Baustatik-Baupraxis 10, © 2008, Universität Karlsruhe (TH)

Raumfachwerke für große Spannweiten

Klaus Knebel, Michael Wahl, Martin Maloblocki

MERO-TSK International Gmbh & Co.KG, Würzburg

Zusammenfassung:

Raumfachwerke aus Stahl stellen seit vielen Jahrzehnten eine wirtschaftliche Bauweise dar. Die Entwicklung der MERO Stab-Knoten Bauweise vor über 60 Jahren hat dem Raumfachwerk eine beispielhafte weltweite Entwicklung gegeben. In der modernen Architektur hat das klassische Raumfachwerk jedoch für einige Zeit an Bedeutung verloren. Als Folge der weltweiten Belebung des Bausektors hat auch die Nachfrage an das klassische Raumfachwerk wieder stark zugenommen.

1 GRUNDLAGEN DER RAUMFACHWERKE

1.1 Historie

Der Erfinder der Mero Bauweise ist Dr. Ing. Max Mengeringhausen (1903-1988). Er war Anfang der 20er Jahre Schüler von Professor Föppl in Berlin. Aus dieser Zeit stammte auch die erste praktische Umsetzung: Aus Brotkugeln und Streichhölzern formte Mengeringhausen das kleinste räumliche Fachwerk aus sechs Stäben und vier Knoten (Tetraeder). Mengeringhausen war Zeit seines Lebens fasziniert von der Bio-Logik bzw. Bionik, der Wissenschaft von den Gesetzen des Lebens. Sein Arbeitszimmer wies eine große Sammlung von biologischen Strukturen auf, von denen er Anregungen für seine Entwicklung erhielt. So stand die Natur auch Pate bei der Entwicklung der Mero-Bauweise, deren geometrischen Gestaltung sich aus den Strukturen der Kristalle bzw. den Gesetzmäßigkeiten, die die Kristallformen bestimmen, ableitet und in den von Plato beschriebenen Polyedern wiederfinden. Diese begründen auch die Planung und serielle Fertigung regelmäßiger Raumfachwerke mit wenigen Standard-Elementen. Der Name der Firma war schnell gefunden: Aus **ME**engeringhausens **RO**hrbauweise wurde ganz einfach **MERO**. Seit nunmehr über 60 Jahren steht dieser Name weltweit für Raumfachwerke in vielfältiger Form und Ausführung. Eine ausführliche Biographie von Mengeringhausen ist in [6] zu finden. Max Mengeringhausen selbst hat zwei Bücher über seine Raumfachwerke verfasst [7] und [8].

Abbildung 1: Dr.Ing.Max Mengeringhausen

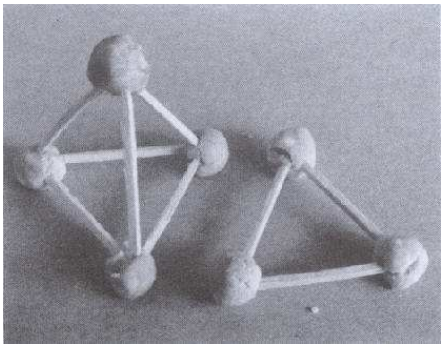

Abbildung 2: Modell aus Brotkugeln und Streichhölzern

1.2 Die MERO Bauweise

In der MERO-Bauart werden ebene oder räumliche Stabtragwerke hergestellt. Für die MERO-Bauart ist kennzeichnend, daß Rohrstäbe durch eine besondere Knoten- und Stabanschlußkontruktion miteinander verbunden werden. Die Stabwerksknoten sind kugelförmi-

Abbildung 3: Der erste Mero Knoten

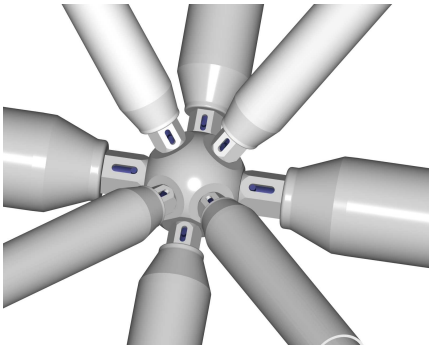

Abbildung 4: Der heutige Mero Knoten

ge, mit eben gefrästen Flächen versehene Knotenstücke, in die Anschlußgewinde geschnitten sind. In diese werden die an den Stabenden angebrachten Bolzen eingedreht. An die Enden der Rohre sind (kegelstumpfförmige) Kegelstücke angeschweißt. In dem an das Stabende anschließenden Kegelboden befindet sich in Stablängsrichtung eine Bohrung. Durch diese Bohrung ist ein Bolzen gesteckt, dessen Schaft außen von der Schlüsselmuffe umgeben ist. Bolzenschaft und Schlüsselmuffe sind durch einen Kerbstift verbunden, so daß durch Drehen der Schlüsselmuffe der Bolzen in das Knotenstück geschraubt werden kann. Diese Anschlußkonstruktion der Stäbe kann Normalkraft, Biegemoment und Querkräfte übertragen. Eine planmäßige Torsion in den Stäben kann ohne zusätzliche Maßnahmen nicht übertragen werden. *Zugkräfte* werden vom Kegelboden über Kontakt in den Bolzenkopf und vom Bolzen über das Gewinde in das Knotenstück übertragen. *Druckkräfte* werden von der Kegelstirnflä-

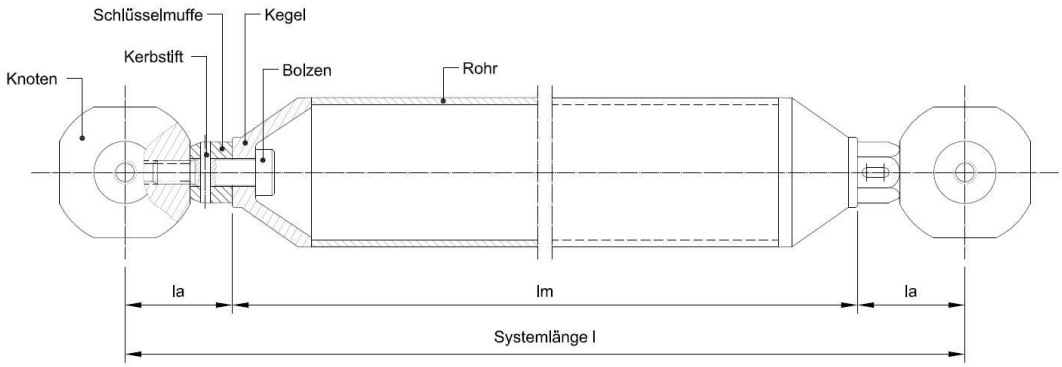

Abbildung 5: Das MERO KK System

che über Kontakt in die Schlüsselmuffe und von dieser über Kontakt mit der eben gefräßten Knotenfläche in den Knoten übertragen.

Biegemomente im Anschluss werden

- durch ein Kräftepaar aus Bolzen und Schlüsselmuffedruckkraft, oder
- durch vorgenanntes Kräftepaar und über Bolzenbiegung oder
- durch die außermittig gedrückte Schlüsselmuffe und Bolzenbiegung

übertragen.

Querkräfte im Anschluss werden

- durch Reibung der Schlüsselmuffe an der Kegelstirnfläche oder
- durch Reibung und den Bolzen oder
- durch den Bolzen alleine

übertragen.

1.3 Bauteile und Materialien

Die *Rohre* bestehen aus Baustahl S235 und S355. In Sonderfällen können auch Stäbe aus Aluminium, Edelstahl, Holz oder CFK Material hergestellt werden. Die Stabdurchmesser der Standardstäbe reicht von d=42.4 mm bis d=219 mm, für größere Kräfte auch bis d=355 mm. Die Länge der Stäbe ist frei wählbar und liegt i.A. zwischen 1.5 und 5 m.

Die *Kegel* bestehen aus Baustahl S355J2, in der Regel als Schmiedeteile oder gedreht. Der Anschluß von Kegel an Stab erfolgt bei Stäben bis zu einem Durchmesser von d=127 mm mittels Laserschweißung. Bei größeren Durchmessern werden die Kegel mit MAG angeschweißt.

Die *Muffen* bestehen aus Material C35 bzw. Automatenstahl 9SMn28K. Die Mindestdruckfestigkeit nach Zulassung [1] beträg 500 MPa. Die normalen Muffen sind sechseckig. Es gibt

aber auch Sondermuffen in runder Ausführung. Die Bezeichnung einer Muffe ist z.B. SM 30/22. Die erste Zahl gibt die Schlüsselweite an, die zweite Zahl den Innenlochdurchmesser.

Die *Stifte* (Kerbstift) verbinden die Muffen mit dem Bolzen, Material ist Edelstahl 1.4305. Die Stifte übertragen die Drehbewegung der Muffe auf den Bolzen.

Eingesetzt werden *Bolzen* der Güte 8.8 und 10.9 mit Durchmessern von M12 bis M90. Die Bolzen werden speziell für die MERO Raumfachwerke hergestellt und unterliegen besonderen Qualitätsanforderungen.

1.4 Lasten

Die Belastung muß im Sinne der Norm vorwiegend ruhend sein. Dymanisch beanspuchte Konstruktionen benötigen eine besondere Sicherung der Stab-Knotenverbindung und sind nicht über die Zulassung erfasst. Die Lasten sind direkt in die Knoten einzuleiten. Dacheindeckungen werden mittels Pfetten an die Obergurtknoten angeschlossen, ebenso eventuelle untergehängte Decken oder sonstige Einbauten. Werden Lasten ausnahmsweise am Stab eingeleitet, so sind diese besonders beim Nachweis zu berücksichtigen (Biegung und Querkraft am Anschluss).

1.5 Geometrie, Berechnung und Bemessung

Die Berechnung eines MERO-Raumfachwerkes erfolgt mit den üblichen Mitteln der Baustatik für räumliche Tragwerke mit gelenkigen Knotenpunkten vorzugsweise mit einem räumlichen Stabwerksprogramm. Die Bemessung der Knoten und Stäbe ist in der MERO Zulassung [1] geregelt welche auf der DIN 18800 basiert. Einzelheiten zur Anschlussbemessung sind in [3] und [4] zu finden.

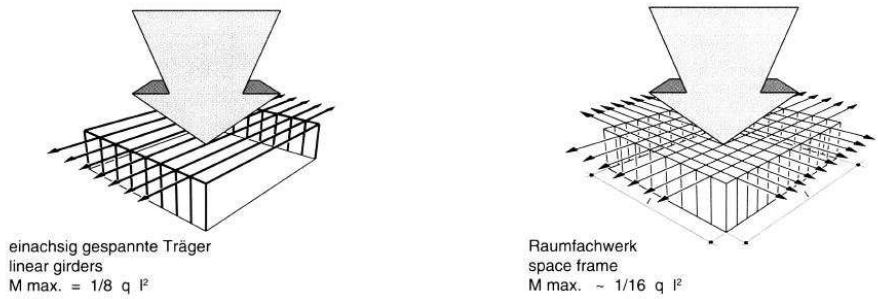

Abbildung 6: Tragweise eines Raumfachwerks

Raumfachwerke können bei entsprechender Lagerung eine 2-achsige Lastabtragung aktivieren. Dies reduziert gegenüber einem ebenen Tragwerk deutlich die Verformungen und die Kräfte in den Querschnitten wodurch ein leichtes und damit wirtschaftliches System entsteht.

In der Planungsphase erfolgt die Festlegung des optimalen Systemrasters anhand der Spannweiten und der späteren Belastung. Als grober Anhaltswert gilt für eine ebene Platte mit einer Auflast von etwa 1.0 kPa

Spannweite : Bauhöhe $\approx 15 \quad \Rightarrow \quad$ Bauhöhe = $\frac{\text{Spannweite}}{15}$

Aus der so festgelegten Bauhöhe (Abstand Obergurt Untergurt) wird dann das Rastermaß bestimmt (Bild 7) und damit die Länge der Elemente. Die Beziehung zwischen der Bauhöhe h und dem Rastermaß a sollte im Bereich $0.5a \leq h < a$ liegen. Die Stablängen sollten 5-6 m nicht überschreiten. Bis zu Spannweiten von ca. 80 m sind zweilagige Konstruktionen machbar. Bei größeren Spanweiten oder höheren Lasten sind auch 3-lagige Systeme wirtschaftlich realisierbar.

Spannweite span in m	Raster = a grid in m	Lagen No of layers	Bauhöhe = h depth of construction in m
- 15,0	2,0 - 3,0	2	1,0 - 1,5
15,0 - 27,5	2,4 - 3,0	2	1,5 - 2,1
27,5 - 36,0	2,4 - 3,6	2	2,1 - 3,0
36,0 - 50,0	3,0 - 4,0	2	2,5 - 4,0
50,0 - 80,0	3.6 - 5,0	2	3,0 - 5,0
80,0 - 150,0	4,0 - 6,0	3	4,2 - 10,0

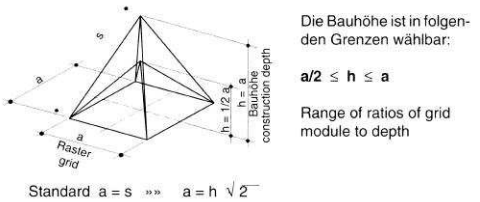

Abbildung 7: Planungskriterien für ebene Raumfachwerke [2]

Neben den klassischen ebenen Bauformen (Platte) sind auch einfach gekrümmte (Tonnen) oder doppelt gekrümmte (Kuppeln) Strukturen sowei Freiformflächen problemlos machbar [9].

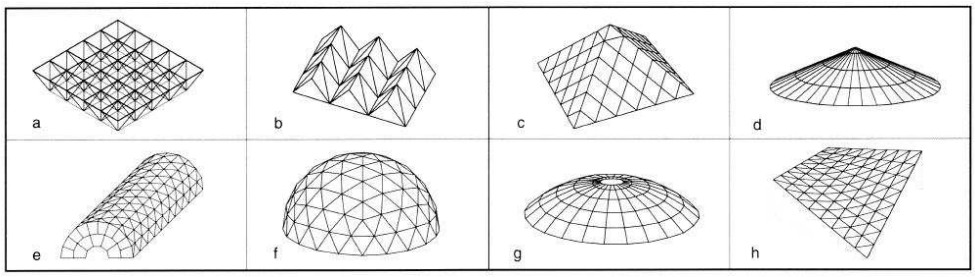

Abbildung 8: Mögliche Bauformen: Ebene, gefaltet, einfach oder doppelt gekrümmt

2 AUSGEFÜHRTE UND IM BAU BEFINDLICHE PROJEKTE

2.1 Globe Arena – Stockholm, Schweden

Die Globe Arena im Zentrum des Stadtteils Hovet wurde als Mehrzweckhalle für internationale Veranstaltungen konzipiert. Das Design der Kuppel realisiert die Idee des Architekten Berg aus Stockholm, die Arenaatmosphäre eines antiken Amphitheaters einzufangen. Die runde Form mit ihren steilen Rängen reduziert den Abstand zum Spektakel und schafft so

Abbildung 9: Globe Arena d=110m

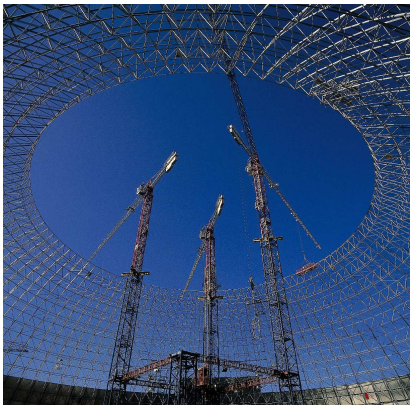

Abbildung 10: Bauzustand

einen direkten Kontakt zu den Zuschauern. Je nach Veranstaltung stehen 5.000 - 16.000 Sitzplätze zur Verfügung. Bei vergleichbarer Oberfläche besitzt sie das größte Volumen und schafft durch die optimale Temperaturverteilung bezogen auf die Sportler- und Zuschauerebene eine angenehme Atmosphäre. Eine runde Sache, für die MERO 1989 den Europäischen Stahlbaupreis erhielt [5]. Die elementierte MERO-Bauweise und die EDV-unterstützte Planung ermöglichten eine direkte Umsetzung in die Fertigung und garantierten so die Einhaltung des Fertigstellungstermins Ende Dezember 1987. Um die Höhe von 85 m und einen Durchmesser von 110 m zu erreichen führte die Geometrieoptimierung zu einer Kuppel mit 96 Meridiane und 19 horizontalen Ringen. Auf diese Weise entstand ein weitmaschiges, zweilagiges Raumfachwerk mit Feldern bis zu 3,60 x 4,40 m und einer Bauhöhe von max. 2,10 m. Statisch wurde zudem eine Zusatzbelastung von 200 t berücksichtigt für eine Serviceplattform von 70 x 45 m, die von 24 Knotenpunkten im oberen Bereich der Kuppel abgehängt wurde. 4 große Anzeigetafeln mit 18 t Gewicht und über 200 Scheinwerfer gehören zur ständigen Installation dieser Plattform. Als Eindeckung wurden 3.693 Alucopan-Sandwichpaneelen montiert. Um der Forderung nach Dampfdichtigkeit zu genügen, wurde eigens für dieses Projekt ein Abdichtungssystem entwickelt.

2.2 Stadiondach – Al Ain, VAE

Als Austragungsort zahlreicher sportlicher Großereignisse liegt das Sheikh Khalifa Stadion nahe des Stadtzentrums der Oasenstadt Al Ain. Anlässlich der FIFA Junioren-Weltmeisterschaft wurde das Stadion um eine VIP-Haupttribüne erweitert. Das neue Tribünenbauwerk mit 3.500 Sitzplätzen besteht aus drei Stockwerkebenen und weiteren Betriebs- und Lagerbreichen im Kellergeschoss. Überdacht wird die Haupttribüne von einer anspruchsvollen Stahl-Membran-Konstruktion. Als freitragende, muschelartige Freiform konzipiert, überspannt das Dach mit einer maximalen Breite von über 40 m und 130 m Länge eine Gesamtfläche von ca. 7.500 m^2. Mit der Ausführung der Dachkonstruktion beauftragt, erarbeitete die Firma MERO in Zusammenarbeit mit der IF-Group hierfür das Strukturkonzept. Ausgeführt ist die Primärstahlstruktur als ein zweilagiges Raumfachwerk mit dem MERO-TSK

Abbildung 11: Stadiondach Al Ain mit 110 m Spannweite

Kugel-Knoten-System. Im mittleren Dachbereich wurde die Struktur aus optischen Gründen entlang der Längsachse auf ein dreilagiges Fachwerksystem erweitert. Die Dachkonstruktion ist lediglich an den beiden flankierenden Pylonen in einem Abstand von etwa 110 m aufgelagert. Als Eindeckung dient eine mechanisch vorgespannte Membrane, bestehend aus PTFE beschichteten Glasgewebe. Das Membrandach ist in einzelne Felder unterteilt, die jeweils zwei Raster der Raumfachwerkstruktur in Längsrichtung überspannen. Jedes der Membranfelder ist über Randseile planmäßig vorgespannt.

2.3 Science and Technology Park, Qatar

Der Science and Technology Park dient als Niederlassung von einigen Firmen und Universitätseinrichtungen aus der Hochtechnologie und befindet sich am Stadtrand von Doha/Qatar. Im Auftragsvolumen der Firma MERO-TSK befand sich die Tragstruktur des Verschattungsdaches (Veil), sowie die zugehörige Eindeckung mit Edelstahllochblechen. Ein zweilagiges Raumfachwerk mit dem MERO-TSK Kugel-Knoten-System bildet die Tragstruktur der wellenförmigen, freigeformten Überdachung. Die Rasterbreite beträgt etwa 1.8 x 1.8 m bei einer Bauhöhe von 0.9 m. In Nord-Süd-Richtung hat das Gebäude eine Länge von 260m, in West-Ost-Richtung 340 m. Die Primärstahlstruktur ist auf 56 großen vierarmigen Stützen und 240 kleinen Stützen aufgelagert. Die Überdachung ist in sieben Einzelabschnitte geteilt, die durch Bewegungsfugen verbunden sind. Aus der Vogelperspektive ergibt sich für das Veil die Grundrissform eines T mit einer Grundfläche von ca. 19.650 m^2. Das Veil wird als eine 2-lagige MERO-TSK Raumfachwerkstruktur ausgeführt, die auf ihrer Ober- und Unterseite mit perforierten, dreiecksförmigen Lochblechen verkleidet wird. Die Ober- und Unterseite des Daches wurde mit Edelstahllochblechen verkleidet. Durch die Freiform des Daches bedingt ergab sich für die insgesamt 38.000 m^2 Verkleidung eine extreme Anzahl unterschiedlicher Paneelgeometrien, sodass in großen Bereichen des Daches jedes Panel ein Unikat darstellt.

Abbildung 12: Science and Technology Park in Doha

Hieraus resultierte auch die Entwicklung eines völlig neuen Befestigungssystems um die unterschiedlichen Knickwinkel in einem Knotenpunkt realisieren zu können.

2.4 ENEL Aluminium Kuppel – Rom

In einem internationalen Ausschreibungsverfahren erhielt MERO Italiana den Auftrag für die Ausführung der neuen Kohle-Zentrallager der Firma ENEL. Die Zwillingskuppeln mit einem Durchmesser von je 144 m und einer Höhe von 49 m sind die größten Kuppeln in Europa. Auf Grund des hohen Salzgehaltes der Luft (die Kuppeln liegen nur wenige Meter vom Meer entfernt) wurde von MERO-TSK erstmals eine Verbindungstechnik aus Edelstahlknoten (Werkstoffnummer 1.4462) und Aluminiumstäben (AW-6082 T6) entwickelt und angewendet. Das zweilagige Raumfachwerk (6.900 Knoten und 25.400 Stäben) ist nur am Außenrand auf 48 Betonstützen gelagert. Die Dachfläche von je ca. 21.000 m^2 ist mit Aluminiumblech eindedeckt. Die erste Kuppel ist errichtet und die zweite Kuppel befindet sich derzeit (Frühjahr 2008) im Aufbau.

Abbildung 13: Montage

Abbildung 14: Bauzustand der Kuppel

2.5 Stadiondach FC Shaktar – Donetzk, Ukraine

Das ikonische Stadion wurde von ArupSport, eines der weltweit führenden Architekturbüros in der Planung von hochmodernen Stadien, für den UEFA Champions League Teilnehmer FC Shakhtar Donetsk entworfen. Das neue Shakhtar Stadion wurde nach den Vorschriften der UEFA für ein 5-Sterne Stadion geplant und wird als Austragungsort für die Fussball-EM 2012 dienen. Unter seinem Dach finden 50.000 Zuschauer Platz. MERO-TSK erhielt den

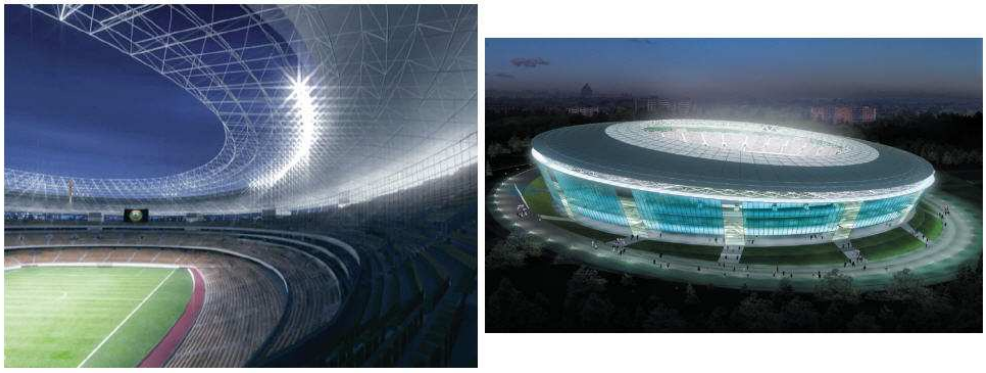

Abbildung 15: Architekturmodell Stadiondach FC Shaktar Donetsk

Auftrag für die Tragwerksplanung einschließlich Montagekonzept des gesamten Stadiondaches und für die Lieferung der zwölf MERO KK Raumfachwerke. Die Idee der Architekten - ein homogenes stützenfreies Stadiondach - wurde von MERO dadurch realisiert, dass die bis zu 60m weitgespannten Raumfachwerke auf dem Untergurt von jeweils zwei der zwölf 60m weit auskragenden räumlichen Fachwerkträgern aufliegen. Raumfachwerk und räumliche Fachwerkträger liegen so in einer Ebene. Die zwölf Abschnitte des Stadiondachs sind so konzipiert, dass sie ungleichmässigen Bodenverschiebungen standhalten können, da im Untergrund früher Kohleabbau betrieben wurde. Für die Montage wurden die acht größeren Abschnitte des Stadiondachs in zwei Teile mit einem Einzelgewicht von mehr als 100t unterteilt. Sie werden mit einem Monsterkran zwischen die räumlichen Fachwerkträger eingehoben.

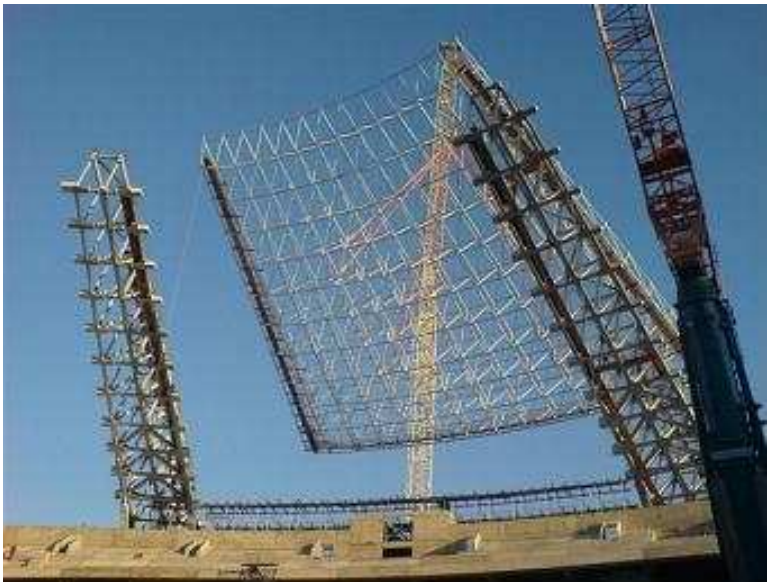

Abbildung 16: Montage eines Abschnitts

2.6 Moskau City Shopping Mall – Moskau

Die Moskau City Shopping Mall soll das neue Geschäftszentrum der russischen Hauptstadt werden. Das Herz dieses Geschäftsviertels bildet ein Gebäudekomplex bestehend aus einem Hotel, einem Einkaufszentrum und einer Music Hall. Das von MERO-TSK projektierte Atrium überdacht auf einer Fläche von knapp 10.000 m^2 den zentralen Teil des Einkaufszentrums. Die Länge des tonnenförmigen Daches beträgt etwa 150 m bei einer Spannweite von ca. 72 m und einer Stichhöhe von 12.5 m.

Um den hohen architektonischen Ansprüchen einerseits und den besonderen Gegebenheiten Russlands mit seinen strengen Wintern andererseits gerecht zu werden, wurde als Tragkonstruktion für das Atrium ein MERO KK System gewählt, auf welchem eine separate Pfettenlage mit Glaseindeckung aufgesetzt ist. Um auch im Winter eine herausragende Optik gewährleisten zu können, hat sich der Investor entschieden das komplette Atrium beheizbar ausführen zu lassen und somit Beeinträchtigungen durch Schnee oder Eis auszuschließen. Da für das Beheizen des gesamten Atriums eine Leistung von ca. 4 MW nötig wäre, wurde beschlossen ein neues Heizverfahren anzuwenden, das in dieser Form und Größe erstmals zum Einsatz kommt.

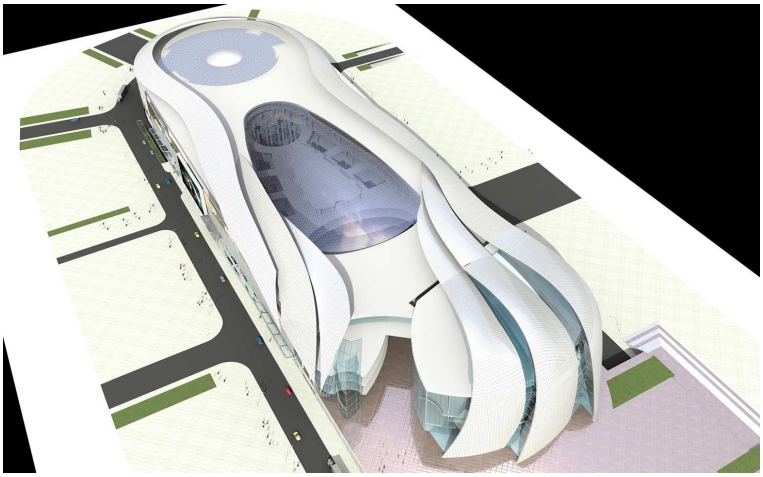

Abbildung 17: Moskau City Modell

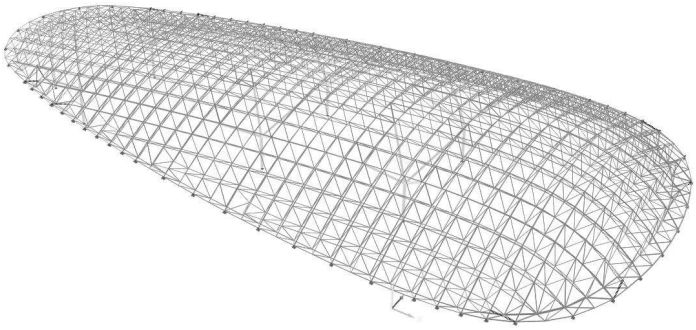

Abbildung 18: Berechnungsmodell

2.7 YAS ISLAND Ferrari Experience Center – Abu Dhabi VAE

Al Yas Island ist mit 2.5 Millionen Quadratmetern eine der größten natürlichen Inseln in den Emiraten und liegt gegenüber von Al Raha Beach, ein wenig außerhalb der Stadt Abu Dhabi.

Auf dieser Insel wird eine Formel 1-taugliche Rennstrecke im Top-Design neu gebaut. Dazu unter anderem auch die größte Shopping Mall von Abu Dhabi mit einer Fläche von 300.000 m^2, mehrere Hotels sowie zwei Golfplätzen. Im Zentrum steht als Vergnügungs- und Freizeitanlage der *Ferrari World Theme Park* . Dieser Bereich wird von einem rießigen Dach überdeckt (Bild 19). Diese komplette Dachkonstruktion mit einer Oberfläche von rund 195.000 m^2 besteht aus einem MERO Raumfachwerk. Mit einer Stabanzahl von 170.000 Stäben und 42.200 Knoten ist es das Größte jeh gebaute Raumfachwerk.

Abbildung 19: Modell des Ferrari World Theme Parks

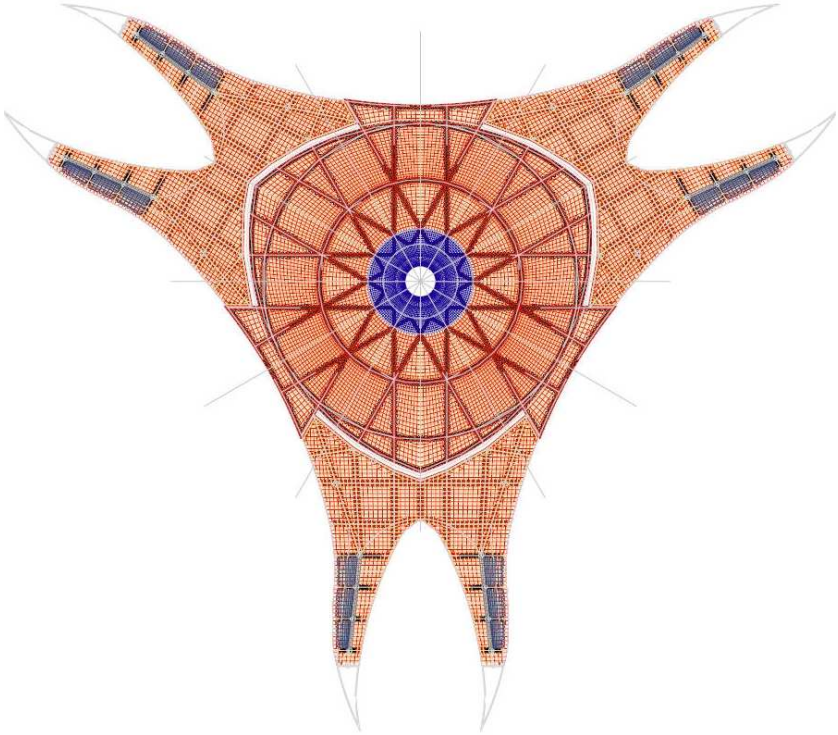

Abbildung 20: Stabwerksmodell mit 42.200 Knoten und 170.000 Stäben

LITERATUR

[1] Deutsches Institut für Bautechnik
Zulassung für MERO Raumfachwerke, Mai 1998

[2] MERO-TSK Homepage
www.mero-tsk.de

[3] Klimke, H.
Entwurfsoptimierung räumlicher Stabstrukturen durch CAD-Einsatz
Bauingenieur, 61 (1986,) S.481–489

[4] Klimke, H.
Entwicklung einer Anschlusstechnik
In Festschrift Joachim Lindner, S. 251–268
Technische Universität Berlin, 1998

[5] Klimke, H.; Kemmer, W.; Rennon, N.
Die Stabwerkskuppel der Stockholm Globe Arena
Der Stahlbau, 59 (1989), Heft 1, S. 1–8

[6] Kurrer, K. E.
Zur Komposition von Raumfachwerken von Föppl bis Mengeringhausen
Der Stahlbau, 73 (2004), Heft 8, S. 603–623

[7] Mengeringhausen, M.
Raumfachwerke aus Stäben und Knoten
Bauverlag, Würzburg, 1975

[8] Mengeringhausen, M.
Kompositionen im Raum
Bertelsmann Fachzeitschriften GmbH, Würzburg, 1983

[9] Stephan, S.; Sanchez, A.J. ; Knebel, K.
Stabwerke auf Freiformflächen
Der Stahlbau, 73 (2004), Heft 8, S. 562–572