

# Der Porsche Pavillon in Monocoque-Bauweise

M. Schlaich, A. Bleicher, H. Pasternak

**Zusammenfassung** Mit Methoden des Schiffbaus lassen sich Bleche beliebig doppelt krümmen, womit der Bau ausgesprochen eleganter, effizienter und materialminimierter Stahlschalen möglich wird. Das „Monocoque“, das den Porsche Pavillon in der Autostadt in Wolfsburg überspannt, ist ein Beispiel für eine solche Schale und ein Beispiel für die erfolgreiche Zusammenarbeit von Architekten, Bauingenieuren, Schiffbauern und mutigem Bauherren. In diesem Artikel wird der gesamte Planungs- und Bauprozess für diese ungewöhnliche Schale, von der Konzeptfindung bis zur Montage, beschrieben.



Bild 1. Porsche Pavillon in der Autostadt, Wolfsburg (HG Esch)  
Fig. 1. The Porsche Pavilion in the Autostadt at Wolfsburg

## The Porsche Pavilion in Monocoque design

**Abstract** The methods used in the ship building industry, allow the fabrication of free-form double-curved steel plates for building elegant, efficient and light-weight shells. The „Monocoque“ used for the Porsche Pavilion in Volkswagen’s „Autostadt“ in the city of Wolfsburg not only is an example for such a shell structures, but also for the successful collaboration of architects, structural engineers, ship builders and a daring client. In the paper, the entire building process of this unusual shell from conceptual and structural design to fabrication and erection will be described.

## 1 Einleitung

Im Juni 2012 wurde ein neuer Markenpavillon in der Autostadt in Wolfsburg eröffnet. Erstmals seit ihrer Eröffnung im Jahr 2000 hat die Autostadt damit die Veranstaltungs- und Ausstellungsfläche des automobilen Themenparks um einen Neubau erweitert. Dessen Silhouette erlaubt keinen Zweifel, welcher Marke dieser Pavillon gewidmet wurde: Die dynamisch geformte Skulptur mit markanten Kurven erinnert sofort an einen Porsche und wird eben diesen beherbergen (Bild 1).

An seiner Eingangsseite ragt das asymmetrisch geformte Schalendach aus Edelstahl weit über die Wasseroberfläche

der vorgelagerten Lagune. Leicht ansteigende Rampen rechts und links der Lagune führen den Besucher zum Eingang. Im Inneren des Pavillons gelangt man über eine schwungvolle Rampe hinab zu der tiefer gelegenen, rund 400 m<sup>2</sup> großen Ausstellungsfläche.

Der Entwurf des Architekturbüros Henn (Bild 2) stellte hohe Anforderungen an das Tragwerk und die Gebäudehülle. Entscheidend für die gestalterisch, konstruktiv und baulich einzigartige Umsetzung war die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Architekten, Tragwerksplanern und Schiffbauern. Ergebnis ist eine der größten Dachkonstruktionen in Monocoque-Bauweise, deren Planung und Ausführung hier vorrangig beschrieben wird.

## 2 Entwurf

### 2.1 Entwurfsvarianten

Die besondere Herausforderung bestand darin, für die über 25 m weit auskragende Dachschaale ein effizientes Tragwerk inklusive Gebäudehülle zu entwerfen. Als Planungs- und Ausführungszeitraum stand nur ein Jahr zur Verfügung. Dem Entwurf des Architekten folgend, musste das Tragwerk innerhalb der gesetzten, frei geformten Hüllfläche liegen. Zudem sollte der skulpturale Charakter durch eine möglichst fugenlose Hülle unterstrichen werden, wobei die stark doppelt gekrümmte Hüllfläche im Eingangsbereich unter der auskragenden Dachschaale eine weitere Herausforderung darstellte.

Der Entwurf weit gespannter und weit auskragender Dachkonstruktionen setzt die Anwendung von Leichtbauprinzipien voraus: Hochfeste und gleichzeitig leichte Werkstoffe sowie biegearme, also vorwiegend rein zug- und druckbeanspruchte Konstruktionen führen zu sparsamem Materialeinsatz, zu einem nachhaltigen Bauwerk. Auf diesen Prinzipien basierend wurde von Schlaich Bergermann und Partner auf der Suche nach dem besten Tragwerkskonzept zunächst eine ganz leichte Dachschaale aus Aluminium und

Prof. Dr.-sc. techn. Mike Schlaich

Dr.-Ing. Achim Bleicher

Schlaich Bergermann und Partner

Brunnenstraße 110 c

13355 Berlin

www.sbp.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Haberweg 8

38116 Braunschweig

www.ipp-pasternak.de

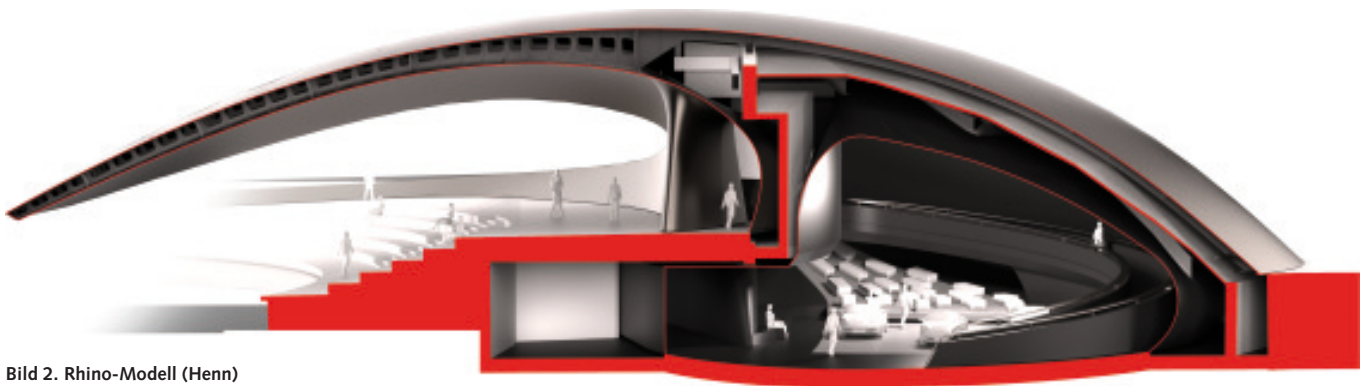


Bild 2. Rhino-Modell (Henn)  
Fig. 2. Rhino model

Carbon vorgeschlagen – Materialien, die wegen ihrer geringen Wichte und der hohen Festigkeit auch im Fahrzeugbau verwendet werden. Mit beiden Materialien hatte schleich bergermann und partner bereits Erfahrung gesammelt: Mit Aluminiumguss beim Christlichen Garten in Berlin [1] und mit der Spannbandbrücke aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbändern an der TU Berlin [2].

So sollte das Tragwerk des Pavillons folgendermaßen aufgebaut sein: Die druckbeanspruchten Tragwerkelemente aus Aluminiumprofilen und die zugbeanspruchten, die die auskragende Dachschale nach hinten abspannen, aus extrem dünnen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbändern (Bild 3. Aluminium-Carbon). Als Eindeckung wurden doppelt gekrümmte Aluminium-Paneele vorgesehen. Diese völlig neuartige Konstruktion hätte sich jedoch aller Erfahrung nach nicht im Rahmen der avisierten Planungs- und Ausführungszeit, vor allem hinsichtlich der notwendigen Zustimmung im Einzelfall für die CFK-Bänder, verwirklichen lassen.

Eine Alternative ist eine Gitterschale mit Dreiecks-Maschen aus Stahl. Gitterschalen können bei entsprechender doppelter Krümmung Lasten sehr effizient über Membrankräfte abtragen. Allerdings ließ im vorliegenden Fall die gesetzte Hüllgeometrie mit geringen Krümmungen nur begrenzt Möglichkeiten der Formoptimierung hin zu einem Schalentragerwerk zu.

Meist werden Gitterschalen mit Glas eingedeckt damit ihre Leichtigkeit auch zum Ausdruck kommt [3]. Beim Porsche Pavillon stand jedoch ein geschlossener, fugenloser und fließender Baukörper im Vordergrund. Als Alternative zu doppelt gekrümmten Aluminium- bzw. Edelstahlblechen wurden weitere Lösungsansätze studiert: kleine dreieckige ebene Carbon-Paneele sowie große doppelt gekrümmte Carbon-Paneele. Die Variante mit ebenen Paneelen schied aus, da ein Fugenbild und eine Polygonalisierung erkennbar ge-

worden wäre. Die großen doppelt gekrümmten Carbon-Paneele erfordern im Herstellungsprozess viele unterschiedliche Negativformen, was die Kosten stark ansteigen lassen würde.

Auf der Suche nach Herstellern von doppelt gekrümmten Eindeckungen lud man auch die aus dem Schiffsbau bekannte Firma Centraalstaal International (CSI) aus Groningen, Niederlande ein, die langjährige Erfahrung in der Kaltverformung von Metallblechen besitzt. Mit der Möglichkeit der Herstellung stark doppelt gekrümmter Bleche entstand in Zusammenarbeit mit CSI eine Dachschale in Monocoque-Bauweise.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Besonderheiten der Monocoque-Bauweise erläutert und ein Vergleich mit anderen Konstruktionsprinzipien im Konstruktiven Ingenieurbau hergestellt. Anschließend wird das Monocoque aus Edelstahl für den Porsche Pavillon beschrieben.

### 2.2 Monocoque-Bauweise

Die Monocoque-Bauweise wird vor allem in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau und im Schiffsbau verwendet. Bei dieser Bauweise ist die Außenhaut tragend in die Gesamtstruktur integriert. Spanten und Querschotte geben die Geometrie vor und versteifen die Struktur. Ein Monocoque (mono = einzeln und coque frz. = Schale) kann also als versteifte Schale bezeichnet werden. Die Außenhaut trägt dabei einen Großteil der Kräfte über Zug und Druck ab.

Versucht man das Monocoque mit Konstruktionsprinzipien im Konstruktiven Ingenieurbau zu vergleichen, so kann eine Rippenschale als Monocoque bezeichnet werden. Als Beispiel seien hier die Stahlbetonrippenschale des Palazzetto dello Sport in Rom und die Holzrippenschale der Hanse Messe in Rostock genannt [4], [5]. Das gleiche gilt für die stählernen orthotropen Platten und Hohlkästen im Brückenbau.

Im weitesten Sinne können monolithische Konstruktionen

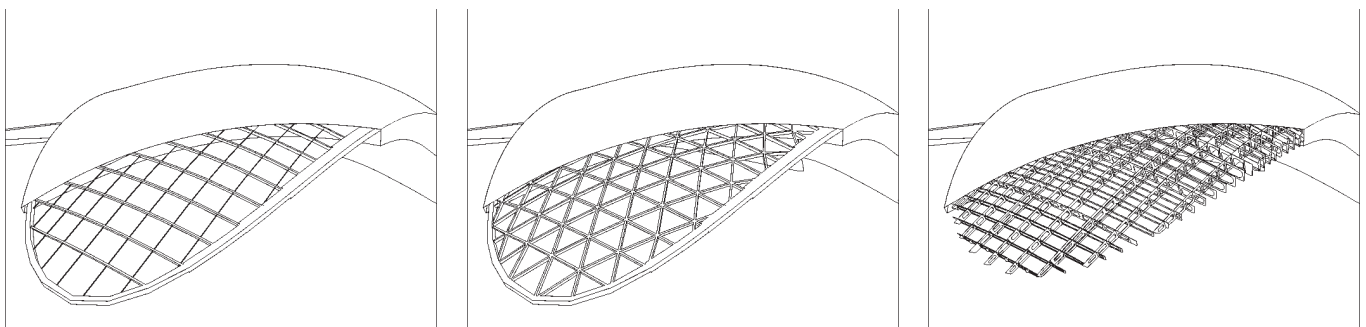
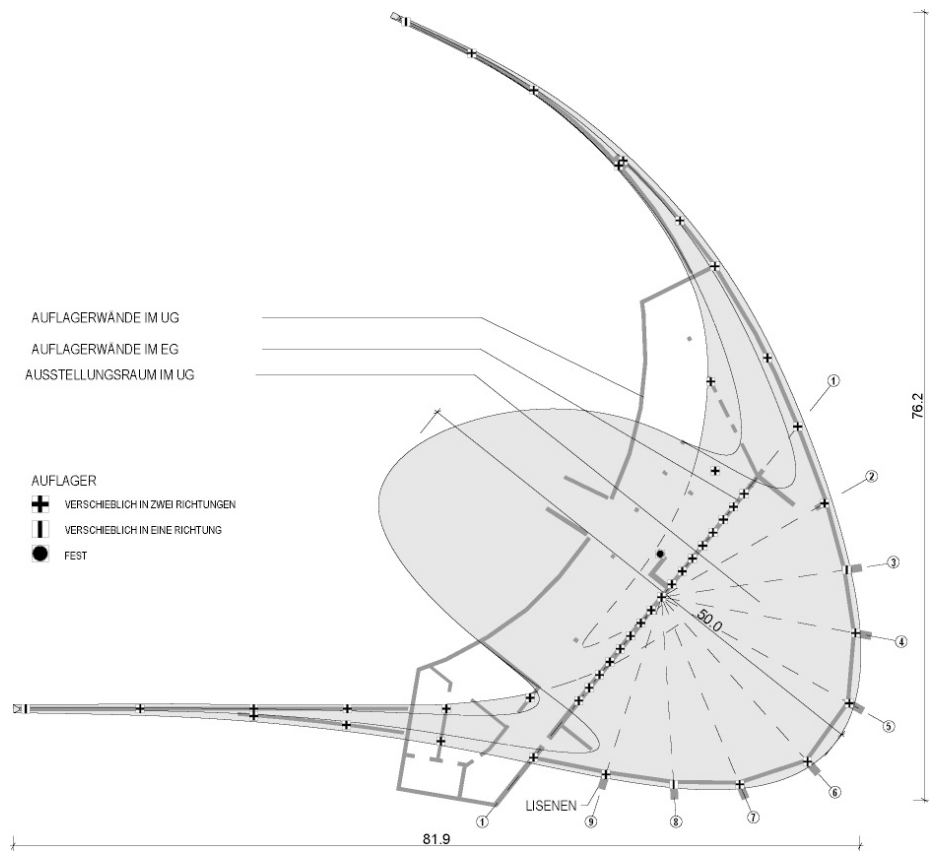


Bild 3. Aluminium-Carbon Gitterschale Monocoque  
Fig.3. Aluminium Carbon Lattice shell Monocoque

aus Wand- und Deckenscheiben als Monocoque betrachtet werden. Dazu zählt auch das Tragkonzept der perforierten Röhre von Hochhäusern. Hierbei wird die perforierte Fassade zum globalen Lastabtrag herangezogen. Im Fassadenbau wird diese Kombination selten gewählt. Für die Funktionen Lastabtrag, Ausgleich und Hülle werden meist mehrere Konstruktionsebenen vorgesehen, die nicht zusammenwirken. Eine Zusammenführung aller Funktionen in eine Konstruktion ist oftmals nur bedingt möglich, weil zum Einen die aussteifende Funktion einer Glasscheibe in Deutschland nicht angesetzt werden darf und zum Anderen die Fassade oftmals separat geplant wird.

Konstruktionen, die auf der Herstellung doppelt gekrümmter Bleche basieren und die eine äußere und eine innere Haut haben sind jedoch relativ neu, zum Beispiel bei der Trambahnhaltestelle Münchner Freiheit in München und der Martin-Luther-Kirche in Hainburg an der Donau [6], [7].



**Bild 4. Grundriss der Stahlbetonkonstruktion und Lagerung des Monocoques**  
 Fig. 4. Ground plan of the reinforced concrete structure and support of the monocoque

### 3 Konstruktion und Berechnung

#### 3.1 Tragwerk

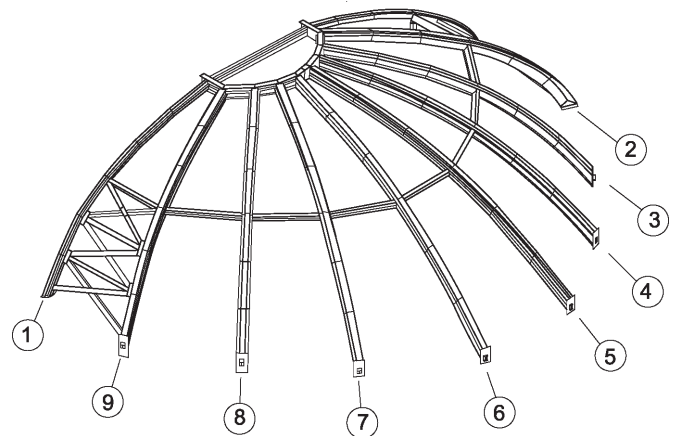
Das Tragwerk des Porsche Pavillons besteht im Wesentlichen aus drei Bauteilen: Dem Untergeschoss in Stahlbetonbauweise, einer stählernen Polygonschale über dem Ausstellungsraum und dem Monocoque, der sich über das gesamte Gebäude erstreckt.

Den Grundriss der Stahlbetonkonstruktion zeigt **Bild 4**. Generell wurde Beton C35/45 verwendet, nur die Innenwand (Achse 1) wurde in C45/55 ausgeführt. Wegen der Gründungsbedingungen wurde eine 50 cm dicke Bodenplatte hergestellt. Beide Dachtragwerke – Polygonschale und Monocoque – ruhen auf der Innenwand (Achse 1) und auf den Lisenen (Achsen 2 bis 9).

Die Polygonschale (**Bild 5**) besteht aus 10 radial angeordneten Bögen (HEA700) aus Stahl S355, die oben in einen Auflagerkranz münden. Im Grundriss beträgt die Länge der Bögen zwischen 12,09 und 17,50m. Um die Durchbiegungen der Bögen zu reduzieren wurden auf halber Spannweite in Umfangsrichtung Profile IPE 500 angeordnet. Die Eindeckung der Schale erfolgte durch Trapezbleche. Sie nehmen das Gewicht der Unterdecke, der Heizung und der für Vorführungen installierten Großgeräte auf. Auf der Grundlage des Windgutachtens [8] wurde zusätzlich (das Monocoque liegt über der Polygonschale!) eine Last von  $\pm 0.15 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt.

Im Folgenden soll vorrangig das Monocoque aus Edelstahl behandelt werden.

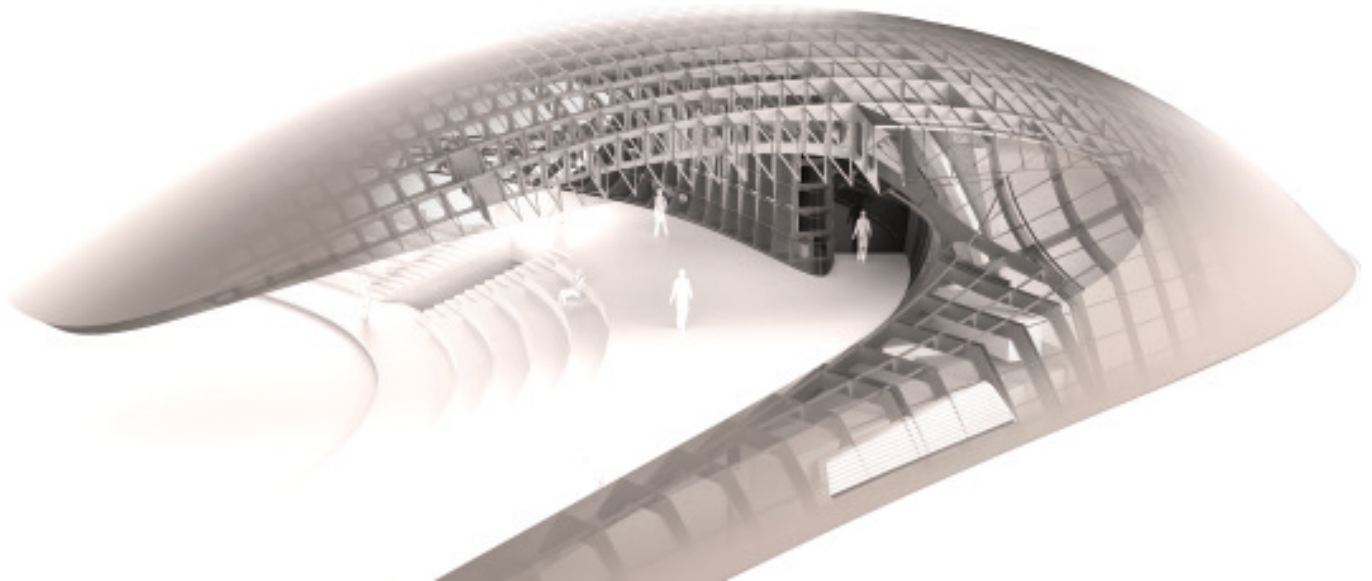
Das Monocoque mit den beiden Seitenarmen (**Bild 6**) hat maximale äußere Abmessungen von rund 75 x 80 m. Das eigentliche Dachtragwerk mit einer maximalen Höhe von 10m, einer Gesamtlänge von rund 50m bei einer Breite von 50m im Ansatzbereich der Seitenarme, liegt auf dem Massiv-



**Bild 5. Polygonschale**  
 Fig. 5. Polygon shell

bau des Untergeschosses auf. Die gesamte Oberfläche der Außenkontur beträgt  $2.550 \text{ m}^2$ , das Gesamtgewicht liegt bei 425 Tonnen.

Damit sich die monolithische Konstruktion ohne Fugen unter Temperaturbeanspruchung ausdehnen kann, wurde eine zwängungsarme Lagerung auf dem Untergeschoss gewählt. Das Festlager befindet sich in der Mitte der Dachkonstruktion am Aufzugskern, so dass sich das Monocoque in alle Richtungen gleichmäßig ausdehnen kann. Am Ansatz der Auskragung wird das Dach nahezu linienförmig auf einer massiven Stahlbetonwand vertikal gelagert. Entlang des unteren Schalenrandes sind vertikale Lager im Abstand von rund 7m vorgesehen (**Bild 4**).



**Bild 6. Aufbau Monocoque (Henn)**  
Fig. 6. Structure of the monocoque

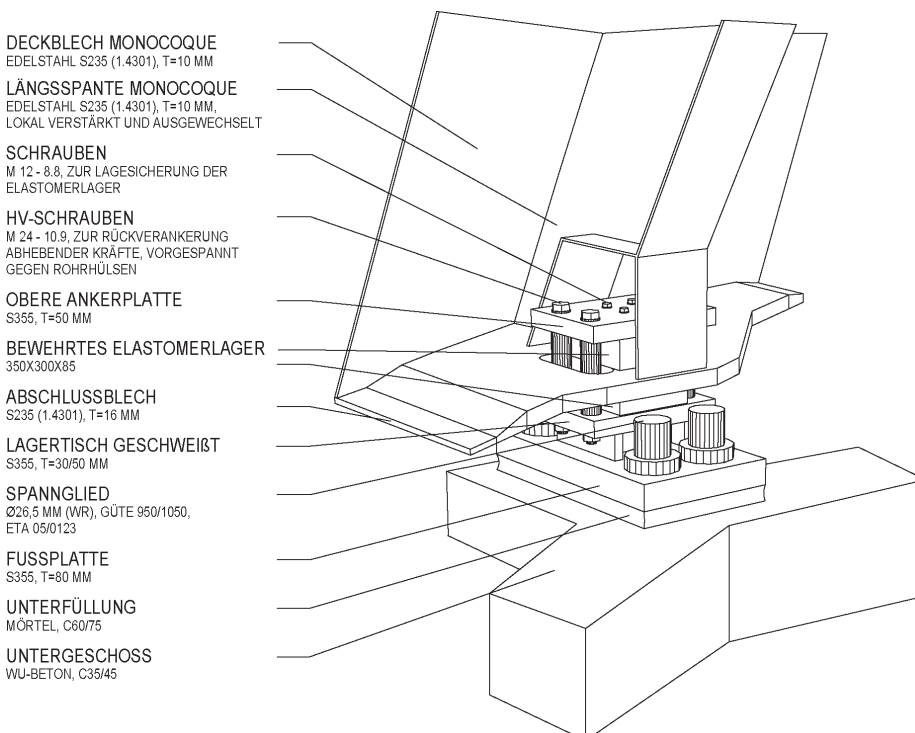
Am hinteren Schalenrand treten aufgrund der Auskrägung auch Zugkräfte auf, zu deren Aufnahme bei gleichzeitiger horizontaler Verschieblichkeit in zwei Richtungen, spezielle Lager entwickelt wurden. Horizontale Lasten aus Wind werden durch das Festlager und zwei horizontale Lager tangential zum Dachschalenrand aufgenommen (**Bild 7**). Die wesentliche tragende Komponente des Monocoques ist die Außenhaut, die fugenlos der Außenkontur folgt (Bild 6). Im auskragenden Bereich gibt es folglich eine Ober- und Unterschale. Hier wird die Steifigkeit der Dachschale vor allem durch die Ober- und Unterschale mit einem Abstand von 0,4 m am Schalenende und 1,6 m bis 2,2 m am Schalenansatz erzielt. Folglich ist die Bauhöhe gleich statischer Höhe, der Querschnitt wird optimal ausgenutzt. Über dem Ausstel-

lungsraum und den beiden Seitenarmen gibt es nur eine Oberschale aus doppelt gekrümmten Edelstahlblechen. Die Bleche sind überwiegend 10 mm dick, am Schalenansatz auf Grund der höheren Beanspruchung jedoch 12 mm. Zwischen der Ober- und Unterschale im auskragenden Bereich sind Spanten in einem orthogonalen Raster angeordnet. Da die Ober- und – falls vorhanden – Unterschale mit den Spannten verschweißt sind tragen sie die Lasten gemeinsam ab. Die Längsspannten mit einer Stärke von 10 mm in Form von ebenen Blechen mit Aussparungen sind im Abstand von 1,60 m, die Querspannten im Abstand von 4 m angeordnet. Über dem Ausstellungsraum haben die Längs- und Querspannten einen unteren Flansch als „Deckblechersatz“. Zur

Aussteifung der druckbeanspruchten Deckbleche gegen Beulen wurden nach Erfordernis Flachsteifen zwischen den Längs- und Querspannten im Abstand von 0,80 m angeordnet. Am unteren Rand der Dachschale verläuft ein Abschlussblech mit einer Stärke von 16 mm an dem die Lager befestigt sind.

Als Material wurde Edelstahl gewählt, weil eine matt metallisch glänzende Oberfläche gewünscht war. Eine hochwertige Lackierung mit den Anforderungen aus dem Automobilbau hätte aufgrund der Größe und der klimatischen Verhältnisse im Frühjahr nur unter sehr großem Aufwand erzielt werden können. Mit Edelstahl wurde gleichzeitig der Korrosionsschutz gewährleistet, der unter montagetechnischen Aspekten nur sehr schwer aufzubringen gewesen wäre. Eine gekrümmte Fußgängerrampe verbindet das Erdgeschoss mit dem Untergeschoss.

Die Konstruktion besteht aus zwei Tragrohren, die über Schottbleche



**Bild 7. Lagerung Monocoque**  
Fig. 7. Support of the monocoque

torsionssteif verbunden sind. Das äußere Tragrohr (508 x 20 mm) ist durchlaufend über die beiden Stützen ausgeführt. Die Anschlüsse an die Stützenköpfe sind gelenkig. Das innere Tragrohr (d = 406 x 25 mm) hat keine direkten Auflager und wird über Querschotte im Abstand von weniger als 1,0 m gehalten.

### 3.2 Modellierung

Grundlage für die Konstruktion des Monocoques war die Außenkontur des Pavillons in Form eines 3D Rhino Modells, das von Henn und Porsche in Abstimmung mit schlaich bergemann und partner festgelegt wurde. Auf dieser Basis wurde von Centraalstaal in Abstimmung mit schlaich bergemann und partner die Geometrie der Spanten und die Lage der Auflager festgelegt. Das für die Berechnung erforderliche FE-Netz wurde gemeinsam generiert und anschließend von schlaich bergemann und partner mit SOFiSTik und von Centraalstaal mit ANSYS weiterberechnet. Das FE-Netz des Monocoques ohne Seitenarme besteht aus ca. 183000 4-knotigen Schalenelementen (Faltwerkselementen) mit einer Größe von rund 0,5 m (Bild 8). Aufgrund der Komplexität des Modells wurden die Flachsteifen nicht modelliert. Der Auflagerbereich wurde mit detaillierten Teilmodellen untersucht.

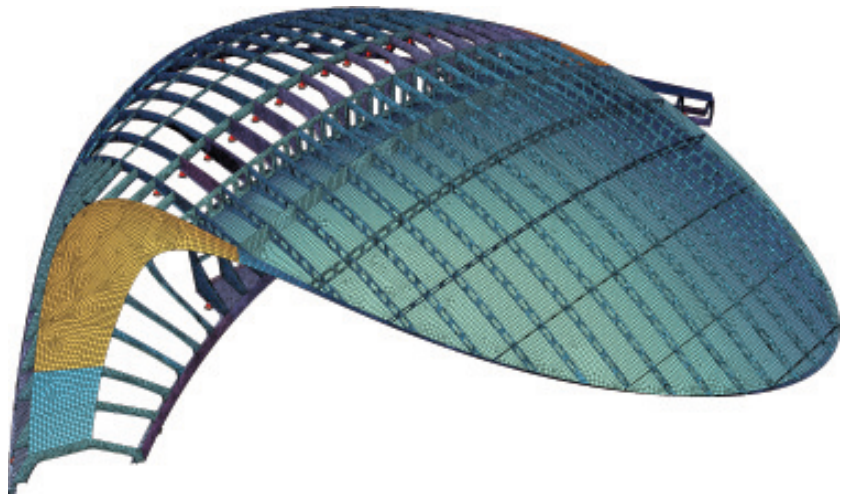


Bild 8. FE-Modell des Monocoques  
Fig. 8. FE model of the monocoque

### 3.3 Analyse und Bemessung

Die maßgebenden Einwirkungen resultieren neben den Eigengewichtslasten von rund 160 kg/m<sup>2</sup> aus den Schneelasten. Die Bemessungswindlasten wurden durch Windkanalversuche von Wacker Ingenieure [8] ermittelt und sind mit rund 0,40 kN/m<sup>2</sup> vergleichsweise gering (Bild 9).

Die Analyse des Tragverhaltens begann zunächst (bei den gegebenen Abmessungen und Blechdicken) mit einer für Geometrie und Material linearen Berechnung des Gesamtmodells. Die maximalen Vergleichsspannungen treten am Schalenansatz auf, weil die Lasten nicht nur über Membrankräfte, sondern auch über Biegung aufgrund der geringen doppelten Krümmung abgetragen werden.

Da fast keine Erfahrungen über das Tragverhalten von Monocoques vorliegen, wurden im Rahmen einer Studie Sensitivitätsuntersuchungen mit dem FE-ABAQUS

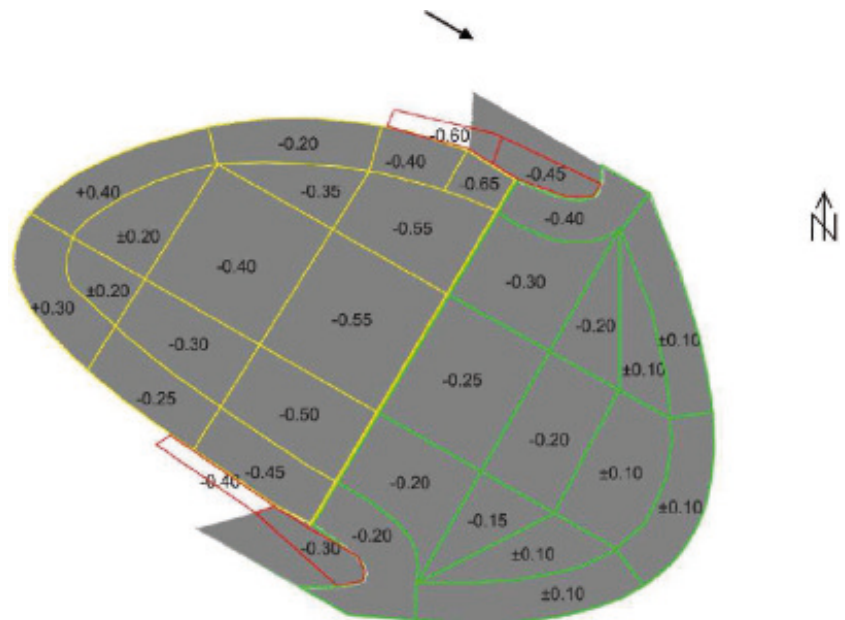


Bild 9. Windbelastung, Anströmrichtung: 300 Grad (Wacker)  
Fig. 9. Wind load, flow direction: 300 Grad

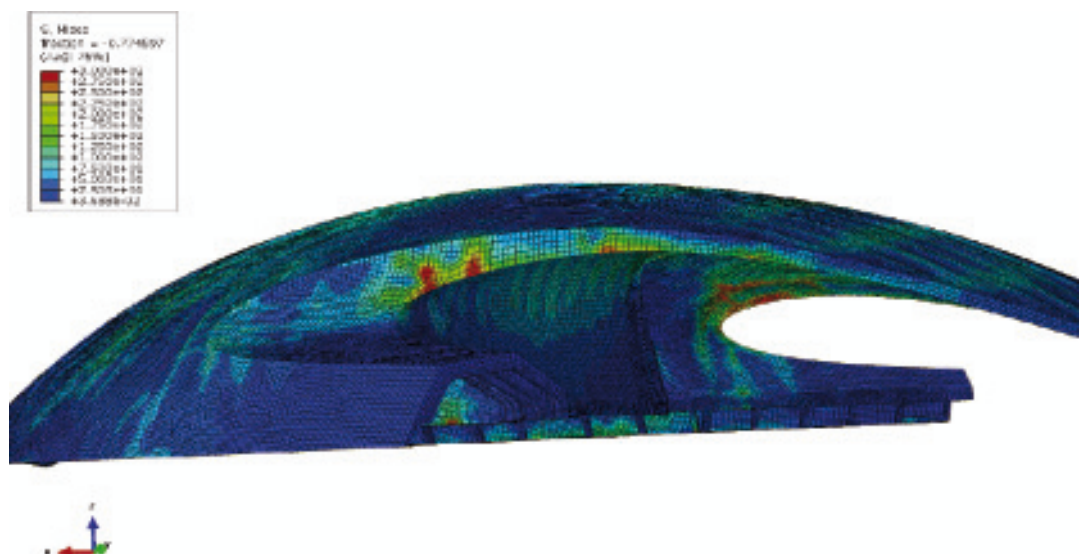


Bild 10. Versagenszustand der Schale  
Fig. 10. Failure mode of the shell

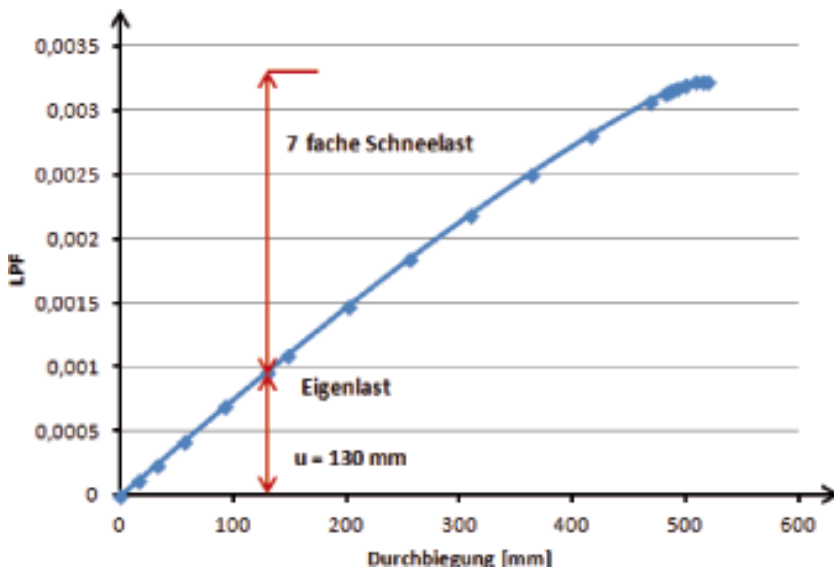


Bild 11. Laststeigerungsfaktor-Durchbiegungsdiagramm  
Fig. 11. Load proportionality factor deflection graph

durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Tragverhalten des Monocoques bei den vorkommenden geometrischen Imperfektionen (s. auch Abschnitt 4) linearisiert werden konnte. Weiterhin war der Versagenszustand interessant. Bild 10 zeigt die Vergleichsspannungen im Versagenszustand der Schale unter Eigen-, Schnee- und Windlast (300 Grad). LPF ist der Laststeigerungsfaktor (engl. Load Proportionality Factor). Die max. rechnerische Durchbiegung unter Eigenlast beträgt 130 mm (Bild 11), wobei diese Eigenlast um 20% wegen der Berücksichtigung der Schweißnähte und Flachsteifen erhöht wurde. In Wirklichkeit stellten sich später ca. 100 mm ein.

Aus Bild 11 ist zu erkennen, dass die rechnerische Tragfähigkeit der Schale bei einer Durchbiegung von etwa 510 mm erschöpft ist. Dies würde bedeuten, dass man neben der Eigenlast z.B. die 7-fache Schneelast aufbringen könnte.

Aufgrund der segmentweisen Montage (erst vertikale Segmente (Bild 12a), dann horizontale über der Polygonschale und schließlich die Segmente des Kragarms) mussten ebenfalls Montagezustände z.B. der Kragsschale untersucht werden (Bild 12b).

Zusätzlich wurden lokale Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt. Der Schiffbauer CSI führte die Beulnachweise nach Germanischem Lloyd, der Prüfer rechnete nach DIN EN1993-1-6. Die Abweichung der Ergebnisse an einigen Segmenten betrug bis 20%.

Die Bemessung erfolgte generell nach der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-50.3-6 für Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen [9].

### 3.4 Details

Die Monocoque-Bauweise hat nur wenige Details, z.B. die nicht sichtbaren Lager, die bei horizontaler Verschieblichkeit und Verdrehbarkeit um zwei Achsen Zugkräfte von bis zu 900 kN aufnehmen können und in den darunterliegenden Massivbau einleiten (Bild 7). Das Lager besteht aus bewehrten Elastomerlagern, die ober- und unterhalb des Monocoque-Abschlussbleches angeordnet sind. Dadurch kann die erforderliche Verschieblichkeit über die Verrautung und die Verdrehbarkeit über die Stauchung der Elastomerlager aufgenommen werden. Durch die beidseitige Anordnung der Elastomerlager ist auch die galvanische Trennung zwischen Edelstahl und Schwarzstahl zur Verhinderung der Kontaktkorrosion gegeben. Die Rückverankerung der abhebenden Kräfte erfolgt über vorgespannte Hülsen mit hochfesten Schrauben in den Ankerblock und von dort mit hochfesten vorgespannten Spanngliedern in den Massivbau.

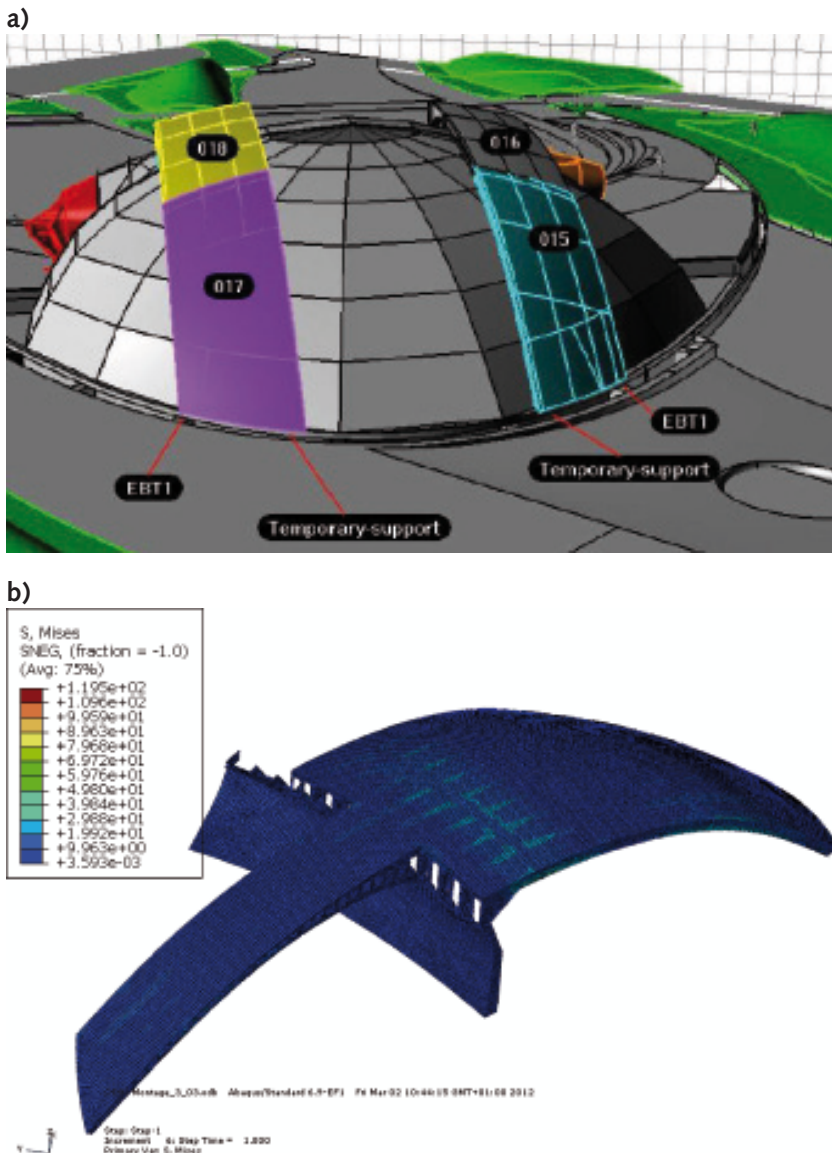


Bild 12. Montage a – vertikale Segmente (CSI), b – Tragverhalten unter Eigenlast  
Fig. 12. Assembling a – vertical segments, b-load carrying behaviour under dead load

## 4 Ausführung

### 4.1 Massivbau und Polygonalschale

Das flach gegründete Untergeschoss liegt knapp über dem Grundwasserspiegel und inmitten eines künstlich angelegten Teiches. Daher wurde das gesamte Untergeschoss in WU-Beton ausgeführt. Um den Ausstellungsraum bauphysikalisch abzuschließen, wurde eine Polygonalschale aus Stahl mit Trapezblecheindeckung (Bild 13) vorgesehen; auf ihr liegt die Dämm- und Abdichtungsebene, darüber erstreckt sich das Monocoque.

### 4.2 Rampe

Die Segmente der gekrümmte Rampe wurde zunächst beim Hersteller auf Hilfsböcken aufgebaut und verschweißt und dann in Wolfsburg verschraubt (Bild 14).

### 4.3 Edelstahl-Monocoque

Auf Grundlage des Rhino Modells und in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften ermittelte CSI mit der hauseigenen Software „Nupas-Cadmatic“ den genauen Zuschnitt der ebenen Bleche und die erforderlichen Reck-Werte für die Kaltverformung der Bleche. Diese erfolgt mit hydraulischen Pressen, die Kräfte von bis zu 6000 kN erzeugen können. Mit Hilfe verschiedener Pressstempel wird das Blech an zuvor berechneten Stellen unter Variation der Pressenkraft plastisch verformt bis die gewünschte Krümmung eingetragen



Bild 13. Polygonalschale, im Hintergrund Innenwand (Achse 1)  
Fig. 13. Polygon shell, in the background interior wall (axis 1)

ist. Der Vorgang erfolgt überwiegend manuell, wobei die erzielte Krümmung kontinuierlich durch Schablonen überprüft wird. Die maximale Größe der zu verformenden Einzelbleche hängt von den Krümmungsradien und der Blechstärke ab. Im stark gekrümmten Eingangsbereich mussten daher sehr kleine Einzelbleche (~0,1 m x ~0,6 m) verwendet werden (Bild 15), für die auskragenden Deckbleche mit ge-



Bild 14. Rampe  
Fig. 14. Ramp

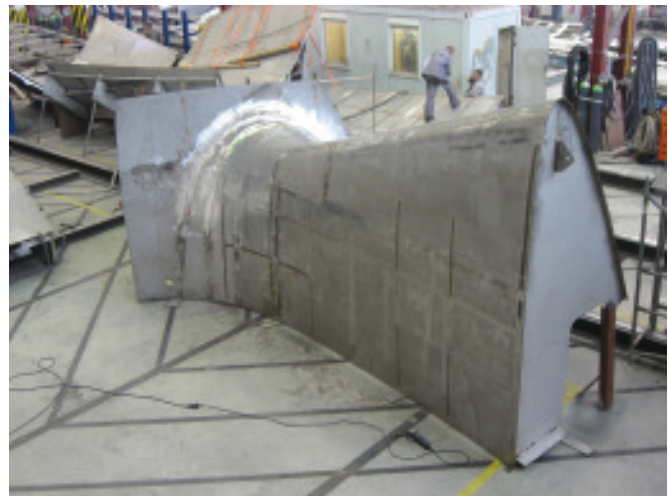


Bild 15. Segment im Eingangsbereich mit stark gekrümmten Blechen  
Fig. 15. Segment in the entrance area with strongly curved plates



Bild 16. Rost aus Längs- und Querspanten  
Fig. 16. Grid



Bild 17. Verschweißen der Deckbleche  
Fig. 17. Welding of the cover plates

ringer Krümmung konnten hingegen große Einzelbleche (~2 m x ~12 m) verwendet werden.

Neben der individuellen Kaltverformung der Deckbleche bestand die große Herausforderung in der Vorfertigung und Fügung von 56 Segmenten. Bei der CSI-Tochterfirma Ostseestaal in Stralsund wurden die Bleche innerhalb kürzester Zeit zu Segmenten mit Abmessungen von rund 14 m x 4,8 m verschweißt. Zuerst wurde der formgebende Rost aus den Längs- und Querspanten ausgerichtet und verschweißt (Bild 16), anschließend die Deckbleche mit dem Rost (Bild 17). Zur Sicherstellung der Qualität wurden hohe Anforderungen an Geometrie, Oberfläche und Schweißarbeiten gestellt. Damit die Segmente auf der Baustelle wirklich zusammenpassen, wurden die Deckbleche und Spanten mehrfach an bis zu über 50 Punkten pro Segment vermessen. Ein typisches Messergebnis zeigt Bild 18. Die Schweißnahtqualität wurde durch Durchstrahlungs-(RT) und Oberflächenrissprüfung (PT) sichergestellt.

In Wolfsburg wurden die Segmente zu einem homogenen Dach verschweißt (Bild 19). Die Oberflächenqualität, vor allem an den Montagestößen, hängt maßgeblich von der Qualität der Vorfertigung und der Fügung auf der Baustelle ab.

Daher sind im Rahmen des Montagekonzepts die Eigengewichtsverformungen der Segmente zu berücksichtigen. Nur so kann sichergestellt werden, dass beim Zusammenschweißen die Verträglichkeit zwischen den Segmenten gegeben ist, also keine sichtbaren Kanten entstehen. Mit der im Schiffsbau üblichen Methode des Zusammenziehens bzw. dem Einsetzen von Blechen können bei der gewählten Oberflächenqualität Differenzen nur bedingt ausgeglichen werden, was aber nur zu geringfügigen Qualitätseinbußen führt. Die matt metallisch glänzende Oberfläche erzielte man durch Strahlen der Bleche mit Edelstahlgranulat. An den Schweißstellen wurden damit auch die Anlauffarben beseitigt, so dass sich die natürliche passive Oxidschicht des Edelstahls zur Sicherstellung der Korrosionsbeständigkeit ausbilden kann.

### 5 Zusammenfassung

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Architekten, Tragwerksplanern und Schiffsbauern wurde ein komplexer und ganz neuartiger Entwurf gestalterisch, konstruktiv und baulich erfolgreich umgesetzt. Der realisierte Pavillon

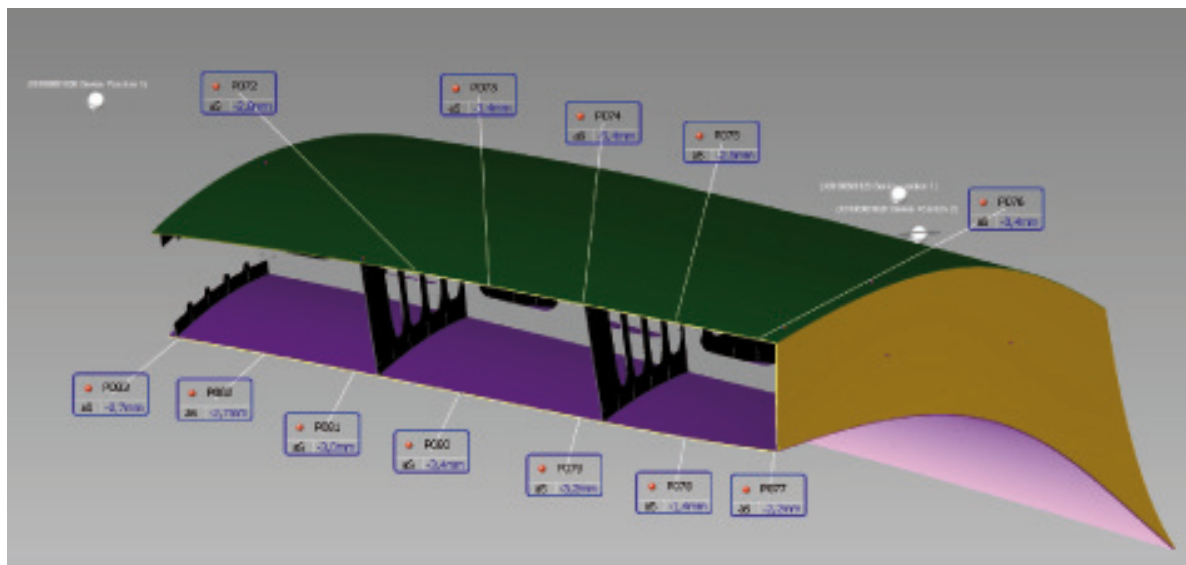


Bild 18. Abweichungen der Ist- von der Sollgröße für Segment 31 (Ostseestaal)  
Fig. 18. Discrepancy between actual and nominal size for segment 31



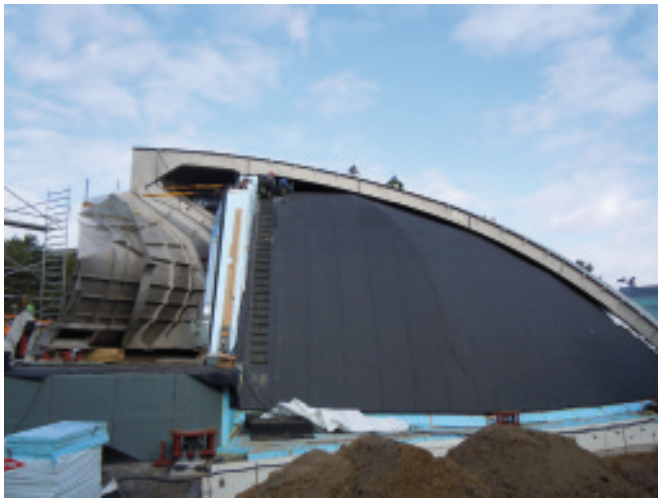


Bild 19. Montage der Segmente  
Fig. 19. Assembling of segments

ion korrespondiert mit dem Porsche-Design und Porsches langer Tradition im Leichtbau sowohl von außen (Bild 20) als auch von innen (Bild 21).

Die Monocoque-Bauweise ist im Bauwesen prinzipiell kein neues Konstruktionsprinzip, wie auch die genannten Bauwerke aus unterschiedlichen Werkstoffen zeigen. Mit der Herstellung doppelt gekrümmter versteifter Bleche eröffnet sich jedoch ein neuer Gestaltungsspielraum, nicht nur für Dächer und Brücken. Im Vergleich zu aufwändigen und teuren Schalungen für Betonschalen bzw. Negativformen für Elemente aus faserverstärkten Kunststoffen können versteifte Bleche mit individuellen Krümmungen sehr wirt-



Bild 20. Porsche Pavillon (HG Esch)  
Fig. 20. Porsche Pavillon



Bild 21. Porsche Pavillon von innen, im Hintergrund die gekrümmte Rampe (HG Esch)  
Fig. 21. Internal view of the Porsche Pavilion, in the background the curved ramp

schaftlich hergestellt werden. Dadurch wird eine Renaissance des Schalenbaus möglich.

Neben der Herstellung frei geformter Strukturen wird durch die Monocoque-Bauweise die Gebäudehülle mit dem Tragwerk effizient und nachhaltig verbunden. Effizient: Weil sich die Gebäudehülle am Lastabtrag beteiligt und nicht nur eine verkleidende Funktion übernimmt, die zu einer Erhöhung der Eigenlasten führt. Nachhaltig: Weil durch die fehlenden Fugen geringere Wartungsarbeiten zu erwarten sind und dank der Verwendung von einem Werkstoff eine vollständige Wiederverwendbarkeit gegeben ist.

Nachteile dieser Bauweise sind die aufwändige Fertigung und Montage. Die umfangreichen Schweißarbeiten in der Werkstatt und auf der Baustelle müssen aufgrund der Geometrie ausschließlich per Hand ausgeführt werden. Anzumerken ist auch, dass doppelt gekrümmte Bleche bisher nur von wenigen Stahlbauern fast ausschließlich aus dem maritimen Bereich hergestellt werden können.

Alternativ zu metallischen Werkstoffen ist eine Umsetzung auch mit den im Bauwesen noch neuen Materialien glasfaser- und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff möglich. Im Vergleich zu Stahl können mit diesen Werkstoffen, wegen der größeren Zugfestigkeit bei einem Fünftel des Eigengewichts, leichtere und noch schlankere Konstruktionen realisiert werden. Doppelt gekrümmte Elemente erfordern jedoch noch relativ teure Negativformen, so dass ein hoher Wiederholungsgrad anzustreben ist.

## Am Projekt Beteiligte

Bauherr	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Stuttgart und Autostadt GmbH, Wolfsburg
Architekt und Generalplaner	Henn, Berlin
Tragwerksplanung	schlaich bergemann und partner, Berlin: M. Schlaich, A. Bleicher, T. Schoknecht, S. Linden, U. Dillmann, C. Striegan, D. Gebreiter, R.M. Behnke
Tragwerksplanung/Rampe	DBT Ingenieursozietät, Frankfurt/M.
Prüfingenieur	Prof. Hartmut Pasternak, Braunschweig, unter Mitarbeit von T. Krausche, G. Kubieniec
Ausführung Massivbau	Kümper + Schwarze Baubetriebe GmbH, Wolfenbüttel
Ausführung Stahlbau	Polygonschale – Temme Stahlbau, Bad Lauchstädt Monocoque – Centraalstaal Construction B.V, Groningen und Ostseestaal GmbH, Stralsund Rampe – Ahlgrimm GmbH, Steinsberg
Landschaftsplanung	WES Landschaftsarchitekten
Inszenierungsplanung und Medien	hg merz architekten museumsgestalter mit jangled nerves
Technische Gebäudeausrüstung	ZWP Ingenieur-AG
Lichtplanung	Kardorff Ingenieure Lichtplanung GmbH
Infrastrukturplanung	Niermann Consult

## Literatur

- [1] Deutscher Designer Club (Hrsg.): Der geschriebene Garten, Gute Gestaltung 12, Seiten 294–295, 1. Auflage 2012
- [2] *Schlaich, M. ; Bleicher, A.*: Spannbandbrücke mit Kohlenstofffaser-Lamellen, Bautechnik 84, Nr. 5, Seiten 311–319, 2007
- [3] *Schlaich, J. ; Schober, H. ; Helbig, T.*: Eine verglaste Netzschale: Dach und Skulptur – DG Bank am Pariser Platz 3 in Berlin, Bautechnik 78, Nr. 7, 2001, Seiten 457–463.
- [4] *Nervi, P.L.*: Neue Strukturen, Hatje Verlag, 1963
- [5] *Schlaich, M. ; Stavenhagen, L. ; Krüger, G.*: Die HanseMesse in Rostock – Zollinger mit moderner Technik, Bautechnik 80, Nr. 5, 2003, Seiten 279–284.
- [6] *Winkler, T. ; Findeiß, R. ; Betko, M.*: Die Überdachung der Trambahnhaltestelle Münchner Freiheit, Bautechnik 88, Nr. 2, Seiten 132 – 139, 2011
- [7] *Santifaller, E.*: Ein Wolkendach, wie hingehaucht, Martin-Luther-Kirche, Hainburg/A, Deutsche Bauzeitschrift 59, Nr. 10, Seiten 50–57, 2011
- [8] Wacker Ingenieure: Windkanalversuche zur Ermittlung der Bemessungswindlasten für die Überdachung, 2011
- [9] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3–6 „Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen“, Sonderdruck 862, 2009