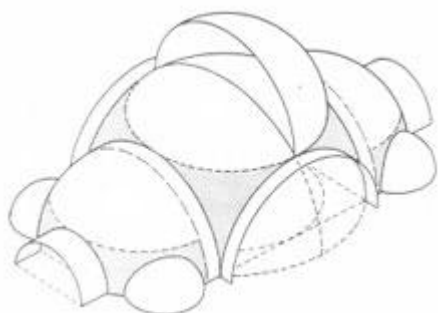
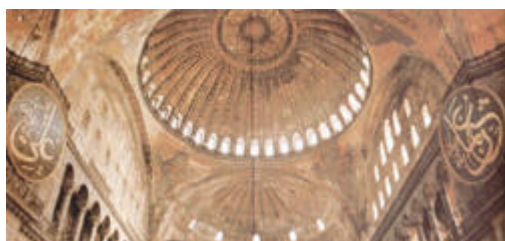


Kuppelkonstruktionen aus Bambus

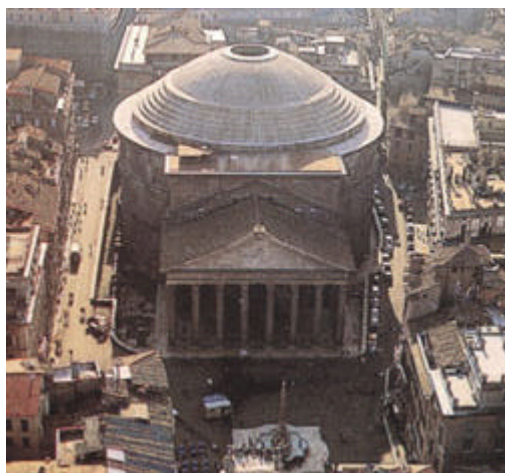
Intro



Kuppeln sind in ihrer räumlichen Gestalt "Wölbungen über einer mit runder, recht- oder vieleckiger Grundfläche in Form Halbkugel (Kugelhülle) oder anderer Kugelabschnitte (Flachkuppel, Spitzkuppel, Prismenkuppel)".



Hagia Sophia



Pantheon/ Rom

Im Laufe der Geschichte wurden für Kuppeln zahlreiche Tragsysteme entwickelt und unterschiedliche Materialien eingesetzt. Am Anfang steht die massive Kuppel aus behauenen Stein, Ziegeln oder unbewehrtem Beton.



Statisch gesehen sind Kuppeln doppelt gekrümmte Schalen. Druck-, Zug- und Schubkräfte werden in der Schalenfläche abgetragen. Die massive tragende Kuppelschale kann aufgrund der günstigen statischen Wirkung sehr gering bemessen werden, jedoch ist sie dann in ihrer Stabilität gegen unsymmetrische und konzentrische Lasten begrenzt. Aussteifungen in Form von Rippen, die auch einen Teil der Schnittgröße übernehmen, können diesem Problem entgegenwirken.

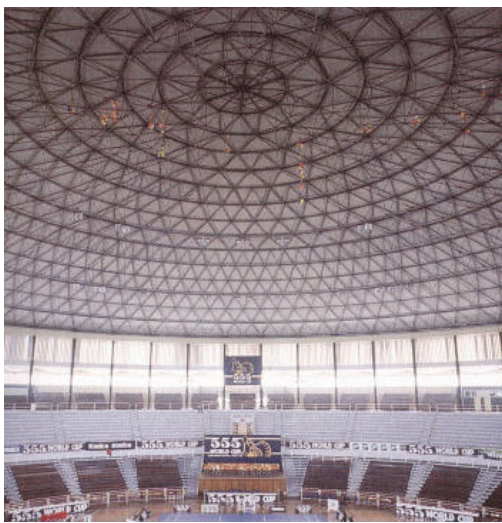


Stadion in Rom/ Nervi



Bewehrung für eine Stahlbetonkuppel

Die konsequente Weiterentwicklung ist ein Stabwerk, das sich der Fläche "löst" und die Funktion der Schale übernimmt. Die Abdeckung der Kuppel leitet die Lasten direkt an das Tragwerk weiter und muß keine Schalenfunktion übernehmen. Der Vorteil des Stabwerks liegt in seiner Lastumlagerungsfähigkeit, dem geringen Materialeinsatz und geringen Gewicht, sowie in der einfacheren schnellen Montage auf der Baustelle.

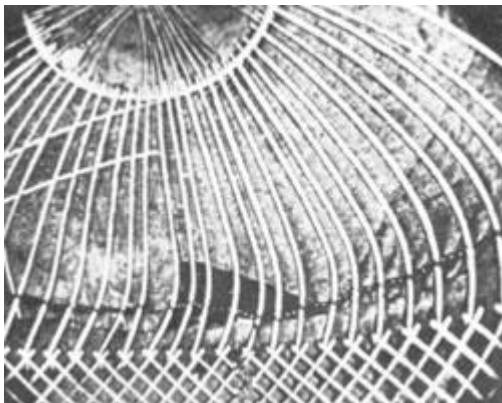


moderne Stahlkuppel

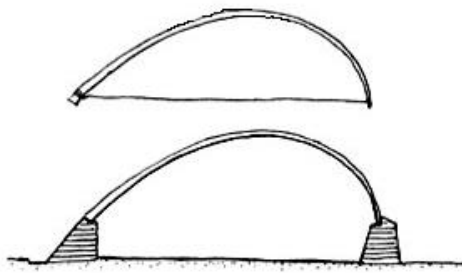
Kuppelstabwerke werden in großem Maßstab aus Holz und Stahl konstruiert. Im folgenden werden verschiedene Kuppeltypen hinsichtlich ihrer Geometrie und ihres Tragverhaltens charakterisiert. Dabei wird untersucht, inwiefern sich Bambus mit seinen spezifischen Eigenschaften als Konstruktionsmaterial für verschiedene Kuppeln einsetzen läßt.

Zunächst erfolgen jedoch allgemeine Aussagen zu den Konstruktionseigenschaften von Bambus, sowie zum Tragverhalten und zur Geometrie von Kuppeln.

Bambus



In seiner Eigenschaft, sowohl Druck, als auch Zugkräfte aufnehmen zu können, ähnelt Bambus Stahlstäben und scheint damit generell die Konstruktion von Kuppelstabwerken geeignet zu sein. Folgende Eigenschaften sind jedoch bei der Planung zu berücksichtigen: Es lassen sich für den Entwurf spezieller Bambuskuppeln einsetzen.

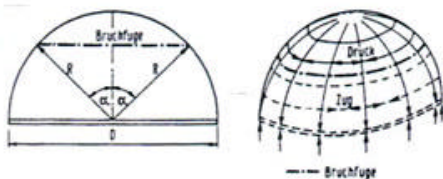


Wie alle pflanzlichen Stäbe läuft der Bambus in seiner vollen Länge zur Spitze hin konisch zu. Bei der Verwendung gerader Stäbe wird deshalb hauptsächlich der untere, steifere Teil verwendet. In einigen Konstruktionen, besonders beim Einsatz gekrümmter Stäbe, ist es jedoch sinnvoller, die volle Stablänge des Bambus zu verwenden und den konischen Wuchs des Bambus im Entwurf zu integrieren. Dabei kann die charakteristische, asymmetrische Biegelinie beim Kuppelbau als Inspiration dienen.

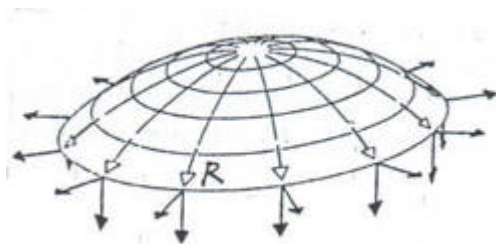


Die Schwierigkeit bei der Konstruktion von Bambusstabwerken liegt eindeutig bei der Ausbildung der Knoten, insbesondere bei dreidimensionalen und auf Zug belasteten Verbindungen. Wegen der Faserstruktur des Bambus fransen Bohrungen schnell aus, bei ringförmigen Einsparungen werden die Halme zusammengedrückt. Textile Verbindungen können dem Anspruch komplexer Konstruktionen kaum genügen. Sie werden hauptsächlich bei temporären Bauten eingesetzt. Mögliche Verbindungen für Bambuskuppeln werden im Anschluß an die Typenbeschreibung aufgeführt und untersucht.

Tragverhalten von Kuppeln



Kuppeln verfügen aufgrund ihrer doppelten Krümmung über ein sehr günstiges Tragverhalten. Gleichmäßig verteilte Belastungen werden ausschließlich über Axialkräfte abgetragen. In Meridianrichtung treten nur Druckkräfte auf; in Ringrichtung treten im oberen Bereich der Kuppel Druckkräfte und unterhalb des Bereiches Zugkräfte auf. Der Übergang zwischen den beiden Zonen ist die Bruchfuge.

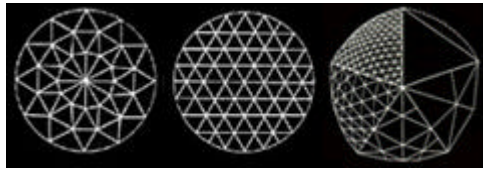


Jede Kuppel, die flacher als eine Halbkugel ist, benötigt eine spezielle Randlagerung, die auch Horizontalkräfte aufnehmen muß.



Der Kräfteverlauf innerhalb der Kuppel hängt auch von ihrer Lagerung ab. Nur bei einer kontinuierlichen Lagerung wirkt die Kuppel als Schale. Jede Unterbrechung der Lagerung erzeugt einen ungleichmäßigen Kräfteverlauf.

Geometrie



radial- konzentrisch, homogen, geodätisch

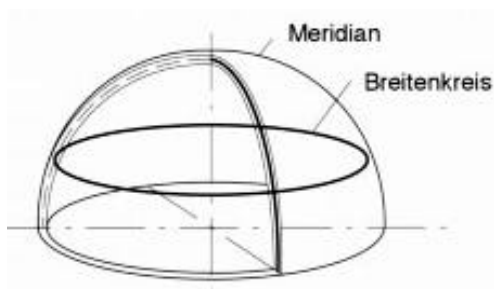
Kuppeln lassen sich in eine Vielfalt von Stabwerken auflösen. Die Einteilung der Kugeloberfläche in möglichst viele gleiche Stablängen stellt jedoch ein geometrisches Problem dar, da sich Teilung nicht abwickeln läßt. Es bieten sich daher drei räumlich ansetzende Systematiken an:

- radial- konzentrisches Prinzip
- Geodätisches Netz
- Homogennetz



Die Wirtschaftlichkeit von Kuppeltragwerken bedingt sich durch die Wahl des Stabwerks. Das Optimierungsziel ist eine geringe Anzahl unterschiedlicher Knoten- und Stabtypen. Da sich Bambus - lapi gesagt - leicht sägen, aber schwer zu Stabwerkknoten verbinden sollte das Minimieren der Knotentypen das erste Ziel sein.

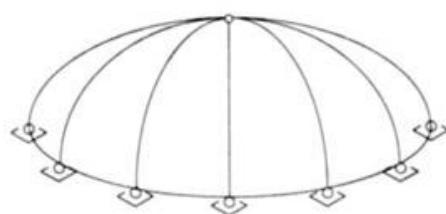
Radialkonzentrische Kuppeln



Die Oberfläche der Kuppel ist in ein Netz aus Längen- und Breitenkreisen eingeteilt. Die Längenkreise oder Meridiane sind Radialen, die sich von Pol zu Pol erstrecken und sich in den Polen schneiden. Von den Breitenkreisen entspricht der Äquator dem Durchmesser der Halbkreiskuppel, die übrigen Kreise werden polwärts immer kleiner.

Radial- konzentrische Kuppeln eignen sich aufgrund ihrer Stab- und Knotenvielfalt nur sehr bedingt für Bambuskonstruktionen. Dennoch werden die verschiedenen Typen hier vorgestellt. Die einfachsten Formen sind auch in Bambus machbar.

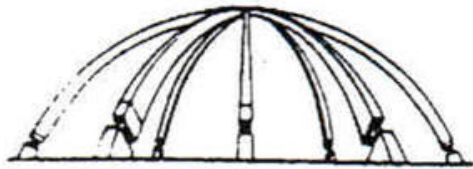
Bogenkuppel



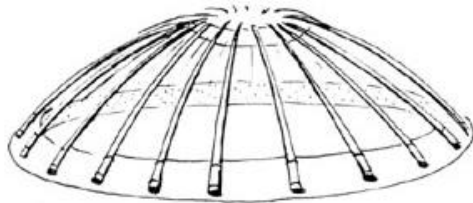
Bogenkuppel

$$h = \frac{l}{50}$$

Radiale, gekrümmte Rippen bilden die Tragstruktur, die über Flächenelemente ausgesteift wird. Die Rippen nehmen als Hauptträger wie Bogensegmente die Lasten auf.



Die konzentrischen Rippen treffen sich alle im Pol. Es entsteht dadurch eine komplizierte Anschlußsituation.

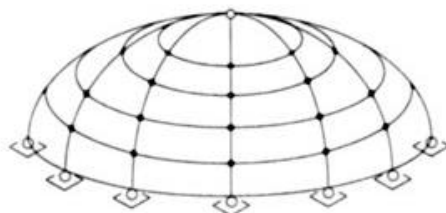


Bogenkuppeln aus Bambus sind auf jeden Fall denkbar. Der komplizierte Polanschluss kann wie in der Abb. durch einen abschließenden Druckring umgangen werden.



Bambusspezifische Formen entstehen, wenn die Enden eingespundelt und die biegsameren Spitzen zusammengeschlossen werden. Durch die gelenkige Lagerung mit einem Zugband und zusätzlichem Druckring erhält die Kuppel eine größere Steifigkeit. Es bildet sich eine bauchigere Form mit nach außen geneigten Bogenansatzern.

Rahmenkuppel

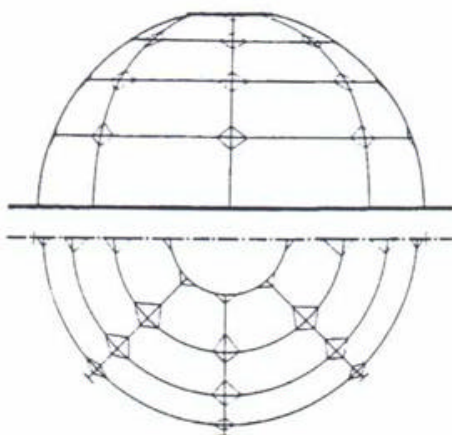


Rahmenkuppel

$$h = \frac{l}{75}$$

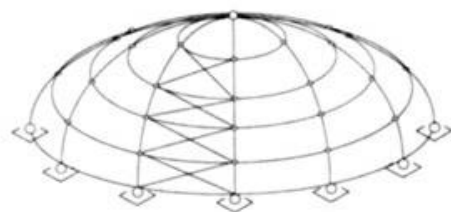
Die Kreuzpunkte zwischen den radial verlaufenden Stäben und den Breitenkreisen sind biegesteif ausgeführt. Die durchlaufenden Rippen werden durch die horizontalen Stäbe versteift.

Die Stablängen der horizontalen Ringe sind jeweils gleich. Wie bei der oben aufgeführten Rippenkuppel kommt es im Pol zu einer problematischen Stabverdichtung. Diese kann umgangen werden, indem der Abschluß als Druckring ausgebildet und damit der Zerdruck ausgespart wird.



An den biegesteifen Knoten werden recht große Momente übertragen. Stäbe und Knoten müssen daher entsprechend stark dimensioniert werden. Das Tragwerk eignet sich deswegen nur für kleine Spannweiten, es ist material- und montageaufwändig.

Bei durchlaufenden Radialen und gestoßenen Querstäben treten große Querkraften auf, die Bambushalme aufgrund ihres Rohrquerschnitts nicht aufnehmen können.

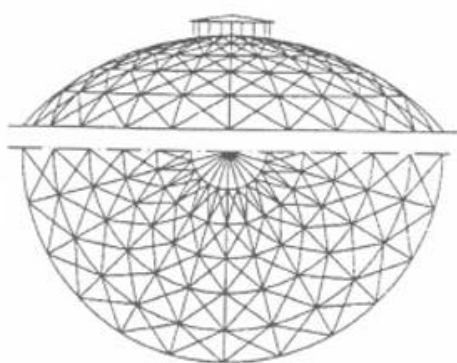
Schwedlerkuppel

Rippenkuppel

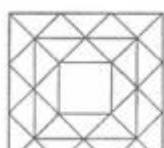
$$h = \frac{l}{100}$$

Die Flächen zwischen den radialen und den Horizontalen werden durch Diagonalen ausgesteift. Die durch die Diagonalen gebildete Dreiecke eines Gefaches liegen in einer Ebene.

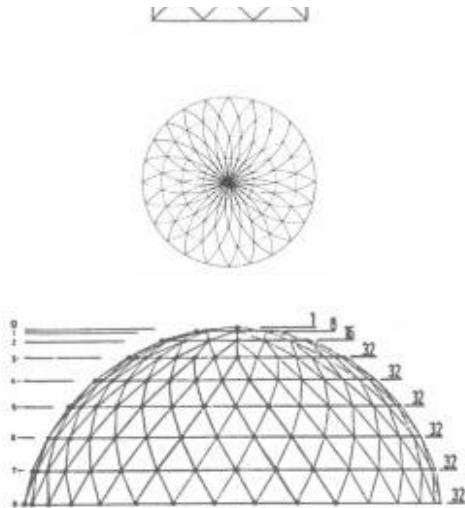
Werden die Diagonalen kreuzweise geführt, kann man sie durch ersetzen, was das Ablängen der Diagonalstäbe erspart.



Das Anwenden von Seilen eignet sich besonders für Bambuskonstruktionen, da so das mühsame Ablängen zu vieler Stäbe entfällt. Für die gelenkigen Anschlüsse der Rippen und Querstreben gilt das typische Anschlussproblem.

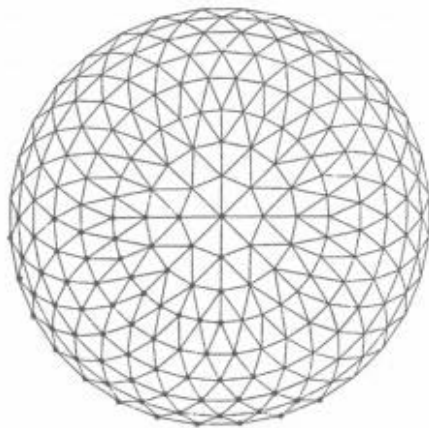
Dreiläufige Ringnetz-kuppel

Die horizontalen Breitenringe werden durch zwei weitere, diagonal verlaufende Stabscharen so verbunden, dass gleichschenklige Dreiecke entstehen. Durch die dreieckige Grundform entsteht eine hohe Steifigkeit, die zu ökonomisch günstigen Systemen führt. Leider gibt es auch hier eine ungünstige Verdichtung der Stäbe zum Zenit hin.

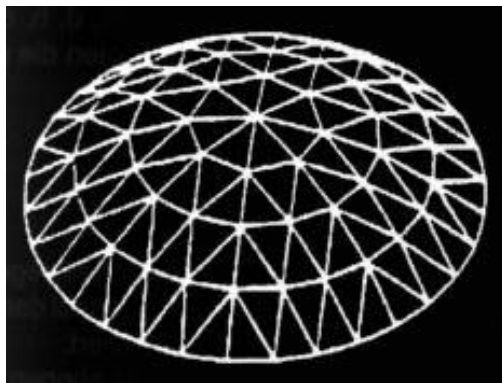


Ausser der Aussparung des Zenits durch einen Druckring gibt es bei radialen Netzen zwei weitere Möglichkeiten, die Stabverdichtung zu umgehen:

Bei der sogenannten Zonenetzkuppel wird im Zenit eine Übergangszone eingeführt, in der die Stabanzahl durch fortschreitende Halbierung beseitigt wird.

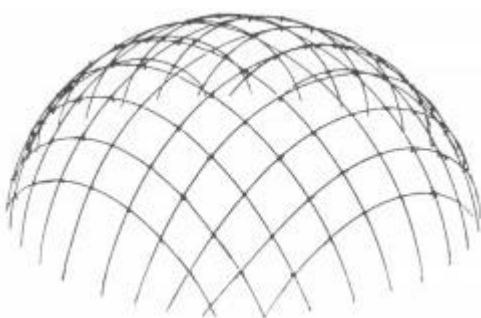


Das Ringnetz besteht aus zwei Teilen: der Polzone als Kuppelabschluß und der Breitenzone mit horizontalen Ringen und zwei Scharen spiralförmig verlaufender Diagonalen.



Eine weitere Möglichkeit ist die Ausbildung einer Sektornetzkuppel. Ihre Oberfläche wird in Sektoren geteilt, die durch Scharen von p_a zu ihren Begrenzungslinien verlaufenden Stäben unterteilt werden.

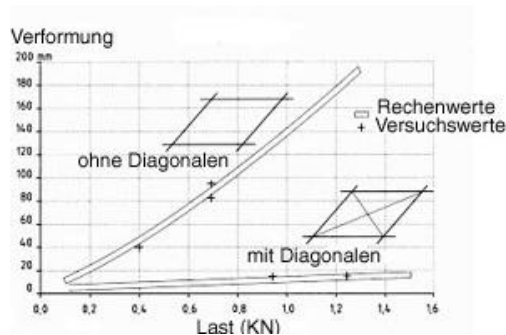
Gitternetz-kuppel



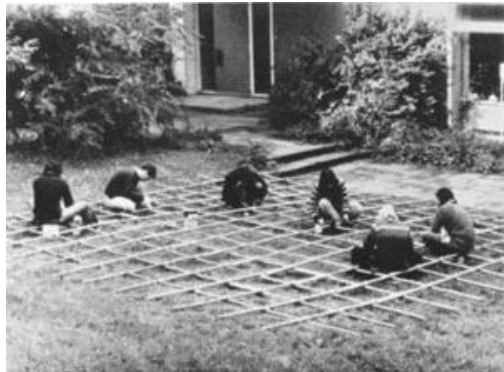
Diese Kuppel verfügt über ein quadratisches Grundraster, das sich in Kuppelform verzerrt, sobald es in Kuppelform gebracht wird. Die Form entspricht der Umkehrung der Kettenlinie.

Hinsichtlich seiner Geometrie ist die reine Gitternetz-Kuppel keine radial-konzentrische Kuppel, sondern setzt sich aus Kreisen zusammen, die sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung kleiner werden.

Bei diesem System reicht eine Stablänge aus, dafür entsteht ein Vielzahl unterschiedlicher Felder.



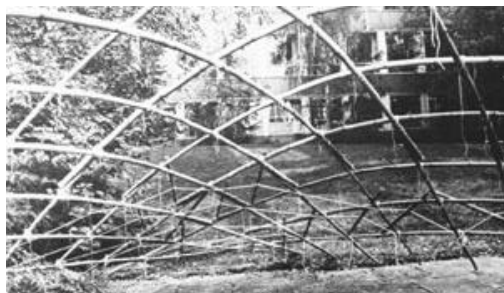
Um die Schalentragswirkung herzustellen müssen die Rauten durch Diagonalen ausgesteift werden. Die Ausbildung der Diagonalen d abgelängte Stäbe wäre aufgrund der vielen unterschiedlichen Feld- und Diagonallängen unwirtschaftlich. Es reicht jedoch bei diesen Kuppeln, durchlaufende Seile an den Knoten festzuklammern.



Die Anschlußstellen der Gitternetzstäbe scheinen zunächst im Vergleich zu den Verbindungen anderer Kuppeln unkompliziert: es treffen immer nur zwei Stäbe aufeinander. Allerdings muss die Verbindung so ausgebildet werden, dass sie sich verdrehen und nach der Kuppelformung fixieren lässt.



Stahlstäbe werden einfach miteinander verschraubt, bei Bambusnetzen gestaltet sich der Verbindungsvorgang um einiges schwieriger. Bislang wurde nur mit textilen Verbindungen experimentiert. Die Fixierung der gebundenen Knoten wurde dabei durch zementgetränkte Bandagen und durch zwischengelegte Gummischeiben vorgenommen.



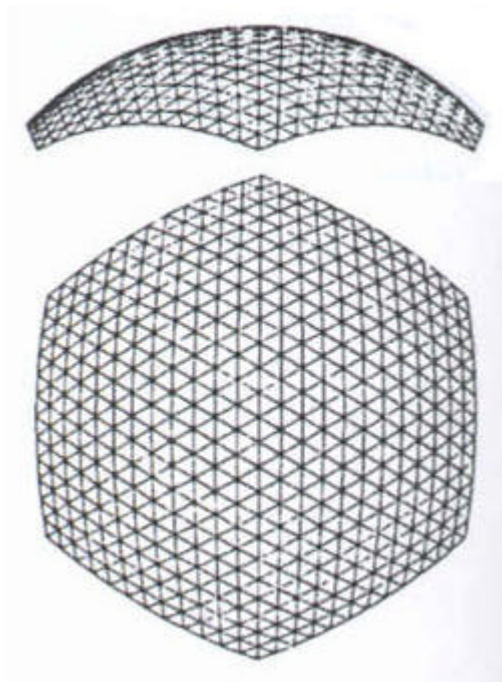
Um die Kuppel z. B. im Gebäude als Dach einsetzen zu können, bedarf es eines Zugringes, der die Kuppel einfaßt. Für Herstellung dieses Ringes wie auch für größere Spannweiten des Gitternetzes werden es zusammengesetzte Bambusstäbe benötigt. Auch hier ist die Verbindung der Knackpunkt.

Im Endeffekt scheitern jedoch die Konstruktionen aus ganzen Bambushalmen hauptsächlich an der leichten Spaltbarkeit der Stäbe. Benötigt werden hier leicht biegsame Vollprofile kleineren Durchmessers, die sich zu beliebigen Längen zusammensetzen lassen.



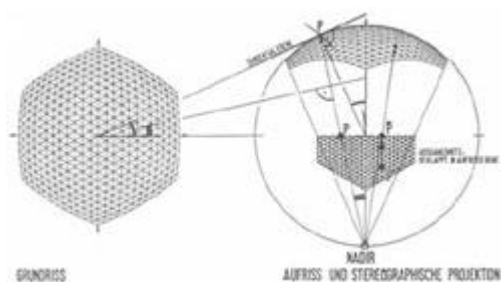
Gespaltener Bambus eignet sich durch seine bessere Biegsamkeit im Grunde besser für die Konstruktion von Gitternetz-kuppeln, allerdings ist die Spannweite auf etwa 10m begrenzt.

Homogennetzkuppel



Bei einem Homogennetz schließen an jedem Knoten die gleiche Anzahl von Stäben an.

"Ein in der Äquatorialebene einer Kugel lokalisiertes Dreiecksnetz wird vom Nadirpunkt (Gegenpol der Kugel) auf den Polbereich der Kugeloberfläche projiziert."



Dabei bilden sich drei Gradenscharen des ebenen Netzes auf drei Kleinkreisscharen des sphärischen Netzes ab, wodurch das Netz eine recht harmonische Wirkung erhält. Da es sich bei steileren Kuppeln am Rand zu stark verzieht und damit ungünstig große Stablängen erzeugt, ist das System nur für flachere Kuppeln geeignet.

Projektion

Geodätische Kuppeln

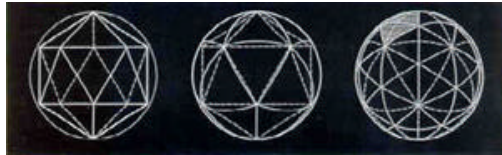


Zu einer innovativen Einteilung der Kugeloberfläche kam Anfang 20. Jahrhunderts Buckminster Fuller (links bei einem praktischen Versuch mit Studenten): die Oberfläche der Kugel wird durch die mehrfache Unterteilung eines Ikosaeders erreicht.

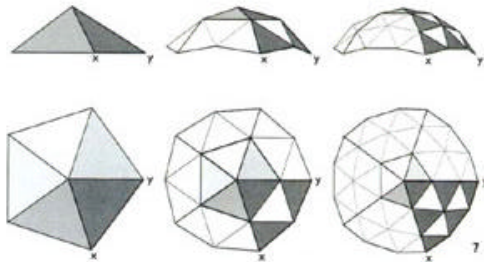


Tetraeder, Hexaeder, Oktaeder,
Dodekaeder, Ikosaeder

Das Ikosaeder ist eines der fünf von Platon beschriebenen regelmäßigen Polyeder. Seine Oberfläche ist aus 20 gleichseitigen Dreiecken mit 30 gleich langen Stäben zusammengesetzt und nähert sich der Kugelform.



Werden die Kanten von innen auf eine Kugeloberfläche projiziert, die Oberfläche in zwanzig sphärische gleichseitige Dreiecke zwischen Großkreisen aufgeteilt, die in geeigneter Form auf dem Weg über Sechsecke und, in den Ecken der Großdreiecke, Fünfecke mit einem dreieckigen Stabnetz belegt werden. Das Prinzip lässt sich auch auf andere platonische Körper, wie z. B. Dodekaeder anwenden.



Die Unterteilung des Ikosaeders erfolgt über die Teilung der Dreiecksseiten. Anschließend werden die Teilungspunkte verbunden und damit neue Dreiecke gebildet. Die Anzahl der Teilstrecken wird als Frequenz bezeichnet.

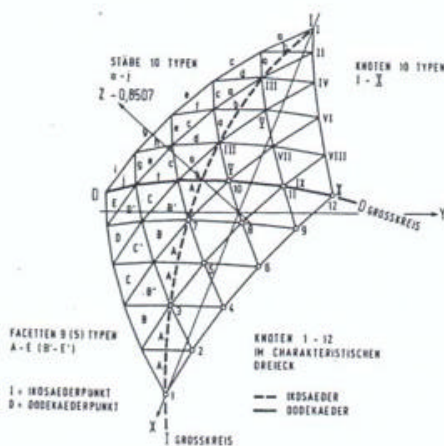
Frequenz1, Frequenz 2, Frequenz3



Schema der alternate Methode für Frequenz 2²⁵

Zwei Methoden der Unterteilung haben sich durchgesetzt:

1. "Alternate" Methode: Jeder Teilungspunkt einer Ikosaederseite ist Eckpunkt eines Dreiecks (s. a. oben links). Bei einer 8er-Frequenz beispielsweise entstehen 10 unterschiedliche Stablängen und Knotentypen. Die Methode eignet sich besonders für Kugelabschnitte.

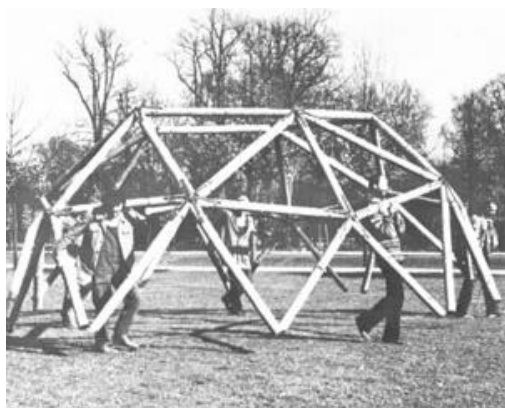
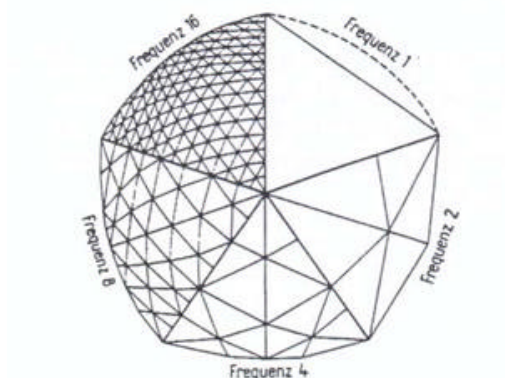


Beispiel der Typenverteilung bei 5er Frequenz²⁶



Schema der triacon Methode für Frequenz 2²⁷

2. "Triacon"- Methode: Nur jeder zweite Teilungspunkt der Ikosaederseite wird Eckpunkt eines Dreiecks. Bei einer 8er-Frequenz entstehen hier 8 unterschiedliche Stablängen und Knotentypen. Die Methode eignet sich besonders für Vollkugeln. Sie lässt sich nur gerade Frequenzen anwenden.

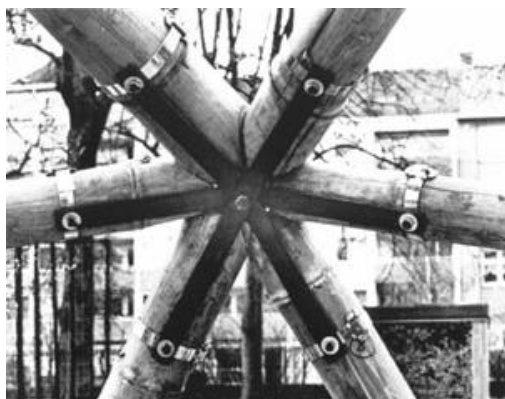


Dieses Beispiel aus IL 31 zeigt eine geodätische Kuppel aus 10-cm dicken Bambusrohren mit einer 2fach- Teilung jeder Ikosaederseite (Frequenz 2), bei dem die oberste Unterteilung ausgespart wurde.

Die Gitterschale umspannt 6m. Obwohl sie sehr massig aussieht wiegt sie nur 2 kN und trägt das hundertfache ihres Eigengewicht



Die Schale wurde mit einer vorgespannten Membran aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe abgedeckt. Die höchste Stelle der Membran wird durch einen Bambushängestab abgestützt.



Die einzelnen Bambusrohre sind abgelängt und mit Stahlprofilen verbunden. Das Aufspalten der Stabenden soll durch rostfreie Stahlbänder verhindert werden. Es scheint jedoch, als ob diese mit dem Bambus verbohrt sind, was unweigerlich zu Schwachstellen führt.



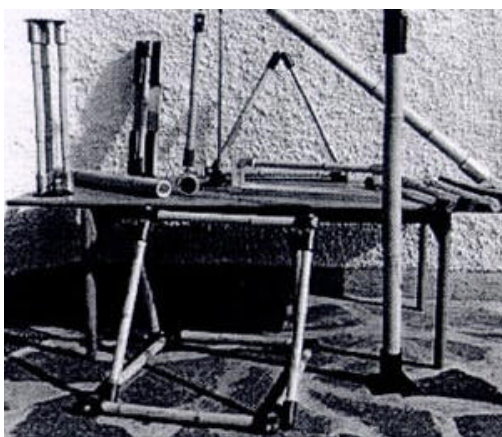
Besonders im Vergleich mit einer geodätischen Stahlkuppel wirkt Bambuskuppel massig und die Verbindungen sehr aufwendig. Aus Transportgründen im Moment die Verwendung des Bambus Form kurzer, gerader Stäbe propagiert. (Jörg Stamm)
Bei der Anwendung dieser Stäbe für geodätischen Kuppelbauten werden hier sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Ästhetik in Frage gestellt.

Verbindungssysteme

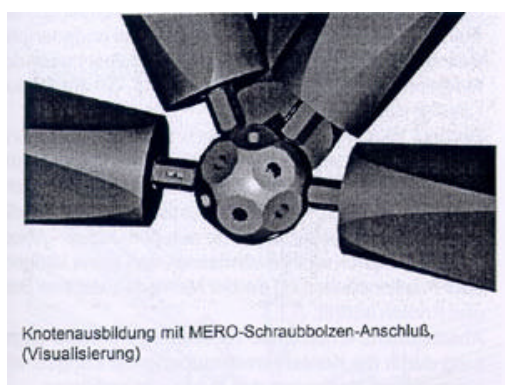
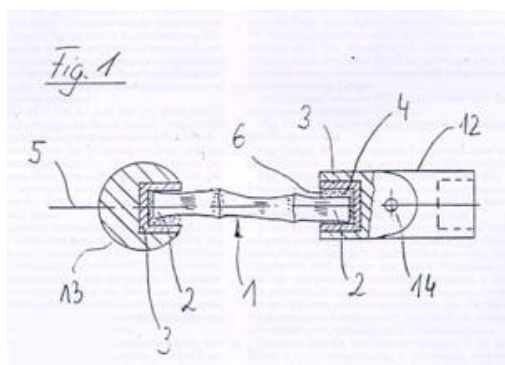
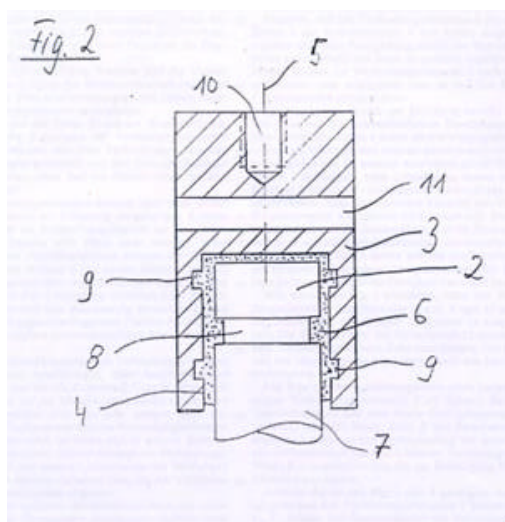


Für räumliche Knotenstabwerke aus Stahl und Vollholzquerschnitten sind bereits verschiedene Verbindungssysteme entwickelt worden, die sich allerdings nur bedingt für Bambus anwenden lassen. Die im Bereich des Möglichen liegenden Verbindungsarten werden im folgenden aufgeführt.

Entwurf für einen räumliche Knoten/ Renzo Piano- Building Workshop

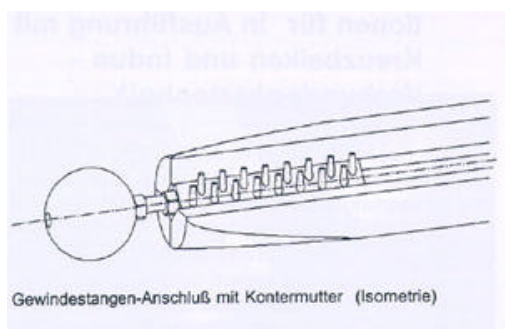


Bambutec

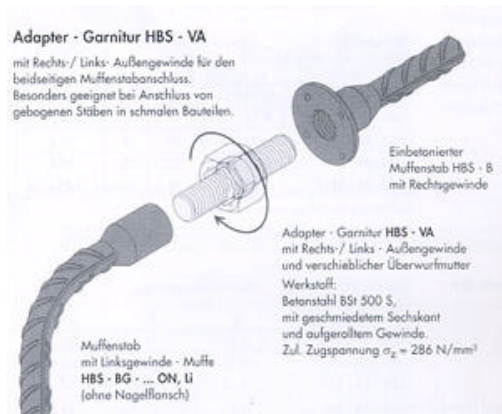


Induo:

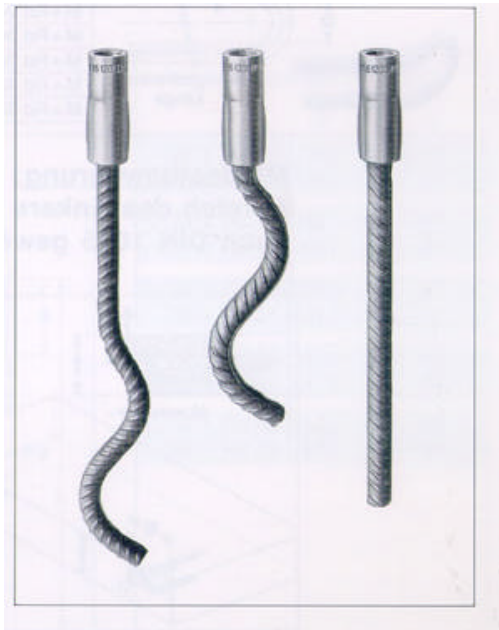
Dieses System eignet sich hervorragend zur Ausbildung von Holzstabwerken.



Induo ließe sich auf Bambus jedoch nur dann anwenden, wenn d Enden der Rohre mit Zement oder ähnlichem vergossen werden u sich das dornige Ende der Gewindestange verzahnen läßt.



Ankerschrauben lassen sich auch nur im Bambus vergießen. Für mehrfache Stabstöße müßten auch mehrfache Ankerschrauben entwickelt werden.



Umfassende Zusammenstellungen von Bambusverbindungen:

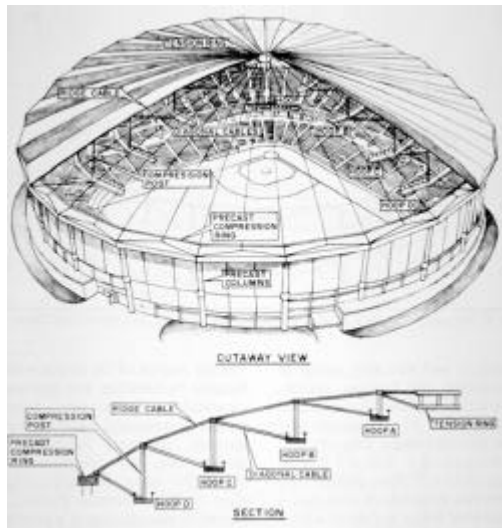
xxx

yyy

Tensegrity im Kuppelbau



Die sogenannten "Cable Domes" sind die einzigen Tragwerke, bei denen von Buckminster Fuller entwickelte Tensegrity- Prinzip in großen Maßstab angewandt wird.



Sie setzen sich aus Ringen abgestuften Durchmessers zusammen. Dabei ist jeder Ring mit seiner Unterseite an der Oberseite des darunter liegenden größeren Ringes aufgehängt. Mit jeder Aufhängung ergibt sich dadurch ein Höhengewinn. Die Druckkraft zwischen den sich kreuzenden Stäben übernimmt entweder der Ring selbst, oder seine Druckstäbe leiten sie weiter.

Diese Art von Kuppeln im Zusammenhang mit Bambuskonstruktionen aufzuführen geht wahrscheinlich - wie der Entwurf der Mendocino-Brücke von DeBoer - ein Schritt zu weit. Es zählt auch mehr um der Anspruch auf die Typenvielfalt von Kuppeln.

bild

Literatur

- Frei, Otto (Hsg.): "IL 31", Stuttgart 1985
 Führer, Wilfried; Heyden, Wilhelm; Dahlhausen, Jochen: "Räumliche Knotenstabwerke", Aachen 2000
 Heinle, Erwin; Schlaich, Jörg: "Kuppeln- alle Zeiten- alle Kulturen", Stuttgart 1996
 Herzog, Thomas; Natterer, Julius; Volz, Michael: "Holzbauatlas Zwei", München 1991
 Peters, Stefan: "Richard Buckminster Fuller" in db 2/ 2002