BIngK
BUNDES-INGENIEURKAMMER

Deutsches Ingenieurblatt

7-8-2015 Juli-August
€ 14,00

Dynamischer Holzbau | Stahl-Membrankonstruktion

Ingenieure in Deutschland: Qualität erhalten!

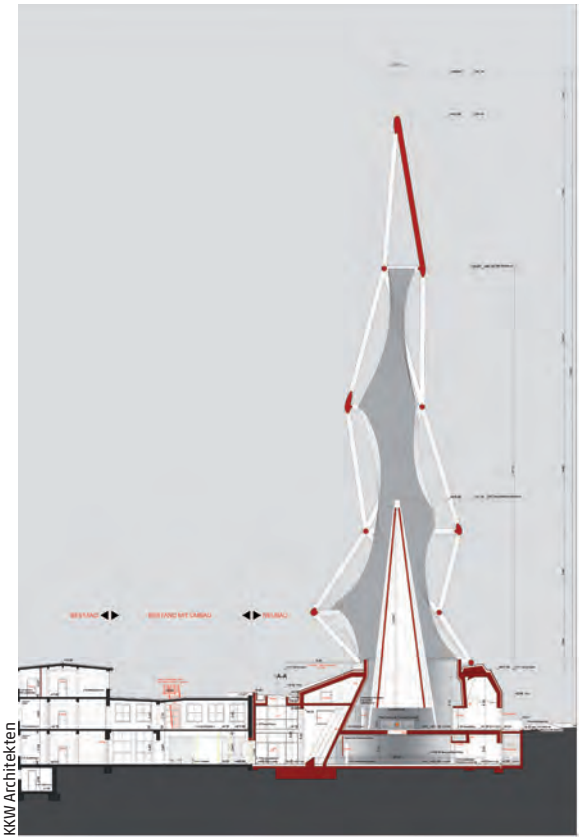
Meilensteine und Impulse im Brandschutz

Science Center Phänomenta: Markante Stahl-Membrankonstruktion

Geometrie und Dynamik vereint

Rutzen, Pressestelle Stadt Lüdenscheid

Dem neuen Erweiterungsbau des Science Centers Phänomenta wird das Potenzial einer ingenieurtechnisch-architektonischen Ikone nachgesagt. Im Innenraum des Stahl-Fachwerk-Turms ist eine helixförmig gespannte Membran eingebracht. Unbeeinflusst vom Wind sowie von den Eigenschwingungen kann sich ein Foucaultsches Pendel in der Primärstruktur bewegen und somit die Erdrotation veranschaulichen. | **Gerd Schmid, Linus Wortmann, Daniel Werner**



KKW Architekten

Weithin sichtbar und auf dem besten Weg zum Wahrzeichen Lüdenscheids: Der markante Stahl-Fachwerk-Turm mit helixförmig gespannter Membran.

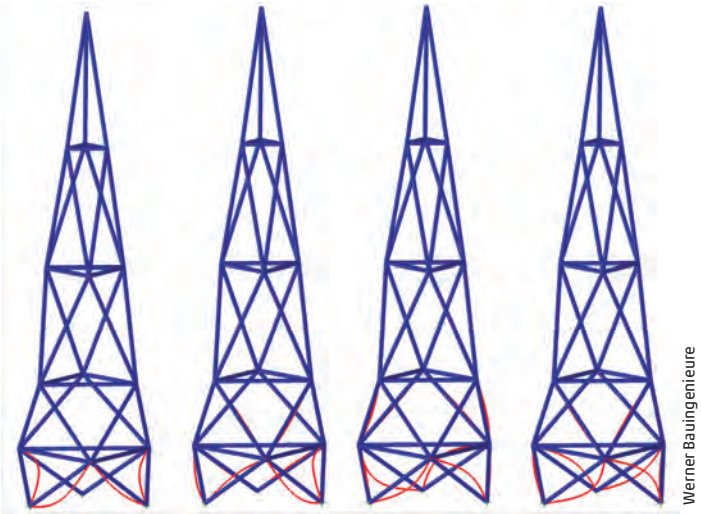
Schnitt des Erweiterungsbaus.

Der markante Turm auf dem neuen Erweiterungsbau des Science Centers Phänomenta in Lüdenscheid könnte als neues Wahrzeichens durchgehen. In interdisziplinärer Zusammenarbeit von KKW Architekten, Werner Bauingenieure und formTL Ingenieure entstand ein ausdrucksstarker Stahl-Fachwerk-Turm, der auf dem Entwurf einer Machbarkeitsstudie von schneider+schumacher aufbaut, in dessen Innenraum eine helixförmig gespannte Membran eingeschrieben ist. Diese Primärkonstruktion umhüllt nach dem Turm-im-Turm-Prinzip ein Foucaultsches Pendel, das an einem sekundären Tragwerk separat aufgehängt ist. Durch diese konsequente Trennung kann sich das Pendel unbeeinflusst vom Wind sowie von den Eigenschwingungen der Primärstruktur bewegen und den Besuchern des Science Centers so die Erdrotation veranschaulichen.

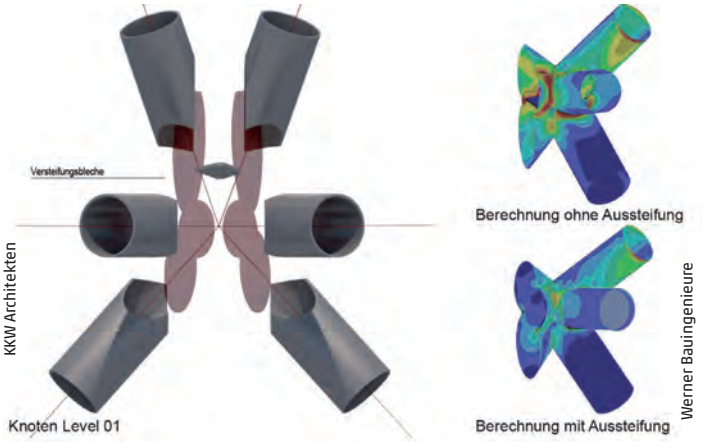
Dabei ist der Turm nur ein Teil der Erweiterung für die Phänomenta: Ein zweigeschossiger Anbau bietet weitere 1.400 m² Ausstellungsfläche mit Räumen, die von expressiven Formen geprägt sind. Diese gewährleisten einerseits die Funktionsfähigkeit des Ausstellungsbereichs und resultieren andererseits aus den Anforderungen der Turmgeometrie. Denn der monolithisch gestaltete Betonbau dient zugleich als Fundament für die markante Stahlkonstruktion – so setzt sich das Stabwerk durch schräg gestellte Stützen im Betonbau fort. Die klare Optik des Turms beruht auf einem von Stabdreiecken gebildeten, schlan-

ken Stahl-Fachwerk aus luftdicht verschweißten Rundrohr-Hohlprofilen. Vor allem die Knotenpunkte, bei denen bis zu sechs Rohre in unterschiedlichen Winkeln ineinander laufen, erforderten eine anspruchsvolle 3D-CAD-Analyse. Membrankräfte aus Vorspannung und Wind werden direkt in die Knoten eingeleitet, sodass eine Biegebeanspruchung der Stäbe weitgehend vermieden wird. Um den Turm in Einzelsegmenten einheben und fügen zu können, wurden etwas außerhalb der komplexen Knoten-Geometrie revidierbare Schraubverbindungen in den Stäben angeordnet und mit speziellen Halbzylinderblechen verdeckt. Dadurch waren keine Schweißarbeiten in großer Höhe erforderlich, und die montagetechnisch notwendige Segmentierung ist nicht ablesbar.

Die Membranhelix innerhalb des Stahl-Tragwerks besteht aus lediglich drei Bausteinen: 990 m² Membrane, drei formgebenden Seilen und neun Abspannungen mit ihren Beschlägen. Diese wenigen Elemente reichen aus, um die Membrane der sich drehenden und nach oben verjüngenden Turmstruktur folgen zu lassen. Während die errechnete Größtform die Kollisionsfreiheit zu den äußeren Turmrohren sicherstellt, verhindert die ermittelte Kleinstform Berührungen mit der inneren Pendelkonstruktion. Besonders markant wirkt die Schraubenlinie nachts, wenn die Nähte der hinterleuchteten Bespannung und die Schatten der Seile konisch nach oben zusammenlaufen und so den Turm noch höher erscheinen lassen. Die Lichtplanung für diese eindrucksvolle Illumination haben KKW Architekten gemeinsam mit wbp Ingenieure entwickelt. Das Lichtmanagement der LED-Leuchten ist Teil der Technischen Gebäudeausrüstung von wbp.



1 *Knickfiguren*



2 *Knotenanalyse*

Punktuelle Einleitung der Lasten

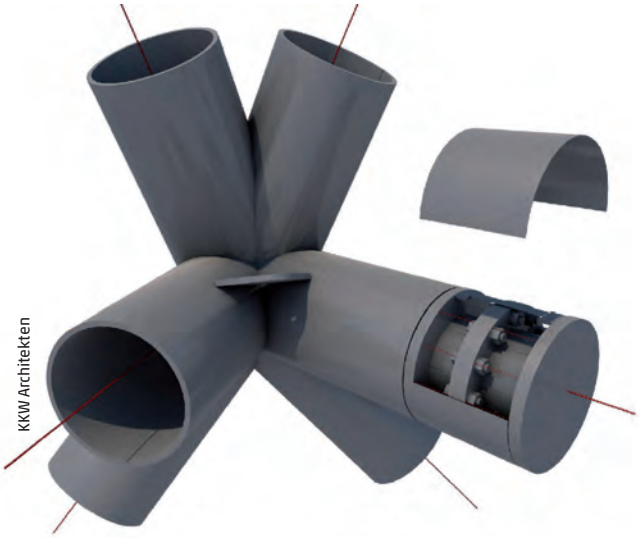
Der Stahlturm ist als räumliches Stabwerk konzipiert, das sich aus Stabdreiecken in die Höhe fügt. Hierbei kamen luftdicht verschweißte Rundrohr-Hohlprofile zum Einsatz. Die Einleitung der Lasten aus der Membrane (Vorspannung und Wind) in das primäre Stahltragwerk erfolgte dabei im Wesentlichen nur punktuell in den Systemknoten. Dem Fachwerkprinzip folgend konnten so Biegebeanspruchungen der Stäbe weitgehend vermieden werden.

Der Durchmesser der Rundrohre beträgt durchgängig 559 mm, die Wandungsstärke wird je nach statischer Beanspruchung bei gleichbleibender, glatter Außenansicht gestaffelt. Hierbei steigt die Wandungsstärke von oben nach unten von 12,5 mm bis 20 mm. Die Knotenbereiche werden aufgrund der höheren lokalen Spannungen grundsätzlich in 20 mm bzw. in den unteren beiden Ebenen 30 mm Wandungsstärke ausgeführt. Damit ergibt sich auch hinsichtlich der Schwingungsanfälligkeit des Turms eine sehr günstige Massenverteilung über die Höhe.

Aufgrund des Charakters als schlankes Turmbauwerk musste dem Stabilitätsversagen unter Windbeanspruchung besonderes Augenmerk geschenkt werden. Die Untersuchung der Knickeigenformen hat ergeben, dass stabweises Ausknicken maßgeblich wird (siehe Abbildung 1). Zudem wurde der Gesamtturm unter der Annahme einer anfänglichen globalen Schiefstellung von 22 cm gemäß Eurocode 3 nach Theorie II. Ordnung berechnet.

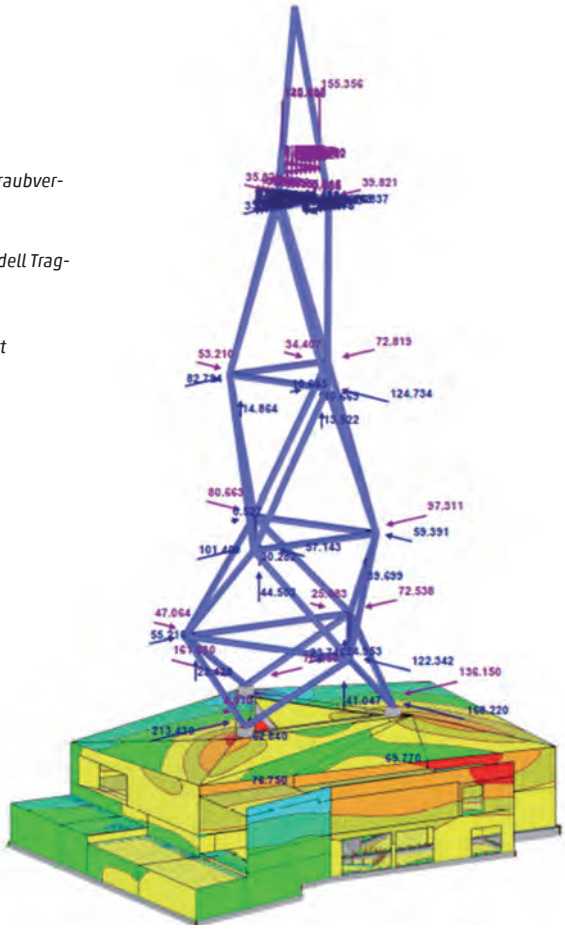
An den Stahlturm bestand die architektonische Anforderung einer kontinuierlich glatten Ansicht der Rohrwandungen auch im Bereich der komplexen Knotenpunkte und der Montagestöße. Dies erforderte in diesen Bereichen besondere konstruktive Lösungen:

In den Eckpunkten des Fachwerks laufen jeweils bis zu sechs Rohre mit unterschiedlichen Winkeln ineinander. Im Zuge der Entwicklung dieser Knoten wurden die Hohlprofile als Zylinderflächen mit 3D-CAD virtuell bis zu den Systempunkten ineinander geführt. Die Durchdringungs-



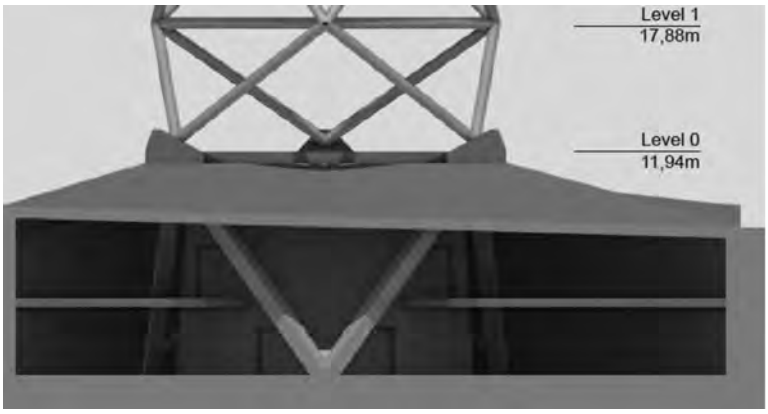
KKW Architekten

3



Werner Bauingenieure

4



KKW Architekten

5

3 *Knoten mit Schraubverbindung*

4 *3D-Gesamtmodell Tragwerksplanung*

5 *Gebäudeschnitt*

linien definieren somit die Linien für die CNC-Zuschnitte der Rohre und deren Verschweißung zu Knoten. Somit wurden in einem ersten Entwicklungsschritt im Inneren hohle Knoten generiert. Da deren Bemessung nicht durch die Standardfälle für Hohlprofilanschlüsse nach EC3 abgedeckt ist, wurde die Tragfähigkeit (mit Beulgefahr, Kerbspannungen etc.) durch umfassende Finite-Elemente-Analyse überprüft. Wo erforderlich, wurden dann im nächsten Schnitt iterativ innenliegende Versteifungsbleche in die Berechnung eingeführt, bis die statischen Nachweise problemlos möglich wurden. Die Knoten wurden dann auf dieser Basis mit hochgradig innovativer Fertigungstechnik hergestellt. (siehe Abbildung 2)

Grundsätzlich ergab sich aus dem Bauablauf heraus die Anforderung, Schraubverbindungen vorzusehen, um handhabbare Einzelsegmente des Turms einheben und fügen zu können. Auf tragende Baustellenschweißnähte sollte verzichtet werden, da diese in großer Höhe ohne Gerüst nur schwer qualifiziert auszuführen und zu überwachen gewesen wären.

Diese Schraubverbindungen wurden etwas außerhalb der anspruchsvollen Geometrien der Systemknotenpunkte angeordnet, um die Stöße standardisiert im Regelquerschnitt der Stäbe ausführen zu können. Hierzu wurde der Stabdurchmesser lokal verjüngt und die Wandungsstärke dort statisch äquivalent stark vergrößert. Damit wurde der Raum für eine Verschraubbarkeit von bündigen Kopfplatten geschaffen. Diese Montagestöße werden im Nachhinein durch Verschraubung von statisch nicht wirksamen Halbzylinderblechen an dafür vorgesehenen Nippelblechen verdeckt. Damit bleibt die Schraubverbindung über die Lebensdauer leicht revidierbar und das Konzept der luftdichten Verschweißung der statisch wirksamen Hohlrundprofile als Garant für wartungsarme Dauerhaftigkeit wird ermöglicht. Die Schraubverbindungen wurden für die Kragmomente aus Bauzuständen mit Einzelstabmontage ausgelegt, so dass die Aufstellzeit der Konstruktion stark verkürzt werden konnte (siehe Abbildung 3).

Ein statisches Gesamtmodell

Der monolithische Betonbau des Science Centers hat neben der raumbildenden Funktion auch eine statische Bedeutung als Sockelartiges Fundament des Turms. Insofern bildet der Neubau ein hybrides Gesamttragwerk mit den wesentlichen Elementen Membrane, Stahlturm und Massivbau. Um die statische Interaktion dieser Tragwerksteile – auch mit dem anstehenden Baugrund – korrekt zu erfassen, erschien es lohnend, ein 3D-Gesamttragwerksmodell zu erstellen. Hierzu konnte das räumliche Architekturmodell der Objektplanung dem BIM-Gedanken folgend in ein statisches Gesamtmodell übersetzt werden (siehe Abbildung 4).

Auf diese Art ließen sich einige wesentliche Fragestellungen bei der Tragwerksplanung besonders realitätsnah und wirtschaftlich beantworten.

Um die Funktion der Durchleitung der Turmkräfte in den Baugrund für die Besucher im Gebäudeinneren

direkt erfahrbar zu machen, setzt sich das Stabwerk des Turms im Betonbau durch schräg gestellte Großstützen 80/80 cm fort (siehe Abbildung 5). In diesen Bauteilen ergaben sich aufgrund der F90-Anforderung durch entsprechende statische Heißbemessung für die vollen Turmauflagerlasten sehr hohe erforderliche Bewehrungsgehalte. Mittels des 3D-Statikmodells konnte nun die Mitwirkung benachbarter Betonwände beim Abtrag der Turmlasten klar nachgewiesen und so eine wirtschaftliche Wahl der Stützenbewehrung getroffen werden.

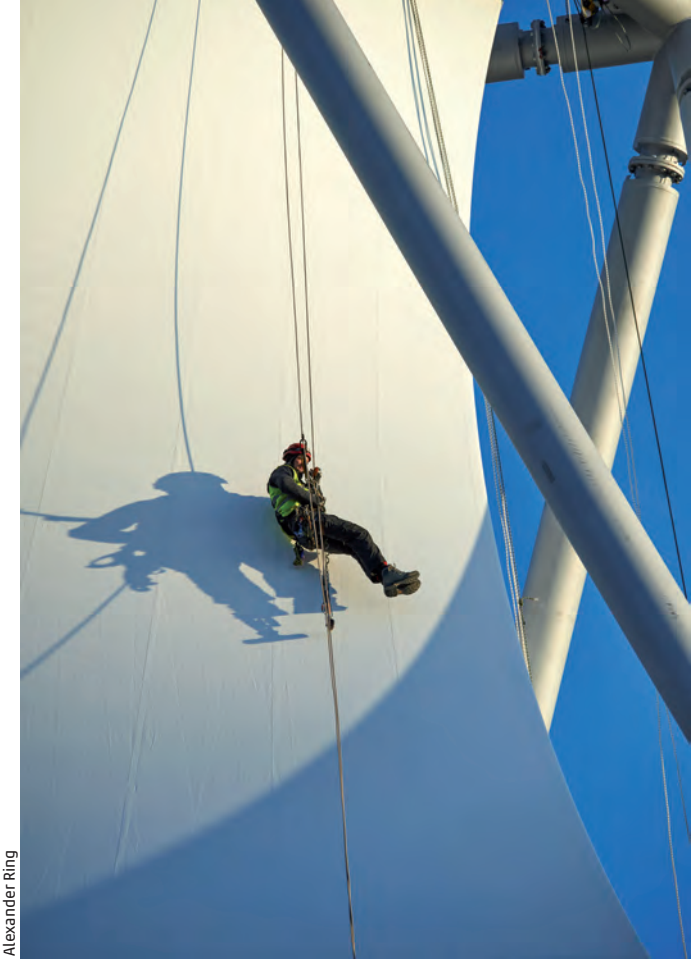
Auch die als Faltwerk ausgebildeten Dachdecken mit ihrer komplexen Geometrie wurden räumlich mit finiten Schalenelementen am Gesamtmodell berechnet. Im Vergleich zu ebenen Vergleichsrechnungen als frei spannende Platten konnten große Effizienzgewinne in der Bewehrungsbemessung erzielt werden.

Durch die Berechnung als räumliches Gesamtmodell wurden für die Decken grundsätzlich alle Einspann- und Lagerungsverhältnisse gleichsam automatisch erfasst. Somit ließen sich präzise Aussagen hinsichtlich der Biegesteifigkeiten der Decken und dem baudynamischen Gutachter machen. Dieser bestätigte unter anderem die ausreichende Fußpunktsteifigkeit des Sekundärturms. Der Sekundärturm ist auf Stahl-Einbauteile auf der freitragenden EG-Decke geschweißt und trägt mit strengen Anforderungen an die Schwingungs- und Verformungsbegrenzung das Focaultsche Pendel.

Schwingendes Pendel mit Kaleidoskop

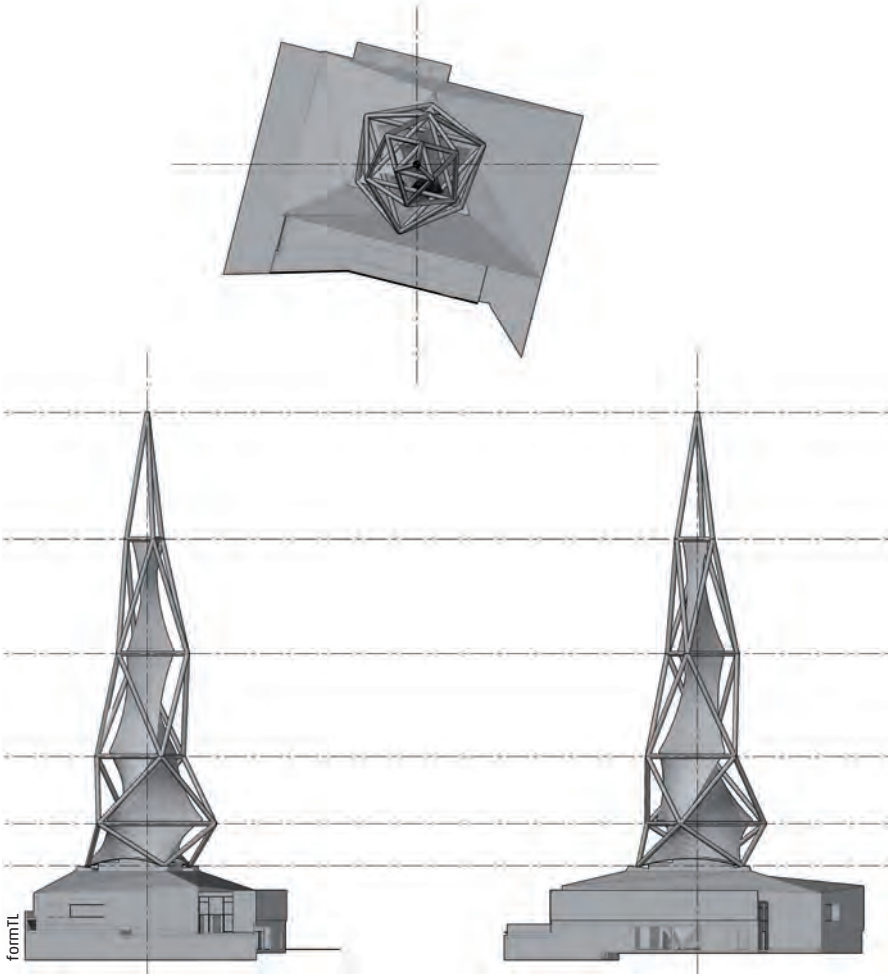
Das Herz der Neukonzeption bildet ein 30 m langes Foucault-Pendel. Es schwingt in der Turmkonstruktion und gibt den Takt für ein überdimensionales Kaleidoskop. Unterhalb des Turms schließt sich das Phänorama an. Von einer Couch im Zentrum betrachtet der Besucher das durch die Schwingungsdauer eines Foucault-Pendels gesteuerte 360°-Videopanorama. Legt er den Kopf nach hinten, sieht er durch das zentrale Fenster in der Decke das schwingende Pendel mit dem Kaleidoskop von unten. So kann er die durch das Pendel verkörperte Zeit erfahren und wird zudem neugierig auf den darüber liegenden Raum. In regelmäßigen Abständen erneuert sich das 360°-Panorama und zeigt den Stadtraum Lüdenscheid in Echtzeit. Durch eine Audioinstallation werden Töne und Geräusche aus der Stadt in den Raum übertragen und beleben das Panoramabild Lüdenscheids akustisch.

Ein vor dem Panorama angebrachter Stadtfries ermöglicht es den Besuchern, Gebäude, Topografien und markante Orte zu finden und sich so das Panorama topografisch zu erschließen. Über Touchpanels können die Besucher Filme, Slideshows und Informationen abrufen, die als Picture-in-Picture über die 360°-Projektion der Stadtansicht gelegt werden. In Filmen und Einspielen werden Menschen und Projekte, Talente von morgen, Innovationen und Unternehmungen, Orte und deren Geschichte(n) interaktiv abrufbar. Mit moderner Medientechnik entsteht so ein lebendiges Abbild der Aktivitäten rund um den Turm.



Alexander Ring

Der „Membranstrumpf" ist aus einem Stück vorgefertigt, was eine spezielle Montagemethode erforderte.

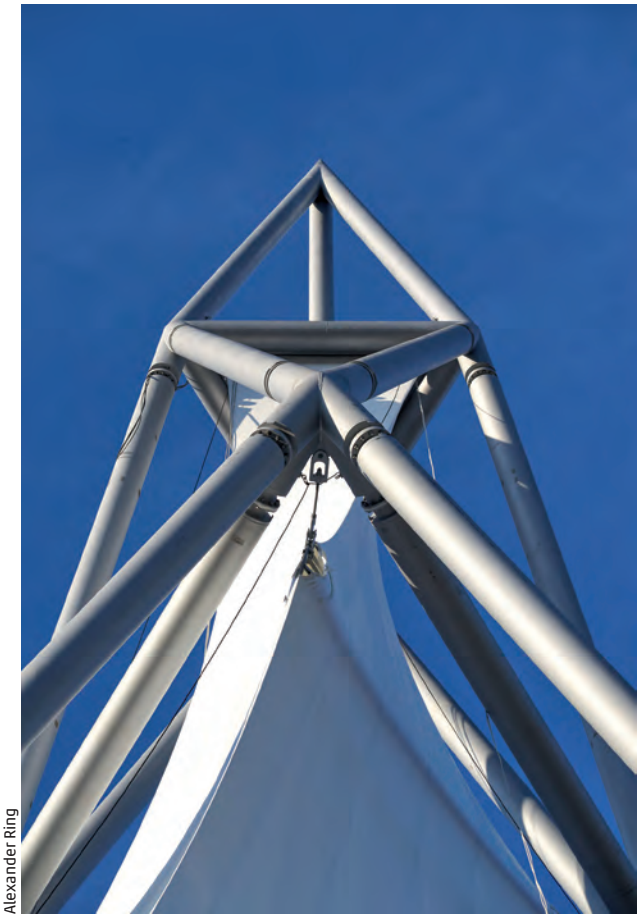


formTL

Der Turm ist nur ein Teil der Erweiterung für die Phänomenta: Ein zweigeschossiger Anbau bietet weitere 1.400 m². Drei Ansichten des Turms.

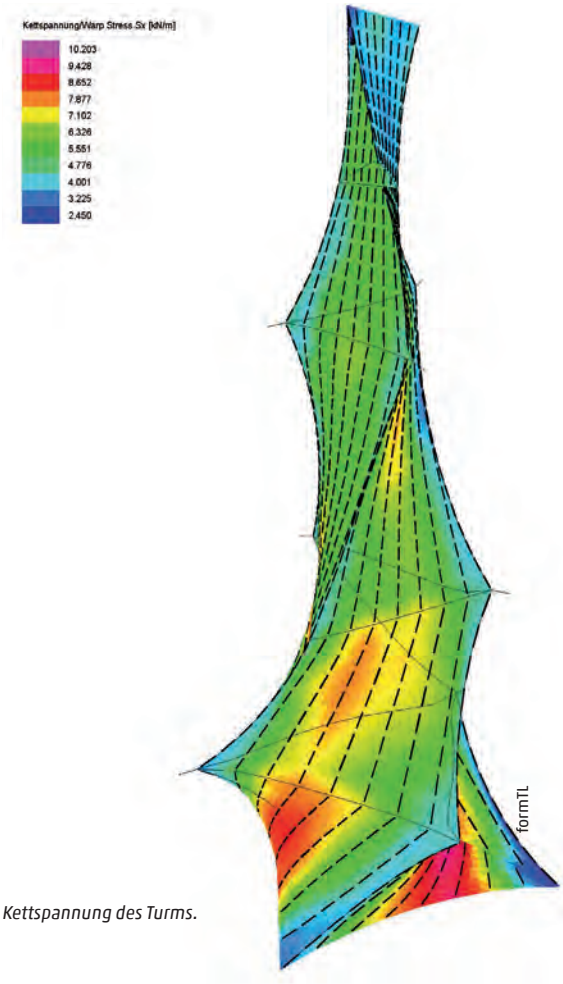
Die Membranhelix wurde in einen großen Membransack hineingefaltet, per Pneukran bis zur oberen Anschlussebene des Turms angehoben, zwischen die Turmbeine mit Kettenzügen gezogen und an der Spitze mit Klemmleisten befestigt. Anschließend wurde der Membransack abgelassen und die Membrane entfaltet.

Der monolithisch gestaltete Betonbau dient zugleich als Fundament für die markante Stahlkonstruktion – so setzt sich das Stabwerk durch schräg gestellte Stützen im Betonbau fort.



Alexander Ring

Alexander Ring



formTL

Kettspannung des Turms.

Dem Kraftverlauf folgend, Biegung vermeidend, einfach und materialsparend

Die Membranhelix, in der das Foucaultsche Pendel schwingt, besteht aus lediglich drei Bausteinen: 990 m² hinterleuchtete Membrane, drei formgebende Seile und neun Spannbeschläge. Die Membrane folgt der sich drehenden und nach oben verjüngenden Turmstruktur und definiert einen Kaltraum mit etwa 1.400 m³, der im Bereich der Hautspitzen und im First offen ist. Für erhöhten Lüftungsbedarf sind im Fuß der Membrane Lamellenfenster eingebaut.

Nachts leuchtet die Membranhelix. Das Membranmaterial und die Beleuchtungsmethode wurden im Erco-Lichtlabor mit Hilfe eines raumhohen Musters ausgewählt. PVC-beschichtetes Polyestergewebe setzte sich gegen PTFE-Glasgewebe und laminiertes PTFE-Glasgittergewebe durch, ebenso wie Licht von innen gegenüber Licht von außen. Licht von außen führte aufgrund der Direktreflexion lediglich zu Glanzpunkten. Licht von innen war deutlich wirkungsvoller: Weil die Membrane das Licht mehrfach reflektiert, reichen bereits die geringe Transluzenz von 6% des gewählten PVC-beschichteten Polyestergewebes und wenige Lux Beleuchtung aus, damit sich die Membranhelix in den Abendstunden in eine Leuchtskulptur verwandelt.

Die Membranhelix ist für eine lange Nutzung ausgelegt. Alle Metallwerkstoffe sind hochwertig korrosions-

Nachts leuchtet die Membranhelix.

Rutzen, Pressestelle Stadt Lüdenscheid

geschützt. Die Stahlteile sind feuerverzinkt und C4lang Duplex farbbeschichtet, die Seildrähte haben eine aluminisierte Feuerverzinkung, die Aluteile eine farblose Eloxierung. Die Membrane hat ein Fluorlackfinish für eine reduzierte Schmutzanhaftung.

Die erste Idee des Innenturms von schneider+schumacher lehnte sich in der Form an eine Fischreuse an – der Entwurf wurde dann aber durch die Alternative einer schraubenförmigen Membrane ersetzt.

Die Philosophie basiert darauf, dem Kraftverlauf zu folgen, Biegung zu vermeiden sowie einfach und materialsparend zu bauen. Dementsprechend wurde durch die Ingenieure der schraubenförmige Ansatz verfolgt, da er aus ihrer Sicht „richtiger" wirkte und ein größeres Potential zum Vereinfachen bot. Die vielen HP-Membranen wurden durch einen einteiligen Membranstrumpf ersetzt, und das innere, biegesteife Skelett gegen drei Seile und neun Abspannpunkte. Das reichte aus, damit sich eine Membranhelix ausbildet, die der Logik des schraubenförmigen Stahlturms folgt. Die formgebenden Seile spannen den Membranstrumpf schraubenförmig gegen den Turm vor und halten ihn auf definiertem Abstand zu den Turmrohren und dem eingestellten Dreibein.

Eine der wichtigsten Untersuchungen bestand darin, die Größtform und die Kleinstform der Membranhelix zu ermitteln. Beide Geometrien entstehen als virtuelle Form

durch die Überlagerung aller durch äußere Kräfte verformten Membranformen. Mit der Größtform wird die Kollisionsfreiheit zu den Turmrohren geprüft, mit der Kleinstform die Kollisionsfreiheit zum eingestellten Pendeldreibein und der vorstehenden Wartungsleiter.

Um die Schraubenlinie zu betonen folgen die Membrannähte den Seilen. Da sich die Membranhelix nach oben hin verjüngt, wurde ein konisches Bahnenlayout gewählt, das die Höhe der Helix betont. Der „Membranstrumpf" ist aus einem Stück vorgefertigt, was eine spezielle Montagemethode erforderte.

Montage der Membranhelix

Die Membranhelix wurde im Werk des Konfektionärs in einen großen Membransack hineingefaltet, per Pneukran vom Lastwagen bis zur oberen Anschlussebene des Turms angehoben, zwischen die Turmbeine mit Kettenzügen gezogen und oben mit Klemmleisten befestigt. Anschließend wurde der Membransack abgelassen und die Membrane entfaltet. Nach dem Einbau der Seile, der neun Spannpunkte und dem Anschluss an die unteren Bogenrohre wurden die Spannpunkte nach außen gezogen und die Membrane vorgespannt. Die gesamte Montage war auf wenige Tage terminiert, wurde aber bedingt durch Schlechtwetter und zum Ausgleich von Toleranzen mehrere Wochen unterbrochen.

Da Membrane und Seile elastisch sind und sich erst unter Dehnung eine stabilisierende Vorspannung in die Membranhelix einprägt, wurde die Membranhelix wenige Promille kleiner gefertigt und dann auf Sollform gespannt.

Planmäßig ist die Membrane in Kette und Schuss mit je 2 kN/m vorgespannt. Wenn der Wind mit 37 m/sek. die Membranhelix einen halben Meter nach innen bzw. nach außen auslenkt steigen die Membranspannungen auf bis zu 10 kN/m in Kettrichtung und 12 kN/m in Schussrichtung, die Kräfte an den Spannpunkten von 75 kN auf 150 kN und die Seilkräfte von 100 kN auf 200 kN. Diese erhöhten Vorspannungen wirken rückstellend und stabilisierend. Lässt der Wind nach, nimmt die Membranhelix wieder die energieärmere Vorspanngeometrie ein.

Auf den Seiten des Deutschen Ingenieurblatts ist der Bau des Stahl-Fachwerk-Turms im Zeitraffer-Video zu sehen. ‹

› Zahlen und Fakten

Maße
Turmspitze: 76,1 m
Membranspitze: 58 m
Starthöhe Membrane: 12,5 m
Grundfläche: 99 m²
Oberfläche 990 m²
Umschriebenes Luftvolumen: 5.200 m³
Gewichte
Membrane: 1.250 kg
Umlenksattel mit Spannstab je 300 kg (9 Stück)
Seil mit Seilköpfen je 195 kg (3 Stück)

› Projektbeteiligte

ARCHITEKTUR und Bauleitung:
KKW ARCHITEKTEN, Altena
Linus Wortmann, Julia Düppe, Corinna Cardaun, Svenja Asmann, Eduardo Abarca
www.kkw-architekten.de

TRAGWERKSPLANUNG STAHLTURM UND MASSIVBAU, Brandschutz, Wärmeschutz:
WERNER Bauingenieure, Menden
Günter Werner, Dr. Daniel Werner, Detlef König, Tim Berg, Stefan Hostert, Henrik Sträter, Christoph König
www.ing-werner.de

ARCHITEKTUR MACHBARKEITSSTUDIE:
schneider+schumacher, Frankfurt
www.schneider-schumacher.de

MEMBRANHELIX Tragwerksplanung Ausschreibung, Fachbauleitung:
formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau GmbH, Radolfzell
Gerd Schmid, Christian Würfl, Ciprian Tripon, Katrin Kaltenbrunner, Christoph Singer
www.form-TL.de

HAUSTECHNIK:
WINKELS BEHRENS POSPICH Ingenieure für Haustechnik GmbH, Münster
Andreas Winkels, Michael Wellmeier, Alexander Löwen, Markus Grote, Björn Scholthaus, Jörg van Look
www.wbp-ingenieure.de

AUSSTELLUNGSKONZEPTION, PLANUNG und Bauleitung Ausstellungsproduktion:
beier+wellach projekte, Berlin
Ruudi Beier, Birte Schramm , Frank Fietzek
www.beier-wellach.de

Daniel Werner
› Dr.-Ing.; Diplom Ruhr-Universität Bochum, Bauingenieurwesen mit Vertiefung konstruktiver Ingenieurbau; wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechanik u. Baukonstruktionen, RWTH Aachen und freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro Prof. Güldenpfennig, Aachen; außerdem Forschungsaufenthalte am Indian Institute of Technology, Kanpur, Indien und an der National University of Kaoshsiung, Taiwan; Promotion RWTH Aachen zu numerischer Bruchmechanik; seit 2013 Partner WERNER Bauingenieur PartG, Menden/Düsseldorf/Münster; 2015 Borchers-Plakette der RWTH Aachen

GERD-MICHAEL SCHMID
› Dipl.-Ing. Architektur und Stadtplanung, Universität Stuttgart; seit 2004 Geschäftsführender Gesellschafter von formTL; seit 2015 im Vorstand der suisseplan Ingenieure AG; gerd.schmid@form-TL.de

LINUS WORTMANN
› Diplom 1998, B1 Architektur, Universität Dortmund; von 1998 – 2004 Prof. Pfeiffer – Pfeiffer. Ellermann . Preckel GmbH, Lüdinghausen, Projektleiter diverser Bauvorhaben; seit 2004 selbständig in Altena im Sauerland