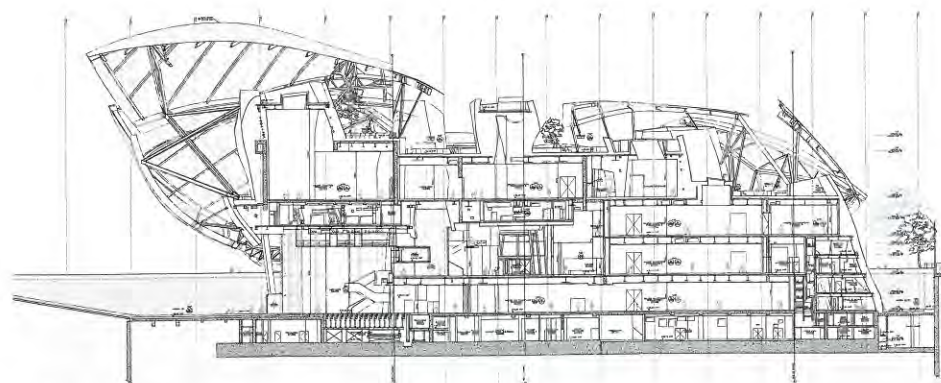


Von Glassegeln umhüllt – die Fondation Louis Vuitton in Paris

Enveloped by Sails of Glass – the Fondation Louis Vuitton in Paris

Matt King, Jacques Raynaud

Projektbeteiligte S. 1291



1 Schnitt Maßstab 1:1500

Section scale 1:1500

Das von Frank O. Gehry entworfene neue Gebäude der Fondation Louis Vuitton grenzt an den Jardin d'Acclimatation im Bois de Boulogne in Paris und ist ein Museum für zeitgenössische Kunst. Auf etwa 3500 m² Ausstellungsfläche beherbergt es 11 Galerien unterschiedlicher Größe sowie ein Auditorium mit 350 Sitzen, einen Buchladen, ein Restaurant und Verwaltungsbüros. Das Haus ermöglicht »einer breiten Öffentlichkeit, eine Vielfalt künstlerischer Werke zu erleben, getreu der Aufgabe der Stiftung LVMH als Förderer der Kultur«.

Das Gebäude besitzt drei Hauptebenen: Keller, Erdgeschoss und Obergeschoss. Die wichtigsten innenliegenden Galerien sind relativ einfache Volumen aus Beton. Sie werden von kleineren Galerien mit eher spielerischen und skulpturalen Formen umringt. Diese Räume sind über eine Erschließungszone verbunden, die das zentrale Element des Raumerlebnisses bildet und reichlich Gelegenheit zum Verweilen sowie Ausblicke in den umgebenden Park bietet. Der Weg durch das Museum wird durch eine externe Erschließungsstraße ergänzt, die zu einer Reihe von Terrassen auf drei von Ost nach West ansteigenden Ebenen führt.

Das Gebäude ist fast vollständig in gläserne Segel oder »Verrières« gehüllt, die den Terrassen und externen Erschließungsflächen als permeable Hülle dienen, diese Außenbereiche räumlich definieren und die Nutzer vor Witterungseinflüssen schützen. Dadurch entstehen einzigartige Räume – fließend, dynamisch und sich stets verändernd. Die gläsernen Oberflächen haben einen ätherischen Charakter – der Eindruck einer festen Gebäudehülle verschwimmt und die Trennung zwischen Gebäude und Himmel wird aufgehoben.

Glassegel

Die insgesamt zwölf Glassegel sind als voneinander unabhängige Strukturen mit insgesamt circa 13400 m² Glas verkleidet. Ihre Größe variiert vom größten mit mehr als 3000 m² Fläche und nahezu 500 t Gewicht bis zum kleinsten mit 500 m² bei 60 t Gewicht. Ihre Ausrichtung reicht von horizontal

zu vertikal. Als Form und Identität des Gebäudes bestimmendes Element sind sie von den Segeln einer Rennyacht inspiriert: Ein Foto der America's Cup-Yacht »Susanne« aus dem Jahr 1911 diente den Architekten als Leitbild (Abb. 4). Die Form der einzelnen Segel ist Teil einer Gesamtkomposition, die von den Architekten im Wesentlichen über Modelle entwickelt wurde. Über einen Zeitraum von mehreren Jahren nahm das Projekt anhand einer Vielzahl von Iterationen Gestalt an, ausgehend von einfachen Massenmodellen über Gesamtmodelle im Maßstab 1:50 bis zu Detailmodellen in größerem Maßstab. Jedes der zwölf Segel ist einzigartig, wobei zehn von ihnen eine sehr spezifische Gestalt besitzen, die durch die Überschneidung zweier einfach abwickelbarer Flächen generiert wird. Deren Schnittlinie bildet am oberen Ende der vertikal ausgerichteten Segel eine Falte, die abwärts zu einem zentralen Punkt hin flach ausläuft. Danach wechselt die Schnittlinie ihre Richtung und nähert sich immer mehr einem perfekt kontinuierlichen Übergang der zwei Flächen. Jedes Element spielt eine bestimmte Rolle innerhalb der Komposition der Segel.

Die Struktur vermittelt einen Eindruck von Bewegung und Spannung der Oberflächen und prägt die räumliche Atmosphäre im darunter liegenden Bereich. Die Profile des Verglasungssystems erinnern dabei an die Nähte herkömmlicher Segel und verleihen den Oberflächen eine deutliche Ausrichtung. Zwischen den Teilsystemen (Verglasung, Tragstruktur der Segel und massive Primärstruktur) entsteht eine deutliche Hierarchie, und jedes einzelne ist in Bezug auf Maßstab und Materialien klar differenziert und identifizierbar.

Technische Herausforderungen

Die vertikal ausgerichteten Segel sind in einem Abstand von bis zu 20 m am Gebäude befestigt und das größte horizontale Segel krägt um 25 m aus. Den Segeln trotz dieser Dimensionen den Eindruck von Leichtigkeit und Spannung zu verleihen, wurde zu einem wichtigen Prüfstein des Projekts. Zudem musste die Tragstruktur aller Segel durch die darunter liegenden Erschließungs- und Terrassenräume hindurch zu den jeweiligen Auflagerpunkten auf der massiven Primärstruktur geführt werden. Die dort jeweils



2



3

benötigte Tragfähigkeit schränkte die mögliche Anordnung dieser Punkte stark ein. Das Ziel war, einheitliche Strukturen zu entwickeln, die in der Detaillierung und Maßstablichkeit der Komponenten ähnlich aufgebaut sind. Jedes Segel ist jedoch in jeweils eigener Weise aufgelagert. Das Tragverhalten der Segel ist daher kaum miteinander vergleichbar. Weitere Herausforderung war die Klassifizierung des Gebäudes als Monument mit einer 100-jährigen Lebensdauer. Dies stellte vor allem für die hölzernen Elemente des Tragwerks ein besonderes Problem dar. Ihre Haltbarkeit hängt im Wesentlichen vom Grad der Luftfeuchtigkeit ab. Die Kombination von Holz und Stahl führt zu unterschiedlichem Verhalten bei Temperaturschwankungen, wobei Stahl sich gegenüber Holz 2,5 mal stärker ausdehnt oder zusammenzieht. Zudem spielen Veränderungen der Holzfeuchte eine wesentliche Rolle. Holz neigt bei langfristiger Belastung dazu, zu kriechen und an Verbindungspunkten zu gleiten. Dies kann zu einer Veränderung des Kräftegleichgewichts in verschiedenen Elementen des Tragwerks und zu zeitlichen Schwankungen der Belastbarkeit führen. Tragwerke aus Holz in dieser Größe und geometrischen Komplexität verlangen eine differenzierte Ausbildung der Verbindungselemente. Um zu verhindern, dass das System aufgrund nicht-duktiler Eigenschaften der Verbindungen zunehmend brüchig wird, muss zum Ausgleich die globale Festigkeit des Tragwerks angehoben werden. Die Baubehörden verlangten, dass jedes Segel eine erhöhte Feuerwiderstandsdauer besitzen sollte, die über die üblichen Vorgaben hinausgeht: Die Segel müssen bei jedem realistischen Feuerszenario stabil und standfest bleiben. Zudem führt die Geometrie der Segel zu komplexen Windströmungen. Diese mussten sorgfältig ermittelt werden, um zu garantieren, dass im Tragwerk keine dynamische Resonanz entsteht.

Konstruktives System

Die Segel bestehen aus vier Subsystemen:

• Verglasung

Die Glasfelder bestehen grundsätzlich aus

rechteckigen, ca. 3 m x 1,5 m großen Scheiben, die heiß zylindrisch gebogen sind. Sie verfügen ausschließlich an den Längsseiten über eine tragende, integrierte Aussteifung aus Edelstahl.

• Tertiäres System

Die Glastafeln sind an einer Rasterstruktur aus hochbelastbarem Edelstahl befestigt. Die Hauptelemente des Rasters verlaufen entlang der Längsseiten der Scheiben und bestehen aus Standardelementen: Rohre mit 80 mm Durchmesser, 120 mm breite Aussteifungsplatten, ergänzt durch Rohre mit 70 mm Durchmesser in Querrichtung. Das System wird durch speziell gefertigte Abschnitte aus Rohren und Platten vervollständigt, die entlang der Ränder sowie der Schnittlinien der zwei Flächen verlaufen und integrierte Regenrinnen und Abflussrohre umfassen.

• Sekundärstruktur

Das Tragwerkssystem der Segel wird im Unterschied zur Primärstruktur des Gebäudes als Sekundärstruktur bezeichnet. Seine Hauptelemente bestehen aus Holz. Sie bilden einen Rahmen für jedes Segel und folgen zudem der jeweiligen Schnittlinie zweier Oberflächen. Nebenträger aus Stahl sind so angeordnet, dass sie den Eindruck der Bewegung und Spannung in den Segeln verstärken. Das System wird durch Aussteifungen in Leichtbauweise vervollständigt, die aus lackierten Stahlrohren und Zugstäben aus Edelstahl bestehen.

• »Tripods«

Die Sekundärstruktur wird durch tetraederförmige Kombinationen von Stützen und Bindern getragen. Je zwei oder drei sind zu einer Gruppe zusammengefügt. Ihre Anordnung bestimmt das Tragverhalten der einzelnen Segel. Ihre jeweilige Position musste sorgfältig abgewogen werden, um auch der gewünschten räumlichen Atmosphäre unterhalb der Segel zu entsprechen.

Funktionsweise des Tragwerks

Die Entwicklung des Tragwerks wurde vom Grundsatz geleitet, den visuellen Hierarchien der architektonischen Gestaltung zu dienen. Daher wurde das tertiäre System, das die Verglasung trägt, von der sekundären

Struktur entkoppelt, was auch die statischen Anforderungen an das Verglasungssystem vermindert. Dies führt zu einem merklichen Maßstabssprung zwischen den Systemen und verstärkt das Gefühl der Leichtigkeit der gläsernen Teile. So konnte das anvisierte architektonische Leitbild des windgefüllten Segels baulich umgesetzt werden. Die gläserne Oberfläche der Segel entspricht an sich nicht ganz diesem Bild, da sie ein relativ steifes Tragwerk benötigt und die Hauptlasten der Segel Eigenlasten und rund 3–5 mal so hoch wie die anfallenden Windlasten sind. Um dies abzumildern, wird die skulpturale Form der Segel dazu genutzt, aus den Flächen eine steife Schale zu bilden. Hierzu sind leichte, hochbelastbare Edelstahl-Zugstangen als Aussteifung in den Ebenen der Sekundärstruktur eingesetzt, was die Gesamtsteifigkeit um den Faktor 5 bis 10 erhöht. Dies vermindert die Biegebeanspruchung am Haupttragwerk deutlich und hat einen erheblichen Einfluss auf die Dimensionierung dieser Bauteile. Ohne diese Aussteifung hätten die hölzernen Balkenquerschnitte gut dreimal so groß sein müssen, was weder architektonisch akzeptabel noch finanzierbar war. Dieser Ansatz führt aber auch zu einer gewissen Komplexität, besonders aufgrund der höchst unterschiedlichen Geometrien der Segel. Ihre Steifigkeit hängt davon ab, wie stark die Oberflächen gekrümmt sind. Dadurch entstehen Unterschiede hinsichtlich der Steifigkeit zwischen den Segeln und innerhalb der Oberfläche jedes einzelnen Segels. Am Kopfende, wo die geometrische Faltung am extremsten ist, haben die Segel einen sehr steifen Bereich. In Richtung zur Basis, wo die Krümmung schwächer ist, nimmt die Steifigkeit ab.

Nachdem die Sekundärstruktur auf diese Weise bestimmt wurde, konnte man die Anordnung der Stützen ermitteln. Hierzu mussten sie an die jeweiligen Eigenschaften jedes einzelnen Segels angepasst werden. Der Maßstab und die Steifigkeit der Segel barg das Risiko schwerwiegender tragwerktechnischer Wechselwirkungen mit der Primärstruktur, die vermieden oder



4

zumindest kontrolliert werden mussten. Im Fall eines steifen Körpers wird dies üblicherweise durch die Entwicklung einer statisch bestimmten Tragwerkslösung erreicht. Dabei wird die Zahl der Auflagerpunkte auf das theoretisch notwendige Minimum begrenzt. So wird das System von unterschiedlichen Bewegungen der Stützen kaum beeinflusst und kann sich temperaturbedingt ausdehnen oder zusammenziehen, ohne dass wesentliche Eigenspannungen entstehen. Durch die unterschiedliche Krümmatur und Steifigkeit der Segel jedoch wäre eine statisch bestimmte Lösung zu teuer. Vorgaben des Entwurfs zur Primärstruktur führten außerdem dazu, dass viele der möglichen Auflagerpunkte nicht mit einem statisch bestimmten System vereinbar waren. Die einzige mögliche Lösung war eine akribische, fallbasierte Untersuchung unter Mitwirkung des gesamten Entwurfs- und Planungsteams. Bei jedem Segel galt es, individuelle Probleme zu lösen – was bei einem Segel funktionierte, war kaum bei einem anderen anwendbar.

Die dabei entstehenden Strukturen waren generell statisch unbestimmt. Es musste daher eine ganze Reihe technischer Probleme bezüglich möglicher Eigenspannung aufgrund von Temperaturschwankungen, feuchtebedingten Bewegungen, sowie komplexer tragwerkstechnischer Wechselwirkungen mit der Hauptstruktur gelöst werden. Diese Auseinandersetzung führte jedoch auch zu einem wesentlichen Vorteil gegenüber einer statisch bestimmten Lösung, und zwar aufgrund der entstehenden erhöhten Festigkeit. Dadurch ist das Tragwerk in der Lage, Unfallschäden zu absorbieren ohne zu versagen, alternative Lastverläufe zu entwickeln und den Ausfall eines Bestandteils zu kompensieren. Dies trägt wesentlich zur Tragsicherheit der Segel bei.

Die Verglasung

Die Verwendung von gebogenem Glas hat eine offensichtliche architektonische Wirkung. Jedoch war von Beginn des Projekts an klar, dass die Herstellung der Gläser eine sehr schwierige Aufgabe sein würde.

Die übliche Herstellungsmethode, Glas zu erhitzen und mittels stählerner Spannvorlagen zu formen, ist für kleine Maßstäbe und die wiederholte Verwendung bestimmter Geometrien gedacht. Dieses Verfahren auf eine Oberfläche anzuwenden, die mehr als 13000 m² groß ist und aus individuellen Einzelstücken besteht, wäre nicht zu finanzieren gewesen. Die Methode führt außerdem zu lediglich teilvorgespanntem Glas mit niedriger charakteristischer Bruchfestigkeit. Es kann brechen, wenn es thermischen Schocks oder Belastungen durch Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Die Suche nach einem Herstellungsverfahren für die Produktion von gekrümmtem und zugleich ausreichend vorgespanntem Glas war von fundamentaler Bedeutung für das Projekt, auch, um die Glasstärke so weit wie möglich zu reduzieren. Dies wirkt sich nicht nur auf die Wirtschaftlichkeit des Materials aus, sondern erhöht auch die Flexibilität der Gläser, wodurch sie toleranter für Bewegungen im Tragwerk werden. So wird ein weiches Tragwerk möglich, was wiederum zur Wirtschaftlichkeit beiträgt. Ebenso führt es zu einer optisch leichteren Wirkung der verwendeten Elemente.

Theoretisch könnte dies auch mit kalt gebogenen vorgespannten Gläsern erreicht werden, die auf der Baustelle in eine gekrümmte Tragstruktur eingefügt werden. Da jedoch viele der Scheiben eine sehr enge Krümmung besitzen, wäre die Spannung im Glas beim Biegen zu groß geworden, um zusätzlich die Windkräfte aufnehmen zu können. Die Lösung fanden wir in der neuesten Generation industrieller Biege- und Vorspannungsanlagen. Diese ermöglichen, qualitativ hochwertige vorgespannte zylindrische Glaspaneele herzustellen (Abb. 16). Kern der Technologie ist ein Kühlmodul mit einem komplexen Mechanismus, der in der Lage ist, heißes Glas in einen bestimmten Radius zu biegen, um dann in schneller Folge kalte Luft auf dessen Oberfläche zu blasen. Währenddessen wird die Scheibe hin und her geschoben, um eine möglichst gleichmäßige Kühlung der Oberfläche zu erreichen. Das computergesteuerte Verfahren gewähr-

leistet, dass jede Scheibe entsprechend ihrem individuellen Radius gebogen werden kann, ohne dass wesentliche Zusatzkosten anfallen. Zudem kann jede Scheibe in einem bestimmten Winkel in die Maschine eingeführt werden, sodass die Krümmungsachse nicht parallel zu den Seiten verlaufen muss. Eine wichtige strategische Entscheidung war, so früh wie möglich einen glasverarbeitenden Betrieb hinzuzuziehen. Aufgrund ihrer umfangreichen Erfahrung mit Biegemaschinen für Glas wurde die italienische Firma Sunglass ausgewählt. So war das Team in der Lage, Lösungen auszuprobieren und deren Wirtschaftlichkeit bereits früh zu untersuchen. Die Firma investierte in die Hochrüstung der firmeneigenen Öfen, um größere Gläser als bisher produzieren zu können. Obwohl die Anlage die Möglichkeit eröffnet, für jede Scheibe einen eigenen Radius und Winkel entlang der Krümmungsachse zu wählen, bleibt die geometrische Einschränkung, dass nur zylindrische Formen produziert werden können. Da das Projekt eigentlich keine zylindrischen Formen aufweist, musste diese Einschränkung durch geometrische Annäherung überwunden werden. Es galt herauszufinden, welche Zylinderform am besten zu jeder einzelnen Scheibe passt (Abb. 10). Diese Annäherung führt jedoch unweigerlich zu Lücken zwischen einzelnen Gläsern. Um die Arbeitsschritte zu kontrollieren und zu reduzieren, war es daher notwendig, einen angemessenen Satz an Zylindern für die Gesamtheit einer jeden Oberfläche zu ermitteln. Hierzu diente die Anwendung einer iterativen computerbasierten Methode, die solange durchgeführt wurde, bis für alle Scheiben eine visuell akzeptable Toleranz erreicht werden konnte. Für die überwiegende Mehrheit der Oberflächen lieferte diese Art der zylindrischen Diskretisierung sehr gute Resultate. Jedoch gab es einige extreme Fälle, wo die entworfene Oberfläche doppelt gekrümmt oder stark konisch geformt war. Dort entstanden größeren Lücken zwischen den Gläsern und wurden zur Herausforderung beim Entwurf des Verglasungssystems. Entlang der Längsseite der Scheiben



6

konnte die Fuge auf 10 mm begrenzt werden. Sie wird durch eine Blende verdeckt. In Querrichtung, wo die Gläser mittels Silikonfuge verbunden sind, konnte die Fuge auf optisch kaum wahrzunehmende 5 mm begrenzt werden. Charakter und Komposition wurden in umfangreichen Forschungen und Versuchen entwickelt und waren Ergebnis einer engen Zusammenarbeit zwischen Gehry Partners und Studios Architecture, dem ausführenden Büro. Die Architekten suchten nach einem subtilen Grad an Transluzenz, um der Verglasung Präsenz zu verleihen und sicherzustellen, dass sie sowohl Licht als auch Schatten zur Geltung bringt.

Zusätzlich sollte die Verglasung den Besuchern auf den Terrassen Sonnenschutz bieten. Es wurde ein zweischichtig laminierter Aufbau aus extra-weißem eisenarmem Glas mit 6 mm + 8 mm Stärke gewählt, der gewährleistet, dass gebrochene Gläser nicht herabfallen können. Das Weißglas wurde zu 50 % mit Punkten mit 2 mm Durchmesser bedruckt, in Kombination mit einer zu 24 % reflektierenden Beschichtung. So entstand eine Verglasung, deren Transparenz sich unter unterschiedlichen Lichtverhältnissen radikal verändert. Innerhalb eines Jahres konnten insgesamt mehr als 3600 Scheiben produziert werden, jede einzelne ein Unikat.



7

4 »Susanne«, America's Cup Yacht der J-Klasse (Foto 1911)

5

3D-Modell der Gesamtkonstruktion

4 Susanne, America's Cup Yacht, J Class (photograph 1911)

5

3D model of the overall structure

Das tertiäre System

Der Verglasungssystem gründet auf dem Prinzip, dass das Tragwerk der Gläser so weit wie möglich statisch bestimmt sein sollte. Dies stellt nicht nur sicher, dass jede Scheibe vor Wechselwirkungen mit dem Tragwerk geschützt ist, sondern auch, dass das System sich an diverse Geometrien anpassen kann. Dieses Prinzip wurde durch den Einsatz von Edelstahl-Aussteifungsprofilen umgesetzt, die an den Längsseiten jedes Glaspaneels mittels Silikon-Verklebung befestigt sind. Dadurch genügen jeweils vier Stellen zur Befestigung der einzelnen Scheiben am Tertiärsystem. Diese Befestigungspunkte sind als Gelenklager ausgebildet, die die Belastung der Gläser in Grenzen halten (Abb. 12). Das ausgeklügelte und komplexe Befestigungssystem stellte für die ausführende Firma ECM eine nicht zu unterschätzende Investition dar, zumal das Detail in rund 14000-facher Wiederholung Verwendung findet. Dies hat sich jedoch dank der daraus folgenden Erleichterung bei der Montage der gläsernen Elemente ohne Zweifel gelohnt. Grundlegendes Element des tertiären Systems ist ein speziell hergestelltes Edelstahlprofil bestehend aus einem Rohr mit 80 mm Durchmesser und einer aussteifenden 120 mm starken Platte. Da diese mittels Laser geschnitten wird, ist eine kontrollierte Herstellung der jeweiligen Geometrien möglich. Das Rohr kann die möglichen Verdrehungen zwischen den verschiedenen Teilen absorbieren. Mit den in Querrichtung verlaufenden Rohren mit 70 mm Durchmesser sind an den Segeln Profile mit insgesamt 12 Kilometern Länge verarbeitet. Sie wurden mithilfe der neuesten robotergestützten Schweißmethoden aus Duplex-Edelstahl hergestellt. Durch die Verwendung dieses hochbelastbaren Materials können Querschnitte minimiert und höchstmögliche Korrosionsbeständigkeit und Haltbarkeit erzielt werden.

Die Sekundärstruktur aus Holz

Relativ früh entschied man sich dafür, Holz für die Sekundärstruktur zu verwenden. Es bildet einen warmen Kontrast zu Stahl und



8

Glas und lässt sich perfekt an die komplexen gekrümmten Geometrien der Segel anpassen.

Insgesamt fanden circa 800 m³ Holz Verwendung. Dabei waren die variablen Eigenschaften des Materials und seine natürlichen Ungenauigkeiten zu berücksichtigen. Holz hat eine deutliche Ausrichtung und ist viel belastbarer in Faserrichtung als quer dazu. Es dehnt sich und schwindet je nach Feuchtegehalt, vor allem quer zur Faserrichtung. Dies kann dazu führen, dass Schnittholz reißt wenn es trocknet, sich bei Verwendung gekrümmter Profile wirft oder seine Geometrie verändert. Seine Belastbarkeit hängt von der Lastdauer ab. Zudem neigt Holz dazu, nach einer gewissen Zeit an den Verbindungen zu kriechen und zu gleiten. Schnittholz ist von Natur aus höchst beständig, kann aber im Lauf der Zeit Schaden nehmen, etwa aufgrund von Pilzbefall, abhängig von der Feuchtebelastung. Obwohl außen angebracht, ist der Großteil der Holzbauteile vor direkter Beregnung geschützt und kann nach Anwendungsbereich Klasse 2 gemäß Eurocode eingestuft werden. Die Architekten wollten Holz aus nachhaltigen europäischen Quellen verwenden. Dies schloss tropische oder exotische Sorten aus, die allgemein eine bessere Beständigkeit besitzen. So fiel die Wahl auf Lärchenholz, ein harzhaltiges Weichholz, das sich für Umweltbedingungen der Klasse 2 gut eignet.

Dort, wo Teile der Balken dem Regen unmittelbar ausgesetzt sind, was eher dem Anwendungsbereich Klasse 3 entspricht, wurden sie durch Bekleiden mit Edelstahlblech örtlich geschützt. In extremeren Fällen wurde Holz durch Stahl ersetzt.

Das Holz muss auch vor Termitenbefall geschützt sein. Hierzu dient ein aufgespritztes Insektizid in Kombination mit einer Lasur, die die Oberfläche UV-beständig macht und die Feuchtepermeabilität begrenzt.

Aufgrund der Abmessungen musste Brett-schichtholz eingesetzt werden. Es wurden Träger aus 25 mm dicken verleibten Bohlen gewählt. Dies bot eine Reihe von Vorteilen, etwa in der Herstellung, wo eine bestimmte

Krümmung für jeden Träger erzielt werden musste. Die Bohlen wurden hierzu auf computergesteuerten Spannvorrichtungen gebogen und verleibt. Die Trägerquerschnitte sind in der Regel 400 mm breit und 600 bis 1200 mm hoch. Der Großteil der Elemente ist nur in einer Ebene gekrümmt, an der Schnittstelle zwischen den Oberflächen jedoch findet eine komplexere Verdrehung statt und es entstehen doppelt gekrümmte Geometrien. Diese werden erzeugt, indem ein gekrümmter, ebener Träger in 25 mm dicke Schichten zerschnitten und danach wieder zusammengeklebt wird. Dabei werden diese, der gewünschten Krümmung entsprechend, erneut auf einer Spannunterlage entlang der anderen Achse gebogen. Mittels einer fünfachsig computergesteuerten Maschine wird der Träger dann gefräst und fertiggestellt.

Mit Brett-schichtholz können größere Querschnitte realisiert werden, da jede einzelne Bohle klassifiziert und speziell ausgewählt werden kann. Es entstehen Querschnitte mit größerer Homogenität, die weniger anfällig sind für holztypische natürliche Unregelmäßigkeiten. So konnte relativ hochbelastbares Brett-schichtholz GL28 hergestellt werden. Das Holz stammt aus Hochgebirgswäldern in Österreich. Dabei wurden nur Bohlen mit einer hohen Dichte zwischen 500 und 700 kg/m³ verwendet. Der Feuchtegehalt des Schnittholzes wurde sorgfältig kontrolliert, um das Risiko der Rissbildung zu vermindern.

Für das Projekt wurden alle Bohlen vorge-trocknet, um einen kontrollierten Feuchtegehalt von 9 bis 14 % zu erzielen. Nach ein paar Jahren wird sich der Feuchtegehalt der Holzelemente dem Pariser Klima anpassen und auf 14 % einpendeln. So nimmt das Holz über seinen Lebenszyklus hinweg einen höheren Feuchtegehalt an, und das Risiko der Rissbildung durch Trocknung wird vermindert.

Der Herstellungsprozess wurde an die doppelt gekrümmten Träger angepasst und hat den Vorteil, dass in beiden Krümmungsrichtungen Leimschichten in Oberflächennähe gebildet werden. Dadurch können Verände-

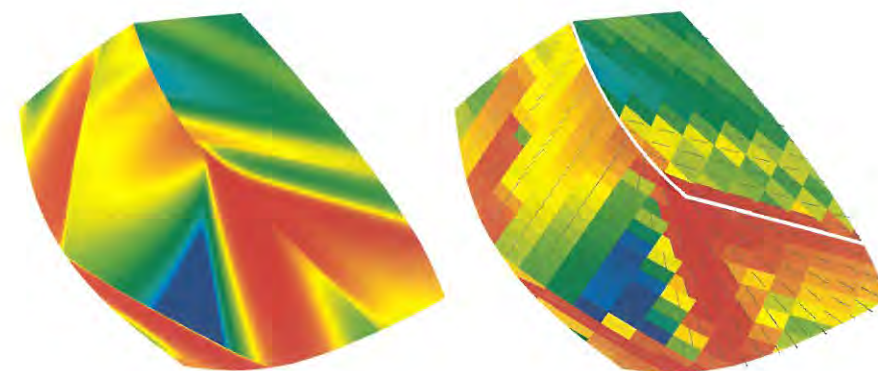
rungen des Feuchtegehalts im Querschnitt verlangsamt werden, und die Holzbauteile werden insgesamt weniger anfällig für saisonale Umweltveränderungen. Risse können so nur auf der äußersten Holzschicht entstehen. Diese Art der doppelten Laminierung wurde letztendlich sogar bei den ebenen gekrümmten Elementen angewendet, um ihre Haltbarkeit und ihren Widerstand gegen Rissbildung zu erhöhen.

Wie im Holzbau üblich, sind auch in diesem Projekt die Knotenpunkte die empfindlichsten Elemente im System. Die Art des Tragwerks verlangte, dass die Verbindungen die Hauptlasten vollkommen durchgängig in Faserrichtung des Holzes abtragen sollten. Aufgrund der geometrischen Komplexität der Struktur waren Exzentrizitäten jedoch unausweichlich. Dadurch entstehen zusätzliche sekundäre Torsions- und Biegekräfte. Das klassische Verbindungsdetail sieht vor, eine Stahlplatte in einen Schlitz in den Querschnitt einzufügen und die beiden Elemente über ein Raster von Querbolzen mit 16 mm Durchmesser zu verbinden. Dieser Ansatz musste angepasst werden, indem zwei Platten eingeführt wurden. Dadurch konnten zugleich Zug- und Druckkräfte im Bauteil aufgenommen werden, um sekundäre Torsions- und Biegekräfte aufzunehmen. Dies erforderte hochpräzise Herstellungsverfahren, um die vorgebohrten Löcher für die Bolzen im Holz perfekt mit denen der doppelten Platten abzustimmen. Für alle Bolzen und Platten wurde Edelstahl verwendet, um ein Maximum an Haltbarkeit der Fügung zu gewährleisten. Die berechnete Leistungsfähigkeit der Verbindungen wurde in Versuchen im Maßstab 1:1 bestätigt.

Sowohl das für die Glassegel des Gebäudes der Fondation Louis Vuitton gewählte konstruktive System als auch seine Umsetzung im Detail unterstützen die Absicht der Architekten: ein niveauvolles und vielfältiges Raumerlebnis zu erschaffen, das zwischen den Ausstellungen zeitgenössischer Kunst einerseits, sowie dem umgebenden Wald und dem Jardin d'Acclimatation andererseits eine starke Verbindung aufbaut.



9



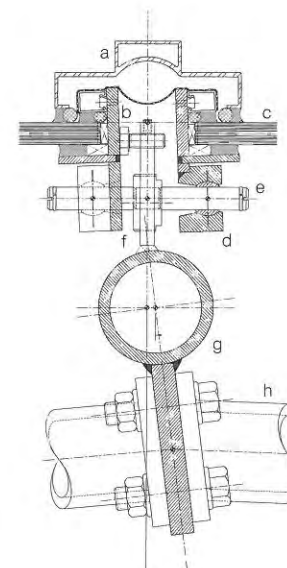
10



11

- 9 Montage eines Verglasungselements
- 10 Simulationsmodell zu Biegeradien der Gläser
links: Oberfläche eines Referenzsegels mit farblicher Markierung der minimalen Krümmung
rechts: Zuordnung der Gläser zu entsprechenden zylindrischen Biegeformen (die zentralen Zylinderkanten sind als graue Linien dargestellt)
- 12 Schnitt Glasbefestigung an tertiärem System Maßstab 1:5
- 13 Axonometrie der Sekundärstruktur eines Segels

- 9 Installation of a glazing element
- 10 Simulation model of bending radii of the glazing
left: surface of a reference sail with colour-coded designation of the minimal curvature
right: assignment of the glazing panels to the corresponding cylindrical bending form (the central cylinder edges are represented as grey lines)
- 12 Section through connection of glazing to the tertiary system, scale 1:5
- 13 Axonometry of the secondary structure of a sail



12

- a Deckleiste Strangpressprofil Aluminium
- b glastragendes Edelstahlprofil
- c VSG aus Weißglas ESG 6 + 8 mm, mit Edelstahlprofil verklebt
- d Befestigungsring Edelstahl sphärisch geformt, in Langloch gleitend
- e Verbindungsstift Edelstahl
- f Verbindungsplatte Edelstahl
- g Edelstahlrohr Ø 70 mm
- h Edelstahlrohr Ø 80 mm

- a extruded aluminium cap
- b glass-supporting stainless-steel profile
- c laminated safety glass of low-iron glass (toughened glass) 6 mm + 8 mm, glued to stainless-steel profile
- d stainless-steel fastening ring, spherically formed, gliding in slit
- e stainless-steel pin
- f stainless-steel joint plate
- g Ø 70 mm stainless-steel CHS
- h Ø 80 mm stainless steel CHS



13

Matt King ist leitender Teilhaber des Ingenieurbüros T/E/S/S. Ab den ersten Skizzen an der technischen Entwicklung der Fondation Louis Vuitton beteiligt, regte er das Planungsteam zur Entwicklung der großen, das Gebäude umhüllenden Glassegel an. 2012 erhielt er den »Grand Prix National de l'Ingénierie«.

Jacques Raynaud ist Architekt und Ingenieur und war verantwortlich für Geometrie und technische Gestaltung der Glassegel. Nach mehr als 20 Jahren Erfahrung in der Entwicklung komplexer Tragwerks- und Fassadenstrukturen im Ingenieurbüro RFR-Group gründete er dort die Abteilung für Tragwerksgestaltung, die optimierte Lösungen für außergewöhnliche Architektur entwickelt.



14

The Fondation Louis Vuitton, designed by Frank O. Gehry and due to be completed in 2014, is a museum for contemporary art, located next to the Jardin d'Acclimatation in the Bois de Boulogne. It houses around 3500 m² of exhibition space in 11 galleries of varying size and volume, a 350-seat auditorium, a bookstore, a restaurant, and administrative areas. Its mission is to "enable a broad public to enjoy a multitude of artistic creations, deepening LVMH's ongoing commitment to promoting culture."

The building is organised on three main levels; basement, ground floor and first floor. Its principal interior galleries are relatively simple, box-like volumes constructed in concrete. Around these are situated smaller-scale side galleries, whose forms are more playful and sculpted. These spaces are connected by a circulation zone, which acts as a central element of the experience, offering multiple opportunities to pause, with views out to the surrounding woods. The journey through the museum is completed by an external circulation route leading to a series of terraces on three levels, stepping up from east to west. The entire building is wrapped in a series of glass sails, or "verrieres", which serve as a permeable en-

sure for the terraces and exterior circulation zones, defining their volumes and sheltering users from the elements. The resulting spaces are unique, while the nature of the glazed surfaces themselves are ethereal, blurring the sense of enclosure and breaking down the distinction between the building and the sky.

Verrieres

There are twelve verrieres – each one an independent structure – supporting a total of around 13,400 m² of glazing. They vary in size from the largest, at over 3,000 m² and nearly 500 tonnes, to the smallest at 500 m² and 60 tonnes, and range in orientation from horizontal to vertical. They are a central element in the external form and identity of the building, taking their inspiration from the sails of racing yachts. The photo below of the America's Cup J class yacht Susanne, from 1911, served as a focal image for the project.

The form of each verriere is part of a global composition, developed by the architect largely through the medium of scale models. The project took shape through multiple iterations, spanning a number of years; from simple massing models up to models at 1:50 of the whole building and even larger scale detail models. While each verriere is unique, ten of the twelve have a very particular form, generated by two intersecting, broadly developable surfaces. At the head of the vertical verrieres the intersection is marked by a sharp fold that flattens out, moving down the verriere, to a central point. Beyond that the intersection changes direction and approaches a perfect continuity or tangency between the two surfaces. Each component of the system plays its part in the composition of the verrieres. Structure is laid out to enhance the perception of movement and tension in the surfaces, and create the sense of space and volume below. Surfaces are given a strong directionality by emphasizing the principal tertiary support elements, or mullions, evoking the seams of traditional sails. A distinct hierarchy is maintained between systems (glazing, tertiary supports, and principal structure), with each one clearly identifiable and differentiated in terms of its scale and materials.

Matt King is partner in the engineering firm T/E/S/S. From the very first sketches, King was involved in the technological development of the Fondation Louis Vuitton; he prompted the team to develop the large glass sails that envelop the building. In 2012 he received the "Grand Prix National de l'Ingénierie".

Jacques Raynaud is an architect and engineer and was responsible for the geometry and technical configuration of the glass sails. After more than 20 years' experience in the development of complex structures and facades at the RFR Group, an engineering firm, he established its Department of Structural Design, which develops optimised solutions for extraordinary architecture.

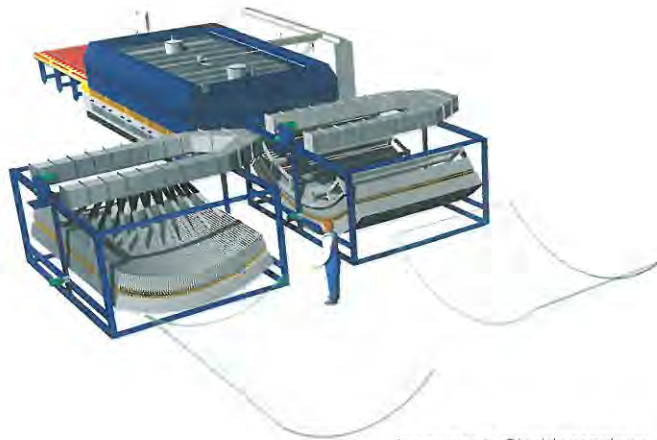
Technical challenges

The vertical verrieres are hung up to 20 m out from their supports on the building and the largest horizontal verriere cantilevers 25 m from the building. Given this scale, one of the principal challenges of the project was to evoke the lightness and tension of a sail. Furthermore, this structural feat had to be accomplished while threading the supporting structure of each verriere through the circulation and terrace spaces below to support points whose locations were severely restricted by the capacity of the primary building structure. The goal was to create a coherent family of structures, with similar detailing and scale of components, but the reality was that each verriere was so unique in its support configuration that its structural behavior bore little or no resemblance to that of its neighbors. A second major challenge for the design of the structures was the classification of the building as a monumental structure with a 100-year design life. This issue was particularly delicate for the timber elements of the structure, whose durability depends principally on their degree of exposure to humidity. The mix of timber and steel also generates issues of differential movements, either under thermal loads, where the steel expands and contracts at more than 2.5 times the rate of timber, or due to changes in the moisture content of the timber. Timber has a tendency to creep and slip at connections under long-term loads, changing the balance of forces in various elements of the structure, while also displaying time-dependent strength characteristics.

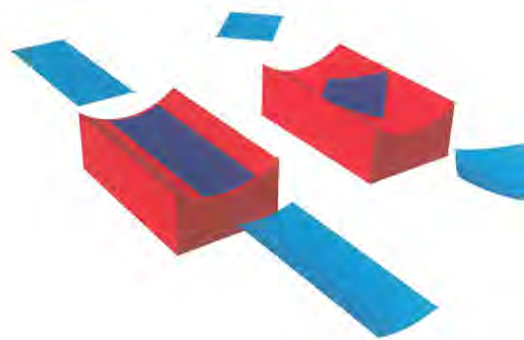
Creating structures of this scale and geometrical complexity in timber posed multiple challenges, particularly in the development of structural connections. These introduce a degree of fragility into the system, due to their non-ductile failure characteristics, which must be compensated by an increased level of global robustness in the structure. The building authorities also required that each verriere have an enhanced performance under fire conditions, above and beyond classic code criteria, such that they are stable and remain in place under any realistic fire scenario. Final-



15



Axonometrie Glasbiegeanlage



Axonometry of glass-bending equipment

16

ly, the geometry of the verrières created complex wind flows, which had to be carefully assessed to ensure that they did not provoke a resonant dynamic response in the structures.

Constructive systems

The verrières comprise of four key sub systems, described below:

- Glazed skin

The glazing panels are typically rectangular, hot-bent cylinders, roughly 3 m × 1.5 m in size. They are supported only their long sides, by an integrated stainless-steel support stiffener.

- Tertiary system

The panels are carried by a high-strength Duplex stainless steel grid. The principal elements of this grid run in the direction of the panels' long sides and are typically fabricated sections formed from an 80 mm diameter tube and a 120 mm deep flat plate stiffener. A simple 70 mm diameter tube forms the grid in the other direction. The system is completed by complex fabricated tube and plate sections running along the edges, and intersections of the two surfaces. These integrate a gutter and downpipe, forming the principal drainage elements of each surface.

- Secondary structure

The main load bearing system of the verrières is named the secondary structure (as opposed to the primary structure of the building). Timber is adopted for the principal elements, framing the external perimeter of each verrière and typically tracing the intersection of the two surfaces. Infill secondary beams in steel are configured to enhance the sense of movement and tension in the sails. The system is completed by lightweight bracing, made up from painted steel tubes and stainless tension rods.

- Tripods

The secondary structure is supported by a series of struts and ties, called the tripods, arranged individually or in groups of two or three. Their configuration determines how each verrière functions structurally, but the location of each tripod also had to be carefully chosen to suit the use and sense of space below each verrière.

Structural function:

One of the key principles in developing the structure was to follow as closely as possible the visual hierarchies in the architecture. Thus the tertiary system supporting the glazing was isolated from secondary structure to ensure that the structural demands imposed on it were minimized. A significant jump in scale between the two systems was maintained through this logic, enhancing the sense of lightness of the glazing system in keeping with the image of a lightweight sail.

The desired architectural image is of a billowing sail – a flexible tension form generated by lateral wind pressure. The glazed, panelized skin of the verrières is not particularly coherent with this image, as it requires a relatively rigid support. This inconsistency is further exacerbated by the fact that the principal load on the verrières is in reality gravity, which is around 3 to 5 times greater than the lateral wind loads. To mitigate this, the inherent rigidity of the sculptural form of each verrière is exploited by bracing its surfaces to form a rigid shell.

This is achieved by the addition of lightweight, high-capacity tension-rod bracing (of stainless steel) in the planes of the secondary structure. This bracing has the effect of increasing global stiffness by a factor of around 5 to 10. More importantly, the approach radically reduces the bending demand on the principal structural elements, which in turn has a significant impact on the size of these elements. In the case of the timber elements, without this bracing, beam would have to be around three times deeper – not only architecturally unacceptable but quite simply outside the range of feasibility.

But this approach brings with it a certain degree of complexity, particularly due to the highly variable nature of the geometry of each verrière. Stiffness depends on the degree of curvature in the surfaces, and each verrière has its own particular characteristics. Not only does this create differences between verrières, but also significant variation in stiffness over the area of each one. The verrières typically have a very rigid zone at their heads, where the fold geometry is most

acute, and this decreases down towards their bases, where curvature is softer.

With the concept for the secondary structure fixed, the challenge posed was to find a configuration of tripod supports adapted to the particular characteristics of each verrière. At the scale and stiffness of the verrières there is a risk of a significant structural interaction with the primary structure. This is ideally avoided and at minimum must be controlled.

Typically this is achieved for a rigid body by developing an isostatic support solution – one in which the number of supports is limited to the theoretical minimum required to prevent the structure becoming a mechanism. In such a case the system is unaffected by differential movements of its supports, and is free to expand or contract under temperature loads, without generating internal stresses.

In practice the variable curvature and rigidity of each verrière meant that perfectly isostatic solutions were not typically feasible. Moreover, the potential support points were often ill-adapted to an isostatic solution due to the numerous constraints imposed on them by the building and primary structure.

The only process possible to develop and test solutions was a painstaking case-by-case effort, involving the entire design team. Each verrière presented its own particular set of problems, and what worked for one was rarely applicable to the next. The resulting structures were typically hyperstatic, which leads to issues of internal stresses due to differential temperature and moisture movements, and a more complex structural interaction with the primary structure.

While this created its own set of technical concerns that had to be resolved, due to the increased robustness it provides, it did offer one significant advantage over an isostatic solution. This robustness gives a structure a capacity to absorb accidental damage without collapse, as it is able to develop alternative load paths to compensate for the loss of components. Clearly this is a significant advantage in terms of the security of the verrières.

17 Herstellung der gebogenen Leimholzbinde

17 Producing the curved glulam trusses

17



Glazing panels

Notwithstanding the evident architectural benefits of adopting curved glazing, it was clear from the earliest stages of the project that the fabrication of the panels would pose a major challenge. The classic fabrication technique of heating and softening glass, then forming it onto steel molds, is adapted to small-scale, repetitive geometries, but would be prohibitively expensive if applied to a surface area of more than 13,000 m².

Furthermore, the technique results in annealed glass, with a low characteristic strength and a susceptibility to rupture provoked by thermal shock under differential solar loads. The search for a fabrication process that could produce curved, high-strength tempered glass was of fundamental importance to the project in order to minimize the thickness of glass required. This not only presents an economy of material, but also increases the flexibility of the panel, making it more tolerant to movements of the structure. This, in turn, allows for a softer structure, leading to further economies, and, critically, to a reduction in the visual bulk of its elements. Theoretically this could have been achieved by cold-bending tempered glass to the required form: by first fabricating flat panels and then forcing them onto a curved supporting frame on site. However, many of the panels had a very tight curvature, which would have generated excessive stress in the glazing to take up the desired form, leaving insufficient residual capacity for resisting wind loads. The solution to this delicate problem was found in the latest generation of industrial bending and tempering ovens that can produce high-quality tempered-glass cylindrical panels (see illustration).

At the core of this technology is a quenching module whose complex mechanism is able to bend hot glass to a chosen radius, then rapidly blow cool air on its surface, while rocking the panel back and forth to ensure that the cooling of its surface is as homogeneous as possible. It is computer controlled and thus enables each panel to be bent to its own unique radius without significant added cost. Furthermore, each panel may be introduced

into the machine at a specific angle, so that its axis of curvature is not parallel to its sides.

The decision was taken to engage as early as possible with a glass transformer, and Sunglass of Italy was chosen on account of its extensive experience with glass-bending machines. This proved invaluable to the development of the technology, as not only was the team able to test solutions and feasibility at an early stage, but Sunglass was also able to upgrade its ovens to produce larger panels.

While the machine opens up the possibility for each panel to have a unique radius and angle to its axis of curvature, it still has a significant geometrical limitation in that it can only produce cylindrical forms. As none of the project's panels are cylindrical, this limitation had to be overcome by a geometrical approximation where the best-fitting cylinder was found for each panel.

The approximation inevitably leads to theoretical steps between panels, whose magnitude depends not just on the geometry of the panel itself, but also on that of its neighbors. Thus, in order to control and minimize steps it was necessary to find an appropriate set of cylinders for the whole of each surface. This was achieved using an iterative computational technique that ran until the steps in all panels were limited to a visually acceptable tolerance. This kind of cylindrical discretization provided very good results for the great majority of the surfaces. However, for some extreme cases – typically where the design surface was doubly curved or strongly conical – the steps between panels were significant and constituted an important constraint for the design of the glazing system. Along the long edge of panels, where the joint was covered by a decorative cap, the maximum step was limited to 10 mm. In the other direction, where the joint is a simple silicone seal, the step was limited to 5 mm, which was not visually perceptible. The nature and composition of the panels was the subject of extensive trials and research, completed in close collaboration with Gehry Partners and Studios Architecture, the project architect of record. The architect was searching for a subtle degree of translucence to give a presence to the glazing and ensure

that it captured light and shadows. Additionally, the glass had to provide solar protection to people on the terraces. Extra-white, low-iron glass was adopted in a two-ply laminated buildup of 6 mm plus 8 mm to ensure that the panels would remain in place if accidentally broken. A white frit with a 50% coverage of 2 mm diameter dots was incorporated, combined with a 24% reflective coating, creating a panel whose transparency changes radically in different light conditions. In all, more than 3,600 panels, each one unique, were produced over a period of around one year to cover all the surfaces of the 12 sails.

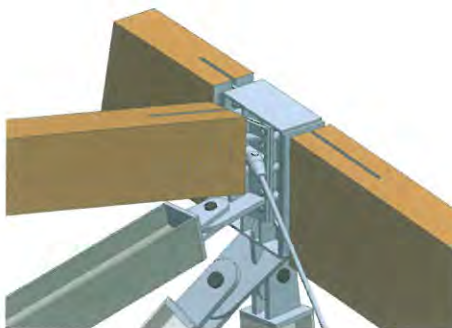
Tertiary system

The design of the glazing system is founded on the principle that the panel supports should be as close as possible to isostatic. This not only ensures that each panel is isolated from interaction with the supporting structure, but also that the system adapts to a wide range of geometrical conditions. The technical implementation of this theoretical principle was achieved by silicone-bonding stainless-steel stiffener plates to the long sides of each glass panel, enabling it to be supported on only 4 fixing points. These incorporate sliding spherical bearings, ensuring that each only provides a restraint normal to the panel surface. The panel is then held in its plane by 3 adjustable bearing fixings. The relative sophistication and complexity of the system represented a significant investment on the part of the contractor, ECM, given that the detail is repeated around 14,000 times. However, it more than paid this back due to its universal applicability and the resulting ease of glass installation.

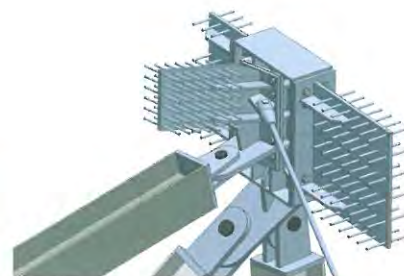
The principal element of the tertiary system is a fabricated stainless-steel profile composed of an 80 mm tube and a 120 mm deep plate stiffener. The laser-cut plate offers geometric control of fabrication, while the tube readily absorbed the variation in twist between the various components. A 70 mm tube completes the structural grid in the other direction. The verrières required about 12 km of these structural profiles. To minimise their dimensions and ensure the highest level of

18, 19 Axonometrie eines Knotenpunkts der Leimholz-
binder und der Stahlverbindungselemente
20 Knotenpunkt am Gebäude

18, 19 Axonometry of a joint of the glulam truss and the
steel connecting elements
20 Actual joint



18



19

corrosion resistance and durability they were fabricated in Duplex, a high-strength stainless steel.

Timber secondary structure

The use of timber as a component of the secondary structure was integrated into the project relatively early both to introduce a warm contrast to the steel and glass, and because it was perfectly adapted to the complex curved geometries of the verrière. It was laid out to trace the principal lines of each surface, requiring a total of around 800 m³ of timber.

This introduced a series of challenges into the project, primarily due to its non-uniform material characteristics. It has a marked directionality, being much stronger in the direction of the grain, the natural fibers running through wood, than perpendicular to it. It expands and contracts with changes in its moisture content, particularly in the direction perpendicular to the grain. This can cause the timber to split on drying, or, with curved profiles, to warp or straighten. Its strength depends on the duration of load, and it tends to creep and slip at connections over time. Timber is naturally highly durable, but can degrade over time due to fungal attack, depending critically on its exposure to moisture. Although exterior, the majority of the timber is protected from direct exposure to rain, placing it in a Service Class 2 Environment, as defined by Eurocode.

The architects wanted to use timber from sustainable European sources, precluding the use of tropical or exotic species, which tend to have the best durability. Consequently, it was decided to use larch, a resinous softwood well adapted to Service Class 2 environments. Where parts of the beams were exposed directly to rain, closer to a Service Class 3 environment, local protection was provided by covering the area with a stainless-steel cladding. In more extreme cases, the timber was substituted with steel. The timber also needed protection from termite attack, as well as a lazure to protect the surface from UV degradation and limit its permeability to moisture.

The structure's scale necessitated glulam technology. This offered numerous advantages

in fabrication, where the specific curvature required for each beam was readily reproduced by bending the planks on computer-controlled jigs during gluing. Beam sections were typically 400 mm wide and ranged in depth from 600 mm to 1200 mm.

The majority of the elements are only curved in one plane, but at the intersection between surfaces, a more complex twisting, doubly curved geometry is generated. These sections are fabricated by producing a curved planar beam, then cutting it into 25 mm thick slices and re-gluing these together on a jig with the required curvature in the other axis. The section is then finished using a computer-controlled five-axis milling machine. The glulam approach can also generate higher-strength sections, as each individual plank can be graded and specifically chosen, creating a more uniform section, less prone to natural defects in the wood. Relatively high-strength GL28 timber was produced in this way, sourcing the planks from high-altitude forests in Austria, and only employing planks with a high density ranging from 500 to 700 kg/m³, and an average density of 585 kg/m³.

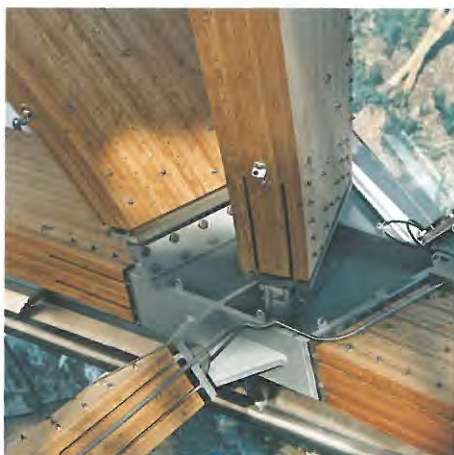
To reduce the risk of fissuring and splitting of the timber over time the moisture content of the timber was also carefully controlled. Over a period of years the moisture content of external, sheltered timber in the Paris climate will settle down to around 14%. For the project, all of the planks were pre-dried to a controlled

moisture content of 9% to 14%. This ensures that the timber's moisture content will tend to increase over its lifespan, reducing the risk of fissuring due to drying.

The fabrication process adopted for the double-curved beams also has the advantage of introducing glue planes close to the surface in both directions. This tends to slow down changes in moisture content of the section, making it less sensitive to cyclical changes in the external environment, both reducing the risk of fissuring, and limiting crack depth to the outer layer of timber. In the end, this form of double lamination was adopted even for the planar curved elements to enhance their durability and resistance to fissuring.

In timber design the connections are typically the system's most critical elements, and this was certainly true for this project. The nature of the structure meant that connections had to be continuous, transferring principal loads in the strong direction for timber (axial and bending forces in the direction of the grain). However, due to the structure's geometrical complexity, eccentricities were inevitable, and these tended to introduce additional secondary torsional and bending forces. The classic connection detail involves slotting a vertical steel plate into the timber section and linking the two with a grid of 16 mm diameter transversal pins. This approach had to be adapted to incorporate two plates in order to generate the push-pull necessary to transfer the secondary torsion and bending forces. This technique required high-precision fabrication so that the pre-drilled holes for the pins in the timber aligned perfectly with those in the twin plates. Stainless steel was used in all of the pins and plates to ensure maximum durability of the assembly. The theoretical strength of the connections was then justified by full-scale testing.

Both the construction system selected and the detailing and execution of the verrières for the Fondation Louis Vuitton support the architects's intention to create a rich and varied experience combining contemporary art display with a strong connection to the surrounding woods and the Jardin d'Acclimatation.



20

Projektbeteiligte • Hersteller • Ausführende Firmen

Persons and organizations involved in the planning • Contractors and suppliers



Seite 1172 / page 1172
Pavillon am Vieux Port in Marseille
The Vieux Port Pavillon in Marseille

Quai des Belges, 13001 F–Marseille

- Bauherr / *Client*: Gemeindeverband Marseille Provence Métropole, F–Marseille
- Architekten / *Architects*: Foster + Partners, GB–London
www.fosterandpartners.com
- Mitarbeiter / *Team*: Norman Foster, Spencer de Grey, Grant Brooker, Andy Bow, Roger Ridsdill Smith, Jürgen Koppers, Max Neal, Merino Ranallo, Adeline Morin, Caroline Talling, Andy Coward, Andrea Solignon, Laura Smith, Mike Holland, Adrian Weidmann mit / *with*: Tangram Architects, F–Marseille Ingerop Méditerranée, F–Marseille AIK Yann Kersale, F–Paris
- Leitung Design / *Lead Design*: Michel Desvigne, F–Paris
www.micheldesvigne.com
- Tragwerksplanung und Haustechnik / *Structural and mechanical engineering*: Foster + Partners mit / *with*: Ingerop Méditerranée, F–Marseille
www.ingerop.com
- Lichtplanung / *Lighting design*: AIK Yann Kersale, F–Paris
www.ykersale.com

- Generalunternehmer / *Main contractor*: Eiffage Construction Métallique, F–Colombes
www.eiffageconstructionmetallique.com
- Dachpaneele / *Canopy*: Euroshelter
- Edelstahlbleche und -stützen / *Stainless steel sheets and columns*: Thyssen



Seite 1176 / page 1176
Ferienhaus auf Lagnö
Holiday Home on Lagnö

S–Lagnö

- Bauherr / *Client*: Privat
- Architekten / *Architects*: Tham & Videgård Arkitekter, Bolle Tham, Martin Videgård, S–Stockholm
www.tvark.se
- Mitarbeiter / *Assistants*: Anna Jacobson
- Tragwerksplaner / *Structural engineer*: Sweco, Mathias Karlsson, S–Stockholm
www.sweco.se
- Elektroplanung / *Electrical planning*: HJ Consulting, Henrik Söderman S–Uppsala
www.hjconsult.se
- Generalunternehmer / *Main contractor*: BTNG projekt AB, Markus Andersson, Martin Persson, S–Stockholm
www.btng.se
- Heizung und Sanitär / *Heating and plumbing*: Venturion Ingenjörfirma, Kristoffer Waszkiewicz S–Stockholm
- Bauherr / *Client*: Alfriston School
- Architekten / *Architects*: Duggan Morris Architects, Mary Duggan, Joe Morris, GB–London
www.dugganmorrisarchitects.com
- Projektleiter / *Project architect*: David Storrington
- Tragwerksplaner / *Structural engineer*: Elliott Wood Partnership, GB–London
www.elliottwood.co.uk
- Umweltingenieur / *Environmental engineer*: Skelly and Couch, GB–London
www.skellyandcouch.com
- Kosten- und Sicherheitsberater / *Cost consultants and CDM coordinator*: Appleyard and Trew, GB–London
www.appleyardandtrew.com
- Bauüberwachung / *Building control inspector*: Butler & Young, www.butlerandyoung.co.uk
- Bauunternehmer / *Contractor*: Feltham Construction, GB–Newbury
www.felthamconstruction.co.uk
- Vorfertigung Holztragwerk / *Prefabricated timber structure*: Cowley Timberwork, GB–Waddington
www.cowleytimberwork.co.uk
- Swimmingpool / *Swimming pool*: Buckingham Swimming Pools, www.buckinghampools.com
- Verglasung / *Glazing*: Ridlands, GB–South Nutfield
www.ridlandstid.com
- Metall- und Dachdeckerarbeiten / *Metalwork and roofing*: PJB cladding, GB–Bucks
www.pjbcladding.co.uk

- Holzverkleidung / *Timber cladding*: Pratley carpentry, GB–Newbury
- Holzverschalung thermisch behandelt / *Thermally treated timber cladding*: Plato, www.platowood.com



Seite 1186 / page 1186
Kunstmuseum Ahrenshoop
Art Museum in Ahrenshoop

Weg zum Hohen Ufer 36
D–18347 Ostseebad Ahrenshoop

- Bauherr / *Client*: Kunstmuseum Ahrenshoop e.V., D–Ahrenshoop
- Architekten / *Architects*: Staab Architekten, D–Berlin
www.staab-architekten.com
- Projektleiter / *Project architect*: Per Pedersen, Anke Hafner
- Mitarbeiter (Wettbewerb) / *Team (competition)*: Antje Bittorf, Katherina Ortner, Johannes Thoma, Anna Hüper, Bettina Schriewer, Matthias Tscheuschler
- Mitarbeiter (Ausführung) / *Team (planning)*: Sonja Hehemann, Michael Zeeh, Daniel Angly, Marcus Ebener, Hagen Groß, Johan Jensen, Manuela Jochheim, Zuzanna Kaluzna, Dalia Karg, Dominik Schendel, Tobias Steib, Fabian Weber, Sabine Zoske
- Bauleitung vor Ort / *Local construction management*: Nicole Braune
- Tragwerksplaner / *Structural engineer*: ifb frohloff staffa kühl ecker, D–Berlin
http://www.ifb-berlin.de
- Landschaftsarchitektur / *Landscape architecture*: Levin Monsigny Landschaftsarchitekten, D–Berlin
- Haustechnik und Elektroplanung / *Mechanical and electrical engineering*: PHA Planungsbüro für Haustechnische Anlagen GmbH, D–Breuna
- Lichtplanung / *Lighting design*: LichtKunstLicht AG, D–Berlin
www.lichtkunstlicht.com
- Bauphysik / *Building physics*: Müller BBM GmbH, D–Berlin
www.muellerbbm.de
- Brandschutz / *Fire protection*: Ingenieur- und Sachverständigenbüro für Brandschutz/Arbeitssicherheit, D–Vogelstein
www.isbm-mv.de
- Rohbau / *Shell work*: OST BAU Osterburger Straßen-, Tief- und Hochbau GmbH, D–Osterburg
www.ostbau.de
- Fassade / *Facade*: Radeburger Fensterbau GmbH, D–Radeburg-Bärwalde
www.rf-fassaden.de
- Musterfassade / *Prototype facade*: Fittkau Metallbau + Kunstschmiede, D–Berlin
www.fittkau-metallbau.de
- Gerüstbau / *Scaffolding*: HTG Hoch-, Tief- und Gerüstbau GmbH, D–Stralsund
www.htg-stralsund.de
- Heizestrich / *Screed with underfloor heating*: Flex Estrich Bau, D–Neu Broderstorf
www.flex-estrichbau.de
- Sichtestrich / *Exposed screed*: Becker & Partner Baugesellschaft mbH, D–Rostock
www.beckerpartnergmbh.de
- Tischlerarbeiten / *Joinery*: Tischlerei Wirth, D–Rostock
www.tischlerei-wirth.de
- Innenputz / *Interior plastering*: Küstenland Bau Marlow, D–Marlow
- Sanitär-, Maler- und Fliesenarbeiten / *Plumbing, paint work and tiling*: Bauhof GmbH Graal-Müritz, D–Graal-Müritz
www.bauhof-gmbh-graal.de
- Außenanlagen / *External works*: Brinkhoff + Nadorf GmbH & Co. KG, D–Wustrow
www.landschaftsbau-brinkhoff-nadorf.de
- Geothermie / *Geothermics*: Celler Brunnenbau, D–Celle
www.celler-brunnenbau.de
- Heizung / *Heating*: GMV GmbH, D–Ribnitz-Damgarten
www.gmv-gmbh.com
- Lüftung / *Ventilation*: Lars Wilke GmbH & Co. KG, D–Saara
www.heizung-wilke.de
- Elektrik / *Electricity*: Elektroanlagen Frank, D–Mariow



Seite 1191 / page 1191
Terrassenwohnhaus in Brugg
Terraced Housing in Brugg

Herrenmatt 3, CH–5200 Brugg

- Bauherr / *Client*: Wartmann Immobilien AG, CH–Brugg
- Architekten / *Architects*: Ken Architekten, CH–Zürich
www.ken-architekten.ch
- Mitarbeiter / *Team*: Jürg Kaiser, Lorenz Peter, Martin Schwager, Gian Andri Mohr, Friederike Wisler, Charles Wülser
- Tragwerksplaner / *Structural engineer*: Heyer Kaufmann Partner, CH–Baden
www.hkp-bauing.ch
- Bauphysik / *Building physics*: Reto Züger Ingenieur AG, CH–Dietikon
- Geologie / *Geologist*: Dr. Heinrich Jäckli AG, CH–Baden
www.jaackli.ch
- Generalunternehmer / *Main contractor*: Metrostav, CZ–Prag
www.metrostav.cz
- Akustik / *Acoustics*: Soning, CZ–Prag
www.soning.cz
- Abdichtung / *Sealing*: Atelier Dek, www.atelier-dek.cz
- Ausbau Holz / *Wooden interior*: Sollus Nábytek, CZ–Rousinov u Vyškova
www.sollus.cz
- Ausbau Edelstahl / *Stainless steel interior*: GIGA-Line, CZ–Prag
www.gigaline.cz
- Gründach / *Green roof*: Roagrotech, www.roagrotech.cz
- CZ–Česká Lípa
- Fenster und Türen / *Windows and doors*: Nevšimal, CZ–Nymburk
www.nevsimal.cz
- Bewegliche Möbel / *Portable furniture*: Cornelia Klien, Martin Stoss

- Baumeisterarbeiten / *Master builder*: Jäggi AG Bauunternehmung, CH–Brugg
www.jaeggia.ch
- Holz-Metall-Fenster / *Windows metal-wood*: Jäggi AG Fensterbau, CH–Brugg
www.jaeggia.ch
- Dichtungsbeläge / *Sealings*: Tecton Flachdach AG, CH–Neuenhof
www.tecton.ch
- Schrägaufzug / *Inclined lift*: Inauen-Schätti AG, CH–Dallenwil
www.seilbahnen.ch
- Metallbauarbeiten / *Metal works*: W. Christen AG, CH–Strengelbach
www.christen-metallbau.ch
- Oberflächen außen (Lasur) / *Outer finishes (stain)*: PSS Interservice AG, CH–Geroldswil
www.pss-technology.ch



Seite 1196 / page 1196
Bildungszentrum in Vrchlabí
Education Centre in Vrchlabí

Dobrovského 3, CZ– 543 01 Vrchlabí

- Bauherr / *Client*: Krkonoše Mountains National Park
- Architekten / *Architects*: Petr Hájek Architekti, CZ–Prag
www.hajekarchitekti.cz
- Mitarbeiter / *Team*: Jaroslav Hulin, Cornelia Klien, Jan Kolář, Andrea Kubná, Ondřej Lipenský, Helena Linová, Martin Proks, Martin Stoss, Michal Volf
- Bauleitung / *Construction management*: Petr Hájek, Cornelia Klien, Martin Stoss
- Tragwerksplaner / *Structural engineer*: Jan Kolář, Vratislav Klíma, Kristina Ambrozová
- Generalunternehmer / *Main contractor*: Metrostav, CZ–Prag
www.metrostav.cz
- Akustik / *Acoustics*: Soning, CZ–Prag
www.soning.cz
- Abdichtung / *Sealing*: Atelier Dek, www.atelier-dek.cz
- Ausbau Holz / *Wooden interior*: Sollus Nábytek, CZ–Rousinov u Vyškova
www.sollus.cz
- Ausbau Edelstahl / *Stainless steel interior*: GIGA-Line, CZ–Prag
www.gigaline.cz
- Gründach / *Green roof*: Roagrotech, www.roagrotech.cz
- CZ–Česká Lípa
- Fenster und Türen / *Windows and doors*: Nevšimal, CZ–Nymburk
www.nevsimal.cz
- Bewegliche Möbel / *Portable furniture*: Cornelia Klien, Martin Stoss



Seite 1200 / page 1200
Forum eines Gymnasiums in Adelsheim
Forum for a Secondary School in Adelsheim

Eckenberg 1, D–74740 Adelsheim

- Bauherr / *Client*: Vermögen- und Bau Baden-Württemberg, Amt Heilbronn
- Architekten / *Architects*: Ecker Architekten, Dea Ecker und Robert Piotrowski, D–Heidelberg / Buchen
www.ecker-architekten.de
- Mitarbeiter / *Team*: Joachim Schuhmacher, John Ruffolo, Tom Jin, Sophie Hartmann, Peter Borek
- Tragwerkberatung Entwurfsgeometrie / *Structural consulting geometrical design*: Emmanuel Livadiotti, MaP3 F–Paris
www.map3.de
- Tragwerksplaner (Leistungsphase 1–3) / *Structural engineer (work phase 1–3)*: WSP Deutschland AG, D–München
www.wspgroup.de
- Tragwerksplaner / *Structural engineer*: Rehle Ingenieure GmbH, D–Stuttgart
www.rehle-ing.de
- Tragwerksplaner (Prüfung) / *Structural engineer (inspecting)*: Ingenieurbüro Kist & Theilig D–Mosbach
www.kist-ingenieure.de
- Lichtplanung / *Lighting design*: LDE Belzner-Holmes, D–Stuttgart
www.LDE-net.com
- HLS und Elektroplanung / *HVP and electrical planning*: Carpus + Partner AG, D–Ulm / Hattersheim, www.carpus.de
- Bauphysik / *Building physics*: Krämer-Evers Bauphysik GmbH & Co. KG, D–Hasbergen / Stuttgart
www.kraemer-evers.de
- Brandschutz / *Fire protection*: Sachverständiger R. Dietz, D–Elztal-Dallau
- Baugrund / *Foundation*: Walter+Partner GbR, D–Tauberbischofsheim / Adelsheim
www.walter-und-partner.de
- Bauleitung Tiefbau / *Supervision and surveillance civil engineering*: Ingenieurbüro Mütsch, D–Tauberbischofsheim
www.ib-muetsch.de

- Fassade und Glasdach / *Facade and glass roof*: Frener+Reifer, F–Paris
www.frener-reifer.com
- Beton / *Concrete*: Albizzati, www.albizzati.fr
- Stahlträger / *Structural Steel*: Brisard Dampierre, F–Dampierre-sur-Salon
www.brisard-dampierre.fr
- Sonstige Stahlbauarbeiten / *Miscellaneous steel*: Eurometal, L–Luxemburg
www.eurometal.net
- Haus- und Sanitärtechnik / *MEP*: Balas, www.groupe-balas.com
- Elektroinstallation / *Electrical installations*: Juret, F–Angers
www.juret.fr
- Innenausbau / *Fitting out*: CAA
- Gartenbauarbeiten / *Landscaping*: Blot



Seite 1207 / page 1207
Fondation Pathé in Paris

73, avenue des Gobelins, F–75013 Paris

- Bauherr / *Client*: Fondation Jérôme Seydoux-Pathé
- Bauherrenvertreter / *Representative*: Les cinémas Gaumont-Pathé
- Architekten / *Architects*: Renzo Piano Building Workshop, Bernard Plattner, Thorsten Sahlmann, F–Paris
www.rpbw.com
- Mitarbeiter / *Team*: Giorgio Bianchi, Alexandre Pachiaudi, Silvia Becchi, Till Kamp, Sophie Moreau, Emanuel Ntourlias, Olivier Aubert, Christophe Colson, Yiorgos Kyrkos
- Tragwerksplaner / *Structural engineer*: VP+Green, F–Paris
www.vpgreen.fr
- 3D-Modell / *model 3d*: designtopproduction, Arnold Walz, D–Stuttgart
www.designtopproduction.com
- Kostenplanung / *Quantity survey*: Sletec, F–Lyon
www.sletec-ingenierie.fr
- Haustechnik und Elektroplanung / *MEP*: Inex, F–Argenteuil
www.inex.fr
- Nachhaltigkeit / *Sustainability*: Tribu, F–Paris
www.tribu-concevoirdurable.fr
- Akustik / *Acoustics*: Peutz, F–Paris
www.peutz.fr
- Lichtplanung / *Lighting design*: Cosil, F–France
www.lightingservicesinc.com
- Fassaden- und Glasdach / *Facade and glass roof*: Frener+Reifer, F–Paris
www.frener-reifer.com
- Beton / *Concrete*: Albizzati, www.albizzati.fr
- Stahlträger / *Structural Steel*: Brisard Dampierre, F–Dampierre-sur-Salon
www.brisard-dampierre.fr
- Sonstige Stahlbauarbeiten / *Miscellaneous steel*: Eurometal, L–Luxemburg
www.eurometal.net
- Haus- und Sanitärtechnik / *MEP*: Balas, www.groupe-balas.com
- Elektroinstallation / *Electrical installations*: Juret, F–Angers
www.juret.fr
- Innenausbau / *Fitting out*: CAA
- Gartenbauarbeiten / *Landscaping*: Blot



Seite 1218 / page 1218
Fondation Louis Vuitton in Paris

8 avenue du Mahatma Gandhi, Bois de Boulogne, F–75116 Paris

- Bauherr / *Client*: Fondation Louis Vuitton
- Architekten / *Architects*: Gehry Partners, USA–Los Angeles
www.foga.com
- Architekten vor Ort / *Local architects*: STUDIUS Architecture, F–Paris
www.studios.com
- Technische Beratung / *Technical consultant*: Quadrature Ingenierie, F–Chambourcy
- Sicherheitsberater / *Security consultant*: Cabinet Casso et Cie, F–Paris
www.cassoetassociates.com
- Ausführungsplanung, Tragwerksplanung, Verkehrsflächen und HLSK / *Planning of execution, structural engineering, traffic areas, HVAC and plumbing*: Setec Bâtiment, F–Paris
www.setec.fr
- Tragwerksplanung Glassegel / *Structural engineer glass sails*: RFR + T/E/S/S, F–Paris
www.rfr-group.com; www.tess.fr
- Bauunterhalt / *Maintenance*: TAW WEISSE International, D–Hamburg
www.taw-weisse.de
- Lichtplanung / *Lighting design*: L'Observatoire International, USA–New York
www.lobintl.com
- Zertifizierung / *Certification*: Bureau Veritas, F–Rueil-Malmaison
www.bureauveritas.fr
- Sicherheits- und Gesundheitsschutz / *Health and safety*: Socotec, F–Noisy-Le-Grand
www.socotec.fr

- Generalunternehmer / *Main contractor*: Vinci Construction, F–Rueil-Malmaison
www.vinci.com
- Verglasungen / *Glazing*: Eiffage Construction Métallique, F–Colombes
www.eiffageconstructionmetallique.com
- mit / *with*: Bureau Greisch, B–Liège
www.greisch.com
- mit / *with*: Sunglass, I–Padua, www.sunglass.it
- Holzbau / *Wood construction*: Hess, D–Kleinheubach
www.hess-timber.com