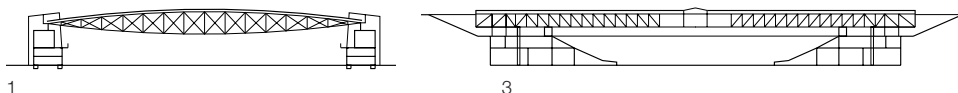


Große Spannweiten
– Tragstrukturen weit gespannter Dächer

Large-Span Roof Structures

Rainer Barthel, Herbert Markert

- 1, 2 Halle 4 – Expo 2000, Hannover 1996
 Gerkan, Marg + Partner/Schlaich + Partner
 Spannweite: 122 m
- 3, 4 Radsporthalle, Berlin 1997
 Dominique Perrault/Arup GmbH
 Spannweite: 142 m



Anders als in den 50er- und 60er-Jahren, in denen die große Spannweite ein zentrales Thema vieler Architekturvisionen war, werden inzwischen viele große stützenfreie Räume aus pragmatischen und wirtschaftlichen Interessen verwirklicht. Übt damals die Verbindung von ästhetischer und technischer Utopie eine große Faszination aus, so zeigen heute manche der realisierten Beispiele, wie schwierig die Einheit von architektonischer Gesamtform und leistungsfähigem Tragwerk mit all seinen Eigengesetzlichkeiten zu erreichen ist.

Trotzdem kann man sich dem Reiz riesiger stützenfreier Räume nicht entziehen. Einige der Konstruktionen erreichen durch präzise Umsetzung der aus der Dimension entstehenden Anforderungen einen sehr hohen Grad an Konsequenz und Klarheit.

In jüngster Zeit entstand eine beachtliche Zahl sehr großer stützenfreier Hallen. Es sind vor allem Sportarenen in den USA und Japan. Die bisher größte Spannweite einer geschlossenen Halle wurde 1992 am Georgia Dome in Atlanta (Abb. 9) mit 240 m realisiert. Der 1990 fertig gestellte Suncoast Dome in St. Petersburg, USA, erreicht 210 m. Japan erlebt durch die Beliebtheit amerikanischer Sportarten wie Baseball und durch die Fußball-WM 2002 einen Boom im Bau riesiger Hallen. Der Seibu Dome in Tokorozawa, fertig gestellt 1999, hat eine

lichte Spannweite von 220 m. Der noch im Bau befindliche Sapporo Dome ist ein geschlossenes Fußballstadion das 218 m überspannen wird.

In Europa entstehen extrem weit gespannte Hallendächer aufgrund der vorherrschenden Bauaufgaben eher selten. Mit dem Millennium Dome in London (siehe Detail 2000/6) oder der Cargo-Lifter-Halle in Brandt bei Berlin (Abb. 7) finden sich jedoch auch hier Beispiele mit gewaltigen Dimensionen. Die neu entstandenen Ausstellungshallen der Expo 2000 auf dem Messegelände in Hannover weisen Spannweiten um 120 m auf. Bei vergleichbaren Vorgaben kam dort eine Vielfalt von unterschiedlichen Tragstrukturen mit jeweils eigener, hoher architektonischer Qualität zur Ausführung.

Es ist bemerkenswert, wie groß die Vielfalt der Konstruktionssysteme auch bei extremen Spannweiten ist. Es gibt nicht »das optimale Tragwerk«, das bei zunehmender Spannweite zwangsläufig entsteht. Doch existiert ein Kriterium, das hierbei immer wichtiger wird, nämlich das Eigengewicht. Es ist entscheidend für die Dimensionierung des Tragwerks, für die Fundamentierung, für die Bauzustände und schließlich für die Kosten. Das Eigengewicht der Konstruktion und die Maßnahmen es zu verringern eignen sich als Kriterium zur vergleichenden Betrachtung der Konstruktionsweisen:

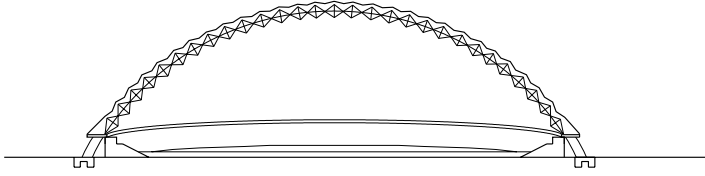
Biegebeanspruchte Tragwerke
 Gänzlich ungeeignet für extreme Spannweiten sind wegen ihres großen Eigengewichts monolithische und massive Tragwerke, die ihre Lasten und ihr Eigengewicht über Biegung abtragen, also der einfache Biegebalken aus Holz, Stahl oder Beton. Der entscheidende Schritt zu mehr Effizienz ist die Auflösung in Druck- und Zuggurt. Dies führt zu wesentlich leichteren Konstruktionen wie z.B. dem unterspannten Träger oder dem Fachwerkträger. Besonders differenziert und optimiert in diesem Sinne sind die 122 m langen Fachwerkträger der Halle 4 auf dem Messegelände in Hannover (Abb. 1, 2). Der Zuggurt besteht aus zwei Seilen, der Druckgurt aus zwei parallelen Rohrquerschnitten, die Trägerhöhe ist gemäß der Beanspruchung mit 9 m in Feldmitte am größten. Mit Fachwerkträgern ließen sich noch weit größere Strecken überbrücken. Da jedoch die Beanspruchung in der Mitte immer am größten ist, wird dort mit zunehmender Feldlänge eine immer größere Tragwerkshöhe erforderlich, was von Nachteil für den umschlossenen Raum sein kann. Eine Tragwirkung in zwei Richtungen lässt sich über Trägerroste und Raumfachwerke erzielen. So überdeckt die Halle 13 der Messe in Hannover orthogonal eine Fläche von 121 x 225 m, die Radsporthalle in Berlin hat als radialer Rost einen Durchmesser von 142 m (Abb. 3, 4).



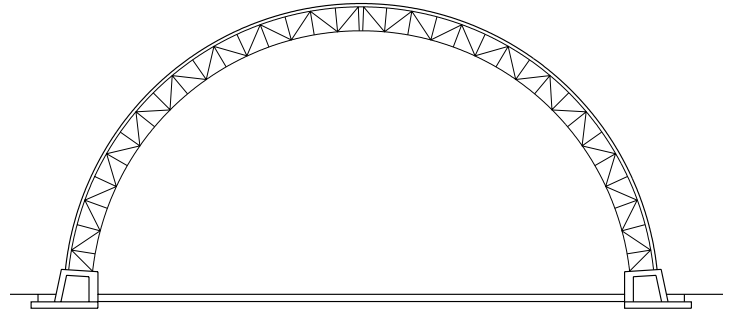
2

4

- 5, 6 Odate-Dome, Odate 1992
Toyo Ito/Takenaka
Spannweite: 178 m
- 7 Cargo-Lifter-Halle, Berlin 2000
SIAT/Arup GmbH
Spannweite: 210 m
- 8 Astrodome, Houston 1966
Wilson, Morris, Crain/Moore
Spannweite: 200 m
- 9 Georgia-Dome, Atlanta 1992
Weidlinger Ass./Heery International
Spannweite: 240 m



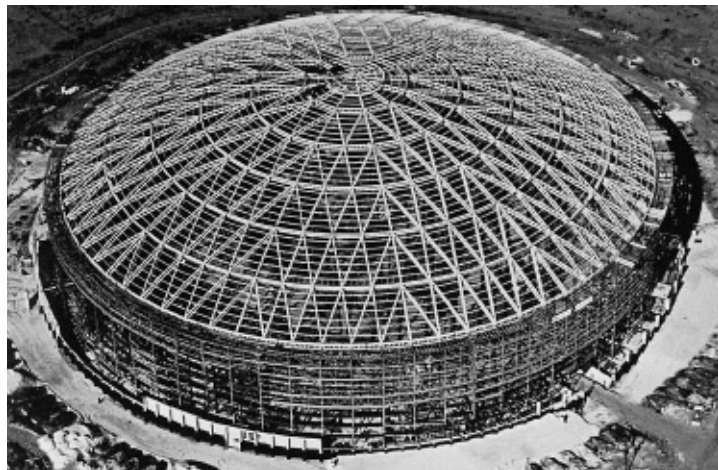
5



7



6



8

Druckbeanspruchte Tragwerke

Bogensysteme und Kuppeln nutzen die gesamte Raumhöhe als statische Höhe. Die Druckkraft wird in Bogenachse abgetragen, die entstehende Zugkraft wird über die Fundamente oder durch Zugglieder im Hallenboden von Auflager zu Auflager kurzgeschlossen. Dies ist ideal für die Verwendung von Materialien ohne große Zugfestigkeit, für gemauerte oder in unbewehrtem Beton gegossene massive Gewölbe und Kuppeln. Das Pantheon, die am weitesten gespannte Konstruktion der Antike, misst ca. 42 m im Durchmesser. Für sehr viel größere Dimensionen eignen sich schwere, massive Konstruktionen nicht. Eine geometrisch ähnliche Vergrößerung, sozusagen ein Hochzoomen, würde das Gewicht in der dritten Potenz anwachsen lassen. Ein Kuriosum stellt deshalb der Entwurf Albert Speers für eine massive Kuppel von 100 m Spannweite für Berlin in den 30er-Jahren dar.

Die für sehr große Spannweiten notwendige Reduzierung des Eigengewichtes wird erreicht durch die Verwendung von leichteren Materialien und wiederum durch die Auflösung des Bogens in einen Fachwerkbogen oder der Kuppel in ein räumliches Fachwerk. Schon 1889 wird zur Weltausstellung in Paris mit einem in ein Fachwerk aufgelösten Dreigelenkbogen die Spannweite von 112 m erreicht. Das Dachtragwerk des Cargo Lifters mit 210 m besteht ebenfalls aus Fachwerkbögen.

Mit zunehmender Spannweite wird die Stabilisierung gegen Knicken immer bedeutender. Dieser Aspekt lässt sich bei räumlichen Systemen einfacher beherrschen als bei ebenen additiven Systemen. Die im Grundriss ovale Kuppel des Odate Dome mit 178 m Spannweite (Abb. 5, 6) wird aus Zedernholz-Fachwerkbögen gebildet, die sich zur Seite hin neigen und mittels senkrecht dazu verlaufenden Holzbögen stabilisiert werden. Bei Dachformen, die eine doppelte Krümmung aufweisen, was bei einer Kuppel der Fall ist, liegt es nahe, die Schalenwirkung auszunutzen. Dazu müssen die Bögen untereinander durch Verstrebungen oder Kreuze schubsteif miteinander verbunden werden. Die dadurch entstehende Stabwerksschale ist stabiler gegen Knicken und steifer gegen-

über ungleichen Lasten als Einzelbögen und kann deshalb wiederum wesentlich leichter sein.

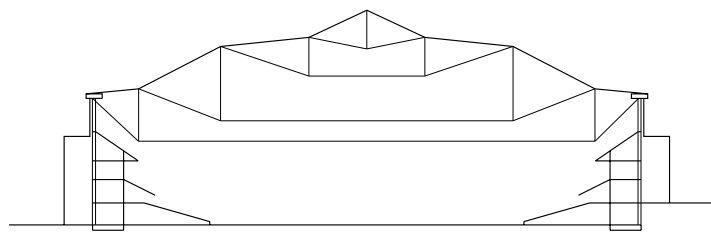
Die Strukturierung der Kuppelfläche ist auf verschiedene Weise möglich. Die Kuppel des AstroDomes in Houston (Abb. 8) ist unterteilt in 12 Sektoren mit jeweils eigener Netzgeometrie. Das zweilagige Sechsecknetz des »Eden Projects« (siehe S. 868ff.) steht in der Tradition von Buckminster Fullers geodätischen Kuppeln.

Zugbeanspruchte Tragwerke

Zugbeanspruchte Konstruktionen haben ein besonders geringes Eigengewicht. In den Querschnitten kann die volle Materialfestigkeit ausgenutzt werden. Da Knicken hier keine Rolle spielt, ist auch keine Steifigkeit quer zur Längsachse notwendig, die bei druckbeanspruchten und noch mehr bei biegebeanspruchten Elementen nur durch hohen Materialeinsatz erreicht wird. Voraussetzung ist selbstverständlich, dass die großen Zugkräfte im Bauwerk oder Fundament verankert werden können.

Doppelt gekrümmte Seilnetze oder Membranen werden durch Vorspannung stabilisiert, wie z.B. die Dächer des Olympiastadions in München. Dieses sehr leistungsfähige Tragssystem kam für weit gespannte Hallen in jüngster Zeit nicht mehr zur Anwendung. Nach den Erfahrungen von München und vor allem mit dem Dach über dem Olympiastadion in Montreal gelten sie als teuer. Ausschlaggebend für die seltene Verwendung sind jedoch eher die aus dem System resultierenden Formgesetzmäßigkeiten, die sich oft schwer mit anderen Entwurfsvorgaben in Einklang bringen lassen.

Bei Gebäuden mit kreisförmigem oder auch ovalem Grundriss besteht die Möglichkeit, die Horizontalkräfte einer Seilkonstruktion über einen massiven Druckring kurz zu schließen, wie es bei den »Cable-Domes« geschieht. Zwei der größten Dachtragwerke, der Sun-coast Dome in St. Petersburg mit 210 m Spannweite und der Georgia Dome in Atlanta mit 240 m sind »Tensegrity«-Strukturen. Dort gibt es nur wenige kurze Druckstäbe, die durch lange Zugseile im Raum gehalten werden (»Inseln aus Druck in einem Meer von Zug«). Die Grundregel, dass ein Tragwerk



9

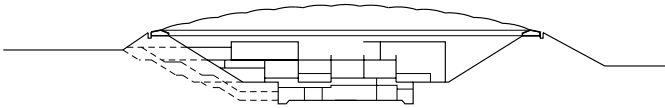
um so leichter ist, je mehr Elemente zugbeansprucht und je weniger druckbeansprucht sind, wird bei dieser Konstruktionsweise konsequent umgesetzt. Das Tragwerk der beiden Cable-Domes in Atlanta und St. Petersburg kann als eine mehrfache Überlagerung des bekannten Prinzips des Speichenrads gedeutet werden (siehe auch S. 841ff.). Die Membran als Dachhaut trägt zum geringen Eigengewicht der Gesamtkonstruktion zusätzlich bei. Für das Dachtragwerk des Millennium Domes in London wurde ebenfalls eine zugbeanspruchte Konstruktion gewählt. Ein vorgespanntes Netz von radial und ringförmig verlaufenden Stahlseilen ist von 12 Pylonen abgehängt.

Pneumatisch gestützte Tragwerke

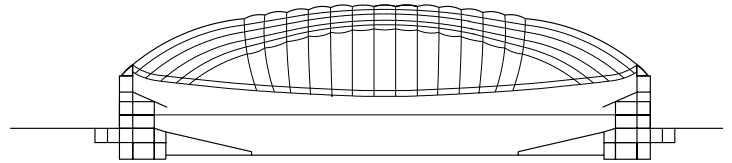
Pneumatisch gestützte Konstruktionen sind verglichen mit allen anderen Konstruktionsprinzipien die leichtesten. Ein gegenüber der Umgebung nur leicht erhöhter Luftdruck ist in der Lage, eine luftdichte Membran zu tragen und zu stabilisieren. Verstärkt z.B. durch ein Seilnetz sind größte Spannweiten erreichbar. 1970 wurde mit dem Ausstellungspavillon der USA in Osaka, Japan, (Abb. 10, 11) die Leistungsfähigkeit einer solchen Konstruktion eindrucksvoll demonstriert. Der Tokyo Dome (Abb. 12, 13) erreicht durch das Zusammenwirken von Membran und Seilnetz eine Spannweite von 201 m. Das Widerlager besteht aus einem Betondruckring und liegt oberhalb der Tribünen. Das zurzeit größte pneumatisch gestützte Dach (Pontiac Silverdome in Detroit, USA) überspannt 220 m. Die Klimahülle über einer Stadt in der Antarktis mit einer Spannweite von mehreren Kilometern, entworfen von Frei Otto 1953, oder die riesige Blase über Manhattan von Buckminster Fuller von 1950 waren ebenfalls als pneumatische Tragwerke gedacht. Diese beiden Entwürfe sind Utopien geblieben. Heute sind die großen Spannweiten nicht mehr verknüpft mit den Visionen für eine bessere Zukunft, werden dafür aber, wie die beschriebenen Beispiele zeigen, immer öfter Realität.

Die Autoren: Rainer Barthel ist Bauingenieur und leitet den Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung an der TU München. Herbert Markert ist Architekt und Wissenschaftlicher Mitarbeiter an diesem Lehrstuhl.

- 10, 11 US-Pavillon, Weltausstellung Osaka 1970
Davis, Brody/Geiger, Berger Ass.
Spannweite: 142 m
- 12, 13 Tokyo-Dome, Tokio 1988
Nikken-Sekkei/Takenaka
Spannweite: 201 m



10



12

In the 1950s and 60s, spanning great distances was central to many architectural visions. Today, although pragmatic, economic considerations are likely to prevail, large-span structures still exercise a fascination for architects and engineers. In recent years, a great number of halls have been realized, the roofs of which are remarkable for their broad spans. At 240 m, the Georgia Dome in Atlanta (ill. 9) has the largest span in the world. The Seibu Dome, erected in 1999 in Tokorozawa, Japan, has a clear span of 220 m; and the Sapporo Dome, at present under construction, will enclose a football stadium and span a distance of 218 m.

With increasing spans, the dead weight of the structure comes to play an ever greater role. That is why monolithic, solid structures subject to bending are quite unsuited for large-span construction. By resolving a structure into a system of compression and tension chords, much greater load-bearing efficiency and lighter forms of construction can be achieved. Hall 4 on the trade fair site in Hanover, with a roof span of 122 m, is an example of this (ills. 1, 2). The 9-metre depth of the lattice girders in their middle indicates the position where the maximum loading occurs. Much greater spans could be bridged with lattice girders, but at a certain point, their increasing depth will impinge on the space below. A two-directional load-bearing effect can be achieved with lattice grids and space frames. Hall 13 in Hanover, for example, is covered by an orthogonal grid 121 × 225 m in size; and the cycling stadium in Berlin

has a radial grid 142 m in diameter (ills. 3, 4). Arched systems and domes exploit the full spatial height of the construction as the effective structural depth. Compression loading is transmitted along the axes of the arches, while tensile stresses are short-circuited to the foundations or tension members in the floor.

The reduction of the dead weight of large-span structures can be achieved through the use of lighter materials, but also by resolving arch members into a latticework, and domes into space-frame structures. The Cargo-Lifter roof, for example, is articulated into lattice arches with a span of 210 m (ill. 7).

With ever greater spans, it becomes important to stabilize the structure against buckling as well. This can be achieved more easily with spatial systems than with planar additive systems. For roof forms with a double curvature, such as domes, it is sensible to exploit the shell effect of the structure. The individual arch members should be tied together by struts or crossed elements. The resultant framed shell will be more resistant to buckling and will possess a greater degree of rigidity.

Domes can be structured in a number of ways. The Astrodome in Houston (ill. 8), for example, is divided into 12 sectors, each with its own net-like geometry; while the double-skin hexagonal structure of the Eden Project roof (see p. 868) is in the tradition of Buckminster Fuller's geodesic domes.

Tensile structures have a very small dead weight. Double-curved cable nets or mem-

branes are stabilized by tensioning members, as can be seen in the roof over the Olympics Stadium in Munich. Systems of this kind are now regarded as too expensive, however, and are rarely used today.

Two of the largest roof structures in the world, the Suncoast Dome in St Petersburg, Florida, (with a span of 210 m) and the Georgia Dome in Atlanta, are tensegrity structures. These cable domes can be seen to follow the principle of the spoked wheel (see p. 841) superimposed in multiple form. The choice of a membrane roof skin also serves to minimize the dead load. Pneumatic structures are the lightest of all. Supported by a cable net, for example, this type of construction is capable of covering very large spans. The American Pavilion in Osaka (1970) was an impressive demonstration of this (ills. 10, 11). The largest pneumatic roof in existence today is the Pontiac Silverdome in Detroit, with a span of 220 m. Frei Otto's project for a protective skin with a span of several kilometres over an entire city in the Arctic, and the bubble over Manhattan by Buckminster Fuller were conceived as pneumatic structures. Both have remained Utopias. Huge spans no longer conjure a vision of a better future. Nevertheless, as the examples described here show, large-span roofs are increasingly part of our built reality.

Rainer Barthele is head of the Department for the Theory of Structures and Structural Engineering at the University of Technology, Munich. Herbert Markert is an architect and research assistant in the same department.



11



13