

Diplomarbeit

Schindelartige Glaseindeckung auf einer räumlich gekrümmten Seilnetzkonstruktion

In Zusammenarbeit mit:

IF

Ingenieurgemeinschaft
Flächentragwerke



Partnerschaft

Essrich + Dürr + Dimort

Dipl. Ingenieure + Architekten

Tel +49(0)7531-9270-80

Fax -81

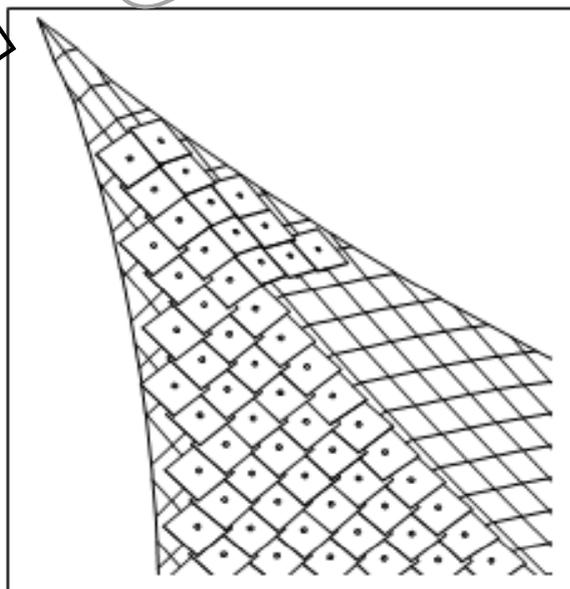
Vorgelegt von:

Benjamin Bohl

Mat. Nr.: 271360

Betreut von:

Prof. Dr. -Ing. W. Francke





Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Aufgabenstellung..... | 4 |
| Eidesstattliche Erklärung..... | 5 |
| Vorwort..... | 6 |
| Hinweise..... | 7 |
| | |
| 1. Stahl – Glas – Seilnetz..... | 8 |
| 1.1 Einführung..... | 8 |
| 1.2 Kleine Sammlung gebauter Stahl – Glas Konstruktionen..... | 10 |
| 1.2.1 Seilnetzkonstruktionen mit Glaseindeckung..... | 10 |
| 1.2.2 Seilnetze mit Kunstglasdeckung..... | 14 |
| 1.2.3 Ebene Seilnetze..... | 16 |
| 1.2.4 Seilhinterspannte Fassaden..... | 18 |
| 1.2.5 Glasgedeckte Gitterschalen..... | 19 |
| 1.3 Materialien..... | 21 |
| 1.3.1 Glas..... | 21 |
| 1.3.1.1 Materialeigenschaften..... | 21 |
| 1.3.1.2 Überkopferverglasung..... | 23 |
| 1.3.1.3 Zwangsspannungen..... | 23 |
| 1.3.1.4 Lagerung..... | 24 |
| 1.3.1.5 Fugen..... | 25 |
| 1.3.2 Kunstglas..... | 26 |
| 1.3.3 Stahlseile..... | 27 |
| 1.4 Seilnetz..... | 29 |
| 1.4.1 Statisches System..... | 29 |
| 1.4.2 Konstruktive Begriffe und Details..... | 31 |
| 1.4.3 Nutzung..... | 32 |
| 1.5 Stand der Software..... | 34 |
| | |
| 2. Bremerhaven..... | 35 |
| 2.1 Kurze Beschreibung des Bauprojektes Zoo am Meer..... | 35 |
| 2.2 Die Mero – Schindel..... | 36 |
| 2.2.1 Wasserablauf und Deckungsart..... | 39 |
| 2.2.2 Geometrie und Verhalten unter Last..... | 42 |
| 2.2.3 Gesichtspunkte des Entwurfs..... | 46 |
| 2.2.3.1 Seilnetz..... | 46 |
| 2.2.3.2 Schindel..... | 51 |
| 2.3 Montage der Schindel..... | 55 |



| | |
|---|----|
| 2.4 Andere Glasschindeln..... | 55 |
| 2.4.1 Dreipunktauflagerung..... | 56 |
| 2.4.2 Schindelhalterung nach dem Patent Sobek..... | 58 |
| 2.5 Kommentar..... | 58 |
| 2.6 Erläuterung zu den Berechnungstabellen..... | 59 |
| 2.6.1 Zu Tabelle 2.1..... | 59 |
| 2.6.2 Zu Tabelle 2.2..... | 62 |
| 2.6.3 Zu Tabelle 2.3..... | 65 |
| 2.6.4 Zu Tabelle 2.4..... | 67 |
| 2.6.5 Zu Tabelle 2.5..... | 69 |
| 2.6.6 Zu Tabelle 2.6..... | 71 |
| 2.6.7 Zu Tabelle 2.7..... | 75 |
| | |
| 3. Anwendung der entwickelten Entwurfsparameter..... | 77 |
| 3.1 Vorgehensweise bei der Formfindung..... | 77 |
| 3.2 Ablaufdiagramm zur Formfindung..... | 80 |
| 3.3 Zu Tabelle 3.2..... | 82 |
| | |
| 4. Die Knotenstory..... | 83 |
| 4.1 Der Knoten im Kopf..... | 83 |
| 4.2 Der Knoten im Raum..... | 83 |
| 4.3 Verschiedene Bildungshypothesen..... | 84 |
| 4.3.1 Geometrische Bildungshypothesen..... | 84 |
| 4.3.2 Mechanische Bildungshypothesen..... | 85 |
| 4.4 Versuchsdurchführung..... | 86 |
| 4.5 Genauigkeiten, Fehler und Fazit..... | 89 |
| 4.6 Findung der Knotenstellung durch Gleichgewichtsbetrachtungen..... | 91 |
| 4.6.1 Allgemeines..... | 91 |
| 4.6.2 Annahmen, Voraussetzungen und Modellierungsprobleme..... | 91 |
| 4.6.3 Erklärungen zu den Rechengängen in Tabelle 4.1..... | 92 |
| | |
| Literaturverzeichnis..... | 98 |
| Abbildungsnachweis..... | 99 |



Vorwort

Das Thema dieser Arbeit, Entwurfsparameter für ein glasgedecktes Seilnetz zu finden, war für mich der Einstieg in eine Sparte des Bauwesens, die mir völlig unbekannt war.

Doch auch für die Ingenieurgesellschaft Flächentragwerke IF, von der ich das Diplomarbeitsthema bekam, war diese Bauaufgabe relatives Neuland. Im Jahr 1996 war das Büro mit der Montageplanung eines Seilnetzes beauftragt, das mit Glasschindeln belegt werden sollte: Die Eingangsüberdachung am Rhön-Klinikums in Bad Neustadt.

1999 stand ein neues verglastes Seilnetz bei IF an: Eine Überdachung für den Zoo am Meer in Bremerhaven, diesmal mit IF als Tragwerkplaner und Werkplaner und der Firma Mero als Ausführer der Seilnetz- und Verglasungsarbeiten. Von Mero war bereits eine Glasschindel entwickelt worden, die zum Einsatz kommen sollte. Ich kam als Diplomand hinzu als der Zoo am Meer schon nicht mehr aktuell war: Das Projekt war gestorben und vegetierte als noch immer weitgehend ungelöste Problemstellung in der Ablage.

Ich hoffe, mit dieser Arbeit ein wenig Licht ins Dunkel gebracht zu haben und würde mich natürlich freuen, wenn das Projekt in Bremerhaven wieder zum Leben erweckt würde.

Danken für die gute Zusammenarbeit möchte ich den IFlern allen voran Horst Dürr, Reiner Essrich und Ralf Dinort aber auch all den anderen Mitarbeitern, die mir für meine Fragen viel Zeit geopfert haben. Ebenfalls danken möchte ich meinem Betreuer Prof. Dr. Francke und meinem Vater für so manchen mathematischen Rat.

Konstanz, 12. Oktober 2003

Benjamin Bohl

1. Stahl – Glas – Seilnetz

1.1 Einführung

Eine Arbeit zum Thema Glas und Stahl kommt nicht umhin, den Glaspalast zu erwähnen. Gebaut für die Weltausstellung 1851 im Hyde Park in London, war er Höhepunkt einer Entwicklung, die zum ersten Mal Glas und Stahl in einer vorher nicht gekannten Kunstfertigkeit kombinierte (s. Bild 1.1).



Bild 1.1 Kristallpalast

Bereits in der ersten Hälfte des 19. Jh. wurden in England große und kunstvolle Gewächshäuser gebaut. Besonders bei den Kuppelbauten wurden regelrechte Schalen-tragwerke als Pfosten-Riegelkonstruktionen errichtet. Interessanterweise verzichtete man bei den Schalen auf eine Aussteifung durch Stahlverbände o. Ä. So kam dem Glas bei diesen frühen Konstruktionen bereits eine statische Tragwirkung als Aussteifungselement zu.



Bild 1.2 Zeltkonstruktion für einen Ausstellungspavillon 1896

Ende des 19. Jh. wurde der Leichtbaugedanke erstmalig vom russischen Ingenieur Vladimir G. Suchov gedacht. Er baute die ersten Membrankonstruktionen mit eisernen Zuelementen, zunächst Flacheisen, später

auch aus Stahlseilen. An die Kuppelbauten der Zirkuszelte angelehnt, entstanden Werkhallen mit doppelt-sinnig gekrümmten, hängenden Dächern. Des weiteren entwarf und reali-



sierte er sehr filigrane andere Ingenieurbauwerke wie Schalendächer, Gittermasten, Behälter, Brücken usw. (s. Bild 1.2). Einige der Dächer waren auch verglast oder hatten zumindest verglaste Teilflächen.

Der Leichtbaugedanke wurde in den fünfziger Jahren von dem deutschen Architekten Frei Otto, der 1953 über das „Hängende Dach“ promovierte und das gleichnamige Buch veröffentlichte, aufgegriffen. Frei Otto lieferte den Entwurf für den Deutschen Pavillon auf der Weltausstellung 1967 in Montreal und baute 1973 mit Günter Behnisch das berühmte Dach des Olympiastadions in München. Das Olympiadach ist bis heute eine Reverenz für alle Seilnetzkonstruktionen.

An beiden Bauten als Ausführender beteiligt war L. Stromeyer. Das Seilnetz und die Dachhaut des deutschen Pavillon von Montreal wurde von der Zeltfabrik L. Stromeyer & Co. GmbH Konstanz ausgeführt, für das Olympiadach von München baute er die Überdachung der Schwimmhalle. Eine Spur der Leichtbautechnologie führte also schon immer an den Bodensee.

if-group

1.2 Kleine Sammlung gebauter Stahl – Glas Konstruktionen

1.2.1 Seilnetzkonstruktionen mit Glasdeckung

Dach des Pavillon im Garten des diplomatischen Club in Riyadh, Saudi Arabien

Architekten und Ingenieure: Otto, Happold, Omramia

Baujahr: 1986

Beschreibung:

Der Pavillon zeigt die klassische Zeltform mit einem Hochpunkt in der Mitte und sternförmigen Abspannungen zu den Rändern. Die Konstruktion ist in Grundriss und Querschnitt symmetrisch. Vom Hochpunkt, der durch einen Gittermast gebildet wird, laufen 10 Gratseile zu den Randstützen. Diese stehen schräg nach außen geneigt und sind zweifach abgespannt. Die Traufe des Seilnetzes ist durch ein Randseil, das von Stütze zu Stütze läuft, eingefasst. Zwischen den Gratseilen ist ein Netz mit quadratischen Maschen aufgespannt.

Die Glaseindeckung ist das eigentliche Kunstwerk. Dabei handelt es sich um 8 mm starke



Bild 1.3 Pavillon diplomatischer Club Riyadh

Floatglasscheiben, die von der Tochter des Architekten Frei Otto mit keramischen Schmelzfarben bemalt wurden. Bei dem Emaillierungsprozess wurden gleichzeitig die Glasscheiben vorgespannt. Die Emaille-glas-elemente sind an jedem Rand zweimal punktförmig eingeklemmt (s. Abb. 1.1).

Ganz dem Wüstenstandort angepasst ist das Zelt nicht für Regenwetter konzipiert. Die Dachdeckung dient nur der Zierde und dem Sonnenschutz, sie ist aber nicht wasserdicht.

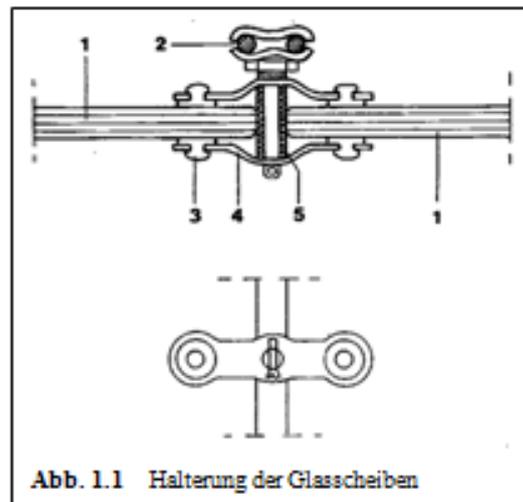


Abb. 1.1 Halterung der Glasscheiben

Die Glaselemente sind weder ausgefugt noch überlappen sie sich. Aufgrund der geometrisch recht einfache Form der Konstruktion ist die Verwendung von ebenen Scheiben kein Problem. Fraglich ist, ob die Art der Lagerung und die verwendete Glaseindeckung in Deutschland genehmigt werden würde.

Überdachung des Eingangsbereichs am Rhön-Klinikum in Bad Neustadt

Architekten: Laum, Weber, Donath und Partner, Stuttgart

Ingenieure: Sobek und Rieger, Stuttgart

Baujahr: 1997

Beschreibung:

Die Seilnetzkonstruktion überspannt satteldachartig den Eingangsbereich des Klinikums. Die Hochpunkte werden von Stützen gebildet, die aus Brettschichtholz gefertigt sind und eine zigarrenförmige Form haben. Firstseile spannen von Hochpunkt zu Hochpunkt. Die Ränder sind mit



Bild 1.4 Seilnetz mit Schindeldeckung Rhön-Klinikum Bad Neustadt

Randseilen eingefasst, die von Randstütze zu Randstütze laufen.

Die Glaseindeckung besteht aus Verbundsicherheitsglas und ist schuppenförmig angeordnet. Die Glasschindeln überlappen sich ca. 5 - 10 cm. Gehalten werden sie in Bügeln, die in den Netzknoten verankert sind. Dabei werden jeweils zwei sich diagonal gegenüberliegende Netzknoten pro Schindel genommen. Im oberen Knoten ist der Bügel fixiert, im unteren kann er gleiten und auf diese Weise eine Verrautung der Netzmasche mitmachen. Diese Art der Halterung ist ein Patent von Prof. Dr. Werner Sobek.



Bild 1.5 Seilnetz mit Schindeldeckung Rhön-Klinikum Bad-Naustadt

Grate, Firste, Traufen und die Hochpunkte des Zeltes wurden mit Polycarbonat-Elementen eingedeckt.

Das Seilnetz mit seiner Eindeckung wirkt sehr transparent, wenn der Betrachter senkrecht auf die Dachfläche schaut. Bei schrägem Blickwinkel leidet die Transparenz an den Bügeln, die auf und unter den Glasschindeln laufen. Trotzdem besticht die Einfachheit der Halterung. Sie erlaubt es trotz unterschiedlicher Maschenwinkel immer die selbe

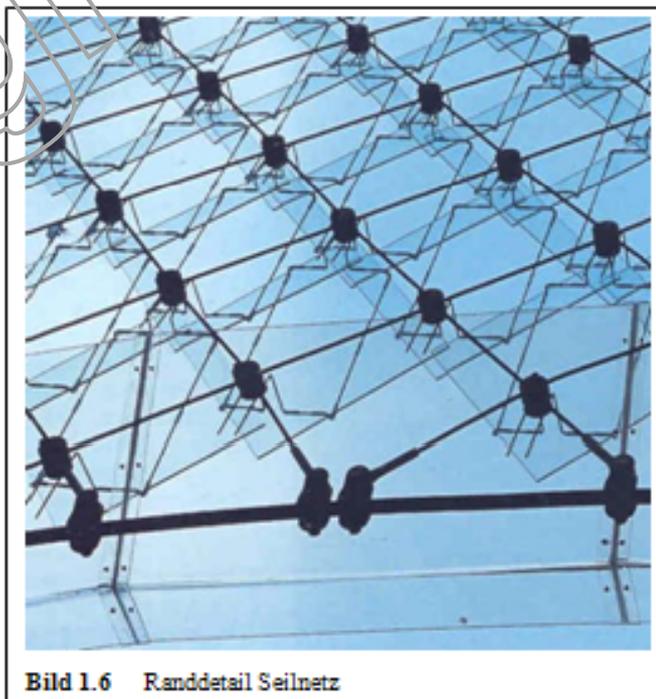


Bild 1.6 Randdetail Seilnetz

Glasschindelgeometrie zu verwenden. Wie in Bild 1.6 zu sehen ist, liegt die Scheibe oben und unten auf den Halterungsbügeln auf, während diese im Mittelteil über der Scheibe verlaufen und sie so in ihrer Lage fixieren. In flacheren Dachbereichen kann durch die Halterungsbügel Wasser von der Scheibenfläche in den Innenraum geleitet werden, was dazu führt, dass die Wasserdichtigkeit der Konstruktion nicht in allen Bereichen und bei jedem Wetter gewährleistet ist.

Dachfassade an der Bilkent Universität in Ankara, Türkei:

Architekt: Erkut Sahinbas, Ankara

Baujahr: 1999

Beschreibung:

Glasschindelgedecktes Seilnetz nach dem System Sobek, aber Wasserablauf nicht diagonal sondern längs des Glasrandes der Schindeln. Da das Dach unter einer Membran gespannt ist, durch seine Steilheit eher eine Art Fassade darstellt und zudem in Ankara steht, hat dieses Objekt sicher nicht mit großen Wasserdichtigkeitsproblemen zu kämpfen.

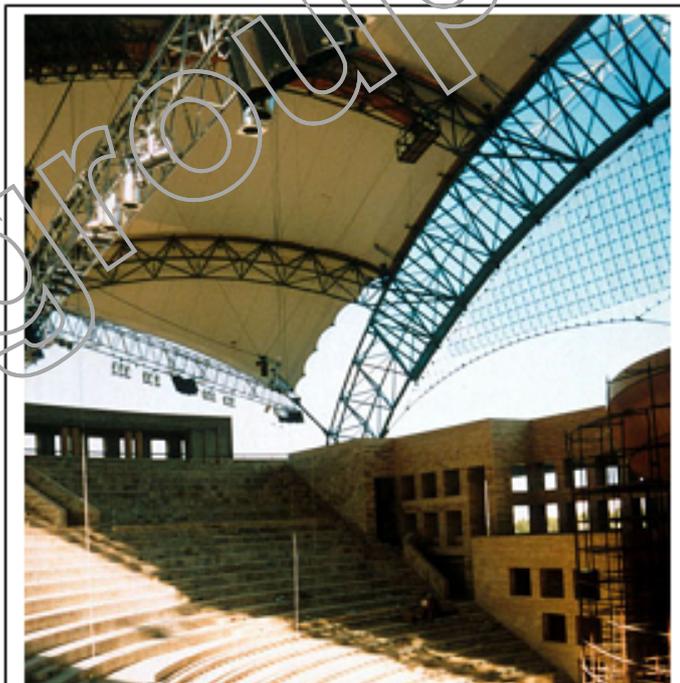


Bild 1.7 Seilnetzfassade Bilkent Universität

1.2.2 Seilnetze mit Kunstglasdeckung

Dach des Olympiastadions in München

Architekt: Behnisch & Partner, Frei Otto

Ingenieur: Leonhardt und Andrä

Baujahr: 1973

Beschreibung:

Das Olympiadach von München ist so komplex, dass eine Beschreibung in diesem Rahmen alle Grenzen sprengen würde. Beschränken will ich mich daher auf die Dachhaut aus Kunstglas und die Details, die mit der Befestigung der Polykarbonplatten auf dem Seilnetz zusammenhängen.

Die Kunstglasplatten sind statisch unbestimmt mehrfach punktförmig gelagert. Durch die Biegeweichheit der Polykarbonplatten, die breite Fugenausführung und die elastische Lagerung auf Gummipunkthaltern, ist die Dachhaut sehr gut an die Anforderungen auf einem räumlich gekrümmten Seilnetz angepasst (s. Abb. 1.2).

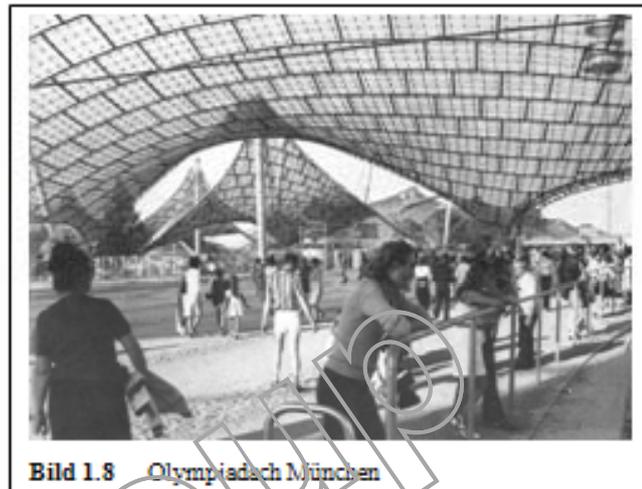


Bild 1.8 Olympiadach München

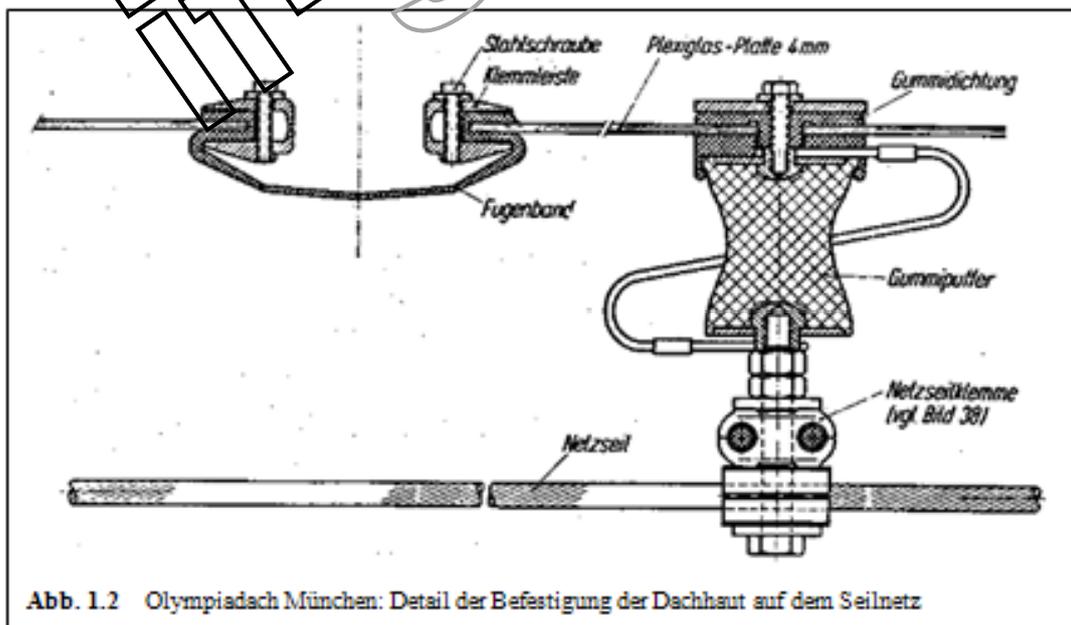


Abb. 1.2 Olympiadach München: Detail der Befestigung der Dachhaut auf dem Seilnetz

Konzertsegel in Radolfzell

Ingenieur: IPL Radolfzell

Baujahr: 1982

Beschreibung:

Das Konzertsegel überdacht eine kleine Freilichtbühne am Bodenseeufer. Das Segel wird von einem zentralen Hochpunkt gebildet, der als überhängender Gittermast ausgeführt ist und von dem in einem Halbkreisbogen die Netzflächen abgespannt sind. Es bilden sich Teilflächen, die von Graten und Randseilen begrenzt sind. Die Ränder an Traufe und Ortgang sind mit Randseilen ausgeführt. Nach vorne in den Zuschauerbereich wird keine Abspannung geführt.

Eingedeckt ist das Seilnetz mit einer Schindeldeckung aus Polycarbonat, die schuppig verlegt und an zwei Ecken an den Netzknoten befestigt ist. Die Polycarbonatplatten sind im Laufe der Zeit versprödet und bieten keine klare Durchsicht mehr.



Bild 1.9 Konzertsegel Radolfzell



Bild 1.10 Konzertsegel Radolfzell: Der Unterschied zwischen den alten, blinden Schindeln und der frisch Ausgewechselten ist gut zu erkennen

1.2.3 Ebene Seilnetze

Fassade des Hotel Kempinski in München

Architekt: Murphy, Jahn
Ingenieur: Schlaich Bergemann und Partner
Baujahr: 1993

Beschreibung:

Bei der Fassade des Eingangsbereichs des Hotels handelt es sich um ein ebenes Seilnetz, das in vertikaler Richtung das Glasgewicht und in horizontaler Richtung die Lasten aus Winddruck und Windsog abträgt. Erreicht wird diese Tragwirkung durch unterschiedliche Vorspanngrade der Seilscharen.

Im Gegensatz zu den Glasvorhängen, bei denen die oberen Scheiben die darunter liegenden Scheiben tragen, dienen die Glasscheiben hier nur als Fassadenelement und nicht als Tragglied. Durch die Konstruktion des Tragwerks als ebene Seilschar sind die zu erwartenden Verformungen bei seitlichem Lastangriff groß und die Seile aufgrund der benötigten hohen Vorspannung relativ dick.



Bild 1.11 Glasfassade Hotel Kempinski



Bild 1.12 Hotel Kempinski:
Netzknotten

Atriumüberdachung eines Bürohauses in Gniebel

Architekt: Kauffmann, Theilig
Ingenieur: Pfefferkorn und Partner
Baujahr: 1995

Beschreibung:

Das Glasdach wird von einem ebenen stark vorgespannten Seilnetz getragen. Die Seile laufen unter den relativ breiten Fugen zwischen den Glasscheiben und sind von unten kaum zu sehen. Die Seile des Tragwerks enden in einem umlaufenden Druckgurt von ovaler Form. Das statische System ist an das Prinzip des Tennisschlägers angelehnt, wobei der ovale Druckring den Rahmen bildet.

Die vertikale Kraft aus Eigengewicht und Schneelasten werden durch Verformung der Seile aufgenommen. Die an vier Punkten gehaltenen Scheiben erfahren dabei eine Zwangsverformung, die aber offensichtlich in unge-

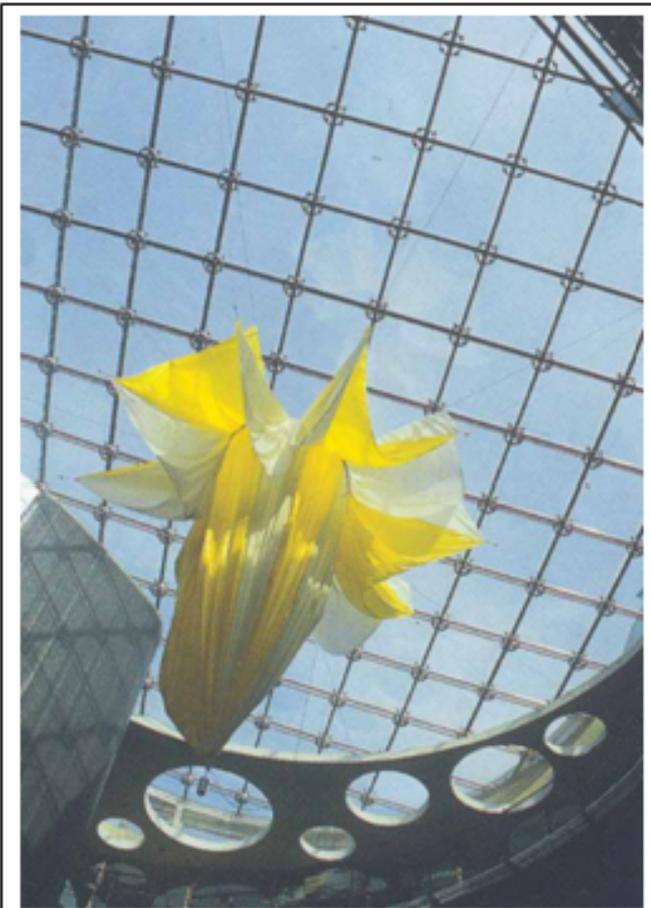


Bild 1.13 Glasdach Bürohaus

fährlichen Bereichen bleibt, aber sicherlich bei der statischen Berechnung berücksichtigt wurde.

1.2.4 Seilhinterspannte Fassaden:

Gewächshäuser am Museum für Wissenschaft und Technik im Parc de la Villette in Paris

Architekt: A. Fainsilber
Ingenieur: P. Rice, Francis, Ritchie
Baujahr: 1986

Beschreibung:

Die Glasscheiben hängen von oben herab aneinander wie ein Vorhang aus Glas. Gegen Winddruck und Windsog sind sie mit horizontal hinter den Fugen verlaufenden Seilbindern gehalten. Die Seilbinder sind fischbauchartig ausgebildet. Das Glas trägt sich selbst, die Seilhinterspannung dient lediglich als Stabilisierung gegen Windlasten. Wegen dieses Tragkonzeptes und den hier erstmalig angewandten gelenkigen, punktförmigen Glasaltern gilt dieser Bau als bahnbrechend in der Glasfasadentechnik.



Bild 1.14 Gewächshäuser Parc de la Villette

1.2.5 Glasgedeckte Gitterschalen:

Palmenhaus in den Bicton Gardens in Devon, England

Baumeister: John Claudius Loudon

Baujahr: um 1840

Beschreibung:

Das Gewächshaus in den Bicton Gardens ist eines der ältesten seiner Art und deshalb von so großem Interesse. Das Bauwerk hat eine zentrale Halle und zwei Nebenschiffe, die überkuppelt sind. Es lehnt sich an der Nordseite an eine Mauer an, die der Dachlinie folgt. Sowohl die Wände als auch die Kuppeln besitzen bemerkenswerterweise kaum Querriegel und keine diagonalen Aussteifungselemente. Die sternförmig von den Firsten herabstrebenden Rippen teilen sich zweimal, um den Rippenabstand klein zu halten. Die Scheiben sind kleinformatig und überlappend eingesetzt.



Bild 1.15 Palmhouse Bicton Gardens