

Neubau der Zayed University Abu Dhabi

Ch. Böttcher, M. Frenz, H. Kaufmann

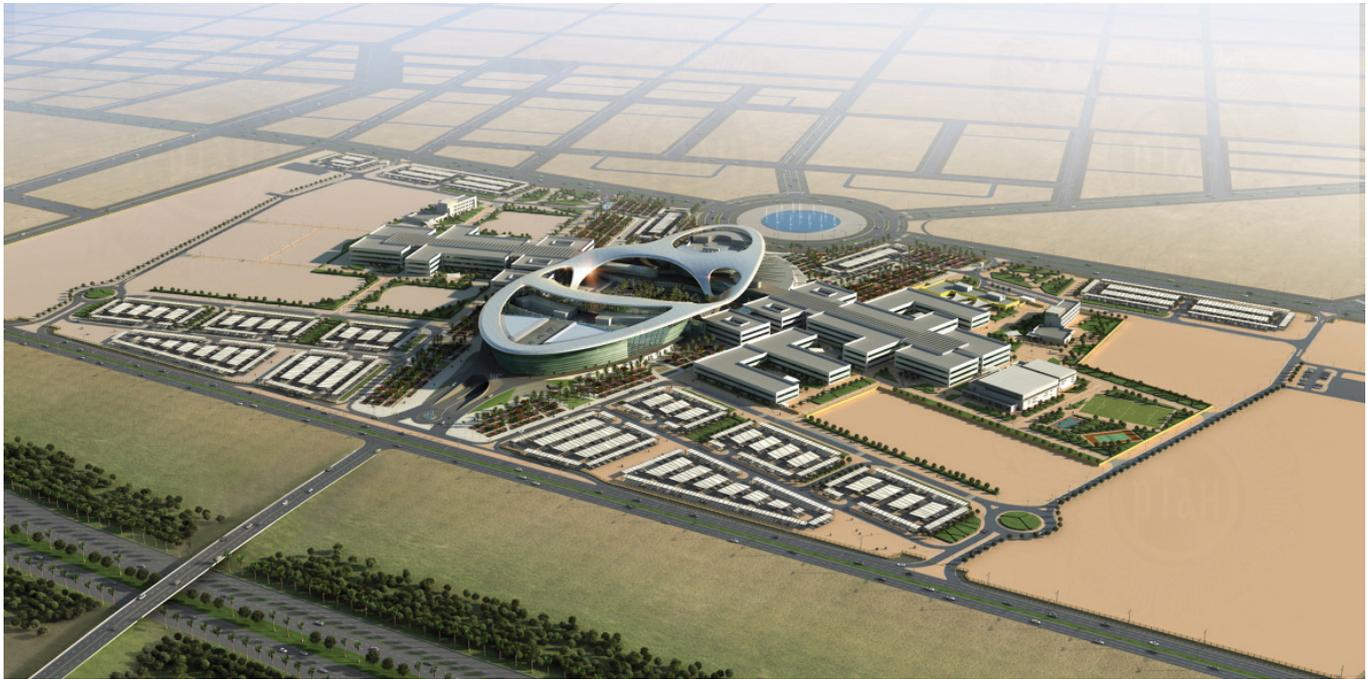


Bild 1. Visualisierung Gesamtgelände

Zusammenfassung

In dem Emirat Abu Dhabi wird nachhaltig für die Zeit nach dem Öl geplant, Bildung spielt daher beim Masterplan 2030 eine zentrale Rolle. Der für 6000 Studierende konzipierte Neubau der Zayed University liegt im zukünftigen Capital District direkt an der wichtigen Verbindungsstraße zwischen internationalem Flughafen und der halbinselförmigen Altstadt.

Der zeichenhafte Entwurf des Architekturbüros BRT Bothe Richter Teherani aus Hamburg formt das Gebäudeensemble des ca. 100.000 m² BGF umfassenden Zentralbereiches zu ei-

ner großen Skulptur. Verbindendes Element ist ein darüberliegendes, fugenloses Freiformdach aus 8000 t Stahl mit Aluminiumverkleidung, welches in seiner Form und Leichtigkeit Anklänge an einen traditionellen arabischen Chador sucht.

Ein äußerst knapper Zeitplan für Planung und Ausführung erforderte eine enge Zusammenarbeit des von einem Generalübernehmer aufgestellten internationalen Teams. Dabei waren zahlreiche ingenieurtechnische Herausforderungen, schwierige Schnittstellen bei Planung und Ausführung, unterschiedliche Planungsphilosophien und eine parallel zur Planung laufende Großbaustelle mit bis zu 8000 Arbeitern zu meistern.

1 Einleitung

In dem Emirat Abu Dhabi wird nachhaltig für die Zeit nach dem Öl geplant, Bildung spielt daher beim Masterplan 2030 eine zentrale Rolle [1]. Der Neubau der nach dem verstorbenen Landesvater H.H. Sheikh Zayed bin Sultan Al Nahyan benannten Universität [2] liegt im zukünftigen Capital District direkt an der wichtigen Verbindungsstraße zwischen internationalem Flughafen und der halbinselförmigen Altstadt.

Auf dem 75 ha großen Gelände sollen 6000 Studentinnen und Studenten untergebracht und unterrichtet werden (Bild 1). Nach Geschlechtern getrennt gibt es Unterkünfte, Sportstätten und Läden, im Osten für Männer und im Westen für Frauen. Im Zentralbereich sind ein Tagungszentrum und eine Bibliothek sowie Verwaltungen, Fakultäten und Mensen angeordnet. Diese Einrichtungen werden über bauliche bzw. zeitliche Beschränkungen ebenfalls geschlechter-

Dr.-Ing. SFI Christian Böttcher

Geschäftsführender Gesellschafter
boettcher@dr-ing-binnewies.de

Dr.-Ing. Matthias Frenz

Divisional Director und Projektleiter
frenz@dr-ing-binnewies.de

Dr.-Ing. Henning Kaufmann

Teamleiter
kaufmann@dr-ing-binnewies.de

Ingenieurbüro Dr. Binnewies
Ingenieurgesellschaft mbH
Alsterterrasse 10a
20354 Hamburg
www.dr-ing-binnewies.de
mail@dr-ing-binnewies.de

getrennt. Insgesamt werden ca. 213.000 m² BGF errichtet, davon ca. 100.000 m² im Zentralbereich.

Kurz nachdem Ende 2008 der Auftrag für den gesamten Neubau an einen arabisch-südafrikanisch-australischen Generalübernehmer vergeben und die Baustelle bereits eingerichtet worden war, wurde nochmals nach einer zeichenhafteren Verbesserung des Entwurfes gesucht. Überzeugen konnte der Entwurf der Architekten BRT Bothe Richter Teherani aus Hamburg. Dieser formt das Gebäudeensemble des Zentralbereiches zu einer großen Skulptur. Verbindendes Element ist ein darüber liegendes, fugenloses Freiformdach aus 8000 t Stahl mit Aluminiumverkleidung. Leitbild beim Entwurf des skulpturalen Daches war die Form und Leichtigkeit eines Tschador bzw. Chador, ein von muslimischen Frauen als Umhang getragenes halbkreisförmiges, dunkles Tuch, das lediglich das Gesicht oder gar nur Teile davon freilässt. Die Gebäudeaußenkonturen geben dabei die wesentlichen Stützlinien für das Freiformdach vor. Angesichts der Dubai-Krise sah sich der bereits mit dem Ursprungsentwurf beauftragte Generalübernehmer gezwungen, die Fertigstellung mit dem neuen Design zum gleichen Termin Ende Juli 2011 zuzusagen. Durch den Zeitverlust infolge Entwurfs- und Planerwechsel bis zum April 2009 verblieben somit nur 27 Monate für die gesamte Planungs- und Bauzeit. Dies erforderte eine massiv baubegleitende Planung mit detailliert abzustimmenden und äußerst knappen Zwischenterminen. Als ein Schlüssel zum Projekterfolg wurde die optimale Zusammenarbeit im Team erkannt. Das Planungskonzept war daher ausgerichtet auf eine 100 prozentige Vorort-Präsenz aller Planer auf der Baustelle. Da aber sowohl die Architekten als auch die Tragwerksplaner in Hamburg ansässig und aus zahlreichen früheren Projekten aufeinander eingestellt waren, erwies sich nicht zuletzt wegen der erforderlichen Größe des Planungsteams von insgesamt bis zu 150 Personen eine lediglich zeitweilige Vorort-Präsenz zur Abstimmung und Koordination mit der Baustelle als sinnvoller.

Die entwerfenden Architekten wurden allerdings im Wesentlichen nur bis zum Abschluss des Entwurfes von Gebäuden und Freiformdach beauftragt. Bei den Gebäuden wurde ein lokal ansässiges Architekturbüro für die Ausführungsplanung engagiert. Für das Freiformdach hingegen wurde die weitergehende Planung einschließlich aller Koordinationsaufgaben und der Klärung von Schnittstellen gemeinsam von den Projektmanagern des Generalübernehmers, den Fachplanern und den ausführenden Firmen übernommen. Die Tragwerksplaner wurden dazu und angesichts der Komplexität des als Ingenieurbauwerk anzusehenden Freiformdaches umfassend eingebunden, so dass diese das Freiformdach von der ersten Idee bis zur Fertigstellung durchgängig begleiten konnten. Die Planung des Tragwerkes musste im Wesentlichen in den verbleibenden 8 Monaten des Jahres 2009 erfolgen und gliederte sich dabei in die drei Planungsstufen Formfindung/Vorplanung (Concept Design), Entwurfsplanung (Design Development) und Genehmigungsplanung (Detailed Design). Für diese teilweise auch parallel verlaufenden Planungsstufen wurden im Vorfeld die jeweils möglichen bzw. notwendigen Modellierungsschärfen und die daraus für Vergabe, Materialbestellung, Fertigung etc. ableitbaren Eigenschaften des Tragwerkes festgelegt.

Im Rahmen der Formfindung/Vorplanung wurden gemeinsam mit den Architekten 16 verschiedene äußere Formen und dementsprechende Hauptvarianten des Tragwerkes entwickelt und untersucht, die noch in bis zu 7 Submodelle für

die Tragwerksplanung unterteilt wurden. 12 Wochen nach Planungsbeginn stand auf der Grundlage von ca. 80 iterativ erstellten Form- und Strukturmodellen die finale Form und eine wirtschaftliche und effiziente Gesamtlösung fest. Dies war nur möglich durch den Einsatz eines ganzheitlichen und voll parametrisierten Architekturmodells der Gebäude und des Freiformdaches in Rhinoceros® in Verbindung mit einer von den Tragwerksplanern selbst entwickelten Software zur weitgehend automatisierten Generierung des Tragwerkes im Architekturmodell. Die Entwicklung, Programmierung und Verifizierung dieser Software erfolgte während der gesamten Projektlaufzeit parallel zu den einzelnen Planungsschritten.

Noch vor Abschluss der Formfindung/Vorplanung war ein vollständiger vorgezogener Lastabtrag für Gebäude und Freiformdach zu erarbeiten, da die Geologie auf dem Baugrundstück durch die Nähe zum Persischen Golf geprägt ist und planmäßig eine Pfahlgründung der Gebäude und der Auflagerpunkte des Freiformdaches erforderlich wurde. Ursächlich sind nur ca. 2m unter der sandigen Geländeoberkante anstehende gering wasserdurchlässige und vergleichsweise weiche marine Sedimente. Auch die Erstellung der ersten Ausschreibung für den Stahlbau des Freiformdaches erfolgte parallel zur Formfindung/Vorplanung und wurde nach nur 8 Wochen Planungszeit ebenso wie die erste Anfrage zur Hülle auf dem Markt gebracht. Durch die anschließende frühe Bindung des Stahlbauers konnten wichtige Abhängigkeiten bei der Materialverfügbarkeit, der Detaillausführung und der Montage von den lokalen Gegebenheiten bereits in die Entwurfsplanung einfließen. Bereits 16 Wochen nach Planungsbeginn, vor Fertigstellung der Entwurfsplanung, sollten wegen einer zum Herbst 2009 erwarteten deutlichen Stahlpreiserhöhung die wesentlichen Stahlkontingente auf Basis detaillierter Angaben zu Tonnagen, Materialgütern, Blechstärken etc. vorab gesichert werden können. Für die kurz danach anlaufende Vorproduktion mussten ebenfalls zu diesem Zeitpunkt schon Details zu den einzelnen Querschnitten abgestimmt und übergeben werden. Weiterhin war eine auf sicherer Seite liegende Vorabstatik für ausgewählte einfachere Teilbereiche des Stahlbaus erforderlich, damit diese bereits gefertigt werden konnten. Die endgültige statische Berechnung war bis Anfang 2010 vollständig zu erstellen, wobei alle Anschlusschnittgrößen und die komplette, dreidimensional überhöhte Geometrie des Stabwerksmodells, de facto als Stahlbauausführungsplanung, bereits 10 Wochen vorab im Dezember 2009 per EDV-Schnittstelle an den Stahlbauer übergeben werden mussten. Abschließend war seitens der Tragwerksplanung die vom Stahlbauer erstellte Werkstattplanung parallel zur schon laufenden Stahlbaufertigung zu überprüfen und durch umfangreiche Berechnungen zur Montageplanung zu ergänzen.

2 Gebäude im Zentralbereich

Im Zentralbereich sind auf einer Nord-Süd-Achse ein Veranstaltungszentrum (Convention Center, CON), Verwaltungen (Administration, AF2), der Campus (Campus), Fakultäten (Interdisciplinary Studies, IS), Mensen (Dining Halls, DH) sowie eine Bibliothek (Library, LIB) für bis zu 500.000 Bände angeordnet. Aus **Bild 2** kann die Anordnung der Gebäude unter dem Freiformdach entnommen werden.

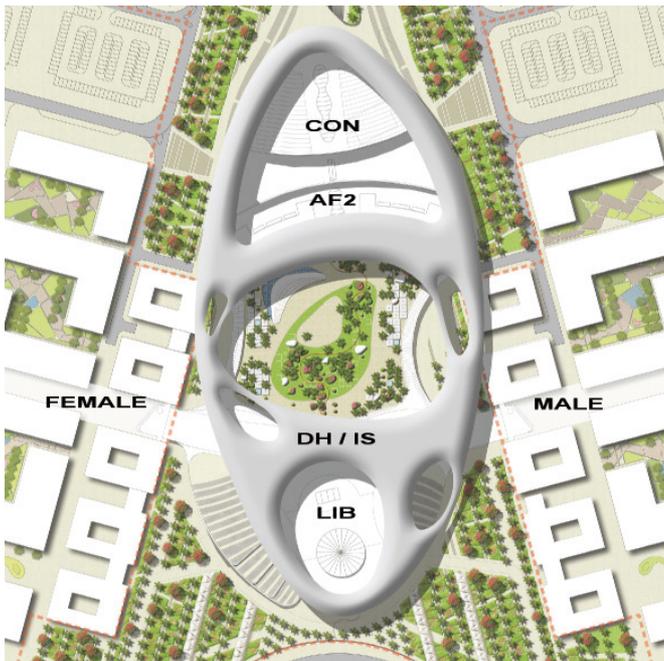


Bild 2. Gebäudeanordnung im Zentralbereich

Convention Center

Das im Norden an der Hauptstraße zum Flughafen gelegene, ca. 33.000 m² BGF umfassende Convention Center gliedert sich in einen Sockel aus Untergeschoss und Erdgeschoss sowie in ein überhohes 1. Obergeschoss und zwei weitere Obergeschosse (Bild 3, blau). Die Gebäudeabmessungen betragen ca. 155x115x7 m für Untergeschoss und Erdgeschoss, sowie ca. 125x80x28,5 m für die drei Obergeschosse, deren Fassadenstützen nach außen geneigt sind. Aufgrund unterschiedlicher Stützraster der Obergeschosse und der beiden Sockelgeschosse waren bereichsweise aufwändige Abfangeplatten von bis zu 2m Dicke erforderlich.

Im Untergeschoss, das im Schutze einer Wasserhaltung erstellt und für drückendes Wasser bemessen und konstruiert werden musste, sind insgesamt 615 Stellplätze angeordnet. Im westlichen Teil des Erdgeschosses sind ebenfalls Stellplätze vorgesehen, während in der östlichen Gebäudehälfte ab dem Erdgeschoss aufwärts ein großes Theater mit 650 Sitzplätzen unterbracht ist. Beginnend ab dem 1. Obergeschoss wird ist das Gebäude durch eine in Nord-Süd-Richtung verlaufende zentrale Erschließungsachse sichtbar ge-

teilt, die westliche Hälfte wird dann als Konferenz-Zentrum mit einer großen Mehrzweckhalle und zwei darüberliegenden Konferenzetagen genutzt. Um den Mehrzweckraum stützenfrei zu halten wurden die Trennwände der Konferenzräume als zweigeschossige wandartige Träger mit ca. 30 m Spannweite ausgeführt.

Die Dachdecke über dem 3. Obergeschoss wird durch die Haustechnik intensiv genutzt. Gleichzeitig lasten zahlreiche Stützen des noch darüber liegenden Freiformdaches auf der Dachdecke ab, so dass diese insgesamt hochbelastet ist und sich auch für die Regelbereiche eine Flachdecke von 50cm Stärke ergab. Der drei Geschosse hohe, atriumartige Eingangsbereich an der nördlichen Spitze wurde abweichend mittels einer Stahlkonstruktion überdacht, um den Aufwand für ein mehrgeschossiges Schalgerüst zu sparen. Das Theater wurde mittels 3m hoher Stahlfachwerkträger im Verbund mit der dort 40 cm starken Dachdecke stützenfrei gehalten. Im Bereich des Bühnenturmes sind, bedingt durch die hohen Lasten aus der Bühnentechnik, die Fachwerkträger bis zu 5m hoch.

Administration

Im Süden grenzt das Convention Center an die zentrale Verwaltung AF2 an (Bild 3, gelb). Außerhalb des zentralen Bereiches liegen im Westen das zugehörige AF1, im Osten das AF3. Das 16.000 m² BGF große Gebäude misst insgesamt ca. 140x32x14 m und beginnt mit seinem Erdgeschoss auf der gleichen Höhe wie das Convention Center. Die beiden Gebäude sind aber über Fugen vollständig voneinander getrennt. Oberhalb des ebenfalls vom Convention Center vorgegebenen Sockelniveaus befinden sich zwei Obergeschosse mit üblichen Flachdecken und analog zum Convention Center geneigten Stützen, wobei der Gebäuderiegel von einem zentralen Atrium als Sonderbereich in einen westlichen und einen östlichen Teil getrennt wird.

Auf der durch zahlreiche Stützen des Freiformdaches hoch belasteten Dachdecke ist im Schutze einer umlaufenden Lamellenfassade, die das Convention Center und die Administration insgesamt umfasst, zusätzlich ein überhoher Haustechnikbereich angeordnet. Die Nordfassade des AF2 und die Südfassade des Convention Centers formen oberhalb des Sockelniveaus gemeinsam den sog. Canyon, der nach oben hin durch das Freiformdach und an den westlichen und östlichen Stirnseiten durch die umlaufende Lamellenfassade geschlossen ist.

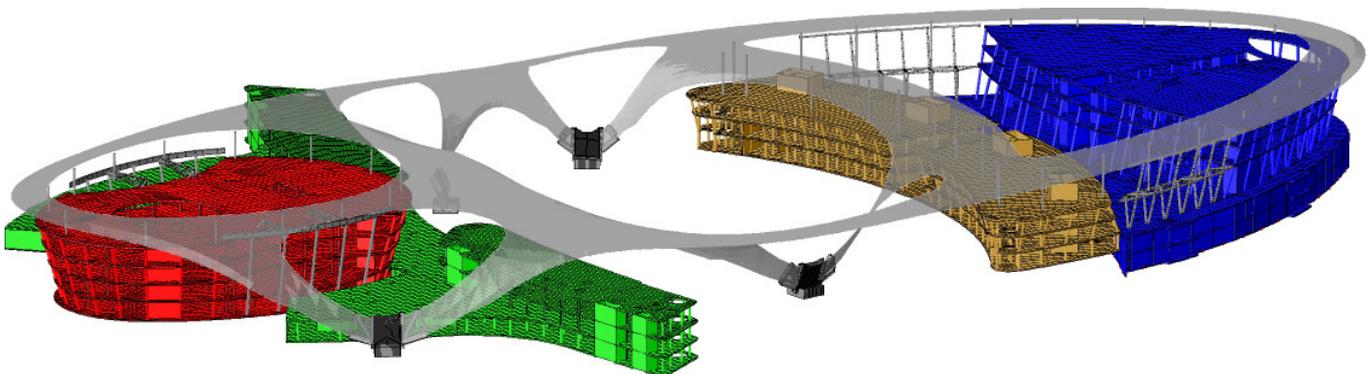


Bild 3. Strukturmodell von Convention Center und Administration

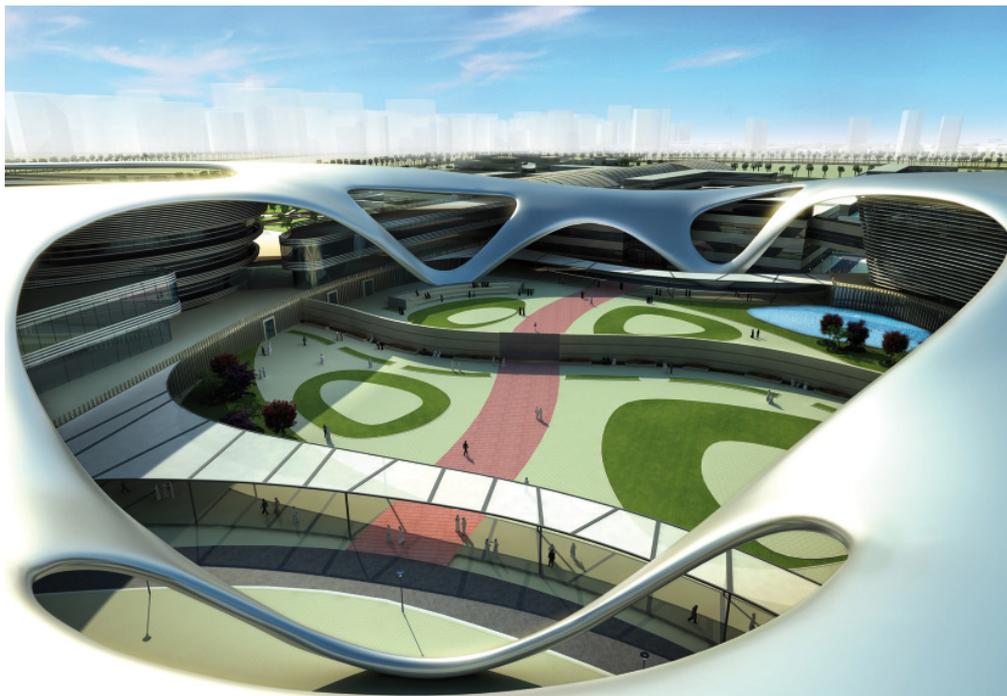


Bild 4. Visualisierung Dachform im Campusbereich

Campus

Der eigentliche Campus liegt absolut zentral und ist fast nicht vom Freiformdach bedeckt. Alle sich hier treffenden Wegebeziehungen sind deshalb mit Schatten spendenden Kolonnaden ausgestattet. Zusätzlich ist aus Gründen der Geschlechtertrennung ein in Nord-Süd-Richtung mäandrierender Sichtschutz vorgesehen.

Faculties

Das südlich des Campus gelegene, dreigeschossige Gebäude der Female bzw. Male Interdisciplinary Studies (F-IS/M-IS) umfasst ca. 7.700 m² BGF (Bild 3, grün). Der 14,75 m hohe Stahlbetonskelettbau konnte bei mittleren Stützweiten durchgängig mit Flachdecken und ohne Abfangungen ausgeführt werden, wobei bei der Dachdecke in Teilen Lasten aus der Montage des Freiformdaches zu berücksichtigen waren. Die obersten beiden Obergeschosse sind getrennt für Männer und Frauen jeweils langgestreckte Riegel von 100 m Länge und 22,5 m Breite, im Erdgeschoss sind die zugehörigen öffentlichen Nutzungen wie Cafeterien untergebracht.

Dining Halls

Das Erdgeschoss der F-IS/M-IS geht direkt in die eingeschossigen, ca. 9.500 m² BGF großen Female bzw. Male Dining Halls (F-DH / M-DH) über. Es ergibt sich ein ca. 135x260m großer Gesamtkomplex, der durch Dehnfugen getrennt dreiseitig die Bibliothek einfasst (Bild 3, grün).

Die durch einen Gründachaufbau hochbelastete Dachdecke der Dining Halls ist nach Süden hin terrassenförmig abgetrepppt, dementsprechend entwickelt sich die Geschosshöhe. Gleichzeitig waren nutzungsbedingt vergleichsweise große Stützweiten und auch Sonderbereiche für Anlieferungen erforderlich.

Library

Ganz im Süden befindet sich die ca. 20.500m² große Bibliothek mit elliptischen Außenabmessungen von ca. 105x90x25 m (Bild 3, rot). Im Erdgeschoss bzw. teilweise im Untergeschoss befinden sich vier große Hörsäle. Die drei Obergeschosse sind als Bibliotheksflächen für ca. 500.000 Bücher ausgelegt. Auf der Dachdecke befinden sich wiederum ausgedehnte Flächen der Haustechnik, gleichzeitig lasten auch hier zahlreiche Stützen des noch darüber liegenden Freiformdaches ab. Im Bereich der seitlichen Gebäudeaussparungen nehmen additiv Fachwerkräger die Stützen des Freiformdaches auf. Die Außenfassade ist analog zum Convention Center geneigt, entsprechend sind die Fassa-

denstützen schräg gestellt, um einheitlich moderate Auskragungen der Geschosdecken zu ermöglichen. Diese sind im Allgemeinen als kreuzweise gespannte, schlaff bewehrte Flachdecken mit Stützenkopfverstärkung ausgeführt. Das Stützraster beträgt ca. 8,40x8,40 m. In den obersten beiden Geschossen befindet sich eine 32m Durchmesser große Öffnung in den Decken. Analog befindet sich auch eine Öffnung in der Dachdecke, die durch eine Stahlkonstruktion mit 2,2 m Bauhöhe geschlossen wird. Über den Hörsälen waren hochbelastete Innenstützen bei einer Stützweite von 21,5 m abzufangen. Dazu stand nur eine Bauhöhe von insgesamt 2 m zur Verfügung. Deshalb wurden zweiteilige massive Verbundträger ausgeführt, bei denen die Deckenstärke auf 45 cm erhöht wurde. Vereinzelt mussten auch schräge Fassadenstützen über dem Erdgeschoss durch Abfangeplatten abgefangen werden.

3 Freiformdach

3.1 Grundlagen des Entwurfes

Äußeres Erscheinungsbild

Das skulpturale Dach wurde als fugenloses, beidseitig mit Aluminiumblechen verkleidetes Stahltragwerk mit konstanter Gesamtdicke von nur 1,75 m und kontinuierlichen dreidimensionalen Krümmungen konzipiert (Bild 4).

Die Anforderungen an die Dachhaut waren dabei vielfältig. Neben höchsten architektonischen Anforderungen an Ebenheit, Kontinuität der Krümmungen, sauberen Verlauf und Sichtbarkeit von Fugen standen insbesondere die Kosten, die einfache Montagemöglichkeit, die verbleibende Bauhöhe für das Stahltragwerk sowie die extremen klimatischen Randbedingungen im Vordergrund. Durch die Nähe zum persischen Golf und das sehr hoch anstehende, salzige Grundwasser sind der aufgewehte Staub und Sand leicht salzhaltig. Dies führt zusammen mit dem erheblichen Tauwasseranfall in den Morgenstunden speziell im Sommer und Herbst und den hohen Temperaturen am Tage tendenziell zu

einem „Festbacken“ von Staub und Sand, dem durch die besonders glatte Oberfläche sowie die spezielle Fugenausbildung weitestgehend begegnet werden sollte. Alternative Dacheindeckungen, z.B. als Stehfalzkonstruktion, konnten daher nicht überzeugen.

Die knapp 25.000 Aluminiumpaneele haben Regelabmessungen von ca. 1500mm x 1500mm bei 1,5 mm Dicke und sind ober- und unterseitig jeweils auf einer eigenen Unterkonstruktion montiert. Dadurch verbleibt für das eigentliche Haupttragwerk eine Bauhöhe von 1,50 m netto. Die Paneele sind nur einachsig vorgekrümmt. Eine Krümmung in der anderen Richtung wird planmäßig durch das Anziehen der selbstschneidenden Schrauben am Rand der Paneele auf der Fassadenunterkonstruktion erzielt. Durch Kunststoffkeile im Zwischenraum kann der Abstand fein justiert werden. Zwischen den einzelnen Paneelen sind schmale, beidseitig überlappende Aluminiumstreifen angeordnet, die sowohl als Ausgleich der unvermeidlichen Rundungenauigkeiten dienen als auch die Dichtebene darstellen. Hierzu sind auf den Streifen Gummidichtungen aufgesteckt. Diese ermöglichen zudem eine schadensfreie thermische Längenausdehnung auch angesichts von Oberflächentemperaturen je nach Jahreszeit von bis zu 70°C am Tage und 8°C in der Nacht.

Interaktion mit den Gebäuden

Um das schlanke Erscheinungsbild des Freiformdaches zu ermöglichen, war es unerlässlich dieses auch im Bereich der Gebäude aufzulagern. Für das Convention Center, die Administration AF2 und die Library war deshalb die Interaktion mit dem Dach eine zusätzliche planerische Randbedingung, die einen hohen Koordinationsaufwand im Rahmen der Formfindung/Vorplanung erforderte. Nach Vorgabe der Architekten sollten die für die Auflagerung des Daches benötigten Stützen „unsichtbar“ sein. Dies konnte durch besonders große Stützenschlankheiten, einen großen Stützenabstand, eine spezielle Farbgebung und durch eine von den Gebäuderändern abgerückte Position erreicht werden. Seitens der Tragwerksplanung wurde angesichts der aus architektonischen Vorgaben und dem Raumprogramm heraus eher knapp dimensionierten Aussteifungselemente der Gebäude früh vorgegeben, dass möglichst nicht noch Erdbebenlasten oder temperaturbedingte Zwangskräfte aus dem Freiformdach von den Gebäuden aufgenommen werden müssen.

Nachhaltigkeit

Auch in Abu Dhabi spielt Nachhaltigkeit eine große Rolle. Dementsprechend wurde insbesondere angesichts der extremen klimatischen Bedingungen und in Übereinstimmung mit den architektonischen Wünschen das Ziel verfolgt, eine fugenlose und möglichst auch lagerlose Stahlkonstruktion mit geringem Wartungsaufwand zu entwerfen. Ein solcher Entwurfsansatz war der lokalen Entwurfspraxis bislang jedoch fremd.

Materialien, Fügeverfahren, Fertigungs- und Montagekapazitäten

Aus Kosten- und Termingründen waren bei der Materialwahl, bei Fügeverfahren und Fertigungsmethoden sowie bei der Montage die Besonderheiten und Kapazitäten des lokalen Marktes zu beachten. So sollten beispielsweise hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit keine Stahlsorten besser als S355 J0 verwendet werden und möglichst auch keine besondere Anforderung in Dickenrichtung (sog. Z-Qualität) ge-

stellt werden müssen. Die Blechdicken sollten das marktübliche Maß von maximal 50 mm nicht überschreiten. Baustellenschweißnähte sollten möglichst vermieden werden und stattdessen gleitfest vorgespannte Schraubverbindungen zum Einsatz kommen. Der Korrosionsschutz sollte angesichts der Einsatzbedingungen, Vorfertigungsgrad und Qualifikation der ausführenden Arbeiter nicht zu aufwendig sein und zum vereinbarten Gewährleistungszeitraum von 10 Jahren passen. Gewählt wurde ein dreilagiges Korrosionsschutzsystem mit insgesamt 260 µm (Mikrometer) Dicke. Für die Montage des Freiformdaches sollten überwiegend die zahlreichen Turmdrehkräne der Gebäude mitbenutzt werden und die Bauteilgewichte entsprechend klein sein. Die übrigen Montageeinheiten sollten hingegen möglichst groß sein um mit Mobilkränen montiert zu werden. Temporäre Hilfsstützen mussten zahlenmäßig minimiert werden, so dass sich planmäßig eine punktförmige Stützung im Bauzustand ergab. Bei Bedarf sollten die Dachdecken der unter dem Dach befindlichen Gebäude auch zur Montage genutzt und entsprechend ertüchtigt werden. Für Stahlbetonarbeiten sollten keine aufwendigen, gar dreidimensionalen Schalungen erforderlich sein, Stabstahl bis höchstens 32 mm Durchmesser eingesetzt werden, auf einen zusätzlichen Korrosionsschutz der Bewehrung verzichtet und im Regelfall höchstens ein C60 eingesetzt werden.

Behördliche Auflagen

Von den lokalen Behörden in Abu Dhabi wurden bislang keine eigenen technischen Regelwerke bzw. Normen herausgegeben. Es existieren lediglich Richtlinien, die auf ausländische Regelwerke verweisen und z.B. ergänzende Vorgaben im Bereich von Windlasten und Erdbebenbeanspruchungen geben. Die Planung im arabischen Raum ist aus historischen Gründen dabei stark von den britischen Normen geprägt. In enger Abstimmung und nach intensiver Diskussion mit den Behörden konnte als Grundlage für die Bemessung allgemein auf den Eurocode in Verbindung mit dem britischen Nationalen Anwendungsdokument zurückgegriffen werden.

Für die Erlangung der Baugenehmigung waren anstelle der üblichen Unterlagen mehrere persönliche Präsentationen der Tragwerksplaner erforderlich. Ein Prüfingenieur wurde seitens der Behörde nicht gefordert.

Temperatur

Neben einer Oberflächentemperatur eines direkt von der Sonne beschienen Metalls von bis zu 70°C und zu berücksichtigenden Lufttemperaturen von bis zu 51°C im Hochsommer werden auch die erheblichen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf relevant. Für die bemessungsrelevanten Temperaturen wurde von Seiten der Baubehörde ein Mittelwert von +29°C bei charakteristischen Schwankungen von ±22 K vorgegeben. Um zusätzlich auch die Temperaturen aus Bauzuständen mit direkt beschienen Stahl abzudecken, wurden die positiven Abweichungen in Abstimmung mit dem Bauherrn und der ausführenden Stahlbaufirma auf +30 K erhöht.

Sand und Regen

Die vertikale Verkehrslast wurde in Abstimmung mit dem Bauherrn und den Behörden zu $q_k=0,75 \text{ kN/m}^2$ festgelegt. Damit sind ggf. auftretende Sandansammlungen von 3–5 cm Dicke auf der Oberfläche abgedeckt. Im Winter und Früh-

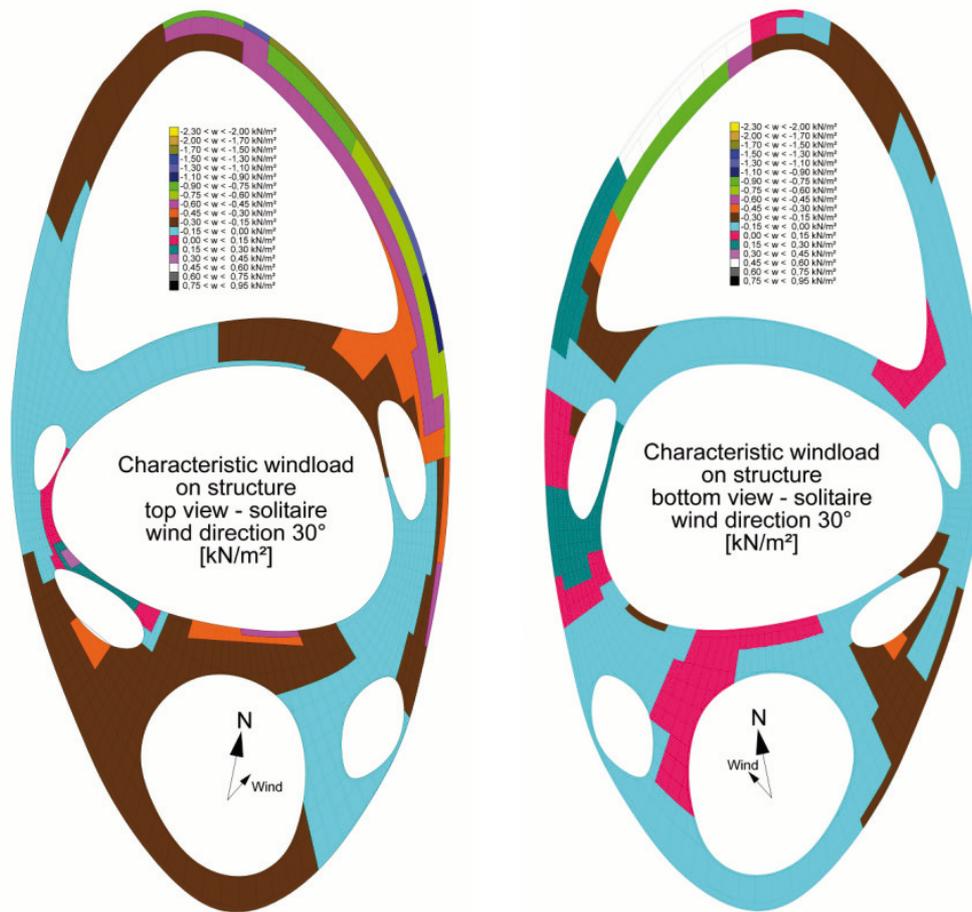


Bild 5. Beispiel für Windlastverteilung an Ober- und Unterseite

jahr ist in Abu Dhabi mit sehr seltenen, dafür aber umso ergiebigeren, monsunartigen Regenfällen von bis zu $50 \text{ l/m}^2/\text{h}$ zu rechnen. In Richtung der Dachränder fließen dann aufgrund der Größe des Daches erhebliche Wassermengen. Um diese zu quantifizieren und parallel die statisch zu berücksichtigende Wasserfilmdicke zu untersuchen, wurden spezielle Wasserablaufuntersuchungen am Teilmodell im Maßstab 1:30 des Daches sowie Ablaufberechnungen durchgeführt. Da an den Dachrändern aus architektonischen Gründen keine Ablaufrinnen möglich waren und die prognostizierten Wassermengen eine Überschreitung der Komfortkriterien für Personen am Boden sowie eine Gefahr von lokalen Ausspülungen am Grund bedeuteten, wurden in Teilbereichen Wasserspoiler von 4,5 cm Höhe vorgesehen. Diese lenken das Wasser zu definierten Abrisskanten. Der auf dem Dach auftretende Wasserfilm ist mit dem gewählten Lastansatz abgedeckt.

Sicher ausgeschlossen werden mussten Wasser- und Sandansammlungen im Inneren des Daches, da dies zu einer erheblich unwirtschaftlichen Bemessung geführt hätte. Entsprechende Anforderungen wurden daher an die Dichtigkeit der Dachhaut gestellt. Die Oberseite des Daches ist bei ordnungsgemäßer Ausführung prinzipiell sand- und staubdicht und weitestgehend wasserdicht. Die unvermeidbar auftretenden kleineren Leckagen werden berücksichtigt, indem die Unterseite des Daches offen konzipiert ist und somit ein Abfließen von eingedrunenem Wasser und innerem Tauwasser gewährleistet ist.

Wind

Form und Abmessungen des Freiformdaches sowie die unmittelbar davor und darunter angeordneten, unregelmäßigen Gebäude erlauben keine sichere Abschätzung oder gar Bestimmung von Windwirkungen auf Grundlage der bestehenden technischen Regeln. Daher wurden Windkanaluntersuchungen in einem Grenzschichtkanal zur Ermittlung der quasi-statischen Windlasten für das Dach und die darunter liegenden Gebäude durchgeführt. Des Weiteren wurde mittels Sanderosionsanalysen der Windkomfort untersucht. Verwendet wurde ein Modell des gesamten Campus im Maßstab 1:400. Für die Bestimmung der quasi-statischen Windlasten wurden anders als bei der Sanderosionsanalyse zwei Modelle des Daches benötigt. Je eines für die Unterseite und die Oberseite, da durch die maßstäbliche Übertragung der realen Dachdicke von 1,75m im Modell eine lediglich 4,4mm

dünne Schale vorhanden war und somit aus Platzgründen keine Drucksensoren für Ober- und Unterseite gleichzeitig installiert werden konnten. Bezüglich der zu erwartenden Windgeschwindigkeiten wurde auf Messungen der vergangenen 30 Jahre des in ca. 3km Entfernung gelegenen Flughafens Abu Dhabi zurückgegriffen. Aus den gegebenen Messwerten wurden die Windgeschwindigkeiten für einen 50-Jahres Sturm extrapoliert. Es ergab sich hier eine Böenwindgeschwindigkeit von ca. 38 m/s in einer Höhe von 30m über Grund. Bedingt durch die Terminalsituation konnte für die Vorplanung/Formfindung nicht auf die Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen gewartet werden, so dass hier mit global abgeschätzten Lasten ohne Differenzierung zwischen Ober- und Unterseite gearbeitet werden musste. Erst als Grundlage der Entwurfsplanung lagen die beispielhaft in Bild 5 dargestellten, in 30° -Schritten getrennt für die Ober- und Unterseite des Daches ermittelten Windlastverteilungen vor. Zusätzlich zu den Sog- und Drucklasten wurden auch Lasten aus Reibung ermittelt. Neben den quasi-statischen Windlasten war auch das dynamische Verhalten des Daches infolge Windwirkungen relevant, wobei hierzu aus Zeitgründen allerdings nur rechnerische Untersuchungen erfolgen konnten.

Erdbeben

Infolge der Nähe zur tektonischen Grenze zwischen arabischer und eurasischer Platte wurden mögliche Erdbebenbeanspruchungen mittels des multimodalen Antwortspektrverfahrens für Zone 2A des UBC 1997 rechnerisch unter-

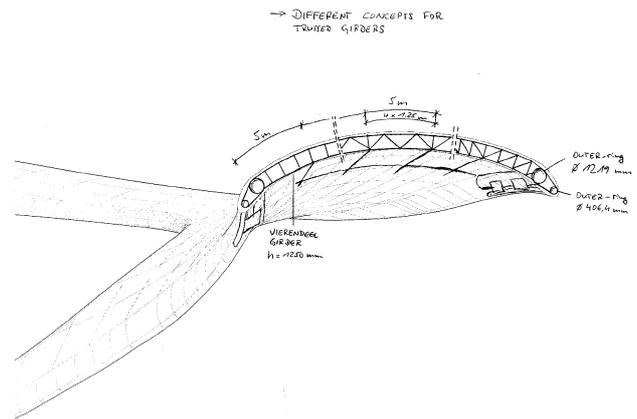
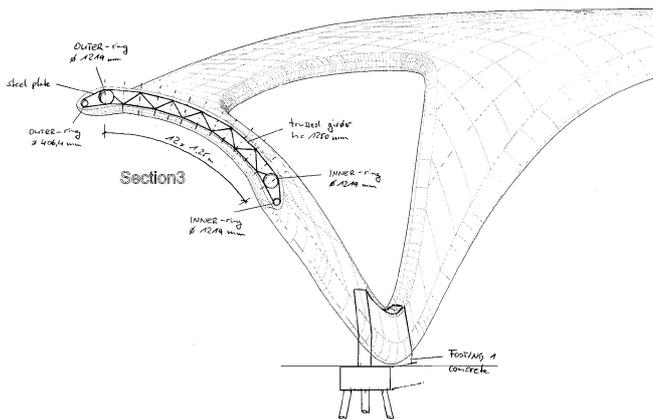


Bild 6. Erarbeitung charakteristischer Schnitte

sucht. Dabei mussten zur geforderten Berücksichtigung von mindestens 90 % der modalen Massen über 300 Moden überlagert werden (Überlagerungsmethoden SRSS und CQC). Es wurde hierfür eine Duktilität von $R=4,2$ und als Bedeutungsfaktor $I=1,0$ angesetzt.

3.2 Planung des Tragwerkes

Formfindung und Vorplanung

Schon früh waren zur Analyse des prinzipiellen Trag- und Verformungsverhaltens zusätzlich zu ingenieurmäßigen Überschlagsrechnungen, der Erarbeitung charakteristischer Schnitte (Bild 6) und einer Analyse der Krümmungen auch erste rechnerische Untersuchungen mit Schalenmodellen durchgeführt worden.

Um gleichzeitig eine besondere Wirtschaftlichkeit und die geringe Bauhöhe des Tragwerkes von überall nur 1,50m zu ermöglichen, wurde auf diesen Grundlagen und in stetiger Abstimmung mit der Architektur gezielt nach Möglichkeiten der Aktivierung eines überwiegend durch Normalkräfte geprägten, schalenartigen Tragverhaltens des Stahlbaus gesucht. Das globale Tragverhalten konnte unter diesem speziellen Blickwinkel schnell wie folgt prinzipiell charakterisiert werden: Im Bereich des Convention Center (CON) ist das Freiformdach ringförmig und weitestgehend eben, so dass dort kein Schalentragverhalten aktivierbar und insbesondere aufgrund der durch das Gebäude vorgegebenen Stützenstellung ein entsprechend torsions- bzw. biegetragfähiges Tragwerk in Ringform erforderlich ist. Ebenso verhält es sich großteils im Bereich der Library (LIB). Die im zentralen Bereich (Center) vorhandenen Krümmungen (Bild 7) ermöglichen hingegen zusätzlich ein schalenartiges Tragverhalten.

Die drei genannten Bereiche treten erst als Gesamtsystem stark positiv in Interaktion, so dass eine vermeintlich vereinfachende Trennung in Einzelsysteme nicht optimal erschien und auch nicht in Übereinstimmung mit den im Abschnitt 3.1 beschriebenen Randbedingungen aus der Architektur, Nachhaltigkeit etc. gestanden hätte. Insbesondere ermöglichte die fugenlose Konstruktion eine aus Gründen der Entlastung der Gebäudeaussteifungen gewünschte, vereinfachte Ausführung der Stützpunkte auf den Gebäuden als Pendelstützen, da die gesamte Aussteifung des Daches von vier integralen Festpunkten im zentralen Bereich übernommen werden kann. Gleichzeitig sind selbst große Bewegungen aus Temperaturänderungen somit weitestgehend zwangsfrei möglich.

Bereits vor Auftragserteilung waren die verschiedenen Möglichkeiten des gegenseitigen Geometriedatenaustausches zwischen Architektur und Tragwerksplanung auf ihre Praxis-tauglichkeit hin untersucht worden. Die Architekten verwendeten Rhinoceros®, um die Hüllgeometrie des Daches und der Gebäude in einem Gesamtmodell zu entwickeln und zu koordinieren. Um den Stahlbau als räumliches Stabtragwerk innerhalb der jeweils von den Architekten übergebenen Hüllfläche anzuordnen, wurde zunächst die Konfiguration der Stäbe auf einer unterhalb des Daches liegenden Konstruktionsebene statisch-konstruktiv erarbeitet. Als Grundlage dienten die zuvor identifizierten Prinzipien des globalen Tragverhaltens sowie ein von der Tragwerksplanung anhand von Erfahrungswerten vorgegebenes Raster von ca. 5,00x 5,00 m. Anschließend wurde diese zweidimensionale Stabkonfiguration mit Hilfe einer selbst entwickelten Software auf die Mittelfläche des Freiformdaches projiziert. Die dabei erforderlichen Raumkoordinaten der Freiformfläche wurden programmintern aus den Geometriedaten der Architekten gewonnen. Ebenfalls automatisiert erfolgte die anschließende räumliche Orientierung der lokalen Stabachsen, wobei starken Achsen der Stabelemente in Richtung der Flächennormalenvektoren der Mittelfläche des Dachs ausgerichtet wurden.

Insbesondere anhand der auf dieser Grundlage durchgeführten Tragwerksberechnungen wurde die äußere Form des Freiformdaches und dementsprechend die räumliche Konfiguration des Tragwerkes interdisziplinär-iterativ optimiert. Dabei war auch, wie von Gensichen [3] zutreffend angemerkt, die Zuverlässigkeit bzw. Anwendbarkeit der im

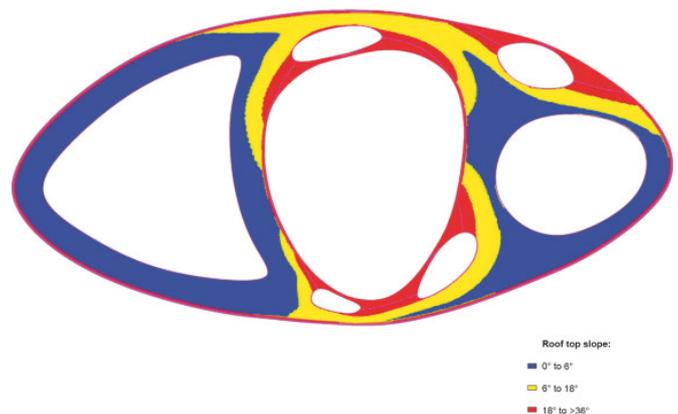


Bild 7. Krümmungen des Daches

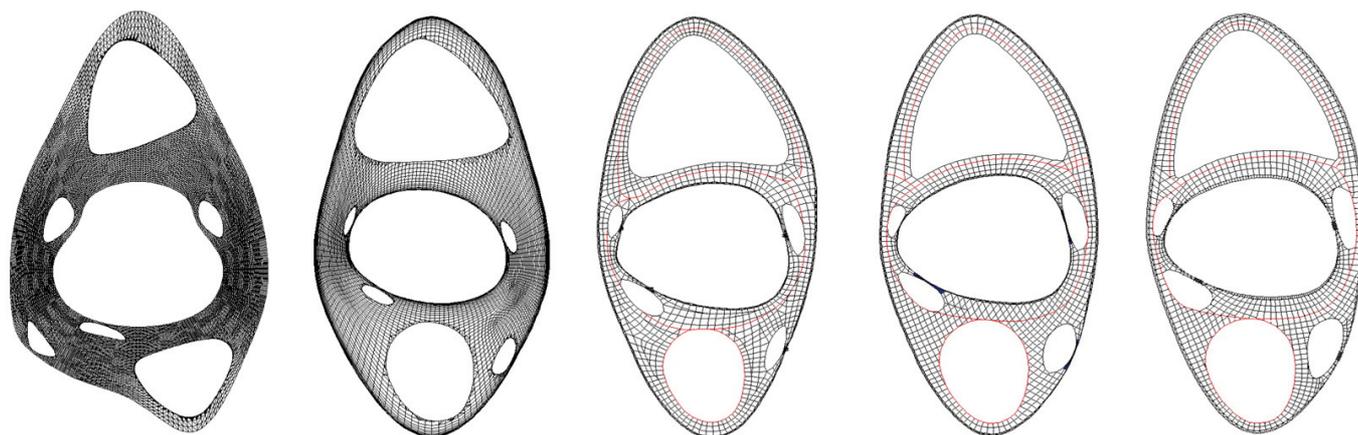


Bild 8. Formevolution des Freiformdaches

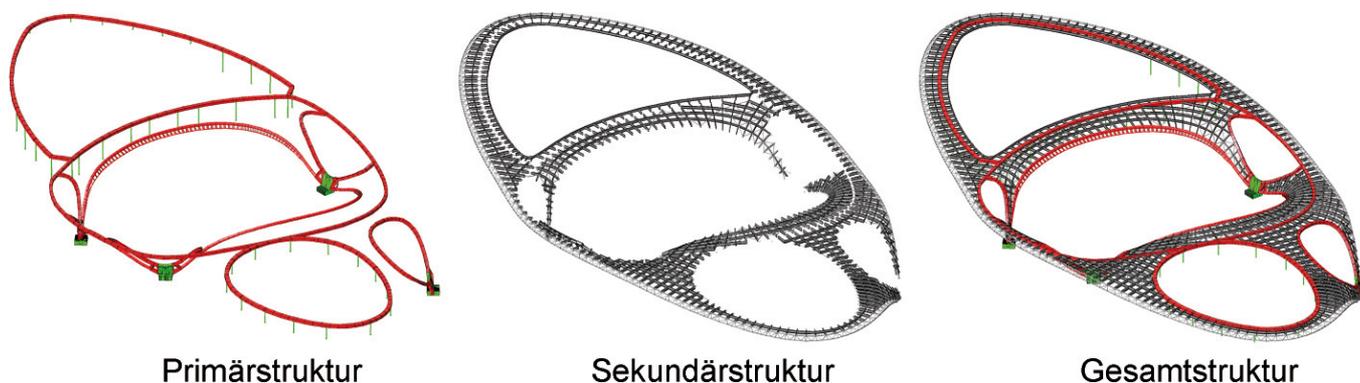


Bild 9. Hierarchische Gliederung des Freiformdaches

verwendeten Berechnungsprogramm implementierten geometrisch nichtlinearen Theorie zu überprüfen. Die komplexe Formfindung des Freiformdaches und der Gebäude konnte als gemeinsames Planungsergebnis von Architektur und Tragwerksplanung schließlich trotz zahlreicher untersuchter Varianten und paralleler Kostenoptimierungen vergleichsweise schnell in nur 16 Wochen zum Abschluss gebracht werden. **Bild 8** erlaubt einen Überblick der Formevolution anhand eines Vergleiches der Grundrissprojektionen ausgewählter Formversionen.

Entwurfsplanung

Das bereits in der Vorplanung entwickelte und während der Entwurfsplanung in mehreren Schritten verfeinerte statische System des Freiformdaches zeigen die Abbildungen in **Bild 9** in seiner hierarchischen Gliederung.

Zu den sog. primären Bauteilen zählen zunächst die beiden Ringe des Convention Center und der Library, die wegen der dominierenden Torsionsbeanspruchung als schwere geschweißte Rechteckhohlprofile 2000x1500mm ausgeführt wurden. Diese beiden Gebäuderinge sind unmittelbar an den zentralen Bereich angebunden, dessen schalenartiges Tragverhalten im wesentlichen durch einen hochliegenden Ring mit kombinierter Zug-Biegebeanspruchung und mehrere weitgespannte Bögen mit überwiegender Druck-Biegebeanspruchung ermöglicht wird. Der Zugring ist als geschweißtes quadratisches Hohlprofil 1500x1500mm ausgeführt und wird bereichsweise durch von den integralen Festpunkten auskragende Auflagerringe in seiner Hochlage gehalten. Diese bestehen ebenfalls aus geschweißten Rechteckkästen 1500x1500mm. Die bis zu 4m hohen Querschnitte

der Druckbögen, die sich auf den integralen Festpunkten abstützen, wurden unter Ausnutzung der lokalen Fertigungsmöglichkeiten aus geschweißten kreisförmigen Hohlprofile von 1500mm Durchmesser und Rohren Durchmesser 406mm zusammengesetzt. Einen Überblick über die typischen Querschnitte gibt **Bild 10**.

Die integralen Festpunkte müssen somit gleichzeitig die Aussteifung des gesamten Daches und eine unnachgiebige Stützung der darauf auflagernden weitgespannten Bauteile gewährleisten, um deren Versagen durch ein kombiniertes Durchschlagen-Biegeknicken zu verhindern. Zur Beherrschung der damit verbundenen konzentrierten Lasteinleitung wurden trotz 1,50m Dicke schneidenförmig anmutende integrale Festpunkte als in massive, 2,50m hohe Pfahlkopfplatten eingespannte Stahlbetonverbundkonstruktionen konzipiert (**Bild 11**). Um größere, schwer zu verdichtende Betonvolumina und eine aufwendige dreidimensionale Schalung zu vermeiden, wurde ein Großteil der ankommenden bzw. weiterzuleitenden Beanspruchungen bereits stahlbaumäßig in den sog. Adaptoren bewältigt. Der bis ca. 8m hohe und 7m breite Mittelbereich der integralen Festpunkte ist insbesondere zwecks eines einfacheren Anschlusses in die Pfahlkopfplatten trotz mehrerer Bewehrungslagen und der Erfordernis von Schraubanschlüssen sowie eines selbstverdichtenden Beton C80 überwiegend betonbaumäßig ausgeführt wurden. **Bild 12** gibt einen Eindruck von der Baustelle.

Die Träger des eigentlichen Flächentragwerkes einschließlich bereichsweise in der Dachebene liegender Aussteifungselemente und spezieller Randträger bilden die sog. sekundären Bauteile. Deren räumliche Konfiguration und De-

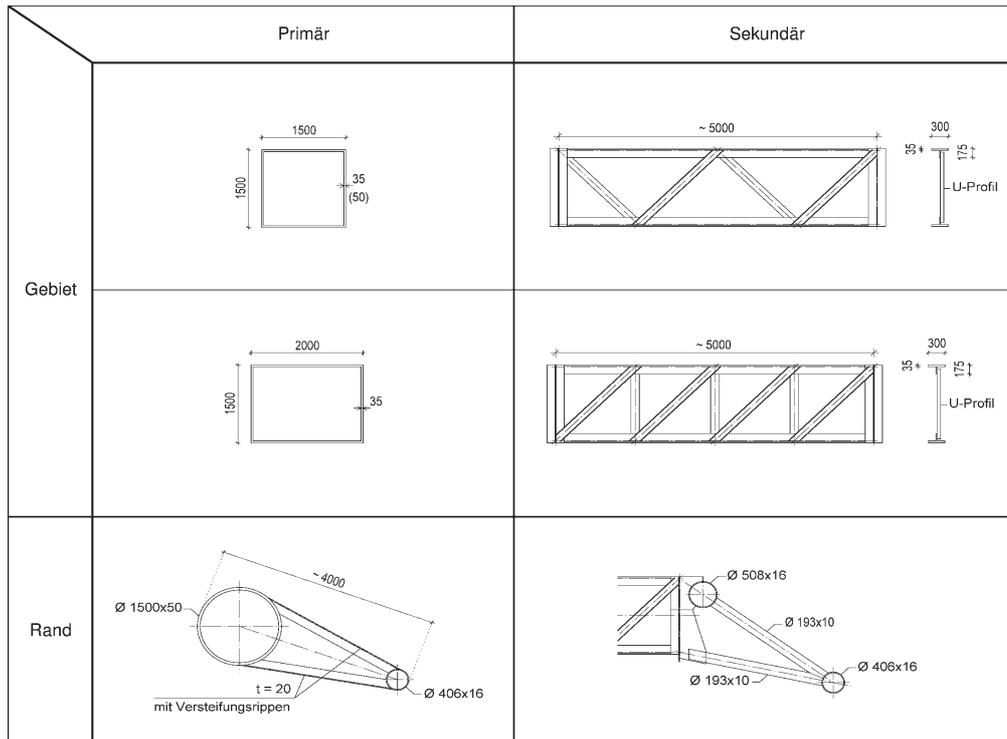


Bild 10. Typische Querschnitte des Daches

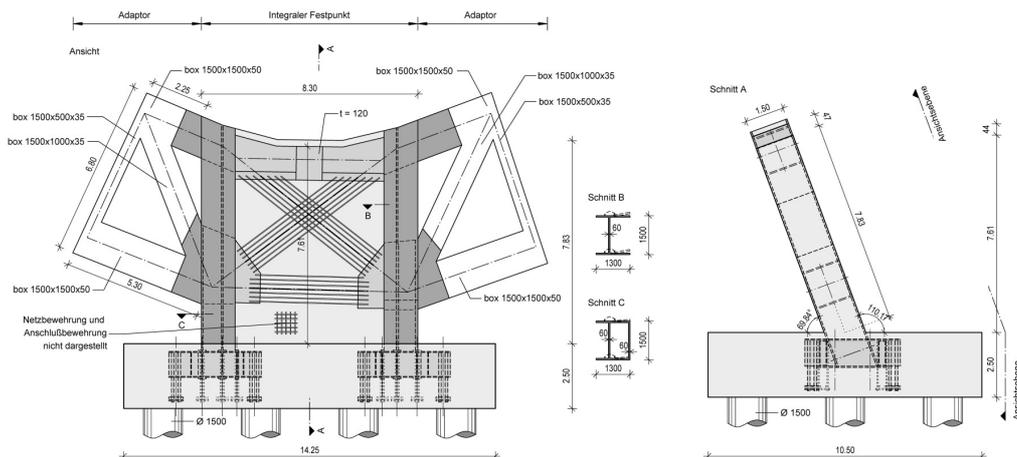


Bild 11. Darstellung eines integralen Festpunktes

taillierung im Stabwerksmodell wurde schrittweise optimiert. In der Vorplanung wurden alle Fachwerkträger zwischen den Primärknoten noch vereinfachend als einzelne Biegeträger mit fachwerk-äquivalenten Steifigkeiten gebildet. Als Ergebnis der Entwurfsplanung mussten hingegen alle ca. 22.000 einzelnen Diagonalen, Pfosten etc. der Fachwerkträger im Stabwerksmodell abgebildet werden (Bild 15).

Dies konnte nur mittels eines speziell für diese Aufgabe selbst entwickelten Preprocessings bewältigt werden. Dabei wurden die notwendigen finiten Gurt- und Strebenelemente auf Grundlage einer vorab getroffenen Auswahl von Streben- bzw. Ständerfachwerk automatisch unter Berücksichtigung der sich unter Eigengewicht einstellenden Schnittgrößen generiert. Die globale Orientierung der dann mehrere Elemente umfassenden Fachwerkträger ergab sich sinn-

gemäß aus den zuvor ermittelten Normalenvektoren. Im Programm auf Basis von vorab durchgeführten separaten Vergleichsrechnungen nach Biegetorsionstheorie 2. Ordnung implementierte Kontrollen der Knicksicherheit führten mit sukzessiver Anpassung von Gurt- und Strebenprofilen schließlich auf eine wirtschaftlich optimierte Konfiguration sämtlicher Fachwerkträger. Zusätzliche, räumlich geführte Rundrohre leisten als bereichsweise Schubaussteifung des aus Gründen der einfacheren Stahlbaufertigung überwiegend orthogonal orientierten Trägerrasters von ca. 5m x 5m einen wichtigen Beitrag zur Schalentragswirkung.

Die äußeren Dachränder wurden mit schräg nach unten geneigten, ausgerundeten Krempe besonders ausgeformt. Hierin wurden entsprechend schräg liegende Rohrfachwerkträger mit einer Bauhöhe von 3,0m angeordnet. Eine insbesondere für niedrige und entsprechend häufig auftre-



Bild 12. Einbauteile Pfahlkopfplatte (links) und Stahlbau integraler Festpunkt (rechts)

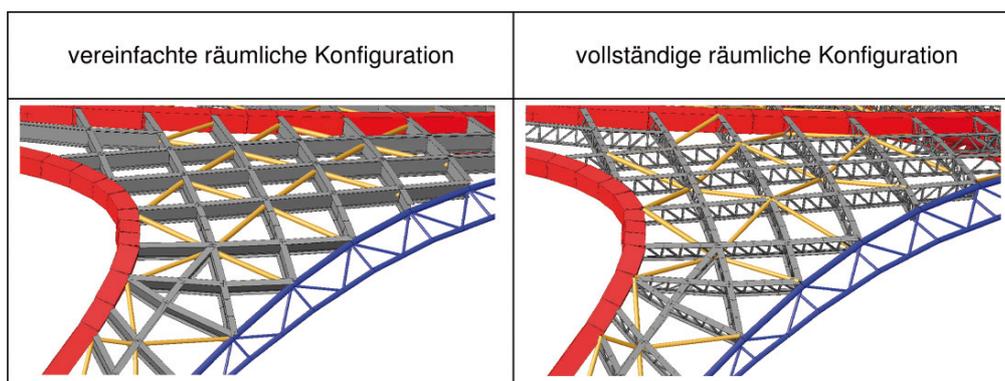


Bild 13. Vergleich der Tragwerksmodellierung in Vor- und Entwurfsplanung

tende Windgeschwindigkeiten befürchtete Schwingungsanfälligkeit des Daches konnte somit sicher ausgeschlossen werden, da einerseits die Rohrfachwerke versteifend wirken und andererseits die gewählte Form der Dachränder strömungstechnisch so günstig ist, dass ein alternierendes Abreißen der Luftströmung nicht zu erwarten ist. Zur Beurteilung aller aerodynamisch möglichen Schwingungsphänomene musste auf allgemein anerkannte Modellansätze und Erfahrungen zurückgegriffen werden, da die Untersuchung der Schwingungsanfälligkeit am Modell durch die komplexe Steifigkeitsverteilung im Tragwerk als zu aufwändig und fehleranfällig eingeschätzt wurde und auch die generell möglichen CFD-Berechnungen aus Zeitgründen ausschieden. Die hier nicht dargestellten sog. tertiären Bauteile bilden die nicht zum Haupttragwerk gehörende zusätzliche Unterkonstruktion der Dacheinkleidung als kaltverformte Z-Pfetten bzw. Hohlprofile.

Genehmigungsplanung

Schließlich wurden im Zuge der Genehmigungsplanung auf Basis von Berechnungen des Gesamtsystems nach Theorie II. und zu Kontrollzwecken auch nach III. Ordnung die räumliche Stabwerkskonfiguration finalisiert (Bild 14) und die einzelnen Bauteile abschließend bemessen. Insbesondere das Knickverhalten der Fachwerkträger um die schwache Achse war hierbei relevant. Als wesentliches Ergebnis der Genehmigungsplanung war eine vollständige Übergabe aller Anschlusschnittgrößen an den Stahlbauer schon 8 Monate nach Auftragserteilung zugesichert worden, da dieser für die Knotenbemessung verantwortlich war.

Ausführungsplanung und Werkplanung

Grundlage für die Werkplanung des Stahlbauers musste wegen bereichsweise großer Verformungen unter Eigengewicht die dreidimensional überhöhte Struktur sein. Die Überhöhung der Struktur war aufgrund der Komplexität des Tragwerkes und aus Zeitgründen vom Tragwerksplaner zu definieren. Die sich an der idealen Struktur aus Eigengewicht ergebenden ungleichförmigen Verformungen des Tragwerkes (Bild 15) wurden in einem ersten Schritt iterativ als rekursive Knotenverschiebungen in das Tragwerksmodell übertragen, bis sich eine perfekte Übereinstimmung des verformten Tragwerkes mit der gewünschten Form einstellte. Insbesondere galt es zu beachten, dass neben den vertikalen Überhöhungen im Bereich großer Spannweiten von bis zu 450mm auch horizontale Überhöhungen von bis zu 100mm notwendig wurden. Diese resultieren aus der im Grundriss asymmetrischen Anordnung der vier integralen Festpunkte und dem sich dadurch einstellenden erheblichen Horizontalschub.

Die überhöhte Geometrie wurde äquivalent zur Ausführungsplanung direkt vom Berechnungsmodell des Tragwerksplaners als Grundlage der Werkplanung des Stahlbauers übergeben. Neben den Knotenkoordinaten wurden dabei auch die einzelnen Profilquerschnitte der Stäbe mit übergeben und eindeutig zugewiesen, um in anbetracht der über 22.000 Stäbe Fehler zu vermeiden. Parallel wurden alle Tragfähigkeitsnachweise der Genehmigungsplanung nochmals auf Basis der überhöhten Geometrie geführt. Auf Grundlage des überhöhten Tragwerksmodells und den übergebenen Anschlusschnittgrößen waren vom Stahlbau-

er sukzessive die statischen Nachweise der Anschlüsse und der notwendigen statischen und konstruktiven Versteifungen zu führen und in das 3D-Modell der Werkplanung einzuarbeiten. Angesichts des großen Umfangs der Anschlusschnittgrößen von ca. 16.000 eng bedruckten DIN A4-Seiten mussten die Tragwerksplaner jedoch erhebliche Hilfestellung bei der Typisierung der Knoten und der geeigneten Aufbereitung der maßgebenden Schnittgrößen leisten. An zahlreichen Knoten ergaben sich aus der Geometrie des Anschlussdesigns, z.B. bei Schraubverbindungen mit sehr spitzen Winkeln, relevante Ausmittigkeiten durch Abweichungen der Systemachsen vom idealen Tragwerksmodell. Die Auswirkungen hinsichtlich des globalen Tragverhaltens wurden vom Tragwerksplaner überprüft und notwendige Änderungsvorschläge an den Stahlbauer zurückgemeldet. Aus dem 3D-Modell der Werkplanung des Stahlbauers wurden dann in einem ersten Schritt Stahlbauübersichtszeichnungen (sog. shopdrawings) mit Darstellung der einzelnen Bauabschnitte als Draufsicht erstellt. Für den jeweils dargestellten Bereich wurden im zweiten Schritt die maßgebenden Anschlüsse und konstruktiven Besonderheiten gezeichnet, um eine nochmalige Kontrolle des Anschlussdesigns zu ermöglichen. Auf Basis der Stahlbauübersichtszeichnungen und den gezeigten Details erfolgte vom Tragwerksplaner die Freigabe zur Ausführung. Nicht zur Freigabe vorgelegt wurden die parallel erstellten Detailpläne (sog. fabricationdrawings), auf denen sämtliche Informationen zur Fertigung des Stahlbaus dargestellt sind. Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes annähernd 420 shopdrawings und ca. 6.500 fabricationdrawings erstellt.

Montageplanung

Der Planung der Bauphasen des Daches mit den zugehörigen Montagesequenzen kam eine besondere Bedeutung zu. Wegen der parallel laufenden komplexen Bauarbeiten auf dem gesamten Universitätsgelände und frei zu haltender Zufahrtswege musste eine koordinierte Montagelösung mit möglichst wenigen diskreten Stützpunkten in Form von Gerüsttürmen entwickelt werden. Zusätzlich zu beachten waren die nur eingeschränkten Kapazitäten der vorhandenen Turmdrehkräne, die fallweise mit schweren Mobilkränen ergänzt wurden. Dabei musste auch beachtet werden, dass größere Segmente oder auch auskragende Elemente bei der Montage erheblich vom Endzustand abweichende Tragmechanismen und somit auch Verformungen aufwiesen. Diese mussten aber mit dem Verformungsbild des Endzustandes weitestgehend verträglich sein, um eine Beeinflussung des globalen Tragverhaltens durch unzulässig eingebaute Imperfektionen auszuschließen. Die seitens des Stahlbauers gewünschten Montageeinheiten wurden daher vom Tragwerksplaner in umfangreichen iterativen

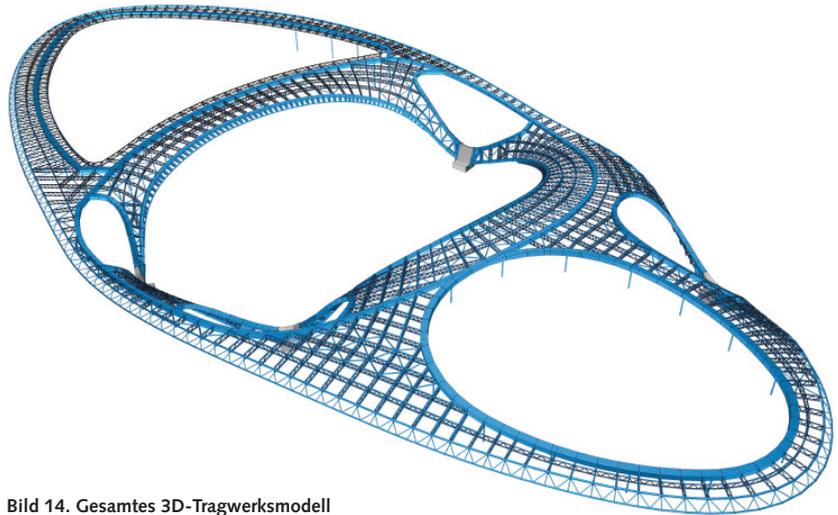


Bild 14. Gesamtes 3D-Tragwerksmodell

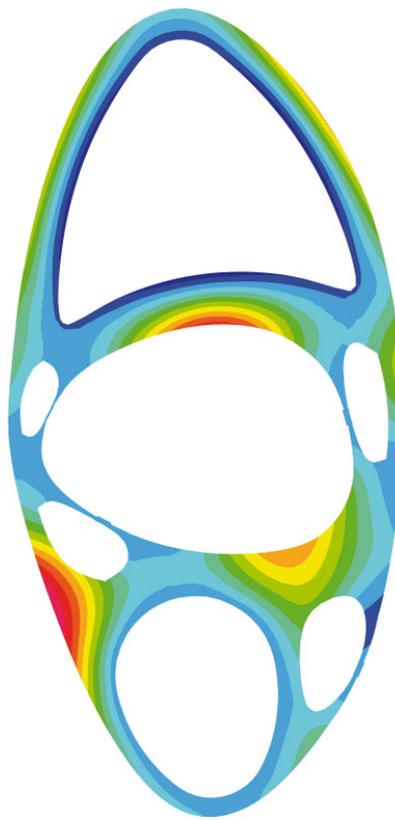


Bild 15. Vertikale Verformungen als Teilgrundlage für Überhöhungsberechnung

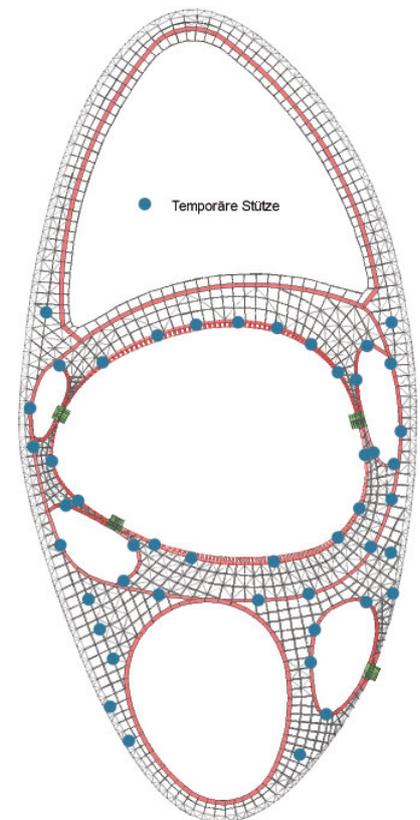


Bild 16. Anordnung der temporären Stützpunkte zur Definition der überhöhten Struktur

Berechnungen auch unter Kontrolle der Anschlusschnittgrößen verifiziert und die exakte Reihenfolge der Montage festgelegt. In diesem Zuge wurde auch die Anzahl der Stütztürme optimiert. Neben den temporär erforderlichen Stütztürmen für Teilmontagen waren zum Ende der Gesamtmontage nur 47 Stütztürme überwiegend im Bereich der zentralen Ringstrukturen erforderlich (Bild 16 und 17), die das Tragwerk in der überhöhten Form hielten. Die Arbeiten an der Dachhaut erfolgten unmittelbar im Anschluss zur Teilmontage der Fachwerkträger, so dass hier für das System im Bauzustand additive Lasten aus Hängegerüsten und Windwirkungen zu berücksichtigen waren.

In einem ersten Schritt wurde die primären Ringe mit Hubsegmenten von bis zu 30m Länge und 50t Gewicht unter Nutzung von schweren Mobilkränen montiert. Bis zum An-



Bild 17. Stütztürme unter primärer Ringstruktur



Bild 18. Nutzung der Stütztürme als temporäre horizontale Halterung



Bild 19. Montage der sekundären Struktur im Nachlauf zur primären Ringstruktur

schluss der primären Ringstruktur an die integralen Festpunkte wurden die Pendelstützen im Bereich der Gebäude durch abgespannte Stütztürme ersetzt (Bild 18), um hier eine ausreichende horizontale Stabilität des Bauzustandes sicherzustellen. Bereits mit auch nur teilweise fertiggestellten Ringen konnten sukzessive die Fachwerkträger und globalen Aussteifungen der sekundären Struktur mit einer prinzipiellen Reihenfolge von Süd (LIB) nach Nord (CON) montiert werden (Bild 19).

Das Ablassen des Tragwerks von den temporären Stützen mit Hilfe hydraulischer Pressen war ein weiterer kritischer Schritt im Rahmen der Montage. Entsprechend umfangreich stellte sich die zugehörige Planung und Überwachung dar. In einem ersten Schritt wurden Maßnahmen zur Vermeidung von lokalen Außermittigkeiten an den Stützpunkten festgelegt. Deshalb wurden je Stützpunkt prinzipiell vier symmetrisch angeordnete Pressen mit bis zu 100t Kapazität eingesetzt. In einem zweiten Schritt galt es zu untersuchen, ob alle Stützpunkte gleichzeitig abgelassen werden können oder ob ein schrittweises Ablassen von Teilbereichen des Daches nötig ist. Wegen der großen Anzahl der erforderlichen Hydraulikpressen für ein gleichzeitiges Ablassen und der aufwändigen Koordination konnte der erste Weg aber nicht weiterverfolgt werden. Es konnten lediglich Pressen für ein gleichzeitiges Ablassen von 8 Stützpunkten bereitge-

stellt werden. Auf dieser Basis wurden vom Tragwerksplaner die Sequenzen zum Ablassen erarbeitet. Eine Randbedingung war hierbei, dass möglichst keine zusätzlichen temporären Verstärkungen notwendig werden sollten, um den Fertigstellungstermin der Dachmontage nicht negativ zu beeinflussen. Des Weiteren mussten die eingeschränkten Lastkapazitäten der Stütztürme berücksichtigt werden. Als Ergebnis wurden, iterativ anhand der Verformungsfiguren unter Eigengewicht und unter Berücksichtigung der sich einstellenden Lagerlasten auf die Stütztürme, 11 hinreichend voneinander unabhängige Bereiche des Daches identifiziert, siehe Bild 20. Die Pressen innerhalb dieser Bereiche wurden jeweils parallel um einen vorher definierten Wert abgelassen bis das Dach frei tragend war. In Teilbereichen erfolgte ein Ablassen nacheinander lediglich zu 50%, um dann in einem erneuten Durchlauf der Bereiche die verbliebenen 50% Weg abzulassen.

3.3 Ausführung

Mock-up

Um die Optik und Farbgestaltung, Funktionsfähigkeit und Installationsmethodik zu prüfen, wurde vor Beginn der Montagearbeiten ein sog. Mock-up erstellt. Als Grundkonstruktion der primären und sekundären Struktur diente ein Teil des Convention Center-Ringes mit installierten Fach-

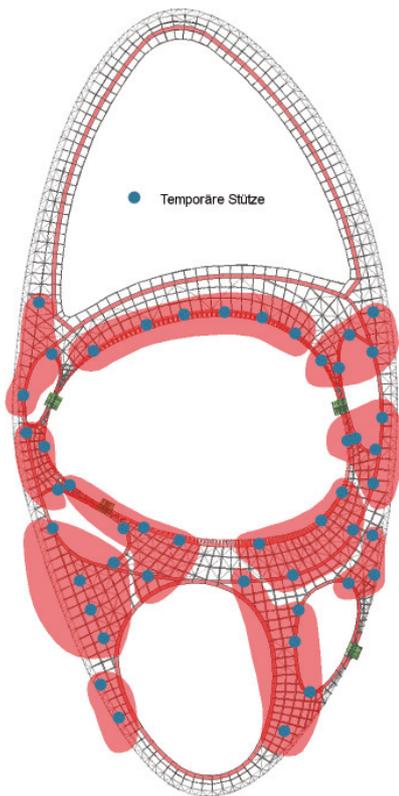


Bild 20. Bereiche zum sequentiellen Ablassen des Daches von den temporären Stützpunkten

werkträgern und äußerem Ring (Bild 21). Die hier festgestellten Mängel wurden im weiteren Planungsverlauf korrigiert und die Installationsmethodik angepasst. Die endgültige Montage erfolgte aus Zeitgründen ohne ein weiteres Mock-up.

Qualitätskontrolle

Angesichts der rauen Montagebedingungen in der Wüste, der oftmals nur einfachst qualifizierten Arbeiter sowie des erheblichen Zeitdruckes wurde eine dreistufige Qualitätskontrolle der Ausführung eingeführt. In einem ersten Schritt erfolgte eine eigene Überwachung und Qualitätskontrolle des Stahlbauers im Werk sowie auf der Baustelle. Diese wurde durch eine Kontrolle der vom Stahlbauer übergebenen



Bild 21. Mock-up für Stahlbau und Dachhaut

Unterlagen durch den Tragwerksplaner sowie einer umfangreichen Ausführungsüberwachung durch den Generalübernehmer ergänzt. Als letzte Stufe erfolgte eine stichprobenhafte visuelle Kontrolle der Ausführung an kritischen Bauelementen durch den Tragwerksplaner. Dieses dreistufige System hat sich vor Ort bewährt. Zur zuverlässigen Kontrolle der Vorspannkkräfte von vorgespannten rutschfesten Schraubverbindungen während der Montage wurde ein DTI-Verfahren mit separaten Unterlegscheiben eingesetzt und die sich einstellenden Vorspannkkräfte stichprobenhaft durch eine Drehmomentenkontrolle verifiziert.

Waren Schweißnähte mit Stumpfstoßen wie z.B. an der primären Ringstruktur erforderlich (Bild 22), wurden diese sowohl im Werk als auch auf der Baustelle zu 100% zerstörungsfrei durch Ultraschall und Magneteindringverfahren geprüft. Die nur an wenigen untergeordneten Punkten eingesetzten Kehlnähte wurden 100% visuell und 10% zerstörungsfrei überprüft. Um die exakte Lage der Tragwerksteile im Zuge der Montage zu verifizieren sowie ggf. eintretende Setzungen der Stütztürme zu erkennen, erfolgte eine permanente Vermessung des Tragwerks an engmaschigen Mess-



Bild 22. Vorfertigung geschweißter Segmente im Werk (links: Druckring, rechts: Kreuzungspunkt Zugring)



Bild 23. Montage der Dachhaut

punkten [4]. Verfälschungen durch Temperatureffekte wurden durch Mehrfachmessungen berücksichtigt und ausgeglichen. Die sich im Zuge des Ablassens des Tragwerks an den Stützpunkten einstellenden zum Teil erheblichen horizontalen und vertikalen Verformungen des Tragwerks von bis zu 450mm stimmten sehr gut mit den vorab berechneten Werten überein.

Im Rahmen der Montage und Fertigstellung der glattflächigen Aluminiumdachhaut (**Bild 23**), wurden zur Sicherstellung der Dichtheit der Konstruktion und somit der Einhaltung der gewählten Lastannahmen diverse Wassertests an unterschiedlichen Stellen vorgenommen. Nach Abnahme und Übergabe werden zukünftig regelmäßige Inspektionen in enger Anlehnung an die DIN 1076 erfolgen. Hierfür sind in der Dachhaut einzelne Paneele als planmäßige Einstiegs- punkte vorgesehen.

4 Fazit

Der Neubau der Zayed Universität ist ein gelungenes Beispiel für die internationale Zusammenarbeit von Planern und Ausführenden aus mehreren Kontinenten und für das Potential eines Generalübernehmermodells [5,6]. Neben extremen terminlichen Randbedingungen waren insbesondere zahlreiche ingenieurtechnische Herausforderungen, schwierige Schnittstellen bei Planung und Ausführung, international unterschiedliche Planungsphilosophien und eine parallel zur Planung laufende Großbaustelle mit bis zu 8000 Arbeitern zu meistern.

Wir freuen uns insbesondere mit den Mitarbeitern und Studierenden der Zayed Universität, den Investoren, dem Generalübernehmer sowie den Architekten, dass das gemeinsame Ziel tatsächlich in so kurzer Zeit erreicht werden konnte. Abschließend möchten wir uns an dieser Stelle herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Bildnachweis

Titelbild: Ingenieurbüro Dr. Binnewies (BIN)
 Bild 1, 4, 7: BRT
 Bild 2: BRT/BIN
 Bild 3, 6, 8–22: BIN
 Bild 5: IFI
 Bild 23: HMR/Mubadala

Literatur

- [1] <http://www.upc.gov.ae/home.aspx?lang=en-US>
- [2] <http://www.zu.ac.ae/main/en/>
- [3] Gensichen, V.; Lumpe, G.: Zur Leistungsfähigkeit, korrekten Anwendung und Kontrolle von EDV-Programmen für die Berechnung räumlicher Stabwerke im Stahlbau (Teil 1). Stahlbau, Volume 77, Issue 6, June 2008, Pages 447–453
- [4] Hayward, T.; Frenz, M.; Böttcher, C.: Up on the roof. Civil Engineering Surveyor, February 2011, Pages 28–31, Published by ICES
- [5] <http://www.cityscapeglobal.com/Awards/2010Winners/>
- [6] <http://www.citybuildabudhabi.com/Images/awards4.jpg>

Ausgewählte Projektbeteiligte

Bauherr: Mubadala, Abu Dhabi, UAE
 Auftraggeber: Al Habtoor & Murray Roberts JV, Abu Dhabi, UAE
 Architekt: BRT Engineering (Bothe Richter Teherani), Hamburg, Germany
 Tragwerksplanung: Ingenieurbüro Dr. Binnewies, Hamburg, Germany
 Projektsteuerung: Parsons, Abu Dhabi, UAE
 Stahlbauunternehmen: Cleveland Bridge & Engineering Middle East, Dubai, UAE
 Fassade Dach: CNYD Shenyang Yuanda Aluminium, Dubai, UAE
 Windgutachten: IFI, Aachen, Germany