

Das Olympiadach in München

Autor(en): **Schlaich, Jörg / Altmann, H. / Bergermann, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **9 (1972)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-9577>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

IIIa

Das Olympiadach in München

The Olympic Roof at Munich

Le Toit Olympique à Munich

JÖRG SCHLAICH

H. ALTMANN, R. BERGERMANN, K. GABRIEL, K. HORSTKÖTTER,
K. KLEINHANSS, P. LINHART, G. MAYR, J. NOESGEN, U. OTTO, H. SCHMIDT
Ingenieurbüro Leonhardt und Andrä, Stuttgart, BRD

1. DER ENTWURF DER TRAGENDEN KONSTRUKTION

Das Olympiadach wurde aus der bei einem Wettbewerb preisgekrönten Idee entwickelt, die einzelnen Sportstätten durch ein einheitliches, leicht wirkendes und durchsichtiges Dach zu einer Großform zu vereinigen. Die Aufgabe, eine insgesamt 75 000 m² große Dachfläche möglichst frei zu gestalten und darunter stützenfreie Räume zu schaffen, lösten die Architekten Behnisch & Partner, Frei Otto und die Ingenieure Leonhardt und Andrä mit einer vorgespannten Seilnetzkonstruktion (Bilder 1 und 2).

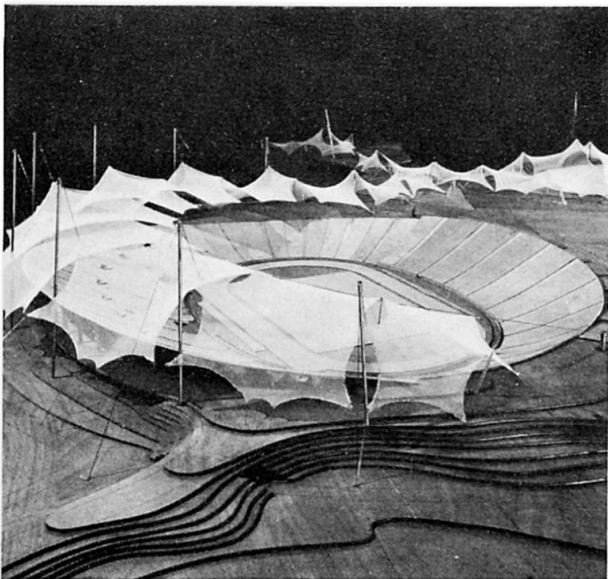


Bild 1: Stadion(links) Zwischenbereiche und Sporthalle(rechts)



Bild 2: Sporthalle(hinten) und Schwimmhalle, Modellfotos

(Gesamtaufnahme, vgl. Bild 1 des Einführungsberichtes IIIa)

An jeder Stelle des Daches wurden ausreichende, wenn auch häufig nur sehr schwache Krümmungen der Netzflächen dadurch geschaffen, daß sie an vielen Punkten durch außenstehende oder frei hängende unterspannte Maste unterstützt und in viele einzelne, aneinandergeschaltete Dachflächen unterteilt wurden.

Beim Stadion wurde die Aufgabe, die Westtribüne zu überdachen, durch Aneinanderreihen von 9 sattelförmig gekrümmten Netzflächen gelöst (Bild 1). Die einzelnen Netze sind mit Randseilen eingefasst. In den Berührungspunkten benachbarter Netze gleichen sich die Kräfte in Ringrichtung über gemeinsame oder gekoppelte Knotenpunkte aus. In radialer Richtung sind die Knotenpunkte an 8 großen Masten aufgehängt und zum Spielfeld hin gegen ein Randkabel gespannt, das in zwei Widerlagern am Rande der Stadionschüssel verankert ist (Bilder 3 und 4). Die großen Maste sind praktisch nur in einer Ebene abgespannt, müssen sich also bei Querbelastung über Auslenkungen stabilisieren.

Der Vorteil, den eine Einfassung von Netzen mit Randseilen dadurch bringt, daß nur wenige Knotenpunkte zur Unterstützung der Netze notwendig sind, mußte auch hier mit dem Nachteil erkauft werden, daß sich die Netze zwischen benachbarten Knotenpunkten glatt ziehen wollen. Vor allem an den Netzecken (Zwickel) stellen sich praktisch ebene Flächen ein. Wenn diese Flächen, wie hier entlang des Randkabels, wenig geneigt sind, müssen sie gegen die Verformungen unter Schneelasten hoch vorgespannt werden. Die Zwickel sind auch insofern problematisch, als ihre kurzen Netzseile schon unter kleinen Lastverformungen der Randseile große Spannungswechsel aufweisen.

Umstritten ist die Frage der Überdeckung der linsenförmigen Augen zwischen den Knotenpunkten benachbarter Netze. Die hier gewählten schwach vorgespannten Augennetze beeinflussen die Geometrie der Hauptnetze ungünstig und erschweren die Zuschnittsermittlung erheblich, so daß Biegestäbe zwischen den Randseilen vorteilhafter sein dürften.

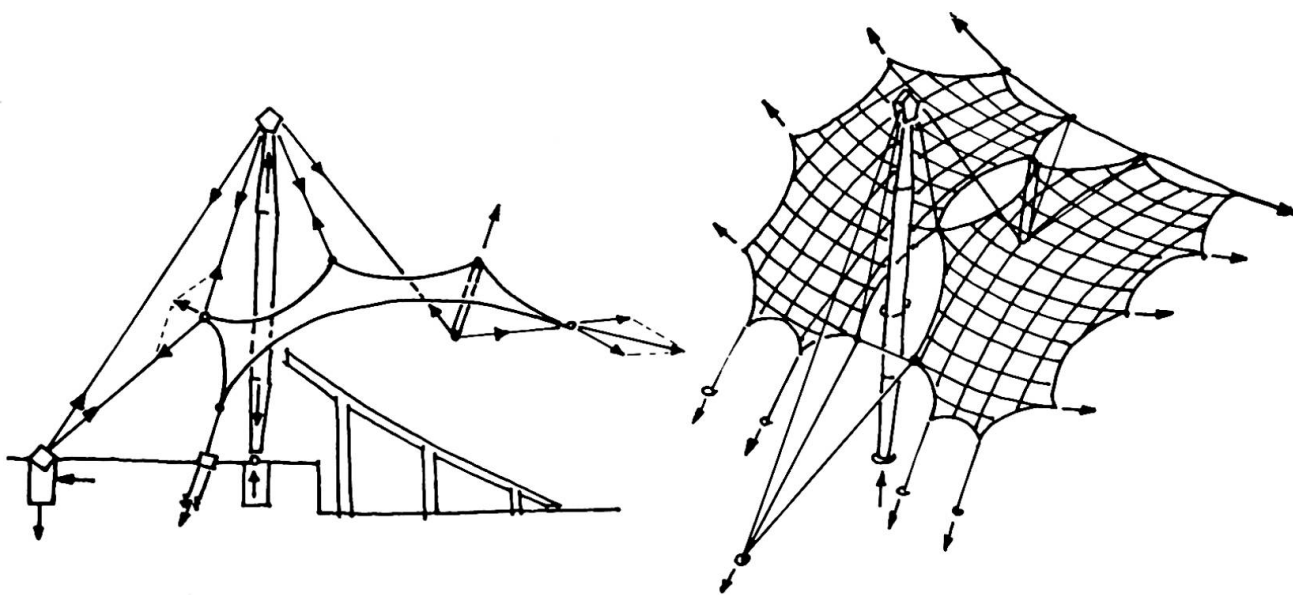


Bild 3: Das Tragwerk des Daches über der Tribüne des Stadions

Für das Dach über der Sporthalle wurde ein im Prinzip ähnliches Tragwerk wie für das Stadion gewählt. Es ist aus 5 aneinandergereihten Netzflächen zusammengesetzt (Bilder 2 und 6). Auf der den beiden Hauptmasten gegenüberliegenden Seite der Halle treten hier an die Stelle des Randkabels des Stadions abgespannte Maste, die die Netze unterstützen, und direkt abgespannte Knotenpunkte. Allerdings hat nur das mittlere Netz eine durchgehend sattelförmige Krümmung, während die 2x2 Seitenfelder Wendeflächen sind, weil je zwei ihrer gemeinsamen Knotenpunkte zu zwei Tiefpunkten hinuntergezogen wurden, um damit einen beidseitigen seitlichen Raumabschluß der Halle zu erreichen. Diese komplizierten Flächen mußten mit hoher Vorspannung erkaufert werden (vgl. Abschn. 4). In den Außenbereichen dieses Daches wurde auf Augen verzichtet und die benachbarten Netze in gemeinsamen Gratseilen zusammengeführt.

Das Dach über der Schwimmhalle hat eine frei gestaltete Flächengeometrie. Eine große, an ihrem Umfang vielfach direkt oder über Randmaste abgespannte Netzfläche, ist einmal an einem Hauptmast über zwei große Augseilschlaufen aufgehängt und zweimal zu Tiefpunkten hin abgespannt (Bilder 2 und 6). Der eine Tiefpunkt liegt im Innern der Netzfläche, wobei die Netzkräfte über ein nach unten abgespanntes Ringseil eingesammelt werden, während der andere - wie bei der Sporthalle - ein gemeinsamer Knotenpunkt mit einer zweiten Netzfläche ist. Am Zusammenschluß der beiden Netzflächen sind zwei linsenförmige Augen und eine beiden Netzen gemeinsame Kehle ausgebildet. Die Halle öffnet sich an einer Seite zum See hin. Diese Öffnung ist während der Olympiade mit einer zusätzlichen Tribüne zugebaut, die provisorisch mit einem vorgepannten PVC-beschichteten Polyester-Gewebe überdacht wird, das teilweise am Schwimmhallendach aufgehängt ist und allein eine Grundfläche von 2 500 m² überdacht.

Die Zwischenbereiche (Bilder 1 und 5) zwischen den Sportstätten sind mit vielfältigen Netzflächen überdacht, die zwischen die anderen Dächer eingehängt oder unabhängig an Masten aufgehängt oder abgespannt sind.

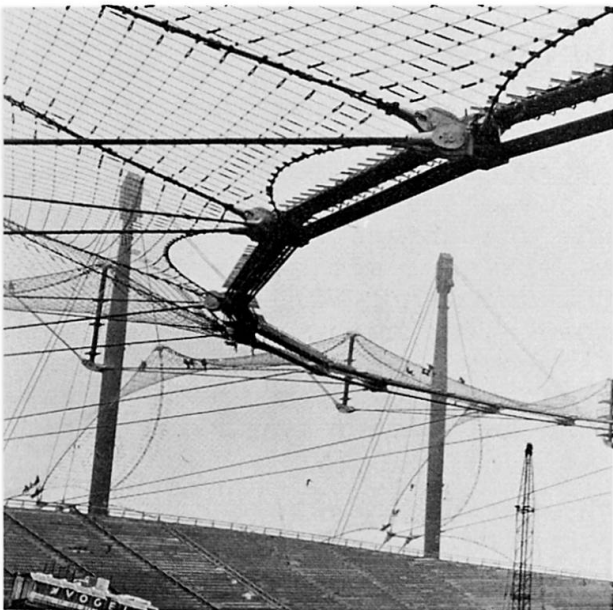


Bild 4: Das Dach über dem Stadion von der Tribüne aus gesehen

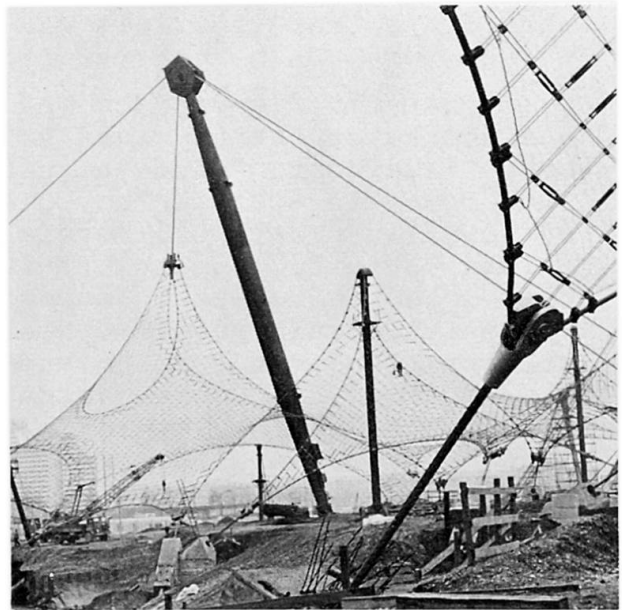


Bild 5: Ausschnitt aus den Zwischenbereichsdächern (ohne Dachhaut)

2. BEURTEILUNG DES OLYMPIADACHS

Die Wettbewerbsidee eines möglichst freizügig gestalteten, alle Sportstätten und die Zwischenbereiche erfassenden Daches, war nur mit einer vorgespannten Seilnetzkonstruktion zu realisieren, da nur sie unter diesen Bedingungen die vollkommene Übereinstimmung zwischen Gestalt und Kraftfluß, der zeitgemäßen Forderung an die Baukunst, ermöglichte. Diese Konstruktionen sind hinsichtlich ihrer vielfältigen Gestaltungsformen unübertroffen.

Durch geschickte Wahl der Verteilung der Vorspannkkräfte in den Seilnetzen läßt sich, wie mit keinem anderen Bausystem, eine solch vollkommene Anpassung der Dachformen an die Idee der Architekten und die Vielfältigkeit des Geländes und der Unterbauten erzielen, wie dies beim Olympiadach möglich und notwendig war.

Auch die beim Olympiadach vom Fernsehen gestellte Forderung nach einer lichtdurchlässigen Dachhaut läßt sich mit vorgespannten, weitmaschigen Seilnetzen, bei denen hinsichtlich des Tragverhaltens in der Dachfläche keine verschattende Masse erforderlich ist, in unübertroffenem Maße erfüllen.

Schwierig ist eine gültige Beurteilung der Wirtschaftlichkeit vorgespannter Seilnetzkonstruktionen. Die Behauptung, daß diese "leichten Flächentragwerke" deshalb, weil ihre oberirdisch sichtbaren Massen gering, also leicht sind, auch unschlagbar wirtschaftlich sind, ist nicht zu halten.

Vorgespannte Seilnetzkonstruktionen können gegenüber anderen Bauweisen vorteilhaft sein, wenn große Spannweiten gefordert werden und gleichzeitig ausreichende Bauhöhen für reichliche Krümmungen der Netzflächen zur Verfügung stehen, und wenn die Flächen so gewählt werden können, daß die Vorspannkkräfte nicht zur Begrenzung der Verformungen unnötig erhöht werden müssen (vgl. Abschn. 4). Ausschlaggebend ist, daß es gelingt, ihre Kräfte auf günstige Weise in einen guten Baugrund abzuleiten. Gerechtfertigt sind vorgespannte Seilnetzkonstruktionen in jedem Fall, wenn bei großen freien Spannweiten wenigstens einer ihrer beiden oben genannten Vorzüge, ihre freie Gestaltbarkeit und ihre mögliche Durchsichtigkeit für das Bauwerk von besonderer Bedeutung ist.

Über das Olympiadach und damit über die Seilnetzkonstruktionen überhaupt gab es wegen dessen hohen Baukosten viele Diskussionen. Diese Kosten sind auf die außergewöhnliche Neuartigkeit der Bauaufgabe zurückzuführen, die ohne jedes Vorbild in kurzer Zeit zu bewältigen war. Die Bereitstellung der Abmessungen jedes einzelnen Bauteils (Zuschnitt) für die Fertigung mit einer Genauigkeit, wie sie sonst im Bauwesen nicht gefordert wird (vgl. Abschn. 5), war das zentrale Problem. Die Abhängigkeiten zwischen diesem Zuschnittsproblem und allen anderen Planungs- und Bauarbeiten für das Dach und die Sportstätten forderten ein völliges Umdenken gegenüber gewohnten Planungsabläufen und bereiteten den Terminplanern größte Schwierigkeiten.

Berücksichtigen sollte man auch, daß die Entwicklungskosten für das Olympiadach einen Abfall technologischen Wissens beinhalten, der allen künftigen Seilkonstruktionen zugute kommt. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs an der Universität Stuttgart haben wir Gelegenheit, die Versuche, die für das Olympiadach durchgeführt wurden, weiter auszuwerten und zu veröffentlichen.

3. ZUR FORMFINDUNG VON VORGESPANNTEN SEILNETZKONSTRUKTIONEN

Die Geometrie der Netzflächen im Vorspannungszustand kann nicht, wie bei anderen Bauweisen, zeichnerisch festgelegt werden, sondern muß erst aus physikalischen Modellen auf experimentellem oder mathematischem Wege entwickelt werden.

Dabei beeinflussen sich die Geometrie, die Größe und die Verteilung der Vorspannkkräfte in jedem Bauteil, die Machart bzw. die Maschengeometrie des Netzes, die Art der Berandung (starrer Rand oder nachgiebige Randseile), die Ausrichtung der Netzseilscharen zum Verlauf der Netzberandungen und die Steifigkeitsverhältnisse aller Bauteile wechselseitig.

Aus diesem Grunde wird es auch nie möglich sein, für die Formfindung allgemeine Regeln aufzustellen. Dies macht die Arbeit mit vorgespannten Seilnetzkonstruktionen so schwierig und zugleich interessant, weil sich hier schöpferische Phantasie entfalten kann, die erst nach langer Betätigung durch Erfahrung unterstützt wird. Es ist nur in ganz einfachen Sonderfällen möglich, etwa bei einer Sattelfläche mit starren Rändern, eine gewünschte Form, die man sich mathematisch formuliert vorgegeben hat, auch tatsächlich im Vorspannzustand exakt zu erreichen.

Von Anfang an gilt es, zuschnittsgerecht zu entwerfen, zu spitze Netzecken, sowie zu flach gespannte Rand- und vor allem Grat- und Kehlseile, zu vermeiden. Ebenso wichtig ist es, sich rechtzeitig Klarheit über die konstruktive Durchbildung und die Fertigung zu verschaffen, da etwa die wirklichen Abmessungen der Knotenpunkte, die möglichen Fertigungslängen der Seile oder ihre Umlenkradien, den Entwurf später grundsätzlich in Frage stellen können.

Für den Entwurf der ersten groben Formen haben sich beim Olympiadach Modelle im Maßstab 1:200 aus Polyester-Gittergewebe für die Netze, Drähten für die Seile und Stäben für die Maste bewährt. Sie sind eine gute Grundlage für die ersten statischen Berechnungen. Mit diesen Rechenergebnissen wurden die Modelle optimiert, bis sie als Grundlage für die Zuschnittsermittlung freigegeben werden konnten.

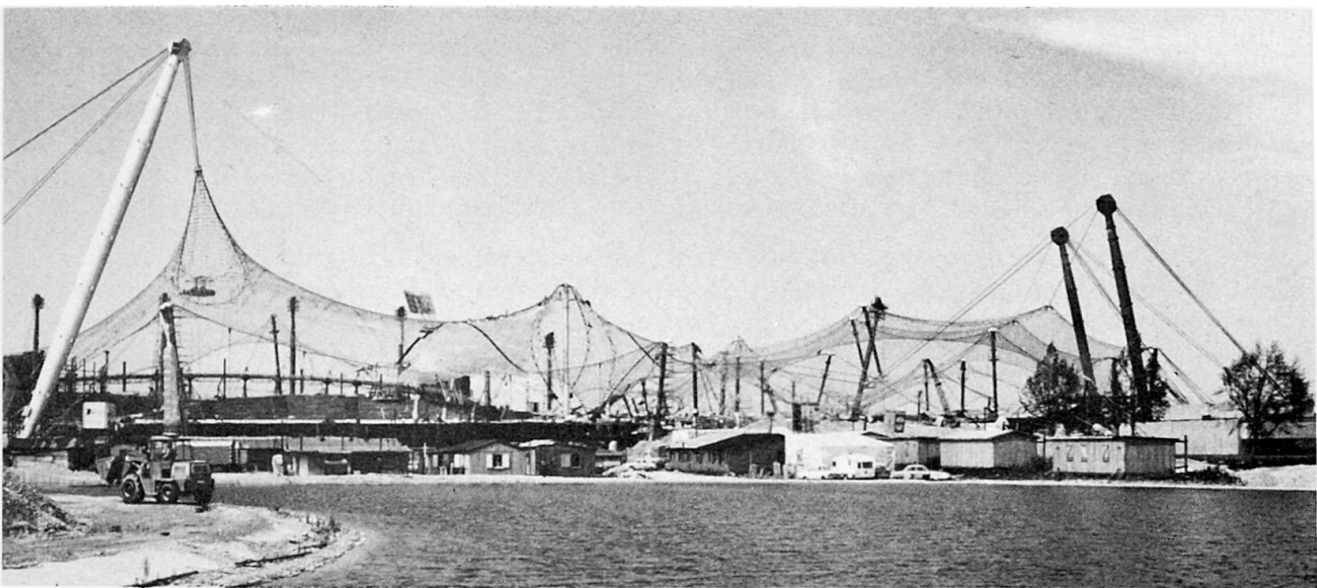


Bild 6: Die Schwimmhalle (links) und die Sporthalle (rechts) ohne Dachhaut

4. ZUR ERFORDERLICHEN GRÖSSE DER VORSPANNKRÄFTE

Während die Verteilung der Vorspannkkräfte die Geometrie und das Tragverhalten einer vorgespannten Seilnetzkonstruktion bestimmt, und es deshalb unabdingbar ist, daß der planmäßige Vorspannzustand am Bau mit großer Genauigkeit realisiert wird (vgl. Abschn.5), ist die absolute Größe der Vorspannkkräfte maßgebend für deren Wirtschaftlichkeit. Die Größe der erforderlichen Vorspannkkräfte wird ausschließlich von den zulässigen Verformungen und den Dauerschwellfestigkeiten der einzelnen Bauteile bestimmt. Dem steht entgegen, daß eine Erhöhung der Vorspannung zur Verminderung von Verformungen, etwa im Vergleich zu einer Vergrößerung der Krümmungen im Netz, wenig wirksam und teuer ist.

Deshalb sollten einem Seilnetzdach immer möglichst große Verformungsmöglichkeiten eingeräumt werden. Dies gilt besonders für die Dachhaut. Sie kann nur in den seltensten Fällen, etwa bei einfachen Sattelflächen, sinnvoll mit dem Seilnetz und dessen Randgliedern zusammenwirkend ausgebildet werden. Bei freier Seilnetzgeometrie ist es stets wirtschaftlicher, eine schub- und biege- weiche Haut den Verformungen des Seilnetzes widerstandslos folgen zu lassen, so daß große Verformungswerte zugelassen werden können.

Bei großen Dächern ist es oft wirtschaftlicher, örtlich begrenzte materielle Schäden unter extremen, während der Lebensdauer des Bauwerks mit geringer Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Lasten, in Kauf zu nehmen, als dagegen die Vorspannkkräfte zu erhöhen. Ebenso kann es sinnvoller sein, die Dauerschwellfestigkeit einzelner Bauteile durch eine Überbemessung zu erhöhen, als die Schwingbreite durch höhere Vorspannung zu vermindern.

Regeln für die erforderliche Größe der Vorspannung gibt es nicht. Die übliche Faustregel, sie so hoch zu wählen, daß unter häufig zu erwartenden Lasten oder gar unter Voll-Lasten keine Seile schlaff werden, führt zu unverträglich hoher Vorspannung. Vielmehr, und das kann hier nur in aller Kürze angedeutet werden, ist eine Verformungsbeschränkung über Vorspannung nur vertretbar, wenn damit diejenigen dehnungslosen Verformungen abgebaut werden, die untragbare Verschiebungen in der Netzfläche auslösen.

Bei der idealen Seilnetzfläche stimmt die Flächengeometrie und die Größe und Verteilung der äußeren Lasten dergestalt überein, daß diese Verschiebungen in der Netzfläche nicht auftreten. Die Größe der Vorspannung spielt dann für die Dimensionierung und damit die Kosten keine Rolle. Diese Forderung ist für die Schneelasten, kaum aber für die Windlasten, erfüllbar. Sie bedeutet darüber hinaus eine Einschränkung bei der Auswahl der Formen der Seilnetzflächen.

Die Stärke der vorgespannten Seilnetzkonstruktionen, ihre freie Gestaltbarkeit, kann also aus wirtschaftlicher Sicht zugleich ihre Schwäche sein, vor allem, wenn wegen einzelner ungünstig gekrümmter Bereiche eines großen zusammenhängenden Daches, dieses insgesamt hoch vorgespannt werden muß. Bei der Sporthalle des Olympiadaches mit ihren Wendeflächen in den Seitenfeldern, aber auch bei der Schwimmhalle, war es unumgänglich, die Verformungen durch hohe Vorspannung zu begrenzen. Aus Erfahrung heraus gilt es, beim Entwurf die Wirtschaftlichkeit, den Nutzwert und die Gestaltung optimal gegeneinander abzuwägen. Das Gelingen hängt wie bei keiner anderen Bauweise von einer verständnisvollen Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur ab.

5. ZUSCHNITTSERMITTLUNG - DAS PROBLEM DER MASSGENAUIGKEIT, STATISCHE BERECHNUNG

Unter Zuschnittsermittlung versteht man die Festlegung der Abmessungen und Materialkennwerte jedes einzelnen Bauteiles der tragenden Konstruktion als Vorgabe für die Fertigung einschließlich der Fertigungsangaben, wie Vorreckkräfte für die Seile, Ablängspannung, -temperatur usw. Dabei müssen Anforderungen an die Maßgenauigkeit beim Zuschnitt und bei der Fertigung gestellt werden, wie dies von keiner anderen Bauweise her bekannt ist. Dies ist das zentrale Problem vorgespannter Seilnetzkonstruktionen, das beim Olympiadach noch alle anderen Überlegungen überschattete und dessen Lösung wir heute sehr viel näher gekommen sind:

Der Vorspannzustand bestimmt die Geometrie und das Tragverhalten der gesamten Konstruktion. Er muß deshalb mit ausreichender Genauigkeit in jedem einzelnen Bauteil am Bau realisiert werden. Beim Olympiadach versuchten wir, im Mittel die Sollspannungen auf $\pm 15\%$ genau zu erreichen, wobei die Vorspannung bei den Seilen etwa 50% der zulässigen Spannungen aufbraucht, die mit zweifacher Sicherheit gegen effektiven Bruch festgelegt waren. Voraussetzung für die Baubarkeit einer Millionen Einzelmaße enthaltenden Konstruktion ist die standardisierte Vorfertigung. Das vorgefertigte Dach muß, nachdem es zwischen seinen vorab hergestellten Festpunkten eingehängt ist, seinen planmäßigen Vorspannzustand annehmen. Dazu muß es vor der Montage im spannungslosen Zustand abgewickelt, exakt um das Maß seiner Dehnungen infolge Vorspannung kleiner hergestellt werden als der Abstand zwischen den Festpunkten, abzüglich deren Nachgiebigkeit unter Vorspannung. Darüber hinaus muß die innere Verträglichkeit dergestalt stimmen, daß jedes Bauteil seinen planmäßigen Spannungszustand annimmt, da selbst Einzelabweichungen zu unkontrollierbaren Umlagerungen führen. Jedes zugbeanspruchte Bauteil, hier also jedes Seil, muß um das Maß seiner Dehnung verkürzt, jedes druckbeanspruchte Bauteil, hier also jeder Mast und Druckstab, um das Maß seiner Verkürzung infolge Vorspannung verlängert vorgefertigt werden. Dabei kommt es nicht nur auf die Gesamtlängen von Verankerung zu Verankerung an, sondern es ist jedes innere Teilmaß, etwa von Netzknoten zu Netzknoten, ebenso bedeutsam. Systematische Additionsfehler sind besonders gefährlich. Bei vorgespannten Seilnetzkonstruktionen sind Längenfehler identisch mit Dehnungsfehlern, d.h. mit Kraftfehlern! Bei Balkentragwerken verursachen erst etwa 50-fache Längenfehler denselben Spannungsfehler wie bei vorgespannten Seilen.

Beispielsweise dehnt sich ein 50 m langes Seil unter einer gebräuchlichen Vorspannung um 10 cm. Ist es um $0,1\%$, also 5 cm, zu lang oder zu kurz, sind seine Spannungen und damit seine Umlenkräfte auf die Seile der Querrichtung um 50% falsch, wobei natürlich durch innere, von den Krümmungsverhältnissen abhängige Umlagerungen ein Ausgleich stattfindet. Wenig gekrümmte und kurze Seile sind dabei besonders gefährdet. Handelt es sich bei diesem Seil um ein Netzseil und wird, wie beim Olympiadach, dessen Länge aus der Addition einzelner Maschenweiten von 750 mm ermittelt (vgl. Abschn. 6), so wird der oben angenommene 5 cm-Fehler bereits erreicht, wenn jede Masche entweder von der Längenvorgabe her (Zuschnitt) und/oder bei der Fertigung systematisch um $0,75$ mm zu lang oder zu kurz vorgegeben oder gefertigt wird. Handelt es sich gar um ein Randseil, so wirkt sich ein Längenfehler als vielfacher Stichfehler aus, der sich ins Netz hinein fortpflanzt und für die Netzseile einen Längenfehler darstellt. Absolute Genauigkeit ist natür-

lich nicht erreichbar. Je höher die Ansprüche jedoch geschraubt werden, desto weniger kostspielige Korrekturen sind später am Bau zu erwarten. Spannungskorrekturen im Netz sind sehr zeitraubend, auch wenn, wie beim Olympiadach mit Spanschlössern an jedem Netzseil, die konstruktiven Maßnahmen dazu vorhanden sind, da jede Einzelkorrektur unplanmäßige Umlagerungen nach sich zieht.

Daraus wird verständlich, daß manuell hergestellte Zuschnittmodelle aus Draht, wie sie bisher üblich waren und wie sie zunächst auch für das Olympiadach im Maßstab 1:125 gebaut wurden, zu ungenau sein müssen. Wir haben deshalb einen rein rechnerischen Weg für die Zuschnittsermittlung gesucht. Darüber berichten J. Argyris und K. Linkwitz mit Mitarbeitern auf diesem Kongreß, ebenso wie über die Zuschnittspläne, die maßstäbliche Abwicklungen der Systemlinien aller Bauteile sind. In den Zuschnittswerkplänen (vgl. den Bericht von H. Egger) werden die Systemlinien materialisiert, d.h. die wahren Abmessungen aller Seile, Beschlüge, Knotenpunkte, Maste etc. so aufgezeichnet, daß daraus die endgültigen Abmessungen aller dieser Bauteile unter Berücksichtigung der Material- und Temperatureinflüsse für die wahren Spannungsverhältnisse unter Vorspannung abgenommen werden können.

Mit den nun vorhandenen rechnerischen Verfahren ist ein wichtiger Teil des Genauigkeitsproblems gelöst, und die vorgespannten Seilnetzkonstruktionen haben damit das Experimentierstadium überwunden. Es bleiben dem Ingenieur bei der Zuschnittsermittlung nach wie vor eine Vielzahl von Problemen, die im Planungsablauf ungewohnte und schwierige Abhängigkeiten zur Folge haben:

Für die Berechnung muß eine möglichst gute Geometrie und ein Vorspannzustand vorgegeben werden. Dazu müssen, bevor die endgültige Geometrie und damit die wirklichen Kräfte bekannt sind, bereits die Abmessungen und Materialkennwerte aller Bauteile bereitgestellt werden, da das Rechenmodell dem endgültigen Bauwerk geometrisch und elastisch exakt entsprechen muß. Dies erfordert eine frühzeitige und detaillierte Kenntnis der Seilführungen, vor allem an den Knotenpunkten, da sonst bei der endgültigen konstruktiven Durchbildung die in die Berechnung eingegebenen Systemlinien verschoben werden müssen. Manches Detail muß verworfen werden, obwohl es alle statischen und konstruktiven Bedingungen ideal erfüllt, weil es nicht zuschnittsgerecht ist. Dabei müssen die Seilkennwerte meist schon in die Berechnungen eingehen, bevor sie an Proben aus den endgültigen Lieferungen bestätigt werden können.

Ferner verlangt die Berechnung eine fortlaufende Betreuung, eine Beurteilung und Anpassung der Zwischenergebnisse, da es wohl keine Bauweise gibt, bei der es zur Berechnung einer solch intimen Kenntnis aller statischen, konstruktiven und fertigungstechnischen Zusammenhänge bedarf.

Nachdem es wegen des Zuschnitts unabdingbar ist, den Vorspannzustand großer Seilnetzkonstruktionen exakt zu berechnen und dies mit der Methode der finiten Elemente elektronisch möglich ist, wird man wenige kennzeichnende Schnee- und Windlastfälle auch auf diesem Wege berechnen, obwohl hierfür wegen der hohen inneren Tragreserven und ohnehin groben Lastannahmen einfache Rechenverfahren ausreichend genau sind. Je komplizierter unsere Tragwerke werden, desto wichtiger ist es, möglichst einfache und transparente Rechenverfahren für den Entwurf, die konstruktive Durchbildung und die Begleitung der genauen elektronischen Berechnungen zu entwickeln

und erst die letzte Verfeinerung dem Computer zu überlassen. Leider reicht der Platz nicht für eine Darstellung unserer am Olympiadach entwickelten Verfahren.

Nachdem es heute noch nicht möglich und auch kein Weg sichtbar ist, über die Ermittlung der Eigenfrequenzen hinaus das aerodynamische Verhalten solcher Tragwerke in natürlichem Wind zu berechnen, haben wir uns beim Olympiadach mit verschiedenen tastenden Untersuchungen, im Windkanal an starren und verschieblichen Modellen, an einem Probedach und mit Teilberechnungen begnügen müssen.

Sicher ist, daß solche Systeme aerodynamisch schwer anzufachen sind, und daß sie gegenüber Stabstahlkonstruktionen eine hohe innere Dämpfung haben, die, wie Versuche zeigten, durch die Acrylglas-Dachhaut noch erheblich verbessert wird. Bei der konstruktiven Durchbildung und Bemessung wurde auf die Dauerfestigkeit aller Bauteile besondere Aufmerksamkeit verwandt.

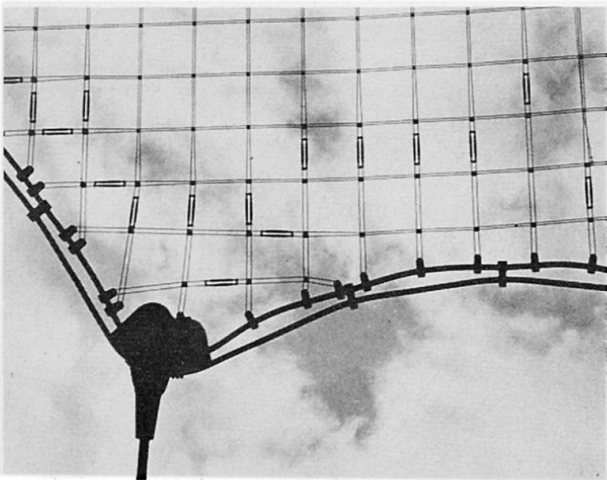


Bild 7: Netzpartie mit Spannschlössern, Randseilklemmen, und Randseil aus 2 gekoppelten Einzelseilen



Bild 8: Netzpartie mit über einem aufgehängten Knotenpunkt umgelenkten Randseilen

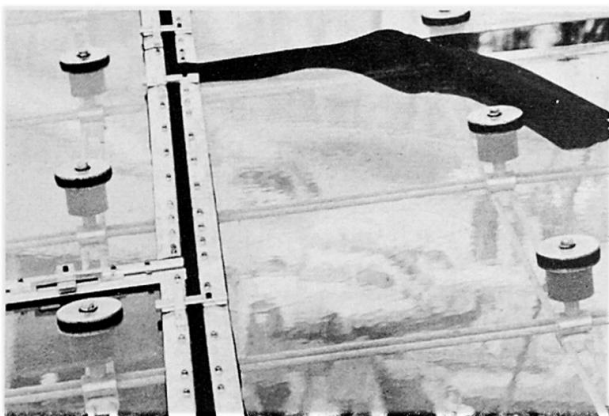


Bild 9: Acrylglas-Dachhaut mit Fugenausbildung und Pufferauflagerung auf den Netzknoten

6. ZUR KONSTRUKTIVEN DURCHBILDUNG

Aus Platzgründen können hier nur die wichtigsten Merkmale der Konstruktion hervorgehoben und muß auf einen Bericht über die große Zahl der Versuche an Seilen, ihren Beschlägen und Verankerungen verzichtet werden.

Das Seilnetz (Bilder 5, 7 und 8) hat viereckige Maschen mit, unter einer konstanten und definierten Vorspannung, gleichen Knotenabständen von 750 mm. Dieses Netz läßt sich mit seinen drehbaren Knoten im eben ausgelegten Zustand spannungslos wie ein Scheurengitter verschieben (Bild 10). Es ist für Seilnetzkonstruktionen universell verwendbar, weil es sich jeder beliebig gekrümmten Fläche spannungslos durch veränderliche Winkelverschiebungen anpassen kann. Das Verlegeschema eines solchen Netzes auf einer gekrümmten Fläche ist frei wählbar. Bei komplizierten Flächen braucht es zur Wahl des besten Verlegeschemas viel Geschick, da davon die Flächenspannungen im Vorspannzustand, das Tragverhalten und die konstruktive Durchbildung stark abhängig sind.

Dieses Netz erfüllt in idealer Weise die Voraussetzungen für die Vorfertigung und damit die Baubarkeit komplizierter Seilnetzkonstruktionen: Im Netzzinnern sind, unabhängig von den Krümmungen der Fläche, alle Maße, die Maschenweiten, gleich. Dies erleichtert die Längenermittlung der Netzseile beim Zuschnitt und bei der Fertigung und garantiert ein Minimum an Fehlerquellen.

Für das Seilnetz des Olympiadaches wurden rund 400 km Seile benötigt. Diese Seile sollen einerseits für die Montage biegsam und daher aus möglichst dünnen Drähten geflochten, andererseits wegen der Korrosionsanfälligkeit möglichst dickdrähtig sein. Gewählt wurden 19-drähtige Litzen aus stark verzinkten Drähten mit 2,3 und 3,4 mm Durchmesser mit einer Schlaglänge von 10 x Durchmesser. Damit erhält das Netz, bei 2-facher Sicherheit gegen Bruch, in den Normalbereichen eine zulässige Tragkraft von 15 Mp/m und in den verstärkten Bereichen von 30 Mp/m.

Auf je zwei Netzseile werden nach dem Vorrecken unter definierter Vorspannung in einem automatisierten Vorgang Aluminiumklemmen mit zentrischen Löchern in genauen Abständen von 750 mm aufgepreßt. Dadurch wird eine gleichbleibende Genauigkeit der Maschenweite garantiert und der Zusammenbau des Netzes sehr einfach: Nach dem Ablängen der Seile können die Klemmen beider Seilscharen mit nur einer Schraube zu drehbaren Netzknoten verbunden werden, ohne daß noch Maße zu nehmen sind (Bild 9 des Vorberichts III a).

Die Längenkorrektur der Netzseile ist durch Spannschlösser am Randseilanschluß möglich. Die Netzseile werden mit den Randseilen durch Randseilklemmen verbunden (Bilder 5 und 7).

Die Randseile in verschlossener Bauart mit einem Durchmesser von 81 mm haben eine zulässige Tragkraft von 300 Mp bei 2-facher Sicherheit gegen Bruch, nach Berücksichtigung aller tragkraftmindernden, durch statische und dynamische Versuche nachgewiesenen Einflüsse, wie Umlenkungen an Sätteln ($r = 80$ cm), Querpressung durch Klemmen und Endverankerungen.

Sind die Rand-, Grat- oder Kehlseilkräfte größer als 300 Mp, so werden mehrere Seile gekoppelt (Bild 7). Damit ergibt sich eine wirtschaftliche Produktionsmenge gleicher Randseile und es können die Randseilklemmen, Führungsnuten und Ankerköpfe vereinheitlicht werden.

Mit äußerster Sorgfalt wurde auf eine genaue Einhaltung der Zuschnittsmaße bei der Fertigung geachtet und dabei alle Seile vorgereckt und unter definierter Vorspannung bei kontrollierter Temperatur abgelängt und mit Markierungen für die Klemmen versehen.

An den Knotenpunkten werden die Randseile entweder umgelenkt und weitergeführt (Bilder 7, 8 u.a.), oder verankert (Bilder 4, 10 u.a.). Die Knotenpunkte sind aus Gußstahl und müssen fast alle der jeweiligen Geometrie folgend angefertigt werden. Gußstahl konnte gewählt werden und war gegenüber Schweißkonstruktionen wirtschaftlich, weil heute statt der teuren Holzformen leicht bearbeitbare Schaumstoffmodelle verwendet werden können. Der schwerste Knotenpunkt wiegt ungefähr 27 t.

Die nicht direkt mit dem Netz verbundenen Abspann- und Aufhängeseile sollen eine große Dehnsteifigkeit haben, da von ihr die Verformungen des Daches unter Wind und Schnee sehr stark abhängen können. Diese Forderung erfüllen Litzenbündel aus parallel verlegten Litzen mit großer Schlaglänge. Ihre Seilköpfe sind mit der neuartigen HiAm-Vergußmasse vergossen (vgl. den Einführungsbericht IIIa), so daß sie bei einer Nennfestigkeit der Litzendrähte von 160 kp/mm^2 mit zulässigen Spannungen von 75 kp/mm^2 bemessen werden konnten. Die einzelnen Litzenbündel sind für Kräfte bis $1\ 150 \text{ Mp}$ bemessen. Bei größeren Kräften - das große Randkabel des Stadions hat $5\ 000 \text{ Mp}$ aufzunehmen - werden mehrere Bündel gekoppelt (Bild 4).

Die Maste mit bis zu 80 m Länge und Lasten bis $5\ 000 \text{ Mp}$ sind zylindrische Rohre mit Durchmessern bis 3,5 m und 7 cm Wanddicke. Die Hauptmaste sind oben und unten konisch. Ihre Mastköpfe sind geschweißte Scheibenkonstruktionen (Bilder 4-6). Die Maste stehen auf allseitig beweglichen Gummitopflagern und einfachen Stahlbetonfundamenten. Für die großen Bewegungen während der Montage sind unter den Gummitopflagern Kugelkalottenlager angeordnet, die nach dem Spannen einbetoniert werden.

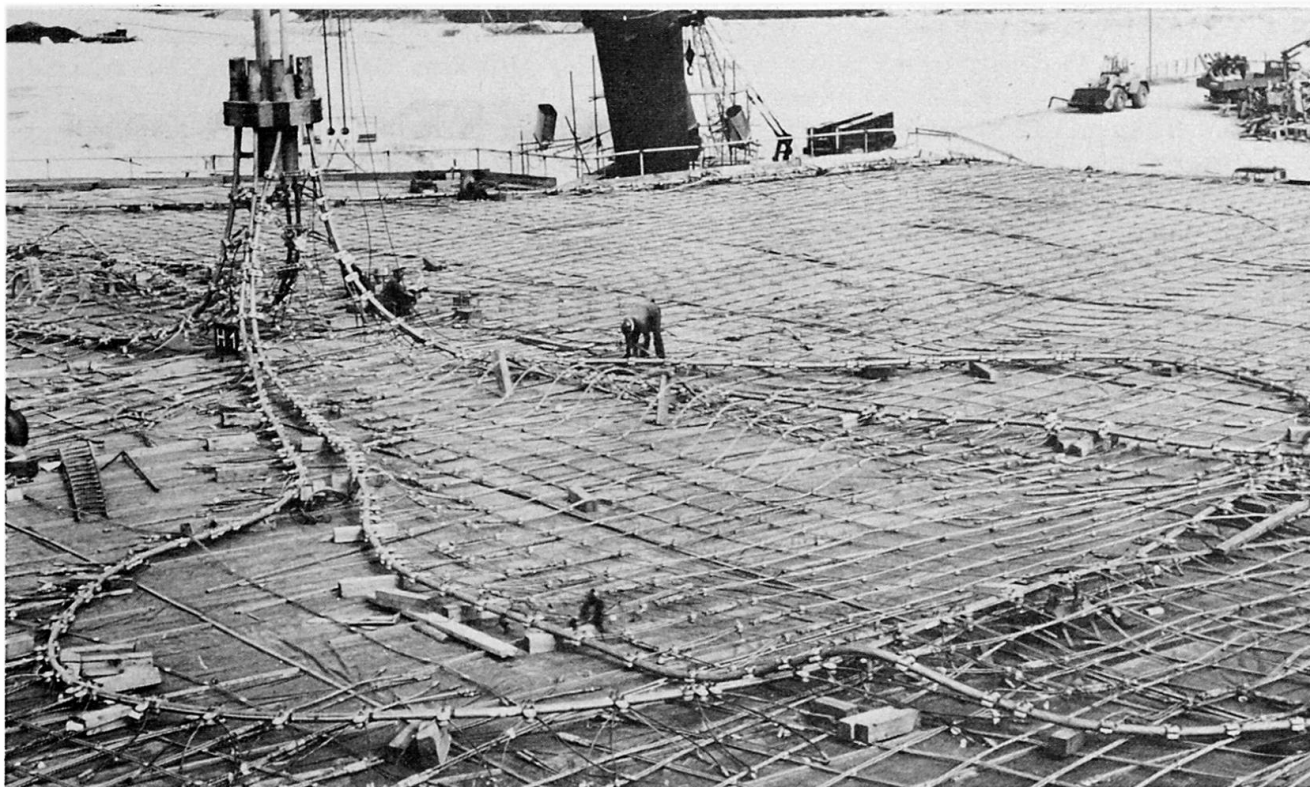


Bild 10: Zusammenbau der Netzkonstruktion am Boden, Schwimmhalle

Für die Zugfundamente wurden entsprechend den örtlichen Verhältnissen 3 Arten verwendet: T-förmige Schlitzwandfundamente, die nach dem Prinzip eines Zelthärings wirken, Schwergewichtsfundamente, die so in Scheiben und Platten aufgelöst sind, daß bei möglichst geringen Betonmassen eine große Erdauflast herangezogen wird, und Bodenankerfundamente.

Das ganze Dach ist mit einer Dachhaut aus 4 mm dicken Acrylglasplatten eingedeckt. Die Platten werden in serienmäßiger Größe von ca. 2,90 x 2,90 m auf dem Seilnetz verlegt. Die Befestigung erfolgt punktförmig im Bereich der Seilnetzknöten. Die Fugen zwischen den Platten werden mit durchgehenden, auf den Plattenrändern aufgeklebten Neoprenprofilen geschlossen (Bild 9). Die Ausgangswinkel der Seilnetzmaschen verändern sich unter Belastung und Temperaturänderungen um bis zu 6°. Die Platten können diese Bewegungen nicht aufnehmen. Deshalb werden zwischen Seilnetzknöten und Dachhaut Neoprenpuffer eingebaut, die eine "schwimmende" Auflagerung der Platten bewirken. Da in den Fugen auch Längsbewegungen auftreten, ist das Fugenband entsprechend breit und dünn, so daß eine Faltenbildung möglich ist.

7. ZUR MONTAGE

Die Beschaffung aller Bauteile, den Zusammenbau am Boden, die Montage und das Spannen des Dachs übernahm eine Arbeitsgemeinschaft aus 6 großen Stahlbaufirmen.

Bei jedem Dach wurden nach Fertigstellung der Fundamente zunächst die großen Maste montiert und die gesamte Netzkonstruktion einschließlich der Randseile, Litzenbündel und kleinen Maste am Boden zusammengebaut (Bild 10). Dann wurden alle Knötenpunkte über ihre Aufhänge- und Abspannseile in ihre richtige Lage gezogen oder auf die sie direkt unterstützenden Maste aufgesetzt. Dabei sollten alle Bewegungen möglichst gleichmäßig vom geometrischen Mittelpunkt des Daches weg erfolgen. Nachdem alle Abspannseile ihre planmäßige Lage in den Fundamenten erreicht hatten, wurden die Geometrie aller Knötenpunkte und kennzeichnender Netzpunkte, sowie die Spannungen in den Netzseilen, Abspannseilen und Masten, gemessen. Bei größeren Spannungsfehlern wurden Seillängenkorrekturen an den Spanschlössern der Netzseile und an den Verankerungen der Abspannseile vorgenommen. In der Regel wurden Spannungsfehler von $\pm 15\%$ dann hingenommen, wenn durch zusätzliche statische Nachweise gezeigt werden konnte, daß dies hinsichtlich der Standsicherheit tragbar ist.

Insgesamt kann gesagt werden, daß sich die große Mühe, die auf einen genauen Zuschnitt und eine genaue Fertigung verwendet wurde, gelohnt hat, da nur sehr wenig Korrekturmaßnahmen erforderlich waren, bis das Dach seinen planmäßigen Zustand erreicht hatte.

ZUSAMMENFASSUNG

Für die Olympiade in München wurde eine vielfältig gestaltete vorgespannte Seilnetzkonstruktion mit einer Fläche von 75 000 m² gebaut. Ihr Tragsystem wird erläutert und beurteilt. Es folgen einige Hinweise zur Formfindung, erforderlichen Größe der Vorspannkkräfte, zur Zuschnittsermittlung und dem damit vor allem verbundenen Problem der Maßgenauigkeit dieser Konstruktionen. Abschließend werden die wichtigsten konstruktiven Details und die Montage beschrieben.