Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 101 (1983)
Heft: 25

Artikel: Netzschalen aus Holz für grosse Spannweiten
Autor: Rossman, Wendell E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75164

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

und führte statt dessen zum rascheren *Ersatz des Holzes* durch vollständig eiserne Konstruktionen.

Die entscheidende Bedeutung einer *optimalen Kraftführung in den Knotenpunkten* unter weitgehender Umgehung von Querbeanspruchungen des Holzes ist dem Holzbau – mit Ausnahme der amerikanischen *Howeschen* Bauweise – lange entgangen. In Europa wurde dies erst viel später wiedererkannt. 1941 formulierte *Trysna* [8] die Kriterien für eine optimale Verbindung folgendermassen:

«Es müssen Bauweisen gefunden und angewandt werden, bei denen das spätere Schwinden des Holzes quer zur Faser *keine* Formänderung erzeugen kann, d.h. die Einzelteile der Tragwerke dürfen an keiner Stelle Kraftdurchleitungen quer zur Faser erhalten. Die Hölzer dieser Tragwerke werden also ausschliesslich axial beansprucht, und die Verbindungen sind so zu wählen, dass auch in den Anschlussstellen *keine* Beanspruchungen quer zur Holzfaser auftreten können. Durch diese Massnahmen wird zugleich erreicht, dass auch die starken elastischen Formänderungen quer zur Faser gegenstandslos werden, weil keinerlei Kräfte in dieser Richtung mehr wirken.»

Diese Kriterien werden z.B. heute durch die Stahl-Holz-Verbindungen in eingeschlitzten Hölzern optimal erfüllt [9,10].

Teil II (20. Jahrhundert und künftige Möglichkeiten): folgt

Ergänzte schriftliche Fassung des am 28. Januar 1983 an der ETH Zürich gehaltenen Vortrages im Rahmen der Tagung «Holzbau gestern und heute» anlässlich des 200. Todestages von Hans Ulrich Grubenmann.

Adresse des Verfassers: *E. Gehri*, dipl. Ing. ETH, Lehrstuhl für Baustatik und Stahlbau, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich.

Netzschalen aus Holz für grosse Spannweiten

Von Wendell E. Rossman, Phoenix

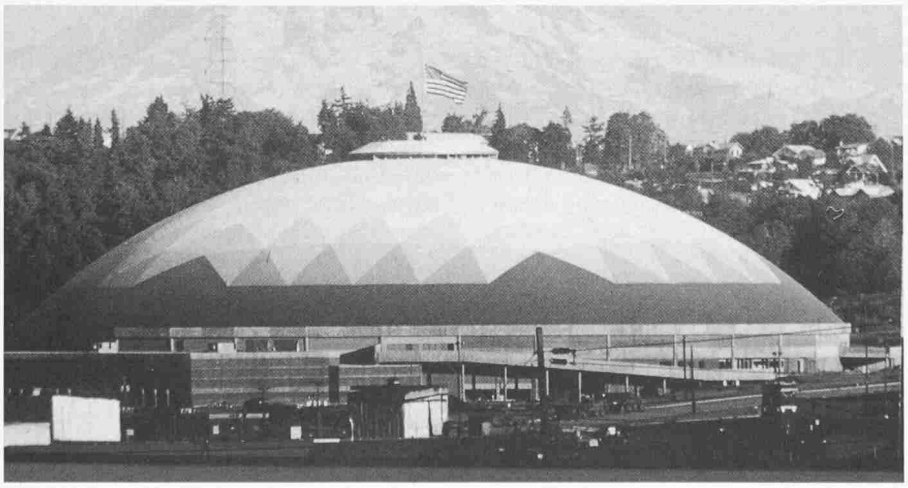
Anlässlich des Kolloquiums für Baustatik und Konstruktion wurde an der ETH Zürich das «Ensphere Concept» vorgestellt. Mit kugelförmigen Holznetzschalen sind in den USA bereits Spannweiten von rund 150 m überdacht worden. Die Konstruktion ist kostengünstig und wirkt auch architektonisch befriedigend.

Einleitung

Jene gesellschaftlichen Veranstaltungen, wozu die Tragwerke mit grossen Spannweiten geradezu prädestiniert erscheinen, betreffen den *Sport*. Schon seit der Antike existierte der Wunsch, vom Wetter unabhängig zu werden, damit Sportereignisse nicht nur öfter, sondern auch mit grösserem Komfort abgehalten werden könnten. Historiker erzählen uns, dass schon die Römer versuchten, das Kolosseum zu überdachen. Sollte ihnen das tatsächlich gelungen sein, dann dürfte es etwa in Form von primitiven Baldachinen gewesen sein, nach heutiger Terminologie also einem Vorläufer des Kabelhänge- bzw. Seilnetzsystems.

Fast 2000 Jahre vergingen jedoch, bis die Technik soweit war, dass der Wunschtraum der Überdachung wirklich erfüllt werden konnte. Hauptverdienste daran haben Ingenieure wie *Nervi* (Italien), die Architekten des Astrodoms in Houston und des Superdoms in New Orleans, sowie *Christiansen* und *Esquillan* mit ihren monumentalen, grossen Freispann-Werken. Es waren diese Bauten, die ganz neue Möglichkeiten eröffneten und in eine neue Richtung wiesen. Da jedoch die *Baukosten recht hoch* lagen, wurde die Verbilligung zur vordringlichen Aufgabe. Als Konsequenz wurde nahezu das gesamte Spektrum der brauchbaren Materialien und Systeme zum Grossexperimentieren herangezogen. Dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprechend sind drei Kombinationen von Material und System vorherrschend. Die ersten zwei sind *Netzschalen*, die aus Holz oder Aluminium gebaut sind. Sie schaffen für den Besucher eine von der Aussenwelt völlig unabhängige innere Umwelt, das dritte, das sog. *Tragluft-System* jedoch nur teilweise. Im folgenden werden Netzschalen erläutert, die aus Holz gebaut sind.

Bild 1. Holznetzschale in Tacoma, Seattle. Überdachung eines Sportstadions



Holzschalen mit Brettschichtträgern

Technisch gesehen wurden die ersten Holzschalen mit Leimbindern im *Radialbogensystem* angeordnet. Eines der schönsten Beispiele ist das *Field House* in Bozeman, Montana. Ein wesentlicher Durchbruch gelang den Ingenieuren von *Timber Structures, Inc.* – einer Firma, die heute nicht mehr existiert – mit der Anwendung von Netzgeometrien, wie sie die Metallbauindustrie kannte. Innerhalb der nachfolgenden 15 Jahre wurden in den USA über 40 Holznetzschalen mit Durchmessern von 70 bis über 100 Meter gebaut. Diese Schalen wurden als *Triaxsystem* bekannt.

Als im Jahr 1973 die jüngste grosse Betonschale, der Kingdome in Seattle, fertiggestellt wurde, überschritt er leider wie seine zwei Vorläufer (Astro- und Superdome) alle Budgets, so dass den Städten, die sich mit der Planung solcher Bauten beschäftigten, die Lust verging.

Gegenwärtige Systeme

Die wirtschaftlichen Schalen mit grossen Spannweiten entstanden dann bei Sportplätzen von Universitäten. Fast gleichzeitig wurden drei solche Bauwerke, nämlich in Idaho, Dakota und in Arizona, konzipiert sowie auch gebaut. Erstaunlicherweise unterschieden sich die drei Bauten stark bezüglich Material als auch System. Der Bau in Idaho war ein Tonnengewölbe, jener in Dakota war lufttragend, und unser Bau in Flagstaff (Arizona) war eine Holznetzschale. Die Arizona-Schale war die grösste der drei, lag aber gleichzeitig am niedrigsten im Preis. Das kam daher, dass die Holznetzschale in Kombination mit dem Ensphere-Concept angewendet wurde.

Beim *Ensphere-Concept* wurde die Methode der traditionellen Sporthalle radikal aufgegeben: Hier wird das gesamte Innere *von Boden zu Boden* überspannt, wodurch teure Tragsysteme und Aussenwände wegfallen. Die Kostenreduktion liegt bei etwa 36% gegenüber der bekannten architektonischen Form. Das Ensphere-Concept verlangte jedoch grössere Schalen, in unserem Fall mit einem Durchmesser von über 150 m. Dabei durfte diese Überdachung aber nicht mehr als 25% des gesamten Baues kosten.

Eine gründliche *Untersuchung* aller damals existierenden Systeme ergab schliesslich die Holznetzschale, aus Brettschichtträgern gebaut, als das System, das nicht nur wirtschaftlich am günstigsten war, sondern nahezu alle anderen wünschenswerten Eigenschaften hatte. Das Problem, das aber verblieb, war ganz einfach die Grössenordnung: Die bis dato erbaute grösste Holznetzschale war nur halb so gross. Wir mussten also die uns bekannte Welt der Architektur hinter uns lassen.

Um das Risiko im *statischen Neuland* möglichst auf Null zu reduzieren, führten wir drei voneinander unabhängige statische Berechnungen durch. Alle drei bewiesen theoretisch, dass eine Holznetzschale dieser Grössenordnung nicht nur möglich, sondern auch sehr wirtschaftlich wäre. Nach diesen Ergebnissen fassten wir den Mut, die damals grösste Holznetzschale in Flagstaff (Arizona) zu bauen.

Die Schale erhielt die technische Bezeichnung *«Ensphere»*, eine Ableitung des Wortes «to ensphere», zu deutsch etwa «kugelartig einschalen». Die Ensphere, kurz Skydome genannt, trägt in Flagstaff heute auch den Namen ihres Universitätspräsidenten, Dr. *J. Lawrence Walkup Skydome.*

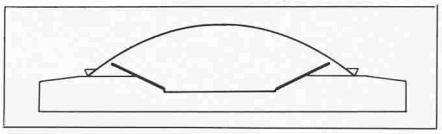


Bild 2. Überdachung nach dem «Ensphere Concept»: Der Zugring der kugelförmigen Schale dient direkt als Fundation. Ein Verzicht auf Seitenwände bedingt aber grössere Platzverhältnisse.

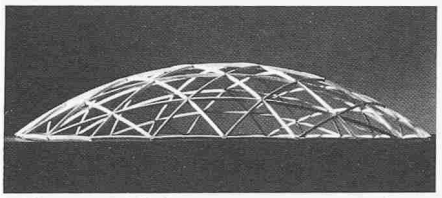


Bild 3a. Modell des Tragsystems einer Holznetzschale (Ansicht)

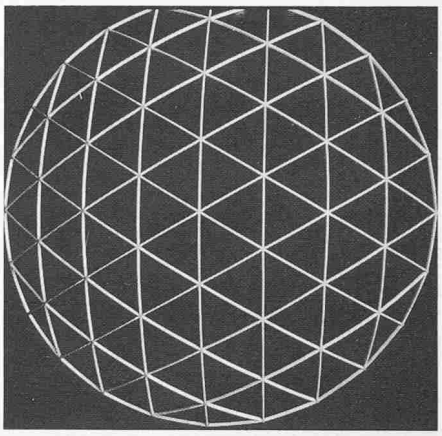


Bild 3b. Modell des Tragsystems einer Holznetzschale (Draufsicht)

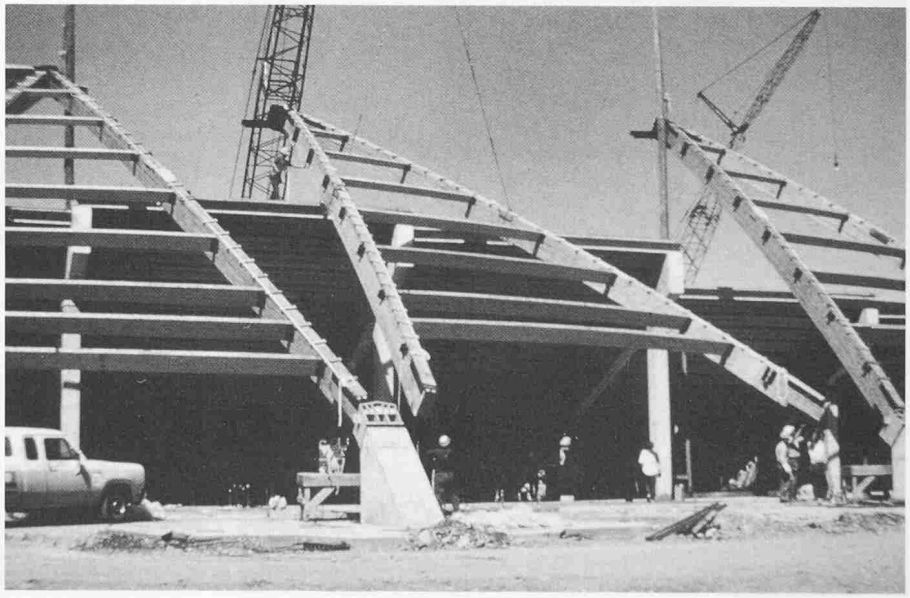
Erfahrungen mit Holznetzschalen

Ein Netzwerk ist erstaunlich duldsam, sowohl bezüglich Muster, Maschengrösse und Kontinuität der Kraftlinien. Es gibt eine Reihe von *Bedingungen* wie Elementlänge, Anzahl Knoten usw., die eine Konstruktion beeinflussen, und das Resultat kann von einem Stück gedankenloser Arbeit bis zum technischen Kunstwerk reichen. Obwohl *verschiedene Berechnungsmethoden* vorhanden sind, scheint es bis heute nicht möglich zu sein, die Theorie mit der Praxis in Übereinstimmung zu bringen. Wahrscheinlich ist das qualitative Verhalten der Netzschale noch nicht voll verstanden.

Nachdem der *Skydome* in Flagstaff fertig war, entschlossen wir uns, alle nur möglichen auftretenden Durchbiegungen und Deformationen zu *messen*. Das geschah dann über eine Zeitspanne von 4 Monaten mit 6 täglichen Messungen der räumlichen Postition des Kugelzenits, d.h. in der x-y-z-Achse. So konnten die kritische Durchbiegung und Deformation festgestellt werden. Während dieser Zeitperiode varrierte die *Schneelast* von 0 bis 80 cm, symmetrisch und asymmetrisch. Ausserdem war die Schale *Windgeschwindigkeiten* bis 100 km/h ausgesetzt. Die errechnete Durchbiegung am Zenit betrug 75 mm unter grösster Last, während die tatsächlich gemessene zwischen 2–5 mm lag. Anderseits zeigt die Schale ein *thermisches Atmen* mit einem 24-Stunden-Zyklus in der Grössenordnung von 12 mm. Vergleichsweise hat die Schale eine Höhe von rund 30 m.

Künftig sind Holznetzschalen von über 250 m Durchmesser realisierbar. Der Schlüssel dazu liegt im Knoten. Mit einer *festen Verbindung* kann die Systemsteifigkeit verbessert werden. Ansteigende Durchmesser vergrössern den Kugelradius, die Raumfachwerke werden flacher und die einzelnen Stäbe schlanker. Dabei entstehen erhebliche Schubspannungen, die aber mit Holz relativ leicht aufzunehmen sind.

Bild 4. Montage der vorfabrizierten Holzsegmente zur untersten Lage



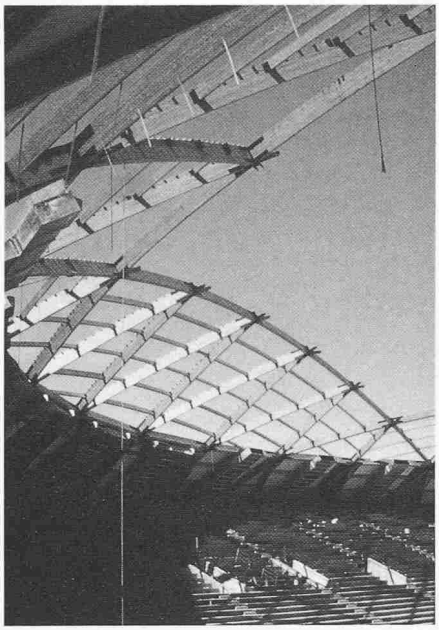


Bild 5. Montage der weiteren Segmente (Freivorbau)

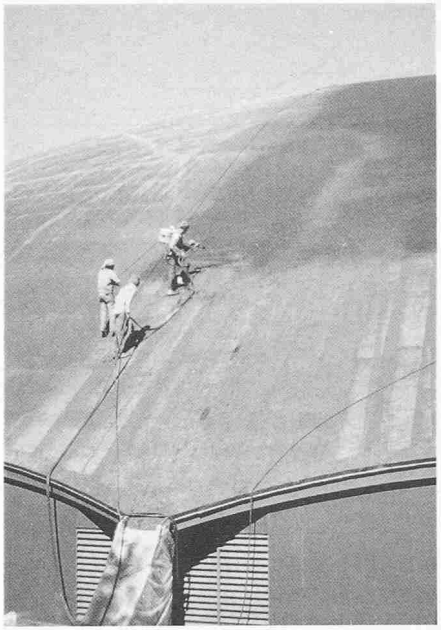


Bild 6. Abdichten der Dachhaut

Knotenpunkt-Verbindung

Bis heute wurde dem Knoten wenig Bedeutung für die Stabilität zugemessen, weil für die Berechnung Gelenkverbindungen angenommen werden. Als wir den Skydome entwarfen, gab es nur einen patentierten Knotenverbinder der Firma Western Wood Structures. Dieser ist unter dem Namen *Varax* bekannt.

Nach der Fertigstellung des Skydomes wurde der Varax-Knoten auf Einspannung im Labor geprüft, um ihn quantitativ etwas zuverlässiger erfassen zu können. Die Messungen wurden von der Universität of Washington durchgeführt, waren vielleicht etwas primitiv und ergaben Werte von 60–100% Einspanngrad. Für den bald nachfolgenden Tacoma Dome wurde eine Zahl von 80% angenommen, was dazu führte, dass bei den Stäben im Durchschnitt eine Lamelle weggelassen werden konnte.

Die Konstruktion des Varax-Knotens erschien mir wegen des hohen Gewichts (10 kg/m²) und wegen der ungenügenden Einspannung (<100%) reichlich archaisch. In den folgenden zwei Jahren entwickelten wir dann auch einen *neuen Knotenpunktverbinder*, der fortschrittlichere Eigenschaften hat: Erstens erreicht er mehr als 100% Einspannung, zweitens ist er nachgespannt, und drittens wiegt er nur 5 kg/m². Der neue Knotenpunktverbinder erhielt die Bezeichnung *Ensphere Connector* und kann in Serie hergestellt werden. Am Holzträger werden Endstücke aus Gussstahl montiert, sechseckförmig um ein Rohr angeordnet und verschraubt. Unterschiedliche Winkel können auf diese Weise ausgeglichen werden.

Die bis heute gebauten Enspheres

Es ist vielleicht von Interesse, den Bau des ersten und vierten Ensphere, die beide über 150 m Durchmesser haben, zu verfolgen. Der erste, der *Skydome* in Arizona, hat einen Durchmesser von 153 m und eine Höhe von 43 m über dem Spielfeld. Das Hallenvolumen ist etwa 400 000 m³. Um ein Fussballfeld sind 15 000 bis 20 000 Sitzplätze gruppiert. Gleichzeitig können 10 Tennisplätze oder Basketballplätze, 20 Volleyballspiele, ein Eisplatz mit Olympischen Massen, eine sechsspurige Laufbahn von 450 m Länge und andere Disziplinen Platz finden. Die gesamte Bodenfläche beträgt etwa 30 000 m². Der Bau begann im Herbst 1975 und wurde zwei Jahre später beendet. Die Baukosten lagen bei 6,7 Millionen Dollar.

Als der Skydome noch im Bau war, begannen wir mit der Lancierung des *Tacoma Domes*. Die Stadt Tacoma hatte schon seit Jahren den Wunsch, so etwas zu bauen, wurde aber dann durch die enormen Kostenüberschreitungen des benachbarten *Kingdomes* davon abgeschreckt. Mit dem niedrigen Preis eines Ensphere erwachte das Interesse wieder, und schliesslich wurde das Ensphere-Programm als Grundlage angenommen.

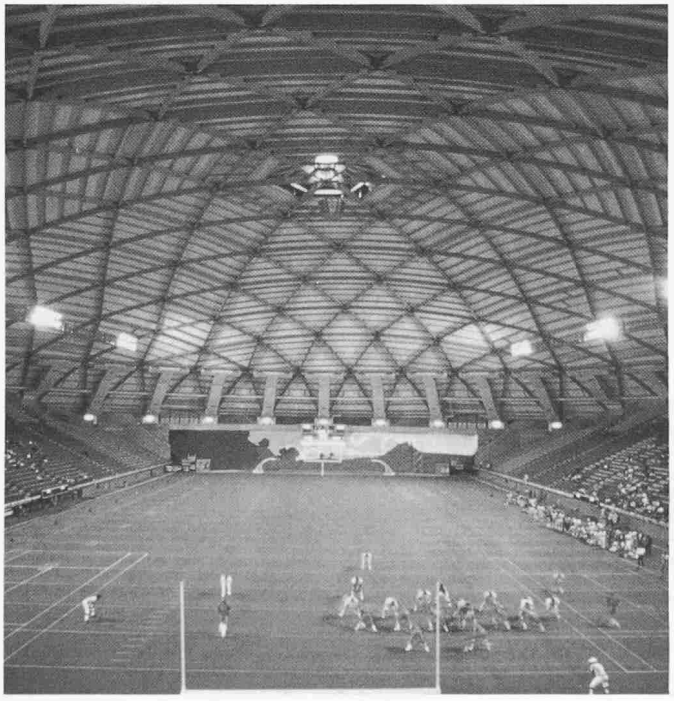
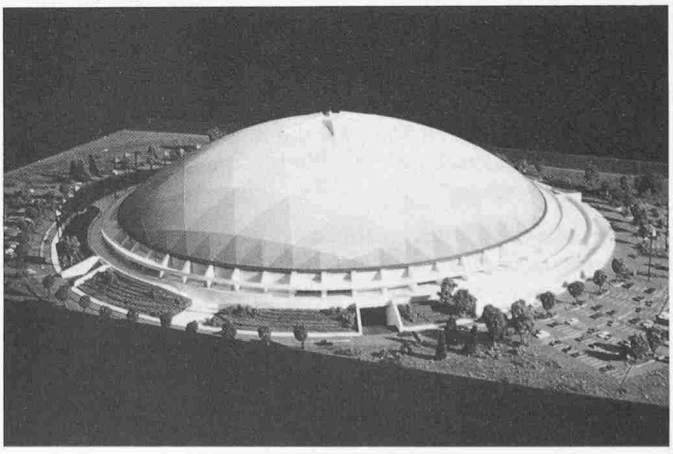


Bild 7 (links). Innenansicht (Skydome in Flagstaff, Arizona)

Bild 8 (unten). Modellansicht einer geplanten Holznetzschale. Die kreisrunde Form setzt genügende Platzverhältnisse voraus



Trotzdem empfanden es die mehr politisch orientierten Stadtväter als unumgänglich, noch schnell einen *Wettbewerb* durchzuführen, zu dem sich 6 der grössten nationalen Teams mit allen möglichen Materialien und Systemen meldeten. Für die Holzindustrie ist es wichtig, dass die Holznetzschale nicht nur mit grossem Vorsprung den zweistufigen Wettbewerb gewann, sondern auch am besten allen Energie- und Umweltbelangen entsprach.

Wirtschaftlichkeit

Die sehr grossen Schalenbauwerke, die über $ 100 Mio. kosten, könnten aus Erträgen *nicht amortisiert* werden. Ihr Wert besteht in sekundärem Nutzen.

Schalenbauwerke mit 25 000 Sitzplätzen müssen sich aber, wenigstens auf dem Papier, selbst erhalten und amortisieren können. Wenn man als Kosten für einen Sitzplatz $ 1000 einsetzt, so lässt sich dies durch *Billetverkauf und Mieten* zurückzahlen. Ein Überdachungssystem für Bauten dieser Grössenordnung darf nicht mehr als 25% des Gesamtbaues, also etwa $ 250 pro Sitz kosten. Ausserdem braucht das Bauwerk einschliesslich eines entsprechend grossen Spielfeldes und Nebenräumen usw. etwa 25 000 m², wobei sich wiederum Baukosten von $ 1000 pro m² errechnen. Es ergibt sich dann ein zulässiger Baukostenanteil von $ 250 pro m² für die komplette Überdachung. Es ist offensichtlich, dass diese Bedingung zurzeit *nur von wenigen Systemen* erfüllt werden kann.

Energie, Akustik, Licht und Ästhetik

Eine umfassende Besprechung der Holznetzschale muss die Gebiete von Energie, Akustik, Licht und Ästhetik mit einschliessen.

Was die *Energie* betrifft, so kann es natürlich nur ein Ziel geben: niedrigsten Energieverbrauch. Es gibt eine Anzahl den Energieverbrauch bestimmende Faktoren wie z.B. Publikum, Licht, Motoren, thermisches Verhalten von Bau und darunterliegendem Boden, Luftverluste usw. Dabei muss in den Energieverbrauch auch die Kühlung einbezogen werden. Am wesentlichsten ist jedoch die Überdachung, insbesondere, wie weit sie gegen Kälte und Hitze ausreichend isoliert ist. Die Ensphere-Schale hat in dieser Hinsicht wesentliche Tugenden.

Ein weiterer sehr wichtiger Punkt ist die *Akustik*. In Räumen mit Volumen von über 400 000 m³ sind die Schallwege schon recht lang; wenn sie nicht entsprechend beeinflusst werden, führen sie zu sehr störenden Echos. Ausserdem kann die Nachhallzeit unakzeptabel lang werden. Das erste Problem kann mit Absorption oder Geometrieverzerrung gelöst werden, das zweite nur durch Absorption. Die zwei besprochenen Bauten wurden ausführlichen akustischen Berechnungen unterzogen. Beide weisen Beläge mit 90% Absorption auf, und beide wurden mit «diffusen Wolken» konzipiert.

Der Skydome wurde inzwischen akustisch getestet. Die Resultate sind zufriedenstellend, da die Nachhallzeit zwischen 4 und 2 sec liegt mit einer Variation der Schallintensität über den Sitzplätzen von ± 2 dB. Tacoma wurde noch nicht getestet.

Wichtig ist weiterhin das *Licht*. Weil eine Arena in ihrer Grundfunktion ein gigantisches Theater darstellt, muss das Licht in verschiedenster Weise dirigierbar sein. Insbesondere muss eine Verdunkelungsmöglichkeit bestehen. Weiterhin sollte Farbe und Intensität den Fernsehanforderungen entsprechen.

Abschliessend noch ein Wort zur *Ästhetik:* Dass eine Schale auch schön sein soll, ist sehr wichtig. Sie ist weithin sichtbar, gibt der Landschaft einen neuen Charakter und wird zum Wahrzeichen einer Stadt. Die Holznetzschale, wenn sie gut entworfen ist, muss in dieser Hinsicht für sich selbst sprechen, denn sie hat die Grundeigenschaften eines ästhetischen Gebäudes: die Eleganz einer kompromisslosen statischen Logik, gepaart mit der natürlichen Schönheit des Holzes.

Adresse des Verfassers: Dr. *W.E. Rossman*, c/o Rossman, Schneider, Gadbery, 4601 East McDowell Road, Phoenix, Arizona 85008, USA.

Zur Konstruktion von Holznetzschalen

Von Christoph Hermann Häring, Pratteln

Bis anhin wurde versucht, grosse Spannweiten mit den Baustoffen Stahl und Beton zu überwinden. Ingenieurmässige Überlegungen zeigen aber, dass auch Holz dazu geeignet ist. Massgebend sind die Baustoffeigenschaften, eine günstige geometrische Anordnung der Konstruktionselemente und die relativ einfachen Montagemöglichkeiten. Bereits heute gibt es spezifische Anwendungen.

Grossräumige Überdachungen

Die Science-Fiction-Literatur eines *Jules Verne* wurde in den vergangenen zwei Jahrzehnten von der Wirklichkeit längst überholt. Sind solche gewaltigen Entwicklungen *auch im Bauwesen* zu erwarten – Städte, die auf kältestarrenden Planeten oder in der gleissenden Hitze einer Wüste unter dem Schutz von riesigen Kuppelhüllen blühen und gedeihen (Bild 1)?

Die faszinierende Idee, unter der *selbsttragenden Decke eines grossen Kugelsegmentes* eine atmosphärische und klimatische Unabhängigkeit zu finden, ist schon sehr alt.

Ist es daher verwunderlich, dass auch hier experimentierfreudige Amerikaner versuchten, die Utopie von gestern in einer heute möglichen Grössenordnung zu verwirklichen?

Mit der physischen Machbarkeit von *Betonschalen* scheint man an die wirtschaftlich vertretbare Grenze gestossen zu sein. Offensichtlich besann man sich aber auf die leistungsfähigen Tragwerke der in Holz erstellten *Arbeits- und Lehrgerüste dieser Schalen* zurück. Mit der Erkenntnis der problemlos belastbaren Hilfsgerüste wurde das Ziel neuer Kuppeldimensionen mit Holz erreicht.

So entstanden in den letzten 15 Jahren in den USA *Holz-Kuppelkonstruktionen* verschiedenster Grössenordnung, die mittlerweile Spannweiten von über 160 m erreicht haben. Dabei scheinen die Grenzen in bezug auf Tragfähigkeit, Montagemöglichkeit und Wirtschaftlichkeit noch nicht erreicht zu sein.