

## Origami aus Brettsperrholz

### Origami in legno lamellare

Hani Buri, Yves Weinand



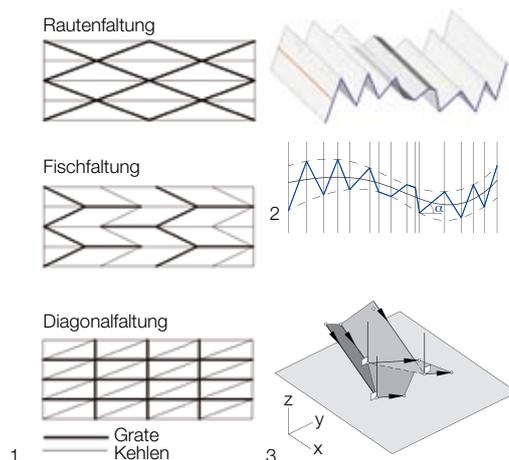
An dem Zusammenspiel zwischen architektonischem Ausdruck, Effizienz und der konstruktiven Ausführung von Tragwerken forscht der Lehrstuhl für Holzkonstruktionen Ibois der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Neue Holzwerkstoffe und Verarbeitungstechniken spielen dabei ebenso eine Rolle wie neue Möglichkeiten der Darstellung von Tragwerksformen.

#### Frühe faltwerke

Die Entwicklung von Faltwerken ist eng mit der von neuen Baumaterialien verbunden. Stahlbeton ermöglicht den Bau von Schalen mit großen Spannweiten, jedoch ist deren Eigengewicht relativ hoch. Um dieses möglichst gering zu halten, muss die Schale dünn sein. Dadurch verliert sie ihre Trägheit und droht zu knicken. Mit einer Riffelung wird das Gewicht verringert, wobei die statische Höhe erhalten bleibt. Faltwerke aus Stahlbeton der ersten Generation, die um 1900 entstanden, weisen eine einfache Riffelung auf, die der Form der Schale folgt und aus sich wiederholenden Elementen besteht. Die formelle Logik von Faltwerken kommt erst in späteren Bauten zum Ausdruck. Ein Beispiel hierfür ist die Kongresshalle der Unesco von Marcel Breuer und Pier Luigi Nervi von 1958, bei der drei Faltflächen zu einem Rahmen verbunden sind. Mit dem Aufkommen von glasfaserverstärkten Kunststoffen wird die Geometrie von Faltwerken verstärkt zum Forschungsthema. Pioniere wie Makovsky und Huybers arbeiten an Bausystemen, die auf antiprismatischen Körpern beruhen. Deren Basiselemente sind diagonal gefaltete Rauten. Arthur Quarmby und Renzo Piano realisieren in den 1970er-Jahren erste Bauwerke, deren Geometrie von Form und Gestalt des Faltwerks geprägt sind. Aus Produktions- und Kostengründen bestehen diese aus einer großen Anzahl identischer, vorfabrizierter Elemente.

#### Holzfaltwerke

Die aus Holz gebauten Faltwerke haben meist eine einfache Form und bestehen aus parallelen oder konzentrischen Falten. Dies ist einerseits auf die beschränkte Größe der



1 — Grate  
2 — Kehlen

bestehenden Holzplatten zurückzuführen, aber auch auf die Schwierigkeit, komplexere Geometrien zu modellieren und herzustellen. Die Entwicklung von großformatigen Brettsperrholzplatten und die Möglichkeit, diese mit computergesteuerten Maschinen abzubinden, eröffnen neue Perspektiven. Unser Ziel war, eine Methode zu entwickeln, mit der solche Faltwerke zeitnah räumlich dargestellt und verändert werden können. Ausgangspunkt war Origami, die japanische Kunst des Papierfaltens, deren einfache Grundtechniken durch geometrische Variationen zu einer erstaunlichen Formvielfalt führen. Das rationale Erzeugen komplexer Formen mit einfachen Mitteln wollten wir auf die Konstruktion von Faltwerken mit Brettsperrholz übertragen.

#### Arbeitsmethode

Das Falten von Papier vermittelt ein direktes und intuitives Verständnis für Geometrie und Steifigkeit von Faltwerken. Davon überzeugt, dass spontanes, handwerkliches Arbeiten zu wissenschaftlichen Erkenntnissen führen kann, verfolgten auch wir diese intuitive Vorgehensweise. Zunächst bestimmten wir drei verschiedene Faltmuster, welche für den Bau mit Brettsperrholzplatten geeignet sind.

Der nächste Schritt umfasste das analytische Verstehen der gewählten Geometrien und das Generieren der Faltstrukturen auf CAD. Wichtig dabei war, Werkzeuge zu schaffen, welche sich in den Entwurfsprozess integrieren und dem Architekten vertraut sind: So wird die Form der Faltwerke durch je eine Linie in Grundriss und Schnitt definiert. Mit dieser Methode können rasch eine Vielzahl verschiedener Formen erstellt und sowohl architektonischen als auch tragwerksplanerischen Anforderungen angepasst werden.

Zuletzt prüften wir die Machbarkeit der Geometrien und deren Eignung für den Bau mit Brettsperrholz. Verbindungen und Montageprozesse entstanden in enger Zusammenarbeit mit einem Bauingenieur. Die Verformbarkeit und die Tragfähigkeit der Prototypen wurden in Belastungstests nachgewiesen.

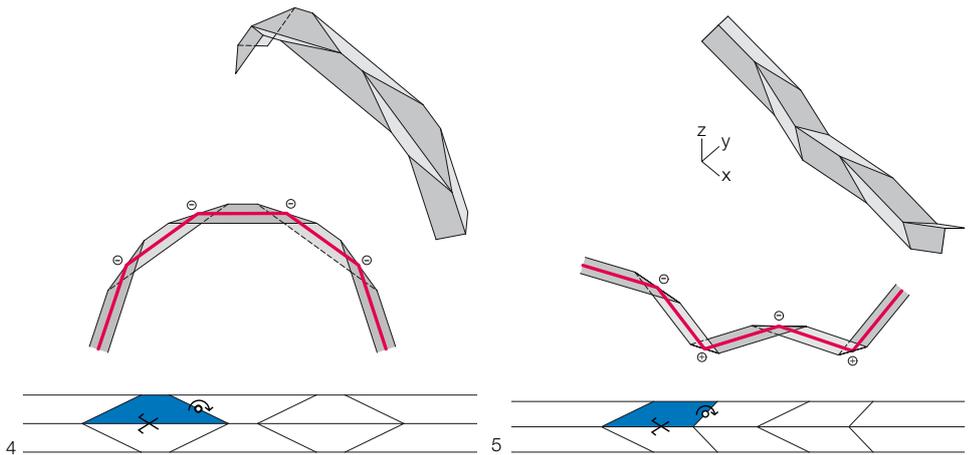
- 1 ausgewählte Faltmuster: Rauten- und Hexagonalfaltung, Fischgrätfaltung, Diagonalfaltung
- 2 Riffelungsprofil
- 3 Umkehrfalte als Spiegelung einer einfach geriffelten Fläche an einer Ebene
- 4 konvex polygonales Querschnittsprofil ergibt Hexagonalmuster
- 5 Zickzack-Querschnittsprofil ergibt Fischgrätmuster
- 6 a Mit Falten parallel zur Aufrissebene ist die doppelt geriffelte Fläche zylinderförmig.  
b Stehen die Falten quer zur Aufrissebene, verformt sich der Zylinder zu einer Helix.  
c Ist die Mittellinie des Riffelungsprofils polygonal oder gekrümmt, verändert sich der Querschnitt der doppelt geriffelten Fläche.
- 7 a doppelt geriffelte Fläche mit normaler Amplitude  
b doppelt geriffelte Fläche mit max. Amplitude  
c doppelt geriffelte Fläche mit gleichmäßiger, maximaler Amplitude
- 8, 9 Sperrholzplatten (Spannweite 6 m, lichte Höhe 2,8 m), Bruch bei 2,7kN.

#### Faltwerksgeometrien

Die drei ausgewählten Faltmuster gründen auf einfach geriffelten Flächen (Abb. 1). Dies hat den Vorteil, dass die Faltgeometrie aus länglichen Streifen mit annähernd parallelen Kanten besteht, die dem Format von Brettsperrholzplatten entspricht. Einfach geriffelte Flächen werden durch ihr Riffelungsprofil definiert (Abb. 2). Dieses bestimmt die Reihenfolge von Berg- und Talfalten sowie Amplitude, Neigungswinkel und Intervall der Falten. Die Mittellinie beschreibt die Gesamtform des Riffelungsprofils.

Einfach geriffelte Flächen bestehen aus geraden Hauptfalten, die mit Umkehrfalten geknickt werden können. Durch die Seitenfalten, die sich im Knickpunkt mit der Hauptfalte schneiden, entsteht eine sekundäre Riffelung quer zu den Hauptfalten. Die Umkehrfalte entspricht einer Spiegelung der einfach geriffelten Fläche an einer Ebene (Abb. 3). Zur räumlichen Darstellung der Faltwerkgeometrie benutzen wir die Normalprojektion. Das Riffelungsprofil im Seitenriss (yz-Koordinaten) bestimmt die Form der einfach geriffelten Fläche. Um diese zu verformen, muss sie an einer Reihe von Ebenen reflektiert werden. Diese stehen senkrecht zur Aufrissebene (xz). Das hat den Vorteil, dass die Position der Reflexionsebenen durch eine polygonale Linie im Aufriss definiert werden kann. Dieses Querschnittsprofil bestimmt die räumliche Form der doppelt geriffelten Fläche und die Knickwinkel der Hauptfalten. Vereinfacht entspricht die Gestalt solcher Flächen einem durch das Querschnittsprofil definierten Zylinder. Die Gesamtform kann durch zwei Parameter beeinflusst werden: die Position der einfach geriffelten Fläche in Bezug zur Aufrissebene und die Form der Mittellinie des Riffelungsprofils. Stehen die Falten der einfach geriffelten Fläche parallel zur Aufrissebene, wird die doppelt geriffelte Fläche zylinderförmig (Abb. 6a). Stehen die Falten schräg zur Aufrissebene, verschraubt sich der Zylinder zu einer spiralförmigen Fläche (Abb. 6b). Wenn die Mittellinie des Riffelungsprofils gekrümmt oder polygonal ist, verändert sich der Querschnitt des Zylinders entlang seiner Längsachse: Teile der Fläche

- 1 Selezione di tipologie di corrugamento: piega romboidale ed esagonale, a spina di pesce, diagonale
  - 2 Profilo di striatura
  - 3 Piegatura inversa ottenuta dalla specchiatura di una piegatura semplice rispetto ad un piano
  - 4 Profilo di sezione poligonale e convesso genera corrugamento esagonale
  - 5 Profilo a zigzag genera corrug. a spina di pesce
  - 6 a La superficie a doppio corrugamento con pieghe parallele al piano si sezione risulta di forma cilindrica  
b Se le pieghe sono perpendicolari al piano di sezione il cilindro si trasforma in un'elica  
c Se la linea centrale del profilo di corrugamento è poligonale o curva, la sezione della superficie corrugata doppia appare deformata
  - 7 a Superficie corrugata doppia con amplitudine normale  
b Superficie corrug. doppia con max. amplitudine  
c Superficie corrug. doppia con amplitudine massima e uniforme
  - 8, 9 Pannelli in legno compensato lamellare (luce 6 m, altezza 2,8 m). Carico di rottura a 2,7 kN.
- 2 Zeilen kürzen ■



werden eingeschnürt, andere beulen aus (Abb. 6c). Das Querschnittsprofil bestimmt nicht nur die Gesamtform, sondern auch die lokale Struktur der Faltenwerksgeometrie. Konvex polygonale Querschnittsprofile führen zu hexagonalen Faltenmustern (Abb. 4), zickzackförmige Querschnittsprofile zu Fischgrätmustern (Abb. 6). Zudem ist die Gesamthöhe (Amplitude) einer einfach geriffelten Fläche für ein spezifisches Querschnittsprofil beschränkt. Die maximale Amplitude hängt von Knickwinkel und Länge der Segmente des Querschnittsprofils ab (Abb. 7). Wir haben eine Methode entwickelt, mit der die maximale Amplitude eines Querschnittsprofils kontrolliert werden kann. Dies ist deshalb von Interesse, weil die Amplitude in etwa der statischen Höhe des Faltenwerks entspricht und somit seine Tragfähigkeit beeinflusst. Die Amplitude bestimmt auch die lokale Geometrie des Faltenwerks. Bei maximaler Amplitude verschieben sich zwei Knickpunkte so aufeinander zu, dass sie sich in einem einzigen Punkt vereinen (Abb. 7c). Das Hexagonmuster wird zum Rautenmuster, das Fischgrätmuster zum Pfeilmuster.

Riffelungs- und Querschnittsprofil können die Faltenwerksgeometrie komplett bestimmen. Durch die Reduktion auf zwei Parametergruppen ist es möglich, die Faltenwerke schnell zu generieren und zu verändern. Die grafische Manipulation der beiden Profile ermöglicht eine intuitive Kontrolle der Geometrie, welche auf räumliche, architektonische, statische und produktionsbedingte Aspekte Einfluss nimmt. Obwohl die Methode formelle Einschränkungen mit sich bringt, ist der Handlungsspielraum groß. Die einfache grafische Definition der Faltenwerksgeometrie erlaubt das rasche Entdecken und Modellieren neuer Varianten.

Im Inneren der Fläche, wo sich benachbarte Falten gegenseitig stützen, sind Faltenwerke relativ steif. Den Randfalten fehlt die Unterstützung und das Faltenwerk hat die Tendenz, sich zu biegen. Dem kann die Geometrie des Riffelungsprofils entgegenwirken, indem entweder die Amplitude der Randfalten oder deren Neigungswinkel erhöht wird. Das Riffelungsprofil kann so gestaltet sein, dass die

Falten flächendeckende und statische Aufgaben, je nach Situation, optimal erfüllen. Ein weiterer Vorteil dieser Geometrien ist, dass sie zu einer durchgehenden Fläche abgewickelt werden können. Dank der annähernd parallelen Hauptfalten reduziert sich der Materialverbrauch. Die Breite der Faltenwerksplatten hängt von der Länge der Segmente des Riffelungsprofils ab. Die Segmentlängen können auf handelsübliche Plattenformate abgestimmt werden.

**Prototypen**

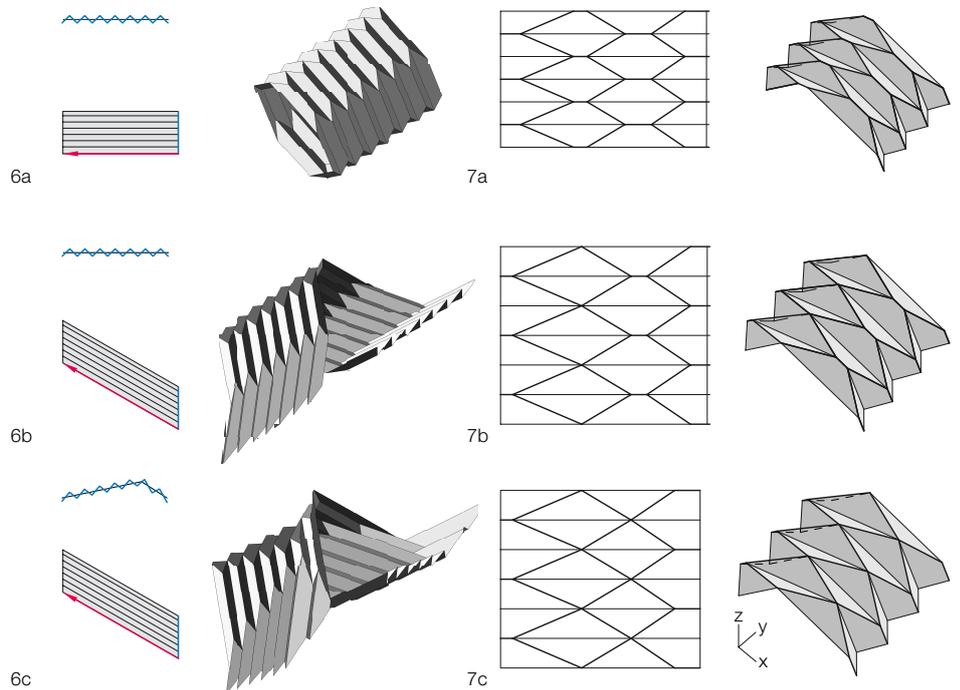
Der Vergleich zwischen dem Tragverhalten der gebauten Prototypen und statischen Berechnungen zeigt, dass Faltenwerksgeometrien interessante Festigkeitswerte aufweisen, da die Verbindungen als gelenkig betrachtet werden können. Dies hat den Vorteil, dass einfache und ökonomische Verbindungsmittel möglich sind und die Weichheit der einzelnen Falten die Montage erleichtert. Die Festigkeit des Faltenwerks wird durch das Zusammenwirken der Falten garantiert.

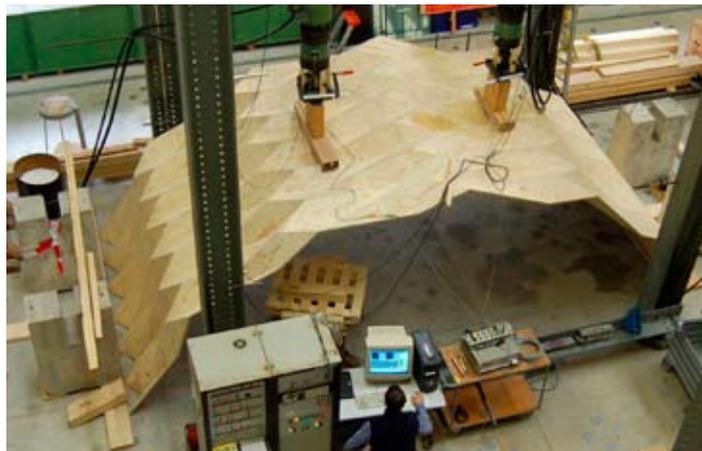
**Fazit**

Mit unserer Arbeit haben wir gezeigt, wie durch das Steuern verschiedener Einflussgrößen die Form und die Tragfähigkeit von Faltenwerken beeinflusst werden können. Die unterschiedlichen Faltenwerkstypen weisen eine starke, eigenständige Gestalt auf, die es erlaubt, einzelne Parameter der Geometrie zu verändern und projektspezifischen Bedingungen anzupassen, ohne dadurch den architektonischen Ausdruck zu beeinträchtigen.

Die entwickelte Methode ermöglicht es, komplexe Faltenwerke schnell zu modellieren und deren Geometrie unmittelbar in ein Statikprogramm oder in eine computergesteuerte Abbundmaschine zu exportieren. Dies wiederum ermöglicht Rationalisierungen im Entwurfs- und Produktionsprozess.

Dr. Hani Buri ist Architekt und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzkonstruktionen Ibois der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Prof. Dr. Yves Weinand, Architekt und Ingenieur, ist Leiter dieses Lehrstuhls.





Le ricerche che si svolgono presso l'Istituto del legno della Scuola politecnica federale di Losanna (IBOIS-EPFL) sono finalizzate allo studio delle relazioni tra l'immagine architettonica, l'efficienza strutturale e l'esecuzione costruttiva delle strutture portanti. I nuovi materiali da costruzione in legno e le tecniche di lavorazione più moderne hanno in questo campo la stessa importanza delle nuove possibilità di rappresentazione delle forme strutturali.

#### Prime strutture corrugate

Lo sviluppo delle strutture corrugate è strettamente legato a quello dei nuovi materiali da costruzione. Il calcestruzzo armato consente la costruzione di gusci di ampia luce e tuttavia il peso proprio di queste strutture si mantiene sempre relativamente alto. Per ridurlo è necessario che il guscio sia sottile. La piegatura ne consente la riduzione pur mantenendone invariato lo spessore strutturale. Le strutture corrugate di prima generazione si distinguono per la piegatura semplice che segue la forma del guscio e che a sua volta è formato da una serie di elementi ripetuti. Un esempio è rappresentato in questo caso dal Palazzo dei congressi dell'Unesco di Marcel Breuer e Pier Luigi Nervi del 1958.

L'arrivo delle materie plastiche rinforzate con fibra di vetro non fa altro che aumentare l'interesse per la ricerca nel campo delle nuove geometrie corrugate.

Arthur Quarnby e Renzo Piano realizzano nel 1979 le prime costruzioni la cui geometria è profondamente condizionata dalla forma e dall'aspetto della struttura corrugata.

#### Strutture corrugate in legno

Le strutture corrugate in legno hanno generalmente una forma semplice e presentano piegature parallele o concentriche. Lo sviluppo dei pannelli in legno compensato lamellare di grande formato e la possibilità di collegamento con l'aiuto di macchine a controllo computerizzato apre nuove prospettive. Il nostro obiettivo era quello di sviluppare un metodo che ci permettesse di rappresentare nello spazio questo tipo di strutture e conseguentemente di modificarne la forma. Il nostro punto

di partenza era rappresentato dall'Origami, l'arte giapponese della piegatura della carta, le cui semplici tecniche di base permettono la creazione di una sorprendente varietà di forme.

#### Metodo di lavoro

La piegatura della carta è uno straordinario strumento, diretto e intuitivo, per valutare geometria e rigidità delle strutture corrugate. Inizialmente abbiamo individuato tre diverse modalità di piegatura che abbiamo ritenuto più adatte alla costruzione con i pannelli di legno compensato lamellare. Il passo successivo ha riguardato la comprensione analitica delle geometrie selezionate e la generazione delle strutture corrugate in CAD. L'importante era utilizzare strumenti familiari agli architetti e facilmente integrabili nel processo progettuale: siamo giunti alla rappresentazione della struttura corrugata attraverso una linea in pianta e una linea in sezione. Infine abbiamo verificato la fattibilità delle geometrie e la loro idoneità alle costruzioni in legno compensato. Lo studio delle connessioni e del montaggio è stato svolto in stretta collaborazione con un ingegnere edile. La deformabilità e la portanza dei prototipi è stata verificata con l'ausilio di prove di carico.

#### Geometrie delle strutture corrugate

I tre modelli di corrugamento sono derivati da superfici a piegatura semplice (Fig. 1). Le superfici sono identificate dal proprio profilo di striatura (Fig. 2) che, oltre ad individuare l'alternanza di picchi e selle, ne definisce ampiezza, angolo d'inclinazione e intervallo dei corrugamenti. Le superfici corrugate semplici sono formate da piegature lineari che possono a loro volta essere alternate a pieghe inverse. La piega inversa corrisponde alla specchiatura della piegatura semplice rispetto ad un piano (Fig. 3).

Per rappresentare la geometria della superficie corrugata nello spazio abbiamo scelto di utilizzare il metodo della proiezione normale. La forma complessiva può essere modificata agendo su due parametri: la posizione della superficie corrugata semplice in relazione al piano di sezione e la forma della linea centrale

del profilo di corrugamento. Se le pieghe della superficie corrugata semplice sono parallele al piano di sezione, la superficie corrugata doppia risulterà di tipo cilindrico (Fig. 6a); se invece le pieghe sono perpendicolari al piano di sezione, il cilindro si avvita dando origine ad una superficie spiraleiforme (Fig. 6b).

In questo modo abbiamo sviluppato un metodo che ci consente di controllare la massima ampiezza di un profilo di sezione. Tutto ciò è di particolare importanza poiché l'ampiezza regola praticamente lo spessore strutturale della superficie corrugata e ne determina la sua capacità portante.

Anche se il metodo porta con sé alcune limitazioni, il campo d'azione si presenta comunque molto ampio. La semplice rappresentazione grafica della geometria del corrugamento facilita la scoperta di nuove varianti e la conseguente rapida modellazione.

#### Prototipi

Il confronto tra il comportamento statico dei prototipi e il calcolo strutturale dimostra che le geometrie corrugate hanno valori di resistenza interessanti dal momento che i punti di giunzione sono assimilabili a cerniere. Questo offre il vantaggio di realizzare connessioni semplici ed economiche, mentre la leggerezza delle singole pieghe non fa altro che facilitare il montaggio. La stabilità della struttura è garantita dall'interazione collaborante delle pieghe.

#### Conclusioni

Con il nostro lavoro abbiamo evidenziato che attraverso il controllo di diversi parametri è possibile influire sulla forma e la resistenza di una struttura corrugata. Il metodo da noi sviluppato consente di svolgere una rapida modellazione di superfici corrugate complesse, esportandone al contempo le caratteristiche geometriche verso un programma di calcolo strutturale o una macchina di assemblaggio a controllo computerizzato.

Dr. Hani Buri è architetto e ricercatore presso l'Istituto di strutture lignee della Scuola politecnica federale di Losanna (IBOIS-EPFL).  
Prof. Dr. Yves Weinand, architetto e ingegnere, è il direttore dell'Istituto.