DOI: 10.1002/stab.202000049

Bernd Stimpfle

Lunar Dome

Zelt für die Apollo 11 Roadshow in den USA

Im Jahre 1969 brachte Apollo 11 die ersten Menschen auf den Mond. Anlässlich des 50-jährigen Jubiläums wurde eine Roadshow konzipiert, die durch mehrere Städte der Vereinigten Staaten von Amerika reisen sollte. Hierfür wurde ein großes mobiles Theaterzelt mit 1600 Sitzplätzen entwickelt. Als fliegender Bau besteht dieses Zelt aus Einzelelementen, die auf schnellen Aufbau und leichten Transport optimiert sind. Eine bogengestützte Hauptmembrane, eine elastisch gelagerte Projektionskuppel und eine große ETFE-Fassade bilden die verschiedenen Hüllen und nehmen dem Projekt den Zeltcharakter. Anpassbare Fußelemente, verankert mit langen Erdnägeln, dienen als flexible Gründung für die verschiedenen Aufstellorte. Im Sommer 2019 stand das temporäre Theater für „Apollo 11 – the immersive live show“ in Pasadena, Kalifornien.

Stichworte Membrane; ETFE-Folie; Akustikgewebe; fliegender Bau; Stahlfachwerkträger; Stahlseile

Lunar Dome – tent for the Apollo 11 roadshow
In the year 1969 Apollo 11 brought the first humans to the moon. On the occasion of the 50th anniversary a brig roadshow was designed which should travel through several cities of the United States of America. A huge theatre tent with 1600 seats was developed. As temporary building the tent consists of single elements which are optimized for a fast assembly and an easy transportation. An arch-supported main membrane, an elastically supported projection dome and a huge ETFE façade form the different envelopes and reduce the tent character of the project. Adaptable base elements, anchored with long pegs, are used as flexible foundation for the different locations. In summer 2019 the temporary theatre for "Apollo 11 – the immersive live show" was in Pasadena.

Keywords membrane; ETFE foil; acoustic fabric; temporary structure; steel truss; steel cables

1 Einleitung

Anlässlich des 50-jährigen Jubiläums der Mondlandung von Apollo 11 wurde eine Theatershow geplant, „Apollo 11 – the immersive live show“. Diese sollte als Roadshow durch mehrere Städte Amerikas reisen. Der Theaterbau wurde als fliegender Bau entwickelt. Der erste Aufbau fand 2019 in Pasadena, Kalifornien statt (Bild 1). Der temporäre Theaterbau bietet Platz für 1600 Zuschauer. Ein großer Foyerbereich mit angeschlossenen VIP-Bereichen bildet den großzügigen Eingangsbereich.

Quelle: Matthew Churchill Production Ltd

Bild 1 Ansicht bei Nacht
View at night

2 Entwurf

Das Tragwerk des Apollo-Theaters (Bild 2) besteht aus vier Fachwerkbögen. Die beiden Hauptbögen stehen symmetrisch geneigt im Mittelbereich. Ein kleinerer Bogen spannt über den Backstagebereich. Über der vorderen transparenten Fassade liegt der Foyerbogen. Die Bögen bestehen aus einzelnen rechteckigen Fachwerkelementen, die mit Bolzen gekoppelt sind. Stahlseile überspannen die ganze Konstruktion und halten die Bögen in Position. Die Fußpunkte sind gelenkig mit den Fußplatten verbunden und mit großen Erdnägeln verankert.

Unter den Hauptbögen sowie dem Backstagebogen verlaufen Gratseile, die – als Doppelseile ausgeführt – gleichzeitig als Montagestoß dienen. Umlaufend sind die Membranen mit Randseilen gefasst (Bilder 3–5).

Um die Verformungen unter maximaler Windlast zu begrenzen, liegen je zwei Kehlseile auf den Sattelflächen. Die Kehlseile sind an den Fußpunkten der Bögen verankert und schließen so einen wesentlichen Teil der inneren Kräfte kurz.

Im Innenraum über einer umlaufenden Holzwand spannt eine Projektionskuppel. Diese Kuppelmembrane ist aus schallabsorbierendem, PVC-beschichtetem Polyestergewebe. Die Kuppel wird mit Gummiseilen an die Außenhülle gehängt und schließt oben am runden Riggträger an. Die Steifigkeit dieser Aufhängung ist so weich ge-

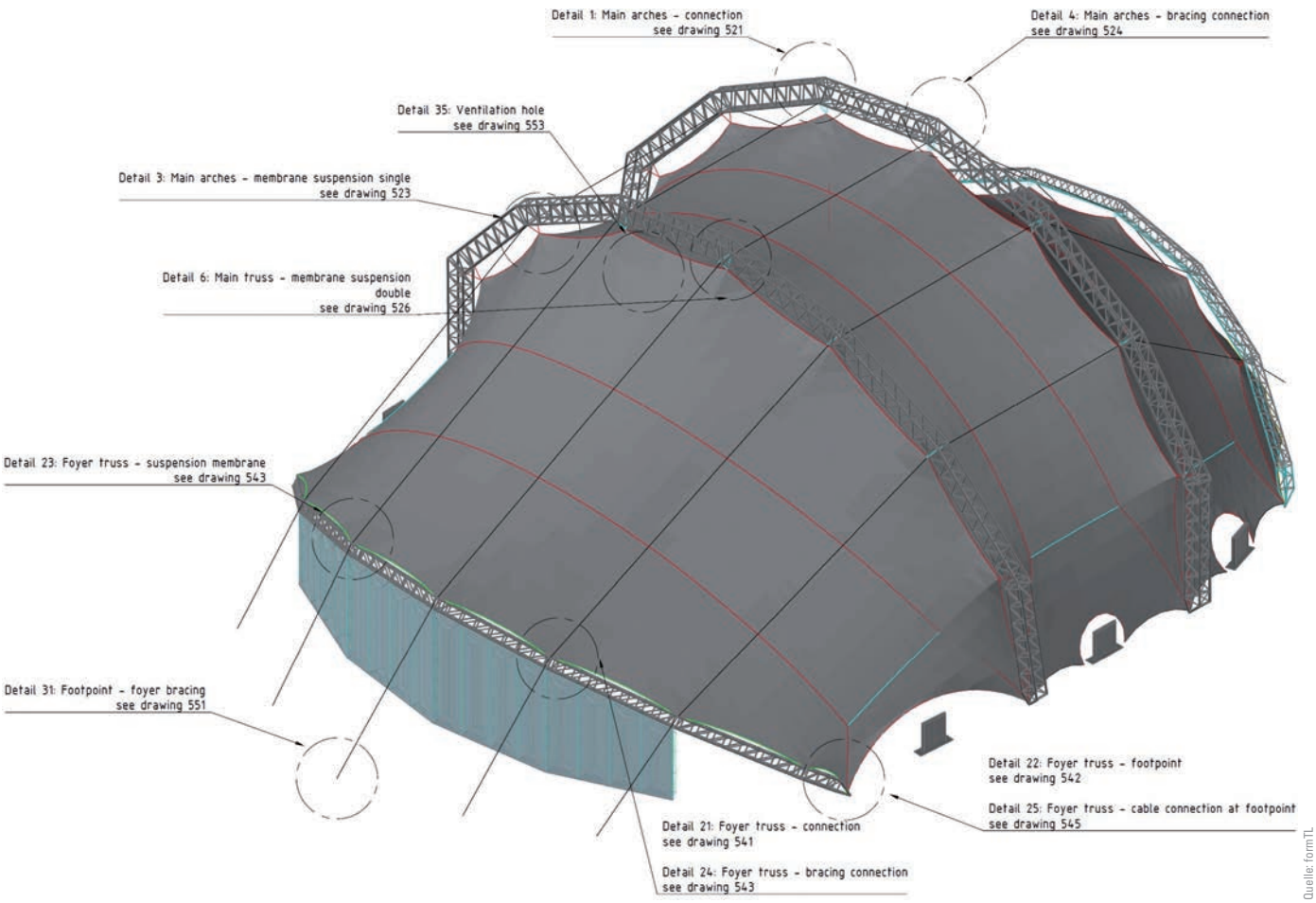


Bild 2 Isometrie der Halle von vorne
Isometric view from front

wählt, dass sich die Spannkraft bei Verformung der Außenhülle nur geringfügig ändert.

Unter dem Foyerbogen stehen bis zu 10 m lange Fassadenstützen, die eine ETFE-Kisseneindeckung tragen. Diese Stützen werden nur über Druck aus dem Foyerbogen belastet. Bei abhebenden Lasten sorgt ein Langloch für die Entkoppelung.

2.1 Zeltkonstruktion

Unter den vier Bogenträgern hängt die etwa 4900 m^2 große Membrane. Unter jedem Bogen ist die Membrane an den Doppelgratseilen gestoßen. Die beiden leicht geneigten Hauptträger sind geometrisch identisch und tragen die wesentliche Last der 73 m langen Zeltkonstruktion. Die Hauptbogen haben eine Spannweite von 55,8 m und eine Höhe von 27 m. Die kleineren seitlichen Foyer- und Backstagebogen sind stärker geneigt und haben eine Höhe von 11 m (Bild 6).

Die Hülle besteht aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe Typ III. Die Beschichtung ist außen weiß und innen schwarz. Auf den Sattelflächen liegen Stahlseile, die den Windsog abtragen. Seitlich sind Durchdringungen für Notausgänge in die Zeltmembrane integriert, im Foyerbereich ermöglicht ein großes Randseil den Übergang zum benachbarten VIP-Anbau. Im Backstagebereich fasst ein großes Ringseil die Membrankräfte und ermöglicht das Einfahren mit Lkw.

2.2 Projektionskuppel

Die Projektionskuppel hat einen Durchmesser von 46,1 m und eine Höhe von 15 m. Im Zentrum schließt sie an einem Lichtrigg mit 20 m Durchmesser an. In Richtung Backstage hat die Kuppel einen großen Ausschnitt, um den Blick auf die dahinterliegende Leinwand zu ermöglichen. Die Kuppel erhält ihre sphärische Form durch Hängerseile, die über ringförmige Membranschürzen angeschlossen sind. Die umlaufenden Ränder haben, ebenso wie die Girlandenschürzen, eingenähte Polyestergurte. Das Material ist ein leichtes PVC-Polyestergewebe mit Mikroperforation, das etwa 65 % des Schalls absorbiert. Die Beschichtung ist in einem hellen Grau. Gegenüber einem ursprünglich angedachten Gittergewebe konnte durch diese Membrane auf eine zusätzliche Dämmstofflage verzichtet werden. Für die Projektion ist das vollflächige Material auch besser geeignet (Bild 7).

Über die Hängerseile ist die Kuppel an der Hauptmembrane aufgehängt. Da sich die Dachmembrane unter

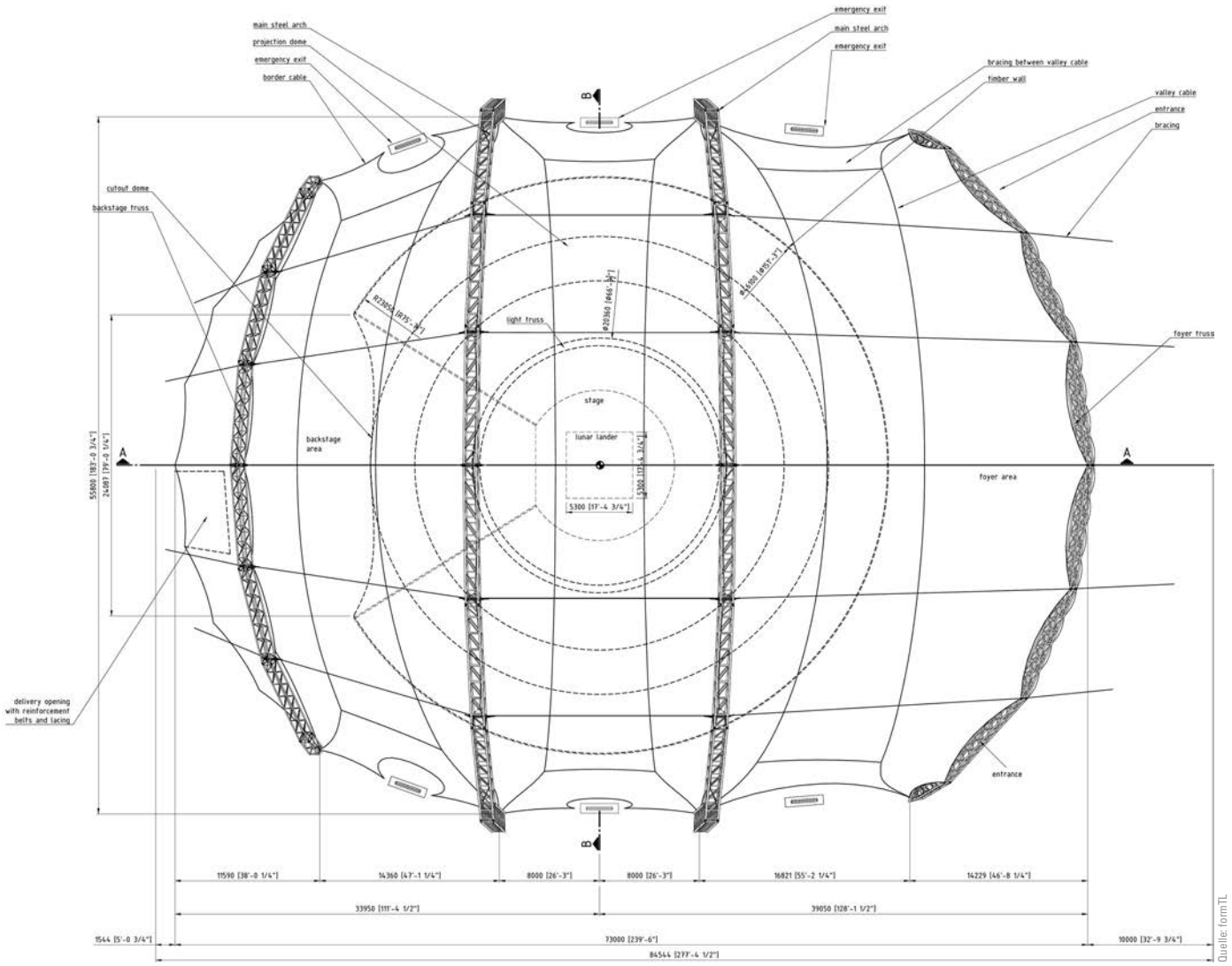


Bild 3 Grundriss
Plan view

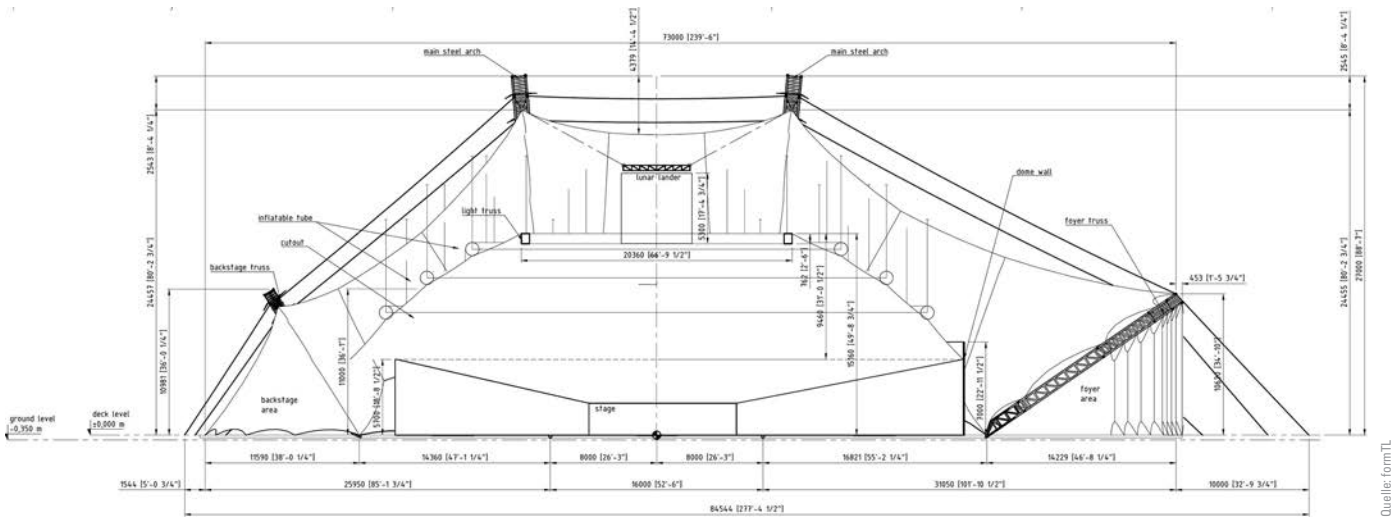


Bild 4 Längsschnitt
Longitudinal section

Windlast stark verformt, mussten die Hänger sehr weich sein. Polyesterseile, die an Rollen unter der Außenmembrane umgelenkt werden, verankern diese Kräfte an der umlaufenden Holzwand. Aus Gummiseilen gefertigte Federpakete sind in diese Seile integriert und halten die Kraftänderung unter Windlast klein. Entsprechend der auftretenden Verformung und passend zur Vorspannung wurden drei verschiedene Federpakete hergestellt.

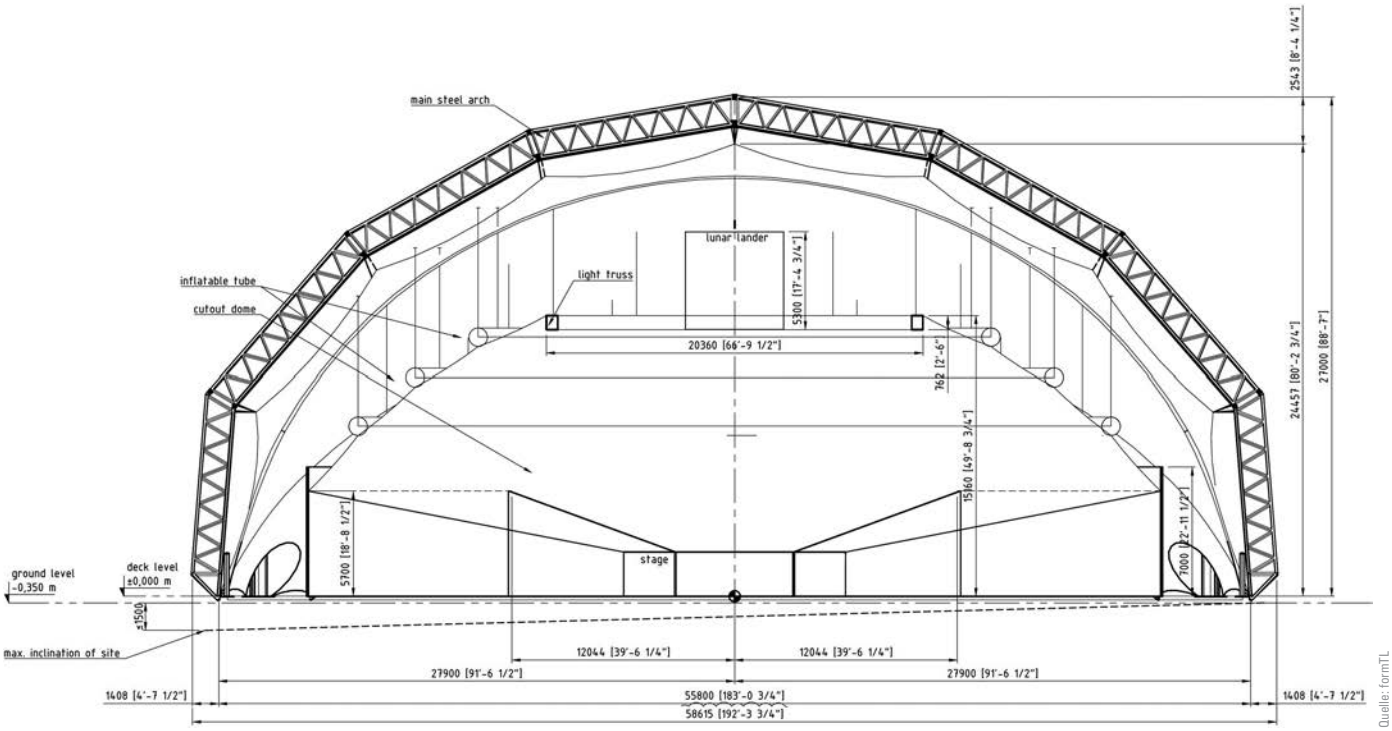


Bild 5 Querschnitt
Cross section

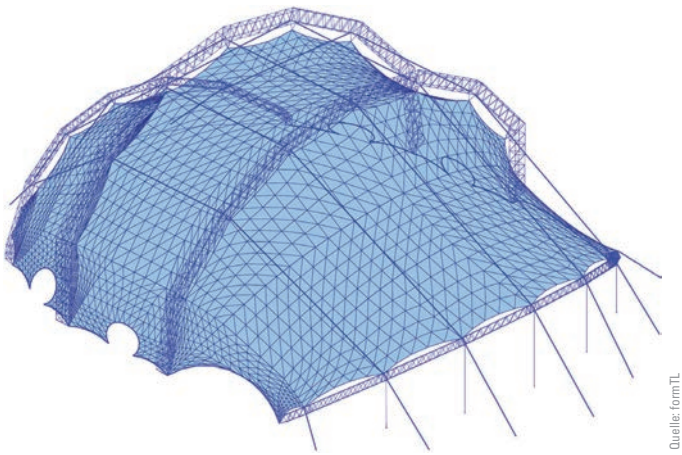


Bild 6 Rechenmodell Haupttragwerk
Numerical model main structure

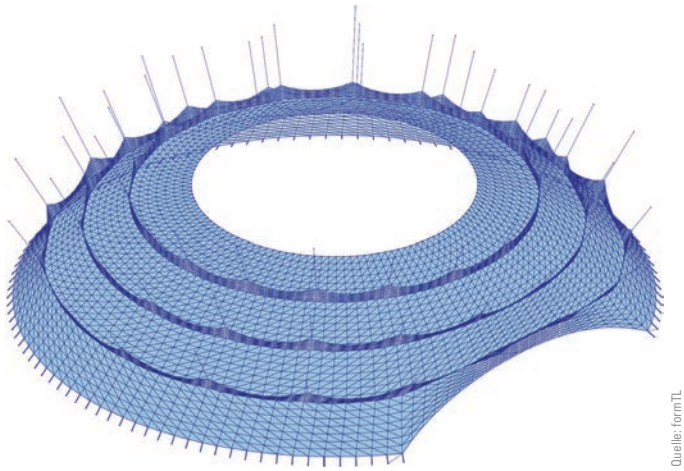


Bild 7 Rechenmodell Kuppelmembrane
Numerical model dome membrane

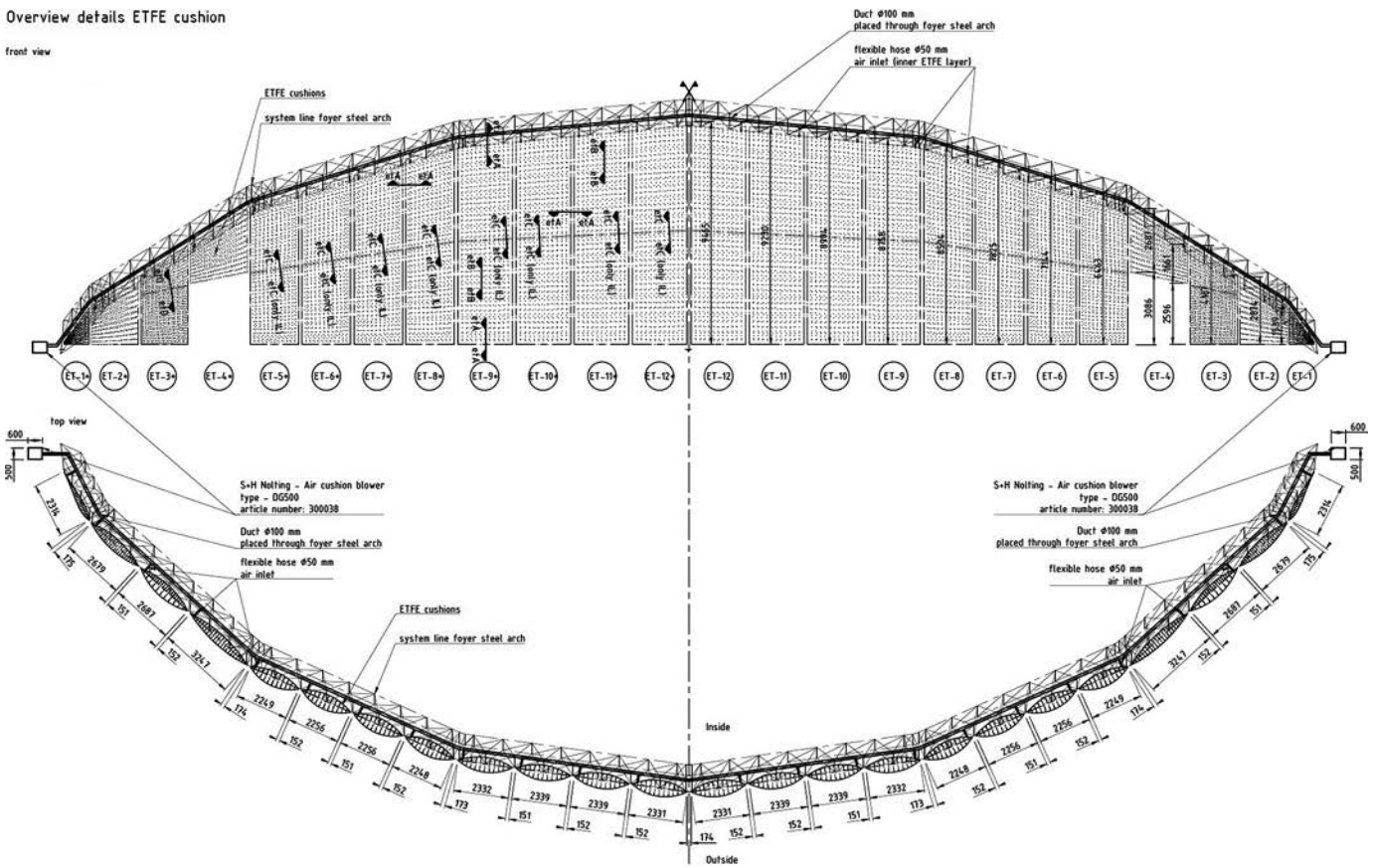
2.3 Foyerfassade

In das Haupttragwerk sind die Hauptstützen der Foyerfassade (Bild 8) integriert. Oben und unten spannen Querriegel. Diese Querriegel tragen zusätzliche Stützen, die auf eine sinnvolle Kissenbreite abgestimmt sind. Auf den Obergurten der Stützen und den Querriegeln sind die ETFE-Kissen mit Extrusionsprofilen befestigt. Die Luftversorgung für die Kissen befindet sich oben im Träger, die Abluftdrosseln unten an der Kissenaußenseite. Die Kissen sind zweilagig mit 250 µm Foliendicke. Die Außenseite ist bedruckt, die Innenseite klar.

2.4 Gründung

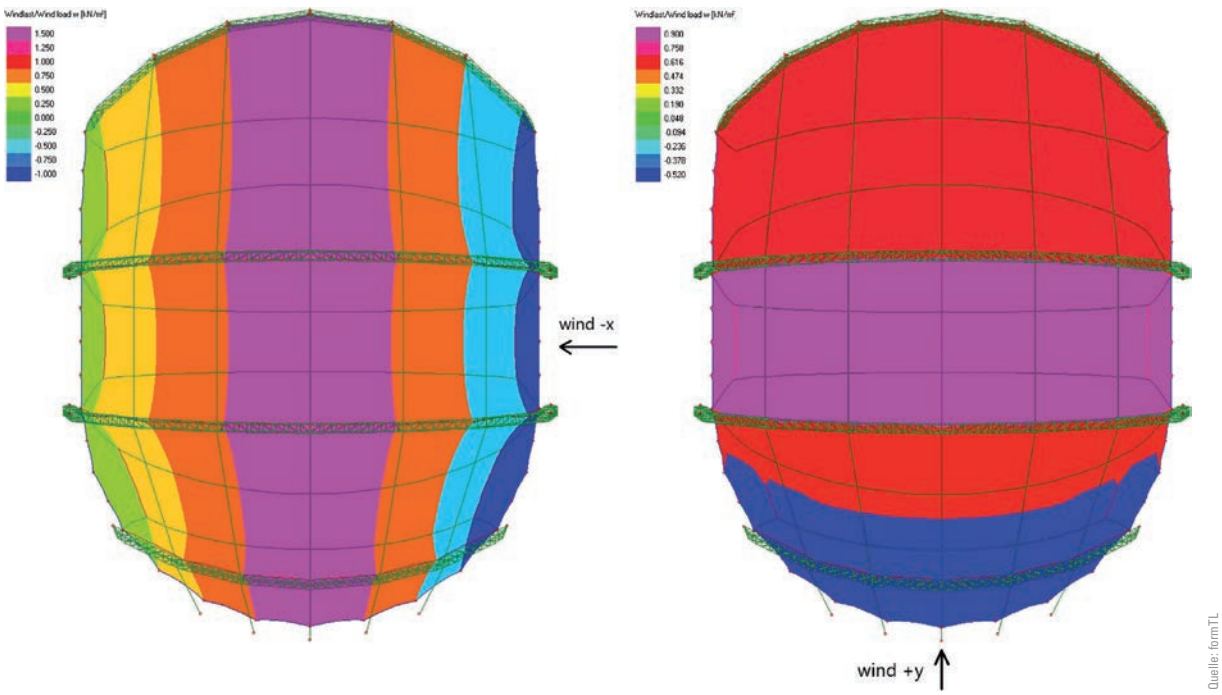
Die Gründung der Bögen erfolgt über große Stahlplatten mit Erdnägeln. Zum Höhenausgleich können diese Platten bis zu 250 mm unterbaut werden und haben außerdem Anschlusskonsolen in zwei unterschiedlichen Höhen, sodass insgesamt ein Höhenausgleich von 500 mm möglich ist. Die Erdnägel haben einen Durchmesser von 60 mm und eine Gesamtlänge von 2000 mm. Die Bemessung ist nach EN 13782 [1] erfolgt. Die Einzelanker wurden im Auszugsversuch getestet.

Seile und Membrane werden mit kleineren Fußplatten verankert. Der Höhenausgleich für die Seile erfolgt mit unterschiedlich langen Stahllaschen. Das Einbauteil wird hierzu in der Richtung der Resultierenden verschoben. Bei den Membranverankerungen erfolgt der Höhenausgleich mit Spanngurten. In den höchst belasteten Bereichen sind die Gurte vierfach gelegt und haben eine Bruchlast von 300 kN.



Quelle: formTL

Bild 8 ETFE Folienfassade
ETFE foil façade

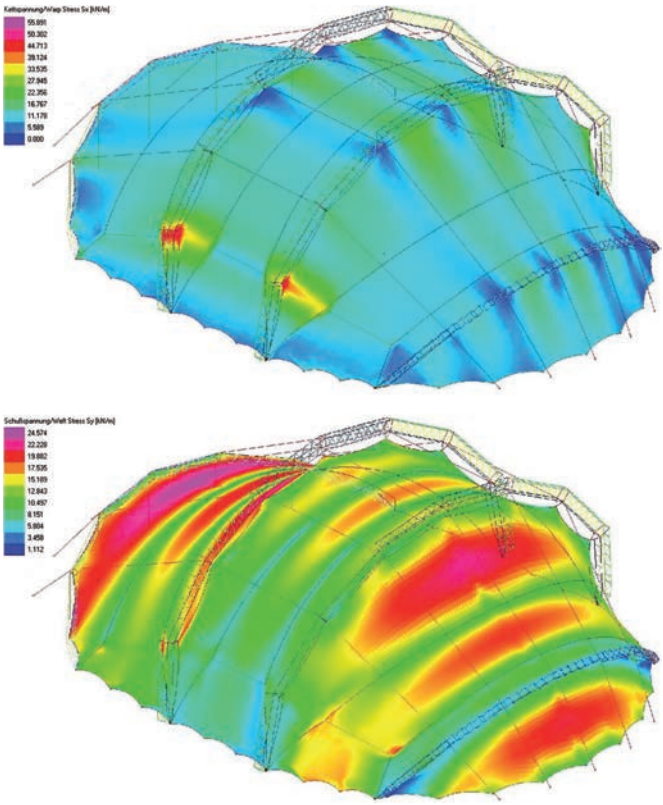


Quelle: formTL

Bild 9 Windbelastung in Quer- und Längsrichtung
Wind load in transversal and longitudinal direction

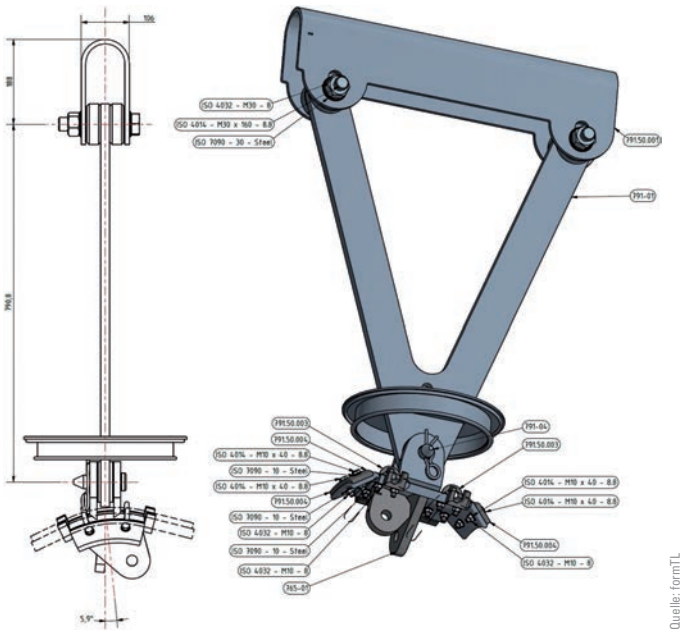
3 Berechnung

Die Berechnung ist am Gesamtsystem mit der Software TL_form und TL_Load erfolgt, einem speziell für zugbeanspruchte Konstruktionen entwickelten Programm von Prof. Mike Barnes. Formfindung und Berechnung erfolgen nach der Methode der dynamischen Relaxation [2] geometrisch nichtlinear.



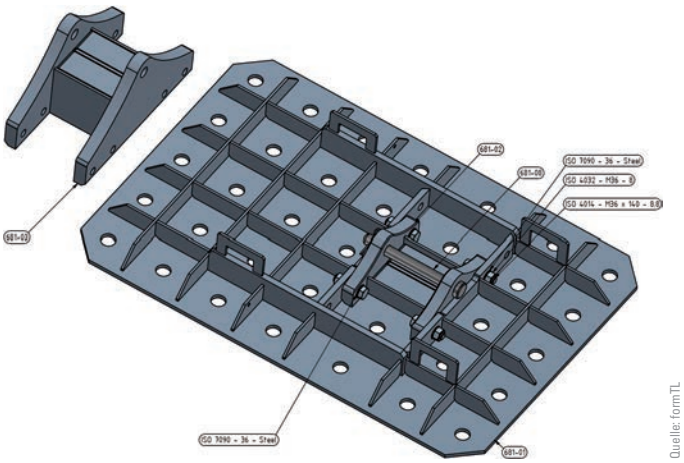
Quelle: formTL

Bild 10 Maximale Membranspannung in Kett- und Schussrichtung
Maximum membrane stress in warp and weft/fill direction



Quelle: formTL

Bild 11 Bumerangaufhängung
Boomerang connection



Quelle: formTL

Bild 12 Auflageplatte Hauptbögen
Support plate for the main arches

3.1 Belastung

Zusätzlich zum Eigengewicht der Konstruktion wurden Ausbaulasten für Lichtrigg und Mondlandefähre von 135 kN berücksichtigt. Die Membrankonstruktion ist nicht auf Schneelast ausgelegt, was bei der Tourplanung entsprechend berücksichtigt wird. Als Windlast wurde eine Basis-Windgeschwindigkeit von 100 mph, das sind 44,7 m/s nach ASCE/SEI 7-10 [3], angesetzt. Die Verteilung der Windlast ist wie in den Grafiken in Bild 9 erfolgt. Hierbei wurde auch ein zusätzlicher Innendruck berücksichtigt. Für die Erdbebenbemessung wurde die Aufstellung in Los Angeles zugrunde gelegt. Ausgehend von einer Aufstelltemperatur von 20 °C wurde noch eine Temperaturschwankung von +/– 20 K berücksichtigt.

Von lokalen Spannungsspitzen abgesehen liegt die maximale Membranspannung bei ca. 25 kN/m in beide Richtungen (Bild 10). Im Bereich der lokalen Lasteinleitung werden die Membranen zusätzlich verstärkt. Der Nachweis der Membrane ist gemäß ASCE/SEI 55-10 [4] erfolgt, wurde aber auch noch anhand des aktuellen Entwurfs für den zukünftigen Eurocode Membrane überprüft.

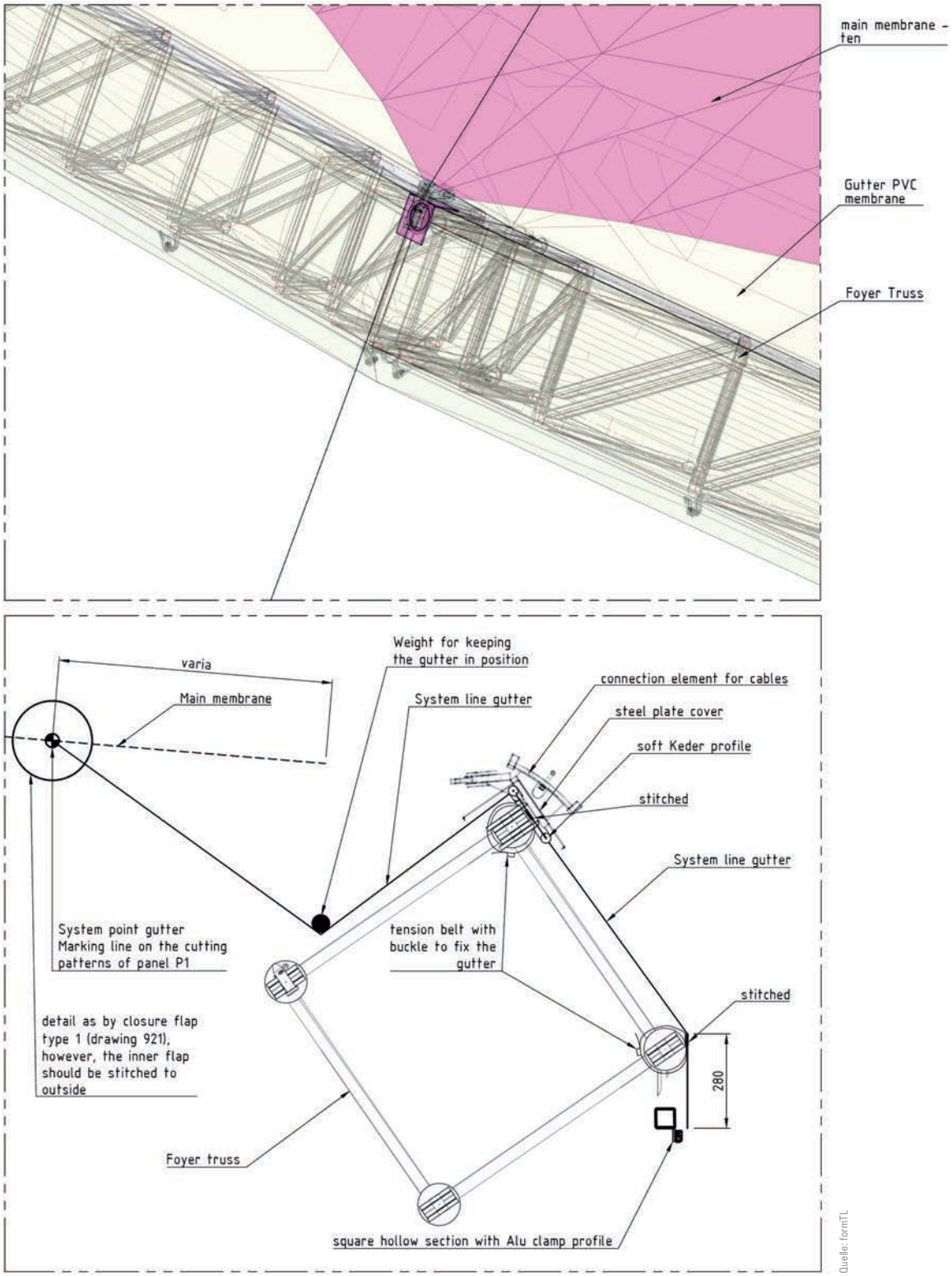
4 Detaillierung

4.1 Stahldetails

Um möglichst viele identische Träger fertigen zu können, sind viele Anschlussteile mit Bolzen oder über Formschluss mit den Trägern verbunden. Zum Durchleiten der über das Dach verlaufenden Stabilisierungsseile werden Stahllaschen an den Trägerstößen auch an deren Bolzenanschlüssen angeschlossen.

Die Aufhängung der Membrane erfolgt punktuell an den Gratseilen. Hierzu werden U-förmige Schellen über die Querstäbe gesetzt, an denen unten ein V-förmiges Stahlteil anschließt, der sog. Bumerang. Dort schließen unten gelenkig die Umlenksattel der Gratseile an (Bild 11). Der Anschluss der Dichtlappen erfolgt an einem Teller mit Spanngurten, also schnell zu befestigen und auch wieder leicht lösbar.

Die Fußplatten der Haupt- und Nebenbogen (Bild 12) sind Stahlplatten mit 2200 mm Länge und einer Breite von 1500 mm. Stahlrippen versteifen die Platte, um die Erdnägel bestmöglich zu aktivieren. Um einen Höhenausgleich zu ermöglichen, sind die Anschlusskonsolen nicht



Quelle: formTL

Bild 13 Membranrinne entlang des Foyerträgers
Membrane gutter along the foyer truss

fest verschweißt. Mit der niedrigen der beiden Konsoltypen liegt der Hauptbolzen 170 mm über der Unterkante, mit der großen Konsole 420 mm.

4.2 Membrandetails

Am Foyerbogen schließt die Dachmembrane mit Randseilen an. Unter der Membrane ist eine flexible Membranrinne angeschlossen, die in einem Stück über den Fachwerkträger führt und somit gleichzeitig Trägerverkleidung ist. Um die Rinnenform zu halten, ist ein Gewichtsstreifen in der Rinne eingelegt (Bild 13). Die Rinnenmembrane verläuft unter den Anschlagpunkten für die Rand- und Stabilisierungsseile und ist mit einer ringförmigen Wulst gegen eindringendes Wasser gedichtet. Vorne verläuft die Membrane bis unter die Anschlusslinie der Folienkissen, um hier möglichst regendicht abzuschließen. Seitlich

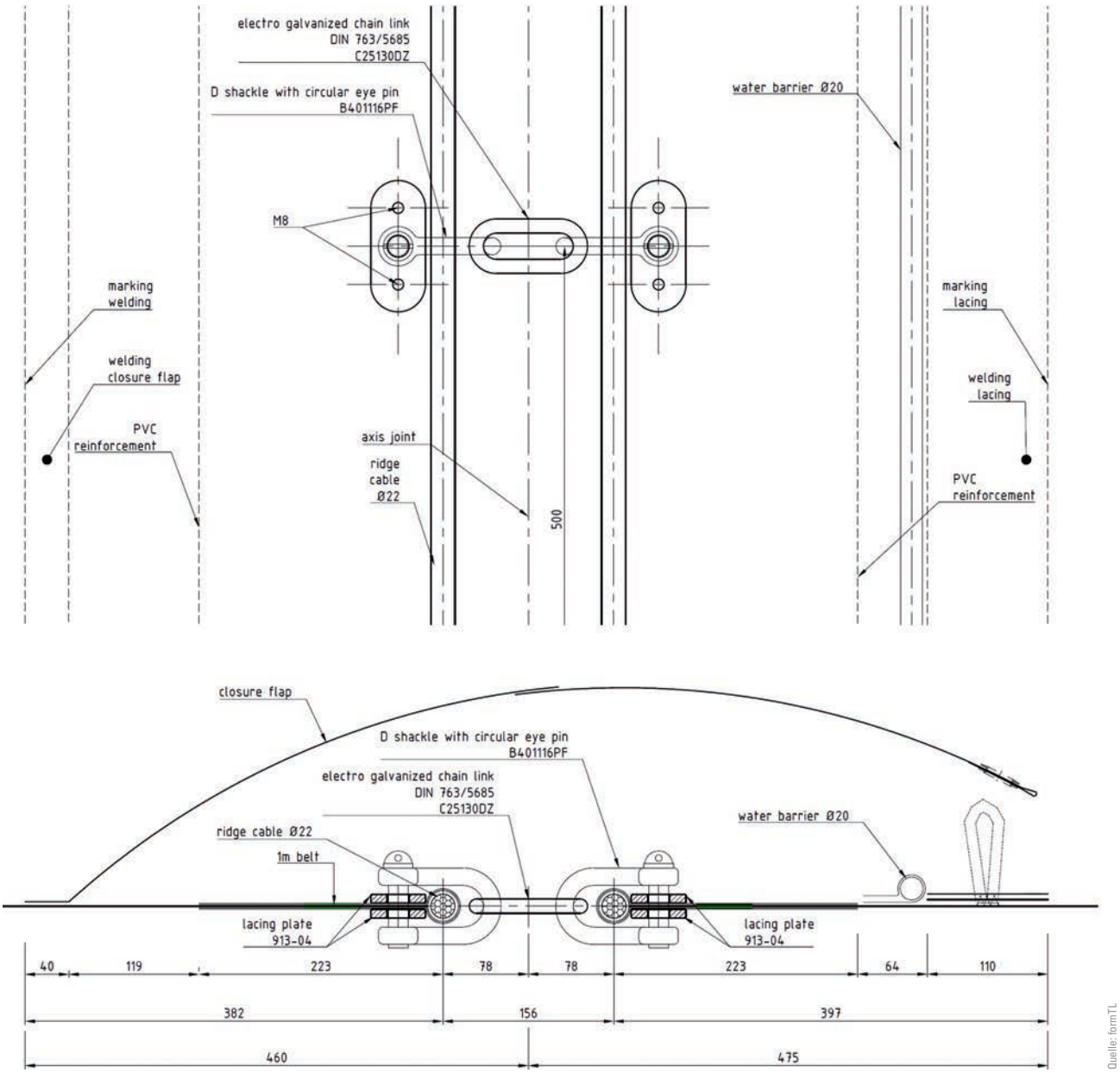


Bild 14 Membranstoß mit integrierten Gratseilen
Membrane joint with integrated ridge cables

wird die Rinne zu den Bogenauflagern gespannt und entwässert dort ins Gelände.

Die Hauptmembrane ist unter den Trägern mit einem Doppelseil gestoßen. Die beiden Seile verlaufen in Membrantaschen. Das Seil ist bereits im Werk in die Membrane eingelegt. Die Membrantasche ist direkt hinter dem Seil verschweißt. Im Abstand von 500 mm sind Klemmplatten aufgeschraubt. An diesen Klemmplatten werden die beiden Seiten mit Schäkel und Kettenglied verbunden (Bild 14). Der Dichtlappen wird auf einer Seite auf das Membranfeld aufgeschweißt. Auf der anderen Seite erfolgt der Anschluss mit Schnürung (French Lacing). Um Wassereintritt zu vermeiden, verläuft entlang der Kante eine kleine Membranwulst.

Im Dach sind Punkthalter für den Anschluss der inneren Membrane ankonfektioniert. Dort werden Rollen angeschlossen. Umgelenkt über diese Rollen wird die Kuppelmembrane mit Seilen gehalten. Seitlich erfolgt die Verankerung an der umlaufenden Holzwand, die Raumabschluss für den Zuschauer- und Bühnenbereich bildet. Um eine möglichst weiche Lagerung sicherzustellen, wurden Federpakete aus Gummiseilen gebaut, mit unterschiedlichem Lastniveau. Das Dehnverhalten wurde im Werk getestet (Bild 15).

4.3 Membranzuschnitte

Die Hauptmembrane besteht aus vier Paneelen. Das größte, in Richtung Foyerbogen, hat eine Fläche von 1 700 m^2. Um die Fertigung zu erleichtern, wurden die großen Felder in der Mitte geteilt und erst gegen Ende der Fertigung zusammengesetzt. Aus diesem Grund ist auch das Gratseil in der Mitte geteilt. Die Membranfelder

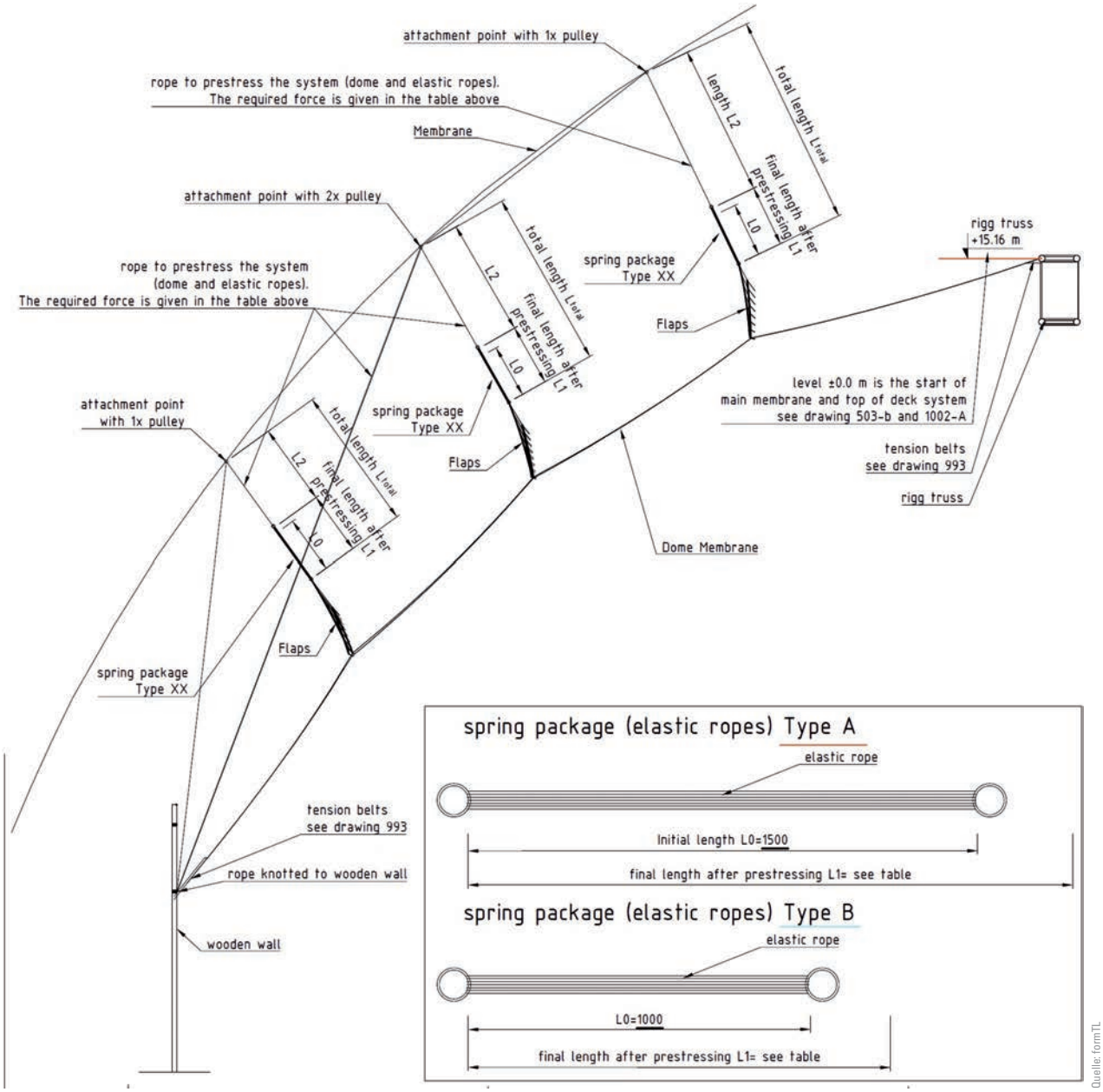


Bild 15 Elastische Aufhängung der Projektionskuppel
Elastic support of the projection dome

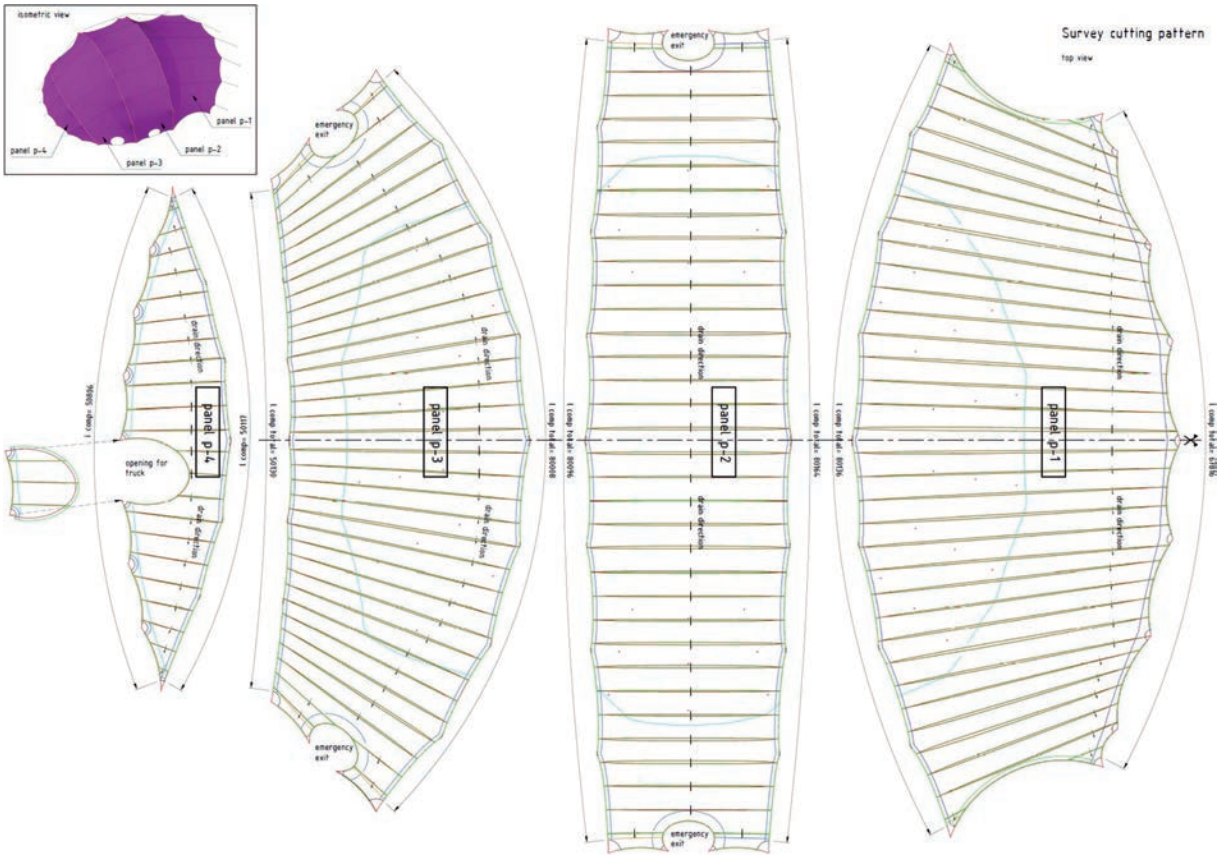
haben einen Parallelzuschnitt, der in den Seitenfeldern radial korrigiert wurde, um ein einheitliches Erscheinungsbild zu bekommen (Bild 16). Die Kompensation wurde anhand von Biaxialversuchen festgelegt. In Kettrichtung wurde nicht kompensiert, in Schussrichtung um 2,8 %. Konstruktionsbedingt wurde am Rand nur noch ganz leicht kompensiert, entsprechend der Dehnung der eingelegten Stahlseile.

Die Projektionskuppel ist aus einem sehr leichten Material, das auch nur sehr schwach vorgespannt ist. Der Zuschnitt erfolgte radial (Bild 17). Die Ränder sind mit den Gurten vernäht. Die Girlandenstreifen zur Aufhängung sind aus normaler weißer PVC-Polyestermembrane. Die Verbindung ist geschweißt und genäht. Alle Flächennähte sind geschweißt. Im Vorfeld wurden mit Schweißproben Projektionsversuche gemacht.

5 Fertigung

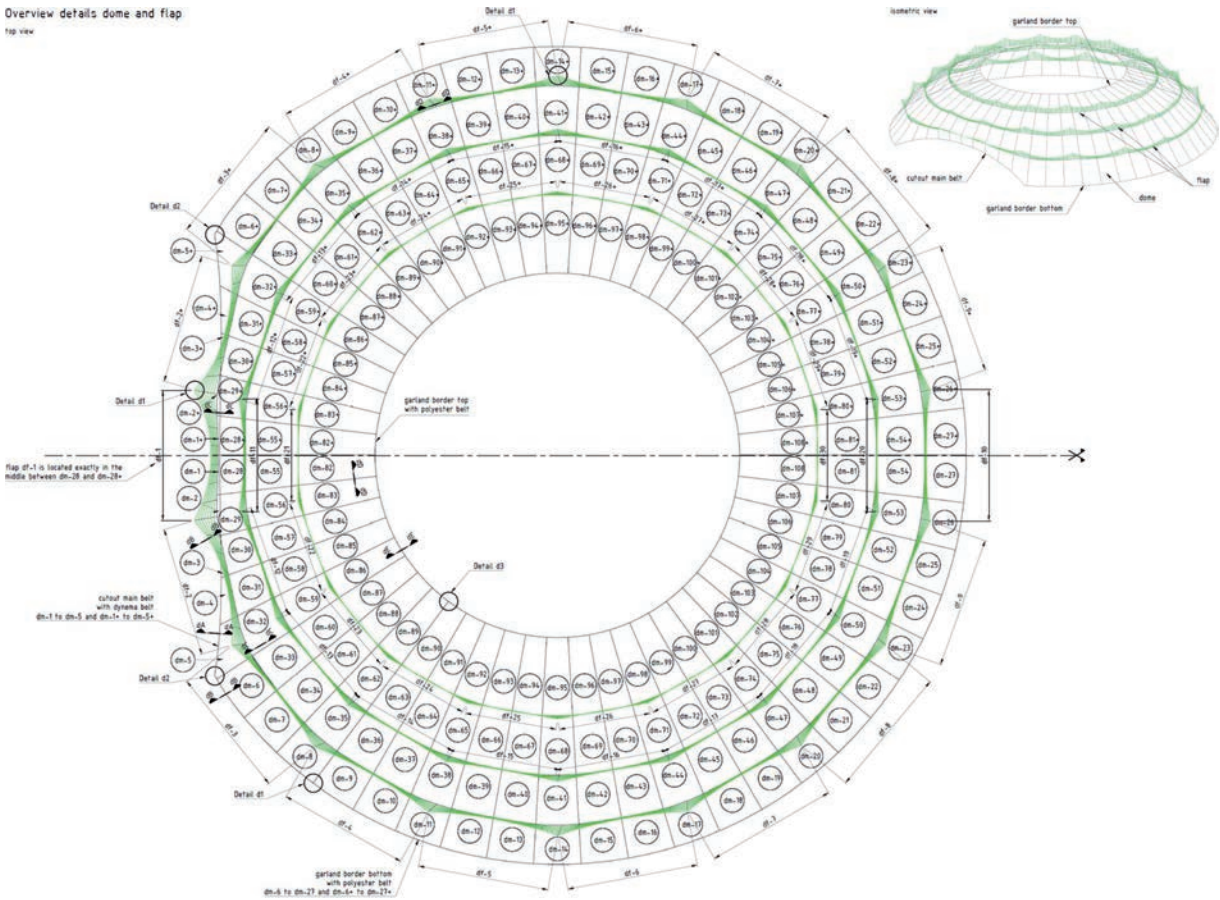
Die Fertigung des Stahlbaus erfolgte an drei Orten. Alle Haupttragelemente wurden in Singapur gefertigt (Bild 18), Membranstahl und Erdnägel wurden in Italien produziert. Die Bumerangaufhängungen und die höhenverstellbaren Auflager für die Fassadenstützen wurden in Kanada hergestellt. Seile und Membrane wurden in Italien gefertigt, Membranen und ETFE-Folie kommen aus Deutschland und Frankreich.

Die Stahlträger sind duplexbeschichtet. Bei der Trägerlänge von knapp 12 m war es nicht möglich, die entsprechenden Entlüftungslöcher vorzusehen. Deshalb wurden die Bolzenanschlüsse erst nach dem Verzinken aufgeschweißt.



Quelle: formTL

Bild 16 Zuschnittslayout Hauptmembrane
Cutting pattern layout main membrane



Quelle: formTL

Bild 17 Zuschnittslayout Projektionskuppel
Cutting pattern layout main membrane

Quelle: formTL

Bild 18 Hauptträger vor dem Verzinken
Main girder before galvanisation

Quelle: Matthew Churchill Production Ltd

Bild 19 Bogenmontage
Arch installation

6 Montage

Die Bögen werden neben den nivellierten Lagerpunkten ausgelegt. Ein spezielles Montagewerkzeug stellt sicher, dass der Bolzenanschluss beim Heben in den Fußpunkt eindreht und dann verbolzt werden kann. In der Endposition werden die Träger mit temporären Seilen in Lage gehalten (Bild 19). Mit jedem weiteren Bogen können teilweise die finalen Stabilisierungsseile verwendet werden, in Verbindung mit temporären Seilen.

Quelle: Canobbio Textile Engineering

Bild 20 Membranstoß
Membrane joint

Quelle: Canobbio Textile Engineering

Bild 21 Heben der Hauptmembrane
Lifting of the main membrane

Quelle: Matthew Churchill Production Ltd

Bild 22 Ansicht bei Tag
View by day

Quelle: Matthew Churchill Production Ltd

Bild 23 Foyer mit ETFE-Fassade
Foyer with ETFE façade

Anschließend werden die Membranfelder unter den Bögen ausgelegt und am Gratseilstoß geklemmt (Bilder 20, 21). An den Sattelflächen schließen dann die Bumerangknoten an, mit Rollen für die elektrischen Winden. Im Bogen sitzen die Winden, die ein gleichmäßiges Anheben der Membrane ermöglichen. Oben werden die Bumerangknoten eingebolzt. Anschließend wird die Membrane zu den Bogenfüßen gespannt und befestigt.

7 Zusammenfassung

In einem Jahr für Planung, Fertigung und Montage ist eine temporäre Halle der Superlative entstanden. Über Kontinente und Zeitzonen hinweg wurde koordiniert, geplant und gefertigt. Die Tourfähigkeit hat hohe Anforderungen an die Detaillierung gestellt. Temporäre Fundamente mit den auftretenden Lasten waren eine Herausforderung, ebenso wie ETFE-Kissen in diesen Abmessungen in einem fliegenden Bau einzusetzen. Aber die Anstrengung hat sich gelohnt. Pünktlich zur Eröffnung im Juli 2019 in Pasadena stand das temporäre Theater (Bilder 22, 23). Von den Abmessungen und der Architektur erinnert es eher an einen klassischen Dauerbau als an ein Theaterzelt. Man kann gespannt sein auf den nächsten Aufbau, der bislang verschoben werden musste.

Projektbeteiligte

Produzent:	Matthew Churchill Production Ltd. und Nick Grace Management Ltd.
Architektur:	Teresa Hoskyns
Tragwerksplanung:	formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau GmbH, Radolfzell
Engineer of Record:	Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc. Northbrook, USA
Stahlbau:	Boon Chang Structure Pte Ltd, Singapur, CORBO Engineering, Inc., Caraquet, Kanada, Anceschi Alberto e Paolo srl, Rio Saliceto, Italien
Membranunternehmer:	Canobbio Textile Engineering, Castelnuovo Scrivia, Italien
Membranhersteller:	Verseidag-Indutex, Krefeld, SergeFerrari, La Tour di Pin, Frankreich
Seile:	FAS SpA, Cinisello Balsamo, Italien

Literatur

[1] EN 13782 (2015) *Fliegende Bauten – Zelte – Sicherheit*. Brüssel: CEN.

[2] Barnes, M. R. (1999) *Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation* in: International Journal of Space Structures 14, no. 2, pp. 89–104. https://doi.org/10.1260/0266351991494722

[3] ASCE/SEI 7-10 (2010) *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE Standard.

[4] ASCE/SEI 55-10 (2010) *Tensile Membrane Structures*. ASCE Standard.

Autor
Dipl.-Ing. Bernd Stimpfle (Korrespondenzautor)
bernd.stimpfle@form-tl.de
formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau GmbH
Güttinger Str. 37
78315 Radolfzell

Zitieren Sie diesen Beitrag

Stimpfle, B. (2020) *Lunar Dome – Zelt für die Apollo 11 Roadshow in den USA*. Stahlbau 89, H. 8, S. 703–714.
https://doi.org/10.1002/stab.202000049

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 11. Mai 2020; angenommen: 19. Juni 2020.