

# Bogenförmige Dächer und Kuppeln

Dr.-Ing. Albrecht Burmeister, DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft, Stuttgart  
Dipl.-Ing. Lutz. Eitel DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft, Stuttgart

Zusammenfassung: Einfach oder zweifach gekrümmte Tragwerke eignen sich bekanntermaßen besonders, um große Spannweiten zu überbrücken. Ausgehend von einem Überblick über Tragwerke und Möglichkeiten des konstruktiven Glasbaus stellt der vorliegende Beitrag aktuelle Bauwerke der Therme Erding zusammen mit dem statisch-konstruktiven Aspekten vor. Hierbei standen nicht nur Transparenz und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund. Hinzu kam die Notwendigkeit, große Bereiche offenbar zu gestalten.

## Einleitung

Moderne Gebäudehüllen sind geprägt durch den Einsatz von Glas in Verbindung mit großflächigen Elementen um helle und transparente Lösungen zu erzielen. Interessant zu beobachten ist der Zeitraum der Verwendung von punktgestützten Gläsern, der vor ca. 10 Jahren begann, als diese Konstruktion technisch und insbesondere von der Berechnungsseite her machbar wurde. Heute kommen punktgestützte Gläser weniger oft zum Einsatz. Es überwiegen Anwendungen mit nach wie vor großflächigen Elementen in Verbindung mit modernen Wärme- und Sonnenschutzbeschichtungen, um höchste bauphysikalische Anforderungen zu erfüllen. Lastabtragende Elemente bestehen in diesem Zusammenhang häufig aus Aluminium oder Stahl, die vor dem Transparenzgedanken selbstverständlich so schlank wie möglich zu halten sind, was das Bestreben nach optimalen Tragwerken begründet.

## 1. Tragwerke

Für weitgespannte Fassaden kommen unterschiedliche statische Systeme in Betracht. Neben allfälligen Biegeträgern sind insbesondere membranartige Tragwerke und gemischte Systeme hervorzuheben. Im Bereich der Biegeträger sind für vertikal orientierte Tragelemente zunächst Flachstahl-Lösungen zu erwähnen, die sehr schlank gehalten werden können, solange sie axial auf Zug beansprucht (hängende Fassaden) und gegen Stabilitätsverlust stabilisiert werden. Für die Stabilisierung eignen sich zum einen das angehängte Eigengewicht der Verglasung oder aber Seil-Abspannungen, die in der Regel nur sehr geringe Querschnitte erfordern. Günstige Wirkungen lassen sich in Verbindung mit punktgelagerten Gläsern erzielen. Linienförmig gelagerte Verglasungen [2] erfordern aus Gründen der Glas-Lagerung entsprechende Auflagerprofile. Dies führt in der Regel zu geschweißten T-Querschnitten mit ansonsten vergleichbaren Maßnahmen zur Stabilisierung.

[3] Bei Tragwerken, die ihre Lasten über Membranwirkungen abtragen, sind Bogenträger und Seile anzusprechen. Beide Lösungen benötigen steife Membranlager. Ebene Seil-Tragwerke stellen die leichteste Version filigraner Tragsysteme dar [4], allerdings sind die entlang der Fassadenränder zu verankernden hohen Seil-Vorspannungen als nachteilig anzusprechen. Zudem ist der Korrosionsschutz der hochfesten Seile als wichtige Aufgabe anzuführen.

Gemischte Systeme, wie sie aus der Verbindung von Biegeträgern mit vorgespannten Zugelementen entstehen, erfordern in der Regel deutlich geringere Vorspannkraft und vermeiden den Nachteil hoher Lagerkräfte. Sie lassen sich zu dem oftmals günstig vorfertigen, was sich auf die bei architektonischen Stahlbaulösungen wesentliche Forderung nach Fertigungsgenauigkeit und auf den Korrosionsschutz positiv auswirkt.

Grundsätzlich gilt für sämtliche optimierten und schlanken Tragwerke, dass mit größeren Deformationen zu rechnen ist. Dadurch vergrößert sich der Einfluss geometrischer Nichtlinearitäten, wodurch entsprechende Analysen, die Behandlung von Ausfallszenarien sowie die Analyse von Stabilitätsproblemen und

Untersuchungen zur Schwingungsanfälligkeit notwendig werden. In Verbindung mit der Dichtigkeitsforderung bzw. der Fugenproblematik ist zudem die Interaktion zwischen Tragwerk und Verglasung zu beachten.

## 2. Gläser

Sowohl im Bereich der Gebäudehülle, als auch für den Innenausbau stehen im Wesentlichen ausgereifte Lösungen mit einem hohen Entwicklungspotential zur Verfügung, die aus architektonischer Sicht einen breiten Gestaltungsspielraum eröffnen. Hierzu stehen qualitativ hochwertige Gläser und ausgereifte Konstruktionen zur Verfügung.

Im Bereich der Isolierverglasungen stehen bauphysikalische Anforderungen wie Wärme – und Schallschutz, Sonnen- und Blendschutz im Vordergrund. Daneben bieten unterschiedliche Einbauten im Scheibenzwischenraum weitere funktionelle Möglichkeiten, wie beispielsweise die steuerbare Lichtlenkung oder Sonnenschutz (s. Bild 2). Darüber hinaus erfüllen Isolierverglasungen auch Funktionen der Absturzsicherung sowie weitergehende Forderungen wie Einbruchhemmung, Schutz vor terroristischen Einwirkungen, um nur einige zu nennen.



Bild 1: Telecomcenter München

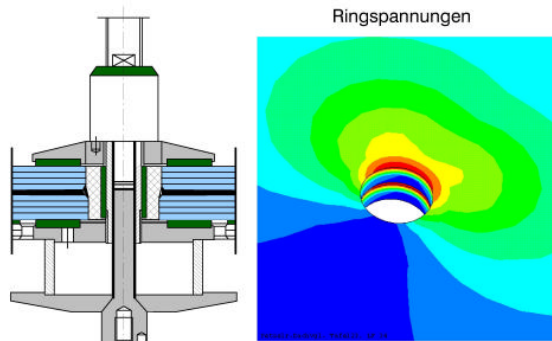


Bild 2: Bürogebäude Gelsenwasser AG

Im Innenbereich werden Gläser in nahezu jeder denkbaren Form eingesetzt. Seien es begehbare Verglasungen, Treppenstufen, Trennwände oder Aufzugschachtverglasungen. In diesen Bereichen, wie auch z.B. in der Fassade kommen vielfach Stützkonstruktionen zu Anwendung, welche das Glas nur punktuell lagern. In diesem Zusammenhang sind kleinflächige Halteelemente anzuführen, welche das Glas entweder durch Bohrungen (gebohrte Punkthalter s. Bild 3) oder durch die Fuge lokal stützen und in der Regel zu Spannungskonzentrationen führen. Selbst punktförmig gestützte Verglasungen im Bereich von Verkehrswegen wie beispielweise beim Petuelring in München stellen beherrschbare Lösungen dar.



Bild 3: Petuelring, München



Grundlage für derartige Anwendungen sind ausreichend erforschte Glasfestigkeiten mit der notwendigen Resttragfähigkeit, die darüber hinaus auch Möglichkeiten bieten, Anforderungen aus dem Brandschutz zu erfüllen (s. Bild 3). Aktuelle Entwicklungen (vergl. Bild 4) gehen in die Richtung von deutlichen Verbesserungen der Resttragfähigkeit. Hierbei kommen moderne Folien oder Harze zum Einsatz.



Bild 4: Einachsige gespannte Glastafel, Resttragfähigkeitsversuch, beide Tafeln gebrochen

### 3. Sonderkonstruktionen

Lösungen, die über die klassischen punktgehaltenen Gläser hinausgehen, finden in Form von Glasschwertern Anwendung, wie sie beispielsweise im Fassadenbereich eingesetzt werden. Selbst gläserne Tragwerke können sicher geplant und ausgeführt werden. Als Beispiel sei der Messestand der Firma Glas Trösch auf der Bau 2003 in München genannt. Dabei wurde bewusst das Ziel verfolgt, den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet den konstruktiven Glasbaus zu demonstrieren.

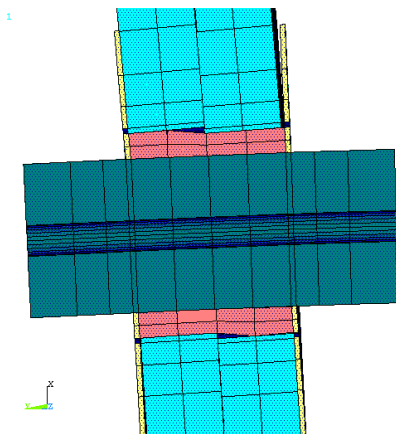


Bild 5: Rahmengelenk, Messestand Glas Trösch

Der in Bild 5 gezeigte vordere Rahmen wurde als gläsernes Tragwerk in Form eines statisch bestimmten 3-Gelenk-Rahmens ausgeführt. Verwendet wurde eine VSG-Lösung, um Aspekten der Resttragfähigkeit Rechnung zu tragen. Die rechnerische Beschreibung derartiger Details erfordert in der Regel voluminöse finite Elementmodelle unter Einbeziehung von Relativ-Verschiebungen, Kontakt und geometrischer Nichtlinearität.

#### 4. Anwendungsbeispiel: Therme Erding

Der architektonische Entwurf (Bild 6) gab eine Hallenkonstruktion 56 m x 53 m mit einer Höhe von max. 17 m vor; sie schließt im Norden an einen konventionellen Massivbau an, der auch die Rückzugposition des zylindrisch gekrümmten verfahrbaren Daches darstellt. Die *gekrümmte Südfassade* spannt wie das Dach über 43 m; die Verschneidungslinie beider Flächen stellt für die Fassade einen freien Rand dar. Da aus gestalterischen Gründen ein steifer Kopfträger nicht erwünscht war, konnte die Fassade nicht vertikal gespannt werden. Um dennoch eine einschalige Konstruktion zu bekommen, wurde die Fassade durch horizontale Bogenträger aus geschweißten Hohlprofilen (RR 280 x 80) mit vertikal eingeschweißten Pfosten (RR 160 x 80) ausgesteift, die sich auf beidseitigen Fachwerktürmen abstützen (Bild 6).

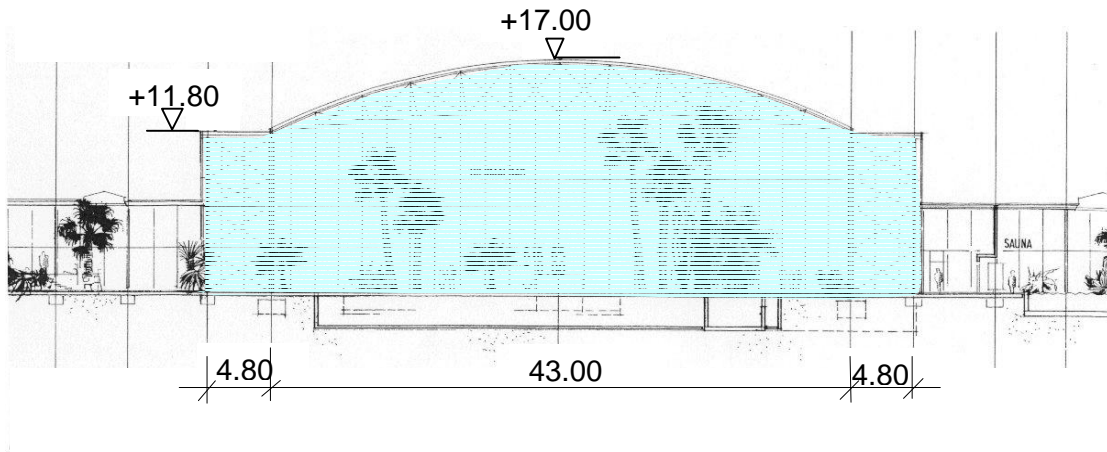


Bild 6 Das architektonische Konzept der Halle in Erding  
Architekt: J. Wund

Die tangentialen Bogenkräfte werden durch K-Verbände in den Türmen aufgenommen. Um die Bautiefe der Fassade zu minimieren, wurde die linienförmig gelagerte Isolierverglasung direkt auf diese Profile aufgelegt. Für die Auflagerung des verfahrbaren Daches wurden die oberen Längsträger der seitlichen Fassadentragwerke als Fahrbahnträger ausgebildet. Da sie auch die Windlasten in den Massivbau bzw. die Türme weiterleiten, sind sie als Dreigurtbinder konzipiert. Ihre Außenstützen wirken darüber hinaus als vertikal angeordnete Hauptträger der Längsfassaden.

Die Dachkonstruktion besteht aus acht gekrümmten Fachwerkträgern mit einer maximalen Konstruktionshöhe von 3,6 m, ihre Gurte sind aus Kreisrohren ca.  $\varnothing$  200mm gefertigt.

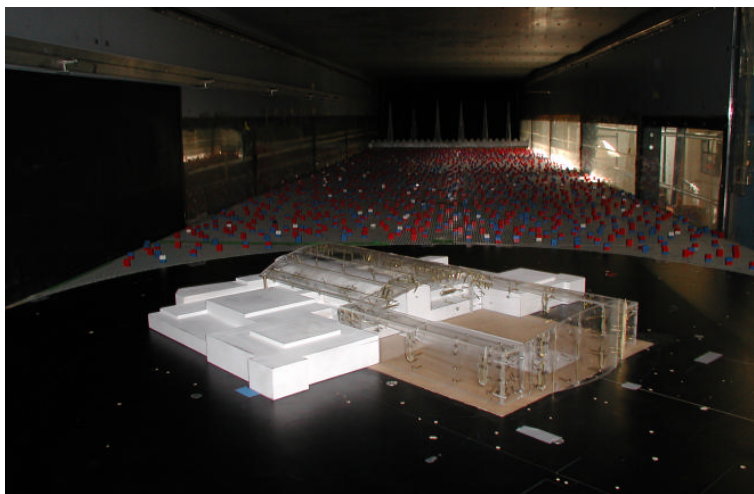


Bild 7 Modell im Windkanal, bewegliches Dach, geöffnet (Foto: Wacker Ingenieure)

Das Dach wird mit den Pfetten in Längsrichtung und diagonal gekreuzten Verbänden in den Endfeldern ausgesteift. Im Auflagerbereich sind durchgehende Hohlkastenträger angeordnet, welche die Räder aufnehmen. Diese werden auf einer Seite durch eine Schiene geführt, auf der anderen Seite sind sie horizontal verschieblich gelagert. Für Eigengewicht, Schnee, Temperatur und Erdbeben entstehen normative Belastungssituationen. Zur Ermittlung der Windeinwirkung wurden für geschlossenes und geöffnetes Dach bei verschiedenen Windrichtungen Windkanalversuche durchgeführt (Bild 7) Für die Berechnung wurde allerdings berücksichtigt, dass das Dach bei Windstärke 6 geschlossen wird oder bleibt. Als weitere Besonderheit waren Lasten aus dem Fahrbetrieb zu berücksichtigen; neben den rein vertikalen Lasten gehören hierzu Beanspruchungen aus Schräglauf, Pufferstoß und Bremsvorgängen.

Um das komplexe Zusammenwirken aller Tragwerksteile im Berechnungskonzept zu erfassen, wurde das gesamte System als räumliches Stabwerksmodell mit Balkenelementen idealisiert. Dabei waren detaillierte Abbildungen beweglicher Anschlüsse (z.B. Langlochverschraubungen, Großbohrungen) über entsprechende partielle Gelenke notwendig. Zunächst wurden für die üblichen Spannungs- und Deformationsnachweise lineare Berechnungen am perfekten System durchgeführt. Sie wurden ergänzt durch lineare Beulanalysen für besonders stabilitätsgefährdete Bauteile, wie z.B. die Bogenfassade, um ungünstige Imperfektionsformen zu bestimmen, die dann dem perfekten System mit normativen Amplituden überlagert werden. Schließlich bilden geometrisch nichtlineare Berechnungen am imperfekten System die Grundlage für die endgültigen Nachweise.

### Lastfall Eigengewicht + Wind aus 60° auf Südfassade

Fassadenträger

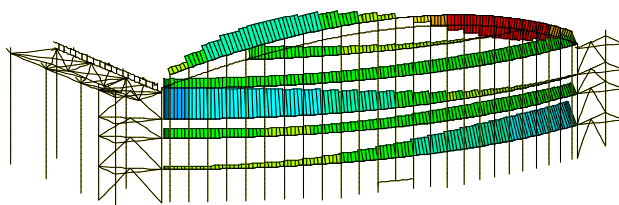
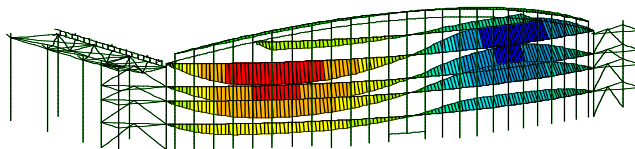


Bild 8 Normalkräfte der Fassadenträger

### Lastfall Eigengewicht + Wind aus 60° auf Südfassade

Fassadenträger



Biegemoment  $M_z$

[Nmm]

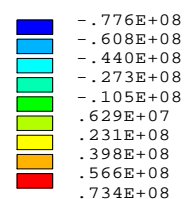


Bild 9 Hauptbiegemoment der Fassadenträger

Weitere Details zum Tragwerk und der Ausführung können [6] entnommen werden. Die Thermenhalle ist inzwischen in Betrieb und erfreut sich großer Beliebtheit.



Bild 10: Außenansicht (Foto: Architekturbüro Wund)



Bild 11: Südfassade, Innenansicht bei geöffnetem Dach (Foto: Architekturbüro Wund)

Die kreisförmige Kuppel mit einem Durchmesser von 50 m und einer Höhe von etwa 15 m besteht aus einem feststehenden 270°-Segment und einem verfahrbaren 90°-Segment, das sich über den festen Bereich verschieben lässt (Bild 12). Die Kuppel liegt auf einer konventionellen Stahlbetonkonstruktion auf.

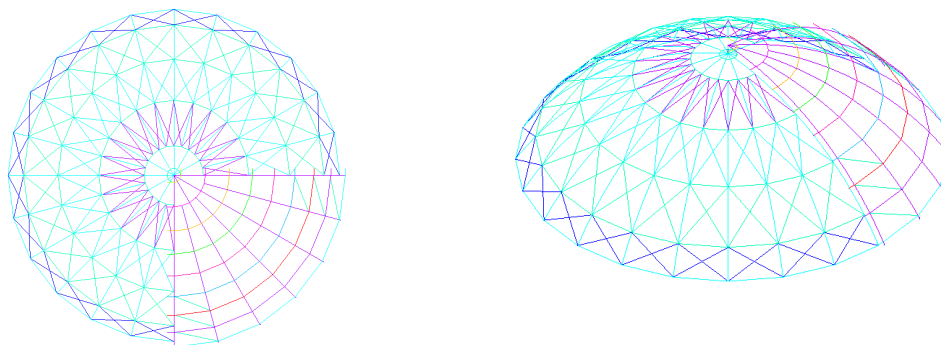


Bild 12: System mit diagonalen Aussteifungen (FE-Modell)

Die Stahlkonstruktion besteht aus Standard I-Profilen. Im festen Teil kann der Anschluss der Pfetten in Ringrichtung an die Binder als gelenkig angesehen werden. Dort wird das Dach mit Trapezblechen eingedeckt. Die Binder sind unten unverschieblich gelagert, wobei in einem Abschnitt aufgrund nachgiebiger Stahlbetonträger auch eine federnde Lagerung angenommen wird. Der bewegliche 90°-Teil erhält die doppelte Anzahl von Ringträgern; diese Pfetten werden biegesteif mit Schraubanschlüssen an die Binder angeschlossen. Unter jedem Binder wird ein Rad angeordnet, welches auf einem kreisförmigen Schweißträger horizontal verschieblich läuft. Das mit Makrolon gedeckte Segment wird oben durch eine Zapfenlagerung geführt.

Die gesamte Dachkonstruktion wird durch ein räumliches Stabwerksmodell mit Balkenelementen abgebildet und wie auch bei der oben beschriebenen Hallenkonstruktion mit dem Programm ANSYS berechnet. Neben den üblichen normativen Lastfällen aus Eigengewicht, Schnee und Temperatur werden die Windlasten nach einem Windgutachten der Firma Wacker angenommen. 46 verschiedene Lastkombinationen werden untersucht. Das Berechnungskonzept folgt demjenigen der Halle in Bad Wörishofen: Lineare Berechnungen, lineare Stabilitätsanalysen, geometrisch nichtlineare Berechnungen am imperfekten System. So wurde beispielsweise ein Binder im restlichen Stabwerksmodell detailliert mit Schalenelementen abgebildet, um das Biegedrillknicken zu erfassen (Bild 13).

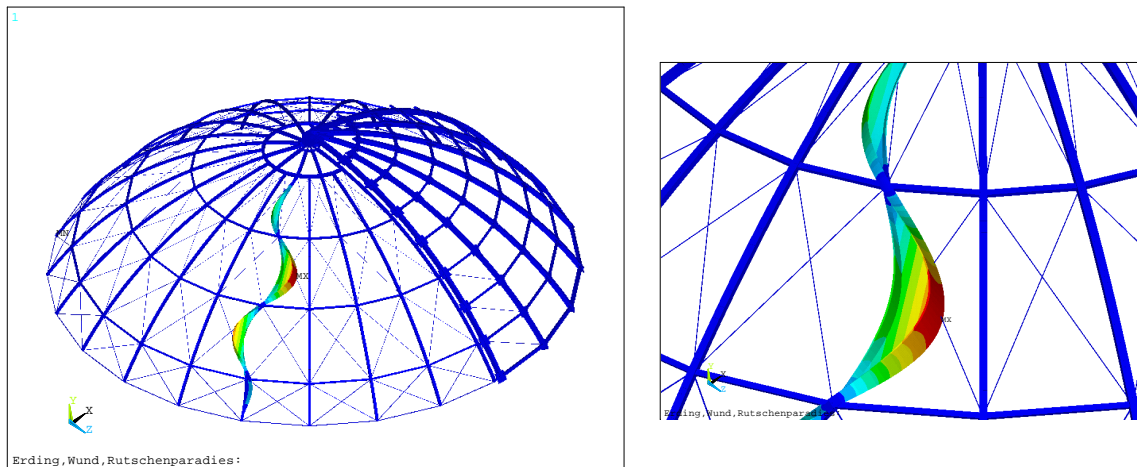


Bild 13: Lineare Stabilitätsberechnung mit detailliertem Schalenmodell für Binder

Durch die Trennung des gesamten Tragwerks in zwei getrennte Systeme ist das ideale Tragverhalten einer geschlossenen Kuppel gestört. Die Lastabtragung über die Ringwirkung ist für jedes System unterbrochen. Während das feste 270°-Segment mit dieser Situation recht gut fertig wird und weitgehend über Normkräfte ohne nennenswerte Biegung abträgt, weist das eigenständige bewegliche 90°-Segment erhebliche Biegemomente auf. Dieses ist für den Lastfall Eigengewicht + Schnee in Abb. 14 sehr gut zu erkennen: Normalkräfte dominieren im 270°-Segment, während das 90°-Segment biegedominant ist.

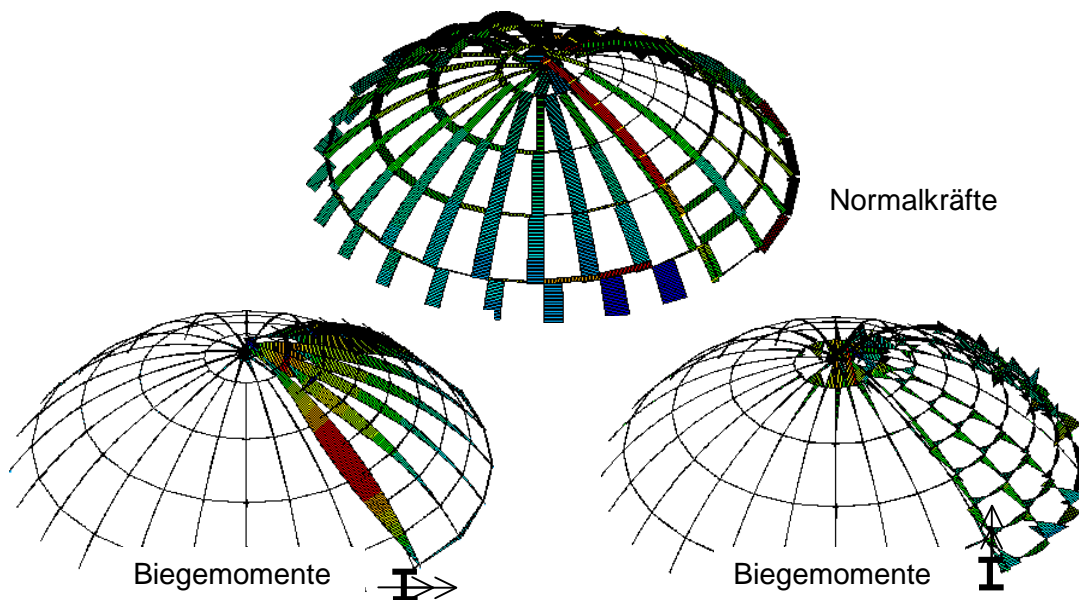


Bild 14: Schnittgrößen für Lastfall Eigengewicht + Schnee

Beide Kuppelteile wurden komplett einschließlich Eindeckung vormontiert und getrennt mit Autokränen eingehoben. Da sie in diesem Zustand sehr weich sind, müssen besondere Maßnahmen zur Stabilisierung getroffen werden. Entsprechende Montagelastfälle sind zu untersuchen. Den Einhub-Vorgang des 90°- Segmentes zeigt Bild 15, die fertiggestellte Kuppel Bild 16.



Bild 15: Montagevorgang 90°- Segment  
(Foto: Architekturbüro Wund)



Bild 16: fertige Kuppel (Foto: Architekturbüro Wund)

## 5 Schlussbemerkung

Stahl-Glas Konstruktionen haben in den letzten Jahren eine große Verbreitung erlangt, siehe z.B. [1], [2], [3], [4], [5]. Bei den im vorliegenden Beitrag behandelten Bauwerken kommt eine weitere Besonderheit hinzu: Sie haben verfahrbare Dächer, die naturgemäß nach einer Leichtbaukonstruktion verlangen. Dementsprechend ist hier in besonderem Maße anzustreben, die Lasten über Membraneffekte, d. h. über Normalkräfte, abzutragen. Für den Betrieb ist das Deformationsverhalten von Bedeutung. Zusatzmaßnahmen für Transport und Montage erfordern bei diesen wegen der noch fehlenden Lagerung extrem weichen Tragwerken erhöhte Aufmerksamkeit.

## Literatur

- [1] A. Burmeister: Filigrane Glasträger und Glasstützen:  
Ausgeführte Beispiele, u.a. der Deutsche EXPO-Pavillon  
23. Stahlbauseminar 2001, 16.-17.2.2001, Neu-Ulm, 23.-24.2.2001, Wien
- [2] E. Ramm, A. Burmeister, R. Reitinger:  
Glass Structures of German EXPO 2000 Pavilion  
Proceedings IASS 2001 "Int. Symposium on Theory, Design and Realization on Shell & Spatial Structures", Nagoya, Japan, 2001
- [3] A. Burmeister, R. Reitinger, E. Ramm: Der Deutsche Pavillon auf der EXPO 2000  
Fassaden und glasversteifte Stützen, Bauingenieur 76 (2001), 487-497
- [4] E. Ramm, A. Burmeister, R. Reitinger: Glas – Umgang mit einem spröden Material  
Tagungsband 5. Dresdener Baustatik-Seminar „Vermeiden von Bauschäden – Aufgabe der Tragwerksplanung“ (Hrsg. B. Möller, B. Dressel), 19.10.2001
- [5] A. Burmeister: Innovative Fassadenkonzepte – statische und bauphysikalische Aspekte  
GlasKon 2003, 15.-16.1.2003, Congress Center, München
- [6] A. Burmeister, L. Eitel, R. Reitinger: Weitgespannte gläserne Fassaden  
Stahlbau 75 (2006), 433-440