

**Zeitschrift:** Tec21  
**Herausgeber:** Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein  
**Band:** 142 (2016)  
**Heft:** 23: "Incidental Space" im Schweizer Pavillon

**Artikel:** Beherrschte Freiform  
**Autor:** Schwartz, Joseph  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-632758>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 06.02.2026

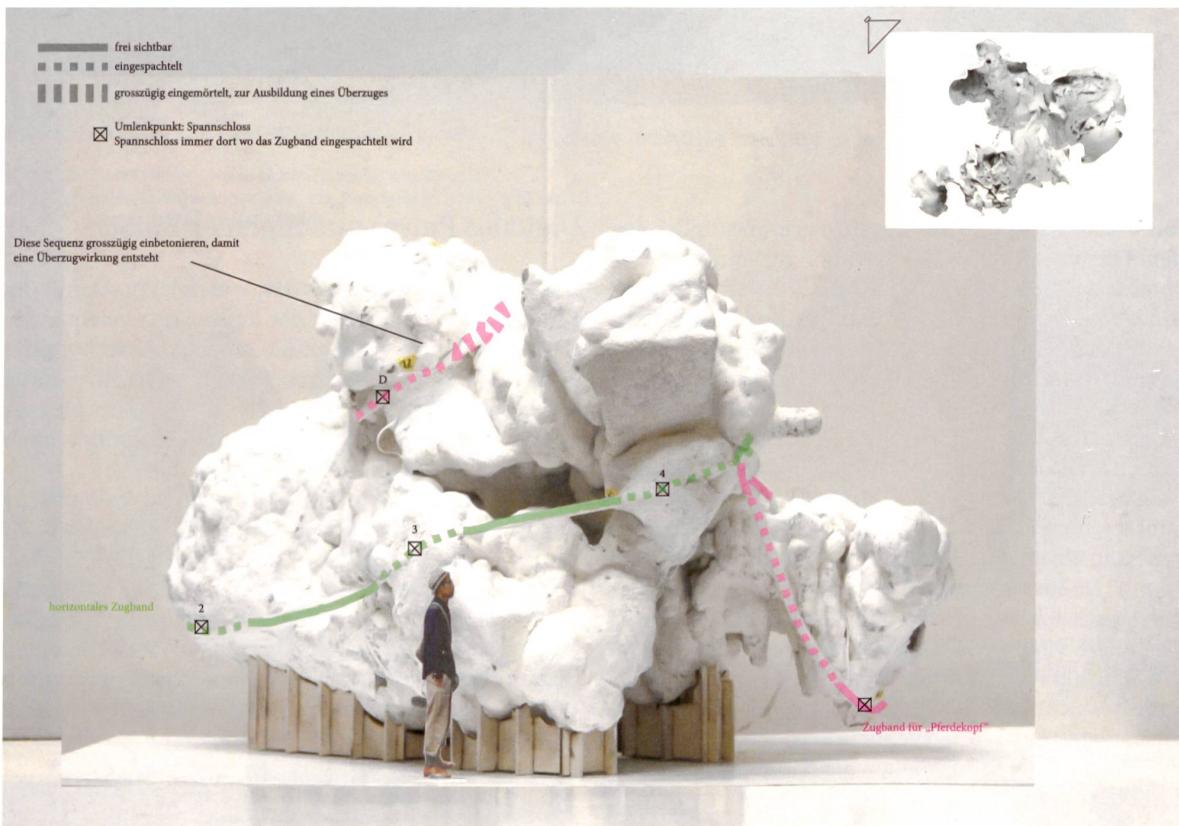
**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## TRAGWERKSENTWURF

# Beherrschte Freiform

Die Betonschale im Biennale-Pavillon ist analog zur architektonischen Raumbildung aus einem intuitiven gesteuerten Prozess abgeleitet, ihr Tragverhalten wurde mit Methoden der grafischen Statik veranschaulicht. Eine angewandte Forschung der Professur für Tragwerksentwurf der ETHZ.

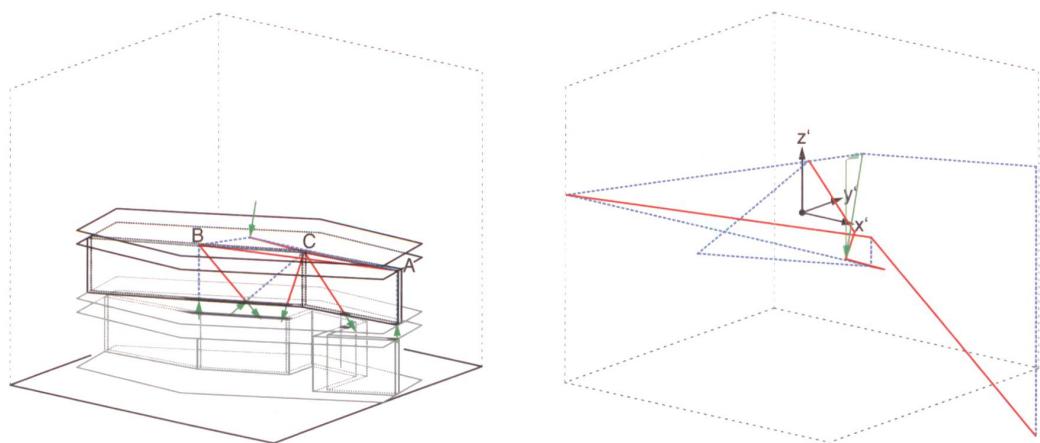
Text: Joseph Schwartz



**Modell** der Betonschale des Biennale-Pavillons.

**D**er Schweizer Pavillon für die Architekturiennale 2016 in Venedig ist auf den ersten Blick genauso wenig als Tragstruktur wie als architektonischer Raum zu erfassen und zu verstehen. Die «zufällig» entstandene Form folgt keinen Regeln, sie ist weder nach geometrischen Gesichtspunkten hergeleitet noch nach experimentell-tragwerkstechnischen Kriterien entwickelt. Sie ist eine Hülle, nichts mehr und nichts weniger.

Wie oft bei den Werken von Christian Kerez wird der architektonische Raum durch die Tragstruktur aufgespannt, es gibt keine additiven Elemente, sondern alles verschmilzt zu einer Einheit (Abb. oben). Die Suche und das Finden der Form sind nicht Thema des vorliegenden Aufsatzes. Nichtsdestotrotz scheint der Dialog mit dem Architekten insofern bedeutungsvoll, als stets über die Konsequenzen der Grundsatzentscheide diskutiert wurde. Und wie immer ging es nicht nur um das Tragverhalten, sondern vielmehr um eine ganzheitliche



Die anschauliche Gegenüberstellung von Kräften und Geometrie ist die Grundlage interdisziplinärer Interaktion. Dreidimensionaler Lage- und Kräfteplan am Beispiel des «Hauses mit einer Wand» von Christian Kerez und Joseph Schwartz.

Betrachtung mit zusätzlichen entscheidenden Aspekten wie etwa der Materialwahl, dem Konstruktionsprinzip, der Herstellungsart inklusive Transport und Montage, dem Nutzungsverhalten oder der Wirtschaftlichkeit.

### Form- und Konstruktionssuche

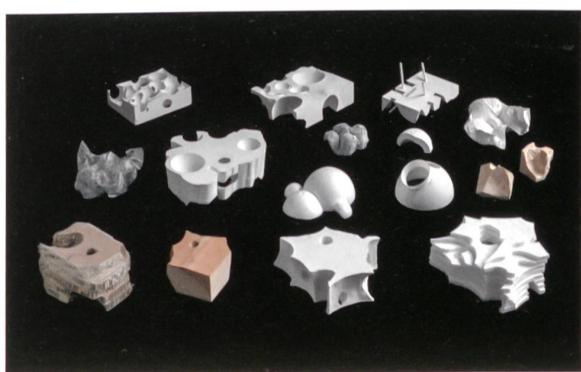
Was sind die Konsequenzen einer massiven, schweren oder leichten Bauweise? Soll das Objekt eher vorfabriziert oder in situ erstellt werden? Wie können die Arbeitsfugen – sei es bei der Vorfabrikation oder beim Betonieren vor Ort – so ausgebildet werden, dass der abstrakte Charakter der Hülle nicht beeinträchtigt wird? Soll das Objekt später abgebaut und an einem anderen Ort wieder aufgebaut werden können? Wie kann es möglichst kostengünstig realisiert werden? Inwiefern wirkt sich die Wahl eines mineralischen Materials auf die Platzverhältnisse in der Ausstellungshalle aus? Soll der Beton gespritzt, gegossen oder aufgetragen werden? Mit oder ohne diskrete Bewehrung, Vorspannung oder Fasern? Mit oder ohne Schalung welcher Art?

All diese Fragen sind eng verknüpft mit dem Tragverhalten und spannen eine komplexe mehrdimen-

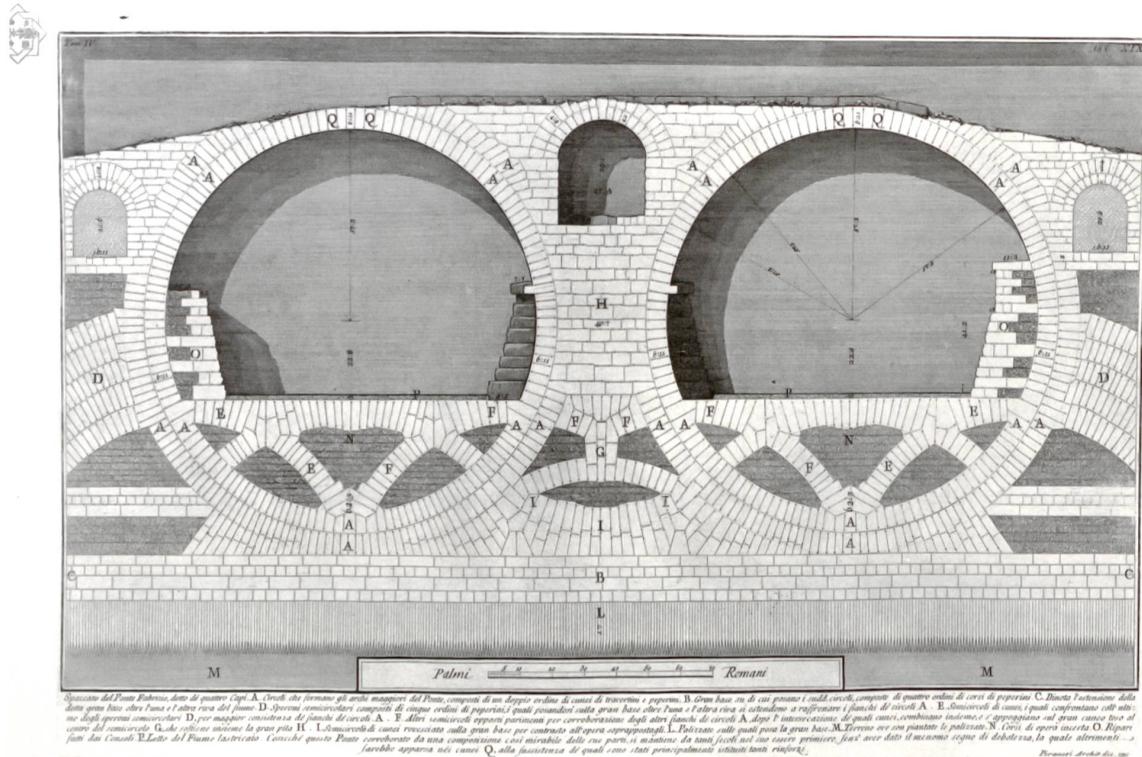
sionale Matrix auf, deren systematische Aufarbeitung genau wie beim klassischen architektonischen Entwurfsvorgehen weder zweckmäßig noch zielführend ist. Anstelle einer wissenschaftlichen Entscheidungsfindung tritt ein intuitiver, oftmals vom sogenannten Bauchgefühl gesteuerter Prozess in den Vordergrund. An die Stelle eines deduktiven Vorgehens tritt ein induktives Vorgehen, allerdings nicht etwa wie die Form des Objekts quasi vollständig dem Zufall unterworfen, sondern doch geeicht durch die harten Kriterien der Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit. Diesbezüglich waren die Diskussionen mit den involvierten Unternehmen im Rahmen der ausgesprochen intuitiven Vorgehensweise sehr wertvoll.

### Stabilität durch vielfältige Verwerfungen

Diese Fragen sind weder dem Lehrstuhl für Tragwerksentwurf noch den Ingenieuren des Büros Dr. Schwartz Consulting fremd, sondern werden laufend und ganz besonders bei der Zusammenarbeit mit dem Architekten thematisiert (vgl. TEC21 44/2009 «Schulhaus Leut- schenbach» und TEC21 11/2016 «Stahlbau nackt»). Dies



Gemeinsame Referenzen des Tandems Kerez-Schwartz. Links: Guangzhou Art Museum, Projekt 2013. Freiformschalen können durchaus klaren tragwerkstechnischen Prinzipien folgen. Rechts: Kunstmuseum Warschau, Projekt 2007–2014. Dank ihrer Krümmung weisen dünne Schalen eine außerordentliche statische Effizienz auf.



**Die kreisrunden Bögen des Pons Fabricius in Rom** (62 v. Chr) wurden tragwerkstechnisch suboptimal ausgebildet, was unter anderem mit einer entsprechenden Stärke der Bauteile kompensiert wurde. Beim Pavillon sorgen hingegen die vielfältigen Verwerfungen und die externen Zugbänder für die Stabilität der Konstruktion.

betrifft ebenfalls die Herausforderungen an das Tragverhalten der hier zu entwickelnden Raumhülle, die als Freiform interpretiert werden kann. Standen beim Entwurf der Überdachung des Kunstmuseums in Warschau geometrische Formen im Vordergrund, nämlich extrem weit gespannte Zylinderschalen (Abb. S. 29 unten rechts), so waren es beim Entwurf des Guangzhou Art Museum in China nicht minder herausfordernde Freiformschalen, die aus geometrischer Sicht frei entwickelt wurden und trotzdem klaren tragwerkstechnischen Prinzipien folgten (Abb. S. 29 unten links). Auch hier wurde der anspruchsvollen Frage der Ausführungsart mit plausiblen Lösungsansätzen begegnet. Interessant ist vor allem der Aspekt, dass vergleichsweise dünne Schalen dank ihrer sogenannten doppelten Krümmung eine ausserordentliche statische Effizienz aufweisen, was den Schalenbauern von der Antike bis zur Moderne bestens bekannt war.

In diesem Zusammenhang sei auf die Entwicklung der Steinbogentragwerke der alten Römer verwiesen. Besonders eindrücklich das Prinzip der Fabricius-Brücke in Rom, das ebenfalls bei der Raumhülle des Biennale-Pavillons eine wichtige Rolle spielt (Abb. oben). Nicht nur die Gravitationskräfte werden mittels der Bogenkrümmung aufgenommen, sondern ebenfalls die in der Fundation erzeugten Reaktionskräfte, die nicht minder gleichmäßig verteilt sind und mithilfe eines auf dem Kopf stehenden Bogens aufgenommen

werden. Sind es bei den römischen Rundbögen die Bogenstärke sowie die zusätzlichen seitlichen Drücke, die die Bögen trotz ihrer aus tragwerkstechnischer Sicht nicht optimalen Form im Gleichgewicht halten, so sind es bei der Raumhülle des Biennale-Pavillons die vielfältigen und allgegenwärtigen Verwerfungen, die der Tragstruktur eine ausserordentliche Steifigkeit verleihen. Weiter sind bei den Bogenbrücken seitliche horizontale Streben zu erkennen, die für die Umlenkung der vertikal verlaufenden Bogenkräfte zuständig sind. Die entsprechenden horizontalen Auflagerkräfte auf halber Höhe fehlen beim Biennale-Projekt und werden durch die im Bild auf S. 28 dargestellten Zugbänder ersetzt, die einem seitlichen Ausweichen der wandartigen Bereiche entgegenwirken.

Formfindung mittels grafischer Statik

Das Projekt des Biennale-Pavillonsbettet sich perfekt in die Forschungsinteressen des Lehrstuhls für Tragwerksentwurf ein. Zentrales Thema von dessen Forschung ist die Frage nach der Beziehung von Architektur und Ingenieurwissenschaften mit Fokus auf dem unterschiedlichen Verständnis der Rolle der Form. Diese Fragestellung dient als Kristallisierungspunkt für ein breit angelegtes Feld von Projekten mit dem gemeinsamen Ziel der Erforschung disziplinimmanenter Denkkategorien und der Möglichkeit interdisziplinärer

## Weitere Forschungsthemen

Die Forschungsprojekte des Lehrstuhls für Tragwerksentwurf der ETHZ entwickeln Lösungsansätze zu tragwerkstechnischen und architektonischen Fragestellungen auf Basis der Geometrie.

Dabei werden die inneren Kräfte von Freiformen mittels gekrümmter Spannungsfelder,<sup>3</sup> mittels Kombination von Hypar-Elementen,<sup>4</sup> mittels interaktiver Steuerung des inneren Kräfteverlaufs<sup>5</sup> sowie an räumlich gefalteten Strukturen<sup>6</sup> untersucht. Ein weiteres Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Herstellung von vorgespannten Freiformen mittels Vorfabrikation.<sup>7</sup>

**Interaktion.** Sowohl Lehre als auch Forschung sind getrieben von der grafischen Statik, bei der im Gegensatz zur analytischen Statik alle mathematischen Operationen vektorgeometrisch durchgeführt werden und damit frei von numerischen Berechnungen sind. Durch die geometrische Abhängigkeit entsteht ein Geflecht von Diagrammen, was dazu führt, dass die Modifikation eines beliebigen Diagramms die geometrische Anpassung der anderen Diagramme erzwingt. Damit werden die Zusammenhänge zwischen Kraft und Form auch im Raum visuell fassbar (Abb. S. 29 oben) und ermöglichen neben der Analyse einen aktiven und damit synthetischen Formfindungsprozess.<sup>1</sup>

Ein nicht nach den elementaren Kriterien eines einfachen inneren Kräfteverlaufs geformtes Flächentragwerk ist tragwerkstechnisch schwer zu erfassen, da es innerlich hochgradig statisch unbestimmt ist und sich jenseits bekannter Typologien positioniert (Abb. unten). Mit der Diskreten Analyse wurde eine Methode zur Erfassung der inneren Kräfte und des systemischen Verhaltens derartiger Strukturen entwickelt, indem das Tragsystem im Sinn des statischen Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie gleitend zwischen diskreter Gitterschale mit gelenkig verbundenen Stäben, biegesteif verbundenen Stäben sowie kontinuierlicher Schale variiert werden kann. Diese Methode eignet sich hervor-

ragend für den Einsatz im Entwurf und dient somit als Grundlage des interdisziplinären Diskurses bei der Entwicklung von Tragwerksformen jenseits bekannter Typologien, die sowohl architektonisch als auch konstruktiv zufriedenstellend sind.<sup>2</sup> Der Biennale-Pavillon ist in diesem Sinn ein willkommenes experimentelles Überprüfungsobjekt. •

*Prof. Dr. Joseph Schwartz*, Professor für Tragwerksentwurf am Institut für Technologie in der Architektur ETHZ, schwartz@arch.ethz.ch

### Anmerkungen

<sup>1</sup> Maximilian Schrems: Zur Erweiterung der «grafischen Statik» in die dritte Dimension, Dissertation, 2016.

<sup>2</sup> Thomas Kohlhammer: Strukturoptimierung von stabförmigen Flächentragwerken mittels reziproker Analyse, Dissertation, 2013.

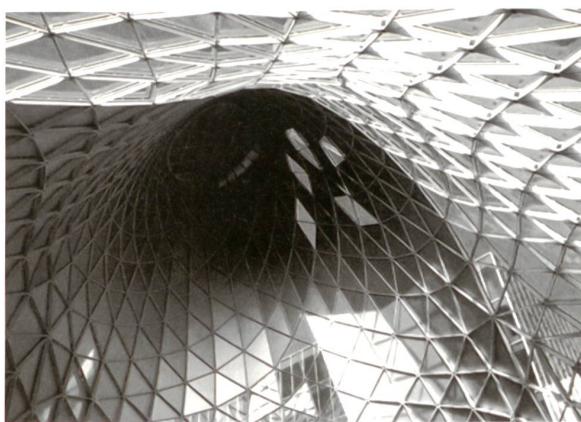
<sup>3</sup> Marco Bahr, Toni Kotnik: Strut and Tie Networks – An Approach to Numerical Curved Stress Fields, Proceedings of the IABSE-IASS Symposium, London 2011.

<sup>4</sup> Ting Cao, Joseph Schwartz, Chi Zhang: Prototypical Hypar: an operative form-making method based on Hyperbolic Paraboloids, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium – Future Visions, Amsterdam 2015.

<sup>5</sup> Patrick Ole Ohlbrock, Joseph Schwartz: Combinatorial Equilibrium Modelling, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium – Future Visions, Amsterdam 2015.

<sup>6</sup> Pierluigi D'Acunto, Juanjo Castellon: Folding Augmented: A Design Method for Structural Folding in Architecture, in: Origami 6: The Sixth International Meeting of Origami in Science, Mathematics, and Education, Koryo Miura, Toshikazu Kawasaki, Tomohiro Tachi, Ryuhei Uehara, Robert Lang, Patsy Wang-Iverson (eds.), 2014.

<sup>7</sup> Lluis Enrique, Philippe Block, Joseph Schwartz: Form-finding method for prestressed cable networks using graphic statics, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium – Future Visions, Amsterdam 2015.



**Beispiele von statisch unbestimmten, als Gitterschalen ausgebildeten Freiformflächen.** Links: Dach der neuen Messe in Mailand von Massimiliano Fuksas (2005). Rechts: Centre Pompidou in Metz von Shigeru Ban (2010).

