



dyAna-membran

Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik
Software Version 1.0

Membran-Konstruktionen

Beispiel 1: Stadiondach

Beispiel 2: Kuppeldach

ADIC Consult

Sümburgstr. 22
58730 Fröndenberg
Germany

Tel: +49 (0) 2373 39641-10

Fax: +49 (0) 2373 39641-79

www.adic.eu

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

Inhaltsverzeichnis

- (1) Eigenschaften von Membran-Konstruktionen
- (2) Wärmebilanz
- (3) Feuchte-Verhalten
- (4) Luftzufuhr + Trockneranlage
- (5) Luftströmung, Druckverteilung & Rohrleitungsberechnung
- (6) Wärmebrücken in der Gesamtkonstruktion
- (7) Gesamt-Energiedurchlassgrad (g-Wert)
- (8) Lichtdurchlässigkeit + photosynthetisch wirksame Strahlung
- (9) UV-Durchlässigkeit
- (10) Referenzprojekte – Auswahl
- (11) Nomenklatur

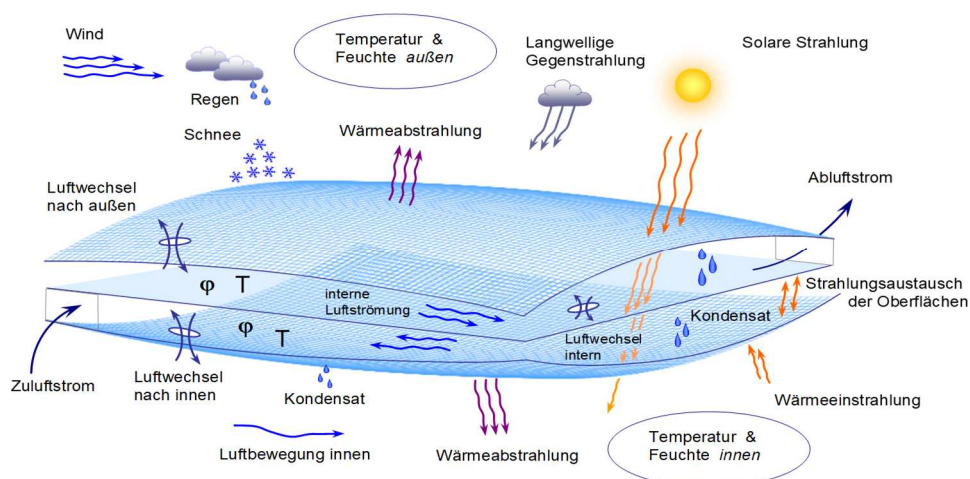
01. Eigenschaften von Membran-Konstruktionen

Eine hygrothermische Simulation von Membran-Konstruktionen dient der bauphysikalischen Beurteilung und der energetischen Bewertung solcher Leichtbauteile. Dabei werden wärme-, feuchte- und strahlungs-technische Eigenschaften der Konstruktion ermittelt und analysiert, wodurch die Gesamtkonstruktion bauphysikalisch (und damit auch kostenmäßig) optimiert geplant werden kann.

Es sind dabei im Wesentlichen folgende Anforderungen an die Konstruktionen gestellt:

- **Gewährleistung der baulichen wärme- und strahlungstechnischen Anforderungen** (Einhaltung der geforderten Dämmeigenschaften der Konstruktion in Verbindung mit dem gewünschten Grad an solarer Strahlungsdurchlässigkeit).
- Optimierung der Möglichkeiten zur **Vermeidung von Tauwasser** sowohl im Innern als auch auf der Innenoberfläche der Konstruktion.
- Abschätzung der **Gefahr möglicher Schimmelpilzbildung** (Schäden am Bauteil / Beeinträchtigung der optischen Gebrauchstauglichkeit)
- Dimensionierung der **Anlagentechnik** (Trockner, Stützluftversorgung)

Einen Überblick über die wesentlichen klimatischen Einflüsse und deren Wechselwirkungen untereinander sind schematisch in der nachstehenden Grafik dargestellt:



Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

Die wärme- und feuchte-technischen Eigenschaften solcher Konstruktionen sind neben den speziellen Materialeigenschaften stark abhängig von dem Klima, das sie am Standort umgibt (Außen- und Innenraumklima). Hinzu kommt der Einfluss der vorkonditionierten Zuluft (Temperatur / Feuchte), wenn diese in die Kissenkonstruktion eingeblassen wird. Das Eigenklima der Zuluft kann bei entsprechendem Luftwechsel das Mikroklima innerhalb der Kissenkonstruktion maßgeblich beeinflussen.

Oft bestehen die Membran-Konstruktionen aus mehreren Kissenkammern. Diese sind im Normalfall lüftungstechnisch miteinander gekoppelt, wodurch interne Luftströmungen und Luftdurchmischungen das Klima der einzelnen Kammern untereinander beeinflussen.

In der Regel steigt mit der Anzahl der Kissenkammern auch die Wärmedämmeigenschaft der Konstruktion.

Die Simulationen erfolgen mit Hilfe einer instationären (dynamischen) Berechnung der Konstruktion, bei der die veränderlichen Randbedingungen des Umgebungsklimas berücksichtigt werden. Damit kann das sich einstellende Mikroklima in den Kissenkammern wärme- und feuchte-technisch simuliert werden.

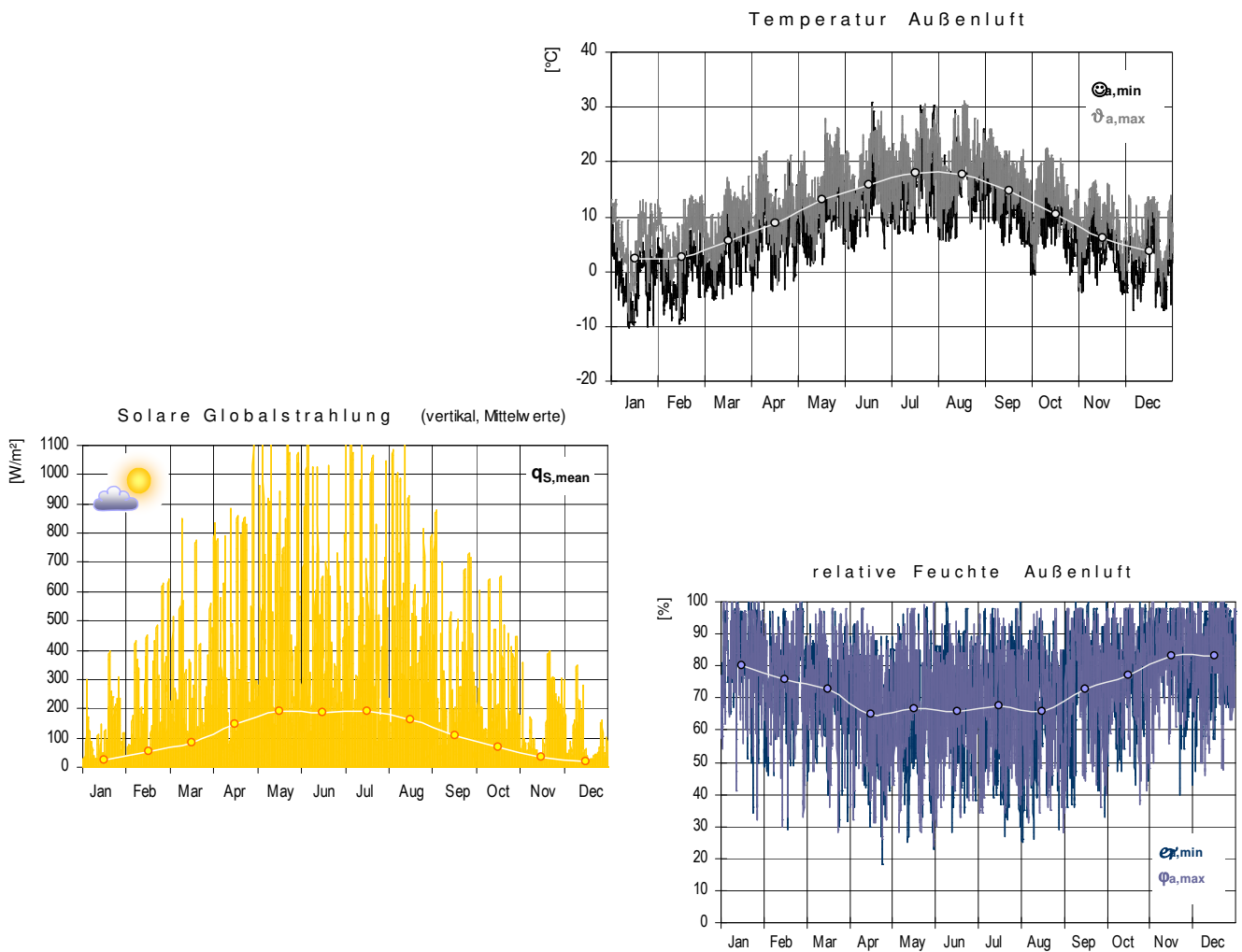


Abb.: Beispiele zur Außenlufttemperatur, solaren Einstrahlung und der relativen Luftfeuchtigkeit über ein Referenzjahr.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

02. Wärmebilanz

Für die Berechnung der erforderlichen Jahres-Heizenergie eines Gebäudes mit Membran-Dachkonstruktion ist es notwendig, Angaben über die Wärmeströme (Wärmeverlust und -gewinn) durch die Membran-Konstruktion zu haben.

Im Standardfall werden für eine stationäre Berechnung nach der EnEV / DIN 18599 hierzu die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile (U-Werte) und deren Gesamt-Energiedurchlassgrad (g-Werte) benötigt. Bei herkömmlichen Außenbauteilen (opake Dächer, Außenwände etc.) sind diese Werte (bis auf den Einfluss der Wärmeübergangskoeffizienten) rein materialabhängige Größen und können unabhängig von den klimatischen Randbedingungen am Standort des Gebäudes angegeben werden.

Bei Membran-Konstruktionen ist dies nicht der Fall. Dies liegt besonders daran, dass sich im Innern der Konstruktionen (in den eingeschlossenen Luftkammern) ein eigenes Klima einstellt und die Luft in den Kissenkammern nicht wie eine feste homogene Materialschicht mit festen Eigenschaften betrachtet werden kann. Vielmehr stellt jede Kissenkammer der Membran-Konstruktion einen zusätzlichen eigenen "Luftraum" innerhalb der Gebäudehülle dar, dessen veränderliches Klima mit Hilfe der Simulation ermittelt werden muss.

Einen großen Einfluss haben hier besonders die strahlungstechnischen Eigenschaften der Folien, die je nach Bedruckung sehr unterschiedlich ausfallen können. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist hier also keine konstante Größe, sondern in Abhängigkeit der Randbedingungen zeitlich veränderlich.

Weiter sind für die Emmissionsgrade, Luftschichtdicken und Belüftung die Voraussetzungen in der Regel nicht gegeben, dass der Wärmedurchgangskoeffizient durch ein Membrankissen trotzdem wie für ein festes Bauteil vereinfacht nach EN ISO 6946 (Abschn. 5.3.) berechnet werden kann.

Um aber trotzdem Berechnungen unter stationären Annahmen gemäß EnEV / DIN 18599 durchführen zu können, werden aus den Wärmeströmen an der Innenoberfläche des Membrankissens effektive U-Werte berechnet, die dann z.B. für eine Energiebedarfsberechnung nach dem "Monatsbilanzverfahren" eingesetzt werden können.

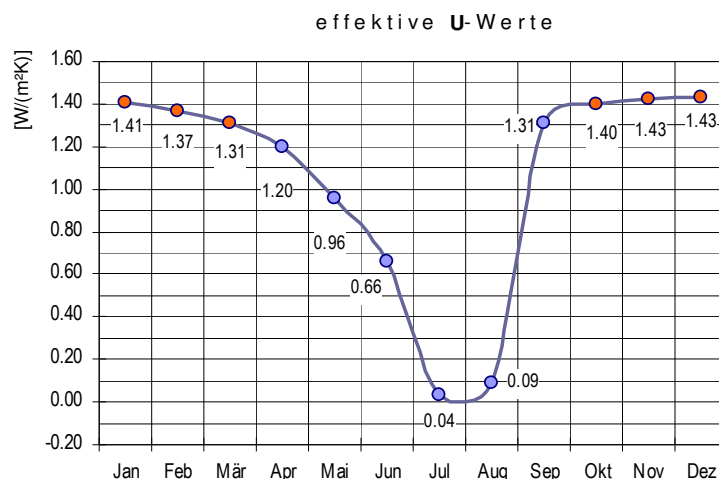


Abb.: Beispiel für effektive U-Werte eines Doppelkissens im monatlichen Durchschnitt

Ziel der Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten ist es,

- die Berechnung der Wärmeströme für eine **Energiebedarfsberechnung** gem. EnEV / DIN 18599 zu ermöglichen und
- den **Wärmeschutznachweis** der Konstruktion gemäß den gestellten Anforderungen führen zu können.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

03. Feuchte-Verhalten

Die Analyse des Feuchteverhaltens von Membran-Konstruktionen bezieht sich im Wesentlichen auf die Untersuchung der relativen Luftfeuchtigkeit in den Kissenkammern und auf der raumseitigen Innenoberfläche der Konstruktionen.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist direkt abhängig von der Verteilung der Temperatur in der Konstruktion und von den Feuchte-Verhältnissen der inneren und äußeren Umgebung.

Im Innern der Kissenkammern wirken sich zudem die Feuchte und Temperatur der zugeführten konditionierten Luft auf die Feuchte-Entwicklung der Kissenluft aus; dieser Einfluss kann u.U. maßgebend sein.

Sowohl im Innern der Kissen, als auch auf den Oberflächen kann bei Erreichen der Sättigungsfeuchte Tauwasser entstehen. Bei ungünstigen klimatischen Verhältnissen und nicht optimaler Konditionierung und Zuführung der Zuluft, können zeitweise mehrere ml an Tauwasser pro m² und Stunde in und auf der Konstruktion entstehen.

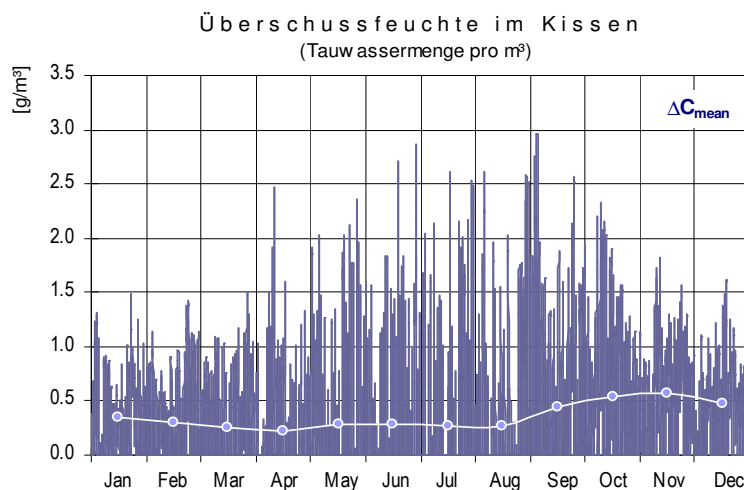


Abb.: Auftreten von Tauwasser (überschüssige Feuchte) über ein Jahr.

Im Allgemeinen muss das Auftreten von Tauwasser an der Innenoberfläche der Membran-Konstruktion vermieden werden, da sonst in den meisten Fällen die Nutzung des darunter liegenden Innenraumes nicht mehr gewährleistet oder stark eingeschränkt ist.

Im Innern der Kissenkammern ist die anfallende Tauwassermenge ebenfalls zu vermeiden oder zumindest auf ein Minimum zu reduzieren.

In Bereichen von Wärmebrücken der Konstruktion ist die Gefahr des Tauwasseranfalls zusätzlich gesondert zu betrachten.

Ziel der Ermittlung der Feuchteverteilung und Tauwassermenge ist es,

- die Gefahr des **Tauwasseranfalls** zu bestimmen und die möglichen **Tauwassermengen** zu ermitteln,
- die Steuerung der erforderlichen **Luftwechselrate** der Zuluft für die Feuchteverteilung optimal und ausreichend festzulegen und
- die Anzahl notwendiger **Ablässventile** festzulegen sowie gegebenenfalls erforderliche Ablaufrinnen und Schläuche zu dimensionieren.

Diese Angaben sind für die Planung der **Konditionierung der Zuluft** (Einblas-Temperatur und Einblas-Feuchte) Voraussetzung. Damit sind die Anforderungen an die **konditionierte Zuluft** definiert, und die angeschlossenen **Klimageräte (Trockner)** können optimal dimensioniert werden.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

04. Luftzufuhr + Trockneranlage

Die Luftzufuhr zur Stützung und Belüftung der pneumatischen Kissen wird über entsprechende Klimageräte zur Verfügung gestellt, in denen die Zuluft in der Regel vorgewärmt und auf ein erforderliches Maß getrocknet wird.

Durch das Einblasen solch vorkonditionierter Luft kann das Mikroklima in den Kissenkammern je nach Luftwechselrate der Kammer erheblich beeinflusst werden, hiermit besonders die Luftfeuchtigkeit und damit die Gefahr des Tauwasseranfalls.

Des Weiteren besteht durch das Einblasen von warmer Luft in die unteren Kissenkammern die Möglichkeit, den Transmissionswärmeverlust über die Membran-Konstruktion zu senken.

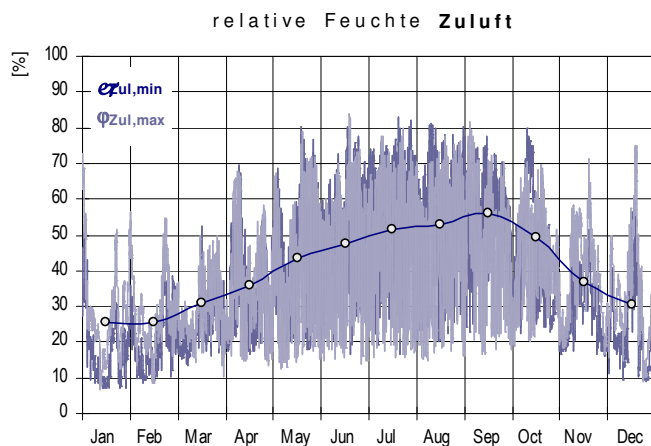


Abb.: Verteilung der relativen Feuchte der Zuluft, die am Kissen eingeblasen wird.

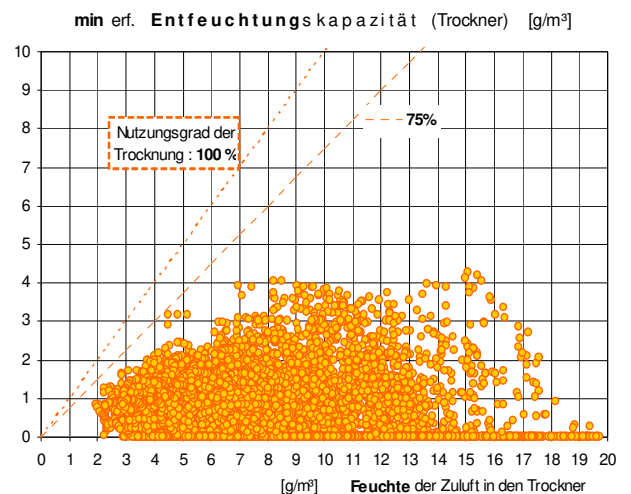


Abb.: Erforderliche Entfeuchtungskapazität einer Trockneranlage.

Unter der Voraussetzung, dass in den Kissen die Sättigungsfeuchte der Luft nicht erreicht wird, ergibt sich die erforderliche Entfeuchtungskapazität des Trockners. Sie ist abhängig von der Luftwechselrate der Kissenkammer und der Feuchte und Temperatur der Luft, die dem Trockner von außen zugeführt wird.

Ziel der optimalen Konditionierung der Zuluft ist es,

- die Gefahr des **Tauwasseranfalls** durch die Anlagentechnik theoretisch auszuschließen oder auf ein Minimum zu reduzieren,
- die Steuerung der erforderlichen **Luftwechselrate** für die Zuluft optimal und ausreichend festzulegen,
- die **Klimageräte** entsprechend den Anforderungen optimal auslegen zu können und
- den **Betriebsenergie-Aufwand** und Energieverlust der Konstruktion zu minimieren.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

05. Luftströmung, Druckverteilung & Rohrleitungsberechnung

Das Strömungsverhalten der zugeführten Luft kann im Innern der Kissen einen erheblichen Einfluss auf die Temperaturverteilung und die Gefahr des Tauwasseranfalls haben.

Um eine ausreichende Durchströmung und Umwälzung der Luftmassen in den Membrankissen zu gewährleisten, sind die Mittelfolien meist mit Lüftungsöffnungen versehen. So kann die durch eine der äußeren Kissenkammern zugeführte Luft gleichmäßig durch die gesamte Kissenkonstruktion bis zu den vorgesehenen Auslassventilen strömen.

Bei der Anordnung und Dimensionierung der Öffnungen und Ventile ist darauf zu achten, dass die Luftströmung möglichst gleichmäßig erfolgt und die erforderliche Luftmenge bei einer bestimmten Luftwechselrate ausgetauscht werden kann.

Außerdem ist eine richtige Anzahl und Einstellung der Ventile erforderlich, um eine homogene Druckverteilung innerhalb aller Kissen in der gesamten Stützdruckanlage zu gewährleisten. Andernfalls kann es zu starken Druckschwankungen innerhalb der Anlage, aber auch innerhalb der Kissenkammern kommen.

Über eine **Berechnung der Rohrleitungsanlage** wird unter Berücksichtigung der *Rohrreibung* und der *Strömungswiderstände* im gesamten Rohrnetz die erforderliche Pumpleistung zur Stützdruckversorgung bestimmt. Eine Rohrleitungsberechnung dient außerdem zur Dimensionierung der Rohrquerschnitte für alle Haupt- und Sticleitungen sowie zur Einhaltung einer gleichmäßigen Druckverteilung in der gesamten Anlage.

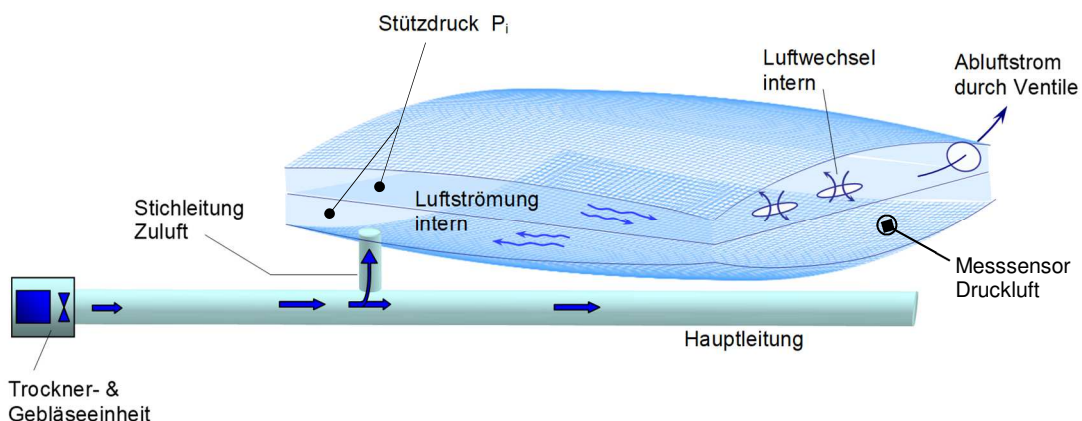


Abb.: Schematische Darstellung der möglichen Luftströmungen in Anlage und Kissen

Ziel der Auslegung und Berechnung der Luftströmung ist es,

- eine **gleichmäßige Verteilung des Stützdruckes** innerhalb der Kissenkammern sicherzustellen,
- die **Führung des Luftstromes** durch die Kissenkonstruktion zu definieren,
- die **Größe, Anzahl und Anordnung der Zuluft - und Abluftöffnungen** zu definieren (**Ventile** und Luftöffnungen),
- die **Lochung der Mittelfolien** festzulegen und
- die **Gebläseeinheit** und die **Rohrleitungen** zur Verteilung und Aufrechterhaltung des Stützdruckes zu dimensionieren.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

06. Wärmebrücken in der Gesamtkonstruktion

An den Randbereichen der Membran-Konstruktionen und in den Bereichen der Tragkonstruktion bilden sich in der Regel geometrische und materialbedingte Wärmebrücken aus.

In diesen Bereichen treten aufgrund niedrigerer Oberflächentemperaturen vermehrt Wärmeverluste auf. Zudem steigt hier die Gefahr des Tauwasseranfalls an den Oberflächen und innerhalb der Klemmleisten stark an. Die erhöhten Wärmeverluste im Bereich der Wärmebrücken erhöhen damit auch den Wärmeverlust der gesamten Membran-Konstruktion.

Um diese zusätzlichen Wärmeverluste zu minimieren oder auszuschalten, sollten die betroffenen Bauteile entsprechend angeordnet oder zusätzlich gemäß den Anforderungen gedämmt sein. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn der Anfall erhöhter Tauwassermengen vermieden werden soll.

Im Bereich der Klemmprofile kann es zudem zum Tauwasseranfall innerhalb der Profile kommen. Hier muss neben einer ausreichenden Dämmschicht zusätzlich darauf geachtet werden, dass im Innern der Profile entstehendes Tauwasser schadensfrei abgeführt werden kann.

Zur Bestimmung der erforderlichen Dämmung und der anfallenden Tauwassermengen werden die Bereiche der Wärmebrücken meist zweidimensional (bei Bedarf auch 3D) hygro-thermisch simuliert.

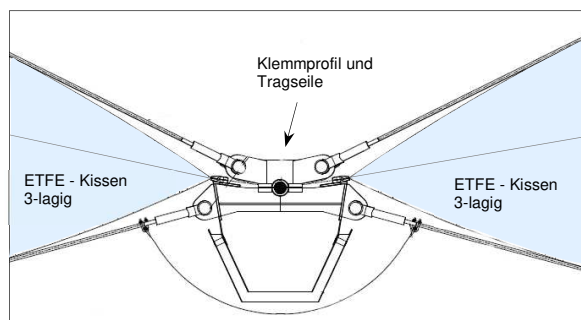


Abb.: Wärmebrücke an einer Stoßstelle der Kissen

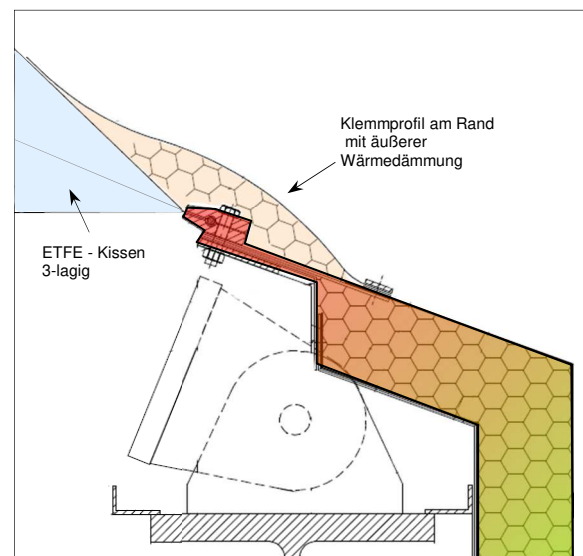


Abb.: Gedämmte Wärmebrücke am Klemmprofil

Ziel einer hygro-thermischen Wärmebrücken-Simulation ist es,

- die **zusätzlichen Wärmeverluste** der Konstruktion ("Ψ-Werte") zu bestimmen, um
- die **Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizienten** (U_{ges}) der Membrankonstruktion bestimmen zu können,
- die **erforderliche Dämmung** der Wärmebrücken festlegen zu können, um
- den **Wärmeschutznachweis** der Konstruktion gemäß den gestellten Anforderungen führen zu können und
- die Gefahr des **Tauwasseranfalls im Bereich der Wärmebrücken** zu bestimmen und die **Tauwassermengen** zu ermitteln.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

07. Gesamt-Energiedurchlassgrad (g-Wert)

Membrankissen-Konstruktionen werden meist aus transparenten Folien hergestellt - häufig aus ETFE-Folien (Ethylen-Tetrafluorethylen).

Je nach Dicke, Farbe und Bedruckung lassen die Folien nur einen gewissen Prozentsatz der globalen Strahlung hindurch. Die restliche Strahlung wird zu einem Teil von der Folie reflektiert und zu einem anderen Teil von ihr absorbiert.

Der prozentuale Anteil der Strahlung, der durch die *gesamte* Kissenkonstruktion hindurchgeht wird als Gesamt-Strahlungstransmissionsgrad bezeichnet. Dieser beinhaltet alle Einflüsse aus Reflexionen und Absorptionen der Strahlung im Innern der Kissenkammern.

Neben dieser direkt durch die Konstruktion hindurch gelassenen Strahlung wird dem Innenraum unter bestimmten Umständen zusätzlich dadurch Energie zugeführt, dass sich die Innenoberfläche der Konstruktion infolge der auftreffenden Strahlung erwärmt und somit sekundär Wärme an den Raum abgegeben werden kann. Dieser Energieanteil wird durch den sogenannten sekundären Wärmeabgabegrad beschrieben.

Als Gesamt-Energiedurchlassgrad (g-Wert) eines transparenten Bauteils bezeichnet man (in Anlehnung an DIN EN 410) die Summe aus Gesamt-Strahlungstransmissionsgrad und dem sekundären Wärmeabgabegrad.

Der g-Wert gibt Auskunft darüber, wie groß der gesamte Wärmeanteil infolge Strahlung ist, der durch die Membran-Konstruktion hindurch dem Innenraum zur Verfügung gestellt wird. Er ist damit ein Maß für die Größe der Strahlungsgewinne über die Membran-Konstruktion.

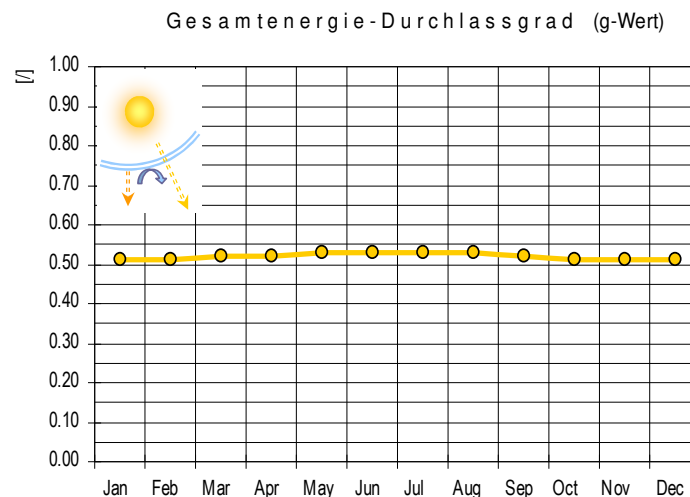


Abb.: Verteilung des Gesamt-Energiedurchlassgrades

Ziel der Bestimmung des Gesamtenergie-durchlassgrades ist es,

- die **Menge an Strahlungsenergie** bestimmen zu können, die die Konstruktion in den Innenraum hindurch lässt, um
- eine **Energiebedarfsberechnung** zu ermöglichen (Strahlungsgewinne) und
- die Membrankonstruktion strahlungstechnisch so auszulegen, dass es im **Sommer** nicht zu einer **Überhitzung** der Innenräume kommt.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

08. Lichtdurchlässigkeit + photosynthetisch wirksame Strahlung

Für verschiedene Raumnutzungen kann es notwendig sein, Kenntnis über die Lichtdurchlässigkeit der transparenten Bauteile zu haben. Damit können Aussagen über die Helligkeit und Beleuchtungsstärke infolge des einfallenden Tageslichtes in den Raum getroffen werden.

Generell ist dies von Bedeutung für die lichttechnische Ausstattung der Räume, besonders aber bei der Haltung und Kultivierung von Pflanzen. Dabei ist es erforderlich, je nach Pflanzenart die spezifische lebenserhaltende Beleuchtung (Durchlass des *photosynthetisch wirksamen Strahlungsanteiles* der Solarstrahlung) sicherzustellen.

Hierzu ist es notwendig, den Gesamt-Lichttransmissionsgrad der Membran-Konstruktion zu bestimmen. Im Wesentlichen ist er abhängig von der Transparenz des Folienmaterials sowie von dessen Eigenschaften bzgl. der Lichtreflexion.

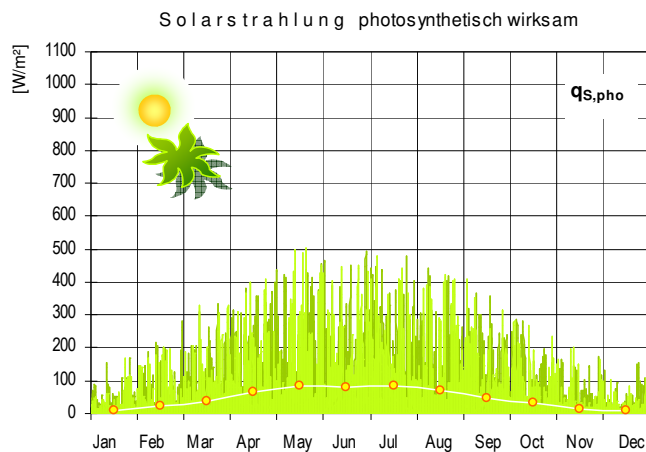


Abb.: Photosynthetisch wirksame Strahlung im Referenzjahr



Ziel der Bestimmung des Gesamt-Lichttransmissionsgrades ist es,

- die **Beleuchtungsstärke** [lx] zu bestimmen, die die Konstruktion in den Innenraum hindurch lässt, um
- eine evtl. **erforderliche Beleuchtung** für den Innenraum in Abhängigkeit der Nutzungsanforderungen bestimmen zu können und
- den durchgelassenen, **photosynthetisch wirksamen Strahlungsanteil** zur Pflanzenkultivierung zu bestimmen.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

09. UV-Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit einer Membran-Konstruktion gegenüber der auftreffenden UV-Strahlung (Transmissionsgrad) verhält sich in der Regel wie der Licht-Transmissionsgrad.

Der gesamte UV-Strahlungsanteil der globalen Strahlung kann bei Bedarf in die Anteile UVA- und UVB-Strahlung geteilt werden, wenn spezielle Aussagen hierzu notwendig sind. Dies kann beispielsweise bei Problemen der Material-Alterung oder dem Ausbleichen von Farben infolge UV-Strahlung der Fall sein.

Sowohl für den gesamten UV-Strahlungsbereich als auch für dessen Teilbereiche UVA/UVB können die Transmissionsgrade der Membrankonstruktion bestimmt werden.



Ziel der Bestimmung des UV-Transmissionsgrades ist es,

- die **Strahlungsstärken** zu bestimmen, die die Konstruktion in den Innenraum hindurch lässt, um
- eventuell erforderliche **Zusatzbeleuchtung** für den Innenraum in Abhängigkeit der Nutzungsanforderungen (z.B. bei Pflanzen) bestimmen zu können und
- eventuell erforderliche **Schutzmaßnahmen** gegenüber der einfallenden UV-Strahlung entsprechend den Anforderungen treffen zu können.

10. Referenzobjekte – Auswahl

1994	Kurklinik Masserberg	- Schwimmbad
1994	Musical-Theater Buddy Holly, Hamburg	- Theater
1996	Musical-Dom Köln (Gaudi)	- Theater
2001	Allwetter-Parkbad Velbert	- Schwimmbad
2004	Tropical Islands, Berlin, Briesen-Brand	- Tropenbad
2004	Atriumdach Wohnbebauung "Mauersegler", Zürich	- Wintergarten
2005	Regionalbad Bingen-Ingelheim	- Schwimmbad
2005	Piscinas Municipais de Torres Novas, Portugal	- Schwimmbad
2005	Bühnenüberdachung "Wolke" / Weltjugendtag Köln	- Bühnenüberdachung
2006	Meilenwerk Düsseldorf	- Ausstellungsraum
2006	Allwetterbad Emden	- Schwimmbad
2006	Südparkbad Neuss	- Schwimmbad
2006	Allwetterbad Senden	- Schwimmbad
2007	Hitachi Power Office	- Atriumdach
2007	Rheinhallen / Rheinpark-Metropole Köln	- Eingangs - Atrium
2007	Solebad Bad Windsheim	- Schwimmbad
2009	Gymnasium Lahr	- Schulgebäude
2009	KITA Wissmar	- Kindertagesstätte
2010-2011	Hirshhorn-Museum Washington/DC, USA	- Museums-Atrium
2011	Condor Campus Frankfurt/Main	- Verwaltungsgebäude

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

11. Nomenklatur

Abluft		exhaust air (waste air)
Abluftstrom		exhaust air flow
Abluftstrom durch Ventile		exhaust air flow through valves
Anlagentechnik		building services equipment
Beleuchtungsstärke	[lx]	illuminance
Betriebsenergie-Aufwand an	[kWh]	operating energy consumption of
effektiver U-Wert	[W/(m ² K)]	effective U-value
Eigenklima		inherent climate
Emmissionsgrad	[/]	emittance
Entfeuchtungskapazität (Trockner)	[g/m ³]	dehumidification capacity (dehumidifier)
ETFE-Kissen 3-lagig		ETFE-cushions three-layers
Gebläseeinheit		blower unit
Gebrauchstauglichkeit		serviceability
Gegenstrahlung, lang-wellige	[W/m ²]	long-wave counter radiation
Gesamt-Energiedurchlassgrad (g-Wert)	[/]	total energy transfer ratio
Gesamt-Lichttransmissionsgrad	[/]	total luminous transmittance
Gesamt-Strahlungstransmissionsgrad	[/]	total radiation transmittance
Hauptleitung		header
Interne Luftströmung		interior air flow
Jahres-Heizenergie eines Gebäudes	[kWh]	annual heating energy of a building
Klemmprofil am Rand mit äußerer Wärmedämmung		interlocking panel at the edge with exterior heat insulation
Klemmprofil und Tragseile		interlocking panel and supporting cables
Kondensat		condensate
Langwellige Gegenstrahlung		long-wave counter radiation
Leistungsgrad der Trocknung	[%]	performance of dehumidification
Luftbewegung innen		interior air movement
Luftfeuchtigkeit, relative	[%]	relative humidity
Luftwechsel intern		interior air change
Luftwechsel nach außen		air change outward
Luftwechsel nach innen		air change inwards
Luftwechselrate	[1/h]	air change rate
Mess-Sensor Druckluft		measuring sensor
photosynthetisch wirksame Strahlung	[W/m ²]	photosynthetically active radiation
Regen		rain
Sättigungsfeuchte	[g/m ³]	saturation humidity
Schimmelpilz-Bildung		fungus formation
Schnee		snow
sekundärer Wärmeabgabegrad	[/]	secondary heat emission ratio
Solare Globalstrahlung	[W/m ²]	solar global radiation
Solare Strahlung		solar radiation
Stichleitung		branch line
Strahlungsaustausch der Oberflächen		radiation interchange of surfaces
Strahlungsdurchlässigkeit	[/]	transmittance
Strömungswiderstand	[/]	flow resistance
Stützluftdruck	[Pa]	support air pressure
Tauwassermenge	[g/m ³]	amount of condensate
Temperatur & Feuchte außen		temperature & humidity outdoor
Temperatur & Feuchte innen		temperature & humidity indoor
Temperatur Außenluft	[°C]	outdoor air temperature
Transmissionswärmeverlust	[W/m ²]	transmission heat loss
Trockner		dehumidifier / dehumidification plant
Überschussfeuchte	[g/m ³]	excess humidity
UV-Durchlässigkeit		UV-transmissivity
vorkonditionierte Zuluft		preconditioned supply air (fresh air)
Wärmeabstrahlung	[W/m ²]	heat emission
Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	[W/(m ² K)]	heat transition coefficient
Wärmeeinstrahlung (aus Innenraum)	[W/m ²]	inside radiation (from inside)
Wind		wind
Zuluftstrom		supply air flow

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

Beispiel 1: Stadionsdach (berechnet mit *dyAna-membran*)

1. Geometrie / Konstruktion

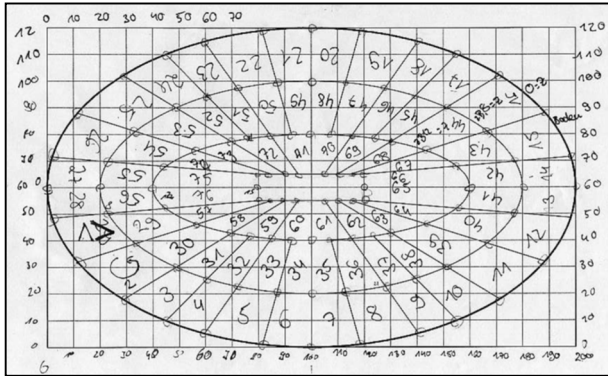


Abb.: Planungsskizze der Geometrie

- Konstruktion:** Membrankonstruktion aus Zweikammerkissen.
Standort / Klima: Referenzklima "Dortmund", Heizlastklima
Luftwechsel: $n = 10/d$. Außenluft in inneren Kammern.
 Äußere Kammern an innere angeschlossen.
Folien: ETFE: transparent 250 μ m Außenlage
 200 μ m Mittel- und Innenlage

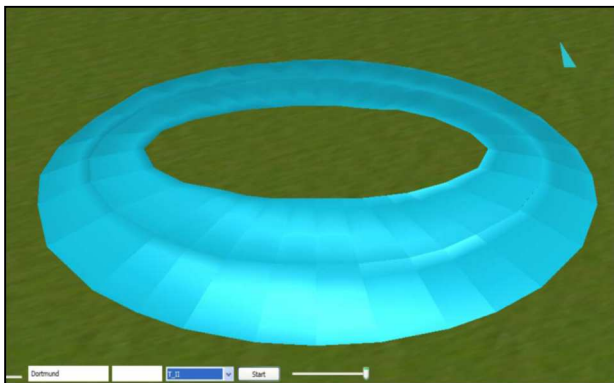


Abb.: 3D - Modellbildung in *dyAna-membran*

Erstellung des 3D-Modells im Raum und Definition der Simulationsparameter wie

- Materialeigenschaften
- Luftwechsel
- Luftführung durch die Kissenkammern
- Lüftungsanlage & Trocknergerät
- Klimadaten ... etc.

2. Simulationsergebnisse / Auswertung

2.1. Auswertungsbeispiele Wärme / Strahlung

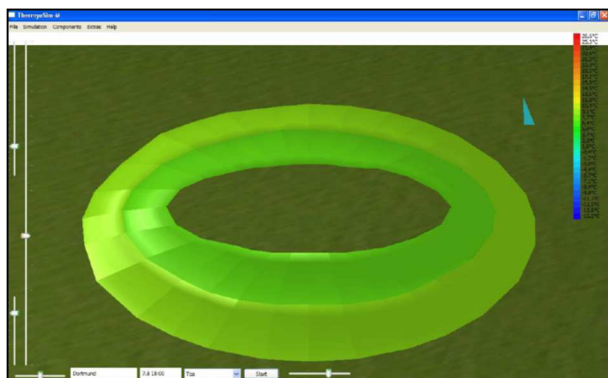


Abb.: Beispiel zur **Temperaturverteilung** auf den Folien und in den Kissenkammern.

Hier: Verteilung der **Oberflächentemperatur** auf der Außenoberfläche am 07.08. 18:00 Uhr des Referenzjahres.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

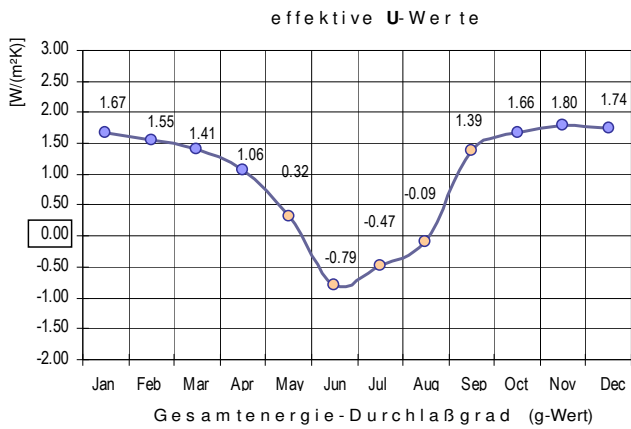


Abb.: Ergebnis der **effektive U-Werte** im Monatsdurchschnitt über das Referenzjahr, resultierend aus der Simulation der Wärmestromfelder.

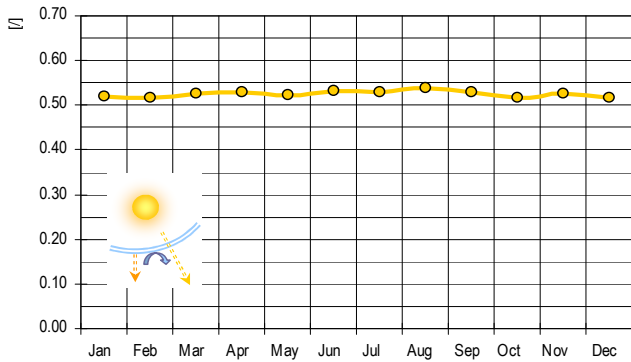


Abb.: Ergebnis der **g-Werte** im Monatsdurchschnitt über das Referenzjahr.

Gesamter **Strahlungstransmissionsgrad** plus **sekundärer Wärmeabgabe** nach innen.

2.2. Auswertungsbeispiele Feuchte

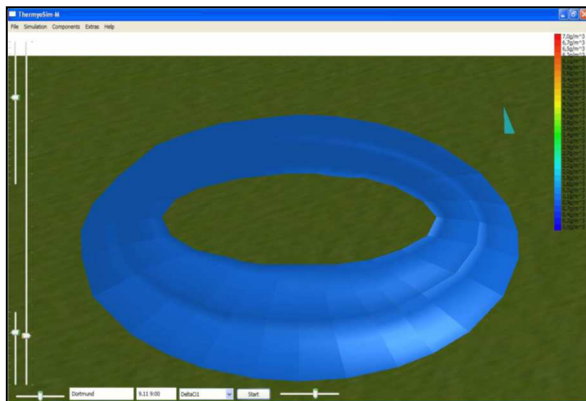


Abb.: Beispiel der **Tauwasserbilanzen ohne Einsatz eines Trocknergerätes**.

Hier: Tauwasseranfall in den äußeren Kammern am 09.11. 09:00 Uhr des Referenzjahres.

Anfallende Überschussfeuchte im Kissen (theoretische Tauwasseremenge pro m² u. Stunde)

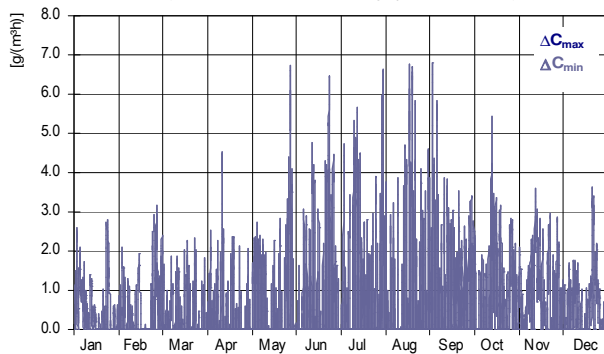


Abb.: Beispiel zur Verteilung der **Überschussfeuchte**.

Hier: in Kissen Nr.13 (stündliche Simulationswerte über das Referenzjahr)

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

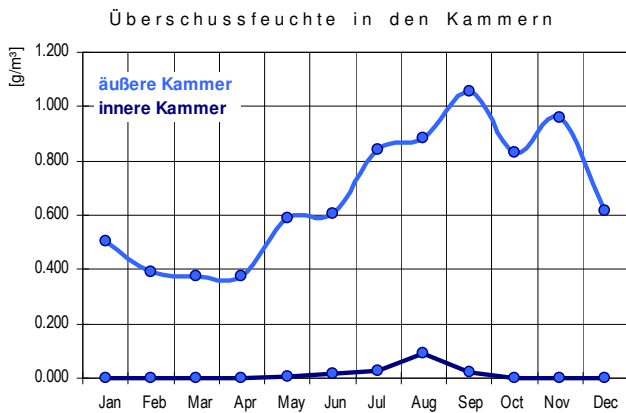


Abb.: Übersicht der Monats-Feuchtebilanz der gesamten Konstruktion.
Äußere und innere Luftkammern.

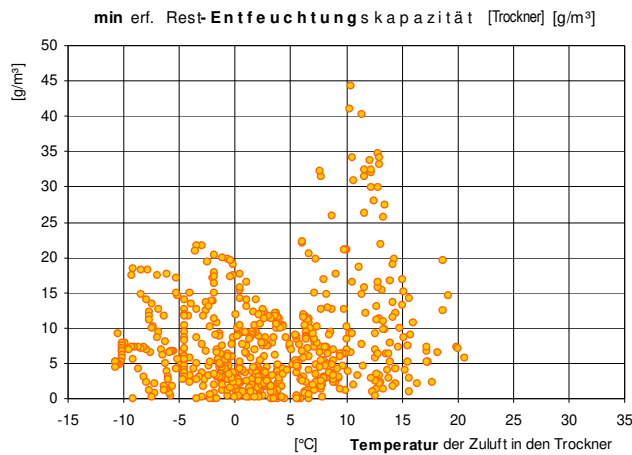


Abb.: Verteilung der erforderlichen Entfeuchtungs-kapazität der Trockneranlage zur Vermeidung von Tauwasser in den Kissenkammern und auf den Folienoberflächen.
Hier: für Kissen Nr. 13

2.2.1. Auswahl eines Trocknergerätes

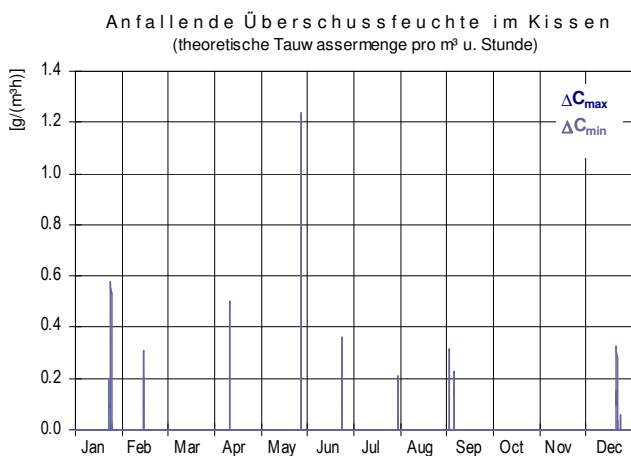


Abb.: Tauwasserbilanzen mit Einsatz eines Trocknergerätes.

Hier: Jahresverteilung der Überschussfeuchte in Kissen Nr. 13

Durch eine Reduzierung der Luftwechselrate auf $n = 2/d$ und Einschaltung einer Trocknerleistung von 600 g/h und einem Trockenluftvolumenstrom von 220 m³/h kann die Überschussfeuchte bis auf minimale, tolerierbare Restfeuchten reduziert

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

Beispiel 2: Kuppeldach (berechnet mit dyAna-membran)

1. Geometrie / Konstruktion

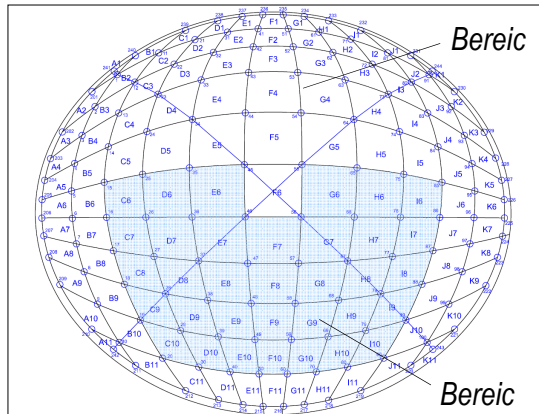


Abb.: **Zeichnung der Geometrie**

Konstruktion: Membrankonstruktion aus Zweikammerkissen.

Standort / Klima: Referenzklima "Dortmund", Heizlastklima

Luftwechsel: $n = 2/d$. Außenluft in innere Kammern.
Äußere Kammern an innere angeschlossen.

Folien: ETFE: Bereich 1: transparent
Bereich 2: Außen- und Mittelfolie bedruckt
200µm Außenlage
150µm Mittel- und Innenlage

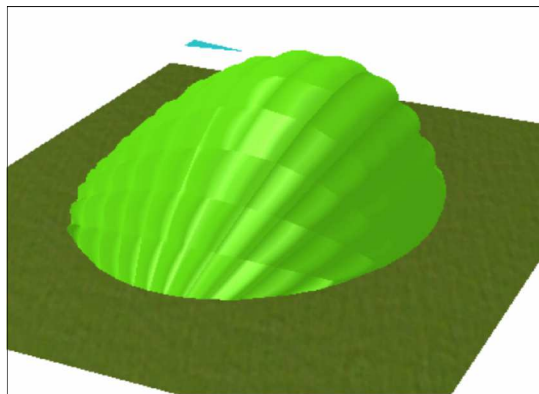


Abb.: **3D - Modellbildung in dyAna-membran**

Erstellung des **3D-Modells im Raum** und
Definition der Simulationsparameter wie

- **Materialeigenschaften**
- **Luftwechsel**
- **Luftführung durch die Kissenkammern**
- **Lüftungsanlage & Trocknergerät**
- **Klimadaten ... etc.**

2. Simulationsergebnisse / Auswertung

2.1. Auswertungsbeispiele Wärme / Strahlung

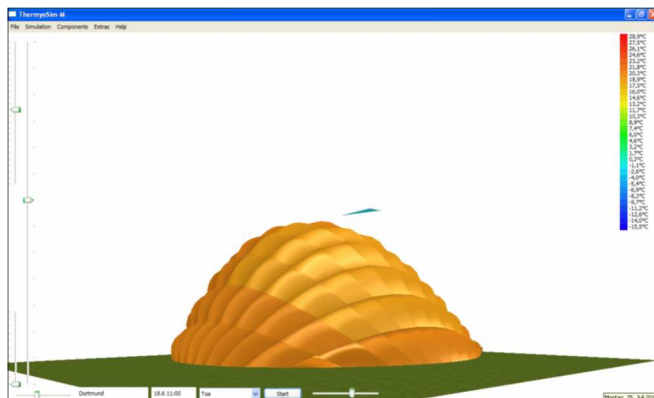


Abb.: Beispiel zur **Temperaturverteilung** auf den Folien und in den Kissenkammern.

Hier: Verteilung der **Oberflächentemperatur** auf der Außenoberfläche am 18.06. 11:00 Uhr des Referenzjahres.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

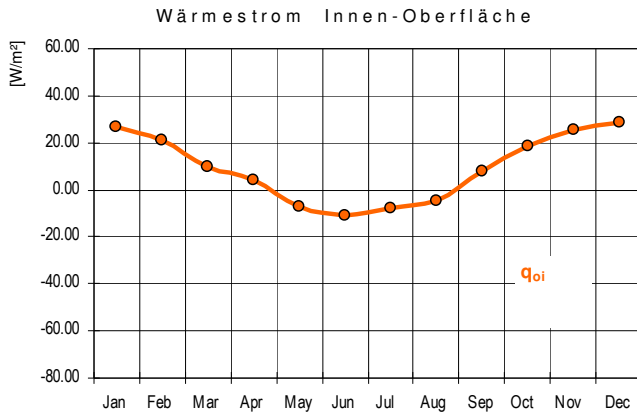


Abb.: Ergebnis des **Wärmestromes** auf der Innenoberfläche im Monatsdurchschnitt über das Referenzjahr.

Bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenluft, ergeben sich hieraus die effektiven U-Werte.

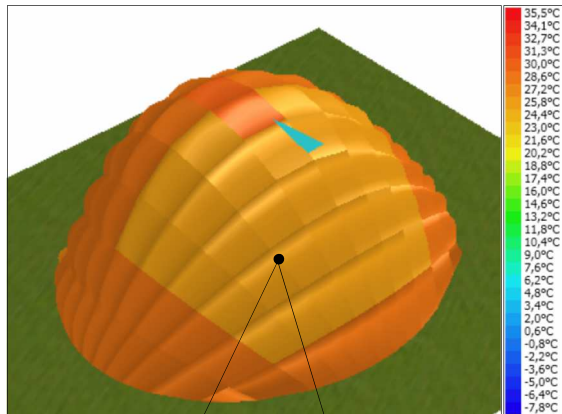
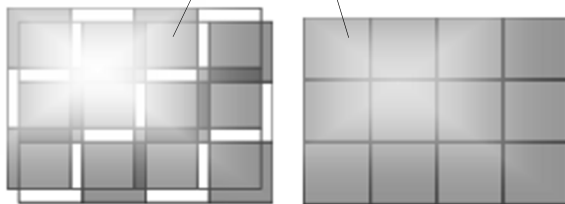


Abb.: **variable Verschattungsmöglichkeiten** mit verfahrbarer Mittellage im Bereich der bedruckten Folien.



Schrägsicht

Direktansicht

Abb.: **Lichtdurchlässigkeit** bei verfahrbarer Mittellage im geöffneten und geschlossenen Zustand.

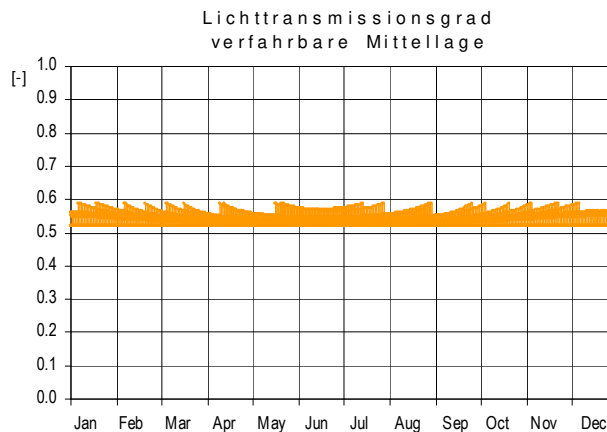


Abb.: Verteilung des **Lichttransmissionsgrades** bei verfahrbarer Mittellage im geöffneten Zustand mit Streuungen durch wechselnde Verschattungen bei unterschiedlichem Sonnenstand.

Membran-Konstruktionen: Hygrothermische Simulation und Anlagentechnik

2.2. Auswertungsbeispiele Feuchte

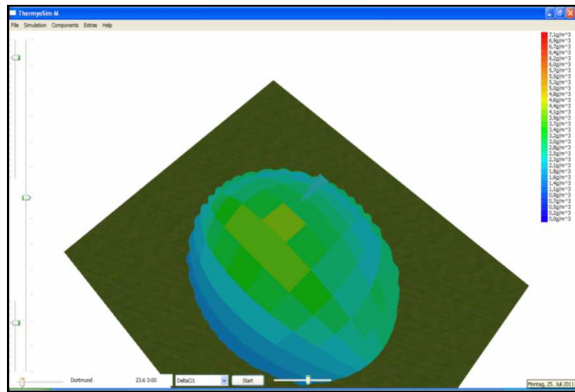


Abb.: Beispiel der **Tauwasserbilanzen ohne** Einsatz eines Trocknergerätes.

Hier : Tauwasseranfall in den äußeren Kammern am 23.06. 03:00 Uhr des Referenzjahres.

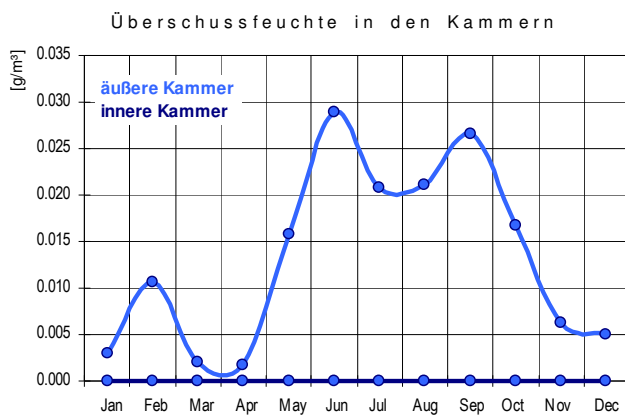


Abb.: Übersicht der **Monats-Feuchtebilanz** der gesamten Konstruktion.

Äußere und innere Luftkammern.

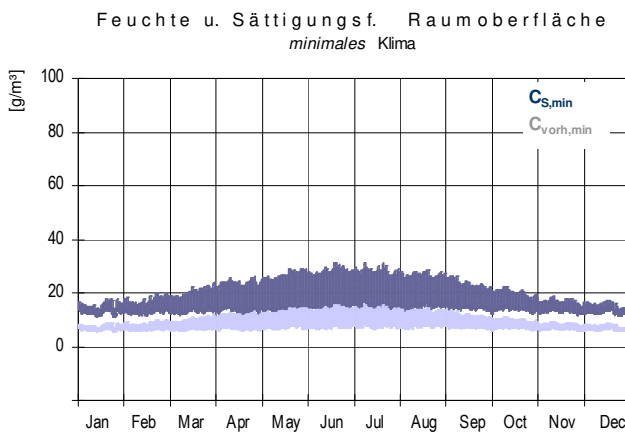


Abb.: Beispiel für die Verteilung der **absoluten Feuchte** und **Sättigungsfeuchte** auf der Innenoberfläche über das Referenzjahr.

Bei Überschreitung der Sättigungsfeuchte fällt auf der Innenoberfläche Tauwasser an.