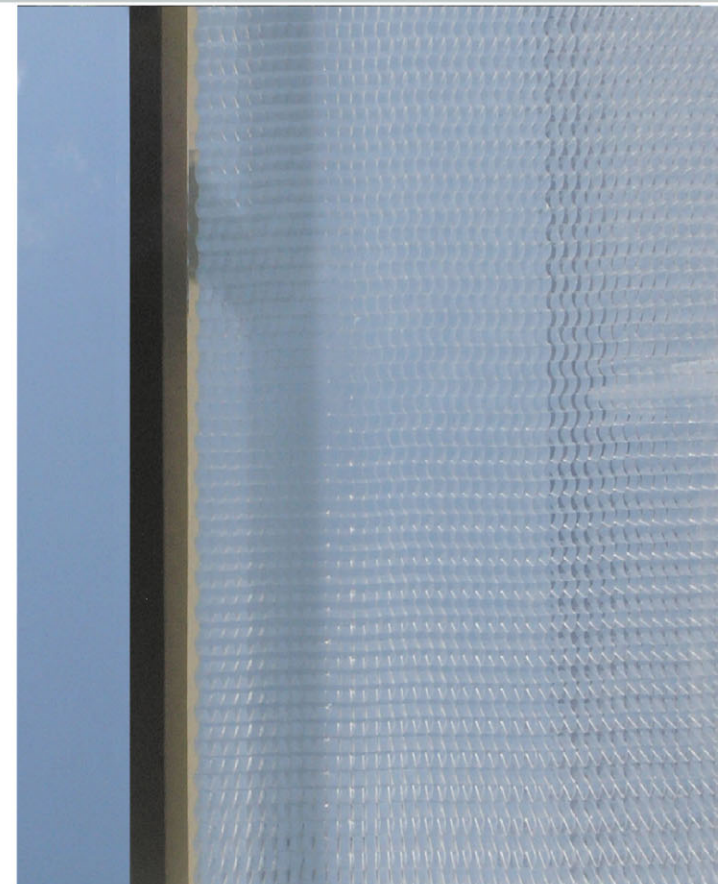


Untersuchung zu mehrlagigen
Membrankonstruktionen im Hinblick auf
unterschiedliche Funktionen von
Gebäudehüllen

LEHRSTUHL FÜR GEBÄUDETECHNOLOGIE · PROF. THOMAS HERZOG

Lingyun Zhang



DISSERTATION
AUS DEM INSTITUT FÜR ENTWERFEN UND BAUTECHNIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN • FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR

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

Untersuchung zu mehrlagigen Membrankonstruktionen im Hinblick auf unterschiedliche Funktionen von Gebäudehüllen

Lingyun Zhang

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 1. Univ.-Prof. Dr.(Univ. Rom) Thomas Herzog, i.R.

Dissertation: 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Die Dissertation wurde am 12. Juli 2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 20. September 2007 angenommen.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog für die thematische Anregung zu dieser Arbeit, für deren fachliche Begleitung sowie für die Bereitschaft zur akademischen Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Hauptreferats,

Herrn Professor Dr.-Ing. Gerd Hauser für die fachliche Unterstützung dieser Arbeit im Bereich der Bauphysik und die Übernahme des Koreferats.

Bei Herrn Dr.-Ing. Roland Krippner, wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, TU München, bedanke ich mich für seine wertvolle sprachliche und fachliche Kritik.

Die Durchführung der experimentellen Arbeit wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik in Stuttgart und Holzkirchen technisch unterstützt - hierfür möchte ich mich ebenfalls sehr herzlich bedanken.

Außerdem möchte ich mich bei folgenden Institutionen und Personen für ihre Unterstützung bedanken:

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

Herrn Dipl.-Ing. Maximilian Rimmel, wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Raumkunst und Lichtgestaltung, Herrn Dr.-Ing. Anton Maas, Akademischer Oberrat am Lehrstuhl für Bauphysik, Herrn Dr.-Ing. Helge Hartwig, ehemaliger wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik.

Besonderer Dank gilt auch folgenden Personen und Firmen, deren wertvolle Hilfe die Durchführung der experimentellen Untersuchungen ermöglichte:

Herr Klaus-Michael Koch, Hightex Engineering GmbH, Rimsting / Chiemsee
Herr Oliver Kehl, Wacotech GmbH & Co.KG., Bielefeld

Auch den Personen in München, speziell Herrn Schrade, Frau von Wedel, Lavinia, Cassian, möchte ich für die sprachliche Korrektur, die interessanten Diskussionen und die technische und geistige Unterstützung danken.

Ganz besonders möchte ich mich bei Frau Verena Herzog-Loibl bedanken, die durch ihre großzügige Hilfe in verschiedenster Hinsicht mir die Möglichkeit zur kontinuierlichen Arbeit in München gab.

Mein Mann Dr. Jianbo Gao und meine Eltern haben mich mit ihrer Liebe während der vierjährigen Arbeit nach ganzen Kräften unterstützt.

Kurzfassung

Das Ziel der Arbeit war die Optimierung mehrlagiger Membrankonstruktionen (MMK) für den Einsatz in der Gebäudehülle unter besonderer Berücksichtigung eine Minimierung des Energieverbrauchs. MMK sind von großer Bedeutung für die Entwicklung neuartiger Leichtbau-Konstruktionen. Daher galt es, weitreichende Material- und Systemkennwerte zum Leistungsspektrum von MMK zu ermitteln sowie Grundlagen zu schaffen, um die Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Gebäudehülle zu erweitern.

Auf der Basis der theoretischen Analysen und Informationsrecherchen wurde eine leichte MMK mithilfe kommerziell verfügbarer transparenter Membranmaterialien aus Ethylene-Tetrafluorethylene (ETFE) als Oberfläche-Strukturen und lichtdurchlässige Wabenstruktur als thermische Wärmedämmung (TWD), vorgeschlagen. Ein innerer Unterdruck bot die mechanische Stabilität und verbesserte auch die Wärmedämmung des MMK-Bauteils. Verschiedene Prototypen wurden durch die Kombination von unterschiedlichen Oberflächenmembranen mit verschiedenen optischen Eigenschaften und TWD-Waben von drei Dicken (90, 120 und 150 mm) aufgebaut.

Die Untersuchungen hinsichtlich thermischer und optischer Eigenschaften zeigten je nach Zusammensetzung der Kombinationen bei Wärmewiderstand, Lichtdurchlässigkeit und gesamtem Energietransmissionsgrad große Unterschiede. Eine weitere optische Eigenschaft stellte auch die Verbesserung der Lichtverteilung im Innenraum dar.

Der Einsatz der MMK-Bauteile gilt insbesondere für Gebäude, bei denen eine Nutzung des Tageslichts gefordert wird. Der Aufbau der MMK-Bauteile stellt ein offenes System dar. Er ermöglicht ausreichende Wärmedämmung, einstellbare Transparenz, leichtes Gewicht und befriedigende Stabilität in einem Bauteil zu realisieren. Dabei lassen sich die thermischen und optischen Parameter durch die Auswahl der Strukturenmaterialien leicht einstellen, um die beste Leistung zu erhalten. Mit der technologischen Weiterentwicklung von Membranmaterialien und neuer Bautechnik sind künftig weitere Optionen mit der dargestellten MMK möglich.

Inhaltverzeichnis	Seite	2.1	Mechanische Eigenschaften	20
		2.1.1	Masse	20
Danksagung	2	2.1.2	Zugfestigkeit	21
Kurzfassung	3	2.1.3	Reißfestigkeit	21
		2.1.4	Knickbeständigkeit und faltbarkeit	21
Teil 1 Einführung	8	2.2	Beständigkeit	21
Vorbemerkung	8	2.2.1	UV- und Witterungsbeständigkeit	21
1 Hintergrund der Untersuchung	8	2.2.2	Brandverhalten	21
1.1 Zur Entwicklung des modernen Membranbaus	8	2.2.3	Chemische Beständigkeit	22
1.2 Membrankonstruktionen für Gebäudehüllen	9	2.2.4	Anschmutzverhalten	22
2 Stand der Technik	10	2.2.5	Alterungsbeständigkeit	22
3 Zielsetzung	11	2.3	Lichttechnische Eigenschaften	22
4 Struktureller Aufbau der Arbeit	11	2.4	Thermische Eigenschaften	23
Anmerkungen	13	2.4.1	Wärmetransmission	23
		2.4.2	Dichtigkeit	23
		2.4.3	Tauwasserbildung	24
Teil 2 Membranwerkstoffe für Gebäude	14	2.5	Akustische Eigenschaft und Schalldämmung	24
Vorbemerkung	14	2.6	Gestalterische Eigenschaften	24
1 Im Bauwesen zur Anwendung kommende Membranwerkstoffe	14	2.7	Ressourcenverbrauch und Recyclebarkeit	24
1.1 beschichtete Gewebe	14	3	Zusammenfassung	25
1.1.1 Gewebe	14		Anmerkungen	28
1.1.2 Beschichtungen	16	Teil 3 Typologie der Aufbauvarianten von mehrlagigen Membrankonstruktionen		30
1.1.3 Produkte	16		Vorbemerkung	30
1.2 Folien	18	1	Anwendungsbereich von MMK in Gebäudehüllen	30
1.3 offene Membranen	19	2	Funktionale Kriterien	32
2 Eigenschaften von Membranen hinsichtlich der Anwendung in Gebäudehüllen	20	3	Konstruktive Kriterien	32

3.1	Kombinierte Elemente	32	4.2	Maßnahmen zur Optimierung der Tageslichtnutzung von MMK	48
3.1.1	Membranlagen	32	5	Zusammenfassung	49
3.1.2	Zusätzliche Elemente	34		Anmerkungen	50
3.2	Befestigung	34			
3.2.1	Verbindung zwischen Membranen	35	Teil 5	Aufbau der wärmedämmten, lichtdurchlässigen MMK-Bauteile	51
3.2.2	Befestigung der Membranen	36		Vorbemerkung	51
3.2.3	Kopplungen der Lagen	36	1	Vorauswahl der zu kombinierenden Elemente	52
3.3	Montage	36	2	Auswahl des Membranmaterials für Membranlagen von MMK-Bauteilen	52
3.3.1	Konstruktionstypen	36	2.1	Auswahlkriterien	53
3.3.2	Modulare Ordnung	37	2.1.1	Beständigkeit	53
3.3.3	Wandelbarkeit	37	2.1.2	Lichtdurchlässigkeit	53
3.3.4	Öffnungen	37	2.1.3	Dichtigkeit	54
4	Zusammenfassung	37	2.1.4	Brandschutz	55
	Anmerkungen	43	2.1.5	Wartungs- und Reinigungsaufwand	55
			2.1.6	Gestalterischer Ausdruck der Membranen	55
Teil 4	Anforderungen an MMK-Bauteile für Gebäudehüllen hinsichtlich der Energiebedarfsminimierung und Komfortoptimierung	44	2.1.7	Zusammenfassung	56
	Vorbemerkung	44	2.2	ETFE-Folien als Membranlagen für MMK-Bauteile	56
1	Allgemeines zum Energie- und Komfortbedarf in Gebäuden	45	3	Transparente Wärmedämmung (TWD) für MMK	57
2	Nutzung der Solarenergie	46	3.1	Grundlagen	57
3	Thermische Aspekte	46	3.1.1	TWD-Systeme zur Nutzung der Solarenergie	57
3.1	Winterlicher Wärmeschutz	46	3.1.2	Grundstoffe und Strukturen von TWD-Materialien	58
3.2	Sommerlicher Wärmeschutz	47	3.1.3	Allgemeine Eigenschaften von TWD-Materialien	59
4	Lichttechnische Aspekte	48	3.2	Vorauswahl der TWD für MMK-Bauteile	60
4.1	Rahmenbedingungen der Tageslichtnutzung	48	3.3	TWD mit absorbersenkrechter Struktur aus Kunststoffen für die MMK	62

3.3.1	Strukturelle Eigenschaften	62
3.3.2	Lichttechnische Eigenschaften	62
3.3.3	Thermische Eigenschaften	64
3.4	Anwendung des TWD-Materials in den MMK-Bauteilen	65
3.4.1	Verformen und Anpassung	65
3.4.2	Visuelles Erscheinungsbild	65
3.4.3	Einfluß der Alterung	65
4	Konstruktiver Aufbau der MMK-Muster mit ausgewählten funktionalen Elementen	66
4.1	Form und Dimensionsstabilität	67
4.2	Befestigung der Membranlagen	67
4.3	Verbindung der Membranfläche mit den TWD	69
5	Einschätzung der Eigenschaften von MMK-Bauteilen	68
5.1	Eigengewicht	68
5.2	Wärmeschutzfunktion	68
5.3	Tageslichtnutzung	69
5.4	Brandschutz	69
5.5	Gebrauchsfunktion	69
5.6	Energieaufwand und Recycling	69
6	Zusammenfassung	70
	Anmerkungen	71

Teil 6	Charakterisierung der Eigenschaften von MMK-Mustern	72
	Vorbemerkung	72
1	Experimentelle Untersuchungen zur Lichtdurchlässigkeit von MMK-Mustern	73
1.1	Lichttechnische Bedingungen	73
1.2	Beschreibung des Versuchsaufbaus	75
1.3	Geforderte Parameter bei der Messung	76
1.4	Messdatenerfassung	77
1.5	Diskussion möglicher Fehlerquellen	77
1.6	Beurteilung der Ergebnisse	77
2	Untersuchung des Einflusses verschiedener MMK-Kombinationen bei der Tageslichtnutzung	79
2.1	Aufbau der Messanlage	79
2.2	Abbildung der Zusammenstellung von MMK-Mustern	79
2.3	Lichtsituation im Künstlichen Himmel	80
2.4	Beurteilung der Lichtwirkung im Innenraum	80
2.5	Ergebnisse der photographischen Untersuchungen	82
3	Experimentelle Untersuchung zum Wärmedurchlasskoeffizient des MMK-Musters	87
3.1	Aufgabenstellung	87
3.2	Messtechnik	87
3.2.1	Messbox	87
3.2.2	Oberflächentemperatur	88
3.2.3	Wärmeflussmesser	88

3.3	Messverfahren	88
3.4	Ergebnisse	89
3.5	Diskussionen möglicher Fehler	89
4	Solarer Energiegewinn durch MMK-Bauteile	89
4.1	Kennwerte	89
4.2	Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung des solaren Transmissionsgrads	89
4.2.1	Messeinrichtung	89
4.2.2	Messdatenerfassung	90
4.2.3	Beurteilung der Ergebnisse	90
4.3	Bedeutung des g-Werts für die Baupraxis	92
	Anmerkungen	93
Teil 7	Zusammenfassung und Ausblick	94
	Literaturverzeichnis	97
	Abbildungsnachweis	104

Teil 1

Einführung

Vorbermerkung

Allgemein bezeichnet man als Membrankonstruktionen die Konstruktionen aus beschichteten und unbeschichteten technischen Geweben und Folien.¹ Die weitere technologische Entwicklung von Membranmaterialien führte zu einer immer schnelleren Innovation im Bereich des Membranbaus in den vergangenen Jahren. Dessen wesentliches Merkmal ist, dass „Membranen neue Konstruktionssysteme ermöglichen; vor allem auch erfordern“.² Neben dem Holz-, Stahl-, Glas-, und Massivbau wird der Membranbau als eine neue Bauweise von Architekten eingesetzt. Neben den neuartigen architektonischen Leistungen gewinnen immer mehr die besonderen Qualitäten der leichten und weichen Materialien für erweiterte Anwendungen an Gebäuden an Bedeutung, vor allem im Bereich der Gebäudehülle, insbesondere die Fassaden und Dächer. Heute ermöglichen die hochfesten Membranmaterialien weitgespannte, filigrane, lichtdurchlässige und stützenfreie Konstruktionen, die besondere Vorteile wie geringes Gewicht, weiche und elastische Beschaffenheit, geringe Kosten, einfache Montage, und gute Anpassungsfähigkeit bieten.

1. Hintergrund der Untersuchung

1.1 Zur Entwicklung des modernen Membraubaus

Membrankonstruktionen wurden in der Geschichte der Menschheit schon lange verwendet. Ursprünglich wurden Zelte, die ältesten Membrankonstruktionen, aus Tierhäuten und Fellen gebaut.³

Der sogenannte moderne Membranbau ist dagegen noch eine junge Konstruktionsweise, die sich mit der Entwicklung der Stofftechnologie, insbesondere der Kunststoff-Composite-Werkstoffe, seit der Mitte des 20. Jahrhunderts als neues Typ des Leichtbaus schnell entwickelt hat.⁴

Der Beginn des modernen Membranbaus vollzieht sich in den fünfziger Jahren durch die Untersuchungen von Forschern, Ingenieuren und Architekten. Die vorgespannte Konstruktion benötigt ein weitaus komplexeres Vorgehen bei der Form- und Gestaltfindung im Vergleich zu konventionellen Bauwesen. Nach den ersten praktischen Anwendungen von Frei Otto, wie den Segeln für die Bundesgartenschau in Kassel (1955) und in Köln (1957) und erfolgreichen über Modelle und experimentelle Messmethoden statisch geklärten Versuchen, beginnt mit dem deutschen Pavillon in Montreal (1967, Abb.1-1)



Abb.1-1: Deutscher Pavillon, Montreal 1967

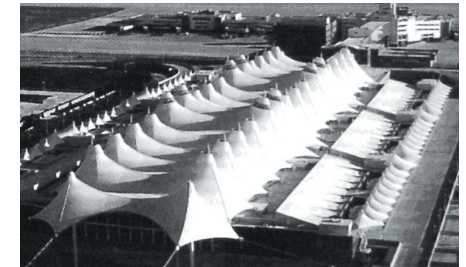


Abb.1-2: Flughafen, Denver 1994

eine neue Epoche und in der Folge stellen die Olympischen Sporthallen den Höhepunkt bei der Entwicklung der modernen Membranarchitektur dar. Seit den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurden Membranen vor allem für die Überdachung von großen Volumen, z.B. Flughäfen und Sporthallen, auf der ganzen Welt eingesetzt. (Abb.1-2)

Mit den Flächen aus Membranen lassen sich unter anderem aufgrund ihrer Leichtigkeit die größten Räume einschließen, die weitesten stützf freien Flächen überdecken, die kürzesten Auf- und Abbauphasen realisieren, sowie für bestimmte Bauaufgaben die geringsten Kosten- und Materialaufwendungen erreichen. Die entsprechende Technologie des Materials, der Statik, Struktur, Montage- und Füge technik wurde schnell weiterentwickelt. In den letzten Jahren wurde eine große Anzahl beispielhafter Membranbauten für temporäre, wie auch für dauerhafte Nutzungen errichtet.⁵ Auch die bislang üblichen Einsatzgebiete weiten sich aus, vom bekannten Bereich der Sport- und Freizeitbauten und den immer wiederkehrenden Elementen der Messebauten, Showrooms für Ausstellungen und Gartenschauen, auf nahezu alle Bereiche der Architektur.⁶

Als ein Typ von Leichtbau stellt der Membranbau Materialeinsparung

durch die optimale Ausnutzung von Werkstoff-Festigkeitswerten dar und vermeidet die Vergeudung von Ressourcen. Durch die Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Bauteile können „die Membrankonstruktionen mehr als andere Bauweisen die Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung zu erfüllen“.⁷

1.2 Membrankonstruktionen für Gebäudehüllen

Bis heute dominierte bei den Realisierungen der Einsatz des Membranbaus als Wetter- und Sonnenschutz von Dauer oder bei temporären Veranstaltungen. Dagegen stellt der deutlich komplexere Einsatz als raumabschließende Gebäudehülle Anforderungen an die verschiedenen Funktionen solcher Gebäudehüllen.

Seit dem Beginn des Membranbaus erfolgt der Versuch raumabschließende Gebäudehüllen zu konstruieren. 1948 wurde von Walter Bird die erste pneumatische, luftgestützte Konstruktion zum Schutz empfindlicher Radaranlagen errichtet.⁸ In den 1950er und 1960er Jahren kam es durch die Fortschritte in der Klimatechnik zu wahren „Allmächtsutopien“. Man träumte vom selbstgemachten Klima in einer künstlichen Umgebung, z.B. der Kuppel über Manhattan von Buckminster Fuller (1950, Abb.1-3) oder den arktischen Städtevisionen von Frei

Otto und Kenzo Tange.⁹

In den 1970er Jahren wurden die pneumatisch gestützten Konstruktionen für abschließende Gebäudehüllen zuerst auf der Weltausstellung in Osaka realisiert. Weitere wichtige Beispiele wurden auf der EXPO in Sevilla (1992), z.B. beim britischen Pavillon, und in Hannover (2000), z.B. beim „Cycle Bowl“, dargestellt, bei denen sich bei der Klimatechnik, der konstruktiven Struktur und Gestaltung völlig neue Lösungsmöglichkeiten abzeichnen.

Neueste technische Weiterentwicklungen auf dem Materialsektor bieten heute neue Möglichkeiten im Membranbau. Die Gebäudehülle ganz oder teilweise aus Membranen auszubilden und dabei die Fassade oder das Dach für ein behagliches oder funktionell gefordertes Raumklima auszubilden, ist weltweit bei unterschiedlichen Klimasituationen realisiert worden. Hier sind der Britische Pavillon von Nicholas Grimshaw und das Hotel Burj al Arab in Dubai¹⁰ von W.S. Atkins & Partner für Membranfassaden und die Hülle des „Eden“ Projekts¹¹, das Gewächshausgebilde in Cornwall von Grimshaw (Abb.1-4) als Pionierleistungen zu nennen, die eine völlig neue Form des Leichtbaus aus Membranen darstellen.

Immer mehr werden Membrankon-



Abb.1-3: Projekte für eine Kuppel über Manhattan, 1950



Abb.1-4: Eden Projekt, Cornwall, 2001

strukturen für Gebäudehüllen verwendet, um helle und klimatisch befriedigende Innenräume zu ermöglichen, z.B. die Dachkonstruktionen im Neubau des Zentrums für Umweltkommunikation der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück von Thomas Herzog + Partner¹² und die Fassadenkonstruktion des Technologie- und Medienzentrums in Erfurt von Göran Pohl.¹³

2. Stand der Technik

Die Entwicklung des Membranbaus in den letzten Jahren ist im wesentlichen durch die Verbesserung des Materials gekennzeichnet.¹⁴ Aufgrund der großen Bedeutung, die das thermische Verhalten von Gebäudehüllebauteilen für den Energiehaushalt des Gebäudes und den Innenraumkomfort hat, gewinnen die Versuche zur Innovation von Membrankonstruktionen mit verbesserter Wärmedämmung an Bedeutung. Dies erfordert die Einbeziehung des neuesten Stands der Entwicklung von Baustoffen und Bautechnik, um leistungsfähigere Lösungen und eine bessere Anpassungsfähigkeit von Membrankonstruktionen an Gebäuden zu ermöglichen. Darüberhinaus besteht die Anforderung, Umwelt-, Energie- und Klima-bezogene leichte Strukturen und energieeffiziente Systeme zu entwickeln.¹⁵

Für einen derartigen Einsatz von Membranen eignen sich ausschließlich mehrlagige Membrankonstruktionen (MMK). Die Mehrlagigkeit resultiert aus Anforderungen, die durch unterschiedliche Elemente erfüllt werden müssen.

Die Untersuchungen erstrecken sich auf die nachfolgenden Themen:

- Verbesserung der thermischen Eigenschaften durch Einsatz von Wärmedämmung;
- Konstruktive Verbesserung der Verbundbaustoffe;
- Einsatz in Manipulatoren zur Optimierung der Tageslichtnutzung.

Die ersten Untersuchungen zu MMK wurde in den 1970er Jahren mit der Einfügung von Wärmedämmung bei Membranbauten begonnen, um den Energieverbrauch der klimatisierten Innenräume zu vermindern. Dazu erfolgte beispielsweise von Ewald Bubner die Beurteilung von verschiedenen Lösungen hinsichtlich funktionaler und konstruktiver Aspekte bei Membranhallen.¹⁶ Eine experimentelle Produktentwicklung von geschosshohen Bauteilen mit aufgeschäumten Membrankonstruktionen wurde an der Universität Kassel von Thomas Herzog durchgeführt, der sich mit der Anwendung von Membrankonstruk-

tion bei Leichtbauten befasst hatte. Dabei wurden unterschiedliche Kombinationen der funktionellen Schichten des Wandelements nach einem umfangreichen Anforderungskatalog systematisch untersucht.¹⁷

Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf die Optimierung der Eigenschaften durch verschiedene Füllstoffe zwischen den Membranlagen. Prinzipiell wird die Stabilität und Funktionalität derartiger Multilagenn-Membranaufbauten, wie Wärmedämmung, Schalldämmung, Kühlung, Tragkonstruktion, durch gezielte ‚Medienfüllung‘, wie Druckluft, Wasser, Thermoöle oder partikuläre Festkörper in Form von Sand, Blähton oder Kunststoffen, erreicht, um einerseits die Vorteile des textilen Bauens wie Flexibilität, Mobilität, geringes Gewicht und niedrige Kosten zu erfüllen, aber andererseits auch bauphysikalische Anforderungen und eine Stabilisierung zu ermöglichen. Nach diesem Konzept wurde die zweilagige Membran mit Abstandsgewebe und Sand als Füllmedium für biegeweihe Lärmschutzwände realisiert.¹⁸ Untersuchungen zu dynamischen Wärmedämmungen mit PCM (Phase Change Material) für Membrankonstruktionen wurden von amerikanischen Forschern durchgeführt, um die thermischen Eigenschaften der leichten Konstruktionen aus Membranen zu verbessern.¹⁹

Darüber hinaus wurden zunehmend neuartige Membrankonstruktionen in Form von Pilotprojekten in der Praxis umgesetzt.

Ein ähnlicher Verbundstoff aus Membranen und Schäumen für konstruktive Anwendungsmöglichkeiten wurde 1999 bekannt gemacht, der nach dem Prinzip von pneumatischen Konstruktionen erzeugt wird, von denen „ein aufschäumendes oder bereits voraufgeschäumtes Material eingebracht ...wird..., das die gehaltene Membranhülle aufbläht und somit unter Zugspannung setzt“. Dies bietet einen leichten, formstabilen und belastbaren Baustoff.²⁰

Eine weitere Innovation ist der Einsatz von Membrankonstruktion bei Manipulatoren. Bei weiteren Entwicklungen erwarten Architekten und Membranindustrie eine Optimierung hinsichtlich der energetischen und lichttechnischen Eigenschaften der eingehüllten Innenräume. Mit der Entwicklung und weiteren Anwendungen von transparenten ETFE-Folien wurden die Versuche auf die Optimierung der lichttechnischen Eigenschaften der Pneukissen konzentriert.²¹ Bei einem Künstleratelier in München wurde z.B. die innerhalb der Membrankissen liegender Aluminiumjalousien als Sonnenschutz realisiert,²² oder beispielsweise mittels steuerbarer Druckluft zu den aus dreilagigen

Folien aufgebauten pneumatischen Kissen, deren äußere und mittlere Schicht zusätzlich bedruckt sind und gegeneinander so gepresst werden, dass ein gewünschter Abschattungseffekt erreicht wird.²³

Weitere Entwicklungspotentiale liegen in der Verbindung mit transluzenter Wärmedämmung (TWD)²⁴, die eine Kombination von optimierter Tageslichtnutzung und verbessertem Wärmeschutz erwarten lassen, um eine Funktionsoptimierung der MMK zu erreichen.²⁵

3. Zielsetzung

Die Arbeit wird sich in einem Umfeld experimenteller Forschung mit nichttragenden Bauteilen der Gebäudehülle mit MMK befassen.²⁶ Hinsichtlich der Merkmale von Membrankonstruktionen werden die Potentiale für die gestiegenen Anforderungen der Gebäudehülle in Bezug auf eine optimierte Nutzung von Solarenergie untersucht. Ansätze zu neuen konstruktiven Lösungen werden hinsichtlich der Kombination von funktionellen und gestalterischen Aspekten und der Optimierung der Leistungen von MMK entwickelt. Neben einer ausreichenden thermischen Dämmfunktion stellt die Lichttransmission der MMK für die Nutzung von Tageslicht und solaren Gewinnen eine wichtige Eigenschaft dar.

Im Hinblick auf die genannten licht- und wärmetechnischen Vorteile der TWD sollen im Rahmen der Arbeit auf der Basis der Anforderungen an die Gebäudehülle das Potential und die Einsatzmöglichkeiten der mit TWD kombinierten MMK untersucht werden. Hierbei stehen neben den funktionalen, konstruktiven, gestalterischen Aspekten, die in Frage kommenden Bedingungen hinsichtlich des Energieverbrauchs von Gebäuden im Vordergrund der Betrachtung. (Abb.1-5)

Arbeitsschwerpunkte sind im Einzelnen:

- Studien konstruktiver Lösungen zum Aufbau der MMK aufgrund von Kenntnissen über die Eigenschaften der Membranen und/oder einer passenden Wärmedämmung auf Basis geeigneter Membranmaterialien und einer TWD;
- Untersuchung der thermischen und optischen Eigenschaften der MMK und deren Bedeutung für die Anwendung als lichtdurchlässiges Bauteil der Gebäudehülle;
- Optimierung des MMK-Aufbaus von Bauteilen im Bezug auf das thermische Verhalten sowie Tageslichtnutzung, Blend- und Sonnenschutz und hinsichtlich des

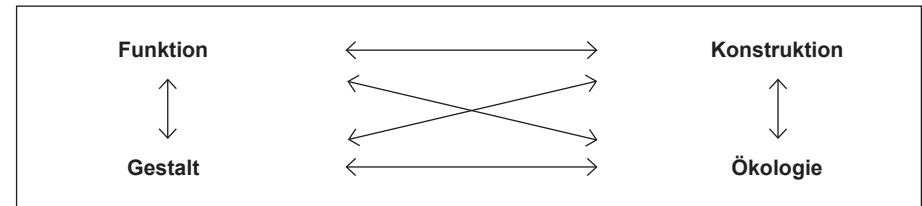


Abb.1-5: Betrachtungskategorien der Gebäudehülle²⁷

Energiebedarfs und der Komfortansprüche;

- weitere Untersuchungen zur Anpassungsfähigkeit von MMK-Bauteilen für eine übliche nichttragende Gebäudehülle sowie zu einem modularen System.

4. Struktureller Aufbau der Arbeit

In Abb.1-6 wird der Aufbau der Dissertation schematisch dargestellt. (Teil 1) Die Studie zu Entwicklungs- und Einsatzmöglichkeiten von MMK-Bauteilen erfordert zunächst die Kenntnis der Materialeigenschaften. (Teil 2)

Das Zusammensetzen verschiedener Lagen und unterschiedlicher Aufbaubedingungen ermöglicht vielfältige Kombinationen. Aufgrund der systematischen Beurteilung der unterschiedlicher Komponenten (Membran und Dämmmaterialien) werden

Lösungsansätze für optimierte MMK-Bauteile vorgeschlagen. (Teil 3)

Das Anforderungsprofil umfasst neben Aspekten der Baukonstruktion, der Fertigungstechnik, der Gestaltung und der Wirtschaftlichkeit von Membranen, besonders die bauphysikalischen Aspekte, die auf eine Komfort- und Energieoptimierung mit dem neuen Baustoff zielen, sowie ökologische Kriterien. (Teil 4)

Darauf basierend wird eine experimentelle Untersuchung zu den lichttechnischen und thermischen Eigenschaften des MMK-Bauteils durchgeführt. Nach diesen Ergebnissen wird der jeweilige konstruktive Aufbau im Rahmen von Modellen verbessert (Teil 5-6).

Die ermittelten thermischen und energetischen Berechnungsergebnisse dienen darüber hinaus künftig als

Basis für eine thermische Simulation. Damit kann der Jahresenergiebedarf von Gebäuden unter Einsatz der entwickelten lichtdurchlässigen und wärmegeprägten MMK ermittelt und bekannten Fassadensystemen zum Vergleich gegenüber gestellt werden. (Teil 7)



Abb.1-6: Aufbau der Dissertation

Anmerkungen

1. Vgl. Bubner, 1999, S. 15
2. Vgl. Doernach, 1974, S. 6
3. Vgl. Baier, 2/1999, S. 6-8
Vgl. Burkhardt, 2000, S. 960-964
4. Vgl. Moritz, 2000, S. 1050-1058
Vgl. Kuhn, 1991, S. 66-69
5. Vgl. Baier, 4/1999, S. 6-9
Vgl. Queffélec, 2000, S. 12-17
6. Vgl. Habermann, 2000, S. 38-41
Vgl. Gabriel, 2002, S. 1544-1548
Vgl. Kaltenbach (Hrsg.), 2001, S. 454-460
7. s. Daniels, K, 1998, S. 139
8. Vgl. Herzog e.a., 2004, S.211.
9. Vgl. Koch (Hrsg.), 2004, S. 16-45:
Habermann, K.J. „Geschichte des Membranbaus,“
10. s. Brux, 2000
11. s. Bauzeitung, 2001; Miloni, 2002
12. Vgl. Flagge e.a. (Hrsg.), 2001, S.150.
13. Vgl. Pohl, 2002, S.22-29
14. Vgl. Bubner, 1981
15. Vgl. Pfammatter, 2005, S.264-265
16. Vgl. Bubner, 1979, S.21-48
17. Vgl. Herzog e.a.,1984
18. Vgl. Schulz,1997, S. 28-32
19. Vgl. Pause,1997 und BMT, 1997.
20. Vgl. Off, 1999.
21. Vgl. Bubner, 2003, S. 28-31
22. Vg. Herzog e.a., 2004, S.225.
23. Vgl. Pfammatter, 2005. S.262-263;
Firmeninformation, <http://www.foiltec.de/deu/index.php3>.
- 24 Vgl. Herzog, 1992
25. Vgl. Koch (Hrsg.), 2004, S.244-251:
26. Definition der „nichttragenden Bauteile,“ s. Herzog, e.a. , 2004, S.27
27. s. Schittich, 2001, S. 29:

Die Arbeit konzentrierte sich auf Probleme der Herstellung und der Formfindung. Die weiteren Varianten der Aufbaumöglichkeiten wurden systematisch untersucht.

Der Bericht hat die Verfahren der Untersuchung und die technischen Eigenschaften der Bauteile dargestellt.

Teil 2

Membranwerkstoffe für Gebäude

Vorbemerkung

Zu den im Bauwesen verwendeten Membranen zählt man beschichtete, aber auch unbeschichtete technische Gewebe und Folien.¹ Jeder Membranwerkstoff hat eine Spezifikation, in der die wichtigsten Eigenschaften in Bezug auf die Statik, Beständigkeit, Formfindung, Recycling, usw. erfasst sind.

Da die Untersuchung sich mit der Erweiterung der Anwendungen von Membrankonstruktionen für die Gebäudehülle befasst, werden die beim Einsatz in diesem Bereich am meisten verwendeten Membranmaterialien betrachtet. Deren Eigenschaften werden hinsichtlich der Anwendungsanforderungen als Bauteile und speziell für die Gebäudehülle untersucht.

1 Im Bauwesen zur Anwendung kommende Membranwerkstoffe

Die Anwendungsmöglichkeiten von Membrankonstruktionen sind mit den Eigenschaften der Werkstoffe sehr eng verbunden. Die bislang eingesetzten Materialien lassen sich nach ihrem Lastabtragungsverhalten in anisotrope und isotrope Werkstoffe unterteilen. Die im konstruktiven Membranbau eingesetzten isotropen Materialien sind üblicherweise aus thermoplastischen Werkstoffen hergestellte Folien; anisotrope Mem-

branen werden vor allem aus technischen Textilien unterschiedlicher Werkstoffe hergestellt.²

Da der Wetterschutz die wichtigste Anforderung an eine Membran beim Einsatz in der Gebäudehülle ist, werden bei der Untersuchung die Membranen hinsichtlich der Anwendungsvarianten als geschlossene und offene Materialien sortiert. Daneben gehören die für besondere Zwecke hergestellten Membranmaterialien zu den Spezialmaterialien³ (Abb. 2-1), wie beispielsweise solche mit hohem Diffusionswiderstand.

Von den geschlossenen Membranmaterialien werden die beschichteten Gewebe und die Folien im Bauwesen am meisten verwendet. Die offenen Membranmaterialien können bei entsprechender Witterungsbeständigkeit im Außenbereich als reiner Sonnenschutz oder zum Blendschutz eingesetzt werden, so wie auch im Innenbereich zur Anwendung kommen.

1.1 Beschichtete Gewebe

Bei beschichteten Membranen übernimmt das Gewebe die Funktion der Lastabtragung, die Beschichtung hat die Aufgabe das Gewebe vor Beschädigung zu schützen, die erforderliche Dichtigkeit gegen Feuchtigkeit und Luft zu gewährleisten und je nach Anwendungsfall mehr oder weniger

lichtdurchlässig zu sein. Außerdem werden auf diese Weise auch das Anschmutzverhalten und die Lebensdauer der Gewebe deutlich verbessert.

1.1.1 Gewebe

Der kleinste textile Baustein von technischen Textilien ist die Faser. Die unterschiedlichen Faserarten lassen sich grob der Gruppe der Naturfasern oder den Chemiefasern zuordnen. Zur Gruppe der Naturfasern zählen die Pflanzen-, Tier- und Mineralfasern. Dem gegenüber stehen die industriell herstellbaren Fasern. Sie lassen sich in Chemiefasern aus natürlichen Polymeren, in Fasern aus synthetischen Polymeren (Synthesefasern) und in Fasern aus anorganischen Rohstoffen (Glasfasern, Metallfasern ...) unterteilen.⁴

Während des Herstellungsprozesses werden Fasern zunächst zu Garnen zusammengefasst. Garne dienen als Ausgangsprodukt für die Herstellung von Gelegeten, Geweben, Gewirken und Gestrickten. Die Produkte lassen sich drei großen Gruppen zuordnen: die Gruppe der Maschenwaren (Gewirke, Gestricke), der Webwaren (Gewebe, Nähgewebe) und der Non-Wovens (Vliese, Filze, Fadengelege).⁵ Durch ihre mechanischen Eigenschaften eignen sich besonders Gewebe im Bereich des textilen Bauens

für einen Einsatz als lastabtragendes Trägermaterial. (Abb. 2-2,3)

Gewebe können mit verschiedenen Technologien hergestellt werden. Allen Geweben gemeinsam ist jedoch die gegenseitige Einbindung der Kett- und Schussfäden, so dass ein Gewebe per se ein dimensionsstabiles Gebilde darstellt. Die Art der Bindung und die gewählte Fadendichte haben einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Gewebes. Die aus der Weberei oder der Wirkerei kommenden Rohwaren werden vor dem Einsatz als Baustoff einer Ausrüstung unterzogen. Prinzipiell erfolgt die Bearbeitung in zwei Stufen: Vorbehandlung und Endausrüstung.⁶

Die beschichteten Gewebe bestehen aus textilem Trägermaterial und dessen Beschichtungen. In der Abb. 2-4 sind die Eigenschaften der Gewebe aus verschiedenen Rohstoffen aufgeführt, denen zum Vergleich ein Baumwollgewebe gegenüber gestellt ist.

- Polyestergerewebe

Das Polyestergerewebe ist eines der am meisten eingesetzten Trägermaterialien textiler Membranen und wird als Standardprodukt angewendet. Das Polyestergerewebe hat eine gute Dehnbarkeit und Elastizität, die zu einer gu-

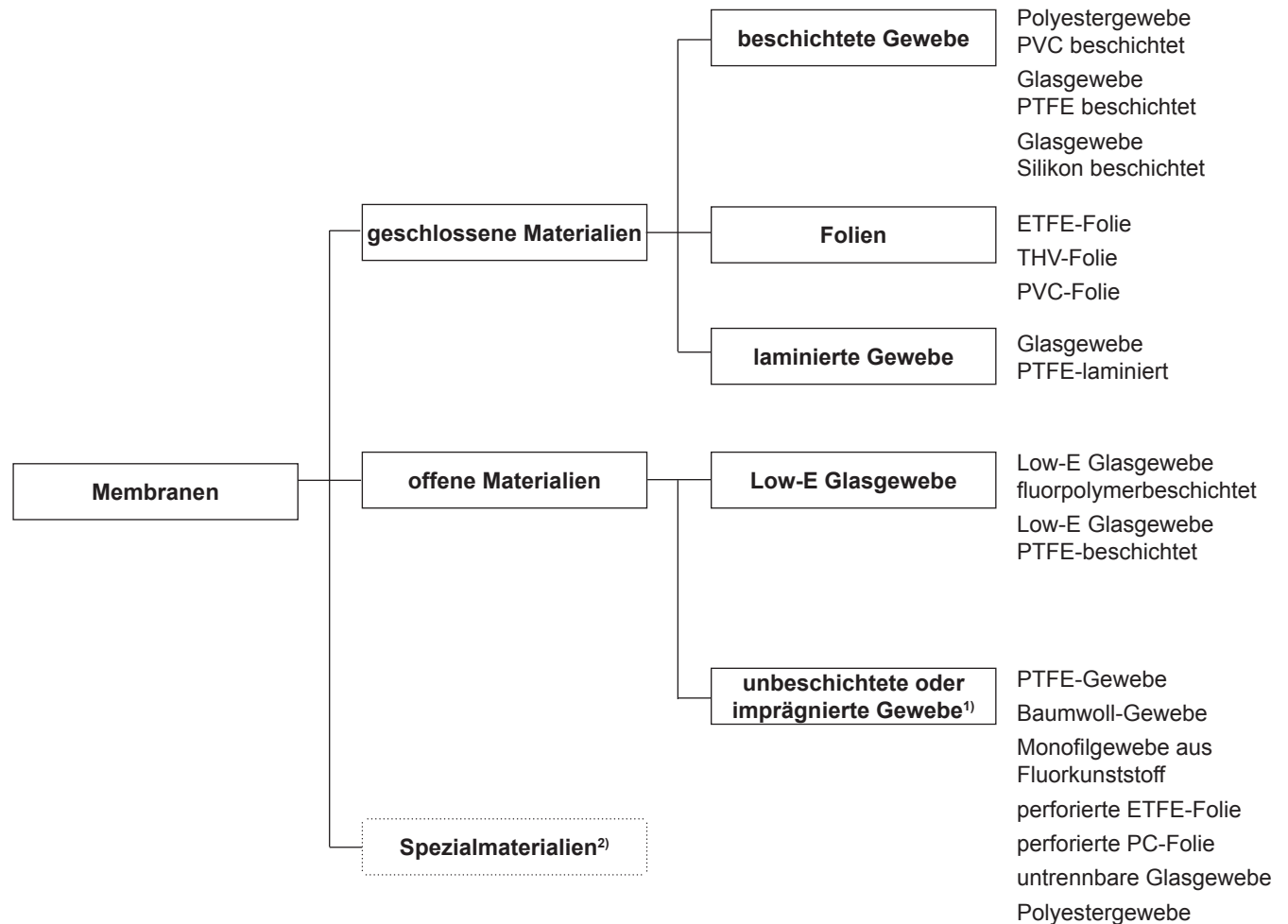


Abb. 2-1: systematische Darstellung von Membranmaterialien ⁷

¹⁾ ausschließlich Anwendung im Innenbereich;

²⁾ diese Materialien werden in Rahmen der Arbeit weiter untersucht

ten Knickbeständigkeit führt. Unter Sonnenstrahlung nehmen die mechanischen Eigenschaften des Materials ab - und damit die Lebensdauer.⁸

- **Glasfasergewebe**

Dieses Gewebe hat besonders hohe Reißfestigkeit, aber eine niedrige Dehnbarkeit. Deshalb muss das Material vorsichtig behandelt werden und einen exakten Zuschnitt erhalten. Es ist aufgrund seiner hohen Temperaturbeständigkeit als ein Trägermaterial für PTFE-Beschichtungen geeignet.⁸

- **Aramidgewebe**

Die Anwendung von Aramidfaser für Gewebe ist relativ neu. Das Material hat eine hohe Reißfestigkeit und ist resistent gegen chemische Beanspruchungen. Aber es hat eine schlechte Beständigkeit gegen hohe Temperaturen und UV-Strahlung. Deshalb ist eine opake Beschichtung notwendig.⁸

1.1.2 Beschichtungen

Wegen der Eigenschaften der Rohstoffe ist die Empfindlichkeit einiger Fasern gegenüber Feuchtigkeits- oder Strahlungseinwirkungen zu beachten. Unmittelbar hieraus leiten sich die Anforderungen an die Beschichtung

ab, die vor allem Schutzfunktionen ausübt. Eine üblicherweise beidseitig aufgetragene Beschichtung und eine Oberflächenversiegelung können die Gewebe schützen, und ihre Eigenschaften, wie z.B. die Weiterreißfestigkeit und die Dauerknickbeständigkeit, beeinflussen. Zudem führt die Beschichtung nicht nur zu einer Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Feuer, Mikroben, chemische Einflüsse sowie Pilzbefall. Sie ermöglicht auch eine unterschiedliche Farbgebung, vermeidet auch Winkelverdrehungen von Gewebefäden und führt somit zu einer Erhöhung der Membranschubsteifigkeit bei kurzzeitiger Belastung. Mit den Beschichtungen kann das nötige Bewitterungsverhalten, die Luft- und Wasserdichtigkeit, sowie die Abrasionsbeständigkeit und die Formstabilität verbessert werden.⁹

Aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften von Membrangeweben, z.B. Schmelztemperatur, müssen geeignete Beschichtungsarten verwendet werden. Für das beidseitige Beschichten der Gewebe kommen die verschiedensten Kunststoffe in Betracht, so wie PVC, PTFE, ETFE, PUR (Polyurethan), Silikon, usw. (Abb.2-5)

1.1.3 Produkte

Nach dem neuesten Stand der Technik können die PVC-beschichteten Polyestergewebe und die PTFE-beschichteten Glasfasergewebe als Standardprodukte angesehen werden, die in der Gruppe der beschichteten oder laminierten eng- oder weitmaschigen Gewebe alle wichtigen technischen Voraussetzungen erfüllen können, um als Material und im Bereich des Wetterschutzes für große Spannweiten und Modulgrößen eingesetzt werden zu können. Bisher werden die meisten aller Membranprojekte mit diesen zwei Materialtypen realisiert. Daneben werden die mit Silikon beschichteten Aramidfaser-, und Glasfasergewebe für besondere Zwecke angewandt.

- **PVC-beschichtetes Polyester-gewebe**

Unter den heute üblichen Materialien kommt den PVC-beschichteten Polyestergeweben mengenmäßig die größte Bedeutung zu. Sie haben sich sowohl bei mechanisch, als auch bei pneumatisch vorgespannten Konstruktionen bewährt. Aufgrund ihrer sehr guten Faltpbarkeit eignen sie sich außerdem für wandelbare Konstruktionen, z.B. bewegliche Dächer.⁹ (Abb. 2-7)



Abb. 2-2: Herstellung der Gewebe

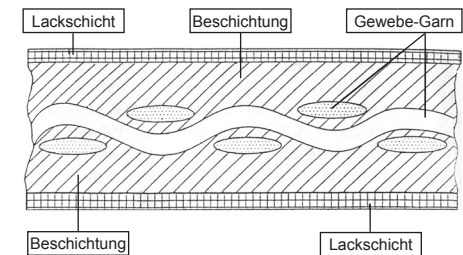


Abb. 2-3: Schematischer Aufbau von beschichteten Geweben (nach Schulz)

- PTFE-beschichtete Glasfasergewebe

PTFE-beschichtete Glasfasergewebe kommen insbesondere bei Bauten mit erhöhten Anforderungen an das Anschmutzungsverhalten, an die Dauerhaftigkeit und an das Brandverhalten des Werkstoffes zur Anwendung. Sie sind, im Bezug auf die Rohware, um ein mehrfaches teurer als die PVC-beschichteten Polyestergerewebe, die Kosten für Zuschnitt und Fügechnik hingegen liegen deutlich darunter.⁹ (Abb. 2-8)

- PVC oder PTFE beschichtete Aramidfasergewebe

Die enorm tragfähigen PVC- oder

PTFE- beschichteten Aramidfasergewebe werden nur auf Anfrage hergestellt, was „einerseits ein sehr detailliertes Eingehen auf Kundenwünsche erlaubt, andererseits jedoch die Abnahme einer nicht unbeträchtlichen Mindestmenge der vergleichsweise teuren Ware bedingt“. Aufgrund der UV-Empfindlichkeit der Faser dürfen die Beschichtungen nicht lichtdurchlässig sein, wodurch bestimmte Anwendungsbereiche ausgeschlossen werden.^{8,9}

- Silikonbeschichtete Glasfasergewebe

Aufgrund seines Anschmutzverhaltens werden die silikonbeschichteten Glasfasergewebe im Hoch-

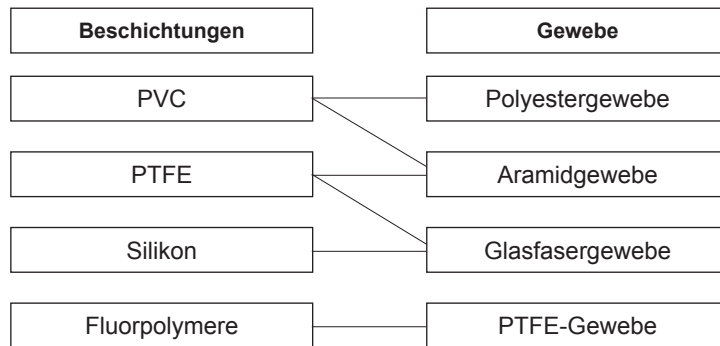


Abb. 2-5: Anpassungsmöglichkeiten von Geweben und Beschichtungen

[- bis +]	Polyester	Glasfaser	Aramid	Baumwolle
Knickbeständigkeit	+	-	+	+
Reißfestigkeit	+	+	+	-
Dehnbarkeit	+	-	+	-
Temperaturbeständigkeit	-	+	+	-
UV-Beständigkeit	-	+	-	-
Anschmutzverhalten	-	+	+	-
Feuchtigkeitbeständigkeit	+	-	+	-
Wandelbarkeit	+	-	+	+
Besondere Beanspruchung	+	+	-	-
Kosten	+	+	-	+

Abb. 2-4: Eigenschaften der Trägermaterialien von Geweben^{8,9}

[- bis +]	PVC	PTFE	Silikon	Fluorpolymere
Knickbeständigkeit	-	+	-	+
Transluzenz	-	+	+	+
Umweltbeständigkeit	-	+	+	+
Temperaturbeständigkeit	-	+	+	+
UV-Beständigkeit	-	+	+	+
Anschmutzverhalten	-	+	+	+
UV-Durchlässigkeit	-	-	-	+
Bearbeitungstemperatur	+	-	-	-
Besondere Beanspruchung	+	-	-	-
Kosten	+	-	-	-

Abb.2-6: Eigenschaften der Beschichtungen^{8,9}

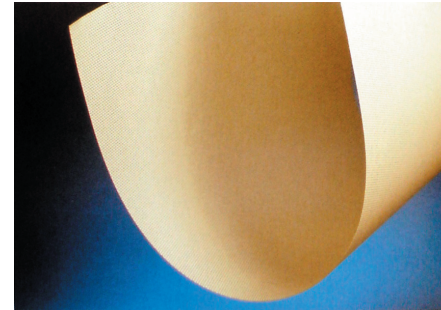
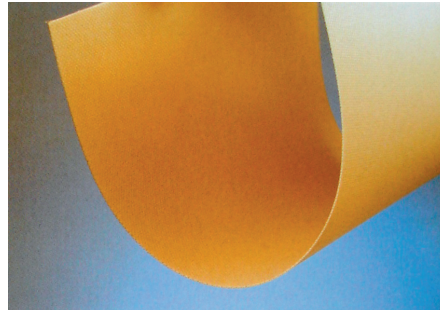


Abb.2-7: PVC beschichtete Polyestergerewebe

Abb.2-8: PTFE beschichtete Glasfasergerewebe

Abb.2-9: Silikon beschichtete Glasfasergerewebe

bau bislang wenig eingesetzt. Mit gleichem Trägermaterial haben „die silikonbeschichteten Glasfasergewebe ein ähnliches mechanisches Verhalten wie solche PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe“.⁹ Die Silikon-Beschichtung bietet eine bessere Dampfdiffusionsdichte und Lichttransluzenz als das mikroporöse PTFE. Da die mit Silikon beschichteten Materialien nicht thermisch verschweißt werden können, können diese Membranen nur mittels Klebeverbindungen dauerhaft und hochfest verbunden werden.^{8,9} (Abb. 2-9)

1.2 Folien

Von den vielen zur Verfügung stehenden Kunststofffolien werden von den thermoplastischen Werkstoffgruppen meistens zwei benutzt, die Fluorpolymerfolien, zumeist ETFE (Polytetrafluorethylen)- oder THV (Tetrafluorethylen Hexafluorpropylen

Vinylidenflourid)- Folien, und die PVC (Polyvinylchlorid)- Folien. Im dauerhaften Außeneinsatz werden nur Folien auf Fluorkunststoffbasis erfolgreich verwendet. PVC-Folien werden wegen ihrer extrem geringen Festigkeit, ihrer hohen Materialdehnung und geringen UV- und Hitzebeständigkeit ausschließlich im Innenbereich eingesetzt. Bei dieser Untersuchung werden die Eigenschaften der Fluorpolymerfolien, bzw. die Folien aus ETFE dargestellt.¹⁰

Bei diesen beiden Werkstoffen kann die Herstellung und Verarbeitung der Rohstoffe zu einer Membran in vier wesentliche Produktionsschritte unterteilt werden. Dies sind Polymerisation, Granulierung, Extrusion und Konfektion. Unter Polymerisation (Vervielfachung) versteht man die Aneinanderreihung von kleinen Molekülen (Monomeren) zu einem großen Molekül. Aus gleichen Monomeren entsteht ein Polymer, aus un-

terschiedlichen Monomeren entsteht ein Copolymer.¹⁰ (Abb. 2-14)

Dieser molekulare Aufbau bestimmt wesentlich das mechanische Verhalten der Folien, die im Vergleich zu den Geweben eine erheblich geringere Tragfähigkeit haben und max. Spannweiten der Pneu- und Dachgeometrie von rund 4,5 Meter bei lang gestreckten und ca. 7,5 m bei runden Grundrissformen erlauben.¹¹ Weiterhin verlieren die Thermoplaste mit steigender Temperatur an Festigkeit und ‚kriechen‘ unter zu großer Vorspannung.

Aufgrund im Vergleich zu anderen Technologien besserer mechanischer und optischer Eigenschaften werden bislang ausschließlich die im Breitschlitz-Extrusionsverfahren hergestellten Flachfolien im Bauwesen eingesetzt. Ihre Dichte beträgt 1750 kg/m^3 , die herstellbare Foliendicke zurzeit bis zu 0,25 mm.

- ETFE-Folien

Die ETFE-Folien bestehen aus dem Fluorpolymer-Werkstoff Ethylen-Tetrafluorethylen, kurz ETFE genannt. Dies stellen zurzeit das gebräuchlichste Folienmaterial für pneumatisch gestützte Membrankonstruktionen dar. Sie sind standardmäßig zwischen 0,05 mm und 0,25 mm dünn und haben eine Lichtdurchlässigkeit bis zu 95%. Wegen der mechanischen Eigenschaften der Folienmaterialien kann die maximale Spannweite einer lastabtragenden Folienkonstruktion im Außenbereich nur deutlich geringer sein als eine entsprechende Konstruktion aus einem beschichteten Gewebe.¹³ (Abb. 2-10,11)

Die Rollenbreite der ETFE-Folien ist ebenfalls herstellungsbedingt auf bislang 1,55 m beschränkt.¹²

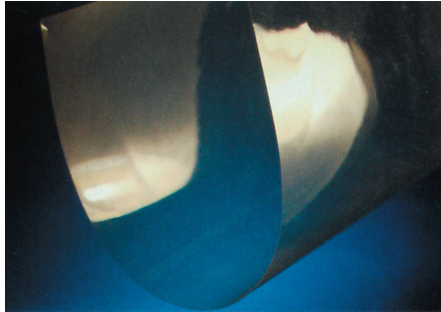


Abb.2-10: ETFE-Folie

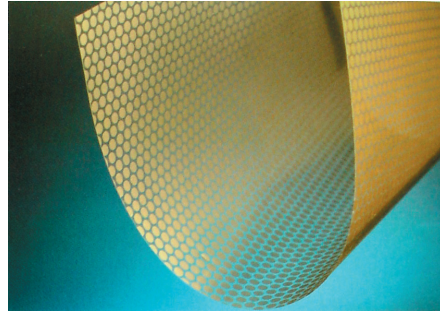


Abb.2-11: Bedruckte ETFE-Folie



Abb.2-12: PTFE Gewebe

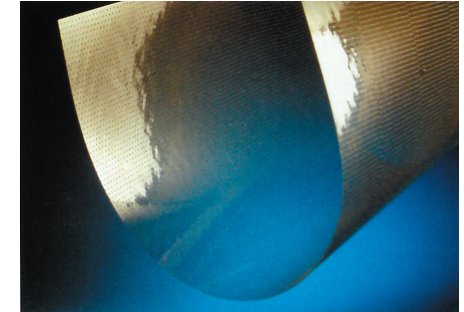


Abb.2-13: Mikroperforierte Folie

- THV-Folien

Die ebenfalls transparenten THV-Folien, deren Stärke von 0,08 mm bis zu mehreren Millimetern reicht, sind ähnlich widerstandsfähig wie ETFE-Folien und können ebenfalls im Außenbereich eingesetzt werden. Wegen einer geringeren Reißfestigkeit bei etwa gleich hoher Reißdehnung im Vergleich mit ETFE-Folien kommt die Anwendung der THV-Folien als Material für lastabtragendes Element nicht in Frage. Deswegen wurden THV-Folien bisher nur vereinzelt eingesetzt.⁸

- PVC-Folien

PVC-Folien bieten sich nur für Innenanwendungen bei geringeren Spannweiten und für temporäre Anwendung im Messebau an. Auch für Lichtdecken in geschlossenen Gebäuden ist dieses Mate-

rial geeignet. Das stark temperaturabhängige Dehnungsverhalten der Folien ist neben ihrer geringen Festigkeit ein Ausschlusskriterium für Außenanwendungen.⁸

1.3 offene Membranmaterialien

Offene Membranmaterialien sind beschichtete Gittergewebe, unbeschichtete oder imprägnierte eng- oder weitmaschige Gewebe oder mikroperforierte Membranen, die vorzugsweise für Außen- und Innenanwendungen zum Einsatz kommen. (Abb.2-12,13) Aufgrund der Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit und an das Anschmutzverhalten ist allerdings nur eine Anwendung mit dem Monofilgewebe aus Fluorkunststoff im Außenbereich möglich.

Neben der Gestaltung kann durch den Einsatz von offenen Membranmaterialien im Innenbereich die Beleuchtung und die Akustik optimiert werden.

Durch ein angenehmes Streulicht im natürlichen Lichtspektrum können die offenen Materialien als Lichtfilter oder Sonnenschutz eingesetzt werden. Sowohl die Gewebe, als auch perforierte transparente Folien mit guten Schallabsorptionswerten, mikroperforierte Akustikmembranen (z.B. bestehend aus Glasgewebe, Polycarbonat- oder ETFE-Folien) können verwendet werden.

Aufgrund der fehlenden Witterungsbeständigkeit werden die offenen Gewebe bei der Untersuchung zu MMK nur hinsichtlich des Einsatzes für den Innenbereich berücksichtigt.



Abb. 2-14: Herstellung von Folien

2 Eigenschaften von Membranen hinsichtlich der Anwendung in Gebäudehüllen

Unter dem Begriff Membran versteht man im Bauwesen „leichte, auf Zug belastete, gespannte Flächen aus dünnen, manchmal lichtdurchlässigen Geweben oder Folien“.¹⁴ Die Eigenschaften dieser Materialien unterscheiden sich stark von denen der Baustoffe Holz, Glas, Stahl, Aluminium oder Stein, und führen zu Besonderheiten bei der Anwendung im Hochbau. In Anlehnung an die Betrachtungskategorien der Gebäudehülle: Funktion, Konstruktion, Gestaltung und Ökologie werden die Eigenschaften der beim Bauwesen am häufigsten angewendeten Membranwerkstoffe unter folgenden Aspekten bewertet:

- mechanische Eigenschaften;
- Beständigkeit;
- bauphysikalische Eigenschaften;
- gestalterische Eigenschaften;
- ökologische Aspekte

um die Anwendungsmöglichkeiten und -potentiale von Membranen in der Gebäudehülle aufzeigen zu können.¹⁵ (Abb. 2-15)

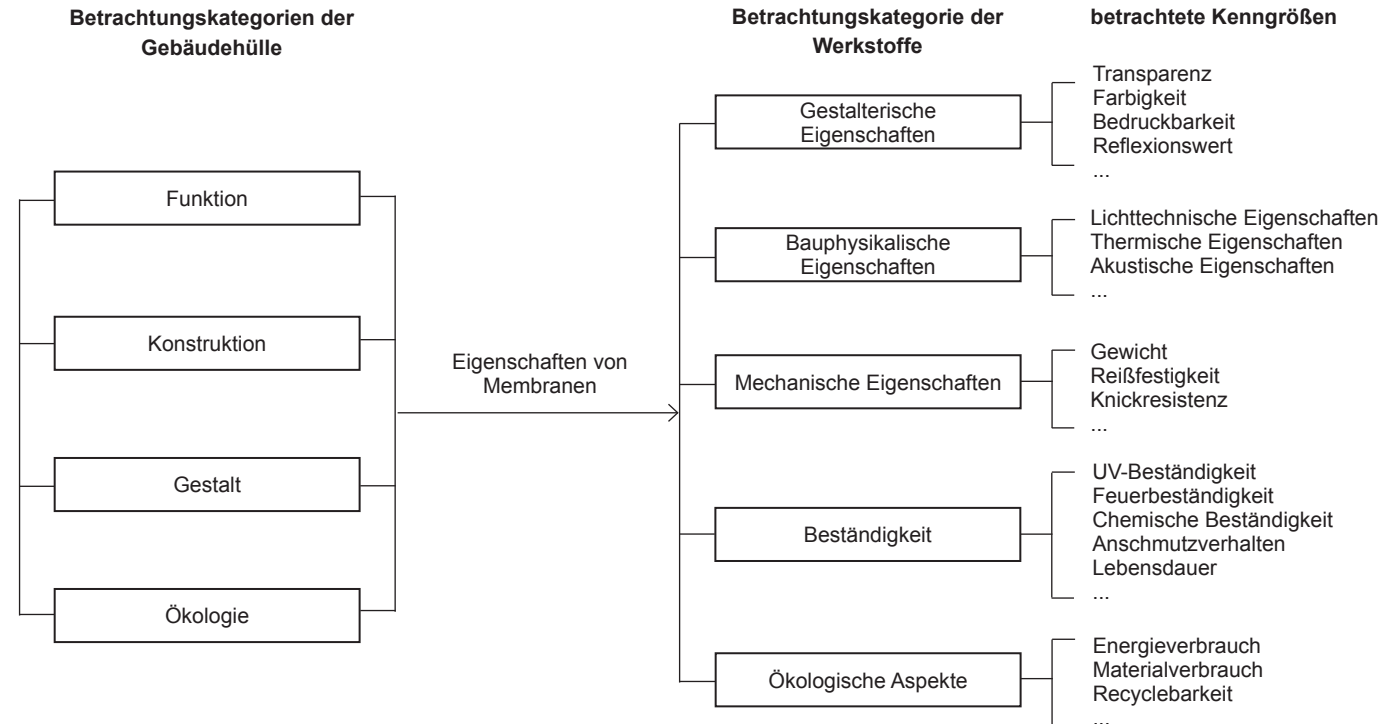


Abb.2-15: Übersicht der Eigenschaften von Membranwerkstoffen

2.1 Mechanische Eigenschaften

Die Leichtigkeit des Materials zählt zu den wichtigsten Eigenschaftsmerkmale von Membranen. Da die biegeweichen Membranen ausschließlich als durch Zugspannung stabilisierter Baustoff zum Einsatz kommen, sind die mechanischen Zugfestigkeiten und elastisches Verhalten wesentliche Kriterien. Dazu zählen ferner die Resistenz gegen Dehnung, Wei-

terreißfestigkeit, Knickbeständigkeit, das Kriech- und Temperaturverhalten der Materialien.

Gewebearten sind im praxisrelevanten Temperaturbereich aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften zwar grundsätzlich für den Einsatz in der Gebäudehülle geeignet, können jedoch bei verschiedenen Parametern, wie z.B. Weiterreißfestigkeit und Dauerknickbeständigkeit, noch durch

eine aufgetragene Beschichtung und eine Oberflächeversiegelung positiv beeinflusst werden.^{10,11}

2.1.1 Masse

Aus der geringen Dicke folgt eine extrem niedrige Eigenmasse von Membranen. Die Membranmaterialien mit einer Flächemasse von ca. 0,1 bis 2 kg/m² sind ausgesprochen leicht, was einen großen Vorteil vor allem

bei großen Spannweiten darstellt. Nur sehr schwere Membranmaterialien oder Sonderanfertigungen kommen auf ein Masse von mehr als 1,5 kg/m². Im Vergleich mit Glas, (eine 4 mm dicke Verglasung hat z.B. ein Flächenmasse von 10 kg/m²), kennzeichnet die Membranwerkstoffe bzw. die Membrankonstruktionen ein deutlich geringeres Flächenmasse.¹⁶ (Abb.2-16)

2.1.2 Zugfestigkeit

Da die Zugfestigkeit ein Hauptkriterium bei der Materialbeurteilung ist, sind die Membranen bezogen auf ihre unterschiedlichen Festigkeiten in verschiedene Typen unterteilt. Bei den Geweben führen die Überlagerungen der materialabhängigen, geometrischen und herstellungsbedingten Eigenschaften von Faser, Faden und Gewebe zu einem anisotropen, nichtlinearen, anfangs plastischen und letztlich näherungsweise viskoelastischen Spannungs-Dehnungsverhalten. Die Verarbeitung des Fasermaterials zu technischen Geweben erfolgt in Spezialwebereien. Die jeweilige Festigkeit wird durch die Wahl der Webart, der Fadenstärke und der Fadenzahl bestimmt.¹⁷ Im Gegensatz zu den anisotropen Geweben weisen die isotropen Folien ein Spannungs-Dehnungsverhalten auf, das in allen Richtungen definitionsgemäß näherungsweise gleich ist.

2.1.3 Reißfestigkeit

Die geforderte Materialfestigkeit ergibt sich aus den membranstatischen Entwurfsberechnungen. Dabei reicht die Bandbreite der Festigkeit bei gebräuchlichen Membranen von ca. 0,2 kN/5cm bei leichten Folien bis zu ca. 10 kN/5cm bei beschichteten Geweben.

Neben dem verwendeten Garnmaterial und der eingestellten Fadendichte, d.h. der Anzahl der Fäden je cm in Kett- und Schussrichtung, hat die Art der Bindung einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Gewebes, da sie das Weiterreißverhalten in beschränktem Ausmaß beeinflusst.¹⁸

2.1.4 Knickbeständigkeit und Faltbarkeit

Bei den Konfektionierungsprozessen im Werk und den Montageabläufen ist es erforderlich, dass alle einzusetzenden Materialien eine gute Knickbeständigkeit haben. Sie ist bei Faltmembranen für die Lebensdauer der Membranen mitentscheidend. Besondere Anforderungen werden an Membranmaterialien für Veranstaltungsbauten, die häufig auf- und abgebaut werden, oder an Faltmembranen gestellt. Die Membranen auf Glasfasergewebematerialien sind hierbei auszuschließen. Die beste Knickbe-

	Gewebe	Folien	Fensterglas
Rohdichte (kg/m ³)	1,100-2,600	1,400-2,200	2,500
Dicke (mm)	0,8-2,6	0,05-0,5	2-12
Flächenmasse (kg/m ²)	0,1-2,02	0,085-1	5-30

Abb.2-16: Masse von Membranwerkstoffen und Fensterglas ¹⁶

ständigkeit liefern beschichtete und unbeschichtete PTFE- Gewebe.

2.2 Beständigkeit

In diesem Bereich wird die Beständigkeit der Membranen, die Beeinflussung durch Bewitterung und die möglichen Faktoren, die zu einer Beschädigung führen könnten, hinsichtlich eines Einsatzes im Außenbereich betrachtet.

2.2.1 UV-und Witterungsbeständigkeit

Beim Einsatz im Außenbereich stellt die Sonnenstrahlung eine der wichtigsten Einflussgrößen dar. Dabei beeinflusst in erster Linie die Beständigkeit bei UV-Strahlung die Lebensdauer der Membranen. Die UV-Beständigkeit bei den beschichteten Geweben wird durch entsprechende Beschichtungen gewährleistet. Es ist festzuhalten, dass eine opake Beschichtung für UV-empfindliche Trägermaterialien, z.B. die Aramidfasergewebe, notwendig ist. Bei den

Folien wird die Beständigkeit von den Rohstoffen bestimmt. Dabei zeigt sich, dass die im Preis günstigsten Werkstoffe, die PVC-Folien für den Einsatz im von der Sonne direkt bestrahlten Bereich nicht geeignet sind.

Die heutzutage in der Außenanwendung gängigen konstruktiven Membranen aus Folien oder beschichteten Geweben sind sowohl UV- als auch witterungsbeständig. Die weichmacherfreien Materialien aus reinen Fluorkunststoffen, wie PTFE-beschichtetes Glasgewebe oder ETFE- Folien, zeigen selbst nach 25 Jahren keine nennenswerten Qualitätsminderungen durch Sonne und Witterung. Die Beständigkeit dieser Membranen kann mit der von üblichen Baumaterialien verglichen werden.¹⁹

2.2.2 Brandverhalten

Im Bauwesen ist die Schwerentflammbarkeit verwendeter Materialien in der Regel eine Mindestanforderung. Bei dem Einsatz von Kunststoffen im Bereich der Gebäudehülle kommt

den brandschutztechnischen Eigenschaften eine besondere Bedeutung zu. Zu den wichtigsten Kriterien gehören ²⁰

- Entflammbarkeit
- Zündtemperatur
- Zersetzungstemperatur
- Qualmbildung
- Toxizität der Zersetzungsprodukte
- Korrosion durch Zersetzungsprodukte

Die in diesem Teil genannten Membranwerkstoffe sind meistens als schwerentflammbar (DIN 4102- B1) oder nichtbrennbar (DIN 4102- A2) eingestuft. Zusätzlich stellen die Membranen aufgrund ihrer geringen Masse eine niedrige Brandlast und eine geringe Gefahr im Hinblick auf herabstürzende Bauteile dar. Allerdings ist die Rauchbildung wegen der Sichtbeeinträchtigung und der Entstehung von giftigen Gasen im Brandfall zu betrachten.

Bei Untersuchungen des Brandverhaltens von Membranbauteilen in realisierten Projekten ist zu beobachten, dass die Folien beim Brandfall schnell schmelzen können, was den Rauch- und Wärmeabzug über

dem Brandherd ermöglichen kann.²¹ (Abb. 2-17)

2.2.3 Chemische Beständigkeit

Die chemische Beständigkeit der Membrane wird in erster Linie von den Werkstoffeigenschaften bestimmt. Die gute Chemikalienbeständigkeit der gebräuchlichen Membranwerkstoffe erlaubt den Einsatz in aggressiven Umweltsituationen in der ganzen Welt. Membranen finden beispielsweise auch Anwendungen im Gewässerschutz.

2.2.4 Anschmutzverhalten

Das Anschmutzverhalten zählt für das Erscheinungsbild und Folgekosten durch Reinigungen zu einem „mitunter wichtigen Kriterium“. Die beim Membranbau häufig verwendeten Fluorkunststoffe, wie ETFE, PTFE und PVDF, sind durch ihre Molekularstruktur und das dadurch bedingte antiadhäsive Verhalten allen anderen Baumaterialien einschließlich Glas deutlich überlegen.²²

Die Materialien unterscheiden sich nicht nur im Anschmutzverhalten, sondern auch im Reinigungsaufwand. Beides wird von der Anwendungssituation und der Verbindungstechnik beeinflusst. In einer Studie werden die Reinigungsanforderungen an eine Membranfassade untersucht, und

es zeigte sich, dass je nach Material eine mechanische Reinigung ein bis zwei Mal im Jahr erforderlich ist.²³

2.2.5 Alterungsbeständigkeit

Die Haltbarkeit im Außeneinsatz korreliert hauptsächlich mit der UV-Beständigkeit, teilweise auch mit der Hydrolyse- und Alkalibeständigkeit der Materialien. Bei wandelbaren Membrankonstruktionen ist der limitierende Faktor eher die mechanische Belastbarkeit und Knickempfindlichkeit des Materials sowie die Detailausführung. Bei der Innenanwendung liegt die zu erwartende Lebensdauer der Materialien wesentlich höher.

Beim Einsatz von Membranen ist zu beachten, dass viele der Kunststoffprodukte in der Regel eine wesentlich geringere Lebenserwartung aufweisen als andere Baumaterialien. Aus diesem Grund werden im Baubereich die PTFE und die ETFE Folien relativ zuverlässig mit einer Lebensdauer von mindest 25 Jahren verwendet.

2.3 Lichttechnische Eigenschaften

Durch Membranen ist es möglich, das Tageslicht in relativ großer Menge in ein Gebäude eindringen zu lassen, gleichzeitig aber klimatische Einflüsse wie Wind, Regen, oder Kaltluft abzuhalten. Je nach Werkstoff unterscheiden sich die lichttechnischen



Abb.2-17:Brandverhalten der Probe aus ETFE-Folien ²¹

Eigenschaften der Membrane. Die Lichttransmission der Membranen kann von 0% bei den opak beschichteten Geweben bis 95% bei den transparenten Folien betragen. Die Lichtabsorption beträgt üblicherweise je nach Farbe bis zu 25%. Die Lichtreflexion kann - beispielsweise bei PTFE-beschichtetem Glasgewebe - bis zu 70% betragen.²⁴

Die transluzenten Materialien ermöglichen eine ausgezeichnete Tageslichtbeleuchtung und teilweise einen Sonnenschutz. Das durch diese Materialien gefilterte Licht ist in der Regel diffus und gleichmäßig und besitzt nur einen beschränkten Einfluss auf plastische Wirkungen, so dass (für die Wahrnehmung) keine Raumtie-

fe entstehen kann.²⁵ Beispielsweise kann eine Membrandachfläche mit 5% Lichtdurchlässigkeit bei Tageslicht eine ausreichend helle Atmosphäre liefern, die den Einsatz von künstlichem Licht überflüssig macht.²⁶ Die transluzenten Membranen ermöglichen aber keinen direkten visuellen Kontakt mit der Außenwelt. Transparente Membranen dagegen bieten einen Ausblick bzw. Durchsicht und liefern weitergehend ungefiltertes Tageslicht. Andererseits lassen sie auch das direkte Sonnenlicht durchdringen und es besteht die Möglichkeit von Blendung, was unter bestimmten klimatischen Bedingungen und Nutzungsanforderungen problematisch sein kann.

Die Transmission der Lichtstrahlung von Membranen spielt auch für die Nutzung der indirekten Beleuchtung oder Durchleuchtung sowie den Energieeintrag in das Gebäude eine wichtige Rolle. Bei aus Glasfaser gebildeten Geweben, z.B. PTFE beschichtetem Glasfasergewebe, kann die kurzwellige Solarstrahlung das transparente Glasgewebe teilweise passieren, wird auf der beschienenen Raumfläche in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt und im Innenraum verbleiben. Diese Eigenschaft ermöglicht den „Glashaus-Effekt“ mit einer Überhitzung im Innenraum. Gegenüber Glas haben transparente ETFE-Folien allerdings den Vorteil ei-

ner deutlich höheren Durchlässigkeit im UV-Spektrum.

Die Eigenschaften, wie Transmission, Reflexion und Absorption des sichtbaren Lichts oder von Strahlung mit anderen Wellenlängen kann auch durch die Einfärbung oder Bedruckung der Materialoberfläche stark beeinflusst werden.

2.4 Thermische Eigenschaften

Künftig werden Membranen auch im Bereich thermisch anspruchsvoller Gebäudehülle-Konstruktionen eingesetzt werden.²⁷ Allgemein geht es bei den bauphysikalischen Eigenschaften um den Wärme- und Feuchtschutz von Gebäuden nach DIN 4108. Für die Membrankonstruktionen, besonders die mehrlagig aufgebauten Fassaden- oder Dachkonstruktionen, sind neben den jeweiligen Wärmedämmeigenschaften von Membranmaterialien die Luftdichtigkeit der Innenlage, die Dampfdiffusion und die Tauwasserbildung innerhalb und auf der Oberfläche der Membranlagen besonders zu beachten.

2.4.1 Wärmetransmission

Zunächst ist festzustellen, dass dünne Kunststoffmaterialien mit einer Dicke von 0,05 bis 2,6 mm keine guten Wärmedämmeigenschaften aufweisen. PVC beschichtetes Polyesterge-

webe hat mit 4,0 bis 4,5 W/m²K etwa denselben U-Wert wie eine einfache Fensterscheibe.²⁸ Daraus resultiert eine Reihe von Nachteilen, die den Einsatz von ungedämmten Membrankonstruktionen für die Raumklimatisierung im Grunde ausschließen:²⁹

- Hoher Energieverbrauch für Heizung bzw. Kühlung
- Risiko von Tauwasserbildung bei kalter Witterung
- Risiko von Aufheizung bei warmer Witterung

Ein Lösungsansatz zur Erfüllung der thermischen Anforderungen liegt im konstruktiven Bereich beim Einsatz mehrlagiger Konstruktionen entweder mit Luftzwischenräumen oder mit addierten Dämmmaterialien. Bei den wärmegeprägten Membrankonstruktionen müssen die unterschiedlichen Membranlagen, die jeweiligen Schutzfunktionen übernehmen.³⁰

Die Membrankonstruktionen können so gewählt werden, dass sich ein thermisches Gleichmaß zwischen Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe im Gebäudeinnern einstellt. In kalten Klimazonen, in denen der Wärmeschutz die Hauptrolle spielt, kann die Gewebehaut so gestaltet werden, dass möglichst viel Umgebungswär-

me transmittiert und im Raum genutzt werden kann. Unter solchen klimatischen Bedingungen könnte die Hülle eines Gebäudes den Treibhauseffekt fördern, d.h. bei starker Sonneneinstrahlung gleichzeitig die Wärmeverluste minimieren. Dies lässt sich beispielsweise durch transparente oder transluzente Membranlagen mit einer emissionsarmen Beschichtung (die langwellige Strahlung reflektiert) in Kombination mit einem transparenten Dämmmaterial erreichen.³¹

2.4.2 Dichtigkeit

Aus technischen und hygienischen Gründen sollen die Zwischenräume und die Dämmstoffe innerhalb der Membranlagen vor Feuchtigkeit geschützt werden. Neben den Anforderungen an die Undurchlässigkeit bei der konstruktiven Ausbildung von Fugen ist die Dichtigkeit der Membranflächen sicherzustellen.

Eine Kennzahl für den Widerstand, den eine Schicht dem Wasserdampf bietet, ist der sd-Wert: Er gibt an, wie dick eine vergleichbare Luftschicht ist, die dem Wasserdampf denselben Widerstand entgegensetzt.³² Nach DIN 4108 soll der sd-Wert der Dampfbremse für belüftete Dächer größer als 2 m sein.

Die sd-Werte von Folien und kunststoffbeschichteten Geweben liegen

zwischen den dampfdichten und dif-fusionsoffenen Materialien.³³ Das PVC-beschichtete Polyestergewebe (sd-Wert = 9-11 m) ist wesentlich dampfdichter als PTFE-beschichtete Glasgewebe (sd-Wert = 2-6 m). Der sd-Wert von ETFE-Folien beträgt 1m. Mit diesen relativ niedrigen sd-Werten können die Membranen nicht als Dampfbremse eingesetzt werden!

2.4.3 Tauwasserbildung

Wegen der niedrigen Wasseraufnah-mefähigkeit von Kunststoffen kann ein Tauwasserausfall bei entsprechender Temperatur- und Wasserdampfdruck-Verteilung im Inneren von einlagigen Membranbauteilen stattfinden. Der Aufbau der mehrlagigen Konstruktion ist nützlich um den Wärmewiderstand der Bauteile zu verbessern und die Tauwasserbildung zu vermeiden.

2.5 Akustische Eigenschaft und Schalldämmung

Die akustischen Eigenschaften der Membran werden von der Struktur des Materials und der Form der Kon-struktion beeinflusst. Wegen ihrer geringen Massen haben Membran-konstruktionen eine nur sehr geringe Schalldämmwirkung.

Allgemein beträgt die Schalldäm-mung einer einlagigen Membran-konstruktion ungefähr 10 dB.³⁴ In der

Praxis zeigte sich, bei einer mehrla-gigen Dachkonstruktion „durch die Veränderung des Flächengewichts und des Abstands der einzelnen bie-geweichen Membranschichten ließ sich ein bewertetes Schalldämmass von bis $R'w = 55$ dB erreichen“. Diese Aufbau wirkt akustisch als Hohlraum-dämpfung und stellt gleichzeitig einen erhöhten Wärmeschutz dar.³⁵

Die Entwicklung von neuen Materi-alien führte zu Verbesserungen der Praxistauglichkeit von Membranen. Die mikroperforierten Folien weisen mit einer großen Transluzenz und den ausgezeichneten akustischen Ei-genschaften in Bezug auf die Schall-absorption einen großen Vorteil auf.³⁶ Daneben spielen die Abstandsgewe-be mit unterschiedlicher Stärke von Sandfüllungen eine sehr wichtige Rol-le bei den mehrlagigen Schallschutz-membranen.³⁷ Der Nachteil von feh-lender Tageslichtnutzung kann durch einer Kombination mit transparenten Teilen ausgeglichen werden.

2.6 Gestalterische Eigenschaften

Die Farbgebungsmöglichkeiten der Membranen weisen ein großes Spektrum auf. Es gibt Materialien mit großer, sogar beidseitig unterschied-licher Farbauswahl und andere, die nur in einer Standardfarbe erhältlich sind.

Bei den beschichteten Geweben sind die PTFE- und Silikon-beschichteten Glasfasergewebe nicht bedruckbar. Die PVC-beschichteten Polyesterge-webe lassen sich mit der so genann-ten Billboard- oder Backlittechnik bedrucken. Die Folien eröffnen mit ihrer Bedruckbarkeit vielfältige gestalter-ische Möglichkeiten, und können dar-überhinaus auch für eine Steuerung des Licht- und Energiedurchgangs verwendet werden.³⁸ Auch lässt sich durch die Veränderung des inneren Luftdrucks der Pneukissen aus Folien das Erscheinungsbild der Gebäu-dehülle verändern.³⁹ (Abb. 2-18, 19)

Aufgrund der Lichtdurchlässigkeit von Membranen, besonders der transparenten Folien, spielt auch die Beleuchtung eine wichtige Rolle bei den gestalterischen Eigenschaften der Materialien.⁴⁰ Allerdings sind bei der Beleuchtung, z.B. für spezielle farbliche Wirkungen in der Nacht, die zusätzlichen Kosten und der Energie-verbrauch zu berücksichtigen. Dabei muss der Planer erwägen, dass die ökologischen Aspekte viel wichtiger sind als das kurzlebige Image für ein futuristisches Gebäude.

2.7 Ressourcenverbrauch und Recyclebarkeit

Als Baustoff überzeugt die Memb-rane durch ihre hohe Zugfestigkeit, ihre geringe Masse und eine ein-

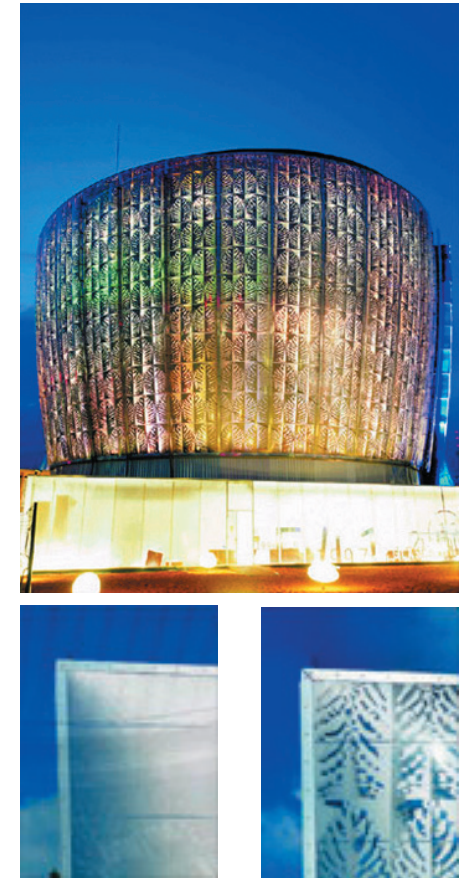


Abb.2-18: Beispiele von bedruckten Mem-branen.

Oben: Ansicht eines Expo-Pa-villions, Hannover, 2000;

Unten: verschiedene Ansichten der Fassade mit unterschied-lichem Innendruck der Folien-kissen.⁴¹

fache Herstellung. Gegenüber den „traditionellen“ Konstruktionen aus Holz, Stahl oder Stahlbeton, mit vergleichbarer Wärmedämmung und Ausstattung weisen Membranen den geringsten Primärenergieaufwand für die Konstruktion, d.h. für Herstellung, Transport, De- und Remontage, sowie Beseitigung auf.⁴²

Membranen leisten aufgrund der geringen Masse, der Stärke und der Flächenmasse einen wichtigen Beitrag für das ressourcenschonende Bauen. Außerdem können viele Materialien vollständig recycelt oder im Recyclingverfahren einer möglichst anwendungsnahen Verwertung zugeführt werden. Für die Membranmaterialien, wie die PTFE-beschichteten Gewebe, bei denen Wiederverwendungszyklen noch nicht gegeben sind, bestehen wegen der sehr langen Haltbarkeit Materialrücknahmegarantien der Produzenten.

Außerdem ermöglicht die geringe Masse der Membranmaterialien bei langen Transportwegen der vorgefertigten Module den niedrigsten Verbrauch an Logistikressourcen im Vergleich mit anderen Baustoffen.

3 Zusammenfassung

In diesem Teil wurden die Eigenschaften der meisten im Bauwesen verfügbaren Membranmaterialien

dargestellt, die sich nach den Werkstoffen für Gewebe, Beschichtung oder Grundstoffe der Folien stark unterscheiden. Bei der Ausführung werden nach konkreten Anforderungen die passenden Materialien ausgewählt. Es ist festzuhalten, dass die Lichtdurchlässigkeit der Membranen eine Nutzung der solaren Energie im Gebäude ermöglicht.

Heute weisen die Membranmaterialien immer bessere Beständigkeiten auf und werden mehr bei permanenten Projekten verwendet. Für eine Anwendung als Gebäudehülle auf Dauer genutzter Räume müssen die thermischen und akustischen Aufgaben erfüllt werden. Es ist bewiesen, dass durch den Aufbau der mehrlagigen Membrankonstruktionen zusätzlich die Wärmedämmeigenschaften verbessert werden und dass sie zudem schalldämmend wirken können.⁴³

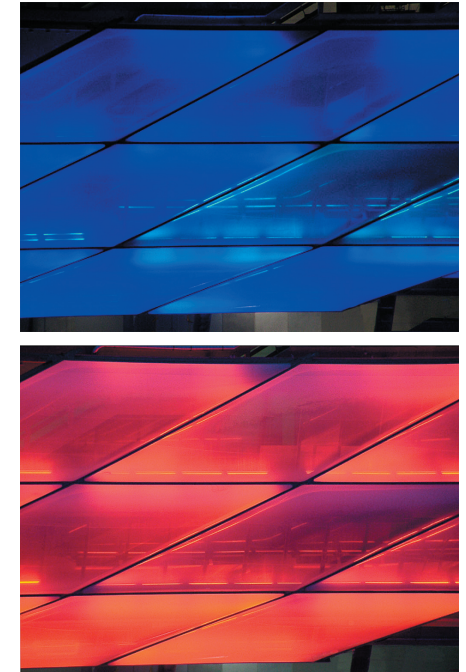


Abb.2-19: Beleuchtungseffekt der Membranfassade, Allianz-Arena, München.

Werkstoffe		Typ	Flächenmasse [g/m ²] ¹⁾	Zugfestigkeit ²⁾	Weiterreißfestigkeit ³⁾	Knickbeständigkeit ⁴⁾	Transluzenz [%]	Lichtreflexion [%]	Standardfarbe	Farbauswahl ⁵⁾
Beschichtete Gewebe	PVC-beschichtete Polyestergewebe	Typ I Typ II Typ III Typ IV Typ V Typ VI	800 900 1050 1300 1450 2000	3000/3000 4400/3950 5750/5100 7450/6400 9800/8300 13000/13000	350/310 bis 1800/1600 580/520 800/950 1400/1100 1800/1600 k.A.	++	bis 20 bis 17,5 bis 15 bis 12,5 bis 10 bis 7,5	50 bis 70	weiß	+
	PTFE-beschichtete Glasfasergewebe		800 1150 1550	3500/3500 5800/5800 7500/6500	300/300 bis 500/500	-	15 12 8	65 bis 75	weiß	+
	Silikonbeschichtete Glasfasergewebe		800 1270	3500/3000 6600/6000	300 570	-	bis 25	50 bis 70	weiß	+
	PVC-beschichtete Aramidfasergewebe		900 1270	7000/9000 24500/24500	700 4450	+	0	k.A.	weiß	+
	PTFE-beschichtete Aramidfasergewebe		Keine Standardprodukte	k.A.	k.A.	+	0	k.A.	weiß	+
Folien Materialien	ETFE Folien	50 µm 80 µm 100 µm 150 µm 200 µm	87,5 140 175 262,5 350	64/56 58/54 58/57 58/57 52/52	450/450 450/450 430/440 450/430 430/430	o	bis ca. 96	k.A.	transparent, weiß	+
	THV Folien	500 µm	980	22/21	255/250	+	bis ca. 95	k.A.	transparent	+
	PVC Folien		50 bis 2000	300 bis 2000	k.A.	o	bis ca. 90	k.A.	transparent, weiß	+
Offene Gewebe	PTFE Gewebe		300 520 710	2390/2210 3290/3370 4470/4510	ca. 500/500	++	15 bis 40	k.A.	weiß	o
	Fluorpolymermonofilgewebe		300 bis 600	400 bis 1000	k.A.	++	bis ca. 90	k.A.	transparent, weiß	-

1) Nach DIN 55352

2) Mindestwerte der Zugfestigkeit von Geweben (N/5 cm) Kette/Schuss und Zugfestigkeit von Folien (N/mm²), nach DIN 53455 bzw. DIN EN ISO 527.

3) Nach DIN 53363.

4) ++: sehr gut; +: gut; o: befriedigend; -: ausreichend.

5) +: mehrere Farben auf Anfrage; o: Farbauswahl begrenzt, -: keine andere Farbe.

Abb.1-20:Ausgewählte Eigenschaften von Membranwerkstoffen (Teil 1) ⁴⁴

Werkstoffe		Regendichtig- keit	Brandverhal- ten ⁶⁾	UV-Beständig- keit	Chemiebestän- digkeit	Selbstreini- gungseffekt	Dauerhaftig- keit [a]	Anwendungs- bereich	Wandelbarkeit	Recyclebarkeit
Beschichtete Gewebe	PVC-beschichtete Polyester-gewebe	o	B1	+	o	o	> 20	Außen Innen	+	o
	PTFE-beschichtete Glasfasergewebe	o	A2	+	+	+	> 25	Außen Innen	-	-
	Silikonbeschichtete Glasfasergewebe	o	A2	+	+	-	> 20	Außen Innen	-	-
	PVC-beschichtete Aramidfasergewebe	o	B1	-	-	o	> 20	Außen	o	-
	PTFE-beschichtete Aramidfasergewebe	o	B1	-	o	+	> 20	Außen	o	-
Folien Materialien	ETFE Folien	+	B1	+	+	+	> 25	Außen Innen	-	+
	THV Folien (500 µm)	+	B1	o	o	+	> 20	Außen Innen	-	+
	PVC Folien	+	B1	-	-	o	15 bis 20	Innen	-	o
Offene Gewebe	PTFE Gewebe	-	A2	+	+	+	> 25	Außen Innen	+	+
	Fluorpolymermonfil-gewebe	-	B1	+	+	+	> 25	Außen Innen	o	+

6) Nach DIN 4102.

Abb.1-21:Ausgewählte Eigenschaften von Membranwerkstoffen (Teil 2) ⁴⁴

Anmerkungen

1. Vgl. Hegger e.a., 2005; S.129
Vgl. Bubner, 1999; S.19
2. Vgl. Kaltenbach (Hrsg.), 2003; S.58
Vgl. Thornton, 1992, S.51-55
3. Vgl. Hegger e.a., 2005; S.129, und Koch (Hrsg.), 2004; S.50:
„Da der Wetterschutz zumeist nach wie vor ein wesentliches Kriterium ist, kann man in zwei Hauptgruppen unterteilen: wasserdichte und wasserundurchlässige Materialien.“
4. Zur Unterteilung der Faserarten vgl. Moritz, 2000, S.1050-1058, und Sobek e.a., 1995, S. 243-250
Vgl. Hegger e.a., 2005; S.129: „Die verwendeten Garne können aus folgenden Faserarten bestehen: Naturfasern, mineralische Fasern, metallische Fasern, Fasern aus thermoplastischen Kunststoffen“.
5. Vgl. Sobek e.a., 1993, S.74-81
6. Vgl. Sobek e.a., 1995, S. 243-250
7. Vgl. Hegger e.a., 2005; S.129
8. Vgl. LGT, 1997-98; S. 62-73
9. Vgl. Kaltenbach (Hrsg.), 2003, S.58-69; Moritz, K.: Membranwerkstoffe im Hochbau - Gewebe und Folien
10. Vgl. Moritz, 2000, S. 1050-1058
11. Vgl. Kaltenbach (Hrsg.), 2003, S.70
12. Nowofol GmbH, Siegsdorf: Firmeninformationen
13. Vgl. Kaltenbach (Hrsg.), 2003; S.69. Vgl. Moritz e.a., 2002
14. S. Hegger e.a., 2005, S. 130
15. S. Einführung.
16. Vgl. Sobek e.a., 1993, S. 74-81
Vgl. Firmenunterlagen von INDUST-EX,
Vgl. Schittich, 1998, S.62
17. Vgl. Brinkmann, 1990
18. Vgl. Sobek e.a.,1995, S.243-250
19. Vgl. Koch (Hrsg.), 2004, S.60-61
20. Vgl. Herzog e.a., 2004, S.212
21. Vgl. Moritz, 2005, S.976
Bei der Anwendung wurden die Brandversuche der Membranbauteile durchgeführt. Bei der Untersuchung beginnt die Folie ab etwa 275°C bei direkter Beflammung zu schmelzen, was den Rauch- und Wärmeabzug über einem Brandherd ermöglicht. „Die Schmelze erstarrt schnell, sodass die Folie als nicht brennend abfallend (abtropfend) nach DIN 4102 eingestuft wird.“
22. Vgl. Koch (Hrsg.), 2004; S.61
23. Vgl. Baier e.a.(Hrsg.), 2001. S.188
Vgl. Tritthardt e.a., 1999, S.14-19
24. Vgl. Koch (Hrsg.), 2004; S.61
25. S. Battle, 1991; S34-38.
26. Beispiel vgl. Koch (Hrsg.), 2004, S.61
27. S. Teil 1.
28. Vgl. Herzog e.a., 1977
29. Vgl. Bubner (Hrsg.), 1979, S. 21
30. Vgl. Schmid, 2004/4; S. 62.
31. Vgl. Baier, 2/1999, S. 8
32. Definition des sd-Werts nach DIN 4108-3:
„Dicke einer ruhenden Luftschicht, die den gleichen Wasserdampf-Diffusionswiderstand besitzt wie die betrachtete Bauteilschicht bzw. das aus Schichten zusammengesetzte Bauteil. Sie bestimmt den Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion. Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke ist eine Schicht- bzw. Bauteileigenschaft.“
Anschaulicher:
<http://www.heimwerker.de/service/heimwerker-lexikon/sd-wert.htm>
„Der sd-Wert ist das Maß für die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke. Der sd-Wert beschreibt daher den Widerstand, den ein Baustoff gegenüber Wasserdampfdurchgang (Wasserdampfdiffusion) besitzt. Je größer der sd-Wert, um so größer der Widerstand des Baustoffs gegenüber Wasserdampfdurchgang. Durch eine dampfbremende Folie mit dem sd-Wert 100 m diffundiert z.B. in gleicher Zeit 100 mal weniger Wasserdampf, als durch eine Luftschicht gleicher Dicke (Kondensation).“
33. Vgl. Schmid, 2004/4, S. 63.
Beispielweise gelten „Alufolien etwa ab 0,05 mm und einem Sd-Wert von 1,5 km als praktisch dampfdicht“; „Holzfaserplatten und Gipskartonplatten mit einem Sd-Wert von 10 bis 20 cm als diffusionsoffen“.
In DIN 4108-3 ist es definiert,
Bauteilschicht mit $S_d \leq 0,5$ m als diffusionsoffene Schicht;
Bauteilschicht mit $0,5 \text{ m} < S_d < 1500$ m als „diffusionshemmende Schicht“;
Bauteilschicht mit $S_d \geq 1500$ m als diffusionsdichte Schicht.
34. Vgl. Ishii (Hrsg.), 1995, S.9
35. Vgl. Koch (Hrsg.), 2004, S.166
36. Vgl. Koch (Hrsg.), 2004, S. 55, 60
37. Vgl. Herzog e.a., 1984; S. 298: das Konzept der Varianten von Wandaufbauten.
Vgl. DBZ, 7/2000, S.62-65
Vgl. Schulz, 1997, S.28-32
Vgl. Koch (Hrsg.), 2004; S. 57 über die Schallschutzmembranen und S. 166 ein Anwendungsbeispiel.
38. Vgl. Lehnert, 2000, S.78-81
39. Vgl. Herzog e.a., 1977, S.960-964
40. Vgl. Licht, 7-8/2005, S. 614-619
41. Vgl. Bubner, 2005, S.66-69
S. Firmeninformation (<http://www.foiltec.de/deu/index.php3>)
„Auf die äußeren zwei der drei Lagen wurde ein positiv/negativ Blattmuster aufgedruckt bei dem das

positive Muster ringsherum 3 mm größer ist als das negative. Über die Veränderung des Kisseninnendrucks wird der Abstand der beiden Folien zueinander verändert und aus der transparenten wurde eine opake Fassade, die als Projektionsfläche genutzt werden konnte. Nach jeder Vorführung wurde die Fassade wieder in den Zustand der 45 % Transparenz zurückgeführt.“

42. Vgl. Bubner e.a. (Hrsg.), 1981: Baier, B.: Sind Membrankonstruktionen Energieverschwender?
43. Vgl. Hegger e.a., 2005; S. 130
44. Vgl. Sobek e.a., 1994; Moritz, 2000; Koch (Hrsg.), 2004; Hegger e.a., 2005.

Teil 3

Typologie der Aufbauvarianten von mehrlagigen Membrankonstruktionen

Vorbemerkung

Der Begriff „Mehrlagige Membrankonstruktion,“ (MMK) bezeichnet Membranen, die konstruktiv mehrlagig ausgeführt, in Kombination mit anderen Funktionsschichten hinsichtlich bauphysikalischer und konstruktiver Prinzipien verbessert sind und eine funktionale Einheit bilden.¹

Die unterschiedlichen Membranwerkstoffe und die verschiedenen Möglichkeiten der Kombinationen von Elementen führen zu zahlreichen Aufbauvarianten von MMK. Nachfolgend werden im Rahmen einer morphologischen Studie unter Berücksichtigung prinzipieller Kategorien bei Membranbauten wesentliche Parameter für den Aufbau der MMK dargestellt. Damit können verschiedene Lösungsansätze für Entwurf und Entwicklung von MMK für Gebäude aufgezeigt werden.

Aus dem Anwendungsbereich der MMK, als Baukomponente im Bereich der Gebäudehülle, resultieren unterschiedliche Anforderungen an deren Aufbau. Nach den funktionsbezogenen Leistungsprofilen wird der konstruktive Aufbau der Bauteile bei der Untersuchung bestimmt. Die gestalterischen Aspekte der kombinierten Bauteile werden als Folge des konstruktiven Aufbaus der funktionalen Elemente abschließend behan-

delt. (Abb. 3-1)

Gemäß der Definition der MMK sind die Lagen funktional und konstruktiv voneinander abhängig. Neben den Anforderungsprofilen, die aus der Gebäudehülle resultieren, bilden die konstruktiven Aspekte zum Aufbau der MMK den Schwerpunkt in diesem Teil der Arbeit. Dabei werden folgende drei Parameter in der Analyse behandelt:

- kombinierte Elemente
- Befestigung
- Montage

Die Kompatibilität der einzelnen Elemente, deren Befestigung zu einer funktionalen Einheit und die konstruktiven Aspekte bei der Montage der Gebäudehülle sind zu berücksichtigen. Die jeweiligen spezifischen Merkmale und die Wechselwirkungen im Gesamtzusammenhang sind maßgeblich.

Die Beschreibung und Klassifizierung der Variablen werden auf solche Begriffskategorien beschränkt, die bereits in Gebrauch sind.

1 Anwendungsbereich von MMK in Gebäudehüllen

Die Gebäudehülle dient als Trenn- und Filterschicht zwischen außen und innen; sie ist eine flächige bauliche Struktur, die zwischen Innen- und Außenraumklima gebaut wird. Durch die Raumanordnung nach dem Prinzip der „thermischen Zwiebel,“ können im Rahmen der Grundrissplanung Anforderungen die Gebäudehülle beeinflussen, wonach die Räume nach verschiedenen Temperaturniveaus als Innenräume und Pufferräume verteilt werden können.²

Energetisch betrachtet sind drei räumlich verschiedene Situationen zu unterscheiden, die jeweils als spezifische Bedingungen den Einsatz von raumabschliessenden MMK als Teil der Gebäudehülle bzw. als Fläche darstellen. Das sind: (Abb. 3-2)

- zwischen Außen- und Innenräumen
- zwischen Außen- und Pufferräumen
- zwischen Innen- und Pufferräumen, und
- Kombinationen.

Hinsichtlich der großen Bedeutung der Sonnenstrahlung wird über die

Orientierung der Gebäudehülle das erwartete Angebot von solarer Einstrahlung, bzw. des Energiegewinns für das Gebäude entschieden.

In dieser Arbeit wird hinsichtlich der gestalterischen, freiformbaren Eigenschaften der Membranen bezüglich der Anwendung von MMK nicht in Dach- oder Fassadenkonstruktionen unterschieden. Aufgrund ihrer Position werden die MMK in

- horizontale
- vertikale
- geneigte
- kombinierte

Bauteile gegliedert. Sie werden zusätzlich hinsichtlich der Exposition unterschieden.

Die Leistungsprofile der MMK-Bauteile sind von den oben genannten Anwendungsbedingungen bestimmt. Bei der jeweiligen Ausführung müssen die Komponenten unter Berücksichtigung der einzelnen Situationen untersucht werden.

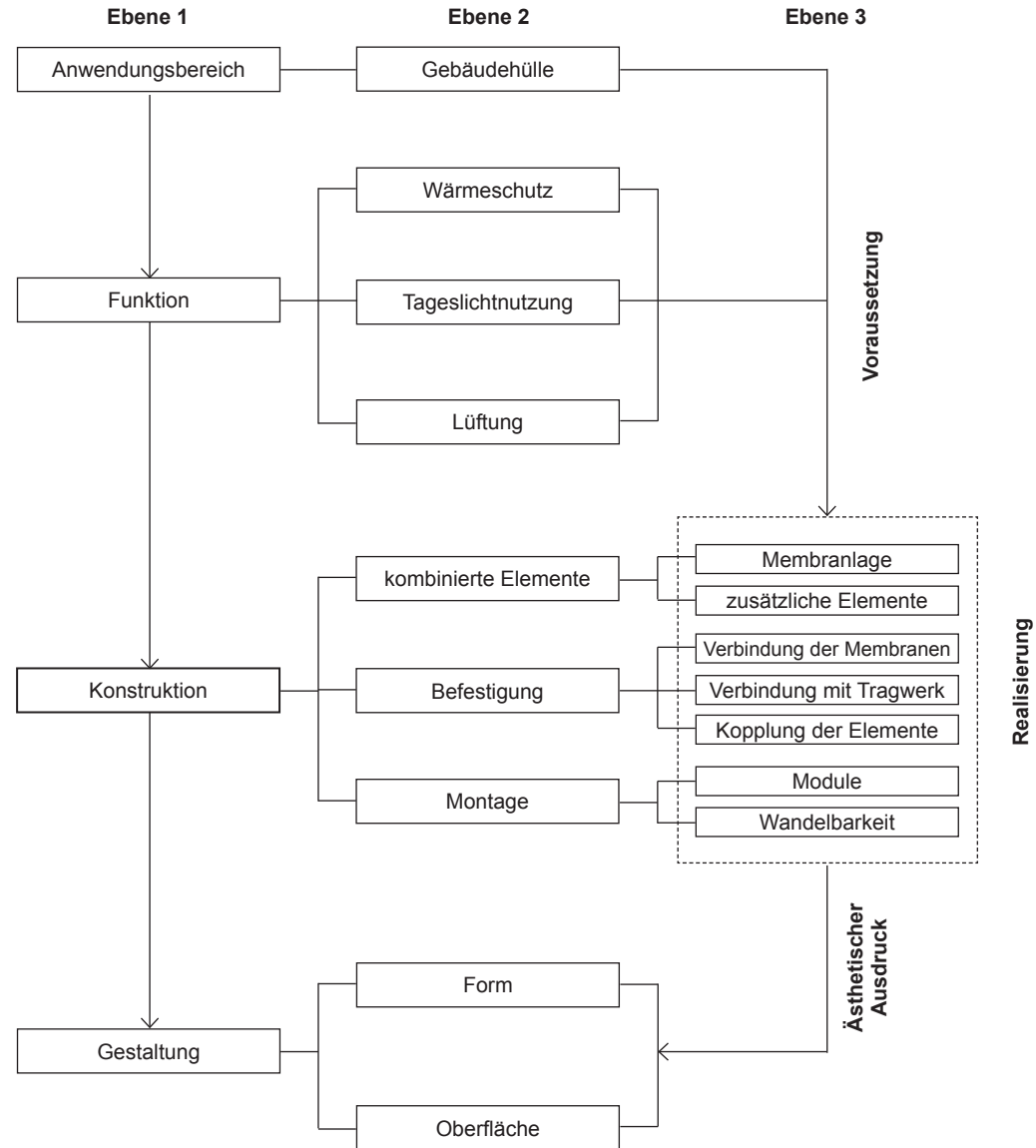


Abb. 3-1: Darstellung der Betrachtungskriterien

2 Funktionale Kriterien

Hinsichtlich des Einsatzes von MMK als Bauteil im Bereich Gebäudehülle sind die Schutz- und Regelfunktionen zu unterscheiden. Die Gewährleistung eines behaglichen Innenraumklimas steht in enger Wechselbeziehung zu den Außenbedingungen. Dabei hat die Hülle Schutzfunktionen zu übernehmen, wie Wärme- und Witterungsschutz, ergänzt durch zusätzliche Regelfunktionen wie Licht- und Luftaustausch.

In der Arbeit werden die MMK als die raumabschließenden Teile der Gebäudehülle untersucht. Hinsichtlich ihrer Leistungscharakteristik werden folgende funktionalen Aspekte berücksichtigt:

- Witterungsschutz gegen Niederschläge
- Witterungsschutz gegen Wind
- Wärmeschutz
- Sonnenschutz
- Schallschutz
- Einbruchschutz
- Energiegewinn
- Tageslichtnutzung
- Durchsicht

3 Konstruktive Kriterien

3.1 Kombinierte Elemente

Gemäß der Definition der MMK wer-

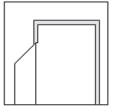
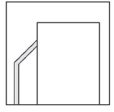
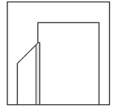
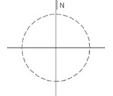
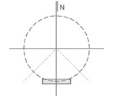
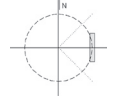
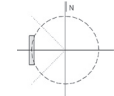


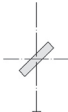
Anwendungskategorie					
Anwendung der MMK an der Gebäudehülle				Kombination	
	zwischen Innen- und Außenräumen	zwischen Außen- und Pufferräumen	zwischen Innen- und Pufferräumen		
Orientierung zur Himmelsrichtung					andere Ausrichtungen
	nach oben	nach Süden	nach Osten	nach Westen	
Position				Kombination	
	horizontal	vertikal	geneigt		

Abb. 3-2: Anwendungskategorie der MMK-Bauteile

den die kombinierten Elemente der MMK aus zwei Gruppen zusammengesetzt:

- Membrananlagen
- zusätzliche Elemente

Die Membrane dient primär als Witterungsschutz und die weiteren Funktionen, wie Wärmeschutz, Tageslichtnutzung, Sonnenschutz und

Schallschutz werden hauptsächlich von zusätzlichen Elementen übernommen. (Abb. 3-3)

3.1.1 Membrananlagen

Im Teil 1 wurden die Eigenschaften der verfügbaren Membranwerkstoffe dargestellt, die nach den jeweiligen funktionalen Anforderungen ausgewählt werden. In einem weiteren Schnitt müssen die konstruktiven

Merkmale berücksichtigt werden.

Konstruktiv unterscheiden sich Membranen stark von anderen Materialien wie Stahl, Beton, oder Holz hinsichtlich Tragverhalten, Verformungen, weshalb eine besondere Konstruktions- und Detailentwicklung erforderlich ist.

Neben dem Tragverhalten der Membrananlagen sind die Art der Vorspannung

und die Krümmung der Membranfläche ebenfalls von großer Bedeutung, weil sie nicht nur die Konstruktion der Membranen bestimmen, sondern auch den Aufbau der zusätzlichen Elemente der MMK beeinflussen.

- Tragverhalten von Membranlagen

In den Membranflächen werden nur Zugkräfte übertragen. Flach gespannten Membranen können senkrecht zur Ebene keine wesentlichen Lasten übernehmen.³ Üblicherweise werden die Membranen vorgespannt und erhalten eine Flächenkrümmung. Die sichtbare Form von Membranen ist abhängig von der Art und Verteilung der Lasten. Durch Maßnahmen wie Vorkrümmung und Vorspannung der Membranfläche können bei Membranen die Verformungen bei Winddruck und -sog sowie die Ausbildung von Schnee- und Wassersäcken vermieden werden.

Die Membranen können durch Zugbelastung mechanisch oder durch die Druckdifferenz der Medien von beiden Seiten pneumatisch vorgespannt werden. Eine weitere Möglichkeit sind die durch Fliehkräfte vorgespannten Formen, die im Bauwesen noch nicht genutzt wurden.⁴

Die Art der Vorspannung ist von großem Einfluss auf die Bauteilform und somit auch auf die Konstruktion der

Randausbildung, auf die statische und aerodynamische Beanspruchung der Membrane sowie auf die dadurch entstehende Raumform.

(Abb. 3-4)

- Krümmung der Membranen

Nach den Hauptgeometrien können Membranflächen entsprechend den Krümmungsarten in

- ebene (nicht gekrümmte)
- einfach gekrümmte
- gleichsinnig doppelt gekrümmte oder synklastische
- gegensinnig doppelt gekrümmte oder antiklastische

Flächen unterschieden werden.⁵

Bei ebenen oder einfach gekrümmten Membranflächen werden bei Belastungen große Verformungen und hohe Auflagerkräfte erzeugt. Bei der Anwendung werden deshalb die Membranen bevorzugt in den doppelt gekrümmten Formen ausgeführt.

Die Krümmung der Membranen ist von der Art der Vorspannung bestimmt. Entsprechend der mechanischen und pneumatischen Vorspannung weisen die Membranen gegen- oder gleichsinnige Krümmungen auf, die auch

		Membranlagen	zus. Elemente	
		+: gefordert. o: bedingt gefordert. -: nicht gefordert.		
Schutzfunktionen	Witterungsschutz	Wind	+	-
		Feuchtigkeit	+	-
		Niederschläge	+	-
	Wärmeschutz	Reduzierung des Wärmedurchgangs	-	+
	Sonnenschutz	Verhinderung der Sonneneinstrahlung	o	o
	Schallschutz	Schalldämmung	-	+
Regelfunktionen	Einbruchschutz	mechanische Beschädigung	o	o
	Energiegewinn	Eintrag solarer Strahlung	o	o
		Lichtnutzung	Tageslichteintrag	+
	Lichtlenkung, -streuung		o	+
	Durchsicht	Sichtschutz	o	o
Sichtbeziehung		+	+	

Abb. 3-3: Kategorien von Anforderungen an die Elemente von MMK nach Einzelfunktionen

nach folgenden Formen bezeichnet werden:

- Synklastische Form

Membranen, die zumeist mittels einer Druckdifferenz pneumatisch stabilisiert werden, weisen in weiten Bereichen ihrer Oberfläche eine synklastische Krümmung auf. Dies bedeutet, dass dort die Fläche gleichsinnig gekrümmt ist.

Somit liegen die Mittelpunkte der Hauptkrümmungsradien eines Punktes der Fläche auf der selben Membranseite.

- Antiklastische Form

Membranen, die mittels einer Vorspannung mechanisch stabilisiert werden, müssen eine antiklastische Krümmung aufweisen. Somit liegen die Mittelpunkte der Haupt-

krümmungsradien jedes Punktes der Fläche auf unterschiedlichen Seiten der Membran. Die Vorspannung und die gegensinnige Krümmung sind erforderlich, damit die dünne, und dementsprechend ausschließlich durch Zug- und Schubspannungen beanspruchbare Membrane die entgegengesetzt wirkenden äußeren Lasten aus Windsog und -druck sowie Schnee aufnehmen kann, ohne zu versagen bzw. ohne Falten zu werfen.

Nach der formalen Ausbildung gehören die folgenden grundlegenden Konstruktionen zu den antiklastischen Formen:⁶

- Sattelflächen
- Flächen mit Hoch- und Tiefpunkt
- Bogengestützte Flächen
- Wellenflächen

Hinsichtlich der konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten können die MMK nach der Art des Innendrucks in

- Unterdrucksysteme
- Überdrucksysteme

unterschieden werden.⁷

3.1.2 Zusätzliche Elemente

Die zusätzlichen Elemente ergänzen bei der MMK die geforderten Funktionen. Nach den in Abb. 2-3 dargestellten Anforderungen ist die Wärmedämmung eine der wichtigsten Funktionen, die bei MMK nur durch zusätzliche Elemente gewährleistet werden kann. Daneben sollen diese konstruktiv mit den Membranlagen zu einer Einheit verbunden werden.

Die zusätzlichen Elemente lassen sich nach den folgenden Kriterien neben der durchgängig vorhandenen Lichtdurchlässigkeit klassifizieren (Abb. 2-4) :

- Position:

Für die Position der zusätzlichen Elemente spielt die Befestigung der Materialien der Zwischenlage eine wichtige Rolle. Besteht die Zwischenlage aus einer Luftschicht, füllt diese vollflächig den Bereich zwischen den Membranen. Darüber hinaus kann diese aus weiteren Materialien bestehen, die entweder einseitig an eine Membran befestigt oder zwischen die Membranflächen eingebracht werden.

- Material:

Wesentlich für die Füllstoffe sind unterschiedliche stoffliche Qualitäten.

Neben der Luft eignen sich

- homogener Materialien, wie Hartschaum
- Materialien mit einer Struktur parallel zur Membran
- Materialien mit einer Struktur quer zur Membran.
- **Veränderbarkeit:**

Durch die Änderung der Position oder der Eigenschaften der Zwischenlage kann die MMK auf die Außenbedingungen besser reagieren. Hinsichtlich der Veränderbarkeit sind zu unterscheiden

- bewegliche Elemente in der Zwischenlage, z.B. die mehrlagige Dachkonstruktion des Konferenz- und Ausstellungsgebäudes für die Deutsche Bundes Umweltstiftung in Osnabrück⁸
- Stoffe, die sich für physikalische Strukturen oder chemische Substanzen je nach Energieaufnahme verändern können, z.B. PCM-Materialien in der Zwischenlage eingebracht, um die Wärmespeichervermögen der Membrankonstruktion zu verbessern.⁹
- **Regelung:**

Hier werden die verschiedenen Mög-

lichkeiten zur Realisierung der Wandelbarkeit durch die Zwischenlage dargestellt.

Bei der Auswahl der zusätzlichen Elemente muss zuerst die Anpassungsfähigkeit betrachtet werden. Danach kommen konstruktive Gesichtspunkte wie Verbindung, Befestigung und Montagetechnik in Betracht. Zielsetzung ist dabei die Leistungsfähigkeit der zusätzlichen Elemente zu erhöhen, bei gleichzeitig konstruktiv möglichst einfachem Aufbau der MMK.

Unter dem Begriff „polyvalente Schicht,“¹⁰ übernehmen unterschiedliche Schichten spezielle Funktionen. Beispielsweise übernimmt die Luftschicht neben der Wärmedämmung gleichzeitig den Innendruck von pneumatisch gestützten Kissen. Durch die Veränderung des Innendrucks ist eine Wandelbarkeit der Lichttransmission oder optischen Wirkung der Bauteile erreichbar. Für die weitere Entwicklung der MMK lassen neue, optimierte Kombinationen von funktionalen Elementen Verbesserungspotential erwarten.

3.2 Befestigung

Die funktionalen Elemente sollen die einwirkenden Lasten gemeinsam aufnehmen und an das Primärtragwerk des Gebäudes weitergeben. Die MMK Bauteile sind Teil des Sekun-

därtragwerks des Gebäudes. Dafür sind die folgenden Beanspruchungen zu berücksichtigen:¹¹

- Vertikallasten: dazu gehören das Eigengewicht, Verkehrlasten, Schnee- und Eislasten
- Horizontallasten: wie Windlast (Druck und Sog)
- Belastungen aus Zwangskräften, die durch thermisch oder hygrysch bedingte Volumenänderungen verursacht werden.

Üblicherweise werden die Lasten aus der MMK-Fläche in das Tragwerk eingeleitet. Im MMK-Bauteil muss durch die konstruktive Zusammensetzung die Aufnahme der Lasten gewährleistet sein. Damit werden auch an die funktionalen Elemente statische Anforderungen, besonders hinsichtlich der Lastableitung gestellt.

3.2.1 Verbindung zwischen Membranen

Bei dieser Ausführung werden die einzelnen Membranbahnen oder aus mehreren Bahnen zusammengesetzte Membranfelder miteinander verbunden. Die Verbindung soll mindestens die gleiche Festigkeit wie die zu verbindenden Membranen aufwei-

sen und die Dehnung soll zwischen Membrane und Stoss möglichst gering sein. Daneben ist die Dichtigkeit der Verbindung gegen eindringendes Wasser und bei luftgetragenen Konstruktionen weitgehend auch gegen Luft gefordert.¹²

Hinsichtlich der Stöße zweier Membranflächen sind permanente und lösbare Verbindungen zu unterscheiden.

- Permanente Verbindungen

Für „Flächennähte“ stehen als permanente Verbindungen

- Schweißnaht
- Nähnaht
- Klebnaht

zur Verfügung, bei denen die Membranen unlösbar miteinander verbunden sind. Sie werden fast ausschließlich werkseits hergestellt.

Bei dem Zusammenfügen einzelner Membranflächen aus beschichteten Geweben besteht die Schwierigkeit in der Sicherstellung der Kraftübertragung von Trägermaterialien zu Trägermaterialien. Zur Zeit werden zum überwiegenden Teil Schweißverbindungen bei Membranstößen

verwendet.

Nähnähte bilden eine Ausnahme, zumal sie infolge der durch die Nähnaht hervorgerufenen Perforation der Membrane zu Undichtigkeiten führen und deshalb nachträglich abgedichtet werden müssen. Insbesondere bei mehrlagigen und hochbeanspruchten Konstruktionen muss immer wieder auf Nähnähte als bewährtes Verbindungsmittel zurückgegriffen werden. Der Nähfaden selbst bedarf bei dauerhaften Bauten eines Schutzes gegen Licht und Bewitterung. Dieser Schutz wird üblicherweise durch Überschweißen des Nähfadens mittels einer Folie erzeugt.¹³

Nähen ist prinzipiell kostengünstiger als Schweißen und vom Konstruktionsprinzip her sicherer als Schweißen oder Kleben. Diese Form der permanenten Verbindung kommt vornehmlich bei Membranmaterialien zur Ausführung, die durch andere Methoden nicht verbunden werden können.¹³

Stöße werden geklebt, wenn andere Methoden des Verbindens von Membranen nicht möglich oder vergleichsweise zu aufwendig sind. Die Zug- und Schubkräfte zwischen zwei Membranen werden mittels eines Klebers oder durch die Verschmelzung der chemisch angelösten Be-

schichtungen übertragen.

- Lösbare Verbindungen

Als lösbare Verbindungen für Flächennähte, sogenannte „Montagestöße“ stehen

- Klemmplattenstöße
- Schlaufenstöße
- Zickzackstöße
- Reißverschluss-Verbindungen bei einfacher Konstruktion

zur Verfügung. Sie werden im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle zusammengefügt.¹³

Mit Klemmplattenstößen lassen sich Festigkeitswerte erzielen, die im Bereich der Festigkeit der Schweißnaht liegen. Sie werden hauptsächlich für Montagestöße verwendet, also für die Verbindung einzelner, bereits vorkonfektionierter Teilflächen auf der Baustelle. Schlaufen- und Zickzackstöße sind hingegen nur für niedrig belastete Verbindungen geeignet. Sie kommen hauptsächlich bei temporären Bauten, und Bauten mit niedrigem Beanspruchungsniveau vor. Ihr großer Vorteil liegt in der schnellen Herstellbarkeit der Verbindung vor Ort.¹³

3.2.2 Befestigung der Membranen

- Randverbindung

Die Membranflächen benötigen eine Befestigung am Rand, die die Zugkräfte aus der Fläche aufnehmen und weiterleiten kann. Durch die Ränder wird das Feld eines MMK-Bauteils begrenzt. Es gibt zwei prinzipielle Arten zur Randbildung:

- biegeweiche Randkonstruktion:

die Ränder verformen sich entsprechend der in der Fläche auftretenden Zugkräfte;

- biegesteife Randkonstruktion:

die Ränder bestehen aus biegesteifen Elementen ohne bemerkbare Verformung durch Lasten.

Für die biegeweiche Randverbindung steht nur die durch Zugkräfte beanspruchbare Konstruktion zur Verfügung. Durch gespannte Seile oder Gurte wird die Komponente mit dem Primärtragwerk verbunden. Als Standardlösung wird dabei das Seil in einer Tasche, wahlweise mit zusätzlich aufgenähtem Gurt zur Aufnahme von Tangentialkräften realisiert.

Normalerweise werden die Membranen durch Klemplattenverankerungen befestigt, die sehr hohe Festigkeits-

werte aufweisen. Die Vorspannung der Membranen wird häufig durch Anschluss der spannbaren Elemente erreicht. Ein in einer Tasche laufendes Rohr stellt eine schnell montierbare und relativ preisgünstige Lösung dar. Sie ist allerdings nur für ein beschränktes Beanspruchungsniveau geeignet. Klemplattenverankerungen wurden lange Zeit als Standarddetail für die Verankerung kleiner Tragluftbauten verwendet.¹³

Allgemein sollen die Konstruktionselemente für die Randverbindung einfach montierbar sein und über die Dauer der Standzeit funktionstüchtig bleiben. Bei der Auswahl von biegeweichen oder -steifen Randverbindungen sind die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:¹⁴

- Größe der Membranspannungen;
- Art und Länge des Randes;
- Länge des Spannweges;
- Anwendungsbereich im Außen- oder Innenraum.

Konstruktiv wird die Fläche der MMK-Bauteile durch die Ränder definiert. In der Regel verbinden zusätzliche Unterstützungen mit Abstand zueinander angeordnete Lagen.

- Zusätzliche Unterstützung

Durch eine zusätzliche Unterstützung kann die Membranfläche sekundär stabilisiert werden. Aus konstruktiven Gründen ist dies im allgemeinen bei großen Spannweiten innerhalb der Membranfläche sinnvoll, um den Krümmungsradius zu verkleinern und damit die Spannung in der Membrane zu reduzieren.¹⁵

Die Unterstützungsarten unterscheiden sich durch den Kontakt mit der Membranfläche, beispielsweise als

- punktuelle Unterstützung;
- lineare Unterstützung; und
- flächige Unterstützung.

Bei den MMK kann eine Vorspannung der Fläche durch die eingefügten Dämmstoffe mit bestimmten Strukturen oder durch belastbare homogene Materialien, womit die Membranen stabilisiert werden können, erfolgen.

3.2.3 Kopplungen der Lagen

Konstruktiv müssen alle Elemente lastabtragende Funktionen übernehmen. Für die mechanischen Verbindungen mit der Membranlage ist auf eine Verformungsmöglichkeit der zusätzlichen Elemente zu achten.

Durch konstruktive Maßnahmen werden die verschiedenen funktionalen Elemente zu einer baulichen Einheit zusammengesetzt. Die Abfolge der Elemente ist nach den funktionalen und bauphysikalischen Anforderungen bestimmt. „Je nach Lage der Funktionsebenen im Aufbau wirken unterschiedliche Lasten ein.“¹⁶

3.3 Montage

3.3.1 Konstruktionstypen

Im Hinblick auf den konstruktiven Aufbau können die MMK-Bauteile nach Transport- und Montagefolgen auf der Baustelle in zwei Typen unterteilt werden,¹⁷

- MMK-Bauteile als einzelne Komponenten
- MMK-Bauteile als funktionsfertige Einheiten

Bei Membrankonstruktionen, besonders für die häufigste Anwendung als Überdachung, ist der erste Bautypus sehr weit verbreitet. Die Membranen werden auf der Baustelle in großen Flächen zusammengefügt und mit dem Tragwerk punktuell oder linear verbunden. Dabei gibt es besondere Vorteile bei der Lagerung und dem Transport. Für die MMK muss die Montage der Komponenten vor Ort durchgeführt werden. Damit ist die

Ausführung zeitaufwändig und wetterabhängig.

Beim Bautypus funktionsfertiger Einheiten erfolgt die mechanische Bearbeitung und die Zusammenfügung der Elemente bereits in der Werkstatt, damit kann eine zuverlässige Qualitätssicherung und Genauigkeit des Resultats sicher gestellt werden. Die realisierten MMK- Bauteile, z.B. pneumatische Kissen basieren auf diesem Bautypus. Auf eine Rahmenkonstruktion werden die vorgespannten Membranen mit Zwischenlagen in einer vorgegebenen Struktur zusammengesetzt.

3.3.2 Modulare Ordnung

Wie bei anderen üblichen Bauteilen in der Gebäudehülle sind bei MMK konstruktive und ökonomische Gesichtspunkte im Zusammenhang mit einer modularen Ordnung zu berücksichtigen. Ziele der Modulordnung der Bauteile sind:

- Geometrische und maßliche Gesamtkoordination des Bauwerks
- Austauschbarkeit der Produkte
- Beschränkung der Produktvielfalt
- Vorfertigung, kontrollierte und schnelle Montage auf der Baustelle.¹⁸

Der modulare Aufbau von Membranstrukturen kann in zwei Arten unterschieden werden,

- modulare Bauteile aus Membranen;
- Membranfläche mit modular aufgebauter Baukonstruktion.

Bei der zweiten Art müssen die vorgefertigten Bauteile verfügbar sein. Für die Modulsysteme von MMK Bauteilen sind Gesichtspunkte wie die Geometrie-, Anordnungsvarianten und Proportion bei den Ausführungen zu berücksichtigen.¹⁹

3.3.3 Wandelbarkeit

Die besonderen Eigenschaften von Membranmaterialien, z.B. das geringe Konstruktionsgewicht und die Flexibilität, ermöglichen die Beweglichkeit der Bauteile. Die Wandelbarkeit der Konstruktionen (Veränderung der Form bzw. der Funktion von Gebäudehüllen) ermöglicht z. B. eine Anpassung an sich verändernde Witterungsverhältnisse.²⁰

Unter dem Begriff Wandelbarkeit der MMK Bauteile versteht man folgende Arten:

- Membranflächen, die eine Änderung von Licht, Luft und Aussicht ermöglichen;

- zusätzliche Komponenten, z.B. die kombinierte Lamelle oder Rollen für den Sonnenschutz;
- Bewegung ganzer Bauteile, damit eine Öffnung durch die Gebäudehülle für Belüftung, Belichtung oder andere Versorgungsfunktionen ermöglicht wird.

In der Arbeit werden die Arten der Bewegung untersucht, die von Membranflächen oder den Konstruktionen machbar sind. Dabei sind das Rollen, Raffen und Falten aufgrund der Merkmale der Membranmaterialien besonders interessant.

3.3.4 Öffnungen

Durch die Öffnungen werden die Schutzfunktionen der Gebäudehülle durch weitere Steuer- und Regelfunktionen zwischen Innen und Außen ergänzt. Grundsätzlich sind Öffnungen in der Gebäudehülle unumgänglich, und ermöglichen die Regelung und Anpassung der Durchlässigkeit von Wärme, Licht und Luft.

Bei Gebäudehüllen mit MMK-Bauteilen sind zwei Arten von Öffnungen zu unterscheiden:

- in MMK integriert
- als einzelne Elemente in die Gebäudehülle eingebaut

Bei der Untersuchung wird die integrierte Version betrachtet, wobei die gesamten konstruktiven und funktionalen Anforderungen an die MMK zu beachten sind.

4 Zusammenfassung

In diesem Teil wurden besonders die konstruktiven Aspekte zum Aufbau der MMK dargestellt. Hinsichtlich der Anwendung im Bereich der Gebäudehülle wurden die Anforderungen an die Elemente bestimmt. Nach den Eigenschaften von Membranmaterialien und Mehrlagigkeit der Konstruktion lassen sich verschiedene Varianten und Kombinationen unterscheiden.

Es wird deutlich, dass aufgrund der großen Vielfalt in jedem Einzelfall eine genaue Definition des Anforderungsprofils hinsichtlich der Funktionen der MMK unabdingbar ist, um bei den Entscheidungen zur Ausführungsform eine insgesamt optimierte Lösung darzustellen.

Neben den funktionalen Aspekten lassen sich auch Forderungen des anpassungsfähigen und flexiblen Bauens mit der Verwendung von MMK erfüllen:

- Lichtdurchlässigkeit und Möglichkeit zur Durchsicht;

- Wandelbarkeit und Standortflexibilität.

Die weiteren funktionalen Aspekte werden in den folgenden Teilen in Zusammenhang mit den Funktionen der Gebäudehülle untersucht.


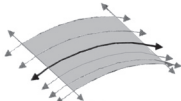
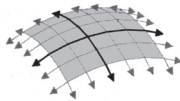
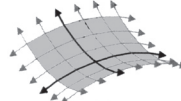
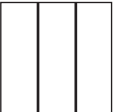
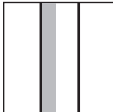
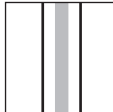
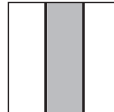
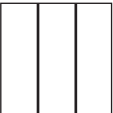
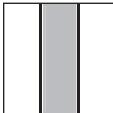
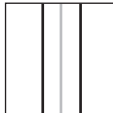

Variable		Varianten				
Vorspannung der Membranen		keine	mechanisch	pneumatisch	Kombination	
Krümmung der Membranen						Kombination
		eben	zylindrisch	synklastisch	antiklastisch	
zusätzliche Elemente	Position					Kombination
		keine	an einer Membranlage anliegen	frei zwischen zwei Membranlagen	formschlüssig zwischen zwei Membranlagen	
	Materialität					Kombination
		Luft	homogene Materialien	Struktur parallel zur Membran	Struktur quer zur Membran	
	Veränderbarkeit	nicht veränderbar	mechanisch	phys. strukturell	chem, substanzuell	Kombination
	Regelung	keine	manuell	selbstregelnd	mit Regelkreistechnik	Kombination

Abb. 3-4: Morphologische Darstellung der Varianten nach verschiedenen konstruktiven Kriterien (Teil 1)

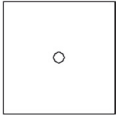
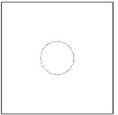

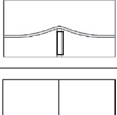
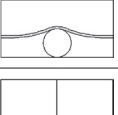
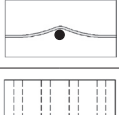
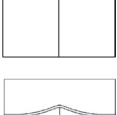
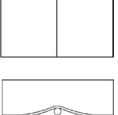
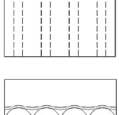

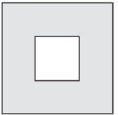
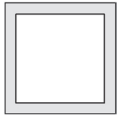

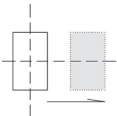
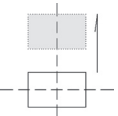
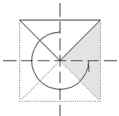
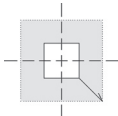
Variable		Varianten					
zusätzliche Unterstützung	Punkt	keine				sonstige	Kombination
	Linie	keine				sonstige	Kombination
	Fläche	keine				sonstige	Kombination
Öffnungen	Öffnungszweck	Ein- und Ausgang	Belichtung	Durchsicht	Luftaustausch	Durchlüftung	Kombination
	Aperturfläche	keine Öffnung					
Wandelbarkeit	bewegliche Elemente	keine	Membranfläche	zusätzliche Elemente	ganze Konstruktion	Kombination	
	Bewegungsweise	keine	Schieben Drehen	Klappen Falten	Rollen Raffen	Kombination	
	Bewegungsrichtung	keine					Kombination

Abb. 3-5: Morphologische Darstellung der Varianten nach verschiedenen konstruktiven Kriterien (Teil 2)

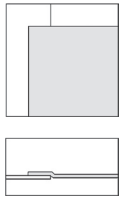
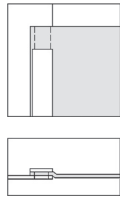
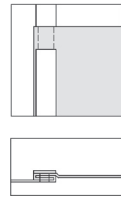

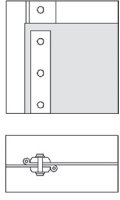

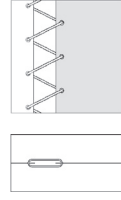
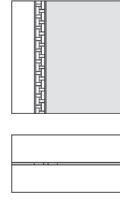
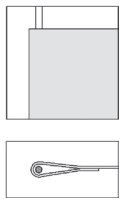
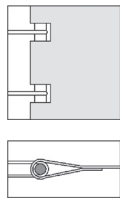

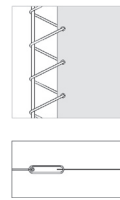
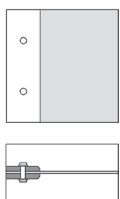
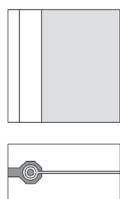


Variable		Varianten					
Teilflächenverbindung	permanente Verbindungen	keine					Kombination
			Schweißnaht	Schweißnaht mit Decklage	Nähnaht	Klebenaut	
	lösbare Verbindungen	keine					Kombination
			Klemmplattenstöße	Schlaufenstöße	Zickzackstöße	Reißverschluss	
Randverbindung	biegeweiche Verbindungen	keine					Kombination
			Seile in Tasche	Rohr in Tasche	Gurtrand	Zickzackrand	
	biegesteife Verbindungen	keine					Kombination
			Klemmplattenrand				

Abb. 3-6: Morphologische Darstellung der Varianten nach verschiedenen konstruktiven Kriterien (Teil 3) ²¹

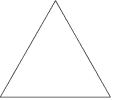
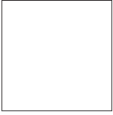
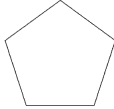
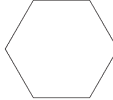
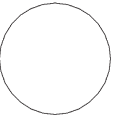

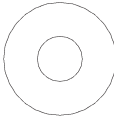
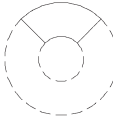




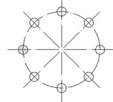



Variable		Varianten					
Modularität	System	keines	Flächeneinheiten	primär Tragwerk	Kombination		
	Geometrie	Poligona					sonstige
		Rundformen					Kombination
	Anordnung						Kombination
	Proportion				Sonstige		

Abb. 3-7: Morphologische Darstellung der Varianten nach verschiedenen konstruktiven Kategorien (Teil 4)

Anmerkungen

1. Vgl. den Begriff der Membrankonstruktion bei Ishii, 1999; S.7: „membrane structure, is used to refer a structure in which the various material or structural properties of membranes are actively incorporated into the architecture“.

Begriff der Membrankonstruktionen bei Bubner, 1999; S.15: „Konstruktionen aus beschichteten und unbeschichteten technischen Geweben und Folien, sogenannte MEMBRAN-KONSTRUKTIONEN, ...“
2. Vgl. Herzog e.a., 2004, S. 25.

„Durch eine Anordnung der Räume nach dem Prinzip der ‚thermischen Zwiebel, können schon im Rahmen der Grundrissplanung Anforderungen an die Fassade beeinflusst werden: Räume mit höherem Temperaturniveau werden von Bereichen mit geringeren Anforderungen umgeben.“
3. Vgl. Herzog, 1976; S.161
4. Vgl. Rein, 2000, S.1044-1049
5. Vgl. Herzog, 1976; S.16.

zusätzlich ist die ebene Fläche als eine der Formvarianten von Membranen definiert.

Vgl. Gengnagel, 2005; S. 59-63.
6. Vgl. Herzog, 1984; S. 292-298.
7. Vgl. Schulz, 1997; S. 28-32.
8. S. Flagge, e.a. (Hrsg.), 2001, S. 150-151
9. S. Teil 1
10. Vgl. Herzog e.a., 2004; S. 34.
11. Vgl. Herzog e.a., 2004.
12. Vgl. Bubner, 1999;S.27
13. Vgl. Sobek e.a., 1994; S. 778-779. Sobek e.a., 1995; S.243-250
14. Vgl. Bubner, 1999; S.129
15. Vgl. Herzog, 1976; S.15
16. S. Herzog e.a., 2004, S.36
17. Vgl. Herzog e.a., 2004, S.54
18. Vgl. Herzog e.a., 2004; S.48
19. Vgl. Hebbelinck, 1999, S.14-17

Vgl. Hebbelinck e.a., 2003
20. Vgl. Gengnagel e.a., 2001, S.841-846
21. Darstellung und Sortieren vgl. Krippner, 2000

Teil 4

Anforderungen an MMK-Bauteile für Gebäudehüllen hinsichtlich der Energiebedarfsminimierung und Komfortoptimierung

Vorbemerkung

Gebäude spielen eine wichtige Rolle beim weltweiten Energieverbrauch und den CO₂-Emissionen. Die Erstellung, der Betrieb und die Entsorgung von Gebäuden erfordern einen Energieaufwand, der sowohl mit Investitions- und Unterhaltskosten, als auch mit CO₂-Emissionen in die Atmosphäre und weiteren Umweltschädigungen verbunden ist. Zum Andern steht das Wohlbefinden des Menschen im Mittelpunkt der Gebäudeplanung. Als Trenn- und Filterschicht zwischen den Außen- und Innenbedingungen spielt die Gebäudehülle die Schlüsselrolle, um beim gegebenen Außenklima das gewünschte

Innenklima gewährleisten zu können und gleichzeitig den erforderlichen Aufwand für den Energieverbrauch möglichst gering zu halten. Die Erfüllung dieser Aufgabe erfordert die Integration einer Vielzahl von Funktionen, die durch eine entsprechende Konzeption und Konstruktion der Gebäudehülle ermöglicht wird. (Abb.4-1)

Im Hinblick auf den Energieaufwand für den Betrieb eines Gebäudes und die Komfortansprüche an den Innenraum ist die Anwendung einer nicht wärmegeprägten Membrankonstruktion als Umschließung des Innenraums auf bestimmte Nutzungen begrenzt. Bei der Verwendung von

Membrankonstruktionen als Gebäudehülle müssen folgende Aspekte bezüglich des Energieverbrauchs und der Behaglichkeit in Betracht gezogen werden:

- Aufgrund der relativ geringen Wärmedämmeigenschaft resultieren nicht nur hohe Energieverbräuche, sondern können auch die Komfortansprüche des Innenraums oft nicht erfüllt werden
- Mit opaken Dämmstoffen gefüllte, mehrlagige Membrankonstruktionen verhindern die Nutzung der solaren Strahlung zur Belichtung. Damit erhöht sich der Energieverbrauch für die Beleuchtung (und

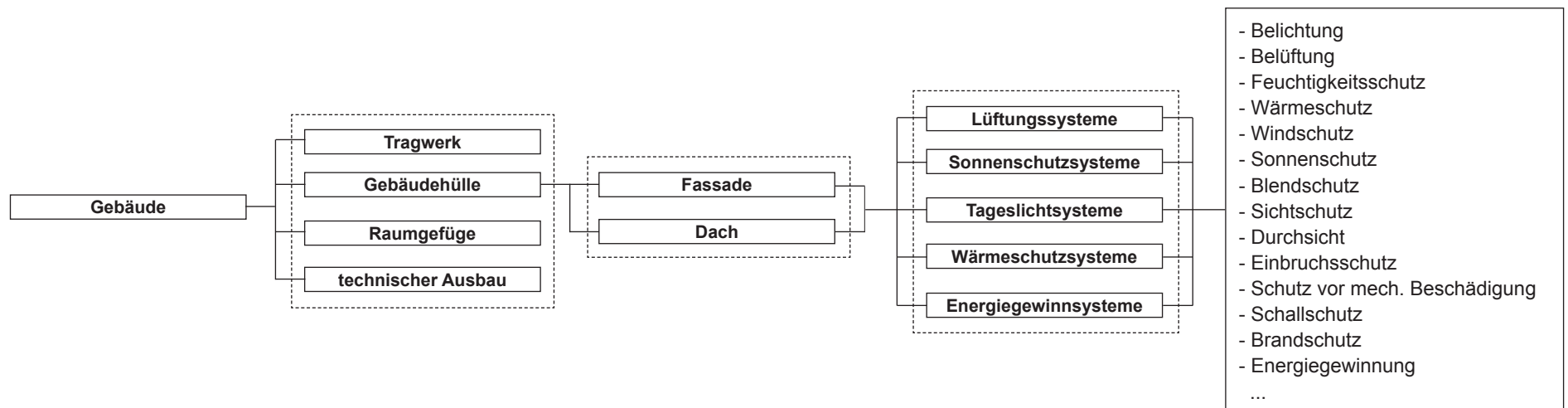


Abb. 4-1: Funktionen der Gebäudehülle¹

Funktionen der Gebäudehülle	einlagige Membrankonstruktion	MMK-Bauteile	
		Zwischenlage aus Luft	Einlage aus opaker Wärmedämmung
Winterl. Wärmeschutz	-	o	+
Sommerl. Wärmeschutz	-	-	+
Zuluft einbringung	o	o	-
Natürliche Belichtung	+	+	-
Sonnenschutz	-	-	+
Blendschutz	-	-	+
Solarenergiegewinn	+	+	-

Konstruktion für angegebene Funktionen

+: gut geeignet;

o: geeignet;

-: nicht geeignet;

Abb. 4-2: Leistungsmerkmale der im Bauwesen verwendeten Membrankonstruktionen

damit auch der für zusätzlichen Kühlungsbedarf)

- Bei einer direkten Durchlässigkeit von Tageslicht bei transparenten Membranen besteht die Problematik einer Überhitzung des Innenraums, was zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs für die Kühlung und möglicherweise zu Blendungseffekten führen kann

Um den Einsatz von Membrankonstruktionen im Bereich der Gebäudehülle zu erweitern, sind vor allem

Fragen zu den thermischen und visuellen Aspekten als Schwerpunkte der Lösungsansätze zu klären.

Der Untersuchung liegt das Ziel zugrunde, durch den konstruktiven Aufbau der MMK die Gebäudehüllen zu entwickeln, deren Verwendung es ermöglichen kann, möglichst viel fossile Energie einzusparen und gleichzeitig die je nach Nutzung des Gebäudes geforderte thermische Behaglichkeit sicherzustellen. Die Potentiale lassen sich auf zwei Ebenen erschließen, den Energiebedarf zu verringern und

den Anteil regenerativer Energieträger, am wichtigsten Solarenergie, zu erhöhen. Daraus resultieren folgende Punkte als Aufgaben bei der Entwicklung von MMK-Bauteilen für Gebäudehüllen: (Abb. 4-2)

- Verbesserung der Wärmedämmfähigkeit von Membrankonstruktionen;
- Möglichkeit der Nutzung von Solarenergie als Raumwärmebeitrag und zur natürlichen Belichtung von Innenräumen;
- Vermeidung von Überhitzung mit entsprechenden Sonnenschutzmaßnahmen;
- Verbesserung von Beleuchtungskomfort und -qualität, durch ausreichende Belichtung bei gleichzeitiger Vermeidung der Blendwirkung, im Sinne einer möglicherweise Gesamtverbesserung der Lichtverteilung im Innenraum.

Im Folgenden werden unter Berücksichtigung der Energie- und Komfortoptimierung die Anforderungen an MMK-Bauteile für Gebäudehüllen festgelegt. Die baulichen Anforderungen an die MMK-Bauteile lassen sich in thermische, lichttechnische, konstruktive Aspekte sowie ökonomische und ökologische Aspekte gliedern.

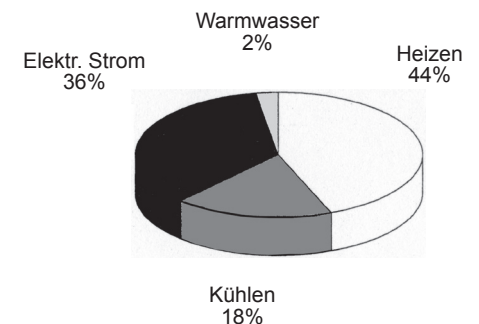
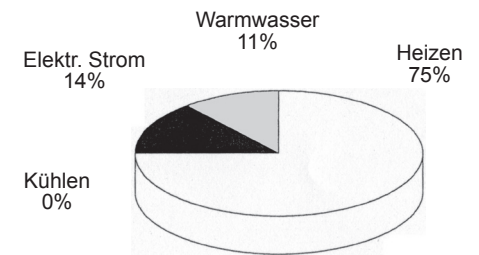


Abb. 4-3: Anteil unterschiedlicher Verbrauchsarten am Gesamtenergieverbrauch für typische Büro- und Wohngebäude³

1. Allgemeines zum Energie- und Komfortbedarf in Gebäuden

In Deutschland wird rund 45% der umgesetzten Endenergie in Gebäuden verbraucht, und die Energiebereitstellung trägt für den Gebäudebestand mit etwa einem Drittel zu den CO₂-Emissionen bei.² Für die Erzeugung von Heizwärme werden etwa

30% des gesamten Endenergieverbrauchs benötigt, also der weitaus größte Teil des Energieverbrauchs von Gebäuden.⁴ Im Nichtwohnungsbau spielt elektrische Energie für Beleuchtung, Lüftung und Kühlung oft eine größere Rolle.⁵ Der Energieverbrauch in diesen Bereichen steht in enger Wechselsbeziehung mit der Gebäudehülle. Durch Tageslichtnutzung, den Einsatz von Sonnenschutz, und die Möglichkeiten der natürlichen Belüftung besteht eine Reihe von Einsparpotentialen. (Abb. 4-3)

Das Behaglichkeitsempfinden des Menschen im Gebäude wird von einer Vielzahl von Kriterien beeinflusst. Energetisch hat das Innenraumklima einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes. Die Anforderungen lassen sich unter dem Begriff der thermischen Behaglichkeit zusammenfassen, die von Faktoren wie Raumtemperatur, Luftbewegung, Luftfeuchte, usw. bestimmt wird, und die in Normen und Richtlinien definiert sind.⁶ Allgemein handelt es sich um ein Behaglichkeitsfeld, welches nicht von einzelnen Größen, sondern von in Kombination auftretenden Parametern abhängt.⁷ Darüber hinaus sind visuelle und akustische Formen der Behaglichkeit zu unterscheiden, die in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden sollten.⁸

2. Nutzung der Solarenergie

Solarenergie mittels direkter und indirekter Nutzung zum Heizen, zur Tageslichtversorgung, Lüftung und Stromgewinnung kann im Bauwesen einen bedeutenden Beitrag zur Energiebedarfsdeckung eines Gebäudes und damit zur CO₂-Minderung leisten.⁹

Hinsichtlich des solaren Strahlungsangebots sind für Deutschland folgende Werte als Grundlage ansetzbar: (Abb. 4-4,5)

1400 - 2000 Sonnenstunden / Jahr;
700 - 800 Sonnenstunden / Heizperiode.¹⁰

Bei der Untersuchung der MMK wird in Betracht gezogen, durch konstruktive und architektonische Maßnahmen die Beeinflussung des Raumklimas durch die Sonneneinstrahlung zu ermöglichen. Hierzu zählen in erster Linie richtig orientierte und dimensionierte, transparente oder transluzente Flächen zum Durchlass der Solarstrahlung in Form von Licht und Wärme, die interne Speichermassen eines Gebäudes sowie Systeme zur Regulierung des Strahlungsangebots.

Wegen ihrer geringen Masse weisen Membrankonstruktionen besonde-

re Eigenschaften unter thermischen Aspekten auf. Damit können Membrankonstruktionen Temperaturschwankungen und -veränderungen nicht abpuffern bzw. dämpfen. Dies erfordert Heizungssysteme, die in der Lage sind, auf die wechselnden Temperaturanforderungen schnell zu reagieren, die für Innenteile viel wichtiger sind.¹²

3. Thermische Aspekte

3.1 Winterlicher Wärmeschutz

Der Sinn des winterlichen Wärmeschutzes besteht darin, dass bei normalen Heizungs- und Lüftungsbedingungen möglichst wenig Wärmeenergie von innen nach außen abfließt und sich ein aus hygienischer Sicht nicht zu beanstandendes Raumklima einstellt sowie, dass Bauschäden vermieden werden. Damit stellt der winterliche Wärmeschutz eine wichtige Maßnahme zur Energieeinsparung bei der Raumheizung dar.¹¹ Je nach der Nutzung eines Bauwerks oder einzelner Räume, variieren die Anforderungen erheblich.¹³

Grundsätzlich fließt die Wärmeenergie von der wärmeren zur kälteren Seite. Dieser Prozess erfolgt auf Basis der drei Grundprinzipien des Wärmetransports: Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Wärmekonvektion.

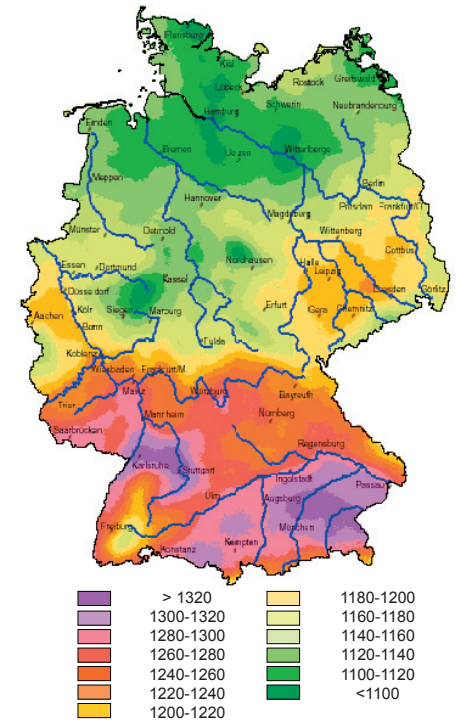


Abb. 4-4: örtliche Verteilung der Jahresglobalstrahlung in Deutschland; 2003.¹⁴

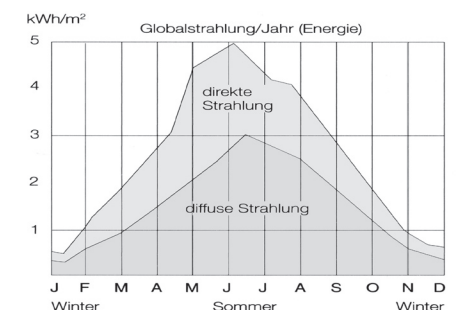


Abb. 4-5: Strahlungsintensität im Tagesdurchschnitt am Beispiel von Mitteldeutschland (50°NB)¹⁵

		U-Wert [W/m ² K]	g-Wert ¹⁷
Glas	Einfachglas	5,8	0,86
	2-Scheiben-Isolierglas	2,8	0,76
	2-Scheiben-Wärmeschutzglas	1,4	0,59
	3-Scheiben-Wärmeschutzglas	0,7	0,41
	2-Scheiben-Sonnenschutzglas	1,3	0,3
ETFE	Einfachfolie	5,1	0,95
	2-Lagen-Kissen	2,94	0,85
	3-Lagen-Kissen	1,96	
	4-Lagen-Kissen	1,47	~
	5-Lagen-Kissen	1,18	0,05*

Abb. 4-6: U- und g-Werte von unterschiedlichen Verglasungen und pneumatischen Membrankissen¹⁸

Der Einsatz von Dämmmaterialien mit niedrigen U-Werten ¹⁶, in Verbindung mit mehrlagigen Luftschichten und erhöhten Dämmstoffstärken reduziert den Transmissionswärmeverlust erheblich. Bei realisierten MMK werden im Fall von transluzenten Pneukissen U-Werte von etwa 1,4 W/m²K erreicht, die im Bereich von 2-Scheiben-Wärmeschutzglas liegen. (Abb. 4-6)

Aufgrund der dünnen Materialschicht geht die Wärme durch die Membranfläche leicht hindurch und wird nicht zwischengehalten. (Eine Möglichkeit zur Verbesserung besteht in Reflexionsbeschichtung der Oberfläche für die Verminderung der Strahlung zwischen den Schichten.)

Hinsichtlich der Nutzung von Solarenergie können Nettogewinne durch die Sonnenstrahlung im Gebäude in der Heizperiode für die transluzenten MMK-Bauteile nur erzielt werden, wenn der nutzbare Strahlungs- bzw. Wärmeeintrag größer als die Transmissionswärmeverluste ist. Es ist zu erwarten, dass in die Gebäudehülle Konstruktionen mit MMK-Bauteilen und transluzenter Wärmedämmung (TWD) den solaren Deckungsanteil in der Heizwärmebilanz verbessern können.¹⁹ Dadurch spielt das Mas seder Wärmedämmfähigkeit und der Durchlässigkeit von Sonnenstrahlung zur Beurteilung der thermischen Eigenschaften von MMK gleichermaßen eine wichtige Rolle.

3.2 Sommerlicher Wärmeschutz

Bei lichtdurchlässigen Gebäudehüllen entsteht ein Wärmegewinn durch den Eintrag von Sonnenstrahlung. Damit spielt der sommerliche Wärmeschutz eine bedeutende Rolle für die Behaglichkeit und das Raumklima, bzw. den Energieverbrauch zur Kühlung des Gebäudes. Die Aufgabe des sommerlichen Wärmeschutzes ist es zu verhindern, dass eine zu starke Aufheizung der Räume durch den Energietransport von außen nach innen stattfindet. Die solare Einstrahlung ist abhängig von der Orientierung und dem Energiedurchlass der Gebäudehülle. Die Konstruktion der Fassade hat einen ausschlaggebenden Einfluss auf den Strahlungseintrag.

Für die MMK-Bauteile wirken sich der Gesamtenergiedurchlassgrad und der Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes direkt auf den Wärmeeintrag, bzw. auf den Temperaturverlauf im Rauminneren aus. Maßnahmen zur Verminderung der Transmission der Sonnenstrahlung durch die MMK sind grundsätzlich auf zwei Weisen möglich: (Abb. 4-7)

- Sonnenschutzvorrichtung als zusätzliches Element innerhalb der MMK-Bauteile
- Bedrucken der Oberfläche von Membranlagen

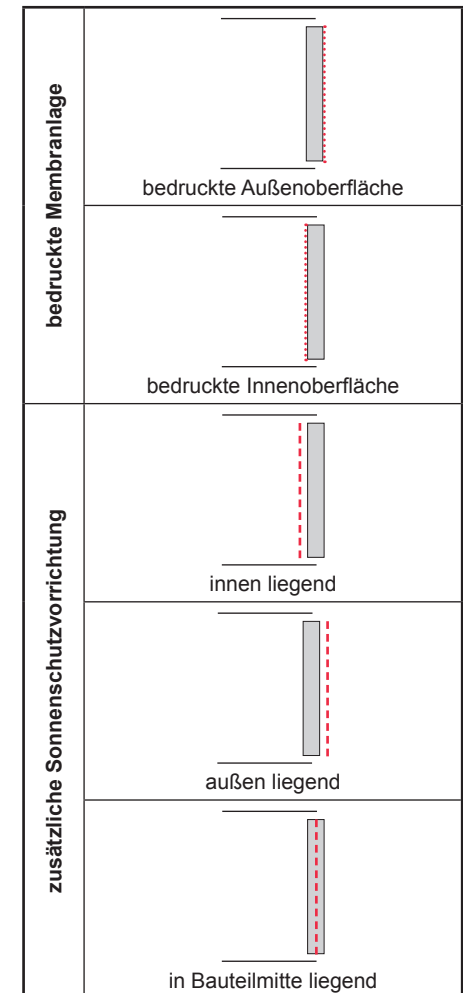


Abb. 4-7: Sonnenschutz bei MMK

Himmel	Beleuchtungsstärke außen	Beleuchtungsstärke im Raum bei Tageslichtquotient	
		D=1%	D=5%
bedeckt	10,000 Lux	100 Lux	500 Lux
klar	50,000 Lux	500 Lux	2,500 Lux

Abb. 4-8: Raumbelichtungsstärke in Abhängigkeit von Außenhelligkeit und Tageslichtquotient.²¹

Bei der Ausführung sind ebenfalls Kombinationen der o.g. Varianten möglich.²⁰

4. Lichttechnische Aspekte

Die Tageslichtnutzung spielt eine immer wichtigere Rolle bei der Energieeinsparung von Gebäuden, besonders bei Bürogebäuden, bei denen der Energieverbrauch für Beleuchtung ungefähr 30% beträgt.²² Daneben gewinnt die physiologische und psychologische Bedeutung des Tageslichts für das Wohlbefinden des Menschen eine große Bedeutung.²³ Darüber hinaus wird auch der Energiebedarf für Kühlung des Gebäudes bei sorgfältiger Planung des Lichtsystems maßgeblich reduziert.

Die Planung von Gebäudehüllen erfordert eine umfassende Berücksichtigung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten von Faktoren wie Standort, Tages- und Jahreszeiten, Wetter, Arten der Strahlung, bzw. Flächenausrichtung und -neigung,

Wechselwirkungen mit Oberflächen und Materialien, usw.²⁴ (Abb. 4-7) Bei diffusem Licht ist die tageslichtbedingte Beleuchtungsstärke in Innenräumen direkt proportional zur Außenbeleuchtungsstärke. (Abb. 4-8)

4.1 Rahmenbedingungen der Tageslichtnutzung

Für eine sinnvolle Nutzung von Tageslicht zur Raumausleuchtung bestehen folgende Anforderungen an Bauteile, die teilweise nicht gleichzeitig erfüllt werden können:

- Blendschutz: Vermeidung von Blendeffekten durch gerichtetes Sonnenlicht oder Flächen mit hoher Leuchtdichte
- Vermeidung hoher Leuchtdichtekontraste: gleichmäßige Raumausleuchtung auf hohem Niveau bis in die Raumtiefe
- Sonnenschutz: geringer Energieeintrag im Sommer

- Unterstützung der Raumheizung: hoher Energieeintrag im Winter. (Zu intensive Solarstrahlung wird jedoch häufig als störend empfunden.)
- Kontakt zur Außenwelt: Möglichkeit der Durchsicht
- keine Beeinflussung der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts
- geringe Investitions- und Wartungskosten sowie eine einfache Handhabung

Diese Anforderungen bedingen eine gezielte Anpassung der Lichttransmission in den Raum und eine gleichmäßige Verteilung des Lichts im Raum.²⁵

Daneben sind Kriterien der visuellen Behaglichkeit, wie

- Beleuchtungsstärke
- Leuchtdichte

bei der Untersuchung zu berücksichtigen, die je nach Beleuchtungsweise auch den Energieverbrauch des Gebäudes beeinflussen.

4.2 Maßnahmen zur Optimierung der Tageslichtnutzung von MMK

Für die MMK-Bauteile stellt die Nutzung des Tageslichts zur Verbesserung der Tageslichtbeleuchtung im Innenraum und bei gleichzeitiger Vermeidung der Überhitzung ein wichtiges Kriterium dar. Allgemein stehen folgende Maßnahmen als Lösungen für die Aufgaben zur Verfügung.²⁶

- Lichtlenkende Systeme, zur gezielten Nutzung gerichtetes Sonnenlichts
Reflektierende Bauelemente lenken einen Großteil des Tageslichts, also direktes Sonnenlicht und diffuses Himmelslicht, in den Raum.
- Lichtstreuende Systeme, zur Ausblendung und gleichmäßigen Umverteilung gerichtetes Sonnenlichts
Auftreffende direkte Strahlung wird abhängig von der Größe und den optischen Eigenschaften der Streukörper verteilt, transluzente Bauteile wirken als diffuse Lichtquelle. (Das ist ein klassisches Mittel zur Reduzierung der Leuchtdichte.)
- Sonnenschutzsysteme, mit dem ausschließlichen Ziel, gerichtetes Sonnenlicht auszublenden

Die direkte Sonnenstrahlung in Innenräumen wird durch opake oder transluzente Elemente verhindert. Die Elemente können jedoch auch einen relativ hohen Anteil diffuses Himmelslichts abschatten und die Raumausleuchtung könnte somit wesentlich reduziert werden.

Für MMK ist eine Integration von Manipulatoren für die Regelfunktionen zur Optimierung der Lichtsituation der Innenräume möglich. Im Fall einer Realisierung sind die konstruktiven Aspekte in Zusammenhang mit ökonomischen und ökologischen Aspekten zu berücksichtigen.

5. Zusammenfassung

In diesem Teil wurden die Anforderungen der MMK-Bauteile für die Gebäudehülle hinsichtlich der Energie- und Komfortoptimierung dargestellt. Die wesentlichen funktionalen Aufgaben von MMK-Bauteilen im Bereich der Gebäudehülle sind, im Gebäudeinneren einen behaglichen Zustand sicherzustellen und gleichzeitig den Energieverbrauch zu mindern. Die Möglichkeit zur Nutzung von Solarenergie, die als Wärmegewinn und Tageslicht zur Verfügung steht, wird bei der Untersuchung der MMK durch die Kombination mit TWD als Lösung

erkennbar.

Die Gebäudehülle hat unter energetischen Gesichtspunkten die folgenden Aufgaben zu erfüllen: (Abb. 4-9)

- winterlicher Wärmeschutz
- sommerlicher Wärmeschutz
- natürliche Belichtung
- Optimierung der Tageslichtnutzung

Die entsprechenden allgemeinen Kennwerte zur Quantifizierung die-

ser funktionalen Eigenschaften von MMK-Bauteilen sind:

- U-Wert
- g-Wert
- τ -Wert²⁷

Daneben stellt es eine Erweiterung der funktionalen Eigenschaften von MMK dar, durch den Aufbau von Transluzenz die Tageslichtnutzung mit der Wirkung für Lichtlenkung und -streuung zu verbessern, was eine optimierte Tageslichtverteilung in Räumen ermöglichen könnte.

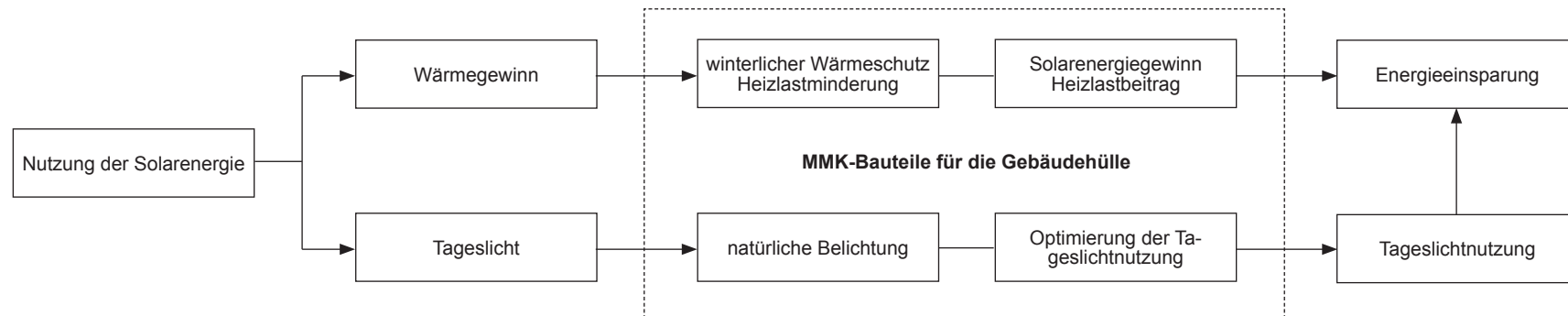


Abb. 4-9: Zusammenfassung der Optimierungskriterien

Anmerkungen

1. Vgl. Schittich (Hrsg.), 2001, S.30
2. Kornadt (Hrsg.), 1997, S.143
3. S. Kerschberger, 1996, S.104
4. Vgl. Kerschberger e.a., 1998; S.9;
31.9% wurde von /ize 90/ in Wilke, 1991; S. 1 genannt.
5. Vgl. Wagner, 2002; S.6
6. Detaillierte Ausführungen zu Wohlbefinden und Raumklima vgl. Hausladen (Hrsg.), 2003, S.15-26 und Fanger, 1970

Normen: ISO 7730, pr EN 15251, EN 1752
7. Die Einflußgröße zur Definition der Anforderungen siehe Lang, 2000, S. 16-17; Hartwig, 2003, S.10.

Zur Beurteilung der Behaglichkeit sind die Faktoren in Einzelgrößen und Zusammenhang dargestellt, siehe Grimm e.a., 1994, S.8.
8. Vgl. Herzog e.a., 2004, S.22
9. Vgl. Wagner, 2002; S.6
10. Vgl. Herzog e.a., 2004, S.21

Daten aus: Deutscher Wetterdienst, Klima- und Umweltberatung. Hamburg
11. Vgl. Grimm e.a., 1994, S.10; Pistohl, 2000, S.A25
12. Vgl. Hauser, 1984-6; Hauser, 1984-33/86/29
13. Vgl. Henn, 1975, S.11
14. <http://www.solarserver.de/service/strahlungsdaten.html> (01. 2004)
15. Herzog e.a., 2004, S.21
16. S. DIN EN 4108

Vgl. Pistohl, 2005, S.H13

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) dient zur Beurteilung des winterlichen Wärmeschutzes der Außenwandkonstruktionen. Er gibt an, wieviel Wärmeenergie pro Zeiteinheit (W) je Quadratmeter und je Kelvin Temperaturunterschied von innen nach außen abwandert.
17. S. DIN EN 410

Vgl. Hauser, 1984-TAB 6

Der Gesamtenergiedurchlaßgrad (g-Wert) gibt an, welcher Anteil der auf eine transparente oder transluzente Konstruktion auftreffenden Solarstrahlung in den Raum weitergegeben wird. Dieser Wert ergibt sich aus der Summe von transmittierter Strahlung und einer Wärmeabgabe durch Absorption. Die g-Werte heutiger beschichteter Isolierverglasungen liegen in der Regel zwischen 60 und 80 %. Die g-Werte von ETFE-Folien können bis zu 95% reichen.
18. Parameter der Verglasung aus Hausladen (Hrsg.), 2003, S.39; Daten der ETFE-Kissen aus Firmeninformation „<http://www.foiltec.de/deu/index.php3>“ (10. 2004)

*: Die genaue Größe der g-Werte von mehrlagigen ETFE-Kissen sind in den Dokumenten nicht aufgeführt.
19. Vgl. Wagner, 2002; S.7
20. Vgl. Teil 2
21. Hausladen (Hrsg.), 2003, S.53
22. Vgl. Geuder, 2002
23. Vgl. Aydinli e.a., 1993
24. Der Anteil der diffusen Strahlung bezogen auf das Gesamtstrahlungsangebot eines Jahres beträgt etwa:

Südfassade 30%
Ost- und Westfassade 60%
Nordfassade 90%
(Differenz zu 100%: direkte Strahlung)

S. Herzog e.a., 2004, S. 21
25. Vgl. Geuder, 2002, S.2-3
26. Vgl. Geuder, 2002, S.5
27. S. DIN EN 410

Der Tageslichtdurchlaßgrad (τ) gibt an, welcher Prozentsatz der außerhalb eines Gebäudes vorhandener Helligkeit bei bestimmten Wellenlängen des Lichts im Inneren gemessen wird. Ein typischer τ - Wert des sichtbaren Lichts für heutige Isolierverglasungen liegt bei etwa 70%.

Teil 5

Aufbau der wärmegeämmten, lichtdurchlässigen MMK-Bauteile

Vorbemerkung

In diesem Teil werden eine geeignete Zusammensetzung der MMK-Bauteile und deren vielfältigen Varianten für einen wärmegeämmten, lichtdurchlässigen Aufbau dargestellt. Im Allgemeinen sollen folgende Gesichtspunkte betrachtet werden:

- Reduzierung des Wärmeverlusts bzw. der Heizlast mittels Einsatz einer effizienten Wärmedämmung
- optimierte Nutzung des Tageslichts zur Verringerung des Energieverbrauchs für Beleuchtung und Verbesserung der visuellen Behaglichkeit im Innenraum
- Verminderung der sommerlichen Überhitzung des Innenraums durch einen adäquaten Energieeintritt durch die Gebäudehülle

Schwerpunkte in der Erörterung:

- Bestimmung und Auswahl geeigneter kombinierter Elemente hinsichtlich Wärmeschutz und Tageslichtnutzung
- Darstellung konstruktiver Lösungen zum Aufbau der MMK-Bauteile

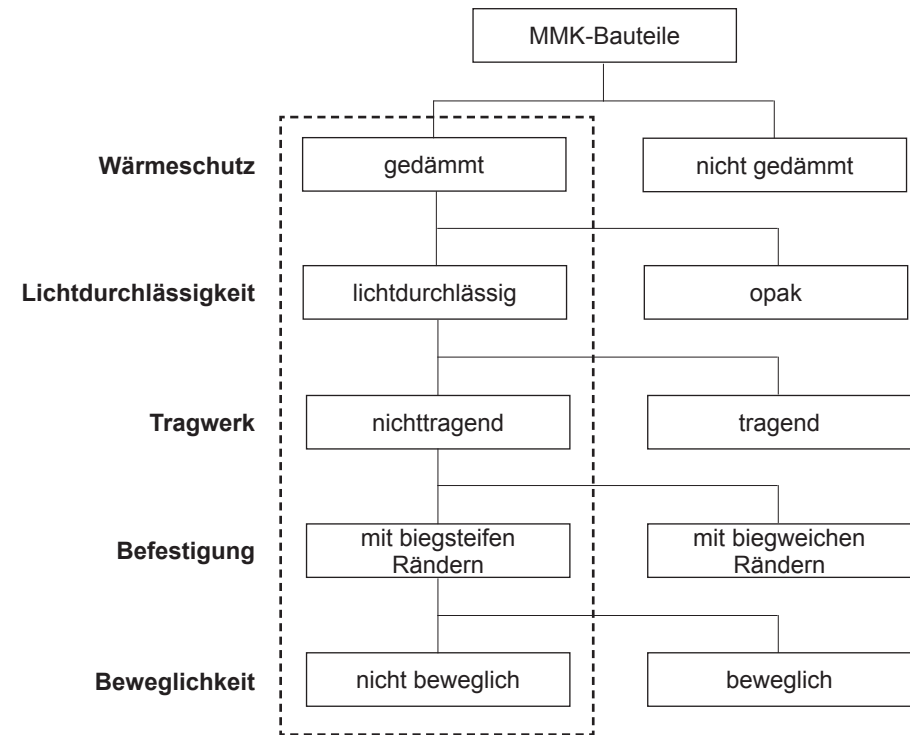


Abb. 5-1: Vordefinition der Untersuchungsbereiche von MMK-Bauteilen (linke Alternative)

Hinsichtlich der funktionalen und konstruktiven Aspekte sind die Untersuchungsbereiche des MMK-Bauteils im voraus abgegrenzt. (Abb. 5-1) Die Betrachtung wird sich auf den mehrlagigen Aufbau mit unterschiedlich kombinierbaren transluzenten Elementen der MMK-Bauteile konzentrieren. Die konstruktiven Aspekte der Rahmen bzw. Randkonstruktionen werden bezüglich der Anwendungs-

varianten im Gebäude in weiteren Arbeitsschritten untersucht. (Abb. 5-2)

Die für die Gebäudehülle bedeutenden gestalterischen, ökologischen und ökonomischen Aspekte, die schon für die Planung ebenfalls von großer Bedeutung sind, werden bei der Untersuchung immer als wichtige Parameter mitberücksichtigt.

Elemente	Funktionen	Grundlegende Anforderungen
Membran	Oberfläche des Bauteils	Beständigkeit Lichtdurchlässigkeit Dichtigkeit Brandschutz Wartungsfreundlichkeit Gestalterische Aspekte
Wärmedämmung	Wärmeschutz	Lichtdurchlässigkeit Verbindung oder Unterstützung der Membranen Lagefixierung
Rahmen	Verbindung und Befestigung	Verminderung von Wärmebrücken Dichtigkeit Montage an Unterkonstruktion

Abb. 5-2: Funktionen und grundlegende Anforderungen an die Elemente von MMK-Bauteilen¹

1. Vorauswahl der zu kombinierenden Elemente

Bei einer Betrachtung der in Frage kommenden Wärmeschutz- und Tageslichtsysteme ist Zielsetzung, dass durch eine Kombination mit zusätzlichen Elementen die MMK-Bauteile

- einen verbesserten Wärmedurchlasswiderstand erreichen
- eine ausreichende Lichtdurchlässigkeit aufweisen
- in ihrer Leistungsfähigkeit möglichst optimiert werden, um die Komplexität des konstruktiven

Aufbaus zu verringern

Aus diesen grundsätzlichen Anforderungen resultieren für die Auswahl der Materialien und Produkte für den Einsatz von auf dem Markt verfügbaren transparenten Materialien als Membranlagen und als zusätzliche Elemente transluzente Wärmedämmungen (TWD). (Abb. 5-3)

Dabei wird deutlich, dass bis jetzt nicht alle Membranmaterialien als Standardprodukte von der Industrie produziert werden. Die konkreten Eigenschaften der Materialien werden von vielen Faktoren, wie z.B. Dicke, Farbe, Hersteller, usw. beeinflusst.

Da es keine einheitlichen und genormten Übersichten zu den Membranen gibt, werden zum Vergleich die wesentlichen Kenngrößen einzelner Werkstoffe nachfolgend dargestellt.

2. Auswahl des Membranmaterials für Membranlagen von MMK-Bauteilen

Im Teil 2 wurden die Eigenschaften von Membranwerkstoffen dargestellt. Es zeigt sich, dass die mechanischen Eigenschaften und die Beständigkeit der benutzten Membranen bei einem Einsatz im Bereich der Gebäudehülle eine lange Lebensdauer gewährleisten können. Bei einer Betrachtung der in Frage kommenden Wärmeschutzsysteme, spielt bei der Auswahl gleichzeitig auch die Lichttransmission der Membranen eine wichtige Rolle.

Aus den oben genannten Gründen eignen sich die opaken und die offenen Membranwerkstoffe nicht als Elemente für die Oberfläche der MMK-Bauteile. Die transluzenten Membranen, die beschichteten Gewebe und die Kunststofffolien, werden nach den aufgestellten Kriterien als Hüllmaterialien für die MMK-Bauteile untersucht.

Wie bereits gezeigt wurde, stehen die folgenden auf dem Markt verfügba-

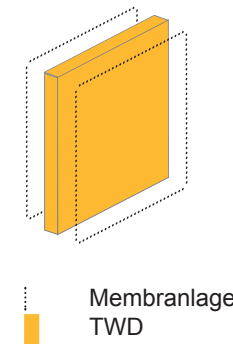


Abb. 5-3: Grundstruktur der MMK aus Membranen und TWD.

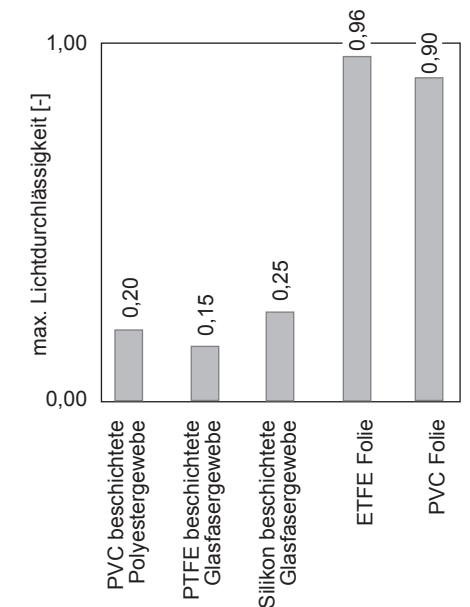


Abb. 5-4: Vergleich des maximalen Lichttransmissionsgrads verschiedener Membranmaterialien

ren transluzenten Materialien für die Membranlagen von MMK-Bauteilen zur Verfügung:

- PVC-beschichtetes Polyestergerewebe
- PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe
- Silikon-beschichtetes Glasfasergewebe
- ETFE Folien
- PVC Folien

- Brandschutz
- Wartungsfreundlichkeit
- Gestalterische Aspekte

2.1.1 Beständigkeit

Zur Untersuchung der Beständigkeiten von Membranmaterialien s. Teil-2.

2.1.2 Lichtdurchlässigkeit

Hinsichtlich der Lichtdurchlässigkeit weisen Kunststofffolien unter den im Bauwesen verwendeten Membranen, die besten Werte auf. (Abb. 5-4)

2.1 Auswahlkriterien

Anhand architektonischer Anforderungen, die an die Gebäudehülle gestellt werden, erfolgt die Untersuchung geeigneter Membranmaterialien für die MMK-Bauteile. Grundsätzlich haben Membranen bzw. die Membranlagen als innere und äußere Bauteiloberflächen die Funktionen von Schutzschichten zu übernehmen. Allgemein werden als Gesichtspunkte bei der Auswahl betrachtet:

- Beständigkeit
- Lichtdurchlässigkeit
- Dichtigkeit

Die Lichtdurchlässigkeit von beschichteten Geweben wird von den Beschichtungen, den Eigenschaften und den Verwebungsarten der Fasern beeinträchtigt. Für alle Werkstoffe gilt, dass eine bessere Lichtdurchlässigkeit auf Kosten der mechanischen Festigkeit erreichbar ist. Dabei können die PVC-beschichteten Polyestergerewebe und PTFE- und Silikonbeschichteten Glasfasergewebe eine Lichtdurchlässigkeit über 15% aufweisen, was bereits eine nennenswerte Nutzung des Tageslichts ermöglichen kann. Hinsichtlich einer Kombination mit TWD wird die Lichtdurchlässigkeit des gesamten Bauteils allerdings dabei noch weiter abgemindert.

Die transparenten Folien erreichen

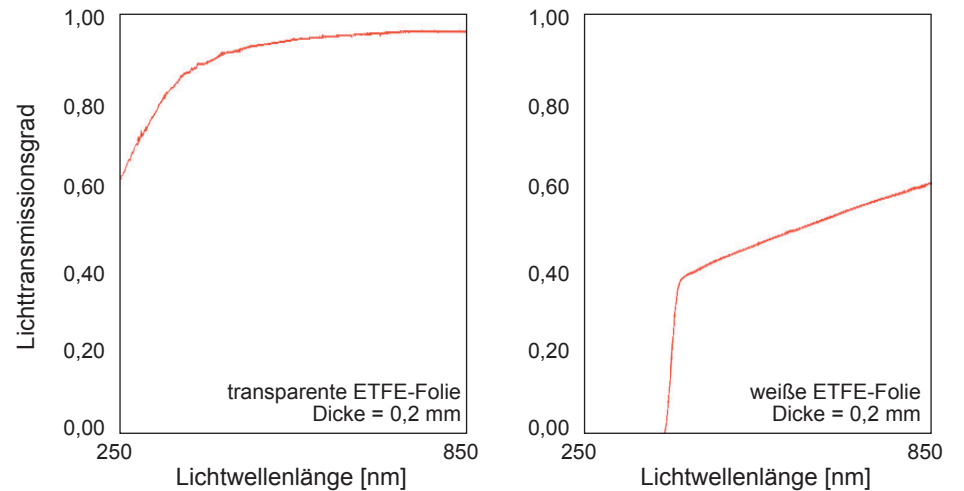


Abb. 5-5: Transmission transparenter und weißer ETFE-Folien bei ausgewählter Lichtwellenlänge²

	Schmelzpunkt (°C)	Pyrolysetemperatur (°C)	Selbstzündungs- temperatur (°C)
Polyethylen	105-138	340-440	350
PVC	>140	200-300	455
PVDF	168-180	340	k.A.
Polyamid	185-265	300-350	450
Polyester	250	283-306	510
ETFE	270	k.A.	k.A.
PTFE	327	510-540	580
Silikon	--	250-300	k.A.
Baumwolle	--	200-270	350-400
Glasgewebe	>1100	--	--
Trockenes Schnittholz *	--	--	160

Abb. 5-6: Heizwerte der Grundstoffe von Membranen³

eine hohe Lichtdurchlässigkeit von über 90%. Bei mehrlagigen Aufbauten reduziert sich die Lichtdurchlässigkeit mit Zunahme der Anzahl der Lagen.

Durch eine Färbung oder Bedruckung der Folienoberfläche werden die lichttechnischen Eigenschaften ebenfalls beeinflusst. Beispielsweise kann mit weiß eingefärbten ETFE-Folien das UV-Spektrum nahezu vollständig ausgeblendet werden, während transparente ETFE-Folien eine relativ hohe Transmission der Sonnenstrahlung im UV-Bereich ermöglichen. (Abb. 5-5) Transparente ETFE-Folien weisen auch eine hohe Transmission im Bereich des sichtbaren Lichts (mit einer Wellenlänge von 380 nm bis 780 nm) auf, was eine gute Durchsicht durch die Folien ermöglicht.

Bei der Untersuchung von Aspekten der Lichtdurchlässigkeit stellen die Anforderungen nach Helligkeit und Verschattung durch die Membranen im Anwendungsfall bezüglich der Themen: Energiegewinne, Überhitzung im Innenraum, natürliche Belichtung, Blendung usw., mitunter konträre Ziele dar. Allerdings bestehen durch Farbgebung und Bedruckung auf der Oberfläche von bestimmten Membranen verschiedene Einflussmöglichkeiten. In der vorliegenden Arbeit werden die funktionalen und

gestalterischen Auswirkungen der verschiedenen Kombinationen derartiger Membranlagen untersucht.

2.1.3 Dichtigkeit

Die Dichtigkeit der Membranfläche hat eine große Bedeutung für das Bauteil. Sie soll Feuchteschutz, Windschutz und Widerstand gegen eine Verschmutzung der innenliegenden Bauteilschichten gewährleisten. Dies erfordert über die Dichtigkeit der Membran selbst hinaus insbesondere die Betrachtung der Fugenausbildung.

Bei der bauphysikalischen Betrachtung von MMK nimmt der Feuchteschutz nach DIN 4108 eine Schlüsselstellung bei der Anwendung von MMK ein. Für die Membranen zählt die Regensicherheit als eines der wichtigsten Kriterien. Ferner müssen bauphysikalisch besonders die Luftdichtigkeit der Innenhaut, die Dampfdiffusion und die eventuelle Tauwasserbildung in und auf den Schichten der MMK untersucht werden.

Folien und mit Kunststoff beschichtetes Gewebe liegen mit ihren Eigenschaften zwischen den dampfdichten und diffusionsoffenen Materialien.⁴ Für die zwischen den Membranlagen befindlichen zusätzlichen Elemente, bzw. TWD, sind feuchtigkeitresistente Werkstoffe zu wählen.

	Lichtdurchlässigkeit	Festigkeit	Dichte ¹⁾	Witterungsbeständigkeit	Chemische Beständigkeit	Brandklassifizierung ²⁾	Nutzungsdauer	Anschmutzverhalten ³⁾
PVC-beschichtete Polyestergewebe	-	+	+	o	+	o	o	-
PTFE-beschichtete Glasfasergewebe	o	+	o	+	+	+	+	+
Silikon-beschichtete Glasfasergewebe	o	+	+	o	-	+	o	-
PTFE-beschichtete Aramidfasergewebe	-	+	o	+	+	+	+	+
ETFE-Folien	+	o	+	+	+	o	+	+
PVC-Folien	+	-	+	-	+	o	-	-

- 1) Dichte der Membranwerkstoffe wird danach beurteilt, ob:
 - + : Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe nicht durchdringen können
 - o : Gase und Dämpfe durchdringen können
 - : Flüssigkeiten durchdringen können
- 2) Die Brandklassen der Werkstoffe sind nach DIN 4102-2 klassifiziert:
 - + : A2
 - o : B1
 - : schlechter als B1
- 3) Die Standardfarbe der verwendeten Membranwerkstoffe ist meistens weiß (bei beschichteten Geweben) oder transparent (bei Folien). Weitere Farben sind auf Anfrage möglich. Für den gestalterischen Ausdruck der Gebäudehülle ist das Anschmutzverhalten ein wichtiger Aspekt.

Abb. 5-7: Beurteilung der Eigenschaften von Membranwerkstoffen nach den Auswahlkriterien⁶

2.1.4 Brandschutz

„Bis jetzt unterliegen die Membranmaterialien in Deutschland noch den geregelten Bauprodukten normativ“.⁵ Daher wird bei den Membranmaterialien für die MMK-Bauteile derzeit die Brandschutzklassifizierung zu den konventionellen Bauweisen und Baumaterialien analog der gültigen DIN 4102 vorgenommen. In diesem Regelwerk sind u.a. die Brandverhütung, Brandbegrenzung und Brandbekämpfung bei Materialien und Bauteilen dargestellt.

Die Brandverhütung „beinhaltet alle vorbeugenden Maßnahmen, die der Entstehung von Schadfeuer entgegenwirken...“⁷ Nach den gesetzlichen Regeln werden die im Baubereich eingesetzten Membranmaterialien in brennbare und nicht brennbare Werkstoffe nach DIN 4102 Teil 4 von B1 bis A2 klassifiziert.

Die Abb. 5-6 zeigt den Schmelzpunkt von typischen thermoplastischen Beschichtungen bzw. von Folien und Gewebefasern (der Erweichungspunkt, ab dem die Nähte aufgehen, liegt noch niedriger). Darüber hinaus ist der Pyrolyse-Bereich, bei dem sich Faserwerkstoffe gasförmig in meist brennbare Gase zersetzen und die Selbstzündungstemperatur, bei den Stoffen eigenständig zu brennen beginnen (Flammen haben ca. 800°C)

dargestellt.⁸

Die Maßnahmen zur Brandbegrenzung haben zur Aufgabe, Rauch zu kanalisieren, einzuschließen und seine Verbreitung zu verhindern. Bauteile aus Membranmaterialien werden so geprüft, dass sie im Brandfall schnell schmelzen können und so ein Rauch- und Wärmeabzugs ermöglicht wird.⁹

Bei der Brandbekämpfung zählt insbesondere die Zeit zwischen dem Brandausbruch und wirksamen Gegenmaßnahmen. Gebäudehüllen aus Folienmaterialien stellen für die Feuerwehr kein Hindernis dar; mit Werkzeugen können kurzfristig großflächige Zugänge oder zusätzliche Entrauchungsöffnungen geschaffen werden. Unter der Hitze aufziehende Nähte sorgen für ein Abführen der Hitze, die Temperaturen bleiben länger unkritisch. Bei realisierten Membranbauten wurden Membranmaterialien nach der Klasse B1 mit ausreichenden Maßnahmen schon vielfach verwendet.

2.1.5 Wartungs- und Reinigungsaufwand

Heute verwendete Membrangewebe können durch Versiegelung eine glatte und antiadhäsive Oberfläche erhalten, welche zu einer deutlichen Verbesserung des Antischmutzver-

haltens führt. Für die bei Dachkonstruktionen eingesetzten beschichteten Gewebe ist eine mechanische Reinigung in der Regel einmal pro Jahr, erforderlich.¹⁰

Die ETFE-Folien aus Fluorkunststoffen weisen eine Selbstreinigungsfunktion auf, d.h. dass in der Praxis eine Reinigung durch Regenwasser ausreichend ist.

2.1.6 Gestalterischer Ausdruck der Membranen

Hinsichtlich der gestalterischen Aspekte von Membranen spielen die Farbigkeit, das Muster, die Transluzenz und Reflexion des sichtbaren Lichts eine große Rolle. Die Standardprodukte von beschichteten Geweben sind meistens weiß, können auf Anfrage aber eine Farbgebung mit Pigmenten zur Beschichtungen erhalten. Die Folien existieren von transparent weiß bis bläulich schimmernd. Auf Anfrage sind viele Farben oder Bedruckungen möglich, die bei der Anwendung auch vielfältig kombiniert werden können. Durch eine innen liegende Beleuchtung der Membranoberfläche können in der Nacht besondere farbige Wirkungen erzielt werden.

Bei den MMK-Bauteilen spielt die Membran als Oberfläche für den architektonischen Ausdruck eine wich-



Abb.5-8: Transparente ETFE-Folie

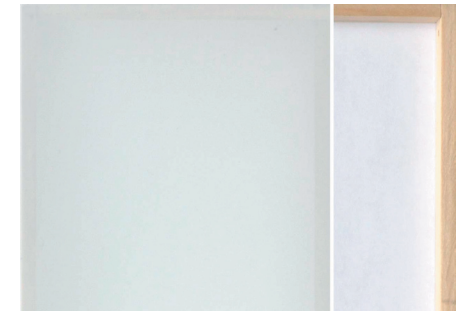


Abb.5-9: Weiß gefärbte ETFE-Folien

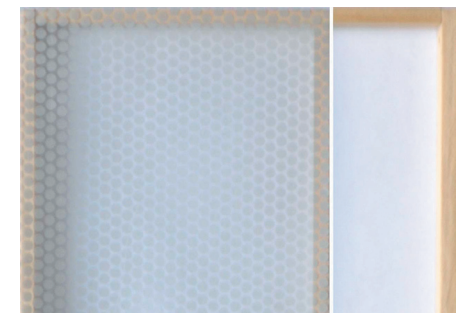


Abb.5-10: Silver bedruckte ETFE-Folien

tige Rolle. Daneben ist im Zusammenhang mit dem gestalterischen Ausdruck auch der Einfluss aus Transluzenz, Farbe und Strukturen der Wärmedämmung zu berücksichtigen. Von großem Einfluss auf das Erscheinungsbild der Gebäudehülle ist das Anschmutzverhalten, das entsprechend bei der Auswahl des Membranmaterials für die Oberfläche der MMK-Bauteile berücksichtigt werden muss.

2.1.7 Zusammenfassung

Beim Vergleich der Eigenschaften von Membranwerkstoffen, beschichteten, geschlossenenporigen Geweben und Folien zeigt sich, dass mit PTFE-beschichteten Glasfasergeweben und ETFE-Folien alle Anforderungen hinsichtlich der vorabbestimmten Kriterien erfüllt werden können. (Abb. 5-7) Unter dem Gesichtspunkt, dass mit MMK-Bauteilen möglichst viel Tageslicht genutzt und ein großer Beitrag zum Energieeintrag geleistet werden soll, werden bei der weiteren Untersuchung die ETFE-Folien wegen ihrer hervorragenden lichttechnischen Eigenschaften verwendet.

2.2 ETFE-Folien als Membranlagen für MMK-Bauteile

Aufgrund ihrer hohen Lichtdurchlässigkeit, guten Beständigkeit und ihres

Verhaltens im Brandfall (DIN 4102-B1) stellen ETFE-Folien zzt. das gebräuchlichste Folienmaterial für pneumatisch gestützte Membrankonstruktionen dar. Die standardmäßige Dicke der Folien beträgt zwischen 0,05 mm und 0,25 mm. Die Standardprodukte der ETFE-Folien sind transparent und erreichen eine Lichttransmission von bis zu 96%.¹¹ Durch Einmischen von Pigmenten können sie sowohl farbig hergestellt als auch mit Fluorkunststoffen bedruckt werden, was eine Verschattung bewirken kann.

Die Lichtdurchlässigkeit von ETFE-Folien mit einer Dicke von 200 µm liegt im Bereich des Lichtspektrums zwischen 380-780 nm bei ca. 95%, wobei der Anteil an Streulicht 10% und der des geradlinigen Lichtdurchgangs 85% beträgt. Der daraus resultierende Lichtverlust liegt bei 5%.¹² (Abb. 5-12) Wegen der schon erwähnten Transmission der Sonnenstrahlung im UV-Bereich bei transparenten ETFE-Folien sind diese für bestimmte Einsatzbereiche, z.B. Einhausungen in botanischen Gärten, besonders geeignet. UV-Strahlung kann jedoch zur Beschädigung der Dämmstoffe und zur Alterung der menschlichen Haut führen. Deshalb muss beim Einsatz der ETFE-Folien die Lage und die Auswirkungen auf andere Komponenten zur Beurteilung mit herangezogen werden.

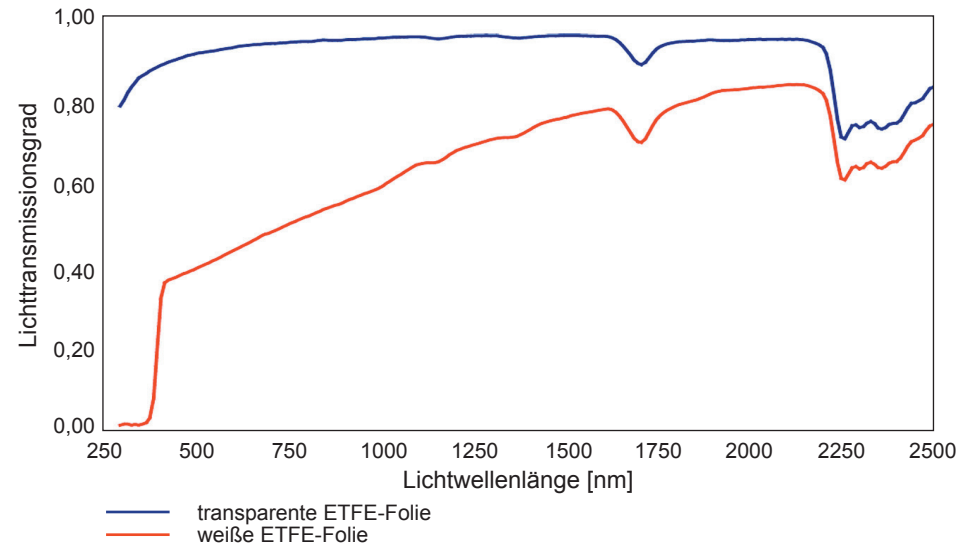


Abb.5-11: Spektraler Transmissionsgrad bei senkrechtem Lichteinfall der Produkte Nowoflon ET-6235 Folien von Firma Nowofol

		Nowoflon 6235 Klar 200	Nowoflon 6235 weiß 200
Sichtbares Licht (380-780 nm)	Transmission	0,92	0,42
	Streulicht	0,08	0,41
	Geradlinier Lichtdurchgang	0,84	0,01
UV-A (320-380 nm)	Transmission	0,84	0,02
UV-B (280-320 nm)		0,79	0,02
Global Strahlung (300- 2500 nm)		0,93	0,48

Abb.5-12: Lichttransmission der transparenten und weißen ETFE-Folien¹³

Bei den mehrlagigen Konstruktionen wird das Maß der durchgelassenen Lichtmenge von der Transluzenz, der Anzahl der Lagen und den Lichteinfallswinkeln beeinflusst.

Da die Reißfestigkeit des stärksten Standardmaterials von ETFE-Folien mit einer Dicke von 0,25 mm mit ca. 633N/5cm gering ist, ist die maximale Spannweite einer Last abtragenden Folienkonstruktion deutlich geringer als bei einem beschichteten Gewebe (z.B. PTFE beschichtete Glasfasergewebe, 1000 - 8000 N/5cm). Wegen der begrenzten Folienbeanspruchbarkeit beträgt die maximale Spannweite für Pneus je nach Pneu- und Dachgeometrie ca. 4,5 m bei bis über 100 m lang gestreckten Konstruktionen und ca. 7,5 m bei runden oder quadratischen Pneus. Größere Spannweiten benötigen eine zusätzliche Unterstützung durch Seile oder Seilnetze.¹⁴

Der U-Wert beträgt bei einer einlagigen Membrane ca. 5,1 W/m²K. Deswegen sind die häufig verwendeten, mehrlagigen pneumatischen Konstruktionen aus Folien nicht nur für die Stabilisierung der Membranflächen von Bedeutung, sondern verbessern durch die zwischen den Folien ruhenden Luftschichten den Wärmedurchlasswiderstand erheblich.¹⁵ Die Taubildung auf der luftdichten Oberfläche kann durch Einfüllung von trockener Luft verhindert werden.

Laut Firmeninformationen ist eine Anti-Taubeschichtung der Folien in der Entwicklung.¹⁶

Aufgrund der antiadhäsiven Oberflächenbeschaffenheit erreichen die ETFE-Folien eine dauerhaft hohe Lichtdurchlässigkeit. Realisierte Beispiele zeigen, dass der anfallende Schmutz fast vollständig durch den Regen weggespült werden kann und eine zusätzliche Reinigung nicht notwendig ist.¹⁷

3 Transluzente Wärmedämmung (TWD)¹⁸ für MMK

3.1 Grundlagen

3.1.1 TWD-Systeme zur Nutzung der Solarenergie

Durch die TWD Systeme, in denen Wärmedämmwirkung und passive Solarenergiegewinnung kombiniert werden, kann sich der Heizenergieverbrauch im Gebäude gegenüber einem opak gedämmten Gebäude weiter deutlich reduzieren lassen.¹⁹

Bei Anwendungen sind zwei Typen für die passive Solarenergienutzung zu unterscheiden:

- TWD mit Massivwand: (Abb. 5-13)

Bei diesem System trifft die ein-

fallende Solarstrahlung durch die TWD auf eine schwarz gestrichene Absorberwand. Die Wand erwärmt sich und gibt die entstehende Wärme zeitverzögert an die dahinter liegenden Räume ab. Mit einem Luftspalt zwischen TWD und Wand oder mit vorgesetzten Sonnenschutzanlagen ist der Wärmege Gewinn aus Solarstrahlung manipulierbar.

- TWD als Direktgewinnsystem: (Abb.5-14)

In diesem Fall befindet sich hinter der TWD keine Absorberwand, so dass die transmittierte Solarstrahlung direkt in den Raum eingelassen wird. Viele TWD-Materialien bestehen aus Strukturen, die das Licht streuen oder umlenken können. Dies wird in der Praxis genutzt um eine Verbesserung der Raumausleuchtung mit Tageslicht zu erreichen. Im Vergleich mit dem Massivwandsystem steht die Energie hier ohne Zeitverzögerung für Beleuchtung und Erwärmung zur Verfügung. Einer Gebäudeüberhitzung kann bedingt mit Beschattungsanlagen und thermischen Massen in den Raumumschließungsflächen entgegenwirken werden.

In der bauphysikalischen Anwendung ist der Anteil von Massivwand- und

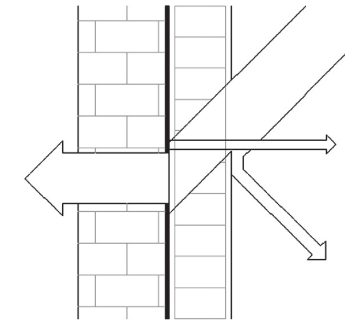


Abb.5-13: TWD mit Massivwand

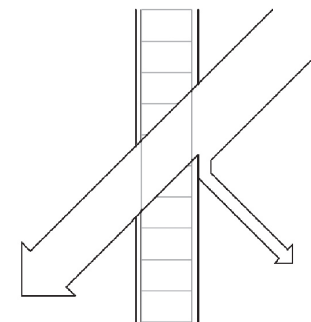


Abb.5-14: TWD als Direktgewinnsystem

(Pfeile geben nicht Strahlungsrichtung sondern transmittierte bzw. reflektierte Energiemengen an)

Direktgewinnsystemen insgesamt annähernd gleich hoch.²⁰ Der Einsatz der funktional unterschiedlichen TWD-Systemtypen hängt eng mit der Gebäudenutzung zusammen. Daher werden die Direktgewinnsysteme bei tagsüber genutzten Gebäuden deutlich häufiger verwendet. Hinsichtlich der geplanten Anwendungsbereiche für Membranbauten werden die MMK-Bauteile aus TWD mit Membranen nachfolgend nur für ein Direktgewinnsystem untersucht.

Da sich ein transparentes Dämmsystem jedoch von konventionellen opaken Dämmsystemen dadurch grundlegend unterscheidet, dass es die passive Nutzung der Solarenergie als ein Hauptziel hat, ist eben entscheidend, wie das TWD-Material mit der auftreffenden Strahlung umgeht. Es müssen deshalb sowohl die lichttechnischen als auch die thermischen Eigenschaften bei der Untersuchung der Leistungsfähigkeit betrachtet werden.

3.1.2 Grundstoffe und Strukturen von TWD-Materialien

Die Eigenschaften der TWD-Materialien sind von zwei wesentlichen Faktoren bestimmt: Den Grundstoffen und dem strukturellen Aufbau.

Die TWD-Materialien sind vorwiegend aus Kunststoffen oder Glas in

geometrischen Strukturen hergestellt. Darüber hinaus gibt es auch Aufbauten mit homogenen Strukturen, wie Silica-Aerogel. (Abb.5-15)

Wegen des geringen Eigengewichts und guter Verarbeitungseigenschaften stellen die Kunststoffe die wichtigsten Grundstoffe für die TWD dar. Grundsätzlich eignen sich dafür alle transluzenten und entsprechend temperaturbeständigen Polymere. Für den Niedrigtemperaturbereich sind dies von den amorphen Polymeren z.B. Kunststoffe auf Acrylglasbasis, Polymethylmetacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC), Celluloseacetate (CTA, CA), sowie amorphe, transparente Copolymere auf der Basis von Cykloolefine und Ethylen.²¹

Die bauphysikalischen Kennwerte variieren bei den stark unterschiedlichen Strukturaufbauten von TWD-Materialien nach den verschiedenen Grundstoffen deutlich. Nach der Ausrichtung der Schichtstruktur im Verhältnis zur Absorberausrichtung können die TWD-Materialien wie folgt klassifiziert werden:²² (Abb. 5-16)

- Absorberparallele Strukturen:
 - Mehrfachverglasung
 - Hohlkammerplatten
 - Folienschichten

- Absorbersenkrechte Strukturen:

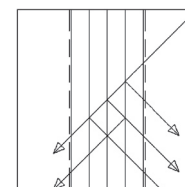
	Kunststoff				Glas	Aerogel
	PMMA	PC	CA	CTA		
Raumdichte [kg/m ³]	1200	1180	k.A.		2500	90-100
R-Wert [m ² K/W]	ca. 1,25*		ca 1,0*		0,85	-**
Dauergebrauchstemperatur(°C)	70-90	115-140	140	130	250	-
Brandverhalten (DIN 4012)	B2/B3	B1/B2	B1	B1	A1	A1
UV-Beständigkeit	+	-	+	+	+	-

+: gut geeignet; -: nicht geeignet.

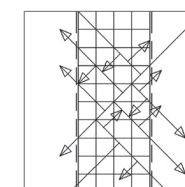
*: bei 100 mm Plattendicke²³

** : R-Wert von Aerogel 2,4 cm granular mit zwei Glasscheiben beträgt 0,93 [m²K/W]²⁴

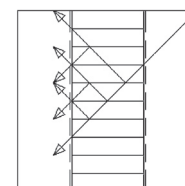
Abb.5-15: Auswählte Eigenschaften der Grundstoffe zur TWD²⁵



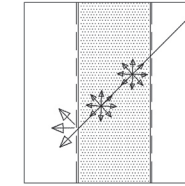
Absorberparallele Strukturen



Kammerstrukturen



Absorbersenkrechte Strukturen



Homogene Strukturen

Abb.5-16: Grundtypen der Strukturen von TWD

Kapillarstrukturen
Wabenstrukturen
Schlitzstrukturen

- Kammerstrukturen:

Stegplatten
Transparenter Schaum
Glashohlkugel

- Homogene Strukturen:

Aerogelplatten und -granulat
Glasfilze

3.1.3 Allgemeine Eigenschaften von TWD-Materialien

Aus der Materialbezeichnung gehen die beiden charakteristischen Eigenschaften von TWD hervor:

- die Durchlässigkeit für Solarstrahlung
- die Wärmedämmeigenschaften

Die Werte beim Strahlungs- und Wärmetransport sind bei den einzelnen TWD-Materialien unterschiedlich. Allgemein wird bei allen TWD-Systemen die Dämmwirkung maßgeblich durch die Eliminierung der Konvektion und die Dämpfung der Wärmestrahlung innerhalb der Strukturen bestimmt.

Für absorberparallele Strukturen sind mehrlagige pneumatische Kissen das

bekannteste Beispiel beim Membranbau. Durch Einfügen zusätzlicher Folienschichten kann die Wärmedämmung verbessert werden. Gleichzeitig treten die Reflexions- und Absorptionsverluste im sichtbaren sowie im nahen Infrarotbereich der Solarstrahlung abhängig von der Anzahl und Eigenschaften der Folienschichten auf. Das bedeutet, die Lichttransmission nimmt mit steigender Wärmedämmung, also Schichtenfolge, stark ab.²⁶

Bei absorbersenkrechten Strukturen, wie Kapillar- und Wabenstrukturen, ist die Absorption aufgrund der großen Zellweite im Material relativ gering. Durch die Reflexion an den Strukturwänden wird die einfallende Strahlung zum überwiegenden Teil in Richtung des Innenraums gestreut. Für den Wärmedurchgang wirkt die Materialstruktur als Strömungswiderstand. Dadurch entsteht im Material ein Luftpolster aus stehender Luft, was eine besonders geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und daher eine gute Wärmedämmung leistet. Der U-Wert wird mit zunehmender Länge zum Durchmesser einer Hohlkammer reduziert.

Abb.5-18: Thermische und energetische Eigenschaften ausgewählter TWD-Systeme im Vergleich mit Verglasungen²⁸

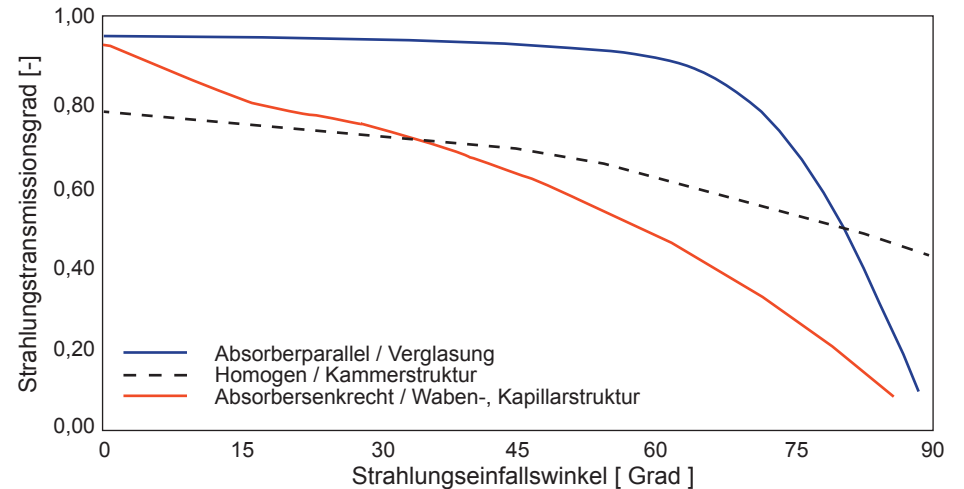
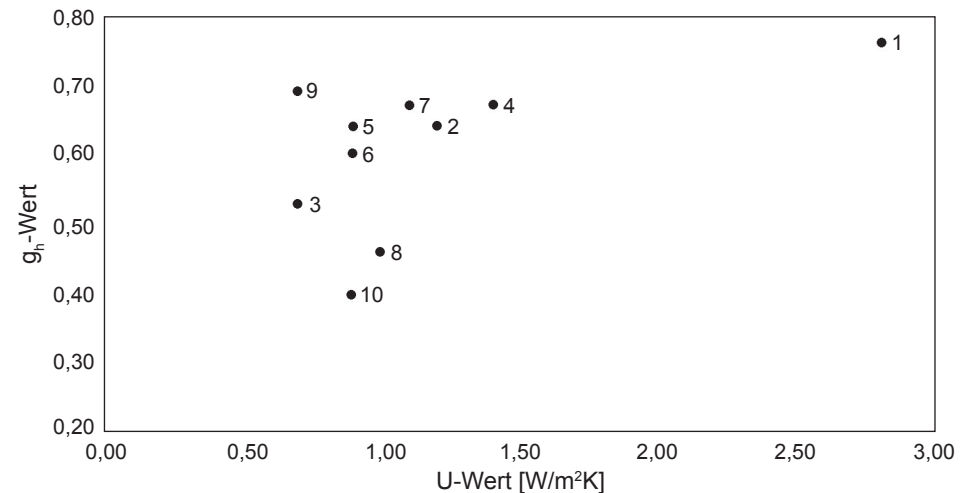


Abb.5-17: Strahlungstransmissionsgrad in Abhängigkeit vom Strahlungseinfallswinkel für die Strukturtypen²⁷



- | | |
|--|--|
| 1 Isolierverglasung | 7 Glasröhrchen 80 mm in Doppelverglasung |
| 2 2-fach Wärmeschutzverglasung (Argon) | 8 Aerogelgranulat 16 mm in Doppelverglasung |
| 3 3-fach Wärmeschutzverglasung (Krypton) | 9 monolithisches Aerogel 20 mm in Doppelverglasung |
| 4 PC Waben 50 mm in Doppelverglasung | 10 Makrolon Stegvierfachplatten zweifach 70 mm |
| 5 PC Waben 100 mm in Doppelverglasung | |
| 6 PMMA Kapillaren 100 mm in Doppelverglasung | |

Mit diesen Eigenschaften besitzen die offenen, senkrecht zur Absorberfläche angeordneten Kapillar- und Wabenstrukturen im Vergleich zu anderen Systemen ein weit besseres Verhältnis von Strahlungsdurchlässigkeit zum Wärmedurchlasswiderstand.²⁹

Bei den Kammerstrukturen und homogenen Materialien fällt die Transmission schnell ab, da die vielen Oberflächen die einfallende Strahlung zurückreflektieren. Diese TWD-Systeme werden daher in sehr geringer Materialstärke eingesetzt, um noch ausreichende Transmissionsgrade zu erreichen.³⁰

Bei allen Strukturarten ist der Transmissionsgrad abhängig vom Einstrahlungswinkel. Die Transmission sinkt bei einem flachen Einfallswinkel rapide ab (Abb.5-17). Innerhalb der verschiedenen TWD-Strukturen wird die direkte Transmission durch Reflexion und Streuung reduziert. Die hohe Durchlässigkeit im solaren und sichtbaren Strahlungsbereich ist selten mit guter Durchsicht verbunden.³¹

Für die Beurteilung der reinen Lichtdurchlässigkeit von TWD-Materialien wird der Transmissionsgrad (τ_v) im Spektralbereich des sichtbaren Lichts (380 bis 780 nm) herangezogen,³² und für energetische Berechnungen der TWD der Gesamtenergiedurch-

lassgrad (g-Wert) verwendet, der aus dem Strahlungstransmissionsgrad und dem Absorptionsgrad gebildet wird.

Für eine realistischere energetische Bewertung von TWD-Systemen ist der halbräumlich-diffuse solare Transmissionsgrad ($\tau_{e,h}$), bzw. g_h -Wert einzusetzen, welcher in erster Näherung einen effektiven Wert für den über das ganze Jahr ermittelten Transmissions- bzw. Gesamtenergiedurchlassgrad bei beliebiger Orientierung darstellt.³³ Die Wärmeleitfähigkeit der TWD-Materialien ist dicken- und temperaturabhängig, die äquivalente Wärmeleitfähigkeit ändert sich mit der Materialdicke und der mittleren Materialtemperatur.³⁴

Wegen der unterschiedlichen Anwendungsbereiche der MMK ist der Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils (R_B) bei bestimmter Mitteltemperatur ohne äußeren bzw. inneren Wärmeübergangswiderstand für die Bewertung anzugeben.³⁵

3.2 Vorauswahl der TWD für MMK-Bauteile

Grundsätzlich werden aus dem Bereich der funktionalen Aspekte die beiden thermischen und lichttechnischen Eigenschaften als wichtigste Faktoren betrachtet:

Kriterien	Gesichtspunkte	Materialität	Struktur
Funktionelle Aspekte	Lichtdurchlässigkeit	+	+
	Wärmedämmung	-	+
	UV-Beständigkeit	+	-
	Feuchte Beständigkeit	+	o
	Temperatur Beständigkeit	+	-
	Brandschutz	+	-
Konstruktive Aspekte	Lage und Fixierung	+	o
	Abbruchgefahr zu Membranen	+	o
	Verbindung mit Membranen	+	+
	Stabilität	-	+
Gestalterische Aspekte	Anschmutzungsverhältnis	-	+
	Kondenswasserbildung	-	+
	Durchsicht	-	+

+: gut geeignet; o: bedingt geeignet; -: nicht geeignet.

Abb. 5-19: Einflussfaktoren bei der Auswahl der TWD-Materialien

- Durchlässigkeit der Solarstrahlung und befriedigende Wärmedämmeigenschaften
- ausreichende Lichttransmission und optimierte Nutzung des Tageslichts.

Von den konstruktiven Aspekten hat die Anpassungsfähigkeit der TWD-Materialien als Einlage zwischen den Membranlagen an die Geometrie der Membranflächen einen besonderen Stellenwert. Weitere Optimierungskriterien resultieren aus den Anforderungen des praktischen Einsatzes

bei Membrankonstruktionen; hierzu zählen u.a. die UV-, Feuchte- und Temperaturbeständigkeit, die Lagefixierung, die einsetzbare Schichtdicke und das Brandverhalten. Schließlich sind Herstellung und Verarbeitung weitere wichtige Parameter. Anhand dieser Kriterien werden die zu Membranen passenden TWD-Materialien nach den verschiedenen Grundstoffen und Strukturen beurteilt. (Abb. 5-18)

Die am Markt verfügbaren TWD-Produkte sind meistens in die Verglasung integriert.³⁶ Zur Auswahl des TWD-

Materials für MMK wird eine effizient zusammenwirkende Struktur erforderlich, die bei der Ausführung die erwarteten Vorteile ermöglichen kann. Es ist erforderlich, die Leistungsfähigkeit von kombinierten Elementen, bzw. die TWD als Einlage möglichst zu erhöhen, sowie verschiedene zusätzliche funktionale Anforderungen gleichzeitig erfüllen zu können. (Abb. 5-19)

Für die Anwendung in den MMK-Bauteilen darf die TWD bei der Anpassungsfähigkeit an die Membranmaterialien keine Beschädigungsgefahr darstellen. Die Montage- und Verbindungsmöglichkeiten und die Stabilität unter den klimatischen Bedingungen müssen sichergestellt sein. Beim Aufbau der MMK sollen bei den konstruktiven Lösungen wenige Verbindungsmaßnahmen gebraucht werden, um die Abweichung der Konstruktionen zu vermindern. Gleichzeitig müssen Tauwasserbildung, Wartung und Reinigung beim Aufbau der MMK beachtet werden.

In Abb. 5-20 werden die Anpassungsmöglichkeiten von verschiedenen TWD-Strukturen in vorgespannten Membrankonstruktionen schematisch dargestellt und bewertet.

Offene, senkrecht zu den Membranen angeordnete Kapillar- und Wabenstrukturen aus Kunststoffen las-

sen bzgl. der Gesichtspunkte:

- geringes Gewicht
- gutes Verhältnis von Lichtdurchlässigkeit und Wärmedurchlasswiderstand
- Möglichkeit zur Verbesserung der Tageslichtnutzung

eine hervorragende Leistungscharakteristik für MMK erwarten. Deshalb werden im Folgenden die Eigenschaften der MMK in Kombination mit TWD aus der absorbersenkrechten Struktur weiter untersucht.

Kunststoffe wie PMMA, PC und neu entwickelte CA und CTA, stehen als Materialien zur Verfügung. Dabei weist der Grundstoff CA und CTA eine bessere Beständigkeit auf und hat ökonomische Vorteile im Vergleich zu dem in der Baupraxis häufig eingesetzten PC.³⁷

Im Rahmen einer Forschungsarbeit zu für die TWD geeigneten Kunststoffen wurden die physikalischen Zusammenhänge zwischen dem Werkstoffaufbau und der Werkstoffstruktur und den anwendungsrelevanten Primäreigenschaften von TWD-Strukturen aus Polymerwerkstoffen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Wabenstrukturen aus CA ein günstigeres Wärmedämmvermögen aufweisen

TWD als Einlage von MMK		Pneumatisch vorgespannt		mechanisch vorgespannt	
		Überdruck	Unterdruck		
A*-parallele Strukturen	Mehrfachverglasung	+	-	+	+
	Hohlkammerplatten	+	-	+	+
	Folienschichten	+	o	+	+
A*-senkrechte Strukturen	Kapillarstrukturen	-	+	o	o
	Wabenstrukturen	-	+	o	o
	Schlitzstrukturen	-	+	o	o
Kammerstrukturen	Stegplatten	+	+	+	+
	Transparenter Schaum	+	-	-	-
	Glashohlkugeln	-	-	-	-
Homog. Strukturen	Aerogelplatten und -granulat	o	-	-	-
	Glasfilze	+	-	o	o

*A = Absorber

+: gut geeignet;

o: bedingt geeignet;

-: ungeeignet.

Abb.5-20: Prinzipien von konstruktiven Anordnungen der TWD-Strukturen in MMK

als vergleichbare Strukturen aus den üblicherweise eingesetzten PMMA und PC.³⁸

3.3 TWD mit absorbersenkrechter Struktur aus Kunststoffen für die MMK

3.3.1 Strukturelle Eigenschaften

Hinsichtlich des Fertigungsprozesses lassen sich die absorbersenkrechten TWD-Strukturen auf zwei verschiedene Weisen herstellen,³⁹

- aus Hohlprofilen
- aus Einsatzstoffen von Kunststofffolien

Am häufigsten werden die Zellen von absorbersenkrechten TWD-Materialien über Extrusion in Form von Hohlprofilen hergestellt. Dafür wird in der Regel die Struktur nach der Düsengeometrie des Extruders in zwei Gruppen unterschieden:

- Kapillarstruktur
- Wabenstruktur

Verglichen mit extrudierten Strukturen zeigen Wabenstrukturen aus Folien signifikante Vorteile:

- durch die Verwendung von hochtransparenten, defektfreien Folien können Strukturfehler an der

Oberfläche und innerhalb der Struktur vermieden werden

- das Herstellungsverfahren ist bezüglich der Art des verwendeten Materials und der Zellgeometrie der TWD-Struktur flexibel anpassbar

Die strukturbedingten Kenngrößen werden im Zusammenhang mit den Materialeigenschaften, wie Gesamtenergiedurchlass und Wärmetransport der TWD bestimmt, ergänzt um Faktoren wie volumenbezogener Materialanteil und Durchstoßzahl, die mit Zellgeometrie und -abmessungen in Verbindung stehen.⁴⁰ (Abb. 5-22)

Bei einer Untersuchung zur Optimierung der Wabenstruktur wurde das Maß des Einflusses von Geometrie und Materialanteil auf die Eigenschaften der TWD-Struktur ermittelt. (Abb. 5-21)

Nach den Fertigungsprozessen, wie Formgebung und Fügenprozess, sind die großzelligen, quadratischen Wabenstrukturen aus verschiedenen Kunststofffolien mit einem hydraulischen Durchmesser von ca. 10 mm mit einem Schweiß-Expansions-Verfahren auf dem Markt verfügbar.⁴¹ Für Forschungszwecke kann die Wabenstruktur in kleiner Zellgröße (Zellhöhe ab 1 mm) im Labormaßstab gefertigt werden.⁴²

3.3.2 Lichttechnische Eigenschaften

Die TWD mit absorbersenkrechter Struktur weist eine gute Durchlässigkeit der Lichtstrahlung auf. Der Reflexionsverlust tritt nur noch an den dünnen Kanten der Struktur-Oberfläche auf, so dass fast die gesamte auftreffende Strahlung durch Vorwärtsreflexionen in Richtung des Absorbers gelenkt wird. Strahlungsdurchlässigkeit ist von einer guten Absorptionsgrad des gewählten Materials im Bereich des Solarspektrums abhängig. In der Praxis erreicht das Material bei Schichtdicken bis zu 20 cm einen hohen Transmissionsgrad.⁴³

Bei den absorbersenkrechten Strukturen wird das in das Material eintretende, gerichtete Licht auf Grund von Vielfachreflexionen kegelförmig aufgeweitet. Bei den geometrisch weniger perfekten Strukturen ist dieser Kegel weiter ausgedehnt.⁴⁴ Dadurch kann ein hoher Anteil des Lichtes zur Decke gerichtet werden und weit in den Raumhintergrund gestreut werden. Dies ermöglicht, eine blend- und schattenfreie, optisch ansprechende Raumausleuchtung. (Abb. 5-23)

Eine Studie zur Wirkung von partiell mit TWD belegten Fensterbereichen eines Büroraums wurde vom ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg) durchgeführt.

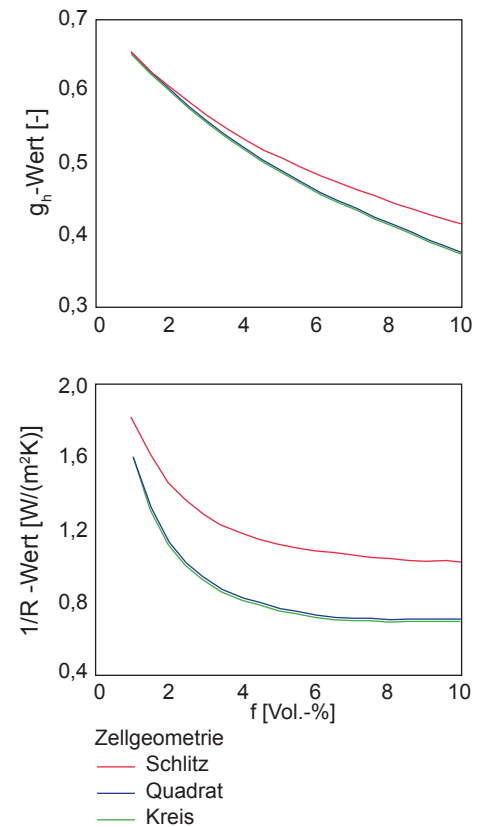
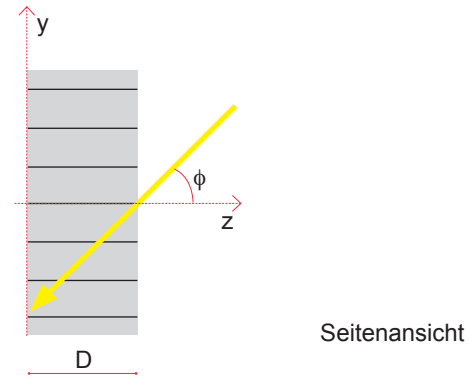
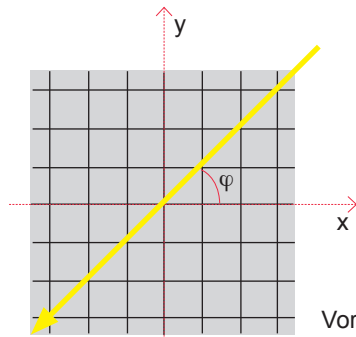


Abb.5-21: Einfluss der Geometrie und des Materialanteils auf die technischen Eigenschaften von TWD-Materialien⁴⁵



Seitenansicht



Vorderansicht

Legende:

- d: Wanddicke
- H: Zellhöhe
- B: Zellbreite
- 2R: Inkreisdurchmesser
- D: Strukturdicke
- Ax: Aspektverhältnis (D/X)
- X: d, H, B, 2R
- φ: Polarwinkel
- ψ: Azimuthwinkel

Abb.5-22: unterschiedliche Zellgeometrie von absorbersenkrechten TWD-Strukturen und Berechnungsgrundlage von Kenngrößen wie Materialanteil, Durchstoßzahl und mittlere Durchstoßzahl (Systematik nach Platzer)⁴⁶

Geometrie	Herstellung*	f (Materialanteil)	N (Durchstoßzahl)	<N> (mitt. Durchstoßzahl)
Schlitz	F	$d A_H/D$	$A_H \sin(\varphi) \tan(\varphi)$	$2/\pi A_H \tan(\varphi)$
Rechteck	E/F	$d (A_H/D + A_B/D)$	$(A_H \sin(\varphi) + A_B \cos(\varphi)) \tan(\varphi)$	$2/\pi * (A_H + A_B) \tan(\varphi)$
Kreis (quadratische Anordnung)	E	$\pi d A_{2R}/D$	$\pi A_{2R} \tan(\varphi)$	$2 A_{2R} \tan(\varphi)$
Kreis (hexagonale Anordnung)	E/F	$2/\sqrt{3} \pi d A_{2R}/D$	$2/\sqrt{3} \pi A_{2R} \tan(\varphi)$	$4/\sqrt{3} A_{2R} \tan(\varphi)$
Hexagonal	E/F	$2 d A_{2R}/D$	$2 d A_{2R} \tan(\varphi)$	$4/\pi A_{2R} \tan(\varphi)$
Wabenlamelle	F	$(1 + \pi/2) d A_H/D$	$A_H (1 + \sin(\varphi)) \tan(\varphi)$	$(1 + 2/\pi) A_H \tan(\varphi)$

*E: mit Hohlprofilen extrudiert; F: aus Folien geklebt oder geschweißt.

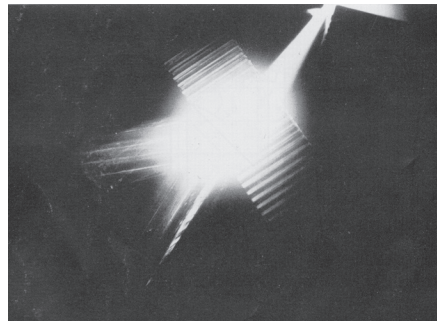
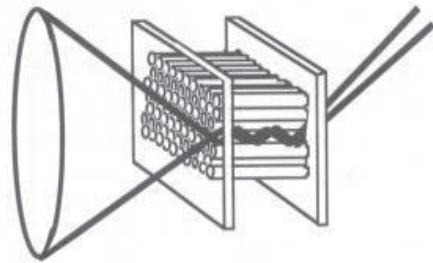


Abb.5-23: Aufteilung der einfallenden Strahlung⁵³

Dabei konnte aufgezeigt werden, wie sich die Tageslichtverhältnisse im Raum durch die TWD-Maßnahme verändern können. (Abb. 5-24) Es zeigt sich die „TWD-Fläche „wie eine in die Raumtiefe hineinstrahlende Leuchte. Dies führt im hinteren Raumbereich zu einer deutlichen Tageslichtquotient (T)- Anhebung, welche sich in reduzierten Einschaltzeiten der künstlichen Beleuchtung niederschlägt“.⁴⁷

3.3.3 Thermische Eigenschaften

Als Wärmetransportmechanismen in absorbersenkrechten TWD-Strukturen, sowie bei anderen Situationen, sind eben die Wärmeleitung im Material und in der Luft, die Wärmestrahlung und die Konvektion zu berücksichtigen. (Abb. 5-25) Bei Zellhöhen kleiner als 10 mm ist die Konvektion nahe zu vernachlässigbar gering.⁴⁸

Bei den absorbersenkrechten TWD-Materialien erfolgt der größte Teil des Wärmetransports durch Strahlungsaustausch im fernen Infrarotbereich.⁴⁹ Für eine gute Wärmedämmung wirkt die Materialstruktur als Strömungswiderstand. Damit wird der Infrarot-Strahlungsfluss von der warmen zur kalten Seite auch verhindert. Die folgenden Eigenschaften der TWD-Struktur sind maßgeblich für einen hohen Wärmewiderstand:⁵⁰

- Konvektionsunterdrückung innerhalb der Hohlkammern bei geeignetem Verhältnis von Zellenlänge zu Durchmesser (>10:1)
- Minderung des Strahlungswärmeaustausches zwischen Absorber und Umgebung aufgrund der Infrarot-Absorption im Material
- minimale Wärmeleitung aufgrund

des geringen Materialanteils (ca. 5%) im Vergleich zu stehender Luft

Wegen des hohen Strahlungsanteils am Wärmetransport und der Transparenz von Folien im Infrarot-Spektralbereich haben diese TWD-Strukturen folgende für die Anwendung wichtigen Merkmale:

- die äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} [W/mK], welche sowohl die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit des Füllgases und Festkörpers der Folien als auch den Strahlungstransport umfasst, ist keine Konstante, sondern abhängig von der Dicke und der mittleren Temperatur des Materials⁵¹
- der g-Wert, abhängig vom Einfallswinkel, liegt ca. 5 bis 10% höher als der gerichtet-hemisphärische Transmissionsgrad. Die lichttechnischen Eigenschaften der Folien von TWD-Strukturen können den g-Wert maßgeblich beeinflussen.

Die kommerziell erhältlichen, offenen TWD-Paneele mit Wabenstrukturen erreichen sehr gute U-Werte bis unter 0,7 W/m²K.⁵²

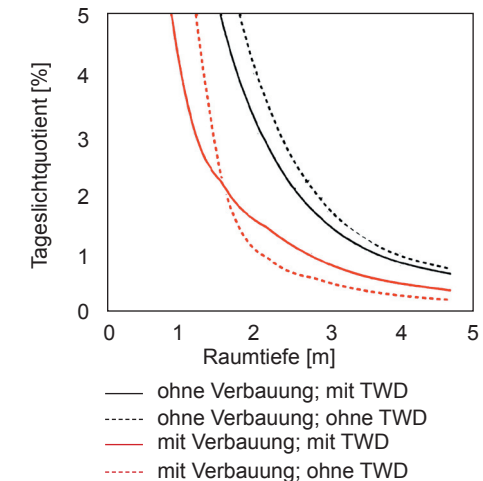
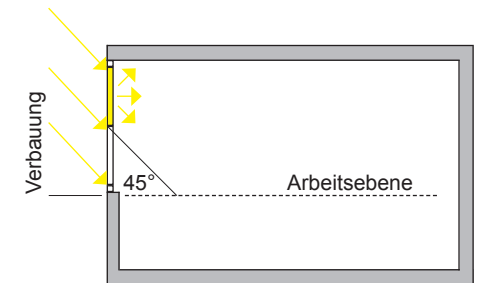
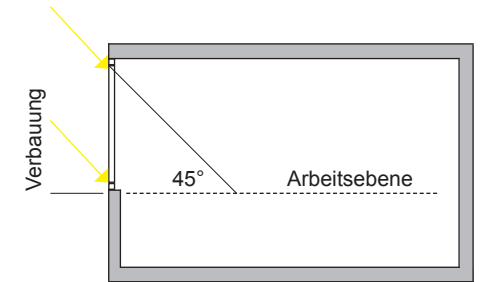


Abb.5-24: Effekt der Lichtstreuung in der TWD sowie T-Verlauf in Raummitte ohne und mit Verbauelementen von 45°⁴⁷

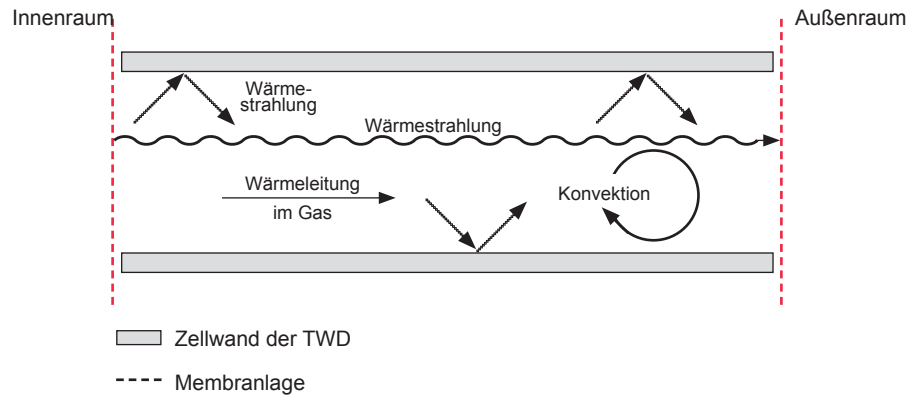


Abb.5-25: Wärmetransportmechanismen in Absorber-senkrechten Strukturen⁵⁶

	CTA (TIMax CA 50-9/S)	CA (TIMax CA 40-9/FR)
Farbe	Transparent	Transparent
Wabenlochbreite [mm]	9	9
Masse [kg/m ³]	ca. 16	ca. 12
Temperaturanwendungsbereich (°C)	-30 bis 140	-30 bis 130
Brennbarkeit	B2	B1
Transmissionsgrad (diffus) [-]	0,86	0,86
Wärmedurchlasskoeffizient [W/m ² K]	1,3	1,3
Breite [mm]	100 bis 1250	100 bis 1250
Länge [mm]	bis 3000	bis 3000
Dicke / Kernhöhe [mm]	bis 160, min. 10 Sägeschnitt	bis 160, min. 10 Sägeschnitt

Abb.5-26: Eigenschaften der TWD-Materialien mit Waben-Strukturen aus CA und CTA⁵⁷

3.4 Anwendung des TWD-Materials in den MMK-Bauteilen

3.4.1 Verformen und Anpassung

Hinsichtlich der Anwendung der dargestellten TWD-Strukturen in MMK ist die mechanische Anpassungsfähigkeit innerhalb der Membranlagen von großer Bedeutung. Die vorher dargestellten TWD-Produkte wurden für erste Versuche ausgewählt.⁵⁴ Dabei zeigt sich, dass eine Verformungsmöglichkeit in der dritten Dimension gegeben ist, und damit trotz der aus der Vorspannung resultierende Krümmung der Membranflächen eine Ausformung zu MMK-Bauteilen möglich ist. (Abb. 5-29, 30)

3.4.2 Visuelles Erscheinungsbild

Aufgrund der inneren Struktur der TWD Waben ist eine Durchsicht im Regelfall nicht möglich. Die Störung für die Durchsicht verstärkt sich mit Zunahme der Dicke der Strukturen. (Abb. 5-31)

Obwohl die Strukturen nicht direkt solarer Einstrahlung ausgesetzt sind, könnten Blendeffekte aufgrund der Lichtreflexionen an den Zellwänden auftreten.

Als Einlage zwischen den transparenten ETFE-Folien ist die TWD hinsichtlich ihrer Struktur zu beachten.

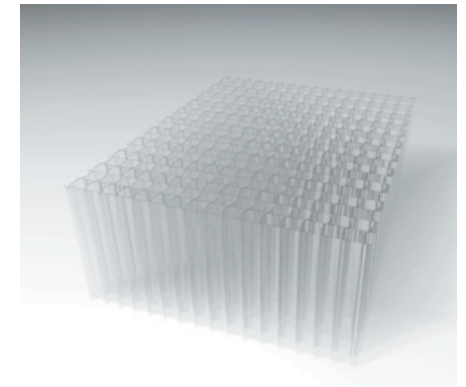


Abb.5-27: TWD-Produkt in Wabenstruktur aus Kunststofffolien⁵⁸

Durch den Einsatz einer transluzenten inneren Membranlage oder Bedruckungen auf der Oberfläche kann die visuelle Beeinträchtigung vermindert werden.

3.4.3 Einfluss der Alterung

Bei den vorangegangenen Studien in Forschungsarbeiten zu Eigenschaften der TWD-Materialien wurde das Alterungsverhalten von verschiedenen polymeren Grundstoffen hinsichtlich der Beeinflussungen unter Solarstrahlung, Wärme, Luftsauerstoff und Feuchtigkeit untersucht.⁵⁵

Bei den strukturell aufgebauten

TWD-Materialien wurde nachgewiesen, dass unter verschärften Bewitterungsbedingungen signifikante Änderungen auftreten infolge der Zunahme der Streuung und der Absorption in den Werkstoffen.⁵⁹ Dies beeinflusst bei der Anwendung in MMK die lichttechnischen und thermischen Eigenschaften der Bauteile. Daneben werden auch die mechanischen Eigenschaften der Strukturen von physikalischen und chemischen Alterungsprozessen beeinflusst. Maßnahmen zur Verminderung der Alterung bzw. zur Bewitterungsbeeinflussung müssen beim konstruktiven Aufbau der MMK mitberücksichtigt werden.

4. Konstruktiver Aufbau der MMK-Muster mit ausgewählten funktionalen Elementen

Die Arbeitsschritte dienen bisher im Wesentlichen dazu, eine Übersicht zu gewinnen über die technischen Parameter für die Auswahl der zu kombinierenden Elemente. Das sind in erster Linie die Eigenschaften der Werkstoffe um eine Optimierung der thermischen und lichttechnischen Werte von MMK-Bauteilen im Zusammenhang mit der Solarenergie-nutzung zu erreichen.

Bei den folgenden Untersuchungen wird der konstruktive Aufbau der gewählten Elemente betrachtet, der von

<ul style="list-style-type: none"> - x: Richtung von geraden Wänden, - y: Richtung der wellenförmigen Wände, - z: Richtung der Dicke. 						
 Verlängern	-	o	-	-	o	-
 Verkürzen	o	+	+	-	+	-
 Biegen	+	-	-	o	-	o

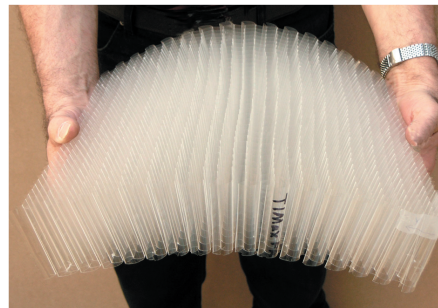


Abb.5-28: Verformungsmöglichkeiten der Wabenstrukturen aus Kunststofffolien unter verschiedenen Kräften.

+: Verformen möglich;
o: Verformen bedingt möglich;
-: Verformen unmöglich.

Abb.5-29: gekrümmte TWD in Bogenform

Abb.5-30: gekrümmte TWD in Segelform

Nutzung und Anwendungsbereich in der Gebäudehülle abhängt.

Folgende Gesichtspunkte sind bei der Ausführung zu berücksichtigen:

- Form und Dimensionsstabilität des Musters für experimentelle

Untersuchungen

- Befestigung der gewählten Elemente unter der geforderten Vorspannung der Membranflächen
- Verbindung zwischen den Elementen, wie den Membrananlagen

mit der strukturellen Zusammensetzung des TWD-Materials, um ein sandwichartiges, flächiges Bauteil entstehen zu lassen.

Ziel der Untersuchung ist es, eine Lösung zu finden, bei der man ohne zusätzliche konstruktive Elemente oder

Verbindungsmittel zunächst Muster zusammensetzen kann.

4.1 Form- u. Dimensionsstabilität

Wegen der einfachen Anpassungsfähigkeit der MMK-Bauteile für den Aufbau eines Experimentiergerüsts wird die Probe in quadratischer Form gebaut.

Aus der symmetrischen Form resultieren eine ausgeglichene Verteilung der Zugspannung auf den Folienflächen und eine symmetrische Strahlungsdurchlässigkeit im Mittelbereich.

Die Dimension der Rahmenprofile, die zur Befestigung der funktionalen Elemente notwendig sind, wird durch folgende Bedingungen begrenzt:

- Die Spannweite der Rahmen des MMK-Bauteils soll nicht größer als die Rollenbreite des Membranmaterials sein, damit die Lichtdurchlässigkeit durch Stöße, z.B. mit Schweißnähten nicht beeinträchtigt wird. Die Rollenbreite der ETFE-Folien beträgt bis zu 1,55m. Hinsichtlich einer Randbearbeitung soll die Breite der Folienfläche ohne verschweißte Fugen nicht mehr als 1,50 m betragen.⁶⁰
- Es soll eine Rahmenkonstruktion

ohne zusätzliche Stützprofile gebaut werden, da solche zu einer Verschattung der transparenten Fläche des Bauteils führen könnten. Die Profilquerschnitte der Rahmen sollten nach der Vorspannung der Membranfläche und deren Übertragung auf die TWD-Materialien ausgelegt werden.

- Die Dicke des Bauteils wird durch die Dicke der TWD-Materialien, mögliche Luftschichten und die Montage- und Verbindungstechnik bestimmt.

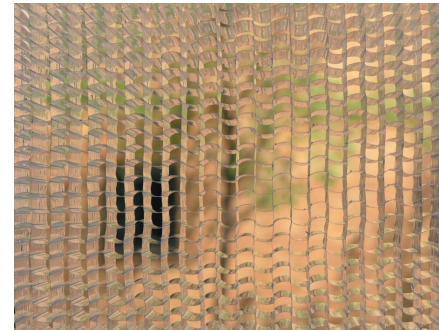
Die Rahmen für die experimentellen Untersuchungen werden in einer ebenen Fläche gebaut. Damit lässt sich ein unerwartetes Verfallen oder Verdichten der empfindlichen TWD-Materialien vermeiden; ferner wird eine Gleichmäßigkeit der lichttechnischen und thermischen Eigenschaften der transluzenten Flächen gewährleistet.

4.2 Befestigung der Membranlagen

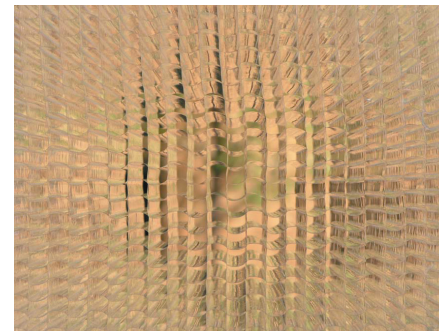
Für die Stabilisierung der Membranfläche ist deren Vorspannung erforderlich. Bei der in einer Ebene montierten Rahmenkonstruktion wird diese über die Randverbindung erzeugt. Im Hinblick auf die absorbersenkrechte Struktur des TWD-Materials ist eine flächige Unterstützung zwischen den Membranlagen durch



Ansicht des Nachbargebäudes an der TUM



TWD-Struktur mit einer Dicke von 70 mm



TWD-Struktur mit einer Dicke von 160 mm



Abb.5-31: Visuelle Auswirkung von TWD-Strukturen bei einem Abstand von 30 cm vor dem Fenster

die TWD gegeben.

In Abb. 5-32 sind die Varianten der Befestigungsmaßnahmen schematisch dargestellt. Auf mechanische Weise, Variante (1), ist eine gleichmäßige Vorspannung der ebenen Fläche in der Praxis schwierig erreichbar. Die Varianten (2) und (3) stellen zwei Grundsätze der pneumatischen Vorspannung von MMK dar. Bei der Variante (3) entstehen Luftschichten zwischen den Membranflächen und den TWD-Materialien. Wegen der Eigenschaften der ausgewählten TWD erfordert diese Variante zusätzliche Maßnahmen zu deren Befestigung.

Bei der Variante (2) kann die TWD als Verbindungs- und Unterstützelement zwischen den Membranen dienen, somit kann ein befestigtes kombiniertes Element in die Rahmenkonstruktion eingebaut werden.

Die Vorspannung der Membranlagen wird durch die Herstellung einer Druckdifferenz zwischen der außen und innen liegenden Luft pneumatisch erzeugt. Dies erfordert eine gute Dichtigkeit der Verbindung mit dem Rahmen und ein Luftrohr muss bei dem konstruktiven Aufbau des Musterelementes als maßgebliches Detail berücksichtigt werden.

4.3 Verbindung der Membranfläche mit den TWD

Die bei den Varianten für den Aufbau von MMK-Bauteilen beschriebenen Probleme bei der Verbindung von Membranlagen und TWD, sollen nach den folgenden Prinzipien gelöst werden:

- Aufbau in einer geschlossenen Hohlkammer, wodurch Wärmeverluste durch großflächige Konvektionen verhindert werden
- Luftdichter Randverbund zur Vermeidung des Eindringens von Staub in das Bauteil, wodurch die Lichtdurchlässigkeit und der gestalterische Eindruck beeinträchtigt werden könnte

Durch negativen Luftdruck, der entsteht, wenn die Luft aus dem Zwischenraum des Bauteils herausgezogen wird, wird die Membranfläche auf die TWD-Struktur gedrückt. In einem vereinfachten Experiment zeigt sich, dass durch Unterdruck die funktionalen Elemente zusammen gemeinsam konstruktiv eine Komponente mit verbessertem Verformungsverhältnis bilden können. (Abb. 5-33)⁶¹

In der Praxis werden meistens pneumatische Membrankonstruktionen mit einem positiven Nenninnendruck von ca. 300 Pa für Fassaden und ca.

450 Pa für Dachkonstruktionen eingesetzt. Ein Nenninnendruck von 300 Pa bewirkt eine durchschnittliche Folienvorspannung von ca. 1,0 kN/m.⁶²

Um einen negativen Innendruck in den Bauteilen zu erhalten, ist ein Luftdurchlass zwischen den einzelnen Kammern der TWD-Struktur erforderlich. Dies ermöglicht einen gleichmäßigen Unterdruck auf die Membranflächen. Um hinsichtlich der Tragfähigkeit die Waben der TWD-Struktur als Unterstützung der Membranflächen nicht zu stark zu schwächen, wird eine Perforierung der Kammerwände der TWD ausgeführt. Etwaige Auswirkungen auf die lichttechnischen und thermischen Eigenschaften der TWD wären gesondert zu prüfen.

5. Einschätzung der Eigenschaften von MMK-Bauteilen

5.1 Eigengewicht

Das Gewicht der MMK-Bauteile spielt eine wesentliche Rolle für die statische Berechnung bei den Lastannahmen, der Dimensionierung der Unterkonstruktion, sowie der Montage von Fassaden. Im Vergleich zu Rahmenkonstruktionen mit Verglasung weisen die MMK-Bauteile ein sehr geringes Eigengewicht auf. MMK-Bauteile aus 2-lagigen 0,2 mm ETFE-Folien und 120 mm TWD in Wabenstruktur

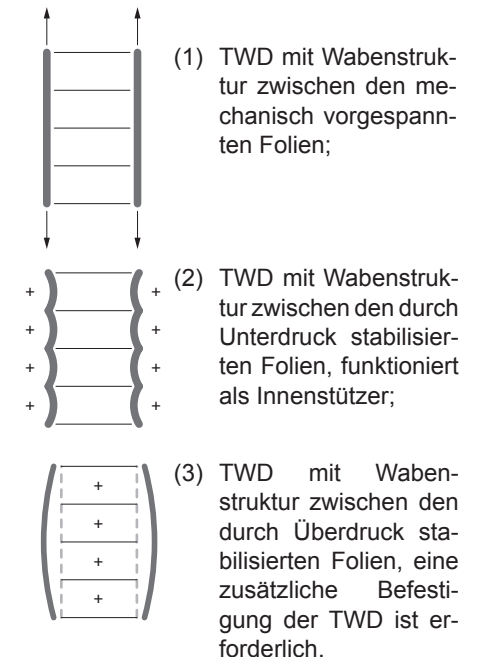


Abb.5-32: Befestigung der Membranlagen

haben eine Masse von nur 2,3 kg/m²; das sind nur 23% gegenüber einem 4 mm dicken Floatglas und 11,5% einer in der Regel verwendeten Zweischeiben-Isolierverglasung. (Abb. 5-34)

5.2 Wärmeschutzfunktion

Laut Herstellerangabe beträgt der U-Wert der gewählten TWD-Einlage allein bei einer Dicke von 100 mm 1,0 W/m²K.⁶³ Durch die Verbindung mit den Membranlagen wird die Struktur in kleine geschlossene Luftkammern

aufgeteilt, die einen ausreichenden Wärmewiderstand gewährleisten können. Erwartungsgemäß wird der Wärmeschutz in einer Verbindung mit geschlossenen Membranhüllen noch verbessert.

Theoretisch kann eine weitere Verbesserung des Wärmedurchgangswiderstands der Bauteile durch den geplanten Unterdruck in MMK-Bauteilen durch eine Art Vakuumwirkung, erzielt werden. (Abb. 5-33)

Ein positives Merkmal von MMK-Bauteilen ist, dass selbst bei auftretenden Leckagen die Wärmedämmfähigkeit immer noch in gewissem Maße gewährleistet ist.

5.3 Tageslichtnutzung

Mit der Anwendung der TWD, deren Struktur den Effekt der Lichtstreuung bewirkt, wird nicht nur eine relativ hellere natürliche Belichtung des Innenraums erreicht, sondern ist auch eine Verbesserung der Tageslichtverhältnisse im Raum zu erwarten.

Dabei steht die Transmission der Lichtstrahlung in Abhängigkeit von den verschiedenen Dicken der ETFE-Folien und TWD-Materialien.

5.4 Brandschutz

Die Folien und die TWD sind nach

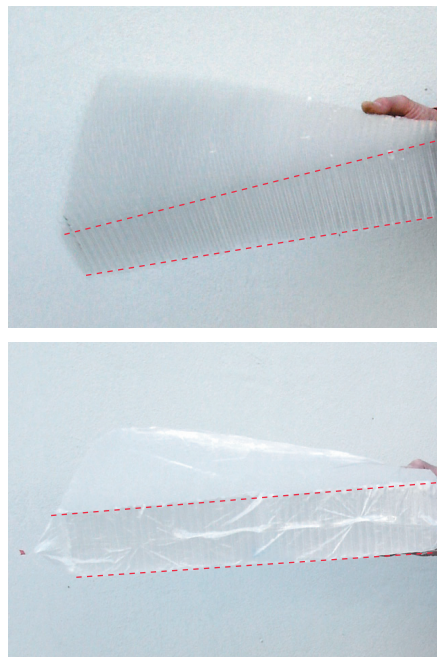


Abb.5-33: Stabilisierung der Geometrie des MMK-Bauteils

DIN-4102 als B1 schwerentflammbar klassifiziert, d.h. bei einer Anwendung in Gebäudehüllen sind in der Regel ergänzende Maßnahmen für den Brandschutz erforderlich.

5.5 Gebrauchsfunktion

Der Wartungs- und Reinigungsaufwand ist bei den geplanten MMK-Bauteilen, die mit selbstreinigenden ETFE-Folien ausgestattet sind, gering. Hinsichtlich einer Anwendung in der Gebäudehülle sind Maßnahmen

gegen mechanische Beschädigungen und zum Einbruchschutz zu berücksichtigen.

5.6 Energieaufwand u. Recycling

MMK-Bauteile eignen sich besonders zur Vorfertigung, was auch ökonomische Vorteile erwarten lässt. Beim Aufbau der einzelnen MMK-Bauteile bis zu Konstruktion der Gebäudehülle wird eine möglichst einfache Montage angestrebt. Die Verbindungen sollten so konzipiert sein, dass Montage, Wartung und Austausch reparaturbedürftiger Teile einfach durchgeführt werden können.

Die MMK-Bauteile weisen mit dem geringen Eigengewicht, einem vergleichsweise geringen Energieverbrauch und niedrigen Kosten beim Transport und Einbau ein großes ökologisches und ökonomisches Potential auf.

Recycling gewinnt immer mehr an Bedeutung. Beim Bauwesen ist Recycling jedoch nicht gleichbedeutend mit Baustoffgewinnung, sondern darunter wird die teilweise Wiederverwendung von Baukomponenten oder Bauelementen bei sachgemäßer Zerlegung verstanden. In dieser Hinsicht bilden die Möglichkeiten der Elementbauweise, lösbare Verbindungen, die Zerlegung und Trennung in einzelne Baustoffgruppen (auch im Werk) für

	Dicke [mm]	Flächen-Masse [g/m ²]
ETFE Folien	0,05	87,5
	0,1	175
	0,15	262,5
	0,2	350
TIMax-CA 50-9/s	90	1440
	120	1600
	150	2400
PMMA	4	4800
PC	4	4900
PETG	4	5100
PET	4	5320
PVC	4	5320
GFK	5	8350
Glas	4	10000

Abb.5-34: Flächen-Masse von unterschiedlichen transparenten Baustoffen⁶⁴

die MMK-Bauteile einen entscheidende Planungsgröße. Deshalb stellt der modulare Aufbau für die MMK-Bauteile für die Herstellung, Montage, Zerlegung, Auswechslung, bzw. Anpassungsfähigkeit an übliche Unterkonstruktionen einen wichtigen Gesichtspunkt dar.

6. Zusammenfassung

In diesem Teil wurden Auswahlkriterien von den Membran- und TWD-Materialien hinsichtlich Energiegewinn und Tageslichtnutzung dargestellt und eine Produktauswahl für die jeweiligen MMK-Bauteilschichten getroffen.

Als Membranlagen werden ETFE-Folien mit einer Dicke von 0,2 mm in verschiedenen Varianten, wie: transparent, weiß und mit Muster bedruckt bei den Untersuchungen eingesetzt. Die TWD-Materialien aus CA-Folien in Wabenstruktur werden als Einlage mit einem negativen Innendruck zwischen den beiden Membranlagen befestigt.

Die Muster für die nachfolgenden Experimente wurden in der Abmessung entsprechend der Größe der transluzenten Flächen von 1m x 1m hergestellt.

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, anhand der Muster die Bestimmungen der funktionalen und konstruktiven Parameter zu verifizieren.

Anmerkungen

1. Rahmen wird hier als konstruktives Element bezeichnet, funktional nicht untersucht
2. Vgl. Kaltenbach, 2003, S. 75
3. Vgl. Schmid, 2004-4, S. 49
4. Vgl. Teil-1
5. Vgl. Klein, 2003, S. 62
6. Vgl. Teil 1, Abb. 1-22, 23
7. Vgl. Teil 1, 3.2.2
8. Vgl. Schmid, 2004, T4
9. Vgl. Teil 2
10. Vgl. Baier, 2001, S.175-189
11. Vgl. Teil 2
12. Die Daten wurden von dem Datenblatt der ETFE-Folien-Produkte Nowoflon genommen
13. Datenblätter, Firma Nowoflon: „Gutachten über die lichttechnischen Messungen von Folien“, die vom Fachgebiet Lichttechnik, TU Berlin durchgeführt wurden
14. Vgl. Kaltenbach, 2003, S.70
15. S. Abb. 3-6
16. Firmendaten Koch Membranen GmbH. Telefax 30-09-99
17. Vgl. Moritz, 2000
18. Zum Begriff der „Transluzenten Wärmedämmung“ siehe Teil 1-11.
19. Vgl. Hauser, 1982
Vgl. Hauser, 1983
20. Vgl. Kerschberger, 1998, S.134
21. Vgl. IBK, 2001 (Hrsg.), S.220
22. Vgl. Wilke, 1991, S.10
23. Cziesielski (Hrsg.), 2004, s.147
24. R-Wert umberechnet vom U-Wert = $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ des Bauteils.
Vgl. Streicher 2005, S.131; Quelle: http://www.iwt.tugraz.at/downloads/skripten/Sonnenenergie_2005.pdf
25. Daten von verschiedenen Quellen. Vgl. Kerschger, 1998; S.45; <http://de.wikipedia.org>; IBK, 2001; <http://www.hug-technik.com/inhalt/ta/kunststoff.htm> (2006)
26. Vgl. IBK (Hrsg.), 2001, S.221
27. Vgl. Ludwig, 1997, S.17
28. Vgl. Wagner, 2002, S.21
29. Vgl. Ludwig, 1997, S.16; IBK (Hrsg.), 2001, S.221; Wagner, 2002, S.13
30. Vgl. Ludwig, 1997, S.17-18
31. Vgl. Kerschberger, 1998, S.46
32. Vgl. Wagner, 2002, s.19
33. Vgl. IBK (Hrsg.), 2001, S.220, Fachverein TWD, Infomappe 2, S.4 unter www.solar-wand.de
34. Vgl. Wilke, 1991, S.4
35. Vgl. Wagner, 2002, s.21
36. Information siehe www.solar-wand.de
37. Vgl. Wallner, 2000, S. 3
38. Vgl. Wallner, 2003
39. Vgl. Wallner, 2000, S.179
40. Vgl. Wallner, 2000, S.197
41. Vgl. Wallner, 2000, S.180
42. Vgl. Wallner, 2002, S. 224
43. Vgl. Marko e.a. (Hrsg.), 1997, S.55
44. Vgl. Kerschberger, 1994, 1998
45. TWD-Material aus PC $50 \mu\text{m}$, in der Dicke von 100 mm, mit beidseitiger Verglasung
s. Wallner, 2000, S. 225
Nach den DIN 4108 steht $1/R=\Lambda$
46. Vgl. Platzer, 1988, S. 32, 33;
Wallner, 2000, S. 197-198
47. Wilke, 1991, S. 44
48. Vgl. Platzer, 1994.
49. Vgl. Wilke, 1991, S.4
Bei der Untersuchung werden die am Wärmetransport beteiligten Mechanismen der Absorber senkrecht größenordnungsmäßig mit folgendem Anteil angegeben:
- 5% Festkörperleitung;
- 30% Luftleitung;
- 65% Strahlungsaustausch im fernen Infrarot.
50. Vgl. Wagner, 2002, S.13
51. Vgl. Wilke, 1991, S.4
52. Vgl. Kerschberger, 1998, S.77
53. Vgl. Schmid, 1995, S.38
54. Wacotech, Bielefeld: Firmeninformation, 2001
55. Siehe Wallner, 2000, Kapitel 5
56. Vgl. Schmid, 1995, S.61
57. Daten wurden vom Hersteller angegeben, Information der Firma Wacotech, unter www.wacotech.de
58. Firmeninformation www.wacotech.de, 2004
59. Vgl. Wallner, 2000, S.240
60. Vgl. Moritz, 2000, S.73
61. aufgezeigt in Patentanmeldung Herzog-Loibl Nr. 12378135
62. Vgl. Moritz, 2005, S. 978
63. Daten wurden vom Hersteller angegeben, Information der Firma Wacotech, unter www.wacotech.de
64. Vgl. Schittich e. a., 1998;
Kaltenbach 2001

Teil 6

Charakterisierung der Eigenschaften von MMK-Mustern

Vorbemerkung

Hinsichtlich des Einsatzes von MMK-Bauteilen für die Gebäudehülle werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse der Prüfung der verschiedenen funktionalen Eigenschaften der MMK-Muster nach vordefinierten Aufbauvarianten dargestellt. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit der mit unterschiedlichen Elementen kombinierten Bauteile zu charakterisieren und Optimierungsmöglichkeiten für weitere Untersuchungen aufzuzeigen.

Es werden folgende Eigenschaften der MMK-Muster, die als Optimierungskriterien bezüglich des Energieverbrauches und Komforts von Gebäuden vordefiniert wurden, untersucht:

- **Lichtdurchlässigkeit**

Für die natürliche Raumausleuchtung mit Tageslicht spielt die Durchlässigkeit der MMK-Bauteile bei sichtbarem Licht die entscheidende Rolle. Daher wird der Lichttransmissionsgrad (τ [-]) der MMK-Muster in verschiedenen Varianten experimentell untersucht.

- **Lichtlenkung und -streuung im Innenraum**

Hinsichtlich der lichttechnischen

Eigenschaften eines mit TWD-Materialien kombinierten Direktgewinnsystems ist gute Tageslichtnutzung sowohl in Form von Lichtlenkung als auch durch Lichtstreuung von den vordefinierten MMK-Bauteilen zu erwarten. Dabei sind auch die Farbgebung und die Bedruckung der Folien zur Reflexion und Diffusion des einstrahlenden Lichts von großer Bedeutung. Die Bestimmung des Einflusses bestimmter Lichtsituationen auf den Innenraum wird mittels photographischer Dokumentation vorgenommen.

- **Wärmedämmfähigkeit**

Zur Charakterisierung der thermischen Eigenschaften zum Wärmeschutz bei den MMK-Mustern wird der Wärmedurchlasskoeffizient ($1/R$ [W/m^2K]) der Muster, der mittels Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz der Oberflächen berechnet wird, im Labor bei relativ stabiler Raumtemperatur gemessen.

- **Solare Energiegewinne**

Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert [-]) ist eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung des solaren Energiegewinns der Bauteile, der sich aus der Summe des Strahlungstransmissionsgrads,

der Strahlungsemission sowie der durch Konvektion und Wärmeleitung abgegebenen Wärme ergibt. Zur Bestimmung der g-Werte von MMK-Mustern werden experimentell verschiedene Kombinationen untersucht.

In der vorliegenden Arbeit wurden 3 Arten kommerziell verfügbarer ETFE-Folien mit einer Dicke von 0,2 mm vermessen¹. Dabei ist das Material

- transparent
- weiß
- bedruckt

Die bedruckten Muster auf transparenten Folienoberflächen können je nach den Anforderungen variiert werden. Bei der Untersuchung ist ein Muster aus runden Formen mit einem Durchmesser von 4 mm, einem Achsabstand von 1mm mit silberner Farbe ausgewählt, die bedruckte Fläche beträgt ca. 56 %.

Die Folien werden in der Kurzform wie folgt benannt:

- t: transparente Folien;
- w: weiße Folien;
- d: bedruckte Folien.

Das Muster aus transparenten Folien und TWD-Material mit einer Dicke von 90 mm wird als

Probe	UV-Strahlung		Sichtbares Licht		Gesamte Strahlung	
	τ_{UV}	ρ_{UV}	τ_{vis}	ρ_{vis}	τ_e	ρ_e
t	0,88	0,11	0,91	0,08	0,92	0,08
w	0,01	0,07	0,43	0,59	0,50	0,47
d	0,50	0,39	0,52	0,35	0,52	0,35

Abb. 6-1: Spektralwerte von ETFE-Folien²

Wabendicke d [mm]	U_1	U_2
	[W/m ² K]	
20	2,6	2,2
40	1,9	1,5
60	1,6	1,3
80	1,3	1,0
100	1,0	0,8
120	0,9	0,6

U_1 : Wärmedurchgangskoeffizient der TWD-Materialien

U_2 : Wärmedurchgangskoeffizient von Doppelverglasung mit TWD-Einlage (4+d+4)

Abb. 6-2: Thermische Eigenschaften der TWD-Materialien³

(t+t, 90) bezeichnet.

Die Transmission und Reflexion der Folienmuster wurden im Labor des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen gemessen. (Abb. 6-1)

Die verbesserte Wärmedämmfähigkeit der Muster wird durch den Einsatz der TWD-Materialien gewährleistet. Nach den vorabgeschätzten thermischen Eigenschaften verhält

sich die TWD mit der Dicke von 90 mm ($U=1,1$ W/m²K) ungefähr wie eine Wärmeschutzverglasung. Um das thermische Potential und die lichttechnischen Eigenschaften der MMK aufzuzeigen, wird eine TWD mit Dicken von 120 mm und 150 mm vermessen. (Abb. 6-2)

1 Experimentelle Untersuchung zur Lichtdurchlässigkeit von MMK-Mustern

Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen werden die lichttechnischen Eigenschaften verschiedener Kombinationsvarianten von vorausgewählten ETFE-Folien und TWD Material getestet und verglichen. Eine geeignete MMK für eine natürliche Belichtung von Innenräumen ist zu erwarten.

Um Aussagen zum Lichttransmissionsgrad treffen zu können, werden die MMK-Muster unter kontrollierbaren Lichtbedingungen in einer Messbox getestet. Zur Potentialabschätzung der lichttechnischen Eigenschaften von MMK-Bauteilen ist für eine Messung der Winkelabhängigkeit der Muster die Messbox einachsigt drehbar aufgebaut. (Abb. 6-6,7)

1.1 Lichttechnische Bedingungen

Die Experimente wurden zuerst im Künstlichen Himmel des Technischen Zentrums der TU München durchgeführt, der eine stabile, regelbare Tageslichtquelle aufweist, um damit vergleichbare Ergebnisse der verschiedenen Varianten zu erhalten.

Der Künstliche Himmel ist eine Vorrichtung zur Simulation von Tageslicht.⁴ Er bildet das Himmelsgewöl-

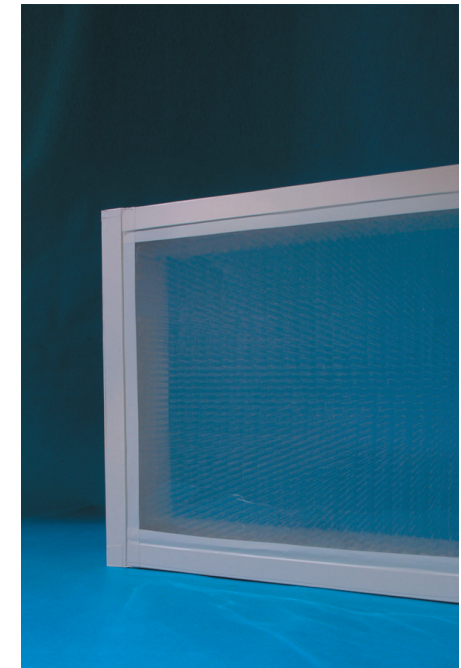


Abb. 6-3: MMK-Probe aus 2-lagigen transparenten ETFE-Folien und TWD-Waben von 90 mm mit innerem Unterdruck von 300 Pa

be nach und erzeugt eine möglichst genaue Abbildung des natürlichen Tageslichts. In einer oben abgeschlossenen Halbkugel ist der Himmel nachgebildet. Die Innenseite der Halbkugel hat eine Verkleidung aus transluzenten Acrylglasscheiben, hinter denen Tageslicht-Leuchtstoffröhren in großer Dichte angeordnet sind. Die Leuchtdichteverhältnisse des Himmels können durch die Ein-

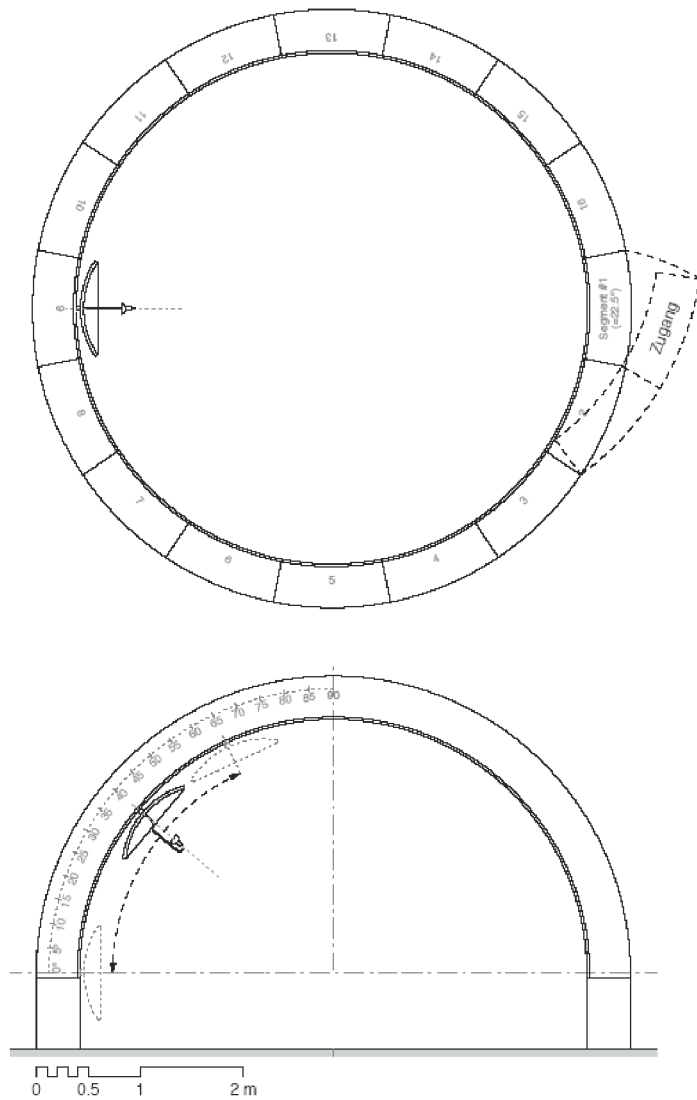


Abb. 6-4: Künstlicher Himmel

Abb. 6-5: Messbox im Künstlichen Himmel



stellung der einzelnen Segmente der Leuchtstoffröhren verändert werden. Ein Kunstlicht-Halogenstrahler, der über eine kreisrunde, parabolförmige Spiegelfläche reflektiert wird, dient als Sonne. Auf einer Schiene ist diese Konstruktion in der Höhe verfahrbar. (Abb.6-4)

Im Künstlichen Himmel ist eine Zone von einer Halbkugel mit einem Radius von ca. 0,5 m ausgewiesen, innerhalb derer die Simulation des Tageslichtes mit einer Fehlertoleranz von ca. 10% vorgenommen werden kann. ⁴

1.2 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Dem Aufbau der Messbox liegen die Annahmen zugrunde, die im Rahmen der Potentialabschätzung im Teil 4 getroffen wurden. Die Messbox soll folgende Funktionen erfüllen:

- leichte Montage und Wechsel der MMK-Komponenten
- Vermessung des Lichttransmissionsgrads
- Vermessung der winkelabhängigen Lichtdurchlässigkeit der MMK und Kontrolle des Einflusses verschiedener Neigungswinkel der Bauteile in Gebäudehüllen

Die Dimension der Messbox muss

auch folgende Bedingungen berücksichtigen:

- die belichtete Fläche des Musters soll möglichst groß sein, damit eine gleichmäßige Lichtverteilung in einem möglichst großen mittleren Bereich des Messkörpers besteht und eine Wechselwirkung mit der Randkonstruktion weitgehend vermieden werden kann
- die Vermessungen der Lichttransmission verschiedener Varianten in einer Einrichtung zu realisieren, um Einwirkungsfaktoren, die zu Messungsfehlern führen könnten, zu vermindern

In Abb. 6-9 wird das Konzept der Messeinrichtung dargestellt. Eine schwarze innere Oberfläche soll das einfallende Licht absorbieren und eine Rückreflexion verhindern. Durch einen hinter dem MMK-Muster liegenden Photometerkopf, der die mittlere halbräumliche Beleuchtungssphäre lesen kann ⁵, wird die Beleuchtungsstärke des Lichts gemessen. Ein angemessener Abstand vom Sensor zum Messkörper ist zu beachten, besonders für transmittierte Messkörper aus nicht homogenen Strukturen.

Der Aufbau der Messbox :

- Maße der belichteten Fläche: 100 cm x 100 cm

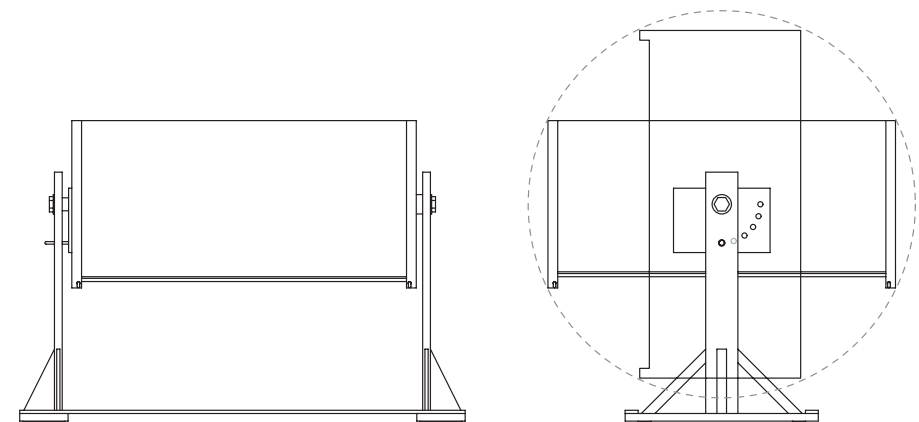


Abb. 6-6: Aufbau der Messbox

└─ 10 cm

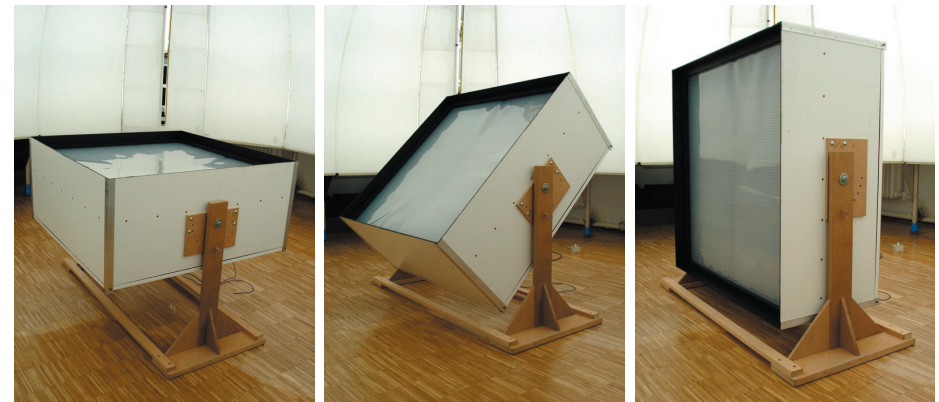


Abb. 6-7: Messbox

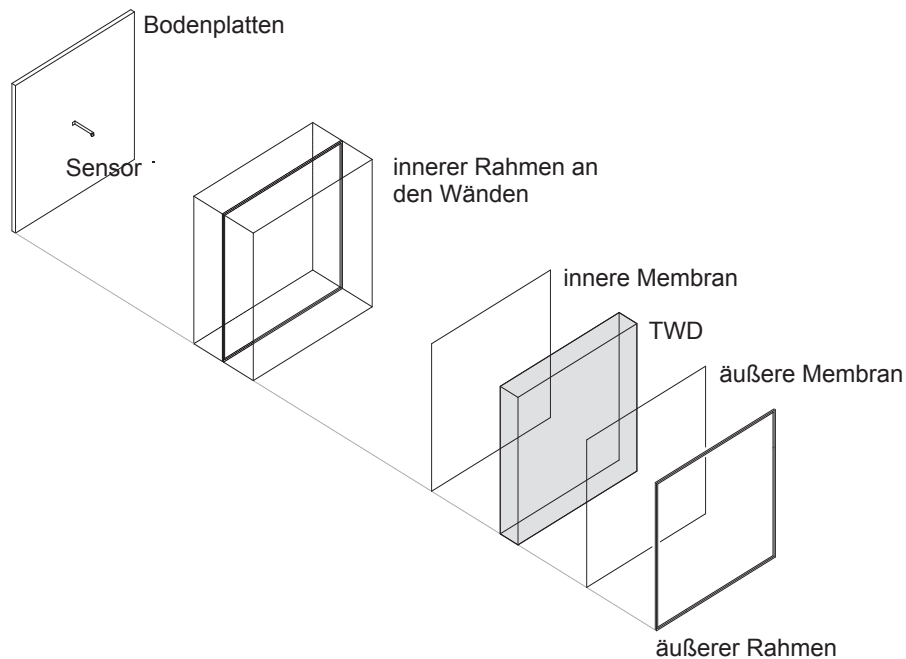


Abb. 6-8: Aufbau der Messbox

- Abstand des Sensors zur belichteten Fläche: 15 cm
- innere Oberfläche: matt schwarze Farbe

Die Box wurde aus Holzplatten zusammengesetzt, um das Eigengewicht gering zu halten, damit die Einrichtung während der Messungen leicht gedreht werden kann. Die Box ist mit einem Rahmen verbunden und im Bereich von 0° bis 90° in 15° Winkelstellungen arretierbar [0°, 15°...]. (Abb. 6-6,7)

Bei der Messung der Lichttransmission der MMK wird eine Lage der Membranen auf den inneren Rahmen, die andere Lage auf einen äußeren, abnehmbaren Rahmen befestigt. Dazwischen liegt die TWD. Der Sensor des Luxmeters wird durch einen auf dem Boden montierten Abstandhalter befestigt. Die Bodenplatte der Messbox ist herausnehmbar, um den Sensor des Luxmeters, die Folien und die TWD-Materialien montieren zu können. (Abb. 6-8)

1.3 Geforderte Parameter bei der Messung

Eine mittlere halbräumliche Beleuchtungsstärke wird von dem Luxmeter erfasst.⁶ Sie gibt an, wie viel Lichtstrom von dem Sensor empfangen wird.

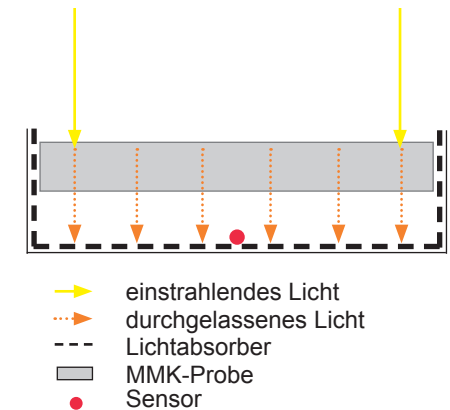


Abb. 6-9: Aufbauprinzip der Messbox für die Messung der Lichttransmission von MMK



Abb. 6-10: Luxmeter zur Messung der Beleuchtungsstärke

Bei dieser Untersuchung sind folgende Parameter zur Ermittlung der Messdaten einzuhalten:

- E_0 : die Beleuchtungsstärke der Einstrahlung vom Künstlichen Himmel. Der Wert wird nach der einfallenden Strahlung in der offenen Messbox ohne MMK definiert. Er beträgt bei bedecktem Himmel 5000 Lux. Bei dieser Untersuchung wurden die konkreten, vom Luxmeter erfassten Daten für die Auswertung der Ergebnisse verwendet
- E_{diff} : die Beleuchtungsstärke der durch die MMK in die Box einfallenden Lichtstrahlung

Die Lichtdurchlässigkeit der eingelegten TWD-Struktur ist von der Winkelstellung abhängig. Somit wird der Lichttransmissionsgrad des MMK-Musters von den unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln der Direktstrahlung maßgeblich bestimmt.

Zur Charakterisierung der Lichtdurchlässigkeit der Muster wird der Transmissionsgrad bei diffuser Strahlung gemessen.

1.4 Messdatenerfassung

Bei der Messung ist die Lichtstrahlung des Künstlichen Himmels als diffuses Licht eingestellt. Bei den ersten

Versuchen wurde das MMK-Muster unter verschiedenen Winkeln von horizontal bis vertikal untersucht. Die Ergebnisse der τ -Werte sind bei den unterschiedlichen Winkeln fast gleich. In einem zweiten Schritt wurde die Messung von MMK in vertikaler Position durchgeführt. Bei dieser Untersuchung wurde die Lichttransmission bei gleichem Elementaufbau mit verschiedenen Folienlagen studiert. Die Ergebnisse zeigen minimale Unterschiede, die in der Praxis vernachlässigbar sind.⁷

Die Ergebnisse der Messung zeigt Abb. 6-12,13:

- die Lichttransmission der MMK reduziert sich mit Zunahme der Dicke des TWD-Materials
- für eine MMK mit gleicher TWD wird sich die Transmission durch die Konstruktion in Kombination mit den Folien unterscheiden.
- Bei den Varianten verringert sich der Transmissionsgrad auf Werte bis 0,16 (w+w, 150).

1.5 Diskussion möglicher Fehlerquellen

Die Untersuchungen dienen zum Vergleich der Lichttransmission von MMK-Mustern mit unterschiedlichen Aufbauten. Mögliche Fehlerquellen

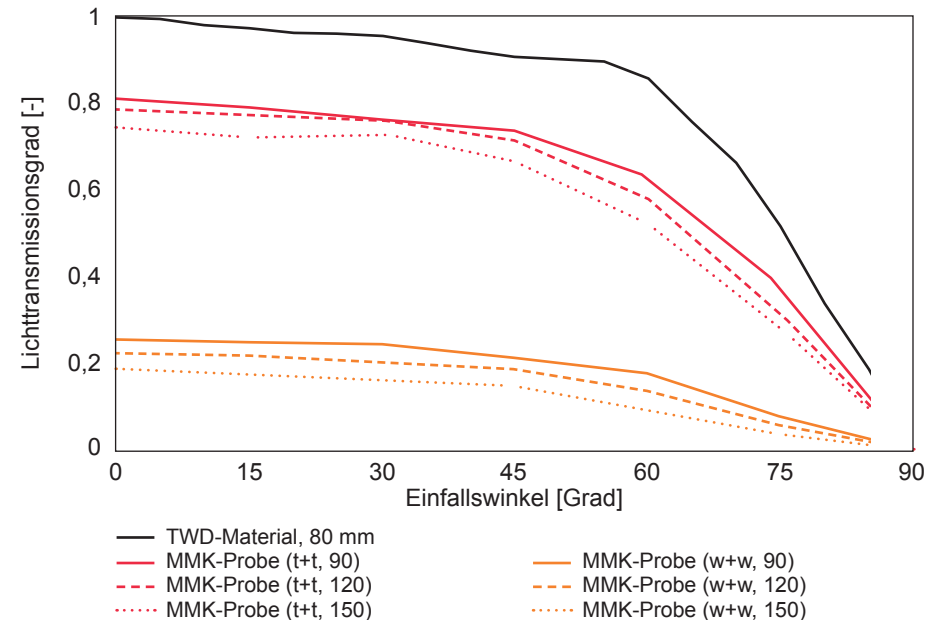


Abb. 6-11: Transmissionsgrade der MMK-Probe in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Lichteinstrahlung

bei den Experimenten können folgende Punkte betreffen:

- für die Messgenauigkeit im Künstlichen Himmel wird eine Fehlertoleranz für die Simulation von 10% angenommen
- gegenüber den Experimenten ist bei einer praktisch Anwendung eine Verschmutzung der Folienoberfläche und der TWD-Strukturen möglich, welche die Lichttransmission vermindern

- Das Material der Messbox kann bei der Untersuchung im Künstlichen Himmel eine Strahlungsreflexion an den Oberflächen erzeugen

1.6 Beurteilung der Ergebnisse

Die Untersuchung zur Lichtdurchlässigkeit von MMK-Mustern hat gezeigt, dass der Transmissionsgrad des sichtbaren Lichts hauptsächlich von den Membranlagen beeinflusst wird. Die Lichtdurchlässigkeit reduziert sich nur in geringem Maße mit

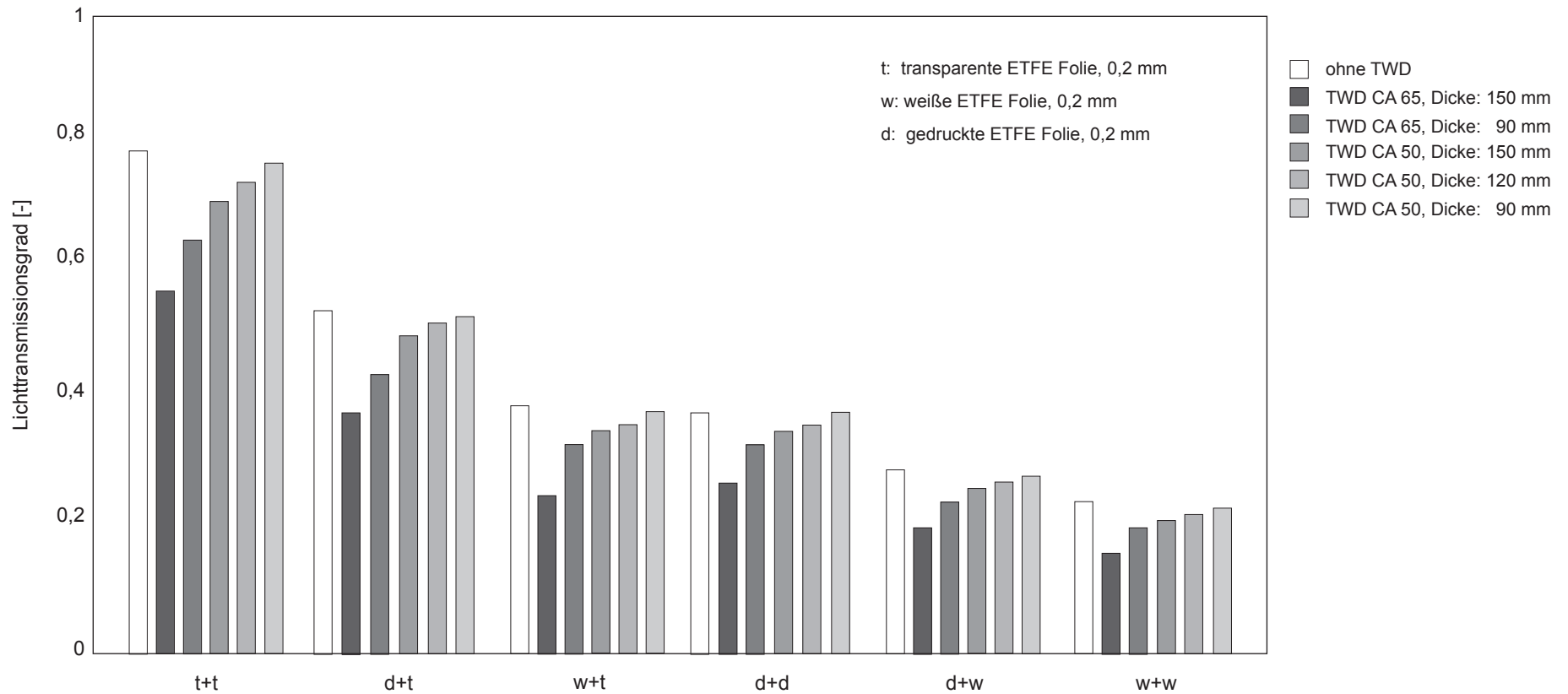


Abb.6-12: Diagramm der Ergebnisse der Messungen des Lichttransmissionsgrades bei verschiedenen Varianten der MMK

Folien	t+t			w+t			d+t			d+w			w+w			d+d		
	150	90	0	150	90	0	150	90	0	150	90	0	150	90	0	150	90	0
Dicke der TWD CA 65 [mm]	150	90	0	150	90	0	150	90	0	150	90	0	150	90	0	150	90	0
$\tau = E_{diff} / E_0$	0,57	0,65	0,79	0,25	0,33	0,38	0,38	0,44	0,54	0,20	0,24	0,29	0,16	0,20	0,24	0,27	0,33	0,39
Dicke der TWD CA 50 [mm]	150	120	90	150	120	90	150	120	90	150	120	90	150	120	90	150	120	90
$\tau = E_{diff} / E_0$	0,71	0,74	0,77	0,35	0,36	0,37	0,50	0,52	0,53	0,26	0,27	0,28	0,21	0,22	0,23	0,35	0,36	0,38

Abb.6-13: Gemessene Werte

der Zunahme der Dicke des TWD-Materials.

2 Untersuchung des Einflusses verschiedener MMK-Kombinationen bei der Tageslichtnutzung

Transparente ETFE-Folien weisen eine hohe Lichtdurchlässigkeit auf. Durch eine Bedruckung auf ihren Oberflächen wird die transmittierte Direktstrahlung des Lichts vermindert. Weiße ETFE-Folien und TWD-Materialien reflektieren einen Teil der Direktstrahlung, der Rest wird in Diffusstrahlung umgewandelt und mittels Lichtstreuung bzw. Lichtlenkung in den Innenraum weiter geleitet.

Um Aussagen zur Lichtverteilung und zur möglichen Lichtlenkung und Lichtstreuung des Tageslichts durch MMK-Muster treffen zu können, wurden photographische Untersuchungen durchgeführt. Diese sollen den Einfluss auf den Innenraum unter festgelegten Lichtsituationen bei verschiedenen Aufbauvarianten im Vergleich aufzeigen.

2.1 Aufbau der Messanlage

Aufgrund des strukturellen Aufbaus des TWD-Materials und der daraus folgenden Lichtwirkung werden die MMK-Muster bei der Messung im Maßstab 1:1 untersucht. Ein Rahmen ungefähr in der Proportion eines

Bürraums, um eine innen räumliche Situation zu simulieren, wird vor das MMK-Muster gesetzt. Die Wirkung der Lichtlenkung und -streuung kann durch den Vergleich der Lichtverteilung an den Rahmenoberflächen bei verschiedenen Kombinationen festgestellt werden. (Abb. 6-14)

2.2 Abbildung der Zusammenstellung von MMK-Mustern

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die theoretischen Erkenntnisse zur Lichtwirkung von MMK-Bauteilen im Innenraum und deren Einfluss auf den Innenraum durch vordefinierten Aufbau der MMK-Muster mittels photographischer Darstellung überprüft werden.

Die erste Untersuchung wurde auf der lehrstuhleigenen Einrichtung mit einem blauen Hintergrund durchgeführt, um den visuellen Eindruck der Kombinationen von MMK-Mustern studieren zu können. Während der ersten Versuche zeigte sich, dass die Beeinflussung durch unterschiedliche Lichteinfallswinkel für die Lichtlenkung nicht feststellbar ist.

Bei der photographischen Untersuchung wurde deutlich, dass sich mit der TWD-Einlage das eingestrahelte Licht im Innenraum gleichmäßig verteilt, ohne dass eine bemerkbare Einfallrichtung zu erkennen ist. Bei der

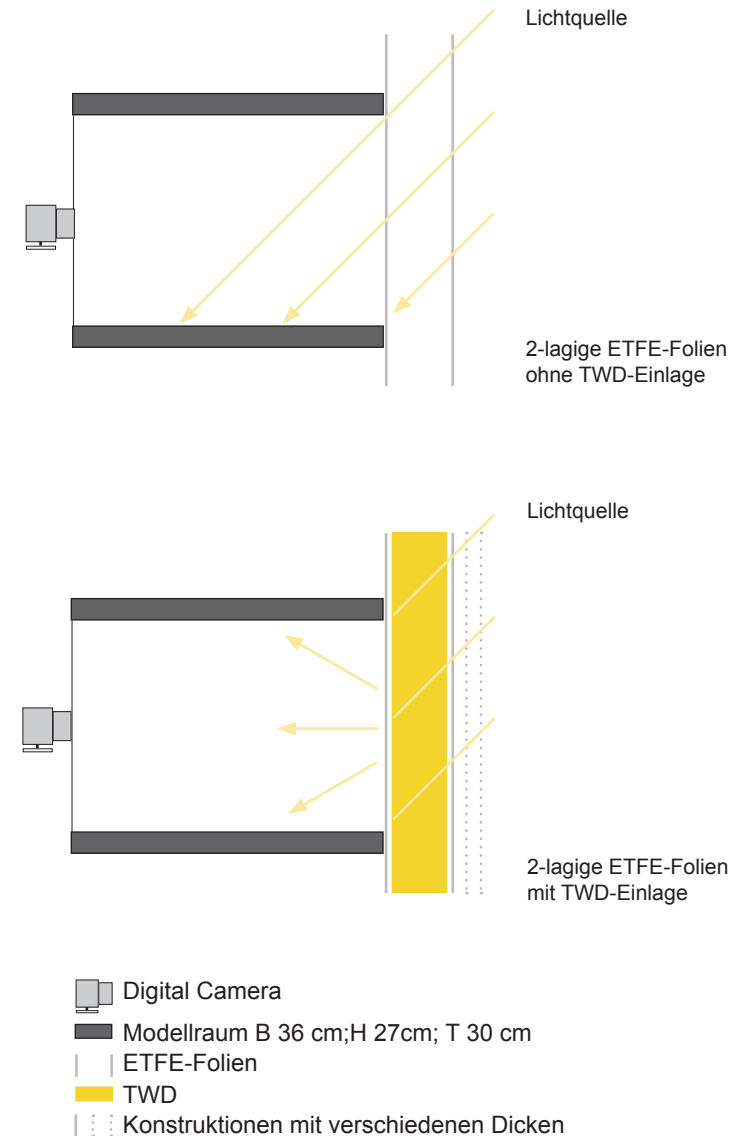


Abb.6-14: Prinzip der Messung zur Lichtwirkung im Innenraum

Lichtlenkungswirkung spielt die Dicke des TWD-Materials keine wichtige Rolle. (Abb. 6-15)

Bei verschiedenen Varianten der Oberflächen aus ETFE-Folien zeigte sich, dass die Lichtstreuung durch weiße Folien verstärkt wird. Mehr Licht wird auf die oberen Oberflächen des Innenraums gelenkt. (Abb. 6-16)

2.3 Lichtsituation im Künstlichen Himmel

Die weitere Untersuchung wurde im Künstlichen Himmel durchgeführt, um eine relativ praxisnahe Situation des natürlichen Lichts simulieren zu können.

Hinsichtlich des Einsatzes der MMK für die Gebäudehülle wurden die typischen Anwendungsbereiche für Fassaden und Dachkonstruktionen betrachtet. Zur Einstellung der Tageslichtsimulation im Künstlichen Himmel wurde das Licht unter Azimut-Abweichung und einem Höhenwinkel von 45° eingestrahlt, entsprechend einer Lichtsituation für Südfassaden um 14:00 Uhr am 21. August für den Standort München (48° NB). Damit existiert eine adäquate Lichtsituation, die einen Vergleich von vertikalen und horizontalen Bauteilen ermöglicht.

2.4 Beurteilung der Lichtwirkung im Innenraum

Bei der Beurteilung des visuellen Komforts spielen die Folien und die Struktur der TWD eine wichtige Rolle für die Lichtverteilung im Innenraum.

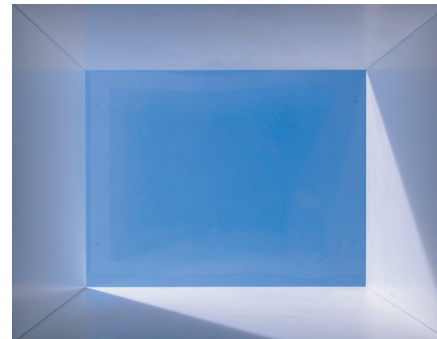
Zur Beurteilung der photographischen Untersuchung wurden folgende Parameter betrachtet:

- Möglichkeit der Durchsicht
- Maß der Lichtreflexion auf den Modellwänden
- Lichtstreuungswirkung bzw. die Gleichmäßigkeit der Verteilung des Lichts durch das Muster

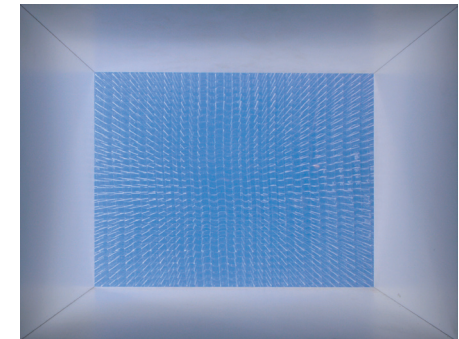
Bei der Darstellung werden die Aufnahmen der Muster im Künstlichen Himmel in eine Falschfarbendarstellung umgewandelt. (Abb. 6-17)

Bei dem Vergleich der Ergebnisse zeigt sich folgendes:

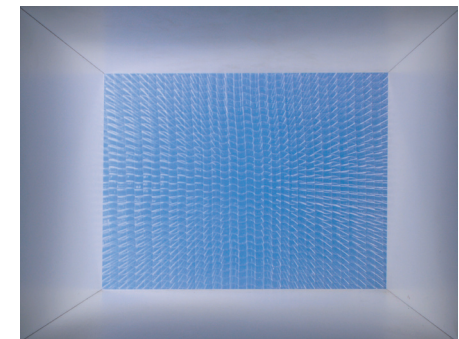
- Bei einer Kombination mit TWD-Materialien ist eine Durchsicht unmöglich
- Mit der TWD-Einlage ermöglichen die MMK-Muster eine Lichtlenkung in den Innenraum
- Die Lichtlenkungswirkung ist we-



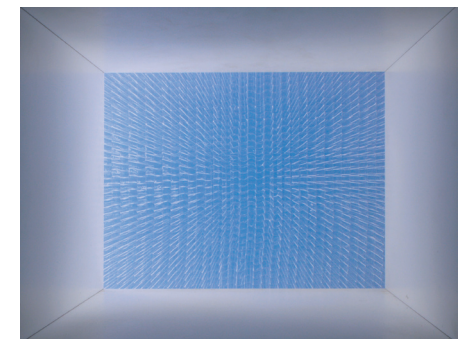
2-lagige transparente ETFE-Folien ohne TWD-Einlage



2-lagige transparente ETFE-Folien mit TWD-Einlage von 90 mm

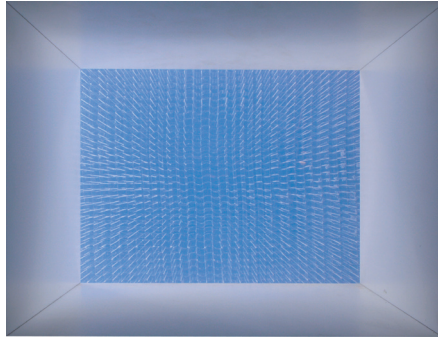


2-lagige transparente ETFE-Folien mit TWD-Einlage von 120 mm

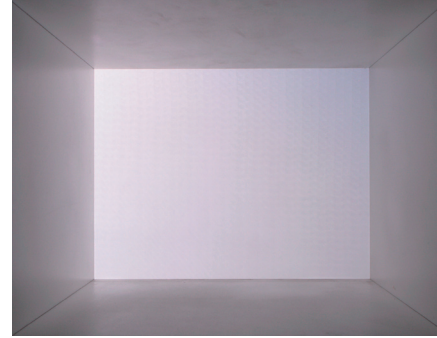


2-lagige transparente ETFE-Folien mit TWD-Einlage von 150 mm

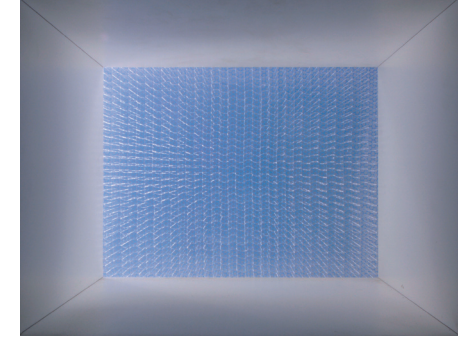
Abb.6-15: Photographische Darstellung der Lichtwirkung im Innenraum bei MMK ohne und mit TWD



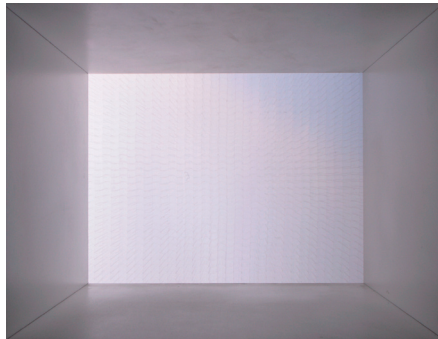
2-lagige transparente ETFE-Folien mit TWD-Einlage von 90 mm



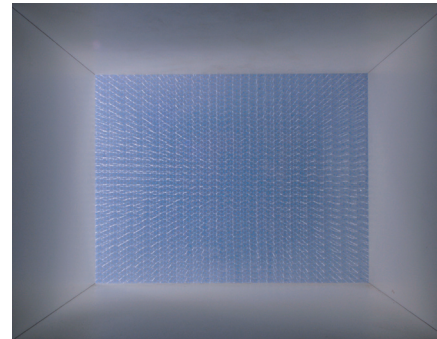
transparente (außen) und weiße (innen) ETFE-Folien mit TWD-Einlage



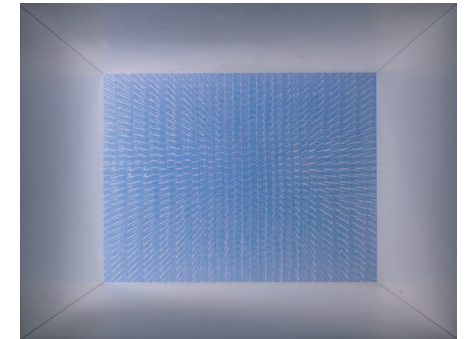
transparente (außen) und bedruckte (innen) ETFE-Folien mit TWD-Einlage



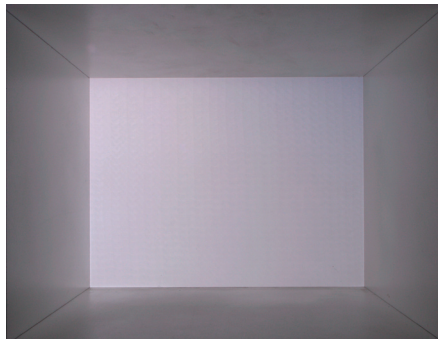
transparente (innen) und weiße (außen) ETFE-Folien mit TWD-Einlage



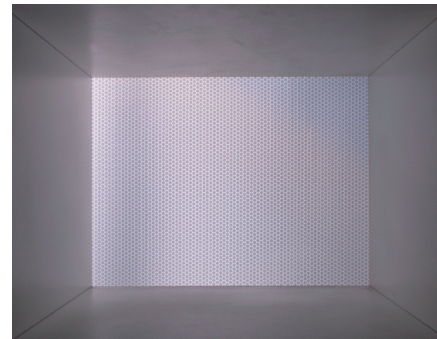
2-lagige bedruckte ETFE-Folien mit TWD-Einlage



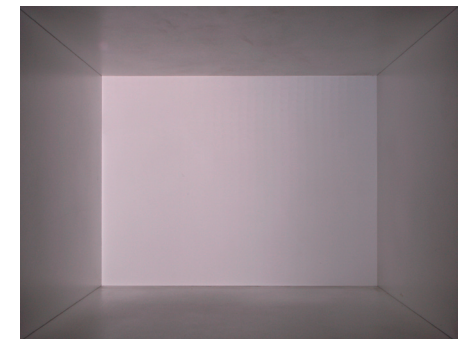
bedruckte (außen) und transparente (innen) ETFE-Folien mit TWD-Einlage



weiße (innen) und bedruckte (außen) ETFE-Folien mit TWD-Einlage



bedruckte (innen) und weiße (außen) ETFE-Folien mit TWD-Einlage



2-lagige weiße ETFE-Folien mit TWD-Einlage

Abb.6-16: Modellphotos von Innenräumen bei verschiedenen Kombinationen der Oberflächen

nig von den Einfallswinkeln der direkten Lichtstrahlung und der Dicke von den TWD-Strukturen beeinflusst

- Bei weißen Folien ist aufgrund der starken Lichtstreuung eine Lichtlenkungswirkung des Musters nicht erkennbar
- Bei transparenten und bedruckten Folien können durch eine Spiegelung des Lichts auf den TWD-Oberflächen spezielle Lichteffekte auftreten



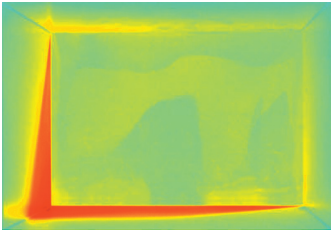
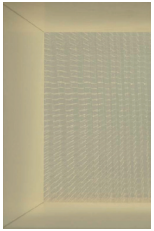
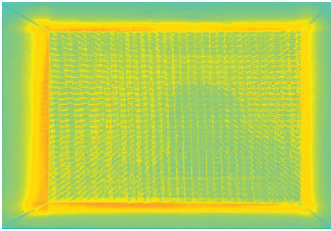
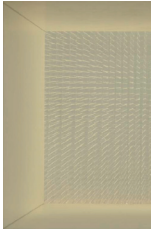
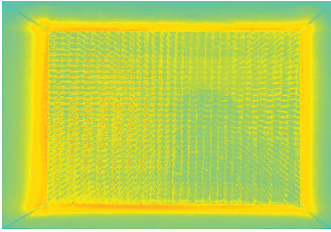

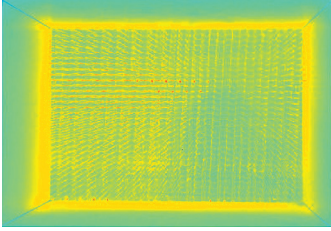
2.5 Ergebnisse der photographischen Untersuchungen



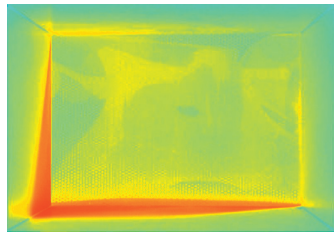

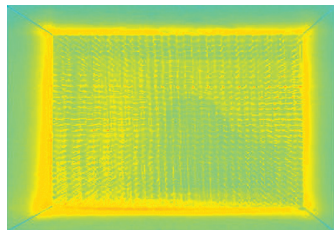

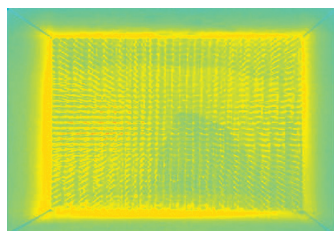

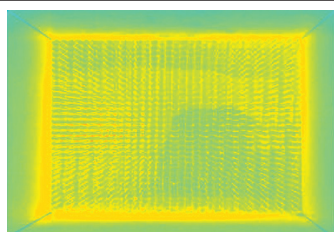
- Die verschiedenen MMK-Kombinationen bestätigen die erwarteten Wirkungen von Lichtlenkung und -streuung
- Die Ergebnisse zeigen, dass für die Wirkung die Dicke der TWD-Materialien keinen nennenswerten Einfluss aufweist; dagegen spielen die Strukturen der Membranoberflächen eine entscheidende Rolle
- Die Beurteilung der Lichtwirkung im Innenraum macht deutlich, dass die Verwendung von transparenten oder teilweise transparenten Membranen für die beiden



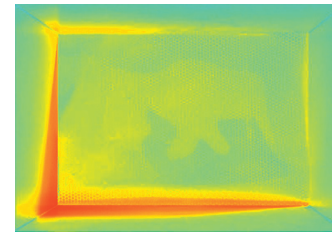
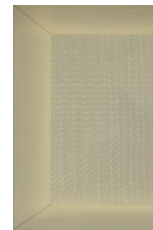
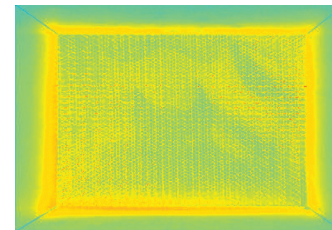
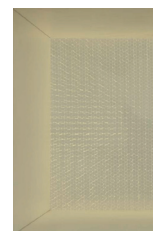
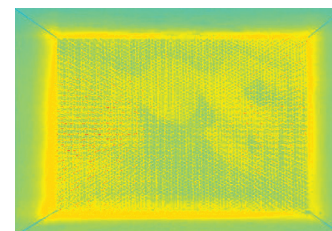
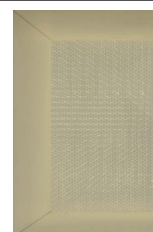
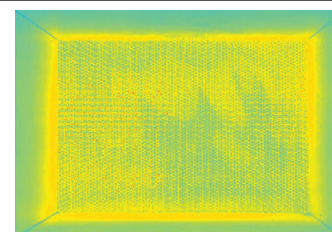
Membranlagen zu Blendungen führen kann. Daher müssen die Folienlagen bei den MMK-Aufbauten jeweils nach den funktionalen Anforderungen richtig ausgewählt werden.



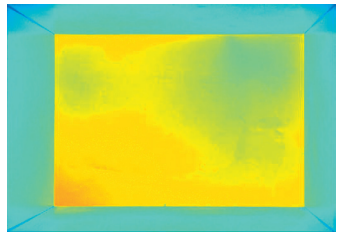

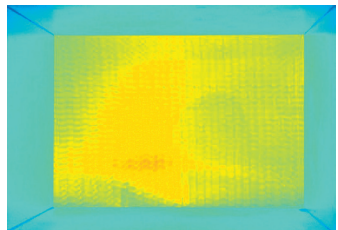

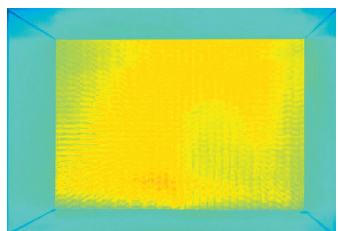

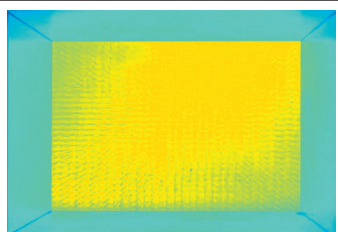
Die Strukturen der Oberflächen und der TWD-Materialien sind ab einem gewissen Abstand nicht mehr im Einzelnen in ihrer visuellen Wirkung optisch erkennbar.⁸



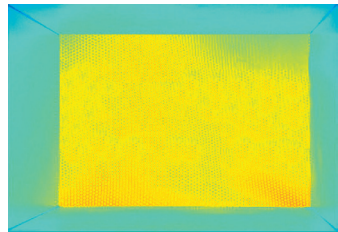
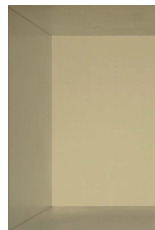
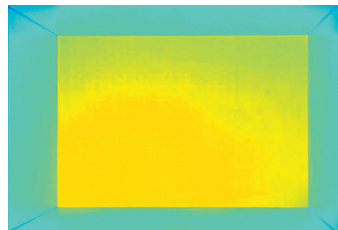


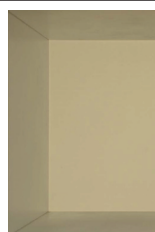
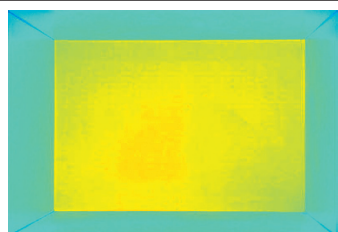
Abb.6-17: Photographische Erfassung verschiedener MMK-Proben


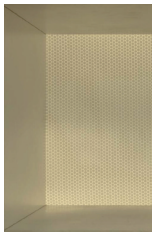
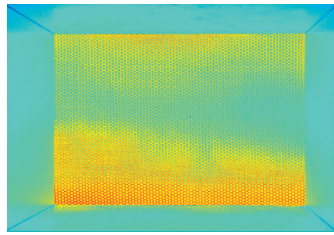

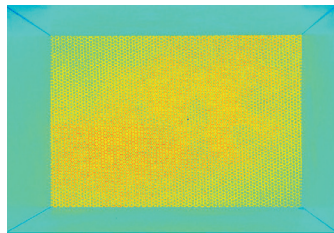

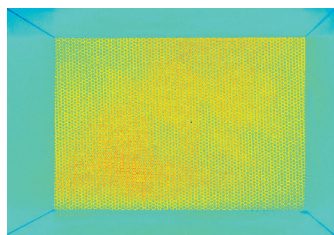

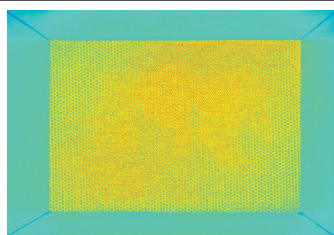
Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung  (hell) (dunkel)	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
t+t, 0			+	-	-
t+t, 90			-	-	+
t+t, 120			-	-	+
t+t, 150			-	-	+


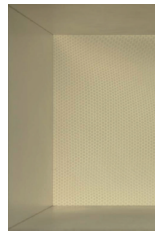
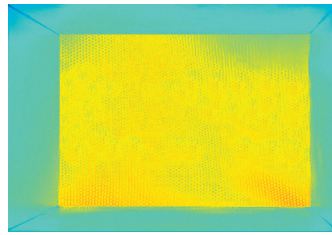

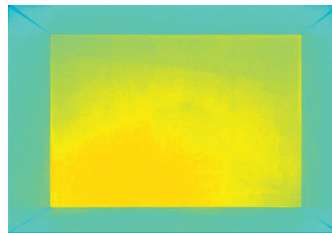

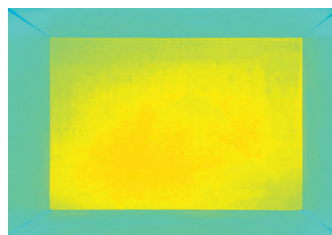

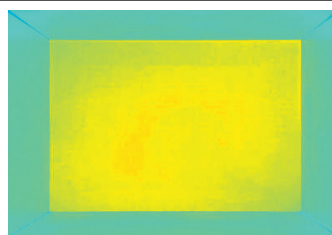
Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung  (hell) (dunkel)	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
t+d,0			o	-	-
t+d,90			-	+	-
t+d,120			-	+	-
t+d,150			-	+	-



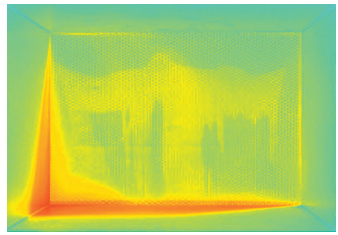

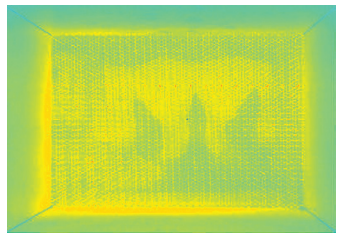

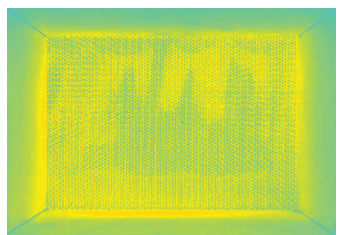

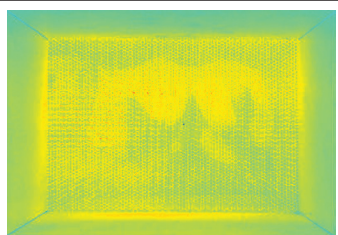
Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung  (hell) (dunkel)	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
d+t,0			o	-	-
d+t,90			-	+	-
d+t,120			-	+	-
d+t,150			-	+	-


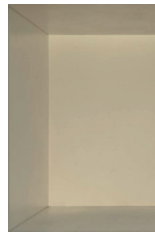
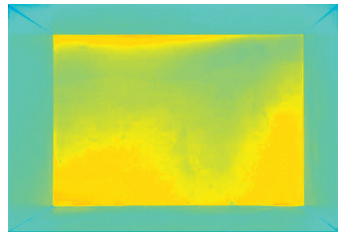

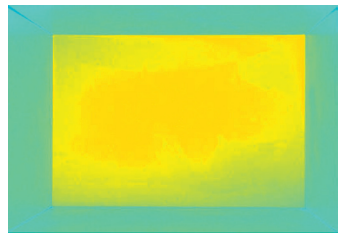



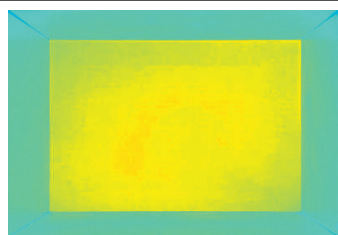
Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
		 (hell) (dunkel)			
t+w,0			-	-	+
t+w,90			-	o	+
t+w,120			-	o	+
t+w, 150			-	o	+

Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
		 (hell) (dunkel)			
w+t,0			-	-	+
w+t,90			-	o	+
w+t,120			-	o	+
w+t,150			-	o	+

Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
		 (hell) (dunkel)			
d+w,0			-	-	-
d+w,90			-	o	-
d+w,120			-	o	-
d+w,150			-	o	-

Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
		 (hell) (dunkel)			
w+d,0			-	-	o
w+d,90			-	o	+
w+d,120			-	o	+
w+d,150			-	o	+

Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
		 (hell) (dunkel)			
d+d,0			o	-	-
d+d,90			-	+	-
d+d,120			-	+	-
d+d,150			-	+	-

Kombination	Photographische Darstellung		Wirkung		
	norm. Farbe	Falschfarbendarstellung	Durchsicht	Lichtlenkung	Lichtstreuung
		 (hell) (dunkel)			
w+w,0			-	-	+
w+w,90			-	o	+
w+w,120			-	o	+
w+w,150			-	o	+

3 Experimentelle Untersuchungen zum Wärmedurchlasskoeffizient des MMK-Musters

3.1 Aufgabenstellung

Der Wärmedurchlasskoeffizient $1/R$ [W/m^2K] ist definiert durch den Quotienten aus der räumlich gemittelten Wärmestromdichte q [W/m^2] und der Temperaturdifferenz der Umgebung ($T_A - T_B$) [K], wobei isotherme Randbedingungen vorausgesetzt werden:⁹

$$\Lambda = q / (T_A - T_B)$$

Wegen der hohen Transmission von IR-Strahlung bei TWD-Materialien ist der Wärmedurchlasskoeffizient

der MMK-Muster abhängig von der Außentemperatur. Zum Vergleich ist der Λ -Wert der Mitteltemperatur von $10\text{ }^\circ\text{C}$ in den Datenblättern der TWD-Produkte dargestellt.

Bei einer Forschungsarbeit über TWD-Materialien wurde die Struktur-geometrie- und Temperaturabhängigkeit der Wärmedurchlasskoeffizienten von verschiedenen TWD-Mustern mit gleicher Dicke untersucht.¹⁰ In der vorliegenden Arbeit werden die Λ -Werte von MMK-Mustern bei relativ stabiler Mitteltemperatur gemessen, um den Einfluss der verschiedenen Aufbau-Varianten aufzeigen zu können.

3.2 Messtechnik

3.2.1 Messbox

Wie in Abb.6-19 dargestellt, wurde die für lichttechnische Messungen gebaute Box mit Wärmedämmung umgeben. Nur die Seite für die Montage der MMK-Muster wurde freigelassen.

Eine Leuchte mit der Leistung von 100 W fungiert als Wärmequelle. Zwischen der Wärmequelle und dem Muster ist eine Aluminium-Folie eingefügt.

Bei der Messung wird die Leistung der Leuchte mit einem Wattmeter ab-

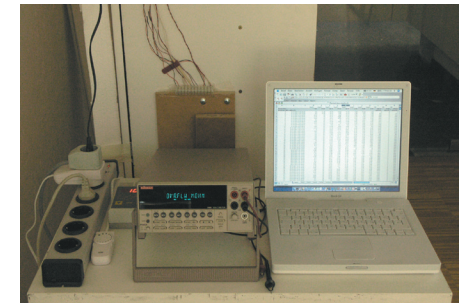


Abb.6-18: Messvorrichtung

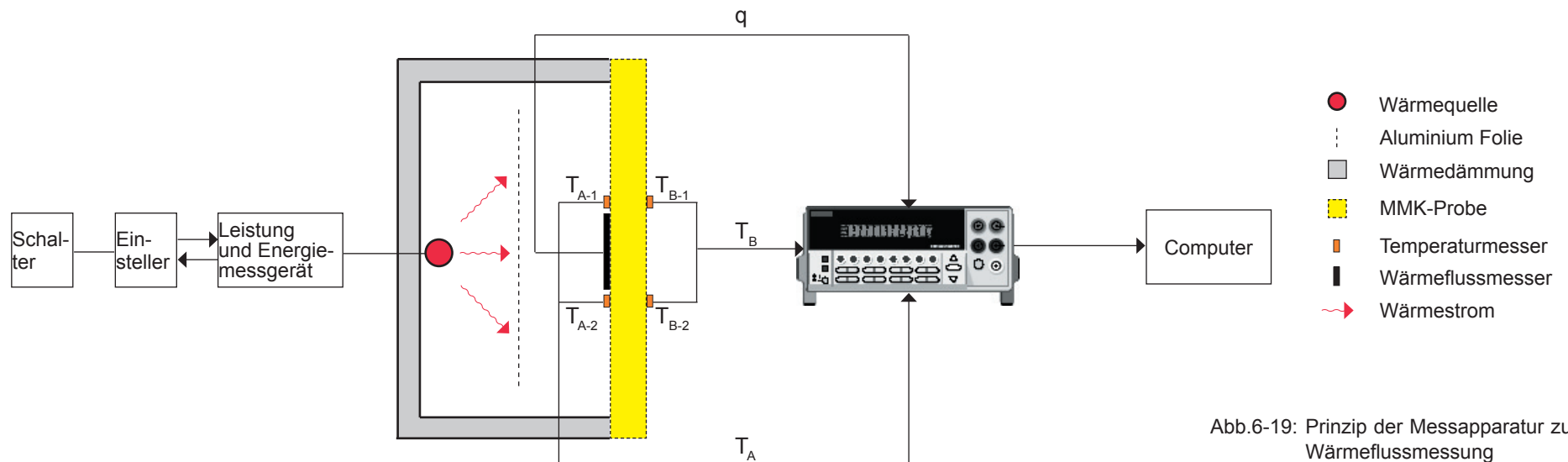


Abb.6-19: Prinzip der Messapparatur zur Wärmeflussmessung

gelesen und 100 W im Gegensatz zu 50 W zum Vergleich gestellt, um die Mittelwerte der inneren Temperatur bei der Messung einzustellen.

3.2.2 Oberflächentemperatur

Auf den beiden Oberflächen des MMK-Musters werden jeweils zwei Temperatur-Sensoren PT-100 aufgeklebt und gegen Wärmetransmission bzw. langwellige Strahlung mit den Wärmeschutzmaßnahmen abgedeckt.

Bei der Berechnung der Oberflächentemperatur werden die Werte gemittelt.

3.2.3 Wärmeflussmesser

Zur Bestimmung der Wärmestromdichte q steht ein plattenförmiger Wärmeflussmesser zur Verfügung.

Auf der inneren Seite des MMK-Musters wurden zwei Wärmeflussmesser positioniert.

Beim Wärmeflussmesser wird der Wärmefluss durch den Temperaturgradienten über die Plattendicke bestimmt. In der Platte sind seriell N (meist mehrere Hundert) Cu-Konstantan-Thermopaare eingeschmolzen, welche die Temperaturdifferenz über die Plattendicke messen. Diese kleine Temperaturdifferenz ΔT ist im Gleichgewicht proportional zur Wärmestromdichte q . Deshalb kann bei Kenntnis des Proportionalitätsfaktors C letztere aus der Thermospannung ΔU eines Einzelpaares bestimmt werden:⁹

$$q = C(T) \cdot \Delta U$$

3.3 Messverfahren

Die Messung dauert nach neu erfolgter Montage der Muster ungefähr 12 Stunden, bis die Oberflächentemperatur und der Wärmefluss relativ stabile Messwerte erreicht.

Um die Wärmeschutzfunktionen der TWD zu gewährleisten, werden die Folien mittels Unterdruck von 400 Pa sehr fest auf die TWD-Struktur gedrückt.¹¹ Mit einem Unterdruck von 100 Pa können die Folienlagen ohne Außenkräfte (z.B. Windsog) die Luftkammer des TWD-Materials fest einschließen.¹²

Beim Verlust des Unterdrucks kann eine starke Konvektion innerhalb des Musters zwischen den Membranlagen stattfinden, in diesem Fall funktioniert der Wärmewiderstand der TWD nicht mehr. Bei der Messung



Abb.6-20: Wärmeflussmesser

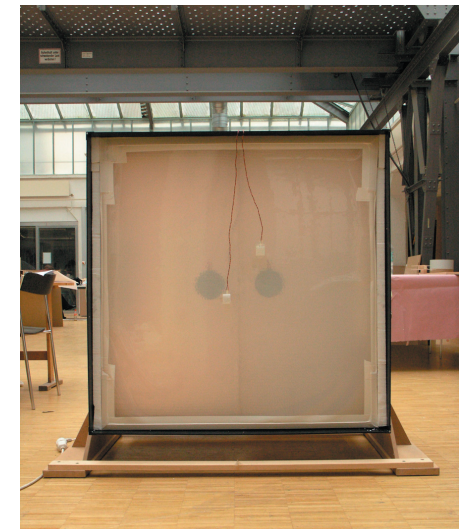


Abb.6-22: Messbox im Labor

Dicke der TWD [mm]	Leistung der Wärmequelle [W]	T_{A-av} [K]	T_{B-av} [K]	T_{mittel} [K]	q_{av} [W/m ²]	1/R [W/m ² K]
150	100	49,77	26,96	38,36	20,89	0,916
	50	40,10	26,54	33,32	12,12	0,893
120	100	45,86	27,62	36,74	20,52	1,125
	50	38,56	26,08	32,32	13,59	1,089
90	100	43,47	25,52	34,49	24,71	1,377
	50	37,21	26,05	31,63	15,01	1,346

Abb.6-21: ermittelte Messwerte

steigt der 1/R- Wert des Musters in diesem Fall auf ca. 3,0 W/m²K.

3.4 Ergebnisse

Der Wärmedurchlasskoeffizient 1/R wird von den thermischen Eigenschaften des TWD-Materials bestimmt, der sich je nach der Dicke des Materials und der Mitteltemperatur der Muster ändern wird. Dafür spielt die Art der Folie keine wichtige Rolle. (Abb. 6-21)

Durch den pneumatischen Unterdruck können die Membranlagen ohne zusätzliche Verbindung fest an der TWD-Struktur befestigt werden. Durch die geschlossenen Luftkammern des TWD-Materials weist das gesamte Bauteil eine gute Wärmedämmfähigkeit auf.

Bei der Herunterregelung der Wärmequelle von 100 auf 50 W wird die Lufttemperatur der Messbox bzw. die Mitteltemperatur des Musters reduziert. Dies führt zu etwa 3% niedrigeren 1/R-Werten bei der Verminderung der Mitteltemperatur.¹³

3.5 Diskussionen möglicher Fehler

Bei der Messung können folgende Faktoren zu Fehlern bei den Ergebnissen führen:

- Veränderung der Lufttemperatur und Luftbewegung bei der Tätigkeiten im Labor kann zu einer Veränderung der Außenoberflächentemperatur (T_B) des Musters führen
- Konvektion durch die Fugen der Box kann zu einer Veränderung der Innenoberflächen-Temperatur (T_A) des Musters führen
- wegen Konvektion innerhalb der Messbox ist der Wärmestrom auf der vertikalen Oberfläche des Musters nicht gleichmäßig verteilt

4 Solarer Energiegewinn durch MMK-Bauteile

4.1 Kennwerte

Nach der Definition der DIN EN 410 ist der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) „die Summe des direkten Strahlungstransmissionsgrades τ_e und des sekundären Wärmeabgabegrades q_i der Verglasung (bzw. transluzenten Bauteile) nach innen, letzterer bedingt durch den Wärmetransport infolge Konvektion und langwelliger IR-Strahlung des Anteils der auftretenden Strahlung, der von der Verglasung (bzw. transluzenten Bauteile) absorbiert wird“:¹⁴

$$g = \tau_e + q_i$$

Der g-Wert ist der Gesamtenergiedurchlass im Bereich der Wellenlängen von 300 nm bis 2500 nm. Bei dieser Untersuchung zu MMK-Bauteilen wurde der hemisphärische g-Wert für die Beschreibung der energetischen Eigenschaften eingesetzt.

Über die Bestimmung des g-Werts der TWD-Materialien wurden bereits viele Untersuchungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass der g-Wert, abhängig vom Einfallswinkel, ca. 5 bis 10% höher als der gerichtet hemisphärische Transmissionsgrad liegt.¹⁵

Bei der in MMK-Mustern eingelagerten absorbersenkrechten TWD-Struktur spielt der Transmissionsgrad der Strahlung, der über 90% vom g-Wert beträgt, eine entscheidende Rolle.¹⁶

4.2 Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung des solaren Transmissionsgrads

4.2.1 Messeinrichtung

Wegen der Inhomogenität der MMK-Muster, in Kombination mit strukturellen TWD-Materialien ist eine Messung im Labor schwierig durchzuführen. Deshalb erfolgten die Messungen unter natürlichen Bedingungen am Prüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen. (Abb. 6-23,24)

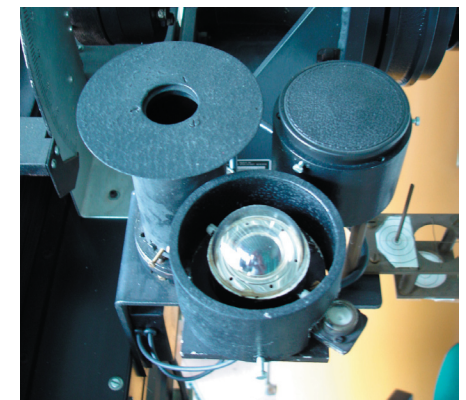


Abb.6-23: Messeinrichtung

Aufgrund der Größe der Messeinrichtung wurden die Muster in den Maßen 120 cm x 80 cm, mit der transparenten Aperturfläche von 97 cm x 77 cm hergestellt. Die Membranlagen wurden derart auf den Rahmen montiert, dass sie einfach gewechselt werden konnten.

Die Messeinrichtung ist horizontal und vertikal drehbar, um eine direkte Sonnenstrahlung unter verschiedenen Einfallswinkeln zu ermöglichen. Da der solare Energiegewinn stark von den Strahlungsbedingungen abhängig ist, konnte die Messung nur bei ausreichendem Strahlungsangebot durchgeführt werden.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse zu den lichttechnischen Eigenschaften des MMK-Musters, die zeigten, dass für die Lichtdurchlässigkeit die Dicke der TWD-Materialien keine große Bedeutung hat, wurde das Muster mit einer 90 mm TWD-Einlage zur Messung aufgebaut.

4.2.2 Messdatenerfassung

Die Ermittlung von Messdaten erfolgte mit dem Ziel, erste Aussagen zu dem Energiegewinn unter solarer Einstrahlung durch das MMK-Muster zu erhalten. Die Datenerfassung bezog sich dabei auf die folgenden wesentlichen Aspekte:

- Verhältnis der solaren Transmission, Reflexion und Absorption in Abhängigkeit von Einfallswinkeln der Einstrahlung
- Ermittlung des g-Werts mit Hilfe anderer geprüfter Forschungsergebnisse.

Die Messdaten wurden mit Hilfe eines Programms beim IBP zu Messergebnissen aufbereitet. (Abb. 6-25)

4.2.3 Beurteilung der Ergebnisse

Bei den Messungen zeigte sich, dass das System richtungsunabhängig ist.¹⁷

Bei den experimentellen Versuchen wurden die Messungen des Transmissions-, Reflexion- und Absorptionsgrads von MMK-Mustern unter verschiedenen Einfallswinkeln der Sonnenstrahlung von 0°, 15°, 30° und 45°, die von den Messungsanlagen bestimmt sind, durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messungen haben gezeigt:

- die transparenten Folienlagen weisen eine niedrige Absorption der Sonnenstrahlung auf
- nach dem Vergleich zwischen (t+t, 90) und (TWD, 90) zeigte sich, dass die Durchlässigkeit der Son-



Abb.6-24: Aufbau zur Durchführung der Messungen

Kombination	Pos. zu Sonne	τ_e	λ_e	ρ_e	g-Wert
(t+t, 90)	0	0,83	0,16	0,01	0,83
	15	0,82	0,17	0,01	0,83
	30	0,81	0,18	0,01	0,82
	45	0,81	0,19	0,01	0,81
(w+w, 90)	0	0,34	0,63	0,03	0,34
	15	0,34	0,63	0,03	0,34
	30	0,34	0,63	0,03	0,34
	45	0,34	0,64	0,02	0,34
(t+w, 90)	0	0,46	0,49	0,04	0,50
	15	0,46	0,49	0,05	0,49
	30	0,46	0,50	0,04	0,49
	45	0,46	0,51	0,03	0,49
(w+t, 90)	0	0,46	0,50	0,04	0,47
	15	0,46	0,50	0,04	0,47
	30	0,46	0,50	0,04	0,46
	45	0,46	0,50	0,04	0,46
(d+t, 90)	0	0,48	0,38	0,14	0,49
	15	0,48	0,38	0,14	0,49
	30	0,48	0,39	0,14	0,49
	45	0,48	0,39	0,14	0,48
(t+d, 90))	0	0,48	0,39	0,13	0,59
	15	0,48	0,39	0,13	0,59
	30	0,48	0,40	0,12	0,59
	45	0,48	0,41	0,12	0,59
(d+d, 90)	0	0,31	0,47	0,23	0,38
	15	0,31	0,47	0,23	0,38
	30	0,30	0,47	0,23	0,38
	45	0,30	0,47	0,22	0,38

Kombination	Pos. zu Sonne	τ_e	λ_e	ρ_e	g-Wert
(d+w, 90)	0	0,31	0,51	0,18	0,33
	15	0,30	0,51	0,19	0,33
	30	0,30	0,51	0,18	0,33
	45	0,30	0,52	0,18	0,32
(w+d, 90)	0	0,31	0,58	0,11	0,38
	15	0,30	0,58	0,11	0,37
	30	0,30	0,59	0,11	0,37
	45	0,30	0,59	0,11	0,37
(TWD, 90)	0	0,97	0,02	0,01	0,97
	15	0,96	0,03	0,01	0,96
	30	0,95	0,04	0,01	0,95
	45	0,94	0,06	0,01	0,94

τ_e : Transmissionsgrad der direkten Strahlung
 λ_e : Reflexionsgrad der direkten Strahlung
 ρ_e : Absorptionsgrad der direkten Strahlung

Abb. 6-25: Messergebnisse

nenstrahlung durch die Reflexion der transparenten Folienlagen reduziert wird

- nach dem Vergleich zwischen (d+t, 90) und (t+d, 90) war erkennbar, dass die Muster aus gleichen kombinierten Elementen in verschiedener Reihenfolge einen gleichen Transmissionsgrad haben; aber sie zeigen großen Unterschied beim Absorptionsgrad und beim g-Wert des Musters. Beim Vergleich von (w+d, 90) und (d+w, 90) wurde eine gleiche Situation festgestellt.
- die Winkelabhängigkeit des g-Werts von MMK-Kombinationen aus weißen und bedruckten Lagen sind nicht signifikant

Durch die Untersuchung der 9 Varianten von MMK-Kombinationen wurde gezeigt, dass der Energiedurchlass der MMK-Bauteile nach der Auswahl von Membranlagen weit reichend variiert werden kann, und eine weitreichende Anpassungsfähigkeit der MMK-Bauteile hinsichtlich des Einsatzes in Gebäudehüllen entsprechend den Erfordernissen erreicht werden kann.

Hinsichtlich energetischer Aspekte sollte bei der Auswahl der Membranlagen die Absorption der Sonneneinstrahlung berücksichtigt werden, die zu

einer Erhöhung des g-Werts, bzw. des Energiegewinns im Innenraum führen kann.

4.3 Bedeutung des g-Werts für die Baupraxis

Der g-Wert ist für raumklimatische Berechnungen von großer Bedeutung. In der Baupraxis bestehen widersprüchliche Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlass von transluzenten Bauteilen. Auf der einen Seite ermöglicht eine Maximierung des g-Werts im Winter zusätzliche Solarenergiegewinne, was den Heizenergieverbrauch reduzieren kann; auf der anderen Seite wird die Minimierung des g-Werts zur Minderung der Kühlleistung im Sommer gefordert.

Es bestehen vielfältige Möglichkeiten den g-Wert zu reduzieren, um eine Überhitzung durch die Sonneneinstrahlung im Innenraum zu vermeiden.

Aufgrund der verschiedenen großen solaren Strahlungsgewinne, die abhängig von der Jahreszeit, über Azimut (Himmelsrichtung) und Zenit (Höhenwinkel) entstehen, sowie der Neigung und Orientierung der Bauteile, können die Eigenschaften der MMK-Bauteile je nach dem Bedarf der Gebäude im Einzelfall optimiert werden. (Abb. 6-26)

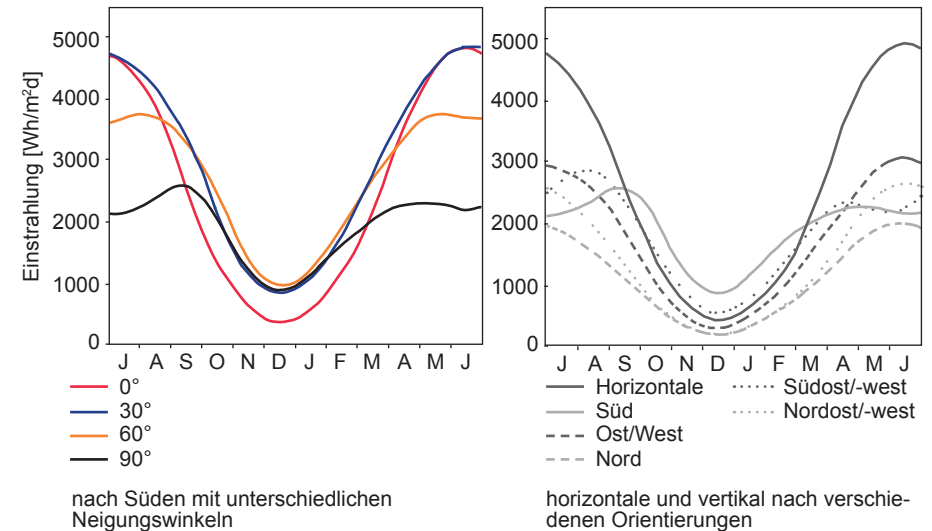


Abb. 6-26: Tagessummen der Globalstrahlung über das Jahr¹⁸

Hinsichtlich der vorher ermittelten, zufriedenstellenden Wärmedämmfähigkeit der MMK-Bauteile, werden für die Bauteile je nach Anwendungssituation in der Gebäudehülle bestimmte g-Werte definiert.

Es ist zu betonen, dass in Süd- sowie Ost/ West-orientierten Bereichen von Gebäudehüllen der Sonnenschutzproblematik besondere Bedeutung zukommt.

Für die nordorientierten Bereiche kann aufgrund sehr geringer Direktstrahlungsgewinne ein sehr guter Wärmedämmstandard erreicht werden.¹⁹

Anmerkungen

1. S. Teil 5
2. Vgl. Teil-3. Die Messung der Spektrowerte von den 3 Arten ETFE-Folien wurde vom Fraunhofer-IBP in Holzkirchen durchgeführt.
3. Wacotech, Bielefeld: Firmendatenblätter
www.wacotech.de, 2003
4. Informationen über relevante Daten zum Künstlichen Himmel wurden vom Lehrstuhl für Raumkunst und Lichtgestaltung, Prof. Hannelore Deubzer, TU München zur Verfügung gestellt.
5. Bedienungsanleitung des Luxmeter 106, von der Firma PRC Krochmann GmbH.
6. Definition der Beleuchtungsstärke.
7. Zum Beispiel bei der Kombination (t+d, 90) beträgt der Transmissionsgrad von
Probe 1- transparenter Folie nach außen, bedruckte Folie nach innen
Probe 2- bedruckte Folie nach innen, transparente Folie nach außen:
 $\tau_1=0,439$
 $\tau_2=0,452$
der Unterschied beträgt 3% $[(\tau_2 - \tau_1) / \tau_2]$ Deshalb wird bei der Darstellung der Ergebnisse die Lage der Folien nach außen oder innen nicht beachtet.
8. Vgl. Hartwig, 2003, S. 90
Strukturen der Größenordnung des Zwischenbereichs (10 mm bis 200 mm) sind für den Betrachter nicht mehr klar zuzuordnen und wirken deswegen häufig störend.
9. Vgl. Platzler, 1988, S.171
10. Vgl. Wallner, 2000
11. Bei der Messung ist die erwartete mögliche Ungleichmässigkeit der Verteilung des Innendrucks nicht berücksichtigt.
12. Wegen der einfachen Montagetechnik muss die Luft in der Probe jede Stunde abgesaugt werden, um den Innendruck nicht kleiner als 100 Pa werden zu lassen. Die Messung der Daten wurde 30 Minuten nach dem Absaugen durchgeführt. Die bei der Berechnung benutzten Daten wurden bei der stabilen Situation gemessen, d.h. dass der Unterschied der Daten nicht mehr als 1% beträgt.
13. Vgl. Wallner, 2000. Bei der Dokumentation von Wallner werden die Δ -Werte um ca. 8 bis 15% bei der Mitteltemperatur von 40 bis 10 °C reduziert.
14. Vgl. Hauser, 1984-TAB 6
15. Vgl. Wallner, 2000, S. 34
16. Vgl. Platzler, 1988
17. S. Email von Herrn Dipl.-Phys. Erwin Lindauer, Fraunhofer-IBP, Holzkirchen, 25-07- 2006
18. Vgl. Wilke, 1991; S.2
19. Vgl. Wilke, 1991, S.30

Teil 7

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit war die Optimierung mehrlagiger Membrankonstruktionen (MMK) für den Einsatz in der Gebäudehülle unter besonderer Berücksichtigung eine Minimierung des Energieverbrauchs.

MMK sind von großer Bedeutung für die Entwicklung neuartiger Leichtbau-Konstruktionen. Daher gilt es, weitreichende Material- und Systemkennwerte zum Leistungsspektrum von MMK zu ermitteln sowie Grundlagen zu schaffen, um die Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Gebäudehülle zu erweitern.

Die Untersuchung gliedert sich in folgenden Arbeitsschritte:

- Erfassung der für den Baubereich relevanten Eigenschaften von Membranmaterialien und Darstellung ihrer Potentiale
- theoretisch-systematische Untersuchung der Aufbauvarianten von MMK-Bauteilen
- Definition des Anforderungsprofils hinsichtlich der Energie- und Komfortoptimierung
- Bewertung der kombinierten Elemente aus Membranlagen und TWD-Materialien
- Experimentelle Untersuchung von

lichttechnischen und thermischen Eigenschaften von MMK-Aufbauten

Aufbauend auf den Kenntnissen der Eigenschaften und Potentiale der Membranmaterialien und -konstruktionen erfolgte die Optimierung der mehrlagigen Membrankonstruktionen hinsichtlich baukonstruktiver sowie bauphysikalischer Aspekte.

Basierend auf diesem Konzept wurden die Untersuchungen zur Bauweise und Kombination der Elemente hinsichtlich der funktionalen, konstruktiven, gestalterischen und ökologischen Gesichtspunkte durchgeführt. Anschließend konnte die Kategorie zur Auswahl der Elemente und zum konstruktiven Aufbau von MMK-Bauteilen nach den energetischen Aspekten bestimmt werden.

Danach wurden die lichtdurchlässigen Elemente von Membranen und Einlagen mit Rücksicht auf die Anforderungen von Wärmeschutz und Lichtdurchlässigkeit zur energetischen Optimierung vordefiniert. Nach weiteren Tests und dem Vergleich der bauphysikalischen Eigenschaften kommerziell verfügbarer Membranmaterialien wurden drei Typen von ETFE-Folien mit gleicher Dicke von 0,2 mm aber verschiedenen optischen Eigenschaften für die Membranlagen und TWD-Waben mit variabler Dicke



Abb.7-1: MMK-Bauteil

als Einlagematerial ausgewählt.

Die Muster wurden hergestellt durch die Kombinationen von verschiedenen ETFE-Folien mit TWD-Waben. Bei der experimentellen Untersuchung der MMK-Prototypen wurde ein innerer Unterdruck zwischen den zwei Außenmembranen erzeugt. Dieser Unterdruck bietet zwei wichtige Vorteile in der vorgeschlagenen MMK-Struktur: Auf der einen Seite werden viele kleine geschlossene Luftkammern in der kompletten Struktur durch einen engen Kontakt zwischen den Membranen und dem TWD-Wabenmaterial infolge des Unterdrucks gebildet. Dies erhöht den Wärmedurchlasswiderstand des ganzen MMK-Bauteils. Auf der anderen Seite erzeugte der Unterdruck eine ausreichende Reibungskraft zwischen Membranlagen und der TWD-Struktur, um die geforderte mechanische Stabilität zu gewährleisten.

Die experimentellen Arbeiten wurden zur Charakterisierung der Eigenschaften der ausgewählten Varianten durchgeführt, um die verschiedenen funktionalen und bauphysikalischen Potenziale der MMK-Bauteile aufzeigen zu können. Die Messungen von verschiedenen Kombinationen erstreckten sich auf: Durchlässigkeit des sichtbaren Lichts, Verbesserung der Lichtverteilung im Innenraum, Erhöhung des Wärmedurchlass-

widerstands und Maximierung der Nutzung von Solarenergie durch die MMK-Bauteile.

Die Untersuchungen der MMK-Muster haben gezeigt, dass die Transmissionsgrade von sichtbarem Licht und von solarer Strahlung am meisten von den Membranlagen beeinflusst werden. Dagegen wird der Wärmedurchlasswiderstand von den thermischen Eigenschaften der TWD-Einlage bestimmt. Der Wärmeschutz der Bauteile kann durch die Zunahme der Dicke des TWD-Materials verbessert werden. Das Maß der Durchlässigkeit sichtbaren Lichts und solarer Strahlung bei bestimmten Wellenlängebereichen kann durch die Auswahl der Membranlagen beeinflusst werden.

Die Konstruktion bietet Vorteile, die sich insbesondere auf folgende Kriterien positiv auswirken können:

- Reduzierung des Energieverbrauchs für den Gebäudebetrieb
- Nutzung von Solarenergie zur Raumtemperierung
- großflächige Nutzung von Tageslicht
- Verbesserung des optischen und thermischen Komforts im Gebäudeinnenraum

- Minimierung von Materialverbrauch
- einfache Montage, Demontage und Remontage

Dabei weisen hinsichtlich der optimierten Nutzung von Solarenergie die lichtdurchlässigen MMK-Bauteile besondere Vorteile auf, da diese je nach Verwendungszweck in verschiedenen Kombinationen hergestellt werden können, um eine entsprechende Anpassung an die raumklimatischen Erfordernisse im Einzelfall zu erhalten.

Diese Eigenschaften machen den Einsatz von MMK-Bauteilen sehr attraktiv für den Einsatz in der Gebäudehülle, weshalb sie besonders weite Verbreitung bei öffentlichen Bauten finden können.

Die MMK-Bauteile können sowohl in den Fassaden als auch im Dachbereich von Gebäuden eingesetzt werden. Sie können in verschiedenen Maßen und auch als einzelne Bauteile in der Größe von Fenstern oder Dachelementen hergestellt werden, die einzeln oder in der Reihe, mit ebenen oder gekrümmten Flächen ausgeführt werden.

Bei den Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Gebäudehülle ist zu berücksichtigen, dass eine ausreichende

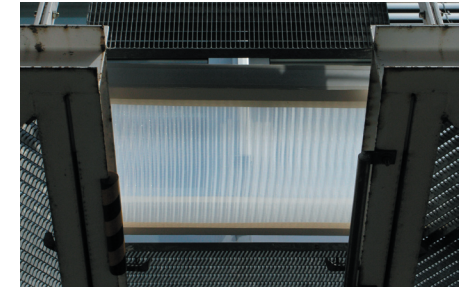


Abb.7-2: MMK-Bauteil auf dem Dach

de Lichtdurchlässigkeit ohne Durchsicht erreicht wird und dass die MMK in Form fixierter oder beweglicher Bauteile eingesetzt werden können. Durchsicht, Sichtbeziehung zwischen Innen und Außen, kann in Verbindung mit transparenten Bauteilen aus mehrlagigen Folienkissen oder Verglasungen ermöglicht werden.

Der Einsatz der MMK-Bauteile gilt insbesondere für Gebäude, bei denen eine Nutzung des Tageslichts gefordert wird. Hier kann eine energetische Verbesserung durch eine entsprechende Auswahl der kombinierten Elemente erfolgen, ohne, dass zunächst auch zusätzliche Maßnahmen für den Sonnenschutz erforderlich werden.

Der Aufbau der MMK-Bauteile stellt ein offenes System dar. Die Kombinationen können je nach Anforderungen aus der entsprechenden Situation ausgewählt und zusammengesetzt werden, um das beste Gesamtergebnis zu erhalten. Mit der technologischen Entwicklung von Membranmaterialien und neuer Bautechnik sind künftig weitere Optionen möglich.

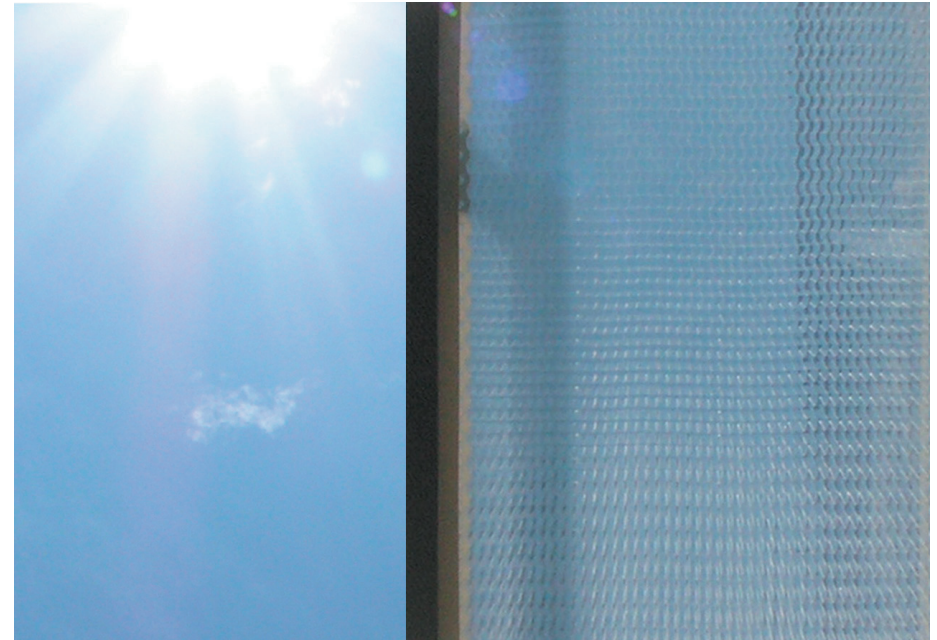


Abb.7-3: MMK-Bauteil bei Direktstrahlung

Literaturverzeichnis

(verwendete und weiterführende Quelle)

- Aydinli, S.; Kaase, H.: Lichttechnische und ergonomische Bewertung von Anlagen zur Abschirmung von Tageslicht im Büro. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz / Forschung. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1993
- Ayrle, H.: Welche Chancen hat der Textilbau in der Veranstaltungsarchitektur? In: Bauen mit Textilien 3/1998, S. 14-16
- Baier, B.: Steuerung von Energieströmen bei mehrlagigen Membrankonstruktionen. In: Hauser, G. (Hrsg.): Bauphysik. Berichte aus Forschung und Praxis Festschrift zum 60. Geburtstag von Karl Gertis. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1998
- Baier, B.; Koenen, R.; Geifes, S. u.a. (Hrsg.): Skelett und Haut - Symposium interdisziplinär. Galerie Architektur und Arbeit, Gelsenkirchen im November 1998, Selbstverlag, Essen, 1999.
- Baier, B.: Neue Entwicklungsansätze und Ziele im Membranbau -oder: Nachdenken über Membrankonstruktionen? Vordenken! In: Baukultur 2/1999, S. 6-8
- Baier, B.: Kriterien für das systematische Konstruieren von Membrankonstruktionen. In: Bauen mit Textilien 4/1999 S. 6-9
- Baier, B.; Koenen, R.; Geifes, S. u.a. (Hrsg.): Leicht Bau Kunst - Symposium interdisziplinär. Universität Essen im November 2000, Selbstverlag, Essen, 2001.
- Battle, G.: Membranen für eine wohltemperierte Umwelt. In: ARCH+ 107 Jg., 1991, S. 34-38
- Bauen mit Kunststoffen: Wärmegedämmte Wand- und Dachkonstruktionen mit Kunststoffen für den Hallenbau. In: Bauen mit Kunststoffen 2/1976, S. 67-78
- Bauzeitung: Englands „New Eden“. In: Bauzeitung 7-8/2001, S. 42-44
- Belz, W.: Zusammenhänge: Bemerkungen zur Baukonstruktion und dergleichen. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln 1993
- Besset, P.; Lyon, D.: Flatternde Häute. In: ARCH+, 107 Jg., 1991, S. 40-41
- Blaser, W.: Werner Sobek, Art of Engineering, Ingenieur-Kunst. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1999
- Blum, H. J.; Compagno, A.; Fitzner, K. u. a. (Hrsg.): Doppelfassaden. Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2001
- BMT (Bauen mit Textilien): Aussichtsreiche Entwicklungsarbeiten zur Klimatisierung von Leichtbauten durch textile Paneele mit Phase Change Material- Verfüllung in den USA. In: Bauen mit Textilien 1997, S. 10
- Bobran Ingenieure; Bobran-Wittfoht, I.; Schlauch, D.: Dämmstoffe für den baulichen Wärmeschutz- (k)einer für alle Fälle/ Thermal Insulation Materials in Building- (n)one for all situations. In: Detail 7/2001, S. 1290-1304
- Bobran, H.W.; Bobran-Wittfoht, I.: Handbuch der Bauphysik: Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen für Schallschutz, Raumakustik, Wärmeschutz, Feuchteschutz. 7. völlig neubearb. Auflage, Braunschweig/ Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft 1995
- Brinkmann, G. (Hrsg.), DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft: Leicht und Weit: Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke, Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 64 „Weitgespannte Flächentragwerke“ der Universität Stuttgart. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1990
- Brux, G.: Vorbote eines neuen Jahrtausends. Das Luxushotel Burj Al Arab

- in Dubai. In: BAUKULTUR, 6/2000, S.6-8
- Bubner, E. (Hrsg.): Membrankonstruktionen - Teil 1. Leichtbaukonstruktionen. Beitr. zur Vortragsveranstaltung Membrankonstruktionen vom 18. Jan. 1979 im Haus d. Technik Essen . Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld 1979
- Bubner, E.; Baier, B.; Koenen, R. u.a. (Hrsg.) : Membrankonstruktionen / 2. Beiträge zur Vortragsveranstaltung vom 12./13. Juni 1980, Haus der Technik Essen, gemeinsam mit dem Fach Konstruktive Gestaltung der Universität Essen, Gesamthochschule. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld 1981
- Bubner, E.: Membrankonstruktionen Verbindungstechniken. 2. Auflage Druckerei Wehlmann, Essen 1999
- Bubner, E.: Der Membranbau. Historischer Überblick, Gegenwart, Ausblick. In: DBZ Deutsche BauZeitschrift, 51. Jg. 4/2003, S.28-31
- Bubner, E.: Bauen mit Membranen. Gestaltungs- und Konstruktionsvarianten aus biegeweichen Materialien. In: DAB DEUTSCHES ARCHITEKTENBLATT, Ausgabe Baden-Württemberg, 37. Jg. 6/2005, S.66-69
- Burghardt, W.; Feist, W.; Geiger, B. u.a.: Energiehaushalt von Bauten, Eine Diskussion, Arcus /14. Verlag Rudolf Müller, Köln 1991
- Burkhardt, B.: Geschichte des Zeltbaus. In: Detail 6/2000, S. 960-964
- Compagno, A.: Intelligente Glasfassaden: Material, Anwendung, Gestaltung. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1999
- Cziesielski, E. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2004, Schwerpunkt: Zerstörungsfreie Prüfungen. Ernst & Sohn, Berlin 2004
- Danner, D.; Dassler, F. H.; Krause, J. (Hrsg.): Die Klima-aktive Fassade. Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden- Echterdingen 1999
- Daniels, K. (Hrsg.): Technologie des ökologischen Bauens - Grundlagen und Maßnahmen, Beispiele und Ideen. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1995
- Daniels, K.: Low Tech - Light Tech - High Tech: Bauen in der Informationsgesellschaft, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1998
- DBZ (Deutsche BauZeitschrift): Zweischalig überspannt - TheatrO in Oberhausen. In: DBZ Deutsche BauZeitschrift, 48. Jg. 7/2000, S.62-65
- Doernach, R. (Hrsg.): Bausysteme mit Kunststoffen. Architektur Forschung und Entwicklung. Deutsche Verlags- Anstalt, Stuttgart 1974
- Ehling, K.: Tageslichtsysteme: lichttechnische Bewertung und Wirtschaftlichkeit. Dissertation 1999, Technische Universität Berlin 2000
- Fanger, P. O.: Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen 1970
- Fischer, L.: Bericht vom 10. Internationalen Techtexsil- Symposium: Fortsetzung aus Bauen mit Textilien, Heft 2/1999, S. 3-8. In: Bauen mit Textilien 3/1999, S.36-39
- Flagge, I.; Herzog-Loibl, V.; Meseure, A. (Hrsg.): Thomas Herzog : Architektur + Technologie. Prestel Verlag, München, Berlin, London, New York 2001
- Gabriel, A.: Weshalb Kunststoff? In: Detail, 42. Jg. 12/2002, S. 1544-1548
- Gengnagel, C.; Barthel, R.: Bewegliche Dächer. In: Detail, 41. Jg. 5/2001, S. 841-846
- Gengnagel, C.: Mobile Membrankonstruktionen; Schriftenreihe des Lehrstuhls für Tragwerksplanung / 12. Dissertation, Technische Universität München 2005
- Gertis, K.; Reiß, J.; Wetzel, C. u.a.: Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 1: Transparente Wärmedämmung. In:

- Bauphysik, 21. Jg. 1/1999, S.1-9
- Geuder, N.: Lichttechnische und thermische Optimierung und Charakterisierung dreier Fassadenverglasungen. Fortschritt-Berichte VDI : Reihe 6, Energietechnik, Wärmetechnik. Dissertation, Universität Würzburg. VDI Verlag, Düsseldorf 2002
- Grimm, F.; Richarz, C.: Hinterlüftete Fassaden - Konstruktionen vorgehängter hinterlüfteter Fassaden aus Faserzement, Karl Krämer Verlag, Stuttgart, Zürich 1994
- Habermann, K.J.: Zelt- und Membranbau. Spurensuche in Süddeutschland. In: Bauwelt, 91 Jg. 6-7/2000, S.38-41
- Hartwig, H.: Konzepte für die Integration selbstregelnder, thermotroper Schichten in moderne Gebäudehüllen zur passiven Nutzung der Sonnenenergie. Dissertation, Technische Universität München 2005
- Hauser, G.: Tragende Außenwände als Wärmespeicher unter Verwendung einer hochwertigen lichtdurchlässigen Wärmedämmung. Bericht RKW-Tagung „Passive Solararchitektur“, Berlin 1982
- Hauser, G.: Passive Sonnenenergienutzung durch Fenster, Außenwände und temporäre Wärmeschutzmaßnahmen - Eine einfache Methode zur Quantifizierung durch k_{eq} -Werte. HLH 34 (1983), H. 3, S. 111-112, H. 4, S. 144-153, H. 5, S. 200-204, H. 6, S. 259-265
- Hauser, G.: Einfluß des Wärmedurchgangskoeffizienten und der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen auf den Heizenergieverbrauch von Gebäuden. - Literaturstudie. Bauphysik 6 (1984), H. 5, S. 180-186, H. 6, S. 207-213
- Hauser, G.: Vergleich des jährlichen Wärme- und Energieverbrauchs von Einfamilienhäusern in Leicht- und Schwerbauweise. Bundesbaublatt 33 (1984), H. 2, S.120-124; Bauen mit Holz 86 (1984), H. 5, S. 293-297; wksb 29 (1984), H. 18, S. 10-15
- Hauser, G.: Einfluß der Fenster auf den Heizwärmeverbrauch von Wohngebäuden. TAB 15 (1984), H. 6, S. 429-432; Glaswelt 38 (1985), H. 1, S. 24-32
- Hauser, G., Hausladen G. (Hrsg.): Energiebilanzierung von Gebäuden. Karl Krämer Verlag, Stuttgart, Zürich 1998
- Hausladen, G. (Hrsg.): Einführung in die Bauklimatik - Klima- und Energiekonzepte für Gebäude, Ernst Verlag, Berlin, 2003.
- Hausladen, G. (Hrsg.): Clima Design. Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können. Callwey Verlag, München 2005
- Hebbelinck, S.: Modulare Membransysteme- auf der Suche nach neuen Anwendungsmöglichkeiten für zugbeanspruchte Konstruktionen. In: Bauen mit Textilien, 1/1999, S.14-17
- Hebbelinck, S.; Mollaet, M.; Haase, J.: From Small Parts to Large Structures. <http://www.tensinet.com/documents/magazines/FromSmallParts.pdf> (12.2003)
- Hegger, M.; Auch-Schwelk, V.; Fuchs, M. u.a. : Baustoff Atlas. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 2005
- Herzog, T.: Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft. Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1976
- Herzog, T.; Magnago-Lampugnani, V.: Aufblasbares in Venedig. In: Baumeister, 74. Jg. 10/1977, S.960-964
- Herzog, T.: Versuche beim Bauen mit Haut und Schaum: Pneumatische Konstruktionen als neuartige Bauteile für leichte Außenwände. In: arcus 6/1984, S. 292-298
- Herzog, T.: Transluzente Bauteile - Anmerkungen zu ihrer Wirkung. In: AL-MANACH, 90/92 Fachbereich Architektur der Technischen Hochschule Darmstadt. Verlag Das Beispiel, Darmstadt 1992
- Herzog, T.; Krippner, R.; Lang, W.: Fassaden Atlas. Birkhäuser Verlag,

- Basel, Boston, Berlin 2004
- Hingerl, K.; Aschauer H.: Transparente Wärmedämmung mit Papierwaben. In: Bauphysik 3/1995, S. 90-93
- Hülsmeier, F.; Petzinka, K. H.: Sanierung der Gebäudehülle, Refurbishment of the Building Envelope. In: Detail 41. Jg. 6/2001, S. 1084-1094
- IBK Darmstadt (Hrsg.): Bauen mit Kunststoffen. Ernst Verlag, Berlin 2001
- Industriebau e.V.: Stahl, Glas und Membranen im Industriebau - Ein Leitfaden für Architekten, Ingenieure und Unternehmen. Konzept u. red. Betreuung: Jola Horschig. Callwey Verlag, München 2003
- Ishii, K. (Hrsg.): Membrane structures in Japan. SPS Publ., Tokyo 1995
- Ishii, K. (Hrsg.): Membrane Designs and Structures in the World. Shin-kenchiku-sha, Tokyo 1999
- Kaltenbach, F.: Künstliche Transparenz (1)/ Artificial Transparency (1). In: Detail 41. Jg. 3/2001, S. 454-460
- Kaltenbach, F. (Hrsg.): DETAIL Praxis: Transluzente Materialien - Glas Kunststoff Metall. 1. Auflage, Edition Detail. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, München 2003
- Kaup, T.: Bauen mit textilen Materialien. In: ARCH+ 107. Jg. 1991, S. 74-78
- Kerschberger, A.: Transparente Wärmedämmung zur Gebäudeheizung. Wirtschaftlichkeit von transparenten Wärmedämmsystemen zur Gebäudeheizung - Systemausbildung von transparenten Dämmsystemen, Randbedingungen und Methodik der Wirtschaftlichkeitsrechnung, Ergebnisse für unterschiedliche Systeme und Anwendungen, Verbesserungsmöglichkeiten, Perspektiven. Dissertation, Universität Stuttgart. 1994
- Kerschberger, A.: Solares Bauen mit transparenter Wärmedämmung - Systemausbildung, Wirtschaftlichkeit, Perspektiven. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1996
- Kerschberger, A.; Platzer, W.; Weidlich, B.: Transparente Wärmedämmung - Produkte, Projekte, Planungshinweise. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1998
- Klein, M.: Baurechtliche Behandlung von Membranbauten. In: DBZ Deutsche BauZeitschrift, 51 Jg. 4/2003, S.84-86
- Koch, K.-M. (Hrsg.): Bauen mit Membranen - Der innovative Werkstoff in der Architektur. Prestel Verlag, München, Berlin, London, New York 2004
- Kornadt, O. (Hrsg.): Gebäude von morgen (Forschungsbericht). Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1997
- Krähling, H.; Mersiowsky, I.: PVC- Fensterprofile; Innovation und Ökoeffizienz als Erfolgsfaktoren nachhaltig zukunftsfähiger Produkte. In: Bauzeitung 55 Jg. 3/2001, S. 54-57
- Krippner, R.: Entwicklung beweglicher Manipulatoren im Bereich der Außenwände mit wärmedämmenden und weiteren Funktionen. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie, TU München - ISOTEG, 2000. Nicht veröffentlicht.
- Kuhn, M.: Glossar zum Leichtbau. In: ARCH+ 107. Jg., 1991, S. 66-69
- Künzel, H.: Die Bedeutung von Schäumhaut und Dämmschichtdicke für das Feuchteverhalten von extrudierten Polystyrol- Hartschaumplatten. In: Bauphysik 17 Jg. 1/1995, S.8-10
- Lang, W.: Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Häuser unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung von Solarenergie. Dissertation, Technische Universität München 2005

- Lehnert, S.: Folien für Fassaden und Dächer- drei Beispiele. In: DBZ Deutsche BauZeitschrift, 48. Jg. 7/2000, S.78-81
- Licht: Eine Arena der Sinne. Dreifarbige Lichtspiele zaubern tolle Effekte auf die größte Membranhülle der Welt an der Münchener Allianz-Arena. In: LICHT, 57. Jg. 7-8/2005, S.614-619
- LGT (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie TU München): Materialspezifische Eigenschaften von Folien und Geweben. In: Sonderthemen Baukonstruktion: Materialspezifische Technologie und Konstruktion - Gläser, Häute und Membranen, Teil 1 Grundlagen. TU München 1997-98. Nicht veröffentlicht.
- LTW (Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung TU München): Flächen- und Raumtragwerke. Lehrunterlagen 2002. Nicht veröffentlicht.
- Ludwig, D.: Transparente Wärmedämmung - Verschattung und thermodynamische Risiken bei der Integration in die Baustruktur. Fortschrittsberichte VDI / 4: Bauingenieurwesen. Dissertation, Technische Universität Berlin. VDI Verlag, Düsseldorf 1997
- Marko, A.; Braun, P. (Hrsg.): Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden. Springer, Berlin, u.a. 1997
- Mengedoht, G.: Untersuchungen an einem Testzellen-Gebäude zum Einsatz von Simulationsrechnungen bei der Planung von Büro-Gebäuden mit transparent wärmegeprägten Massivwand-Fassaden. Dissertation, Universität Karlsruhe 1995
- Meyer-Bohe, W.: Fassaden: Bekleidung, Verblendung, Hinterlüftete Außenwände. Verlagsanstalt Alexander Koch, Stuttgart 1975
- Miloni, R. P.: Umhüllte Paradiese. Membrantechnik am Beispiel Eden-Projekt in Cornwall GB. In: FASSADE, FACADE, 1/2002, S.5-13
- Moritz, K.: Membranstoffe im Hochbau In: Detail, 40. Jg. 6/2000, S.1050-1058
- Moritz, K.; Barthel, R.: Transparente Architektur - Bauen mit ETFE-Folien In: Detail, 42. Jg. 12/2002, S.1616-1620
- Moritz, K.: Die Stadionhülle der Allianz Arena - Bauweise der ETFE-Folienneus. In: Detail, 45. Jg., 9/2005, S. 976-980
- Oesterle, E. (Hrsg.): Doppelschalige Fassaden: Ganzheitliche Planung-Konstruktion, Bauphysik, Aerophysik, Raumkonditionierung, Wirtschaftlichkeit. Verlag Callwey, München 1999
- Off, R.: Ein neuartiger Verbundbaustoff aus Membranen und Schäumen. In: Baukultur 2/1999, S.10-12
- Otto, F.: „...noch vieles ist möglich...“-Frei Otto zur Zukunft des Zeltbaus, „... there's still plenty of scope...“- Frei Otto on the Future of Tent Construction. In: Detail 40. Jg. 6/2000, S. 965-970
- Pause, B.: Development of New Panel Systems with Phase Change Material for Air- conditioning of Buildings. Techtexil Symposium, Frankfurt 1997
- Pfammater, U.: In der Zukunft gebaut - Bautechnik- und Kulturgeschichte von der Industriellen Revolution bis heute. Prestel Verlag, München, Berlin, London, New York 2005
- Pistohl, W.: Handbuch der Gebäudetechnik / 2: Heizung, Lüftung, Energiesparen, 3. neubearb. und erw. Auflage. Werner Verlag, Düsseldorf 2000
- Pistohl, W.: Handbuch der Gebäudetechnik: Planungsgrundlagen und Beispiele, 5. Auflage. Werner Verlag, Düsseldorf 2005
- Platzer, W. J.: Solare Transmission und Wärmetransportmechanismen bei transparenten Wärmedämmmaterialien, Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 1988
- Platzer, W. J.: Transparente Wärmedämmung (TWD) im Wohnungsbau. In: Erneuerbare Energie 1/1994, S. 21-30

- Pohl, G.: Technologie und Medienzentrum in Erfurt: Gebäude mit Zukunft. In: Intelligente Architektur 11-12/2002, S. 22-29
- Powell, K.; Moore, R. (Hrsg.): Struktur, Raum und Haut. Nicholas Grimshaw & Partners, Bauten und Projekte. Ernst Verlag, Berlin 1993
- Queffélec, D.: Evolution of the Architecture and Engineering of Fabric Membrane Structures in France. In: Bauen mit Textilien 3/2000, Nr.4, S. 12-17
- Rein, A.: Seilnetzkonstruktionen für Dächer und Fassaden. In: Detail 39. Jg. 4/1999, S. 679-682
- Rein, A.; Wilhelm, V.: Das Konstruieren mit Membranen. In: 40. Jg. Detail 6/2000, S. 1044-1049
- Scheuermann, R.; Boxer, K. (Hrsg.): Tensile architecture in the urban context. Butterworth Architecture, Oxford e.a. 1996
- Schittich, C.; Staib, G.; Balkow, D. u.a.: Glasbau Atlas. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1998
- Schittich, C. (Hrsg.): Gebäudehüllen - Konzept, Schichten, Material. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 2001
- Schmid, J.: Transparente Wärmedämmung in der Architektur: Materialien - Technologie - Anwendung. Müller Verlag, Heidelberg 1995
- Schmid, G.: Bauen mit Membranen, Teil 1: Membran- und Folienwerkstoffe. In: Architektur 06/2004, S. 58-63; Teil 2: Wärmedämmung von Membranen und Folienkonstruktionen. In: Architektur 07/2004, S. 62-66; Teil 3: Licht und Akustik. In: Architektur 08/2004, S. 62-66; Teil 4: Brandschutz; In: Architektur 09/2004, S. 49-53
- Schock, H.: Segel, Folien und Membranen - innovative Konstruktionen in der textilen Architektur. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1997
- Schulitz, H.C. (Hrsg.): Industriearchitektur in Europa, Constructec-Preis 1994. Ernst Verlag, Berlin 1994
- Schulz, G.: Innovative zwei- und mehrschalige Membranbauelemente- ein revolutionierender Schritt in der textilen Architektur. In: Bauen mit Textilien 1997, S. 28-32
- Sobek, W.; Speth, M.: Von der Faser zum Gewebe. Textile Werkstoffe im Bauwesen. In: db deutsche bauzeitung, 127. Jg. 9/1993, S.74-81
- Sobek, W.: Technologische Grundlagen des textilen Bauens. In: Detail, 34. Jg. 6/1994, S. 776-779
- Sobek, W.; Speth, M.: Textile Werkstoffe. In: Bauingenieur, 70. Jg., 6/1995, S. 243-250
- Steimle, F. (Hrsg.): Handbuch Haustechnische Planung. Krämer Verlag, Stuttgart 2000
- Thornton, J.: Getting Design on Site. The design process, performance and construction of membrane structures are analysed in the second of two articles. You can't just draw the shape and build it. In: the architects' journal, 23. Jg. 9/1992, S.51-55
- Tritthardt, J.; Ayrle, H.: Textile Fassadensysteme. Perspektiven eines neuen Baukonzepts. In: Baukultur 2/1999, S.14-19
- Wallner, G.: Kunststoffe für die transparente Wärmedämmung: polymerphysikalische Einflüsse und Modellierung. Dissertation, Montanuniversität Leoben, (A) 2000
- Wallner, G.; Lang, R.; Schobermayr, H. u.a. : Entwicklung und Anwendungsdemonstration eines neuartigen transparenten Wärmedämmsystems basierend auf Kunststofffolien. Leobener Symposium POLYMERIC SOLAR MATERIALS, Leoben, (A) 2003
- Wagner, A.: Transparente Wärmedämmung an Gebäuden - Ein Informationspaket. Verlag TÜV, Rheinland, Köln 2002

Werner, H.: Falten im Leichtbau. In: ARCH+ 131 Jg., 29/1996, S. 82-85

Wigginton, M.: Glas in der Architektur. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1997

Wilke, W.: Transparente Wärmedämmmaterialien in der Architektur - Anwendung, thermisches Systemverhalten und optimale Raumklimakonditionierung. Dissertation, Universität Karlsruhe 1991

Zürcher, C.; Frank, T.: Bauphysik - Leitfaden für Planung und Praxis; Bau und Energie / 2. vdf. Hochschulverlag, Zürich, Teubner, Stuttgart 1998

Zwiener, G.: Ökologisches Baustoff-Lexikon: Daten, Sachzusammenhänge, Regelwerke. Verlag Müller, Heidelberg 1994

Abbildungsnachweis

http://www.aspekt1.net/ms/fo_ref/projekte.html (1997)
Abb. 1-1

<http://www.foiltec.de/deu/index.php3> (2003)
Abb. 2-18

<http://www.allianz-arena.de> (02/ 2003)
Abb. 2-19

<http://www.solarserver.de/service/strahlungsdaten.html> (01/ 2004)
Abb. 4-4

<http://www.wacotech.de> (2004)
Abb. 5-27, 6-2

Datenblätter, Firma Nowofol
Abb. 5-11, 12

Herzog e.a., 2004, S.21
Abb. 4-5

Kaltenbach, 2003, S. 75
Abb. 5-5

Kerschberger, 1996, S.104
Abb. 4-3

Kerschberger, 1998, S.11, 12
Abb. 5-13, 14

Koch, 2004, S. 35, 43, 50, 51, 52, 53, 54
Abb. 1-2, 3; 2-2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14

Ludwig, 1997, S.17
Abb. 5-17

Milioni, 2002, S. 5
Abb. 1-4

Moritz, 2005, S. 976
Abb. 2-17

Schittich, 2001, S. 29
Abb. 1-5

Schmid, 1995, S.61
Abb. 5-23, 25

Schulz, 1997, S. 28
Abb. 2-3

Wagner, 2002, S.21
Abb. 5-18

Wallner, 2000, S.225
Abb. 5-21

Wilke, 1991, S.10, 44, 2
Abb. 5-16, 24, 6-21

Die Abbildungen 6-23 und 6-24 stammen von Dipl.-Phys. Erwin Lindauer am Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen

Die übrigen Abbildungen stammen von der Autorin