

Waagner-Biro Stahlbau AG  
Leonard-Bernstein-Straße 10  
A - 1220 Wien  
+43 1 28844  
+43 1 28844 7946  
[stahlbau@waagner-biro.at](mailto:stahlbau@waagner-biro.at)  
[www.waagner-biro.at](http://www.waagner-biro.at)

## **Freiformflächen – Optimierung in Theorie und Praxis**

Bei der Entwicklung von geometrisch anspruchsvollen Tragwerken spielt die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle. Ziel ist es durch verschiedene Optimierungen die Kosten solcher Lösungen möglichst nahe an die von Standardlösungen heranzubringen. Ein Ansatzpunkt dafür ist die durchgängige Automatisierung der gesamten Abläufe beginnend mit der statischen Berechnung über die gesamte Planung bis hin zu allen für die Montage relevanten Daten. Ein weiterer Aspekt ist die Optimierung der Netze mit welchen die vom Architekten vorgegebenen Formen belegt werden können. Hier gibt es beginnend mit der Wahl zwischen Dreiecks- und Vierecksnetzen aber auch verschiedenen gekrümmten Formen unterschiedliche Ansatzpunkte ohne das vom Architekten vorgegebene Konzept zu kompromittieren.

Waagner-Biro hat in den letzten Jahren in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien und Evolute sowohl im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes als auch projektspezifisch an der Entwicklung von Tools gearbeitet, welche die Optimierung von Freiformflächen in Bezug auf die nachstehend beschriebenen Aspekte ermöglichen.

Der Ausgangspunkt der diesbezüglichen Überlegungen ist das Projekt Überdachung des Great Court im British Museum in London. Hier ist dem Architekten, sowie den Ingenieuren (Norman Foster, Büro Happold) eine perfekte Symbiose zwischen alt und neu gelungen. Die Freiformfläche überspannt den Bereich zwischen dem kreisförmigen Auflager im Bereich des zentralen Readingrooms und der rechteckigen Begrenzung der benachbarten Gebäude in statisch optimaler Weise. Die Fläche ist mit einem Dreiecksnetz belegt, welches sich durch die Dynamik der Linien auszeichnet. Die Elementgröße ist bestimmt durch eine optimierte Scheibenabmessung am Außenrand, welche nach innen zuläuft. Um der Proportion der Abmessungen Rechnung zu tragen, sind die Stahlprofile gevoutet und werden zur Mitte hin kontinuierlich niedriger.

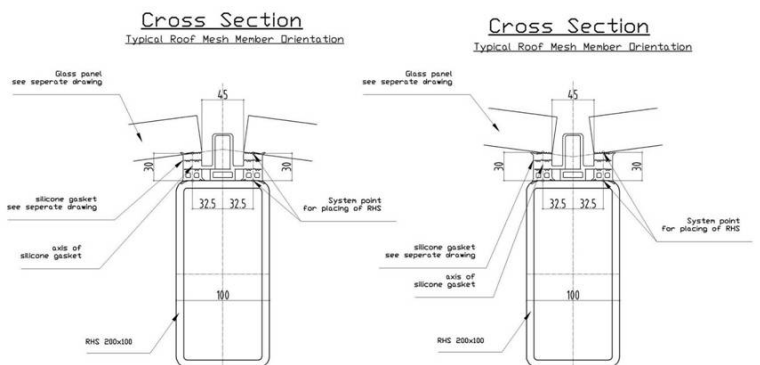


British Museum

Als nächste Entwicklungsstufe ist das Projekt Złote Tarasy in Warschau von Jerde Partnership in Zusammenarbeit mit ARUP zu erwähnen. Hier handelt es sich wiederum um ein Dreiecksnetz. Aufgrund der konvexen und konkaven Krümmungen weitere geometrische Implikationen vorhanden sind, welche die Entwicklung eines verbesserten Knotendetails erforderten. Allen Projekten gemeinsam ist das Prinzip, das Glas bzw. die Paneele über ein Dichtungsprofil direkt auf der Stahltragkonstruktion aufzulagern. Damit erscheint es logisch die Stahlprofile in der Winkelsymmetrale der angrenzenden Scheiben zu positionieren. Von diesem Prinzip abzuweichen um größere Verdrehungen der angrenzenden Stäbe im Knotenbereich zu vermeiden ist ebenfalls eine sowohl konstruktiv als auch optisch interessante Möglichkeit der Optimierung.

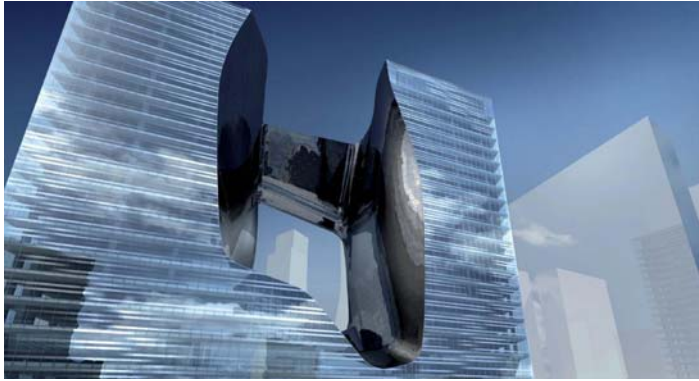


Złote Tarasy

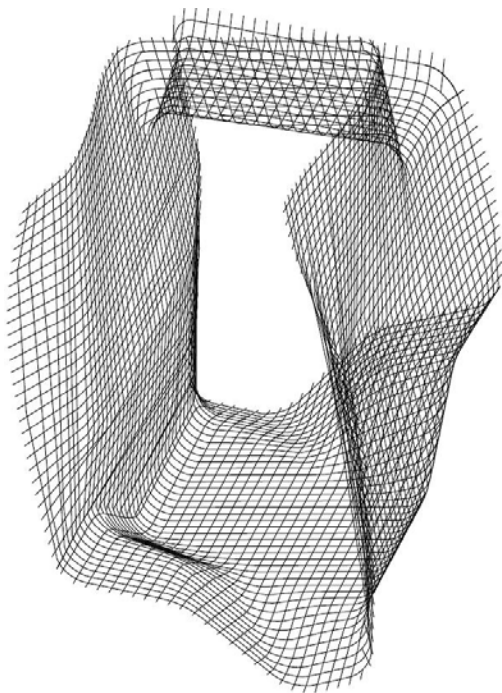


Sowohl bei Glas als auch bei Metallpaneelen als mögliche Eindeckungen ergeben sich Extrakosten beim Einsatz von dreieckigen Elementen. Demzufolge wären von einem wirtschaftlichen Standpunkt aus gesehen Vierecksnetze kostengünstiger. Für diese bestehen jedoch Restriktionen im Hinblick auf die möglichen Flächen unter Berücksichtigung des Einsatzes von ebenen Vierecken. Daraus abgeleitet wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher es ermöglicht vorgegebene Freiformen unter Berücksichtigung einer maximal

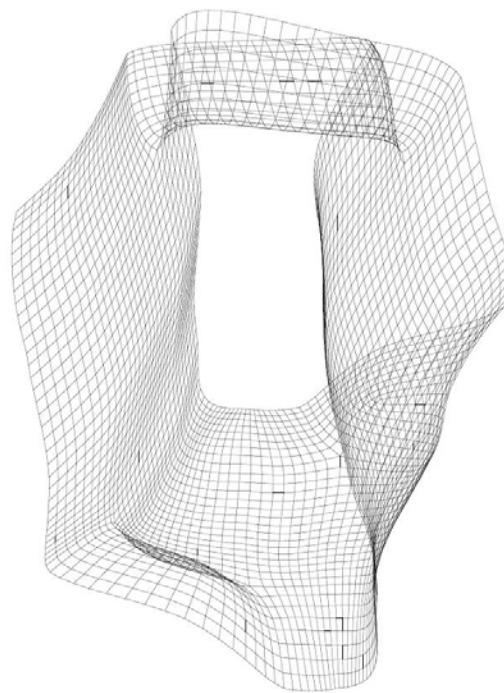
zulässigen Abweichung von dieser Form mit einem Vierecksnetz zu belegen. Dabei kann wahlweise auch eine gewisse Abweichung aus der Ebene zugelassen werden, welche z.B. durch Kaltverformung der Elemente beim Einbau realisiert werden können. Als Beispiel für diese Optimierung ist das Projekt Opus von Zaha Hadid angeführt. Hier ist es gelungen ein vorgegebenes Netz mit ebenen Vierecken zu belegen und dabei auch die Restriktionen durch die einzelnen Deckenebenen zu berücksichtigen.



Opus

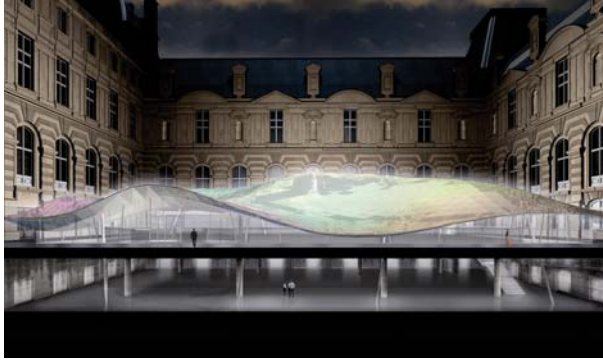


3D-Grid / Base Tender Design

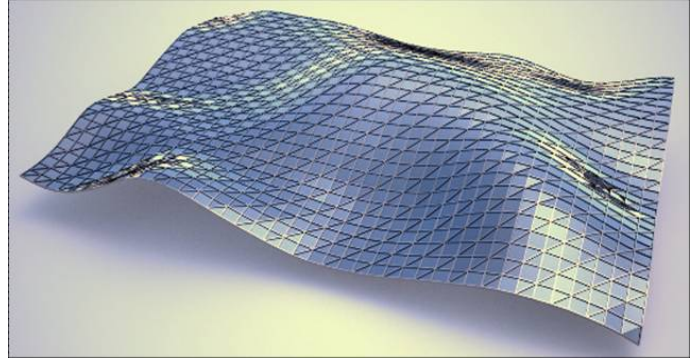


3D-Grid / Waagner Biro Design

Ebenfalls architektonisch interessant kann eine Kombination von Dreiecks- und Vierecksnetzen sein. Damit ist mehr Flexibilität bezüglich der möglichen Formen gegeben und es kann zumindest teilweise ebenfalls der wirtschaftliche Vorteil der viereckigen Elemente genutzt werden. Ein Beispiel dafür ist das Netz für eine Hofüberdachung eines Innenhofes im Louvre in Paris von Mario Bellini.



Louvre Paris, Quelle Mario Bellini



Quelle Evolute

Bei den vorgenannten Überlegungen bildet jeweils ein ebenes Element die Eindeckung. Damit ergibt sich grundsätzlich ein facettierter Eindruck der Fläche, welcher je nach Krümmung, Elementgröße und Blickwinkel mehr oder weniger in Erscheinung tritt. Grundsätzlich ist dieser jeweils von außen betrachtet deutlicher wahrnehmbar. Sollte der Architekt diesen Effekt vermeiden wollen, besteht die Möglichkeit gekrümmte Elemente einzusetzen. Dies ist in jedem Fall ein Kostenfaktor, dessen Auswirkung jedoch wiederum durch eine entsprechende Optimierung der Geometrien minimiert werden kann. Ein möglicher Aspekt dabei ist die Krümmung eines Elementes bis zu einem Mindestradius, welcher durch Kaltverformen erzielt werden kann wie z.B. bei Cold Bent Glass, eventuell auch in Kombination mit einem maximal zulässigen Knickwinkel zwischen angrenzenden Elementen. Bezogen auf Glas ist auch der Einsatz von zylindrisch gebogenen Formen sowohl technisch als auch wirtschaftlich vorzuziehen. Im Gegensatz zu konischen Formen und doppelt gekrümmten Flächen kann vorgespanntes Glas eingesetzt werden und der Produktionsprozess ist insgesamt ökonomischer. Sofern doppelt gekrümmte Flächen notwendig werden, bietet die Verwendung von gleichen Elementen oder zumindest gleichen Krümmungen und damit wiederholtem Einsatz gleicher Formen ein interessantes Potential. Ein diesbezügliches Beispiel ist das Projekt National Holding Headquarters Abu Dhabi von Zaha Hadid. Hier ist es durch Optimierung gelungen, den flächenmäßigen Anteil der ebenen Elemente von 29,3% auf 41% zu steigern bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamtanzahl der Elemente von 9.651 auf 7.265 Stück. Leider ist dieses Projekt wie auch das zuvor erwähnte Opus der wirtschaftlichen Situation zum Opfer gefallen und wurde daher bis dato nicht realisiert.



National Holding

File name	Info	Modifications	Flat		Single Curved		Double Curved		Total	
			Area [m2]	%	Area [m2]	%	Area [m2]	%	Area [m2]	%
Tender geometry ZHA / RWB	Area [m2]	kinkangle = 3°	4.388 m2	29,3%	7.669 m2	51,2%	2.926 m2	19,5%	14.983 m2	100,0%
Tender geometry ZHA / RWB	Panels quantity	kinkangle = 3°	2.231 pcs	23,1%	5.076 pcs	52,6%	2.344 pcs	24,3%	9.651 pcs	100,0%
Tender geometry WB analysis	Area [m2]	kinkangle = 3°	4.300 m2	28,7%	6.113 m2	40,8%	4.570 m2	30,5%	14.983 m2	100,0%
Tender geometry WB analysis	Quantity of panels	kinkangle = 3°	2.131 pcs	22,1%	3.947 pcs	40,9%	3.573 pcs	37,0%	9.651 pcs	100,0%
WB - 1st Geometry Modification	Quantity of panels	Omit T-Junctions; increase individual panel size	1.604 pcs	22,1%	2.971 pcs	40,9%	2.689 pcs	37,0%	7.264 pcs	100,0%
WB - 2nd Geometry Modification	Quantity of panels	kinkangle = 3°, cold bending max. 15mm (flat-panels), no cold bending (double curved) changed the glazing-seams	2.058 pcs	28,3%	2.656 pcs	36,6%	2.551 pcs	35,1%	7.265 pcs	100,0%
WB - 3rd Geometry Modification	Quantity of panels	kinkangle = 5°, cold bending max. 15mm (flat-panels), no cold bending (double curved) changed the glazing-seams	2.978 pcs	41,0%	2.180 pcs	30,0%	2.107 pcs	29,0%	7.265 pcs	100,0%

Entwicklungsstufen Geometrie zusammen mit Evolute

Wie oben gezeigt, gibt es verschiedene Ansatzpunkte der Optimierung sowohl in visueller also auch ökonomischer Hinsicht. Ziel dabei sollte es jeweils sein, eine Win-Win-Situation zu erzeugen bei der einerseits wirtschaftliche Vorteile lukriert, aber auch Verbesserungen in ästhetischer Hinsicht erreicht werden. Die Aufgabe des Ingenieurs dabei ist es ein Verständnis für die Geometrie und daraus resultierende Implikationen zu entwickeln, dem Architekten die verschiedenen Möglichkeiten aufzuzeigen und das Tragwerk gemeinsam mit diesem weiterzuentwickeln.