

Zur Konstruktion von Holznetzschalen

Autor(en): **Häring, Christoph Hermann**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 25

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75165>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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 Sitzkosten. 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 Fernsehansforderungen 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, Gadbry, 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.

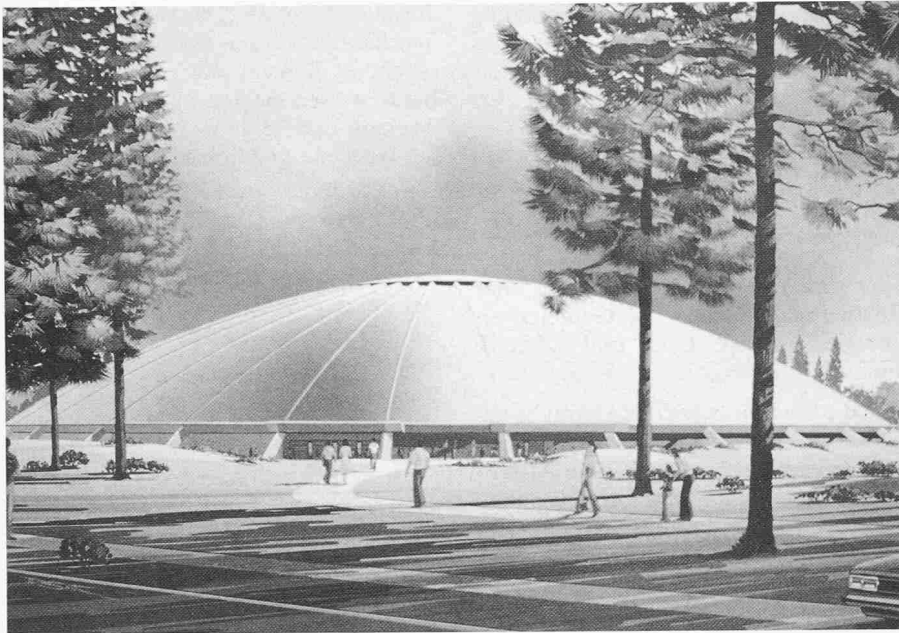


Bild 1. Klimatische Unabhängigkeit unter grossen Schalen. Die Science-fiction wird von der technischen Machbarkeit eingeholt. Kuppelüberdachung einer Sportarena in der Vorstellung des Architekten (Modellaufnahme)

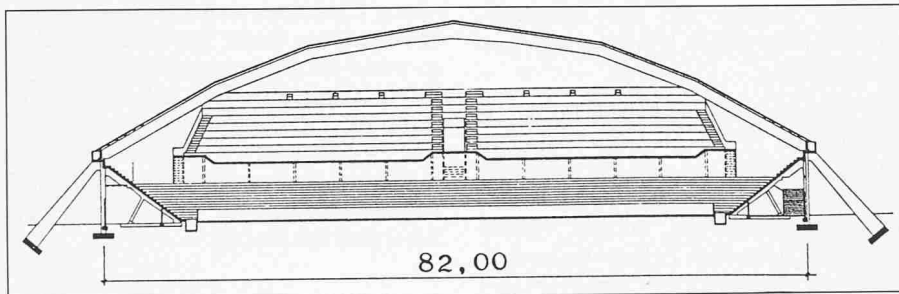


Bild 2. Wirtschaftliche Bogenkonstruktion mit ebenen Bindern aus Brettschichtholz. Eisenbahnüberdachung in Zug (Längsschnitt)

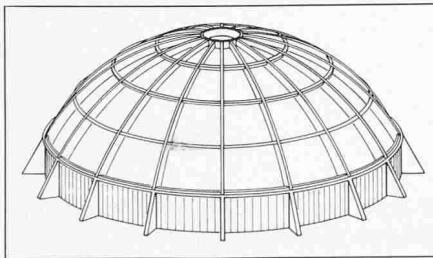


Bild 3. Schematische Darstellung des Radialbindersystems. Trotz räumlichem Kuppel-effekt erhöhte Materialkonzentration im Pol

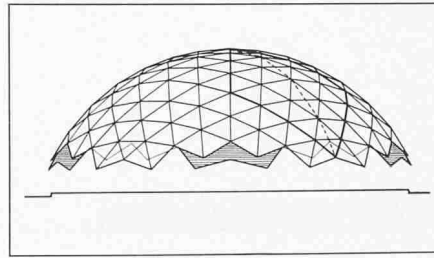


Bild 4. Netzgeometrie für Metallbausysteme mit max. Spannweiten bis etwa 100 m bei Stablängen von etwa 2 m

Tabelle 1. Technischer Leistungsvergleich Stahl-Holz

Parameter	Stahl (Fe 360)	Holz (Fichte)
Zugfestigkeit σ_u [Nmm ⁻²]	ca. 420	40
Spez. Gewicht γ [kNm ⁻³]	78,5	5
Grenzbruchlänge $l_{grenz} = \frac{\sigma_u}{\gamma}$ [m]	5350	8000
Schub-/Zugspannungs-verhältnis = $\frac{\tau_{zul}}{\sigma_{zul}}$	0,67	0,12
Durchbiegungsempfindlichkeit = $\frac{\sigma_{zul}}{E}$	700×10^{-6}	909×10^{-6}

Im Wettbewerb zwischen den Baustoffen hat sich ergeben, dass Beton und Stahl für diesen speziellen Einsatz dem Holz den Vortritt lassen müssen. Die empirischen Prüfungen in bezug auf die Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit im Baustoffwettbewerb sprechen eindeutig für den Einsatz von Holz. Dass Tragwerke in Holz für die Überspannung grösster Stützweiten so konkurrenzfähig sind, kann zum vorneherein nicht als selbstverständlich angenommen werden. Mit einigen ingenieurmässigen Überlegungen kann diese Tatsache jedoch einfach erläutert werden.

Baustoff Holz

Mit der Weiterentwicklung der Holzleimbautechnologie werden immer mehr Ingenieure herausgefordert, die verbesserten Materialeigenschaften des Baustoffes Holz bei anspruchsvollen Bauvorhaben einzusetzen. Das roh aus dem Baum gesägte Brett wird durch folgende Massnahmen der Leimbautechnologie zu einem hochwertigen Konstruktionsbauteil aufgewertet:

- Die natürliche Inhomogenität des Astes wird durch die Lamellierung der Tragelemente zu ungestörtem Kraftfluss verbessert.
- Die industrielle Keilzinkung verbindet die begrenzte Brettlänge kraftschlüssig zu einem in der Länge frei wählbarem Werkstück.
- Das beleimte Lamellenpaket kann dank seiner leichten Formbarkeit in die entsprechend statisch günstigste Ideallinie eingespannt werden.

Damit ist die Voraussetzung für den technischen Vergleich der äusserst tragfähigen Holzfasern mit anderen Baustoffen geschaffen.

Die Grenzspannweite oder Grenzbruchlänge als Quotient von Festigkeit und spezifischem Gewicht mit einem allfälligen Systembeiwert zeigt den charakteristischen und potentiellen Leistungswert deutlich auf. Mit der Wahl eines geeigneten statischen Systems kann der eher ungünstige Wert des Schub-/Zugspannungs-Verhältnisses τ_{zul}/σ_{zul} und die Durchbiegungsempfindlichkeit, die mit dem Wert σ_{zul}/E dargestellt wird, kompensiert werden, vgl. Tabelle 1. Die geringen zulässigen Schub- und Querdrukkspannungen bedingen Fachwerke, Bogen- oder Schalenkonstruktionen: Systeme, welche vorwiegend auf Druck oder Zug beansprucht werden.

Geometrie

Die Form des Bogens ist wohl die älteste und zeitloseste Konstruktionsart zur rationalen Überbrückung grosser Spannweiten. Bogenkonstruktionen für Überdachungen lassen sich in verleimter Brettschichtart einfacher und preisgünstiger erstellen als in einem anderen Baustoff (Bild 2).

Die Weiterentwicklung des Bogens aus der Ebene brachte das Radialbogensystem, das leicht zu verstehen war. Diese Leimbinderholzschalen weisen bereits räumliche Kuppel-effekte auf, haben aber allerdings eine hohe Materialkonzentration im Pol (Bild 3).

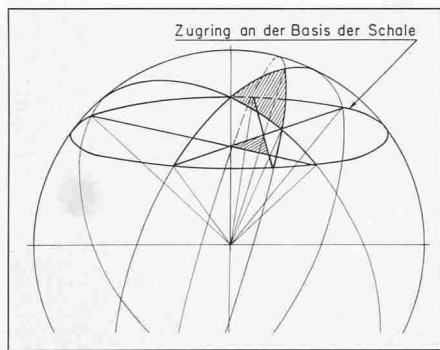


Bild 5. Projektion von Geraden auf die Kugeloberfläche zur Erzeugung von Grosskreisen

Der Durchbruch kam mit der erstmaligen Anwendung von Netzgeometrien, welche von der Metallbau-Industrie übernommen wurden (Bild 4). Mit der Projektion einer Dreiecksmasche auf die Kugeloberfläche entstand eine Tragwerksform, die aus Serien gekrümmter Brettschichtmodulen aufgebaut werden konnte. Für das Netzwerk können eine Anzahl von Faktoren bestimmend sein: die praktische Länge des Elementes, die Anzahl der Knotenpunkte, die Ausbildung der Eindeckung und die Einteilung der Fundamente.

Das Ensphere-Konzept wird gebildet durch drei sich durchdringende Bogensysteme, die elementweise Kugelgrosskreise folgen. Die optische Geradlinigkeit ergibt die wirkungsvolle und statisch günstige Geometrie (Bild 5). Dadurch macht das System auch einen ästhetisch ausgereiften Eindruck.

Der meist vorgespannte Zugring beim Kuppel-Kämpfer schliesst das Gleichgewicht der Horizontalschubkomponenten und verleiht damit der Struktur eine enorme Steifigkeit und Tragvermögen. Falls die Platzverhältnisse es zulassen, können Foundation und Zugring zusammengelegt werden, was für das Ensphere-Konzept kennzeichnend ist. Damit erreicht man wirtschaftliche, stützenfreie Überdachungsformen bei grossen Durchmessern.

Berechnung und Bemessung

Die Abschätzung der Stabkräfte gelingt bisweilen für symmetrisch wirkende Lasten für die Vordimensionierung näherungsweise genügend genau. Die durch Wind, abgerutschten Schnee- und Sandverfrachtung erzeugten Schnittkräfte inkl. der dazugehörigen Verschiebungslinie werden heute auf leistungsfähigen Minicomputern mit den entsprechenden Programmen schnell und genau ermittelt (Bild 6).

Bei den ersten Holznetzschalen wurden die Schnittkräfte am gelenkig angenommenen Raumfachwerk errechnet. Mit

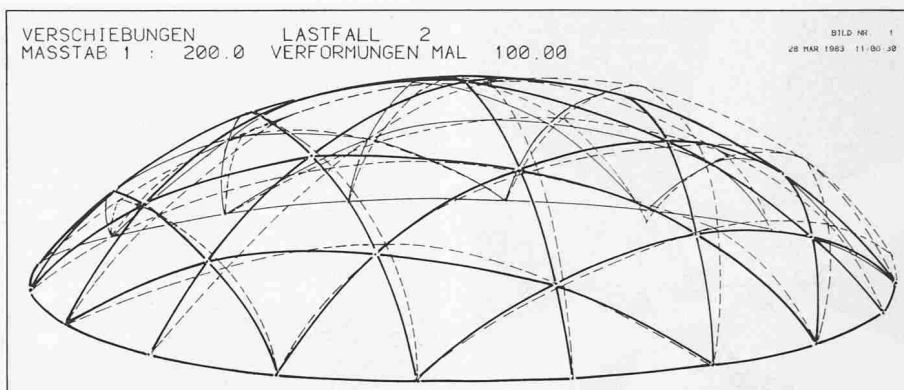


Bild 6. Grossmaschenstruktur für Holznetzschalen. Die einfache Formbarkeit von Brettschichtholz und die grossen Knicklängen dank günstigen materialtechnologischen Eigenschaften sind die wesentlichen Vorzüge für die Wirtschaftlichkeit von Schalenkonstruktionen in Holz. Stablängen bis 20 m. Mit leistungsfähigen finiten Element- und Graphic-Programmen wird das Tragverhalten ermittelt und dargestellt

grösser werdenden sphärischen Radien will man aber die Einspannung der Elemente im Knoten mitberücksichtigen. Den mit Bolzen angeflanschten Verbindungen können heute Einspanngrade von 50–80% zugemessen werden. Die Bemessung der Stäbe und die Gesamtsteifigkeit des Systems ist von diesem Wert abhängig.

Die Systemsteifigkeit wird mit der Sicherheit gegen Durchschlagen eines Knotens innerhalb einer Wabe beurteilt. Der statische Ausfall einer solchen Teilfläche stellt aber die Standsicherheit der Schale noch nicht in Frage. Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei benachbarte Knotenpunkte gleichzeitig durchbeulen sollten, ist äusserst gering. Wenn also ein kritisch belasteter Knotenpunkt vom «Snap-through» verschont wird, ist ein grossflächiges Beulen der Schale auszuschliessen.

Auch unabhängig vom Einspannungsgrad der Elemente in den Knoten wirken sich die vorteilhaften Eigenschaften des Holzes bei der Bemessung der Stäbe aus. Es ist leicht einzusehen, dass der relativ niedrige Elastizitätsmodul grössere Querschnittswerte erfordert und dementsprechend ein gröberes Maschennetz mit grösseren Knicklängen erlaubt.

Die Weiterentwicklung neuer Knotenverbindungen, die im Test voll wirksame Einspannung ergeben haben, werden Schalendurchmesser bis zu 250 m realisierbar machen. Die Druckkraftreserven des Holzes lassen dann selbst bei diesen grossen Spannweiten noch flache Raumfachwerke zu.

Verbindung

Wie jeder Planer einer Netzschale weiss, entstehen im Netzsystem zwar mehrere gleichartige Segmentfelder, die aber eine Anzahl verschiedener Knoten aufweisen, da die Bauelemente

unterschiedliche Winkel um die Knoten herum erzeugen.

Die bis heute verwendeten Knoten wurden als individuell geschweisste Stahl-naben angefertigt. Die mit Bolzen angeflanschten Brettschichtträger werden durch den von der Verbindungsart bedingten Schlupf nur teilweise eingespannt.

Ein neues patentiertes Verbindungssystem spannt gleichartige Stahlguss-Segmente an die Stirnseite der Holzträger auf, die ihrerseits während der Montage mit einem individuell verbohrteten Zentralrohr hochfest verschraubt werden (Bild 7). Die Systematisierung der Verbindung und die Gewährleistung der statischen Kontinuität im Knoten schafft die Voraussetzung für die notwendige Systemsteifigkeit grösster Schalendurchmesser.

Fertigung und Montage

Sämtliche Brettschichtholzbauteile werden auf einer Schablone mit demselben sphärischen Radius gefertigt. Die Länge der Stäbe wird rechnerisch ermittelt und mit Winkelschnitten abgebunden. Anschliessend können alle Segmente bereits im Werk aufgespannt werden. Bei einer Länge von 10–20 m sind die Elemente sehr leicht zu transportieren.

Ausgehend von genau eingemessenen Binderschuhen im Zugring werden die vormontierten Dreieckelemente lagenweise vorgebaut. Die Temperatur- und Formstabilität von Brettschichtholz einerseits und die systematische, sich selbst kontrollierende Geometrie andererseits gewährleisten einen problemlosen Freivorbau mit leichten Hilfsstützen (Bild 8).

Das mit Zwischenpfetten seitlich ausgefachte Netzgerippe wird zur weiteren Aussteifung mit einer Holzhaut überzo-

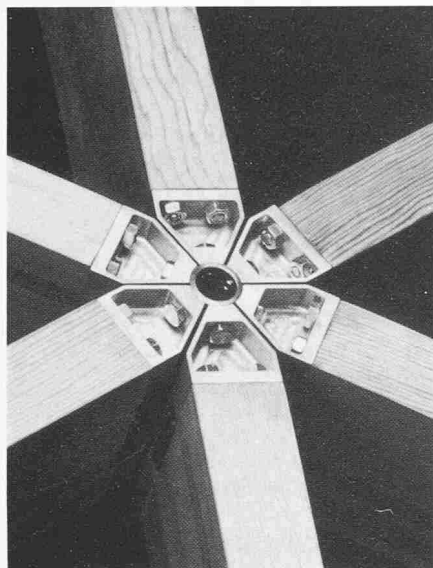


Bild 7. Ensphere Knoten. Die Entwicklung von standardisierten Knotenverbindungen mit hohen Anschlusswerten ermöglichen weitgehende Vorfabrikation



Bild 8. Die leicht anzutransportierenden Elemente werden mit Kranwagen und mit wenigen Hilfsstützen im Freivorbau montiert. Die Zwischenpfetten werden im Takt eingehängt, damit die nachfolgende Schalung befestigt werden kann

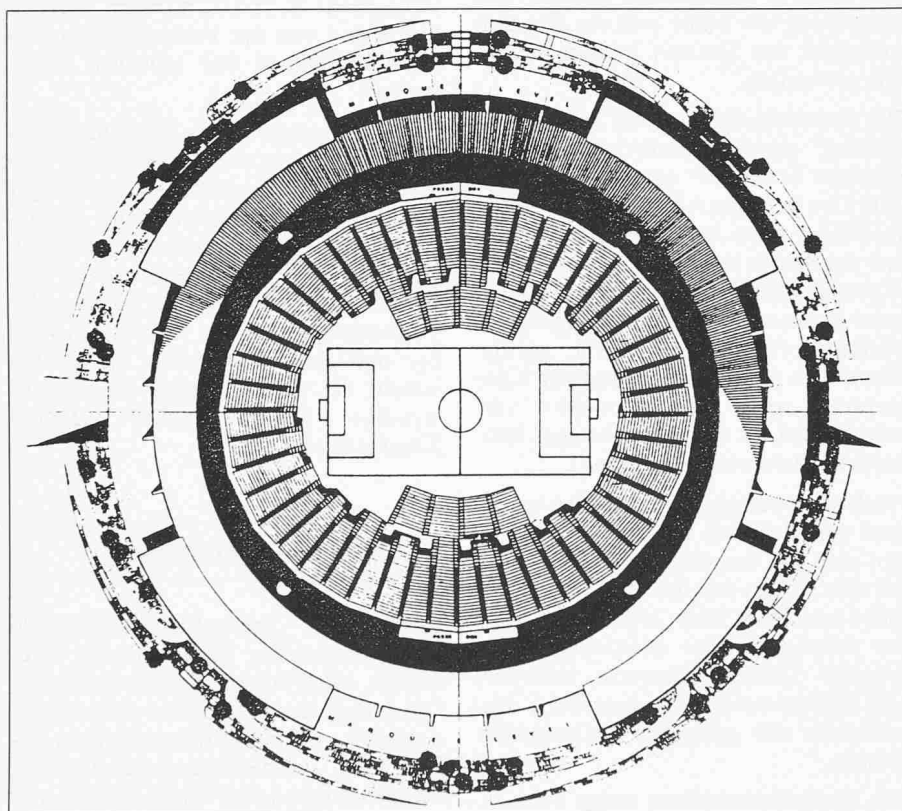
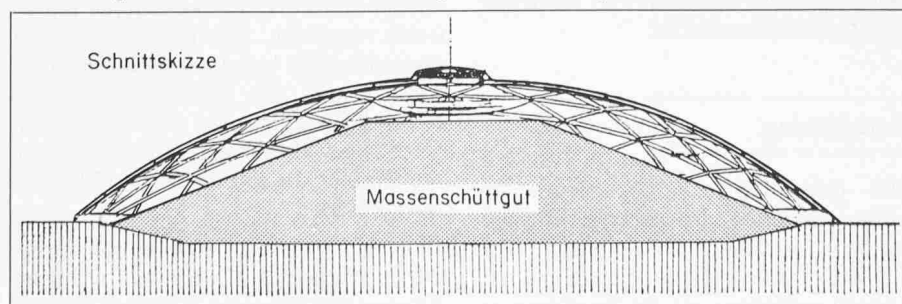


Bild 9. - Bei entsprechenden Platzverhältnissen sind selbst überdachte Mehrzwecksportstadien mit Durchmessern von bis zu 250 m technisch und wirtschaftlich realisierbar. Modell-Grundriss eines Fussballstadions mit 30 000 Plätzen nach dem Ensphere-Konzept

Bild 10. Leicht transportierbare Überdachungskonstruktion für chemisch aggressive Massenschüttgüter wie z.B. Düngemittel oder Salz. Die Stahlverbindungen werden durch Epoxidharzanstriche geschützt



gen, auf der eine allfällige Isolation und die Wetterhaut befestigt wird. Es sind Anwendungsmöglichkeiten denkbar, bei denen das Skelett direkt mit einer transparenten Haut aus Kunststoffextilien überzogen wird.

Anwendungsmöglichkeiten

Die bis heute gebauten Schalenkonstruktionen dienen dank ihrer ästhetisch ansprechenden Form für *Sportstadien* sowie kulturelle und kommerzielle *Ausstellungs-Gebäude*. In *Europa* sind bis anhin keine solche Hallentypen gebaut worden. Die Möglichkeiten sind aber genügend anregend, dass sich Ingenieure und Architekten mit solchen Systemen auch bei uns befassen werden. Es ist durchaus denkbar, dass bei entsprechenden Platzverhältnissen ein witterungsunabhängiges Fussball- oder Mehrzweckstadion auch in Europa im Bereich der Realisierbarkeit liegt (Bild 9).

Die leicht transportierbare Holznetzschale überdeckt auch in optimaler Weise *Massenschüttgutkegel* und gewährleistet den Einsatz rationeller Beschickungs- und Umschlagsinstallationen (Bild 10). Bei der Lagerung von chemisch aggressiven Stoffen wie Salzen und Düngemitteln, bieten Holzkonstruktionen seit jeher grosse Vorteile. Im weiteren dürfte der Bau von isolierten *Experimental-Biosphären* zwar ökologisch reizvoll, aber erst bei zwingenden Umweltbedingungen erwogen werden.

Adresse des Verfassers: Ch. H. Häring, dipl. Ing. ETH/SIA, c/o Häring & Co. AG, Schlossstrasse 3, 4133 Pratteln.