

# Schwebende Strukturen mit Durchblick: Evolution und Anwendung eines alternativen Leichtbaukonzepts

Autor(en): **Paronesso, Antonio / Passera, Rinaldo**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tec21**

Band (Jahr): **129 (2003)**

Heft 40: **Leichte Konstruktionen**

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-108824>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

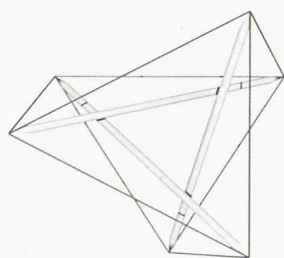
Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Schwebende Strukturen mit Durchblick

Evolution und Anwendung eines alternativen Leichtbaukonzepts

**Seit etwa 50 Jahren fasziniert R. B. Fullers radikales Konzept für leichte Tragkonstruktionen Statiker und Gestalter. Praktisch umsetzbar ist es aber erst nach einer stufenweisen Evolution geworden. In deren Verlauf wurde die Doktrin der isolierten «schwebenden» Druckglieder zu Gunsten der Steifigkeit und Tragkraft der Strukturen pragmatisch angepasst. In den letzten Jahren ist die technische und ökonomische Machbarkeit metallischer Tensegrity-Tragwerke an Bauwerken mit beachtlichen Dimensionen nachgewiesen worden.**

Das Tensegrity-Konzept wurde von Richard Buckminster Fuller in den 1950er-Jahren entwickelt. Gemäss seiner klassischen Definition wird in einem Tensegrity-System durch die Verbindung nicht zusammenhängender druckbeanspruchter Elemente mit zusammenhängenden zugbeanspruchten Elementen ein in sich stabiles Raumvolumen erzeugt.<sup>1</sup> Etwas poetischer beschrieb Fuller eine Tensegrity-Struktur auch als «Druckinseln in einem Ozean von Zugspannungen». Die erste, in Bild 1 gezeigte Elementarzelle des Tensegrity-Systems erhielt Fuller durch Verbinden der Enden von drei steifen, sich nicht berührenden Druckstäben mittels neun gespannter Kabel. Da in einer Tensegrity-Struktur allein die Druckspannungen in den Stäben ausreichen, um die Zugspannungen in den Kabeln auszugleichen, wurden sie als «autostabile

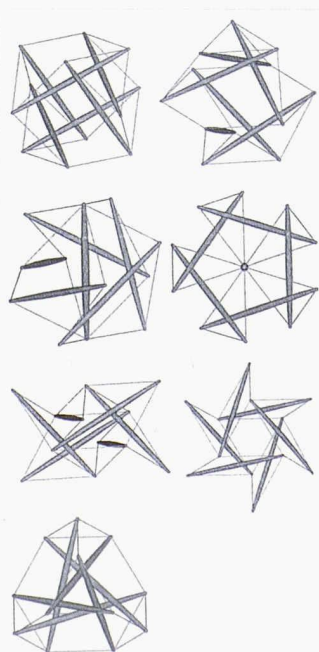


1

Die erste Elementarzelle des von R. B. Fuller entwickelten Tensegrity-Systems ohne Kontakt zwischen den Druckstäben (Bilder: Wenn nicht anders angegeben: Passera & Pedretti)

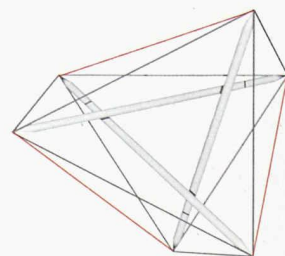
2

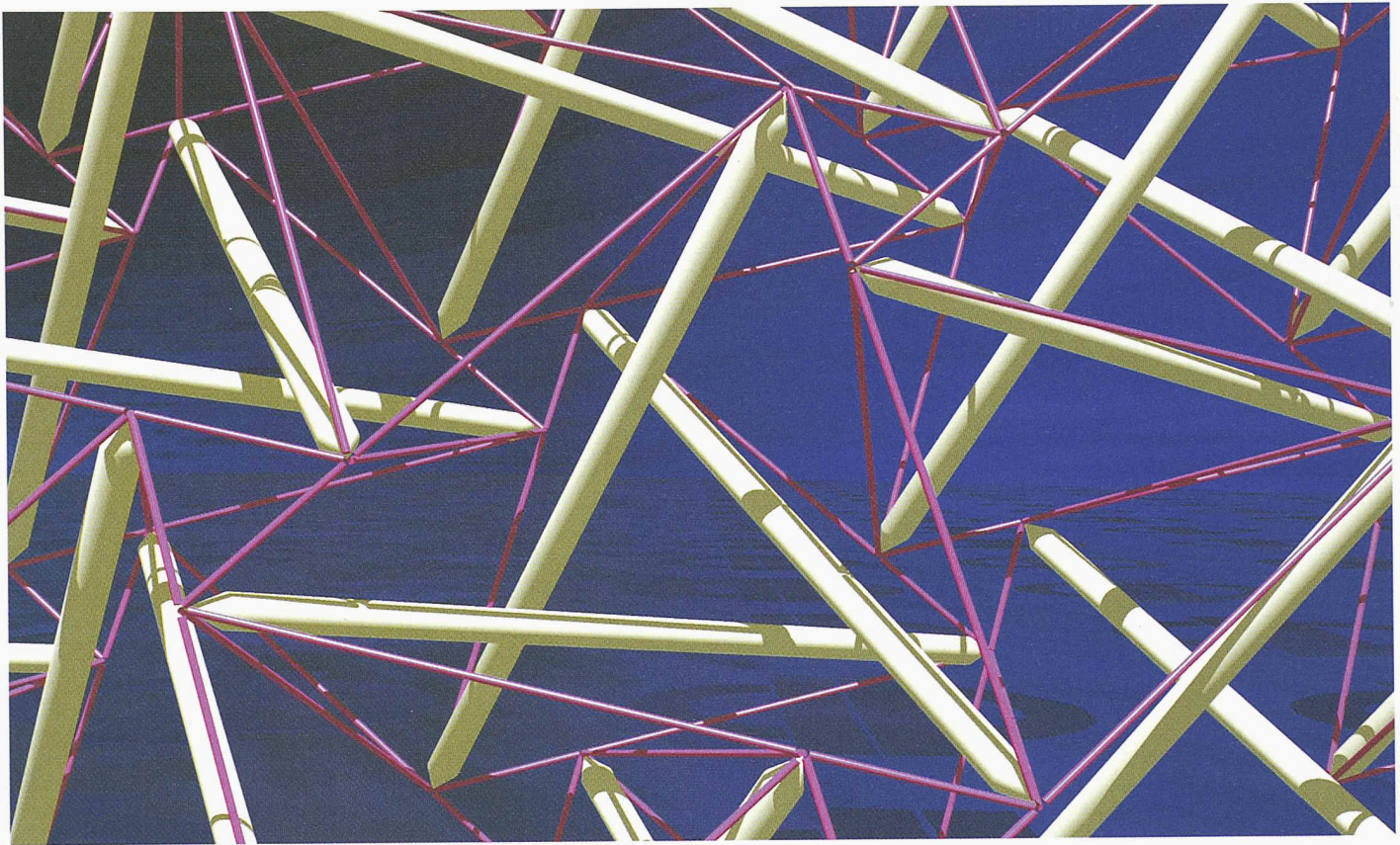
Beispiele von Elementarzellen des Tensegrity-Systems ohne Kontakt zwischen den Druckstäben (Bilder aus <sup>2</sup>)



3

Geometrisch steife, aus der flexiblen Zelle in Bild 1 durch die Einführung von 3 zusätzlichen äusseren Kabeln entwickelte Elementarzelle





4

#### Geometrisch flexible Verbindung von nicht zusammenhängenden Druckstangen

Kabelnetzwerke» definiert. Diese benötigen im Gegensatz zu konventionellen seilverspannten Konstruktionen keine Gegengewichte oder Bodenverankerungen für ihre Stabilisierung.

Der aus dem englischen Begriff «tensile integrity» (integrale Zugspannung) abgeleitete Begriff Tensegrity bezeichnet somit eine Kategorie von Tragsystemen, bei denen das Gleichgewicht zwischen inneren und äusseren Kräften durch die Ausbildung von inneren reinen Druckspannungen in diskontinuierlichen (untereinander nicht verbundenen) Systembereichen und von inneren reinen Zugspannungen im restlichen, kontinuierlichen (verbundenen) Systembereich realisiert wird.

Die nicht auf Anhieb verständliche statische Funktionsweise der Tensegrity-Systeme und der durch ihr spezifisches Erscheinungsbild hervorgerufene Eindruck von Transparenz und Leichtigkeit haben seit ihrem ersten Erscheinen Forscher wie Künstler fasziniert. Seither wurden immer komplexere und attraktivere neue Formen entwickelt, wie die Beispiele in Bild 2 zeigen.<sup>2</sup>

#### Klassische Tensegrity

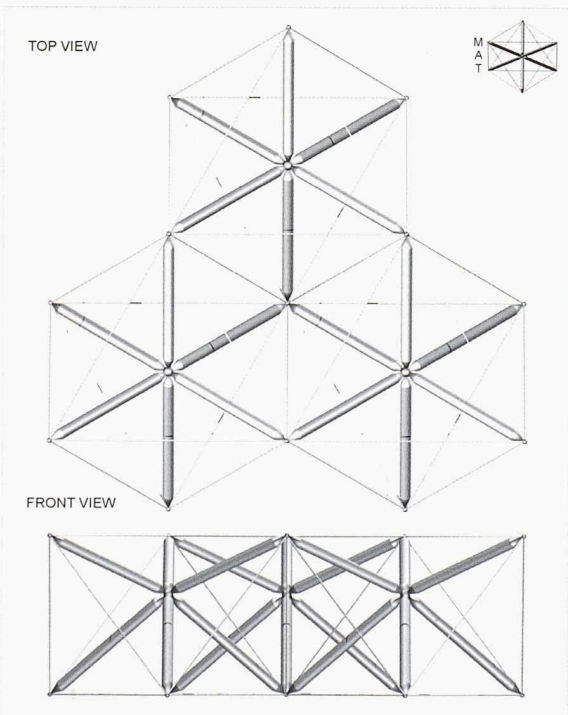
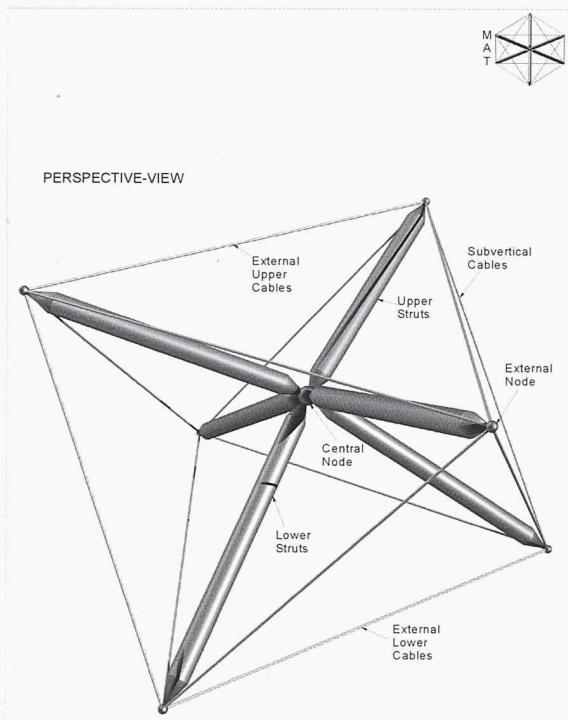
Die Struktur der Tensegrity-Systeme entspricht einem Netzwerk von linearen Elementen, die untereinander durch Kugelgelenke verbunden sind. Innerhalb dieser Struktur ist ein kontinuierliches System von zugbeanspruchten Kabeln oder Zuggliedern gegen ein diskontinuierliches System von Druckstäben vorgespannt. Ten-

segrity-Systeme werden durch das Aneinanderfügen von Elementarzellen erzeugt, die auch in verbundenem Zustand diesem konstruktiven Prinzip entsprechen.

Bei der Konzeption einer Tensegrity-Struktur ist die Anzahl Druckstäbe zu minimieren, um in diesen Elementen unter allen auf die Struktur einwirkenden Lasten eine Druckbeanspruchung sicherzustellen. Aus diesem Grundsatz folgt gemäss Fuller und Emmerich, dass Tensegrity eine optimale strukturelle Form ohne Materialverschwendung ist, da sie kein überschüssiges druckbeanspruchtes Material beinhaltet.<sup>2</sup>

Die Evolution der Tensegrity-Strukturen zielt darauf ab, diesen Tragwerkstyp in Anwendungsgebieten und Grössenordnungen einzusetzen, die als Domänen der konventionellen Fachwerke gelten. Mit neu entwickelten Elementarzellen und Verbindungsschemas wurde und wird laufend die Verbesserung der funktionalen Effizienz der einzelnen Elemente und damit die Verringerung des Gewichts der Strukturen angestrebt.

Zunächst wurden die geometrisch flexiblen Elementarzellen analog Bild 1 von geometrisch steifen Anordnungen wie jener in Bild 3, die sich durch 3 zusätzliche äussere Kabel unterscheidet, abgelöst. Die Elementarzelle in Bild 3 weist gegenüber dem ursprünglichen Konzept eine grössere strukturelle Steifigkeit auf. Die geometrisch flexiblen Anordnungen sind nämlich nicht kinematisch bestimmt und daher hauptsächlich durch infinitesimale Mechanismen in ihrem Inneren bestimmt. Diese entwickeln ihre Tragfähigkeit nur



5 und 6  
Elementarzelle des Tensegrity-Systems mit Zentralknoten  
Geometrisch steife Verbindung von Zellen in Bild 5 mit zusammenhängenden Druckstäben

aufgrund grosser starrer Relativbewegungen zwischen den Elementen einer Zelle. Im Gegensatz dazu sind geometrisch starre Anordnungen kinematisch bestimmt. Die Entwicklung ihrer Steifigkeit und damit der Tragfähigkeit beruht auf den elastischen Verformungen der Elemente, die im Allgemeinen nur mit kleinen Verschiebungen innerhalb der Zelle verbunden sind.

Solange in einer geometrisch steifen Anordnung keine infinitesimalen Mechanismen wirken, ist es für die Stabilität ausreichend, dass die Zugkräfte in allen Kabeln einer Zelle von Null verschieden sind. Unter dieser Voraussetzung kann das Verhalten des Systems mit Hilfe von FE-Tragwerksberechnungsprogrammen, die auf den klassischen Hypothesen der kleinen Verschiebungen und des Gleichgewichts für den unverformten Zustand beruhen, untersucht werden.

Aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes erscheinen die klassischen Tensegrity-Strukturen vorwiegend für Bauwerke oder Bauteile mit dekorativem Charakter und für besondere Anwendungen geeignet.

### Pragmatische Anpassung der Regeln

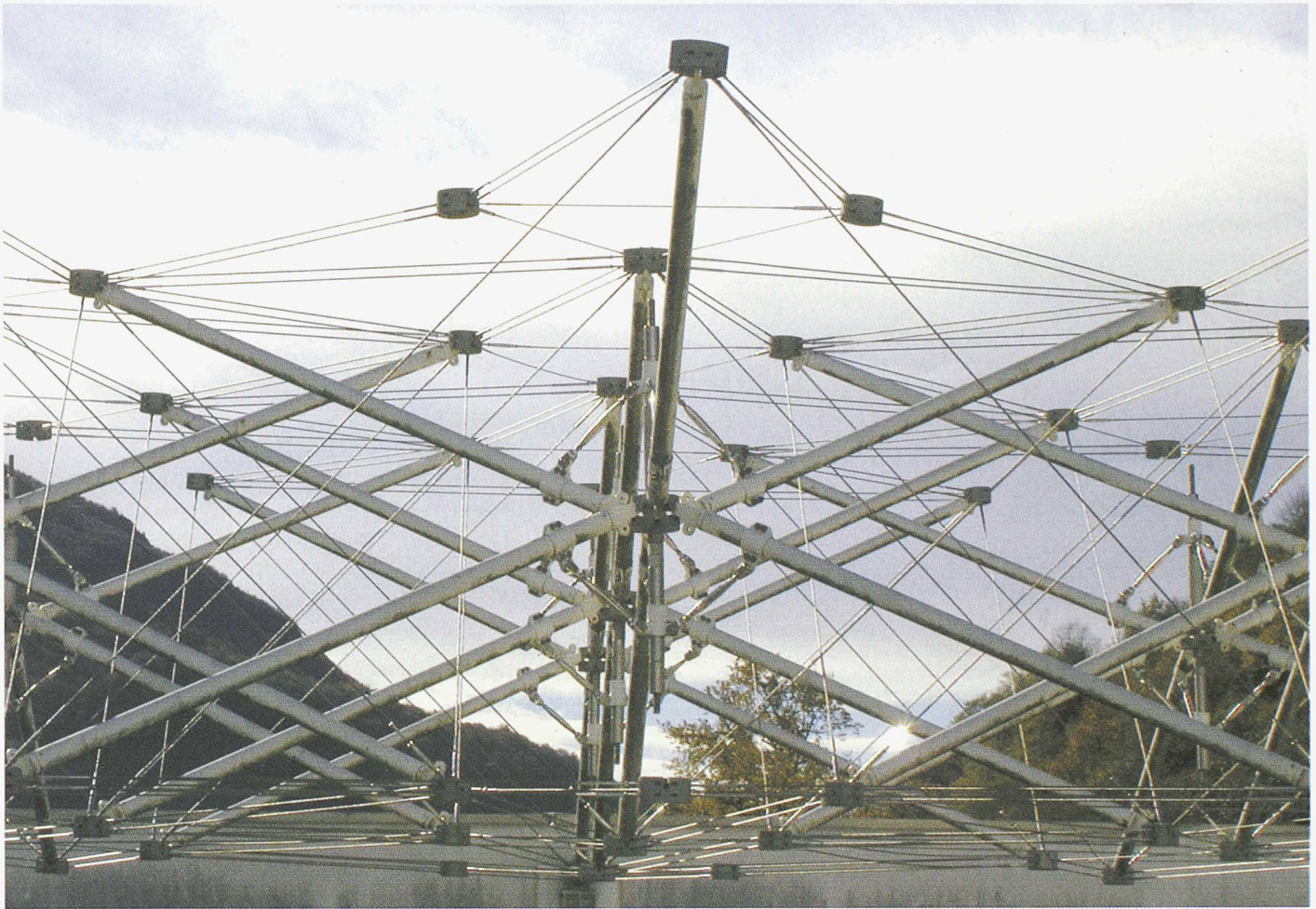
Die experimentell erhaltene Lösung des Problems, wie die Elementarzellen eines Systems in effizienter Weise miteinander zu verbinden sind, löste einen ersten Evolutionsschub des strukturellen Konzepts Tensegrity aus. Um Strukturen mit ausreichender Steifigkeit zu erhalten, wurde Fullers ursprüngliche Bedingung, dass kein Kontakt zwischen den druckbeanspruchten Elementen bestehen darf, zumindest für Kontakte zwischen Elementen verschiedener Zellen fallen gelassen.

Die räumlichen Gitterwerke mutierten in der Folge von Anordnungen nicht zusammenhängender geometrisch flexibler Druckstäbe (Bild 4) zu Strukturen mit verbundenen, geometrisch steifen Balken. Trotz dieser Weiterentwicklung fiel der Vergleich mit den klassischen, aus Rohrelementen aufgebauten räumlichen Fachwerken sowohl bezüglich des höheren Gewichts als auch aufgrund der geringeren Steifigkeit aber noch zu Ungunsten der Tensegrity-Strukturen aus.

### Deregulierung des Konzepts

Ein zweiter Evolutionsschub setzte ein, als die Bedingung des Nicht-Berührens auch für Druckstäbe, die derselben Elementarzelle angehören, fallen gelassen wurde. Als Beispiel werden die drei Balken in Bild 3 wie in Bild 5 dargestellt durch einen zusätzlichen zentralen Knoten miteinander verbunden.<sup>3</sup> Die daraus entstandenen, als Anti-Prism (AP) bezeichneten neuen Zellen<sup>4</sup> sind untereinander durch zusammenhängende, geometrisch steife Stäbe (Bild 6) verbunden.<sup>3</sup>

In dieser Anordnung wirkt sich die Reduktion der freien Länge der Stäbe und die Möglichkeit, die Position des Zentralknotens bezüglich der Ebenen der horizontalen Kabel zu variieren, als Gewichtsreduktion von ca. 30% gegenüber klassischen, nur aus Rohrprofilen gebildeten räumlichen Fachwerken aus. Die beschriebene Lösung bietet auch den Vorteil, dass es nicht unbedingt erforderlich ist, im System einen vorgepannten Zustand einzustellen, um seine Stabilität und eine ausreichende Steifigkeit zu gewährleisten.

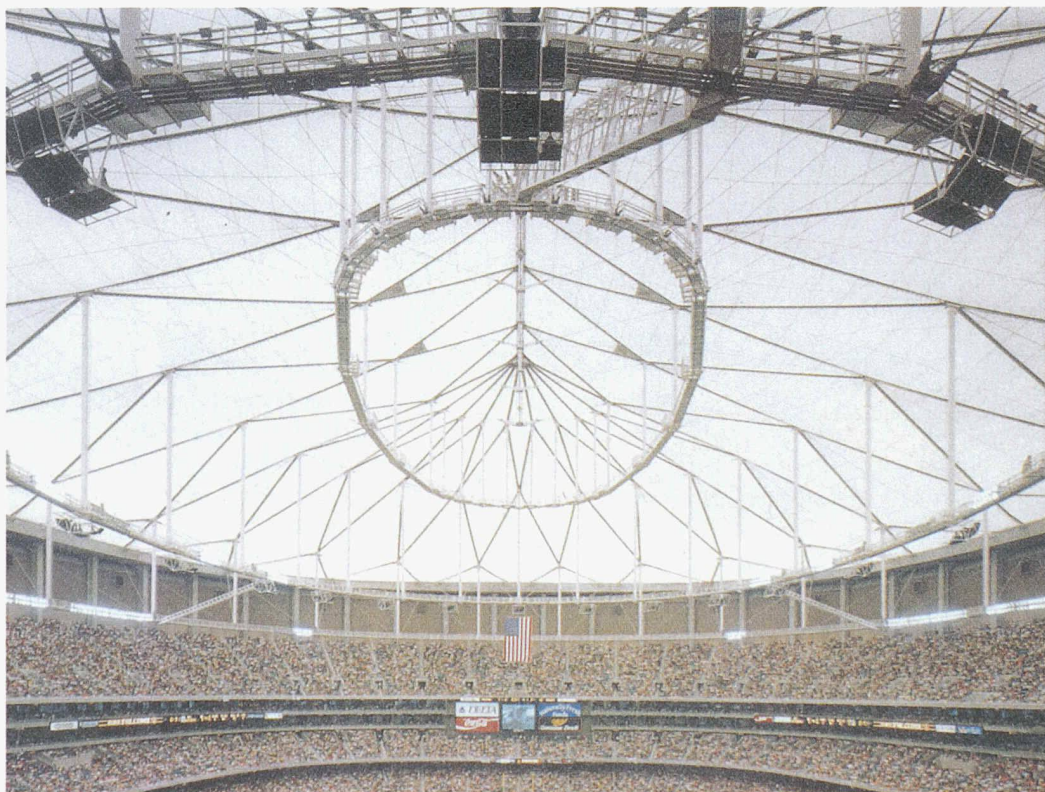


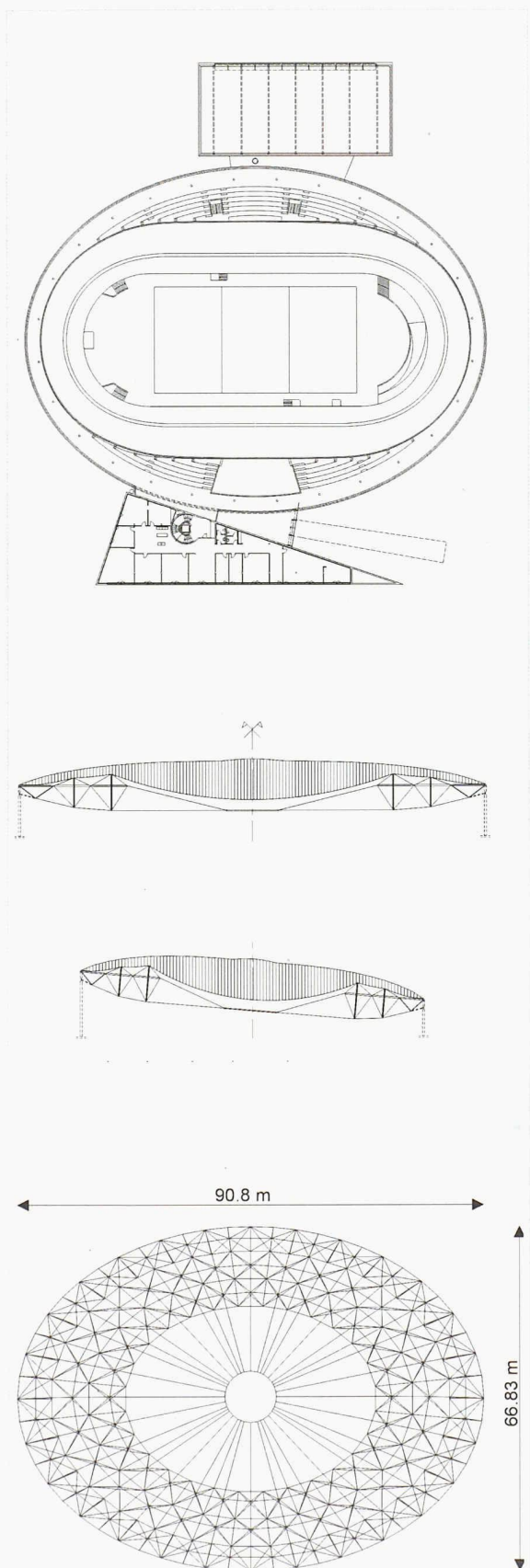
7

Modellanordnung eines räumlichen Tragwerks für die Untersuchung des Verhaltens von Elementarzellen mit Zentralknoten

8

Hyper Dome in Georgia (USA) von M. Levy, 1992





9

Situation, Schnitt und Dachaufsicht des Velodroms im Weltzentrum des Fahrradsports (Centre Mondial du Cyclisme) in Aigle (VD), Architekten Pierre Grand und Pascal Grand, Lausanne

Im Rahmen des neuen Tensegrity-Konzepts, das Verbindungen der Stäbe sowohl innerhalb der einzelnen Elementarzellen als auch zwischen verschiedenen Zellen erlaubt, sind neben dem beschriebenen Beispiel weitere neue Typen von Elementarzellen entstanden. Sie zeichnen sich generell durch verbesserte strukturelle Effizienz bei reduzierter Komplexität aus und passen sich besser an die Anforderungen bezüglich Gebrauchstauglichkeit und konstruktiver Einfachheit, wie sie im Bereich der Leichtmetallstrukturen gestellt werden, an. Die Vielzahl der neu entwickelten Modultypen (aber auch die Zelle in Bild 1) und -familien wird gegenwärtig in der strukturellen Kategorie der «Cable-Strut Simplexes» zusammengefasst.<sup>4</sup>

Mit aktuellen Tensegrity-Strukturen lassen sich im Vergleich zu nur aus Rohrprofilen gebildeten räumlichen Fachwerken Gewichtsreduktionen in den Größenordnungen von 40% bis 50% auch ohne Vorspannung erzielen.<sup>4</sup> Mit Tensegrity-Strukturen des Typs DP (Di-Pyramiden) liegen Tragwerke mit Spannweiten von 200 m und Einheitsgewichten unter 30–40 kg/m<sup>2</sup> im Bereich des Möglichen.<sup>4</sup>

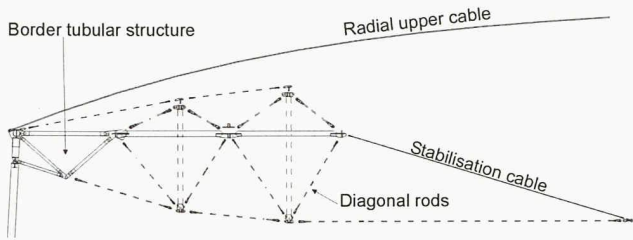
### Praktische Anwendungen

Angesichts der zahlreichen Studien, die den Tensegrity-Tragwerken und insbesondere ihren strukturellen Konzepten gewidmet sind, ist hervorzuheben, dass bis anhin nur wenige Beispiele technischer Anwendungen existieren. Diese beschränken sich mehrheitlich auf leichte ringförmige Dachkonstruktionen mit Membranen als horizontalen Abschlüssen. Ausser R. B. Fullers berühmtem Modell des «Geodesic Tensegrity Dome» ist auf seinen 1964 patentierten «Aspension Dome» hinzuweisen, der von D. Geiger 1986 weiterentwickelt und unter dem Namen «Cable Dome» realisiert wurde, sowie auf den «Hyper Dome» von M. Levy in Georgia (1992) in Bild 8 und auf den «Tension Strut Dome» von M. Saithoh, der 1991 in Amagi in Japan erstellt wurde.

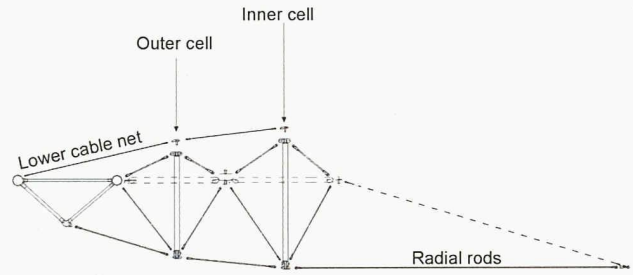
Bis 1999 war der Grossteil der Anwendungen auf dem Gebiet der räumlichen Gitter auf Prototypen in verkleinertem Massstab zum Testen der technischen Machbarkeit der neuen Strukturtypen beschränkt (Bild 7). Erst im Jahr 2000 wurde die Projektierung von Strukturen, die das bipyramidale Modul verwenden, im Massstab 1:1 aufgenommen. Die einem breiten Publikum bekannte, mehrfach beschriebene «Wolke» von Yverdon<sup>5,6</sup> und das Velodrom in Aigle<sup>7</sup> stellen wahrscheinlich die weltweit ersten technischen Anwendungen dieses Zellentyps dar. Um die Konstruktion sowie die Montage- und Reguliervorgänge des Systems zu vereinfachen, bestehen die Zugglieder dieser realen Anwendungen aus Zugstangen anstelle von Kabeln.

### Das Velodrom in Aigle

Mit der Überdachung des im Bild 9 dargestellten, am 14. April 2002 eingeweihten Velodroms im Centre Mondial du Cyclisme in Aigle (VD) existiert in der Schweiz gegenwärtig ein zweites Beispiel für die technische Anwendung des bipyramidalen Moduls, in diesem Fall mit zusätzlicher Vorspannung.



Cross section along the columns



Cross section along the vertical struts



10

Schnitte des doppelten Stahlstrukturrings, der das Luftkissendach trägt. Schnitt oben durch die tragenden Stützen, unten durch die vertikalen Druckstäbe

11

Innenraum des Velodroms: Untere Membrane mit innerer Tragstruktur

12

Aufsicht auf die obere Membrane, Radial- und Zentralkabel



Das Velodrom in klassischer Ellipsenform mit Hauptachsen von 90,8 m und 66,83 m weist eine gesamt überdachte Fläche von ca. 5000 m<sup>2</sup> auf (Bild 9). Das Dach und die Fassaden werden von 28 gleichmässig am äusseren Rand des Bauwerks angeordneten Stahlstützen mit einer mittleren Höhe von ca. 17,40 m getragen. Ihre Spitzen liegen in einer Ebene, die um 6,5° bezogen auf die kleine Hauptachse der Ellipse geneigt ist.

Das Dach wird durch ein Tragluftkissen, bestehend aus einer in einem Stahlring eingespannten Doppellage PVC-Membranen, gebildet. Der Ring ist aus zwei konzentrischen Tragstrukturen aufgebaut (Bilder 9 und 10). Die äussere Tragstruktur (links in Bild 10) ist mit den Fassadenstützen verbunden und besteht aus 28 aus Rohrprofilen aufgebauten pyramidalen Zellen mit trapezförmiger Grundfläche. Die innere Tragstruktur (bipyramidale Tensegrity-Struktur) wird durch 28 × 2 = 56 bipyramidale Zellen gebildet. Die vertikalen Streben dieser Zellen dienen als Umlenkungen für die Versteifungskabel der unteren Membrane (Bild 11). Die obere Membran wird von 28 an den Spitzen der Fassadenstützen verankerten Radialkabeln gehalten, die untereinander durch ein elliptisches Zentralkabel verbunden sind (Bild 12). Der Innendruck des Luftkissens beträgt unter normalen Betriebsbedingungen 370 Pa.

Um dem Stahlring eine grössere Steifigkeit zu verleihen, sind die Zellen der Tensegrity-Struktur vorgespannt. Jeder der 28 zwischen je 2 benachbarten bipyramidalen Zellen angeordneten Zentralknoten besteht aus einer festen unteren Platte und einer beweglichen oberen Platte. Die vier unteren im Knoten zusammen treffenden Zugstreben sind mit der festen Platte verbunden, währenddem die oberen Zugstreben mit der beweglichen Platte verbunden sind.

Während der Montage der Tragstruktur wird der Abstand zwischen den beiden Platten der 28 zusammengesetzten Knoten auf einen im Voraus berechneten, von Null verschiedenen Wert eingestellt. Der Vorspannungszustand, der in allen Zuggliedern des Systems von Null verschiedene Zugspannungen für alle Belastungszustände gewährleistet, wird durch das gleichzeitige Schliessen der Knoten mittels hydraulischer Pressen aufgebracht (detaillierte Angaben in<sup>7</sup>).

#### Literatur

- 1 R. B. Fuller and R. Marks: The Dymaxion World of Buckminster Fuller. Anchor Books Edition, 1973.
- 2 R. Motro, A. Smaili and O. Foucher: Form controlled for Tensegrity Formfinding Snelson and Emmerich Examples. Proc. Int. IASS Symposium, Warsaw, Poland 24 – 28 June, 2002, 243–248.
- 3 Passera & Pedretti Consulting Engineers Switzerland: Catalogue for Designers. Expo.01/Forum, Technical-descriptive report, release 2.0, 1998.
- 4 B. B. Wang and L. Yan-Yun: From Tensegrity Grids to Cable-Strut Grids. Int. Journal of Space Structures, Vol. 16 n° 4, 2001, 279–314.
- 5 H. Rochat: Eine künstliche Dunstwolke. SI+A Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 33/34, August 2000, 670–674.
- 6 A. Paronesso: Uno nuvola ticinese a Yverdon. Rivista Archi n° 3, 2002, 92–97.
- 7 A. Paronesso: The 2002 World Cycling Centre Arena, Aigle, Switzerland. Proc. of Int. IASS Symposium, Warsaw, Poland, Juni 24–28, 2002, 910–917.

#### VELODROM AIGLE

##### BAUHERR

UCI Union Cycliste Internationale, Aigle

##### ARCHITEKTEN

Pierre Grand und Pascal Grand, Lausanne

##### BAUINGENIEUR DACHKONSTRUKTION

Passera & Pedretti Consulting Engineers, Lugano-Grancia

##### AUSFÜHRUNG

2001–2002

##### WEITERE INFORMATIONEN

[www.uci.ch](http://www.uci.ch), [www.cmc-aigle.ch](http://www.cmc-aigle.ch)

Dr. sc. techn. Antonio Paronesso, dipl. Bauing. ETH,  
Rinaldo Passera, dipl. Bauing. ETH,  
Passera & Pedretti, Consulting Engineers  
Via al Molino 6, 6916 Lugano-Grancia  
[ppeng@ppeng.ch](mailto:ppeng@ppeng.ch)

Der vorliegende Beitrag ist in einer ausführlicheren Fassung bereits in der Zeitschrift «archi» Nr. 6, Dezember 2002, erschienen.

Aus dem Italienischen übersetzt und bearbeitet von Aldo Rota, [rota@tec21.ch](mailto:rota@tec21.ch)