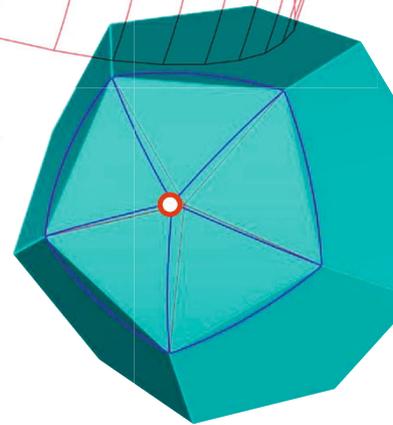


Hans Schober

TRANSPARENTE SCHALEN FORM TOPOLOGIE TRAGWERK



TRANSPARENTE
SCHALEN
FORM
TOPOLOGIE
TRAGWERK

Hans Schober

TRANSPARENTE
SCHALEN
FORM
TOPOLOGIE
TRAGWERK

	Geleitwort	6
	Vorwort	6
	Würdigung und Danksagung	8
	Über den Autor	9
	Unter Mitwirkung von	10
1	Allgemeines zu Schalen	13
1.1	Zum Entwurf von Schalen	14
2	Geschichtliches	19
2.1	Historische Beispiele	20
3	Konstruktionsprinzip von Netzkuppeln	31
3.1	Entwicklung des Konstruktionsprinzips	32
3.2	Konstruktion der Netzkuppeln in Neckarsulm und Hamburg	40
4	Geometrieprinzipien für Netzkuppeln mit ebenen Viereckmaschen	49
4.1	Geometrieprinzip für Translationsflächen	51
4.2	Tonne als einfachste Translationsfläche	53
4.2.1	Optimale Profilkurve	55
4.2.2	Tonnenaussteifung	56
4.2.3	Tonne in Zollinger-Bauweise	63
4.3	Rotationsflächen	64
4.3.1	Reihung von Rotationsflächen	67
4.3.2	Eindimensionale Streckung und Rotation	70
4.4	Kuppeln als Translationsflächen	72
4.4.1	Optimaler Stich von Kuppeln	73
4.4.2	Beispiele für kuppelartige Translationsflächen	74
4.4.3	Reihung von Translationsflächen	79
4.5	Hyperbolisches Paraboloid mit ebenen Viereckmaschen	80
4.5.1	Zum Tragverhalten von Hyparschalen mit geraden Rändern	82
4.5.2	Hypar als Translationsfläche mit ebenen Vierecken	84
4.5.3	Hypar als Regelfläche mit ebenen Vierecken	87
4.5.4	Gleichung des Hypars bei gegebenen vier geraden Rändern	91
4.5.5	Ausschnitte aus Hypar-Flächen entlang der Erzeugenden	94
4.5.6	Reihung von Hyparflächen	101
4.5.7	Entwässerung „ebener“ Flächen	112
4.6	„Schiefe“ Translation	113
4.7	Geometrieprinzip für Streck-Trans-Flächen	122
4.7.1	Zur Streckung räumlicher Kurven	122
4.7.2	Streck-Trans-Flächen	125

4.8	Lamellenkuppeln mit ebenen Viereckmaschen	132
4.8.1	Die reguläre Lamellenfläche	135
4.8.2	Ausschnitte aus Lamellenflächen	136
4.9	Streckung doppelt gekrümmter Flächen aus ebenen Viereckmaschen	137
4.10	Anwendung Geometrieprinzip für räumliche Blechkonstruktionen	140
4.11	Anwendung Geometrieprinzip für Schalungen im Betonbau	142
5	Freigeformte Netzkuppeln	147
5.1	Netzkuppeln mit ebenen Viereckmaschen auf freien Formen	149
5.2	Netzkuppeln mit verwundenen Viereckmaschen	150
5.3	Kombination von ebenen Viereck- und Dreieckmaschen	154
6	Formfindung und Optimierung von Netzkuppeln	161
6.1	Formfindung mit Hängemodell	163
6.2	Formfindung mit Membranelement	165
6.3	Formfindung auf Basis der Dynamischen Relaxation und der Kraftdichtemethode	168
6.4	Holistische „Formfindung“ mittels Formoptimierung	175
7	Zur Statik von Netzkuppeln	185
7.1	Nachweis Verglasung	186
7.2	Nachweis Tragwerk	186
8	Ausgeführte Beispiele	189
8.1	Liste gebauter verglasteter Schalen	190
8.2	Knotenverbindungen	208
8.2.1	Allgemeines	208
8.2.2	Geschraubte Knoten	214
8.2.3	Geschweißte Knoten	229
9	Ganzheitlicher Entwurf – Entwicklungen und Ausblick	239
	Literatur	250
	Literatur zu Projekten	251
	Projektregister	252
	Bildnachweise	254
	Impressum	256

Geleitwort

Dieses Buch beschreibt eine spezielle, aber wunderschöne Baukonstruktion: die gläserne Netzkuppel für weitgespannte, doppeltgekrümmte verglaste Dächer mit minimalem Konstruktionsgewicht und geistreichen Details.

Die Beschreibung erfasst – mit Fleiß und Können – die ganze Breite, von den Netzkuppeln mit ebenen Viereckmaschen bis zu den frei geformten Kuppeln und deren geometrische, statische und konstruktive Optimierung, belegt durch viele Beispiele aus der Praxis des Verfassers.

Wenn man bedenkt, dass damit als Nutzer vor allem die Ingenieure des Konstruktiven Ingenieurbaus angesprochen sind und ihnen ein neues und reizvolles Gebiet erschlossen wird, mit dem sie nicht nur die Architekten sondern auch direkt die Bauherren ansprechen können, dann werden einem die Chancen bewusst, die sich mit diesem Buch uns Bauingenieuren eröffnen, auch dank der vielen Beispiele einschließlich einer der ersten Anwendungen dieses Konstruktionsprinzips beim Olympiadaach in München 1972.

So kann der Unterzeichner, der das Glück hatte viele Jahre mit dem Verfasser im gemeinsamen Büro diese Entwicklung zu begleiten, das vielfältige Buch nur mit offenen Armen empfangen und hiermit freudig weitergeben, in der sicheren Hoffnung, dass damit kreative Ingenieure zu weiteren reizvollen Bauwerken mit leichten, eleganten gläsernen Netzkuppeln stimuliert werden.

Jörg Schlaich

Berlin, im Mai 2015

Vorwort

In den 1980er Jahren beflügelte die technologische Entwicklung den Bau einfach- und doppeltgekrümmter Glasbauten. Mit der Entwicklung leistungsfähiger Computer und CAD-Programmen in Verbindung mit CNC-Maschinen wurden auch geometrisch komplizierte Tragwerke konkurrenzfähig. Dies führte teils zu einer Architektur frei von Fesseln, zur „blob architecture“, also Freiform-Architektur. Das Entwerfen völlig freier Formen erfordert besondere Fähigkeiten, die nur wenige Entwerfer haben, denn opulente und disziplinlose „blobs“ sind in den seltensten Fällen gute Architektur. Nur wenn die Gestaltung mit einer klaren und angenehmen Funktionalität einhergeht, kann man von einer guten Architektur sprechen, denn die optische Erscheinung sollte nur ein integrativer Teil der technischen Entwicklung sein. In dieser Zeit entwickelte das Büro schlaich bergemann und partner, Stuttgart, die Netzkuppeln, eine neuartige Tragkonstruktion, die das Tragwerk durch vorgespannte Seile in ein einlagiges Schalentragwerk überführt, das sich für einfach- und doppeltgekrümmte Formen eignet.

In diesem Buch habe ich meine seit jener Zeit bis heute im Büro schlaich bergemann und partner gesammelten Gedanken, Entwicklungen und Erfahrungen bezüglich der transparenten Schalen niedergelegt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Meinem Lehrer und langjährigen „Chef“ Jörg Schlaich verdanke ich ein kreatives, offenes Umfeld im Büro, das es ermöglichte, an interessanten und innovativen Entwicklungen teilzuhaben und ein erfülltes Berufsleben zu führen.

Einen erheblichen Umfang im Buch nehmen die Geometrieprinzipien für Netzkuppeln ein, welche einfach, anschaulich und leicht nachvollziehbar und mit den heute zur Verfügung stehenden Modulen der üblichen CAD-Programme leicht anzuwenden sind. Obwohl heute Computer-Hilfsmittel verfügbar sind, die auf strukturlosen, völlig frei geformten Flächen Netze mit den gewünschten Eigenschaften generieren und so homogene Strukturen erzeugen, die ohne diese Hilfsmittel nicht möglich wären, meine ich, dass einfache und nachvollziehbare Prinzipien, deren mathematische und geometrische Grundlagen man nachvollziehen kann und die somit keine Blackbox darstellen, nach wie vor ihre Berechtigung haben. Denn die mathematisch basierten Formen sind „begründet“ und diszipliniert, und mathematische Beziehungen haben eine eigene ihnen innewohnende Ästhetik. Rationale Gestaltungsprinzipien sind zeitlos. Was man verstehen kann, wird meist auch als gut bzw. richtig empfunden – dies gilt sowohl für die Geometrie als auch für den Kraftfluss. Jörg Schlaich hat es – in Anlehnung an den bekannten Satz von der guten Theorie – folgendermaßen auf den Punkt gebracht: „Es gibt nichts Praktischeres als eine transparente Theorie“.

In Kapitel 5 beschränke ich mich auf kurze Hinweise zur Benutzung von komplexen Programmen zur (geometrischen) Netzgenerierung auf freien Formen. Die einfachen Geometrieprinzipien des Kapitels 4 können hier bei der Festlegung der Topologie hilfreich sein.

Die statische Optimierung, die bei Schalen stets auch mit einer geometrischen Optimierung einhergeht, wird in Kapitel 6 behandelt. Hiroki Tamai und Daniel Gebreiter erläutern verschiedene, teils noch in der Entwicklung stehende Methoden, die unter anderem verdeutlichen, wie wichtig eine Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur in der Entwurfsphase ist. Lesern, die sich in das Thema Formfindung und Optimierung weiter vertiefen wollen, sei auch das Buch [23] empfohlen.

Um den Umfang nicht zu sprengen, habe ich als ausgeführte Beispiele lediglich die von Schlaich, Bergemann und Partner geplanten Netzkuppeln verwendet und in Kapitel 8 zusammen mit den wesentlichen Informationen bezüglich Geometrie, Tragwerk und Knotenausbildung aufgelistet. Da zu den meisten Projekten Veröffentlichungen existieren, wurde an Stelle einer detaillierten Projektbeschreibung jeweils der entsprechende Literaturhinweis aufgenommen.

Das Buch schließt mit dem von Sven Plieninger und Stefan Justiz zusammengestellten Kapitel „Ganzheitlicher Entwurf“, worunter eine komplexe Interaktion zwischen Geometrie, Topologie und Tragwerksberechnung verstanden wird, um vorgegebene Optimierungsziele wie kraftflussorientierte Geometrie und Stabstruktur, Gewichtsminimierung, homogene Materialausnutzung etc. zu erreichen. Dadurch entsteht ein filigranes und effektives Tragwerk mit technischer Disziplin und Ordnung von guter Qualität und Ästhetik, was allerdings nur bei einer engen Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur bereits im frühen Entwurfsstadium erreicht werden kann.

Sinn des Buches ist es, das bei Schlaich, Bergemann und Partner erarbeitete Wissen bezüglich der transparenten Schalenträgerwerke festzuhalten und den interessierten Kollegen zur Verfügung zu stellen. Wenn einige Architekten und Bauingenieure damit angeregt werden, ästhetische, effiziente und leichte Schalenträgerwerke zu entwerfen und damit einen Beitrag zur Baukultur zu leisten, dann ist das Ziel des Verfassers voll erreicht.

Hans Schober

Stuttgart, im Mai 2015

Würdigung und Danksagung

Während meiner Tätigkeit bei schlaich bergemann und partner habe ich mit vielen talentierten und motivierten Ingenieuren zusammengearbeitet, ohne deren Mitwirkung die Projekte nicht zustande gekommen wären. Um alle aufzuzählen, müsste ich einen großen Teil der Büromannschaft der letzten 30 Jahre benennen, weshalb ich mich auf diejenigen beschränken möchte, mit denen die Zusammenarbeit besonders intensiv war.

Bedanken möchte ich mich bei:

Sven Plieninger, Stefan Justiz, Thomas Moschner, Michael Stein, Thomas Fackler, Michael Werwig, Jochen Gugeler, Jörg Mühlberger, Matthias Nier, Kai Kürschner, Tilman Schober, Daniel Gebreiter, Jan Knippers, Thorsten Helbig, Thomas Bulenda, Peter Schulze, Bernd Ruhnke, Hansmartin Fritz, Cornelia Striegan, Brian Hunt, Jochen Bettermann.

Was wäre die Ingenieurskunst ohne mutige, innovative und engagierte Firmen! Das weiß ich seit meiner Tätigkeit in New York besonders zu schätzen, wo Glasbaufirmen mit dem für neuartige Konstruktionen nötigen Mut und handwerklichem Können nur schwer zu finden waren, so dass wir in vielen Fällen auf deutsche Tochterfirmen in den USA zurückgreifen mussten.

Folgende Firmen trugen wesentlich dazu bei, dass unsere Ideen und Planungen umgesetzt werden konnten:

Helmut Fischer GmbH, Talheim
Mero TSK International GmbH und Co. KG, Würzburg
Josef Gartner GmbH, Gundelfingen
Permasteelisa Group, Vittorio Veneto, Italien
Seele GmbH, Gersthofen
Waagner-Biro, Stahlbau AG, Wien, Österreich
Roschmann Konstruktionen aus Stahl und Glas GmbH, Gersthofen
Tripyramid Structures Inc., Westford, MA, USA
Müller Offenburg GmbH, Offenburg
Lacker GmbH und Co. KG, Waldachtal
W&W Glass, Nanuet, NY, USA

Über den Autor

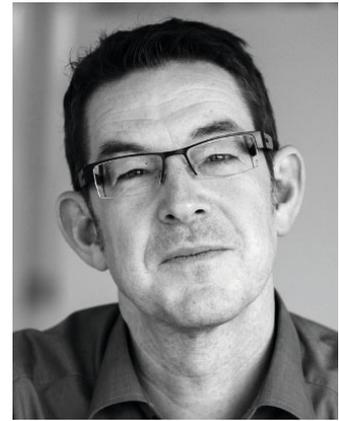


Hans Schober, geboren 1943, studierte Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart und promovierte 1984 bei Professor *Jörg Schlaich* am Institut für Massivbau zum Dr.-Ing. Ab 1982 wirkte er als Ingenieur im Büro *schlaich bergemann und partner*, wurde 1992 Partner und leitete von 2005 bis 2009 das Büro in New York. Seit seiner Rückkehr aus New York ist er als Berater für das Stuttgarter Büro tätig. Während seiner langjährigen Berufspraxis beschäftigte er sich mit dem Entwurf und der Konstruktion von unterschiedlichen Fußgängerbrücken, Eisenbahnbrücken und Bahnhöfen und sammelte reichlich Erfahrung im Entwurf und Bau von Glasdächern, Seilnetzfassaden und frei geformten Strukturen.

Unter Mitwirkung von



Sven Plieninger, 1964 in Heilbronn geboren, studierte Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart und schloss das Studium als Diplom-Ingenieur ab. Seit 1991 wirkte er als Ingenieur bei schlaich bergemann und partner in Stuttgart, wurde im Jahr 2000 Partner und ist seit 2002 geschäftsführender Gesellschafter. Er beschäftigt sich vor allem mit Bauprojekten aus den Bereichen Bildung, Sport und Kultur, die weltweit, mit Schwerpunkt China, umgesetzt werden.



Stefan Justiz studierte Bauingenieurwesen an den Universitäten von Stuttgart und Calgary mit einem Abschluss als Diplom-Ingenieur im Jahr 1995. Seither arbeitet er als Ingenieur bei schlaich bergemann und partner in Stuttgart. Dort beschäftigt er sich mit der Planung von Tragwerken für Brücken, weit gespannten Dächern und Stadionüberdachungen, mit besonderem Fokus auf Glas-Stahlkonstruktionen.



Daniel Gebreiter wurde 1982 geboren. Er hat Masterabschlüsse in Architektur und nachhaltigem Bauen der University of Nottingham (2005) und der Technischen Universität Berlin (2011).

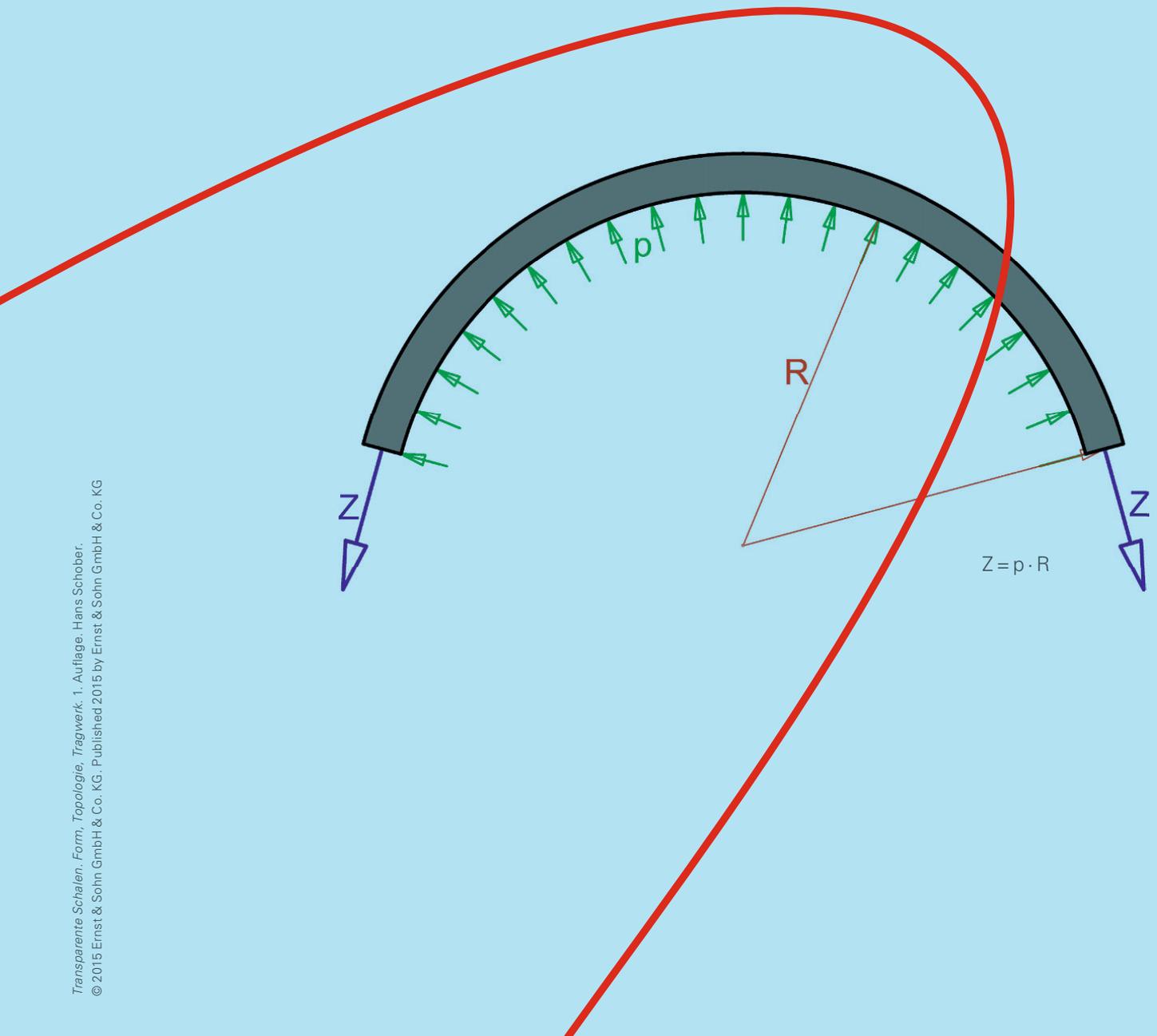
2012 erlangte er im Nachdiplomstudium den Grad des M. Phil. in Digital Architectonics an der University of Bath. Die Abschlussarbeit behandelte das computergestützte Entwerfen von Freiform-Gebäudehüllen. Seither ist Daniel Gebreiter Mitglied der dedizierten Geometrie- und Strukturoptimierungsgruppe bei schlaich bergemann und partner in Stuttgart. Diese Gruppe verwendet und entwickelt digitale Werkzeuge zur Optimierung von Statik und Geometrie großer Bauwerke und Fassaden.

Zuvor arbeitete er bei UN Studio in Amsterdam und Wilkinson Eyre Architects in London.



Hiroki Tamai studierte Architektur und Bauingenieurwesen an der Universität Kyoto mit dem Abschluss als Bachelor und Master of Science. Seinen Titel als PhD in Architektur erhielt er 2005 am Illinois Institute of Technology bei Professor *Mahjoub Elminiri*. Er arbeitete in verschiedenen Architektur- und Ingenieurbüros in den USA bevor er 2008 seine Tätigkeit als Ingenieur im Büro schlaich bergemann und partner in Stuttgart aufnahm. Dort beschäftigt er sich vor allem mit der statischen Optimierung von verglasten Schalen und weitgespannten Stadiondächern und entwickelt Programme zur Formfindung.

1 Allgemeines zu Schalen



1 Allgemeines zu Schalen

Schalen sind auf natürliche Weise schön und effizient, weil die fließende und doppelt gekrümmte Form Lasten ohne Biegung, nur in der Fläche, also nur über Zug- und Druckkräfte fortleiten kann. Sie brauchen daher bedeutend weniger Material als biegebeanspruchte, ebene Tragwerke, beispielsweise Träger oder Platten. Es besteht aber ein Gegensatz zwischen günstigem Tragverhalten und schwieriger, da doppelt gekrümmter Herstellung. Die Lösung dieses Gegensatzes ist eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Schalenbau.

Sollen Schalen durchsichtig sein, also verglast werden, muss man sie so in Stäbe auflösen, dass eine Struktur mit möglichst großer Transparenz entsteht. Günstige Voraussetzungen für optimale Transluzenz bieten doppelt gekrümmte Flächentragwerke mit Dreiecksmaschen. Nur das Dreiecksraster ist in der Lage, Kräfte im Wesentlichen ohne Stabbiegung nur in der Fläche fortzuleiten, eine notwendige Voraussetzung für einlagige Membranschalen.

Die Wirtschaftlichkeit transparenter Schalen hängt wesentlich von der Fügung der Netzstäbe im Knoten und der Form der Eindeckung ab.

1.1 Zum Entwurf von Schalen

Für die Berechnung von Schalen stehen heute leistungsfähige Programme mit relativ einfacher Geometrie- und Lasteingabe und übersichtlicher Ergebnisdarstellung zur Verfügung.

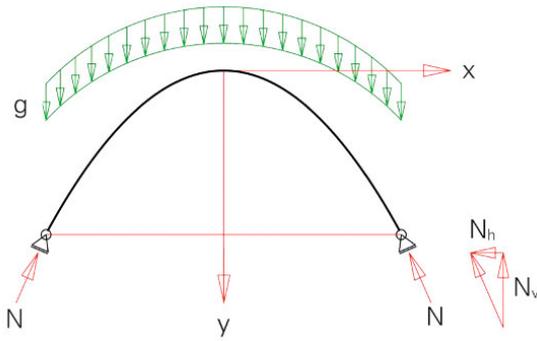
Trotzdem benötigt der entwerfende Ingenieur gutes theoretisches Wissen zum Tragverhalten von Schalen, um im Entwurfsstadium die Weichen für ein ästhetisches und effizientes Tragwerk richtig zu stellen. Ein falsches Tragwerkskonzept kann zwar mit Hilfe des Computers und entsprechender Dimensionierung der Tragglieder machbar gemacht werden, das Ergebnis ist jedoch weder effektiv noch innovativ.

Ausreichendes Wissen um das Tragverhalten von Schalen wird hier vorausgesetzt.

Beim Entwurf sollte stets der Membranzustand angestrebt werden, also ein momentenfreier Zustand. Voraussetzung dafür ist zunächst eine kontinuierliche doppeltgekrümmte Form. Im Gegensatz zum Bogen, der Lasten nur dann momentenfrei abträgt, wenn die Bogenform auf die Art der Belastung abgestimmt ist (Stützlinienform, Bild 1.1), kann eine einzige Schalenform verschiedene Belastungen momentenfrei abtragen. Die Stützung der Schale muss lediglich membrangerecht, das heißt in Richtung der Schalenfläche erfolgen und Einzellasten müssen vermieden oder möglichst flächig eingeleitet werden. Die aus den Verträglichkeitsbedingungen auftretenden Störmomente in der Schale können mit dem Computer zuverlässig ermittelt werden.

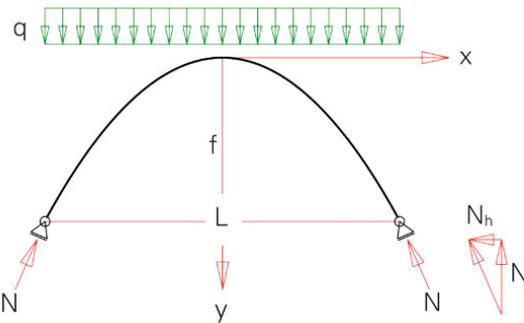
Die Schalenkräfte im Membranzustand können leicht von Hand abgeschätzt werden. Solche einfachen Abschätzungen sind zur Kontrolle von Computerergebnissen und für die Entwurfsarbeit sehr wichtig.

Bei Kenntnis der resultierenden Last P_1 oberhalb des Rundschnittes können die Membrankräfte für beliebig rotationssymmetrisch belastete Rotationsschalen einfach abgeschätzt werden (Bild 1.2).



Stützlinienform für Bogen unter Eigenlast

$$y = a \cdot \cosh \frac{x}{a} - a \quad (\text{Kettenlinie})$$



Stützlinienform für Bogen unter Gleichlast q

$$x^2 = 2p \cdot y \quad (\text{Parabel})$$

$$\text{Auflagerkräfte: } N_h = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f}, \quad N_v = q \cdot \frac{L}{2} \quad (1)$$

Bild 1.1 Stützlinienform eines Bogens ist belastungsabhängig (Abschätzung der Normalkräfte und Biegemomente im Bogen bzw. der Tonne siehe auch Abschnitt 4.2)

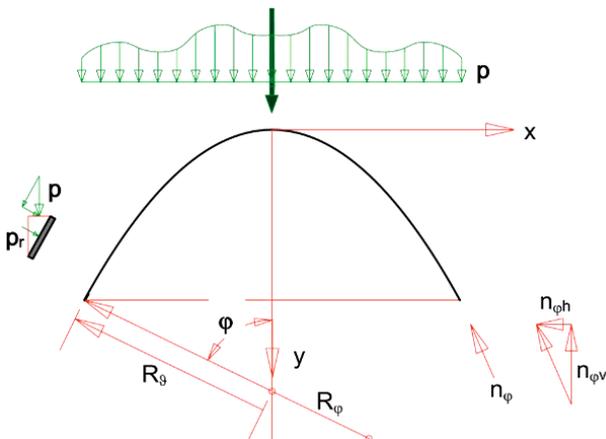


Bild 1.2 Abschätzung der Membrankräfte n_{ϕ} , n_{ϕ} einer Rotationsschale, R_{ϕ} ist der Krümmungsradius in Meridianrichtung, R_{ϕ} in Ringrichtung

$$\text{Meridiankraft } n_{\phi} = -\frac{P_1}{2 \cdot \pi \cdot R_{\phi} \cdot \sin^2 \phi} \quad (2)$$

Die Ringkraft n_{θ} kann durch zweifache Anwendung der Ringformel $Z = p \cdot R$ einfach ermittelt werden.

Aus n_{ϕ} ergibt sich eine Ulenkraft u nach außen von

$$u = \frac{n_{\phi}}{R_{\phi}} \text{ und mit der Ringformel } Z = p \cdot R \text{ eine Ringkraft}$$

$$n_{\theta} = \frac{n_{\phi}}{R_{\phi}} \cdot R_{\theta}$$

Die äußere Last p erzeugt eine radiale Lastkomponente p_r . Mit der Ringformel $Z = p \cdot R$ erhält man die Ringkraft $n_{\theta} = p_r \cdot R_{\theta}$ und somit Ringkraft

$$n_{\theta} = -R_{\theta} \cdot \left(p_r + \frac{n_{\phi}}{R_{\phi}} \right) \quad (3)$$

Für den Sonderfall einer Kugelschale unter Gleichlast p ist die radiale Lastkomponente $p_r = p \cdot \cos^2 \varphi$ und die resultierende Last $P_1 = \pi \cdot p \cdot R_\vartheta \cdot R_\vartheta \cdot \sin^2 \varphi$. Unter Eigenlast g ist die radiale Lastkomponente $p_r = g \cdot \cos \varphi$ und die resultierende Last $P_1 = 2\pi \cdot g \cdot R_\vartheta^2 \cdot (1 - \cos \varphi)$. Setzt man p_r und P_1 in obige Beziehungen ein, erhält man die Membrankräfte der Kugelschale. Diese sind in Bild 1.3 zusammengestellt. Für andere Fälle wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

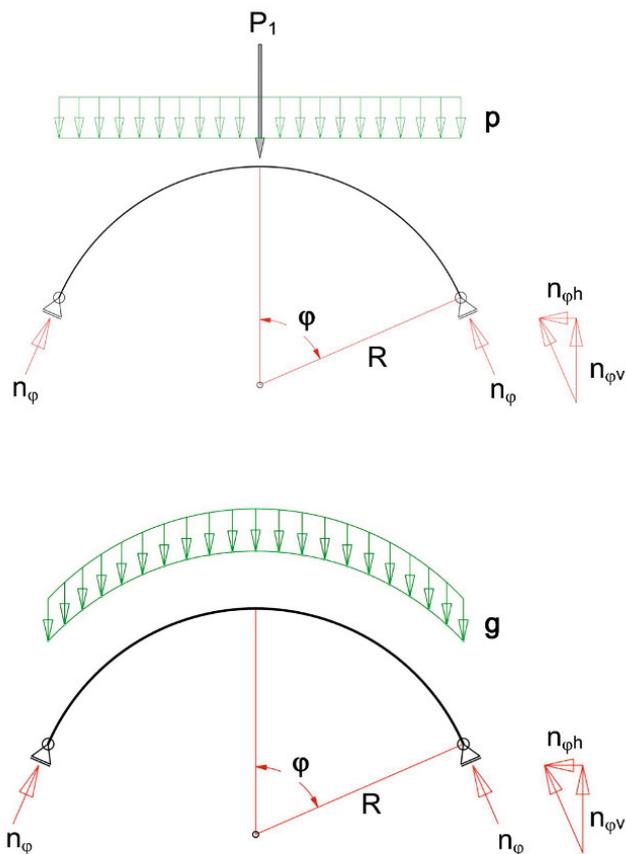


Bild 1.3 Membrankräfte einer Kugelschale

Kugelschale unter Gleichlast

Komponenten der Meridiankraft n_φ :

Horizontalkomponente $n_{\varphi h} = n_\varphi \cdot \cos \varphi$ (4)

Vertikalkomponente $n_{\varphi v} = n_\varphi \cdot \sin \varphi$

Meridiankraft n_φ aus Gleichlast p

$$n_\varphi = -p \cdot \frac{R}{2}$$

Ringkraft n_ϑ aus Gleichlast p

$$n_\vartheta = -p \cdot \frac{R}{2} \cdot \cos 2\varphi$$

Kugelschale unter Eigenlast

Komponenten der Meridiankraft n_φ :

Horizontalkomponente $n_{\varphi h} = n_\varphi \cdot \cos \varphi$ (5)

Vertikalkomponente $n_{\varphi v} = n_\varphi \cdot \sin \varphi$

Meridiankraft n_φ aus Eigenlast g

$$n_\varphi = -g \cdot \frac{R}{1 + \cos \varphi}$$

Ringkraft n_ϑ aus Eigenlast g

$$n_\vartheta = -g \cdot R \cdot \left(\cos \varphi - \frac{1}{1 + \cos \varphi} \right)$$

Weicht die Lagerung einer Schale von der idealen Membranlagerung ab, wenn beispielsweise nur vertikale Auflagerkräfte aufnehmbar sind, kann mit einem steifen Randträger ein membranähnlicher Zustand mit nur geringen und schnell abklingenden Biegemomenten in der Schale geschaffen werden. Ist der Randträger ringförmig, können die Ringkräfte leicht mit einer Handrechnung abgeschätzt werden (Bild 1.4).

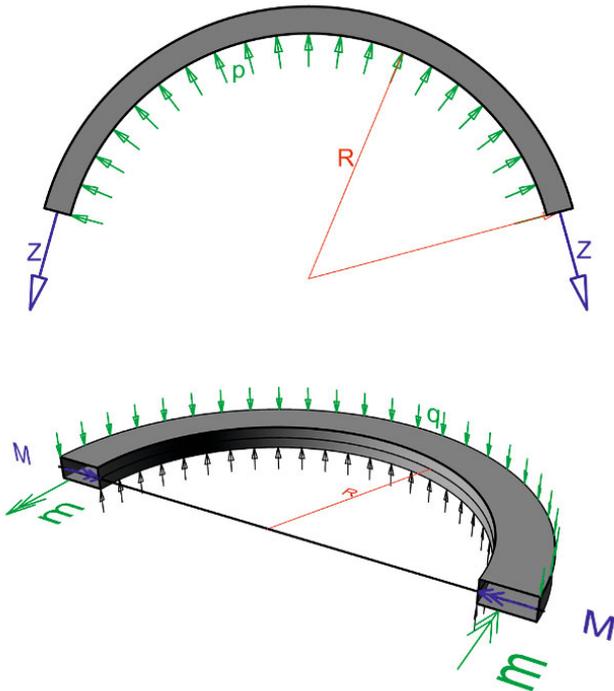


Bild 1.4 Schnittkräfte im Kreisring infolge Radiallast und Krepelmoment

Kreisring unter Radiallast p
 (rotationssymmetrisch)
 Ringzugkraft $Z = p \cdot R$ (6)

Kreisring unter Krepelmoment $m = q \cdot e$
 (rotationssymmetrisch)
 Biegemoment $M = m \cdot R$ (7)
 (oben Zug, unten Druck)
 Torsionsmoment = 0

Eine wichtige Eigenschaft des mit einem Krepelmoment $m = q \cdot e$ belasteten Ringträgers besteht darin, dass als Schnittgröße im Ring keine Torsion entsteht, sondern ein Biegemoment M , das sich in Ringdruck und Ringzug aufteilt [13]. Diese Eigenschaft wurde schon mehrfach bei gekrümmten Fußgängerbrücken umgesetzt [14].

Eine resultierende Querkraft Q , welche über die Radialkräfte $n = \bar{n} \cdot \cos \varphi$ am Kreisring eingeleitet wird, bewirkt aus Gleichgewichtsgründen die Schubkräfte $t = \bar{n} \cdot \sin \varphi$ (Bild 1.5).

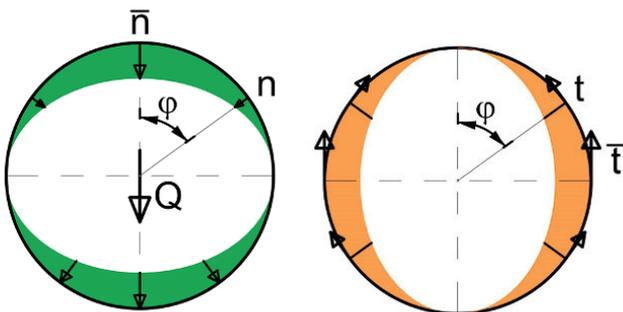


Bild 1.5 Schubkräfte t am Kreisring

Aus $\sum Q = 0$ folgt:

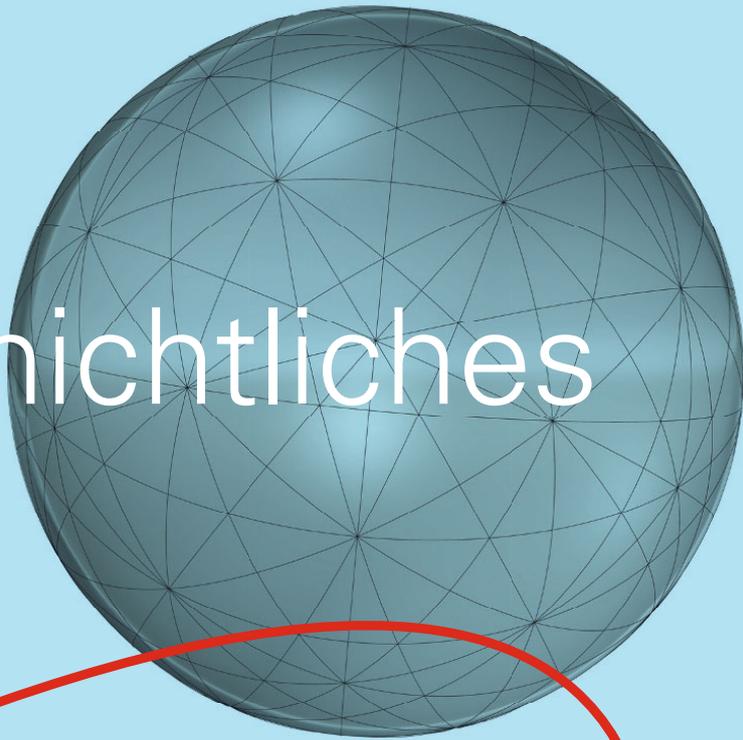
$$\int_0^{2\pi} \bar{n} \cdot \cos^2 \varphi \cdot R \cdot d\varphi = \int_0^{2\pi} \bar{t} \cdot \sin^2 \varphi \cdot R \cdot d\varphi$$

$$\bar{n} \cdot R \cdot \pi = \bar{t} \cdot R \cdot \pi = Q$$

$$\max t = \bar{t} = \frac{Q}{\pi \cdot R}$$

 maximale Schubkraft \bar{t} aus Q . (8)

2 Geschichtliches



2 Geschichtliches

Die historische Entwicklung der Glasbauten wird hier nur im Hinblick auf den Kuppel- und Schalenbau verkürzt dargestellt. Ein kurzer Abriss dazu ist auch in [1] zu finden. Lediglich die neueren Entwicklungen im Schalenbau werden vertieft dargestellt.

2.1 Historische Beispiele

Der moderne Glasbau entwickelte sich in der Mitte des 19. Jahrhunderts mit La Bourse de Commerce in Paris, 1811 (Bild 2.1). Es war die erste verglaste Rippenkuppel – eine gusseiserne, zentralsymmetrische Kugelkalotte, die von *F. J. Belanger* als Architekt und *F. Brunet* als Ingenieur und Unternehmer geschaffen wurde. Meilensteine waren die Gewächshäuser in den Kew Gardens in England, 1845 sowie *Paxton's* Kristallpalast in London, 1851, und die *Galleria Vittorio Emmanuele* in Mailand, 1865 (Bild 2.2).

Bei den Kuppeln dieser Zeit ging es geometrisch betrachtet im Wesentlichen um zentral- bzw. rotations-symmetrische Kugelkalotten mit Stäben nur in Ring- und Meridianrichtung. Wegen der viereckigen Maschen kann nicht von einem Schalentragsystem gesprochen werden, denn die Tragfähigkeit war auf die Rahmenwirkung bzw. die Biegesteifigkeit der Stäbe angewiesen. Ein echtes Schalentragsystem besteht aus dreieckigen Maschen, so dass die Lasten im Wesentlichen in der Fläche über Druck- und Zugkräfte abgetragen werden.

Der entscheidende und mit vielen sehr großen Bauten sehr erfolgreiche Schritt in Richtung Schalenbau waren 1863 *Schwedlers* Stabwerkkuppeln. Er versah seine zentralsymmetrischen Kuppeln mit dünnen Diagonalstäben und überführte sie so in echte Schalen. Sein Name steht außerdem für die theoretische Fundierung der Fachwerktheorie und die Erarbeitung klarer Bemessungsregeln für Details im Eisenbau, wofür er internationale Anerkennung erhielt. Viele seiner Kuppeln sind bis heute erhalten, ein Beispiel zeigt Bild 2.3.

Bild 2.1 Kuppel La Bourse, Paris, 1811

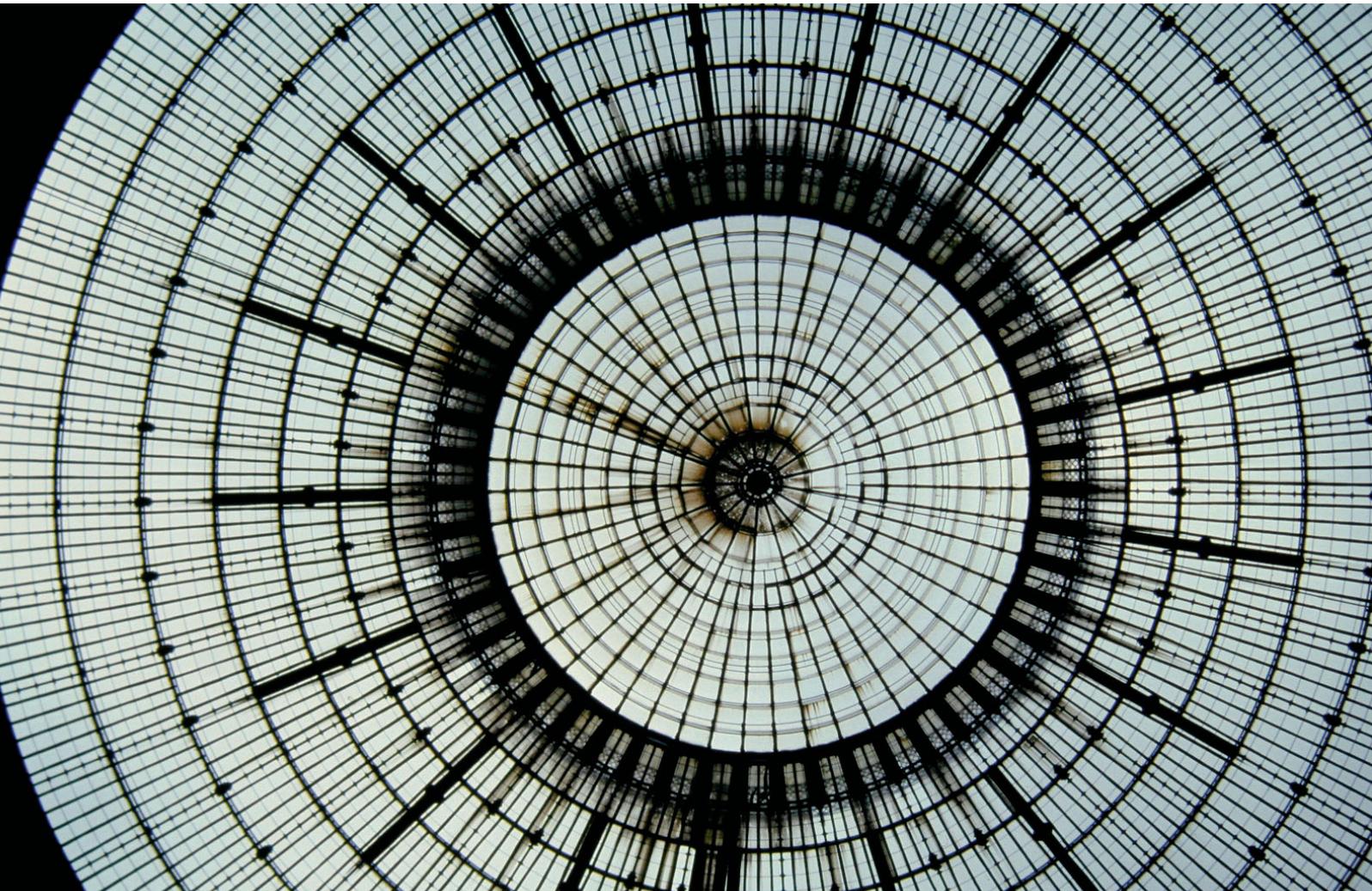




Bild 2.2 Kuppel der Galleria Vittorio Emmanuele, Mailand, 1865

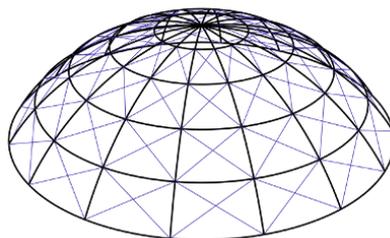
Bild 2.3 Schwedlerkuppel über Gasometer Wien, 1896



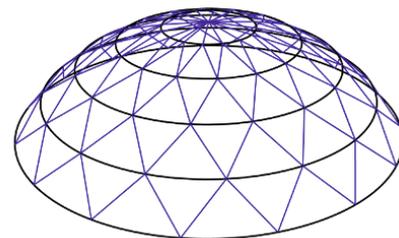
Die prinzipiell zentralsymmetrische Stabgeometrie bei rotationssymmetrischer Form erfuhr nun bis heute unzählige Variationen, Bild 2.4 [2].



Rippenkuppel



Schwedlerkuppel



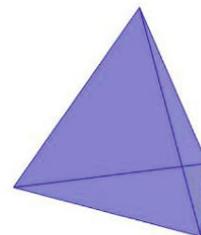
Kuppel mit Ringnetz

Bild 2.4 Stabgeometrie für Kuppeln [2]

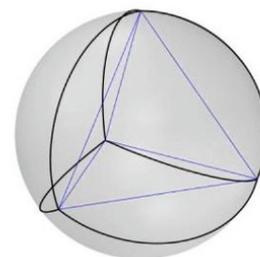
Platonische Körper als Basis der Kugelaufteilung

Einen völlig neuen Schritt tat *Buckminster Fuller* 1954 mit seinen „geodätischen Kuppeln“ [3]. Die erste geodätische Kuppel wurde allerdings bereits 1919 von dem Ingenieur und Physiker *Dr. Walther Bauersfeld* für den Bau des Zeiss Planetariums in Jena entwickelt [4]. Er beschäftigte sich mit der Sternenprojektion und entwickelte zunächst einen Fixsternprojektor auf der geometrischen Basis des auf die Kugel projizierten Ikosaeders. Vier Jahre später hatte er die Idee, auch das Stabnetzwerk der halbkugeligen Stahlbetonkuppel nach demselben Prinzip zu bauen (Bild 2.6). Diese Struktur gilt als erste geodätische Kuppel der Welt.

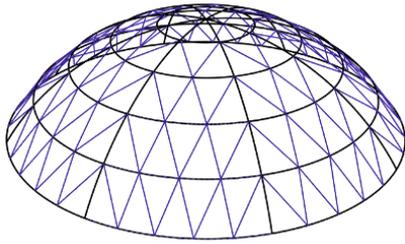
Tetraeder
(4 identische Flächen)
4 gleichseitige Dreiecke



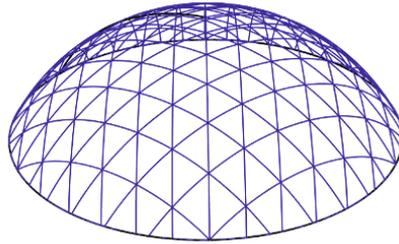
Projektion der
Kanten auf
die Kugel



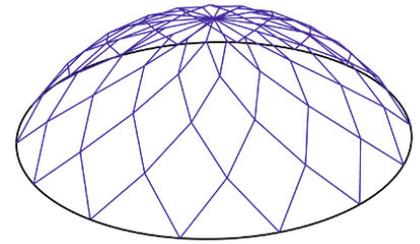
Netzgenerierung auf Basis
der Platonischen Körper,
Beispiele



Kuppel mit Sektoren-Ringnetz

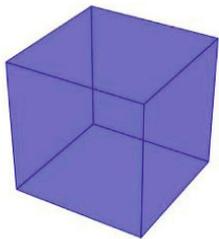


Dreischarige Kuppel

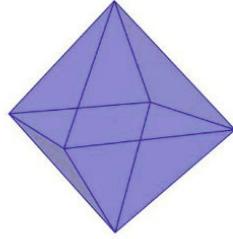


Lamellenkuppel

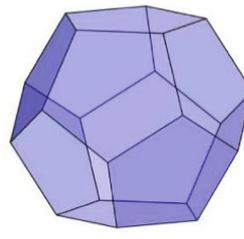
Hexaeder
(6 identische Flächen)
6 Quadrate



Oktaeder
(8 identische Flächen)
8 gleichseitige Dreiecke



Dodekaeder
(12 identische Flächen)
12 regelmäßige Fünfecke



Ikosaeder
(20 identische Flächen)
20 gleichseitige Dreiecke

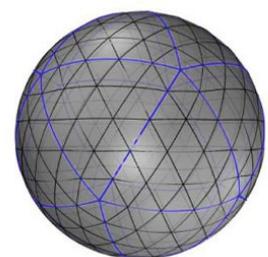
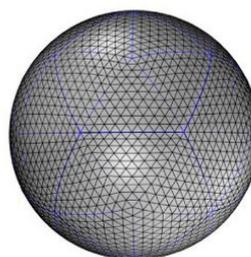
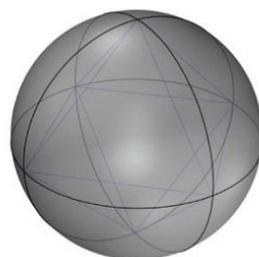
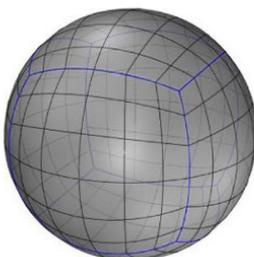
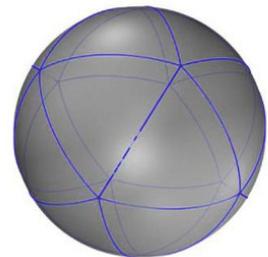
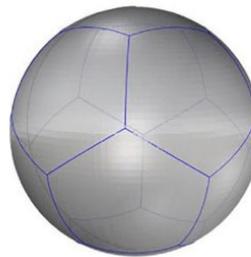
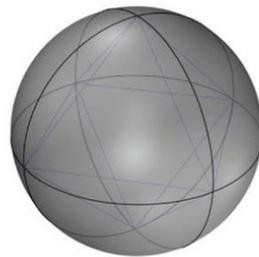
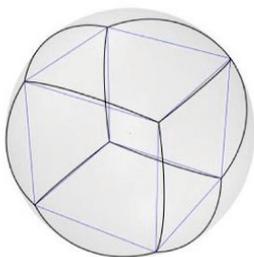
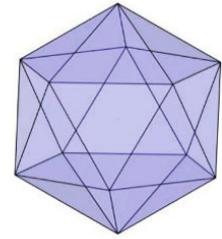


Bild 2.5 Die fünf Platonischen Körper als Basis der Kugelaufteilung

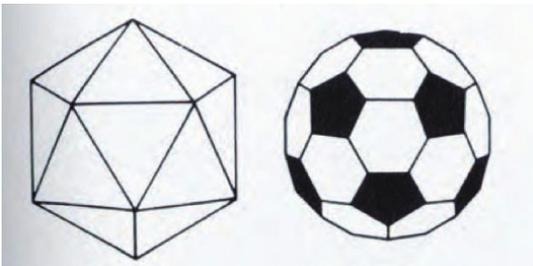
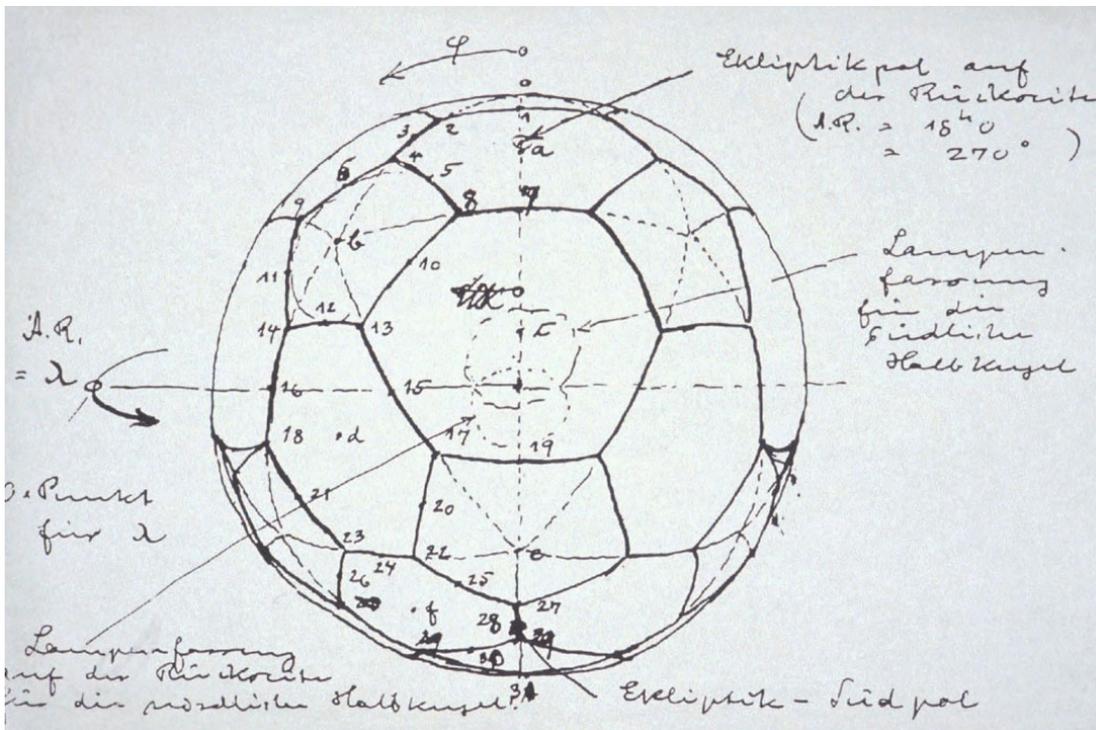


Bild 2.6 Das Stabnetzwerk zum Bau der Stahlbetonkuppel für das Zeiss-Planetarium in Jena basiert auf der geodätischen Kuppel; *Bauersfeld*, 1924 [4]