

# Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands – Entwurf

S. Blümel, B. Stimpfle, W. Rudolf-Wittrin, H. Pasternak

**Zusammenfassung** Beim Umbau der CargoLifter-Werfthalle zu einem Freizeitpark mit tropischem Regenwald und Badebereich sollten die vier südwärts gerichteten Bogenfelder neben hoher allgemeiner Transparenz auch einen gewollt hohen Anteil an UV-Durchlässigkeit aufweisen. Die ausgeschriebene Lösung ging von einem einlagigen Seilnetz aus, das an Stelle der bisherigen Außenmembrane die Lasten der Eindeckung auf die Bögen abträgt. Auf diesem Seilnetz sollten die ETFE-Folienkissen mit einer Sekundärkonstruktion aufgeständert werden.

Basierend auf der Verformung der ursprünglichen Membranlösung wurde als Sondervorschlag erstmalig ein pneumatisches Großkissen entwickelt, bei dem die Kissenstiche unter den äußeren Lasten den Verformungen der bisherigen Membrane entsprechen, und der somit den selben Lastabtrag, d.h. die selben Anschlusskräfte hat.

## From CargoLifter Airship Hangar to Tropical Islands – Design

**Abstract** For the modification of the CargoLifter-Hangar into a leisure park with a tropical rain forest and bathing areas, four of the southwards directed bays should have, beneath a high general transparency, a high portion of ultraviolet transparency. The tendered solution assumed a cable truss or a single-layer cable net, which instead of the present outer membrane carries the loads of the roof to the arches. On this cable net the ETFE foil cushions should be elevated by a secondary structure. Based on the deflections of the original membrane solution a specific proposal in form of an huge pneumatic cushion was developed. Under applied loads the sag of this cushion correspond to the deflections of the original membrane and therefore has the same load carrying behaviour, that is the same reaction forces.

## 1 Einführung

Eine der größten freitragenden Hallen der Welt, südlich von Berlin an der A13 gelegen und gebaut für die CargoLifter AG [1,2,3], auf dem ca. 500 ha großen Gelände eines ehemaligen

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Blümel

CL MAP GmbH  
Haydnstraße 7, 80336 München

Dipl.-Ing. Bernd Stimpfle  
form TL GmbH  
Kapellenweg 2b, 78315 Radolfzell

Wolfgang Rudolf-Wittrin

CENO TEC GmbH  
Am Eggenkamp 14, 48268 Greven

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau  
BTU Cottbus  
K.-Wachsmann-Allee 2, 03046 Cottbus

Militärflugplatzes wurde zu einem Freizeitpark mit tropischem Regenwald und Badebereich umgestaltet [4]. Den Besuchern wird hier die Möglichkeit gegeben, eine tropische Landschaft zu besuchen, ohne eine weite Reise antreten zu müssen. Aufgrund der Größe der Halle mit 5,5 Mio. Kubikmeter umbautem Raum und einer lichten Höhe von 99 m ist Tropical Islands nicht als ein Hallenbad im herkömmlichen Sinne zu verstehen, eher schon als überdachter und klimatisierter „Außenraum“. Eine 20000 m<sup>2</sup> große, transparente und UV-lichtdurchlässige ETFE-Folieneindeckung verstärkt das Gefühl, im Freien zu sein und lässt gleichzeitig die Pflanzen im Regenwald wachsen.

Die gesamte Einrichtung wurde in die bestehende ehemalige CargoLifter Halle eingebaut. Vorhandene Einrichtungen werden weitgehend weitergenutzt und entsprechend ergänzt. Gebäude, Becken und künstliche Landschaft wurden bis auf kleine Ausnahmen auf der ursprünglich vorhandenen Bodenplatte aufgebaut. Das Kernstück der künstlichen Landschaft ist ein ca. 12 m hoher Hügel in der Mitte der Halle. Er ist mit einer vielfältigen Vegetation bepflanzt. Um diesen zentralen Regenwaldbereich sind unterschiedliche Ereigniszonen angeordnet (Bild 1):

- Tropisches Dorf
- „Bali Lagune“ mit Wasserattraktionen, Saunabereich und Sandstrand
- „Südsee“ mit Sandstrand, Liegestuhlterrassen und Inseln, die am Abend als Bühne für Veranstaltungen dienen.

Die notwendigen Funktionsräume, Einrichtungen für die Verpflegung der Besucher sowie die Technikräume für die Schwimmbadtechnik und die Lüftungsanlagen sind in einem zentralen zweigeschossigen Servicegebäude unter dem Regenwaldhügel untergebracht.

Für die beschriebenen Einrichtungen werden ca. 37000 m<sup>2</sup> im mittleren Bereich der Werfthalle unter den stählernen Bogenbindern und festen Torsegmenten genutzt. Die beiden Torbereiche mit jeweils ca. 15000 m<sup>2</sup> sind derzeit mit temporären Nutzungen (z.B. Beachvolleyball) belegt und bleiben späteren Erweiterungen der Badebereiche vorbehalten. Durch die Umnutzung der Halle ergaben sich auch geänderte Anforderungen an die bestehende Hüllkonstruktion. Im Wesentlichen sind dies die Stilllegung der stirnseitigen Großoranlagen, Feuchtebeaufschlagung durch veränderte Anforderungen an das Raumklima (Luftfeuchte und Raumtemperatur) sowie der Ersatz eines Teils der Halleneindeckung durch ein transparentes Material (Tageslichteintrag).

Während die beiden ersten Punkte relativ einfach zu bewerkstelligen waren (wie z.B. das Abdichten der horizontalen und vertikalen Torfugen) bzw. bei genauerer Untersuchung geringere Anforderungen aufwarfen als anfangs erwartet (die Luftfeuchtigkeit erreichte schon zu Zeiten der CargoLifter-Nutzung bei planmäßigem Aushallen der Luftschiffe den Taupunkt, d.h. durch die neue Nutzung entfallen

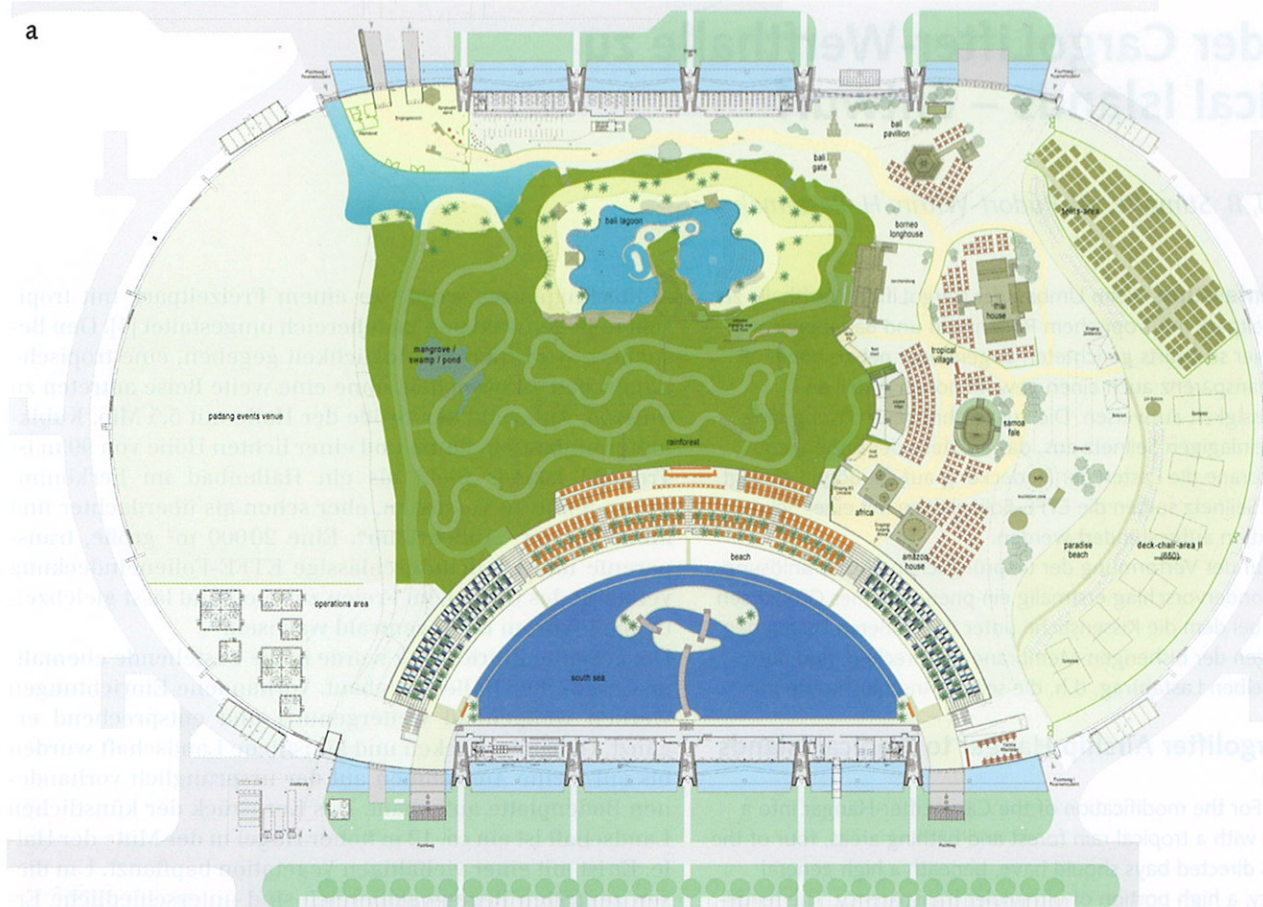


Bild 1. CL MAP GmbH München: a Draufsicht b Ansicht  
 Fig. 1. CL MAP GmbH München: a Topview b elevation

sogar die kurzzeitigen Spitzenbeanspruchungen durch Kondenswasserausfall beim sommerlichen Aushallen). Der dritte der oben genannten Punkte stellte jedoch die eigentliche Herausforderung dar. Aus der Nutzungskonzeption ergab sich das Erfordernis insbesondere den Mittelbereich der Halle mit Tageslicht zu versorgen. Die zu wählende Konstruktion sollte Tageslicht in möglichst unveränderter Qualität in die Halle bringen. Dies bedeutet neben einer hohen allgemeinen Transparenz auch einen gewollt hohen Anteil an UV-Durchlässigkeit. Damit lagen die Anforderungen deutlich oberhalb üblicher transparenter Konstruktionen wie Groß-Wintergärten oder Gewächshäusern. Als problematisch erwies sich, dass die vorhandene Konstruktion für den Einsatz als Primärtragwerk für eine Membraneindeckung optimiert war. Alle Spannweiten, Lastaufnahmepunkte etc. waren für eine Membraneindeckung vorgesehen und boten kaum mobilisierbare Tragreserven.

## 2 Findungsphase

### 2.1 Material

Als Material für die Neueindeckung der Halle im südlichen zylindrischen Mittelteil (vier Felder mit je ca. 5000 m<sup>2</sup>) kamen aufgrund der o.g. Randbedingungen nur wenige Materialien in Frage. Unter anderem wurden auf ihre Eignung hin überprüft:

- Glas
  - Vorteile: Brandschutz, Transparenz
  - Nachteile: zu schwer, zu aufwändige Unterkonstruktion, zu teuer, nicht (ausreichend) UV-durchlässig
- Polycarbonat u.ä. plattenförmige Kunststoffe
  - Vorteile: leichter und preiswerter als Glas
  - Nachteile: noch immer zu schwer (inklusive der erforderlichen Unterkonstruktion), problematisch hinsichtlich der temperaturbedingten Ausdehnungen, problematisches Brandverhalten, mit wenigen Ausnahmen nicht UV-durchlässig
- Membrankonstruktionen
  - Vorteil: kompatibel zur vorhandenen Stahlkonstruktion
  - Nachteile: nicht transparent, nicht UV-durchlässig
- diverse Folien
  - Vorteile: leicht, teilweise transparent
  - Nachteile: i.d.R. problematisch hinsichtlich Brandverhalten und UV-Stabilität (Dauerhaftigkeit) sowie der UV-Durchlässigkeit, Unterkonstruktion aufwändig, da wesentlich ungünstigeres Tragverhalten als die bisherige Membrankonstruktionen

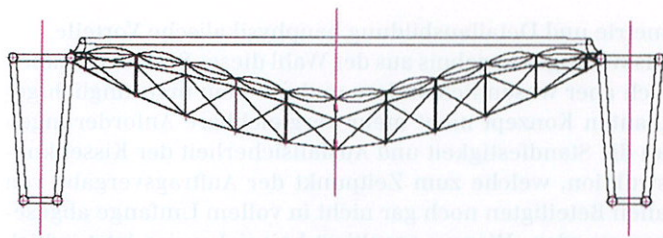


Bild 2. Seilbinder  
Fig. 2. Cable truss

- ETFE-Folie

Vorteil: transparent, UV-stabil, leicht, erfüllt die Brandschutzanforderungen

Nachteil: spannt ohne zusätzliche Maßnahmen nicht von Bogenbinder zu Bogenbinder, d.h. es wird eine zusätzliche Sekundärkonstruktion benötigt.

Aus der Betrachtung der Vor- und Nachteile wurden schließlich dreilagige ETFE-Folien ausgewählt (Außenfolien 200  $\mu\text{m}$ , Innenfolie 100  $\mu\text{m}$ ).

## 2.2 Vorentwurf, Sondervorschläge der Bieter

Im Zuge der Planung wurden mehrere Varianten der Sekundärkonstruktion als Unterkonstruktion zwischen der vorhandenen Stahl-Bogenbinderkonstruktion und der künftigen ETFE-Eindeckung untersucht.

Betrachtet wurde anfänglich eine Konstruktion aus parallel zum Firstträger zwischen den Bogenbindern (in Abständen von jeweils 2,36 m) gespannten **Seilbindern**, deren Ober- und Untergurt jeweils die Ideallinie zur jeweiligen Lastabtragung im Druck- bzw. Sogfall nachzeichnen. Das 2D-Seilbinder-Modell ist in **Bild 2** dargestellt; es enthält längs zur Binderrichtung scheinbar Kleinkissen, jedoch quer zur Binderrichtung sind es zehn vom First zur Traufe durchlaufende Großkissen!

Ziel dieser Binderform war die Reduzierung der in die Bogenbinder einzuleitenden H-Kräfte auf ein mit der bestehenden Konstruktion verträgliches Maß. Dabei sind nur die (Druck-) Pfosten (gleichzeitig Aufständerungen für die Randprofile der ETFE-Kissen) aus Profilstahl, alle anderen Bestandteile sind aus Seilen. Aus Brandschutz- und auch Qualitätssicherungsgründen waren keine Schweißarbeiten am bestehenden Tragwerk zulässig, d.h. allein die vorhandenen Anschlagpunkte der früheren Membrankonstruktion sollten genutzt werden. Als Nachteile dieser Konstruktion erwiesen sich die aufwändige und damit Zeit raubende und letztendlich teure Montage sowie die problematische Aussteifung dieses System.

Parallel hierzu wurde eine Alternative mit einem **Seilnetz** (ähnlich der bisherigen Membrangeometrie) untersucht (**Bild 3**). Dieses System besticht durch die übersichtliche Montage und den raschen Einbau. Nachteilig wirkt sich – auch bei diagonaler Anordnung der Seillagen – die Tatsache aus, dass geometriebedingt die hier auftretenden H-Kräfte zusätzliche Maßnahmen zur Harmonisierung mit der bestehenden Stahlkonstruktion erforderlich machen. Entweder muss das Primärtragssystem (im wesentlichen Bögen) partiell durch Verstärkungsmaßnahmen ertüchtigt werden, oder die H-Kräfte müssen durch den Einbau „weicherer“ Komponenten (auch „Lastdosierer“ genannt) reduziert werden. Untersuchungen z.B. von Federelementen (erforderliche Einbaulänge eines einzelnen Federelementes ca. 1,20

bis 1,50 m) erbrachten zwei gravierende Nachteile. Zum einen die Kosten, zum anderen die nunmehr im Bereich der Federelemente konzentriert auftretenden Längenänderungen unter Last, die sich bei der zu erwartenden Längenänderung nicht dauerhaft durch die Dichtungsebene (Kissenkonstruktion, elastische Eindeckung o.ä.) aufnehmen ließen. Zusammen führten diese Aspekte zum Ausschluss der Federtlösung. Die verbleibende Lösung (Ertüchtigung der bestehenden Primärkonstruktion) wurde der weiteren Planung und Ausschreibung zugrunde gelegt. Die aus dieser Lösung resultierenden Konsequenzen insbesondere im Bauablauf machten deutlich, dass hier noch Potential zur Optimierung – z.B. im Rahmen von Sondervorschlägen von Bieter – gegeben war. In beiden vorgenannten Fällen (Seilnetz) war eine Großkissenlösung mit 10 vom First bis zur Traufe (ca. 150 m) durchlaufenden Pneus vorgesehen. Jedes dieser Kissen hätte eine Einzelgröße von ca. 500 m<sup>2</sup> aufgewiesen. Zwar wären diese Kissen in dieser Größe ein- bzw. erstmalig gewesen, stellten jedoch konstruktiv lediglich die logische Fortführung einer von der Fa. Covertex bei der Masoala-Halle in Zürich bereits umgesetzten Konstruktionsform dar. Im o.g. Falle der Seilnetzlösung wurde eine Aufständerung erforderlich, welche eine ungestörte Kissengeometrie oberhalb der von Bogenbinder zu Bogenbinder quer verlaufenden Seillagen ermöglichte. Hierdurch wurde andererseits ein Kippmoment in die 3-dimensional gekrümmte Seilnetzstruktur eingebracht, wodurch die Breite der Pneus begrenzt war.

Im Zuge des Wettbewerbes unter den Bieter wurden weitere Konstruktions- und Montagekonzepte entwickelt. Zu nennen sind hier insbesondere drei grundsätzlich unterschiedliche, vom Ausschreibungstext abweichende Varianten. Ausschlaggebend für die Wahl der letztendlich umgesetzten Variante waren neben dem Preis auch der von den jeweiligen Bieter dargestellte mögliche Fertigstellungstermin, dem im Rahmen des Gesamtprojektes ganz erhebliche Bedeutung zukam. Insofern konkurrierten hier nicht nur Konstruktions-, sondern auch Terminkonzepte.

Variante 1 der Firma Foiltec sah im Wesentlichen die Übernahme des ursprünglichen Seilnetztragwerkes vor, unter setzte dieses jedoch mit einer zusätzlichen Unterteilung der Kissen in für den Bieter handliche Einzelgrößen (je nach Variante bis zu 155 Einzelkissen je Binderfeld). Wenn die Lasten am Bogen-Obergurt der Bögen angriffen, war eine Verstärkung der Stahlbögen unausweichlich. Wenn man die Lasten an der Torsionsaussteifung einleitete, brauchte man die Bögen nicht zu verstärken, ggf. war eine Verstärkung der Torsionsaussteifungen (z.B. durch Unterspannung) notwendig. Nachteil dieser Konstruktion waren neben dem hohen

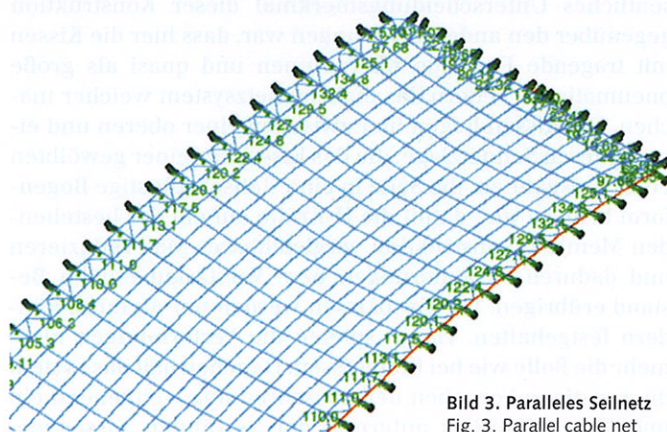


Bild 3. Paralleles Seilnetz  
Fig. 3. Parallel cable net

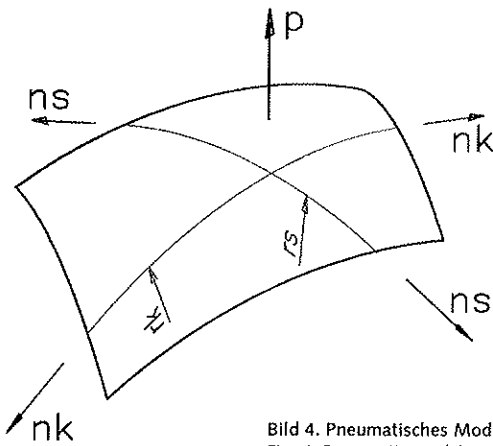


Bild 4. Pneumatisches Modell  
Fig. 4. Pneumatic model

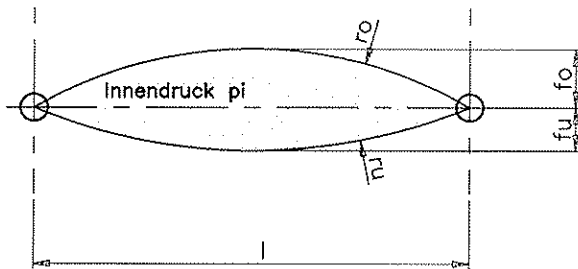


Bild 5. Prinzipskizze Kissen  
Fig. 5. Principle sketch of a cushion

Preis insbesondere der hohe (Alu-)Profilanteil und diverse noch zu lösende Detail- und Geometrie-Probleme sowie die in Aussicht gestellte Terminalschiene.

Variante 2 der Firma Covertex behielt die ursprünglich vorgesehene Kissen-Geometrie weitgehend bei, basierte aber auf einer Seilbinderunterkonstruktion (statisch vorteilhaft und verträglich mit der bestehenden Primärkonstruktion), sah jedoch abweichend von den o.g. Vorgaben eine Montage unterhalb der während der Bauzeit verbleibenden Außenmembran vor. Zusätzliche Sicherungsmaßnahmen nach unten waren unumgänglich. Vorteilhaft war insbesondere, dass auf Ertüchtigungsmaßnahmen am Bestand verzichtet werden konnte. Nachteilig war primär die Tatsache, dass der Bieter aufgrund anderer parallel laufender Bauvorhaben erst einen Baubeginn in 2005 darstellen konnte.

Variante 3 der letztendlich beauftragten Firma Cenotec sah eine Großkissenlösung mit einer Unterteilung eines Binderfeldes in 14 rautenförmige Kissen von ca. 350 m<sup>2</sup> Einzelgröße vor, wobei diese Kissen in sieben Zeilen übereinander und zwei Spalten nebeneinander angeordnet waren. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser Konstruktion gegenüber den anderen Lösungen war, dass hier die Kissen mit tragender Funktion übernehmen und quasi als große pneumatische Federn das Stahlseilnetzsystem weicher machen. Die Kissen liegen hier zwischen einer oberen und einer unteren Seilnetzlage, die das Kissen in seiner gewölbten Form umspannen, die Seile in eine statisch günstige Bogenform bringen und damit die H-Kräfte auf ein der bestehenden Membrankonstruktion vergleichbares Maß reduzieren und dadurch Veränderungen bzw. Verstärkungen im Bestand erübrigen. Die Großkissen werden nur an ihren Rändern festgehalten. Damit spielen die Verformungen nicht mehr die Rolle wie bei Kleinkissen. Daneben hält das System die sonstigen Vorgaben der Ausschreibung weitgehend ein und bietet überdies aufgrund der gewählten Kissen-geo-

metrie und Detailausbildung bauphysikalische Vorteile. Als wichtiges Ergebnis aus der Wahl dieses Systems ergaben sich aber wesentlich andere und mit dem ursprünglich geplanten Konzept nicht mehr vergleichbare Anforderungen an die Standfestigkeit und Ausfallsicherheit der Kissenkonstruktion, welche zum Zeitpunkt der Auftragsvergabe von allen Beteiligten noch gar nicht in vollem Umfang abgesehen wurden. Hieraus resultiert beispielsweise letztendlich eine ungemein komplexe und mit redundanten Sicherheitsvorrichtungen versehene Steuerung der Stützluftversorgung. Daneben wurde der Versuch unternommen, die Stützluftversorgung wesentlich wirtschaftlicher als bei vergleichbaren Projekten zu gestalten. Der hier beschriebene Weg ist mit Sicherheit noch nicht abgeschlossen, dürfte aber wegweisend für künftige Projekte sein.

### 3 Zur Statik: Seilnetz und Kissen

#### 3.1 Allgemeines zu Kissenkonstruktionen

Pneumatische Konstruktionen folgen starren Gesetzmäßigkeiten, die ihre Formfindung und damit entscheidend ihren Entwurfsprozess beeinflussen [5]. Die Form einer pneumatischen Konstruktion folgt immer der allgemeinen Kesselformel  $p = n_k / r_k + n_s / r_s$  mit dem Innendruck p, den Membranspannungen  $n_k$  und  $n_s$ , und den Krümmungsradien  $r_k$  und  $r_s$  (Bild 4).

Kissenkonstruktionen sind zweilagige pneumatische Konstruktionen (Bild 5), die entweder eine starre innenliegende Stützkonstruktion haben, die in der Lage ist, die großen, am Rand auftretenden, Umlenkkräfte im Kissen kurzzuschließen. Oder sie sind als Deckung auf eine Primärkonstruktion aufgeständert und leiten die resultierenden Horizontalkräfte in die Hauptkonstruktion. Die Druckbelastung auf das Kissen wird durch eine Druckerhöhung auf die andere Seite des Kissens getragen. Die Sogbelastung erhöht die Membranspannung auf der Außenseite.

Da Sogbeanspruchungen ausschließlich aus Wind resultieren, sind es kurzzeitige Belastungen. Die Luftversorgung kann die Volumenänderung, die sich aus einer Dehnung der Oberlage ergibt, nicht so schnell nachführen. Daher muss die Oberseite nur die Windlast abtragen, ohne Überlagerung des Innendruckes.

#### 3.2 Tragverhalten bestehende Membraneindeckung, daraus abgeleitetes Tragsystem als Großkissen

##### Bestehendes Membrandach

Die bestehende Membraneindeckung [6] besteht aus je einer Innen- und einer Außenmembrane. An beiden Lagen ist jeweils eine locker untergehängte dünne Membrane aufgeschweißt, so dass insgesamt ein 4-lagiges System entsteht. Die Außenmembrane ist PVC beschichtetes Polyestergewebe Typ V, die Innenmembrane Typ III (Bild 6). Mit dieser 4-lagigen Konstruktion wird ein U-Wert je nach Berechnungsverfahren zwischen 0,9 und 1,5 W/m<sup>2</sup>K erreicht. Die Transluzenz der bestehenden Membraneindeckung beträgt ca. 0,5 bis 2 %.

Um Licht, insbesondere UV-Licht in die Halle zu bekommen, wird auf der Südseite die Membraneindeckung durch eine ETFE-Folienkissenkonstruktion ersetzt, mit einer Gesamttransluzenz von ca. 85% und einem maximalen U-Wert von 1,4 W/m<sup>2</sup> K. Die neue Eindeckung schließt direkt in der Ebene der bisherigen Außenmembrane an. Das Kehlseil und die unteren Randseile werden wiederverwendet. Die bisherige

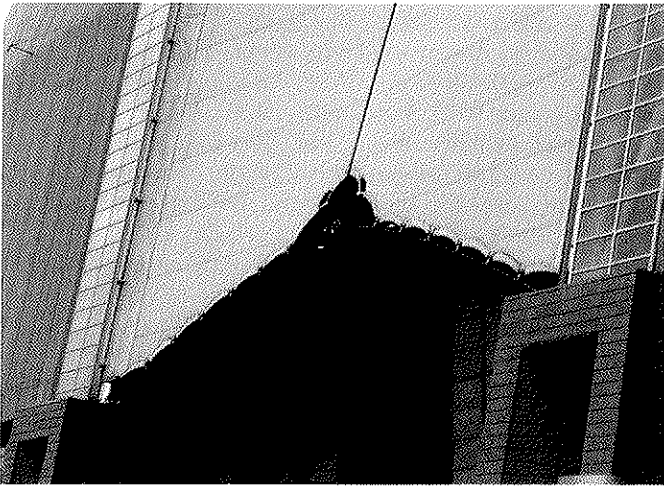


Bild 6. Bestehende Membran: Kehlseil und Randseil  
Fig. 6. Existing fabric: valley cable and border cable

Innenmembrane dient in der Bauphase als Montageplattform und wird anschließend entfernt.

*Sondervorschlag*

Die ausgeschriebene Lösung ging von einem 1-lagigen Seilnetz aus, das an Stelle der bisherigen Außenmembrane die

Verformungsfiguren

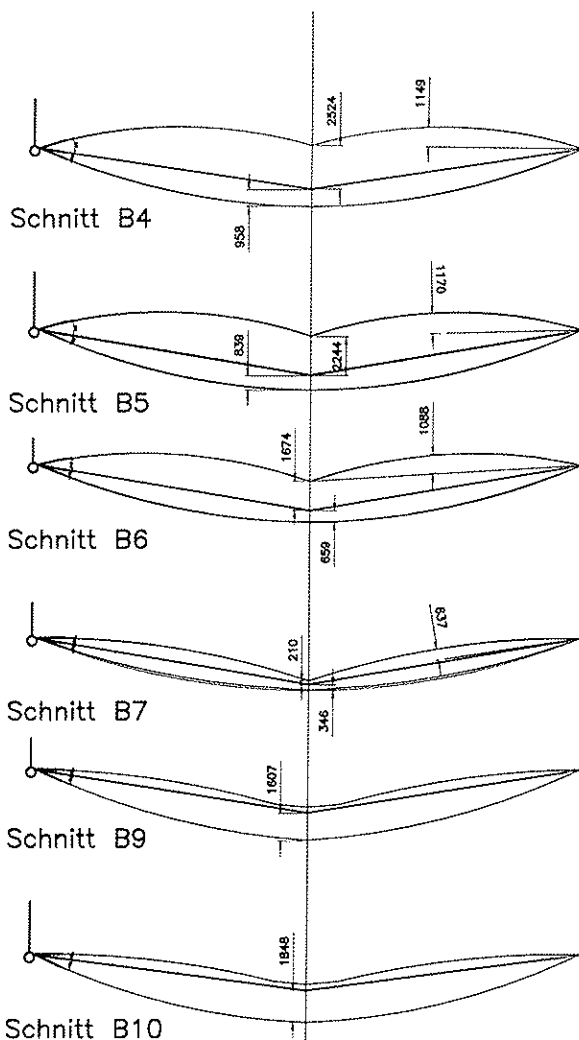


Bild 7. Verformung ursprüngliches Membrandach  
Fig. 7. Deflection of the original fabric roof

Lasten der Eindeckung auf die Binder abträgt. Auf diesem Seilnetz sollten die Folienkissen mit einer Sekundärkonstruktion aufgeständert werden. Durch die deutlich höhere Steifigkeit des Seilnetzes hätte diese Lösung zu größeren Anschlusslasten auf die Primärkonstruktion geführt, und damit eine Verstärkung erforderlich gemacht, deren Umfang nur schwer abzuschätzen war. Basierend auf der Verformung der ursprünglichen Membranlösung (Bild 7) hat form TL daher als Sondervorschlag ein pneumatisches Großkissen entwickelt, bei dem die Kissenstiche unter den äußeren Lasten den Verformungen der bisherigen Membrane entsprechen (Bild 8) und der somit den selben Lastabtrag, d.h. die selben Anschlusskräfte hat. Hierzu wurde die Einhüllende der Membranverformungen unter allen Lastfällen gebildet, und als Grundgeometrie für das neue Großkissen zu Grund gelegt. Aus diese Grundgeometrie wurde dann eine fertigungsgerechter einheitlicher Kissenstich für die Kissenober- und -unterseite festgelegt.

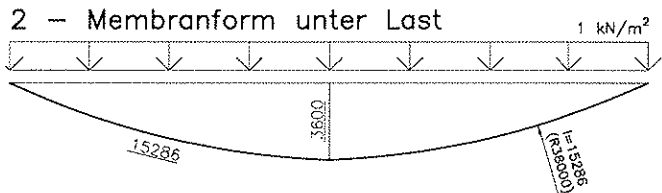
3.3 Beschreibung Lastabtrag Windsog, Winddruck und Schnee

Bei Windsog wird die Kissenoberseite nach außen gezogen und versucht das Volumen zu vergrößern. Da die Luft nicht schnell nachströmen kann und bereits eine geringe Volumenvergrößerung zu einem vollständigen Druckabfall im Kissen führt, wirkt auf die Kissenoberseite der maximale Windsog und der Innendruck wird zu 0 (Bild 9). Die obere Lage trägt die Windsoglasten. Die untere Lage wird entlas-

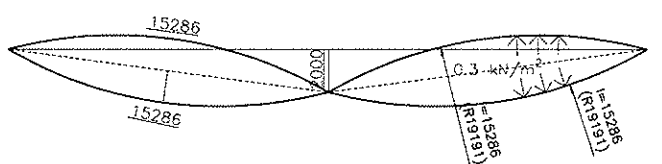
1 – Membranform unter Vorspannung



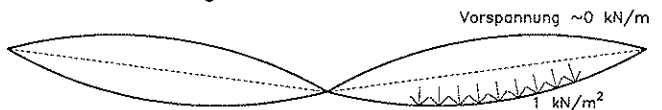
2 – Membranform unter Last



3 – Kissenform unter Innendruck



4 – Belastung Kissen



5 – Kissenform unter Last

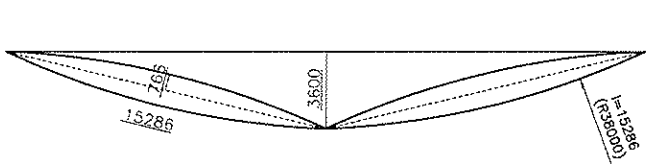


Bild 8. Ermittlung der Kissenform für Winddruck  
Fig. 8. Determination of the cushion shape in case of wind pressure

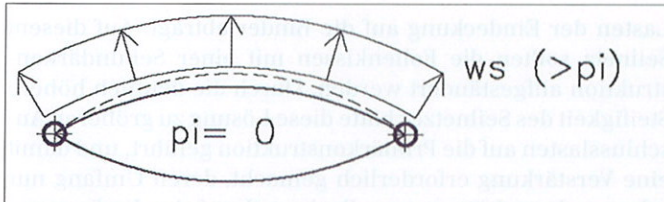


Bild 9. Lastabtrag bei Windsog  
Fig. 9. Load transmission with wind suction

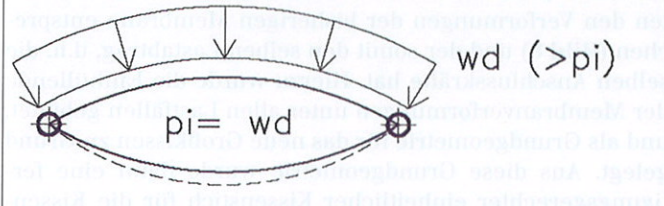


Bild 10. Lastabtrag bei Winddruck  
Fig. 10. Load transmission with wind pressure

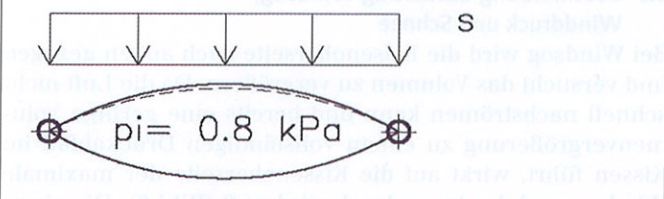


Bild 11. Lastabtrag bei Schnee  
Fig. 11. Load transmission with snow

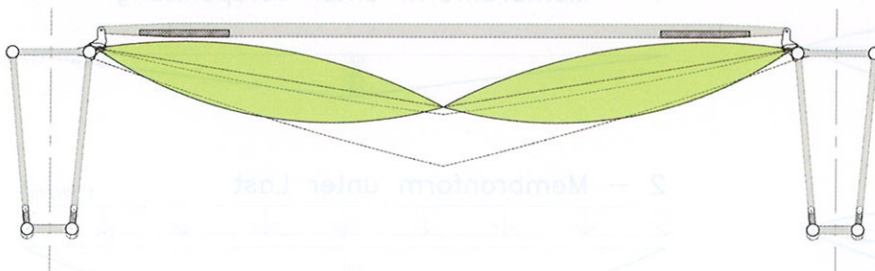


Bild 12. Schnitt durch das Großkissen  
Fig. 12. Cross-section of a large cushion

tet. Bei Winddruck wird die Kissenoberseite nach innen gedrückt, und im Kissen stellt sich ein Gleichgewicht mit der angreifenden Windlast ein. Wenn der Winddruck größer als der Innendruck wird, dann stellt sich im Kissen ein Innendruck gleich dem Winddruck ein (Bild 10). Die obere Lage wird entlastet. Die untere Lage trägt die Winddrucklasten. Bei Schnee wurde der Innendruck in den Kissen per elektrischem Schneewächter auf 0,8 kPa erhöht, um die Bemessungsschneelast von 0,75 kN/m<sup>2</sup> zu überdrücken (Bild 11).

### 3.4 Berechnungsmodell Gesamtsystem

#### Tragverhalten

Das Tragsystem der Kisseneindeckung funktioniert als Großkissen (Bild 12). Zwischen den seitlichen Bogenbindern und dem Kehlseil spannt auf der Oberseite ein rautenförmiges Seilnetz, und auf der Unterseite eine parallele Seilschar (Bild 13). Zwischen diesen beiden Lagen liegen insgesamt 14 einzelne Kissen, die mit ihrem Innendruck die beiden Seillagen aufspannen und so das Kissen bilden. Die Kissen haben einen Regelinnendruck von 0,5 kPa. Bei Schneefall wird der Innendruck der oberen Kissen auf 0,8 kPa erhöht.

Die Kissenoberseite bildet ein rautenförmiges Seilnetz aus Spiralseilen mit einem Durchmesser von 14 mm. Im Bereich der Kissenstöße ist die nach oben verlaufende Seilschar mit einem Muffenstoß gekoppelt. Die Kissenunterseite bildet eine parallele Seilschar aus Spiralseilen mit 16 mm Durchmesser. Aus Korrosionsschutzgründen wurden Stalum-Seile verwendet, mit einer Aluminiumbeschichtung auf den einzelnen Drähten, die eine hohe Beständigkeit gegen Chloratmosphäre haben. Das wiederverwendete Kehlseil ist ein vollverschlossenes Seil mit einem Durchmesser von 50 mm. Die Randseile, die ebenfalls wiederverwendet werden, sind vollverschlossene Seile mit einem Durchmesser von 59 mm. Der Berechnung liegen die Regeln der Seiltheorie zugrunde. Dafür wird ein spezielles Programm eingesetzt, welches insbesondere zur Berechnung von Seilnetzen und Membrankonstruktionen

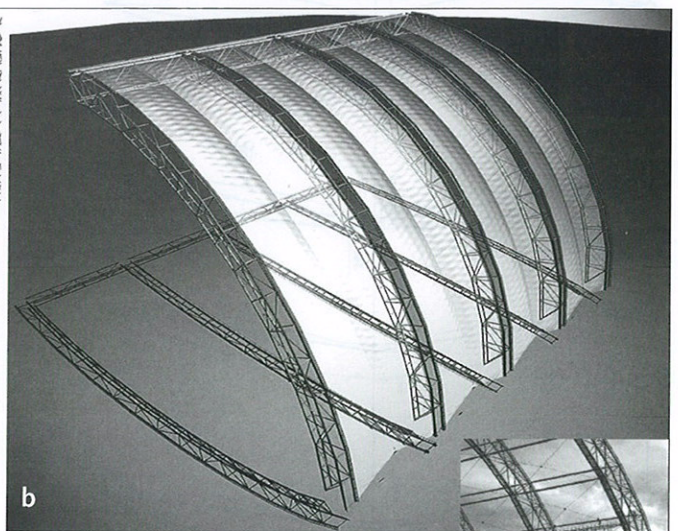
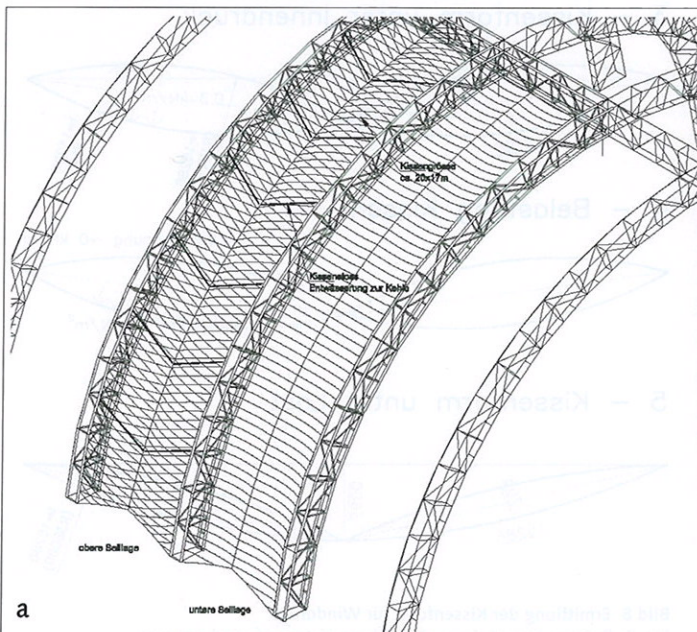


Bild 13 a. Übersicht obere und untere Seillage b. Visualisierung  
Fig. 13 a. Outline upper and lower cable net b. Visualisation

nen geeignet ist. Nichtlinearitäten wie Ausfall von Zuggliedern und Membranelementen, sowie die unterschiedlichen Materialeigenschaften und große Verformungen werden hierbei berücksichtigt. Das Modell wird durch einzelne Seilelemente diskretisiert (Bild 14). Das Gleichgewicht wird am verformten System ermittelt.

Die Berechnung wird ohne Teilsicherheitsbeiwerte durchgeführt, da diese Methode bei zugbeanspruchten Konstruktionen, bedingt durch die Seilverformungen zu niedrigeren Schnittgrößen führt. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden daher erst bei der Bauteilbemessung berücksichtigt. Durch die Wahl dieses Tragsystems war es möglich für die Anschlusskräfte innerhalb der Belastung aus dem ursprünglichen Dach zu bleiben, und die maximalen Kräfte von Kehlseil und Randseil einzuhalten.

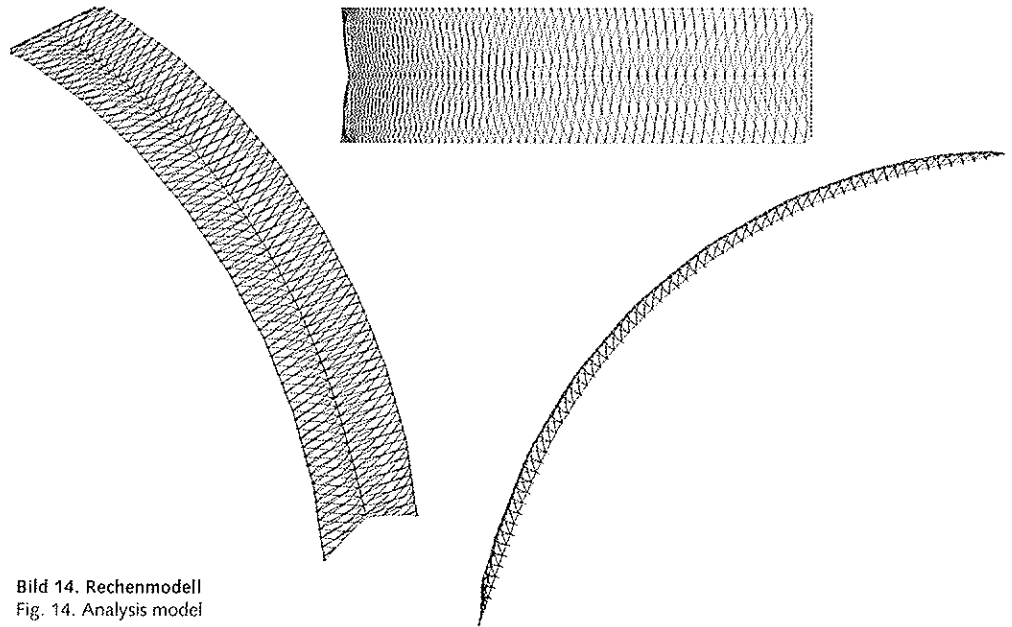


Bild 14. Rechenmodell  
Fig. 14. Analysis model

### 3.5 Berechnungsmodell Folie

Die ETFE Kissen wirken als Subsystem innerhalb dieses Großkissens. Der Innendruck wirkt auf die ETFE Folie, und diese stützen sich auf dem Seilnetz ab und spannen somit das Großkissen auf (Bild 15).

Die Bemessung der ETFE Folie erfolgt als nichtlineare Berechnung am einachsig gespannten Folienstreifen bei dem das nichtlineare Verformungsverhalten der Folie mit eingerechnet wird. Der Sicherheitsfaktor gegen die 10%-Dehngrenze beträgt 1,5, somit liegt die effektive Sicherheit gegen Bruch bei ca. 4,0 (Bild 16).

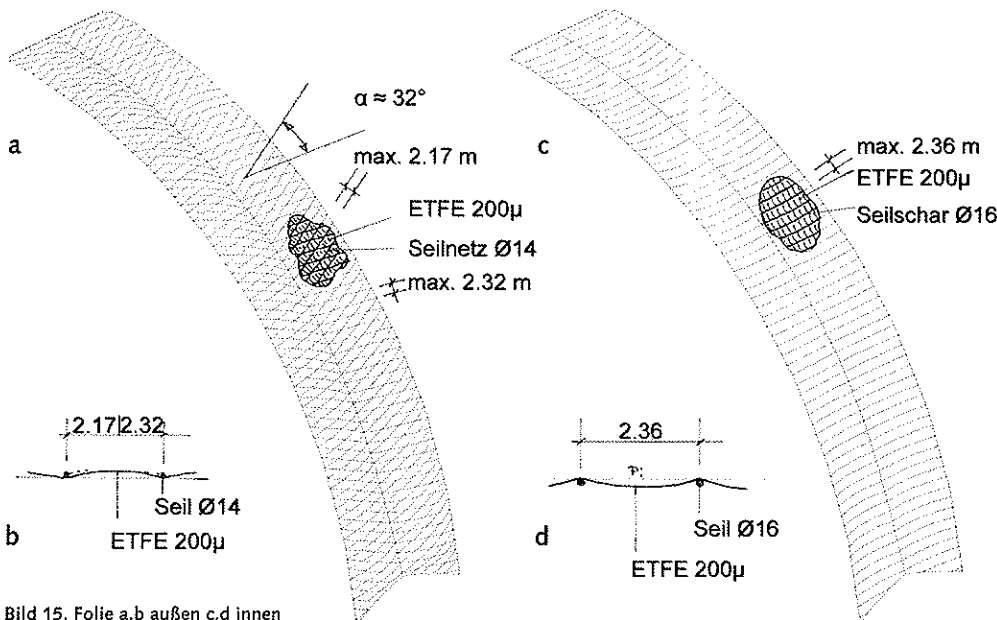


Bild 15. Folie a,b außen c,d innen  
Fig. 15. Foil a,b outer c,d inner

### 3.6 Untersuchte Zwischenzustände während der Montage

Da die Bauzeit auch über den Winter ging, musste für die Innenmembran der Nachweis für Schnee erbracht werden. Da die Membran nur noch zweilagig war, bzw. im Nahtbereich einlagig, kann man davon ausgehen, dass ein Teil des Schnees abtaut. Daher wurde für die Berechnung 70% der Schneelast angesetzt. Die Windlast auf die Innenmembran wurde ebenfalls auf 70% abgemindert, da es sich um einen zeitlich begrenzten Bauzustand handelt. Da das Gebäude noch während der Montage in den Betrieb ging, wurde darüber hinaus gefordert, dass ab einer Windgeschwindigkeit von 140 km/h die Halle zu räumen ist.

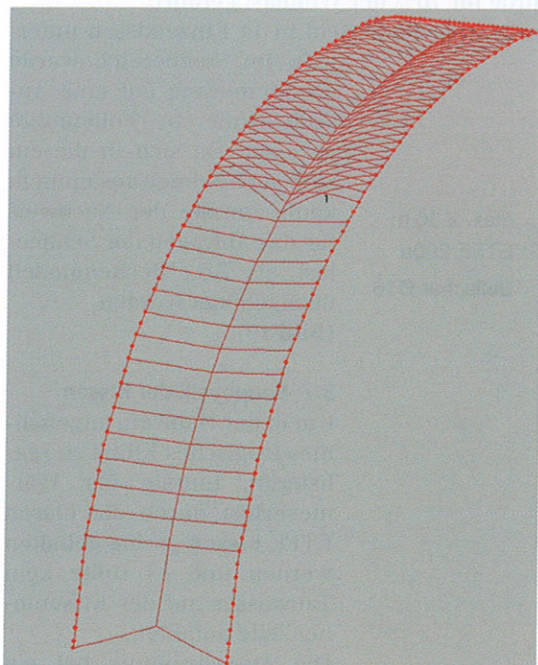
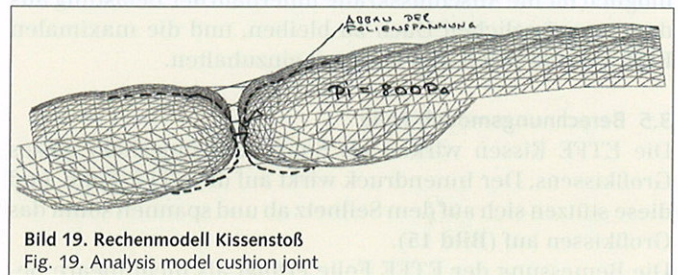
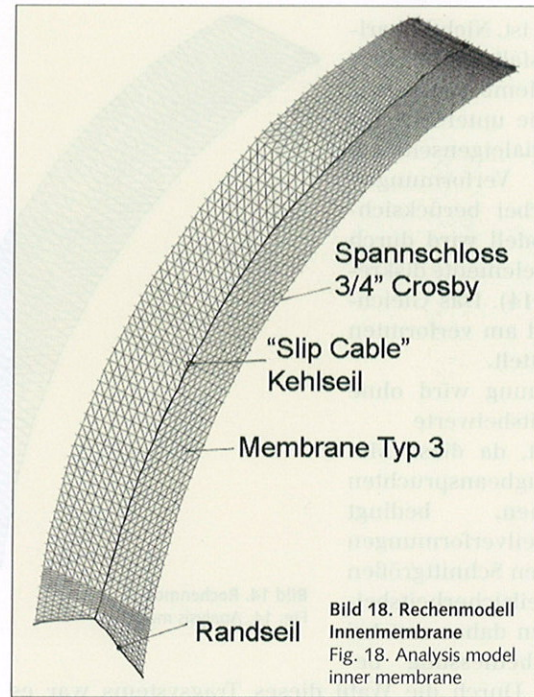
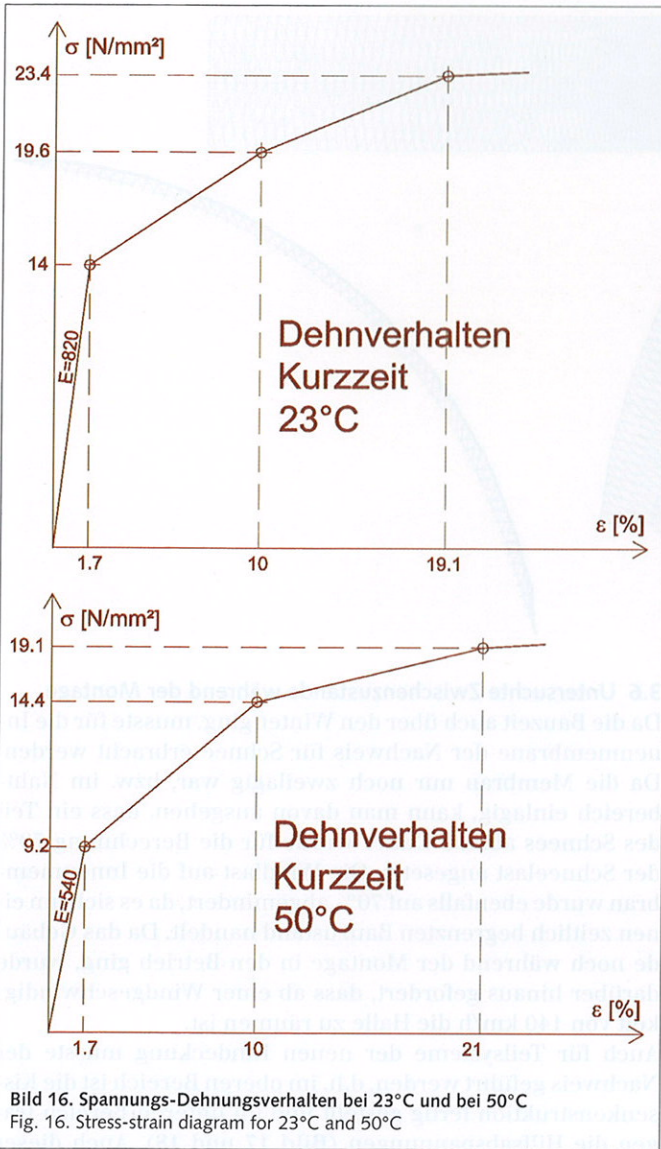
Auch für Teilsysteme der neuen Eindeckung musste der Nachweis geführt werden, d.h. im oberen Bereich ist die Kissenkonstruktion fertig gestellt und im unteren Bereich tragen die Hilfsabspannungen (Bild 17 und 18). Auch dieser Nachweis wurde für 70% der Windlast geführt.

Das Großkissen ist je Binderfeld in 14 Einzelkissen unterteilt. Im Stoßbereich wurde die Membrane auf eine Anschlusslinie in Foliennitte gezogen. Da sich in diesem Stoß auch Schnee ansammeln kann, musste der Nachweis für das Abtragen der Schneelast als 3D-Rechenmodell nachgebildet werden (Bild 19).

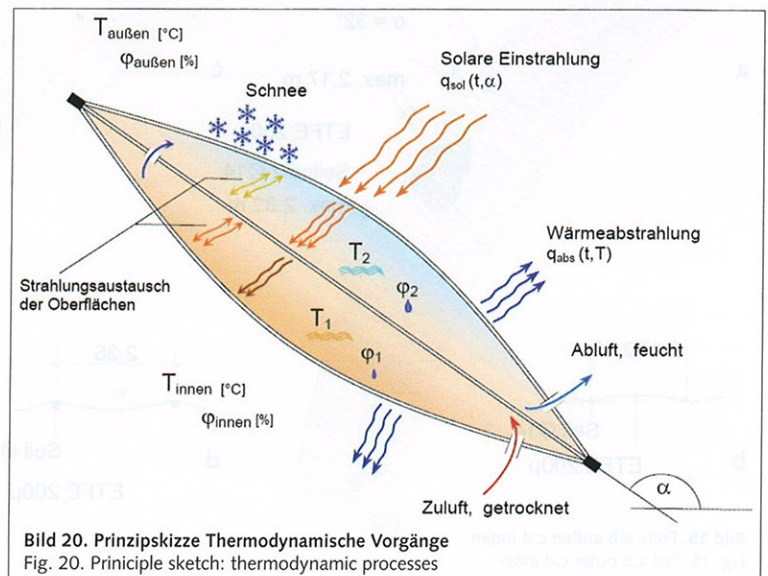
### 3.7 Bauphysik der Kissen

Um in der Halle ein angenehmes tropisches Klima zu realisieren, musste der Wärmeverlust durch die klaren ETFE Kissen gering gehalten werden und es sollte kein Tauwasser auf der Kisseninnenseite anfallen.

Die Ausschreibung hat ein 3-lagiges ETFE Kissen spezifiziert, dessen U-Wert nicht



größer als  $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  sein durfte (Bild 20). Anhand der einschlägigen Normen lässt sich für stehende Luftschichten ein Wärmedurchlasswiderstand von jeweils  $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$  ermitteln - allerdings begrenzt auf Luftschichten  $< 0,5 \text{ m}$  nach DIN 4108, bzw.  $< 0,3 \text{ m}$  nach der neuen EN ISO 6946. Bei größeren Schichtdicken stellt sich innerhalb der Kissen eine Luftströmung ein, so dass eine Simulationsrechnung durchgeführt werden muss. Die Simulationsberechnung der Kissen wurde von Dr. Mahler, Remscheid in Zusammenarbeit mit Dipl.-





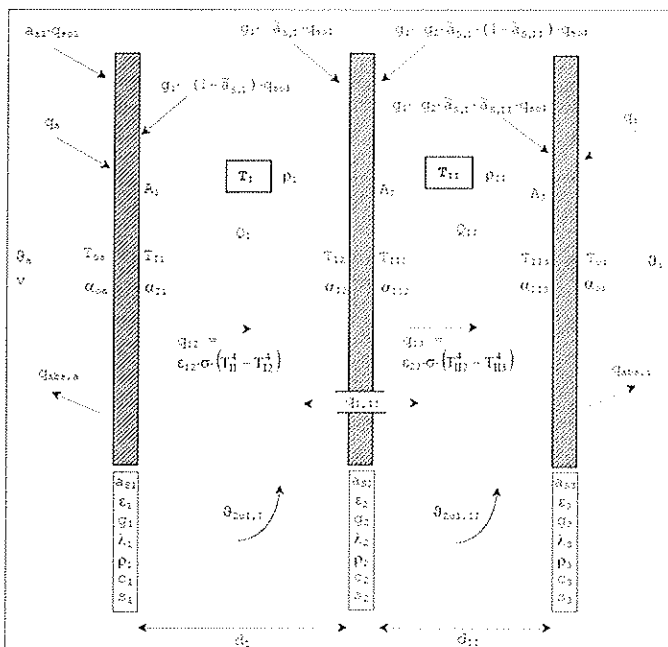


Bild 21. Simulationsmodell Temperatur  
Fig. 21. Simulation model of the temperature

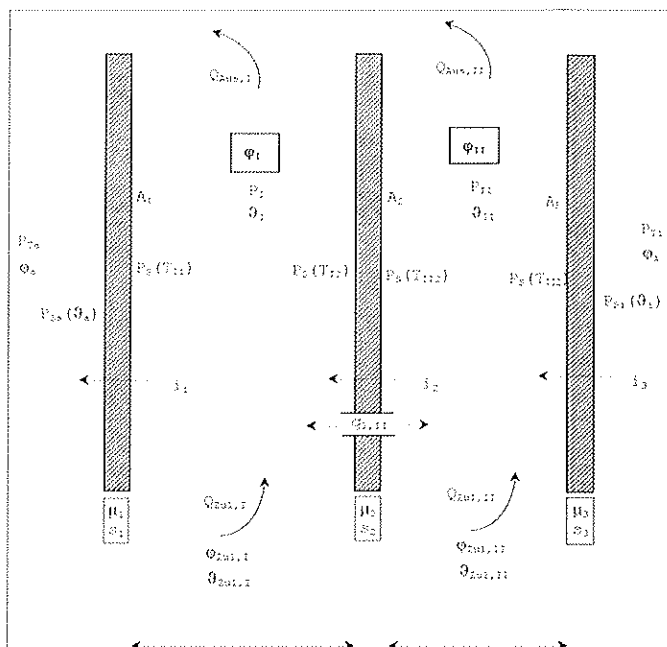


Bild 22. Simulationsmodell Feuchte  
Fig. 22. Simulation model of the humidity

Ing. Buchner, Bochum, durchgeführt, mit dem Ziel den U-Wert, erforderliche Luftwechselrate im Kissen und Tauwasseranfall zu bestimmen (Bild 21 und 22).

Um die Strömung im Kissen möglichst gering zu halten, sollte der Kissenstich entsprechend klein gehalten werden, was andererseits zu erhöhten Lasten in der Kissenverankerung führt. In einem iterativen Prozess gemeinsam mit den Bauphysikern wurde der Stich gerade so groß gewählt, dass die Lastweiterleitung in die Primärkonstruktion problemlos möglich war. Der endgültige Kissenstich lag mit 1,5 m nach außen und 1,8 m nach innen zwar noch deutlich über dem Wunschstich der Bauphysiker, der bei maximal 1 m je Seite lag. Dennoch konnten in der Simulation aber weit bessere Werte als gefordert nachgewiesen werden.

Der U-Wert der Kissen liegt im Maximum unterhalb von 1,4 W/m<sup>2</sup> K (Bild 23). Es entstehen nur bei extremen klimatischen Bedingungen geringe Tauwassermengen auf der Kisseninnenseite, die aber durch die Luftbewegung in der Halle wieder abtransportiert werden können. Weitere Informationen siehe [7].

In Kürze erscheint als Fortsetzung ein Beitrag über Fertigung und Montage.

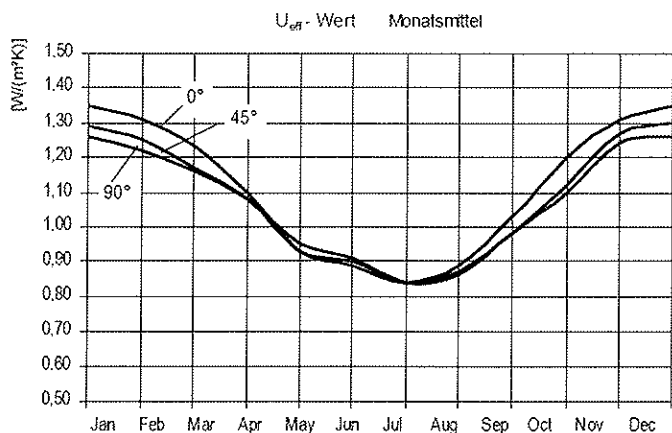


Bild 23. Mittlerer U-Wert  
Fig. 23. Mean U-Value

Literatur

- [1] Pasternak, H. u.a.: Die CargoLifter-Luftschiffhalle in Brand – zwischen Planung und Ausführung. Bauingenieur 75(2000) 209–218
- [2] Kramer, H. u.a.: Die CargoLifter-Luftschiffhalle in Brand – Fertigung und Montage der Stahlkonstruktion. Bauingenieur 76(2001) 211–217
- [3] Lutz R.u.a.: Luftschiffhalle Brand- Entwurf und Berechnung des CargoLifter-Werfthalle. Stahlbau 69(2000), 764–774
- [4] Grothe J.: Südsee Flair im Land Brandenburg: „Tropical Islands“. A.B. Archiv des Bäderbaus, 58. Jahrgang, Juli 2005
- [5] Stimpfle, B.: Luft formt – Pneumatische Konstruktionen. 8. Dresdener Baustatik Seminar: Kreative Ideen im Ingenieurbau
- [6] Schmid, G.: Bauen mit Membranen, Teil 1 bis 4: architektur 03/2004 bis 06/2004
- [7] Post H.: Von der Werfthalle des CargoLifter zum Tropical Island Resort. Bauphysik 26 (2004) 380–384



Bild 22. Fassadenanschluss  
Fig. 22. Closing membrane to glass façade

nächst nur mit reduziertem Druck gefahren wurde. Im nächsten Schritt erfolgte dann die Montage des oberen Seilnetzes (Bild 20). Zur Sicherstellung der gewollten Geometrie sind sodann das obere wie auch das untere Seilnetz auf die richtige Lage hin zu kontrollieren und ggfs. nachzurichten. Hierzu waren – wie oben bereits beschrieben – Markierungspunkte auf die Folie aufgebracht worden. Erst nach Abschluss dieser Arbeiten kann dann – jeweils getrennt im unteren und oberen Luftsystem und jeweils paarweise - der Nenndruck aufgebracht werden. Dies jedoch nicht, bevor die zuvor montierten Kehlhilfsseile, die zur Vormontage der Rinne dienten, demontiert wurden.

Nach Abschluss dieser Arbeiten wurde das obere und untere Dichtsystem erstellt (Bild 4, Bild 21). Wie beschrieben wurden bereits im Werk Aufnahmelaschen aus gesondert entwickelten flexiblen ETFE-Profilen an die Kissen angeschweißt. In diese Profile werden an der Baustelle die Dämmkissen sowie die Kondensrinnen eingehakt. Die Dichtigkeit dieses Systems wurde im Rahmen der Entwicklung dieser Detaillösung im Werk ausreichend überprüft. Die Verwendung einer derartigen Anschlusstechnologie war erforderlich um auch in diesem Bereich einen lösbaren Anschluss zu haben. In den Aufgabenbereich der Abdichtung gehörte auch der Einbau der Kondensrinnen.

Als abschließende Arbeit wird je Feld der untere Traufabschluss, d.h., der Abschluss zwischen der ETFE- Kissenkonstruktion und der darunter liegenden Glasfassade durch ein entsprechend geformtes Membranteil wieder hergestellt (Bild 22). Ursprünglich sah die Planung auch hier vertikale ETFE-Kissen vor. Bedingt durch die Gefahr von Schmutzabla-

gerung in diesem Bereich, wurde die Entscheidung für eine normale Membrane getroffen.

Erst nach Fertigstellung eines jeden Feldes, also dem Einbau der 14 Kissen mit Seilen und Seilnetz, Sicherstellung der Stützluftversorgung, Herstellung der Dichtungsebenen nebst Dämmung und abschließender Kontrolle, erfolgt der Rückbau der bis dato als Montageplattform dienenden Innenmembrane.

Der Rückbau sollte nicht unterschätzt werden. Immerhin gilt es - frei schwebend in Höhen bis zu 100 m - eine ca. 5.000 m<sup>2</sup> große Membranfläche zurückzubauen. Das Gewicht einer Einzelfeldmembrane beträgt einschließlich der Stahlteile und Seile ca. 10.000 kg. Innerhalb dieser Aktion war sicherzustellen, dass unter diesen Bereichen erbrachte Leistungen nicht durch z.B. aus großer Höhe herunterfallende Teile beschädigt werden. Erschwerend kam hinzu, dass zum Zeitpunkt der Demontage Tropical Islands bereits eröffnet

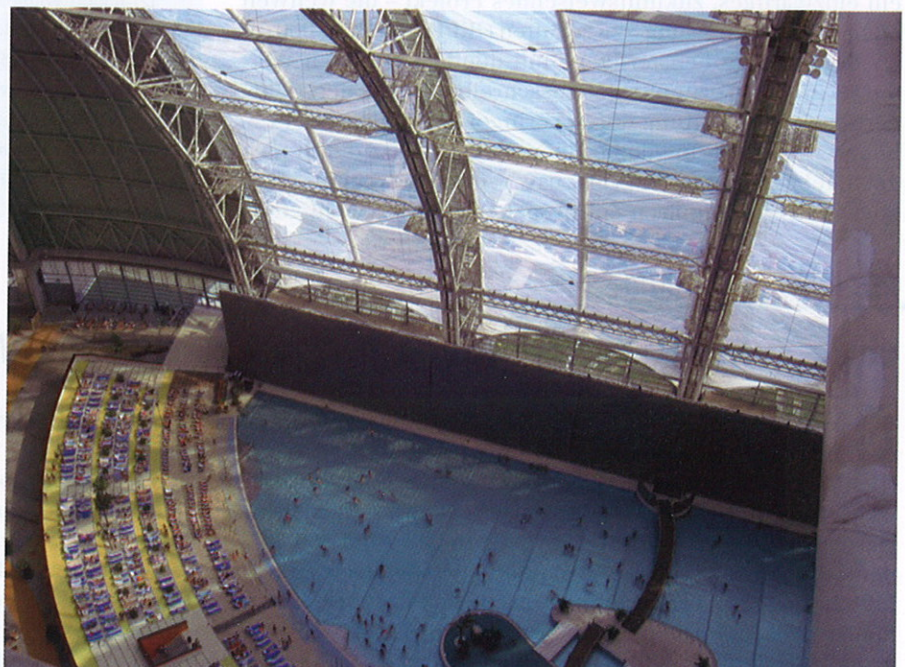


Bild 23. Tropical Islands a- von innen, b – von außen  
Fig. 23. Tropical Islands a- from inside b- from outside

hatte. Obgleich zur Sicherheit bei allen „Innenarbeiten“ der darunter liegende Bereich großzügig abgesperrt wurde, erfolgte der Rückbau der Innenmembrane zum Personenschutz in den Nachtstunden.

## 5 Schluss

Die Umsetzung des beschriebenen Konzeptes stellte höchste Anforderung an Alle an der Planung, Herstellung und der Umsetzung vor Ort Beteiligten. Die Größe und Komplexität des Projektes brachte naturgemäß einige Ablaufstörungen mit sich. Insgesamt ist es jedoch gelungen, durch permanentes Abgleichen des Leistungsolls mit höchsten Qualitätsansprüchen und einer ausgefeilten Sicherheitsphilosophie, ein einzigartiges, zukunftsweisendes Projekt – die weltweit erste Großkissenlösung – zu schaffen (Bild 25). Rd. 20.000 m<sup>2</sup> UV-durchlässige Fensterfläche mit deutlich besseren Werten als in der ursprünglichen Ausschreibung gefordert (10 % geringere Verschattung durch geringeren Profilanteil; 45 % höherem U-Wert; mögliche Energieeinsparung durch ausgeklügelte Lüftungssteuerung usw.) sind das Ergebnis einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit aller Beteiligten.

### Am Bau Beteiligte

Bauherr:	Tropical Islands, Krausnick
Generalplaner:	CI. MAP GmbH, München
Gesamtausführung der ETFE-Folienkissen:	CENO TEC GmbH, Greven mit:
– Tragwerks- und Werkstattplanung:	form TL GmbH, Radolfzell
– Bauphysik:	Dr.-Ing. Mahler, Dipl.-Ing. Bucher, Remscheid
– Prüfung-/Fremdüberwachung:	SKZ, Würzburg
– Montage:	Montageservice S. Lenk, Hallbergmoos
Prüfingenieur:	Prof. Pasternak, Braunschweig

### Literatur

- [1] Blümel S. u. a.: Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands – Entwurf. Bauingenieur 80(2005) 461–469
- [2] Rudolf-Witrin W.: Tropical Islands- Implementation of the New ETFE Film Cushion Roofing, Structural Membranes 2005, Textile Composites and Inflatable Structures II, CIMNE Barcelona
- [3] Stimpfle B.: From the CargoLifter to the Tropical Islands Building Physics, Structural Analysis and Realisation of the New ETFE Roof, Structural Membranes 2005, Textile Composites and Inflatable Structures II, CIMNE Barcelona

## Produkte und Märkte

### Gute Zukunftsperspektiven für den klassischen Mauerwerksbau

Über aktuelle Tendenzen im Mauerwerksbau informierten die Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e. V. (DGfM) und das Institut für Massivbau der TU Darmstadt während des Deutschen Mauerwerkskongresses 2005 in Darmstadt. Praxisnahe Vorträge zeigten den rund 200 Teilnehmern dabei Vorteile und Zukunftsperspektiven auf. Im Mittelpunkt der Veranstaltung, die speziell für Architekten, Planer und Unternehmer konzipiert wurde, standen die grundlegenden Veränderungen, die sich durch die Entwicklung neuer Baustoffe und Bauweisen, aber auch durch veränderte Rahmen- und Marktbedingungen im Mauerwerksbau vollzogen haben.

„Wie kaum ein anderer Bereich im Bau“, so Dr. Ronald Rast, Geschäftsführer der DGfM in Berlin, „hat sich der Mauerwerksbau in den letzten Jahren signifikant weiterentwickelt. Daraus resultieren neue Anforderungen an alle, die mit Planung und Ausführung von Mauerwerk befasst sind.“

Entsprechend bot der Kongress ein umfassendes Spektrum zu theoretischen, praxisbezogenen und politischen Themen. Wichtiger Schwerpunkt war dabei der Einsatz von Mauerwerk bei Neubauten sowie bei Gebäuden im Bestand. So stellte Ministerialdirektor Robert Scholl, Leiter der Zentralabteilung Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin, Perspektiven für das Bauen im Zeichen des demographischen Wandels vor. Dipl.-Ing. Ulrich Zink, Vorstandsvorsitzender des Bundesarbeitskreises Altbauerneuerung, entwickelte am Beispiel eines konkreten Bauvorhabens eine Gebäuediagnose und Entscheidungskriterien für Ersatzneubauten. Kosten- und energieoptimierte Erlebnishäuser präsentierte Professor Georg Sahner von der Fachhochschule Augsburg und nahm dabei Bezug auf die neuerdings besonders in Ballungsgebieten zu beob-

achtenden moderaten Anstiegsraten im mehrgeschossigen Wohnungsbau.

Durch neue nationale und europäische Vorgaben für energieeffizientes Bauen ist künftig mit einer verstärkten Nutzung des klassischen Mauerwerks gegenüber Glas-Stahl-Verbund-Konstruktionen zu rechnen. Diese ökologischen sowie die ökonomischen Potentiale von Mauerwerk waren Thema des Vortrags von Professor Dr. Carl-Alexander Graubner, Institut für Massivbau der TU Darmstadt.

Gleich zwei Beiträge beschäftigten sich mit den Zukunftsperspektiven des Mauerwerksbaus: Professor Dr. Konrad Zilch, der den Lehrstuhl für Massivbau an der TU München inne hat, zeigte moderne Entwicklungen und Trends im Produktbereich auf. Professor Dr. Thomas Jocher, Direktor des Instituts Wohnen und Entwerfen der Universität Stuttgart, stellte Beispiele moderner Mauerwerks-Architektur vor.

Daneben wurden in zwei Workshops die Entwicklungen in der Mauerwerksnormung beziehungsweise die aktuellen Normungstrends im Schallschutz diskutiert. Der Workshop „Ausführung“ befasste sich mit der CE-Kennzeichnung sowie mit der Umsetzung der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Beide Arbeitskreise boten außerdem Hinweise zu juristischen Fragestellungen und rundeten damit das Spektrum ab. Weitere Informationen: [wwdgm.de](http://wwdgm.de) / [www.c-a-graubner.de](http://www.c-a-graubner.de)

Sämtliche Kongress-Ergebnisse sind in einem Tagungsband zusammengefasst, der als Sonderausgabe der Zeitschrift „Mauerwerk“ erschienen ist. Das 100seitige Kompendium kann zum Preis von 22 € bestellt werden bei: Dipl.-Ing. Thomas Kranzler, TU Darmstadt, Institut für Massivbau Petersenstraße 12, 64287 Darmstadt, [kranzler@massivbau.tu-darmstadt.de](mailto:kranzler@massivbau.tu-darmstadt.de)