



© Foster + Partners, London

Das Schalentragswerk des Kuwait International Airport Terminal 2 – Bemessung und Ausführung einer komplexen Megastruktur in Zeiten der Digitalisierung

Lucio Blandini
Guido Nieri
Werner Sobek

Das Schalentragwerk des Kuwait International Airport Terminal 2 – Bemessung und Ausführung einer komplexen Megastruktur in Zeiten der Digitalisierung

Der internationale Flughafen von Kuwait wird bis 2022 um ein neues Terminalgebäude nach einem Entwurf von Foster + Partners erweitert. Das neue Terminal hat eine Kantenlänge von fast 1,2 km, eine lichte Höhe von bis zu 25 m und eine Dachfläche von 320 000 m². Das Gebäude zeichnet sich aber nicht nur durch seine Größe, sondern auch durch die Komplexität seines Dachtragwerks aus. Trotz seines großen Umfangs musste das Dach ohne Dehnfugen geplant werden. Dies hatte umfangreiche Auswirkungen auf Bemessung und Berechnung aller Bauteile. Das Dachtragwerk ist ein statisch hochgradig unbestimmtes System. Die Interaktion zwischen den verschiedenen Komponenten ist hierdurch sehr komplex, sodass jede Steifigkeitsänderung bei einem Element maßgeblichen Einfluss auf die statische Auslastung der anderen Bauteile hat. Der vorliegende Aufsatz beschreibt, wie dieser anspruchsvolle Entwurf mithilfe komplexer digitaler Methoden und Werkzeuge realisierbar gemacht werden konnte.

Keywords Digitalisierung; BIM; parametrisches Entwerfen; Verbundwirkung; Schalentragwerk

The shell structure of Kuwait International Airport Terminal 2 – engineering and execution of a complex mega-structure in the Digital Age

The international airport of Kuwait is currently being extended by a new terminal building designed by Foster + Partners. The new terminal is to be completed by 2022. It has an edge length of almost 1.2 km, a clear height of up to 25 m and a roof area of 320 000 m². The building is characterized not only by its size, but also by the complexity of its roof structure. Despite its large circumference, the roof had to be designed without expansion joints. This had extensive effects on the design and calculation of all components. The roof structure is a statically highly indeterminate system. The interaction between the various components is therefore very complex, so that any change in stiffness of an element has a significant influence on the static load of the other components. The paper describes how this sophisticated design was made feasible with the help of complex digital methods and tools.

Keywords digitalization; BIM; parametric design; compound effect; shell structure

1 Einleitung

Digitale Methoden und Werkzeuge bieten ein großes Potenzial für das Bauwesen – sei es in Bezug auf die Steigerung der Qualität, der Wirtschaftlichkeit oder der Komplexität. Auch im Büro Werner Sobek kommen sie deshalb schon seit Langem zum Einsatz, z. B. bei Projekten wie dem Audi-Messestand (Architekt: Christoph Ingenhoven), dem Mercedes-Benz Museum (Architekt: UN Studio) [1] oder den Baku Flame Towers (Architekt: HOK Architects). Hierbei wurden ad hoc spezifische Lösungen und Programme entwickelt, um die Planung und Optimierung der jeweils zu realisierenden komplexen Geometrien zu ermöglichen. Dieser Ansatz wurde später erweitert, um eine parametrische Kopplung der geometrischen Modelle an die Berechnungsmodelle zu ermöglichen, wie etwa beim neuen Stuttgarter Hauptbahnhof (Architekt: Christoph Ingenhoven) [2]. Auf diesem Weg konnten nicht nur komplexe Tragwerke modelliert, sondern auch iterativ die jeweils bestmöglichen Lösungen gesucht werden.

Die steigende Komplexität vieler Projekte ebenso wie das Potenzial der computergesteuerten Fertigung führen immer öfter dazu, dass sich nicht nur die entwerfenden Architekten, sondern auch die ausführenden Firmen an die planenden Tragwerks- und Fassadenplaner wenden. Hierbei geht es vor allem um Unterstützung beim Übergang zwischen Planung und Fertigung („file to fabrication“). Aus dieser Zusammenarbeit mit den ausführenden Firmen können so anspruchsvolle Projekte wie das Ferrari-Museum in Modena (Architekt: Future Systems) [3], das neue Nationalmuseum von Katar (Architekt: Jean Nouvel) [4] oder das Heydar Aliyev Center in Baku (Architekt: Zaha Hadid) entstehen.

Da das Büro Werner Sobek bei vielen Projekten bereits in sehr frühen Entwurfsphasen beteiligt ist, bei anderen Projekten aber eher an Optimierung und Ausführung mitwirkt, konnte das Unternehmen sein Wissen entlang der gesamten Prozesskette konsequent ausbauen und weiterentwickeln. Dies ist wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Beratung des jeweiligen Auftraggebers, unabhängig von der Frage, ob es der entwerfende Architekt, der beauftragende Entwickler oder die ausführende Firma ist. Das in den vergangenen Jahren aufgebaute Know-how spielte auch eine wichtige Rolle für die Beauftragung mit der Planung von Terminal 2 des Kuwait International Airport. Bei diesem Projekt waren verschiedene parame-

*) Corresponding author: lucio.blandini@wernersobek.com

Submitted for review: 04 February 2019

Accepted for publication: 09 February 2019



Copyright: Foster + Partners, London



Copyright: Google Earth

Bild 1 a) Aufsicht auf das neue Terminalgebäude am Kuwait International Airport, b) Luftaufnahme der Baustelle im Sommer 2018
a) Aerial view of the new terminal building at Kuwait International Airport, b) aerial view of the construction site in summer 2018

trische Modelle ebenso wie selbst entwickelte Programme unabdingbar, um die geometrische und konstruktive Komplexität des Tragwerks planerisch zu meistern und realisierbar zu machen. Im Folgenden wird dies am Beispiel des komplexesten und schwierigsten Bereichs des Terminals, nämlich des Schalentragwerks illustriert.

2 Projektbeschreibung

Der internationale Flughafen von Kuwait wird in den kommenden Jahren konsequent ausgebaut, um das Emirat zu einem neuen Luftdrehkreuz in der Golfregion zu machen. Die Kapazität des Flughafens soll von derzeit knapp 14 Millionen Passagieren pro Jahr auf 25 (und in einem zweiten Schritt auf 50) Millionen Passagiere erweitert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, soll bis 2022 ein von Foster + Partners entworfenes Terminalgebäude (T2) realisiert werden [5]. Das Terminal gleicht im Grundriss einem dreiflügeligen, symmetrischen Stern mit

abgerundeten Endbereichen (Bild 1). Die Form des Dachs orientiert sich an den traditionellen kuwaitischen Dhow-Segelbooten. Mit einer Kantenlänge von fast 1,2 km, einer lichten Höhe von bis zu 25 m und einer Dachfläche von 320 000 m² ist das Gebäude schon allein aufgrund seiner Größe ein außergewöhnliches Projekt [6]. Eine besondere Herausforderung für die Ingenieure lag aber auch in dem komplexen Tragwerk aus Stahl und Stahlbeton, das es hier zu planen und zu realisieren galt. Das Tragwerk spannt bis zu 120 m und kragt bis zu 50 m aus. Es bietet so einen natürlich verschatteten Eingangsbereich und einen großzügigen und flexiblen Innenbereich (Bild 2).

Die Tragwerks- und Fassadenplanung für das neue Terminal wurde bis zur Ausschreibung vom Büro Arup London erbracht. Nach der Ausschreibung übernahm Werner Sobek Stuttgart die Weiterentwicklung der Details und die Ausführungsplanung. Der Auftrag von Werner Sobek umfasste dabei sowohl die Berechnung, Bemessung und



Bild 2 Die markante Auskrugung des Dachschalentragwerks sorgt für einen großzügigen sonnengeschützten Eingangsbereich
The striking overhang of the roof shell structure provides a generous sun-protected entrance area

Weiterentwicklung auf Grundlage der Ausschreibungsunterlagen als auch die Vorbereitung und Koordination des BIM-Modells bis zu einer Detailgenauigkeit von LOD 400. Außerdem wurden für einige komplexe Bauteile (wie zum Beispiel das Schalentragwerk des Dachs) parametrische 3-D-Modelle definiert, die als Grundlage für die Fertigung dienen.

Das Schalentragwerk des Dachs bestimmt das architektonische Erscheinungsbild des Gebäudes und ist gleichzeitig die komplexeste Tragwerksstruktur [7]. Die spezifische Form entsteht so durch die Kombination architektonischer Gestaltungsmethoden (wie z.B. die Verwendung nicht wiederkehrender Freiformflächen) mit tragwerksplanerischen Formfindungsmethoden.

3 Das Tragwerk

3.1 Die wichtigsten Bauteile

Das Tragwerk des neuen Terminals besteht insgesamt aus fünf unterschiedlichen Systemen (Bild 3): dem Haupttragwerk (Gruppe 100), dem Schalentragwerk (Stahlstruktur: Gruppe 200; Stahlbetonpaneele: Gruppe 800), den aussteifenden Stahlfachwerkträgern (Gruppen 400, 500 und 600), dem Sekundärdachtragwerk (Gruppe 700) und den Fassaden (Glasfassade: Gruppe 300; Dachhülle: Gruppe 900). Die Unterteilung in die o.g. Gruppen wurde konsequent für die Nummerierung aller Komponenten verwendet – von den ersten Rechen- und BIM-Modellen bis hin zu den Ausführungsplänen. Sie taucht deshalb auch immer wieder im vorliegenden Artikel auf.

Das Haupttragwerk besteht aus Stahlbeton. Die wichtigsten Elemente dieses Tragwerks sind 90 im Grundriss achteckige Stahlbeton-Hohlstützen sowie die Haupt- und Querträger, auf denen das Schalendach ruht. Die Hohlstützen haben Durchmesser zwischen 3 und 9 m und variieren in der Höhe zwischen 25 m und 45 m; aufgrund ihres Ausmaßes und der abzutragenden Lasten sind sie in

ihrer Funktion mit Gebäudekernen vergleichbar. Zwischen diesen Stützen spannt ein komplexes System von vorgespannten Stahlbetonfertigteilen; aufgrund ihrer Anordnung werden diese Bogenstrukturen als Längs- bzw. Querrippen bezeichnet. Die Längsrippen spannen entlang der Außenkante des Gebäudes und übernehmen unter anderem die Lasten aus der Fassade. Die Querrippen spannen jeweils von der einen Außenkante über den Innenraum hin zur gegenüberliegenden Außenkante.

Längs- und Querrippen unterteilen das Terminalgebäude in insgesamt 136 Felder. Den oberen Abschluss dieser Felder bildet jeweils eine doppelt gekrümmte Schale aus Stahl und Stahlbeton. Diese Schalen sind das herausragende architektonische und ingenieurtechnische Merkmal des Bauvorhabens. Der sandfarbene Sichtbeton der Schalen prägt das Erscheinungsbild des Terminals (obwohl Stahlelemente eine maßgebende Rolle für das Tragverhalten des Schalendachs spielen!). Die Schalen geben die Lasten am Rand an die Längs- und Querrippen weiter – und stabilisieren zugleich das Haupttragwerk. Am Rand des auskragenden Bereichs und entlang der Symmetrieachsen werden die Schalen durch räumliche Stahlfachwerkträger ausgesteift (Gruppen 400 und 500). Im Zentralbereich (Bild 3) hat das Schalentragwerk eine besondere Geometrie und wird ebenfalls mit einem Stahlfachwerkträger ausgesteift (Gruppe 600). Hierdurch werden Spannweiten von bis zu 105 m möglich.

Trotz seiner sehr großen Abmessungen wurde das Dach ohne Dehnfugen geplant, um Risiken hinsichtlich der Funktionalität und der Wartung auszuschließen. Dies hatte umfangreiche Auswirkungen auf die konstruktive Ausbildung, die Berechnung und die Bemessung aller Bauteile. Das Dach musste durch den Verzicht auf Dehnfugen als ein einheitliches Tragwerk betrachtet werden, das statisch hochgradig unbestimmt ist. Die Interaktion zwischen den verschiedenen Komponenten ist hierdurch sehr komplex, sodass jede Steifigkeitsänderung bei einem Element maßgeblichen Einfluss auf die statische Auslastung der anderen Bauteile hat. So übertragen zum Beispiel die Schalentragwerke zum einen die Hauptdachlasten auf die Längs- und Querrippen, stabilisieren zum anderen aber auch das Haupttragwerk.

Die untere Dachfläche wird von dem o.g. Schalentragwerk bestimmt, während die obere Fläche aus einem Aluminiumdach besteht (Gruppe 900), das mit Photovoltaik-Elementen belegt ist. Wegen der unterschiedlichen Krümmungen des Schalentragwerks und des Aluminiumdachs ist der Einbau eines Sekundärdachtragwerks (Gruppe 700) erforderlich, das die obere Dachhaut stützt und deren Lasten an das Haupttragwerk weiterleitet. Dieses Sekundärtragwerk besteht zum größten Teil aus räumlichen Stahlfachwerkssystemen.

Alle beschriebenen Komponenten sind von einer sehr komplexen Geometrie gekennzeichnet. Dank der Symmetrie des Gebäudes wiederholen sich einige Elemente aber drei bzw. sechs Mal.

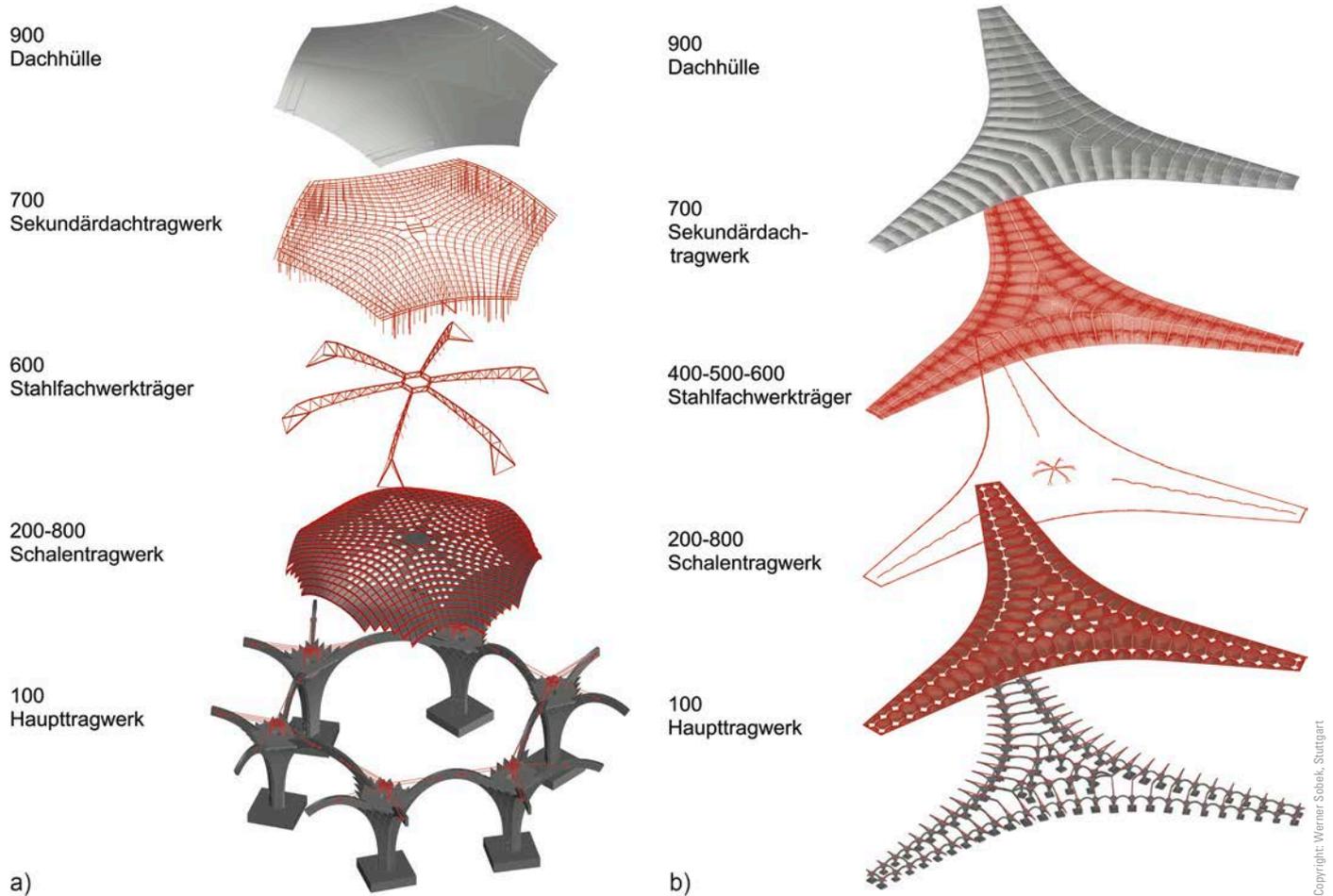


Bild 3 a) Die einzelnen Komponenten von Dach- und Primärtragwerk im Zentralbereich, b) Platzierung der einzelnen Komponenten im Gesamtzusammenhang
 a) The individual components of roof and primary supporting structure in the central area, b) placement of the individual components in the overall context

3.2 Workflow und digitaler Planungsprozess

Aufgrund der parametrischen Struktur des Projekts und der Komplexität der Schnittstellen zwischen Fachplanern und ausführenden Firmen war ein gut organisierter, auf mehreren digitalen Werkzeugen basierender Prozess unabdingbar. Es ging zum einen um die Steuerung und Verwaltung sehr vieler Daten. Zum anderen ging es um die Verwendung einer breiten Palette von Computerprogrammen, damit für jede Aufgabe das jeweils am besten geeignete Werkzeug verwendet werden konnte.

Die Pflege der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Programmen war deshalb ein wichtiger Bestandteil des Planungsprozesses selbst. Die standardmäßig verfügbaren Programme waren nicht immer in der Lage, allen Anforderungen aus diesem komplexen Projekt gerecht zu werden; aus diesem Grund wurden projektspezifische Tools und Programme konzipiert und in den Planungsprozess implementiert (Bild 4). Ziel war es hierbei, jedes konstruktive Element nur einmal zu definieren und den unterschiedlichen Programmen alle relevanten Informationen aus einer einzigen Quelle zur Verfügung stellen zu können. FE-Modell und BIM-Modell konnten sich so auf ein zentrales geometrisches Digitalmodell stützen, in dem alle wichtigen Informationen koordiniert und gespeichert waren.

Für das zentrale Datenmodell wurde die Software McNeel Rhinoceros verwendet; fast alle Bauteile wurden per Scripting (C++, C# und Grasshopper) erzeugt. Ausgehend von dem zentralen Datenmodell wurden die verschiedenen Bauteile mit spezifischen Schnittstellen – einige davon hausintern entwickelt – in andere Programme exportiert bzw. als Basis für Tochtermodelle benutzt. Für die Berechnung aller hier beschriebenen Tragwerkskomponenten wurde die Software SOFiSTiK verwendet. Die verschiedenen Bauteile wurden hierfür zuerst per Scripting definiert und dann durch Ad-hoc-Schnittstellen aus dem zentralen Datenmodell direkt in SOFiSTiK importiert. Hierfür wurden auch die Anpassungen des Modells

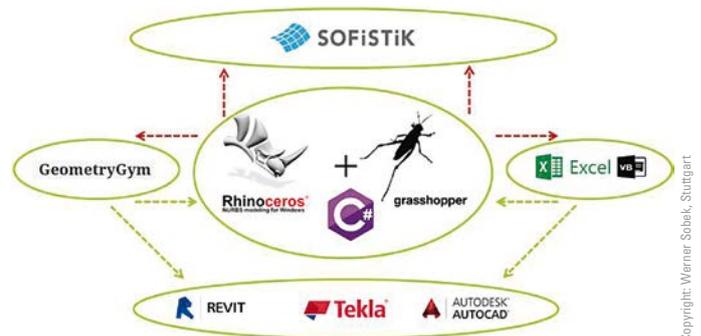


Bild 4 Prozessdiagramm mit Übersicht über die verwendeten EDV-Programme
 Process chart showing the different software programs used

(Bestimmung der Bezugsachse, Punkte, Orientierungspläne etc.) vorprogrammiert, die bei der Übertragung der Informationen in das FE-Modell erforderlich waren. Auf ähnliche Art und Weise wurden auch die BIM-Modelle (über Revit und teilweise über Tekla) generiert. Hierdurch war sichergestellt, dass alle Anpassungen und Aktualisierungen eines Bauteils im Planungsprozess zeitgleich in das FE-Modell und in das BIM-Modell übernommen wurden (Bild 5).

Um eine effiziente Steuerung und Koordination des Projekts zu ermöglichen, wurde das Terminalgebäude in verschiedene Subsysteme und Zonen unterteilt. Für einige Bauteile wurden sogar klar geregelte Namenskonventionen für jedes einzelne Element definiert. Diese Unterteilung, die mit allen externen Beteiligten abgestimmt wurde, wurde durch entsprechende Kodierung in jedes Element integriert und als Referenz für das FE-Modell, das BIM-Modell und die Fertigung verwendet. Dank dieses Prozesses war eine effektive Koordination zwischen Bemessung, Entwicklung und Fertigung der unterschiedlichen Bauteile möglich.

4 Das Schalentragwerk

4.1 Komponenten

Die Dachschalen sind herausragendes Merkmal des architektonischen Entwurfs und stehen gleichzeitig für ein innovatives Tragwerkskonzept (Bild 6). Zum ersten Mal weltweit wurde hier ein Verbundschalentragsystem aus Stahl und Stahlbeton entwickelt, welches trotz hoher thermischer Lasten zugleich eine kontinuierliche Oberfläche und ein gutes Tragverhalten aufweist. Durch die Elementierung und das speziell für das Projekt entwickelte Vorfertigungskonzept konnte das Dachtragwerk darüber hinaus mit hoher Qualität und Präzision und gleichzeitig auch wirtschaftlich gefertigt werden.

Wichtigste Bestandteile des Dachtragwerks sind 136 doppelt gekrümmte Schalen. Jede Schale spannt zwischen 45 und 105 m und wölbt sich bis zu 25 m über den Boden des Innenraums. Die Besonderheit des Tragwerks der Schalen liegt nicht nur in seiner komplexen Geometrie, sondern auch in seiner strukturellen Beschaffenheit: Es besteht hauptsächlich aus drei Komponenten, nämlich den Stahlrandplatten, den Eckknoten aus Stahl und den doppelt gekrümmten Stahlbetonpaneelen (Bild 7). Stahlrandplatte und Stahlbetonpaneel bilden zusammen das Kernelement der Konstruktion, die sogenannten Kassetten.

Die Unterkante der Stahlrandplatten ist gebogen, da sie gleichzeitig auch die Kante der Stahlbetonpaneele definiert. Die Stahlrandplatten werden durch einen automatisierten Prozess mittels CNC-Maschinen gefertigt, um die Form der Platte sowie die Position bzw. Anzahl der Löcher mit einer sehr hohen Genauigkeit realisieren zu können. Je nach statischer Ausnutzung variiert die

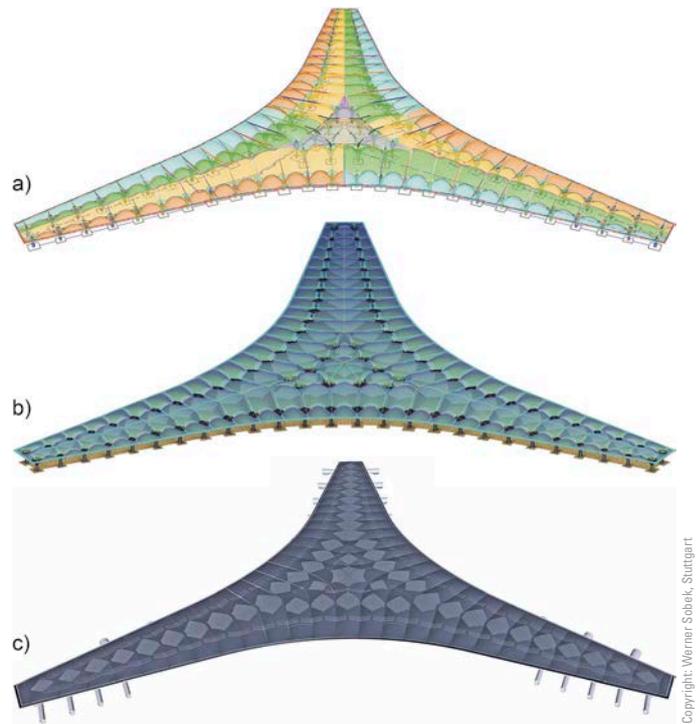


Bild 5 a) Zentrales geometrisches Digitalmodell, b) FE-Modell, c) BIM-Modell
a) Central geometric digital model, b) FE model, c) BIM model

Wandstärke der Stahlplatten zwischen 10 und 16 mm (an einigen besonders belasteten Stellen beträgt sie 20 mm). Die Höhe der Platten variiert zwischen 560 mm im Zentralbereich und 1300 mm an den Rändern: Dies ergibt sich aus der geometrischen Beschreibung, hat aber auch einen positiven Einfluss auf die Randbiegesteifigkeit der Schale. Die untere Kante der Seitenplatten ist zudem bis auf 2 mm abgeschrägt, sodass der Stahlteil im Vergleich zur Sichtbetonfläche fast unsichtbar ist (Bild 12).

Die Stahlbetonpaneele haben eine Wandstärke von 160 mm. Sie wurden im Rahmen der Ausführungsplanung durch eine geometrische Optimierung in Regelflächen umgewandelt, sodass eine möglichst einfache Fertigung gewährleistet war. Stahlrandplatten und Stahlbetonpaneele sind durch ein komplexes Verbundsystem miteinander gekoppelt. Dieses System überträgt die Membranschubkräfte der Stahlbetonplatten in die seitlichen Stahlplatten und ermöglicht gleichzeitig die Befestigung der Bewehrungen.

Die Eckknoten bestehen aus vier Stahlplatten mit Wandstärken von jeweils 40 mm. Diese Platten werden durch Elektroschlacke-Auftragsschweißen zusammengefügt. Dadurch können alle benötigten Knotengeometrien im Werk und mit sehr hoher Präzision hergestellt werden. Die Verbindung zwischen den Knoten und den Paneelen erfolgt durch gleitfeste vorgespannte Schraubverbindungen (M30 F3125M Grade A490). Die Anzahl der Schrauben pro Verbindung variiert dabei zwischen neun und 30 Schrauben. Durch einen automatisierten Optimierungsprozess wird die Anzahl der Schrauben jeweils der tatsächlichen statischen Anforderung angepasst: dies er-



Copyright: Foster + Partners, London

Bild 6 Innenansicht des neuen Terminalgebäudes
Interior view of the new terminal building

möglicht die Reduzierung der Schraubenzahl auf ein absolutes Minimum. Um die Tragfähigkeit der gleitfesten Schraubverbindungen zu erhöhen und dazu auch den nötigen Korrosionsschutz zu gewährleisten, werden die Stahlplatten sandgestrahlt und dann mit einer Aluminiumbeschichtung („Thermal Spray Aluminium“) versehen.

Das Schalentragwerk besteht aus insgesamt ca. 37 000 Kassetten und 41 000 Eckknoten (Bild 7). Mehr als zwei Millionen Schrauben sind erforderlich, um alle Elemente miteinander zu verbinden. Sobald alle Elemente kraftschlüssig miteinander verbunden sind, zeigt die Schale ein Tragverhalten, das als die Kombination einer Stahlgitterschale mit einer kontinuierlichen Stahlbetonschale betrachtet werden kann. Die tragenden Stahlelemente der Schale entsprechen in ihrer Geometrie dem Rand der Stahlbetonelemente. Bei der Anordnung der Stahlelemente wurden zum einen die rechnerisch optimale Position (z. B. gemäß dem Verlauf der geodätischen Kurven) und zum anderen praktische Vorgaben (wie Aspekte der Machbarkeit und der Fertigung ebenso wie möglichst einfache Details) berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde jedes Feld in der Ebene in Trapezbleche unterteilt, die dann vertikal auf die Hülle projiziert wurden.

Die Randplatten aus Stahl bestimmen hauptsächlich die axiale Steifigkeit und die Biegesteifigkeit der Schale in den beiden Hauptrichtungen. Die Paneele aus Stahlbeton wirken als exzentrische Aussteifung; sie sind zum größten Teil nur durch Membrankräfte beansprucht. Besonderheit dieses hybriden Schalentragwerks ist ein gutes Tragwerksverhalten unter thermischen Lasten; dies ist aufgrund der Abmessungen der Schalen und aufgrund des Verzichts auf Bewegungsfugen besonders wichtig. Die Kassetten sind hauptsächlich durch die Eckknoten miteinander verbunden. Dank des Zwischenraums von 40 mm, der sich zwischen den einzelnen Kassetten befindet, können sich die Verbundelemente und die Schale insgesamt leicht dehnen und damit Zwangskräfte auflösen.

4.2 Bemessung

Die Bemessung des Schalentragwerks war in drei Hauptbereiche unterteilt: 1) Bestimmung des optimalen Tragwerksystems für die FE-Analysen. 2) Ermittlung der Bemessungskräfte jeder Komponente (Seitenplatten, Eckknoten, Schubverbindungen, Verbundbausystem etc.). 3) Festlegung der Geometrie bzw. der mechanischen Eigenschaften jeder Komponente.

Für die Tragwerksanalyse wurden verschiedene Modellierungsansätze untersucht und miteinander verglichen; zwei davon wurden schließlich weiterverwendet (Bild 8). Im FE-Gesamtmodell wurde das Schalentragwerk mit einigen Vereinfachungen modelliert: Jedes Paneel aus Stahlbeton wurde in Sofistik als einzelnes Schalenelement („Quad“) mit abgeminderter Steifigkeit abgebildet; die Randplatten zwischen zwei Eckknoten wurden als einzelnes exzentrisches Stahl-Ersatzprofil definiert. Ziel dieses Ansatzes war eine genaue Modellierung der Steifigkeit des Schalentragwerks mit einer realistischen Verteilung der Lasten auf alle Bauteile. Hierdurch konnten das gesamte Gebäude modelliert und wichtige Aspekte wie die dynamischen Eigenfrequenzen untersucht werden. Dieses Modell wurde vor allem für die Bemessung des Primärtragwerks des Dachs (d. h. der Längs- und Querrippen aus Stahlbeton) und der Fachwerkträger verwendet. Beim Detailmodell, das für die Bemessung des Schalentragwerks selbst verwendet wurde, wurde die Maschenweite der Stahlbetonpaneele und der Stahl-Ersatzprofile verfeinert; außerdem wurden spezifische Randbedingungen definiert, um die Lücke zwischen den Paneelen zu simulieren und um damit das spezifische mechanische Verhalten der Schale besser definieren zu können.

Die Steifigkeiten beider Modelle wurden durch Versuche kalibriert; zusätzlich wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter besser berücksichtigen zu können. Diese Abläufe wurden meistens durch Scripting automatisiert, um die nötigen Iterationen zu ermöglichen bzw. um mehrere Varianten mit unterschiedlichen Maßstäben zu testen; dadurch wurde eine höhere Zuverlässigkeit des Prozesses gewährleistet.

Die Bemessungs- und Widerstandskräfte für die Komponenten des Schalendachs waren aufgrund der Verbundwirkung der Elemente und der unterschiedlichen Exzentrizitäten nicht einfach zu ermitteln. Ein typisches Beispiel dafür ist die Ermittlung der Bemessungskräfte der Stahlrandplatten. Diese Bemessungskräfte bestehen aus der Überlagerung der Schnittkräfte des Stahl-Ersatzprofils und der Membrankräfte des Stahlbetonpaneels. Auch die Ermittlung der Widerstandskräfte ist in diesem Fall nicht leicht. Die Tragfähigkeit der Randplatten wird von zahlreichen geometrischen Parametern beeinflusst: unterschiedliche Höhe und Wandstärke der Seitenplatten sowie Lage und Anzahl der Schrauben, Winkel, Exzentrizitäten etc. Um die Tragfähigkeit jedes Bauteils und der gesamten Verbindung ermitteln zu können, mussten mehrere Versagensmechanismen geprüft werden (Tragfähig-

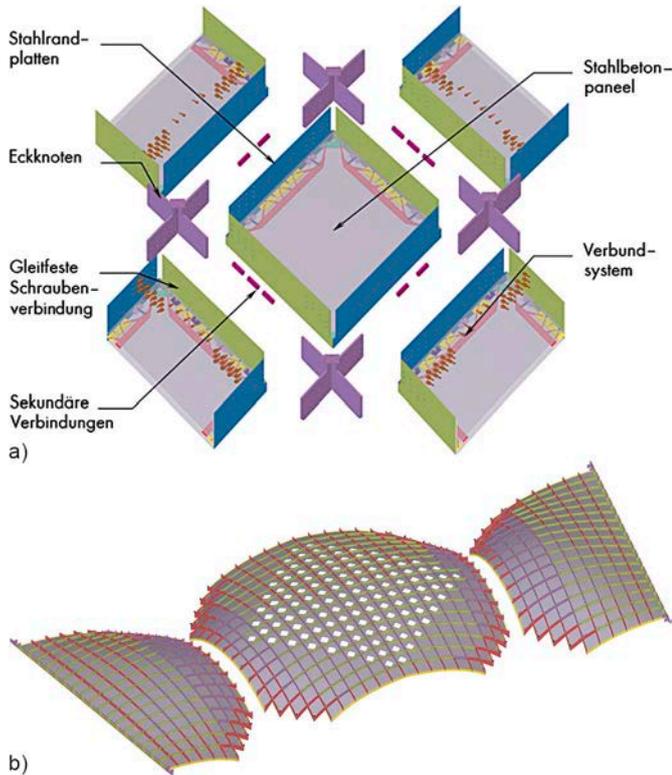


Bild 7 a) Die Hauptkomponenten des Schalentragswerks, b) Tekla-Modell des Schalentragswerks
a) The main components of the shell structure, b) Tekla model of the shell structure

keit der Platte, Blockversagen im Verbindungsbereich, lokales Beulen und Knicknachweisen etc.). Darüber hinaus wurde für die Bemessung der gleitfesten Schraubenverbindungen statt der elastischen Methode die sogenannte „Instantaneous Center of Rotation Method“ angewandt, um eine Optimierung der Anzahl an Schrauben zu ermöglichen. Diese alternative Methode (s. ASTM 360-16) bietet eine realistische Ermittlung der Kräfte; andererseits benötigt man ein iteratives Berechnungsverfahren, das für jede Verbindung und jeden Bemessungslastfall durchgeführt werden muss.

Für die Steuerung der Variablen, die zur Bemessung der tragenden Elemente erforderlich waren, wurde bürointern eine projektspezifische Bemessungssoftware („KIA Shell Cassettes Design Tool“) entwickelt. Hierfür wurden alle benötigten geometrischen Informationen der tragenden Elemente in einer Datenbank zusammengefasst. Dann wurde für jedes Versagenskriterium eine parametrische Funktion implementiert (z.B. Tragfähigkeit jeder Platte in Abhängigkeit von Höhe, Wandstärke, Anzahl der Löcher etc.), mit der jedes Element berechnet wurde. Mit dieser Methode wurden ca. 120 000 Verbindungen zwischen Seitenplatten und Eckknoten bemessen.

Auf ähnliche Art und Weise wurden auch die Knicknachweise der Seitenplatten, die Bemessung des Verbundsystems aus Stahl und Stahlbeton sowie die Bemessung der Stahlbetonpaneele ausgeführt. Dank des dualen Systems zwischen Berechnung und Modellierung war eine kontinuierliche Überprüfung möglich; jede Änderung konnte

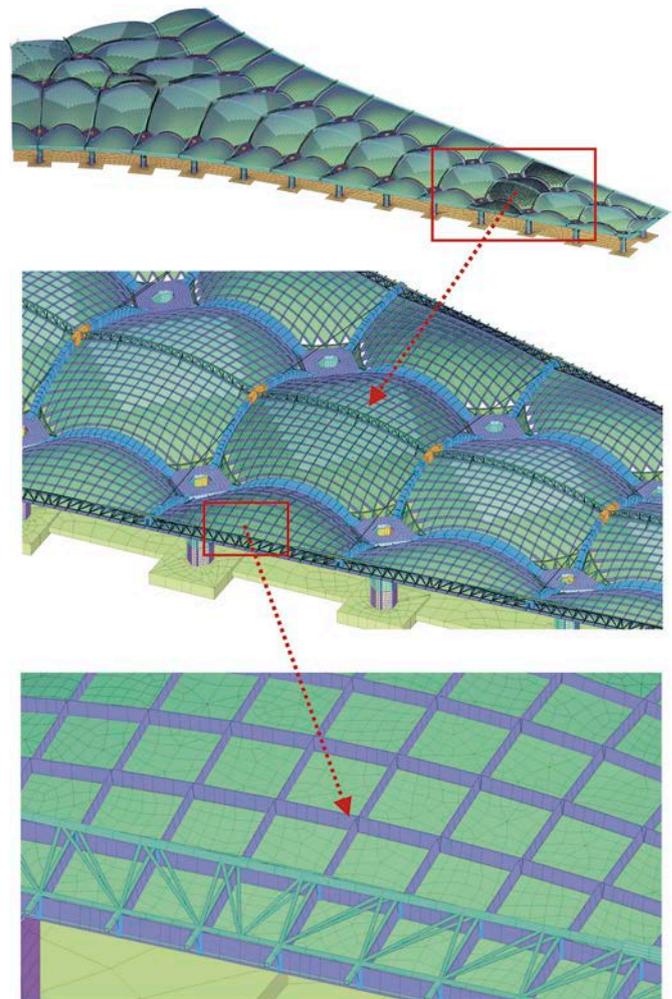


Bild 8 Detailsicht des FE-Modells
Detailed view of the FE model

rechnerisch überprüft und parallel in das BIM-Fertigungsmodell eingefügt werden. So wurde zeitnah und mit überschaubarem Aufwand sichergestellt, dass die Planung alle Anforderungen angemessen berücksichtigt und umsetzt.

4.3 Fertigung und Montage

Die Fertigung und Montage der verschiedenen Bauteile mit der erforderlichen Genauigkeit ist eine der kritischen Aspekte des Projekts – das Schalentragswerk kann nur dann erfolgreich wirken, wenn die einzelnen Elemente exakt zusammenpassen. Um die benötigte Tragfähigkeit der Schraubenverbindungen sicherzustellen, kamen meistens Standardbohrungen zur Anwendung, die maximal $\pm 1,5$ mm Toleranzen pro Schraube erlauben. Aus diesem Grund spielte die Qualität der Fertigungsunterlagen und ihre Integration in den Fertigungsprozess eine maßgebende Rolle. Alle Stahlelemente (inklusive der Schraubverbindungen) wurden in ein BIM-Tekla-Modell integriert; die Freiformflächen der Stahlbetonpaneele wurden innerhalb der Software Rhinoceros mit NURBS-Flächen („Non-Uniform Rational B-Spline“) definiert. Tekla kam auch für Abbildung und Überprüfung der Schnittstelle zu Haupttragwerk (Einbauteile), Fachwerkträger und Sekundär-

tragwerk zum Einsatz. Wo erforderlich, wurden (in der Regel automatisch) auch 2-D-Pläne erzeugt (Bild 9a).

Durch diesen Prozess können zum Beispiel die Eckknoten direkt auf Basis des von Werner Sobek Stuttgart entwickelten Tekla-Modells mit CNC-Maschinen abgeschnitten, mit Robotern positioniert und dann zusammenschweißt werden (Bild 9b). Konturen, Bohrlöcher und Winkel erzielen so immer die erforderliche Genauigkeit.

Die Stahlbetonpaneele werden durch ein hochmodernes und innovatives Produktionsverfahren hergestellt. Dieses Verfahren hilft nicht nur, Kosten zu optimieren, sondern dient auch einer Steigerung der Qualität und einer Beschleunigung des Fertigungsprozesses. Zuerst werden die Freiformflächen aus dem architektonischen Entwurf geometrisch optimiert, sodass die Paneele als Regelflächen ausführbar sind. Anschließend werden die Paneele mithilfe adaptiver Schalungstische der Firma Adapa hergestellt (Bild 10). Die Anpassung der Schalung an das Fertigungsmodell wird durch eine Vielzahl an computergesteuerten hydraulischen Zylindern erreicht.

Mithilfe mehrerer Versuchsaufbauten wurde nicht nur das gewünschte Erscheinungsbild verifiziert, sondern konnte auch die Montage getestet und die Fertigungsgenauigkeit überprüft werden (Bilder 11, 12). Hierbei wurde auch nachgewiesen, dass einzelne Kassetten nachträglich ausgetauscht werden können. Die Grundsteinlegung für das Projekt fand im Mai 2017 statt. Bis Ende 2020 soll die



Copyright Linak, Ankara

Bild 10 Adaptive Schalungstische der Firma Adapa, Aalborg
Adaptive formwork tables made by Adapa, Aalborg

Fertigung und Montage des Primärdachtragwerks erfolgen, die Projektvervollständigung ist für 2022 geplant.

5 Fazit

Auch wenn die Digitalisierung der Baubranche in den letzten Jahren bereits deutliche Fortschritte gemacht hat, so sind wir doch noch weit von einer integralen und reibungslosen Informationskette zwischen Planung und Fertigung entfernt. Gleiches gilt für die noch zu leistende Integration des gesamten Lebenszyklus (bis hin zum Rückbau und zum Recycling) in den Planungsprozess. Die digitalen Werkzeuge und Planungsmethoden, welche die Autoren für die Ausführung von Terminal 2 des Kuwait

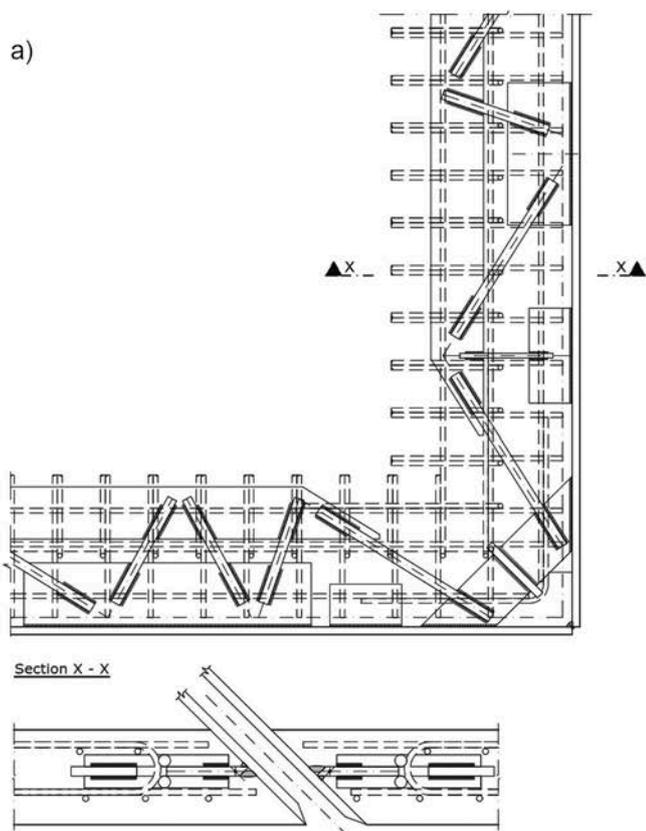


Bild 9 a) Detail des Verbundsystems zwischen den Stahlrandplatten, b) die ersten Eckknoten
a) Detail of the bonded system between the steel edge plates, b) the first corner knots



Copyright: Werner Sobek, Stuttgart

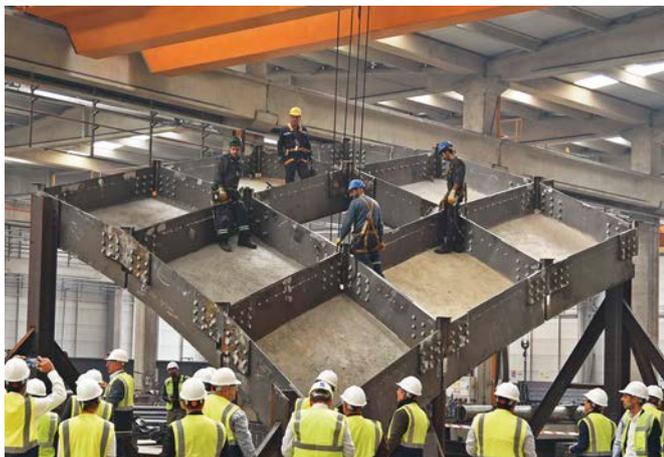


Bild 11 Erster Versuchsaufbau für das Schalendach (Oktober 2017)
First experimental setup for the shell roof (October 2017)



Bild 12 Erster Aufbau eines Schalensegments in Kuwait (September 2018)
First mock-up of a shell segment in Kuwait (September 2018)

International Airport entwickelt haben, sind nur ein kleiner, aber dennoch wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer umfassenden Digitalisierung des Bauwesens. Diese Werkzeuge und Methoden zeigen beispielhaft auf, wie die Qualität und Wirtschaftlichkeit von Großprojekten durch die Planer deutlich erhöht werden kann – sie haben nämlich nicht nur zu einer größeren Präzision bei Modellierung, Bemessung und Fertigung des komplexen Tragwerks beigetragen, sondern gleichzeitig auch eine bessere Koordination der unterschiedlichen Akteure ermöglicht.

Dank

Die Autoren danken der ausführenden Firma Limak Insaat Kuwait und insbesondere dem Design-Team unter der Leitung von *Izzet Fikirlier, Koray Etoz* und *Alptekin Kibar* für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit bei diesem außergewöhnlichen Projekt. Ein großer Dank geht auch an alle Kolleginnen und Kollegen, die mit den Autoren an dem Schalentragerwerk gearbeitet haben. Besonders gedankt sei *Stephen Hagenmayer, Wolfgang Sundermann, Mario Steinlechner, Matteo Brunetti, Maximilian Karcher, Zachary Christian, Carlotta Santachiara, Alissa Beck, Eugen Chladny, Agatha Braun, Mladen Markovic, Heike Myland, Sandra Neaga-Friz* und *Johannes Finster*. Ihr Wissen, ihr Engagement und ihre Leidenschaft waren von unschätzbarem Wert für die erfolgreiche Realisierung des Projekts. *Frank Heinlein* danken die Verfasser für die kritischen Rückmeldungen zum Manuskript.

Projektbeteiligte

Bauherr: Ministry of Public Works, Kuwait
 Bauunternehmen: Limak Insaat Kuwait
 Architekten: Foster + Partners, London/Großbritannien
 Tragwerks- und Fassadenplanung (bis Ausschreibung): Arup, London/Großbritannien; Gulf Consult, Kuwait
 Tragwerks- und Fassadenplanung (ab Ausschreibung): Werner Sobek Stuttgart/Deutschland
 Ausführungsarchitekten und BIM-Management (ab Ausschreibung): AECOM, Madrid & London
 Beratung zu Bauabläufen: Robert Bird Group, Brisbane/Australien

Literatur

- [1] *Sobek, W.; Klein, D.; Winterstetter, T.* (2005) Hochkomplexe Geometrie. Das neue Mercedes-Benz-Museum in Stuttgart. In: *Beratende Ingenieure 10*, S. 16–21.
- [2] *Blandini, L.; Schuster, A.; Sobek, W.* (2011) The Railway Station „Stuttgart 21“ – Structural Modelling and Fabrication of Double Curved Concrete Structure. In: *Gegnagel, M.; Kilian, A.; Palz, N.; Scheurer, F.* [eds.] (2011) *Complexity and Responsibility – Proceedings of the Design Modelling Symposium*. Berlin: Springer, S. 217–224.
- [3] *Blandini, L.; Schmidt, T.; Winterstetter, T.; Sobek, W.* (2014) Fassaden mit komplexer Geometrie – am Beispiel des Enzo Ferrari Museums in Modena. In: *Bautechnik 91*, H. 3, S. 175–180.
- [4] *Winterstetter, T.; Toth, A.; Sobek, W.* et al. (2017) National Museum of Qatar. Stahlbau, Gebäudehülle und 3D-BIM in höchster Komplexität. In: *Stahlbau 86*, H. 4, S. 346–350.
- [5] Foster + Partners: Designs unveiled for Kuwait International Airport [online]. [Zugriff am: 22. Jan. 2019]. <https://www.fosterandpartners.com/news/archive/2011/10/designs-unveiled-for-kuwait-internationalairport/>
- [6] *Josefsson, K.* (2013) Symmetry as Geometry Kuwait International Airport. In: *Architectural Design 83*, No. 2 (March/April).
- [7] *Munro, D.; Arkinstall, M.; Carfrae, T.* (2018) Kuwait International Airport Terminal II: the development of a new form of precast composite shell. *Proceedings of IASS Symposium Boston, 16–20 July 2018*.

Autoren

Dr.-Ing. M.Arch. Lucio Blandini
 M.Eng. Guido Nieri
 Prof. Dr. Dr. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Werner Sobek Stuttgart AG
 Albstr. 14
 70597 Stuttgart
lucio.blandini@wernersobek.com

Werner Sobek Group

Albstraße 14
70597 Stuttgart
Germany
Tel +49.711.7 67 50-0
Fax +49.711.7 67 50-44
mail@wernersobek.com

Werner Sobek Stuttgart

Albstraße 14
70597 Stuttgart
Germany
Tel +49.711.7 67 50-0
Fax +49.711.7 67 50-44
stuttgart@wernersobek.com

Werner Sobek Design

Albstraße 14
70597 Stuttgart
Germany
Tel +49.711.7 67 50-0
Fax +49.711.7 67 50-44
design@wernersobek.com

WSGreenTechnologies

Albstraße 14
70597 Stuttgart
Germany
Tel +49.711.7 67 50-0
Fax +49.711.7 67 50-44
greentech@wernersobek.com

Ingenieurbüro htp GmbH

Rosenbrunnenstraße 8
69469 Weinheim
Germany
Tel +49.62 01.2 90 90-0
Fax +49.62 01.2 90 90-20
info@buerohpt.de

Werner Sobek Berlin

Kurfürstendamm 216
10719 Berlin
Germany
Tel +49.30.4 03 63 72-50
berlin@wernersobek.com

Werner Sobek Buenos Aires

1933 Armenia, Piso 3, K
Buenos Aires
CABA, C1414DKO
Argentina
Tel +54.911.25 03 12 02
buenosaires@wernersobek.com

Werner Sobek Dubai

City Tower 2,
Office Unit 1602 C
Sheikh Zayed Road
P.O. Box 119553
Dubai, UAE
Tel +971.4.3 42 55 01
Fax +971.4.3 27 57 65
dubai@wernersobek.com

Werner Sobek Frankfurt

Darmstädter Landstraße 125
60598 Frankfurt am Main
Germany
Tel +49.69.42 69 59-0
Fax +49.69.42 69 59-44
frankfurt@wernersobek.com

Werner Sobek Istanbul

Mimarlık Mühendislik ve
Danışmanlık Tic.Ltd.Şti.
I Tower Plaza
Merkez Mah. Akar
Caddesi No:3
Kat:25 Ofis No:174
34381 Bomonti-Şişli/Istanbul
Turkey
Tel +90.212.6 32 95 82
Fax +90.212.8 09 04 72
istanbul@wernersobek.com

Werner Sobek Moskwa

Malaya Dmitrovka, 20
127006 Moscow
Russia
Tel +7.495.7 80 72-29
Fax +7.495.7 80 72-30
moskwa@wernersobek.com

Werner Sobek New York

138 Spring Street, 2nd Floor
New York, NY 10012
USA
Tel +1.212.58 80-233
Fax +1.212.58 80-826
newyork@wernersobek.com