

## CFK-Valley Stade

# Integrale Freiformtragwerke aus Faserverbundwerkstoffen

## Einsatz innovativer Materialien im Europäischen Bauwesen

**Durch den gleichzeitigen Einsatz von modernen Planungs- und Fertigungsmethoden und innovativen Materialien wurde mit der Freiform-Raumskulptur Virtual Tectonics 1 eine komplexe Geometrie höchster Präzision gefertigt. Dabei wurden die hohen Anforderungen an Standortsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Nachhaltigkeit erfüllt. Als Symbol für die Einsatzmöglichkeiten von Faserverbundwerkstoffen (speziell von CFK und GFK) im Bauwesen stellen die während des Projektes gesammelten Erfahrungen eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung integraler Tragwerke aus Faserverbundstoffen im Bauwesen dar.**

Aktuell erleben wir eine Renaissance der frühen Visionen [1] für die Verwendung faserverstärkter Kunststoffe als Tragwerke des Bauwesens. Während zum Beispiel in den Emiraten schon heute mit Faserverbundwerkstoffen im größeren Maßstab gebaut wird, ist der Einsatz in Europa noch auf Sonderfälle beschränkt. Die Gründe hierfür liegen in der geringen Erfahrung bei Planung und Genehmigung, im Brandschutz sowie insbesondere in den hohen Produktionskosten. Daher kann die Entwicklung von neuen Fertigungsmethoden als Schlüssel für den gewünschten Durchbruch im europäischen Bauwesen angesehen werden.



Abb. 3: Gliederung in primäre Bauelemente

Fig. 3: Layout of the primary construction elements

Wohl bekanntestes Zeugnis der frühen Arbeiten mit Kunststoffen im Bauwesen ist das Futuro-House

[2]. Der 36m<sup>2</sup> große Rundbau wurde 1968 von dem finnischen Architekten Matti Suuronen entwickelt und in Serie produziert. Es besteht aus glasfaserverstärktem Polyester mit einer Dämmung aus Polyurethan und kann aufgrund seines geringen Gewichtes mit Transporthubschraubern auch in schwieriges Gelände gebracht werden. Seine Widerstandsfähigkeit beweist es als Aufenthaltsraum für Forscher in der Arktis und genießt einen Kultstatus als feste Referenz für das visionäre Bauen mit Faserverbundwerkstoffen. Für integrale Tragwerke des modernen Bauwesens haben sich Faserverbundwerkstoffe wie zum Beispiel CFK aus den genannten Gründen noch nicht durchsetzen können. So ist es bei der Idee des 2002 von Peter Testa und Devyn Weiser vorgestellten Carbon Tower [3] geblieben. Heute wird beispielsweise an der Entwicklung von vereinfachten Herstellungsmethoden für Bauteile und Gebäude wieder verstärkt geforscht. So konnte an der Universität Stuttgart vor kurzem mittels eines computergesteuerten Roboterarms der 29m<sup>2</sup> Grundfläche überdeckende Forschungspavillon 2012 des ICD und ITKE [4] hergestellt werden. Dabei wurden mit Matrix bestrichene Fäden um eine Stahlunterkonstruktion gewickelt. Mit den sogenannten 3D-Druckern wird bereits der nächste große Schritt in der Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen vorbereitet. Nachdem die Technologie hierfür bereits im Bereich des Solid Prototyping in der Anwendung ist, werden bald auch Bauteile mit im Bauwesen relevanten Größenordnungen kostengünstig und mit hoher gleichbleibender Qualität hergestellt werden können. Dieser Artikel soll am Beispiel der Freiform-Raumskulptur Virtual Tectonics 1 über die in einer interdisziplinären Kooperation gewonnenen Erkenntnisse über die Besonderheiten von Planung und Fertigung integraler Freiformtragwerke im Bauwesen berichten.

### Idee und Architektur Virtual Tectonics

Die Freiform-Raumskulptur Virtual Tectonics 1 vom Hamburger Architekturbüro BAT ist in interdisziplinärer Zusammenarbeit entwickelt und realisiert worden. Die Skulptur soll Symbol für die besonderen Möglichkeiten des Einsatzes von Faserverbundwerkstoffen, speziell von CFK und GFK, im Bauwesen sein. Ziel ist es auch, die hohe Präzision der Bauweise aufzuzeigen. Entwurfsleitende Qualitäten für die abstrakte Freiform-

Raumskulptur sind daher die hohe Festigkeit bei geringen Querschnitten, freie Formbarkeit und die glatten Oberflächen dieser Faserverbundwerkstoffe. Die im Computer in Anlehnung an ein verknotetes Endlosband entwickelte Freiform-Geometrie erzeugt den Effekt, dass die 2,30m hohe Raumskulptur je nach Standort des Betrachters anders erscheint. Obwohl die Distanz zwischen den Auflagerpunkten nur 2,14m beträgt, spannt das verwundene Band in jedem der drei Flügel mit einer Länge von 11m frei. Die Dicke des primär als GFK-Sandwich hergestellten Bandes beträgt dabei an jeder Stelle nur 10cm. Entwurfsbestimmend war zusätzlich der Gedanke der Nachhaltigkeit. Virtual Tectonics 1 sollte nicht nur für den einmaligen bzw. zeitlich begrenzten Einsatz konzipiert werden, sondern universell für eine dauerhafte Aufstellung an unterschiedlichen Orten und auch im öffentlichen Raum geeignet sein. Dies war insbesondere bei Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sowie bei den Vorrüstungen für wiederholte Montage und Demontage auf geeignete Weise zu berücksichtigen.

### Engineering

Die initiale Geometrie von Virtual Tectonics 1 war im digitalen Entwurfsprozess noch ohne genaue Kenntnis der verfügbaren Materialien, der bauaufsichtlichen und tragwerksplanerischen Erfordernisse, der Fertigungsmethode, der Fugestellen und der Gründungsverhältnisse entwickelt worden. Die technische Bearbeitung erfolgte im Ingenieurbüro Dr. Binnewies, welches mit der Planung von Freiformtragwerken vertraut ist [9,10,11]. Angesichts des begrenzten Budgets und der unter anderem hieraus eingeschränkten Verfügbarkeit an Materialien galt es zunächst die Machbarkeit und Genehmigungsfähigkeit sicherzustellen und dabei die Bauteildicke unter ausgewogener Berücksichtigung der gestalterischen, der tragwerksplanerischen und fertigungstechnischen Anforderungen festzulegen. Insbesondere die geplante Aufstellung der Skulptur im öffentlichen Raum und die damit verbundene freie Zugänglichkeit für Personen erforderte eine Dimensionierung zugleich in statischer Hinsicht als auch gegenüber Wind- und Personeninduzierten Schwingungen. Standortsspezifische Parameter wie Wind-, Schneelasten und Baugrundbedingungen waren dabei ebenso bestimmend wie der für Fertigung sowie für Montage und Demontage zur Verfügung stehende Zeitrahmen.



Abb. 2: Virtual Tectonics 1 auf der IBA in Hamburg 2013

Fig. 2: Virtual Tectonics 1 at the IBA in Hamburg 2013

Zur Ermöglichung einer praxis- und sponsorengerechten Arbeitsteilung bei Planung, Fertigung und Montage wurde eine ingenieurmäßige Gliederung der Skulptur in vier primäre Bauelemente (Abb. 3) vorgenommen: Flügel, Lasteinleitung, Interfaces und Gründung.

### Flügel

Aus Fertigungs- und Transportgründen ist die rotationssymmetrische Skulptur in drei identische Flügel aufgeteilt. Die mit einer konstanten Dicke von 100mm ausgeführten Flügel bestehen in den Regelbereichen aus einer Sandwichkonstruktion, welche aus einem mit 4,5mm dicken GFK-Laminat allseitig laminierten Hartschaumkern gefertigt ist. Die Stoßstellen zwischen den Flügeln sind beanspruchungsgerecht im Bereich der Rotationsachse angeordnet und mittels einlaminiertes Stahlbauteile praktisch unsichtbar ausgeführt.

### Lasteinleitung

An den Auflagerpunkten sind in das hier mit hochfestem Hartschaumkern ausgeführte GFK-Sandwich zusätzlich trapezförmige Verstärkungsplatten aus 10mm CFK integriert, die gleichzeitig der Aufnahme von jeweils vier Edelstahl-Gewindestangen M20 zur Verankerung dienen.

### Interface

Die sogenannten Interfaces zwischen Gründung und Skulptur sind als geschweißte Stahlbaukonstruktion ausgeführt und dienen als kostengünstige und montagefreundliche Adapter zwischen den mit sehr großer Präzision gefertigten Flügeln und den Gründungsbauteilen aus Stahlbeton. Für die Bemessung der Interfaces war insbesondere die Sicherstellung einer definierten (Torsions-) Einspannung der Skulptur in die Gründung relevant.

### Gründung

Die bei der IBA in Hamburg [8] ausgeführte Gründung besteht aus drei Stahlbeton-Einzel-fundamenten (C20/25, d=30cm), welche sich durch eine zwischen den Fundamenten verdickt ausgeführte Sauberkeitsschicht gegen seitig auch gegen Torsionsverdrehungen sichern. Das defi-

nierte Zusammenspiel der primären Bauelemente war erforderlich, um eine hinreichende Einspannung der Skulptur im Bereich der Gründung zu gewährleisten. Nur auf diesem Wege konnten die Verformungen und Schwingungen der schlanken Skulptur auf ein auch gegen Vandalismus sicheres Maß begrenzt werden.

### Fertigung

Bei der Auswahl des Fertigungsverfahrens für Faserverbundbauteile sind zugleich die Stückzahl

allen Beteiligten, also die Umsetzung eines Digital Workflow. Für die Fertigung der Flügel konnte die Fa. Hahlbrock auf Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten zurückgreifen. Die Fertigung erfolgte daher in einem Verfahren, in dem quasi von innen nach außen zur späteren Sichtfläche hin gearbeitet wird. Somit konnte auf die zeitaufwendige Herstellung klassischer Formwerkzeuge verzichtet werden. Die globale Formgebung erfolgte durch untermassiges Fräsen von Sandwichkernen aus einem PVC-Hartschaumstoff, der zunächst durch

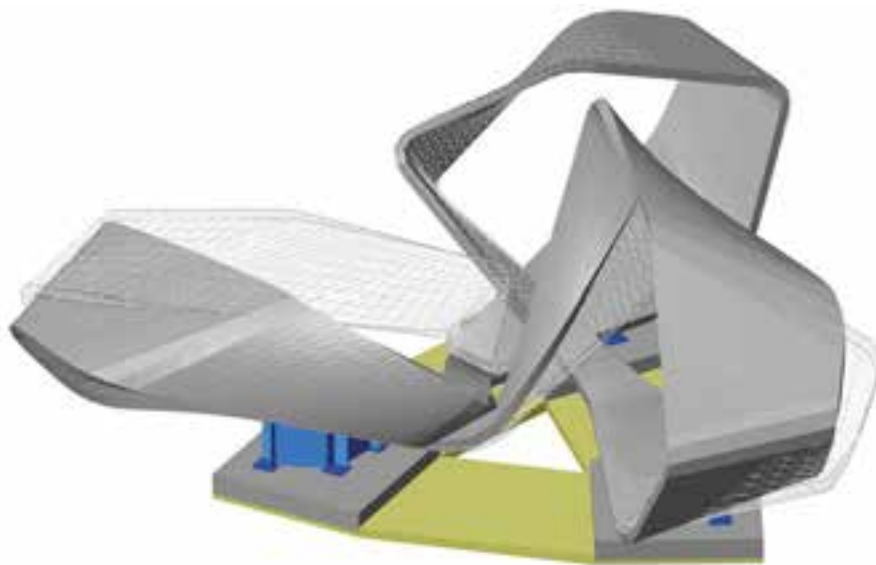


Abb. 4: Erste Schwingungseigenform der Skulptur Virtual Tectonics 1

Fig. 4: First vibration eigenmode for the sculpture Virtual Tectonics 1

identischer Bauteile, die Komplexität der Form und die Festigkeitsanforderungen geeignet zu berücksichtigen. Dabei reicht das Spektrum von geometrisch einfachen Formteilen, die in großer Stückzahl zu fertigen sind, bis hin zu großformatigen Bauteilen mit Freiformoberflächen, von denen nur jeweils ein Unikat benötigt wird. Virtual Tectonics 1 wies in diesem Kontext alle Merkmale eines besonderen Schwierigkeitsgrades auf: Unikatcharakter, großformatig, komplexe Geometrie, strakende Flächenführung und hohe Belastung. Unabdingbar war daher die konsistente Verwendung eines einheitlichen CAD-Modells bei

Schichtung zu 200mm dicken Rohblöcken verklebt worden war. Abb. 5 zeigt die NC-Fräsbearbeitung eines von sechs Sandwichkernelementen, aus denen jeweils ein Flügel zusammengesetzt wurde. Diese Kernelemente bestehen aus mehreren, wegen der starken Flügelkrümmung verdreht angeordneten Einzelblöcken. Ein konturfolgendes Gerüst aus individuell gefrästen Holzspanen gab dabei die inneren und äußeren Stützflächen der Kernelemente auf dem Tisch der CNC-Fräsmaschine vor und generierte die Referenz zwischen Fräsmaschine und CAD-Modell. Das lokale Untermaß in den Schaumstoffkernen, welches die Dicke des

nachfolgend aufzubringenden GFK-Laminats berücksichtigt sowie die verschiedenen Taschen für Einbauteile und Laminatverstärkungen wurden ebenfalls basierend auf dem globalen CAD-Modell erstellt. Dies war speziell für den Einbau der von außen unsichtbaren Flügelverriegelungen erforderlich, weil diese der lokalen Verdrillung der Form folgend raumschief im Sandwichkern sehr genau platziert werden mussten. Andernfalls wäre eine hinreichend fluchtende Montage der Flügel untereinander und auch zum Interface später nicht möglich gewesen. Im Bereich der Auflagerung auf den sogenannten Interfaces wurde auf die gleiche Weise eine hochsteife CFK-Platte im Inneren des Sandwichkerns eingebettet. Lediglich die vier Gewindestangen aus Edelstahl, die aus der Unterseite jedes Flügels herausragen, lassen die Lage des integrierten Lasteinleitungselementes erkennen. Der Aufbau des statisch tragenden GFK-Laminats zum Sandwich erfolgte im Handlaminierverfahren. Dabei wurden verschiedene Glasfaser-Multiachsalgelege mit einem UP-Harz zunächst auf einer Seite der Flügel aufgetragen, dabei aber bereits auf die ca. 90mm breiten Flanken des Sandwichkerns herumgezogen. Abb. 6 zeigt einen Flügel nach der Entnahme aus dem konturfolgenden Spanten-Gerüst. Auf die gleiche Weise wurde die gegenüberliegende Fläche nach dem Wenden der Schaumstoffkerne überlamiert, wobei der Flügel wiederum in einem dazu korrespondierenden Spanten-Gerüst gebettet war. Das eigentliche Flächenfinish bestand aus einem mehrfach wiederholten Auftrag von Spachtel und Füller mit Zwischenschliffen sowie einer mehrschichtigen Endlackierung. Die erste Montage der drei Flügel auf dem Gelände der IBA in Hamburg war ein spannender Moment. Unter anderem weil das Zusammenführen der Flügel zu einem geschlossenen Band letztlich keine eindeutige Fügerichtung aufweist. Gleichzeitig hatte das Einsetzen der raumschief ausgerichteten



Abb. 5: Herstellung eines Sandwichkerns mittels CNC-Fräsmaschine

5: Fabrication of a sandwich core using a CNC milling machine

Gewindestangen in die Interfaces zu erfolgen, die wiederum durch Bolzen der Ankerplatten in der Betongründung festgelegt waren (Abb. 7).

Nicht zuletzt dank des geringen Gewichtes der drei Flügel sowie aufgrund der ingenieurmäßig durchdachten und hochpräzise gefertigten Fügestellen konnte schon die erste Montage und später auch die erste Demontage unproblematisch und ohne Beschädigungen erfolgen (Abb. 8)

### Zusammenfassung

Die Freiform-Raumskulptur Virtual Tectonics 1 ist ein nachhaltiges Beispiel für den interdisziplinären Einsatz innovativer Materialien sowie moderner Planungs- und Fertigungsmethoden. Die während des Projektes gesammelten Erfahrungen stellen eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung integraler Tragwerke aus Faserverbundwerk-

stoffen im Bauwesen dar. Abschließend sei allen Freunden, Förderern und Projektbeteiligten für die ausgesprochen angenehme Zusammenarbeit sehr herzlich gedankt. ■

Autoren: Christian Böttcher, Henning Kaufmann, Julia-Elise Hoins, Arnd-Benedikt Willert-Klasing, Martin Kacza, Gunnar Merz

### Literatur

- [1] Genzel, E.; Voigt, P.: Kunststoffbauten – Die Pioniere. Bauhaus Universitätsverlag 2005
- [2] Schröder, B.: <http://www.heise.de/tp/artikel/21/21070/1.html>
- [3] Elvin, G.: <http://www2.arch.uiuc.edu/elvin/carbon tower.html>
- [4] La Magna, R.; Reichert, S.; Schwinn, T.; Waimer, F.; Knippers, J.; Menges, A.: Carbon und Glasfaser – vom Roboter gewickelt. Deutsches Ingenieurblatt 5 – 2013
- [5] Engelhardt, M.: Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in Architektur und Bauwesen. Innovation Report Ausgabe 2-2013, S. 53-56
- [6] Gefroi, C.: Raumskulptur aus Composite-Material. Deutsches Architektenblatt Ausgabe 09-2013, S. DABregional 9
- [7] Hoins, J.; Willert-Klasing, A-B: Why hasn't everything already disappeared – Hintergrund von Virtual Tectonics 1. Vortrag beim Innovation Day IBA Spezial, 2013
- [8] Hoins, J.; Willert-Klasing, A-B: In 80 Gärten um die Welt - Das offizielle Buch der igs 2013, S.280-281
- [9] Böttcher, C.; Frenz, M.; Kaufmann, H.: Neubau der Zayed University Abu Dhabi. VDI-Bautechnik Jahressausgabe 2011/2012, S. 37-50
- [10] Böttcher, C.; Frenz, M.: Iconic Campus of the Zayed University Abu Dhabi. Steel Construction Volume 5, Issue 2, pages 108-116, June 2012
- [11] Böttcher, C.: Herausforderung Freie Form - Innovative Methoden und Materialien. Vortrag beim Innovation Day IBA Spezial, 2013
- [12] Böttcher, C.; Kaufmann, H.; Hoins, J.-E.; Willert-Klasing, A.-B.; Kacza, M.; Merz, G.: Deutsches Ingenieurblatt 4 - 2014, S. 12-17



Abb. 1: Entwurf der Skulptur Virtual Tectonics 1

Fig. 1: Draft design of the sculpture Virtual Tectonics 1

# Integral free-form structures in fibre composite materials

## Use of innovative materials in the European building construction industry

**Using modern planning and fabrication methods whilst employing innovative materials resulted in a complex and highly precise geometry in the production of the free-form sculpture Virtual Tectonics 1. The project met all of the highest requirements for stability and sustainability and the sculpture is entirely fit for purpose. As a symbol for the possible applications of fibre composite materials (especially of CFRP and GFRP) in the building construction industry, the experiences gained and lessons learned in the course of the project are a sound foundation for the further development of entire structures made from fibre composite materials.**

We are currently experiencing a renaissance of the early visions [1] for the use of fibre reinforced plastics structures in the building construction industry. Whilst in the arabic region, for example, fibre-reinforced materials are widely being used in construction, their use in Europe is still restricted to exceptional cases. Reasons for this are caused in limited experience in planning and approval, in fire safety and in particular in the high production costs. Hence the development of new production methods can be seen as a key to the desired breakthrough in the European building construction industry.

Surely the most well-known example of early work with synthetics in the building construction industry is the Futuro House [2]. The 36 m<sup>2</sup> circular construction was developed and produced by Finnish architect Matti Suuronen in 1968 and

mass produced. It consists of glass fibre reinforced polyester with polyurethane insulation and its low weight means that it can be transported to difficult terrain by helicopter. Its durability means that it is ideal for use as accommodation for researchers in the Arctic and it enjoys cult status as a fixed point of reference for visionary construction using fibre composite materials.

Fibre composite materials such as CFRP have not yet succeeded in establishing themselves in the construction of entire structures for the reasons listed above, which is why Peter Testa and Devyn Weiser's Carbon Tower [3] idea, presented in 2002, has remained just that – an idea. Today, research is once again being carried out, and with increased vigour, into the development of simplified production methods for components and buildings. For example, the staff at the University of Stuttgart were recently able to produce the 29 m<sup>2</sup> footprint ICD/ITKE Research Pavilion 2012 [4] with the help of a computer-controlled robot arm. This involved wrapping a steel substructure in fibres coated with matrix material. The next big step in the processing of fibre composite materials is already in development with the use of 3D printers. Now that the technology for this is already in use in the field of solid prototyping, the capacity will soon exist to produce construction components of appropriate size for the building industry - economically and at a consistently high level of quality. Based on the example of the free-form sculpture Virtual Tectonics 1, this article reports on the knowledge gained from an interdisciplinary collaboration concerning the peculiarities of plan-

ning and production of integral free-form structures in the building construction industry.

### Virtual Tectonics – idea and architecture

The free-form sculpture Virtual Tectonics 1, by Hamburg architectural studio BAT, was developed and realised in a collaboration between a range of disciplines. The sculpture is intended as a symbol for the particular opportunities offered by the use of fibre composite materials, especially of CFRP and GFRP, in the building construction industry. The aim is also to demonstrate the high level of precision possible with this method of construction. Qualities which guided the design for this abstract free-form sculpture, therefore, were high strength despite the thin cross-section, the ability to create free forms and the smooth surfaces of these fibre composite materials.



Abb. 6: Flügel mit eingebettetem Lastenleitungselement vor dem Flächenfinish und Lackieren

6: Wing with embedded support stiffening element before surface finishing and lacquering

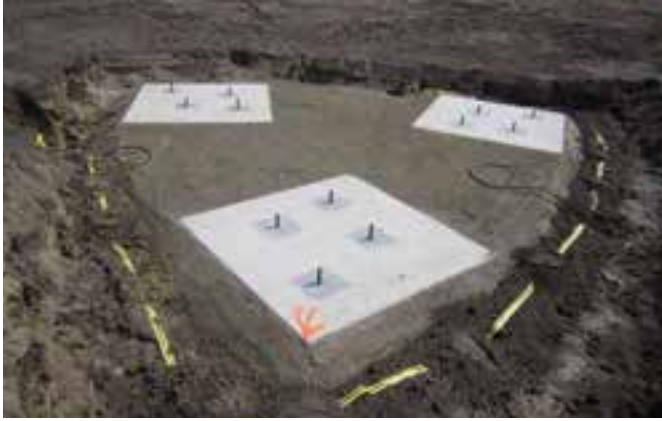


Abb. 7: Fertiggestellte Gründung bei der IBA in Hamburg

Fig. 7: Prepared foundation at the IBA in Hamburg



Abb. 8: Erstmögliche Montage bei der IBA in Hamburg

8: First assembly at the IBA in Hamburg

The free-form geometry, developed digitally and inspired by an endless interlooped strip, creates the effect that the 2.30 m tall sculpture appears different depending on where the viewer is standing. Although the distance between the supports is only 2.14 m, each of the three wings of the interlooped strip freely spans as much as 11 m.

The strip, primarily of GFRP sandwich construction, is only 10 cm thick at any point. An additional aspect defining the design was the idea of flexibility and sustainability. Virtual Tectonics 1 was not intended to be designed for one-time or time-limited use but to be universally suitable as a long-term exhibit at various locations and in public spaces. This had to be kept in mind in particular when it came to structural safety and usability as well as in designing the joints for repeated assembly and disassembly.

### Engineering

The initial geometry of Virtual Tectonics 1 was developed in a digital design process without yet knowing precisely the materials available, the authority and structural engineering requirements, the fabrication method, the placement of joints or the foundation conditions. The structural design was carried out from Dr. Binnewies Engineers who are familiar with the planning of free-form structures [9, 10, 11]. With regard to the limited budget and the otherwise limited availability of materials, it was necessary to first ensure that the project was in fact achievable and that permission would be granted whilst at the same time establishing the thickness of the components and keeping in mind the design, engineering and fabrication requirements. The fact in particular that the sculpture was planned for exhibition in public spaces and would thus be freely accessible to the public required that the dimensions be designed both from a static point of view as well as with regard to deformations and oscillations induced by wind and the actions of people. Location-specific

parameters such as wind, snow load and ground conditions were equally definitive here, as were the time constraints for production, assembly and disassembly.

In order to enable the work to be effectively divided in terms of planning, fabrication and assembly case well as appropriate to practical constraints and the requirements of funders, the sculpture was engineered as four primary elements (fig. 3): wings, support stiffening element, interfaces and foundation.

### Wings

The sculpture has rotational symmetry and for reasons of production and transportation is divided into three identical wings. The wings are designed to have a constant thickness of 100 mm and over the majority of their area have a sandwich construction made from a rigid foam core laminated on all sides with a 4.5 mm thick GFRP laminate. The joints between the wings are situated in the area of the rotational axes, appropriate to load, and the joints constructed almost invisibly using a laminated steel component.

### Support stiffening elements

At each of the supporting points, trapezoid reinforcement plates in 10 mm CFRP are integrated into the extremely strong GFRP and rigid foam core sandwich design, each one holding four M20 stainless steel threaded bars for ground anchoring.

### Interface

Additional interfaces between the foundation and the sculpture are of welded steel construction and serve as economical and easily assembled adapters between the high-precision engineering wings and the reinforced concrete foundation components. It was important to follow up the (torsional) loading of the sculpture into the foundations in order to design the interfaces.

### Foundation

The foundation used at the IBA in Hamburg [8] consists of three individual steel-reinforced concrete bases (C20/25,  $d=30$  cm) with a thicker blinding between them to provide protection from torsional twist. It was necessary to have a definite interaction between the primary construction elements in order to guarantee rigid fixing of the sculpture at the foundation. This was the only way to minimize the deformations and oscillation of the slim sculpture in a way that was also secure against vandalism.

### Fabrication

In the selection of the fabrication process for fibre composite components, the number of identical components, the complexity of the form and the strength requirements must all together be appropriately taken into account. Here, the spectrum ranges from geometrically simple forms to be produced in large quantities to large format components with free-form surfaces which are only required as single examples. In this context Virtual Tectonics 1 demonstrated all the characteristics of a particularly high level of difficulty: single example character, large format, complex geometry and high load. It was therefore essential that all participants use a single CAD model throughout and so a digital workflow was implemented. The company Hahlbrock was able to use their experience from previous projects to produce the wings. This meant that production took place in a process working practically from the inside to the outside, to what would become the visible surface. There was therefore no need to use classic mould tools which take time to produce. The overall shape was provided by milling the sandwich core pieces to undersized dimensions from rigid PVC foam material which was first applied to 200 mm thick raw blocks. Fig. 5 shows the CNC milling of one of the six sandwich core elements used to produce each wing. These core elements consist of several individual blocks arranged on a skew due to the extreme curves in

the wings. A contoured temporary support, made from individually milled timbers, provided the interior and exterior support surfaces for the core elements on the table of the CNC milling machine and acted as reference between milling machine and CAD model. The local under-dimensioning of the foam core pieces, which takes into account the thickness of the subsequent GFRP laminate application and the various pockets for the insertion of later components and laminate reinforcements, was also designed using the global CAD model. This was especially necessary for the integration of the wings joint-connecting elements which are invisible from the exterior, because these had to be very precisely placed at a slant within the sandwich core, following the twist of the shape at each point. If it had not been done this way, it would not have later been possible to fix the wings to each other and to the interface with sufficiently precise alignment. When it came to supporting the wings on the interfaces an extremely stiff CFRP plate was embedded into the interior of the sandwich core in the same way. Only the four stainless bolts protruding from the underside of each wing give a clue as to the position of the integrated support stiffening element. The stiffening GFRP laminate was layered on to the sandwich in a hand lamination process. Here, a variety of multi-axial fibreglass fabric sheets were first applied to one side of the wing with a UP resin and wrapped around the approx. 90 mm wide flanks of the sandwich core. Fig. 6 shows the wing after the contoured temporary support has

been removed. After turning the foam cores, the opposite side was laminated in the same way with the wing being held in a corresponding temporary support. The actual surface finish consisted of a repeated application of screed and filler, sanded between each application, and several layers of finishing lacquer. Assembling the three wings for the first time on the grounds of the IBA in Hamburg was a tense moment, in part because bringing the wings together to form one continuous strip ultimately didn't show a clear direction of joint. At the same time, the threaded bars had to be inserted at a slant into the interfaces which were then fixed to the anchor plates in the concrete foundation also by means of bolts (fig. 7).

Most importantly, thanks to the low weight of the three wings and because of the cleverly engineered and highly precise finishing of the joints, it was possible to complete the first assembly and, later, the first disassembly with no problems and no damage (fig. 8).

#### Conclusion

The free-form sculpture *Virtual Tectonics 1* is a lasting example of the interdisciplinary use of innovative materials and modern planning and production methods. The experiences gained and lessons learned in the course of the project are a sound foundation for the further development of integral load-bearing structures made from fibre composite materials in the building construction industry.

In closing we would like to thank all of the friends, supporters and project participants and to say that we very much enjoyed working with them.

#### An interdisciplinary cooperation project

The architectural studio „BAT Bureau for Advanced Tectonics“ (Hamburg) developed and realised the *Virtual Tectonics 1* sculpture in close interdisciplinary cooperation with Dr. Binnewies Engineers (Hamburg), Hahlbrock (Wunstorf), Öllerich (Stade), Möbius (Barsbüttel), IDS (Hamburg) and the CFK-Valley (Stade) network. 20 other sponsors supported the project with their commitment. The sculpture was presented to the public for the first time in the summer of 2013 at the International Garden Show (IGS) and International Building Exhibition (IBA) in Hamburg. ■

Authors: Christian Böttcher, Henning Kaufmann, Julia-Elise Hoins, Arnd-Benedikt Willert-Klasing, Martin Kacza, Gunnar Merz

CFK-Valley Stade  
[www.cfk-valley.com](http://www.cfk-valley.com)



CFK VALLEY STADE™

#### Literature

- [1] Genzel, E.; Voigt, P.: Kunststoffbauten – Die Pioniere. Bauhaus Universitätsverlag 2005
- [2] Schröder, B.: <http://www.heise.de/tp/artikel/21/21070/1.html>
- [3] Elvin, G.: <http://www2.arch.uiuc.edu/elvin/carbontower.html>
- [4] La Magna, R.; Reichert, S.; Schwinn, T.; Waimer, F.; Knippers, J.; Menges, A.: Carbon und Glasfaser – vom Roboter gewickelt. Deutsches Ingenieurblatt 5 – 2013
- [5] Engelhardt, M.: Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in Architektur und Bauwesen. Innovation Report Ausgabe 2-2013, S. 53-56
- [6] Gefroi, C.: Raumsulptur aus Composite-Material. Deutsches Architektenblatt Ausgabe 09-2013, S. DABregional 9
- [7] Hoins, J.; Willert-Klasing, A.-B.: Why hasn't everything already disappeared – Hintergrund von *Virtual Tectonics 1*. Vortrag beim Innovation Day IBA Spezial, 2013
- [8] Hoins, J.; Willert-Klasing, A.-B.: In 80 Gärten um die Welt - Das offizielle Buch der igs 2013, S.280-281
- [9] Böttcher, C.; Frenz, M.; Kaufmann, H.: Neubau der Zayed University Abu Dhabi. VDI-Bautechnik Jahresausgabe 2011/2012, S. 37-50
- [10] Böttcher, C.; Frenz, M.: Iconic Campus of the Zayed University Abu Dhabi. Steel Construction Volume 5, Issue 2, pages 108-116, June 2012
- [11] Böttcher, C.: Herausforderung Freie Form - Innovative Methoden und Materialien. Vortrag beim Innovation Day IBA Spezial, 2013
- [12] Böttcher, C.; Kaufmann, H.; Hoins, J.-E.; Willert-Klasing, A.-B.; Kacza, M.; Merz, G.: Deutsches Ingenieurblatt 4 - 2014, S. 12-17