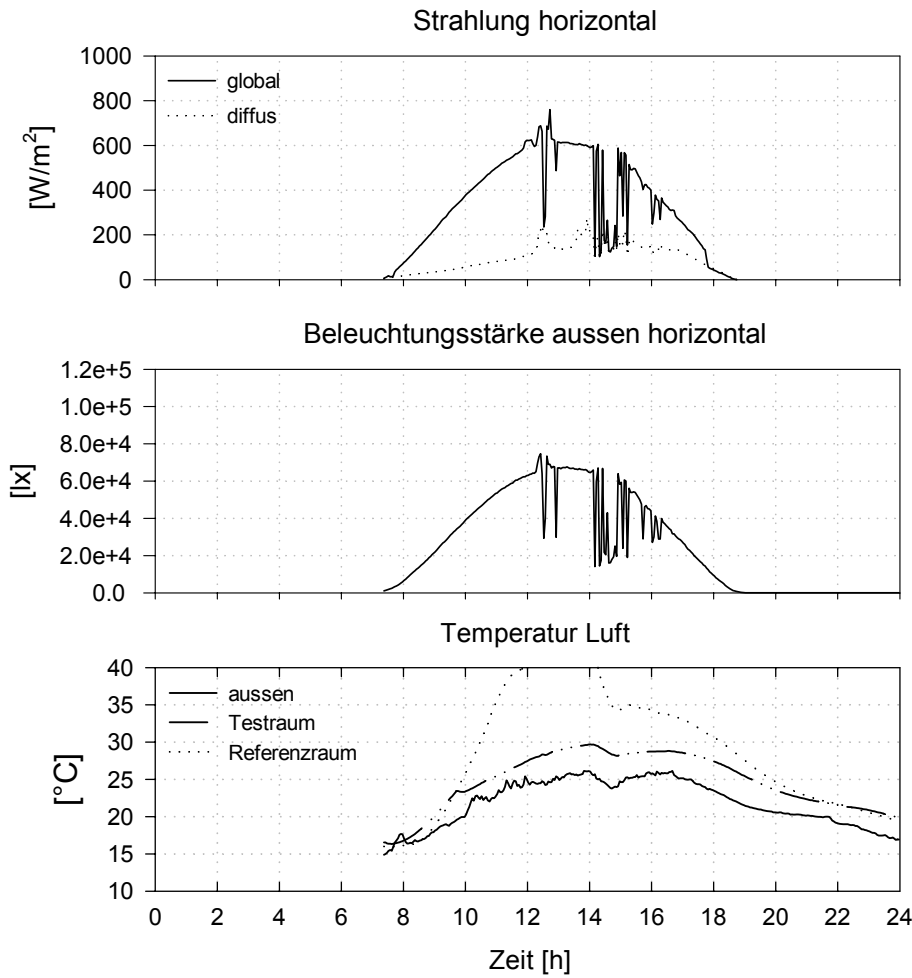
10.3.6 Kombination mit weißen Streifen

28.09.2001:
Referenz Klarglas, Situation 2

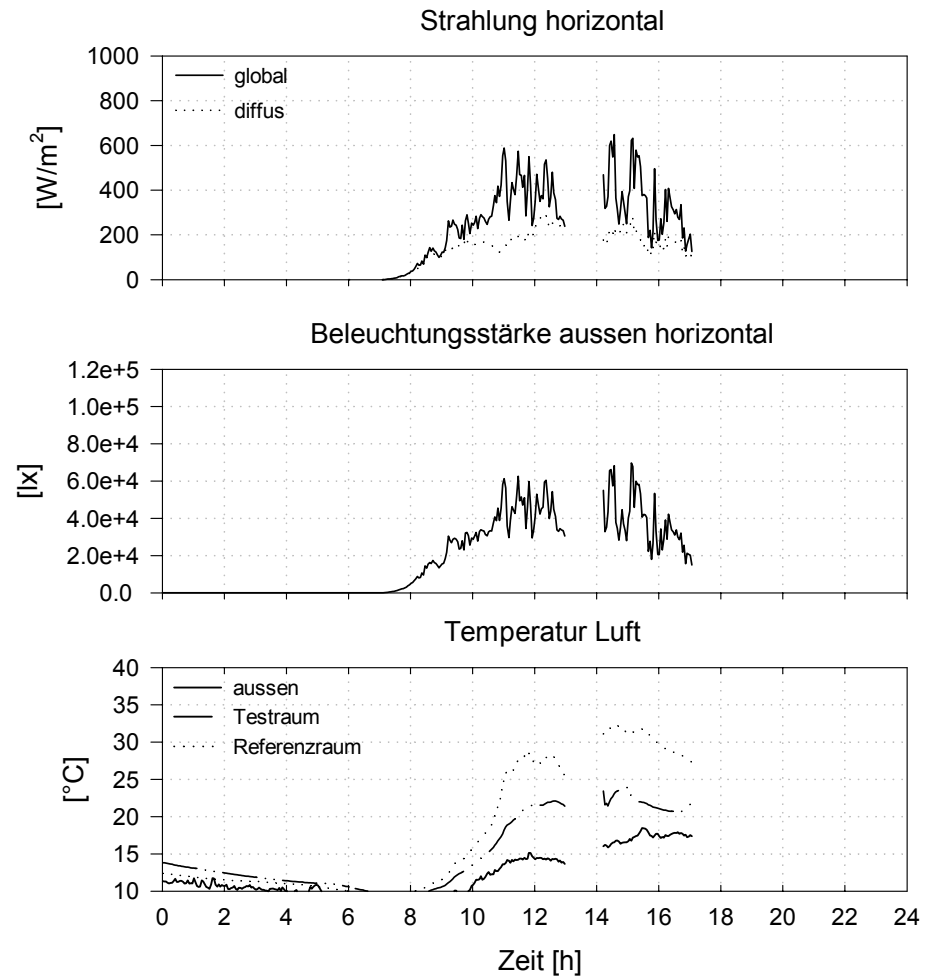


10.3.7 Kombination mit silbernem Streifen

03.10.2001:
Referenz Klarglas, Situation 2

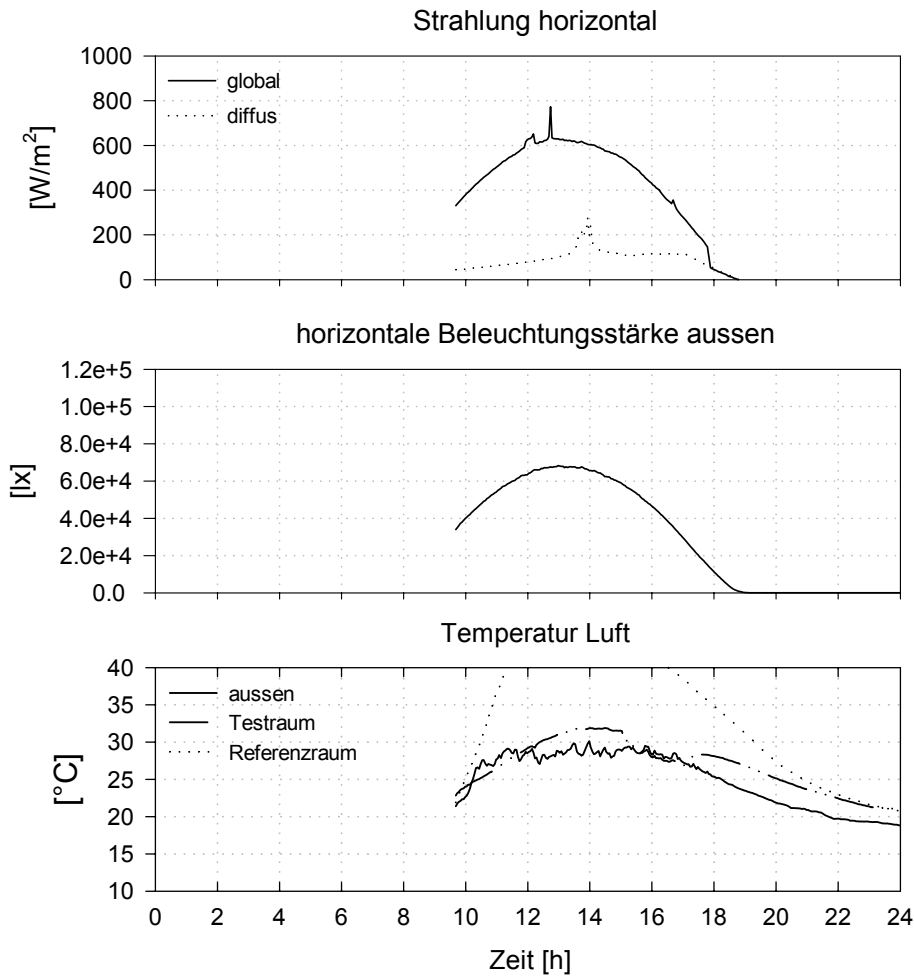


05.10.2001:
Referenz Klarglas, Situation 2



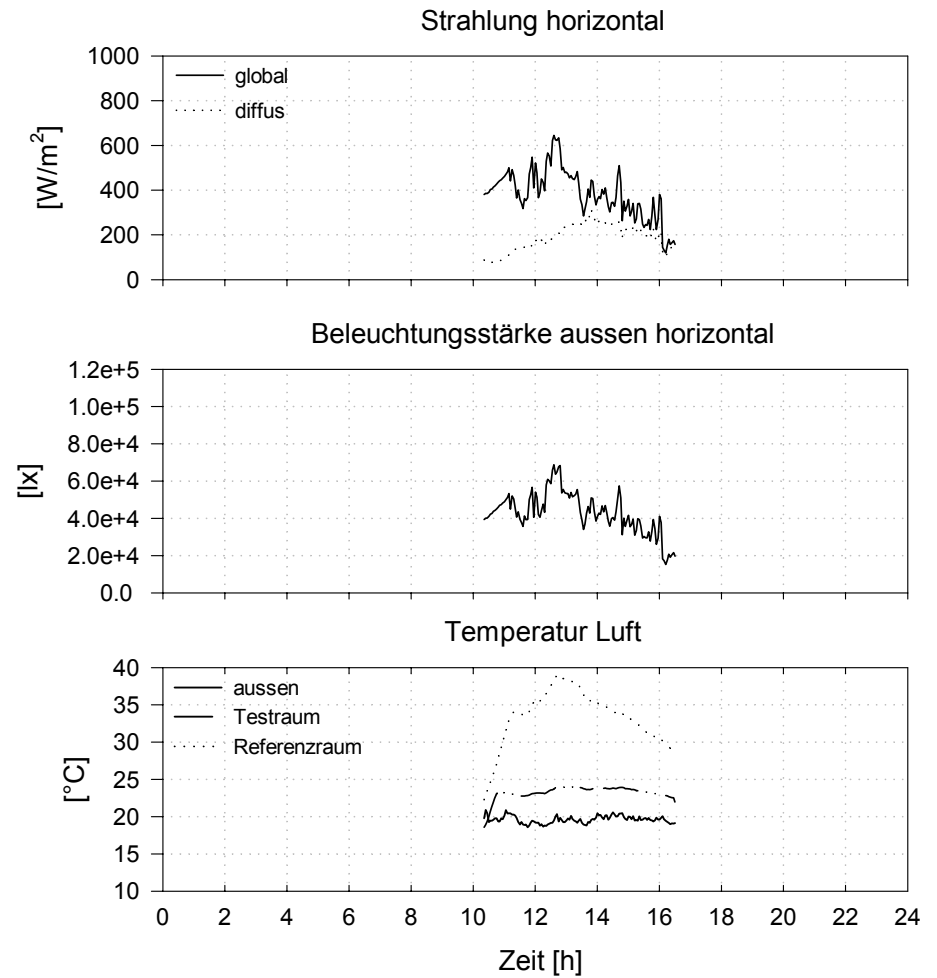
10.3.8 Kombination mit weißen Punkten

02.10.2001:
Referenz Klarglas, Situation 2



10.3.9 Kombination mit silbernen Punkten

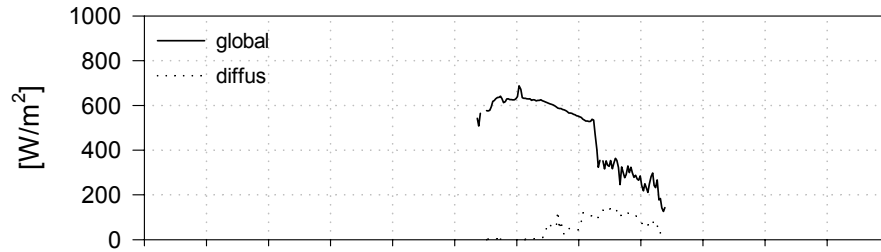
09.10.2001:
Referenz Klarglas, Situation 2



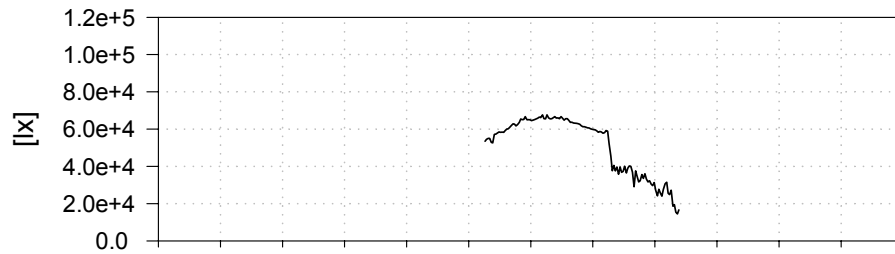
10.3.10 Schwarz gepunktete Streifen

08.03.2002:
Referenz Klarglas, Situation 2

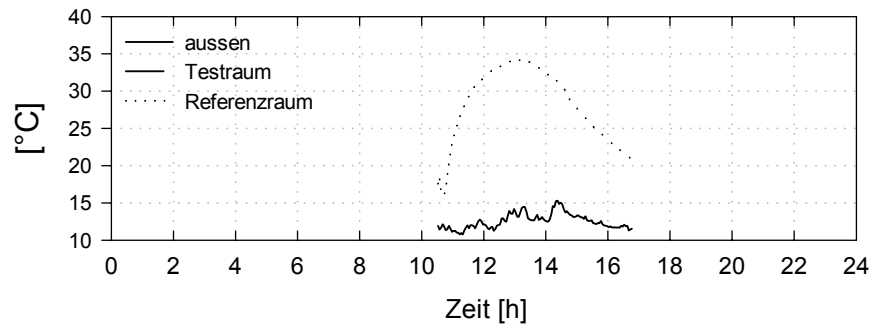
Strahlung horizontal



horizontale Beleuchtungsstärke aussen

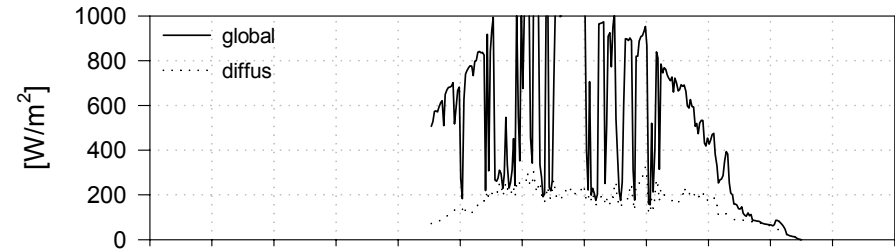


Temperatur Luft

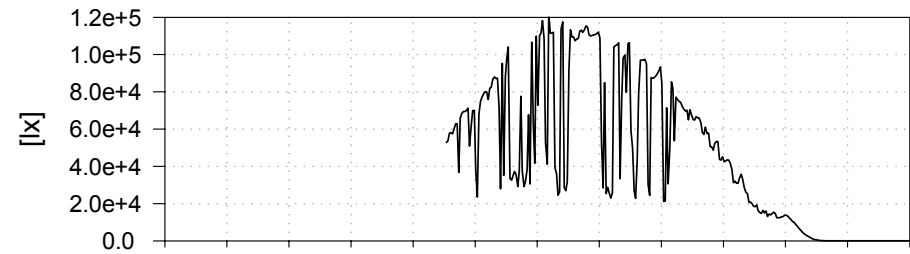


11.03.2002:
Referenz Klarglas, Situation 2

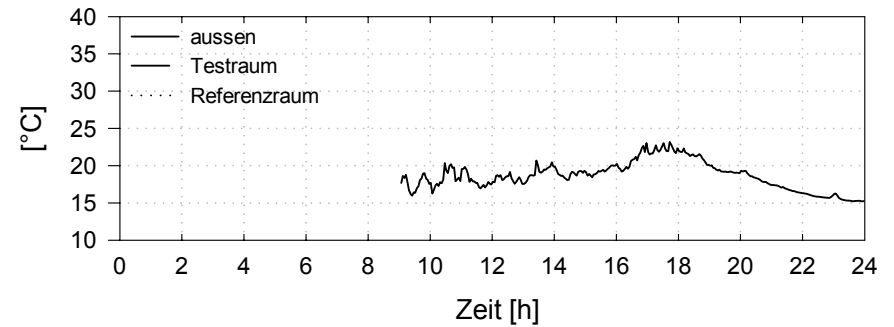
Strahlung horizontal



Beleuchtungsstärke aussen horizontal



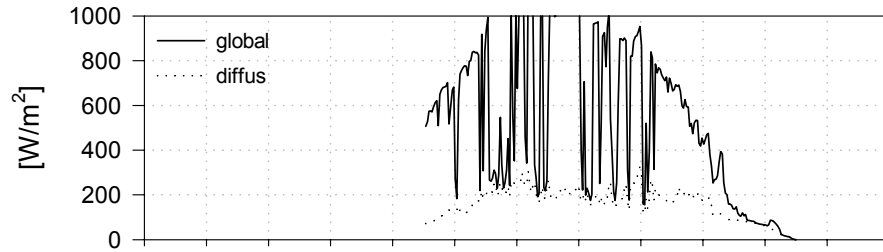
Temperatur Luft



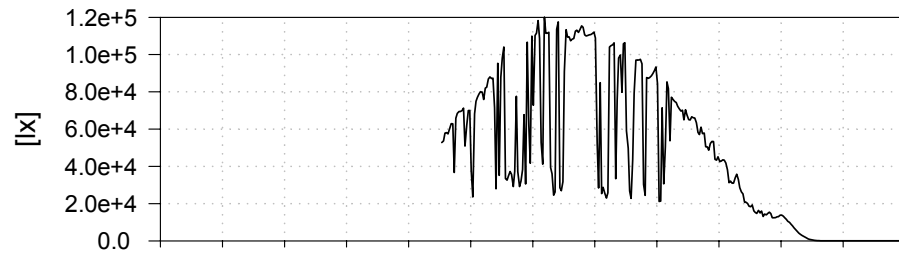
10.3.11 Grau gelochte Streifen

30.05.2002:
Referenz Klarglas, Situation 2

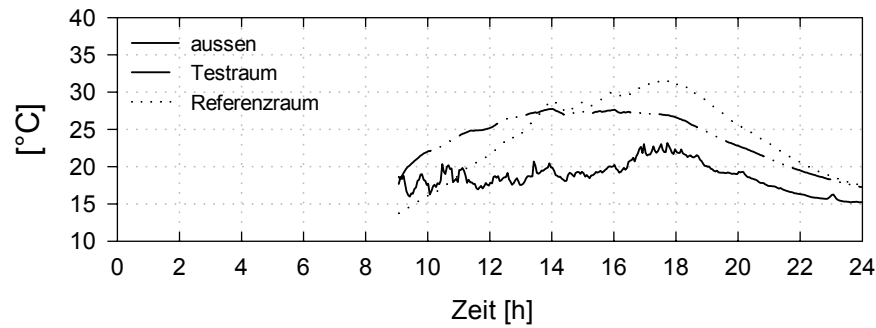
Strahlung horizontal



horizontale Beleuchtungsstärke aussen

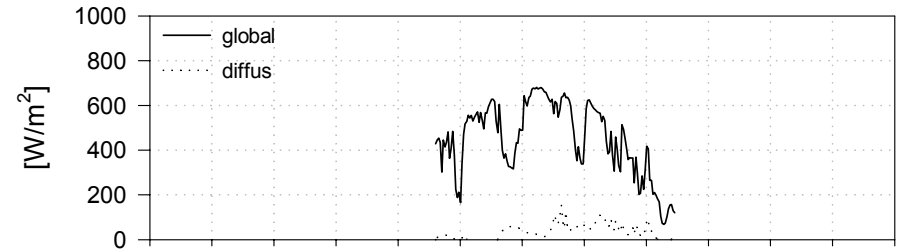


Temperatur Luft

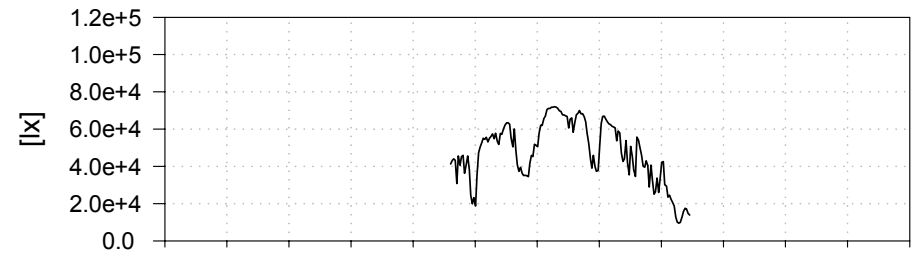


12.03.2002:
Referenz Klarglas, Situation 2

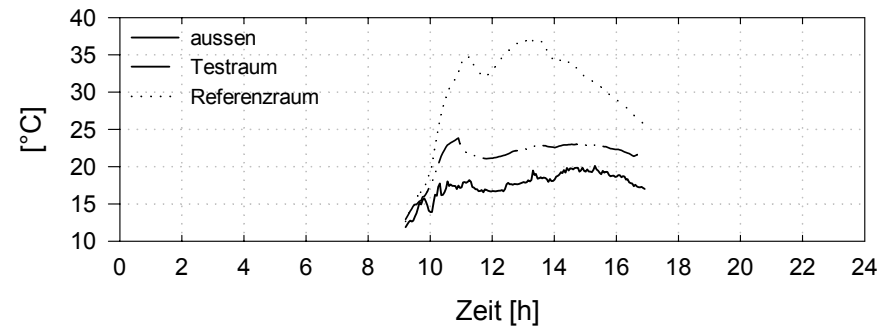
Strahlung horizontal



Beleuchtungsstärke aussen horizontal



Temperatur Luft



10.4 Resultate der Labormessungen an thermotropen Glasmustern von Affinity

Das Glasmuster besteht aus 3 mm Glas, 1 mm thermotropes Hydrogel, 3 mm Glas.

10.4.1 Messwerte

T [°C]	τ_{nh} rad	ρ_{nh} rad	α rad	τ_{nh} vis	ρ_{nh} vis	α vis
20.0	73.78			88.02		
21.0	73.77			88.04		
25.0	73.78			88.02		
30.0	17.10			19.74		
35.0	12.45			15.20		
40.0	13.81			17.16		
50.0	14.75			18.42		

10.4.2 Simulation Messwerte

Die Werte werden durch die Anpassung simulierter Werte an die Messwerte gewonnen.

T [°C]	τ_{nh} rad	ρ_{nh} rad	α rad	τ_{nh} vis	ρ_{nh} vis	α vis
20.0	74.91	07.48	17.60	88.78	08.53	02.69
35.0	13.07	33.57	53.36	16.32	41.26	42.42

10.4.3 Simulation ‚wahre Größen‘

Die Werte wurden durch die Anpassung an die gemessenen Werte und Übertragung auf Muster mit größeren Abmessungen übertragen (Randeffekte reduziert).

T [°C]	τ_{nh} rad	ρ_{nh} rad	α rad	τ_{nh} vis	ρ_{nh} vis	α vis
20.0	74.91	07.48	17.60	88.78	08.53	02.69
35.0	17.95	52.86	29.19	24.15	69.19	06.66

10.4.4 Farbwiedergabe

Die Angaben für den Farbwiedergabeindex wurden aus den gemessenen, spektralen Werten der Transmission gerechnet.

General Color Rendering Index (Ra): 98.362285

Special Color Rendering Index (R_1): 98.965940
 Special Color Rendering Index (R_2): 98.157189
 Special Color Rendering Index (R_3): 97.991374
 Special Color Rendering Index (R_4): 98.531855
 Special Color Rendering Index (R_5): 98.380850
 Special Color Rendering Index (R_6): 97.289231
 Special Color Rendering Index (R_7): 98.419263
 Special Color Rendering Index (R_8): 99.162580

10.5 Resultate der Labormessungen an den Bedruckungen von Interpane

10.5.1 Schwarze Punkte, M276

T: Transmission
R Reflexion
R1: bedruckte Seite
R2 unbedruckte Seite

Bei den Werten handelt es sich um normal-hemisphärische Werte, z. B. τ_{nh}

Datei RSIE_ST1.L9

Lichtreflexionsgrad = 7.53248E-2
Strahlungsreflexionsgrad = 7.55973E-2
UV-Reflexionsgrad (ges) = 7.24651E-2
Farbwiedergabeindex = 98.26
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 98.36
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 99.67
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 97.64
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 97.56
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 98.56
Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 99.20
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 98.22
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 96.88
Farbkoordinaten $x = 0.3087$, $y = 0.3259$
Farbkoordinaten $L^* = 32.9894$, $a^* = -0.2186$, $b^* = -0.8539$

Datei RSIE_ST2.L9

Lichtreflexionsgrad = 6.99055E-2
Strahlungsreflexionsgrad = 7.53661E-2
UV-Reflexions (ges) = 7.70046E-2
Farbwiedergabeindex = 97.98
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 98.41
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 99.39
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 96.93
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 97.26
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 98.56

Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 98.78
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 97.85
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 96.68
Farbkoordinaten $x = 0.3074$, $y = 0.3237$
Farbkoordinaten $L^* = 31.7852$, $a^* = -0.0400$, $b^* = -1.2783$

Datei SIEB_ST1.L9

Lichttransmissionsgrad = 4.41863E-1
Strahlungstransmissionsgrad = 4.17707E-1
UV-Transmissionsgrad (ges) = 2.84343E-1
Farbwiedergabeindex = 98.87
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 98.53
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 99.30
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 99.46
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 98.48
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 98.69
Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 99.26
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 99.29
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 97.95
Farbkoordinaten $x = 0.3119$, $y = 0.3306$
Farbkoordinaten $L^* = 72.3525$, $a^* = -0.9026$, $b^* = 0.3408$

Datei SIEB_ST2.L9

Lichttransmissionsgrad = 4.46999E-1
Strahlungstransmissionsgrad = 4.2409E-1
UV-Transmissionsgrad (ges) = 2.84579E-1
Farbwiedergabeindex = 99.00
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 98.71
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 99.39
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 99.49
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 98.65
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 98.85
Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 99.36
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 99.36
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 98.20
Farbkoordinaten $x = 0.3121$, $y = 0.3307$
Farbkoordinaten $L^* = 72.6935$, $a^* = -0.8516$, $b^* = 0.3663$

10.5.2 Grau perforiert, M425

T: Transmission
R Reflexion
R1: unbedruckte Seite
R2 bedruckte Seite

Datei R1SIEBG1.L9

Lichtreflexionsgrad = 2.33346E-1
Strahlungsreflexionsgrad = 2.06405E-1
UV-Reflexionsgrad (ges) = 7.99606E-2
Farbwiedergabeindex = 95.39
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 96.52
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 98.48
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 92.84
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 93.90
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 96.94
Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 97.37
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 94.93
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 92.13
Farbkoordinaten $x = 0.3013$, $y = 0.3173$
Farbkoordinaten $L^* = 55.4149$, $a^* = -0.0795$, $b^* = -4.1389$

Datei R2SIEBG2.L9

Lichtreflexionsgrad = 1.82692E-1
Strahlungsreflexionsgrad = 1.56467E-1
UV-Reflexionsgrad (ges) = 7.26491E-2
Farbwiedergabeindex = 95.34
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 95.34
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 99.12
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 93.96
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 93.43
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 96.00
Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 98.25
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 95.29
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 91.29
Farbkoordinaten $x = 0.3032$, $y = 0.3228$
Farbkoordinaten $L^* = 49.8203$, $a^* = -1.0841$, $b^* = -2.3966$

Datei T1SIEBG1.L9

Lichttransmissionsgrad = 2.60376E-1
Strahlungstransmissionsgrad = 2.8089E-1
UV-Transmissionsgrad (ges) = 1.36343E-1
Farbwiedergabeindex = 98.63
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 99.01
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 99.49
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 97.90
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 98.07
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 98.97
Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 98.99
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 98.60
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 98.04
Farbkoordinaten x = 0.3171, y = 0.3339
Farbkoordinaten L* = 58.0729, a* = -0.0693, b* = 1.7130

Datei T1SIEBG2.L9

Lichttransmissionsgrad = 2.6422E-1
Strahlungstransmissionsgrad = 2.87421E-1
UV-Transmissionsgrad (ges) = 1.3924E-1
Farbwiedergabeindex = 98.70
Farbwiedergabeindex für Farbe 1 : 99.01
Farbwiedergabeindex für Farbe 2 : 99.57
Farbwiedergabeindex für Farbe 3 : 98.07
Farbwiedergabeindex für Farbe 4 : 98.12
Farbwiedergabeindex für Farbe 5 : 98.97
Farbwiedergabeindex für Farbe 6 : 99.10
Farbwiedergabeindex für Farbe 7 : 98.68
Farbwiedergabeindex für Farbe 8 : 98.11
Farbkoordinaten x = 0.3169, y = 0.3337
Farbkoordinaten L* = 58.4357, a* = -0.0477, b* = 1.6288

10.6 Erläuterungen zur CD-Beilage

Auf der CD befinden sich die vollständigen Bildsequenzen zu den in Kap. 5 und Kap. 6 diskutierten und in Form von Bildern Ausschnittsweise vorgestellten Versuchsreihen.

Die Sequenzen wurden –auf einem PC mit ‚Quicktime 4.0‘ erstellt und sind sowohl auf PC als auch auf Macintosh unter verschiedenen Versionen von Quicktime lauffähig. Es wird ein ausreichender Grafikspeicher (min. 8 MB) benötigt, da sonst beim Abspielen einzelne Bilder übersprungen werden und die Sequenz nicht vollständig wieder gegeben wird.

Die Sequenzen wurden Kapitelweise (Verzeichnisse: KAP-5-2, KAP-5-3, KAP-5-4 und KAP-6-2) unter dem Namen des Datums der Versuchsdurchführung (Dateiname: yy-mm-dd.MOV) geordnet.