Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 128 (2002)
Heft: 12: Fokus Glas

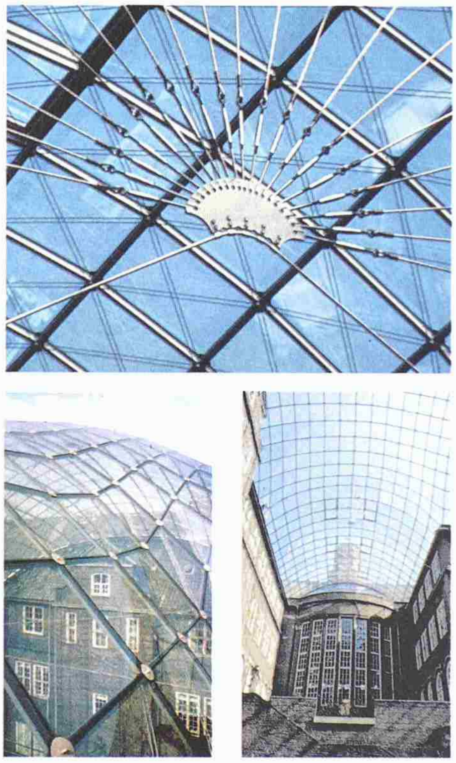
Artikel: Filigrane Kuppeln: Beispiele, Tendenzen und Entwicklungen
Autor: Schlaich, Jörg / Schober, Hans
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-80394

Jörg Schlaich, Hans Schober

Filigrane Kuppeln

Beispiele, Tendenzen und Entwicklungen

Geometrisch komplizierte, doppelt gekrümmte Schalentragwerke lassen sich heute mit vergleichsweise geringem Aufwand berechnen und bauen, wenn einige wenige geometrische und wirtschaftliche Grundsätze berücksichtigt werden; es entstehen äussserst elegante und lichtdurchlässige Kuppeln, auch über unregelmässigen Grundrissen.



1
Museum für Hamburgische Geschichte, Übergangsbereich
Arch.: von Gerkan, Marg und Partner, Hamburg

(alle Bilder: Autoren)

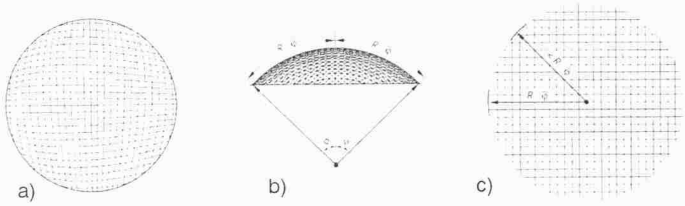
Je leichter und lichtdurchlässiger Glaskuppeln erscheinen, desto besser gefallen sie. Günstige Voraussetzungen für optimale Transparenz bieten doppelt gekrümmte Flächentragwerke mit Dreiecksmaschen. Nur das Dreiecksraster ist in der Lage, Kräfte im Wesentlichen ohne Stabbiegung nur in der Fläche fortzuleiten, eine notwendige Voraussetzung für einlagige Membranschalen. Solche Flächentragwerke werfen drei grundlegende Fragen auf, insbesondere wenn die Gläser ohne Zwischenkonstruktion auf dem Tragwerk fixiert werden sollen: 1. Wie kann der Gegensatz zwischen günstigem Tragverhalten und schwieriger, doppelt gekrümmter Herstellung aufgelöst werden? 2. Wie kann eine Dreiecksstruktur mit den viel günstigeren Viereckscheiben belegt werden? 3. Wie können doppelt gekrümmte Flächen mit ebenen Viereckscheiben belegt werden?

Netzkuppeln

Mit den Netzkuppeln haben wir bekanntlich die beiden ersten Punkte so gelöst, dass das Grundraster des Tragwerkes aus einem Vierecksnetz aus Flachstäben besteht, das quadratisch ist, wenn man es sich eben ausgelegt denkt [1,2]. Dieses ebene Quadratnetz lässt sich in nahezu beliebige Formen bringen, indem sich der Maschenwinkel von 90 Grad verändert. Aus den Quadraten werden Rhomben. Dünne Seile verspannen die Vierecksmaschen diagonal, sodass Dreieckselemente –

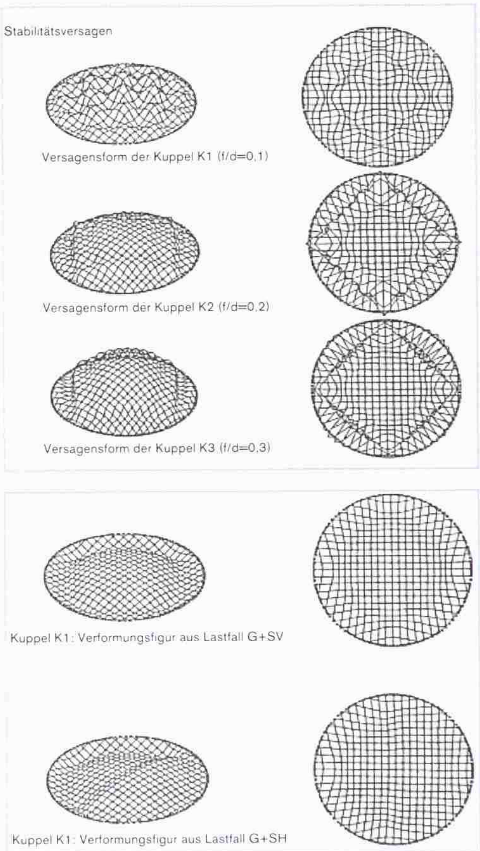
die notwendige Voraussetzung für eine günstige Schalentragwirkung – entstehen (Abb. 2). Die Verglasung wird direkt auf die Flachstäbe aufgeklemmt. Dieses Konstruktionsprinzip wurde in den Jahren 1989 und 1990 entwickelt, in Hamburg und Neckarsulm (Abb. 1 und 10) erstmals gebaut und inzwischen für geometrisch recht anspruchsvolle Glasdächer vielfach umgesetzt.

Das Stabilitätsverhalten solch filigraner Stabkuppeln ist von grosser Bedeutung. Das zentrale Problem ist das Auffinden der massgebenden Beulform. Wir haben dafür das folgende Nachweisverfahren entwickelt: Mit einer Traglastberechnung wird die Last bei perfekter Struktur und geometrisch nichtlinearer Berechnung so lange gesteigert, bis Stabilitätsversagen eintritt. Ausgehend von der Steifigkeit des Systems im letzten konvergenten Iterationsschritt wird eine Eigenwertuntersuchung durchgeführt, die zu Eigenfrequenzen und Eigenformen führt. Die Abbildung 3 (oben) zeigt die so ermittelten Beulformen für Kuppeln unterschiedlicher Krümmung. Die Eigenformen werden nun auf einen Maximalwert normiert und als Imperfektionsform der Schale angesetzt. Dann wird eine geometrisch nichtlineare Berechnung durchgeführt. Zu beachten ist, dass sich die Imperfektion aus einem geometrischen und einem strukturellen Wert zusammensetzt. Würde man an Stelle dieser aufwendigen Beulformermittlung beispielsweise die Verformungsfigur für Schnee oder halbseitigen Schnee als Imperfektionsform ansetzen (Abb. 3 unten), läge man, wie in Abbildung 4 ersichtlich, im Hinblick auf die Traglast spürbar auf der unsicheren Seite. Das wirksamste Mittel gegen Stabilitätsversagen ist und bleibt aber nach wie vor eine vernünftige Krümmung.



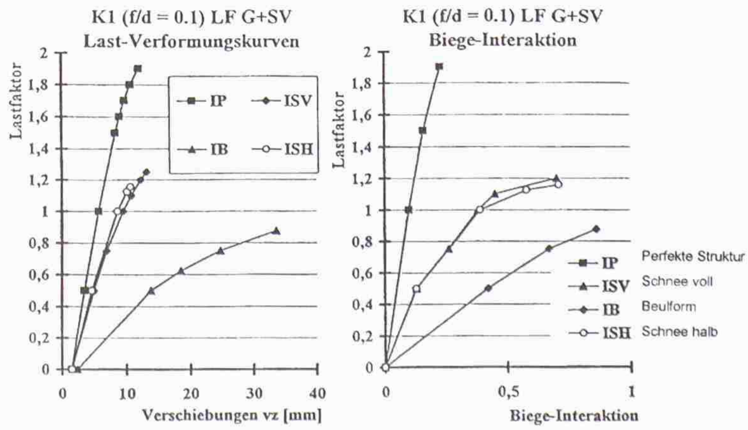
2

Geometrieprinzip Netzkuppeln: a) Draufsicht ohne Seildiagonale, b) Ansicht mit Seildiagonale, c) abgewickeltes Seilnetz (= ebenes Quadratnetz)



3

Beulformen aus Traglastiteration (oben) und Lastansätzen (unten) (g+Schnee voll, g+Schnee halb)

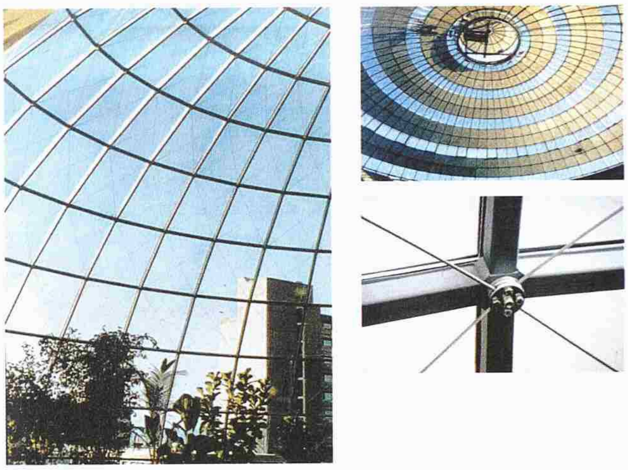


4

Traglasten für unterschiedliche Beulformen

Zentralsymmetrische Kuppeln

Rippenkuppeln mit Stäben in Ring- und Meridianrichtung sind wegen der rotationssymmetrischen Struktur einfach herzustellen, benötigen aber, da auf Rahmenwirkung bzw. Biegesteifigkeit angewiesen, entsprechend schwere Profile. Durch die diagonale Seilverspannung der viereckigen verglasten Maschen können solche Rippenkuppeln in echte Schalentragwerke mit optimaler Transparenz überführt werden. Ausgeführt wurden solche Tragwerke beispielsweise für das Rhönklinikum in Bad Neustadt und das Einkaufszentrum Grünau in Leipzig (Abb. 5). Rotationssymmetrische Strukturen lassen sich natürlich immer mit ebenen Vierecksscheiben belegen. Nachteilig sind die veränderlichen Stablängen und die Verdichtung der Stäbe im Zenit, also dort, wo man es gerade nicht haben möchte.

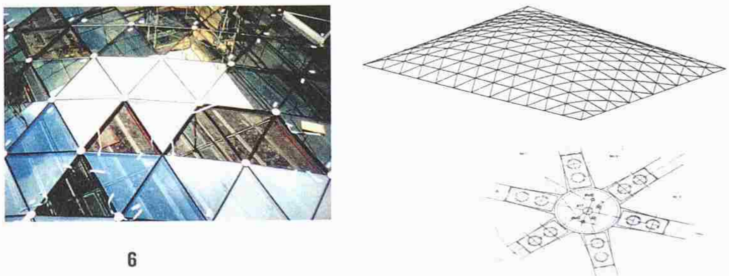


5
Links: Kuppel Rhönklinikum Bad Neustadt (Arch. W. Wilhelm, Bad Neustadt). Rechts: Kuppel Einkaufszentrum Grünau, Leipzig Arch.: von Gerkan, Marg und Partner, Hamburg

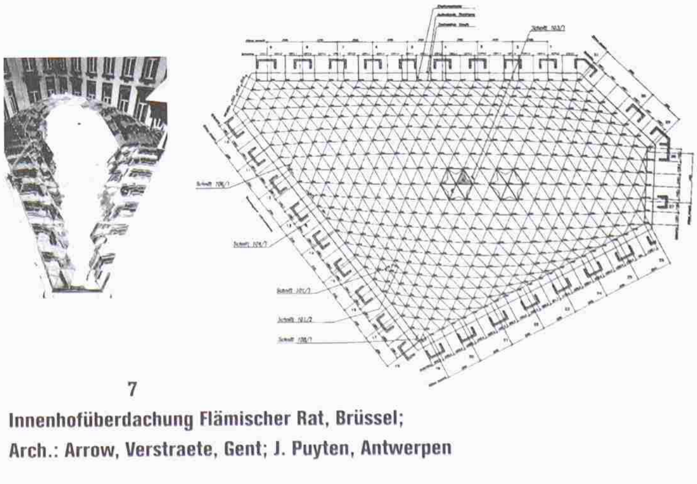
Kuppeln mit verglasten Dreiecksmaschen

In vielen Fällen stehen wir vor der Aufgabe, Glaskuppeln freier Form zu bauen, weil sie sich über unregelmässige Grundrissen wölben, den Übergang zwischen unterschiedlichen geometrischen Flächen bilden oder als Skulptur wirken sollen. In der Regel lassen sich solche Flächen nicht mehr mit ebenen Vierecksscheiben belegen, sodass man genötigt ist, die wirtschaftlich und konstruktiv ungünstigeren Dreiecksscheiben zu verwenden. Insbesondere bei Isolierverglasung wird man dann auch das Stabnetz als direktverglastes Dreiecksnetz ausbilden.

Beim Palais Bernheimer in München wie auch beim Flämischen Rat in Brüssel[3] sollte ein unregelmässiger Innenhof mit einem isolierverglasten kissenförmigen Glasdach überspannt werden. Die mögliche Wölbung erlaubte ein einlagiges Schalentragwerk, dessen Gestalt über die Umkehrung einer Hängeform gewonnen wurde. Vierecksmaschen hätten sich zu stark verwunden. Es ergab sich, trotz der ungünstigen Dreiecksstruktur, bei der sich 6 Stäbe in Knoten kreuzen, ein filigranes Gebilde (Abb. 6 und 7).



6
Innenhofüberdachung Palais Bernheimer, München; Arch.: Freiherr von Branca, E. Freiin von Branca, München

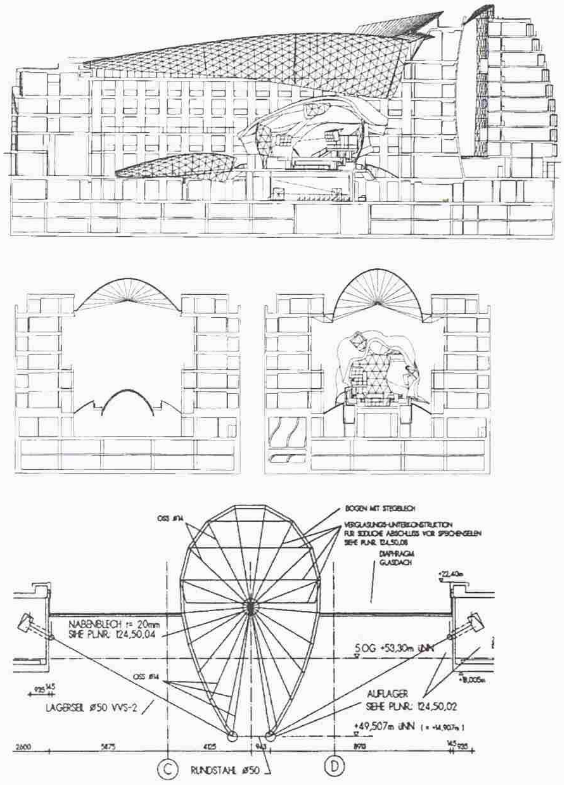


7
Innenhofüberdachung Flämischer Rat, Brüssel; Arch.: Arrow, Verstraete, Gent; J. Puyten, Antwerpen

Für das Atriumdach am Pariser Platz in Berlin entwarf der Architekt Frank O. Gehry ein dreidimensionales Tonnendach als Skulptur, die in den Innenraum eingreift[4] (Abb. 8 und 9). Solche freien Formen können nur mit Dreiecken verglast und mit einem dreieckigen Stabnetz als Schale gebaut werden. Das Schalentragwerk ist am Rand nicht kontinuierlich, sondern lediglich im Abstand von etwa 16 m gestützt. Wegen der geringen Krümmung in der Längsrichtung musste die Schale aus Stabilitätsgründen in den Auflagerachsen durch Speichenräder zusätzlich ausgesteift werden (Abb. 8). Das gesamte Tragwerk ist aus Edelstahl gefertigt. Die Knoten wurden dreidimensional gefräst.

Kuppeln als Translationsflächen

Diese Beispiele zeigen, dass sich freie, doppelt gekrümmte Flächen zwar stets mit Dreiecken bilden lassen, leider aber weder die Transparenz noch die Wirtschaftlichkeit einer viereckig verglasten Struktur erreichen. Bei doppelt gekrümmten Flächen mit günstiger viereckiger Struktur müssen also entweder die Glasscheiben die Maschenverwindung mitmachen können oder selbst doppelt gekrümmt sein wie ihre Tragkonstruktion. Um das zu vermeiden, müsste die Netzgeometrie so gewählt werden, dass die einzelnen Vierecksmaschen stets eben bleiben. Bei der Kugelkalotte in Neckarsulm sind die Isoliergläser sphärisch gekrümmt. Sie erlauben so verwundene Vierecksmaschen und führen zu einer idealen Kugelgestalt (Abb. 10). Diese architektonisch anspruchsvolle und teure Verglasungsart würde den Bau doppelt gekrümmter Schalen mit viereckigen Maschen sehr einschränken, gäbe es da nicht einen geometrischen Trick, nahezu beliebige Formen mit ebenen Vierecken zu bauen.

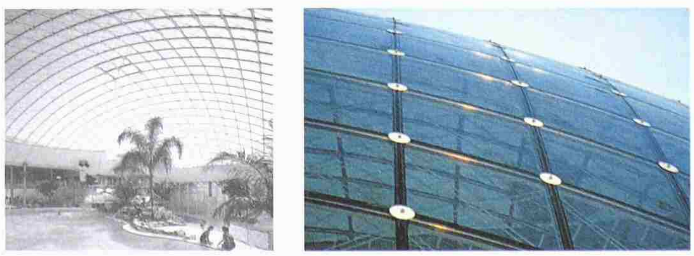


8

Atriumdach der DG-Bank, Berlin; Arch: Frank O. Gehry, Santa Monica; Längs- und Querschnitte

9

Atriumdach der DG-Bank, Berlin; Arch.: Frank O. Gehry, Santa Monica; Innenansicht, Speichenrad, Dreieckmasche

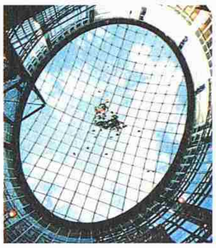


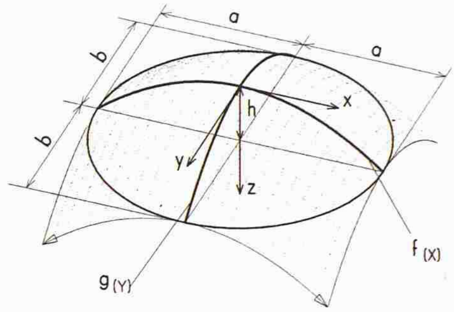
10

Netzkuppeln Neckarsulm; Arch.: Kohlmeier und Bechler, Heilbronn

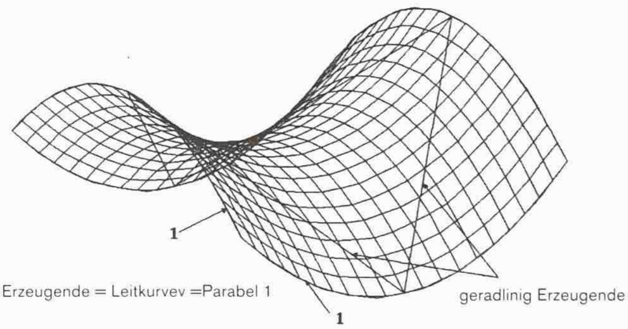
Netze aus ebenen Vierecken

Hans Schober hat in verschiedenen Beiträgen[2, 5 und 6] (s. auch Kasten: Der Dreh mit der Geraden) gezeigt, dass Translationsflächen eine riesige Formenvielfalt von Netzkuppeln mit gleichmaschigem Netz aus ebenen Vierecksmaschen ermöglichen. Lässt man beispielsweise eine Parabel (Erzeugende) über eine dazu senkrecht stehende Parabel (Leitkurve) gleiten, entsteht ein elliptisches Paraboloid mit einer elliptischen Grundrisskurve, das mit einem gleichmaschigen Netz aus ebenen Vierecksscheiben belegbar ist. Das erste gebaute Beispiel dazu ist die Innenhofüberdachung des Rostocker Hofes in Rostock (Abb. 11). Ist die Leitlinie gegenüber der Erzeugenden gegensinnig gekrümmt, entsteht das hyperbolische Paraboloid, das bekanntlich auch aus zwei Scharen geradlinig Erzeugender gebildet werden kann (Abb. 12). Man kann so Hyparflächen mit geraden Rändern herstellen, was eine einfache Lagerung erlaubt. Ein Beispiel dafür ist die Innenhofüberdachung in Leipzig. Die Translationsfläche überdeckt einen trapezförmigen Innenhof mit ebenen Vierecksscheiben (Abb. 13). Leitlinie und Erzeugende müssen aber nicht, wie bei den gezeigten Beispielen, geometrisch einfache Kurven sein, sondern können als beliebige Raumkurven definiert werden und eröffnen dadurch eine riesige Formenvielfalt. Ein Beispiel dafür ist das Flusspferdehaus im Zoo Berlin[7]. Hier wurden zur Überdachung der beiden kreisrunden Becken als Leitlinie zwei Parabeln mit einer frei definierten Übergangs-

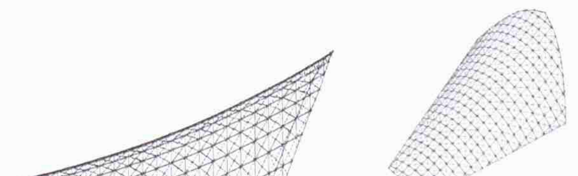




11
Galerie Rostocker Hof, Rostock; Netzkuppel als Translationsfläche; Arch.: Schweger und Partner, Hamburg



12
Das hyperbolische Paraboloid als Translationsfläche mit ebenen Vierecksflächen



13
Innenhofüberdachung Industriepalast Leipzig; Arch.: M. Frishman und D. Düttmann, Berlin

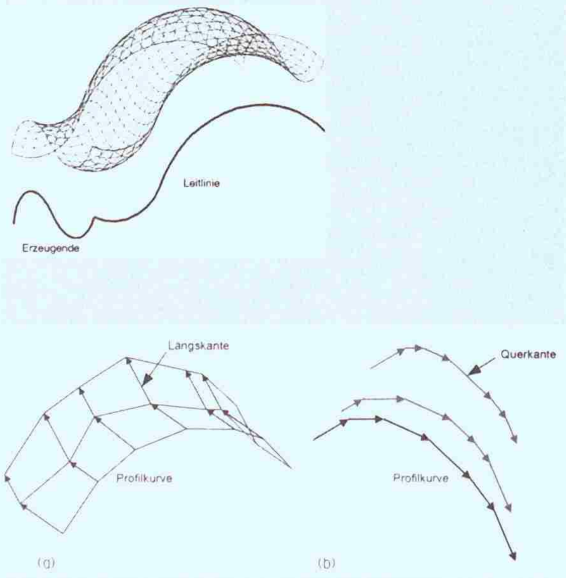
Der Dreh mit den Geraden

Mit Hilfe einfacher Methoden lässt sich eine fast unbegrenzte Formenvielfalt von doppelt gekrümmten Flächen mit ebenen Vierecken schaffen: die Methode beruht auf dem Prinzip, dass zwei parallele Vektoren im Raum stets eine ebene Viereckfläche aufspannen. Die Vektoren und die Verbindung ihrer Anfangs- und Endpunkte bilden die Kante der Vierecksfläche. (Dies ist nicht die einzige Methode, aber eine recht einfache.) Bezeichnet man eine Richtung des Vierecknetzes als Profilkurve oder *Erzeugende* und deren einzelne Kurvenstücke als Querkanten, die andere Richtung als *Leitlinie* oder Richtungsgebende und deren einzelne Kurvenstücke als Längskanten, und fasst man die beiden Quer- bzw. Längskanten als Vektoren auf, dann können zwei Bildungsgesetze für ebene Viereckmaschen beschrieben werden:

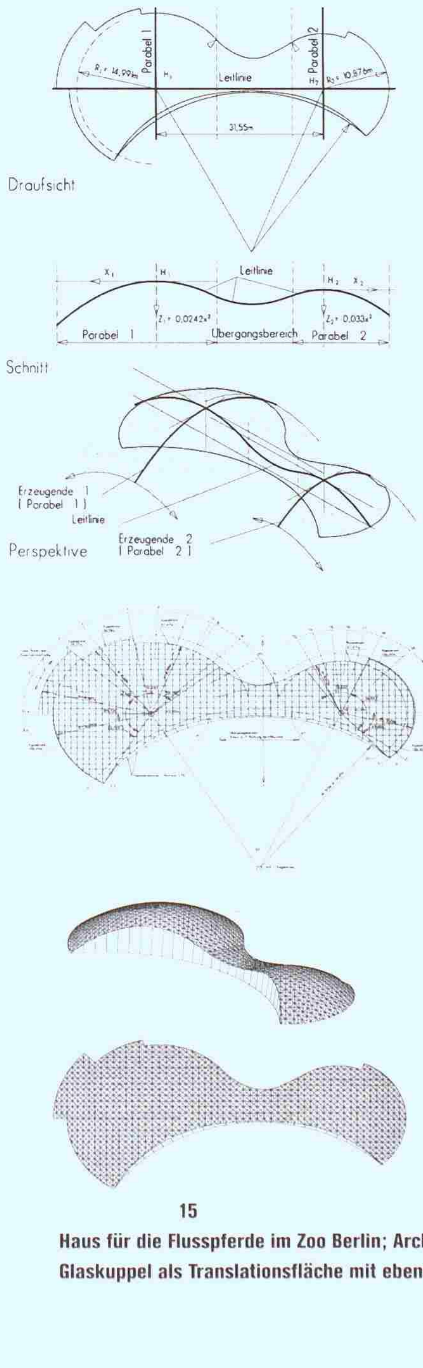
1. Die Längskanten einer Maschenreihe bilden zwei parallele Vektoren (Bild 14a)
2. Die Querkanten einer Maschenreihe bilden zwei parallele Vektoren (Bild 14b)

Als Profilkurve kann eine beliebige Raumkurve – sie muss nicht eben sein – gewählt werden. Mit parallelen Vektoren wird die erste Maschenreihe erzeugt (Bild 14a). Die neue Profilkurve ergibt sich als Verbindungslinie der Vektor-Endpunkte. Die nächste Maschenreihe wird nach demselben Prinzip gebildet, wobei die Vektoren dieser Maschenreihe natürlich eine andere Richtung und andere Längen haben können als die vorhergehenden. Auf diese Weise wird eine Maschenreihe an die andere gesetzt. Nahezu beliebige Formen mit ebenen trapezförmigen Maschen sind so möglich.

Auf eine analytische Beschreibung der entstehenden Flächen kann hier verzichtet werden, weil sich mit Hilfe des CAD die Flächen wie beschrieben einfach erzeugen lassen.



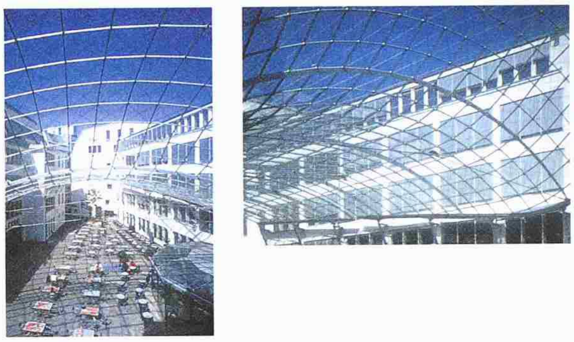
14
Der Dreh mit der Geraden: Erzeugung doppelt gekrümmter Flächen mit Hilfe ebener Vierecke



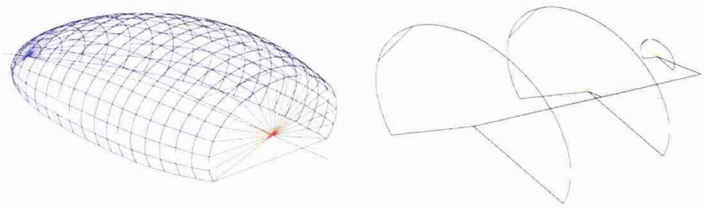
15
Haus für die Flusspferde im Zoo Berlin; Arch.: J. Gribl, München; Glaskuppel als Translationsfläche mit ebenen Vierecksmaschen

kurve gewählt (Abb. 15). Als Erzeugende wurden ebenfalls Parabeln gewählt, die mit denen der Leitlinien jeweils identisch sein mussten, um kreisförmige Grundrisskurven zu ergeben. Innerhalb des Übergangsbereiches wurden die unterschiedlichen Erzeugenden des grossen und des kleinen Beckens ineinander übergeführt. Der kreisförmige Einschnitt der Besucherhalle in die Netzkuppel wird durch einen auf der Spitze stehenden Kreiskegel mit 8 Grad Neigungswinkel beschrieben, der sich mit der Kuppel in einem frei geschwungenen Rand verschneidet. Die Kegelfläche definiert die um 8 Grad geneigte Fassadenfläche, die als Regelfläche verwindungsfrei verglast werden kann.

Die Innenhofüberdachung des ehemaligen Bosch-Areals in Stuttgart ist ebenfalls ein Beispiel dafür, dass auch sehr schwierige Geometrien als Translationsflächen ausgebildet werden können. Obwohl hier mehrere unregelmässige Innenhöfe aufeinander treffen, konnte ein kontinuierlich gekrümmter Übergangsbereich mit lauter ebenen und gleichmaschigen Vierecken geschaffen werden (Abb. 16). Die Erzeugende wird im Verschneidungsbereich einfach so ergänzt, wie es die einmündenden Innenhöfe erfordern. Die Leitlinie wird so frei geformt, dass der Verschneidungsbereich und die einmündenden Dächer eine ausreichende Krümmung erhalten. Das Beispiel zeigt, dass Netzkuppeln in nahezu beliebiger Form wirtschaftlich hergestellt werden können, indem mit dem Trick der Translationsfläche die gesamte Kuppel aus einem gleichmaschigen Netz mit ebenen Vierecksscheiben hergestellt wird, eine in gestalterischer und wirtschaftlicher Hinsicht optimale Lösung. Die hier gezeigte Methode zur Erzeugung von Netzkuppeln mit ebenen Maschen ist eine einfache, aber bei weitem nicht die einzige. Es gibt weitere Methoden[6], mit denen beliebig doppeltgekrümmte Flächen mit ebenen Viereckelementen belegt werden können; die Abbildung 17 zeigt eine davon.



16
Innenhofüberdachung im ehemaligen Bosch-Areal, Stuttgart; Netzkuppel als Translationsfläche mit ebenen Maschen Arch.: Prof. Ostertag, Stuttgart



17
Doppelt gekrümmte Fläche mit ebenen Vierecksmaschen durch zentrische Streckung und Translation

Prof. Dr.-Ing. Drs. h.c. Jörg Schlaich, Dr.-Ing. Hans Schober, Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart, www.sbp.de

Anmerkungen

1 Schlaich, J., Schober, H.: Verglaste Netzkuppeln. Bautechnik 69 (1992), S. 3–10.
2 Schober, H.: Die Masche mit der Glaskuppel. Netztragwerke mit ebenen Maschen. Deutsche Bauzeitung 128 (1994), S. 152–163.
3 Der Vlaamse Raad in Brüssel. Glas 1 (1996), S. 18–24.
4 Schlaich, J., Schober, H., Helbig, T.: Eine verglaste Netzschale: Dach und Skulptur. DG Bank am Pariser Platz in Berlin. Bautechnik 78 (2001), H. 7, S. 457–463
5 Schober, H.: Netzkuppeln mit ebenen Maschen. Beratende Ingenieure, September 1998, S. 15–19.
6 Schober, H.: Geometrie-Prinzipien für wirtschaftliche und effiziente Schalentragwerke. Bautechnik (2002), H. 1 S. 16–24.
7 Schlaich, J., Schober, H.: Glaskuppel für die Flusspferde im Zoo Berlin, Stahlbau 67 (1998), H. 4, S. 3–8.