

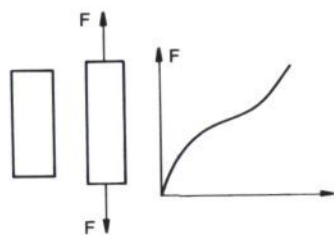
Um sich der gesuchten Form einer Membrankonstruktion anzunähern, werden zwischen „Randseilen“ aus gebogenem Draht Seifenlamellen gespannt. In der Oberfläche herrscht Spannungsgleichgewicht: Minimalfläche mit Randbedingungen

Zeltformen

Demontiert man ein Zelt, so erhält man Stäbe, Seile, eine Handvoll Knoten, sowie eine schlappe Membran. Mit den linearen Druck- und Zugstäben ist man vertraut, durch Teilen, Bündeln bzw. Aufrollen sind sie schnell verstaut.

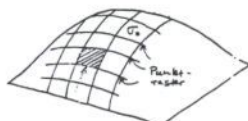
So verhält es sich auch mit ihrer Statik. Die Methoden der Berechnung sind einfach, weil so ein Bauteil bei gegebener Belastung proportional zur angreifenden Kraft seine Form verändert und dabei ebensogroße Gegenkräfte erzeugt. Die Formveränderungen bleiben dabei üblicherweise im Rahmen eines Bruchteils der ursprünglichen Länge und können bei gelenkigen Konstruktionen vernachlässigt werden.

Beim Falten der Plane kommt man allerdings ins Schwitzen. Nur durch ein genaues Nachvollziehen ihrer inneren Geometrie läßt sie sich überhaupt bändigen, denn sie ist nicht in die Ebene abwickelbar und wegen ihrer geringen Elastizität meist auch mit Gewalt nicht dazu zu bewegen. Diese beiden Eigenschaften sind aber gerade die Voraussetzung für ihre erstaunlichen konstruktiven Möglichkeiten. Verantwortlich für die fehlende Abwickelbarkeit einer Zeltmembran ist ihre doppelte Krümmung, die das Flächentragwerk ohne Biegebeanspruchung stabilisiert und eine punktweise Unterstützung in großen Abständen zuläßt (Seile und Stäbe fungieren dabei nur als Abstandshalter zur Positionierung im Raum). Im Versuch mit einer elastischen Membran oder einer Seifenhaut stellt sich bei einer solchen Anordnung eine



Nichtlineares Kraft-Dehnungs-Verhalten eines Gewebematerials

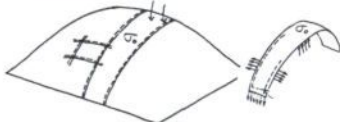
Erzeugung der Reinform



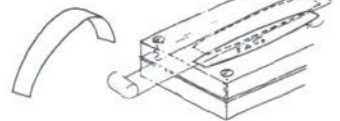
Einbau unter Spannung



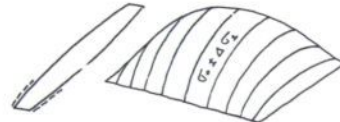
Bahnfindung



Verebnung



Errichtung



Herkömmliche Methode der Schnittmusterermittlung

ideale sogenannte Minimalfläche ein, die auf besonders günstige Art auf Lasten senkrecht zu ihrer Oberfläche reagieren kann, indem die Haut im belasteten Bereich nachgibt. So stellt sich eine neue Geometrie ein, bei der wiederum sämtliche Kräfte in der Oberfläche verlaufen und sich ebenfalls recht gleichmäßig über sie verteilen.

Nun kann bei einem Zelt allerdings durch die Verformung unter großen Lasten der Abstand der neu eingestellten Geometrie zur ursprünglichen Minimalfläche so groß werden, daß anstelle der Gleichverteilung örtliche Spannungsspitzen auftreten, die die Festigkeit des Materials überfordern. In einem solchen Fall reißt die Membran, obwohl der größte Teil der Konstruktion längst nicht maximal belastet ist. Wie in einem gespannten Leintuch kann sich ein einmal entstandener Riß mühelos ausbreiten, das Zelt stürzt ein.

Daraus ergeben sich im wesentlichen drei Anforderungen an ein gutes Material für Zeltmembranen. Natürlich sollte es große Zugspannungen aufnehmen können. Für den oben beschriebenen Fall sowie für die Vermeidung von Katastrophen nach Beschädigung der Haut durch Punktlasten, etwa durch herabfallendes schweres Werkzeug während des Aufrichtens, sollte ein Riß sich im gesuchten Material nicht ausbreiten können. Drittens, und das ist die ungewöhnlichste Bedingung für einen scheinbar so frei formbaren Baustoff, müßte es außerordentlich steif sein. Damit könnte man allzugroße Formänderungen vermeiden und so die Membran rechnerisch erst in den Griff bekommen und eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte gewährleisten.

Festigkeit, Zähigkeit und Steifigkeit eines Materials müssen für diese Anwendung mit geringem Flächengewicht verbunden sein, da die Absolutbelastung an jedem Punkt der Konstruktion von der Eigenlast der Membran abhängt.

Verbundwerkstoffe

Während die Baustatik seit ihrer Entstehung als wissenschaftlich theoretische Methode zur Verhaltensvorbestimmung geplanter Eisenkonstruktionen im

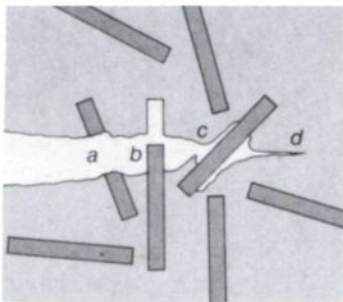
19. Jh. an Dimension und Logik des Stahlbaus für ihre Berechnungs- und Denkmodelle weitgehend festgehalten hat, findet über architektonische Randbereiche mit Hochleistungskonstruktionen ein vierter Baustoff (neben Holz, Mineralien, Metallen) und mit ihm eine neue Betrachtungsweise Eingang in die Architektur.

Die Kunststoffe haben dabei, und damit unterscheidet sich das Phänomen von ihrem ersten Auftreten in den siebziger Jahren, einen von vielen unbeachteten Umweg über die modernen Schrittmacherindustrien der Luft- und Raumfahrttechnik hinter sich, im Verlauf dessen die konzeptionelle Entsprechung ihrer verfeinerten Herstellungstechnologie hinsichtlich konstruktiver Anwendbarkeit erst entwickelt wurde. Für die technischen Leitbilder dieser Richtung der Materialforschung, wie dem ultraleichten Raumgleiter, der aus eigener Kraft von der Erde durch die Atmosphäre ins All und wieder zurück fliegen können soll, ohne auf seiner Bahn diverse Hilfsapparaturen abstoßen zu müssen, stellen sich Anforderungen, die mit keinem der bekannten Konstruktionsmaterialien erreicht werden können. Ein Flügel beispielsweise müßte hochfest, unter großen Spannungen völlig unnachgiebig sowie extrem hitze- und chemikalienbeständig sein. Das im Flugzeugbau klassischerweise verwendete Aluminium wird schon heute bei einigen Überschallflugzeugen durch Kunststoffe verdrängt. Über die Strategie zur Entwicklung der gesuchten Substanzen sind die Wissenschaftler sich einig: Verbundwerkstoffe.

Durch Einbetten von Fasern oder Partikeln einer Substanz in einer Matrix aus einer anderen Substanz können sich Eigenschaften ergeben, die keine der beiden Komponenten alleine aufweist.

Das Prinzip ist bekannt. Die Kombination von Beton mit Eisenstäben führt zu einem Stoff, der Eisen an Steifigkeit und Beton an Festigkeit bei weitem übertrifft. Zur Armierung der neuen Kompositkunststoffe werden aber zunehmend Fasern herangezogen, deren Querschnitte in der Größenordnung einzelner Moleküle liegen.

mit textilen Materialien



Möglichkeiten des Versagens bei Ausbreitung eines Risses in einem Verbund: Der Anstieg der Spannung vor einer laufenden Rißfront kann die verstärkenden Fasern überlasten und brechen lassen (a), sie aus der Matrix ziehen (b) oder von der Matrix trennen (c). Der zwischen den Fasern fortschreitende Riß verursacht eine Deformation der Matrix und läßt sie versagen.

Rißausbreitung

Dieser Maßstabssprung stellt einen wesentlichen Grund für die Qualität der neuen Werkstoffe dar und erklärt die erstaunliche Zunahme der realen Festigkeit beim Übergang vom homogenen Material zur Faser. Denn selbst theoretisch sehr leistungsfähige Substanzen wie die keramischen Werkstoffe Aluminiumoxid (der Grundstoff von Edelsteinen wie Rubin und Saphir), Siliziumcarbid sowie Siliziumdioxid (ein Hauptbestandteil von Quarz und Glas) erreichen in Blockform kaum je ihre rechnerische Festigkeit. Sie sind nämlich spröde. Ein äußerer Kratzer oder ein Fehler im Inneren kann schon einen katastrophalen Riß einleiten.

Unter Zugbelastung konzentrieren sich in spröden Stoffen rund um die Enden winzig kleiner Risse und Sprünge die Spannungen auf ein Vielfaches. Ob die benachbarten Atombindungen in diesem Bereich ebenfalls brechen und damit der Sprung zum „Keim“ für einen schnell wachsenden Riß wird, oder ob das Material zäh reagiert und die freigesetzte Rißenergie absorbieren kann, hängt dabei in erster Linie von der Länge des Sprunges ab.

Die „Versagens-Theorie“ der modernen Werkstoffwissenschaften berechnet für jeden zu belastenden Werkstoff seine Griffith-Länge. Während sie für Weicheisen etwa zwei Meter beträgt, nimmt sie mit wachsender Steifigkeit zu, liegt bei Hochleistungsstahl zwischen einem und zehn Zentimetern und

bei Glas sogar im Bereich einiger Zehntelmillimeter. Überschreitet ein Riß diese kritische Länge, so kann er sich explosionsartig ausbreiten und das gesamte Werkstück zerstören.

Zähigkeit durch Fasern

Nach Auffassung der Forscher ist dieses Phänomen die Ursache für viele große Unfälle mit Brücken oder Schiffen aus Stahl, weil dort dem Anlaß nach kleinere Beschädigungen zu katastrophalen Folgen führen können, wenn die Konstruktion nahtlos gefügt ist. Es geht also darum, die Größe der einzelnen Glieder eines Tragwerkes auf diese gegen alle Intuition absolut gegebene Länge abzustimmen. Wenn deswegen große Stahlkonstruktionen in Paneele aufgelöst werden, folgt für die neuen hochfesten Konstruktionswerkstoffe daraus direkt ihre Verwendung in Form kleiner Partikel oder dünner Fasern.

So hat zu feinen Fäden gesponnenes Glas eine Zugfestigkeit von mehr als drei Milliar-

den Pascal gegenüber normalem Stahl mit nur einer halben Milliarde Pascal. Bestimmte keramische Stoffe wie Siliziumcarbid oder Aluminiumoxid finden Verwendung in Form kleiner nadelförmiger Gebilde. Die sogenannten Whiskers haben eine besonders niedrige Wahrscheinlichkeit für Fehler ihrer inneren Geometrie, da sie als Einkristalle hergestellt werden. Carbonfasern gehören zu den monoatomaren Fasern und haben wegen ihrer festen Bindungen und leiterartigen Struktur außergewöhnliche Steifigkeit bei großer Festigkeit. Sie bestehen aus langen Ketten aneinandergereihter Graphitringe und haben damit vergleichbare Eigenschaften wie der verwandte Diamant.

Verbindende Matrix

Eine Möglichkeit, die besseren Eigenschaften von Fasern für Werkstoffe zu nutzen, ist, sie im Verbund mit anderen Materialien zu verwenden. Als lockeres Bündel sind Fasern für Konstruktionszwecke wenig zu gebrauchen. Selbst für die Verwendung in Seilen und Geweben müssen sie vor Umwelteinflüssen geschützt werden. Daher bettet man sie in eine Matrix ein, die als Klebstoff oder Binder wirkt und das Ganze verfestigt.

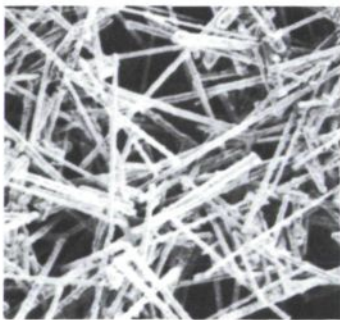
Die mechanischen Eigenschaften hängen ab vom Zusammenspiel zwischen Fasern und Matrix. Die Zugfestigkeit ist ein Produkt dieses Zusammenspiels. Wird ein Bündel von Fasern ohne Matrix unter Zugspannung gesetzt, so fällt mit dem Bruch einer einzelnen Faser gleichsam ein Lastträger aus. Der entsprechende Lastanteil verteilt sich dann auf die übrigen und bringt sie so dem Versagen näher. Sind hingegen die Fasern in einer Matrix eingebettet, büßt eine einzelne Faser durch den Bruch ihre tragende Funktion noch nicht ein. Denn die Materialien sind gewöhnlich duktil, also elastisch oder plastisch. Wenn die gebrochenen Enden der Fasern auseinanderweichen, übt die elastische oder plastische Verformung der daran hängenden Matrix Scherkräfte aus, die allmählich die Spannung in die Bruchstücke zurückleiten. Wegen dieser Lastübertragung trägt diese

Faser weiterhin zu einer gewissen Verstärkung des Verbundwerkstoffes bei. Die jeweilige Belastung der umliegenden intakten Fasern erhöht sich weniger, als wenn keine Matrix vorhanden wäre und so kann der Verbundwerkstoff insgesamt höheren Zugspannungen standhalten ohne auseinanderzubrechen. Das Zusammenspiel von Fasern und Matrix vermag daher den Verbundwerkstoff fester und auch rißzäher zu machen, indem es den Energieaufwand zum Erreichen der Bruchgrenze erhöht.

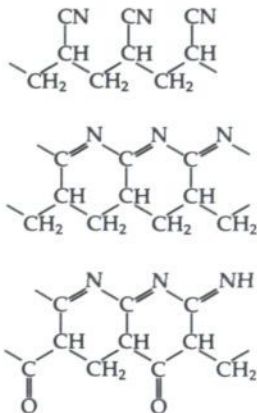
Das wohl bekannteste Beispiel sind glasfaserverstärkte Kunststoffe, GFK. Sie bestehen aus Glasfasergewebematten in einer Matrix aus Polyesterharzen und werden durch sogenanntes Laminieren zu Auto- und Schiffskarosserien verarbeitet, indem Schicht für Schicht nacheinander Gewebe und Kunststoff auf eine Negativform aufgetragen und das Harz durch eine beigemischte Komponente gehärtet wird. Beim Filamentwickeln können kompliziertere Formen erzielt werden, indem ein mit Matrixmaterial getränkter Faden sukzessive auf eine Form gewickelt wird. Wenn die thermischen Anforderungen an die Matrix nicht sehr hoch sind, kann der Werkstoff auch durch Sintern geformt werden. Bei einer Temperatur etwas unterhalb ihres Schmelzpunktes wird der Stoff in Pulverform hohen Drücken ausgesetzt und in Endform gepreßt.

Polymerfasern

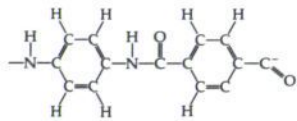
Neben Matrixmaterialien werden aber auch hochfeste Fasern vermehrt aus Polymeren hergestellt. Die langen Molekülketten liegen zwar üblicherweise ungeordnet und dicht verknäutelt wie in den Kunstharzen vor und machen die Materialien weich, indem sich bei Beanspruchung schlicht die Knäuel aufziehen. Aber es sind inzwischen Verfahren entwickelt worden, bei denen durch mechanische Verformung die Knäuel zu geraden Fasern verstreckt werden können. So werden nun die festen Atombindungen die schwächsten Glieder der Kette. Neben der enormen Erhöhung der Zugfestigkeit ergibt sich bei der Verstreckung auch die par-



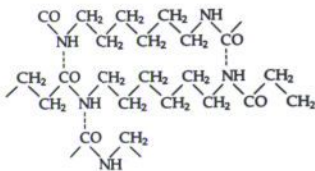
Keramische Whiskers aus Siliziumcarbid



Ausgangsstadien der Umwandlung von Polyacrylnitril in Carbonfasern



Molekularstruktur von Kevlar: Durch gezielten Einsatz aromatischer Gruppen (Doppelbindungen) werden sehr steife Fasern erzeugt.



Molekularstruktur von Nylon 66. Die Faser ist sehr fest, aber außerordentlich dehnbar (Zick-Zack).

alle Ausrichtung der Fasern und damit die Möglichkeit, feste Fäden aus ihnen zu spinnen. Nach diesem Verfahren hergestellte Garne wie Nylon sind für die Textilindustrie außerordentlich bedeutend, aber für eine Verwendung zu konstruktiven Zwecken häufig zu elastisch. Aus dem eigentlich weichen Polyäthylen (Plastiktüten) lassen sich allerdings seit neuestem steife Fasern herstellen, die fester sind als Stahlseile gleichen Gewichts.

Molekül-Statik

Durch Einbau geeigneter Moleküle auf Monomerebene lassen sich Polymerfasern in Richtung der gewünschten Steifigkeit verbessern. Dazu dienen sogenannte aromatische Gruppen. Sie enthalten Doppelbindungen, die sich im Gegensatz zu einfachen Bindungen nicht biegen lassen. In aromatischen Polymeren überträgt sich diese Eigenschaft auf die übrigen Einfachbindungen. Sie erhalten dadurch einen gewissen Doppelbindungscharakter und dadurch versteift sich die ganze Kette zu einer Art Stäbchen. Stabpolymere können leicht ausgerichtet und zu Fasern versponnen werden. Durch ihre extreme Steifigkeit eignen sich z. B. Aramidfasern außerordentlich gut für konstruktive Zwecke. Die bekannteste von ihnen, Kevlar, wird unter anderem zur Verstärkung von Auto-

reifen und Tragegurten und zur Herstellung von Hochleistungsseilen für Rennyachten verwendet.

Es gibt mittlerweile eine riesige Anzahl erprobter Kombinationen von Matrix und Faser. Bei den meisten Anwendungen aus dem Maschinenbau und der Raumfahrttechnik liegen die größten Anforderungen an das Material im Bereich hoher Temperatur und der Steifigkeit bei Biegezug. Die vorherrschenden Materialien müssen also einen hohen Schmelzpunkt besitzen. Es werden sowohl keramische Fasern zur Armierung von Metallen benutzt wie auch ohnehin schon sehr feste keramische Substanzen durch Keramikfasern rißzäh gemacht.

Zeltmembranen

Für Zeltmembranen werden heute fast ausschließlich ummantelte Gewebe verwendet. In aller Regel wird das Tragverhalten maßgeblich durch die Art der verwendeten Faser bestimmt. Die modernen Fasern machen die heutigen Gewebe zwar um ein vielfaches steifer und fester als die früher verwendeten Naturfasern oder Kunststoffolien. Ihre Anfälligkeit gegenüber Witterungseinflüssen bleibt aber unverändert der wichtigste Grund für die allgemein verbreitete Einschätzung von Zelten als temporäre Bauten.

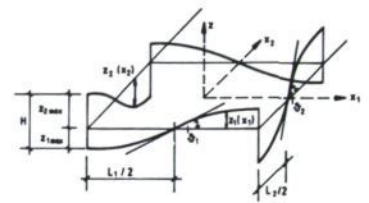
Wünscht man eine längere Lebensdauer der Membran, so macht schon allein ihre große relative Oberfläche und deren zerklüftete Struktur eine Umarmung zum Schutz vor organischem Wachstum und Zerstörung durch atmosphärische Schadstoffe notwendig. Selbst bei mobilen Zelten mit geplant kurzer Lebensdauer kann man

auf sie nicht verzichten, weil die Festigkeit der Fasern durch UV-Strahlung rapide herabgesetzt wird und die meist steifen Gewebe allein nicht ausreichend rißzäh sind. Beide Größen muß man für den rechnerischen Umgang mit Zelten in den Griff bekommen.

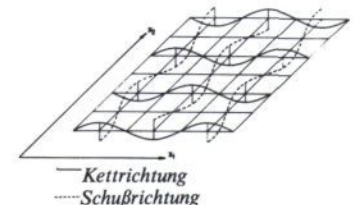
Mit dem Beschichtungsverfahren muß neben guter Durchdringung des Stoffes und Faserhaftung eine angemessene Schichtdicke in allen Bereichen erreicht werden. Es gliedert sich daher im allgemeinen in mehrere Phasen, in denen zunächst der Stoff auf chemische Verträglichkeit mit dem Mantelmaterial vorbereitet wird, Grundierung und Verflüssiger aufgetragen werden und erst dann mit dem eigentlichen Matrixmaterial beschichtet wird. Bei der gängigen Methode für Polyestergerewe wird ein dünner Film PVC oder Gummi erst auf eine Kalanderwalze gesprüht und dann auf den darunter durchlaufenden Stoff übertragen. Einen guten Schutz des Gewebes erreicht man bei diesen Substanzen mit Schichtdicken um einen Viertel Millimeter. Im letzten Arbeitsschritt werden die Oberflächen veredelt: Polyvinylchlorid erhält i. a. ein schmutzabweisendes Acrylfinish.

Weben

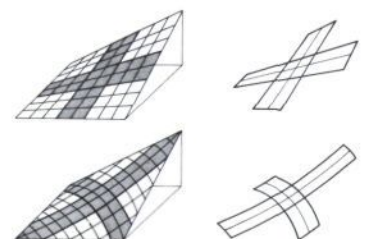
Zwei verschiedene Sorten von Garnen, Kette und Schuß, werden beim Weben rechtwinklig ineinander gefädelt, wobei die Kettfäden gewöhnlich unter Spannung stehen, um die Durchfahrt des Schiffchens zu ermöglichen, und so im fertigen Gewebe straffer liegen. Dadurch bekommen Webstoffe verschiedene mechanische Eigenschaften in Kett- und Schußrichtung, sie sind anisotrop. Üb-



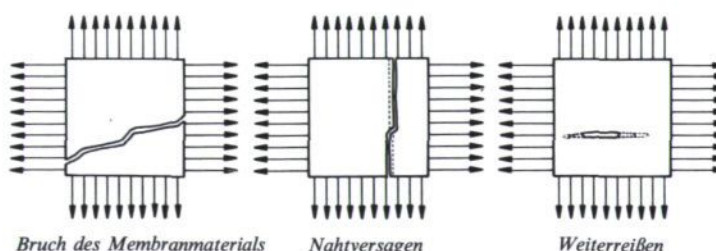
Strukturmodell* für das mechanische Verhalten eines Gewebes (Einheitszelle)



Strukturmodell eines Gewebes; die Fäden sind zu Linien abstrahiert.



Unterschiedliches Tragverhalten einer Membran mit gleicher äußerer Form und unterschiedlicher Orientierung der Anisotropierichtungen.



Versagensfälle: Sprödes Membranmaterial neigt zum Brechen. Die Festigkeit der Verbindungen muß vergleichbar der Membranfestigkeit sein. Überschreiten Risse eine charakteristische Länge, droht sprunghafte Ausweitung.

licherweise werden die Fäden trotzdem in beiden Richtungen im gleichen Verhältnis verwebt, pro Durchlauf ein oder zwei, aber es besteht die Möglichkeit, sich mit unausgewogenen Geweben ($2 \times 1,3 \times 1$) steuernd die Anisotropie zunutze zu machen und Gewebe gezielt den lokalen Spannungsverhältnissen anzupassen.

Um einen zusätzlichen „Rip-Stop“ Effekt zu erreichen, kann in größeren Abständen ein schwererer Faden eingewoben und damit das Gewebe gewissermaßen „strukturell kariert“ werden. Man löst so wiederum große und damit gefährdete Tragglieder in kleinere Einheiten auf, damit sich ausbreitende Risse nicht zu einer selbstverstärkenden Gefahr für das Gesamtsystem werden können.

Aber auch die ungewöhnlichen Fähigkeiten der neuen Zeltmembranen ergeben sich erst aus der Kombination der Vorteile der verwendeten Mate-

rialien im Zusammenspiel von Matrix und Faser. So erreicht beispielsweise PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe mit 9000 N/50 mm eine deutlich höhere Zugfestigkeit als die unbeschichtete Faser (6500 N/50 mm). Die Systemanpassung ist auf allen Ebenen möglich. Stärkere Elastizität im Bereich kleinster Dehnung bei eigentlich steifen Membranen erreicht man durch gezwirbelte Garne. Aus geometrischen Gründen kann der Faden zunächst leichter der Spannung nachgeben, die eigentliche Steifigkeit der Faser kommt erst zum Tragen, nachdem sich das Gewebe leicht verformt hat. Durch Auswahl von weniger Fäden, dafür aber schwereren Garnen läßt sich der Effekt verstärken. So kann die Membran schockartige Belastungen abfedern und ihre zunächst punktförmige Energie verteilen. Durch ihre Fähigkeit, lokale Spannungen auszugleichen, vermeidet sie das Auftreten von Falten und Säcken, sonst eine direkte Konsequenz von Ungenauigkeiten beim Aufrichten oder von Fertigungstoleranzen konventioneller Materialien.

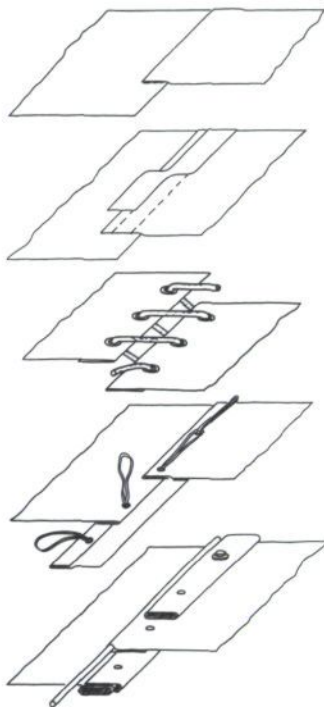
Schnittmuster und Nähte

Andererseits bedingt ein steifer Werkstoff die exakte Konfektionierung der komplexen, doppelt gekrümmten Membran aus kleinen Einzelstücken, denn es kann nur eben gewebt werden, während die der Formfindung zugrundeliegenden Minimalfläche nachweislich nicht in die Ebene abwickelbar ist. (Die einzelnen Stücke sind natürlich ebenfalls nicht abwickelbar, aber sie lassen sich für die Praxis ausreichend verformen.) Man denke nur an die Schwierigkeiten, die der Versuch mit sich bringt, eine normale Hose in einem Arbeitsgang zu bügeln.

Um die Bahnen zusammenzufügen, gibt es im wesentlichen drei Möglichkeiten: Schweißen oder Kleben, Vernähen und mechanisches Verbinden. Weil das Gewebe den wesentlichen Beitrag zur Festigkeit liefert, bedeutet Fügen zweier Membranteile vor allem das Übertragen der Kräfte von Faser zu Faser. Beim Schweißen und Kleben hängt die Qualität der Verbindung sowohl von der Zugfestigkeit des Elastomers oder Kle-



Fügen der Membranteile. Zeltmacher in Strohmeyersdorf um 1960



Fügetechniken für die Verbindung zweier Membranen (von oben nach unten): Schweißen, Vernähen mit Schutzstreifen, Zick-Zack-Expanderzug, Ösenverschluß, Klemmverbindung.

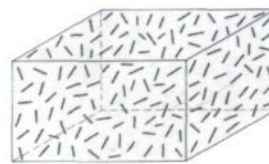
bers wie von den Adhäsionskräften zwischen Beschichtung und Gewebe ab. Der zweite Faktor begrenzt häufig die Haltbarkeit der Verbindungen. Dennoch erreicht man mit diesen Verfahren die größte Festigkeit. Während sich PTFE-beschichtetes Gewebe wegen der Sprödigkeit der Glasfasern überhaupt nicht vernähen läßt, und die Festigkeiten am Stoß beim Hochtemperatur-Kontaktschweißen zwischen 80 und 90 % der Gewebefestigkeiten liegen, liefert das Hochfrequenzschweißen von PVC-Beschichtungen für Polyester- und Aramidgewebe bis zu 95 % der Gewebefestigkeit.

Das Vernähen von Teilmem-

branen ist mittlerweile stark zurückgegangen, weil einerseits die neuen Schweißverbindungen stärker und wasserdichter und darüberhinaus für die Verbindung langer Bahnen wirtschaftlicher sind. Die Belastbarkeit von Nähten wird durch die Zugfestigkeit des verwendeten Garnes und die Überlappung bestimmt. Für schwere und sehr hoch belastete Membranen wird sehr häufig eine Kombination aus Schweißen und Nähen verwendet. Mechanische Verbindungen spielen vor allem für temporäre Verbindungen weniger stark belasteter Membranen eine Rolle.

Interdisziplinarität

Wie man sieht, stellt sich für das Konstruieren mit Verbunden eine andere Frage als die nach Konstruktion und Material. Läßt sich bei herkömmlicher Konstruktion (Holz, Stahl) nach dem Vorentwurf der tragenden Teile die Materialauswahl bewerkstelligen, indem Punkt für Punkt die geforderten Eigenschaften mit der „Qualität“ des gewählten Materials in Einklang gebracht werden, dann kommen bei Kompositen nicht nur erheblich mehr Parameter ins Spiel (die Zahl der möglichen Eigenschaftsparameter wächst exponentiell mit der Anzahl der verwendeten Stoffe), sondern zu jedem Element der tragenden Struktur kommt noch eine Art „innere Konstruktion“. So enthält jeder Balken aus Stahlbeton mit seiner Armierung eine statisch zu begründende innere Geometrie entlang derer der Stahl in seinem Volumen verteilt ist (ab-



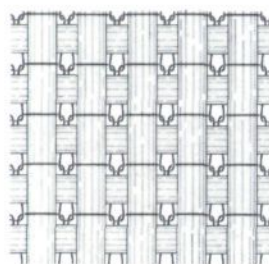
kurze Fasern



Endfasern



gewirktes Gewebe



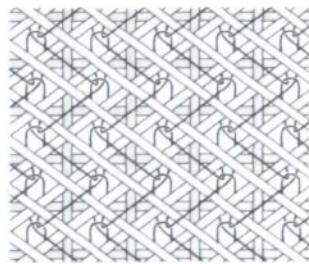
biaxiales Gewebe



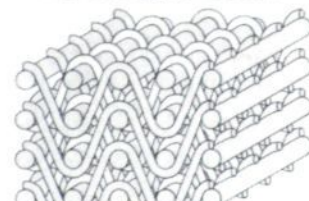
tridimensionales Geflecht



multiaxiales mehrlagig gewirktes Gewebe

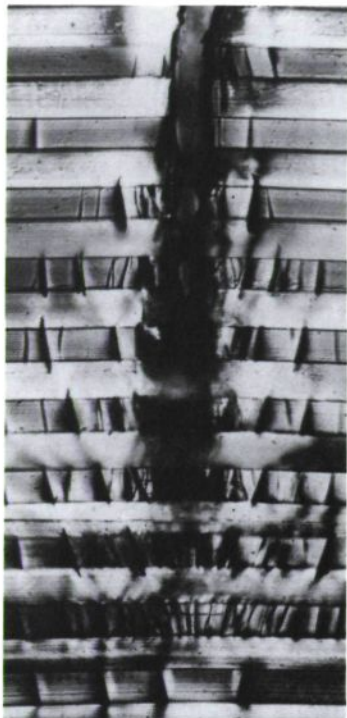


dreidimensionale schräg-verkettete Konstruktion



dreidimensionale schräg-verkettete Konstruktion

Innere Geometrie von Verbundwerkstoffen. Je nach Anforderung können die Fasern in der Matrix unterschiedlich angeordnet werden.



„Rip-Stop“ in einer polymeren Mehrschichtfolie: Durch Absorption seiner Weiterreiß-Energie wird der Riß abgepuffert. Rißausbreitung kann vermieden werden, wenn steife Materialien auf Mikromaßstab mit plastischen Stoffen kombiniert werden. Die abgebildete Folie (dunkel = plastisch, hell = steif, Schichtdicke = 1/100 mm) erhält so gleichzeitig Steifigkeit und Zähigkeit.

gesehen von der Menge der Materialparameter im Verbund Beton). Während die Bewehrung eines solchen Trägers aber in Form und Dimension durchaus mit einem aufgelösten Träger herkömmlicher Bauart (Fachwerk) vergleichbar ist, und sich daher weitgehend nach den traditionellen statistischen Methoden beschreiben läßt, ergibt sich gerade hier bei den neuen Kompositen ein grundlegender Unterschied: Die verschiedenen Substanzen durchdringen sich gegenseitig auf molekularem Maßstab.

Dadurch wird das Problem scheinbar noch komplizierter. Zur vergrößerten Anzahl zu berücksichtigender Parameter kommt eine Betrachtungsebene, die für die Baukonstruktion völliges Neuland bedeutet. Tatsächlich berühren sich in der Faser zwei Disziplinen, die sonst nur sehr vage voneinander Notiz nehmen. Mit der Polymerchemie rückt eine Wissenschaft ins Blickfeld der Konstrukteure, die seit etwa achtzig Jahren in diesem Maßstab syste-

matisch Konstruktionen entwickelt und beurteilt. Gerade durch die Anwendungsbezogenheit und dem resultierenden Entwicklungsdruck entstanden dabei wichtige Grundlagenergebnisse für die Werkstoffwissenschaft (Flüssigkristalle, etc.).

Über die gefundenen Modelle für eine „Molekulare Statik“ lassen sich auch Kleinstprozesse in natürlichen, metallischen oder keramischen Stoffen besser verstehen. Damit gewinnt neben der Beurteilung eines Materials nach Kennwerten, die sich auf sein Verhalten als stofflicher Anteil eines irgendwie standardisierten Tragelements beziehen (Prüfkörper, Balken, Stütze, etc.), die Möglichkeit an Bedeutung, das Material selbst als Konstruktion aufzufassen (finite Elemente) und auf einem sehr viel kleineren Maßstab verstehend zu gestalten.

Betrachtet man nun z. B. eine Membran als „multifunktionalen Baustein“ (sie kann gleichzeitig und an allen Orten Tragwerk, Wetterhaut, transuzente und gedämmte Schicht sein), dann müssen die getroffenen Entscheidungen auf allen Ebenen des möglichen Eingriffs und somit alle Materialparameter miteinander korrespondieren. Um einen solchen „roten Faden“ durch die unzähligen Entscheidungsprozesse durchhalten zu können, betreiben Ingenieure heute den Entwurf so komplexer Strukturen mithilfe neuer analoger Computer, den sogenannten Workstations.

Ausblick

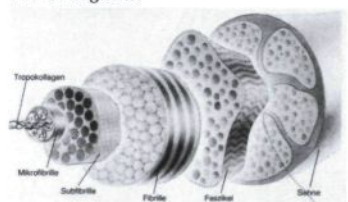
Mit dem Verschwinden der industriellen Polarität von Materi-

al und Konstruktion verliert auch der Ausdruck harter Maschinenhaftigkeit hochbeanspruchter Konstruktionen an Bedeutung. Die neuen Systeme verbindet vielmehr ein Moment der „Angepaßtheit“, dessen Vorbilder bei den biologischen Konstruktionen der Natur liegen. Die Funktionalität von Holz und Knochen kann durch die erwähnte Entwicklung in der Werkstoffwissenschaft heute detaillierter verstanden werden. Bis auf tiefere Schichten als bisher angenommen, spielt die lokale Anpassung der konstruktiven Elemente an das organische Gesamtsystem und seine äußere Belastung eine Rolle.

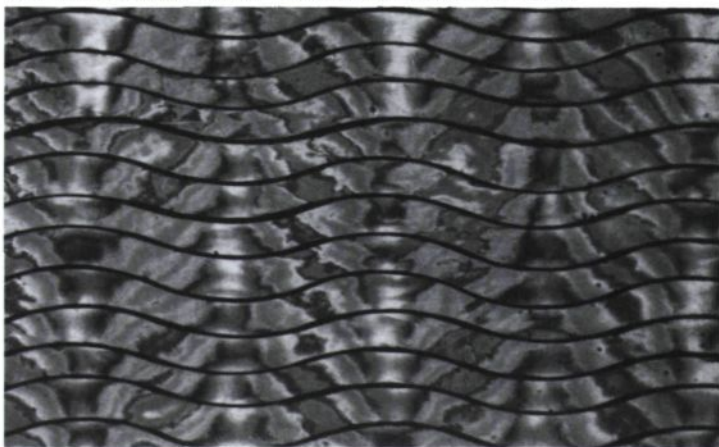
Eine hierarchische Struktur unterschiedlich geordneter Bereiche sorgt je nach Situation für genügend Festigkeit durch einen hohen Grad der Faserausrichtung, ausreichende Zähigkeit durch absorbierende Zonen zur Dämpfung von Schockbelastungen und nicht zuletzt für Leichtigkeit des Gesamtsystems durch raffinierte Anordnung von Löchern und Hohlräumen in weniger stark belasteten Bereichen.

Durch das Nachvollziehen besonders erfolgreicher Subsysteme wie tierischer Sehnen (durch wellenförmige Fibrillen

Tierische Sehne: Durch 6 unterschiedliche, hierarchische Konstruktionsebenen wird Festigkeit bei gleichzeitiger Zähigkeit ermöglicht.



Hybrid-Konstruktion: Gewellte Fasern federn Schockbelastung ab.



führt ruckartige Belastung hier nicht sofort zum Riß) gewinnen Verbunde, bei denen man eine bestimmte nicht-lineare Beziehung zwischen Spannung und Dehnung zu erreichen sucht, zunehmend an Interesse. Nach Meinung vieler Forscher werden solche „Hybrid-Konstruktionen“ in der nahen Zukunft eine größere Rolle spielen.

Neben dieser direkten Übersetzung natürlicher Konstruktionsprinzipien in technologische Strategien, gibt es weitere Prognosen, die von einer radikaleren Analogie zwischen Natur und Technik ausgehen: Die Herstellung exotischer Superfasern ist schon jetzt eine teure Angelegenheit. Die extreme Steigerung ihrer Festigkeit und Steifigkeit (Entwicklungsziel für den oben erwähnten Raumgleiterflügel) käme einer gleichzeitigen Minimierung ihrer wirtschaftlichen Effizienz gleich. Das Vorbild Natur umgeht solche Extreme, wo sie nur kann. Evolutionär erfolgreiche Neuerungen gehen immer einher mit minimalem Stoffwchelaufwand. Den hohen Stabilisierungsanforderungen an den Flügel eines fliegenden Vogels begegnet die Natur mit „aktiver Elastizität“. Lokale Belastungen werden durch nervenimpulsgesteuerte Muskelkontraktionen kompensiert. Intelligentes Material spart Aufwand.

Für eine technische Umsetzung kämen die piezoelektrischen Stoffe in Frage, eine Klasse von Materialien, die auf elektrische Impulse mit Erzeugung innerer mechanischer Spannung und Formveränderung reagieren. Wenn es gelänge, piezoelektrische Konstruktionswerkstoffe zu entwickeln und ihr Verhalten wirksam zu steuern, könnte eine völlig andere Art der angepaßten Systeme entwickelt werden.

Thomas Kaup

Die Abbildungen sind entnommen aus:
IL 18, Seifenblasen, Stuttgart 1988
R. Blum, Zeltbaumaterialien, in: Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke. Hrsg.: G. Brinkmann, Weinheim 1990
Spektrum der Wissenschaften, Sonderheft Moderne Werkstoffe, 1987
J.E. Gordon, The Science of Structures and Materials, New York 1988
Karin Wilhelm, Architekten heute. Portrait Frei Otto, Berlin 1985
J. Schlaich, Tensyl Membran, IASS Bulletin 1989

TENSYL – Ein interaktives Grafik-CAD-System für Entwurf und Zuschnitt leichter Flächentragwerke

Die Computertechnologie ist aus Entwurf und Handhabung von Zeltkonstruktionen nicht mehr wegzudenken. Bei TENSYL handelt es sich um eine integrierte Folge von Programmen (sog. Module) zur Formerzeugung, Lastanalyse und Schnittmusterentwicklung für Membran- und Seilnetzstrukturen. Während es eigentlich für den HP9845 entwickelt und im Verlauf der letzten 10 Jahre schrittweise auf ein weites Feld von Projekten erweitert wurde, ist TENSYL jetzt vollständig neu geschrieben worden, um die Entwicklungen der Informatik in dieser Zeit nutzen zu können. Vor allem sollte die neue Version durch schnellere Routinen und eine verbesserte Interaktivität mit dem Anwender eine deutliche Beschleunigung der CAD-Komponente erreichen. Da die dem Programm zugrundeliegenden numerischen Operationen inzwischen allgemein beherrscht werden, wurde der größte Aufwand für die Benutzeroberfläche betrieben.

Im Zentrum der Entwicklung steht ein technischer Arbeitsplatzrechner (workstation computer). Solche Hardware besteht aus einem Hochleistungsprozessor, der mit einem farbigen hochauflösenden Grafikbildschirm eng verknüpft ist. Für unsere Arbeit wählten wir einen Hewlett-Packard 9000/350 mit SRX Graphikprozessor, welcher einen 48cm Farbmonitor mit einer Auflösung von 1280 × 1024 Pixel und über 16 Millionen unterschiedlicher Farbtöne steuert. Der Rechner arbeitet mit dem Unix-Betriebssystem und TENSYL ist in der Programmiersprache „C“ geschrieben.

Bei Hardware von solcher Leistungsfähigkeit und Raffinesse ergibt sich die Herausforderung, nun die Software zu entwickeln, welche die gegebenen Möglichkeiten am besten ausnutzt. Die Kombination von voll interaktiven Farbgrafiken mit einer effektiven Benutzeroberfläche birgt die Lösung. Der Gebrauch dieser Technologie für die Analyse im Ingenieurwesen ist nach wie vor vergleichsweise selten.

Die Benutzeroberfläche

Bei TENSYL gibt es während aller Programmphasen eine gra-

phische Abbildung des betrachteten numerischen Modells und der Anwender hat zu allen Zeiten die Kontrolle über Blickwinkel und Ausschnitt. Zugleich wird am rechten Rand des Bildschirms ein sogenanntes Menü von Befehlen angezeigt. Diese Befehle können entweder direkt selbst eine Funktion ausführen oder Zugang zu einem weiterführenden, stärker detaillierten Befehlsmenü bieten, welches dann zeitweilig das aufrufende Menü überschreibt. Während er die vom Nutzer ausgewählte Ansicht zeigt, wird der Bildschirm automatisch angepaßt, um für das augenblicklich ausgewählte Menü die betreffenden Informationen einblenden zu können. So können z.B. je nach Bedarf der Kräfteverlauf zwischen einem Randknoten und einem Spannseil oder die spezifischen Spannungsverhältnisse in den Elementen gezeigt werden. Das Interagieren über Menübefehle oder direkt mit Gitterpunkten oder Elementen in der Grafik wird durch einen sogenannten Onscreen Cursor ermöglicht, der seinerseits durch eine Zweitasten-Maus aktiviert und positioniert wird. Sich ändernde Etiketten (labels) in der Nähe des Cursors bedeuten dem Anwender die vom Programm erwartete nächste Information. In Bild 4 wartet TENSYL gerade darauf, daß der Nutzer beim interaktiven Anfügen von Spannkabeln einen zweiten Knoten auswählt. Im allgemeinen dient die linke Maustaste für Aktionen, wie zur Elementbestimmung oder Knotenauswahl, während mit der rechten Taste der Modus gewechselt werden kann (z.B. von Modell zu Menü). Sie wird außerdem benutzt, um teilfertige Befehle zu korrigieren oder rückwärts abzuschreiben.

Der Entwurfsprozeß

Zu Beginn der Arbeit am numerischen Modell müssen die räumlichen Koordinaten von Systempunkten der Membran eingegeben werden. Dann werden Grenzlinien zwischen einzelnen Systempunkten definiert und mit Hilfe von vorläufigen Seitenmittelpunkten ungefähre erste Krümmungen ermittelt. Bei einer Konstruktion mit einem Feld beschreiben die Grenzlinien den mehrfach ge-

schwungenen Verlauf der Randseile, während sie für addierte Formen die Kammseile zwischen den einzelnen Feldern darstellen.

Der Maschinengenerator operiert dann Feld für Feld mit den Optionen Knotenfortsetzung oder -abbruch entlang gemeinsamer Grenzlinien. Membran und Seilnetzmaschen werden auf der Grundlage einer rechtwinkligen Topologie erzeugt. In der Schirmdarstellung der Grenzlinien eines Feldes wird die Maschenanordnung zunächst als orthogonales Gitter skizziert. Das Anbringen der Netzlinien geschieht in beliebiger Ordnung, indem Löschen- und Korrekturbefehle gegeben werden, während sich das Gitter aufbaut. Das fertige Netz kann dann numerisch aufgelöst werden, um die räumlichen Koordinaten der Knoten an den Schnittpunkten der Linien zu gewinnen.

Ist das Netz erst einmal aufgelöst, werden neue Membran- und geodätische Linienelemente automatisch innerhalb der rechtwinkligen Topologie erzeugt. Die Grenzliniendefinitionen werden ebenfalls automatisch an das verfeinerte Modell angepaßt. Sobald der Maschinengenerator verlassen wurde, können im folgenden direkt auf dem Bildschirm individuelle Elemente jeder Art hinzugefügt, gelöscht oder verändert werden.

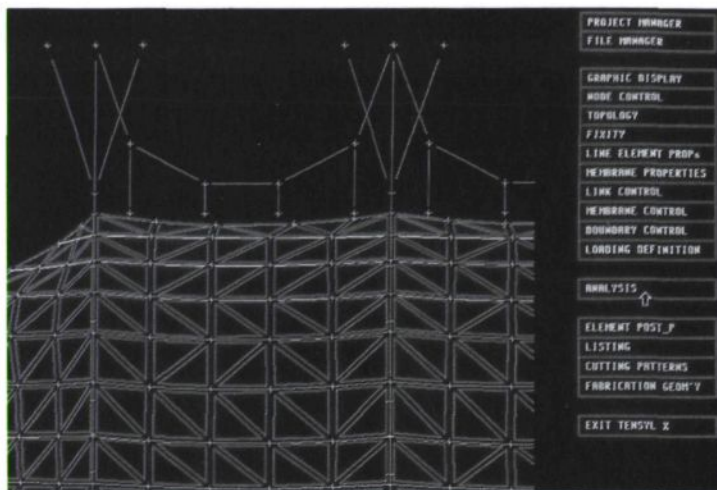
Die Abspannbedingungen der Membran können darüber hinaus auch im Detailausschnitt graphisch indiziert werden, indem translationale Haltekräfte direkt am betreffenden Befestigungsknoten angebracht oder gelöst werden. Die Anzahl der jeweiligen Knotenbedingungen ist nicht begrenzt, da diese in einer internen Datei des betreffenden Knotens abgelegt werden. Wahlweise kann jedem Element auf dem Bildschirm seine Elastizität beigelegt oder sein spezifisches Belastungsniveau zugeschrieben werden. Dann werden die Elemente nuanciert eingefärbt, um die jeweilige Größe der Belastung zu illustrieren. Formerzeugung und Belastungsanalyse verwenden den gleichen analytischen Teil des Programms. Die graphische Darstellung während der Analysephase zeigt Grundriß und Ansichten des Problems, die allesamt an Zwischenlösungspunk-

ten der fortschreitenden Analyse dem jeweils neuesten Stand angepaßt werden. Der Punkt, an welchem die augenblickliche Spannung am weitesten von der durchschnittlichen Gitterbelastung abweicht, wird graphisch hervorgehoben, um das Aufspüren von physikalischen Instabilitäten zu unterstützen und eine ausgewogene Spannungsverteilung zu erreichen. Analysekontrollparameter und Lastfallnummern werden über Dialogfelder auf dem Bildschirm eingegeben.

Der Rechner ordnet jedem einzelnen Gitterknoten interaktiv seine Belastungskoeffizienten auf einer separaten Befehlsseite zu. Bis zu fünf Koeffizientensätze können gleichzeitig gespeichert werden. Wird nun ein spezieller Lastfall aufgerufen, so werden die Koeffizienten mit Wind oder Gravitationskraftfaktoren multipliziert. Kombinierte Fälle sind zulässig, ebenso die Annahme eines Innendrucks, der eine Tragluftkonstruktion oder inneren Winddruck repräsentieren kann. Der postprozessurale Modul erzeugt ein farbiges Diagramm der Elementbelastungen und erleichtert so die schnelle Anpassung einer großen Menge von Daten. Von allen Ergebnissen und Koordinaten lassen sich über den Laser-Drucker Listen erstellen und direkte Bildschirmkopien anfertigen. Mit dem Produktionsgeometriemodul können Membranschnittmuster und die Geometrie untergeordneter Systemkomponenten wie die Winkel von Membran- und Mastspitzenplatten entwickelt werden. Die Anpassung der Grenzlinienknotenpositionen für eine optimale Ausnutzung der Stoffbahnbreiten wird durch die on-screen Darstellung der Schnitte aller dem betreffenden Feld benachbarten Felder erleichtert.

Modellsimulation

Es gibt in TENSYL einen hochentwickelten Veranschaulichungsmodul, der bei der Interpretation komplexer Flächen und ihrer Beziehung zu umliegenden festen Körpern helfen kann. Im Verbund mit dem Hochleistungsverfahren für die Berechnung ergibt sich ein leistungsfähiges Interaktionswerkzeug für die architektonische Interpreta-



links von oben nach unten:

TENSYS Bildschirm: interaktive Oberfläche mit Graphik und Menüleiste (Hauptmenü, Cursorpfeil). Bei der Finite Elemente Statik werden kontinuierliche Tragwerke in leicht zu handhabende einzelne Stücke aufgeteilt (z.B. Tetraeder, hier: Dreiecke).

Knotenpunkt: Übergang von Membran zum Spannseil: Seilbefestigung und Kräfteverlauf werden graphisch angedeutet.

Zur Formfindung werden die Elemente je nach Belastung unterschiedlich eingefärbt. Ziel ist möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung, die Methode funktioniert analog.

Lokale Maschenbestimmung: Ein Verbindungselement wird hinzugefügt.

Interaktive Maschengenerierung: Erweiterung der Knotenlinie ausgehend von der gemeinsamen Grenzlinie mit dem fertigen Feld.

unten:

Mit einer Membran gedeckte Seilnetzkonstruktion

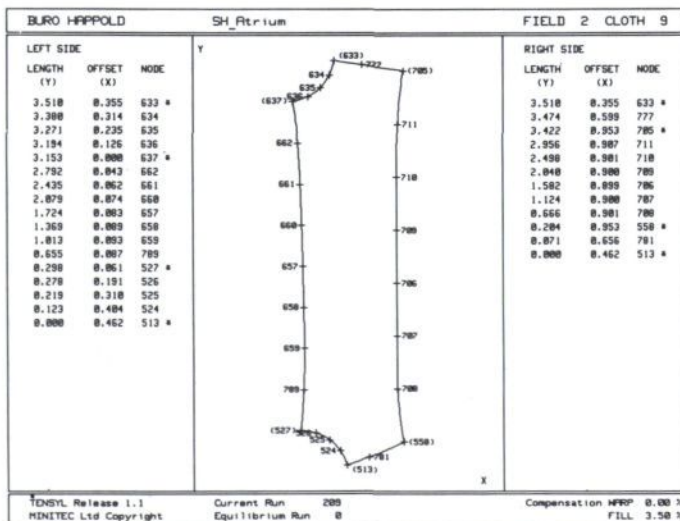
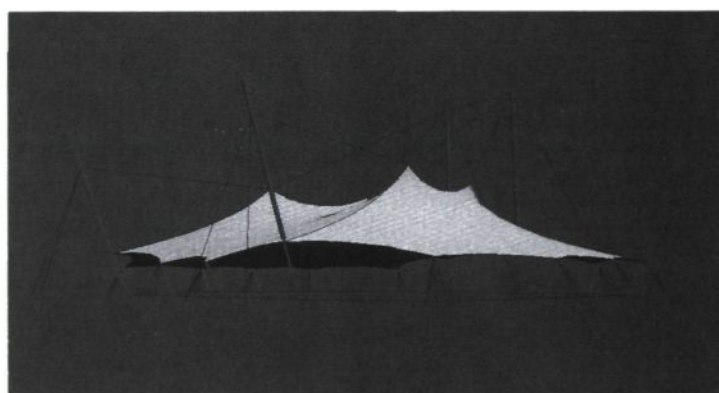
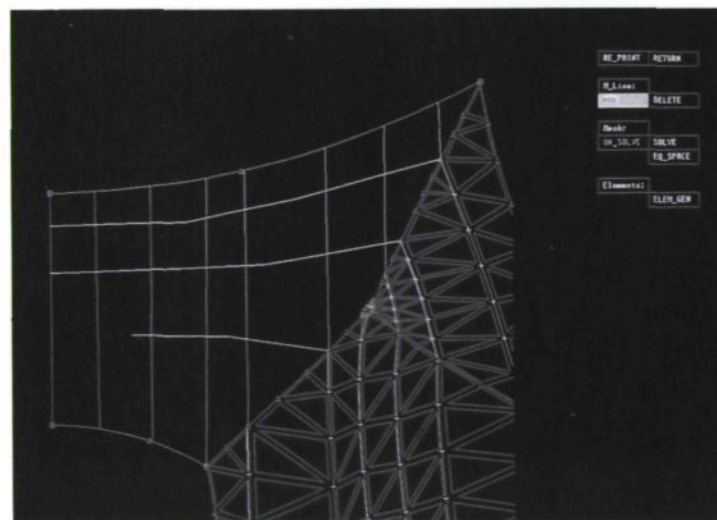
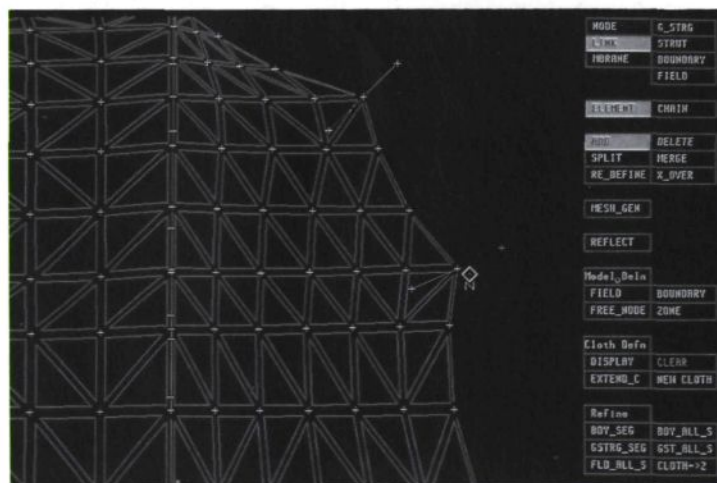
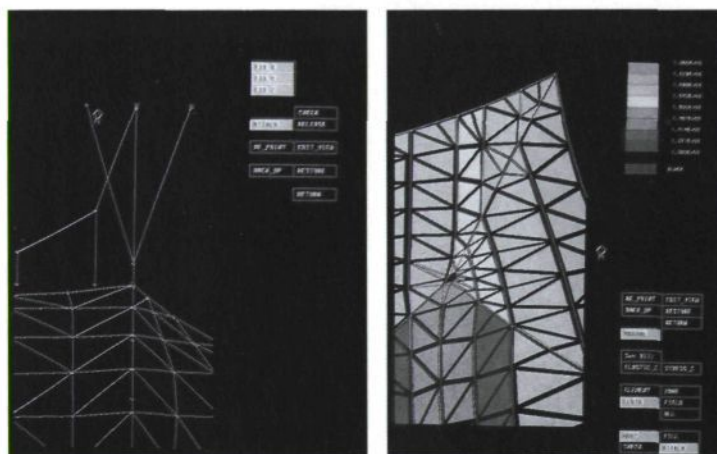
Typisches Schnittmuster

tion schon im Vorentwurfsstadium, sowie die Möglichkeit, qualitativ hochwertige Präsentationszeichnungen herzustellen. Dieser Modul macht vollen Gebrauch von den SRX Graphik Koprozessoren, die mit der workstation verschaltet sind.

Fest verdrahtet ermöglichen sie, verdeckte Flächen zu eliminieren, gekrümmte weich zu schattieren, mehrere Lichtquellen sowie gegebene Textur zu berücksichtigen und augpunktbezogene Reflexionen wiederzugeben. Darüberhinaus wird die Oberflächenwiedergabe komplexer Elemente mithilfe nicht-uniformer rationaler Näherungsflächen unterstützt.

Das analytische Modell wurde durch eine Reihe von weiteren Modellierungsprimitiven erweitert. Darunter gibt es allgemeine Quader, Wände, Fußböden sowie gerade und gebogene Röhren oder rechtwinklige Schnitte. Zunächst werden sie als Drahtnetzmodelle dargestellt, es können diesen zusätzlichen Elementen aber ebenfalls eigene Texturen und Farben zugeordnet werden.

Membranelemente und ebene Flächen können mit unterschiedlichen Graden der Transparenz indiziert werden, um durchscheinende Stoffe wie Folien oder Fensterglas zu simulieren. Die vorhandenen Beleuch-

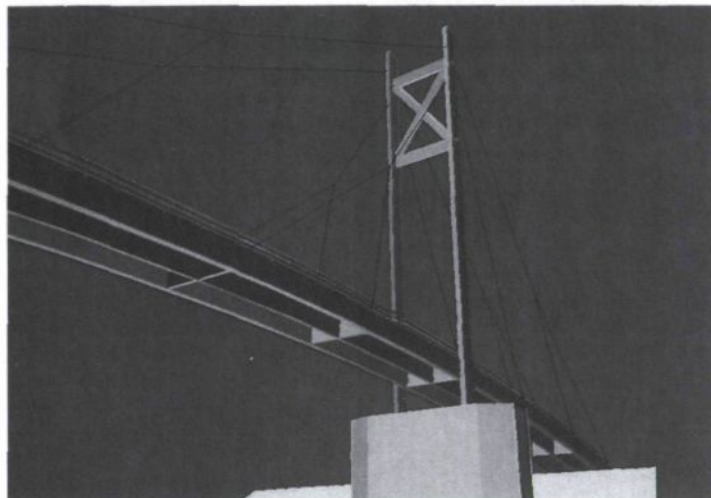
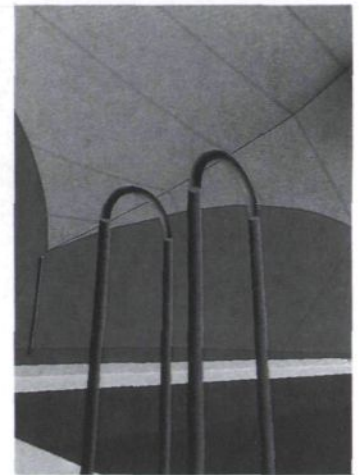
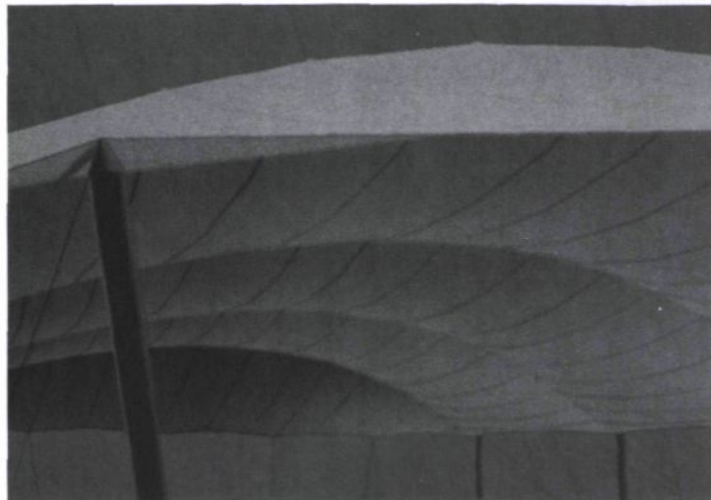


tungsoptionen schließen diffuse, parallele, Punkt- und Mehrfachlichtquellen ein, die alle in der Intensität, dem Ort und der Farbe im on-screen-editing Verfahren verändert werden können. Genauso können Texturen und Körperfarben der Elemente angepaßt werden, und das kombinierte Gesamtergebnis ist direkt auf dem Bildschirm verfügbar.

Das zusammengestellte Anschauungsmodell kann von jedem Standort aus perspektivisch dargestellt werden. Der Blickwinkel des Betrachters entspricht dabei einem Kameraobjektiv mit 35mm Brennweite. Der Graphikprozessor erlaubt sehr schnelle Inkrementierungsänderungen sowohl des Standpunkts wie des betrachteten Bildausschnitts, während er alle graphischen Verbesserungen aufrecht erhält. Doppelte Bildpufferung sichert flimmerfreie Übergänge, und eine „walk through facility“ erlaubt dem Entwerfer, Inneneindrücke von der Konstruktion zu erhalten, während er sich vorwärts oder rückwärts bewegt, sich zu beiden Seiten umdreht oder nach oben und unten schaut.

Vorteile in der Praxis

Vom Standpunkt eines Anwenders aus dem Ingenieurwesen hat sich das System, vor allem wegen des Wegfalls zeitaufwendiger Manipulationen großer Dateien von Hand, in der Nutzung als populär und leicht zu lernen erwiesen. Frühe Projekte zeigen mindestens fünffache Verbesserung, was die Gesamtheit der auf die Erstellung des numerischen Modells und auf die Anwendung verwendeten Zeit betrifft. Der analytische Modul von TENSYL rechnet etwa sechzigmal schneller als die alte Version. Wenn diese Geschwindigkeit in der Formerzeugung und Handhabung mit qualitativ hochwertiger Visualisierungskapazität verbunden wird, dann wird die direkte Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur schon in der Vorentwurfsphase möglich. Die entstehende interaktive, gemeinschaftliche Atmosphäre kann dem Projekt nur zuträglich sein und bekommt wachsende Relevanz mit zunehmender Verwendung leichter Flächentragwerke, die in ein einzelnes Gebäude integriert werden.



oben links: Entrospektie, Oberflächenreflexe

oben rechts: Durch zusätzliche Modellierungsprimitive kann die Wirkung des Zeltes in seiner Umgebung simuliert und beurteilt werden.

links: Die zusätzlichen Modellierungsroutinen können auch unabhängig vom analytischen Modell benutzt werden, um jede andere Konstruktion zu veranschaulichen. Vorschlag Holzbrücke

unten: „Walk through facility“ durch das Anschauungsmodell. Innenansichten einer Ladenstraße

Zukünftige Entwicklung

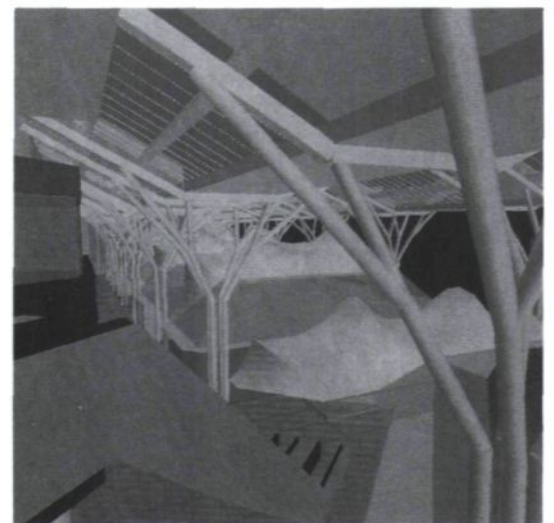
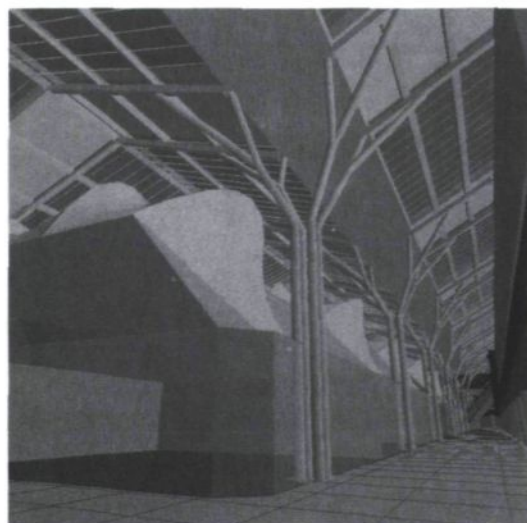
Die kommenden Entwicklungen in der Computergraphik werden in die Richtung der Produktion von photorealistischen Abbildungen gehen, mit verbesserter Hardwareimplementierung für ray-tracing und radiosity visualisation. Dennoch, hat man diese Bilder erst einmal auf dem Bildschirm erzeugt, so bleibt immer noch das Problem

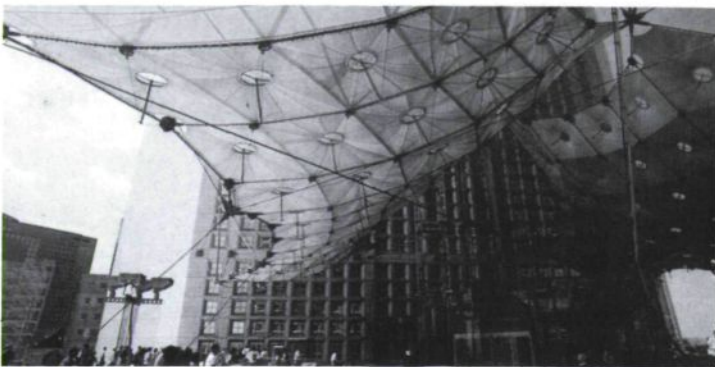
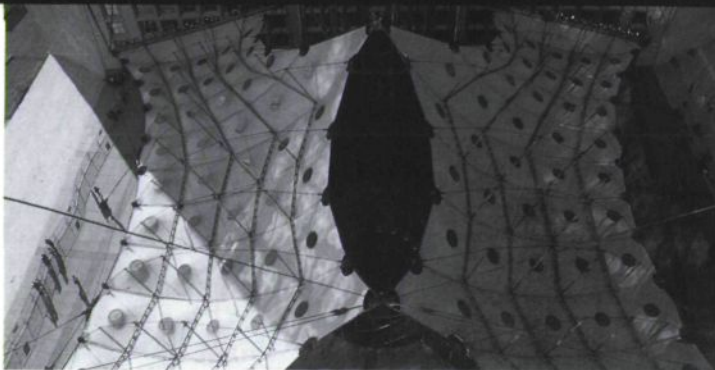
ihres Ausdrucks der sogenannten Hardcopy, in vergleichbarer Qualität. Es ist möglich, mit recht gutem Ergebnis Photos direkt vom Bildschirm zu machen, und es gibt Maschinen, die auf direktem Wege das RGB-Computersignal in Dias umwandeln können, allerdings ist dieses Verfahren sehr teuer. Farbdrucker müssen die notwendige Auflösung und das not-

wendige Farbspektrum erst noch erreichen. Für Präsentationszwecke ist mittlerweile Hardware erhältlich, welche die Umwandlung von Schirmbildern zu Videofilmen ermöglicht und damit dynamische Präsentationen eines Konzeptes erlaubt.

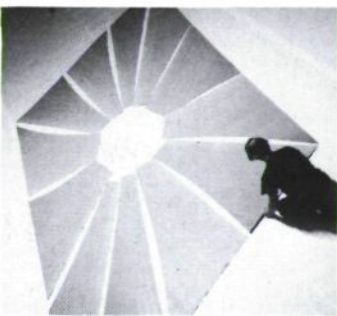
David Wakefield

Übersetzung: Thomas Kaup





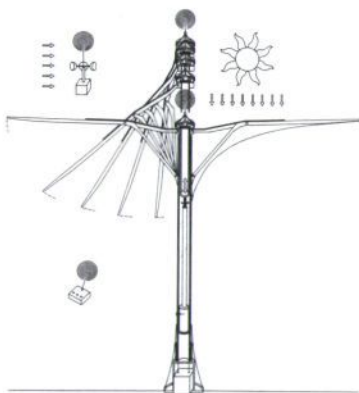
Membrankonstruktion im Grande Arche, Detail. Es handelt sich um ein durch Kabelüberspannung einseitig gekrümmtes Seilnetz mit Minimalflächenausfaltung. In den Hochpunkten ist die flexible Membran direkt mit starren Sicherheitsglasscheiben verbunden. Die Vorspannung kann durch unterspannte Masten geregelt werden.



Einzelzuschnitte, fertiges Membransegment.



Faltbare Solarschirme Mekka, Saudi Arabien. Antrieb und Batterie befinden sich im Fuß, Solarzellen auf den Schirmarmen (Entwurf B. Rasch).



KOIT

Herbert Koch GmbH & Co KG
Nordstraße 1
D-8219 Rimsting
Fax: 08051-690919

Bei KOIT werden die unterschiedlichsten konstruktiven Membranen aus flexiblen Materialien wie Filmen und Folien, beschichteten und unbeschichteten Geweben, Netzen und Verbundwerkstoffen zu zwei- und dreidimensionalen Gebilden zusammengefügt. Die nötigen Techniken wie Kunststoffschweißen, Kleben und Nähen wurden parallel zur steigenden Verwendung von Kunststoffmembranen verfeinert, seit der Konfektionär aus Rimsting am Chiemsee Ende der 50er Jahre mit der Verlegung von hochpolymeren Dachbahnen begann. Mit der textilen Dachkonstruktion für das olympische Radstadion München 1971 bildete sich der neue Unternehmenszweig High-Tex (weitere Bereiche: Geo-Plan, Dach-plan), der seither auf textile Konstruktionen im weiteren Sinn spezialisiert ist. (Man betreibt hier auch die Entwicklung eines Solarluftschiffs, transparenter Kugelkonstruktionen für Solar-Hochtemperatur-Parabolspiegel und von Regattasegeln aus trägerlosem, durchsichtigem Folienmaterial). Die verwendeten Materialien reichen von hochfestem Polyester-Gewebe über teflonbeschichtetes Fiberglas bis zu einer Membran aus reinem PTFE-Gewebe, das gemeinsam mit der Firma Gore entwickelt wurde und sich besonders für mobile und transluzente Strukturen eignet. KOIT beherrscht alle Fügeverfahren für den Textilbau. Viele Spezialmaschinen sind in der Firma entstanden. Um die für flatterfreie Stabilität der Membran nötige Vorspannung zu erreichen, müssen für den Zuschnitt der einzelnen Segmente kleinere Abmessungen als im Endzustand ermittelt werden. Die Anforderungen an die Maßgenauigkeit betragen $\pm 1\text{mm}$. In Zusammenarbeit mit RFR/Ove Arup entwickelte man die Details für die Misch-

konstruktion der „nuage leger“ in Paris La Defense. Wegen der enormen Windlasten (die Gebäudeform des Grande Arche wirkt wie eine überdimensionierte Düse) überträgt ein durch Kabelüberspannung gekrümmtes Stahlseilnetz mit Gußknoten (Bruchlast einiger Seile 1000t) die Kräfte auf den Bogen. Es wird durch 24 Membranfelder aus PTFE-Glasgewebe ausgefacht, die jeweils in ihrem Hochpunkt mit einer kreisrunden Sicherheitsglasscheibe verbunden und von einem Flugstab vorgespannt werden. Zur Befestigung der Membranen mußten über 60.000 Einzelteile wie Klemmplatten, Schrauben, Seile und Stahlmasten, innerhalb von sechs Wochen zusammengesetzt und montiert werden.

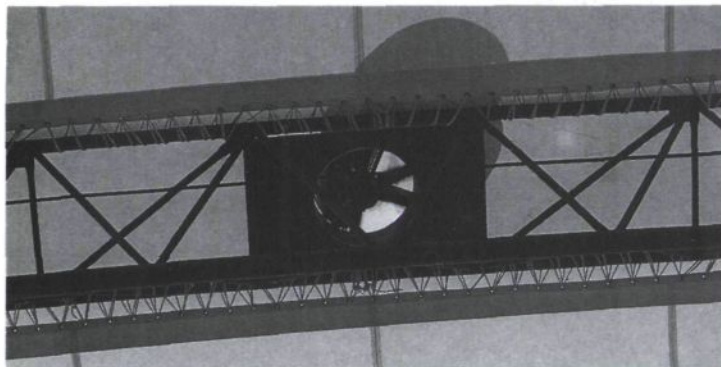
Für Mekka wurden Solarschirme entwickelt, die mit PTFE-Reingewebe bespannt sind und je nach Sonnenstand automatisch gefaltet werden können. Die Zellen sind auf den Schirmarmen angebracht, Batterie und Antrieb befinden sich im Fuß. (Solche Anwendungen übersteigen die Biege- und Festigkeit herkömmlicher Membranen bei weitem.) Im Londoner Alexandra Palace wurde mit einer speziellen transluzenten Membran (Durchlässigkeit ca. 70%) eine temporäre Akustikdecke unter einem Glasgiebeldach eingebaut, so daß der Raum für Orgelkonzerte genutzt werden kann, ohne sein charakteristisches Licht zu verlieren. Das mit Silicon beschichtete Glasfasernetz verhindert Widerhall durch kleine schallabsorbierende Löcher und ist auf ganzer Fläche luftdurchlässig (im Zwischenraum unter dem Glasdach befindet sich die Entlüftung). Es wird mit einer eigens dafür entwickelten Kombination aus Kleben und Nähen gefügt. Von Anfang an hat KOIT High-Tex sich auf die leichte Überdachung von Sportstätten spezialisiert. In den letzten Jahren entstanden u.a. das Fußballstadion Bari mit Renzo Piano, ein leichtes, kreisförmiges Beschattungssegel für die Stierkampfarena in Saragossa, das Sportzentrum in Jeddah und ein neues Dach für das Lords-Cricket Stadion, London, in Zusammenarbeit mit Michael Hopkins und Ove Arup.

Alexandra Palace London. Transluzente Akustikdecke unter Glasdach.

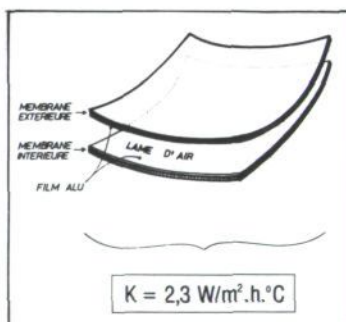
Textile Hallen und Dächer



Natürliche Beleuchtung durch transluzente Bereiche.



Fotos oben: Ausstattungsdetails bleiben selbständige Elemente. Sie befinden sich in Zwischenzonen oder gesonderten Membranausschnitten.



Wärmedämmung durch doppelte Haut mit Luftschicht.

Montage von Hand im Expanderzugverfahren. Reinigung eines Membransegments.



Esmerly Caron S.A.
20, Rue Pastre
F-28130 Dreux
Fax: 003337-464152

Für textile Industriehallen erreicht der französische Zeltbauer Esmerly Caron durch Reihung von Minimalflächen zwischen aufgelösten Raumfachwerkbogenbindern eine außergewöhnlich elegante Innenraumwirkung. Die Planung neuer Strukturen kann von einem erprobten System ausgehen, welches bis ins Detail schlüssig durchdacht ist und standardisierte Roll- und Schiebetore aus Metall enthält, die als eigenständige Elemente auf unterschiedliche Art mit den gewölbten Membranflächen verbunden werden können. Das System enthält auch Klimatisierungsvorrichtungen. Ventilatoren werden in den dreidimensionalen Trägern, jeweils in der Zone zwischen zwei größeren Membranstücken angebracht, die Beleuchtung kann durch Gewebe unterschiedlicher Transluzenz gesteuert werden (passive Sonnenenergienutzung).

Je nach Anwendung funktioniert die Membran selbst durch doppelschichtige Haut mit eingeschlossenem Luftvolumen und interner Aluminiumbeschichtung als Wärmedämmung (der erzielte k-Wert liegt bei 2,3; der Abstand zwischen den Membranen wird ohne Innendruck allein durch unterschiedliche Geometrie erreicht). Die radikal schlichte Ästhetik der Hallen wird durch die Membranmontage von Hand im Zick-Zack-Expanderzugverfahren unterstützt. Berechnung, Zuschnitt und Anzeichnen der Stoffe geschehen mit Computer/Plotter. (Vgl. Firmenportrait in Heft 103, S. 92)

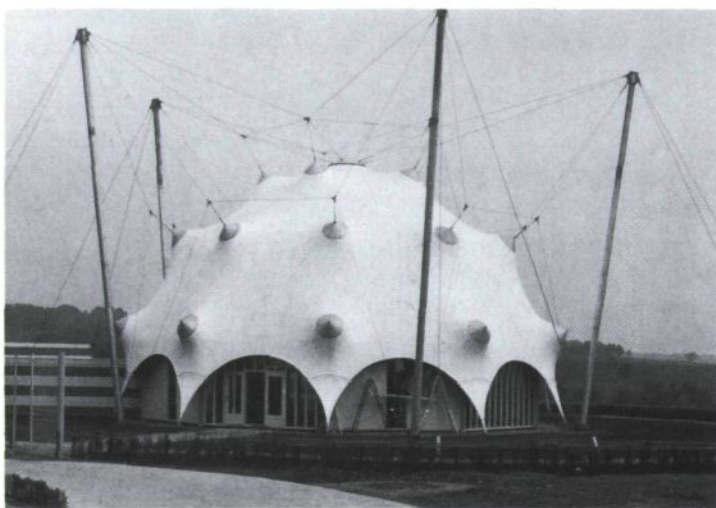
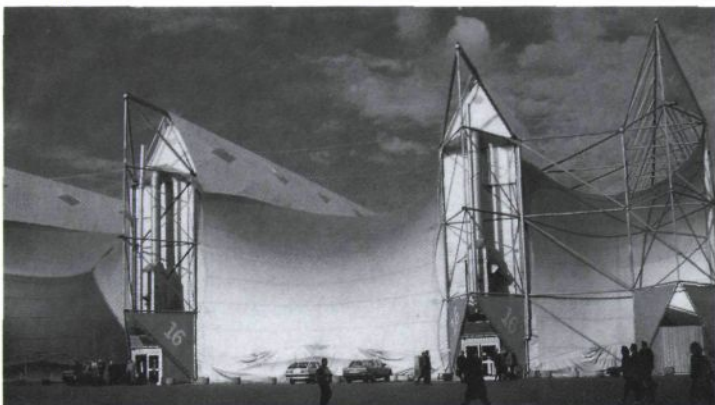
Carl Nolte GmbH & Co
Industriegebiet Eggenkamp
4402 Greven 1
Fax: 02571-2333

Die Planung und Herstellung textiler Bauten, 1885 vom Unternehmer Carl Nolte mit der Fertigung von Festzelten begonnen, wurde von seiner Familie im Laufe der Generationen in ein modernes, hochleistungsorientiertes Zeltbauunternehmen mit 150 Angestellten und Mehrschichttakt überführt. Neben der Entwicklung von Spezialkonstruktionen und der Produktion im westfälischen Greven vertreiben die Niederlassun-

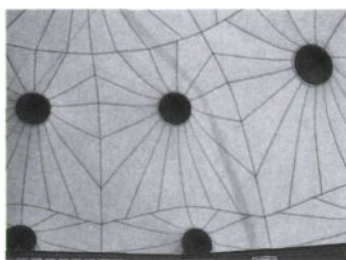


gen in Münster und Leipzig eine Reihe von Serienprodukten wie Messepavillons, Tribünenüberdachungen oder Eingangsbaldachine und ein Sortiment von Regelanschlußdetails und Zubehör wie Beleuchtung, Werbeblenden, raumabschließende Verglasung. Viele Konstruktionen sind ohne Beschädigung demontierbar und können auch geleast werden. In enger Zusammenarbeit mit externen Architekten und Ingenieuren (insb. IPL Radolfzell) entstehen in der Grevenener Entwicklungsabteilung zusammengesetzte Minimalflächen zwischen Stahlrahmen oder Brettschichtbogenbindern sowie Kuppelflächen, die an zahlreichen Hochpunkten über außenstehende Masten abgehängt werden. Pylone und Seile werden aus Edel- bzw. feuerverzinktem Stahl hergestellt und wegen der Leichtigkeit der Konstruktion

Nowea-Messehalle. Raumfachwerkträger nehmen sekundäre Gebädefunktionen auf.



oben und unten: Befreiungsmuseum Goesbek, NL. Kuppelform durch abgehängte Minimalfläche mit vielen Hochpunkten

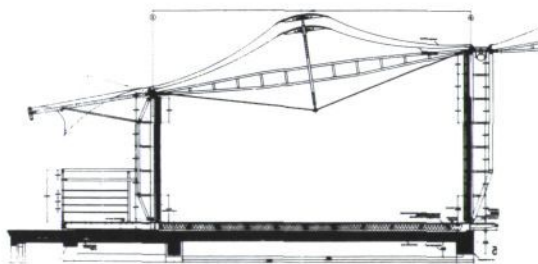


in Schwerlastfundamenten (Wind-sog) verankert. Nach Möglichkeit verwendet Nolte zur Materialersparnis Zuganker und Bohrpfähle, kleinere Konstruktionen erhalten Einzel- und Köcherfundamente. Stählerne Binder, zunächst häufig als Kasten-träger ausgeführt, werden vermehrt in Raumfachwerk aufgelöst. Durch konzentrierte Aufnahme von Zusatzfunktionen wie Zugang, Beleuchtung/Belüftung, Werbung können sie gut in die Gesamtkonstruktion integriert werden und vermitteln

zwischen Zelt und Architektur. Für die Membranen wird PVC-beschichtetes Polyester- sowie PTFE-beschichtetes Glasgewebe verwendet, innenliegende Unterspannungen (z.B. von leichten Membrankuppeln) können mit hochsteifen Kevlar-Seilen ausgeführt werden. Nolte realisiert viele größere internationale Projekte. Neben dem Bau von Konferenzzelten für den Nahen Osten war die Firma an den riesigen Sonnensegeln der Expo 88 in Brisbane beteiligt.

LANDRELL Fabric Engineering Limited
Station Road, Chepstow,
Gwent, NP6 5PF, GB
Fax: 00442912-71991

Die Zeltbaufirma im südwalisischen Chepstow wurde 1984 als Reaktion auf den wachsenden Markt für große und kleine Gewebekonstruktionen gegründet und verfügt nach eigenen Angaben inzwischen über eine in England konkurrenzlose Kapazität für die Anfertigung von textilen Membranen in der Größenordnung von 100 bis 5000qm sowie über eigenen Grund und Boden. Die Produktion ist in zwei Bereiche aufgeteilt, damit die komplizierte Montage von großen Einzelkonstruktionen nicht vom ständigen Durchlauf der in Serie hergestellten Zelte und Sonnensegel gestört wird, welche die Firma für größere Sportereignisse in England und Übersee anfertigt. Neben eigenen Projekten wird auch die Herstellung für außenstehende Architekten übernommen, je nach Bedarf arbeitet man mit Atelier One oder Büro Hapold zusammen und bezieht ganze Pakete technischer Dienste (z.B.: CAD-Schnittmustererzeugung).



Imagination Building, London (Ron und Andrew Heron). Der Schnitt durch die Dachgalerie zeigt die innere und äußere Membran.

Der Zugschnitt des Gewebes nach Computerausdrucken wird von einem digitalen Plotter unterstützt, der den Stoff auf langen Tischen anzeichnet. Die so erreichbare Genauigkeit liegt im Bereich von ± 1 mm auf 30 m. Die weitere Automation des Verfahrens durch Computergesteuerten Laser-Schnitt ist bereits in Auftrag. Den Kern des Produktionsprozesses bildet das Hochfrequenzschweißen von kunststoffbeschichteten Geweben. Landrell verwendet hochfestes Polyestergewebe

mit PVC-Beschichtung. Durch die unter hohem Druck zusammengeklebten Membranen werden Radiowellen geschickt. So erwärmen sich die Moleküle im Inneren und werden schließlich ohne Beschädigung der Oberfläche verschweißt. Die Endmontage größerer Membranen wird durch ein mobiles Schweißgerät erleichtert, so daß die schweren, unhandlichen Teile an jedem Punkt des Werkstattbodens verbunden werden können. Das Gerät kann unabhängig von der Werkstatt auf der Baustelle verwendet werden, wenn Änderungen oder Reparaturarbeiten nötig sind.

Im vergangenen Jahr hat Landrell unter anderem das Atriumdach für das Strathfordshire House gemeinsam mit Ron Herron und ein mobiles Zelt für Großveranstaltungen mit 10.000 Sitzplätzen in Eigenregie entwickelt und aufgerichtet.

Canobbio S.p.A.
Via Spartaco 23
I-20135 Milano
Fax: 00392-55183182

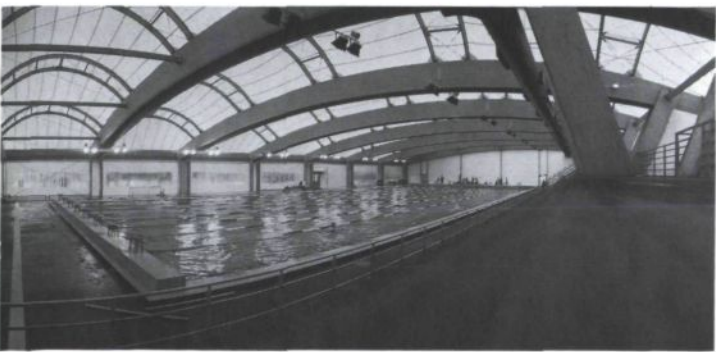
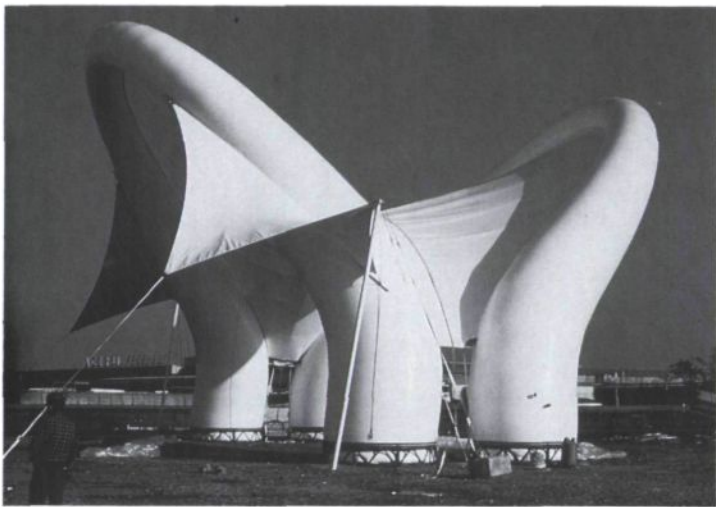
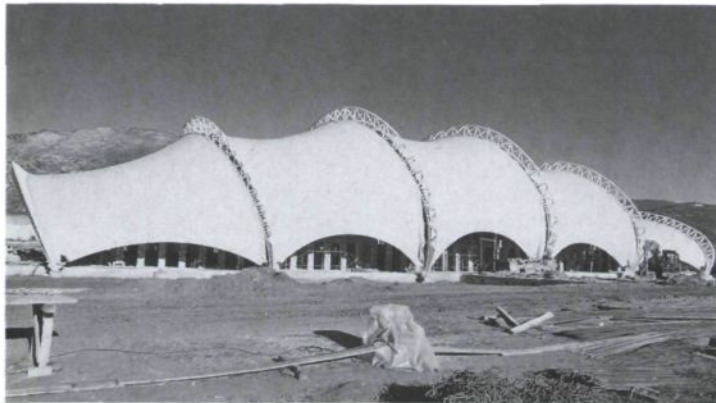
Gegründet 1926 als Produktionsbetrieb für Lastwagenplanen, dann Zirkuszelte begann das Mailänder Unternehmen ab 1961 mit der Entwicklung neuer Technologien für das Hochfrequenzschweißen PVC-beschichteter Polyestergewebe für Traglufthallen. Heute werden vielfältige Kunststoffmembranen hergestellt und zu räumlichen Gebilden weiterverarbeitet. Zur Beschichtung von Glasfasergewebe mit PTFE besteht ein technischer Kooperationsvertrag. Kevlargewebe werden mit PVC, Polyestergewebe neuerdings mit TEDLAR und PVDF ummantelt.

Seit 1971 plant und fertigt das Unternehmen in enger Zusammenarbeit mit IPL Radolfzell mechanisch vorgespannte Zeltkonstruktionen. Dabei entstehen einerseits Serien wie Schwimmhallen mit von Leimholzbindern getragener Membranüberdachung oder geodätische Kuppeln mit je nach Bedarf zu öffnender, abgehängter Plane zur Sportplatzüberdeckung. Zur thermischen Isolierung können die Planen doppel-lagig mit eingeschlossenem

oben: Industriehallen-Konstruktion aus gebogenen Stahlrahmen mit eingespannter Membran

Mitte: Pneumatisches Dach

unten: Olympisches Schwimmbad in Rom. Das bewegliche textile Dach wird von einer lamellierten Holzbogenkonstruktion getragen (preisgekrönt).



Serge Ferrari
Boite Postal 54
F-38352 La Tour du Pin
Cedex
Fax: 00337497-6720

Clyde Canvas Goods & Structures LTD
Wharton Road, Winsford
Cheshire CW7 3BY, GB
Fax: 0044606-592379

Unter den Gewinnern des „1990 International Achievement Award“ der amerikanischen IFAI ist mit einem ersten Platz eine Membranstruktur in Kuala Lumpur/Malaysia, die einen Tennisplatz für die Südostasienspiele abdeckt.

Verwendet wurde eine Membran Precontraint 1002 der französischen Firma Ferrari, die aufgrund ihrer Beschichtungstechnik auf textile Bauten spezialisiert ist.

Designer der Struktur von 8.000 Quadratmetern waren Geiger Engineers, SAA, Lee Weng Yan, die Konfektion erfolgte durch Clycan Alpha Ltd. in den USA.

Precontraint-Membranen sind eine Weiterentwicklung von Ferrari, die beschichteten Geweben neue Eigenschaften verleiht (symmetrisches biaxiales Verhalten, d. h. gleiche Dehnung in Kett- und Schußrichtung und höherer Beschichtungsschutz des Trägergewebes).

Damit werden neue Möglichkeiten eröffnet für textile Bauten, die geringe Vorspannungen und kein Nachspannen erfordern.

Mit drei britischen Filialen und einer Abteilung in Lexington, Kentucky USA errichtet die schottische CLYCAN weltweit textile Bauten, vorwiegend für die Freizeit- und Unterhaltungsindustrie. Nach ersten Formüberlegungen mit CAD-Programmen auf dem Computer werden Modelle aus Stoff angefertigt, an denen Architekten und Ingenieure den Entwurf überprüfen. Erst wenn die Form nach ästhetischen und konstruktiven Gesichtspunkten ausgereift ist, beginnt unter ständiger Rückkoppelung mit Herstellern und Monteuren die Ausführungsplanung. Neben Polyvinylchlorid-beschichtetem Polyestergerewebe, das große Flexibilität mit guter Reißfestigkeit verbindet, wird bei CLYCAN Fiberglas mit Beschichtung aus PTFE für Außenanwendung, aus Silicon für innenliegende Membranen verarbeitet, beide mit einer Lebenserwartung von 30 Jahren. Mit dem James Hunt Centre in Milton Keynes entwickelte das Unternehmen kürzlich das erste vollgedämmte Zeltdach in Großbritannien. Ein mit Dämmstoffen gefülltes Volumen wird von zwei Membranen umschlossen. Während die Außenhaut vom zentralen Mast über Zuganker rund um das kreisförmige Gebäude abgespannt wird, spreizt eine elastische Schürze die innere Schicht gegen den von den festen Wänden des Unterbaus gebildeten Zugring.

Open-air Tennisstadion in Kuala Lumpur, Malaysia, mit der Precontraint 1002 Membran von Ferrari



Luftvolumen oder zusätzlichen Dämmstoffen ausgeführt werden.

Nach Berechnungen des Ingenieurs H. Mühlberger (IPL) entwickelt Canobbio weitgespannte Minimalflächen und Mischkonstruktionen wie das Freiluftfoyer der Feria di Milano: Eine von A-Stützen gespreizte Brückenkonstruktion überspannt den gesamten Vorplatz und trägt über Drahtseilhänger den Kamm einer asymmetrischen Membranstruktur, die auf einer Seite an das Gebäude an-

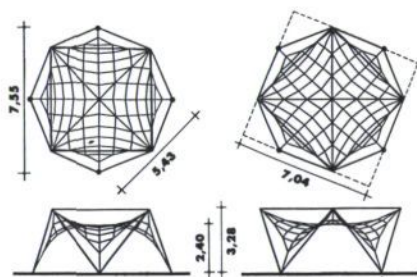
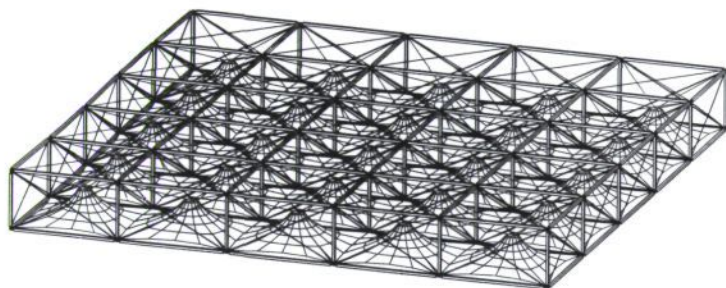
schließt und sich auf der anderen zur Straße öffnet.

Für Restaurationsarbeiten an einem griechischen Tempel, die unter schwierigen Witterungsbedingungen (Windgeschwindigkeiten bis 180km/h, Schneelast 200kg/qm) in einer Gebirgsgegend auf dem Peloponnes stattfinden, lieferte Canobbio ein saisonal veränderliches Schutzzelt (27m×50m), welches durch leichte Komponenten und Fundamente den Eingriff in die historische Situation begrenzt.

Modulare Zeltkonstruktionen



Modulares System. Überdachung einer archäologischen Ausgrabung in Desenzano.



Serienprodukt Gartenzelt

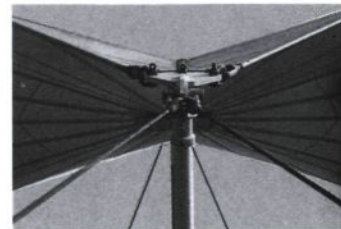
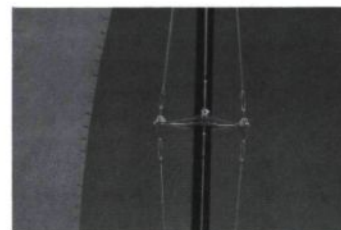
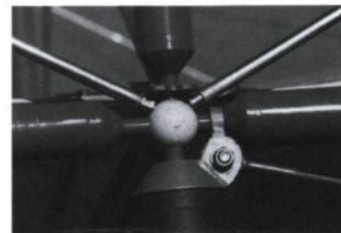
Aluminiumstruktur mit eingespannter Membran. Tribünenüberdachung Monza



Tensoforma
Via Porta Dipinta, 12
I-24100 Bergamo

Die italienische Leichtbaugesellschaft hat sich 1983 aus einem Entwurfsstudio entwickelt. Sie betreibt neben Entwurf, Produktion und Montage von spezialangefertigten größeren Zeltstrukturen auch Entwicklung und Vertrieb sowie Verleih modularer Konstruktionen mit Membranabdeckung. Planung und Entwicklung finden in einem Prozeß ständiger Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur statt, und die endgültige Formfindung wird durch moderne Computerprogramme unterstützt. Durch Verwendung sehr konkreter Modelle und ständige Rückkoppelung mit Schweißern, Drehern, dem Aufbauteam und dem Zeltmacher kann die Ausführungsplanung in Hinblick auf Materialverarbeitung, Montage und Kosten optimiert werden. An Prototypen wird die Konstruktion überprüft, geplante Details unter Zug auf Materialbelastbarkeit getestet, das Produkt korrigiert. Vor dem Transport an ihren Bestimmungsort werden die verschiedenen Elemente je einmal vollständig auf dem Firmengelände aufgebaut, um Montageprobleme zu bewältigen, die Farbgebung abzustimmen, etc. Die Firma übernimmt nach der Montage den Service und gibt auf ihre Konstruktionen eine fünfjährige Garantie. Für Zeltmembranen verwendet Tensoforma PVC-beschichtetes Polyestergerewebe. Wenn auch in viele Richtungen systematisch optimiert wird, sollen doch keine Standarddetails entstehen, vielmehr setzen die Mitarbeiter auf neue Lösungen bei möglichst jedem Projekt. Die Strukturen sind deshalb sehr fein durchgearbeitet, bei den gern verwendeten Mischkonstruktionen (Minimalflächen mit Bogenunterstützung) sind Stahlbau- und Aluminiumdetails ebenso sorgfältig entworfen wie Membranform und Anschlüsse. Durch die Kombination mit aufgelösten Trägern, knickverspannten Pylonen, Raumfachwerken integrieren sich die Membranen gut in umgebende Architektur.

(Vgl. ausf. Firmenportrait in Heft 103)



von oben: Knotenpunkt des Raumfachwerks mit Anschlußpunkten, Aussteifung und Randkabel der Membran; Mastverstrebung; Verbindungsdetails ■

Tyvek

Hersteller: DuPont
Wilmington Del., USA
Vertrieb: Klöber GmbH & Co. KG
Scharfenbergerstr. 72-74
5828 Ennepetal 1

Unterspannbahnen schützen geneigte Dächer zwar gegen Windauskühlung und Flugschnee, führen bei gleichzeitiger Wärmedämmung aber mittelbar zu hohem Dachaufbau und plumpen Details.

Die Verwendung von Sperrschichten macht Lüftungskanäle erforderlich; perforierte Folie führt zum „Zelteffekt“ (Durchtropfen bei Kontakt Folie/Dämmung) und benötigt Abstand

Gore-Tex

zur Dämmung. Der amerikanische Chemiekonzern DuPont, Erfinder von Nylon und Kevlar und größter Faserhersteller der Welt, bietet eine überzeugend einfache Lösung auf molekularer Ebene. Die Baumembran aus Tyvek ist dampfdurchlässig und dabei völlig wasserdicht. Als Unterspannbahn lüftet sie Feuchtigkeit auf kürzestem Weg ab und ergänzt schlüssig das nach dem gleichen Prinzip funktionierende Ziegeldach. Der Schutz feuchteempfindlicher Dämmstoffe gegen Flugschnee und Regen kann also ohne aufwendige Hinterlüftung erreicht und die Dachkonstruktion insgesamt schlanker werden. Durch vergleichsweise geringes Flächengewicht (55g/qm, die 150 qm Rolle wiegt 9 kg) ist die hellgraue Bahn mit papierartiger Konsistenz leicht zu verlegen. Das Material wird seit Jahren in der amerikanischen Holzleichtbauweise zur Windabdichtung verwendet. Für den europäischen Markt wird es neuerdings in Luxemburg produziert.

Es handelt sich bei Tyvek um ein reißfestes Spinnvlies aus hochdichtem Polyäthylen HDPE. Solche filzartigen, porösen Textilien aus reinem Kunststoff werden durch das Vernetzen von erweichten Mikrofasern hergestellt. Die Verarbeitung erfolgt hier im sogenannten flash-spin Verfahren: Unter Druck und in gelöster Form wird das Granulat durch eine Spinn Düse verdampft das Lösungsmittel explosionsartig (flash), dabei entstehen die kurzen Mikrofasern. Sie werden vom rotierenden Düsenkopf in mehreren Lagen auf einem darunterlaufenden Förderband verteilt. Der durch das Kreisel entstehende Wirbeleffekt (swirl) läßt sich

auf dem Endprodukt noch gut erkennen. Durch ihn wird eine ebene Faserorientierung ohne Vorzugsrichtung und damit eine gute Reißfestigkeit erreicht. Unter dem Druck einer Kalandrierrolle wird die Bahn verfestigt.

Die Alkene (CH-Moleküle mit Doppelbindungen, z. B. PE) gehören zu den typischen wasserabweisenden (hydrophoben) Stoffen. Durch seine mikroporöse Struktur ist das Vlies zwar luft- und insbesondere dampfdurchlässig, für Wasser als Flüssigkeit aber undurchdringlich, weil das Kapillarprinzip, welches den Flüssigkeitsdurchgang durch poröse Stoffe sonst ermöglicht, durch die hier stattfindende Abstoßung der Wassermoleküle ausgeschaltet wird. Daraus ergibt sich eine erstaunliche Dichtigkeit (entspricht 1 m Wassersäule). Das Durchfeuchten normaler Zeltgewebe bei Kontakt mit einem festen Gegenstand liegt daran, daß sich seine meist kleinere Oberflächenspannung durch den Stoff auf das Wasser auf der anderen Seite auswirken kann und es so gewissermaßen durch das Gewebe ziehen kann. Der gefürchtete Zelteffekt wird hier schließlich durch die schlichte Mehrschichtigkeit des Faservlieses erledigt.

HDPE läßt sich (kontrolliert) aschefrei zu Kohlendioxid und Wasser verbrennen und ist auf der Deponie weitgehend chemisch inert. Damit ist Tyvek verglichen mit anderen Kunststoffen relativ umweltverträglich. Das Vlies ist auch in vakuum-aluminierter Form erhältlich. Nach solcher Vorbehandlung reflektiert es bis zu 80% der Infrarotstrahlung und führt im Sommer zu deutlich kühleren Dachböden.

W.L.Gore & Co. GmbH
Hermann-Oberth-Str. 22
D-8011 Putzbrunn bei München

Gore steht fast synonym für die systematische Entwicklung von Anwendungsmöglichkeiten für PTFE (Polytetrafluoräthylen, Teflon). Der Familienbetrieb wurde 1958 in Kalifornien zur Herstellung von Isolierungsbeschichtungen für elektronische Leitungskabel gegründet. Die Basis für die Entwicklung des Unternehmens liegt in der Erfindung von GORE-TEX 1969: Durch Recken von PTFE entsteht ein mikroporöses Material, das gleichzeitig wasserdicht und dampfdurchlässig ist. Die Firmenphilosophie von Gore beruht auf dem Vermeiden von Hierarchien, direkter Kommunikation und der Aufgliederung in kleine, wendigere Unternehmensbereiche (max. 250 Mitarbeiter pro Werk) mit eigener Forschung. Das Produktspektrum (es reicht immerhin von Textilien über medizinische Prothesen und Mikrofilter bis zum Lecksondensystem für die chem. Industrie) hat einen deutlichen konzeptionellen Zusammenhang, obwohl das Unternehmen mittlerweile auf 5000 Angestellte in 35 Werken gewachsen ist.

Gore Tenara

Während bislang im Bereich hochbelastbarer Zeltmembranen Glasfasergewebe für die Aufnahme der Zugspannungen verwendet wurden und die weiche Teflonbeschichtung vor allem zum Schutz des Gewebes vor Witterungseinflüssen aufgebracht wurde, besteht TENARA zu 100% aus PTFE. Es handelt sich also um eine völlige Neuentwicklung, die ebenfalls durch das Expansionsverfahren ermöglicht wird. Während der zunächst weiche Kunststoff der Belastung beim Recken nachgibt, richten sich die Polymerketten in seinem Inneren aus und lassen seine Verarbeitung zu festen Fasern zu. Sie werden zu Garnen versponnen und ermöglichen die Kombination von Material- und Strukturvorteilen in einem PTFE-Gewebe:

- keine Beschädigung durch UV-Strahlung, daher lange Lebensdauer
- das Material wird durch keine der in der Atmosphäre ent-

haltenen Chemikalien angegriffen (PH 0-14), es ist nahezu chemisch inert und damit physiologisch unbedenklich

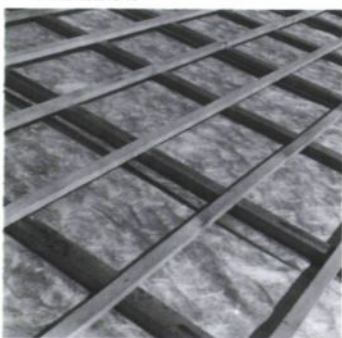
- wegen des hydrophoben Rohstoffs kann Wasser nicht in das Gewebe eindringen (keine Schmutzablagerungen); hohe Antiadhäsivität
- das Gewebe ist wartungsfreundlich
- geringes Flächengewicht (300-650g/qm)
- vernähen der einzelnen Gewebeteile möglich wegen geringer Sprödigkeit der PTFE Fasern. Hohe Biegezugfestigkeit erlaubt mobile Konstruktionen und Falt/Klappmechanismen
- das Gewebe besitzt variable Lichtdurchlässigkeit (Transmission ca. 15-55%), Farbgebung durch Verwendung farbiger Fasern
- PTFE ist unbrennbar und wird auch durch Hitze und Frost in seiner Struktur nicht verändert.

Während das reine Gewebe vorwiegend für Schattendächer und Innenarchitektur verwendet wird, bietet Gore auch einen völlig regendichten Typ mit einer zusätzlichen PTFE-Beschichtung an. Die Verbindung von Gewebe und Ummantelung aus dem gleichen, reaktionsunfreudigen Material ist nach Auskunft der Firma technisch schwierig. Durch das Vernähen der Anschlüsse ergeben sich Möglichkeiten für schöne Details. Die neue Membran Tenara wurde in Zusammenarbeit mit der Zeltbau firma KOIT entwickelt.

Elektronenmikroskopische Aufnahme: Feinstruktur Faservlies



Unterspannbahn Satteldach; papierähnliche Konsistenz



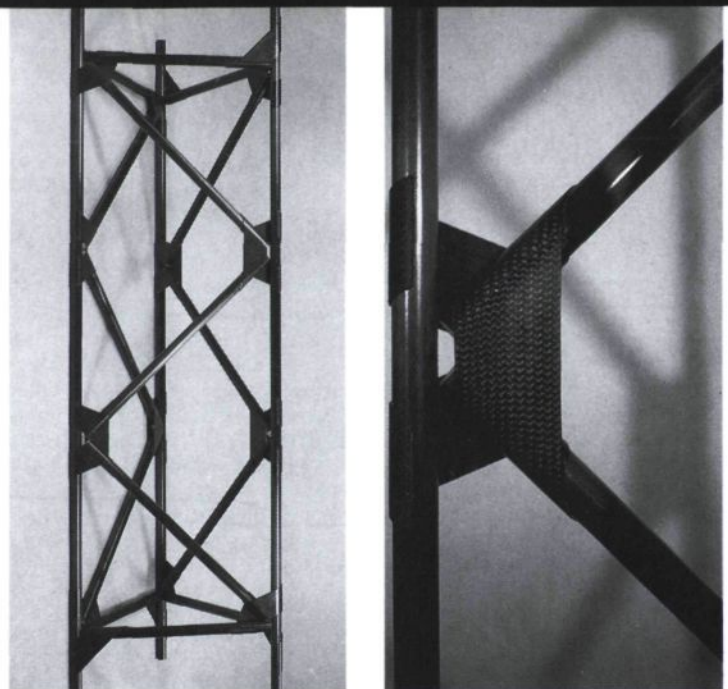
Bahnrennrad aus CFK

**Projekt: Tom Moeller,
Student am Art College of
Design, Pasadena, Ca., USA**

Um den Windschatten des Vordermanns auszunutzen, fahren Bahnrennteams in engen Gruppen. Beim abgebildeten Prototypen für ein Bahnrad aus kohlefaserverstärktem Kunststoff wandert das Hinterrad nach vorne, um den Fahrern durch kürzere Pulks einen besseren aerodynamischen Wirkungsgrad zu geben.

Den Rahmen bildet eine Schalenstruktur mit integrierten Lagern und Steuerkopf; Gabel und Lenker gehen, ebenfalls in einem CFK-Bauteil, nahtlos ineinander über. Der Sattel und die Griffe werden im RIM-Verfahren aufgegossen. Die ultraleichten Reifen sind aufgezogen

des verzogen), mußte die Gabelneigung vergrößert werden. Durch den verkürzten Radstand ergab sich noch ein weiteres Problem: Die Tretlagerspindel hätte bei herkömmlicher Konstruktion das Hinterrad durchqueren müssen. Daher gibt es zwei unabhängige Antriebssätze auf beiden Seiten des Rades. Da es sich bei dem Prototypen um ein Bahnrad handelt, hat es weder Bremsen noch Gänge. Jeder Bestandteil der Form unterstreicht den niedrigen Luftwiderstand. Das Rad ist ein strahlendes Beispiel für alles, was nach dem offiziellen Reglement verboten ist. Der ganze Entwurf ist besonders auf Leichtigkeit ausgelegt: Die beiden aerolite-Pedalen wiegen 66 g, die Reifen je 120 g, und das Gesamtgewicht des



Fachwerk aus CFK-Leichtbaustäben. CFK-Knoten: vorgefertigtes Formteil aus Kohlefaserschläuchen wird mit Stäben verklebt.

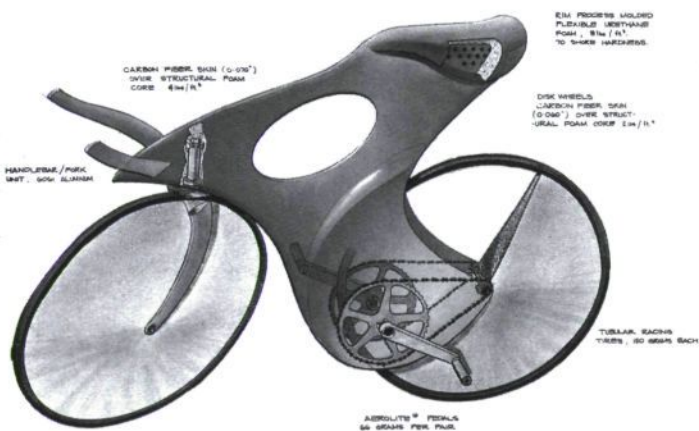
Leichtbausystem aus CFK

**Hersteller: Dt. Forschungsanst. f. Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Strukturmechanik.
Flughafen.
3300 Braunschweig**

Außerordentlich leichte Raumfachwerke und Rahmen lassen sich mit den Strukturelementen aus kohlefaserverstärktem Kunststoff bauen. Neben hochbeschleunigten Steuerungsteilen für Industrieroboter und Großkonstruktionen für die Raumfahrt werden beispielsweise große Antennenspiegel auf einer

CFK-Basiskonstruktion errichtet. Außer extrem hoher Steifigkeit (450.000 N/mm^2) und Zugfestigkeit (450 N/mm^2) haben Carbonfasern einen negativen Ausdehnungskoeffizienten in Faserrichtung. Das bedeutet, daß sich die Fasern bei Erwärmung geringfügig verkürzen. Im Verbund mit der Kunststoffmatrix kann also der Ausdehnungskoeffizient gezielt kontrolliert werden oder Wärmedehnung völlig vermieden werden.

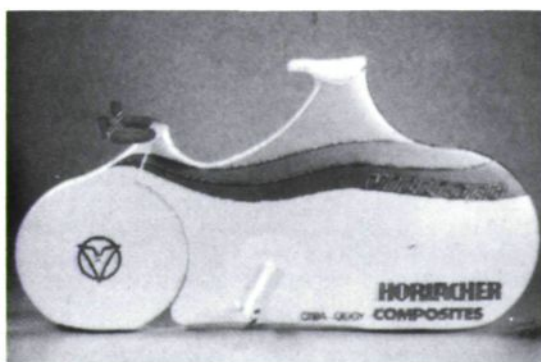
Die Leichtbaustäbe bestehen aus leichten Schaumkernen, die von dünnen, kräfteführenden



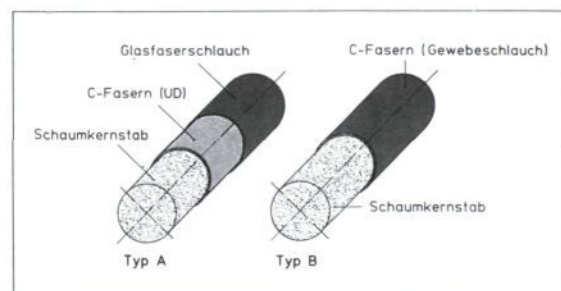
Funktionsweise, Materialien und Gewichte. Das nach vorne wandernde Hinterrad macht doppelten Antriebsatz erforderlich. Durch starke Gabelneigung wird das Rahmengleichgewicht wieder hergestellt.

auf CFK-Scheibenräder der italienischen Firma Campagnolo (Serienprodukt). Wegen der weniger stabilen Rahmengestaltung (Rautenform des klassischen Diamantrahmens wird durch neue Lage des Hinterra-

Fahrrads liegt bei 7 Kilogramm. Leider ist die Anpassung solcher hyperangepaßten Konstruktionen (Schale) an einen wachsenden oder wechselnde Fahrer bislang kaum möglich. ■



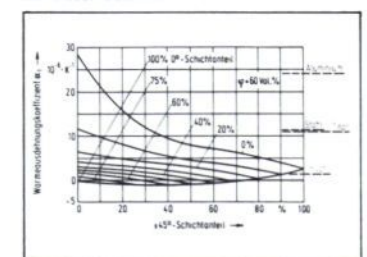
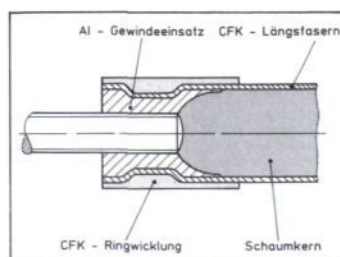
Ein ähnliches Konzept der Firma Horlacher: Bahnrad mit selbsttragender aerodynamischer CFK-Karosserie



Aufbau der Leichtbaustäbe A und B

Integrierte formschlüssige Krafteinleitung.

Steuerbarkeit des Ausdehnungskoeffizienten durch Verändern des Verhältnisses Faser/Matrix.



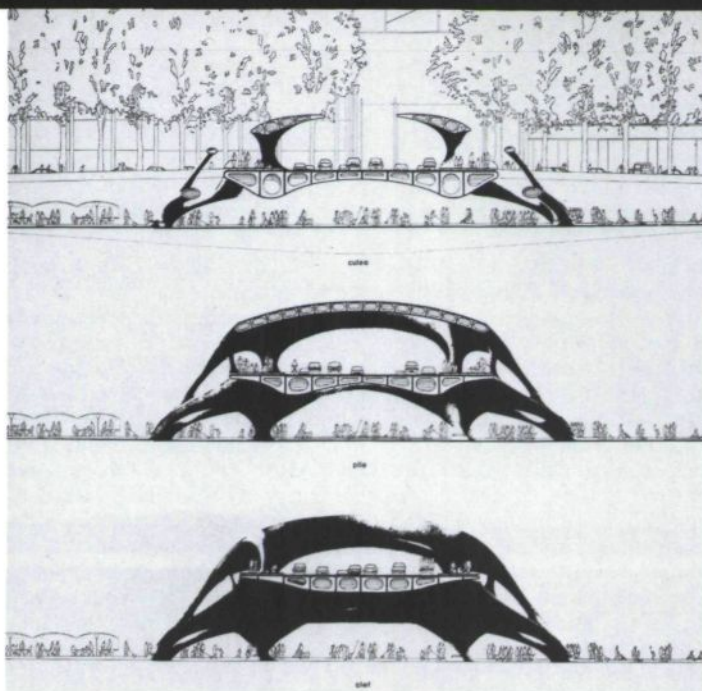
CFK-Schichten umgeben sind. Die Stabkräfte werden von der inneren Schicht völlig ausgerichtet (unidirektionaler) Carbonfasern aufgenommen. Um Ausknicken des Stabes infolge Beulenbildung in der dünnen Wandung zu vermeiden, wird sie von innen durch den Schaumkern, von außen durch einen Glasfaserschlauch mit diagonal (ca. 40°) zur Stabachse gerichteten Fasern abgestützt. Darüberhinaus zeigt der Glasschlauch äußere Beschädigungen durch Weißfärbung an und ermöglicht effektive Qualitätssicherung bis in den eingebauten Zustand. Ein typischer Stab (A 20 × 0,43/M40) dieser Serie hat

- Durchmesser 20mm
- Kern: Rohacell 51
- C-Fasermaterial: Torayca M40
- Masse 80 g/m
- Druckfestigkeit ca. 25.000 N
- Biegesteifigkeit: $ExJ = 2,3 \times 10^8 \text{ N/mm}^2$

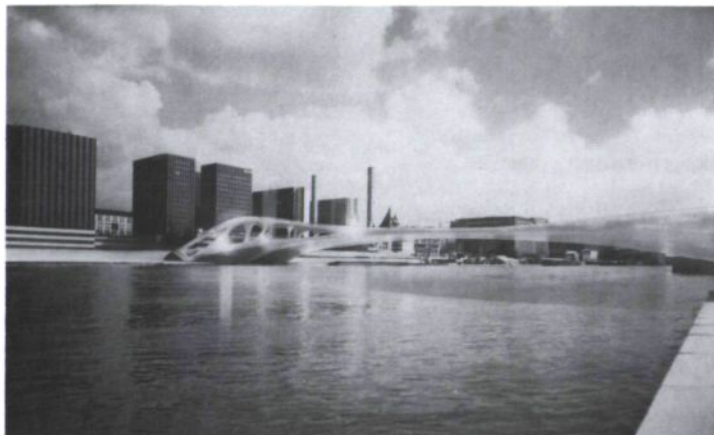
Ein zweiter Stabtyp B wird hergestellt, indem der Schaumkern lediglich mit einem C-Fasergewebeschlauch überzogen wird. Je nach Typ und Anzahl der Schläuche lassen sich die gewünschten mechanischen Eigenschaften des Stabes einstellen. Verlaufen die Fasern in sehr spitzen Winkeln zur Stablängsachse, so ergibt sich hohe Biegesteifigkeit, während bei Faserwinkeln von $\pm 45^\circ$ der Leichtbaustab eine hohe Torsionssteifigkeit erhält. Die entsprechenden Kohlefaserschläuche werden nach Kundenwunsch gefertigt.

Für die Verbindung der Faserverbundstäbe unter verschiedenen Winkeln wurden stufenlos anpaßbare CFK-Knoten entwickelt, welche die zu verbindenden Stäbe in Form breiter Ränder umgreifen und mit ihnen verklebt werden. Sie bestehen aus flachliegenden Faserschläuchen mit unidirektional ausgerichteten Fasern, die zunächst in Formen vorgefertigt und nachträglich mit den Stäben verklebt werden. Bei hoher Ecksteifigkeit sind sie deutlich leichter als entsprechende Metallteile.

Zur Einleitung großer Kräfte in die dünnwandigen Stäbe werden zwei Anschlußtypen angeboten: einer als im Fertigstab integrierte, metallene Gewindebuchse, der andere zur späteren Verbindung mit dem Stab als Halbzeug. ■



Pont Austerlitz



Mit modernsten Verfahren und Materialien konstruiert, ähnelt die Brücke wieder biologischen Konstruktionen, wie Knochenmaterial oder Horn. Durch veränderlichen Schnitt paßt sich die Form den unterschiedlichen Bindungen an.

Wettbewerbsbeitrag von
Jourda & Perraudin, Foster,
Francis;
Ingenieure: MTI, Ove Arup,
Sogelerg, Bet;
Paris 1988

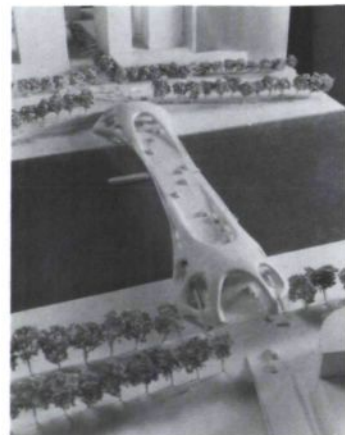
Mit einer Oberfläche aus rostfreiem Stahl wäre die Brücke ein Spiegelobjekt für die Jahreszeiten mit ihrem wechselnden Licht, unbeweglich unter bleiernem Himmel, sonst durch ziehende Wolken und Reflexe belebt. Sie wäre gleichzeitig Skulptur und architektonische Promenade mit Ausblick auf Seine, Ile St. Louis und Notre Dame und würde durch Ausbau der Böschungen in das umliegende

Quartier eingebunden.

Mit einer Schalenkonstruktion wird der Kräfteverlauf durch Gleichverteilung optimiert. Über den veränderlichen Querschnitt ergab sich die beste Vermittlung der unterschiedlichen Bindungen. So können die Formen der unterschiedlichen Brückenteile den Lasten (Autos, Fußgänger, Metro), die sie übertragen sollen, angepaßt werden. Die Schalenhaut wird von Kompositpaneelen aus rostfreiem und carbonisiertem Stahl gebildet. Auf allen Sichtflächen der Konstruktion zeigen die Paneele ihre rostfreie Seite, welche der Brücke als

Wetterschutz dient. Die Inoxschicht hat eine Dicke von 3 mm und wird je nach örtlicher Belastung auf 1-3 cm dickes Schwarzeisen aufgeschmiedet. Dieses Verhüttungsprodukt wurde bis jetzt vor allem zum Bau von Druckbehältern verwendet.

Aus Schiffsbau und Raumfahrttechnik sind mit dem Sektionsbau erprobte technische Lösungen bekannt, die die Konstruktion komplexer Formen durch vollständig automatisierte Prozesse zulassen. Numerisch gesteuerter Plasmazuschnitt ermöglicht die Herstellung völlig individualisierter Formen und ihre Montage zu Kuppeln, Strängen und Flächen. Die Verbundpaneele sollen mit rostfreien Nähten verschweißt, offenliegende Kanten



abgefast und ebenfalls mit einer Inox-Naht besäumt werden, um überall gleichen Korrosionsschutz zu erhalten. Die inneren Kammern werden gestrichen.

Die vergrößerte Leistungsfähigkeit moderner Rechner ermöglicht die wirtschaftliche Anwendung von Analysetechniken wie der Finite-Elemente-Methode in interaktiven Systemen. Mit dem hier verwendeten Programm (System TITUS), das von der Kernindustrie entwickelt und schon für TGV-Komponenten erfolgreich angewendet wurde, wäre die Brücke ein interessantes Beispiel für den Transfer von Hochtechnologie.

Jourda & Perraudin

Wandelbares Dach der Arena in Zaragoza

Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart
Membran: KOIT
Herbert Koch GmbH & Co KG
 Nordstr. 1
 D-8219 Rimsting

Die Arena stammt aus dem letzten Jahrzehnt des 18. Jahrhunderts und liegt in der Altstadt von Zaragoza im spanischen Aragon. Während bis vor kurzem die Arena nur etwa fünfzehn Tage im Jahr für Stierkämpfe genutzt wurde, spendet nun der permanente Teil des Membrandachs für diese Veranstaltungen Schatten und der bewegliche Teil verwandelt die Arena für den Rest des Jahres in eine multifunktionale Halle. Gegen Installation des Daches hat sie die Stadt an einen privaten Investor verpachtet.

Das neue Dach wurde auf der umlaufenden, gemauerten, dreigeschossigen Galerie aufgelegt. Den permanenten Teil bildet eine leichte „Speichenrad“-Primärkonstruktion. Dabei stellen radial gespannte Stahlseile die „Speichen“ und ein polygonaler Stahlring die „Felge“ am Rand dar. Die „Nabe“ besteht aus zwei übereinanderliegenden Ringseilen, die

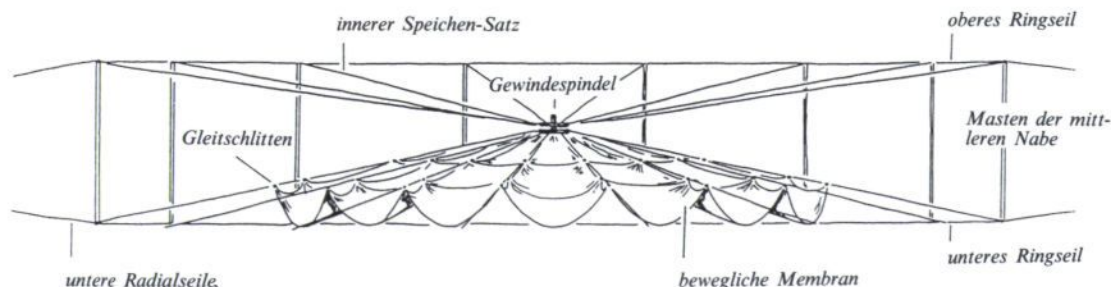
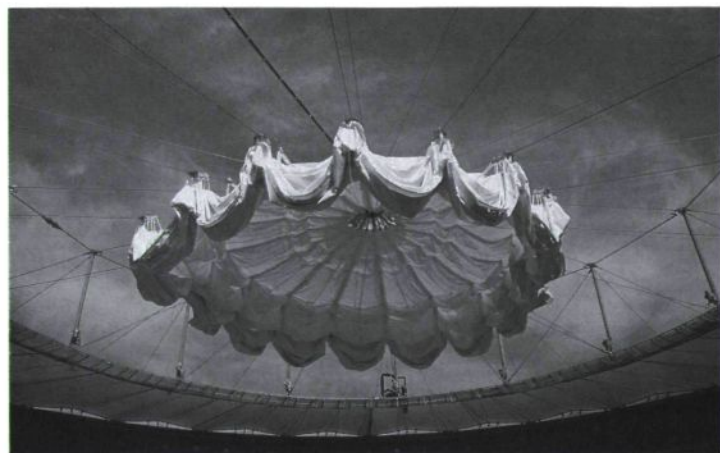
durch 16 Flugmasten aufgespreizt werden. Zwischen den unteren Radialseilen verläuft wie ein geöffneter Fächer die permanente Membran.

In der mittleren Öffnung befindet sich das temporäre Dach. Am Rand ist die Membran an den Fußpunkten der Masten befestigt. Zwischen ihnen wird im Mittelpunkt der Konstruktion über ein zweites Speichensystem eine weitere Nabe abgespannt. Hier greifen die oberen und unteren Speichen jeweils an einem von zwei Tellern an, die mit variablem Abstand über eine elektrisch betriebene Gewindespindel miteinander verbunden sind. Während die oberen Seile die Nabe tragen, gleiten auf den unteren die Befestigungspunkte der Membran mithilfe kleiner Schlitten. „Verfahren“ und „Vorspannen“ funktionieren nacheinander und sind bei diesem Dach entkoppelt. Mit der Gewindespindel (funktioniert wie ein Korkenzieher) können die beiden Teller gegeneinandergezogen und so die Seilspannung vergrößert werden. Wenn sich die Fahrseile strecken, übernimmt die Membran einen Teil der Spannung.

Um das Dach zu öffnen, wird zunächst der untere Teller um 70 cm abgesenkt. Während sich die Fahrseile verkürzen, entspannt sich die Membran. Nun können die pneumatisch gesetzten Bolzen an der Peripherie gelöst und die Membran in die Mitte gefahren werden. Die äußeren Gleitschlitten werden durch Zugseile bewegt, die entlang dem Mast und zwei Speichen gebildeten Dreieck verlaufen und über Rollen umgelenkt werden. Im Mittelpunkt faltet sich die Membran zu einem kleinen Paket zusammen. Der gesamte Vorgang verläuft vollautomatisch und wird von etwa hundert streichholzschachtelgroßen Sensoren ständig berührungsfrei abgefragt und durch computergesteuerte Elektromotoren und Bolzenkupplungen koordiniert.

Während die meisten wandelbaren Membrankonstruktionen für einzelne Veranstaltungen eigens ausgefahren und deshalb nur für mittlere Wetter ausgelegt werden, mußte hier mit Schneelasten von bis zu 500 Tonnen und beträchtlichem Windsog gerechnet werden. Zaragoza ist für seine Platzregen bekannt. Im geschlossenen Zustand entsteht am Verbindungskreis zwischen permanenter und temporärer Membran eine etwa 100 m lange Kehle. Es wurde also genau an diesem wichtigen Übergang eine Regenrinne erforderlich. Das Problem wurde durch eine Kastenrinne aus Plexiglas gelöst, aus der mit vier sensorgesteuerten, extrem leistungsfähigen Pumpen das Wasser schnell nach außen gepumpt werden kann. ■

Temporäres Dach. Vereinfachte Darstellung. Über 16 Zugseile werden die äußeren Schlitten bewegt. Nach Verriegelung an den Mastfüßen wird die Membran mit der Gewindespindel vorgespannt. Vollautomatisches Ein- und Ausfahren koordiniert über berührungsfreie Sensoren und Computer.



Ingenieurbüros

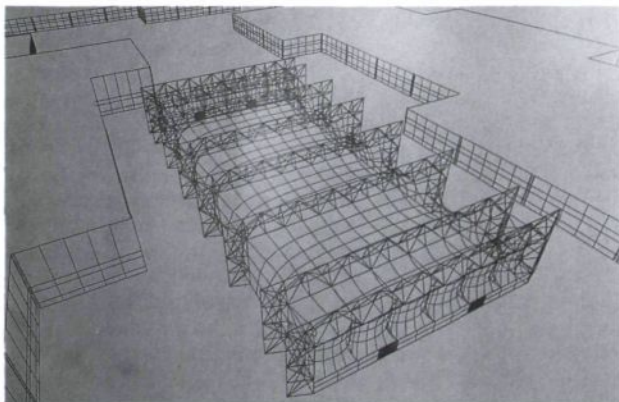
Moderne Zeltkonstruktionen sind auch über 30 Jahre nach ihrer Einführung in die Architektur noch immer eine Randerscheinung, der Sonderfall. Das begründet sich nicht nur aus den Schwierigkeiten, die Architekten, aus welchen Gründen auch immer, mit Membrankonstruktionen haben, sondern auch aus dem Anspruch, den ihr Einsatz an das fachliche know-how der Ingenieure stellt. Nur wenige Ingenieurbüros in Europa verfügen heute über praktische Erfahrung und die nötigen technischen Hilfsmittel, vor allem spezielle CAD-Programme, um solche Konstruktionen zu entwickeln. Sie bilden so etwas wie eine große Familie, die sich kennt, auf die unterschiedlichsten Weisen miteinander verflochten ist, in der zusammengearbeitet und voneinander gelernt wird. Und sie sind zu einem großen Teil auch für die architektonische Qualität im Leichtbau verantwortlich: die enge Verbindung zwischen Form und Konstruktion zwingt Architekten und Ingenieure zum gemeinsamen Entwerfen.

IPL

IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH
 Kapellenweg 2c
 D-7760 Radolfzell

Hinter IPL – Ingenieurplanung Leichtbau – verbirgt sich ein interdisziplinäres Team, das sich zur Zeit aus drei Architekten und sieben Ingenieuren zusammensetzt. Unter der Leitung von Harald Mühlberger beschäftigt es sich ausschließlich mit Projekten aus dem Bereich des Leichtbaus. Dabei ermöglicht ihm der Einsatz von Computern, integrierten CAD-Programmen und der Zugriff auf einen Windkanal, alle heute verfügbaren technischen Möglichkeiten auszuschöpfen. Harald Mühlberger, der Gründer von IPL und in Stuttgart ausgebildeter Bauingenieur, hat einige Jahre bei Mero in Würzburg, Frei Otto und Peter Strohmeyer gearbeitet, bevor er 1974 ein eigenes Büro aufbaute. Inzwischen hat er mit IPL an fast 500 vorgespannten Zelt- und Seilnetzkonstruktionen mitgewirkt – zum Teil federführend wie bei der Nowea-Halle in Hannover,

Die Nowea-Halle stammt von Harald Mühlberger und seinem Büro IPL. Die Kunststoffmembrane wird hier zu einem Baustoff, der gleichermaßen Wand und Decke bildet (s. auch S. 84).



zum Teil in Zusammenarbeit mit Architekten wie Renzo Piano, Michael Hopkins oder Frei Otto, für die er oftmals die komplette Werkplanung und Bauleitung übernommen hat. Im Augenblick entwickelt IPL unter anderem verschiedene Projekte für die Weltausstellung 1992 in Sevilla, ein Raubtierhaus im Münchener Zoo und großflächige Überdachungen von Mülldeponien mit Spannweiten bis zu 700 Metern.

Atelier 1

Atelier 1
4 Goodge Place
GB-London W1P 1FL

Neil Thomas, Jahrgang 1959, arbeitete zunächst bei Happold in Bath, später als Direktor bei Anthony Hunt, bevor er 1989 mit Atelier 1 ein eigenes Ingenieurbüro gründete, das inzwischen in der englischen Szene für Furore sorgt. Die über einen Zeitraum von zwei Jahren entwickelten Projekte zeichnen sich durch die große Offenheit gegenüber neuen Materialien und Konstruktionslösungen aus – unter anderem aus dem Leichtbau. Gemeinsamer Bezug all dieser Projekte ist ein charakteristischer Entwurfsansatz. Neil Thomas arbeitet bei all seinen Aufträgen und Wettbewerben eng mit Architekten zusammen und findet in einem ständigen „Frage und Antwort“-Spiel mit den Entwerfern auf jeweils spezifische Probleme immer wieder neue und allgemeingültige Lösungen. Noch bei Anthony Hunt baute er in Eton eine extravagante Fußgängerbrücke aus Holz; mit Alsop, Lyall und Strömer nahm er am

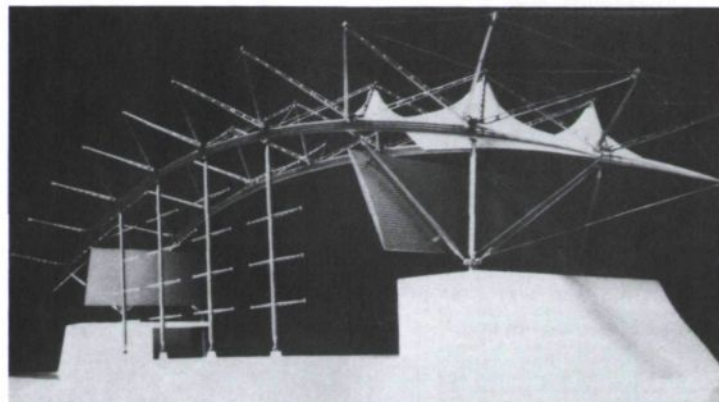
Wettbewerb für den britischen Pavillon auf der Expo 1992 in Sevilla teil und realisierte mit ihnen das Cardiff Bay Visitors' Centre. Zusammen mit Aidon Potter aus dem Büro Thourton McAslan verwirklichte er die Sonnensegel am Bürogebäude der Apple-Niederlassung in Stockley Park, und mit Eva Jiricna gestaltete er den Eingang des Vitraschops in Weil am Rhein neu. Im Moment realisiert er mit Arad Associates einen Ausstellungsraum für den Londoner Designer Ron Arad.

YRM

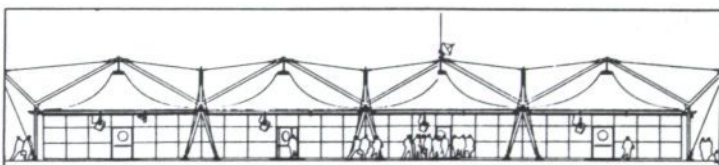
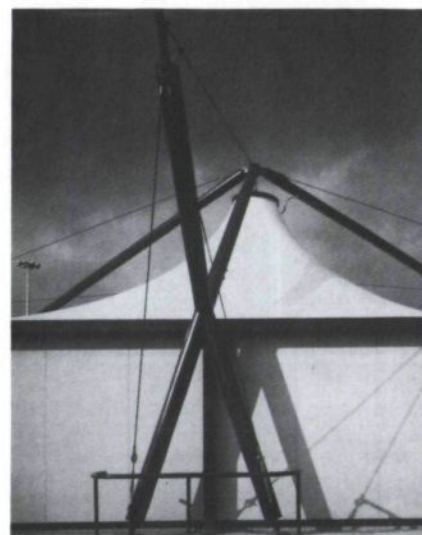
Anthony Hunt Ass

YRM Anthony Hunt Partnership
24 Britton Street
GB-London EC1M 5NQ

Anthony Hunt gründete sein Ingenieurbüro 1962 und hat seit dieser Zeit die Entwicklung der englischen Architektur begleitet. Einige der Meilensteine wurden mit seiner Hilfe gesetzt: das IBM-Gebäude in Cosham, Willis Faber & Dumas in Ipswich und das Sainsbury Center for the Visual Arts mit Norman Foster, die Immos-Fabrik mit Richard Rogers oder das Schlumberger Forschungszentrum in Cambridge mit Michael Hopkins – eine der schönsten Membrankonstruktionen überhaupt. Seit 1988 ist Anthony Hunt Associates dem multidisziplinären Hochbauunternehmen YRM Partnership angegliedert. Es verfügt über die modernsten technischen Hilfsmittel für den Entwurf, dazu gehören Computer und CAD-Programme, aber auch andere ingenieurtechnische Einrichtungen.

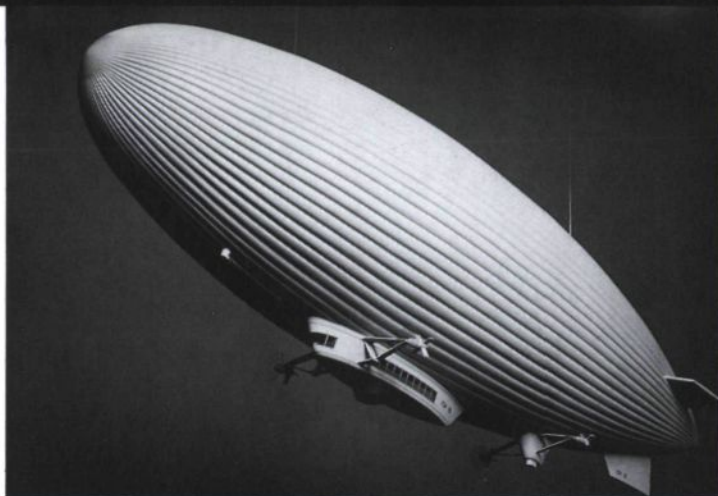


In ihrem Beitrag für den Eurodrome-Wettbewerb in Glasgow aus dem Jahr 1988 gelingt es dem Ingenieur Neil Thomas und dem Architekten Aidan Potter, die amorphen Formen doppeltgekrümmter Membranen durch das Prinzip der Reihung architektonisch zu strukturieren.

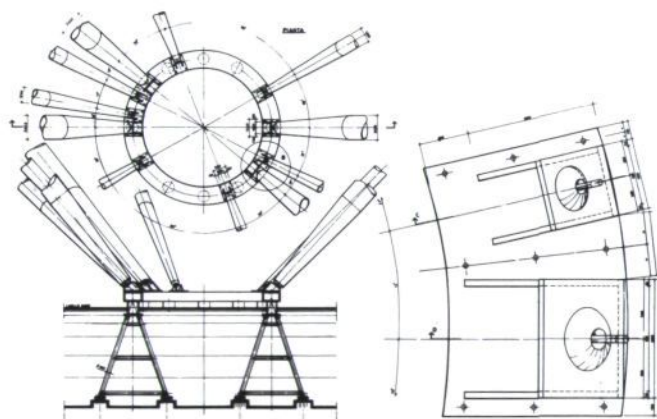


Das Don Valley Athletics Stadion in Sheffield wurde im Juni 1990 nach nur einjähriger Planungs- und Bauzeit fertiggestellt. Anthony Hunt Associates mußten die Konstruktion praktisch parallel zum Bau entwickeln.

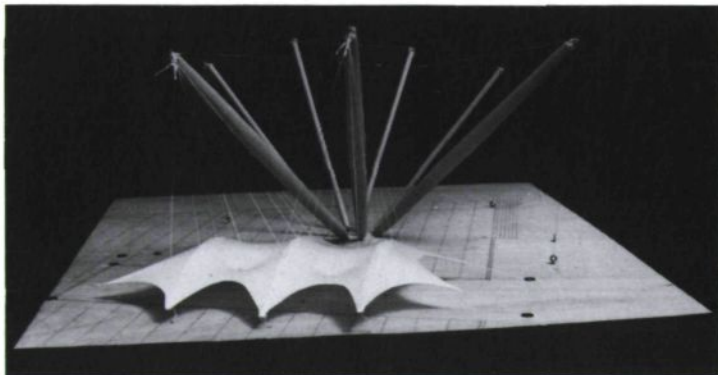




Buro Happold entwarf dieses Hochgeschwindigkeitsluftschiff 1989. Da in den Drehbewegungen bei Geschwindigkeiten bis zu 180 km/h extrem hohe Spannungen auftreten, mußte ein völlig neues Konstruktionssystem entwickelt werden.



Gemeinsam mit Renzo Piano arbeitet Ove Arup Partnership zur Zeit an einem Zelt-dach für den Hafen von Genua, das mit seinem monumentalen Fahnen und Masten an die Silhouette alter Segelschiffe erinnert. Auf dem Gelände findet demnächst ein Festival zu Ehren Christopher Columbus' statt.



Buro Happold

Buro Happold
Camden Mill
Lower Bristol Road
GB-Bath BA2 3DQ

In seinem 14jährigen Bestehen hat sich das Büro Happold mit einer Vielzahl an Leichtbauten konstruktiv, aber auch entwerflich beschäftigt. Die Arbeit daran war wesentlich geprägt von einer engen Kooperation mit Frei Otto: gemeinsam entwickelten sie einige der bemerkenswertesten Projekte im Leichtbau überhaupt, unter anderem die Multihalle in Mannheim, den Entwurf für eine Stadt in der Arktis, selbst Staudämme und Luftschiffe. Darüber hinaus wird im Büro beständig an der Erweiterung der ingenieurtechnischen Grundlagen des Leichtbaus gearbeitet. In einem Forschungsprojekt wurden, unterstützt von der Universität Bath, die Ursachen für den Einsturz von Tragluflhallen untersucht – die Ergebnisse sind grundlegend für die Konstruktion von Pneus. Die Beteiligten, neben Ted Happold vor allem Ian Lidell, gehören zu den weltweit anerkannten Fachleuten. Um den Prozeß der Formfindung, die Berechnung des Tragverhaltens, die Ermittlung von Zuschnittsmustern und die Darstellung von Leichtbaukonstruktionen zu verbessern, entwickelte Buro Happold über Jahre ein integriertes CAD-Programm, auf das heute weltweit von Architekten, Ingenieuren und Herstellern zurückgegriffen wird.

Buro Happold beschäftigt heute weit über 100 Mitarbeiter und arbeitet in verschiedenen Niederlassungen in allen Teilen der Welt.

Ove Arup Partnership

Ove Arup Partnership
13 Fitzroy Street
GB-London W1P 6BQ

Arup, ohnehin Inbegriff ingenieur Leistung, stellte seine erste Seilnetzkonstruktion bereits 1970 fertig: das Hotel- und Konferenzzentrum der Archi-

tekten Frei Otto und Rolf Gutbrod in Mekka. Mit diesem Projekt bildete sich ein harter Kern aus Ingenieuren, der über praktische Erfahrung im Entwurf und der Konstruktion von vorgespannten Zelt- und Seilnetzkonstruktionen verfügt. Er hat sich über die Jahre unter der Leitung von Peter Rice kontinuierlich entwickelt. Heute arbeiten Fachleute für den Leichtbau aus dem Arup-Büro in London, aber auch in Los Angeles, Sydney und Brisbane. Zu den in den letzten Jahren realisierten Projekten gehören unter anderem das Sportstadion in Bari von Renzo Piano, das Schlumberger Zentrum in Cambridge und Lords Cricket Ground von Michael Hopkins, sowie La Grand Arche und der Tour de la Liberté in Paris. Im Augenblick arbeitet Arup mit Renzo Piano an Projekten für das BIGO-Gelände in Genua und mit Frank Stella an einem Museum in Groningen. Grundlage für das breite Engagement im Leichtbau bildet auch hier eine interaktive, integrierte CAD-Softwaretechnik, an der bei Arup seit 25 Jahren gearbeitet wird.

Tensys Limited

Tensys Limited
D.S. Wakefield
13 Milton Avenue
GB-Bath BA2 4QZ;
M.R. Barnes
7 Myddelton Square
GB-London EC1R 1YE

Der Entwurf von Leichtbaukonstruktionen erfordert ein hohes Maß an ingenieurtechnischem Spezialwissen und den Einsatz aufwendiger Hilfsmittel. Beides ist für Architekten, Ingenieure und Hersteller in der Regel nicht zugänglich. Michael Barnes und David Wakefield schließen mit ihrem 1990 gegründeten Consulting-Büro Tensys diese Lücke: sie stehen Planern mit ihrer Erfahrung und ihrer Software bei dem Entwurf vorgespannter Zeltkonstruktionen zur Seite und entwickeln für sie die Konstruktion, einschließlich Details und Zuschnittsmuster. Sie beliefern ihre Kunden überdies mit den Daten des Computermodells,

die dann in die eigenen CAD-Modelle übernommen werden können. David Wakefield hat zwischen 1978 und 1990 bei Happold an der Entwicklung von CAD-Software gearbeitet und war für ihre Anwendung in über 100 Projekten verantwortlich. Michael Barnes ist Dekan an der Fakultät für Bauingenieurwesen an der City University in London und hat seit Mitte der 70er Jahre als Consulting-Ingenieur Windkanalversuche, Materialprüfungen und Computeranalysen für Leichtbaukonstruktionen durchgeführt.

Schlaich, Bergermann und Partner

Schlaich, Bergermann und
Partner
Hohenzollernstr. 1
D-7000 Stuttgart 1

Die Mitarbeiter des Büros Schlaich, Bergermann und Partner beschäftigen sich seit über 20 Jahren mit dem Entwurf und der Planung von zugbeanspruchten Konstruktionen aus Seilen und Membranen.

Erstes bedeutendes Projekt war die statisch-konstruktive Bearbeitung des Olympiastadions in München 1968-71 – damals noch im Büro Leonhardt und Andrä; kurz darauf folgte der Seilnetz-Kühlturm in Schmehausen.

Die wichtigsten Membranbauten nach der Gründung des eigenen Büros 1980 waren die Überdachung des Stadions in Riad, das wandelbare Dach des Olympiastadions in Montreal, das Membrankissen zur Überdachung der Arena in Nîmes und das Membrandach der Arena Zaragoza mit wandelbarem Innenteil. Das besondere Interesse Jörg Schlaichs galt dabei immer auch dem Einsatz des Leichtbaus bei der alternativen Energiegewinnung. Er verwirklichte in Manzanares/Spanien ein Aufwindkraftwerk als Seilnetzkonstruktion (s. ARCH⁺ 104, S. 72) und bildete einen 17 Meter großen Sonnenspiegel für ein Solarkraftwerk in Saudiarabien als pneumatische Membran aus. Für die Berechnung

und die Zuschnittsermittlung der Membranen hat das Büro eigene CAD-Programme entwickelt. Im Moment arbeitet es unter anderem an einer Überdachung des Neckarstadions in Stuttgart.

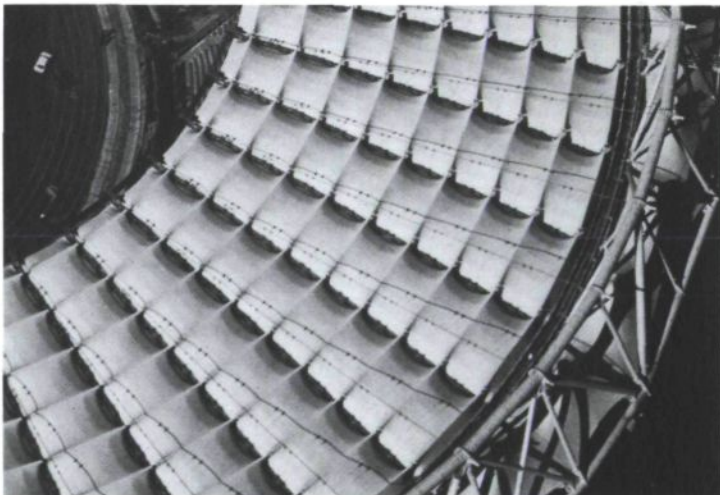
Studio Tecnico Majowiecki

Studio Tecnico Majowiecki
Via Tizzano 46/2
I-40033 Casalecchio di Reno

Massimo Majowiecki begann sich in den frühen 70er Jahren mit Leichtbaukonstruktionen zu beschäftigen, als er die aus der Luft- und Raumfahrttechnik stammende Methode der finiten Elemente auf ihre Brauchbarkeit für die Berechnung der nicht-linearen Felder von Seilnetzen untersuchte. Seine Arbeiten führten schließlich zu der Entwicklung des weltweit ersten, vollständig interaktiven CAD-Programms für den Entwurf und die Berechnung von vorgespannten Zelt- und Seilnetzkonstruktionen. Mit diesem neuen Entwurfsinstrument verfügte sein Büro schon früh über die Möglichkeit, auf zeit- und kostenintensive modellbautechnische Entwurfsmethoden, wie sie Frei Otto entwickelt hat, zu verzichten. In den rund 15 Jahren, die Massimo Majowiecki nun schon an dem Entwurf von zugbeanspruchten Leichtbaukonstruktionen arbeitet, sind eine Reihe vielbeachteter Projekte entstanden, darunter die Dachkonstruktion für eine Sporthalle in Athen, ein wandelbares Dach für das Messegelände in Mailand, das neue Stadion „des Alpes“ in Turin und das Hängedach des Olympiastadions in Rom.



Das Luftkissen über der antiken Arena in Nîmes wird jeweils für die Wintersaison auf- und abgebaut. Es wurde von Schlaich, Bergermann und Partner zusammen mit den Architekten von Labfac/Stuttgart entworfen.



Das neue Dach über dem Olympiastadion in Rom konstruierte der Italiener Massimo Majowiecki für die Fußball-Weltmeisterschaft 1990. Seine Form erinnert an die wandelbaren Dächer der antiken römischen Amphitheater.

