

**Zeitschrift:** IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht

**Band:** 9 (1972)

**Rubrik:** Theme IIIb: Space structures

#### **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:** 15.02.2026

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

**III b**

**Structures tridimensionnelles**

**Raumtragwerke**

**Space Structures**

Leere Seite  
Blank page  
Page vide

### IIIb

## DISCUSSION PRÉPARÉE • VORBEREITETE DISKUSSION • PREPARED DISCUSSION

### **Kompositionsgesetze der Raumfachwerke**

Laws of Composition of Three-Dimensional Frames

Lois de composition des treillis à trois dimensions

MAX MENGERINGHAUSEN

Dr. Ing.

Würzburg, BRD

#### Vorbemerkung:

Der Verfasser hat als Urheber des MERO-Bausystems im Laufe von 3 Jahrzehnten die Grundlagen für die Komposition von Raumfachwerken entwickelt und darüber in zahlreichen Veröffentlichungen berichtet. Anlässlich der "International Conference on Space Structures in London 1966" hat er in einem Film unter dem Titel "Komposition im Raum" ausführlich über die Bildungs-Gesetze der räumlichen Fachwerke berichtet. Der nachstehende Beitrag behandelt die erweiterte Theorie für die Bildung beliebig gestalteter Raumfachwerke.

Die folgenden Ausführungen bilden den Inhalt eines Films, der für die Amsterdamer Tagung der "Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau" geschaffen wurde.

#### Die regelmässigen Raumfachwerke:

Die Bildungs-Gesetze der regelmässigen Raumfachwerke, vom Verfasser 1940 entdeckt und formuliert, gehen von dem "flächen-zentrierten Cubus" aus, der innerhalb des von Bravais erstmalig (1850) aufgestellten Bausystems der Kristalle eine besondere Stellung einnimmt. Diese Besonderheit des flächen-zentrierten Cubus (Bild 1) ergibt sich aus der Tatsache, dass dieser Körper in 16 Viertel-Oktaeder und 8 Tetraeder zerlegt werden kann, somit insgesamt in 24 "Vierflächen". Das Vierflach aber ist - wie schon August Föppl in seiner grundlegenden Schrift "Das Fachwerk im Raum" (1892) dargelegt hat, nicht nur der kleinste überhaupt mögliche regelmässige Körper, sondern dadurch ausgezeichnet, dass dieser Körper statisch stabil ist und sich als Grund-Zelle oder Elementarkörper für die Raumfachwerk-Bildung besonders eignet, (Bild 2).

Alle regelmässigen Raumfachwerke (Tafel 1) entstehen aus solchen Elementar-körpern, die entweder selbst aus "Vierfläche", in Form von Tetraedern oder Viertel-Oktaedern bestehen oder aus Viertel -Oktaedern und Tetraedern zusammengesetzt sind.

Der besondere bauwirtschaftliche Vorzug der regelmässigen Raumfachwerke stützt sich auf folgende Tatsachen:

1. Alle derartigen Raumfachwerke können mit einer einzigen Art von Knotenstücken ausgeführt werden, die dadurch gekennzeichnet ist, dass das Knotenstück 18 konzentrische Anschlüsse entsprechend den Teilungslinien des flächen-zentrierten Cubus besitzt.
2. Alle derartigen Raumfachwerke können mit einer Stab-Reihe ausgeführt werden, deren System-Längen eine geometrische Reihe mit dem Faktor  $\sqrt{2}$  bilden ("Geometrische Reihe des natürlichen Wachstums").

Bauwirtschaftlich wirkt sich dies dadurch aus, dass man derartige Bau-Elemente industriell besonders wirtschaftlich herstellen und auf Lager legen kann, so dass damit die Bauwerke "aus Vorratsmaterial" errichtet werden können, (Bild 3). Auf diesem Tatbestand baut das MERO-Bausystem und der mit Hilfe dieses Bausystems in über 50 Ländern erzielte Erfolg auf.

#### Die Elementar-Körper und ihre Gestalt-Veränderung durch Koordinaten-Transformationen:

Architektonisch eröffnet der Aufbau der Raumfachwerke aus Elementar-Körpern eine ganz neuartige Stil-Bildung im Bauwesen. Während in der Vergangenheit alle Bauwerke in der Regel und, von wenigen Ausnahmen abgesehen, vom Cubus und Quader abgeleitet waren, gelangt man durch die Zusammensetzung der Elementarkörper in Raumfachwerken zu dem neuen Prinzip der "Komposition von Cubus-Segmenten" nicht nur in statischer, sondern auch in baugestalterischer Hinsicht.

Dieses Prinzip wurde seit der erstmaligen Demonstration in der Ausstellung DEUNAU Essen 1962 und in der gleichzeitigen Schrift "Komposition im Raum" in zahlreichen Veröffentlichungen und Bauwerken demonstriert und verwirklicht. Dass es sich auch um ein baugestalterisch neues und interessantes Prinzip handelt, wurde in der als Kunst-Ausstellung traditionsreichen Biennale Venedig im Jahre 1970 mit einer Reihe von Modellen vorgeführt (Bild 4).

Zunächst handelt es sich dabei um die aus dem Cubus durch verschiedene Schnitte gewonnenen Cubus-Segmente. Aber schon beim kritischen Vergleich dieser Cubus-Segmente fällt etwas auf, was bisher in der Architektur nicht beachtet und verwertet worden ist. Es handelt sich um die Verwandtschaft verschiedenartiger Cubus-Segmente und um die Wandlungsfähigkeit durch Koordinaten-Transformation.

So z.B. sind die 3 wichtigsten Vierflächen der regelmässigen Raumfachwerke miteinander verwandt, nämlich das Tetraeder mit 6 gleichlangen Seiten und 4 gleichseitigen Dreiecken sowie das Viertel-Oktaeder mit 2 gleichseitigen Dreiecken und 2 rechtwinkligen Dreiecken und schliesslich das Achtel-Oktaeder mit einem gleichseitigen Dreieck und 3 rechtwinkligen Dreiecken. Alle 3 Körper können ineinander durch Koordinaten-Transformation überführt werden. (Bild 2). Sinngemäß kann man das halbe Oktaeder in die Zentral-Pyramide des raum-zentrierten Cubus überführen, einen Quader mit der Grundflächenkante 1 und der Bauhöhe  $\sqrt{2}$  in einen raum-zentrierten Cubus (Bild 5a und 5b), ein Oktaeder in ein Trigonal-Anti-Prisma usw. Alle derartigen Koordinaten-Transformationen sind selbstverständlich umkehrbar.

#### "Abgeleitete Raumfachwerke":

Die festgestellte Verwandtschaft gewisser Elementarkörper erklärt, dass auch eine Reihe regelmässiger Raumfachwerke miteinander "verwandt" sind.

So z.B. entsteht aus einer Oktaeder-Tetraeder-Platte (im Dreiecks-Raster) gemäss Bild 11 der Bauhöhe  $H_B = \frac{1}{3} \sqrt{6}$  durch Halbierung die neue Bauhöhe  $H_B = \frac{1}{6} \sqrt{6}$  und damit das reguläre Raumfachwerk aus Achtel-Oktaeder und Trigonal-Anti-Prisma. Beide erscheinen im Grundriss in gleicher Gestalt. (Bild 6a u. 6b).

Hieraus entsteht die wichtigste Folgerung für den Bau beliebig gestalteter Raumfachwerke:

Grundsätzlich kann aus jeder regulären Bau-Form durch Koordinaten-Transformation eine ähnlich aussehende irreguläre Bau-Form mit einer frei gewählten Bau-Höhe geschaffen werden. Hierbei geht aber die Einheitlichkeit der Winkel am Knoten verloren; d.h. es entstehen neue Winkel am Knoten.

### Raumfachwerke für beliebig gestaltete Grundriss-Lösungen:

Dies hier umrissene Verfahren der Koordinaten-Transformation regelmässiger Raumfachwerke bietet insbesondere in der Praxis des Bauwesens die Grundlage für die Ausführung von Raumfachwerken mit beliebig gestalteten Grundrissen. Bild 7 zeigt beispielsweise einen Grundriss, bei dem durch eine Schar parallel laufender Geraden und eine kreuzende zweite Schar von Geraden, die sich in einem Fluchtpunkt schneiden, ein Grundriss mit einem Trapez als Begrenzung und einer Schar von Trapezen als Raster-Elementen entsteht. Bild 8 zeigt an dem Beispiel des Daches für das Olympia-Stadion Berlin eine Variation, bei der sowohl der Gesamt-Grundriss wie auch das Grundriss-Raster bestimmt ist durch eine Schar kenzentrischer Polygone und die Schar der Strahlen, die die Polygonen-Mittelpunkte mit den Eckpunkten verbinden. Gleichzeitig ist in beiden Fällen sinngemäss, unter Beibehaltung des Konstruktionsprinzips regelmässiger Raumfachwerke, die Bauhöhe in Abhängigkeit von der Veränderung der Kantenlänge verändert.

### Raumfachwerke für Tonnen, Kuppeln und ähnliche räumliche Gebilde:

Verkürzt man in einer regelmässigen Raumfachwerk-Platte mit 2 Achsen beispielsweise auf der Unterseite die Länge der Stäbe in einer Richtung, so entsteht ein tonnenförmiges Raumfachwerk (Bild 9).

Sinngemäss kann man aber auch die Raumfachwerke für Kuppeln ableiten aus den Baugesetzen der regelmässigen Raumfachwerke. Beispielsweise kann man sich ein einlagiges Kuppel-Raumfachwerk dadurch entstanden denken, dass man ein ebenes Netz aus Stäben und Knoten räumlich verformt (Bild 10). Hierbei verändern sich gleichzeitig die Stablängen und die Winkel zwischen den Stäben.

Schliesslich kann eine zweilagige räumliche Fachwerk-Kuppel dadurch aus einem ebenen Raumfachwerk abgeleitet werden, dass man im Gegensatz zu den vorher erwähnten Beispielen nicht die Bauhöhe verändert, sondern wie bei der einlagigen Kuppel die Stablängen und die Winkel so verändert, dass schliesslich ein Gebilde entsteht, das einer Kugel-Schale angenähert ist, wie beispielsweise bei der für die Regierung der Bundesrepublik auf der EXPO 1970 in Osaka ausgeführten Konzertkuppel (Bild 11).

Praktisch kann man nach diesem Verfahren der Ableitung von räumlich verformten Raumfachwerken aus den regelmässigen Fachwerken beliebig gestaltete Flächen-Konstruktionen ausführen, also auch beispielsweise eine Gruppe von Kuppeln in Form von Rotations-Paraboloiden (Bild 12).

### Probleme der wirtschaftlichen Ausführung und deren Lösung:

Die "regelmässigen Raumfachwerke" haben ihren Siegeszug der Tatsache zu verdanken, dass man mit einem kleinen Sortiment von Stablängen und einem einzigen Typ von Knotenstücken, d. h. mit solchen Knotenstücken auskommt, die einheitliche Winkel aufweisen.

Bei den "abgeleiteten Raumfachwerken" werden durch die Verzerrung der Elementarkörper sowohl die Stablängen wie auch die Winkel zwischen je 2 Stäben verändert. So z.B. weist das Dach des Olympia-Stadions Berlin über 250 Arten von Knotenstücken und rund 450 verschiedene Stäbe auf, weil zu den Unterschieden in der stereometrischen Form der Elementarkörper noch die unterschiedlichen Abmessungen der Stäbe und damit der Knotenanschlüsse hinzukommen, die sich aus der unterschiedlichen Beanspruchung der Stäbe an den verschiedenen Stellen des Raumfachwerkes ergeben. Zunächst ist festzustellen, dass die Bewältigung dieser Aufgaben rein rechnerisch heute nur mit Hilfe der EDV-Technik möglich ist. Noch vor wenigen Jahren musste man sich mit Näherungsrechnungen behelfen, die unzuverlässig und darüberhinaus ausserordentlich zeitraubend waren, unter Umständen so zeitraubend, dass allein daran die Projektbearbeitung gescheitert wäre. Nunmehr ist es möglich, mit Hilfe der EDV-Technik sowohl die Kräfte wie auch die Stablängen und Winkel und darüberhinaus die Abmessungen der Stäbe und Anschlüsse und die im Gebrauchszustand auftretenden elastischen Verformungen genau zu berechnen. Aber auch diese rechnerische Erfassung allein würde noch nicht für die wirtschaftliche Ausführung derartiger Raumfachwerke genügen. Das zweite sind die Verfahren für die mathematische "Optimierung" der Raumfachwerk-Netze. Das Dritte schliesslich ist die Entwicklung neuer Produktionsverfahren für Stäbe und Knoten. Diese neuen Produktionsverfahren verwirklichen es, kleine oder sogar sehr kleine Serien von Knoten und Stäben mit individuellen Winkeln bei den Knoten und individuellen Längen bei den Stäben genauso wirtschaftlich auszuführen wie grosse Serien, und wesentlich wirtschaftlicher als dies früher bei genormten Bauelementen möglich war. Wesentlich hierbei ist ferner, dass auch diese Herstellung kleiner Stückzahlen für eine Art von Knotenstücken oder Stäben mit der grössten Präzision möglich ist, die die Voraussetzung bildet für eine reibungslose und schnelle Montage auf der Baustelle sowie für die Vermeidung von Montagezwängungen und Ungenauigkeiten.

Erfahrungen und Beispiele aus der Praxis:

Die serienmässige Herstellung der typisierten Bau-Elemente und die Konstruktion der Raumfachwerke im Sinne der vorstehend umrissenen "Kompositions-Gesetze" ermöglicht und sichert auch die wirtschaftliche Anwendung in der Praxis. Ein entscheidender Vorteil der industriell hergestellten Bau-Elemente des MERO-Systems liegt in der Möglichkeit, auch sehr grosse Baukonstruktionen am Boden zu montieren und mit Hebezeugen in die Gebrauchslage zu heben. (Bild 13 und 15). Anderseits können Bauwerke mit grosser senkrechter Ausdehnung besonders günstig auch vom Boden aus in die Höhe gebaut werden (Bild 14).

Die Raumfachwerke der hier beschriebenen Art sind unter allen heute international realisierten Baukonstruktionen dadurch ausgezeichnet, dass sie extrem günstige Verhältnisse zwischen Eigengewicht und Nutzlast garantieren. Sie besitzen also eine äusserst günstige "Leichtbau-Kennziffer". Das bedeutet: man kann mit einem Mindestaufwand an Material sehr grosse Spannweiten überbrücken. Ein typisches Beispiel ist das Dach der Flugzeughalle gemäss Bild 15/17.

Diese Eigenschaft sichert den Raumfachwerken in der Zukunft auch eine führende Rolle im Mehrgeschoss- und Vielgeschoss-Bau. Zwar steht diese Entwicklung noch am Anfang. Jedoch ist sicher, dass im Städtebau der Zukunft der Hoch-Bau im wörtlichen Sinne die Voraussetzung für die Bewältigung der Probleme sein wird, die das schnelle Wachstum der Erdbevölkerung einerseits und die Begrenzung der Erdoberfläche andererseits verursachen. Hierbei wird es zugleich notwendig sein, den bisherigen Baustil, der durch das Bauen mit Steinen auf die bevorzugte Anwendung des Cubus und des Quaders ausgerichtet ist, durch eine mathematisch fundierte und bewusst ausgeübte Kunst der "Komposition im Raum" unter Verwendung industriell hergestellter Serienbauelemente zu bereichern.

Hier kann und wird das Bauen mit Raumfachwerken im "Baustil der Cubus-Segmente" etwa im Sinne der Bilder 18 und 19 für die Zukunft des Bauwesens aus technischen, wirtschaftlichen und baugestalterischen Gründen eine entscheidende Rolle spielen.

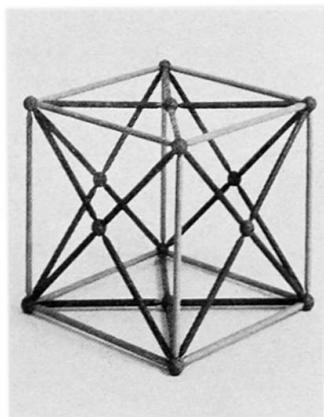
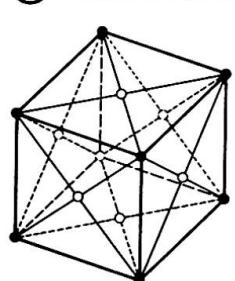


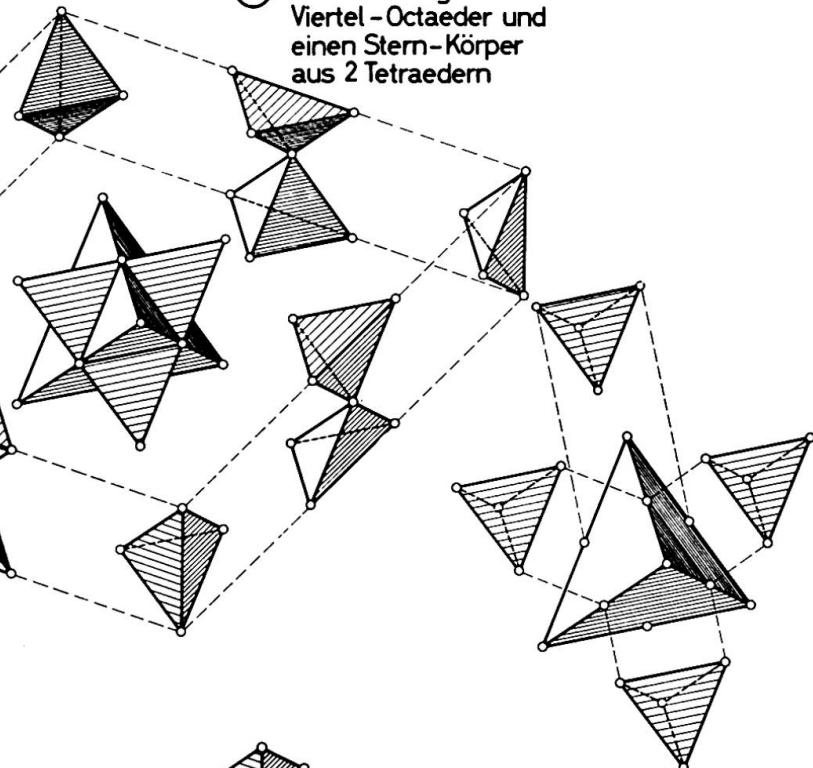
Bild 1 a: Der flächen-zentrierte Cubus und seine Zerlegung in 18 Viertel-Oktaeder und 8 Tetraeder  
Dr. 1872 c 2

Bild 1 b: Zerlegung des Cubus in 16 Viertel-Oktaeder und 8 Tetraeder Dr. 533

① Flächen-zentrierter Cubus

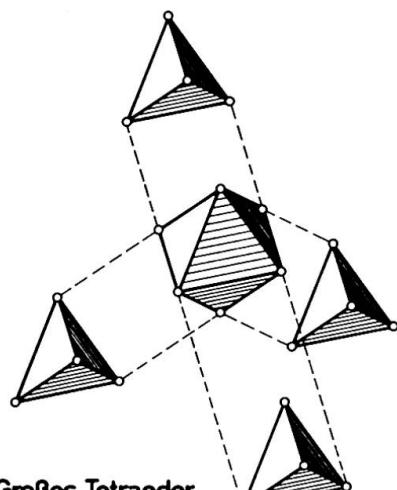


② Cubus zerlegt in 12 Viertel-Oktaeder und einen Stern-Körper aus 2 Tetraedern



③ Stern-Körper zerlegt in 1 großes Tetraeder und 4 kleine Tetraeder

④ Großes Tetraeder zerlegt in 1 Octaeder und 4 kleine Tetraeder



⑤ Octaeder zerlegt in 4 Viertel-Oktaeder

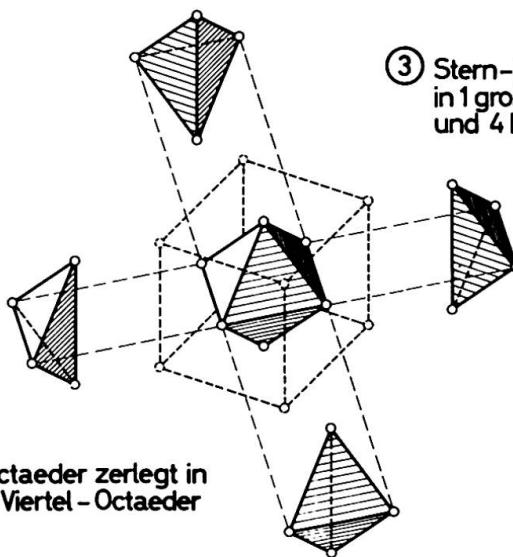


Bild 2: Die wichtigsten (regelmässigen und halbregelmässigen)Vierflache, nämlich:  
 das regelmässige Tetraeder, das Viertel-Oktaeder und das Achtel-Oktaeder

Dr. 1872 A 12

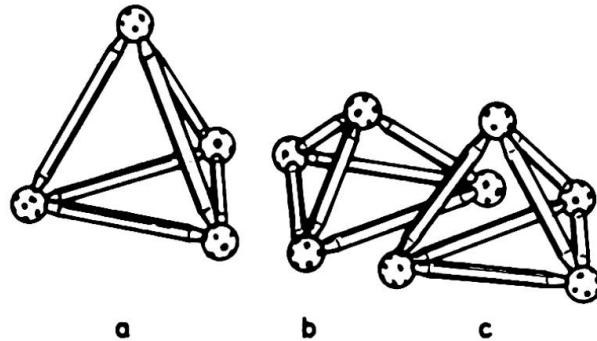
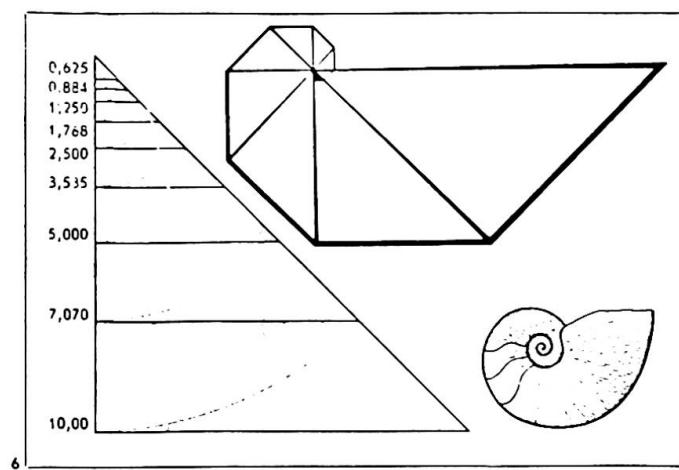


Bild 3: Die Stab-Reihe des "natürlichen Wachstums mit dem Faktor  $\sqrt{2}$ " mit den Ausgangslängen für den Bau regelmässiger Raumfachwerke nach Tafel 1

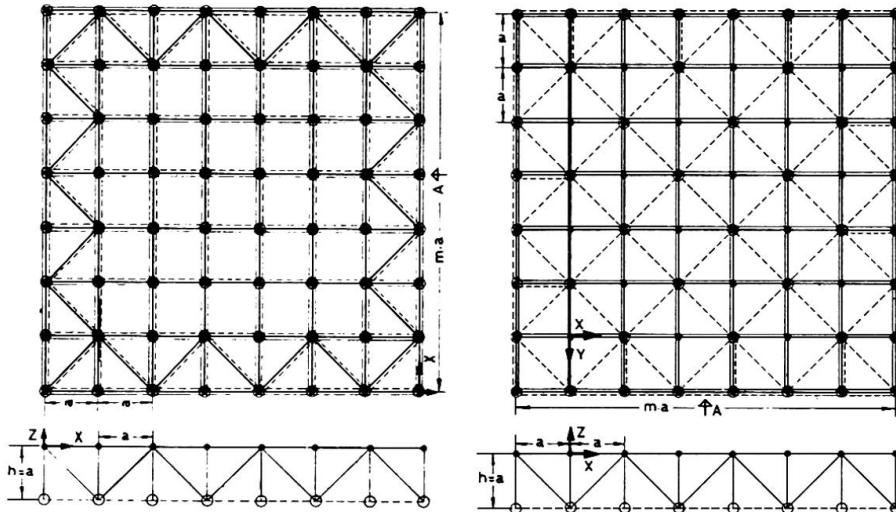
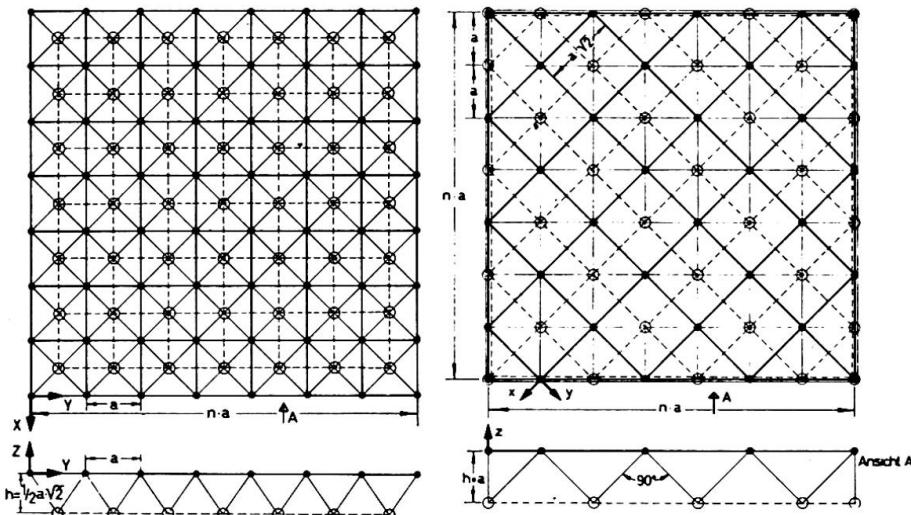
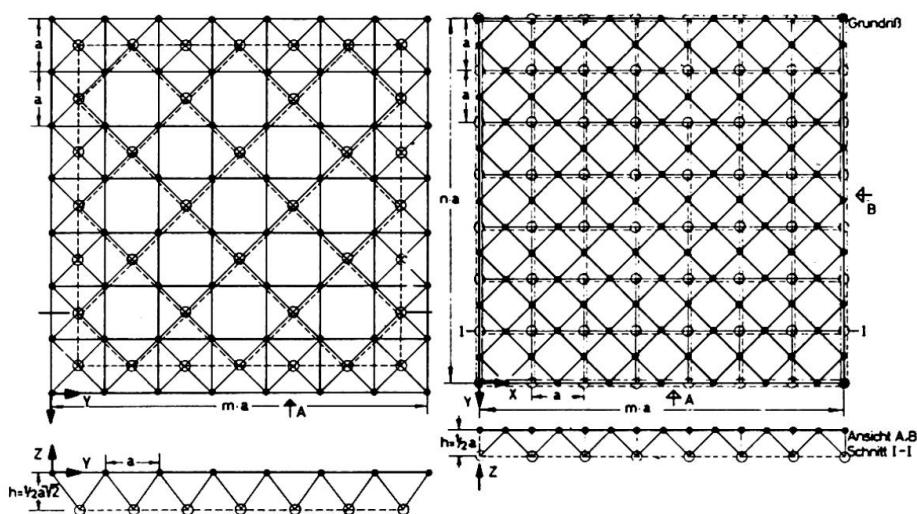


# Katalog der regelmäßigen Raumfachwerke (Auszug)

Tafel 1

## Quadrat-Raster (Rand parallel oder „Diagonal“)

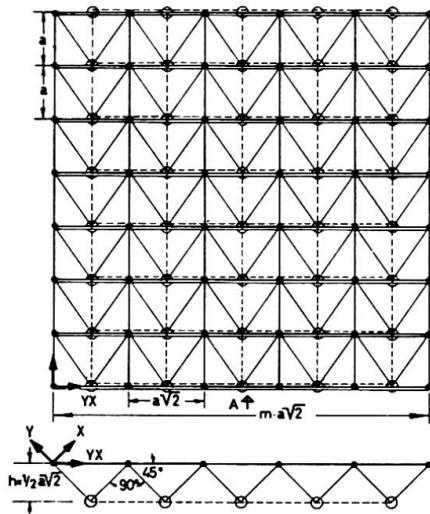
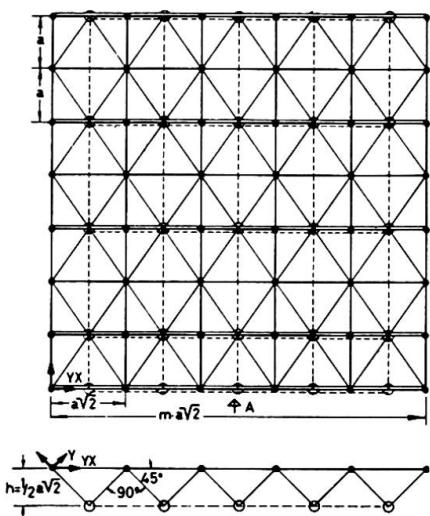
Cubus mit Diagonalen-Minimum C (Dmin)

Halb-Oktaeder und Anti-Sphenoid  
Obergurt Rand-parallel  $\frac{1}{2}O$  + ASPHalb-Oktaeder und Tetraeder  $\frac{1}{2}O$  + THalb-Oktaeder und Tetraeder Obergurt  
und Untergurt nicht Rand-parallel  $\frac{1}{2}O$  + THalb-Oktaeder und Halb-Cub-Oktaeder  
Obergurt Rand-parallel  $\frac{1}{2}O$  +  $\frac{1}{2}CO$ Halb-Oktaeder und Halb-Cub-Oktaeder  
Untergurt Rand-parallel  $\frac{1}{2}O$  +  $\frac{1}{2}CO$ 

Tafel 2

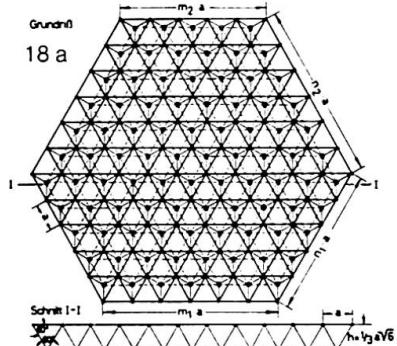
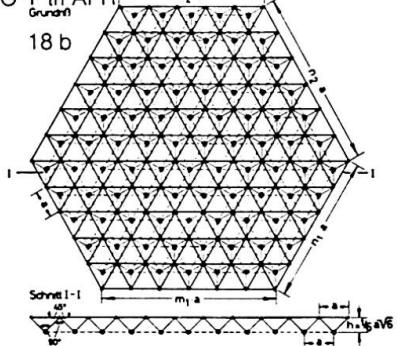
## Rechteck-Raster

Zwei-Cubus-Diagonal Segment 2 x CDS

Achtel- und Viertel-Okttaeder und Cub-Okttaeder-Segment  $\frac{1}{8}O + \frac{1}{4}O + COS$ 

## Dreieck- und Sechseck-Raster

Oktaeder und Tetraeder O + T

Achtel-Okttaeder und Trigonal-Anti-Prisma  $\frac{1}{8}O + tri\ APR$ 

Oktaeder-Tetraeder und Hex-tri-Prismatoid O + T + PRT

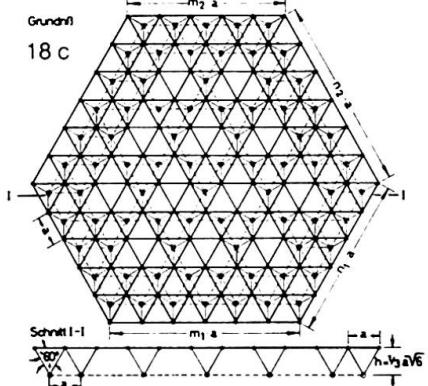


Bild 4: Prinzip der Raum-Komposition aus Cubus-Segmenten mit Darstellung der wichtigsten Elementarkörper um den "natürlichen Raum-Raster" des flächen-zentrierten Cubus.

Modell einer Raum-Komposition, ausgestellt in der "Biennale Venedig 1970"

Foto 2004 a

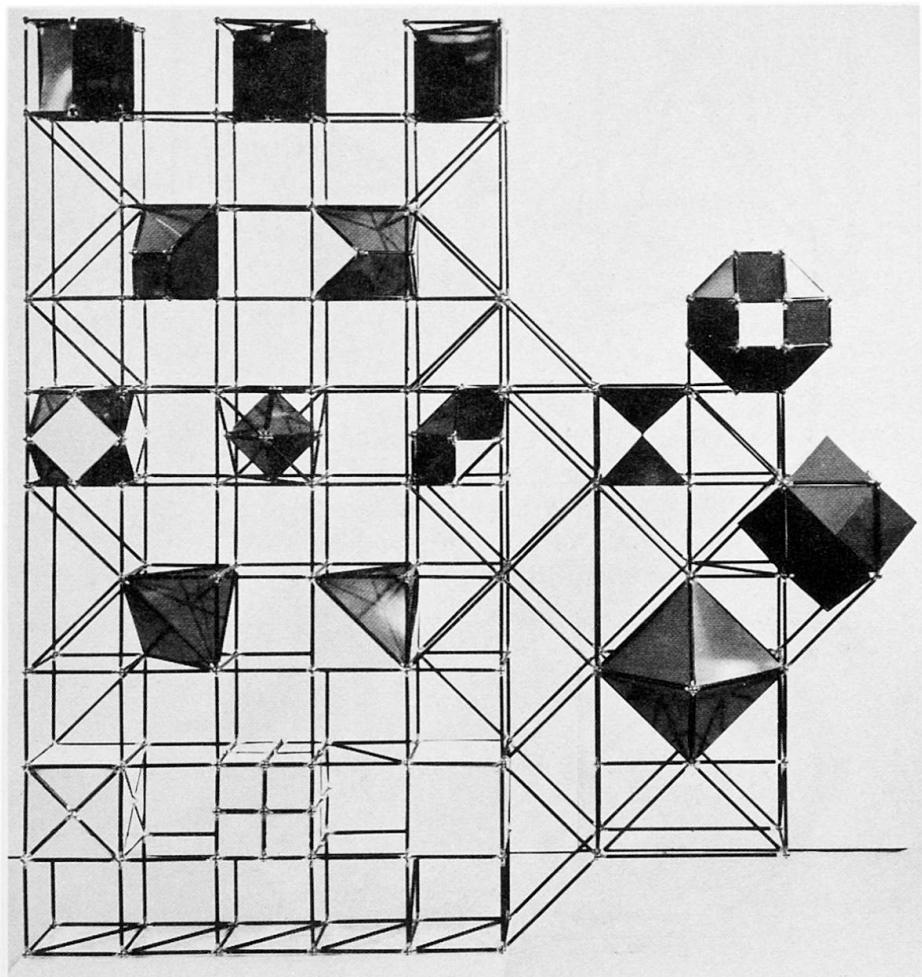


Bild 5: Verwandlung eines Quaders mit der Grundflächenkante 1 und der Bauhöhe  $\sqrt{2}$  (Bild 5 a links) in einem raum-zentrierten Cubus (Bild 5 b rechts) Dr. 1872 A 5 a

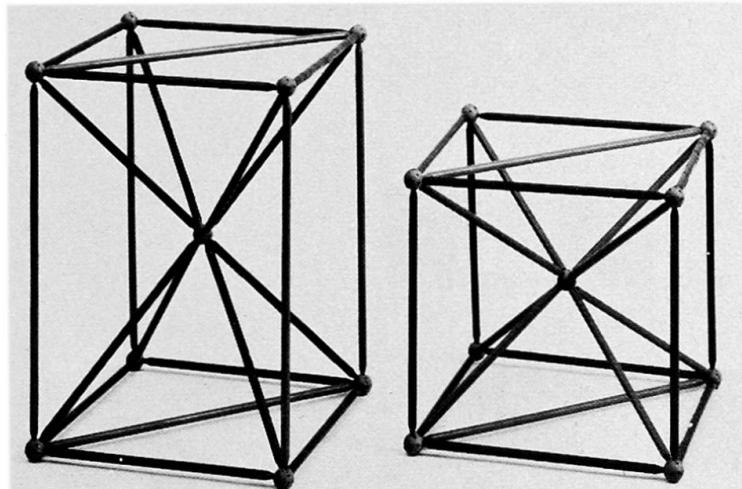


Bild 6: Verwandlung eines Raumfachwerks aus Oktaedern und Tetraedern (Bild 6 a) in ein Raumfachwerk mit Trigonal-Anti-Prisma und Achtel-Oktaedern (Bild 6 b)

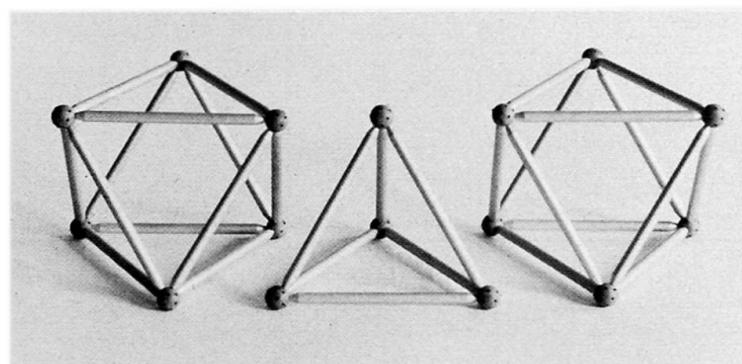


Bild 6 a

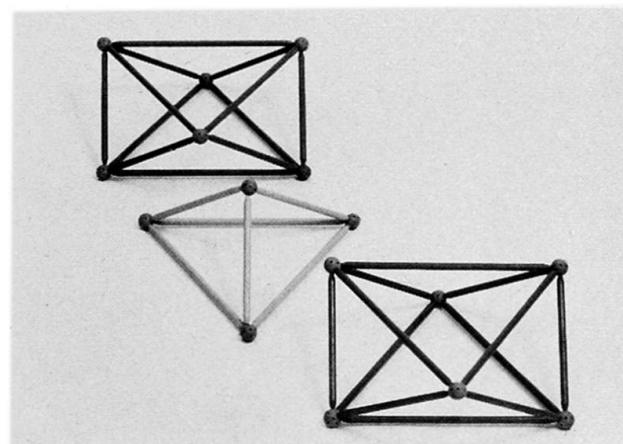


Bild 6 b

Bild 7: Raumfachwerk für eine Aula mit trapez-förmigem Gesamt-Grundriss und Trapez-Raster (gebildet durch eine Schar parallel laufender Geraden, die sich auf einem Fluchtpunkt ausserhalb des Gebäude-Grundrisses schneiden). Die Bauhöhe der einzelnen Elementarkörper ändert sich im Verhältnis der Trapez-Seiten. Dr. 923

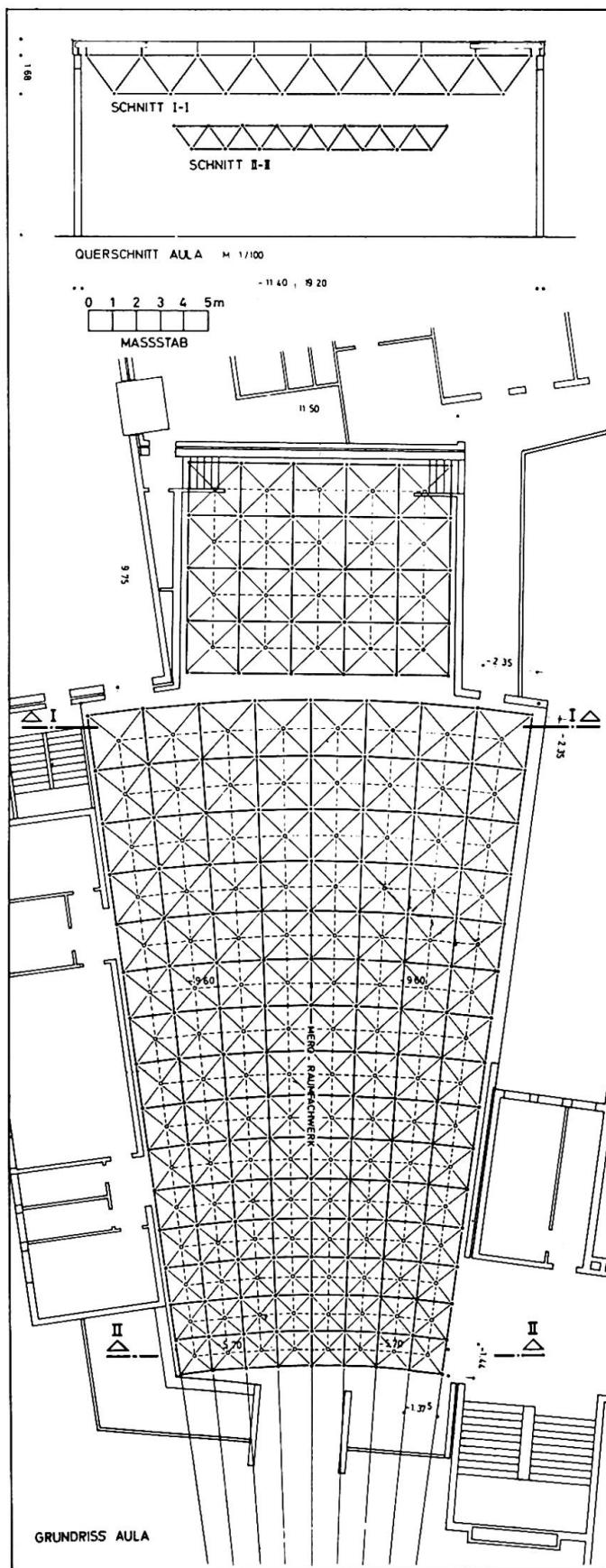
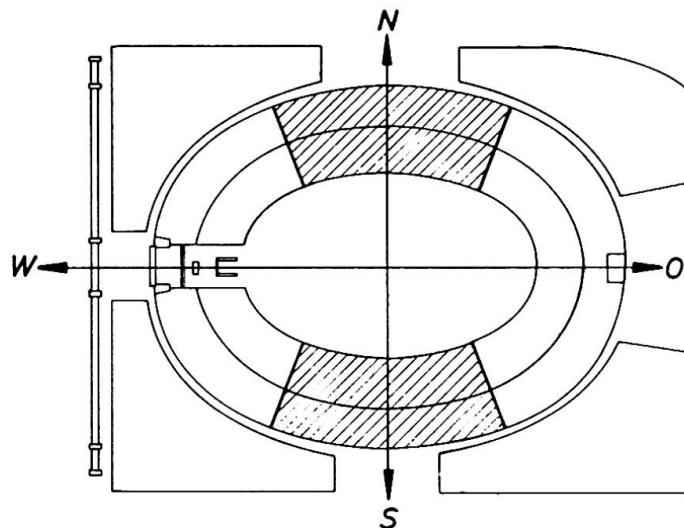
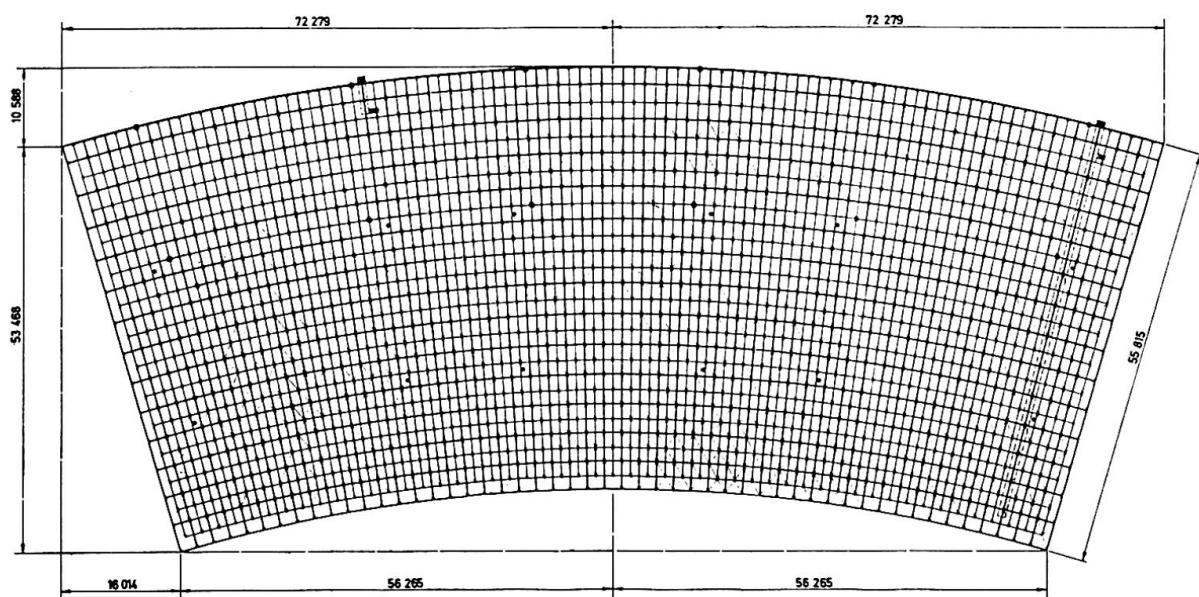


Bild 8: Dach für das Olympia-Stadion Berlin



a) Uebersichtszeichnung

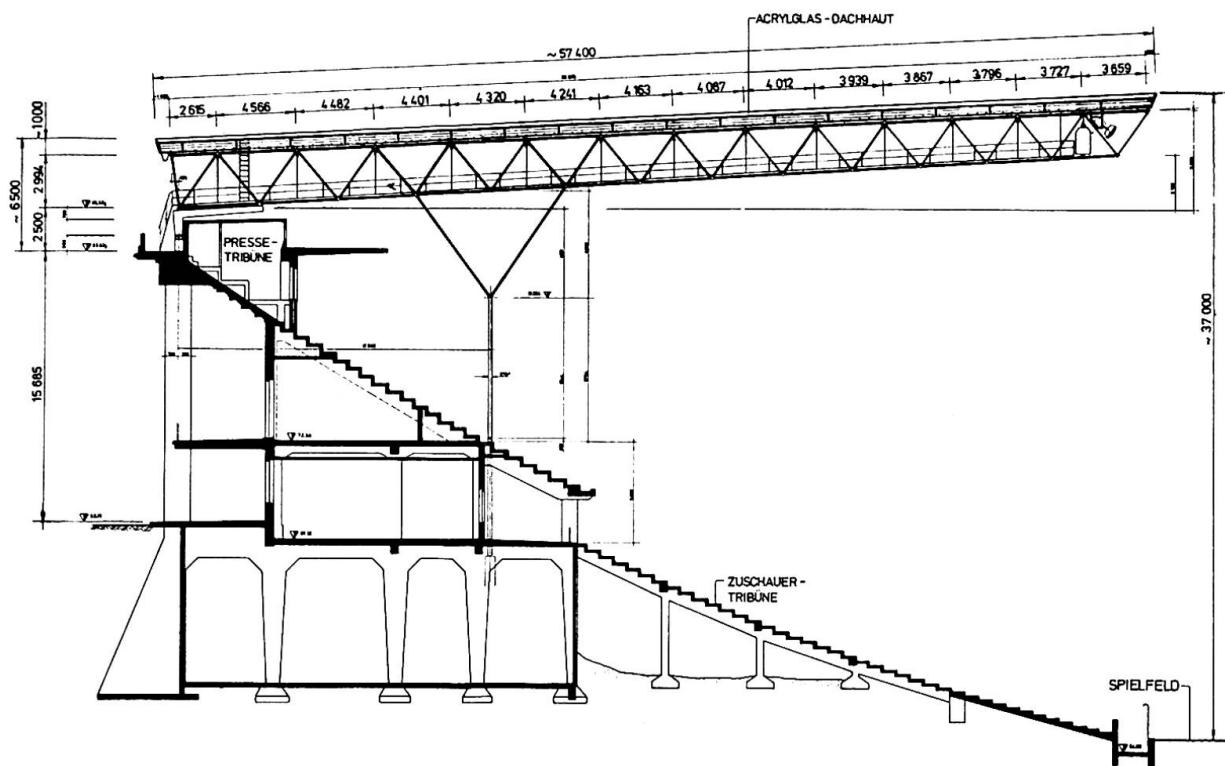
Dr. 1106 a



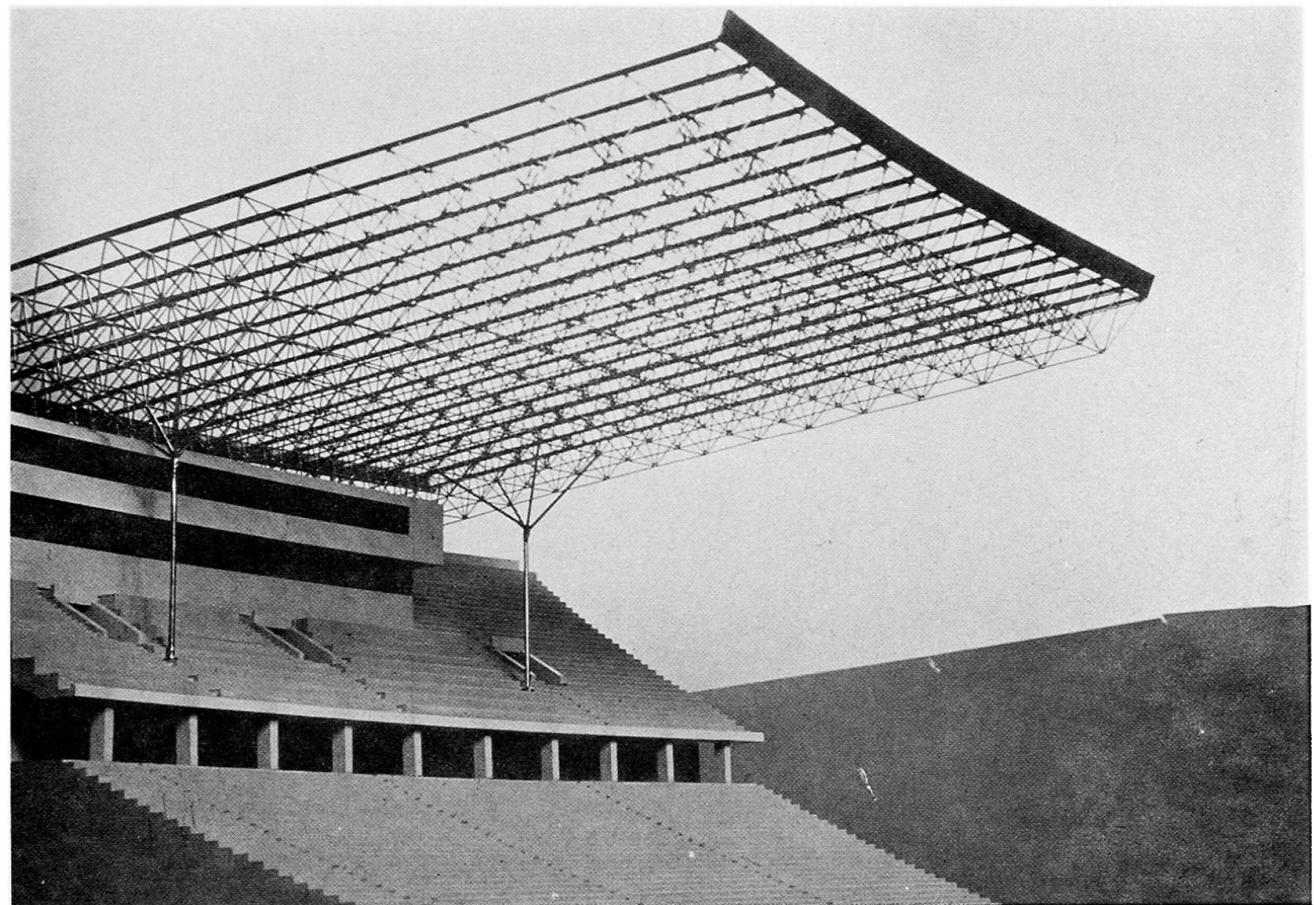
b) Einzelheiten des Raumfachwerks für die Dachkonstruktion, ausgeführt entsprechend der Krümmung des Stadion-Grundrisses mit einer Vielzahl verschiedenartiger Stäbe und Knoten

Dr. 1106 b

Bild 8: Dach für das Olympia-Stadion Berlin (Querschnitt)



c) Schnittzeichnung des MERO-Daches für das Olympia-Stadion mit Hervorhebung der verschiedenen Stablängen, die sich aus der individuellen Grundriss-Konstruktion ergibt  
Dr. 1106 c



d) Modell-Ansicht des MERO-Daches

Foto 2112 ab

Bild 9a: Beispiel für ein Raumfachwerk in tonnenförmiger Ausführung mit regelmässigen Oktaedern und verformten Tetraedern durch Kürzung des Untergurtes

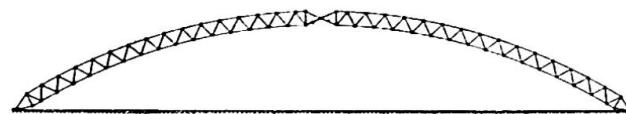


Bild 9b: Ein Beispiel für eine Doppel-Kuppel aus 2 Stablängen und einem MERO-Knoten

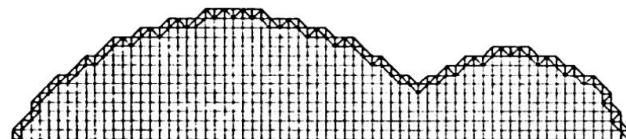


Bild 10: Beispiel für eine einschalige Stabwerk-Kuppel: Spannungsmessungen in der Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin-Dahlem Dr. 1107

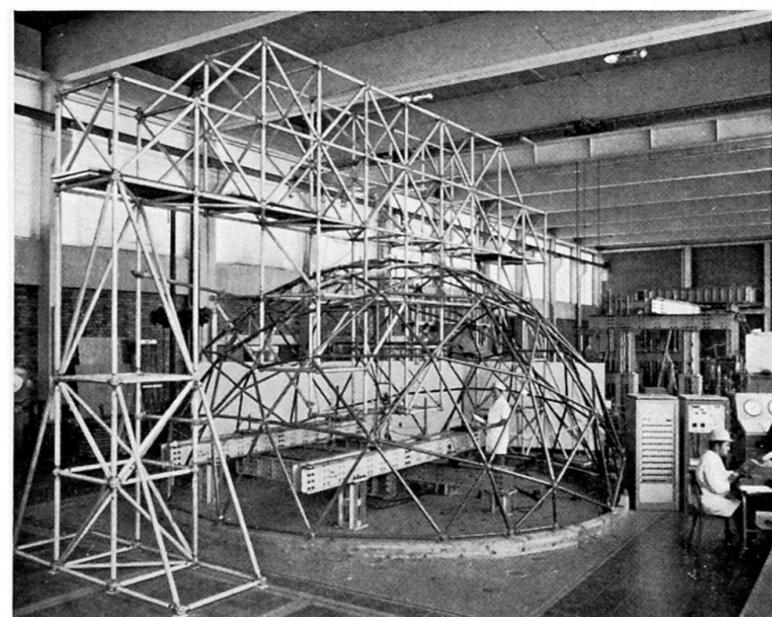
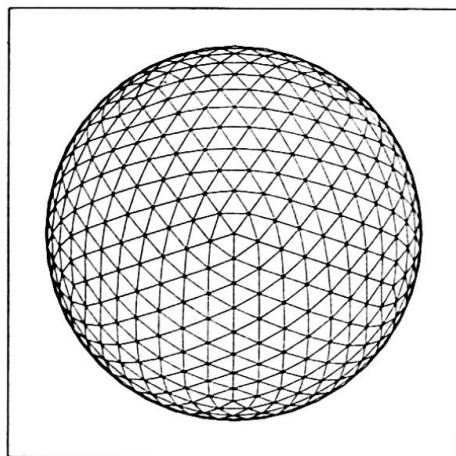
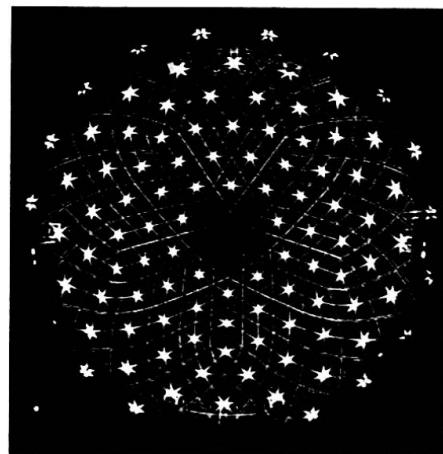


Bild 11: Beispiel für ein Raumfachwerk in Kuppel-Form:  
Konzerthalle der Bundesrepublik Deutschland auf der  
"EXPO Osaka 1970"



a) Computerzeichnung  
der Aussenschale



b) Innenansicht der Kuppel



c) Ansicht der Kuppel

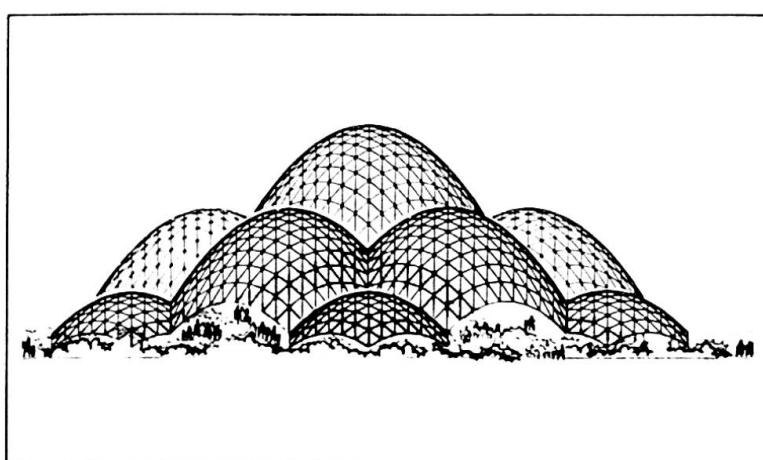


Bild 12: Gruppe von Kuppeln in Form von Rotations-  
Paraboloiden  
Dr. 1105

Bild 13: Montage-Bild eines Fabrikdaches am Beispiel des MERO-Betriebes Berlin-Marienfelde (Halb-Oktaeder - Tetraeder - Packung) mit 3 Stufen:

vorne rechts: Dacheinheit am Boden montiert;

in der Mitte: Dacheinheit während des Hochziehens durch Autokrane;

hinten links: fertiges Dach-Gerippe im Gebrauchszustand  
Foto 2133 g



Bild 14: Montage-Bild einer Ingenieurbaukonstruktion (Cubus-Packung) am Beispiel der Hockey-Anlage für die Olympiade München 1972  
Dr. 1073 Foto 2099 e

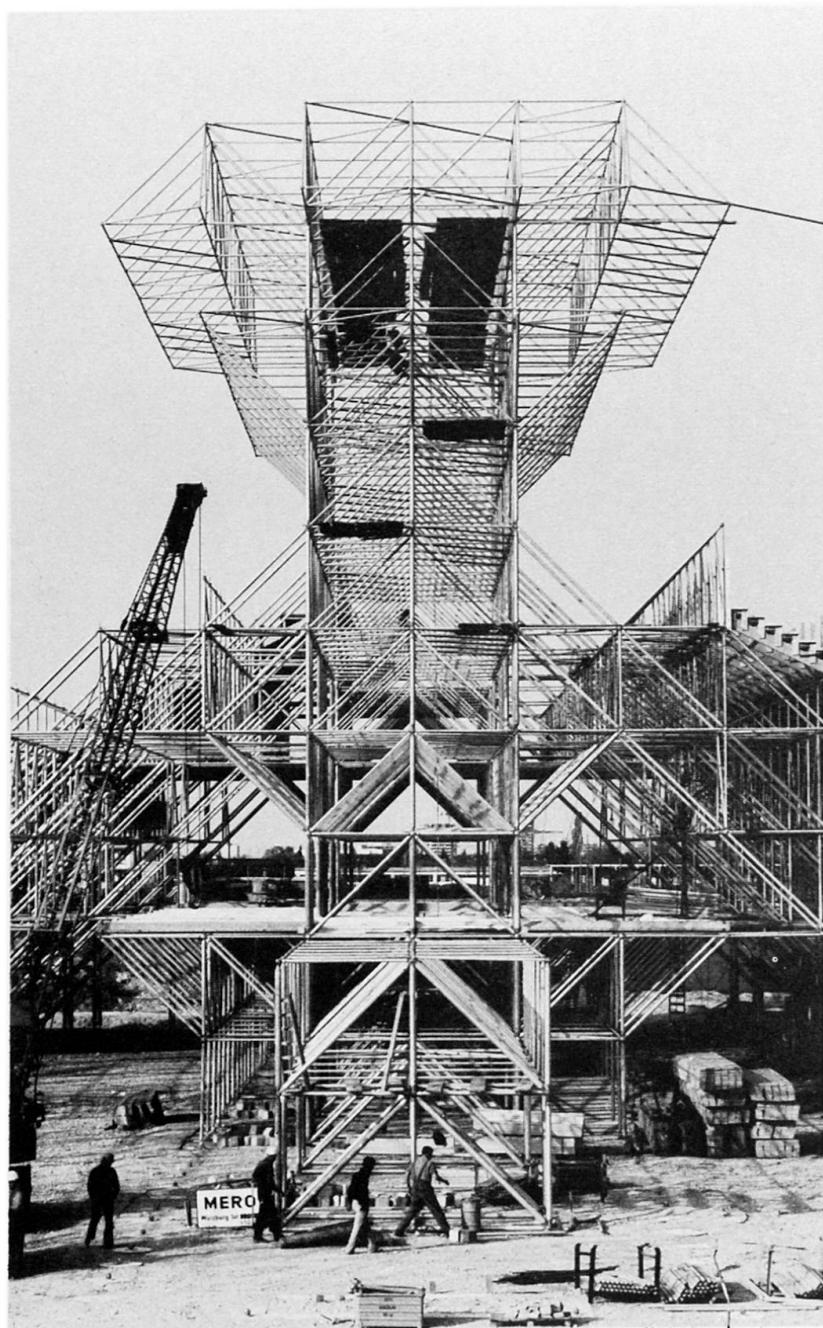


Bild 15: Montage eines Flugzeughallen-Daches von 64 x 83 m Spannweite (Aufziehen der am Boden montierten Dachscheibe mit hydraulischen Hebeböcken auf den vorher montierten Rand-Stützen)  
Dr. 1070 a

Foto 2084 at

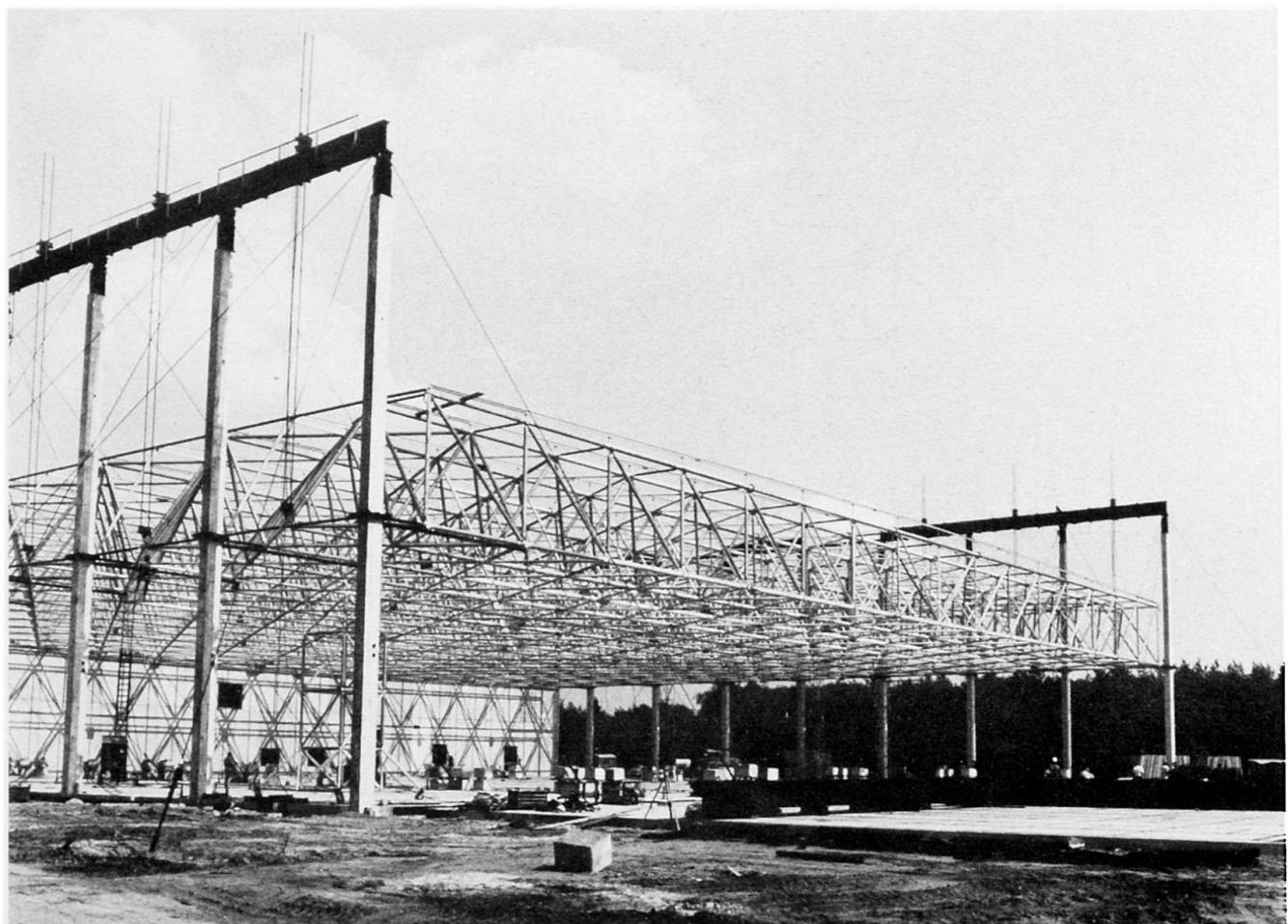


Bild 16: Aussenansicht der fertigen Flugzeughalle nach Bild 15

Dr. 1083 b  
Foto 2084 a2

Bild 17: Innenansicht der fertigen Flugzeughalle nach Bild 15

Dr. 1083 a  
Foto 2084 a7

Bild 18: Ein Muster-Beispiel für ein Bauwerk mit Gestaltung aus Cubus-Segmenten:  
die St. Jakobus-Kirche in Düsseldorf-Eller (1962) Dr. 911

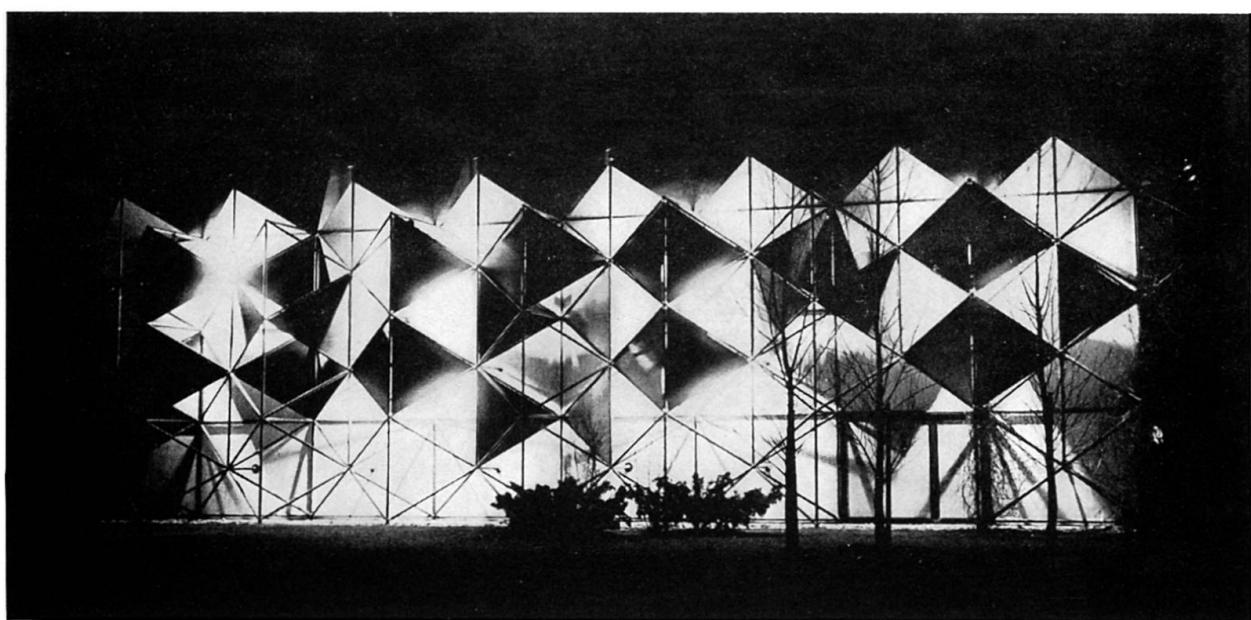
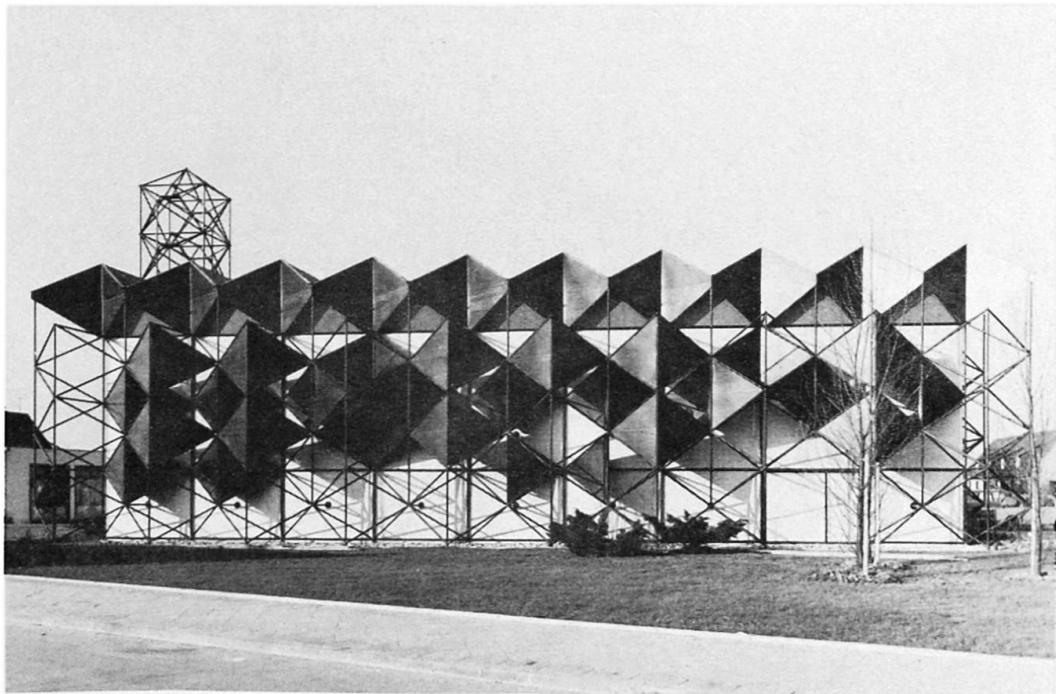
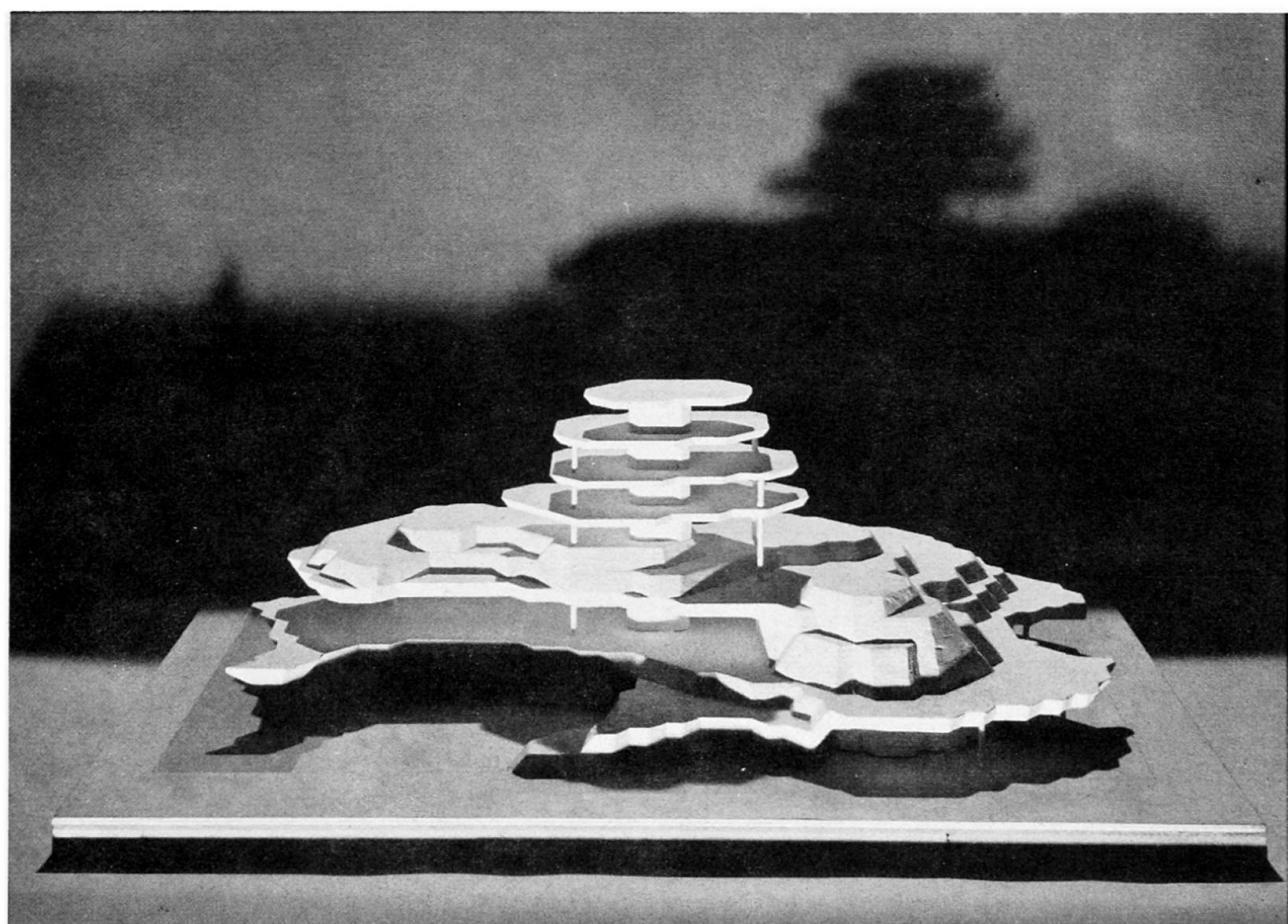


Bild 19: Modell eines Mehrgeschoßbaues mit plastischer Gestaltung aus Cubus-Segmenten  
Foto A/2562 a



Leere Seite  
Blank page  
Page vide

## DISCUSSION LIBRE • FREIE DISKUSSION • FREE DISCUSSION

## Ein besonderes Tragsystem für Hallen grosser Spannweite

A Special System of Space Structure for Halls of Wide Span

Un système de structure particulier pour halles de grande portée

JOSEF ZEMAN  
 Entwurfsbüro für Hüttenwesen  
 Prag, CSSR

Während letzter Jahre wurde in der Tschechoslowakei eine ungewöhnliche Tragkonstruktion für Hallen grosser Spannweiten entwickelt. Diese besteht aus einem Paar schräg gegeneinander geneigten Bogen, welche sich im Scheitel gegenseitig durchdringen. Dieses Bogenpaar bildet das Haupttragssystem für sämtliche senkrechte oder waagerechte Belastungen. Die übrigen Tragteile der Dachkonstruktion wie Unterzüge, Binder und Pfetten sind auf dem Bogenpaar mittels besonderer Hängestäbe eingehängt. Die Bogenpaare können in den Längs- oder auch Querachsen der entworfenen Objekte orientiert werden. /Siehe Bild 1./ Bei grossen und langen Objekten können sie dann auch nebeneinander beliebig oft wiederholt werden.

Die einfachere Ausführung - mit dem Bogenpaar in der Längsachse - wurde bereits mehrmals bei Sporthallen in der CSSR realisiert. Dagegen die weitere Möglichkeit wurde in der letzten Zeit für eine grossere Bauaufgabe in Prag verwendet.

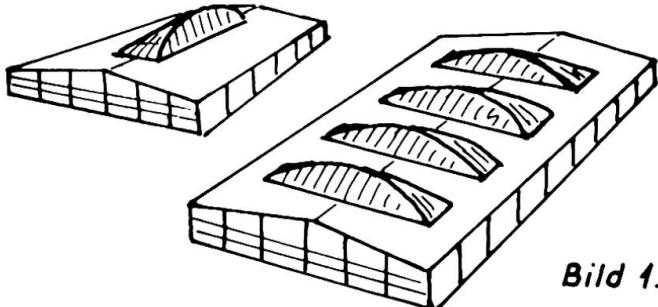


Bild 1.

Für die Überdachung eines grossen Objektes für Garagen und Pflege von Bussen der Hauptstadt Prag wurde eine grosse Hallenkonstruktion mit freiem Raum von 90 x 120m verlangt. Dabei waren die Ansprüche auf die freie Höhe dieses Raumes nicht allzu gross, cca 6-7m.

Für den Entwurf einer geeigneten Tragkonstruktion war dann auch der Bedarf an einer durchlaufenden Reihe von Toröffnungen für die Ein- und Ausfahrt der Buse in den beiden Giebelwänden entscheidend. Zuerst wurde für die Lösung dieser anspruchsvollen Aufgabe eine Seilkonstruktion gewählt.

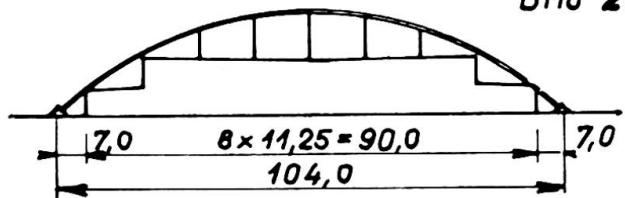
Aus verschiedenen Gründen trat aber die Ausführungs firma von der Realisation dieses Entwurfes ab und so entstand ein Problem, für die anspruchsvollen Bedingungen eine neue, geeignete Lösung

aufzufinden. Für die Tragkonstruktion dieser neuen Halle, welche mit ihren Grundrissabmessungen des freien Innenraumes von 90x120m die grösste seiner Art in der Tschechoslowakei ist, wurde dann die hier kurz dargestellte besondere Tragkonstruktion gewählt.

Das Dach dieser grossen Halle wird von einem Doppelpaar von schräg geneigten Bogen von einer Spannweite 104m und gegenseitiger Entfernung 45m getragen. Die Bogenpaare haben einen geschweißten Kastenquerschnitt und sind hier in der Querrichtung der Halle orientiert. Sie sind – überwiegend

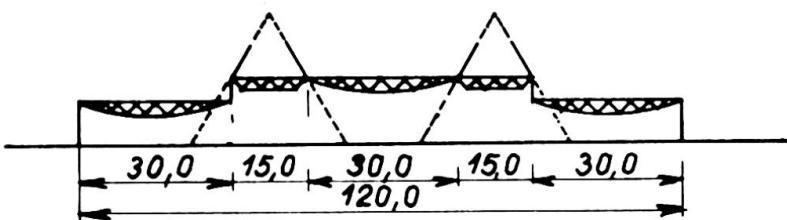
aus architektonischen Gründen in ihrer ganzen Länge oberhalb des Hallengebäudes situiert, weshalb ihre Fundamente 7m hinter den Hallenlängswänden liegen, und die Halle dann eine freie Breite von 90m hat. /Siehe Abbildung 2./

Bild 2.



die übrige Dachkonstruktion besonderer gebrochener Form mit einem mächtigen Oberlicht, eingehängt. Diese besteht aus besonderen, 15m langen Querträgern in 7 Zwischenebenen und in Entfernungen à 11m, in welche dann auch beiderseitig die Binder von 30m Spannweite eingehängt sind. Diese Fachwerkbinder aus Rohren /Bild 3./

Bild 3.



haben eine linsenartige Form, die teilweise im Obergurt der gebrochenen Form des Daches angepasst wird. Auf den beiden Giebelseiten der Halle sind diese Binder auf einfache Stützen in Entfernungen à 11,0m aufgelagert. Zwischen diesen leichten Stützen bleibt genügend freien Raumes für die Durchführung von einer durchlaufenden Reihe von Toröffnungen. Die Dacheindeckung selbst /Profiliertes Alu-Blech mit einer Ausgleichsschicht Leichtbeton und abschliessender, wasser dichter Dachpappe/ tragen leichte Fachwerkpfetten 11m gespannt und in Entfernungen à 3m.

Ausser dieses beschriebenen Objektes wurde dieses besondere Tragsystem in einem Studienentwurf auch für ein weiteres grosses Objekt in Grundrissabmessungen von 90 x 480m gefolgt. Die Anzahl der Bogenpaare war – wegen der grossen Hallenlänge von 480m – insgesamt 11. Zusätzlich wurden aber bei dieser riesigen Industriehalle auf die entsprechend angepasste Dachkonstruktion noch die Kranbahnen für die eingehängten Kranbrücken von 20m Spannweite und 8,0Mp Tragfähigkeit untergebracht. Die Studie hat bewiesen, dass man ein so grosses Objekt mit so anspruchsvoller Belastung mittels des beschriebenen Tragsystems sehr ekonomisch und mit einem niedrigen Stahlverbrauch ausführen kann.



Bild 4.  
Das Objekt der Grossgaragen in Prag im Bauzustand.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag beschreibt kurz einen besonderen Typ der Tragkonstruktion, welche für Hallen grosser Spannweiten geeignet ist. Das Haupttragelement dieses Systemes ist ein Paar schräg gegeneinander geneigter Bogen, welche entweder in der Längs- oder Querachse der Halle orientiert sind. In ihrem mittleren Teil ragen sie über die Dachebene hinaus und können dabei ein grosses Oberlicht bilden. Die übrige Dachkonstruktion ist in die Bogen eingehängt.

## SUMMARY

The contribution describes briefly a special type of the supporting structure which is suitable for halls of wide span. The main supporting element of this system is a pair of slanting converging inclined curvatures orientated or in the longitudinal or in the transverse axis of the hall. In their middle part they project above the roof plain and can form in this way a large skylight. The remainder roof construction is hanged up in the curvatures.

## RESUME

Ce travail décrit un type spécial d'éléments porteurs étudiés pour les halles de grande portée. La partie principale du système est une paire d'arcs, inclinés de biais l'un contre l'autre, qui sont orientés soit dans le sens de la longueur ou dans le sens de la largeur de la halle. Dans leur partie centrale ils ressortent du plan du toit et peuvent former un grand vitrage. L'autre partie du toit est suspendue aux arcs.

Leere Seite  
Blank page  
Page vide

## IIIb

### Monte Carlo Simulation of the Load Carrying Capacity of Members in Space Trusses

Simulation de la force portante d'éléments en treillis à trois dimensions moyennant la méthode Monte Carlo

Simulation der Tragfähigkeit von Elementen in Raumfachwerken mit Hilfe der Monte Carlo-Methode

BO EDLUND  
Assistant Professor  
Chalmers University of Technology  
Gothenburg, Sweden

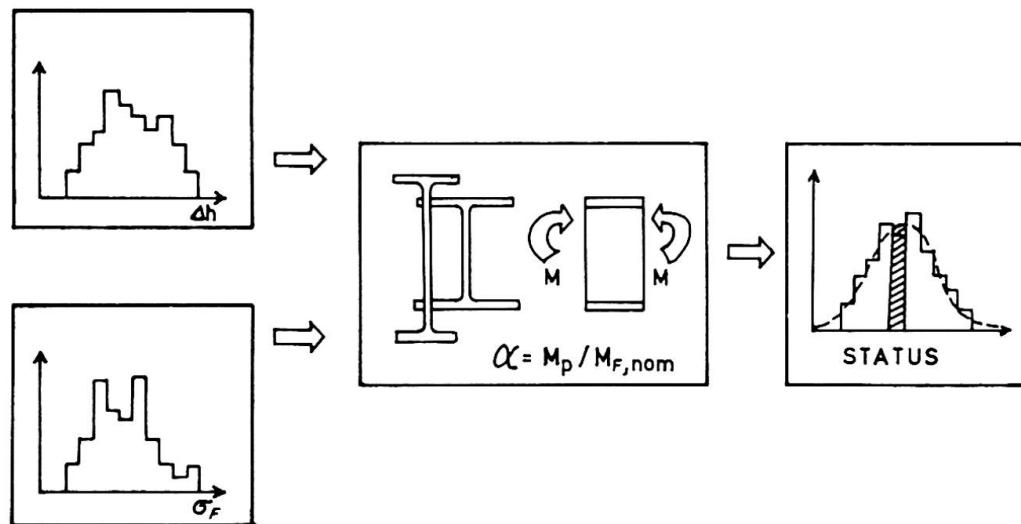
In their paper on the Influence of Member Quality on the Safety of Space Trusses Messrs. Tolman and de Witte use a Monte Carlo Simulation Method to determine the theoretical probability distribution of the collapse load of a truss. The number of bars, the bar arrangement and the number of inferior members with equal degree of inferiority  $f < 1$  are given. The authors seem to use the term "analogous simulation" in the sense of "representing some aspects of the real world by a mathematical model which may be easily manipulated to facilitate their study", i. e. what often is simply called simulation, [1], p.1.

As single random variable Tolman and de Witte introduce the location of the inferior members. Their paper is an interesting study of the load carrying capacity of multiple-member structures with random defects. By use of the finite element method the same Monte Carlo procedure may be applied to problems of nonhomogeneous plates, membranes and shells.

In the following the main principles of a computer program system for Monte Carlo simulation of structural strength will be given. The interest will be focused on the determination of the scatter in the load carrying capacity of single members. As a consequence of this study it is suggested that a simulation of a space truss should be performed where  $f$  is treated as a random variable, and where  $f \geq 1$  is allowed.

#### Monte Carlo simulation program

A Monte Carlo method, i. e. a numerical procedure where random numbers are used, is suited for the investigation of different phenomena governed by stochastic variables [1]. Here we are especially interested in how the scatter in material properties and cross sectional dimensions affect the mean values and the scatter of the load carrying capacity of structural members [1] [2].



This block diagram shows the three main steps of our simulation method :

1. Input of known distribution functions (histograms) for the geometrical and strength variables.
2. A mathematical model for the load carrying capacity. The governing variables are randomly chosen for each play.
3. Output of the statistical distribution (i. e. histograms) of the load carrying capacity of the member. Statistical analysis of the results.

#### Example. Steel compression member [3]

The relative buckling load  $\beta = P_k / P_{F,nom}$  of a centrally loaded initially straight steel column of I-section is computed using the tangent modulus theory and the following mathematical model, which considers elastoplastic behaviour and residual stresses. Here  $P_{F,nom} = \sigma_{F,nom} A_{nom}$  is the yield load of a nominal cross section, and  $P_k = \sigma_k \cdot A$  is the buckling load of the actual column with cross section area  $A$  and buckling stress  $\sigma_k$ .

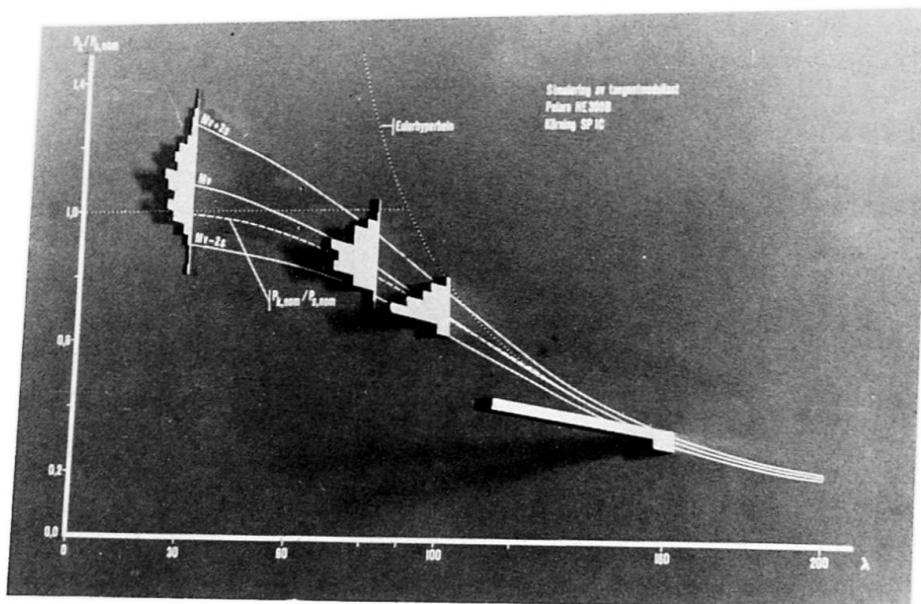
$$\sigma_k = (\pi^2 E / (L/i)^2) \sigma_r^{-q} \cdot (\sigma_F - \sigma_k)^q, \quad \sigma_k \geq \sigma_p = \sigma_F - \sigma_r, \quad 0 \leq q \leq 1$$

$$\sigma_k = \pi^2 E / (L/i)^2, \quad \sigma_k \leq \sigma_p$$

The column has length  $L$  and radius of gyration  $i$ .  $E$  is Youngs modulus,  $\sigma_F$  the yield stress, and  $\sigma_r = k_r \cdot \sigma_F$  the maximum compressive residual stress.

The input data consist of seven stochastic variables (yield stress and cross sectional dimensions) and three deterministic variables ( $k_r$ ,  $q$  and  $E$ ). For the exponent  $q$ , which determines the form of the stress-strain-diagram, the values  $q = 1/2$  and  $2/3$  were chosen [3].

The results are printed as histograms of the relative buckling loads  $\beta$  for every nominal slenderness ratio. The different histograms may be gathered in a 3-dimensional diagram.



The figure given here refers to a column HE 300 B and a mathematical model with  $q = 1/2$  and  $\sigma_r = 0.5 \sigma_F$ . The assumed yield stress has a rather large scatter (coefficient of variation = 9.25 %).

In [3] the results of a series of simulations with different input data are statistically analysed and compared with each other and with experimental results. The large scatter in the simulated buckling load for short and medium length columns is mainly due to the variation in yield strength.

#### References

- [1] Edlund, B. - Leopoldson, U. : Monte Carlo Simulation of the Strength of Steel Structures. Part I. Method and Basic Data. Publ. S 71:3. Chalmers Univ. of Technology, Division of Steel and Timber Structures, Göteborg 1971.
- [2] Edlund, B. - Leopoldson, U. : Monte Carlo Simulation of the Load Carrying Capacity of Steel Beams. To be published in Acta Polytechnica Scandinavica.
- [3] Edlund, B. - Leopoldson, U. : Simulering av bärformåga hos stålpelare. Delrapport 1. Statistisk variation hos tangentmodullasten för valsade pelare med I- och H-tvärsnitt. Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för Konstruktionsteknik, Stål- och träbyggnad, Int. skr. S 70:8, Göteborg 1970.

## SUMMARY

With knowledge of the statistical distribution of member properties, such as geometry, modulus of elasticity and yield strength, the distribution of the load carrying capacity of a member can be determined by a three step simulation procedure. As an example the scatter of the tangent modulus load of a compression member is computed.

## RESUME

En connaissant la distribution statistique des propriétés des éléments, tel que la géométrie, le module d'élasticité et la tension de fluage, la répartition de la force portante d'un élément peut être déterminée par un procédé de simulation en trois étapes. Le calcul du dispersement de la charge (calculée à l'aide du module tangent) d'un élément comprimé, est présenté ici comme exemple.

## ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund der Kenntnisse über die Verteilungsfunktion von Elementeigenschaften wie Geometrie, Elastizitätsmodul und Streckgrenze kann die Verteilungsfunktion der Elementtragfähigkeit mit Hilfe einer dreistufigen Simulationsmethode bestimmt werden. Als Beispiel wird die Streuung der Tangenten-Modul-Last eines gedrückten Stabes berechnet.