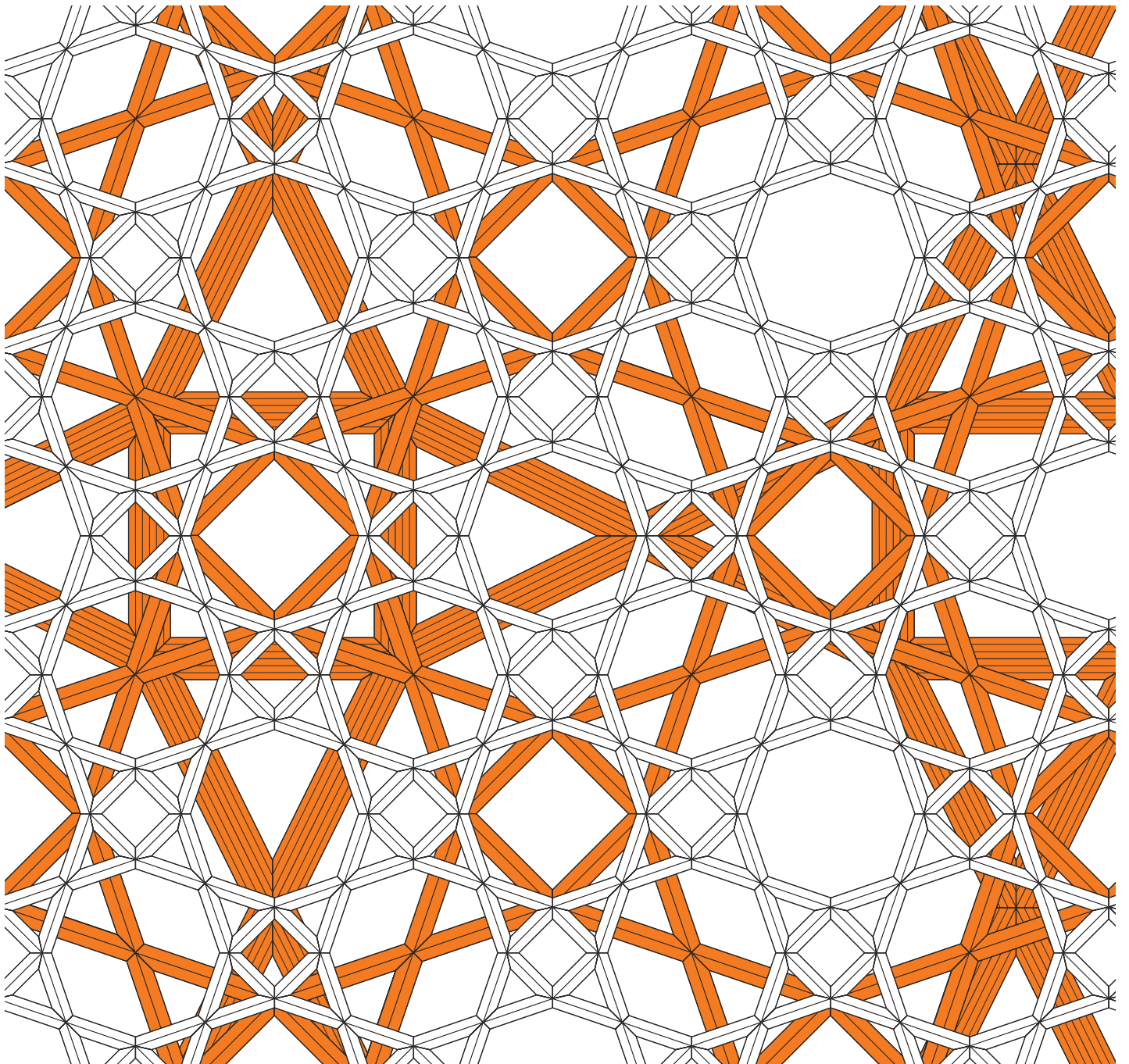


- Kongresszentrum in Rom von Studio Fuksas
- Das Soulages-Museum der Pritzker-Preisträger RCR
- Jean Nouvel's Louvre-Kuppel in Abu Dhabi

DETAIL

Zeitschrift für Architektur + Baudetail · Review of Architecture + Construction Details
Bauen mit Stahl · Steel Construction · Ausgabe · Issue · 4 · 2017



Die Konstruktion der Kuppel des Louvre Abu Dhabi

Construction of the Dome over the Louvre Abu Dhabi

Architektur: Ateliers Jean Nouvel, HW architecture
 Tragwerksplanung: Buro Happold
 Ausführung: Waagner-Biro
 Text: Bernhard Reiser

Fotos:

S. 69 oben: ©TDIC, Architect: Ateliers Jean Nouvel;
 S. 69 unten, 70–74: Waagner Biro

Als »Regen aus Lichtbündeln« und als Sternenhimmel bei Nacht stellt sich Jean Nouvel den Außenraum des Louvre in Abu Dhabi vor, der noch dieses Jahr eröffnet werden soll. Auf 8600 m² Ausstellungsfläche werden 600 Kunstwerke von der Antike bis zur Gegenwart zu sehen sein, die Hälfte davon stammt von Partnerinstitutionen aus Frankreich. Insgesamt umfasst das Bauprojekt eine Fläche von 87000 m², die zunächst als künstliche Halbinsel im Meer aufgeschüttet wurde. Im Anschluss wurden die Wasserbecken geflutet, sodass der Eindruck von einem Museum mitten im Meer entsteht (Abb. 1, 2). Das markante Zeichen des Gebäudes ist die geometrisch ornamentierte Kuppel. Sie ist eine Referenz an die traditionelle orientalische Architektur und schwebt über weißen Kuben, die an ein arabisches Dorf erinnern. Mit ihrem Durchmesser von 180 m kühlt sie in der sengenden Hitze eine Fläche von 25000 m² allein durch ihren Schatten. Gemeint sind dabei nicht nur die Außenbereiche, sondern auch eine Vielzahl der 55 mit strahlend weißem Faserbeton bekleideten Kuben, in denen Sammlungsräume, Wechselausstellungen, ein Kindermuseum, Café und Restaurant sowie ein Auditorium untergebracht sind. Der Rand der gigantischen Konstruktion liegt in 14 m Höhe auf nur vier Auflagern auf. Der höchste Punkt der Kuppel befindet sich 40 m über dem Boden.

Stahltragwerk auf vier Auflagern

Nach ersten Tragwerkskonzepten während der Entwurfsphase 2007 hat der Bauherr, die Tourism Development & Investment Company Abu Dhabi (TDIC), im Zuge der Ausarbeitung Buro Happold beauftragt, die Tragwerksplanung der Stahlbetonkonstruktionen und des Stahlbaus weiterzuentwickeln. Für die Planung des Mikroklimas, das in einzelnen lokalen Bereichen differenziert wurde – heller und wärmer über dem Wasser, dunkler und kühler in Besucherbereichen – hat Transsolar die Wirkung der Verkleidung am Computermodell zu simuliert. Aus der Entwurfsplanung der Architekten, den Vordimensionierungen der Tragwerks-

und Klimaplaner wurden die Spezifikationen der Kuppel zur Ausschreibung zusammengestellt. Im Zuge eines mehrjährigen Ausschreibungsprozesses hat der Bauherr 2013 Waagner-Biro mit der Ausführung nach dem Prinzip »Design and Build« beauftragt, das heißt inklusive der Fertigungs- und Montageplanung. Waagner-Biro planten nicht nur sämtliche Stahlbau- und Verkleidungselemente dreidimensional, sondern auch die komplette Unterstützungs- und Montagekonstruktion: 4500 t Lasttürme und Plattformen. Diese Plattformen sind erforderlich, damit der Bau und Ausbau unter der Kuppel bei laufenden Arbeiten an der Dachkonstruktion weitergehen kann, wie z. B. das Einheben der großflächigen Verkleidungselemente aus Glasfaserbeton, die den Kuben des Museums ihr weißes Erscheinungsbild geben.

BIM-Modell

Um diese Schnittstellen zu kontrollieren, greifen alle Gewerke auf dasselbe globale BIM-Modell zu. Dieses Modell bildet auch sämtliche Montageschritte der temporären Konstruktion sowie deren sequentiellen Rückbau ab. Außerdem ist daraus ersichtlich, in welchen Bereichen bis zu welchem Zeitpunkt welcher Kran für welche Firma verfügbar ist. Eine der Herausforderungen liegt in der schieren Größe des Bauwerks, der Komplexität vieler unterschiedlicher Bauteile und der kurzen Planungs- und Bauzeit von nur drei Jahren. Um die Entwicklung der Kuppel unter den schwierigen Randbedingungen bewältigen zu können, musste das 3D-Modell parametrisch aufgebaut werden – sowohl um Änderungen schnell umsetzen zu können als auch um später alle wesentlichen Pläne möglichst automatisiert aus dem Modell abzuleiten (Abb. 11). Diese Automatisierung wäre nicht möglich gewesen ohne die firmenintern entwickelte Software, die die Schnittstellen zwischen Statik, Stahlbauplanung und Fassadenplanung überbrückt und Informationen zwischen einzelnen Planungsprozessen übermittelt. So werden alle Zuschnitts- und Montagepläne für die 7850 Verkleidungselemente vollautomatisiert erzeugt (Abb. 14).

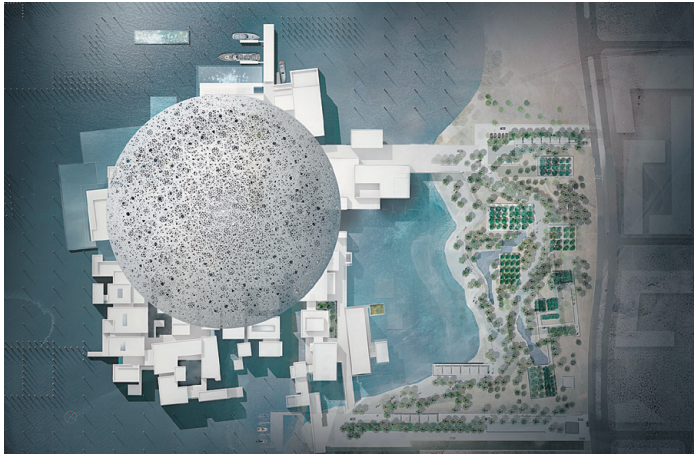
Verschweißt und oben verschraubt

Das statische Konzept des Domes ist eine freitragende Kuppel, die auf nur vier Lagern ruht. Von Lager zu Lager spannt ein kreisförmiger sogenannter Ringbeam, bestehend aus drei umlaufenden Trägern und einer Ausfachung, wovon der innere mit einem Querschnitt von 850 × 700 mm und Wandstärken bis 70 mm von den Lagern gestützt wird. Dieser Ringträger muss enorme Zugkräfte aufnehmen und ist daher kontinuierlich voll verschweißt (Abb. 5). Die Verbindungen des Raumfachwerks, das sich über dem Ringträger aufwölbt, sind über den vier Auflagern ebenfalls verschweißt. In der Feldmitte zwischen den Lagern ist die Konstruktion leichter ausgeführt und verschraubt.

Um bei dem flachen Stich der Kuppel die Stabverkürzung richtig abzubilden, wird in der weiteren Planung für den Krafteintrag jeder Verbindung ein bestimmter Wert zugeordnet, ab dem der Schlupf in den Langlöchern der Schraubverbindungen aktiviert wird. Die Verformungen aus Eigengewicht und Schlupf müssen kompensiert werden, indem die im voll belasteten Endzustand kugelförmige Krümmung des Domes für die Bauphase mit einer Überhöhung versehen wird. Die Geometrie wird dadurch in eine Freiformfläche überführt, was die Planung deutlich komplexer macht.

Vorgefertigte Super Size Elements

Das gesamte Raumfachwerk besteht aus ca. 15000 einzelnen Stäben mit einem Gewicht von 5000 t. Um den Aufbau der Kuppel mit der erforderlichen Präzision, Geschwindigkeit und nur relativ wenigen Montagefehlern zu bewerkstelligen, wurde die Dachkonstruktion in 85 vorgefertigte Elemente unterteilt, die aus insgesamt 10968 einzelnen, im Werk vorgefertigten Stahlprofilen auf der Baustelle in der Wüste verschraubt bzw. verschweißt wurden (Abb. 7). Diese Super Size Elements (SSE) sind bis zu 33 m lang und 14 m breit mit einer Höhe von 6 m. Das schwerste SSE wiegt 65 t. Die fertigen SSE werden mit Tiefbettlastern vom Baustellenbereich für die Vorfertigung zum Einbauplatz



1



2

gebracht und dort von einem 1200 t Raupenkran auf die Unterstützungskonstruktion gehoben. Zur Ableitung des Eigengewichts während des Bauzustands mussten 117 Schwerlasttürme geplant, gefertigt und montiert werden. Die Zwischenräume der auf Abstand vormontierten SSE werden mit insgesamt 3604 Losstäben geschlossen (Abb. 4).

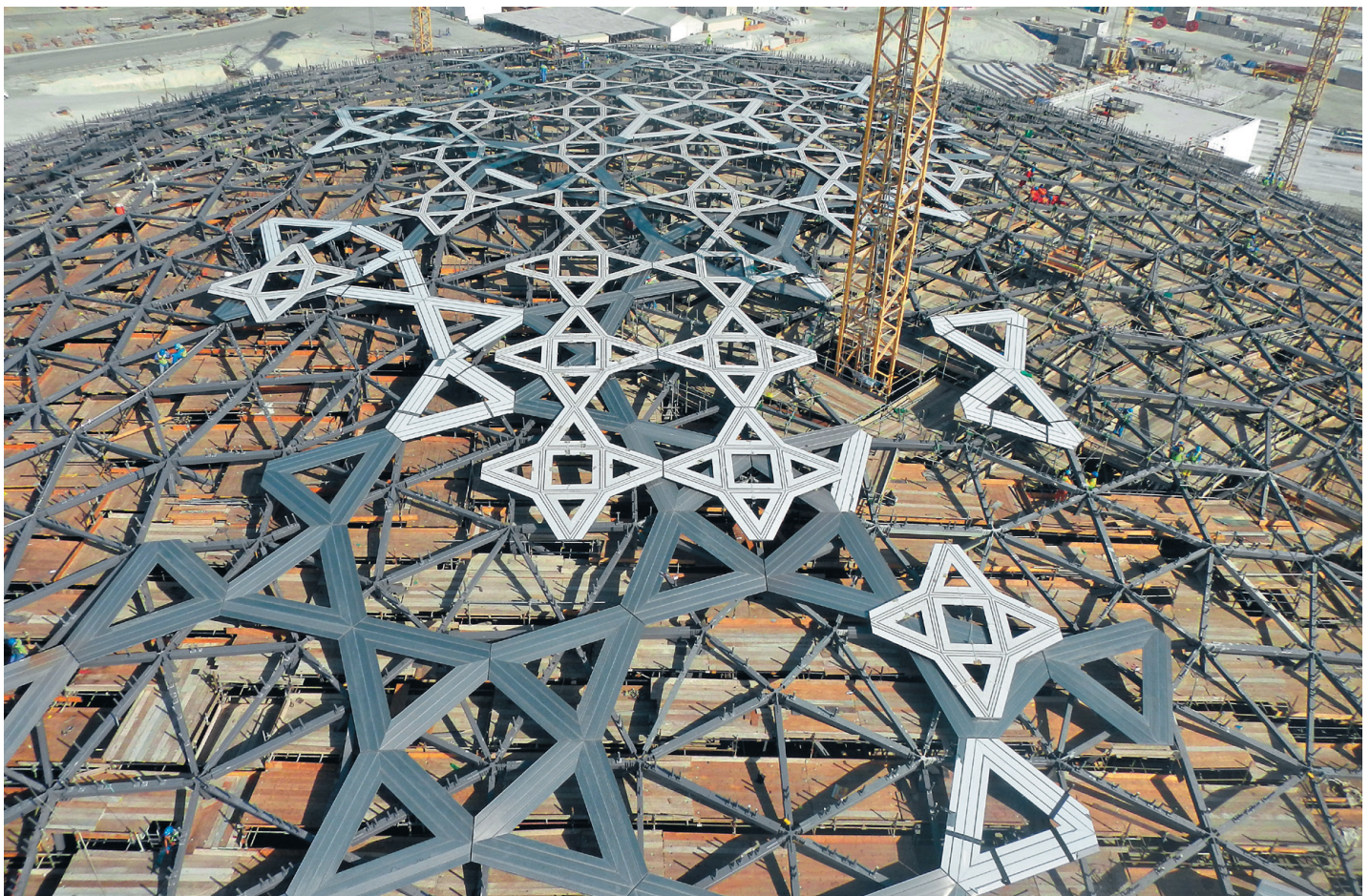
Taktung mit Betonbau

Um den engen Terminplan halten zu können, wird die Errichtung die Kuppel direkt dem Fortschritt der darunterliegenden Betonarbeiten folgend getaktet. Deshalb wird an der Stelle begonnen, wo sich später keine Gebäude darunter befinden. Damit die anderen

Gewerke unter der Kuppel zeitgleich arbeiten können, wird unter der Kuppelunterseite eine von den Schwerlasttürmen getragene freispannende Montageplattform errichtet (Abb. 3). Von dort betragen die Montagehöhen zwischen 2 und 7 m. Zunächst werden die Losstäbe, die die SSEs miteinander verbinden, mit fahrbaren Scherenbühnen montiert, anschließend mit speziell konstruierten Hubvorrichtungen die an der Unterseite angebrachten vier Ebenen der Verkleidung. Nach der Fertigstellung der Stahlmontage aus SSEs und Losstäben ist das Eigengewicht des Domes noch von ca. 200 Unterstützungspunkten auf den Schwerlasttürmen getragen mit Lasten von bis zu 150 t.

- 1, 2 Louvre Abu Dhabi als Oase im Meer, Renderings Ateliers Jean Nouvel
- 1 Galerien, Kindermuseum, Restaurant und Auditorium sind auf 55 einzelne weiße Kuben aufgeteilt, die an ein traditionelles arabisches Dorf erinnern. Die perforierte Kuppel schafft ein angenehmes Mikroklima mit kontrastreichen Lichteffekten.
- 3 Montage der zwei unteren Ebenen der sternförmigen Aluminiumverkleidung auf dem Stahltragwerk

- 1, 2 *The Louvre Abu Dhabi: an oasis in the sea; renderings by Ateliers Jean Nouvel*
- 1 *The galleries, children's museum, restaurant and auditorium are distributed over 55 individual white cubic structures, reminiscent of a traditional Arab village. Set in the middle of the desert, the perforated dome creates a pleasant microclimate with contrasting lighting effects.*
- 3 *Assembly of the two lower levels of the star-shaped aluminium cladding elements on the steel structure*



3



4



5

Seismic Isolators

Jedes der vier Auflager ist auf eine maximale Vertikallast von 33000 kN ausgelegt – das entspricht ca. 3300 t oder 40 Lokomotiven – mit einer maximalen horizontalen Auslenkung von 286 mm, um die sich die Kuppel im Falle eines Erdbebens verschieben kann. Das Unterteil des Lagers hat die Form einer Schale, das Oberteil ist linsenförmig (Abb. 18). Diese Geometrie führt zu einer Selbstzentrierung nach einer Auslenkung, das heißt, die Kuppel gleitet nach Verschiebungen während eines Erdbebens wieder zurück in seine Ausgangsposition. Wegen der extrem hohen Belastungen bei gleichzeitiger oszillierender Auslenkung müssen diese »Seismic Isolators« speziell entwickelt werden. Weltweit ist nur ein Testlabor in der Lage, diese Dimensionen zu beherrschen: das California Department of Transportation Caltrans in Sacramento. Dort wird unter anderem die Abnahme der Gleitfähigkeit über die Länge des zurückgelegten Gleitwegs bestimmt. Diese hat Einfluss auf die Auflagerreaktionen und ist wichtig bei der Stahl-dimensionierung.

Absenkung auf die vier Lager

Um das gesamte Eigengewicht in die vier Lager einzuleiten, ist es erforderlich, die gesamte Kuppelkonstruktion mit hydraulischen Pressen anzuheben. Diese wurden beiderseits der vier Lagerpunkte positioniert und über Steuerungsgeräte miteinander verschaltet, um die Kuppel simultan langsam in die Höhe zu heben. Dabei werden zuerst die Auflager der Unterstützungstürme unmittelbar neben den Lagern frei, bis zum Schluss der Montageturm unter dem Mittelpunkt der Kuppel unbelastet ist. Erst jetzt hat sich die Konstruktion von ihrer überhöhten Geometrie in die endgültige Kalottenform abgesenkt. Da hydraulische Pressen mit der erforderlichen Kapazität nicht über den entsprechend hohen Kolbenhub verfügen, wird die Last alternierend auf den Pressen und auf dazwischengeschobenen Stapel-elementen abgela-s-sen, die schrittweise immer höher gestapelt werden. Bei der Maximalhubhöhe von 385 mm verschieben sich die Lagerpunkte

ca. 90 mm radial nach außen. Um den Eintrag der daraus resultierenden Horizontal-lasten in die Auflager zu begrenzen, stehen die Pressen auf geschmierten polierten Edelstahlblechen.

Nach Entlastung aller Schwerlasttürme werden diese innerhalb von drei Tagen abgebaut. In dieser Zeit steht die Kuppel nur auf den Hochlaststapel-elementen, die an der Position der späteren vier Auflager aufgeschichtet wurden. Jetzt können die speziell für den Louvre dimensionierten und gefertigten Lager mit einem Durchmesser von 1,6 m und einem Gewicht von je 6 t montiert werden. Nach Abbau aller Türme wird der Hubprozess umgekehrt und der Dome mit der Stapelmethode in seine endgültige Lage auf die Lager abgelassen. Um die Maßgenauigkeit zu garantieren, wird das Anheben und Absenken mitlaufend vermessen und mit Daten aus der Statik des 3D-Modells abgeglichen.

7850 Sterne aus Aluminiumprofilen

Um das Mikroklima unter der Kuppel zu steuern, wurde für die Außen- und Innen-seite des Raumfachwerks eine Verkleidung entworfen, die – maßgeschneidert auf die darunterliegenden Freibereiche und Gebäude mit bzw. ohne Oberlichter – eine unterschiedliche Lichtdurchlässigkeit aufweist. In Anlehnung an islamische Kacheln entstehen aus wenigen Grundformen komplexe geometrische Muster. Diese Grundformen sind sternförmige Elemente aus 75 mm hohen extrudierten Aluminiumprofilen, die ein Quadrat mit vier Dreiecken als Spitzen bilden. Die Breite der aus Einzelblechen zusammengeclipsten Aluminiumprofilen beträgt maximal 1,5 m, variiert aber von Stern zu Stern und auch innerhalb eines Sterns, um die Lichtdurchlässigkeit steuern zu können (Abb. 13). Vier Ebenen aus solchen Sternen mit Abständen von 65–93 mm überlagern sich an der Ober- und Unterseite der Kuppel, wobei die Größe der Sterne von Ebene zu Ebene von $3,5 \times 3,5$ bis zu 14×14 m variiert (Abb. 9). Da die in sich regelmäßigen Muster gegeneinander verschoben und verdreht sind, bildet sich ein dreidimensionales

unregelmäßiges Gesamtbild mit unterschiedlich großen punktuellen Öffnungen, die das Sonnenlicht wie Irisblenden unterschiedlicher Durchmesser zu Strahlenbündeln fokussieren (siehe Seite 67). Insgesamt besteht die Verkleidung des Domes aus 7850 individuellen Sternelementen mit einer Gesamtprofillänge von 827000 m bei 21 unterschiedlichen Querschnitten. Daraus resultieren geometrisch individuelle 459260 Zuschnittsteile und 413821 Eckverbinder, mit denen die Profile zu Sternen vormontiert werden.

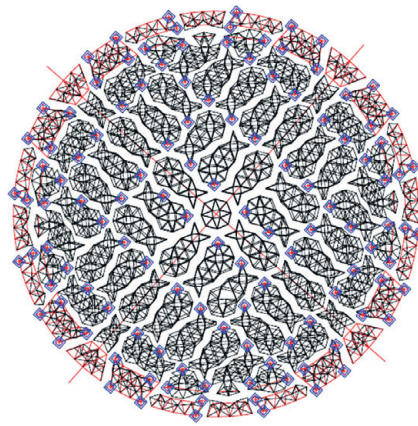
Montage der Verkleidungsebenen

Die Spitzen der Sterne einer Ebene sind über Pins miteinander verbunden. Dies bedeutet sehr enge Montagetoleranzen und die Erfordernis einer hohen Genauigkeit bezüglich der Positionierung. Beim Aufaddieren der zulässigen Toleranzen hätte die Verkleidung nicht montiert werden können. Die vier gegeneinander verdrehten Lagen sind durch 145000 speziell entwickelte Konnektoren miteinander verbunden. Diese 6–9 cm langen Verbinder aus Aluminium-Druckguss sind im Inneren mit einem Silikonring versehen, um Verformungen aus unterschiedlicher Sonneneinstrahlung aufnehmen zu können und Zwängungen zu verhindern (Abb. 10). Die untereinander gekoppelten vier Verkleidungsebenen werden mit ca. 55000 Verbindungskonsolen an die Stahlkonstruktion angehängt (Abb. 15). Da die Verkleidung in sich genau passen muss, das Raumfachwerk sich aber während der Montage der Verkleidung durch die zusätzlich ansteigende Belastung weiter verformt, ist es schwierig, die exakte Position vor Ort festzulegen. Anhand von Fixpunkten wurde ein lokales Koordinatensystem eingemessen, an dem die Sterne ausgerichtet wurden. So konnte eine Endgenauigkeit von ± 10 mm zur geplanten Endlage erzielt werden.

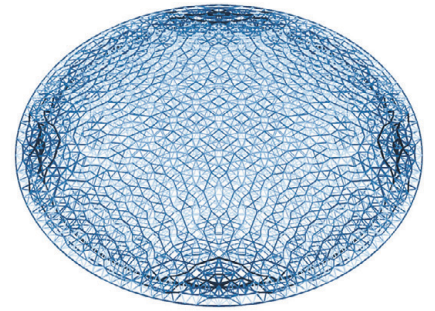
Der umlaufende Rand ist nicht wie die übrige Verkleidung aus Aluminium, sondern aus gebogenem und verschweißtem Edelstahl, um eine präzise geschnittene Silhouette zu gewährleisten (Abb. 17, 19).



6



7



8

Jean Nouvel conceived the external space of the Louvre in Abu Dhabi as a “rain of light” and as a starry sky at night. The museum will open later this year. Some 600 works of art dating from antiquity to the present day will be on display in an exhibition space 8,600 m² in extent. The development, covering an overall site area of 87,000 m², stands on a made-up peninsula in the ocean amid pools of water that were formed to create the impression of a museum rising from the sea (ills. 1, 2). The distinctive feature of the building is the geometrically ornamented dome – a reference to traditional Arabian architecture – which seems to hover above the 55 cubic structures beneath. These are clad in gleaming white fibre

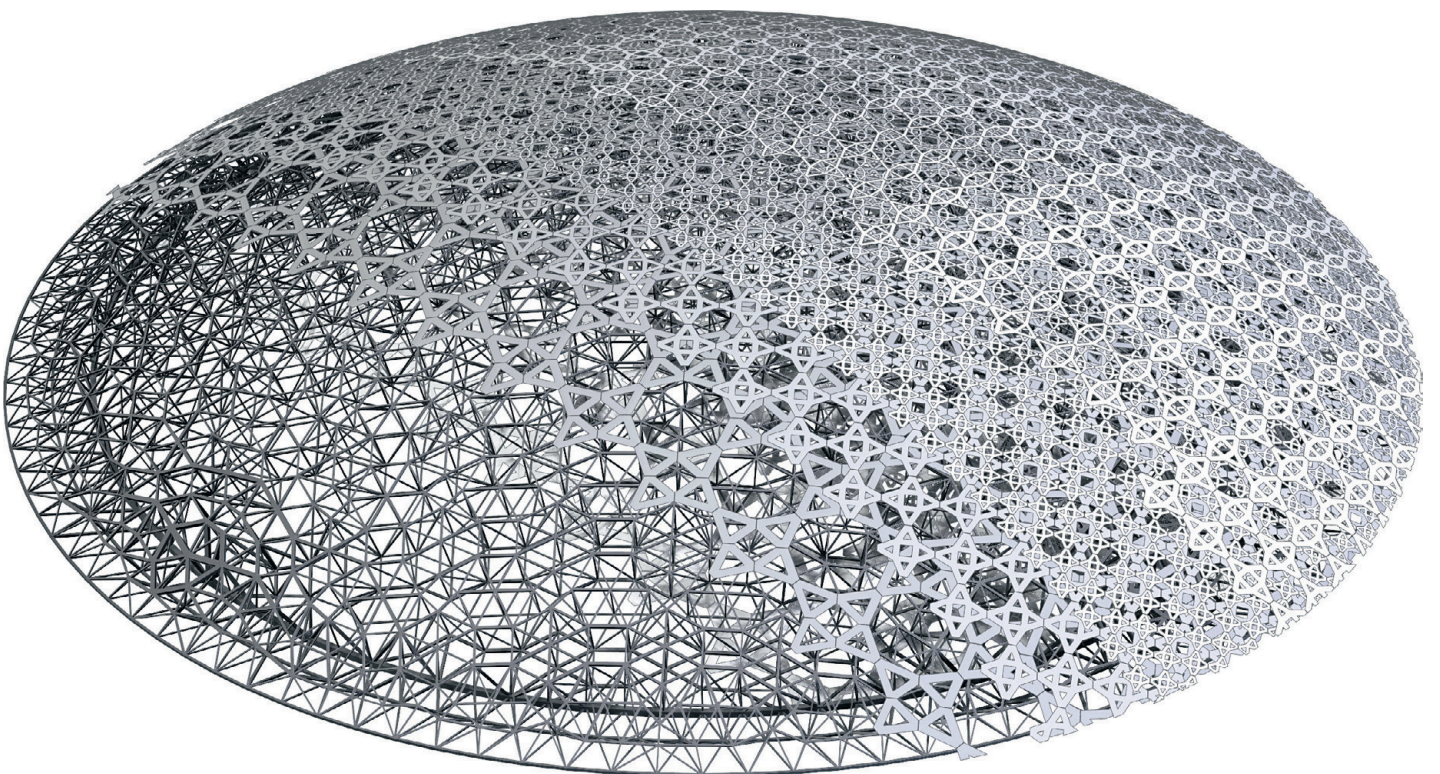
concrete and house spaces for the museum’s permanent collection of art, temporary exhibitions, a children’s museum, a cafe and restaurant, as well as an auditorium. With a diameter of 180 m, the gigantic dome cools an area of 25,000 m² through the shade it provides. At its edge, it is supported on only four bearing points at a height of 14 m. At its highest point, it is 40 m above the level on the sea.

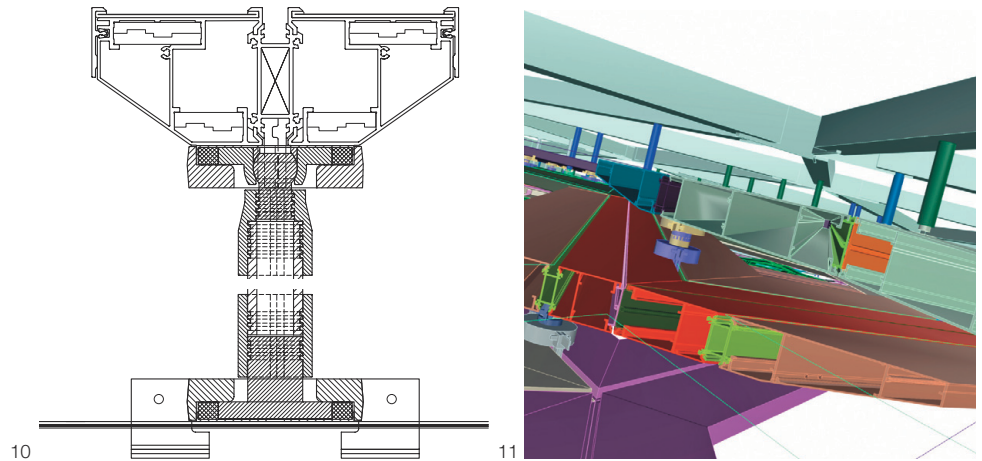
Steel structure borne on four supports

After the formulation of initial structural concepts during the design phase in 2007, the client, the Tourism Development and Investment Company (TDIC) Abu Dhabi, commissioned the engineers BuroHappold to undertake the

- 4 vorgefertigtes Super Sized Element (SSE) auf den temporären Schwerlasttürmen
- 5 SSE an einem der vier Auflagerpunkte
- 6 Modell der Kuppel, 3D-Druck
- 7 Unterteilung der Kugelkalotte in 85 vorgefertigte Super Sized Elements mit Lage der temporären Auflagerpunkte
- 8 Zunahme der Stahlquerschnitte zu den vier Auflagern hin
- 9 3D-Modell mit den vier Bekleidungsebenen

- 4 Prefabricated supersized element (SSE) on temporary heavy-duty towers
- 5 SSE at one of the four bearing points
- 6 Model of dome: 3D print
- 7 Subdivision of spherical cap of dome into 85 prefabricated SSEs with locations of temporary bearing points
- 8 Increasing cross-sections of steel members towards the four bearing points
- 9 3D model showing the four cladding layers





further development of the load-bearing reinforced concrete and steel structure. For the initial studies the Transsolar office was entrusted with simulating the effects of the cladding, using a computer model, and with the planning of the microclimate, which is differentiated between lighter, warmer areas over the water and darker, cooler realms for visitors.

In 2013, Waagner-Biro was appointed to execute the scheme on a design-and-build basis; i.e. including the planning of the production and assembly. This company planned not only the complete steel structure and cladding elements, but also the supporting construction and framing for assembly work, including some 4,500 tonnes of steel for shoring towers and platforms. The latter were necessary to allow construction work and finishings to be executed beneath the dome while the erection of the latter was still in progress.

BIM model

In order to manage these different interfaces, all sections of the work were based on the

same overall BIM model. The main challenges lay in the sheer magnitude of the development, the complexity of the many different building components and the short period of only three years foreseen for the planning and construction. To develop the dome in compliance with these constraints, the 3D model had to be built up in a parametric form. An automation of these processes would not have been possible without the software developed within the firm, which bridges the interfaces between the structural calculations and the planning of the steel structure and the facade. In this way, it was possible to create all fabrication and assembly plans for the 7,850 cladding elements in a fully automated form (ills. 11, 14).

Welded and bolted at the top

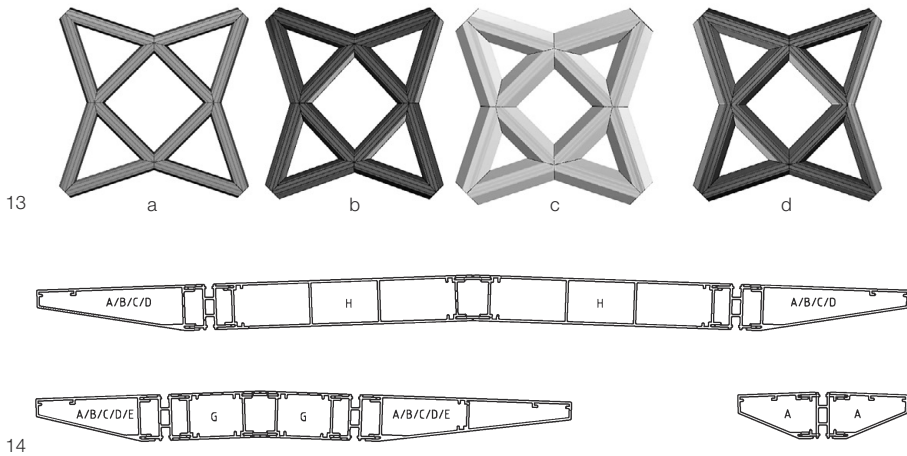
The structural concept for the dome is that of a self-supporting dome resting on only four bearing points. Between each of these points of support, a circular "ring beam" is spanned, consisting of three continuous girders with in-

fill bracing. The innermost girder, which is 850/700 mm in cross-section and has wall thicknesses of up to 70 mm, is supported on the bearings. The ring beam has to resist enormous tension loads and is, therefore, continuously welded (ill. 5). Connections with the space frame – which curves up above the ring beam – are also welded at the four bearing points. Between these support points, the structure is in a lighter form and is bolted. To ensure the correct design of members of reduced length in the shallow rise of the dome, given values were assumed in the planning for the transmission of forces at each point of connection, from where the slippage in the longitudinal openings of the bolt connections is activated. Deformation resulting from dead weight and slippage had to be compensated for: the height of the spherical curve of the dome in its fully loaded end state had to be increased during the construction phase. The geometry was thus changed into a free-form surface, with the result that the planning became much more complex.

Bernhard Reiser hat Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen studiert und arbeitet seit 2003 bei Waagner-Biro Design Management und Engineering. Vor dem Louvre Abu Dhabi hat er u.a. Freiformflächen wie die Gridshell des YAS Viceroy Hotel in Abu Dhabi, die Aluminiumfassade des Co-operative Headquarters One Angel Square in Manchester und die Glas- hülle des Präsidententerminal in Baku realisiert. Eines seiner aktuellen Projekte sind Gebäudeteile im Gazprom-Hauptquartier Lakhta Center in St. Petersburg.



- 10 justierbares Verbindungselement zwischen den vier Lagen der Bekleidung aus Aluminiumprofilen: Aluminiumdruckguss mit innenliegendem Silikonring, Schnitt Maßstab 1:5
- 11 Ausschnitt parametrisches BIM-Modell: Unterseite des Raumfachwerks aus Stahl mit Schnitt durch die ersten zwei Ebenen der vierlagigen abgehängten Aluminiumverkleidung
- 12 Dachaufsicht nach Montage aller vier gegeneinander verdrehten Ebenen aus unterschiedlich großen Sternelementen
- 13 Die Größe der Sternelemente unterscheidet sich von Ebene zu Ebene. Um das Maß des Lichteinfallfalls zentimetergenau kontrollieren zu können, gibt es Sterne mit schmalen (a), breiten (b) und sehr breiten (c) Aluminiumprofilen. Bei einigen Elementen sind sogar innerhalb eines Sterns die Profilbreiten unterschiedlich (d).
- 14 extrudierte Aluprofile der Elemente je nach Ebene mit unterschiedlicher Breite. Schnitt M 1:10
- 15 Montage der ersten Ebene der Bekleidung an der Oberseite des Raumfachwerks



Prefabricated supersized elements

The space frame consists of approximately 15,000 individual members with a weight of 5,000 tonnes. To construct the dome with the requisite precision and speed and using relatively few shoring columns, the dome structure was divided into 85 prefabricated sections (assembled from a total of 10,968 steel members produced at works) and bolted or welded together on site in the desert (ill. 7). These supersized elements (SSEs) are up to 33 m in length and up to 14 m wide, with a height of 6 m. The heaviest SSE weighs 65 tonnes. The elements were transported to the site, where they were hoisted on to the supports by a 1,200-tonne caterpillar crane. To bear the dead weight during the construction phase, 117 heavy-duty towers were erected. The intermediate spaces in the SSEs were closed with a total of 3,604 struts (ill. 4).

Phasing with the concrete construction

To comply with the tight planning schedule, the erection of the dome was phased to follow the concrete construction below. Work began, therefore, at the point where no buildings were planned beneath. In order that other trades could operate below the dome at the same time, a free-spanning assembly platform was erected under the dome, borne by the heavy-duty towers (ill. 3). Here, the height foreseen for assembly work was between two and seven metres. The struts connecting the SSEs were assembled with mobile scissors lifts. Finally, the four layers of cladding were fixed to the underside of the dome with specially constructed lifting equipment. After the assembly of the steel SSEs and struts, the dead weight of the dome was still supported by roughly 200 bearings on the heavy-duty towers, with loads of up to 150 tonnes.

Seismic isolators

Each of the four points of support is designed to bear a maximum vertical load of 33,000 kN (corresponding to a weight of 3,300 tonnes), with a maximum lateral deflection of 286 mm in the dome in the event of earthquakes. The lower part of the bearing is dish-shaped, the

upper part has the form of a lens (ill. 18). This geometry ensures an automatic recentering process following a deflection. In view of the extremely high loading that would exist at the same time as a possible oscillating deflection, these seismic isolators had to be specially developed. Only one test laboratory in the world is capable of determining the necessary dimensions: the California Department of Transportation (Caltrans) in Sacramento.

Lowering the dome on to the four supports

In order to transmit the dead load of the dome to the four bearing points, it was initially necessary to raise the entire dome structure by means of hydraulic presses. These were located on both sides of the four points of support and linked with each other by control devices in order to raise the dome slowly and synchronously. In this way, the support towers immediately next to the bearings were first freed of loading and then the centre of the roof. Only then did the dome sink from its raised geometry and assume its final form – that of a spherical segment. Since hydraulic presses with the requisite capacity do not possess the necessary length of piston stroke, the load was lowered sequentially on the presses and on to intermediate stacked elements. When the maximum lifting height of 385 mm was reached, the bearing points shifted roughly 90 mm radially outwards. To limit horizontal loading resulting from this, the presses were set on oiled, polished stainless-steel plates. After the loads had been removed from all the heavy-duty bearing towers, the latter were dismantled within three days. During this time, the dome rested solely on the heavy-duty stacked elements, which were built up in the positions of the four subsequent supports. The bearings, specifically dimensioned and manufactured for this purpose with a diameter of 1.6 m and a weight of six tonnes each, could then be assembled. After dismantling the towers, the lifting process was reversed and the dome was lowered by means of the stacking method into its final position on the supports. To ensure dimensional accuracy, the lifting and lowering processes were subject to constant

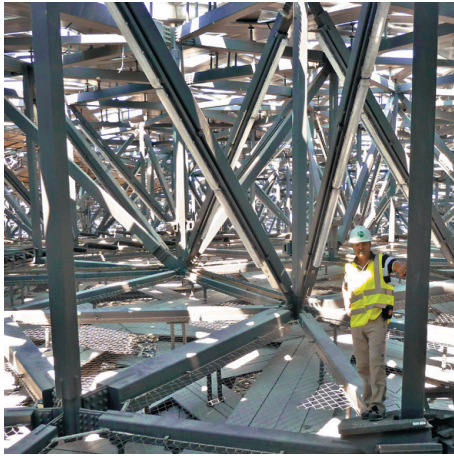
measurement and compared with data from the structural calculations derived from the 3D model.

7,850 aluminium-section stars

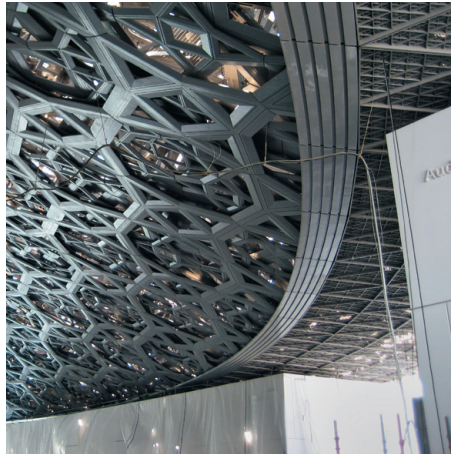
The microclimate beneath the dome is controlled by cladding specially designed for the inner and outer faces of the space frame. This bespoke lining was designed to correspond with the open areas and the buildings below – with and without roof lights. The cladding permits the transmission of different degrees of daylight. Based on the idea of Arab tiles, a few simple forms allowed the creation of complex geometric patterns. These forms are star-shaped elements, consisting of extruded aluminium sections 75 mm deep that form a square with four corner triangles. The maximum width of the sections is 1.5 m, but this varies from star to star and also within individual stars, and it serves as a means of regulating the amount of daylight transmitted (ills. 13, 14). Four layers of stars with intermediate spacings of 65–93 mm are overlaid on each

Bernhard Reiser studied building engineering at the RWTH Aachen and has worked since 2003 for Waagner-Biro Design Management and Engineering. Prior to the Louvre Abu Dhabi project, he implemented free-form surfaces like the grid shell of the YAS Viceroy Hotel in Abu Dhabi, the aluminium facade of the Co-operative Headquarters One Angel Square in Manchester and the glazed skin of the Presidential Terminal in Baku. His current projects include construction elements for the Gazprom headquarters Lakhta Centre in St Petersburg.

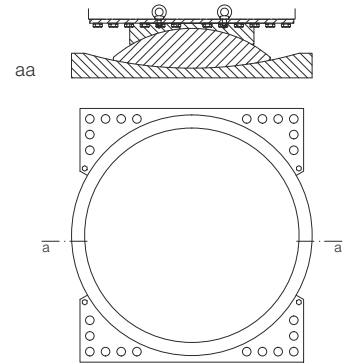
- 10 Adjustable connecting element between the four layers of cladding: die-cast aluminium sections with inner silicone ring Section scale 1:5
- 11 Part of parametric building information model (BIM): underside of steel space frame with section through the first two levels of the suspended four-layer aluminium cladding
- 12 View of roof after assembly of all four layers of cladding, consisting of star elements of different sizes turned horizontally against each other
- 13 The size of the star elements differs from layer to layer. To control the penetration of daylight, the aluminium sections are of various widths: narrow (a), wider (b) and very wide (c). In some cases, the widths vary within a single star (d).
- 14 Extruded aluminium sections of star elements; different widths, according to the level of the elements Sections scale 1:10
- 15 Assembly of first layer of cladding on top of space frame



16



17



18

other on the upper and lower faces of the dome, whereby the sizes of the star elements vary from layer to layer from 3.5×3.5 m to 14×14 m (ill. 9). The regular patterns of the layers were turned horizontally against each other and offset, forming an irregular three-dimensional overall arrangement with apertures of different sizes that focus the rays of sunlight like iris diaphragms (see page 67). The cladding to the dome consists of 7,850 individual star-shaped elements. The overall length of the members amounts to 827,000 m with 21 different cross-sections, with 459,260 geometrically distinct intersections and with 413,821 corner connections by which the elements are preassembled into star-like forms.

Assembly of cladding layers

The tips of the star units in each layer were fixed together with pins. This called for very tight assembly tolerances and a high degree of precision in positioning the elements. If all the permissible tolerances had simply been added together, it would not have been possi-

ble to assemble the cladding. The four planes, offset to each other, were joined by 145,000 specially developed connectors 6–9 cm long. Inside these die-cast aluminium elements is a silicone ring to absorb deformation caused by solar radiation and to ensure a stress-free form of construction (ill. 10). The four cladding layers, linked to each other, are attached to the steel structure by roughly 55,000 fixing brackets (ill. 15).

Since the cladding had to fit precisely, but the space frame was subject to further deformation during the assembly process because of the increasing load, it was difficult to determine the precise positions of the stars in advance. A local system of coordinates was, therefore, measured out in accordance with a programme of fixed points. In the end, the degree of precision was ± 10 mm. The cladding to the outer edge is not in aluminium like the rest of the dome covering, but in stainless steel, bent to form and welded together in order to achieve a precisely shaped outline (ills. 17, 19).

- 16 Raumfachwerk mit montierter Bekleidung an der Unterseite. Wartungsgänge und ein Montagernetz garantieren die Sicherheit während der Baustelle und für den späteren Betrieb.
- 17 Randprofile aus Edelstahl als Bekleidung des umlaufenden Ringträgers. Da die Auflager nicht sichtbar sind, scheint die Kuppel in geringem Abstand über den Betonkuben der Ausstellungsräume zu schweben.
- 18 Schnitt und Aufsicht Unterseite eines der vier eigens entwickelten Auflager Maßstab 1:50
- 19 Baustelle auf der aufgeschütteten Halbinsel im August 2015. Ab Sommer 2016 wurden die Wasserbecken geflutet, sodass der Eindruck von einem im Meer stehenden Museum entsteht.
- 16 Space frame with cladding assembled on underside. Maintenance walkways and an assembly network ensure safety during construction and for later operations.
- 17 Peripheral stainless-steel cladding to ring beam. Since the bearings are not visible, the dome seems to hover above the structures beneath
- 18 Section through one of the four bearings and view of underside scale 1:50
- 19 Construction site on infill peninsula, August 2015. In the summer of 2016, the basins were filled with water to create the impression of a museum rising from the sea.



19