

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der
Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt
(<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the
main library of the Vienna University of Technology
(<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

DIPLOMARBEIT

ZUR SYSTEMATIK UND STRUKTUR VON MEMBRANFASSADEN UND MEMBRANHÜLLEN

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des
akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Seidel
E253 Institut für Architektur und Entwerfen

Eingereicht an der
Technischen Universität Wien
E600 - Architektur und Raumplanung

von

0227451
Anna-Vera Deinhammer
Koppstraße 62/32-34, 1160 Wien
Wien, März 2011

Für meinen lieben Papa, der immer bei mir ist.

Danksagung

In erster Linie bedanke ich mich bei meinen Eltern Isolde und Richard Deinhammer, die mich zu einem wissensdurstigen, kritischen Menschen erzogen haben. Sie haben hartnäckig an mich geglaubt, selbst dann – oder besonders dann – als ich es nicht mehr tat.

Dank gilt meinem Gefährten Philipp Wirth, der mir freudig in die Gedankenwelt der Architektur gefolgt ist anstatt davor stehen zu bleiben um auf meine Rückkehr zu warten, ebenso meinem lieben Freund und Kollegen Mina Yaney, der mich in ebendieser getroffen und unheimlich inspiriert hat. Unvergessen ist auch das gemeinsame Lustwandeln auf dem Boulevard der Geisteswissenschaft mit meiner Gefährtin Andrea Romstorfer.

Besonders bedanke ich mich bei Michael Seidel für seine schonungslose Kritik, die das Salz in der Suppe war, die Arbeit an diesem Buch hat gerade deshalb soviel Spaß gemacht.

Kurzfassung

Im chemischen und biologischen Zusammenhang definiert sich die Membran als eine durchlässige Abgrenzung zwischen einem System und der Umwelt.

Überträgt man dies wörtlich in die Architektur, klärt sich die Bedeutung:

Membrane Architektur verwendet Segel, Kissen, Folien, etc. auf verschiedene Arten um ein System abzutrennen, vor den Umwelteinflüssen – Wind, Regen, Schnee, Sonne - zu schützen, ein Territorium abzugrenzen oder ein Bestehendes zu ergänzen.

Das Tragwerk besteht beispielsweise aus Stahlstützen, Stahlseilen und dem Flächenelement Membran. Die Membran muss vorgespannt werden um eine Grundstabilität zu erreichen. Das System ist auf Zug beansprucht.

Verwendung finden Membrane unter anderem in Stadien, Platzüberdachungen, Ausstellungszentren, Flughäfen, Ausstellungspavillons und - darauf liegt der Fokus dieser Arbeit - als Fassade bzw. Hülle. Entsprechend der Verwendung unterscheiden sich Membrankonstruktionen stark in Größe und Art der Ausführung. Die Membranarchitektur erfordert

die Berücksichtigung des Zusammenwirkens vieler Komponenten. Da sie das äußere Erscheinungsbild eines bestehenden Gebäudes, eines Straßenzugs oder der unmittelbaren Nachbarschaft grundlegend ändern kann, steht am Anfang die prinzipielle Auseinandersetzung mit der Funktion der Hülle und Fassade im Stadt- und Straßenraum bis hin zu den ihr innewohnenden Schutzfunktionen und Nutzungsmöglichkeiten.

Da bei der Thematik „Bauen mit biegeweichen Tragelementen“ alle Parameter für eine uneingeschränkte Funktionalität reibungslos ineinander greifen müssen sollte sich der Entwerfer auch mit diesen nicht direkt mit der Architektur verbundenen Themen beschäftigen. Interdisziplinäres Denken ist unerlässlich und deshalb im Hochbau eine Grundkonstante.

Der Hauptteil der Arbeit widmet sich eingangs den Anforderungen an das Entwerfen mit Membranen. Sozusagen eine Sammlung der wichtigsten Punkte, derer sich der Entwerfer bewusst sein sollte bevor der schöpferische Prozess beginnt. Weiters finden sich Informationen über den Aufbau von ein- bzw.

mehrschaligen Membranfassaden hinsichtlich Nutzeranforderungen bezüglich der klimatischen Umgebungsbedingungen, Wärmeschutz, akustischen Aspekten und Brandschutz sowie membranummüllten Gebäudesystemen.

Abschliessend wird auf die möglichen Strukturen eingegangen. Eine Auswahl an gebauten Beispielen veranschaulicht die theoretischen Ausführungen.

„Das Schlagwort »das Zweckmäßige ist auch schön« ist nur zur Hälfte wahr. Wann nennen wir ein menschliches Gesicht schön? Die Teile eines jeden Gesichts dienen einem Zweck, aber nur wenn sie vollkommen sind in Form, Farbe und wohlausgewogener Harmonie, verdient das Gesicht den Ehrentitel »schön«. Das gleiche gilt für die Architektur. Nur vollkommene Harmonie in der technischen Zweck-Funktion sowohl wie in den Proportionen der Formen kann Schönheit hervorbringen. Und das macht unsere Aufgabe so vielseitig und kompliziert.“
(Walter Gropius)

„Das Konstruieren mit Membranen nimmt im Bauschaffen immer noch eine untergeordnete Rolle ein. Die Ursachen sind zum einen nicht unerheblichen Teil darin zu suchen, dass der technologisch richtige Umgang mit dieser Bauweise eher als Spezialdisziplin gehandelt wird und in der Anwendung letztendlich nur wenigen Spezialisten und Fachfirmen vorbehalten scheint.“

Vgl. (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2000) S. 1044

Inhalt

1.	Einführung	11
1.1	Fassade & Hülle im Kontext der Öffentlichkeit	12
1.2	Gestalten mit Membranen - eine Verbindung von Kreativität & Technik.....	14
2.	Funktionen der Fassade & Hülle in der Architektur.....	19
2.1	Hochbautechnische Anforderungen aus bauphysikalischer Sicht	20
2.2	Fassade und Tragwerk.....	25
2.3	Ausstattungsmöglichkeiten	26
3.	Kunststoff - materialtechnische Grundlagen	29
3.1	Membranwerkstoffe in Bezug auf den werkstoffgerechten Entwurf	32
3.1.1	Gewebe.....	33
3.1.2	Folien	36
4.	Anforderungen an das Entwerfen mit Membranen	39
4.1	Formfindung und Tragverhalten	39
4.2	Anforderungen an das Entwerfen mit Geweben.....	49
4.3	Anforderungen an das Entwerfen mit Folien	56
5.	Aufbau von Membranfassaden.....	63
5.1	Nutzeranforderungen bezüglich Bauphysik	63
5.1.1	Klimatische Umgebungsbedingungen.....	63
5.1.2	Wärmeschutzstrategien	67
5.1.3	Akustische Aspekte	72
5.1.4	Brandschutz und Brandverhalten	73
5.1.5	Membranhüllte Gebäudesysteme.....	74
5.2	Die einschalige Membranfassade.....	78
5.3	Die mehrschalige Membranfassade	80
6.	Strukturen von Membranfassaden.....	83
6.1	Modulare Strukturen	84
6.1.1	Form und Vorspannung	86
6.1.2	Gebaute Beispiele.....	89
6.2	Weit gespannte Strukturen	98
6.2.1	Form und Vorspannung	99
6.2.2	Gebaute Beispiele.....	103
6.3	Luftgestützte Strukturen.....	107
6.4	Ausblick und Vision	114
	Literatur- und Abbildungsverzeichnis.....	117

1. Einführung

Die typischen haptischen und visuellen Eigenschaften von Kunststoff - das heißt Struktur, Textur und Faktur - können sehr interessant für den architektonischen Entwurf sein. Das Spiel mit Licht, Transluzenz oder Blickbezügen bzw. das Entgrenzen von innen und außen um damit vielfältige, wandelbare Beziehungen zu erzeugen sind mitunter das Reizvollste an dem Material Kunststoff.

Architekturtheoretisch wird mit dem Einsatz architekturfremder Materialien bzw. die Metamorphose und Verfremdung traditioneller Baustoffe mit Hilfe immaterieller Elemente wie Fotografie eine unmittelbare, kontextunabhängige Architektursprache manifestiert. Das Material an sich ist mittlerweile zum Informationsträger avanciert. Ganz im Sinne Peter Sloterdijks nutzen Leichtigkeit, Beweglichkeit und die Vielgestaltigkeit der Kunststoffe das Verhältnis des Menschen zur Welt zu bestimmen.

In der Baubranche setzte eine erste Kunststoff-Euphorie in den späten 1950er Jahre ein. Die damalige Entwicklung brachte Häuser mit Außen- und Innenwänden oder Sanitärzellen bzw. Einrichtungen aus Kunststoff hervor.

Genau diese Veränderung führt zu einer regelrechten Revolution im Form-Material-Verhältnis, besser gesagt zu dessen Auflösung in allen Anwendungsbereichen.

Bis in die 1970er Jahre hielt diese Situation an. Kunststoffe begannen die Überfluss- und Wegwerfgesellschaft zu prägen.

Nach und nach, unterstützt durch diverse Umweltskandale, verlor das Material an Sympathien - zeitweise konnte man Kunststoff beinahe als Material non grata bezeichnen. Als naturfernes - naturfeindliches - Material rückte es immer mehr in den Hintergrund.

Bis heute haben sich die Kunststoffmaterialien und deren Verarbeitung sowie Recycling radikal verändert oder wurden gänzlich neu entwickelt.

In beinahe allen Bereichen unseres Lebens findet man Kunststoffe - als Verpackungsmaterial, in der Medizin, in Fahrzeugen, im Haushalt, in unseren Möbeln, in elektronischen Geräten aller Art, am Bau, selbst in der Landwirtschaft. Diese Liste ließe sich endlos fortsetzen.

Heute muss klar sein, dass die moderne Gesellschaft nicht ohne Kunststoff existieren kann.

Der Weg zu der momentan positiven Stimmung und dem besonderen Interesse gegenüber dem Membranbau wurde von einigen Rückschlägen begleitet.

Das enge Verhältnis von Membranbau und dessen Materialien - zum großen Teil das Material Kunststoff - führte unter anderem aufgrund der bereits genannten Faktoren zu einem gesellschaftlichen gesellschaftlichen Untergang.

Probleme mit der Dauerhaftigkeit der Gebäude und die damit verbundenen Komplikationen in der Rückführung der entstandenen Abfälle in den Materialkreislauf taten ihr Übriges.

Der Wandel der Entwurfskonzepte - nicht zuletzt durch den Einsatz computerunterstützter Entwurfsmethoden - und die sich transformierende Auffassung von Architektur an sich begünstigt die Rückkehr der Kunststoffe in den sichtbaren Materialkanon der zeitgenössischen Architektur.

„Der Beruf des Architekten ist eine abenteuerliche Tätigkeit: Ein Grenzberuf in der Schwebe zwischen Kunst und Wissenschaft, auf dem Grat zwischen Erfindung und Gedächtnis, zwischen dem Mut zur Modernität und echter Achtung der Tradition.“
(Renzo Piano)

1.1 Fassade & Hülle im Kontext der Öffentlichkeit

Die Fassade oder Hülle ist einerseits Teil des Gebäudes, also die Schwelle von Außenraum / Innenraum bzw. die Trennung von öffentlich und privat / halb-öffentlich, andererseits Teil der Straße, des öffentlichen Raumes. Im Entwurfsprozess sind deshalb nicht nur die Auswirkungen auf den Benutzer im Gebäude – wie Belichtung, Klima oder ähnliches – zu berücksichtigen, sondern auch der städtebauliche Kontext:

Wie verändert sich das äußere Erscheinungsbild, die Wirkung des Gebäudes und des dazugehörigen Ensembles?

Wie geht der Entwurfende mit dem *genius loci* – der Atmosphäre eines Ortes – um?

Die Hülle bzw. die Fassade ist eine Grenze, die mit der Umwelt korrespondiert – im physischen wie im intellektuellen Sinn. Der Architektur wohnt eine gesellschaftliche und öffentliche Dimension inne, was bedeutet, dass nicht immer die funktionale Belegung zur Diskussion steht, sondern die spezifische Stellung im städtebaulichen Kontext. Das

Volumen, die Stellung und die Fassadengestaltung bestimmen gemeinsam die Rolle des Gebäudes im Konglomerat.

Farbigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Plastizität, Öffnungsanteil – um nur ein paar Begriffe zu nennen – prägen das zukünftige Erscheinungsbild.

Fassaden und Hüllen sind kulturelle Bedeutungsträger, die sich teils bewusst, teils unbewusst der öffentlichen Diskussion stellen. Das Abwägen der inneren und äußeren Anforderungen muss deshalb mit großer Sorgfalt betrieben werden. Eine Fassade kann viele Haltungen widerspiegeln – beginnend mit der direkten Ablesbarkeit der inneren Struktur und Nutzung von außen bis zur absoluten Autonomie der Fassade oder Hülle zum Innenleben des Objekts.

Im Zusammenhang mit Öffentlichkeit wurde in den letzten Jahren der Begriff „Bilbao-Effekt“ geprägt. Das bedeutet, dass durch die Fassade als Identitätsstifter ganze Städte bzw. ganze Stadtteile mit einem einzelnen Bauwerk aufgewertet oder zumindest geprägt werden können. Frank O. Gehry's Guggenheim Museum in Bilbao wird mehr als begehbare Skulptur begriffen

und hat sich als Hülle von seinem Inhalt emanzipiert. Für Kritiker ist das Bauwerk ein weiterer Teil Gehry's Corporate Identity nach dem Motto „es wird eine Marke gekauft, die Besucher garantiert“. Für die Stadt als Profiteur des Neubaus, dürfte die Rechnung aufgegangen sein.

Wie bei den meisten Themen der Architektur kann der „Bilbao-Effekt“ sowohl ein identitätsraubendes als auch ein identitätsstiftendes Mittel sein. Identitätsraubend in dem Sinne dass ein Stadtviertel in eine Kulisse für das Landmark verwandelt wird, d.h. die Umgebung reagiert mehr auf den neuen Baukörper als dieser selbst. Identitätsstiftend deshalb, weil – wie im Beispiel von Valencia, die „Ciutat de les Arts i les Ciències“ von Santiago Calatrava – traditionelle Bauformen oder Materialien neu interpretiert und in einem Komplex zusammengefasst werden können, der ebenfalls skulptural spektakulär ist. Anders gesagt wirkt sich der Bilbao Effekt je nach Architekturauffassung unterschiedlich auf die Identität der Umgebung aus. Diese Auseinandersetzung betrifft in sehr großem Maße die Membranarchitektur. Durch die Möglichkeit großer Spannweiten und den damit verbunden spektakulären



Abb. 1 Guggenheim Museum, Bilbao / Frank O. Gehry



Abb. 2 Ciutat de les Arts i les Ciències, Valencia / Santiago Calatrava

Formen kann sich der Charakter eines Ortes grundlegend ändern.

Ein Beispiel ist der Urban-Loritz-Platz in Wien (Architekten Tillner & Willinger ZT GmbH)

Wo vorher U-Bahn, Autobus und Straßenbahn für Fußgänger schlecht miteinander verbunden waren, bzw. der Platz als solches im Autolärm des Neubaugürtels vollkommen unterging, markiert nun eine Membranüberdachung einen wichtigen innerstädtischen Verkehrsknoten: Eine witterungsgeschützte „Großhaltestelle“ für die Fußgänger die nur durch den querenden Verkehr unterbrochen ist. Damit wurde den Fußgängern ein Zentrum an einem vom Autoverkehr dominierten Ort geschenkt.

Der „schmutzige Gürtel“ wirkt durch die helle Membran gesäubert, die im Viertel dahinter liegende Stadthalle – eine der größten Veranstaltungshallen Wiens – hat nun einen würdigen Treffpunkt für die anreisenden Besucher erhalten. Die beinahe unüberwindbare Schwelle Neubaugürtel ist perforiert, der außen liegende 15. Bezirk rückt näher an die Innenstadt.

Insbesondere für Entwürfe im Bestand sind mögliche Metamorphosen des Ortes zu bedenken. Der Ansatz der vor Kurzem vom australischen Architekturbüro Laboratory for Visionary Architecture (LAVA) postuliert wurde, nämlich hässlichen Zweckbauten vergangener Generationen eine neue, schönere, ökologischere Verpackung zu geben, ist äußerst verführerisch.

Beispielhaft für deren Visionen ist der „Water Cube“ in Peking. Für die Olympischen Spiele 2009 gestaltete LAVA gemeinsam mit Bauingenieuren die charakteristische blaue, leuchtende Außenhaut. In diesem Fall ist das Ergebnis ein klassischer Vorher-Nachher Effekt, ein gelungenes Remake.



Abb. 3 Überdachung Urban-Loritz-Platz, Wien / Architekten Tillner & Willinger ZT GmbH



Abb. 4 Schwimmsporthalle „Water Cube“, Peking / LAVA - Laboratory for Visionary Arts

1.2 Gestalten mit Membranen - eine Verbindung von Kreativität & Technik

Wie Prof. Dipl. Arch. Marc Meyer, Professor für Architekturtheorie an der Hochschule für Technik Zürich, 2001 postulierte, ist eines der größten Themen in der Architektur die Oberfläche.

Materialien werden verändert, beinahe bis zur Unkenntlichkeit verfremdet - wie mittels Glasfasern „durchscheinender“ Beton - teilweise ihrer innewohnenden Bedeutung beraubt. Was einmal massiv und gewichtig war und wirkte, kann heute leicht und luftig daherkommen. Geschwungene „Betonschalen“ und aufgrund ihrer Größe sehr verdichtet wirkende Stahl-Glas-Skelettbauten - beinahe alles ist möglich. Man kann behaupten, wir befinden uns momentan in einer Phase in der die Materialtechnik jeden Bereich der Architektur durchdringt.

Die neue „Oberflächlichkeit“ der Architektur ist mehr als bloßes Design oder „kunstvoll tätowierte Kisten“¹. Die Architektur hat nach Jaques Herzog eine neue Dreieinigkeit:

Struktur - Raum - Fassade

Genau diese Dreieinigkeit hat besonders die Membranarchitektur inne.

Aber ist dieses Architekturverständnis wirklich neu? Bezogen auf Membrankonstruktionen, ist das Entwerfen mit biegeweichen Tragelementen tatsächlich ein neuer Trend?

Ein Rückbesinnen auf Gottfried Sempers (1834 - 1879) Schriften zeigt, dass dem nicht so ist. Er führt sämtliche künstlerische Techniken auf die Textilkunst zurück:

„Unter diesen beiden Künsten (Textile Kunst und Keramik; mm/hg) gebührt aber wieder der textilen Kunst der unbedingte Vorrang, weil sie sich dadurch gleichsam als Urkunst zu erkennen gibt, dass alle Künste, die Keramik nicht ausgenommen, ihre Typen und Symbole aus der textilen Kunst entlehnten, während sie selbst in dieser Beziehung ganz selbständig erscheint und ihre Typen aus sich heraus bildet oder unmittelbar der Natur abborgt.“¹

Für Semper hat die Architektur ihren Ursprung im Pferch und im Zelt. Man könnte sagen, für

ihn war Architektur eine Art von Bekleidung. Daher kommt wahrscheinlich auch seine überlieferte Überzeugung, dass die Hauptaufgabe nicht tragender Wände wäre daran Teppiche anzubringen bzw. eine Trennwand ein metaphorischer Wandteppich ist.

Während Semper teilweise in seiner Oberflächengestaltung die Nähe zur textilen Ornamentik suchte, kehrt die Membranarchitektur wieder zur Semperschen Urform der Architektur zurück. Das Membranmaterial wirkt als das was es ist: eine leichte, massarme nicht ultimative Grenze zur Umwelt.

¹ [Meyer & Geilinger]



Abb. 1 Deckenansicht des Palais Kesel Oppenheim, Dresden / Gottfried Semper

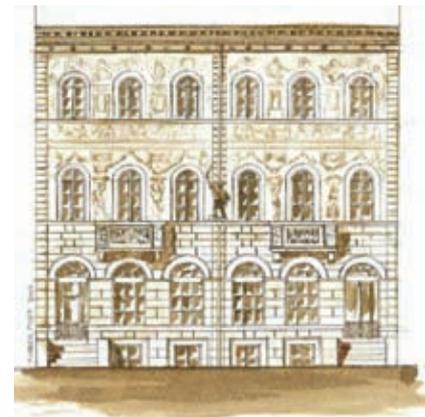


Abb. 2 Skizze Fassadengestaltung / Gottfried Semper

Mehr als ein Jahrhundert später setzte sich die Architekten-Künstler-Gemeinschaft Haus-Rucker-Co (Europa) bzw. Haus-Rucker-Inc. (USA) mit textiler und biegeweicher Architektur auseinander. Insbesondere mit der Problematik:

Architektur - Habitat - Umwelt

1968 sorgte die Gruppe mit der Installation „Gelbes Herz“ für Aufsehen. Man wollte die reale Umwelt für bestimmte Zeitabschnitte verlassen und sich einer neuen Art Entspannung durch die besonderen optischen und akustischen Reize im Inneren hingeben. Es ist zu erkennen, dass zwar der Einsatz von Folien und beschichteten Textilien relativ neu war - also die Materialität - der Wunsch nach einer gewissen „Ur-Geborgenheit“ jedoch zählt zu den ureigenen Bedürfnissen der Menschheit. Man könnte sich fragen, ob vielleicht Architektur nicht nur Bekleidung sein kann, sondern ein Rückbesinnen in den Mutterleib. Sozusagen das vollständige „Eingehüllt-Sein“.

„Rund und glatt, leuchtend, schimmernd, dick und weich - das gelbe Herz. [...] Drinnen den Regen draussen sehen und hören rundherum und trotzdem nicht nass. [...] Draussen die Hitze

- schwül - und von drinnen die Sonne bloss schön, nicht heiß. [...] Die Natur neu erleben, das ist sich selbst neu erleben.“²

Aus diesem Zitat ist die Sehnsucht nach einer haptischen und klimatischen Trennung von der Umwelt ohne die optische Verbindung zu verlieren herauszulesen. Jetzt, 42 Jahre später sind wir dank der Materialforschung und verbesserter Konstruktionsmöglichkeiten diesem Bedürfnis einen Schritt näher gekommen.

Während sich das „Gelbe Herz“ dem Thema Kissenkonstruktionen annimmt, setzt sich das Projekt „Cover - Überleben in einer verschmutzten Umwelt“ mit membranumhüllten Gebäudesystemen auseinander.

Das 1921 von Ludwig Mies van der Rohe kreierte Einfamilienhaus Lange erhielt 1971 eine Hülle aus weißem, beschichteten Gewebe. Die Traglufthalle überdachte auch einen Teil des mittels Terrassen gegliederten Gartens.

„Im Inneren bewirkte das gleichmäßig von allen Seiten durch die Hülle gefilterte Licht eine fahle Treibhausatmosphäre, in der sich nicht nur die Pflanzen des Gartens zu verändern begannen, sondern auch die Proportionen

des Hauses selbst und seine Fassaden, die gänzlich entmaterialisiert nun flach-papieren erschienen.“³

Beide Projekte setzen sich mit dem Schutz vor den Umwelteinflüssen auseinander. Das „Gelbe Herz“ sollte dem verletzlichen Menschen die Möglichkeit geben diese unmittelbar - aber geschützt - zu erleben. Drei Jahre später wollte man sich gänzlich von ihnen trennen, da die Umwelt etwas substanziiell Bedrohliches darstellte. Die Gemeinsamkeit liegt in der haptisch unüberwindbaren Grenze zur Aussenwelt, welche durch die geringe Materialmasse allerdings nicht gänzlich negiert wird.

Gesellschaft - Architektur - Mode

Weitere 30 Jahre später setzt die britische Künstlerin Lucy Orta mit dem Projekt dwelling X ein weiteres Statement zur gegenwärtigen Gesellschaft und deren Architekturauffassung.

Sie dekonstruiert die kulturelle Konstruktion des „Zuhause“ bzw. des Fehlen desselben - der „Obdachlosigkeit“. Ihre Arbeit basiert auf einer Fusion aus Mode und Architektur.

Mit den von ihr bevorzugten Materialien - Synthetika aller Art mit



Abb. 6, 7 „Cover - Überleben in einer verschmutzten Umwelt“ / Haus-Rucker-Co

„gelbes Herz“ / Haus-Rucker-Co im UZS
Abb. 3 Ausstellungsfoto
Abb. 4 Publikationsdokumentation
Abb. 5 Modellaufnahme

2 Vgl. (Ortner, et al., 1968)

3 Vgl. (Ortner)

den typischen leuchtenden Farben der High-Tech-Outdoor-Mode - konstruiert sie Privatsphären und kollektive Strukturen. Die Grenzen setzt eine hoch performative Membran - im wörtlichen wie auch im übertragenden Sinn.

Die Künstlerin vertritt die Meinung, dass in unserer, gegenwärtigen Gesellschaft der Mensch sein Zuhause mittels den gegebenen soliden und massiven architektonischen Strukturen definiert. Wird er aus diesem Kontext gerissen, verschwinden die sozialen Grenzen und verpuffen.

2004 ging Lucy Orta eine Kollaboration mit dem Ingenieurbüro Atelier One ein um das Projekt dwelling X - an dem sie seit den 1990iger Jahren arbeitete - zu materialisieren.

Es handelt sich um eine Serie von Interventionen im öffentlichen Raum. Das Ziel ist dem Betrachter und dem Benutzer Möglichkeiten zu geben sich mit Hilfe von Unterschlupfmöglichkeiten vor sozialer Bedrängnis, sozialem Leid oder einem unpassenden sozialen Umfeld zu schützen, bzw. sich davon zu abzugrenzen. Quasi eine Interpretation der legendären Siegfried'schen Tarnkappe.

Beginnend mit architektonischen Konstrukten wie ein Truck, der mit einer wild verschlungenen Konstruktion ausgestattet ist, die bei Bedarf mit einer Membran überspannt wird.

Über Zelte, die aus verschiedenen Kleidungsstücken gefertigt sind. Ärmel von Jacken dienen dem „Begreifen“ der Umwelt ohne die schützende Blase zu perforieren. Bis hin zu „Body Architecture“ - ein von der Künstlerin geprägter Begriff. Miteinander verbundene Schutzanzüge bilden kollektive Strukturen in denen alle gemeinsam jeder für sich bleibt und so eine doppelte Grenze zur Umgebung bilden. Die physische Grenze durch den dünnen Stoff und eine kollektiv erlebte Abgrenzung durch die Uniformierung und Verbundenheit.

Genau an dieser Stelle möchte ich einhaken, denn besser als mit Lucy Orta's Arbeit könnte man das Wesen der Membranarchitektur nicht beschreiben.

Diese Art der Architektur bedient nicht das traditionelle Architekturverständnis von Masse welche das Volumen für alle Zeiten definiert, sondern ermöglicht eine teilweise entgrenzte, jedenfalls flexiblere und physisch leichtere Architektur. Die Masse ist immer

noch vorhanden, allerdings nicht mehr so sehr im physischen Sinne, sondern im Übertragenen:

Es ist eine genaue Planung mit einer Vielzahl an Experten nötig um die Vision dieser eher jüngeren Architekturauffassung zu verwirklichen.

Abb. 8, 9, 10
Antarctica Lucie + Jorge orta in Mailand /
Projekt dwelling X





Abb. 11, 12
Antarctica Lucie + Jorge orta in Mailand / Projekt nexus



2. Funktionen der Fassade & Hülle in der Architektur

Zu Beginn werden die Wörter Hülle, Fassade, Membran definiert um deren wörtliche Bedeutung in dieser Arbeit festzulegen.

Der Begriff Hülle¹ bedeutet den größten Teil der Oberfläche eines Objekts mit etwas zu umschließen um es von äußeren Einflüssen abzugrenzen.

Dabei wird kein Unterschied hinsichtlich vorne, hinten, oben oder unten gemacht. Das bedeutet die Hülle ist ein zusammenhängendes System, das zwar aus mehreren Elementen bestehen kann, aber als ein homogenes Teil seine Funktion aufnimmt. Auf formale Gesichtspunkte ist diese Definition ebenso anzuwenden. Kann das umschließende System als ein Zusammenhängendes erfasst werden, so wird von einer Hülle gesprochen.

Eine Fassade² umschließt nicht das gesamte Objekt, sondern die vertikalen Flächen.

Es müssen nicht alle Seiten umschlossen sein, es kann lediglich eine Seite - beispielsweise die Schauseite - betreffen. Im Gegensatz zur Hülle ist die Fassade ein Teil des das Objekt von äußeren Einflüssen trennenden Systems.

Als Membran³ wird landläufig eine dünne Trennschicht bzw. eine dünne Haut bezeichnet. In Bezug auf die geringen Materialstärken der Gewebe und Folien die in diesem Bereich der Architektur eingesetzt werden drängt sich der Begriff „Membran“ auf.

Im Einsatz muss die Oberfläche gespannt sein und kann nur Zugkräfte aufnehmen. Weiters ist eine Membran keine starre Grenze zwischen zwei Systemen, sondern kann durchlässig sein. Das kann auf die möglichen Eigenschaften der Membranarchitektur übertragen werden: Transparenz, Transluzenz, Wandelbarkeit, Anpassungsfähigkeit. Aufgrund der geringen Materialstärke korrespondiert eine Membranhülle bzw. -fassade mit den physikalischen Bedingungen der Umgebung, was die Unerlässlichkeit eines standortgerechten Entwurfs unterstreicht.

Alle drei Begriffe haben die Eigenschaft der Grenze gemein. Hülle, Fassade und Membran sind das Kommunikationsmedium mit der Umwelt und prägen das äußere Erscheinungsbild des Objekts.

Formal-konstruktive Anleihen aus der Natur - ethymologisch, formal wie auch konstruktiv - sind seit

jeher zu erkennen. Mittlerweile gibt es vermehrt Bemühungen biologische Systeme strukturell auf die Fassade zu übertragen. Die mit dem Begriff „intelligente Fassadensysteme“ zusammengefassten Gebäudestrukturen kommen immer mehr in den Fokus der Planer. Die adaptive Hülle bzw. Fassade soll sich optimal an die wechselnden klimatischen Verhältnisse anpassen können, im besten Falle wie eine zweite Haut fungieren. Bei mehrschichtigen und beweglichen Konstruktionen übernehmen die einzelnen Schichten die adaptiven Funktionen, unterstützt durch Implementierungen, Bedruckungen bzw. High-Tech-Oberflächen. Diese öko-intelligente Architektur kann vielleicht in Zukunft als lebender Organismus bezeichnet werden.

Der funktionale Nutzen⁴ einer Hülle bzw. Fassade besteht primär darin das Bauwerk vor Wind, Niederschlag und Sonneneinstrahlung zu schützen. Mit zunehmenden Behaglichkeitsanforderungen der Nutzer übernimmt besonders die gesamte Gebäudehülle auch eine komplexere klimaregulierende Funktion.⁵ Sie soll eigenständig die Licht- und Luftdurchlässigkeit steuern um den Energiehaushalt durch Wärmespeicherung, Reflexion und Absorption der Sonneneinstrahlung regeln.

1 **Hül|le, die** - von althochdt. Hulla, altengl. Hylla und schwed. Hölja: im eher gehobenen Sprachgebrauch Mantel, Kopftuch - hül|len; sich in etwas hüllen; hül|len|los
Vgl. (Scholze-Stubenrecht, et al., 2000)

2 **Fas|sa|de, die** - von ital. facciata, ursprünglich von lat. facies: Angesicht (**Vorder-, Schauseite, Ansicht**)
Vgl. (Scholze-Stubenrecht, et al., 2000)

3 **Mem|b|ran, die** - von mittelhochdt. Membrane: Pergament und von lat. membrana: Häutchen oder membranum: Körperglied (**gespanntes Häutchen; Schwingblatt**)
Vgl. (Scholze-Stubenrecht, et al., 2000)

4 **Funktionaler Nutzen der Fassade:**

- Windschutz
- Regenschutz
- Schutz vor Sonneneinstrahlung
- Steuerung von Licht- und Luftdurchlässigkeit
- Regelung des Energiehaushalts

Vgl. (Hegger, et al., 2008) S.82 ff

5 Vgl. (Hegger, et al., 2008) S.82 ff

2.1 Hochbautechnische Anforderungen aus bauphysikalischer Sicht

„Nichts ist in der Architektur so gefährlich, wie sich mit Problemen getrennt zu beschäftigen. Wenn wir das Leben in getrennte Probleme aufspalten, spalten wir die Möglichkeiten auf, um gute Gebäudekunst zu bilden.“

(Alvar Aalto - Übersetzung aus dem Finnischen)

Die Anforderungen an ein Bauwerk sind vielschichtig. Es gilt die statisch-konstruktive, bauphysikalisch, materialgerechte, montage-rechte bzw. sicherheitstechnisch günstigste Lösung zu finden, welche mit den gestalterischen, soziologischen, psychologischen bzw. philosophischen Zielen konform geht. Die Disziplin Hochbau fügt sämtliche Ziele zusammen, indem zuerst die technische Machbarkeit geprüft wird um in weiterer Folge die Detaillierungsmaßnahmen festzulegen. Deshalb ist in diesem Bereich der Architektur Interdisziplinarität allgegenwärtig und selbstverständlich.

Als entwurfsbestimmender Faktor gilt in erster Linie die für die jeweilige Nutzung besten Innenraumverhältnisse – sicher, gesund, behaglich - zu schaffen.

Für Wohngebäude gelten andere Anforderungen als beispielsweise für Museen oder Büroräume¹. Das heißt der Planer muss im Vorfeld die rechtlichen Vorgaben bezüglich Luftaustausch und Beleuchtungsstärken recherchieren. Danach wird sich auch in gewissem Maße die Ausbildung der Gebäudehülle orientieren. Die energieeffiziente Planung zeichnet eine genaue Analyse der vorherrschenden Verhältnisse vor Ort aus² (Vgl. 5.1.1). Die gesammelten Daten geben Aufschluss über die Möglichkeiten verschiedener Konzepte. Vor allem bei Gebäuden, deren Energiekonzept eng mit den äußeren Einflüssen korrespondiert, kann es teilweise erforderlich sein die subjektiven Anforderungen des Nutzers bzw. des Bauherrn zu hinterfragen. Es kann vorkommen, dass gewisse statisch-konstruktive bzw. gestalterische Lösungen in Verbindung mit dem lokalen Wetter nicht das Optimum für das menschliche Wohlbefinden im Inneren des Gebäudes darstellen, oder Standortvorteile nicht nutzen.

Demgegenüber stehen die Wünsche des Nutzers und die allgemeinen Nutzungsanforderungen für den jeweiligen Gebäudetyp. Diese werden mit dem Überbegriff „Behaglichkeitsanforde-

rungen“³ zusammengefasst, die teilweise von den lokalen Bauordnungen vorgeschrieben sind und subjektiv ergänzt werden. An diesem Punkt ist die Frage der Nutzungsflexibilität zu erörtern, denn die Vergangenheit hat uns gezeigt, dass sich eventuell je nach Lebensdauer des Objekts die Nutzung bzw. die Behaglichkeitsanforderungen zyklisch ändern können. Das gilt vor allem für große Bauvorhaben, da diese oftmals eine größere Struktur benötigen, die im Nachhinein eventuell nicht ohne zusätzlichen Aufwand adaptiert werden kann. Außerdem geht die technische Entwicklung der Fassadensysteme rasant voran und es könnte wünschenswert werden bestehende Gebäude zu aktualisieren.

Die Summe der Gegebenheiten und der subjektiven Wünsche ergibt die entwurfsrelevanten Eigenschaften⁴, Schutzfunktionen⁵ und Versorgungsfunktionen⁶ der Hülle bzw. der Fassade. Auf diese Ziele werden die technischen und materialbezogenen Eigenschaften der Außenflächen ausgerichtet sein – eine standortgerechte Gebäudehülle.

1 Nutzungsprofile:

- Wohngebäude
- Büro- und Verwaltungsgebäude
- Veranstaltungs- und Kulturbauten
- Temporäre Gebäude

2 Zusammenfassung äußere Einflussfaktoren:

- Licht - Solarstrahlungsintensität, Solarstrahlungswinkel, Umgebende Bebauung / Horizont, Vegetation
- Luft - Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit / Niederschlag, Luftgeschwindigkeit / Windrichtung, Luftqualität, Schall
- Erde - Erdreichtemperatur, Erdreichfeuchtigkeit, Speichervermögen

3 Zusammenfassung

Behaglichkeitsanforderungen:

- thermisch – Raumlufttemperatur, Raumschließungstemperatur, Oberflächentemperaturen, Zulufttemperatur / -geschwindigkeit / Luftbewegung, Raumluftfeuchte / Zuluftfeuchte
- akustisch – Geräuschpegel, Schallbelastung, Nachhallzeiten
- visuell - Direkteinstrahlung / Beleuchtungsstärke, Leuchtdichteverteilung, Kontrast / Blendung, Tageslichtquotient / -autonomie, Ausblick / Außenbezug
- olfaktorisch – Luftwechsel, Luftqualität

4 Entwurfsrelevante Eigenschaften:

- Transparenz / Transluzenz / Opazität
- Wärmeleitfähigkeit / Gesamtenergiedurchlassgrad
- Gewicht / Speichervermögen
- Schalldämmmaß
- Dampfdiffusionswiderstand

5 Entwurfsrelevante Schutzfunktionen:

- Wasser- / Windschutz
- Sommerlicher / winterlicher Wärmeschutz
- Sonnen- / Blend- / Sichtschutz
- Einbruchschutz

6 Entwurfsrelevante Versorgungsfunktionen:

- Beleuchtung
- Belüftung
- Ausblick / Einblick
- passive / aktive Wärmegewinne
- passive / aktive Solarnutzung

Sanierung

Wie bereits in der Einführung erwähnt forderte das australische Architekturbüro Laboratory for Visionary Architecture (LAVA) hässlichen Zweckbauten früherer Generationen eine neue, schönere, ökologischere Verpackung zu geben.

Der Wirtschaftskammerpräsident Christoph Leitl spricht sich im Ö1-Mittagsjournal vom 15.02.2010 für ein neues Förderpaket für die thermische Sanierung aus. 40 Prozent der österreichischen Gebäude wurden nach dem Zweiten Weltkrieg errichtet, in einem hastigen Wiederaufbauprogramm. Mittlerweile bzw. seit jeher ist die Bausubstanz dieser Häuser schlecht und ihr Energieverbrauch mehr als doppelt so hoch als im Durchschnitt. So ist es zusätzlich möglich den Wert des Gebäudes zu steigern.

„Das würde einen Innovations- und Kreativitätswettbewerb in der Wirtschaft hervorrufen, der nicht nur unserem Land dienen, sondern Österreich international im Bereich Energie- und Umwelttechnik stärken kann.“ (Christoph Leitl, 2010)

Ungefähr seit Beginn der 1980er Jahre entwickelt sich ein Be-

wusstsein für Sanierung hinsichtlich der nachhaltigen Möglichkeiten für die Stadtentwicklung. Der Planer, der in ein bestehendes Gebäude eingreift, muss sich den räumlichen und zeitlichen Veränderungen stellen, die solch ein Projekt mit sich bringt. Vielleicht bringt man Ideen, die bereits vorhanden waren an die Oberfläche oder das Gegebene wird auf eine Art interpretiert, die dem Vorgänger nie in den Sinn gekommen wäre. Jedenfalls reicht beim Bauen im Bestand der Fokus auf das zukünftige Objekt mit seinen Anforderungen und Erwartungen nicht aus.

Für Neubauten sind sanierungsbedürftige Objekte ebenfalls von Bedeutung. Die Evaluierung älterer Bausubstanz liefert Erkenntnisse für den Neubau - Insbesondere Hinsichtlich Wärme- bzw. Kältebrücken.

Ist sich der Planer der sensiblen Stellen – wie einige Anschlussstellen es sein können – bewusst, werden diese sicher eine besonders sorgfältige Detailplanung genießen. Die prozentuelle Häufigkeitsverteilung der Bauschäden an einem Gebäude (wobei das gesamte Gebäude 100 Prozent ausmachen)

stellt sich folgendermaßen dar⁷: Es haben nach einer allgemeinen, repräsentativen Untersuchung mit 42% die Wände, vor allem die Außenwände, die meisten Bauschäden zu verzeichnen. Die übrigen Prozentpunkte sind relativ gleichmäßig auf die weiteren Bauteile verteilt. Lediglich die Kamine fallen mit 3% aus dem Muster. Allerdings nicht wenig verwunderlich, da dieses Bauteil einen sehr geringen Kontakt zur Außenluft hat.

Diese Zusammenstellung führt dem Planer die allgemeinen Probleme bei den Anschlussstellen vor Augen. Kaum ein Detail, das nicht potentiell von Bauschäden bedroht ist. Die Gruppe der Öffnungen wird von den Fensteröffnungen angeführt: bei näherer Betrachtung der Werte für eben diese sind die Rahmenprofile, aber auch die Anschlussbereiche die kritischen Details. Solche Anschlussstellen fungieren sehr oft ebenfalls als Wärmebrücken. Das sind örtlich begrenzte Bereiche der Gebäudehülle, die im Gegensatz zu den sie umgebenden Flächen einen deutlich geringeren Wärmeschutz aufweisen. Auf der Innenseite dieser Bereiche sind die Oberflächentemperaturen deutlich niedriger als in den angrenzenden Bereichen⁸.

7 Prozentuelle Häufigkeitsverteilung Bauschäden:
Einschätzung nach (Pfeiffer, 2008)

Wände	42%
Dächer	15%
Öffnungen	11%
Keller	10%
Installationen	8%
Fußböden	7%
Kamine	3%
Sonstige	4%

8 gefährdete Bauteile & mögliche Schäden:

Bauteil	Mögliche Schäden
Anschluss Dach / Wand	Tauwasser-niederschlag
Deckenaufleger	Durchfeuch-tungs-erscheinungen
Anschluss Fenster / Tür / Wand	Feuchteschäden
Ausragende Betonteile	Schimmelpilz-schäden
Rollladenkästen	Wärmebrücke

Wärmebrücken führen zu Tauwasserniederschlag, Durchfeuchtungserscheinungen, Feuchte- und Schimmelpilzschäden – in der Folge zu einer schlechten Energieeffizienz.

Je höher der Dämmstand ist, desto stärker wirken sich die Wärmebrücken aus.

Die bereits erwähnte Durchfeuchtung bzw. das Feuchteverhalten eines Bauteils ist abhängig von den Stoffeigenschaften Hygroskopizität, kapillaren Leitfähigkeit und Wasserdampfdiffusionsfähigkeit bzw. der Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl abhängig. Von Hygroskopizität spricht man, wenn die Eigenschaft eines Bauteils Luftfeuchte aus der Umgebungsluft aufzunehmen und zu binden beschrieben wird. Das Ziel ist eine Gleichgewichtsfeuchte, diese ist wiederum von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig, die je nach Beschaffenheit des Bauteils mehr oder weniger von jenem reguliert wird.

Die Grundlage für die Aufnahme, den Transport und die Abgabe von Wasser ist die kapillare Leitfähigkeit. Der Ursprung liegt im Porengefüge des Baustoffs – seinem Kapillarsystem. Um an der Oberfläche zu verdunsten wandert das Kapillarwasser immer an die trockene Seite.

Je kleiner der Dampfdiffusionsfaktor μ des Bauteils oder Baustoffes ist, desto geringer ist der Widerstand, den Wasserdampf der Luft hindurch zulassen, desto leichter kann also der Dampf eindringen. Dieser diffundiert aufgrund eines Dampfdruckgefälles zur kalten Seite des Bauteils, oder bei gleicher Temperatur zur Seite der geringeren Luftfeuchte. Ist die Temperatur im Bauteil sehr gering, wird der Wasserdampf zu Tauwasser.

Liegt der Taupunkt des Wasserdampfes im äußeren Drittel der Außenwand, kann der Wasserdampf meist schnell an die Oberfläche transportiert werden und durch eine dampfdurchlässige Oberfläche verdunsten. Je weiter der Taupunkt in das Innere verschoben wird, desto weiter ist der Weg zur Verdunstung.⁹

Deshalb ist eine Innendämmung zu vermeiden: die Temperatur würde direkt hinter der Dämmung so weit absinken, dass der Wasserdampf innerhalb des Systems an der kalten Seite kondensiert. Ein weiterer Aspekt, um thermische Schwachstellen zu vermeiden ist die Luftdichtheit. In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt der energetischen Gebäudemodernisierung bei der Verbesserung des Wärmeschutzes. Aus energetischen, bauphysikalischen

und baurechtlichen Gründen kommt der Luftdichtheit immer mehr Bedeutung zu. Gerade bei Gebäuden im Bestand spielen Undichtheiten in der Gebäudehülle eine wesentliche Rolle.

Die genannten Bauteile wie Fenster, Rollladenkästen und -durchdringungen, Anschlüsse in Dachgeschoßen aber auch die restlichen Fugen und Ritzen lassen einen unkontrollierten Luftaustausch zu.

Diese Transmissionswärmeverluste lassen sich durch solare Pufferräume reduzieren, indem ausschließlich solar erwärmte Zwischenräume zwischen innen und außen geschaffen werden, die höhere Temperaturen als die Außenluft aufweisen. Der Pufferraum ist nicht beheizt, könnte mit einer erweiterten Nutzungsmöglichkeit ausgestattet sein. Hierfür sind Folienkonstruktionen gut einsetzbar. In dreilagiger Ausführung werden U-Werte $> 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht. Spezielle Ventile können die Lage der mittleren Folie verändern – in Verbindung mit einer invertierten Bedruckung werden beispielsweise Sonnenschutzeffekte hervorgerufen.

Um allen Einflüssen gerecht zu werden, ist eine fundierte Bestandsaufnahme der Bausubstanz unerlässlich.

⁹ Vgl. (Pfeiffer, 2008) S. 123 ff

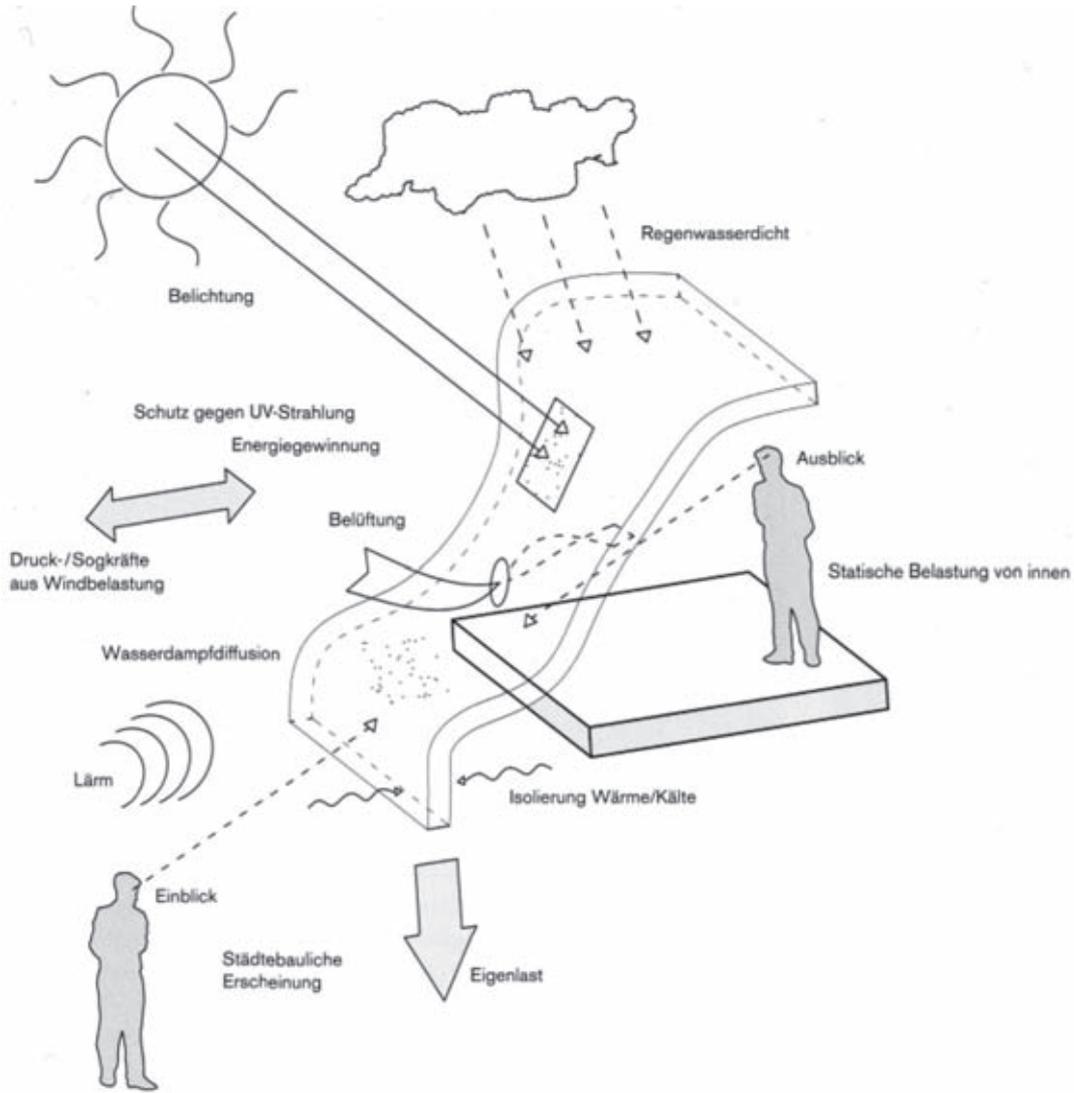


Abb. 1 Fassadenfunktionen

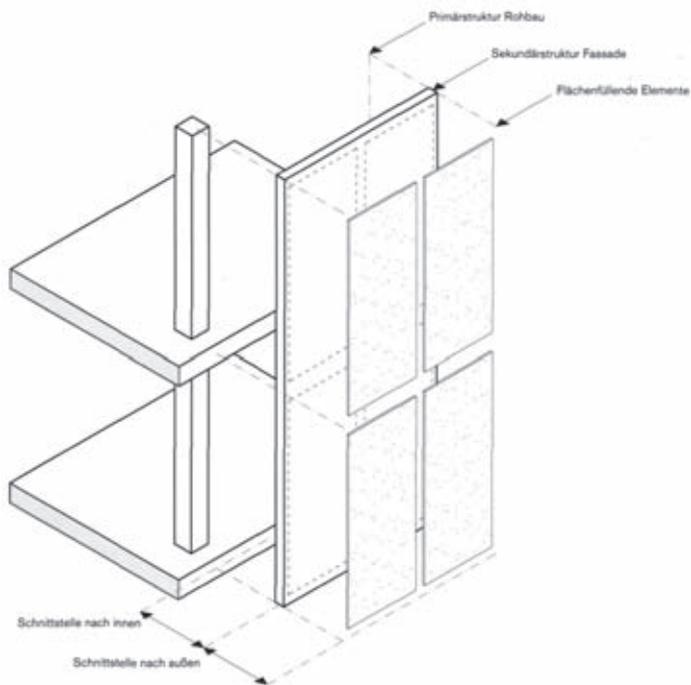


Abb. 2 Schema der konstruktiven Bereiche

2.2 Fassade und Tragwerk

Das Thema Lastabtragung von Fassadentragwerken ist bereits ausreichend dokumentiert, deshalb werden an dieser Stelle die wichtigsten Aspekte zusammengefasst. Weiterführende Quellen sind dem im Anhang befindlichen Literaturverzeichnis zu entnehmen.

Die abgebildete Skizze^{Abb.1} zeigt die zahlreichen Anforderungen die eine Fassade erfüllen muss. Die gewünschten Fassadenfunktionen müssen in allen Phasen der Fassadenkonstruktion berücksichtigt werden.

Prinzipiell funktioniert jede Fassadenkonstruktion nach dem Schema^{Abb.2} Primärstruktur - Haupttragwerk des Gebäudes -, Sekundärstruktur - Tragstruktur der Fassade - und die flächenfüllenden Elemente.

Diese Funktionsbereiche müssen nicht immer sichtbar voneinander getrennt sein, oft sind diese in einem Bauteil zusammengefasst und sind nicht auf den ersten Blick zu erkennen.

Die Primärstruktur leitet die Lasten aus der Fassade in die Fundamente weiter und übernimmt so die tragende Funktion für das gesamte Gebäude. Die Sekundärstruktur dient als Tragstruktur der Fassade, sie gibt die Lasten an die Primärstruktur weiter.

An dieser „Schnittstelle nach innen“ müssen unterschiedliche Bewegungen von Rohbau und Fassade ausgeglichen werden. Darauf werden flächenfüllende Elemente wie z.B. Paneele befestigt. Diese Elemente bilden die „Schnittstelle nach außen“ und müssen die Primärstruktur vor Wassereintritt schützen, bzw. Wasser ableiten. Sie müssen winddicht befestigt sein und es dürfen keine Wärmebrücken (Vgl. 2.1) entstehen.

Bei Fassadenkonstruktionen die Primärkonstruktion und Sekundärkonstruktion in einem Bauteil zusammenfassen, hat die Tragstruktur der Sekundärkonstruktion Anteil an der Gesamttragkonstruktion des Gebäudes.

Zu beachten ist hierbei, dass die Schnittstellen nach außen und innen auf eine einzige reduziert sind. Bei solchen Fällen muss be-

sonderes Augenmerk auf Toleranzen, Verformung und Bauphysik gelegt werden, da eventuell Komponenten der Fassade nicht einfach ausgetauscht werden können weil sie Teil der Tragstruktur des Gebäudes sind.

Lastabtragung

Es werden verschiedene Lastarten unterschieden, die auf die Fassadenkonstruktion wirken^{Abb.3}:

- Eigenlast aus den Komponenten der Fassade
- Schneelast
- Windlast (Druck und Sog)
- Verkehrslasten
- Belastungen aus Zwangskräften (Formveränderung von Bauteilen aufgrund Temperaturschwankungen, veränderter Luftfeuchtigkeit o.ä.)¹

Um die unterschiedlichen Lasten abzutragen gibt es verschiedene Möglichkeiten sei es hängend, stehend über ein Geschoss bzw. stehend über mehrere Geschosse. Das abgedruckte Schema^{Abb.4} illustriert das Zusammenspiel der drei Tragkonstruktionen bei der Lastabtragung.

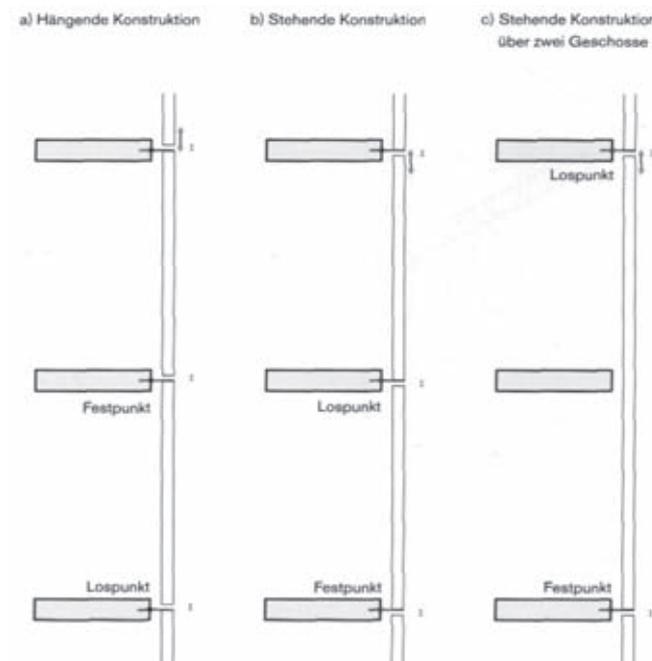


Abb. 3 Lastabtragung von Fassaden

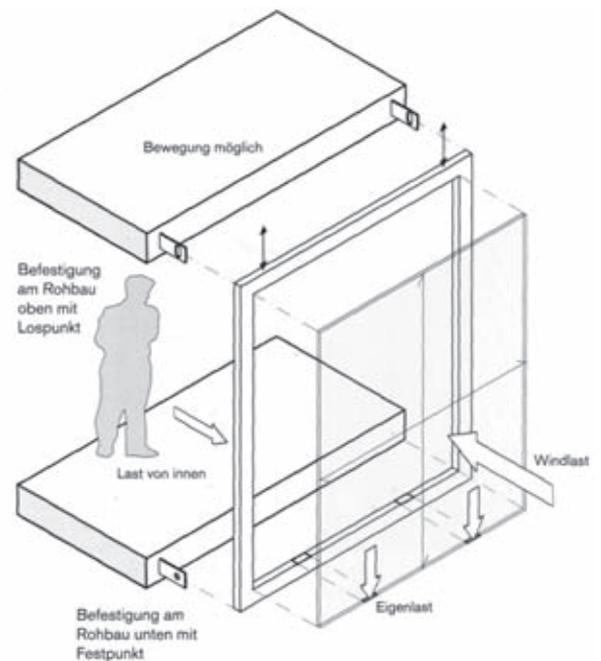


Abb. 4 Lastabtragung

¹ Vgl. (Knaack, et al., 2007) S. 38

2.3 Ausstattungsmöglichkeiten

Prinzipiell lassen sich Fassaden in zwei Gruppen einteilen. Zum Einen die elementierten^{Abb.1} Fassaden, gegliedert durch Elemente, welche einzelne Funktionen (Belüftung, Belichtung, Transparenz) separiert. Zum Anderen die vollflächigen^{Abb.2} Fassaden aus mehreren Ebenen, die an jeder Stelle der Fassade alle Funktionen wahrnehmen können.

Angefangen im Kleinen – im Nanobereich – bis hin zu großmaßstäblichen Lösungen: Längst verlangt der Kunde einen gewissen Mehrwert von der Hülle bzw. Fassade. Die technische Entwicklung der letzten zehn Jahre zeigte uns eine ganze Palette an Ausstattungsmöglichkeiten bzw. Materialien mit Zusatznutzen die auf ihren Einsatz warten.

„Zehn hoch minus neun“ – das ist die Nanodimension, man könnte sie als inneren Weltraum begreifen. Jenseits des mikroskopischen Bereichs kommen Effekte zur Wirkung, die in größeren Skalen nicht zu simulieren sind. Diese sich stets erweiternden Erkenntnisse in Verbindung mit baulich-konstruktiven Ideen zur Verbesserung des Mehrwerts der

Hülle haben einige interessante Möglichkeiten hervorgebracht. Speziell auf dem Sektor der Beschichtungen werden sich in Zukunft neue Möglichkeiten auftun. Da der Einsatz von Membranen (Gewebe, Folien) als Fassadenmaterial einen großen Anteil von transparenter bzw. transluzenter Fläche an der Hülle anbietet, drängt sich die Frage nach integriertem Sonnenschutz auf. Im besten Fall passt sich die Fassade an die den Tag über wechselnden Bedingungen an.

Die selektive Hülle

Bedruckte und beschichtete transparente Oberflächen können oberhalb einer bestimmten Grenze auf Temperaturunterschiede reagieren. Die Folge sind optische, aber ebenso energetisch wirksame Effekte auf das Gebäude. Ebenfalls kann der Grad der Transparenz präzise auf die jeweiligen Anforderungen abgestimmt werden. So werden Flächen mit starker Sonneneinstrahlung nicht vollständig transparent ausgeführt, um Überhitzung zu vermeiden. Gleichzeitig wird die Versorgung der Innenräume mit indirektem Tageslicht gewährleistet. Das bedeutet die Veränderlichkeit des Streuverhaltens der Lichtstrahlen, durchsichtige

Stellen erscheinen weiß und reflektierend. Erweitert man die beschriebenen Methoden mit mehrlagigem Aufbau und pneumatischen Techniken, führt das zur sogenannten pneumatischen Verschattung^{Abb.3}.

Die intelligente Hülle:

Veränderungen im Nanoskala-Bereich modifizieren die Struktur der Materialien. Diese „Nanomaterialien“ sind meist Beschichtungen, die auf Trägermaterialien aufgebracht sind und so beispielsweise mit Hilfe der Photokatalyse (durch UV-Strahlung ausgelöste chemische Reaktion) Schmutzfilme aufspalten um sie vom Regen wegwaschen zu lassen. In dieselbe Kerbe schlägt der „Lotusblüten-Effekt“, welcher durch die Oberflächenbeschaffenheit der modifizierten Fläche wie das Vorbild aus der Natur Schmutzpartikel erst gar nicht an die Fläche heranlässt.

Mittlerweile wird bei der Bewertung eines Gebäudes der Grad der Energieselbständigkeit herangezogen. Elektrisch leitfähige Moleküle oder Halbleiter-Nanopartikel können Sonnenlicht in Strom umwandeln, was die Herstellung von biegsamen, vor allem flachen Solarzellen im Rotationsdruck

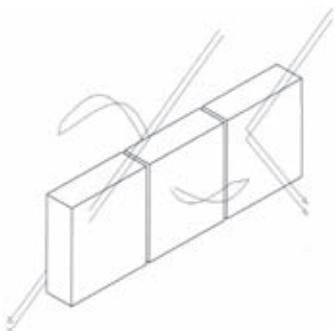
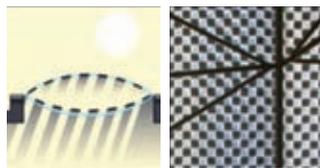
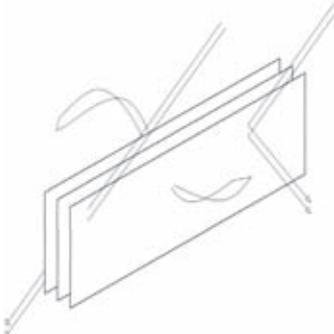


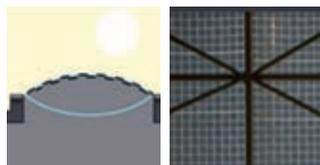
Abb. 1 Elementierte Fassade

Abb. 2 Fassade aus mehreren Ebenen



Offen:

Angesteuert von Solar- oder Temperatur-Sensoren wird der Druck in der oberen Luftkammer erhöht; die bedruckten Folien verlagern sich und es kann mehr Licht durch das Gesamtsystem dringen.



Geschlossen:

Bei ansteigender Raumtemperatur oder zunehmendem Lichteinfall wird der Druck in der unteren Luftkammer erhöht. Der Licht- und Sonneneinfall verringert sich; im Innenraum herrscht optimales klimatisches Wohlbefinden.

Abb. 3 pneumatische Verschattung
(<http://www.vector-foilttec.com>)



Abb. 4 Architektur Biennale Venedig 2008, Deutscher Pavillon

zur Folge hat. Auf der Architektur Biennale in Venedig 2008 wurden solche biegsamen Photovoltaik-Elemente in einer Installation im deutschen Pavillon^{Abb.4} gezeigt.

Am Massachusetts Institut of Technology (MIT) arbeitet Sheila Kennedy an der Integration von Solarzellen in der Architektur. Ihr Projekt „Soft House“^{Abb.7} – ein Prototyp eines Hauses, welches einen Teil des benötigten Stroms selbst produziert – zeigt, dass Solarzellen nicht unbedingt sperrige Solar-Panels sein müssen. Ihre Solartextilien können über Dächer und Wände gespannt, wie Vorhänge drapiert werden. Diese Vorhänge passen sich dem Sonnenstand an und erzeugen nach den Angaben der Expertin bis zu 16.000 kWh Strom. Das wäre mehr als die Hälfte, die ein durchschnittlicher amerikanischer Haushalt täglich verbraucht. Hoch reflektierende und absorbierende Schichten verbessern die Lichtausbeute und Tageslichtlenksysteme bzw. Antireflexsysteme erhöhen die Energieausbeute von Solarmodulen um bis zu 5%.

Die Firma vector foiltec bietet Texlon® Solar Produkte an, die die Solarenergieausbeute zum Ziel hat. Texlon®-Solarzellen sind in den oberen Folienlagen einge-

arbeitet, die mittels Wechselrichter an das regionale Stromnetz angeschlossen werden bzw. ein bereits vorhandenes Solarsystem ergänzen^{Abb.6}.

Die informative Hülle:

Bei Einbruch der Dämmerung wird ein weiterer möglicher Zusatznutzen der Fassade sichtbar – die Medienfassade. Was früher als nachträgliche Erweiterung der Fassade empfunden wurde – was nicht unbedingt positiv sein muss, die Medienfassade wurde eher als Fremdkörper im Ensemble angesehen – eröffnet nun neue Gestaltungsmöglichkeiten und es etablierte sich der Begriff der „Mediatektur“^{Abb.5}. Besonders weit gespannte Membrankonstruktionen bieten sich als Projektionsfläche an – also eine nicht mechanische Medienfassade.

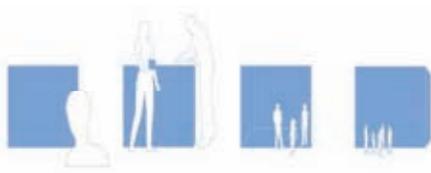


Abb. 5 vier physische Medienformate: Bildschirm, Interaktive Objekte, interaktive Räume, Mediatektur

Abb. 6 Mit Texlon® Solar bespannte Kuppel

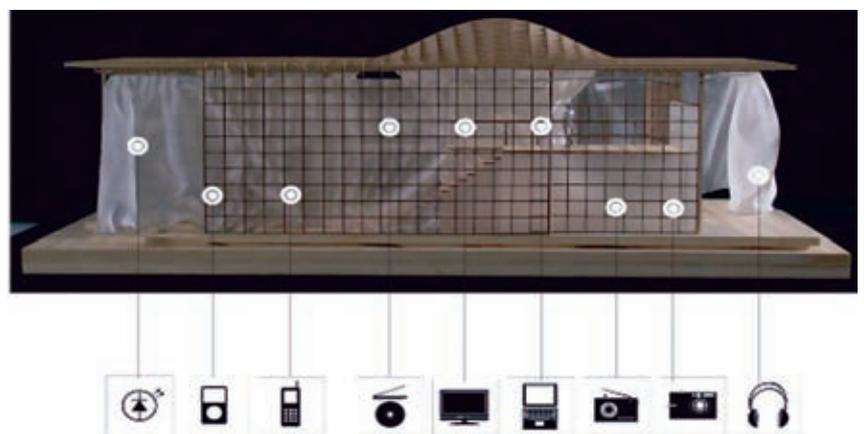


Abb. 7 Soft House

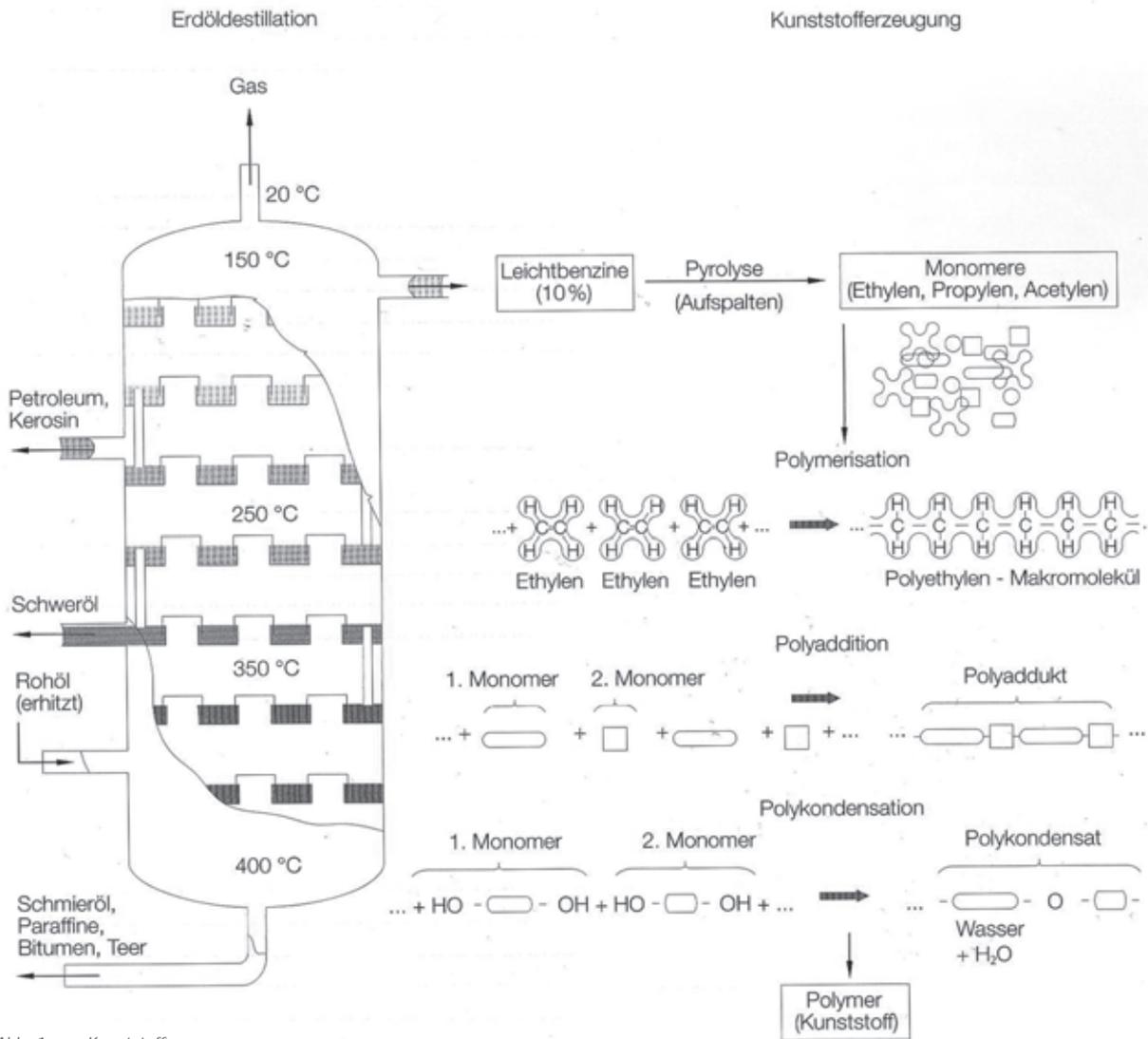


Abb. 1 Kunststoffherzeugung

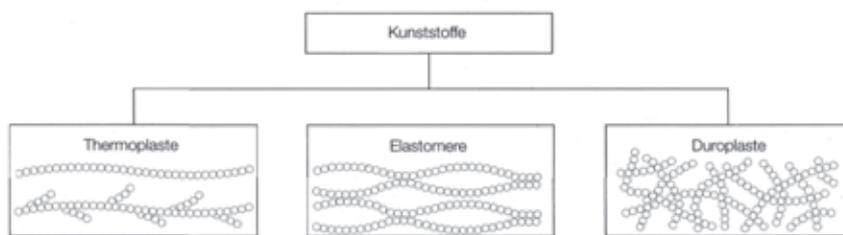


Abb. 2 Einteilung von Kunststoffen nach ihrem chemischen Aufbau

3 Vgl. (Compagno, et al., 2003) S. 41

Elastomere (Natur-Kautschuk, Silikon-Kautschuk)	Lose vernetzte Moleküle, bei normaler Temperatur gummielastisch. Hitze- einwirkung führt zu irreversibler Vernetzung (Vulkanisation). Nicht schweißbar
Duroplaste (Melaminharze)	Räumlich eng vernetzte Moleküle, bei normaler Temperatur sehr hart und spröde. Hitze- einwirkung führt zu irreversibler Härtung. Nicht schweißbar, klebbar
Thermoplaste (Polyolefine – Polyethylen, Polypropylen)	Linearer Molekülaufbau (mit oder ohne Seitenketten). Unter Hitze- einwirkung reversibel verformbar ohne Änderung der thermoplastischen Eigenschaften. Schweißbar

3. Kunststoff - materialtechnische Grundlagen

„Wenn ein Festkörper aus Polymeren besteht, die synthetisch oder halb synthetisch hergestellt wurden, so nennt man ihn Kunststoff.“¹

Wolfgang Seidel entdeckte 1531 in seiner Heimatstadt Augsburg die erste Art von Kunststoff. Er experimentierte mit Magerkäse der im erwärmten Zustand verformbar ist, sich während des Abkühlungsprozesses wieder erhärtet. Bei mehrfacher Wiederholung dieses Prozesses entstand Kunsthorn oder Kasein welches zur Herstellung von Formen, Schmuckstücken oder Trinkgeschirr verwendet wurde. Im 19. Jahrhundert zog man Kautschuk oder Zellulose zur Produktion von Kunststoff heran. Heute wird als Hauptrohstoff Erdöl verwendet.¹

Argumente wie günstiger Preis, Langlebigkeit oder gute Barriere-Eigenschaften haben den Kunststoffen den Weg in die Architektur geebnet. In Anstrichen, Beschichtungen und Lacken findet man sie genauso wie in der gesamten Haustechnik als Rohrsysteme und Kabelbeschichtungen. Abdichtungs- und Dämmsysteme,

Zuschlagstoffe, Kleber und Fugenmassen wären ohne die materialverbessernden Eigenschaften von Kunststoff nicht auf dem hohen Leistungslevel. Man könnte sagen wir sind von Kunststoff umgeben. Temporäre Konstruktionen wie zum Beispiel Messestände oder Bühnen, Zelt-, Seilnetz- und pneumatische Konstruktionen, Fassadenelemente, Bauteile mit freier Form kompletieren die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieses Materials.

Herstellung

Der wichtigste Rohstoff für die Kunststoffherstellung ist Erdöl – ca. 7% des Erdöles fließen weltweit in die chemische Industrie. Kunststoffe und andere Chemikalien, das heißt ca. 4% des globalen Erdölverbrauchs werden für die Kunststoffproduktion verwendet².

In der Raffinerie wird das Rohöl im ersten Schritt erhitzt und in seine Bestandteile separiert. Ca. 10% dieses Ausstoßes sind Leichtbenzine - Naphta - aus denen Kunststoffe hergestellt werden. Die anderen Komponenten - Petroleum, Kerosin, Heizöl, Bitumen - finden in anderen Industriezweigen Verwendung. Das Naphta muss gespalten - „gecrackt“ - werden. Die so ge-

wonnenen Monomere - z.B. Ethylen, Propylen, Acetylen - werden zu kettenartigen Makromolekülen³ verbunden.^{Abb.1}

Bereits in den Chemiewerken wird der Kunststoff mit Füllstoffen und Additiven versetzt, um danach als Zwischenprodukt ausgeliefert zu werden.

Die Einteilung in Elastomere, Duroplaste bzw. Thermoplaste^{Abb.2} ist für die Be- bzw. Verarbeitung der Kunststoffprodukte von großer Bedeutung³.

Füllstoffe und Additive

Im Wesentlichen werden die Eigenschaften der Kunststoffe von eingebauten Füllstoffen⁴ und Additiven⁵ beeinflusst. Obwohl die Kunststoffproduzenten über das Wissen aus jahrelanger Erfahrung welche Wirkungen die Zusatzstoffe erzielen können verfügen, kann die Planung eines Bauteils durch eine kurze Auseinandersetzung mit den wichtigsten Aspekten, die diese Stoffe beeinflussen, erleichtert⁶ werden:

- gewünschte Lebensdauer
- chemische Beständigkeit
- Witterungs- und UV-Beanspruchung
- beabsichtigte Endverarbeitung
- gewünschte Farbe

1 Vgl. (raumPROBE OHG)

2 **Anteilverteilung der Kunststoffproduktion**
Vgl. (Fehring, et al., 1997) S. 18

Sektor	Anteil %
Bausektor	25
Verpackungssektor	21
Elektroindustrie	15
Farbenindustrie	10
Sonstige Gebiete	10
Fahrzeugindustrie	7
Möbelindustrie	5
Landwirtschaft	4
Haushaltswarenindustrie	3

4 **Füllstoffe** = Stoffe, die den Kunststoff strecken

5 **Additive** = verbessern die Eigenschaften bzw. fungieren als Reaktionspartner

6 **Gebräuchliche Füllstoffe und Additive**
Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 32:

- Kaolin, Kreide, Öl, o.ä. - kostenreduzierende Füllstoffe
- Farbstoffe, Pigmente - Farbmittel
- Katalysatoren und Reaktionspartner für die Steuerung der chemischen Reaktion
- Stabilisatoren zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit (z.B. unter UV-Beanspruchung)
- Weichmacher bei Thermoplasten zur Verhinderung spröden Verhaltens
- Halogene, Aluminiumtrihydrit, Aluminiumhydroxid - Flammenschutzmittel
- Thixotropiermittel zur Verbesserung der Streichfähigkeit bei Duroplasten

- angestrebte Transparenz
- Anforderungen an den Brandschutz
- Anforderungen an mechanische Eigenschaften

Gewisse Pigmente können die Wärmespeicherung bzw. -reflexion beeinflussen. Es kann die Reflexion des Kunststoffes mittels Glimmerpigmenten erhöht werden, da diese einen hohen Anteil des einfallenden Infrarotlichts spiegeln. Auf diese Weise kann der Energiedurchlassgrad bei transparenten Flächen optimiert werden.

Thermochrome oder photochrome Additive absorbieren Energie um diese zu einem späteren Zeitpunkt wieder abzugeben.

Recycling - Entsorgung

Ein solch allgegenwärtiges Material wirft die Frage nach Verwertung, Recycling und Entsorgung auf.

Eingangs lässt sich feststellen: die Qualität leistungsstarker Materialien ist sehr von zugesetzten Additiven abhängig. Textile Gewebe sind zahlreichen Einwirkungen ausgesetzt, diese sollen im Sinne der Dauerhaftigkeit die Qualitätsanforderungen nicht in zu großem Maße mindern. Da wären einerseits die lastabhängigen Einflüsse – Lastwechsel, -höhen und

Kriechen -, andererseits lastunabhängige Einwirkungen wie natürliche, klimatische, atmosphärische Belastungen – hervorgerufen durch beispielsweise Schadstoffausstoß – und Alter.

Ihr Einsatz ist gekoppelt an die Verträglichkeit der Additiven untereinander – es dürfen sich keine neue, unerwarteten Stoffe bilden. Das bedeutet die Gewährleistung der Stabilität, Migrationsbeständigkeit und besonders der physiologischen Unbedenklichkeit.

„Bei den Additiven handelt es sich teilweise um toxische und nicht umweltverträgliche Wirkstoffe. Sowohl bei der Verwertung wie auch bei der Entsorgung sind das Verhalten und der Verbleib dieser Substanzen von großer Bedeutung für die Umwelt. In jedem Fall ist es notwendig, den Pfad der relevanten Additive für die Sekundärkunststoffe über die Verwertung und Entsorgung bis zur letzten Senke zu kennen.“⁸
Die Voraussetzung für eine effiziente Verwertung⁹ ist die Samm-

lung sortenreiner, bzw. nicht gemischter Kunststoffabfälle. Je nach Beschaffenheit und Masse des Abfalls sind verschiedene Verfahren möglich.

Stoffliche Verwertung:

Das Ziel der stofflichen Verwertung ist die thermoplastischen Kunststoffabfälle wieder aufzuschmelzen und zu regranulieren. Daraus können wieder dieselben Kunststoffprodukte hergestellt werden, wenn die Qualität durch gute Vorsortierung erzielt wird. Ist dies nicht der Fall, verarbeitet man das Granulat zu anderen, neuen Produkten - Downcycling. Die stoffliche Verwertung erzeugt selbst auch Emissionen und Abfälle.

Chemische Verwertung:

Hydrierung, Hydrolyse bzw. die Vergasung gehören zur Chemischen Verwertung. Chemische Reaktionen setzen wieder die monomeren Ausgangsstoffe oder Kraftstoffe und Schmiermittel frei. Auch diese Verwertungsart erzeugt Emissionen und Abfälle.

Thermische Verwertung:

Die wahrscheinlich bekannteste Verwertung ist die thermische Verwertung. Müllverbrennung und die Pyrolyse (Entgasung

⁸ Vgl. (Fehring, et al., 1997) S. 208

⁹ **Verfahren der Kunststoffverwertung**
Vgl. (Fehring, et al., 1997) S. 22 ff

Verfahren	Produkt
stoffliche Verwertung	Regranulation – Recycling bzw. Downcycling
chemische Verwertung	Hydrierung, Hydrolyse bzw. Vergasung – Freisetzung der monomeren Ausgangsstoffe
Thermische Verwertung	Müllverbrennung, Pyrolyse – liefert Energie, Pyrolysegas, Pyrolyseöl, Pyrolysekoks
Kompostierung / Deponie	nn

– thermische Zersetzung von organischem Material) liefern Energie, Pyrolysegas, Pyrolyseöl, Pyrolysekoks.

Die ungünstigste, thermische Behandlung wäre die Verbrennung der Kunststoffe ohne jegliche weitere Nutzung. Der Grund für ein solches Vorgehen könnte die volumenmäßige Minimierung des zu deponierenden Abfalls sein.

„Biologisch abbaubare, insbesondere kompostierbare Kunststoffe werden durch Mikroorganismen wie Pilze und Bakterien angegriffen und unter optimalen Bedingungen zu Wasser, Kohlendioxid und Mineralien metabolisiert. Auf dem Markt erhältlich sind kompostierbare Kunststoffe aus Erdöl, Stärke, Zellulose, Zucker, während sich Polymere aus Pflanzenöl noch in der Entwicklung befinden.“¹⁰

Obwohl in Österreich die Deponierung von Kunststoffabfällen in keinem Fall sinnvoll ist, wird sie zu einem überwiegenden Teil praktiziert. Langzeitstudien über das Verhalten von Kunststoffen in Deponien gibt es noch nicht. Versuche haben bereits gezeigt, dass die Kunststoffabdichtungsbahnen am Grund der Deponie durch die Vorgänge im Deponiekörper in

Mitleidenschaft gezogen wurden.

Die Ferrari-Gruppe hat zusammen mit der SOLVAY-Gruppe das TEXYLOOP-Recycling-Verfahren^{Abb3} entwickelt, das auf einen geschlossenen Stoffkreislauf aufbaut. Der beinhaltet das Zerkleinern, gezielte Herauslösen einzelner Werkstoffe, Abtrennung der Fasern, Ausfällung von PVC und Rückgewinnen des Lösungsmittels.

Mit diesem Kreislauf lassen sich Verbrennung und Deponierung vermeiden. Die Rohstoffe gelangen zurück in den Materialkreislauf der Ferrari-Gruppe, bzw. anderer Industriezweige. Die Umweltbelastungen entstehen im Durchschnitt zu 80% bei der Gewinnung und Aufarbeitung von Rohstoffen. Nun können die Werkstoffe aus dem Recycling verwendet werden – das hilft Umweltbelastungen zu vermeiden, die durch den Abbau und die Gewinnung neuer Primärstoffe entstehen.

Aus den recycelten Rohstoffen entstehen Zierleisten für den Bootsbau, Schläuche, Abdichtmembranen, Stoßdämpfer, Unterlegplatten, Vliese zur Wärmedämmung, u.v.m.

In Österreich gibt es mittlerweile drei Sammelstellen (Leonding,

Klagenfurt, Innsbruck) für dieses System, wo Folienverschnitt, gebrauchte Planen und bedruckte Textilien abgegeben werden können.

¹⁰ Vgl. (Fehring, et al., 1997) S. 23



Abb.3 TEXYLOOP Recycling Programm

3.1 Membranwerkstoffe in Bezug auf den werkstoffgerechten Entwurf

Das Wort Membran ist auf das lateinische Wort „membrana“ zurückzuführen, was übersetzt Pergament oder Haut bedeutet. Charakteristikum für diese Materialform ist in erster Linie der dünne Querschnitt - dasselbe gilt für moderne Membranen. Dieser dünne Querschnitt bedeutet große Belastungen auf eine vergleichsweise geringe Masse. Was den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Material und Entwurf vor Augen führt.

„Die Eigenschaften wie mechanische Festigkeit, Kosten, Flexibilität, Verarbeitung, Dauerhaftigkeit, UV-Licht und Chemiebeständigkeit, Anschmutz- und Reinigungsverhalten, Brandverhalten, Feuchtebeständigkeit bzw. Umweltverträglichkeit bestimmen die Wahl der Materialien.“¹

Membranwerkstoffe werden nach ihren Lastabtragungseigenschaften in anisotrope² und annähernd isotrope³ Werkstoffe eingeteilt:

Isotrope Membranwerkstoffe sind im Hochbau aus thermoplastischen Kunststoffen hergestellte Folien, bzw. in manchen Fällen aus Metallen hergestellte Folien. Folien aus Metallen kommen im Hochbau relativ selten zum Einsatz.

Zu den **anisotropen Membranwerkstoffen** zählen aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellte technische Textilien.

„Immer leistungsfähigere Werkstoffe führen zu einem stetigen Ausbau des Anwendungsspektrums.“⁴

Der architektonischen Anwendung stehen hauptsächlich zwei Membranwerkstoffarten zur Verfügung, nämlich Folien und textile Produkte⁵, im Besonderen Gewebe.

Gewebe gelten als besonders geeignet für den Einsatz als lastabtragendes Material für große Flächen, während bei Folien der Vorteil der Transparenz und den günstigen mechanischen Eigenschaften bei geringeren Spannweiten hervorzuheben ist.

¹ Vgl. (Adamczewski, 2008) S. 16

² **Anisotropes Verhalten =**

Die mechanischen Eigenschaften sind richtungsabhängig, das bedeutet bei unterschiedlicher Drehung einer Werkstoffprobe werden unter Wirken der selben Kraft unterschiedliche mechanische Werte erzielt.

Teilweise zeigen Gewebe - meist aufgrund der orthogonal gerichteten Strukturierung verwebter Fäden - eine bevorzugte Dehnungsrichtung auf, diese werden als orthogonal anisotrop oder orthotrop bezeichnet.

³ **Isotropes Verhalten =**

Die mechanischen Eigenschaften sind in alle Richtungen annähernd gleich.

⁴ Vgl. (Compagno, et al., 2003) S. 58

⁵ *Textile Produkte sind in drei Gruppen zu gliedern:*

- **Maschenwaren** - Gewirke, Gestricke
- **Webwaren** - Gewebe, Nähgewebe
- **Non-Wovens** - Vliese, Filze, Fadengelege

3.1.1 Gewebe

Gewebe sind ein System mit - im ungespannten Zustand - näherungsweise orthogonal zueinander stehenden verwebten Fäden^{1,2}

Die Flächenbildung für die architektonische Anwendung aus den Kett- und Schussfäden erfolgt entweder durch die Leinwandbindung - die einfachste und engste Verkreuzung der Fäden - oder die Panamabindung - eine Variante der Leinwandbindung, bei der Kett- und Schussfäden bündelweise zusammengekommen werden.

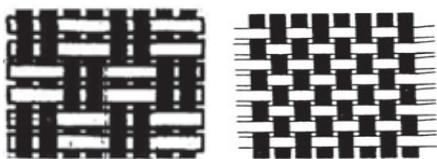


Abb. 1 (li) Panamabindung
Abb. 2 (re) Leinwandbindung

Beim Webvorgang lassen sich annähernd gleiche oder extrem unterschiedlich mechanische Kennlinien in beide Hauptisometrieachsen herstellen. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften einer Membrane - Zugfestigkeit³, Weiterreißfestigkeit⁴, Bruchdehnung⁵, Dehnsteifigkeit⁶ - sind maßgeblich durch das Gewebe bestimmt.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit diese Eigenschaften durch Beschichtungen und Oberflächenversiegelung positiv zu beeinflussen.

Da die Anforderungen an im Membranbau eingesetzten Gewebe sehr vielfältig sind, gibt es momentan noch kein ultimatives Gewebe, das allen Wünschen Rechnung tragen kann. Es kommt ganz auf den Standort und die Nutzung bzw. die Nutzungsdauer an inwieweit die Kriterien an technischen Geweben gewichtet werden. Beeinflusst können die Eigenschaften von Geweben mit Beschichtungen werden.

In erster Linie müssen Beschichtungen das Gewebe vor Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Feuer und Befall durch Mikroben bzw. Pilze schützen. Dermaßen wird die Lebensdauer des Werkstoffs für den Einsatz in der Architektur optimiert.

Darüber hinaus ändern Beschichtungen hauptsächlich folgende mechanische Eigenschaften:

- Weiterreißfestigkeit - eine ausschlaggebende Versagensart
- Festigkeit und Steifigkeit des Gewebes⁷
- Membranschubsteifigkeit⁸
- Knickbeständigkeit⁹

Weitere beeinflusste Eigenschaften:

- Schweißbarkeit
- Lichttransmission, -reflexion, -streuung
- Anschmutzverhalten
- Farbgebung
- Wärmeabstrahlung

Eine Beschichtung wird normalerweise beidseitig aufgebracht - Coating - und schützt das Gewebe vor Umwelteinflüssen. So wird z.B. eine textile Fläche dauerhaft wasserdicht, brandbeständig oder verschiedene Farbgebungen sind möglich.

Übliche Beschichtungen sind jene aus Polyvinylchlorid (PVC), Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Silikon.

Zur Beurteilung ob sich ein Fasermaterial als Membranwerkstoff eignet, ist seine freie Reißlänge¹⁰ heranzuziehen. Sie veranschaulicht das Verhältnis zwischen Gewicht und Zugfestigkeit.

Zu beachten ist, dass wenn beschichtetes Gewebe über längere Zeit hinweg den verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt wird, sich die Beanspruchbarkeit mindern kann.

1 Glossar:

- **Fäden** = Fadenbildung aus mehreren hundert miteinander verdrehten Einzelfasern. Geeignete Faserarten: Naturfasern, mineralische Fasern, metallische Fasern, thermoplastische Kunststofffasern
- **Filamente** = Synthetisch hergestellte Fasern, welche praktisch endlos sind.
- **Monofil** = Faden aus lediglich einer synthetisch hergestellten Faser. Synthetische Fasern können bei der Herstellung hinsichtlich ihres Querschnitts verändert werden um so an die jeweiligen Erfordernisse angepasst zu werden.
- **Naturfasern** = Fasern wie Baumwolle, Seide, Hanf, Leinen, o.ä weisen bezüglich Länge und Querschnitt naturgegebene Werte auf.
- **Kettfäden** = Fäden in Bahn- bzw. Herstellungsrichtung des Gewebes.
- **Schussfäden** = Fäden orthogonal zur Bahnrichtung.

2 Vgl. (Seidel, 2008) S. 35

3 **Zugfestigkeit** = Angabe in Kraft/Länge Ermittlung in einachsigen Zugversuchen; Werte können sich in Kett- und Schussrichtung unterscheiden. Einteilung in Typen:

Typ I: +/- 3000N / 5cm
Typ II: +/- 4000N / 5cm
Typ III: +/- 5000N / 5cm
Typ IV: +/- 7000N / 5cm
Typ V: +/- 9000N / 5cm

Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 105

4 **Weiterreißfestigkeit** = maximale Kraft, die eine eingerissene Membran noch tragen kann. Je geringer dieser Wert, desto eher kollabiert das gesamte Membrantragwerk nach einem lokalen Versagen der Membrane.

5 **Bruchdehnung** = prozentuale Dehnung einer einachsigen gezogenen Probe zum Zeitpunkt des Versagens. Je geringer der Wert, desto spröder ist das Material, d.h. das Materialversagen tritt spontan ein (Sprödbbruch). Eine hohe Prozentangabe bedeutet duktileres Verhalten - dem Materialversagen gehen Verformungen voran.

Glasgittergewebe, PTFE laminiert	5,5%
Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet Typ III	9%
Glasfasergewebe, silikonbeschichtet Typ III	9,5%
PTFE-Gewebe, unbeschichtet	10,5%
Polyestergewebe, PVC-beschichtet Typ III	23%
PTFE-Gewebe, beschichtet	28%
ETFE-Folie, 200 µm	ca. 300%

Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 105

6 **Dehnsteifigkeit** = durch Biaxialtest in Kett- und Schussrichtung ermittelt: das Material wird auf Vorspannungsniveau gedehnt und anschließend unter zu erwartende Lasten gesetzt. Die Restdehnung wird zur Beurteilung herangezogen.

7 **Festigkeit und Steifigkeit des Gewebes** = Bei beschichtetem Gewebe hängt die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften in großem Maße vom Fadenverhalten, ebenso wie von der Geometrie der im Gewebe liegenden Kett- und Schussfäden ab.

Ein Aspekt ist die Langzeitfestigkeit - dabei wird ermittelt wie viel Spannung nötig ist um das Ge-

webe nach 11,4 Jahren zu brechen.

Die höchste Festigkeit weist beschichtetes Gewebe in der Kurzzeitfestigkeit auf: sie ist höher als die Langzeitfestigkeit wie auch die Restfestigkeit. Es müssen die Spannungsverhältnisse im Material für jedweden Lastfall untersucht werden.

8 Die **Schubsteifigkeit** kommt dann zum Tragen, wenn Kräfte die über die Ränder eingeleitet werden nicht in Gewebehauptrichtung verlaufen. Es kommt zu einer Schubdeformation zwischen Kett- und Schussfäden. Die auftretende Deformation sollte nur geringe Spannungen im Gewebe hervorrufen, um die Beschichtung nicht zu beschädigen.

9 **Knickbeständigkeit** = Beschichtetes Gewebe ist relativ verletzlich was die Einwirkungen während des Transport und der Montage betrifft. Falten, Einheben, Anklemmen alles kann zu Verletzungen in der Beschichtung führen. Sogenannte Beschichtungsbrüche legen das Gewebe frei, das die tragende Funktion übernimmt. Was unerwünscht zu frühzeitigem Versagen der Konstruktion führt.

10 **freie Reißlänge** = ungedehnte Länge eines fiktiv an einem Ende des Teststreifens angehängten Teststabs in Kilometern, bei der er unter seinem Eigengewicht abreißt.

~ Reißlänge	89 km	48 km	25 km
Material	Nylon	Baumwolle	Stahl

Vgl. (Compagno, et al., 2003)

Tabelle Eigenschaften gängiger textiler Membranwerkstoffe
Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 102

	Polyestergewebe, PVC-beschichtet Abb. 3	Polyestergewebe, THV-beschichtet Abb. 4	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet Abb. 5	Glasfasergewebe, silikonbeschichtet Abb. 6	Glasgittergewebe, PTFE-laminiert Abb. 7	PTFE-Gewebe, beschichtet Abb. 8	PTFE-Gewebe, unbeschichtet Abb. 9
Einsatzgebiet Besonderheiten	vielseitig einsetzbar, sehr preisgünstiges Standardmaterial	hochwertige Oberfläche, sehr hohe Lichttransmission	für permanente Konstruktionen, hochwertiges Standardmaterial	für permanente Konstruktionen, hohe Lichttransmission	für permanente Konstruktionen, hohe Lichttransmission bei hoher Festigkeit	für permanente und mobile Konstruktionen, hohe Lichttransmission	für permanente und mobile Konstruktionen, hohe Lichttransmission, geringe Regendichtigkeit
Fügbareit	Hochfrequenz und Thermoimpulsschweißen	Hochfrequenz- und Thermoimpulsschweißen	Thermoimpulsschweißen mit Zwischenfolie	Vulkanisieren (Kleben) oder Nähen und Kleben (Kombinaht)	Thermoimpulsschweißen mit Zwischenfolie	Hochfrequenzschweißen	Nähen
Langzeitstabilität	gute UV-Stabilität bei ausreichender Beschichtungsdicke, gute chemische Beständigkeit	k. A.	sehr gute UV-Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit	gute UV Stabilität, gute chemische Beständigkeit	gute UV Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit	sehr gute UV-Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit	sehr gute UV-Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit
Knickempfindlichkeit	sehr knickbeständig, für wandelbare Systeme geeignet	knickbeständig, für wandelbare Systeme geeignet	hohe Knickempfindlichkeit, für wandelbare Systeme nicht geeignet	geringe Knickempfindlichkeit	hohe Knickempfindlichkeit, für wandelbare Systeme nicht geeignet	sehr knickbeständig, für wandelbare Systeme gut geeignet	sehr knickbeständig für wandelbare Systeme sehr gut geeignet
Schmutzempfindlichkeit	schmutzanfällig, besser mit Deckschicht, z. B. Fluorlack	gutes Anschmutzverhalten	sehr gutes Anschmutzverhalten, selbstreinigend	schmutzanfällig	selbstreinigend, jedoch Schmutzansammlung wegen rauher Oberfläche möglich	gutes Anschmutzverhalten	gutes Anschmutzverhalten
Lichttransmission	5-15% Anstieg der solaren Absorption durch Vergrauen	15-23%	8-20%	25-30%	43-46%	20-40%	35%
Umweltbelastung ⁹⁾	PVC zerfällt unter Bildung von Chlor und Salzsäure, es besteht ein Rücknahme-Netzwerk; Polyester lässt sich einschmelzen oder als Kurzfasern weiterverwenden	THV zersetzt sich bei hohen Temperaturen	Glasfasern lassen sich umweltfreundlich entsorgen, PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor	Glasfasern lassen sich umweltfreundlich entsorgen, Silikon ist recycelbar	Glasfaser lässt sich umweltfreundlich entsorgen, PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor	sortenrein, PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor	sortenrein, PTFE zerfällt nicht. Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor
Brandverhalten (Brandklassen nach DIN 4102)	B1	B1	A2 (bis Typ II) B1 (ab Typ III)	B1	B1	B1 S1-d0 (EN 13501)	B1 S1-d0 (EN 13501)
Standardfarben	Standard weiß, weitere Farben	Standard weiß	Standard weiß, begrenzte Farbauswahl	Standard weiß, Silber, weitere Farben	farblos	Standard weiß	teilweise gefärbte Garne
Flächengewicht* nach DIN 55352 [g/m ²]	Typ I: 750 Typ II: 900 Typ III: 1100 Typ IV: 1300 Typ V: 1450	Typ I: 1150 Typ II: 1200	Typ I: 800 Typ II: 900 Typ III: 1200 Typ IV: 1500	Typ 0: 200 Typ I: 340 Typ III: 685 Typ IV: 1100	1050	1080	320 530
Zugfestigkeit ¹ Kett/Schuss nach DIN 53354 [N/50 mm]	Typ I: 3000/3000 Typ II: 4200/4000 Typ III: 5800/5400 Typ IV: 7500/6500 Typ V: 10000/9000	Typ I: 3500/3000 Typ II: 11:5000/4500	Typ I: 3500/3500 Typ II: 5000/4500 Typ III: 7000/6000 Typ IV: 8000/7000	Typ 0: 2500/1 750 Typ I: 3000/3000 Typ III: 5000/5000 Typ IV: 8000/8000	4500/4000	4000/4000	2000/2050 4000/3700
Weiterreißfestigkeit ¹ Kett/Schuss nach DIN 53363 [N]	Typ I: 300/300 Typ II: 500/500 Typ III: 850/800 Typ IV: 1200/1200 Typ V: 1800/1800	Typ I: 700/700 Typ II: 600/600	Typ I: 300/300 Typ II: 350/350 Typ III: 500/500 Typ IV: 500/500	Typ 0: 350/400 Typ II: 300/300 Typ III: 400/400 Typ IV: 500/500	250/250	798/752	365/330 669/550
Lebensdauer	15-20	k. A.	>25	>20	>25	>25	>30
Rohmaterialkosten ²	15-45%	60-140%	50-150%	110-180%	100-180%	100-140%	120-170%

x) getrennte Betrachtung von Beschichtung und Gewebe, Trennung im Allgemeinen noch schwierig, erste Recyclingkreisläufe sind im Aufbau

1 Durchschnittswerte

2 im Vergleich zum Durchschnittspreis von Glas-PTFE (100%)



Abb. 3 PVC-beschichtetes Polyestergerewebe



Abb. 4 THV-beschichtetes Polyestergerewebe



Abb. 5 PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe

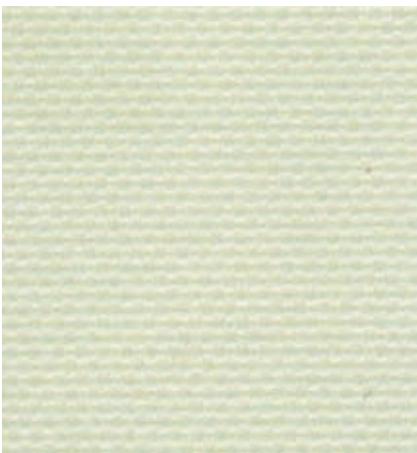


Abb. 6 silikonbeschichtetes Glasfasergewebe

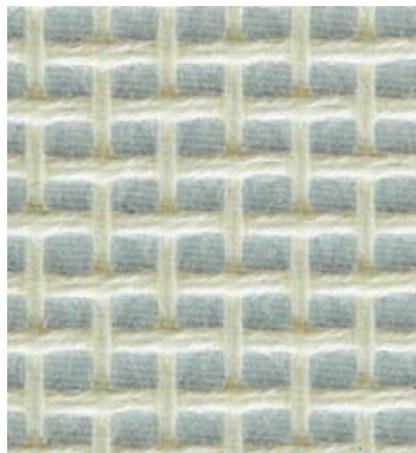


Abb. 7 PTFE-laminiertes Glasgittergerewebe



Abb. 8 beschichtetes PTFE-Gewebe



Abb. 9 unbeschichtetes PTFE-Gewebe

3.1.2 Folien

Folien weisen im Gegensatz zu den anisotropen Geweben ein annähernd isotropes Spannungs-Dehnungsverhalten auf. Das heißt die Formänderung ist in allen Richtungen annähernd gleich. Die technische Entwicklung auf dem Materialmarkt hat sehr viele verschiedene Folien hervorgebracht. Davon haben zwei thermoplastische Werkstoffgruppen eine herausragende Stellung erlangt, nämlich die Fluoropolymerfolien - meist ETFE- oder THV-Folien - und die Polyvinylchlorid-Folien - PVC.

ETFE-Folien:

ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen) präsentiert sich als eine sehr stabile chemische Verbindung, was das Material sehr widerstandsfähig gegen Umweltbelastungen wie UV-Strahlung, Säuren, Laugen o.ä. macht. Als Verbindungsmittel dient in erster Linie die durch Schweißen herbeigeführte thermische Verschmelzung. Technische Kunststoffe aus Fluorthermoplasten in Form von Folien erfreuen sich wegen ihrer hohen Transparenz großer Beliebtheit. Der größte Unterschied zu beschichtetem Gewebe sind die niedrigeren Festigkeiten^{Abb.1} und die damit verbundenen geringeren Spannweiten. Zusätzlich müssen die Ränder mit biegesteifen bzw. biegeweichen Primär- bzw. Sekundärtragkonstruktionen gestützt werden. Ist der mehrlagige Einsatz vorgesehen, haben diese Folien deutliche Vorteile gegenüber

textilen Geweben hinsichtlich des Wärmedämmverhaltens. Die ETFE-Folie hat sich als transparentes Membranmaterial in der Baubranche durchgesetzt.

Eigenschaften, die ETFE-Folien für den Einsatz in Gebäudehüllen anbieten:

- Vorteilhafte mechanische Eigenschaften
- ETFE-Membrane erfüllt die Eigenschaft „schwerentflammbar B1“ nach DIN 4102 und ist nicht brennend abtropfend. (Vgl. 5.1.4)
- Zusätzlich ist die Brandlast durch die geringe Masse bei Materialstärken sehr gering und eine geringe Gefährdung im Brandfall ist durch entsprechende Versuche zahlreich belegt.
- Hohe Durchlässigkeit von Strahlung im UV-Spektrum.

Die Belastungsdauer, sowie die Umgebungstemperatur haben sehr großen Einfluss auf das Relaxations- bzw. Kriechverhalten und die Materialsteifigkeit. Bei kurzen Belastungen in gemäßigter Umgebungstemperatur verhält sich Material annähernd elastisch¹.

THV-Folien:

Die transparenten Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Folien sind ähnlich widerstandsfähig wie ETFE-Folien und sind deshalb ebenfalls im Außenbereich einsetzbar. Sie sind leichter zu verarbeiten, elastischer und hochfrequenzschweißbar. Eine geringere Reißfestigkeit bei annähernd gleicher Reißdehnung bedeutet kleinere Spannweiten

für lastabtragende Elemente.

PVC-Folien:

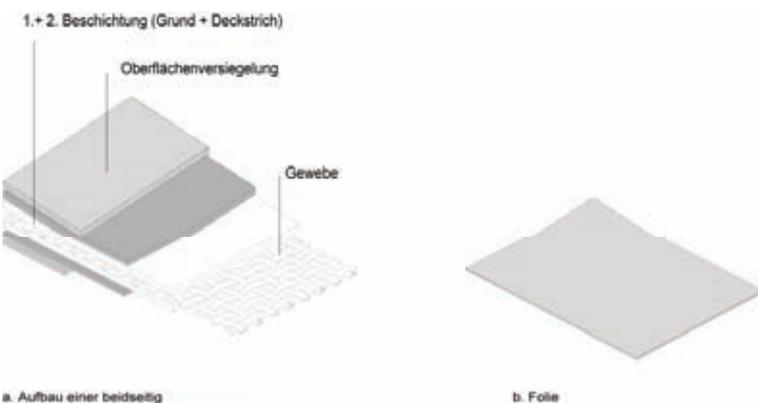
Hergestellt aus mit Weichmachern versetztem PVC-P, weist dieses Material eine geringe UV- und Temperaturbeständigkeit auf. Ebenso die Festigkeitswerte, Dehnungsergebnisse und das Anschmutzverhalten sind ungünstig für den konstruktiven Einsatz. Im Innenbereich werden PVC-Folien aufgrund ihrer preisgünstigen Verfügbarkeit, bzw. der einfachen Möglichkeit der Verarbeitung (Kleben, Schweißen) häufig im Möbel- und Messebau eingesetzt.

PE-Folien:

Als Baufolie in mehreren Stärken angeboten sind Polyethylen-Folien sehr günstig im Preis. Deshalb und wegen ihrer hohen Lichttransmission sind sie oft im Gewächshausbau zu finden. Allerdings ist PE nicht UV-stabil, was den Einsatz auf temporäre Objekte eingrenzt oder eine Aufrüstung der Folie erfordern würde.

PTFE-Folien:

Die Oberfläche der Folien aus Polytetrafluorethylen ist selbstreinigend, UV-stabil und beständig gegenüber Pilzbefall bzw. chemischen Einwirkungen. Sie sind hauptsächlich milchig weiß, weitere Farben sind werkseitig möglich. Im Vergleich zur ETFE-Folie verfügt PTFE über geringere Festigkeiten und sind weniger verformbar, aus diesem Grund beschränkt sich das architektonische Einsatzgebiet eher auf Laminatfolien für Glasgittergewebe.



a. Aufbau einer beidseitig PVC beschichteten Polyester-Membran
Abb.1 Aufbau Gewebe vs. Folie

¹ Auswirkungen der Umgebungstemperatur auf ETFE-Folien Vgl. (Knippers, et al., 2010) S.97ff

-25 °C	Dehnung geht nach mehreren Lastzyklen auf null zurück
35 °C	Deutliches Kriechen des Materials; auftreten einer Restdehnung
70 °C	Verlust von Festigkeit

Tabelle Folien nach Krämer

Gewebematerial	ETFE-Folie Abb. 2	THV-Folie Abb. 3	PVC-Folien Abb. 4
Materialtyp	50 µm 80 µm 100 µm 150 µm 200 µm	500 µm	
Flächengewicht [g/m²] DIN 55 352	87,5 140 175 262,5 350	980	25
mind. Zugfestigkeit [N/5cm] Kette/Schuss DIN 53 354 Bzw. DIN EN ISO 527	64/56 58/54 58/57 58/57 52/52	22/21	1200/1200
Bruchdehnung [%] K/S DIN 53 354 Bzw. DIN EN ISO 527	450/500 500/600 550/600 600/650 600/600	540/560	
Weiterreißfestigkeit [N] K/S DIN 53 363	450/450 450/450 430/440 450/430 430/430	255/250	
Knickbeständigkeit	befriedigend	gut	befriedigend
UV Beständigkeit	sehr gut	gut	ausreichend
Erreichbare Baustoffklasse DIN 4102	B1	B1	B1
Transluzenz [%]	bis ~ 95	bis ~ 95	bis ~ 95
Lebenserwartung (a)	>25	>20	>5
Standardfarben	Standard transparent, weiß oder blau, weitere Farben und Bedruckungen auf Anfrage	Standard transparent, weitere Farben auf Anfrage	diverse Standardfarben
Anwendungen	Zoologische Anlagen, Gewächshäuser, Schwimmbäder, Fassaden und Atrien	Innenanwendungen, Außenanwendungen geringer Spannweiten	Innenanwendungen



Abb. 2 ETFE-Folie

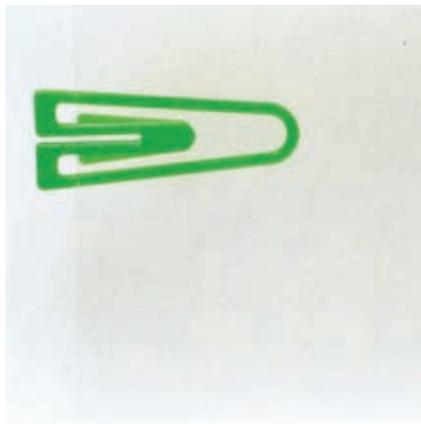


Abb. 3 THV-Folie

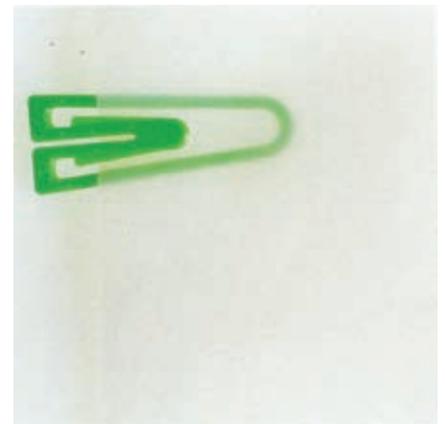


Abb. 4 ETFE-Folie

Abb. 1 **Frei geformte Flächen** = folgen weder physikalischen noch geometrischen Gesetzmäßigkeiten; mathematisch beschreibbar mit Uniform Rational B-Splines (NURBS), die über ihren Grad, gewichtete Kontrollpunkte und Knotenvektoren bestimmt werden.

- a) einfach gekrümmt
- b) doppelt gekrümmt, synklastisch
- c) doppelt gekrümmt, antiklastisch

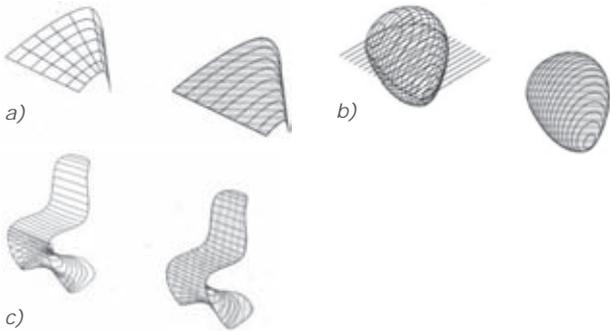


Abb. 3 **Strukturopimierte Flächen** = Geometrien, die unter definierten Lasten und Lagerbedingungen möglichst reine Membranspannungszustände ermöglichen.

- a) einfach gekrümmt
- b) doppelt gekrümmt, synklastisch
- c) doppelt gekrümmt syn- bzw. antiklastisch

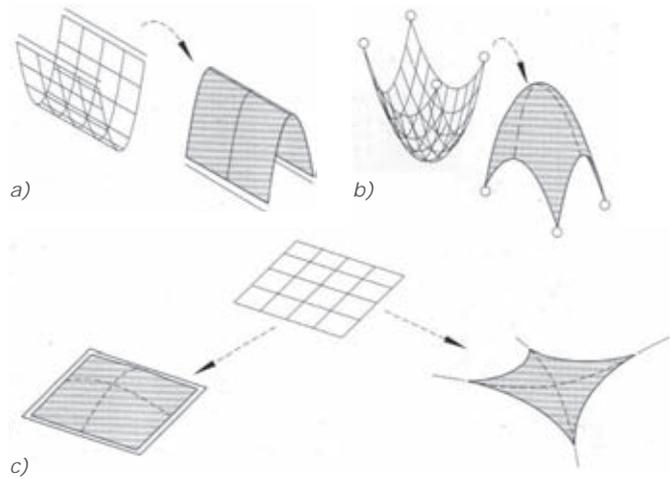
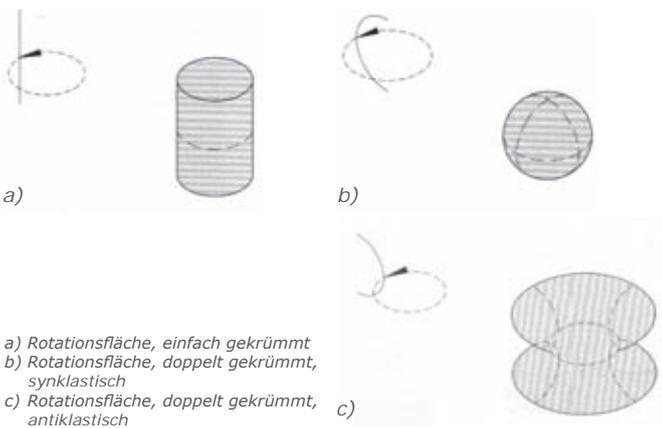
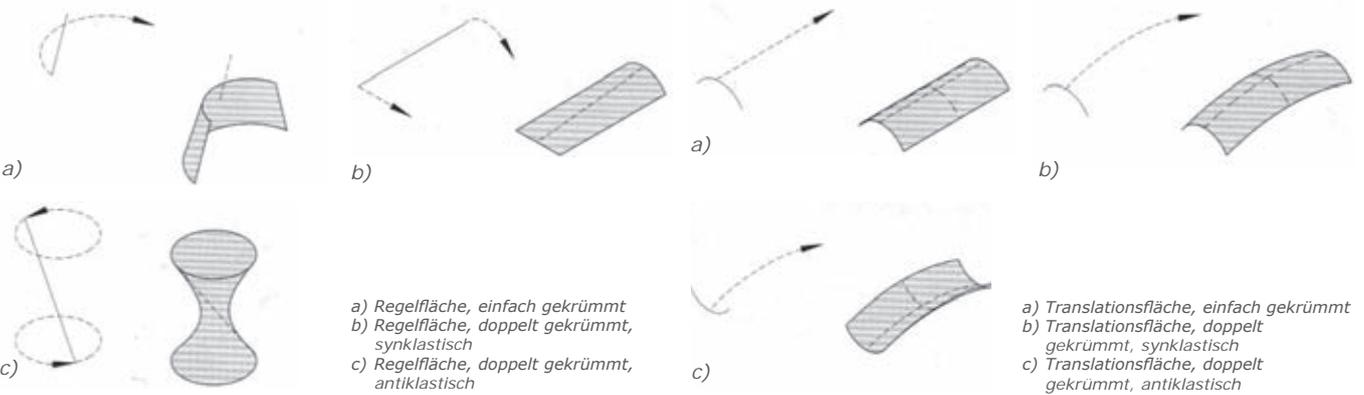


Abb. 2 **Geometrische Flächen** = entstehen durch Leitkurven; algebraische Flächen sind durch ein Polynom definiert. Diese Flächen sind vorteilhaft für Fertigung und Montage, da sie garantiert abwickelbar sind, die Krümmungen definiert und mittels Vierecken eindeckbar sind.



- a) Rotationsfläche, einfach gekrümmt
- b) Rotationsfläche, doppelt gekrümmt, synklastisch
- c) Rotationsfläche, doppelt gekrümmt, antiklastisch

4. Anforderungen an das Entwerfen mit Membranen

Membranen und das Prinzip Leichtbau bilden eine untrennbare Einheit. Die Verbindung von Konstruktion, Fertigungstechnik und Werkstofftechnik sollen den Anspruch der Minimalkonstruktion erfüllen - das heißt das Streben nach maximaler Werkstoffausnutzung bei minimalem Gewicht unter Miteinbeziehung der Wirtschaftlichkeit und der Umwelteinflussung.

Membrankonstruktionen können nicht im herkömmlichen Sinne entworfen werden, da sämtliche Randbedingungen, Einflussfaktoren oder sonstige Parameter direkten Einfluss auf das Gesamtsystem haben.

Der Entwerfende kann nicht intuitiv gestalterisch wirken, er muss sich allen Folgen seiner Entscheidungen bewusst sein.

Der Entwurfsprozess verläuft nicht linear, sondern ist oft Rückkopplungen unterworfen und damit iterativ.

Dieser Abschnitt soll Einblicke in das Prinzip Kraft - Material - Form geben und dem Planenden den Einstieg in den Entwurfsprozess erleichtern.



Abb. 4 Prinzip Leichtbau

1 Beispiele für Randbedingungen für Membranflächen:

- Kontur des Randes
- Anordnung der Hoch- und Tiefpunkte
- Stützende Tragteile
- Verteilung der Vorspannung in der Fläche
- Gewebeausrichtung bei Textilien
- Querdehnungseigenschaften des Werkstoffes
- Anordnung der Unterspannselle bzw. Gurte

4.1 Formfindung und Tragverhalten

Eine Membranfläche wird in der Regel folgendermaßen definiert:

- Räumlich gekrümmt
- Sich im Kräftegleichgewicht befindend
- Ausschließlich auf Zug beansprucht (Druckspannungen würden zu Falten führen)

Die Materialeigenschaften bedingen die Formgebung - dieses Prinzip gilt ganz besonders für Membrankonstruktionen bei denen das Material und die Form zur Optimierung der Statik aufeinander abgestimmt werden müssen um ihr ästhetisches Potential auszuspielen zu können.

Es wird von formaktiven Systemen gesprochen, das bedeutet ein enges Zusammenspiel von Kräftefluss, materialisierter Form und architektonischer Entwurfs-idee.

Es gibt zwei Möglichkeiten äußere Lasten ohne Schubkräfte und Biegemomente abzutragen, nämlich entweder mittels reinem Zug (Seile, Membrane) oder durch reinen Druck (Stützbögen).

Wirken äußere Lasten - wie Wind oder Schnee - auf das System, wird es sich in seiner Geometrie durch Verformung ändern - daher die Bezeichnung formaktiv. Zu den effizientesten Tragsystemen

zählen die zugbeanspruchten formaktiven Tragsysteme, auch bekannt als leichte Flächentragwerke.

Damit die Lasten axial abgetragen werden können, ist eine Flächenkrümmung vorzunehmen, was entweder mit freien^{Abb.1}, geometrischen^{Abb.2} oder strukturoptimierten^{Abb.3} Formen erreicht werden kann.

Der Kraftfluss nimmt eine entscheidende Rolle ein, die Form ergibt sich aus dem Eigenspannungszustand der Membranfläche und den festgelegten Randbedingungen.

Im ersten Formfindungsschritt werden die Randbedingungen¹ definiert, was zu weiteren Formfindungsschritten führen wird, da in diesem Prozess die kreative, immaterielle Idee bzw. das Konzept mit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten zusammengeführt werden muss.

Das zunächst entweder experimentell - z.B. Stoffmodelle aus elastischen Geweben - oder auf numerischem Wege - z.B. Finite-Elemente-Methode², Kraft-Dichte-Methode³ - entstandene Arbeitsmodell ist ständigen Adaptionen unterworfen, die erst mit der Zugschnittsplanung nach der Bauteildimensionierung und Detailplanung enden. Softwareanwendungen wie z.B. Formfinder⁴ oder EASY⁵ unterstützen den Planungsprozess.

2 Finite-Elemente-Methode (FEM)

Vgl. (Knippers, et al., 2010) S.139: Eine Gesamtstruktur wird in einzelne, durch Knoten miteinander verbundene Elemente unterteilt. Die spezifischen Eigenschaften typischer Stab- oder Flächenelemente können durch Federmodelle dargestellt werden. Die Spannungs-, Verzerrungs-, und Verschiebungsgrößen in den Elementen und die Erfüllung der Bedingung, dass an den gemeinsamen Knoten benachbarter Elemente die Verschiebungen gleich sein müssen, werden zur Betrachtung herangezogen. Damit ist es möglich die Kräfte und Verformungen der Struktur näherungsweise zu berechnen.

3 Kraft-Dichte-Methode / Force Density Method

Vgl. (Knippers, et al., 2010) S.139: Entwickelt speziell für die Berechnung vorgespannter Seilnetzkonstruktionen. Das Prinzip fußt auf dem Kräftegleichgewicht in den Netzknoten. Der Quotient aus Kraft/Länge wird zur Kraftdichte zusammengefasst, was die Bestimmungsgleichungen linear und damit direkt bestimmbar machen lässt.

4 Formfinder - Entwurfs- und Architekturwerkzeug Arbeitsweise

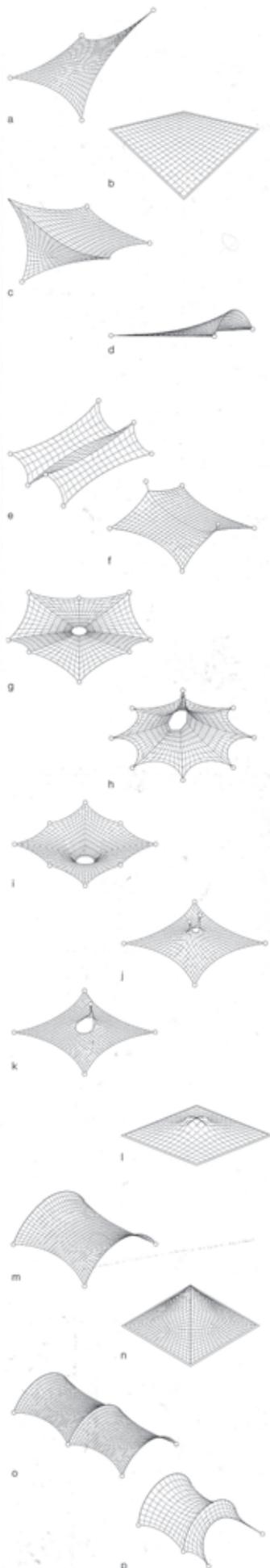
- Vgl. (Formfinder Software GmbH):
- Festlegen der Geometrie des Randes mittels Punkten. Auf diese Weise kann eine grobe Handskizze in ein 3D_Modell am Bildschirm übersetzt werden.
 - Generieren des Netzes: Die Membranfläche stellt sich auf die Kraftverläufe ein (mehrere Parameter sind einzustellen). Die so entstandene

ne Form basiert auf der Kraft-Dichte-Methode - die Kräfte verteilen sich harmonisch über die Gesamtgeometrie

- Bestimmung der Festpunkte und der Vorspannungsverteilung, sowie Zuweisung materialspezifischer Charakteristika.
- Objektanalyse: Typologieabfrage, Baumassen- und Kostenschätzung wird durch Zugriff auf die Membranbaudatenbank „Project Finder“ bzw. eine Materialdatenbank möglich um die Komplexität des Projekts abschätzen zu können.

5 EASY Produktpalette

- Vgl. (technet GmbH - Berlin):
- **Easy.Form:** Prozeduren, die für die Datenaufbereitung zusammen mit der Kraft-Dichte-Formfindung benötigt werden.
 - **Easy.Stat:** statische Analyse nichtlinearer Strukturen (Beschränkung auf: Membranelemente, Seilelemente, Druckstäbe)
 - **Easy.Beam:** Einbeziehung biegesteifer Elemente in die Berechnung des Gesamtsystems.
 - **Easy.Cut:** Erzeugen von hochqualitativen ebenen Schnittmustern aus den Easy.Form Ausgabedaten.
 - **Easy.Vol:** Erweiterung für pneumatische Strukturen



Als lastabtragende Fläche eingesetzt müssen Membrane vorspannbar⁶ ausgeführt sein bzw. eine im Raum gekrümmte Fläche einnehmen können. Die Art der Vorspannung ist nicht nur für die ästhetische Wirkung der Hülle ausschlaggebend, sondern bestimmt gemeinsam mit der Geometrie und Materialsteifigkeit die Steifigkeit und das Tragverhalten.

„Man spricht von geometrischer Steifigkeit in Abhängigkeit der Flächenkrümmung und von elastischer Steifigkeit in Abhängigkeit von Werkstoffeigenschaften und Flächenvorspannung.“⁷

Äußere Lasten können ausschließlich mit ausreichender doppelter Krümmung abgetragen werden. Lasten wie zum Beispiel Windsog, Winddruck und Schneelast gelangen sicher über die ausschließlich zugbeanspruchbare Membran in die Primärkonstruktion bzw. in die Fundamente.

Hochfrequentes Flattern aufgrund starkem Wind führt zu Schäden am Material und an der Unterkonstruktion. Ein weiteres Beispiel ist sich ansammelndes Wasser in horizontalen, ebenen Bereichen, das sich zu einem schweren Wassersack entwickelt und zu spontanem Materialversagen führen kann. Solche Verformungen und damit verbundene Schäden können durch entsprechende Vor-

spannung verhindert werden. Als mechanisch vorgespannte Struktur sollten sie eine im Raum doppelt und gegensinnig gekrümmte Fläche einnehmen, pneumatisch vorgespannte Systeme weisen doppelt und gleichsinnig gerichtete Krümmungen auf.

Mechanische Vorspannung

Feste Auflager und Vorspannung definieren die Form einer mechanisch vorgespannten Membran. Um die Membranhaut zu stabilisieren nimmt diese meist eine antiklastisch⁸-gekrümmte Form ein, die auf verschiedene Weise erzeugt wird⁹.

Lässt das Membranmaterial Verformungen zu, so könnte die Membranfläche eben gespannt werden. Es wird sich unter Windlast eine synklastische Krümmung einstellen. Um Faltenbildung und Flattern der Membranfläche Vorschub zu leisten, muss der Wert der Vorspannung so gewählt werden, dass keine spannungslosen Zustände während der Belastung in der Membran auftreten können.

Nicht nur die Optik würde unter Falten und dergleichen leiden, sondern die Lebensdauer würde drastisch verkürzt werden. Zusätzlich ist es möglich die Membran durch Seile und Gurte zu stabilisieren die auf der Fläche aufliegen.

6 **Vorspannung** bedeutet in der Membranarchitektur, dass die Membran zu jeder Zeit – also auch im unbelasteten Zustand – unter Grundspannung steht. Dieser Umstand wirkt sich in großem Maße auf den Alterungsprozess der Membran aus. Als Richtwert für die Vorspannung bei technischen Geweben können 10% der Kurzzeitfestigkeit angenommen werden.

Abb. 5 Varianten mechanisch vorgespannter Flächen:

- a) Vierpunktsegel mit biegeweichen Rändern
- b) Vierpunktsegel mit biegesteifen Rändern
- c) Funfpunktsegel mit biegeweichen Rändern und Segellatte
- d) Dreiecksfläche mit biegesteifem Bogenrand
- e) Segelfläche mit abwechselnden Grat- und Kehlseilen
- f) Segelflächen mit Gratseil und ebenen biegeweichen Rändern
- g) Sternwelle mit abwechselnden Grat- und Kehlseilen
- h) Hochpunktfläche mit Seilauge und Gratseilen
- i) Tiefpunktfläche mit steifem Ring
- j) Hochpunktfläche mit Seillinse
- k) Hochpunktfläche mit Seilauge
- l) Hochpunkt mit Buckel
- m) bogengestützte Fläche mit zwei Randbögen
- n) bogengestützte Fläche mit innen liegendem, durch die Membran stabilisierten Bogen
- o) Addition von bogengestützten Flächen
- p) stabilisierter Randbogen durch außen liegenden biegeweichen Rand

7 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S.140

8 **antiklastisch** = gegensinnig gekrümmt
synklastisch = gleichsinnige Krümmung

9 **„Die Krümmung bei mechanisch vorgespannten Membranen wird erzeugt**
Vgl. (Adamczewski, 2008) S.17:

- Durch **Höhenunterschiede der Randpunkte**
- Durch **Hoch- und Tiefpunkte** innerhalb der Membranfläche
- Mit Hilfe **linear stützender Tragteile** als Auflager für die Membran. Hierfür eignet sich vor allem der Druckbogen, der der Membran seine eigene Krümmung unmittelbar am Auflager mitteilt.
- **Gekreuzte Bögen** bis hin zur Gitterschale
- **Seile und Gurte**, die zur Stützung der Membran eingesetzt werden, können als Pendant zum Druckbogen angesehen werden. Unterhalb der Membran angeordnet, ziehen sie diese in hängender Form nach oben und bilden einen Grat; umgekehrt kann die Membran durch oben auf-liegendes Seil nach unten gespannt werden, wobei sich eine Kehle einstellt.“

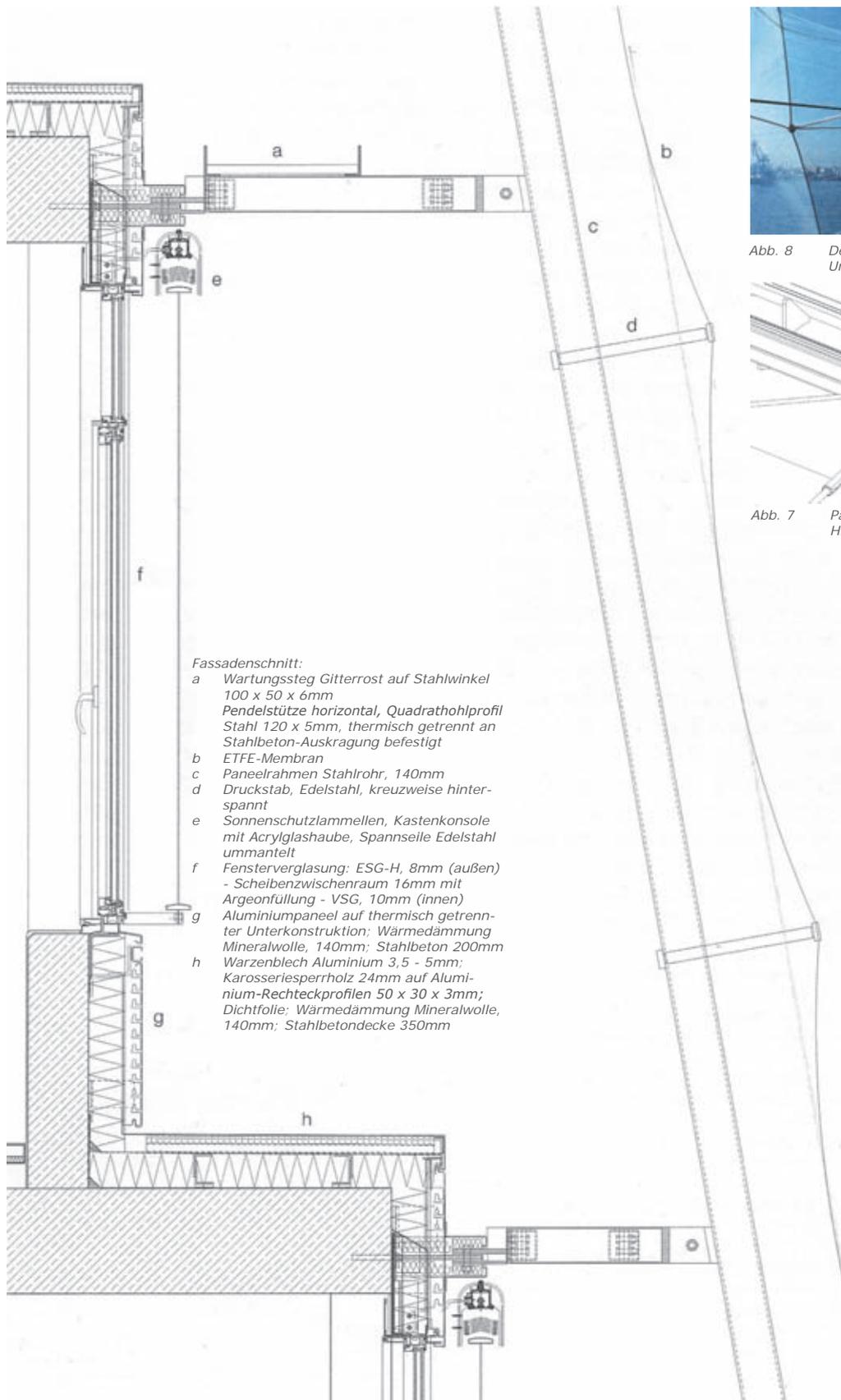


Abb. 6 Fassadenschnitt einer mechanisch vorgespannten Membran
Firmenzentrale Unilever, Hamburg
Behnisch Architekten, Stuttgart



Abb. 8 Detailfoto Fassade Firmenzentrale Unilever, Hamburg

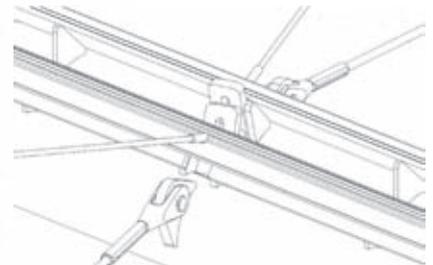


Abb. 7 Paneelrahmen mit Befestigung der Hinterspannung (Axonometrie)

Pneumatische Vorspannung

In diesem Fall wird die Form durch feste Auflager in Verbindung mit Vorspannung und Volumen gebildet. Dazu werden pneumatische Kissen in Rahmen eingespannt und ein gewisser Innendruck aufgebaut.

Prinzipiell kann die Form jegliche Geometrie aufweisen, jedoch sollte beachtet werden, dass sehr spitze innere Winkel des Rahmens zu Problemen bereits bei der Herstellung führen können - Faltenbildung ist an diesen Stellen quasi vorprogrammiert.

Als Ausgangspunkt für den Entwurf sind quadratische, rechteckige, rautenförmige bzw. mehreckige Formen zu empfehlen, die zusammengesetzt eine geschlossene Fläche bilden. Es müssen nicht alle Teile absolut gleich sein, die Geometrie kann sich wie Puzzleteile voneinander unterscheiden.

Eine weitere Möglichkeit für Kissenkonstruktionen^{Abb.9} ist die Schlauchform, die – wie beim Raumfahrtmuseum in Leicester von Nicholas Grimshaw & Partners Limited^{Abb.10} – geschosshohe, vertikal angeordnete Ringe bilden, die den Gebäudeumriss definieren.

Die Vorspannung ist ebenfalls wie der Stich bzw. die Krümmung so zu bemessen, dass bei Belastung keine spannungslose Zustände auftreten.

Werden Spannweiten erreicht, bei denen das Membranmaterial die Windlasten nicht ausreichend aufnehmen kann, können, wie bereits bei den mechanisch vorgespannten Systemen erwähnt, Gurte bzw. Seile als stützende Elemente verwendet werden. Je nach Art des Drucks werden diese außenseitig (Überdruckpneus) bzw. innenseitig (Unterdruckpneus) angebracht^{Abb.9}.

Meistens werden die Membranspannungen durch einen biegesteifen Rand aufgenommen, was bedeutet dass keine großen Spannkraften in den Baugrund abgeleitet werden müssen.

„Pneumatische Kissen können im Vergleich zu mechanisch vorgespannten Flächen wegen ihrer geringen Steifigkeit kein Zuelement im Tragwerk ersetzen und somit keinen Beitrag zur Systemsteifigkeit leisten.“¹⁰

10 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 143

Abb. 9 Pneumatisch vorgespannte Flächen

- a) quadratisches Kissen
- b) rechteckiges Kissen
- c) dreieckiges Kissen
- d) sechseckiges Kissen
- e) Tragluflhalle
- f) seilverstärkte luftgestützte Fläche
- g) Unterdruckkissen
- h) Schlauch
- i) Addition von Schläuchen
- j) Tensairity-Balken mit steifem Ober- und Untergurt
- k) Tensairity-Balken mit steifem Obergurt und Seiluntergurt

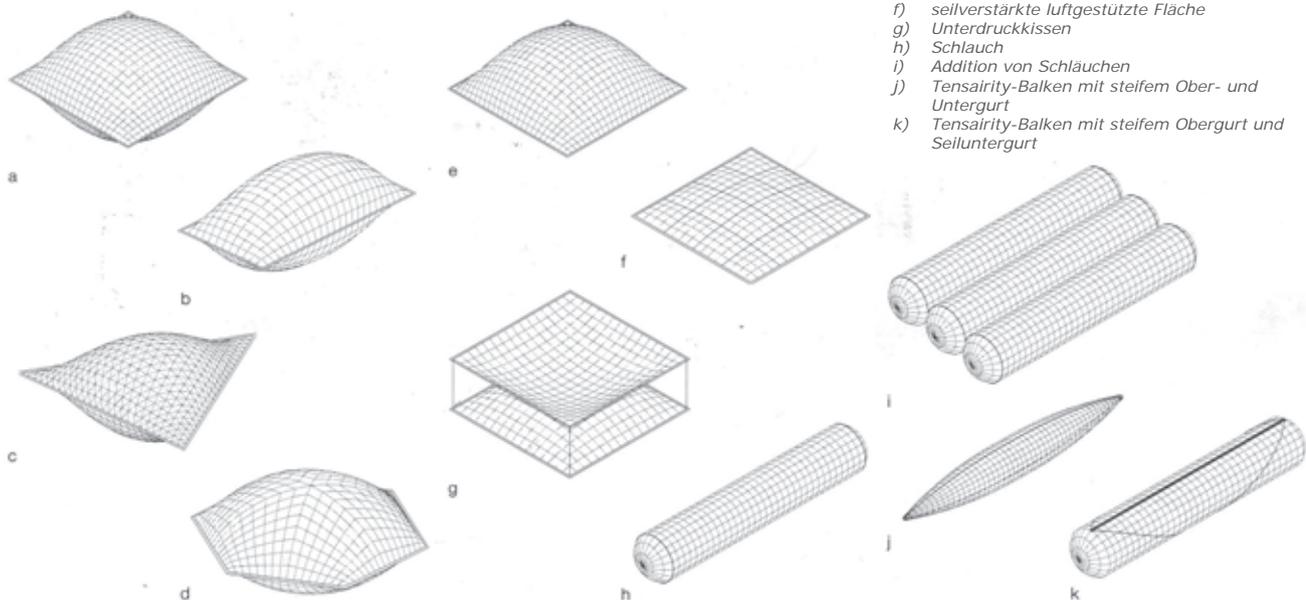




Abb. 11 Raumfahrtmuseum, Leicester
Nicholas Grimshaw & Partners Limited

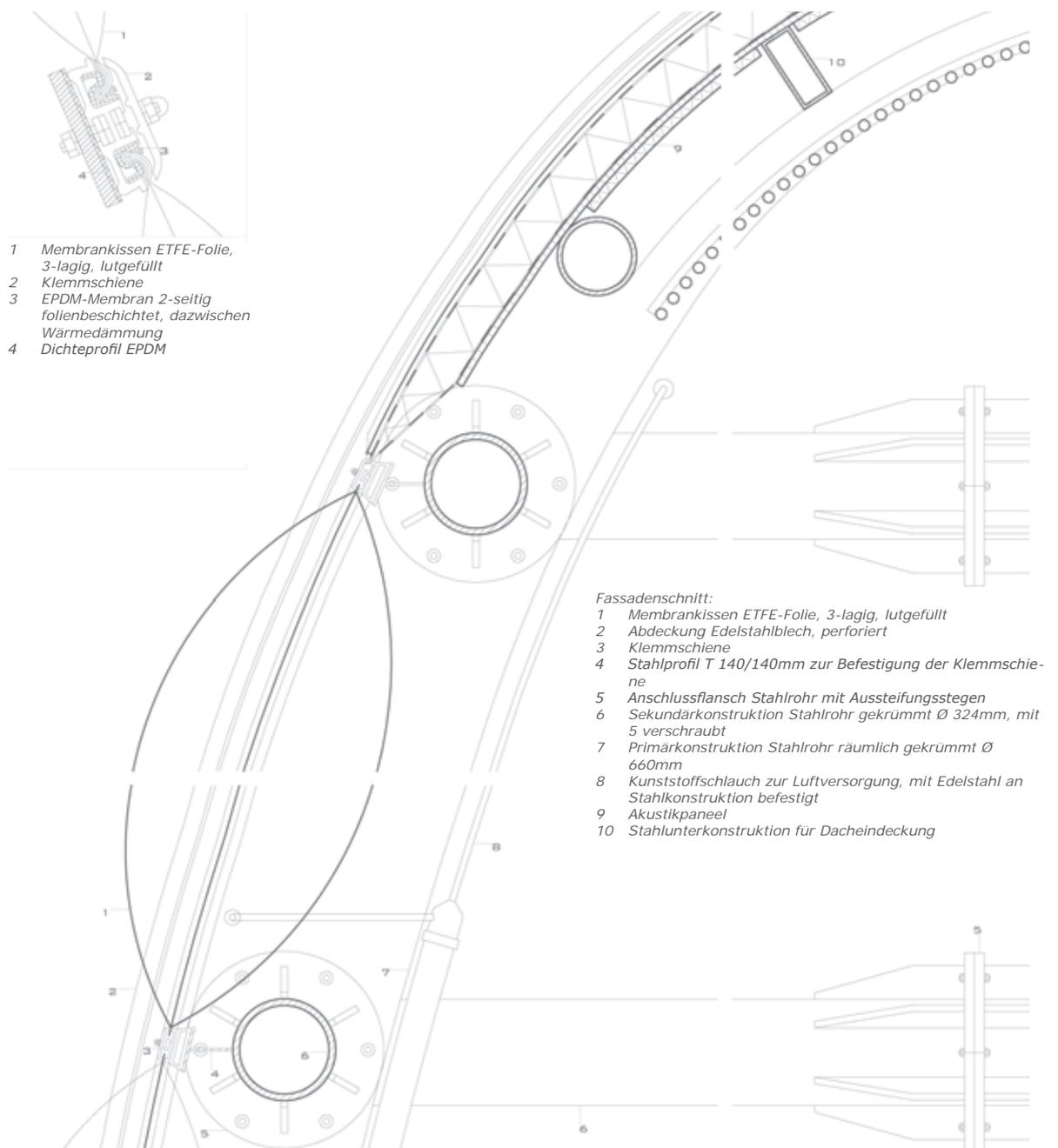


Abb. 10 Fassadenschnitt pneumatische Kissen in schlacuhähnlicher Ausführung
Raumfahrtmuseum, Leicester
Nicholas Grimshaw & Partners Limited

Bei der Entwicklung einer Membranfläche müssen einige Parameter für eine uneingeschränkte Funktionalität bedacht bzw. zu Beginn festgelegt werden:

- Minimal-Konstruktion
- Fixpunkte, Randseil-, Flächenkrümmung und Vorspannwerte mechanisch vorgespannter Flächen
- Wandelbarkeit ja / nein
- Belüftungsmöglichkeiten
- Sonnenschutz
- Montage
- Lebensdauer und Beständigkeit

Minimal-Konstruktion¹¹

Aus ästhetisch, gestalterischer aber ebenfalls aus ökonomischer Sicht ist es wünschenswert, dass die Tragkonstruktion der Membranfassade die der Formbildung bzw. Nachspannung dient möglichst reduziert wird. Um die Windlasten zu reduzieren ist auf eine aerodynamische Form abzu-
zielen^{Abb.12}.

Dem Prinzip der minimalen Materialaufwendung ist bis in die Detailplanung Folge zu leisten. Wichtig ist die proportionale harmonische Beziehung zwischen den Verbindungen o.ä., die Dimensionen ergeben sich jeweils

aus den unmittelbar miteinander verbundenen Details.

Fixpunkte, Randseil-, Flächenkrümmung und Vorspannwerte mechanisch vorgespannter Flächen¹²

Prinzipiell ist ein **Fixpunkt** ein Auflagerpunkt zur indirekten Ableitung der Zugspannungen über Stützen, Abspannungen, Ausleger bzw. zur direkten Ableitung in den Baugrund. Architektonische Randbedingungen legen im Normalfall die geometrische Lage der Fixpunkte fest.

Biegeeweiche Membranränder beschreiben annähernd einen Kreisbogen, da die Membranspannungen hauptsächlich im rechten Winkel zum Membranrand wirken. Dieses Verhalten beschreibt die zweidimensionale Kesselformel¹³. Diese Formel verdeutlicht den Zusammenhang von Flächen- und Randseilkrümmung und zeigt, dass die **Randseilkrümmung** nicht von der Spannweite abhängt. Allerdings beeinflusst die Spannweite indirekt die Randseilkrümmung, denn je weiter gespannt wird, umso größer muss aus wirtschaftlichen, geometrischen und konstruktiven Gründen der Krümmungsradius sein.

Als Faustregel für den Mindestradius eines Randseils gilt die halbierte Spannweite.

An den Randpunkten wird das Randseil festgemacht.

Wird eine Membran zwischen Randpunkten gespannt, entsteht die sogenannte **Flächenkrümmung**. Diese ist nur bedingt beeinflussbar, da sie in erster Linie von der Geometrie der Fix- bzw. Randpunkte abhängt. Oft muss aus funktionalen Gründen der Durchhang einer Fläche verändert werden - man denke an Durchgangshöhen, Lichteinfallswinkel oder Wassersackbildung. Für solche Vorhaben werden Grat- und Kehlseile eingesetzt. Sie erhöhen die Steifigkeit der Membranfläche und reduzieren Verformungen und Spannungen.

Die letzte festzulegende Randbedingung ist der **Vorspannwert**. Dieser hängt von der geometrischen und elastischen Steifigkeit der Membran ab.

Prinzipiell ist festzuhalten, dass **flache Formen im Gegensatz zu stärker gekrümmten stärker vorgespannt werden müssen**.

Zu gewährleisten ist eine gleichmäßig vorgespannte, faltenfreie

¹¹ Vgl. (Adamczewski, 2008)

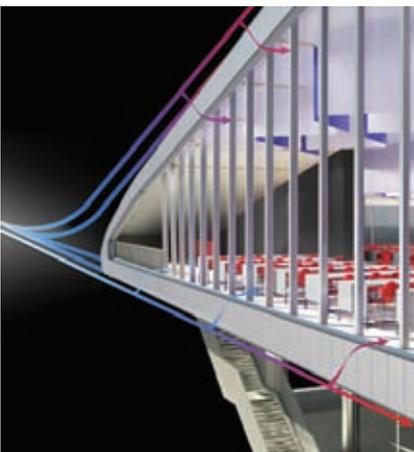


Abb. 12 Aerodynamik einer Gebäudeform

¹² Vgl. (Knippers, Cremers, Gabler, & Lienhard, 2010) S. 140 ff

¹³ Kesselformel: $S = r \cdot V$
 S ... Randseilkraft [kN]
 r ... Randseilkraft [kN]
 V ... Flächenspannung [kN/m]

Oberfläche, die auch bei Wirken der Außenlasten die Vorspannung aufrecht erhält. Wird jedoch die Vorspannung als zu hoch angenommen, kann die Tragreserve ungenügend sein, was zu hohen Auflagerkräfte führt.

In die Praxis übersetzt bedeutet dies die großflächige Erhaltung der Vorspannung, sodass sich unter Winddruck oder Schneelast keine große Mulden bilden, in denen sich Wasser sammeln kann. Typische Werte für die Vorspannung liegen zwischen 1-5 kN/m¹⁴.

Randbedingungen für pneumatisch vorgespannte Flächen¹⁵

„Grundsätzlich besteht bei pneumatisch vorgespannten Flächen ein Zusammenhang zwischen der Oberflächenkrümmung und dem für die Stützwirkung erforderlichen Druckniveau.“¹⁴

Der Grad der pneumatischen Vorspannung ist mittels Steuerung des Innendrucks regulierbar. Deshalb ist der erforderliche Überdruck in Kissen abhängig vom Volumen und den statischen Erfordernissen. Der Druck bewegt sich zwischen 100-1000 Pa (0,1 kN/m² - 1 kN/m²) und muss größer als die prognostizierte Belastung aus Schnee und Wind sein. Im Vergleich zu mechanisch

vorgespannten Flächen ist der Wert der Vorspannung gering, allerdings muss dieser konstant aufrecht erhalten werden.

Es kommt vor, dass Systeme eingesetzt werden, die den Innendruck je nach Anforderung anpassen können.

Wandelbarkeit

Es ist ratsam sich bereits zu Beginn des Entwurfsprozesses prinzipiell für oder gegen eine mögliche Wandelbarkeit zu entscheiden. Wandelbare Konstruktionen sind immer Sonderlösungen die projektspezifisch bearbeitet werden müssen. Selbstverständlich erleichtert ein interdisziplinärer Ansatz die Planung ungemein. Membrane können relativ einfach ihre Form reversibel ändern. Das Wechselspiel zwischen Vorspannung und Formänderung macht zwei Arten der Wandelbarkeit aus:¹⁶

Die Membran bleibt während des gesamten Wandlungsvorgang unter Vorspannung und damit begrenzt stabil. Die Form und der Spannungszustand ändern sich.

Beispielsweise pneumatisch stabilisierte Membranen ändern durch Druckänderungen Form

und Vorspannung. Ein Mindestdruck ist immer vorhanden, der ein Mindestmaß an Vorspannung während des Wandlungsprozess aufrecht erhält.

Die Membran verliert ihre Vorspannung und ändert damit ihre Geometrie von einem Flächenelement zu einem Volumelement.

Diese Art der Wandelbarkeit kommt sowohl bei mechanisch als auch pneumatisch vorgespannten Membranen zum Einsatz. Verschiedene Bewegungsarten wie Falten¹⁷, Raffen¹⁸, Rollen¹⁹ bieten sich für die Wandlung von flächigen Konstruktionselementen zu kompakten Volumen an.

Belüftungsmöglichkeiten

Je nach Nutzung sind verschiedene Konzepte zur Frischluftzufuhr möglich. Doch die Erfahrung aus dem Passivhaus-Bereich zeigt, dass in manchen Fällen die Möglichkeit zur Individual-Lüftung erwünscht sind. Ist dies der Fall, muss die Integration von Lüftungsschlitzen oder dergleichen miteingeplant werden. Wird eine Doppelfassade angedacht, ist die natürliche Durchlüftung des Fassadenzwischenraums zu bedenken.

¹⁴ Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 147

¹⁵ Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 147ff

¹⁶ Vgl. (Gengnagel, 2005)

¹⁷ **Falten:**

Wird eine Membran mehrfach gefaltet, reduziert sich die Fläche in beide Dimensionen. Der Vorteil einer Faltung liegt in der Erzeugung eines präzisen Faltbildes und der maximalen Wandlung von der Fläche zum Volumen.

¹⁸ **Raffen:**

Raffen ist eine Variante des Faltens, bei der sowohl eine Kante als auch ein Eckpunkt der Fläche zu einer Linie oder einem Punkt hin bewegt wird.

¹⁹ **Rollen:**

Die Dimension einer Fläche einer Membran reduziert sich in lediglich einer Richtung. Durch das Rollen ändert sich die Fläche zu einem zylindrischen Volumen, das hat den Vorteil der geringeren Anfälligkeit für Beschädigungen durch Knicken im Gegensatz zum Falten/Raffen.

Sonnenschutz

Wie bereits ausgeführt können durch große transparente Flächen abgegrenzte Räume bei kontinuierlicher Sonneneinstrahlung überhitzen.

Prinzipiell sollte der Sonnenschutz außerhalb der temperierten Hülle liegen, um die Temperatur der Innenluft gering zu halten - Stichwort Treibhauseffekt: kurzweilige Sonnenstrahlen durchdringen die transparente Fläche und erwärmen Masse - Möbel, Boden, o.ä. Die Masse sendet Wärme mittels langwelliger Strahlung aus, die die transparente Fläche nicht mehr durchdringt, sondern von ihr reflektiert wird.

Klimatechnisch günstig wäre bei mehrlagigen Aufbauten das Anbringen des Sonnenschutzes im Zwischenraum, da auf diese Weise Windlasten vermieden werden können.

Der Entwurf von rpaX - rainer pirker architeXture für ein Bürohaus in Salzburg^{Abb.13} zeigt die Möglichkeiten der Klimatisierung mit Hilfe einer sehr leichten, pneumatischen Hülle auf.

Der Luftaustausch findet über Lüftungsöffnungen in den bzw. aus dem Fassadenzwischenraum mittels Lüftungsöffnungen statt.

Die aufsteigende warme Luft kann durch die Lüftungsöffnungen entweichen, der integrierte pneumatische Sonnenschutz schützt vor Überhitzung. Zusätzlich dazu wird zwischen der pneumatischen Aussenhülle und der Innenschale vom Erdreich temperierte Luft in den Zwischenraum gebracht. Das erleichtert im Sommer das Kühlen, in der kalten Jahreszeit wirkt die wärmere Erdluft als Puffer.

Montage und Wartung^{20,21}

Zu Beginn steht die Frage ob die geplanten Konstruktionselemente problemlos anzufertigen sind - deren Fertigungsgerechtigkeit hinsichtlich Typisierung, Austauschbarkeit, Serienfertigung und Lieferzeit.

Weiters sind Überlegungen zur **Belastungsgerechtigkeit** anzustellen. Das bedeutet, dass die **Werkstoffwahl** nach dem stofflich-mechanischen Verhalten, der statischen Funktion, den Festigkeiten, Steifigkeiten bzw. Beständigkeit auf das Montagekonzept abgestimmt sein muss. Beispielsweise glasfaserverstärkte Membranen weisen eine relativ hohe Empfindlichkeit gegenüber dem Knicken auf.

Weiters sollte die Frage der **Montagegerechtigkeit** geprüft werden:

Können Toleranzen und Passgenauigkeit im Kraft-, Stoff- und Formschluss gewährleistet werden?

Ist die Montage hinsichtlich Gewicht, Ergonomie bzw. Handhabbarkeit, Greifbarkeit und Zugänglichkeit möglich?

Müssen Zugangsmöglichkeiten oder -wege konstruktiv eingeplant werden?

Im Allgemeinen ist die Montage abhängig von:

- Konstruktion (Geometrie, Vorfertigung)
- örtliche Randbedingungen (Zugänglichkeit)
- Material (Vorspanngeschwindigkeit, Spannweiten, Spannweg)
- Zuschnitt (Spannrichtung)
- Wetter (Sicherheit)

Es kann vorkommen, dass das Material eine Einleitung der Vorspannung über einen längeren Zeitraum hinweg erfordert. Denn die zeitabhängige Spannungsrelaxation kann teilweise nur schrittweise erfolgen, damit sich die Vorspannung dauerhaft in der Membran einprägt.

20 Vgl. (Seidel, 2008) S. 93 ff

21 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 92 ff

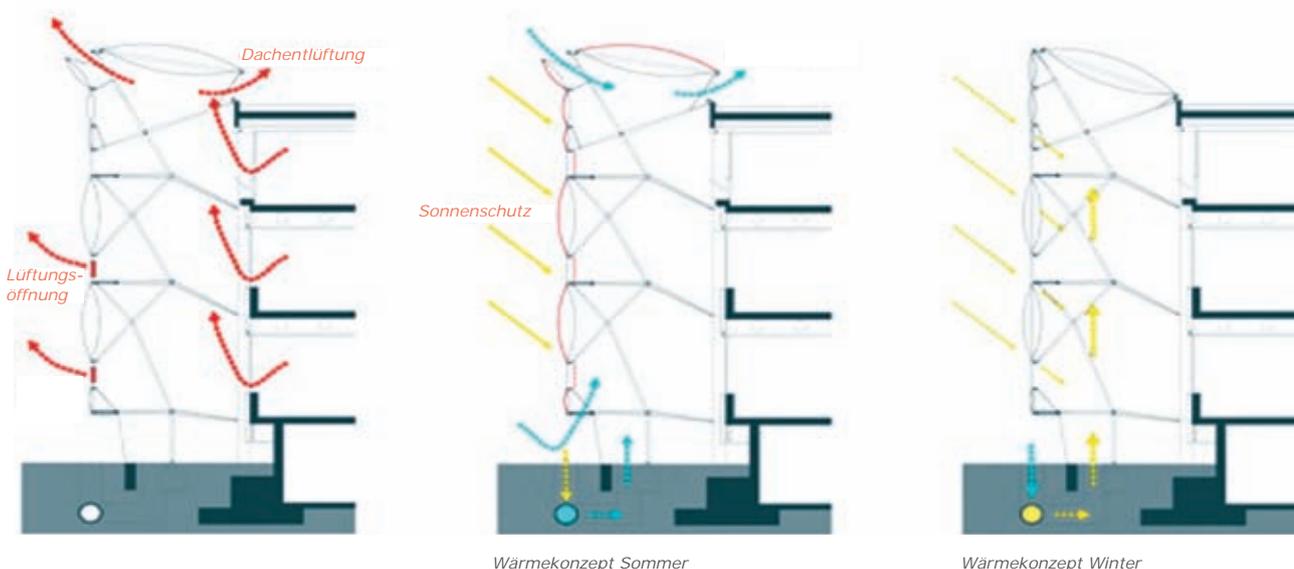


Abb. 13 Klimakonzept
Neugestaltung Hülle Bürohaus in Salzburg
rpaX - rainer pirker architeXture, Wien

Abschließend findet der Punkt **Beständigkeit gegen äußere Einwirkungen** Beachtung. Die Langlebigkeit hängt in großem Maße von den mechanischen, biologischen, chemischen und physikalischen Einwirkungen auf die Konstruktion insbesondere auf seine Verbindungen ab.

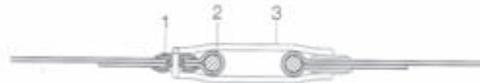
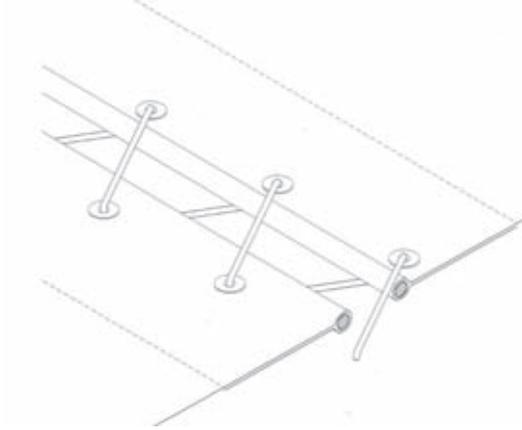
Die Aufzählung der wichtigsten Aspekte, dessen sich der Planer bereits in der Konzept- bzw. Entwurfsphase bewusst sei sollte, zeigt die große Komplexität des Entwurfsprozesses. Deshalb wurden vor der rasant voranschreitenden Entwicklung der CAD Systeme beinahe alle Entwürfe mittels experimenteller, analoger Methoden erarbeitet. Was nicht nur haptische Qualitäten hat: die große Anschaulichkeit ermöglicht die schnelle Erfassung ästhetischer und statischer Zusammenhänge.

In der letzten Zeit sind zu den Arbeitsmodellen rechnergestützte, mathematisch-nummerische Methoden hinzugekommen.

Neben der prinzipiellen Form ist auf die Fügetechnik zu achten, da diese den Charakter der Membranfläche mitbestimmt. Dieser Ansatz bringt den Entwerfer schnell zur Frage des Zuschnitts bzw. der Konfektionierung, da sich dieser ebenfalls auf die ästhetische Wirkung auswirkt.

Aufgrund der Komplexität dieses Themas ist es ratsam interdisziplinär mit den ausführenden Firmen bereits im Vorfeld zusammenzuarbeiten.

Abb. 1 Schnürstoss mit gekreuzten Seilen



- 1 Öse
- 2 Kederschnur
- 3 Polyesterseil
- 4 Klemmplatte
- 5 Kederprofil, zweiteilig
- 6 Verbindungsblech
- 7 doppelte Kappnaht
- 8 Gurt
- 9 Membranverstärkung
- 10 Stahlseil
- 11 Membranschlaufe
- 12 Metallklammer
- 13 Kederprofil / Schiene
- 14 Schutzblech
- 15 Abdeckstreifen

Abb. 2 Schnürstoss mit gehäkeltten Seilschlaufen

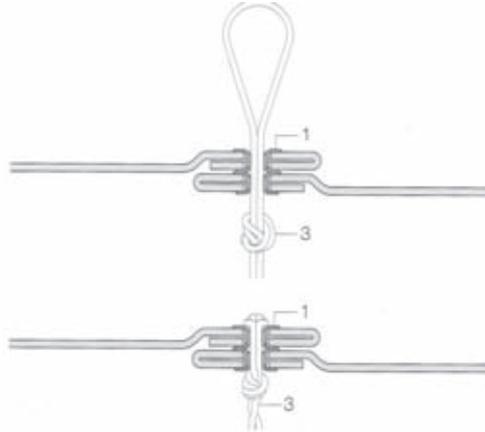
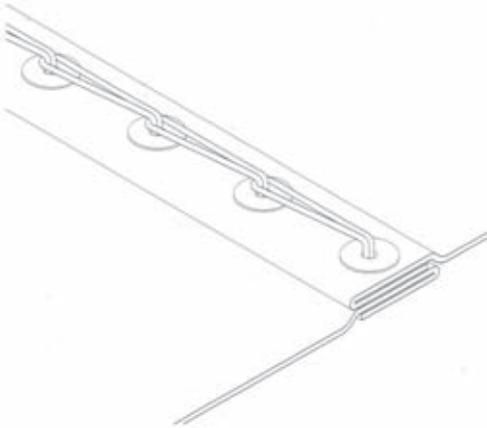


Abb. 3 Klemmplattenstoss und Stoss mit zweiteiliger Kederschiene

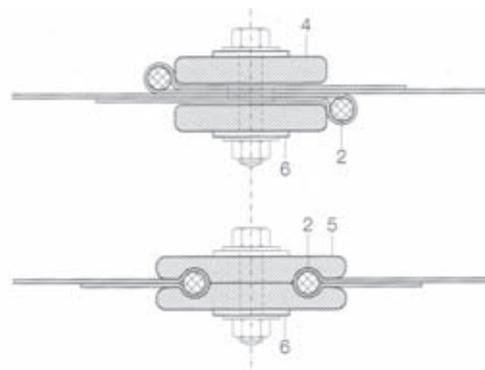
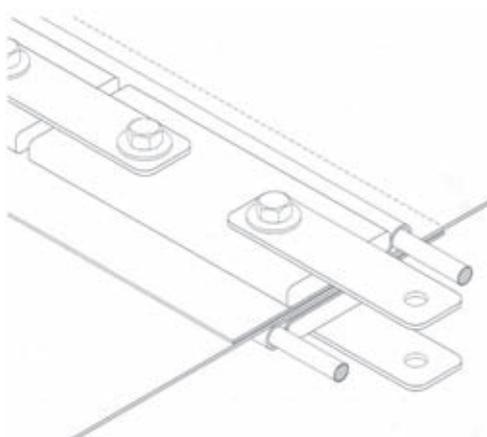
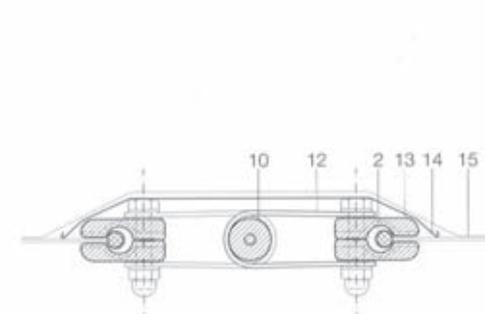
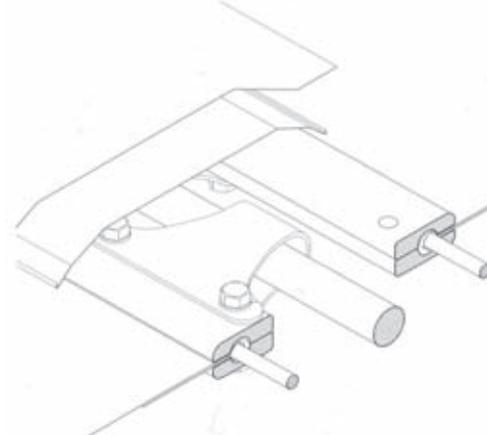


Abb. 4 Membranstoss mit Kederprofilen an einem Gratseil



4.2 Anforderungen an das Entwerfen mit Geweben

Textile Membrane werden großflächig - Werte bis zu 1500m² sind durchaus üblich - vorgefertigt und entweder gerollt oder gefaltet transportiert. Deshalb ist die Anzahl der Fugen, Stöße und Anschlussdetails im Vergleich mit anderen Bauweisen relativ gering. Auf geringe Materialmasse wirken hohe Kräfte, welche die Gesamtkonstruktion ableiten muss.

Fügetechnik¹

Große Spannweiten erfordern große Membranflächen, die die Produktionsmaschinen nicht herstellen können.

Aus diesem Grund werden die hergestellten und konfektionierten Bahnen zusammengesetzt. Dies wird meist werkseitig ausgeführt mittels nicht lösbaren Flächenstößen² - Schweißen³, Nähen^{Abb. 5} bzw. Kleben⁴.

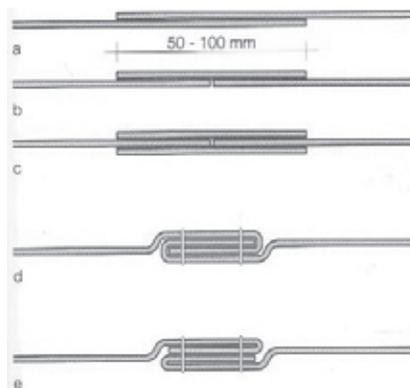
In den Fällen wo Konfektionierung, Transport oder Montage eine Teilung der Membranfläche erforderlich gemacht haben fügt man die Teile vor Ort, auf der Baustelle, mit werkseitig vorbe-

reiteten lösbaren Montagestößen - Schweißen⁵, Schnüren⁶ bzw. Klemmen^{7,8} - zusammen. Ansonsten werden sie eher vermieden. Das Schweißen ist die mit Abstand verbreitetste Form der dauerhaften Verbindung. Die erzielbare hohe Qualität - Schweißnähte können bis zu 90% der Membranfestigkeit erreichen - sowie die kostengünstige Herstellung erklären diese Entwicklung.

Lediglich nicht schweißbares Material wird noch geklebt oder genäht.

Abb. 5 versch. Arten von Nähen:

- einfach überlappende Schweißnaht
- stumpf gestossene Schweißnaht mit einem Deckstreifen
- stumpf gestossene Schweißnaht mit zwei Deckstreifen
- doppelte Kappnaht, verschränkt
- doppelte Kappnaht, übereinander



1 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 198 ff

2 Nicht lösbare Flächenstöße Hauptanforderungen:

- Hohe mechanische Festigkeit unter Kurz- und Langzeitwirkung. Im besten Fall ähneln sich die Werte des Membranmaterials und des Stosses.
- Ähnliches Dehungsverhalten und Flexibilität wie der Membranwerkstoff
- Wasserdicht, bei pneumatischen Konstruktionen auch luftdicht
- Möglichst schmal
- Konsistente optische und mechanische Qualität
- Wirtschaftlich in der Herstellung

3 Werkseitige Schweißnaht:

Eine Werksfugung, die mit Hilfe von Schweißgeräten hergestellte hochwertige Nähte erzeugt wird.

4 Nähnaht:

Das Einsatzgebiet ist hauptsächlich unbeschichtetes, nicht schweißbares Gewebe. Es wird in Flachnaht, Kappnaht und doppelte Kappnaht unterschieden. Ausreichende Festigkeit und Wasserdichtheit bietet nur die doppelte Kappnaht. Ungünstig für die Dichtheit der Membranfläche ist, dass sich beim Vorspannen die Einstichlöcher weiten können. Dem kann durch Aufkleben oder Aufschweißen von Abdeckstreifen oder Einstreichen der Naht mit einem speziellen Kleber entgegengetreten werden.

Klebenaht:

Eine Klebnaht wird nur dann eingesetzt, wenn keine andere Möglichkeit besteht. Kombiniert mit Nähnähten - Kobinaht - oder Klebebändern, wird die Klebnaht nur noch für Glas-Silikon-Membranen eingesetzt. Diese Fügeart entspricht der Schweißnaht.

5 Schweißnaht als Montagefügung (Atlas): Einsatz nur für Abdeckstreifen an lösbaren Membranstößen, biegesteifen Rändern, Eckdetails bzw. anderen Öffnungen.

6 Schnürstoß Abb. 1, 2:

Das Versellen paralleler Membranbahnen ist eine besonders leichte und flexible Form des lösbaren Montagestosses. Die Handhabung ist sehr einfach, die Schnürung lässt sich problemlos Justieren und Nachspannen. Allerdings ist die gesamte Länge betroffen falls das Nahtseil reißt. Das am häufigsten vorkommende Seilmaterial sind geflochtene Polyesterseile, die durch Ösen geführt werden. Polyester hat eine geringe UV-Beständigkeit, deshalb eignet sich diese Art des Flächenstosses ungeschützt lediglich für temporäre Konstruktionen.

7 Klemmplattenstoß Abb. 3:

Sich überlappende Membranstreifen werden mittels Metallplatten aufeinander geklemmt. Typischerweise werden die Klemmplatten in Flächenstößen so angebracht, dass der Membranrand auf das Vorspannmaß gedehnt wird. Kurze Klemmplatten und große Fugen ermöglichen eine Dehnung der Membran entlang des Stoßes. Die eingestanzten Löcher für die Schraubverbindungen stellen die Weiterreißfestigkeit des Membranmaterials auf die Probe, was bei der Materialwahl zu bedenken ist.

8 Stoß mit Kederschiene bzw. Kederprofilen Abb. 4:

Aufgrund der etwas längeren Profile ist eine Klemmverbindung mittels Kederschiene bzw. Kederprofilen steifer. Sind die Profile zweiteilig und wird der Spalt geschlossen, besteht die Möglichkeit die Membran vorzudehnen und direkt zu klemmen.

Das Erscheinungsbild wird gemeinsam mit den im Detail festgelegten Randbedingungen und den physikalischen Gesetzmäßigkeiten erzeugt. Deshalb werden die folgenden Punkte in diesem Abschnitt erläutert:

- Ausführung von Rändern und Anschlüssen
- Ausführung von Ecken

Ausführung von Rändern und Anschlüssen

Der Rand ist die Schnittstelle um die Kräfte aus der Membranfläche bzw. aus der Berandung in das primäre Tragsystem einzuleiten. Entscheidend ist die Art wie die Kräfte geführt bzw. in das Primärtragwerk übertragen werden. Parallel dazu ist das Miteinbeziehen in die Überlegungen der spe-

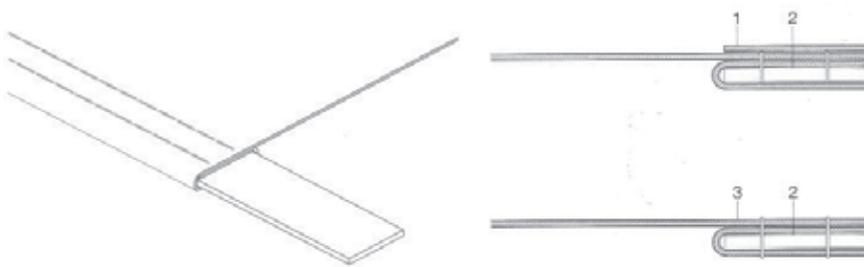
zifischen Materialeigenschaften, der Verbindungsmittel und der Montagemöglichkeiten ratsam.

Es bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- biegeweich
- biegesteif

	Anwendung	Wirkprinzip	Material
Gurtrand^{Abb.6a}	<i>kleinere bis mittlere Spannweiten</i>	<i>flexibel, direkte Aufnahme der parallel laufenden Tangentialkräfte durch den Gurt</i>	<i>Gurt: Gewebe aus Polyester oder Polyamidfasern nicht UV-beständig, daher Schutz vor Sonneneinstrahlung und Witterung nötig</i>

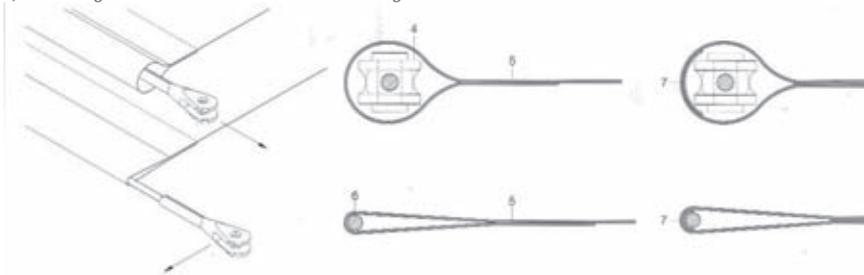
Abb. 6a biegeweiche Randausführung - Gurtrand



Randseil in Tasche^{Abb.6b}	<i>Bei weniger knickanfälligen Membranwerkstoffen, da sich die profilierte Oberfläche des Randseils in die Membran drückt</i>	<i>Übertragung der Membranspannungene, welche senkrecht zum Rand laufen in das Randseil</i>	<i>Tasche bzw. Membran: Polyester-PVC</i>
--	---	---	---

Abb. 6b biegeweiche Randausführung - Randseil in Tasche mit Öffnung für Gabelfitting

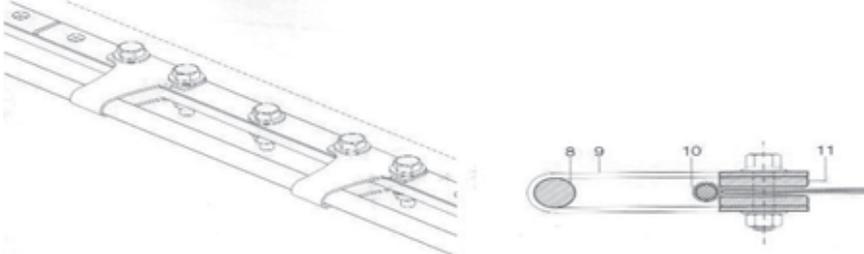
- a) mit umgeschlagenem Rand, Isometrie
 b) mit umgeschlagenem Rand
 c) mit angeschweißter Tasche und Verstärkung



- 1 doppelter Einschlag mit Nahtschutz
- 2 Gurt
- 3 einfacher Einschlag
- 4 Gabelfitting
- 5 Seiltasche
- 6 Stahlseil
- 7 Membranverstärkung
- 8 Randseil
- 9 Metallhammer
- 10 Kederschnur
- 11 Klemmplatte
- 12 Aluminiumwinkel
- 13 aufgestellter Membranrand
- 14 Schaumstoffrolle
- 15 Aluminiumblech

Freies Randseil^{Abb.6c}	<i>große Spannweiten</i>	<i>Führung außerhalb des Membranrands, punktuell an die Membran angeschlossen</i>	<i>Membran: Glas-PTFE</i>
---	--------------------------	---	---------------------------

Abb. 6c biegeweiche Randausführung - freies Randseil



Der biegeweiche^{Abb.6 a-c} Rand

Die Kräfte werden entlang einer gekrümmten Fläche gesammelt und mittels eines Randelements über den Verankerungsbereich abgeführt.

Es gibt drei Möglichkeiten einen Rand biegeweich auszuführen:

- Gurtrand
- Randseil in Tasche
- Freies Randseil

Der biegesteife^{Abb.7 a-c} Rand

Es wird die Membran in starre, linienförmig verlaufende Formteile eingespannt, um die Kräfte über einen Punkt oder eine Linie in die Primärkonstruktion einzuleiten.

Es gibt drei Möglichkeiten einen Rand biegesteif auszuführen:

- verseilter Rand
- Rohr in Tasche
- Freies Randseil

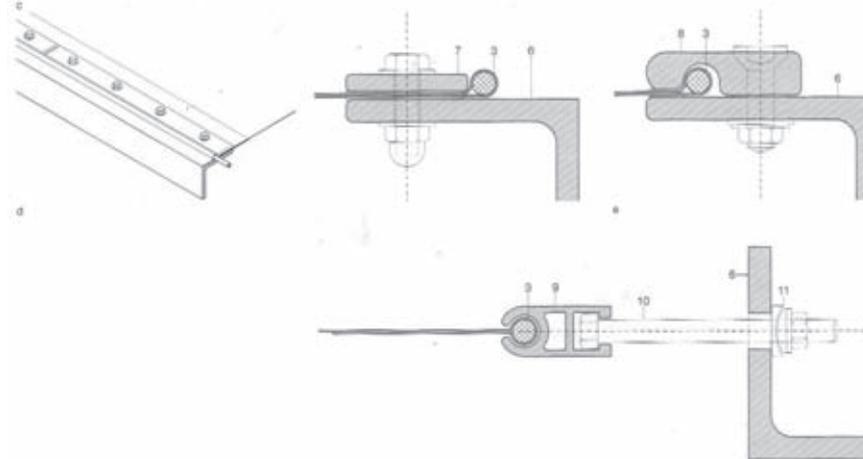
	Anwendung	Wirkprinzip
verseilter Rand^{Abb.7a}	temporäre Membrankonstruktionen; einfaches Prinzip, nicht Witterungsgeschützt	Ein mit Abstandhalter ausgerüsteter Stab wird an die Unterkonstruktion geschweißt oder geschraubt. Ausführung der Verseilung wie bei lösbaren Verbindungen (Bsp. Schnürstoß).

Abb. 7a biegesteife Randausführung - verseilter Rand



Rohr in Tasche^{Abb.7b}	v.a. Traglufthallen; einfache Ausführung und Montierbarkeit, geringe Tragfähigkeit	Ein biegesteifes Rohrprofil wird in eine Membrantasche eingeschoben. Öffnungen in der Tasche ermöglichen eine Verbindung durch Metallklammern oder mittels Verseilen mit einem Randträger.
--	--	--

Abb. 7b biegesteife Randausführung - Rohr in Tasche



Freies Randseil^{Abb.7c}	gute Tragfähigkeit; auf Grund vieler Variationsmöglichkeiten universell einsetzbar.	Klemmplatten und Kederprofile werden direkt an die steifen Randträger (Holz, Metall) geschraubt oder mit Hilfe von Metallklammern auf Abstand befestigt. Möglichkeit der Membran-Vordehnung, Spannung, Justierung
---	---	---

Abb. 7c biegesteife Randausführung - Freies Randseil

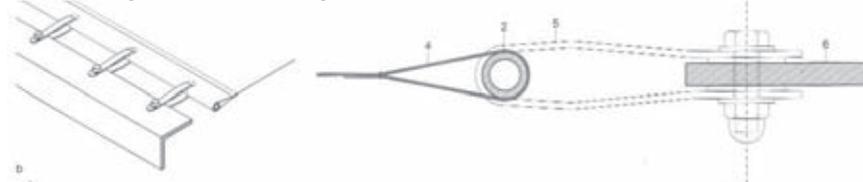
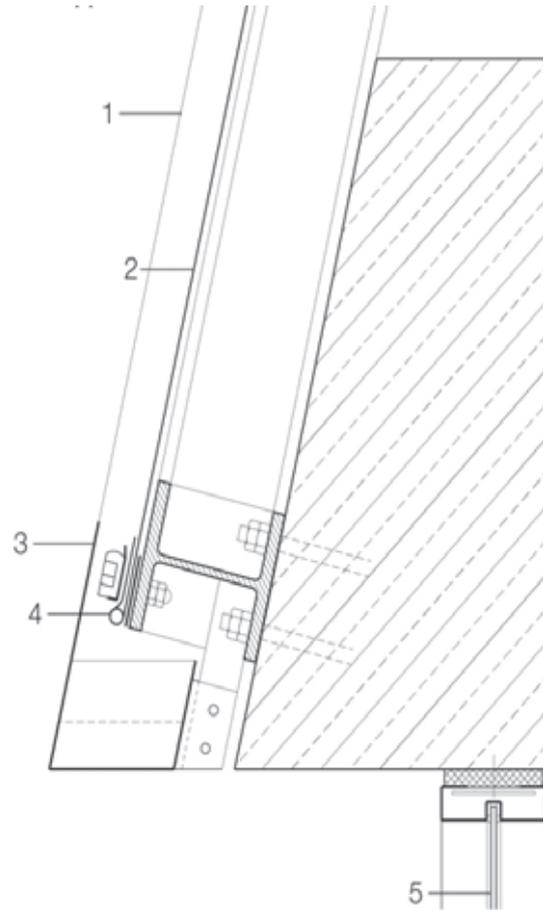




Abb. 8 Einfamilienhaus in Tokyo
F.O.B.A., Kioto



- 1 Abdeckprofil, Aluminium 1,5 mm
- 2 PTFE-beschichtete Glasfasermembran 0,5 mm
- 3 Regenrinne, Aluminium 1,5 mm
- 4 Randseil, Polyester 12 mm
- 5 Festverglasung, einfach 8 mm

Abb. 9 Anschluss biegesteifer Rand auf Beton
Einfamilienhaus in Tokyo
F.O.B.A., Kioto

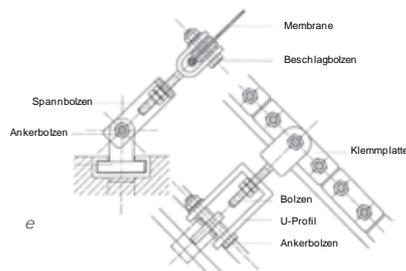
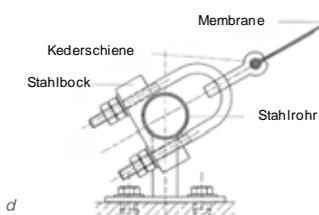
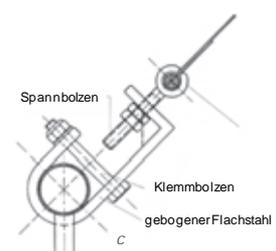
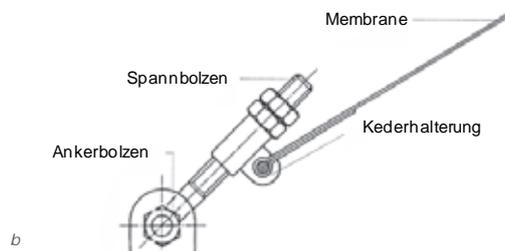
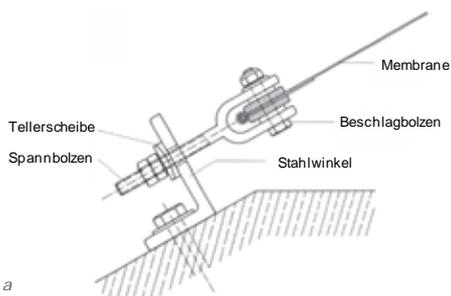
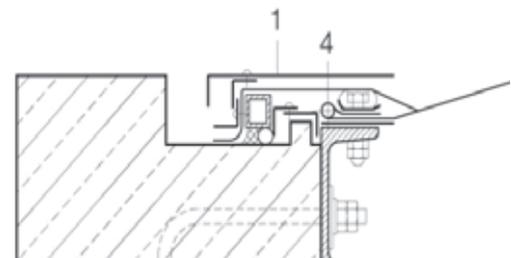


Abb. 10 Befestigung biegesteifer Rand an Stahlelementen - spannbar

- a) Stahlwinkel mit Spannbolzen
- b) Drehbare Bolzenhalterung
- c) Spannbolzen mit Kederhalterung
- d) Spannbolzen mit Kederhalterung
- e) Drehbarer Beschlag mit Spannbolzen

Möglichkeiten des Fassadenanschlusses:

Soll eine Membran mit einer steifen Fassade verbunden werden, ist zuerst zu bedenken, dass sich die zwei nicht untereinander beeinflussen sollen. Das bedeutet die Membranfläche muss sich nach ihrem Kräftefluss bewegen können und die steife Fassade soll keine Lasten (unkontrolliert) von der Membran übertragen bekommen.

Dafür können Membranlappen zwischen Fassade und Membran angebracht werden, gespannt durch Federn oder elastische Schnüre um die verschiedenartigen Bewegungen ausgleichen zu können. Auch pneumatische Schläuche oder Kissen sind in der Lage diesen Zweck zu erfüllen⁷.

Es ist eine Unterscheidung zu treffen zwischen Anschlüssen die zur Spannung herangezogen werden können und solche die lediglich der Befestigung dienen.

Diese grundsätzliche Überlegung beeinflusst die Vorgangsweise wie die Vorspannung in die Membranfläche eingebracht wird bzw. wie eine eventuelle Nachspannung vollzogen werden kann.^{Abb. 10-12} Es ist auf die Witterungsbeständigkeit der jeweiligen Lösung zu achten, ebenso auf die Beschaffenheit des Untergrunds hinsichtlich Material, Aufnahme- bzw. Weiterleitfähigkeit der Auflagerkräfte.

7 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 205

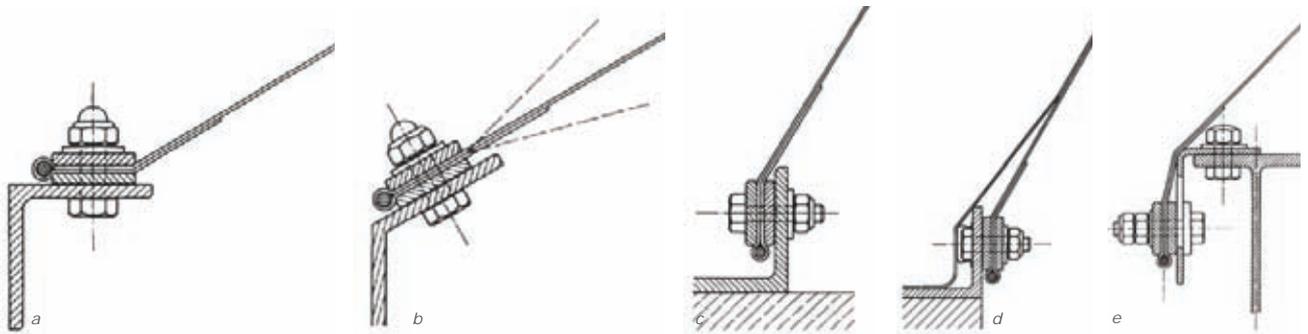


Abb. 11 Befestigung biegesteifer Rand auf Stahlprofilen - nicht spannbar
 a) Befestigung horizontal
 b) Befestigung geneigt
 c) Befestigung innerhalb des Stahlprofils
 d) Befestigung außerhalb des Stahlprofils
 e) Befestigung auf Stahl mit gerundetem Blech

Abb. 12 Befestigung biegesteifer Rand auf Beton - nicht spannbar
 a) Befestigung mit Dübel
 b) Befestigung mit Klemmplatten und Blech
 c) Befestigung mit Klemmplatten und Kunststoffelement

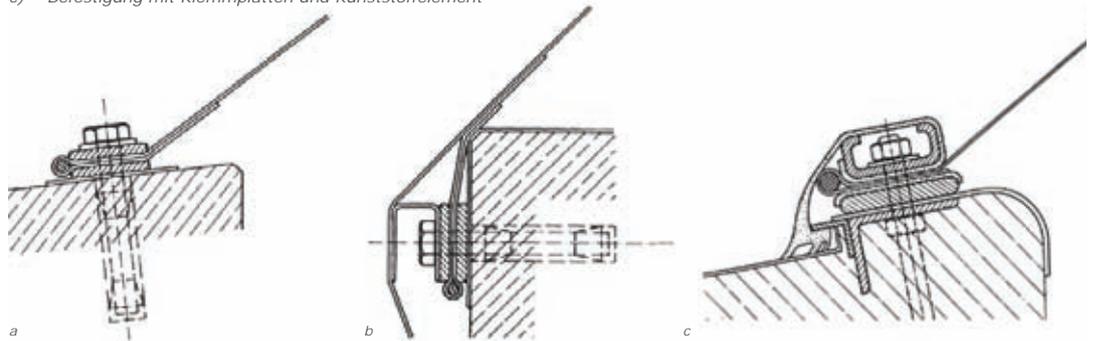


Abb. 13 Befestigung biegesteifer Rand auf Holz - nicht spannbar
 a) Befestigung mit Schrauben
 b) Befestigung mit zwei Klemmplatten
 c) Befestigung mit Klammern

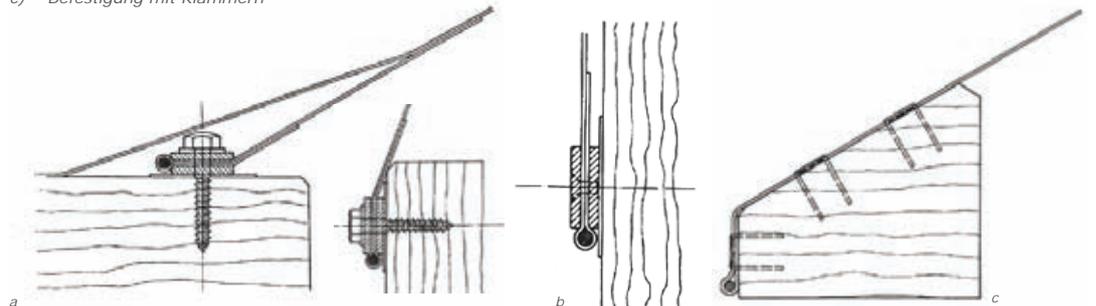
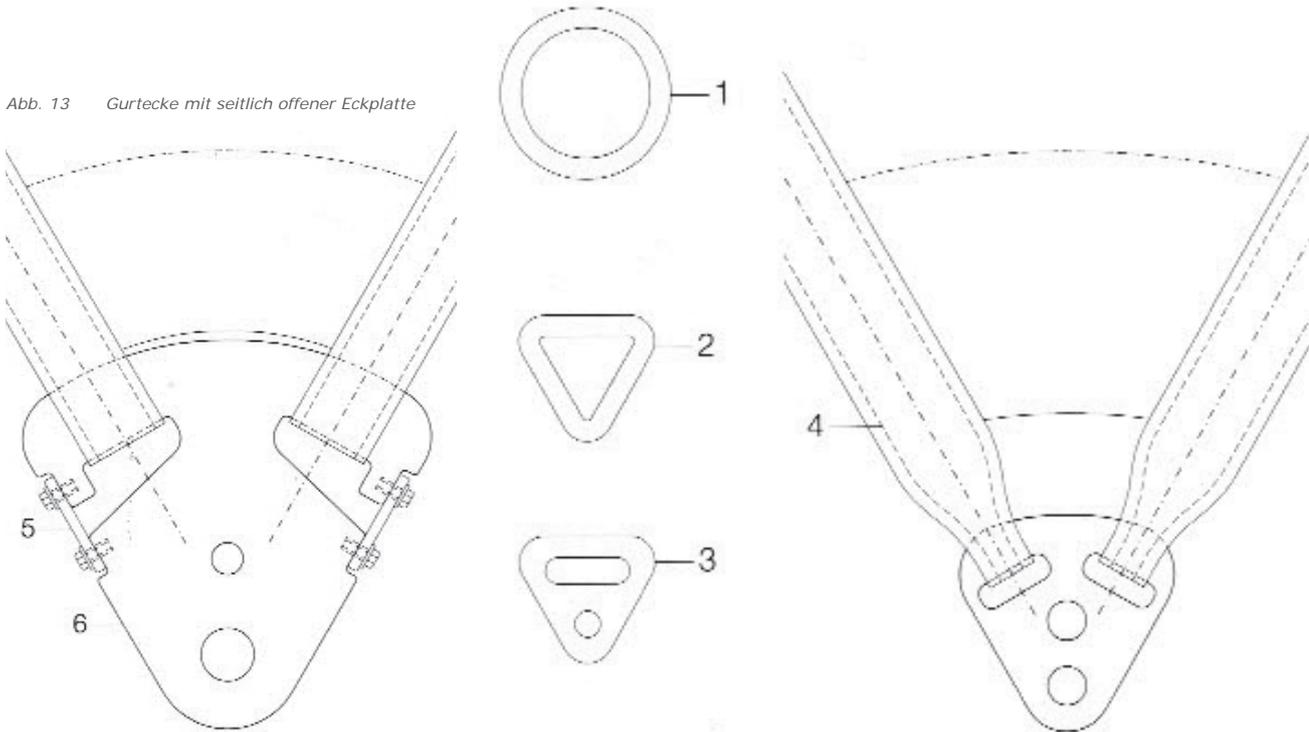


Abb. 13 Gurtecke mit seitlich offener Eckplatte



- 1 Ring
- 2 D-Ring
- 3 zugeschnittene Eckplatte
- 4 Randgurt
- 5 Abdeckblech
- 6 geschlitzte Eckplatte
- 7 Randseiltasche
- 8 Randseil
- 9 Eckplatte
- 10 Gurt
- 11 Gewindefitting
- 12 Kugelscheibe
- 13 Zugstab

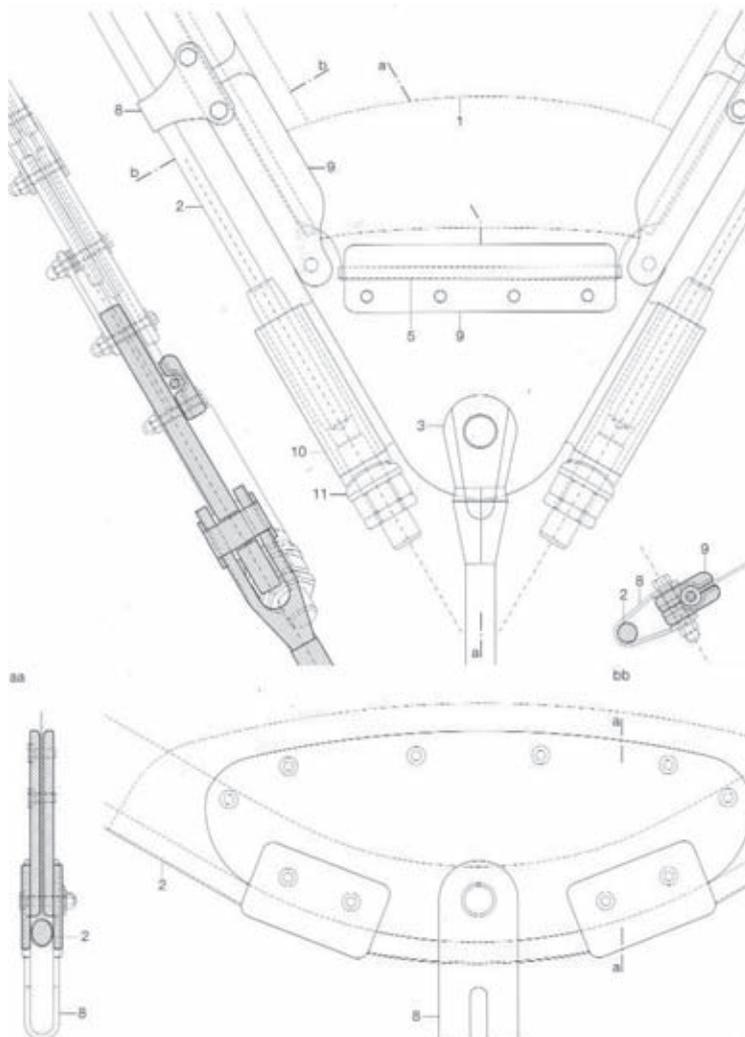


Abb. 14 geschlossene Membranecke mit durchgehendem Randseil

Ausführung von Ecken:

Neben der Randausbildung beeinflussen die **Eckausbildungen** das Tragverhalten von Membranen wesentlich. In dem sogenannten Zwickelbereich sind die lasttragenden Randelemente mittels Beschlag unverschieblich zueinander verankert⁸. Das bedeutet in diesem Zwickelbereich müssen die Kräfte aus der Membrane bzw. aus den Randelementen in die Primärkonstruktion übertragen werden. Dieser Bereich ist sehr genau zu bedenken bezüglich Faltenbildung und Überspannung.

Die Eckverbindung ist in jedem Fall ein steifes Bauteil, wobei die Steifigkeit und somit die Membranspannungen mit spitzer werdenden Winkel steigen.

Die wichtigsten Anforderungen an Eckdetails müssen auf kleinstem Raum gelöst werden⁹:

- Beweglichkeit der Anschlüsse in verschiedenen Drehachsen, da während der Nutzung und Montage große Verformungen auftreten können.
- Aufnahme der Randseilkräfte bzw. der Spannkraften aus der Membran.
- Ausrichtung der Eckplatten nach den Winkeln der Seilkräfte.
- Vermeidung von Exzentrizitäten, das bedeutet Abweichungen von der Symmetrie und den Systemlinien.
- Nachjustierbarkeit der Randseile.

Meistens muss eine Membran im Eckbereich doppelt genommen werden um einem Versagen bei Spannungsspitzen - die unvermeidlich sind - Vorschub zu leisten.

Eckausführung Gurtrand:

Gurte sind Gewebe aus Polyester oder Polyamidfasern und nicht knickempfindlich. Dieser Umstand wirkt sich günstig auf den Radius des Umschlags aus, selbst enge Radien stellen kein Problem dar. Dem Anspruch der Minimalkonstruktion folgend sind sehr reduzierte Detailpunkte^{Abb.13} möglich.

Eckausführung Seilanschlüsse

- **offene Membranecken^{Abb.15}:** Verbindung der Membran über Randseile und eventuell Spanngurte mit einer Eckplatte. Diese Variante ist ein indirekter Anschluss.

- **geschlossene Membranecken^{Abb.14}:**

Dieser Eckanschluss findet eher bei kleineren und / oder temporären Konstruktionen Anwendung, da Nachspannen nicht möglich ist. Klemmplatten oder Kederanschlüsse befestigen die Membran direkt auf der Eckplatte.

8 Vgl. (Seidel, 2008) S. 82 ff

9 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 206

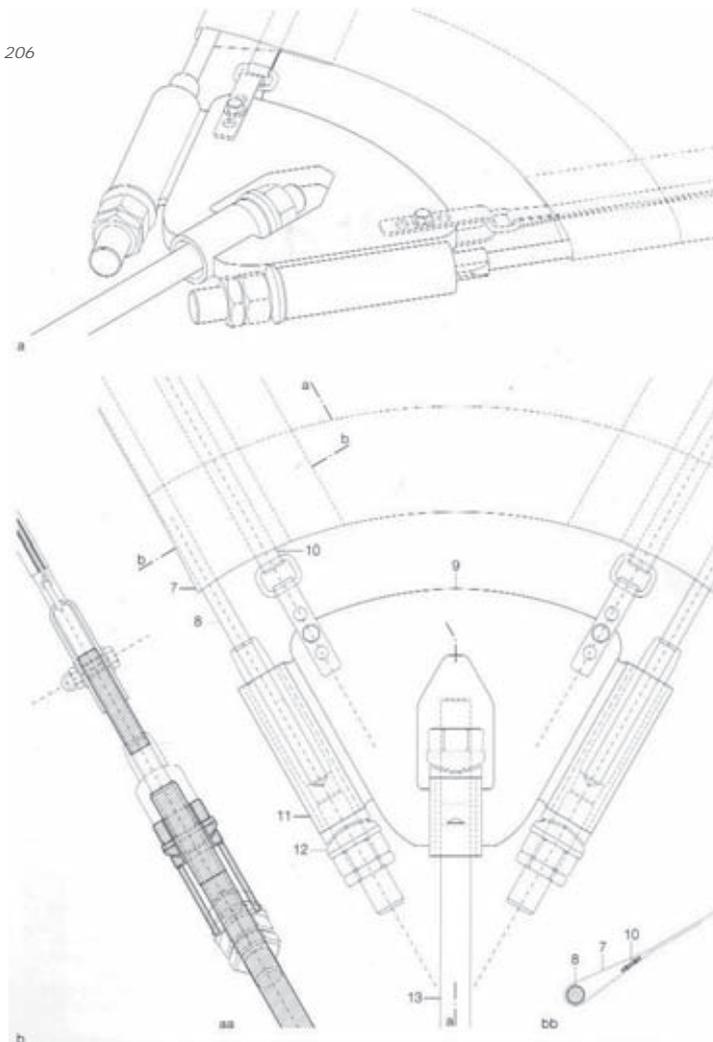


Abb. 15 offene Membranecke mit unterbrochenen Randseilen

- 1 Membranverstärkung
- 2 Randseil
- 3 Gabelfitting
- 4 Klemmplatte
- 5 Kederschnur
- 6 Augblech
- 8 Metallklammer
- 9 Kederprofil
- 10 Gewindefitting in Rohr
- 11 Kugelscheibe

4.3 Anforderungen an das Entwerfen mit Folien

Folien finden die meiste Anwendung in Form von pneumatisch vorgespannter Kissen, denn die hohe Dehnung bzw. geringe Festigkeit und das ausgeprägte Kriechverhalten sind keine günstigen Ausgangspunkte für eine mechanische Vorspannung. Deshalb behandeln die nächsten Absätze in erster Linie den Aufbau, die Form, die Randausführung, Luftversorgung und Sicherheit von Kissenkonstruktionen.

Die Herstellung der Folienkissen findet beinahe ausschließlich im Werk statt, diese werden auf die Baustelle transportiert und eingebaut. Deshalb ist bei der Dimensionierung unbedingt die Transportfähigkeit zu beachten, da die meist zusammengeschweissten dreidimensionalen Gebilde eher nicht gefaltet werden können. Faltungen würden unschöne Knicke zur Folge haben, die die Optik empfindlich stören könnten.

Für Folienkonstruktionen sind folgende Punkte im Entwurfsprozess zu bedenken:

- Spannweiten
- Unterkonstruktion
- Mehrlagigkeit
- Verbindungs- und Fügetechnik
- Eckausführung
- Luftversorgung von pneumatisch vorgespannten Folienkissen
- Sicherheit von pneumatisch vorgespannten Kissen

Spannweiten

In der gemäßigten Klimazone gilt als die maximale Spannweite bei typischen Wind- und Schneelasten $4,50 \text{ m}^1$. Bei länglichen Formen - Schläuche - ist der genannte Richtwert für die kürzere Spannweite heranzuziehen, da pneumatische Kissen ebenfalls einachsrig vorgespannt stabil sind. Falls die Feldformate noch größer sein sollten, kann mit einigen Maßnahmen die Spannweite erweitert werden^{Abb.1:}

- Erhöhung des Sticks
- zusätzliche Seilnetze zur Ableitung horizontaler Kräfte und Lasten (Schneelasten)
- Dopplung der Folie in Unter- und bzw. oder Oberlage
- Materialmix aus Folien und Geweben (Bsp. bei Dopplung)

Unterkonstruktion

Folienkissen geben wegen ihrer vergleichsweise geringeren Vorspannkraft bzw. ihrem niedrigem Eigengewicht wenig Lasten an das Tragwerk weiter. Daher genügt eine schlanke, filigrane Unterkonstruktion.

Im Allgemeinen werden die Kissen mittels Aluminiumprofile auf einer Holz-, Stahl- oder Aluminiumkonstruktion montiert. Bei der Planung des Tragwerks sollten die materialspezifischen Eigenheiten bekannt sein, da das Kissen seine endgültige Form durch die Art des Zuschnitts, aber auch die Materialdehnung erhält. So könnte ein gewisser Abstand zwischen den

1 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 189

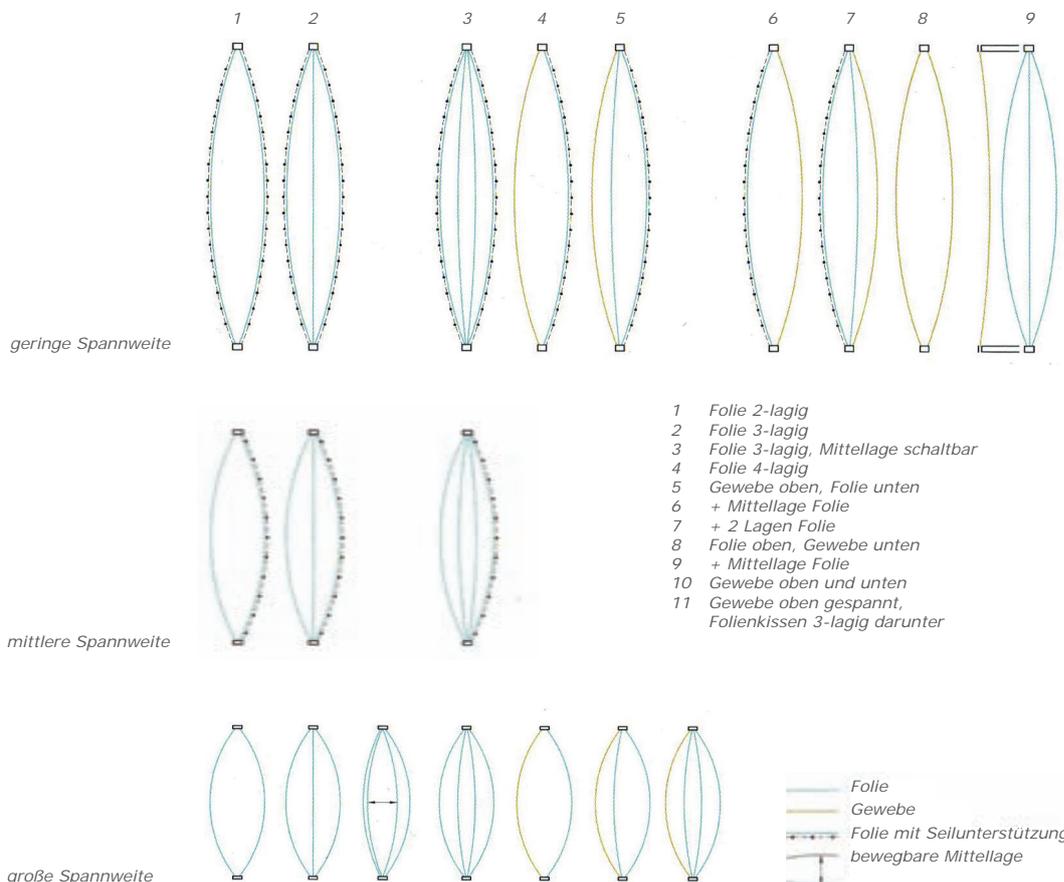


Abb. 1 Übersicht Folienkissen nach Spannweite und Lagenaufbau

Kissen oder zu anderen Bauteilen erforderlich sein damit es zu keinen unvorhergesehenen Berührungspunkten durch die Ausdehnung des Kissens kommt.

Mehrlagige Kissen

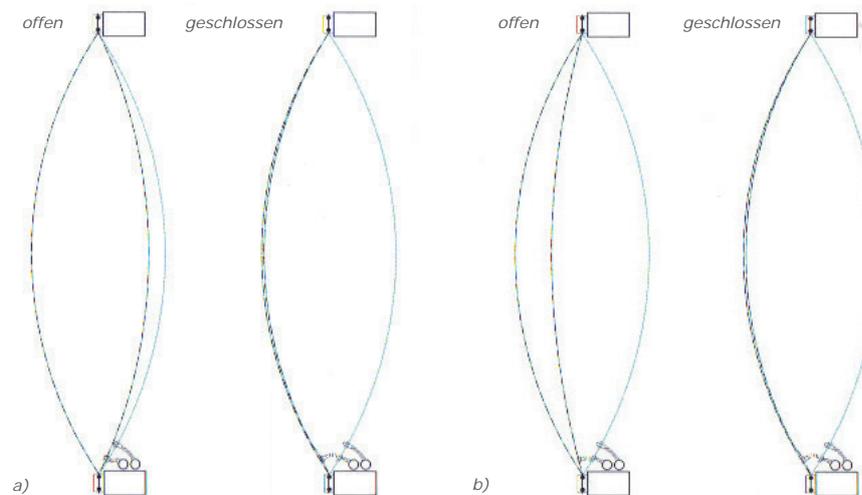
Durch die Trennung in zwei oder mehrere Luftschichten erhöht sich die Dämmwirkung. Die inneren Lagen sind unerheblich an der Lastabtragung beteiligt und stehen unter geringerer Vorspannung als die äußeren Lagen. An dieser Stelle kann Material eingespart werden indem im Inneren geringere Materialstärken gewählt werden.

Da ETFE-Folien schweißbar sind, können sämtliche Lagen werkseitig in einem zu Kissen geschweißt werden. Das bedeutet weniger Arbeitsaufwand auf der Baustelle, da die Kissen in einer Klemme am Rand fixiert werden können. Allerdings können durch die Lagenschweißung extreme Wärmebrücken entstehen.

Sollten verschiedene Lagenmaterialien zum Einsatz kommen, wird es wahrscheinlich von Nöten sein die Lagen separat zu klemmen. Einerseits hätte dieses Vorgehen einen größeren Arbeitswand auf der Baustelle zur Folge, andererseits könnte man schadhafte Lagen zukünftig relativ einfach austauschen.

Ab einer Lagenstärke von vier kann eine Kombination aus den genannten Konzepten zu einem zufrieden stellenden Ergebnis führen. Sind Folienkissen mit einem Muster (Punkte, Schachbrett, etc.) bedruckt um die Strahlungstransmission zu verringern, kann eine schaltbare Mittellage - mit einem entsprechend versetzten Muster - die Intensität der Einstrahlung steuern^{Abb.2}.

Abb. 2 Schema schaltbare Mittellage
a) durch Umschlagen
b) durch elastische Dehnung



Verbindungs- bzw. Fügetechnik

Durch das Verschweißen von Folien entsteht eine dauerhafte, homogene Verbindung. Eine sichere Schweißnaht hat eine Breite von 10 - 15 mm², dieser Wert ist nicht nur für die Langlebigkeit des Elements von Bedeutung, sondern ebenfalls für die Sicherheit der Konstruktion.

Die Randausführung ist im Falle pneumatisch vorgespannter Folienkissen meist biegesteif mit Klemmprofilen³.

Es wird in verschiedene Arten von Randklemmung unterschieden:

Die in den Folienrand eingeschweißte Kederschnur wird direkt in ein elastisches Kunststoffprofil geklemmt^{Abb.3, S.58} - dazu gehören die einfache Randklemmung⁴ und die Randklemmung mit vormontiertem Kunststoffprofil⁵.

2 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 190

3 **Anforderungen an Randklemmungen von Kissenkonstruktionen** Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 190

- Aufnahme von Zugspannungen
- Übertragung der Lasten an die Unterkonstruktion
- Selbsttragende Ausführung
- Klemmung mehrerer getrennter Kissenlagen, auch unterschiedlicher Materialien
- Aufnahme thermischer Längenausdehnungen
- thermische Dämmung / Trennung im Randbereich
- Rinne für die Dachentwässerung
- Auffangrinne bei Tauwasserbildung am Kissenrand
- Befestigung der Luftversorgung und Beleuchtung
- Begehbarkeit für Wartungsarbeiten
- Vogelschutz
- Unterstützung bei der Montage

4 **einfache Randklemmung:**

- **einfaches Flachprofil:** Der Keder wird hinter dem Profil geklemmt, also müssen Befestigungsschrauben durch Löcher im Folienrand eingebracht werden.
- **extrudiertes Aluminiumprofil:** Der Keder wird vor der Schraube im Profil gehalten, deshalb findet keine Verletzung der Folie statt.

5 **Randklemmung mit vormontiertem Kunststoffprofil** Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 191:

Die konfektionierte Folie mit eingeschweißtem Keder wird werkseitig in ein Kunststoffprofil eingezogen. Dieses wird auf der Baustelle in ein Aluminiumprofil geklemmt.

- Vorteile gegenüber der einfachen Randklemmung:
- verkürzte Montagezeit
 - Schutz der Folientasche im Bereich der Klemmung
 - verringerte Spannungsspitze am Klemmrand
 - Aufnahme von Temperaturexpansionen durch segmentierte Aluminiumklemmung auf dem Kunststoffprofil möglich

Die mittels Umschlag in den Folienrand eingefasste Kederschnur wird in ein elastisches Kunststoffprofil geklemmt^{Abb.3b} - wie die Randklemmung mit Montagehilfe⁶.

Da diese Verbindungen Wärmebrücken sind oder zumindest bauphysikalische Schwachstellen aufweisen, sind die Klemmen oft mit thermischen Trennlagen ausgestattet. Bei solchen Ausführungen kommt es vermehrt zu Tauwasserausfällen, da der Dämmwert des Kissens zum Rand hin immer geringer wird. Zum Auffangen müssen Tropfrinnen^{Abb.4a} oder dergleichen vorhanden sein. Getrennt geklemmte Lagen verhindern dieses Problem^{Abb.3c}.

Eckausführung

Besonders spitze Eckausführungen rufen bei Folienkissen Probleme hervor: durch die inhomogene Flächenspannung kommt es zu Faltenwurf. Lassen sich spitze Ecken dennoch nicht vermeiden, wird die Folie unter Vorspannung mit warmer Luft auf 70 - 80°C erwärmt. Das hat eine plastische Verformung zur Folge, welche die Spannung ausgleicht. Obwohl diese Lösung relativ einfach herbeizuführen ist, wird die zeitliche Verzögerung nicht unbeträchtlich sein.

Sind die Ecken offen, kappt man die Kederschnur knapp vor der Ecke^{Abb.7}. Die Schweißnaht läuft selbstverständlich weiter bis in die Ecke und gewährleistet die Dichtigkeit.

Luftversorgung von pneumatisch vorgespannten Folienkissen

Von besonderer Bedeutung ist die konstante Aufrechterhaltung des Druckniveaus. Dazu müssten die Kissen eine vollkommene Gasdichtheit vorweisen. Dies ist aus mehreren Gründen in der Praxis nicht möglich⁷.

Da die Luft schleichend entweicht, werden die Kissen mit Luftversorgungssystemen ausgestattet. Deren Leitungen gehen meist entlang der Randklemmung, was deren problemlose Befestigung gewährleistet. Die Schlauchleitungen haben meist einen Durchmesser von 40 mm⁸. Obwohl kleinere Dimensionierungen für den Normalbetrieb ausreichend wären, könnten diese einen größeren Druckverlust nicht ausgleichen.

Ein weiterer Effekt der permanenten Luftversorgung ist die Vorkonditionierung - z.B. Trocknung - der Luft im Kisseninneren. Optischen Störungen wie Tauwas-

serbefall und Algenbildung wird auf diese Weise Vorschub geleistet. Daher ist fast jedes System mit einem Filter, einem Ventilator oder Kompressor und einem Kondensationstrockner oder einer Lufttrocknungseinheit ausgestattet^{Abb.5}.

Leider verbraucht momentan die Trocknung der Luft noch sehr viel Energie - die Zukunft wird dem Markt einige Systeme bringen, die einerseits auf Energieeinsparung setzt oder andererseits die solare Energie, welche besonders bei transparenten Fassadenflächen gewonnen werden kann, zur Lufttrocknung nutzt. Wahrscheinlich wird eine Kombination aus Beidem am Besten sein, da es schade wäre die aus der Fassade lukrierte Energie wieder in den Betrieb derselben zu stecken. Energiesparend mit seiner Rückströmungsleitung wirkt sich das Umluftsystem^{Abb.6c/d} aus. Filter sind unerlässlich um einen Schmutz- oder Staubeintritt in das Kisseninnere zu verhindern.

Diese Systeme benötigen regelmäßige Wartung, demnach müssen alle relevanten Bauteile erreichbar bleiben.

6 Randklemmung mit Montagehilfe

Vgl. (Knippers, Cremers, Gabler, & Lienhard, 2010) S. 191:

Separate Klemmleisten im Klemmprofil integriert, lassen sich ohne Verschraubung in - auf der Tragkonstruktion fixierten - Profilen eingehängt werden.

7 Undichtheiten sind in diesen Bereichen unvermeidlich:

- das Material an sich
- Fehlstellen im Material
- Fügung des Materials
- Anschlüsse zur Luftversorgung
- Klemmung oder Randfassung

8 Vgl. (Knippers, Cremers, Gabler, & Lienhard, 2010) S. 192

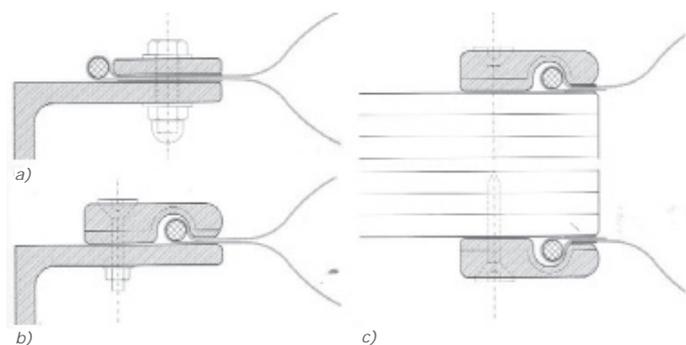


Abb. 3 Einfache Randklemmung

a) mit Flachprofil

b) mit Aluminium-Extrusionsprofil

c) mit Aluminium-Extrusionsprofil beidseitig auf Holzträger für bessere Isolation im Randbereich

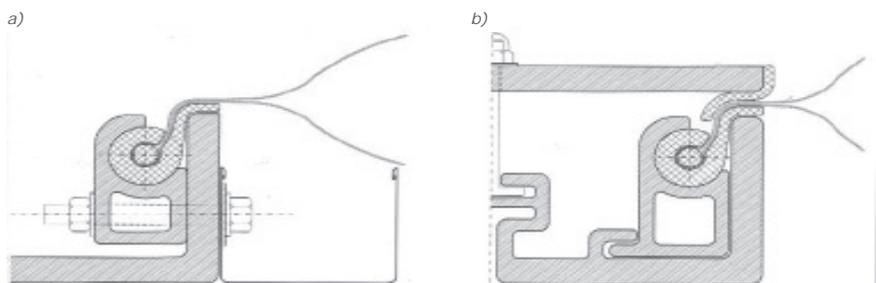


Abb. 4

a) Randklemmung mit Abtropfrinne und vormontiertem Kunststoffprofil

b) Randklemmung mit vormontiertem Kunststoffprofil und Klemmleiste als Montagehalterung

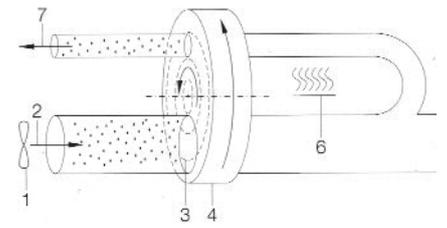
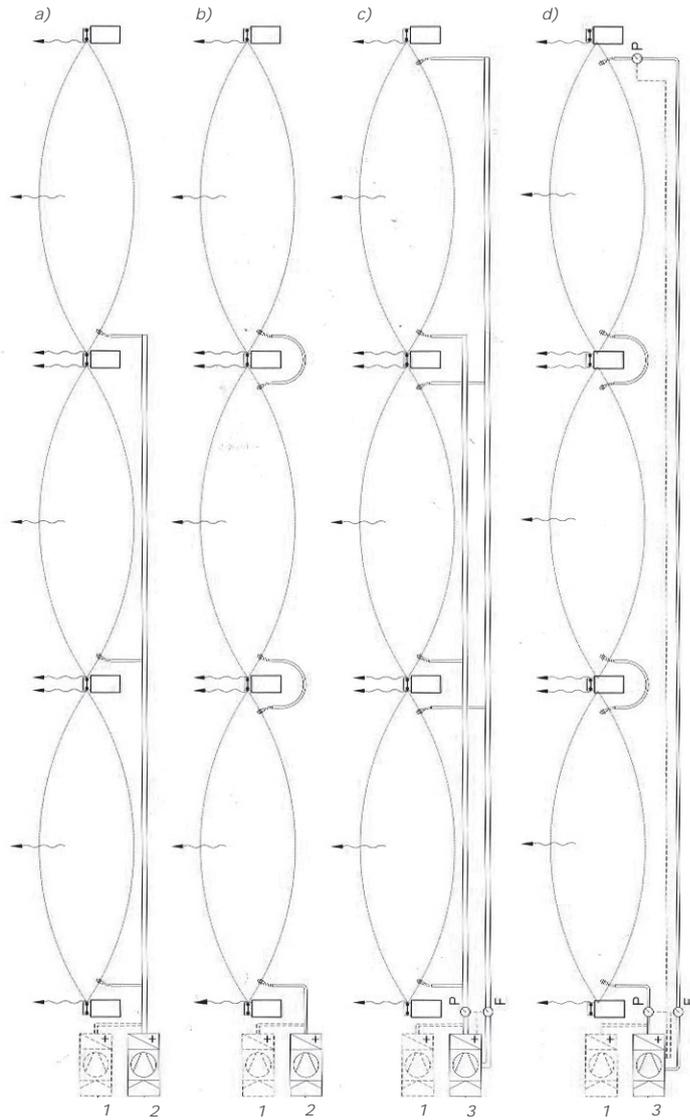


Abb. 5 Gebläseeinheit mit Absorptionstrocknung
 1 Gebläse
 2 feuchte Luft
 3 Feuchtigkeitsaufnahme
 4 Silicagel-Rotor
 5 entfeuchtete Luft
 6 Heizregister
 7 feuchte Abluft

Abb. 6 Luftversorgungssysteme

- a) paralleler Anschluss
- b) serieller Anschluss
- c) Umluft und paralleler Anschluss
- d) Umluft mit seriellen Anschluss

- 1 Backup-Versorgung
- 2 primäre Luftversorgung ausgestattet mit Filter, Druckerzeugung, Lufttrocknung
- 3 Umluftsystem mit Sensoren
 P = Sensor für Luftdruck
 F = Sensor für Luftfeuchtigkeit

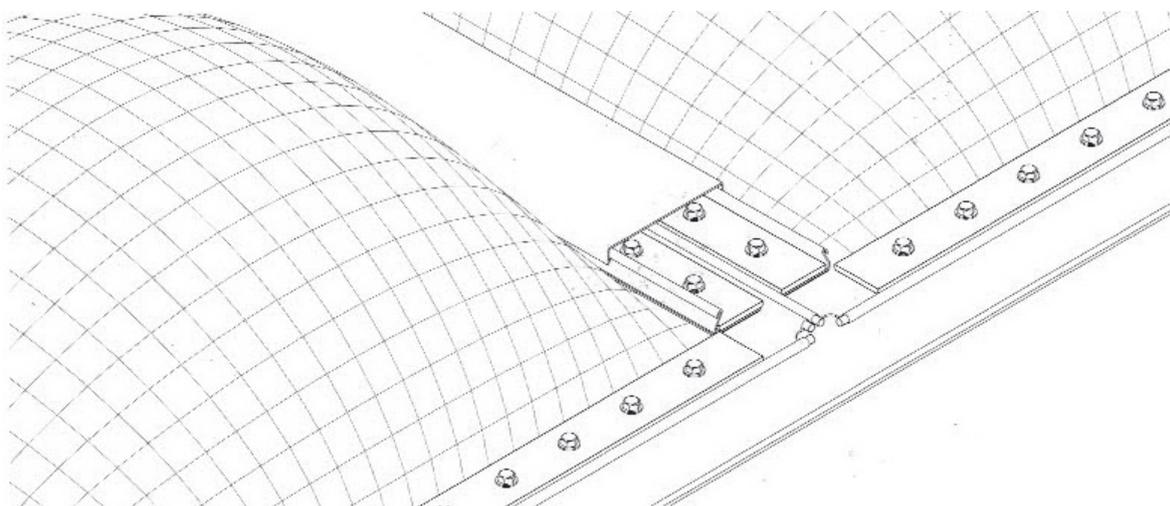


Abb. 7 Offene Kissenecke mit unterbrochenem Keder

Sicherheit von pneumatisch vorgespannten Kissenkonstruktionen

Die Stabilisierung der Kissen erfolgt über den aufrechterhaltenen Überdruck im Inneren. Exakt dieser Umstand sichert die Tragfähigkeit der Kissen. Kann der Druck nicht aufrecht erhalten werden, könnten die Lagen bei starkem Wind in Flatterbewegung versetzt werden. Das kann zu deren Zerstörung führen, finden gleichzeitig starke Niederschläge statt, könnte sich ein Wassersack bilden und eine Überbelastung träte ein.

Praktiker berichten von zwei Szenarien, nämlich zum Einen das Versagen der Luftversorgung, zum Anderen lokale Schäden wie Löcher in den Kissenaußenlagen. Beide Fälle führen nicht zu spontanem Versagen, da Drucksensoren die Kissen überwachen und so geeignete Maßnahmen rechtzeitig ergriffen werden können.

Würde die Kissenkonstruktion wider Erwarten spontan versagen, wären die Gefahren ebenfalls überschaubar. Die Kissen würden zerreißen und das angesammelte Wasser entleerte sich. Kissen haben ein sehr geringes Gewicht, also stellen herab fallende Mate-

rialfetzen ein kleines Risiko dar - insbesondere im Vergleich zu einer Verglasung im Überkopfbereich.

Strategien um die Sicherheit zu gewährleisten

- Installation von Notstromaggregaten
- mehrlagiger Kissenbau - wird die äußere Schicht verletzt, saugt sich durch den Druck die nächste Lage an und das Loch ist geschlossen.
- regelmäßige Wartung mit Sichtbegutachtung
- Vogelschutz - Vögel stellen mit ihren spitzen Schnäbeln prinzipiell eine Gefahr dar. Jedoch haben die Vögel auf der Oberfläche so gut wie keine Haftung - deshalb sitzen die Tiere bevorzugt auf den Rändern. Von diesem Punkt aus können sie Schaden anrichten. Dagegen werden dünne Edelstahldrähte direkt über die Profile gespannt, damit ein sich Niederlassen unmöglich gemacht wird.

5. Aufbau von Membranfassaden

Obwohl die konstruktive Detaillierung essentiell für eine lange Nutzungsdauer ist, darf die bauphysikalische Sicht und der damit verbundene Aufbau nicht vernachlässigt werden.

5.1 Nutzeranforderungen bezüglich Bauphysik

Der winterliche Wärmeschutz, also die Wärme erhalten und den Schutz vor unbehaglich tiefen Temperaturen zu gewährleisten, ist selbstverständlich eine sehr wichtige und entscheidende Entwurfsrichtlinie die mittlerweile ausreichend dokumentiert ist. Dagegen ist der sommerliche Wärmeschutz gerade bei Membranfassaden ebenfalls eine entscheidende Größe, da die transparenten oder transluzenten Membranen eine große Einstrahlungsfläche bilden können. Außerdem kann sich der Mensch besser vor zu geringen Temperaturen schützen als vor zu hohen. Die Erzeugung von Wärme ist physikalisch mit einem geringeren Energieaufwand verbunden als die Kühlung, da die Wärme immer abtransportiert werden muss – das Schwitzen¹.

Aus den vorangegangenen Ausführungen lassen sich fünf Punkte des energieeffizienten Bauens formulieren:

	Minimierung Energiebedarf	Optimierung Energieversorgung
Wärme	Wärme erhalten	Wärme effizient gewinnen
Kälte	Überhitzung vermeiden	Wärme effizient abführen
Luft	Natürlich lüften	Effizient maschinell lüften
Licht	Tageslicht nutzen	Strom dezentral gewinnen
Sonne	Strom effizient nutzen	Strom dezentral gewinnen

Einen weiteren Aspekt stellt die Akustik dar, da diese durch die geringe Materialstärke bedingte Leichtigkeit besonderes Augenmerk verlangt.

5.1.1 Klimatische Umgebungsbedingungen

Da die Materialstärken nicht selten bei oder unter 1mm liegen, ist nicht viel Masse zur Speicherung oder als Pufferbarriere vorhanden.

Das hat folgende Auswirkungen:

- Sinkt die Umgebungstemperatur - beispielsweise nachts – kühlt die Hülle schnell aus.
- Bei starkem Anstieg der Umgebungstemperatur – beispielsweise bei Sonneneinstrahlung – heizt sich die Hülle schnell auf.

Um den genannten Vorgaben Rechnung zu tragen, ist es unerlässlich besonders beim Bauen mit Membranen im ersten Schritt die Klimazone in der sich das Bauvorhaben befinden zu identifizieren.

Grundsätzlich kann die Weltkarte in vier Klimazonen eingeteilt werden^{Abb. 1}:

- feucht-warm
- trocken-heiß
- gemäßigt
- kalt

In den folgenden Absätzen wird auf die spezifischen Eigenschaften dieser Klimazonen eingegangen, um einen standortgerechten

¹ **Zusammenfassung Wärmeschutz:**

- Reduktion der Wärmetransmission
- Reduktion der solaren Einstrahlung – Verglasungsanteil, Sonnenschutz
- Speichermasse und Lüftung
- Dezentrales Lüften – freie Lüftung, Fensterlüftung, natürliche Lüftung durch Windkräfte oder Thermik

Abb. 1 Klimazonen der Erde



Entwurf, bzw. ein behagliches, Ressourcen schonendes Innenraumklima zu kreieren.

[Klimazone feucht-warm – die Tropen²](#)

Die Sonneneinstrahlung kann aufgrund der oft auftretenden Bewölkung (hoher Anteil an diffuser Strahlung im Vergleich zu direkter Sonneneinstrahlung) als gemäßigt angenommen werden. Temperaturunterschiede fallen das Jahr über relativ gering aus, die Tageshöchsttemperaturen liegen im Jahresschnitt bei 30°C, die niedrigste Nachttemperatur beträgt im Schnitt bei 25°C. Allerdings ist die Luftfeuchtigkeit sehr hoch, teilweise bedingt durch sehr hohe Niederschlagsmengen. Bei Regenfällen kann es zu starken Sturmböen kommen, regional sollte das Aufkommen von tropischen Wirbelstürmen – Zyklone, Hurrikans, Taifune – abgeklärt werden.

Fazit

Das bedeutet, die Verformung der meisten Membranmaterialien hält sich aufgrund wechselnder Temperaturen in Grenzen halten wird. Dieser Umstand wird sich positiv auf die Langlebigkeit der Hülle auswirken. Die Möglichkeit des Auftretens von starken

Sturmböen muss ebenfalls bei der Materialwahl – als auch für die Ausformung der Verbindungen wie Nähte dgl. – berücksichtigt werden. Eigenschaften wie das Weiterreißverhalten bzw. die Schubsteifigkeit werden besonders zum Tragen kommen. Die Bauteile müssen vor andauernder Durchfeuchtung mittels guter Lüftungskonzepte bzw. kontrollierter Regenwasserableitung geschützt werden. Das Innenraumklima wird durch Nutzung der durch die Schwüle hervorgerufenen Luftbewegungen entlastet, da so die Wärmeabgabe über die Hautverdunstung unterstützt wird.

[Klimazone trocken-heiß – die Subtropen³](#)

An erster Stelle steht die direkte Sonneneinstrahlung – meist klarer Himmel, zeitweise hoher Staubanteil in der Luft – in Verbindung mit niedriger relativer Luftfeuchtigkeit. Die Niederschlagsmengen sind sehr gering, jedoch aufgeteilt auf einige wenige kurzzeitig starke Regenfälle. Während des Tages sehr hohe Temperaturen – im Jahresdurchschnitt 35 – 38°C, in kontinentalen Wüstengebieten teilweise über 50°C, des Nachts fallen die Temperaturen stark ab – im

Jahresdurchschnitt 16 – 20°C, in Einzelfällen sogar bis zur Frostgrenze. Das ergibt hohe tägliche Temperaturschwankungen von durchschnittlich 20°C. Die Luftbewegungen sind unterschiedlicher Intensität mit teilweise starker Luftbewegung, in kontinentalen Wüstengebieten besteht die Gefahr von Sand- und Staubstürmen.

Fazit

Die größte Herausforderung an den Entwurf wird in dieser Klimazone der Ausgleich der extremen Außentemperaturen sein. Dieser Umstand fordert das Membranmaterial hinsichtlich seiner Langlebigkeit – direkte Sonneneinstrahlung, Staubstürme –, als auch seines Verformungsverhalten. Eine kriechende, bzw. schwindende Membran erfordert eine darauf abgestimmte Trag- bzw. Spankonstruktion, die sich eventuell entweder mitbewegen kann oder über ein einfaches Nachspannsystem verfügt. Das gesamte Bauwerk muss vor den Belastungen wie hoher Wärmeaufnahme durch direkte Sonneneinstrahlung und hohe Lufttemperaturen geschützt werden. Hier könnte eine Kombination aus einem membranumhüllten System und einem massiven Kern eine Möglichkeit darstellen.

2 Klimadaten Rio de Janeiro Vgl. (deutschland-findet.de):

Monat	Temp. max.	Temp. min.	Sonnenstunden	Regentage	Feuchtigkeit
Jan.	29 °C	23 °C	7	12	76 %
Feb.	29 °C	23 °C	7	12	78 %
Mär.	29 °C	22 °C	7	13	81 %
Apr.	27 °C	21 °C	7	11	80 %
Mai	25 °C	19 °C	7	10	79 %
Jun.	24 °C	18 °C	6	8	78 %
Jul.	24 °C	17 °C	7	7	77 %
Aug.	24 °C	18 °C	7	8	75 %
Sep.	24 °C	18 °C	5	11	78 %
Okt.	25 °C	19 °C	5	12	78 %
Nov.	26 °C	20 °C	6	13	77 %
Dez.	28 °C	22 °C	6	14	77 %

3 Klimadaten Kairo Vgl. (deutschland-findet.de) :

Monat	Temp. max.	Temp. min.	Sonnenstunden	Regentage	Feuchtigkeit
Jan.	19 °C	9 °C	7,5	2,5	nn %
Feb.	21 °C	9 °C	8,4	2,1	nn %
Mär.	24 °C	11 °C	8,9	1,4	nn %
Apr.	28 °C	14 °C	9,6	0,4	nn %
Mai	32 °C	17 °C	10,6	0,3	nn %
Jun.	35 °C	20 °C	11,7	0,1	nn %
Jul.	35 °C	22 °C	11,6	0	nn %
Aug.	35 °C	22 °C	11,2	0	nn %
Sep.	32 °C	20 °C	10,6	0	nn %
Okt.	30 °C	18 °C	9,6	0,2	nn %
Nov.	25 °C	14 °C	8,6	1,5	nn %
Dez.	21 °C	10 °C	7,3	3,1	nn %

Die Ausrichtung des Gebäudes und zwar mit dem meist frequentierten Räumen Richtung Osten, um die ersten Sonnenstrahlen nach den kalten Nachtstunden optimal ausnutzen zu können und so das Innenraumklima sanft an die heißen Temperaturen ab Mittag anzupassen sollte gut durchdacht sein. Dafür ist es meist hilfreich ein eigenes Mikroklima mit Übergangszonen zu schaffen.

Klimazone gemäßigt – Gemäßigte Zone⁴

Die Sonneneinstrahlungsintensität ist sehr unterschiedlich: in Mitteleuropa gibt es einen hohen Anteil an diffuser Strahlung durch häufige Bewölkung, die Übergangsregionen zu den Tropen weisen höhere direkte Strahlungsmengen auf. Der Temperaturunterschied zwischen den Sommer- und Wintermonaten ist hoch – er liegt bei durchschnittlich 20°C – zwischen Tag und Nacht eher gering mit durchschnittlich 8°C.

Mittlere Niederschlagsmengen bedingen die mittlere bis hohe relative Luftfeuchtigkeit.

Fazit

Für die Materialeigenschaften bedeuten diese Parameter eine ausgewogene Beanspruchung im Gegensatz zu den anderen Kli-

mazonen. Hierfür können bereits einige Kenndaten von bereits gebauten Beispielen herangezogen werden, da diese sehr gut dokumentiert sind.

Augenmerk wird auf die winterliche Auskühlung bzw. die sommerliche Aufheizung gelegt.

Klimazone kalt – Polarzone⁵

Geprägt von sehr geringer Sonneneinstrahlung und jahreszeitlich sehr niedrige Jahresdurchschnittstemperaturen von 0-6°C. Die täglichen Temperaturunterschiede fallen ebenfalls gering aus, zu bedenken ist die lange Helligkeit im Sommer bzw. die anhaltende Dunkelheit während des Winters.

In kontinentaler Lage fallen die jährlichen Temperaturunterschiede mit 45°C sehr hoch aus, in meeresnaher Lage kann man mit 15°C von einem mittleren jährlichen Temperaturunterschied sprechen.

Besonders in den Wintermonaten fällt die relative Luftfeuchtigkeit sehr gering aus – bedingt durch sehr lange Frostperioden von 5 – 9 Monaten, zum Teil Dauerfrost in tieferen Erdschichten.

Fazit

Die baulichen Grundvoraussetzungen sind in dieser Zone je

nach Lage – kontinental oder in Meeresnähe – etwas unterschiedlich. Die Beschaffenheit des Bodens bzw. seine statische Veränderlichkeit werden ausschlaggebend für die Fassadenkonstruktion sein. Auch die Umgebung wird in besonderem Maße Einfluss auf den Entwurf nehmen, da sie periodenweise eher lebensfeindlich sein kann. Es gibt jedoch ein paar Gesichtspunkte, die für die gesamte Polarzone gelten: der Schutz vor Kälte, Starkwind bzw. Sturm in den meisten Monaten des Jahres und die bestmögliche Nutzung der Sonnenwärme während des kurzen Sommers. In diesem extremen Fall kann ebenfalls wie beim heißen-trockenen Klima die Schaffung eines Mikro-

4 Klimadaten Wien Vgl. (deutschland-findet.de):

Monat	Temp. max.	Temp. min.	Sonnenstunden	Regentage	Feuchtigkeit
Jan.	2 °C	-3 °C	1,8	14	nn %
Feb.	4 °C	-1 °C	2,8	12	nn %
Mär.	10 °C	2 °C	4,1	13	nn %
Apr.	15 °C	6 °C	5,7	12	nn %
Mai	20 °C	10 °C	7,1	13	nn %
Jun.	21 °C	13 °C	7,5	14	nn %
Jul.	25 °C	15 °C	7,9	13	nn %
Aug.	25 °C	15 °C	7,3	12	nn %
Sep.	20 °C	12 °C	5,7	10	nn %
Okt.	14 °C	7 °C	4,4	9	nn %
Nov.	8 °C	3 °C	2,1	14	nn %
Dez.	3 °C	-1 °C	1,7	15	nn %

5 Klimadaten Reykjavik Vgl. (deutschland-findet.de):

Monat	Temp. max.	Temp. min.	Sonnenstunden	Regentage	Feuchtigkeit
Jan.	2 °C	-2 °C	1	20	nn %
Feb.	3 °C	-2 °C	2	17	nn %
Mär.	4 °C	-1 °C	4	18	nn %
Apr.	6 °C	1 °C	5	18	nn %
Mai	10 °C	4 °C	6	16	nn %
Jun.	12 °C	7 °C	6	15	nn %
Jul.	14 °C	9 °C	6	15	nn %
Aug.	14 °C	8 °C	5	16	nn %
Sep.	11 °C	6 °C	4	19	nn %
Okt.	7 °C	3 °C	2	21	nn %
Nov.	4 °C	0 °C	1	18	nn %
Dez.	2 °C	-2 °C	0	20	nn %

Klimas sehr hilfreich sein.

Ein positives Beispiel für einen klimagerechten Entwurf ist die King Fahad Nationalbibliothek^{Abb.2} in Riad, Saudi-Arabien.

Das Dortmunder Architekturbüro Gerber Architekten erreichte beim 2002 ausgeschriebenen Wettbewerb den 1. Platz und eine 3-jährige Bauzeit von 2007 – 2009 folgte. Die bestehende Bibliothek aus den 1970er Jahren musste aufgrund des Denkmalschutzes erhalten bleiben und sollte zusätzlich vor den immer massiver werdenden Umwelteinflüssen geschützt werden. Deshalb umhüllt der quadratische Neubau, dessen Fassade einem grazilen ornamentalen bzw. geometrischen Muster folgt, den Bestand von allen Seiten.

„Sie formt einen kubischen „Ring“ um den nach Denkmalschutzkriterien erhaltenen Altbau, der eine architektonische Einheit mit dem Neubau bildet. So dient das flache Dach des Altbaus als Lesesaal, während sich in seinem Inneren – wie in einer Schatztruhe – die Büchermagazine befinden.“¹

Doch nicht lediglich formale Aspekte argumentieren für die besondere Ausformung der

Textilfassade. Das Ingenieurbüro Drees & Sommer Advanced Building Technologies setzte auf eine fundierte Standortanalyse. Täglich bis zu neun Stunden Sonne bzw. Temperaturen bis zu 50°C sind keine Besonderheit in Riad. Um mit diesen klimatischen Gegebenheiten fertig zu werden und ebenfalls die vom Bauherr gewünschte Transparenz zu gewährleisten, passte man die starre Membranfassade an die lokale Sonnenbahn an. Dazu wurden dreidimensionale Lichtberechnungen durchgeführt, die den Lichteinfall von allen Seiten, d.h. den Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Strahlungintensität unter Miteinbeziehung der von der Tageszeit abhängigen Sonnenbahn aufzeigen. Aufgrund dieser Überlegungen wurde die Fassade von den Architekten als durchlässigen Hitzeschild – in eine dreidimensionale zugbelastete Stahlseilkonstruktion eingespannte weiße Membranflächen – ausgeführt. Ein kombiniertes System aus Schichtlüftung und Fußbodenkühlung von Drees & Sommer ergänzt den Hitzeschild, da es ausreichend Belüftung und ein angenehmes Raumklima gewährleistet.

„Dank der durchdachten Membranfassade und des klimatechni-

schen Kombi-Systems gelang ein Novum im arabischen Raum: ein Maximum an thermischen Komfort bei minimalem Energieaufwand.“¹

Abb. 2 Universitätsbibliothek King Fahad, Riad Gerber Architekten, Dortmund



¹ Vgl. (Gerber Architekten)

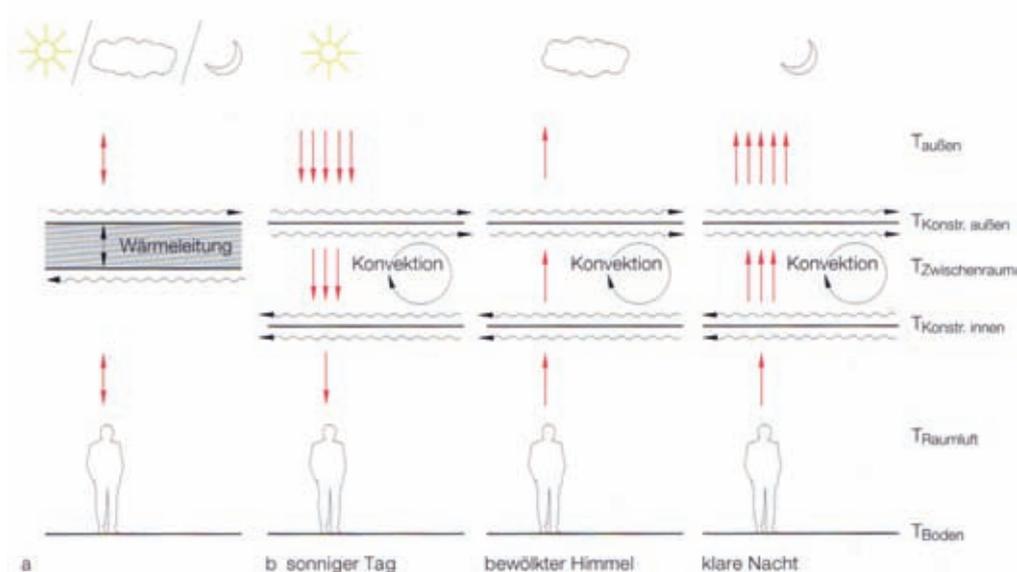


Abb. 1 (5.1.2) Witterungsabhängigkeit von Membrankonstruktionen
 a) typische konventionelle Konstruktion mit Wärmedämmung
 b) strahlungsdurchlässige Konstruktion mit getrennten Schalen und geringer Masse

5.1.2 Wärmeschutzstrategien

Damit die jeweils beste Wärmeschutzmaßnahme identifiziert werden kann, wird als Einstieg der Wärmetransport beleuchtet.

Da selbst mehrschalige Membrankonstruktionen sehr geringe Materialmassen im Vergleich zu massiven Bauweisen aufweisen, liegt der Fokus für die Beurteilung des Wärmeschutzes nicht auf der Wärmeleitfähigkeit der Lagen. Vielmehr ist das Einfangen, Speichern und der Weitertransport bzw. das Verhindern des Eindringens der Umgebungstemperatur / Sonnenstrahlung von größerer Bedeutung.

Demnach zieht der Experte den Anteil an Konvektion und Wärmestrahlung am Gesamtwärmetransport^{Abb.1, S.68} heran. Deshalb reagiert die Hülle bei nahe unmittelbar auf veränderte Umgebungstemperaturen, was die Gefahr der Taupunktverschiebung und Kondenswasserbildung (Vgl. 2.1) in sich birgt. In der Konzeption der Gesamtkonstruktion wird dieser Umstand Beachtung finden.

Luft ist ein schlechter Wärmeleiter - was sich in der Ausformung der verschiedenen Wärmedämmmaterialien manifestiert - deshalb werden Membrankissen gerne aus bauphysikalischen Gründen eingesetzt^{Abb.2}. Ist zum Beispiel kein zwiebelartiger Aufbau der Hülle

erwünscht, drängen sich pneumatisch stabilisierte Konstruktionen auf. Genauso stellen sie für Bauten mit hoher Transparenz eine ernstzunehmende Alternative für Glaskonstruktionen dar. Die Wärmeschutzleistung steigt mit den eingearbeiteten Lagen. Jede weitere Luftschicht begünstigt das stufenweise Anpassen der Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Aussenraum^{Abb.3}. Wie im Kapitel 4.3 bereits angesprochen stellt die Randausbildung bzw. Klemmung eine Wärmebrücke dar, die mit Fensteranschlüssen vergleichbar ist. Ist die Möglichkeit gegeben die einzelnen Lagen getrennt zu klemmen, würde es große thermische Vorteile haben. In jedem Fall sollten Möglichkeiten zum Abführen des

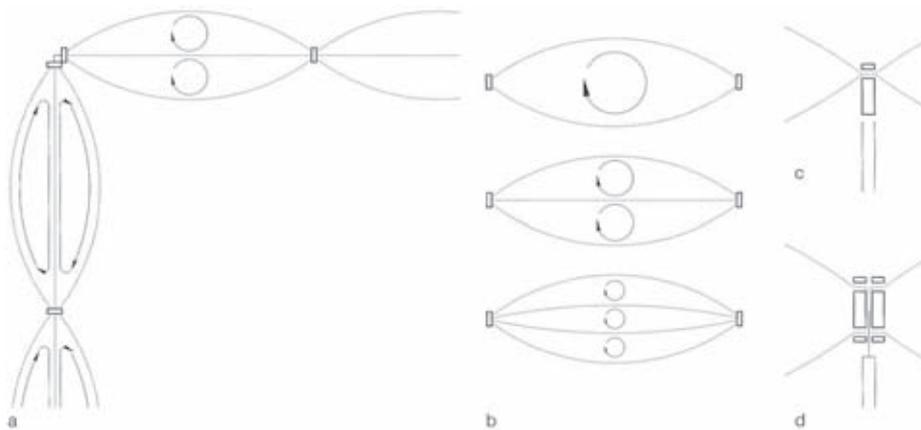


Abb. 3 unterschiedliche Konvektion
 a) horizontales, vertikales Kissen
 b) zwei- und mehrlagige Kissen
 c) Kissen mit einer Randklemmung
 d) Kissen mit nach Lagen getrennter Randklemmung

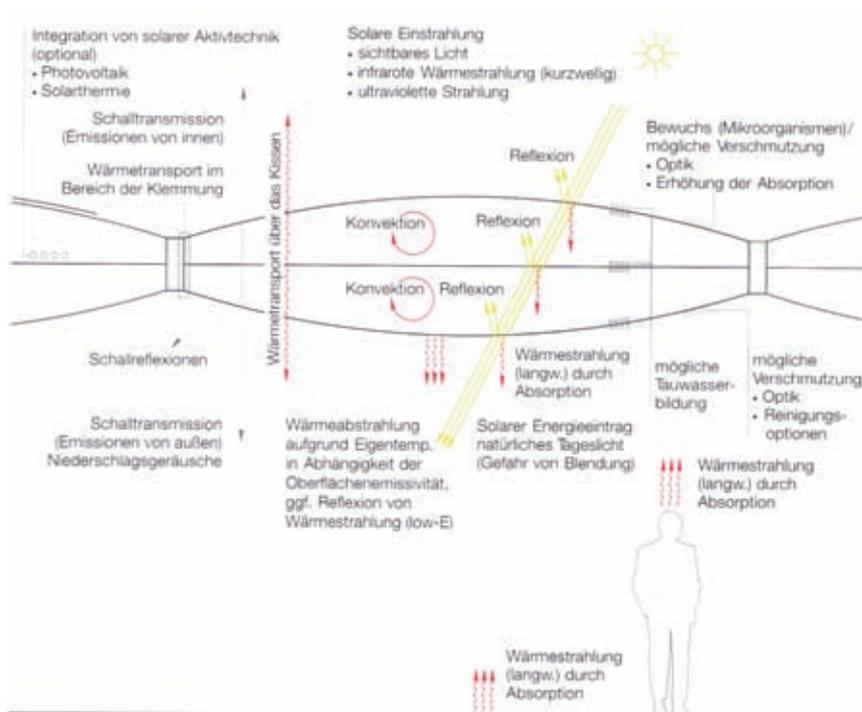


Abb. 2 bauphysikalischen Besonderheiten von Folienkissen

Kondensats eingeplant sein. Weiters ist der Anteil der Randflächen zur Gesamtkonstruktion so gering wie möglich zu halten.

Technisch gesehen gibt es mehrere Möglichkeiten der Wärmedämmung. Diese werden in den nächsten Absätzen vorgestellt.

- 1 Punkthalter Acryglas Ø 78mm
- 2 Sogsicherung Punkthalter Stahlseil Ø 3mm
- 3 Acryglasplatten B1 transparent 10mm
- 4 Fugenband Chloropren Breite 140mm
- 5 tragendes Seilnetz Spiralseil Stahl 2x Ø 10mm
- 6 Seilklemme auf Traverse verschieblich
- 7 Traverse Stahlrohr Ø 100/50/6,3mm
- 8 Spannschloss 10mm
- 9 Spreize Rundstahl Ø 40mm
- 10 Randprofil Rundstahl Ø 65mm, Länge 1500mm
- 11 Inneres abgehängtes Membrandach tragende Schicht Polyesterwebung PVC beschichtet transluzent
- 12 Polyester-Dämmvlies transzärent 2x 35mm mit versetzten Stößen, luftdurchströmt
- 13 Abdichtung ETFE-Folie transparent
- 14 Vogelschutznetz Polyamid Maschenweite 30x30mm
- 15 ETFE-Pneu zweilagig, Höhe variabel
- 16 Stahlfassade IPE 200
- 17 Isolierverglasung 45mm
- 18 Belüftung anstelle Dampfsperre Stichleitung Ø 20mm entlang der Stege Bohrung Ø 1mm alle 2000mm warme vorkonditionierte Luft ca. 2-3 bar
- 19 PVC -Steg auf jeder Flächennaht
- 20 Klemmprofil Befestigung ETFE-Folie gegen Sog
- 21 Auslassöffnung Belüftung Polypropylen Ø 12mm
- 22 Klemnteiler Kleblatt 300mm
- 23 Kleblatt-Abhängung Federstahl Ø 25mm
- 24 Abhängung Beleuchtungssteg Stahlseil 10mm
- 25 Klemmring Aluminium 8 mm Ø 220mm
- 26 Trichtermanschette PVC mit Tragmembrane verschweißst
- 27 Hochpunkt Ringträger Ø 4000mm Stahlrohr Ø 273mm / 8mm
- 28 Abhängung vom Seiltragwerk Stahlseil Ø 22mm

Konventionelle Wärmedämmung¹

Eine mindestens 15 cm dicke Wärmedämmschicht ist im Zwischenraum einer zweilagigen Membran angebracht, ebenso ein Luftraum von mindestens 2 cm um die Durchlüftung zu gewährleisten.

Diese Art der Dämmung erreicht einen U-Wert von bis zu 0,25 W/m²K. Die Transluzenz geht jedoch verloren, welche viele Membranfassaden charakterisiert. Die Berliner Firma Aeroix hat ein Dämmsystem für Ballone entwickelt, das auf einer zweilagigen Membran aus Polyamidgewebe basiert, welche mit aufgeflockten Filamentfasern gefüllt ist. Die Gesamtmaterialestärke beträgt 8mm und der λ -Wert ist mit 0,0265 W/mk sehr klein, was sehr gute Wärmedämmeigenschaften beweist. Momentan ist dieses Material für architektonische Anwendungen wegen seiner hohen Kosten noch nicht geeignet, aber es zeigt die Richtung an in die sich Membranmaterialien bewegen werden.

Beispiel für eine konventionell gedämmte Gebäudehülle ohne Verlust der Transluzenz ist die Olympiaschwimmhalle in München^{Abb.4}. Von 2003 bis 2006 musste die Decke des Schwimmbades erneuert werden.

Der innere Raumabschluss ist eine Polyester-PVC-Membran auf der eine zweilagige Dämmung aus imprägniertem Polyestervlies angebracht ist. Ein Lüftungssystem entlüftet kontrolliert die Dämmebene. Den Abschluss nach außen bildet eine ETFE-Folie, die den Aufbau vor Wassereintritt schützt.

Abschließend ist zu erwähnen, dass Membrane und Folien nicht dampfdicht sind, was eine Durchfeuchtung der Dämmschichten bedeuten kann. Abhilfe können eingebrachte Dampfsperren oder intensive Hinterlüftung bieten.

Flontex-Systeme¹, Abb.5

Ursprünglich zwar für Dachsysteme konzipiert, könnte die Firma Flontex ein interessantes Material für die Dämmung von Membranbauten geliefert haben. Es handelt sich um ein semitransparentes Glasgittergewebe das einen höheren Wärmestandard erreicht. Eine spezielle Glasfasereinlage erhält die Transluzenz, da diese 50% des einfallenden Lichtes durchlässt. Im Prinzip funktioniert das System wie eine konventionelle Wärmedämmung mit dem Vorteil der Transluzenz.

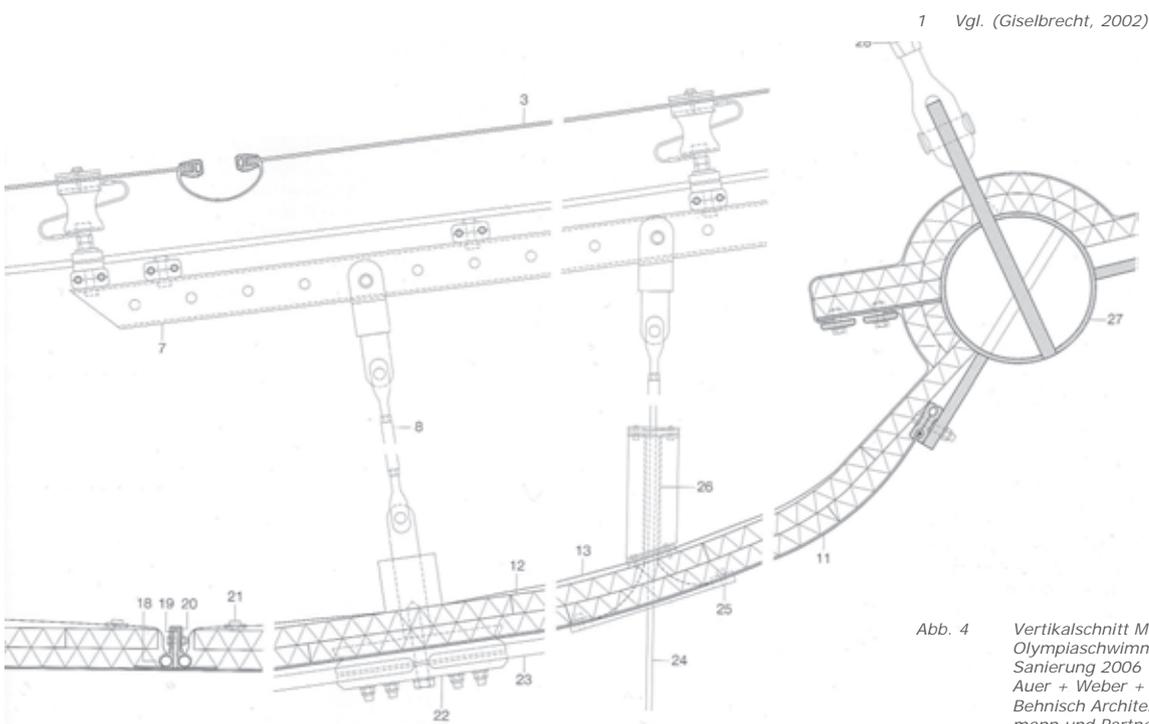


Abb. 4 Vertikalschnitt Membrandecke Olympiaschwimmhalle, München (D) Sanierung 2006 Auer + Weber + Assoziierte, Behnisch Architekten mit Schlaich Bergmann und Partner (Tragwerksplanung)

Transparente Wärmedämmung – TWD

Bei der transparenten Wärmedämmung handelt es sich um eine hinterlüftete, transparente bzw. transluzente Fassade mit Kartonwaben, die mit Hilfe von solaren Gewinnen die Wärmeverlustrate bei herkömmlich gedämmten Wänden aufhebt. Im Winter wird der mittlere U-Wert durch die solaren Gewinne auf den vier Gebäudeseiten mit ca. 0,04 W/m²K so gering, dass aus jedem Niedrigenergiehaus ein Passivhaus wird. Die Waben können glasklaren bzw. transluzente Röhrchen, oder undurchsichtige Kartonwabe sein. Bei letzteren geht zwar die Transparenz verloren, allerdings verhindert das aufgrund des steilen Einfallswinkels der Sonne im Sommer und der Hinterlüftung eine Überhitzung. Die Sonne kann nicht tief in die Waben eindringen. Es kann daher auf teure mechanische Beschattungen verzichtet werden. Da bei diesem Verfahren mit Elementen gearbeitet wird, kann mit Transparenz und Intransparenz gespielt werden.

Funktionsprinzip^{Abb.6}

Das Herz der transluzenten Wärmedämmung ist die Solarwabe aus Karton, die zwischen zwei

Membranlagen angebracht wird. Eine Hinterlüftung von mindestens 2 cm oder ein solarer Pufferaum zur passiven Solarnutzung ist einzuhalten – durch die Solarstrahlung wird die stehende Luft auch im Winter in den Waben erwärmt. Die warme Temperaturzone verhindert Wärmeverluste aus dem Wohnraumbereich bzw. wirkt einer Überhitzung im Sommer entgegen. Im Mittel kann die transluzente Wärmedämmung die Wärmeverlustrate während der Heizperiode auf der Südseite fast völlig ausschalten und auf der Nordseite etwa halbieren - das entspräche Passivhausqualität. Voraussetzung für die oben genannten Effekte ist eine ausreichend vorhandene Masse zur Speicherung der Solarwärme. Ist ein Gebäude ohne massiven Kern geplant, sollten andere Speichermedien bzw. Massen überlegt werden.

Die Herausforderung wird sein dieses eher starre Material in eine Membranfassade zu integrieren. Durch den geometrischen Aufbau kann diese Aufgabe als lösbar eingestuft werden. Da entweder mithilfe eines modularen Aufbaus der Struktur der TWD Rechnung getragen werden kann, oder für weitgespannte Strukturen Netz-

strukturen als Vorbild dienen können.

Aerogele²

Hochleistungsmembrane bzw. Folienwerkstoffe auf der Basis von Fluorpolymeren - wie transluzente Membranmaterialien aus PTFE, beschichtetes Glasfasergewebe bzw. transparente ETFE Folien aus Copolymer - sind Ergebnisse der Forschung nach hochleistungsfähigen Materialien für biegeeweiche Gebäudehüllen. Eine der vielversprechendsten Weiterentwicklung im Bereich des Wärmeschutzes ist ein Dämmmaterial aus Silika-Aerogel. Meist bestehend aus Silikaten, ist dieses Material ein trockenes Gel, das sehr leicht und hitzebeständig ist. Aerogele sind sehr porös, können sehr große Mengen an Gas aufnehmen³.

„Transluzente Aerogele bieten eine ausgezeichnete Wärmedämmung bei maximaler Tageslichtnutzung. Das poröse Silizium-Material ist lichtdurchlässig, schallisolierend und streut einfallendes Tageslicht tief in den Raum. Tageslichtsysteme mit dieser Technik erreichen bei der Dämmung Werte besser als extrem gutes Isolierglas, Wärmedurchgangskoeffizienten

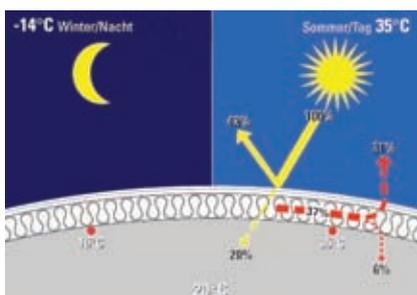


Abb. 5 Flontex-System

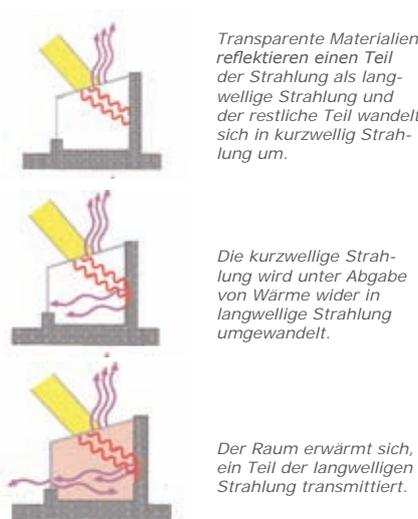


Abb. x Funktionsprinzip TWD

² Vgl. (WEKA MEDIA GmbH & Co. KG)

³ **Eigenschaften Silikat-Aerogel**
Vgl. (Giselbrecht, 2002):

Granulatgröße	0,5-4,0mm
Porengröße	10-100 nm
Porenvolumanteil	80%
Lichttransmissionsgrad / cm Einbaustärke	~80%
Rohdichte	90-100 kg/m ³
Innere Oberfläche	600-800 m ² /g
Wärmeleitfähigkeit	0,018 W/mK
Temperaturbeständigkeit	Bis 600 °C, unbrennbar
Weitere Eigenschaften	UV-beständig, recyclebar, hydrophob, langzeitstabil
physische Verfügbarkeit	Pulver (opak), Granulat (transluzent), monolithische Blöcke

von weniger als $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ sind möglich. ^{4/2/S.69}

Aerogele haben eine Granulatgröße von $0,5 - 4,0 \text{ mm}$ bei einer Porengröße von ca. $10-100 \text{ nm}$ und einem Porenvolumenanteil von mehr als 80% . Pro Zentimeter Einbaustärke beträgt der Lichttransmissionsgrad einer Aerogelschicht ca. 80% , bei beinahe doppelt größere Dämmeigenschaften bezogen auf die Schichtstärke vergleichbarer Dämmstoffe wie Polystyrolschaum. Ein weiterer erfreulicher Punkt sind die lichtstreuenden Eigenschaften, was angenehme blendfreie Lichtverhältnisse bedeutet.

Für mechanisch vorgespannte Konstruktionen ist das Aerogel-Vlies interessant: es handelt sich um ein Vlies - aus Zweikomponentenfasern hergestellt und mit Aerogel Partikeln versetzt. Dadurch erhält man eine flexible und druckfeste Matte mit sehr guten Dämmeigenschaften⁴. Das Vlies könnte direkt auf der unteren Membranlage aufgebracht werden. Der Effekt wäre eine homogene Optik, die allerdings durch Materialstöße des Vlieses zueinander gestört werden könnte.

Membranfassade als Klimahülle

Mit Hilfe der Membranfassade kann eine Klimahülle geschaffen werden, die mit dem massiv gebauten Innenkern einen zwiebelartigen Aufbau bildet und auf diese Weise ein angenehmes Raumklima zu schaffen. Der Innenteil wirkt als thermische Speichermasse – wie bereits bei der transparenten Wärmedämmung gezeigt, der Pufferraum zwischen Membran und massivem Kern temperiert die kalte Außenluft vor^{Abb. 8-10} bzw. schützt durch Einsatz von Sonnenschutz oder anderen klimatechnischen Maßnahmen vor Überhitzung.

Eine Klimatisierung muss leisten:

- Durchlüftung
- Frischluftzufuhr
- Abtransport heißer Luft
- Abtransport von entstehendem Kondensat
- Verhinderung von Schimmelbildung
- Angenehmes Raumklima

Das Ausnutzen des Windes für die natürliche Ventilation hält den Energieverbrauch zwar gering, aber die Konstruktion wird zusätzlich beansprucht. Das bedeutet, die Form des Gebäudes spielt eine große Rolle beim natürlichen Frischluft-

austausch. Dafür müssen selbstverständlich die lokalen Windverhältnisse stark in den Entwurf einbezogen werden.

Da, wie bereits erwähnt, eine fundierte Standortanalyse ohnehin unerlässlich ist, dürfte eine Erweiterung der Forschungen auf die Windverhältnisse kein Problem darstellen.

Ein Beispiel für eine Membranfassade als Klimahülle ist die temporäre Stadtteilverwaltung in London von Lifschutz Davidson Sandilands^{Abb. 11} (Vgl. 6.1.2).

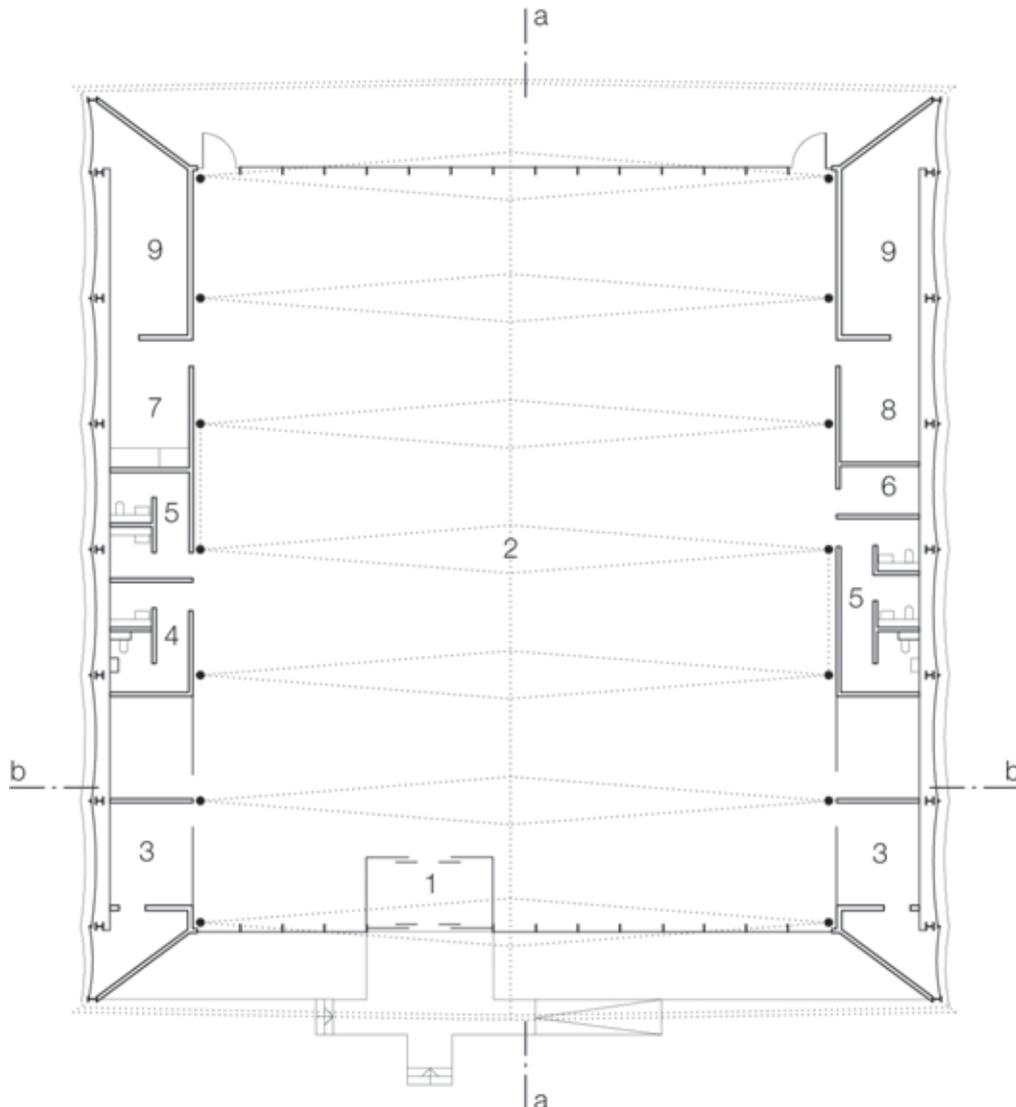
Um den inneren Kern, den das Großraumbüro (2) darstellt, sind sämtliche Nebenräume - (1), (3)-(9) - als „Massespeichersatz“ angeordnet. Es kommt die erwähnte zwiebelartige Gebäudegliederung zum Einsatz. Die Nebenräume werden bei Sonneneinstrahlung solar erwärmt und geben die vortemperierte Luft durch aufgeständerte Gipskartonplatten an den größten Raum weiter. Lüftungslamellen in den verglasten Kopfteilen der Fassade lassen eine individuelle Raumlüftung zu, ansonsten wird Frischluft unter dem aufgeständerten Boden in den Raum geblasen. Bei Bedarf kann diese Luft vorgekühlt werden.

4 Eigenschaften Aerogel-Vlies:

Dicke	3,5 und 8mm
Rollenbreite	56cm
Wärmeleit-fähigkeit	21,0 W/mK bei $\varnothing\text{Temp. } 12,5^\circ\text{C}$ 23,5 W/mK bei $\varnothing\text{Temp. } 37,5^\circ\text{C}$ 26,0 W/mK bei $\varnothing\text{Temp. } 62,5^\circ\text{C}$
Rohdichte	~ 75 kg/m ³

Abb. 7 Aerogel-Vlies





- 1 Windfang
- 2 Großraumbüro
- 3 Besprechungsraum
- 4 Kundentoilette
- 5 Mitarbeitertoilette
- 6 Lager
- 7 Teeküche
- 8 Informations- und Kommunikationstechnologie
- 9 Technik / Lüftung

Abb. 11 Membranfassade als Klimahülle; temporäre Stadtteilverwaltung London; Lifschutz Davidson Sandilands

Abb. 8 Vorwärmen von frischer Luft

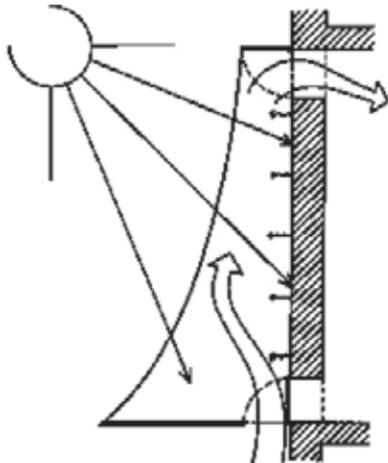


Abb. 9 Zirkulation der aufgewärmten Luft – Vermeidung von Überhitzung

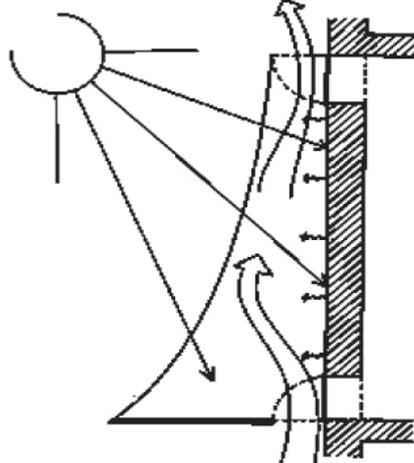
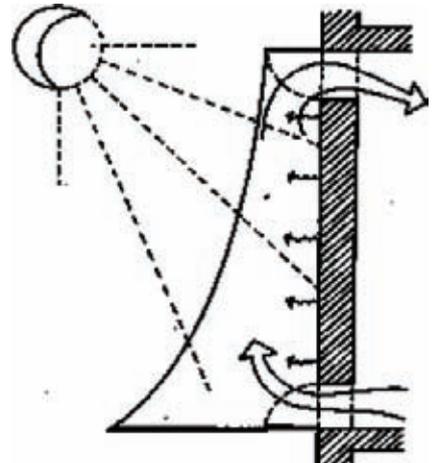


Abb. 10 Vorwärmen zirkulierende Luft nachts



Variable Konstruktionen⁵

Nach der Auseinandersetzung mit kombinierten Systemen als Klimahüllen drängt sich die Frage nach den Möglichkeiten hinsichtlich anpassungsfähigen Hüllen auf. Vor allem auch deshalb, weil Membranfassaden völlig unterschiedlich auf heiße bzw. auf eine kalte Umgebung reagieren. Im Laufe des Tages oder der Jahreszeit kann sich ein entsprechender Konstruktionsentwurf^{Abb. 12} an die wechselnden Bedingungen anpassen. Meist sind dies Beschattungssysteme, Windbrecher oder Schutz vor Nässe bzw. Schnee, da mit konstruktiven Maßnahmen der U-Wert nur sehr bedingt beeinflusst werden kann.

5.1.3 Akustische Aspekte

Das akustische Verhalten von Membrankonstruktionen wird aufgrund deren Materialität von folgenden Parametern beeinflusst:

- Absorptions- und Resorptionsverhalten der Folien / Geweben
- Geometrie der Hülle bzw. des Raumes
- Volumen des Raumes

Schallreflexion¹ und Schallabsorption² sollen für die jeweilige Nutzung im Gebäude optimiert werden.

Beim Arbeiten mit Membranen ist der Einsatz von mikroperforierten Absorbern relevant. Diese können mit glatten Materialien hergestellt werden, da der Fokus nicht auf der Porosität liegt. Prinzipiell muss wegen der geringen Materialdicke der Membranmaterialien mit mehreren Lagen gearbeitet werden und eventuell mit massereicherer Materialien kombiniert werden.

Die Firma KAEFER hat mikroperforierte Folien entwickelt, die transparent, transluzent oder bedruckt sind und den Reflexionsschall bzw. die Nachhallzeit senken³.

Der Hersteller empfiehlt den Ein-

satz in Großraumbüros, Kantinen, Schwimmbädern, Produktionsstätten oder Eingangshallen. Das lässt den Schluss zu, dass diese Folien eher für den Innenbereich konzipiert sind. Bei mehrlagigen Membranfassaden kann die innere Hülle aus diesem Material bestehen.

Gewölbte, schräggestellte bzw. mehrlagige Folien können eine breitbandige Wirkung erzielen, wenn die Folien in einem angemessenen Abstand zu einander bzw. zum massiven Kern hin angeordnet sind.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin schwere Mittellagen in den Aufbau einzubringen. Angewendet bei der Gebäudehülle des Flughafens Bangkok. Nicht nur Polycarbonatplatten sind dafür geeignet, auch ist es möglich eine mechanisch vorgespannte Membran doppelartig auszuführen um den Zwischenraum mit Sand zu füllen.

Da pneumatisch vorgespannte Kissenkonstruktionen einen beträchtlichen Resonanzkörper aufweisen können, stellen diese ein besonderes Problem dar. Regentropfen können die Folienlagen wie bei einer Trommel zum Schwingen bringen und der Resonanzkörper tut sein Übriges. Die Lärmbelastung ist bei normaler

5 Vgl. (Giselbrecht, 2002)

1 Schallreflexion =

Effekt wenn eine Schallwelle auf eine harte Oberfläche trifft.

- Glatte Oberfläche: gespiegelte Reflexion
- Rauhe / unregelmäßige Oberfläche: diffuse Reflexion

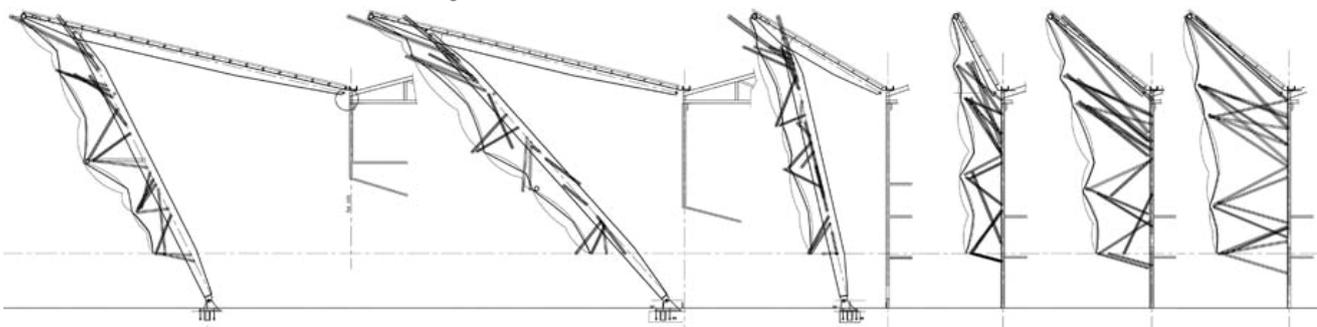
Einfluss der Geometrie: konvexe – nach außen gewölbte – Flächen haben immer eine zerstreue Wirkung.

2 Schallabsorption =

vollständige oder teilweise Aufnahme des Schalls von dem Körper, auf den die Schallwelle trifft. Die Schallwellen werden in Wärme umgewandelt. Die Materialien, die einen hohen Schallabsorptionsgrad aufweisen können, heißen Schluckstoffe:

- Poröse Absorber: Umwandlung der Schallenergie in Wärmeenergie durch Reibung der sich in den Poren befindenden Luftteilchen. Dafür müssen die Poren offen und tief sein, was bedeutet dass z.B. Schaumkunststoffe die zur Wärmedämmung eingesetzt werden mit ihren geschlossenen Poren zur Schallabsorption ungeeignet sind.
- Mikrofeiner Absorber: sehr dünne Platten (<8mm) mit sehr kleinen Öffnungen (Ø 0,3-2,0mm). Die so herbeigeführten Reibungsverluste in den Löchern bewirken die Dämpfung. Damit ist der Einsatz faserfreier Schallabsorber möglich. Vgl. (Giselbrecht, 2002)

Abb. 12 Wandelbare Hülle: Le Zénith de Strassbourg



Nutzung und bei normalem Regen bzw. kürzeren Starkregengüssen überschaubar, aber für akustisch sensible Nutzung scheiden Folienkonstruktionen aus. Ebenso in Gegenden wo es starke Regenfälle über längere Zeiträume geben kann (Monsun), wäre eine reine Folienkissenkonstruktion eventuell zu überdenken. Zu erwähnen wäre, dass beschichtetes Gewebe einen kleineren Geräuschpegel produziert, da die Oberfläche eine größere Inhomogenität aufweist. Auch feine Netze können die Lärmentwicklung verringern, jedoch mit einer Einschränkung der Transparenz. Desweiteren sammelt sich Schmutz an diesen Netzoberflächen, der nicht ohne Weiteres entfernt werden kann.

Fazit

Die meisten Strategien für eine angenehme Akustik setzen im Innenraum an. Zum Einen, weil sich höhere Materialmassen speziell bei pneumatisch vorgespannten Konstruktionen nicht integrieren lassen und zum Anderen weil eine Ausstattung leichter Flächentragwerke mit viel mehr Masse die Intention der Minimalkonstruktion konterkariert.

5.1.4 Brandschutz und Brandverhalten

Grundsätzlich ist bei allen Gebäuden der Nachweis hinsichtlich Sicherheit und Alterungsfähigkeit zu bringen. Die Sicherheit betreffend steht das Brandverhalten bzw. der Brandschutz an vorderster Stelle, da hier die größten Gefahren liegen können. Der Brand selbst ist oft nicht gefährlich, sondern vielmehr die Folgen. Teilweise laufen völlig irrationale sozialpsychologische Verhaltensweisen ab oder das Material versagt in Folge seiner Verminderung bzw. stofflichen Veränderung. Der Brandschutz sieht vor die Brandausbreitung zu verhindern oder zu verzögern, dabei die Tragfähigkeit der Konstruktion zu erhalten um so die Gesundheit der Nutzer zu schützen. Materialien müssen gemäß Normung nach Baustoffklassen eingeteilt werden:

A nicht brennbare Baustoffe

- A1 ohne organische Bestandteile, kein Nachweis erforderlich
- A2 mit organischen Bestandteilen, Nachweis erforderlich

B brennbare Baustoffe

- B1 schwer entflammbar
- B2 normal entflammbar (nicht selbstverlöschend)
- B3 leicht entflammbar (nicht selbstverlöschend)

Kennwert ist der Zeitraum, bis wann der Baustoff vollständig brennt (Flashover). Bei A1, A2, B darf der Flashover niemals eintreten. Zusätzlich führte die EU Unterklassen für Rauchentwicklung (s1, s2, s3) und brennendes Abtropfen (d0, d1, d2) ein. Diese Bezeichnungen müssen mit jedem Material mitgeliefert werden.

Es ist möglich sich an diesen Angaben zu orientieren. Weitere eventuell entscheidende Faktoren und Eigenschaften sind vom Planenden zu ermitteln¹:

- Bei welchen Temperaturen der Schmelzpunkt und der Punkt der Entflammbarkeit liegen.
- Ob das Material bzw. Produkt brennend abtropft, wobei ein heißes Abtropfen ebenfalls sehr problematisch sein kann.
- Ob sich das Material im Brandfall zurückzieht und dadurch eventuell Öffnungen entstehen, die Hitze und Rauchgase nach außen strömen lassen. (Rauchklappe)
- Welche Verbrennungsprodukte entstehen. (Toxizität)
- Ob sich der Kunststoff einer regelmäßigen Sichtkontrolle stellen kann.
- Welche Gebäudekomponente bei welchen Temperaturen ihre statische Funktion verlieren und welche Folgen das nach sich ziehen kann.

3 Mikroperforierte Aryphanfolie Vgl. (KAEFER Construction GmbH)

Foliendicke	0,1 mm
Perforation	Lochdurchmesser 0,2mm / Lochabstand 2mm
Ausführungsart	transparent, transluzent, bedruckt
Eigenschaften	Schwerentflammbar B1 gem DIN 4102, UV stabilisiert, neutrales Verhalten gg stat. Aufladung oberh. Einer relativen Feuchte von 40%
Max. Folienbreite	1,25m

1 Vgl. (Knippers, et al., 2010) S. 119 ff

Mikroperforierte ETFE-Folie (Teflon) Vgl. (KAEFER Construction GmbH):

Foliendicke	0,1 mm
Perforation	Lochdurchmesser 0,2mm / Lochabstand 2mm
Ausführungsart	transparent, bedruckt
Eigenschaften	Schwerentflammbar B1 gem DIN 4102, absolut UV stabilisiert
Max. Folienbreite	1,25m

Flammschutzmittel werden entweder über die Polymerstruktur aufgenommen oder über Beschichtungen an der Oberfläche angebracht. Sie reduzieren die Brennbarkeit bzw. mildern die Folgen des Verbrennens ab. Besonders günstig ist die chemische Bildung einer luftabschließenden Schicht o. ä. die das Feuer am Weiterbrennen hindert.

Folienkissenkonstruktionen verlieren zwar sehr rasch ihre statische Funktion, dennoch werden sie von der Feuerwehr als vergleichsweise positiv bewertet. Sie reißen schnell auf, wirken wie ein Rauchabzug und haben keinen statischen Einfluss auf das Gesamttragssystem. Der Fall kann bei mechanisch vorgespannten Konstruktionen anders liegen, da diese teilweise Anteil am statischen Gesamtsystem haben.

5.1.5 Membranhülle Gebäudesysteme

Wie bereits erwähnt, werden momentan membranumhüllte Gebäudesysteme als Maßnahme zur thermischen und ästhetischen Sanierung bestehender Objekte diskutiert. Deshalb werden diese aufgrund ihrer speziellen Lüftungsmöglichkeiten und dem damit verbundenen Erleben des Innenraums – zu vergleichen mit dem in Passivhäusern – näher behandelt.

Die membranumhüllten Gebäudesysteme entwickelten sich aus den Glasdoppelfassaden mit dem Ziel der Optimierung von Raumkomfort und Reduktion des Energieverbrauchs. Glasdoppelfassaden zeigten den Nutzen einer Einfachverglasung als Windbarriere mit beweglichem Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum. Die Schall-, Wärme- und Sonnenschutzigenschaften der Fassaden verbesserten sich eklatant.

Der nächste Schritt führte zu den sogenannten Hybridfassaden. Die aufwändige Technik – wie Vollklimaanlagen – sollte reduziert werden. Die Frischluftversorgung übernimmt nicht länger eine herkömmliche Klimaanlage, sondern eine Quelllüftung mit geringem

Luftwechsel ohne Zegerscheinungen. Über eine mit Kaltwasser gespeiste Kühldecke wird der Raum gekühlt. Es sind wieder natürliche Belüftungsmöglichkeiten vorgesehen.

„Hybridfassaden stellen sich nicht mehr als starre, undurchlässige Grenze zwischen Raum und Umgebung dar, sondern als semipermeable Membran mit dynamischen Eigenschaften, welche negative Außeneinflüsse (Regen, Sturm, Hitze, Kälte und Lärm) reduziert und die positiven (Sonne, Licht, Luft) so weit wie möglich und sinnvoll zur natürlichen Beheizung, Beleuchtung und Belüftung nutzt.“¹

Diesen Prinzipien folgen ebenfalls membranumhüllte Gebäudesysteme^{Abb.1:}

Sie umhüllen das Gebäude als zweite Haut und schaffen so einen Gebäudezwischenraum, der als thermische Pufferzone die Wärmeverluste reduziert. Die außen liegende, zweite Gebäudehülle dient als Solarfalle des Gebäudes. Das lichtdurchlässige Material nimmt die Strahlung auf und erwärmt auf diese Weise die Luftschicht in der Pufferzone. Die innenliegende massive Gebäudehülle übernimmt statische Funktionen und bildet die Masse, die die solare Wärme aufnimmt und

¹ Vgl. (Grunwald, 2007) S. 64

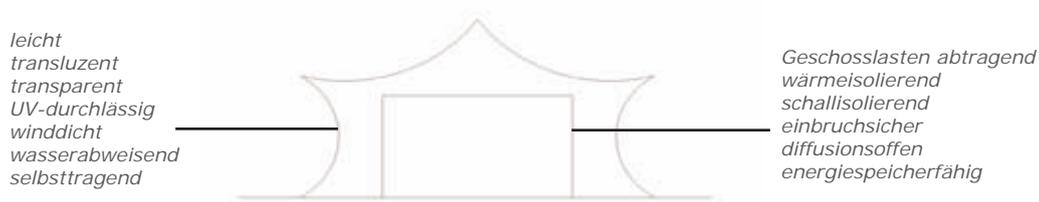


Abb. 1 membranumhülltes Gebäudesystem

langsam an die innen liegenden Räume weitergibt. Eine weitere Masse ist der Boden innerhalb der Pufferzone. Er nimmt tagsüber die Strahlungsenergie auf und gibt sie nachts an die Zwischenzone ab. Das bedeutet eine optimale Nutzung der Solarfalle auch in der Nacht.

Es besteht die Möglichkeit an der massiven Gebäudewand Sonnenkollektoren zu installieren die zusätzlich Energie aus der Sonneneinstrahlung generieren und so die solare Ausbeute zu maximieren. Mit der gewonnenen Energie kann die Warmwasseraufbereitung gespeist sowie eine installierte Wandheizung betrieben werden. Durch die Membranhülle kann die massive Gebäudeaußenwand vollkommen diffusionsoffen gestaltet sein. Somit stellt sie der Luftfeuchtigkeit der Innenräume keinen Widerstand beim Verdunstungsprozess nach außen dar.

Normalerweise werden Energiesparhäuser mit Diffusionsbremsen bzw. -sperrern ausgestattet, um gerade diese Wasserdampfdiffusion zu verhindern. Denn bei kalten Temperaturen kann der Taupunkt innerhalb der Außenwand liegen und beschädigt die Konstruktion oder die Wärmedämmung. Bei der Membranhülle kann diese

Diffusion zugelassen werden, weil die Zwischenzone bei Tag erwärmt wird und die Außenwand wieder trocknet.

Auf diese Weise findet der Feuchtigkeitstransport nach außen über die Zwischenzone statt. So hilft die Gebäudehülle den Wasserdampf in den Innenräumen ohne Fensterlüftung oder aufwändige Lüftungsanlagen – wie es beim Passivhausbau üblich ist - zu beseitigen. Die Gefahr der Schimmelbildung kann ausgeschlossen werden, die Räume erhalten ein natürliches Klima^{Abb.2}.

Die Solarfalle kann in warmen Perioden jedoch auch zu einem Problem werden – Überhitzung ist ein Aspekt der Doppelfassadentechnik. Die Membranhülle muss auf eine sommerliche Überhitzung reagieren, vor allem ohne Einsatz künstlicher Kühlung. Ein entscheidender Ansatz ist die Energiedurchlassreduktion. Der Einsatz von transluzenten oder transparenten, bedruckten Membranflächen in Verbindung mit wärmedämmenden, opaken Membranflächen könnte für den Sommer als auch für den Winter von Vorteil sein. Im Winter deshalb, weil die Wärmedurchlasswerte (U-Werte) von Membran bzw. Folienhülle hoch sind, was

sich ungünstig auf den Verbleib der Wärme in der Pufferzone auswirkt. Wird ein Anteil mit opaken, wärmeisolierenden Membranflächen ausgeführt, kann das Verhältnis von Einstrahlungsfläche zu Auskühlung über die transparenten Teile günstiger ausfallen, bzw. die Auskühlung deutlich verlangsamt werden. Im Sommer wird so ein zu massives Eindringen der Sonnenstrahlen und der damit verbundene Treibhauseffekt verhindert.

Unterstützend dazu kann die Zwischenzone belüftet werden mit Hilfe von Klappen oder Lüftungsschlitzen im Sockelbereich. Dieser Bereich wird meist ohnehin massiver gestaltet werden müssen, um eine mögliche Angriffsfläche für Vandalismus außer Reichweite zu bringen. Die aufgeheizte Luft steigt mit der Luftbewegung nach oben zu den oberen Lüftungsöffnungen um dort zu entweichen. Ebenfalls vor Überhitzung schützt die massive zweite Gebäudehülle wie sie im Winter vor Auskühlung schützt. Addiert man die genannten Maßnahmen kann von wirksamem Einschreiten gegen zu hohe Temperaturen im Innenraum gesprochen werden.

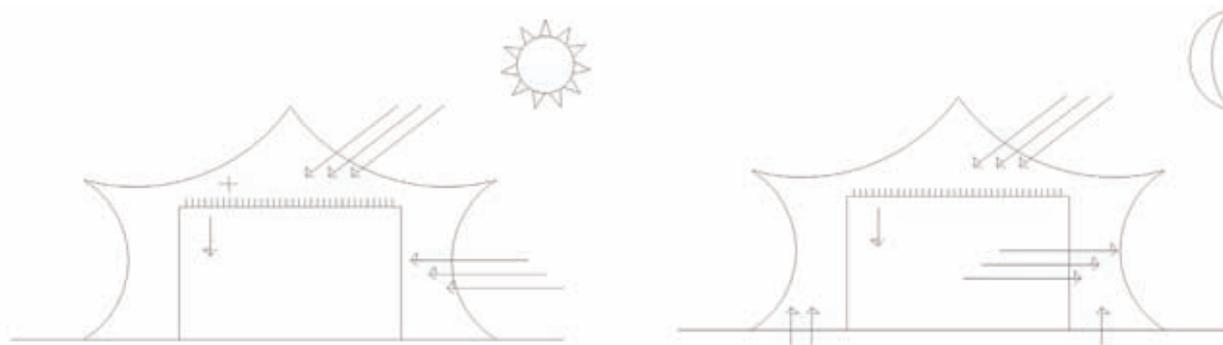


Abb. 2 Diffusionswege

Aspekt Sommer- und Winterfenster Abb.3

Bisher wurde lediglich von der Belüftung der Zwischenzone gesprochen. Doch der Nutzer möchte die Raumtemperatur auch über selbstständiges Öffnen der Fenster steuern. Zum Einen um schnell frischen Sauerstoff einzulassen, zum Anderen um das Bedürfnis nach Kontakt mit der Außenwelt zu befriedigen. Bei Niedrigenergiehäusern ist dieses Verhalten oftmals mit einer Störung des automatischen Luftaustauschs verbunden. Dieses Problem kann mit Hilfe von Sommer- und Winterfenster gelöst werden. Sommerfenster sind jene, die die Hülle durchstoßen und es direkt nach außen hin öffnen. Das Winterfenster hingegen ist innerhalb der Membranhülle angebracht, das heißt im Winter strömt die frische, vorgewärmte Luft in den Innenraum.

Beispielhaft für ein Membranhülltes Gebäudesystem wird an dieser Stelle ein Einfamilienhaus in Santiago de Chile, geplant und gebaut von FAR frohn&rojas, vorgestellt. Abb.4-7

Gelegen am Rande Santiago de Chiles fällt sofort der ländliche Charakter auf. Trotz der unmittelbaren Nähe zur Stadt verstärken unbefestigten Wege und Hecken, die jede Parzelle umgeben, diesen Charakter. Die Nachbarbebauung wird verdeckt, der freie Blick auf die Anden lässt die urbane Nachbarschaft vergessen. Die Hecken können als äußere Begrenzung des Hauses angesehen werden, was für das entstehende Objekt eine schrittweise Verdichtung bedeuten kann. Die jeweiligen Zonen erfüllen klimatische, statische und funktionale Aufgaben. Daher spiegelt dieses Projekt die Philosophie des textilen Bauens - mit Bezug auf Semper - zu einem sehr großen Teil wider.

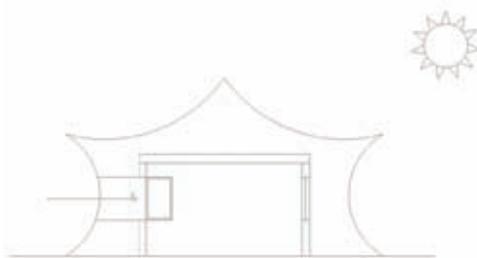
Im Zentrum befindet sich ein rechteckiger Betonkern, der statisch als auch klimatechnisch günstig ist. Die Betonwände sind Strahlungsflächen für die Zentralheizung im Winter, im Sommer wird diese mittels Wärmepumpe passiv kühlen. Außerdem befindet

sich innerhalb des Betonkerns die höchste Privatsphäre.

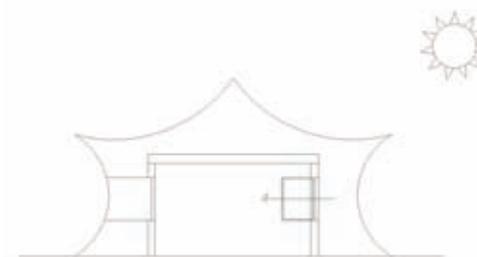
Darauf folgt die nächste Schicht, 2 aufeinander gestellte Regalbänder als Haupttragwerk. Gegen einander verschoben ergibt sich eine Auskragung von 5,20m, die weitere Wohnfläche freigibt. Als nächstes folgt die lichtdurchlässige Klimahülle aus Polycarbonatplatten auf einer Unterkonstruktion aus verzinkten Standardprofilen.

Zuletzt spannt sich eine zeltartige Hülle aus Polymer mit eingearbeiteten Aluminiumstreifen - reflektiert 70% der Sonnenenergie und schützt vor Insekten - über den Aufbau. Drei verschiedene Gewebedichten je nach Himmelsrichtung, teilweise mit Reißverschlüssen miteinander verbunden, wurden eingesetzt.

Abb. 3 Schema der Belüftungsmöglichkeiten:



Öffnung in den Außenraum



Öffnung in den Pufferraum

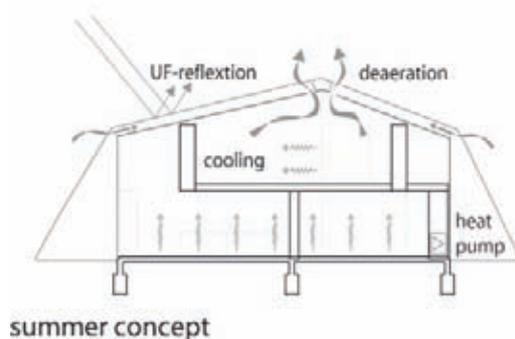
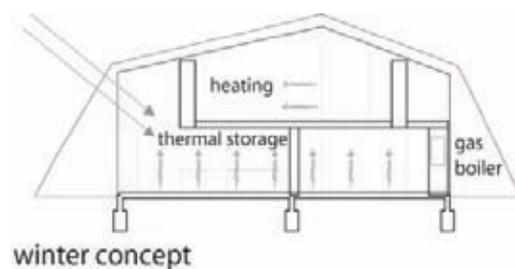


Abb. 4 Energieschemata



Abb. 7 Konzept zwiebelartiger Aufbau

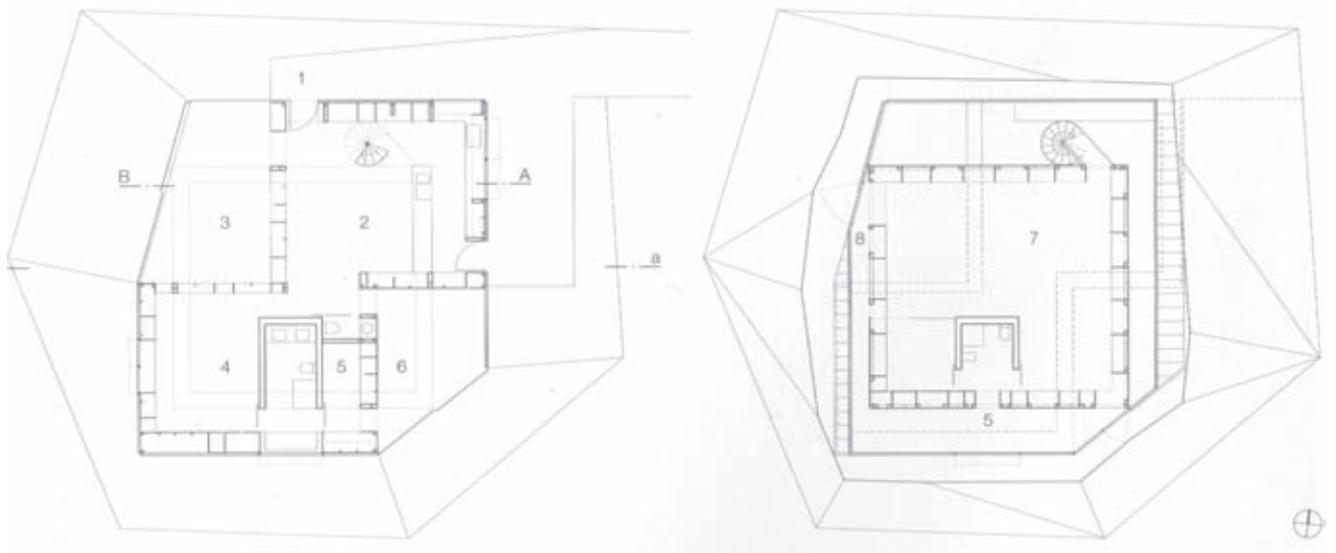


Abb. 6 Einfamilienhaus in Santiago de Chile, FAR frohn & rojas, Santiago de Chile, Grundrisse



Abb. 5 Einfamilienhaus in Santiago de Chile, FAR frohn & rojas, Santiago de Chile

5.2 Die einschalige Membranfassade

Nicht hinterlüftete Konstruktionen werden als Warmfassaden bezeichnet. Das bedeutet der wärme- als auch witterungstechnische Raumabschluss liegt in einem - eventuell mehrlagigen - Bauteil.

Ein Wandsystem ist aus bauphysikalischer Sicht einschichtig und homogen, wenn alle Schichten das selbe Verhalten hinsichtlich Wärme-, Feuchte- und Witterungseinwirkungen aufweisen. Besonders elementierte Fassadenelemente sind hauptsächlich mehrschichtig, weil der Wärme-, Feuchte- und Witterungsschutz von unterschiedlichen Materialien mit abweichendem spezifischen Charakter erfüllt wird. Deshalb benötigt eine Wandkonstruktion wärme- und feuchtetechnische Planung.

Fassaden von Wintergärten, Lifttürmen und Lichthöfen sind oft mehrere Geschoße hoch und können im Inneren einen großzügigen Raumeindruck erzeugen.

Oft werden diese Pufferräume bepflanzt, was ebenfalls durch eine Membranfassade unterstützt werden könnte.

Im Vergleich mit Glaskonstruktionen sind transparente bzw. transluzente Folien bzw. Gewebe aufgrund ihrer hohen Licht- und UV-Durchlässigkeit und der geringeren Eigenlast – was zu schlankeren Konstruktionsbemessungen führt – besser als Fassadenmaterial geeignet.

Bei Lichthöfen ist die erwünschte natürliche Belichtung der angrenzenden Räume im Fokus der Planung. Wo der direkte Sichtbezug zu Außenräumen nicht von Bedeutung ist, wäre der Einsatz von transluzenten Materialien möglich. Der Vorteil läge in der höheren Zugfestigkeit von textilen Membranen im Gegensatz zu Folien – was höhere Spannweiten erlaubt.

Einlagig kann die Membran ausgeführt sein, wenn die Fassade ausschließlich dem Witterungsschutz dient. Durch einen mehrlagigen Aufbau würde eine Verbesserung der Wärmedämmwerte erreicht werden, was die Aufwertung der Wintergärten und Lichthöfen zu Aufenthaltsräumen zur Folge hätte.

Die ungünstigen Schalldämmeigenschaften der Membran sind bei Wintergärten und Lichthöfen

zu vernachlässigen. Einerseits lässt die temporäre Nutzung der Großräume einen höheren Schallpegel zu, andererseits lassen die leichten Membranen den Schall von innen nach außen entweichen und reduzieren den Nachhall effekt.¹

Als Beispiel ist die Luna Rossa Teambase^{Abb.1} im Hafen Valencias von Renzo Piano zu nennen.

Das Gebäude ist ein temporär genutztes Objekt, da die Segelwettkämpfe nur wenige Wochen im Jahr in Anspruch nehmen. Die Hülle ist eine einzigartige Kombination aus Segeln, die auf einem Aluminiumgestell überlappend miteinander verbunden sind. Diese Vertäfelung wurde mit Polycarbonatpaneelen verstärkt, spezielle Dichtungen sorgen für die besonders geforderte Wasser- und Winddichtheit der Hülle.

Das so entstandene Patchwork-Muster, eine Collage aus Segelmaterialien die auf dem Segelschiff Luna Rossa während der letzten Jahren verwendet wurde, besticht besonders in der Nacht, da durch die Einschichtigkeit die Beleuchtung des Innenraums nach außen dringt. Das matte Fassadenmaterial aus Kevlarfaser, welches tagsüber das Tageslicht gestreut in die Innenräume eindringen lässt, legt seine Glanzlo-

Abb. 1 Luna-Rossa-Teambase Valencia, Renzo Piano

1 Vgl. (Adamczewski, 2008) S. 32



sigkeit ab und zeigt die elemtierre Fassade als eine Licht-Schablone.

Ein Objekt, welches für den ganz-jährigen Einsatz konzipiert ist, ist die Trainingshalle der Bergwacht in Gaißbach bei Bad Tölz, geplant von Herzog + Partner^{Abb.2-4}.

Genutzt als eine Simulationsanlage für die technische Luftrettung, um die sehr budgetintensiven wie wetterabhängigen Trainingsein-sätze im Freien zu substituieren. Die Benutzer wünschten eine sehr realitätsnahe Umgebung, was den Einsatz einer ungedämmten, einschaligen Membranfassade begünstigte. Ganz bewusst soll die Umgebungstemperatur das

Innenraumklima beeinflussen.

Darum wählte das Architekten-team eine einlagige, einschali-ge Folienkonstruktion, welche über der Sockelzone beginnt um eventuellen Vandalismusschäden vorzubeugen. Das Haupttragwerk besteht aus Rahmen aus Z-Profilen und Druckbögen, um die zeitweise hohen Windkräfte auf den 20 m hohen Kubus aufneh-men zu können.

So gesehen wurde dem Prinzip der Minimalkonstruktion im ganz-heitlichen Sinne zu größten Teilen entsprochen, da die Bauweise wie das Material optimal mit der Nutzung korrespondieren. Der

vermeintliche Nachteil - nämlich stark auf Umgebungstempera-turen zu reagieren - wandelte sich in diesem Beispiel zu einem unschlagbaren Vorteil.

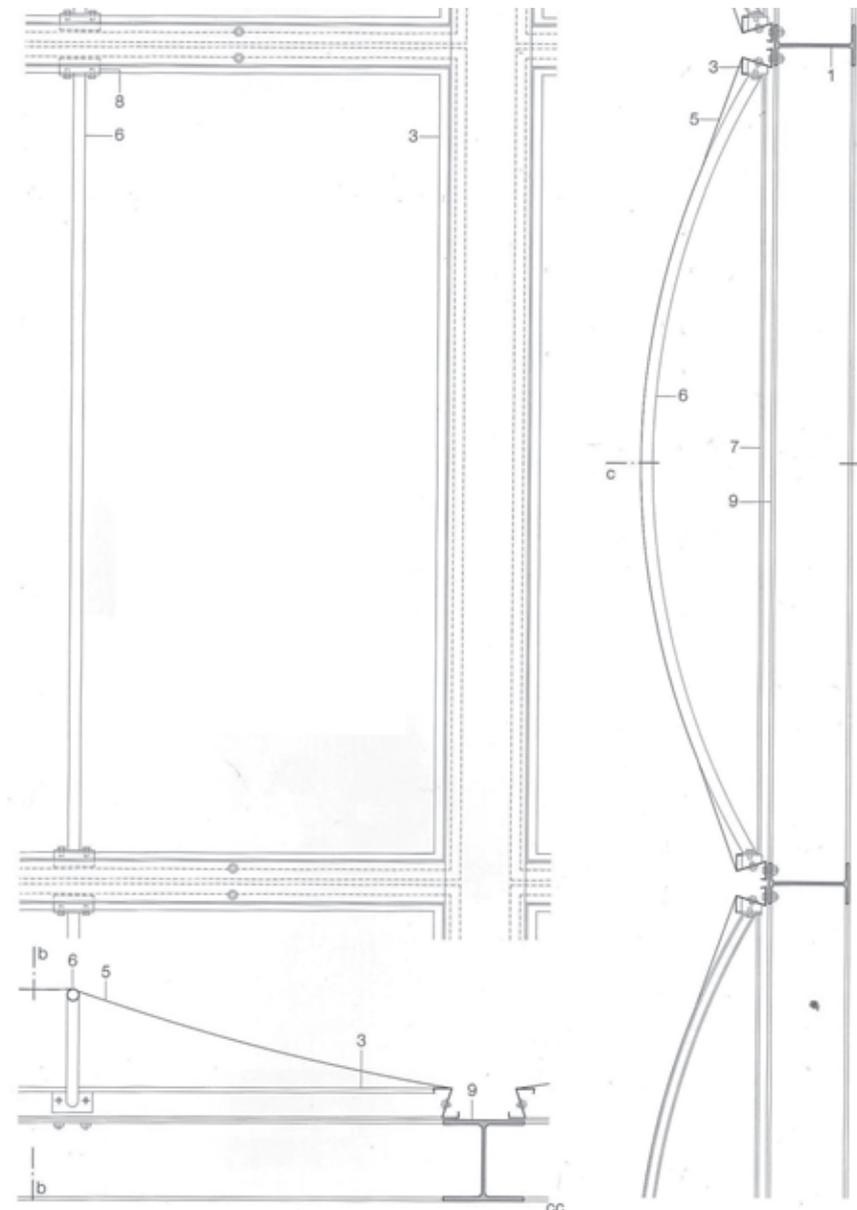


Abb. 2 Aufsicht, Vertikalschnitt, Horizontalschnitt einschalige Membranfassade, Trainingshalle der Bergwacht, Gaißbach, Herzog + Partner, München



Abb. 3 Trainingshalle der Bergwacht, Innenansicht



Abb. 4 Trainingshalle der Bergwacht, Aussenansicht

- 1 Stahlprofil I 240 mm
- 2 Schraube M12
- 3 Z-Profil aus Stahl 3 mm
0,20 mm; 0,25 mm; 0,30 mm
- 6 Druckbogen Stahlrohr \emptyset 35 x 8 mm
- 7 Sehne Stahlrohr \emptyset 8 mm
- 8 Flachstahl \emptyset 60 / 120 / 5 mm
- 9 Stahlprofil HEB 240 mm

5.3 Die mehrschalige Membranfassade

Die Doppelfassade wird oft als „Zweite-Haut-Fassade“ bezeichnet. Von der geschichtlichen Entwicklung her gesehen ist wohl das alte Kastenfenster mit dem inneren und äußeren Fensterelement der Vorgänger der Doppelfassade. Die Idee hinter diesem System ist folgende: die äußere Fassade schützt vor den direkten Witterungseinflüssen die das Klima im Innenraum besonders bei geöffnetem Fenster negativ beeinflussen, die zweite Schale dient als Schallschutz und Speichermasse für die Raumwärme. Der zwischen den beiden Schichten entstandene Pufferraum trägt zu einem geringen Heizwärmeverlust im Winter bzw. Überhitzung im Sommer bei.

Doppelfassaden werden nach der Unterteilung des Fassadenzwischenraums bzw. der Lüftungsfunktion eingeteilt:

Kastenfenster^{Abb.1}

An jedem Fenster gibt es Zu- und Abluftöffnungen um den Fassadenzwischenraum bzw. den Innenraum zu belüften. Der Fassadenzwischenraum ist horizontal getrennt, vertikal erfolgt die Trennung geschoßweise.

Korridorfassade^{Abb.2}

Zu- und Abluftöffnungen in Boden- oder Deckennähe. Vertikaler, geschoßweise getrennter Fassadenzwischenraum. Horizontal lediglich aus brandschutz-, schallschutz-, oder lüftungstechnischen Gründen.

Mehrgeschoßfassade

Be- und Entlüftung des Fassadenzwischenraumes durch boden- und dachnahe Öffnungen. Es grenzen sowohl vertikal als auch horizontal mehrere Räume an denselben Fassadenzwischenraum an. Es kann sich dabei um einen um das Gebäude laufenden Fassadenzwischenraum handeln, der über keine Abschottungen verfügt.

Schacht-Kasten-Fassade^{Abb.3}

Vertikal angeordnete Kastenfenster wechseln sich mit Vertikalschächten ab. Da diese Schächte über mehrere Geschoße durchlaufen wird der Kamineffekt genutzt, welcher mit Überströmöffnungen mit den angrenzenden Kastenfenstern optimal genutzt werden kann.

Demnach ist die äußere Hülle einer doppelschaligen Fassade vom klimatischen Raumabschluss getrennt, den die innere Fassade leisten muss. Also sind die nicht optimalen Dämmeigenschaften

einer Membran aufgrund ihrer geringen Masse nicht relevant.

Transluzente textile Membranen können in Bereichen, die keine Transparenz erfordern – z. B. Brüstungen – eingesetzt werden. Dies kann sowohl gestalterisch als auch nutzungsbedingt wünschenswert sein. Jedoch sollte in solch einem Fall eine konstruktive Trennung zwischen den verschiedenen Membranmaterialien vollzogen werden, da eine kraftschlüssige Verbindung unterschiedlicher Stoffe nicht ohne weiteres möglich ist. Ebenfalls zu bedenken ist, dass die Komplexität der Fassadenkonstruktion steigen wird.

Wegen ihrer Materialeigenschaften eignen sich Membranen sehr gut für den Einsatz als Außenschicht einer Doppelfassade.

Die Firmenzentrale von Unilever in Hamburg^{Abb.4-5}, geplant von Behnisch Architekten ist ein Beispiel für eine Mehrgeschoßfassade.

Das Flaggschiff des Unilever-Konzerns liegt im Stadterweiterungsgebiet Hamburg Hafen City direkt am Elb-Ufer. Das bedeutet eine Umgebung geprägt von einer Hafen- und Industriekultur - visuell

Abb. 1 Kastenfenster-Fassade

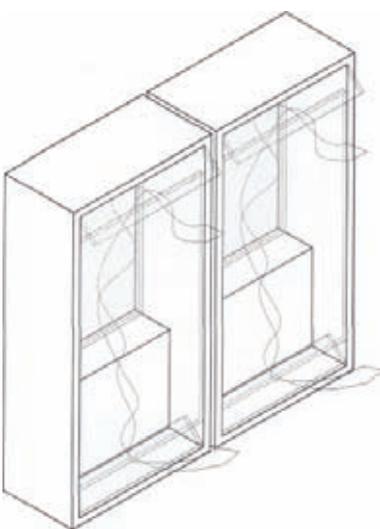


Abb. 2 Korridorfassade

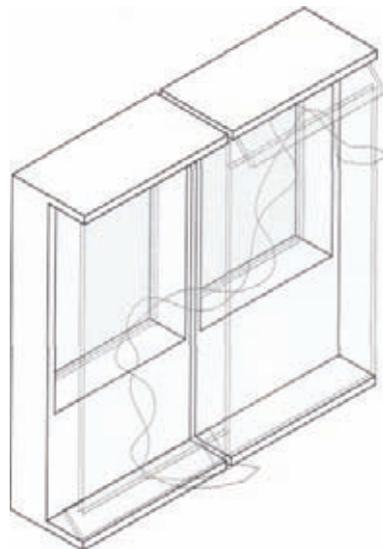
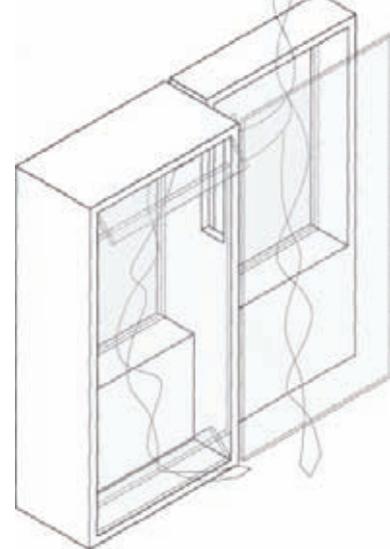


Abb. 3 Schacht-Kasten-Fassade



manifestiert in den Takelagen der Schiffe. Die filigrane Hinterspannung der Fassade bezieht sich ästhetisch auf diesen Umstand.

Die Fassade teilt sich in eine äußere, leichte Haut und in eine innere Schale. Mit ETFE-Folie bespannte Rahmen bilden die äußere Fassadenhaut, die vor einer Isolierverglasung - die Innenfassade - geblendet ist.

Die hohe Lichtdurchlässigkeit (95% im sichtbaren Bereich), die maximale Tragfähigkeit von 50 N/mm² und die durch die gute UV-Betändigkeit hohe Lebensdauer von veranschlagten 30 Jahren führten zur Materialentscheidung zu Gunsten der 0,25 - 0,3mm dünnen ETFE-Folie.

In horizontaler Achse konvex, bzw. in vertikaler Achse konkav gekrümmte Sattelflächen bestimmen die Vorspannung der Membranfläche, die gegen örtlich auftretende starke Winde bestehen muss. Die filigrane Seilnetzkonstruktion - Druckstempel und horizontale Unterspannungsseile drücken die ETFE-Folie nach außen, horizontal gespannte Windsogseile übertragen die Sogkräfte auf die Rahmen - hält die Membran in Form. Die Rahmen sind an einer Geschossebene mit Kragarmen angeschlossen, an den übrigen Geschossebenen werden diese mittels gelenkig gelarteten Pendelstützen horizontal abgestützt.

Der Hamburger Kreuzfahrthafen ist nur wenige Schritte entfernt was große Abgasemissionen

bedeutet. Laut Bebauungsplan ist ein mechanisches Belüftungssystem mit SO₂-Filter gefordert, was meistens eine individuelle Fensterlüftung unmöglich macht. Genau diese Fensterlüftung möchte der Bauherr erhalten.

Die Lösung sieht folgendermaßen aus^{Abb.6}: ein Hybridsystem aus freier Fensterlüftung und mechanischer Lüftung. Die Außenluft wird durch einen Erdkanal angesaugt und gefiltert, vor dem Wiederaustritt ins Freie wird die Wärme mittels Wärmetauscher in den Heizkreislauf zurückgeführt. Die Mitarbeiter können die Fenster sooft und solange öffnen wie sie möchten. Durch die vorgespannte Fassade und die gefilterte Luft steigt die SO₂-Belastung nicht über den kritischen Wert.



Abb. 4 (links) Rendering Unilever Zentrale, Hamburg

Abb. 5 (rechts) Außenaufnahme Unilever Zentrale, Hamburg

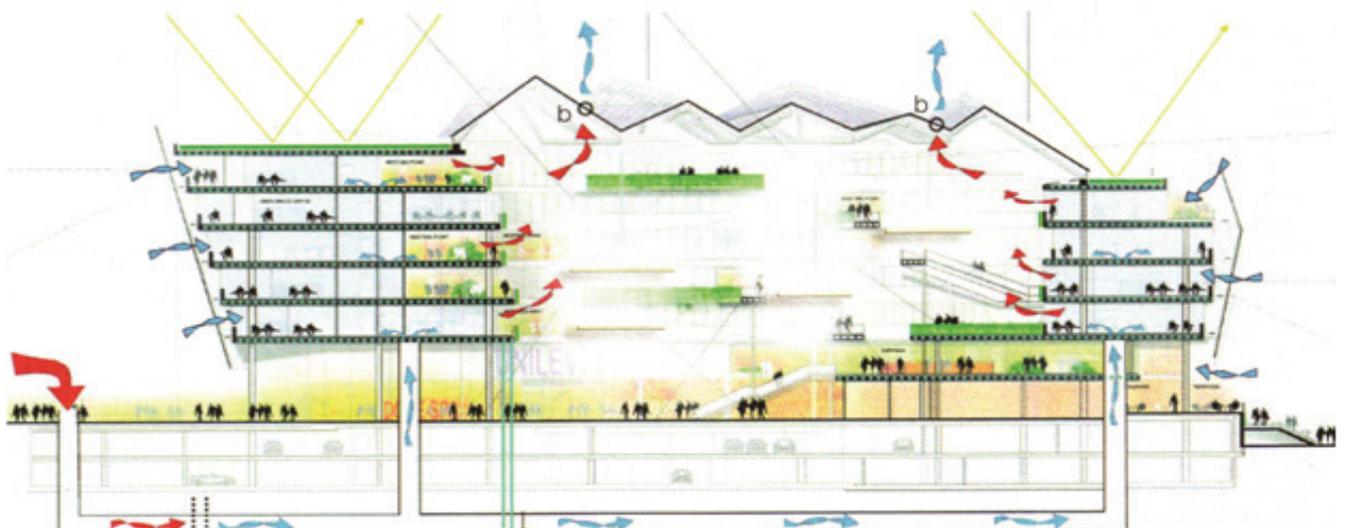


Abb. 6 Klimakonzept Unilever Zentrale, Hamburg



Abb. 1 Le Zénith, Parc de la Villette, Paris



Abb. 2 Le Zénith, Parc de la Villette, Paris

Abb. 3 Le Zénith, Strassburg, Massimiliano Fuksas, Aussenansicht



Abb. 4 Le Zénith, Strassburg, Massimiliano Fuksas, Innenansicht

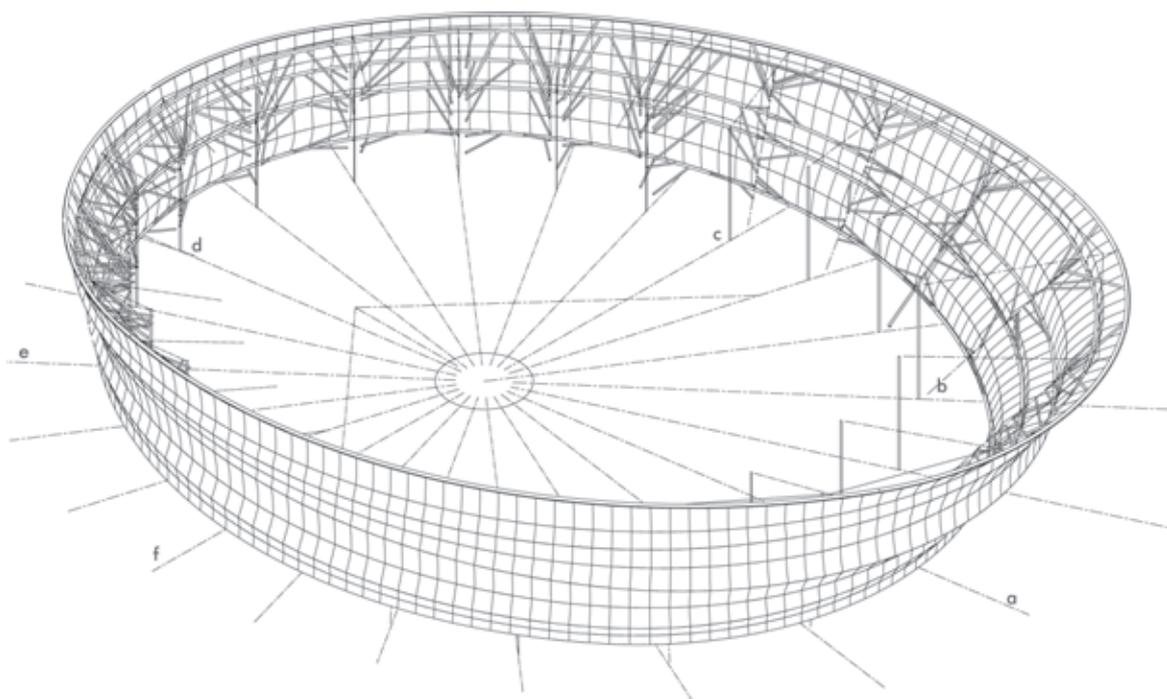


Abb. 5 Le Zénith, Strassburg, Massimiliano Fuksas, Konstruktionsschema

6. Strukturen von Membranfassaden

Gestalterisch gesehen bestechen Membrane durch die hohe Plastizität und räumliche Tiefe der zweiachsig gekrümmten Oberflächen. Die Formensprache erhält ein großes Maß an Leichtigkeit. Außerdem können Membranfassaden adaptierbare, sich verändernde Fassaden darstellen, die ihr Erscheinungsbild an die jeweilige Nutzung oder an die jeweiligen Witterungsverhältnisse anpassen.

Der 1983 von Philippe Chaix und Jean Paul Morel konstruierte Hallenkomplex „Le Zénith“ im Parc de la Villette in Paris stellt ein solches Beispiel dar^{Abb.1-2}. Die quadratische Halle umfasst 6200m² und verfügt über 5830 Sitzplätze und 570 Stehplätze, die auf zwei Ebenen aufgeteilt sind. Die Halle sollte modulierbar bleiben um ein größtmögliches Spektrum an Veranstaltungen – Rockkonzerte, Sport- und andere Veranstaltungen – anbieten zu können. Dazu entwickelten die Architekten die leichte Metallgerüststruktur, welche einfach an die Bedürfnisse des jeweiligen Auftritts angepasst werden kann. Ursprünglich war das Projekt ähnlich wie der Eiffelturm als ein auf drei Jah-

re angelegter Prototyp geplant, durch den großen Erfolg – 2000 Gruppen traten seit der Eröffnung 1984 auf, darunter alle bekannten französischen Rockgruppen – wird die Halle bis dato weiterbetrieben. Das Konzept des Zénith wird nun als Lizenz an andere französische Städte weitergegeben.

Die größte Halle dieser Art ist der von 2006 bis 2008 von Massimiliano Fuksas entworfene Zénith in Straßburg^{Abb.3-4}. Dieser Musikpalast fasst 10000 Menschen, dessen Kern eine ellipsoide Betonkonstruktion darstellt^{Abb.5}. Aus diesem Perimeter gehen die Stahlträger für die Hülle hervor, die wiederum die 22 Sekundärträger miteinander verbinden um die zylindrische Form perfekt zu machen. Diese Hülle – teilweise in den Betonwänden verankert – neigt sich dem Besucher als orange eingefärbte, transluzente Membran entgegen. Nach Sonnenuntergang leuchtet der Zénith und verwandelt sich zum Landmark – wenn das Gebäude genutzt wird, ist keine Veranstaltung geplant, verschwindet das Monument wie alle anderen Gebäude im Schwarz der Nacht.

Wie bereits am Zénith de Straßburg gezeigt, lassen sich Membrane und Folien leicht einfärben, bedrucken oder anderwärtig individualisieren was viele Möglichkeiten hinsichtlich Werbeflächen bzw. Kommunikationsmöglichkeiten gibt.

Die Leichtigkeit des Materials verlangt geringere Interventionen in die bestehende Bausubstanz als beispielsweise schwere curtain walls. Das bedeutet dieses Fassadensystem ist weit wirtschaftlicher als vergleichbare Glasfassaden.

Wie jedem anderen Material bzw. wie jeder anderen Technik stehen den zahlreichen Vorteilen¹ auch einige Schwächen² gegenüber. Diesen sollte sich der Planer bewusst sein, um angemessen darauf reagieren oder damit arbeiten zu können.

Membransysteme werden entweder als Außenschale einer Doppelfassade oder als einschalige Membranfassade für beispielsweise Wintergärten und Lichthöfe eingesetzt.

Nach umfassender bauphysikalischer Untersuchung bzw. Konzeption des membranumhüllten Gebäudekonzepts sind die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Form, Nutzung und Gestaltung im

¹ Vorteile nach (Adamczewski, 2008)

Formbarkeit	Vor allem organische Formen, die mit anderen Materialien nur sehr aufwändig herzustellen wären, verlangen beinahe nach Membranmaterialien.
Knickbeständigkeit	Für Fassadenkonstruktionen, die sich an die wechselnden Klimabedingungen anpassen sollen, ist die Knickbeständigkeit von großer Bedeutung.
Materialstärke / Gewicht	Die Materialstärken liegen meist bei bzw. unter 1mm. Das führt zu geringem Gewicht und geringer Masse, was wiederum den Materialaufwand deutlich geringer als bei traditionellen Fassaden macht.
Bruch-, Reissdehnung	Membranmaterialien verfügen über ausgeprägte elastische Eigenschaften.
Transluzenz / Transparenz	Wegen ihrer extrem hohen Durchlässigkeit von UV-Strahlung, die von Pflanzen zum Wachstum genutzt wird, eignen sich transparente Membranmaterialien hervorragend für Wintergärten. Auch für Ausblicke und Sichtbezüge bieten sie sich an. Im Gegensatz zu Glas ist dieses Material einfacher zu verarbeiten.
Wirtschaftlichkeit	Aufgrund der Formbarkeit, dem geringen Gewicht, dem geringen Materialaufwand, der schmutzabweisenden Eigenschaften, der hohen Transparenz bzw. UV-Durchlässigkeit und der mit diesen Parametern verbundenen Leichtigkeit sind Membranfassaden interessant.

² Nachteile nach (Adamczewski, 2008)

Schalldämmung	Aufgrund des geringen Flächengewichts besitzen Membranmaterialien sehr geringe Schalldämmeigenschaften. Der Schall wird einfach durchgelassen ohne ihn zu reflektieren.
Wärmedämmwerte	Die Materialstärken liegen meist bei bzw. unter 1mm. Das führt zu geringem Gewicht und geringer Masse, was wiederum den Materialaufwand deutlich geringer als bei traditionellen Fassaden macht. Jedoch das Fehlen der Speichermasse wirkt sich schlecht auf die Wärmedämmwerte aus. Da liegt die Verbindung von bestehendem Mauerwerk als Masse und davor vorgespannter Membranen nahe.
Feuerbeständigkeit	Die Mehrzahl der Membranmaterialien wird der Feuerwiderstandsklasse B1 – schwer entflammbar – zugeordnet. Nur wenige Membranmaterialien gelten als vollkommen unbrennbar und können ohne weitere Prüfung bzw. einer damit verbundenen Zustimmung seitens des Gesetzgebers im Fassadenbereich eingesetzt werden.
Aufbau / Recycelbarkeit	In der Regel bestehen Membrane aus Verbundmaterialien was das Recycling erheblich erschwert. Wie bereits in Kapitel 3.4 erwähnt werden bereits Möglichkeiten zur Verwertung – Stichwort „Downcycling“ – angewendet und entwickelt.

Entwurf umzusetzen. Es gilt der Grundsatz, dass die Hülle, deren Unterkonstruktion und das Innere des Gebäudes eine untrennbare Einheit bilden.

Um das Energieeinsparpotenzial das der Membranarchitektur inne- wohnt optimal nutzen zu können, ist die Wahl kompakter Gebäu- dekubaturen – d.h. ein günstiges Volumen-Außenraumverhältnis – zu empfehlen. Dieses Vorgehen optimiert die Flächen wärmeab- gebenden Bauteilen im Verhältnis zum umbauten Volumen.

6.1 Modulare Strukturen

Diese Art der Membranfassade zeichnen kleine Spannweiten und kleine Membranflächen aus.

Es wird von einer modularen Struktur gesprochen, wenn die Fassade aus mehreren Membran- flächen besteht. Diese bilden in der Addition bzw. Multiplikation die Fassadenfläche. Das Aus- wechseln einzelner Module birgt keine Probleme, da die einzelnen Module meist voneinander unab- hängig gespannt sind.

Wann liegt die Entscheidung für die modulare Struktur auf der Hand, bzw. wann ist es sinnvoll die Membranfassade zu elemen- tieren?

- Doppelfassaden - Kastenfenster, Schacht-Kasten-Fassade verlangen auf Grund bauartbe- dingter Lüftungsöffnungen eine modulare Fassade^{Abb1}.
- Materialentscheidung - Wenn man sich für Folien als Mem- branmaterial entschieden hat, da beispielsweise ETFE auf- grund der niedrigeren Festig- keiten geringere Spannweiten ermöglicht.
- Art der Vorspannung - Die Vorspannung wirkt sicher im- mer auf die Form der Fassade aus. Gewisse Vorspannungsar- ten bedingen den modularen Aufbau.

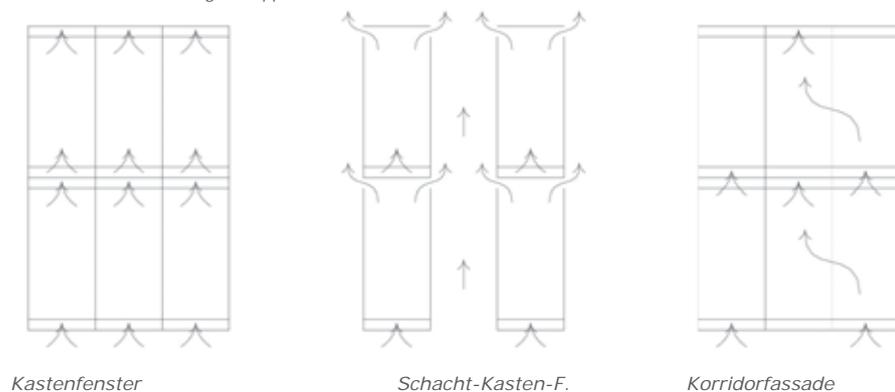
- Falls Flexibilität hinsichtlich Transparenz möglich bzw. ge- wünscht wird, kann es hilfreich sein, mit austauschbaren Mo- dulen zu arbeiten um auf diese Weise im Nachhinein Flächen der Fassade opak bzw. trans- parent zu gestalten. Das be- deutet, dass nicht die gesamte Fassade ausgetauscht bzw. transformiert werden müsste, bzw. im Innenraum komplizier- te Änderungen vorgenommen werden müssen.
- Sollte sich der Nutzer Erweiter- ungen des Objekts vorbehal- ten wollen, ist es mittels Mo- dulen sicherlich einfacher die Corporate Identity zu erhalten. Ebenso gilt dieser Ansatz für Rückbaumöglichkeiten.

Unterschieden wird zwischen geschlossenen und offenen Mo- dulen.

Wird die Vorspannung innerhalb eines Moduls erzeugt und auf- rechterhalten, ist das Modul ge- schlossen. Auf das übergeordnete Tragwerk werden lediglich die Eigenlast und die auf die Fassa- denfläche einwirkenden Außenlas- ten übertragen. Das bedeutet, die einzelnen Module können mit Hil- fe eines Fassadenpaneel-Systems am übergeordneten Tragwerk befestigt werden.

Passiert die Vorspannung unter Einbeziehung des übergeordne- ten Tragwerks – d.h. die raum-

Abb.1 Luftströmungen Doppelfassaden



abschließende Schale – spricht man von einem offenen Modul. Dafür muss das übergeordnete Tragwerk zusätzlich zu seinen eigenen Lasten auch die Last der Vorspannung der Membranmodule aufnehmen. Außerdem ist die Vorspannung nur vor Ort vorzunehmen.

Ökonomischer Vorteil - Vorfertigung

Die Module lassen sich kostengünstig im Werk vorfertigen, besonders in Serie können große Stückzahlen die Wirtschaftlichkeit steigern. Eine Rahmenkonstruktion bildet die Basis eines jeden Moduls, diese wird auf der Ober- und Unterseite – doppellagig – mit einer Membran bespannt. Um die Membran zu krümmen, wird entweder der Rahmen selbst dazu herangezogen, oder Bogen bzw. Spreizen lenken die Membran aus um eine antiklastische Krümmung in der Fläche zu erhalten^{Abb.2}. Diese Krümmung gibt Stabilität durch Vorspannung. Auf diese Weise entstehen die charakteristischen Buckel- oder Bogenflächen – bei Unterstützung- bzw. Sattelflächen – bei Auslenkung der Rahmenebene. Membranmodule addieren sich zu einer flexiblen Form, die sich an das Gebäude anpassen kann. Gestalterisch bietet diese Art unzählige Variationen, was bereits die traditionelle Mosaiktechnik

gezeigt hat. Spätere Erweiterungen und Veränderungen bei veränderter Nutzung oder besserer Technik sind möglich. Die Module werden entweder direkt auf der Außenwand oder je nach Anforderlichkeit an einer entsprechenden Unterkonstruktion angebracht.

Die Unterkonstruktion nimmt die Fassaden- und Dachlasten auf um sie in die Fundamente abzuleiten. Die einzelnen Module lassen sich individuell erweitern, so ist es möglich punktgenau Zusatzfunktionen wie Sonnenschutz, Solar Kollektoren, o.ä. zu installieren. Weiters besteht die Möglichkeit die doppellagig bespannten Membranmodule mit wärmedämmendem Material zu füllen, was zwar die Transluzenz bzw. Transparenz aufheben kann, aber die Dämmeigenschaften hinsichtlich Schall und Wärme verbessert.

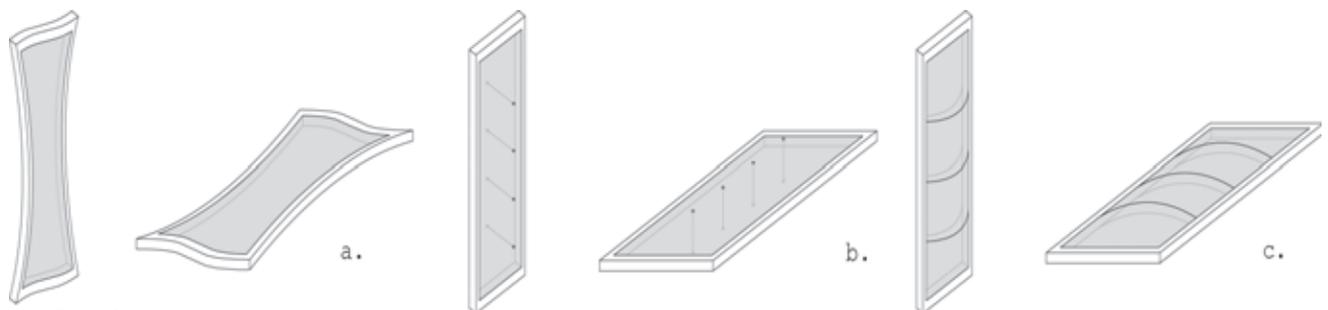


Abb. 2 Die drei Grundformen der Membranmodule:
 a) Sattelfläche
 b) Buckelfläche
 c) Bogenfläche

6.1.1 Form und Vorspannung

In diesem Abschnitt werden die gängigsten Vorspannungsmöglichkeiten des modularen Membranbaus visualisiert und auf ihre Eignung für die verschiedenen Anforderungen hin untersucht:

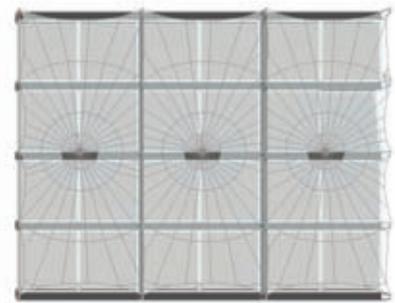
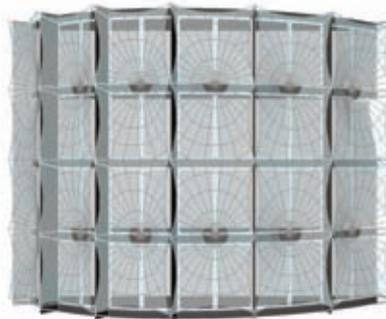
Mechanische Vorspannung

1) Einbringen der Vorspannung mittels zentralem Tiefpunkt

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Mehrgeschossfassade)
- zylindrische und kubische Gebäudeformen

Die Kräfteübertragung erfolgt harmonisch, Nachspannungsvorrichtungen und Sonnenschutzelemente sind gut integrierbar. Diese Form verhindert allerdings Lüftungsschlitze, auch die Aerodynamik leidet.

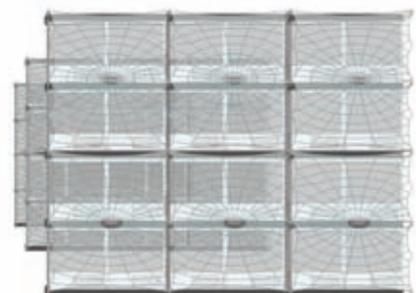
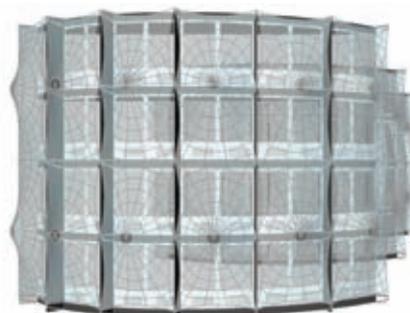


2) Einbringen der Vorspannung mittels zentralem Hochpunkt

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Kastenfenster, Schacht-Kasten-Fassade, Korridorfassade, Mehrgeschossfassade)
- zylindrische und kubische Gebäudeformen

Nachspannung, Lüftungsschlitze sowie Sonnenschutz stellen kein Problem dar. Die Form weist schlechte aerodynamische Eigenschaften auf.



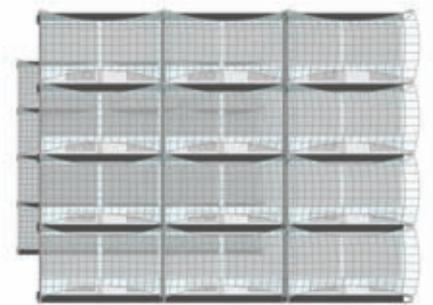


3) Einbringen der Vorspannung mittels Druckbögen (Hochpunkt)

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Kastenfenster, Korridorfassade)
- zylindrische und kubische Gebäudeformen

Sämtliche Ausstattungsmöglichkeiten können installiert werden, die Aerodynamik dieser Form ist sehr gut.

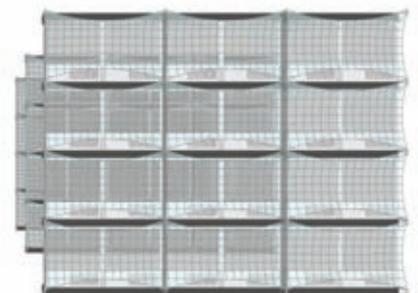


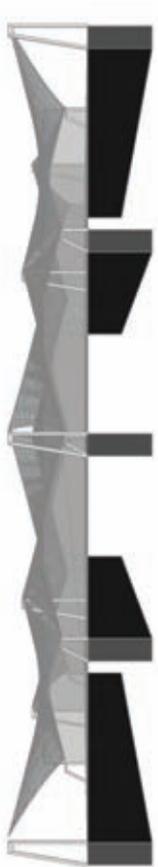
4) Einbringen der Vorspannung mittels Druckbögen (Tiefpunkt)

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Kastenfenster, Schacht-Kasten-Fassade, Korridorfassade)
- zylindrische und kubische Gebäudeformen

Sämtliche Ausstattungsmöglichkeiten können installiert werden, die Aerodynamik dieser Form ist sehr gut.



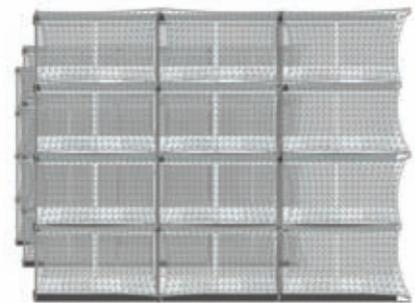


5) Flächenmodule mit Hochpunkten und Tiefpunkten (Bsp. Vierpunktsegel)

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Kastenfenster, Schacht-Kasten-Fassade, Korridor-fassade)
- kubische Gebäudeformen

Sämtliche Ausstattungsmöglichkeiten können installiert werden, die Aerodynamik dieser Form ist sehr gut.



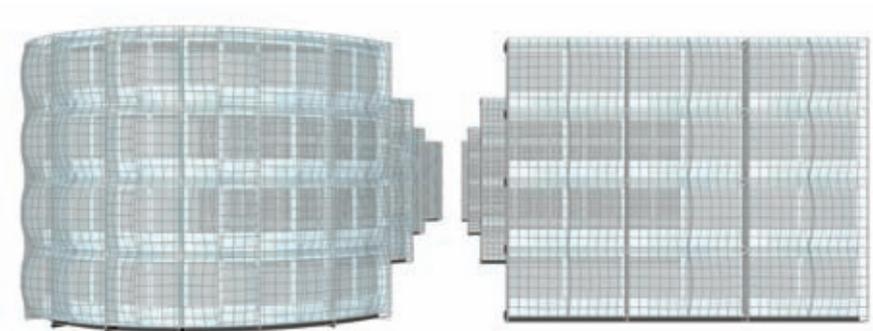
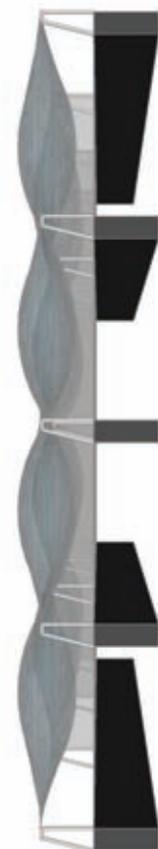
Pneumatische Vorspannung

6) Nebeneinander geschaltete, abgeschlossene Kissen (Überdruck)

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Kastenfenster, Schacht-Kasten-Fassade, Korridor-fassade, Mehrgeschossfassade)
- zylindrische und kubische Gebäudeformen

Sämtliche Ausstattungsmöglichkeiten können installiert werden, die Aerodynamik dieser Form ist sehr gut.



6.1.2 Gebaute Beispiele

Badeschiff, Berlin
 Wilk-Salinas Architekten BDA,
 Berlin

Tragwerksplanung: IB Leipold,
 Berlin
 HHW und Partner, Braunschweig
Bauherr: Kulturarena Veranstaltungen GmbH
Pneumatisch vorgespannt,
 Vorspannungsschema 6) vgl.
 6.1.1

Das Nutzungsprofil ist ein Badeschiff, bzw. mobiles Schwimmbad mit Sommer- und Winternutzung. Das Badeschiff ist im Osthafen an der Spree verortet. Das bedeutet eine eher industrielle Umgebung die in den letzten Jahren einer Umnutzung unterworfen ist. Das Prinzip des Wassers am Wasser, der Kahn ist Teil des Flusses kommt hier zum Tragen. Die Basis bildet ein 8m breiter, 32m langer Kahn, der 2m Tiefgang hat. Die für den Winterbetrieb erforderliche Schutz- bzw. Thermohülle besteht aus einer aufgeblasenen, doppelwandigen PVC-Kissen-Membran. Ein elliptisches, zur einfacheren Montage zweiteiliges Holzgerüst, welches am Scheitelpunkt ver-

schraubt ist bildet die Hüllkonstruktion. Getragen wird diese von hölzernen Grundplatten am Rand des Kahn bzw. der Stege. Horizontale Verspannungen mittels 5 Stahlrohrleitungen und diagonalen Seilen in den mittleren Feldern geben der Hülle die Spannung und Form. Ein an den elliptischen Gerüsten entlang geschlungenes Seil verbindet die aufgeblasenen Felder mit der Holzkonstruktion. Für konstanten Luftdruck sorgt ein durch einen Druckluftschlauch angeschlossener Kompressor. Teilweise transparent ausgeführt ermöglicht die Hülle den Blick auf die Spree, wirkt gegen allfällig auftretendes Gefühle der Enge.



Abb. 1 Außenaufnahme Badeschiff, Berlin



Abb. 2 Innenaufnahme Badeschiff, Berlin

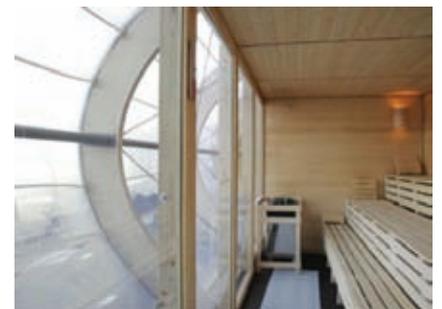
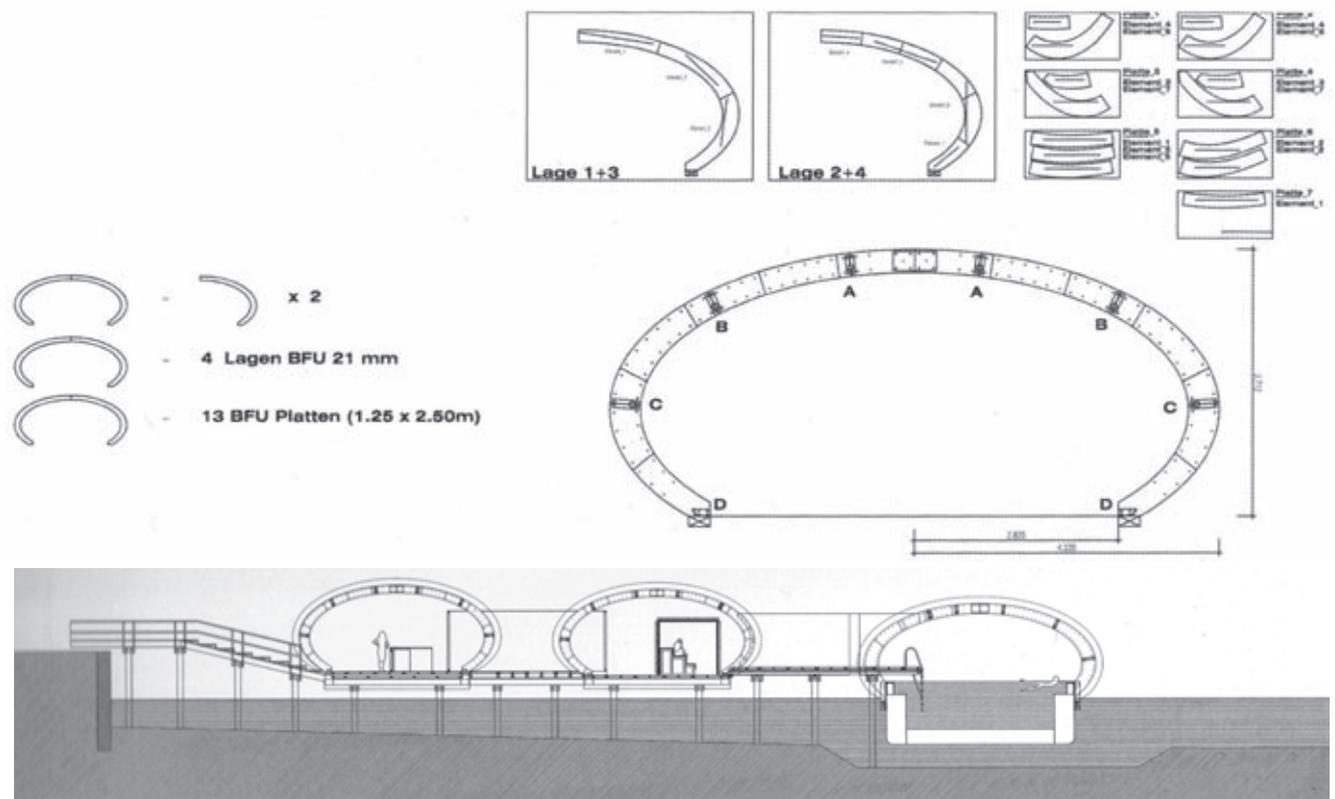


Abb. 3 Innenaufnahme Badeschiff, Berlin



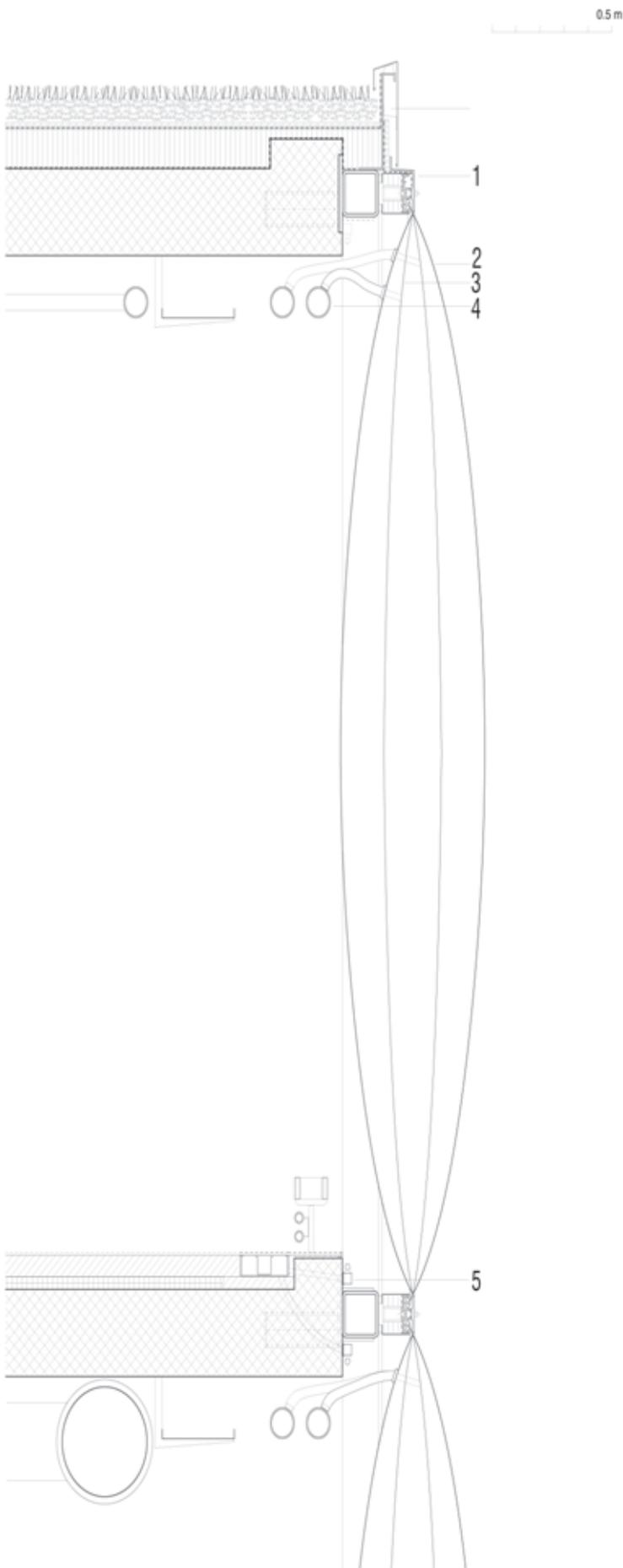


Abb. 6 Fasadenschnitt „Miroiterie au Flon“, Lausanne
B+W Architecture Sarl, Lausanne

Extensiver Gründachaufbau:

Extensive Bepflanzung	50 mm
Mineralisches Pflanzsubstrat	80 mm
Drainageschicht	10 mm
2-schichtige Elastomerdichtung	8 mm
Schaumglasisolierung	
bituminös eingeschwämmt	180 mm
Dampfsperre	
Vorgespannte Betondecke	280 mm

- 1 Unterkonstruktion INOX Aluminiumblech
- 2 Stahlprofil RHS 150
- Befestigungskonsolle RHS 80x50
- Zwischenlage PE
- Alu-Klemmprofil
- EPDM Dichtprofile
- 3 PTFE-Membran
- 4 ETFE-Membran
- 5 Leuchtstoffröhre

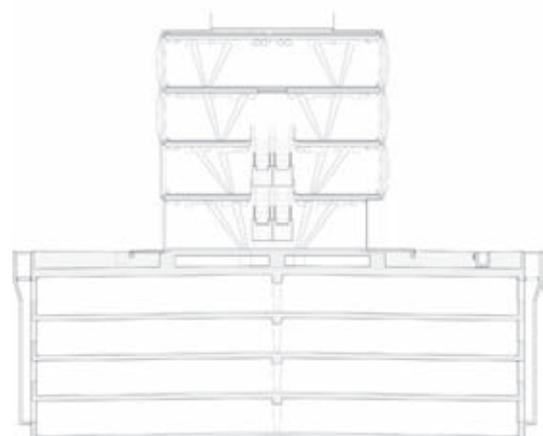


Abb. 7 Querschnitt „Miroiterie au Flon“, Lausanne
B+W Architecture Sarl, Lausanne

Einkaufszentrum „Miroiterie au Flon“, Lausanne
 B+W Architecture Sarl, Lausanne

Tragwerksplanung: Losinger Construction
Bauherr: nn
Pneumatisch vorgespannt,
 Vorspannungsschema 6) vgl. 6.1.1

Das Flon-Quartier erlebte in den vergangenen Jahren einen Wandel vom nüchternen Industriegebiet mit seinen Lagerhäusern zu einem kulturellen Szene-Ort. Dieser Wandel wurde sehr von der modernen Architektur, die im Flon-Quartier als Kontrapunkt zur restlichen - mit einem sehr mittelalterlichen Charme belegten - Stadt Lausanne entwickelt wurde. „La miroiterie au Flon“ ist mit ihren dreieckigen, leuchtenden Membrankissen das Wahrzeichen des Viertels. Die Fassade wirkt als ob sie als Kubus über das Erdgeschoss bzw. den verglasten

Eingang gestülpt worden wäre. Sozusagen ein Paradebeispiel für ein membranumhülltes Gebäudesystem.

Vierlagige Kissen mit drei Luftkammern - welche variabel überdruckgesteuert sind - bilden die Hülle.

Die äußere Lage ist ein transluzentes, schmutzabweisendes PTFE-Glasfasergewebe, die inneren Membranhäute bestehen aus ETFE-Folien. Nachts können die insgesamt 820m² großen Kissen verschiedenfarbig beleuchtet werden.



Abb. 9 Nachtaufnahme „Miroiterie au Flon“, Lausanne



Abb. 10 Rendering „Miroiterie au Flon“, Lausanne



Abb. 11 Innenaufnahme „Miroiterie au Flon“, Lausanne

5 m

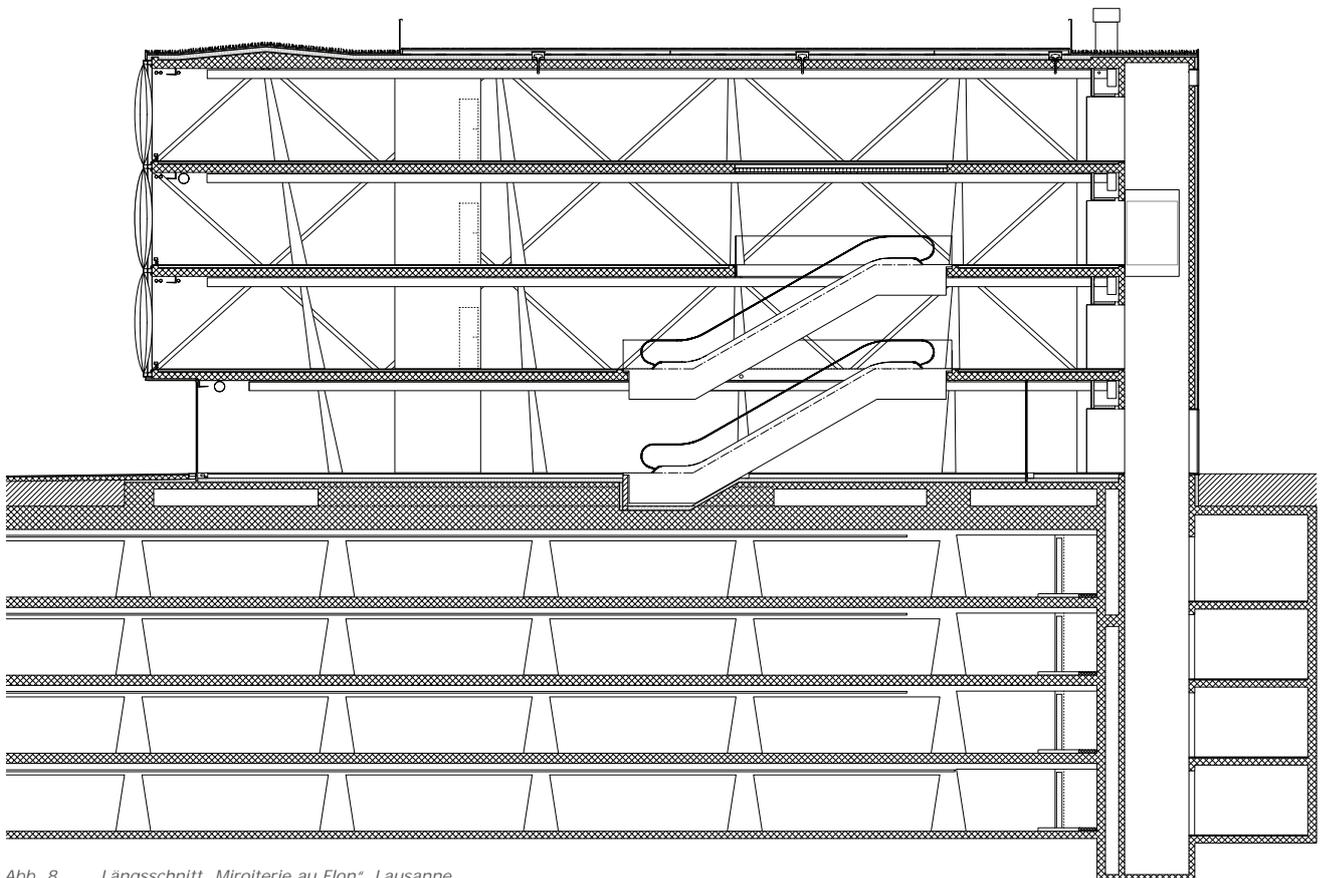
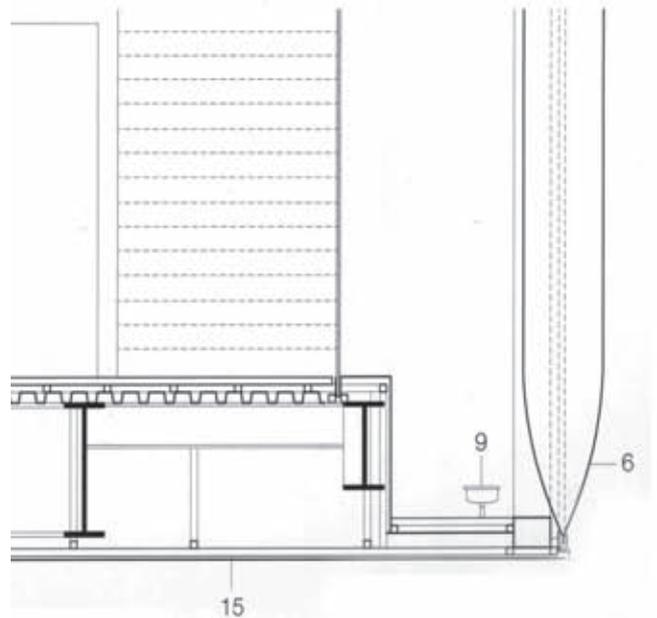
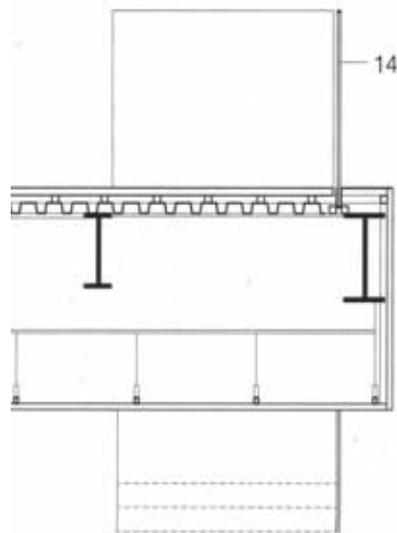
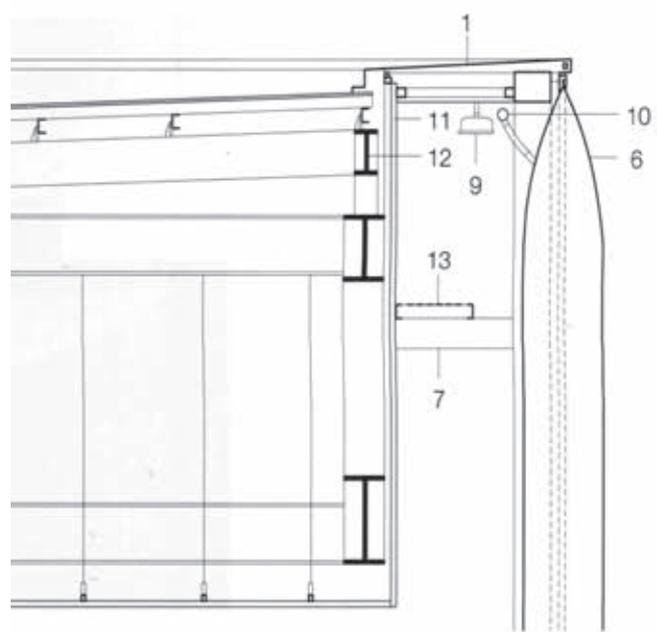
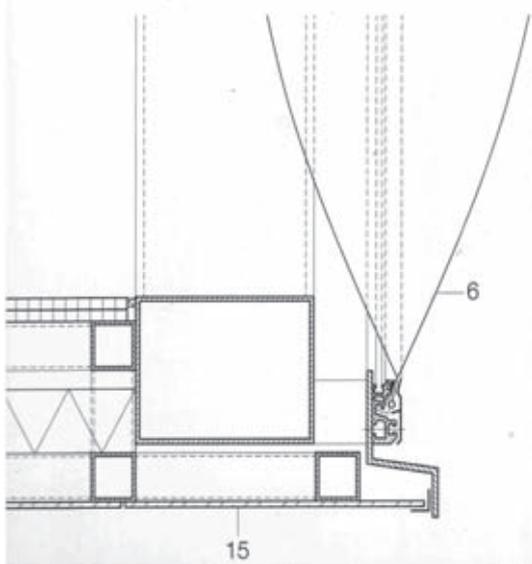
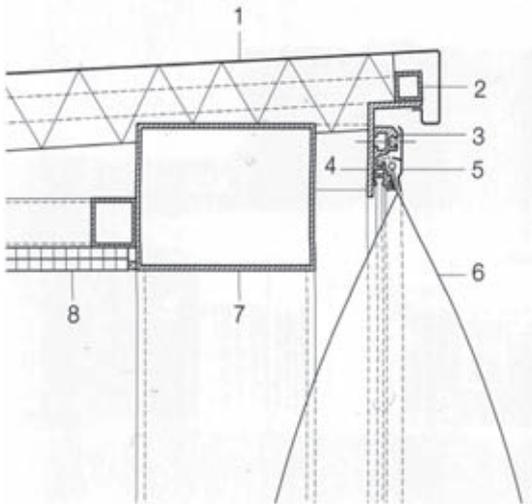


Abb. 8 Längsschnitt „Miroiterie au Flon“, Lausanne
 B+W Architecture Sarl, Lausanne



Fassadenschnitte

- 1 Aluminiumblech
- 2 Stahlrohr \varnothing 30 / 30mm
- 3 Klemme Aluminium
- 4 Stahlprofil L 100 / 60 / 6mm
- 5 Deckleiste Aluminium 65mm
- 6 ETFE-Folie 250 μ m, 2-lagig, äußere Folie transparent mit Bedruckung, innere Folie transluzent
- 7 Stahlrohr \varnothing 200 / 150 / 4mm
- 8 Sperrholzplatte weiß gestrichen, 2 x 12mm
- 9 Leuchtstofflampe
- 10 Luftzufuhr Pneu
- 11 Gipskartonplatte weiß gestrichen 9mm
- 12 Stahlprofil I 440 / 440 / 11 / 18mm
- 13 Revisionssteg Streckmetall
- 14 Glasbrüstung ESG 12mm, Handlauf Edelstahlschiene
- 15 Faserzementplatte weiß gestrichen 9mm

Abb. 12, 13

Fassadenschnitte Ausstellungsgebäude, Busan
Mass Studies, Seoul

Austellungsgebäude, Busan
Mass Studies, Seoul

Tragwerksplanung: Teo Structure, Seoul

Bauherr: nn

Pneumatisch vorgespannt,
Vorspannungsschema 6) vgl. 6.1.1

Das Projekt beinhaltet ein Ausstellungsgebäude einer Baugesellschaft mit einem kommerziellen Showroom für Wohnimmobilien, einer gegliederten Veranstaltungsfläche mit kulturellen, gemeinnützigen Angeboten für die Bewohner des Viertels, Parkflächen in der Sockelzone und einer 3000m² großen, offenen, neutralen Ausstellungsfläche zur Präsentation der Musterwohnungen der Baugesellschaft. Als Genius Loci ist ein Stadtviertel mit hohem Wohnanteil an der Peripherie Busans zu identifizieren.

Die Basis bildet ein massiver, begrünter Sockel auf dem der Baukörper welcher schichtweise mittels Stahlstützen und Geschoßplatten aufgebaut ist. An der großflächigen, geschwun-

genen Fassade, die vor den massiven Baukörper gespannt ist, sind 2-lagige Folienkissen vertikal angeordnet. Die unterschiedliche Länge der Membrankissen bildet den geschwungenen „Einschnitt“ in das Volumen.

Die transparente, äußere Folieneinlage wurde mit dem stilisierten Logo des Bauunternehmens bedruckt und bildet die Solarfalle. Auf der Innenseite wurde die Folie transluzent ausgeführt, um eine gleichmäßige bzw. diffuse Innenraumbeleuchtung zu erreichen.

Um die spektakuläre Aussenwirkung in der Nacht zu unterstreichen können die Kissen innenseitig verschiedenfarbig beleuchtet werden.



Abb. 15, 16 Außenaufnahme und Innenaufnahme Ausstellungsbäude, Busan
Mass Studies, Seoul

Abb. 17 Grundriss Ausstellungsbäude, Busan
Mass Studies, Seoul

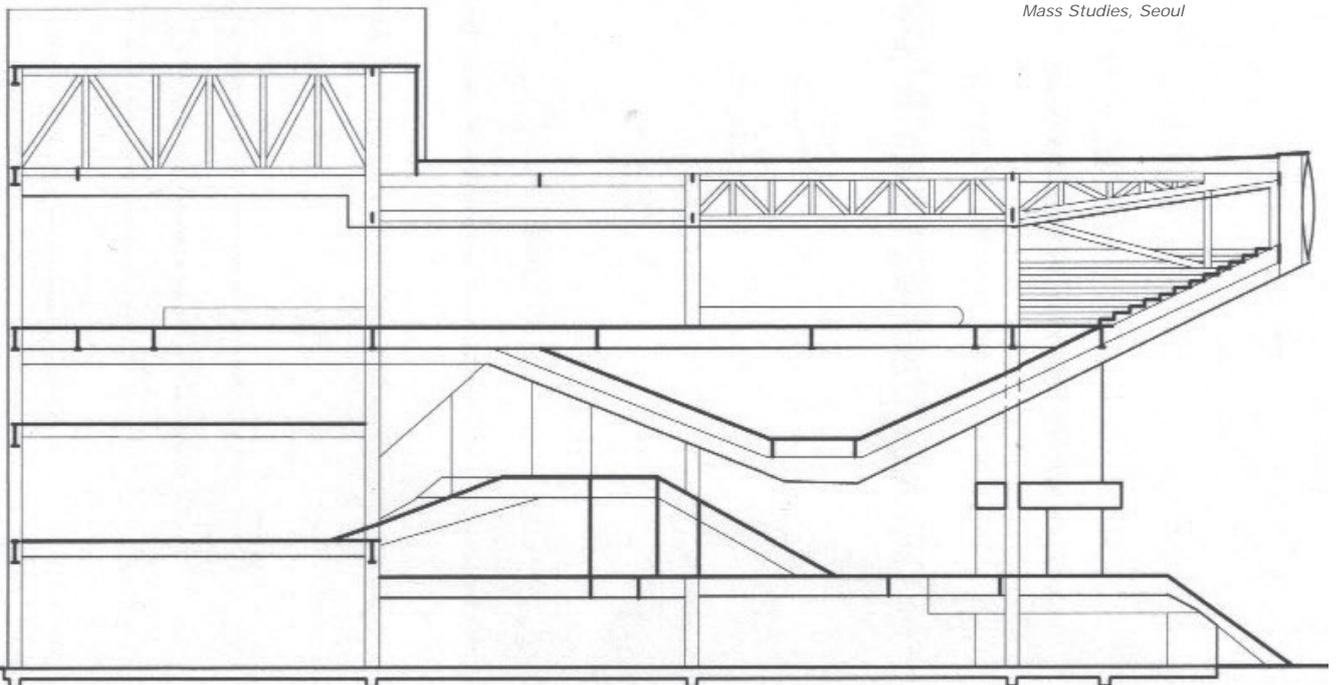


Abb. 14 Schnitt Ausstellungsbäude, Busan
Mass Studies, Seoul

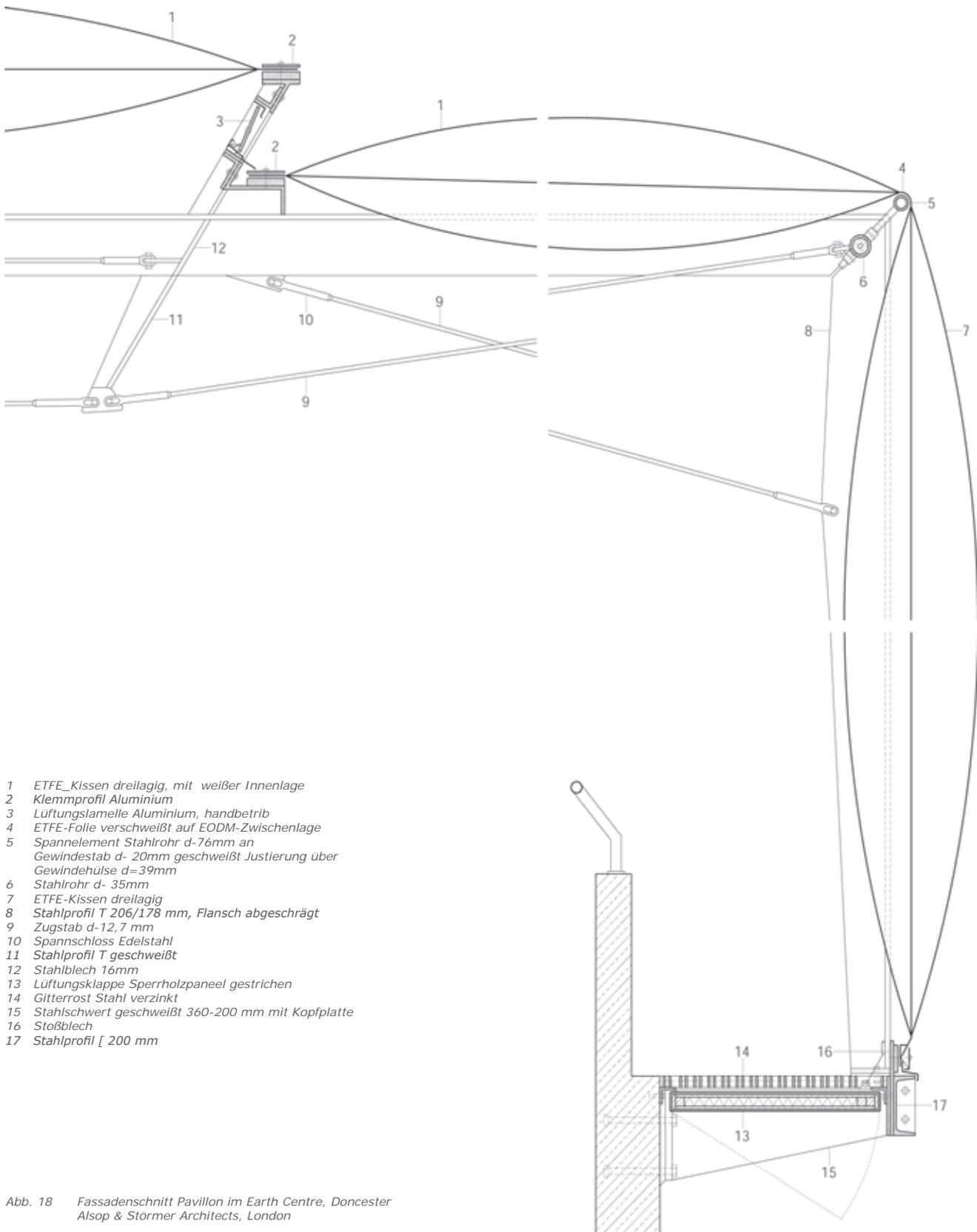


Abb. 18 Fassadenschnitt Pavillon im Earth Centre, Doncaster
 Alsop & Störmer Architects, London

Pavillon im Earth Centre,
Doncaster
Alsop & Störmer Architects,
London

Tragwerksplanung: Atelier one,
London

Bauherr: nn

Pneumatisch vorgespannt,
Vorspannungsschema 6) vgl.
6.1.1

Der Pavillon „Waterworks“ demonstriert die Reinigung von Wasser. Das Gebäude beherbergt die „Living Machine“, eine mit Pflanzen betriebene Maschine, die das auf dem Areal anfallende Abfallwasser reinigt. Für diesen Reinigungsprozess wird das gesamte Bauwerk herangezogen - die transparente Fassade ermöglicht das Beobachten der physikalischen Vorgänge im Inneren des Objekts bzw. der Maschine.

Ursprünglich wurde das Areal des „Earth Centre“ zur Abbau von Braunkohle genutzt. Der Ausstellungspavillon ist in einem ökologischen Themenpark eingebunden, der dem Besucher die Bedeutung seiner Umwelt vor

Augen führen soll. In unmittelbarer Nachbarschaft befindet sich eine für Großbritannien typische Gartenschau.

Das Stahlrahmenskelett sitzt auf Betonschotten welche die Trennwände für die Tanks [2] bilden. Das Dach besteht aus auf das Stahlrahmenskelett gespannte luftgefüllte, 3-lagige ETFE-Kissen mit weißer Innenlage. Die Innenlage hält nicht nur das Kissen in Form, sondern wirkt als transluzenter Beleuchtungskörper. An der Fassade sind ebenfalls 3-lagige ETFE-Kissen angebracht, allerdings mit transparenter Innenlage um die (Ein)Sicht nicht einzuschränken.



Abb. 19 Außenansicht Pavillon im Earth Centre, Doncaster
Alsop & Störmer Architects, London



Abb. 20 Lageplan Pavillon im Earth Centre, Doncaster
Alsop & Störmer Architects, London

- 1 Living Machine
- 2 Wassertank
- 3 Technik
- 4 Ausstellung

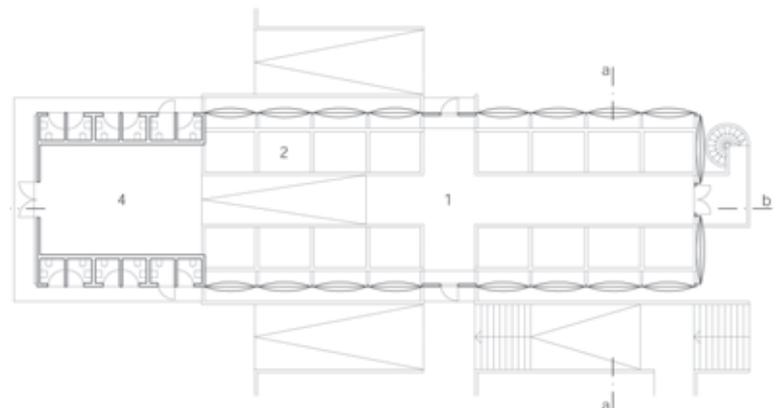
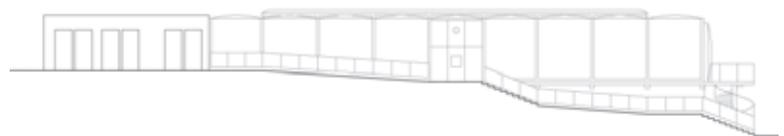
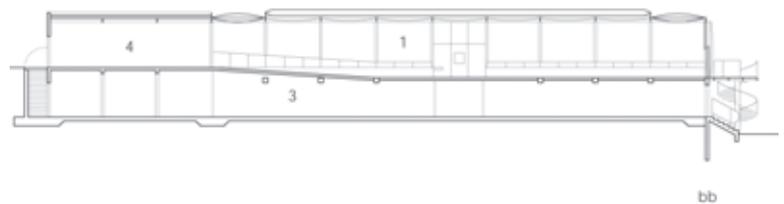
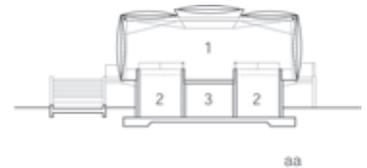


Abb. 21 Grundrisse, Schnitte Pavillon im Earth Centre, Doncaster
Alsop & Störmer Architects, London

Fasadenschnitt:

- 1 ETFE-Kissen luftgefüllt, dreilagig, transluzent
- 2 Fuge: Polyesterlasche, PVC-beschichtet, wasserdicht verschweißt mit ETFE-Kissen, Wärmedämmung Mineralfaser 50 mm, Aluminiumstrangpressprofil | 80/80 mm
- 3 Abstandhalter Flachstahl 12 mm
- 4 Stahlprofil L 90/90/10 mm verschweißt mit Flachstahl 12 mm verschraubt mit Stahlprofil L 100/100/10 mm
- 5 Träger Stahlprofil Å 140 mm
- 6 Glas-/Polyestergewebe PVC-beschichtet, dehnbar
- 7 Stahlprofil Å 254/254/89 mm
- 8 Sockelschutz Gitterrost Stahl 40 mm
- 9 Untergurt Stahlrohr Ø 139/8 mm
- 10 Stahlrohr Ø 60/5 mm
- 11 Lichtschiene
- 12 Stütze Stahlrohr Ø 139/8 mm
- 13 leichte Trennwand: 2x Gipskarton 2x 12,5 mm dazwischen Stahlprofil verzinkt U 70 mm und Dämmung Mineralfaser 25 mm
- 14 Sperrholz gestrichen 15 mm, Stahlprofil verzinkt U 92 mm,

- Wärmedämmung Mineralfaser 100 mm, Dampfbremse
 Polyestergewebe, PVC-beschichtet, silbern; Wärmedämmung Mineralfaser,;
 aluminiumkaschiert 25 mm

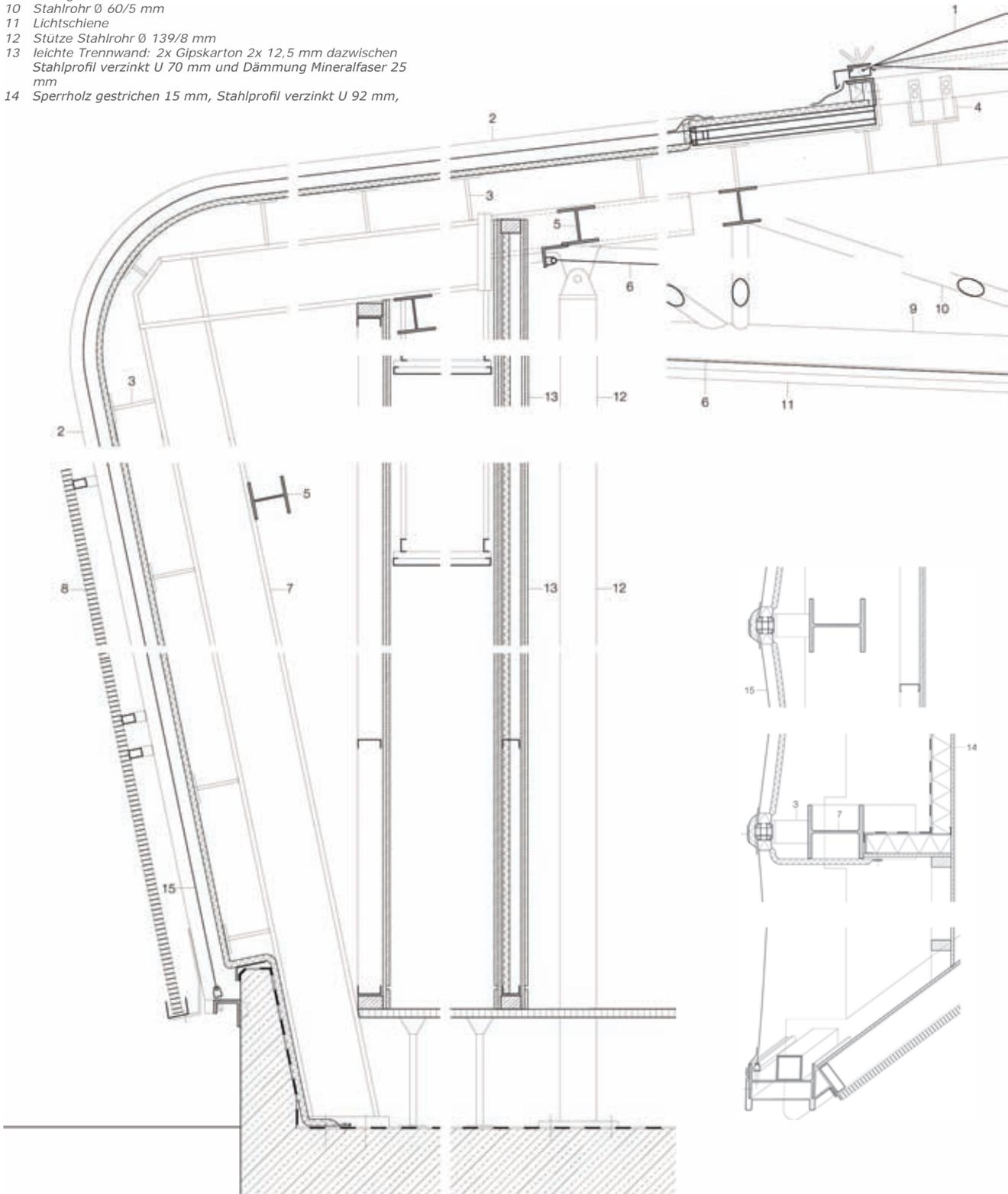


Abb. 22 Fasadenschnitt Temporäre Stadtteilverwaltung, London
 Lifschutz Davidson Sandilands, London

Temporäre Stadtteilverwaltung,
London
Lifschutz Davidson Sandilands,
London

Tragwerksplanung: Ove Arup,
London

Bauherr: Stadtteilverwaltung
Southwark, London

Mechanisch vorgespannt,
Vorspannungsschema 5) vgl.
6.1.1



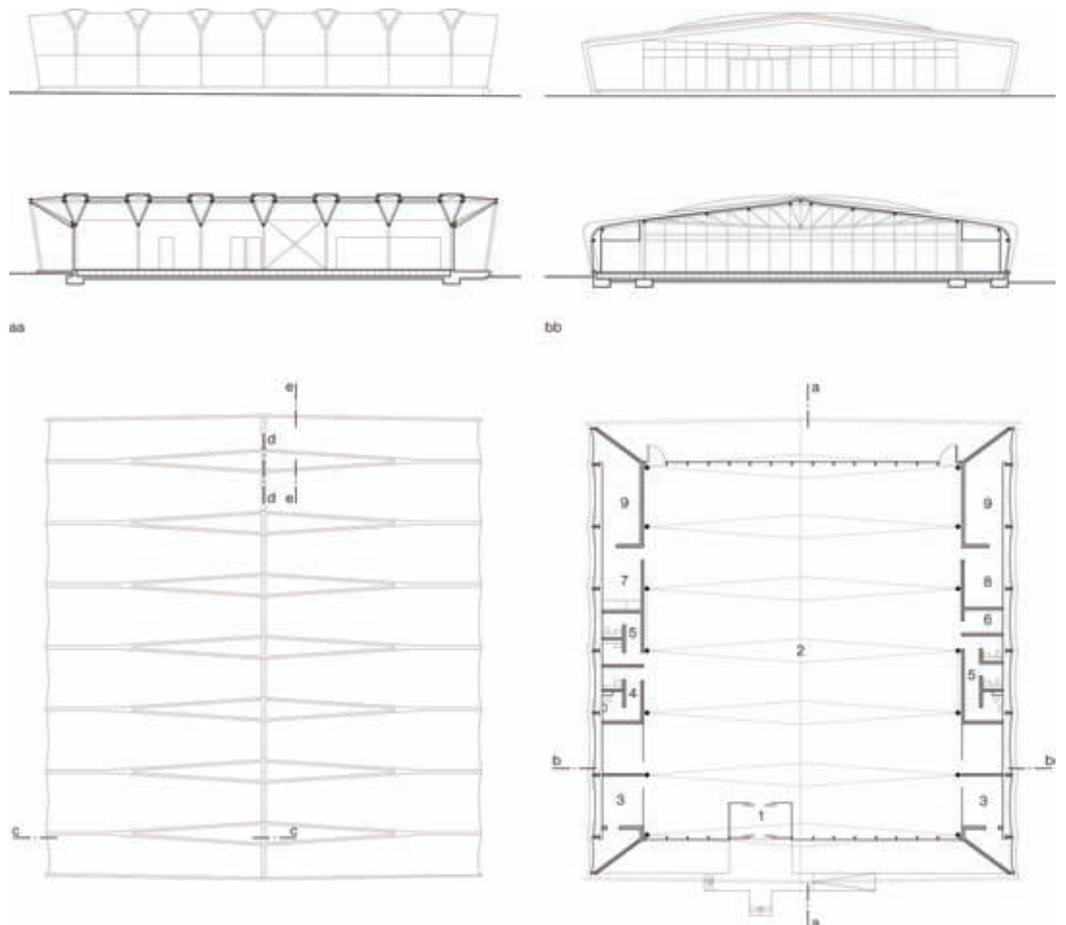
Abb. 24 Außenaufnahme Temporäre Stadtteilverwaltung, London

Ein für 3 - 5 Jahre projektiertes, temporäres Verwaltungsgebäude. Die Stadtteilverwaltung zieht in ein neues, erst fertig zu stellendes Bürogebäude ein. Deshalb muss der Pavillon komplett demontierbar sein, aber nicht provisorisch wirken. Als zusätzlichen Parameter ist das niedrige Budget zu nennen.

Southwark ist ein Stadtteil von London, unmittelbar südlich der City of London. Früher lag dieses Gebiet vor den Toren der Stadt, demnach etablierte sich hier eher halbseidenes Gewerbe. Heute leben hier Menschen verschiedener Herkunft: aus dem anglikanischen und europäischen Raum, Einwanderer aus Jamaica und anderen Karibik Staaten, Südasien und Chinesen

Eine bereits vorgefertigte, leichte Stahlkonstruktion trägt 7 dreidimensionale Fachwerkträger. Diese überspannen 22,5m stützenfrei, das Dach besteht aus ETFE-Kissen. Sie gewährleisten Tageslicht mittels Oberlicht.

Die inneren Träger wurden mit Membranen überzogen um skulptural, sauber und glatt zu wirken. Ein Teil der Membranfassade ist mit einer 3-lagigen Membran bespannt, die folgende Komponenten enthält: Polyestergerewebe, Wärmedämmung (Mineralfaser, silbern), Glasfasergewebe. Lüftungslamellen im verglasten Teil der Fassade lassen eine individuelle Raumlüftung zu, ansonsten wird Frischluft unter dem aufgeständerten Boden in den Raum geblasen. Bei Bedarf kann diese Luft vorgekühlt werden.



- 1 Windfang
- 2 Großraumbüro
- 3 Besprechungsraum
- 4 Kundentoilette
- 5 Mitarbeitertoilette
- 6 Lager
- 7 Teeküche
- 8 Informations- und Kommunikationstechnologie
- 9 Technik / Lüftung

Abb. 23 Grundrisse, Schnitte Temporäre Stadtteilverwaltung, London
Lifschutz Davidson Sandilands, London

6.2 Weit gespannte Strukturen

Hierbei handelt es sich um mittlere bis große Spannweiten die von einer durchgehenden Membranfläche umhüllt sind.

Weit gespannte Strukturen sind in jedem Fall als formaktive Strukturen zu verstehen, da mit nicht-steifer bzw. flexibler Materie geformt und mit festen Endpunkten gesichert wird, welche sich selbst trägt und Raum be- bzw. überspannt.

Zu erkennen an der für den Kräftefluss durchgehenden Membranfläche. Mittels zusätzlicher Unterstützung kann die weit gespannte Membran weit größere Distanzen überspannen als einzelne Module. Die Form der Tragfläche wird in hohem Maße von in der Membranfläche liegenden Festpunkte oder linear stützenden Tragseilen bestimmt¹. Auf diese Weise werden Verformungen und Spannungen innerhalb zulässiger Grenzen gehalten. Das bedeutet, die Last der Vorspannung wird

auf das übergeordnete Tragwerk übertragen - vgl. offenes Membranmodul - und die darin befestigten Verankerungen verursachen eine zusätzliche Belastung durch die Fassadeneigenlast zusätzlich zu den auf das Gebäude einwirkenden Außenlasten.

Wann ist eine weit gespannte Struktur einer modularen Struktur vorzuziehen?

- Am Augenscheinlichsten ist der große Vorteil große Spannweiten mit wenig Material - und damit verbunden wenig Gewicht - zu überbrücken (vgl. le Zénith).
- Wandelbare Konstruktionen werden sich leichter mittels weitgespannter und faltbarer Konstruktionen verwirklichen lassen.
- Licht-, Lifthöfe oder Wintergärten bzw. sonstige nicht ständige Aufenthaltsräume benötigen keinen besonderen Wärmeschutz. Dafür ist eine weitgespannte, einlagige Membran als Witterungsschutz prädestiniert.
- Art der Vorspannung Struktur.

6.2.1 Form und Vorspannung

In diesem Abschnitt werden die gängigsten Vorspannungsmöglichkeiten des weitgespannten Membranbaus visualisiert und auf ihre Eignung für die verschiedenen Anforderungen hin untersucht:

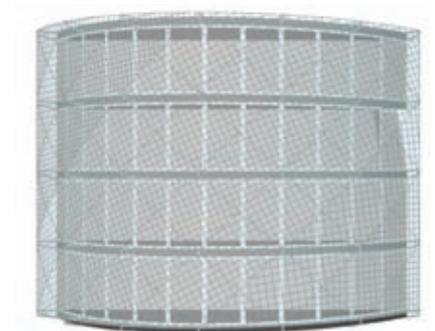
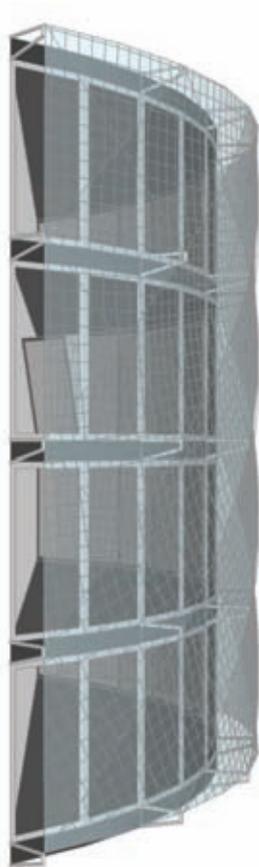
Mechanische Vorspannung

1) Vorspannung mittels diagonal verlaufenden Gurten / Seilen

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Mehrgeschossfassade)
- zylindrische Gebäudeformen mit Fachwerkgerüsteraussteifung

Die Kräfteübertragung erfolgt harmonisch, Nachspannungsvorrichtungen sind gut integrierbar, die Aerodynamik ist besonders günstig. Diese Form kann allerdings Lüftungsschlitze verhindern, bei gewissen Ausformungen sind keine Lüftungsschlitze möglich.

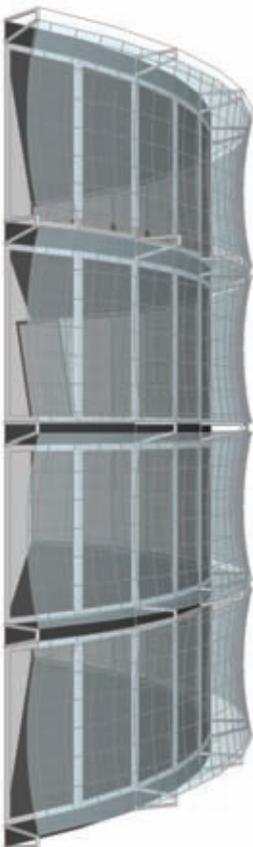


2) Vorspannung mittels Druckbögen entlang der Gebäudeform

Gute Eignung für

- Doppelfassaden, geschossweise getrennt
- ausschliesslich zylindrische Gebäudeformen

Diese Art der Vorspannung ist besonders günstig für weit gespannte Membranfassaden: alle Parameter hinsichtlich Nachspannung, Integration von Lüftungsschlitzen bzw. Sonnenschutz, aerodynamischer Form, minimierte Konstruktion oder Kräfteübertragung sind problemlos zu bearbeiten.



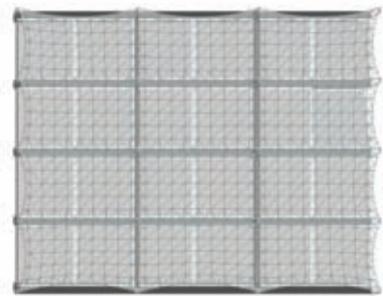
3) Punktgestützte Membranfläche mit Seil- oder Gurtunterstützung bzw. Druckstäben

Gute Eignung für

- Doppelfassaden (Mehrgeschossfassade)
- zylindrische und kubische Gebäudeformen

Abgesehen von der nicht unproblematischen Integration von Lüftungsschlitzen und der nicht vorhandenen Aerodynamik der Form ist diese Art der Vorspannung sehr beliebt (Nachspannmöglichkeiten, harmonischer Kraftfluss und Sonnenschutz stellen keine Hindernisse dar).

Bei ebener Spannung ist die synklastische Formänderung aufgrund beispielsweise Windbelastung in die Überlegungen mit einzubeziehen.



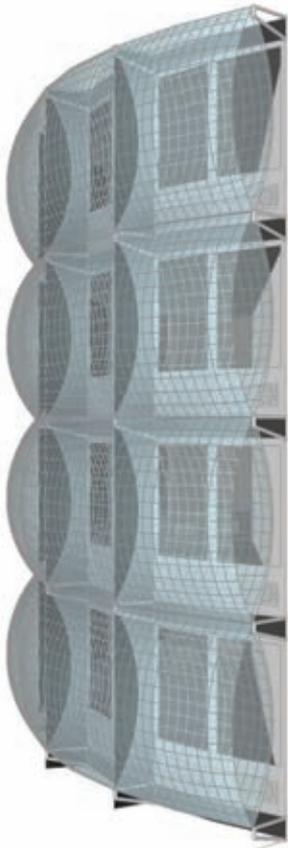
Pneumatische Vorspannung

4) An der gesamten Gebäudeform entlang laufendes horizontales Pneu-Kissen (Überdruck)

Gute Eignung für

- Doppelfassaden, geschossweise getrennt oder Mehrgeschossfassaden
- zylindrische Gebäudeformen

Sämtliche Ausstattungsmöglichkeiten können installiert werden, die Aerodynamik dieser Form ist sehr gut.



5) An der gesamten Gebäudeform entlang laufendes horizontales Pneu-Kissen (Unterdruck)

Gute Eignung für

- Doppelfassaden, geschossweise getrennt oder Mehrgeschossfassaden
- zylindrische Gebäudeformen

Bis auf die eher maximierte Konstruktion können alle Parameter hinsichtlich Nachspannung, Integration von Lüftungsschlitzen bzw. Sonnenschutz, aerodynamischer Form oder harmonischer Kräfteübertragung positiv beantwortet werden.

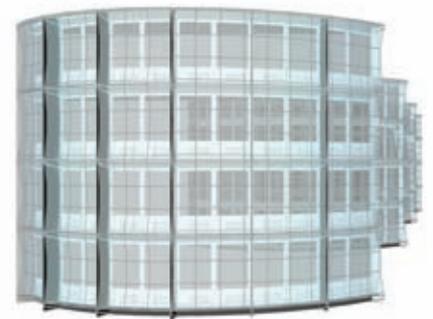
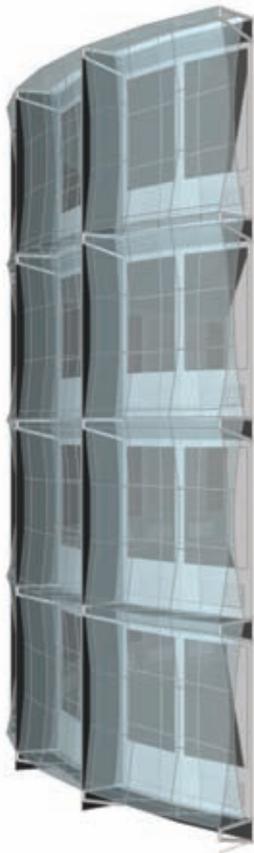
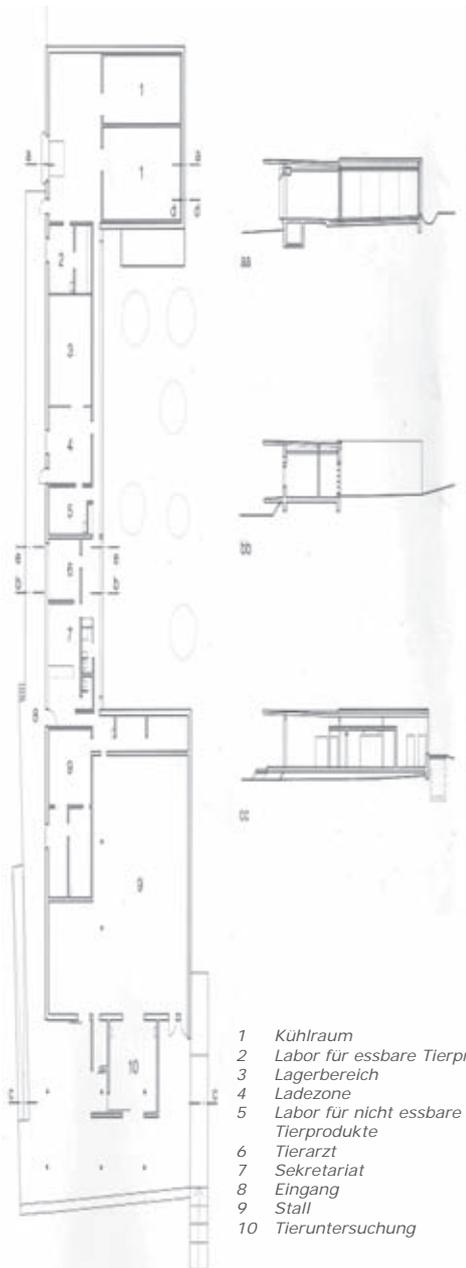




Abb. 1 Außenaufnahme Veterinärrenzstation, Spielfeld
Wolfgang Feyferlik, Graz



Abb. 2 Außenaufnahme Veterinärrenzstation, Spielfeld
Wolfgang Feyferlik, Graz



- 1 Kühlraum
- 2 Labor für essbare Tierprodukte
- 3 Lagerbereich
- 4 Ladezone
- 5 Labor für nicht essbare Tierprodukte
- 6 Tierarzt
- 7 Sekretariat
- 8 Eingang
- 9 Stall
- 10 Tieruntersuchung

Abb. 3 Grundriss Veterinärrenzstation, Spielfeld
Wolfgang Feyferlik, Graz

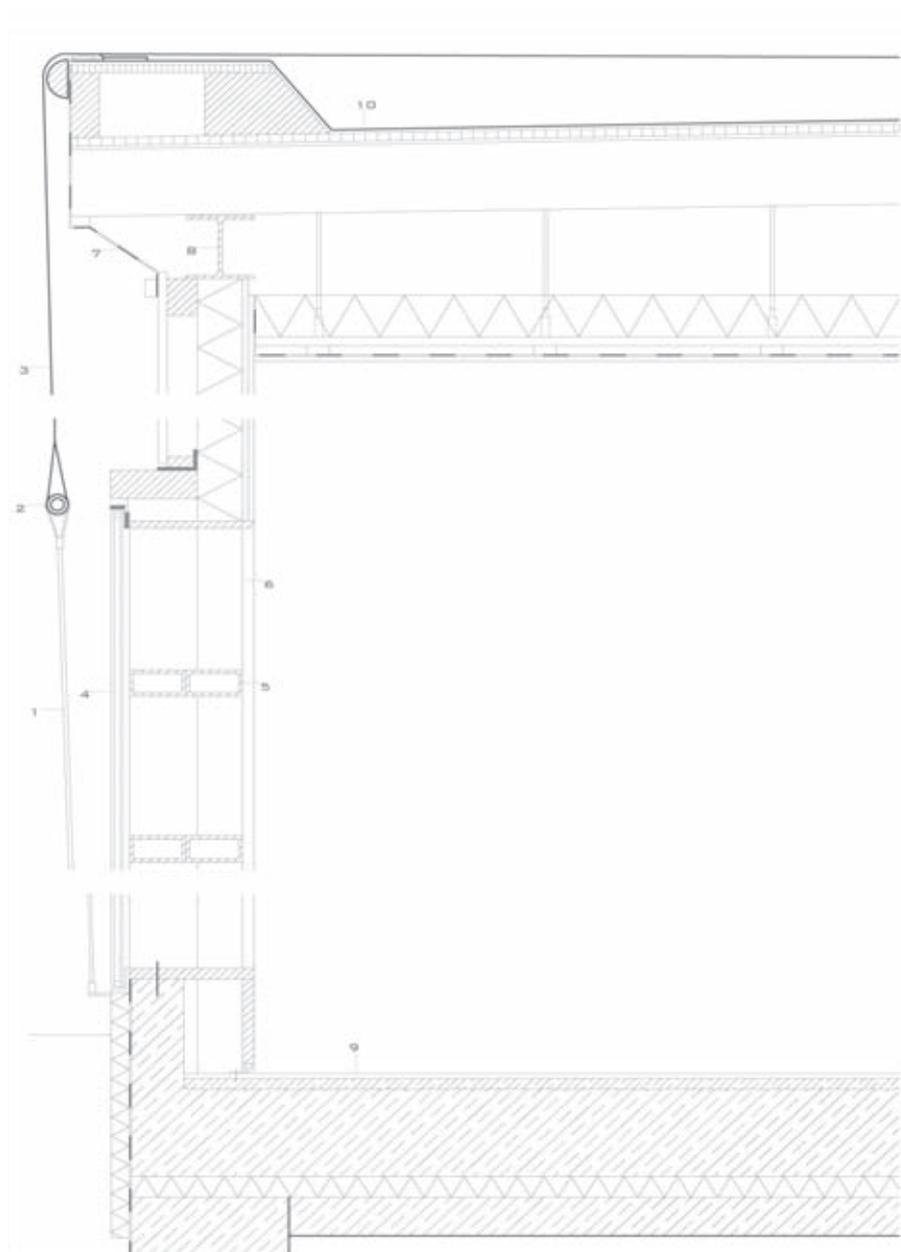


Abb. 4 Fassadenschnitt Veterinärrenzstation, Spielfeld
Wolfgang Feyferlik, Graz

6.2.2 Gebaute Beispiele

Veterinärrenzstation, Spielfeld
Wolfgang Feyferlik, Graz

Tragwerksplanung: ARGE

Winkler Schindler, Graz

Bauherr: Republik Österreich

Pneumatisch vorgespannt,

Vorspannungsschema 3) vgl.

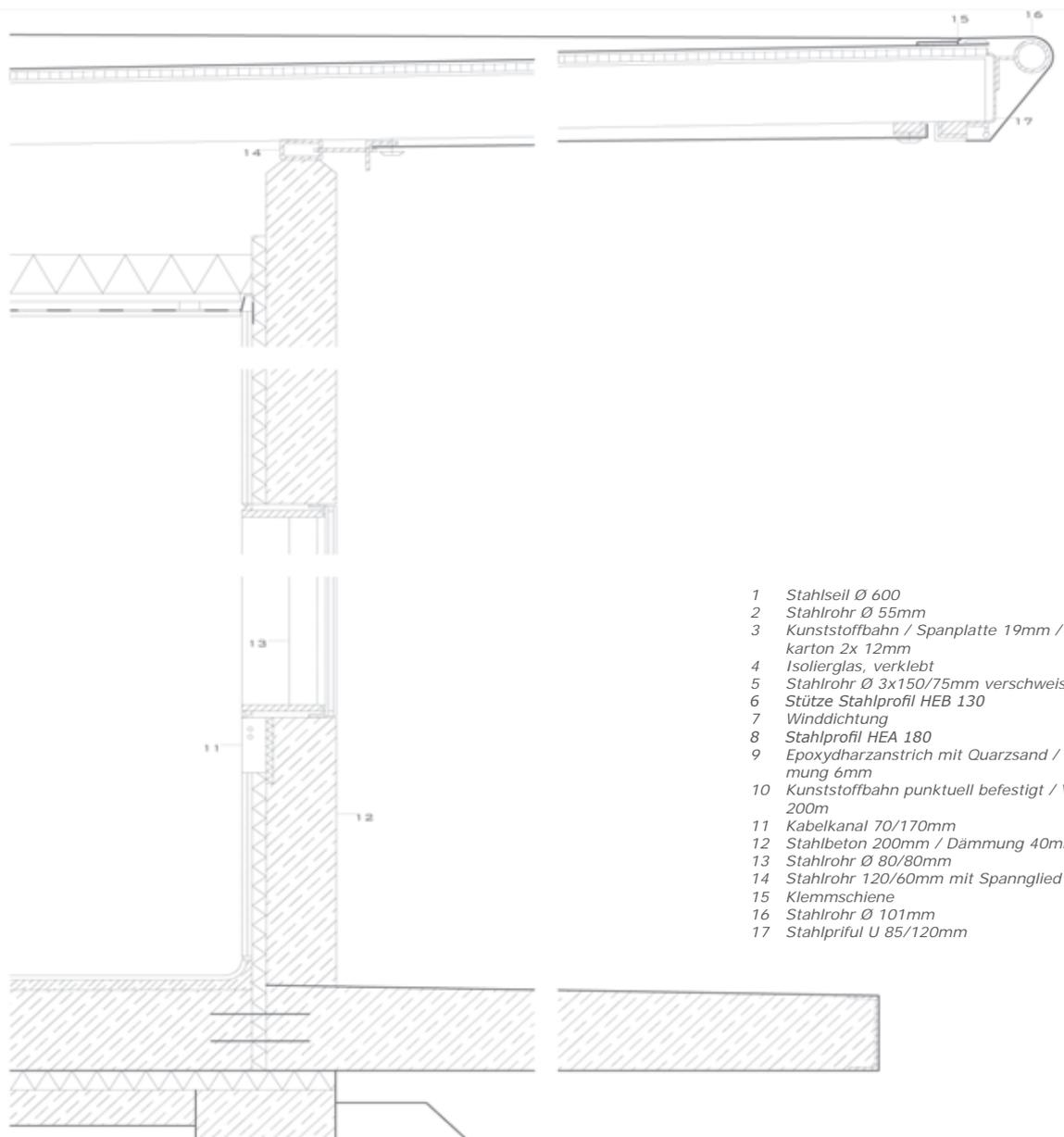
6.2.1

Veterinärrenzstation zur Ein- und Ausfuhr von lebendem Vieh,

projektiert für 10 - 15 Jahre. Als das Projekt startete, war der Grenzübergang Spielfeld die südöstliche Aussengrenze der EU. Bei Baubeginn 2002 war die Grenze noch vorhanden, jedoch mit einem Ablaufdatum versehen. Daher die offene Anordnung bzw. Ausrichtung der Gebäude, nämlich parallel zur Fahrbahn. Eine einfache Stahl- und Trapezblechkonstruktion bespannt im Dach- und Fassadenbereich mit einer Kunststoffbahn - thermoplastisch mit Hochpolymerlegierung aus EVA und PVC-Vlies - bespannt. In Bereichen die den erhöhten Prallschutzanforderungen gerecht werden müssen,

wurde mit Ortbeton gearbeitet und ebenfalls mit Kunststoffolie bespannt.

Durch die ganzheitliche Bespannung fließt das Regenwasser selbstständig über die Fassade ab, was einen starken gestalterischen Effekt hat. An der Oberfläche entsteht eine Textur, die sich mit jedem Tag verstärkt und die Luftverschmutzung sichtbar bzw. haptisch erfahrbar macht. Es ist zu hoffen, dass sich dieser weiße Kubus nicht in seiner vergleichsweise kurzen Lebensdauer in ein schwarzes Loch transformiert.



- 1 Stahlseil Ø 600
- 2 Stahlrohr Ø 55mm
- 3 Kunststoffbahn / Spanplatte 19mm / Lattung 80mm / Steinwolle 120mm / Gipskarton 2x 12mm
- 4 Isolierglas, verklebt
- 5 Stahlrohr Ø 3x150/75mm verschweisst
- 6 Stütze Stahlprofil HEB 130
- 7 Winddichtung
- 8 Stahlprofil HEA 180
- 9 Epoxydharzanstrich mit Quarzsand / Estrich 25mm / Stahlbeton 200mm / Dämmung 6mm
- 10 Kunststoffbahn punktuell befestigt / Vlies / Spanplatte 24mm / Trapezblech 200m
- 11 Kabelkanal 70/170mm
- 12 Stahlbeton 200mm / Dämmung 40mm / Klimamembran / Gipskarton 2x12mm
- 13 Stahlrohr Ø 80/80mm
- 14 Stahlrohr 120/60mm mit Spannglied
- 15 Klemmschiene
- 16 Stahlrohr Ø 101mm
- 17 Stahlprofil U 85/120mm

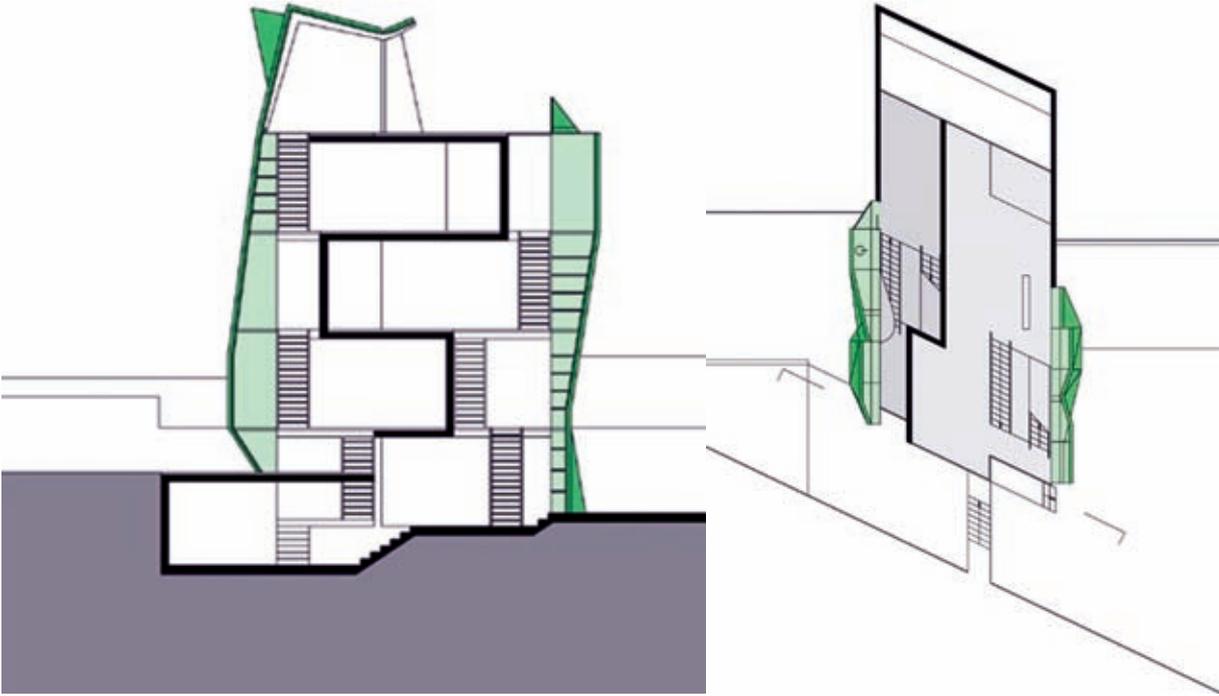


Abb. 5-6 Schnitt und Grundriss Zweifamilienhaus „softbag house“, Wien
Rainer pirker architeXture - rpaX, Wien, unvollendet

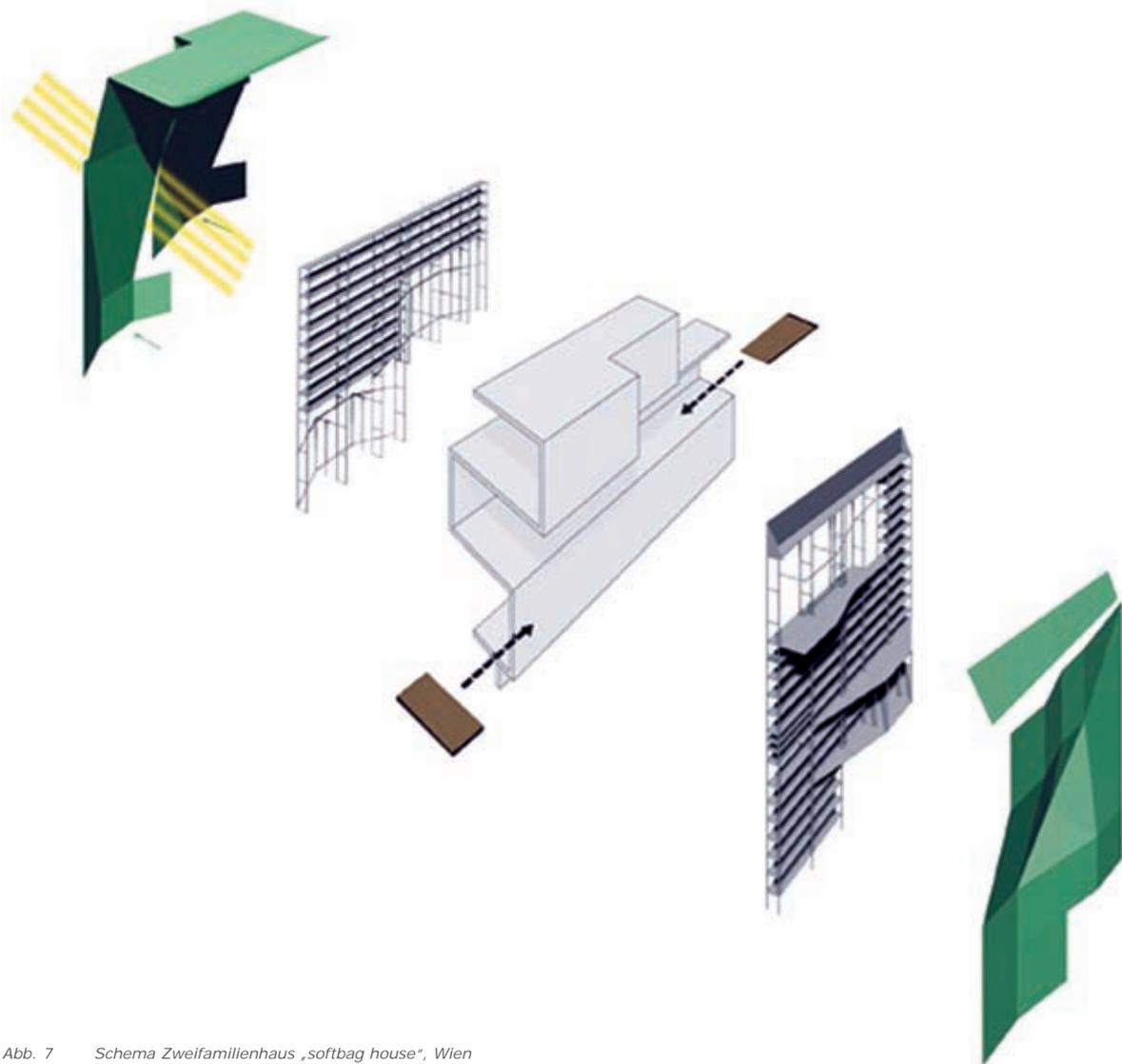


Abb. 7 Schema Zweifamilienhaus „softbag house“, Wien
Rainer pirker architeXture - rpaX, Wien, unvollendet

Zweifamilienhaus „softbag house“, Wien
 Rainer pirker architeXture - rpaX,
 Wien
 unvollendet

Tragwerksplanung: nn
Bauherr: privat
Mechanisch vorgespannt,
 Vorspannungsschema 3) vgl.
 6.2.1

Zwei getrennte Wohneinheiten die erweiterbar bleiben und möglichst kostengünstig errichtet werden sollen.

Angesiedelt in Hanglage am Rande Wiens, von dem für die Region typischen Mix aus Kleingartensiedlungen und klassischer Wohnbebauung - Ein- und Mehrfamilienhäuser - umgeben. Um Platz zu sparen, aber auch um beiden Wohneinheiten die gleichen Vorteile einer Hanglage - Ausblick über Wien, private Wohnbereiche in Richtung bzw. innerhalb des Erdreichs - zu bieten, hat sie der Architekt ineinandergesteckt. Auf diese Weise kann jede Hälfte einmal die volle Breite des Hauses ausnutzen, ausserdem bleibt die Aussenflä-

che der Fassade relativ klein. Was Vorteile für die Statik - Windkräfte - als auch für den Wärmeschutz hat.

Das Prinzip erinnert etwas an das Curtain-Wall-House von Shigeru Ban, da auch hier zunächst die innere Struktur des Grundrisse im Vordergrund steht. Im Gegensatz zu Ban nutzt Rainer Pirker die nötige Konstruktion für die Membranfassade - die wahrscheinlich aufgrund der nicht benötigten Transparenz konventionell gedämmt sein wird - als Regale um die Habe der Bewohner aufzunehmen. Damit hat er den anderen Lebensumständen eines Mitteleuropäers Rechnung getragen, da dieser im Durchschnitt mehr Hab und Gut im Laufe seines Lebens ansammelt als ein Asiate.

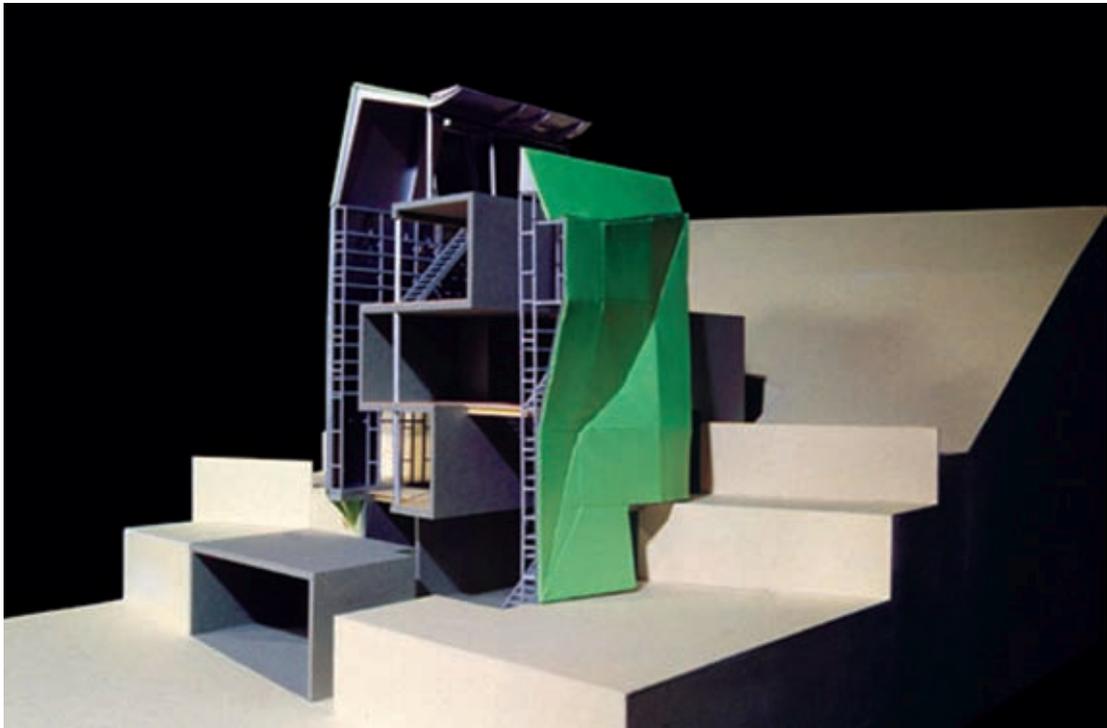


Abb. 8 Modellaufnahme Zweifamilienhaus „softbag house“, Wien
 Rainer pirker architeXture - rpaX, Wien, unvollendet

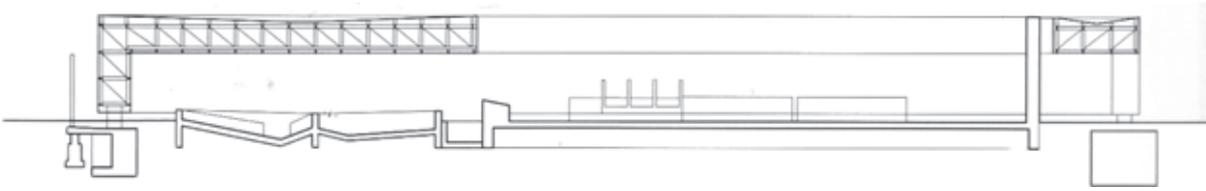


Abb. 9 Schnitt Gedenkstätte, Sachsenhausen
hg merz architekten museumsgealter, Stuttgart / Berlin

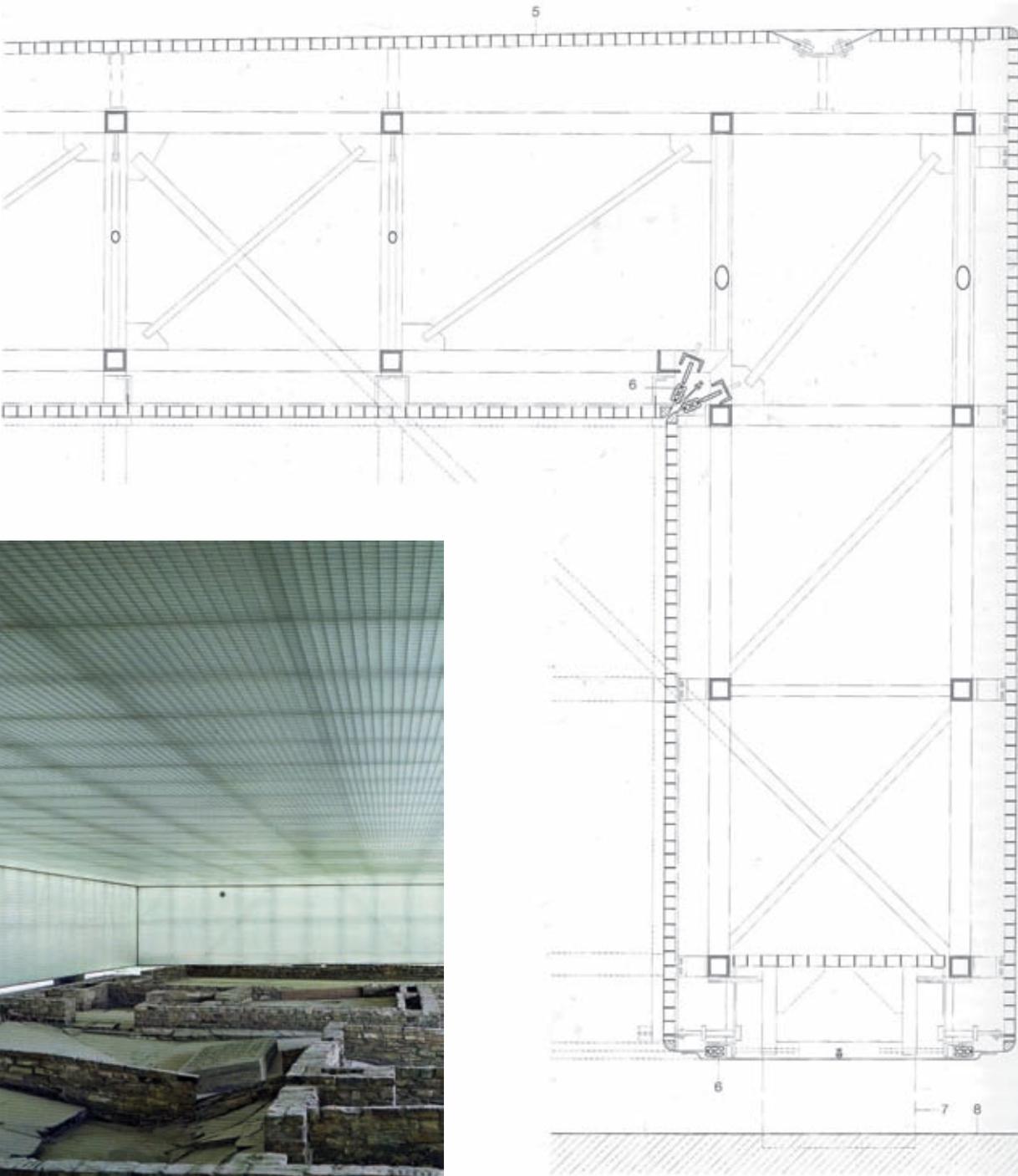


Abb. 10-11

Innenaufnahme Fassadenschnitt horizontal
Gedenkstätte, Sachsenhausen
hg merz architekten museumsgealter, Stuttgart / Berlin

Gedenkstätte, Sachsenhausen
hg merz architekten museumsge-
stalter, Stuttgart / Berlin

Tragwerksplanung: Ingenieur-
gruppe Bauen, Berlin
Bauherr: Stiftung Brandenburi-
sche Gedenkstätten
**Pneumatisch und mechanisch
vorgespannt,**
Vorspannungsschema 3) bzw 5)
vgl. 6.2.1

Dieser weiße, beinahe monoli-
thisch schwebende Kubus umhüllt
den Raum einer Gedenkstätte des
ehemaligen Konzentrationslagers
in Sachsenhausen nahe Berlin,
die die Überreste der sogenann-
ten Station Z zeigt. Das Entwurfs-
ziel war ein kontemplativer Raum,
der als Mahnmal fungieren soll.
Monumental und scharfkantig in
seinem Volumen, leicht und zu-
rückgenommen in seiner Materi-
alität.
Auf künstliche Belichtung wur-
de verzichtet, da das Volumen
mit einem transluzenten PTFE-
beschichteten Glasfasergewebe
bespannt ist. Die ungewöhnliche
Art der Vorspannung erzeugt
diesen nahtlosen, beinahe un-
wirklich-jenseitigen Eindruck. Sie
wurde nämlich mittels Unterdruck
zwischen den Lagen und einer

verdeckten Verspannung an den
Kanten der Fassade eingeleitet.

Die Tragkonstruktion besteht aus
einem räumlichen Stahlfachwerk-
system mit geschweißten Knoten
und überspannt stützenfrei eine
Fläche von ca. 37 x 39 m. Eine
Ausnehmung in der Dachfläche in
der Größe von 22 x 10 m, welche
viel Licht einfallen lässt, markiert
den eigentlichen Ort des Geden-
kens.

Auf acht Einzelfundamenten ru-
hend setzt sich der Kubus 60 cm
von der Erde ab, was das Gefühl
des Schwebens hervorruft. Glaub-
würdig ist diese Leichtigkeit nur
in Verbindung mit der Material-
wahl. Würden massive Materialien
eingesetzt werden, könnte die
Schwerkraft wieder spürbar sein.



Abb. 13 Außenaufnahme Gedenkstätte, Sachsenhausen
hg merz architekten museumsge-
stalter, Stuttgart / Berlin



Abb. 14 Innenaufnahme Gedenkstätte, Sachsenhausen
hg merz architekten museumsge-
stalter, Stuttgart / Berlin

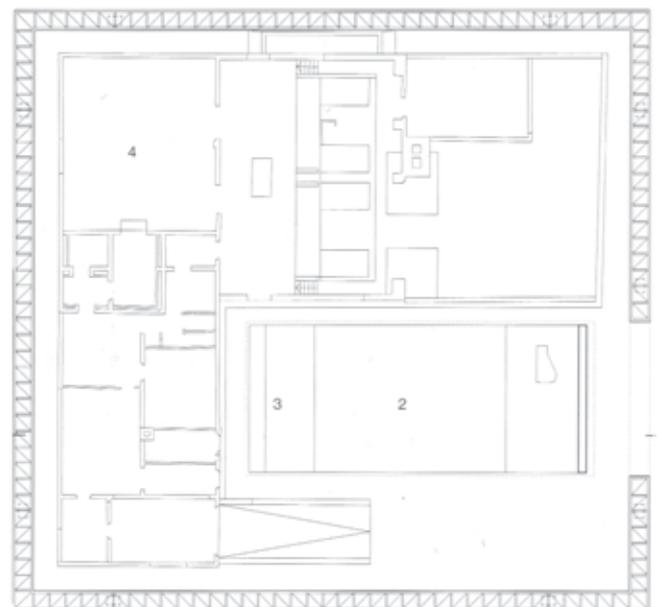


Abb. 12 Grundriss Gedenkstätte, Sachsenhausen
hg merz architekten museumsge-
stalter, Stuttgart / Berlin

- 1 Eingang
- 2 Gedenkort
- 3 Ausstellung
- 4 Relikte
- 5 Membran Glasfasergewebe PTFE-be-
schichtet
Gitterrost Stahl verzinkt 40 / 2 mm
Maschenweite 55 / 55 mm
Stahlhohlprofil Ø 80 / 80 mm
- 6 Extrusionsprofil Aluminium
- 7 Auflagersockel Stahlbeton
- 8 wassergebundene Decke

6.3 Luftgestützte Strukturen

Besser bekannt als Tragluft-Konstruktionen wurden in den 1960er Jahren beispielsweise Tennishallen oder Schwimmhallen als membranumhüllte Systeme realisiert. Da diese Art der Membranstruktur den Membranspannungszustand durch das Füllgas herbeiführt, bzw. Luft oder Gas als Stützmedium fungiert um die Zugspannung in die Hülle einzuleiten, hat die luftgestützte Struktur eine eher marginale Rolle für Membranfassaden.

Aus diesem Grund wird lediglich auf die prinzipielle Funktionsweise eingegangen.

Bei einer Tragluft Halle wird nicht der zu nutzende Raum mit luftgestützten Kissen umhüllt, sondern der Raum liegt innerhalb des Pneus. Das bedeutet der Besucher betritt die Hülle durch Luftschleusen und steht praktisch innerhalb der Vorspannung. Wie auch bei pneumatisch vorgespannten Kissen ist der benötigte Überdruck nicht sonderlich groß, deshalb wird dieser physisch nicht bemerkt.

Jedenfalls ist diese von in diesem Buch vorgestellten Strukturen die Leichteste. Spannweiten von über 200 m - mit Unterstützung

von Seilnetzen - sind möglich. Jedoch steigt der Energieaufwand in diesen Dimensionen beinahe ins Unermessliche - was mit unseren derzeitigen Möglichkeiten der Energiebeschaffung nicht zu bedienen ist.

Nach DIN 4134 werden Luftgestützte Strukturen - pneumatische Strukturen - folgendermaßen definiert:

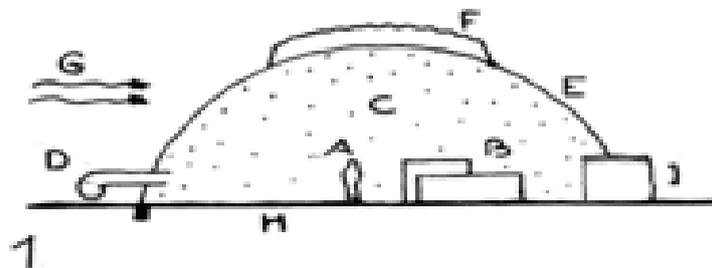
„Tragluftbauten im Sinne dieser Norm sind bauliche Anlagen, deren äußere Raumabschließung ganz oder überwiegend aus einer flexiblen Hülle (mit oder ohne Stützung durch Seile oder Seilnetze) besteht, welche von der durch Gebläse unter Überdruck gesetzten Luft des Innenraumes getragen wird.“

Bei einem vorherrschenden Überdruck von 100 kN/m^2 brauchen pneumatische Systeme einen Überdruck von mindestens $0,3 - 0,5 \text{ kN/m}^2$ - das entspricht $3 - 5 \text{ mbar}$.

Nach dem Innendruck π werden Hochdrucksysteme mit $\pi < 1,0 \text{ kN/m}^2$ und Niederdrucksysteme mit $\pi > 1,0 \text{ kN/m}^2$ unterschieden.

Abb. 1 Systemskizze nach Frei Otto

- A Mensch
- B Objekte
- C erhöhter Luftdruck
- D Gebläse
- E biegeunsteife Membran,
- F Schneelast
- G Windlast
- H Baugrund



Mobiler Aktionsraum raumlabor berlin, Berlin plastique fantastique

Dieses als soziale Skulptur zu begreifende „Küchenmonument“ basiert auf dem Prinzip luftgestützter Strukturen.

Das Objekt stellt einen kostengünstigen Witterungsschutz dar, der rasch und einfach auf- und abbaubar ist und sich leicht transportieren lässt. Für den Transport ist die Volumenverkleinerung von großer Wichtigkeit, dafür bietet sich der aufblasbare Raum an, der bei Bedarf aus der Stirnseite des massiven Kubus - ein umfunktionierter Bauwagen - wächst.

Die Nutzungsmöglichkeiten erstrecken sich vom Konferenzraum oder Kino über einen Schlaflsaal zum Dampfbad.

Das wahrscheinlich charmanteste Element ist die Inszenierung des Aufbaus. raumlabor berlin stellt zunächst den hermetisch abgeschlossenen Kubus an die gewünschte Stelle. Er soll als eine abstrakte Skulptur aus Zinkblech im Stadtraum wirken. Ist der Zeitpunkt günstig, beginnen die Vorbereitungen für das „Entpuppen“, die Passanten beginnen zu rätseln was an diesem Ort vorgeht. Dann kommt der Moment an dem die Türen geöffnet werden und sich ein halböffentlicher, privat anmutender Raum in die Öffentlichkeit ergießt. Der Pneu passt seine Form an die Umgebungsbedingungen an, das perfekte Chamäleon unter den Stadtmöbeln.

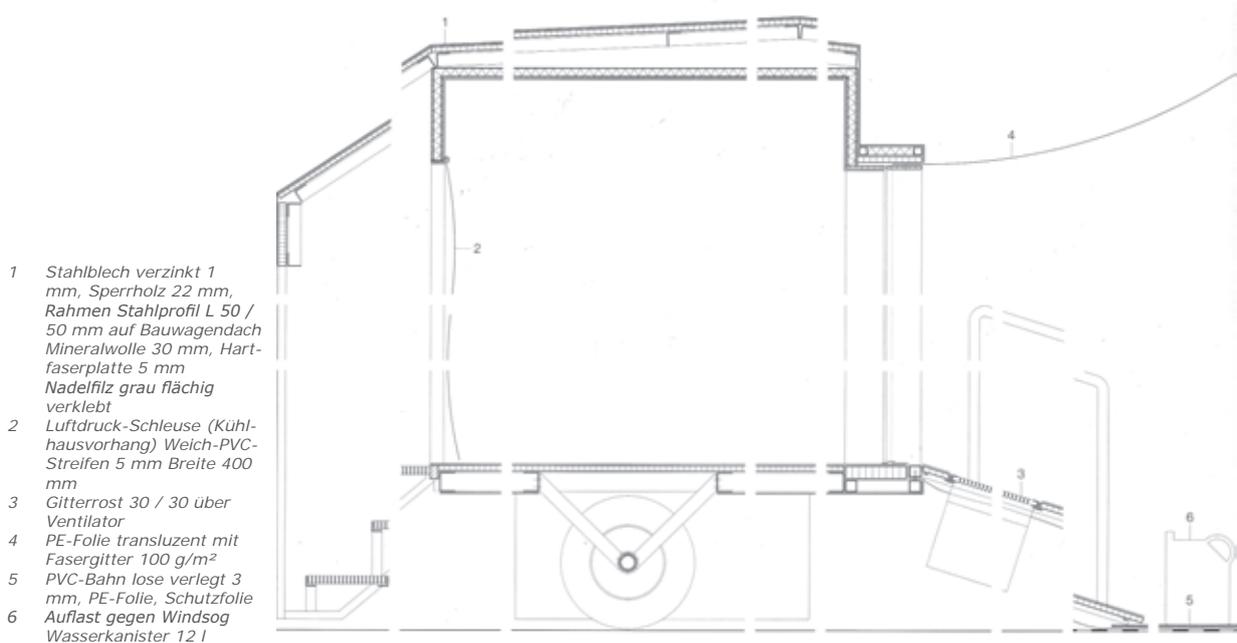


Abb. 2 Vertikalschnitt Mobiler Aktionsraum, raumlabor berlin, Berlin *plastique fantastique*



Abb. 3 Außenaufnahme Mobiler Aktionsraum, geschlossen



Abb. 4 Außenaufnahme Mobiler Aktionsraum, entfaltet

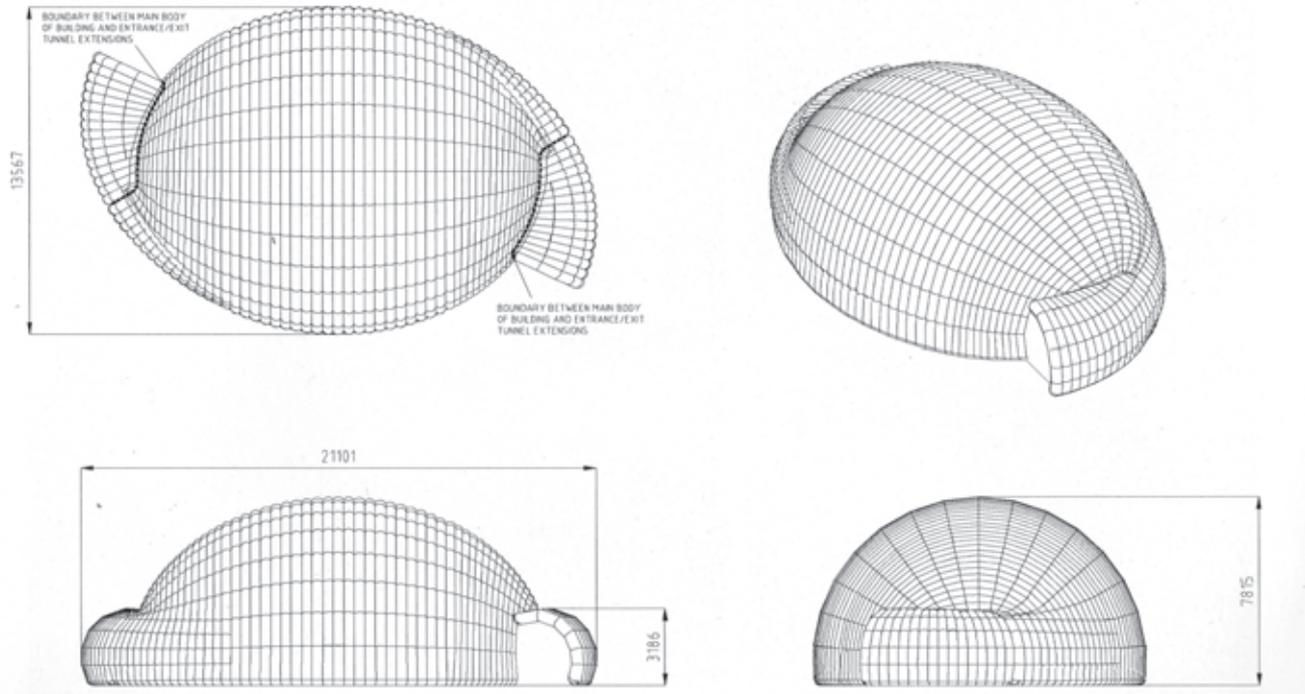


Abb. 5 Grundriss, Axonometrie, Seiten- und Vorderansicht Luftschiffterminal „Spirit of Dubai“, Dubai Tectoniks Ltd., Shropshire



Abb. 6 Außenansicht Luftschiffterminal „Spirit of Dubai“, Dubai Tectoniks Ltd., Shropshire

Luftschiffterminal „Spirit of Dubai“, Dubai Tectoniks Ltd., Shropshire

Für das weltgrößte Luftschiff wurde von der Firma Tectoniks Ltd., welche auf aufblasbare und mobile Gebäude spezialisiert ist, ein Terminal entwickelt. Dieses Vorhaben erforderte aufgrund seiner Größe einen anspruchsvollen Konstruktionsentwurf. Die Passagiere, die die Europareise mit der „Spirit of Dubai“ absolviert haben, sollen ihre Reise in diesem Terminal beenden.

Die aus zwei Lagen feuerfesten PVC-Gewebe zusammengesetzten Formteile, welche mit Pressluft gefüllt und somit trag-

fähig gemacht werden, wurden in Großbritannien hergestellt. In lediglich zwei Holzkisten brachte man die Teile an den Standort in Dubai, wo das Fundament vor Ort gegossen wurde. Zur Montage breitete man die Membran auf dem Fundament aus, befestigte diese mit Klebeankern und schloss ein Gebläse an. Dieser Vorgang benötigt 40 Minuten. Vier kleindimensionierte Gebläse mit jeweils 375 Watt, angeschlossen an eine Steuerungseinheit, den benötigten kontinuierlichen Druck gewährleisten. Von Geräuschbelästigung ist im Inneren des Terminals kaum etwas zu merken. Vor allem deshalb, weil im Normalbetrieb nur zwei der vier Gebläse zum Einsatz kommen.



Abb. 7 Werkstattaufnahme, Fügen der Membranen



Abb. 10 Luftschiff „Spirit of Dubai“



Abb. 8 Werkstattaufnahme, Montageprobe

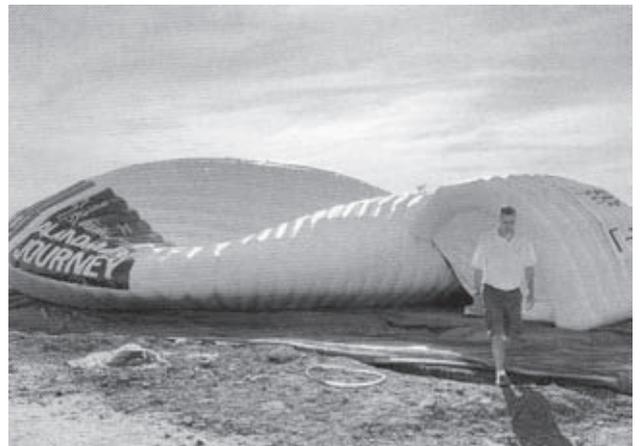


Abb. 9 Montage vor Ort

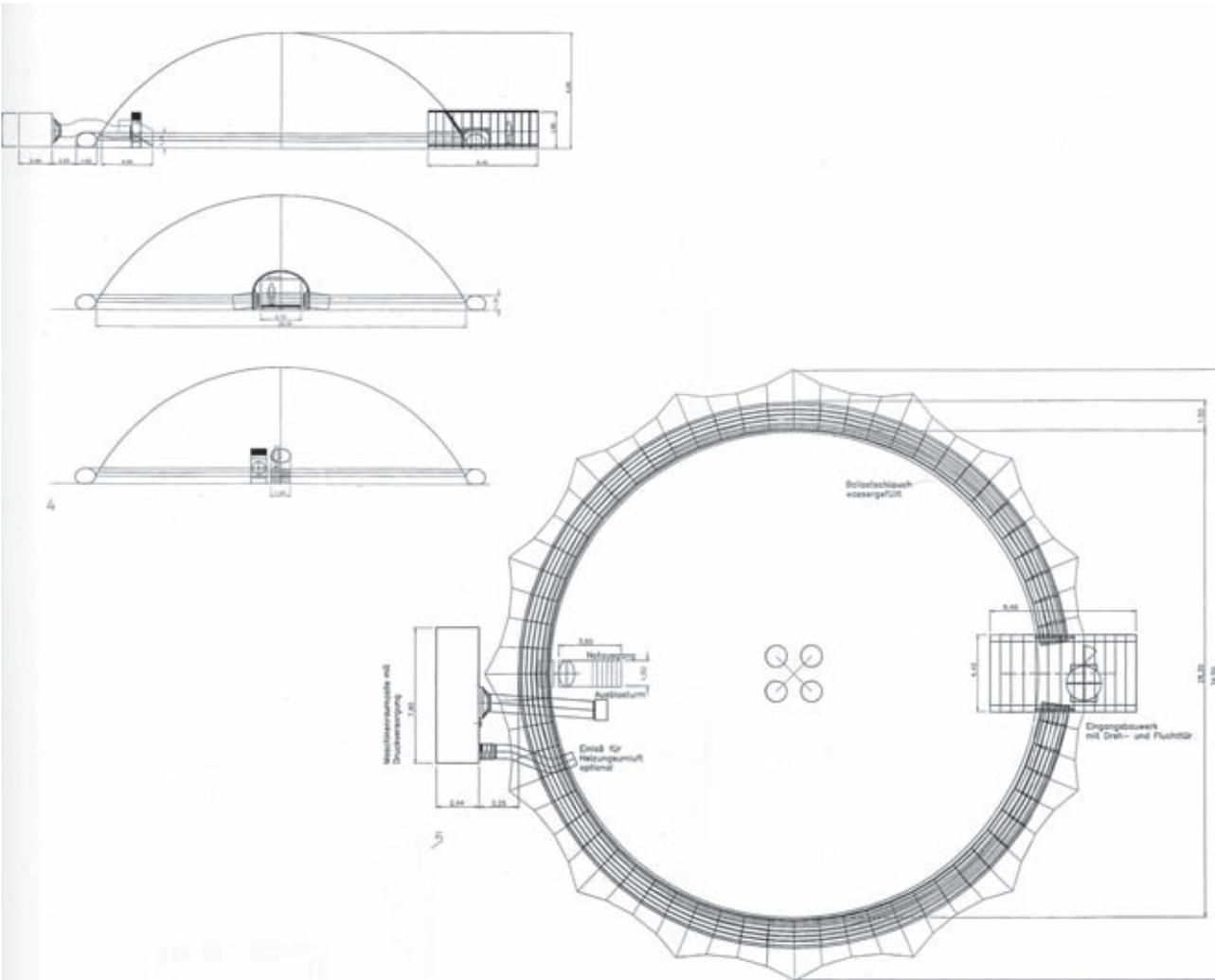


Abb. 11 Schnitte und Grundriss des Mobiles Eventzelt „Airquarium“
FESTO Corporate Design, Esslingen

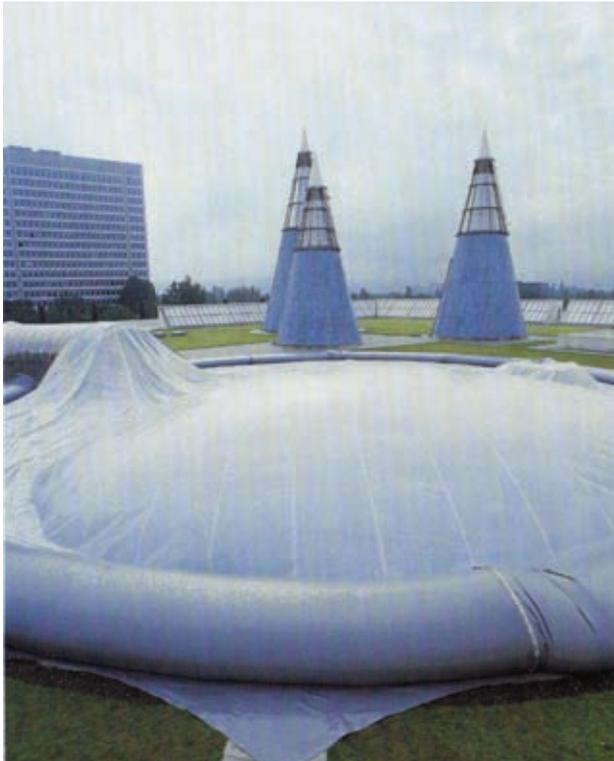


Abb. 12-13 pneumatischer FÜllvorgang Mobiles Eventzelt „Airquarium“
FESTO Corporate Design, Esslingen

Mobiles Eventzelt „Airquarium“ FESTO Corporate Design, Esslingen

Mit dem „Airquarium“ entwickelte FESTO mit einer luftgetragenen Kuppel von 32 Metern Durchmesser sein größtes mobiles Gebäude. Es wurde eine neuartige Vitroflex Membran eingesetzt, die sich durch ihre weite Spannbarkeit und extrem hohe Transluzenz auszeichnet. Im Falle eines Brandes werden nur ungiftige Wasser-Essig-Dämpfe freigesetzt. Durch eine als Haupteingang genutzte Schleuse gelangt der Besucher in einen 9 Meter hohen, halbkugelförmigen Kuppelraum. Als Fundament dient ein mit Wasser gefüllter Schlauch, der sich als Ring um die Kuppel

legt. Dadurch ist die Errichtung des Gebäudes auf jedem festen Untergrund möglich. Dieser Schlauch ist unterbrochen von der Eingangsschleuse, die sogar von größeren Transportfahrzeugen genutzt werden kann.

Für den Transport werden zwei Standard Container benötigt: in einem finden die modularen Wartungseinheiten für die Klima- und Belüftungsanlage, ein Wärmetauscher, eine Wetterstation, eine windlastabhängige Luftdruckregelung, sowie Notstromgeneratoren Platz. Der zweite Container beinhaltet die Luftschleuse, die Kuppel und die Fundamentmembran.

Die Montage benötigt eine Woche bei einem sechsköpfigen Montageteam.

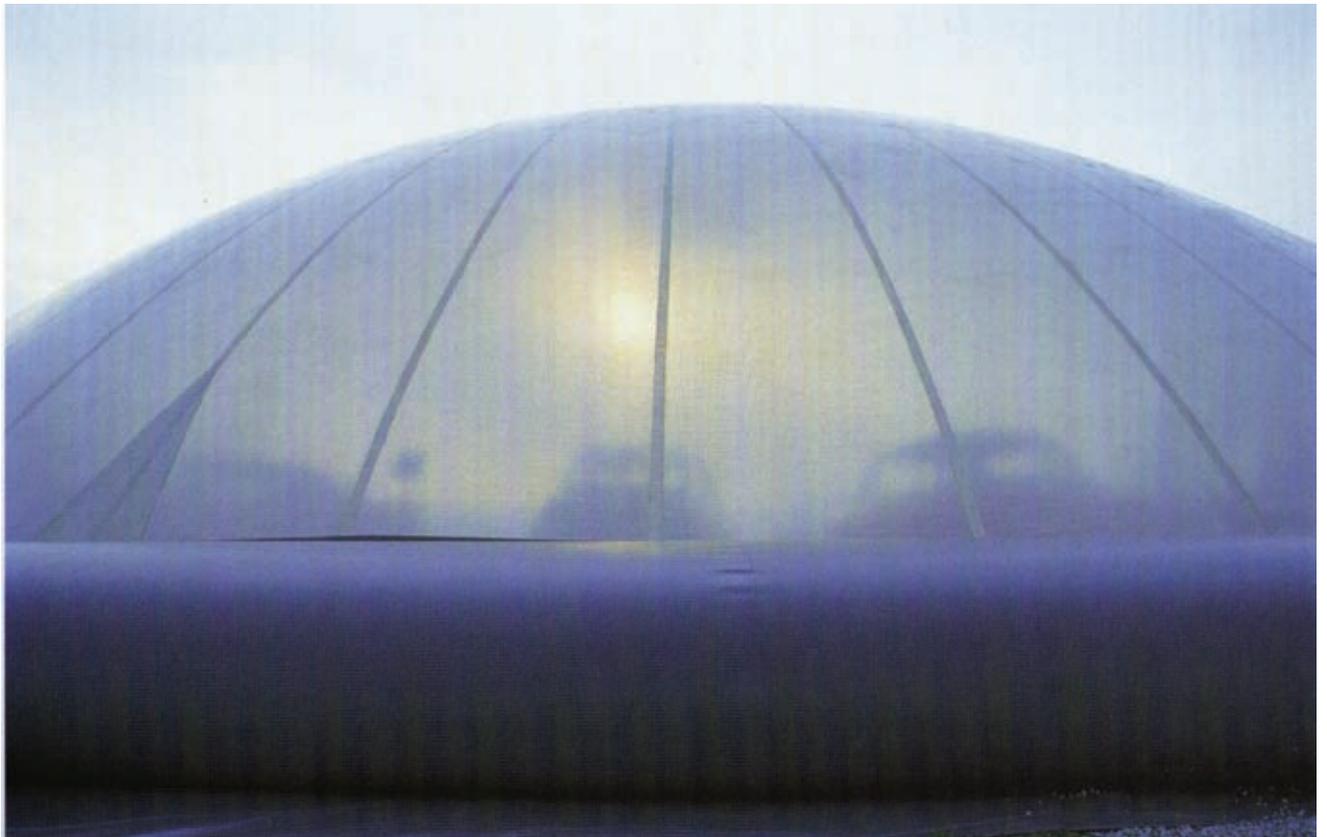


Abb. 14 Außenansicht Mobiles Eventzelt „Airquarium“
FESTO Corporate Design, Esslingen

6.4 Ausblick und Vision

Die Architektur steht vor einem fundamentalen Wandel. In Zukunft wird weniger ein Stil, eine Ästhetik für die Ewigkeit gebaut, sondern die Hülle wird nach ihren Möglichkeiten bewertet.

Konstruktion, Oberflächen und Materialien werden das Erscheinungsbild anstelle eines bestimmten Stils, einer bestimmten Ästhetik prägen. Daher ist es essentiell den Materialkanon für Architekturschaffende zu erweitern.

Die immer rasanter voranschreitende Materialentwicklung wie auch die geringer werdenden Zeitabschnitte in denen Neuerungen aller Bereiche des Architekturschaffens auftreten begünstigen das größer werdende Interesse an Membranarchitektur.

Die Hülle wird anpassbar sein müssen um weiterführenden Entwicklungen - ob technisch, soziologisch oder philosophisch - Rechnung tragen zu können.

Der Ausspruch „Wir sind die Neanderthaler von morgen“ beweist beispielsweise nach der Betrachtung eines Wiener Gründerzeitbaus seine Gültigkeit. Damals

bereits mit veralteten Materialien erbaut, bescheren diese nun, über hundert Jahre später massive Probleme. Katastrophale CO₂-Bilanzen, explodierende Heizkosten, immer schlechter werdende konstruktive Eigenschaften. Außerdem entsprechen die Grundrisse nicht mehr dem modernen Leben, was massive Umbauarbeiten in relativ starren Systemen erfordert.

Vielleicht ist ein Gegenentwurf zum Typus des „Domizilerbauers“ fällig um das trügerische Sicherheitsgefühl des „Bauens für die Ewigkeit“ abzuschwächen. Denn was haben dauerhafte Bauten für einen Sinn, wenn diese - überspitzt formuliert - den Nachkommen das Risiko höherer Kosten bescheren?

Das bedeutet eine Änderung des Entwurfsvorgangs. Es wird nicht mehr aus einer begrenzten Anzahl an Werkstoffen mit definierten Eigenschaften gefügt. Das Bauen mit Membranen erfordert zunächst eine intensive Auseinandersetzung mit den Grundlagen, um das schier unüberschaubare Angebot an Ausgangsstoffen, Kombinationsmöglichkeiten und Potentialen überblicken zu können. Nicht nur die technischen Eigenschaften sind steuerbar,

gleichzeitig verändern sich die visuellen und haptischen Qualitäten.

Besonderes Potential ist in der multifunktionalen Hülle zu sehen, die bereits heute das Bauwerk mit Strom versorgen oder sich auf sich verändernde Umweltbedingungen einstellen kann.

Die Architekturschaffenden von morgen erwartet in einigen Bereichen Entwicklungsbedarf. So wird es nötig sein, ein Normensystem zu erarbeiten, das einerseits dem individuellen Charakter - jede Konstruktion ist ein Unikat, da sich im Leichtbau wechselnde Umgebungsbedingungen stark auswirken können - Rechnung trägt, andererseits eine vergleichende Gesamtbewertung eventuell bereits im Vorfeld möglich machen.

Membranmaterialien sind nicht gänzlich unbrennbar. Versuche mit Zugaben von Brandschutzadditiven haben bis dato noch nicht vollständig zufriedenstellende Ergebnisse geliefert. Unter anderem deshalb, weil die Zugabe von Additiven die Toxizität erhöht, was eine gesundheitliche Bedrohung und Probleme bei der Recyclierbarkeit bedeutet.

Auf dem Gebiet der Ökologie wurden bereits große Fortschritte gemacht. Allerdings verursachen Membranmaterialien am Ende ihrer Nutzungsdauer Probleme. Beispielsweise textile Membranen lassen sich schwer bis gar nicht in ihre verschiedenen Komponenten zerlegen. Was eine Grundvoraussetzung für den Eintritt in den Materialkreislauf ist. Jedenfalls ist die Deponierung die denkbar schlechteste Lösung.

Literaturverzeichnis

- Adamczewski Piotr Hochhausfassaden aus Membranen [Buch]**. - Berlin : Technische Universität Berlin - Fakultät VI - Planen, Bauen, Umwelt, 2008.
- AGI AG für Isolierungen Agitec Aktuell [Online]**. - 27. 01 2011. - http://www.agitec.ch/fileadmin/images/img/pdf/Verarbeitungshinweise_Aerogel.pdf.
- Architen Landrell www.architen.com [Online]**. - 9. Juni 2010. - <http://www.architen.com/projects/imagination-headquarters>.
- BauNetz Media GmbH Baunetz Wissen [Online]**. - 11. 09 2010. - http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fassade_Funktionsaufbau-einschaliger-Konstruktionen_154441.html.
- Compagno Andrea Dip.-Ing [et al.] Transluzente Materialien - Glas, Kunststoff, Metall [Buch]**. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2003. - ISBN 3-920034-08-2.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Das Konstruieren mit Membranen [Artikel] //** Bauen mit Membranen. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH + Co. KG, 2000. - 06.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Effizienzstrategie mit Hindernissen: Das Energiekonzept [Artikel] //** Detail Green. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2010. - 01.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Familienhaus in Tokio [Artikel] //** Bauen mit Membranen. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH + Co. KG, 6 2000. - 06.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Kunststoffhülle für ein Bürohaus [Artikel] //** Detail Green. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH + Co. KG, 10 2010. - 01. - S. 30-31.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Mobiler Aktionsraum [Artikel] //** Experimentelles Bauen. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2009. - 12.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Pavillon im Earth Centre in Doncaster [Artikel] //** Bauen mit Membranen. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2000. - 06.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Temporäre Stadtteilverwaltung in London [Artikel] //** Transluzente Materialien . - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2007. - 10.
- Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail Wohnhaus in Santiago de Chile [Artikel] //** Kunststoffe. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2008. - 05.
- Detail -Zeitschrift für Architektur + Baudetail Ausstellungsgebäude in Busan [Artikel] //** Kunststoffe. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2008. - 05.
- Detail Zeitschrift für Architektur + Baudetail Temporäre Stadtteilverwaltung in London [Artikel] //** Transluzente Materialien. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH + Co. KG, 2007. - 10.
- Detail -Zeitschrift für Architektur + Baudetail Veterinärgrenzstation in Spielfeld [Artikel] //** Bauen mit Kunststoffen. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2002. - 12.
- deutschland-findet.de Der internationale Klimaindex [Online]**. - 27. 8 2010. - <http://www.eklima.de>.
- Drees & Sommer AG www.dreso.com [Online]**. - 28. Juli 2010. - <http://www.dreso.com/german/referenzen/3628.asp>.
- Fehringer Roland und Brunner Paul H. Kunststoffflüsse und Möglichkeiten der Kunststoffverwertung in Österreich [Buch]**. - Wien : Österreichisches Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, 1997.

Formfinder Software GmbH www.formfinder.at [Online]. - 16. 09 2010. - <http://www.formfinder.at/main/software/user-interface/>.

Gengnagel Christoph Dr.-Ing. Mobile Membrankonstruktionen [Buch]. - München : Technische Universität München - Fakultät für Architektur, 2005. - ISBN 3-938660-07-4.

Gerber Architekten Gerber Architekten [Online]. - 28. Juli 2010. - [http://www.gerberarchitekten.de/index.php?id=172&stp_context_navigation\[parent\]=22,273&stp_context_navigation\[image\]=1](http://www.gerberarchitekten.de/index.php?id=172&stp_context_navigation[parent]=22,273&stp_context_navigation[image]=1).

Giselbrecht Markus // Bauphysikalische Aspekte von Membrankonstruktionen. - Wien : TU Wien, Institut für Architektur und Entwerfen, Abteilung für Hochbau, Konstruktion, Installation und Entwerfen, 2002.

Grunwald Georg Dipl.-Ing Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranmodule [Buch]. - Berlin : Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt - Inst. f. Architektur d. TU Berlin, 2007.

Hegger Manfred [et al.] Energie Atlas - nachhaltige Architektur [Buch]. - München : Birkhäuser - Verlag für Architektur, 2008. - ISBN 978-3-7643-8385-5.

Henn Architekten www.henn.com [Online]. - 9. Juni 2010. - <http://www.henn.com/#de/verwaltung/311>.

Jodidio Philip Architecture Now! [Buch]. - Köln, Deutschland : Taschen GmbH, 2004.

Jodidio Philipp Architecture Now! [Buch]. - Köln, Deutschland : Taschen GmbH, 2007. - Bd. 5.

KAEFER Construction GmbH www.microsorber.de [Online]. - 07. 09 2010. - http://www.microsorber.de/pdf/Folder_Produktinfo.pdf.

Kappert Michael Prof. Dr. Ing. [et al.] Messprogramm und Evaluierung - Neubau Technologiezentrum Erfurt [Bericht]. - Braunschweig : Fachhochschule Erfurt, 2006.

Knaack Ulrich [et al.] Fassaden - Prinzipien der Konstruktion [Buch]. - Basel : Birkhäuser Verlag AG, 2007. - ISBN 978-3-7643-7961-2.

Knippers Jan Prf. Dr.-Ing. [et al.] Atlas Kunststoffe + Membranen [Buch]. - München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH + Co. KG, 2010. - 987-3-920034-41-6.

Koch Klaus-Michael und Habermann Karl J. Bauen mit Membranen / Der innovative Werkstoff in der Architektur [Buch]. - München : Prestel Verlag, 2004.

Kronenburg Robert Mobile Architektur - Entwurf und Technologie [Buch]. - Berlin : Birkhäuser Verlag AG, 2008.

McLeod Virginia Detail in Contemporary Residential Architecture [Buch]. - London, Großbritannien : Laurence King Publishing Ltd, 2007.

Membrantechnik Flontex GmbH FLONTEX - Textile Architektur [Online]. - 03. 09 2010. - <http://www.flontex.ch/wDeutsch/waermedaemmung/index-25870.shtml>.

Meyer Marc und Geilinger Hans www.geilinger.net [Online]. - 28. 11 2010. - <http://www.geilinger.net/media/pdf/oberfl-che.pdf>.

Meyhöfer Dirk motortecture / architektur für automobilität [Buch]. - Ludwigsburg, Deutschland : avedition GmbH, 2003.

Mollaert Marijke Enviromental aspects in textile architecture [Buch]. - Vrje : Universiteit Brussel. Nelte H.M. Deutsch-Chinesische Projekte / Architektur, Landschaftsarchitektur [Buch]. - Wiesbaden, Deutschland : H.M. Nelte, 2005.

Ortner Laurids www.ortner.at [Online]. - 15. 12 2010. - <http://www.ortner.at/haus-rucker-co/de/cover.html>.

Ortner Laurids, Pinter Klaus und Zamp Kelp Günter Gelbes Herz. - Film, 1968.

- Pfeiffer Martin Energetische Gebäudemodernisierung [Buch].** - Stuttgart : Fraunhofer IRB Verl., 2008.
- raumPROBE OHG www.raumprobe.de [Online].** - 04. 09 2010. - http://www.raumprobe.de/5288_Kunststoff-Definition.html.
- Sauter Joachim <http://netzspannung.org> [Online]** // Das vierte Format: Die Fassade als mediale Haut der Architektur. - 10. 10 2010. - [http://netzspannung.org/cat/servlet/CatServlet/\\$files/273668/sauter.pdf](http://netzspannung.org/cat/servlet/CatServlet/$files/273668/sauter.pdf).
- Schittich Christian, Wiegelmann Andrea und Madlehner Thomas Japan / Architekten, Konstruktionen, Stimmungen [Buch].** - Basel, Schweiz : Institut f. int. Architektur-Dokumentation GmbH, 2002.
- Scholze-Stubenrecht Werner und Osterwinter Ralf Duden - die deutsche Rechtschreibung [Buch].** - Mannheim : Bibliografisches Institut & F.A. Brockhaus AG, 2000. - ISBN 3-411-04012-2.
- Schulitz Helmuth C., Sobek Werner und Habermann Karl J. Stahlbau Atlas [Buch].** - Basel, Schweiz : Birkhäuser - Verlag f. Architektur, 2001.
- Seidel Michael Univ. Ass. Dipl. Ing. Dr techn. Skript m5 Membrankonstruktionen [Buch].** - Wien : Schriftenreihe des Instituts für Hochbau 2, TU Wien, 2003.
- Seidel Michael Univ. Ass. Dipl. Ing. Dr. techn. Textile Hüllen - Bauen mit biegeweichen Tragelementen [Buch].** - Wien : Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co. KG, Berlin, 2008.
- Smith Courtenay und Topham Sean Xtreme Houses [Buch].** - Munich - Berlin - London - New York : Prestel Verlag, 2002.
- technet GmbH - Berlin www.technet-gmbh.de [Online].** - 16. 09 2010. - [http://www.technet-gmbh.de/index.php?id=63&L=1//%3F_P...//data/id.txt%3F%3F//%3F_PHPLIB\[libdir\]%3D](http://www.technet-gmbh.de/index.php?id=63&L=1//%3F_P...//data/id.txt%3F%3F//%3F_PHPLIB[libdir]%3D).
- Vector Foiltec GmbH <http://www.vector-foiltec.com> [Online].** - 15. 12 2010. - <http://www.vector-foiltec.com/cms/de/technical/variableskins.php>.
- WEKA MEDIA GmbH & Co. KG Energie und Bau [Online].** - 03. 09 2010. - <http://energieundbau.de/gebaeudetechnik/news/Aerogel-Daemmung-und-noch-mehr-20100120.html>.
- WEKA MEDIA GmbH & Co. KG Energie und Bau [Online].** - 07. 09 2010. - <http://energieundbau.de/gebaeudetechnik/news/Aerogele-Hervorragende-Waermedaemmung-bei-maximaler-Tageslichtnutzung-20090114.html>.
- Zhang Lingyun Dr.-Ing. Untersuchung zu mehrlagigen Membrankonstruktionen im Hinblick auf unterschiedliche Funktionen von Gebäudehüllen [Buch].** - München : Technische Universität München Fakultät für Architektur Institut für Entwerfen und Bautechnik, 2007.

Abbildungsverzeichnis

1.1

- Abbildung 1** Guggenheim Museum, Bilbao / Frank O. Gehry
http://farm4.static.flickr.com/3551/3453231550_65d48618d1_o.jpg
- Abbildung 2** Ciutat de les Arts i les Ciències, Valencia / Santiago Calatrava
fotografiert von Philipp Wirth 2010
- Abbildung 3** Überdachung Urban-Loritz-Platz, Wien / Architekten Tillner & Willinger ZT GmbH
fotografiert von Philipp Wirth 2008
- Abbildung 4** Schwimmsporthalle „Water Cube“, Peking / LAVA - Laboratory for Visionary Arts
http://www.archinect.com/images/uploads/watercube_aerial_01.jpg

1.2

- Abbildung 1** Deckenansicht des Palais Kaskel Oppenheim, Dresden / Gottfried Semper
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Dresden_Palais_Kaskel-Oppenheim,_Salon_Plafond_-_L%C3%B6ffler_S._381,_Bildnr._476_und_Helas_1999,_S._33_Plafond_des_Salons_entworfen_von_Gottfried_Semper_Kopie_von_C._Balthasar_1847.jpg
- Abbildung 2** Skizze Fassadengestaltung / Gottfried Semper
<http://www.preiswert-webdesign.de/bilder/grafik/semper6.jpg>

Abbildung 3 **Ausstellungsfoto „gelbes Herz“ / Haus-Rucker-Co**
http://3.bp.blogspot.com/_HMTcR_29J-w/TOxWkiK01wI/AAAAAAAAAFbA/HzQZ4wVWG08/s1600/9.jpg

Abbildung 4 **Publikationsdokumentation „gelbes Herz“ / Haus-Rucker-Co**
<http://www.ortner.at/haus-rucker-co/images/herz2.jpg>

Abbildung 5 **Modellaufnahme „gelbes Herz“ / Haus-Rucker-Co**
<http://www.ortner.at/haus-rucker-co/images/herz1.jpg>

Abbildung 6, 7 **„Cover, Überleben in einer verschmutzten Umwelt“ / Haus-Rucker-Co**
<http://www.ortner.at/haus-rucker-co/images/cov3.jpg>
<http://www.ortner.at/haus-rucker-co/images/cov2.jpg>

Abbildung 8, 9, 10 **Antarctica Lucie + Jorge orta in Mailand / Projekt dwelling X**
<http://www.flickr.com/photos/nearnearfuture/2434920108/sizes/o/in/set-72157604846671057/>
http://www.flickr.com/photos/nearnearfuture/2434901882/sizes/o/in/set-72157604846671057/2434901882_ce30b3ca0e_o
http://www.flickr.com/photos/nearnearfuture/2434326143/sizes/l/in/set-72157604846671057/2434326143_07a28dca5e_b

Abbildung 11, 12 **Antarctica Lucie + Jorge orta in Mailand / Projekt nexus**
http://www.flickr.com/photos/44124408791@N01/2434090547/-2394841835_e386622b29
http://anygivenname.org/load/2007/12/image_82_image.jpg image_82_image

2.2

Abbildung 1 **Fassadenfunktionen** (Knaack, et al., 2007) S. 36
Abbildung 2 **Schema der konstruktiven Bereiche** (Knaack, et al., 2007) S. 37
Abbildung 3 **Lastabtragung von Fassaden** (Knaack, et al., 2007) S. 39
Abbildung 4 **Lastabtragung** (Knaack, et al., 2007) S. 38

2.3

Abbildung 1 **Elementiere Fassade** (Knaack, et al., 2007) S. 56
Abbildung 2 **Fassade aus mehreren Ebenen** (Knaack, et al., 2007) S. 56
Abbildung 3 **pneumatische Verschattung**
<http://www.vector-foiltex.com/images/backgrounds/variableskins.jpg>

Abbildung 4 **Architektur Biennale Venedig 2008, Deutscher Pavillon**
 fotografiert von Philipp Wirth 2008

Abbildung 5 **Vier physische Medienformate (Sauter)**
Abbildung 6 **Mit Texlon Solar bespannte Kuppel**
<http://www.vector-foiltex.com/images/backgrounds/textlonsolar.jpg>

Abbildung 7 **Soft House**
<http://inhabitat.com/solar-harvesting-textiles-energize-soft-house/attachment/11718/>

3

Abbildung 1 **Kunststofferzeugung** (Knippers, et al., 2010) S. 31
Abbildung 2 **Einteilung von Kunststoffen nach ihrem chemischen Aufbau** (Compagno, et al., 2003) S. 31
Abbildung 3 **TEXYLOOP Recycling Programm**
<http://www.texyloop.com/index.php?lang=d#/95/> von der Autorin modifiziert

3.1.1

Abbildung 1 **Panamabindung**
<http://www.raumausstattung.de/bilder/lexikonraum/lr-3708-Panama.jpg>

Abbildung 2 **Leinwandbindung**
<http://www.holzkircher.de/magazinneu/webtechniken/Schema%20Leinwandbindung.JPG>

Abbildung 3-9 (Knippers, et al., 2010) S. 103

3.1.2

Abbildung 1 **Aufbau Gewebe vs. Folie**
 BIG TOP Manufacturing, Perry, Florida

Abbildung 2 **ETFE-Folie** (Compagno, et al., 2003) S. 69
Abbildung 3 **THV-Folie** (Compagno, et al., 2003) S. 69
Abbildung 4 **ETFE-Folie** (Compagno, et al., 2003) S. 69

4. 1

Abbildung 1 **Frei geformte Flächen Vgl.** (Knippers, et al., 2010) S. 137
Abbildung 2 **Geometrische Flächen Vgl.** (Knippers, et al., 2010) S. 137
Abbildung 3 **Strukturprimierte Flächen Vgl.** (Knippers, et al., 2010) S. 137
Abbildung 4 **Prinzip Leichtbau**
http://www.lkr.at/images/Leistungen/Leichtbau/Neues_Bild_3_.gif

Abbildung 5 **Varianten mechanisch vorgespannter Flächen** (Knippers, et al., 2010) S. 141

- Abbildung 6** Fassadenschnitt einer mechanisch vorgespannten Membran; Firmenzentrale Unilever, Hamburg; Behnisch Architekten, Stuttgart (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2010) S. 32
- Abbildung 7** **Paneelrahmen mit Befestigung der Hinterspannung** (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2010) S.32
- Abbildung 8** **Detailfoto Fassade Firmenzentrale Unilever, Hamburg** (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2010) S. 31
- Abbildung 9** **Pneumatisch vorgespannte Flächen** (Knippers, et al., 2010) S. 142
- Abbildung 10** **Fassadenschnitt pneumatische Kissen in schlauchähnlicher Ausführung Raumfahrtmuseum, Leicester; Nicholas Grimshaw & Partners Limited**
Gezeichnet von Anna-Vera Deinhammer nach Plänen von Nicholas Grimshaw & Partners Limited

- Abbildung 11** **Raumfahrtmuseum, Leicester; Nicholas Grimshaw & Partners Limited**
http://farm1.static.flickr.com/223/501824806_41dc6f9fb4_b.jpg
- Abbildung 12** **Aerodynamik einer Gebäudeform** http://www.constructalia.com/de/resources/ContenidoProyect/04600363Foto_big.jpg
- Abbildung 13** **Klimakonzept Neugestaltung Hülle Bürohaus in Salzburg; rpaX - rainer pirker architeXture, Wien**
<http://files2.world-architects.com/projects/23613/images/500:w/W71.jpg>

4.2

- Abbildung 1** **Schnürstoss mit gekreuzten Seilen** (Knippers, et al., 2010) S. 200
- Abbildung 2** **Schnürstoss mit gehäkelten Seilschlaufen** (Knippers, et al., 2010) S. 200
- Abbildung 3** **Klemmplattenstoss und Stoss mit zweiteiliger Kederschiene** (Knippers, et al., 2010) S. 200
- Abbildung 4** **Membranstoss mit Kederprofilen an einem Gratseil** (Knippers, et al., 2010) S. 201
- Abbildung 5** **versch. Arten von Nähten** (Knippers, et al., 2010) S. 199
- Abbildung 6 a-c** **biegeweiche Randausführungen** (Knippers, et al., 2010) S. 202-203
- Abbildung 7 a-c** **Biegesteife Randausführungen** (Knippers, et al., 2010) S. 204-205
- Abbildung 8** **Einfamilienhaus in Tokyo; F.O.B.A., Kioto** (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2000) S. 1011
- Abbildung 9** **Anschluss biegesteifer Rand auf Beton; Einfamilienhaus in Tokyo; F.O.B.A., Kioto** (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2000) S. 1010
- Abbildung 10** **Befestigung biegesteifer Rand an Stahlelementen – spannbar** (Seidel, 2003)
- Abbildung 11** **Befestigung biegesteifer Rand auf Stahlprofilen - nicht spannbar** (Seidel, 2003)
- Abbildung 12** **Befestigung biegesteifer Rand auf Beton - nicht spannbar** (Seidel, 2003)
- Abbildung 13** **Befestigung biegesteifer Rand auf Holz - nicht spannbar** (Seidel, 2003)

4.3

- Abbildung 1** **Übersicht Folienkissen nach Spannweite und Lagenaufbau nach** (Knippers, et al., 2010) S. 189
- Abbildung 2** **Schema schaltbare Mittellage nach** (Knippers, et al., 2010) S.190
- Abbildung 3** **Einfache Randklemmung** (Knippers, et al., 2010) S. 191
- Abbildung 4** **Varianten der Randklemmung nach** (Knippers, et al., 2010) S. 191
- Abbildung 5** **Gebälseeinheit mit Absorptionstrocknung** (Knippers, et al., 2010) S. 194
- Abbildung 6** **Luftversorgungssysteme nach** (Knippers, et al., 2010) S. 193
- Abbildung 7** **Offene Kissenecke mit unterbrochenem Keder** (Knippers, et al., 2010) S. 191

5.1.1

- Abbildung 1** **Klimazonen der Erde** (Hegger, et al., 2008) S. 260
- Abbildung 2** **Universitätsbibliothek King Fahad, Riad; Gerber Architekten, Dortmund** (Gerber Architekten)

5.1.2

- Abbildung 1** **Witterungsabhängigkeit von Membrankonstruktionen** (Knippers, et al., 2010) S. 215
- Abbildung 2** **Bauphysikalischen Besonderheiten von Folienkissen** (Knippers, et al., 2010) S. 215
- Abbildung 3** **Unterschiedliche Konvektion** (Knippers, et al., 2010) S. 216
- Abbildung 4** **Vertikalschnitt Membrandecke Olympiaschwimmhalle, München (D), Sanierung 2006, Auer + Weber + Assoziierte, Behnisch Architekten mit Schlaich Bergmann und Partner (Tragwerksplanung)** (Knippers, et al., 2010) S. 219
- Abbildung 5** **Flontex-System**
<http://www.flontex.ch/wDeutsch/waermedaemmung/index-25870.shtml>

- Abbildung 6** Funktionsprinzip TWD (Giselbrecht, 2002)
Abbildung 7 Aerogel-Vlies (AGI AG für Isolierungen)
Abbildung 8 Vorwärmen von frischer Luft (Giselbrecht, 2002)
Abbildung 9 Zirkulation der aufgewärmten Luft – Vermeidung von Überhitzung (Giselbrecht, 2002)
Abbildung 10 Vorwärmen zirkulierende Luft nachts (Giselbrecht, 2002)
Abbildung 11 Membranfassade als Klimahülle; temporäre Stadtteilverwaltung London; Lifschutz Davidson Sandilands (Detail Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2007)
Abbildung 12 Wandelbare Hülle; Le Zénith de Strassbourg – die Zeichnung wurde zur Verfügung gestellt von form TL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh

5.1.5

- Abbildung 1** membranumhülltes Gebäudesystem nach (Grunwald, 2007) S. 65
Abbildung 2 Diffusionswege nach (Grunwald, 2007) S. 66
Abbildung 3 Schema der Belüftungsmöglichkeiten nach (Grunwald, 2007) S. 68
Abbildung 4 Energieschemata
http://www.detail.de/www.detail.de/Db/DbFiles/plus_artikel/57/Energieschemata

- Abbildung 5** Einfamilienhaus in Santiago de Chile, FAR frohn & rojas, Santiago de Chile (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2008) S. 479
Abbildung 6 Einfamilienhaus in Santiago de Chile, FAR frohn & rojas, Santiago de Chile, Grundrisse (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2008) S. 478
Abbildung 7 Konzept zwiebelartiger Aufbau (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2008) S. 478 – 479

5.2

- Abbildung 1** Luna-Rossa-Teambase Valencia, Renzo Piano
http://www.mimoo.eu/images/1896_l.jpg
Abbildung 2 Aufsicht, Vertikalschnitt, Horizontalschnitt einschalige Membranfassade, Trainingshalle der Bergwacht, Gaißbach, Herzog + Partner, München (Knippers, et al., 2010) S. 261
Abbildung 3 Trainingshalle der Bergwacht, Innenansicht
<http://www.drk-eu.de/typo3temp/pics/19fab46644.jpg>
Abbildung 4 Trainingshalle der Bergwacht, Aussenansicht (Knippers, et al., 2010) S. 260

5.3

- Abbildung 1** Kastenfenster-Fassade (Knaack, et al., 2007) S. 31
Abbildung 2 Korridorfassade (Knaack, et al., 2007) S. 31
Abbildung 3 Schacht-Kasten-Fassade (Knaack, et al., 2007) S. 32
Abbildung 4 Rendering Unilever Zentrale, Hamburg
http://dreisechsnull.com/_img/unilever.jpg
Abbildung 5 Außenaufnahme Unilever Zentrale, Hamburg
<http://architekturblog.files.wordpress.com/2009/11/behnisch-unilever-hamburg.jpg>
Abbildung 6 Klimakonzept Unilever Zentrale, Hamburg (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2010) S.32

6

- Abbildung 1-2** Le Zénith, Parc de la Villette, Paris
 fotografiert von Philipp Wirth 2010
Abbildung 3-4 Le Zénith, Strassburg, Massimiliano Fuksas - die Bilder wurden zur Verfügung gestellt von form TL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh
Abbildung 5 Le Zénith, Strassburg, Massimiliano Fuksas, Konstruktionsschema - die Zeichnung wurde zur Verfügung gestellt von form TL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh

6.1

- Abbildung 1** Luftströmungen Doppelfassade – gezeichnet von der Autorin
Abbildung 2 Die drei Grundformen der Membranmodule (Grunwald, 2007) S. 100

6.1.1

Sämtliche Schemata gezeichnet von der Autorin

6.1.2

- Abbildung 1** Außenaufnahme Badeschiff, Berlin
http://www.berlin.de/orte/schwimmbad/badeschiff/Sauna_nachts_presse2_big_420_315.jpg
Abbildung 2 Innenaufnahme Badeschiff, Berlin
http://www.gil-wilk.de/index2.php?start_from=&archive=&subaction=showfull&id=1141665718&go=2&site=2&ucat=2

- Abbildung 3** Innenaufnahme Badeschiff, Berlin
http://www.gil-wilk.de/index2.php?start_from=&archive=&subaction=showfull&id=1141665718&go=2&site=6&ucat=2
- Abbildung 4** Konstruktionsstrategie Bögen (Kronenburg, 2008) S. 77
- Abbildung 5** Schnitt Badeschiff, Berlin, Wilk-Salinas Architekten BDA, Berlin (Kronenburg, 2008) S. 79
- Abbildung 6-8** Zeichnungen wurden zur Verfügung gestellt von B+W Architekten, Lausanne
- Abbildung 9-11** Fotografien & Rendering wurden zur Verfügung gestellt von B+W Architekten, Lausanne
- Abbildung 12-17** Alle Bilder und Zeichnungen (Detail -Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2008) S. 484-487
- Abbildung 18–21** Alle Bilder und Zeichnungen (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2000) S. 1002-1004
- Abbildung 22-24** Alle Bilder und Zeichnungen (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2007) S. 1140-1144

6.2.1

Sämtliche Schemata gezeichnet von der Autorin

6.2.2

- Abbildung 1-4** alle Bilder und Zeichnungen (Detail -Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2002) S. 1574-1577
- Abbildung 5-8** alle Bilder und Zeichnungen zur Verfügung gestellt von rpaX – rainer pirker architeXtur
- Abbildung 9-12** Alle Bilder und Zeichnungen (Knippers, et al., 2010) S. 268-269
- Abbildung 13** Außenaufnahme Gedenkstätte, Sachsenhausen, hg merz architekten museumsgestalter, Stuttgart / Berlin
<http://t0.gstatic.com/images?q=tbn:ytn86zID0zHWAM: http://www.bauforumstahl.de/typo3temp/pics/539487085f.jpg&t=1>
- Abbildung 14** Außenaufnahme Gedenkstätte, Sachsenhausen, hg merz architekten museumsgestalter, Stuttgart / Berlin
<http://www.mwfk.brandenburg.de/sixcms/media.php/1492/Sachsenhausen1.gif>

6.3

- Abbildung 1** Systemskizze nach Frei Otto gezeichnet von der Autorin
- Abbildung 2** Vertikalschnitt Mobiler Aktionsraum, raumlabor berlin, Berlin, plastique fantastique (Knippers, et al., 2010) S. 252
- Abbildung 3-4** alle Bilder (Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2009) S. 1336 – 1337
- Abbildung 5-9** alle Bilder und Zeichnungen (Kronenburg, 2008) S.37-39
- Abbildung 10** Luftschiff „Spirit of Dubai“
<http://www.newdesignworld.com/press/img/press/Palm-dubai-spirit-of-dubai.jpg>
- Abbildung 11-14** alle Bilder und Zeichnungen (Kronenburg, 2008) S. 65-67