

Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Sander zum 75. Geburtstag gewidmet

Joachim Lindner  
Gerhard Breitschaft  
Johannes Thaten

## Die Seilkraftmessungen bei der Errichtung des Forumdaches beim Sony Center am Potsdamer Platz in Berlin

### 1 Einleitung

Im Juni 2000 wurde das Sony Center am Potsdamer Platz in Berlin offiziell eröffnet. Sowohl in architektonischer als auch in ingenieurmäßiger Hinsicht stellt dabei die Überdachung des Forums den Höhepunkt des gesamten Gebäude-Ensembles des Sony Centers dar.



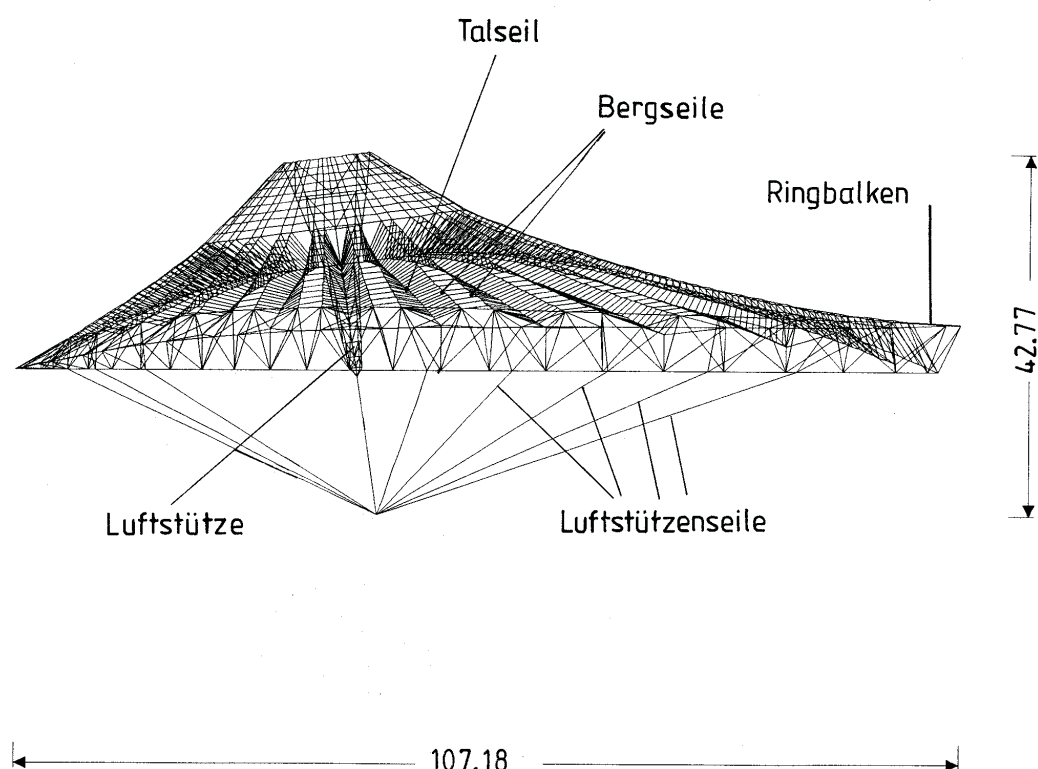
**Bild 1.** Untersicht des Forumdaches

Nicht vollständig abschließend, aber dennoch als Wetterschutz dienend, ist das Forumdach, s. Bild 1, in der Höhe von 40m – 62m über Straßenniveau weithin über die Stadt sichtbar und auf besten Wege sich zu einem weiteren Wahrzeichen Berlins zu entwickeln. Der elliptische Innenhof des Sony Centers, das Forum, wird mit einer schwebenden Konstruktion aus Stahl, Glas und textiler, transluzenter Membran überspannt. Neben dem elliptischen Fachwerkträger stellen die zahlreichen Stahlseile die Haupttragglieder dieser leichten und weichen Konstruktion dar.

Damit die im architektonischen Entwurf geplante Dachform verwirklicht werden konnte und gleichzeitig der in der statischen Berechnung zugrunde gelegte Kraftzustand erreicht wurde, war es unbedingt erforderlich, die Kräfte in den Seilen während verschiedener Bauphasen zu kennen und den Planungsvorgaben anzupassen. Am Beginn war nicht allen am Bau Beteiligten die Notwendigkeit klar, dass möglichst viele Seilkräfte durch Messungen festzustellen waren. Man ging zunächst davon aus, durch äußerst genaues Ablängen der Seile und genaue Fertigung der anschließenden Bauteile den geplanten Kraftzustand ohne größere Kontrollmessungen zu erreichen. Der Prüfenieur und der Tragwerksplaner veranlassten dann doch die durchgeführten Messungen, welche schließlich auch zu einigen erforderlichen Korrekturen in den Spannkraften der Seile führten.

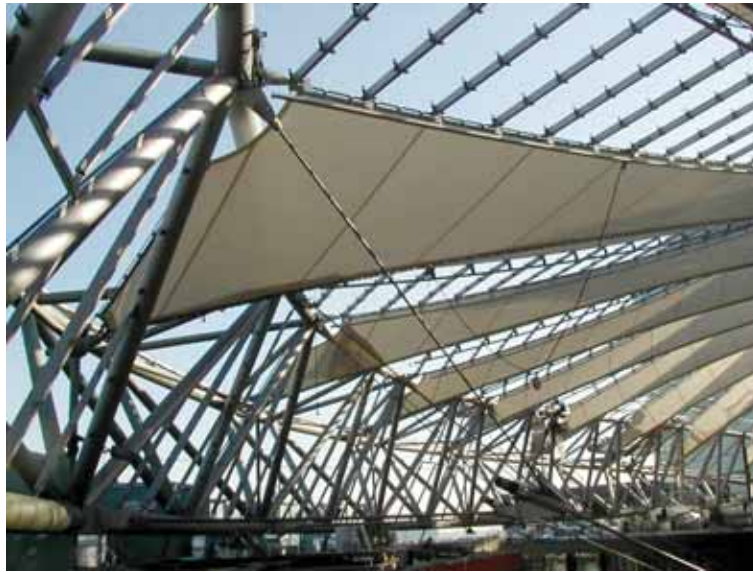
## 2 Konstruktionsbeschreibung

Das Tragwerk des Forumdaches entspricht einer abgewandelten Form eines horizontal liegenden Speichenrades, s. Bild 2, [1].



**Bild 2.** Seitenansicht des zur Prüfung der statischen Berechnung benutzten Computermodells

Die „Felge“ des Rades hat eine elliptische Form und wird vom *Ringbalken*, einem Raumfachwerkträger aus Stahlrohren gebildet.



**Bild 3.** Ringbalken, Teilansicht

Die Felge ist an sieben Punkten auf den das Forum umgebenden Gebäuden aufgelagert. Diese Lager bilden die einzigen Anbindungen des gesamten Daches an die Umgebung. Die Abmessungen der beiden Ellipsen-Hauptachsen betragen 102 m und 77m.

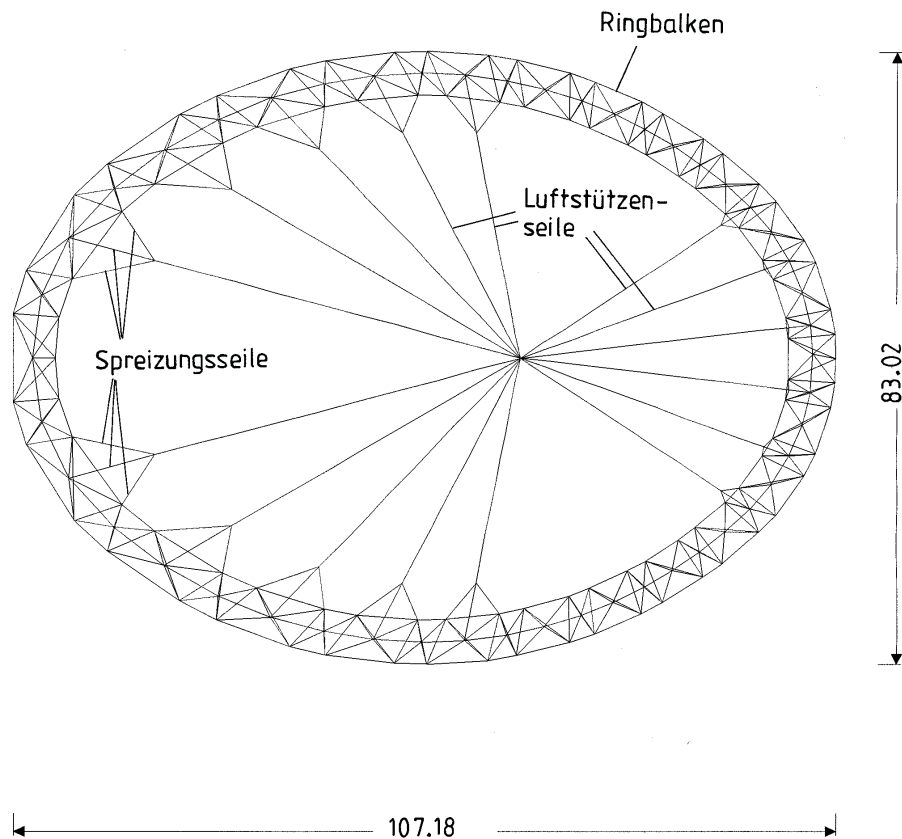
Die „Nabe“ oder „Achse“ des Rades ist um  $8^\circ$  gegenüber der Vertikalen geneigt und wird von der *Luftstütze* gebildet.



**Bild 4.** Luftstütze, unterer Teil

Die Luftstütze ist im oberen Teil ebenfalls ein Raumfachwerk aus Stahlrohren und im unteren Teil, s. Bild 4, ein vollwandiger, achteckiger, sich nach unten verjüngender Hohlquerschnitt. Die scheinbar schwebende Luftstütze besitzt ein Gewicht von ca. 90 t.

Die „Speichen“ des Rades werden von Stahlseilen gebildet. Die obere Seillage, vom Kopf der Luftstütze zum Ringbalken, wird von den 48 *Bergseilen* und den 24 *Talseilen* gebildet, zwischen denen als Dachhaut die textile Membran mit ebenfalls tragender Wirkung und die Dachverglasung liegen.



**Bild 5.** Untere Seillage aus Luftstützenseilen und den Spreizungsseilen

Die untere Seillage, vom Fußpunkt der Luftstütze zum Ringbalken, besteht aus den 16 Luftstützenseilen, die sich nahe dem Ringbalken in jeweils drei *Spreizungsseile*, s. Bild 5, aufspreizen. Die Seildurchmesser betragen 45 mm bei den Berg- und Talseilen, 91 mm bei den Luftstützenseilen sowie 51 mm und 81 mm bei den Spreizungsseilen. Die maximalen Seillängen betragen über 60 m.

Die geplanten Seilkräfte für den Lastfall „Eigengewicht und Vorspannung“, also den Zustand nach Fertigstellung des Daches (mit der Annahme, dass kein Wind wirkt) lagen bei ca. 500 kN in den Berg- und Talseilen und bis zu 3000 kN in den Luftstützenseilen.



### 3 Bauablauf und Einbringen der Vorspannung

Zunächst wurde der Ringbalken in 11 Teilsegmenten am Boden vorgefertigt und anschließend auf den Dächern der das Forum umgebenden Gebäude zusammengebaut. Zeitlich etwas verschoben wurde auch die Luftstütze aus vorgefertigten Teilstücken in ihre endgültige Form und Lage gebracht. Zur Lagefixierung und zum Zusammenbau waren ein Hilfsgerüst und zahlreiche Hilfsabspannungen notwendig.

Das untere Ende der Luftstütze war „teleskopartig“ ausgebildet, wobei der Fußpunkt mit den Anschlusslaschen für die Luftstützenseile zunächst um ca. 650 mm eingefahren war (die Luftstütze war um 650 mm kürzer als in ihrer geplanten Endlage), s. Bild 6.



**Bild 6.** Fußpunkt der Luftstütze

Nachdem die biegesteifen Bauteile, Ringbalken und Luftstütze, der Dachkonstruktion in ihrer Lage fixiert waren, wurden die Seile und die Membransegmente eingehängt. Dank der verkürzten Luftstütze konnte der Seileinbau mit relativ geringem Kraftaufwand erfolgen, da näherungsweise nur der Seilzug aus der Eigenlast der jeweiligen Seile aufgebracht werden musste.

Das Einbringen der Vorspannung in das Gesamtsystem erfolgte anschließend durch das Ausfahren des Fußpunktes der Luftstütze. Dazu wurde die Luftstütze an ihrem Fußende mittels einer hydraulischen Presse kraft- und weggesteuert über einen Zeitraum von zwei Wochen um 650 mm auseinandergespreizt. Dieser lange Zeitraum war notwendig, um dem System Zeit zur Lastumlagerung zu geben und um die verschiedensten Kontrollmessungen durchführen zu können. Die Gesamtkraft, die von der Presse aufgebracht wurde und die nun als „Vorspannkraft“ in der Luftstütze herrscht, beträgt 15 000 kN. Bei derart großen Kräften ist es verständlich, dass im Laufe der Kraftaufbringung mehrere Zwischenmessungen erforderlich waren, um eventuelle, durch Verklemmungen im System entstehende,

ungewollte Lastumlagerungen festzustellen, die zu lokalen Überbeanspruchungen mit unabsehbaren Folgen hätten führen können.

## **4 Seilkraftmessungen**

### **4.1 Allgemeines**

Die Seilkräfte wurden vor dem Vorspannen, mehrmals während des Vorspannens und nach dem Vorspannen gemessen. Dabei wurden nicht alle Seile, sondern nur die 48 Bergseile und die 16 Luftstützenseile gemessen. Die Kräfte in den Talseilen und den Spreizungsseilen hängen direkt von den anderen gemessenen Seilkräften ab, so dass sich ihre Größe über die Kenntnis der anderen Kräfte unmittelbar ergibt.

Zur Messung der Kräfte standen je nach Seilabmessungen, Randbedingungen und Montageaufwand verschiedene Methoden zur Verfügung.

### **4.2 Messung mittels hydraulischer Pressen**

Die Seilköpfe waren so ausgebildet, dass an ihnen eine hydraulische Presse derart angebracht werden konnte, dass die gesamte Seilkraft über die Presse übertragen wird, s. Bild 7.



**Bild 7.** Hydraulische Presse am Luftstützenseil

Über das Manometer der Hydraulik konnte der Druck abgelesen werden, womit bei Kenntnis der Gerätedaten (Fläche des Druckzylinders) die aufgebrachte Kraft berechnet werden konnte.

Dieses Verfahren war die direkteste und im Stahlbau die bekannteste und vertrauteste Methode der Seilkraftermittlung. Sie wurde für alle 48 Bergseile und an zwei Luftstützenseilen durchgeführt und diente auch zur Kalibrierung der anderen, weniger vertrauten Methoden.

Der Nachteil dieser Messmethode liegt aber in der Größe und dem Gewicht der Pressen, was je nach Betrag der Seilkraft erheblichen Umbauaufwand bedeutet. An den Bergseilen waren die Kräfte mit 500 kN noch relativ klein und die Zugänglichkeit der Seilköpfe am Kopf der Luftstütze war konstruktionsbedingt sehr gut. Das Pressengewicht erforderte hier zwar schon den Einsatz des Krans, die Zeit zum Umbau von einem Seilkopf zum anderen betrug aber nur ca. eine halbe Stunde.

Zur Messung der bis zu 3000 kN großen Kräfte bei den Luftstützenseilen waren sehr große Geräte erforderlich, welche zusammen mit der schlechten Zugänglichkeit der Seilköpfe mit Hilfe des Turmdrehkrans und auch des teilweise eingesetzten Autokrans einen erheblichen Zeitaufwand und enorme Kosten erforderlich machten. Der Umbauaufwand der Messgeräte von einem Seilkopf zum anderen betrug fast einen ganzen Arbeitstag, wobei lange Kranzeiten zu kalkulieren waren. Hier wurde schnell klar, dass nicht alle Zwischenmessungen an allen 16 Seilen mit dieser Methode durchgeführt werden konnten.

#### **4.3 Messung des statischen Durchhanges**

Bei dieser Methode wurde mit geodätischen Instrumenten der Seildurchhang gemessen. Mit Kenntnis der Seillänge und des Querschnitts sowie der Materialdaten war es möglich, mit den bekannten Gleichungen aus der Seilstatik die Seilkraft zu ermitteln. Vorausgesetzt wird hierbei eine gelenkige aber starre Lagerung der Seilenden, was bei den Luftstützenseilen jedoch nicht genau erfüllt ist. Der Vorteil dieses Verfahrens war, dass man von wenigen Standpunkten aus sämtliche Seile in kurzer Zeit vermessen konnte. Es waren lediglich der Theodolit an geeigneten Stellen im Forum aufzustellen und die Lagekoordinaten von jeweils drei Seilpunkten aufzumessen, wodurch diese Methode vergleichsweise schnell und billig war.

Der entscheidende Nachteil aber ist die Messgenauigkeit bei nur flachem Durchhang. Je straffer das Seil gespannt ist, desto größer wirkt sich eine auch nur geringe Messungenauigkeit bei der geodätischen Messung auf die Genauigkeit der daraus berechneten Seilkraft aus. Aus diesem Grund konnte die Messung des statischen Durchhanges nur vor dem eigentlichen Vorspannen zum Einsatz kommen, weil in diesem Bauzustand die Luftstützenseile noch einen relativ großen Durchhang aufwiesen. Dabei

wurde überprüft, ob die Seillängen planungsgemäß eingestellt waren, was immerhin eine wichtige Voraussetzung für den ersten Vorspannschritt war.

Die Messung der Bergseilkräfte war mit dieser Methode schlecht möglich, da die Membran während der Montage bereits zwischen den Seilen gespannt war und eine rechnerische Ermittlung der Seilkraft aus dem Durchhang unter Berücksichtigung der Membran zu aufwändig war, zumal sich die Geometrie von Seil zu Seil ändert.

#### **4.4 Messung mittels *Dynatension Meter***

Diese Messmethode sollte eigentlich hauptsächlich zum Einsatz kommen.

Man versprach sich auf Grund von Empfehlungen von anderen Bauvorhaben (mit jedoch völlig verschiedenen Randbedingungen) und wegen der Gerätebeschreibung des Herstellers eine schnelle, einfach durchzuführende und genaue Messung der Seilkräfte aller Seile.

Wie das Gerät genau arbeitet, war den beteiligten Bauingenieuren jedoch nicht bekannt, zumal der Hersteller aus Wettbewerbsgründen auch nicht jeden Zusammenhang nennen mochte.

Das *Dynatension Meter* musste also mehr oder weniger als „Black Box“ behandelt werden, wobei nur bekannt war, dass Schwingungen aufgenommen wurden und über den Zusammenhang von Eigenfrequenz und Seilkraft die letztere ermittelt wurde. Nach schneller Montage dieses Geräts und Eingabe der wesentlichen Seildaten, sollte am Gerät die Seilkraft abgelesen werden können. Leider funktionierte diese Vorgehensweise überhaupt nicht, es wurden nur unsinnige Werte abgelesen. Vergleichsmessungen in der Werkstatt der Stahlbaufirma Waagner Biró ergaben dagegen sehr gute Ergebnisse. Auch der Austausch des Gerätes und das Durchführen der Messungen von Technikern der Herstellerfirma brachte auf der Baustelle demgegenüber keine verwertbaren Ergebnisse.

Nach längerer Diskussion mit den Gerätebauern kristallisierte sich heraus, dass die weiche Lagerung der Seilköpfe, in deren Nähe wegen der Zugänglichkeit gemessen wurde, neben der interessanten Grundschwingung des Seiles auch eine sehr deutliche Schwingung (große messbare Amplituden) des Seilauflagers verursachte. Diese Frequenz der Lagerschwingung lag nun noch tiefer als die erste Eigenfrequenz des Seiles, was aber vom Hersteller nicht vorgesehen war, so dass keine vernünftigen Ergebnisse zu erhalten waren. Die Überlagerung der vielen anderen Grundfrequenzen der benachbarten Seile machte dem hochempfindlichen Instrument ebenfalls zu schaffen.

All diese störenden Einflüsse sind in der Werkstatt nicht zu spüren, da dort das Seil zwischen zwei wirklich nahezu festen Lagern eingespannt wurde und benachbarte dynamische Einflüsse durch Abschalten von Maschinen vermieden werden können, so dass dieses Gerät vorerst als einsatztauglich erschien.



#### 4.5 Frequenzmessung mittels Optron

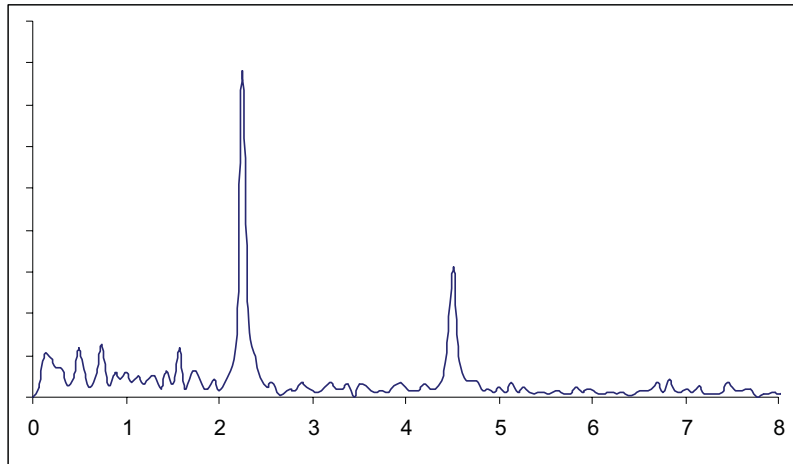
Nachdem die vorgesehenen Messmethoden für die Luftstützenseile während des Vorspannens nacheinander wegen der geschilderten Gründe ausfielen und der Terminplan zu raschem Handeln zwang, wurde auf Vorschlag des Prüfenieurs am Institut für Mechanik der TU Berlin nach den dort verfügbaren Möglichkeiten der Frequenzmessung angefragt. Dabei konnte die Machbarkeit der Messungen und die zügige Verfügbarkeit der optischen und elektronischen Messeinrichtungen geklärt werden.

Das Optron musste, ähnlich wie der Theodolit bei der geodätischen Messung, an nur zwei verschiedenen Punkten für die Messungen an allen 16 Luftstützenseilen aufgestellt werden. Mit einer Fernseh- Kamera wird dabei eine kontrastreiche Kante eines schwingenden Gegenstands aufgenommen und deren Bewegung gegenüber dem ruhenden Untergrund registriert, s. Bild 8.



**Bild 8.** Blick vom Optron zu den Luftstützenseilen

Die Seile wurden von einem Monteur am Fußpunkt der Luftstütze per Hammerschlag impulsförmig zum Schwingen angeregt. Die einzige Schwierigkeit bei der Messung mit dem Optron war, einen relativ scharfen Kontrast zwischen dem schwingenden Seil und dem ruhenden Hintergrund zu erhalten, der für die Bewegungsregistrierung erforderlich ist. Die angeschlossenen elektronischen Geräte führten vor Ort gleich eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) durch, wodurch das Frequenzspektrum mit deutlich herausragenden „Peaks“ sichtbar wurde, s. Bild 9.



**Bild 9.** Frequenzspektrum der mit dem Optron aufgezeichneten Schwingungen

Das Wissen aus den Problemen mit dem Dynatension Meter und die Kenntnis der rechnerisch ermittelten Grundschwingungen des gesamten Daches erlaubte das schnelle Auffinden der gesuchten ersten Eigenfrequenz des Seiles.

Die Vergleiche mit den beiden sehr aufwändigen Messungen an der hydraulischen Presse konnten dann diesen Schluss wie auch eine ausreichende Genauigkeit bestätigen. Mit den wesentlichen Seilparametern wurden auf der Baustelle gleich die Seilkräfte ausgerechnet. Bei dieser Vorgehensweise war es möglich, innerhalb eines halben Arbeitstages jeweils die Kräfte in allen 16 Luftstützenseilen festzustellen und die Information zum Nachjustieren der Seillängen weiterzureichen.

Als Nachteil dieser Messmethode wie auch der Messung des statischen Durchhangs muss aber noch festgehalten werden, dass sie, zumindest bei diesen Randbedingungen, nur in Verbindung mit einer „direkteren“ Vergleichsmessung angewendet werden sollte. Damit kann beispielsweise der Einfluss der elastischen Einspannung an den Vergussdüsen der Seilköpfe oder der Seilbiegesteifigkeit abgeschätzt werden. Denn auch für die Berechnung der Seilkraft aus der Grundfrequenz nach [5] wird die Kenntnis der Randbedingungen, der Steifigkeiten und der freien Seillänge vorausgesetzt.

## 5 Zusammenfassung

Bei der Messung von Seilkräften lässt sich, wie auch in anderen Bereichen der Naturwissenschaften und der Technik von vornherein nicht immer eine ideale Meßmethode voraussagen. Wie hier am Beispiel der Kraftmessungen der Stahlseile des Forumdaches aufgezeigt wird, kamen bei diesem Bauvorhaben gleich vier Messverfahren zum Einsatz.

Jedes der drei Verfahren, die sich hier als brauchbar erwiesen, hatte für sich Vor- und Nachteile und eignete sich je nach vorliegenden Seilabmessungen, Vorspanngrad und Randbedingungen. Im vorliegenden Fall konnte nur durch Kombination mehrerer Verfahren ein wirtschaftlich vertretbares und aus Gründen der Standsicherheit auch ein hinreichend genaues Ergebnis erreicht werden.

### **Am Bau Beteiligte:**

Bauherr:	Sony mit seinen Partnern Tishman Speyer & Kajima
Projektentwickler:	Tishman Speyer Properties, New York - Berlin
Architekten:	Murphy/Jahn Architects, Chicago
Tragwerksplaner:	Ove Arup & Partner USA, New York
Prüfingenieur:	Univ.- Prof. Dr.-Ing. Joachim Lindner, Berlin
Generalunternehmer:	Hochtief AG, Berlin
Subunternehmer Forumdach:	Waagner-Biro AG, Wien
Glasstatik und Montageberechnungen	Zenkner & Handel, Graz
Windkanal und Schneelastuntersuchungen:	Rowan Williams Davis Irwin – Ontario, Kanada

### **Autoren dieses Beitrags**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Lindner, Prüfingenieur für Baustatik, Richard-Strauss-Straße 27, 14193 Berlin

Dipl.-Ing. Gerhard Breitschaft, Prof. Lindner - Prüfingenieur für Baustatik, Richard-Strauss-Straße 27, 14193 Berlin

Dipl.-Ing. Johannes Thaten, Institut für Mechanik, Sekr. C8, Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

## **Literatur**

- [1] Lindner, J./ Schulte, M./ Sischka, J./ Breitschaft, G./ Clarke, R./ Handel, E./ Zenkner, G.: Das Forumdach des Sony Centers am Potsdamer Platz in Berlin, Stahlbau 68 (1999), Heft 12
- [2] DIN 18800 - 1: Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion (11.1990)
- [3] Eurocode 3, Teil 1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
- [4] Szabo, I.: Höhere Technische Mechanik, Springer-Verlag 1964
- [5] Ramberger, G.: Die Bestimmung der Normalkräfte in Zuggliedern über ihre Eigenfrequenz unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen, der Biegesteifigkeit und der Dämpfung, Der Stahlbau 10/1978

## **Messprotokolle**

- [6] Thaten, J.: Frequenzmessungen zur Bestimmung der Seilkräfte an der Dachkonstruktion des Sony Centers in Berlin, Bellevuestraße, Messprotokolle zu den Optron-Messungen 1, 2 und 3 vom 20.10., 10.11. und 22.11.1999 im Auftrag der Waagner Biró AG
- [7] Unger, W.: Hubprotokoll vom 28.10.1999, Protokoll – Überprüfung Bergseile, Talseil u. Luftstützenseil vom 1.11.1999, Protokoll – Einstellen Luftstützenseile vom 18.11.1999, Protokoll – Überprüfung Bergseile u. Luftstützenseil vom 19.11.1999  
Messprotokolle zu Messungen mittels der hydraulischen Pressen durchgeführt von der Waagner Biró AG
- [8] Tiedmann, Fuchs & Partner, Vermessungsbüro: Durchhang der Stahlseile Pos 101 bis 116  
Auszüge aus dem Feldbuch der Vermessungen des statischen Durchhangs der Luftstützenseile, vom 15.10.1999.