

Publikationen

2. Gussstahl, Schrägkabel

Deutsches Technikmuseum Berlin

Pichler Gerhard, Guggisberg Roland

“Deutsches Technikmuseum Berlin - Kranartige Abhängung
von Geschossbereichen über dem Anschlussgleis”

Stahlbau 68 (1999), Heft 4, Seite 277 - 289

Verlag Ernst & Sohn, Berlin



Deutsches Technikmuseum Berlin – Kranartige Abhängung von Geschößbereichen über dem Anschlußgleis

Das bereits bestehende Deutsche Technikmuseum Berlin wird um einen Neubau trakt für Luft- und Schifffahrt erweitert. Der Neubau gliedert sich in einen Ausstellungstrakt und in einen Infrastrukturtrakt. Dieser Aufsatz beschränkt sich als Fortsetzung eines früheren Beitrages auf den Infrastrukturtrakt. Dieser krägt in Teilbereichen über die Zufahrtsgleise des Museums und über einen Werkhof. Es war nicht möglich, im Gleisbereich Stützen zu stellen, weshalb die ausragenden Bereiche über Spannkabel an einem Fachwerksystem auf dem Treppenhaus abgehängt sind. Die Spannkabel haben ähnlichen Aufbau und Abmessungen wie bei Schrägseilbrücken. Die Kabel führen von den Hängepunkten schräg hoch zum Fachwerk, dessen gekrümmter oberer Gurtung sie bis zur Verankerungsstelle folgen. Dies bedingt mehrfache Umlenkung der Kabel über sattelartig ausgebildete Fachwerkknoten aus Gußstahl. Das an einen Kran erinnernde Hängewerk läßt das Wechselspiel der Kräfte in seinem Zusammenwirken spüren. Es ist Bestandteil eines architektonischen Ausdrucks, der den spannungsvollen Bezug des Bauwerks zur im Museum ausgestellten Technik sucht. Angestrebt wird eine tiefere Integration von Ästhetik und Funktion.

German museum of technology, Berlin – Suspension of floors overhanging railway tracks by a system similar to a crane. The existing German museum of technology is to be extended by a new building for the departments of aviation and navigation. The new building complex consists of an exhibition and a service wing. This article is a continuation of a previous contribution [1], and deals only with the service wing. The floor slabs of this building partially overhang the private rail tracks of the museum and an internal court yard. Even on private ground the German railway regulations have to be observed. Therefore, it was not possible to put columns near the railway tracks. The overhanging parts of the building are to be suspended from a truss on top of the stair core using post-tensioning cables. The cables have cross sections similar to those used for cable stayed bridges. The cables span from the tops of the hangers up to the truss and follow the upper chord to the anchorage. Several saddle supports made of cast steel guide the cables. The tensile system makes the interplay of forces visible. This is part of an architectural expression to develop affinities between the building and the technical exhibition in the museum. The aim is to achieve the integration of aesthetics and functionalism.

Fiktiver Ausblick

Ein Museumsbesucher wird im Jahr 2010 mit seinen Kindern, vom Anhalter-Bahnhof kommend, durch den Park am Tempodrom vorbei schlendern. Bereits auf der Fußgängerbrücke über den Landwehrkanal kann der augenfällige Ausstellungstrakt für Luftfahrt und Schifffahrt gesehen werden, welcher im Juni 2000 feierlich eingeweiht wurde. Die Kinder freuen sich an dem Flugzeug, einem „Rosinenbomber“, das als Blickfang außerhalb des Gebäudes über einer hochgelegenen Terrasse an einem Fachwerk aufgehängt ist. Es soll an die Berliner Luftbrücke 1947 erinnern, und es sieht so aus, als wollte es gerade zur Landung ansetzen. Die Kinder wären am liebsten gleich zum großen Schaufenster gerannt, einer 17 m ho-

hen Glasfassade am Tempelhofer Ufer, die tiefe Einblicke in das Innere des Museums erlaubt. Aber der Weg führt zuerst zum Hauptportal des Museums, dem Kopfbau des ehemaligen Güterbahnhofes von *Schwechten*. In der früheren Durchfahrt zu den Laderampen befindet sich der Eingang. Nach dem Passieren der Kassen geht die Familie über eine verglaste Brücke, die über die Zufahrt zum Museumspark und die Anschlußgleise der Eisenbahnsammlung hinweg direkt in das erste Obergeschoß des Infrastrukturtraktes führt. Der Infrastrukturtrakt mit öffentlichem Restaurant grenzt unmittelbar an den Ausstellungstrakt für die Luftfahrt- und Schifffahrtsammlung. Durch Glastüren sind bereits aus dem Foyer Schiffe und Flugzeuge zu sehen. Die Kinder interessieren sich angesichts der Attraktionen nicht weiter für die graphische Tafel, die die Hängekonstruktion des Gebäudes veranschaulicht, in dem sie sich gerade befinden.

1 Infrastrukturtrakt für das Museum

Das Deutsche Technikmuseum Berlin oder Museum für Verkehr und Technik, wie es vormalig hieß, wurde aufgrund einer Standortstudie im Gleisfeldbereich des ehemaligen Anhalter-Bahnhofes angesiedelt. Dem seit 1983 bestehenden Museum wird mit dem Neubau eine Ausstellung für Luftfahrt und Schifffahrt angegliedert. Dieser ist als kompakter, mehrgeschossiger Baukörper auf einem Grundstück entstanden, das durch die Keimzelle des Museums, den alten Bahndamm, die Trebbiner Straße und das Tempelhofer Kanalufer eingegrenzt ist. Städtebaulich komplettiert der Ausstellungstrakt die frühere Bebauung. Der südlich angrenzende, der Infrastrukturversorgung



Bild 1. Gesamtansicht des Neubaus von Ost, rechts Ausstellungs- und links Infrastrukturtrakt mit Hängesystem

Fig. 1. Overall view from east of the new building complex, on the right the exhibition wing, on the left the service wing with the suspension system on top



Bild 2. Der Infrastrukturtrakt krägt in Teilbereichen über das Anschlußgleis des Museums

Fig. 2. The service building partially overhangs the private railway tracks of the museum

dienende Trakt schiebt sich in das ehemalige Bahngelände. Bild 1 zeigt den Neubaukomplex aus Blickrichtung Ost. Es wird hier nur der Infrastrukturtrakt beschrieben. Der Ausstellungstrakt wurde in einem früheren Aufsatz behandelt [1].

Der im Grundriß quadratische Infrastrukturtrakt (auch Versorgungstrakt genannt) krägt im 2. und 3. Obergeschoß mit der Ecke Süd-Ost über das Anschlußgleis des Museums (Bild 2) und mit der Ecke Süd-West über einen Werkhof mit Wendepfad für Lastkraftwagen. Das Anschlußgleis wird vom Museum gelegentlich genutzt, um für Ausfahrten mit schweren Dampflokomotiven das Gelände zu verlassen. Auch wenn die Gleisanlagen inzwischen nicht mehr der Deutschen Bahn AG (vorher Deutsche Reichsbahn) gehören, gelten trotzdem die Vorschriften der Bahn. So mußten für die Stützmauern die

Bahnlasten UIC 71 angesetzt und wegen der Anprallgefahr durften im Bereich der Gleise keine Stützen vorgesehen werden. Dies führte zur Abhängung der auskragenden Geschößbereiche an einem auf dem zentralen Treppenhaus stehenden räumlichen Fachwerk. Die Hängekonstruktion wird in Abschn. 3 ausführlich beschrieben.

Infrastrukturtrakt und Ausstellungstrakt sind ab Kellerdecke durch eine Bewegungsfuge vollständig getrennt. Die Brandwand zwischen den Gebäudetrakten ist zweischalig ausgeführt. Der Infrastrukturtrakt ist über das Treppenhaus und die Brandwand ausgesteift. Auf der Nordseite des Gebäudes, angrenzend an die Treppenhäuser des Ausstellungstraktes, befinden sich Schächte für die Erschließung mit Haustechnikmedien und ferner drei kleinere, interne Aufzüge. Bild 3 zeigt zwei typische Geschößgrundrisse. Die Grundrisse sind im Erdgeschoß bis zum 1. Obergeschoß durch Anschlußgleis und Innenhof begrenzt. Die 2. und 3. Obergeschosse kragen weit aus. Im 3. OG dient der auskragende Bereich als Terrasse für das Restaurant. Mittels Punktraster sind im Bild die abgehängten Deckenbereiche um die drei Zugstützen hervorgehoben.

In der vertikalen Gliederung korrespondiert der Infrastrukturtrakt mit dem Ausstellungstrakt. Im Bereich der hohen Geschosse wurden allerdings Zwischengeschosse eingeschoben, so daß der Infrastrukturtrakt effektiv fünf Obergeschosse aufweist. In Konsequenz wurden die Konstruktionshöhen der Deckenträger den Geschößhöhen angepaßt.

Primär öffentlicher Nutzung vorbehalten sind das 1. und 3. Obergeschoß. Als Zugangsfoyer und als öffentliches Restaurant sind sie über verglaste, breite Türfronten mit dem Ausstellungstrakt verbunden. Das Foyer im 1. Obergeschoß wird als Erschließungsebene für die neue Ausstellung über Verbindungsbrücken einerseits mit dem geplanten Hauptzugang im ehemaligen Güterbahnhof, und andererseits mit den bereits bestehenden Ausstel-

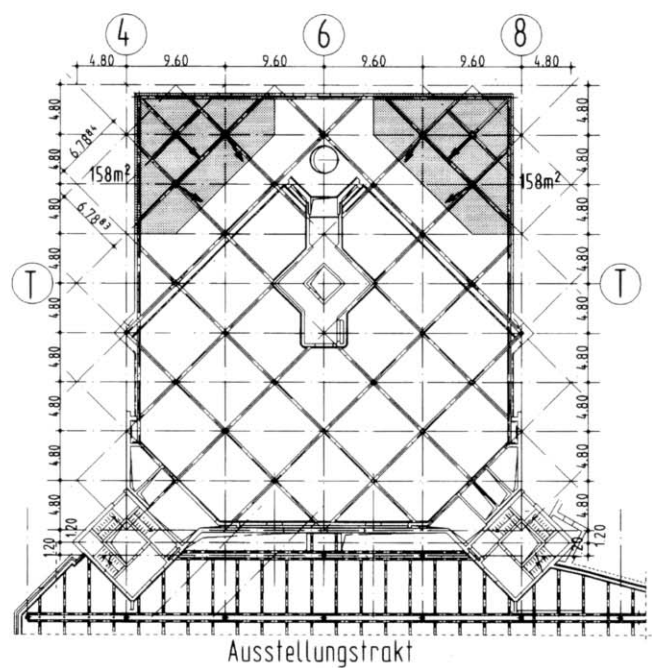
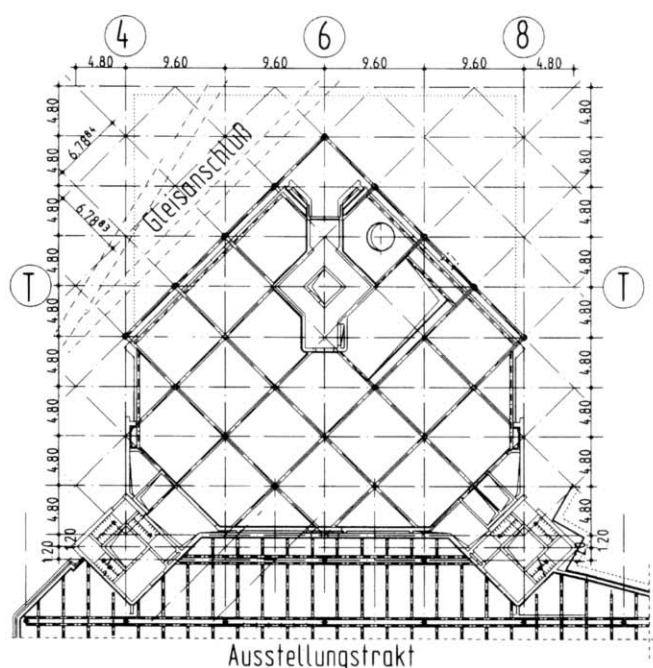


Bild 3. Grundrisse Erdgeschoß und 2. OG/ZW, abgehängte Deckenbereiche sind markiert

Fig. 3. Plan of ground floor and 2nd floor/mezzanine; suspended parts of floor are marked

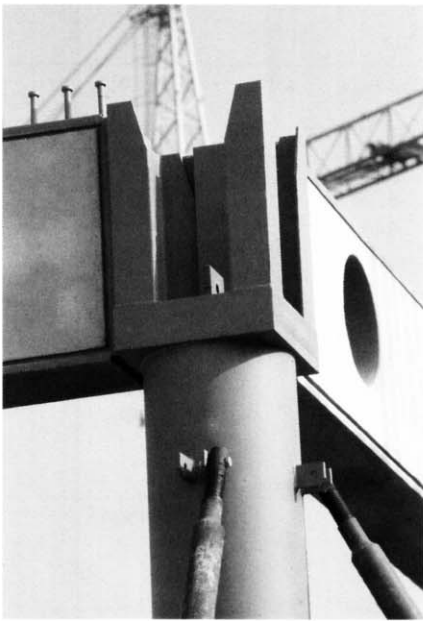


Bild 4. Typische Knotenausbildung Stütze – Träger

Fig. 4. Typical detail of the column-girder connection



Bild 5. Deckenfeld und Träger mit großen Aussparungen

Fig. 5. Floor bay and girder with large openings

lungsbereichen des Museums verbunden. Die weitere Nutzung des Infrastrukturtraktes umfaßt Bibliothek mit Lesesaal und Werkstätten. Die in der Planung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehene Großküche mit entsprechenden Lagerräumen wird vorläufig für Sonderausstellungen genutzt.

2 Geschoßbau in Stahlverbund

2.1 Rasterbau

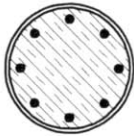
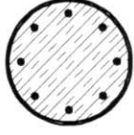
Die tragende Struktur des Infrastrukturtraktes entspricht in den grundsätzlichen Ausführungsmerkmalen derjenigen des Ausstellungstraktes, wie in [1] beschrieben. Unterschiedliche Randbedingungen gegenüber dem Ausstellungstrakt führten jedoch zu einer anderen gestalterischen Ausdrucksform des Tragwerks dieses Gebäudeteils. Das quadratische Stützenraster des Infrastrukturtraktes ist gegenüber dem Rechteckraster des Ausstellungstraktes um 45° gedreht. Die Feldlänge von 6,788 m entwickelt sich aus der Diagonale eines Quadrates mit 4,80 m Kantenlänge (vgl. Bild 3). Die quadratischen Felder werden von zweiachsig tragenden Holorib-Verbunddecken mit 18 cm Dicke überspannt. Bei der Bemessung der Decken mußte, neben Berücksichtigung der orthotropen Eigenschaften, drillungsw weich gerechnet werden. Die Berechnung konnte mittels Streifenmethode der Plastizitätstheorie von Hand erfolgen.

Die Hauptträger liegen entsprechend dem quadratischen Raster axial zentrisch an runden Stützen auf. Zu beachten ist der Unterschied zum Ausstellungstrakt mit paarweisen Hauptträgern seitlich auf Konsolen an Stützen mit kreuzförmigem Querschnitt. Die Stützen mit 406,4 mm Außendurchmesser haben Kopfplatten 120 mm dick und mit Abmessungen von 440 auf 440 mm. Diese stehen somit seitlich wie ein Stützenkapitel etwas vor (Bild 4). Die Träger liegen mit einer an der Stirnplatte angeschweißten Knappe auf den Kopfplatten der Stützen. Ein zentrisch eingeschweißter Vollstahlvierkant von 200 mm

bildet im Knoten die kraftschlüssige Verbindung von Stütze zu Stütze. Der Hohlraum zwischen Vierkant und Auflagerknaggen der Träger wird für den Brandschutz mit Steinwolle verfüllt. Stahlwinkel decken die Eckbereiche zwischen den Trägern ab. Die Montage erfolgte ohne Sicherungsschrauben. Mit dem Betonieren der Decke wurde der Knoten fixiert. Die Stützenpositionen VT-1 und VT-2 bestehen aus einem Stahlrohrmantel und sind mit bewehrtem Beton verfüllt. Die Tabelle 1 zeigt den Querschnittsaufbau und die Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Stützenhöhe für die verschiedenen Stütztypen. Für die Rückverankerung der Geschoßabhängung sind Stützen mit inneren, dickwandigen Stahlrohren versehen (Positionen VT-3). Diese Stahlrohre bilden den tragenden Kern; der Beton und die äußeren Stahlrohre bilden den Schutzmantel für den Brandfall. Die Kopfplatte weist bei diesen Stützen eine entsprechende Öffnung auf, und der Vierkant ist durch ein Rohrstück ersetzt. Die nächste Stütze wird nach dem Nut-und-Feder-Prinzip aufgesetzt. Weiteres wird im entsprechenden Abschnitt beschrieben.

Die Träger basieren auf der Profilreihe HEA mit Breite von 300 mm und je nach Geschoß unterschiedlicher Profilhöhe. Einige Positionen wurden als geschweißte Profile ausgeführt, wie z. B. Profile mit stärkerem Flansch oder gevoutete Träger. Die Profilhöhe hängt mit der Gestaltung der Deckenuntersicht zusammen. Im Infrastrukturtrakt ist aus schalltechnischen und hygienischen Gründen überall eine abgehängte Deckenverkleidung vorgesehen. In öffentlich zugänglichen Bereichen soll aber wie im Ausstellungstrakt das Tragwerk ablesbar sein. Die Deckenverkleidung läßt deshalb die unteren 10 cm der Träger sichtbar und wird auch nicht bis an die Träger herangeführt. Die Träger müssen entsprechend große Öffnungen für Lüftungskanäle aufweisen. Sie haben entweder fünf runde Öffnungen mit Durchmesser 400 mm oder zwei runde außen und drei rechteckige 400 mal 700 mm innen (Bild 5). Der 690 mm hohe Träger wird durch die

Tabelle 1. Stützen mit zulässigen Lasten „kalt“ und nach 90 Min. ETK-Brand**Table 1.** Columns with allowable Load at normal service conditions and 90 min. exposure to fire

Pos. type	Querschnitt cross section	Profile shape	Stützenhöhe column length [m]	zul N _{kalt} normal service [kN]	zul N ₉₀ exposure to fire [kN]
VT-1		ø 406,4 / 12,5	4,4	-5200	-4965
		St 37	3,6	-5400	-5053
		B 55, BSt 500 8 ø 25			
VT-2		ø 406,4 / 8,8	6,0	-3700	-3154
		St 37	4,5	-3900	-3350
		B 45, BSt 500 8 ø 20	2,9	-4200	-3969
VT-3a		ø 406,4 / 6,3	Druck	-4500	-4500
		ø 273 / 25,0 St 52, B 25 Rückverankerung 12 Litzen ø 15 mm	Zug	+1860	+1860
VT-3b		ø 406,4 / 6,3	Druck	-3000	-3000
		ø 273 / 25,0 St 37, B 25 Rückverankerung 12 Litzen ø 15 mm	Zug	+1860	+1860
VT-4		ø 323,9 / 10,0 St 37, B 25 Hängestütze 10 Litzen ø 15 mm	7,0	+1550	+1550

großen Öffnungen zu einem Vierendeelsystem aufgelöst. Im nichtöffentlichen Bereich werden die Lüftungskanäle unterhalb der nicht sichtbaren Träger geführt. Die 390 mm hohen Profile haben nur kleine Öffnungen mit Durchmesser 120 mm für Elektro- und Sprinklerleitungen.

2.2 Auskragende Bereiche

In den auskragenden, abgehängten Geschoßbereichen wirken die Träger in einem Rostsystem zusammen. Dies



Bild 6. Trägerrost im auskragenden Deckenbereich mit aufgeschweißten Zuglaschen

Fig. 6. The grid of girders in the cantilever part of the floor with plates welded to the upper flange

erfordert die Übertragung von Momenten im Knotenbereich. Der Knoten ist hier nicht als Bestandteil der Stütze ausgebildet, sondern ist in den Träger eingeschweißt. Der Träger ist mit dem Knotenteil und der Auskragung von fast 5 m zu einer 11,5 m langen Position verbunden. In der Auskragung verjüngt sich der Träger von 690 auf 390 mm Höhe. In Auflagertaschen am Knotenbereich werden die kreuzenden Träger eingehängt. Eine bei der Montage aufgeschweißte Blechlasche von 60 mm Dicke verbindet die oberen Flansche im Knotenbereich (Bild 6).

Die abgehängten Geschoßbereiche wurden auf je drei Hilfsunterstützungen zusammengebaut. Die späteren Zugstützen Position VT-4 bestehen im Bauzustand aus leeren Stahlrohren von 323,9 mm Außendurchmesser mit 10 mm Wanddicke. Das Innenleben der Stütze wird in Tabelle 1 und Abschn. 4.1 beschrieben.

2.3 Besondere Brandschutzaspekte

Die Träger- und Stützenprofile sind wie im Ausstellungs-trakt betonverfüllt. Der Beton ist bewehrt. Die Bewehrung ersetzt im Brandfall den Verlust an Stahlquerschnitt. Bügelbewehrung hält den Beton zusammen und verhindert fortschreitendes Abschälen der Oberfläche. Da bereits in [1] Brandschutzaspekte ausführlich behandelt wurden und diese Ausführungen auch für den Infrastrukturtrakt gelten, soll hier nur noch auf eine Besonderheit eingegangen werden.

Im Erdgeschoß bis zum 1. Obergeschoß gibt es einige Stützen, die vor der Fassade stehen. Die an den Stützen

auffliegenden Deckenträger durchstoßen die Gebäudehülle. Horizontale Rohre parallel zur Fassade steifen die Stützen zusätzlich aus (Bild 7). Bei einem Vollbrand muß wegen Flammenüberschlag auch außerhalb der Glasfassade F90 gewährleistet sein. Es stellte sich das Problem, den Anschluß des Trägers an die Stütze ohne Verbunddecke zu gewährleisten. Der Knoten wird bei schraubenlosem Verbundbau durch die Decke zusammengehalten [1]. Als formal saubere Lösung bot sich die Herstellung von Gußstahlteilen an, die den kammerbetonierten Träger außerhalb der Fassade verlängern. Als architektonische Sprache für den Knoten wurde die Kugelform gewählt. Das dickwandige Gußteil umgreift den Vollstahlkern der Stütze im Knotenbereich und liegt auf zwei Nocken auf. Die Lagerung des Trägers ist zwängungsfrei. Wegen der Massivität und geringen Beanspruchung der 80 mm dicken Wandung kann das Gußteil 90 Minuten einem ETK-Vollbrand widerstehen. Durch den Luftraum innerhalb der Kugel wird der Stahlkern der Stütze vor übermäßiger Durchwärmung geschützt. Abschn. 5 gibt weitere Informationen zu Gußstahl und Gießtechnik.

3 Abhängung von Geschoßbereichen

3.1 Entwurfsprozeß

Bei diesem Bau bestand die architektonische Absicht, die Tragstruktur und deren technische Lösungen zu zeigen. Die Lastabtragung wird in ein Wechselspiel von Kräften aufgelöst, das in allen Teilen des Tragwerks in seinem Zusammenwirken spürbar ist. Assoziationen zu den kranar-

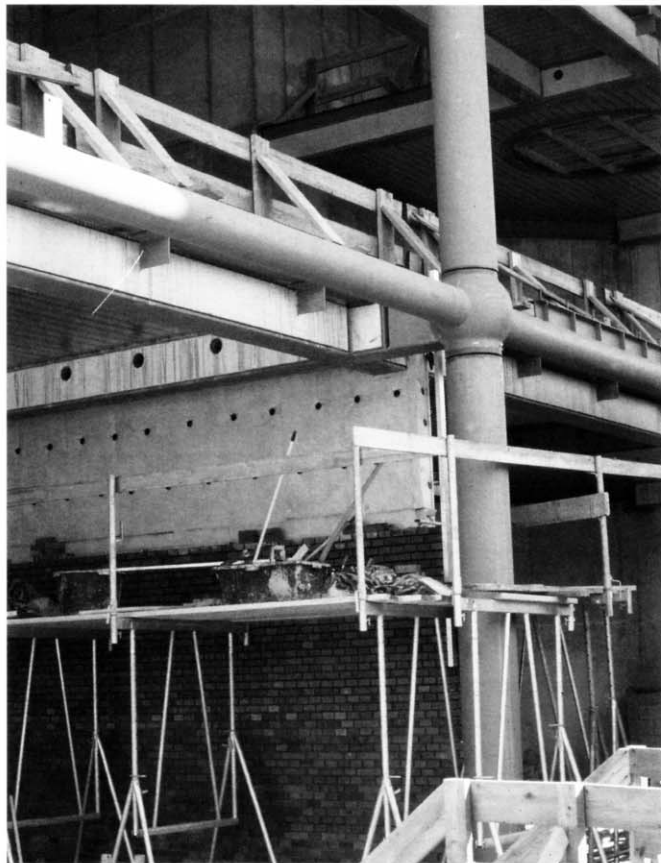


Bild 7. Stütze vor der Fassade mit Endbereich des Trägers aus Gußstahl

Fig. 7. Column in front of the facade with cast steel girder connection piece

tigen Dachtragwerken [2] von *Richard Rogers* oder *Norman Foster* sind nicht zufällig. Diese außerhalb der Gebäudehülle sichtbaren Tragwerke verweisen auf industrielles Bauen, auf die maschinenartige Architektur von Förderanlagen oder ähnlichem. Ökonomische Gesichtspunkte standen dabei nicht unbedingt im Vordergrund.

In der Entwurfsphase wurden verschiedene Varianten für die Abhängung der auskragenden Bereiche erwogen. Durch die einseitige Anbindung des Infrastrukturtraktes an den Ausstellungstrakt und durch die einseitige Auskragung des Gebäudes über die Gleise und den Hof ist eine Situation gegeben, auf die das Hängesystem in besonderer Weise eingehen muß. Im Gegensatz zum Hängehaus mit rundum mehr oder weniger symmetrisch abgehängenen Geschossen soll hier der Asymmetrie im Lastabtrag besondere Geltung zukommen.

Die erste Variante gemäß Bild 8a sah die Abhängung an einem auf dem Treppenhaus stehenden Pylon vor und trug der Asymmetrie durch eine Rückverankerung durch Zugelemente an die benachbarten Treppenhäuser im Ausstellungstrakt Rechnung. Besser als mit einem senkrechten Pylon wird die Tragwirkung durch geneigte, gespannte Masten, ähnlich einem Derrickkran, ausgedrückt. Eine weitere Möglichkeit sind Fachwerkausleger mit Gegengewicht, wie die in Bild 8b gezeigte Variante. Als Gegengewicht wird das Gebäude selbst benutzt, dazu sind vier Stützen als Zugelemente über das Dach hinaus verlängert. Die Hänger sind schräg gestellt, dadurch wird ein dynamischer Effekt erzielt, welcher die Tragwirkung verstärkt zeigt. Durch Ausformung des Fachwerks wird diese Wirkung noch gesteigert, was zur Variante gemäß Bild 8c führte. Die drei schrägen Hänger finden im Knoten an der Fachwerkspitze zusammen und setzen sich in der geschwungenen Linie der oberen Gurtung fort, dynamische Kontinuität des Kraftflusses andeutend. Die Form des Fachwerks versinnbildlicht die Umlenkung der Kraft zur Rückverankerung hin. Die Verwendung von Vorspannkabeln erlaubt diesen Entwurfsgedanken konsequenter umzusetzen. Die Spannkabel werden entlang der oberen Gurtung zum hinteren Ende des Fachwerks geführt, wo sie verankert werden. Das notwendigerweise wuchtige Übergangsstück vom Zugglied auf das Fachwerk befindet sich am hinteren Ende und nicht an der Spitze des Fachwerks, wo es den Kraftfluß stören würde.

Die Spannkabel werden über Sättel mit minimalem Radius von 6,0 m mehrmals polygonal umgelenkt. Als Material für die Sättel wurde moderner Gußstahl gewählt, welcher sich gut ausformen läßt. Moderne Gußstähle sind Baustählen an Festigkeit ebenbürtig und gut schweißbar. Dazu wird in einem nachfolgenden Abschnitt weiteres angeführt. In Bild 9 wird ein Arbeitsmodell des räumlichen Fachwerks gezeigt. Die Schrägseile sind nur im Bereich des Fachwerks dargestellt (schwarze Farbe). Die Rückverankerungen sowie die Gußknoten wurden an dem Modell weggelassen.

Mit Spannkabeln können Kräfte im System wesentlich besser einreguliert werden. Dieser Vorteil wird bei Schrägseilbrücken genutzt. Auch die Maßstäblichkeit gegenüber der geforderten Tragfunktion wird mit Spannkabeln besser eingehalten. Durch die mehrfach größere Festigkeit des Spannstahles gegenüber Baustahl wird der Querschnitt und das Gewicht der Zugelemente geringer.

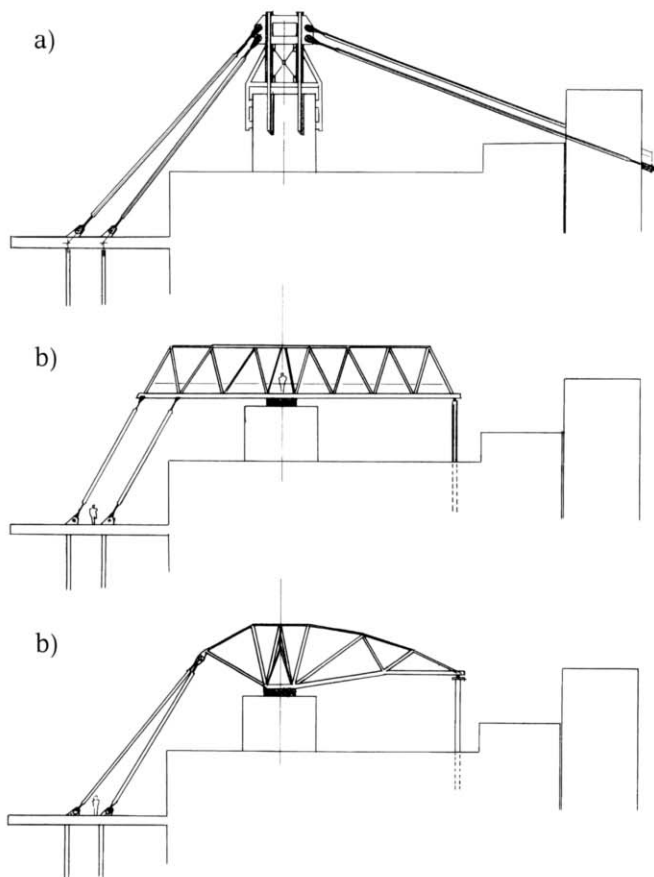


Bild 8. Verschiedene Entwurfsstadien der Geschoßabhängung; a) Variante mit Pylon, b) Variante mit Fachwerkbalken, c) Weiterentwicklung durch Ausformung
Fig. 8. Different stages of design for the suspension system; a) pylon with anchorage at adjacent stair core, b) parallel chord truss, c) truss form corresponds to acting forces

Entscheidend für diesen Entwurf des Hängewerkes, ist die differenzierte Beurteilung der Gefährdung durch Brandeinwirkungen. Durch die Lage des Fachwerkes mehr als 7,0 m über dem Dach sind geringe Hitzeeinwirkungen zu erwarten. Das massive Dach wirkt als horizontale Brandabschottung, deshalb sind keine Dachöffnungen im unmittelbaren Bereich der Fachwerkbalken vorgesehen. Die Schrägkabel sind in Nähe der Fassade durch flammenabweisende Blechhalbschalen gegen Beflammung aus dem 3. Obergeschoß geschützt.

3.2 Hängesystem und Belastung

Für die zwei abgehängten Geschoßbereiche gibt es zwei Hängesysteme, die sich auf dem Treppenhaus rechtwinklig überkreuzen. Jedes der Hängesysteme, wie im schematischen Gebäudeschnitt in Bild 10 dargestellt, besteht aus drei Zugstützen, drei Umlenkknöten, drei Schrägkabeln, einem Fachwerkbalken sowie zwei Kabeln für die Rückverankerung. Wegen der Überkreuzung der Schrägkabel am höchsten Punkt des Fachwerkes müssen die Kabelscharen entsprechend unterschiedlich umgelenkt werden.

Die Lasteinflußfläche auf die drei Zugstützen Typ VT-4 (vgl. Bild 3) beträgt je Geschoß 158 m². Bei einer der Stützen kommt ein Flächenanteil von 20 m² aus dem Zwischengeschoß hinzu. Die Geschoßlast von $q = 16,38 \text{ kN/m}^2$ setzt sich aus der Rohbaulast von $g_1 = 7,18 \text{ kN/m}^2$, der



Bild 9. Modell des räumlichen Fachwerkes; Schrägkabel nur teilweise dargestellt, ohne Rückverankerungskabel und Gußknoten
Fig. 9. Three-dimensional model of the truss without cast steel parts; cables are shown partially

Ausbaulast von $g_2 = 4,2 \text{ kN/m}^2$ und der Verkehrslast von $p = 5,0 \text{ kN/m}^2$ zusammen.

Es resultiert eine totale Hängelast von 5705 kN im Gebrauchszustand. Diese verteilt sich auf die drei Hängepunkte mit Ausnahme des Lastanteils aus dem Zwischengeschoß näherungsweise gleichmäßig. Bei Annahme feldweise ungünstiger Anordnung der Verkehrslast ergeben sich für einzelne Hängepunkte rund 15 % höhere Lasten. Die ermittelten Lasten sind in der Tabelle 2 den einzelnen Schrägseilpositionen zugeordnet. Über den Umlenkwinkel von 51° respektive 58,15° ergeben sich die Kräfte in den Kabeln.

Die Gefährdung durch schwere Beschädigung oder Zerstörung eines Kabels wird durch Umlagerung des Lastanteils des ausgefallenen Kabels über die Trägerroste der Geschoßdecken auf die restlichen Kabel berücksichtigt. Für diesen Katastrophenfall wird nur die halbe Verkehrslast angenommen. Ferner wird vorausgesetzt, daß

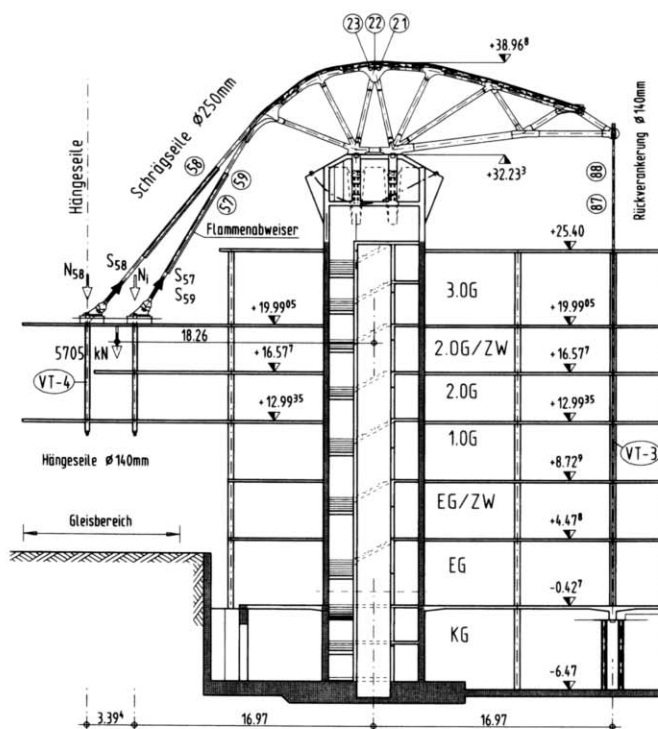


Bild 10. Schematischer Schnitt durch das Gebäude mit Geschoßabhängung
Fig. 10. Schematic section through the building and suspension system

Tabelle 2. Hängelast und Kräfte in den Schrägkabeln; Gefährdung mutwillige Zerstörung eines Schrägkabels
Table 2. Suspended load and forces in the stay cables; risk of damage loss of stay cable

Kabel Position	Hängelast	Schräggabel Gebrauch	Schräggabel Bemessung	Ausfall Pos. 58	Ausfall Pos. 59	Ausfall Pos. 57
cable number	suspended load	stay cable service load	stay cable design load	loss of no. 58	loss of no. 59	loss of no. 57
	max N_i [kN]	max S_i [kN]	max $S_{i,d}$ [kN]	max $S_{i,d}$ [kN]	max $S_{i,d}$ [kN]	max $S_{i,d}$ [kN]
Pos. 58	2610	3358	4702	0	4850	4418
Pos. 59	2610	3073	4302	3817	0	1215
Pos. 57	1655	1948	2727	3468	662	0
Summe	5705	6953	9735	–	–	–

für die auftretenden dynamischen Effekte bei der schlagartigen Lastumlagerung genügend plastische Tragreserven zur Verfügung stehen. Die dabei auftretenden Verformungen des Tragwerks sind bedeutungslos. Für den Katastrophenfall wird mit dem Sicherheitsbeiwert $\gamma_L = 1,0$ gerechnet, weshalb die Lasten verschiedener Gefährdungen nur auf Bemessungsniveau verglichen werden können. Die Bemessungslasten für die Schräggabel gehen aus Tabelle 2 hervor.

3.3 Räumliches Fachwerk „Spinne“

Die abgehängten Geschoßbereiche erzeugen bezüglich der Achse des Treppenhauses ein Moment von 126 MNm je Fachwerkbalken. Von diesem Moment werden 40 % über die Rückverankerung ausbalanciert. 60 % des Momentes übernimmt das Treppenhaus. Im Tragsystem sind zwei Tragwirkungen überlagert. Die Rückverankerung wirkt über einen Waagebalken, und das Treppenhaus wirkt durch die schräg verlaufenden Hängelkabel als Pylon. Das Fachwerk selbst partizipiert an beiden Tragwirkungen. Zum Treppenhaus ist es eine Pylonverlängerung, wodurch am Übergang vom Fachwerk auf das Treppenhaus nebst vertikaler Last von maximal 39,4 MN auch Momente von bis zu 17,2 MNm und Horizontalkräfte von bis zu 4,9 MN je Balken wirken.

Das Fachwerk ist zur Übertragung dieser Schnittgrößen auf dem Treppenhaus mit sechzehn vorgespannten Stabankern befestigt. Die Fußpunktknoten sind mit Schubknaggen aus Vollstahl Durchmesser 250 mm versehen und im Stahlbeton mit einem hochwertigen Vergußmörtel verankert.

Nebst Betrachtung dieses äußeren Zusammenwirkens der Kräfte ergibt sich die Beanspruchung des Fachwerks aus den Umlenk- und Verankerungskräften der Kabel. Die Umlenkkkräfte wirken radial auf die Sättel. Tangentiale Kräfte aus Reibung sind vernachlässigbar. Relativbewegungen der Kabel bezüglich der Sättel sind nur während der Montage und beim Spannen zu erwarten. Hinzu kommt die sekundäre Wirkung aus Wind. Das Fachwerk wurde als herausgelöstes Element mit den entsprechenden Kräften beaufschlagt und mittels räumlichem Stabwerksprogramm gerechnet. Es wurden aber auch umfangreiche Gegenrechnungen per Hand an vereinfachten Systemen vorgenommen. Am meisten beansprucht sind die Stäbe, welche an den Verankerungsknoten der Schräggabel anschließen. Es wird ein Ausnut-

zungsgrad bis $\eta = 0,86$ erreicht. Für die untere Gurtung, welche im Grundriß ein rahmenartiges System bildet, wurde untersucht, ob Stabilitätsversagen maßgebend werden kann. Durch die Kabel als lastbringendes Element liegt der günstige und außergewöhnliche Fall einer mitdrehenden, nicht richtungstreuen Kraft vor. Ferner üben die Kabel bei seitlicher Auslenkung des Fachwerks erhebliche rückstellende Kräfte aus. Anhand eines einfachen Ersatzstabmodells konnte gezeigt werden, daß kein Nachweis 2. Ordnung erforderlich ist.

4 Hängung mittels Vorspannkabel

4.1 Querschnittsaufbau der Kabel

Zugstützen, Schrägseile und Rückverankerung werden als Zugelemente alle mit Spannkabeln ausgerüstet. Die Kabel sind vom Aufbau ähnlich. Außen weisen sie ein dickwandiges, UV-beständiges HDPE-Schutzrohr (High Density Polyethylen) auf. Lange Elemente werden durch Spiegelschweißen konfektioniert. Die Endstücke sind aufwendig bearbeitet, um einen dichten Anschluß an die Ankerkörper zu erzielen. Die Außendurchmesser betragen 250 mm für die Schräggabel und 140 mm für die anderen Kabel. Die Wanddicken der Rohre sind 14,2 mm respektive 8,0 mm. Verwendet werden verbundfreie Monolitzen St 1570/1770 mit Nenndurchmesser 15,7 mm nach Eurocode 138-79. Der Spannstahl hat eine niedere Relaxation nach ASTM A416-85 (Klasse 2 nach Eurocode). Die gefettete 7drähtige Litze ist in einen Kunststoffmantel gehüllt und im Endzustand von speziellem Injektionsmörtel umgeben. Mit diesem Kabelaufbau wird ein mehrfacher Korrosionsschutz erzielt. Gleichen Aufbau weisen auch die Kabel bei Schrägseilbrücken auf. Kritisch bezüglich Korrosion sind vor allem die Ankerbereiche, die einer durchdachten konstruktiven Ausbildung bedürfen.

Die Querschnittsdimensionierung der Kabel bestimmt sich maßgeblich aus deren Verformung. Änderung der Verkehrslast führt zur Verlängerung der Kabel, wobei ein Teil der Verformung vorweggenommen werden kann. Durch leichte Überdimensionierung der Kabel werden die Verformungen geringer. Auch die Durchwärmung der Kabel infolge Sonneneinstrahlung führt zu Längenänderungen. Anhaltspunkte ergeben Messungen an schwarzen Kunststoffhüllrohren [3] über auftretende Rohrinnen- und Außentemperaturen an heißen Sommertagen. Bei 35 °C Lufttemperatur wies die sonnenzugewandte

Rohraußenseite Temperaturen nicht über 60 °C auf. Somit ist zu erwarten, daß die Litze aufgrund der Betonummantelung immer ungefähr mittlere Lufttemperatur hat.

4.2 Umlenkung der Schrägkabel

Bei den Schrägkabeln besteht eine besondere Problematik in der Umlenkung der Spannkabel mit 31 Litzen. Es handelt sich allerdings um kein Novum, bei externer Vorspannung von Brücken werden engere Umlenkradien ausgeführt. Dabei weisen die Kabel aber weniger Litzen auf. Die Pressungen im Umlenksattel nehmen mit kleinerem Umlenkradius und größerer Litzenzahl zu. Insbesondere die Injektionsmatrix muß dieser Beanspruchung widerstehen können, ohne zu reißen. Eine innere Zerrütung des Kabelquerschnitts im Sattelbereich könnte in Folge zur Beeinträchtigung des Korrosionsschutzes führen. Durch geeignete Abstandhalter wird im Sattelbereich verhindert, daß direkt Litze auf Litze liegt, damit die Litzen rundum mit Injektionsgut umschlossen werden. Es muß im weiteren auch beim Zusammenbau der Kabel darauf geachtet werden, daß alle Litzen parallel liegen, d. h. keine Litzen übereinanderschlagen oder das Kabel längs zur Achse verdreht ist. Es können einzelne Litzen unter voller Last abgespannt und ausgewechselt werden. Mit der alten Litze wird gleich die Neue eingezogen. Auf diese Weise kann ein ganzes Kabel Litze für Litze ausgetauscht werden, ohne daß Hilfsunterstützungen erforderlich sind. Es wird ferner an Verfahren gearbeitet, Kabel im Betrieb durch spezielle Sonden inspizieren zu können. Dadurch können Beschädigungen oder gar Brüche von Drähten festgestellt werden.

Im Umlenkbereich wird das Kabel durch die Zugkraft auf die Sattelfläche gepreßt. Die Litzen konzentrieren sich unterhalb der Mittelachse des Querschnitts, d. h. also innerhalb des halbrunden Sattelquerschnitts. Wenn angenommen wird, daß die Litzen im Bündel reibungsfrei aneinander abgleiten, stellt sich in Querrichtung eine näherungsweise sinusförmige Verteilung der Pressung des Kabels auf den Sattel ein. Wird hingegen Reibung zwischen den Litzen angenommen, baut sich eine Gewölbewirkung [4] auf, die ungefähr in den Viertelpunkten des halbrunden Sattels konzentrierte und dadurch größere Pressungen hervorruft. Es ergeben sich daraus untere und obere Grenzwerte für die Beanspruchung des Kabelquerschnitts und des Umlenksattels. Die um den Materialbeiwert reduzierte Bruchlast des Kabels beträgt 7130 kN. Mit der Kesselformel, dem Umlenkradius von 6,0 m und oben beschriebenen Annahmen können Grenzwerte für die Pressung der Sattelfläche mit 6,0 MN/m² und 19,0 MN/m² geschätzt werden. Für Spannkabel dieser Größenordnung ist immer eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich. Im Rahmen dieses Verfahrens mußten Versuche zum Nachweis des Querschnittswiderstandes im Sattelbereich durchgeführt werden.

4.3 Montage und Spannvorgang

Die Kabel wurden auf der Baustelle gefertigt und mit einem Autokran an die Einbaustelle gehoben. Die Kabel der Rückverankerung konnten von oben her durch den Gußknoten in die hohlen Stützen eingeführt werden. Die Schrägkabel wurden zuerst am unteren Ankerpunkt eingehängt, dann über die Sättel des Fachwerks gelegt und



Bild 11. Spannkabel-Verankerung: 31 Litzen, Bruchlast 8215 kN (Aufnahme während des Spanns)

Fig. 11. Anchorage of stay cables with 31 rods and an ultimate load of 8215 kN (photo taken during tensioning process)

zuletzt unter Zuhilfenahme eines weiteren Kranes in die obere Verankerung eingeführt.

Die Kabel können auf zwei Arten gespannt werden: mit einer handlichen, kleinen Hydraulikpresse Litze für Litze oder mittels großer Presse durch Ziehen am gesamten Ankerkörper. Die Verankerung (Bild 11) kann vereinfachend beschrieben werden als runder Metallzylinder mit konischen Bohrungen, worin die Litzen durch Verkeilen verankert werden, und einem Außengewinde. Auf dem Außengewinde sitzt ein großer Stellring, welcher gegen die Ankerauflagefläche festgezogen wird.

Zuerst mußten die Zugstützen gespannt werden. Anschließend wurden, beginnend mit der Rückverankerung, reihum die weiteren Kabel gespannt. Das Spannen erfolgte in vier Stufen gemäß Tabelle 3. Während des Spanns treten Kräfte auf, welche nicht mit dem Endzustand übereinstimmen. Beim Anspannen der Rückverankerungskabel fehlt noch die entsprechende Gegenkraft aus den Schrägseilen. Dadurch wird der Fachwerkbalken als Hebelarm beansprucht. Begrenzt wird die Spannkraft durch die Tragfähigkeit der Stabanker, mit welchen das Fachwerk auf dem Treppenhaus befestigt ist. Für die Kabel der Rückverankerung war ferner der Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Spannweg und gemessener Kraft nicht einfach zu interpretieren, da ein Teil der beim Spannen eingebrachten Energie in Verformung des Fachwerks – wie in einer Feder – gespeichert wurde.

Nach der ersten Spannstufe wurden die Kabel mit Injektionsmörtel verpreßt. Mit der dritten Spannstufe wurde der auskragende Gebäudeteil von den Hilfsunterstützungen abgehoben. Als Hängelast wirkt in diesem Stadium die Rohbaulast, d. h. ca. 55 % der ständig wirkenden Lastanteile. Zu den ständigen Lasten wird hierbei auch ein Drittel der Verkehrslast gezählt. Die weitere Steigerung des Spannweges in der vierten Stufe des Spannprogrammes diente dazu, die aus der restlichen ständigen Belastung zu erwartende Verformung vorweg zu nehmen. Bei den ersten zwei Spannstufen wurde litzenweise gespannt, da dadurch eine gleichmäßige Verteilung der Kraft auf die Litzen erzielt wird. Die dritte und vierte Stufe mußte mit großer Presse gespannt werden, da die Abhebekraft nicht genügend genau vorherbestimmbar ist.

Tabelle 3. Spannprogramm
Table 3. Post-tensioning Program

	Rückhaltekabel rear anchorage cables		Schräggabel stay cables		
	Pos. 87 Pos. 86 [mm]	Pos. 88 Pos. 85 [mm]	Pos. 57 Pos. 23 [kN]	Pos. 58 Pos. 22 [kN]	Pos. 59 Pos. 21 [kN]
1. Stufe 1. step	30	30	290	420	360
	Verpressen injection	Verpressen injection	Verpressen injection	Verpressen injection	Verpressen injection
2. Stufe 2. step	60	60	580	840	720
3. Stufe 3. step	90	90	(860) bis Abheben until lift off	(1230) bis Abheben until lift off	(1080) bis Abheben until lift off
4. Stufe 4. step	103	103	δ_{32} δ_{19}	δ_{31} δ_{17}	δ_{33} δ_{18}

Nach Beenden der Spannarbeiten wurden die Litzenüberstände auf ca. 30 cm eingekürzt, die Ankerbereiche mit Stahlkappen verschlossen und mit Schutzwachs verpreßt. Ein Nachspannen der Kabel ist durch das Verwahren der Litzenüberstände sowohl mit der großen Presse als auch mit kleiner Presse litzenweise möglich.

5 Knotenbereiche aus Gußstahl

5.1 Ein neues altes Material

Zu Beginn der Industrialisierung in den Anfängen des Eisenbaues spielten Gußwerkstoffe eine dominierende Rolle. Als Bearbeitungstechniken des Eisens kannte man damals nur Schmieden und Gießen. Die Konstruktionsformen und Fügetechniken waren dem Stein- und Holzbau entliehen. Auch die Gestaltung der Eisenteile, wie z. B. bei gußeisernen Säulen mit reich verzierten Kapitellen, entsprang der Steinmetz- oder Holzbautradition. Selbst Brücken wurden aus Gußeisen gebaut, wobei auch dort steinerne Brücken nachgeahmt wurden. Wir bewundern heute an diesen alten Eisenkonstruktionen den Gestaltungsreichtum, welcher durch die Formungsmöglichkeit der Gießtechnik gegeben war.

Mit der Entwicklung von Stahl und Walzerzeugnissen wurde das Gußeisen aus dem Bauwesen weitgehend verdrängt. Gußwerkstoffe gerieten auch als verformungsarm brechende Materialien in Verruf. Dies liegt am hohen Gehalt an Kohlenstoff von mindestens 2 %, welcher als lamellarer Graphit in die metallische Matrix eingebettet ist und durch Kerbwirkung zu geringem Verformungsvermögen führt. Man kennt diese Werkstoffe unter dem vereinfachenden Sammelbegriff „Grauguß“ [5]. Im Maschinen- und Turbinenbau wurden die Gußwerkstoffe weiterentwickelt zu einer vielfältigen Palette an kohlenstoffarmen, niedriglegierten Stählen mit Eigenschaften, die Baustahl absolut ebenbürtig sind. Diese „neuen“ Gußmaterialien können mechanisch bearbeitet und – für das Bauwesen besonders wichtig – geschweißt werden. Im Bauwesen werden diese Gußwerkstoffe bis heute wenig verwendet.

Für die Gußstahlteile beim Museum wird die Sorte GS-20 Mn 5 V mit der Werkstoffnummer 1.1120V einge-

setzt, mit einem Massenanteil an Kohlenstoff von 0,17 bis 0,23 %, weniger als 0,6 % Silizium, 0,02 % Phosphor, 0,015 % Schwefel und als Zulegierung 1,0 bis 1,5 % Mangan. Diese werden in der Tabelle 4 mit Baustählen S235JRG1 (USt37.2) und S355JR (St52.3) verglichen. Man beachte insbesondere die guten Werte für die Zähigkeit des Materials. Die Gußteile wurden vergütet, d. h. auf eine Austenitisierungstemperatur von 890 bis 940 °C erwärmt und in einer Flüssigkeit abgeschreckt, dann nochmals auf 610 bis 660 °C angelassen. Dadurch entspricht der Stahl der besseren Güte eines S355JR.

5.2 Technik des Gießens

Gießtechnik hat auch heute die Faszination des alchemistisch anmutenden Handwerks nicht eingebüßt. In den rauchigen, schwarzen Werkhallen der Gießereien fühlt man sich unvermittelt an die beschwörenden Verse von *Schillers* Glocke erinnert. Gießen hat auch in unserem hochtechnisierten Zeitalter noch viel mit Erfahrung und Gefühl zu tun. Nicht jeder Guß gelingt. Dies hat auch die Planung der Teile nicht einfach gemacht, weil die Gießtechnik auf die Formfindung maßgeblichen Einfluß hat. In diversen Gesprächen mit Gußtechnikern wurde versucht, die Randbedingungen herauszuschälen.

Gegossen wird in Formen aus Formsand. Formsand ist eine Mischung aus Tonmaterialien und speziellem Sand und kann mehrmals wiederverwendet werden. Gelegentlich werden auch Mischungen von Sand mit Epoxidharzen verwendet. Um die Negativform herstellen zu können, muß vom zu gießenden Körper ein Modell in natürlicher Größe, respektive wegen des Schrumpfens des Gußstahles beim Abkühlen etwas größer, hergestellt werden. Diese Gießmodelle werden als Holzgerippe gefertigt, die Hohlräume mit Schaumkunststoff ausgefüllt und die Oberfläche mit Spachtelmasse geglättet (Bild 12d). Das Modell wird in den Formsand gebettet. Die Gießform besteht mindestens aus zwei Teilen, wodurch das Gießmodell aus der Form genommen werden kann. Die Trennfläche zwischen den Formhälften muß das Modell überall auf konvexen Flächen schneiden, sonst kann das Modell nicht aus der Sandform genommen werden. In solchen

Tabelle 4. Gußstahl GS-20 Mn 5 mit verbesserter Schweißeignung und Zähigkeit; mechanische Eigenschaften bei 20 °C nach DIN 17 182 (1992) und Vergleich mit Baustählen**Table 4.** Cast steel GS-20 Mn 5 with better weldability and higher toughness; mechanical properties at 20 °C according to DIN 17 182 (1992) and comparison with structural steel

Wärme- behandlung	Wanddicke	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruch- dehnung	Kerbschlag- arbeit (ISO-V-Proben)
heat treatment	thickness	elastic limit	tensile strength	elongation at failure	notch toughness
		$f_{y,k}$	$f_{u,k}$	A_5	A_V
	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]
normalgeglüht (N)	bis 50	300	500 bis 650	22	55
	50 bis 100	280	500 bis 650	22	40
	100 bis 160	260	480 bis 630	20	35
normalized	über 160	240	450 bis 600		
vergütet (V)	bis 50	360	500 bis 650	24	70
	50 bis 100	300	500 bis 650	24	50
quench + temper	100 bis 160	280	500 bis 650	22	40
Zum Vergleich: comparison:					
S235JRG1	100 bis 150	195	340 bis 470	22	27
S355JR	100 bis 150	295	470 bis 630	18	27

Fällen muß entweder die Form durch keilförmige Teile ergänzt oder das Gußmodell zerlegbar sein. Dies war bei den Sattelknoten der Fall (siehe Bild 12d). Hohlräume erfordern eine innere Form. Diese wird entweder als Kragarm in die äußere Form eingespannt oder muß sich auf die äußere Form abstützen, was entsprechende Öffnungen im Gußstück erfordert. Diese Innenteile sind beim Gießen hohen Beanspruchungen ausgesetzt, weil der flüssige Stahl ein hohes spezifisches Gewicht hat und die Formteile entsprechende Auftriebskräfte erhalten. Die Bereiche des Gußstückes, welche die höchste Anforderung an die Materialqualität haben, wie z. B. die Sättel, müssen in der Form unten sein, da dort das Gußmaterial die höchste Dichte erreicht.

Zum gleichmäßigen Ausgießen der Form müssen an richtiger Stelle Eingießkanäle und Pfeifen, durch die Gase aus der Form entweichen können, angelegt werden. Der gegossene Stahlkörper kühlt nicht gleichmäßig aus. Bereiche, wo viel Masse konzentriert ist, kühlen langsamer aus. Da der Stahl sich beim Abkühlen zusammenzieht, können durch das ungleichmäßige Abkühlen Eigenspannungen und in deren Folge Risse entstehen. Rascher abkühlende Zonen werden durch langsamer abkühlende in der Verformung behindert. Wenn noch flüssige Zonen von bereits verfestigten Bereichen umschlossen sind, können Hohlräume entstehen, wenn kein Material beim Schwinden nachfließen kann. Dazu werden flüssige Gießreserven, sogenannte Speiser, außerhalb des Gußstückes geschaffen. Das größte Gewicht, was eine Gießerei fertigen kann, hängt von der Größe der vorhandenen Gießpfanne ab. Hierbei muß die flüssige Stahlmenge nicht nur für das Gußstück, sondern auch für alle Kanäle und vor allem die Speiser ausreichen. Der Guß darf nicht unterbrochen werden. Hier wurden Gußstücke bis 10 t gefertigt.

Nachdem das Gußstück aus dem Formsand genommen ist, werden alle überflüssigen Teile abgetrennt. Das

Stück wird entgratet und von Sandresten befreit, welche auf der Oberfläche anbacken. Danach wird das Teil einer eingehenden Prüfung unterzogen. Insbesondere wird geprüft, ob keine Poren oder Risse entstanden sind. Die äußere Beschaffenheit der Oberfläche wird mittels Magnetpulverprüfung nachgewiesen. Für den Nachweis der inneren Güte gibt es die Durchstrahlungsprüfung oder Ultraschallprüfung. Gußstücke können nicht auf den Millimeter genau und auch nicht scharfkantig hergestellt werden. Flächen mit entsprechenden Anforderungen, wie z. B. die Ankerauflagebereiche, mußten nachträglich gefräst werden. Die Sattelflächen wurden nur grob geschliffen, da die Kunststoffrohre auch gröbere Unebenheiten ausgleichen können.

Zuletzt wurden die Teile dem langwierigen Vergütungsverfahren unterzogen. Alle Teile wurden im Werk zweimal grundiert (Bild 12e). Die Sattelflächen wurden flammgespritzverzinkt und auf der Baustelle mit einer geeigneten Endbeschichtung versehen. Für den gesamten Produktionsprozeß muß mit zehn Monaten gerechnet werden.

5.3 Formfindung

Die Knotenbereiche können nach ihrer Funktion in drei Gruppen eingeteilt werden: die Sattelknoten zur Seilumlenkung, Knoten mit Kabelverankerungen und Knoten mit Rohrzusammenführungen. Die Gießtechnik bietet prinzipiell viel Freiheit in den Ausgestaltungsmöglichkeiten der Knoten. Diese sollten in Richtung einer klaren Formsprache genutzt werden, mit prioritärem Ziel, den Kraftfluß am Knoten äußerlich lesbar zu machen. Die Sattelknoten erhielten Rippen, welche durch die geschwungene Form die Zunahme des Kragmomentes im Sattel zum Fachwerkknoten hin zeigen. Ausgangspunkt bei der Formfindung für die Gußknoten war für die Architekten die Kugelgestalt (Bild 12a). Mit der Kugel sollte der eigentliche Knotenpunkt markiert werden, damit nicht

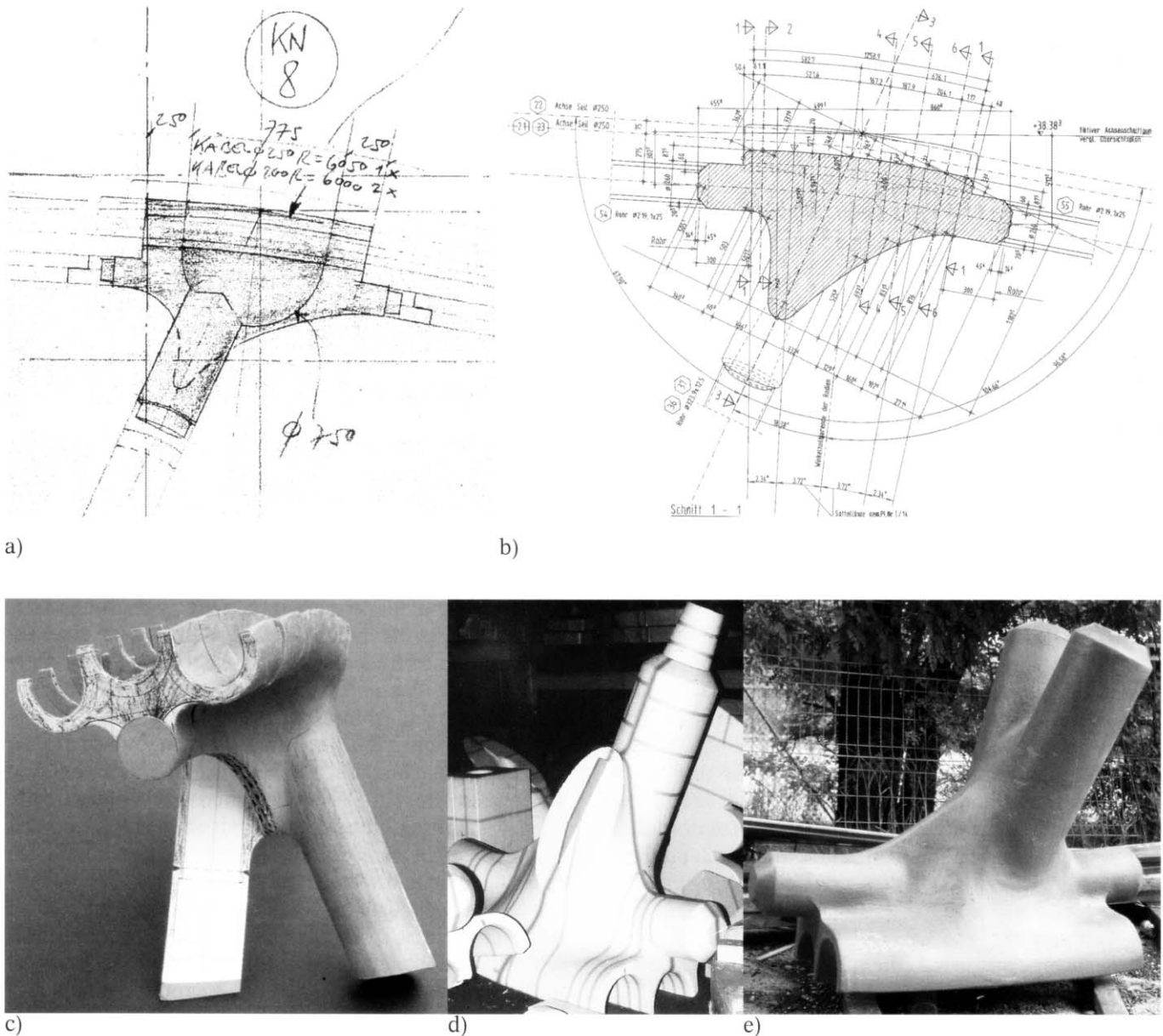


Bild 12. Vergleich Entwurf Architekten (a), Werkplan (b), Arbeitsmodell (c), Gußmodell (d) und fertiges Gußteil vor der Montage (e)
Fig. 12. Comparison of architectural design (a), workshop drawing (b), design model (c), model for casting (d) and the finished cast steel piece before assemblage (e)

verschiedene Formen im Knoten organisch zusammenfließen. Dagegen stand, daß kugelförmige Bereiche von der statischen „Idealform“ abweichen. Gußtechnisch sind Kugelformen, welche in andere Formen überfließen, auch aufwendiger herzustellen. Die Form wurde aus diesen Gründen gemeinsam optimiert. Um die Gußteile von den sie verbindenden Rohren abzusetzen, wurde der Wandickenversprung nach außen hin sichtbar ausgeführt. Dadurch sind Ausführungsungenauigkeiten weniger augenfällig. Die Gußteile treten auch durch die rauhere Oberflächenstruktur optisch heraus, was dem architektonischen Willen entspricht, Materialien möglichst in ihrer natürlichen Textur und Farbe zu zeigen.

In statischer Hinsicht wurde die Form anfänglich aufgrund einfacher Handrechnungen mit anschaulichen Fachwerkmodellen und vereinfacht gedachten Querschnitten ermittelt. Bei den Sätteln basierte die Ermittlung von Grenzwerten für Spannungen auf den im Abschnitt 4.2 beschriebenen Annahmen für die Vertei-

lung der Pressungen aus dem Kabel. Diese Berechnungen wurden in einem weiteren Schritt mittels ebener Finite-Elemente-Rechnung vertieft. Dazu wurden die Knoten in Scheiben zerschnitten gedacht, wobei durch Überlagerung der Rechenmodelle begrenzt auch räumliche Wirkung erfaßt werden konnte. Durch den Bau maßstäblicher Kartonmodelle wurde das räumliche Vorstellungsvermögen unterstützt (Bild 12c). An diesen Modellen ließ sich der Kräfteverlauf anschaulich nachvollziehen und mit der ebenen FE-Rechnung abstimmen. Zuletzt wurde das Rechenverfahren am meistbeanspruchten Knoten mittels räumlicher FE-Rechnung überprüft. Als Ergebnis sind in Bild 13 Bemessungswerte für Vergleichsspannungen nach *von Mises* (Energiehypothese) als Isoliniendarstellung gezeigt. Gerechnet wurde der Knoten mit den Endverankerungen der Schrägseile. Unter der Annahme symmetrischer Belastung wurde nur der halbe Knoten gerechnet. Maximale Bemessungsspannungen von ca. 165 N/mm^2 (bei zulässigen $f_{y,k} = 280 \text{ N/mm}^2$) tre-

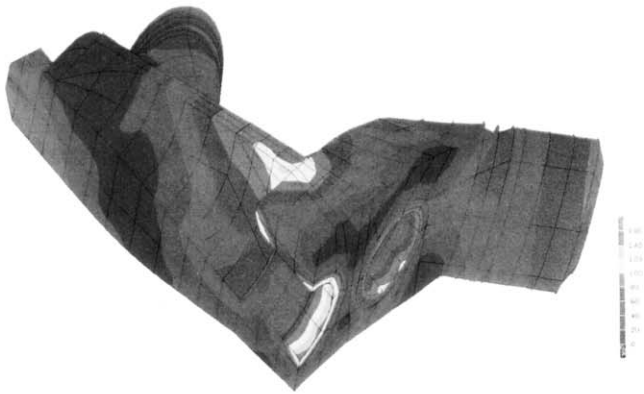


Bild 13. Räumliche Berechnung des Knotens mit Endverankerung: Vergleichsspannungen als Isoliniendarstellung (Plot Technische Datenverarbeitung TDV, Graz)

Fig. 13. Three-dim. FE-calculation of the anchorage piece: diagram showing isostatic lines of allowable stress

ten im Bereich der Krafteinleitung aus dem mittleren Kabel auf.

Die Darstellungsart der Werkstattzeichnungen als Grundlage für den Gußmodellbau scheint relativ einfach aufgebaut (Bild 12b). Bei den hier gefertigten Formen ist jedoch gutes geometrisches Vorstellungsvermögen und dessen zeichnerische Umsetzung gefragt. Zur Darstellung sind sehr viele Schnitte erforderlich. Teilweise wurden Isoliniendarstellungen benutzt, um die Vorstellungskraft für die äußere Form zu unterstützen. Maße und wahre Winkel müssen unmißverständlich dargestellt sein. Speziell werden Bereiche mit besonderen Toleranzanforderungen angegeben, wie zum Beispiel die Ankerauflagenflächen.

5.4 Montage

Das Fachwerk wurde auf einem Hilfsgerüst vor Ort Stück um Stück zusammenmontiert, beginnend mit den vier Fußknoten auf dem Treppenhaus. Durch das Hilfsgerüst wurden direkt die Gußknoten abgestützt. Sie konnten dadurch in Höhe, Lage und Ausrichtung genau eingemessen werden. Dann wurden sie durch provisorische Heftnähte fixiert. Die Rohre wurden ausgeschnitten, um sie auf die



Bild 14. Fußknoten des Fachwerks während der Montage: Vorwärmen des Schweißnahtbereichs

Fig. 14. Cast steel base connectors of the truss during assemblage: heating of the base metal to prepare for welding

konischen Anschlüsse der Gußknoten von seitlich einzuschwenken. Der Ausschnitt wurde anschließend wieder eingeschweißt.

Der Gußstahl mußte vor dem Verschweißen im Nahtbereich auf 200 °C vorgewärmt werden. Dies geschah mittels elektrisch beheizbarer Manschetten (Bild 14). Die Temperatur wurde während des Schweißvorgangs kontinuierlich überwacht. Die Qualität der Nähte wurde von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) kontrolliert.

Die genaue Positionierung der bis zu 10 t schweren Gußteile stellte an die Montagekolonne und an das Vermessungsteam hohe Anforderungen. Hinzu kamen die exponierte Lage und der unglückliche Montagezeitpunkt mit einem frühen Wintereinbruch.

6 Zirkulärer Prozeß

Ziel dieses Aufsatzes ist der Versuch, die Leitgedanken und Rahmenbedingungen zu beschreiben, die der Planung des Gebäudes zugrunde lagen. Die Darstellung der Prozeßhaftigkeit des Denkens, die der Methodologie des Entwerfens und Planens eigen ist, muß zwangsläufig skizzenhaft bleiben. Planen ist nie der kühne Wurf einer ersten Idee, sondern das wiederholte Hinterfragen einer gewonnenen Idee und Hineindenken in die Beschaffenheit eines Projektes. Im Verlauf dieses zirkulären Prozesses gilt es, sich mit einer Unmenge von Informationen vertraut zu machen, um den Entwurf zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Viele Personen mit unterschiedlichem Erfahrungshintergrund sind am Planungsprozeß beteiligt, und es ist am Ende unwesentlich und unmöglich nachzuvollziehen, wer was eingebracht hat. Auch wechseln einige Beteiligte in der langen Planungszeit. Um so faszinierender ist zu beobachten, wie der Prozeß auf verschlungenen Pfaden auf einen finalen Punkt zuläuft, der im Verlauf der dichter werdenden Planung immer klarer in Erscheinung tritt.

Als architektonischer Ausdruck für den Neubau eines Technikmuseums wurde ein technischer Hintergrund gesucht. Das Tragwerk und die Gebäudetechnik sollen sichtbar bleiben und dem Museumsbesucher das Gebäude als integralen Bestandteil der technischen Ausstellung darstellen. Angestrebt wird eine tiefere Integration von Ästhetik und Funktion. Um diese zu erreichen, müssen Zusammenhänge und Wechselwirkungen präzise verstanden werden. Eine Kernfrage bildet dabei die Beurteilbarkeit. Durch die Wahl einer kranartigen Hängekonstruktion und die Verwendung von Spannkabeln gelang es, das Kräftespiel präziser zu fassen und zu beherrschen. Durch klare funktionale Gliederung wird die Vorhersagbarkeit des Verhaltens eines Tragwerks einfacher. Allerdings wurde dadurch in Bereiche der Konstruktion vorgestoßen, welche nur durch Orientierung an aktuellsten Erkenntnissen und Entwicklungen der Industrie begangen werden können. Kernfragen betrafen die Umlenkung der Kabel und die Ausführung der Knoten in Gußstahl. Zur Klärung solcher Fragen ist die Beratung durch entsprechend ausgewiesene Firmen empfehlenswert. Dadurch bleibt der Wettbewerb bei der Vergabe der Arbeiten unbeeinflusst, denn ein Informationsvorsprung gegenüber Mitkonkurrenten bedeutet nicht zwangsläufig

das niedrigere Angebot. So ist keine der im Vorfeld beigezogenen Firmen zum Auftrag gekommen.

Durch die Verwendung der Spannkabel und des Gußstahles, überhaupt durch die Wahl der Hängekonstruktion, wurden Lösungen im Planungsprozeß umgesetzt, welche nach moderner Terminologie als High-Tech-Engineering bezeichnet werden. Mit dem Begriff High-Tech wird leicht der negative Beigeschmack von Suche nach Superlativen oder extrovertierten Gesten verbunden. Es ist eine Entwicklung unserer Informationsgesellschaft, daß heute im Planungsprozeß Lösungsansätze eher an wissenschaftlicher Forschung orientiert sind als an Tradition. Durch die rasante Entwicklung der Informationstechnologie steht heute die Übersicht über den aktuellen Kenntnisstand rascher und umfassender zur Verfügung. Leistungsfähige und preiswerte Rechner haben den Anteil der Berechnung an der Ingenieurkunst fast zur Nebensächlichkeit verkommen lassen. Alles ist im Grunde genommen berechenbar geworden, wird allerdings dadurch nicht zwangsläufig besser beurteilbar. Der Planungsprozeß wird freier für gemeinsame Entwicklung herausfordernder neuer Ideen. Dies gilt ganz besonders für den planerischen Rahmen dieses Technikmuseums. Historische Technik im Museum verbindet sich mit dem Ausstellungsrahmen moderner Bautechnik, ohne jedoch die Bautradition völlig zu negieren. Besonders anschaulich wird dies durch das Material Gußstahl, welches Tradition und Moderne verbindet.

Welche Gedanken werden unseren virtuellen Museumsbesuchern im Jahr 2010 wohl durch den Kopf gehen, wenn sie sich auf der Terrasse des Restaurants von den Strapazen des Rundganges erholen? Was werden ihnen die Gußteile auf der Terrasse, um die herum sie sitzen werden, wohl für Gedankenanstöße geben?

Danksagung

Für die Beratung in der Planung durch VSL-International Ltd., Bern (Schweiz), und Krupp Stahlbau, Berlin, bedanken sich die Verfasser.

Am Bau Beteiligte:

Bauherr: Senatsverwaltung für Bauen,
Wohnen und Verkehr,

Architekt:

Tragwerk und

Ausführungsplanung:

Brandschutz:

Prüfingenieur:

Bauausführungen:

Abteilung HVII für das Deutsche
Technikum Berlin
Architektengemeinschaft MVT
Ulrich Wolff und Helge Pitz

PICHLER Ingenieure GmbH

Hosser, Hass und Partner

Hornfeldt & Scheel

Arge MVT, Strabag – Ludwig
Freytag – Max Bögl; Arge Stahlbau
MVT, Bögl – Dillinger DSD
(Stahlbau); FAP Argentières-la-
Bessée, Frankreich (Gußstahl);
Reinhard Tweer GmbH (Stützen-
knoten); SHW-Freyssinet (Vor-
spanntechnik); Karin Kunath
(Vermessung)

Literatur

- [1] *Pichler, G., Guggisberg, R.*: Deutsches Technikmuseum Berlin – Technik der Zukunft verbindet sich mit Geschichte der Technik. Stahlbau 67 (1998), H. 7, S. 580–591.
- [2] *Ackermann, K.*: Industriebau. Ausstellung, Universität Stuttgart. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1984, S. 190–213.
- [3] *Kollegger, J.*: Untersuchungen an einem Kunststoffhüllrohr für Spannglieder mit nachträglichem Verbund. Bauingenieur 69 (1994), S. 247–255.
- [4] *Oertle, J.*: Reibermüdung einbetonierter Spannkabel. Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, Bericht Nr. 166. Birkhäuser, September 1988, S. 114.
- [5] *Käpplein, R.*: Untersuchung und Beurteilung alter Gußkonstruktionen. Stahlbau 66 (1997), H. 6, S. 318–332.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dipl.-Ing. Gerhard Pichler, Beratender Ingenieur VBI, Universitätsprofessor für Tragwerklehre an der Hochschule der Künste HDK Berlin, Geschäftsführer der PICHLER Ingenieure GmbH, Giesebrechtstraße 13, 10629 Berlin,

Dipl.-Ing. ETH/SIA Roland Martin Guggisberg, Urech + Guggisberg Partner, Froburgstraße 60, CH-8006 Zürich (bis April 1998 Projektleiter bei PICHLER Ingenieure GmbH)