# **Die Welle von Kristiansand** - Unikate in der Serienproduktion

The Kristiansand wave - series production for one-off solutions

La vague de Kristiansand - l'unique réalisé en production sérielle

> Franz Tschümperlin Dipl.-Ing. FH SJB.Kempter.Fitze AG Eschenbach, Schweiz



# **Die Welle von Kristiansand** - Unikate in der Serienproduktion

#### 1. Ausgangslage

Kristiansand liegt im Südwesten von Norwegen und nimmt eine Zentrumsfunktion für die Region Agder einnimmt. Nachdem weder das ansässige Symphonie-Orchester noch die Theater-Hochschule geeignete Räume für Vorstellungen zur Verfügung hatte, wurde 2002 entschieden, dass ein Konzert- und Theaterhaus in Kristiansand erstellt werden soll.

Der Architekturwettbewerb wurde von ALA Architects von Helsinki im Jahr 2005 gewonnen. Das Kernstück der Aussenansichten war dabei eine Wellenfront aus 3'500m<sup>2</sup> astfreier norwegischer Eiche.

Die Eröffnung ist für den Frühling 2012 geplant.

#### Konzeptentwicklung 2.

# 2.1. Ausschreibung

Die Idee war , dass sich die Fassade ab einer Traufkante in 22m Höhe wie ein im Wind wehender Vorhang nach hinten schwingt.

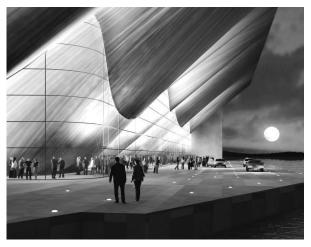




Abbildung 1: Visualisierung Wettbewerb ©ALA

Abbildung 2: Visualisierung ©ALA

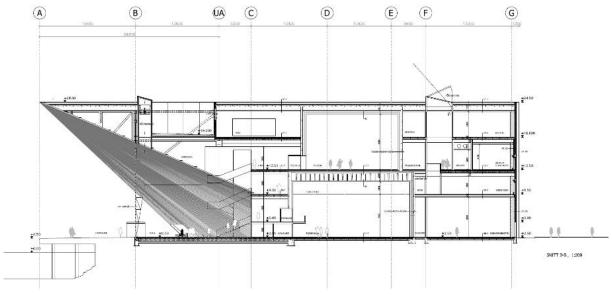
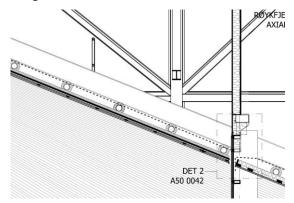


Abbildung 3: Schnitt Bauprojekt

Das Konzept ist dabei gegeben. Gerade Stahlträger folgen der Falllinie bis zum Boden. Die Fassade sollte dabei von vorgängig gebogenen Stahlrohren getragen werden, welche entlang der Höhenlinien an der komplexen Stahlunterkonstruktion angeschweisst werden. Auf einer mehrlagigen dünnen Holzunterkonstruktion sollten dann die Eichenbretter aufgeschraubt werden.



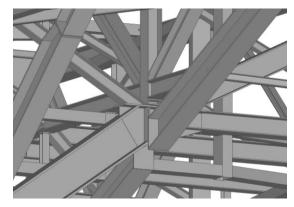


Abbildung 4: Konzept Bauprojekt

Abbildung 5: Stahlunterkonstruktion im Randbereich

Damit die gewellte Fläche mit geraden Eichenbrettern verschalt werden kann, müssen diese exakt ausgerichtet sein und nach oben schmaler werden, was bei der Montage vor Ort einen immensen Aufwand generiert.

Die Hauptproblematik war jedoch das individuelle Biegen der mehreren tausend Laufmeter Stahlrohre da Biegemaschinen nur in der Lage sind, Kreisbogensegmente herzustellen. Aufgrund der Wellenform ändert der Radius aber kontinuierlich. Man versuchte diese Form mit kurzen Rohrstücke zu stossen und so anzunähern. Diese durchgeschweissten Stösse führen aber zu einer ungenügenden Präzision.

Das angefertigte Mockup zeigte diese Punkte auf und konnte so die Anforderungen der Bauherrschaft nicht erfüllen.

## 2.2. Vorschlag Trebyggeriet

Der ortsansässige Holzbauer Trebyggeriet hat sich zum Ziel gesetzt, der Bauherrschaft eine Unternehmervariante zu unterbreiten. Das Unternehmen will dabei die Stahl-unterkonstruktion durch eine Holzunterkonstruktion ersetzen.

Bald war die elementierte Herstellung im Vordergrund der Überlegungen, damit die Montage über Kopf vor Ort reduziert (Temperatur im Winter) und die Präzision gesteigert werden kann.

Im Juli 2009 konnte die Bauherrschaft mit dem "Trebyggeriet Mockup I" und einem Besuch der Baustelle des Centre Pompidou in Metz überzeugt werden und die Detailplanungen wurden in Angriff genommen.



Abbildung 6: "Mockup Trebyggeriet"

#### 3. Masterfläche

Die Masterfläche wurde von den Architekten bereitgestellt und besitzt eine gerade Oberkante, orthogonale Falllinien und eine geschwungenen Unterkante.

Dies ermöglicht, dass die Bretter entlang der Falllinie nur tordiert und nicht gebogen werden müssen.

Designtoproduction als Spezialist für parametrische Planung stellte fest, dass diese Regel in einem Bereich gebrochen wurde und die Bretter so auch gebogen werden müssen.

Es stellte sich heraus, dass die Regel aufgrund des erforderlichen Zugangs zu einem der Säle angepasst wurde. Da sich dieser Saal bereits im Rohbau befand, musste die Unterkante verschoben werden, bis die Regel wieder eingehalten werden konnte. Aber auch Unstetigkeiten der Krümmungsverläufe mussten eliminiert werden.

So wurde die gesamte Masterfläche im Hinblick auf die digitale Fertigung nochmals aufwendig überarbeitet.

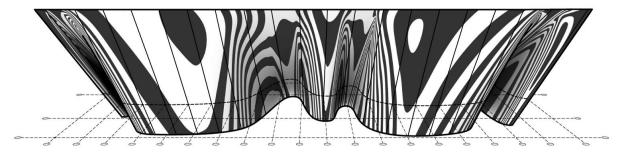


Abbildung 7: Masterfläche der Ausführung

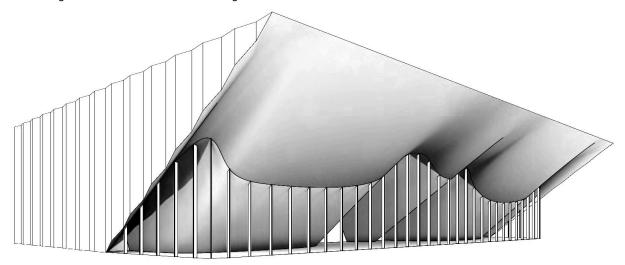


Abbildung 8: Axonometrie mit fertiger Masterfläche und Glasfassade

#### 4. Konstruktion

#### 4.1. Prinzip

Ende Oktober 2009 war die Masterfläche genügend präzise definiert, dass darauf aufgebaut werden konnte.

Die Fassade wurde in 126 Elemente aufgeteilt, wobei das Aufrichten in vertikaler Richtung von unten erfolgen soll.

Die Elemente bestehen aus zwei geraden Trägern aus Brettschichtholz (BSH), zwischen denen bis zu 13 individuelle gekrümmte BSH-Träger die jeweilige Form des Elementes definieren. An diesen Trägern werden dann die Eichenbretter befestigt.

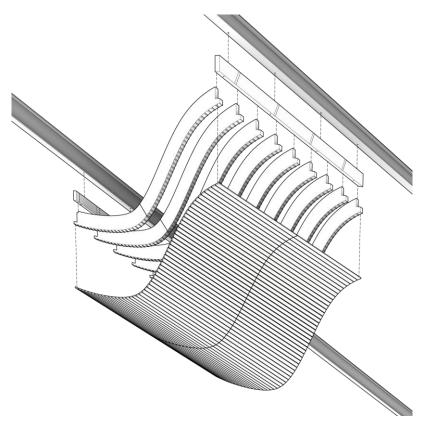


Abbildung 9: Prinzip der Elemente

### 4.2. Statisches Modell

Jede Brettschichtholzrippe ist entsprechend modelliert. So kann über parametrisierte Bemessung jede Rippe an x-beliebiger Stelle nachgewiesen werden, wobei der Faseranschnittwinkel entsprechend berücksichtigt werden kann.

Die Rippen weisen teilweise Materialwechsel von BSH auf Brettsperrholz oder zu Furnierschichtholz auf. Dies geschieht dort, wo jeweils die Krümmungen zu gross oder die Belastungen zu stark für das BSH sind. Die Verbindungen geschehen dabei mit aussenliegenden Stahlblechen.

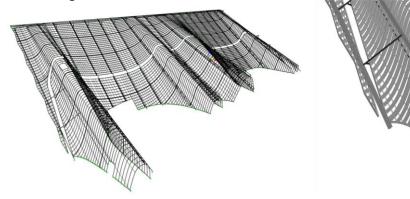


Abbildung 10: Axo Statikmodell

Abbildung 11: Axo-Rendering vom Statikmodell

Die Unterkonstruktion in Stahl ist ebenfalls im Modell enthalten da die Verformungen unter Last nicht vernachlässigt werden konnten.

Die grossen Herausforderungen liegen dabei in den Randbereichen der Fassade in Kombination mit der beträchtlichen Temperaturausdehnung der Stahlkonstruktion. Hier sind auch die zweisinnig gekrümmten Bauteile zu finden.

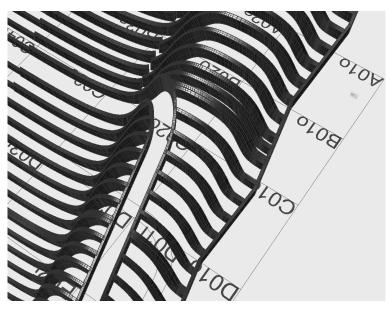


Abbildung 12: Randbereich mit Fassadenschlitz

#### 4.3. Schnittstelle zur Unterkonstruktion

Die Elemente hängen mit Bolzen an den unteren Flanschen der Stahlträger. Mit dem Austausch der Information der Bohrungen hatte man ein Minimum an Koordination mit dem Stahlbauer.

Aufgrund des Baufortschritts, war die Stahlunterkonstruktion zu Beginn der Produktion grösstenteils aufgerichtet. Dies ermöglichte die Kontrolle der Abmessungen vor Ort wie auch der Position der Flanschbohrungen. So konnte auf grössere Abweichungen reagiert werden.

Gleichzeitig ist eine 30mm-Sperrholzplatte bei den Befestigungspunkten eingefügt, um auf eine allfällig zu tiefe Position des Stahlträgers reagieren zu können. Auch diese Korrektur wurde bei dieser Aufnahme vor Ort bereits ermittelt.

Diese Bolzen sind allesamt im Statikmodell integriert, damit auf zu schwache Flanschwiderstände reagiert werden konnte.

#### 5. **Produktion**

## 5.1. Optimierung der Rohlinge

Einer der wichtigsten Schritte ist die Bestimmung der Rippenrohlinge unter Berücksichtigung des Holzverbrauchs, der statischen Erfordernisse, der Bearbeitungsmöglichkeiten und der Logistik.

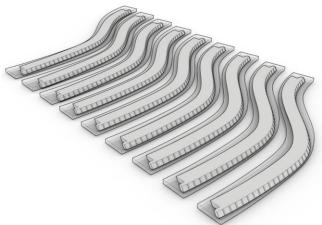


Abbildung 13: Rippenvolumen im Rohling und kontinuierliche Änderung

#### 5.2. Seat-Cuts

Nach ausführlichen Diskussionen, wie die Bretter bei der Vormontage eingeteilt werden sollen, hat man sich entschieden, sogenannte Seat-Cuts zu fräsen um über die NC-Daten die Positionierung der Eichenbretter zu steuern. Das Team um Trebyggeriet und Blumer-Lehmann war sich einig, dass es anderweitig nicht möglich sein wird, einen seitlichen Versatz über die Elementlängsstösse zu vermeiden





Abbildung 14: Seat-Cut

Abbildung 15: Fugenbild über Elementstoss

### 5.3. Fräsarbeiten

Die gekrümmten Rippen wurden bei Blumer-Lehmann auf einer 5-Achs NC-Anlage produziert. Insbesondere die Vielzahl von Bearbeitungen war eine grosse Herausforderung.



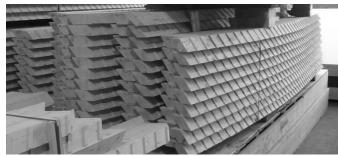




Abbildung 16: Produktionsfotos Rippen

Die Eichenbretter hingegen wurden bei Risør Trebåtbyggeri maschinell bearbeitet, wobei eine ausgeklügelte Nummerierung unerlässlich ist. Jedes dieser Bretter passt ausschliesslich an einer Stelle in der gesamten Fassade. Gleichzeitig werden zwei Bretter beim Unterschreiten einer minimalen Breite zu einem breiteren Brett zusammengefasst. Auch diese Übergänge mussten minutiös geplant werden, damit diese vom Betrachter kaum erfasst werden. Ebenfalls per CNC-Technologie wurden die Schrauben und deren Flickzapfen vorgebohrt.





Abbildung 17: Auflösen von einzelnen Brettern

Abbildung 18: Eichenbretter mit Laufblätter

## 5.4. Montage

Die Vormontage fand in der Werft von Risør Trebåtbyggeri statt, da diese wie die Baustelle direkt am Meer liegt, über genügend Fläche verfügt und die übergrossen Elemente über den Seeweg auf die Baustelle transportiert wurden. Hierbei wurde jedes Element während dem Prozess auf seine Geometrie hin überprüft. Auch die Erstellung der Pläne wurde so aufbereitet, dass diese automatisch generiert werden konnten. Die Montagearbeiten wurden ein gutes Jahr nach Vertragsabschluss im Dezember 2010 abgeschlossen.

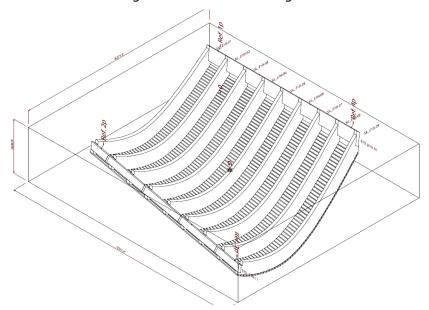


Abbildung 19: Elementplan mit Kontrollpunkten



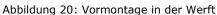




Abbildung 21: Montage

#### **Impressionen & Beteiligte** 6.



Abbildung 22: Ansicht Süd

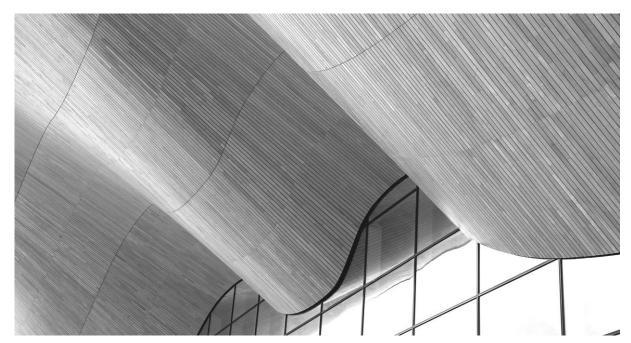


Abbildung 23: Detailansicht Fassade

Bauherrschaft: Kilden IKS, Kristiansand (N)

ALA Arkitekter AS, Helsinki (FIN)und Architekten:

SMS Arkitekter AS, Kristiansand (N)

GU: AF Gruppen AS, Oslo (N)

Holzbau und Montage: Trebyggeriet AS, Hornnes (N) Blumer-Lehmann, Gossau (CH) CNC-Fertigung Rippen: Risør-Trebåtbyggeri, Risør (N) CNC-Fertigung Schalung: Risør-Trebåtbyggeri, Risør (N) Vormontage:

SJB.Kempter.Fitze AG, Eschenbach (CH) Ing. Holzfassade: Parametrische Planung: designtoproduction GmbH, Erlenbach (CH)

Kilden in Zahlen:

Anzahl Elemente: 126 Individuelle Eichenbretter 12`248 BSH-Träger gerade: 292 Bohrungen für Schrauben 125,000 BSH-Rippen 1`769 Fläche abgewickelt 3\500 m<sup>2</sup>