

Lageplan, M 1:3000

# Summe seiner Technik active energy building, Vaduz/LIE

Drei Kriterien sprachen für die Entscheidung zu einem Stütztragwerk für das Mehrfamilienhaus: viel Licht im Gebäudeinneren, flexible Grundrisse und Materialersparnis. Über parametrische Berechnungen wurden die optimalen Positionen ermittelt.



Foto: Frank Röhli

## Bollinger + Grohmann Ingenieure

Die Tragwerkplaner Klaus Bollinger (links im Bild) und Manfred Grohmann gründeten 1983 das Büro Bollinger + Grohmann Ingenieure in Frankfurt. Das Büro hat sich besonders im Zusammenhang mit freien Formen jenseits der geometrischen Regelmäßigkeit einen Namen gemacht. Neben ihrer praktischen Arbeit lehren beide Ingenieure an Architekturfachbereichen.



Foto: Ciba Delmonette

## falkeis.architects

Anton Falkeis und Cornelia Falkeis-Senn gründeten ihr Wiener Büro 1988, eine weitere Niederlassung folgten 2011 in Vaduz. Cornelia Falkeis-Senn studierte Architektur, Innenarchitektur und Design an der Universität für Angewandte Kunst. Anton Falkeis studierte Architektur an der Universität für Angewandte Kunst Wien, er ist staatlich befugter Architekt in Österreich und Liechtenstein.



Als wäre eine Mega-Yacht in einem Bergdorf aufgelaufen, so wirkt das active energy building in Vaduz, gebaut von Anton Falkeis und Cornelia Falkeis-Senn. Die Bauherrenfamilie Marxer wünschte sich ein Mehrfamilienhaus und bekam eine High-Tech-Kraftmaschine. Diese wanderte schon vor Fertigstellung durch viele internationalen Fachzeitschriften und durch Museen in New York, Los Angeles und Wien. Um den Erfolg und die sehr eigenwillige Architektur zu verstehen, muss man den Entstehungsprozess nachzeichnen.

Sechs Jahre forschten und entwickelten die Architekten am Gebäude. Sie bildeten interdisziplinäre Teams aus Informatikern, Robotikingenieuren, Tragwerkplanern, Physikern, Gebäude- und Energietechnikern – ein Pingpongmatch der Experten und ihrer Software. Ihr Ziel ist, den Energie- und Materialeinsatz für das Gebäude auf ein Minimum zu reduzieren. Das fängt beim ersten Ent-



Foto: Roland Körner

wurf an. Das Haus steht auf einem Nord-Süd ausgerichteten Grundstück. Um viel Licht in das Gebäude zu tragen, simulieren die Architekten für die Gebäudemasse den Lichteinfall am Rechner. Sie berücksichtigen den Sonnenstand nach Tages- und Jahreszeit, sowie die Verschattung des Gebäudes durch sich selbst und durch Nachbargebäude. So entwickeln sie die schiffsartige Kubatur, mit einer zum Himmel geneigten Südfassade, fächerartig herausgeschobenen Terrassen an der Ostseite, mit zurückspringenden Terrassen an der Westseite und einer nach Innen gerückten Gebäudemitte. Die Architekten erklären: „Der Canyon in der Gebäudemitte bringt Licht in die Tiefe, die hier 'abgetragene' Baumasse ermöglicht Terrassen im Osten und verbreitert so die Südfäche für die Energiegewinnung.“

### 2300 Schritte zum optimierten Tragwerk

Für die Konstruktion gelten drei Kriterien: Sie soll viel Licht im Gebäude und flexible Grundrisse ermöglichen und dabei Material sparen. Das Architektenteam landete schnell bei einem Stützentragswerk.

Man entschied sich für V-förmige Stahl-Beton-Verbundstützen, einmal symmetrisch und einmal mit lotrechter und geneigter Flanke, die jeweils umgedreht zwei baugleiche A-Stützen ermöglichen. Einer der Tragwerksplaner, Adam Orlinski von Bollinger + Grohmann, erklärt: „Die A- und V- Stützen ergeben im Schnitt ein Dreieck und können so vertikale und horizontale Kräfte aufnehmen. Wir haben einen Softwareaufsatz entwickelt, der eine parametrische Berechnung in Echtzeit ermöglicht. Man hat sehr schnell ein Feedback über das, was man da rechnet.“ So wurde die Position der Stützen am Rechner ermittelt. Nach einem sogenannten genetischen Algorithmus entwickelt der Rechner nach vorab bestimmten Kriterien und in einem Lernprozess aus Trial-and-Error ein optimiertes Tragwerk. Nach 2300 Entwicklungsstufen ergab sich die Mindestanzahl der Stützen und deren ideale Verteilung im Gebäude. Orlinski erklärt: „Ein Kriterium war die Zonierung des Grundrisses in Bereiche, wo Stützen stehen können und wo nicht.“ So bleiben weite Wohnflächen stützenfrei und lassen sich flexibel und unabhängig vom Tragwerk einteilen.



Foto: Roland Körner

Die schiffsartige Kubatur des Gebäudes ist das Ergebnis einer rechnergestützten Simulation des Lichteinfalls über Tages- und Jahreszeit und die Verschattung durch benachbarte Gebäude

Die tragenden Stützen stehen frei im Raum. Sie stehen übereinander und sind gegeneinander verdreht. Durch diese parametrische Verdrehung entwickelt sich das Tragwerk organisch zu einer Baumstruktur. Das war die Hauptentwurfsidee. Ein amorph geformter Betonmantel schützt die Stahlstützen im Brandfall. Der Architekt Falkeis sagt dazu: „Die amorphe Form zeichnet die leichte Verdrehung des Gebäudes um seine Achse nach.“ Nicht nur die Verteilung, auch die Herstellung der Stahl-Beton-Verbundstützen war hochtechnisch und rechnergestützt: Dreiteilige, CNC-gefräste Epoxidschalungen dienten als Gussform für den festen selbstverdichtenden Hochleistungsbeton, der u.a. mit Quarz und Polypropylen abgemischt ist. Dabei war die Serienproduktion der Stützen wichtig, um Kosten, Aufwand und vor allem Abweichungen auf maximal 2 mm zu minimieren. Alle Stützen wurden mit nur zwei Schalungen gefertigt.

#### Tragwerksgeometrie nach einem Vorbild aus der Natur

Ganz anders im Dachgeschoss: „Wir haben hier ein leichtes Tragwerk zur Integration der Energietechnik gesucht und ein Vorbild in der Natur gefunden,“ sagt Falkeis, „ein Voronoi-Flächentragwerk.“ Die Voronoi-Berechnung teilt eine Fläche oder ein Volumen in einzelne Zellen und ermittelt geometrisch das beste Verhältnis von Tragleistung zu Materialstärke. In der Natur ist das ein Evolutionsprozess, z. B. bei der Form von Insektenflügeln. Nicht aus organischem Material, sondern aus Stahl besteht die Tragstruktur beim active energy building. Das Dach besteht aus I-Profilen, die aus Blechen im Werk vorgefertigt und in Modulen angeliefert wurden. Die Stege der Profile stehen teilweise schräg und bilden so die Geometrie der Voronoi-Zelle ab. Das Flächentragwerk ummantelt den Riegel und ermöglicht so eine 11m weite Auskragung, eine bessere Integration der dachseitigen Energietechnik und eigentlich auch stützenfreie Innenräume. Eigentlich, denn die Baufamilie bewohnt das Dachgeschoss selbst und „die Eigentümer wollten auch so schöne Stützen in der eigenen Wohnung haben.“ Allein durch die unterschiedlichen Tragwerke und die sonnenoptimierte Kubatur entsteht ein sehr heterogenes Fassadenbild. Noch vielfältiger wird es durch die Energietechnik.



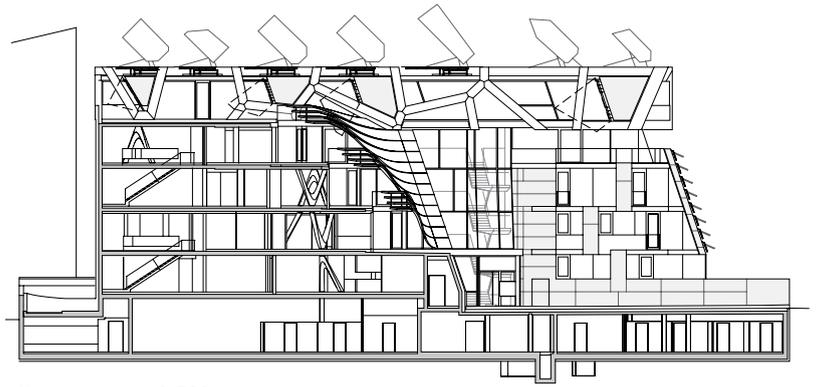
Foto: Roland Körner



Foto: Weissner

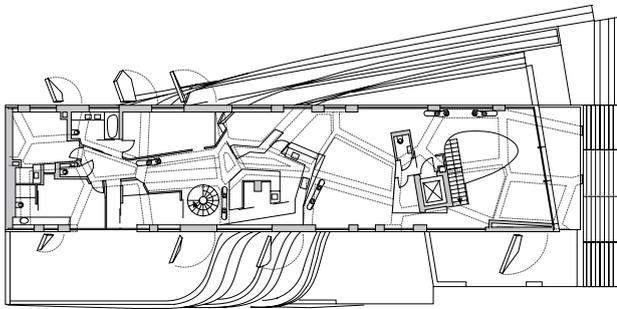
Oben: In den elf zusätzlichen Oberlichtern auf dem Dach befinden sich monokristalline Zellen

Unten: 13 Segel mit monokristallinen PV-Zellen sind in die Voronoi-Struktur des Daches eingepasst. Die Segel sind dreiaxsig gelagert und mit einem Solartracker ausgestattet, so dass sie der Sonne nachwandern und den möglichen Stromertrag fast verdreifachen

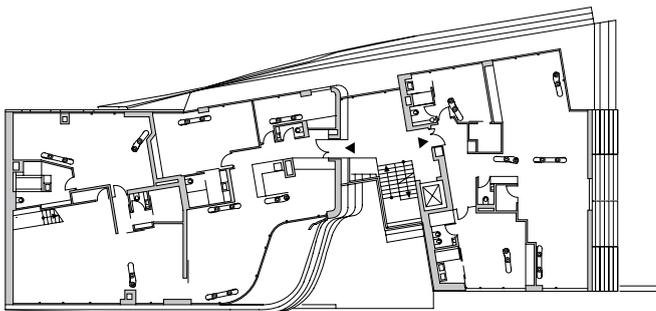


Schnitt AA, M 1:500

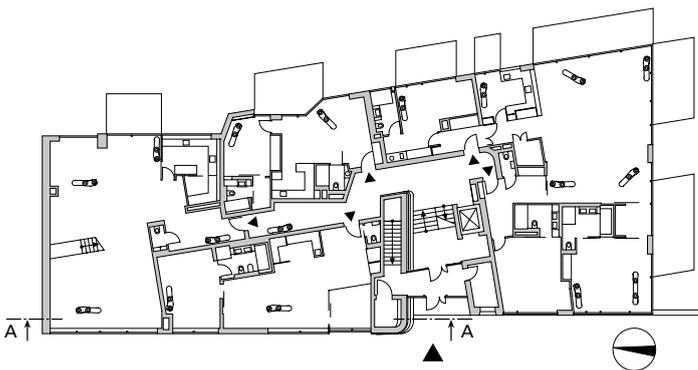
Die Balkongeländer bestehen aus geschwungenen, der Sonne horizontal zugeigten Bändern mit bronzefarbenen, polykristallinen PV-Zellen



Attika, M 1:500



2. Obergeschoss, M 1:500



Erdgeschoss, M 1:500

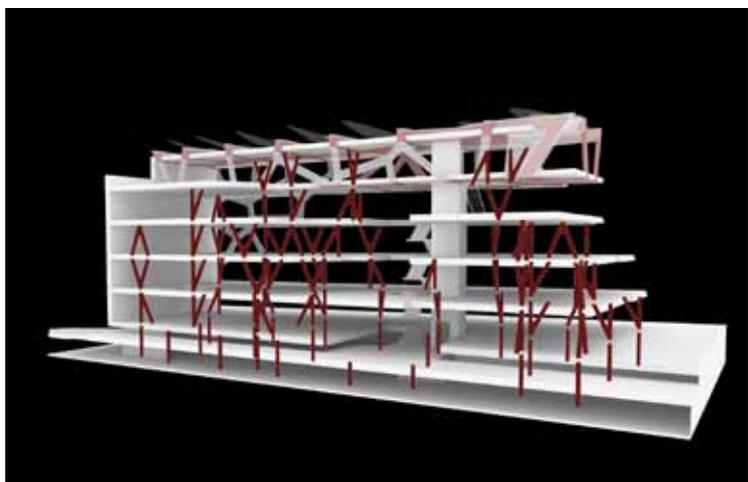


Foto: Roland Körner



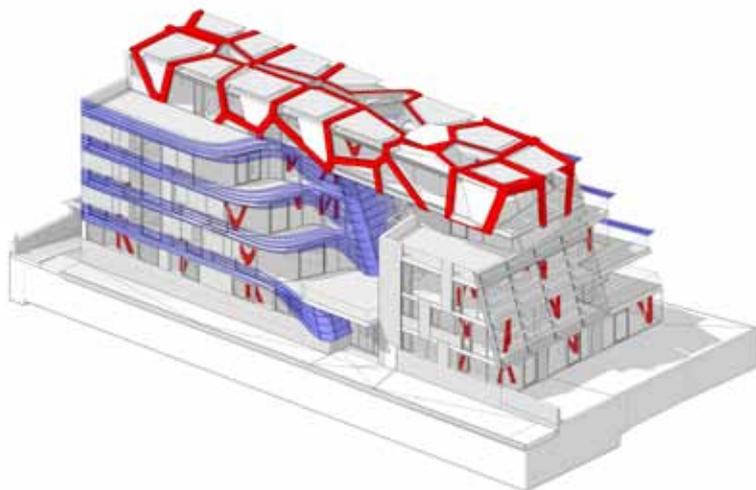
Foto: Bollinger + Grohmann

Die Voronoi-Dachstruktur während der Bauzeit. Die Stege der Stahlbleche stehen nicht immer lotrecht, sondern zeichnen die geneigten Wände einer dreidimensionalen Voronoi-Zelle ab



Grafik: Bollinger + Grohmann

Mit Hilfe von Algorithmen wurde eine Tragstruktur entwickelt, die dem Bauwerk ein irreguläres Gesamtbild verleiht und dennoch ein optimiertes Tragverhalten der Fertigteilstützen mit möglichst kleiner Verformung in horizontaler und vertikaler Richtung aufweist



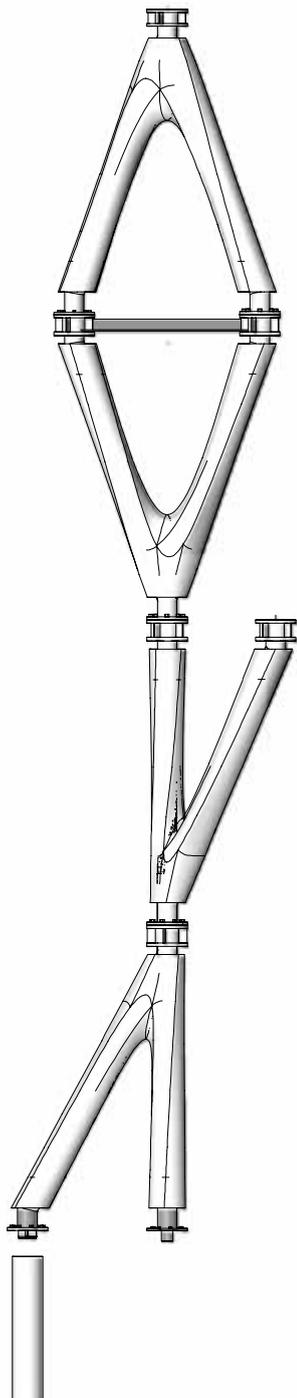
Gesamtansicht des BIM Modells in der Ausführungsplanung: Der gesamte Planungsprozess wurde mittels 3D BIM bewältigt. Alle Bauteile wurden räumlich als Kombination zwischen 3D Geometrie und Informationen im Gebäude-Datenmodell organisiert

### Fassade unter Strom

Am Auffälligsten ist dabei die Photovoltaik. 314 m<sup>2</sup> unterschiedliche PV-Elemente überziehen das Gebäude und bringen eine Gesamtnennleistung von 34,79 kWp. Die leistungsstärkste Fläche liegt auf dem Dach: Hier sind 13 Segel mit monokristallinen PV-Zellen in die Voronoi-Struktur eingepasst. Die Segel sind dreiaxsig gelagert und mit einem Solartracker ausgestattet, so dass sie der Sonne nachwandern und den möglichen Stromertrag fast verdreifachen. Falkeis berichtet: „Wir mussten die Solartracker für diese geringe Einbauhöhe von 80 cm erst entwickeln, denn die herkömmlichen Systeme sind für die großen Energieanlagen mit einer Standhöhe von 3 m ausgelegt.“ Zusätzlich finden sich auf den elf Oberlichtern im Dach aufgedruckte monokristalline Zellen. Gestalt prägend sind aber vor allem die metallisch braunen PV-Elemente der Fassade. Die Balkongeländer bestehen aus geschwungenen, der Sonne horizontal zugelegten Bändern mit bronzefarbenen, polykristallinen PV-Zellen. Auch die Südfassade ist Goldbraun gefärbt durch die Fläche der 32 PV-Lamellen. Der überschüssig produzierte Strom geht dabei an die benachbarten Bürogebäude und ins kommunale Versorgernetz.

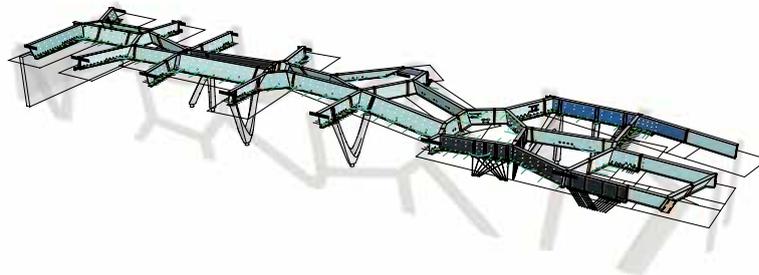
### Heiß-kalter Speicher

Die eigentliche Klimasteuerung des Gebäudes funktioniert via passiver Solareinstrahlung und Temperierung der kontrollierten Zuluft mit Geothermie und Wärmepumpe mit Wärmerückgewinnung. Zur Unterstützung dieses Systems entwickelte das Architektenteam mit der Hochschule Luzern Phase-Change-Material-Flügel, die latent Wärme- und Kälteenergie speichern und an das Gebäude abgeben: Sie bauen in die Dachgeschossfassade bewegliche Carbonfaserrahmen ein, in die mit Paraffin gefüllte Aluminium-Lamellen eingesetzt sind. Auf der Ostseite sind es drei und auf der Westseite vier Flügel. So klappen sich tagsüber die westseitigen Flügel auf, nehmen über das PCM Paraffin Wärme auf, speichern sie und erwärmen damit zeitverzögert die Zuluft. Nachts hingegen klappen die ostseitigen Segel auf, nehmen die Nachtkühle auf und geben diese ebenfalls zeitverzögert an die Zuluft weiter. Der Plan ist Energie auch für ein paar Tage zu speichern und so 10% der Heiz- und 16% der Kälteenergie zu sparen. Besonders schwierig war der Brandschutz der PCM-Flügel. Einem Fachmagazin sagte Falkeis: „Wir entwickelten eine Ummantelung, damit kein Sauerstoff an das PCM dringt. Und wir haben das System bei bis zu 300 °C getestet, aufgeheizt, runter gekühlt und wieder aufgeheizt.“ Auf diese Technik meldete das Architektenpaar ein Patent an. Mit all seiner Technikinnovation, mit seinem langen, interdisziplinären Bauprozess, seinem hohen Fertigungsstandard und dem spendablen Bauherrn bleibt das Projekt zunächst ein Leuchtturm für High-Tech-Pioniere. Orlinski sagt: „Wir sind auf den parametrischen Entwurf spezialisiert, aber nicht jedes Projekt und jeder Projektpartner eignet sich dafür. Es war schon besonders, dass die Architekten so experimentierfreudig waren.“ Die Technologien könnten bald Standard werden, wenn sich auch die Hersteller dafür gewinnen lassen. Falkeis sagt: „Man muss in einem ersten Schritt neue Technologien in ihrer komplexesten Form erforschen und nachweisen, dass sie funktionieren. Danach kommt das Down-Grading der Technik auf standardisierte Produkte.“ Und genau deshalb lohnt der genaue Blick auf das active energy building. Rosa Grewe, Darmstadt



**Detail Stütze, o. M.**  
Geschoßweise aufeinander gestellte Stützentypen mit unterschiedlichen Verdrehungen (Teildarstellung: Decken ausgeblendet)

Die V-förmigen Stahlstützen sind einmal symmetrisch und einmal mit lotrechter und geneigter Flanke ausgeführt, die jeweils umgedreht zwei baugleiche A-Stützen ermöglichen. Für die Positionierung der Stützen programmierten die Tragwerksplaner eigens ein Berechnungsverfahren nach einem sogenannten genetischen Algorithmus. Ein amorph geformter Betonmantel schützt die Stahlstützen im Brandfall



**Voronoi-Dachträger:**  
Parametrisches 3D Werkstattplanungsmodell des Stahldaches

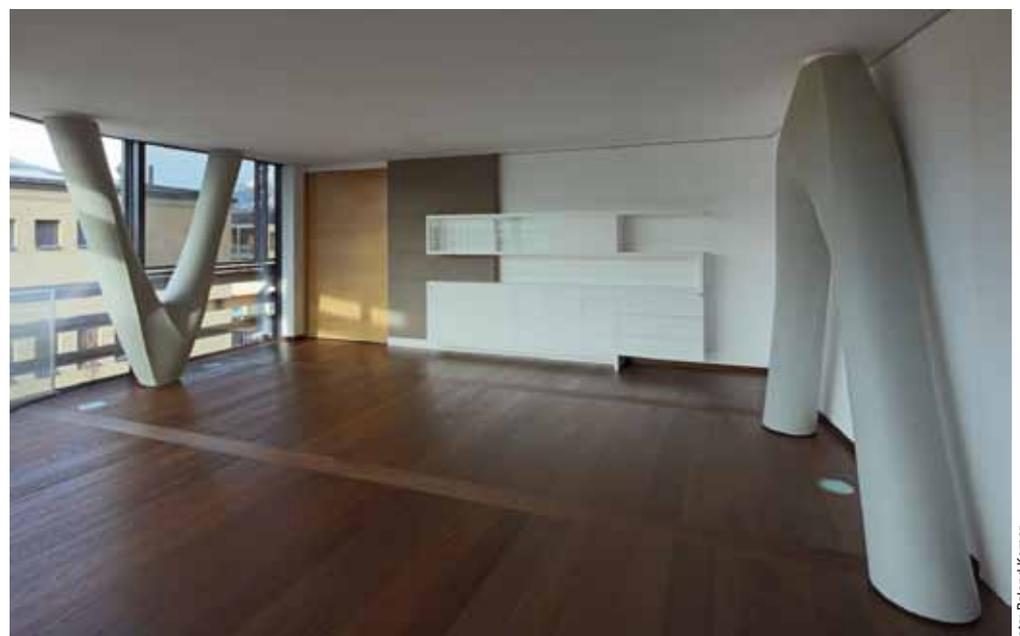


Foto: Roland Komer

## Baudaten

**Objekt:** active energy building  
**Standort:** Gerberweg 1, Vaduz/LIE  
**Typologie:** Mehrfamilienhaus  
**Bauherr:** Fam. Marxer, Vaduz  
**Architekt:** falkeis.architects, Wien/AT, Vaduz/LIE,  
[www.falkeis.com](http://www.falkeis.com)  
**Projektleitung:** Anton Falkeis, Cornelia Falkeis-Senn  
**Team:** Masha Hupalo, Galo Moncayo, Stefan Sobel, Clelia Baumgartner, Cornelia Faisst, Anna Edthofer, Curime Batliner, Thomas Dobler  
**Forschungspartner:** Hochschule Luzern, Dr. Fischer und Team, [www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)  
**Planungs- und Bauzeit:** 2011 – 2017

## Fachplaner

**Tragwerksplaner:** Bollinger + Grohmann ZT GmbH, Wien/At, [www.bollinger-grohmann.com](http://www.bollinger-grohmann.com)  
ARGE Hanno Konrad Anstalt, Schaan/LIE; Hoch & Gassner AG, Triesen/LIE  
**Maschinenbau:** Woessner Engineering AG, Balzers/LIE, [www.weag.li](http://www.weag.li)  
**Haustechnik:** A. Vogt Gebäude AG, Vaduz/LIE; Brian Cody, Graz/AT (Wettbewerb)  
**Bauphysik:** BDT AG / IB Bauphysik, Eschen/LIE; [www.bdt-ib-bauphysik.net](http://www.bdt-ib-bauphysik.net); KH Wille

## Projektdate

**Brutto-Geschossfläche gesamt:** 4678 m<sup>2</sup>  
**Nutzfläche gesamt:** 4187 m<sup>2</sup>

## Konstruktion

**UG – 3.OG:** Stahlbetonbau mit V- und A-förmigen Stützen  
**Atrium-Geschoss:** Stahlbau und Stahl-Beton Verbundbauweise  
Freiform Stahl-Beton Verbundstützen als Fertigteilstützen  
**Voronoi-Dach:** Stahl-Verbundbau/ Stahl-Vorfertigung

## Hersteller

**Beton:** Alphabeton GmbH, [www.alphabeton.eu](http://www.alphabeton.eu);  
LafargeHolcim Ltd, [www.holcim.ch](http://www.holcim.ch)  
**Photovoltaik:** MGT-esys GmbH, [www.mgt-esys.at](http://www.mgt-esys.at)  
**Phase-Changing-Materials:** Rubitherm Technologies GmbH, [www.rubitherm.eu](http://www.rubitherm.eu)  
**Textile Gebäudehülle und Akustik-Leuchtfelder:** WhiteTrue Innovation – a Brand of Marte and Marte LTD, Dornbirn/AT, [www.white-innovations.com](http://www.white-innovations.com)