Energieoptimiertes Bauen: Membrankonstruktionen zur energetischen Sanierung von Gebäuden

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2008 – 29.02.2012

J. Manara, M. Arduini-Schuster, H.-P. Ebert
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)
Am Hubland, 97074 Würzburg
Förderkennzeichen: 0327240G

A. Beck
Hochschule für Technik Stuttgart (Studiengang Bauphysik)
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
Förderkennzeichen: 0327240H

K. Puchta, T. Rampp, W. Lang
Lang Hugger Rampp GmbH Architekten (LHR)
Domagkstraße 1, 80807 München
Förderkennzeichen: 0327240K

M. Winkler, W. Jensch
Hochschule für angewandte Wissenschaften München (Fakultät 05)
Lothstraße 34, 80335 München
Förderkennzeichen: 0327240J

J. Cremers
Hightex GmbH
Theodor-Sanne-Straße 6
83233 Bernau
Förderkennzeichen: 0327240P

M. Lickes, J. Staedtler
TAG Composites & Carpets GmbH
Gladbacher Straße 465,
47805 Krefeld
Förderkennzeichen: 0327240N

H. Klöpfer, D. Stempfhuber
Roto Frank Bauelemente GmbH
Wilhelm-Frank-Straße 38,
97980 Bad Mergentheim
Förderkennzeichen: 0327240M

B. Strieder
Dörken GmbH & Co. KG
Wetterstraße 58,
58313 Herdecke
Förderkennzeichen: 0327240O

1 Entwicklung von Prinziplösungen

Als konkrete Objekte, bei denen eine Innenhofsituation vorliegt, die mit einer Membranüberdachung versehen werden könnten, wurden von den Projektpartner zwei Innenhöfe an der HfT Stuttgart und der TU München betrachtet. Solche Überdachungen können die Energieeffizienz der angrenzenden Gebäudeteile wesentlich erhöhen. Um dieses Ziel zu erreichen wurden zunächst Prinziplösungen zur möglichen Realisierung der Überdachung entwickelt.

Als konkrete Objekte, bei denen eine Innenhofsituation vorliegt, die mit einer Membranüberdachung versehen werden könnte, wurden von den Projektpartnern zwei Innenhöfe an der HfT Stuttgart und der TU München betrachtet.

Der Typ der Atriumüberdachung bietet aus konstruktiver Sicht einige große Vorteile im Vergleich zu den anderen Typen, da Membrankonstruktionen bei der Anwendung zur Überdachung größerer Flächen ihre Vorteile im Hinblick auf das geringe Eigengewicht und die daraus resultierende Wirtschaftlichkeit der Gesamtkonstruktion bei größeren Tragweiten ausspielen können. Der geringere Materialaufwand bei Tragwerk und raumabschließenden Bauteilen bringt zudem Vorteile hinsichtlich der in Herstellung und Transport der Bauteile verbrauchten Primärenergie. Dieser positive Effekt fällt bei vertikalen Konstruktionen (bei üblichen Gebäudehöhen) geringer aus.
Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Tatsache, dass bei Überkopf-Verglasungen eine aufwendigere, teurere Verglasung aus Verbundsicherheitsglas verwendet werden muss. Zudem ergibt sich bei relativ geringem baulichen Aufwand durch die zusätzliche Membran über dem Innenhof eine deutliche Verringerung der Gebäudeaußenfläche, was einen weiteren Vorteil durch Reduzierung der Wärmeverluste darstellt.

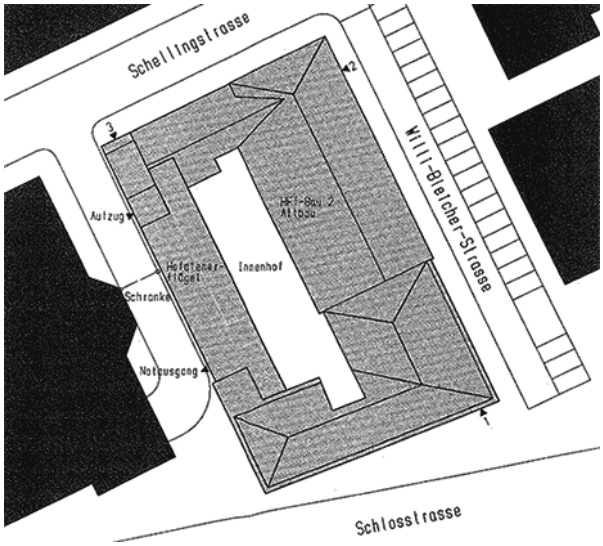


Abbildung 1: Lageplan der Gebäude um den Innenhof der HfT Stuttgart.

Innenhof Hochschule für Technik Stuttgart

Der Stuttgarter Innenhof stellt baukonstruktiv folgende Anforderungen: Der allseitig umschlossene Innenhof ist zweigeschossig unterkellert, was eine dort notwendige Gründung von Stützen sehr aufwändig machen würde. Zudem entsteht durch den polygonalen Grundriss des Innenhofs und die wechselnden Traufhöhen und Fassadentypen der angrenzenden Gebäude eine anspruchsvolle Situation (siehe Abbildung 3), was den Anschluss an den Bestand betrifft.

Abbildung 2: Blick von Westen in den Innenhof der HfT Stuttgart.

Abbildung 3: Innenhof der HfT Stuttgart.

In einem ersten Schritt wurden mehrere denkbare Typen untersucht:
Variante A (siehe Abbildung 4) sieht eine Überdachung vor, die sich an der höchsten Traufhöhe des Innenhofs orientiert - eine vergleichsweise große, teuere Maßnahme. Interessant hierbei war der Gedanke, dass das Tragwerk eventuell auf dem Bestand auflasten könnte, wodurch eine Gründung über zwei Untergeschosse hinweg (und damit deren Umbau) entfallen könnte.

Abbildung 4: Variante A.

Variante B (siehe Abbildung 5) stellt die Lösung mit dem geringst möglichen Materialeinsatz dar. Der Rand der Membrankonstruktion müsste in diesem Fall aber an die umliegenden Fassaden anschließen, was vor allem im Bereich der vorgehängten Glasfassade der Bibliothek architektonisch heikel wäre. Zudem müssten die Lasten wohl zumindest teilweise über Stützen im Innenhofbereich abgeleitet werden, was wiederum eine Gründung durch die zwei Untergeschosse notwendig machen würde.

Abbildung 5: Variante B.

Die Weiterentwicklung der beiden Varianten führte dann zu Variante C (siehe Abbildung 6). Die bauliche Maßnahme wäre etwas größer als bei Var. B, jedoch wesentlich kleiner als bei Var. C. Das Membrandach würde nicht an die Glasfassade der Bibliothek anschließen, sondern knapp über die Oberkante ihrer Attika gehen, was einen architektonisch sauberen Anschluss ans Gebäude ermöglicht. Im Osten bedingt die Höhe des Membrandachs einen Anschluss an das Dach (beim etwas niedrigeren Gebäude im Nordosten) und an die Wand des höheren Gebäudeteils im Südosten.

Abbildung 6: Variante C.

Eine Ablastung über Stützen im Innenhofbereich könnte eventuell vermieden werden.

Um eine Aussage über die Machbarkeit einer Ablastung über den Bestand zu treffen, müsste dieser jedoch baustatisch detailliert untersucht werden. Je nach Aufwand und Durchführbarkeit der eventuell notwendigen Zusatzmaßnahmen zur statischen Ertüchtigung des Bestandes könnte man abwägen, ob die beschriebene Variante C konstruktiv lösbar und auch wirtschaftlich sinnvoll wäre.

Ein auf Variante C basierender Vorentwurf sieht vor, standardisierte Stahlträger, die quer über die kurze Hofseite reichen, einzusetzen. Der Achsabstand beträgt in etwa 4,80 m. ETFE Pneus könnten dann, ähnlich wie die Hauptträger, im Ganzen über den Hof spannen. Eine Unterspannung der Hauptträger ist nötig, da die Spannweiten von etwa 17 m in Querrichtung einen einfachen Stahlträger sehr ungünstig erscheinen lassen. Ebenfalls denkbar wäre ein Fachwerkträger oder ein aufgelöster Träger, wobei die unterspannte Lösung für diese Situation am optisch unaufdringlichsten bzw. am wirtschaftlichsten erscheint.

Das Rendering (Abbildung 7) zeigt den Innenhof mit dem angedachten Membrandach.

Abbildung 7: CGI Innenhof HfT mit Pneudach (Software: ArchiCAD, 3dsMax, V-Ray).

Kurzer Vergleich Stuttgart – München

Zusammenfassend lasst sich sagen, dass aufgrund der vergleichsweise größeren Grundflache die Investitionskosten zur Überdachung des Innenhofs der TU München höher ausfallen dürften, als für die Überdachung des Innenhofs der HFT Stuttgart.
In Stuttgart lässt die Kubatur des Hofes relativ hohe thermische Gewinne bei einer im Verhältnis zum Raumvolumen eher kleinen Membranfläche erwarten. Eine Überdachung könnte, mit entsprechend eingestellter Verschattung, Überhitzungsproblemen in der Bibliothek entgegenwirken.
Im Zusammenhang mit der Überdachung des Innenhofs der TUM bietet sich ein größeres Sanierungspotenzial, das neben den Wandflächen der umgebenden Gebäudeteile auch die Dachfläche der Landmaschinenhalle einschließt. Zudem entstehen hierbei in weitaus größerem Umfang zusätzliche Nutzflächen im Bereich des Innenhofs und der Dachfläche der Landmaschinenhalle.
Ein Problem stellt die geschlossene Situation in Stuttgart dar: Der allseitig gefangene Innenhof macht bauliche Maßnahmen dort sehr aufwändig; größeres Baugerät müsste über die Dächer in den Hof ein- und ausgehoben werden. Notwendige Umbauten wie neue Fundamente im Bereich des Innenhofs gestalten sich also aller Voraussicht nach schwierig.

Innenhof Technische Universität München

Der allseitig umschlossene sogenannte Eiselehof der Technischen Universität München wird zweiseitig von einem Flügelbau (im folgenden Bestelmeyer Bau genannt) umschlossen, dessen denkmalgeschütze Fassaden nach Süden und Westen zeigen. Die Nordfassade wurde vor kurzem mit einer Aussendämmung versehen. Die beiden zugehörigen Gebäudeteile sind Teil des Hauptbaus (im folgenden Vorhoelzer Bau genannt) und des Flügelbaus. Die Ostfassade bildet ein wesentlich niedrigerer Bau, die sogenannte ehemalige Landmaschinenhalle.
Der Innenhof hat eine Grundfläche von ca. 27 m x 33,5 m bei einer Höhe (Traufe Bestelmeyer Bau) von etwa 18 m. Das Hof ist also wesentlich breiter als der Innenhof in Stuttgart. Das umschlossene Volumen wäre mehr als doppelt so groß.

Abbildung 8: Blick von außerhalb (Westen) auf die Fassaden des Innenhofs.

In den Innenhof führt, neben den zwei Eingängen zu anliegenden Gebäuden, auch eine kleine Durchfahrt. Der Innenhof ist eingeschossig unterkellert, im Untergeschoss befindet sich das sogenannte "Technische Zentrum" der Fakultät für Architektur, ein großer Arbeitsraum mit angrenzenden Werkstätten.

Abbildung 9: Innenhof der Technischen Universität München, Varianten.

Betrachtet wurden mehrere Varianten. Bei der in Abbildung Abbildung 9 gezeigten Gegenüberstellung von 3 Varianten umschließt die links dargestellte Variante das größte Volumen. Die Traufe des Membrandachs befindet sich knapp unterhalb der Traufhöhe des Bestelmeyer Baus. Dies hat den Vorteil, dass man umlaufend in gleicher Höhe an die Gebäude anschließen kann; zusätzlich wird die Landmaschinenhalle in einer Höhe überdeckt, die eine Nutzung der Dachfläche möglich macht und großzügige vertikale Lüftungsöffnungen an dieser Seite erlaubt.
Ein zweiter Vorteil ist, dass ein großer Anteil des Gebäudebestands von der neu zu erstellenden Membrankonstruktion umschlossen und geschützt werden würde. Diese Variante stellt zwar den umfangreichsten Eingriff, verspricht aber zugleich den größten Zugewinn an ganzjährlich nutzbarem Raum.

Es bietet sich zudem die Möglichkeit, das Membrandach über die Landmaschinenhalle hinaus auskragen zu lassen, wodurch eine Verschattung der neuen west-orientierten Fassade erreicht werden könnte.
Um die Varianten planerisch durchspielen zu können, wurden Ansichten und Schnitte nach Bestandsplänen gezeichnet. Die Grundrisse wurden freundlicherweise von einem Ingenieurbüro zu Verfügung gestellt, das vor einigen Jahren diese Gebäudeteile vermessen hat.

Daraus wurde ein 3D Modell des Bestands entwickelt. Dieses Modell diente neben den digitalen Plänen zur Vertiefung einer Variante. Es wurden die für die Membranbauteile und das direkt darunter liegende Tragwerk nötigen Rahmenbedingungen untersucht.

Eine Abschätzung für den Aufwand einer eigenen Gründung im Vergleich zu einer Ableitung der Auflast in den Bestand ergab, dass eigene Stützen erforderlich werden, die neu gegründet werden. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass die Fassaden des Bestelmeyer Baus unter Denkmalschutz stehen.

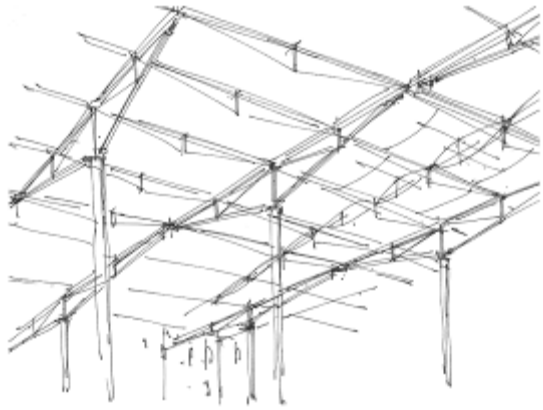


Abbildung 10: Freihandskizze eines Vorentwurfs.

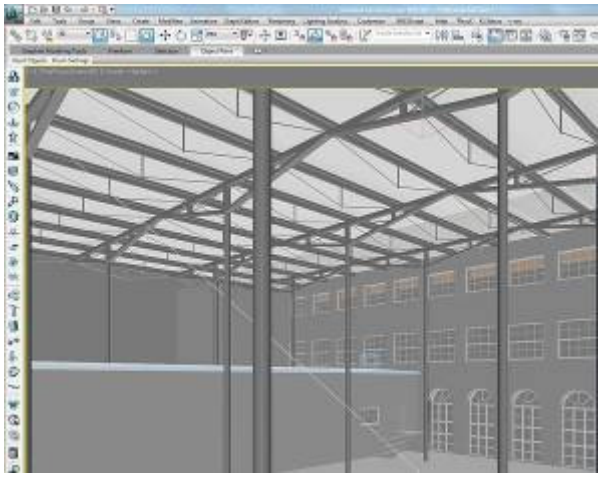


Abbildung 11: Screenshot 3D Modell eines Vorentwurfs (Software: 3dsMax).

Im Bereich des Dachtragwerks wurde zunächst eine Tragwerksvariante mit mehreren, entkoppelten Tragfeldern, die auf Pendelstützen ruhen, untersucht und (vereinfacht) dreidimensional konstruiert (siehe Abb. Abbildung 11 und Abbildung 12).
Hierbei war vorgesehen, das die Pneus in Längsrichtung durchlaufen und in Querrichtung die Breite des Tragwerksrasters aufnehmen. Der erzielte Raumeindruck war jedoch nicht zufriedenstellend. Diese Lösung hätte relativ viele Stützen im Innenraum zur Folge, was auch die Nutzbarkeit des Innenraums einschränken würde.

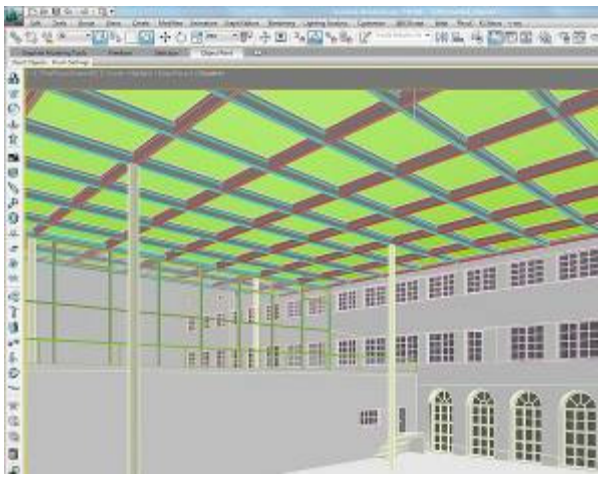


Abbildung 12: Screenshot 3D Modell eines Vorentwurfs (Software: 3dsMax).

Daraufhin wurde eine weitere Tragwerksvariante mit leicht geänderten Rahmenbedingungen entworfen, die mit weniger Stützen auskommen sollte.
Dieser Vorentwurf sieht ein über die Stützen auskragendes Flächentragwerk, einen biegesteifen Trägerrrost, vor. Das Tragwerk kommt im Innenhofbereich mit lediglich 4 Stützen (insgesamt 6 Stützen) aus (Abbildung 12).
Ein derartiges Tragwerk würde für die Hauptträger relativ kleine Querschnitte erlauben, was den Materialaufwand reduziert.

Abbildung 13: Querschnitt (ohne Maßstab).

Das Konstruktionsraster orientiert sich am Fassadenraster des Bestelmeyer Baus (siehe Abbildung 13) und vermittelt dadurch zwischen dem neuen Membrandach und den denkmalgeschützten Bestandsfassaden.

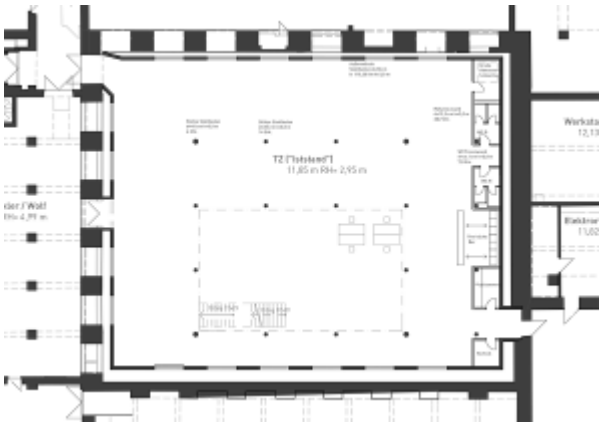


Abbildung 14: Grundriss UG (ohne Maßstab).

Die Querschnitte der Stützen würden theoretisch relativ schlank ausfallen, weil sie als Pendelstützen ausgeführt werden können die keine Biegemomente aufnehmen müssen.

Hierbei wurde im Entwurf berücksichtigt, dass das Untergeschoss wegen der neu zu errichtenden Fundamente umgebaut werden müsste.

Ziel war es, eine möglichst sinnvolle Verbindung zum Erdgeschoss zu schaffen, um eine räumliche Flexibilität bei der Nutzung zu erreichen und die am Technischen Zentrum angesiedelten Arbeitsplätze um einen wertvollen kommunikativen Bereich zu erweitern und damit deutlich aufzuwerten. Den Grundriss des Untergeschosses zeigt Abbildung 14.

Baustatische Berechnungen

Um beim Entwurf des Tragwerks in eine Richtung zu gehen die eine in Bezug auf den Materialaufwand optimierte Lösung anstrebt, wurden für mehrere Tragwerksvarianten baustatische Berechnungen durchgeführt. Dies war auch in Hinblick auf die angestrebte Bestimmung des Primärenergiegehalt der hierbei zu berücksichtigenden Materialmengen sehr wichtig.

Eine Tragwerksvariante wurde hierfür vergleichend einmal für eine Glasdeckung und alternativ für eine Dachfläche aus ETFE-Kissen berechnet. Es ergaben sich, schon allein aus dem geringeren Flächengewicht der Pneus, signifikante Unterschiede (vgl. Kapitel 6.3).

Sämtliche baustatische Berechnungen wurden von SSF Ingenieure in München durchgeführt.

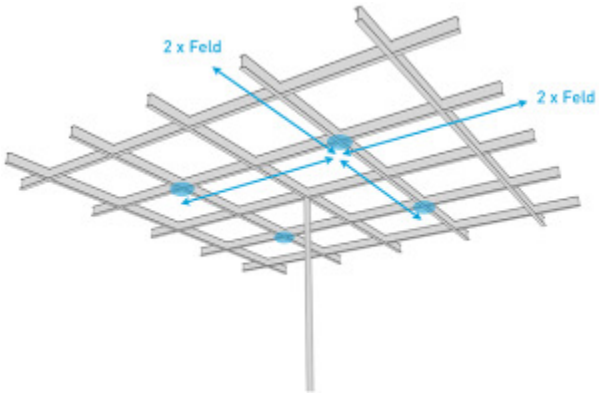


Abbildung 15: Durch vier statt einem Auflagerpunkt reduziert sich die Feldbreite.

Potentiale zur Tragwerksoptimierung

In einem weiteren Schritt wurden dann zwei Tragwerksvarianten untersucht, die zu einer besseren Verteilung der Biegemomente führen sollten. Die Tragweite von Auflagerpunkt zu Auflagerpunkt im Rost beträgt hierbei etwa 16 m. Zur Verringerung der Spannweite sollten Auflagerpunkte mit einem Abstand von etwa 8 Metern ausgebildet werden (siehe blaue Punkte in Abbildung 15). Dies würde theoretisch dazu führen, dass die Biegebelastung besser verteilt und der Querschnitt der Stahlträger gleichmäßiger ausgenutzt werden würde.

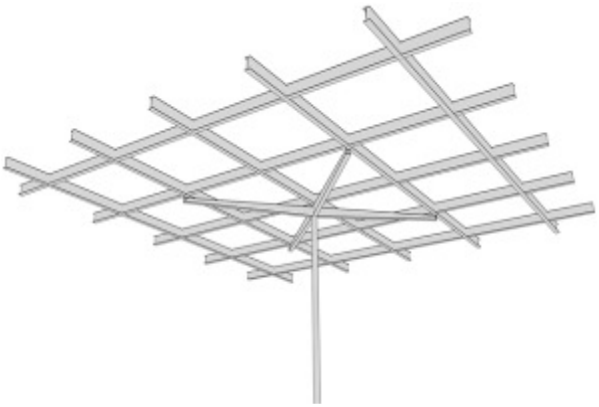


Abbildung 16: Kragarme zwischen Stütze und Trägerrost.

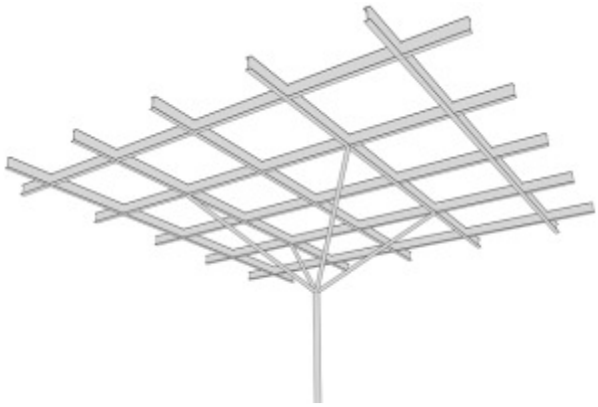


Abbildung 17: Aufgeteilte Stütze hält den Trägerrost.

Ein Entwurfsansatz sah hierbei vor, die Vertikallasten aus dem Tragrost durch diagonale Kragarme an vier anstatt nur einem Punkt pro Stütze abzufangen (Abbildung 16).
Ein weiterer Entwurfsansatz löst die Stütze im oberen Bereich in vier Teile auf, die den Rost ebenfalls an vier Auflagerpunkten stützen würde (Abbildung 17).

Für beide Varianten wurden von SSF Ingenieure statische Berechnungen durchgeführt.

Es ergaben sich folgende Erkenntnisse:

Die Variante mit den Kragarmen lässt keine signifikante Verbesserung des Tragwerks erwarten.

Die Variante mit der aufgeteilten Stütze ist in statischer Hinsicht wesentlich interessanter. Die Biegebelastung des Trägerrosts ist wesentlich gleichmäßiger, zudem wirkt diese Lösung der Durchbiegung an der Vorderkante des Rostes, dort wo das Dach frei auskragt, wirksam entgegen.

3D Modelle, Visualisierung

Parallel zur Entwurfsplanung wurde an 3D-Modellen der beiden Situationen von Stuttgart und München gearbeitet, was einerseits zur Klärung der teilweise komplizierten räumlichen Zusammenhängen beitrug. Andererseits erlaubte dies, mit Hilfe der 3D-Software computergenerierte Bilder (CGI) zu erzeugen, die einen guten Eindruck der Raumwirkung vermitteln und auch im Hinblick auf eine mögliche Umsetzung der Planungen ein wichtiges Instrument darstellen.

Abbildung 18: CGI Innenraumperspektive Innenhof TUM mit umgebauten Untergeschoss (Software: 3dsMax, VRay).

Abbildung 19: CGI Innenraumperspektive Blick von der gegenüberliegenden Seite (Software: 3dsMax, VRay).

Untersuchungen zum Brandschutz

Grundlegende Brandschutzanforderungen wurden exemplarisch unter Bezugnahme auf die bayerische Bauordnung im MESG Zwischenbericht HJ 1/2010, S.23 f vorgestellt. Die Innenhofüberdachung an der TUM stellt eine brandschutztechnisch relativ komplexe Situation dar. LHR hat deshalb zur weiteren Planung das auf Brandschutz spezialisierte Ingenieurbüro hhpberlin hinzugezogen.

Hieraus ergab sich die folgende Einschätzung der Situation:

Aus baurechtlicher Sicht sind bei der Überdachung eines Innenhofes mit einer Folien- bzw. Membrankonstruktion die geänderten brandschutztechnischen Rahmenbedingungen für die den Innenhof umgebenden Gebäude sowie des mit der Überdachung entstehenden neuen Gebäudes zu berücksichtigen.
Unterschiedliche Nutzungseinheiten und Nutzungsarten sind voneinander mit brandschutztechnisch qualifizierten Bauteilen zu trennen.
Dies erfordert eine Ertüchtigung der früheren Außenfassaden (die mit der Überdachung des Innenhofes zu Trennwänden verschiedener Nutzungsbereiche werden), um eine zulässige brandschutztechnische Trennung zu erreichen. Durch ein entsprechend schutzzielorientiertes Brandschutzkonzept kann eine unauffällige und dennoch wirksame brandschutztechnische Lösung gefunden werden. So können z.B. Öffnungen in den Trennwänden zwischen Innenhof und angrenzenden Gebäuden auch mit automatischen Feuerschutzabschlüssen versehen werden, die ohne ein Brandereignis gar nicht in Erscheinung treten (z. B. Feuerschutzvorhänge). Der Einsatz einer automatischen Löschanlage kann den Umfang der brandschutztechnisch notwendigen baulichen Maßnahmen reduzieren, da diese Anlage grundsätzlich dazu dient, eine Brandausbreitung zu verhindern.

Hinsichtlich der Rettungsweggestaltung wird mit der Überdachung eines Innenhofes ebenfalls eine neue Situation geschaffen, für die die notwendigen Regelungen zum Thema Rettungswege der entsprechenden Landesbauordnung zu berücksichtigen sind. Im vorliegenden Fall ist es wahrscheinlich, dass der Innenhof auch für die Durchführung von Veranstaltungen genutzt wird – damit ist auch die Versammlungsstättenverordnung zu berücksichtigen, die höhere Anforderungen für der Rettungsweggestaltung als die Landesbauordnung aufweist. So sind für je 200 Besucher 1,20 m lichte Ausgangsbreite sicherzustellen, die insgesamt erforderlichen Ausgangsbreiten sind entsprechend dem gewünschten Nutzungsumfang anzupassen.

Die Ausgänge aus einem Veranstaltungsraum sind grundsätzlich direkt ins Freie, auf notwendige Flure oder zu notwendigen Treppenräumen zu führen. Im Fall des TUM Innenhofs kann die Anbindung an bestehende Rettungswege innerhalb der angrenzenden Gebäude erfolgen.

Für die Konstruktion der Innenhofüberdachung ist unter Berücksichtigung der baurechtlichen Anforderung grundsätzlich eine feuerhemmende Konstruktion (F 30) erforderlich. Sollte eine Löschanlage in dem neu geschaffenen Raum installiert werden, ist eine nichtbrennbare tragende Dachkonstruktion ausreichend.
Die eigentliche Membranbedachung erfüllt zunächst nicht die baurechtlichen Anforderungen, welche an Dächer von Gebäuden gestellt werden. Hier ist eine Widerstandsfähigkeit gegen Flugfeuer und strahlende Wärme in den Bauvorschriften verankert. Membrankonstruktionen sind jedoch aufgrund ihrer Materialität empfindlich gegen den Eintrag von Wärme. Dies bedeutet, dass strahlende Wärme zu einem Stabilitätsverlust bis hin zu einer Entzündung der zur Verwendung kommenden Folien führen kann. Auch die Widerstandsfähigkeit gegen Flugfeuer ist nicht gegeben, da glühende Brandreste durch die Folien hindurchschmelzen. Trotz dieser zunächst nicht baurechtskonformen Situation können Membrandächer für die Überdachung von Gebäuden dienen. Deren Einsatz muss aber in einem entsprechenden Brandschutzkonzept berücksichtigt werden. Das übergeordnete Schutzziel muss dabei die Verhinderung einer flächigen Brandausbreitung bzw. Brandweiterleitung über die Dachkonstruktionen sein.

Für den Fall eines Brandes innerhalb des neu überdachten Innenhofes müssen auch Möglichkeiten zur Rauchableitung geschaffen werden. Hierbei kann nicht auf die bereits zuvor erwähnte Eigenschaft des Membranmaterials, des Schmelzens, zurückgegriffen werden, da der Schmelzpunkt der Verwendung findenden Folien in der Regel bei rd. 300 °C und mehr liegt, bevor nennenswerte Öffnungen im Dachbereich freigegeben werden. Deshalb sind entweder im Dach oder in den Fassaden einer derartigen Membranüberdachung Öffnungen für die Rauchableitung vorzusehen. Dies kann z.B über die bewegbaren Membranelemente geschehen, die für die passive Lüftung des Raumes vorgesehen sind.
Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Überdachung des Innenhofes bei der Technischen Universität München aus brandschutztechnischer Sicht unter Berücksichtigung eines schutzzielorientierten und objektspezifischen Brandschutzkonzeptes möglich ist.

Bauphysik, **TGA, Regelungstechnik**

In weiteren Schritten wurden die durch eine solche Maßnahme erzielbare Energieeinsparung in bauphysikalischer Hinsicht sowie durch eine abgestimmte TGA bestimmt. Dazu sind thermische, lichttechnische und regelungstechnische Betrachtungen notwendig (siehe Kapitel 6.4 bis 6.6). Als Eingangsdaten dienen dabei bauphysikalische Kenndaten, die in Kapitel 6.7 dargestellt sind sowie die Wärmedurchgangskoeffizienten, die in Kapitel 6.11 aufgeführt sind. Um die energetischen Berechnungen zu vervollständigen wurde auch der Primärenergiegehalt der zu verwendenden Bauteile bestimmt (siehe Kapitel 6.3).

2 Berechnungen zum Primärenergiegehalt der Bauteile

Von der ausgewählten Prinziplösung in München wurde der Primärenergiebedarf, der im Bauwerk selbst steckt, für zwei Varianten berechnet. Eine Variante nimmt an, dass die Dachfläche aus Isolier-Sicherheitsglas besteht, die andere Variante geht von ETFE Pneus als Dachfläche aus. Da bei Variante 2 mit luftgestützten Membrankissen gebaut wird, wird im Folgenden der Energiebedarf hinzugerechnet, der zum Betrieb der Pneus nötig ist. Durch die statische Berechnung des Tragwerks der Situation des Münchener Innenhofs war es möglich, mit sehr präzisen Werten für das Stahltragwerk zu rechnen. Eine weitere Grundlage hierfür bildeten Ökobillanzdaten aus der Baustoffdatenbank „ökobau.dat“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

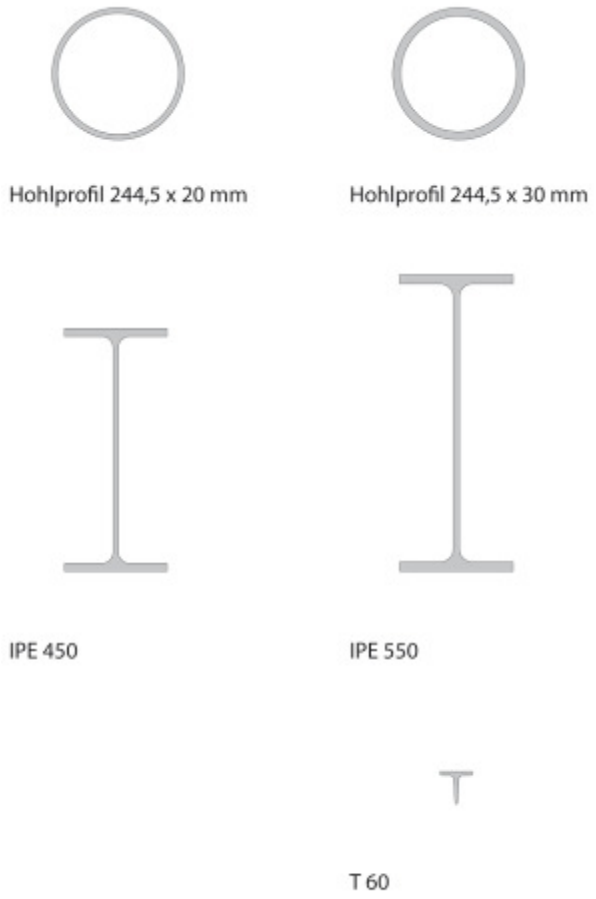


Abbildung 20: Nach baustatischer Berechnung erforderliche Stahlprofile, links Variante ETFE Kissen, rechts Variante Glasdach.

Einige Bauteile, wie etwa die Klemmprofile für Glas und ETFE Kissen, sowie die Fundamente wurden hierbei vernachlässigt, da hier von sehr ähnlichen Werten auszugehen ist. Ebenfalls wurde zunächst auf eine Berechnung der Recyclingpotentiale, die sich am Ende des Lebenszyklus ergeben, sowie auf die Berücksichtigung des Energieaufwands zum Transport und zum Einbau der Bauteile verzichtet. Einerseits sind hierzu zum gegenwärtigen Stand der Planung keine Aussagen zu treffen, andererseits wäre für eine detaillierte Ökobillanzierung ein weit größerer Aufwand zu betreiben, der für eine erste Einschätzung nicht zwingend nötig ist.

In einem ersten Schritt wurden die Ökobillanzdaten und die durch die statische Berechnung ermittelten Werte für die Bauteile in eine Tabellenkalkulation übernommen.

Damit ist war es möglich, bei sich ändernden Ausgangswerten relativ einfach entsprechend aktualisierte Ergebnisse zu erhalten. Zudem war es möglich, verschiedene Szenarien relativ einfach quantitativ zu analysieren.

Einen Teil dieser Tabellenkalkulation ist in Abbildung 21 zu sehen. In ihr sind die Werte aufgelistet, die zur Berechnung der Massen und somit auch zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs zur Herstellung der Bauteile erforderlich waren.

Es war nicht möglich, Ökobilanzdaten zu ETFE Folie und zu Verbundsicherheitsglas (VSG)/Einscheibensicherheitsglas (ESG) zu ermitteln. Die Werte für das Sicherheitsglas sind aus Ermangelung passender Ökobillanzdaten lediglich aus der Glasstärke und den Werten für einfaches Fensterglas berechnet. Hier ist davon auszugehen, dass aufgrund des Vorspannens der Glasscheiben bzw. durch das Laminieren der beiden Glasscheiben zu VSG eigentlich mit höheren Werten gerechnet werden müsste.

Da Ökobilanzdaten zur ETFE Folie nicht ermittelt werden konnten, wurde ein Wert angenommen (140 MJ/kg), der sich an ähnlichen Baufolien orientiert. Bei der sehr geringen Masse der Kissenkonstruktion dürften sich Fehler in der hierzu getroffenen Annahme relativ gering auswirken.
Die Energie, die zur Herstellung von Mehrscheiben-Verbundsicherheitsglas zusätzlich nötig wäre, wurde nicht eingerechnet. Es ist daher von tendentiell ungünstigeren Werten im Hinblick auf die Glaslösung auszugehen. Für eine präzisere Berechnung wäre es vonnöten, auf genau ermittelte Werte für Isolierverbundglas und ETFE Folie, die zu Kissen verarbeitet wurde, zurückgreifen zu können. Wie stark dies die folgenden Ergebnisse beeinflussen würde, kann ohne extensive Untersuchungen nicht beurteilt werden.

Betrachtet man zunächst die verbauten Massen, ergeben sich folgende Werte:

rund 180 t für die Glasvariante
rund 80 t für die Pneuvariante

Der Gewichts- bzw. Massenunterschied von rund 100 t beruht auf folgenden Unterschie-

den im Hinblick auf die verbauten Stahl-, Glas- bzw. Kunststoffmengen (ETFE Folie):

Massenunterschied der Stahlkonstruktion im Bereich der Stützen: etwa 5 t aufgrund der größeren Materialstärke.
Massenunterschied der Stahlkonstruktion im Bereich der Träger: etwa 25 t aufgrund der größeren Stahlträger im Trägerrost.
Massenunterschied der Stahlkonstruktion im Bereich der Nebenträger: etwa 5 t aus den zusätzlich als Auflager für die Glasprofile dienenden Nebenträger.
Massenunterschied Dacheindeckung Glas/Folie im Bereich der Dachkonstruktion: etwa 65 t aus dem Unterschied Glas zu ETFE. (Aus dieser um ca. 65 t geringeren Auflast ergibt sich im übrigen Tragwerk die erwähnte Einsparung von etwa 35 t Baustahl.)

stabilisierung der Kissen notwendigen Energieaufwand vergleichen zu können.
Primärenergieaufwand Glas: ca. 1.267 MWh
Primärenergieaufwand ETFE: ca. 690 MWh
Hieraus ergibt sich eine Differenz von rund 577 MWh, was einer Einsparung von ca. 45% im Vergleich ETFE zu Glas entspricht. (vgl. Abbildung 21)

Diese Berechnungen bestätigen, dass sich durch die Gewichtsersparnis für die Dachoberfläche und der sich daraus ergebenden erheblichen Gewichtersparnis beim Primärtragwerk auch große Einsparungen beim Primärenergieeinsatz ergeben.

Dem gegenüber steht der Betriebsenergiebedarf, der zur mechanischen Stabilisierung der Kissen im laufenden Betrieb anfällt.

Bauteile Überdachung TUM Innenhof					Primärenergie		
	Grundmaß Bauteil	Materialstärke	Fläche / Länge	Gewicht	Bauteil	Beschichtung	**Summe**
Glasdach							
Stütze, kreisförmiges Hohlprofil	244,5 mm	30 mm	90 m	14.310 kg	96.048 kWh	2.201 kWh	**98.249 kWh**
Stahlprofil, Hauptträger „Rost“	IPE 550		880 m	93.280 kg	626.091 kWh	52.670 kWh	**678.760 kWh**
Stahlprofil, Nebenträger	T 60		764 m	4.759,7 kg	31.049 kWh	5.570 kWh	**36.619 kWh**
Zuschlag Stahl Kleinbauteile	8,00 %						**63.470 kWh**
Verglasung VSG/ESG	1,78 m x 1,92 m	6:-10-16 mm	1.320 m²	66.000 kg	389.674 kWh	0 kWh	**389.674 kWh**
Summe Glasdach							**1.266.772 kWh**
Pneudach ETFE							
Stütze, kreisförmiges Hohlprofil	244,5 mm	20 mm	90 m	9.990 kg	67.052 kWh	2.201 kWh	**69.253 kWh**
Stahlprofil, Hauptträger „Rost“	IPE 450		880 m	68.288 kg	458.346 kWh	45.105 kWh	**503.451 kWh**
Zuschlag Stahl Kleinbauteile							**63.470 kWh**
Pneus ETFE Folie	3,65 m x 3,93 m	1 mm	1.370 m²	1.370 kg	53.278 kWh	0 kWh	**53.278 kWh**
Summe Pneudach							**689.451 kWh**
Differenz							**577.320 kWh**

Abbildung 21: Übersicht der berechneten Werte für den Primärenergieinhalt.

Der Zuschlag für Kleinbauteile wurde mit 8 % des Stahltragwerks bei beiden Varianten gleich hoch angesetzt.

Die Berechnung der eingesetzten Primärenergie in den Bauteilen (unter Akzeptanz der beschriebenen Ungenauigkeiten) ergab die nachfolgend genannten Werte. Der Primärenergieinhalt wurde hierbei in kWh angegeben um unmittelbarer mit dem zur Druck-

2.1 Berechnungen zum Primärenergieverbrauch beim Kissenbetrieb

Zur Bestimmung des Primärenergieeinsatzes für die beiden alternativen Dachkonstruktionen wurde die vereinfachende Annahme getroffen, dass für eine Überkopfverglasung im eingebauten Zustand kein Betriebsenergieaufwand anzusetzen ist. Der Energieaufwand für die Reinigung der Dachfläche oder den eventuell erforderlichen Austausch defekter Bauteile wurde hier nicht berücksichtigt. Lediglich der zur Druckhaltung der Membrankissen anfallende Energiebedarf wurde ermittelt.

	Durchschnittliche Lebensdauer	min	max
Betonfundament, Flachgründung oder Pfahl	100 Jahre	80 Jahre	150 Jahre
Betondecke, stahlbewehrt	100 Jahre	80 Jahre	130 Jahre
Stahlkonstruktion, Stahl verzinkt und beschichtet	80 Jahre	60 Jahre	100 Jahre
Fassade, vorgehängt, hinterlüftet; Stahl verzinkt	30 Jahre	15 Jahre	45 Jahre
ETFE Kissen; Wert geschätzt!	20 Jahre		

Quelle: Informationsportal nachhaltiges Bauen, Nutzungsdauer von Bauteilen, Zwischenauswertung 09/2008

Abbildung 22: Tabelle mit Werten zur Lebensdauer von Bauteilen.

Die erforderlichen Daten zur Nutzungsdauer von Bauteilen wurden dem ‚Informationsportal nachhaltiges Bauen’ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung entnommen. Im online veröffentlichten Stand von September 2008 sind noch keine Daten zu Glasdächern und Membrandächern enthalten.
Für die Überkopfverglasung wurde deshalb vereinfacht der Wert für Glasfassaden angenommen. Für die ETFE Pneus wurde eine durchschnittliche Lebensdauer von 20 Jahren angenommen (vgl. Abbildung 22).

Abbildung 23 zeigt bei einem Betrachtungsabstand von 10 Jahren folgendes:

Die blaue Linie zeigt den Energieaufwand beim Glasdach, die grünen die bei den ETFE-Varianten, die grauen Linien die Differenz, also was man beim ETFE Dach gegenüber der Glasvariante einsparen würde.

Im Jahr 1, also unmittelbar nach Errichtung des Bauwerks, beträgt der Energieaufwand zur Herstellung der Bauteile (gerundet) für die:

- Glasvariante: 880.000 kWh Stahltragwerk
  390.000 kWh Glasdeckung

ETFE-Variante: 640.000 kWh Stahltragwerk
53.000 kWh Pneukonstrukt.

Beim Membrandach ist neben dem Energieaufwand für den Austausch der Pneus (alle 20 Jahre) auch der Energieaufwand zum Kissenbetrieb zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf den Betriebsenergieaufwand wurden 3 Varianten betrachtet: einmal mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 0,4 W/m^2, dann mit 0,8 W/m^2 und schließlich mit 1,2 W/m^2.

Unter der Annahme, dass die Pneus alle 20 Jahre ausgetauscht werden müssen, ist ein Anstieg des Energieaufwands um 53.000 kWh zu berücksichtigen.

Unter der Annahme, dass die Glaseindeckung alle 30 Jahre ausgetauscht werden muss, ist ein Anstieg des Energieaufwands um 390.000 kWh zu berücksichtigen.

Nach insgesamt 60 Jahren werden in dieser Beispielrechnung jeweils die Pneus und die Glaseindeckung wiederum ausgetauscht, was einer abermaligen Steigerung des Energieeinsatzes um 390.000 kWh für die Glasvariante, und um 53.000 kWh für die Pneuvariante entspricht..

Nach 80 Jahren entspricht dies für die Glasvariante einem Gesamtenergieaufwand von 2.050.000 kWh.

Für das ETFE-Pneudach ergeben sich in Abhängigkeit von dem angenommenen Energieaufwand für den Betrieb der Kissen unterschiedliche Werte.

Wäre man in der Lage, die Leistungsaufnahme für den Kissenbetrieb auf durchschnittlich 0,4 W/m^2 zu begrenzen, entspräche dies in etwa einem Jahresenergiebedarf von 3,65 kWh/m^{2}a.

Bei dieser Variante wäre die Membrankonstruktion gegenüber der Glaskonstruktion auch nach 80 Jahren Betriebsdauer klar im Vorteil.
Die Gesamtenergieersparnis beim Einsatz einer Membrankonstruktion gegenüber einer Glaskonstruktion würde nach dieser Zeit 790.000 kWh betragen. (siehe Abbildung 23, Kreis ganz rechts an der gepunkteten Linie).

Bei angenommenen Leistungsaufnahme von 0,8 W/m^2 (entspricht rund 7,3 kWh/m^{2}a) schneidet die Membranvariante gegenüber der Glaskonstruktion nicht mehr ganz so günstig ab.

Der energetische Vorteil, der sich aus dem geringeren Membran- und Stahlgewicht gegenüber der Glaskonstruktion ergibt, bleibt zwar erhalten, aber der etwas erhöhte Betriebsenergieaufwand mindert diesen Vorteil im Hinblick auf den Gesamtenergieaufwand deutlich. (siehe Abbildung 23, gestrichelte Linien).

Bei einer angenommenen Leistungsaufnahme von 1,2 W/m^2 (entspricht rund 11 kWh/m^{2}a) verliert die Membranlösung gesamtenergetisch betrachtet immer mehr an ‚Vorsprung’ gegenüber der Glasvariante. Nach 80 Jahren ist der Vorteil, der sich aus dem geringeren Membran- und Stahlgewicht gegenüber der Glaskonstruktion ergeben hatte, gänzlich aufgebraucht (siehe Abbildung 23, durchgehende Linien).

Betrachtet man die Entwicklung des Gesamtenergieaufwands im Fall der Glaskonstruktion im Verlauf von 80 Jahren (Abbildung 23, blaue Linie), so erkennt man deutlich die sprunghafte Zunahme des Gesamtenergieaufwands um jeweils 390.000 kWh, der sich aus dem Austausch der Glaseindeckung ergibt.

Im Vergleich dazu zeichnet sich aufgrund des geringeren Herstellungsenergieaufwands im Zusammenhang mit der Membrankonstrukion der Einbau neuer Kissen nicht ganz so deutlich ab.

Die genannten Zusammenhänge weisen darauf hin, dass der Betriebsenergieaufwand zur Stabilisierung der pneumatischen Kissen- bzw. Membrankkonstruktion im Vergleich zum Energiegehalt der Bauteile eine größere Rolle spielt.

Insgesamt zeigt sich jedoch, dass die Membranlösung auch nach 80 Jahren Betriebsdauer in gesamtenergetischer Hinsicht gegenüber einer Glaskonstruktion von Vorteil sein kann.

Ein entscheidender Faktor ist dabei die Energieeffizienz der zum Druckerhalt der Membrankissen notwendigen Anlage.

Die Energieeffizienz der Anlage wird wiederum von der Kissengeometrie und der Qualität der Ausführung des Randverbundes der Membranen im Hinblick auf die erreichbare Luftdichtigkeit der Pneus beeinflusst. Zudem spielen die Reibungsverluste in den Luftleitungen eine entscheidende Rolle.

In diesem Zusammenhang wäre zu untersuchen, wie sich die Energiebilanz einer pneumatischen Membrankonstruktion durch eine integrierte Energiegewinnung (z.B. durch Photovoltaik oder die Nutzung von Solarthermie) verbessern ließe.
Wird eine sparsame Anlage zum Betrieb der Kissen eingesetzt und darauf geachtet, dass sowohl die Kissen selbst als auch die Leitungen in Blick auf den Energieverbrauchs optimiert werden, ist ein deutlicher energetischer Vorteil von Membrankonstruktionen im Vergleich zu Glaskonstruktionen zu erreichen.
In den folgenden Kapiteln werden weitere Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs näher beleuchtet.

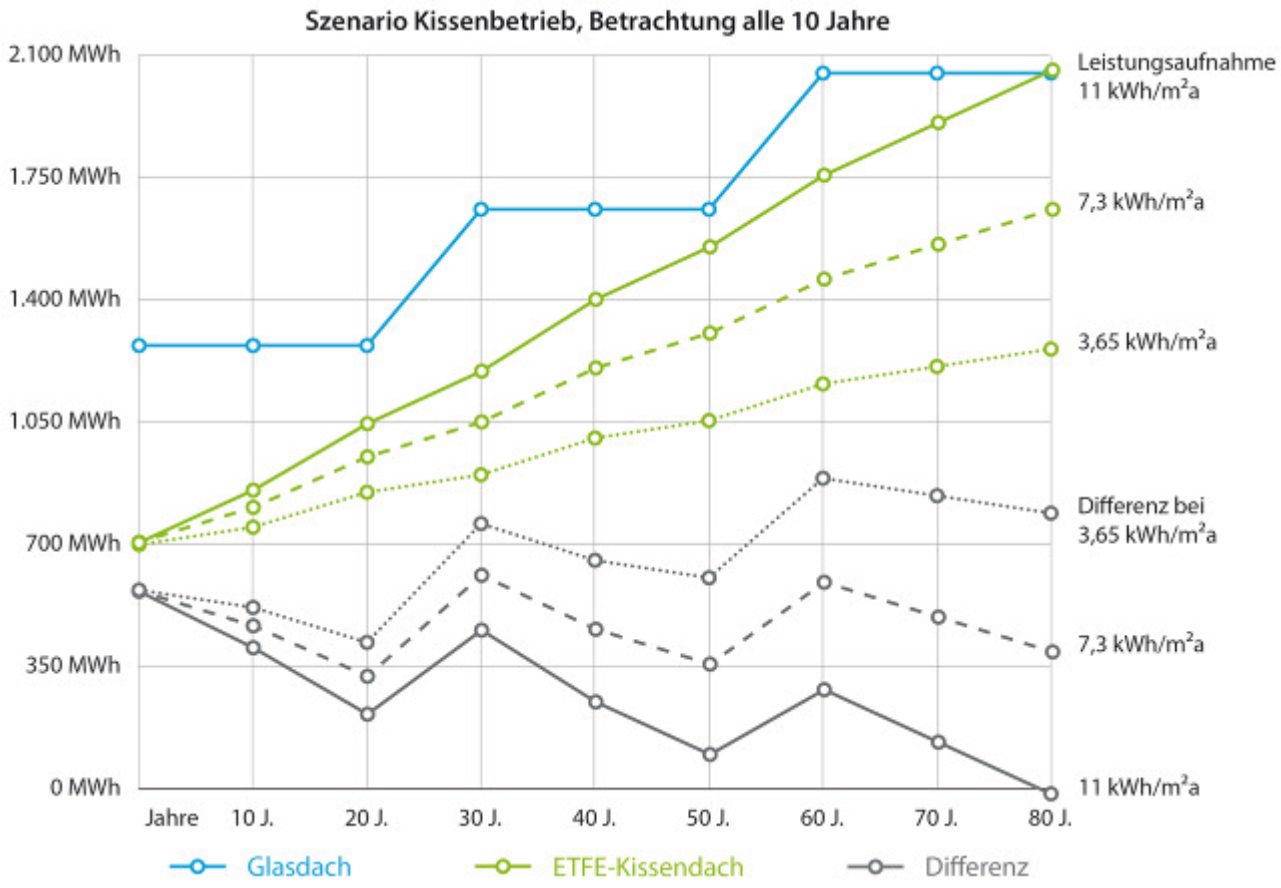


Abbildung 23: Aufsummierter Energieverbrauch alle 10 Jahre: Glasdach blau, Membrandach grün, Differenz grau.

3 Allgemeine Grundlagen zur Auslegung Technischer Gebäudeausrüstung

Nach den Definitionen der Prinziplösungen und ersten Berechnungen zum Primärenergiegehalt benötigter Bauteile ist eine energieeffiziente technische Gebäudeausrüstung (TGA) maßgeblich dafür verantwortlich, dass ein Optimum an Energieeinsparung und Energieeisatz nutzungsabhängig gefunden werden kann.

In nachfolgender Abbildung 24 sind die vier in diesem Forschungsvorhaben definierten Typicals möglicher Anwendungsfälle von Membrankonstruktionen aufgezeigt. Jedes dieser Typicals bedarf einer fein abgestimmten technischen Gebäudeausrüstung. Der nötige regelungstechnische Aufwand variiert allerdings stark. Allgemein lässt sich festhalten, dass mit einem steigenden Textilisierungsgrad der Hüllfläche auch der Technisierungsgrad der Gebäudeausrüstung steigt.

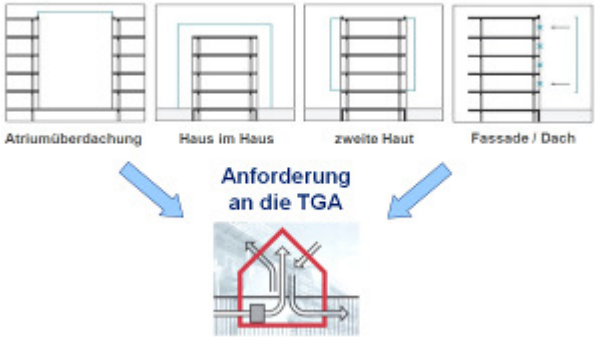


Abbildung 24: Untersuchte Typicals Membranbauten [Bild unten: Pistohl – Handbuch der Gebäudetechnik].

Fassade/Dach

Am höchsten ist der zu treibende Planungsaufwand bei Gebäuden mit kompletten Fassaden aus einer Membran. Wegen der geringen Masse der Fassadenkonstruktion, schlägt jede Änderung der äußeren Lasten direkt in den zu regelnden Nutzungsraum hinter der Hülle durch. Je nach Aufbau der Hülle und Nutzung des Raumes muss hier die Gebäudeautomation eine geringe Reaktionszeit aufweisen, um schnell auf ständig wechselnde Einflüsse wirken zu können. Von besonderer Wichtigkeit ist hierbei ein ausreichender und optimal funktionierender Sonnenschutz. Auch über eine Kühlung der Räume wird bei einer Fassadenkonstruktion aus Membranen nachgedacht werden müssen.

Zweite Haut

Bei einer Ausführung von Membranen als zweite Haut, wie dies sehr prominent in der Hamburger Hafencity am Beispiel der Unilever Zentrale für Deutschland, Schweiz und Österreich gezeigt wurde, fungiert die Membranhülle ähnlich einer zweiten Schicht aus Glas, bekannt von vielen Doppelfassadenkonstruktionen. Sie ist von technischer Gebäudeausrüstungsseite her betrachtet, weit weniger kritisch anzusehen, als dies noch im ersten untersuchten Beispiel der Fall wäre. Hinter der Membranhaut liegt eine zweite konventionelle Gebäudehülle aus Glas mit den bekannten Eigenschaften einer solchen Konstruktion. Es ist zumindest von den herkömmlichen erhöhten Maßnahmen zum Einhaltend der Behaglichkeitsgrenzen in dahinter liegenden Räumen auszugehen. Die einzusetzende Gebäudetechnik sollte in der Lage sein, schnell und direkt reagieren zu können, dazu sind flinke Systeme in Heizung Kühlung und Lüftung nötig. Zur Grundlastabdeckung ist es ratsam auf Low-Ex Systeme zurückzugreifen. So kann eine Bauteilaktivierung, angefahren mit einer Grundwasserwärmepumpe zum Heizen und Kühlen gut verwendet werden. Diese Systeme können allerdings erfahrungsgemäß nur sehr träge auf Änderung der Inneren und Äußeren Lasten reagieren. Weswegen auf eine Kombination beider Systeme geachtet werden sollte.

Haus-im-Haus

Ein weiterer Extremfall einer denkbaren Membrankonstruktion zur energetischen Sanierung, der im Laufe des Vorhabens untersucht wurde, ist das Haus-im-Haus Prinzip. Hier war es Gegenstand ein komplettes Gebäude, bzw. sogar einen Gebäudekomplex mittels einer Leichtbaukonstruktion mit Membranen zu überspannen. Je nach Ausfertigung ergeben sich nun unterschiedliche Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung. Wird die nachträgliche Konstruktion voll geschlossen um das Objekt gelegt, kommt es auf die Größe des Luftraumes an, der zur Pufferung thermischer Lasten heran-

gezogen werden kann. Je größer dieser Puffer ist, desto besser kann das Gebäude und die Gebäudetechnik reagieren, um für den Nutzer solcher Bauten behagliche Zustände zu erhalten. Wird die Pufferzone sehr gering, da die Konstruktion dicht am zu überspannenden Objekt liegt, führt dies zu deutlich steigenden Anforderungen, da sich die Angrenzenden Räume durch die Stauwärme im Sommer aufheizen. Was im Winter allerdings zu Verbesserungen der Behaglichkeit führt, da eine weitere Dämmschicht der bestehenden vorgeschalten ist.

Wird die Konstruktion mit unten geöffneten Passagen versehen, ähnlich der eines Zeltes, ist auf die Windan- und -abströmfläche zu achten. Es kann zu erhöhten Zugerscheinungen wegen Durchströmung kommen, was zu erhöhten Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung im Innern des Bestandsgebäudes führt. Die mechanische Lüftungsanlage, eventuell basierend auf einem natürlichen Lüftungskonzept, muss sehr genau wissen welche Staudrücke anliegen, damit sie optimal arbeiten kann. Das natürliche Lüftungskonzept ist in solchen Objekten dann nur schwer zu bestimmen, da die ständig wechselnden Bedingungen großen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit solcher Konzepte haben.

Atriumüberdachung

Als einen optimalen Fall zur Anwendung einer Membrankonstruktion zur energetischen Sanierung von Gebäuden hat sich im Verlauf des Vorhabens eine nachträgliche Überdachung eines Innenhofes herausgestellt. Bereits der enorme Gewinn, resultierend aus der Verbesserung des A/V-Verhältnisses und den damit einhergehenden Einsparungen bedingt durch geringere Wärmedurchgangsverluste weist auf eine gute Umsetzungsfähigkeit hin. Mit Hilfe der technischen Gebäudeausrüstung kann nun auch der Nutzer der gewonnen Flächen energieeffizient in behaglicher Atmosphäre Ausstellungen besuchen, Konzerte erleben oder kreativ arbeiten, sollte dies gewünscht sein.

Um nun ein besseres Bild notwendiger Gebäudeausrüstung zu erhalten und diese auch mit Zahlen zu hinterlegen werden in den folgenden Kapiteln Berechnungsergebnisse vorgestellt, die aufzeigen sollen, welche thermischen und optischen Verhältnisse in nachträglich mit Membranen überdachten Innenhöfen anzutreffen sind. Die beiden unterschiedlichen Hofsituationen in Stuttgart und München bieten dazu eine gute Grundlage, da sie in Aufbau, Dachfläche und Speicherfähigkeit deutlich verschieden sind.

4 Thermisches Strömungsverhalten

In diesem Kapitel werden die erstellten Modelle zur Berechnung des thermischen Strömungsverhaltens für beide Hofsituationen vorgestellt. Ziel war es, über eine einfache Knotenmodellsimulation zur Berechnung des thermischen Verhaltens hinaus, zu bestimmen, wie sich Schichtungen in überdachten Innenhöfen ausprägen. Diese sind für ein regelungstechnisches Konzept wichtig, lassen sich dadurch zum Beispiel Art und Weise der notwenigen Be- und Entlüftungssituation bestimmen. Abbildung 25 zeigt das dreidimensionale Modell der Stuttgarter Hofumgebung. Aufgebaut wurde das Modell mit der Software ANSYS Fluent. Der grün eingefärbte Bereich stellt eine Variante des unter einer Membrane befindlichen Luftraums dar.

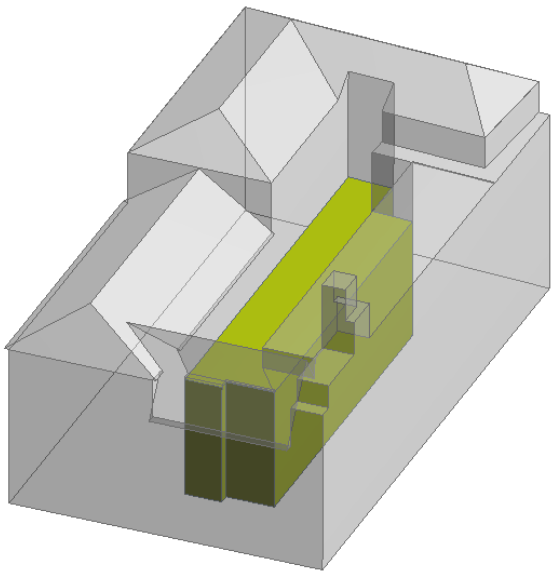


Abbildung 25: 3D Modell zur Berechnung der thermischen Strömungssituation im Innenhof der HfT Stuttgart (Software ANSYS Fluent).

In Abbildung 26 ist die zur Auswertung herangezogene Schnittebene gezeigt. Um einer erwarteten Überhitzung entgegenzuwirken,

wurden bei dem Modell bereits eine Nachströmöffnung in der Hauswand und eine Abluftöffnung in der Membrankonstruktion vorgesehen. Durch diese beiden Öffnungen kann die Luft im Innenhof zirkulieren. Die unten nachströmende Luft hat eine Temperatur von 21 °C. Betrachtet wird der Fall mit einem Transmissionsgrad der Membrane von 60 %.

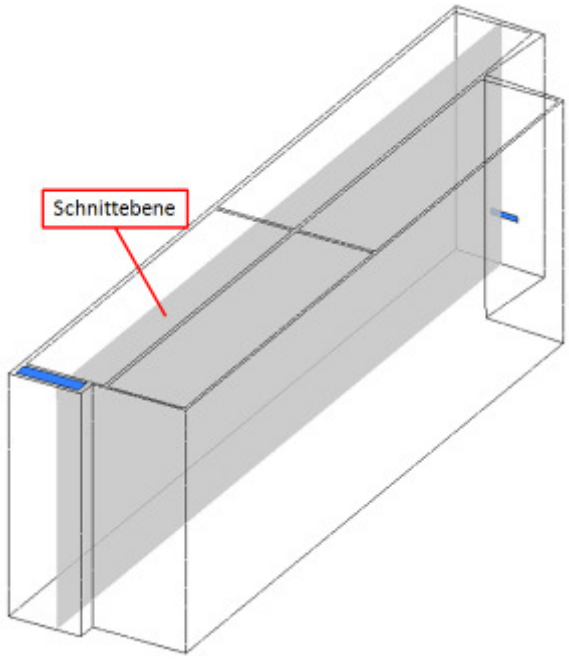


Abbildung 26: Grau dargestellt die Schnittebene durch den Berechnungsraum unter der geplanten Membrane. Die beiden blauen Felder stellen Luftein- und -auslass dar.

Es wurde exemplarisch ein Tag mit sommerlichen Außentemperaturen berechnet. Vorlage war hierzu ein heißer Septembertag mit externen Temperaturen von bis zu 32,6 °C nach Testreferenzjahr. Abbildung 27 zeigt die sich einstellende Schichtung der Temperaturen. Durch die Lufteintrittstemperatur von 21 °C steigt die Temperatur im Aufenthaltsbereich auf ca. 29 °C. Die Temperatur unter dem Dach steigt auf ca. 33 °C. Dadurch entsteht eine Schichtung im Raumvolumen mit einem Unterschied von ca. 4 Kelvin. Die berechneten Temperaturen sind sowohl für den Aufenthaltsbereich, als auch für die Dachregion zu hoch, um noch behaglich zu sein. Dem kann mit definierten höheren Luftwechselzahlen oder größeren Luftauslassöffnungen im Dachbereich entgegen gewirkt werden.

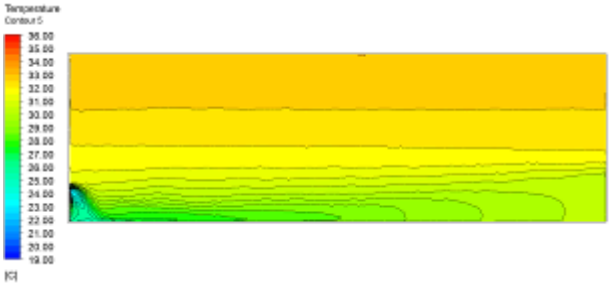


Abbildung 27: Temperaturschichtung an einem sommerlichen Tag in der in Abbildung 26 gezeigten Schnittebene. An der rechten Bildseite ist die Nachströmöffnung zu erkennen.

Beim zweiten untersuchten Fall wurde bereits detaillierter gedacht. So konnten in Abstimmung mit LHR Architekten modellseitig 6 konkrete Öffnungen im Dach realisiert werden. Diese Öffnungen sind als nach oben verschiebbare Kissen modelliert. Je nach Hubhöhe entsteht dadurch eine variable Öffnungsweite. Gezeigt sind in diesem Bericht die Ergebnisse für eine Öffnungsweite von 50 cm Hub. Zunächst zeigt Abbildung 28 das gesamte Modell, welches ebenfalls mit der Software ANSYS Fluent aufgebaut wurde. Hier konnte nun auch die Beschattung der umliegenden Gebäudehöhen mit einbezogen werden.

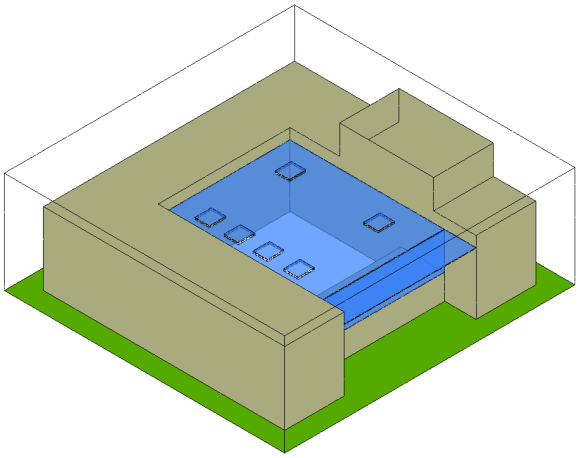


Abbildung 28: 3D Modell zur Berechnung der thermischen Strömungssituation im Innenhof der TU München (Software ANSYS Fluent)

Abbildung 29 stellt die ausgewählte Schnittebene durch den Luftraum des Innenhofes dar. Auf dieser Seite des Hofes wurden vier Öffnungen im Dach vorgesehen, da dies die sommerlich am stärksten Beschienene Seite darstellt und dort die höchsten Temperaturen

erwartet werden. Zur Nachströmung wurde in diesem Modell ein Bodeneinlass entlang der Maschinenhalle hofseitig mit ca. 18 m² Einlassfläche generiert.

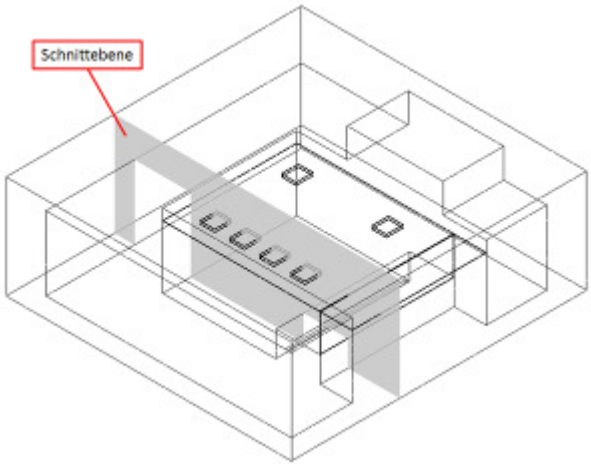


Abbildung 29: 3D Modell zur Berechnung der thermischen Strömungssituation im Innenhof der HfT Stuttgart (Software ANSYS Fluent).

Die Außentemperatur liegt in dem untersuchten Fall bei ca. 28 °C. Abbildung 30 zeigt das Temperaturverhalten der oben vorgestellten Schnittebene. Die Raumlufttemperaturen liegen im mittleren Aufenthaltsbereich bei ca. 32 °C, also 4 Kelvin über der Außentemperatur. Über der Maschinenhalle zeigt sich die schlechte Durchmischungsmöglichkeit der gewählten Zuluftvariante. Dort liegen die Temperaturen mit ca. 34 °C noch einmal weitere 2 Kelvin über den Temperaturen des unteren Aufenthaltsbereichs. Auch in diesem untersuchten Fall sind die geöffneten Flächen noch zu gering, um ein behagliches Nutzen im Sommer zu ermöglichen.

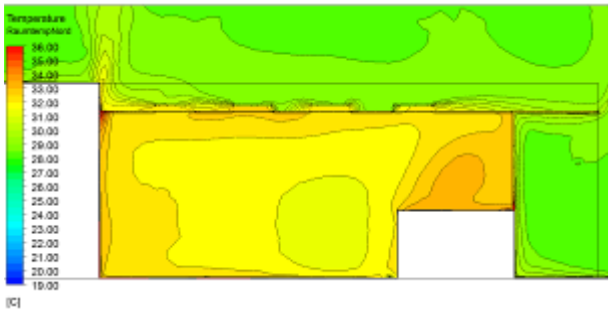


Abbildung 30: Temperaturschichtung an einem sommerlichen Tag in der in Abb. 15 gezeigten Schnittebene. Die Lufteintrittstemperatur am Bodenlufteinlass beträgt 21 °C.

Der untersuchte Fall der Lufteinbringung über den Fußboden neben der Maschinenhalle erweist sich in der Strömungssimulation als nicht zielführend. Als Lösungsansatz kann sich eine Anbringung von Weitwurfdüsen in der zum Hof gewandten Seitenwand der Maschinenhalle vorgestellt werden. Das würde die Bereiche „Aufenthaltszone unten“ und „Luftvolumen unter den Dach“ trennen, eine bessere Durchmischung der Luftvolumen begünstigen und dafür sorgen, dass eine definierte Menge Luft nachströmt. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Luft sind ein wichtiges Behaglichkeitskriterium in solchen Räumlichkeiten. Mit zu kleinen Eintrittsflächen im Boden kann es, bedingt durch den Massenerhaltungssatz, zu erhöhten Geschwindigkeiten kommen.

Eine weitere wichtige Komponente besteht in der Gewährleistung eines ausreichenden Tageslichteintrags in den Innenhof sowie die angrenzenden Gebäudeteile. Daher wurden entsprechende Simulationen durchgeführt.

5 Tageslichtsimulationen

Es wurden Berechnungen zur Tageslichtsituation in einem durch Membranen überdachten Innenhof an der Hochschule für Technik in Stuttgart (HfT) und ein 3D Modell zur Bestimmung der Tageslichtverhältnisse im Innenhof der Technischen Universität in München (TUM) erstellt.

Nachfolgend wird das Modell der Innenhofsituation an der HfT dargestellt (Abbildung 31). Aufgrund der unterschiedlichen Traufhöhen wurde die Membrane auf einer Höhe von 18 Metern gesetzt. Das entspricht der untersten Dachkante des nördlichen Gebäudeteils. Neben der Tageslichtsituation im überdachten Innenhof spielten gerade die angrenzenden Räume eine wichtige optische und energetische Rolle. Exemplarisch sei dazu die Glasfassade der angrenzenden Bibliothek modelliert. Im folgenden Bild als helle graue Fläche zu erkennen.

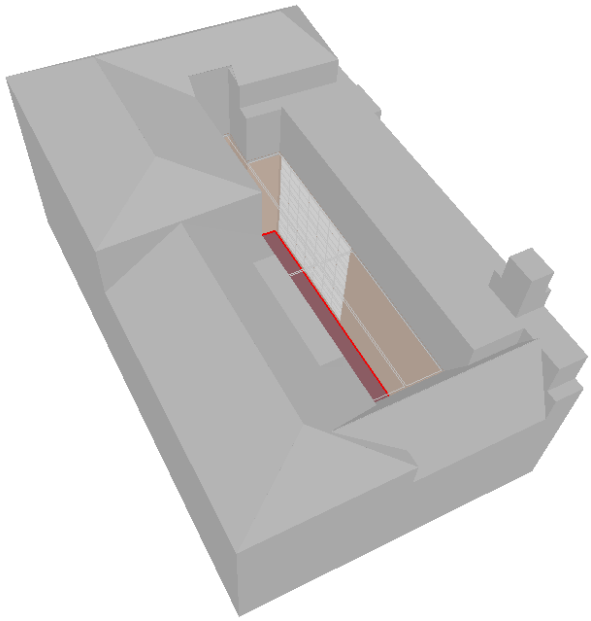


Abbildung 31: 3D Modell zur Berechnung der Tageslichtsituation im Innenhof HfT Stuttgart (Software: Relux 2010).

Um die untersuchte Situation weiter zu verdeutlichen sind in Abbildung 32 die beiden Messflächen zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke gezeigt. Diese befinden sich jeweils auf Erdgeschossniveau auf einer Höhe von 0,75 m. Mit jedem weiteren Stockwerk würde die Helligkeit in den angrenzenden Räumen zunehmen, deshalb wurde nur der erwartungsgemäß schlechteste Fall (Erdgeschoß) betrachtet.

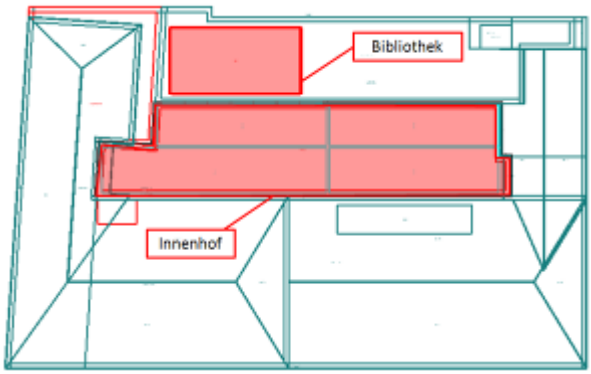


Abbildung 32: Darstellung der zwei unterschiedlichen untersuchten Messebenen am Modell HfT.

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurde ein zweiter Innenhof in München näher untersucht. Daraufhin wurde ein Modell der Situation an der Technischen Universität München erstellt. Siehe dazu Abbildung 33. Hierbei handelt es sich um eine vollkommen andere Bebauungssituation, da der Innenhof in Stuttgart schlauchartig und mit einer eher geringen tageslichtdurchlässigen Dachfläche von ca. 400 m² zu beschreiben ist und der zweite Fall in München mit einer deutlich größeren Dachfläche von ca. 1.300 m² bzw. mit einer neu zu erstellenden transparenten Fassadenfläche (ca. 300 m²), welche eine Querbelichtung zulässt, ausgestattet ist. Auch das in München zur Verfügung stehende Luftvolumen von 18.000 m³ entspricht ungefähr dem 2,6-fachen vom Stuttgarter Hof (mit ca. 7.000 m³).

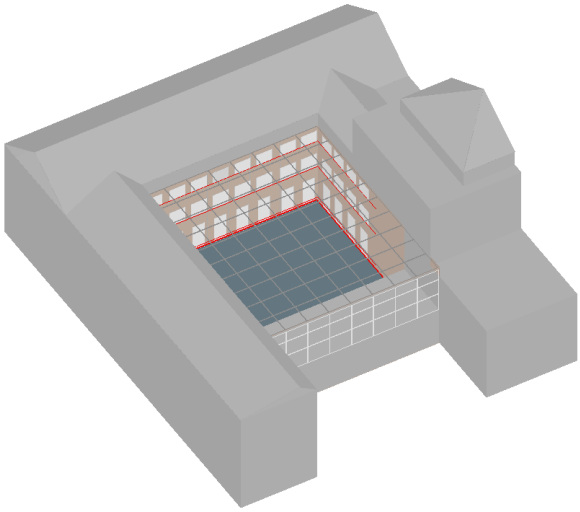


Abbildung 33: 3D Modell zur Berechnung der Tageslichtsituation im Innenhof TU München (Software: Relux 2010).

Die oben stehenden Zahlen ermöglichen unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten und bieten verschiedene Vor- und Nachteile. Der Münchener Innenhof bietet z. B. eine größere Nutzfläche, hat aber auch das größere Problem was den sommerlichen Wärmeschutz betrifft. Wohingegen beim Stuttgarter Hof wegen seiner geringen Dachfläche und seinem schlauchartigen Aufbau ein geringeres Wärmeproblem zu erwarten ist, allerdings wird man sich in den angrenzenden Räumen verstärkt um das Belichtungsangebot kümmern müssen.

Vergleichend zum Stuttgarter Innenhof sind in Abbildung 34 auch die untersuchten Messebenen in München dargestellt. Hier wurde sowohl der Innenhof, als auch die beschatteten angrenzenden Räume im südlichen Gebäudeteil betrachtet.

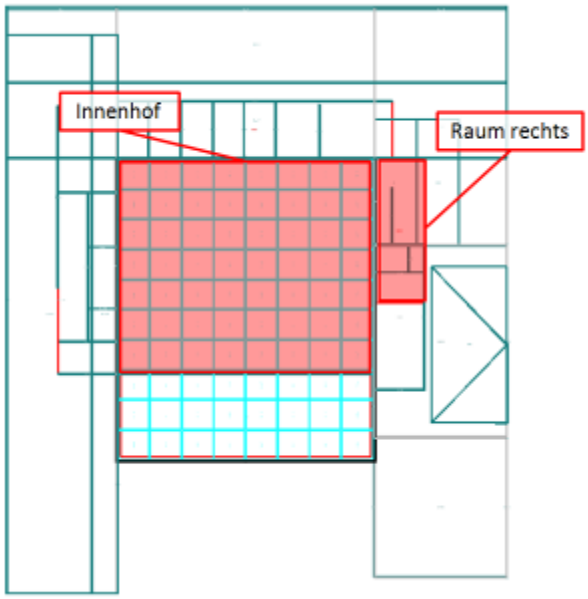


Abbildung 34: Darstellung der zwei unterschiedlichen untersuchten Messebenen am Modell TUM.

In den folgenden Abbildung 35 bis Abbildung 38 sind auszugsweise die berechneten Ergebnisse für den bevorzugten Fall dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen verwendeten Transmissionsgrad von 60 Prozent auf der Membrane. Weitere untersuchte Fälle sind den vorangegangenen Zwischenberichten zu entnehmen.

Zunächst wird die Belichtungssituation im Innenhof gezeigt. Hier konnte eine Beleuchtungsstärke zwischen 1000 und 2000 Lux im Hof Stuttgart (Abbildung 35) berechnet werden. Wohin gegen der Hof in München (Abbildung 36) wegen seiner deutlich größeren Dachfläche auf Werte zwischen 2000 und 4000 Lux zu berechnen ist. Beide Situationen sind für eine Nutzung als Ausstellungsfläche vollkommen geeignet.

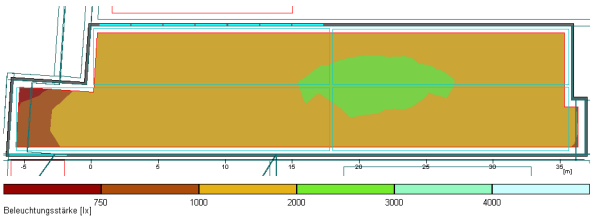


Abbildung 35: Berechnete Beleuchtungsstärke bei einem Transmissionsgrad der Membrane von 60 % im Innenhof Stuttgart, Messebene auf 0,75 m.

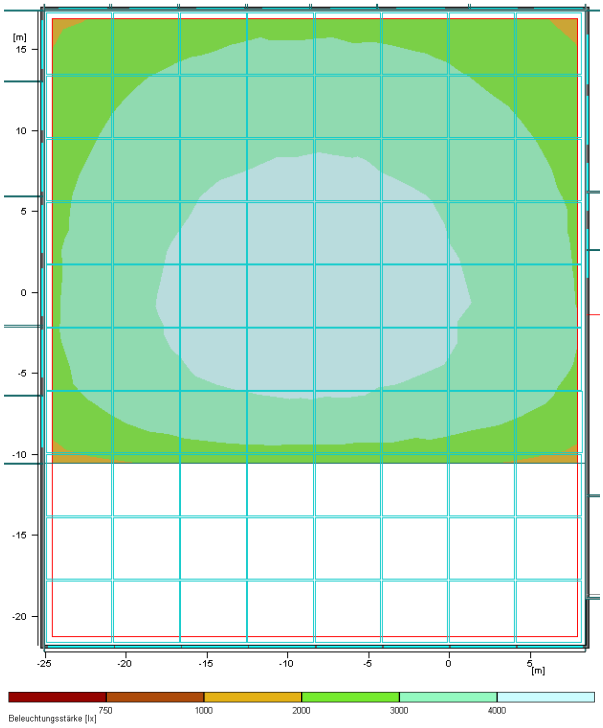


Abbildung 36: Berechneter Beleuchtungsstärke bei einem Transmissionsgrad der Membrane von 60 % im Innenhof München, Messebene auf 0,75 m.

Weiterhin wird jeweils ein an den Hof angrenzender Raum gezeigt. Die Beleuchtungsstärke in der Stuttgarter Bibliothek liegt in Fensternähe bei ca. 750 Lux. In Raumtiefe werden weitestgehend noch zwischen 300 und 500 Lux erreicht. Vgl. dazu Abbildung 37. Die Verglasung der Bibliothek besteht gegenwärtig aus einer sehr dunklen Sonnenschutzverglasung. Dieser Sonnenschutz wurde wegen eines Überhitzungsproblems nachträglich mittels einer auf die Scheiben geklebten dunklen Kunststofffolie hergestellt. Laut den Verantwortlichen in Stuttgart sollte diese Folie im Falle einer Überdachung wieder entfernt werden.

Die angestellten Berechnungen zur natürlichen Belichtung des Bibliothekssaals im Erdgeschoss wurden demnach, mit einem Transmissionsgrad von 80 % der Glasfassade hinterlegt. Und die berechneten Beleuchtungsstärken fordern diese Änderung ein. Die 750 Lux in fensternähe sind für die vorzufindende Raumnutzung angemessen. Ab ca. 2 m Raumtiefe legen bereits nur noch 300 bis 500 Lux vor. Hier wird es für den Nutzer bereits notwendig Kunstlicht einzuschalten. Was

die Energieeffizienz des Gesamtgebäudes reduzieren würde.

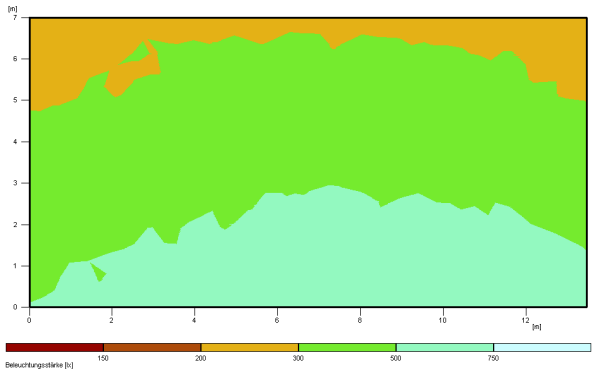


Abbildung 37: Berechneter Beleuchtungsstärke bei einem Transmissionsgrad der Membrane von 60 % in der Bibliothek Stuttgart, Messebene auf 0,75 m.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 38 angrenzende Räume des Münchner Innenhofes, wiederum das Erdgeschoss. In den belichteten Bereichen ist das Tageslichtangebot mit 500 bis 750 Lux durchaus für Bürotätigkeiten ausreichend. Einzig in den hinteren Raumgruppen (im Bild rechts) muss Kunstlicht zugeschaltet werden.

Auch für das Münchner Modell wurden verschiedene Berechnungen angestellt. Diese wurden bereits in vorangegangenen Berichten vorgestellt. Wegen der Übersichtlichkeit innerhalb des vorliegenden Berichtes wurden die aussagekräftigsten Grafiken herausgegriffen und erneut dargestellt.

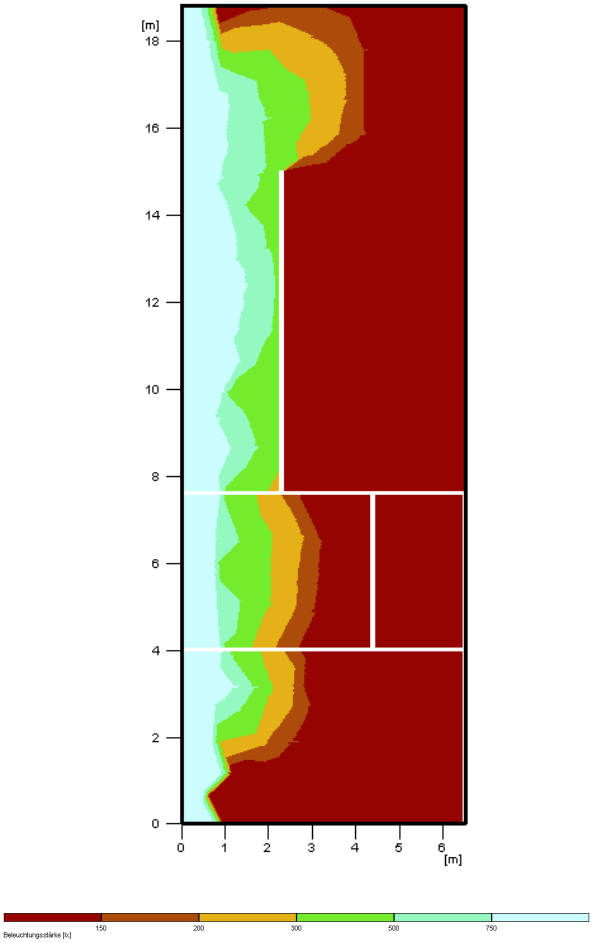


Abbildung 38: Berechneter Beleuchtungsstärke bei einem Transmissionsgrad der Membrane von 60 % in angrenzenden Räumen München, Messebene auf 0,75 m.

Darüber hinaus konnte mit einem Design Builder Modell eine Betrachtung der Belichtungssituation im überdachten Innenhof München vorgenommen werden. Die folgenden Abbildung 39 bis Abbildung 47 zeigen verschiedene exemplarische Lichtspiele, abhängig von Tages- und Jahreszeit. Im Monat Januar liegt wegen der tiefstehenden Wintersonne der gesamte Hof und die angrenzenden Räume nahezu vollkommen im Schatten (Abbildung 39 bis Abbildung 41). In der Übergangszeit, hier April (Abbildung 42 bis Abbildung 44), ist ein kleiner Teil des Hofes bereits am Morgen belichtet, um die Mittagszeit liegt ca. die Hälfte in der Sonne. Auch in den Abendstunden wird die südliche Fassade noch zu einem großen Teil besonnt. Im betrachteten Sommerfall (Abbildung 45 bis Abbildung 47) wird der zur Universitätsstraße hin geöffnete Teil des Hofes größtenteils beschienen. Bedingt durch die hochstehende Sonne wird der Hofbereich bis in die Abendstunden hinein besonnt.

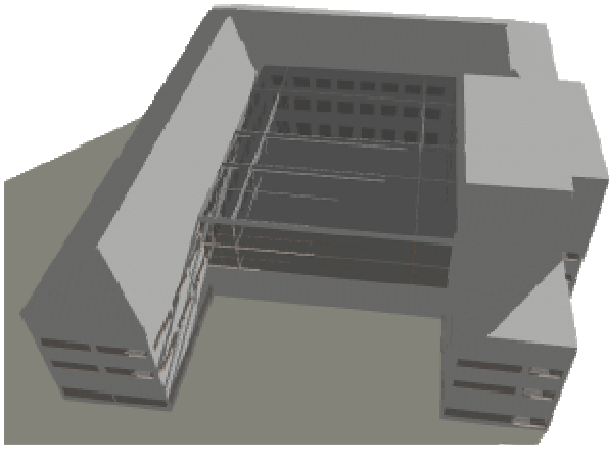


Abbildung 39: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. Januar 10 Uhr.

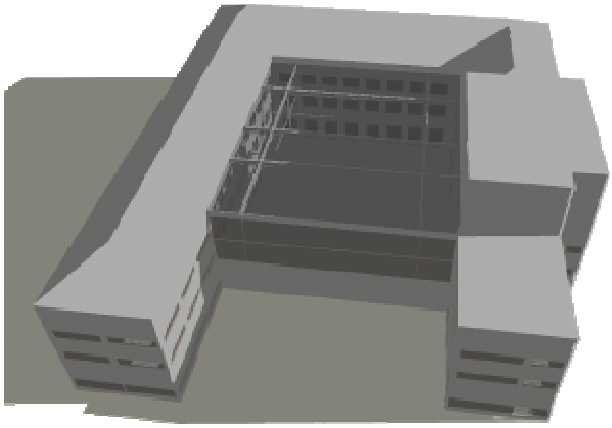


Abbildung 40: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. Januar 13 Uhr.

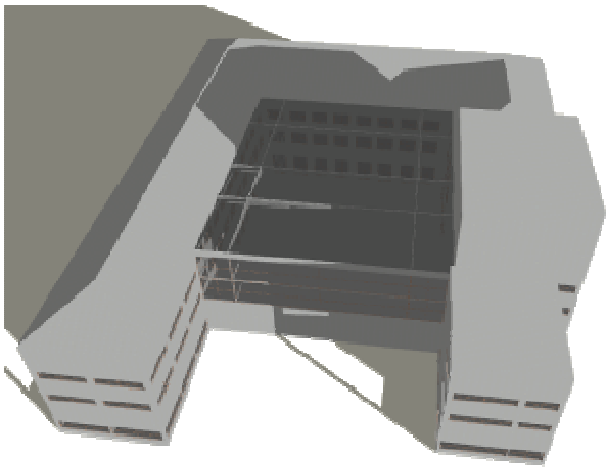


Abbildung 41: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. Januar 17 Uhr.

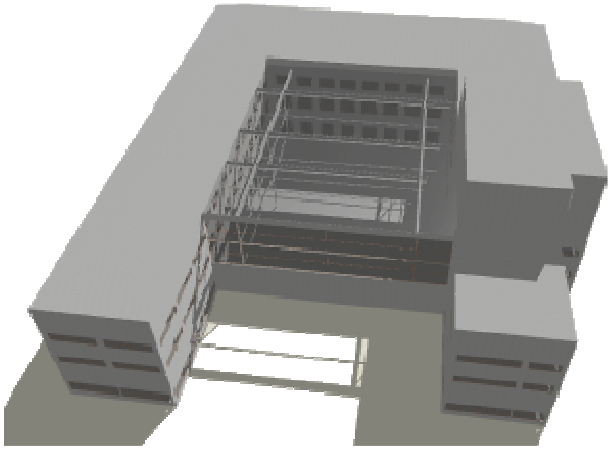


Abbildung 42: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. April 10 Uhr.

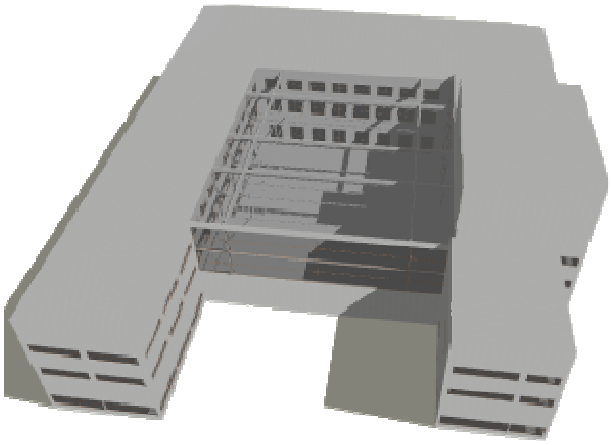


Abbildung 43: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. April 13 Uhr.

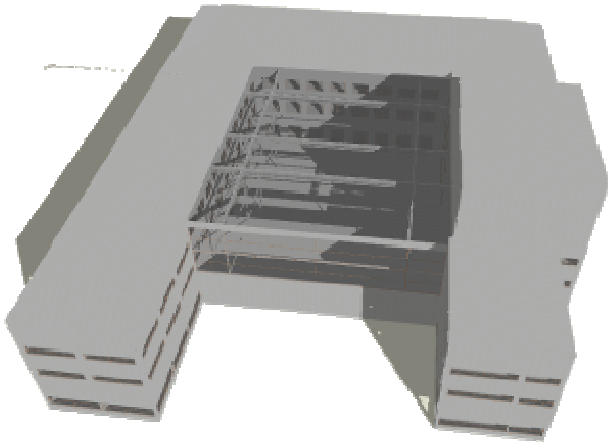


Abbildung 44: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. April 17 Uhr.

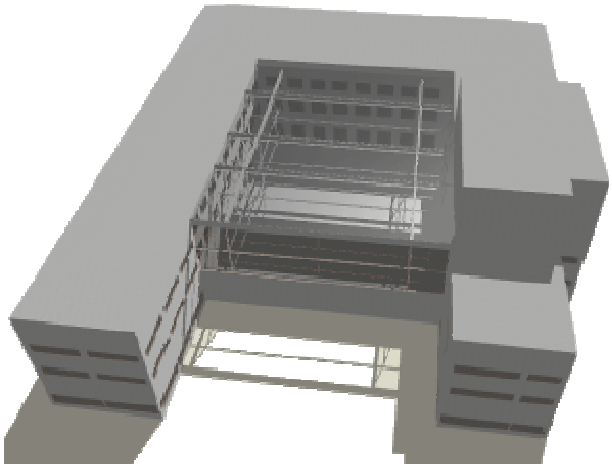


Abbildung 45: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. Juli 10 Uhr.

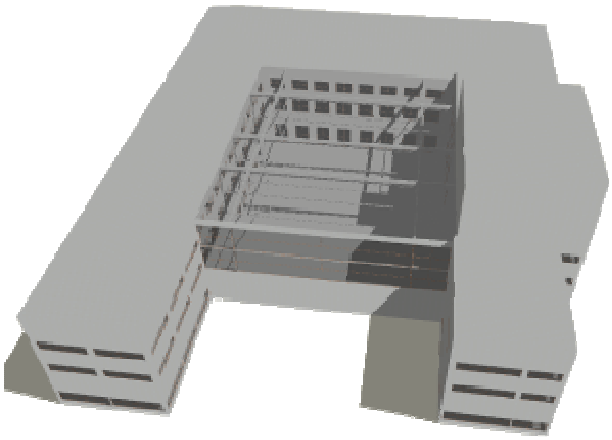


Abbildung 46: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. Juli 13 Uhr.

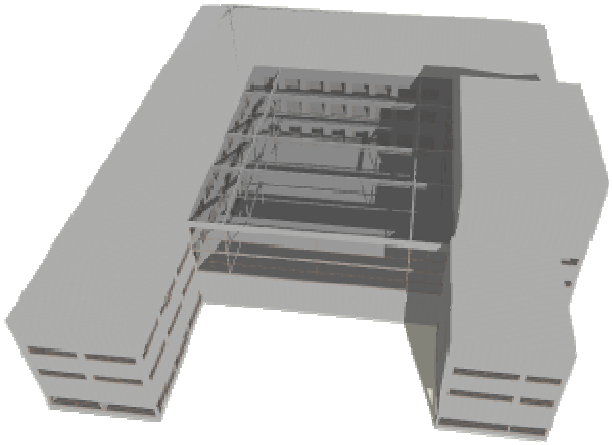


Abbildung 47: Belichtungssituation im überdachten Innenhof München 21. Juli 17 Uhr

Abschließend wurde noch eine regelungstechnische Konzeption erstellt, mit deren Hilfe geeignete Temperatur-, Strömungs- und Lichtverhältnisse im Innenhof erreicht werden können.

6 Regelungstechnische Konzeption

Auf Grundlage der oben gewonnen Erkenntnisse bzgl. der konkreten Innenhofsituation mit Membranüberdachung wurden regelungstechnische Konzepte entworfen. Zunächst aber sollen die unterschiedlichen Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung anhand der vier ursprünglich betrachteten Membrankonstruktionsvarianten beleuchtet werden. Darauf aufbauend sind regelungstechnische Konzepte zu erstellen.

Abbildung 48 zeigt die erste, näher betrachtete Variante. Hier wurde überlegt, eine bestehende Fassade durch eine Membrankonstruktion auszutauschen. Die Anforderungen an die TGA gliedern sich in schnelle Systeme zur Beheizung, einer notwenigen Kühlung dahinter liegender Räume und einem ausreichenden Blendschutz. Die Regelung solcher Gebäude, bzw. der angrenzenden Räume bedarf höchster technischer Anforderung. Die hohen dynamischen Effekte und die maximal geringe Speicherfähigkeit verlangen eine umfassende regelungstechnische Konzeption.

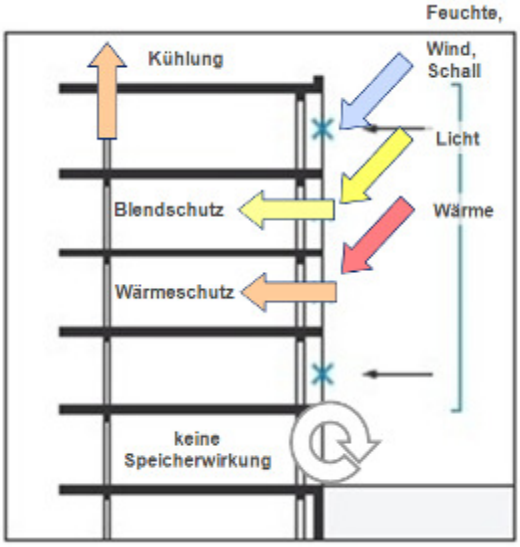


Abbildung 48: Anforderungen an TGA bei Austausch von Fassadenteilen durch Membrankonstruktionen.

Der zweite denkbare Fall einer Anwendung von Membranen zur energetischen Sanierung von Gebäuden stellt eine Doppelfassadenkonstruktion dar. Abbildung 49 zeigt das Prinzip und die für TGA ausschlaggebenden Faktoren. Durch die äußere zweite Hülle ent-

steht ein Luftraum, der als minimaler Wärmespeicher fungieren wird. Von besonderer Wichtigkeit ist in diesem Fall bereits der Schutz vor Überhitzung. Verlangt der Brandschutz nach Geschossweisen Abtrennungen, wäre es für den Abtransport der im Zwischenraum entstehenden Wärmelasten ebenfalls ratsam, eine ausreichende Be- und Entlüftungsmöglichkeit vorzusehen. Demnach wäre eine aufwendige raumlufttechnische Anlage notwendig. Geringe Vorteile könnte eine dadurch zu schaffende Nachtlüftungsmöglichkeit bringen. Die Anforderungen an eine Reglungstechnik in auf diese Weise ertüchtigten Gebäuden sind ebenfalls anspruchsvoll.

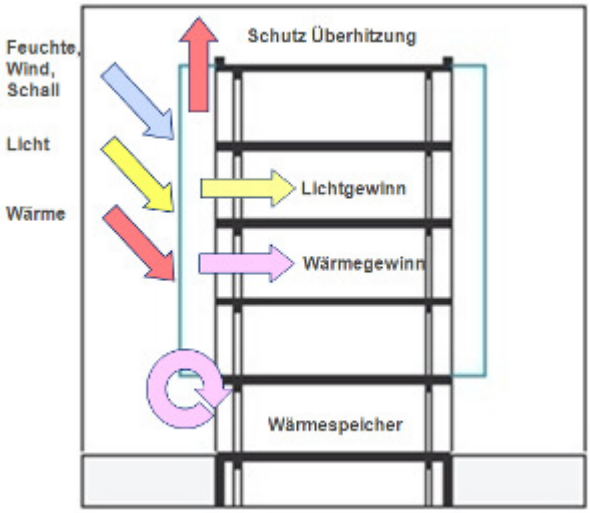


Abbildung 49: Anforderungen an TGA bei einer zweiten Haut durch Membrankonstruktionen.

Weiterhin wurde darüber nachgedacht, ein Gebäude oder einen aus mehreren Teilen bestehender Gebäudekomplex mittels einer Membrankonstruktion zu überspannen. Abbildung 50 stellt diese Prinzip auf einfache Art und Weise dar. Der größte Konflikt besteht in dieser Variante darin, eine ausgewogene Balance zwischen notwendigem Lichteintrag und dem zu begrenzenden solaren Wärmeeintrag herzustellen. Je nach Luftvolumen zeigt sich eine mittlere Speicherwirkung mit mittlerer Dynamik. Ein Schutz vor Überhitzung ist bei geschlossener Bauweise dringend erforderlich. Liegt die Membrankonstruktion lediglich über dem Gebäudeszenario und ist unten weiträumig geöffnet stellt die Überhitzung eine untergeordnete Rolle dar, allerdings sollte dann auf eine Anströmung und eine Durchströmung des Geländes geachtet werden. Könnte es in einem solchen Falle doch zu erheblichen Zugerscheinungen kommen. Die Anforderungen an eine energieeffiziente Regelungstechnik, die zu jederzeit behagliche Zustände im Inneren des eingehüllten Gebäudes schafft werden als erhöht eingestuft.

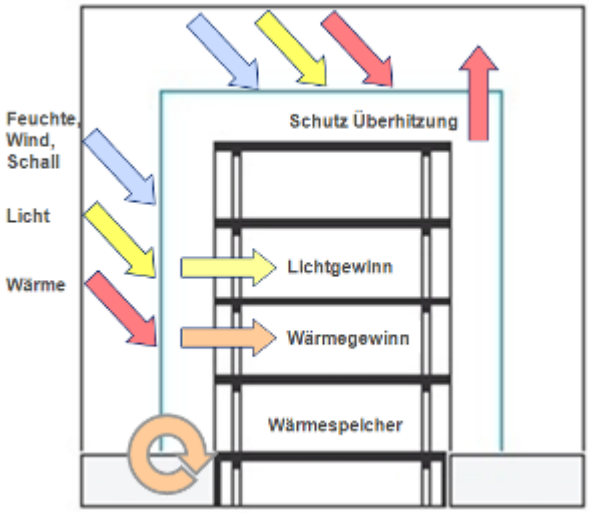


Abbildung 50: Anforderungen an TGA bei einer Haus in Haus Membrankonstruktion.

Wegen den in vorangegangen Kapiteln vorgestellten Gründen und nicht zuletzt wegen den hier erläuterten deutlich erhöhten Anforderungen der ersten drei Fälle, konzentrierte sich der weitere Projektverlauf auf eine Überdachung eines vorhandenen Innenhofes. Die bauphysikalischen Vorteile, die eine Atriumüberdachung mit Membrankonstruktionen bietet, werden an anderer Stelle dieses Berichtes ausführlich beleuchtet. In Abbildung 51 wird das untersuchte Prinzip anskizziert.

Die Speicherwirkung des Luftvolumens unter der Membranhaut ist wegen der umseitig umschlossenen Bebauungssituation als hoch anzusehen. Bietet die Variante Haus-im-Haus unter anderem wegen den Transmissionsverlusten der enorm großen Hüllfläche maximal mittlere Speichermöglichkeiten, fungiert die beschriebene Situation einer Atriumüberdachung als eine Art Luftkollektor. Die damit zusammenhängende Dynamik der Temperaturen des Luftvolumens variiert stark mit dem Luftwechsel. Eine natürliche Lüftung ist durch geeignete Öffnungen im Dachbereich und zur Nachströmung geeignete Öffnungen im Aufenthaltsbereich gut zu realisieren, allerdings nur zu bestimmten Wettersituationen. Um

eine durchgängige Behaglichkeit zu gewährleisten wird eine mechanische Belüftung eines Atriums empfohlen. Eine Nachauskühlung bringt im Sommer geringe Vorteile. Die regelungstechnischen Anforderungen liegen im favorisierten Fall auf üblichem Niveau.

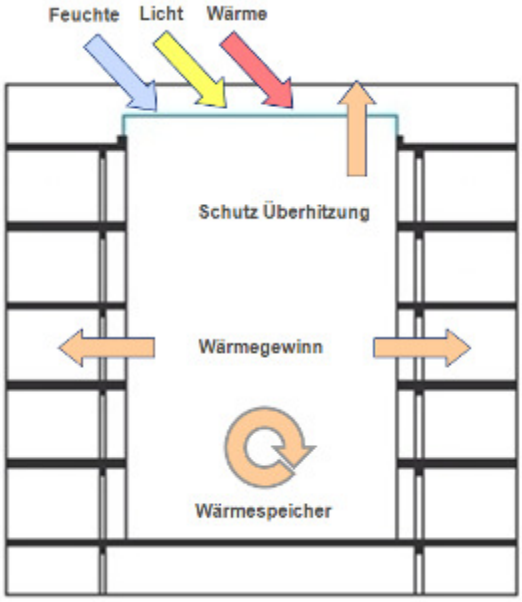


Abbildung 51: Anforderungen an TGA bei einer Atriumüberdachung durch Membrankonstruktionen.

Die im Kapitel 6.8 vorgestellten thermischen Simulationen zeigen ein dynamisches Verhalten für unterschiedliche Luftwechselzahlen. Je häufiger die Luft ausgetauscht wird, desto geringer liegt das zu erwartende Temperaturniveau. Eine Vortemperierung bereits mechanisch belüfteter Hörsäle in direkter Nähe zum Innenhof wurde geprüft.

Für die weitere Konzeption ist es ratsam, zu definieren welche Temperaturen im Aufenthaltsbereich, bzw. im Dachbereich als zulässig anzusehen sind. Und welche Nutzungen sich aus den verschiedenen Temperaturniveaus erschließen. Abbildung 52 stellt die Möglichkeiten einer Nutzung den anzustrebenden Temperaturen gegenüber.

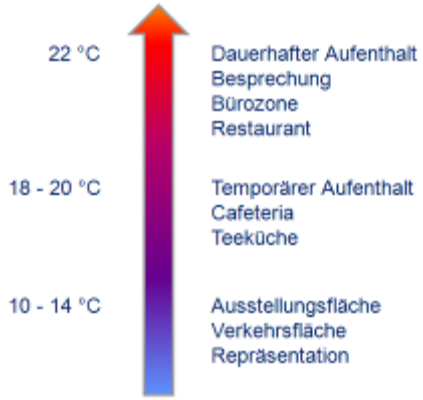


Abbildung 52: Temperaturen in Atrien in Abhängigkeit von der Nutzung [Quelle: Hausladen et. al., Climadesign].

Im Temperaturbereich von 10 bis 14 °C wird sich ein kurzfristiger Aufenthalt einstellen. Soll der überdachte Bereich als Ausstellungsfläche genutzt werden, müssen diese Temperaturen vorgehalten werden. Wie die thermischen Simulationen zeigen, kann auch im Winter durch die Kollektorwirkung des Membranhofes diese temperaturspanne gut ohne zusätzliche Beheizung erreicht werden. Jedoch reichen 10 - 14 °C nicht aus, um temporären oder gar dauerhaften Aufenthalt zu ermöglichen. Soll die Fläche auch als Arbeitsplattform genutzt werden, wird eine Beheizung des Aufenthaltsbereiches notwendig. Dies kann durch eine Kombination aus Bauteilaktivierung und flinken Luftsystemen ermöglicht werden.

Die nachfolgenden beiden Schemata in Abbildung 53 und Abbildung 54 geben einen Überblick über die regelungstechnische Konzeption des näher untersuchten Falles eines Atriums. In einem vorangegangenen Zwischenbericht wurden bereits weitere Konzepte für die anderen Fälle vorgestellt.

Zunächst wird in Abbildung 53 dargestellt, welche Informationen die Gebäudeautomation benötigt, um alle zu regelnden Parameter der Raumautomation behandeln zu können. Für den Witterungsschutz werden zunächst eine Windmessung, die Außentemperatur und der Niederschlag benötigt. Zur Sonnenstandsberechnung ist die Uhrzeit erforderlich. Die Globalstrahlung ist zur Sonnenschutzregelung unablässig. Es werden hier drei Zeitprogramme dargestellt, (Zeitprogramm Energieniveau Büro, Besprechung und Funktion) die ebenfalls auf die Uhrzeit-

angabe angewiesen sind. Die Übergabe der Daten an den eigentlichen Raum, ob nun Innenhof selbst oder an den Innenhof angrenzende Raum besteht aus folgenden Funktionen:

- Jalousiesteuerung
- Witterungsschutz
- Energieniveauwahl Büro
- Energieniveauwahl Besprechung
- Reglerfunktion
- Sonnenstand Azimuth
- Sonnenstand Elevation
- Außentemperatur
- Außenhelligkeit
- Jalousiestellung Automatik

Abbildung 54 stellt das Regelungskonzept im Zusammenhang mit den zu messenden Werten, den Funktionen und den Geräten dar. Die notwendigen regelungstechnischen Funktionen werden nachfolgend kurz erläutert (von links nach rechts in der Abbildung).

Belegungsauswertung:

Ermittlung des Belegungszustands im technischen Zentrum, bzw. Innenhof für weitere Anwendungsfunktionen.

Sollwertermittlung:

Ermittlung aller notwendigen Sollwerte von unterschiedlichen Energieniveaus.

Energieniveauwahl mit Startoptimierung:

Erweiterung der Funktion Energieniveauwahl, damit der Zeitpunkt zum automatischen Umschalten der Raumzustände gleitend berechnet wird.

Temperaturregelung (Heizen/Kühlen):

Einhaltung von gewünschter Raumtemperatur durch ständige Ermittlung der Temperaturdifferenz zum Sollwert und der Anpassung der Ventilstellung.

Nachtkühlung:

Kühlung des Innenhofes durch Einbringung kälterer Außenluft über Öffnungen in Fassade und Dach.

Tageslichtschaltung:

Schaltung der Raumbeleuchtung (bei Belegung automatisch ein, falls die natürliche Beleuchtungsstärke unter einen eingestellten Sollwert fällt). Die Funktion schaltet die Beleuchtung automatisch ab, wenn die natürliche Beleuchtung ausreicht. Diese Funktion ist im technischen Zentrum wegen der geplanten Öffnung zum Hof hin durchaus sinnvoll.

Witterungsschutz:

Schutz von außenliegenden Sonnenschutzeinrichtungen vor Beschädigungen bei Unwettern. Zudem können über diese Funktion geöffnete Dachluken bei Regenfall geschlossen werden.

Thermoautomatik:

Nutzung des Sonnenschutzes in unbelegten angrenzenden Räumen zur Unterstützung der Temperaturregelung.

Prioritätssteuerung:

Festlegung der Rangfolge verschiedener Befehle. Hier wird entschieden, ob die Dachluken analog der Funktion „Thermoautomatik“ geöffnet, oder wegen „Witterungsschutz“ geschlossen werden.

Die vorgestellten Funktionen ermöglichen einen energieeffizienten und nachhaltigen Betrieb eines mit Membranen überdachten Innenhofes. Sie regeln mit ihren speziellen Eigenschaften das Zusammenspiel von Bauteilaktivierung, Lüftungsgerät, Entlüftungsöffnungen in Dach und Fassade, einem Sonnenschutz und der Innenhofbeleuchtung. Durch verwendete Sensoren und einer intelligenten Programmierung zur Berücksichtigung von tages- und jahreszeitlichen Unterschieden in Nutzung und Bedarf wird der Betrieb vorausschauend optimiert. Eine Entrauchung des Innenhofes ist gesondert zu regeln.

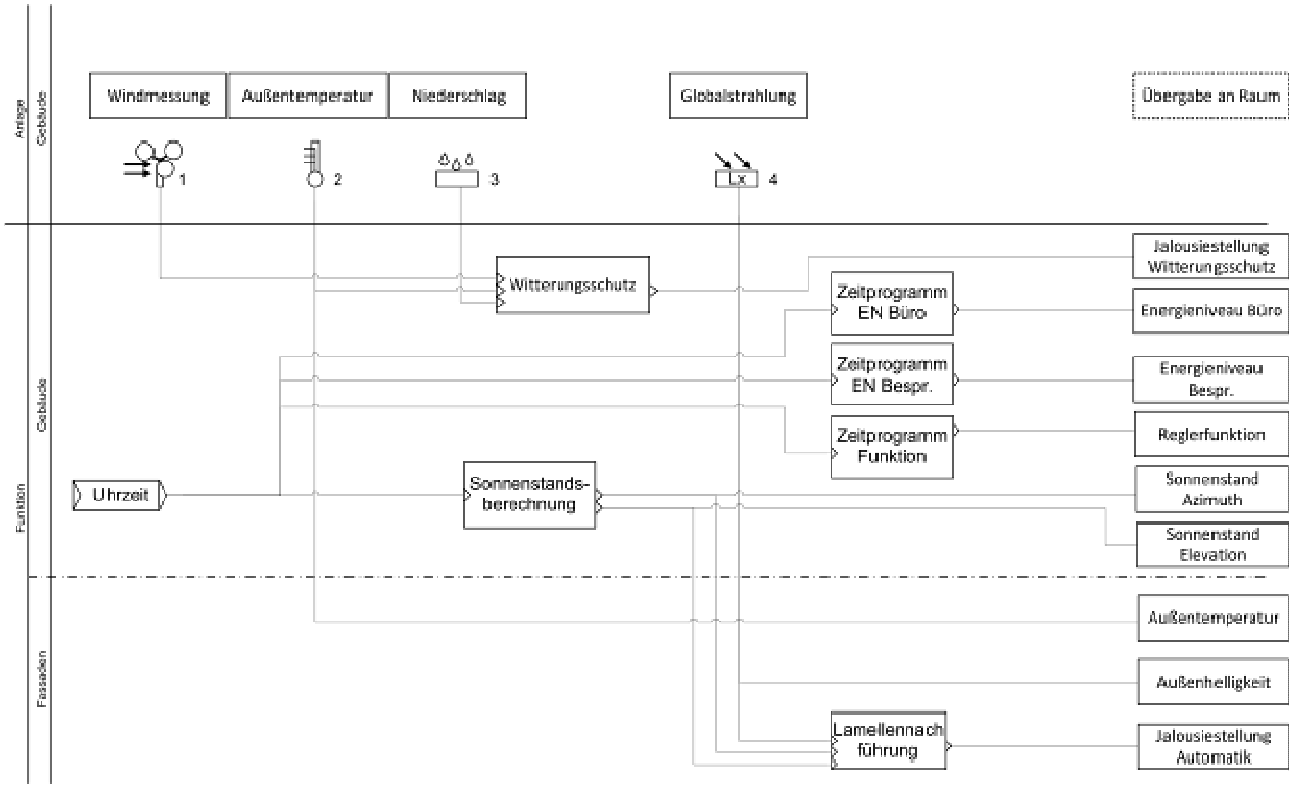


Abbildung 53: Schema der für die Regelungstechnik nötigen Kenndaten.

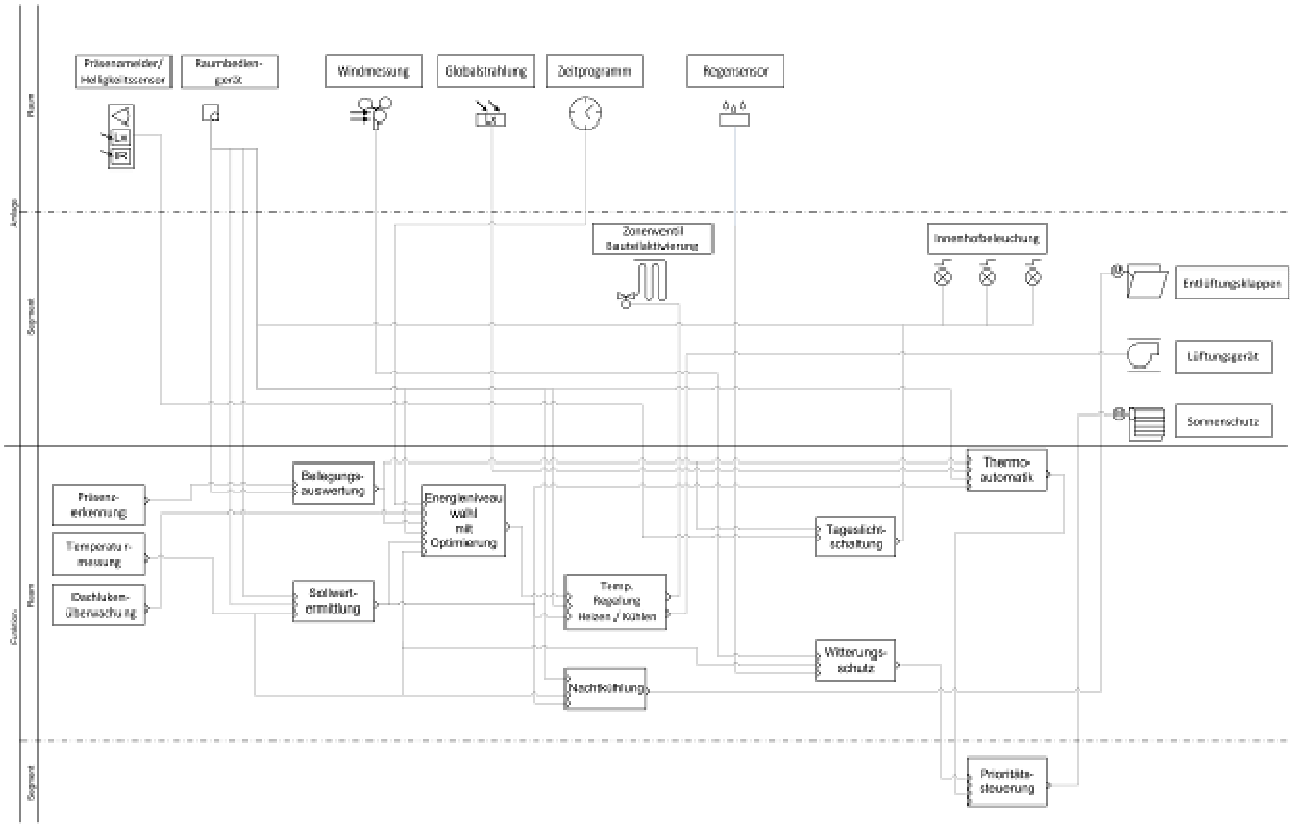


Abbildung 54: Regelungskonzept für ein membranüberdachtes Atrium.

Abschließend sind in den folgenden Abbildung 55 bis Abbildung 57 drei unterschiedliche Konzepte gezeigt, wie eine behagliche und energieeffiziente Betriebsart in einem speziell genutzten überdachten Innenhof aussehen kann. Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Erklärung des Konzeptes unterteilt in die Jahreszeiten Winter, Übergangszeit und Sommer.

Der Winterfall:

Die öffenbaren Dachelemente bleiben im Winter weitgehend geschlossen, um keine unnötigen Wärmeverluste zu erzeugen. Wegen gegenwärtig sinnvoll erreichbaren U-Werte von ca. 2 bis 3 W/m²*K wird die oberste Schicht in Dachnähe kälter sein als im restlichen Luftraum. Um den Aufenthaltsbereich angenehm zu temperieren sind neben einer trägen Bauteilaktivierung zur Grundlastabdeckung auch flinke Luftsysteme angeraten. Diese über das technische Zentrum, fallweise auch in weiteren Höhen mittels Weitwurfdüsen einzubringende erwärmte Luft, sorgt dafür, dass es zu keinem Kaltluftabfall in den Aufenthaltsbereich kommt. Die durch das überdachte Atrium angesaugte vortemperierte Zuluft reduziert den einzusetzenden Energiebedarf zur Beheizung des Objektes. Die weiteren angrenzenden Räume können im Winter problemlos über das Atrium gelüftet werden. Das Temperaturgefälle im gesamten Luftraum wird sich dank intelligenter Regelung, idealerweise wie in Abbildung 55 angedeutet, ausbilden.

Die Übergangszeit:

Um in der Übergangszeit in allen angrenzenden Räumen ein gleichbleibendes Lüftungsverhalten zu ermöglichen, ist es angedacht, eine gleichmäßige Schichtung (siehe dazu farblicher Pfeil in Abbildung 56) zu erzeugen. Dazu wird die in Dachnähe durch Sonneneinwirkung erwärmte Luft abgesaugt und durch verschiedene Höhen im Luftraum wieder eingebracht. Dadurch kann eine Umluftwalze erzeugt werden.

Der Sommerfall:

Im Sommer (Abbildung 57) wird es notwendig, die Dachluken zum Abtransport der nicht nutzbaren Stauwärme zu öffnen. Dazu sind weitere Nachströmöffnungen im Fassadenbereich nötig. Durch eine Bauteilaktivierung, angeschlossen an eine Grundwasserkühlung, wird zusätzlich der Aufenthaltsbereich und das technische Zentrum temperiert. Die Luft des Innenhofes wird auch im Sommer durch im gezeigten Schema umgewälzt. Dadurch kann eine Lüftungsmöglichkeit der angrenzenden Räume ermöglicht werden.

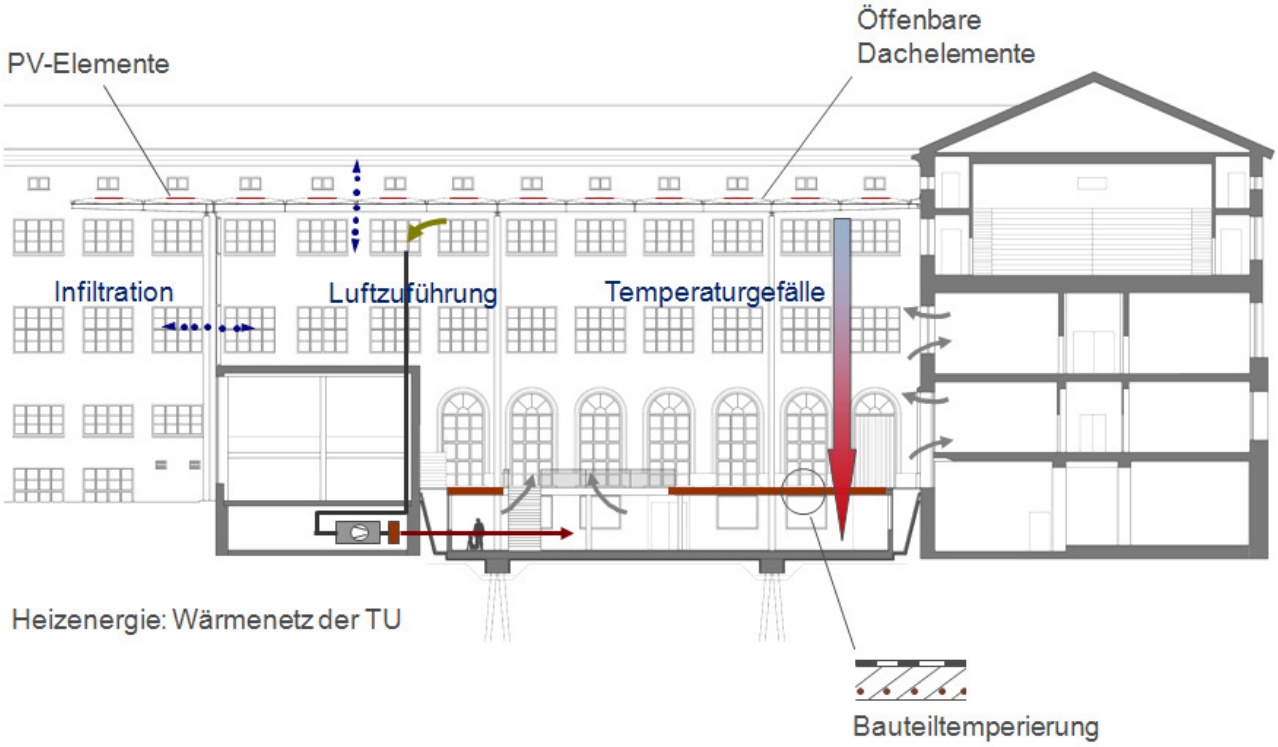


Abbildung 55: Darstellung einer empfohlenen Betriebsart im Winter.

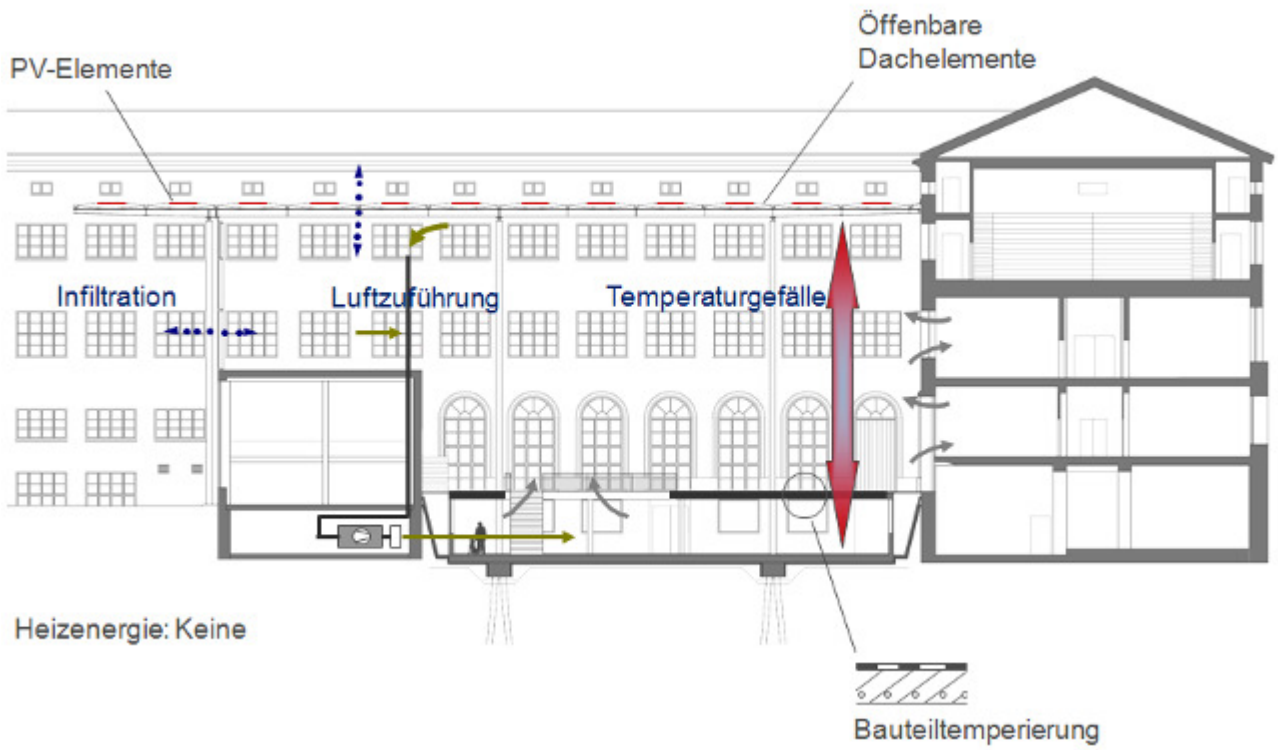


Abbildung 56: Darstellung einer empfohlenen Betriebsart in der Übergangszeit.

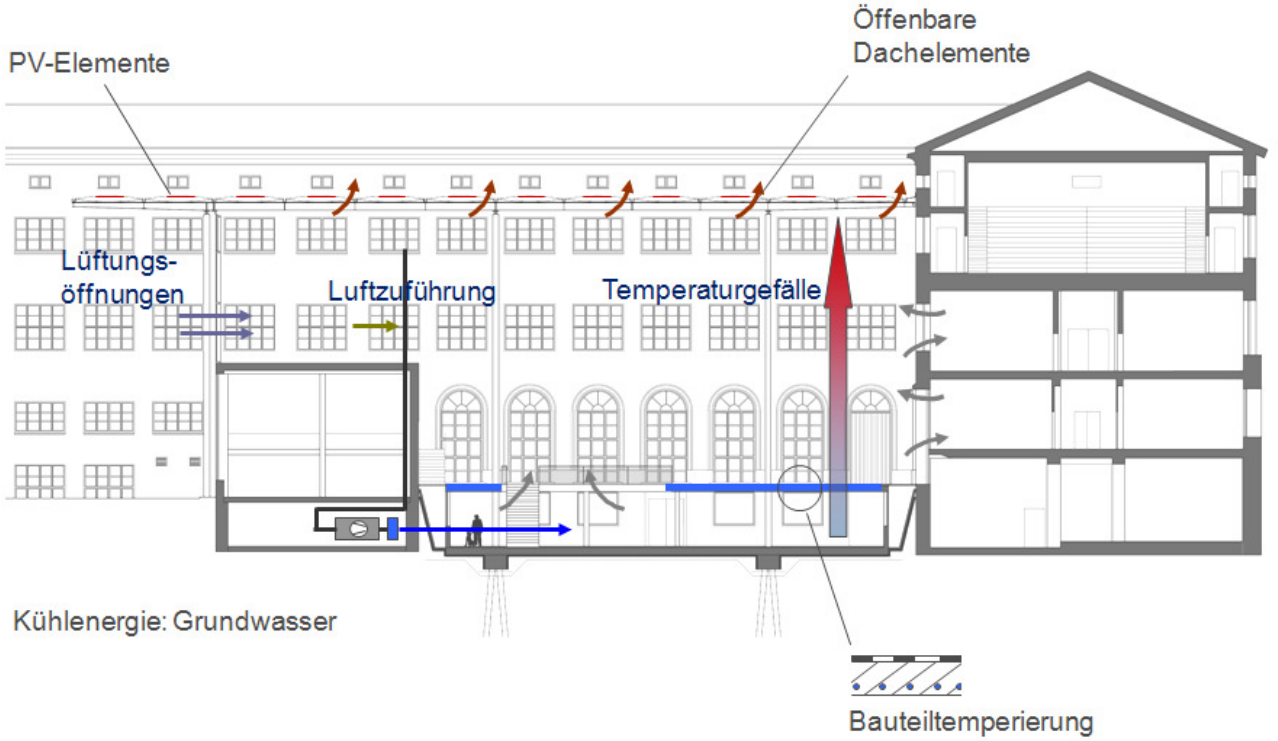


Abbildung 57: Darstellung einer empfohlenen Betriebsart im Sommer.

Die entwickelten regelungstechnische Konzepte ermöglichen eine optimale Verwendung des Innenhofs als Zwischennutzungszone und gewährleisten eine Energieeinsparung der angrenzenden Gebäudeteile.

Wesentliche Erkenntnisse

Die erarbeiteten wesentlichen Erkenntnisse in Bezug auf eine energieeffiziente und nachhaltige Nutzung von gewonnenen Flächen unter einer Membrankonstruktion sind nachfolgend noch einmal übersichtlich zusammengefasst. Von Beginn an wichtig festzulegen ist die Nutzung der zugewonnen Flächen. Daraus leiten sich dann die notwendigen technischen Maßnahmen ab, die durch ein ausgeklügeltes TGA Konzept eine optimale Nutzung in allen Jahreszeiten garantieren. Neben der Energieeinsparung durch Verbesserung der Transmissionswärmeverluste der Hüllflächen kann mit Energieeinsparungen durch die Nutzung des vortemperierten Luftraumes gerechnet werden. Die einzusetzende TGA muss in der Lage sein, mit ständig wechselnden Verhältnissen umgehen zu können. Dazu sind ausreichend Sensoren für Raumlufttemperaturen, Beleuchtungszustände (Beleuchtungsstärke) und Luftbewegungen einzuplanen. Nur wenn die Gebäudeautomation die vorherrschenden Zustände kennt, kann sie adäquat arbeiten und für einen optimalen Einsatz aller vorhandenen Energiepotentiale und den weiteren notwendigen Energien sorgen.

- ✓ **Genaue Kenntnis über Nutzung des gewonnenen Raumes nötig**

Von besonderer Wichtigkeit ist das Festlegen der angedachten Nutzung des zu überdachenden Luftraumes. Wird der gewonnene Raum als überdachter Außenraum angesehen, wie dies beispielsweise beim Residenzschloss in Dresden der Fall ist, werden die Anforderungen an thermische Behaglichkeit gering ausfallen. Hier ist der Zweck bereits erfüllt, wenn der Nutzer trockenen Fußes zwei unterschiedliche Orte unter der Membrane erreichen, bzw. er sich kurzfristig darunter aufhalten kann. Hier sind dann auch keine Klagen über niedrigere Temperaturen im Winter zu erwarten. Soll der gewonnene Raum als Ausstellungsfläche, für winterliche Konzerte, Weihnachtsfeiern oder gar zu längerem sitzenden Arbeiten, wie dies im hier näher untersuchten Fall durch das technische Zentrum an der TUM der Fall wäre, muss wesentlich genauer hingesehen werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich einzig auf natürliche Konzepte zu verlassen nicht der richtige Weg ist. Es wird Tage des Jahres geben, an denen das unbedingt notwendige natürliche Belüftungskonzept bestens funktioniert. An den anderen Tagen ist eine intelligente TGA für die Einhaltung der gewünschten Zustände unumgänglich.

- ✓ **Membranbauten mit wechselnder Nutzung erfordern ausgeklügelte Gebäudeautomation**

Ist die Nutzung von Flächen unter einer Membrankonstruktion klar definiert, kann ein technisches Konzept erarbeitet werden. Von der festgelegten Nutzung hängt es ab, welche Temperatur- und Beleuchtungszustände vorgehalten werden müssen. Ausgeklügelte Gebäudeautomation sorgt dann für ein behagliches Befinden der Menschen unter diesen Leichtbaukonstruktionen. Wechselt das Nutzungskonzept von Ausstellungsfläche über abendliche Konzerte bis hin zum sitzenden Arbeiten fällt der TGA ein erhöhtes Augenmerk zu, da hier eine Varianz in der Raumlufttemperatur von 10 bis 22 °C vorliegt, welche abrufbereit vorliegen muss.

- ✓ **Zusätzlich zur Energieeinsparung durch Verbesserung des A/V Verhältnisses weitere Einsparungen durch intelligente Nutzung der gewonnenen Energiepotentiale**

Die in diesem Bericht vorgestellten Konzepte zeigen auf, dass es durch integrales Planen und den Einsatz bekannter Technologien möglich ist, die berechneten Energiepotentiale effizient zu nutzen. Die berechneten Temperaturen überdachter Höfe können als Basis dienen und unter Verwendung von Low-Ex Systemen auch in der kalten Jahreszeit energieeffizient behagliche Zustände für selbst sitzende Tätigkeiten erzeugen. Weiterhin ist es sinnvoll beispielsweise bestehende Lüftungsanlagen ohne Wärmerückgewinnung durch Vorerwärmung deutlich in deren Energieeffizienz zu steigern. Die Berechnungen haben gezeigt, dass hier weitere Einsparungsmöglichkeiten liegen.

7 Thermische und strömungstechnische Gebäudesimulationen

Winterfall:

Das Energieeinsparpotenzial lässt sich sehr anschaulich mit Hilfe eines stationären Modells berechnen. In der Abbildung 58 sind hierzu die notwendigen Wärmeströme skizziert.

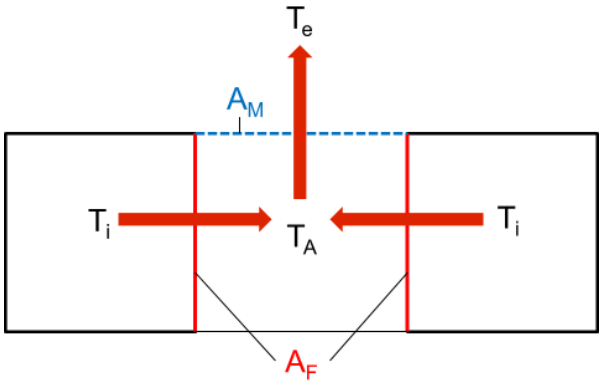


Abbildung 58: Verwendetes stationäres Modell zur Berechnung der Wärmebilanzen.

Durch Aufstellen der Energiebilanz im Atrium lässt sich die Innentemperatur T_A und die Reduktion der Transmissionswärmeverluste f_x durch folgende Gleichungen ermitteln:

$$f_x = \frac{1}{1+V} \quad \text{mit} \quad V = \frac{A_M \cdot U_M}{A_F \cdot U_F}$$

wobei A die jeweiligen Flächen (Membran A_M, Fassade A_F) und U die dazu gehörigen Wärmedurchgangskoeffizienten bezeichnet.

$$T_A = f_x \cdot (T_i - T_e) + T_e$$

Mit Hilfe von Gleichung 1 lässt sich die Reduktion der Transmissionswärmeverluste durch die angrenzenden Fassaden berechnen. Abbildung 59 zeigt die relativen Einsparungen an Nutzwärme für Membranen mit unterschiedlichen U-Werten. Dabei stellt ein U-Wert von 3,5 W/(m² K) den Stand der Technik dar, während der Wert U = 2,0 W/(m² K) nur durch aufwendige Konstruktionen erreicht wird.
Aus Abbildung 59 ist zu erkennen, dass das mögliche Einsparpotenzial für den Innenhof der HfT Stuttgart zwischen 40 % und etwa 55 % liegt, während beim Innenhof der TU München eine Einsprung von 20 % bis ca. 35 % erzielt werden kann (jeweils markiert durch die grünen Linien in Abbildung 59).

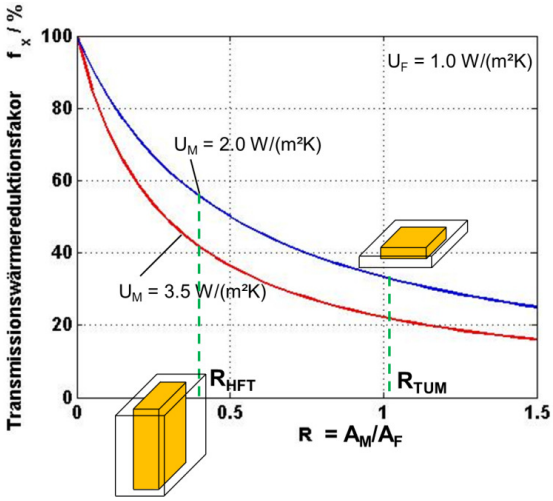


Abbildung 59: Reduktion der Transmissionswärmeverluste für unterschiedliche Systemrandbedingungen.

Berücksichtig man noch die solaren Gewinne, so erhöht sich das Einsparpotenzial und man erhält

$$f_{ges} = f_x + \frac{V}{1+V} \cdot \frac{g\alpha \cdot I}{(T_i - T_e) \cdot U_M},$$

wobei $g \cdot \alpha \cdot I$ die transmittierte und absorbierte solare Strahlungsstromdichte im Atrium darstellt. Legt man monatliche Mittelwerte für die solare Strahlung und die Außentemperatur für die Periode 1. November bis 31. März zugrunde, so ergibt sich für das Münchner Projekt eine zusätzliche Erhöhung der Einsparung um ca. 10 %
($g \cdot \alpha \cdot I$ = 0,6·0,8·45 W/m² = 23 W/m², T_e = 2 °C, U_M = 3,5 W/(m² K)).

Eine weitere wichtige Fragestellung ist, inwieweit eine Beheizung die gewonnenen Einspareffekte zunichte macht. Aus dem stationären Modell lässt sich die maximale Atriumstemperatur, bei der gerade die Energieeinsparung verschwindet, berechnen. Diese ergibt sich zu

$$T_{A,max} = {}^{1}/_{V} \cdot (T_i - T_e) + T_e$$

D.h. für $V < 1$ darf bis zur Innentemperatur T_i beheizt werden. Allerdings wirkt sich das

kontraproduktiv zur gewünschten energetischen Sanierung aus!

Im nächsten Abschnitt wird untersucht, ob die angenommenen U-Werte realistische Abschätzungen darstellen. Hierzu wurde der Wärmedurchgang durch Konvektion untersucht. Das dabei eingesetzte Berechnungsprogramm Comsol wurde anhand vorhandener Literaturdaten (VDI-Wärmeatlas) getestet. Abbildung 60 zeigt die gute Übereinstimmung der Nusseltkorrelationen mit den Literaturwerten.

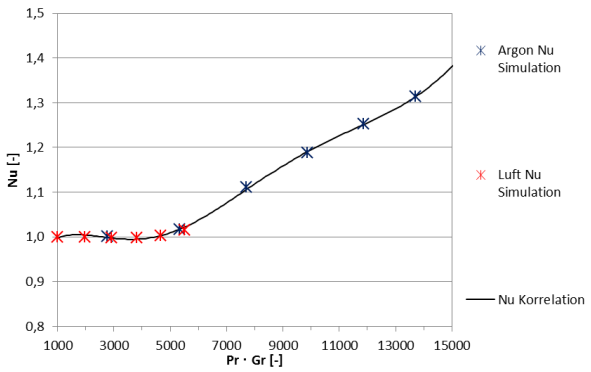


Abbildung 60: Nusseltkorrelationen in Abhängigkeit der Rayleighzahl (Pr*Gr) am 45° geneigten Spalt.

Aufbauend auf obigen Berechnungen wurde die Konvektion in einem Membrankissen untersucht. In Abbildung 61 sind die thermisch bedingten Luftbewegungen in einem Membrankissen dargestellt.

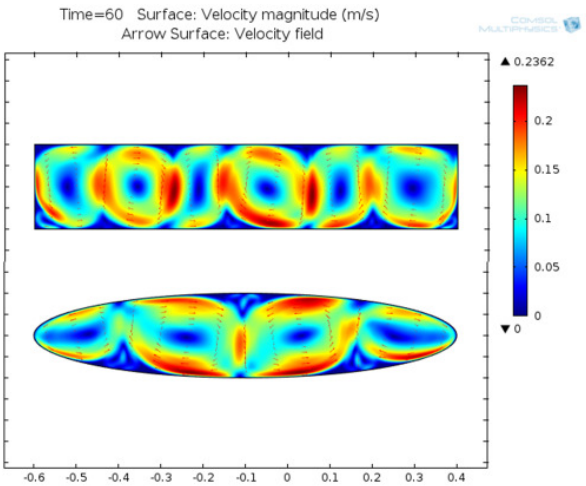


Abbildung 61: Geschwindigkeitsfeld im Membrankissen bei einer Temperatur von 20 °C an der Unterseite und einer Temperatur von 0 °C an der Oberseite.

Aus den Berechnungen lässt sich ein konvektiver Wärmedurchgangskoeffizient von 1,8 W/(m²K) ableiten. Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Strahlungstransfers und der äußeren Wärmeübergangskoeffizienten gemäß DIN 4108 ergibt sich ein U-Wert von 3,1 W/(m² K).

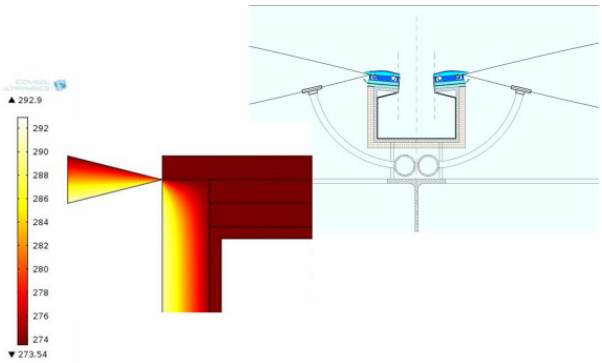


Abbildung 62: Wärmebrückenanalyse am Übergang Kissen-Kissen.

Um Vorhersagen über eine mögliche Kondensation in der Konstruktion zu erhalten, wurde eine Wärmebrückenanalyse an einem Kissen-Kissen Übergang mit dazwischen liegender Regenrinne durchgeführt. Das entsprechende Detail und die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 62 dargestellt. Aus den Randbedingungen der Untersuchung ergibt sich ein Temperaturfaktor f_{Rsi} von 0,4. Da die genauen Nutzungsbedingungen und mögliche Feuchtequellen in den Atrien nicht bekannt sind, ist eine genaue Vorhersage über den Tauwasseranfall nicht möglich. Aus der relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur im Atrium – beide ermöglichen die Berechnung der Taupunkttemperatur T_τ - und dem Temperaturfaktor lässt sich aber vorhersagen, ab welcher Außentemperatur $T_{e,k}$ bei nächtlicher Abkühlung eine Kondensation an der thermischen Schwachstelle der Konstruktion stattfindet. Die folgende Gleichung beschreibt diesen Zusammenhang

$$T_{e,k} = \frac{T_\tau - f_{Rsi} \cdot T_i}{1 - f_{Rsi}}$$

Diese kann genutzt werden, um die Lüftungsklappen zur Abfuhr von zu feuchter Luft zu

steuern. Die größte Menge an Tauwasser ist in den Übergangsmonaten März, April und Oktober, November zu erwarten. Während den anderen Monaten ist entweder die Außenluft trocken (Winter) oder ein erhöhter Luftwechsel ist eingestellt, um die sommerliche Überhitzung zu vermeiden. Eine dosierte und nach obiger Gleichung gesteuerte Lüftung ermöglicht somit die maximale Ausnutzung solarer Strahlungsgewinne.

Sommerfall:

Validierung der Simulationssoftware am Innenhof der HFT-Stuttgart

Die strömungstechnischen und daraus abgeleiteten thermischen Vorgänge in großen, hohen und vor allem hoch verglasten Hallen und Atrien sind sehr komplex und deren Prognostizierung im Rahmen von Simulationsrechnungen mit großen Unsicherheiten verbunden. Eine wichtige, aber zunächst unbekannte Größe stellt hier der Luftwechsel dar, der von Öffnungen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit maßgeblich beeinflusst wird. Zur Abschätzung dieser Randbedingung wurden in einem ersten Schritt die thermischen Gegebenheiten exemplarisch am Innenhof des Gebäudes 2 der Hochschule für Technik, Stuttgart (HFT) messtechnisch erfasst und ersten Simulationsrechnungen gegenübergestellt.

Abbildung 63: Innenhofsituation Bau 2 der HFT-Stuttgart.

Die Längsseite des schmalen Innenhofs des Gebäudekomplexes 2 der HFT Stuttgart ist nahezu in Süd-Nord Richtung orientiert. Gebäudebereiche in Mauerwerksausführung mit Lochfassade grenzen nördlich, östlich und südlich an den Hof. Die Westfassade zum Innenhof ist vollständig verglast und grenzt in den unteren Geschossen zur HFT-Bibliothek und in den oberen Geschossen an Flure, die PC-Räume erschließen. Die Innenhofsituation ist in Abbildung 63 veranschaulicht.

Die Innenhoftemperaturen wurden über den Zeitraum vom 15.07. – 05.08. 2009 in 5-Minuten-Intervallen erfasst und sind in Abbildung 64 für unterschiedliche Höhen wiedergegeben. Mit dargestellt werden die Außentemperatur (über Dach) sowie die horizontale Gesamtstrahlung. Während der Nachstunden ergeben sich kaum Unterschiede der Temperaturen, im Gegensatz zu Zeiten mit Strahlung. Hier weichen die Innenhoftemperaturen im Vergleich zur Außentemperatur um ca. 5 K ab (Abbildung 64).

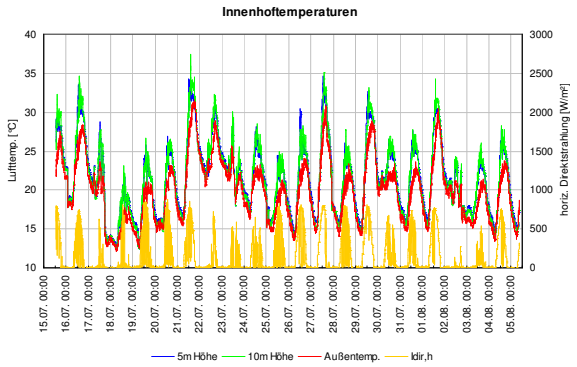


Abbildung 64: Gemessene Innenhoftemperaturen in 5 m bzw. 10 m Höhe und horizontale Gesamtstrahlung.

Die über alle Sensoren gemittelten Messwerte der Innenhoftemperaturen wurden in einem zweiten Schritt den berechneten Daten der Simulation gegenübergestellt. Die thermische Simulation erfolgte hierbei mit dem Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS (Vers. 16.1). Hierbei ist der zu untersuchende Gebäudebereich mit den entsprechenden Bauteilaufbauten und weiteren gebäudespezifischen Randbedingungen vorzugeben. Die stündliche Berechnung der sich einstellenden Innentemperaturen erfolgt dann bei vorgegebenem Außenklima (Temperatur, Einstrah-

lung) unter Berücksichtigung der thermischen Speichermasse der einzelnen Bauteile (instationäre Berechnung). Die für die Simulation erforderlichen Klimadaten (Außentemperatur und Einstrahlung) wurden von der Wetterstation der HFT aufgenommen.
Zum Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Innenhoftemperaturen konnten die von der Hochschule München mittels CFD-Berechnung ermittelten Luftwechselraten als Eingangsdaten verwendet werden. Die daraus abgeleitete Luftwechselrate von $n = 12\ h^{-1}$ ergibt eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Temperaturen. Zur Verdeutlichung des Einflusses des Luftwechsels werden die Simulationsergebnisse für einen 5-fachen und einen 20-fachen Luftwechsel mit angegeben (Abbildung 65).

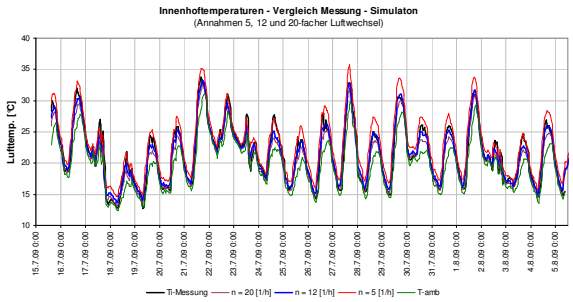


Abbildung 65: Simulierte Innenhoftemperaturen bei unterschiedlichen Luftwechselraten.

Neben dem Innenhof wurde exemplarisch der vollverglaste Flur im dritten Obergeschoss in die Simulation eingebunden, da hier allein der Luftwechsel unbekannt ist und keine internen Lasten vorliegen. Die Gegenüberstellung von Messung und Simulation des verglasten Flurs zeigt Abbildung 8. bei einem angenommenen konstanten 0.3-fachen Luftwechsel. Da die Fensterfassade Kippfenster besitzt und diese gelegentlich geöffnet waren, stimmt die Simulation mit der Messung hinreichend genau überein, auch wenn die realen Luftwechselzahlen zeitweise deutlich von der Annahme abweichen dürften (Abbildung 66).

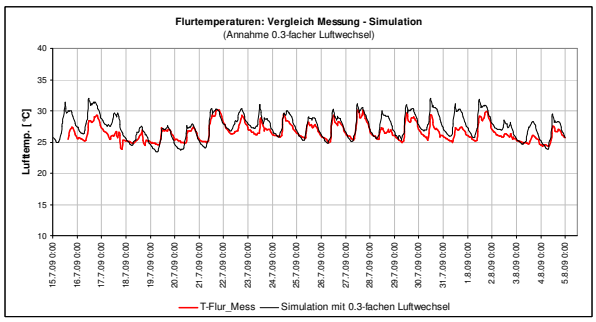


Abbildung 66: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Temperatur der Flurzone

Vergleiche zwischen Messungen und Simulationsrechnungen in offenen Innenhöfen und an daran grenzende Räumlichkeiten mit hoch verglasten Fassaden ergaben eine gute Übereinstimmung, sodass im weiteren Vorgehen nun die Situation eines geschlossenen Hofes (Atrium) mit einer Membranabdeckung simuliert wurde.

Bedingt durch die unterschiedlichen Dachhöhen und Fassadengeometrien aller Innenhofseiten des Bau 2 der HFT-Stuttgart, würden sich bei einer praktischen Ausführung einer Membranabdeckung erhebliche konstruktive Probleme ergeben. Eine praktikablere Anwendung ergab sich daher in der zweiten untersuchten baulichen Situation an der TU-München, die im Folgenden näher betrachtet wird.

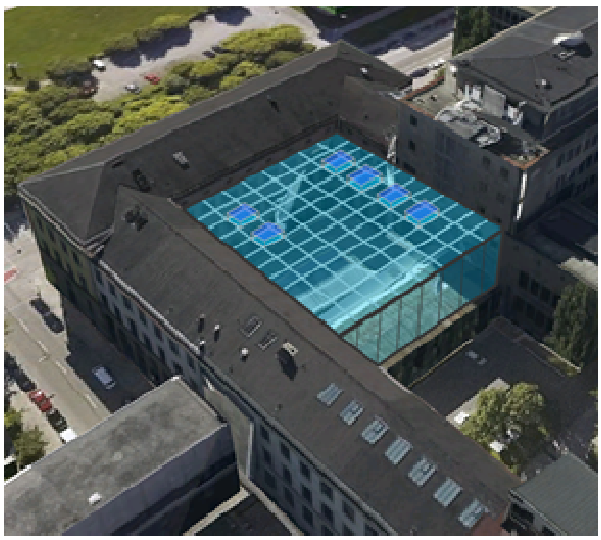


Abbildung 67: Darstellung einer möglichen Innenhofverglasung der TUM.

Validierung der Simulationssoftware am Innenhof der TU-München

Die Programmteile TRNSYS und TRNFLOW ermöglichen eine detaillierte Gebäudebetrachtung unter Berücksichtigung mehrerer thermisch getrennter Zonen, der Einbeziehung thermischer Speichermassen, interner Wärmelasten, Verschattungseinrichtungen sowie einer Strömungsmodellierung zwischen verschiedenen Gebäudezonen. Der Programmzusatz TRNFLOW ist jedoch kein CFD-Programm, sondern bildet den Luftaustausch zwischen den Gebäudebereichen über ein einfacheres Luftknotenmodell ab. Zur Berechnung der thermischen Auftriebsströmung sowie einer daraus resultierenden Temperaturschichtung sind daher große und vor allem hohe Gebäudebereiche in fiktive Unterzonen zu unterteilen. Eine solche Unterteilung der baulichen Situation zeigt schematisch Abbildung 68.

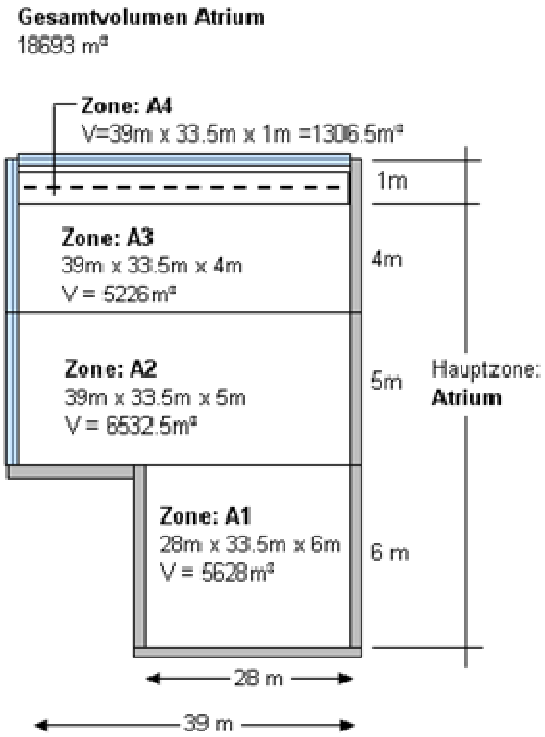


Abbildung 68: Schematische Darstellung des Atriummodells zur Berechnung mit dem Programm TRNSYS / TRNFLOW.

Ein kritischer Punkt ist hierbei jedoch die Einbindung einer mehrlagigen transparenten Membran in das TRNSYS-Simulationsmodell, das als optische Bausteine nur herkömmliche Verglasungen kennt. An der HFT-Stuttgart wurde daher ein Berechnungsmodell entwickelt, das neben der detaillierten Betrachtung der optischen Eigenschaften der Membranlagen auch den thermischen Auftrieb in einem hohen Raum berücksichtigt. Zudem lässt sich ein horizontaler, innen liegender Sonnenschutz in das Modell einbinden. Die Funktionsweise des HFT-Rechenmodells ist in Abbildung 69 schematisch dargestellt.

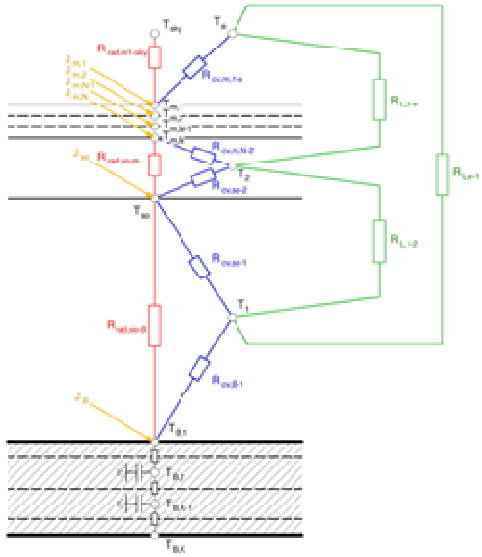


Abbildung 69: Aufbau des vereinfachten HFT-Simulationsmodells mit den berücksichtigten Wärmeströmen (rot: radiativ, blau: konvektiv, grün: Lüftung).

Beide Modelle weisen Vorteile und Schwächen auf. Ein direkter Vergleich zwischen der TRNSYS- Berechnung und dem vereinfachten HFT-Modell ist somit nur mit Einschränkungen möglich, da das HFT-Modell zwar die Membranabdeckung mit unterschiedlichen Folienlagen genauer als das TRNSYS-Modell berücksichtigt, jedoch die bauliche Situation stark vereinfacht (z.B. keine weitere Verglasung neben der Dachmembran). Neben der Temperatur über dem innen liegenden Sonnenschutz wird zudem nur eine Mitteltemperatur über die gesamte Atriumshöhe angegeben.

Der Nachteil des TRNSYS-Modells ist die unzureichend genaue Abbildung der Membranüberdachung. Der hier verwendete Berechnungsansatz die Membranabdeckung zu simulieren besteht aus der ersatzweisen Einbindung einer Doppelverglasung (U-Wert

2.8 W/m²K, g-Wert 0.76) mit innenliegendem Sonnenschutz.

Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen die Simulationsergebnisse exemplarisch für 10 Sommertage. Dargestellt sind neben der Außentemperatur (schwarze Linie) die berechneten Zonen-Innentemperaturen sowie die Luftwechselraten. Für die TRNSYS-Simulation (obere beide Grafiken) wurden zwei Fälle mit bzw. ohne Berücksichtigung der Reibungsverluste an den Lüftungsöffnungen betrachtet. Die Ergebnisse des HFT-Modells zeigt die dritte Grafik. Zum Vergleich zwischen beiden Modellen können die Verläufe T-A4 und T2 (rote Kurven) für die Temperaturen im Bereich des innenliegenden Sonnenschutzes herangezogen werden. Die Temperatur T-A2 des TRNSYS-Modells kann näherungsweise als Atrium-Mitteltemperatur betrachtet werden und mit dem Verlauf T1 des HFT-Modells verglichen werden (grüne Kurven).

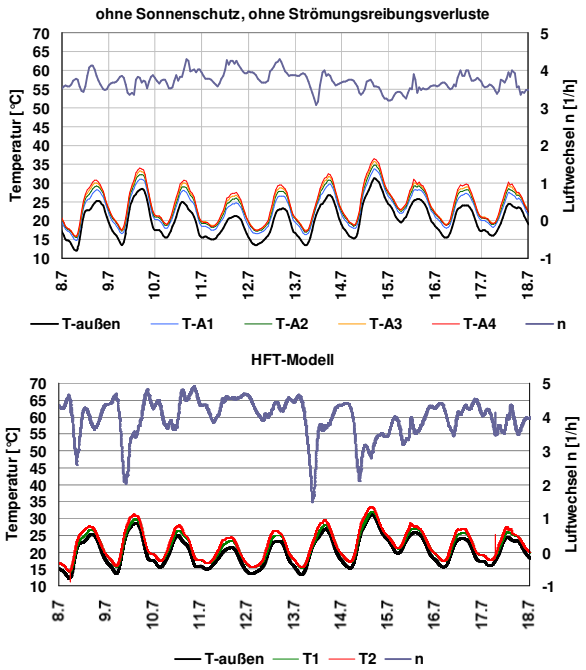


Abbildung 70: Zonentemperaturen und Luftwechselraten für den Fall ohne innenliegenden Sonnenschutz sowie mit bzw. ohne Berücksichtigung von Strömungsreibungsverlusten. Simuliert mit TRNSYS und dem HFT-Matlab-Modell (untere Grafik).

Werden die Reibungsverluste der Lüftungsöffnungen vernachlässigt, so ergeben sich für beide Simulationsmodelle für den Fall „ohne Sonnenschutz“ ähnliche Ergebnisse hinsichtlich des sich einstellenden Luftwechsels bei natürlicher Lüftung (Eigenkonvektion) ohne Berücksichtigung von Windlasten. Die berechneten Zonentemperaturen liegen bei der TRNSYS-Simulation etwas höher im Vergleich zum HFT-Modell. Auch die Temperaturschichtung ist hier ausgeprägter. Bedenkt man jedoch die unterschiedlichen Randbedingungen beider Modelle, so liegen die Abweichungen im akzeptablen Rahmen.

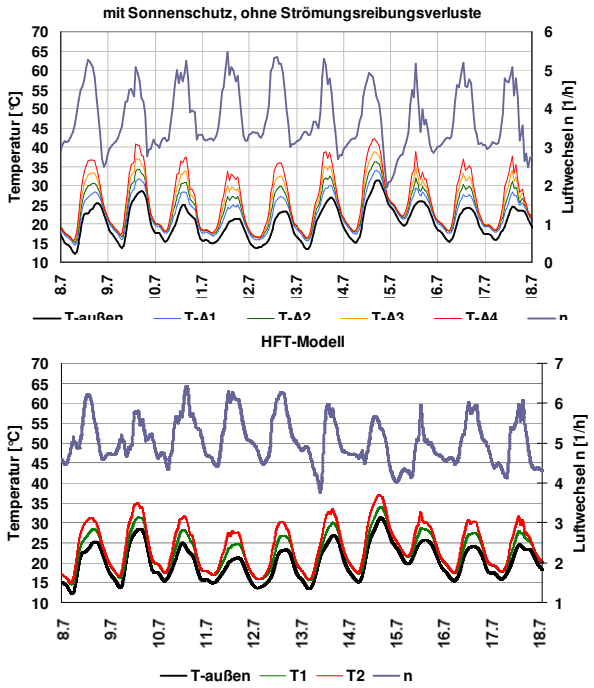


Abbildung 71: Zonentemperaturen und Luftwechselraten für den Fall mit innenliegendem Sonnenschutz und für die Fälle mit bzw. ohne Berücksichtigung von Strömungsreibungsverlusten. Simuliert mit TRNSYS und dem HFT-Matlab-Modell (untere Grafik).

Unter Berücksichtigung eines innenliegenden Sonnenschutzes sinken die Temperaturen in der bodennahen Zone A1 geringfügig ab. Bedingt durch die starke Erwärmung des Sonnenschutzes und der Durchmischung der Atriumluft stellt sich eine ausgeprägte Schichtung ein. Infolge der höheren Temperaturdifferenz zwischen innen und außen steigt somit auch der Luftwechsel an. Der Vergleich beider Simulationsmodelle zeigt hier größere Abweichungen gegenüber der Betrachtung ohne Sonnenschutz. Wie schon erwähnt, sind beide Modelle nicht direkt vergleichbar, da zum einen das vereinfachte HFT-Modell die

Membranlagen genauer abbildet als das Fenstermodell in TRNSYS, zum anderen die bauliche Situation mit zusätzlicher Westverglasung genauer in TRNSYS wiedergegeben wird.

Aus den durchgeführten Vergleichen zwischen Messungen oder zwischen Berechnungsmodellen mit detaillierteren Ansätzen und dem Simulationswerkzeug TRNSYS kann abgeleitet werden, dass die mit TRNSYS erzielten Resultate ausreichend genau die thermische Situation abbilden können.

Abschließend wird die sommerliche thermische Situation des Innenhofes der TU-München unter Einbeziehung einer möglichen Membranabdeckung mit bzw. ohne innenliegendem Sonnenschutz sowie die Auswirkungen auf einen daran angrenzenden Büroraum dargestellt.

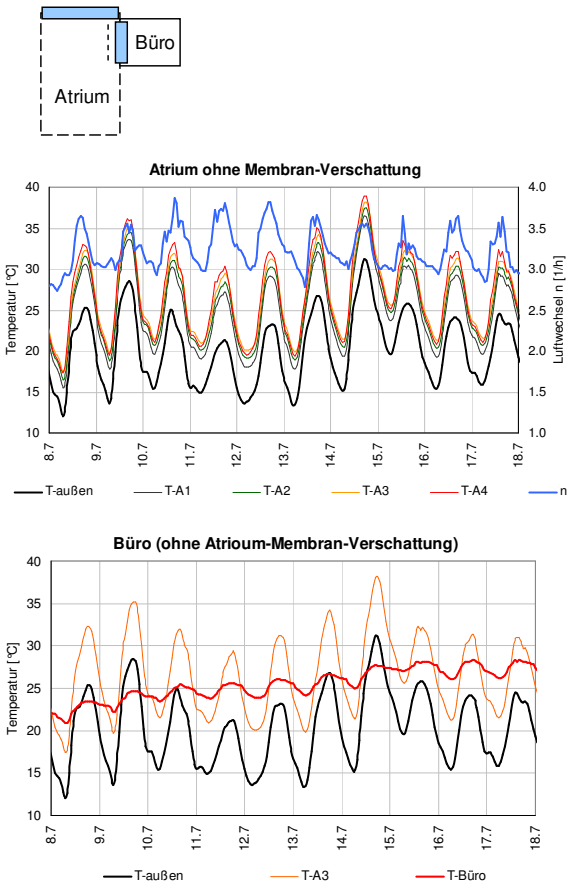


Abbildung 72: Temperaturverläufe im unverschatteten Atrium bzw. einem daran angrenzenden Büro. Die Temperaturbezeichnungen entsprechen der schematischen Abbildung 68.

Das südorientierte Büro befindet sich hierbei im oberen Bereich des Atriums, direkt unterhalb der Membranabdeckung. Der Luftwechsel des Büroraumes wurde konstant zu 0,6 h^{-1} festgelegt. Verfügte die Atriumsmembran über keinen Sonnenschutz, wurde der Büroraum zu 75 % verschattet. Für den Fall einer innenliegenden Membranverschattung entfiel der Sonnenschutz des Büros (Abbildung 72 und Abbildung 73).

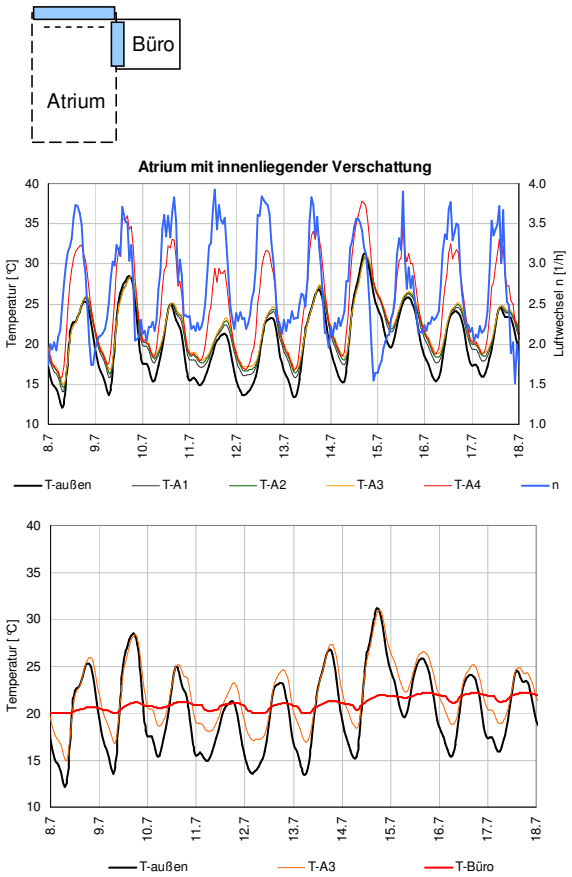


Abbildung 73: Temperaturverläufe im verschatteten Atrium bzw. einem daran angrenzenden Büro. Die Temperaturbezeichnungen entsprechen der schematischen Abbildung 68.

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Atriums auf die Bürosituation wird abschließend die gegebene Innenhofsituation ohne Membranabdeckung betrachtet. Zu erkennen sind die nahezu gleichen simulierten Bürotemperaturen für die Fälle verschattetes Atrium und Innenhof mit verschatteter Büroverglasung (Abbildung 73 und Abbildung 74).

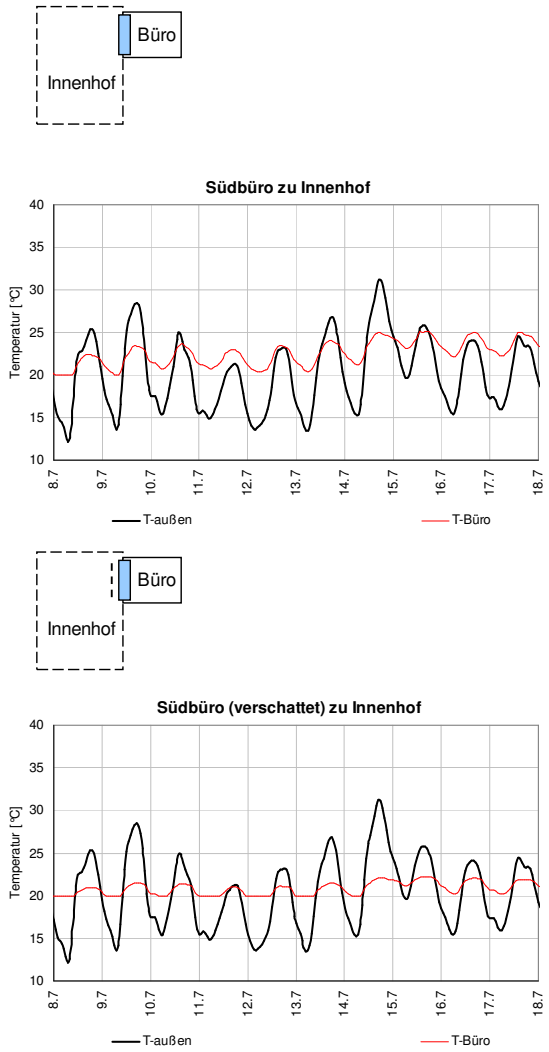


Abbildung 74: Temperaturverläufe in einem Südbüro mit und ohne Sonnenschutz.

6.8 Bauphysikalische Kenndaten

Als Eingangsdaten für die Berechnungen in den obigen Kapiteln wurden bauphysikalische Kenndaten verwendet, die im Folgenden dargestellt sind.
Zur Ermittlung der bauphysikalischen Kenndaten wurden am ZAE Bayern zunächst die infrarot-optischen Eigenschaften einiger Materialien bestimmt.
Um die jeweils relevanten Spektralbereiche zu verdeutlichen sind in Abbildung 75 die solare Einstrahlung der Sonne auf der Erdoberfläche, sowie die Wärmeabstrahlung eines schwarzen Strahlers bei Raumtemperatur (die durch die Planck-Funktion $i_\lambda(T)$ beschrieben wird) aufgetragen.

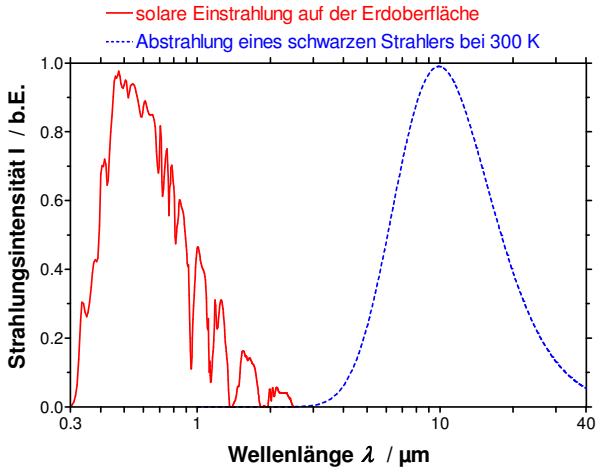


Abbildung 75: Auf der Erdoberfläche ankommende Sonnenstrahlung (rote Kurve) im Vergleich zur Wärmeabstrahlung eines schwarzen Körpers bei Raumtemperatur (blaue Kurve). Die Höhe der Kurven wurde dabei jeweils auf 1 normiert.

Zur Erfassung des Spektralbereiches von 0.25 µm bis 2.5 µm wird ein Perkin Elmer Lambda 9 Gitterspektrometer eingesetzt. Für den Wellenlängenbereich von 2 µm bis 35 µm wird ein Bruker IFS 66v Fourier-Transformations Infrarot (FTIR) Spektrometer verwendet.
Aufgrund der Energieerhaltung gilt:

$$\alpha_g(\lambda) + R_{gh}(\lambda) + T_{gh}(\lambda) = 1 .$$

wobei α_g der gerichtet-spektrale Absorptionsgrad ist. Bei bekanntem gerichtet-hemisphärischen spektralen Reflexions- und Transmissionsgrad, lässt sich aus obiger Gleichung, zusammen mit dem Kirchhoffschen Gesetz

$$\alpha_g(\lambda) = \varepsilon_g(\lambda),$$

der gerichtet-spektrale Emissionsgrad ε_g berechnen:

$$\varepsilon_g(\lambda) = 1 - R_{gh}(\lambda) - T_{gh}(\lambda).$$

Die infrarot-optischeen Eigenschaften von Folien- und Gewebematerialien bilden eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für mögliche Anwendungen von Membranmaterialien in baulichen Strukturen, v.a. aber in der Gebäudehülle. Hierzu zählen

in erster Linie die Transmission im sichtbaren Bereich des Spektrums, die solare Transmission, die Reflexion im solaren Bereich und außerdem die Absorption im Wärmestrahlungsbereich (die physikalisch dem Emissionsgrad für diesen Frequenzbereich entspricht). Diese Eigenschaften bestimmen nicht nur die visuelle Erscheinung einer Struktur, sondern beeinflussen auch maßgeblich die energetischen Eigenschaften einer Gebäudehüllenkonstruktion mit diesen Materialien.
Bei einer ausführlichen Recherche über die Bandbreite möglicher verfügbarer Membranmaterialien fiel auf, dass viele dieser Daten entweder fehlen oder aufgrund unterschiedlicher Messumstände nicht vergleichbar waren.
Daher wurden auf Initiative von Prof. Cremers verschiedene Materialtypen nach einem einheitlichen Verfahren am ZAE Bayern vermessen. Die Auswahl und Beschaffung geeigneter Materialien, bei denen es sich zumeist um marktverfügbare Muster handelt, wurde von Prof. Cremers vorgenommen. Eine Besonderheit im Bereich von Membranmaterialien ergibt sich aus dem Umstand, dass Standardmaterialien für den Einsatz in konkreten Projekten oft modifiziert werden (z.B. durch Bedrucken und Beschichten). Daher wurden für die Vergleichsmessung entsprechende typische Varianten ausgewählt. Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, wurden außerdem verschiedene Materialalternativen aus den Bereichen Glas und Kunststoffe charakterisiert, so dass es nun möglich ist, die materialtechnischen Optionen im direkten Vergleich zu beurteilen und zu bewerten. Die Liste der untersuchten Materialien gliedert sich somit in mehrere Gruppen:

Folien:
- ETFE-Folie klar, 200 µm,
- ETFE-Folie klar, 200 µm, einseitige 100%-ige Silberbedruckung,
- ETFE-Folie weiß, 250 µm,
- ETFE-Folie weiß, 250 µm, einseitige 100%-ige Silberbedruckung,
- ETFE-Folie klar, 200 µm, einseitige 65%-ige Silberbedruckung (Punktbedruckung),
- THV-Folie, 200µm
- Polyethylen(PE)-Folie, Standard, UV-stabilisiert, (wird häufig in Gewächshäusern eingesetzt),
- PE-Noppenfolie (wird häufig in Gewächshäusern eingesetzt).

Gewebe:
- PVC-beschichtetes Polyester-Gewebe (PVC/PES),
- THV-beschichtetes Polyester-Gewebe (THV/PES),
- Glasfaser/Silikon-Gewebe, low-e beschichtet,
- Silikon-beschichtetes Glasfaser-Gewebe,
- PVDF-Gewebe mit 80% Licht-Transmissionsgrad,
- PTFE-beschichtetes Glassfasergewebe, Typ II (gebleicht),
- PTFE-beschichtetes Glasfaser-Gewebe (gebleicht),
- PTFE/Glas-Gitter, Silber,
- low-e PTFE/Glassfaser-Gewebe (wie für den Flughafen Bangkok verwendet),
- PTFE-Gewebe, Gore Tenara 4T40HF.

Vergleichsgruppe Glas (mit Produkten der Firma Centrosolar):
- Floatglas Standard, 3 mm,
- Floatglas eisenarm (weiß), 3 mm,
- Floatglas eisenarm mit Antireflex-Beschichtung, 3 mm.

Vergleichsgruppe Kunststoffe:
- Polycarbonat(PC)-Platte, 8 mm,
- PC-Stegsechsfachplatte, 16 mm,
- PC-Stegdreifachplatte, 16 mm, IR-Beschichtung,
- Polymetyl-Metacrylat(PMMA)-Platte, massiv, 8 mm,
- PMMA-Stegdoppelplatte, Fachwerk, 16 mm,
- Glasfaser-verstärkte Kunststoff (GFK) - Platte (Fa. Scobalith),
- GFK-Platte, massiv, natur (Fa. Swissfiber).

An dieser Stelle werden die Ergebnisse von 4 ausgewählten Materialien gezeigt. Die Größen gerichtet-hemisphärischer Transmissionsgrad und Reflexionsgrad sind in Abbildung 76 bzw. Abbildung 77 jeweils in Abhängigkeit von der Wellenlänge von 0.25 µm bis 35 µm aufgetragen.

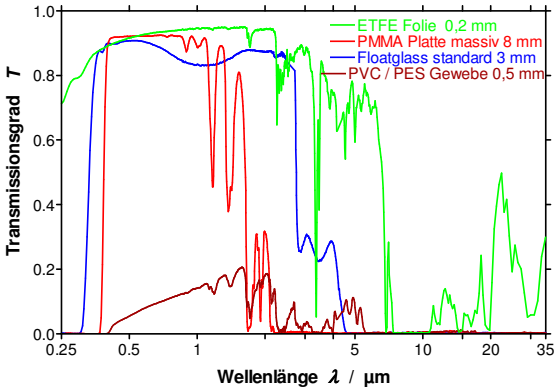


Abbildung 76: Gerichtet-hemisphärischer Transmissionsgrad T_{gh} als Funktion der Wellenlänge.

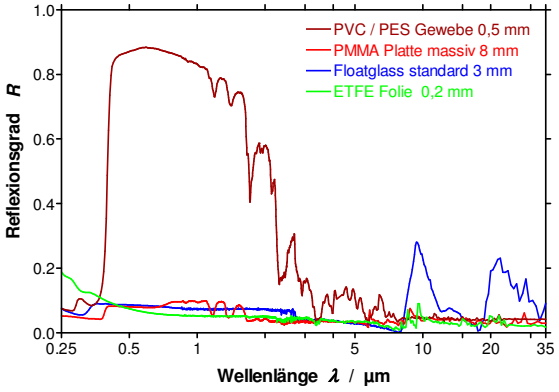


Abbildung 77: Gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad R_{gh} als Funktion der Wellenlänge.

Die aus den spektralen Kurven berechneten Gesamt-Emissionsgrade sowie die solaren Transmissionsgrade sind aus Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 1: Zusammenstellung des Gesamt-Emissionsgrades ausgewählter Proben.

Probe	Gesamt-Emissionsgrad $\varepsilon(T)$ bei $T = 300$ K
PMMA Platte, 8 mm	0.96 ± 0.02
PVC/PES-Gewebe, 0.5 mm	0.95 ± 0.02
Floatglas, 3 mm	0.90 ± 0.02
ETFE Folie, 0.2 mm	0.83 ± 0.02

Tabelle 2: Zusammenstellung des solaren Transmissionsgrades ausgewählter Proben.

Probe	solarer Transmissionsgrad τ_e
PMMA Platte, 8 mm	0.80 ± 0.02
PVC/PES-Gewebe, 0.5 mm	0.09 ± 0.02
Floatglas, 3 mm	0.87 ± 0.02
ETFE Folie, 0.2 mm	0.93 ± 0.02

Für die Anwendung in der energetischen Sanierung wurde u.a. ein neuartiges Gittergewebe-Laminat untersucht. Es kombiniert erstmals die herausragenden Eigenschaften von PTFE beschichtetem Glasfasergewebe - hier als offenes Gittergewebe ("Mesh") - mit ETFE-Folien. Die untersuchte Materialprobe bestand aus einem vorgebleichtem PTFE/Glass und beidseitig 200µm ETFE klar.

Als Zieleigenschaften eines solchen Materials können genannt werden:
- maximale Lichttransmission bei hoher Festigkeit, geringe Lichtstreuung
- geringere Steifigkeit im Vergleich zu Materialalternativen
- Dauerhaftigkeit und Anschmutzverhalten auf Fluorpolymerniveau

Abbildung 78 zeigt die untersuchte Materialprobe.

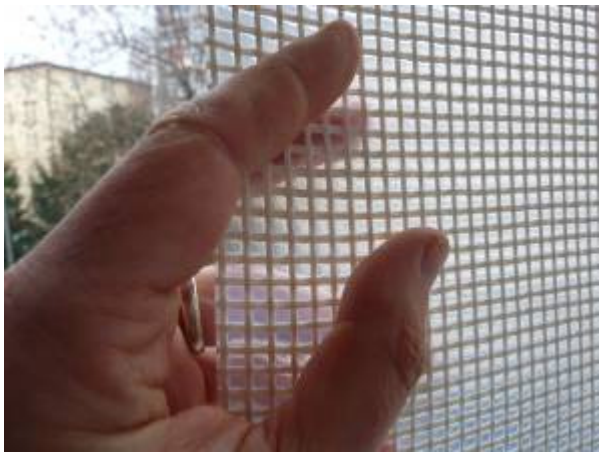


Abbildung 78: ETFE - PTFE/Glass Mesh - ETFE - Laminate

T_{sol}	T_{vis}	T_{uv}	R_{sol}	R_{vis}	R_{uv}	A_{sol}	A_{vis}	A_{uv}
0,48	0,47	0,34	0,42	0,49	0,41	0,10	0,04	0,25

Abbildung 79: ETFE - PTFE/Glass Mesh - ETFE- Laminate, Messergebnisse des ZAE-Bayern: Transmission, Reflexion, Absorption (jeweils für die Spektralbereiche Solar, Vis und UV).

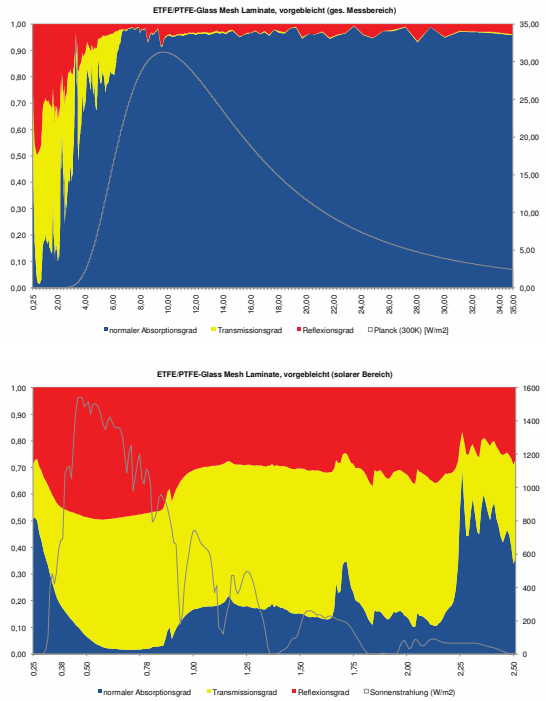


Abbildung 80: ETFE - PTFE/Glass Mesh - ETFE- Laminate, grafische Darstellung der Messergebnisse des ZAE-Bayern: oben der gesamte Messbereich (0,25 µm bis 35 µm), unten der solare Spektralbereich (0,25 µm bis 2,5 µm).

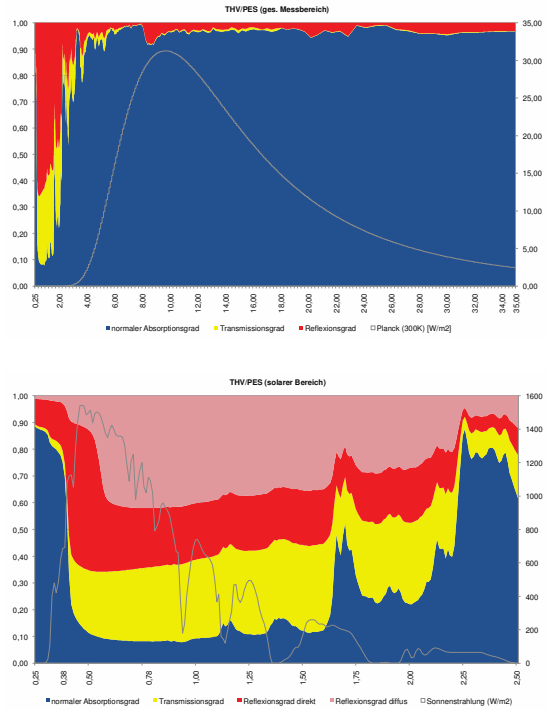


Abbildung 81: zum Vergleich Messergebnisse für ein THV/PES-Material, in analoger grafischer Darstellung: oben der gesamte Messbereich (0,25 µm bis 35 µm), unten der solare Spektralbereich (0,25 µm bis 2,5 µm).

Auch diese Materialproben wurden am ZAE-Bayern ausführlich vermessen und bei Hightex im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit internen Verarbeitungstests unterzogen (z.B. auch Schweißbarkeit). Ergebnisse der optischen Vermessung finden sich in Abbildung 79 und Abbildung 80. Abbildung 81 zeigt im Vergleich die Ergebnisse der optischen Vermessung eines alternativen Materials, das auch über eine vergleichsweise hohe Transmission verfügt. Hierbei handelt es sich um ein in THV eingebettetes PES-Gewebe, das im Gegensatz zu dem PTFE/Glass-Laminat z.B. auch für bewegbare Konstruktionen eingesetzt werden könnte. Inwieweit beide Materialien am Markt Verbreitung finden werden, wird in hohem Maße vom Preis abhängen. Hierzu liegen noch keine verbindlichen Informationen vor, es ist jedoch zu vermuten, dass insbesondere das PTFE/ETFE-Laminat eher im obersten Preisspektrum angesiedelt sein wird, da bereits die Basiswerkstoffe sehr hochpreisig sind. Außerdem wird diese Variante nach Kenntnis von Hightex weltweit derzeit nur von einem Hersteller angeboten.

Darüber hinaus wurde am ZAE Bayern die Wärmeleitfähigkeit von unterschiedlichen Proben gemessen.
Zunächst wurde die Wärmeleitfähigkeit eines Verbunds aus Aerogel-Granulat (mit einer Schichtdicke von 22 mm) und weißen Polyester-Geweben vermessen (s. Abbildung 82). Die Wärmeleitfähigkeit der Probe beträgt 18.0 ± 0.5 mW/(m·K).

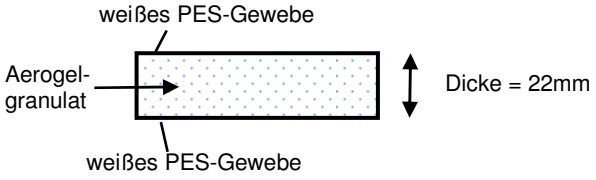


Abbildung 82: Aerogel-Granulat zwischen zwei weißen PES-Geweben.

Vergleichbare Werte erhält man für einen Verbund aus Aerogel-Granulat und Polypropylen-Folie. Bei einer Reduktion der Schichtdicke auf 8 mm (s. Abbildung 83), erhält man eine leichte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit auf 24.4 ± 0.2 mW/(m·K), was allerdings auf eine geringere Packungsdichte des Aerogel-Granulats zurück zu führen ist.

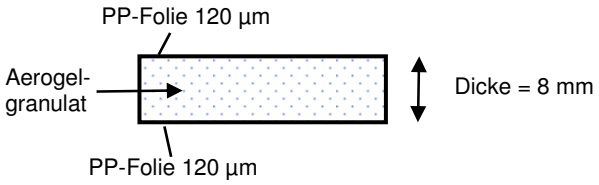


Abbildung 83: Aerogel-Granulat zwischen zwei PP-Folien.

Anschließend wurde ein Verbund aus einem Aerogel-Vlies der Fa. Cabot und einer ETFE-Folie vermessen. Bei einer Schichtdicke von 8 mm (s.Abbildung 84) beträgt die Wärmeleitfähigkeit 22.6 ± 0.3 mW/(m·K).

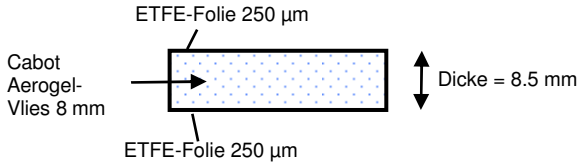


Abbildung 84: Aerogel-Vlies der Fa. Cabot zwischen zwei ETFE-Folien.

Um die bauphysikalischen Kenndaten zu verbessern wurden die Gewebe funktionalisiert (siehe Kapitel 6.8) sowie die Komponenten und Systeme optimiert (siehe Kapitel 6.9).

8.1 Einsatz von organischen Materialien im Membrantragwerk.

Der Einsatz von Polyethylen (PE)-Gewebegurten in Membranbauwerken an Stelle von Stahlseilen bietet mehrere Vorteile. PE Gurte zeigen Vorteile durch ihre Knickbeständigkeit, niedrigem Primärenergiebedarf bei der Herstellung sowie niedrige Kosten.
In Zusammenhang mit aktuellen Projekten wurde die Eignung von PE Gewebegurten im Membrantragwerk untersucht. Ziel war es das Langzeitdehnungsverhalten von PE Gurten unter wechselnder Belastung hervorgerufen durch Schnee- und Windlasten experimentell zu untersuchen. Hintergrund ist, dass bei Dächern mit geringem Gefälle eine Dehnung unter Langzeitbelastung zu Schneesackbildung führen kann.
Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass PE Gurte nach einer Dehnung im einstelligen Prozentbereich keine weitere signifikante Dehnung zeigen (Abbildung 85).

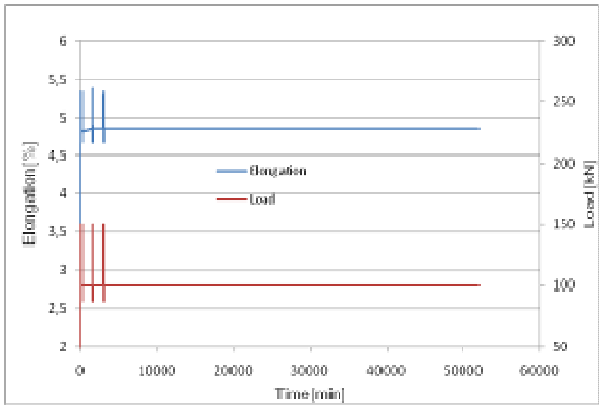


Abbildung 85: Langzeitdehnung unter zyklischen Lasten eines PE Gurtes aus Hochleistungsfasern. Dehnung normiert auf die Länge des ungespannten Gurtes. Die Last beträgt etwa 20% der MBL des Gurtes. Eigene Messung.

Diese Ergebnisse erlauben den Einsatz von PE Gurten im Membrantragwerk.
Jedoch müssen Gurte beim Einbau um mehrere Prozent gedehnt werden. Auch Schädigung durch Feuchtigkeit und durch solare Strahlung müssen beachtet und durch schützende Maßnahmen minimiert werden.

9 Weiterentwicklung der Low-e Gewebe

Zur Verbesserung der thermischen Eigenschaften von Membrankonstruktionen wurden die Funktionalisierungen der Membranen weiterentwickelt, speziell die low-e Beschichtungen zur Erzielung einer geringeren Wärmeabstrahlung bzw. einer Erhöhung der Wärmereflexion.
Eine farbige niedrig-emittierende Beschichtung besteht aus einer Polymer-Matrix in der Farb- und Metallpigmente eingebettet sind. Die Farbpigmente sind für den Farbeindruck und die Metallpigmente für die Reflexion der IR-Strahlung verantwortlich. Als Metallpigmente wurden unterschiedliche Aluminium-Pigmente verwendet, deren Teilchen plättchenförmig sind. Weitere Einzelheiten sind den Projekt-Zwischenberichten zu entnehmen.
Abbildung 86 zeigt den spektralen Emissionsgrad von drei Al-Pigmente ohne zusätzliche Farbpigmente in einer Polymer-Matrix auf PES-Gewebe und Abbildung 87 stellt den spektralen Emissionsgrad der neuen Beschichtungen mit dem Spezial-Al-Pigment unter der Zugabe von Farbpigmenten dar.

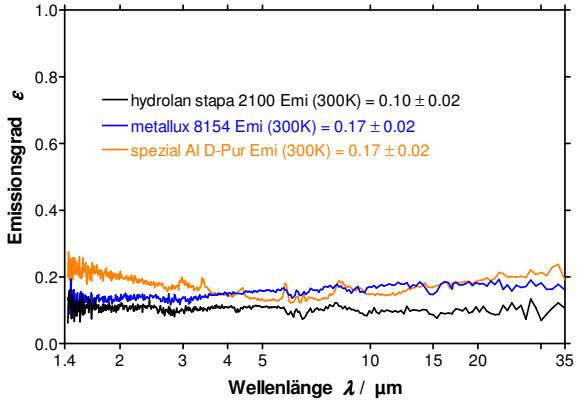


Abbildung 86: Silberfarbene PU-Beschichtungen mit verschiedenen Aluminium-Pigmenten auf PES-Gewebe.

Nachdem die Herstellung von niedrig emittierenden Beschichtungen auf PES-Gewebe für den Innenbereich erfolgreich verlief, beschäftigte sich die Fa. TAG mit witterungsbeständigen Low-e Beschichtungen auf PVC-Membranen für den Außenbereich. Die Versuche haben gute Ergebnisse gezeigt. Am ZAE Bayern wurde der Emissionsgrad von ca. 160 Proben der Fa. TAG mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Beschichtung und Farbe vermessen. Nur eine kleine Auswahl davon wird im Bericht präsentiert (s. Abbildung 87).
In Abbildung 87 ist der spektrale Emissionsgrad von drei beschichteten PVC-Membranen, einmal ohne Farbpigmente, einmal mit der Zugabe von einem roten Farbpigment und einmal mit der Zugabe von einem blauen Farbpigment zu sehen. Die Gesamt-Emissionsgrade bei Raumtemperatur bewegen sich zwischen 0.25 und 0.34.

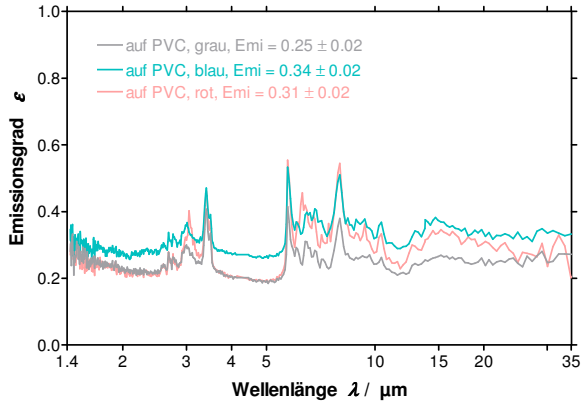


Abbildung 87: spektraler Emissionsgrad von drei ausgewählten Low-e Beschichtungen auf PVC-Membranen.

Zur Prüfung von Lichtechtheit wurden an einigen beschichteten Membranen der Fa. TAG entsprechenden Prüfungen durchgeführt. Die Beschichtungen unterscheiden sich hinsichtlich der Aluminiumpigmente, der Farbpigmente und der Zusammensetzung.
Die Lichtechtheit beschreibt die Konstanz von Farben, Lacken aber auch sonstigen Oberflächen bei längerer Beleuchtung. In DIN EN ISO 105-B04 Verfahren 2 werden für Textilien Farbechtheitsprüfungen als Farbechtheit und Alterung gegen künstliches Licht (Xenonbogenlicht) vorgeschrieben. Die Lichtechtheit wird dabei in 8 Stufen eingeteilt, welche von Lichtechtheit 1 (sehr gering) bis Lichtechtheit 8 (hervorragend) reichen. Bei den geprüften beschichteten PES/PVC-Membranen wurde durchweg eine Lichtechtheit 6-7 (vorzüglich) mit Tendenz zur Lichtechtheit 7 festgestellt.
Am ZAE Bayern wurden unterschiedliche beschichtete PES-Gewebe von der Firma TAG für die Messtests im Außenmessstand verwendet. Diese beschichteten Gewebe wurden unterschiedlichen Witterungsverhältnissen ausgesetzt. Eine grüne low-e Beschichtung aus Chromoxidgrün und Al-Stapa 2100 wurde vor und nach den monatlichen

Sommer-Außentests gemessen. Der Emissionsgrad der Beschichtung im neuen Zustand ist 0.34 ± 0.02 und nach den Tests 0.35 ± 0.02.
Eine gelbe low-e Beschichtung aus Sicomixgelb und Al-Metallux 8154, die neu einen Emissionsgrad von 0.37 hatte, zeigte nach den Wintertests ebenfalls keine bedeutende Veränderung.
Abbildung 88 zeigt den spektralen Emissionsgrad von diesen zwei beschichteten Geweben vor und nach den Außentests am ZAE Bayern.
Die Ergebnisse zeigen, dass die niedrig emittierenden Beschichtungen der Fa. TAG eine sehr gute Wetterbeständigkeit aufweisen.

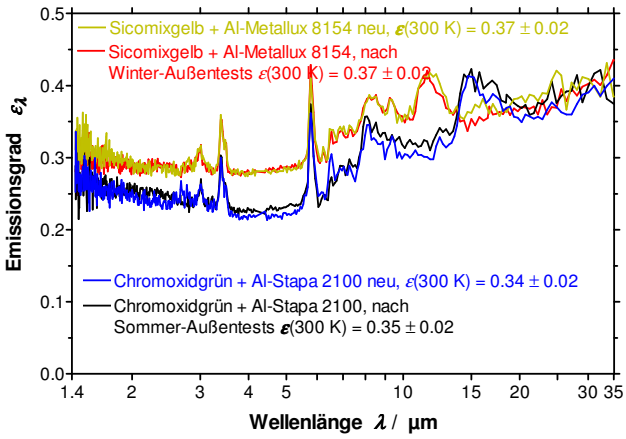


Abbildung 88: Spektraler Emissionsgrad von zwei low-e Beschichtungen auf PES-Gewebe vor und nach den Außentests am ZAE Bayern.

Bei der Fa. TAG wurden auch niedrig emittierende Beschichtungen auf ETFE-Folien erfolgreich aufgetragen. In Abbildung 89 ist der spektrale Emissionsgrad von einer blauen low-e-Beschichtung auf ETFE-Folie mit Emissionsgrad $\varepsilon = 0.23$ und von einer grauen low-e-Beschichtung auf ETFE-Folie mit Emissionsgrad $\varepsilon = 0.22$ dargestellt.

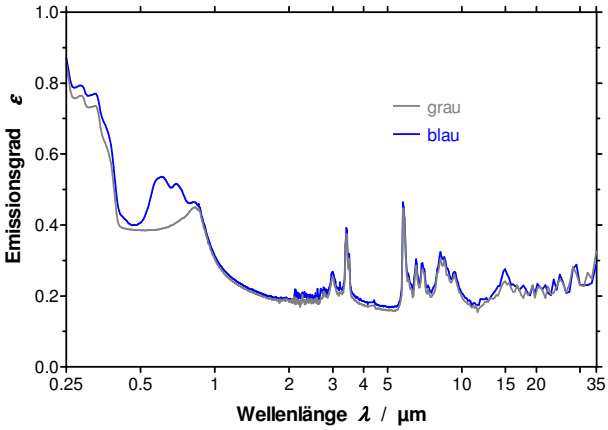


Abbildung 89: spektraler Emissionsgrad einer blauen und einer grauen low-e-Beschichtung auf ETFE-Folie.

Neben der Funktionalisierung von Oberflächen wurden auch Komponenten und Systeme mit Membranen optimiert.

10 Kombination von Gewebe- und Membranmustern mit Dämmmaterialien

Zur Verbesserung der Wärmedämmung von Membrankonstruktionen wurden am ZAE Bayern Funktionsmuster mit Membranen bzw. Geweben in unterschiedlichen Größen hergestellt und sowohl hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften als auch hinsichtlich ihrer Performance im Außen-Teststand untersucht. Bei den Funktionsmustern handelt es sich um Verbundsysteme aus ETFE- oder PP-Folien und verschiedenen Dämmmaterialien oder Latentwärmespeichern. Abbildung 90 bis Abbildung 93 zeigen die Bilder von ausgewählten Mustern. In Abbildung 90 und Abbildung 91 ist ein Verbund aus zwei Polypropylen-Folien, zwischen denen ein Aerogel-Vlies eingebracht ist, dargestellt. Abbildung 92 und Abbildung 93 zeigen zwei Polypropylen-Folien, deren Zwischenraum mit Aerogel-Granulat gefüllt und zur Sicherstellung einer hinreichenden mechanischen Stabilität leicht evakuiert wurde.

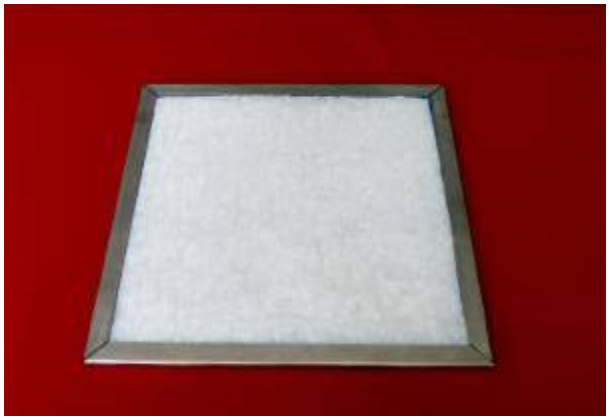


Abbildung 90: Aerogel-Vlies zwischen zwei Polypropylen-Folien.

Abbildung 91: Aerogel-Vlies zwischen zwei Polypropylen-Folien.

Abbildung 92: Zwei Polypropylen-Folien mit Aerogel-Granulat gefüllt und evakuiert.

Abbildung 93: Zwei Polypropylen-Folien mit Aerogel-Granulat gefüllt und evakuiert.

11 Wärmeübergang durch ein mehrschichtiges System

Um die thermischen Simulationen zu unterstützen, wurde am ZAE Bayern der Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m² K)] von mehrlagigen Membran-Anordnungen mit und ohne low-e Beschichtung, für senkrechte und waagrechte Neigung, für den Winter- und für den Sommerfall und für unterschiedliche Abstände zwischen den Membranen sowie mit Luft und mit Aerogel-Granulat zwischen den Platten berechnet. In Abbildung 94 ist der Fall für die senkrechte Neigung und in Abbildung 95 für die horizontale Neigung skizziert.

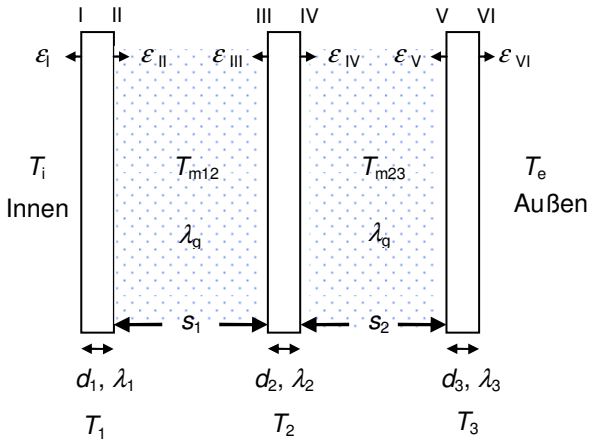


Abbildung 94: Anordnung für drei parallele vertikale Platten oder Membranen.

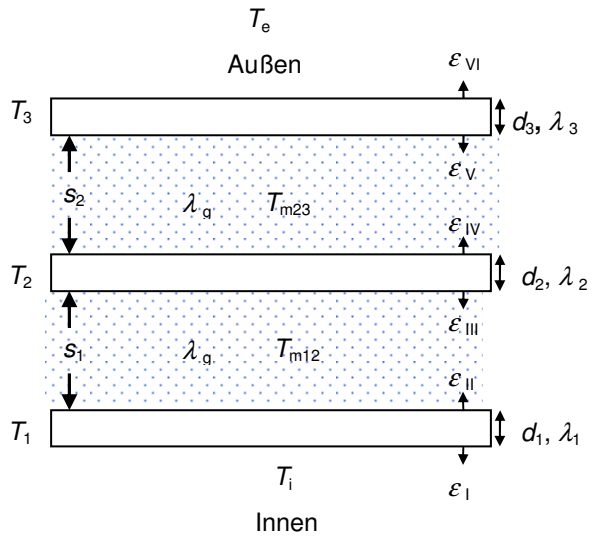


Abbildung 95: Anordnung für drei parallele horizontale Platten oder Membranen.

Die Wärmestromdichte *q*, welche durch das System pro Fläche und pro Zeit übertragen wird ist:

$$q = -\left(\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}\right)^{-1} \cdot \Delta T = -U \cdot \Delta T$$

Gleichung (1)

mit:

- U: Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m² K)],
- ΔT: Temperaturdifferenz $T_i - T_e$,
- h_e: äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m² K)],
- h_i: innerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m² K)],
- h_t: Gesamtwärmedurchlasskoeffizient [W/(m² K)].

Der *U*-Wert kann unter anderem reduziert werden, indem man z. B. eine low-e-Schicht auf die Scheiben oder Membranen aufträgt, welche der Emissionsgrad *ε* verringert oder indem man den Spalt zwischen den Scheiben oder Membranen mit einem anderen Gas als Luft (z.B. Argon oder Krypton) oder z.B. mit Aerogel befüllt.
In Tabelle 3 sind die resultierenden *U*-Werte für zwei und drei senkrechte und zwei und drei horizontale parallele Membranen mit Luft in den Zwischenräumen, mit der oben gegebenen Formel für den Winter- und den Sommerfall gerechnet, aufgetragen. Unterschiedliche Abstände *s* zwischen den Membranen und diverse Beschichtungsvarianten der Membranen wurden untersucht. Der Emissionsgrad *ε* der Beschichtung wurde gleich 0.35 angenommen.
Für 2 senkrechte und 2 waagrechte Membranen wurde auch den *U*-Wert für den Fall vom Zwischenraum mit Aerogel-Granulat befüllt gerechnet.
Den niedrigsten *U*-Wert liefern immer die Anordnungen mit komplett beschichteten (nach innen und nach außen) Membranen.

Tabelle 3: Zusammenfassung der *U* – Werte / W/(m²K)

U-Wert

Winterfall

	s = 16 mm	*s* = 60 mm	*s* = 300 mm	*s* = 1000 mm
2 senkrechte unbeschichtete Membranen	2,64	2,60	2,67	
2 senkrechte beschichtete Membranen	1,37	1,30	1,41	
2 senkrechte unbeschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	1,00	0,38	0,07	
2 senkrechte beschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	0,87	0,36	0,07	
3 senkrechte unbeschichtete Membranen	1,85	1,75	1,81	1,70
3 senkrechte beschichtete Membranen	0,90	0,77	0,84	0,70
2 horizontale unbeschichtete Membranen	3,58	3,47	3,33	
2 horizontale beschichtete Membranen	2,09	1,94	1,73	
2 horizontale unbeschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	1,09	0,39	0,07	
2 horizontale beschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	1,02	0,38	0,07	
3 horizontale unbeschichtete Membranen	2,19	1,90	1,79	2,15
3 horizontale beschichtete Membranen	1,08	0,69	0,53	0,83

Winter-Temperatur

T_i	290,5 K
T_e	275,5 K
ΔT	15 K

Sommerfall

	s = 16 mm	*s* = 60 mm	*s* = 300 mm	*s* = 1000 mm
2 senkrechte unbeschichtete Membranen	2,90	2,60	2,95	
2 senkrechte beschichtete Membranen	1,44	1,40	1,50	
2 senkrechte unbeschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	1,04	0,39	0,07	
2 senkrechte beschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	0,89	0,37	0,07	
3 senkrechte unbeschichtete Membranen	2,04	1,98	2,04	1,93
3 senkrechte beschichtete Membranen	0,94	0,87	0,95	0,50
2 horizontale unbeschichtete Membranen	2,87	2,68	2,59	
2 horizontale beschichtete Membranen	1,22	0,97	0,84	
2 horizontale unbeschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	1,04	0,39	0,07	
2 horizontale beschichtete Membranen mit Aerogel im Spalt	0,80	0,35	0,07	
3 horizontale unbeschichtete Membranen	2,03	1,85	1,77	1,76
3 horizontale beschichtete Membranen	0,85	0,63	0,52	0,50

Sommer-Temperatur

T_i	293 K
T_e	308 K
ΔT	15 K

12 Außenteststand

Zur Überprüfung der bauphysikalischen Kenndaten aus Kapitel 1.9 und der Wärmedurchgangskoeffizienten aus Kapitel 1.13 sowie zur Verifizierung des Potenzials von Membranen und der entwickelten Funktionalisierungen wurden Messungen an einem Außenteststand des ZAE Bayern durchgeführt.
Es sind zwei gleiche Räume mit den Abmessungen 1.5 x 3.0 x 2.5 m^2 entstanden, die mit variabler Leistung heizbar bzw. kühlbar sind. In jedem Raum wurden 20 Temperatursensoren an den Wänden, an der Decke, am Boden und an einer Säule in der Mitte jedes Raumes befestigt. An einer ca. 1 x 2 m^2 großen Öffnung (rechts in Abbildung 96 bzw. mittig in Abbildung 97) in der südlichen Außenwand jedes Raumes ist ein Metallrahmen der Fa. Hightex eingebaut worden, in den Gewebe, Membranen oder Folien, ein- oder mehrlagig, eingespannt werden können.

Abbildung 96: Umgebauter Teststand des ZAE Bayern.

Abbildung 97: Großansicht der beiden südlichen Wandöffnungen, in die Membranen eingespannt werden können.

Nachdem getestet wurde, dass beide Räume des Außenmessstands am ZAE Bayern bei gleichen Bedingungen sich thermisch gleich verhalten, wurden unterschiedliche Proben eingebaut und über einen Zeitraum von mehreren Wochen getestet. Es werden aber nur repräsentative Bereiche der Langzeitmessungen im Bericht dargestellt. Bei den Winter-Tests wurden beide Räume des Außenmessstandes mit einer Leistung von 500 W geheizt, bei den Sommer-Tests wurde die Heizung ausgeschaltet.
Die Ergebnisse der Messungen wurden in den Projekt-Zwischenberichten ausführlich erläutert. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der im Kapitel 6.12 experimentell ermittelten und der im Kapitel 6.11 theoretisch berechneten Werte.
Darüber hinaus konnten auch die oben diskutierten Vorteile der low-e Gewebe verifiziert werden.

13 Weiterentwicklung von Membran-integrierter Photovoltaik

Im Verlauf des Projektes hat die Hightex GmbH intensiv am Thema der Integration von Photovoltaik auf Membranen gearbeitet.

<u>Grundsätzliche Vorteile der Anwendung von PV auf Membranen sind dabei:</u>

- Erzeugung elektrischer Energie stellt eine zusätzliche Nutzung der Dachfläche dar,
- PV Module erzeugen Abschattung des darunterliegenden Gebäuderaums,
- PV als innovative Technologie erhöht das Presitge eines Bauwerks (Marketing-Effekt).

<u>Grundsätzliche Vorteile flexibler Photovoltaik:</u>

- Durch Verzicht von starren, schweren Substraten (Glas) erreicht man dünne, leichte und flexible Module,
- Polymerwerkstoffe (verwendet in Verkapselung, ggf. auch Substrat) lassen sich bei niedrigen Temperaturen und somit mit weniger intensivem Energieeinsatz verarbeiten,
- Verwendung dünner Schichten photaktiven Materials; dadurch kostengünstig. Geringer Ressourceneinsatz (z.B. von Silizium).

Der in Rimsting im Firmengebäude der Hightex GmbH installierte Prototyp von in ETFE-integrierter Photovoltaik beruht auf einem speziell hierfür entwickelten Laminat, das einen Aufbau wie folgt hat (von oben nach unten, siehe auch Abbildung 98):

- tragende ETFE-Folie (250 µm),
- Ethylenvinylacetat (EVA),
- PV-Film (eigentliche Photozelle),
- Ethylenvinylacetat (EVA),
- ETFE-Folie als „Backsheet“ (80 µm).

Abbildung 98: Schematischer Aufbau eines Photovoltaikmoduls mit ETFE als Backsheet.

Die Kontaktierung der Photozelle erfolgt von der Unterseite über spezielle Junction-Boxes, die im Kissen-Inneren verlegt und verkabelt werden.
Dieser Aufbau, der in Rimsting die Oberlage eines ETFE-Folienkissens bildet, ist nicht für alle Anwendungen ideal und umsetzbar. Daher untersuchte die Hightex GmbH im Rahmen des MESG-Projekts weitere Laminat-Varianten auf die mögliche Anwendung in der gebäudeintegrierten Photovoltaik im Membranbau hin. Hierzu zählen insbesondere Variationen des Backsheet-Materials, z.B. thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis (TPO) und TPO/Stahlblech-Verbünde (siehe Abbildung 99). TPO ist ein im Bereich von Flachdächern häufig eingesetztes Folienabdichtungsmaterial, das thermisch verschweißt werden kann.
Neben Preisvorteilen bieten sich durch die Varianten ggf. Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften (Robustheit, Hagelfestigkeit, Reduktion Transport- und Installationsrisiko), etc.

Abbildung 99: Schematischer Aufbau eines Photovoltaikmoduls mit TPO oder TPO/Stahlbelchverbund als Backsheet.

Neben den materialtechnischen Fragen untersuchte die Hightex GmbH auch Alternativen zur Integration in die Oberlage von Folienkissen, beispielsweise die Integration in die Unterlage und die Integration als Mittellage (Abbildung 100).

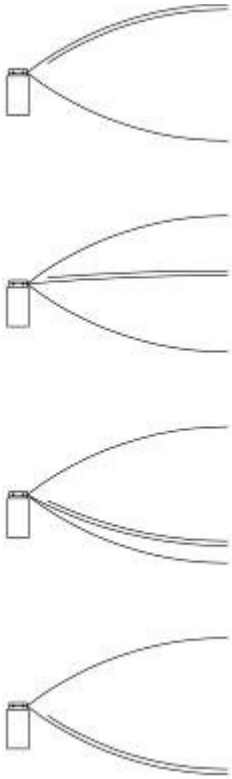


Abbildung 100: Mögliche Lagen der Photovoltaik in einem Kissen.

Bei der Integration als Mittellage müssen die Photovoltaikelemente nicht zwingend in eine vollflächige Mittellage integriert werden, stattdessen ist es denkbar die Elemente unabhängig von einander zu installieren, so dass, falls nötig, ein Austausch einzelner Photovoltaikelemente möglich ist.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Weiterentwicklung von Photovoltaik auf textilen Materialien bestand im Projektzeitraum v.a. bei Membranen aus PTFE/Glas. Zum Einsatz kommen auch hierbei naturgemäß flexible PV Module, wobei aufgrund der nicht zwingend erforderlichen statischen Integration auch Module mit Metallblechsubstrat in Betracht kommen. Dies eröffnet Einsatzmöglichkeiten für Module von weiteren Herstellern, neben denen für ETFE verwendeten der Firma VHF. Solche Hersteller könnten beispielsweise UNISOLAR, FUJI oder GLOBAL SOLAR sein, die alle entsprechende flexible Module anbieten. Hierzu wurden erste Tests mit Mustern durchgeführt.
Im Hinblick auf die Entwicklung von Membran-integrierter PV stellen die untersuchten Untergrundmaterialien Folie und Gewebe grundsätzlich verschiedene Fälle dar.

Wichtige Aspekte sind hier v.a. unterschiedliche Anforderungen im Hinblick auf die Dehnung:
Die Vorspannkräfte bei ETFE-Folien, v.a. auch bei pneumatischen Anwendungen (Kissen) sind vergleichsweise gering, sie können i.d.R. inklusive der resultierenden Dehnung vom PV-Modul getragen werden. Die Kräfte bei vorgespannten textilen Membranen sind ungleich höher und können einem flexiblen PV Modul keinesfalls zugemutet werden. Hier sind daher alternative Konzepte der mechanischen Befestigung erforderlich, die berücksichtigen und sicherstellen, dass die Vorspannkräfte keinesfalls in das PV-Modul eingeleitet werden.
Die Installation von PV auf Folien/ Membranen erfordert die Lösung spezieller Probleme:

1. Folien/Membranmaterialen werden im Einsatz als tragende Gebäudehülle unter Vorspannung verbaut. Diese Vorspannung führt zu einer Dehnung des Materials. Hierbei kann die Dehnung, welche direkt bei der Installation der Membran entsteht (Zeitraum: mehrere Tage) und die Dehnung welche sich nach Einbau (Zeitraum: halbes Jahr) entsteht unterschieden werden. Diese Dehnungen sind elastischer und sowohl plastischer Natur. In der Regel zeigen die verwendeten Materialien eine nicht isotrope Verteilung der Dehnung. Diese resultiert aus der Produktionstechnik, bei Membranen außerdem durch die Orientierung des Gewebes (Schuss- und Kettrichtung) und eine folgende Verrautung der Maschen. Im Allgemeinen sind aufgrund der Form flexibler Dachkonstruktionen die Vorspannungen nicht isotrop in Richtung der Dachfläche verteilt. Durch die 3-dimensionale Gestalt des Daches entstehen zusätzlich Dehnungen oder Stauchungen. Die durch diese Effekte entstehenden Kräfte werden zum großen Teil durch das Bauteil mit der höchsten Steifigkeit im System kompensiert. Dies stellt eine erhebliche Belastung für die Kontaktflächen und PV Module dar, vergleiche Abbildung 101 und Abbildung 102.

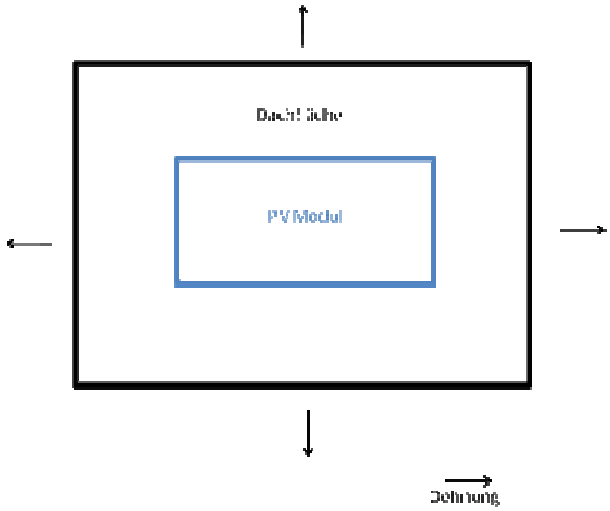


Abbildung 101: Draufsicht; PV Modul auf dehnbarer Dachfläche (Membran oder Folie). Wird die Dachfläche durch Vorspannung gedehnt, muss das PV Modul dieser Vorspannung folgen.

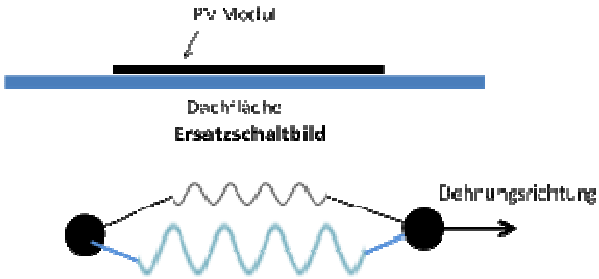


Abbildung 102: Seitenansicht; PV Modul auf dehnbarer Dachfläche (Membran oder Folie). Wird eine Vorspannung an diese Konstruktion angelegt, verteilen sich die Zugkräfte wie bei parallel gespannten Federn. Die Feder mit der größeren Federhärte/Steifigkeit übernimmt den Großteil der resultierenden Kraft.

2. Unter Einfluss von Wind, Niederschlag (Hagel, Schneelast, usw.) kommt es bei flexiblen Dachkonstruktionen zu einer weiteren Verformung vertikal zum PV-Modul. Aktuell ist unklar, inwiefern sich die mechanischen Belastungen auf das PV-Modul im Vergleich zu starren Dachkonstruktionen erhöhen oder erniedrigen

Die Eigenschaften dieses Materials bieten erhebliche Schwierigkeiten für die Integration von PV. PTFE/Glas wird in der Regel unter Vorspannung installiert. Dies führt während der Installation zu einer Längendehnung in Schuss- und Kettrichtung von 2-4 %. Nach der Installation wird durch weiteres „Nachge-

ben“ der Membran, diese erneut um etwa 0,5 % gedehnt. Generell können flexible PV-Module dieser Dehnung nicht folgen. Deshalb müssen diese Dehnungen bei der Installation der PV-Module berücksichtigt werden.
Dieses Problem kann durch die nachträgliche Installation der PV-Module auf die installierte und damit vorgespannte Membran teilweise gelöst werden.
Ein weiteres Problem besteht in der Befestigung. Ein erster Ansatz hierzu bestand darin, die in Flurpolymer eingebetteten PV-Module direkt auf die Membran aufzuschweißen.
Ein solcher Prototyp wurde auf einem Vierpunktsegel beim Firmensitz der Hightex GmbH installiert. Hier wurden modifizierte Module von VHF eingesetzt. Diese PV-Module selbst befinden sich zwischen zwei EVA-Schichten eingebettet und sind von Fluorpolymerfolien umschlossen. Das Front-Sheet steht über das Modul über und bildet außerhalb des PV Moduls einen breiten Rand (siehe Abbildung 103).

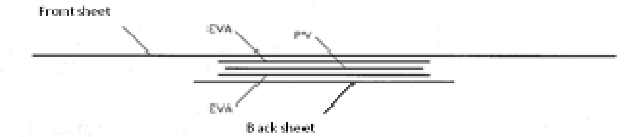


Abbildung 103: PV Modul in jeweils an Ober- und Unterseite in je einer Schicht EVA und Flurpolymer eingebettet.

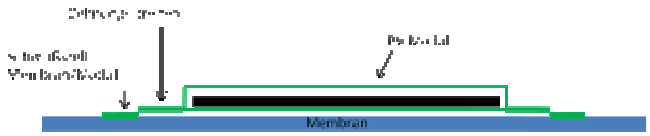


Abbildung 104: Skizze der Befestigung des PV Moduls auf dem PTFE/Glas.

Dieser breite Rand um das PV Modul wird zum Teil dazu verwendet, um das Modul auf dem PTFE/Glas zu verschweißen. Der andere Teil des Randes wird nicht mit der Membran verschweißt, sondern dient zur Kompensation von Dehnungen, vergl. Abbildung 104.

Erste Ergebnisse hierzu (vgl. Abbildung 105):

- Die Verschweißung des Fluorpolymer Front Sheets auf die PTFE Beschichtung zeigt sich dauerhaft und haltbar,
- Bereits nach kurzer Zeit zeigen sich Risse/Löcher an der Schweißinnenkante zum PV Modul im Front-Sheet,
- Das Front Sheet auf der PV Modul Oberseite löst sich ab. Das PV Modul selbst delaminiert.

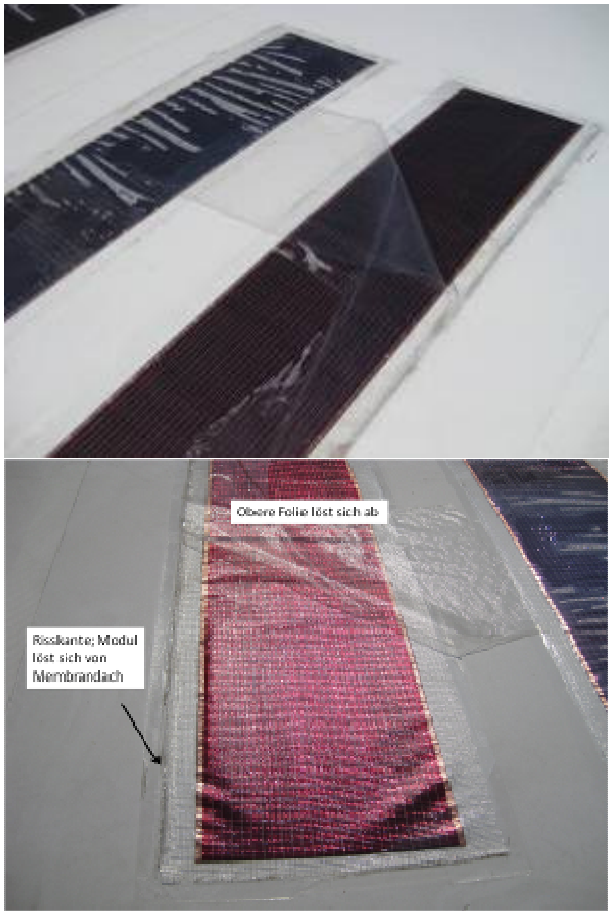


Abbildung 105: Schäden der Befestigung der PV Moduls.

Ein Schwachpunkt des beschriebenen Prototypen ist, dass dieser nur am Rand mit dem PTFE/Glas verbunden ist. Eine flächige Verschweißung des PV Moduls, welches in ein Flurpolymer verkapselt ist, auf das PTFE/Glas ist nicht möglich, weil der Schmelzpunkt des EVA mit $T_{schmelz}$ = 150 °C zu niedrig ist, um das Modul durch Heißschmelzen auf das PTFE/Glas aufzubringen, und auch das PV Modul selbst durch die hohen Temperaturen und mechanischen Belastungen beschädigt werden könnte.

Ein neuer Ansatz verfolgte daher die Strategie, PV-Modul und Untergrund (Membran) nicht flächig kraftschlüssig zu verbinden, sondern mit einer Fügung zu arbeiten, die insbesondere Dehnungen und Verformungen aus der Membran nicht als Kräfte in das PV-Modul überträgt. Hier liegt der Fokus auf flächigen Verbindungen auf Basis von Industrie-

Klettverschlüssen und speziell entwickelten linearen Verbindungsmitteln (für eine Verbindung entlang der PV-Modulränder).

Abbildung 106 zeigt den aktuellen Stand, hier unter Einsatz der SolarLoc-Technologie der Firma Saint-Gobain. Das besondere bei diesem Lösungsansatz ist die Kombination eines Hochtemperaturprozesses (thermische Schweißung von PTFE/Glass) mit einem Niedertemperaturprozess (Klebungen) über geeignete Zwischenschichten und die Klettverbindung. Die Verbindung ist reversibel, wodurch z.B. im Schadensfall PV-Module ohne Beschädigung der tragenden Membranlage ausgetauscht werden können.

Darüber hinaus löst dieser Ansatz die zwingende Bindung an einen PV-Hersteller, denn prinzipiell können hier alle flexiblen PV-Module zum Einsatz kommen, die über geeignete Klebstoffe mit der Klettoberseite verbunden werden können. Dies trifft auf alle bekannten großen Hersteller zu (z.B. UNISOLAR, FUJI, FLEXCELL, GLOBAL SOLAR).

Abbildung 107 zeigt einen Biax-Versuch mit der neuen Verbindungsmethode.

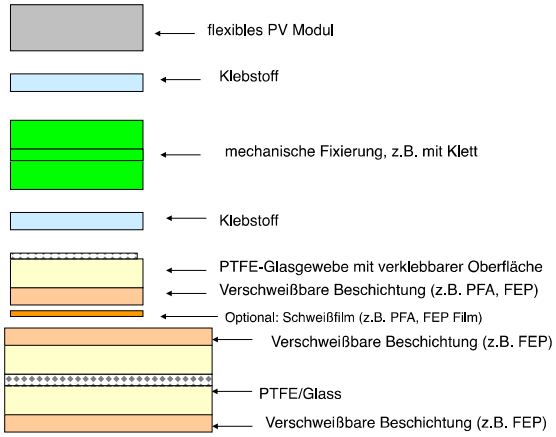


Abbildung 106: Schematische Schnittdarstellung der Verbindung von PTFE/Glass mit flexibler PV (mit SolarLoc von Saint-Gobain).

Abbildung 107: Biax-Test der Verbindung zwischen PV-Modul und PTFE/Glass (mit SolarLoc von Saint-Gobain).

Ein weiteres konstantes Thema ist die Beobachtung des Marktes im Hinblick auf neue Entwicklungen im dynamischen Bereich der PV-Technologien. Im Berichtszeitraum hat die Hightex GmbH erste Kontakte zum Hersteller Global Solar (Sitz in Tucson, USA, und in Berlin) aufgenommen. Aus diesem Hause stammt ein sehr interessantes und vielversprechendes Produkt aus dem Bereich der flexiblen PV, hier auf Basis von CIGS, mit vergleichsweiser hoher Effizienz (derzeit zwischen 10,5% und 12,6%), vgl. Abbildung 108. Der Markteintritt mit diesem flexiblem PV-Produkt in Europa ist für Q1/2011 geplant. Es ist zu erwarten, dass bis dahin alle relevanten derzeit noch laufenden Zertifizierungsprozesse abgeschlossen sein werden.

Die Technologie verspricht gegenüber Alternativen einige entscheidende Vorteile, vgl. Abbildung 109. Insbesondere für die Anwendung in Verbindung mit PTFE/Glass könnte auf begrenztem Flächenangebot mit dieser Technologie deutlich mehr Energie pro Fläche bereitgestellt werden, und das bei deutlich geringeren Kosten (spezifisch pro kW_{peak} und vermutlich auch Systemkosten). Da im Hinblick auf die Kosten des fertig installierten PV-Systems die Flächenansätze (Material und Arbeitszeit) einen großen Anteil haben, sind grundsätzlich Systeme mit höherem Wirkungsgrad im Vorteil (vergl. auch Abbildung 109).

Abbildung 108: PowerFLEX-PV-Modul der Firma Global Solar (Q4 / 2010)

Abbildung 109: Vergleich von PowerFLEX_PV-Modulen der Firma Global Solar mit technologischen Alternativen (Firmenangaben)

Für die erfolgreiche Vermarktung von PV auf Membran ist der glaubhafte Nachweis einer wirtschaftlichen Funktionstüchtigkeit der Technologie unerlässlich. Deshalb untersucht und analysiert Hightex verfügbare PV Technologien speziell für den Einsatz auf Membranen. Hier findet man in Abhängigkeit des Einsatzortes unterschiedliche Bedingungen vor. Es ist bekannt, dass gerade dachintegrierte PV besonders sensibel auf äußere Bedingungen wie Solare Einstrahlung und Temperatur reagiert [1]. Abbildung 110 zeigt eine auf Daten der Hersteller beruhenden Abschätzung der mit einem Modul erreichbaren Effizienz in Abhängigkeit der Modultemperatur. Es ist deutlich erkennbar das bei der Auswahl des einzusetzenden Moduls auf die unter den äußeren Bedingungen entstehenden Oberflächentemperatur des Daches geachtet werden muss.

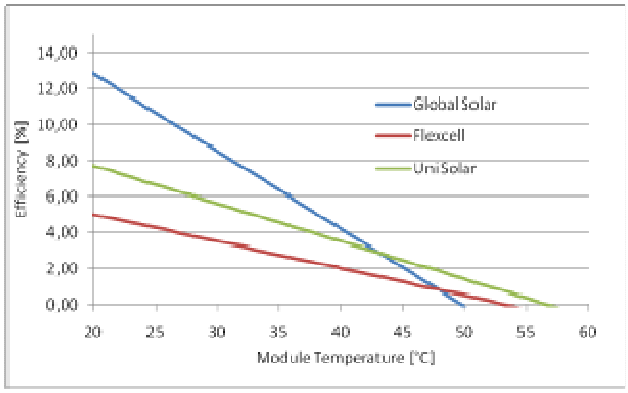


Abbildung 110: Abschätzung der erreichbaren Effizienz in Abhängingkeit der PV Modultemperatur. Daten PV Modul Hersteller.

Eine PV Modul Befestigung auf PTFE/Glass-Membranen muss folgende Herausforderungen meistern:

- Die hervorragend schmutzabweisende Oberfläche der PTFE/Glass-Membran stellt, durch ihre kaum mögliche Verklebbarkeit mit verfügbaren Klebetechnologien eine Herausforderung für die Befestigung von PV Modulen dar. Ziel ist es, die Membran durch die Verbindungstechnik nicht zu verletzen, weshalb mechanische Befestigungstechnik vermieden werden soll.
Bei der hier vorgestellten Befestigungsmöglichkeit wird diese Verbindung durch Heißschweißen hergestellt. Dieses Verfahren wird auch für Flächennähte bei diesem Material eingesetzt.

- Die durch die Bewitterung des Membrantragwerks erzeugte dauerhafte Bewegung, Verformung und Dehnung der PTFE/Glass-Membran muss durch die Befestigung absorbiert werden und darf nicht an das PV Modul weitergegeben werden. Andernfalls ist eine Schädigung des PV Moduls zu erwarten.
Bei der hier vorgestellten Befestigungsmöglichkeit wird dies durch eine bewegliche und reversible Klettverbindung sichergestellt. Diese ist in der Lage, diese Bewegung auszugleichen, ohne wesentlich Kräfte zu übertra-

gen und auch eine Ermüdung ist nicht zu erwarten.

- Die Befestigung ist starker Solarstrahlung ausgesetzt und muss daher dauerhaft UV beständig sein und auch Temperaturen über 70°C dauerhaft widerstehen. Auch stark schwankende Luftfeuchtigkeit, Niederschläger und Schmutz und die damit eventuell verbundene Ansiedlung von Bakterien, Algen und Pilzen muss berücksichtigt werden.
Dies wurde bei der Auswahl der verwendeten Materialien in Betracht gezogen, eine zuverlässige Bewertung lässt jedoch nur der Langzeittest zu.
Auf das Sonnensegel am Firmensitz der Hightex wurde hierzu ein Prototyp installiert (vgl. Abbildung 111).

Abbildung 111: Installierter Prototyp der flexiblen Photovoltaik Befestigungslösung auf PTFE/Glass-Membran.

Ein flexibles Standard Unisolar PV Modul wird auf seiner Rückseite flächig mit PE Klett-Schlaufen beklebt. Dieses Modul wird längs seitig mit schmalen Klett-Haken-Streifen befestigt. Diese Klett-Haken-Streifen sind mit Butyl-Kleber auf die nicht beschichtete Seite von einseitig beschichteten PTFE/Glass-Membran-Streifen geklebt. Diese schließlich sind mit der beschichteten Seite mittels Heißschweißen auf der Tragwerksmembran befestigt (vgl. Abbildung 112 und Abbildung 113).

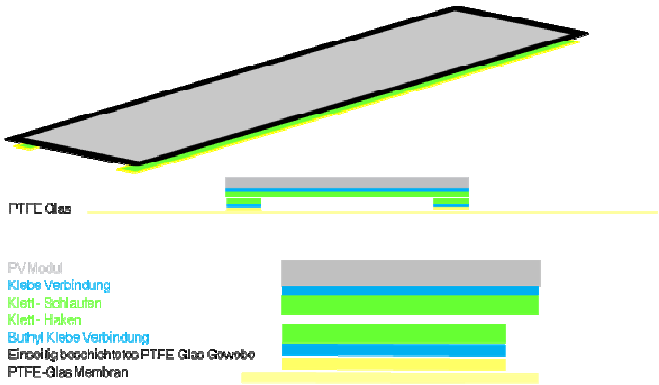


Abbildung 112: Schematischer Aufbau der Verbindung PV Modul-PTFE/Glass-Membran (SG SolarLoc).

Abbildung 113: Installationsfertig vorbereiteter Prototyp der flexiblen Photovoltaik Befestigung für PTFE/Glass-Membranen.

Installation:
PTFE/Glass-Membranen werden durch die Beschichtung bzw. Lamination mit einer dünnen Lage FEP auf der PTFE-Beschichtung schweißbar gemacht. PTFE selbst ist nicht schmelzbar und kann deshalb nicht heissgeschweißt werden. FEP hingegen ist schmelzbar und hat einen Schmelzpunkt von etwa 280°C, das Heißschweißen findet bei Temperaturen wesentlich oberhalb dieser Temperatur statt. Diese Temperatur würde sowohl den Butylkleber als auch das Polyester des der Klett-Haken zerstören bzw. schmelzen. Aus diesem Grund muss der einseitig beschichtete PTFE/Glass-Membran-Streifen aufgeschweißt werden, bevor der Klett-Haken-Streifen auf diesen aufgeklebt wird.
- Im ersten Arbeitsschritt werden zwei einseitig laminierte PTFE/Glass-Membran-Streifen im Abstand der Modulbreite mit der beschichteten Seite auf die Tragwerksmembran geschweißt (vgl. Abbildung 114).

Abbildung 114: Aufschweißen des einseitig beschichteten PTFE/Glass-Membran Streifens auf die Tragwerksmembran mittels „bügeln“.

Abbildung 115: Aufkleben der Klett-Haken-Streifen mit Butyl Kleber.

- Im zweiten Schritt werden die Klett-Haken-Streifen mit den gleichen Abmessungen wie die zuvor aufgeschweißten einseitig beschichteten PTFE/Glass-Membran-Streifen auf diese aufgeklebt. Ein Vorwärmen des rohen Glasgewebes verbessert die Haftung des Klebers (vgl. Abbildung 115).
- Im dritten Schritt wird das flexible PV Modul mit der Klett-Schlaufen-Rückseite auf die beiden auf der Tragwerksmembran befestigten Klett-Haken-Streifen abgerollt (vgl. Abbildung 116).

Abbildung 116: Aufbringen des flexiblen PV Moduls mit Klett-Schlaufen-Rückseite, auf die Klett-Haken-Streifen.

13.1 Aktueller Stand und Fazit

Die hier vorgestellte Lösung zur Befestigung von flexibler Photovoltaik auf PTFE/Glass-Membranen hat sich nach dem bisherigen Stand der Erkenntnis als technisch funktionstüchtig und umsetzbar erwiesen - allerdings mit vergleichsweise hohem Zeitaufwand. Die verwendete Schweißtechnologie ist von Hightex erprobt worden und wird auch unter schwierigen Baustellenbedingungen als zuverlässig und durchführbar angesehen.
Die durchgeführte Installation zeigt, dass diese Lösung bei bestehenden PTFE/Glass-Membran Bauwerken eingesetzt werden könnte.
Eine Verlagerung der Schweiß- und Klebearbeiten in den Bereich der Vorfertigung wird für Neubauten als möglich erachtet und sollte Ziel weiterer Forschung sein. Hierdurch wäre eine erhebliche Installationszeit- und Kostenersparnis zu erwarten.
Die reversible Klettverbindung ermöglicht den Austausch sowohl defekter PV Module als auch der Tragwerksmembran. Dies senkt das Investitionsrisiko bei der Installation der Photovoltaik auf Bestandsbauten und auch die Reparaturkosten bei Schadensfällen, dies ist im Hinblick auf die erheblichen Investitionskosten und die Markteinführung dieser Art von PV Installationen von Vorteil.

Desweiteren wird das installierte PV Modul weiter genutzt um die Witterungsbeständigkeit der Befestigungslösung unter Realbedingungen zu testen.
Insbesondere zu untersuchen sind

- Dauerhaftigkeit der Butyl Klebeverbindung zwischen nicht beschichtetem Glas-Fasergewebe und Klett-Hakenstreifen, bei Einwirken von Kräften, Feuchtigkeit und Wärme
- UV-Beständigkeit der PE Klettverbindung
- das Anschmutzverhalten der lose auf dem Dach liegenden PV Modulrückseite mit den Klett-Schlaufen
- Kompensation der Dauerbewegung der Tragwerksmembran durch die Klettverbindung und etwaige Materialermüdung.

13.2 Ertragsprognose

Aufgrund der langen Amortisationszeit von PV Installationen ist die Haltbarkeit und eine lange Lebensdauer von größter Wichtigkeit, denn Gründe für die Installation einer PV Anlage sind neben dem positiven ökologischen Image und dem ästhetischen Aufwerten des Gebäudes vor allem ökonomische Erwägungen. Um den Kunden von der Installation einer PV Anlage zu überzeugen, muss Hightex in der Lage sein, die Anlagen optimal zu installieren, aber auch den Ertrag der Anlage zuverlässig abzuschätzen und die Rentabilität somit nachweisen zu können. Ziel hier ist, aus den PV Modulangaben der Hersteller und verfügbaren geographischen Angaben der solaren Einstrahlung unter Berücksichtigung der Installationseigenschaften den Ertrag zu bestimmen.

Die generierte elektrische Leistung

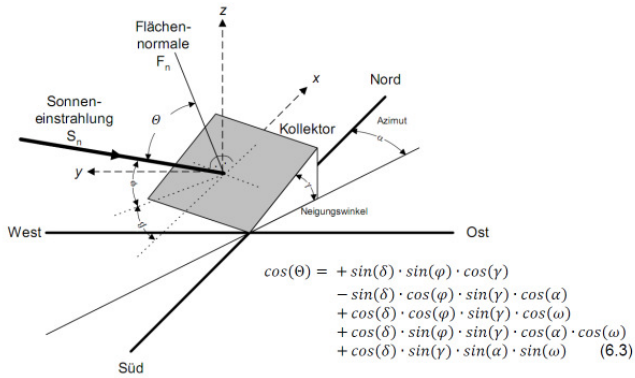
$$P_{el} = \eta \cdot \Phi$$

eines PV Moduls ergibt sich aus dem Produkt von Modulwirkungsgrad η und dem solaren Strahlungsfluss Φ.

Der Strahlungsfluss, das Vektorprodukt von Bestrahlungsstärke und der bestrahlten Fläche,

$$\Phi = E \cdot A \cdot \cos(\theta)$$

ergibt sich aus dem Produkt der solaren Bestrahlungsstärke E, der Modulfläche A und dem Kosinus des Winkels θ zwischen Modulflächennormale A und der solaren Einstrahlung E.
Zur optimalen Installation ist nach der durch ein potentielles Projekt vorgegebenen geographischen Lage und nach Auswahl von auf dem Markt verfügbaren PV Modulen noch der Winkel θ veränderbar.



$$\begin{aligned} cos(\Theta) = &+ sin(\delta) \cdot sin(\varphi) \cdot cos(\gamma) \\ &- sin(\delta) \cdot cos(\varphi) \cdot sin(\gamma) \cdot cos(\alpha) \\ &+ cos(\delta) \cdot cos(\varphi) \cdot sin(\gamma) \cdot cos(\omega) \\ &+ cos(\delta) \cdot sin(\varphi) \cdot sin(\gamma) \cdot cos(\alpha) \cdot cos(\omega) \\ &+ cos(\delta) \cdot sin(\gamma) \cdot sin(\alpha) \cdot sin(\omega) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Abbildung 117: Schema zur Ermittlung des Winkels zwischen solarer Einstrahlung und PV Modulflächennormale in Abhängigkeit von Winkelgrößen, welche durch die geographische Lage, das Datum, die Uhrzeit und die PV Modulausrichtung beschrieben werden.

Beim Anbringen des PV Modules auf eine vorgegebene Membran- oder Folienkonstruktion ergibt sich der Neigungswinkel und der Azimut (vgl. Abbildung 117).

Geographisch angepasste Einstrahlungsscheiben sind verfügbar, welche eine Abschätzung des Ertrags in Abhängigkeit der Ausrichtung nach diesen Winkeln ermöglichen. Für starre PV Module sind diese einfach anwendbar, da ein Modul immer nur eine Ausrichtung hat. Bei auf Membranen oder Folien 2-achsig gekrümmt angebrachten flexiblen PV Modulen wird diese Abschätzung dadurch komplexer, dass das PV Modul über die Fläche unterschiedlich ausgerichtet ist (vgl. Abbildung 118). Hierdurch wird ein Modul über seine Fläche unterschiedlich mit solarem Strahlungsfluss beaufschlagt. Dies erschwert einerseits eine Ertragsabschätzung. Aus technischen Gründen kann dieser theoretische Ertrag jedoch nur teilweise dem Modul entnommen werden. Grund hierfür ist, dass die ungleiche Beaufschlagung mit solarem Strahlungsfluss zum Phänomen der Teil-Abschattung führt.

Abbildung 118: Prototyp ETFE-Kissen mit flexiblen PV Modulen, die in die Oberlage integriert sind

Bei der Installation von starren, gleich ausgerichteten PV Modulen versucht man diese Teilabschattung, verursacht durch Gebäudeteile oder Bäume die in den Weg der solaren Einstrahlung ragen gänzlich zu vermeiden. Bei Folien- und Membranbauwerken muss dieser Effekt aufgrund der gewollten Krümmung der Oberfläche als Element zur Stabilisierung des Bauwerks in Kauf genommen werden. Negative Einflüsse des Ertrages sind durch eine geeignete PV Modul Auswahl und die optimale Anbringung und Ausrichtung des PV Moduls auf der gekrümmten Tragwerksoberfläche zu minimieren.
Für große Projekte empfiehlt es sich den Ertrag eines mit entsprechender Krümmung und Ausrichtung angebrachten PV Moduls im Vergleich zu einem eben installiertem PV Modul vor Ort experimentell zu ermitteln. Auf diese Weise können verfügbare Techniken und Informationen verwendet und validiert werden, und der zu erwartende Ertrag zuverlässig abgeschätzt werden.

13.3 Leistungsverhalten von PV Modulen bei Teil-Abschattung

Die durch die gekrümmte Installation von PV Modulen, resultierende lokal über das Modul variierende solare Einstrahlung führt zu der im vorigen Absatz beschriebenen technischen Schwierigkeit. Je nach der Schaltung der PV Zellen im Modul reduzieren gering mit solarer Einstrahlung beaufschlagte Gebiete der Modulfläche den generierten Strom durch das PV Modul.
Der MPP (maximum power point) eines PV Modules in einem definierten Betriebszustand wird bestimmt durch den Strom-Spannungszustand bei dem die generierte elektrische Leistung

$$P_{el} = U \cdot I$$

ihr Maximum erreicht. Da der Strom I stark von der solaren Strahlungsfluss abhängt, ergeben sich für PV Zellen mit verschiedenem solaren Strahlungsfluss auch verschiedene Ströme zum Erreichen des MPP (vgl. Abbildung 119).

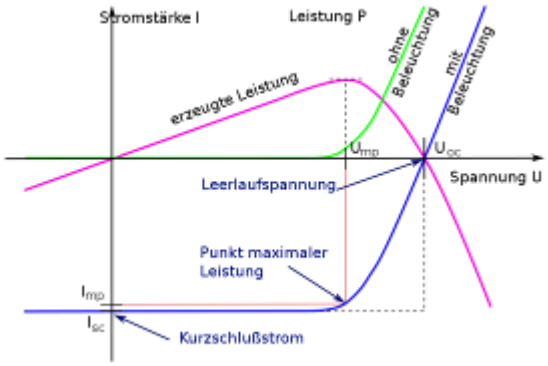


Abbildung 119: Schema der Strom-/Leistungs-Spannungskurve einer Photozelle unter verschiedenen Beleuchtungssituationen. [Quelle: de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Standard_iv_de.svg&filetimestamp=20100929173345].

Alle in Serie geschalteten PV Zellen eines Moduls müssen jedoch am gleichen Arbeitspunkt (mit gleichem Strom) betrieben werden. Stark mit solarer Einstrahlung beaufschlagte PV Zellen werden somit nicht am optimalen Arbeitspunkt betrieben und weisen dadurch einen teils deutlich reduzierten Wirkungsgrad auf.

Dieser Effekt entspricht einer Teilabschattung des PV Moduls. Zur experimentellen Untersuchung der Teilabschattung wird folgender Messaufbau verwendet. Das PV Modul wird gleichmäßig mit einer dem Sonnenspektrum ähnlichen Lichtquelle (Metall-Halogen-Hochdruckdampflampe) beaufschlagt. Während das PV Modul partiell abgedeckt wird, wird durch eine steuerbare Last die Strom-Spannungskurve des PV Moduls ermittelt. (vgl. Abbildung 120).

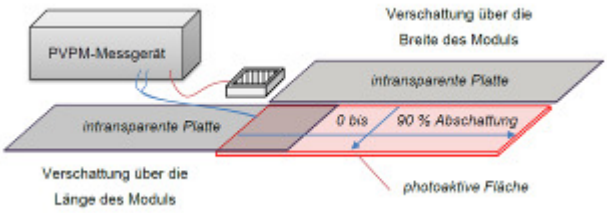


Abbildung 120: Schema eines Messplatzes zur experimentellen Untersuchung des Leistungsverhaltens bei partieller PV Modulabschattung.

Der Einfluss von Teilabschattung auf das Leistungsverhaltens eines Moduls hängt wesentlich von der internen Schaltung dessen PV Zellen ab. Das untersuchte Modul Sunslick 14W enthält eine Kombination aus serieller und paralleler geschalteter Zellen. Das Modul besteht aus einer Anzahl parallel geschalteter Zeilen, wobei jede Zeile aus in Serie geschalteten PV Zellen besteht (vgl. Abbildung 121).

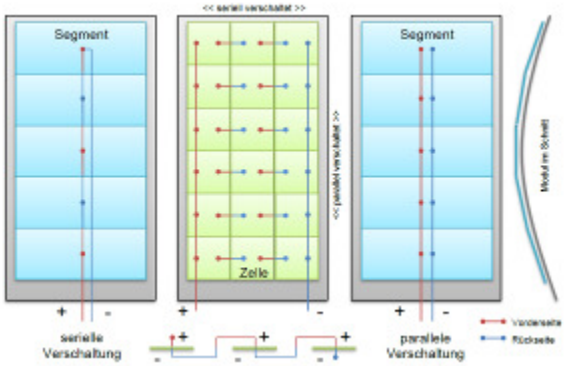


Abbildung 121: Interne Schaltung der PV Zellen des PV Moduls Sunslick 14 W von Flexcell.

Im Experiment zeigt sich deutlich, dass bei einer Abschattung entlang der Modullänge die generierte Leistung proportional zur beleuchteten Fläche ist (vgl. Abbildung 122). Wird hingegen das Modul entlang der Modulbreite verschattet bricht bereits bei einer Abschattung von 10% der Modulfläche die generierte Leistung um 50% ein. Grund hierfür ist, dass komplett abgeschattete PV Zellen in Serie mit beleuchteten PV Zellen geschaltet sind und erstere als Sperrdiode wirken, und die generierte Leistung der beleuchteten PV Zellen absorbieren (vgl. Abbildung 123).

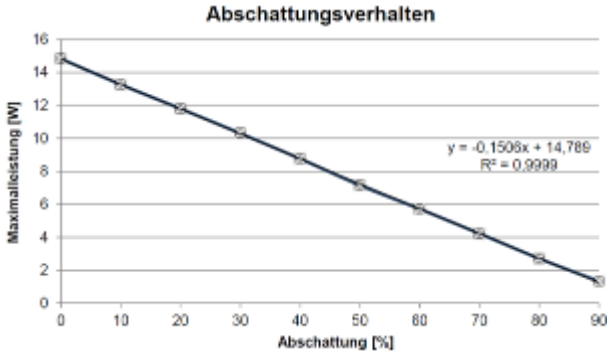


Abbildung 122: Modulleistung bei Teilabschattung (Abschattung entlang der Modullänge).

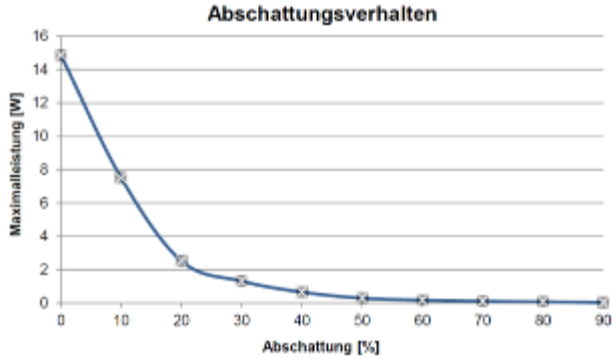


Abbildung 123: Modulleistung bei Teilabschattung (Abschattung entlang der Modulbreite).

Die interne Schaltung des Moduls wurde bereits vom Hersteller optimiert. Die Richtung, in welcher das PV Modul empfindlich auf die Teil-Abschattung reagiert, wurde stark verkürzt und das PV Modul wurde als langer Streifen ausgeführt, in welchem die PV Zellen parallel verschaltet werden. Somit tritt bei einer Krümmung des PV Moduls über die Länge dieser Effekt nicht auf. Jedoch kommt dieser Effekt für die Installation und externe Schaltung mehrerer PV Module zu einem Strang, welcher schließlich an einen Wechselrichter angebunden wird, erneut zum tragen. Um Leistungseinbußen zu vermeiden sind Module in Serie zu schalten, welche ähnliche Ausrichtung und Krümmung und somit mit einem möglichst ähnlichem solaren Strahlenfluss beaufschlagt sind. Die Entwicklung der idealen Lösung der Schaltung hängt stark vom Design der mit PV Modulen zu belegenden Dachfläche ab.

13.4 Modulperformance unter Außenbedingungen in Abhängigkeit von Krümmung und Ausrichtung.

Folgende Tests zeigen den Einfluss der Ausrichtung auf den Ertrag bei Außenbedingungen. In einer Messreihe wurden drei Module Sunslick 14W gleicher Ausrichtung mit unterschiedlichem Stich vermessen. Die unterschiedlichen Krümmungen entsprechen in etwa den Bedingungen von Folien- und Membrandächern. Kleine ETFE-Folien-Kissen können eine Krümmung wie hier S=0,4m erreichen, bis stark vorgespannte PTFE/Glass Membran mit sehr leichter Krümmung näherungsweise wie hier S=0,2m bis S=0m (vgl. Abbildung 124).

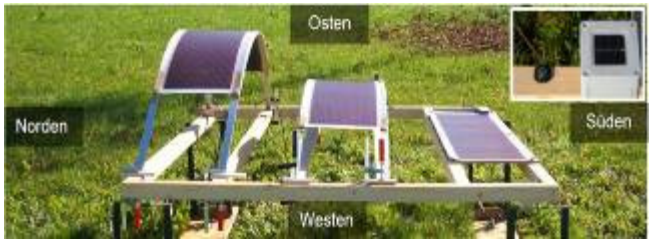


Abbildung 124: Messaufbau für Außenmessung. Links Kissenstich S=0,4 m bezogen auf die Befestigungsebene, Mitte S=0,2 m, Rechts S= 0m.

An zwei verschiedenen Tagen wurde mit dieser Anordnung in Ausrichtung Modullänge in Ost-West und Nord-Süd der Tagesertrag gemessen.

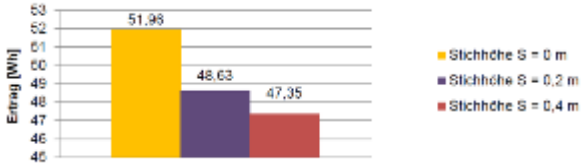


Abbildung 125: Ergebnis der Ertragsmessung (Ost-West-Ausrichtung)

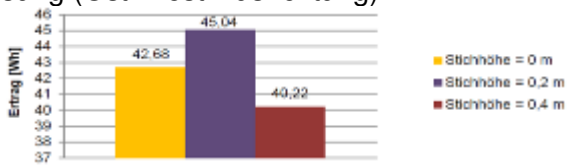


Abbildung 126: Ergebnis der Ertragsmessung (Nord-Süd- Ausrichtung).

Aufgrund der unterschiedlichen solaren Einstrahlung während der Messungen an verschiedenen Tagen sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar.
Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass die Orientierung und Krümmung des PV Modules den Ertrag deutlich beeinflussen. Sowohl eine Erhöhung als auch eine Erniedrigung des Ertrags um mehr als 5% sind möglich. Durch eine optimierte Ausrichtung und Anordnung der Module können auf gekrümmten Flächen durchaus vergleichbare und auch höhere Erträge erzielt werden, wie mit horizontal verlegten PV Modulen. Jedoch bestehen erhebliche Anforderungen um eine optimierte Lösung für die komplexen geometrischen Oberflächen von Folien- und Membrandachflächen zu finden.
Für eine zuverlässige Ertragsabschätzung wird eine experimentelle Untersuchung über einen längeren Zeitraum empfohlen.
Besonders zu beachten ist der diffuse Anteil der solaren Einstrahlung, welcher beispielweise in Deutschland sehr hoch ist, hierzulande teilt sich die solare Einstrahlung etwa 1 zu 1 auf direkte und diffuse Einstrahlung auf. Es ist zu erwarten, dass bei diffuser Einstrahlung der Einfluss der Krümmung den Ertrag wesentlich geringer beeinflusst.

Quellen für den Teil " Ertragsprognose":

[1] UNDERSTANDING TEMPERATURE EFFECTS ON PV SYSTEM PERFORMANCE Thomas Nordmann, Luzi Clavadetscher

[2] Z. Lakatos, HAW Hamburg, Untersuchung einer Membrandach-Konstruktion mit integrierten flexiblen Photovoltaikzellen, 2011

13.5 Entwicklung eines thermisch getrennten Klemmprofils durch Hightex

Sollen mit Membranmaterialien hochwertige Gebäudehüllen realisiert werden, die unter anderem Wärmeschutzfunktionen erfüllen müssen, muss neben der Membranfläche selbst auch der Membranrand in die Betrachtung eingeschlossen werden. Das gilt besonders für Kissenkonstruktionen, die durch ihre Mehrlagigkeit eine maßgebliche Option für die Realisierung von wärmedämmenden Hüllkonstruktionen bietet. Hier bietet die Membranfläche durch den Einsatz mehrerer Lagen (2, 3, 4 oder sogar mehr) oft hinreichend gute U-Werte (vergl. Abb. E5.10 in Atlas Kunststoffe+Membranen, S. 216). Der Gesamt-U-Wert einer Hülle wird jedoch in Abhängigkeit der konkreten Geometrie zusätzlich maßgeblich durch die Wärmedämmwirkung des Membranrandes und des linea-

ren Klemmprofils geprägt. Konventionelle Klemmprofile haben i.d.R. sehr ungünstige U_f-Werte, die oft deutlich schlechter als 6 W/m²K liegen, manchmal sogar über 8 W/m²K. Dies bedingt entsprechende Transmissions-Wärmeverluste, kann aber auch teils erheblichen lokalen Tauwasserausfall zur Folge haben, oft mit weiteren Folgen wie Schimmelpilzbildung etc.

Aufbauend auf bestehender Projekterfahrung mit diesem Thema und bereits ersten umgesetzten Verbesserungsschritten wurden systematisch weitere Entwicklungsschritte unternommen. Das Thema und wesentliche Untersuchungsschritte wurden im MESG-Zwischenbericht vom 29.7.2011 (1HJ2011) ausführlich beschrieben (S. 53-65), vgl. Abbildung 128 bis Abbildung 131.

Als Ergebnis im Projekt MESG wurde ein Profilprototyp erreicht, der einen deutlichen Fortschritt gegenüber dem bisherigen Stand der Technik darstellt. Abbildung 127 zeigt diesen Stand.

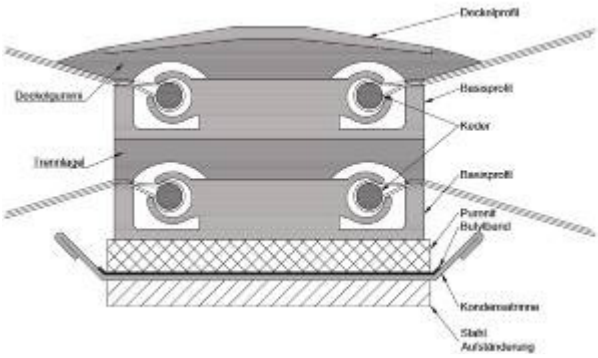


Abbildung 127: Prototyp eines von Hightex entwickelten Klemmprofils mit thermischer Trennung (Prinzipdarstellung ohne Maßstab).

Das Prinzip des neuen Profils beruht auf folgenden Ansätzen:
• Getrennte Lagenklemmung
• Stapelung der Klemmungen, dazwischen thermische Trennung
• möglichst einfache Installation
• Modularer Aufbau für maximalen Anwendungsbereich

Der Prototyp hat einen U_f-Wert von ca. 4,4 W/m²K, was gegenüber üblichen Klemmprofilen eine erhebliche Verbesserung darstellt. Dennoch ist auch bei diesem Stand Tauwasser nicht grundsätzlich auszuschließen, sodass auch weiterhin eine entsprechende Kondensatrinne erforderlich ist. Diese findet sich daher auch in o.g. Abbildung. Das von Hightex entwickelte neue Profil soll patentrechtlich geschützt werden.

Weiteres zukünftiges Optimierungspotenzial ist u.a. für folgende Punkte zu sehen:
• Verbesserung der Dichtigkeit des Kissens, d.h. vor allem eine Verbesserung der Ecklösung für das Profil
• Untersuchung alternativer Dämmstoffe für die Trennlage
• Befestigungsmöglichkeiten von Dämmstoffen in der Kissenfläche, v.a. in Bezug auf mögliche vertikale Anwendungen.

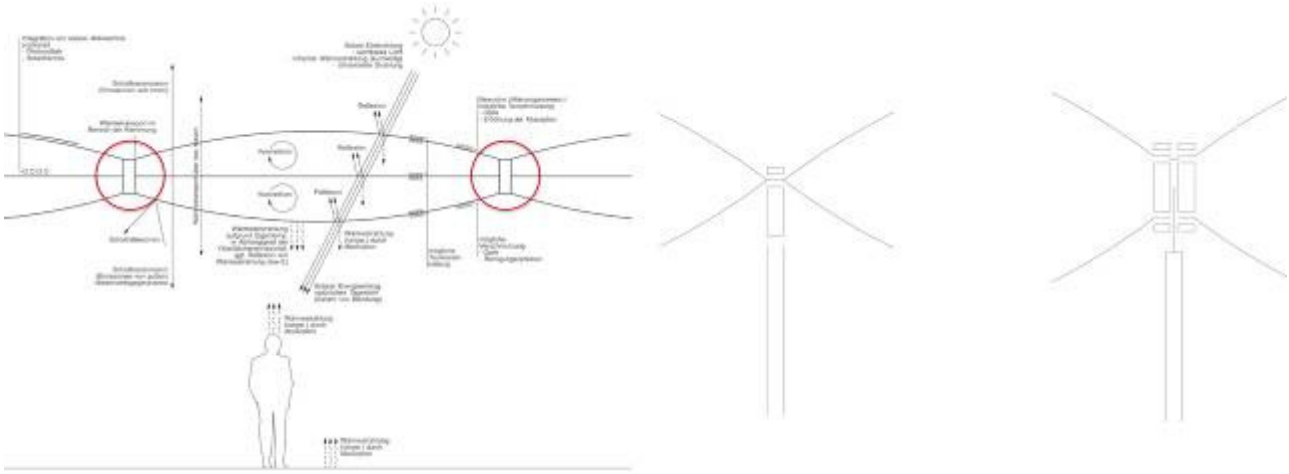


Abbildung 128: Prinzipien der Klemmung von Membrankissen.

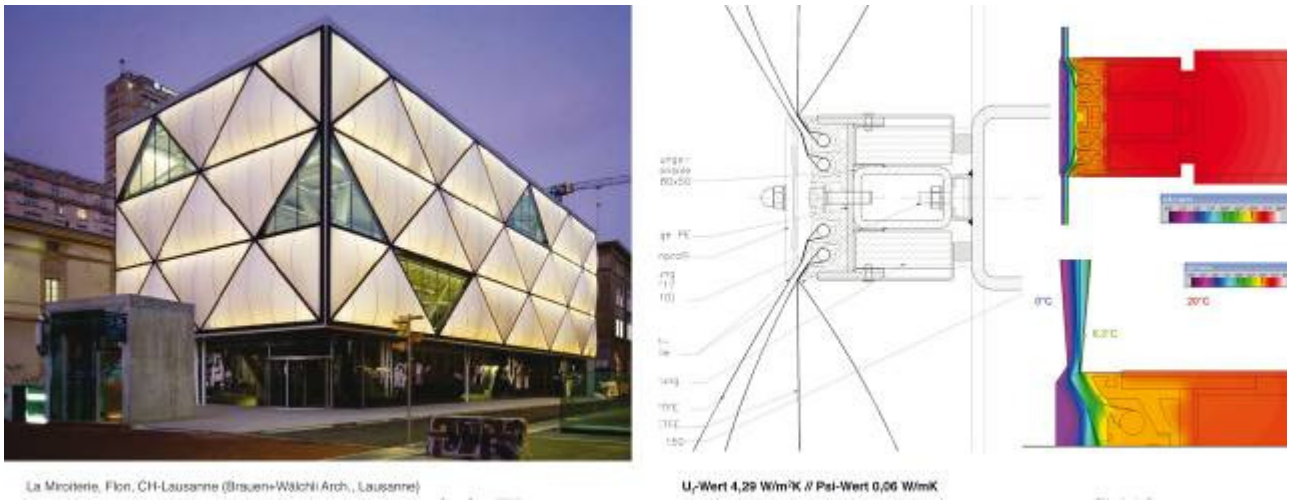


Abbildung 129: Projektbeispiel "La Miroiterie", Lausanne-Flon (CH).

	U-Factor Profil (ca.) [W/m²K]		
Standard K 04	3,49	100%	
Dämmkeil 5 mm, hier aus Hart-PU (Urethane, 0,121 W/mk)	2,96	85%	100%
Dämmkeil 5 mm, hier aus HD-PU-Schaum (0,060 W/mk)	2,77	79%	94%
...+ Seitenteil-Dämmung mit PS (0,038 W/mk)	2,60	74%	88%
...+ Dämmung unter Klemmplatte oben mit PS (0,038 W/mk)	2,25	64%	76%
...+ alle Hohlräume mit PS (0,038 W/mk) und Ausw. der seitl. Dämmung	2,17	62%	73%
Dämmkeil 10 mm, hier aus Hart-PU (Urethane, 0,121 W/mk)	2,75	79%	100%
Dämmkeil 10 mm, hier aus HD-PU-Schaum (0,060 W/mk)	2,57	74%	93%
...+ Seitenteil-Dämmung mit PS (0,038 W/mk)	2,43	70%	88%
...+ Dämmung unter Klemmplatte oben mit PS (0,038 W/mk)	1,79	51%	65%
...+ Dämmung unter Klemmplatte (teilw.) oben mit PS (0,038 W/mk)	1,98	57%	72%
...+ alle Hohlräume mit PS (0,038 W/mk) und Ausw. der seitl. Dämmung	1,74	50%	63%
anderer Profil – UK – Übergang, Modifik. EPDM-Profil...	1,82	52%	
...+ PU-Schaum unter Klemmprofil (0,024 W/mk)	1,81	52%	

Abbildung 130: Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der einzelnen Entwicklungsschritte und relative Verbesserungen (gesamt und pro Entwicklungsschritt).

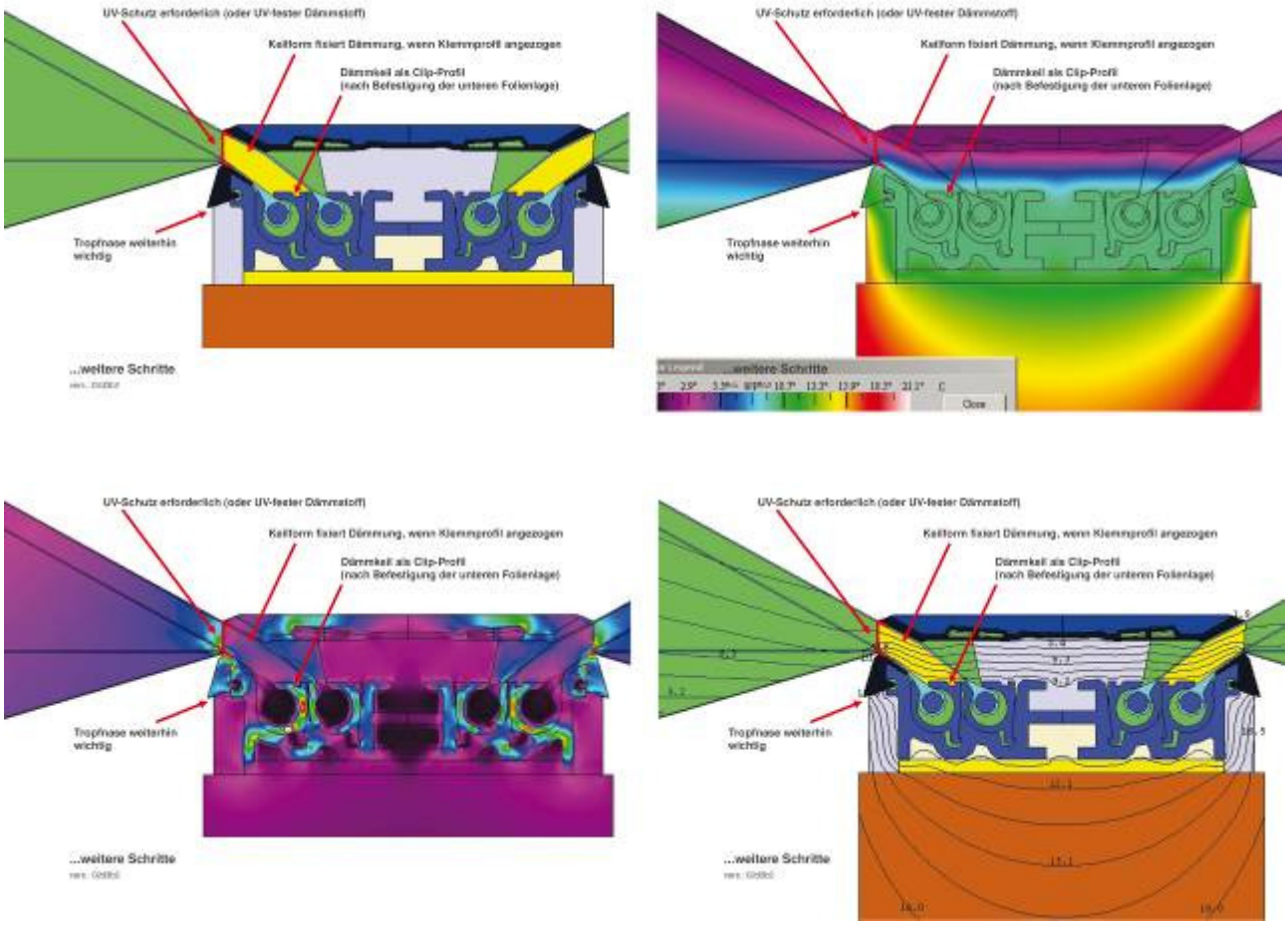


Abbildung 131: Weitere mögliche Entwicklungsschritte und -aspekte, Heat-Flux-Darstellung / Isothermenverlauf.

14 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden u.a. auf zwei Symposien präsentiert.
Das erste Symposium fand am 28.10.2010 in Rimsting am Chiemsee bei der Firma Hightex statt.
Das zweite Symposium fand am 16.02.2012 in München am Oskar von Miller Forum statt.
Mit dem Symposium konnte ein projektübergreifender Austausch zwischen Entwicklern, Planern und Anwendern ermöglicht bzw. vertieft werden. Insgesamt wurde das Symposium von über 120 Teilnehmern aus den Bereichen Architektur, Industrie und Forschung besucht. Die unter Beteiligung der Referenten und Zuhörer durchgeführte Diskussionsrunde des Symposiums offenbarte ein reges Interesse an Themenstellungen im Bereich der textilen Architektur.
In der Veranstaltung informierte Herr Markus Kratz vom Projektträger Jülich über Forschungsschwerpunkte des BMWi im Bereich „Forschung für Energieoptimiertes Bauen“. Dr. Jochen Manara vom ZAE Bayern stellte generelle Aspekte des energieeffizienten Bauens mit textilen Konstruktionen und Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt MESG vor. Aus Sicht der Architektur haben die Professoren Jan Cremers (Fa. Hightex, HfT Stuttgart) und Werner Lang (Lang Hugger Rampp, TU München) einen Überblick zum Einsatz von Membranen in der textilen Architektur und deren anwendungsbezogene Aspekte gegeben. Aspekte der Bauphysik und Betriebskonzepte wurden von den Professoren Andreas Beck (Hft Stuttgart) und Werner Jensch (Hochschule München) erörtert. Weitere namhafte Vertreter aus Industrie, Forschung und Planung haben unterschiedliche Themenstellungen und Lösungsansätze sowie realisierte Objekte im Bereich der textilen Architektur vorgestellt.

Abbildung 132: Vortragssaal des Oskar von Miller Forums während des zweiten MESG-Symposiums.

Abbildung 133: Gespräche unter den Teilnehmern zwischen den Vorträgen.

Abbildung 134: Prof. Dr.-Ing. Werner Lang (links) referierte über anwendungsbezogene Aspekte des innovativen Bauens mit Membranen, während Prof. Dr. Jan Cremers (rechts) eine Übersicht über den Einsatz von Membranen im Rahmen der textilen Architektur gab.

Weitere Präsentationen und Veröffentlichungen:

J. Manara, *Membrankonstruktionen für die energetische Sanierung*. 15. EnOB Workshop Bauphysikalische Bewertung von Konstruktionen in der Bauerneuerung – Simulation und Praxis, Nürnberg, 02.-03.04.2009

J. Manara, *Membrankonstruktionen zur Erhöhung der Energieeffizienz in Gebäuden*. Statusseminar: Forschung für Energieoptimiertes Bauen, Würzburg, 30.06.-02.07.2009

J. Manara, M. Reidinger, M. Rydzek, M. Arduini-Schuster, *Polymer-Based Pigmented Coatings on Flexible Substrates with Spectrally Selective Characteristics to Improve the Thermal Properties*. Prog. Org. Coat. **70** (2011) 199-204

W. Lang, T. Rampp, K. Puchta, J. Cremers, A. Beck, M. Binder, V. Fux, J. Manara, M. Arduini-Schuster, H.-P. Ebert, *Neue Hüllen für alte Gebäude*. Deutsches Ingenieur Blatt, **11** (2011) 18-25

Cremers, J.: 'High Performance Lightweight Building Envelopes Made of Foils and Textiles‘, Proceedings, international architecture workshop „Lightweight Landscape“ (Lightweight landscape for a sustainable built environment / Minimal mass buildings for an energy-saving environment) at Politecnico di Milano in Italy, 2012

Cremers, J.: ‚Energy Saving Design of Membrane Building Envelopes‘, Eccomas MEMBRANES 2011, Barcelona, 2011, Proceedings

Cremers, J.: ‚membranes vs. glass - recent innovations from the world of foils and textiles‘, engineered transparency | international conference at glasstec, Düsseldorf, 2010, Proceedings, S. 535-544

Cremers, J.: ‚Performance-Steigerungen von Bestandsgebäuden durch innovative Membrankonstruktionen‘, Zwischenbericht aus dem Projekt „Membrankonstruktionen zur energetischen Sanierung von Gebäuden (MESG)“, 4. Internationales Anwenderforum ‚Energetische Sanierung von Gebäuden‘ (OTTI), Neumarkt i.d.OPf., 2010, Proceedings/Tagungsband, S. 140-147

Cremers, J.: ‚Architektur / Energie / Bestand‘, Europäisches Symposium ‚90 Jahre Bauhaus – Neue Herausforderungen durch die europäische Energiepolitik‘ (Passivhäuser, Solares und ökologisches Bauen und Sanieren), veranstaltet vom Europäischen Informations-Zentrum in der Thüringer Staatskanzlei und dem Thüringer Ministerium für Bau, 2009 in Bad Langensalza

Cremers, J.: ‚Transluzente Hochleistungsdämmung für Membrane“, Proceedings, 14. Symposium Licht + Architektur (OTTI), 2009, Kloster Banz, Bad Staffelstein

Cremers, J.: ‚Flexible Photovoltaics Integrated in Translucent PTFE/Glass and Transparent ETFE Membrane Structures‘, Proceedings, 5th User Forum Thin-Film Photovoltaics (OTTI), 2009, Würzburg

15 Fazit

Das Projekt konnte erfolgreich durchgeführt werden und die im Antrag genannten Ziele wurden erreicht.
Außerdem lässt sich sagen, dass das Thema „Textiles Bauen“ eine zunehmende Bedeutung gewinnt und mit hoher Intensität vor allem im Bereich der Großbauten vorangetrieben wird. Aber auch im Bereich der energetischen Sanierung besteht ein deutlich zunehmendes Interesse am Einsatz von Membrankonstruktionen. Als zukünftige Forschungsfelder wurden dabei weitere u.a. funktionale Optimierungen (wie z.B. low-e Beschichtungen, Integration von Photovoltaik, Verbesserung der Wärmedämmung), Erschließung neuer Einsatzgebiete (Überdachung von Innenhöfen, Gebäudearealen als Zwischennutzungszonen zur Verminderung der Wärmeverluste aus den angrenzenden Gebäuden, etc.), Verbesserung der Regelungstechnik zur Gewährleistung optimaler Luftwechselraten, sowie effiziente Sonnenschutz-Systeme zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung, identifiziert.

16 Danksagung

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung im Rahmen des Projektes „Membrankonstruktionen zur energetischen Sanierung von Gebäuden“ (Förderkennzeichen: 0327240G bis O) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages sowie dem Projektträger Jülich (PTJ) für die administrative Unterstützung.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

EnOB
Forschung für
Energieoptimiertes Bauen