

Walter Haase, Thorsten Klaus, Elias Knubben, Fritz Mielert,
Stefan Neuhäuser, Fabian Schmid, Werner Sobek

Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen

Mit Anl. 1. Recherchebericht:
Beispiele zur konstruktiven
Ausführung mehrlagiger gedämmter
Membranbauwerken

Anl. 2. Dokumentation:
Simulationstool für mehrlagige Aufbauten

F 2798

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8606-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag

Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen

Dr.-Ing. Walter Haase
M.A.Sc. Thorsten Klaus
Dipl.-Des. Elias Knubben
Dipl.-Ing. Fritz Mielert
M.Eng. Stefan Neuhäuser
Dipl.-Ing. Fabian Schmid
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Werner Sobek

April 2011



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Forschungsprojekt: Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen

Förderstelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn (Germany)

Förderkennzeichen: Z 6 – 10.08.18.7- 07.37 / II 2 – F20-07-043
Kostenneutral verlängert bis 30.04.2009
Ergänzungsantrag „DEUBAU“
1.11.2009 bis 31.03.2010
Kostenneutral verlängert bis 30.06.2010

Mitarbeit: Dr.-Ing. Walter Haase
M.A.Sc. Thorsten Klaus
Dipl.-Des. Elias Knubben
Dipl.-Ing. Fritz Mielert
M.Eng. Stefan Neuhäuser
Dipl.-Ing. Fabian Schmid
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Bearbeitungszeitraum: Januar 2008 - Juni 2010

Bearbeitungsstelle: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Werner Sobek
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart
Telefon 0711 / 685 63599
Telefax 0711 / 685 66968

Dieser Forschungsbericht umfasst 125 Seiten.

Stuttgart, 12.04.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Impressum	5
2	Danksagung.....	7
3	Vorwort.....	9
4	Einleitung	11
4.1	Projektziele	11
5	Anforderungen und Recherche.....	13
5.1	Recherche zum „State of the Art“	13
5.2	Anforderungen	17
5.3	Recherche neuer Materialien.....	17
5.4	Datenbank.....	19
5.4.1	Bestehende Datenbanksysteme	20
5.4.2	Anforderungen an die Datenbank.....	20
5.4.3	Spezifikation der umgesetzten Datenbank	20
5.4.4	Bedienung	23
5.4.5	Suche	25
5.4.6	Export von Daten.....	26
5.4.7	Maschineller Zugriff auf die Datenbank	28
5.4.8	Technische Bestandteile	31
6	Versuchsvorrichtungen und messtechnische Grundlagen.....	35
6.1	Grundlagen	35
6.1.1	Grundlagen des Wärmetransports	35
6.1.2	Heizkasten	35
6.1.3	U-Wert	35
6.2	Messstand und Proben zur Wärmedurchgangsermittlung.....	36
6.3	Messergebnisse.....	42
6.4	Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände und Wärmedurchgangskoeffizienten	51
6.4.1	Messungen und Auswertung	51
6.5	Strahlungstechnische Charakterisierung von Werkstoffen	56
7	Simulation	65
7.1	Grundlagen	65
7.2	Umsetzung.....	66
7.3	Simulationsergebnisse.....	71
7.3.1	Vergleich der U-Werte	71
7.3.2	Analyse von Hüllenaufbauten.....	75

8	Entwurf.....	82
8.1	Konzepte.....	82
8.2	Materialversuche.....	82
8.3	Untersuchungen zu Verbindungsmethoden und zur Funktionalisierung	83
8.4	Mock-Ups.....	85
8.4.1	Atmende Gebäudehülle.....	85
8.4.2	Solar-Duokollektor	86
8.4.3	Schaltbare Wärmedämmung.....	86
9	Zusammenfassung	90
10	Veröffentlichungen zur Ergebnisdarstellung	92
11	Ausblick.....	94
11.1	PROFAKU	94
11.2	Akustische Konditionierung von textilen Gebäudehüllen.....	94
12	Zusatzbeauftragung – Deubau und Bautec 2010	96
12.1	Das Exponat „Twister“	100
12.2	Das Exponat „Flow“	101
12.3	Das Exponat „Plusminus“	102
12.4	Das Exponat „PROFAKU“	103
13	Anhang	106
13.1	Herstellerverzeichnis	106
13.1.1	Hersteller von Folien und Geweben	106
13.1.2	Hersteller von Dämmstoffen	107
13.1.3	Hersteller adaptiver Werkstoffe	108
13.1.4	Sonstige.....	109
13.2	Spektrometrische Vermessung von Produkten	110
13.3	Spektrometrische Vermessung von Lagenaufbauten.....	115
13.4	Versuch beim Industriepartner	118
14	Literatur.....	124

1 Impressum

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Verantwortlich für die redaktionelle Bearbeitung und die inhaltliche Gliederung zeichnet Dr.-Ing. Walter Haase.

2 Danksagung

Die Förderung des Projekts erfolgte durch Mittel der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Aktenzeichen: Z 6 - 10.08.18.7-07.37 / II 2 – F20-07-043).

Dank gilt insbesondere Herrn Dr. Brüggemann, Herrn Architekt Hagel sowie Herrn Dr. Simon für ihre wertvollen Hinweise und die Begleitung des Vorhabens.

Besonderer Dank gilt auch dem Industriepartner Verseidag-Indutex GmbH.

3 Vorwort

Bei der Bearbeitung der Thematik des Forschungsprojekts wurde festgestellt, dass im Gegensatz zu den Erwartungen, faktisch keinerlei Grundlagen im Bereich der bauphysikalischen Evaluierung (Software, Materialdatenbanken, Messmethodik) verfügbar sind, auf deren Basis die Forschungsanstrengungen hätten aufbauen können. Wissen im Bereich des Membranbaus ist überwiegend konzentriert bei privatwirtschaftlich agierenden Ingenieurbüros oder Firmen, die jeweils verständlicherweise sehr darauf achten, eigenes Know-how nicht zu verbreiten.

Es gibt sicherlich sehr viele Veröffentlichungen und auch Normen im Bereich der bauphysikalischen Bewertung und Vermessung von herkömmlichen Wandaufbauten (Wärmedämmverbundsysteme, Massivbauwände oder Holzständerbauvarianten mit Zwischendämmung), nicht jedoch fundamentale Beschreibungen der Herangehensweise für die zu entwickelnden Mehrlagensysteme aus Folien und Textilien. Bei diesen spielt neben der Wärmeleitung und dem konvektiven Wärmestrom die Wärmeübertragung durch Strahlungsvorgänge zwischen den einzelnen Oberflächen der Lagen eine große und teilweise entscheidende Rolle für deren wärmetechnisches Verhalten.

Dies hatte zur Folge, dass aufbauend auf den tatsächlichen physikalischen Vorgängen und dabei einer vollständigen Beschreibung sowohl der Wärmeleitungsvorgänge in den Werkstoffen wie auch des Strahlungsaustausches und der konvektiven Wärmeleitungsvorgängen die Entwicklung von Berechnungsalgorithmen durchzuführen war. Der Strahlungsaustausch ist dabei vollständig zu beschreiben, also mit den Transmissions-, den Reflexions-, den Absorptionsanteilen bei Außenbestrahlung beispielsweise durch die Sonne (Wellenlängenbereich von 200 nm bis 2500 nm) wie auch für die wärmestrahlungstechnischen Vorgänge im Wellenlängenbereich von etwa 3.5 μm bis ca. 50 μm . Auch in diesem Frequenzbereich gilt es, die Effekte der Transmission, Reflexion und der Absorption zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Eigenabstrahlung jeder einzelnen Lage des Aufbaus zu berücksichtigen. Im Rahmen des Projekts nun konnten entsprechende Algorithmen erstellt werden, die die Grundlage für eine Software zur wärme- und feuchtetechnischen Analyse von unterschiedlichen Mehrlagenaufbauten bilden. Diese Algorithmen wurden unter einer Bedienoberfläche integriert und als Werkzeug zur Analyse bereitgestellt.

Dieselbe Problematik, die bezüglich der Simulation durch den Einfluss von Konvektion und Strahlung auftritt, besteht auch im Bereich der messtechnischen Evaluierung von unterschiedlichen Lagenaufbauten im Heizkasten (Hotbox). Dort wirkt sich die von den Seitenwänden emittierte Wärmestrahlung ebenfalls auf den Gesamtenergiedurchgang durch die Lagen aus. Dieser Anteil ist aber messtechnisch nicht einfach zu erfassen. Das übliche Verfahren bei der Hotboxmessung, nämlich durch die Leistungsmessung der eingetragenen Wärmeleistung in die Messbox auf den Energiefluss durch die Probe zu schließen, funktioniert demnach ebenfalls nicht so, dass belastbare Ergebnisse für die U-Werte zustande kommen. Dies hatte zur Folge, dass mehrmals der Innenaufbau der Hotbox und die Messmethode verändert und angepasst werden musste. Dieser Prozess ist noch nicht abgeschlossen, trotz mittlerweile erreichter guter Messgenauigkeiten.

Zudem ist aus den obigen Ausführungen offensichtlich, dass die verwendeten Werkstoffe in einer Weise charakterisiert werden müssen, wie dies üblicherweise bei den Herstellern und auch den Verarbeitern nicht bekannt ist. Es sind die strahlungstechnischen, die wärmeleitungstechnischen Kennwerte und auch die feuchtetechnisch relevanten Daten zu ermitteln beziehungsweise abzuschätzen, um Simulationen zielführend durchführen zu können. Die Ermittlung der vollständigen Daten erfolgt teilweise projektbezogen und auf Veranlassung unterschiedlicher Planungsbeteiligter. Eine allgemeinverfügbare Datenbasis für Werkstoffe des textilen Bauens, die Anspruch auf Vollständigkeit erheben könnte, ist derzeit nicht bekannt.

Das im Projektrahmen beschaffte messtechnische Equipment konnte zur Ermittlung strahlungstechnischer Daten eingesetzt werden. Es erwies sich jedoch, dass für transparente Werkstoffe wie

Folien aus Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) die Fehler bei der Bestimmung der Emissivitätskennwerte im Infrarotstrahlungsbereich zu groß waren. Um die nötigen Charakterisierungen mit entsprechender Genauigkeit durchführen zu können, war es gegen Ende der ursprünglichen Projektlaufzeit und in der Verlängerungsphase möglich, entsprechende Messtechnik (Spektrometer für Bereiche von UV bis IR) am Institut bereitzustellen (Spektrometer (UV, VIS, NIR, IR). Die nötige Erfahrung zur Ermittlung der Kennwerte wurde dabei im Laufe diverser Messreihen erworben und konnte für das Projekt genutzt werden.

4 Einleitung

In diesem Bericht werden die Arbeiten und erreichten Ziele des Forschungsprojekts „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“ dargestellt.

4.1 Projektziele

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer modularen, mehrlagigen, textilen Gebäudehülle mit adaptiven Eigenschaften. Die zu entwickelnden Systeme sollten umsetzbar sein als vorgespannte Membranstrukturen, aber auch als Ersatz für herkömmliche Wand- und Deckenaufbauten im Hochbau.

Eine solche Hülle sollte fähig sein, sich an verändernde Umgebungsbedingungen und Nutzungsanforderungen unter Verwendung eines minimalen Materialeinsatzes anzupassen. Diese Funktionalität sollte durch den Einsatz neuer Materialien, Beschichtungen und durch die Entwicklung sinnvoller Lagenaufbauten erreicht werden. Durch den Einsatz und die Kombination effektiver Materialien galt es, effiziente System für den Einsatz als zukünftige Hüllenelemente zu entwerfen und in Musteraufbauten umzusetzen.

Zunächst galt es, im Arbeitspaket 1 im Rahmen einer Recherche den Stand der Technik im Bereich der konstruktiven Ausführungen mehrlagiger textiler Konstruktionen zu ermitteln. Daneben stand die Ermittlung relevanter Werkstoffe im Fokus der Bearbeitung. Auch die Definition der zu erreichenden wärmetechnischen Kennzahlen von Hüllenaufbauten war Bestandteil der Forschungsarbeit.

Auf der Basis der Material- und Konstruktionsrecherche sollte im Arbeitspaket 2 die Entwicklung von Systemkonzepten für textile mehrlagige Hüllenaufbauten erfolgen. Wichtiges Werkzeug hierfür sollte ein Berechnungsprogramm darstellen, das in diesem Arbeitsblock zu erstellen war. Durch Materialcharakterisierung waren wichtige strahlungstechnische Kennwerte relevanter Werkstoffe zu bestimmen, um anschließend Simulationen von Hüllenaufbauten durchführen zu können.

Im dritten Arbeitspaket sollte die Umsetzung der Ideen durch die Herstellung von Musterelementen und -aufbauten sowie deren Charakterisierung erfolgen. Auch galt es, Aufbauten anhand der Messergebnisse an Mustern zu optimieren.

Die abschließende Dokumentation war Aufgabe des Arbeitspaketes vier. Dabei sollte der Vergleich zwischen der Simulation und der Vermessung diskutiert und Empfehlung für sinnvolle Hüllenaufbauten gegeben werden.

Im Rahmen der Bearbeitung wurde festgestellt, dass auf Grund der notwendigen sehr grundlegenden Herangehensweise zur Erstellung des Simulationsprogramms ein deutlich größerer Arbeitsaufwand als vorgesehen für diese Projektaufgabe nötig sein würde. Zudem war nach der Produktrecherche ersichtlich, dass alle für die wärme- und feuchtetechnische Simulation von Hüllenaufbauten nötigen Kennwerte nicht zur Verfügung stehen würden.

Beide Aspekte führten in Abstimmung mit dem Projektträger und den projektbegleitenden Beratern zu einer Schwerpunktverlagerung der Aufgabenstellung hin in Richtung Grundlagenerarbeitung (Sammlung von Material- und Produktdaten, Erstellung des Simulationsprogramms, Optimierung der Messtechnik, konzeptionelle Erarbeitung von Hüllenkonzepthen) und der Datenbankstrukturierung.

5 Anforderungen und Recherche

Zunächst erfolgte eine Recherche, die sich in drei Bereiche gliederte. Im Bereich „State of the Art“ wurde die momentane Situation im Bereich des Bauens mit mehrlagigen textilen Hüllen anhand von Beispielen ausgeführter Gebäude analysiert. Aus dieser Recherche ist ein Forschungsbericht hervorgegangen, der die zusammengetragenen Gebäudebeispiele erläutert [1]. Der Bereich „Anforderungen“ definiert die grundlegenden Eigenschaften, die eine textile Hülle erfüllen muss. Im Bereich „Neue Materialien“ werden Materialien aufgeführt, die für den Einsatz im Mehrlagenaufbau als ausgesprochen interessant erscheinen.

5.1 Recherche zum „State of the Art“

Bisher war der Einsatz von textilen Außenhüllen als vollwertige Klimahüllen für eine dauerhafte Nutzung häufig mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Diese rührten daher, dass sich die einzelnen fundamentalen Ansprüche des textilen Bauens in den Bereichen der Bauphysik, der Transluzenz, der Flexibilität und der Mobilität der Hüllen nicht gleichzeitig und in einem Lagenaufbau erfüllen ließen. Eine Übertragung von etablierten Werkstoffen zur Dämmung (z.B. Mineralfaserdämmung) führt beispielweise zu einem Verlust der Transluzenz. Weitgespannte Membranhüllen zeigen unter äußeren Lasten deutliche Verformungen, auf die der gesamte Lagenaufbau und insbesondere die Dämmung ausgelegt sein müssen. Entscheidend für die Funktionsfähigkeit der Hülle ist dabei die Vermeidung der Gefahr einer dauerhaften Durchfeuchtung der Dämmung [1].

Eine Übersicht der recherchierten Bauwerke mit mehrlagigen Gebäudehüllen ist in Tabelle 1 dargestellt. Im entsprechenden Bericht [1] werden die aufgeführten Bauten im konstruktiven Aufbau beschrieben und diskutiert.

Bei einigen der recherchierten Gebäude trat während der Nutzung das Problem der Durchfeuchtung der Dämmung infolge von Kondensatbildung auf. Die Feuchtigkeit ist dabei entweder aus dem Innenbereich in die Dämmlagen diffundiert und konnte dort nicht mehr nach außen abtrocknen, oder stammte aus der Kondensatbildung auf den äußeren Membranlagen selbst. Verantwortlich für den letztgenannten Effekt ist die große nächtliche Abkühlung der Membranlagen verursacht durch den Strahlungsaustausch mit dem kalten Nachthimmel. Die Oberflächentemperaturen der Membranen können dabei deutlich unter die Umgebungstemperatur und die Wasserdampfsättigungstemperatur der Luft sinken. Dies führt zur flächenhaften Kondensierung von Wasser aus der Luft auf den Oberflächen der Hüllen. Sofern diese Feuchtigkeit in die Dämmlagen gelangen kann, besteht die Gefahr der Durchfeuchtung der Dämmung. Eine geeignete Maßnahme, um dies zu verhindern, ist eine Abstufung der Wasserdampfdiffusionsdichte der Membran- und Folienlagen von dichteren zu weniger dichten Lagen beim Durchgang von innen nach außen der Hüllenaufbauten. Die kontrollierte Lüftung der Dämm- und Luftzwischenräume bei Mehrlagenaufbauten ist ebenfalls geeignet, um den Feuchteabtransport zu gewährleisten. Zudem bewirken nach außen orientierte Beschichtungen zur Reduzierung des Emissionskoeffizienten der Oberflächen, die im Strahlungsaustausch mit dem Nachthimmel stehen, eine geringere Abkühlung der Oberflächen, verbunden mit einer Reduktion der Kondensatbildungsgefahr. Diese Beschichtungen verringern jedoch derzeit ebenfalls noch die Transluzenz der beschichteten Gewebe.

Häufig werden textile Bauten im Bereich temporärer Nutzungen eingesetzt [2]. In den letzten Jahren gab es verstärkt Bestrebungen, neueste Entwicklungen aus der Textilindustrie im Bereich des textilen Bauens einzusetzen. Auch hier liegt der Fokus auf Nutzungen wie Schutzbauten ohne Dämmfunktion (Gedenkstätte „Station Z“, [3]) oder Verkehrsinfrastrukturbauten wie dem Flughafen Bangkok [4,5]. Beim Hüllenaufbau der Membranbereiche der Zubringer des Flughafens ist beispielweise die Symbiose gelungen, die Anforderungen bezüglich Wärmedämmung, Akustik und Transluzenz in einem Hüllenaufbau zu erfüllen. Dies stellt eine wesentliche Erweiterung bisheriger Konzepte mit opaken und herkömmlichen Dämmstoffen und Diffusionssperrfolien im Lagenaufbau von Membranhüllen dar.

Parallel zu diesen realisierten Bauten gibt es die Bestrebung, durch gezielte Beforschung der Thematik textile Hüllen soweit zu verbessern, dass sie auch für Wohn- und Büronutzungen einsetzbar werden [2,6,7]. Dabei stehen eine geeignete Integration von wärmedämmenden Schichten [7,8], die Entwicklung von Beschichtungen [6] für textile Träger und die Implementierung von Funktionsmaterialien [7,8] im Vordergrund.

Mehrlagige Membranbauwerke

Nr.	Name	Standort	Jahr der Fertigstellung	Eigentümer / Auftraggeber	Architekt (Membrane)	Ingenieur (Membrane)	Bauphysik	Konfektionär	Wärmedämmsystem	Nutzung	ÜGF	Außenmembran	Innenmembran	Wärmedämmung	Transluzenz
1	Olympia Schwimmhalle	München, Deutschland	1972	nicht bekannt	Behnisch und Partner, Stuttgart, Deutschland	Schlaich Bergemann und Partner, Stuttgart, Deutschland	Dr. Grah (Umbau)	nicht bekannt	Einlagig gedämmt unter Seilnetz mit Acrylglas	Schwimmbad	8200 sqm	-	PES/PVC	Mineralwolle, nach Umbau PES Vlies	derzeit 0% nach Umbau ca. 2%
2	Cuppamare	Kuppenheim, Deutschland	1978	Stadt Kuppenheim, Deutschland	Linecker, Mattighofen, Österreich	n.b.	nicht bekannt	Zimmermann Zeltbau, Deutschland	5 Membranlagen mit Durchlüftung	Schwimmbad	1600 qm	PES/PVC	PES/PVC	Teflonfolien als Luftpolster 3-lagig	0%
3	TOM Dortmund	Dortmund, Germany	1978	nicht bekannt	nicht bekannt	IPL, Radolfzell, Deutschland	nicht bekannt	Stromeyer, Konstanz, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Eisbahn jetzt Diskothek	2300 sqm	Glas/PTFE	PES/PVC	Mineralwolle 50 mm, nach Umbau 80 mm	0%
4	Denver International airport	Denver, USA	1994	City of Denver, USA	C.W.Fentress, J.H.Bradburn and Associats, P.C.	Severud Associates Consulting Engineers P.C., USA	nicht bekannt	Taiyo Kogyo, Japan	Zweilagig	Flughafen	23250 sqm	Glas/PTFE SHEERFILL IIA	Glas/PTFE FABRASORB II Akustikmembrane	nicht vorhanden	10%
5	Kurklinik Masserberg	Masserberg, Deutschland	1994	Rennsteig Kur- und Touristik GmbH, Deutschland	Laurens Schneider-Zimmerhackl IPL, Radolfzell Germany	IPL, Radolfzell, Deutschland	Büro Paul Schröder	Canobbio SPA, Italien	Zweilagig gedämmt	Freizeitbereich und Schwimmbad	3300 sqm	PES/PVC (Verseidag)	PES/PVC (Verseidag)	Mineralwolle 2x 80 mm	0%
6	Buddy Holly Musical Dome	Hamburg, Deutschland	1994	Buddy KG, Deutschland	IPL, Radolfzell, Deutschland	IPL, Radolfzell, Deutschland	MMS, Wuppertal	Sarnafil AG, Schweiz	Zweilagig	Musical Dome	5000 sqm	PES/PVC	PES/PVC	nicht vorhanden	0%
7	Gaudi Musical Dome	Köln, Deutschland	1996	Musical Dome Verwaltungs-und Betriebs GmbH, Deutschland	K.Latuske	IPL, Radolfzell, Deutschland	MMS, Wuppertal	Sarnafil AG, Schweiz	Zweilagig gedämmt	Musical Dome	4000 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Mineralwolle 160 mm	0%
8	Odate Jukai Dome Park	Odate, Japan	1997	Stadt Odate, Japan	Toyo Ito & Associates, Tokio, Japan	Takenaka Corp., Tokio, Japan	nicht bekannt	Taiyo Kogyo Corp., Japan	Zweilagig	Stadion	21911 sqm	Glas/PTFE	Glas/PTFE	nicht vorhanden	
9	Millenium Dome	Greenwich, UK	1998	The New Millennium Experience Company Limited, UK	Richard Rogers Partnership, London UK	Buro Happold, Bath, UK	BDSP, London, UK	Birdair	Zweilagig	Veranstaltungsgebäude	80425 sqm	Glas/PTFE	Glas/PTFE	nicht vorhanden	12%
10	Tabaluga Musical-Theater	Oberhausen, Deutschland	1999	TheatrO. CentrO, Deutschland	RKW Architektur und Städtebau, Oberhausen Germany	Ingenieurbüro Teschner, Kosel, Deutschland	nicht bekannt	CENO TEC, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Musical Dome	4560 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Mineralwolle 150 mm	0%
11	Kulturzentrum Puchheim	Puchheim, Deutschland	1999	Gemeinde Puchheim, Deutschland	LAI Lanz Architekten + Ingenieure, München, Deutschland	Tensys, Bath, UK	Transsolar, Stuttgart	Koch Hightex, D Flontex, Deutschland	Zweilagig gedämmt mit zusätzl. Schallschutz	Veranstaltungsgebäude	1000 sqm	Glas/PTFE	Glas/PTFE	Mineralwolle 180 mm	0%
12	Atriumsüberdachung Schöllerbau	Wien, Österreich	2000	Schöllerbau	Jabornegg Palfy, Wien, Österreich	Karlheinz Wagner, Wien, Österreich		Skyspan GmbH, Deutschland	Dreilagig	Atrium	270 sqm	ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
13	Tegut	Fulda, Deutschland	2000	Tegut Supermarkt, Deutschland	Günter Peichl, Fulda Germany	Ingenieurbüro Teschner, Kosel, Deutschland	nicht bekannt	CENO TEC, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Supermarkt	1837 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Vlies	0%
14	Storek	Leonberg, Deutschland	2000	Heidrun Storek / Varia Küchen, Deutschland	Architekturbüro Rasch + Bradatsch, Stuttgart, Deutschland	Büro Happold, Berlin, Deutschland	nicht bekannt	Birdair	Dreilagig gedämmt	Ausstellungsraum	900 sqm	PES/PVC	Glas/Silikon	PES Vlies 80+40 mm	0%
15	Cargolifter Halle	Brand, Deutschland	2000	Cargolifter AG, Deutschland	SIAT GmbH, München, Deutschland	IPL, Radolfzell, Deutschland	Umbau MMS, Wuppertal	Birdair	Vierlagig	Werfthalle / Tropischer Freizeitpark	66000 sqm	PES/PVC PES/PVC	PES/PVC PES/PVC	nicht vorhanden	2%
16	Eden Project	St. Austell, Cornwall, UK	2001	The Eden Project, UK	Nicholas Grimshaw	Anthony Hunt and Associates	Van Vliet Automation Ltd., Niederlande	Vector Foiltec, Deutschland	Dreilagig	Gewächshaus	22140 sqm	ETFE	ETFE	nicht vorhanden	84%
17	Festo Technologiezentrum	Esslingen, Deutschland	2001	Festo AG & Co.	Architekturbüro Jaschek, Stuttgart, Deutschland	Ingenieurbüro IPL, Radolfzell, Deutschland			Dreilagig	Atrium		ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
18	TMZ Erfurt	Erfurt, Deutschland	2001	nicht bekannt	Pohl Architekten, Jena, Deutschland	Pohl Architekten, Jena, Deutschland	Schmidt Reuter Partner, Erfurt	Flontex, Deutschland	Einlagig gedämmt	Bürogebäude	nicht bekannt	Glas/PTFE	Glas/PTFE	Glasgespinst 100 mm	ca. 15 - 20%
19	Villa Arena	Amsterdam, Niederlande	2001	ING Vastgoed Ontwikkeling BV, Niederlande	Bentham Crouwel, Niederlande			Skyspan GmbH, Deutschland	Zweilagig	Atrium	3890 sqm	ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
20	Parkbad Velbert	Velbert, Deutschland	2002	Stadtwerke Velbert, Deutschland	Dr. Krieger Architekten und Ingenieure, Deutschland	IPL, Radolfzell, Deutschland	CCD Bautechnik	Koch Membranen, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Schwimmbad	700 sqm	PES/PVC Type IV mit PVDF, Ferrari Précontraint 1302 Series 8000	PES/PVC Type II mit Acryl, Ferrari Précontraint Series 1002	PES Vlies 2x120 mm	0%
21	Papageno Kindertheater	Frankfurt, Deutschland	2003	Maienschein, Deutschland	Felicitas Mossmann, Deutschland	Dr. Greiner, Oberaichen, Deutschland	Dr. Grah	covertex, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Theater	630 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Mineralwolle 100 mm	0%
22	Allianz Arena	München, Deutschland	2005	FC Bayern München AG	Herzog & de Meuron, Basel, Schweiz	Arup Ltd.		Covertex GmbH, Deutschland	Zweilagig	Stadion		ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
23	Flughafentower Wien	Wien Schwechat, Österreich	2005	Flughafen Wien	Zechner & Zechner Wien, Österreich	Peter Mandl, Graz; form TL, Radolfzell	Labor Blum, Stuttgart	KIM, Wailhausen, Österreich	Einlagig	Fassade		Glas/PTFE	Glas/PTFE	nicht vorhanden	
24	New Bangkok Airport	Bangkok, Thailand	2005	NBIA New Bangkok International Airport Co. Ltd., Bangkok TJ	Murphy/Jahn, Chicago, USA	Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart, Deutschland	Transsolar, Stuttgart	Hightex, Deutschland	Zweilagig mit zusätzlicher Polycarbonatplatte	Flughafen	108000 sqm	Glas/PTFE	Glas/Silikon	nicht vorhanden	2%
25	Stazion Z	Sachsenhausen, Deutschland	2005	Stadt Bernau, Deutschland	hg Merz, Berlin, Deutschland	Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart, Deutschland			Zweilagig	Gedenkstätte		Glas/PTFE	Glas/PTFE	nicht vorhanden	
26	Modern Teahouse	Frankfurt, Deutschland	2007	MAK Frankfurt	Kengo Kuma, Japan	form TL, Radolfzell, Deutschland			Zweilagig	Teehaus		PTFE Gewebe / Fluor Folie	PTFE Gewebe / Fluor Folie	nicht vorhanden	38%
27	Schulungszentrum der Bergwacht Bayern	Bad Tölz, Deutschland	2008	Bergwacht Bayern	Herzog + Partner, München, Deutschland	Sailer, Stepan + Partner, München, Deutschland			Zweilagig	theoretische und praktische Schulung		ETFE	ETFE	nicht vorhanden	

Tabelle 1: Zusammenstellung einiger mehrlagiger, gedämmter Membranbauwerke. Entnommen aus [1] und ergänzt.
Alle Angaben ohne Gewähr

5.2 Anforderungen

Die Anforderungen an eine textile Hülle orientierten sich an den zu Projektbeginn geltenden und geplanten Bestimmungen wie beispielsweise dem „Entwurf der Energieeinsparverordnung 2009 [9]. In ihr sind Anforderungen bezüglich der maximalen U- und g-Werte für Dach- und Wandelemente enthalten. Da textile Hüllen im Projekt sowohl als opake, transluzente wie auch als transparente Ausführungen beforcht werden sollten, war neben der Definition der wärmetechnischen Kennwerte für opake oder transparente Dächer und Wände auch die Festlegung für transluzente Bauteile sinnvoll. In einem ersten Ansatz erfolgte für solche Hüllenaufbauten die Festlegung der Maximal- und Minimalwerte für den U-Wert, den g-Wert und die Transmission (τ) auf der Basis einer linearen Interpolation.

In Tabelle 2 sind die Vorgaben und Annahmen aus dem Entwurf zur Energieeinsparverordnung aufgestellt und beispielhaft die U- und g-Werte für Hüllen mit einer Transluzenz von 10% interpoliert. Dabei folgen die Daten soweit möglich den Vorgaben für Wohngebäude. Wo dies aufgrund fehlender Angaben nicht möglich war, wurde auf Vorgaben und Annahmen für Nichtwohngebäude zurückgegriffen.

		Wand			Dach		
		Opak (Außenwand)	Translu- zent (interpo- liert)	Transpa- rent (Fenster)	Opak (Dach)	Translu- zent (interpo- liert)	Transpa- rent (Glas- dach)
Parameter	Lichttransmissionsgrad	0,00	0,10	0,78	0,00	0,10	0,76
	Max. U-Wert [W/(m ² K)]	0,35	~ 0,55	1,90	0,35	~ 0,66	2,70
	Max. g-Wert	--	~ 0,08	0,60	--	~ 0,08	0,63

Tabelle 2: Bauphysikalische Zielvorgaben.
Abgeleitet aus dem Entwurf der EnEV 2009

5.3 Recherche neuer Materialien

Um die komplexen bauphysikalischen und technischen Anforderungen umzusetzen, müssen beim Entwurf von textilen Gebäudehüllen mehrere Lagen aus Materialien mit den entsprechenden Eigenschaften kombiniert werden. Dabei sollen neue und innovative Methoden und Materialien zum Einsatz kommen. Die Recherche nach neuen Materialien erfolgte über Kontakte mit verschiedenen Herstellern und hat interessante Einblicke in neue Entwicklungen, die derzeit in der Industrie vorangetrieben werden, ermöglicht. Nachfolgende Tabelle 3 und Tabelle 4 enthalten die recherchierten Produkte und deren Hersteller. Im Anhang ist das entsprechende Herstellerverzeichnis zu finden, welches keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

An dieser Stelle soll der Hinweis auf die entsprechenden Verzeichnisse der „Tensinet Association“ [22], des „Netzwerkes“ im Bereich vorgespannter Membrantragwerke, nicht fehlen.

Hersteller	Produkt	Einsatz
3M	Sonnenschutzfilme	Selektive Transmission, Reflexion von Wärmestrahlung
Cabot Corp	Aerogel-Vlies	Wärmedämmung
Müller Textil	Abstandsgewebe (ASG) mit großen Dicken	Luftkollektoren, Temperierung, Wärmedämmung
Ceno Tec, Dyneon, Nowofol,	ETFE-Folie	Dampfsperre/Membranmaterial
Sandler	Polyestervlies	Wärmedämmung
SCC	drapierbares Silikongewebe	extreme Geometrieänderungen der Oberfläche
SCC	Folien mit selektiven Beschichtungen	Filterung von Wärmestrahlung
Sefar	leitfähige Gewebe	Stromversorgung, Datentransfer
Sika	Verbindungstechniken	konstruktive Anbindung von Membranen
Verseidag	Gittergewebe	Ableitung von Lasten
Mehler, Sioen, Verseidag	PVC-beschichtetes Polyester-gewebe (PVC/PES)	Membranmaterial, Außen- und Innenhüllen
Ceno Tec, Saint-Gobain, Verseidag	PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe (PTFE/Glas)	Membranmaterial, Außen- und Innenhüllen
Ceno Tec, Saint-Gobain,	Silikonbeschichtetes Glasfasergewebe	Membranmaterial
Verseidag	Low-E-Beschichtungen	Reduzierung der Abstrahlung im Ir-Bereich, erhöhte Reflexion im solaren Spektrum
Wacotech	Glasfaser(GF-)gespinst	Wärmedämmung bei entsprechender Modifizierung

Tabelle 3: Nicht adaptive Materialien

Hersteller	Produkt	Einsatz
BASF	Phase Change Materials (Latentwärmespeicher-Materialien)	Ausgleich von Temperaturschwankungen, Wärmepufferung
LBM-Fasertechnik	Gewebe mit integrierten Lichtleitern	Beleuchtung, medialer Effekt
Du Pont, Metalor, Ormecon	Werkstoffe für Elektrolumineszenz	Beleuchtung
Sefar	Gewebe mit integrierten Sensoren	Überwachung von Raumklima und/oder statischer Belastung
Sefar	Gewebe mit integrierter Widerstandsheizung	Temperierung, Strahlungsheizung
Sefar	Gewebe mit integrierten LEDs	Beleuchtung
Sika	Abdichtungsbahnen mit Photovoltaik	Energiegewinnung
Textile Testing	in Vliese eingebettete Phase Change Materials	Ausgleich von Temperaturschwankungen
VHF-Technologies	transluzente Dünnschicht-Photovoltaik	Energiegewinnung

Tabelle 4: Adaptive/smarte Materialien

5.4 Datenbank

Die allgemeine Produktvielfalt im Bereich der Gebäudehülle steigt kontinuierlich. Die Archivierung und Vergleichbarkeit der Produkte wird zunehmend komplexer. Entsprechend erschwert sich die Suche nach den geeigneten Produkten für die jeweilig definierten Anforderungen. Dies liegt neben der hohen Anzahl der zur Verfügung stehenden Produkte auch an der Bandbreite unterschiedlichster Technologien, auf denen Produktneuentwicklungen basieren. Einige dieser Technologien werden sich zukünftig gegen andere durchsetzen können. Ebenso sind Anforderungsprofile, nach denen Produkte bewertet werden, stets neu zu definieren und stehen in Wechselbeziehung mit aktuellen Trends und vorherrschenden Regelwerken.

Im Hinblick auf diese dynamischen Grundvoraussetzungen wurde für die Produktverwaltung eine flexible, internetbasierte Datenbank zur Ordnung der Rechercheergebnisse und der Charakterisierungen entwickelt, die optimal auf die beschriebenen Bedingungen zugeschnitten ist. Besonderes Interesse bestand an der Entwicklung einer Struktur zur Aufnahme und Verwaltung von Daten innovativer Produkte, die oftmals sehr spezifisch und somit komplex in der allgemeinen Datenerfassung sind. Die Datenbankprogrammierung erfolgte in Ergänzung der im Projekt definierten Aufgaben als Leistung des Projektbearbeiters.

Insbesondere innovative, nicht genormte Produkte sind nur von einem Hersteller verfügbar oder unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller stark. Auch bei Kenntnis der Inhaltsstoffe eines Produkts und ihrer mengenmäßigen Anteile führen nicht genormte Herstellungsverfahren zu zum Teil sehr unterschiedlichen Produkteigenschaften. Deshalb wurde beschlossen, die Datenbank explizit auf Produkte auszurichten und nicht den allgemeineren Ansatz einer Materialdatenbank zu verfolgen.

Als Produkt wird im Folgenden ein Artikel verstanden, der von einem bestimmten Hersteller stammt. Dieser ist durch einen Code des Herstellers (z.B. „B 1010 286“ für ein bestimmtes PVC-beschichtetes Polyester-Gewebe von Verseidag Indutex GmbH) eindeutig identifizierbar. Der Begriff „Material“ wird hier als Oberbegriff für verschiedene Produkte und Produktvarianten verschiedener Hersteller verwendet (PVC-beschichtetes Polyester-Gewebe, Typ II).

Derzeit sind in der Datenbank ca. 100 Produkte eingepflegt. Hierbei handelt es sich vorrangig um Produkte, die für Lagenaufbauten von textilen Gebäudehüllen interessant sind (Membranen, Gittergewebe, Folien, Vliesstoffe, Abstandsgewebe). Es ist vorgesehen, die Datenbank kontinuierlich zu erweitern und auf aktuellem Stand zu halten.

5.4.1 Bestehende Datenbanksysteme

Im Internet finden sich eine ganze Reihe von Material- und Produktdatenbanken, die mehr oder weniger öffentlich zugänglich sind. Diese lassen sich grob in die drei im Folgenden beschriebenen Kategorien einteilen.

Datenbanken für Architekten und Designer [10],[11],[12] beschränken sich in der Regel auf qualitative Aussagen über Produkte und Materialien. So werden Produkte z.B. als „weich“ oder „flexibel“ charakterisiert, ohne eine objektive Aussage zu treffen. Eine Ausnahme bildet hier das „Material Archiv“ [11], in dem Materialien qualitativ und quantitativ erfasst werden, welches sich aber, wie der Name schon sagt, auf Materialien beschränkt und keine konkreten Produkte beinhaltet.

Datenbanken für Ingenieure [13],[14] erfassen hauptsächlich genormte Stoffe und Halbzeuge und beschränken sich dabei in der Regel auf einzelne Fachthemen, wie Polymere. Sie sind recht gut durchsuchbar, aber durch ihre fachliche Spezialisierung nicht im Bereich der Bauwirtschaft einsetzbar, da für das Bauwesen relevante Eigenschaften nicht integriert sind. Die Datenbank Masea [<http://www.masea-ensan.de>] erfasst zwar Materialien zur energetischen Altbausanierung und ist damit auf die Bauwirtschaft zugeschnitten, ist aber – zumindest über die Weboberfläche – nur mittels baumartiger Kategorien durchsuchbar und somit schwierig zu handhaben.

Datenbanken von Online-Vertrieben erfassen Produkte mit qualitativen und quantitativen Attributen und sind dadurch sehr gut durchsuchbar. Die starke Verkaufsorientiertheit macht diese Datenbanken für eine objektive Bewertung problematisch.

5.4.2 Anforderungen an die Datenbank

Ziel der Datenbankentwicklung war es, diese mit maximaler Flexibilität und Erweiterbarkeit auszustatten. Bezüglich der Leistungsfähigkeit sollte das System weitaus effizienter als andere Produktablagensysteme sein, die beispielsweise auf einfachen Excel-Tabellen basieren. Die Datenbank sollte so ausgelegt werden, dass Anwendern eine maximale Freiheit beim Anlegen von Produkten gewährt wird. So sollte der Nutzer - solange er die notwendigen Rechte besitzt - numerische oder textbasierte Attribute, Schlagworte, Kategorien, Bilder und Dokumente erstellen und Produkten zuweisen können. Diese erhöhte Flexibilität der Datenerfassung gegenüber existierenden Datenbanken wie Baustoffdatenbanken [15] oder kategoriespezifischen Datenbankstrukturen [16], bedingt sich aus der Vielzahl von Produkten unterschiedlicher Kategorien innerhalb der Fassadenkonstruktion.

Speziell innovative Produkte, deren Anwendungsgebiete noch nicht gänzlich spezifiziert worden sind oder die unvollständige Datensätze aufweise, erfordern flexible Methoden der Erfassung und des Vergleichs.

5.4.3 Spezifikation der umgesetzten Datenbank

Die für dieses Projekt entwickelte Produktdatenbank (

Abbildung 1) basiert auf der Kombination der genannten Systeme. Sie wurde speziell auf die Anforderungen einer Archivierung und Gegenüberstellung unterschiedlichster, innovativer Produkte im Bereich der Gebäudehülle abgestimmt.

Produktdaten werden in Form von Kennwerten festgehalten. Produkte werden ferner unterschiedlichen Kategorien zugeordnet und lassen sich darüber hinaus durch eine Indexierung mittels Deskriptoren genauer beschreiben.

Diese flexible Datenerfassung berücksichtigt das breite Spektrum der verfügbaren Informationen innovativer Produkte und liefert die Grundlage für Produktvergleiche bezüglich definierter Anforderungen.

Um bestimmten Personen im Forschungsverbund einen Datenzugriff unabhängig vom jeweiligen Standort zu ermöglichen, erfolgt die Datenein- und Datenausgabe ortsungebunden. Hierzu wurde eine internetbasierte Datenbankstruktur angelegt, die durch ein umfassendes Rechtemanagementsystem definierten Nutzergruppen unterschiedliche Zugriffsmöglichkeiten gestattet.

PRODUCTBOX.ORG		NEUES PRODUKT ERSTELLEN	SUCHE ZURÜCKSETZEN	EXCEL-EXPORT	EXCEL-EXPORT 2	WILLKOMMEN MATTHIAS RIPPMANN ABMELDEN
Schlagwörter		Hersteller	Kategorien	Attribute		
Name	Hersteller	Schlagwörter	Kategorien			
8003	Müller Textil	Abstandsgewebe, aus dem Probenkatalog, Probe vorhanden, Angaben fehlen, Weiß, transparent			Wärmedämmung, Wärmedämmung, Textil	X
AD494	Delo	transparent, Acrylat, UV-härtend, Lösungsmittelfrei, einkomponentig			Wärmedämmung, Klebstoff	X
AD640 (VE 17557)	Delo	transparent, UV-härtend, Epoxidharz, Lösungsmittelfrei, einkomponentig			Wärmedämmung, Klebstoff	X
B 1010 286	Verseidag Indutex	Transluzenz fehlt, Acryllack, fungizid, Gewebe, Membran, opak, PES Faser, PVC, Weiß, EC 6 Faser, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
B 1014	Verseidag Indutex	PVC Beschichtung, PVC, Transluzenz fehlt, transluzent, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
B 1015 109 (Low-E)	Verseidag Indutex	Acryllack, fungizid, Gewebe, Membran, opak, PES Faser, PVC, Transluzenz fehlt, Low-E Beschichtung, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
B 1015 286	Verseidag Indutex	Transluzenz fehlt, Acryllack, fungizid, Gewebe, Membran, opak, PES Faser, PVC, Weiß, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
B 1017 286	Verseidag Indutex	Transluzenz fehlt, Acryllack, fungizid, Gewebe, Membran, opak, PES Faser, PVC, Weiß, Probe vorhanden, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
B 1017 286 + Low-E	Verseidag Indutex	Gewebe, Low-E Beschichtung, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
B 1050	Verseidag Indutex	Transluzenz fehlt, Acryllack, fungizid, Gewebe, Membran, opak, PES Faser, PVC, Weiß, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
B 1092 198	Verseidag Indutex	Transluzenz fehlt, Acryllack, fungizid, Gewebe, Membran, opak, PES Faser, PVC, Gelb, Probe vorhanden, geschlossen, transparent			Wärmedämmung, Textil	X
Zum Blog	RSS-Feed	Impressum				129 Ergebnisse

Abbildung 1 : Startfenster und Suchergebnis

5.4.4 Bedienung

Im Folgenden werden die Produkteingabe, die Suche nach Produkten und der Export von Einzelprodukten oder aller Produkte des Suchergebnisses erläutert. Die Datenbank besteht im Kern aus einzelnen Produkten, die mit Hilfe allgemeiner Daten beschrieben werden. Einem solchen Produkt sind beliebig viele weitere Datensätze aus den Bereichen Bilder, Schlagwörter, Kategorien, Attribute und Dokumente zuordenbar.

Entsprechende Rechte vorausgesetzt, kann der Benutzer neue Produkte eingeben oder bestehende bearbeiten. Um ein neues Produkt anzulegen, klickt der Nutzer auf den Menüeintrag „Neues Produkt erstellen“. Daraufhin öffnet sich ein Fenster (Abbildung 2), in dem alle Operationen zur Erstellung eines Produkts durchgeführt werden können.



Abbildung 2: Detailansicht eines Produkts

In einem ersten Schritt werden die sogenannten allgemeinen Daten eines Produkts angelegt (Abbildung 3). Hierzu gehört die Produktbezeichnung, ein Hersteller, bei Produktfamilien ein übergeordnetes Produkt und ein kurzer Beschreibungstext. Die Daten werden mit einem Klick auf „Speichern“ gespeichert. Erst nach diesem Schritt können Sekundärdaten zugeordnet werden.

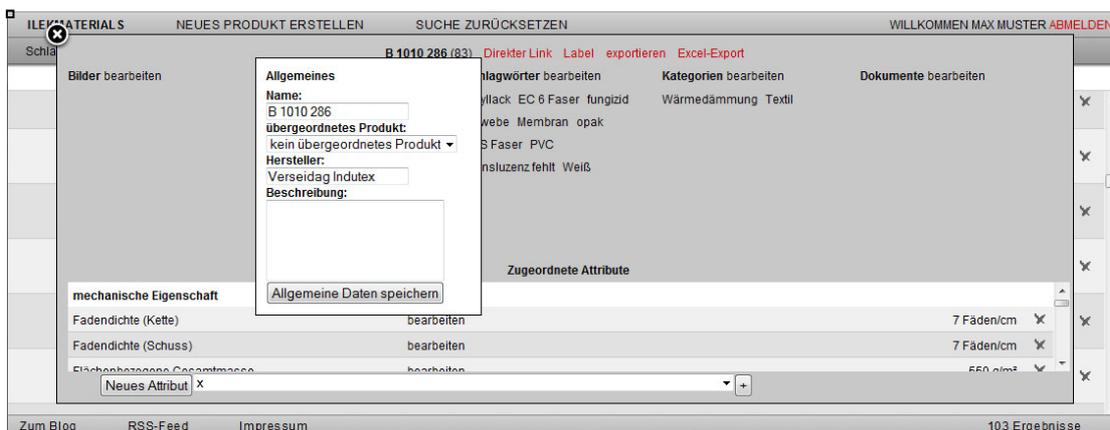


Abbildung 3: Bearbeitung allgemeiner Daten eines Produkts

Im zweiten Schritt werden diesem Basisprodukt weitere Eigenschaften, die Sekundärdaten, zugeordnet.

Als Sekundärdaten werden hier Bilder, Schlagwörter, Kategorien, Dokumente und Attribute bezeichnet. Einem Produkt können beliebig viele Sekundärdaten zugeordnet werden. Fährt der Nutzer über eine der Bereichsbezeichnungen, öffnet sich ein Bearbeitungsbereich.

Bilder

Bilder sind eindeutig einem Produkt zugeordnet. Deshalb kann in diesem Bereich kein bereits auf dem Server vorhandenes Bild ausgewählt, sondern nur ein neues Bild vom Computer des Benutzers hochgeladen werden. Hierzu wird der Button „Durchsuchen“ angeklickt, die entsprechende Datei ausgewählt und anschließend mit einem Klick auf „Hochladen“ auf den Server geladen und dem Produkt zugeordnet.

Ein Bild kann durch Klicken des roten Kreuzes in seiner unteren linken Ecke wieder gelöscht werden.

Schlagwörter

Über Schlagwörter kann ein Produkt mit weichen, d.h. interpretierbaren, aber auch mit eindeutigen Eigenschaften, wie „flexibel“ oder „PTFE“ versehen werden. Die Schlagwörter tragen wesentlich zur Verbesserung der Auffindbarkeit des Produkts bei.

Ein neues Schlagwort wird einem Produkt zugeordnet, indem es in das betreffende Feld geschrieben wird. Dabei erscheint eine Auswahl von ähnlichen Begriffen, die schon anderen Produkten als Schlagwörter zugeordnet wurden. Mit einem Klick auf „+“ neben dem Eingabefeld wird das Schlagwort bestätigt.

Ein Schlagwort kann durch einen Klick auf das rote Kreuz rechts neben ihm wieder gelöscht werden.

Kategorien

Kategorien dienen der groben Einordnung der Produkte in verschiedene Bereiche. Der Nutzer kann mehrere Kategorien einem Produkt zuordnen. Kategorien sind fest vorgegeben, können im Pull-down-Menü ausgewählt und mit einem Klick auf „+“ neben dem Eingabefeld dem Produkt zugeordnet werden.

Die Zuordnung von einem Produkt zu einer Kategorie kann durch einen Klick auf das rote Kreuz rechts neben ihm wieder gelöscht werden.

Dokumente

Dokumente belegen in der Regel die gemachten Angaben und enthalten weitergehende Informationen. Dokumente sind, wie Bilder, eindeutig einem Produkt zugeordnet. Um ein neues Dokument hochzuladen, wird der Button „Durchsuchen“ angeklickt, die entsprechende Datei ausgewählt und anschließend mit einem Klick auf „Hochladen“ auf den Server geladen und dem Produkt zugeordnet.

Ein Dokument kann durch einen Klick auf das rote Kreuz rechts neben ihm wieder gelöscht werden.

Attribute

Als Attribut wird in dieser Datenbank ein Merkmal eines Produkts bezeichnet, dem ein Wert einer Variablen zugeordnet werden kann.

Eine solche Verknüpfung entsteht, wenn am unteren Rand des Produktfensters ein Attribut im Pull-down-Menü ausgewählt und über das „+“ rechts neben ihm dem Produkt zugeordnet wird. Es erscheint anschließend als Attribut in der Liste der „Zugeordneten Attribute“. Am rechten Rand dieser Liste öffnet sich bei einem Klick auf den Attributwert ein weiteres Fenster (Abbildung 4), in dem dieser editiert werden kann.

Durch einen Klick auf das rote Kreuz rechts neben dem Attributwert kann die Zuordnung wieder gelöscht werden.



Abbildung 4: Bearbeitung eines Attributwertes

Entsprechende Rechte vorausgesetzt, kann der Benutzer neue Attribute erstellen oder bestehende ändern.

Zur Neuerstellung eines Attributs führt ein Klick auf „Neues Attribut“ im Produktfenster. Hier kann eine Bezeichnung, eine Einheit und eine Beschreibung (Normen, Testmethoden) eingegeben und über zwei Pulldowns der Datentyp, eine Attributskategorie und ggf. ein Importfilter für den automatischen Import größerer Datenmengen aus Dateien hinzugefügt werden.

Sind alle Felder ausgefüllt, wird das neue Attribut mit einem Klick auf „Speichern“ in der Datenbank abgelegt und dem entsprechenden Produkt zugeordnet.

5.4.5 Suche

Die Datenbank kann mit Hilfe von vier Pulldown-Menüs durchsucht werden. Dabei kann das Suchergebnis durch den Ein- und Ausschluss von Schlagwörtern, durch eine Beschränkung auf einen Hersteller, eine oder mehrere Kategorien oder numerische Attributwerte, die in einem bestimmten Bereich liegen, eingeschränkt werden.



Abbildung 5: Suche nach Produkten, die das Schlagwort „Gewebe“, aber nicht das Schlagwort „Glasfaser“ enthalten.

Dabei werden die dargestellten weiteren Suchmöglichkeiten auf der Grundlage der bisherigen Suchanfrage reduziert, sodass beispielsweise nach einer Suche nach dem Hersteller „Verseidag In-

Indutex“ das Stichwort „Abstandsgewebe“ nicht mehr erscheint, da dieser Hersteller momentan keine Produkte herstellt, die Abstandsgewebe enthalten. Eingeschlossene Begriffe werden in den Pull-down-Menüs grün, ausgeschlossene rot umrandet. Soll ein Schlagwort ausgeschlossen werden, muss dieses erst einmal angeklickt werden, um es einzuschließen. Ein weiterer Klick auf das jetzt grün umrandete Schlagwort schließt es aus und führt zu einer roten Umrandung. Ein weiterer Klick gibt das Schlagwort wieder frei.

5.4.6 Export von Daten

Die Datenbank kann insgesamt oder in Teilen exportiert werden. Ein kompletter Export ist nur in eine Excel-Datei möglich.

Export eines einzelnen Produkts

Zum Export eines einzelnen Produkts kann dieses sowohl in seinen Rohdaten als XML-Datei (Abbildung 6) als auch mit allen vorhandenen Daten als Excel-Datei (Abbildung 7) exportiert werden. Der XML-Export dient dabei dem maschinenlesbaren Import der Daten in andere Programme. Der Excel-Export dient einer leserlichen Aufbereitung der Daten zum Ausdruck oder zur Präsentation.

```

- <root>
- <product>
  - <row>
    <product_id>197</product_id>
    <parent_product_id>0</parent_product_id>
    <company_id>11</company_id>
    <name>B 3701</name>
    <description></description>
    <parent_product_name></parent_product_name>
    <company_name>Verseidag Indutex</company_name>
    <company_description></company_description>
    <global_rights>1</global_rights>
    <group_rights></group_rights>
    <product_rights></product_rights>
    <role_id>1</role_id>
  </row>
</product>
<product_images></product_images>
<product_images_inherit></product_images_inherit>
<product_documents></product_documents>
<product_documents_inherit></product_documents_inherit>
+ <product_tags></product_tags>
  <product_tags_inherit></product_tags_inherit>
+ <free_tags></free_tags>
+ <product_attributes></product_attributes>
+ <product_attributes_inherit></product_attributes_inherit>
+ <free_attributes></free_attributes>
+ <product_categories></product_categories>
+ <product_categories_inherit></product_categories_inherit>
+ <free_categories></free_categories>
+ <sources></sources>
+ <data_types></data_types>
+ <companies></companies>
+ <stats></stats>
</root>

```

Abbildung 6: XML-Export eines Produkts mit ausgeblendeten Bereichen

Ein Produkt wird beim Excel-Export als einzelnes Tabellenblatt innerhalb der Excel-Datei angelegt. Dabei wird das Produkt auf dem momentanen Stand „eingefroren“, d.h. alle Informationen, die die Datenbank flexibel machen, wie Relationalität oder ein hoher Grad an Normalisierung gehen verloren. Auch wird von jedem Produkt nur ein Bild mit exportiert. Verknüpfungen zu Dokumenten des Produkts bleiben jedoch erhalten.

□

B 18971
Verseidag Indutex

ID 114
Exportdatum 16.09.2009 11:08
Name B 18971
Hersteller Verseidag Indutex

Beschreibung
Indexierung EC 6 Faser, Fassade, Gewebe, Gittergewebe, Grau, Probe vorhanden, PTFE
Kategorien Textil
Dokumente

Attribute	Anteil offener Flächen	30 %
	Beschichtung	PTFE
	Dicke	0,7 mm
	Faserstoff des Trägergewebes	Glass EC 6
	Flächenbezogene Gesamtmasse	450 g/m ²
	Flächenbezogene Masse des Gewebes	340 g/m ²
	Höchstzugkraft (Kette)	1700 N/5cm
	Höchstzugkraft (Schuss)	2300 N/5cm
	Probengröße	A6

Abbildung 7: Excel-Export eines Produkts

Export der gesamten Datenbank

Im Hauptmenü befindet sich der Link „Excel-Export“. Ein Klick auf diesen öffnet ein neues Browserfenster, in dem der Prozess des Exports verfolgt werden kann.

Als Ergebnis liefert die Datenbank eine Excel-Datei, in der jedes Produkt in Form einer einzelnen Tabelle abgebildet ist. Vorangestellt wird den Produkten eine Übersichtstabelle mit Verknüpfungen zu den Produkttabellen.

Jede Produkttabelle enthält außerdem einen Link zum Produkt in der Online-Datenbank und Links zu hinterlegten Dokumenten. Diese funktionieren jedoch nur, wenn das entsprechende Verzeichnis auf dem Server („product_documents“) mittels eines Transferprogramms (WinSCP, Cyberduck o.ä.) heruntergeladen wurde.

5.4.7 Maschineller Zugriff auf die Datenbank

Im folgenden Abschnitt sind verschiedene Ansätze für einen maschinellen Zugriff auf die Datenbank dokumentiert. Hierdurch wird es möglich, eigene Benutzeroberflächen (Simulationsprogramme, Visualisierungen von Produktähnlichkeiten o.ä.) anzubinden.

Aufbau der Anfrage

Zum maschinellen Zugriff auf die Datenbank existiert ein Script mit dem Namen parser.php im Serverunterverzeichnis db. Dieses Script übernimmt die komplette Datenein- und -ausgabe. Eine beispielhafte Anfrage zum Durchsuchen der Datenbank nach Produkten, die bestimmten Anforderungen gerecht werden, lautet http://productbox.org/db/parser.php?v=1.33&action=product_search&tags=53&unwanted_tags=98&companies=11&categories=5&attributes=83;0;10. Ihre Bestandteile sind in der folgenden Tabelle näher erläutert.

Variablenname	Beschreibung	Inhalt	Variable
v	Version des Parsers Float	Neueste Version	0
action	Befehl String	Produktsuche	product_search
tags	IDs der Schlagwörter kommaseparierte Integers	EC6-Faser	53
unwanted_tags	IDs der Schlagwörter kommaseparierte Integers	Gittergewebe	98
companies	IDs von Herstellern kommaseparierte Integers	Verseidag Indutex	27
categories	IDs von Kategorien kommaseparierte Integers	Textil	15
attributes	Attributwerte mit Wert und ID kommaseparierte Kombinationen aus einer Attribut-ID, einer Komparator-ID und einem Float-Wert	Fadendichte (Kette) < 10 Fäden/cm	83;0;10
usr	Benutzername String		
pwd	Passwort String		

Tabelle 5: Bestandteile einer Suchanfrage

Programmierbeispiele

Im Folgenden sind für die Sprachen AppleScript, C#, JavaScript und Visual Basic for Applications beispielhafte Programmierungen aufgeführt, um aus der Datenbank automatisiert eine Liste von Produkten auszulesen.

AppleScript

Unter Mac OS X kann mit AppleScript auf die Datenbank zugegriffen werden. Hierbei wird in einem ersten Schritt eine lokale Kopie des XML-Dokuments erstellt.

```

set shellCommand to "curl -o " & XMLtmpfile & " " & searchURL & ""
do shell script shellCommand
try
  tell application "System Events"
    set xml_data to contents of XML file XMLtmpfile
    tell xml_data to set root to XML element 1
    tell XML element "products" of root
      repeat with thisElement from 1 to (count of XML elements)
        # process products
      end repeat
    end tell
  end tell
end

```

Tabelle 6: Programmierbeispiel in AppleScript

C#

Bei einer Programmierung von Plugins für z.B. Autodesk Revit kann der folgende Code verwendet werden.

```
using System.Xml;
public void readProducts(string searchURL)
{
    XmlDocument doc = new XmlDocument();
    try
    {
        doc.Load(searchURL);
        XmlElement root = doc.DocumentElement;
        XmlNode products = root["products"];
        foreach (XmlNode product in products)
        {
            // process products
        }
    }
}
```

Tabelle 7: Programmierbeispiel in C#

JavaScript

Ähnlich des hier gezeigten Codes kommuniziert die bestehende Weboberfläche mit der Datenbank.

```
<script language="JavaScript" src="prototype-1.6.0.2.js"></script>
<script language="JavaScript" src="xpath.js"></script>
<script language="JavaScript" src="SpryData.js"></script>
<script language="JavaScript" src="SpryNestedXMLDataSet.js"></script>
<script language="JavaScript">
    function readProducts(searchURL){
        var XMLdata = new Spry.Data.XMLDataSet(searchURL,{path:"root"});
        var dsProducts = new Spry.Data.NestedXMLDataSet(XMLdata, "products");
        var rows = dsProducts.getData();
        for (var i = 0; i < rows.length; i++){
            // process products
        }
    }
</script>
```

Tabelle 8: Programmierbeispiel in JavaScript

Visual Basic for Applications

Für Programmierungen in Microsoft Excel oder ähnlichen Anwendungen eignet sich der folgende Code.

```
Sub readProducts(ByVal searchURL As String)  
Dim xmlDoc As New MSXML2.DOMDocument60  
Dim objNodeList As IXMLDOMNodeList  
Dim currNode As IXMLDOMNode  
Dim products As IXMLDOMNodeList  
xmlDoc.async = False  
xmlDoc.Load searchURL  
If (xmlDoc.parseError.ErrorCode = 0) Then  
    Set objNodeList = xmlDoc.getElementsByTagName("products")  
    Set currNode = objNodeList.Item(0)  
    Set products = currNode.SelectNodes("row")  
    For i = 0 To (products.Length - 1)  
        ' process products  
    Next  
End If  
End Sub
```

Tabelle 9: Programmierbeispiel in Visual Basic for Applications

5.4.8 Technische Bestandteile

System

Der Zugriff auf die Datenbank erfolgt online über das Internet. Vor unerlaubter Manipulation der Produktdaten sowie der Datenbankstruktur ist die Online-Datenbank durch ein Sicherheits- und Rechtemanagementsystem hinreichend geschützt. Die in die Datenbankstruktur eingepflegten Produkte sind sofort für alle Projektbeteiligten, die über die entsprechenden Rechte verfügen, einsehbar.

Die Datenbank wurde mit Hilfe neuester Web 2.0-Technologien [17] auf Basis eines Linux-Apache-PHP-MySQL-Systems (Abbildung 8) umgesetzt und baut auf einer relationalen, hochgradig normalisierten Datenbank mit über 20 Tabellen auf, die in der Lage sind, alle Anforderungen flexibel und erweiterbar abzubilden. Zur Kommunikation mit der grafischen Benutzeroberfläche und mit weiteren Programmen ist sie mit einer kombinierten XML- und JSON-Schnittstelle ausgerüstet, über die sämtliche Kommunikation zwischen Server und Client (der grafischen Oberfläche im Webbrowser) abläuft (Abbildung 9).

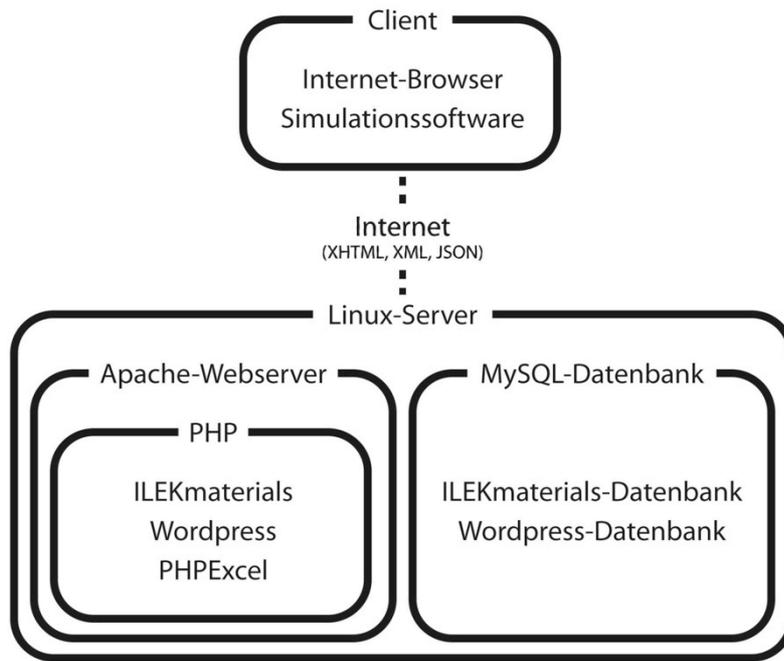


Abbildung 8: Systemkomponenten

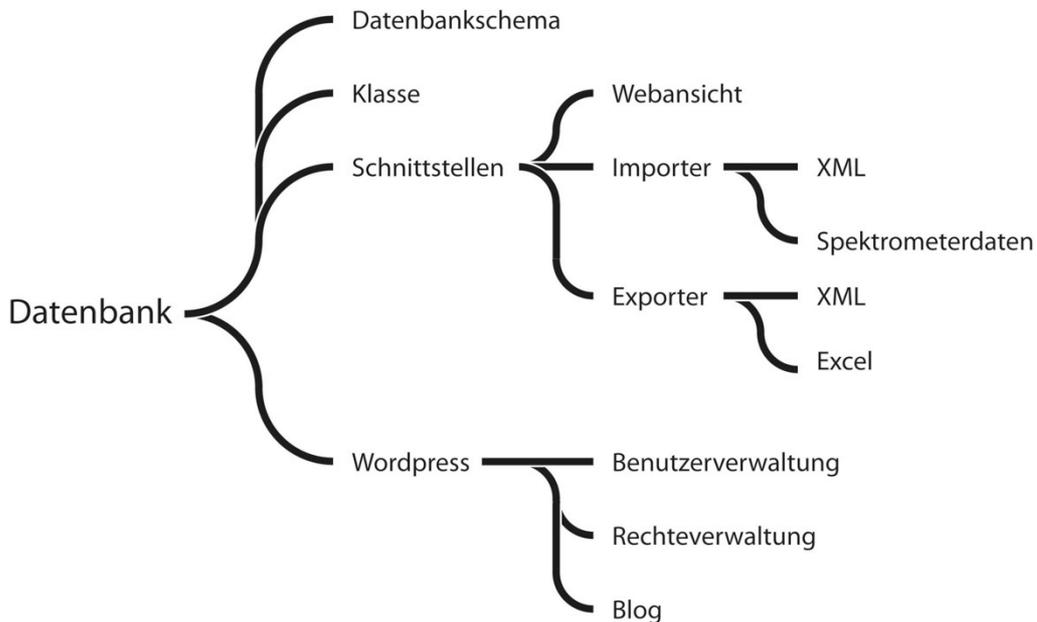


Abbildung 9: Bestandteile der Datenbank

Für komplexere Dateneingaben besteht die Möglichkeit, eigene Importfilter in Form von Plugins zu programmieren, die ihre Daten auch in Datenarrays speichern können. Momentan sind diese Arrays auf zwei Dimensionen beschränkt und werden als Liniengrafik mit entsprechenden Beschriftungen der Grafik und der Achsen angezeigt.

Datenbankstruktur

Im Folgenden wird auf die in der Datenbank vorhandenen Tabellen und ihre Verknüpfung untereinander eingegangen.

Tabellen

In Tabelle 10 sind alle Tabellen innerhalb der Produktdatenbank mit einer Beschreibung ihres jeweiligen Inhalts aufgelistet.

Tabellenname	Tabelleninhalt
attribute	Attribute mit Name, ID, ID einer Attributskategorie und ggf. ID eines Importfilters
attribute_category	Attributskategorien mit Name und ID
cache	Speicher mit Ergebnissen komplexerer Datenbankabfragen
category	Produktkategorien mit Name und ID
company	Hersteller mit Name und ID
data_types	Datentypen zur Klassifizierung von Attributen mit Name, ID und eindeutiger Bezeichnung
document	Dokumente mit Originaldateiname, neuer Dateiname und ID
image	Bilder mit Binärdaten des Originalbildes, Dateiname einer Verkleinerung und ID
products	Produkte mit Name, ID, Kurzbeschreibung, ID eines übergeordneten Produkts und ID des Herstellers
roles	Rollen, die ein Benutzer innehaben kann mit Bezeichnung und ID
source	Quellen von Angaben in Attributen mit Name und ID
tag	Schlagwörter mit Name und ID
thevalues	Attributwerte mit Wert und ID
value_importer	Importskripte mit Bezeichnung, Dateiname und ID
x_attribute_product	Verknüpfung zwischen Produkten, Attributen und Attributwerten
x_category_product	Verknüpfung zwischen Produkten und Produktkategorien
x_document_product	Verknüpfung zwischen Produkten und Dokumenten
x_image_product	Verknüpfung zwischen Produkten und Bildern
x_tag_product	Verknüpfung zwischen Produkten und Bildern
x_user_company	Verknüpfung zwischen Benutzern und Herstellern
x_user_product	Verknüpfung zwischen Benutzern und Produkten
x_user_role	Verknüpfung zwischen Benutzern und Rollen

Tabelle 10: Tabellen in der Datenbankstruktur

Verknüpfung

Abbildung 10 zeigt die Verknüpfungen der wichtigsten Tabellen. Kommentare an den Relationen geben die Art der Verknüpfung an.

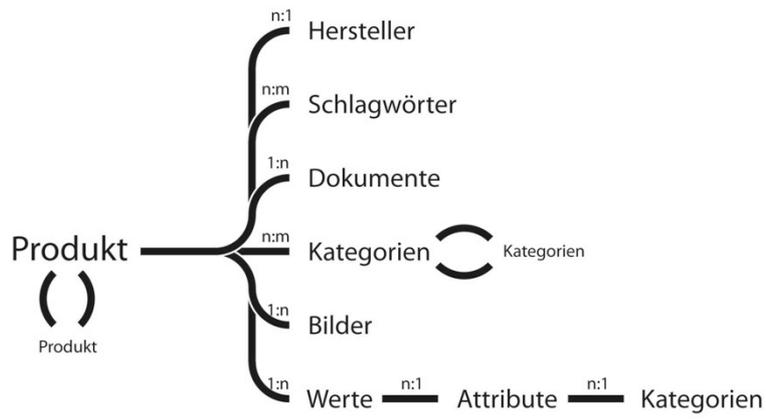


Abbildung 10: Verknüpfungen der wichtigsten Tabellen.

6 Versuchsvorrichtungen und messtechnische Grundlagen

6.1 Grundlagen

6.1.1 Grundlagen des Wärmetransports

Zur Veranschaulichung der nachfolgend verwendeten Begrifflichkeiten im Bereich des Wärmetransports soll an dieser Stelle eine kurze Einführung zur Erläuterung der Transportmechanismen erfolgen.

Der Energietransport in und zwischen Festkörpern und Fluiden (Flüssigkeiten und Gase) erfolgt jeweils vom Körper/Bereich höherer Temperatur zum Körper/Bereich niedrigerer Temperatur. Dabei kommt es zu einem Temperatenausgleich. Die Wärme kann durch drei Vorgänge übertragen werden: durch Leitung, durch Konvektion und durch Strahlung.

Die Wärmeleitung erfolgt auf atomarer Ebene durch Weitergabe kinetischer Energie der in einem Körper enthaltenen Atome von Atom zu Atom.

Unter Konvektion wird der Wärmetransport in Fluiden durch Massenbewegung, also durch Strömungsvorgänge, verstanden. Die in einer bestimmten Stoffmasse enthaltene Wärmemenge wird mit dem Stoff mitgeführt und an einen anderen Ort transportiert. Es wird unterschieden zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion. Bei der freien Konvektion ist die Ursache der Strömung ein temperaturbedingter Dichtegradient im Fluid. Beispielsweise bewegt sich erwärmte und damit weniger dichte Luft entgegen der Schwerkraft nach oben. Ist die Strömung durch äußere Einflüsse bedingt (z.B. durch einen Ventilator), so spricht man von einer erzwungenen Konvektion.

Festkörper und Fluide senden an freien Oberflächen entsprechend ihrer absoluten Temperatur Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung aus. Dabei ist sowohl die Frequenz wie auch die abgestrahlte Energie abhängig von der absoluten Temperatur und der Stoffeigenschaft (Oberflächeneigenschaft). Viele Gase (z. B. auch Luft) sind weitestgehend durchlässig für Wärmestrahlung. Der Frequenzbereich der Wärmestrahlung (von ca. 2.5 μm bis ca. 50 μm) liegt überwiegend deutlich oberhalb der Wellenlängen der solaren Einstrahlung (ca. 200 nm bis ca. 3000 nm). Während Festkörper ein kontinuierliches Strahlungsspektrum erzeugen strahlen Gase in charakteristischen Wellenlängenabschnitten (Linienspektren).

Bei den Wärmetransportvorgängen in mehrlagigen Hüllenaufbauten mit Luftzwischenräumen sind alle drei Transportvorgänge beteiligt. Die Gewichtung der einzelnen Wärmeströme ist nicht konstant sondern abhängig von den Randbedingungen (Umströmungsgeschwindigkeiten an den Oberflächen, Emissionskoeffizienten, Sichtfaktoren, Oberflächentemperaturen der Hüllenschichten und der Umgebungen,...). Für einen zweilagigen Hüllenaufbau bestehend aus zwei PVC-PES-Geweben mit einem zwischenliegenden Luftraum von ca. 12 mm (Aufbau 007 nach Kap. 6.3) kann der strahlungsbedingte Wärmestrom durchaus etwa gleich groß sein wie der Wärmestrom bedingt durch Leitung und Konvektion.

6.1.2 Heizkasten

Die beschriebenen Wärmetransportvorgänge wirken sich auch bei der messtechnischen Evaluierung von unterschiedlichen Lagenaufbauten im Heizkasten (Hotbox) aus. Dort beeinflusst die von den Seitenwänden emittierte Wärmestrahlung ebenfalls den Gesamtenergiedurchgang durch die Lagen. Dieser Anteil ist aber messtechnisch nicht einfach zu erfassen. Das übliche Verfahren bei der Hotboxmessung, nämlich durch die Leistungsmessung der eingetragenen Wärmeleistung in die Messbox auf den Energiefluss durch die Probe zu schließen, funktioniert demnach ebenfalls nicht so, dass belastbare Ergebnisse für die U-Werte zustande kommen. Dies hatte zur Folge, dass der Innenaufbau der Hotbox und die Messmethode mehrmals verändert und angepasst werden mussten. Die entsprechenden Optimierungen des Aufbaus sind noch im Gange.

6.1.3 U-Wert

Ein Ergebnis der Arbeiten im Projekt ist die Erkenntnis, dass die Angabe eines allgemeingültigen U-Wertes für Mehrlagensysteme nicht möglich ist. Der U-Wert wird maßgeblich durch den Strahlungsfluss wie auch durch die konvektiven Wärmeleitungsvorgänge beeinflusst und ist kein kon-

stanter Wert für diese Wandaufbauten. Die Abstrahlungsvorgänge und damit die Wärmeweitergabe durch Strahlung von einer Lage des Wandaufbaus zur nächsten oder zur Umgebung ist sehr abhängig von der jeweiligen Oberflächentemperatur (Exponent 4). Bei einer Temperatur einer Oberfläche von 60 °C wird im Gegensatz zur Temperatur von 30 °C das Verhältnis der Abstrahlleistungen sich um den Faktor 1.46 unterscheiden. Für die durch Konvektion bedingten Wärmeflüsse durch die Mehrlagenwand gilt Ähnliches in einer noch komplexer zu fassenden Weise. Die jeweiligen Strömungsgeschwindigkeiten bei luftdurchströmten Aufbauten, beispielsweise bei rein konvektiv getriebenen Strömungen, ist stark abhängig von der jeweiligen Oberflächentemperatur. Im Zusammenhang mit den Strömungsgeschwindigkeiten verändern sich dabei auch die Wärmeübergangszahlen in luftdurchströmten Zwischenräumen von Mehrlagensystemen.

6.2 Messstand und Proben zur Wärmedurchgangsermittlung

Zur bauphysikalischen Charakterisierung der Lagenaufbauten wurde am Institut ein U-Wert-Messstand, ein sogenannter Heizkasten, konzipiert und gebaut. Der Heizkasten (Abbildung 11) ist in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 8990 [17] konstruiert worden.

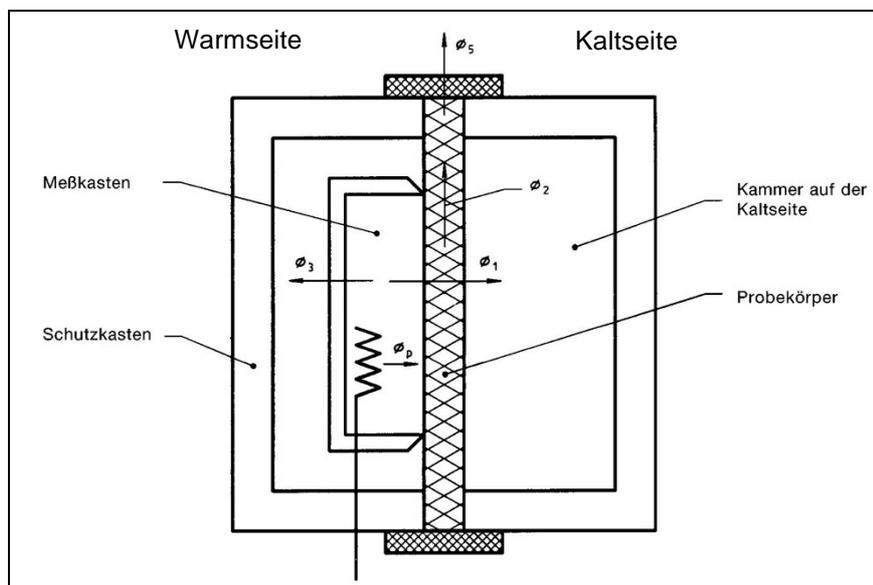


Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Heizkastens nach [17]

Das Prinzip beruht auf der Einstellung einer konstanten Temperaturdifferenz zwischen den beiden gegenüberliegenden Seiten des Lagenaufbaus (Probe) und der Messung der notwendigen Heizleistung im Messkasten zur Aufrechterhaltung eines stationären Zustands der Temperaturen im Kalt- und Warmbereich der Vorrichtung. Die Temperatureinstellung erfolgt auf der Warmseite durch ein elektrisches Heizelement (Abbildung 12 und Abbildung 13) und auf der Kaltseite durch einen Flüssigkeitskreislauf mit einem großflächigen, ebenen Wärmetauscher und einem daran angeschlossenen Kühlaggregat (Julabo Modell FL601, Abbildung 14).

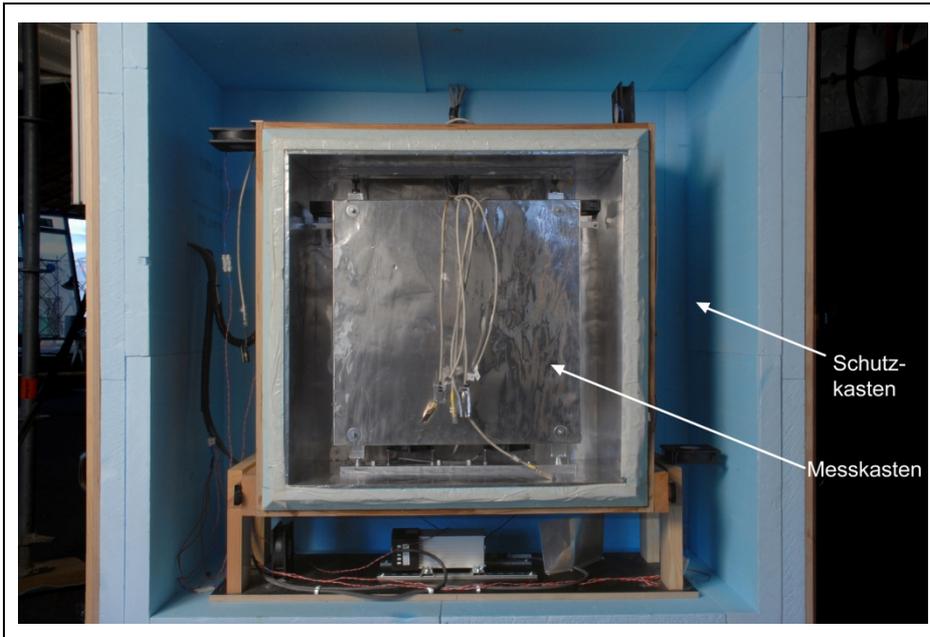


Abbildung 12: Heizkasten – Warmseite (Frontalansicht)

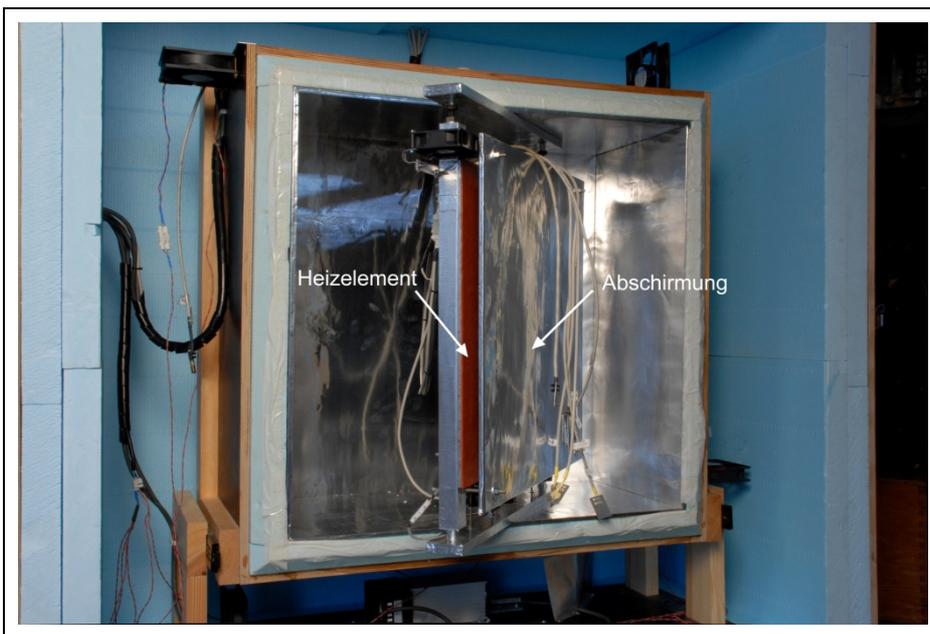


Abbildung 13: Heizkasten - Warmseite (Blick auf herausgeklapptes Heizelement)

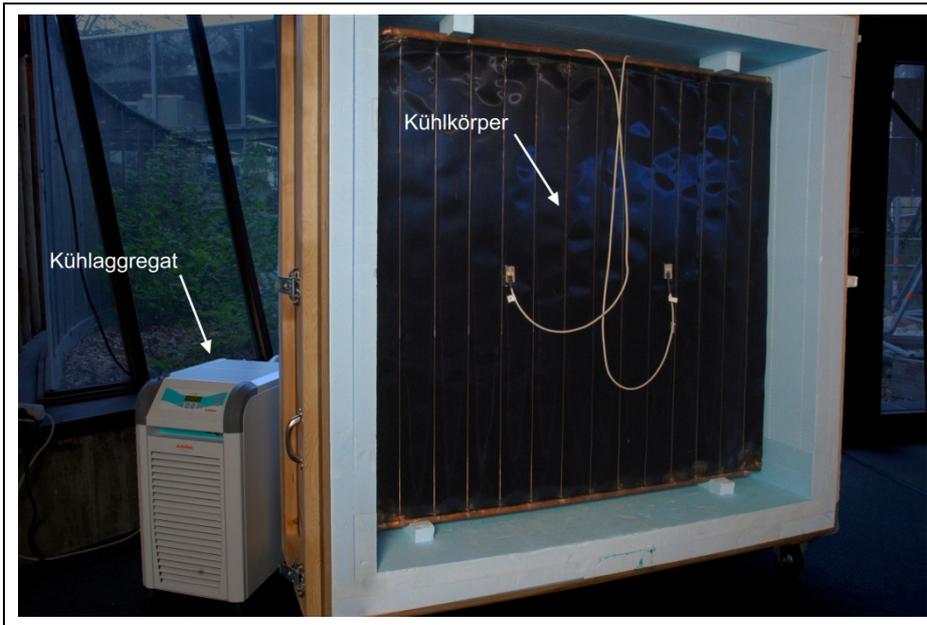


Abbildung 14: Heizkasten – Kaltseite mit Kühlkörper und Kühlaggregat

Zusätzlich zu der Warmseite und der Kaltseite enthält der Heizkasten einen Mittelteil zur Aufnahme der zu bewertenden Probe (Abbildung 15 und Abbildung 16).

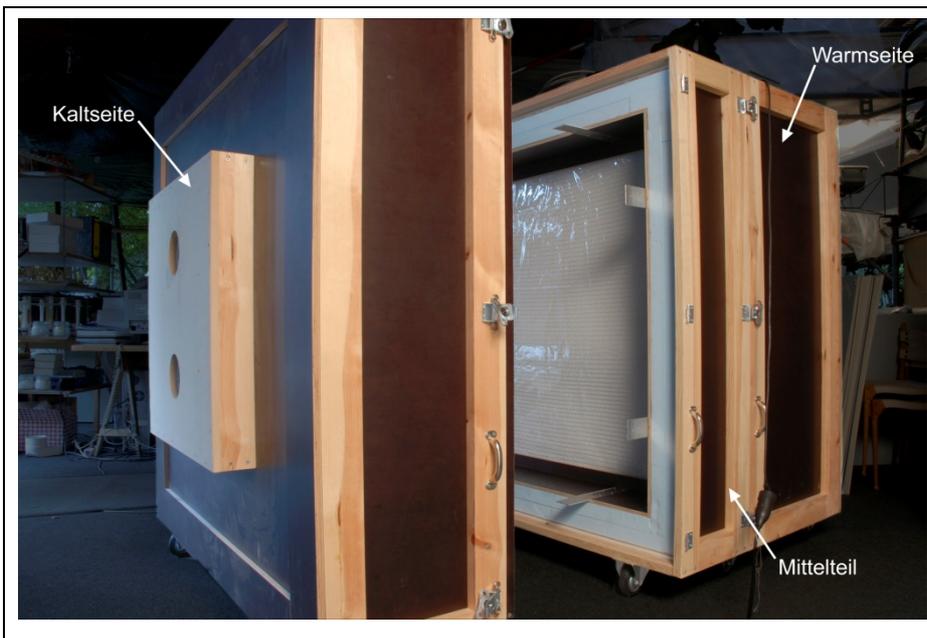


Abbildung 15: Heizkasten - Gesamtaufbau. Von links nach rechts: Kaltseite (ohne Kühlaggregat), Mittelteil für Proben, Warmseite



Abbildung 16: Beispiel für einen Lagenaufbau im Heizkasten

Für die Messungen des Temperatur- und Luftfeuchteverlaufs stehen 20 Temperatursensoren (Typ PT100) und 7 Feuchtigkeitsaufnehmer (Typ Linear Voltage) zur Verfügung (Abbildung 17). Die Kalibrierung der Temperatursensoren erfolgte mittels eines Wasserbads bei drei verschiedenen Temperaturen (0°C , 20°C , 40°C) und eines geeichten Referenzthermometers. Die Kalibrierung der Feuchtesensoren beruhte auf Eigenschaften verschiedener gesättigter Salzlösungen. In einem abgeschlossenen Luftraum über verschiedenen Salzlösungen stellen sich bestimmte Feuchtwerte ein, die zur Kalibrierung benutzt werden können (Abbildung 18 und Tabelle 11). Bei Referenzmessung zur Überprüfung der Kalibrierung wiesen die Temperatursensoren eine Toleranz von $\pm 0,05\text{ K}$ auf. Die Genauigkeit der Feuchtigkeitssensoren betrug $\pm 5\%$ rel. Luftfeuchtigkeit.

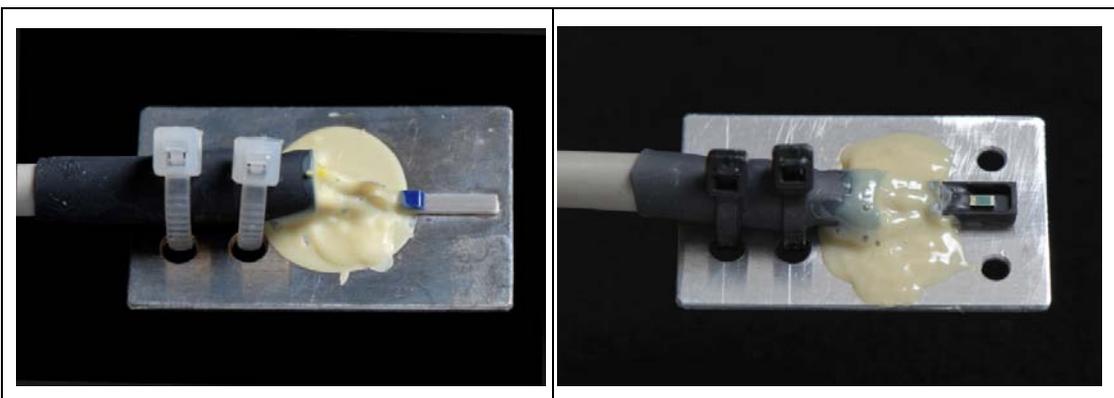


Abbildung 17: Temperatursensor (Typ PT100) und Feuchtigkeitsensor (Typ Linear Voltage)

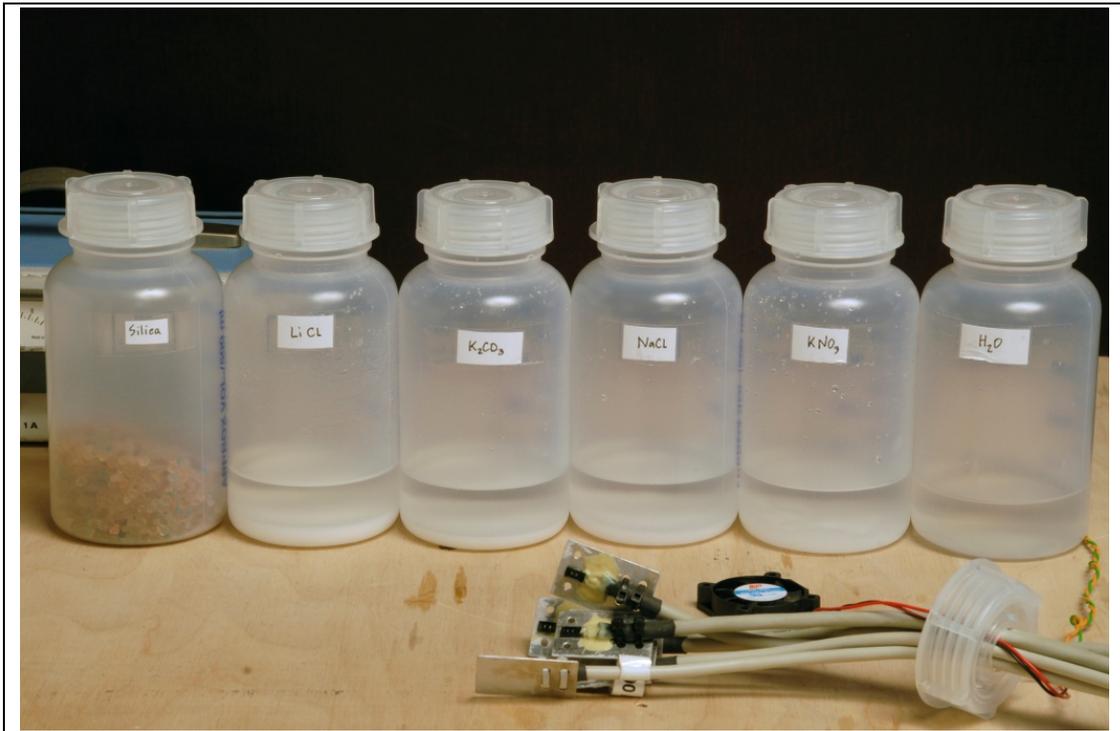


Abbildung 18: Verschiedene gesättigte Salzlösungen für die Kalibrierung der Feuchtesensoren

Material	Rel. Luftfeuchtigkeit über dem Material
Silica-Gel, getrocknet	0 %
LiCl (gesättigte Lösung)	12 %
K ₂ CO ₃ (gesättigte Lösung)	44 %
NaCl (gesättigte Lösung)	75 %
KNO ₃ (gesättigte Lösung)	97 %
H ₂ O	100 %

Tabelle 11: Charakteristische Luftfeuchtigkeitswerte über verschiedenen Materialien und Lösungen zur Kalibrierung der Feuchtigkeitssensoren

Bei bisherigen Versuchen wurde auf der Warmseite eine Temperatur von ca. 40 °C und auf der Kaltseite eine Temperatur von ca. 10°C eingestellt. Die so erreichte Temperaturdifferenz übertrifft die von der entsprechenden DIN-Norm angegebene Differenz von 20 K. Die größere Temperaturdifferenz wurde gewählt, um die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen. Die Regelung der Warmseite erfolgt durch einen speziell für diese Anwendung konzipierten Regelungs- und Messcomputer, der gleichzeitig Messungen der Temperatur und Luftfeuchte im Lagenaufbau durchführt und aufzeichnet. Die Regelung der Kaltseite erfolgt direkt durch das Kühlaggregat. Ein Beispiel für den Temperaturverlauf während des Regelungsprozesses ist in Abbildung 21 dargestellt. Auf beiden Seiten wird mit Hilfe von Lüftern ein möglichst konstantes Temperaturprofil eingestellt. Allerdings war eine Temperaturdifferenz unterschiedlicher Punkte innerhalb des Messkastens nicht vollständig zu eliminieren, somit wurden Temperaturverlaufsmessungen in vier Bereichen durchgeführt (Abbildung 19 und Abbildung 20). Bei den Messungen stellte sich heraus, dass ein vertikaler Temperaturgradient bestand, nicht aber ein horizontaler. Die von den Lüftern eingebrachte elektrische Leistung wurde bei der Bestimmung des Wärmestroms jeweils berücksichtigt. Um den Einfluss der Strahlung bei den Sensoren, die die Raumtemperatur messen, zu minimieren, wurden diese jeweils mit Aluminiumfolie abgeschirmt (Abbildung 19).

Es war ursprünglich angedacht, den Wärmedurchgang direkt aus der Leistungszufuhr in den Messkasten abzuleiten. Dies erwies sich bei Referenzmessungen als zu ungenau. Daher wurden sogenannte Wärmeflussplatten (Heat Flux Plates, Hukseflux/Meier NT Modell 2016.0000) eingesetzt, um den Wärmestrom direkt an der Probenoberfläche auf der Warmseite zu messen. Bei dieser Methode ergaben Referenzmessungen einen Messfehler von <6,7% (max. Fehler, siehe Abschnitt 6.3). Aufgrund des beschriebenen vertikalen Temperaturgradienten wurden die Wärmeflussplatten an zwei verschiedenen Höhen angebracht (Abbildung 20).

Die Erfassung der Signale der Wärmeflussplatten erfolgte mittels eines Datenerfassungssystems (Agilent Modell 34980A). Die so gemessenen Daten wurden dann mit den Temperaturdaten des Messcomputers des Heizkastens abgeglichen.

Eine Regelung der Feuchte auf der Warm- oder der Kaltseite ist bisher nicht möglich. Daher können spezielle Umgebungsfeuchtebedingungen bezüglich deren Auswirkungen auf den Feuchtegradienten durch den Probenaufbau bisher nicht messtechnisch simuliert werden. Das Institut verfügt somit aber dennoch über eine sehr genaue, aber auch flexible Messanlage, um verschiedene Lagenaufbauten klimatechnisch zu untersuchen.

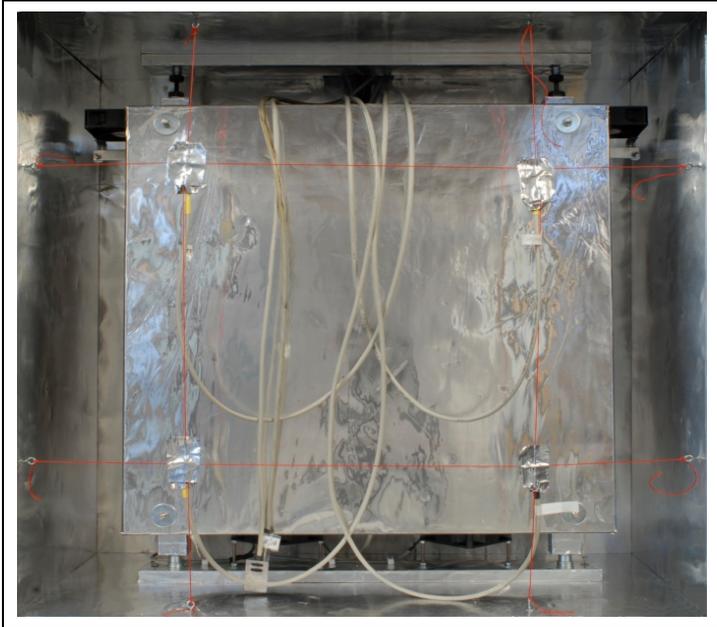


Abbildung 19: Heizkasten – Warmseite, Ausschnitt mit Anordnung der abgeschirmten Sensoren

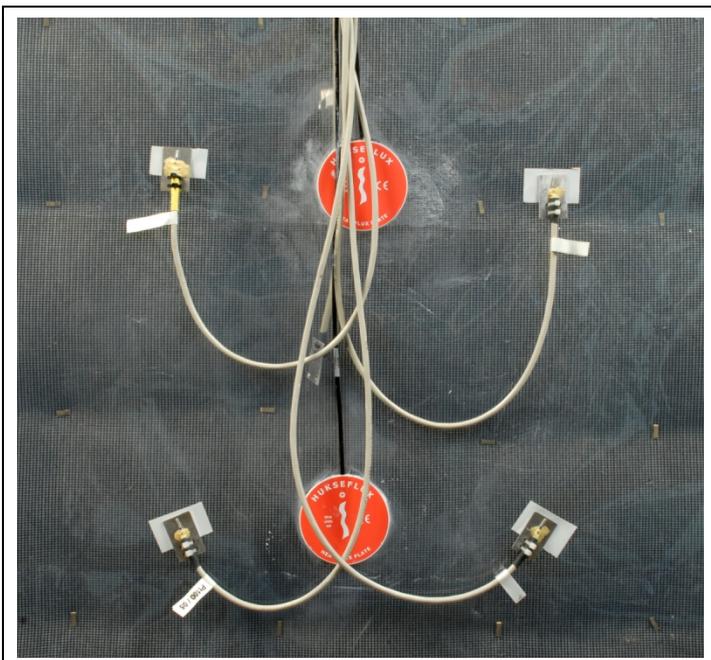


Abbildung 20: Sensoren im Messfeld auf Warmseite der Probe: PT-100 und Wärmeflussplatten

6.3 Messergebnisse

Die Durchführung eines Versuches zur Bestimmung der wärmetechnischen Eigenschaften einer Messprobe besteht grundsätzlich aus zwei Teilvorgängen. Im ersten Vorgang wird auf der Warmseite eine konstante Temperatur durch den Regelungscomputer eingestellt. Auf der Kaltseite wird die konstante Temperatur mittels des Kühlaggregats bereitgestellt. In Abbildung 21 ist der Verlauf der Messwerte während dieses Regelungsvorgangs dargestellt. Die erfolgreiche Einstellung des konstanten Temperaturdifferentials ("Constant Mode") benötigt üblicherweise 12 bis 24 Stunden. Nach diesem ersten Teilvorgang wird die Heizleistung konstant gehalten.

Um das Gleichbleiben des Temperaturdifferentials zwischen der Warm- und Kaltseite des Heizkastens sicherzustellen, wird dieser bei konstanter Leistungszufuhr für weitere 24 bis 48 Stunden betrieben. Anschließend beginnt die eigentliche Aufnahme der Messungen der Temperatur und des

Wärmeflusses für die Auswertung. Zur Bestimmung des U-Wertes wird das Verhältnis des Wärmeflusses zum Temperaturunterschied zwischen der Warm- und Kaltseite ermittelt. Der 1/R-Wert wird anhand der Differenz der Oberflächentemperaturen bestimmt:

$$U = \frac{q}{T_{warm} - T_{kalt}} = (1/\alpha_w + R + 1/\alpha_k)^{-1} \quad (1)$$

$$1/R = \frac{q}{T_{OFwarm} - T_{OFkalt}} \quad (2)$$

mit

U	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert, W/m ² ·K)
$1/\alpha_w$	Wärmeübergangswiderstand an der Oberfläche auf der Warmseite (m ² ·K/W), Wert siehe Tabelle 14
$1/\alpha_k$	Wärmeübergangswiderstand an der Oberfläche auf der Kaltseite (m ² ·K/W), Wert siehe Tabelle 14
$1/R$	Wärmeübergangskoeffizient, auch als h gekennzeichnet (W/m ² ·K)
R	Wärmedurchlasswiderstand des Lagenaufbaus (m ² ·K/W)
q	Wärmefluss von Warmseite zu Kaltseite (W/m ²)
T_{warm}	Lufttemperatur Warmseite (°C)
T_{kalt}	Lufttemperatur Kaltseite (°C)
T_{OFwarm}	Oberflächentemperatur Warmseite (°C)
T_{OFkalt}	Oberflächentemperatur Kaltseite (°C)

Ein Beispiel für die Auswertung und Berechnung ist in Abbildung 22 dargestellt.

Bisher wurden am Institut Referenzmessungen unternommen und verschiedene Lagenaufbauten untersucht. In Tabelle 12 findet sich eine Zusammenfassung der bisher durchgeführten Versuche. Abbildung 23 zeigt schematisch die entsprechenden Lagenaufbauten.

Wie bereits oben erläutert, wurde bei einer Referenzmessung der Aufbau verifiziert. Dies geschah anhand einer 50 mm EPS-Platte mit bekannter Wärmeleitfähigkeit. Der vom Hersteller (Schwenk Dämmtechnik) angegebene Maximalwert der Wärmeleitfähigkeit beträgt $\lambda_{Max} = 0,04$ W/m·K, wobei laut Rücksprache mit dem Hersteller der Wert üblicherweise in einem Bereich von $\lambda_{eigentlich} \sim 0,037$ bis 0,038 W/m·K liegt. Messungen mit dem gebauten Messkasten ergaben einen Wert von $\lambda_{Messung} = 0,0373$ W/m·K. Somit liegt die maximal mögliche Abweichung der Referenzmessung vom angegebenen Wert bei 6,7% bezogen auf eine maximale Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{Max} = 0,04$ W/m·K.

In Messungen an Lagenaufbauten wurde festgestellt, dass sich Polyestervlies als guter Dämmstoff eignet (Aufbau 001: $U = 0,464$ W/m²·K für 100 mm Vlies zwischen ETFE-Folien). Nicht unproblematisch sind allerdings bei diesem Werkstoff die Brandeigenschaften.

Wie erwartet, weist Abstandsgewebe aufgrund der hohen Luftdurchlässigkeit wenig Dämmfähigkeit auf und eignet sich daher wegen seiner guten Durchströmbarkeit eher zum Einsatzkomponente eines Solarthermiekollektors (Aufbau 002: $U = 1,79$ W/m²·K).

Erste Messungen zur Erstellung einer adaptiven Wärmedämmschicht aus komprimierten Glasfasergespinnsten ergaben, dass eine Komprimierung des Glasfasergespinnsts keine ausreichende Veränderung des Wärmedurchgangs erbringt. Sowohl im komprimierten Zustand (Aufbau 003 –

Gesamtaufbau komprimiert: $U = 1,436 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ und Aufbau 005 – nur Gespinstlage komprimiert: $U = 1,54 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) als auch im unkomprimierten Zustand (Aufbau 004: $U = 1,47 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) ergeben sich ähnliche und zur Wärmedämmung von Gebäuden ungeeignete Dämmwerte. Dies ist womöglich auf die hohe Luftdurchlässigkeit in der dickenveränderlichen Gespinstlage zurückzuführen, die einen erheblichen Wärmeübergang mittels Konvektion durch das Gespinst ermöglicht. Ein weiteres Problem, das auch bei den Funktionsmustern für die Messe Bau München 2009 beobachtet wurde, ist der Zerfall des Gespinstes bei wiederholten Komprimiervorgängen.

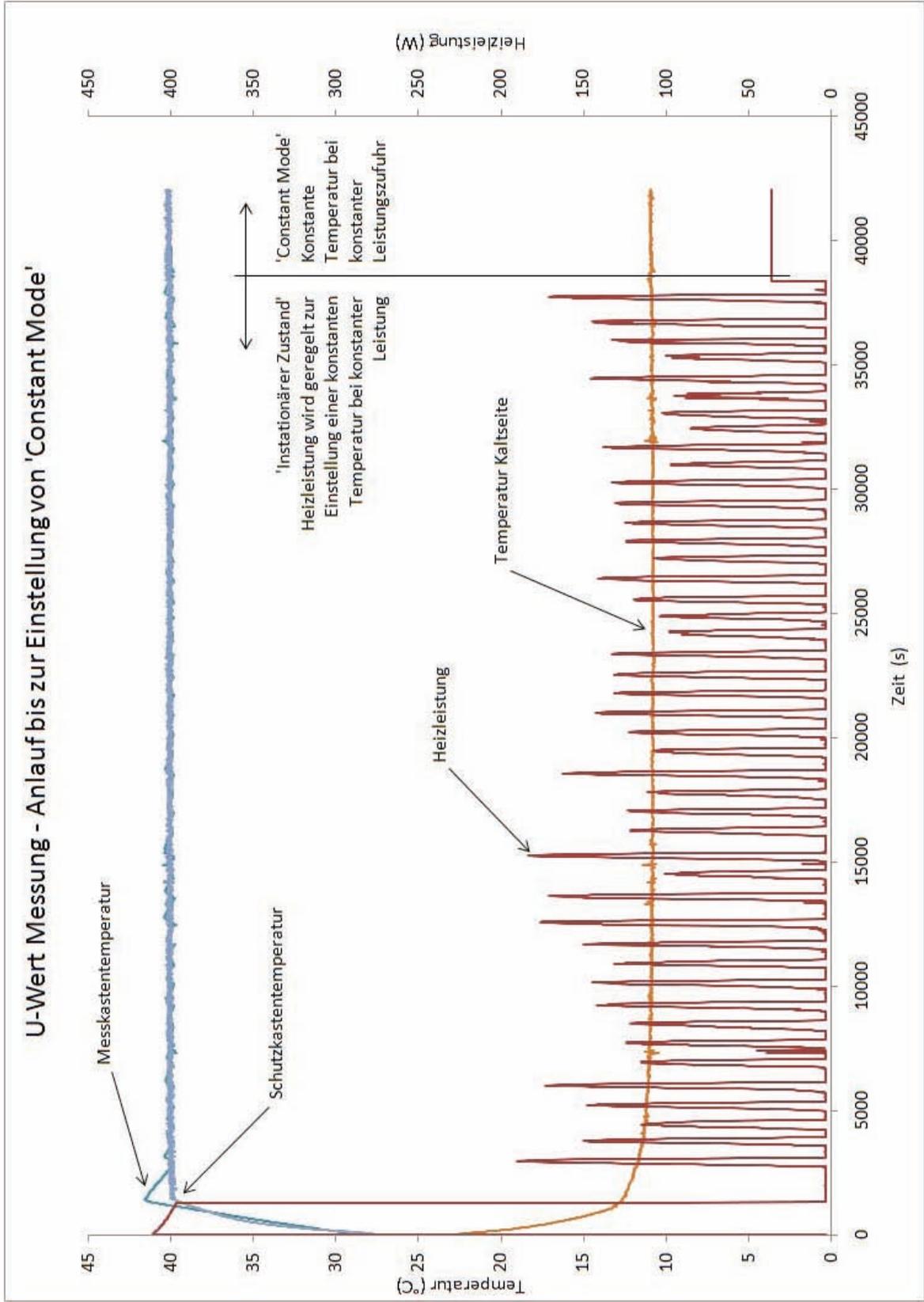


Abbildung 21: Beispiel eines Versuchsablaufes bei der Regelung des Heizkastens durch den Messcomputer bis zum 'Constant Mode'.

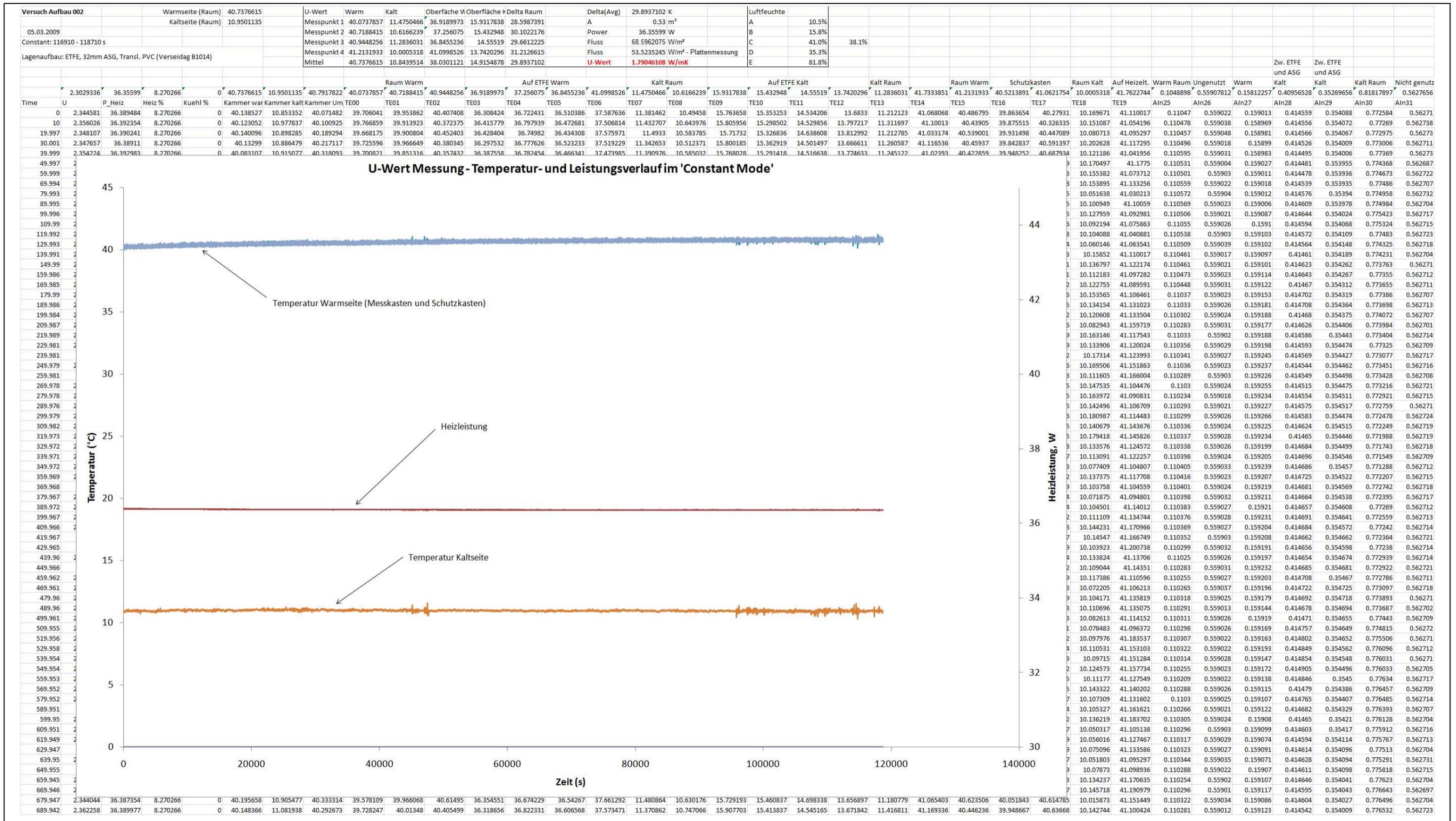


Abbildung 22: Beispiel - Auswertung der U-Wert-Messung mittels Heizkasten (nicht alle Daten dargestellt)

Aufbau	Lagen	Temperatur [°C]				Wärmefluss [W/m ²]		Kennwerte [W/m ² ·K]		Luftfeuchte				λ[W/m·K]
		Warm Raum	Warm OF	Kalt OF	Kalt Raum	LZH	WFP	U-Wert	1/R-Wert	Warm Raum	Aufbau Warm	Aufbau Kalt	Kalt Raum	
REF 001	EPS	42,20	41,04	10,20	8,06	30,75	23,02	0,674	0,746	--	--	--	--	0,03732
001	ETFE, 100 mm Vlies, ETFE	38,61	37,88	7,84	6,90	17,15	14,70	0,464	0,489	11,7%	17,5%	83,6%	99,8%	--
002	ETFE, 32 mm ASG, Transl. PVC (Verseidag B1014)	40,74	38,03	14,92	10,84	68,60	53,52	1,790	2,316	10,5%	15,9%	38,2%	81,8%	--
003	ETFE, komprimiertes GF-Gespinst zwischen (2) Lagen Gittergewebe, ETFE	40,42	38,32	14,37	9,64	71,70	44,21	1,436	1,846	10,2%	14,7%	38,4%	79,1%	--
004	ETFE, unkomprimiertes GF-Gespinst zwischen (2) Lagen Gittergewebe, ETFE	39,85	38,72	11,57	8,72	43,27	45,78	1,470	1,686	10,6%	15,1%	51,1%	85,6%	--
005	ETFE, 35mm Abstand, komprimiertes GF-Gespinst zwischen (2) Lagen Gittergewebe, 35 mm Abstand, ETFE	40,47	38,07	14,85	9,15	66,77	48,19	1,539	2,076	10,4%	16,7%	38,4%	75,5%	--
006	ETFE, 12 mm Luft, ETFE (zum Vergleich mit Simulation)	39,59	33,56	20,07	11,53	113,29	75,24	2,681	5,575	11,8%	27,3%		89,0%	--
007	PVC/PES (B1015), 12 mm Luft, PVC/PES (B1015) (zum Vergleich mit Simulation)	38,31	33,38	19,04	11,39	96,48	63,98	2,377	4,462	12,2%	27,2%		86,2%	--
008	PVC/PES+LowE (B1015), 12 mm Luft, PVC/PES+LowE (B1015), LowE-Schichten in den Zwischenraum gerichtet (zum Vergleich mit Simulation)	40,94	36,46	16,05	9,91	78,72	58,78	1,894	2,880	12,2%	26,8%		95,3%	--

OF – Oberfläche

LZH – Leistungszufuhr in den Messkasten, zur Bestimmung des U-Wertes

WFP – Wärmeflussplatten

ASG – Abstandsgewebe

GF – Glasfasergespinst

U-Wert – Inklusive Oberflächenübergang auf Warm- und Kaltseite

1/R-Wert – Exklusive Oberflächenübergang auf Warm- und Kaltseite

Tabelle 12: U-Wert-Messungen

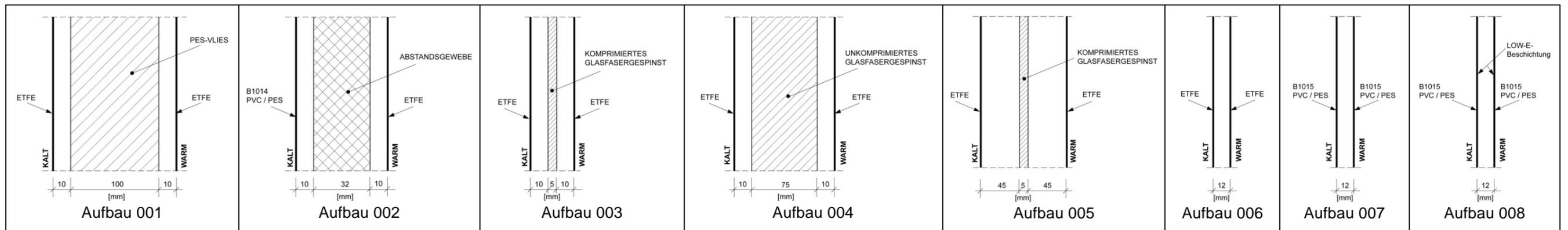


Abbildung 23: Vermessene Lagenaufbauten

6.4 Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände und Wärmedurchgangskoeffizienten

Zur vollständigen Betrachtung der Vorgänge beim konvektiven Wärmetransport und zum Vergleich mit Simulationsergebnissen ist die Erfassung der Wärmeübergangsschichten auf der Warm- und der Kaltseite der Probe von kritischer Bedeutung, da diese in den Gesamtwiderstand des Bauteils einfließen.

Aufgrund der im Heizkasten integrierten Lüfter (zur Sicherstellung eines möglichst homogenen Temperaturzustands) herrscht an der Probenoberfläche der Warmseite ein Zustand erzwungener Konvektion vor. Die Wärmeübergangswiderstände sind maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft an der jeweiligen Oberfläche abhängig.

Zur Bestimmung der Übergangswiderstände an den Probenoberflächen wurden Messungen der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt.

6.4.1 Messungen und Auswertung

Die Messungen wurden im Zeitraum vom 6.8.2009 bis 11.8.2009 durchgeführt. Die im Heizkasten befindliche Probe war ein Aufbau, dessen Außenoberflächen aus lackiertem Holz bzw. Melamin bestanden. Die Oberflächenbeschaffenheit gilt als hinreichend ähnlich der Beschaffenheit der Oberflächen der im Heizkasten zu vermessenden Aufbauten. Somit können die Werte, die im Rahmen dieser Messungen für den Wärmeübergang bestimmt wurden, auf ähnliche Proben übertragen werden. Unter Umständen (stark anderswertige Oberflächenbeschaffenheiten der zu vermessenden Probe) sollten diese Werte modifiziert bzw. neue Messungen des Wärmeübergangswiderstands durchgeführt werden.

Die Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten wurden mittels einer sogenannten Hitzdrahtsonde durchgeführt. Das Prinzip beruht auf einer Bereitstellung einer konstanten Temperatur des Drahtes. Die dafür benötigte elektrische Leistung ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Lufttemperatur [25]. Die Sonden sowie die dazugehörige Regelungs- und Ansteuerungstechnik wurden von der Firma SVMtec bereitgestellt, die auch die Kalibrierung der Sonden vornahm. Das Gesamtsystem liefert eine Spannung, aus der die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden kann (nach [25]):

$$U_{Br} = \frac{U_{mess}}{m} + U_{offset} \quad (3)$$

$$w = \left(a + b \cdot \frac{U_{Br}^2}{T_S - T_F} \right)^e \quad (4)$$

mit

U_{Br}	Ausgangsspannung der Messbrücke (Volt)
U_{mess}	Spannungsmessung (Volt)
m	Verstärkungsfaktor
U_{offset}	Offset-Spannung (Volt)
w	Strömungsgeschwindigkeit (m/s)
a, b, e	Konstanten bestimmt aus der Kalibrierung
T_S	Sensortemperatur bestimmt aus der Kalibrierung (°C)
T_F	Lufttemperatur (°C)

Die Hitzdrahtsonde und die Anordnung im Aufbau ist Abbildung 24 dargestellt.

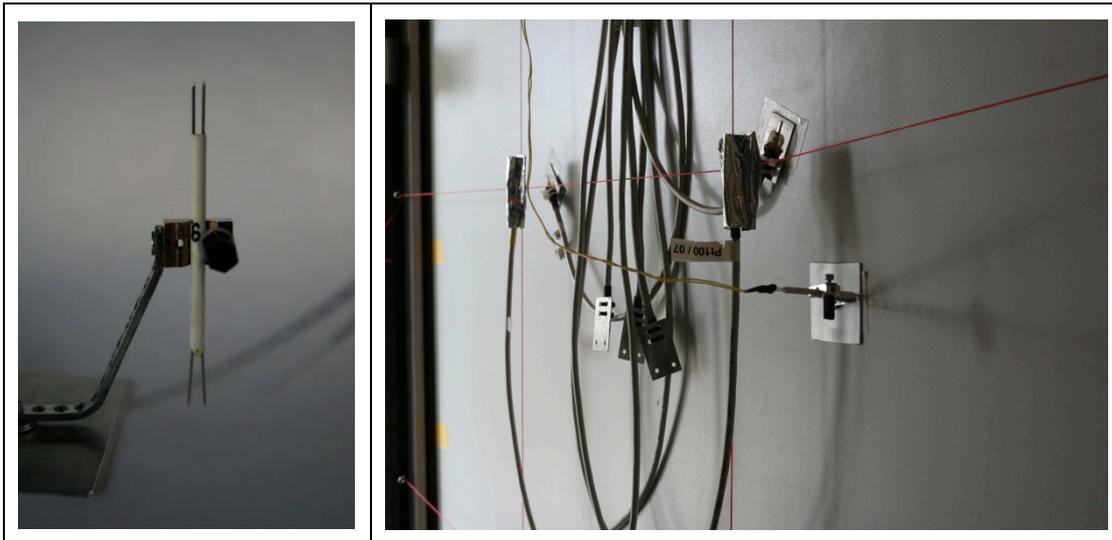


Abbildung 24: Hitzdrahtsensor (links). Anordnung auf Probe zur Strömungsmessung (rechts)

Die Messungen wurden an verschiedenen Stellen innerhalb des Messfeldes auf der Kalt- sowie auf der Warmseite durchgeführt (Abbildung 25 und Abbildung 26). Die Ergebnisse der Strömungsmessungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

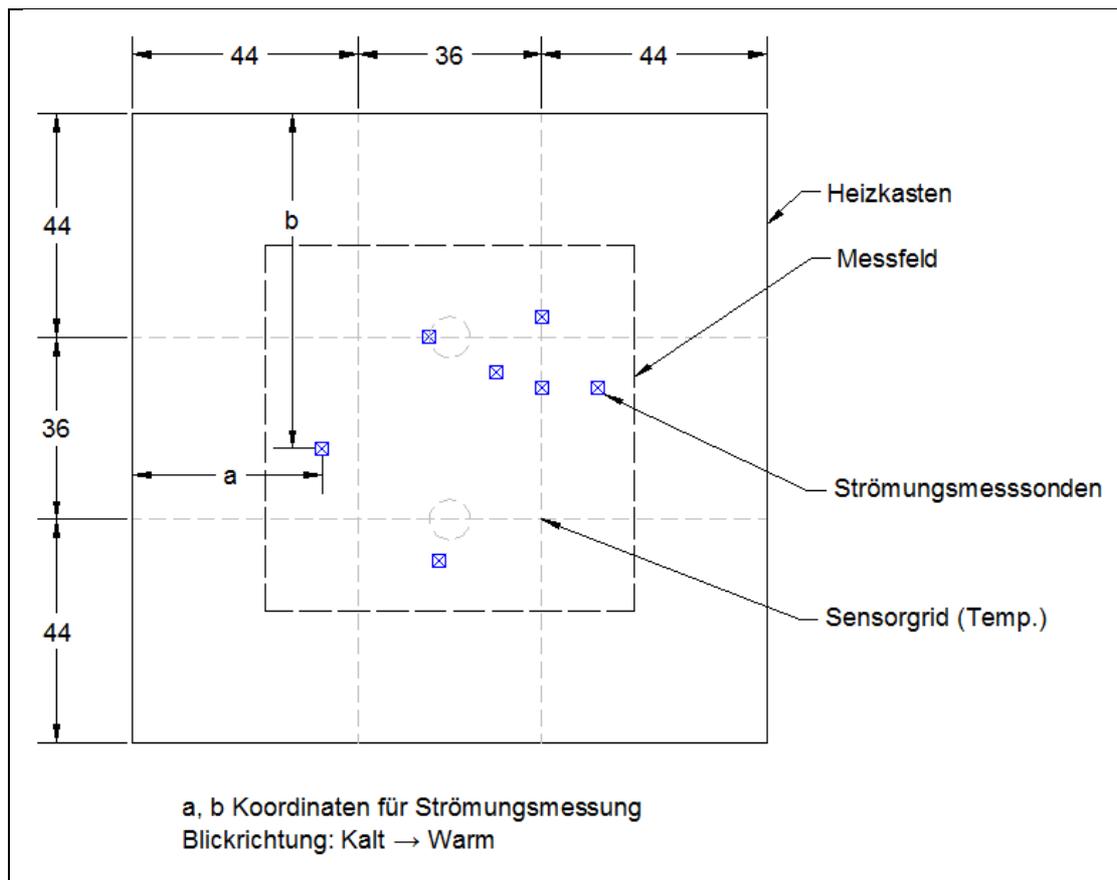


Abbildung 25: Positionen der Strömungsmesssonden (Kaltseite)

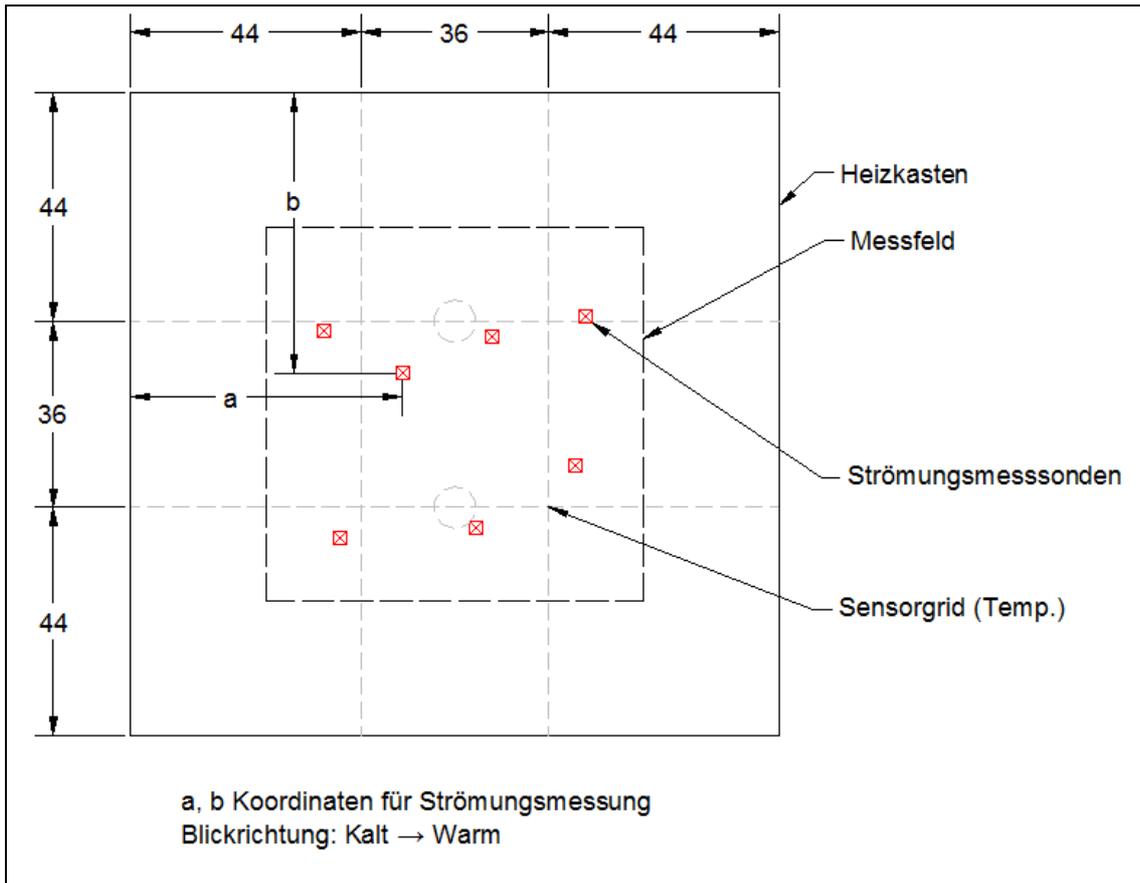


Abbildung 26: Positionen der Strömungsmesssonden (Warmseite)

	Ort	Koordinaten		Temp [°C]	Ab- stand [mm]	Richtung (Strömung)	Strömung [m/s]	Kombi- niert [m/s]
		a [cm]	b [cm]					
001	Kaltseite	58	44	8.78	1	Vertikal	0.05942	Vergleich bei ver- schie- denen Ab- ständen
002	Kaltseite	58	44	8.52	2	Vertikal	0.07442	
003	Kaltseite	58	44	8.28	5	Vertikal	0.10409	
004	Kaltseite	58	44	8.39	10	Vertikal	0.10539	0.134
005	Kaltseite	58	44	8.06	10	Horizontal	0.08355	
006	Kaltseite	80	54	8.20	10	Vertikal	0.06123	0.092
007	Kaltseite	80	54	7.82	10	Horizontal	0.06910	
008	Kaltseite	71	51	9.39	10	Vertikal	0.08211	0.105
009	Kaltseite	71	51	9.42	10	Horizontal	0.06475	
010	Kaltseite	80	40	9.43	10	Vertikal	0.06237	0.097
011	Kaltseite	80	40	9.55	10	Horizontal	0.07481	
012	Kaltseite	91	54	12.61	10	Vertikal	0.09314	0.221
013	Kaltseite	91	54	12.22	10	Horizontal	0.20016	
014	Kaltseite	37	66	13.69	10	Vertikal	0.10757	0.273
015	Kaltseite	37	66	13.94	10	Horizontal	0.25123	
016	Kaltseite	60	88	12.45	10	Vertikal	0.08138	0.205
017	Kaltseite	60	88	13.29	10	Horizontal	0.18821	
018	Warmseite	69	47	41.31	10	Vertikal	0.20007	0.256
019	Warmseite	69	47	40.36	10	Horizontal	0.15952	
020	Warmseite	52	54	41.00	10	Vertikal	0.16703	0.230
021	Warmseite	52	54	40.05	10	Horizontal	0.19870	
022	Warmseite	37	46	40.78	10	Vertikal	0.30146	0.375
023	Warmseite	37	46	40.63	10	Horizontal	0.22377	
024	Warmseite	87	43	42.88	10	Vertikal	0.21688	0.275
025	Warmseite	87	43	41.70	10	Horizontal	0.16870	
026	Warmseite	85	72	41.66	10	Vertikal	0.24775	0.320
027	Warmseite	85	72	41.04	10	Horizontal	0.20324	
028	Warmseite	66	84	41.40	10	Vertikal	0.48883	0.571
029	Warmseite	66	84	40.08	10	Horizontal	0.29511	
030	Warmseite	40	86	40.86	10	Vertikal	0.41257	0.659
031	Warmseite	40	86	41.34	10	Horizontal	0.51366	

Tabelle 13: Ergebnisse der Strömungsmessungen

Aus den Messungen 004 bis 017 kann die mittlere Geschwindigkeit auf der Kaltseite berechnet werden. Gleichfalls kann aus den Messungen 018 bis 031 die mittlere Geschwindigkeit auf der Warmseite bestimmt werden.

Anhand der Strömungsgeschwindigkeit kann der Wärmeübergangswiderstand berechnet werden. Für diese Untersuchung wurden zwei Berechnungsmethoden verglichen. Nach DIN EN ISO 6946 [26] lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient wie folgt berechnen:

$$h = 4 + 4 \cdot w \quad (5)$$

mit

w Strömungsgeschwindigkeit (m/s)
 h Wärmeübergangskoeffizient ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)

wobei der Wärmeübergangskoeffizient h den Reziprokwert des Wärmeübergangswiderstands darstellt.

Eine weitere Berechnungsmethode nach [27] gibt folgende Berechnung an:

$$h = 6,2 + 4,2 \cdot w \quad (6)$$

Die Messungen der Geschwindigkeiten (Tabelle 13) liegen zwischen $w = 0,09$ und $w = 0,66$ m/s. In Abbildung 27 sind die Berechnungen nach [25] und [27] für den Bereich von $w = 0$ m/s bis $w = 1$ m/s vergleichsweise dargestellt.

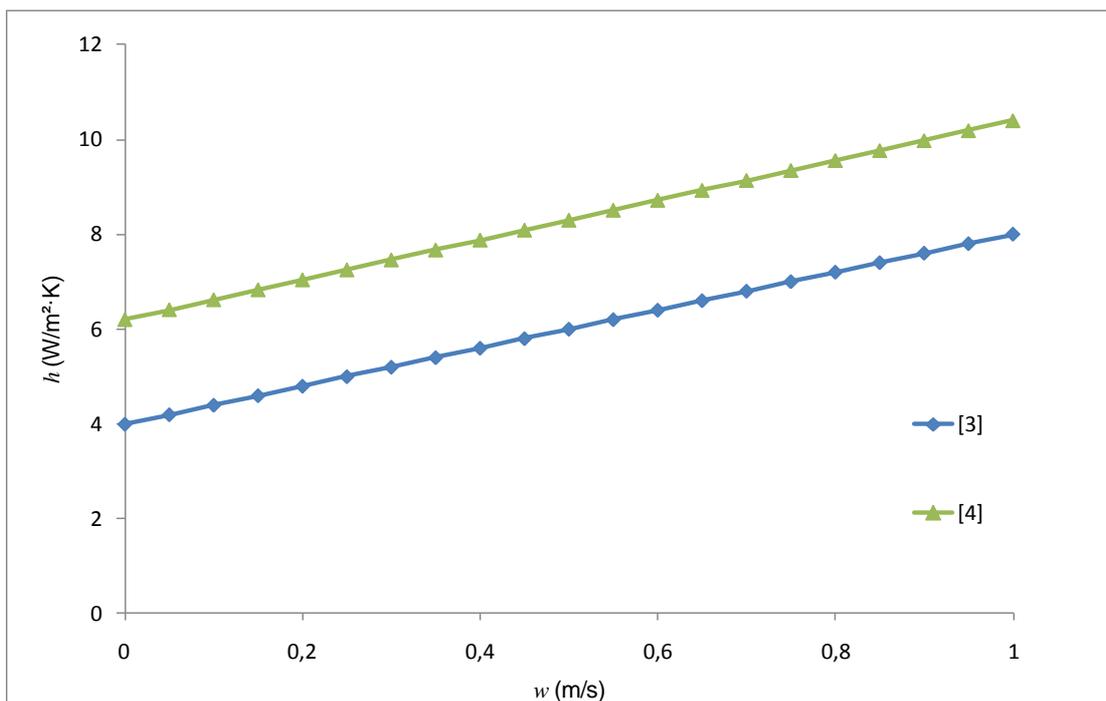


Abbildung 27: Vergleich der Berechnung für den Wärmeübergangswiderstand

Die Ergebnisse für die Übergangskoeffizienten und Übergangswiderstände für die mittleren Geschwindigkeiten auf der Kaltseite und auf der Warmseite sind zusammenfassend in Tabelle 14 dargestellt.

	Mittlere Geschwindigkeit [m/s]	Übergangskoeffizient nach [25] [W/m ² ·K]	Übergangswiderstand nach [25] [m ² ·K/W]	Übergangskoeffizient nach [26] [W/m ² ·K]	Übergangswiderstand nach [26] [m ² ·K/W]
Kaltseite	0,161 m/s	4,64	0,215	6,88	0,145
Warmseite	0,388 m/s	5,55	0,180	7,83	0,128

Tabelle 14: Zusammensetzung der Messungen und Ergebnisse

Die ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha_w = 5,55$ und $\alpha_k = 4,64$ für die Warm- bzw. Kaltseite fanden Eingang in die Berechnung der Wärmedurchgangsmessungen mit dem Heizkasten (vgl. Kap. 6.3).

6.5 Strahlungstechnische Charakterisierung von Werkstoffen

Um geeignete Materialien für einen möglichen Lagenaufbau der Gebäudehülle sinnvoll auswählen zu können, ist zum einen eine Datenbank für Materialkennwerte und zum anderen eine Software zur Simulation des Materialverhaltens im späteren Verbund notwendig. Hierbei ist es besonders wichtig, die strahlungstechnischen Kennwerte der Materialien zu ermitteln, da ein bedeutender Anteil des Wärmeaustauschs in Lagenaufbauten über Strahlung erfolgt.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Einzelmaterialien bezüglich ihrer optischen und wärmestrahlungstechnischen Eigenschaften vermessen. Die Charakterisierung der Materialien im Infrarotbereich (Wärmestrahlung) wurde zunächst mittels eines Versuchsaufbaus (Abbildung 28) mit einem Pyrogeometer (Kipp & Zonen Modell CGR 3, Spektrum: 4,5 – 44 μm) durchgeführt. Hierfür wurde jeweils die Wärmeabstrahlung durch die Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt, um so auf die Emissivität ε zurückzuschließen (der temperaturabhängige Anteil der Abstrahlung ist proportional zu σ und zu T^4):

$$q_1 = q_0 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4 \quad (7)$$

$$q_2 = q_0 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_2^4 \quad (8)$$

mit

q_1, q_2	Strahlung gemessen mit einem Pyrogeometer (W/m ²)
$\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$	Temperaturabhängige Abstrahlung der Probe (W/m ²)
q_0	Temperaturunabhängiger Strahlungsanteil (Reflexion und Transmission), der auf den Sensor trifft und aus dem Anteil der Umgebungsstrahlung besteht, der durch die Probe tritt und aus dem Anteil der an der Probe reflektierten Strahlung des Sensors selbst (W/m ²)
ε	Emissivität der Messprobe
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
T_1, T_2	Oberflächentemperatur (entsprechend zu q_1, q_2 , (K))

Wird die Messung bei mindestens zwei verschiedenen Oberflächentemperaturen T_1 und T_2 durchgeführt, dann lässt sich die Emissivität errechnen. Die Oberflächentemperatur wurde mit Hilfe Thermoelementen (Typ K) und einem Datenerfassungssystem (Agilent Modell 34980A) bestimmt. Die Variation der Temperatur erfolgte durch Auflegen von Heizplatten auf die Probe.

Die Versuche wurden weiterhin bei verschiedenen Umweltbedingungen (Innenraum bei Zimmertemperatur, Außenraum bei klarem Nachthimmel) vorgenommen, um Rückschlüsse auf die Zu-

sammensetzung des temperaturunabhängigen Strahlungsanteils q_0 zu erhalten und somit die Transmission τ und die Reflexion ρ zu bestimmen:

$$q_0 = \tau \cdot q_{Ein} + \rho \cdot q_{Gerät} \quad (9)$$

mit

q_0	Temperaturunabhängiger Strahlungsanteil (W/m ²)
q_{Ein}	Umwelteinstrahlung (gemessen mit Pyrgeometer, W/m ²)
$q_{Gerät}$	Abstrahlung des Geräts ($q_{Gerät} = \sigma \cdot T_{Gerät}^4$, (W/m ²))
τ	Transmission der Messprobe
ρ	Reflexion der Messprobe

Führt man diese Messungen bei mindestens zwei verschiedenen Umgebungsstrahlungen q_{Ein} durch, lassen sich τ und ρ berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 dargestellt. Die Pyrgeometermethode erwies sich als erfolgreich für alle untersuchten Materialien außer für die ETFE-Folie. Hier zeigten die Messungen sehr hohe Streuungen und es wurde für dieses Material auf am Institut verfügbare Daten eines ETFE-Folienmaterials desselben Herstellers zurückgegriffen. Zudem erfolgten eigene Messungen mit einem IR-Spektrometer.

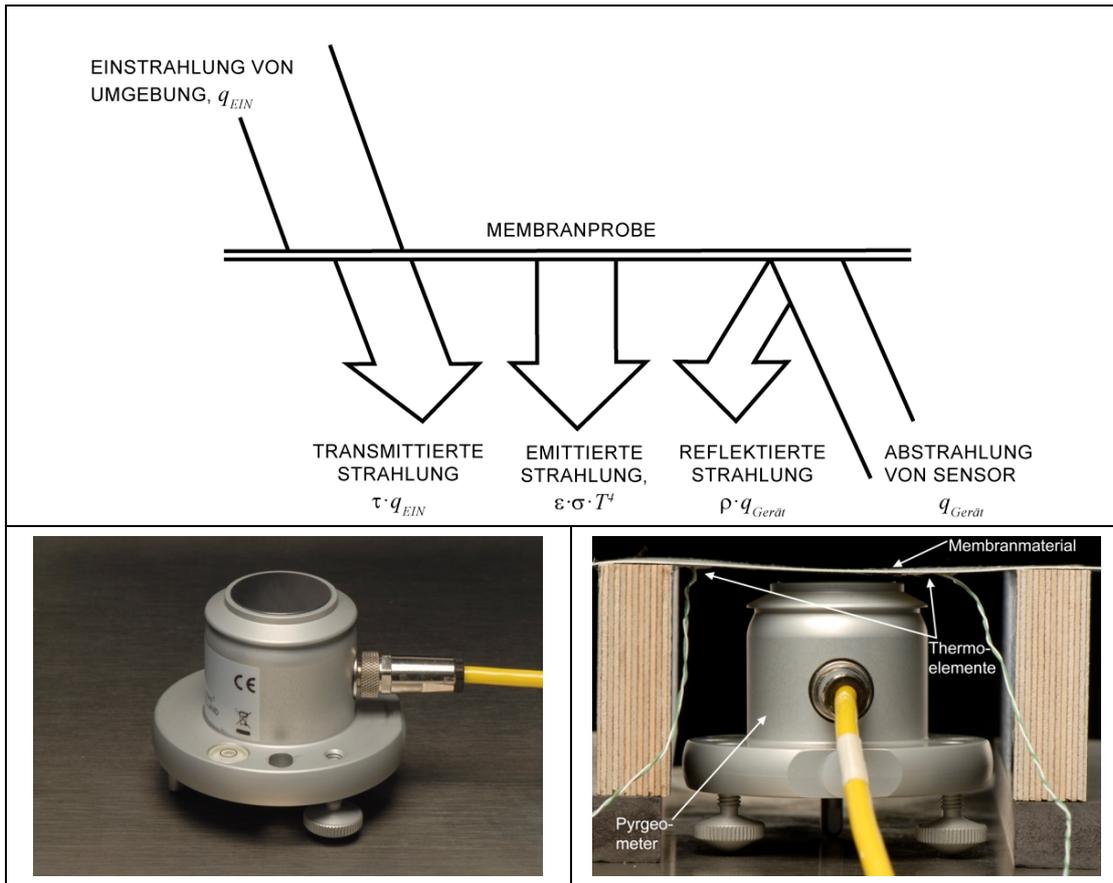


Abbildung 28: Oben: Strahlungsvorgänge an der Messprobe, Unten: Pyrometer und Versuchsaufbau zur Bestimmung der strahlungstechnischen Eigenschaften von Membranmaterialien und Folien

Für die Ermittlung der strahlungstechnischen Kenndaten im solaren Strahlungsspektrum wurde ein am Institut zur Verfügung stehendes Spektralphotometer (Varian Modell Cary 5000, Spektrum: 250 nm – 2500 nm, Abbildung 29) eingesetzt. Mit diesem Gerät lassen sich die Kennwerte in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmen (Abbildung 30 und Abbildung 31). Referenzweißstandard bei den Messungen war eine PTFE-Probe. Diese wurden über den gewünschten Bereich wie folgt integriert, um gewichtete Mittelwerte zu bestimmen:

$$\tau_{SOL} = \frac{\int_{250nm}^{2500nm} S_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{250nm}^{2500nm} S_{\lambda} \cdot d\lambda} \quad (10)$$

mit

- τ_{SOL} Gewichteter Mittelwert der Transmission
- S_{λ} Relative spektrale Globalstrahlungsverteilung nach [18]
- $\tau(\lambda)$ Mit dem Spektralphotometer gemessene Transmission bei der Wellenlänge λ

Analog erfolgte die Bestimmung der gewichteten Mittelwerte für die Reflexion und die Absorption.

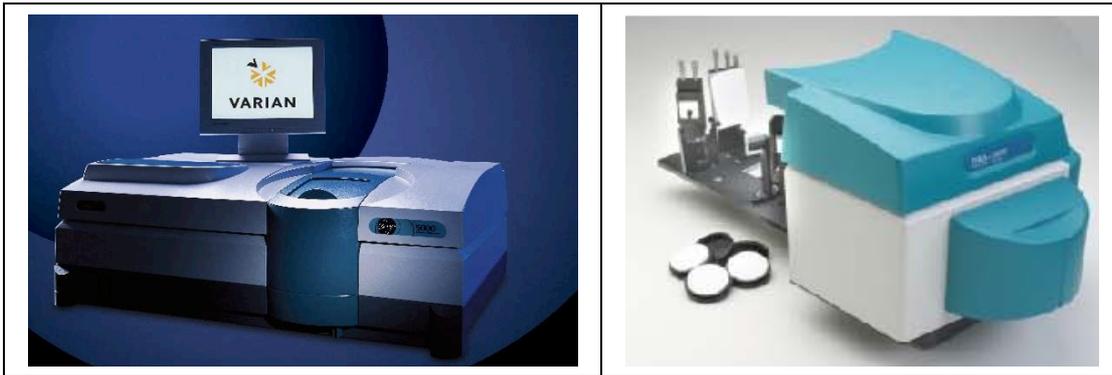


Abbildung 29: Spektralphotometer Varian Modell Cary 5000 und Ulbricht-Kugel

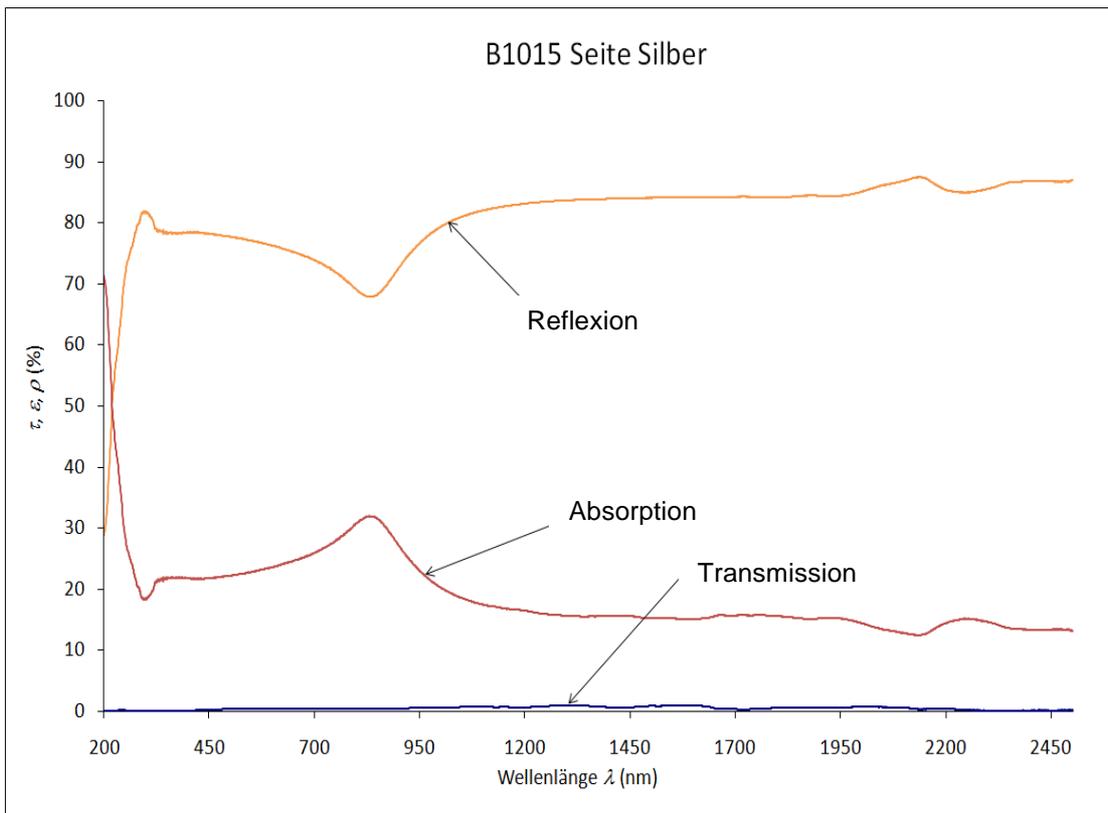


Abbildung 30: Grafen für die Transmission, die Reflexion und die Absorption im Spektralbereich des Spektralphotometers für Low-E-beschichtetes PVC/PES (Verseidag B1015+Low-E, Low-E-Beschichtung gemessen)

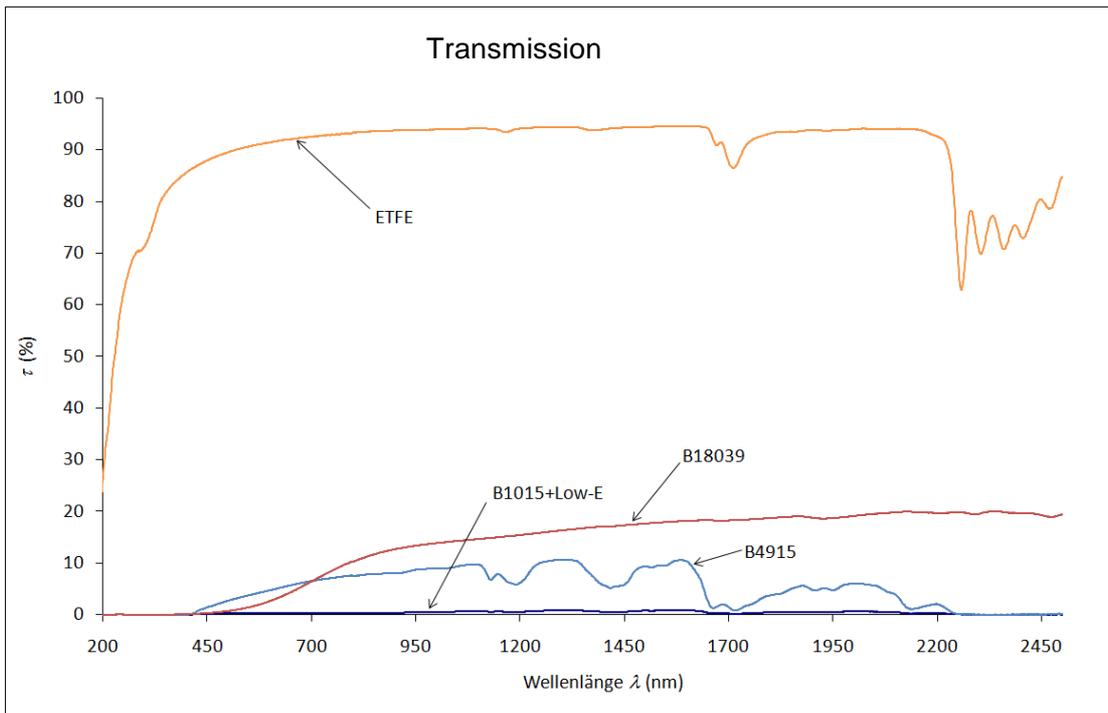


Abbildung 31: Vergleich der Transmissionswerte für verschiedene Membranmaterialien, gemessen mit dem Spektralphotometer (Bezeichnungen siehe Tabelle 15)

Für die Bestimmung der strahlungstechnischen Eigenschaften im infraroten Spektralbereich (2,5 μm bis 35 μm) wurde ein am Institut zur Verfügung stehendes FTIR Spektrometer (Bruker, Tensor 27, Spektrum: 2500 nm – 35000 nm) eingesetzt. Referenzweißstandard bei den Messungen war eine Gold-Probe. Mit diesem Gerät lassen sich die strahlungstechnischen Kennwerte in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmen. Diese wurden dann über den gewünschten Bereich wie folgt integriert (am Beispiel der Transmission im Infrarotspektrum):

$$\tau_{IR} = \frac{\int_{2500nm}^{35000nm} \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{2500nm}^{35000nm} d\lambda} \quad (11)$$

mit

- τ_{IR} Mittelwert der Transmission
- $\tau(\lambda)$ Mit dem IR-Spektrometer gemessene Transmission bei der Wellenlänge λ

Analog erfolgte die Bestimmung der Mittelwerte für die Reflexion und die Absorption. Diese Mittelwertbildung ist angelehnt an die DIN EN 12898. Eine Gewichtung mit der relativen spektralen Ausstrahlung des schwarzen Körpers erscheint den Autoren zur Bestimmung der Emissivitätswerte besser geeignet zu sein, wird aber nicht angewandt, um die Konformität mit der genannten Norm zu wahren. Auf der Grundlage des Kirchhoffschen Gesetzes wird die Emissivität gleichgesetzt mit der Absorption.

In Abbildung 32 sind verschiedene Materialien dargestellt, die auf ihre strahlungstechnischen Eigenschaften untersucht wurden. Eine Zusammenfassung der entsprechenden Ergebnisse findet sich in Tabelle 15. Die gewonnenen Daten wurden bei der Umsetzung einer Computersimulation zur Modellierung der Wärme- und Lichtdurchgangsprozesse eingesetzt (siehe Kapitel 7). Im Be-

reich der Wärmestrahlungseigenschaften wurde für die Simulationsberechnungen auf die Messergebnisse des FTIR-Spektrometers zurückgegriffen.

Neben den Geweben und Folien erfolgte auch die Vermessung von Lagenaufbauten im Spektralphotometer. Die ermittelten fotometrischen und radiometrischen Kennwerte können Tabelle 16 entnommen werden. Die größte Transmission erreicht Lagenaufbau 006 bestehend aus lediglich zwei Lagen ETFE-Folie mit zwischenliegendem Luftraum. Die Lagenaufbauten 003 bis 005 sind sich bezüglich der Durchlässigkeit für solare Strahlung sehr ähnlich und weisen Transmissionswerte von 0,1744 (VIS) auf. Aufbau 007 besteht aus zwei Lagen eines PVC-beschichteten PES-Gewebes und einem Luftzwischenraum und zeigt eine Transluzenz von 0,0114 (VIS). Sehr geringe Durchlässigkeiten weisen die Lagensysteme 001 sowie 008 auf. Sowohl die PES-Dämmlage wie auch die Low-E-Beschichtung verhindern bei diesen Hüllen einen signifikanten solaren Strahlungsdurchgang. Die Transluzenz des Systems 002 liegt bei 0,0487 (VIS).

Der Einsatz von PES-Vlies als Dämmlage führt, bei den benötigten Dicken zur Erreichung guter Dämmwerte, zu sehr geringen Transmissionswerten. Alternative Aufbauten unter Verwendung von Wabensystemen, Nanogel-Werkstoffen oder auch pyrogener Kieselsäure sind interessant, um das Ziel in einem Aufbau sowohl einen großen Dämmwert wie auch eine signifikante Transmission zu erreichen. Weitere Untersuchungen sind hierfür nötig.



Abbildung 32: Auf strahlungstechnische Kennwerte untersuchte Membran- und Folienmaterialien (Bezeichnungen und Messergebnisse siehe Tabelle 15)

Probe		VIS	UV/VIS/NIR	IR _{Pyrgeo}	IR _{FTIR}
PVC/PES Verseidag B1015 + Low-E - Seite A (Weiß)	Absorption, α Emissivität, ε	0,1001	0,2025	0,899	0,9335
	Transmission, τ	0,0029	0,0037	0	0,0156
	Reflexion, ρ	0,8970	0,7938	0,101	0,0509
PVC/PES Verseidag B1015 + Low-E - Seite B (Silber)	Absorption, α Emissivität, ε	0,2282	0,2251	0,292	0,2881
	Transmission, τ	0,0029	0,0037	0	0,0156
	Reflexion, ρ	0,7688	0,7713	0,708	0,6962
PVC/PES Verseidag B4915	Absorption, α Emissivität, ε	0,0653	0,145	0,867	0,9367
	Transmission, τ	0,0379	0,0522	0	0,0170
	Reflexion, ρ	0,8970	0,8027	0,133	0,0464
PTFE/Glass Verseidag B18039	Absorption, α Emissivität, ε	0,5650	0,38	0,684	0,8979
	Transmission, τ	0,0162	0,0745	0,091	0,0343
	Reflexion, ρ	0,4188	0,5455	0,225	0,0583
Nowofol ETFE-Folie (Dicke: 0,1 mm)	Absorption, α Emissivität, ε	0,0103	0,0105	0,897	0,7732
	Transmission, τ	0,9059	0,9106	0,074	0,1794
	Reflexion, ρ	0,0838	0,0789	0,029	0,0474

VIS: 380 – 780 nm (Spektralphotometermessung)

UV/VIS/NIR: 250 – 2500 nm (Spektralphotometermessung)

IR_{Pyrgeo}: 4,5 – 44 μ m (Pyrgeometermessung)

IR_{FTIR}: 2.500 nm – 35.000 nm (FTIR-Messung)

Tabelle 15: Strahlungstechnische Kennwerte der vermessenen Membranmaterialien

Lagenaufbau		VIS	UV/VIS/NIR
001	Absorption, α	0,2604	0,2785
	Transmission, τ	0,0021	0,0035
	Reflexion, ρ	0,7375	0,7180
002	Absorption, α	0,3431	0,3591
	Transmission, τ	0,0487	0,0561
	Reflexion, ρ	0,6082	0,5846
003	Absorption, α	0,3001	0,3373
	Transmission, τ	0,1744	0,1825
	Reflexion, ρ	0,5256	0,4802
004	Absorption, α	Messung nur im komprimierten Zustand möglich (vergl. Aufbau 003)	
	Transmission, τ		
	Reflexion, ρ		
005	Absorption, α	0,3001	0,3373
	Transmission, τ	0,1744	0,1825
	Reflexion, ρ	0,5256	0,4802
006	Absorption, α	0,0325	0,0306
	Transmission, τ	0,8350	0,8431
	Reflexion, ρ	0,1325	0,1263
007	Absorption, α	0,0944	0,1843
	Transmission, τ	0,0114	0,0200
	Reflexion, ρ	0,8942	0,7957
008	Absorption, α	0,1039	0,2074
	Transmission, τ	0,0000	0,0001
	Reflexion, ρ	0,8961	0,7924

Tabelle 16. Strahlungstechnische Kennwerte der vermessenen Lagenaufbauten nach Tabelle 12, gemessen jeweils von „außen“ (Kaltseite) nach „innen“ (Warmseite).

7 Simulation

7.1 Grundlagen

Gegenüber üblichen Wandaufbauten aus massiven Werkstoffen besitzen Gewebe und Folien lediglich geringe Wärmespeicherkapazitäten. Sie reagieren daher auf Änderungen der Umgebungstemperaturen fast ohne Verzögerung und sehr dynamisch. Aufgrund der überwiegend großen Emissivitätswerte der beschichteten Gewebe und auch der Folien spielen Austauschvorgänge durch Strahlung bei diesen Materialien eine wichtige Rolle beim Wärmeaustausch. Daher müssen neben den Wärmeleitungs- und Konvektionsvorgängen auch die Strahlungseffekte berücksichtigt werden. Diese beinhalten dabei sowohl die Strahlungsemission als auch die Strahlungsabsorption- sowie Strahlungstransmission und damit die strahlungsbedingten Energieeinträge oder -verluste.

Bei der Bilanzierung einer mehrlagigen Gebäudehülle sind demnach drei Effekte (Leitung, Konvektion, Strahlung) einzubeziehen, um eine physikalisch korrekte Beschreibung des Wärmeaustausches zu gewährleisten. Die wärmetechnischen Eigenschaften und damit die Temperaturgradienten im Schichtenaufbau beeinflussen wesentlich die Feuchtegradienten im Hüllenaufbau. Auch die Wasserdampfdiffusionseigenschaften der Schichten im Lagenaufbau wie auch die relativen Luftfeuchten beidseitig der Hülle beeinflussen diesen Feuchtegradienten.

Zur Bewertung der Qualitäten unterschiedlicher Hüllenentwürfe wird eine Betrachtung der Feuchteverteilung im Lagenaufbau mit untersucht. Dies ist nötig, um Probleme durch Kondensation im Lagenaufbau und damit die Vorherbestimmtheit von Baumängeln durch den Lagenaufbau bereits im Entwurfsstadium ausschließen zu können. Die umgesetzte Simulationssoftware berücksichtigt die beschriebenen physikalischen Vorgänge und erlaubt eine Bewertung der Wärme- sowie der Feuchtetransportvorgänge für ebene und planparallele Lagenaufbauten unter stationären Bedingungen.

Der strahlungsbedingte Wärmetransport, der durch natürliche Konvektion begründete Wärmetransport, wie auch die Festkörperleitung sind im Berechnungsprogramm in entsprechenden Algorithmen umgesetzt. Nicht erfassen lassen sich bisher Effekte erzwungener Konvektion. Die Beschreibung von Werkstoffen mit veränderlichen spezifischen Wärmekapazitätswerten (Latentwärmespeichermaterialien, PCM) ist derzeit ebenfalls nicht möglich. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsgrundlagen, des Programmaufbaus und auch der Handhabung findet sich im entsprechenden Handbuch [29]. Durch das Programm wird ein Wärmedurchgangswert berechnet, der die Nettowärmeströme unter Einbeziehung der Strahlungseffekte berücksichtigt ("U-Value"). Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem U-Wert nach DIN EN ISO 6946.

Abbildung 33 zeigt im Schema die verschiedenen Wärme- und Feuchtigkeitstransportvorgänge, die zu beachten sind.

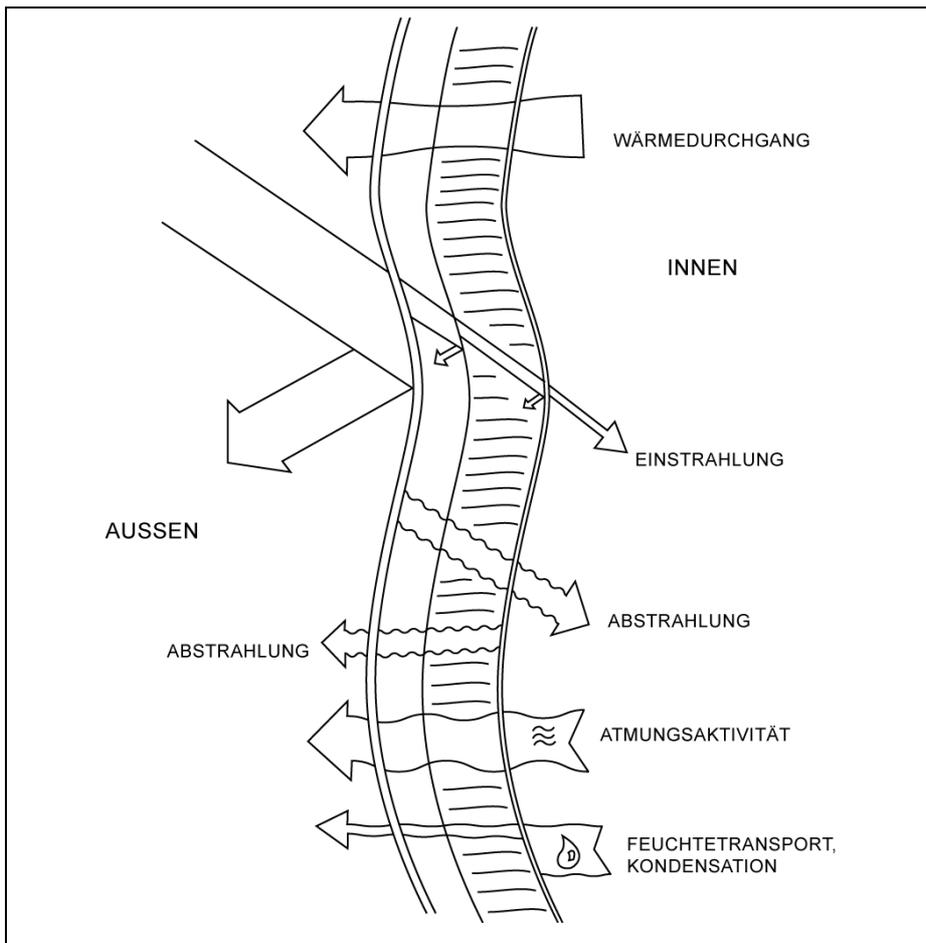


Abbildung 33: Vorgänge, die die Effektivität mehrlagiger Hüllen wesentlich beeinflussen

7.2 Umsetzung

Auf der Basis von vorangegangenen Arbeiten am ILEK wurde ein Simulationstool für Wärmestrahlungs-, Wärmeleitungs- und Wärmekonvektionsvorgänge in mehrlagigen textilen Gebäudehüllen entworfen und programmiert. Hierbei finden Leitungs- und Konvektionsvorgänge in Gasen Berücksichtigung wie auch der strahlungsbedingte Wärmeaustausch unter Beachtung von Reflexions- und Absorptionsvorgängen an den einzelnen Lagen. Die Festkörperleitung ist ebenfalls implementiert. Im Rahmen der Forschungsaktivitäten war es nicht möglich, in die Berechnung der Feuchtegradienten den Einfluss des konvektiven Feuchtetransports mit einzubeziehen. Dies ist nötig, um beispielsweise Trocknungsvorgänge mittels Durchströmung der Lagenzwischenräume mit trockener Luft zu simulieren. Eine entsprechende Programmerweiterung ist für die Zukunft vorgesehen.

Durch die Definition eines Lagenaufbaus aus verschiedenen, hintereinander liegenden Materialien und den Temperaturen beiderseits des Bauteils lassen sich Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe im Bauteil bestimmen.

Das Simulationstool dient dem Design optimaler Hüllenaufbauten und erlaubt eine Bewertung der Aspekte Dämmung und Feuchte. Hierzu erfolgen Simulationen der Temperatur- und Feuchtegradienten für unterschiedliche Außen- und Innenraumkonditionen. Die Zahl nötiger Messungen an Hüllenaufbauten kann durch Anwendung des Simulationstools im Entwurfsprozess geeigneter Lagenaufbauten deutlich reduziert werden.

Grundlage des Simulationstools ist ein von M. Rubin [19] zur Berechnung von Isolierverglasungen vorgestelltes Berechnungsverfahren, das im Rahmen der Umsetzung erweitert und angepasst wurde, um den speziellen Eigenschaften der Folien und Gewebelagen im Hüllenaufbau gerecht zu werden. Im Unterschied zu Verglasungen, die für IR-Strahlung ($3\ \mu\text{m} - 50\ \mu\text{m}$) weitestgehend undurchlässig sind, kann dies für Folien und Gewebe nicht vorausgesetzt werden. Entsprechende

Erweiterungen bei den Berechnungsmethoden berücksichtigen diese Effekte. Zudem ist die Festkörperleitung ebenfalls implementiert.

Mittels des von Rubin vorgestellten und für textile Hüllenaufbauten erweiterten und angepassten Matrizenberechnungsverfahren ist es möglich, die Leitungs- und Strahlungsvorgänge in mehrlagigen textilen Hüllenaufbauten sehr realitätsnah nachzubilden. Vorausgesetzt wird dabei, dass Energieströme lediglich senkrecht zu den Flächen der Einzellagen auftreten. Die Berechnung der Feuchtegradienten geschieht nach [20]. Eine detaillierte Beschreibung der Software (Documentation) liegt in Form eines eigenständigen Berichtes [29] vor.

Die Berechnungsalgorithmen sind in einem Visual Basic for Applications (VBA)-Code umgesetzt und nutzen eine Excel-basierte Programmoberfläche zur Dateneingabe sowie zur Ergebnisdarstellung. Die Oberfläche ist in Abbildung 34 dargestellt.

Multilayer Cladding Analysis

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Solar Incident Radiation (VIS)	0 W/m ²
OUTSIDE	
Sky Cloud Cover	100 %
Outside Obj/Cloud Emissivity	0.9
Outside Air Temperature	10 °C
Outside Relative Humidity	90 %
Outside Wind Speed	0 m/s
INSIDE	
Inside Air Temperature	40 °C
Inside Relative Humidity	10 %
Inside Object Temperature	40 °C
Inside Object Reflectivity	0.1
Inside Object Emissivity	0.9

Quick Analysis (conduction only)

Full Analysis

Calculate

Show Required Input

SYSTEM PERFORMANCE

U-value	-3.02	W/m ² ·K
R (SI)	-0.33	m ² ·K/W
R (US)	-1.88	ft ² ·F·h/Btu
Transmitted Radiation (VIS)	0	W/m ²
Inner Surface Radiation (IR)	426	W/m ²

positive U-value ► heat flow into room
negative U-value ► heat flow out of room

MULTILAYER CONSTRUCTION

LAYERS	Material Layer	1		2														TOTAL
		Surface	Outer	Inner														
	Type	Surface Film	Material	Airspace	Material	(unused)	Surface Film											
	Description	Outside Air Layer	ETFE		ETFE												Inside Air Layer	
	Thickness	mm	0.1	10	0.1													10.2
	Mass	kg/m ²																
	Specific Heat Capacity	J/kg·K																
	Thermal Conductivity	W/m·K	0.24		0.24													
	Thermal Conductance	W/m ² ·K	12.3	2400.0	2.5	2400.0										2.0	1.56	
	VIS Transmissivity	%	10.3		10.3													
	VIS Reflectivity	%	90.6	90.6		90.6	90.6											
	IR Transmissivity	%	0		0													
	IR Reflectivity	%	2.9	2.9		2.9	2.9											
	IR Emissivity	%	0.9	0.9		0.9	0.9											
	Permeability	ng/Pa·s·m	0.000000		0.000000													
	Permeance	ng/Pa·s·m ²	0		0													0.0
	Qr - Radiative Heat Flux	W/m ² ·K	328	359	362		423	426									491	
	Qc - Cond/Conv Heat Flux	W/m ² ·K	123	182	37		67	54									80	
	Temperature Change	°C	5.6	0.0	12.0		0.0										5.6	30.0
	Temperature at Surface	°C	10.0	14.834	14.834	26.876	26.876										40.0	
	Vapour Pressure Change	hPa	0.000	1.825	0.000	1.825											0.0	3.6
	Vapour Pressure at Surface	hPa	11.0	11.0	9.2	9.2	7.4										7.4	
	Saturation Vapour Pressure	hPa	12.3	16.9	16.9	35.4	35.4										73.9	
	Relative Humidity	%	90.0	65.5	54.7	26.0	20.9										10.0	

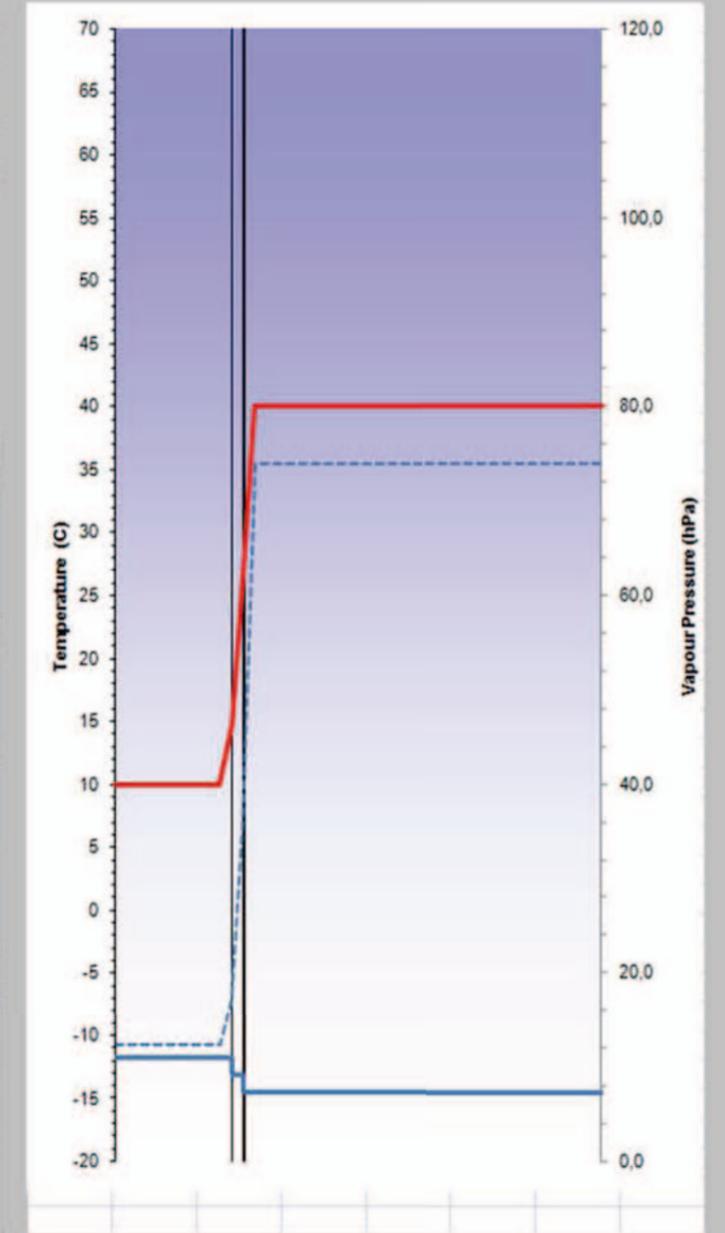


Abbildung 34: Simulation von Wärmeleitungs- und Wärmestrahlungsvorgängen – Dargestellt ist die grafische Eingabe- und Ausgabeoberfläche der Simulationssoftware (Stand 12.2008) mit der angeschlossenen grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse (rechts)

7.3 Simulationsergebnisse

7.3.1 Vergleich der U-Werte

Um die Simulationsergebnisse mit Messergebnissen zu vergleichen, wurden drei Messungen mit doppelagigen Membran- bzw. Folienaufbauten durchgeführt. Bei solchen Aufbauten ist der Wärmeaustausch durch Strahlung besonders maßgebend, was einen sinnvollen Vergleich mit der Funktionalität der Simulationssoftware ermöglicht.

Die Umgebungsparameter in der Simulation wurden so gewählt, dass sie den Bedingungen im Inneren des Heizkastens entsprachen. Hierbei wurden folgende Werte eingesetzt:

	Emissivität	Reflexion	Oberflächentemperatur
Messkasten	0,1	0,9	Raumtemperatur Warmseite
Kühlkörper	0,9	0,1	Raumtemperatur Kaltseite

Tabelle 17: Umgebungsbedingungen des Heizkastens

Ein weiterer wichtiger Faktor, der Einfluss auf den U-Wert hat, ist der Wärmeübergangswiderstand ($1/\alpha$) an den Membranoberflächen. Dieser ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit, welche aufgrund der Umluftventilatoren auf der Warm- und Kaltseite nicht als Null vorausgesetzt werden kann. Für den Vergleich zwischen den Simulationen und den Messungen des Heizkastens wurden die Wärmeübergangskoeffizienten nach Kapitel 6.4 – Tabelle 14 herangezogen.

	Wärmübergangswiderstand $1/\alpha$ ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)	α ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
Kaltseite	0,215	4,64
Warmseite	0,180	5,55

Tabelle 18: Werte für Wärmeübergangswiderstand auf Warm- und Kaltseite

Es besteht das Ziel, sowohl die Übergangswiderstände als auch die Annahmen für die strahlungstechnischen Eigenschaften in Tabelle 17 mit weiteren Messungen zu verifizieren. Sensibilitätsanalysen mittels der Simulationssoftware haben ergeben, dass die Werte für den Wärmeübergangswiderstand zwar erheblich die Membranoberflächentemperaturen, den Gesamtwärmefluss und den U-Wert beeinflussen, aber nur geringfügige Einwirkung auf den $1/R$ -Wert haben ($1/R$ – Wärmefluss durch den Lagenaufbau in Abhängigkeit der Oberflächentemperaturen, nicht der Umgebungstemperaturen).

In Tabelle 19 sind die Messergebnisse mit dem Heizkasten und vergleichend die Resultate der Simulation dargestellt. Es zeigt sich, dass bei zwei (Aufbau 006 und Aufbau 007) der drei Aufbauten die gemessenen U-Werte sehr gut mit dem Ergebnis der Simulation übereinstimmen. Bei dem Low-E-beschichteten Material (Aufbau 008) ist die Abweichung größer (10,6%). Auffällig am Vergleich der Ergebnisse zwischen der Messung und der Simulation ist die Tatsache, dass unter Heranziehung der ermittelten Wärmeübergangswerte und der strahlungstechnischen Kennwerte eine sehr gute bis gute Übereinstimmung bei den U-Werten erzielt werden kann. Die Oberflächentemperaturwerte zwischen der Simulation und der Messung jedoch differieren auf der Warmseite der Proben deutlich. Hier besteht für dieses Phänomen noch weiterer Klärungsbedarf.

Zu bedenken ist bei der Betrachtung der dargestellten U-Werte, dass diese lediglich für die versuchs- bzw. simulationstechnischen Randbedingungen gültig sind.

		Warmseite		Kaltseite					Abweichung	
		Raum [°C]	Oberfläche [°C]	Oberfläche [°C]	Raum [°C]				Wärmefluss [W/m²]	U-Wert [W/m²·K]
Aufbau 006 ETFE, 12 mm Luft, ETFE	Experiment	39,59	33,56	20,07	11,53	75,24	2,68	5,58	2,2%	
	Simulation	39,59	27,95	18,72	11,53	73,54	2,62			
Aufbau 007 PVC/PES (B1015), 12 mm Luft, PVC/PES (B1015)	Experiment	38,31	33,38	19,04	11,39	63,98	2,38	4,46	-1,2%	
	Simulation	38,31	27,96	18,72	11,39	64,75	2,41			
Aufbau 008 PVC/PES+LowE, 12 mm Luft, PVC/PES+LowE	Experiment	40,94	36,46	16,05	9,91	58,78	1,89	2,88	10,6%	
	Simulation	40,94	32,51	15,52	9,91	52,58	1,69			

Tabelle 19: Vergleich von Messungen mit Simulationsergebnissen

7.3.2 Analyse von Hüllenaufbauten

Im Rahmen der Untersuchungen der wärme- und feuchttechnischen Eigenschaften ausgewählter Hüllenaufbauten erfolgten Simulationen für unterschiedliche Wettersituationen. Ausgewählt wurden hierfür folgende Bedingungen:

1. Klare, kalte Winternacht
2. Sonniger, heißer Sommertag

Die jeweiligen Innen- und Außentemperaturen wie auch die Feuchtwerte sind in Tabelle 20 dargestellt.

	Außen-			Innen-	
	Temp. [°C]	Feuchte [%]	Solarstrahlung [W/m ²]	Temp. [°C]	Feuchte [%]
klare, kalte Winternacht	-14	84	0	22	50
sonniger, heißer Sommertag	35	41	600 (auf Vertikale)	22	50

Tabelle 20: Wetter- und Innenraumbedingungen für die Simulation

Die Ergebnisse der Simulation für den Aufbau 001 sind nachfolgend in den Abbildungen AAbbildung 35 bis Abbildung 36 zusammen mit den weiteren Eingabewerten dargestellt.

Für den Aufbau 001 nach Abbildung 23 (in der Anordnung als vertikales Fassadenelement) ergibt sich für den Winterfall das Problem der Feuchte Kondensation in äußeren Bereichen der Dämmschicht (Abbildung 35). Dabei ist der berechnete Wasserdampfpartialdruck (blaue durchgezogene Linie) größer als der entsprechende Sättigungpartialdruck (blaue gestichelte Linie). Die Simulation geht dabei von nichtbelüfteten Zwischenräumen mit konstantem Luftvolumen aus. Für einen entsprechenden Aufbau könnte eine kontrollierte Belüftung des äußeren Luftzwischenraumes ein probates Mittel sein, die Durchfeuchtung der Dämmung auf Grund von Kondensation zu verhindern. Die Simulation zeigt sehr anschaulich die Abkühlung der äußeren Folie unter die Umgebungstemperatur auf Grund der ungünstigen Strahlungsenergiebilanz mit dem klaren Nachthimmel. Für horizontal liegende Lagenaufbauten ist dieser Effekt noch deutlicher, da der Sichtfaktor (Sky View Faktor) zwischen Hülle und Himmel größer wird.

Effekte einer gezielten Durchströmung des Luftraumes zwischen den einzelnen Lagen können bisher noch nicht mit der erstellten Simulationssoftware berechnet werden. Hierfür ist weitere Entwicklungsarbeit nötig.

Der Sommerfall wurde ebenfalls untersucht für eine Anordnung als vertikales Fassadenelement. Hierfür sind die Eingabewerte und die Berechnungsergebnisse der Temperatur- und Feuchteverläufe in Abbildung 36 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Oberflächentemperatur auf der äußeren Oberfläche der Dämmlage deutlich über der Umgebungstemperatur liegt.

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Outside Air Temperature	-14 °C
Outside Relative Humidity	84 %
Outside Wind Speed	1,3 m/s
Solar Incident Radiation (Global)	0 W/m ²
Sky View Factor	0,5
Cloud Cover	0 %
Cloud Temperature	-14 °C
Cloud Reflectivity (IR)	10 %
Cloud Emissivity	0,9
Outside Object Temperature	-14,00 °C
Outside Object Reflectivity (IR)	10 %
Outside Object Emissivity	0,9

Inside Air Temperature	22 °C
Inside Relative Humidity	50 %
Inside Object Temperature	22 °C
Inside Object Reflectivity (IR)	10 %
Inside Object Emissivity	0,9

Quick Analysis (conduction only) Show Required Input
 Full Analysis (conduction, convection, radiation)

Calculate

SYSTEM PERFORMANCE

total energy flux into room (SOL, IR, cond, conv)	Q_{in}^{rcs}	594	W/m ²
total energy flux out of room (IR, cond, conv)	Q_{out}^{rcs}	606	W/m ²
net energy flux at inner surface (SOL, IR, cond, conv)	Q_{net}	-12	W/m ²
radiative flux into room (SOL)	T		
radiative flux into room (SOL, IR)	g-value/SHGC	X -> fix!	
"U-Value"		-0,33	W/m ² ·K
"R-Value" (SI)		-3,00	m ² ·K/W
"R-Value" (US)		-17,04	ft ² ·F·h/Btu

clear sky emittance 80 W/m²
 cloud emittance 0 W/m²
 outside obj emittance 115 W/m²
 inside obj emittance 431 W/m²
 positive energy flux ► heat flow into room
 negative energy flux ► heat flow out of room

MULTILAYER CONSTRUCTION

LAYERS	Material Layer	1		2		3												TOTAL	
		Surface	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer		Inner
	Type	Surface Film	Material	Airspace	Material	Airspace	Material	(unused)	Surface Film										
	Description	Outside Air Layer	ETFE	Air	Fleece	Air	ETFE											Inside Air Layer	
	Thickness	mm	0,1	10	100	10	0,1												120,2
MATERIAL PROPERTIES	Thermal Conductivity	W/m·K	<input checked="" type="checkbox"/> Override 0,24		0,035		0,24											<input checked="" type="checkbox"/> Override 8,0	0,26
	Thermal Conductance	W/m ² ·K	23,0	2400,0	2,5	0,35	2,5	2400,0											
	SOL Transmissivity	%	91		0		91												
	SOL Reflectivity	%	7,9 7,9		80 80		7,9 7,9												
	IR Transmissivity	%	17,9		0		17,9												
	IR Reflectivity	%	4,7 4,7		3,5 3,5		4,7 4,7												
AIR	IR Emissivity	%	0,77 0,77		0,965 0,965		0,77 0,77												
	Permeability	ng/Pa·s·m	0,000500		170		0,000500												
	Permeance	ng/Pa·s·m ²	5,0		1700		5,00000												2,5
	Force Convection Airspeed	m/s																	
	Force Airspace Temperature	°C																	
OUTPUT	Radiative Flux (SOL)	W/m ²	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Radiative Heat Flux (IR)	W/m ²	208	248	242	253	417	425	423									430	
	Conductive/Convective Heat Flux	W/m ²	-322	-350	-38	-37	49	53	171									176	
	Temperature Change	°C	1,2	0,0	0,6	34,3	1,7	0,0										0,7	36,0
	Temperature at Surface	°C	-14,0	-15,2	-15,2	-14,6	19,6	21,3	21,3										22,0
	Vapour Pressure Change	hPa	0,0	5,8	0,0	0,0	0,0	5,8										0,0	11,7
	Vapour Pressure at Surface	hPa	1,5	1,5	7,4	7,4	7,4	7,4	13,2										13,2
	Saturation Vapour Pressure	hPa	1,8	1,6	1,6	1,7	22,8	25,3	25,3										26,4
	Relative Humidity	%	84,0	94,1	100,0	100,0	32,3	29,1	52,1										50,0

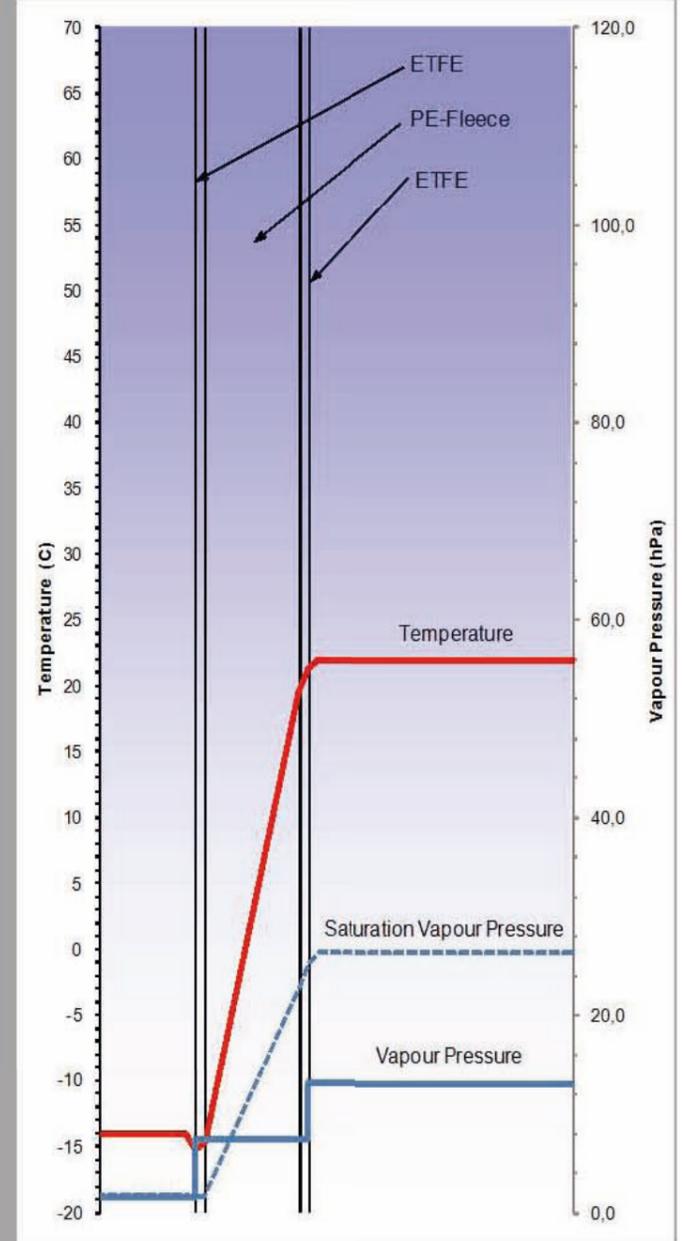


Abbildung 35: Simulation des Hüllenaufbaus 001 für Winterfall - Programmversion 09/2010

Multilayer Analysis

© ILEK - Thorsten Klaus - 2009

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Outside Air Temperature	35 °C
Outside Relative Humidity	41 %
Outside Wind Speed	1.1 m/s
Solar Incident Radiation (Global)	600 W/m ²
Sky View Factor	0.5
Cloud Cover	0 %
Cloud Temperature	35 °C
Cloud Reflectivity (IR)	10 %
Cloud Emissivity	0.9
Outside Object Temperature	35.00 °C
Outside Object Reflectivity (IR)	10 %
Outside Object Emissivity	0.9

Inside Air Temperature	22 °C
Inside Relative Humidity	50 %
Inside Object Temperature	22 °C
Inside Object Reflectivity (IR)	10 %
Inside Object Emissivity	0.9

Quick Analysis (conduction only) Show Required Input
 Full Analysis (conduction, convection, radiation)

Calculate

SYSTEM PERFORMANCE

total energy flux into room (SOL, IR, cond, conv)	$Q_{n,TCB}$	673	W/m ²
total energy flux out of room (IR, cond, conv)	$Q_{n+1,TCB}$	609	W/m ²
net energy flux at inner surface (SOL, IR, cond, conv)	$Q_{n,net}$	64	W/m ²
radiative flux into room (SOL)	T	0.00	
radiative flux into room (SOL, IR)	g-value/SHGC	0.77	X -> fix!
"U-Value"		4.90	W/m ² ·K
"R-Value" (SI)		0.20	m ² ·K/W
"R-Value" (US)		1.16	ft ² ·°F·h/Btu

clear sky emittance	227 W/m ²	positive energy flux	▶ heat flow into room
cloud emittance	0 W/m ²	negative energy flux	▶ heat flow out of room
outside obj emittance	230 W/m ²		
inside obj emittance	431 W/m ²		

MULTILAYER CONSTRUCTION

LAYERS	Material Layer	1		2		3										TOTAL
		Surface	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	
	Type	Surface Film	Material	Airspace	Material	Airspace	Material	(unused)	(unused)	(unused)	(unused)	(unused)	(unused)	(unused)	Surface Film	
	Description	Outside Air Layer	ETFE	Air	Fleece	Air	ETFE								Inside Air Layer	
MATERIAL PROPERTIES	Thickness	mm	0.1	10	100	10	0.1									120.2
	Thermal Conductivity	W/m·K	<input checked="" type="checkbox"/> Override 0.24		0.035		0.24								<input checked="" type="checkbox"/> Override 8.0	0.26
	Thermal Conductance	W/m ² ·K	23.0	2400.0	2.5	0.35	2.5	2400.0								
	SOL Transmissivity	%		91		0		91								
	SOL Reflectivity	%		7.9 7.9		80 80		7.9 7.9								
	IR Transmissivity	%		17.9		0		17.9								
	IR Reflectivity	%		4.7 4.7		3.5 3.5		4.7 4.7								
	IR Emissivity	%		0.77 0.77		0.965 0.965		0.77 0.77								
	Permeability	ng/Pa·s·m		0.000500		170		0.000500								
	Permeance	ng/Pa·s·m ²		5.0		1700		5.00000								2.5
AIR	Force Convection Airspeed	m/s														
	Force Airspace Temperature	°C														
OUTPUT	Radiative Flux (SOL)	W/m ²	625	491	607		485	0		0	0				0	
	Radiative Heat Flux (IR)	W/m ²	484	523	513		557	499		453	461				433	
	Conductive/Convective Heat Flux	W/m ²	805	835	91		105	84		66	212				176	
OUTPUT	Temperature Change	°C	1.3	0.0	5.6	8.5	6.9	0.0							4.4	13.0
	Temperature at Surface	°C	35.0	36.3	36.4	41.9	33.4	26.5	26.4						22.0	
	Vapour Pressure Change	hPa	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9						0.0	9.9
	Vapour Pressure at Surface	hPa	23.1	23.1	18.2	18.2	18.1	18.1	13.2						13.2	
	Saturation Vapour Pressure	hPa	56.3	60.6	60.7	81.9	51.6	34.6	34.5						26.4	
	Relative Humidity	%	41.0	38.1	29.9	22.2	35.2	52.5	38.3						50.0	

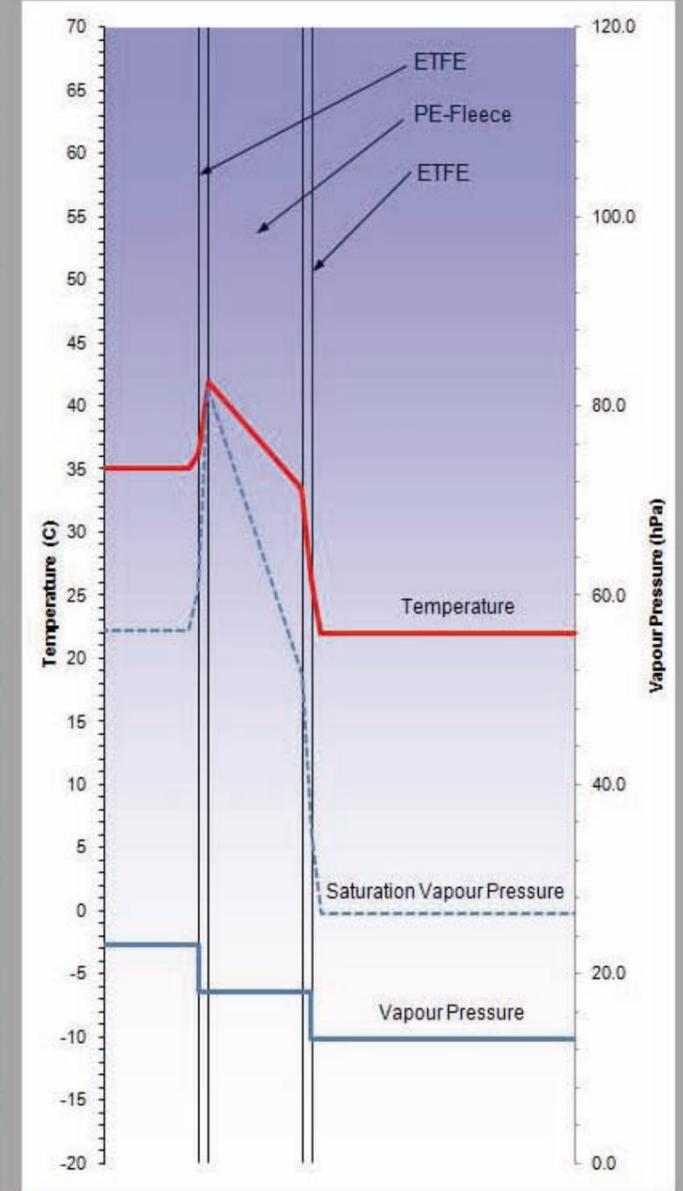


Abbildung 36: Simulation des Hüllenaufbaus 001 für Sommerfall - Programmversion 09/2010

8 Entwurf

8.1 Konzepte

Für das Projekt wurden sowohl Konzepte für Lagenaufbauten, als auch Einzelkonzepte für die Verbindung von Lagen und die Funktionalisierung von Materialien sowie Möglichkeiten der Adaptivität untersucht.

In Abbildung 37 sind drei konzeptionelle Lagensysteme dargestellt, die am Anfang des Projektes entwickelt wurden. Diese verdeutlichen die Grundgedanken der textilen, transluzenten, hochdämmenden Hülle (Konzept A), der textilen Wand mit variabler Wärmedämmung (Konzept B) sowie einer Hülle mit integrierter Wärmespeicherfähigkeit (Konzept C). Die entsprechenden Konzeptideen konnten im Laufe der Projektbearbeitung bezüglich der Materialität, Kombination nötiger Funktionswerkstoffe sowie der Effektivität verifiziert und weiterentwickelt werden (Abschnitt 8.4 und 12).



Abbildung 37: Konzepte A, B und C

8.2 Materialversuche

Adaptive Wärmedämmung

Glasfasergespinnste sind sehr leichte, hauptsächlich als Dämm- und Filterstoffe eingesetzte Materialien. Sie eignen sich nach ersten Versuchen bezüglich deren Komprimierbarkeit gut, um möglicherweise eine adaptive Wärmedämmung zu konstruieren (Abbildung 38). Die Idee besteht darin das Gespinnst zwischen Folienlagen einzuschließen. Wird zwischen den Folienlagen ein Unterdruck erzeugt, reduziert sich die Dicke der Dämmschicht nach ersten Messungen auf ca. 3% der Ursprungsdicke. Mit der Dickenreduzierung geht auch ein leichter Verlust der Transparenz einher. Der Vorteil einer adaptiven Wärmedämmung besteht darin, den Dämmwert an unterschiedliche Situationen anpassen zu können. Zudem wäre in einem mehrlagensystem mit einer dickenveränderlichen Dämmung auch eine Veränderung der Luftzwischenräume möglich und damit eine Kontrolle der Strömungsquerschnitte, und damit der Durchlüfteigenschaften. Beispielsweise ließen sich Anwendungen, wie eine schnelle Abkühlung eines Bauwerks in einer Sommernacht, mit einer adaptiven Dämmung realisieren.

Erste Versuche an komprimiertem und unkomprimiertem Glasfasergespinnst haben allerdings ergeben, dass sich mit der untersuchten Variante keine zufriedenstellende Variation der Wärmedämmeigenschaften realisieren lässt (siehe Abschnitt 6.3). Es ist keine signifikante Änderung des U-Wertes feststellbar. Außerdem besteht das Problem der Zerstörung des Glasfasergespinnstes nach ca. 1000 Kompressionszyklen.



Abbildung 38: Komprimierbarkeit eines Glasfasergespinnsts unter Vakuum. Links: vor der Komprimierung, rechts: während der Komprimierung

8.3 Untersuchungen zu Verbindungsmethoden und zur Funktionalisierung

Im Dezember 2008 führten zwei Mitarbeiter des ILEK in den Laboratorien des Drittmittelpartners, der Firma Verseidag-Indutex in Krefeld, in Zusammenarbeit mit dem Partner verschiedene Versuche zu Verbindungsmethoden von Lagenmaterialien und zur Funktionalisierung von Membranen und Folien durch. Ziel der Versuche war es, verschiedene Methoden zur Verbindung von Lagen zu untersuchen. Hierfür wurden einerseits Klebewebmaterialien (Copolyamid, Copolyester, Copolyolefin) benutzt und andererseits die direkte Einbindung von Materialien in Weich-PVC vor dem Gelierungsprozess versucht.

Zunächst wurde das Fügeverhalten von Membran- und Folienmaterialien mittels verschiedener Klebewebmaterialien untersucht (Versuchsreihen 1 – 3, Tabelle 21). Das Ziel war es dabei, die Haftungseigenschaften der verschiedenen Materialien und die benötigten Schmelztemperaturen und Schmelzzeiten zu ermitteln. Darauf aufbauend erfolgten Versuche Dämm- und Funktionalisierungslagen (Abstandsgewebe und PES-Vlies) mittels geeigneter Klebewebs auf die Membranmaterialien aufzubringen (Versuchsreihe 4, Tabelle 21). Diese Versuche haben gezeigt, dass mit Copolyester-Klebeweb auf PVC/PES-Gewebe die besten Haftergebnisse erzielt werden. Auf PTFE/Glasfasergewebe und ETFE-Folie war die Haftung mittels Klebewebs unzureichend.

Ein weiterer Ansatz zur Anbindung und Fügung von Lagenmaterialien ist die direkte Einbindung in die Flüssig-PVC-Schicht vor dem Gelierungsprozess. Dies kann direkt bei der Herstellung der PVC/PES-Membranen erfolgen. Diese Versuche (Versuchsreihe 5, Tabelle 21) haben ergeben, dass nach dem Gelierungsprozess (Verfestigung der Weich-PVC-Schicht) eine sehr gute Anbindung erzielt wurde.

Weiterhin wurden Versuche unternommen, Elektrolumineszenz (EL)–Schichten auf Membranmaterialien und Folien aufzutragen, um somit leuchtende Membranen und Folien herzustellen (Versuchsreihen 6-8, Tabelle 21). Die Anwendung als Umgebungsbeleuchtung oder als Medienfassade ist dabei angedacht. Auch hier wurden vielversprechende Ergebnisse mit zum Teil transluzenten, leuchtenden Membranen erreicht.

Eine Übersicht der Versuche und Resultate ist in Tabelle 21 und im Anhang 13.4 angegeben. Weiterhin zeigen Abbildung 39 bis Abbildung 42 Beispiele von Ergebnissen dieser Versuche. Eine ausführliche Auflistung der durchgeführten Versuche findet sich im Anhang.

1	Klebewebversuche auf PVC/PES-Membrane und unbeschichtetem PES-Gewebe	Gute Haftung bei Copolyester, schlechte Haftung bei Copolyamid und Copolyolefin
2	Klebewebversuche auf PTFE/Glasfaser-Membrane	Keine gute Haftung bei allen drei Klebewebmaterialien
3	Klebewebversuche auf ETFE-Folie	Etwas Haftung, aber ungenügend für den Einsatz im Bauwesen
4	ASG, GF-Gespinst, Vlies auf PVC/PES-Membran mit Copolyester	Gute Haftung
5	Anbindung von ASG, GF-Gespinst, PES-Vlies direkt in die PVC-Beschichtung	Sehr gute Haftung
6	Aufbringen von EL-Beschichtung auf PVC/PES-Membranen per Abziehrakel	Sehr gute Ergebnisse mit starkem Leuchteffekt und Schichtdicken verifiziert mit Mikroskop
7	Aufbringen von EL-Beschichtung auf ETFE-Folie per Abziehrakel	Leuchteffekt erbracht, aber keine gute Haftung
8	Aufbringen von EL-Beschichtung auf Polyethylen-Folie per Abziehrakel	Leuchteffekt erbracht, Haftung besser als bei ETFE, aber nicht ideal

Tabelle 21: Versuche bei Verseidag – Zusammenfassung

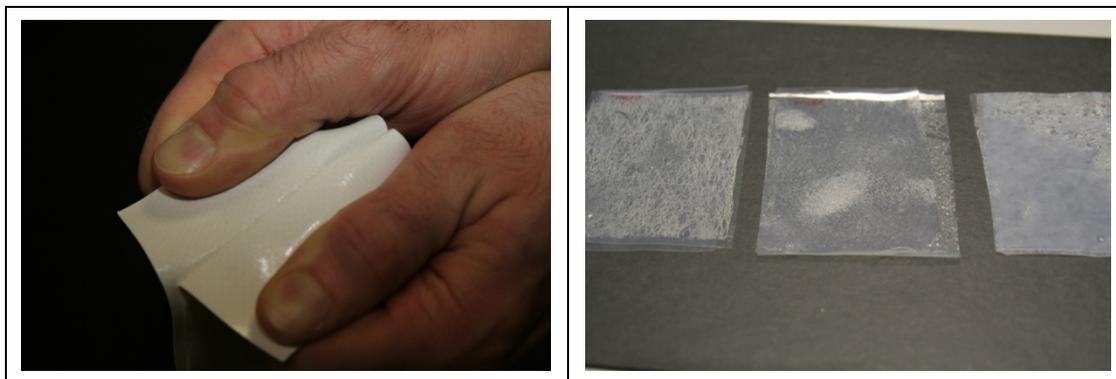


Abbildung 39: Fügungsversuche mit Klebeweb

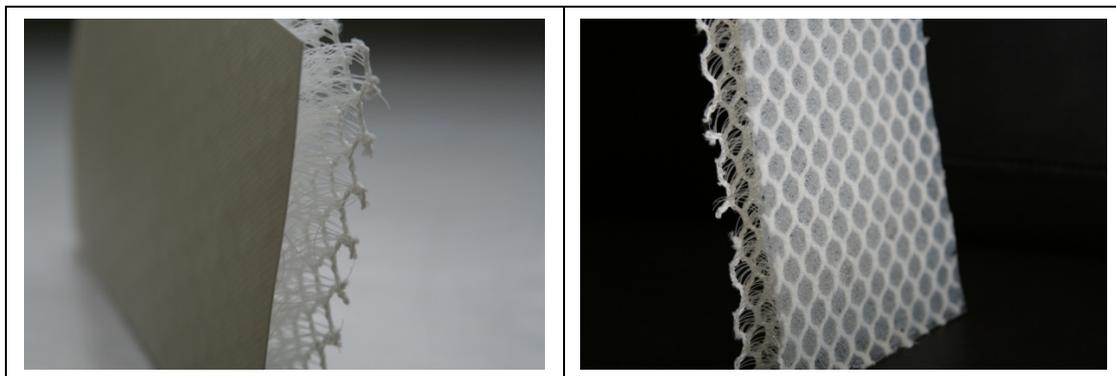


Abbildung 40: Fügungsversuche von Abstandsgewebe mit PVC/PES Membrane und ETFE-Folie unter Verwendung eines Copolyester-Klebewebs

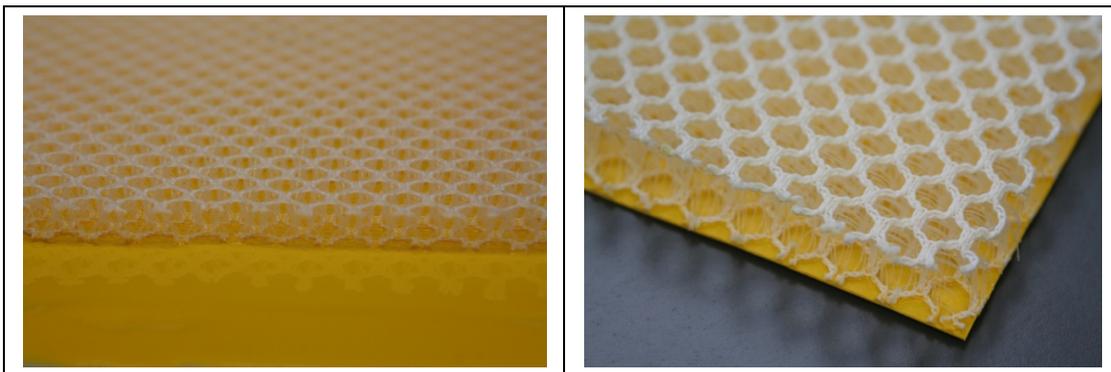


Abbildung 41: Fügungsversuche durch Einbinden von Abstandsgewebe direkt in PVC-Schicht. Links: vor Gelierung, rechts: nach Gelierung

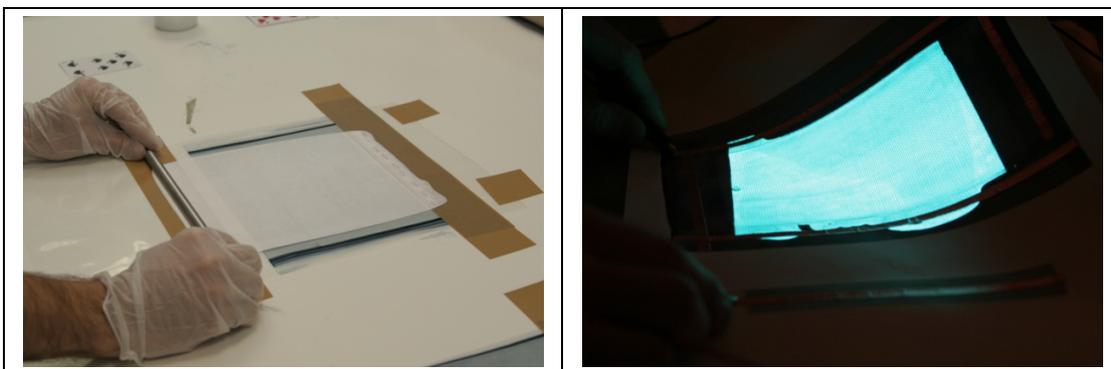


Abbildung 42: Auftragen von EL-Schichten auf Membranmaterialien und Ergebnis

8.4 Mock-Ups

Für den Stand der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ auf der Messe BAU 2009 in München wurden im Januar 2009 verschiedene Funktionsmuster hergestellt, die demonstrieren, wie Aufbauten von mehrlagigen, adaptiven und funktionalen Gebäudehüllen aussehen könnten. Unter anderem kamen flexible Photovoltaikmodule, Wärmespeichermaterialien, LED-bestückte Gewebe, adaptive Lüftungsöffnungen und adaptive Dämmschichten zum Einsatz in den Demonstrationsmustern. Die verschiedenen Lagenaufbauten der Muster und die intendierten Funktionsweisen sind in Tabelle 22 dargestellt. In Abbildung 43 bis Abbildung 45 sind die entsprechenden Muster dargestellt.

8.4.1 Atmende Gebäudehülle

Im Lagenaufbau „Atmende Gebäudehülle“ bestand der Ansatz darin, durch eine schaltbare Öffnung den Luftaustausch durch die Innenlage des Hüllenaufbaus zu kontrollieren (mittels Pneumatik). Hinter der Öffnungsschicht befindet sich ein Wärmespeicher. Der Wärmespeicher bestand aus zwischen Foliendeckschichten eingebrachtem Abstandsgewebe. Das so hergestellte Kissen wurde mit Phase-Change-Material (PCM)-Granulat gefüllt. Die Fügung zwischen der Folie und dem Abstandsgewebe (mittels Klebeweb) erwies sich als problematisch, mehrmals löste sich der Verbund aufgrund des Drucks durch die PCM-Partikel. Die Haftung zwischen Folie und Abstandsgewebe war kritisch und es konnte im Rahmen der durchgeführten Verbindungsversuche noch keine zufriedenstellende, gebrauchstaugliche Lösung gefunden werden. Weiterhin enthielt dieser Lagenaufbau eine Hochleistungswärmedämmschicht. Für diese Lage wurde mittels Klebeweb ein Abstandsgewebe zwischen zwei transluzenten PVC/PES-Schichten fixiert und der so erhaltene Aufbau mit Aerogelgranulat gefüllt.

8.4.2 Solar-Duokollektor

Der Lagenaufbau "Solar-Duokollektor" kombiniert einen Duokollektor (Photo-voltaikelement mit Solarthermiekollektor) mit einer lichtemittierenden LED-Schicht in der Funktionalität einer Medienfasade. Durch die Kombination einer flexiblen photovoltaisch-aktiven Schicht mit üblicherweise geringen Wirkungsgraden entsteht ein großer Abwärmeanteil, der wiederum mit einer thermischen Kollektoreinheit genutzt werden kann. Der Aufbau des Kollektors erwies sich als relativ problemlos. Die Bestückung des leitfähigen Gewebes mit LEDs erwies sich im Gegensatz dazu als sehr schwierig, was auf die Feinheit der eingewebten leitenden Kupferfasern zurückzuführen war. Herkömmliche Lötmethoden, die zur Anbindung der LEDs angewendet wurden, erwiesen sich als ungeeignet. Letztlich wurden die LEDs mit einer ansteuerbaren Leitungsmatrix verbunden. Der Lagenaufbau wurde darüber hinaus mit einer Wärmedämmschicht ausgestattet. Diese Schicht bestand aus einer Polyestervlieslage mit einer lastabtragenden Bewehrung aus Gittergewebe.

8.4.3 Schaltbare Wärmedämmung

Der Lagenaufbau "Schaltbare Wärmedämmung" beruht auf dem Konzept des komprimierbaren Glasfasergespinst, um möglichst effektiv die Dicke und somit die Dämmeigenschaft des Glasfasergespinstkissens anzupassen. Ausgeführte Messungen des Aufbaus haben allerdings ergeben, dass die Dämmeigenschaft dieses Aufbaus im nicht komprimierten Zustand den in Tabelle 2 definierten Anforderungen nicht entsprach. Die Änderung des U-Wertes durch die Komprimierung erfüllte nicht die gesetzten Erwartungen (siehe Abschnitt 6.3). Weiterhin wurden Probleme mit der Stabilität des Gespinsts beobachtet, welches nach mehreren hundert Komprimiervorgängen begann, durch Faserbruch beziehungsweise durch Filamentbruch zu degradieren.

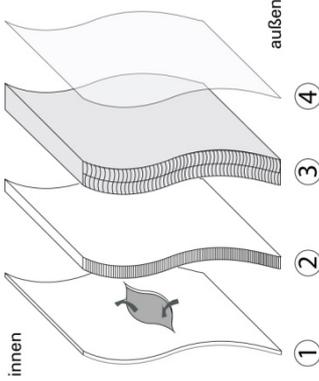
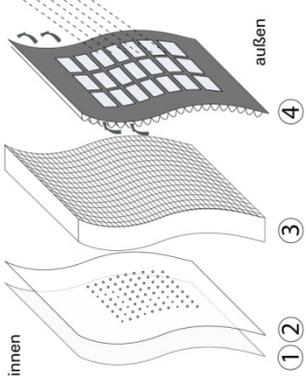
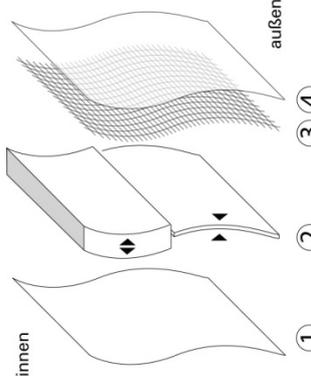
Darstellung	Titel und Beschreibung	Lagen
	<p>Atmende Gebäudehülle - Kontrollierbarer Luftaustausch durch adaptive Membranöffnungen</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 Innenmembrane – lokal kontrollierbarer Luftaustausch 2 Latentwärmespeicher – PCM-gefüllte Abstandsstruktur 3 Hochleistungswärmedämmung – Aerogel-gefüllte Abstandsstruktur 4 Außenhaut – transluzent, witterungsbeständig
	<p>Solar Duokollektor - Zweifache Nutzung der solaren Energie via Photovoltaik und Solarthermie</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 Diffusor – transluzent, wasserdampfdiffusionsdicht 2 LED-Display – programmierbar, flexibel 3 Wärmedämmebene – textiltigitterbewehrte Wärmedämmung 4 Außenhülle – Solarthermie mit PV-Belegung
	<p>Schaltbare Wärmedämmung - Adaptiver Wärmedurchgang zur Anpassung an wechselnde Anforderungen im Jahresverlauf</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1 Raumabschluss – transluzent, wasserdampfdiffusionsdicht 2 Schaltbare Wärmedämmung - komprimierbares Glasfasergespinnst 3 Glasgitterbewehrung der Außenhaut - Lastaufnahme 4 Außenhaut – hochtransparent, witterungsbeständig

Tabelle 22: Lagenaufbauten für Messe BAU 2009



Abbildung 43: Lagenaufbau – Atmende Gebäudehülle. Geöffnet (links), geschlossen (rechts)

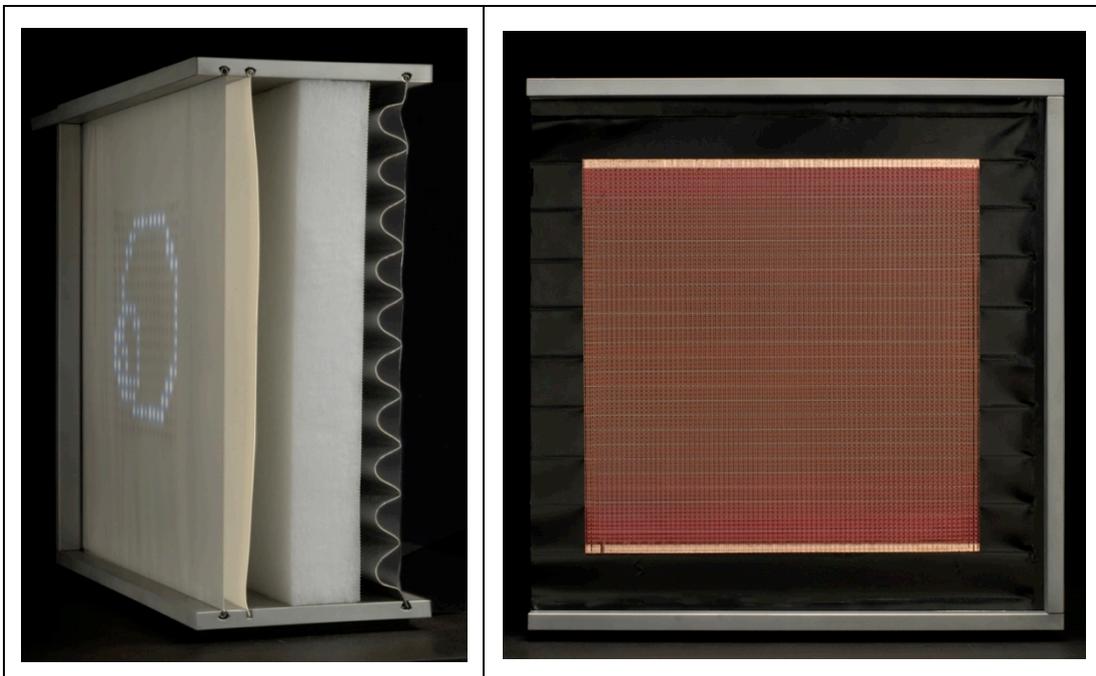


Abbildung 44: Lagenaufbau – Solar Duokollektor. Gesamtaufbau mit LED-Bespielung sichtbar (links), Ansicht des Doppelkollektors (rechts)

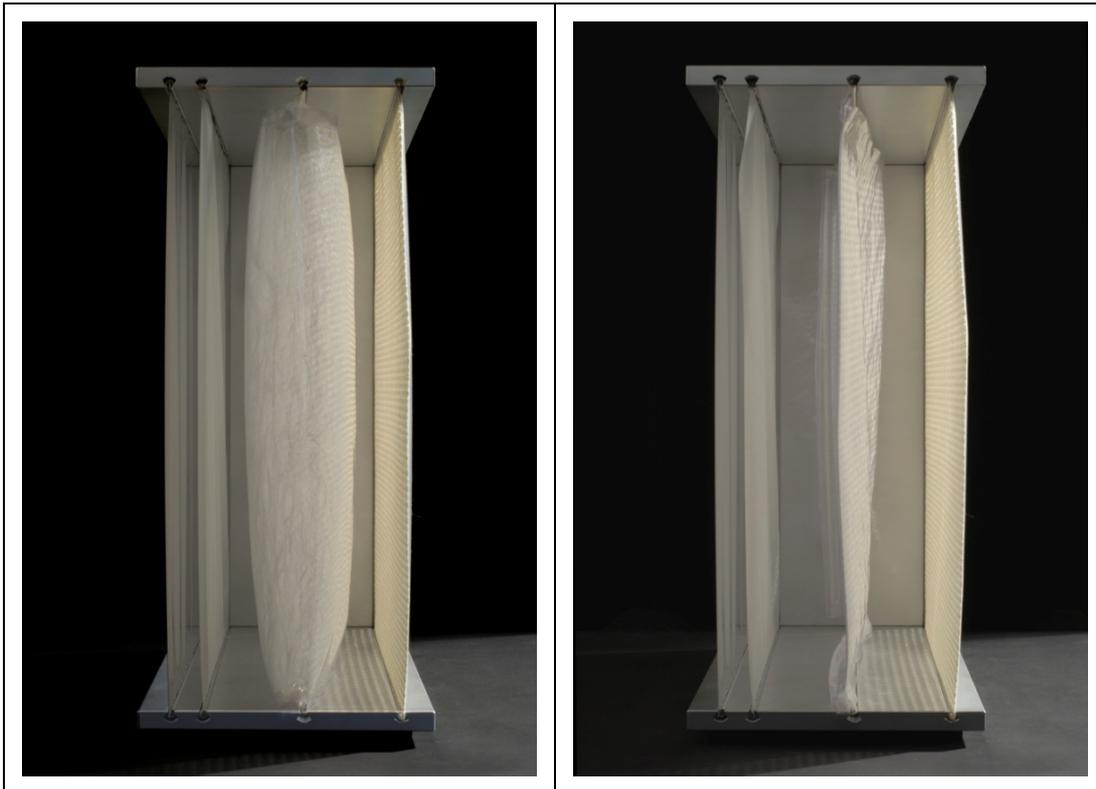


Abbildung 45: Lagenaufbau – Schaltbare Wärmedämmung. Unkomprimiert (links) und komprimiert (rechts)

Kombinationen von Einzelschichten der ausgestellten Lagenaufbauten (Polyestervlies, schaltbare Wärmedämmung mit komprimierbarem Glasfasergespinnst) wurden bereits wärmetechnisch untersucht (siehe Abschnitt 6.3). Messungen am Fassadenaufbau der Lagensysteme nach Tabelle 22 konnten nicht mehr im zeitlichen Rahmen des Projekts durchgeführt werden.

9 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer modularen, mehrlagigen, textilen Gebäudehülle mit adaptiven Eigenschaften. Teilziele wurden definiert in den Bereichen Bauphysik, Tragwirkung, Nachhaltigkeit und Ästhetik.

Im Bereich der bauphysikalischen Eigenschaften sollte die zu entwickelnde textile Gebäudehülle in der Lage sein, als Schnittstelle zwischen Innen- und Außenraum zu agieren. Sie sollte dabei Anpassungsfähigkeit bezüglich Temperaturveränderungen und der Variation der auftretenden Strahlungsintensität aufweisen, den Luftstrom als auch den Feuchtigkeitsaustausch durch die Fassade regulieren können, den notwendigen Wärme- und Schallschutz gewährleisten und gleichzeitig den Durchgang des natürlichen Lichtes durch die Gebäudehülle ermöglichen.

Im Bereich der Tragfunktion sollte die zu entwickelnde textile Gebäudehülle in der Lage sein, den einwirkenden Kräften (Windlasten, Schneelasten) zu widerstehen und diese an das Primärtragwerk abzuleiten. Auch sollten die Möglichkeiten des Einsatzes von Aktuator-Sensor-Systemen im Hüllbereich untersucht werden.

Bezüglich des nachhaltigen Bauens sollten die Aspekte der Integration regenerativer Energiesysteme in den Hüllenaufbau, die Reduzierungsmöglichkeiten des Massenverbrauchs durch den Einsatz leichter und tragfähiger Werkstoffe sowie die Recyclingfähigkeit durch leicht separierbare Materialaufbauten berücksichtigt werden.

Textile Gebäudehüllen werden bezüglich ihrer Akzeptanz ganz wesentlich vom ästhetischen Erscheinungsbild aus bewertet werden. Jegliche Entwicklungen von Hüllkonzepten erfolgten daher unter dem Anspruch des architektonischen Erscheinungsbildes.

Zur Erreichung der definierten Ziele wurden vier Arbeitspakete definiert:

- AP1: Anforderungen und Recherche,
- AP2: Entwurf,
- AP3: Herstellung, Versuch und Optimierung,
- AP4: Dokumentation.

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets erfolgten Recherchen zu textilen Bauten mit Mehrlagenaufbauten und dem Anspruch auf bauphysikalische Funktionalität. Die Ergebnisse in Form der Beschreibung dieser Bauten liegt vor in [1]. Als wesentliche Erkenntnis der Recherche konnte ermittelt werden, dass diese Bauten in der Vielzahl der Fälle durch die Kombination von Membranwerkstoffen mit herkömmlichen Dämmkonzepten ausgeführt wurden. Teilweise führte dies jedoch zu Problemen bezüglich der Durchfeuchtung der Dämmung und damit einhergehend zur Reduzierung der Dämmeigenschaften. Zur komfortablen Verwaltung der Kenndaten der ebenfalls im Arbeitspaket 1 recherchierten Produktdaten erfolgte die Programmierung und Pflege einer Datenbankstruktur. In die Datenbank eingepflegt wurden die Produktdaten der Hersteller, aber auch Daten aus der eigenen Vermessung der eingeholten Folien, Membranen und Funktionswerkstoffe. Die Datenbank ermöglicht die kriterienselektive Auswahl einzelner Werkstoffe und wurde als hilfreiches Werkzeug bei der Erarbeitung von Hüllkonzepten eingesetzt.

Ziel der Arbeiten im Arbeitspaket 2 war es zunächst, durch das Erstellen von Simulationswerkzeugen, die die bauphysikalischen Mechanismen des Wärme- und Feuchtetransports physikalisch möglichst korrekt abbilden sollten, die Grundlage für die ebenfalls in diesem Arbeitspaket angesiedelte Entwicklung von Konzepten für mehrlagige Gebäudehüllen zu schaffen. Mit dem erstellten Programm war es möglich, vergleichend unterschiedliche Lagenaufbauten zu analysieren, zu optimieren und zu bewerten.

Unterschiedliche Muster verschiedener Hüllenaufbauten wurden im Arbeitspaket 3 hergestellt und mit dem im Projekt gebauten Wärmedurchgangsprüfstand messtechnisch untersucht. Durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge im Bereich der Simulation und der Messtechnik erfolgte die Bewertung der Hüllenaufbauten.

Die Optimierung der Schichtaufbauten nach Arbeitspaket 4 erfolgte sukzessive und partiell im Rahmen der Weiterentwicklung der Hüllenaufbauten von grundlegenden Ideen bis zu den in diesem Bericht dokumentierten Systemen.

Die am Institut durchgeführten Untersuchungen und Experimente haben grundsätzliche Möglichkeiten zum Aufbau von sinnvollen, klimatechnisch hochwertigen, mehrlagigen, textilen Gebäudehüllen unter Maßgabe der definierten Ziele aufgezeigt. Dies konnte insbesondere mit Hilfe der im Forschungsprojekt entworfenen, gebauten und verifizierten Messanlage zur Bewertung von Wärmedurchgangseigenschaften in mehrlagigen textilen Hüllen und der Simulationssoftware für Wärmeleitungs- und Wärmestrahlungsvorgänge demonstriert werden. Mit diesen, durch verschiedene Referenzmaterialien validierten Mess- und Simulationstechniken entstanden am Institut fundamentale Voraussetzungen für die konzeptionelle Erstellung von Hüllenaufbauten und deren Bewertung.

Im Rahmen des Validierungsprozesses wurde die Sensibilität der Berechnung der Wärmedurchgangsvorgänge - insbesondere im Vergleich von Messung und Simulation - bezüglich der Festlegung der Umgebungsbedingungen und damit des Wärmeübergangswiderstands deutlich. Auch die Wichtigkeit einer genauen Ermittlung der radiometrischen Kennwerte der Transmission, Reflektion und Absorption der eingesetzten Materialien im solaren und dem infraroten Strahlungsspektrum wurde offenbar. Charakteristische Werte in diesem Bereich sind bisher kaum verfügbar und werden daher jeweils projektbezogen im Rahmen von Bauvorhaben ermittelt. Sie stehen daher den Planern im Bereich des textilen Bauens nur partiell zur Verfügung, was sich bezüglich der energetischen Bilanzierung von Vorhaben als großes Hemmnis erweist. Bezüglich der Verfügbarkeit der feuchtetechnischen Kennwerte gilt ähnliches. Nötige Daten für die Feuchtetransportvorgänge sind bisher kaum verfügbar.

Die beiliegend zum geförderten Vorhaben erstellte Datenbank eröffnet die Möglichkeit, durch eine kontinuierliche Datenpflege eine Datenbasis verfügbar zu machen, um die beschriebene Problematik zu beheben.

Weiterhin wurden Konzepte zur Einbindung von adaptiven Eigenschaften in Bezug auf den Wärme-, den Luft- und den Feuchtigkeitsaustausch entwickelt und untersucht.

Für die Messe BAU 2009 in München erfolgte die Umsetzung einiger dieser Konzepte als Prototypen. Hierfür kamen zum Beispiel Ideen zur Realisierung von adaptiven Öffnungen, zur Wärmespeicherung, zu einer transluzenten, schaltbaren Wärmedämmung, und zur Funktionalisierung von textilen Materialien zur Beleuchtung und die Energiegewinnung zum Einsatz.

Im Fall der schaltbaren Wärmedämmung zeigten die durchgeführten Eignungsuntersuchungen, dass die angedachte Methodik (Komprimierung von Glasfasergespinnst) noch nicht die gewünschten Resultate im Hinblick auf hohe Variabilität der Dämmeigenschaften und die Zyklfestigkeit gewährleistet.

Weitere Anschlussprojekte sind wünschenswert, um die beschriebenen Fragestellungen wissenschaftlich in der nötigen Tiefe zu bearbeiten und Lösungen zu finden.

10 Veröffentlichungen zur Ergebnisdarstellung

Im Rahmen der Projektergebnisdarstellung wurden bislang drei Artikel veröffentlicht. Zwei Veröffentlichungen erfolgten im Rahmen eines Fachsymposiums. Dabei konnten die Forschungsteilergebnisse auch durch entsprechende Vorträge publik gemacht werden. Zum einen handelt es sich dabei um die Darstellung der Datenbankumgebung für die Erfassung von Produkten für die Anwendung im textilen Bauen [27] und zum anderen um eine Kurzdarstellung der Forschungsthematik [28]. Die Fachartikel und die Vorträge wurden präsentiert im Rahmen der "International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures" Structural Membranes 2009 in Stuttgart. Eine weitere Veröffentlichung erfolgte in der Fachzeitschrift Bautechnik im Rahmen eines Grundlagenartikels zum Bauen mit mehrlagigen textilen oder folienbasierten Werkstoffen [31].

11 Ausblick

Die Arbeiten, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Umsetzung von mehrlagigen, textilen Gebäudehüllen als vollwertige Klimahüllen ein komplexes, aber vielversprechendes Thema ist. Weiterführende Arbeiten im Rahmen von Anschlussprojekten sind am ILEK bereits in Arbeit bzw. in Planung.

Aufbauend auf den Ergebnissen des abgeschlossenen Projekts zu adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehüllen ist das Institut bestens gerüstet, die laufenden, weiterführenden Arbeiten zum Themenkomplex textiles Bauen erfolgreich durchzuführen.

Im Weiteren werden zwei dieser Projekte kurz vorgestellt, um die Bedeutung der Ergebnisse des Forschungsprojekts zu adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehüllen für die Nachfolgeprojekte zu erläutern.

11.1 PROFAKU

Bei einem noch laufenden Projekt wird derzeit die Problematik der Einbindung von mehreren Lagen von Textilien und Funktionswerkstoffen in Rahmenprofile untersucht (Projekt PROFAKU der Zukunft-Bau-Initiative, Förderkennzeichen Z 6 – 10.08.18.7-08.29). Die als Sekundärstruktur vorgesehenen Profilsysteme sollen in der Lage sein, unterschiedliche Hüllenaufbauten aufzunehmen und in Form von modularen Elementen zur Verfügung zu stellen. Die Lastableitung äußerer Einwirkungen und ggf. der Vorspannlasten erfolgt vom „PROFAKU-Profil“ in die Primärtragstruktur.

11.2 Akustische Konditionierung von textilen Gebäudehüllen

Ein weiteres Projekt hat die umfassende Untersuchung von textilen Werkstoffen und mehrlagigen Systemaufbauten bezüglich akustischer Wirkweisen und die akustische Konditionierung von Fassaden, Decken und Innenwandsystemen zum Inhalt. Die bauphysikalische Bewertung von Werkstoffen und von Bausystemen gewinnt zunehmend an Bedeutung, da durch Lärm als einer der größten Umweltbelastungsfaktoren auch die auditive Wahrnehmung von Räumen vermehrt ins Bewusstsein rückt. Zu große Hintergrundgeräusche und akustische Mängel unterstreichen oftmals eine schlechte Verständlichkeit und führen zu wesentlichen Einbußen bei der Raum- und Lebensqualität.

Durch die Anpassungsfähigkeit der Bau- und Raumakustik an die jeweilige Nutzungssituation werden Störgeräusche und der Lärmpegel gezielt reduziert sowie die Sprachverständlichkeit und die Raumklangqualität je nach Anwendungsbereich verbessert. Eine adaptive Raumakustik ermöglicht es, auf die jeweilige Nutzungssituation einzugehen, auf unerwartete Ereignisse zu reagieren oder inszenierte Darbietungen zu unterstreichen [22].

Die akustische Konditionierung textiler Gebäudesysteme erweitert somit konsequent die Forschungsprojekte des Themenbereichs der adaptiven textilen mehrlagigen Gebäudehüllen um einen weiteren relevanten bauphysikalischen Aspekt. Das Potential des Mehrlagenaufbaus, durch Kompressibilität, geometrische Veränderbarkeit oder materialtechnische Optimierung die verschiedenen Systemparameter zu verändern und zur Anpassungsfähigkeit des Systems beizutragen, kann so auf die akustische Bewertung, Wirkungsweise und Optimierung ausgeweitet werden. Das Ziel ist die Verifizierung der Materialeigenschaften von potentiellen Werkstoffen, die Modifikation von Systemaufbauten und die Entwicklung von funktionsgerechten Adaptionstechnologien, die die Veränderung des Absorptionsvermögens textiler Schichten ermöglichen. Das beschriebene Vorhaben befindet sich in der Evaluierung.

12 Zusatzbeauftragung – Deubau und Bautec 2010

Im Rahmen einer Zusatzbeauftragung durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung wurde ein Messestand für die Messe Deubau in Essen (12. bis 16.01.2010) und die Bautec in Berlin (16. bis 20.02.2010) entworfen und in Zusammenarbeit mit der Fa. E. Scheuerle Messebau GmbH umgesetzt.

Ziel war es, die Großdemonstratoren, die im Rahmen des geförderten Forschungsprojekts hergestellt wurden, einer breiten Öffentlichkeit vorzustellen. Zudem sollte sich das BBSR und die Initiative „Zukunft-Bau“ präsentieren können.

Hierfür wurde ein Stand mit einer Fläche von 100 m² geplant, der durch eine hinterleuchtete, mit Textil bespannte Traverse abgeschlossen war. Die drei Meter hohen Exponate bildeten zu drei Seiten hin einen Raum, in dessen Mitte ein Tisch mit Auslagen des BBSR stand.

Zur Rückseite hin wurde eine schwarze „Box“ platziert, die sowohl Fläche für Logos und Grafik bot, als auch Lagerraum beinhaltete.

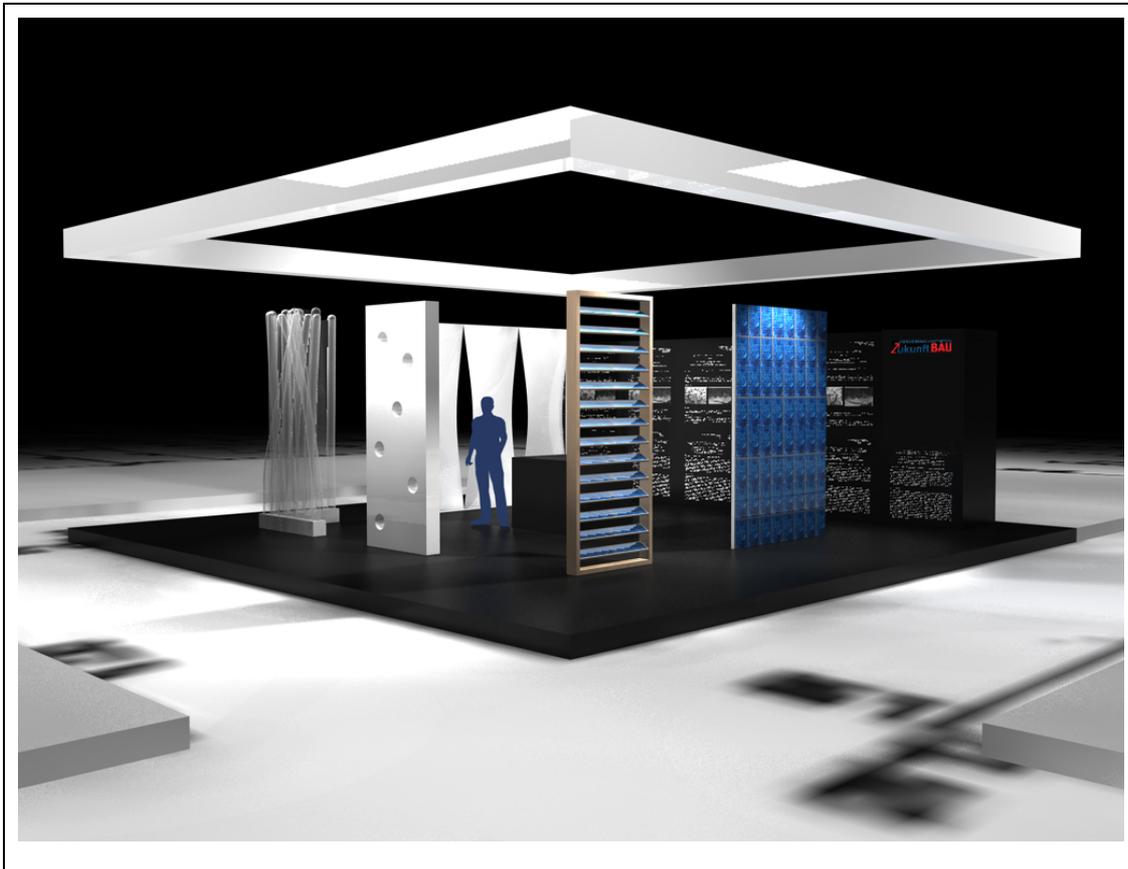


Abbildung 46. Computersimulation des geplanten Messestandes

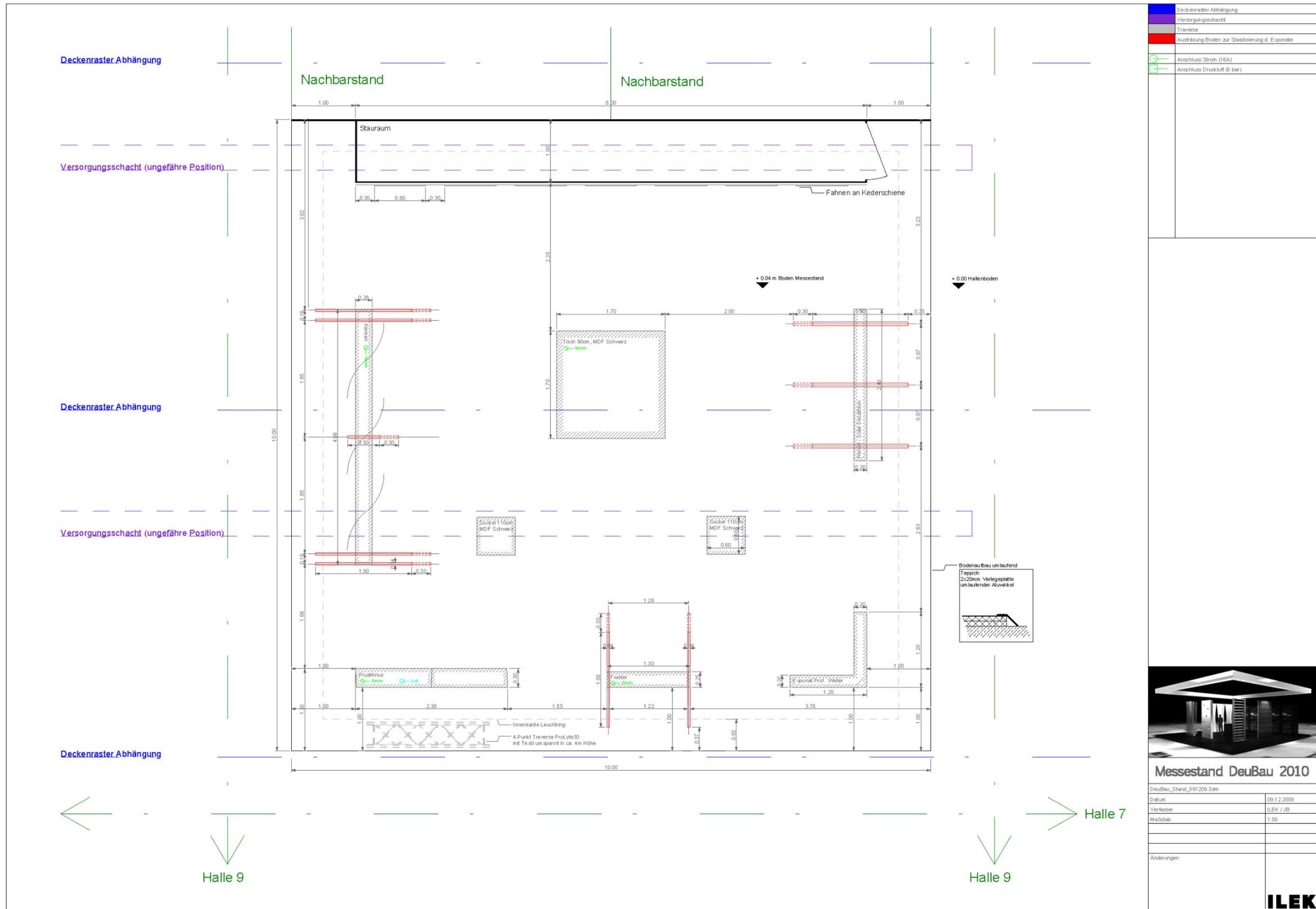


Abbildung 47. Grundriss Messestand



Abbildung 48. Foto des Messestandes auf der Messe

Innerhalb dieser Beauftragung wurden am ILEK drei Großdemonstratoren entwickelt und zwei Exponate in Vitrinen aufgebaut.

12.1 Das Exponat „Twister“

„Twister“ bezeichnet ein adaptives Öffnungselement für den Einbau in die Fassade. Es dient der gezielten Belüftung in dichten Gebäudehüllen und kann auch in Verbindung mit Abluftsystemen eingebaut werden.

Das Element ist im geschlossenen Zustand luft- und wasserdicht sowie schall- bzw. wärmedämmend. Im geöffneten Zustand ist durch den Einsatz eines Lüfters eine Luftwechselrate von bis zu 40 m³/h erzielbar.

„Twister“ kann mit umfangreicher Sensorik ausgestattet und somit auch als autarkes Lüftungselement in Alt- und Neubauten eingesetzt werden.

Das Öffnungselement reagiert auf Regen, Wind, Feuchte, Temperatur und CO₂-Gehalt und ermöglicht dadurch ein energieeffizientes, bedarfsgerechtes Lüften.

Dieses System wurde am ILEK entwickelt. Als Element einer textilen Hülle ist es in der Lage, sich Veränderungen der Lagenabstände (z.B. durch windbedingte Membranverformungen) anzupassen und dabei voll funktionsfähig zu bleiben.

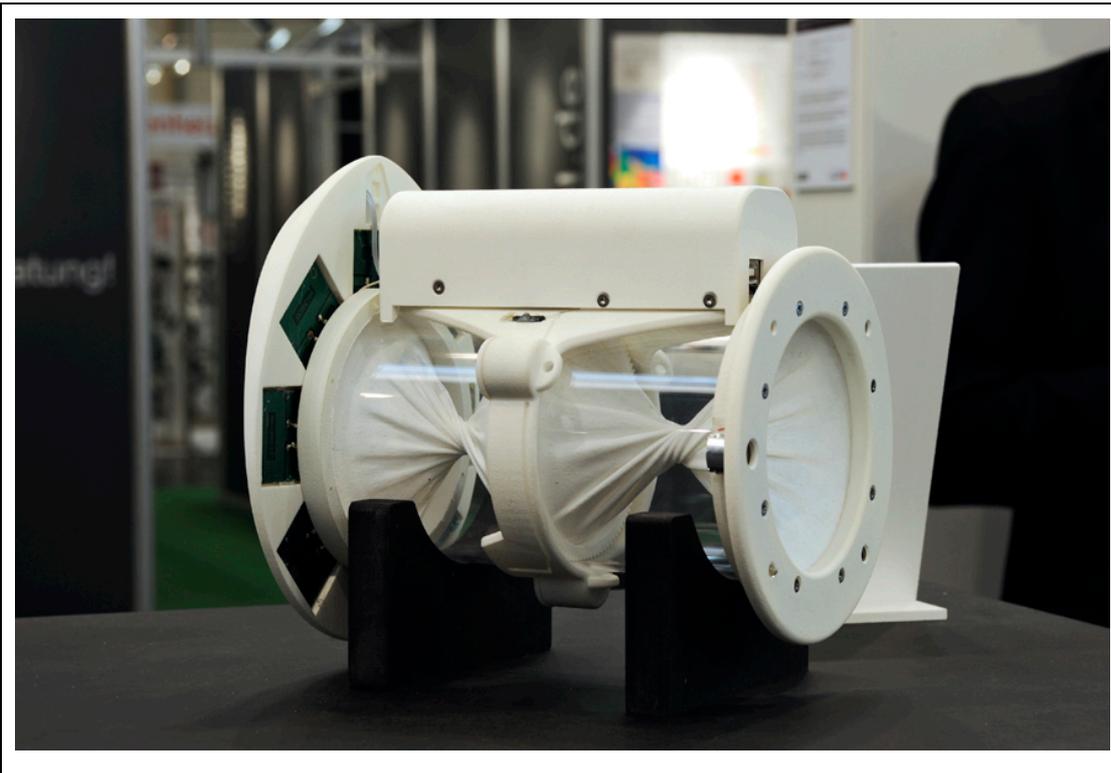


Abbildung 49. Exponat „Twister“

12.2 Das Exponat „Flow“

Das Projekt untersucht die funktionalen und gestalterischen Potentiale neuartiger Öffnungskonzepte für mehrlagige textile Gebäudehüllen.

Typische Öffnungssysteme aus Rahmen, Öffnungsflügel und einer Drehachse (Türen und Fenster) schöpfen die vielfältigen Möglichkeiten, die textile Baustoffe bieten, bei weitem nicht aus.

Das vorgestellte Konzept nutzt die Flexibilität von Textilien und stellt eine Neuinterpretation der Themen Tageslichtführung, Raumbelüftung und Blicklenkung dar. Es ermöglicht die Öffnung einer Wandfläche auf voller Raumhöhe und ist durch den Benutzer individuell steuerbar. Durch die kleine vertikale Auslenkung eines elektrischen Aktuators werden verhältnismäßig große horizontale Öffnungsquerschnitte erzielt.

Es entstehen kiemenartige Auswölbungen der Fassadenflächen und charakteristische Faltenwürfe der Textilien, die eine eigenständige architektonische Qualität schaffen.



Abbildung 50. Exponat „Flow“

12.3 Das Exponat „Plusminus“

Durch die Kombination aus Überdruck und Unterdruck können besonders leichte raumbildende Strukturen geschaffen werden.

Mit aufgeblasenen stabförmigen Elementen und durch das Vakuumisieren zweier Hüllfolien ist es möglich, große Flächen mit minimalem Materialaufwand aufzubauen. Dabei übernehmen die mit geringem Überdruck beaufschlagten Folienschläuche die abstützende Funktion, während die vakuumisierte Hüllfolie das System aussteift.

Es entsteht eine transparente bzw. opake Struktur, die besonders im Innenraum als raumbildendes Element eingesetzt werden kann.



Abbildung 51. Exponat „Plusminus“

12.4 Das Exponat „PROFAKU“

Die Aufgabenstellung im Forschungsvorhaben "PROFAKU" besteht in der Entwicklung leichter Profile und Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen für Anwendungen in der textilen Gebäudehülle und der Fenstertechnik.

Mit der in diesem Projekt geplanten Entwicklung von Profilen und Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) wird es möglich, Tragstrukturen für Anwendungen in der textilen Gebäudehülle und der Fenstertechnik herzustellen, die einen wesentlichen Gewichtsvorteil gegenüber herkömmlichen Werkstoffen aufweisen.

Das präsentierte Muster zeigt einen Ausschnitt eines textilen Fassadenmoduls. Das Rahmenelement bietet Möglichkeiten zur Aufnahme von zwei abdichtenden Außenlagen und zwei Innenlagen zur Anbindung von weiteren Funktionsschichten, wie einer Wärmedämmung.

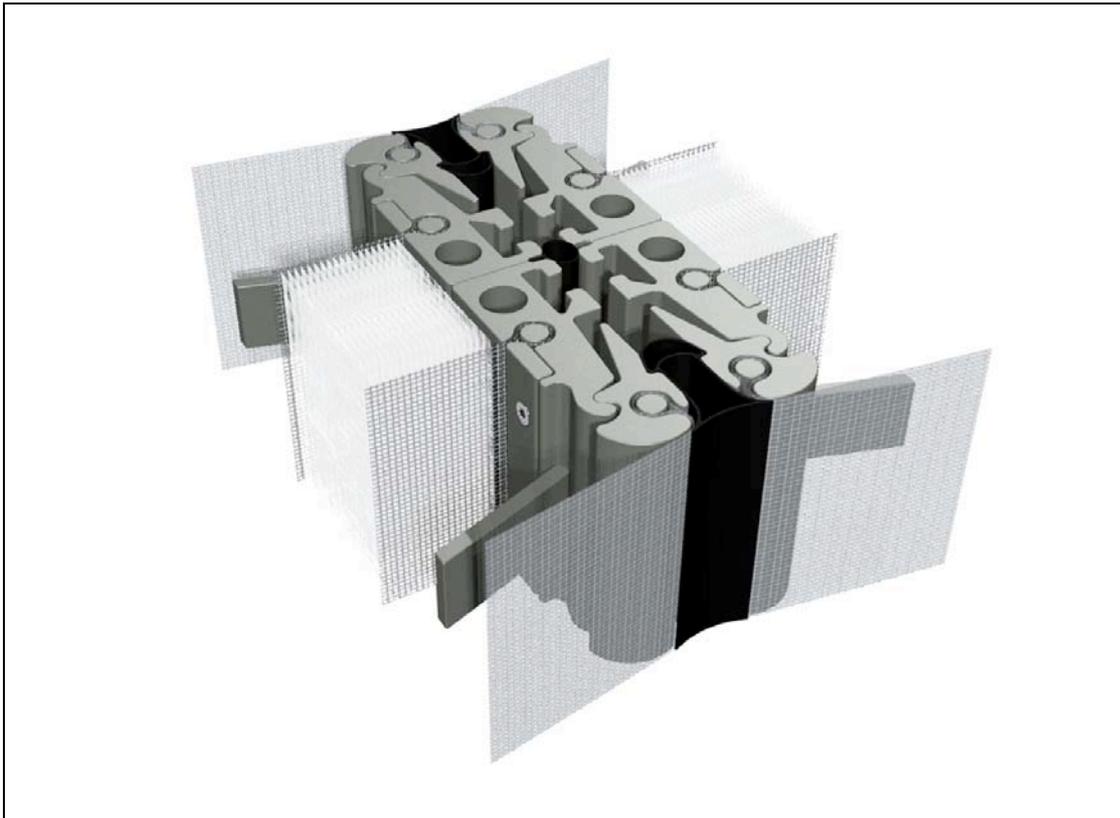


Abbildung 52. Computersimulation Exponat PROFAKU – Detail Lagenaufbau mit Stoß zweier Hül-
lenmodule



Abbildung 53. Foto Exponat PROFAKU mit Mehrlagensystem

13 Anhang

13.1 Herstellerverzeichnis

Nachfolgend aufgeführt sind einige Hersteller unterschiedlicher Produkte, die im Rahmen der Projektbearbeitung ermittelt wurden.

13.1.1 Hersteller von Folien und Geweben

1. CENO TEC GmbH - Textile Constructions
Am Eggenkamp 14
D – 48268 Greven
www.ceno-tec.de

2. Dyneon GmbH
Carl-Schurz-Strasse 1
D-41453 Neuss
www.dyneon.com

3. FERRARI SA
La Tour du Pin –
France
www.ferrari-textiles.com

4. Mehler Texnologies GmbH
Rheinstrasse 11
D-41836 Hückelhoven
www.mehler-texnologies.com

5. NOWOFOL Kunststoffprodukte GmbH & Co. KG
Breslauer Straße 15
83313 Siegsdorf
www.nowofol.de

6. Saint-Gobain Performance Plastics Corp.
701 Daniel Webster Highway
03054 Merrimack, NH
United States
www.sheerfill.com

7. SCC Solutions for Coating & Composites
Ziegelhütte 13
79793 Wutoeschingen
www.scc-europe.de
8. Sefar AG
Hinterbissastrasse 12
9410 Heiden – Switzerland
www.sefar.com
9. SIOEN Industries nv
Fabriekstraat 23
8850 Ardoorie – Belgium
www.sioen.be
10. VERSEIDAG-INDUTEX GmbH
Postfach 102313, 47723 Krefeld
Industriestraße 56, 47803 Krefeld
www.vsindustex.de

13.1.2 Hersteller von Dämmstoffen

1. Cabot Corporation
Two Seaport Lane
Suite 1300
Boston, MA 02210
www.cabot-corp.com
2. Müller Textil GmbH
Industriestr. 8
51674 Wiehl
Germany
www.muellertextil.de
3. Sandler AG
Postfach 1144
D-95120 Schwarzenbach/Saale
www.sandler.de

4. Wacotech GmbH & Co.KG
Gewerbepark Brake
Querstraße 7
D-33729 Bielefeld
www.wacotech.de

13.1.3 Hersteller adaptiver Werkstoffe

1. BASF SE
Kommunikation BASF-Gruppe
67056 Ludwigshafen,
www.basf.com
2. Du Pont de Nemours (Deutschland) GmbH
Du Pont Straße 1
D-61343 Bad Homburg v. d. H.
www.dupont.com
3. LBM LICHTLEIT-FASERTECHNIK GMBH
Gutenbergstr. 5
92334 Berching
www.lbm-fasertechnik.com
4. Metalor Technologies (Deutschland) GmbH
Kronacher Straße 66
96257 Redwitz
www.metalor.com
5. ORMECON
Ferdinand-Harten Str. 7
22941 Ammersbek
www.enthone.com/
Vertrieb durch: Lackwerke Peters
Hooghe Weg 13
47906 Kempen
6. Sefar AG
Hinterbissaustrasse 12
9410 Heiden – Switzerland
www.sefar.com
7. Sika Deutschland GmbH
Kornwestheimer Str. 107
D-70439 Stuttgart
www.sika.com
8. Textile Testing
553 76th Street
Byron Center, Michigan 49315
www.textiletesting.com

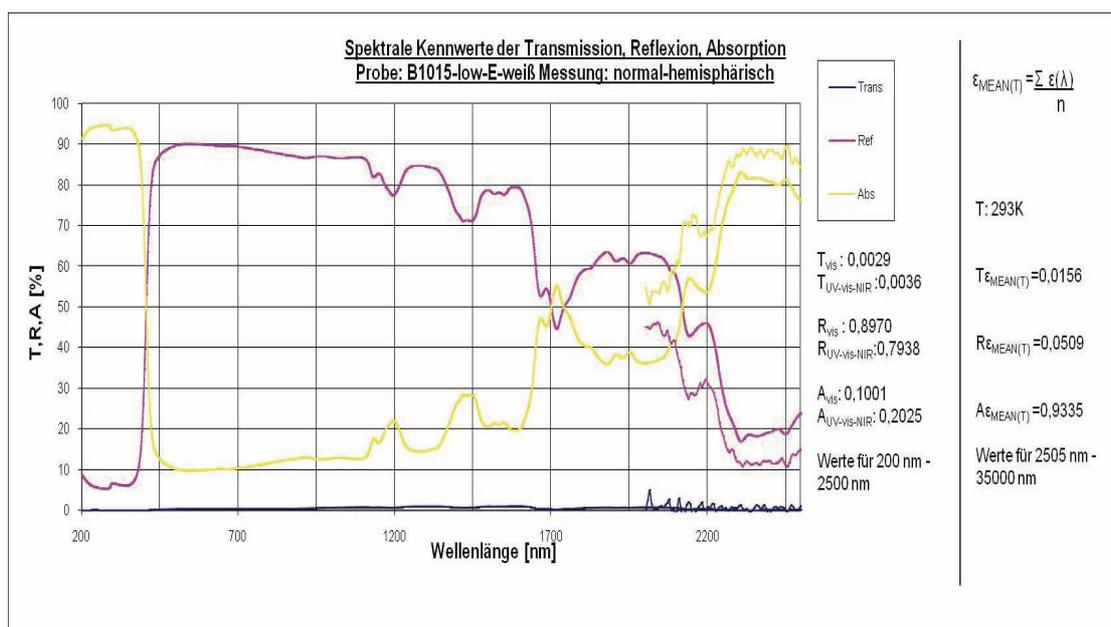
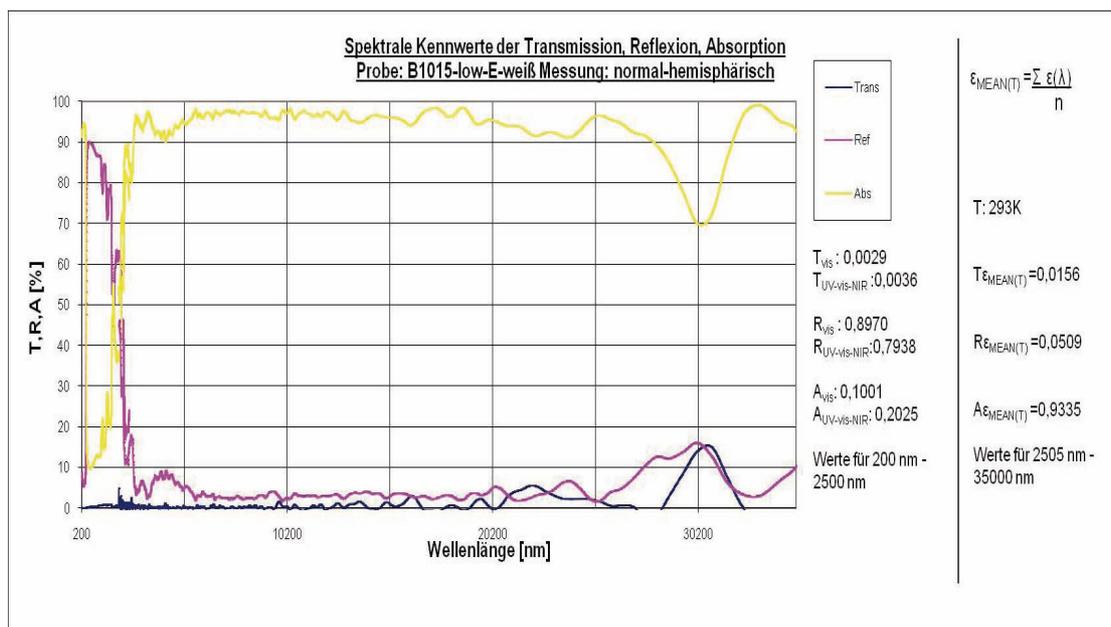
9. VHF Technologies SA
Avenue des sports 18,
Yverdon-les-Bains 1400, Waadt

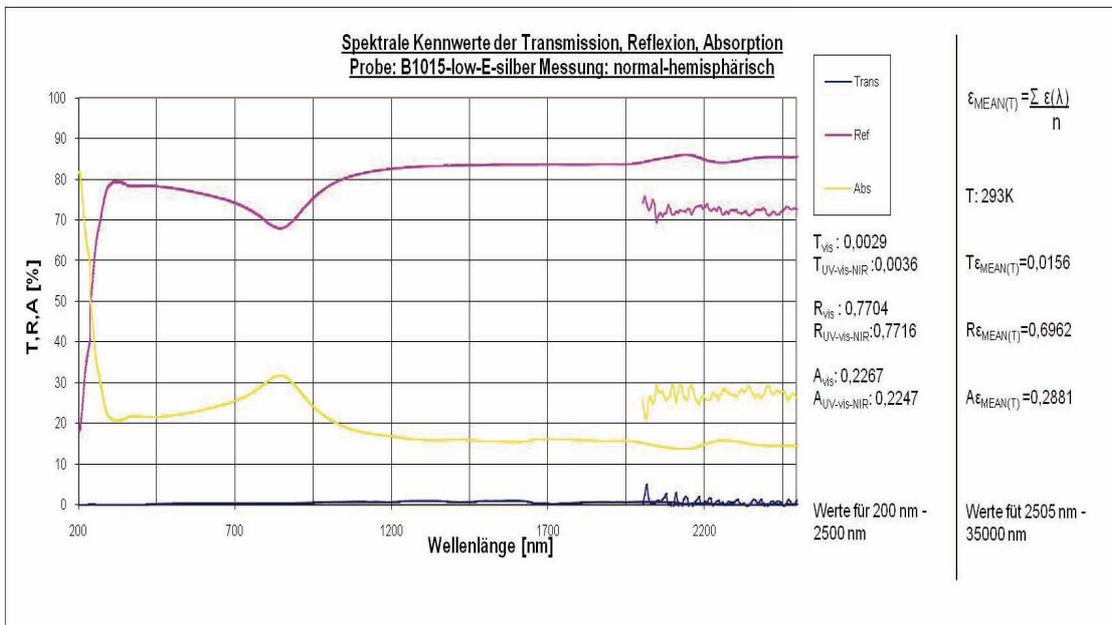
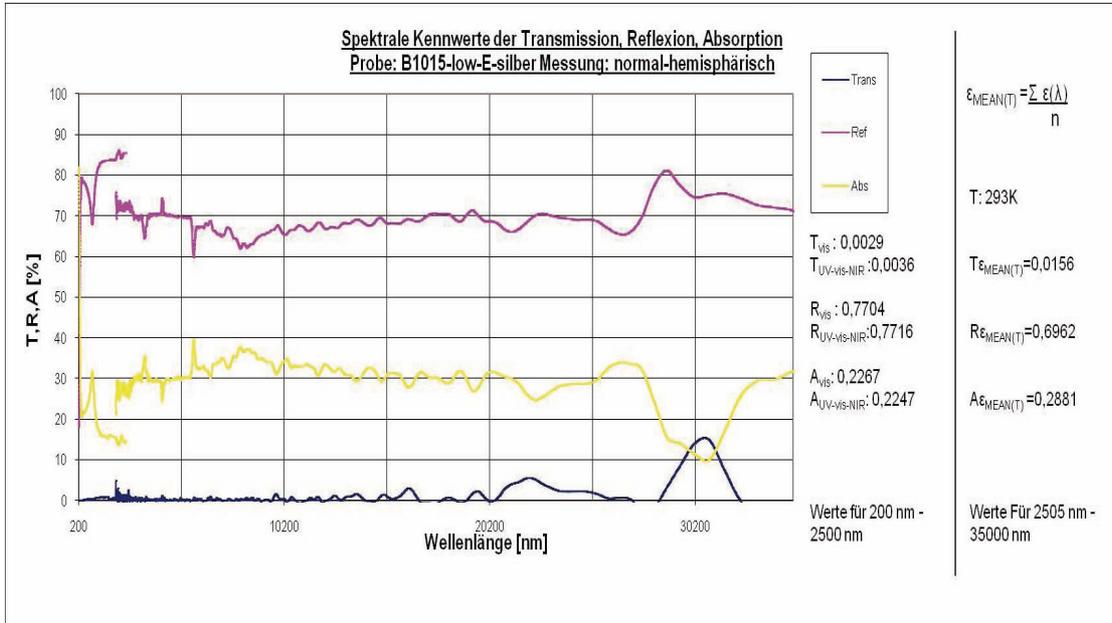
13.1.4 Sonstige

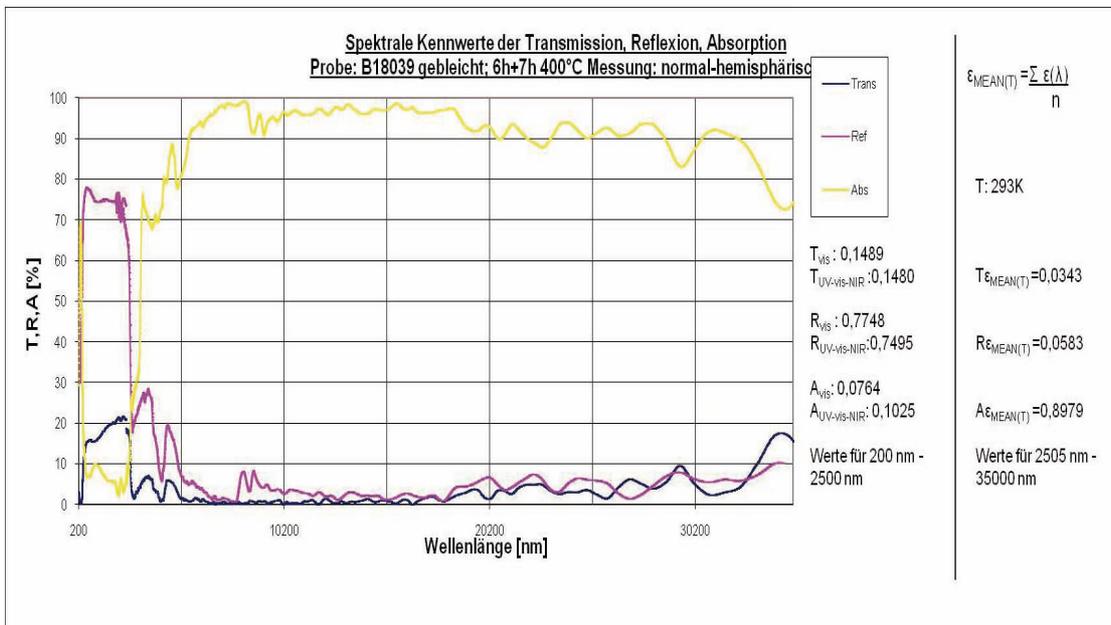
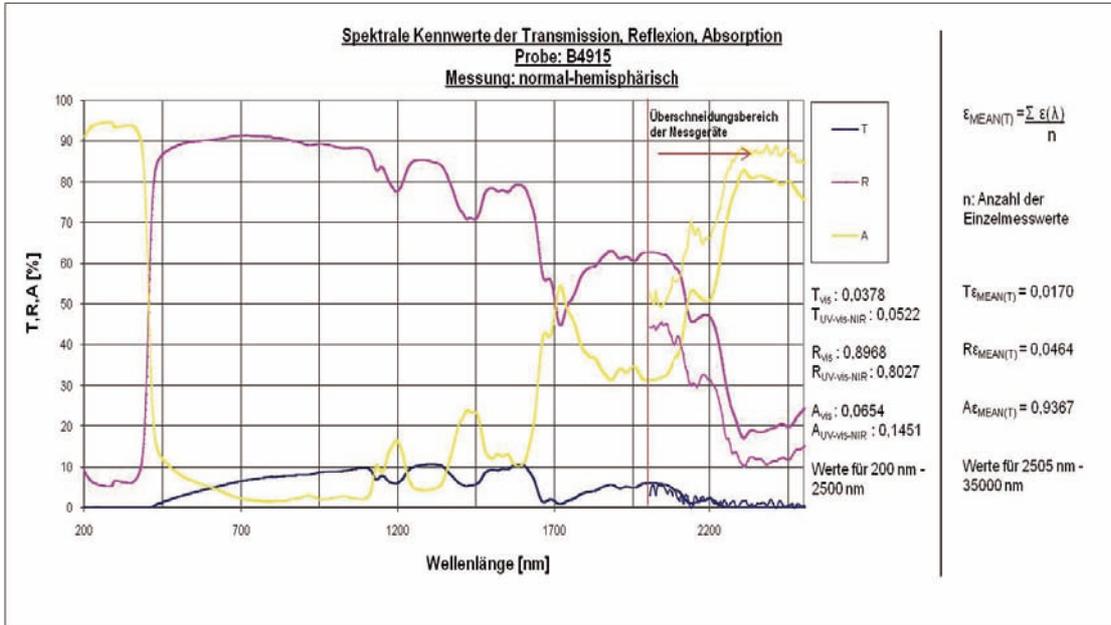
1. Sika Deutschland GmbH
Kornwestheimer Str. 107
D-70439 Stuttgart
www.sika.com
2. 3M Deutschland GmbH
Carl - Schurz - Straße 1
41453 NEUSS
solutions.3mdeutschland.de

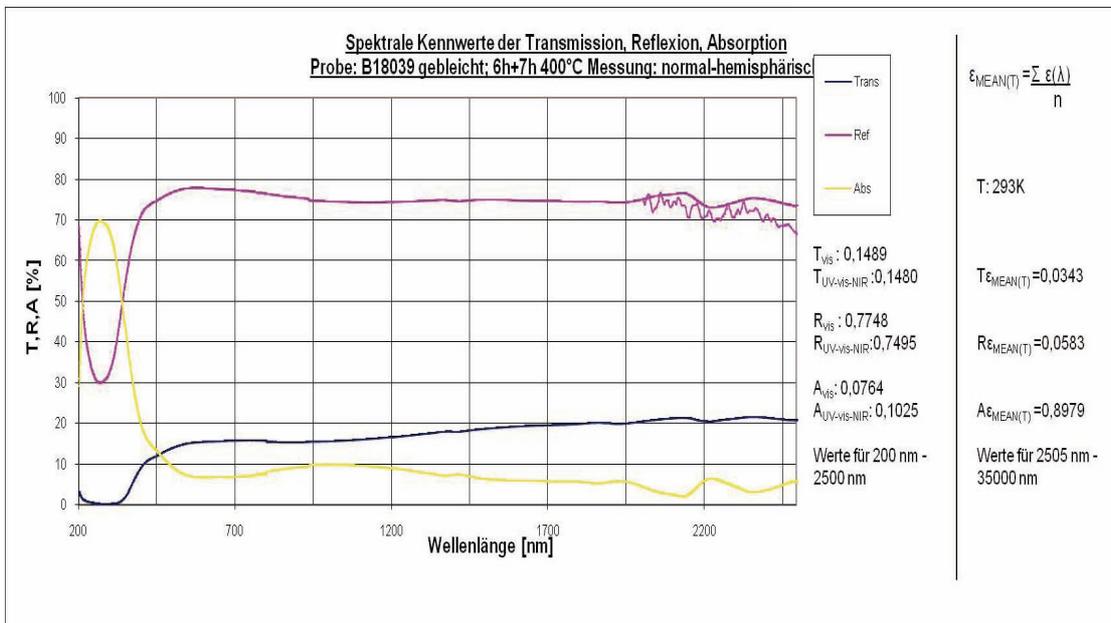
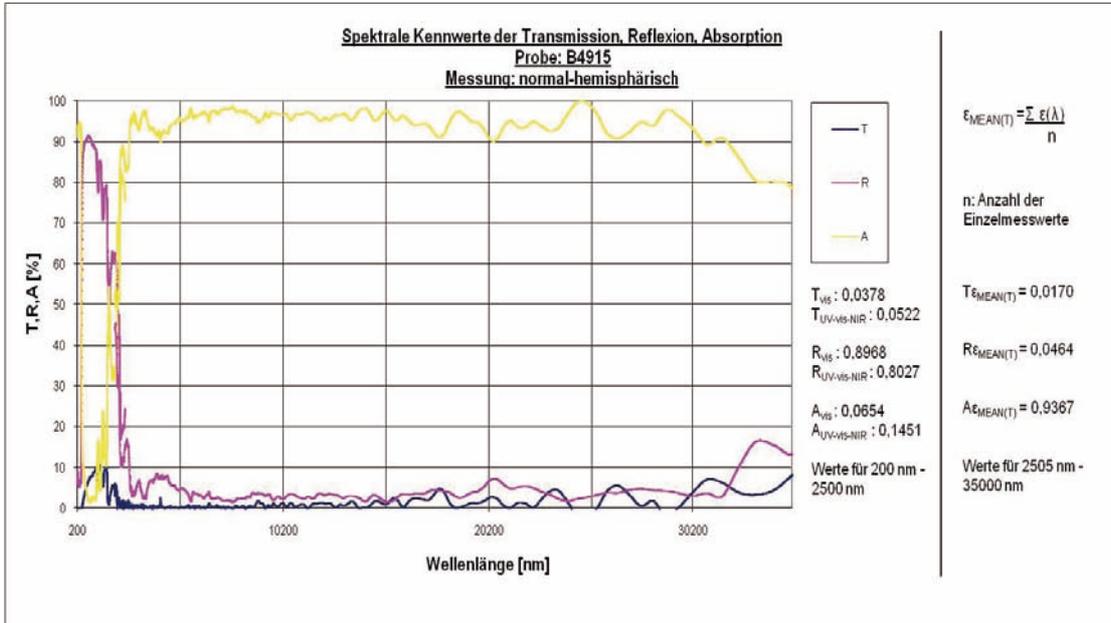
13.2 Spektrometrische Vermessung von Produkten

Nachfolgend dargestellt sind die Ergebnisse der spektralen Vermessung diverser Gewebe- und Folienproben bezüglich deren Transmission, Reflexion und Absorptionseigenschaften. Die Messungen wurden am ILEK durchgeführt. Auf Grund unterschiedlicher Weißstandards für den Bereich der solaren Strahlung und den Bereich der Wärmestrahlung kommt es im Übergangsbereich zu unterschiedlichen Messergebnissen beider Spektrometer.

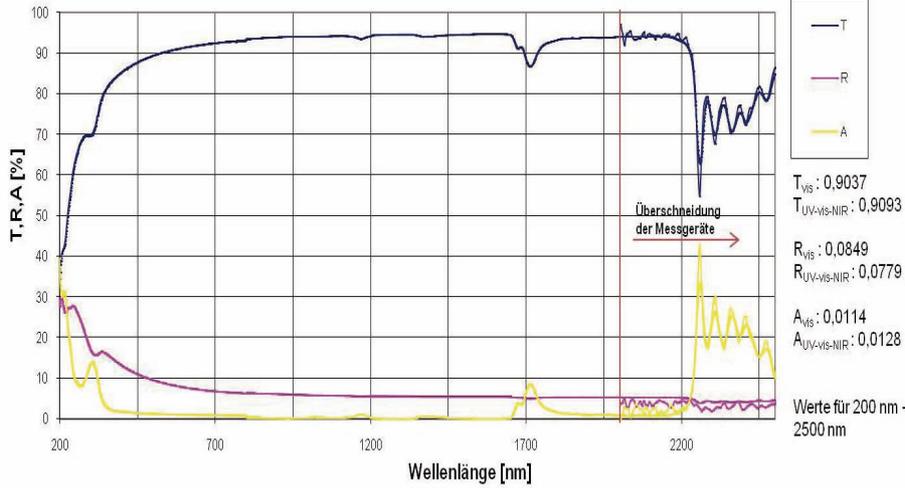








Spektrale Kennwerte der Transmission, Reflexion, Absorption
Probe: ETFE-Folie 0,2mm
Messung:normal-hemisphärisch



$$\epsilon_{\text{MEAN}(T)} = \frac{\sum \epsilon(\lambda)}{n}$$

n : Anzahl der Einzelmesswerte

$$T_{\text{MEAN}(T)} = 0,1794$$

$$R_{\text{MEAN}(T)} = 0,0474$$

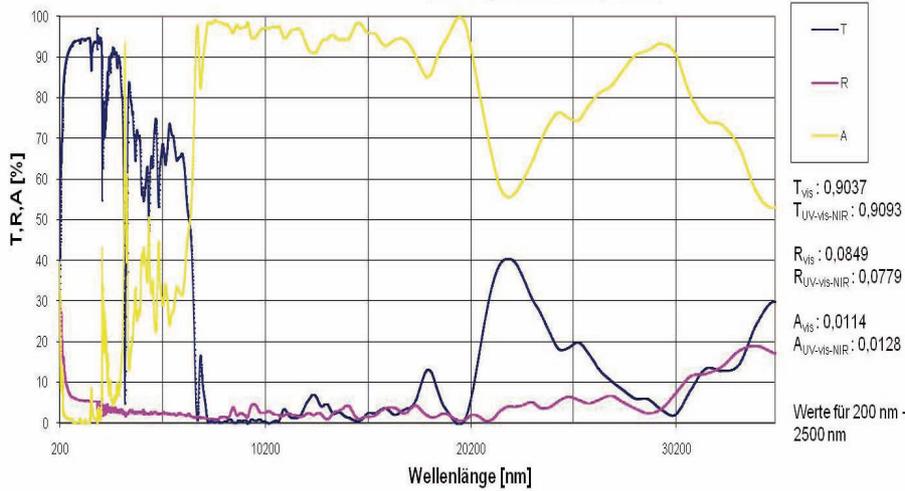
$$A_{\text{MEAN}(T)} = 0,7732$$

Werte für 2505 nm - 35000 nm

T_{vis} : 0,9037
 T_{UV-vis-NIR} : 0,9093
 R_{vis} : 0,0849
 R_{UV-vis-NIR} : 0,0779
 A_{vis} : 0,0114
 A_{UV-vis-NIR} : 0,0128

Werte für 200 nm - 2500 nm

Spektrale Kennwerte der Transmission, Reflexion, Absorption
Probe: ETFE-Folie 0,2mm
Messung:normal-hemisphärisch



$$\epsilon_{\text{MEAN}(T)} = \frac{\sum \epsilon(\lambda)}{n}$$

n : Anzahl der Einzelmesswerte

$$T_{\text{MEAN}(T)} = 0,1794$$

$$R_{\text{MEAN}(T)} = 0,0474$$

$$A_{\text{MEAN}(T)} = 0,7732$$

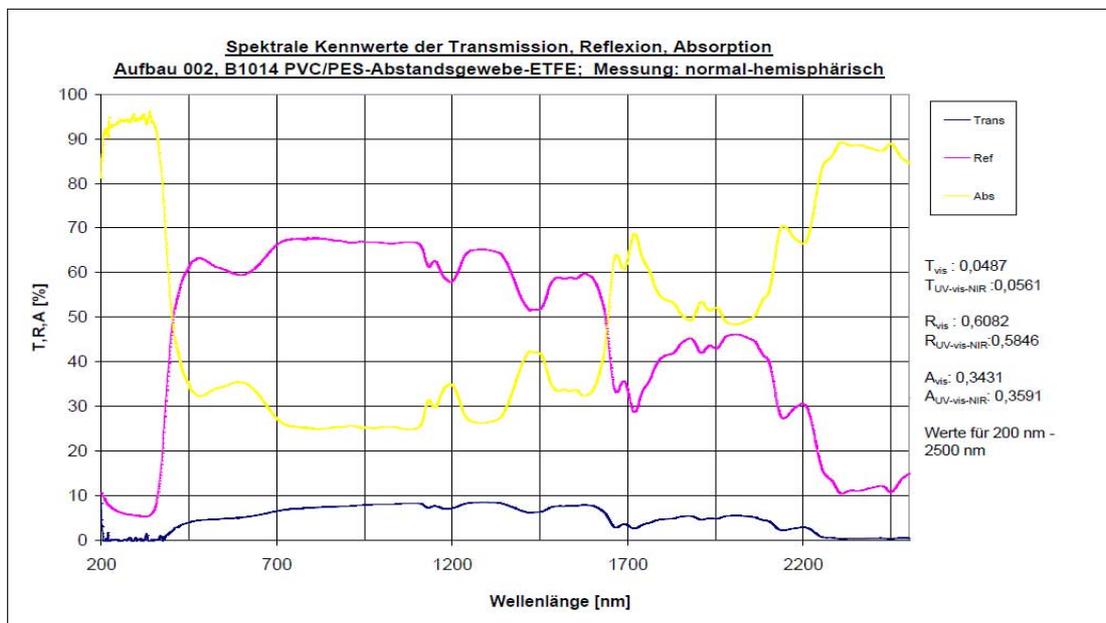
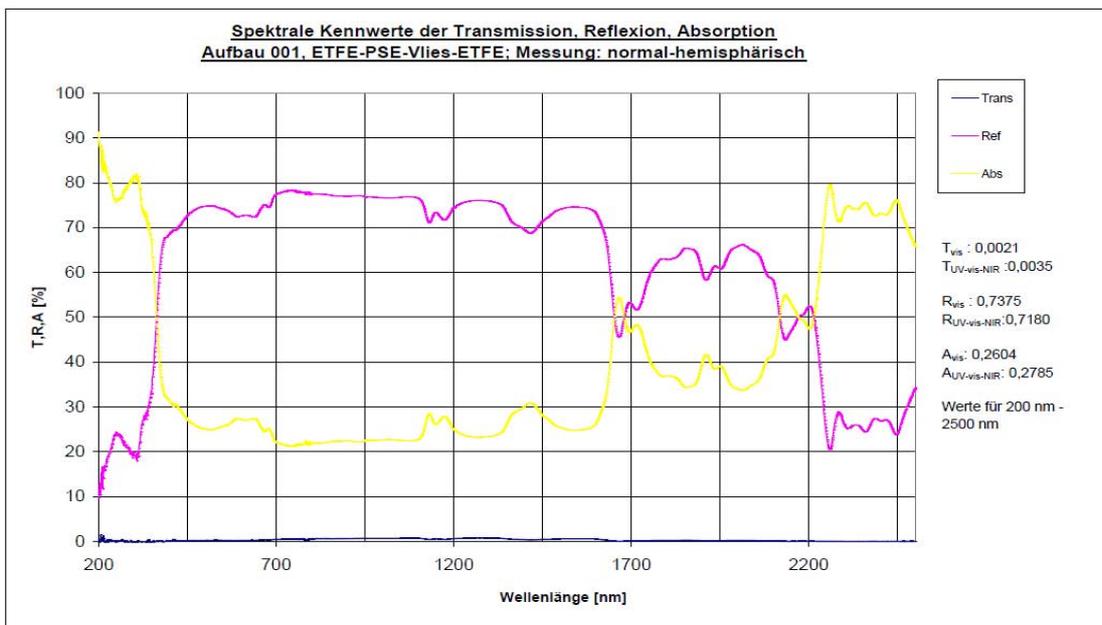
Werte für 2505 nm - 35000 nm

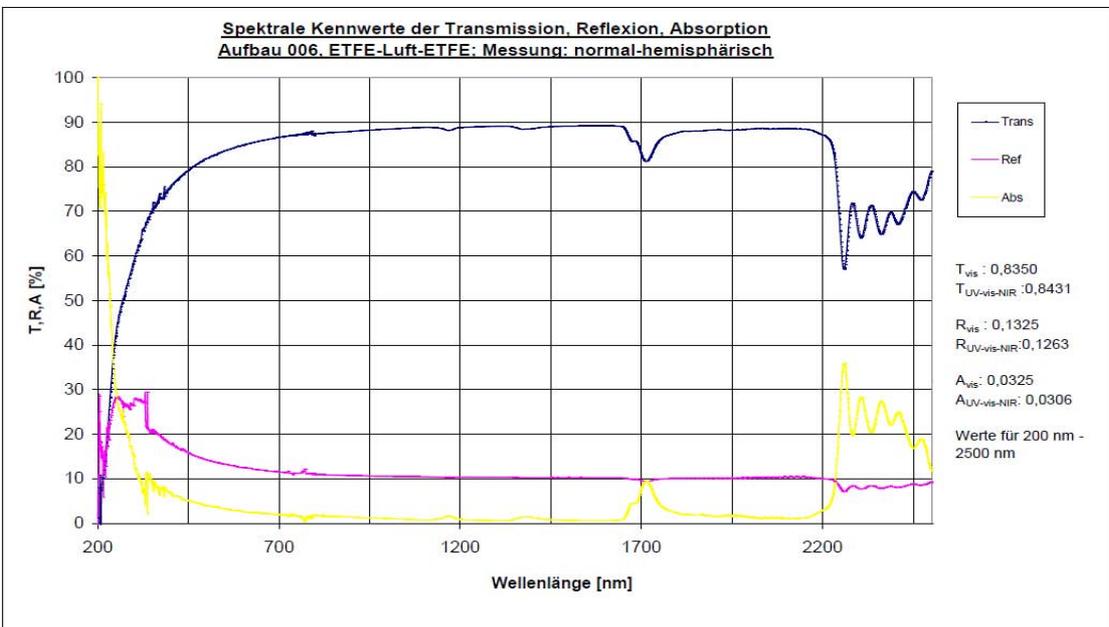
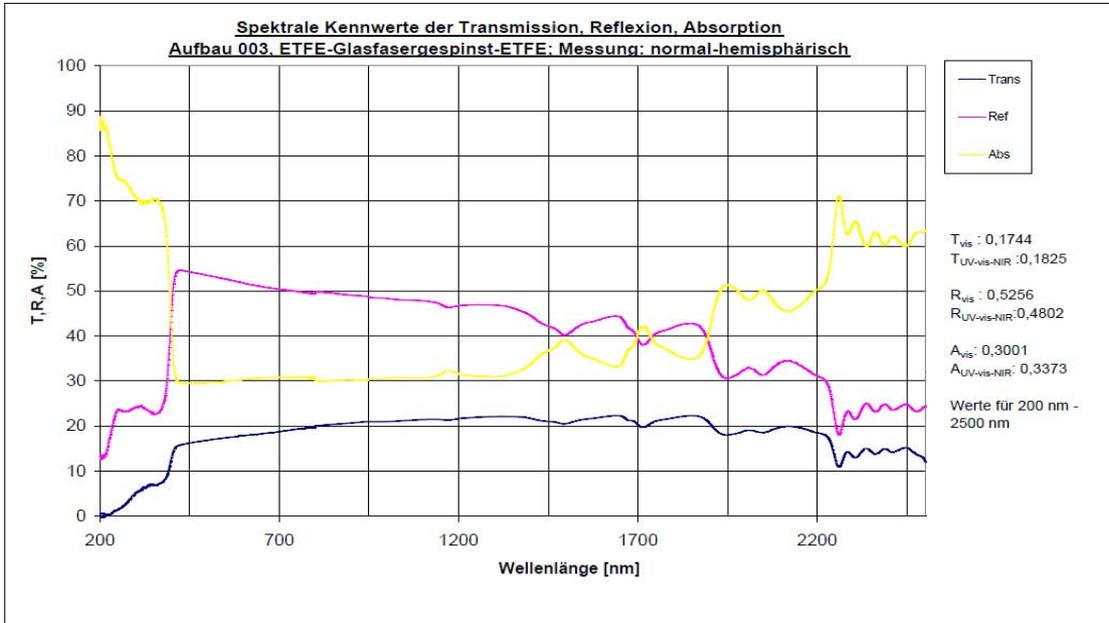
T_{vis} : 0,9037
 T_{UV-vis-NIR} : 0,9093
 R_{vis} : 0,0849
 R_{UV-vis-NIR} : 0,0779
 A_{vis} : 0,0114
 A_{UV-vis-NIR} : 0,0128

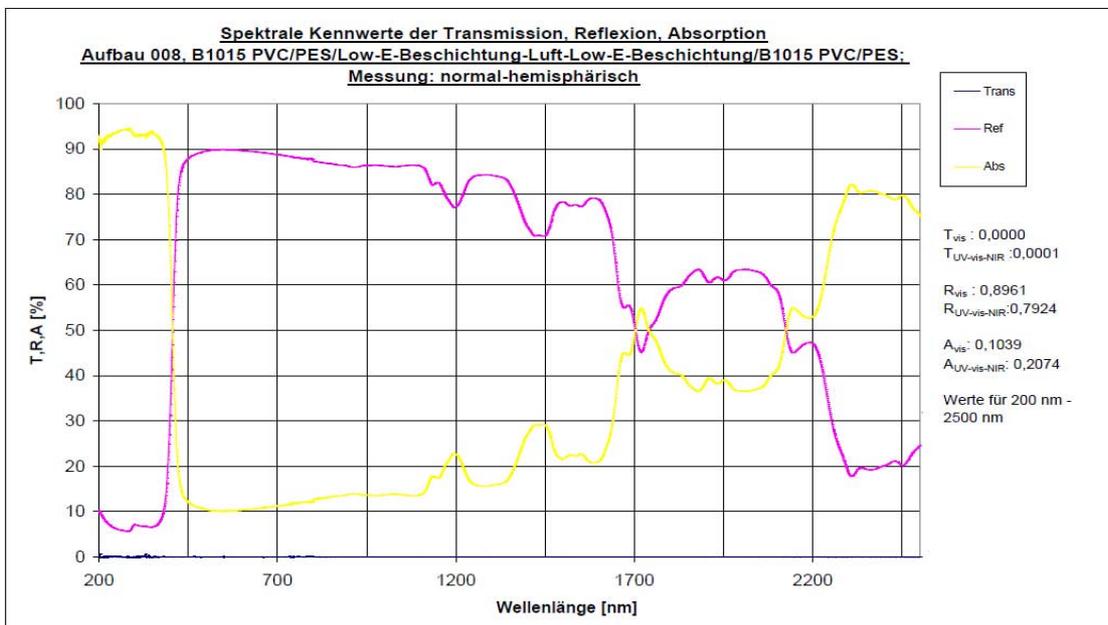
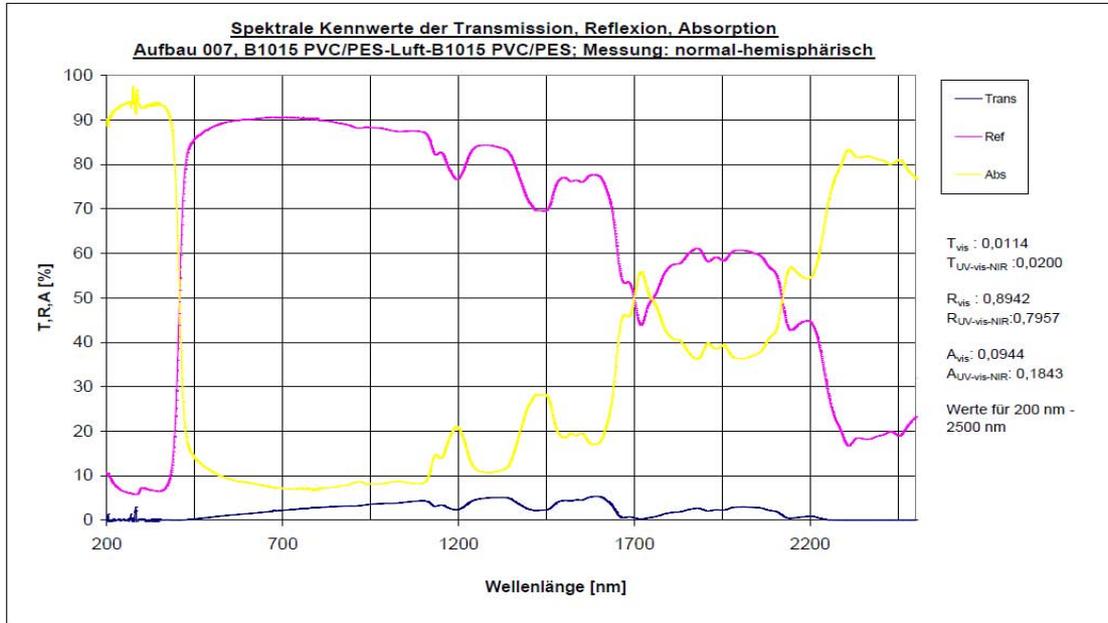
Werte für 200 nm - 2500 nm

13.3 Spektrometrische Vermessung von Lagenaufbauten

Nachfolgend dargestellt sind die Ergebnisse der spektralen Vermessung diverser Lagenaufbauten bezüglich deren Transmission, Reflexion und Absorptionseigenschaften. Die Messungen wurden am ILEK durchgeführt. Vermessen wurde der Strahlungsdurchgang von „außen“ nach „innen“ im Lagenaufbau.







13.4 Versuch beim Industriepartner

Versuche bei Verseidag-Indutex, 15.12.2008 – 17.12.2008

15.12.2008

Versuch E1 – Haftung von Klebeweb auf PVC/PES (Verseidag B1015, Type I PVC/PES mit Acryl-
atlack)

Aufbau: Klebeweb zwischen B1015

E1/1 – 1 Lage Copolyamid 20 g/m²

E1/2 – 1 Lage Copolyester

E1/3 – 1 Lage Copolyolefin

Zwischen Metallplatten (Größe A4, 730 g) als Gewicht

Im Ofen 4 min bei 140 °C (Ofeneinstellung)

E1/2 geschmolzen

E1/1 und E1/3 gar nicht geschmolzen

Weitere 4 min

E1/2 gute Haftung

E1/1 und E1/3 weitere 10 min bei 150 °C

Beide geschmolzen, aber keine Haftung auf PVC

Versuch E2 – Anbindung von Abstandsgewebe auf PVC/PES

Aufbau: B1015, 1 x Copolyester, 10 mm Abstandsgewebe, 2 x Copolyester, B1015

Im Ofen 4 min bei 150 °C zwischen Metallplatten

2 Lagen Copolyester mit besserer Haftung, aber mehr Klebmasse wäre möglicherweise
besser

Versuch E3 – Anbindung von GF-Gespinst auf PVC/PES

Aufbau: B1015, 2 x Copolyester, GF-Gespinst

Im Ofen 4 min bei 150 °C zwischen Metallplatten

Gute Haftung, Fasern des GF-Gespinsts trennen sich beim Auseinanderziehen

Versuch E4 – Anbindung von PE-Vlies auf PVC/PES

Aufbau: B1015, 2 x Copolyester, 39 mm PE-Vlies

Im Ofen 4 min bei 150 °C zwischen Metallplatten

Gute Haftung, PE-Vlies-Fasern trennen sich beim Auseinanderziehen

PE-Vlies verdichtet durch Gewicht von Metallplatte (730 g) von 39 mm auf 13 mm)

Versuch E5 – Anbindung von PE-Vlies auf PVC/PES ohne Platte

Aufbau: B1015, 2 x Copolyester, 17 mm PE-Vlies

Im Ofen 4 min bei 150 °C ohne obere Metallplatte

Gute Haftung

Ohne Metallplatte PE-Vlies verdickt sich von 17 mm auf 21 mm

Versuch E6 – Untersuchung von 39 mm PE-Vlies ohne Metallplatte

Aufbau: B1015, 2 x Copolyester, 39 mm PE-Vlies

Im Umluftofen 4 min bei 150 °C (Umluft aus)

Gute Haftung

Verdickt sich von 39 mm auf 56 mm

Versuch E7 – Anbindung von 20 mm ASG auf PVC/PES

Aufbau: B1015, 2 x Copolyester, 20 mm Abstandsgewebe

Im Ofen 4 min bei 150 °C zwischen Metallplatten

Haftung akzeptabel, aber mehr Klebmasse wäre vielleicht besser

Versuch E8 – Anbindung von 55 mm PE-Vlies

Im Umluftofen 4 min bei 150 °C ohne obere Metallplatte (Umluft aus)

Keine Bindung

Weitere 4 min

Keine Bindung

Weitere 4 min mit Umluft an

Bindung gut, Ausdehnung von 55 mm auf 62 mm

Versuch E9 – Haftung von Klebeweb auf blankem PES-Gewebe (ohne PVC-Beschichtung)

Aufbau: 2 Lagen Klebeweb zwischen PES-Gewebe

E9/1 – Copolyolefin

Im Ofen 4 min bei 180 °C

Kaum geschmolzen, keine gute Haftung

Im Ofen weitere 4 min bei 200 °C

Geschmolzen, aber immer noch keine gute Haftung

EP9/2 – Copolyester

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Gute Haftung

EP9/3 – Copolyamid 20 g/m²

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Keine Haftung

Im Ofen weitere 4 min bei 150 °C

Keine Haftung

Versuch E10 – Anbindung von Abstandsgewebe auf ETFE-Folie

E10/1 – ETFE, 2 x Copolyester, 10 mm ASG

E10/2 – ETFE, 2 x Copolyamid, 10 mm ASG

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Copolyester mit besserer Haftung, aber nicht besonders stark. Bei diesen Versuchen auch Verifizierung der Ofentemperatur: E10/1 erreicht 133 °C am Ende der 4 min (direkt neben der Probe), E10/2 erreicht 125 °C.

Versuch E11 – Haftung Klebeweb auf ETFE-Folie

Lagenaufbau: 2 Lagen Klebeweb zwischen ETFE

E11/1 – Copolyamid

E11/2 – Copolyester

E11/3 – Copolyolefin

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Erreicht nur 105 °C

Im Ofen weiter 4 min

Erreicht 130 °C

Copolyolefin haftet schlecht

Copolyamid haftet ein bisschen besser

Copolyester haftet am besten, aber auch relativ einfach zu lösen

Versuch E12 - Haftung Klebeweb auf PTFE-Glas

Lagenaufbau: 2 Lagen Klebeweb zwischen PTFE/Glas

E11/1 – Copolyamid

E11/2 – Copolyester

E11/3 – Copolyolefin

Im Ofen 2 x 4 min bei 150 °C

Schlechte Haftung bei allen

Versuch E13 – Anbindung von ASG und PE-Vlies auf ETFE

Lagenaufbau: ETFE, 2 x Copolyester, 20 mm ASG/Vlies

E13/1 – 20 mm ASG

E13/2 – PE-Vlies

Im Ofen 6 min bei 150 °C ohne obere Platte

Beide haften relativ gut. Verdickung von PE-Vlies von 17 mm auf 18 mm. Geringere Verdickung als in vorhergehenden Versuchen eventuell beeinflusst durch Drücken der Proben sofort nach dem Herausnehmen aus Ofen.

16.12.2008

Versuche mit Verseidag

Versuch E14 – Versuche von Anbindung von Materialien direkt in PVC-Schicht an PES-Gewebe (B1030 Rohware)

PVC-Beschichtung auf Rückseite immer 400 µm (entspricht normaler Beschichtungsdicke), im Ofen 3 min bei 180 °C

Vorderseite mit Einbindung von Gewebeproben (A6)

E14/1 – 10 mm ASG

Rakeln von 400 µm in Vorrichtung des Mathisofens klappt nicht (variable Schichtdicke der Beschichtung der Rückseite und Fransen verhindern das Rakeln) → ASG ist in unbekannter, variabler Schichtdicke in dieser Probe. Geliert im Ofen 3 min bei 180 °C. Haftung gut, aber unregelmäßige Schichtdicke, und ASG zeigt Wegziehverhalten von Membran (vermutlich thermisch bedingt), dort keine Haftung.

E14/2 – 39 mm PE-Vlies

400 µm PVC-Schicht in mit Aufziehrakel von Hand aufgetragen, dann Probe in vorgelierte PVC-Schicht gestellt, dann mit 700 g (Metallplatte) angepresst, dann geliert im Ofen 3 min bei 180 °C. Vlies zeigt wieder Verdickungsverhalten. Haftung gut.

E14/3 – 20 mm ASG

400 µm PVC-Schicht in mit Aufziehrakel von Hand aufgetragen, dann Probe in vorgelierte PVC-Schicht gestellt, dann mit 700 g (Metallplatte) angepresst, dann geliert. ASG zieht sich wieder teilweise von Membran (siehe auch E14/1), dort keine Haftung. Ansonsten Haftung gut.

E14/4 – GF-Gespinst

400 µm PVC-Schicht in mit Aufziehrakel von Hand aufgetragen, dann Probe in vorgelierte PVC-Schicht gestellt, dann mit 700 g (Metallplatte) angepresst und während des Geliervorgangs auf 3,5 mm Dicke gehalten (um Einführung in Matthisofen zu ermöglichen). Gute Haftung.

E14/5 – 20 mm ASG

400 µm PVC-Schicht in mit Aufziehrakel von Hand aufgetragen, dann Probe in vorgelierte PVC-Schicht gestellt, dann mit 700 g (Metallplatte) angepresst und während des Geliervorgangs mit 700 g beschwert gehalten um Ablösung (siehe E14/3) zu verhindern. Volle Haftung ist erreicht.

E14/6 – 17 mm PE-Vlies

Größere Probe. 400 µm PVC-Schicht in mit Aufziehrakel von Hand aufgetragen, dann Probe in vorgelierte PVC-Schicht gestellt, dann mit 700 g (Metallplatte) angepresst. Gute Haftung über die gesamte Probe.

Versuche mit EL

L1 – Auftragen von Pasten auf B1015 (PVC/PES) mittels Spiralarakeln

Backelektrode (unverdünnt) 100 µm

Dielektrikum (unverdünnt) 40 µm

Leuchtpigment (unverdünnt) 60 µm

Frontelektrode (verdünnt mit 3% Ethylenglykol) 60 µm

Auftragen der Schichten mittels Spiralarakeln hinterlässt z.T. Rillen. Versuch, die Pasten mit Toluol zu verdünnen, erbringt überhaupt keine Mischung der beiden Chemikalien (bei Ba-

ckelektrode). Trotz der Rillenbildung gelang relativ gutes Aufbringen und starker Leuchteffekt.

L2 – Auftragen von Pasten auf B1015 mittels Aufziehrakel

Backelektrode (unverdünnt) 100 µm

Dielektrikum (unverdünnt) 50 µm

Leuchtpigment (unverdünnt) 60 µm – Spiralrakel

Frontelektrode (verdünnt mit 3% Ethylenglykol) 60 µm – Spiralrakel

Backelektrodenschicht ging, aber mit schlechterer Schichtgleichmäßigkeit als Versuch L1. Dielektrikumschicht ging sehr schlecht. Weiterer Versuch erforderlich, mit manueller DickenEinstellung „nach Gefühl“ um gleichmäßige Schicht zu erreichen. Danach Zurückgreifen auf Spiralrakel. Auch hier Leuchteffekt erreicht, allerdings mit verringerter Intensität.

L3 – Auftragen von Pasten auf ETFE

Backelektrode (unverdünnt) 100 µm

Dielektrikum (unverdünnt) 50 µm

Backelektrodenschicht mit Aufziehrakel ging relativ gut, allerdings nicht aufgetragen an Knickstellen. Auftragen von Dielektrikum funktionierte nicht so gut. Beim Abziehen des Schutzklebebands löste sich die darunterliegende Backelektrodenschicht → Haftung auf ETFE sehr schlecht.

17.12.2008

Versuche mit Verseidag

Versuche von Anbindung von Materialien auf Gittergewebe (B9536 PVC/PES mit Acrylatlack und B2704 PVC/PES mit PVDF Lack)

E15 – B9536, 2 x Copolyester, 17 mm PE-Vlies

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Mit 730 g Gewicht (Metallplatte) auf 15 mm Abstand gehalten

Gute Haftung

E16 – B9536, 2 x Copolyester, GF-Gespinst

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Mit 730 g Gewicht auf 15 mm Abstand gehalten

Gute Haftung

E17 – B9536, 2 x Copolyester, 20 mm ASG, A5 Probe

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Mit 730 g Gewicht (Metallplatte)

Gute Haftung

E18 – B3704, 2 x Copolyester, 39 mm PE-Vlies

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Mit 730 g Gewicht (Metallplatte) auf 15 mm Abstand gehalten

Gute Haftung

E19 – B3704, 2 x Copolyester, 10 mm ASG

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Mit 730 g Gewicht

Gute Haftung

E20 – B1014, 2 x Copolyester, 20 mm ASG, A5 Probe

Im Ofen 4 min bei 150 °C

Mit 730 g Gewicht

Gute Haftung

Schichtdickenmessung der EL-Schichten

Probe L2 wurde angeschnitten und unter dem Mikroskop bei 100facher Vergrößerung betrachtet. Schichtdicken wurden gemessen (Fotos kommen noch von Verseidag), die erreichten Schichtdicken entsprechen den Zielschichtdicken, die mit dem Rakelverfahren erreicht werden sollten.

Versuche mit EL auf transluzenten Substraten

Frontelektrodenmaterial als Backelektrode (verdünnt mit 3% Ethylenglykol) 40 µm

Dielektrikum (unverdünnt) 40 µm

Leuchtpigment (unverdünnt) 60 µm

Frontelektrode (verdünnt mit 3% Ethylenglykol) 40 µm

L4 - Auf Polyethylen Folie

Funktioniert, aber Haftung ist nicht ideal

L5 – Auf B1014

Funktioniert, mit besserer Haftung, aber geringerer Transluzenz als Folie

Bei allen EL-Proben besteht ein Problem der Kontaktierung durch die eingesetzten Kupferstreifen. Probe leuchtet Kurzzeitig, danach Erlöschen, und Funkenbildung am Rand der Kupferstreifen.

Nachtrag 18.12.2008

Einsatz von Silberleitpaste auf Frontelektrodenmaterial scheint das Kontaktproblem zu beheben und längere Lebensdauer ist erreicht.

14 Literatur

- [1] Haase, W. et al. : *Beispiele zur konstruktiven Ausführung mehrlagiger textiler Gebäudehüllen*, Universität Stuttgart, Juni 2010.
- [2] Zhang, L.: *Untersuchung zu mehrlagigen Membrankonstruktionen im Hinblick auf unterschiedliche Funktionen der Gebäudehülle*, Dissertation, TU München, 2007.
- [3] Schmidt, T. et al.: Vacuumatics - Bauen mit Unterdruck, *Detail*, 10 (2007), 1148-1158.
- [4] Holst, S.: Suvarnabhumi International Airport Bangkok - Innovative Klimakonzeption, *Detail*, 7+8 (2006), 820 - 822.
- [5] Heeg, M.: Suvarnabhumi International Airport Bangkok - Engineering, Konfektion und Montage des Membrandachs, *Detail*, 7+8 (2006), 824 - 825.
- [6] Sauer, A.: *Textiler Verbundwerkstoff als Putzersatz für WDVS (Arbeitstitel)*, Dissertation, Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- [7] Holzbach, M.: *Adaptive und konditionierende textile Gebäudehüllen auf Basis hochintegrativer Bauteile*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.
- [8] Schnubel, A.: *Implementierung klimatisierender Funktionsmaterialien in textile Gebäudehüllen*, Universität Stuttgart, April 2003.
- [9] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Entwurf zur Verordnung der Bundesregierung zur Änderung der Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung)* unter <http://www.bmvbs.de/Anlage/original_1035281/Entwurf-der-Energieeinspar-verordnung-2009.pdf>.
- [10] www.raumprobe.de :: Home :: Material - Recherche, Datenbank - Suche, Scouting, Ausstellung unter <<http://www.raumprobe.de/>> Aufruf: 17.8.2009.
- [11] [Materialarchiv](http://www.materialarchiv.ch/) unter <<http://www.materialarchiv.ch/>> Aufruf: 17.8.2009.
- [12] [MaterialConnexion](http://www.materialconnexion.com/) > Home unter <<http://www.materialconnexion.com/>> Aufruf: 17.8.2009.
- [13] [Material Data Center](http://www.materialdatacenter.com/mb/index.php#loadPage0) unter <<http://www.materialdatacenter.com/mb/index.php#loadPage0>> Aufruf: 17.8.2009.
- [14] [Online Materials Information Resource - MatWeb](http://www.matweb.com/) unter <<http://www.matweb.com/>> Aufruf: 17.8.2009.
- [15] [Datenbank - buildingmaterial.db](http://www4.architektur.tu-darmstadt.de/buildingmaterials/db/251,s_Search.fb15) unter <http://www4.architektur.tu-darmstadt.de/buildingmaterials/db/251,s_Search.fb15> Aufruf: 17.8.2009.
- [16] [Interglad ver.6](http://www.newglass.jp/interglad_6/gaiyo/info_e.html) unter <http://www.newglass.jp/interglad_6/gaiyo/info_e.html> Aufruf: 17.8.2009.
- [17] [Adobe Labs - Spry framework for Ajax](http://labs.adobe.com/technologies/spry/) unter <<http://labs.adobe.com/technologies/spry/>> Aufruf: 16.8.2009.
- [18] DIN EN 410 (1998-12): Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Deutsche Fassung EN 410:1998.
- [19] Rubin, M.: Calculating Heat Transfer Through Windows, *Energy Research*, 6 (1982), 341-349.
- [20] Hutcheon, N.B.; Handegord, G.O.: *Building Science for a Cold Climate*, National Research Council of Canada unter <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/catalogue/nrcc39017_e.html> Aufruf: 30.4.2009, 1995.

- [21] DIN EN ISO 8990 (1996-09): Wärmeschutz: Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand; Verfahren mit dem kalibrierten und dem geregelten Heizkasten.
- [22] Mommertz, E., Akustik und Schallschutz: Grundlagen Planung Beispiele. 1. Aufl. ed. 2008, München: Institut f. intern. Architektur-Dok.
- [23] Blesser, B. and L.-R. Salter, Spaces Speak, Are You Listening?: Experiencing Aural Architecture. 2006: The MIT Press.
- [24] Haase, W. et al.: ILEK U-Wert Messstand - Dokumentation, Universität Stuttgart, 2009.
- [25] SVMtec GmbH: Flowsound - Messsystem für aeroakustische Untersuchungen - Handbuch und technische Dokumentation, SVMtec GmbH Stuttgart, 2008.
- [26] DIN EN ISO 6946 (2007): Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren.
- [27] Mielert, F. et al.: Systematic Compilation of Material Data for Lightweight Structures, International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Structural Membranes, Stuttgart, 2009
- [28] Haase, W., Sobek, W. et al.: Systematic Development of Adaptive Multi-Layer Textile Building Envelopes, International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Structural Membranes, Stuttgart, 2009
- [29] Klaus, Th.: Multilayer Analysis Program - Documentation, Stuttgart, 2010
- [30] <http://www.tensinet.com>
- [31] Haase, W., Sobek, W. et al.: Adaptive textile und folienbasierte Gebäudehüllen, Bautechnik, 88 (2011), 69-75.

zum Forschungsbericht „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“, Z 6 – 10.08.18.7-07.37

Beispiele zur konstruktiven Ausführung
mehrlagiger gedämmter Membranbauwerken

Dr.-Ing. Walter Haase
Dipl.-Ing. Jörg Mühlberger
Dipl.-Ing. Fabian Schmid
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Forschungsprojekt: Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen

Förderstelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn (Germany)

Förderkennzeichen: Z 6 – 10.08.18.7- 07.37 / II 2 – F20-07-043

Mitarbeit: Dr.-Ing. Walter Haase
Dipl.-Ing. Jörg Mühlberger
Dipl.-Ing. Fabian Schmid
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Bearbeitungszeitraum: Januar 2008 - Juni 2010

Bearbeitungsstelle: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Werner Sobek
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart
Telefon 0711 / 685 63599
Telefax 0711 / 685 66968

Dieser Forschungsbericht umfasst 150 Seiten.

Stuttgart, 18.03.2011

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	7
Projekte.....	9
1.1. Olympiaschwimmhalle München.....	11
1.1.1. Allgemeines	11
1.1.2 Details.....	13
1.1.3 Probleme	16
1.1.4 Einschätzung / Kommentar	16
1.1.5 Zusammenfassung der Membrandaten.....	16
1.2 Cuppamare.....	17
1.2.1 Allgemeines	17
1.2.2 Aufbau und Funktion	17
1.2.3 Montage.....	19
1.2.4 Details.....	19
1.2.5 Probleme	21
1.2.6 Einschätzung / Kommentar	21
1.2.7 Zusammenfassung der Membrandaten.....	22
1.3 TOM Dortmund.....	23
1.3.1 Allgemeines	23
1.3.2 Aufbau und Funktion	23
1.3.3 Details.....	24
1.3.4 Probleme	29
1.3.5 Einschätzung / Kommentar	29
1.3.6 Zusammenfassung der Membrandaten.....	29
1.4 Denver International Airport	31
1.4.1 Allgemeines	31
1.4.2 Aufbau und Funktion	33
1.4.3 Details.....	34
1.4.4 Probleme	35
1.4.5 Einschätzung / Kommentar	35
1.4.6 Zusammenfassung der Membrandaten.....	35
1.5 Kurklinik Masserberg.....	37
1.5.1 Allgemeines	37
1.5.2 Aufbau und Funktion	39
1.5.3 Details.....	39
1.5.4 Probleme	44
1.5.5 Einschätzung / Kommentar	44
1.5.6 Zusammenfassung der Membrandaten.....	44
1.6 Buddy Holly Musical Dome	45
1.6.1 Allgemeines	45
1.6.2 Aufbau und Funktion	46
1.6.3 Details.....	47
1.6.4 Probleme	51
1.6.5 Einschätzung / Kommentar	51
1.6.6 Zusammenfassung der Membrandaten.....	51
1.7 Gaudi Musical Dome	53
1.7.1 Allgemeines	53
1.7.2 Aufbau und Funktion	53
1.7.3 Details.....	55
1.7.4 Probleme	56

1.7.5	Einschätzung / Kommentar	56
1.7.6	Zusammenfassung der Membrandaten.....	56
1.8	Odate Jukai Dome Park	57
1.8.1	Allgemeines	57
1.8.2	Aufbau und Funktion	57
1.8.3	Details.....	59
1.8.4	Einschätzung / Kommentar	60
1.8.5	Zusammenfassung der Membrandaten.....	60
1.9	Millennium Dome.....	61
1.9.1	Allgemeines	61
1.9.2	Aufbau und Funktion	62
1.9.3	Details.....	63
1.9.4	Probleme	64
1.9.5	Einschätzung / Kommentar	64
1.9.6	Zusammenfassung der Membrandaten.....	64
1.10	Tabaluga Musical Theater	65
1.10.1	Allgemeines.....	65
1.10.2	Aufbau und Funktion	66
1.10.3	Details	66
1.10.4	Probleme	69
1.10.5	Einschätzung/Kommentar	69
1.10.6	Zusammenfassung der Membrandaten	69
1.11	Bürgerzentrum Puchheim	71
1.11.1	Allgemeines.....	71
1.11.2	Aufbau und Funktion	71
1.11.3	Details	73
1.11.4	Probleme	74
1.11.5	Einschätzung / Kommentar:	74
1.11.6	Zusammenfassung der Membrandaten	74
1.12	Atriumsüberdachung Schöllerbank.....	75
1.12.1	Allgemeines.....	75
1.12.2	Aufbau und Funktion	75
1.12.3	Einschätzung / Kommentar	76
1.12.4	Zusammenfassung der Membrandaten	76
1.13	Tegut Verbrauchermarkt.....	77
1.13.1	Allgemeines.....	77
1.13.2	Aufbau und Funktion	77
1.13.3	Details	78
1.13.4	Probleme	80
1.13.5	Einschätzung / Kommentar	80
1.13.6	Zusammenfassung der Membrandaten	80
1.14	Storek-Varia Verkaufsgebäude.....	81
1.14.1	Allgemeines.....	81
1.14.2	Aufbau und Funktion:	81
1.14.3	Details	82
1.14.4	Probleme	86
1.14.5	Einschätzung / Kommentar	87
1.14.6	Zusammenfassung der Membrandaten	88
1.15	Cargolifter Werfthalle	89
1.15.1	Allgemeines.....	89
1.15.2	Aufbau und Funktion	90

1.15.3	Details	91
1.15.4	Probleme	91
1.15.5	Einschätzung / Kommentar	91
1.15.6	Zusammenfassung der Membrandaten	92
1.16	Eden Project	93
1.16.1	Allgemeines	93
1.16.2	Aufbau und Funktion	93
1.16.3	Probleme	95
1.16.4	Einschätzung / Kommentar	95
1.16.5	Zusammenfassung der Membrandaten	95
1.17	Festo Technologiezentrum	97
1.17.1	Allgemeines	97
1.17.2	Aufbau und Funktion	97
1.17.3	Details	98
1.17.4	Probleme	99
1.17.5	Einschätzung / Kommentar	99
1.17.6	Zusammenfassung der Membrandaten	99
1.18	Technologie und Medienzentrum Erfurt	101
1.18.1	Allgemeines	101
1.18.2	Aufbau und Funktion	101
1.18.3	Details	103
1.18.4	Einschätzung / Kommentar	105
1.18.5	Zusammenfassung der Membrandaten	105
1.19	Villa Arena	107
1.19.1	Allgemeines	107
1.19.2	Aufbau und Funktion	107
1.19.3	Einschätzung / Kommentar	108
1.19.4	Zusammenfassung der Membrandaten	108
1.20	Parkbad Velbert	109
1.20.1	Allgemeines	109
1.20.2	Aufbau und Funktion	110
1.20.3	Details	111
1.20.4	Probleme	115
1.20.5	Einschätzung / Kommentar	115
1.20.6	Zusammenfassung der Membrandaten	116
1.21	Papageno Kindertheater	117
1.21.1	Allgemeines	117
1.21.2	Aufbau und Funktion	117
1.21.3	Details	118
1.21.4	Probleme	119
1.21.5	Einschätzung / Kommentar	119
1.21.6	Zusammenfassung der Membrandaten	119
1.22	Allianz Arena	121
1.22.1	Allgemeines	121
1.22.2	Aufbau und Funktion	121
1.22.3	Details	122
1.22.4	Einschätzung / Kommentar	124
1.22.5	Zusammenfassung der Membrandaten	124
1.23	New Bangkok Airport	125
1.23.1	Allgemeines	125
1.23.2	Aufbau und Funktion	125

1.23.3	Details	129
1.23.4	Probleme	130
1.23.5	Einschätzung / Kommentar	130
1.23.6	Zusammenfassung der Membrandaten	131
1.24	Station Z.....	133
1.24.1	Allgemeines.....	133
1.24.2	Aufbau und Funktion	134
1.24.3	Details	134
1.24.4	Einschätzung / Kommentar	135
1.24.5	Zusammenfassung der Membrandaten	135
1.25	Modern Tea House	137
1.25.1	Allgemeines.....	137
1.25.2	Aufbau und Funktion	137
1.25.3	Details	138
1.25.4	Zusammenfassung der Membrandaten	139
1.26	Schulungszentrum der Bergwacht Bayern.....	141
1.26.1	Allgemeines.....	141
1.26.2	Aufbau und Funktion	141
1.26.3	Probleme	143
1.26.4	Zusammenfassung der Membrandaten	143
2.	Literaturverzeichnis	145

Vorwort

Im Folgenden soll eine Übersicht zu mehrlagigen Membranbauwerken gegeben werden, die seit den 1970er Jahren gebaut wurden.

Die beschriebene Sammlung entstand im Rahmen der Forschungsaktivitäten des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) und des vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Projekts „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“ (Förderkennzeichen Z6 – 10.08.18.7-07.37).

Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie zeigt aber, dass seit vielen Jahren gedämmte Membranbauwerke mit der Absicht erstellt werden das Anwendungsfeld von textilen Gebäudehüllen über die Funktion eines Regen- und Sonnenschutzes hinaus zu erweitern und einen vollwertigen, bauphysikalisch effektiven Gebäudeabschluss zu etablieren.

Es stellte sich bei einzelnen Bauwerken als sehr schwierig heraus, detaillierte Informationen zu erhalten, da nur jeweils wenige Veröffentlichungen zugänglich sind und nur teilweise auf verlässliche Informationen der Planungs- und Ingenieurbüros zurückgegriffen werden kann. Die Veröffentlichungen enthalten nur in geringem Maße Aussagen und Ausführungen über die bauphysikalischen Eigenschaften und Verhaltensweisen der Bauwerke.

Inwiefern der jeweils für die Projekte dargestellte Aufbau der Fassade sowie dessen Detaillierung dem tatsächlich gebauten Zustand entspricht, kann nicht beurteilt werden. Auch ist bekannt, dass an einigen Bauten Sanierungsarbeiten und dabei Veränderungen an der baulichen Ausführung durchgeführt wurden. Untersuchungen über Art und Umfang dieser Veränderungen, insbesondere Untersuchungen dahingehend, inwieweit dabei vom ursprünglich geplanten Zustand abgewichen wurde, konnten im Rahmen der vorliegenden Dokumentation nicht durchgeführt werden.

Wenn in den folgenden Projektbeschreibungen bei den Projektbeteiligten von „Ingenieur“ gesprochen wird, so bezieht sich dies zumeist nur auf die Ingenieurleistungen am Membrantragwerk.

Projekte

Mehrlagige Membranbauwerke

Nr.	Name	Standort	Jahr der Fertigstellung	Eigentümer / Auftraggeber	Architekt (Membrane)	Ingenieur (Membrane)	Bauphysik	Konfektionär	Wärmedämmsystem	Nutzung	ÜGF	Außenmembran	Innenmembran	Wärmedämmung	Transluzenz
1	Olympia Schwimmhalle	München, Deutschland	1972	nicht bekannt	Behnisch und Partner, Stuttgart, Deutschland	Schleich Bergemann und Partner, Stuttgart, Deutschland	Dr. Grah (Umbau)	nicht bekannt	Einlagig gedämmt unter Seilnetz mit Acrylglas	Schwimmbad	8200 sqm	-	PES/PVC	Mineralwolle, nach Umbau PES Vlies	derzeit 0% nach Umbau ca. 2%
2	Cuppamare	Kuppenheim, Deutschland	1978	Stadt Kuppenheim, Deutschland	Linecker, Mattighofen, Österreich	n.b.	nicht bekannt	Zimmermann Zeltbau, Deutschland	5 Membranlagen mit Durchlüftung	Schwimmbad	1600 qm	PES/PVC	PES/PVC	Teflonfolien als Luftpolster 3-lagig	0%
3	TOM Dortmund	Dortmund, Germany	1978	nicht bekannt	nicht bekannt	IPL, Radolfzell, Deutschland	nicht bekannt	Stromeyer, Konstanz, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Eisbahn jetzt Diskothek	2300 sqm	Glas/PTFE	PES/PVC	Mineralwolle 50 mm, nach Umbau 80 mm	0%
4	Denver International airport	Denver, USA	1994	City of Denver, USA	C.W.Fentress, J.H.Bradburn and Associates, P.C.	Severud Associates Consulting Engineers P.C., USA	nicht bekannt	Taiyo Kogyo, Japan	Zweilagig	Flughafen	23250 sqm	Glas/PTFE SHEERFILL IIA	Glas/PTFE FABRASORB II Akustikmembrane	nicht vorhanden	10%
5	Kurklinik Masserberg	Masserberg, Deutschland	1994	Rennsteig Kur- und Touristik GmbH, Deutschland	Laurens Schneider-Zimmerhackl IPL, Radolfzell Germany	IPL, Radolfzell, Deutschland	Büro Paul Schröder	Canobbio SPA, Italien	Zweilagig gedämmt	Freizeitbereich und Schwimmbad	3300 sqm	PES/PVC (Verseidag)	PES/PVC (Verseidag)	Mineralwolle 2x 80 mm	0%
6	Buddy Holly Musical Dome	Hamburg, Deutschland	1994	Buddy KG, Deutschland	IPL, Radolfzell, Deutschland	IPL, Radolfzell, Deutschland	MMS, Wuppertal	Sarnafil AG, Schweiz	Zweilagig	Musical Dome	5000 sqm	PES/PVC	PES/PVC	nicht vorhanden	0%
7	Gaudi Musical Dome	Köln, Deutschland	1996	Musical Dome Verwaltungs- und Betriebs GmbH, Deutschland	K.Latuske	IPL, Radolfzell, Deutschland	MMS, Wuppertal	Sarnafil AG, Schweiz	Zweilagig gedämmt	Musical Dome	4000 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Mineralwolle 160 mm	0%
8	Odate Jukai Dome Park	Odate, Japan	1997	Stadt Odate, Japan	Toyo Ito & Associates, Tokio, Japan	Takenaka Corp., Tokio, Japan	nicht bekannt	Taiyo Kogyo Corp., Japan	Zweilagig	Stadion	21911 sqm	Glas/PTFE	Glas/PTFE	nicht vorhanden	
9	Millenium Dome	Greenwich, UK	1998	The New Millennium Experience Company Limited, UK	Richard Rogers Partnership, London UK	Buro Happold, Bath, UK	BDSP, London, UK	Birdair	Zweilagig	Veranstaltungsgebäude	80425 sqm	Glas/PTFE	Glas/PTFE	nicht vorhanden	12%
10	Tabaluga Musical-Theater	Oberhausen, Deutschland	1999	TheatrO, CentRO, Deutschland	RKW Architektur und Städtebau, Oberhausen Germany	Ingenieurbüro Teschner, Kosel, Deutschland	nicht bekannt	CENO TEC, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Musical Dome	4560 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Mineralwolle 150 mm	0%
11	Kulturzentrum Puchheim	Puchheim, Deutschland	1999	Gemeinde Puchheim, Deutschland	LAI Lanz Architekten + Ingenieure, München, Deutschland	Tensys, Bath, UK	Transsolar, Stuttgart	Koch Hightex, D Flontex, Deutschland	Zweilagig gedämmt mit zusätzl. Schallschutz	Veranstaltungsgebäude	1000 sqm	Glas/PTFE	Glas/PTFE	Mineralwolle 180 mm	0%
12	Atriumsüberdachung Schülerbank	Wien, Österreich	2000	Schülerbank	Jabornegg Palffy, Wien, Österreich	Karlheinz Wagner, Wien, Österreich		Skyspan GmbH, Deutschland	Dreilagig	Atrium	270 sqm	ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
13	Tegut	Fulda, Deutschland	2000	Tegut Supermarkt, Deutschland	Günter Peichl, Fulda Germany	Ingenieurbüro Teschner, Kosel, Deutschland	nicht bekannt	CENO TEC, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Supermarkt	1837 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Vlies	0%
14	Storek	Leonberg, Deutschland	2000	Heidrun Storek / Varia Küchen, Deutschland	Architekturbüro Rasch + Bradatsch, Stuttgart, Deutschland	Büro Happold, Berlin, Deutschland	nicht bekannt	Birdair	Dreilagig gedämmt	Ausstellungsraum	900 sqm	PES/PVC	Glas/Silikon	PES Vlies 80+40 mm	0%
15	Cargolifter Halle	Brand, Deutschland	2000	Cargolifter AG, Deutschland	SIAT GmbH, München, Deutschland	IPL, Radolfzell Deutschland	Umbau MMS, Wuppertal	Birdair	Vierlagig	Werfthalle / Tropischer Freizeitpark	66000 sqm	PES/PVC PES/PVC	PES/PVC PES/PVC	nicht vorhanden	2%
16	Eden Project	St. Austell, Cornwall, UK	2001	The Eden Project, UK	Nicholas Grimshaw	Anthony Hunt and Associates	Van Vliet Automation Ltd., Niederlande	Vector Foiltec, Deutschland	Dreilagig	Gewächshaus	22140 sqm	ETFE	ETFE	nicht vorhanden	95%
17	Festo Technologiezentrum	Esslingen, Deutschland	2001	Festo AG & Co.	Architekturbüro Jaschek, Stuttgart, Deutschland	Ingenieurbüro IPL, Radolfzell, Deutschland			Dreilagig	Atrium		ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
18	TMZ Erfurt	Erfurt, Deutschland	2001	nicht bekannt	Pohl Architekten, Jena, Deutschland	Pohl Architekten, Jena, Deutschland	Schmidt Reuter Partner, Erfurt	Flontex, Deutschland	Einlagig gedämmt	Bürogebäude	nicht bekannt	Glas/PTFE	Glas/PTFE	Glasgespinst 100 mm	ca. 15 - 20%
19	Villa Arena	Amsterdam, Niederlande	2001	ING Vastgoed Ontwikkeling BV, Niederlande	Bentham Crouwel, Niederlande			Skyspan GmbH, Deutschland	Zweilagig	Atrium	3890 sqm	ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
20	Parkbad Velbert	Velbert, Deutschland	2002	Stadtwerke Velbert, Deutschland	Dr. Krieger Architekten und Ingenieure, Deutschland	IPL, Radolfzell, Deutschland	CCD Bautechnik	Koch Membranen, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Schwimmbad	700 sqm	PES/PVC Type IV mit PVDF, Ferrari Précontraint 1302 Series 8000	PES/PVC Type II mit Acryl, Ferrari Précontraint Series 1002	PES Vlies 2x120 mm	0%
21	Papageno Kindertheater	Frankfurt, Deutschland	2003	Maienschein, Deutschland	Felicitas Mossmann, Deutschland	Dr. Greiner, Oberaichen, Deutschland	Dr. Grah	covertex, Deutschland	Zweilagig gedämmt	Theater	630 sqm	PES/PVC	PES/PVC	Mineralwolle 100 mm	0%
22	Allianz Arena	München, Deutschland	2005	FC Bayern München AG	Herzog & de Meuron, Basel, Schweiz	Arup Ltd.		Covertex GmbH, Deutschland	Zweilagig	Stadion		ETFE	ETFE	nicht vorhanden	
23	New Bangkok Airport	Bangkok, Thailand	2005	NBIA New Bangkok International Airport Co. Ltd., Bangkok TJ	Murphy/Jahn, Chicago, USA	Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart, Deutschland	Transsolar, Stuttgart	Hightex, Deutschland	Zweilagig mit zusätzlicher Polycarbonatplatte	Flughafen	108000 sqm	Glas/PTFE	Glas/Silikon	nicht vorhanden	2%
24	Stazion Z	Sachsenhausen, Deutschland	2005	Stadt Bismarck, Deutschland	hg Merz, Berlin, Deutschland	Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart, Deutschland	Transsolar, Stuttgart	CENO TEC, Deutschland	Zweilagig	Gedenkstätte		Glas/PTFE	Glas/PTFE	nicht vorhanden	
25	Modern Teahouse	Frankfurt, Deutschland	2007	MAK Frankfurt	Kengo Kuma, Japan	form TL, Radolfzell, Deutschland			Zweilagig	Teehaus		PTFE Gewebe / Fluor Folie	PTFE Gewebe / Fluor Folie	nicht vorhanden	38%
26	Schulungszentrum der Bergwacht Bayern	Bad Tölz, Deutschland	2008	Bergwacht Bayern	Herzog + Partner, München, Deutschland	Sailer, Stepan + Partner, München, Deutschland			Zweilagig	theoretische und praktische Schulung		ETFE	ETFE	nicht vorhanden	

Tabelle 1: Zusammenstellung der im vorliegenden Bericht dokumentierten gedämmten Membranbauwerke

1.1. Olympiaschwimmhalle München

1.1.1. Allgemeines

Standort: München
Baujahr: 1972
Architekt: Behnisch und Partner mit Jürgen Joedicke, Frei Otto und Ewald Bubner
Ingenieur: Leonhardt + Andrä

Erneuerung: 2008
Architekt: Auer und Weber, Behnisch und Partner, beide Stuttgart
Ingenieur: Schlaich Bergemann und Partner, Stuttgart

Die Olympiaschwimmhalle wurde zur Austragung der Schwimmwettbewerbe der Olympiade 1972 erbaut. Sie befindet sich direkt am Olympiasee und gegenüber dem bekannten Olympiastadion. Die Außenhülle bildet ein mit Polymethylmethacrylat (PMMA, Acrylglas) eingedecktes Seilnetz.

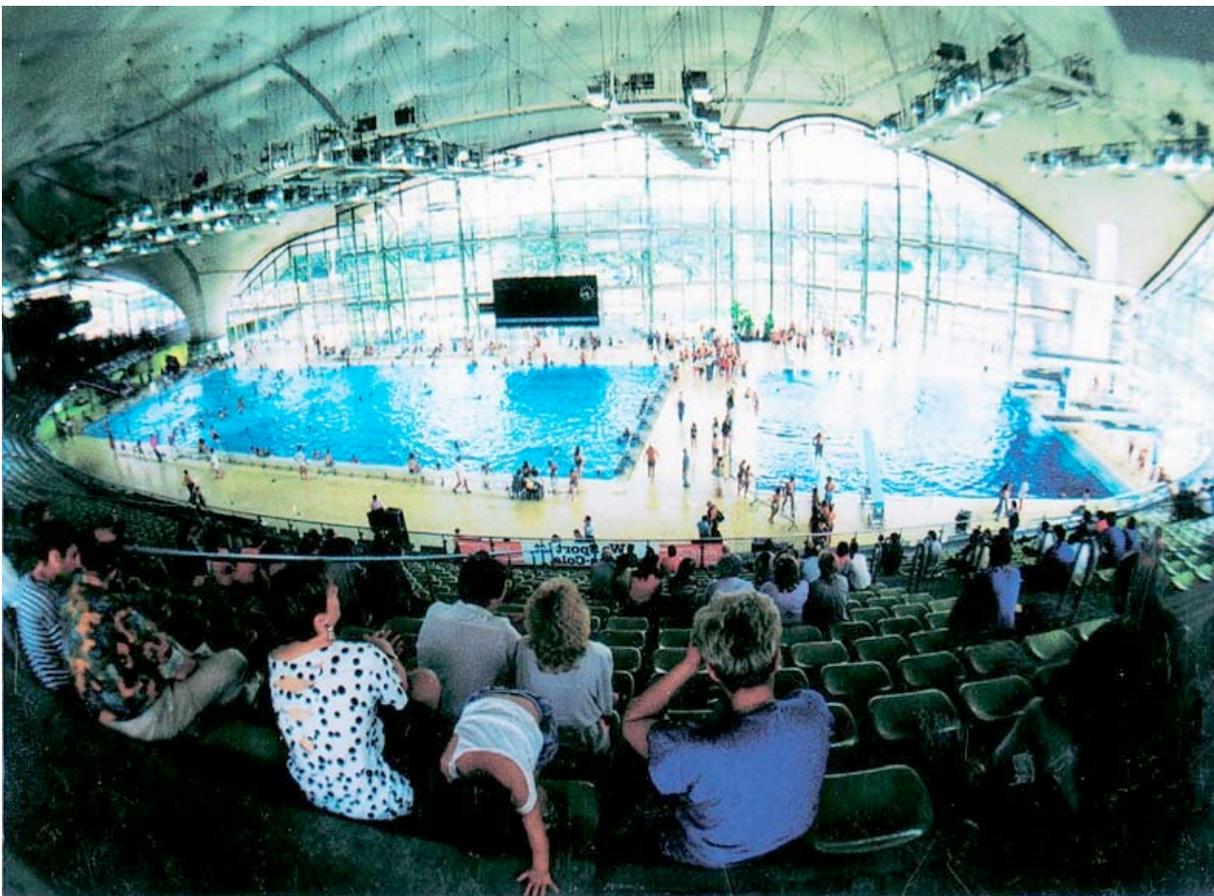


Abbildung 1: Innenansicht [7]

Das ca. 8.250 qm große Dach weist zwei Hoch- und zwei Tiefpunkte auf. Die ursprüngliche Ausführung wurde aus 17 Membranelementen von 80 bis 950 qm Größe mittels Schnurstößen zusammengesetzt und mit 218 so genannten „Kleeblättern“ (siehe Abbildung 2) vom Seilnetz abgehängt. Die „Kleeblätter“ waren notwendig, um die Membran in einem Abstand von rund 40 cm vom Seilnetz zu halten und mit dem Seilnetz kraftschlüssig zu verbinden. Zu den Durchdringungen der Membran durch die „Kleeblätter“ kommen über 100 weitere Durchdringungspunkte für die Befestigung der sieben in Querrichtung angebrachten und jeweils 24 m langen Beleuchtungsstege.

Nach dem Bau 1972 kam es bereits 1974 zu einer vorläufigen Sanierung der Dämmung und 1997 zur Sanierung der Acrylglaseindeckung. Eine komplette Sanierung des Membrandachs wurde aufgrund des Alters sowie durch die Einwirkung von Feuchtigkeit und chloridhaltiger Atmosphäre nötig und von 2003 bis 2006 durchgeführt [1]bis [3],[5],[6].

Erster und zweiter Aufbau:

Das mit vorgereckten Acrylplatten eingedeckte Seilnetz dient der Abtragung der äußeren Lasten und dem Wetterschutz. Die innere Membran war aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe in einem Abstand von mindestens 40 cm gehalten. Darauf aufgelegt war eine 14 cm dicke Dämmung aus plissierter Polyethylen-Folie (PE) und mit einem darüberliegenden, abdichtenden, PVC beschichteten Polyestergewebe. In den Unterlagen aus der ursprünglichen Planung sind alternative Dämmsysteme beschrieben. Die gewählte Kombination wurde vornehmlich auf Grund der Anforderungen an verschattungsfreie Ausleuchtung für die Fernsehübertragung gewählt. Da die PE-Folie der Dämmung dem unterschätzten Temperatureinfluss von bis zu 100 °C nicht widerstand, wurde sie bei der Sanierung 1974 durch PVC-Foliendämmung oder Mineralwollendämmung ersetzt. Die Angaben hierzu sind widersprüchlich. Gesichert beschrieben ist eine Erweiterung der Dämmung um zusätzlich 8 cm Mineralwolle mit einer Abdeckung durch ein PVC beschichtetes Polyestergewebe. Der resultierende Verlust an Transluzenz durch den zusätzlichen Aufbau wurde in Kauf genommen, da den Anforderungen durch die Fernsehübertragung nach der Olympiade ein geringerer Stellenwert eingeräumt werden konnte [1] bis [3],[5],[6].

Sanierung des gesamten Aufbaus:

Bei der Sanierung von 2003 bis 2006 konnte auf leistungsfähigere Membranmaterialien zurückgegriffen werden, wodurch die Anzahl der Kleeblätter auf ca. 70 minimiert wurde. Die sieben quer liegenden Beleuchtungsstege konnten trotz der umfangreichen Anforderungen an die künstliche Beleuchtung auf einen längs verlaufenden Steg reduziert werden. Damit einher ging die Reduzierung auf 30 Befestigungsseile und Membrandurchführungen [5] und [6].

Der neue mehrlagige Aufbau sollte vergleichbar zu den ästhetischen Anforderungen des ursprünglichen Zustands ausgeführt werden, allerdings unter der Prämisse, dass den umfassenden bauphysikalischen Ansprüchen Rechnung getragen wird. Mehrere Varianten für die innere Membran, die Befestigung der „Kleeblätter“, die Dampfdichtigkeit und für das Dämmmaterial wurden untersucht.

Als innere Membran wurde schließlich wiederum PVC beschichtetes Polyestergewebe verwendet. PTFE beschichtetes Glasfasergewebe wurde durch seine Knickempfindlichkeit als unpraktikabel eingeschätzt.

Eine transluzente Wärmedämmung (TWD) in Wabenausführung hätte den ästhetischen und bauphysikalischen Anforderungen genügt, konnte allerdings aus konstruktiven und montagetechnischen Gründen nicht verwendet werden. Beschädigungen waren bei den möglichen Montageszenarien obligatorisch, da das Material nur geringe Druckkräfte aufnehmen kann und dadurch sehr anfällig gewesen wäre. Des weiteren sind die vorgesehenen Waben aus Celluloseacetat wasserempfindlich und hätten aus diesem Grund in Ethylen-Tetrafluoroethylen-Kissen (ETFE) dampfdicht eingeschweißt werden müssen, was den ohnehin schon hohen Preis weiter gesteigert hätte. Aus diesen Gründen entschied man sich das Dach mit einem 7 cm starken Polyestervlies auszurüsten. Dieses sollte beidseitig mit einer ETFE-Folie vor Wasser und Wasserdampf geschützt werden. Die Zweifel von Seiten des Konfektionärs sämtliche Durchdringungen (siehe Abbildung 4 und 5), sowie die ca. 1.000 Sogsicherungen in der geforderten Dampfdichtigkeit herstellen zu können, waren der Grund für die Entwicklung eines adaptiven Lüftungssystems in der Dämmung.

Das zur Ausführung gekommene System sah vor, Membranstege in einem Abstand von ca. 2 m auf die Membran aufzuschweißen, zwischen denen die Polyesterdämmung eingeklemmt werden konnte. Da keine zusätzliche Dampfsperre zum Einsatz kam, war mit starker Wasserdampfdiffusion

zu rechnen. Durch gezielte Zufuhr von warmer Luft sollte die Feuchte abgeführt werden. Dazu wurde, wie in Abbildung 2 dargestellt, in jedem Feld ein poröses Rohr (d = 70 mm) angebracht, durch welches ständig warme Luft ausströmt. Die warme Luft soll, auf ihrem Weg durch die Dämmung zu der am anderen Ende angebrachten Öffnung, Wasserdampf aufnehmen und diesen nach dem Austritt an die Umgebungsluft abgeben.

Die Kalkulation des Konfektionärs bestätigte diesem Aufbau geringere Kosten in Anschaffung und Betrieb über die nächsten 15 Jahre, als dem ursprünglichen Entwurf mit der transluzenten Wabendämmung [5] und [6].

1.1.2 Details

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die konstruktive und bauphysikalische Umsetzung bei der Sanierung von 2003 bis 2006. Abbildung 2 zeigt die Abhängung vom Seilnetz und die Membrananbindung mittels „Kleeblatt“.

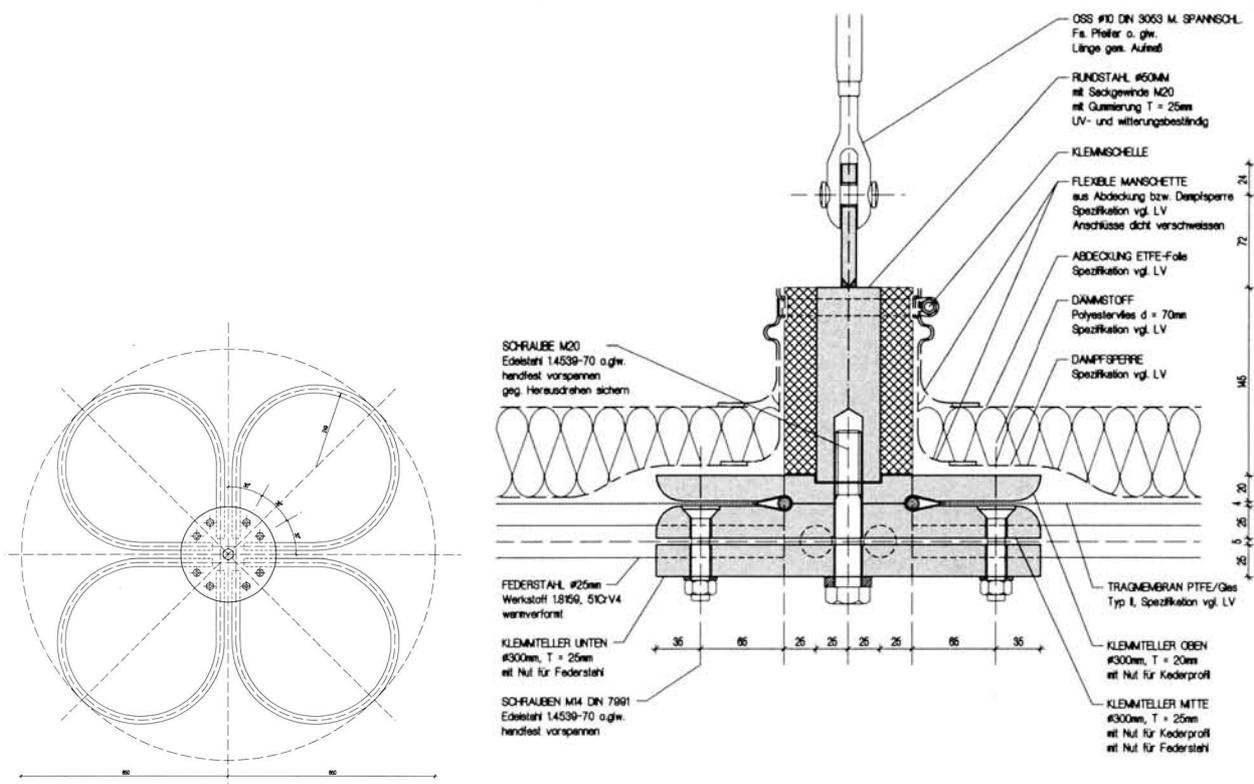


Abbildung 2: Kleeblatt in Draufsicht und Schnitt (Entwurf 2003/2004) [7]

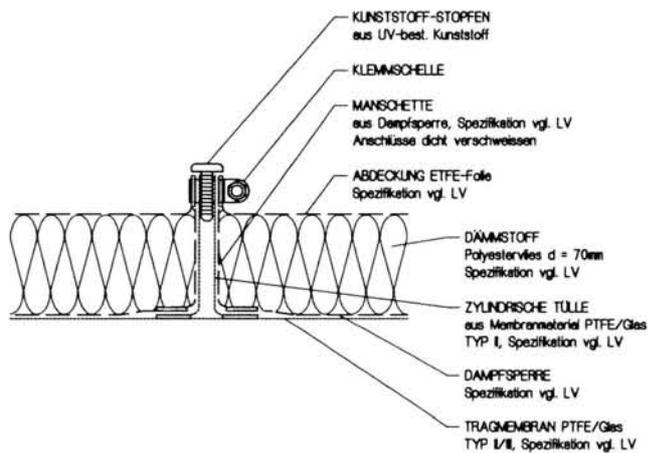


Abbildung 3: Sogsicherungen (Entwurf 2003/2004) [7]

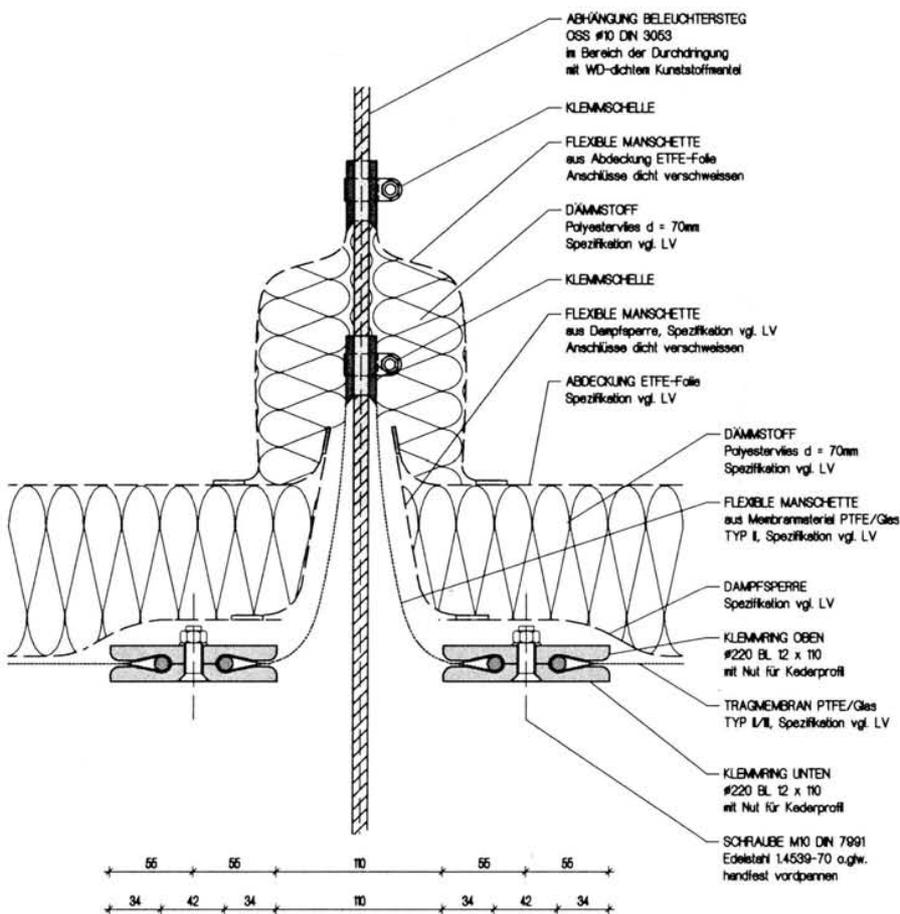


Abbildung 4: Durchdringung des Stahlseils zur Befestigung des Beleuchtungsstegs (Entwurf 2003/2004) [7]



Abbildung 5: Der zur Ausführung gekommene Dachaufbau mit aktiver Entfeuchtung

Die in Abbildung 5 grün gekennzeichneten Klemmprofile verhindern das Abheben der aufliegenden ETFE-Folie unter Sogwirkung und sind in Abbildung 3 detailliert dargestellt. Die warme, rot gekennzeichnete Luft durchströmt die Dämmung und kann durch Entlüftungsöffnungen am Ende jedes Feldes entweichen.

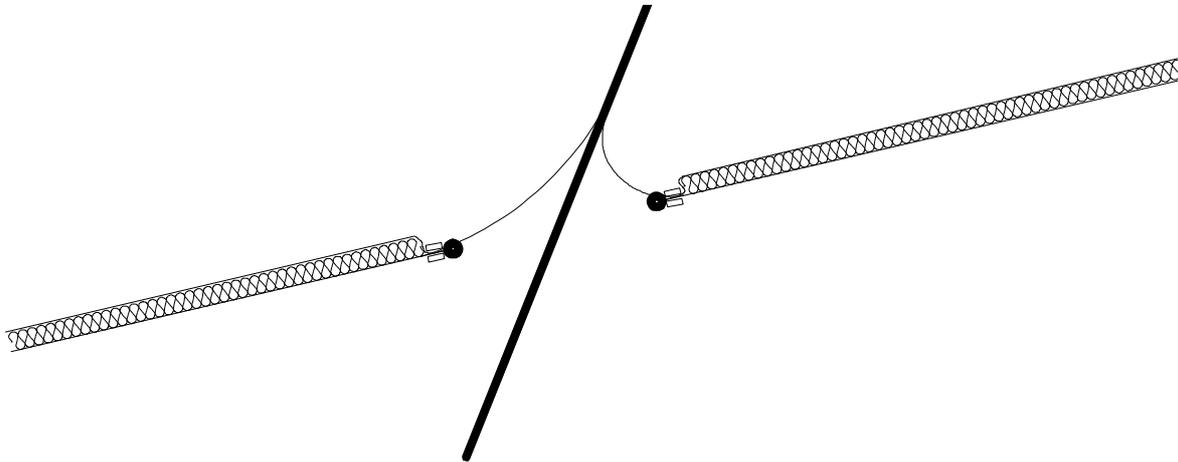


Abbildung 6: Aufbau 1972-2005: Nicht wärmedämmte Durchdringungen (schematisch)

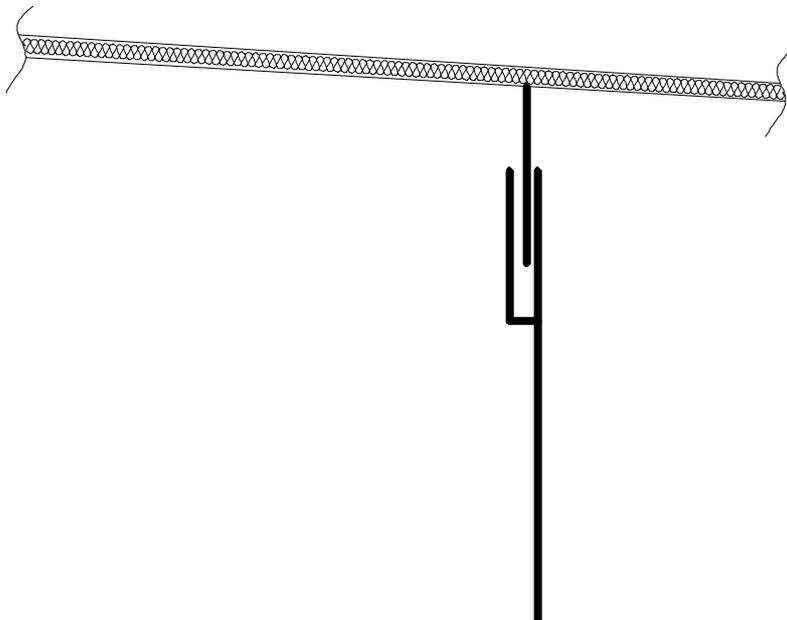


Abbildung 7: Aufbau 1972-2005: Anschluss an die Fassade (schematisch)

Der ursprüngliche Anschluss der Membran an die Fassade erfolgte mittels einer Plexiglasschürze, welche in einem Schlitz vertikal verschieblich gelagert war. Dieser Anschluss wurde bei der Sanierung durch einen ETFE-Pneu ersetzt [1] bis [3].

1.1.3 Probleme

Der bis zur Sanierung in Betrieb befindliche Aufbau wies Probleme mit Kondensatbildung an den Kleeblättern, sowie an sämtlichen Durchdringungen der Membran auf, da diese nicht wärmegeklämt ausgeführt waren und eine Dampfsperre fehlte.

Die vielen für den Membranbau untypischen Durchdringungen waren auch aus konstruktiver Sicht problematisch. Aus den Windkanalversuchen geht hervor, dass sich Vertikalverschiebungen der Membran von bis zu 2,5 m hätten einstellen können. Dies wäre besonders gravierend gewesen, wenn die Bewegungsrichtung nicht in der Achse der Stahlseile gelegen hätte. Aus diesem Grund sind die Manschetten an den Durchdringungen bei der Sanierung sehr groß ausgefallen, was wiederum die Detaillierung des gedämmten Aufbaus erschwerte [5] und [6].

1.1.4 Einschätzung / Kommentar

Da durch die gegebenen konstruktiven Bedingungen eine dampfdichte Sanierung nur mit sehr großem Aufwand möglich gewesen wäre, ist der Einsatz eines aktiven Entfeuchtungssystems eine sinnvolle Alternative. Da das hierzu erstellte Bauphysikgutachten leider nicht vorlag, kann allerdings keine detaillierte Aussage zur Effektivität der Systemlösung beschrieben werden. Auch wenn eine gezielte Erwärmung der Dämmung zunächst aus energetischen Gesichtspunkten als nicht sinnvoll erscheinen mag, so kann doch festgestellt werden, dass die Maßnahme auch eine Erhöhung der Oberflächentemperatur der inneren Membran zur Folge hat. Dies wiederum schlägt sich als positiver Effekt auf die Behaglichkeit im Gebäude und in Bezug auf eine Reduzierung der Wärmeleitungsverluste nieder.

1.1.5 Zusammenfassung der Membrandaten

Aufbau bis zur Sanierung von 2003 - 2006:

Bauteil	Hersteller	Typ
Deckbahn	nicht bekannt	PVC Abdeckplane
Dämmung	nicht bekannt	Mineralwolle
Innenmembran	nicht bekannt	PES/PVC

Nach der Sanierung:

Bauteil	Hersteller	Typ
Deckbahn	nicht bekannt	ETFE Folie
Dämmung	nicht bekannt	Polyestervlies 70 mm
Innenmembran	nicht bekannt	PES/PVC

1.2 Cuppamare

1.2.1 Allgemeines

Standort:	Kuppenheim
Baujahr:	1978
Architekt:	Josef Linecker, Mattighofen, Österreich
Ingenieur:	Nicht bekannt
Zuschnitt:	Ballonfabrik Augsburg

Das Cuppamare war eine mehrlagige Traglufthalle, die einen Teil des Schwimmbads in Kuppenheim überdachte. Die überbaute Grundfläche (ÜGF) beträgt ca. 1.350 qm. Das Bauwerk wurde im Jahr 2000 abgerissen, nachdem es durch das Orkantief „Lothar“ stark beschädigt wurde.



Abbildung 8: Außenansicht [13]

1.2.2 Aufbau und Funktion

Bei der Planung des Gebäudes wurde davon ausgegangen, dass sich durch Mehrlagigkeit eine engergetisch optimierte Gebäudehülle erstellen lassen würde. Deshalb wies die Traglufthalle einen fünfteiligen Schichtaufbau auf.

Die Außenhaut bestand aus einem Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe (PES). Darunter befanden sich drei Lagen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) Folien, gefolgt von der inneren Schicht aus PVC beschichtetem PES-Gewebe [12].

Zwischen jeder dieser Schichten befand sich eine Luftschicht, die als Wärme- und Schalldämmung fungieren sollte und mittels Abstandhalter in seiner vorgesehenen Lage gehalten wurde. Durch Öffnungen und Klappen im Scheitelbereich und im Sockel wurde die Belüftung der verschiedenen Zwischenräume gewährleistet. Durch die Lüftungsanlage konnte allerdings nur der äußerste und/oder der innerste Zwischenraum direkt belüftet werden. Das Belüften erfolgte durch den für die Tragkonstruktion ohnehin benötigten Überdruck, wobei die Luft durch Klappen am Scheitel der Konstruktion einströmte und entlang der Membran nach unten zu einem Rückluftkanal geführt

wurde. In der Nähe des Rückluftkanals gab es eine weitere Klappe, mit deren Hilfe man zwischen den beiden Luftschichten umschalten konnte. Außerdem war es möglich beide Luftschichten gleichzeitig zu belüften. In der Regel strömte die Luft jedoch nur in einem Zwischenraum.

Die bogenförmigen Wand- und Fensterelemente der Halle waren in den am Fußboden laufenden Rückluftkanal eingespannt. Die Rückströmöffnungen waren entlang der Scheitellinien der einzelnen Segmentbögen und an den Rückluftkanälen im Sockel angeordnet, um den Membranzwischenraum gleichmäßig von oben nach unten zu durchströmen [9].

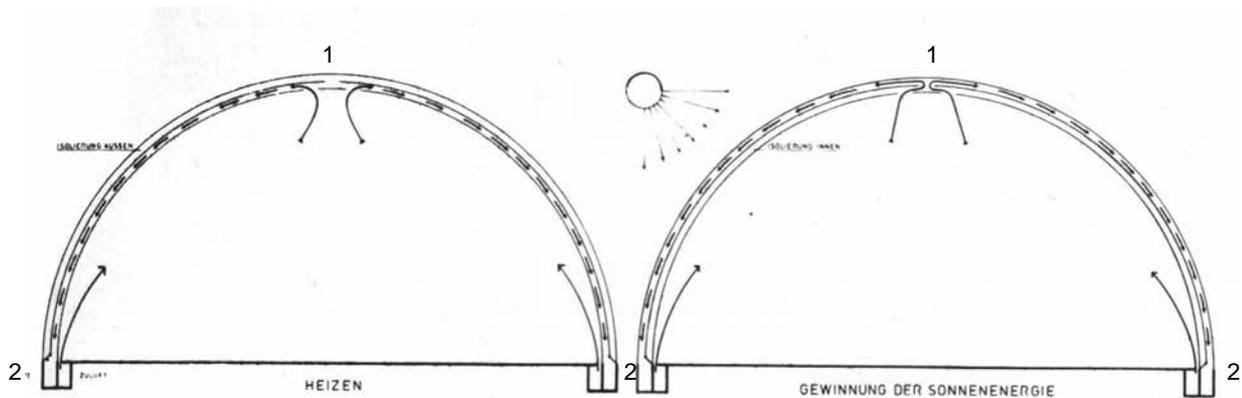


Abbildung 9: Funktionsprinzip der mehrlagigen Membranen mit Rückströmöffnung(1) und Rückluftkanal (2) [9]

Wie in Abbildung 9 ersichtlich ist, wurde die Luft durch den Überdruck vom Innern der Traglufthalle in den Zwischenraum gedrückt und bewegte sich dann nach unten zum Rückluftkanal.

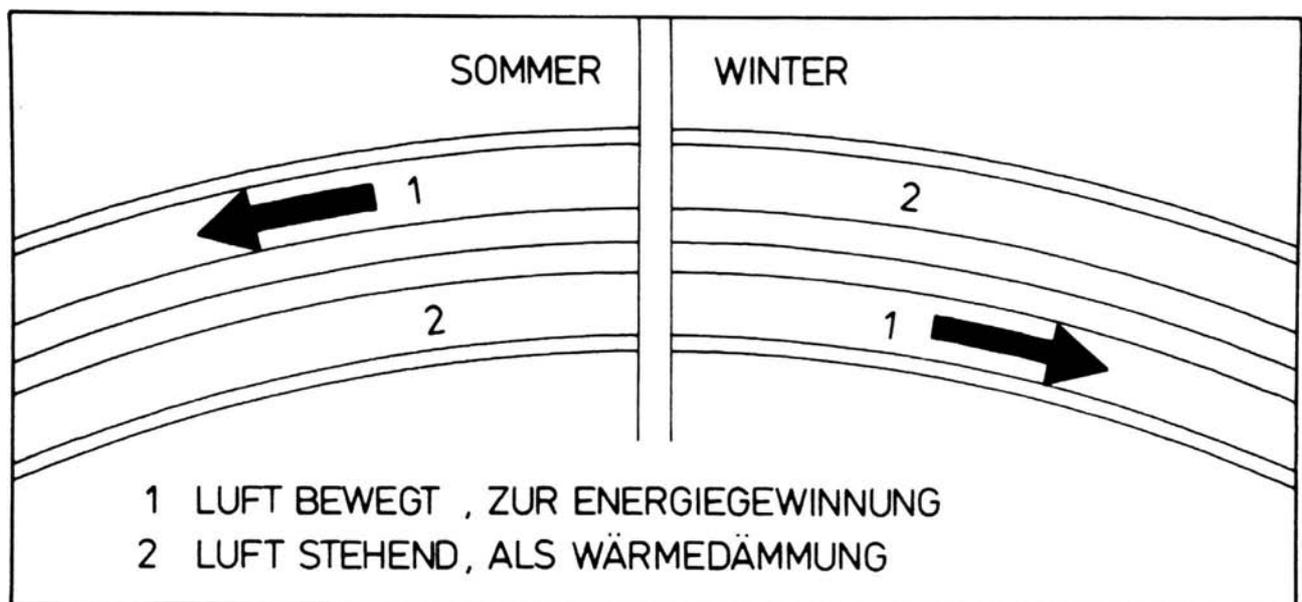
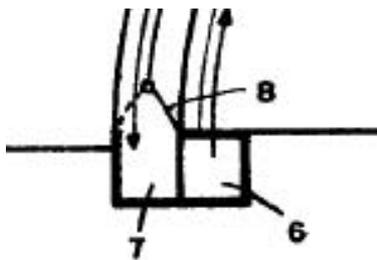


Abbildung 10: Wärmedämmung und Energiegewinnung durch variable Membranhülle nach dem LIN-System (nach Linecker) [9]



- 6 Zuluftkanal
- 7 Rückluftkanal
- 8 Klappen zur Luftstromregulierung

Abbildung 11: Prinzipskizze: Berandung mit Rückluftkanal [12]

Je nach Außentemperatur sollte die in Abbildung 11 mit (8) bezeichnete Klappe am Membranrand umgestellt werden, damit entweder die äußere oder die innere Luftschicht in Bewegung gerät. Die durch die solaren Gewinne im Zwischenraum der Membran gewonnene Energie sollte dadurch für die Beheizung des Innenraums sowie für die Temperierung des Wassers nutzbar gemacht werden.

„Mehrschalige Konstruktionen dampfdicht auszuführen ist praktisch nicht möglich. Deshalb wurde eine durchlüftete Konstruktion angestrebt.“, [9]. Aus diesem Grund sollte im Winter eine geringe Menge trockene Außenluft durch ein Gebläse in den Zwischenraum der äußersten Schicht eingeblasen werden, die sich dann nach oben bewegen und durch die Klappe in den belüfteten inneren Zwischenraum gelangen sollte [9].

Vor der Realisierung des Gebäudes wurden Versuche in einer Klimakammer gefahren, mit dem Ergebnis, dass bei -15°C Außentemperatur und 32°C Innentemperatur durch das Dach keine Wärme verloren gehen würde, wenn es senkrecht mit 250 W/m^2 bestrahlt würde.

Dies liegt noch im Einstrahlungsbereich, der im Winter am Gebäudestandort zwischen ca. 60 W/m^2 und ca. 300 W/m^2 variiert. Eine U-Wert Messung am Testaufbau ergab für die angenommenen Temperaturen einen U-Wert von $0,91\text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$, was einem Wert von $1,06\text{ W/m}^2\text{K}$ entspricht [9] bis [12].

1.2.3 Montage

Bei der Montage wurde die Außenmembran zunächst auf dem Boden ausgelegt. Ein darunter befindliches Luftkissen wurde daraufhin aufgeblasen, um die Membran soweit anzuheben, dass eine Befestigung an den Stahlbetonkuppeln möglich wurde. Die Membran musste dann mit Hilfe von Greifzügen in die richtige Position verschoben werden. Nachdem die Randverankerungen befestigt waren, konnte die Halle durch den nötigen Überdruck stabilisiert werden. Nachdem dies erfolgt war, befestigte man an der Innenseite die Teflonmembranen, sowie die innere Membran.

Das Montageverfahren funktionierte jedoch nur im unteren Teil der Konstruktion, da kein Gerüst in die Halle eingebracht werden konnte. Um die Montage fortzusetzen, wurde ein Teil des Überdruckes abgebaut, um damit die Außenhaut auf Arbeitshöhe abzusenken.

1.2.4 Details

In Abbildung 12 ist der Lagenaufbau prinzipiell ersichtlich. Das Dach besteht, wie bereits beschrieben, aus einer Außenhaut aus PES/PVC-Gewebe, darunterliegenden drei Lagen PTFE-Folien und einer PES/PVC-Innenmembran. Um die Abstandshalter befestigen zu können, wurden Noppen auf die Außenmembran aufgeschweißt, an denen sie mittels Schnurverbindung angebracht werden konnten [12].

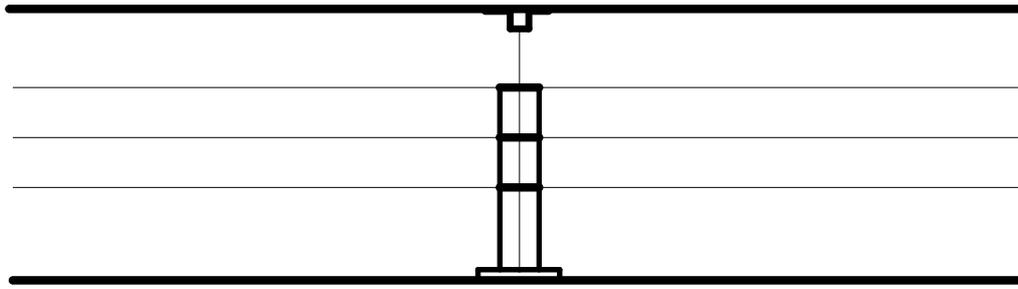


Abbildung 12: Prinzipskizze: Schnitt durch das Dach mit Abstandshalter

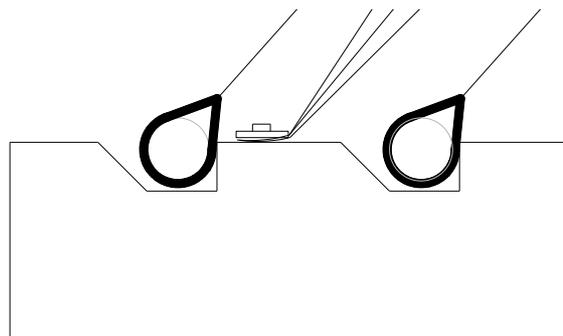


Abbildung 13: Prinzipskizze Randdetail: Die innere und äußere Membran wurde mittels Stahlseil, die Teflonfolien mittels Klemmleiste befestigt.



Abbildung 14: Kleines Gebläse zur Entfeuchtung des Membranzwischenraums [13]

Anfallendes Kondenswasser sollte entlang der Membran fließen und an der Berandung entwässert werden (vgl. Abbildung 14). Ebenfalls ersichtlich ist die Gebläseeinrichtung zur Einbringung der trockenen Außenluft im Winter.

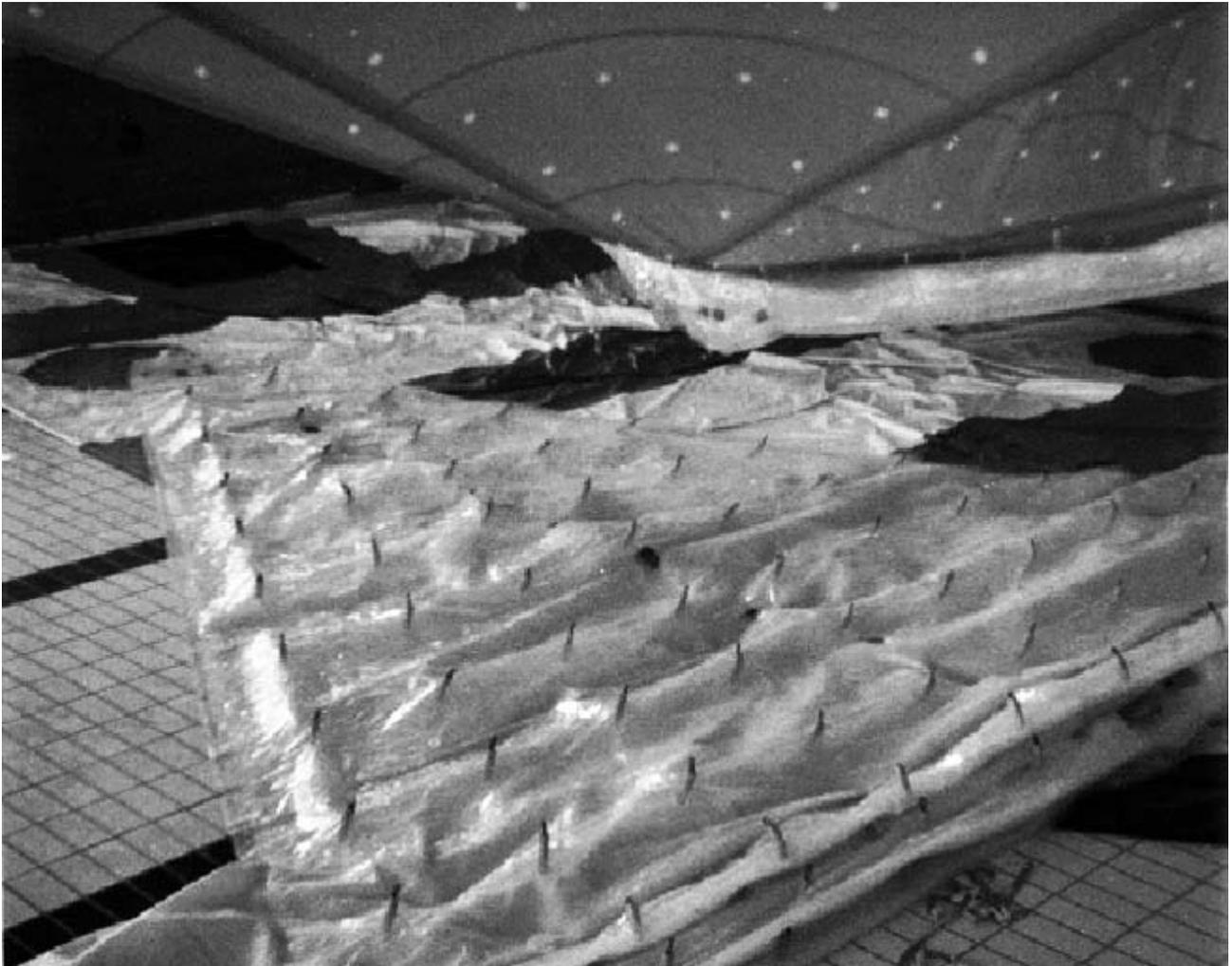


Abbildung 15: Dreilagige Teflonfolien mit Abstandshalter; Außenmembran mit angebrachten Befestigungspunkten [13]

1.2.5 Probleme

Gesicherte Aussagen zu Problemen beim Betrieb waren aus den vorliegenden Dokumenten nicht zu entnehmen. Nicht belegbare Aussagen seitens der Stadt Kuppenheim beschreiben allerdings Schimmelbefall durch Kondenswasserbildung [13].

1.2.6 Einschätzung / Kommentar

Die anfallende hohe Luftfeuchtigkeit in Verbindung mit den geringen Luftwechselraten einer Traglufthalle führen zu hohen Luftfeuchten im Membranzwischenraum. Daher besteht für einen solchen Aufbau die Gefahr des mikrobiellen Schädlingsbefalls. Dieses Risiko ist insbesondere in Bereichen wie den beiden mittleren Luftzwischenräumen gegeben, da hier auch durch Ablüften der feuchten Luft keine ausreichende Feuchtereduzierung erreicht werden kann. Auch eine ständig andauernde Belüftung der Zwischenräume mit höheren Luftwechselraten führt zwangsläufig zu

Problemen, da die inneren Membranlagen durch den Luftstrom zu flattern beginnen und gegeneinander schlagen können. Zudem ist mittlerweile bekannt, dass durch ETFE-Folien der strahlungsbedingte Energieaustausch nicht unterbunden wird und daher die tatsächliche Dämmwirkung deutlich geringer ausfällt als damals unter Berücksichtigung der wärmeleitungs- und konvektiven Übergänge angenommen wurde.

1.2.7 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	nicht bekannt	PES/PVC
Zwischenmembran	nicht bekannt	ETFE-Folien (dreilagig)
Innenmembran	nicht bekannt	PES/PVC

1.3 TOM Dortmund

1.3.1 Allgemeines

Standort:	Dortmund
Baujahr:	1978
Architekt:	Firma Planbau, Heiligenhaus
Ingenieur:	IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH, Konstanz
Konfektionär:	Stromeyer, Konstanz

Im Jahre 1978 wurde als Überdachung einer Eislaufbahn in Dortmund ein zweilagig gedämmtes Zeldach errichtet. Es war eines der ersten aus polytetrafluorethylenbeschichtetem (PTFE) Glasfasergewebe gebauten Zeldächer in Deutschland. Seit der Sanierung im Jahr 2004 wird das Gebäude als Diskothek genutzt.

1.3.2 Aufbau und Funktion

Das Dach wurde als eine typische Kaldachkonstruktion realisiert. Die äußere Membran diente der Lastabtragung und dem Wetterschutz. In einem Abstand von ca. 60 cm folgte die innere Membran aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe (PES). Im Luftzwischenraum war auf dem PES-Gewebe eine ca. 50 mm dicke Mineralfaserdämmung angebracht. Mit der Dämmlage versteppt waren beidseitige Auflagen aus unbeschichtetem Glasfasergewebe. Die Aussagen zur Dicke der Dämmschicht variieren in den vorliegenden Unterlagen [15].

Der gesamte Membranzwischenraum wurde mechanisch über Lüfter, die an den Stahlbetonbindern positioniert waren, entlüftet. Die nötige Luftzufuhr wurde über Lüftungshutzen am Membranrand sichergestellt. Schon bei der damaligen Planung wurde Kondenswasserbildung im Zwischenraum in Erwägung gezogen, weshalb konsequenterweise eine Entwässerung entlang der Berandung eingeplant wurde.

2004 wurde die Außenmembran und die Wärmedämmung des gesamten Daches ausgetauscht. Anstelle der Mineralfaserdämmung wurde ein 80 mm starkes Polyestervlies angebracht [14] und [15].



Abbildung 16: Außenansicht [15]

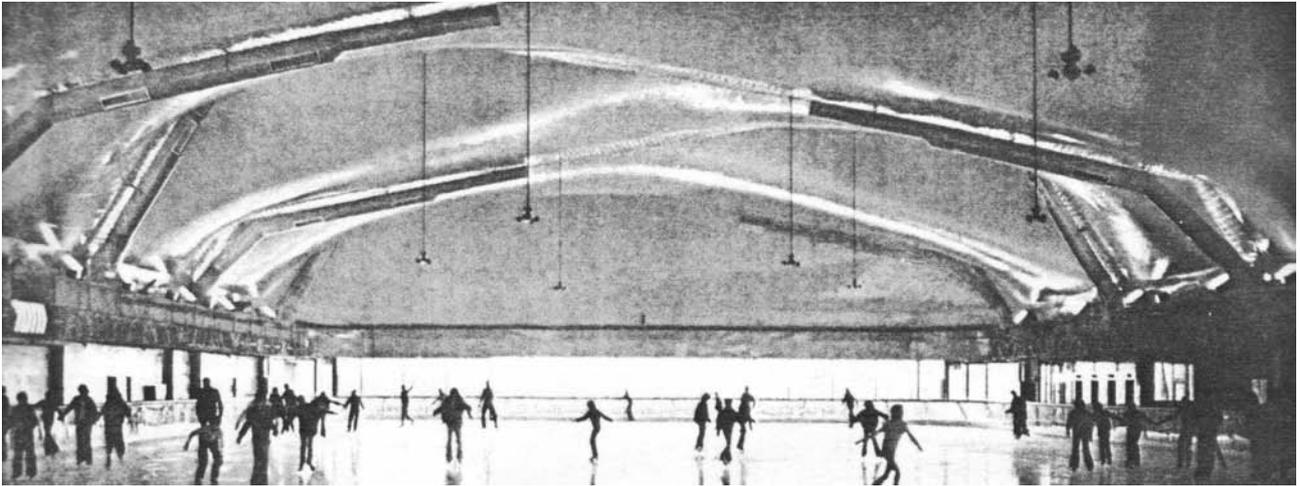


Abbildung 17: Innenansicht Eislaufhalle [15]

1.3.3 Details

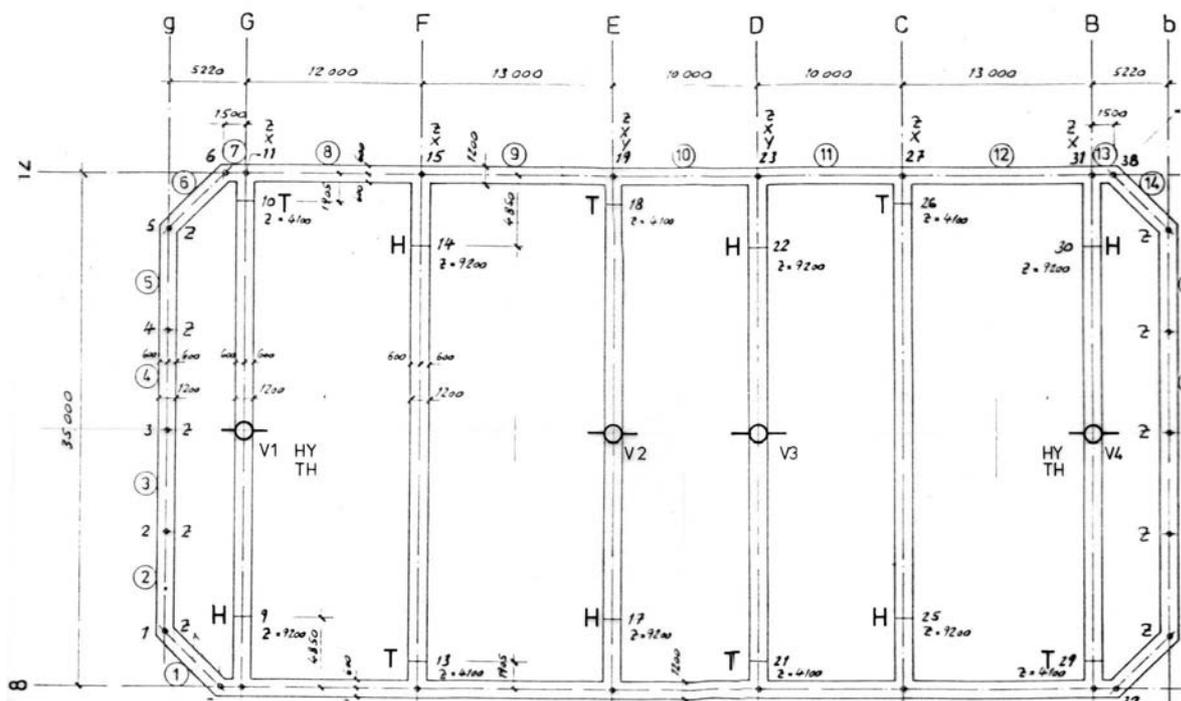
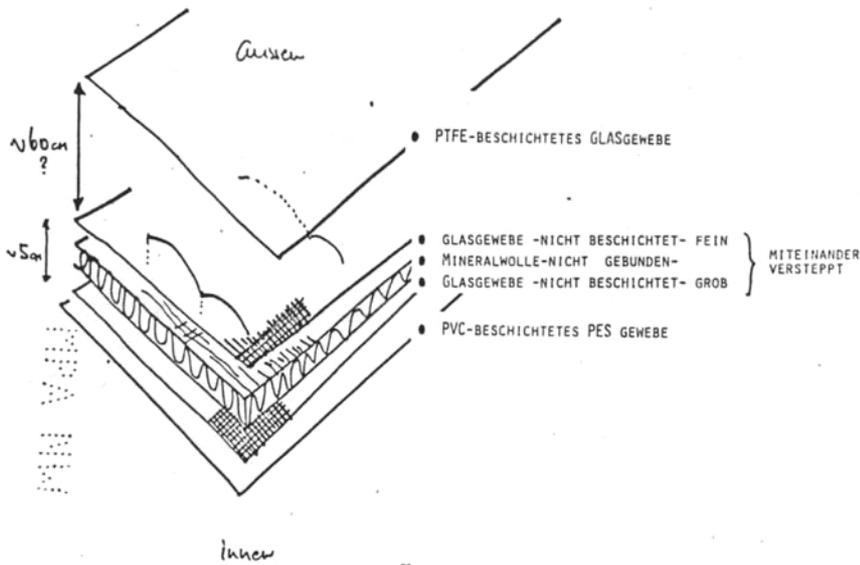
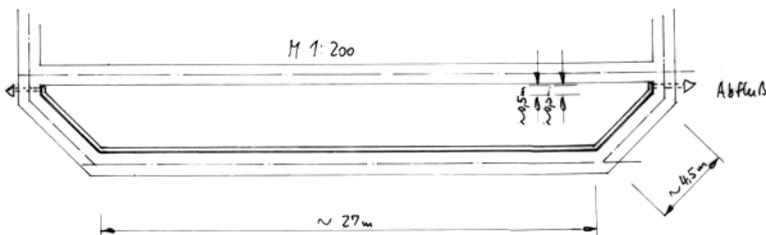
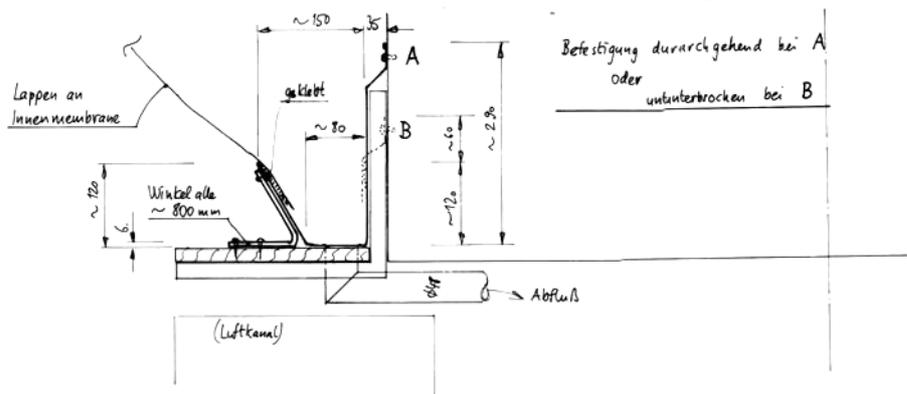


Abbildung 18: Grundriss: V1-V4 kennzeichnen die Gebläse zur Entlüftung des Zwischenraumes [15]



Prof. Dr. Ingrid Isenhardt, 0936 978-2

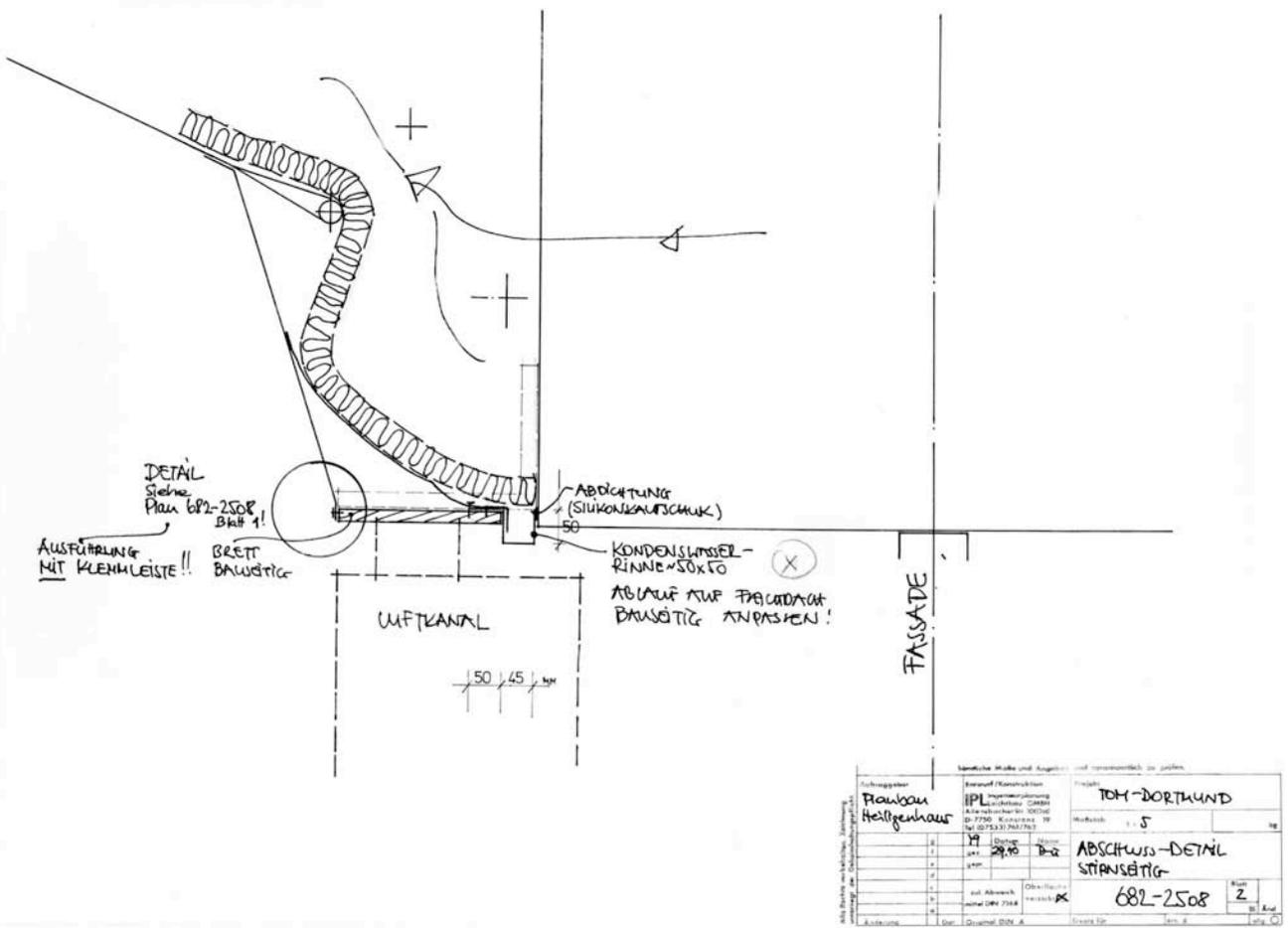
Abbildung 21: Dachaufbau mit Außenmembran aus Glas/PTFE; Dämmung aus miteinander verstepten Glasgewebe- und Mineralwollelagen; Innenmembran aus PES/PVC [15]

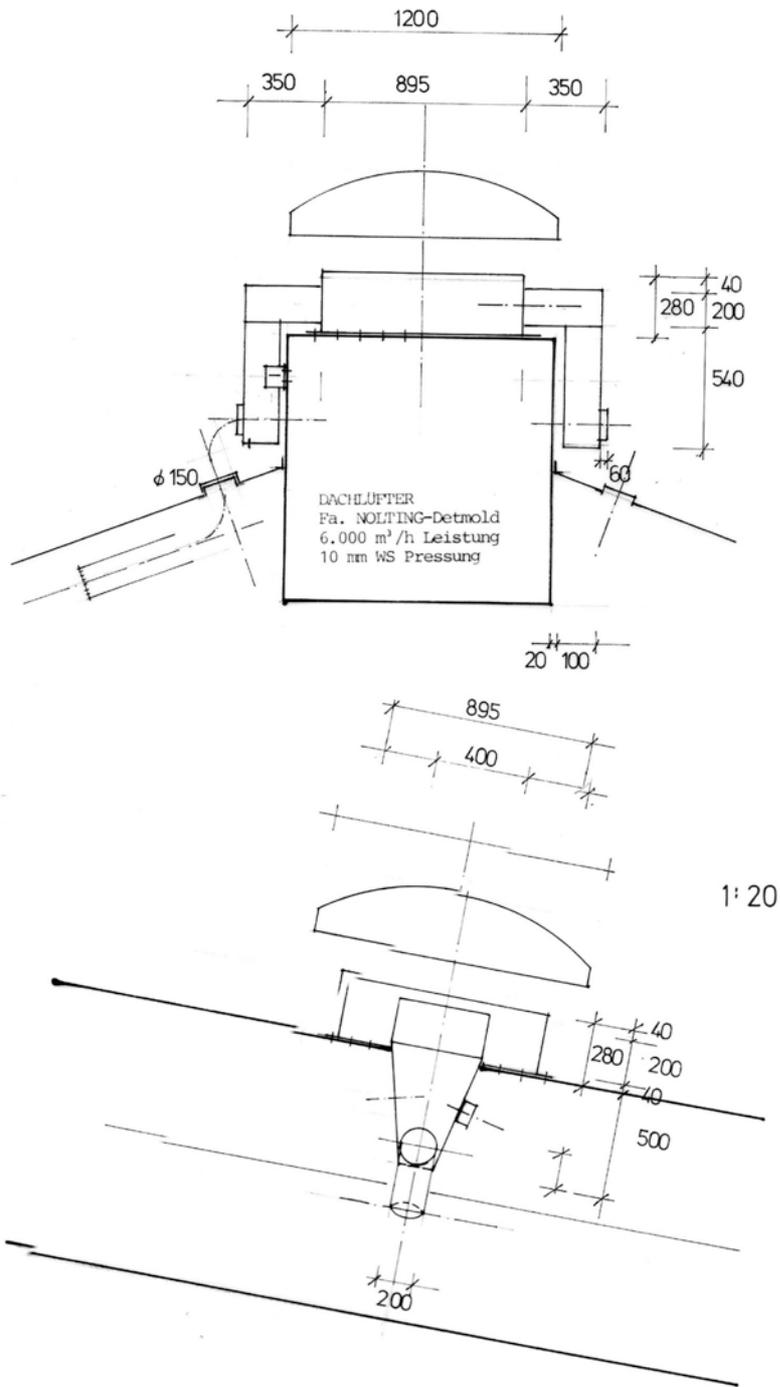


2x herstellen

Sämtliche Maße und Angaben sind verpflichtend zu prüfen			
Auftraggeber	IPK	Projekt	Eislaufcenter TOM Dortmund
Erreichte Konstruktion	IPK	Maßstab	1:5/200
Ingenieurplanung	B. K. P. 2	Blatt	682-511
Bauherr	IPK	Blatt	682-511
Objekt	IPK	Blatt	682-511
Standort	IPK	Blatt	682-511
Zeichnung	IPK	Blatt	682-511
Druck	Original DIN A 3	Erstellt für	IPK

Abbildung 22: Randdetail mit Entwässerung der Innenmembran [15]





Sämtliche Maße und Angaben sind verantwortlich zu prüfen.

Alle Rechte vorbehalten. Zeichnung unterliegt der Geheimhaltungspflicht.	Auftraggeber		Entwurf / Konstruktion		Projekt	
	Planbau 5628 Heiligenhaus		IPL Ingenieurplanung Leichtbau GMBH Ringstr. 75 (Dett) D-775 Konstanz 19 Tel. (07533) 6800		Eislaufcenter TOM Dortmund	
	g		Datum	Name	Maßstab	kg
	f		gez.	<i>20.07.19</i>	1:250/20	
	e		gepr.	<i>D. A.</i>	LÜFTUNG SCHALENZWISCHENRAUM	
	d				682 - 2569	Blatt
	c		zul. Abweich.	Oberfläche:		
	b		mittel DIN 7168	verzinkt <input type="radio"/>		
	a					Bl. Änd.
Änderung		Dat	Original DIN A	Ersatz für	ers. d.	allg. <input type="radio"/>

Abbildung 25: Entlüftungsmotor auf Träger zur Entlüftung des Membranzwischenraumes [15]

1.3.4 Probleme

In den vorliegenden Unterlagen werden keine Probleme für die Nutzung als Eislaufbahn beschreiben.

1.3.5 Einschätzung / Kommentar

Der Dachaufbau scheint für die Nutzung als Eislaufhalle geeignet gewesen zu sein. Die aktuelle Nutzung als Diskothek mit einer veränderten Klimatisierung des Innenraums wird den Systemaufbau überfordern. Durch den erhöhten Feuchteintrag der Diskothekbesucher und eine zu geringe Oberflächentemperatur der Innenmembrane besteht die Gefahr der erhöhten Kondensatbildung im Zwischenraum.

1.3.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Alter Aufbau:

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	nicht bekannt	Glas/PTFE
Deckbahn	-	nicht vorhanden
Dämmung	nicht bekannt	Mineralwolle 50 mm
Innenmembran	nicht bekannt	PES/PVC

Neuer Aufbau:

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	nicht bekannt	PES/PVC
Deckbahn	-	nicht vorhanden
Dämmung	Ziegler	PES-Vlies 80 mm
Innenmembran	nicht bekannt	PES/PVC

1.4 Denver International Airport

1.4.1 Allgemeines

Standort:	Denver, USA
Baujahr:	1994
Architekt:	C.W. Fentress, J.H. Bradburn and Associates, USA
Ingenieur:	Severrud Associates Consultants, USA
Konfektionär:	Birdair, Amherst, USA

Der internationale Flughafen von Denver ist mit seiner Grundfläche von 137 qkm einer der größten Flughäfen in den USA. Das in Abbildung 26 gezeigte 305 m lange Membrandach überdacht das Jeppsen Terminal mit einer Fläche von 23.250 qm [17].

Bei diesem Projekt fiel die Entscheidung für eine Membrankonstruktion erst zu einem sehr späten Zeitpunkt im Projektverlauf, da konventionelle Lösungen sehr lange untersucht und favorisiert wurden. Keine dieser Lösungen entsprach den ästhetischen Anforderungen, sowie der Budget- und Terminplanung, so dass man sich letztendlich für eine Membrankonstruktion entschied. Als Vorbild für das Membrandach diente das kurzzeitig zuvor errichtete San Diego Convention Center. Das Membrandach ermöglichte zwar eine kosten- und termingerechte Fertigstellung des Projektes, allerdings war man sehr skeptisch, ob ein Membrandach mit den extremen Witterungsbedingungen der Rocky Mountains zu recht kommen würde.



Abbildung 26: Außenansicht bei Nacht [20]



Abbildung 27: Nord-Süd Schnitt [16]



Abbildung 28: Ost-West Schnitt [16]



Abbildung 29: Innenansicht [16]

1.4.2 Aufbau und Funktion

Das Membrandach besteht aus zwei Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichteten Glasfasergeweben, die in einen Abstand von ca. 50 cm angebracht sind. Auf eine separate Dämmung des Zwischenraumes wurde verzichtet. Stattdessen wird die Luft im Zwischenraum entsprechend konditioniert. Dies ermöglicht der Konstruktion mit einer Transluzenz von ca. 7 % auf eine künstliche Beleuchtung des Gebäudes tagsüber fast gänzlich zu verzichten [17] und [18].

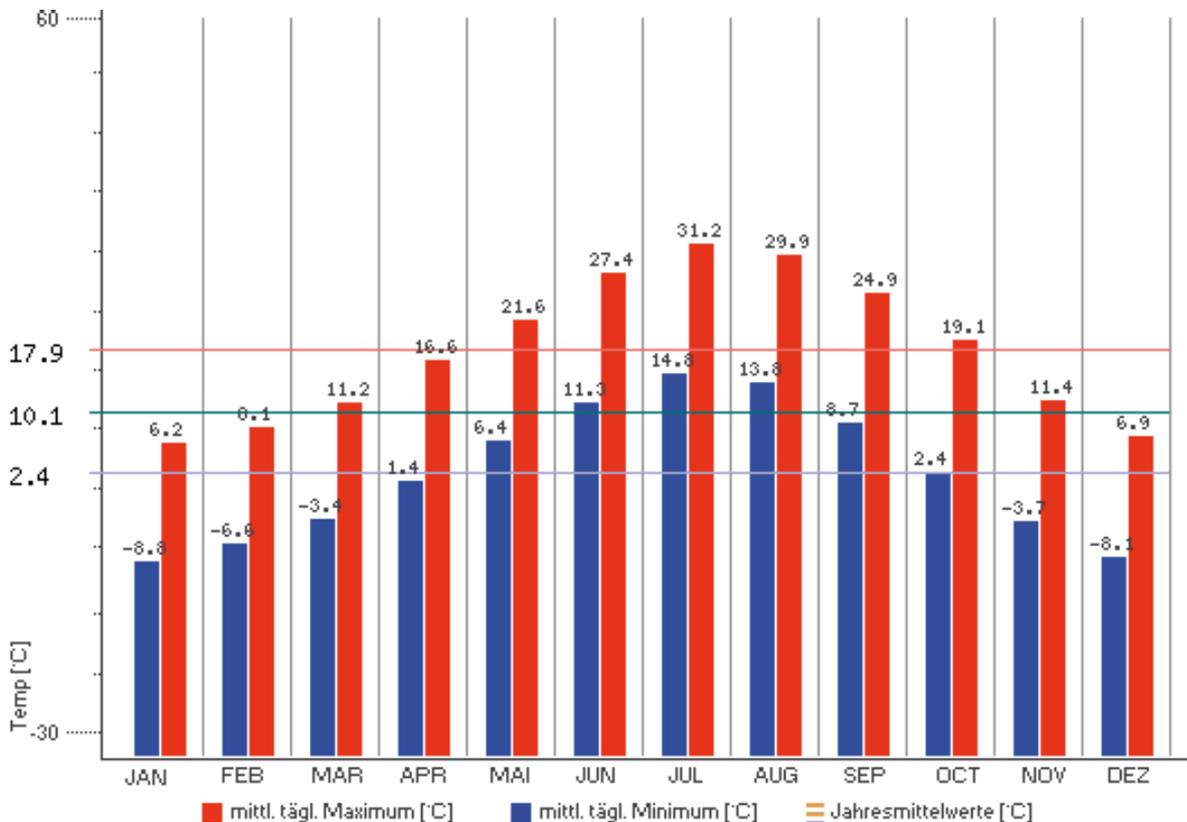


Abbildung 30: Jahresdurchschnittswerte der Temperatur in Denver [25]

Trotz der in Denver vorliegenden starken Temperaturschwankungen (siehe Abbildung 30) zwischen Winter und Sommer ist das Membrandach, nach Angaben der Projektbeteiligten, energetisch wie konstruktiv einem konventionellen Dach überlegen.

Der energetische Vorteil besteht bei diesem Dach darin, dass aufgrund der hohen Transluzenz während der Tagzeiten selbst bei bewölktem Himmel beinahe gänzlich auf künstliche Beleuchtung verzichtet werden kann. Der Nachteil, dass hierbei Wärmeenergie in das Gebäude eingeleitet wird, relativiert sich dadurch, dass eine künstliche Beleuchtung auch eine starke Wärmequelle wäre. Die während des Tages eindringende Wärme wird in dem massiven Stahlbetonbau gespeichert und kann nachts über das ausgekühlte Dach abgeführt werden. Im Winter muss das Gebäude beheizt werden, da der notwendige Heizenergiebedarf nicht ausschließlich durch die vorhandenen Wärmequellen, wie Menschen und Maschinen, gedeckt werden kann. Die Addition dieser Effekte soll sich vorteilhaft gegenüber einem konventionellen Dach auswirken. Inwieweit diese Prognose der Planungsbüros einer genaueren bauphysikalischen Untersuchung standgehalten hat, lässt sich aufgrund der dürftigen Quellenlage nicht einschätzen [19].

Bei dem zweilagigen Aufbau kommt es anscheinend trotz des nicht gedämmten Membranzwischenraums zu keiner Kondensatbildung an der Innenmembran. Dies lässt sich eventuell auf die extreme Temperaturschichtung im Innenraum zurückführen, da somit die Innenmembran über den konvektiven Wärmeaustausch relativ warm gehalten wird.

1.4.3 Details

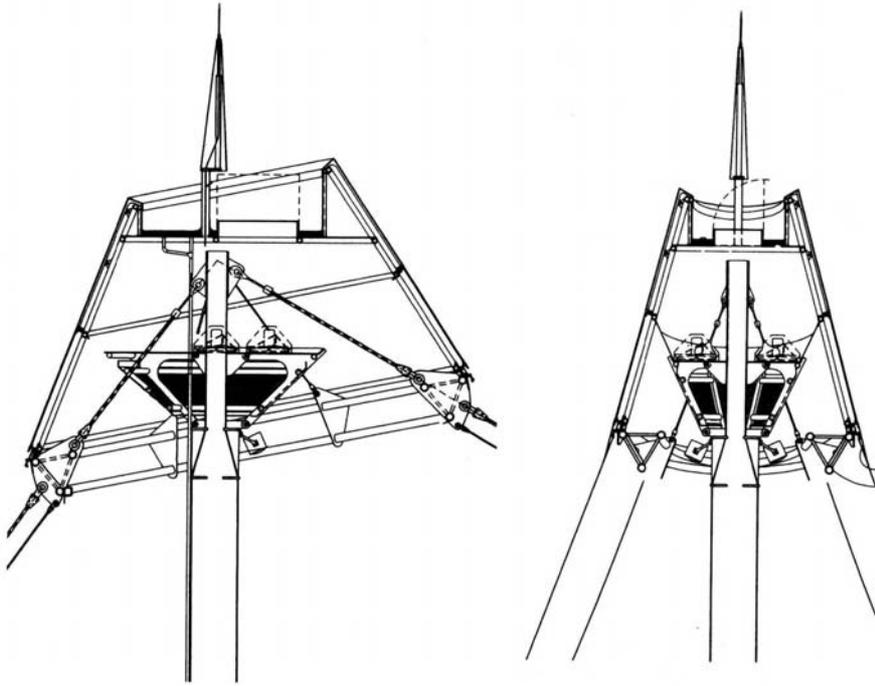


Abbildung 31: Schnitt durch einen großen Mastkopf und den typischen Mastkopf [16]

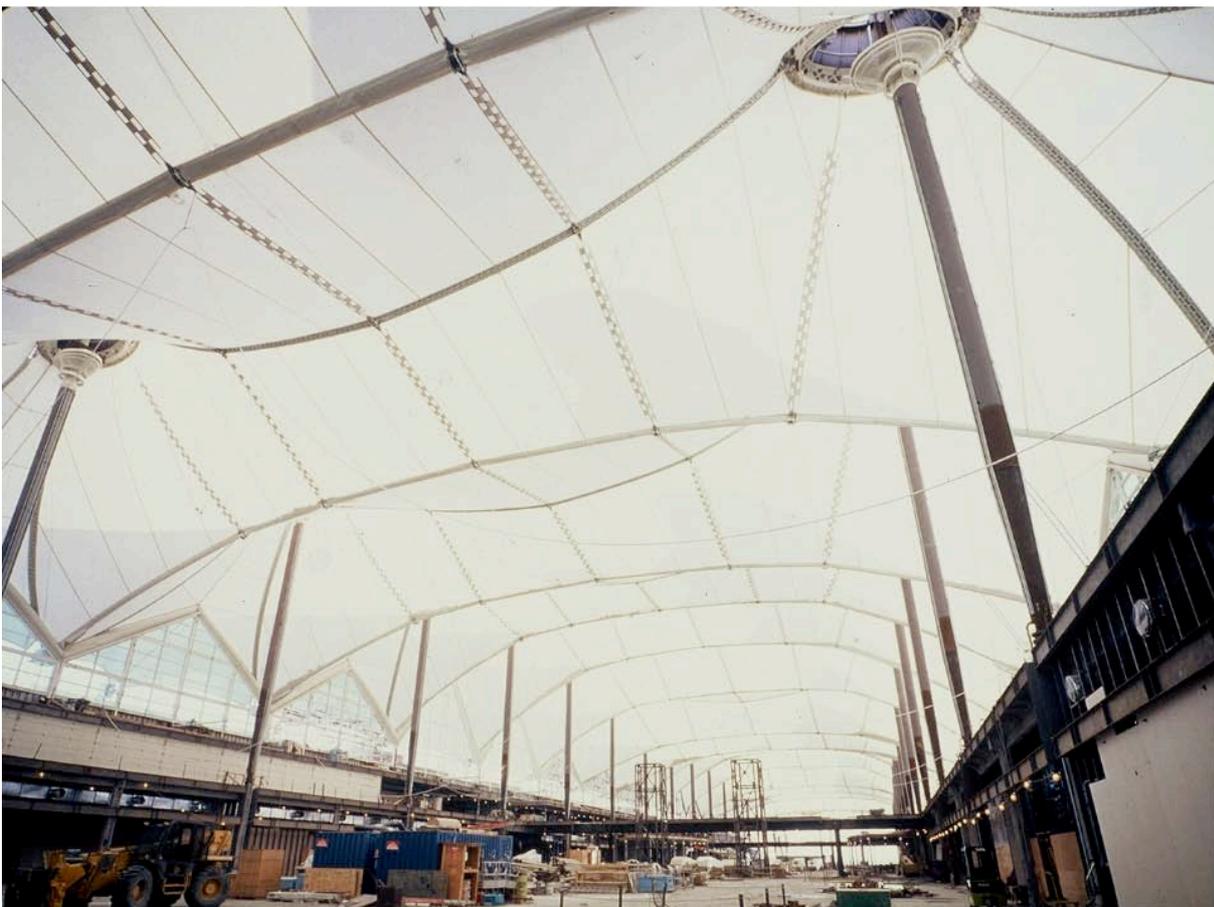


Abbildung 32: Innenraumansicht vor der Montage der Innenmembran [18]



Abbildung 33: Randdetail mit Luftkissen zwischen Außenmembran und Fassade [18]

Die in Abbildung 32 und Abbildung 33 gezeigten Luftkissen ermöglichen die Verbindung zwischen der Außenmembran und der starren Glasfassade. Sie sind untereinander verbunden und durch kleine Gebläse in Funktion gesetzt. Damit der Druck in den Kissen nicht unkontrolliert steigt, sind vereinzelt Überdruckventile angebracht. Eine Entwässerung des Membranzwischenraumes erfolgt über kleine Schläuche, die im Bereich der Stützen untergebracht sind [16].

1.4.4 Probleme

Bei der Recherche wurden keine Hinweise zu Problemen mit dem Membrandach gefunden.

1.4.5 Einschätzung / Kommentar

Der Denver International Airport ist eines der symbolträchtigsten Gebäude mit einem mehrlagigen Membrandach. Der offenbar problemlose Betrieb trotz extremer klimatischer und bauphysikalischer Anforderungen veranschaulicht, dass Membrandächer auch bei umfangreicher Gebäudenutzung ihren Zweck erfüllen und die architektonischen Qualitäten ausspielen können.

Es wird berichtet, dass die Lärmbelastung im Innenraum als sehr gering empfunden wird. Inwiefern sich die Emissionen der Flugzeuge allerdings zum Lärmpegel im Innenraum verhält, kann aufgrund fehlender Daten nicht eingeschätzt werden.

1.4.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Saint Gobain	Sheerfill IIA Glas/PTFE
Innenmembran	Saint Gobain	Fabrasorb II Glas/PTFE

1.5 Kurklinik Masserberg

1.5.1 Allgemeines

Standort:	Masserberg
Baujahr:	1994
Architekt:	Architekt Laurens Schneider-Zimmerhackl IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH (Membrane)
Ingenieur:	IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH (Membrane und Primärtragwerk)
Bauphysik:	Büro Paul Schröder
Konfektionär:	Canobbio S.p.A., Castelnuovo, Italien

Bei der Kurklinik Masserberg handelt es sich um zwei umgebaute und erweiterte DDR-typische Bettenhäuser. Bei der Umgestaltung wurde neben einem konventionellen Neubau auch ein membranüberdachter Freizeitbereich angegliedert. Die Anlage liegt in ungeschützter Lage auf 800 Metern über NN, was durch die klimatischen Bedingungen zu sehr hohen Bemessungslasten für Schnee und Wind führte. Das Membranbauwerk überspannt eine Fläche von 3.300 qm, wovon die Bereiche des Freizeitbades mit 1.270 qm sowie der Sporthalle mit 395 qm mit einem zweilagig gedämmten Membrandach ausgeführt wurden [26] und [27].

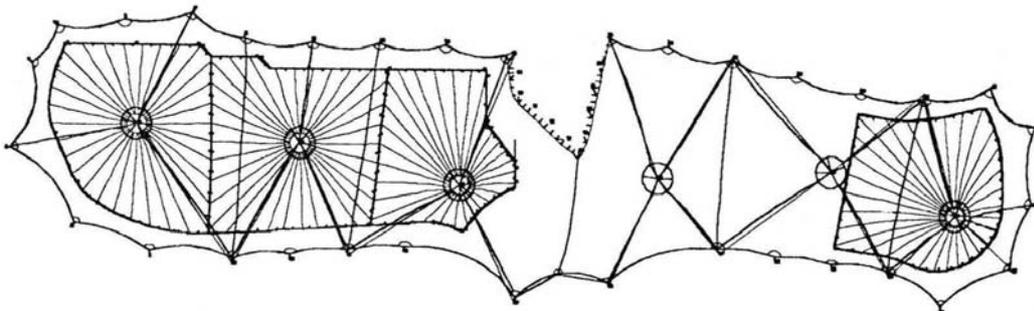


Abbildung 34: Grundriss Membrantragwerk mit Kennzeichnung des 2-lagigen Bereichs [28]

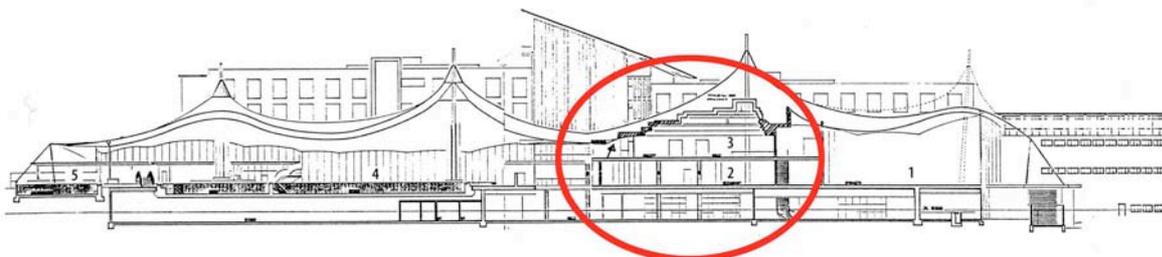


Abbildung 35: Schnitt durch das Membranbauwerk. Gekennzeichnet ist der in Ständerbauweise hergestellte Teil der Konzerthalle [28].

Zwischen der Schwimm- und Sporthalle befindet sich unter dem Zeltdach eine Konzerthalle, die aus leichten Ständerwänden erbaut wurde (siehe Abbildung 35). Das Membrandach wurde im Bereich der Konzerthalle allerdings nur einlagig ausgeführt.



Abbildung 36: Außenansicht [28]

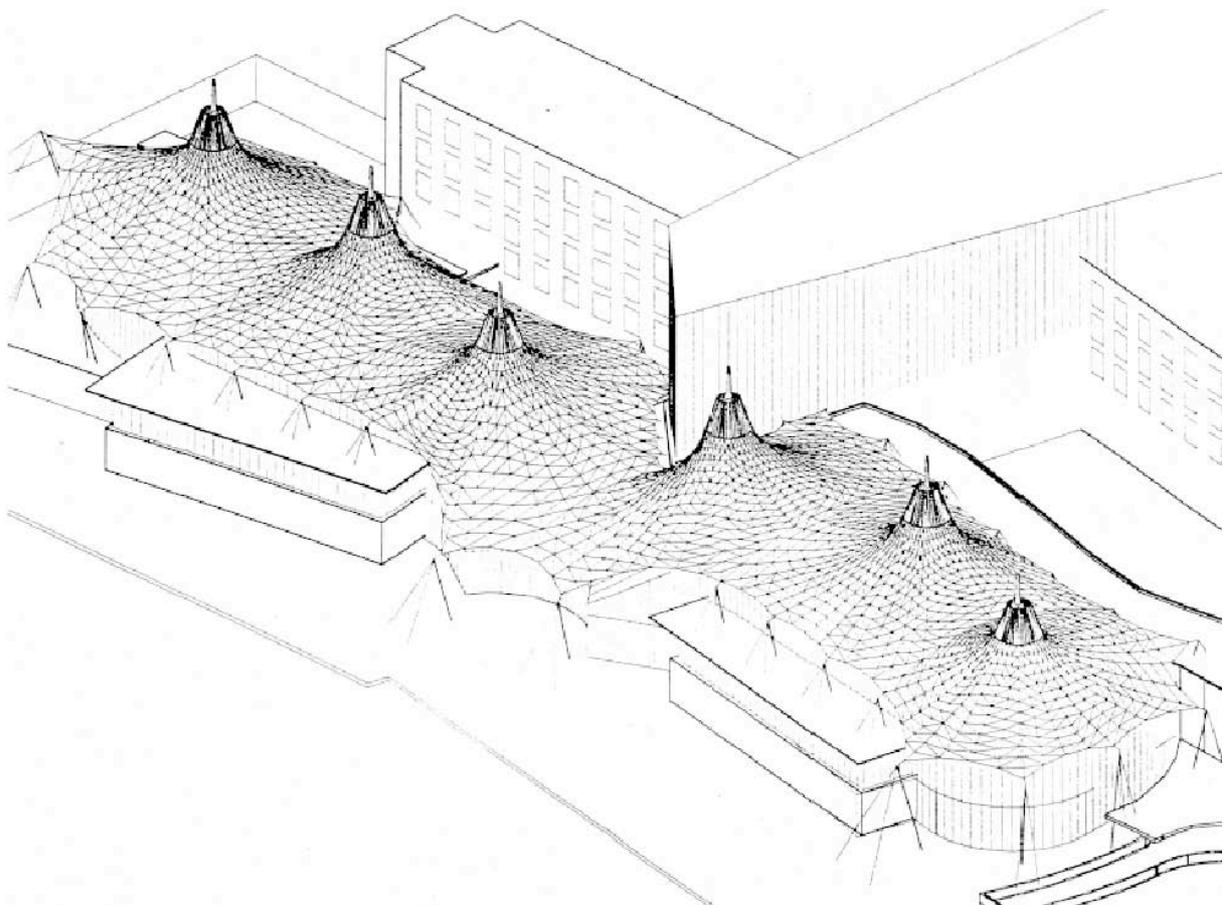


Abbildung 37: Isometrie [28]

1.5.2 Aufbau und Funktion

Die Konstruktion besteht aus einer äußeren Membran aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergerewebe (PES), einem belüfteten und konditionierbaren Zwischenraum, sowie zwei 80 mm dicken Mineralwollgedämmungen mit versetzten Fugen und einem abschließenden inneren PVC beschichteten Polyestergerewebe. Für diesen Aufbau weist das bauphysikalische Gutachten einen errechneten U-Wert von $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ aus [28].

Da im Bereich des Schwimmbades eine erhöhte Feuchteproduktion anfällt, wurde speziell dort zusätzlich zur natürlichen Belüftung des Zwischenraumes auch eine mechanische Entlüftung angebracht. Diese ist in den Mastspitzen untergebracht und kann sowohl den Zwischenraum, wie auch den Innenraum des Schwimmbades entlüften. Im Gutachten zum Entlüftungskonzept ist beschrieben, dass die gesamte Entlüftungsanlage einen Luftvolumenstrom von ca. $17.500 \text{ m}^3/\text{h}$ erzielen kann, damit es zu keinem Tauwasseranfall kommt. Ein Großteil des notwendigen Luftdurchflusses könnte zwar mittels natürlicher Belüftung erfolgen, da die Wind- und Druckverhältnisse jedoch sehr schlecht für den Standort vorherzusagen sind, wurde die mechanische Belüftung auf 100 % der benötigten Durchflussleistung ausgelegt. Um die Durchlüftung im Zwischenraum sicherstellen zu können, wurde auf eine geringe Verformung der Außenmembrane selbst bei voller Schneelast geachtet [26] bis [28].

Damit Vögel oder andere Tiere nicht in den Zwischenraum eindringen können, ist entlang der Berandung die innere Membran mittels einer Membranschürze in Ziehharmonikafaltung an der äußeren Membran befestigt. Die Schürze ist teilweise als feines Gittergerewebe ausgeführt, um die natürliche Belüftung zu gewährleisten. Um einen geordneten Faltschlag zu erreichen, befinden sich zwischen den Falten diagonal gespannte Gummibänder [28].

1.5.3 Details

In Abbildung 38 wird die konstruktive Ausführung des Hochpunktes deutlich. Von links nach rechts ist eine Prinzipskizze der Entlüftung im Hochpunkt, die Spannvorrichtung für den Außenring dargestellt und der voll verkleidete Hochpunkt abgebildet.

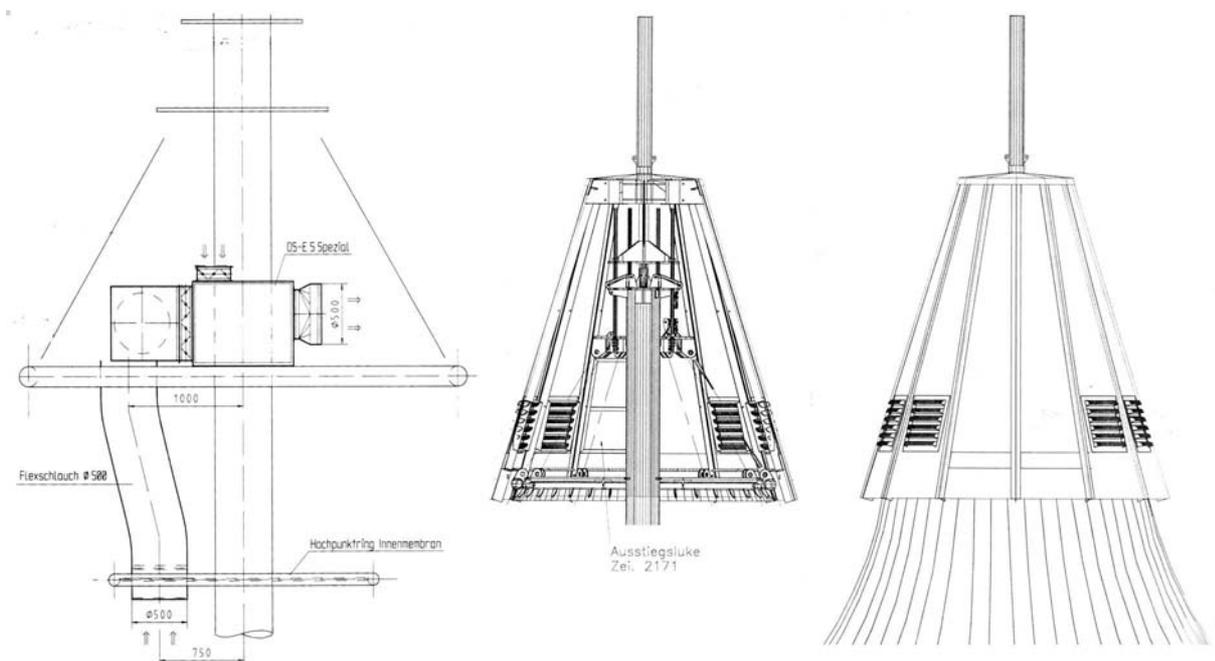


Abbildung 38: Hochpunkt [28]



Abbildung 39: Ziehharmonikaschürze [28]

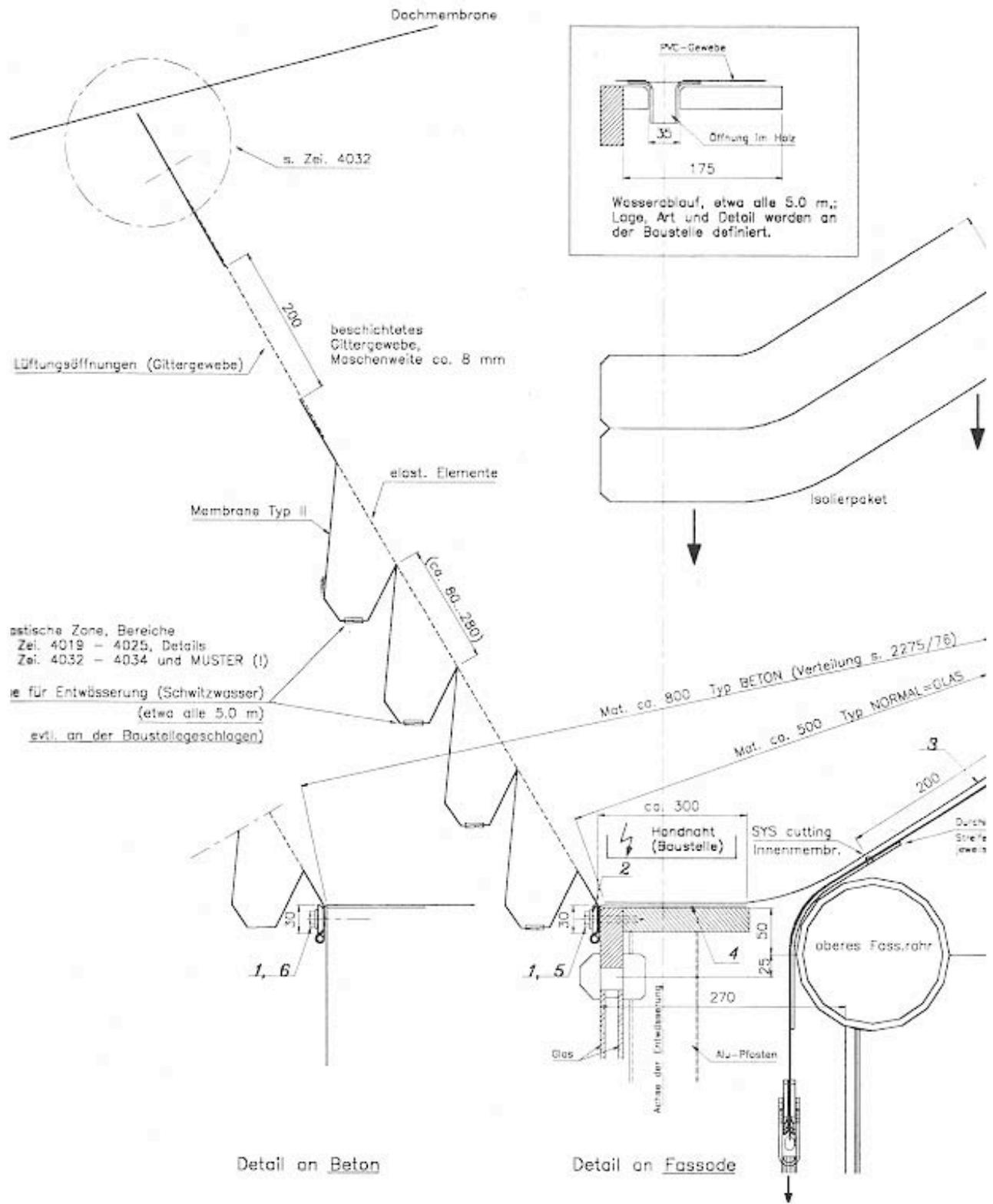


Abbildung 40: Randdetail mit Ziehharmonikaschürze [28]

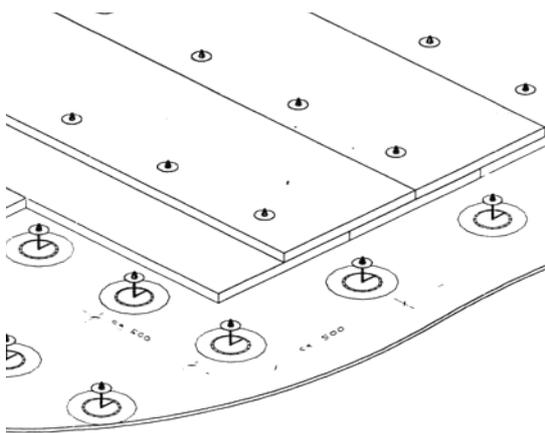
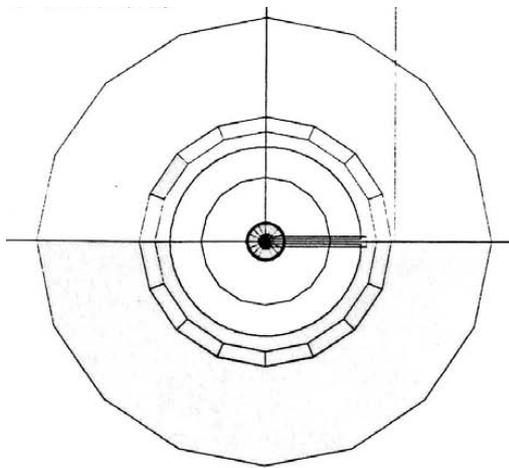
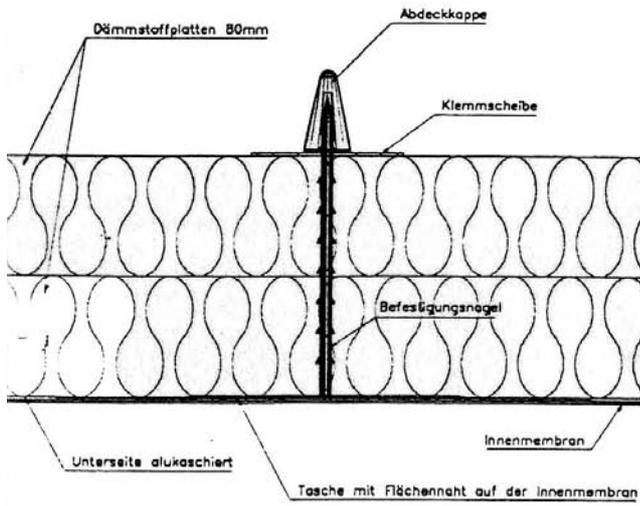


Abbildung 41: Befestigung der Dämmung [28]

Einzelteile

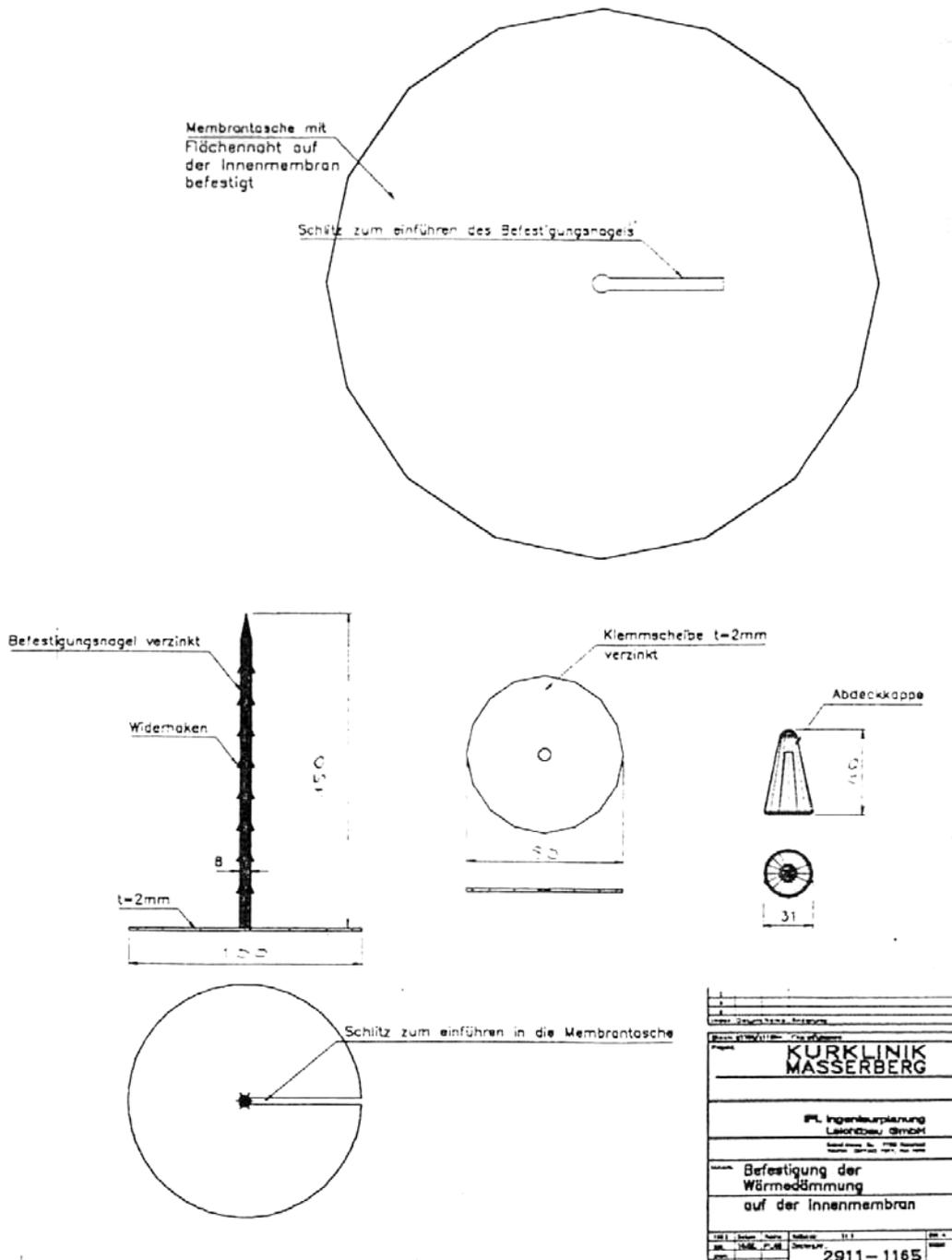


Abbildung 42: Detail Befestigungsnagel [28]

In Abbildung 41 und Abbildung 42 ist das Befestigungsprinzip der Dämmung an der inneren Membran dargestellt. Es wurden im Abstand von ca. 50 cm runde Membranteller aufgeschweißt, die zur Befestigung eines verzinkten Nagels dienten. Die zweilagige Dämmung wurde danach auf die Innenmembran aufgebracht und verhakt. Die durchstanzenden Nägel bekamen eine Klemmplatte und aufgesetzte Schutzkappen, um das Verrutschen der Dämmung zu vermeiden.

1.5.4 Probleme

Nach wenigen Betriebsjahren kam es zu Feuchteschäden am Membrandach. Die Gründe hierfür lassen sich auf unterschiedliche Ursachen und Maßnahmen zurückführen. Ein Nachunternehmer hatte angeblich im Bereich des Konzertsaals eine Entlüftung anbringen lassen. Es wird vermutet, dass dadurch feuchte Luft aus dem Konzertsaal in den Zwischenraum des Membrandachs eingeblasen wurde. Die natürliche Belüftung war folglich an dieser Stelle nicht mehr ausreichend, um die anfallende Feuchtigkeit abzuführen. Des Weiteren gab es anscheinend Undichtigkeiten am Abschluss der Schwimmbadtrennwand, wodurch ein stetiger feuchter Warmluftstrom in den Luftraum über dem Konzertsaal eintrat. Da das Schwimmbad mit einer druckbeaufschlagten Atmosphäre arbeitete, wurde der stetig feuchte Luftstrom begünstigt. Die feuchte Luft kondensierte an der äußeren kalten Membran und durchnässte die Dämmung. Dies hätte konstruktiv verhindert werden können. Eine dampfoffene Deckfolie oberhalb der Dämmung war in der Planung zwar vorgesehen, kam jedoch nicht zur Ausführung [28] und [30].

Nachdem die Entlüftung des Konzertsaals umgebaut und die Belüftung des Schwimmbades angepasst wurde, sind keine weiteren Feuchteschäden aufgrund der Belüftung bekannt geworden [28] und [30].

Als ein weiteres anfälliges konstruktives Bauteil stellte sich mit der Zeit das Gittergewebe der seitlichen Berandung heraus. Starker Wind im Winter begünstigt das Eintreten von Treibschnee in den Membranzwischenraum. Das Abtauen des Schnees führt dann zur Durchfeuchtung der randseitigen Dämmung [28] und [30].

1.5.5 Einschätzung / Kommentar

Im Bauphysikgutachten wird für ein normales Innenklima errechnet, dass mit dem angenommenen S_d -Wert von 10 m keine Kondensation zu erwarten ist. Da der Schwimmbadbereich erhöhte Ansprüche stellt, wurde ein S_d -Wert von 20 m gefordert. Die innere PES/PVC Membran hat jedoch nur einen S_d -Wert von 6 bis 10 Metern. Es kommt jedoch trotzdem zu Schäden. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die im Gutachten angenommenen Extremsituationen nur selten eintreten.

1.5.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Verseidag	Typ VII Diolen Superfest
Deckbahn	-	nicht vorhanden
Dämmung	nicht bekannt	2x 80 mm Mineralwolle
Innenmembran	Verseidag	Typ III Diolen

1.6 Buddy Holly Musical Dome

1.6.1 Allgemeines

Standort:	Hamburg
Baujahr:	1994
Architekt:	Urban Project GmbH, Hamburg IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH (Membrane), Radolfzell
Ingenieur:	IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH (Membrane, Tragwerk), Radolfzell
Bauphysik:	Sellhorn Ingenieurgesellschaft (Akustik), Hamburg MMS (Membranhülle), Wuppertal
Konfektionär:	Sarnafil AG, Schweiz

Im Freihafen von Hamburg wurde 1994 ein „mobiles Theater“ errichtet, das nach 2 Jahren an einen anderen Ort umziehen sollte. Der Umzug wurde jedoch nicht vollzogen. Stattdessen wurde das Bauwerk im Jahr 2000 umgebaut, um es an die Anforderungen des nachfolgenden, neuen Musicals „König der Löwen“ anzupassen.



Abbildung 43: Ansicht des ursprünglichen Bauwerks [31]

1.6.2 Aufbau und Funktion

Bei dieser ca. 5.000 qm großen Überdachung wurde ein 2-lagiges Membransystem gewählt, weil davon ausgegangen wurde, dass die erhöhten Heizkosten während der kurzen Standzeit geringer sein würden, als die Mehrkosten für eine Wärmedämmung.

Die äußere Membran besteht aus einem Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe (PES) mit einer Transluzenz von 4 %. Die innere Membran ist eine leichtere PES / PVC Membran allerdings mit 0 % Transluzenz. Dies war notwendig, um auch tagsüber Vorstellungen im abgedunkelten Vorführungsraum geben zu können.

Die äußere lastabtragende Membran ist an den jeweiligen Untergurten der fünf Fachwerkbögen angebracht. Membranstreifen befestigen die innere Membran linienförmig durch Abhängung an der äußeren Membrananlage. Der Abstand zwischen den Lagen beträgt an der Berandung und den Abhängungen jeweils ca. 25 cm, in Feldmitte bis zu 75 cm.

Die für die Be- und Entlüftung benötigten Ventilatoren wurden im oberen Teil der Fachwerkbögen angebracht und mittels Schläuchen mit dem Zwischenraum der Membrankonstruktion und mit dem Innenraum verbunden. Die Abluft wird durch mehrere Lüftungsgitter, die in die Membran eingearbeitet sind, abgesaugt (siehe Abbildung 47).

Der Membranzwischenraum wird komplett mechanisch belüftet. Die gesamte Gebäudeklimatisierung erfolgt in drei Zonen, die jeweils eigenständig geregelt werden können. Die Regelung erfolgt in vier verschiedenen Betriebsarten:

- Rauchabzug
- Winterschaltung „Eis“
- Winterschaltung „Normal“
- Sommerentlüftung

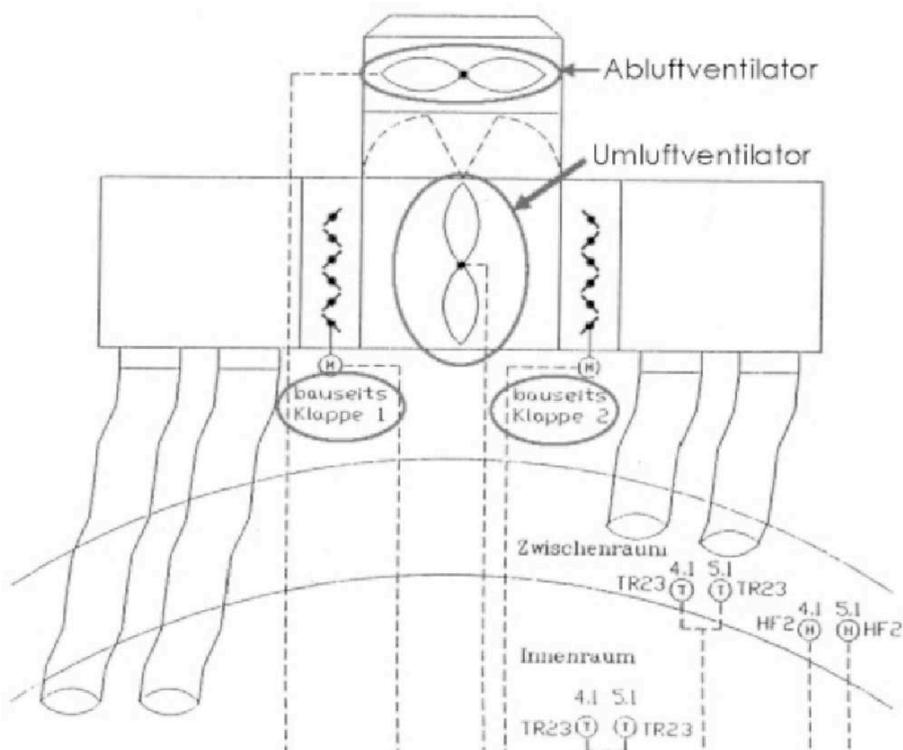


Abbildung 44: Prinzipskizze Lüftung [33]

In der Betriebsart Rauchabzug wird die Klappe 1 (siehe Abbildung 44) geöffnet und der Abluftventilator auf die höchste Stufe gestellt.

Die Belüftung des Zwischenraumes bei der Winterschaltung „Eis“ richtet sich nach den Temperaturen im Membranzwischenraum. Die bauphysikalische Untersuchung hat ergeben, dass es bei Außentemperaturen $< -3\text{ °C}$ zu einer Vereisung des im Membranzwischenraum anfallenden Kondenswassers kommen kann. Um dem entgegenzuwirken wird versucht, den Zwischenraum möglichst stark zu erwärmen. Durch den Umluftbetrieb (Klappen 1 und 2 offen sowie Umluftventilator) ist dies am besten zu bewerkstelligen, was im Extremfall dazu führen kann, dass außerhalb der Vorstellungszeiten die Innentemperatur auf ca. 28 °C angehoben wird und die Anlage auf höchster Stufe im Umluftbetrieb läuft [33].

Bei der Winterschaltung „Normal“ regelt sich die Lüftung über die relative Luftfeuchte im Innenraum. Dabei öffnet sich die Klappe 2, um durch den Abluftventilator Innenraumluft abzusaugen, die den Membranzwischenraum erwärmt. Dadurch, dass sich die Innenmembran beinahe auf Innentemperatur erwärmt, wird das Tauwasserrisiko drastisch reduziert. Die Tatsache, dass die warme und feuchte Luft (ca. 50 % rel. Luftfeuchte) an der Innenseite der Außenmembran kondensiert, wird wissentlich in Kauf genommen, da es hier möglich ist das Tauwasser gezielt abzuleiten. Energetisch gesehen ist dieses Verfahren durchaus sinnvoll, da durch die geringere Temperaturdifferenz auch der Wärmeübergang durch die innere Membranschicht verringert wird. Der Wärmeverlust, der zwischen dem Membranzwischenraum und der Außenhülle stattfindet, fällt weniger ins Gewicht, da die verbrauchte Luft ohnehin abgelüftet werden müsste. Dies gilt natürlich nur, so lange für die Rückgewinnung der Energie aus der Abluft kein Wärmetauscher vorgesehen ist.

In den Sommermonaten soll durch die Sommerentlüftung die heiße Innenluft abgesaugt werden. Dafür öffnet sich die Klappe 1 und der Abluftventilator wird in Betrieb gesetzt [33].

Da in den vergangenen Jahren die Temperatur im Membranzwischenraum nie unter 6 °C gefallen ist und es aufgrund der Luftströmung zu Problemen mit den beweglichen Bühnenbildern kam, entschloss man sich, die Zuluftgitter (siehe Abbildung 47) im Innenraum zu verschließen.

Nach dem Umbau im Jahr 2000 wurden von der Stadt Hamburg neben dem Rauchabzug auch Brandgasventilatoren gefordert, die im Falle eines Brandes auch bei den sich dann einstellenden hohen Temperaturen für sichere Entrauchung sorgen.

Die Temperaturen im Innenraum werden ähnlich wie in einem normalen Gebäude geregelt. Nach der Nachtabsenkung erreicht der Innenraum zu Beginn der Proben um 11.00 Uhr wieder eine Temperatur von 22 °C . Beheizt wird das Gebäude über eine Warmluftheizung, die über Weitwurfdüsen und Drallauslässe den Innenraum aufheizen. Im Sommer wird die Innenraumluft mittels einer Klimaanlage gekühlt. Diese Anlage wurde vollautomatisch ausgeführt, um die Luft zu filtern, zu temperieren und zu be- oder entfeuchten. Die Befeuchtung wurde insbesondere durch die geringe Feuchtigkeit der angesaugten und erwärmten winterlichen Außenluft notwendig, um Erkrankungen der Schauspieler vorzubeugen [33].

1.6.3 Details

Wie in Abbildung 45 gezeigt, werden die beiden Membranlagen vollständig über die ebenfalls zweilagig ausgeführten Seitenwände hinweggeführt. Am Rand sind die beiden Membranlagen über einen Lappen dicht von der Außenluft abgeschlossen. Eine Entwässerung des Zwischenraums wird durch Öffnungen in den Dichtlappen ermöglicht. Darüber hinaus hat der Lappen mehrere große Reißverschlüsse in der Nähe der Binder, wodurch der Zwischenraum bei Revisionen zugänglich wird.

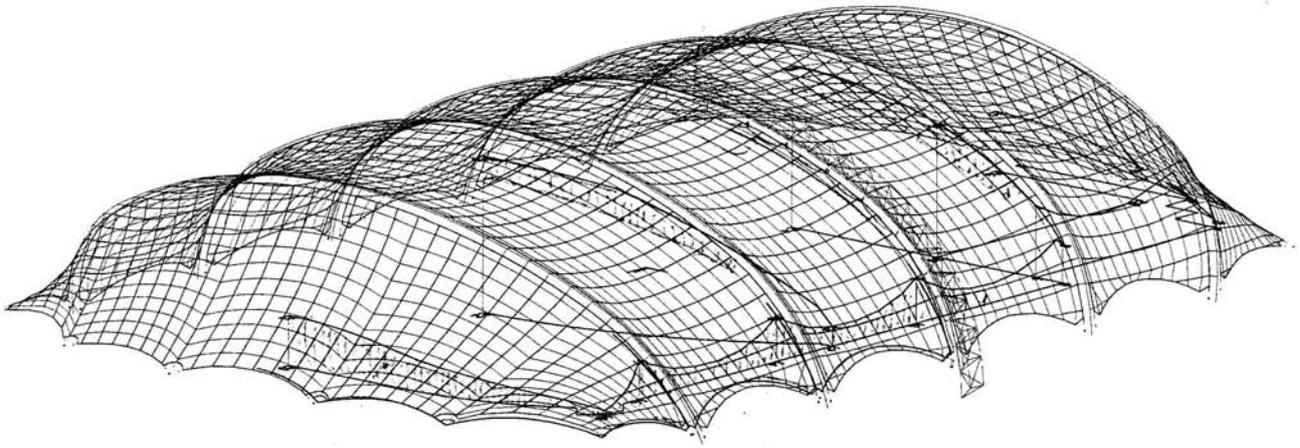


Abbildung 45: Ansicht mit inneren Seitenwänden des ursprünglichen Gebäudes [33]



Abbildung 46: Untersicht des Dachüberstands mit seitlicher "Membranwand" [33]

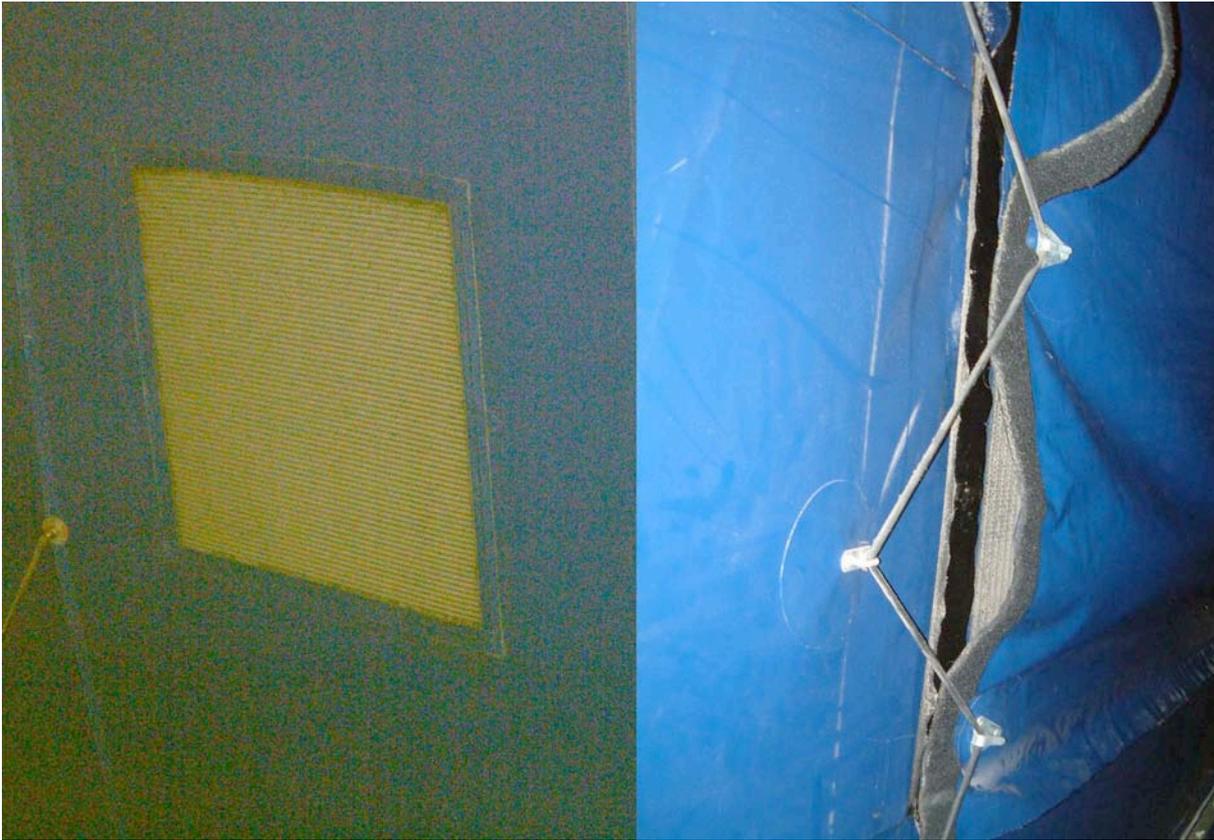


Abbildung 47: Offenes Lüftungsgitter im Innenraum des Gaudi Musical Dome (links);
Verschlossenes Lüftungsgitter des baugleichen Buddy Holly Musical Dome (rechts)

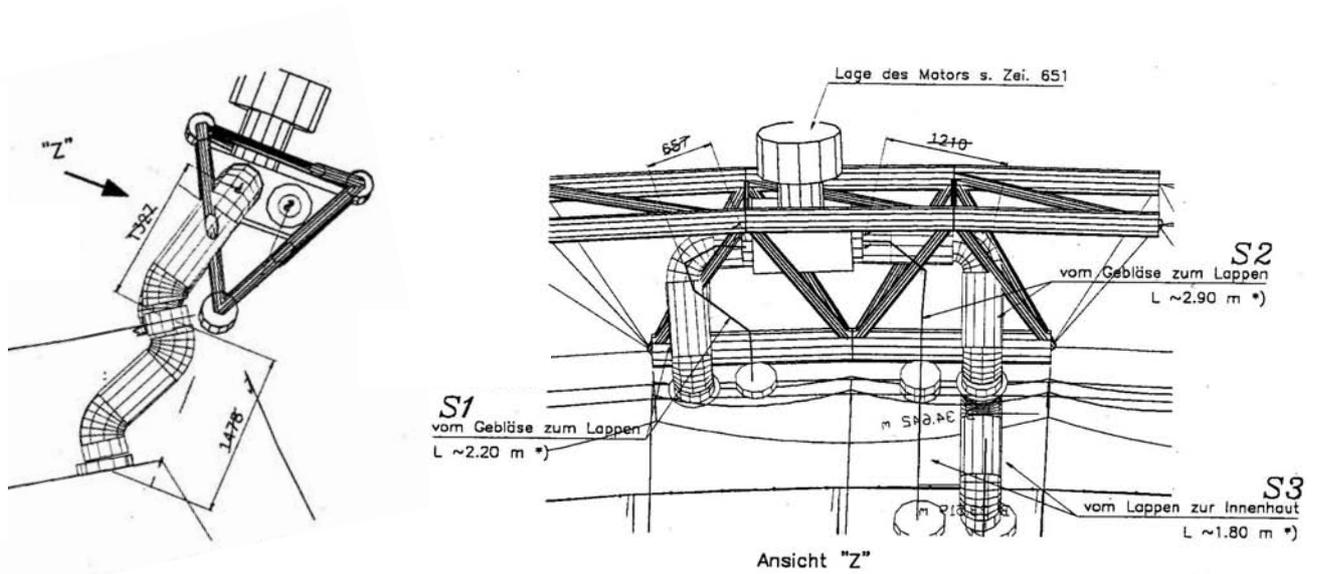


Abbildung 48: Belüftungsmotoren mit Schläuchen zur Konditionierung des Zwischen- und Innenraumes [33]

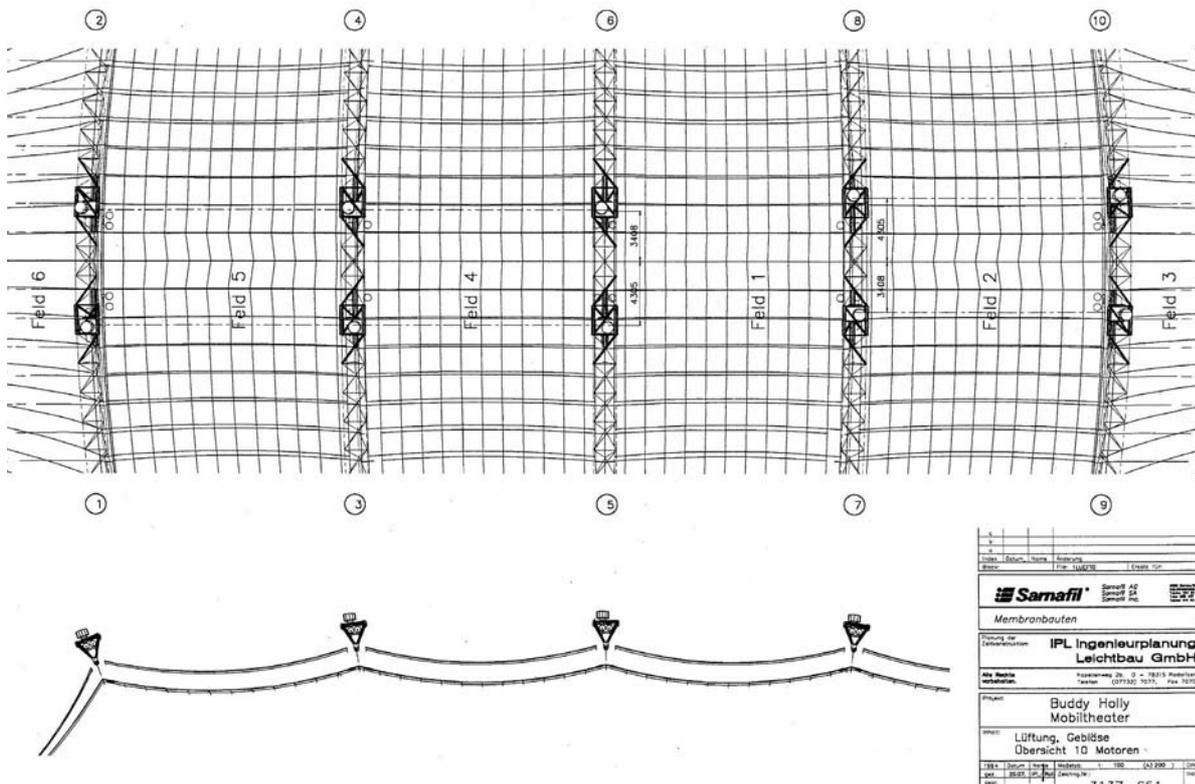


Abbildung 49: Lage der Lüftungsmotoren [33]

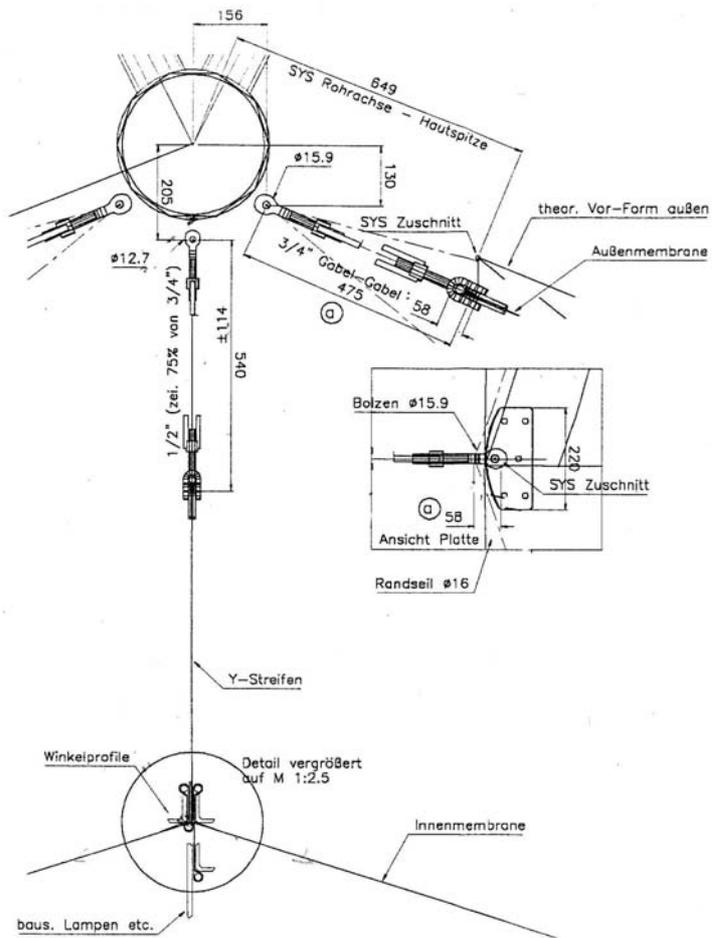


Abbildung 50: Abhängung der Innenmembran [33]

1.6.4 Probleme

Für das Bauwerk konnten keine Hinweise hinsichtlich bauphysikalischer Probleme ermittelt werden. Der technische Leiter vor Ort berichtete, dass es zu keiner Zeit Kondensation an der Innenmembran gegeben habe und auch, dass eine Kondensation im Zwischenraum höchst selten sei [33].

1.6.5 Einschätzung / Kommentar

Das Bauwerk wäre sicherlich mit einer Wärmedämmung ausgestattet worden, wenn in der Planungsphase abzusehen gewesen wäre, dass ein Umzug ausgeschlossen werden kann und eine längere Nutzungszeit prognostizierbar gewesen wäre.

1.6.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Sarna (Verseidag)	Sarnafil S Typ 5
Innenmembran	Sarna (Verseidag)	Sarnafil S Typ 2

1.7 Gaudi Musical Dome

1.7.1 Allgemeines

Standort:	Köln
Baujahr:	1996
Architekt:	Urban Project GmbH, Hamburg
Ingenieur:	IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH, Radolfzell
Bauphysik:	MMS, Wuppertal
Konfektionär:	Sarnafil AG, Schweiz

Im Jahr 1996 wurde an der Rheinufersperrade direkt neben dem Kölner Hauptbahnhof ein zweilagig gedämmtes Membrandach zur Unterbringung des Musicals „Gaudi“ erbaut. Da das Gelände, wie auch beim Buddy Holly Musical in Hamburg, nur angemietet ist, wollte man eine flexible Konstruktion, die sich durch eine möglichst kurze Bau- und Planungszeit auszeichnet. Nach weniger als 8 Monaten war das Gebäude bezugsfertig und es konnten die ersten Aufführungen gegeben werden.

1.7.2 Aufbau und Funktion

Neben der Wärmedämmung war es nötig, ein von der Stadt vorgegebenes Schalldämmmaß einzuhalten, weshalb auch besonderen Wert auf die akustischen Eigenschaften des 2-lagig gedämmten Membrandachs gelegt wurde.

Der Aufbau besteht aus einem Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe (PES) als äußere Membran, einem Luftzwischenraum dessen Dicke zwischen 35 cm und 235 cm variiert, einer 15 cm dicken Dämmschicht aus Steinwolle, welche in Membrankissen aus PVC/PES eingeschweißt wurden und einer inneren Membran aus PVC beschichtetem PES Gewebe. Das bauphysikalische Gutachten weist für diesen Aufbau einen U-Wert von 0,231 W/m²K und ein bewertetes Schalldämmmaß von 34 dB aus [35].

Um die Funktionsfähigkeit des Daches bei allen möglichen äußeren und inneren Klimabedingungen zu gewährleisten, wurde die Hülle ebenfalls konditioniert und für verschiedene Nutzungssituationen optimiert. Dies führte zu einem Klimatisierungskonzept mit Lüftungsöffnungen vom Theaterinnenraum in den Dachzwischenraum sowie der mechanischen Be- und Entlüftung mittels Gebläseeinheiten, die auf den Stahlbindern angeordnet wurden. Der Raumabschluss zwischen der Innenmembran und der Fassade wurde ebenfalls zweischalig und wärmegeklämmt ausgeführt. Dadurch erhielt die gesamte Dachhaut bis hin zum Anschluss an die Fassade die gleichen Wärmedämmeigenschaft. Das Lüftungskonzept gleicht dem ursprünglichen Konzept des Buddy Holly Musical Theaters in Hamburg und wird hier nicht weiter behandelt.

Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über eine an das Fernwärmenetz angeschlossene Luftheizung. Im Sommer kann der Innenraum über dieselbe Lüftung auch gekühlt werden.



Abbildung 51: Luftansicht [35]



Abbildung 52: Außenansicht [37]

1.7.3 Details

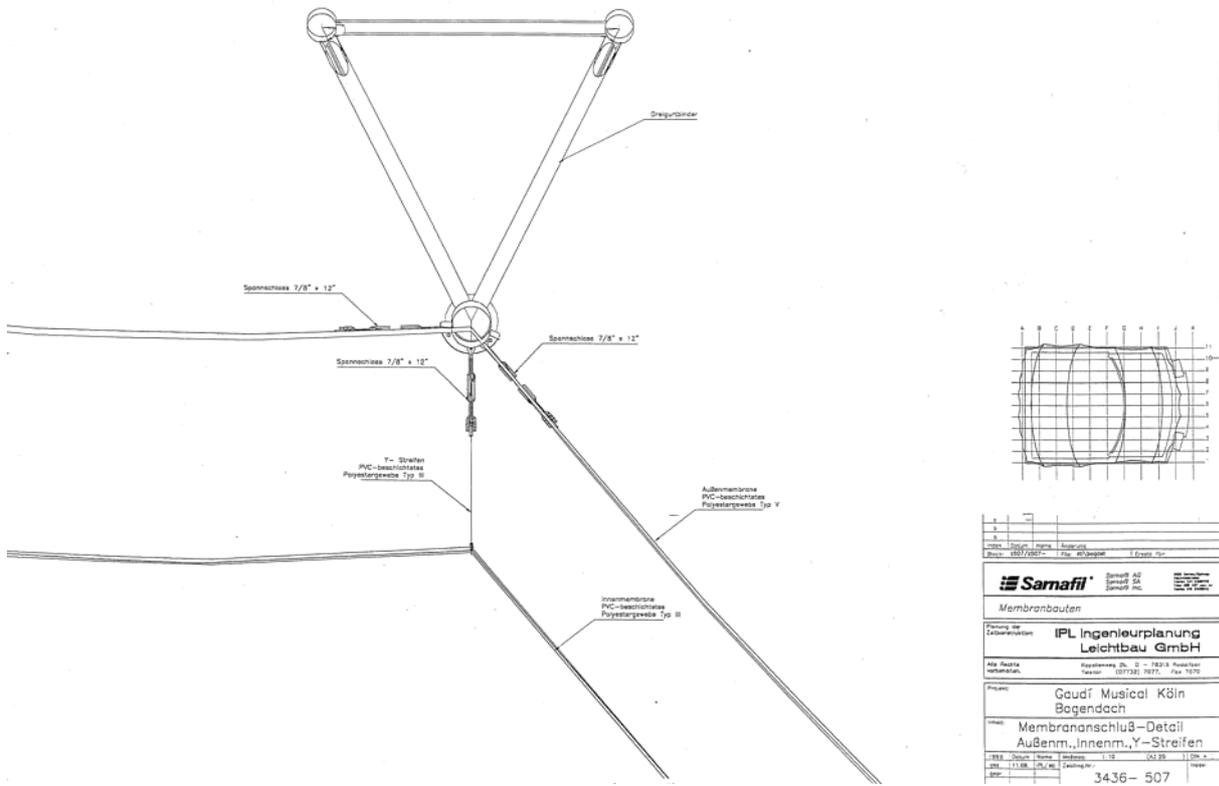


Abbildung 53: Detail: Abhängung der Innenmembran mittels Y-Streifen [35]

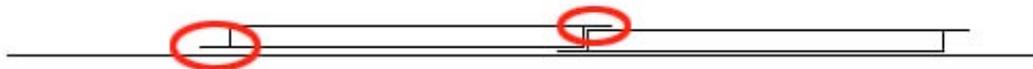


Abbildung 54: Prinzipskizze Dämmkissen

Die Dämmkissen wurden nach der Montage der Innenmembran auf der Baustelle mit jeweils zwei Schweißstellen an der Innenmembran befestigt.

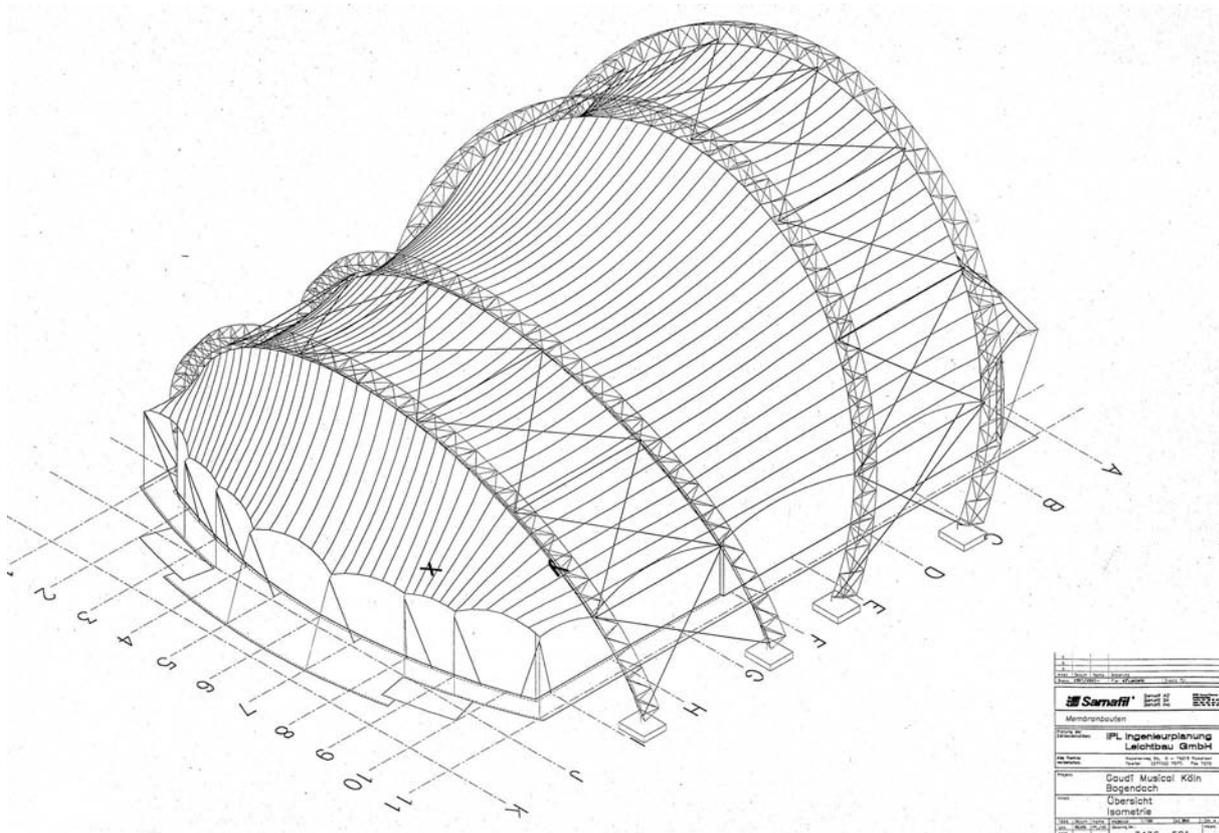


Abbildung 55: Isometrie [35]

1.7.4 Probleme

Es gibt keine dokumentierten bauphysikalischen Probleme mit dem Dachtragwerk. Allerdings bleichte die gefärbte Außenmembran im Laufe der Zeit aus. Sie wurde mit Siebdruckfarbe gestrichen, um das gewohnte dunkelblaue Erscheinungsbild sicherzustellen.

1.7.5 Einschätzung / Kommentar

Es wurde bekannt, dass bei Messungen der Oberflächentemperaturen angeblich Werte von bis zu 85°C ermittelt wurden. Sollten sich diese Temperaturen bestätigen, muss eine deutlich reduzierte Schweißnahtfestigkeit in Betracht gezogen werden.

1.7.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Sarna (Verseidag)	Sarnafil S Typ 5
Deckbahn	-	Dämmung in PES/PVC Typ I eingeschweißt
Dämmung	Isover	Mineralwolle 150 mm
Innenmembran	Sarna (Verseidag)	Sarnafil S Typ 3

1.8 Odate Jukai Dome Park

1.8.1 Allgemeines

Standort:	Odate, Japan
Baujahr:	1997
Architekt:	Toyo Ito & Associates, Tokio, Japan
Ingenieur:	Takenake Corp., Tokio, Japan
Bauphysik:	nicht bekannt
Konfektionär:	Taiyo Kogyo Corp., Japan

Der Odate Jukai Dome wurde als Mehrzweckhalle erbaut. Er dient ganzjährig als überdachte und klimatisierte Sportstätte. Als Herausforderung für den Kuppelbau galt es den klimatischen Einflussfaktoren im nördlich gelegenen, schneereichen Odate gerecht zu werden.

Im Jahr 1992 gewann der Architekt Toyo Ito den Architektur- und Planungswettbewerb. Von 1995 bis 1997 wurde der Bau ausgeführt. Dabei musste die komplexe Konstruktion aus Brettschichtholzbindern innerhalb des kurzen Sommer errichtet werden, um keine Langzeitschäden durch Feuchtigkeit in der Holzkonstruktion zu riskieren [39].

1.8.2 Aufbau und Funktion

Die Gitterschalenkonstruktion wird von zwei transluzenten Membranen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtetem Glasfasergewebe geschützt. Diese wurden mittels Aluminiumprofilen an der Unterkonstruktion befestigt. Beide Membranschichten sind an den oberen Brettschichtholzträgern zusammengeführt und mit einer Metallkonstruktion verankert. Sie bilden damit die charakteristischen Grate der weitsichtbaren Gitterschalenkonstruktion aus. Die Kehlen wurden durch die Abspannung der unteren Membranlagen auf die tiefer verlaufende Brettschichtholzträgerlage erzeugt. Dadurch bildet sich gleichzeitig der konditionierte Membranzwischenraum. Durch die Kuppelform und die längsgerichtete Eindeckung der Gitterschale mit der zweilagigen Membrankonstruktion konnten für den Zuschnitt nur einfache Membranbahnen verwendet werden, was den Aufwand für die Konfektionierung sehr stark reduzierte [38] und [39].



Abbildung 56: Außenansicht [40]



Abbildung 57: Innenansicht [40]

Um die Anforderungen an ein komfortables Klima für Besucher und Nutzer zu schaffen und einen effizienten und sparsamen Betrieb des Stadions zu gewährleisten, sind zwei Systeme zur Klimakontrolle eingebaut. Mit einem „Seat Air-Conditioning System“ wird nach Bedarf heiße oder kühle Luft in den Beinbereich der Zuschauer mittels Luftauslassdüsen geblasen. Es wird somit möglich gezielt auf die lokalen klimatischen Anforderungen einzugehen. Andererseits nutzt der Kuppelbau ein passives Kühlsystem, das den Dome vor Überhitzung schützt. Das „Roof Spraying System“ sprinkelt hierzu Wasser auf das Membrandach, welches durch Verdampfen der Halle die entsprechende Energie entzieht und damit für angenehme Temperaturen sorgt [40].

Die Verwendung der Gitterschale als Konstruktion und einer transluzenten Membran als klimatische Hülle garantiert ebenfalls die gute Belichtung mit natürlichem Licht. Der Transmissionsgrad beider Membranschichten liegt bei 8 %, so dass im Jahresdurchschnitt mit 1.000 – 1.200 Lux Beleuchtungsstärke gerechnet werden kann. Durch die Transluzenz kann auf künstliche Belichtung bis in die Abendstunden verzichtet werden [40].

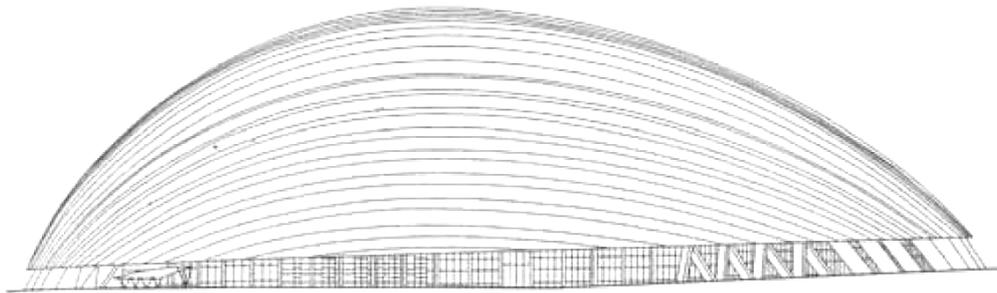


Abbildung 58: Seitenansicht [40]

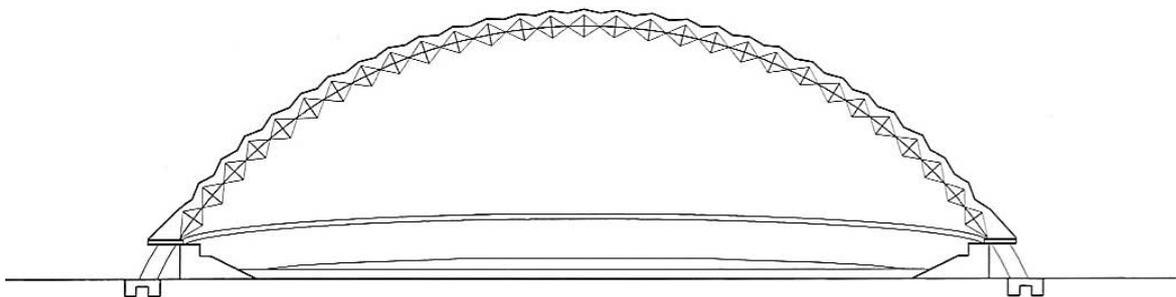


Abbildung 59: Längsschnitt [40]

1.8.3 Details

Die Membranen werden mittels Metallkonstruktion an den Brettschichträgern befestigt. Das Kastenprofil und ein T-Profil bilden den Sockel, auf den die Membranen mittels Klemmen verschraubt wurden. Aluminiumschienen decken die Konstruktion ab und schützen vor äußeren Witterungseinflüssen.

Die Befestigung und Abspannung der Membran auf die unteren Brettschichtholzträger erfolgt durch Klemmleisten, welche die Membranbahnen zusammenspannen. Angeschweißte Flachstähe dienen zur Befestigung der Spannglieder und führen auf die Stahlplatten an den kreuzenden Brettschichtholzjoagen [40].

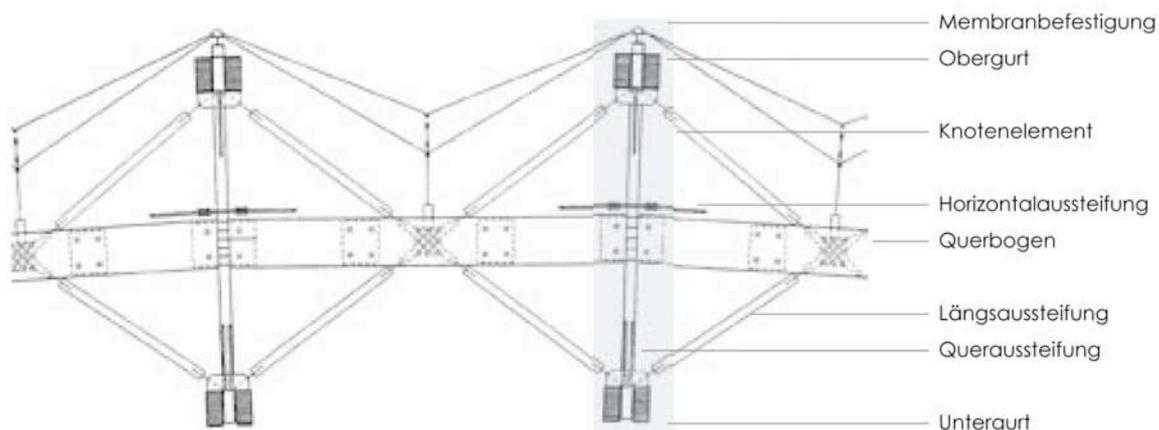


Abbildung 60: Gitterschalenkonstruktion mit Membraneindeckung [40]

1.8.4 Einschätzung / Kommentar

Zwischen den beiden Membranschichten kann erwärmte oder gekühlte Luft durchgeblasen werden. Dies ermöglicht die ständige Überwachung und Angleichung des Wärme- und Feuchtehaushaltes zwischen den Membranschichten. Dabei wird die Luftzirkulation durch Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen ebenfalls zur Ventilation genutzt. Schneelasten können so durch Abschmelzen zum Abfließen gebracht werden. Schimmelwachstum kann durch Entfeuchtung ausgeschlossen werden.

1.8.5 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Saint Gobain	Glas/PTFE
Deckbahn	-	-
Dämmung	-	-
Innenmembran	Saint Gobain	Glas/PTFE

1.9 Millennium Dome

1.9.1 Allgemeines

Standort:	Greenwich, UK
Baujahr:	1999
Architekt:	Richard Rogers Partnership, London, UK
Ingenieur:	Buro Happold, Bath, UK
Konfektionär:	Birdair, Amherst, USA

Der zum Jahrtausendwechsel erbaute „Millennium Dome“ ist momentan der weltweit größte Kuppelbau mit einer überdachten Grundfläche von 80.000 qm. Für das Bauwerk wurde ein zweilagiger Membranaufbau als Dacheindeckung gewählt, um den konstruktiven Aufwand der temporär geplanten Halle zu minimieren. Um das Kondenswasserrisiko zu verringern und ein zu starkes Erwärmen und Abkühlen der 2,1 Mio. m³ großen Innenraumluftmasse zu verhindern, wurden leistungsfähige Lüftungs- und Konditionierungsanlagen installiert [42].



Abbildung 61: Außenansicht [42]



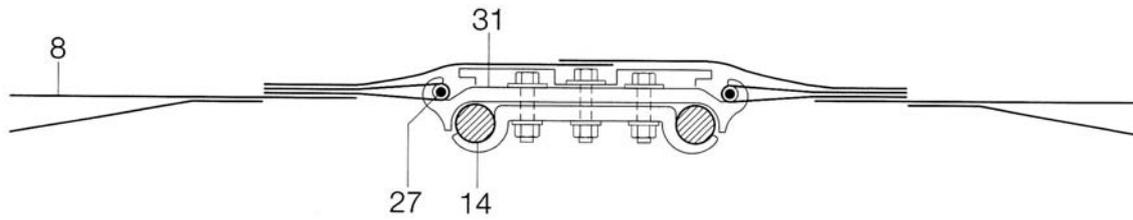
Abbildung 62: Innenansicht nach der Montage [44]

1.9.2 Aufbau und Funktion

Die Membrankonstruktion besteht aus einem mittelschweren polytetrafluorethylenbeschichteten (PTFE) Glasfasergewebe als äußere, lastabtragende Dachhaut, sowie einem leichteren und weitmaschigen PTFE beschichteten Glasfasergewebe als innere Membran. Diese innere Membran wurde nur zwischen die einzelnen Membranabschnitte ohne Spannung eingehängt. Der Membranzwischenraum wird nicht planmäßig belüftet. Der Dachaufbau verfügt über eine Transluzenz von 12 %.

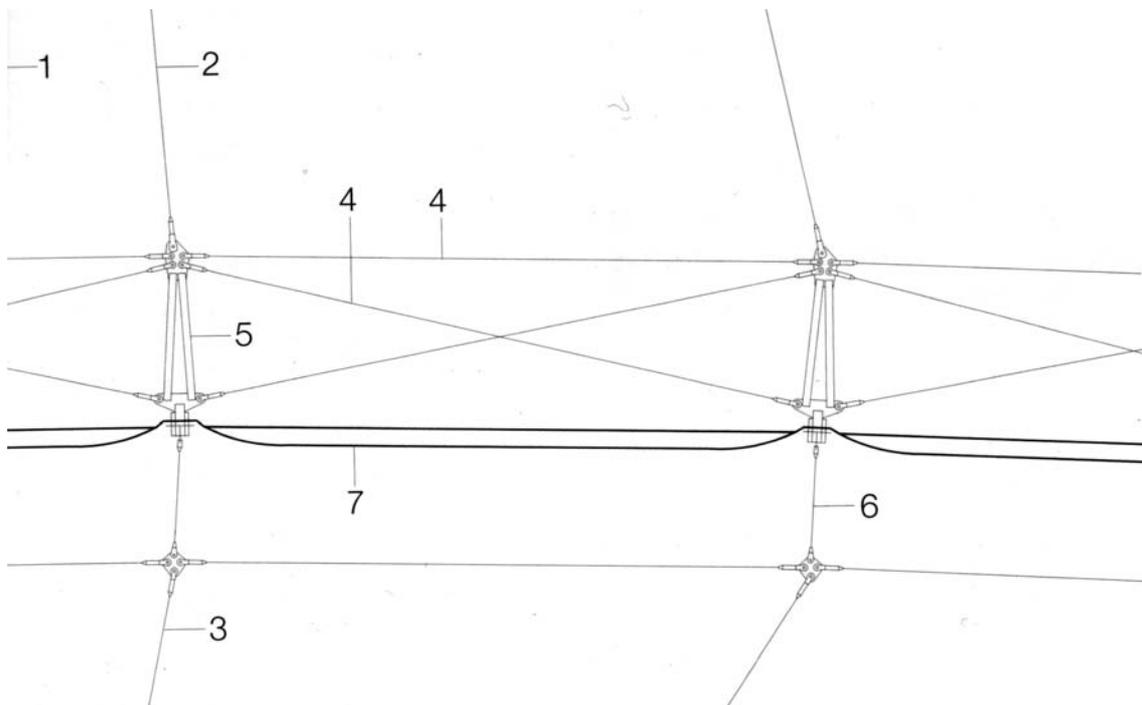
Das Dach mit dem teureren PTFE beschichteten Glasfasergewebe zu realisieren ist auf die politische Entscheidung nach dem Regierungswechsel zurückzuführen, die für die Millenniumsprojekte dann eine längere Nutzungsdauer vorsah [50].

1.9.3 Details



- 8 PTFE beschichtetes Glasfasergewebe, zweilagig mit Luftzwischenraum
- 14 Doppelspannseil 2x 32 mm
- 27 Randprofil
- 31 Verbindungsklemme in Stahl

Abbildung 63: Befestigung der zwei Membranlagen an einem der Radialseile [50]



- 1 Pylon aus 8x Stahlrohr d=323 mm
- 2 Abspannung Stahlseil d=32 mm
- 3 Abspannung Stahlseil d=25 mm
- 4 Zugstäbe des Ringträgers d=25 mm
- 5 Verbindungsglied des Ringträgers aus 2x Stahlrohr d=114 mm
- 6 Zugstab des Ringträgers d=30 mm
- 7 Glasfasergewebe , PTFE-beschichtet, zweilagig mit Luftzwischenraum

Abbildung 64: Schnitt durch den Membranaufbau [50]

1.9.4 Probleme

Bereits bei der Planung war bekannt, dass die Innenmembran trotz PTFE Beschichtung zu einer sehr schnellen Verschmutzung führt. Mangels Alternativen wurde trotzdem dieses Material verbaut. Bereits nach wenigen Monaten der Nutzung stellten sich sichtbare Verschmutzungen ein [50].

1.9.5 Einschätzung / Kommentar

Der Dome wurde zuerst als temporäres Gebäude für die Millenniumsausstellung geplant. Eine mögliche Nachnutzung wurde dann erst im Projektverlauf in die Planungen mit einbezogen. Nachdem die erwarteten Besucherzahlen im Millenniumsjahr nicht erreicht und die Ausstellung sehr kritisch bewertet wurde, folgte die langwierige Suche nach einer Nachnutzung. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Projekt in der Öffentlichkeit sehr kritisch gesehen. Heute fungiert die Halle als Konzert- und Veranstaltungsort. Die Aufwertung des industriell geprägten Stadtteils an der Themse gelang bisweilen nicht.

1.9.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Saint Gobain	Glas/PTFE (Sheerfill 2)
Innenmembran	Saint Gobain	Glas/PTFE (Fabrasorb)

1.10 Tabaluga Musical Theater

1.10.1 Allgemeines

Standort:	Oberhausen
Baujahr:	1999
Bauherr:	TheatrO CentrO, Oberhausen
Architekt:	RKW Rhode Kellermann Wawrowsky, Oberhausen
Ingenieur:	Ingenieurbüro Teschner, Kosel
Konfektionär:	CENO TEC, Greven

Für das Musical „Tabaluga und Lilli“ wurden 1998 mehrere Entwürfe erstellt, wobei sich schnell herausstellte, dass die nötige Flexibilität der Gestaltung nur durch ein Membranbauwerk erreicht werden konnte. Deshalb entschloss man sich für ein Membrandach, welches an zwei ca. 90 m langen Dreigurtbindern befestigt wurde.

Das Gebäude hat eine überbaute Grundfläche von 4.560 qm und bietet 1.800 Zuschauern Platz. Der Membranaufbau wurde nicht nur wegen der Wärmedämmfunktion, sondern auch aufgrund der geforderten akustischen Anforderungen zweilagig gedämmt ausgeführt [58].



Abbildung 65: Außenansicht [59]

1.10.2 Aufbau und Funktion

Der Aufbau besteht aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe (PES) als äußere und innere Membranlage. Beide Lagen sind etwa 40 cm entfernt voneinander angebracht. Auf die innere Membran ist eine 150 mm starke Mineralfaserdämmung aufgelegt.

Die äußere Membran schließt luftdicht mit der Fassade und dem Obergurt ab. Um eine gleichmäßige natürliche Durchlüftung des Membranzwischenraumes zu erreichen, wurden Lüftungsöffnungen in der Fassade unterhalb der umlaufenden Regenrinne angebracht. Am oberen Ende der Membran sind Schläuche eingearbeitet, die das Entlüften sicherstellen sollen.

Die Mineralfaserdämmung wurde in dampfdichte Kissen eingeschweißt. Die einzelnen Kissen wurden bei der Montage in Bahnen miteinander verbunden, was die lückenlose Verschiebung bei Veränderungen der Membrangeometrie durch Wind- oder Schneelasten ermöglicht [59].

1.10.3 Details



Abbildung 66: Stahlbetonbau mit aufgelegtem Stahlträger [59]



Abbildung 67: Die Montage der Dämmung [59]



Abbildung 68: Außenansicht mit rot markierten Entlüftungsschläuchen [59]

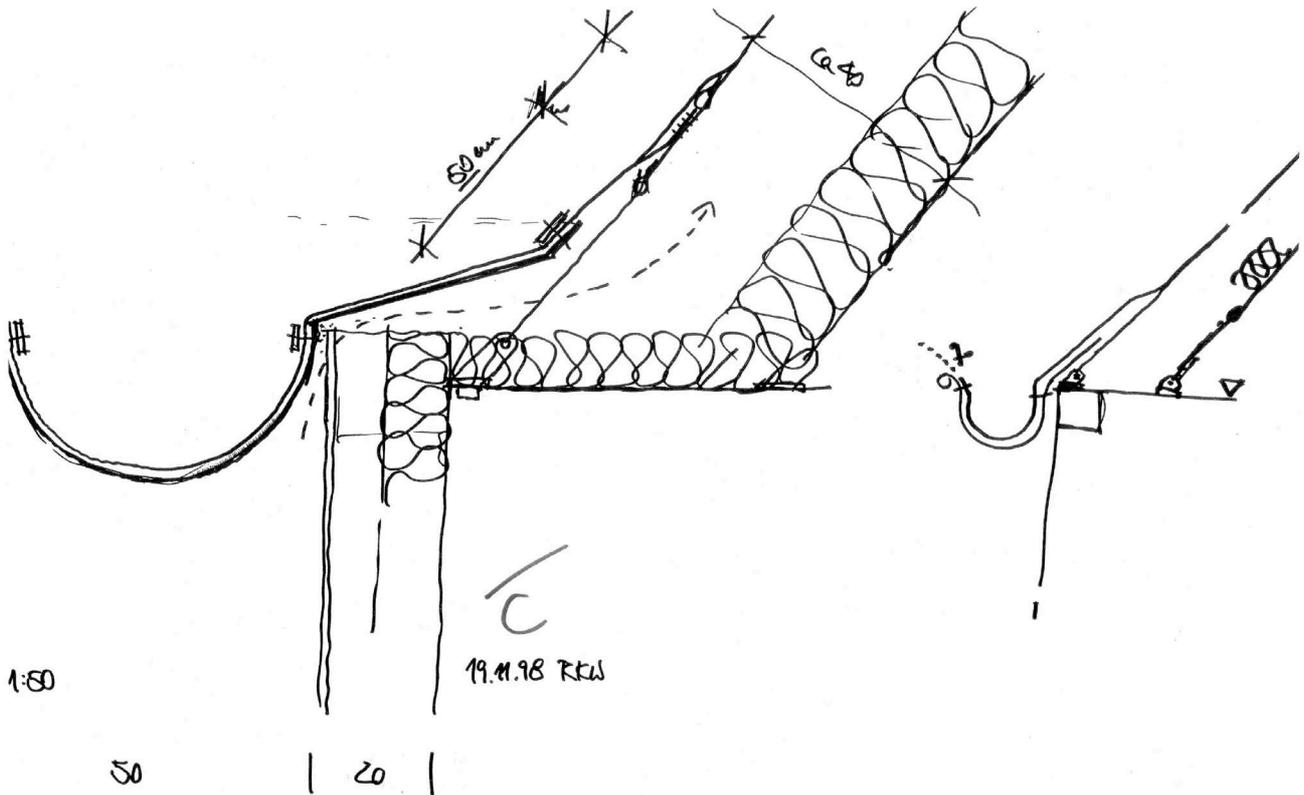


Abbildung 69: Prinzipskizze der Berandung mit Belüftung des Zwischenraums [59]

Seitenfeld

Mittelfeld

Obergurt

Aussenmembran

Innenmembran

3 cm breit aufkleben und abschneiden
Bei Spannung woehrend der Montage Latz evtl. keilfoermig einschneiden und verschweissen.

Isolierung direkt vor Montage
Abdeckklatz einbringen.
abgewickelte Länge: 1250 cm

Bemerkungen:
wenn nicht anders angegeben gilt:

Materialien:
-Stahl: S355-3
-Edelstahl: X2CrNiMo1810, Wstov. 1.4401
-Spinnvl.: Estabon

Vorverarbeitung:
-Schweißnahte:
alle Verbindungen Rohr-Rohr als HV-Naht
alle Verbindungen Rohr-blech als HV-Naht
Keinhalte: $a < 0,7t$
 $t < 20$ dann $a \geq 5$ mm
 $t > 20$ dann $a \geq 7$ mm
 $t > 30$ dann $a \geq 8$ mm
HV-Nahte: $a = t$
-alle Kanten brechen
-Gerade noch Verzinken nacharbeiten
-Toleranzen nach ISO 2768 - ct

Allgemeines:
-Alle Teile sind durch Funktionsnummern zu kennzeichnen
-Lagerbezeichnung der Masse prüfen
-Änderungen nur nach Absprache mit Ing.-Büro Teschner
-Erläuterungen und Zeichnungen
-Alle Unterlagen bis zur einseitigen Freigabe
nur zur Information, nicht zur Freigabe
-Vermessung der Systempunkte Plan 9845-508

Montagehinweise:
-Bautelle durch Problemontage
auf Massstabigkeit überprüfen

project: TheatrO Oberhausen

Textile Konstruktionen
CENO TEC
CENO TEC GmbH
Am Eggenkamp 14
D-42558 Greven
Tel.: +49-2571-969-0
Fax: +49-2571-3300

INGENIEURBURO TESCHNER GmbH
An den Turlen 20 Tel.: +49-4622-1868-0
D-24882 Fehmarn Fax: +49-4622-1868-99

Titel			
Proj.			
Bl.			
Datum	23.03.99	Blatt	9845-752a
Proj. Nr.		Blatt	9845-752a
Blatt			
Anordnung Dämmung Obergurt			

Abbildung 70: Anordnung der Dämmung am Obergurt [59]

1.10.4 Probleme

In den vorliegenden Unterlagen wird nicht über Schwierigkeiten betreffend der bauphysikalischen Verhaltensweisen berichtet. Es wird lediglich beschrieben, dass die Montage der Dämmkissen an der äußeren Membranlage nicht unproblematisch gewesen sei, da die leichten Dämmkissen unter Windsog von der Innenmembran abhoben. Temporär angebrachte Gurte lösten die Problematik und sicherten die Membrankissen während der Montage [59].

1.10.5 Einschätzung/Kommentar

Angeblich wurde während der Planungsphase eine konvektive Entlüftung des Membranzwischenraumes über eine zentrale Entlüftungsöffnung auf der oberen Dachfläche in Erwägung gezogen, dann aber verworfen. Die ausgeführte Lösung mit den linear angebrachten Entlüftungsstellen an den Obergurten ermöglicht sicherlich eine gleichmäßigere und umfangreichere Durchlüftung der Konstruktion.

1.10.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	PES/PVC	PES/PVC
Deckbahn	-	Dämmung eingeschweißt
Dämmung	nicht bekannt	Mineralwolle 150 mm
Innenmembran	PES/PVC	PES/PVC

1.11 Bürgerzentrum Puchheim

1.11.1 Allgemeines

Standort:	Puchheim
Baujahr:	1999
Architekt:	LAI Architekten + Ingenieure, München
Tragwerk:	Mayr + Ludescher, München
Bauphysik:	Transsolar, Stuttgart
Gebäudetechnik:	Prof. Hausladen, Kirchheim
Konfektionär:	Koch Hightex (Außenmembran), Rimsting Flontex (Innenmembran), Steinach, CH

Beim Bürgerzentrum Puchheim wurde der 1.000 qm große Saal mit einem mehrlagigen textilen Aufbau überdacht. Das Veranstaltungsgebäude grenzt direkt an ein Wohngebiet, so dass erhöhte Schallschutzmaßnahmen zu treffen waren.

1.11.2 Aufbau und Funktion

Der Dachaufbau besteht aus sieben unterschiedlichen Lagen. Das äußere Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtete Glasfasergewebe dient der Abtragung der Lasten. Darunter befindet sich ein ca. 15 cm breiter Luftzwischenraum zur Hinterlüftung der Dämmung. Auf der Dämmung befindet sich ein aufkaschiertes Drahtnetz, das die Formstabilität der Dämmung verbessert und die Verrödelung der angrenzenden Dämmbahnen ermöglicht. Die Mineralfaserdämmung mit einer Dicke von 18 cm liegt auf der Dampfsperre auf. Unterhalb schließt ein sandgefülltes Distanzgewebe mit einem Flächengewicht von 25 kg/qm an, um die Schallreflexion zu gewährleisten. Die gesamte innere Membranschichtung ist mittels eines Seilnetzes stabilisiert. Es folgt die innere abschließende PTFE beschichtete Glasfasermembran mit einem Luftzwischenraum [63] und [64].

Der mehrlagige Aufbau mit Dämmschicht und sandbefülltem Abstandsgewebe war notwendig, um die wärmetechnischen und schalltechnischen Anforderungen erfüllen zu können.

Der durchlüftete Zwischenraum wird an der Berandung der Innenmembran mit einem Gitternetz zur Außenmembran hin abgetrennt. Damit wird das Eindringen von Laub und Kleintieren verhindert.

Anfangs sollte ein transluzenter Aufbau mit einem Glasfasergespinnst als Dämmung verwirklicht werden. Die Brandschutzanforderungen verhinderten die Umsetzung dieser Überlegungen.

Der Gebäudeinnenraum wird mittels einer Luftheizung und einer Fußbodenheizung konditioniert. Letztere dient im Sommer auch zur Kühlung des Gebäudes [63] und [64].

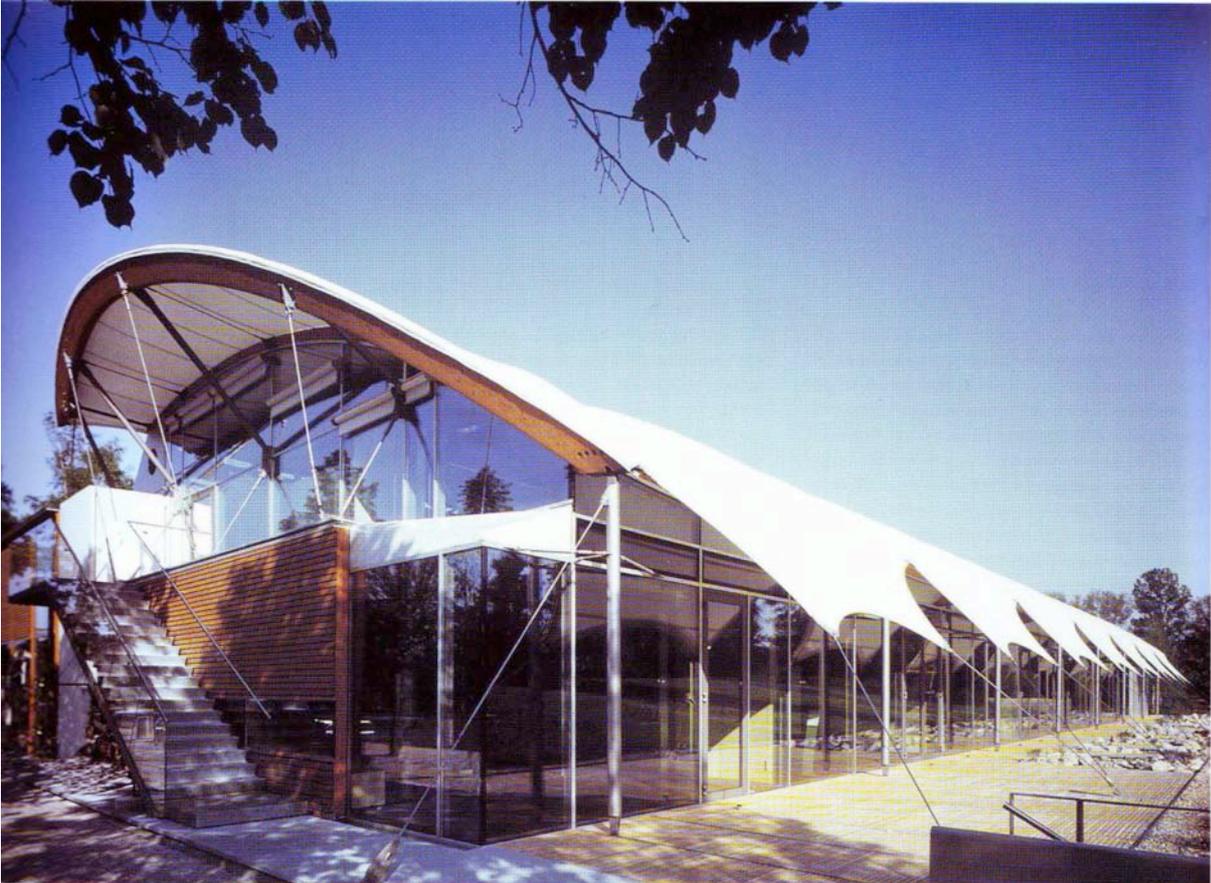


Abbildung 71: Ansicht Süd-Ost [63]



Abbildung 72: Ansicht Süd-West [64]

1.11.3 Details

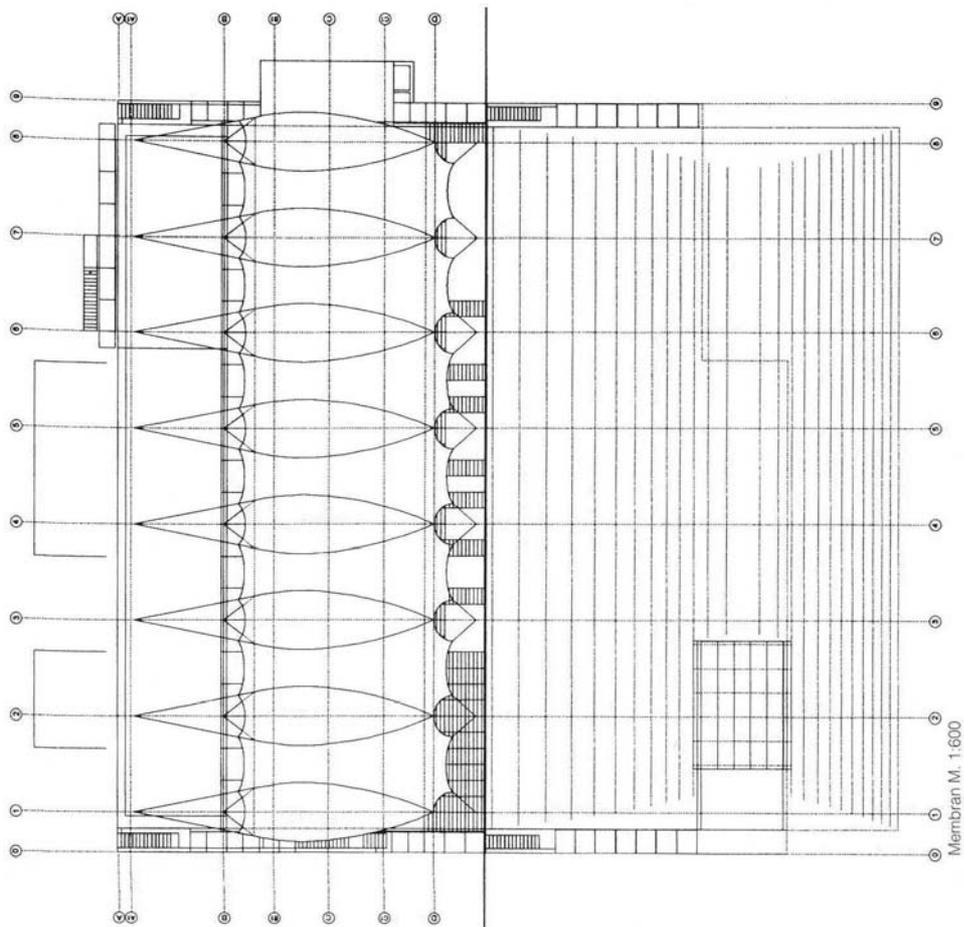


Abbildung 73: Grundriss [66]

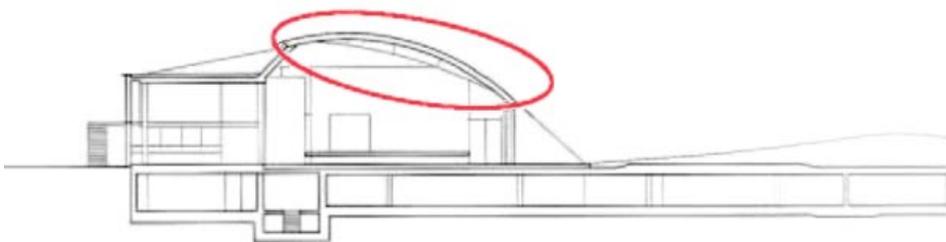
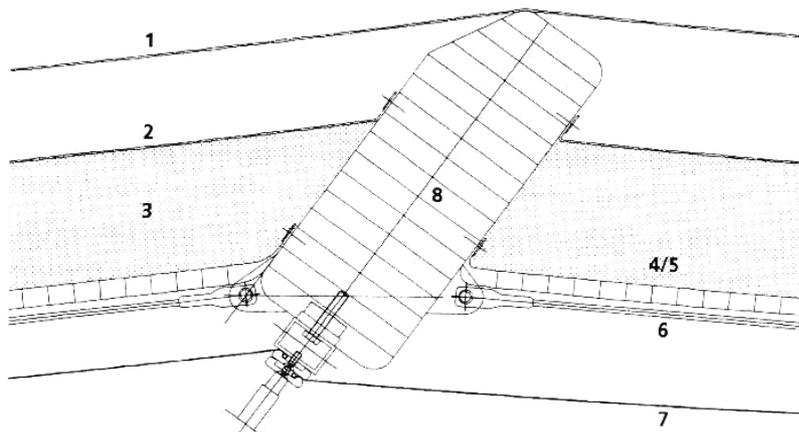


Abbildung 74: Schnitt [66]



Membranaufbau

- 1 Aussenmembran PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe
- 2 Drahtnetz
- 3 Mineralfaserdämmung
- 4 Dampfsperre
- 5 Distanzgewebe Quarzsandfüllung 2 cm
- 6 Seilschar \varnothing 6 mm
- 7 Innenmembran PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe
- 8 Holzbinder BSH

Abbildung 75: Dachaufbau [66]

1.11.4 Probleme

In den vorliegenden Unterlagen werden keine bauphysikalischen Probleme beschrieben.

1.11.5 Einschätzung / Kommentar:

Das komplizierte Dachtragwerk wurde sehr gut detailliert und schon während der Planung kam es zu einem regen Austausch zwischen Architekten und Fachplanern. Dadurch entstand ein Bauwerk, das aus bauphysikalischer Sicht ideal ausgearbeitet ist, mit einer Dampfsperre, um diffundierenden Wasserdampf zu vermeiden, und einem belüfteten Zwischenraum, um trotzdem anfallendes Wasser abzulüften, versehen wurde. Eine weitere Verbesserung des Aufbaus könnte durch eine dampfdiffusionsoffene Deckfolie auf der Dämmung erreicht werden, damit von der Außenmembran abtropfendes Kondenswasser nicht die Dämmung durchnässt.

1.11.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	nicht bekannt	Glas/PTFE
Deckbahn	-	nicht vorhanden
Dämmung	nicht bekannt	Mineralwolle 18 cm
Distanzgewebe		Distanzgewebe mit Quarzsandfüllung
Innenmembran	nicht bekannt	Glas/PTFE

1.12 Atriumsüberdachung Schöllerbank

1.12.1 Allgemeines

Standort:	Wien, Österreich
Baujahr:	2000
Architekt:	Jabornegg Palffy, Wien, Österreich
Ingenieur:	Karlheinz Wagner, Wien, Österreich
Bauphysik:	nicht bekannt
Konfektionär:	Skyspan GmbH, Deutschland

Zwischen 1997 und 2000 wurde das Palais Rothschild zur Nutzung als Verwaltungsgebäude der Schöllerbank umgebaut. Der Baubestand wurde erhalten, soweit er historisch als bedeutend eingestuft wurde und trotz der neuen Anforderungen genutzt werden konnte.

1.12.2 Aufbau und Funktion

Zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen und der neuen Nutzung wurden Teile des Gebäudekomplexes im Inneren des Grundstückes abgebrochen und Wände errichtet, die neben der statischen und raumbildenden Funktion auch für die Gebäudeklimatisierung und Lichtstreuung sorgen. Zwei vertikale Versorgungsschächte bilden mit den Außenwänden eine statische Einheit und ermöglichen stützenlose Räume mit der notwendigen Nutzungsflexibilität [68].



Abbildung 76: Untersicht [67]

Die neu geschaffenen Büroflächen und das Treppenhaus werden über einen verglasten Innenhof natürlich belichtet. Der Innenhof ist nach oben mit einer pneumatischen Luftkissenkonstruktion abgeschlossen. Die Luftkissen bestehen aus drei Lagen unbedruckter ETFE Folie. Sie überdachen das gesamte Atrium mit rund 270 qm. Die Abluft aus den Büroräumen wird in diesen Hofraum eingeleitet und zur Wärmerückgewinnung genutzt [68].

1.12.3 Einschätzung / Kommentar

ETFE-Kissenkonstruktionen gehören mittlerweile zu einer Standardlösung für die Überdachung von Atrien. Die reduzierten Ansprüche an die Konditionierung ermöglichen diesen Einsatz.

Das Projekt zeigt, dass Membrankonstruktionen inzwischen bei wirtschaftlicher, ästhetischer und konstruktiver Bewertung konkurrenzfähig werden.

1.12.4 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Skyspan	ETFE
Deckbahn	-	
Dämmung	-	
Innenmembran	Skyspan	ETFE

1.13 Tegut Verbrauchermarkt

1.13.1 Allgemeines

Standort:	Petersberg
Baujahr:	1998
Architekt:	Günter Peichl, Fulda
Ingenieur:	Ingenieurbüro Teschner, Kosel
Konfektionär:	CENO TEC, Greven

Bei dem im Jahr 2000 eröffneten Verbrauchermarkt handelt es sich um vier getrennte Bauwerke. Der 1.350 qm große Lebensmittelmarkt und der ca. 490 qm große Getränkemarkt wurden jeweils mit einem zweilagig gedämmten Membrandach ausgeführt.

1.13.2 Aufbau und Funktion

Das mit Polyvinylchlorid (PVC) beschichtete Polyestergewebe (PES) der äußeren Membran wurde von der Firma Mehler-Haku geliefert. Die silberne Färbung wurde aus architektonischen Gründen gewählt. Der Zwischenraum wird rein durch Konvektion natürlich entlüftet. Bei der Dämmung handelt es sich um einen Vliesstoff, der angeblich in der Medizintechnik verbreitet zur Anwendung kommt. Er ist auf der inneren PVC beschichteten Polyester membran befestigt.

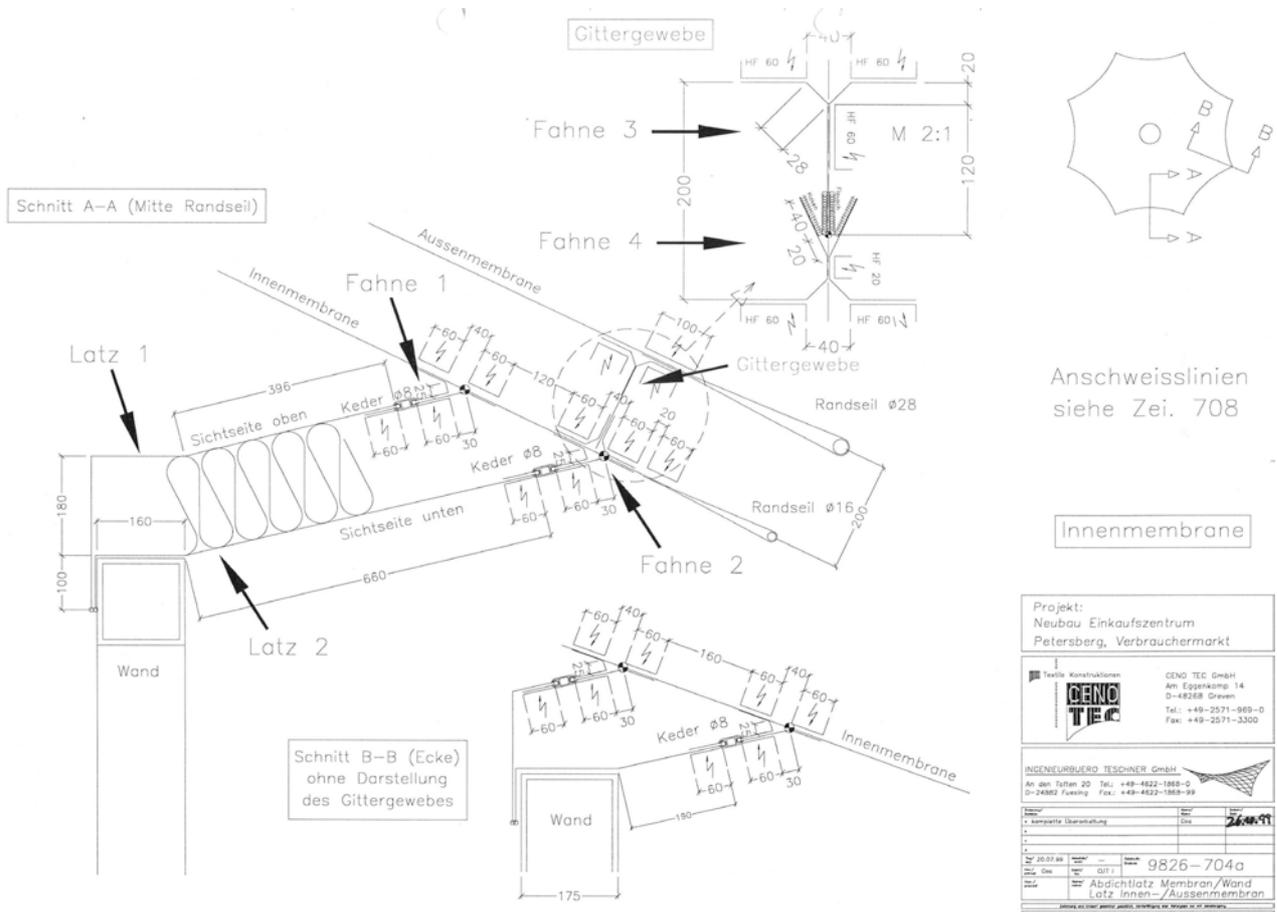
Der Hochpunkt besteht aus zwei Stahlringen, an den die beiden Membranlagen befestigt wurden. Die technischen Anlagen für den erforderlichen Rauch- und Wärmeabzug (RWA) wurden ebenfalls darin untergebracht [69].



Abbildung 77: Verbrauchermarkt im Vordergrund sowie Getränkemarkt und Nebengebäude [69]

1.13.3 Details

Wie in Abbildung 78 dargestellt ist, wurde der Verbindungslappen zwischen Membrandach und der Fassade gedämmt ausgeführt. Aufgrund der hohen Vertikalverschieblichkeit der Membrankonstruktion ist dieser quasi liegend zur Ausführung gekommen. Dies verhindert Beschädigungen selbst bei großen Verschiebungen. Außerdem ersichtlich ist das Gittergewebe, welches zwischen der inneren und äußeren Membranlage des Daches angebracht wurde. Es ermöglicht den Schutz vor Schmutzeintrag und gewährleistet die Entwässerung von möglicherweise anfallendem Kondenswasser [69].



Projekt:
Neubau Einkaufszentrum
Petersberg, Verbrauchermarkt

CENO TEC GmbH
Am Eggenkamp 14
D-48268 Greven
Tel.: +49-2571-989-0
Fax: +49-2571-3300

INGENIEURBERG TESCHNER GmbH
An den Tannen 20 Tel.: +49-4522-1885-0
D-24362 Fuesing Fax: +49-4522-1889-99

Zeichnung	Titel	Blatt
1. Abwärtige Überarbeitung		26/99
Datum	Blatt	
20.07.98	9826-704a	
Proj. Chef	Abdichtplatz Membran/Wand	
Zeichner	Latz Innen-/Aussenmembran	

Abbildung 78: Detailanschluss der Fassade [69]

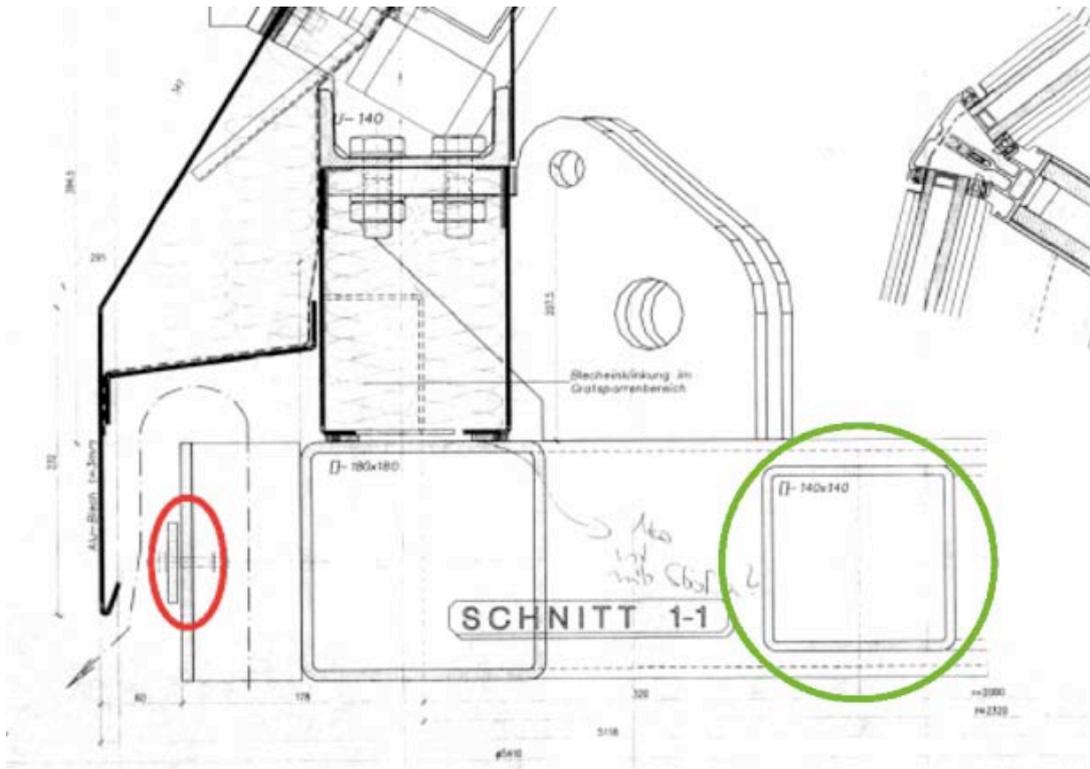


Abbildung 79: Hochpunkt [69]



Abbildung 80: Befestigung an der Stütze [69]

In Abbildung 79 ist ein Schnitt durch den Hochpunkt gezeigt. Die konstruktive Ausführung der Anschlussdetails beider Gebäude ist prinzipiell identisch. Die Außenmembran wird durch einen Klemmplattenstoß befestigt (rote Markierung). Die Innenmembran wird am inneren Ring (grün Markierung) angebracht. Die befestigte Membran wurde allerdings nicht dargestellt. Die Zwischenraumbelüftung erfolgt durch Umlenkung mittels eines Aluminiumbleches (mit gestricheltem Pfeil markiert).

Beide Membranlagen sind an den Stahlstützen separat befestigt und werden zusammen über die Fassadenkonstruktion hinausgeführt [69].

1.13.4 Probleme

Es sind keine bauphysikalischen Probleme in den vorliegenden Unterlagen beschrieben. Nach Aussage des Bauherr wird über die Errichtung weiterer vergleichbarer Märkte nachgedacht.

Die silberne Membran muss an den Schweißstellen von der Beschichtung befreit werden, da ansonsten die Schweißnahtfestigkeit stark reduziert ist und bei lediglich 50 bis 60 % der zulässigen Gewebefestigkeit bei 70°C liegen würde [69].

1.13.5 Einschätzung / Kommentar

Auf das Dämmmaterial und dessen Befestigung auf der Membran konnte nicht näher eingegangen werden, da die notwendigen Unterlagen dazu nicht einzusehen waren.

1.13.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Mehler-Haku	PES/PVC Membran
Deckbahn	-	nicht vorhanden
Dämmung	nicht bekannt	Vliesmaterial
Innenmembran	Mehler-Haku	PES/PVC Membran

1.14 Storek-Varia Verkaufsgebäude

1.14.1 Allgemeines

Standort:	Leonberg
Baujahr:	2000
Entwurf:	Prof. Frei Otto mit Christine Kanstinger
Architekt:	Architekturbüro Rasch + Bradatsch, Leinfelden-Echterdingen
Ingenieur:	Buro Happold, Berlin
Konfektionär:	Birdair Europe Stromeyer GmbH, Konstanz

Im Jahr 2000 und 2001 wurden in Leonberg zwei wärmegegedämmte Rundzelte mit einem Durchmesser von jeweils 24 Metern als Ausstellungsräume für ein Möbelhaus, sowie für ein Küchenstudio errichtet. Nach der Fertigstellung und der Abnahme der Gebäude erfolgten eine Reihe unterschiedlicher baulicher Maßnahmen an den beiden Membrandächern. Beide Dächer liegen infolge dessen heute in unterschiedlichen baulichen Ausführungen und in unterschiedlichen baulichen Zuständen vor.

1.14.2 Aufbau und Funktion:

Beide Gebäude weisen jeweils einen kreisförmigen Grundriss mit einem Durchmesser von ca. 24 Metern und einer Nutzfläche von ca. 453 qm auf. Die Membrandächer bestehen aus einer dreilagig aufgebauten, räumlich gekrümmten und vorgespannten textilen Membrankonstruktion, die zum einen entlang ihres unteren (äußeren) Randes an einem ringförmig verlaufenden Balken („Ringbalken“) aus Brettschichtholz befestigt ist und die zum anderen an einem Hochpunkt, der durch die Spitze eines ca. 13 m hohen Holzmastes gebildet wird, befestigt ist. Jede der drei, die Konstruktion bildenden Membranen besteht aus einem beschichteten Gewebe mit Verstärkungen aus radial verlaufenden Gurten. Die Außenmembrane ist aus einem Polyestergerewebe (PES) mit einer beidseitigen Polyvinylchloridbeschichtung (PVC), auf der wiederum außenseitig eine spezielle Oberflächenschicht aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) aufgebracht ist. Die mittlere Membrane vom selben Hersteller weist ein PES-Gewebe auf und ist ebenfalls mit einer PVC-Beschichtung beidseitig versehen. Die Innenmembrane basiert auf einem Glasgewebe mit Silikonbeschichtung. Die vorgenannten Materialangaben sind der Leistungsbeschreibung des Architekturbüros Rasch und Bradatsch entnommen.



Abbildung 81: Außenansicht beider Gebäude [71]

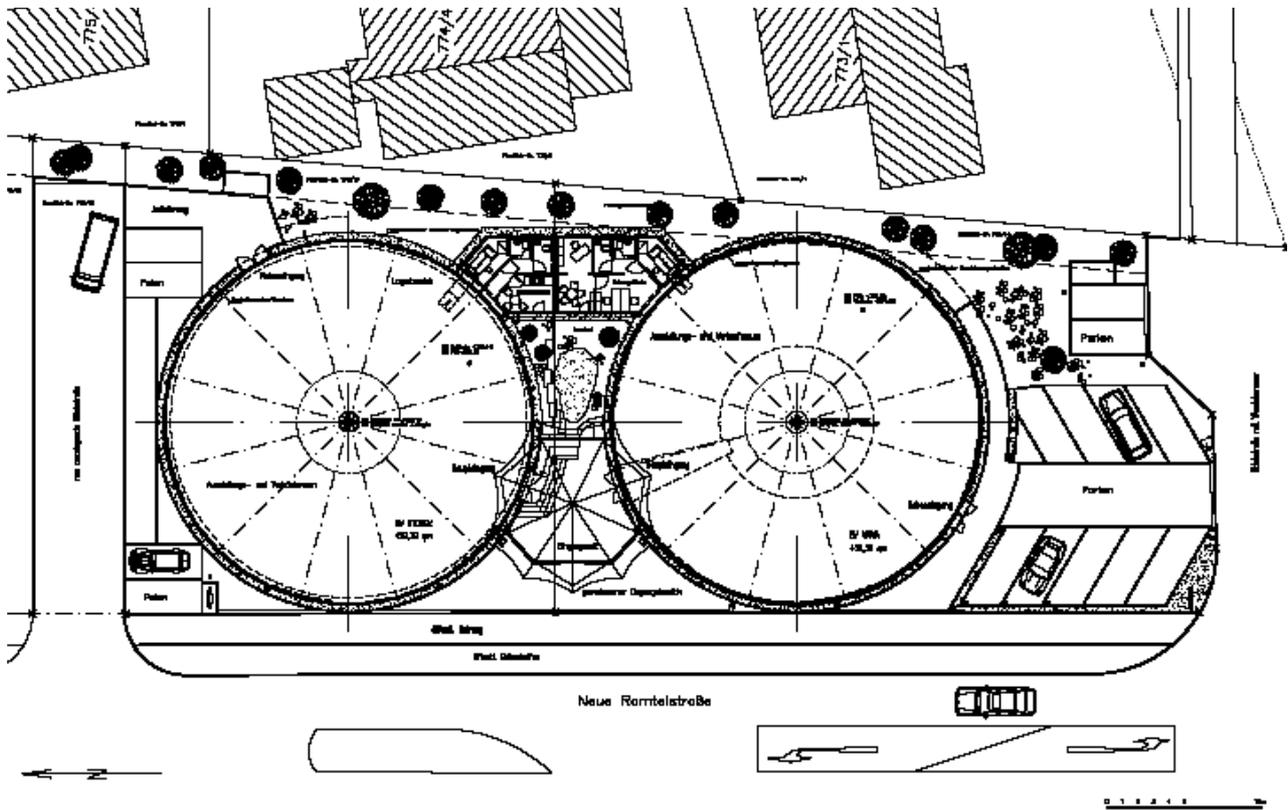


Abbildung 82: Grundriss beider Gebäude [71]

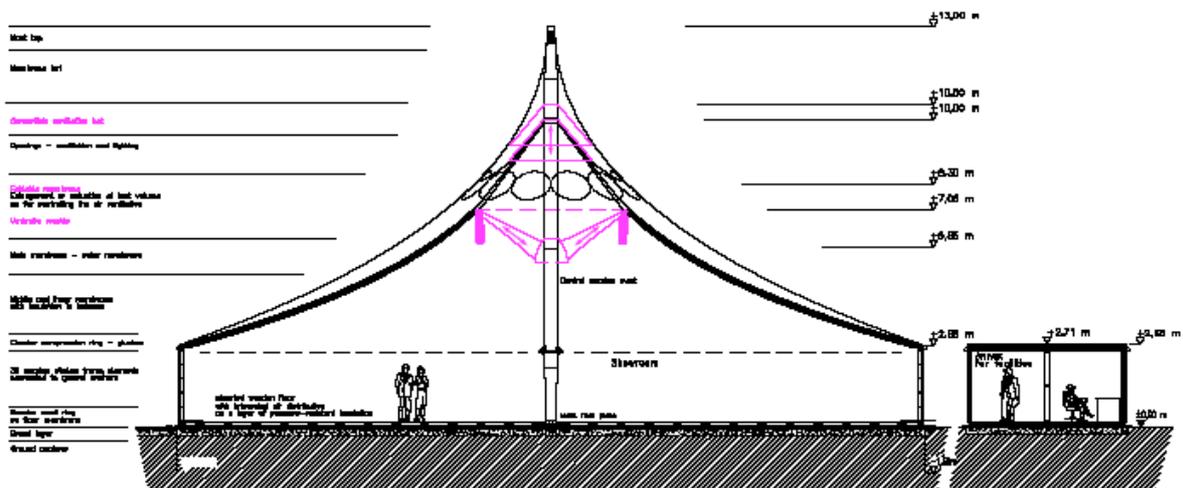


Abbildung 83: Schnitt durch ein Gebäudeteil [71]

1.14.3 Details

Zwischen der inneren Membrane und der mittleren Membrane befindet sich eine Wärmedämmung aus einem Polyestervlies mit einer Dicke von 80 mm, Fabrikat Caruso-Iso-Bond, der Firma Caruso

in Ebersdorf (Bauzustand November 2000). Bei den Nacharbeiten im November 2002 wurde die Wärmedämmung in beiden Gebäudedächern unterschiedlich verstärkt. Die zusätzlich angebrachte Wärmedämmung in Form einer weiteren Lage Polyestervlies reicht vom Ringbalken bis etwa zur Höhe von 3.5 m bis 4.0 m über dem Bodenbelag im einen Gebäudeteil und bis zum oberen Abschluss der Innenmembrane beim zweiten Gebäudeteil. Die genaue Dicke der zusätzlichen Dämmschicht kann den vorliegenden Unterlagen nicht eindeutig entnommen werden. Es wird eine Materialstärke von ca. 30 bis 40 mm als wahrscheinlich angegeben.

Bei den Nacharbeiten erfolgte ebenfalls die Montage einer Dampfsperre in Form einer gitterverstärkten Verbundfolie des Typs Delta-Fol Reflex vom Hersteller Ewald Dörken GmbH & Co. KG in Herdecke. Diese Dampfsperre bildet den Abschluss der Dämmschicht nach innen in den Dächern beider Gebäude [71].

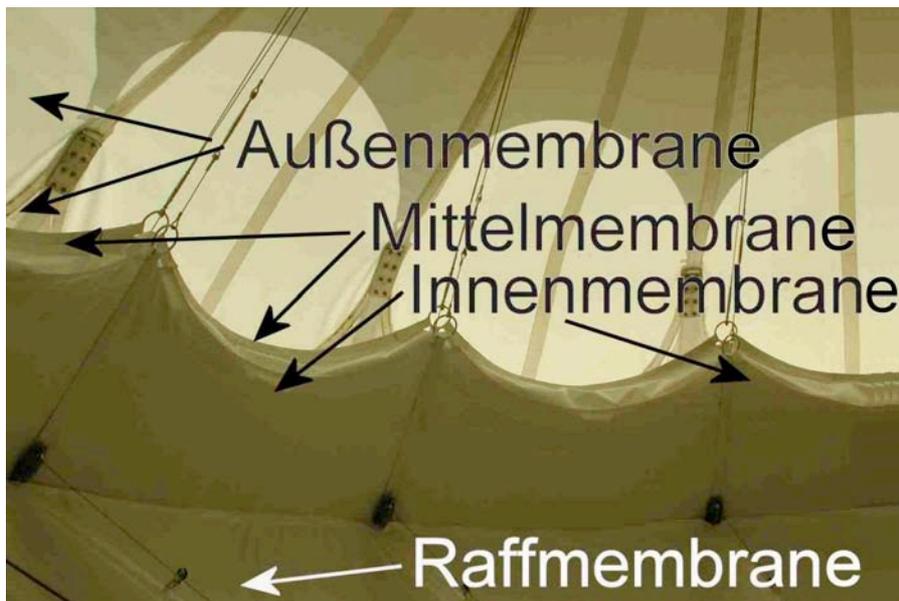


Abbildung 84: Innenansicht des Abschlussbereichs der mittleren und inneren Membran [71]



Abbildung 85: Innenansicht des Hochpunktes und des beweglichen Lüftungselementes [71]



Abbildung 86: Innenansicht der Raffmembrane in ausgefaltetem Zustand [71]

Im Bereich der Membranhochpunkte weisen beide Dächer einen beweglichen Lüftungsmechanismus auf. Eine im oberen Bereich der Innenmembrane und dem Mast befestigte bewegliche, nicht vorgespannte Membrane, die vom Planer als „Raffmembran“ oder auch als „Raffvorrichtung“ bezeichnet wird, bildet den Abschluss des Innenraumes. Der bewegliche Lüftungsmechanismus dient, laut Ausschreibungstext des Planers, der manuell kontrollierbaren Lüftung des Innenraumes. Die Raffmembran wird nach Nutzeraussage zur jahreszeitlichen Anpassung an das Außenklima eingesetzt. Für die Anpassung an den Sommer wird diese gerafft und es entsteht eine große Öffnung im oberen Dachbereich zum beweglichen Lüftungsmechanismus hin, wohingegen zur Anpassung an die kalten Monate die Raffmembran ausgelassen wird und somit der Innenraumbereich durch die Raffmembran nach oben hin abgeschlossen ist [71].

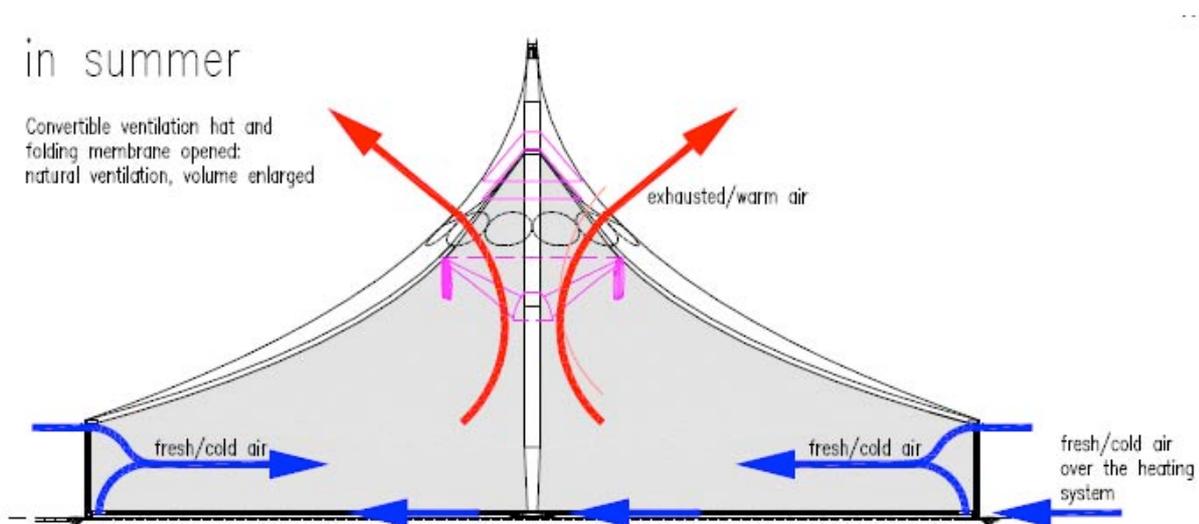


Abbildung 87: Klima Sommer: Warme Luft kann nach oben entlüftet werden. [71]

in winter

Convertible ventilation hat and folding membrane closed:
no ventilation, volume reduced

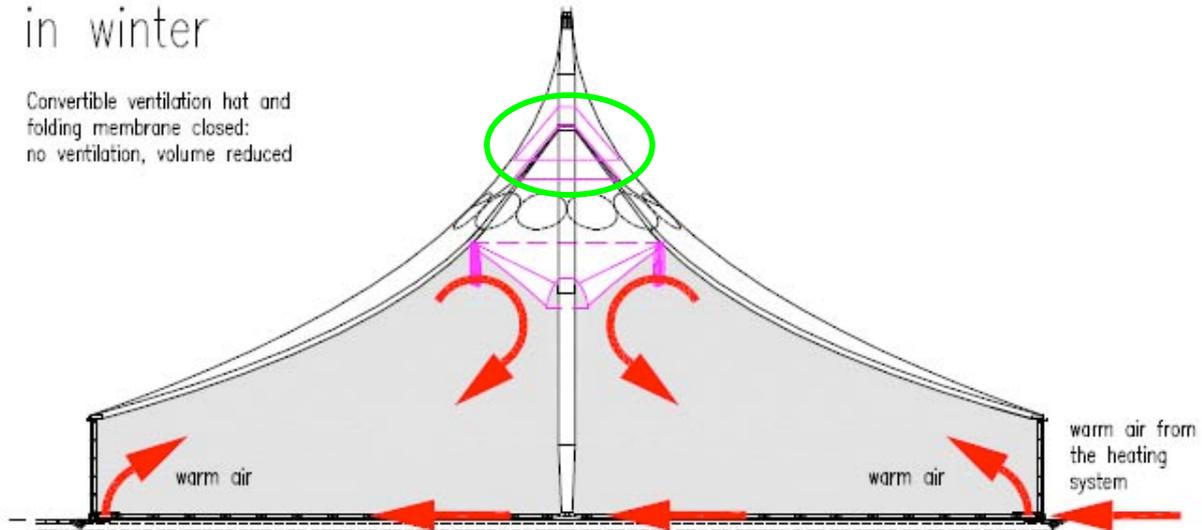


Abbildung 88: Klima Winter: Innenvolumen wird verkleinert [71]

Die Raffmembrane lässt sich als variabler Abschluss des Innenraumes nach oben hin einsetzen und dient vor allem im Winter der Verringerung der Wärmeverluste aus dem Innenraum. Die Raffmembrane bildet dabei jedoch keinen gasdichten Abschluss des Innenraumes. Die Heizung des Innenraumes erfolgt durch Lüftungskanäle, die nahe der Glasfassade verlaufen und von einer Gas-Warmluftheizung versorgt werden [70] und [71].

Die konstruktive Ausführung des unteren Membrananschlusses ist in Abbildung 87 dargestellt. Die obere und mittlere Membran werden dort durch einen eingelegten Filz nach außen entwässert. Die Dampfsperre (rot hervorgehoben) ist umlaufend und auf der Oberseite bis über den Schnürstoß geführt.

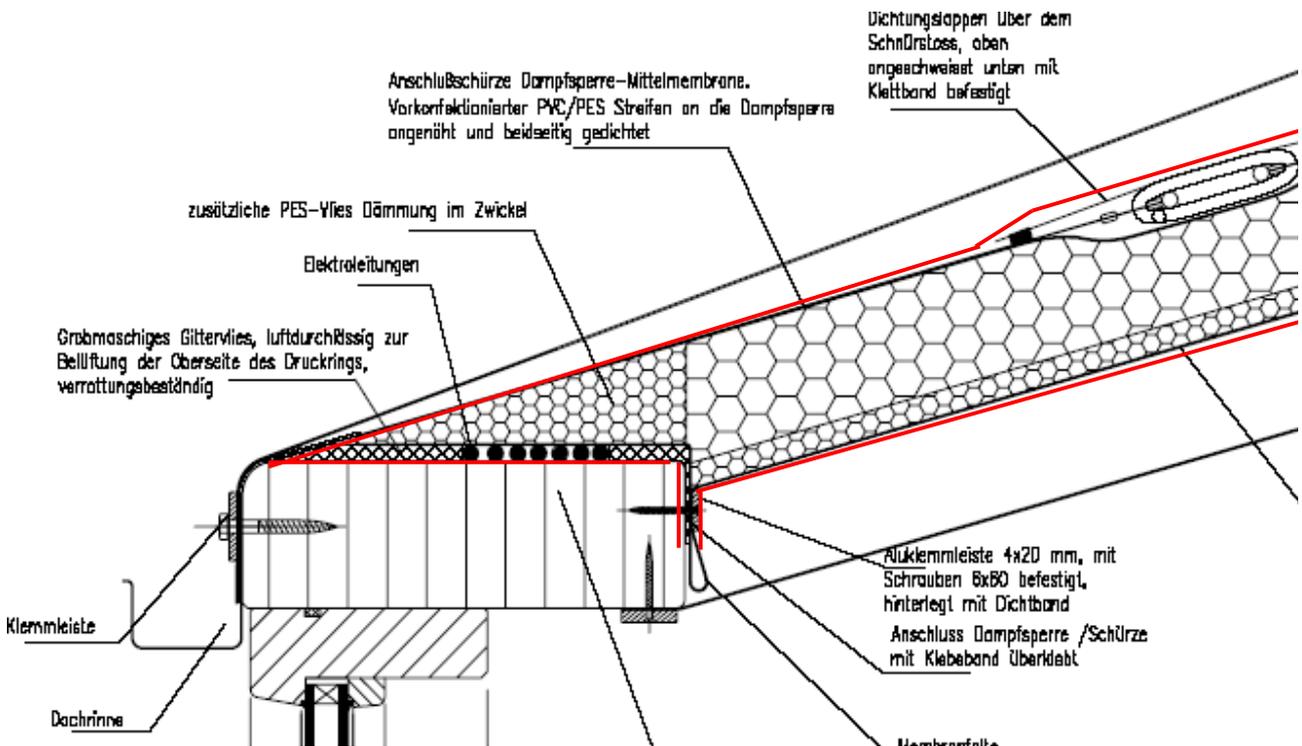


Abbildung 89: Traufdetail mit Ringbalken und Membrananschluss [71]

In Abbildung 90 ist die letztendlich ausgeführte Befestigung der Dämmung abgebildet. In rot gekennzeichnet ist die angebrachte Fahne, durch die horizontale Schnüre (blau) durchgeführt werden. Die vertikalen Schnüre (gelb) wiederum werden durch aufgeschweißte Ösen (grün) geführt. Die Dämmung wurde nur einlagig und dadurch nicht überlappend angebracht.

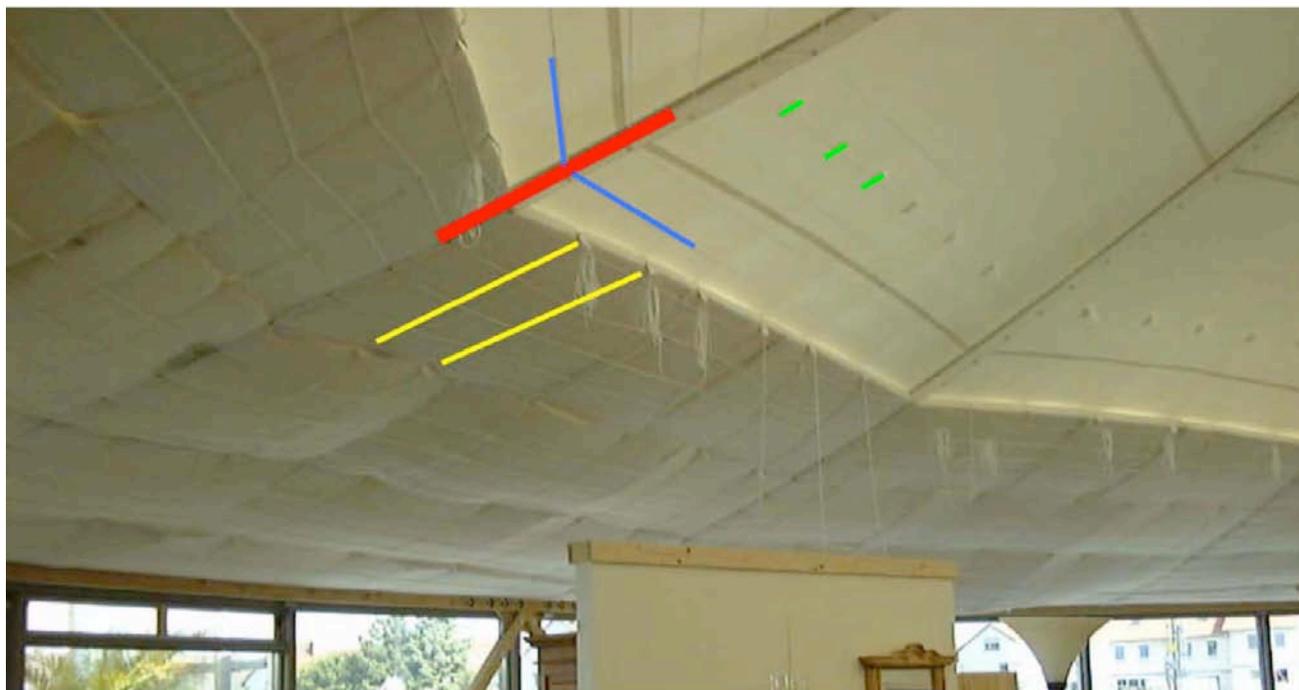


Abbildung 90: Ausgeführte Befestigung der Dämmung [71]

1.14.4 Probleme

Bei allen Gebäudehüllen erfolgt ein Wärmeaustausch zwischen dem Gebäudeinneren und der äußeren Umgebung sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlung. Bauteile, die im Wärmeaustausch mit einer kalten Umgebung oder im Austausch mit einem kalten Strahler (z. B. dem Nachthimmel) stehen, kühlen stark und schnell ab, wenn sie nicht über ein großes Wärmespeichervermögen verfügen oder durch einen kontinuierlichen Wärmestrom aus dem Innenraum vor dem Abkühlen bewahrt werden. Textile Membranen verfügen über ein sehr kleines Wärmespeichervermögen. Um den Wärmestrom vom Innen- zum Außenraum zu reduzieren, wurde beim vorliegenden dreilagigen Membranaufbau eine Dämmschicht zwischen der inneren und der mittleren Membrane eingebaut. Zwischen der mittleren und der äußeren Membrane befindet sich ein Luftspalt zur Abführung von auftretendem Kondenswasser. Infolge des geringen Wärmespeichervermögens textiler Membranen und infolge des durch die Wärmedämmung stark reduzierten Wärmestroms kühlen sich sowohl die äußere Membrane wie auch die mittlere Membrane bei niedrigen Außentemperaturen und / oder klarem Himmel stark ab [71].

Sinkt nun die Temperatur einer Membrane unter den Taupunkt der umgebenden Luft ab, so kommt es zur Kondenswasserbildung auf der betroffenen Oberfläche der Membrane. Typischerweise tritt dies an denjenigen Oberflächen auf, die in Berührung mit der warmen und feuchteren Luft des Innenraums sind. Im vorliegenden Fall sind dies die Innenseite der äußeren Membrane und die Außenseite der mittleren Membrane. Dies bedeutet, dass sich bei einem Absinken der Temperatur der Außenmembrane unter den Taupunkt der Luft Kondenswasser an der Innenseite der äußeren Membrane niederschlägt. Falls die Temperatur der mittleren Membrane ebenfalls unter dem Taupunkt der umgebenden Luft liegt, fällt auf der Oberseite der mittleren Membrane ebenfalls Wasser aus. Dies ist bei entsprechend tiefen Außentemperaturen und / oder bei klarem Nachthimmel der Fall [71].

Liegt die Temperatur der Membrane unterhalb des Gefrierpunktes, so bildet sich auf ihrer Oberfläche aus dem dort befindlichen Kondensat eine Eisschicht. Wird der Gefrierpunkt nicht erreicht, fließt Kondenswasser an den Membranen nach unten und tropft ab. Das auf der Innenseite der äußeren Membrane und das auf der Außenseite der mittleren Membrane niedergeschlagene Kondenswasser rinnt entlang der Membranen nach unten und sammelt sich dort in einem Zwickel. Das Anbringen der aluminiumbedampften Membran reduzierte dieses Verhalten durch seine dampfsperrenden Eigenschaften [70] und [71].

Es kommt nicht nur an den luftzugewandten Oberflächen der äußeren und der mittleren Membrane zur Kondenswasserbildung, sondern auch an der dämmungszugewandten Innenseite der mittleren Membrane. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die innere Membrane aus einem Glasfasergewebe mit einer Silikonbeschichtung besteht und diese nicht wasserdampfdiffusionsdicht ist. Daher kann Wasserdampf aus dem Innenraum des Gebäudes in die Dämmschicht eindringen und bis zur mittleren Membrane gelangen (Planungs- und Ausführungsstand November 2000). Dort kondensiert es entsprechend der bereits beschriebenen Bedingungen. Das Kondensat kann an der Innenseite der mittleren Membrane infolge der dort vorhandenen Wärmedämmung nicht frei abfließen oder abtropfen. Es dringt daher in die Wärmedämmung ein und durchfeuchtet diese. Auf Grund der Durchfeuchtung verlor die Dämmschicht partiell ihre Dämmfunktion. Die Folge des im Ringbalkenbereich auftretenden Feuchtestaus war zusätzlich die partielle Zersetzung des hölzernen Ringbalkens. Ein weiteres Problem ergab sich aus der Tatsache, dass die Dämmung nicht wie geplant zweilagig überlappend ausgeführt wurde. Durch die Bewegung des Membrandaches entstanden Lücken zwischen den Dämmbahnen, die sich als Kältebrücke mit Kondenswasserausfall abzeichnen [70] und [71].

Wegen der großen Dachfläche kann die als Kondensat anfallende Wassermenge erhebliche Größenordnungen annehmen. Betrachtet man beispielsweise den Luftraum zwischen äußerer und mittlerer Membrane, so fallen dort bei einem Absinken der Temperatur der Membranen von 20 °C auf -10 °C ca. 1,9 Liter Kondenswasser an. Während dieses Prozesses erhöht sich die relative Feuchte der mit den Membranen in Kontakt befindlichen Luft von 40 % bei 20 °C auf 100 % bei -10 °C. Eine Luftzirkulation wurde bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigt. In Wirklichkeit ist zumindest von einer geringen Luftzirkulation auszugehen. Hierdurch würde sich die angegebene Menge an Kondenswasser noch deutlich erhöhen.

Das Kondensat gefriert bei Temperaturen unter 0 °C an der Membranfläche. Bei entsprechend anhaltenden Umgebungsbedingungen sammelt sich im Laufe von mehreren Tagen weiteres gefrorenes Kondensat an, das bei Tauwetter an der Membrane nach unten abläuft oder abtropft. Über wasserdurchlässige Stellen, wie die Nähte an der Mittel- und Innenmembran, dem Schnürstoß an der Mittelmembrane im Ringbalkenbereich oder der Randklemmung der Innenmembrane gelangt das angesammelte Kondensat in den Gebäudeinnenraum.

1.14.5 Einschätzung / Kommentar

Das beschriebene Phänomen einer Taubildung infolge Kondensation mit anschließendem Ablauf des Kondenswassers in den Membranzwickel wird durch die Messungen der Transsolar Energietechnik GmbH (2004) bestätigt [70]. In den Untersuchungen wurden sowohl Temperaturen wie relative Luftfeuchten am Membranaufbau der Dachstrukturen gemessen. Die Messreihen bestätigen, dass die Taupunkttemperaturen der umgebenden Luft an den Membranflächen bei entsprechenden Umgebungsbedingungen unterschritten werden, was die Bildung von Kondenswasser zur Folge hat.

Besonders problematisch an diesem Zeltbau ist die Tatsache, dass das anfallende Kondensat keine ausreichende Möglichkeit zur kontrollierten Entwässerung darbietet.

Die Diffusion von Wasserdampf durch die Innenmembran in den darüberliegenden Luftraum ist ein Effekt, der sowohl bei PVC beschichtetem PES, bei PTFE beschichtetem Glasfasergewebe, wie auch im Besonderen bei silikonbeschichtetem Glasfasergewebe auftritt. Daher ist bei der Planung solcher Aufbauten unter Berücksichtigung von Entfeuchtungsmechanismen besondere Sorgfalt geboten. Die eingesetzten Gewebe sollten einen abnehmenden S_d -Wert von den inneren zu den äußeren Lagen aufweisen. Die natürliche oder kontrollierte Belüftung der Luftzwischenräume ist sicherzustellen.

Nachdem an der Konstruktion massive, die Standsicherheit gefährdende Schäden festgestellt wurden, sind die Gebäude im Rahmen einer umfassenden Sanierung wieder in Stand gesetzt worden. Die empfohlenen Maßnahmen aus dem bauphysikalischen Gutachten wurden dabei, soweit bekannt, umgesetzt.

1.14.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Ferrari SA, La Tour-du-Pin Cedex, Frankreich	Fluotop T 1202, Typ III
Mittelmembran	Ferrari SA, La Tour-du-Pin Cedex, Frankreich	Precontraint 402
Dämmung	Caruso	Isobond PES Vlies WLG 040 80 + 40 mm
Dampfsperre	Dörken	Deltafol Reflex
Innenmembran	CS-Interglas / P-D Interglas Technologies AG, Erbach	Glas/Silikon 3200-2-sw
Bodenmembran (zum Schutz vor aufsteigender Feuchtigkeit)	Ferrari SA, La Tour-du-Pin Cedex, Frankreich	XR-5

1.15 Cargolifter Werfthalle

1.15.1 Allgemeines

Standort:	Brand
Baujahr:	2000
Bauherr:	Cargolifter AG, Brand, Deutschland
Architekt:	SIAT, München
Ingenieur:	IPL Ingenieur Planung Leichtbau GmbH, Radolfzell
Konfektionär:	Birdair Europe Stromeyer, Konstanz CENO TEC, Greven (Umbau)

Die Cargolifter Werfthalle ist mit einer überdachten Grundfläche von 66.000 qm und einem Innenvolumen von 5.2 Millionen m³ eine der weltweit größten freitragenden Hallen. Die Halle wurde zum Bau und zur Wartung des CargoLifters, einem Luftfrachtschiff, erbaut. Nach der Insolvenz der Cargolifter AG wurde das Bauwerk an einen Investor verkauft, der es zum „Tropical Islands Resort“, einem Erlebnisbad, umbaute.



Abbildung 91: Ansicht der ursprünglichen und umgebauten Halle [92]



Abbildung 92: Innenansicht des „Tropical Islands Resort“ [92]

1.15.2 Aufbau und Funktion

Der ursprüngliche Membranaufbau bestand aus vier Lagen Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe (PES). Jeweils zwei Lagen wurden als Kissen ausgebildet, wobei die jeweils untere Lage ohne Vorspannung eingehängt wurde. Auf den oberen Membranlagen verlief ein Sogseil, welches gleichzeitig zur Führung des abfließenden Regenwassers genutzt wurde. Durch die redundante Ausführung der zwei tragenden Membranlagen war im Schadensfall ein Membranfeld ohne Einschränkung der Nutzung austauschbar. Die Membranzwischenräume wurden in Hinblick auf die Nutzung als Werkhalle nicht konditioniert [72].

Um nach dem Umbau für den „tropischen Regenwald“ des Erlebnisbades ausreichend Licht insbesondere mit UV-Strahlungsanteil in den Innenraum zu leiten, wurden vier Membranfelder auf der Südseite durch Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) Kissenkonstruktionen ausgetauscht. Diese sind mit warmer Luft konditioniert, damit der Wärmeübergang vom Innenraum nach außen reduziert wird. Der Wärmeübergang aus dem Zwischenraum an die Außenluft ist dabei geringer als der Gesamtwärmeverlust bei alternativ nicht gewärmten Kissen. Außerdem wird dadurch die Kondensatbildung an der Innenoberfläche der Membranen deutlich reduziert. Das dennoch im Kissenzwischenraum anfallende Kondenswasser wird durch die Durchlüftung und eine Entwässerung abgeführt [75].

Der Innenraum wird über eine Fußbodenheizung erwärmt, wodurch die vorgeschriebenen 18 °C bis zu einer Höhe von 12 m über dem Boden gewährleistet werden können. Um den im Winter auftretenden Kaltluftabfall aufgrund der kalten Membrankonstruktion zu minimieren, sind an der Längsseite der Halle jeweils drei Reihen Infrarotstrahlungsheizungen angebracht.

Die Untersuchung der Temperaturschichtung und des Wärmeverhaltens im Innenraum während der Planung zeigte, dass sich die 5,2 Millionen m³ Luft sehr träge verhalten und so mit einer stabilen Luftschichtung gerechnet werden kann. Die Lüftungswärmeverluste über die Torfugen und die Zu- sowie Abluftlamellen stellten sich ausschlaggebender heraus als die Transmissionswärmeverluste über die gesamte Membrankonstruktion. Aus diesem Grund entschied man sich für die ungedämmte, aber transluzente Konstruktion. Damit verbunden konnte man den 30 % höheren Tageslichtanteil gegenüber einem gedämmten, opaken Aufbau nutzen und durch den verringerten Kunstlichtbedarf signifikante Einsparungen beim Stromverbrauch ermöglichen [80].

1.15.3 Details

An detaillierten konstruktiven Darstellungen ist der Anschluss der Membranlagen an den Binder der Tragkonstruktion abgebildet. Die Zeichnung zeigt die PES beschichteten PVC Membranen mit der Rückverankerung (1) im Bogenbinder, sowie den aufgeschweißten Dichtungslappen (2).

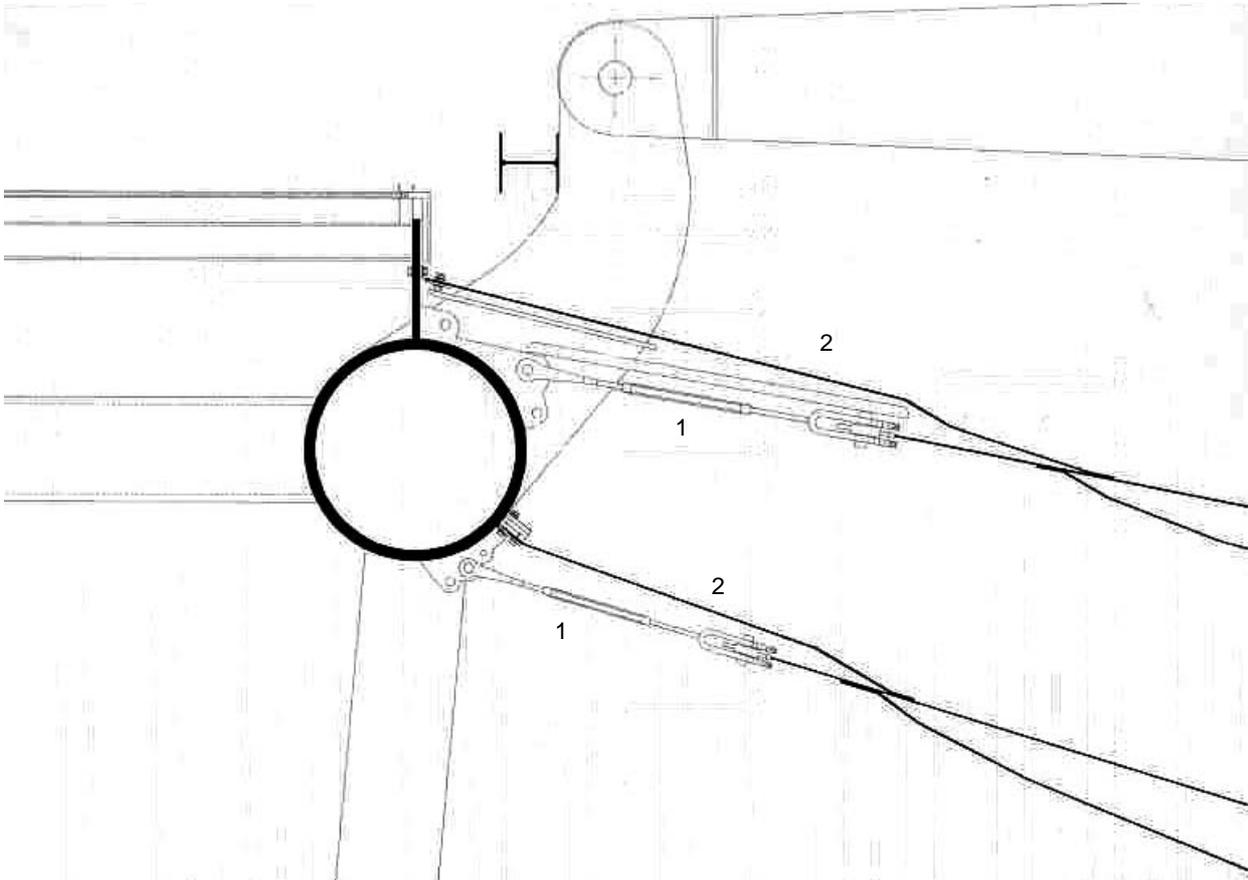


Abbildung 93: Anschluss der vier Membranlagen an den Bogenbinder im Bereich der PES/PVC Membraneindeckung [72]

1.15.4 Probleme

In den vorliegenden Unterlagen sind keine bauphysikalischen Probleme beschrieben.

1.15.5 Einschätzung / Kommentar

Da die Lüftungswärmeverluste bei diesem Bauwerk in der Nutzung die Hauptverluste darstellen, erscheint es sinnvoll anstatt eines wärme gedämmten opaken Aufbaus die ungedämmte transluzente Konstruktion vorzuziehen, da so durch die Einsparungspotentiale durch die Tageslichtnutzung Kostenvorteile entstehen. In Hinblick auf die Umnutzung wurden wichtige Maßnahmen ergriffen, um den veränderten bauphysikalischen Anforderungen Rechnung zu tragen.

1.15.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	nicht bekannt	PES/PVC
Außenmembran (Liner)	nicht bekannt	PES/PVC
Innenmembran	nicht bekannt	PES/PVC
Innenmembran (Liner)	nicht bekannt	PES/PVC

Neuer Bauteil nach Umbau:

Bauteil	Hersteller	Typ
Kissen außen	nicht bekannt	200 µm ETFE
Zwischenmembran	nicht bekannt	100 µm ETFE
Kissen innen	nicht bekannt	200 µm ETFE

1.16 Eden Project

1.16.1 Allgemeines

Standort:	St. Austell, Cornwall, UK
Baujahr:	2001
Architekt:	Nicholas Grimshaw, London, UK
Ingenieur:	Anthony Hunt and Associates, London, UK
Bauphysik:	Van Vliet Automation Ltd., Niederlande
Konfektionär:	Vector Foiltec, Deutschland

Seit 2001 ist im südenglischen Cornwall einer der größten botanischen Gärten mit weit spannenden Gewächshäusern im Einsatz. Bis zu 124 Meter weit reicht die Konstruktion, deren Grundform auf miteinander verschnittenen, geodätischen Kuppeln basiert. Die geometrische Form vereint die Vorteile einer leichten und dennoch steifen Konstruktion, einen hohen Vorfertigungsgrad und schnelles Errichten der Struktur vor Ort. Das Tragwerk ist in zwei Schichten aufgelöst. Die äußere Schicht basiert auf einer Hexagonalstruktur, die innere Schicht auf Drei- und Sechsecken. An den Verschneidungslinien liegen Dreigurträger. Zur Eindeckung wurden Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) Folienkissen verwendet.

1.16.2 Aufbau und Funktion

Die Luftkissen bestehen aus drei Lagen unbedruckter ETFE-Folie. Aluminiumklemmleisten befestigen die Kissen an der Stahlunterkonstruktion. Einige Elemente sind als Öffnungsluken ausgeführt, um für Abluft und Abkühlung im Gewächshaus zu sorgen [101].



Abbildung 94: Außenansicht [105]



Abbildung 95: Innenansicht [105]

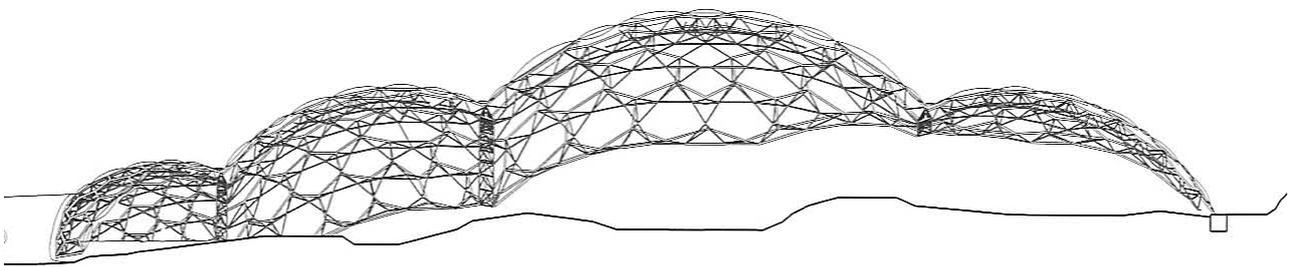
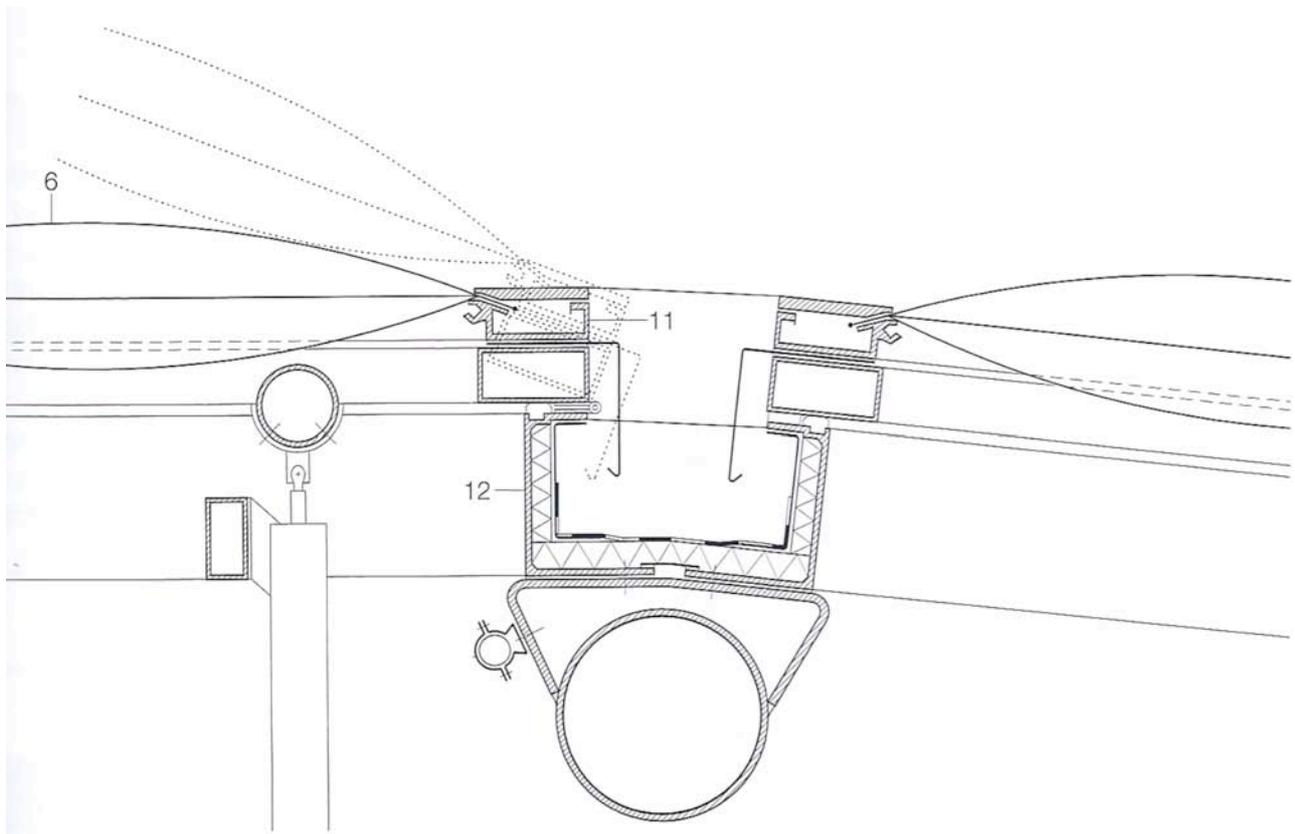


Abbildung 96: Schnittansicht [105]



- 6 ETFE Folienkissen
- 11 Klemmleiste
- 12 Regenrinne

Abbildung 97: Unterkonstruktion mit Membrankissenbefestigung und Entwässerung [105]

1.16.3 Probleme

In den vorliegenden Unterlagen sind keine bauphysikalischen Probleme beschrieben.

1.16.4 Einschätzung / Kommentar

Messungen haben ergeben, dass sich die Außenmembran im Sommer bis auf 85 °C erhitzen kann, was eine deutlich herabgesetzte Schweißnahtfestigkeit zur Folge hätte.

1.16.5 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Vector Foiltec	ETFE
Deckbahn	-	-
Dämmung	-	-
Innenmembran	Vector Foiltec	ETFE

1.17 Festo Technologiezentrum

1.17.1 Allgemeines

Standort:	Esslingen, Deutschland
Baujahr:	2001
Architekt:	Architekturbüro Jaschek, Stuttgart, Deutschland
Ingenieur:	Ingenieurbüro IPL, Radolfzell, Deutschland
Bauphysik:	Ingenieurbüro Rittgen, Trier, Deutschland
Konfektionär:	Foiltec GmbH, Bremen, Deutschland

Nach fast achtzehnjähriger Planung und zweijähriger Bauzeit wurde das Technologiezentrum der Festo AG in Esslingen fertig gestellt. Die Planungsvorgaben waren umfangreich und umfassten neben dem Erreichen eines Niedrigenergiehaus-Standards den Anspruch auf technisch neuartige Lösungen. Das Gebäude ist eine Erweiterung der Bebauung des Werksgeländes mit der Zielsetzung die im näheren Umkreis verstreut liegenden Betriebsstätten des Unternehmens zusammenzufassen und an einen gemeinsamen Standort zu konzentrieren. Der Baukörper zeigt sich als ein nach Süden aufgefächerter, sechsflügliger Komplex, bei dem jeweils zwei „Finger“ durch ein überdachtes Atrium und eine abgespannte Glasfassade zusammengefasst werden. Hierdurch wird die Außenfläche des Baukörpers deutlich verkleinert und eine Umsetzung des Niedrigenergiekonzeptes ermöglicht [106].



Abbildung 98: Außenansicht [117]

1.17.2 Aufbau und Funktion

Die Überdachung der Atrien wurde durch ein feingliedriges Tragwerk realisiert. Die pneumatisch stabilisierten Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) Folienkissen sind auf einer leicht gekrümmten, orthogonal verlaufenden Stahlgitterschale aufgelagert und über eine filigrane Seilkonstruktion an der Unterseite gegen Windsog abgespannt. Die Folienkissen sind dabei selbsttragend und ermöglichen eine außerordentlich reduzierte Ausbildung der Tragschale. An der Fassade wird die Unterspannung längs der schrägen Glasfassade nach unten in den Boden geführt [107].



Abbildung 99: Bedruckte Folienkissen mit Unterspannung und Fassadenanschluss [117]

Die dreilagigen ETFE-Folienkissen sind orthogonal zu den Gebäuderiegeln angeordnet. Sie erstrecken sich bei einer Breite von jeweils 2,5 Metern über eine Länge bis maximal 28 Metern. An den Außenrändern sind sie luftdicht verschweißt und in einem Aluminiumrahmen verankert, der auf dem Primärtragwerk verschraubt ist. Über die zwei außen liegenden Längsträger wird die Luft zugeführt, mit der die obere und untere Luftkammer der einzelnen Folienkissen auf einem geringen Überdruck gehalten wird. Gleichzeitig wird damit ein Wärmedämmkissen aufgebaut. Im Sommer kann durch gezielten Luftaustausch dem Dach Wärme entzogen werden bevor diese das Klima im Atrium beeinflussen kann [107].

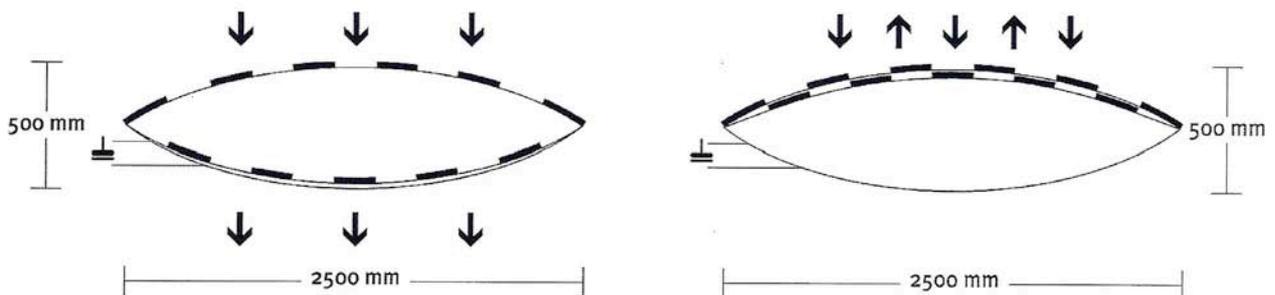


Abbildung 100: Systemschnitt Sonnenschutz der Folienkissen [117]

1.17.3 Details

Für die mit Folienkissen eingedeckten Dächer der Atrien wurde ein pneumatischer Sonnenschutz entwickelt. Die drei Membranen der Folienkissen werden durch den Innendruck stabilisiert. Die mittlere Membran kann dabei durch Druckänderung Ihre Lage verändern. Durch die Lageveränderung wird das positive und invertierte Schachbrettmuster, das auf der obersten und mittleren Folienlage aufgedruckt ist, zur Deckung gebracht. Es ermöglicht so einen variablen Sonnenschutz von 47 bis 93 %. Die Umschaltzeiten betragen zwischen 15 und 20 Minuten. Es wird somit ein variabler Gesamtennergiedurchlassgrad zwischen $g = 0,15$ und $g = 0,32$ bei einem U-Wert

von 2,7 bzw. 2,5 W/qmK erreichbar. Die kombinierten Maßnahmen zur Wärme und Kältereulation stellen sicher, dass im Atrium im Sommer die Temperatur 5 °K unter der Außentemperatur gehalten werden kann und im Winter die Innentemperatur nicht unter 12 °C sinkt [107] und [108].



Abbildung 101: Untersicht: Sonnenschutz und Lichtlenkung [117]

1.17.4 Probleme

Es sind keine bauphysikalischen Probleme in den vorliegenden Unterlagen beschrieben.

1.17.5 Einschätzung / Kommentar

Für das Gebäude wurde ein umfassendes Energiekonzept entwickelt, welches bei der Realisierung auch konsequent umgesetzt werden konnte. Neben der Behaglichkeit und Nutzungsfreundlichkeit des Gebäudes standen Faktoren wie ökologische und ökonomische Effizienz und der Einsatz umweltfreundlicher Technik im Fokus der Planung. Die umfangreichen Maßnahmen beinhalteten die Reduzierung von Wärmeverlusten und die Minimierung des Kühlbedarfs, die passive Nutzung der Solarenergie, die Nutzung des Erdreichs als Wärme und Kältequelle sowie den Einsatz ressourcensparender Haustechnik.

1.17.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Foiltec GmbH	ETFE Folie
Deckbahn	-	-
Dämmung	Foiltec GmbH	ETEF Folie
Innenmembran	Foiltec GmbH	ETFE Folie

1.18 Technologie und Medienzentrum Erfurt

1.18.1 Allgemeines

Standort:	Erfurt
Baujahr:	2001
Architekt:	Pohl Architekten Stadtplaner, Jena
Ingenieur:	Pohl Architekten Stadtplaner, Jena
Bauphysik:	Schmidt Reuter Partner, Köln
Konfektionär:	Flontex, Steinach, CH

Das Technologie und Medienzentrum Erfurt wurde als konventionelles Stahlbetongebäude errichtet. Die Erschließungsbereiche des dreibündigen Komplexes ist mit einer Glas- und Membranfassade versehen.



Abbildung 102: Außenansichten [119]

1.18.2 Aufbau und Funktion

Die Erschließungszonen dienen neben ihrer eigentlichen Funktion zusätzlich als Pufferzone und zur Luftzufuhr für die Querlüftung der Hauptnutzflächen der Gebäude. Die Solarstrahlung und das Lüftungskonzept in den Erschließungszonen bewirken die Vorkonditionierung der Luftmassen [118].

Die Erschließungszone wird natürlich belüftet, wobei die Luftströmung über eingebaute Klappen geregelt werden kann. Die dahinter liegenden Hauptnutzflächen sind durch verglaste Wände und Türen von den Erschließungszonen abgeteilt. Die Belüftung erfolgt manuell. Die Verglasung trägt zusätzlich zur Belichtung mit natürlichem Licht bei.



Abbildung 103: Grundriss [119]

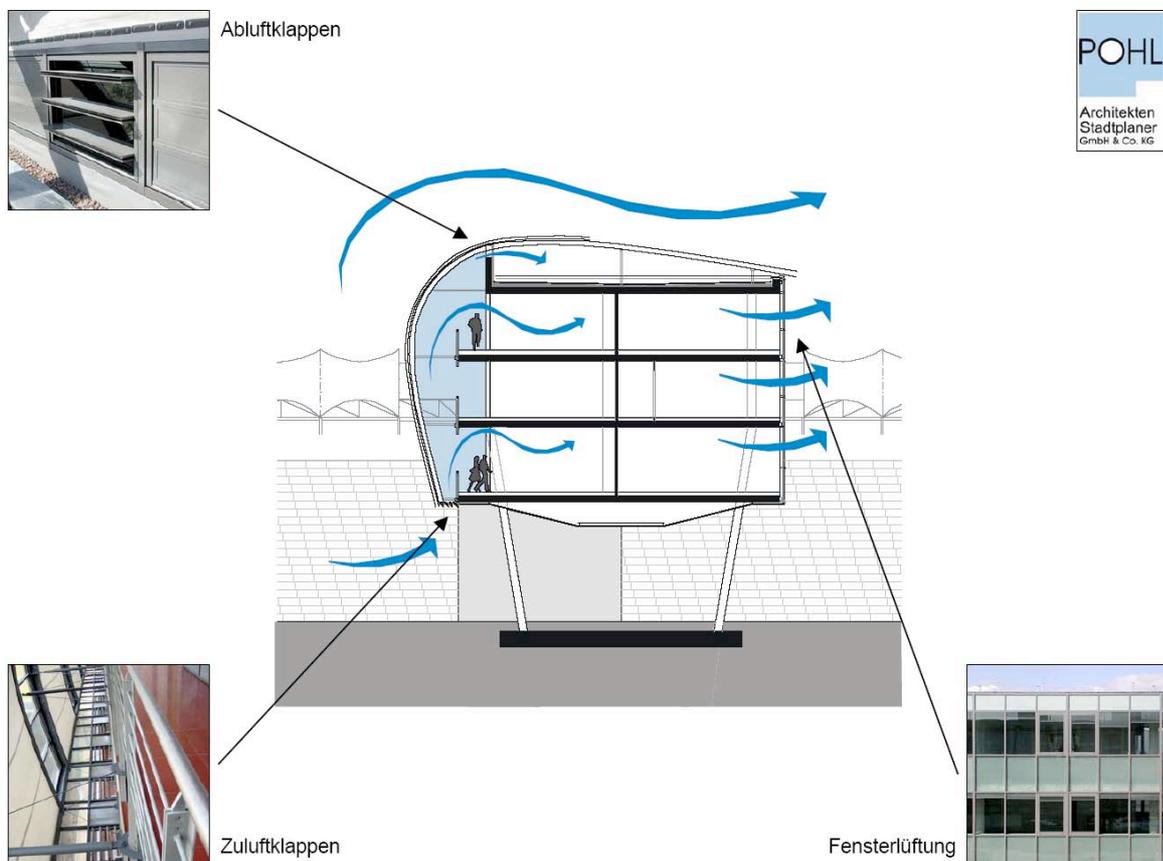


Abbildung 104: Prinzip der Belüftung [119]

Die Membranfelder bestehen aus einem äußeren Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtetem Glasfasergewebe, einem Glasfasergespinst als Dämmung und einer PTFE beschichteten inneren Membran. Die Dämmung weist eine Dicke von 10 cm auf und wurde in Kissen eingeschweißt. Die Kissenelemente wurden wiederum linear mit den Stahlträgern verbunden. Eine Hinterlüftung des Membranaufbaus sowie eine separate Entwässerung wurden nicht vorgesehen, da die Erschließungszone aufgrund der Durchlüftung keinen nennenswerten Dampfdruckunterschied gegenüber dem Außenklima aufbauen kann und somit kein Kondensat zu erwarten war.

Die Fassade wurde bewusst aus einer Kombination von transparenten Glas- und transluzenten Membranelementen erstellt. Das Glas ermöglicht die Blickbeziehungen nach außen, die Membran hingegen erzeugt ein diffuses Licht im Innenraum, wodurch Blendungen am Arbeitsplatz verhindert werden sollen. [118]

1.18.3 Details

Die Abbildung 105 zeigt die Montage des Glasfasergespinsts. Die unterschiedlichen Lagen wurden nach außen hin eingebaut. Die am Boden angebrachten Lüftungskappen, sowie der sich ergebende ephemere Charakter des Erschließungsbereichs bei Lichteinfall sind in Abbildung 106 dargestellt.



Abbildung 105: Befestigen der Dämmung [119]



Abbildung 106: Erschließungsgang und regelbare Lüftungskappen [119]

1.18.4 Einschätzung / Kommentar

Das Gebäude besitzt eine sehr innovative Fassade, bei der die Vorteile der Membran gezielt genutzt werden. Durch die konditionierende Wirkung der Erschließungszonen wird eine natürliche Belüftung der Räume erreicht und für eine ausgewogenere Ausleuchtung der Arbeitsplätze gesorgt.

1.18.5 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	nicht bekannt	Glas/PTFE
Deckbahn	-	nicht vorhanden
Dämmung	nicht bekannt	Glasgestrichelt 10 cm
Innenmembran	nicht bekannt	Glas/PTFE

1.19 Villa Arena

1.19.1 Allgemeines

Standort:	Amsterdam, Niederlande
Baujahr:	2001
Architekt:	ING Vastgoed Ontwikkeling BV
Ingenieur:	Bentham Crouwel, Niederlande
Bauphysik:	nicht bekannt
Konfektionär:	Skyspan GmbH, Deutschland

Ursprünglich war für das Shopping Center in Amsterdam ein verglastes Atrium geplant. Aus Gründen der Konstruktion, Kosten und Ästhetik fiel die Entscheidung für die Alternative einer anspruchsvollen Membrankonstruktion.

1.19.2 Aufbau und Funktion

Das Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) Foliendach erstreckt sich in 25 Metern Höhe zwischen der vierten und fünften Etage des „Woon Thema Centruums“. Es überspannt eine Gesamtfläche von 3.890 qm und besteht aus 105 transluzenten Membrankissen. Die obere Membran der pneumatisch vorgespannten Kissen ist zu 75 Prozent mit einem Punktraster bedruckt, um den Lichteinfall zu reduzieren. Die untere Membran ist unbedruckt [122] und [124].

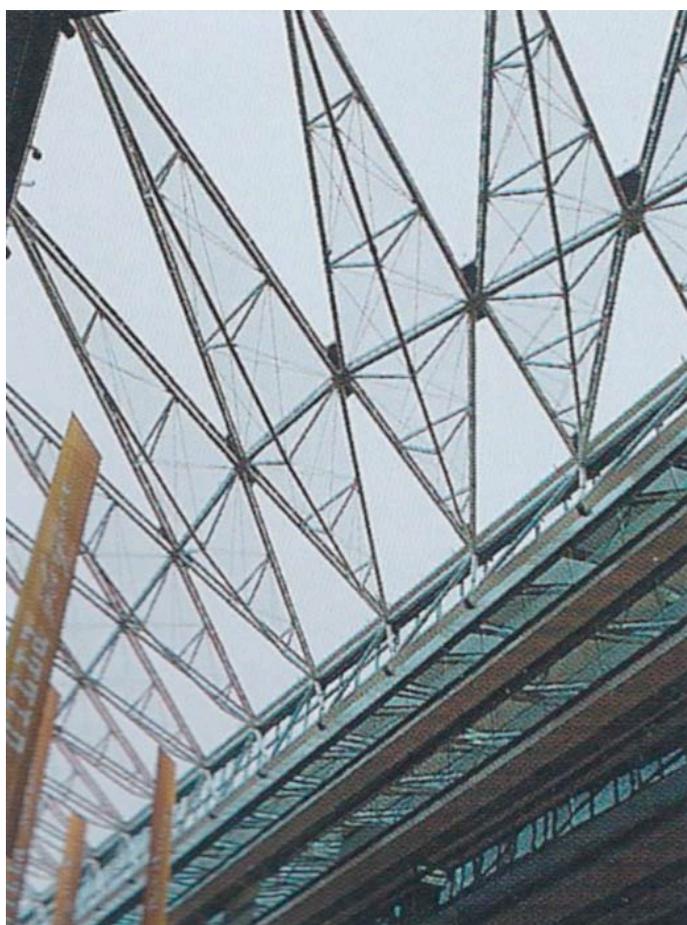


Abbildung 107: Innenansicht [124]

1.19.3 Einschätzung / Kommentar

ETFE-Kissenkonstruktionen gehören mittlerweile zu einer Standardlösung für die Überdachung von Atrien. Die reduzierten Ansprüche an die Konditionierung machen den Einsatz hier sinnvoll.

Das Projekt zeigt, dass Membrankonstruktionen inzwischen bei wirtschaftlicher, ästhetischer und konstruktiver Bewertung konkurrenzfähig ausgeführt werden können.

1.19.4 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Skyspan	ETFE
Deckbahn	-	-
Dämmung	-	-
Innenmembran	Skyspan	ETFE

1.20 Parkbad Velbert

1.20.1 Allgemeines

Standort:	Velbert, Deutschland
Baujahr:	2002
Bauherr:	Stadtwerke Velbert
Architekt:	Dr. Krieger Architekten und Ingenieure GmbH & Co. KG, Velbert
Ingenieur:	IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH, Radolfzell
Bauphysik:	CCD Bauphysik, Remscheid
Konfektionär:	Koch Membranen, Rimsting

Aufgrund der hohen Kosten des Betriebes eines Schwimmbades, entschloss sich die Stadt Velbert nur noch zwei ihrer drei Bäder zu bewirtschaften und rüstete das Freibad im Zuge eines Umbaus zu einem Allwetterbad um.

Das Membrantragwerk überdacht eine Fläche von ca. 700 qm und wurde zweilagig gedämmt ausgeführt. Es ist eines der wenigen Schwimmbäder, welches die erforderliche Hinterlüftung ausschließlich konvektiv bewerkstelligt. Die in Isolierglas ausgeführten Oberlichter übernehmen die Aufgabe der Ablüftung ins Freie.



Abbildung 108: Außenansicht [125]



Abbildung 109: Innenansicht [125]

1.20.2 Aufbau und Funktion

Der Dachaufbau besteht aus zwei Polyvinylchlorid (PVC) beschichteten Polyesterwebelagen (PES) und einer 240 mm dicken Polyestervliesdämmung. Der Abstand zwischen der Dämmung und der oberen Membran beträgt bis zu einem Meter, damit auch unter voller Schneelast ein noch ausreichender Zwischenraum für die konvektive Entlüftung bestehen bleibt. Die bauphysikalische Berechnung gibt an, dass die Luft mit 0,5 m/s an den Rändern einströmt und aufgrund des Kamineffekts die Dachkonstruktion an den Hochpunkten mit ca. 3 bis 5 m/s wieder verlässt.

Die Dämmung wurde in zwei Lagen auf die Innenmembran geschnürt und ist somit lagefixiert und abgedichtet. Oberhalb der Dämmung wurde eine dampfdiffusionsoffene Deckfolie mit einem S_d -Wert von nur 8 cm angebracht, welche ebenfalls mit der Verschnürung der Dämmung gegen Abheben gesichert ist. Bei allen Lagen wurde auf eine sichere Entwässerung des zeitweise anfallenden Kondenswassers geachtet. Es soll somit ausgeschlossen werden, dass es durch Feuchtestau zu Beschädigungen der Konstruktion kommen kann. Da die innere Membranlage mit einem S_d -Wert von ca. 9 m nur eine Dampfbremse darstellt, wurde die Deckfolie mit einem sehr geringen S_d -Wert ausgeführt, um dem zwangsweise hindurch diffundierenden Wasserdampf einen möglichst geringen Widerstand entgegenzusetzen.

Da die Hochpunkte keine Möglichkeit zur Be- oder Entlüftung des Innenraumes bieten, wurden unterhalb der Membran mittels flexiblen Schläuchen eine separate mechanische Entlüftung angebracht.

Um eine faltenfreie Membran zu erreichen, wurde die Konstruktion dahingehend konstruiert, dass die innere und die äußere Membran jeweils getrennt voneinander gespannt werden können [125] und [126].

1.20.3 Details

Nachfolgend ist der Schnitt durch das gesamte Gebäude und der detaillierte Anschluss am Hochpunkt dargestellt. In Abbildung 112 ist das Anschlussdetail der Traufe abgebildet. Das Gittergewebe (rot), welches für den Schutz vor Vögeln und Verunreinigungen verwendet wird, ist mittels eines eingeführten Gummibands (grün) nach innen verspannt. Es ermöglicht die notwendigen Ausgleichsbewegungen. Die innere Membran ist direkt an der Traufe angeschlagen. Die äußere Membran wird über die Fassade hinausgeführt.

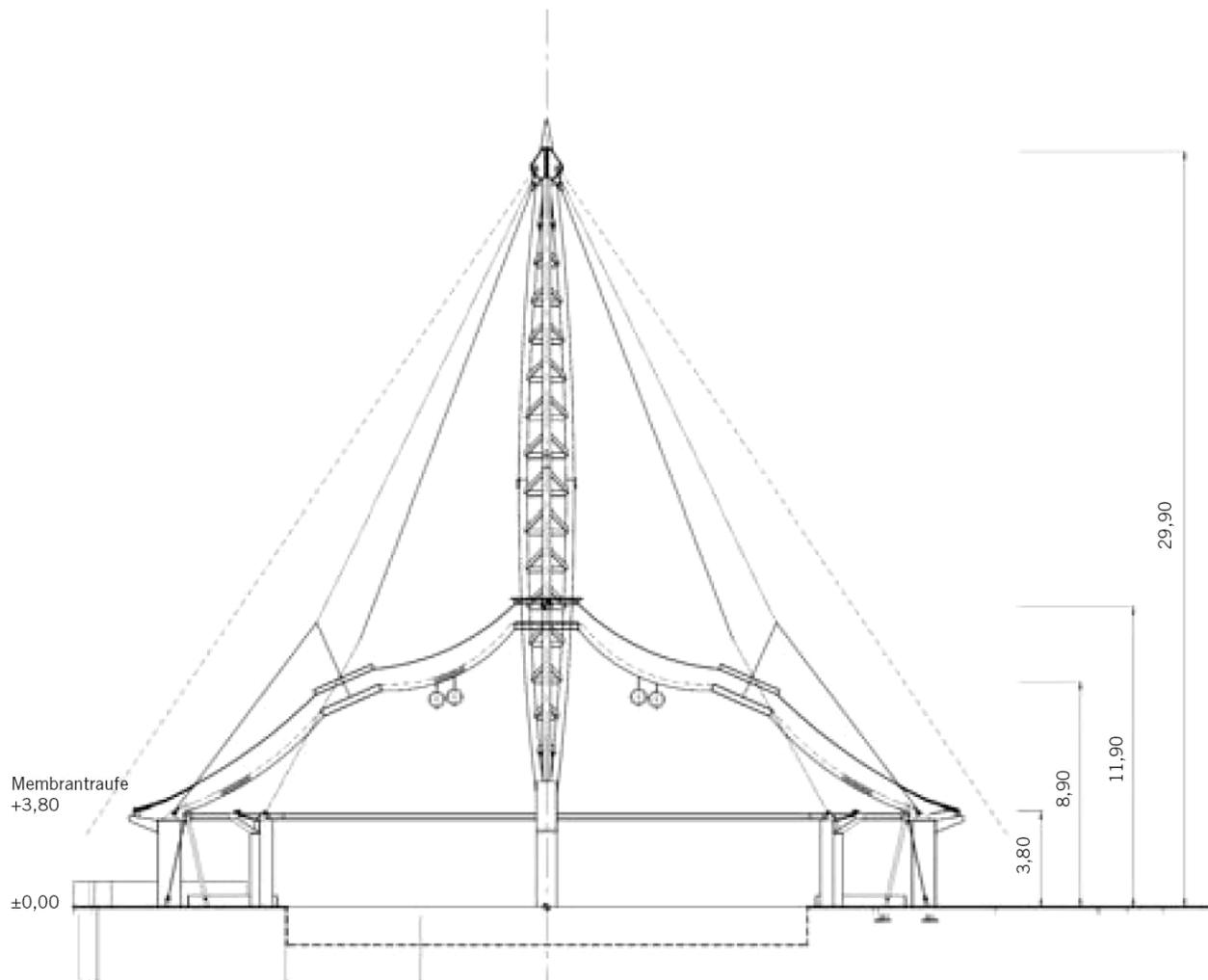


Abbildung 110: Schnitt durch Außen- und Innenmembran [125]



Abbildung 113: Hochpunkt und Membran mit Laschen zur Befestigung der Dämmung [127]



Abbildung 114: Montage der dampfdiffusionsoffenen Deckbahn [127]



Abbildung 115: Fertiggestellter Hochpunkt. Außen- und Innenansicht [127]

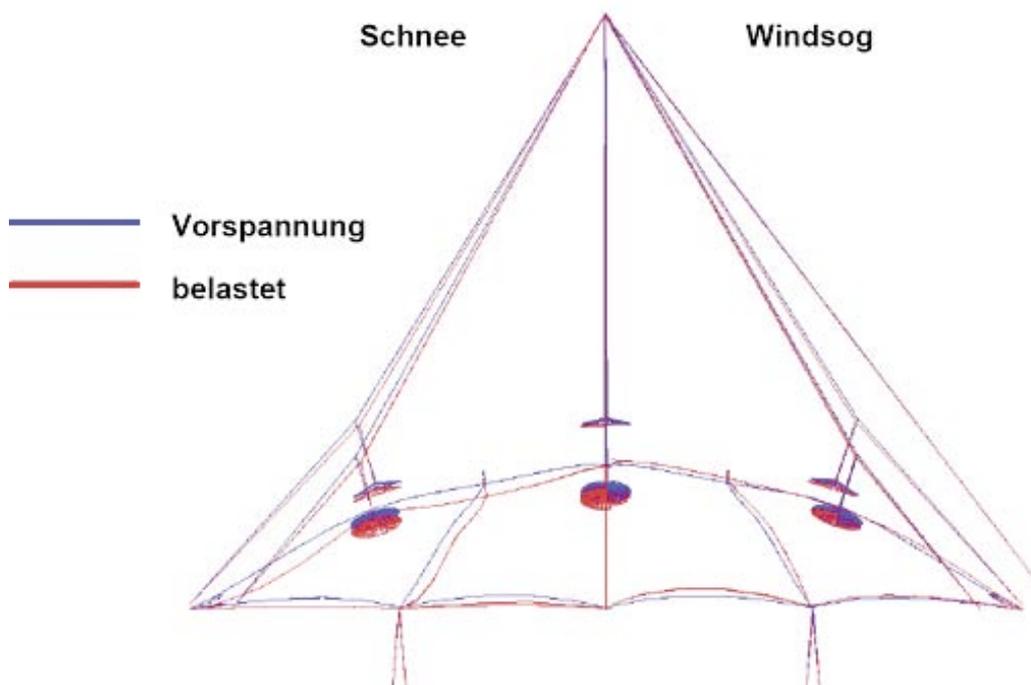


Abbildung 116: Verformung der Membran unter verschiedenen Lasten [128]

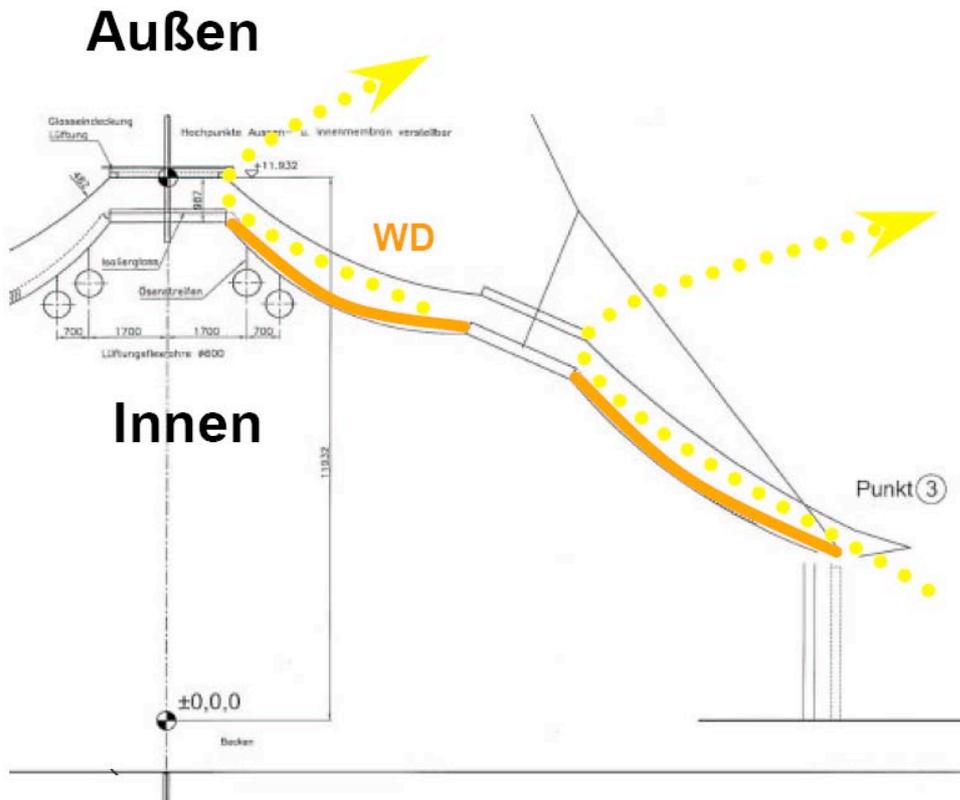


Abbildung 117: Konvektiver Luftstrom durch den Membranzwischenraum (in gelb dargestellt) [126]

1.20.4 Probleme

In den vorliegenden Unterlagen sind keine Schwierigkeiten mit dem Gebäude dokumentiert. Allerdings wurde von Seiten des Betreibers angemerkt, dass es im Innenraum zu laut sei, da zu wenig schallabsorbierende Oberflächen installiert seien [127].

1.20.5 Einschätzung / Kommentar

Die Überdachung des Schwimmbades mit einer rein konvektiven Hinterlüftung ermöglicht den kostengünstigen Betrieb des Bauwerks, da keine Zusatzkosten für den Unterhalt einer entsprechend aufwendigen Lüftungsanlage anfallen. Die bauphysikalische und konstruktiv richtige Ausführung konnte sicherlich nur durch die gute Zusammenarbeit zwischen Bauphysikern, Ingenieuren und Architekten gelingen. Grundlage ist hierbei eine sehr sorgfältige Detaillierung des Lagenaufbaus und der Anschlussdetails.

Die Deckfolie mit sehr geringem S_d -Wert ist sicher sinnvoll, da besonders bei der Nutzung als Schwimmbad mit Kondensation an der Außenmembran gerechnet werden muss und ein Abtropfen ohne Schutz der Dämmung zur Durchfeuchtung führen würde.

1.20.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Ferrari	PES/PVC Typ IV mit PVDF Précontraint 1302 Serie 8000
Deckbahn	nicht bekannt	S _d -Wert 0,08m
Dämmung	Caruso	PES Dämmvlies Isobond 2x 120 mm
Innenmembran	Ferrari	PES/PVC Typ II mit Acryl Précontraint 1002 Serie 8000

1.21 Papageno Kindertheater

1.21.1 Allgemeines

Standort:	Frankfurt
Baujahr:	2003
Architekt:	Felicitas Mossmann
Ingenieur:	Dr. Greiner, Oberaichen
Konfektionär:	covertex, Obing

Das Papageno Kindertheater ist ein kleines Bauwerk im Frankfurter Palmengarten. Dort beherbergt es ein kleines Theater mit Bühne und 199 Sitzplätze.

1.21.2 Aufbau und Funktion

Das Membrandach besteht aus einem grün eingefärbten, mit Polyvinylchlorid (PVC) beschichteten Polyestergewebe (PES) als äußere Membran, einer Hinterlüftung und einer 100 mm starken Mineralfaserdämmung, die auf das innere PVC beschichtete Polyestergewebe aufgebracht ist. Das Dach verfügt über keinerlei Transluzenz, da dies als Randbedingung für die Nutzung als Theater vorgegeben war.

Der Aufbau ist natürlich hinterlüftet. Die Luft kann dabei nur an der Berandung in den Zwischenraum einströmen. Diese ist mit einem Gitternetz vor dem Eintrag von Laub und Schmutz geschützt [129].



Abbildung 118: Außenansicht [129]



Abbildung 119: Ansicht von oben [129]

1.21.3 Details

Die Mineralfaserdämmung ist auf die untere Membranlage aufgeschnürt, wozu an den Flächennähten der inneren Membran separate Membranlappen aufgeschweißt wurden (siehe Abbildung 120). Durch die an den Lappen angebrachten Ösen wird eine Schnur gefädelt und die Dämmung mit einer Zickzack Verschnürung fixiert. Auf eine dampfoffene Deckbahn oder dampfdichtes Einschweißen der Dämmung in Kissen wurde bei diesem Bauwerk verzichtet [129].



Abbildung 120: Während der Montage der Innenmembran [129]

1.21.4 Probleme

In den vorliegenden Unterlagen sind keine Probleme beschrieben.

1.21.5 Einschätzung / Kommentar

Das Anbringen einer dampfoffenen Deckbahn auf der Dämmung wäre sicherlich zum Schutz der Dämmung vor Durchnässung durch abtropfendes Kondensat von der äußeren Membran ratsam gewesen.

1.21.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	nicht bekannt	PES/PVC
Deckbahn	-	nicht vorhanden
Dämmung	nicht bekannt	100 mm Mineralwolle
Innenmembran	nicht bekannt	PES/PVC

1.22 Allianz Arena

1.22.1 Allgemeines

Standort:	München, Deutschland
Baujahr:	2005
Architekt:	Herzog & de Meuron, Basel, Schweiz
Ingenieur:	Arup Ltd.
Bauphysik:	nicht bekannt
Konfektionär:	Covertex, Deutschland

Die Allianz Arena in München wurde 2005 als neue Fußballarena des FC Bayern München erbaut. Die 2.874 Rauten der Außenhülle bilden eine Medienfassade aus Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) Folienkissen mit einer Fläche von rund 65.000 qm.

1.22.2 Aufbau und Funktion

Im Dachgeschoss sind in rund 50 Metern Höhe 19 ETFE-Folienkissen als Hubelemente zur Belüftung ausgebildet. Befestigt sind die Kissen mittels Aluminiumprofilen. Diese klemmen den Kederrand mit einem EPDM-Gummiprofil an die Stahlunterkonstruktion. Die erforderlichen Entwässerungsrinnen zwischen den Pneus sind mit flexiblen, stranggezogenen Kunststoffprofilen aus thermoplastischem Polyolefin abgedichtet.

Das Dach kann sich bei Temperaturdehnungen der Hülle als Gesamtkörper ausdehnen. Die Bewegungen in der Fassade werden komplett in Dehnfugen abgebaut. Eine von Covertex entwickelte neuartige Detaillösung ermöglicht dabei den Verzicht auf durchgehende Dehnfugen in der Kissenhülle. Die Federbleche in den Kissenecken sind in der Lage, Bewegungen von mehreren Zentimetern in den Fassadenknoten durch Verformung aufzunehmen [130] und [134].



Abbildung 121: Außenansicht [142]

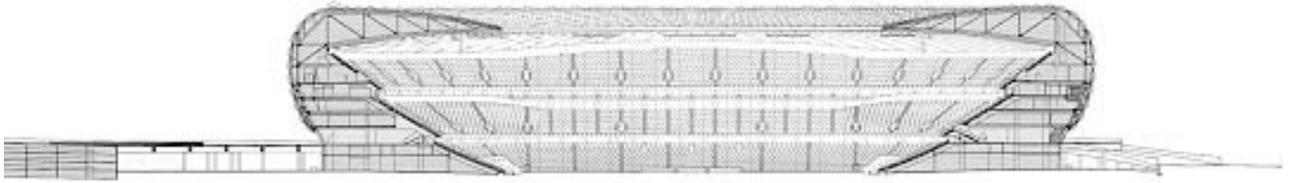


Abbildung 122: Längsschnitt [142]

1.22.3 Details

Die speziell entwickelte Pneuentwässerung schließt eine Überlastung der Dachpneus durch Wassersackbildung aus. Sie ist in der Lage, das Regenwasser im Notfall ins Gebäude abzuleiten.

Beim Projekt wurden sowohl transparente, bedruckte und weiße ETFE Folien mit einer Dicke von 0,2 Millimetern verwendet.

Zwölf Gebläseeinheiten halten den Betriebsüberdruck der Pneus konstant bei 3,0 mbar und erhöhen ihn in Abhängigkeit von Wind- und Schneelasten auf maximal 8,0 mbar [138] und [142].



Abbildung 123: Dachaufsicht auf transparente ETFE-Folienkissen [142]

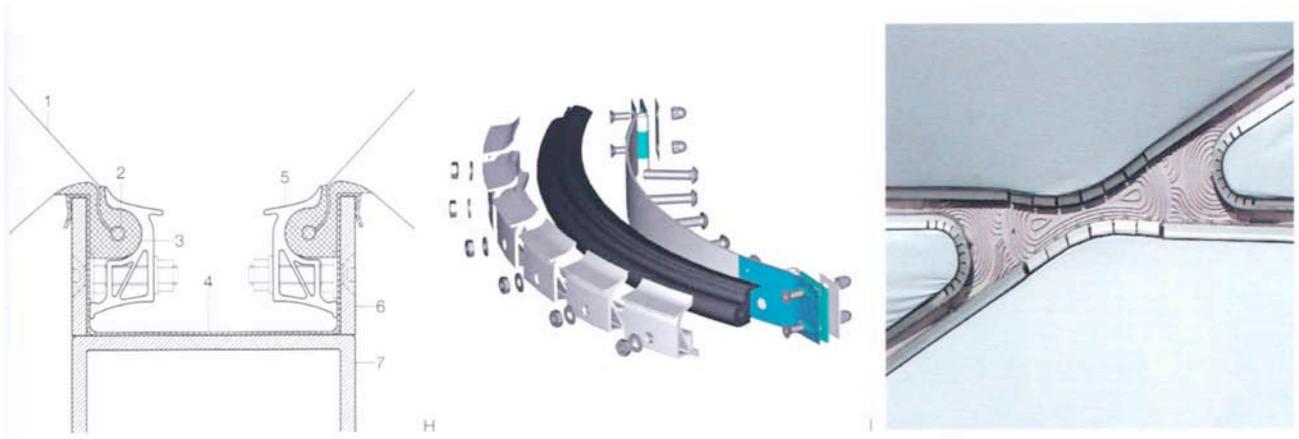


Abbildung 124: Detail der Membranbefestigung, Abdichtung und Entwässerung [142]

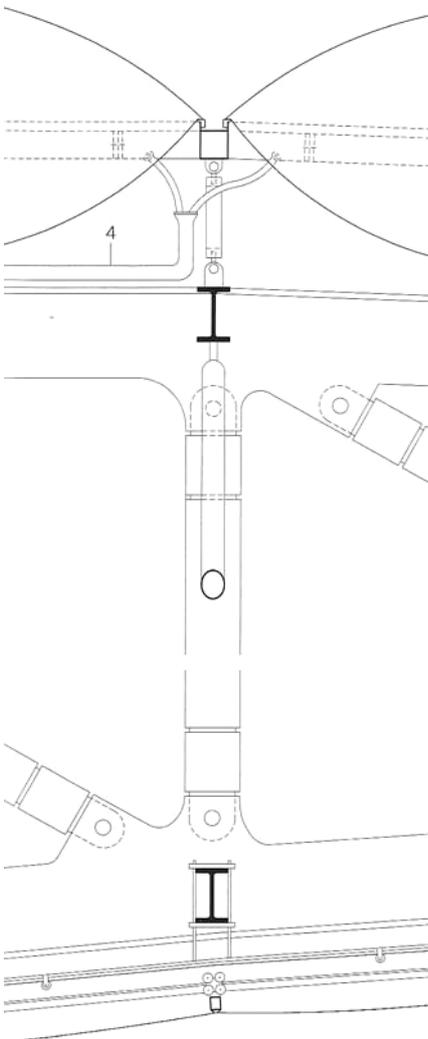


Abbildung 126: Konstruktion und Membranbefestigung [142]

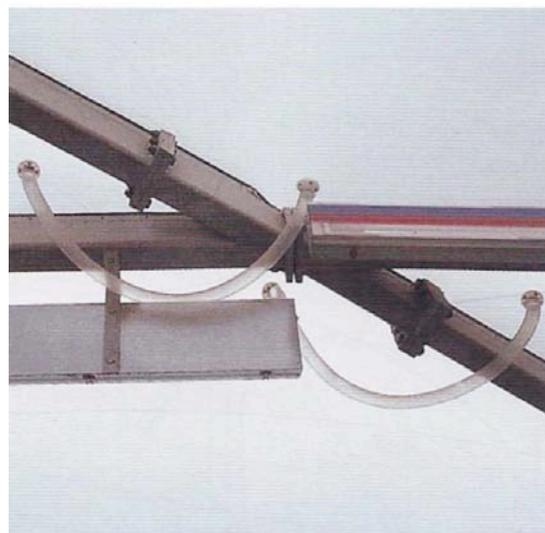


Abbildung 125: Luftzuführung [142]

1.22.4 Einschätzung / Kommentar

ETFE-Folien werden seit Jahrzehnten für Hüllbauteile der Gebäudehülle eingesetzt. Die Allianz Arena zeigt eindrucksvoll den Stand der diesbezüglichen Entwicklung.

1.22.5 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Covertex Novum Membranes GmbH	ETFE 0,2 mm
Deckbahn	-	
Dämmung	-	
Innenmembran	Covertex Novum Membranes GmbH	ETFE 0,2 mm

1.23 New Bangkok Airport

1.23.1 Allgemeines

Standort:	Bangkok, Thailand
Baujahr:	2005
Architekt:	Murphy / Jahn Architects, Chicago, USA
Ingenieur:	Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart
Energiekonzept:	Transsolar Energietechnik, Stuttgart
Akustik:	Labor Blum, Stuttgart
Konfektionär:	Hightex GmbH, Rimsting

Nach einer Planungszeit von 9 Jahren wurde im September 2005 der auf den Namen Suvarnabhumi getaufte Flughafen eröffnet. Er gehört zu den größten Flughäfen im asiatischen Raum.

Bei der Konzeption des Flughafens wurde darauf geachtet, die bauphysikalischen Parameter dahingehend zu beeinflussen, dass die Kühllasten möglichst gering ausfallen. Dies wurde notwendig, da die klimatischen Verhältnisse durch ganzjährig hohe Temperaturen (25 °C bis 35 °C) und starke Sonneneinstrahlung gekennzeichnet sind.



Abbildung 127: Außenansicht [143]

1.23.2 Aufbau und Funktion

Die röhrenartigen Concourses, die vom Terminalgebäude zu den Flugsteigen führen, bestehen aus abwechselnd aneinander gereihten Glas- und Membraneindeckungen. Der Membranaufbau besteht aus einem Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichteten Glasfasergewebe als äußerste Membran und einer inneren Membran aus solafionbeschichteter Glasfaser. Im Luftzwischenraum befindet sich ein Seilnetz mit transparenter Polycarbonatplattendeckung, welche für den notwendigen Schallschutz sorgt.

Die Außenmembran dient hauptsächlich der Lastabtragung. Die Polycarbonatplatten haben mit ca. 7,8 kg/m² ein verhältnismäßig hohes Flächengewicht, das unabdingbar ist, um das geforderte Schalldämmmaß von 28 dB (STC) durch Schallreflexion zu erreichen. Die innere Membranlage bricht den einfallenden Innenraumschall und dämpft diesen ab [144] und [145].

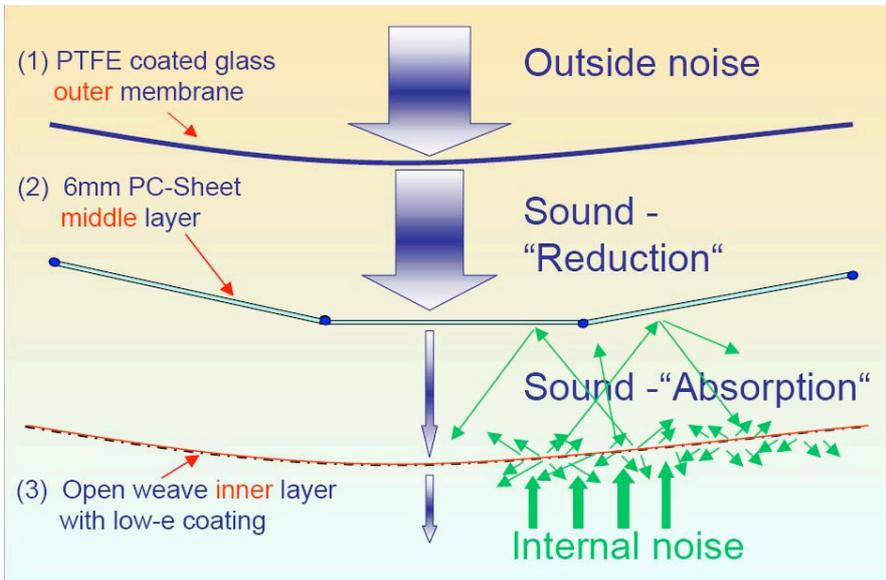


Abbildung 128: Funktionsschema des Schalldämmsystems [143]

Der hohe Schalldämmwert ist notwendig, da die Concoursen gleichzeitig als Gates verwendet werden und somit direkt der starken Lärmbelastung durch die Flugzeuge ausgesetzt sind [144].

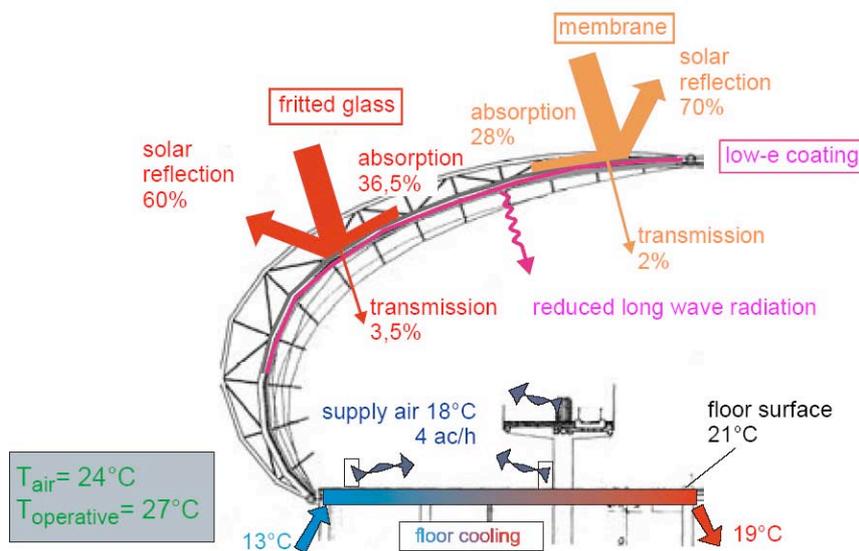


Abbildung 129: Energiekonzept der Concoursen [144]

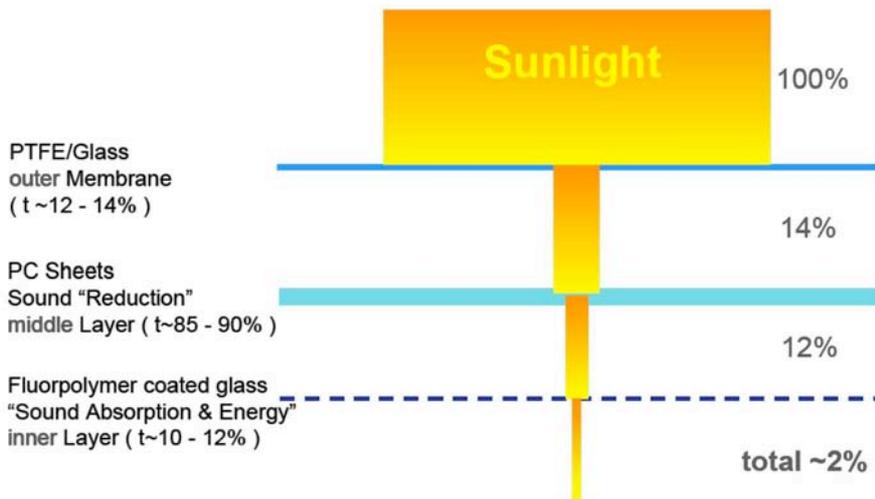


Abbildung 130: Sonnenlichttransmission durch den Schichtenaufbau [143]

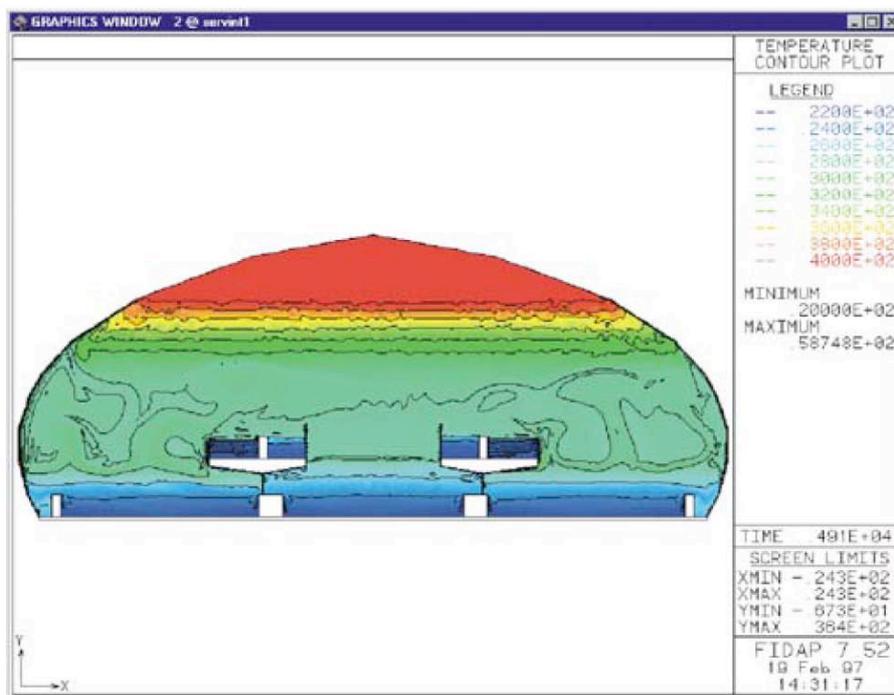


Abbildung 131: Computerberechnung zur Temperaturverteilung im Concoursequerschnitt [144]

Aus der wärmetechnischen Betrachtung wurden folgende Vorgaben an das Dachtragwerk gestellt. Die Transluzenz sollte nicht mehr als 2 % betragen, wobei die verschiedenen Schichten gemäß Abbildung 130 das Licht transmittieren.

Die in Glaseindeckung hergestellten Segmente erhielten unterschiedlich stark bedruckte Glasscheiben, um den im Zenitbereich besonders starken solaren Wärmeeintrag zu verringern, gleichzeitig aber in horizontaler Blickrichtung eine gute Sicht auf die Flugzeuge zu ermöglichen.

Um angenehme Aufenthaltsbedingungen zu gewährleisten, musste die langwellige Abstrahlung der inneren Membranlage zum Innenraum hin reduziert werden. Dazu wurde eine Low-E Beschichtung auf der Innenseite der inneren Membran aufgebracht. Damit kann sich die Luft im Giebelbereich bis auf ca. 40 bis 50 °C aufheizen ohne die Behaglichkeit im Innenraum wesentlich zu beeinflussen. Dies schlägt sich in der Reduzierung notwendigen Kühlleistung nieder [143] und [145].

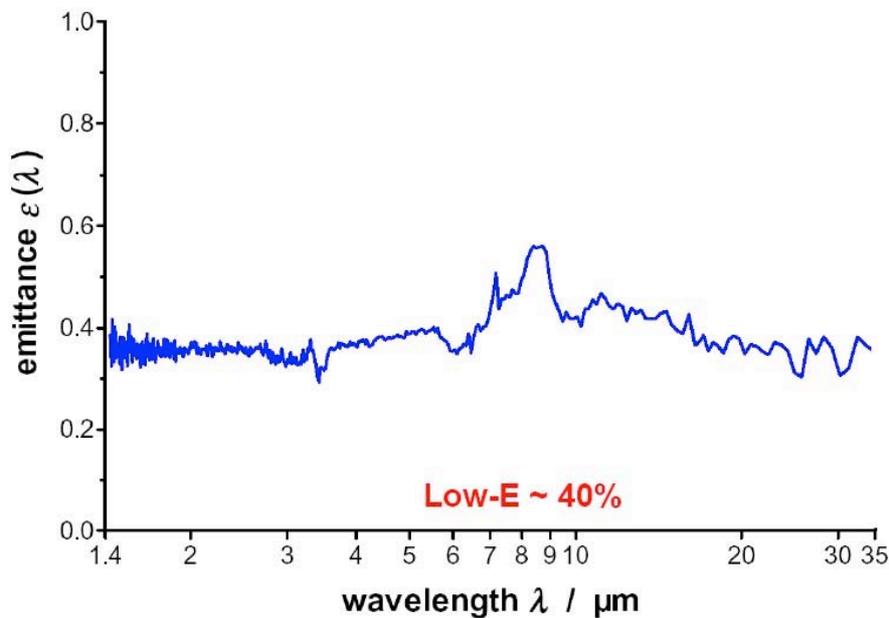


Fig. 2: Spectral emittance ε_λ of the sample in the wavelength range between 1.4 μm and 35 μm .

Abbildung 132: Emissivität der eingesetzten Innenmembran [143]

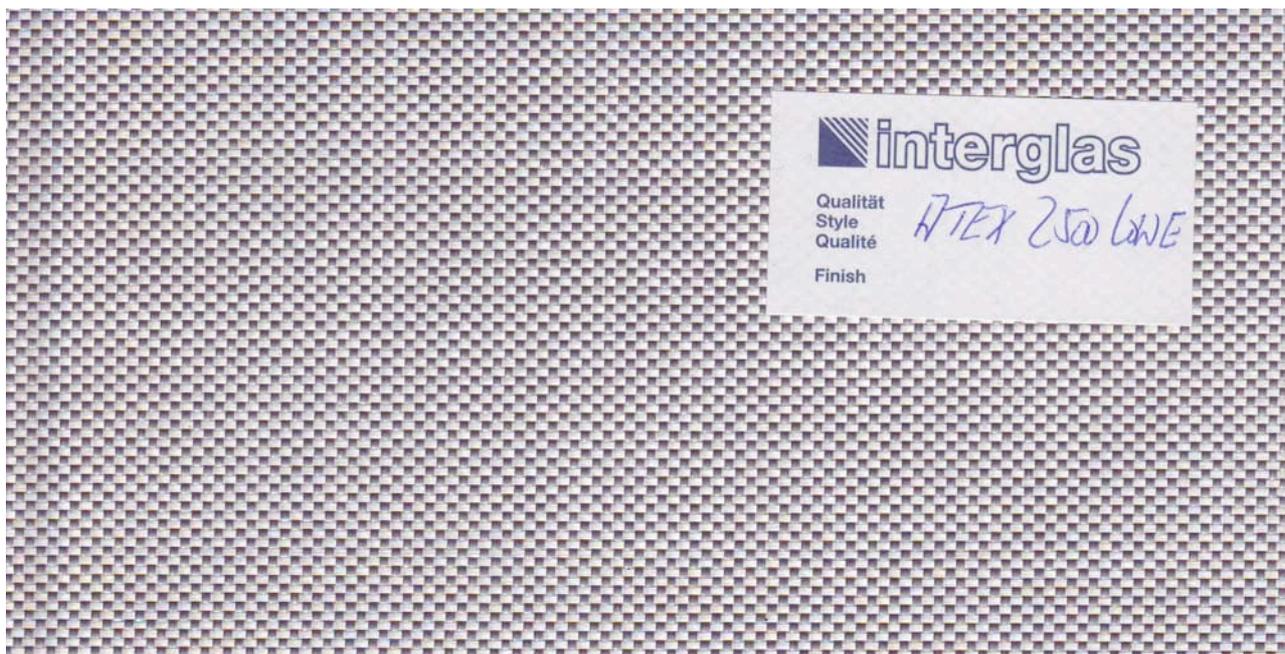


Abbildung 133: Innenmembran mit Low-E Beschichtung [143]

Sowohl durch CFD-Berechnungen wie auch durch die Verifizierung an Testaufbauten wurde sichergestellt, dass eine Durchmischung der unterschiedlichen Temperaturschichtungen im Concoursenquerschnitt nicht erfolgt und der Passagierbereich wohl konditioniert bleibt. Einen großen Anteil an der stabilen Schichtung hat dabei der mit kaltem Wasser durchströmte Fußboden [144].

1.23.3 Details

In Abbildung 134 und Abbildung 135 sind die drei Membranlagen des Aufbaus abgebildet. Eine Abführung von Kondenswasser ist nicht vorgesehen, da die Berechnung ergab, dass es nur dann zu einer Kondensation an der Innenseite der Mittellage kommen kann, wenn eine Außenlufttemperatur von 35 °C mit einer Luftfeuchtigkeit von 70 % vorliegt und die Innentemperatur am Bauteil 26 °C und eine relative Feuchte von 40 % unterschreitet. Dies ist ein mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintretender Fall, da die klimatischen Bedingungen dies kaum zulassen werden [144] und [145].

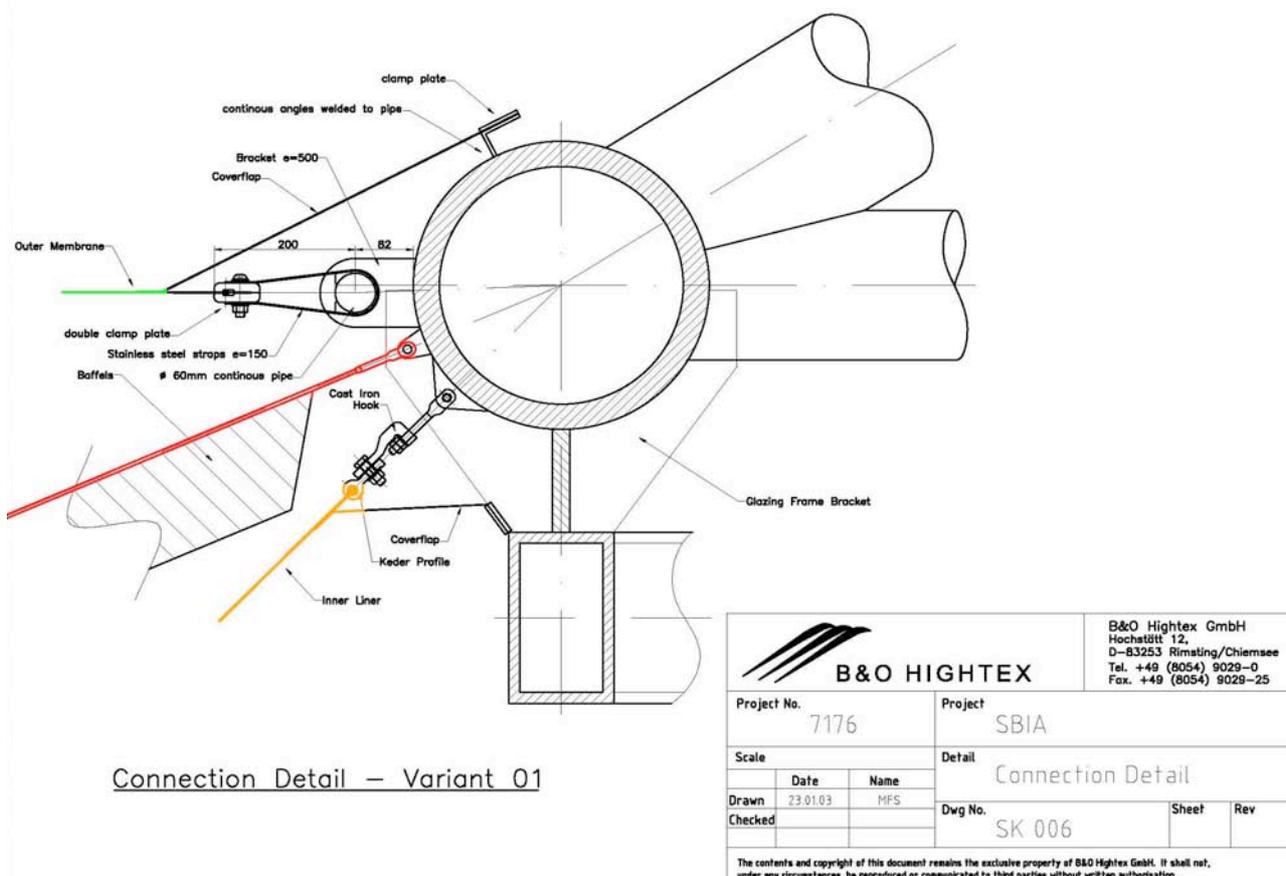


Abbildung 134: Anschlussdetail [143]

Membrane Roof with 3 Functional Layers

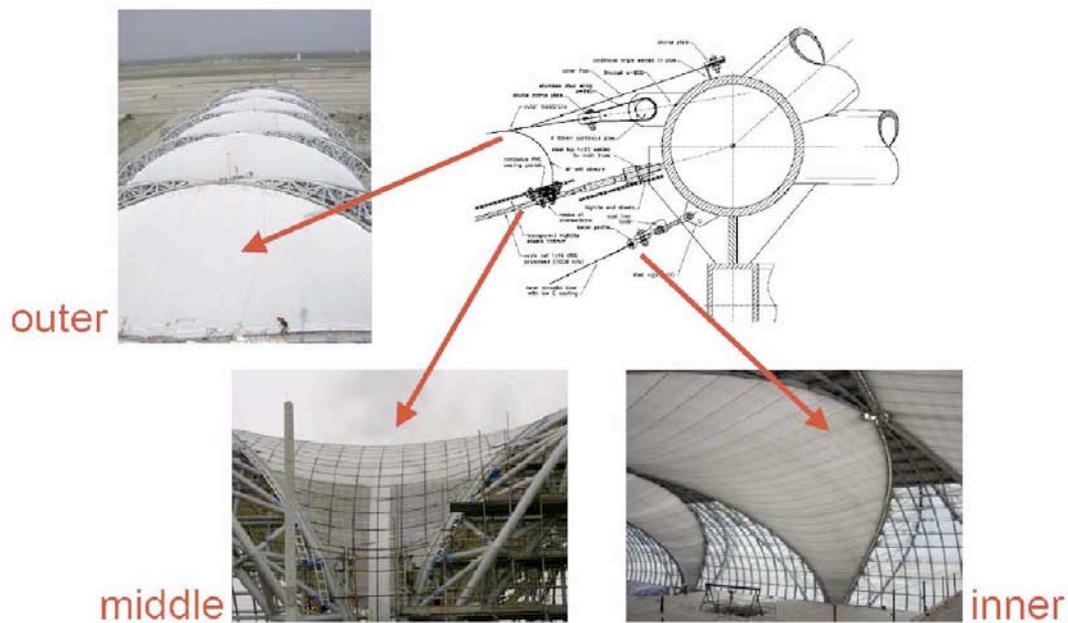


Abbildung 135: Übersicht der drei Lagen [143]



Abbildung 136: Während der Montage der Außenmembran [143]

1.23.4 Probleme

Der sich abzeichnende Farbverlauf der inneren Membran hat ein sehr ungleichmäßiges Erscheinungsbild. Ansonsten sind keine Probleme in der vorliegenden Literatur beschrieben.

1.23.5 Einschätzung / Kommentar

Bei diesem Flughafen wurde von Anfang an darauf geachtet, möglichst geringe Betriebskosten zu erzielen. Unter dieser Vorgabe wurde mit dem Einsatz innovativer Materialien ein bauphysikalisch optimiertes Konzept erarbeitet. Der Einsatz einer Low-E beschichteten Membran wurde bei diesem

Bauwerk weltweit zum ersten Mal in ein umfassendes Energiekonzept während der Planung eingearbeitet.

Bei diesem Projekt konnte durch den Einsatz einer Membran ein Innenraum geschaffen werden, der trotz guter Beleuchtung Blendungen verhindert.

1.23.6 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Chukoh Flo	Skytop FGT 800 Glas/PTFE Membran
Zwischenlage	Nicht bekannt	6 mm Polycarbonatplatten auf Seilnetz
Innenmembran	Interglas	Low-E beschichtetes Glasgewebe

1.24 Station Z

1.24.1 Allgemeines

Standort:	Sachsenhausen, Deutschland
Baujahr:	2005
Architekt:	hg Merz, Berlin, Deutschland
Ingenieur:	Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart, Deutschland
Bauphysik:	Transsolar, Stuttgart, Deutschland

Ein Teil der Neugestaltung der Gedenkstätte „Station Z“ im ehemaligen Konzentrationslager Sachsenhausen wurde als abstrakter Schutz- und Kontemplationsbau realisiert. Dieser soll in Verbindung mit der angestrebten artifiziellen Leere des Geländes jede Art von Symbolik und Pathos vermeiden. Als „Station Z“ war während des Dritten Reichs der Bereich des Lagerkrematoriums innerhalb des Konzentrationslagers Sachsenhausen bezeichnet worden. Dort hatten das KZ-Personal und die SS-Mannschaften die inhaftierten Menschen systematisch umgebracht. 1961 wurde vom SED-Regime der DDR auf Initiative ehemaliger Häftlinge des Lagers eine Gedenkstätte errichtet.

Nur wenige originale Relikte aus der NS-Lagerzeit sind erhalten geblieben. Die objekthafte Hüllform des Gebäudes vermeidet eine exakte Rekonstruktion des ursprünglichen Volumens des Lagergebäudes. Es wird lediglich durch die Grundrissgestaltung Bezug auf das im Boden vorhandene Relief des Lagers genommen. Fehlende Ausblicke nach außen verdeutlichen die ausweglose Lage am geschichtsträchtigen Ort. Eine Raumhöhe von nur 2,60 m bewirkt räumliche Dichte und beschränkt sich auf das Innere des Schutzbaus. Die Konstruktion und das Erscheinungsbild des Gebäudes nehmen sich bewusst zurück, um den Besucher bei der Auseinandersetzung mit den historischen Ereignissen nicht zu beeinflussen und ihm eine eigene Deutung zu überlassen.



Abbildung 137: Außenansicht [147]

1.24.2 Aufbau und Funktion

Das mit einer Außenhöhe von 4,10 Metern als Stahl-Fachwerksystem mit geschweißten Knotenverbindungen ausgebildete Primärtragwerk überspannt freitragend eine Fläche von 37,40 m auf 39,40 m. Die Dachebene besteht aus einem räumlichen Fachwerk in einem regelmäßigen Raster mit 1 Meter Achsmaß. Der Abstand zwischen Ober- und Untergurtebene beträgt 87 cm. Durch den Übergang von Vollquerschnitten auf Hohlprofile mit unterschiedlichen Wandstärken werden die Gurtprofile dem Beanspruchungsverlauf wirtschaftlich angepasst. Damit werden die architektonisch vorgegebenen äußeren Abmessungen beibehalten.

Raster und Querschnitte der Wände entsprechen den Abmessungen und Regeln der Dachebene. Jede Wand besteht aus 2 Fachwerkebenen, die im Abstand von 87 cm hintereinander angeordnet sind. In der untersten Ebene wird durch einen horizontalen Verband die Abtragung der Horizontallasten zu den Auflagerpunkten sichergestellt [147].

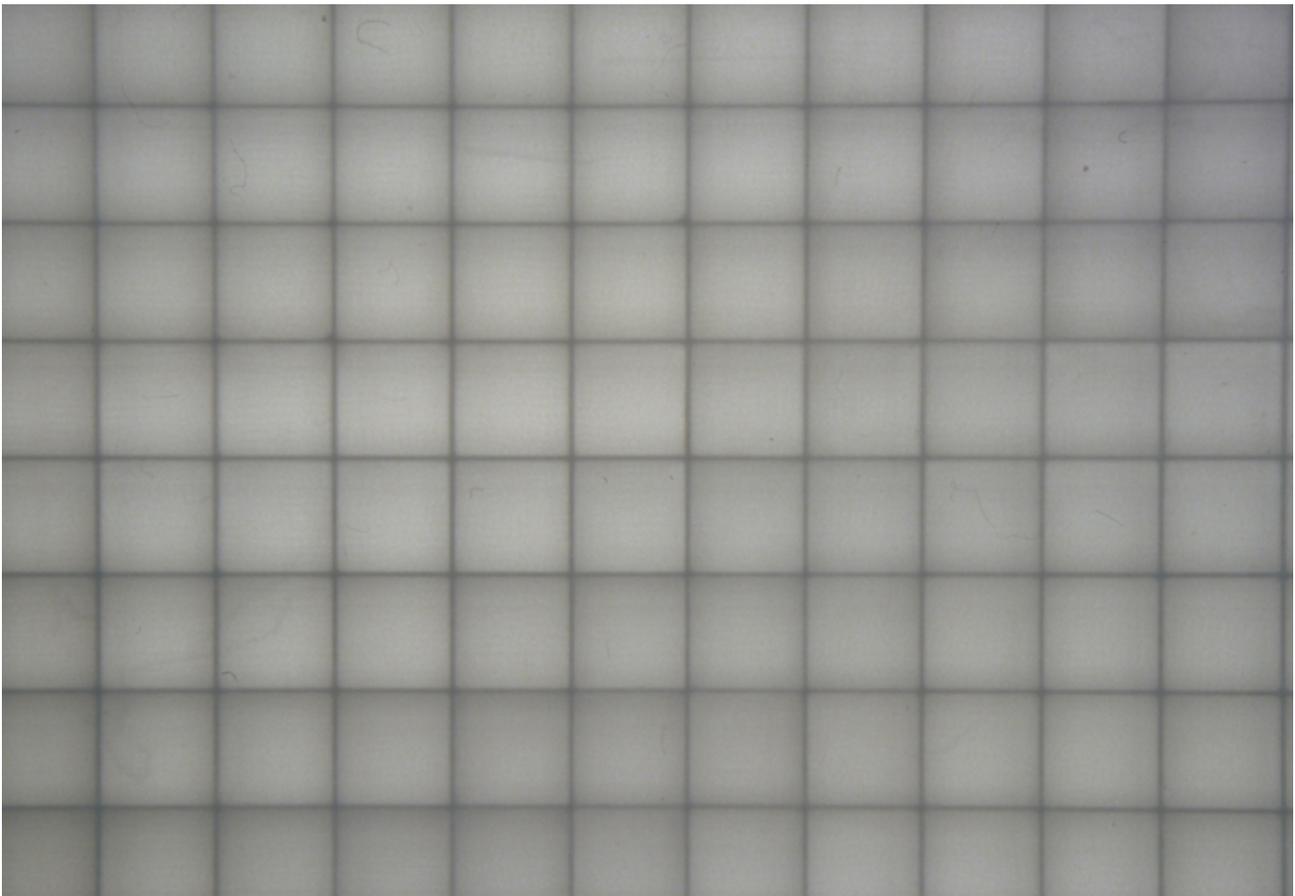


Abbildung 138: Detailansicht [147]

1.24.3 Details

Die reduzierte kubische Gesamtform sollte ausschließlich natürlich belichtet werden. Die Konstruktion musste dabei stets in den Hintergrund treten. Gelöst wurde diese Anforderung durch den Einsatz einer transluzenten Membranhülle aus einem Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichteten Glasfasergewebe. Es umschließt die Außen- und Innenseiten der Gesamtkonstruktion. Die Membran wurde zwischen den Auflagerflächen aus Gitterrost verspannt, um in planen Flächen montiert werden zu können. Der Konstruktionszwischenraum sorgt durch einen permanenten Unterdruck für eine konstant ebene Oberfläche. Dies generiert den ästhetisch erwünschten homogenen Körper, der sich lediglich durch seine Transluzenz abzeichnet [147].

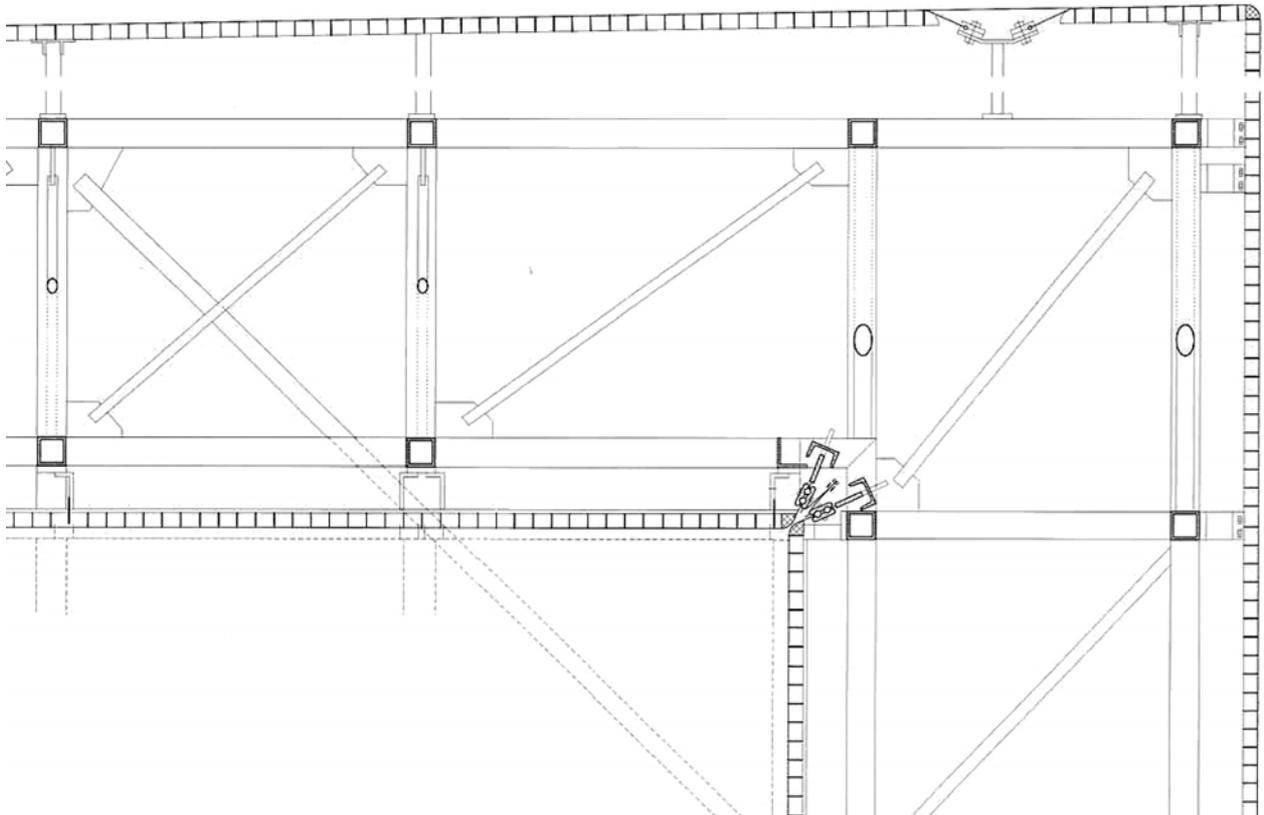


Abbildung 139: Detail zur Fügung von Tragwerk, Gitterrost und vakuumierter Membran [146]

1.24.4 Einschätzung / Kommentar

„Hier ist ein Gebäude entstanden, das seine spezielle Wirkung aus der Aufhebung des vermeintlichen Gegensatzes zwischen Architektur und Konstruktion bezieht, die Konstruktion wird integraler Bestandteil der Architektur, die in ihrer Schlichtheit und Einfachheit wiederum völlig die Konstruktion bedingt. Das Dach wird von einem Fachwerkträgerrost gebildet, der durch die von den ebenfalls als Fachwerk ausgebildeten Wänden als Rahmen eingespannt wird. Die Konstruktion von Dach und Wand wird außerdem mit Gitterrosten belegt und mit PTFE-Folie bespannt, was Dach und Wand nach innen und außen gleich erscheinen lässt. Was entsteht, ist eine überraschende, aber angemessene Lösung für ein schwieriges Thema.“, Deutscher Stahlbaupreis 2006, Jurybegründung.

1.24.5 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Sarna (Verseidag)	Sarnafil S Typ 5
Deckbahn	-	-
Dämmung	-	-
Innenmembran	Sarna (Verseidag)	Sarnafil S Typ 3

1.25 Modern Tea House

1.25.1 Allgemeines

Standort:	Frankfurt, Deutschland
Baujahr:	2007
Architekt:	Kengo Kuma, Japan
Ingenieur:	form TL, Radolfzell, Deutschland
Bauphysik:	nicht bekannt
Konfektionär:	Canobbio S.P.A. Castelnuovo Scivia

Das aufblasbare Tea House des Museum für angewandte Kunst (MAK) war eine skulpturale Installation und ein temporärer Bau für Tee-Zeremonien. Er war ein Geschenk von Japanischen Firmen an die Stadt Frankfurt und an das MAK.

1.25.2 Aufbau und Funktion

Konstruktiv besteht das Teehaus aus zwei Membranhüllen. Die 80 qm große äußere Membran umhüllt mit etwa 40 bis 100 cm Abstand die 60 qm große innere Membran. Die bei der Errichtung eingeblasene Luft und etwa vier bis fünf dünne Kunststoffseile pro qm, welche die Membranen verbinden, stellen den Abstand her. Die punktuelle Kopplung der beiden an der Grundfläche miteinander verschweißten Hüllen verleiht der Oberfläche seine charakteristische Struktur. Membrane, Seile und Luft bilden zusammen ein stabiles Tragwerk, das ohne Schleusen funktioniert und in kürzester Zeit auf- und abgebaut werden kann. Durch eine hoch beanspruchbare Befestigung des Pavillons auf der Bodenplatte hält dieser Windgeschwindigkeiten bis zu 100 km/h stand: Der Membrankörper ist mittels Hochlastreißverschlüssen, eingezogen in Kedernutprofilen, auf Trägern befestigt. Diese sind mit Klebeankern in der Bodenplatte verschraubt und verbergen zudem eine Lichtleiste mit LEDs. Die umlaufende Beleuchtung lässt den Pavillon in weiß bis weißblau leuchten und schafft unterschiedliche Lichtstimmungen im Inneren [148].



Abbildung 140: Außenansicht [148]

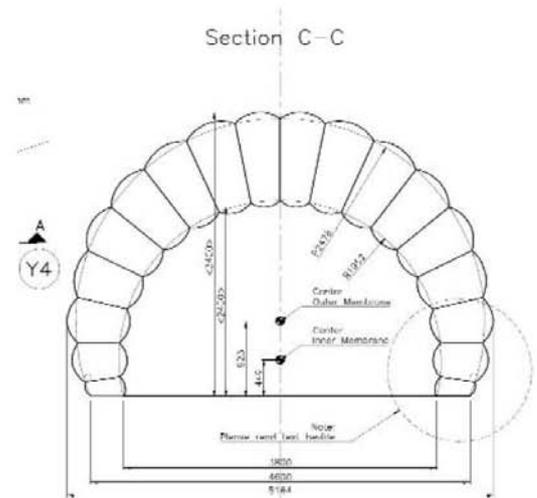
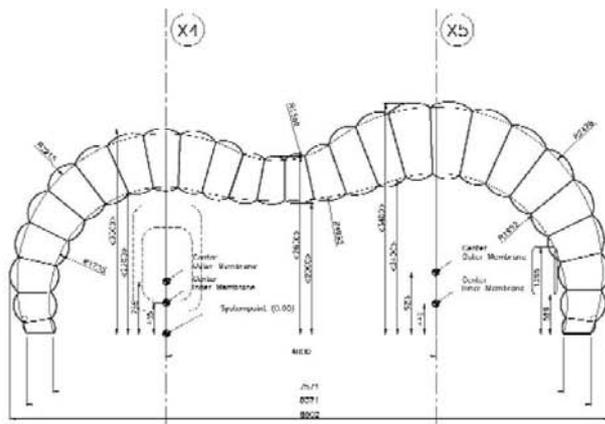


Abbildung 141: Schnittansichten [148]

1.25.3 Details

Der Pavillon besteht aus einem Gewebe aus Fluorkunststofffasern im Verbund mit Flurfolien, welches ein Flächengewicht von 630 gr/qm aufweist und mit einem Transmissionswert von 38 % sehr lichtdurchlässig ist. Die Membranen wurden aus insgesamt 116 ca. 1,2 qm großen Stücken mit 30 mm breiten Schweißnähten zusammengesetzt und über 306 Seile miteinander gekoppelt. Ein Stützluftaggregat, das 1.000 m³ gefilterte und getrocknete Luft mit bis zu 2.200 Pascal liefert, hält die Pneukonstruktion in Form.

Um das Zusammenspiel zwischen Form, Material und Struktur optimal zu gestalten, waren zahlreiche Studien mit dem Konfektionär Canobbio notwendig, der die Details testete, prüfte und verbesserte bis keine Faltenbildung an den Verbindungsknoten erfolgte [148].



Abbildung 142: Detailansicht der Membranverbindungen [148]



Abbildung 143: Luftzufuhr, Entfaltung und Abdichtung des Pneus [148]

1.25.4 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Sefar AG	Tenara Type 1 3T40
Deckbahn	-	-
Dämmung	-	-
Innenmembran	Sefar AG	Tenara Type 1 3T40

1.26 Schulungszentrum der Bergwacht Bayern

1.26.1 Allgemeines

Standort:	Bad Tölz, Deutschland
Baujahr:	2008
Architekt:	Herzog + Partner, München, Deutschland
Ingenieur:	Sailer, Stepan und Partner, München, Deutschland
Bauphysik:	nicht bekannt
Konfektionär:	Hightex Engineering GmbH

Das neue Schulungszentrum der Bergwacht Bayern in Bad Tölz bietet eine ideale Ausbildungsstätte für die Luft- und Höhenretter. 2008 wurde der Bau mit Büro- und Schulungsräumen sowie einer Trainingshalle für die realistische Übung am Hubschrauber erstellt. Die Fassade der Trainingshalle wurde mit mechanisch vorgespannten Folienrahmenmodulen verkleidet. Realitätsnahe Klimabedingungen für diese Trainingshalle waren ein wichtiges Kriterium bei der Planung. Somit wurde lediglich eine leichte Wetterhaut konstruiert, die das Innere vor Wind und Niederschlag abschirmt, den Wärme- und Schallschutz aber gewollt vernachlässigt.

1.26.2 Aufbau und Funktion

Es entstand ein rechteckiger, schlichter Baukörper, der von seinem Stahltragwerk und den eingehängten folienbespannten Rahmenmodule geprägt ist. Die Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) Folie wird in Stahlrahmen gehalten und durch Bögen nach außen vorgespannt. Die dadurch resultierenden strukturierten Gebäudeaußenseiten erzeugen Spiegelungen und Verzerrungen [150].



Abbildung 144: Außenansicht [152]

Mit der Konstruktion und der Montage der Rahmenmodule wurde die Firma Hightex beauftragt. Sie entwickelte und optimierte die Module zu einem Rahmensystem, das auf einem Z-förmigen Stahlprofil aufbaut. Der obere Steg des Profils wird als Auflager für die Folie verwendet. Im entspannten Zustand wird die Folie mittels Klemmleisten montiert. Danach werden die Bögen in das Element eingebracht und die Folie gespannt

Die Rahmen werden mittels Bolzen an die Unterkonstruktion angebracht und verschraubt. Eine Abdichtung schützt vor eindringender Feuchtigkeit. [150].



Abbildung 145: Längsansicht [153]



Abbildung 146: Schnittansicht [153]

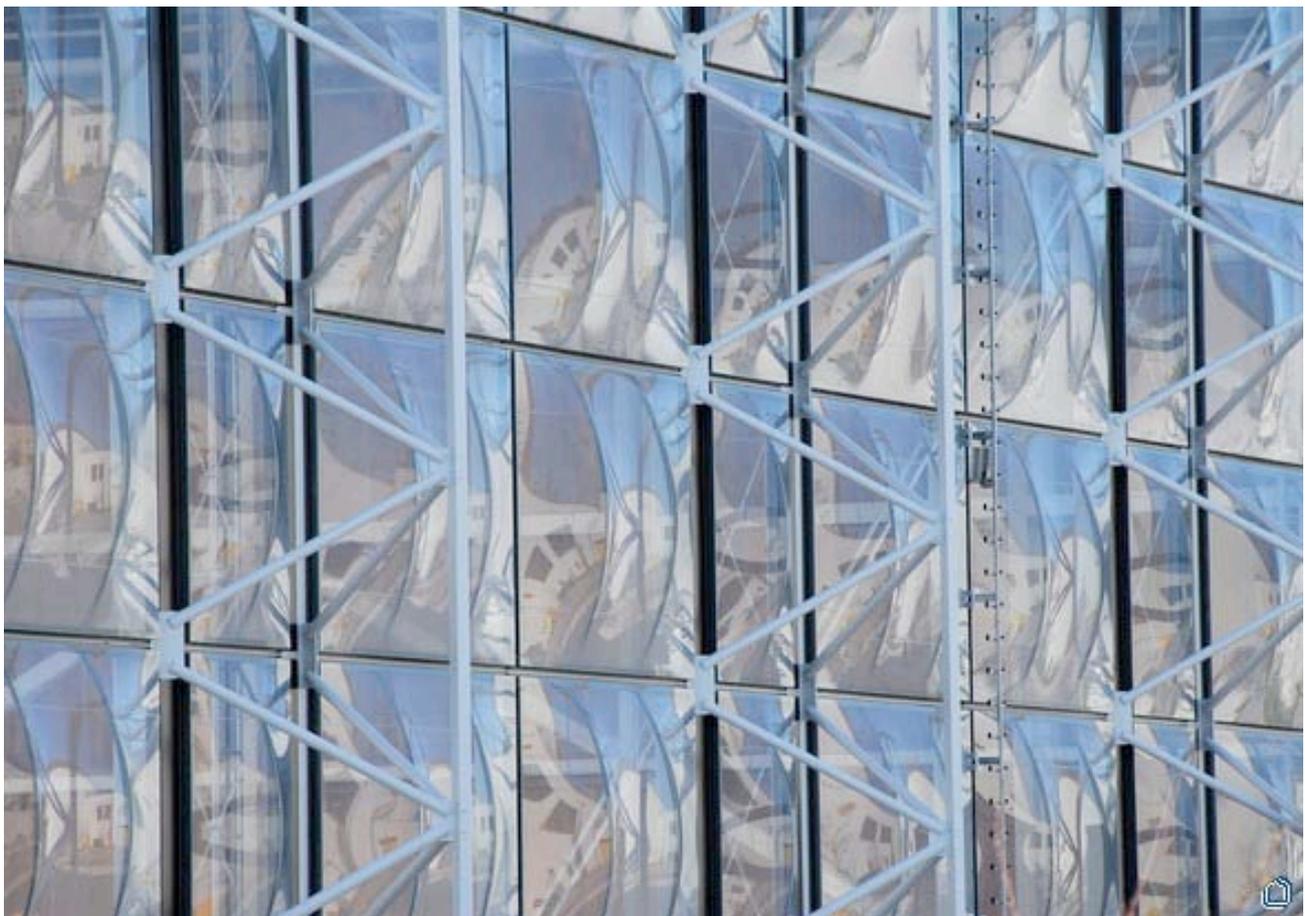


Abbildung 147: Fassadenansicht mit mechanisch vorgespannten Membranmodulen [152]

1.26.3 Probleme

„Entscheidend beim Einbau der Folie ist eine Vorspannungskontrolle: Die Folienvorspannung muss so bemessen sein, dass die äußeren Lasten abgeleitet werden und sie trotz der Relaxation des Materials nicht ausfällt, denn ein kompletter Spannungsabbau führt zu Faltenbildung mit der Folge von Flattern und mechanischen Zerstörungen. Die so optimiert eingestellte Folienspannung belastet jedoch den Rahmen und verformt diesen, was wiederum zu einem Vorspannungsabbau führt. Das hybride Tragverhalten von Folie und Rahmen, das zusätzlich noch durch die eingefügten Bögen beeinflusst wird, hat also bei der Bemessung des Rahmens Berücksichtigung zu finden. Das Modul wird daher auf den Transport- und Montagezustand hin bemessen, bei dem die Folienvorspannung allein vom Rahmen aufgenommen werden muss. Nach dem Einbau wird er hingegen durch die Anbindung an die Unterkonstruktion ertüchtigt, wobei nun die höher anzusetzenden Windkräfte in die Bemessung einfließen.“, [150].

1.26.4 Zusammenfassung der Membrandaten

Bauteil	Hersteller	Typ
Außenmembran	Hightex Engineering GmbH	ETFE
Deckbahn	-	-
Dämmung	-	-
Innenmembran	-	-

2. Literaturverzeichnis

Olympiaschwimmhalle München

- [1] Halbhuber, D. and K.G. Dr.-Ing. Walter Diwi, Olympia-Bauten München. 1971, [Essen].
- [2] Harbeke, C.H., Bauten für Olympia 1972 : München, Kiel, Augsburg. 1972, München: Harbeke.
- [3] Mertz, C. and B. Olympia, Olympische Bauten München neunzehnhundertzweiundsiebzig, Stuttgart: Krämer.
- [4] Herwig O., Featherweights, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2003
- [5] Erneuerung der abgehängten Decke in der Olympiaschwimmhalle in München; Renewal of the suspended ceiling at the olympic swimming facility in Munich; DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 47, Nr.5, 2008; Seite 508-515
- [6] Erneuerung der abgehängten Decke in der Olympiaschwimmhalle in München; Göppert, Knut; Linden, Sebastian; Stahlbau; ISSN: 0038-9145; Jg.: 76, Nr.12, 2007; Seite 880-886
- [7] Informationen von Schlaich, Bergermann Partner mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005
- [8] <http://www.olympiapark.de/index.php?id=olympia-schwimmhalle> [23.11.10]

Cuppamare

- [9] Membrankonstruktionen / [Publ. des Faches Konstruktive Gestaltung im Fachbereich 10 Bauwesen, Univ. Gesamthochschule Essen]; Linecker J., Baier B.; Köln-Braunsfeld : Mueller, 19XX; 5 Bd. im Selbstverl. ersch.
- [10] Linecker J., Patentschrift Österreichisches Patentamt Nr.: 331 462
- [11] Linecker J., Patentschrift Österreichisches Patentamt Nr.: 332 058
- [12] Linecker J., Patentschrift Österreichisches Patentamt Nr.: 351 716
- [13] Informationen von Zeltbau Zimmermann, Tengen mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005

TOM Dortmund

- [14] Membrankonstruktionen / [Publ. des Faches Konstruktive Gestaltung im Fachbereich 10 Bauwesen, Univ. Gesamthochschule Essen]; Linecker J., Baier B.; Köln-Braunsfeld : Mueller, 19XX; 5 Bd. im Selbstverl. ersch.
- [15] Informationen von formTL, Radolfzell mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005

Denver International Airport

- [16] Kazuo Ishii, Membrane Designs and Structures in the World, Shinkenchi-sha Co. Ltd., Tokyo, 1999
- [17] Robin T., Engineering a New Architecture, Yale University Press, New Haven - London, 1996
- [18] Berger H., Light Structures - Structures of Light, Birkhäuser, Basel-London-Berlin 1996
- [19] <http://www.fentressarchitects.com/> [23.11.10]
- [20] http://www.taiyokogyo.com/membrane/cgi-bin/larger/larger2.cgi?no=other_03 [23.11.10]
- [21] <http://www.colorado.edu/libraries/govpubs/dia.htm> [23.11.10]
- [22] <http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?ID=s0000717> [23.11.10]
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Denver_International_Airport [23.11.10]
- [24] http://www.birdair.com/projectgallery/denver_airport.aspx [23.11.10]
- [25] <http://www.wetter.com/v2/?SID=&LAN=DE&LOC=0226&LOCFROM=0201&search=1&city=denver> [23.11.10]

Kurklinik Masserberg

- [26] Schock H-J., Soft Shells, Birkhäuser, Basel-Berlin-Boston, 1997
- [27] Bauen mit Membranen. Tl.2: Wärmedämmung von Membranen und Folienkonstruktionen; Schmid, Gerd; architektur (Wien); ISSN: 1606-4550; Jg.: 11, Nr.4, 2004; Seite 62-66
- [28] Informationen von formTL, Radolfzell mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005
- [29] Bedienungs- und Funktionshandbuch, SHNothing GmbH
- [30] Wärmeschutznachweis, Ingenieurbüro Paul Schröder

Buddy Holly Musical Dome

- [31] Herwig O., Featherweights, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2003
- [32] Schock H-J., Soft Shells, Birkhäuser, Basel-Berlin-Boston, 1997

- [33] Informationen von formTL, Radolfzell, SH Nolting, Bauphysikgutachten mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005

Gaudi Musical Dome

- [34] Das Gaudi Musical Theater Köln; Joachim Scheer; Bauingenieur, v. 72 No. 9, 1997, S. 371-372
[35] Informationen von formTL, Radolfzell, SH Nolting, Bauphysikgutachten mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005
[36] <http://www.kraetzigundpartner.de/720-gaudi.htm> [23.11.10]
[37] <http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0002107> [23.11.10]

Odate Jukai Dome Park

- [38] Koch K-M., Bauen mit Membranen, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2004
[39] Kazuo Ishii, Membrane Designs and Structures in the World, Shinken-chikusha Co. Ltd., Tokyo, 1999
[40] Sporthalle in Odate; DETAIL; ISSN: 0011-9571; Nr.6, 1998; Seite 957 ff.
[41] Dome in Odate. Spektakulärer japanischer Sportstättenbau; sb sportstättenbau und bädieranlagen; ISSN: 0036-102X; Jg.: 37, Nr.1, 2003; Seite 12-15

Millennium Dome

- [42] Kazuo Ishii, Membrane Designs and Structures in the World, Shinken-chiku-sha Co. Ltd., Tokyo, 1999
[43] LeCuyer A., Stahl und Co., Birkhäuser, 2003
[44] Koch K-M., Bauen mit Membranen, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2004
[45] Millenniums-Drama. Der Millennium Dome in London - ein Blick hinter die Kulissen der Organisation. Bauten mit Verfallsdatum?; Moore, Rowan; AIT - Architektur, Innenarchitektur, Technischer Ausbau; ISSN: 0173-8046; Jg.: 108, Nr.3, 2000; Seite 78-85
[46] South Bank London. Stadtumbau am Südufer der Themse; South Bank London. Urban renewal on the south bank of the Thames; Polinna, Cordelia; architektur aktuell; ISSN: 0570-6602; Nr.6, 2003; Seite 74-88
[47] Die Erneuerung der Greenwich-Halbinsel; Greenwich Peninsula Regeneration; Firth, Kathryn; Topos; ISSN: 0942-752X; Nr.44, 2003; Seite 24-30
[48] Monuments to a nation. Palaces, domes, cathedrales and other attempts to entertain the British public; Monumente einer Nation. Paläste, Dome, Kathedralen und andere Versuche, das britische Publikum zu unterhalten; Domeisen, Oliver J.; Werk Bauen + Wohnen; ISSN: 0257-9332; Jg.: 87/54, Nr.9, 2000; Seite 28-42
[49] Under The Big Top; Hart, Sara; Archplus; ISSN: 0587-3452; Jg.: 32, Nr.149/150, 2000; Seite 32-33
[50] Millenium Dome in London; DETAIL; ISSN: 0011-9571; Nr. 6, 2000; Seite 1020 ff.
[51] Die Konstruktion des Millenium Dome in London; DETAIL; ISSN: 0011-9571; Nr. 6, 2000; Seite 1040 ff.
[52] Die Millennium Halle in London – ein Baustellenbericht; Brandl S.; DETAIL; ISSN: 0011-9571; Nr. 6, 1998; Seite 946-947
[53] <http://www.birdair.com/projectGallery/O2.aspx> [23.11.10]
[54] <http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?ID=s0000362> [23.11.10]
[55] <http://www.hb2.tuwien.ac.at/dbase/ddb/index.php?rr=784916> [23.11.10]
[56] http://www.greatbuildings.com/buildings/Millennium_Dome.html [23.11.10]
[57] <http://deu.archinform.net/projekte/8943.htm> [23.11.10]

Tabaluga Musical Theater, Oberhausen

- [58] Zweischalig überspannt - TheatrO in Oberhausen; Planende Institution: Rhode, Kellermann, Wawrowsky und Partner -RKW- (Architekt); Ingenieurbüro Teschner (Statiker); DBZ Deutsche BauZeitschrift; ISSN: 0011-4782; Jg.: 48, Nr.7, 2000; Seite 62-65
[59] Informationen vom Ingenieurbüro Teschner, Kosel mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005
[60] http://www.teschner.eu/_tabaluga.html [23.11.10]

Bürgerzentrum Puchheim

- [61] Koch K-M., Bauen mit Membranen, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2004
[62] Herwig O., Featherweights, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2003
[63] Hausladen G., Innovative Gebäude-, Technik- und Energiekonzepte, Oldenbourg Industrieverlag, 2001
[64] Kulturzentrum. Bürgerhaus Puchheim bei München; Cultural Centre. Civic Centre, Puchheim near Munich; Planende Institution: LAI Lanz Architekten und Ingenieure, München (Architekt); Mayr und Ludescher, München (Ingenieur); Siegele, Klaus; db deutsche bauzeitung; ISSN: 0721-1902; Jg.: 134, Sonderheft, 2000; Seite 64-67

- [65] Das gewobene Gewölbe; Planende Institution: LAI Lanz Architekten und Ingenieure, München (Architekt); Capol, Jan; Artikel aus der Zeitschrift: HOCHPARTERRE; Jg.: 13, Nr.1/2, 2000; Seite 46-47
- [66] LAI, Bürgerhaus Puchheim PUC; wa Wettbewerbe Aktuell; ISSN: 0177-9788; Jg.: 29, Nr.12, 1999

Atriumsüberdachung Schöllerbank

- [67] Textile Hüllen; Bauen mit biegeweichen Tragelementen. Materialien, Konstruktion, Montage; Michael Seidel; 2008 236 S. m. 371 meist farb. Abb., 32 Farbfotos. 27,5 cm, Gebunden; Ernst & Sohn; ISBN 978-3-433-01865-1
- [68] Jabornegg & Palfy; Dtsch.-Engl; Christian Jabornegg, Andras Palfy; Hrsg.: Christian Jabornegg, Andras Palfy; 2009 276 S. m. 180 Farbfotos. 30,5 cm, Gebunden; Language: Deutsch; Englisch; Niggli; ISBN 978-3-7212-0720-0

Tegut Verbrauchermarkt

- [69] Informationen vom Ingenieurbüro Teschner, Kosel mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005

Storek-Varia

- [70] Bauphysikalisches Gutachten, Transsolar GmbH
- [71] Sachverständigen Gutachten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, 1/2005

Cargolifter Werfthalle

- [72] Siat, CL 21, die Cargolifter Werft, München, 2001
- [73] Koch K-M., Bauen mit Membranen, Prestel, München-Berlin-London-New York, 2004
- [74] Praxisseminar 2004. Brandschutz bei Sonderbauten. 29. und 30. September 2004 in Braunschweig. Kurzreferate; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig; Hrsg.: TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz -iBMB-; 2004, 322 S.; Technische Uni Braunschweig Inst. f. Baustoffe; ISBN 978-3-89288-159-9
- [75] Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands - Konstruktion, Herstellung und Montage der neuen ETFE-Folienkissen-Eindeckung; Rudolf Witrin, Wolfgang; Stimpfle, Bernd; Blümel, Stefan; Pasternak, Hartmut; Bauingenieur; ISSN: 0005-6650; Jg.: 81, Nr.1, 2006; Seite 33-42
- [76] Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands – Entwurf; Blümel, Stefan; Stimpfle, Bernd; Rudolf Witrin, Wolfgang; Pasternak, Hartmut; Bauingenieur; ISSN: 0005-6650; Nr.10, 2005; Seite 461-469
- [77] Lagune auf märkischem Sand. Die virtuellen Tropen der ehemaligen CargoLifter-Halle; Lang, Susanne; Baumeister; ISSN: 0005-674X; Jg.: 102, Nr.3, 2005; Seite 12-13
- [78] Hinter den Kulissen des Niederlausitzer Tropenparadieses. Umnutzung der Cargolifter-Halle; Planende Institution: Drommer und Schwiedersky (Fachingenieur); Werner, Sauer und Co (Fachingenieur); Drommer, Andreas; Trömel, Eiko; Schaffner, Kathrin; Beratende Ingenieure; ISSN: 0005-8866; Jg.: 35, Nr.7/8, 2005; Seite 42-45
- [79] Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands – Entwurf; Blümel, Stefan; Stimpfle, Bernd; Rudolf Witrin, Wolfgang; Pasternak, Hartmut; Bauingenieur; ISSN: 0005-6650; Nr.10, 2005; Seite 461-469
- [80] Von der Werfthalle des CargoLifter zum Tropical Island Resort. Klima- und Energiekonzept für den weltweit größten überdachten tropischen Freizeitpark; Post, Heinrich; Bauphysik; ISSN: 0171-5445; Jg.: 26, Nr.6, 2004; Seite 380-384
- [81] Aus Luftschiffhalle wird Tropischer Regenwald - Brandschutzkonzepte für die größte Halle der Welt; Kirchner, Udo; Bauphysik; ISSN: 0171-5445; Jg.: 26, Nr.6, 2004; Seite 368-379, Abb.,Tab.,Lit.
- [82] Technische Eleganz. SIAT GmbH, München; Planende Institution: SIAT; Fröschl, Cornelia; DBZ Deutsche BauZeitschrift; ISSN: 0011-4782; Jg.: 51, Nr.6, 2003; Seite 106-111
- [83] Das Luftschiff des dritten Jahrtausends. Werfthalle für den CargoLifter; INTEC; ISSN: 1436-6541; Nr.2, 2002; Seite 18-19
- [84] Cargolifter - Werft "Aerium"; Planende Institution: SIAT Bauplanung und Ingenieurleistungen GmbH (Architekt); Arup GmbH (Statiker); TAB TECHNIK AM BAU; ISSN: 0341-2032; Jg.: 32, Nr.4, 2001; Seite 37-48
- [85] Die CargoLifter-Luftschiffhalle in Brand - Fertigung und Montage der Stahlkonstruktion; Kramer, H.; Marquardt, R.; Schilling, S.; Bauingenieur; ISSN: 0005-6650; Jg.: 76, Nr.5, 2001; Seite 211-217
- [86] Prototyp Cargo Lifter Werfthalle Brand; Hupfuf, Achim; Thiels, Verena; DAS BAUZENTRUM / BAUKULTUR; ISSN: 0006-688X; Jg.: 48, Nr.7, 2000; Seite 20-25
- [87] Planung, Konstruktion und Ausführung der Werfthalle für den CargoLifter CL 160; Hupfuf, Achim; Hautum, Martin; Thiels, Verena; Grothe, Jürgen; Bautechnik; ISSN: 0932-8351; Jg.: 77, Nr.8, 2000; Seite 594-600

- [88] Transluzente Hülle - Werfthalle für den CargoLifter; Planende Institution: SIAT Bauplanung und Ingenieurleistungen GmbH (Architekt); Arup GmbH (Statiker); Uhde, Robert; DBZ Deutsche BauZeitschrift; ISSN: 0011-4782; Jg.: 48, Nr.7, 2000; Seite 58-61
- [89] Werfthalle für Luftschiffe; Airship hangar; Planende Institution: SIAT Architektur und Technik (Architekt); DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 40, Nr.6, 2000; Seite 984-986
- [90] www.my-tropical-islands.com [23.11.10]
- [91] www.ceno-tec.de/ind05jrd.htm [23.11.10]
- [92] <http://www.bauen-mit-stahl.de/bilder/presseinfo/stahlbaupreis2002/cargolifter-300.jpg> [23.11.10]
- [93] http://www.siat.de/projekt.php?A=projekt&id_projekt=49&id_bereich=3 [23.11.10]

Eden Project

- [94] The architecture of Eden / [by Hugh Pearman and Andrew Whalley. With a foreword by Sir Nicholas Grimshaw] Pearman, Hugh ; Whalley, Andrew ; Grimshaw, Nicholas; ISBN: 1-903919-15-0
- [95] ETFE - Technologie und Entwurf; Annette LeCuyer; 2008 160 S. m. 150 Farb- u. 250 SW-Abb. 30,5 cm, Gebunden; Birkhäuser Architektur; ISBN 978-3-7643-8562-0
- [96] Botanical Garden Design: It,s about Plants and People; Botanische Gärten - es geht um Pflanzen und Menschen; Maunder, Michael; Artikel aus der Zeitschrift: Topos; ISSN: 0942-752X; Nr.62, 2008; Seite 14-19
- [97] "I have a dream. Neubau Education Resource Centre auf Gelände Eden Project (Cornwall/England); Meywald, Ulrike; Artikel aus der Zeitschrift: HK GEBÄUDETECHNIK; ISSN: 1016-5878; Jg.: 5, Nr.4, 2007; Seite 74-75
- [98] Sonnenblume, Zapfen, Pyramide. Neubau des Education Resource Centre beim Eden Project in Cornwall; Planende Institution: Nicholas Grimshaw and Partners (Planer); Artikel aus der Zeitschrift: DACHBAU-MAGAZIN; ISSN: 1618-9612; Jg.: 58, Nr.3, 2006; Seite 16-21
- [99] Visionärer Pragmatismus. Unter der dünnen Haut des "Eden Project" in Cornwall gedeihen geschlossene Biotope für die Öffentlichkeit; Planende Institution: Grimshaw and Partners (Architekt); Winkler, Olaf; Artikel aus der Zeitschrift: build DAS ARCHITEKTEN-MAGAZIN; ISSN: 1619-3512; Jg.: 4, Nr.4, 2004; Seite 44-45
- [100] Himmel auf Erden. Nicholas Grimshaw mit Anthony Hunt: Eden Project, Bodelva, 1996-2001; Korein, Simone; Artikel aus der Zeitschrift: archithese; ISSN: 1010-4089; Jg.: 32, Nr.6, 2002; Seite 62-63, Abb.
- [101] Eden Project in St Austell; Artikel aus der Zeitschrift: Detail; ISSN: 0011-9571; Jg.: 41, Nr.5, 2001; Seite 868-872
- [102] Der Steinbruch und die Kuppel. Gewächshäuser "Eden Project" in Cornwall, England; Artikel aus der Zeitschrift: Bauwelt; ISSN: 0005-6855; Jg.: 92, Nr.21, 2001; Seite 20-25
- [103] The Eden Project, Cornwall, England Nicholas Grimshaw High-tech Paradise; Artikel aus der Zeitschrift: architektur aktuell; ISSN: 0570-6602; Nr.4, 2001; Seite 162-171
- [104] Verpackung für den Garten Eden. The Eden Project, Bodelva, Cornwall; Planende Institution: Grimshaw and Partners (Architekt); Hunt Associates (Statiker); Artikel aus der Zeitschrift: architektur (Wien); ISSN: 1606-4550; Jg.: 7, Nr.5, 2001; Seite 48-53
- [105] Eden-Projekt in Cornwall; The Eden project, Cornwall; Artikel aus der Zeitschrift: DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 40, Nr.6, 2000; Seite 987-993

Festo Technologiezentrum

- [106] Die Atrien des Festo TechnologieCenters in Esslingen; Artikel aus der Zeitschrift: Beratende Ingenieure; ISSN: 0005-8866; Jg.: 32, Nr.5, 2002; Seite 23-29
- [107] Fokus: Technologiezentrum Festo - Energieregeldes pneumatisches ETFE-Folienkissendach; Gahr, Peter; Artikel aus der Zeitschrift: Baumeister; ISSN: 0005-674X; Jg.: 99, Nr.6, 2002; Seite 28-31
- [108] TechnologieCenter - Druckluft in der Gebäudetechnik; Lauster, Marcus; Artikel aus der Zeitschrift: TAB TECHNIK AM BAU; ISSN: 0341-2032; Jg.: 33, Nr.11, 2002; Seite 27-38
- [109] Technologiecenter der Festo AG. Esslingen; Artikel aus der Zeitschrift: Bauwelt; ISSN: 0005-6855; Jg.: 93, Nr.20, 2002; Seite 2-3
- [110] Gebäudekonzepte. Wechselspiel von Fassade und Dach; Planende Institution: Festo (Bauherr); Artikel aus der Zeitschrift: metallbau; ISSN: 0947-9430; Jg.: 13, Nr.6, 2002; Seite 12-14
- [111] TechnologieCenter Festo in Esslingen. Die Hand hat sechs Finger; Planende Institution: Festo AG (Bauherr); Gartner (Hersteller); Fischer (Hersteller); Foiltec (Hersteller); Artikel aus der Zeitschrift: GLAS, Architektur und Technik; Jg.: 8, Nr.3, 2002; Seite 12-18
- [112] Die Atrien des Festo TechnologieCenters in Esslingen. Leichtes Dach - filigrane Fassade; Planende Institution: Festo (Bauherr); Artikel aus der Zeitschrift: glasforum; Nr.8, 2002; Seite 2-6
- [113] Nomen est omen. Festo-Technologie-Center in Esslingen/D; Artikel aus der Zeitschrift: architektur (Wien); ISSN: 1606-4550; Jg.: 8, Nr.3, 2002; Seite 14-17
- [114] Seiner Zeit weit voraus. TechnologieCenter der Festo AG & Co. in Esslingen; Artikel aus der Zeitschrift: Intelligente Architektur / AIT Spezial; ISSN: 0949-2356; Nr.36, 2002; Seite 64-67

- [115] Die etwas andere Fassade. Das neue Festo Technologie-Center in Esslingen; Planende Institution: Festo (Bauherr); Okalux (Hersteller); Artikel aus der Zeitschrift: glaswelt; ISSN: 0017-1107; Jg.: 55, Nr.8, 2002; Seite 32-33
- [116] Mehr als Luft ... TechnologieCenter der Festo AG in Esslingen; Jaschek, Ulrich; Rittgen, Josef; Kress, Christa; Thallemer, Axel; Artikel aus der Zeitschrift: Intelligente Architektur / AIT Spezial; ISSN: 0949-2356; Nr.31, 2001; Seite 29-41
- [117] Festo AG, Publikation zum Technologie Center

Technologie und Medienzentrum Erfurt

- [118] Gebäude mit Zukunft. Technologie- und Medienzentrum in Erfurt; Pohl, Göran; Intelligente Architektur / AIT Spezial; ISSN: 0949-2356; Nr.37, 2002; Seite 22-29
- [119] Informationen von Pohl Architekten, Folien einer Präsentation

Villa Arena

- [120] Villa Arena: Der Himmel auf Erden; Artikel aus der Zeitschrift: DER ROLLADEN-JALOUSIEBAUER; ISSN: 0344-8088; Jg.: 37, Nr.4, 2002; Seite 64-65
- [121] Birnweggli. Villa Arena; Planende Institution: Benthem und Crouwel (Architekt); Virgile und Stone (Innenarchitekt); Artikel aus der Zeitschrift: Architektur & Technik; Jg.: 25, Nr.11, 2002; Seite 26-28
- [122] Villa ArenA. Möbelverkaufszentrum in Amsterdam; Planende Institution: Benthem Crouwel, Amsterdam (Architekt); Fischer, Ludger; Artikel aus der Zeitschrift: Bauwelt; ISSN: 0005-6855; Jg.: 92, Nr.38, 2001; Seite 18-23
- [123] Architektur im Zwischenraum. Restaurant Deli France in der Villa Arena, Amsterdam/NL; Planende Institution: Virgile and Stone (Architekt); Artikel aus der Zeitschrift: architektur (Wien); ISSN: 1606-4550; Jg.: 8, Nr.1, 2002; Seite 38-41
- [124] Villa Arena; DETAIL; ISSN: 0011-9571; Nr. 12, 2002; Seite 1556 ff.

Parkbad Velbert

- [125] Schmid G., Senkrechtstarter, Architektur Heft Februar 2004
- [126] Schmid G., Vortrag Bauphysik von Membranbauwerken, Konstanzer Leichtbausymposium
- [127] Koch Membranen, in Vortrag Neidhart M., Konstanzer Leichtbausymposium
- [128] Schmid G., Bauen mit Membranen 2, architektur Heft Mai 2004

Papageno Kindertheater

- [129] Informationen von covertex, Obing mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005

Allianz Arena

- [130] Herzog & de Meuron. Bd.4. 1997-2001; Dtsch.-Engl; Jacques Herzog, Pierre de Meuron, Gerhard Mack; 2008 352 S. m. 500 SW- u. 1500 Farbabb. 33,5 cm, Buchleinen; Birkhäuser Architektur; ISBN 978-3-7643-8639-9
- [131] Stadien der Fussballweltmeisterschaft 2006; Gernot Stick; 2005 110 S. m. 75 Farbabb. u. 75 Zeichn. 26 cm, Kartoniert/Broschiert; Birkhäuser Verlag; ISBN 978-3-7643-7247-7
- [132] Membranbau: Transparent, leicht, flexibel; Martens, Nadine; Artikel aus der Zeitschrift: Fassadentechnik; ISSN: 0948-1214; Jg.: 16, Nr.1, 2010; Seite 8-11
- [133] Bauen mit Membranen. Kissenkonstruktionen aus Fluorkunststoff-Folien; Bubner, Ewald; Artikel aus der Zeitschrift: DAB DEUTSCHES ARCHITEKTENBLATT, Ausgabe Baden-Württemberg; ISSN: 0012-1215; Jg.: 38, Nr.5, 2006; Seite 65-69 (4 Seiten)
- [134] Allianz Arena in München; The Allianz Arena in Munich; Planende Institution: Herzog und de Meuron (Architekt); Artikel aus der Zeitschrift: DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 45, Nr.9, 2005; Seite 950-998 (39 Seiten)
- [135] Prozession zum Stadion. Herzog & De Meuron: Allianz Arena München, 2001-2005; Adam, Hubertus; Artikel aus der Zeitschrift: archithese; ISSN: 1010-4089; Jg.: 35, Nr.4, 2005; Seite 66-71
- [136] Die Allianz Arena in München als Architektur betrachtet; Planende Institution: Herzog und de Meuron (Architekt); Düttmann, Martina; Artikel aus der Zeitschrift: Bauwelt; ISSN: 0005-6855; Jg.: 96, Nr.30, 2005; Seite 10-11,
- [137] Allianz Arena: Brandschutzkonzept für ein Fußballstadion - mit Brandversuchen zum Erfolg; Niemöller, Harald; Artikel aus der Zeitschrift: Bauphysik; ISSN: 0171-5445; Jg.: 27, Nr.1, 2005; Seite 9-14
- [138] Planung, Fertigung und Montage der Kissenhülle; Planning, Prefabrication and assembly of the pneumatic membrane skin; Planende Institution: Herzog und de Meuron (Architekt); Zettlitzer, Walter; Artikel aus der Zeitschrift: DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 45, Nr.9, 2005; Seite 966-969
- [139] Die Stadionhülle der Allianz Arena - Bauweise der ETFE-Folienpneus; The outer enclosure of the Allianz Arena - construction of the ETFE pneumatic skin; Planende Institution: Herzog und de Meuron

(Architekt); Moritz, Karsten; Artikel aus der Zeitschrift: DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 45, Nr.9, 2005; Seite 976-980

- [140] Vom Olympiastadion zur Allianz Arena; From the olympic stadium to the Allianz Arena; Planende Institution: Herzog und de Meuron (Architekt); Dürr, Alfred; Artikel aus der Zeitschrift: DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 45, Nr.9, 2005; Seite 952-953
- [141] Das Stadion - die Allianz Arena in München; Planende Institution: Herzog und de Meuron (Architekt); Hofmeister, Sandra; Busse, Caspar; Westphalen, Joseph von; Artikel aus der Zeitschrift: Baumeister; ISSN: 0005-674X; Jg.: 102, Nr.6, 2005; Seite 68-79
- [142] Allianz Arena; Planende Institution: Herzog und de Meuron (Architekt); Artikel aus der Zeitschrift: DETAIL; ISSN: 0011-9571; Jg.: 42, Nr.12, 2002; Seite 1556 ff.

New Bangkok Airport

- [143] Informationen der Firma Hightex, Rimsting mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005
- [144] Informationen der Firma Transsolar, Stuttgart mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005
- [145] Informationen der Firma Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart mittels Diplomarbeit am ILEK; Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerke; Jörg Mühlberger, 2005

Stazion Z

- [146] Atlas Kunststoff + Membranen, Knippers J.; Cremers, Jan; Stuttgart 2010
- [147] Informationen der Firma Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart, 2010

Modern Tea House

- [148] architektur FACHMAGAZIN, Ausgabe, 6/2008, ISSN: 1606-4550
- [149] Teehaus für das Museum für Angewandte Kunst Frankfurt; Planende Institution: Takenaka Europe GmbH (Bauunternehmer); W.L. Gore & Associates (Hersteller); Canobbio S.p.A. (Bauunternehmer); Artikel aus der Zeitschrift: Glas Architektur und Technik; ISSN: 0949-2720; Jg.: 13, Nr.5, 2007; Seite 5-10 (5 Seiten)

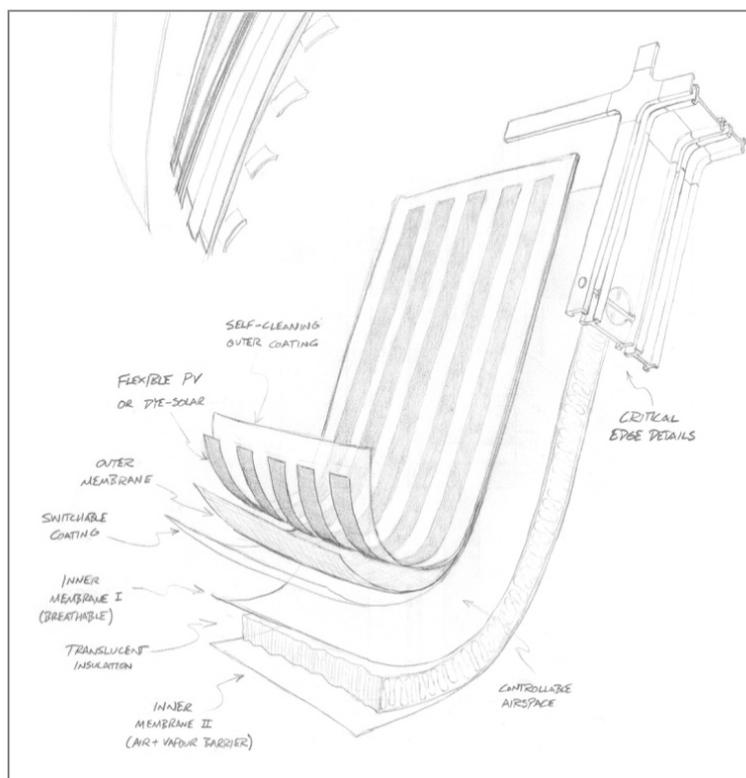
Schulungszentrum der Bergwacht Bayern

- [150] Atlas Kunststoff + Membranen, Knippers J.; Cremers, Jan; Stuttgart 2010
- [151] [Umriss] - Zeitschrift für Baukultur, Ausgabe 2/2009, ISSN 1437 – 2533
- [152] <http://www.herzog-und-partner.de> [23.11.10]
- [153] <http://www.team-bhp.de> [23.11.10]

Simulationstool für mehrlagige Aufbauten

M.A.Sc. Thorsten Klaus
 Dr.-Ing. Walter Haase
 Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

April 2011



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
 Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek
 Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Forschungsprojekt: Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen

Förderstelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn (Germany)

Förderkennzeichen: Z 6 – 10.08.18.7- 07.37 / II 2 – F20-07-043
Kostenneutral verlängert bis 30.04.2009
Ergänzungsantrag „DEUBAU“
1.11.2009 bis 31.03.2010
Kostenneutral verlängert bis 30.06.2010

Mitarbeit: M.A.Sc. Thorsten Klaus
Dr.-Ing. Walter Haase
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Bearbeitungszeitraum: Januar 2008 - Juni 2010

Bearbeitungsstelle: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Werner Sobek
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart
Telefon 0711 / 685 63599
Telefax 0711 / 685 66968

Diese Dokumentation umfasst 23 Seiten.

Stuttgart, 12.04.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
2	Programmeingaben und -ausgaben	7
3	Programmablauf	9
4	"Quick Analysis" (Schnellanalyse) Modus.....	11
5	"Full Analysis" (Komplettanalyse) Modus.....	13
5.1	Rubin-Methode:.....	13
5.2	Klaus-Rubin Methode:.....	15
6	Programmbedienung	21
7	Literaturverzeichnis	23

1. Einführung

Das hier beschriebene Programm wurde für die Analyse von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen durch mehrlagige Materialaufbauten entwickelt. Durch die Eingabe der erforderlichen Parameter werden Temperatur- und Wasserdampfpartialdruckprofile in Schichtungsrichtung eindimensional berechnet. Berücksichtigt werden sowohl leitungsbasierte, konvektive und strahlungsbedingte Wärmeflüsse als auch der wasserdampfdiffusionsbedingte Feuchtetransport. Die Wärmetransportrate durch den gesamten Aufbau wird ebenfalls bestimmt.

Das Programm bietet zwei Arten von Berechnungsmodi. Zum einen ist dies der Modus "Quick Analysis" (Schnellanalyse) und zum anderen der Modus "Full Analysis" (Komplettanalyse). Der Modus „Quick Analysis“ ist eine im klassisch bauphysikalischen Sinne querschnittsbasierte Analyse der Wärmeleitfähigkeit einzelner Materialien. Der Modus „Full Analysis“ berücksichtigt zusätzlich die Transluzenz und Transparenz der Materialien und berechnet den strahlungsbedingten Wärmefluss durch und zwischen Schichtaufbauten, sowie den leitungsbedingten und konvektiven Wärmefluss. Beide Berechnungsmodi sind im Folgenden detailliert beschrieben.

Die Benutzeroberfläche basiert auf einer Excel-Ein- und Ausgabemaske. Das Programm wurde in der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) erstellt.

Die Programmerstellung erfolgte im Rahmen des geförderten Forschungsvorhabens „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“.

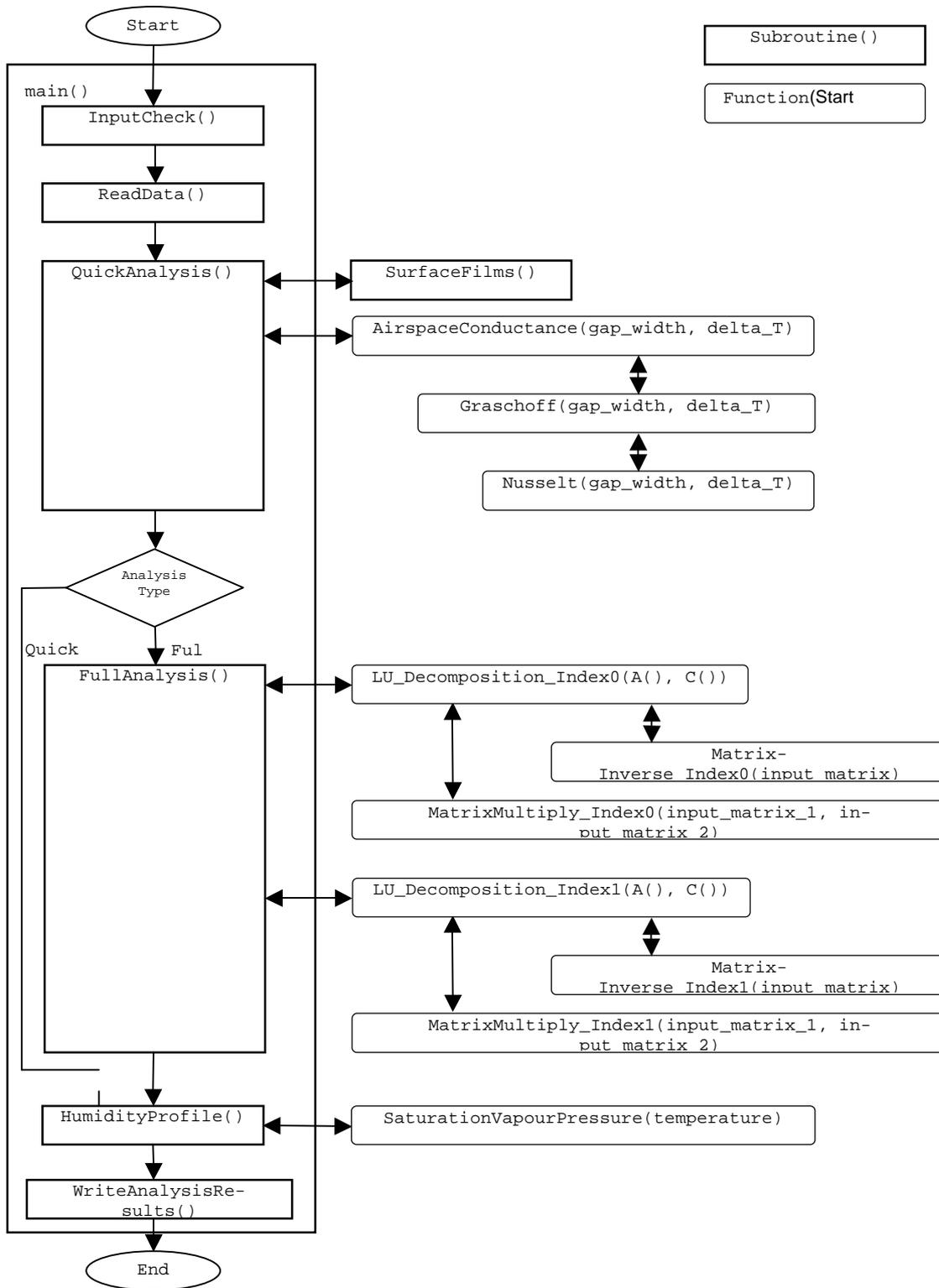
2. Programmeingaben und -ausgaben

Die erforderlichen Eingabeparameter und die berechneten Ausgaben sind in der folgenden Zusammenstellung für die Berechnungsmodi „Quick Analysis“ und „Full Analysis“ aufgelistet.

				Quick	Full	
Eingaben	Umgebungsbedingungen:	Solareinstrahlung (Normal)	W/m ²		•	
		Bewölkungsgrad	%		•	
		Emissivität Außenobjekte/Wolken				•
		Lufttemperatur außen	°C	•	•	
		Relative Feuchte außen	%	•	•	
		Windgeschwindigkeit außen	m/s	•	•	
		Lufttemperatur innen	°C	•	•	
		Relative Feuchte innen	%	•	•	
		Temperatur Innenobjekte	°C		•	
		Reflexion Innenobjekte	%		•	
		Emissivität Innenobjekte			•	
	Materialeigenschaften:	Schichtdicke	mm	•	•	
		Masse	kg/m ²			
		Spezifische Wärmekapazität	J/kg•K			
		Wärmeleitfähigkeit	W/m•K			
		Transmission SOL	%		•	
		Reflexion SOL (pro Oberfläche)	%		•	
		Transmission IR	%		•	
		Reflexion IR (pro Oberfläche)	%		•	
Emissivität IR (pro Oberfläche)				•		
Wasserdampfdurchlässigkeit	ng/Pa•s•m	•	•			
Ausgaben	Temperaturänderung in der Schichtenlage	°C	•	•		
	Oberflächentemperatur an jeder Lage	°C	•	•		
	Wasserdampfpartialdruckänderung in der Schichtenlage	hPa	•	•		
	Wasserdampfpartialdruck an jeder Schichtoberfläche	hPa	•	•		
	Sättigungsdruck an jeder Schichtoberfläche	hPa	•	•		
	Relative Feuchte an jeder Schichtoberfläche	%	•	•		
	U-Wert des Aufbaus	W/m ² •K	•	•		
	R-Wert des Aufbaus (auch in US ft ² •°F•h/Btu)	m ² •K/W	•	•		
	Strahlungsbedingte Wärmeabflüsse von jeder Materialoberfläche	W/m ² •K		•		
	Wärmestrom durch Leitungs- und Konvektionsvorgänge von jeder Materialoberfläche	W/m ² •K		•		
	Transmittierte Strahlung im VIS-Spektrum	W/m ²		•		

3. Programmablauf

Der allgemeine Programmablauf und die Zuordnung der Funktionen und Unterprogramme wird im folgenden Ablaufplan 1 dargestellt.



Ablaufplan 1

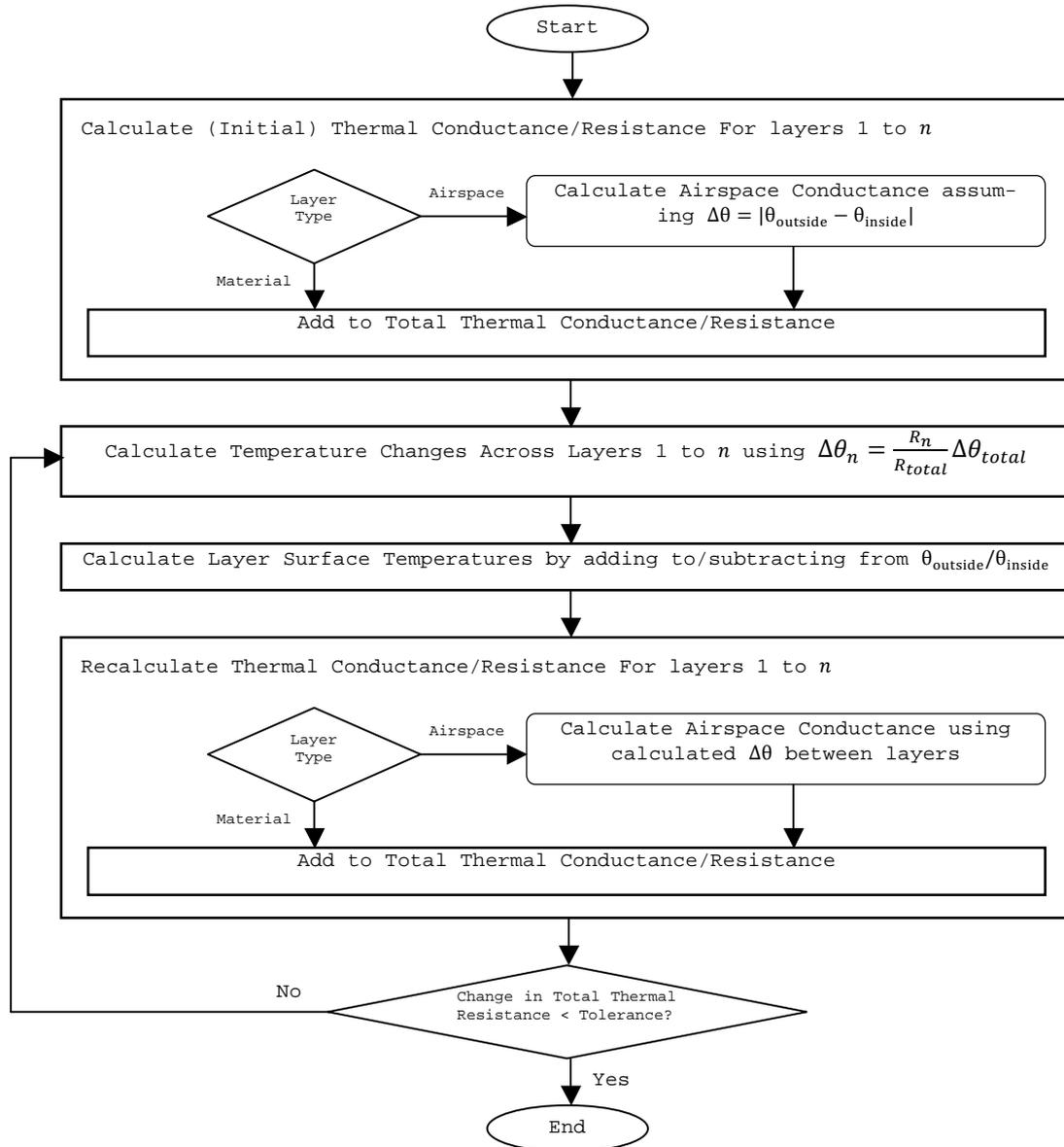
4. "Quick Analysis" (Schnellanalyse) Modus

Der Berechnungsmodus "Quick Analysis" führt eine herkömmliche bauphysikalische Berechnung für einen Wandaufbau durch, welche die Wärmeleitfähigkeiten und entsprechende Widerstände der einzelnen Materialschichten des gesamten Aufbaus berücksichtigt. Strahlungsbedingter Wärmestrom wird nicht beachtet, außer dieser ist implizit in den thermischen Widerständen der Materialien enthalten. Aus diesem Grund ist die Transparenz bzw. Transluzenz der Schichten irrelevant.

Die Temperaturänderungen $\Delta\theta_n$ durch Schicht n mit dem thermischen Widerstand R_n wird folgendermaßen berechnet:

$$\Delta\theta_n = \frac{R_n}{R_{total}} \Delta\theta_{total} \quad (1)$$

Die Wärmeleitfähigkeit der Materialaufbauten wird durch die erforderliche Eingabe in der Benutzeroberfläche definiert. Die Wärmeleitfähigkeit der inneren und äußeren Luftschichten wird aus der entsprechenden Tabelle des Handbuchs „ASHRAE Handbook, 1981“ [1] übernommen, wobei die Oberflächenemissivität sowie die Windgeschwindigkeit hierin berücksichtigt sind. Die Wärmeleitfähigkeit der Luftzwischenräume in dem Schichtaufbau wird über die *Nusselt- und Grashof-Zahlen* bestimmt. Dies ist für den Berechnungsmodus „Full Analysis“ gleich und basiert auf den Ausführungen von Michael Rubin (1982) [2]. Aufgrund der Abhängigkeit der *Grashof-Zahlen* vom Temperaturunterschied im Luftraum erfolgt die Berechnung iterativ. Hierfür ist der Ablauf im folgenden Ablaufplan 2 dargestellt:



Ablaufplan 2

$$\Delta_n = Q_{2n-1}^r + Q_{2n}^r - Q_{2n-2}^r - Q_{2n+1}^r + Q_{2n-1}^c + Q_{2n}^c - Q_{2n-2}^c - Q_{2n+1}^c + P_{2n-1} + P_{2n} - P_{2n-2} - P_{2n+1} \quad (3)$$

Zur Lösung der unbekanntenen Temperaturen erfolgt zunächst die Berechnung der „Quick Analysis“, um Anfangstemperatur θ_n^0 in den n Schichten zu bestimmen. Die exakten Temperaturen ergeben sich dann zu:

$$\theta_n = \theta_n^0 + \delta\theta_n \quad (4)$$

Für kleine θ_n^0 kann dieser Ausdruck in erster Näherung erweitert werden zu:

$$\Delta_n(\{\theta_n\}) = \Delta_n(\{\theta_n^0 + \delta\theta_n\}) = 0 \quad (5)$$

$$0 \approx \Delta_n(\{\theta_n^0\}) + \left[\frac{\partial \Delta_n}{\partial \theta_n} \right] \{\delta\theta_n\} \quad (6)$$

Durch Umformen ergibt sich die folgende Matrixgleichung für das Gleichungssystem:

$$\left[\frac{\partial \Delta_n}{\partial \theta_n} \right] \{\delta\theta_n\} = -\{\Delta_n(\theta_n^0)\} \quad (7)$$

Diese Matrixgleichung kann dann für $\{\delta\theta\}$ gelöst werden, um eine verbesserte Annahme der Temperaturverteilung zu erhalten:

$$\theta_n^1 = \theta_n^0 + \delta\theta_n^1 \quad (8)$$

Dieses Vorgehen wird solange iterativ wiederholt, bis die Lösung gegen eine vorgegebene Genauigkeit konvergiert.

Die einzelnen Schritte im Berechnungsmodus „Full Analysis“ sind auf der folgenden Seite grafisch dargestellt. Die Matrix $[M]$ enthält die Materialeigenschaften der Oberfläche (Reflexion, Transmission) der einzelnen Schichten. Der Vektor $\{S(\theta)\}$ enthält die Oberflächenemissivitäten als Funktion der Schichttemperaturen. Die genaue Darstellung der mathematischen Funktionen kann dem Beitrag von *Rubin [2]* entnommen werden.

Die Lösung der Matrix erhält man durch einen LU-Zerlegungsalgorithmus.

5.2. Klaus-Rubin-Methode

Eine Einschränkung der Rubin-Methode stellt die Annahme eines gleichmäßigen Temperaturverlaufs innerhalb der Materialschichten dar, wie in Abbildung 2 gezeigt. Diese Annahme trifft für Fensterscheiben oder Membranwerkstoffe zu, ist aber für isolierende Materialien ungeeignet.

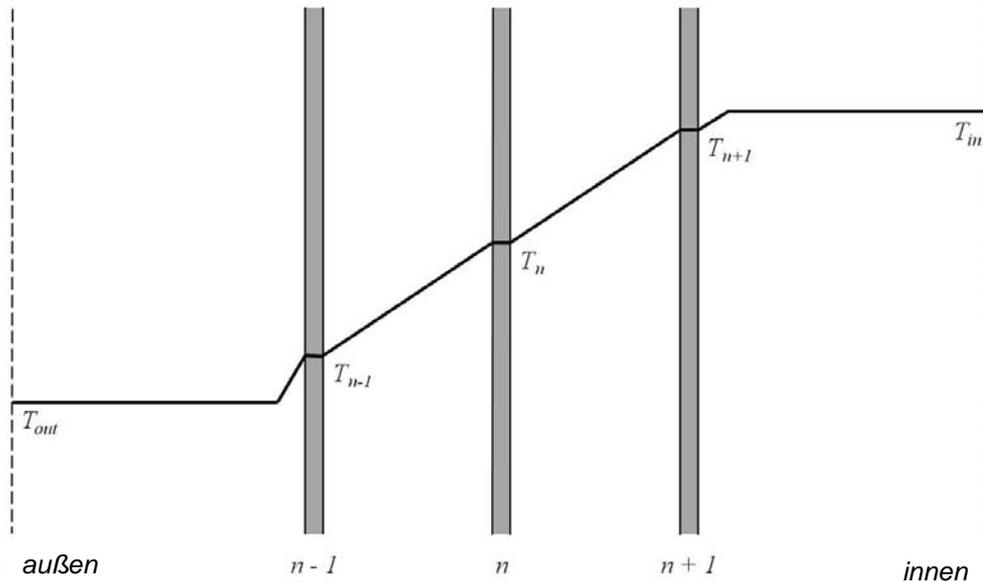
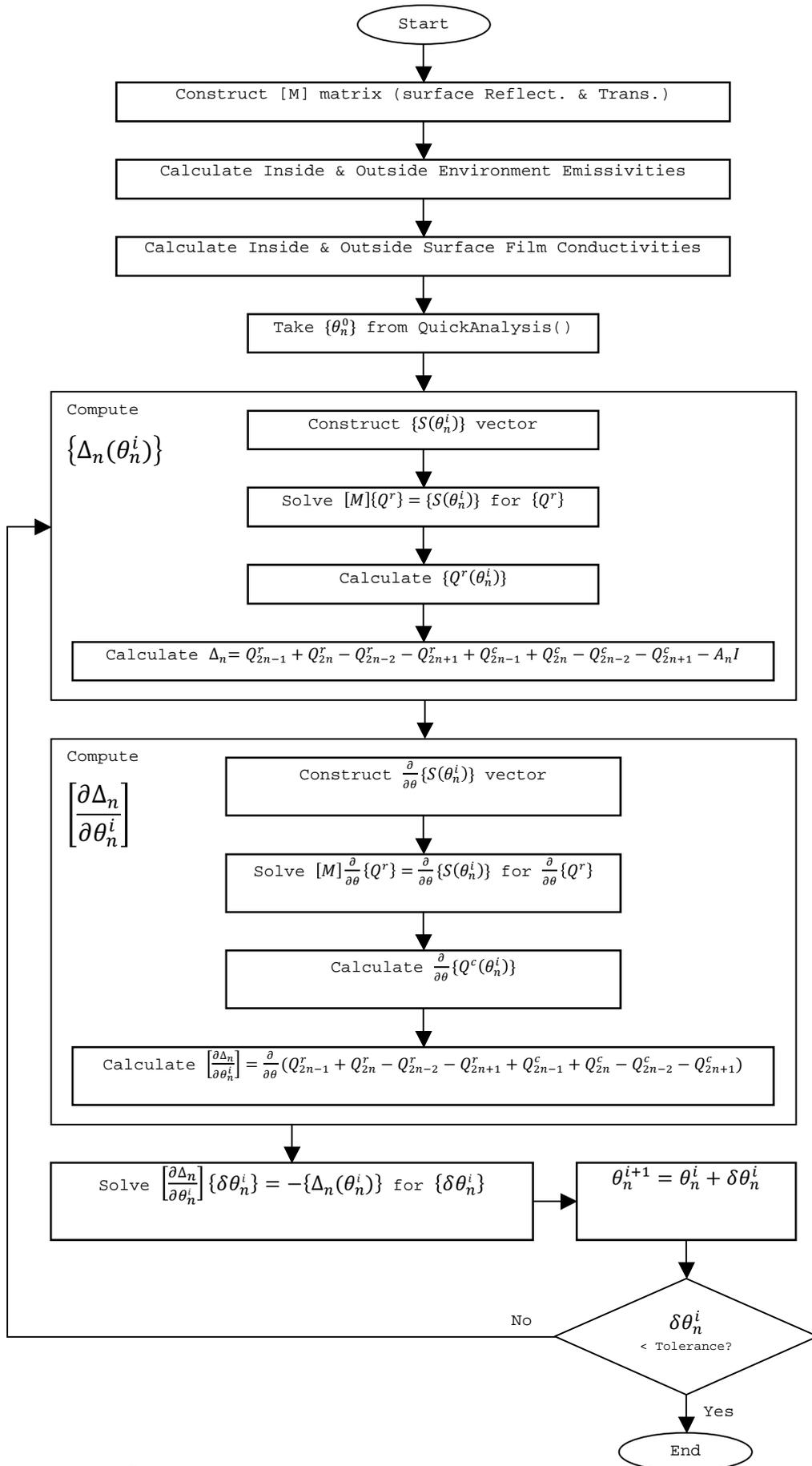


Abbildung 2

Um diesen Nachteil zu vermeiden, werden bei der Klaus-Rubin-Methode die Materiallagen des Systemaufbaus in Oberflächen und Sub-Oberflächen unterteilt. Jede Materiallage weist zwei Oberflächen auf. Die eine zeigt nach außen, die andere zeigt nach innen. Jede dieser Oberflächen wird in zwei Sub-Oberflächen unterteilt, wobei eine dieser Sub-Oberflächen nach innen und die andere nach außen zeigt. Diese Unterteilung ist in Abbildung 3 dargestellt.



Ablaufplan 3

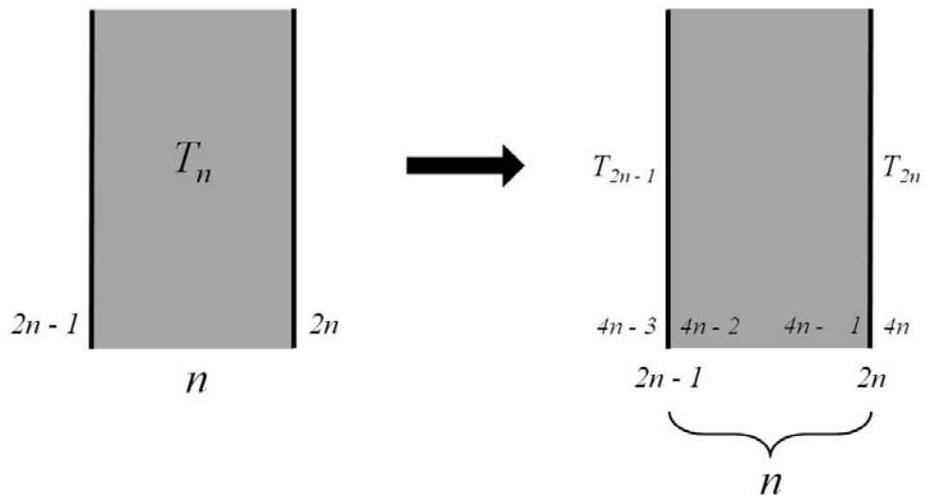


Abbildung 3

Die Oberflächen $2n - 1$ und $2n$ jeder Materialschicht n können nun unterschiedliche Temperaturen annehmen und ein Temperaturgradient entlang der Dickenrichtung des Materialquerschnittes ist abbildbar. Hierdurch wird die Berechnung von dickeren Schichten und isolierenden Materialien ermöglicht.

Gemäß dieser Unterteilung sind es nun die Temperaturen der Oberflächen (welche als infinitesimal dünn angenommen werden) für die eine gleichmäßige Temperatur angenommen wird. Durch die weitere Einführung von Sub-Oberflächen $4n - 3 \dots 4n$ erhält man eine Analogie zwischen der Rubin-Methode mit den dort verwendeten gleichen Temperaturen der beiden Oberflächen jeder Materiallage und der Klaus-Rubin-Methode mit den konstanten Oberflächentemperaturen der jeweiligen Materialoberflächen. Diese Analogie ermöglicht einen gleichen mathematischen Lösungsansatz beider Methoden, wobei eine signifikante Modifikation der Eingabeparameter notwendig ist, um die komplexere Anordnung der Oberflächen und Sub-Oberflächen zu berücksichtigen und das vorhandene Material und die Lufträume zwischen den Oberflächen einzubinden. Das modifizierte System ist in Abbildung 4 vollständig dargestellt.

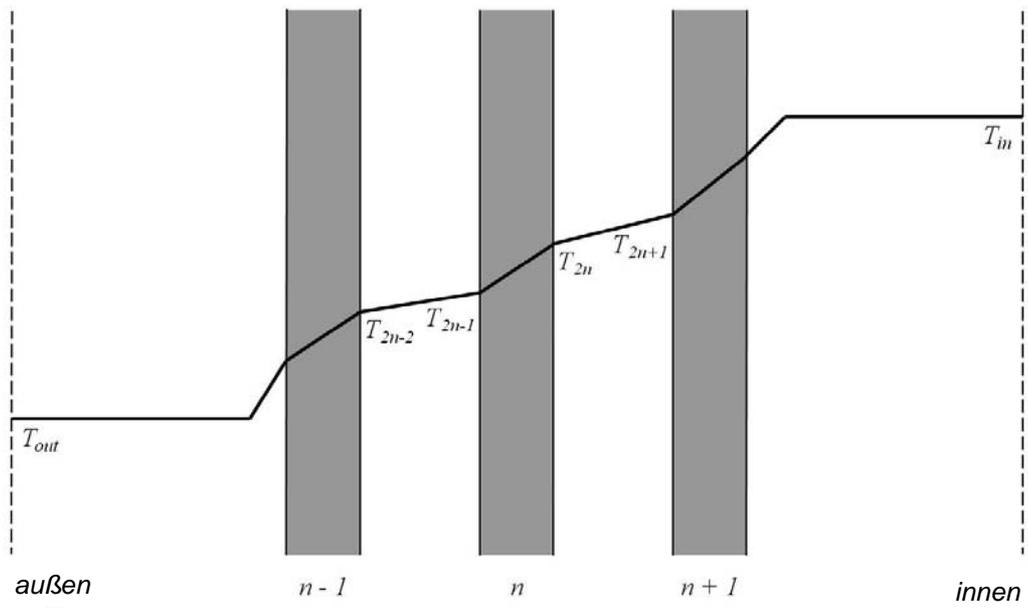


Abbildung 5

6. Programmbedienung

Die Programmoberfläche besteht aus einer Excel-Eingabemaske, die leicht zu bedienen ist:

- 1) Zunächst erfolgt die Wahl der Berechnungsmethode: „Quick Analysis“ oder „Full Analysis“, um die Analysemethode, wie auf den vorherigen Seiten beschrieben, festzulegen. Der Modus kann jederzeit geändert werden, benötigt aber unterschiedliche Eingabeparameter – zur Darstellung der erforderlichen Eingabeparameter für die ausgewählte Analyse, erfolgt ein „Klick“ auf die „Show Required Input“-Kontrollbox. Die notwendigen Eingaben werden gelb markiert.
- 2) Es folgt die Eingabe der gewünschten inneren und äußeren Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Strahlungsbedingungen) für die Analyse im „Environmental Conditions“-Eingabefeld.
- 3) In dem Eingabefeld „Multilayer Construction“, nutzt man die „drop-down“-Auswahlmenüs, um den gewünschten Schichtaufbau zu definieren. Die richtige Reihenfolge der Material- und Luftschichten ist dabei zu beachten. Schicht 1 zeigt in Richtung Außenumgebung, und Schicht n zeigt zum Innenraum. Sobald die Schichtart ausgewählt ist, werden die möglichen Eingabefelder zur Beschreibung des Materialverhaltens weiß gesetzt. Eingaben in graue Felder sind entweder für die Analyse nicht notwendig, oder werden automatisch auf Grundlage der weiteren Eingaben berechnet.
- 4) Die Materialeigenschaften und Luftschichtdicken müssen noch in die entsprechenden Felder eingegeben werden. Vertikale schwarze Linien erscheinen im Temperatur- und Feuchtigkeitsdiagramm rechts, und zeigen maßstäblich den Schichtaufbau an.
- 5) Durch Drücken des „Calculate“-Feldes erfolgt die Analyse. In den Ausgabefeldern werden vorherige Ergebnisse gelöscht und die neuen Ergebnisse eingetragen. Die Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile werden im Diagramm rechts dargestellt, und die Gesamtleistung des Systems (U-Wert, R-Wert, VIS Transmission, etc.) wird im Abschnitt „System Performance“ ausgegeben.

7. Literaturverzeichnis

- [1] *ASHRAE Handbook: 1981 Fundamentals*, Atlanta, GA: ASHRAE, 1985.
- [2] Rubin, Michael, *Calculating Heat Transfer Through Windows*, Energy Research, Vol. 6, 1982, 341-349.
- [3] Hutchin, N.B., & G.O.P. Handegord, *Building Science for a Cold Climate*, National Research Council of Canada, 1995.