



Glasbau 2012

Bauten und Projekte
Bemessung und Konstruktion
Forschung und Entwicklung
Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

Bernhard Weller, Silke Tasche (Hrsg.)
Glasbau 2012

Bernhard Weller, Silke Tasche (Hrsg.)

Glasbau 2012

Herausgeber:
Bernhard Weller, Silke Tasche
Technische Universität Dresden
Institut für Baukonstruktion
George-Bähr-Straße 1
01069 Dresden

Titelbild: Die 21 m lange Glasbrücke mit einer Hülle aus gebogenen Scheiben verbindet die beiden Gebäudekomplexe des „Centre of the Unknown“, eine Forschungseinrichtung der Champalimaud-Stiftung in Lissabon, Portugal (Photo: Bellapart)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

© 2012 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
Rotherstr. 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: Sophie Bleifuß, Berlin
Herstellung und Produktion: NEUNPLUS1 GmbH, Berlin

Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Print ISBN: 978-3-433-03021-9
ePDF ISBN: 978-3-433-60217-1
ePub ISBN: 978-3-433-60216-4
Mobi ISBN: 978-3-433-60215-7
o-Book ISBN: 978-3-433-60214-0

Vorwort

Glasbau findet überwiegend in der Gebäudehülle statt. Glasfassade und Glasdach haben bestimmenden Einfluss auf das Erscheinungsbild heutiger Architektur. War für die Moderne der 1920er und 1930er Jahre, ja noch für die Nachkriegsmoderne der 1950er und 1960er Jahre, die Transparenz ebener Hüllflächen das entscheidende Kriterium der Glasarchitektur, so hat der Glasbau heute eine Vielzahl zusätzlicher Aufgaben zu übernehmen: Formgebung und Lastabtragung, Sonnenschutz und Verschattung, Dämmung und Energiegewinnung stellen dabei große Anforderungen.

Ernst & Sohn, allen voran Herr Dr. Karl-Eugen Kurrer, hat die Herausgeber des vorliegenden Buches seit vielen Jahren motiviert, für die Zeitschrift »Stahlbau« ein Sonderheft »Glasbau« zu gestalten. Jährlich im März bot diese Fachzeitschrift etwa zwölf Beiträgen Raum, über den Stand der Technik des Glasbaus zu informieren. Die Fortsetzung dieser Hefte in Form des vorliegenden Jahrbuches »Glasbau« berichtet über den aktuellen Stand des Wissens in über dreißig Fachaufsätzen namhafter Autoren aus den Bereichen Planung, Bemessung, Ausführung und Forschung.

Die Berichterstattung gliedert sich in vier große Abschnitte: Teil A »Bauten und Projekte« zeigt jüngste Beispiele, die wegweisende Architektur mit innovativer Glasfassadentechnik erreichen. Teil B »Bemessung und Konstruktion« erläutert die neue DIN 18008 bis hin zum prüffähigen Bemessungsbeispiel. Teil C »Forschung und Entwicklung« berichtet über neueste Projektergebnisse anerkannter Forschungseinrichtungen. Teil D »Energieeffizienz und Nachhaltigkeit« zeigt die Optimierung zukunftsfähiger Gebäudehüllen neben der energetischen Sanierung historischer Fassaden.

Jedem Autor sei für die Erstellung seines Beitrages herzlich gedankt. Ausdrücklichen Dank auch den Mitgliedern des Wissenschaftlichen Beirates, die in bewährter Tradition die Qualität der Veröffentlichung sichern. Ein besonderes Dankeschön gilt dem Verlag Ernst & Sohn, Frau Karin Lang, die das Buch in seiner gedruckten Form ermöglicht hat und sich für die Veröffentlichung der Fachbeiträge auf der Plattform Wiley Online Library einsetzte, sowie Herrn Francisco Velasco, der die Entstehung des Buches betreut hat. Und wir danken sehr Frau Stefanie Retsch am Institut für Baukonstruktion in Dresden für ihre von großer Einsatzfreude getragene Mitarbeit.

Ein ganz wesentlicher Dank gebührt dem Bundesverband Flachglas e.V. und dem Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V., die seit langen Jahren Forschung und Entwicklung im Glasbau anregen und vorantreiben und schließlich die Drucklegung des Buches entscheidend gefördert und unterstützt haben.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Dr.-Ing. Silke Tasche

Dresden, März 2012

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Dr.-Ing. Silke Tasche

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Oliver Englhardt, Technische Universität Graz
Prof. Dr. Markus Feldmann, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft, Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider, Technische Universität Darmstadt
Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert, Universität der Bundeswehr München

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
----------------------	---

Teil A – Bauten und Projekte

Lincoln Center Canopies, New York	1
Jan Knippers, Jochen Riederer, Matthias Oppe	

Multifunktionale, sphärisch gebogene Oberlichtverglasung für das Städel Museum	12
Kai Otto, Harald Kloft, Florian Mähl, Hanno Sastré	

Cabot Circus, Bristol – Ebene Vierecknetze für freigeformte Glasdächer...	28
Hans Schober, Stefan Justiz	

Structural-Glazing-Fassade für die Zeppelin-University Friedrichshafen ...	43
Albrecht Burmeister, Lutz Eitel	

Großflächiger Einsatz von entspiegelten Gläsern – Ein Erfahrungsbericht	53
Josef J. Ludwig	

Your Rainbow Panorama – Ein begehbarer Regenbogen aus Stahl und Glas	60
Wolfgang Kahlert, Frank Spangemacher	

Shuter Street Bridge, Toronto – Fußgängerbrücke mit gebogenen Isoliergläsern	67
Felix Schmitt, Michael Sendelbach, Harald Elbert, Matthias Benning, Frank Wellershoff	

Teil B – Bemessung und Konstruktion

DIN 18008 Teile 1-5: Neuerungen gegenüber eingeführten Regelungen	79
Geralt Siebert	

Punktförmig gelagerte Verglasung nach E DIN 18008 Teil 3	89
Bernhard Weller, Stefan Reich, Michael Engelmann	

Baurechtliche und normative Anforderungen an ESG und ESG-H	105
Peter Hof, Frank Ensslen, Martin Reick	
Gekrümmte Isoliergläser	112
Jürgen Neugebauer	
Anwendung von thermisch gebogenem Glas im Bauwesen	123
Eva Scheideler, Markus Broich, Michael Elstner	
Kalt-Bemessung von Brandschutzverglasungen und Klassifizierung des Brandverhaltens	136
Hermann Hoegner	
VSG-Glasstützen unter kombinierter Langzeit- und Kurzzeitbelastung	149
Katharina Langosch, Markus Feldmann	
Glashäuser – warum nicht mehr ausführbar wie vor 150 Jahren?.....	159
Holger Techen, Matthias Michel	

Teil C – Forschung und Entwicklung

Ein Modell zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von heißgelagertem ESG	171
Jens Schneider, Jonas Hilcken, Andreas Kasper	
Verbundsicherheitsglas und Glasfassaden unter Explosionsbeanspruchung	185
Martin Larcher, Norbert Gebbeken, Martien Teich	
Oberflächenvorbehandlung von Füge­teilen zur Optimierung von Klebeverbindungen.....	195
Bernhard Weller, Christiane Kothe	
Experimentelle und numerische Untersuchungen zu geklebten Glas-Stahlverbindungen	206
Jochen Menkenhagen, Kai Koschecknick	
Ermittlung der Klebe­eigen­spannungen struktureller Glas-Glas-Verbindungen.....	215
Jörg Hildebrand, Jenny Rütz	
In Verbundglas integrierte Lasteinleitungselemente und deren Tragverhalten	225
Kerstin Puller, Werner Sobek	

Strategien zur Fugenverlaufsoptimierung von Glasschalen	236
Thiemo Fildhuth, Sebastian Lippert, Jan Knippers	

Prüfung vorgespannter, gebogener Gläser	246
Bernhard Weller, Philipp Krampe, Michael Engelmann	

Teil D – Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

Optimierung zukunftsfähiger Gebäudehüllen	258
Winfried Heusler	

Die Closed-Cavity-Fassade	268
Martin Lutz	

Variable Sonnenschutzgläser – von den Grundlagen zur Praxis	279
Hartmut Wittkopf, Manfred Dittmar	

Lösungen für energieeffiziente multifunktionale Verglasungen	291
Frank Schneider	

Die Zukunft energieaktiver und adaptiver Gebäudehüllen	305
Andreas Fuchs	

Tragfähigkeit von Dünnschicht-Photovoltaik-Modulen	315
Jens Schneider, Jonas Kleuderlein, Johannes Kuntsche	

Denkmalgerechte Sanierung einer Stahl-Glas-Fassade der Nachkriegs- moderne	326
Winfried Brenne, Manfred Hoffmann	

Transparente Fassaden bei Neubau und Sanierung von Gebäuden	337
Iris Maniatis, Barbara Siebert	

Innovative Stahlfensterkonstruktionen für das Weltkulturerbe Bauhaus Dessau	348
Winfried Brenne, Ulrich Nickmann, Mark Mathijssen, Bernhard Weller, Stefan Reich	

Autorenregister	365
------------------------------	-----

Schlagwortverzeichnis	367
------------------------------------	-----

Lincoln Center Canopies, New York

Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers¹, Dipl.-Ing. (FH) Jochen Riederer¹, Dr.-Ing. Matthias Oppe¹

¹ Knippers Helbig Advanced Engineering, Stuttgart, New York. Tübingerstr. 12-16, 70174 Stuttgart, Deutschland

Die weit auskragende Stahl-Glas-Konstruktion in New York, USA, besteht aus zwei nach außen gekippten, knapp über 27m langen Stahlträgern, einer zentralen Stütze und einer aussteifenden Glasfläche. Unter den beiden Stahlträgern sind zwölf 2,30 × 4,40m große Scheiben aus 4-fach VSG angehängt, welche zur Aussteifung der Konstruktion dienen. Weitere aussteifende Elemente sind daher nicht erforderlich. Über eigens entwickelte Punkthalter werden die Glasscheiben an jeweils vier Punkten befestigt und mit einem Zweikomponenten-Injektionsmörtel kraftschlüssig verbunden. Am Knick der Stütze gewährleistet ein 'Glasknie' bestehend aus zwei rahmenlosen 4-fach VSG-Scheiben die Lastweiterleitung.

Schlagwörter: Glasbau, aussteifendes Glas, SGP-Folie, Vordach, Auskragung, Stahl-Glas-Konstruktion, New York

1 Einleitung

Das „Lincoln Center for the Performing Arts“ wurde Ende der 50er Jahre errichtet und ist das bedeutendste kulturelle Zentrum New Yorks. Als Teil einer Modernisierungsmaßnahme wurden der zugehörigen Josie Robertson Plaza sowie dessen Zugang von der Columbus Avenue/ Broadway durch die Architekten Diller Scofidio + Renfro neu gestaltet (Bild 1-1).

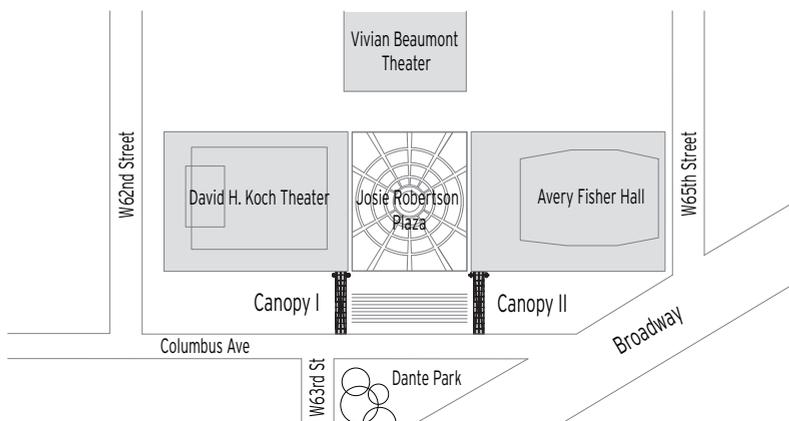


Bild 1-1 Übersicht - Lageplan

Für den Zugang vom Broadway entwarfen die Architekten zwei weit auskragende gläserne Vordächer als Wetterschutz für ankommende Besucher. Die beiden fast baugleichen Vordächer, die sogenannten Lincoln Center Canopies, bestehen aus jeweils zwei Stahlstützen, auf denen zwei Stahlkastenträger von 27m Länge mit einer Auskragung von 12m aufliegen. An der Trägerunterseite sind ebene Glasscheiben angebracht, welche die Stahlkonstruktion horizontal aussteifen. Daher kann auf jegliche zusätzliche Ausfachung der Konstruktion verzichtet werden. Die Stützenfüße sind ebenfalls mittels zwei Glasscheiben verbunden. Durch die skulpturale Geometrie entsteht ein markantes und zugleich leichtes sowie transparentes Bauwerk (Bild 1-2).



Bild 1-2 Gesamtansicht - Blick auf beide Vordächer und das Lincoln Center, New York
(Foto: Keller Fotografie)

2 Konstruktionsbeschreibung

Die beiden weit auskragenden Vordächer bestehen aus leicht nach außen gekippten, knapp über 27m langen Stahlträgern, die aus Einzelblechen gefertigt wurden. Ein quer durch die Stahlträger gestecktes Rundrohr verbindet diese an einem Ende vertikal und horizontal mit dem Bestandsgebäude und bildet zusammen mit einem zentralen Stützenpaar die Auflagerpunkte der Träger. Zur Straße hin sind die Träger auf einer Länge von 11,60m frei auskragend (Bild 2-1).



Bild 2-1 Seitenansicht Canopy Avery Fisher Hall (Foto: Keller Fotografie)

Den beiden Trägern untergehängt sind zwölf großformatige Glasscheiben von $2,30 \times 4,40$ m. Über vier eigens entwickelte Punkthalter aus hochfestem Stahl werden sie mit den Stahlträgern verbunden und mit einem Zweikomponenten-Injektionsmörtel kraftschlüssig verbunden, dadurch bilden Glas und Stahl einen statisch wirksamen Verbund. Im Rahmen der Tragwerksplanung ist der Ursprungsentwurf dahingehend optimiert worden, dass keine weiteren horizontal aussteifenden Elemente für die Dachebene erforderlich sind. Jede Scheibe ist mit einem leichten Gefälle versehen und entwässert ohne Rinne zur Seite. Aufgrund der leichten seitlichen Neigung der Kragträger, die zudem nicht parallel laufen und der Neigung der Einzelscheiben ist jeder Punkthalter eine Einzelanfertigung. Die aus Einzelblechen geformte zentrale Stahlstütze, welche in der Ansicht ein stilisiertes Y bildet, dient als Auflagerpunkt für die Träger. Sie gründet auf der Untergeschossebene, durchstößt eine Fußgängerrampe und hat eine Gesamthöhe von 8 m. Sämtliche Lasten der Canopy-Konstruktion sowie die Vertikallasten der Fußgängerrampe werden von dieser Stütze aufgenommen und in die massive Unterkonstruktion abgetragen. Um die äußeren Horizontallasten aus Wind gleichmäßig zu verteilen sowie die Umlenkkräfte am Stützenknick kurzzuschließen, sind die Stützen an der Knickstelle über zwei rahmenlose Verbundglasscheiben statisch wirksam miteinander verbunden.

3 Tragende Glas-Stahl-Konstruktion

3.1 System- und Detailentwicklung

Die Konstruktion wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem Tragwerksplaner, der ausführenden Firma sowie Architekten und Bauherren entwickelt. In mehreren Entwicklungsstufen wurde zuerst das Gesamtsystem mit den aussteifenden Glasscheiben und anschließend die Entwicklung der Details wie Punkthalter und Träger-Stützen-Anschluss vorangetrieben. Durch die Einbeziehung der lokalen Entscheidungsträger vor Ort konnte ein sehr straffer Zeitplan eingehalten werden.

3.2 Lastannahmen

Die Canopies wurden für die üblichen Lastfälle wie Schnee- und Windlasten bemessen. Aufgrund der extremen Auskragung und Sonderform waren Windkanalversuche erforderlich. Zwei Modelle wurden hierzu untersucht. Für die Ermittlung der örtlichen, charakteristischen Windgeschwindigkeiten diente ein Umgebungsmodell (Bild 3-1 / links), in dem ein großer Bereich des Stadtbildes im Maßstab 1:350 nachgebildet wurde. Am Teilmodell (Bild 3-1 / rechts) wurde die Druckverteilung auf die Dachfläche und die Stahlstruktur bestimmt.

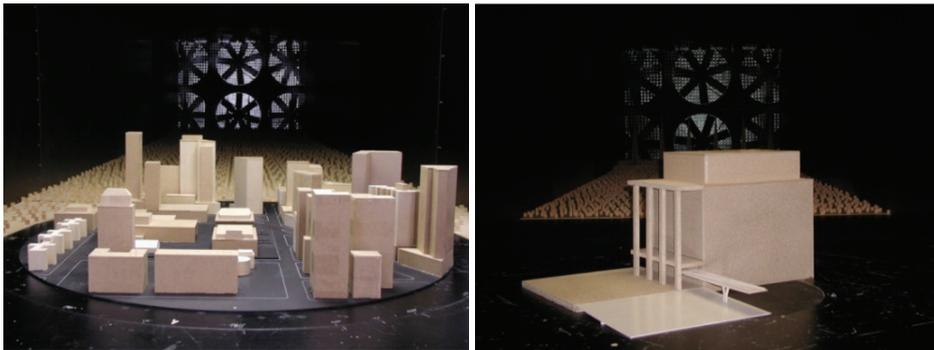


Bild 3-1 Windkanalversuche - 1:350 Umgebungs- und 1:60 Teilmodell (Fotos: Wacker Ingenieure)

Durch die Untersuchungen konnten die statischen und dynamischen Windlasten korrekt erfasst werden. Die Vordächer sind für übliche Reinigungszwecke betretbar, was durch eine entsprechende Last in der statischen Berechnung berücksichtigt wurde. Temperaturlasten müssen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Aufheizung der dunklen Stahlträger und transparenten Dachfläche sowie unterschiedlichen Temperaturendeckungskoeffizienten ebenfalls berücksichtigt werden.

3.3 Stahlbau

Für die Geometrie und Detailausbildung der Stahlbaukonstruktion (Bild 3-2 und Bild 3-3) sind zwei Kriterien maßgebend: zum einen das Ziel einer möglichst skulpturalen, einfachen Struktur, in der die Träger ohne sichtbare Anschlüsse auf den Stützen ruhen, zum anderen die Verbindung der Einzelteile mittels Verschraubung, sodass kostenintensive Baustellenschweißungen entfallen können. Diese Ziele wurden erreicht, indem alle Anschlüsse mit versenkten Schrauben oder in Aussparungen vorgesehen wurden. Abschließend wurden die Anschlussstellen abgedeckt, verspachtelt und überstrichen. Bei den geschweißten Kastenprofilen der Träger und Stützen handelt es sich um gevoutete Sonderprofile, welche im Werk vorgefertigt wurden.

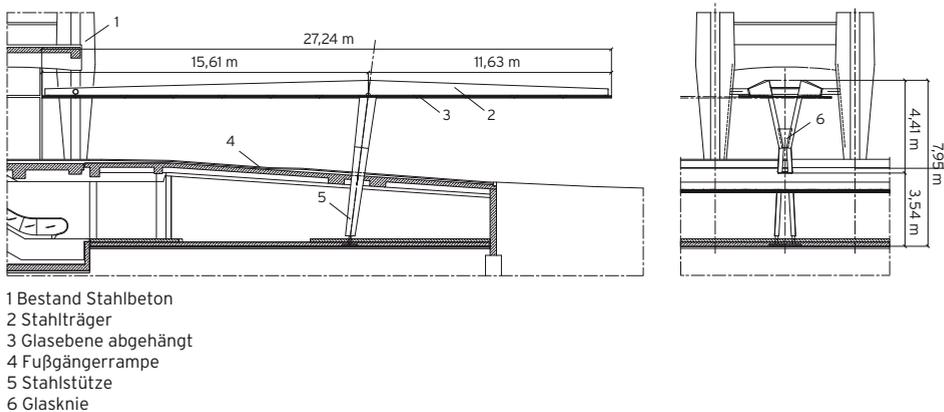


Bild 3-2 Konstruktion - Ansichten Canopy

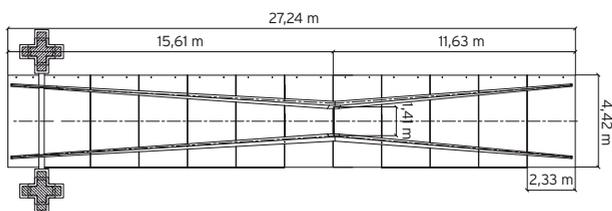


Bild 3-3 Konstruktion - Grundriss Canopy

Die leicht seitlich gekippten Hauptträger weiten sich von einem Rechteckhohlprofil $300 \times 55\text{mm}$ auf ein Rechteckhohlprofil $700 \times 180\text{mm}$, jeweils mit Flanschdicken von 50mm und Stegdicken von $10\text{-}25\text{mm}$. Die beiden Stützenfüße sind ebenfalls gevoutete Sonderprofile aus Einzelblechen mit Abmessungen von $460 \times 185\text{mm}$ am Fußpunkt und

800 × 185mm am Stützenkopf. Die großen Blechdicken der Stützen von 40mm resultieren aus dynamischen Untersuchungen an der Gesamtstruktur. Die Konstruktion wird nach amerikanischer Normung nachgewiesen.

3.4 Aussteifende Glasscheiben

Dachfläche

Die Dachfläche besteht aus zwölf ebenen Glasscheiben mit Abmessungen von 2324 × 4420mm. Das Verbund-Sicherheitsglas (VSG) setzt sich aus drei 15mm und einer unteren 8mm thermisch vorgespannten Flachglasscheibe (ESG) zusammen. Als Zwischenfolie zur Laminierung dient eine 1,52mm Sentry Glas Plus (SGP)-Folie. Auf Ebene 7 (von oben) ist ein Lochraster in RAL 9003 mittels Siebdruck aufgebracht. Die beiden an die Stützen angrenzenden Scheiben sind ausgeschnitten, sodass die Stütze die Scheibenebene durchdringen kann. Jede Scheibe wird an vier Punkten gehalten und hat hierzu vier Aussparungen mit einem Durchmesser von je 46mm (Bild 3-4 / links). Aufgrund des Scheibenaufbaus und den Abmessungen wiegt jede Scheibe knapp 1,5 Tonnen. Nach der zwängungsfreien Montage der einzelnen Scheiben wird der Spalt zwischen Glasscheibe und Punkthalter mit Injektionsmörtel Hilti Hit HY 70 verpresst, sodass die Horizontalkräfte aus Aussteifungslasten und Zwängungen zwischen Stahlträger und Glasscheiben übertragen werden können.

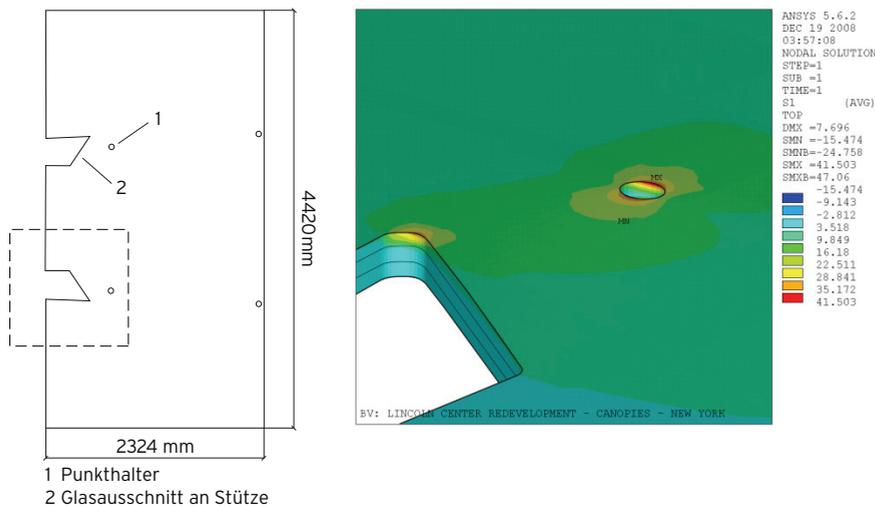


Bild 3-4 Aufsicht Glasscheibe der Dachfläche mit vier Punkthaltern / Detail Glasscheibe – Rechenmodell Spannungsverteilung (Bild: LFK Ingenieure)

Die Berechnung der Glasscheiben erfolgt linear-elastisch nach der Methode der Finiten Elemente. Hierfür wird ein Volumenmodell mit drei 15mm Scheiben und dazwischen je eine 1,52mm SGP-Folie erzeugt (Bild 3-4 / rechts).

Die untere 8mm Scheibe ist dabei nur als Eigengewicht berücksichtigt, da sie nicht direkt mit dem Punkthaltern verbunden ist und somit keine statisch tragende Funktion hat. Für die SGP-Folien werden die Schubsteifigkeiten in Abhängigkeit der Lasteinwirkungsdauer angesetzt (siehe Tab. 3-1).

Tabelle 3-1 Ansatz Materialeigenschaften SGP-Folie

Schubmodul SGP-Folie	MPa
G, lang, Eigengewicht	2
G, lang, Schneelast	15
G, kurz, Wind	80

Zur Bildung der Lastkombinationen werden sowohl die gewöhnlichen Lasten aus Eigengewicht, Schnee, Wind, Temperatur und Verkehr als auch außergewöhnliche Lasten aus Erdbeben herangezogen. Hinzu kommen hier noch die Horizontalkräfte aus Zwängungen und der Aussteifung der Konstruktion, welche dem Globalmodell entnommen werden und als Einzelkräfte im Bohrloch angesetzt werden. Schließlich wird noch der außergewöhnliche Lastfall mit einer gebrochenen oberen oder unteren Scheibe untersucht. Die Berechnung erfolgt gemäß amerikanischer Norm ASTM E 1300-04 [1]. In den außergewöhnlichen Lastkombinationen ist die zulässige Spannung der Glasscheiben um 50% erhöht.

Glasknie

Das sogenannte Glasknie verbindet die beiden Stahlfüße im Knick zu einer Stahl-Glas-Verbundstütze (Bild 3-5). Es besteht aus zwei Koppelgläsern, beide mit Abmessungen von 311×800 mm. Der Scheibenaufbau wird hier für das durch die Stützen maximal induzierte Moment bestimmt. Jede Scheibe besteht aus Verbund-Sicherheitsglas (VSG) mit vier 12mm thermisch vorgespannten Flachglasscheiben (ESG), jede verbunden durch 1,52mm SGP-Zwischenfolien. Der Verbund wird hier durch vier Eckbolzen als Punkthalter sowie teilweise Linienlagerung im Eckbereich hergestellt. Die kraftschlüssige Verbindung wird ebenso durch Verpressung mit Injektionsmörtel in den Bohrlochern und in den Teilbereichen der Linienlagerung erreicht.

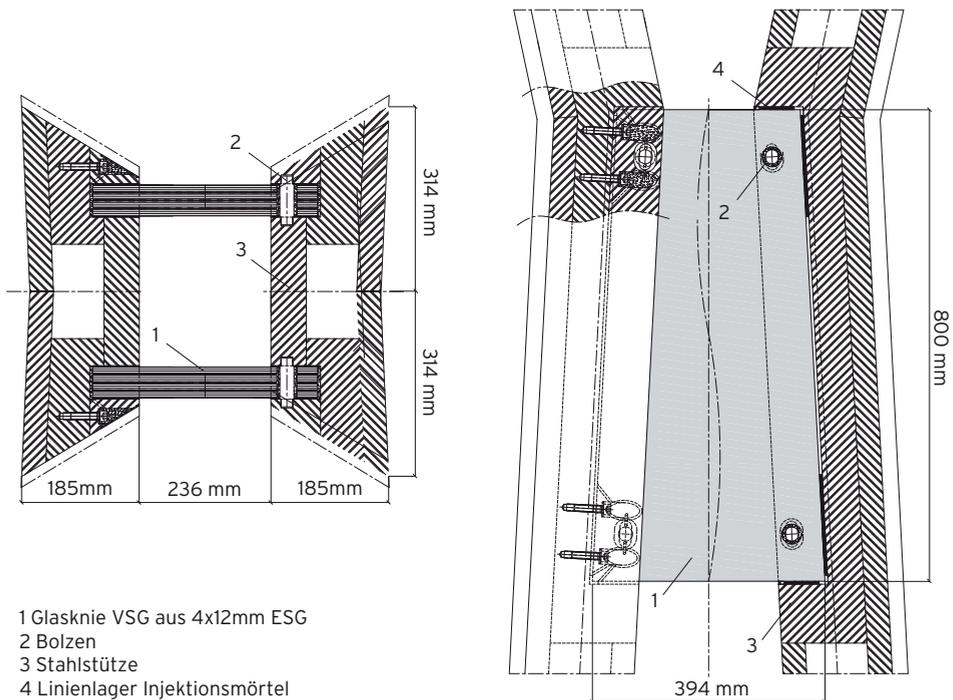


Bild 3-5 Glasknie - Detailschnitt (Bild: Seele)

3.5 Punkthalter und Aussteifung

Die Punkthalter wurden in enger Zusammenarbeit mit der Seele Sedak GmbH so entwickelt, dass auf der sichtbaren Unterseite eine ebene, gleichmäßige Fläche ohne störende herausstehende Punkthalter oder Verschraubungen entsteht (Bild 3-6). Aus diesem Grund wurden die Halter in die äußerste Scheibenlage von 8mm eingelassen und mit einer Abdeckkappe versehen. Jeweils zwei nebeneinander liegende Bohrlöcher werden durch einen Punkthalter gekoppelt. Aufgrund der Aussteifungskräfte sowie Kräften aus Zwängungen durch die verschiedene Temperaturexpansion der Materialien Glas und Stahl, kommt den Punkthaltern eine entscheidende Bedeutung für das Gesamtsystem zu. Wegen der Geometrie und Anschlusshöhen an die darüberliegenden Stahlträger ist jeder Punkthalter eine Einzelanfertigung. Um die Abmessungen der Punkthalter möglichst filigran zu halten, wird als Material hochfester Edelstahl Typ 1.4462 verwendet.

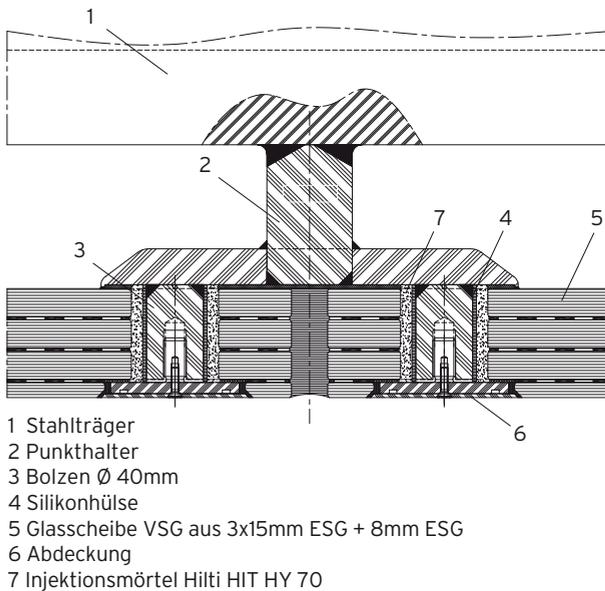


Bild 3-6 Punkthalter - Schnitt (Bild: Seele)

Durch den kraftschlüssigen Verbund zwischen Glasscheibe und Stahltragwerk werden die Vordächer ausgesteift. Jedoch können bei starrem Anschluss die dann auftretenden Kräfte im Bohrloch nicht durch die Glasscheiben aufgenommen werden. Als ersten Schritt werden daher die Glasscheiben zwängungsfrei eingebaut und der Verguss nachträglich eingebracht. Dadurch entstehen keine Zwangskräfte aus dem Lastfall Eigengewicht. Zudem musste ein System gefunden werden, um die zu übertragenden Kräfte einstellen zu können, ohne dabei die aussteifende Wirkung der Scheiben zu verlieren. Es wurde eine 2mm Silikonhülse um den Stahlbolzen im Glasbohrloch vorgesehen, welche im statischen Globalmodell als Wegfeder abgebildet ist. Zudem wurde der Einfluss verschiedener Dicken der Stahlbolzen auf das Gesamttragverhalten untersucht. Durch die Wahl der geeigneten Dicken der Bolzen und Silikonhülse sowie deren Shorehärte, können so die Kräfte aus allen Lastfällen durch die Glasscheiben übertragen werden. Anschließend wurde am Globalmodell anhand einer Eigenwertermittlung untersucht, ob die Steifigkeit des Gesamtsystems noch gegeben ist und ob die ermittelte Frequenz Auswirkungen auf die anzusetzenden Windlasten hat. Das Stahl-Glas-System wurde dementsprechend in mehreren Iterationsläufen optimiert und die Annahmen in Materialversuchen für die Silikonhülse verifiziert (Tab. 3-2).

Tabelle 3-2 Aussteifungssystem

System	Federsteifigkeit Silikonhülse [kN/mm]	Durchmesser Bolzen d [mm]	Eigenfrequenz System f [Hz]	Max. Kraft F_k [kN]
Modell 1	10	20	1,2	0,3
Modell 2	10	40	1,3	1,5
Modell 3	100	20	1,6	14
Modell 4	100	40	1,9	19
Verwendetes System:				
Hülse 2mm, 80 Shore	44 / 94 ¹	40	1,7	17

¹ unterer und oberer Grenzwert der tatsächlichen Silikonfedersteifigkeit

Nach der Wahl eines geeigneten Systems einer 2mm dicken Silikonhülse mit Shorehärte 80 wurde eine Grenzwertbetrachtung durchgeführt. Diese berücksichtigt die Härteunterschiede der Hülse durch auftretende Temperaturunterschiede sowie den Schlupf zwischen Hülse und Stahlpin.

3.6 Gebrauchstauglichkeit und Verformungen

Um die Verformungen unter Gebrauchslast zu minimieren, sind die Träger überhöht hergestellt. Da die Verformung der Kragarmspitze durch das Eigengewicht der Konstruktion mit vertikal ca. 60mm und horizontal ca. 95mm bereits sehr groß sind, werden die Stahlträger mit Hilfe von Schablonen passgenau zusammengesetzt. Die Überhöhung erfolgt in Trägerlängsrichtung durch partielles Erhitzen. Wegen der seitlichen Schiefstellung der Träger erfolgt dies dreidimensional für die vertikale und horizontale Richtung.

4 Fertigung und Montage

4.1 Toleranzen

Aufgrund der architektonischen Vorgabe einer perfekt ebenen Kragarmkonstruktion und Scheibenfläche mussten die üblichen Bautoleranzen von ± 3 bis 5mm für Stahlbauten deutlich unterschritten werden. Für das fertige Bauwerk wurden Toleranzen von $\pm 1,5$ mm für den Stahlbau vorgegeben. Für die Glasscheiben mussten die Stahlbolzen der Punkthalter exakt eingepasst werden, sodass sowohl die Silikonhülse als auch der Injektionsmörtel mit mindestens 3mm Dicke vollständig eingebracht werden konnte.

4.2 Transport und Montage

Transport und Montage der Konstruktionen waren eine große logistische Herausforderung (Bild 4-1). Das komplette Bauwerk mit einem Gesamtgewicht von je 40 Tonnen wurde in Europa vorgefertigt, verschifft und mit Hilfe von Schwertransportern nach Manhattan im Herzen von New York transportiert. Dabei wurde das Stahltragwerk in zwei Teilen vorgefertigt. Ein Teil bestand aus den Stützen inklusive eingebautem Glas-knie, der zweite Teil aus dem kompletten Stahldachtragwerk. Nach dem Transport auf die Baustelle wurden die beiden Stahlbauteile am Stützenkopf gestoßen. Durch die großen Einheiten konnte die Montagezeit vor Ort verkürzt werden, sodass Sperrungen des Verkehrs auf ein Minimum reduziert werden konnten.



Bild 4-1 Transport Stahlbauteile (Bild: Seele)

5 Projektbeteiligte

- Bauherr: Lincoln Center for the Performing Arts, Inc., New York, USA
- Architekt: Diller Scofidio + Renfro, New York, USA
- Entwurfsplanung: Dewhurst Macfarlane, New York, USA
- Tragwerks- u. Ausführungsplanung: Knippers Helbig GmbH, Stuttgart
- Glasstatik: Knippers Helbig GmbH, Stuttgart mit LFK Ingenieure GmbH, Lauffen
- Windgutachten: Wacker Ingenieure, Birkenfeld
- Glasbau und Stahlbau: Seele Sedak GmbH & Co. KG, Gersthofen
- Fertigstellung: 12.2009

6 Literatur

- [1] ASTM International: ASTM E 1300-04: Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings, 2004.

Multifunktionale, sphärisch gebogene Oberlichtverglasung für das Städel Museum

Kai Otto¹, Harald Kloft², Florian Mähl², Hanno Sastre³

1 schneider+schumacher Poststr. 20A, 60329 Frankfurt/Main, Deutschland

2 osd – office for structural design, Gutleutstr. 96, 60329 Frankfurt/Main, Deutschland

3 seele_sedak GmbH & Co. KG, Einsteinring 1, 86368 Gersthofen, Deutschland

Das Städel Museum in Frankfurt ist durch einen unterirdischen Neubau erweitert worden. Gestaltprägende Elemente sowohl im Gebäudeinneren wie auch im gartenlandschaftlichen Außenraum sind 195 kreisrunde Oberlichter, die multifunktionale Anforderungen erfüllen müssen. Neben den statischen Anforderungen an die Begehrbarkeit und bauphysikalische Durchbildung als Isolierverglasung erfolgt die gesamte Belichtung – sowohl Tages- wie auch Kunstlicht – ausschließlich über diese Öffnungen. Darüber hinaus wurden bei dem Bauvorhaben erstmals sphärisch kaltgekrümmte Scheiben als Überkopferverglasung eingesetzt, die dauerhaft allein über den Schubverbund tragen.

Schlagwörter: Multifunktionale Oberlichtverglasung, laminationsgebogene sphärisch gekrümmte Gläser

1 Architektonisches Konzept

Johann Friedrich Städel (1728-1816) legte mit seinem Testament den Grundstein für das heutige Städel Museum in Frankfurt am Main. Ursprünglich war die Städel-Sammlung nur in seinen privaten Räumen zugänglich und sollte nach seinem Tod öffentlich präsentiert werden. Weil sein Nachlass jedoch nicht nur die „Veröffentlichung“ seiner gesammelten Werke regelte, sondern auch gezielt die Ergänzung und Erweiterung dieser vorsah, musste die Sammlung aus Platzgründen schon wenige Jahre nach Städels Tod zum ersten Mal umziehen. 1878 bekam das Museum schließlich mit dem Neubau von Oskar Sommer (1840-1894) am südlichen Mainufer eine dauerhafte Unterkunft. In der folgenden Zeit wurde diese durch weitere Zukäufe kontinuierlich ergänzt und nahm insbesondere durch Ankäufe zeitgenössischer Kunst schon bald eine führende Position im Kunstgeschehen ein.

Unterstützt durch den Städelschen Museums-Verein und die Städtische Galerie, welche in den Jahren vor dem Ersten Weltkrieg mit dem „Städel“ fusionierte, wurde in den Jahren um den Ersten Weltkrieg die erste bauliche Erweiterung des Museums durch die Architekten Hermann von Hoven (1842-1924) und Franz Heberer (1883-1955) verwirklicht. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden die stark zerstörten Gebäude wieder aufgebaut und im Sinne der Zeit sehr behutsam „modernisiert“.

Die letzte Erweiterung erfuhr das Gebäudeensemble in den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts durch den Wiener Architekten Gustav Peichl als Antwort auf den gestiegenen Anspruch an Sonderausstellungen. Als sich das Museum 2007 für eine erneute Erweiterung entschied, stand die Ausstellung zeitgenössischer Kunst im Vordergrund. Das Städel Museum lobte einen beschränkten Wettbewerb aus, der vorsah, die vorhandene Ausstellungsfläche um 2.500 m² zu erweitern und damit die bestehende Ausstellungsfläche fast zu verdoppeln. Die Anforderung war, diese Erweiterungsfläche als Neubau auf dem vorhandenen Gelände zu schaffen. Die Frankfurter Architekten schneider+schumacher überzeugten mit ihrem Vorschlag, die Erweiterung unter dem Garten der Anlage anzuordnen und diese in der Verlängerung der zentralen Achse durch den Hauptbau zu erschließen.

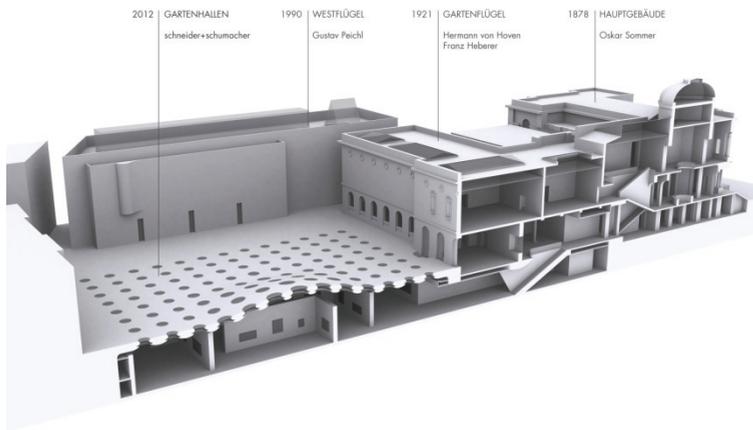


Bild 1-1 Schnitt in der zentralen Achse durch Alt- und Neubau © schneider+schumacher

Zentrale Idee des Wettbewerbsentwurfs war es, die letzte Freifläche auf dem Gelände, den Garten, für die Erweiterung zu nutzen und diesen gleichzeitig als begehbare Fläche und zur Präsentation von Skulpturen zu erhalten. Dieses architektonische Konzept wurde im Wesentlichen durch zwei Leitideen umgesetzt.

Die erste Idee ist der formale Ansatz, mit seiner zentralen Aufwölbung der den gesamten Raum überspannenden Decke. Hierdurch wird eine räumliche Zentrierung des Baukörpers erreicht und die innere Orientierung festgelegt. Im Außenraum wird der unterirdische Neubau durch die Aufwölbung als fester Bestandteil des Gartens wahrgenommen und die vierte Erweiterung des Städel Museums als eigenständiger Beitrag zur Architektur des historischen Städel-Komplexes markiert.



Bild 1-2 Der neue Städelgarten, Anfang 2012 © Städel Museum/Norbert Miguletz

Die zweite Leitidee zielt auf die Belichtung der zirka 8 m unter der Erde angeordneten Ausstellungsräume. Ziel war es, ähnlich wie in den Oberlichtsälen des Altbaus, eine von Tageslicht geprägte Atmosphäre entstehen zu lassen. Hierzu wurden 195 kreisrunde Oberlichter in einem Raster von 3,7 m x 3,7 m symmetrisch über die gesamte Deckenfläche angeordnet. Die Oberlichter haben in den Randbereichen einen Durchmesser von 1,5 m und nehmen zum Zentrum der Aufwölbung hin im Radius bis zu einem Durchmesser von 2,5 m zu.

Die Vor- und Nachteile des Tageslichtes spielten eine zentrale Rolle bei der Lichtplanung. Zum einen wird möglichst viel Tageslicht als Referenzlichtquelle für eine möglichst natürliche Farbwiedergabe bei den Kunstwerken gewünscht, zum anderen enthält natürliches Licht Strahlungsanteile, die unter konservatorischen Gesichtspunkten nicht nur unerwünscht, sondern sogar schädlich sind. Außerdem müssen tages- und jahreszeitliche Schwankungen des Tageslichtes für einen geregelten Museumsbetrieb über Kunstlicht ausgeglichen werden. Dieses architektonische Konzept überzeugte das Preisgericht, das den Entwurf wie folgt im Protokoll der Jurysitzung würdigte:

„Ein leuchtendes Juwel am Tag, ein Lichtteppich in der Nacht - etwas ganz Besonderes ist den Architekten mit der Erweiterung des Städel Museums gelungen. Sie setzen ein zugleich subtiles wie markantes, ja starkes, ein flächendeckendes Zeichen, das sich selbstbewusst in den städtebaulichen Kontext einfügt. Es ist gerade die Zurückhaltung in der Architektur, die Inszenierung, die der Authentizität des Ortes Achtung entgegenbringt und dem baulichen Umfeld die Luft zum Atmen lässt. Den Architekten ist der Spagat gelungen, die große Baumasse, die fast zu einer Verdoppelung der Ausstel-

lungsflächen im Städel Museum führen wird, so zu organisieren, alle Zeitschichten der Städel'schen Bauentwicklung, ob denkmalgeschützt oder nicht, bleiben erkennbar,..... der Garten bleibt, wenn auch unterbaut, als grüne Oase erhalten, die überraschende Einblicke bieten, Neugierde wecken wird.“

2 Integrale Planung der multifunktionalen Oberlichter

Die 195 Oberlichtverglasungen bestehen aus kreisrunden Isolierglaseinheiten mit Außendurchmessern von 1500 bis 2500 mm, der Einbauwinkel zur Horizontalen beträgt 0° bis ca. 15°. Jedes Glaselement ist am Rand linienförmig auf einer Stahlunterkonstruktion gelagert, die wiederum auf der doppeltgekrümmten Ortbetondecke verankert ist. Um die vielfältigen Funktionen in der Gebäudehülle zu erfüllen, musste die Verglasung für eine Vielzahl von Anforderungen geplant und ausgelegt werden.

Neben der Erfüllung statischer Anforderungen aus Einwirkungen wie Schneelasten und Nutzlasten von 5 kN/m² waren die Glaselemente für eine gefahrlose Begehbarkeit mit entsprechender Rutschhemmung auszulegen. Aufgrund der überwiegend horizontalen Einbausituation fiel besonderes Augenmerk auf die Planung einer kontrollierten Abführung des Niederschlagswassers.

Bauphysikalische Untersuchungen ergaben zudem die Notwendigkeit, die Oberlichtverglasungen mit einer Sonnenschutzbeschichtung sowie einer raumseitig angeordneten lokalen Beheizung zur Vermeidung von temporär anfallendem Kondensat auszustatten. Da die unterirdischen Ausstellungsräume ausschließlich über die Oberlichter belichtet werden sollten, kam der Steuerung der Lichttransmission eine zentrale Rolle zu. Ziel der Planung war es, das Tageslicht möglichst farbneutral und blendfrei einfallen zu lassen und so durch Kunstlicht zu ergänzen, dass eine gleichmäßige Belichtung der Museumsräume sichergestellt ist.

Zur Steuerung der Tageslichtnutzung wurden unterhalb der Verglasungseinheit horizontal verfahrbare Textilelemente angeordnet, welche die individuelle Lichtfilterung und -streuung ermöglichen. Die Zuführung von Kunstlicht erfolgt durch stufenlos regelbare LED-Elemente, die unterhalb der mechanisch verfahrbaren Sonnenschutz- und Verdunklungsanlage in die kreisrunde Form integriert wurden. Die LED-Elemente sind zusätzlich mit einem Diffusor ausgestattet und können je nach Bedarf gedimmt und in ihrer Lichtfarbe verändert werden.

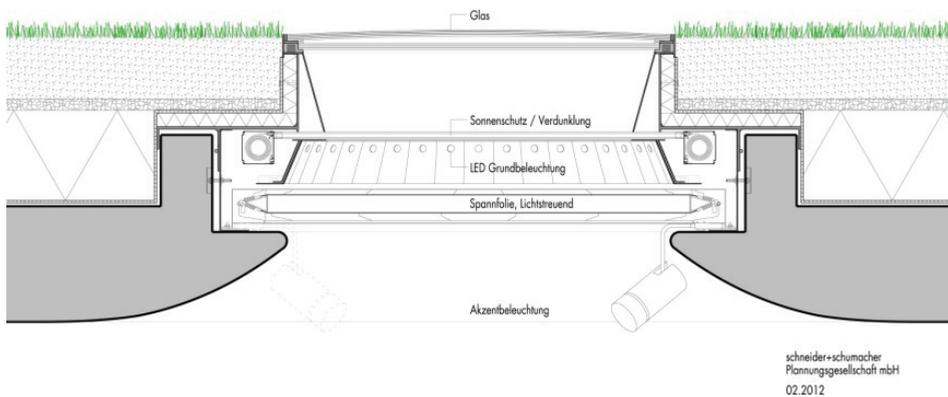


Bild 2-1 Detailschnitt durch das Oberlicht © schneider+schumacher

Als letzte Möglichkeit der Lichtakzentuierung ist der Spannring für den Diffusor zusätzlich noch mit Steckplätzen für Spotbeleuchtung ausgestattet, die je nach Anforderungen der Kuratoren eine zielgerichtete Ausleuchtung von Kunstobjekten ermöglichen. Tageslicht und Kunstlicht können so optimal über die Lichtsteuerung abgestimmt werden. Die ursprüngliche Planung der Verglasung sah vor, zwei flache Verbundsicherheitsgläser (VSG) als Isolierglaseinheit auszubilden.



Bild 2-2 Der Ausstellungsraum in der Bauphase mit Tageslicht ausgeleuchtet © Kirsten Bucher

Die Idee, sphärisch gebogene Oberlichter als Wiederholung der Aufwölbung des Gartens einzubauen, wurde zwar in der Wettbewerbsphase bereits angedacht, in der weite-

ren Planung dann aber vorerst verworfen. Der Einsatz gewölbter Scheiben schien aus Kostengründen nicht realisierbar, außerdem lagen keine Erfahrungen für die technische Machbarkeit mit den verfügbaren Herstellungsverfahren vor. So wurden zunächst ebene Scheiben ausgeschrieben. In den Bietergesprächen wurde jedoch schnell klar, dass bei einem horizontalen Einbau der Oberlichtelemente eine geregelte Abführung von Niederschlagswasser nicht gewährleistet sein würde und zu Problemen wie Verschmutzungsanfälligkeit, erhöhte feuchtetechnische Beanspruchung des Glasrandes sowie eingeschränkte Begehbarkeit bei Pfützenbildung führen wird.

Zur Lösung der genannten Probleme wurde im weiteren Planungsprozess die Variante einer leicht sphärisch gekrümmten Außenscheibe entwickelt und diese Variante gemeinsam mit den anbietenden Firmen in Hinblick auf Kosten und Machbarkeit optimiert. Entscheidende Kriterien waren die Realisierbarkeit der Verglasung und die Einhaltung des Kostenrahmens.

Letztendlich überzeugte der innovative Vorschlag einer laminationsgebogenen, sphärisch gekrümmten Verglasung der Firma seele_sedak sowohl die Planer wie auch den Bauherrn. Die Isolierglaseinheit besteht aus einer äußeren, sphärisch kaltgebogenen VSG-Scheibe sowie einer inneren flachen VSG-Scheibe. Die gekrümmten Scheiben müssen zum einen die geforderte Tragfähigkeit für eine Begehbarkeit erfüllen und eine flächige Nutzlast von 5 kN/m^2 ebenso wie eine mittige Punktlast von 4 kN abtragen können.



Bild 2-3 "Belastungstest" im Werk von seele_sedak © schneider+schumacher

Gleichzeitig sind die bauphysikalischen Anforderungen eines modernen Isolierglases zu erfüllen. Überkopfverglasungen müssen außerdem ein ausreichend hohes Resttragver-

halten im Bruchfall aufweisen. Das gilt insbesondere für die untere Scheibe der Isolierglaseinheit, die im Gegensatz zur oberen Scheibe nur auf ihr Resttragverhalten unter Eigengewicht bemessen wird. Das notwendige Resttragverhalten kann nur mit Verbund-sicherheitsglas (VSG) erreicht werden, indem nachgewiesen wird, dass im Versagensfall die einzelnen Bruchstücke der Glasscheiben an dem Verbundmaterial haften bleiben und die gesamte Scheibe über eine definierte Standzeit nicht aus dem Rahmen fällt. Für begehbare Überkopfverglasungen als Isoliergläser wird somit der Einbau von zwei Verbund-sicherheitsglasscheiben zwingend erforderlich. Während die obere VSG-Scheibe die Tragfähigkeit sicherstellt, muss die untere VSG-Scheibe die Anforderungen an die Überkopfverglasung erfüllen. Für alle Scheiben wurde Weißglas verwendet, um eine möglichst farbneutrale Lichttransmission zu erreichen.



Bild 2-4 Versuchskörper für die Begutachtung des Resttragverhaltens © seele_sedak

Die Außenscheibe gleicht in ihrer Form einer flachen Kugelkalotte mit einem Stich im Mittelpunkt von ca. $1/100$ des Außendurchmessers (zwischen 19 und 32 mm) und gewährleistet so sicher die Abführung von Niederschlagswasser zum Rand. Sie ist als Verbund-sicherheitsglas aus kaltgekrümmten Scheiben aus ESG-H hergestellt. Je nach Durchmesser liegen die Einzelstärken der Scheiben zwischen 5 und 10 mm. Der bei dieser neuartigen Technologie zwingend notwendige schubsteife Scheibenverbund wird durch ein von der Firma seele_sedak entwickeltes Herstellungsverfahren unter Verwendung der Sentryglas 5000 Folie von DuPont gewährleistet. Diese Folie weist gegenüber konventionellen PVB-Folien eine etwa um den Faktor 100 erhöhte Steifigkeit auf. Durch die Verwendung dieser Sentryglas-Folie und des statisch voll ansetzbaren Schubverbundes konnten die Scheibenstärken im Zuge der Planung gegenüber der Ausschreibung weiter reduziert werden. Die untere VSG-Verglasung wurde als Verbund-sicherheitsglas aus teilvorgespanntem Glas mit PVB-Folien ausgeführt. Auf der Innenseite des sphärisch gekrümmten Scheibenpakets ist eine Alarmspinne als leitender Siebdruck aufgebracht und die Außenscheibe ist mit einem Antirutschbelag versehen. Dieser erfüllt auch in den Randbereichen mit maximalen Neigungen von 19° - 27° die Anforderungen der Rutschfestigkeitsklasse R11 nach DIN 51130.