

Wiley Industry Days

**WIN DAYS**

7.-9. Juni 2021

[www.WileyIndustryDays.com](http://www.WileyIndustryDays.com)

## **Bauen 2021 –** Werden Sie mit uns Teil der WINDays

Virtuelle Show mit Konferenz, Ausstellung und Networking  
für Architektur und Bauingenieurwesen, Automatisierung, Machine  
Vision, Photonics, Healthcare und Sicherheit.

- **Virtuelle Ernst & Sohn Ausstellungshalle**  
mit Auditorium für Architektur und Bauingenieurwesen
- **Fokus auf Ihr Networking –**  
Ihre Kommunikation – Ihren Vertrieb
- **3 Leistungspakete bieten Ihnen optimale  
Repräsentationsmöglichkeiten,**  
inkl. direkter Kommunikation mit den Messeteilnehmern  
per Video- und Textchat u. v. m.



### **STANDBUCHUNGEN**

Wenden Sie sich jetzt an unsere Experten!

**Fred Doischer** – [Fred.Doischer@Wiley.com](mailto:Fred.Doischer@Wiley.com)

Tel. +49 (0)172-3999-853

**Sigrid Elgner** – [Sigrid.Elgner@Wiley.com](mailto:Sigrid.Elgner@Wiley.com)

Tel. +49 (0)30-47031-254



**JETZT KOSTENFREI ALS  
BESUCHER REGISTRIEREN!**  
[WWW.WILEYINDUSTRYDAYS.COM](http://WWW.WILEYINDUSTRYDAYS.COM)

# Multifunktionale, sphärisch gebogene Oberlichtverglasung für das Städel Museum

Kai Otto<sup>1</sup>, Harald Kloff<sup>2</sup>, Florian Mähl<sup>2</sup>, Hanno Sastré<sup>3</sup>

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 Überkopfverglasung eingesetzt, die dauerhaft allein über den Schubverbund tragen.

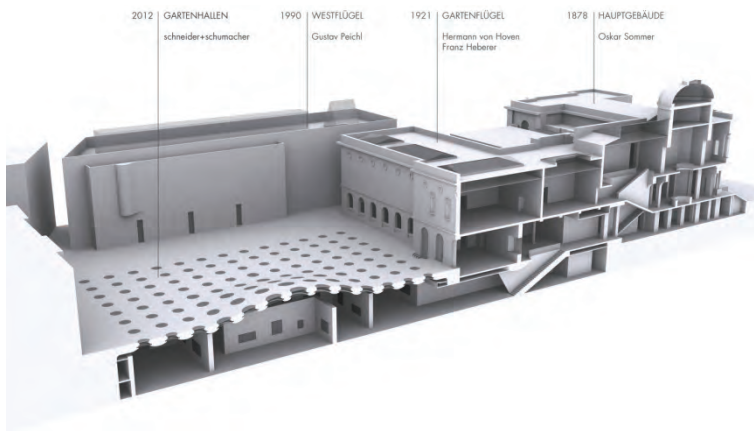
**Schlagwörter:** Multifunktionale Oberlichtverglasung, laminationsgebogene sphärisch gekrümmte Gläser

## 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 m<sup>2</sup> 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-*

*lungsf lächen 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.“*

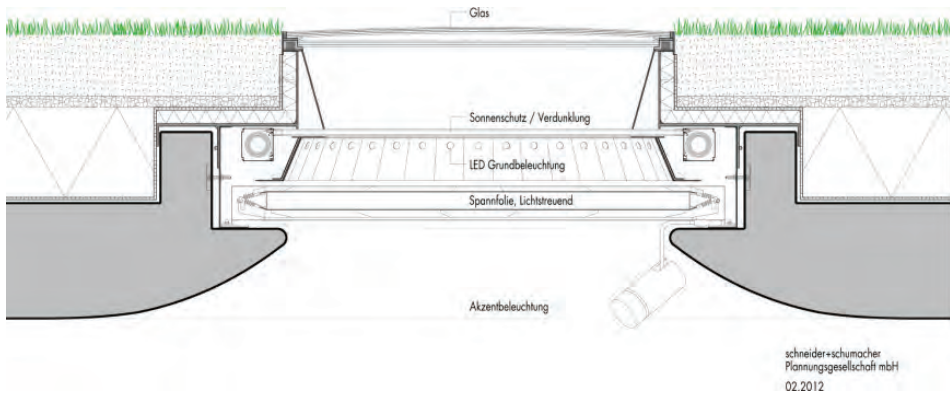
## 2 Integrale Planung der multifunktionalen Oberlichter

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/m<sup>2</sup> 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  $5 \text{ kN/m}^2$  ebenso wie eine mittige Punktlast von  $4 \text{ kN}$  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 begehbbare 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

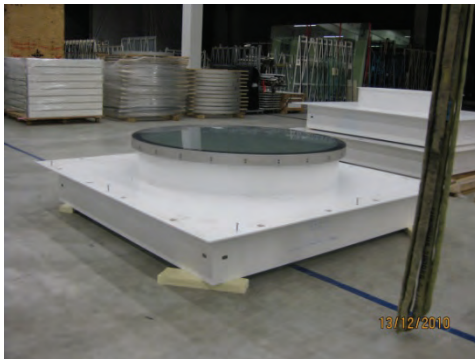
Die Außenscheibe gleicht in ihrer Form einer flachen Kugelkalotte mit einem Stich im Mittelpunkt von ca. 1/100 des Außendurchmessers (zwischen 19 und 32 mm) und gewährleistet so sicher die Abführung von Niederschlagswasser zum Rand. Sie ist als Verbund sicherheitsglas aus kaltgekrümmten Scheiben aus 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.



Der U-Wert der Isolierverglasung beträgt zirka  $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  im horizontalen Einbaustand, der g-Wert zirka  $0,36$ . Ein zusätzlich rückseitig des Laibungsbleches angeordnetes Heizblech vermeidet die zeitweise Bildung von Kondensat unterhalb der Glasebene sowie im Bereich der Laibungsbleche bei extremen Kälteperioden. Durch die farbneutrale Sonnenschutzbeschichtung auf der Innenseite der sphärisch gekrümmten VSG-Scheibe wird der solare Wärmeeintrag deutlich reduziert und Spitzenlasten – auch im Hochsommer – bei geschlossener Blend- beziehungsweise Verdunklungsschicht ausgeschlossen.

Der Rand der Isolierglaseinheit ist als Stufenfalz ausgeführt. Die kraftschlüssige, umlaufende Befestigung auf der ringförmigen Konstruktion aus 6 mm dicken Stahlblechen erfolgt durch Verklebung mit Silikon. Die Stirnkante der zurückspringenden unteren Scheibe sowie der Randverbund sind mit einem alukaschierten Butylband hermetisch abgeklebt, um einen Kontakt mit dem Klebemittel dauerhaft zu vermeiden. Die kraftschlüssige Verbindung dient ausschließlich zur Lagesicherung der Oberlichtverglasung auf der Unterkonstruktion sowie zur Aufnahme von Abtriebskräften bei den geneigt angeordneten Elementen.

Die ringförmige Unterkonstruktion zur Aufnahme des Glaselements ist auf einen Stahlrahmen aus Blechen aufgeschweißt, welcher im unteren Bereich der Kontur des Rohbaus folgt und auf einer quadratischen Aufkantung aus Stahlbeton aufsitzt.



**Bild 2-5** Oberlicht mit Stahlrahmen vor der Auslieferung © seele\_sedak

Die ca. 30 cm hohen, zumeist im Quadrat angeordneten Aufkantungen wurden als Teil der gewölbten Ortbetondecke hergestellt und waren durch die Neigungen der Decke mit einem entsprechend hohen Schalungs- und Herstellungsaufwand verbunden. Die gekrümmten Ränder der Oberlichtöffnungen zum Innenraum hin wurden mit Hilfe von dreidimensional gefrästen Hartschaumschalungen hergestellt.



**Bild 2-6** Oberlichter nach der Montage eingehüllt in eine Schutzkonstruktion © Kirsten Bucher

### 3 Warm- oder kaltverformte Gläser – Einige Anmerkungen zur Entscheidungsfindung

Sphärisch gebogene Verglasungen wurden bisher durch die Verwendung von warm gebogenen Scheiben hergestellt. Die Glasscheiben werden hierzu soweit aufgeheizt, bis sie sich verformen lassen. Wegen der hohen geforderten Tragfähigkeit kam bei der planmäßig begehbaren Oberlichtverglasung des Städelmuseums nur Verbundsicherheitsglas (VSG) in Frage. VSG erfordert herstellungsbedingt parallele Scheiben, mit der Konsequenz, dass beim warmverformten „Schwerkraftbiegen“ die Scheiben gemeinsam in die Form „fallen“ müssen. Wegen der geforderten uneingeschränkten Begebarkeit der Oberlichter zur Nutzung des Gartens, sollte der Stich der Scheiben nicht zu groß sein, was im Warmbiegeverfahren nicht ohne Beeinträchtigung der Scheibenoberflächen möglich ist, denn das Warmbiegen sehr flach gekrümmter Formen führt zu optischen Verzerrungen der Glasmatrix. Darüber hinaus können für die Scheiben nur Floatgläser verwendet werden, da der Einsatz thermisch vorgespannter Gläser beim Warmverformen nicht möglich ist. Ein eventuell chemisches Vorspannen der Einzelscheiben wäre nur für die inneren Scheiben des Laminates sinnvoll, da diese Vorspannart durch Kratzer entspannt wird und die Vorspannung der oberen, begehbaren Scheibe durch Gebrauch verloren gehen würde. Selbst wenn die Tragfähigkeit der Scheiben nachgewiesen werden könnte, sind die erforderlichen Beschichtungen auf warmgebogenen Scheiben ausführungstechnisch nicht möglich.

Moderne Sonnenschutzbeschichtungen sind in der Regel nicht wärmebeständig und würden das Warmbiegen mit einer Prozesstemperatur von über 640 °C nicht überstehen. Darüber hinaus ist auch die rutschhemmende Bedruckung, welche im Wesentlichen aus einer keramischen Schmelzfarbe besteht, nicht auf der konvexen Seite möglich, da diese beim Schwerkraftbiegen die Form berührt. Für ebene Scheiben sind die Anforderungen dagegen leicht zu erfüllen.

Die Verwendung von PVB-Folien (Polyvinylbutyral) mit herkömmlichem Floatglas gewährleistet das erforderliche Resttragverhalten durch die sich gegenseitig stützenden

großen Bruchstücke des Glases. Darüber hinaus kann die Tragfähigkeit durch TVG (Teilvorgespanntes Glas mit höherer zulässiger Biegezugfestigkeit) gesteigert werden ohne die Resttragfähigkeit negativ zu beeinflussen. Dennoch hätten sich Scheibendicken für die obere begehbare Scheibe von bis zu 3\*12 mm ergeben, was wiederum die Lichttransmission negativ beeinflusst hätte und im Grunde nicht dem eigentlichen Entwurf entsprach.

Mit dem Vorschlag von seele\_sedak, die Scheiben durch Laminationsbiegen - ein neues Kaltbiegeverfahren - in Form zu bringen, konnten dagegen die Anforderungen aus dem Entwurf und gleichzeitig sämtliche Anforderungen an das Isolierglas erfüllt werden. Laminationsbiegen ermöglicht das Biegen von Gläsern ohne thermisches Aufheizen und verändert damit nicht die Glasoberfläche, so dass die hohe Qualität des Basisglases erhalten bleibt. Das Basisglas wird während des Laminierens zu Verbundsicherheitsglas (unterhalb der maximalen Bruchspannungen) gebogen und durch eine schubsteife Folie dauerhaft in Form gehalten. seele\_sedak verwendet dazu die allgemein bauaufsichtlich zugelassene Hausmarke Glascobond®-Verbundsicherheitsglas mit Schubverbund. Mit diesem Kaltbiegeverfahren können sämtliche Beschichtungen und Bedruckungen vor dem Biegen aufgebracht werden.

Darüber hinaus kann mit Glascobond® auch das bauaufsichtlich geregelte ESG mit seiner hohen Biegezugfestigkeit im Überkopfbereich verwendet werden. In diesem Fall gewährleisten die minimal dünnen VSG-Scheiben eine hervorragend hohe Lichttransmission, die erforderliche Tragfähigkeit und Einbruchsicherheit bei gleichzeitiger Ausnutzung des geometrischen Steifigkeitszuwachses durch den Kuppeloeffekt. Die hohe Steifigkeit der oberen Scheibe macht es zusätzlich sinnvoll, die untere Scheibe eben auszuführen. So können die im Scheibenzwischenraum (SZR) auftretenden Klimalasten durch Verformung der unteren Scheibe kompensiert werden. Die 195 kreisrunden Isolierglasscheiben wurden in fünf verschiedenen Durchmessern von 1500 mm bis 2500 mm in das Stahlbetondach des unterirdischen Baukörpers integriert und sind Teil des öffentlich zugänglichen Gartens.

Auf Grund der Nutzung handelt es sich um durch Personen planmäßig begehbare Überkopferverglasungen. Die obere Scheibe der Isolierverglasung hat die Form einer Kugelkalotte mit geradem Rand. Sie besteht in Abhängigkeit vom Radius aus 1\*5 mm und 3\*6 mm ESG-H oder aus 1\*6 mm und 2\*8 mm ESG-H. Der Stich der Scheiben ist etwa 1/100 und variiert damit von 15 mm bis 25 mm. Mit einem Abstandshalter von 12 mm ergibt sich ein variierender SZR von 27 mm bis 37 mm Höhe.

Die Scheiben sind mit einer Sonnenschutzbeschichtung zum SZR hin und einer rutschhemmenden Bedruckung auf der Oberfläche versehen. Die Isolierglasscheiben wurden werkseitig in spezielle Stahlkonstruktionen vormontiert und auf der Baustelle in einem Stück eingehoben und mit der Betondecke kraftschlüssig verbunden.

Tabelle 3-1 Gegenüberstellung Warmbiegen und Kaltbiegen

	warmgebogen	laminationsgebogen
<b>Geometrie</b>	Einfachkrümmung, Mehrfachkrümmung i.d.R. im Bauwesen nicht möglich	Einfachkrümmung ab 6 m Radius, Mehrfachkrümmung ab 15 m Radius, Doppelkrümmung, Verwindungen
<b>Beschichtung</b>	i.d.R. hardcoatings	Vielzahl an hard- und softcoatings
<b>keramische Bedruckung</b>	i.d.R. nur auf der konkaven Seite möglich	Auf der konkaven und konvexen Seite
<b>optische Erscheinung</b>	Rolerwaves, Verzerrungen, (Toleranzen)	Optisch glatte Oberfläche insbesondere auf der Zugseite
<b>normative Regelungen</b>	Nicht vorhanden	geregelte Bauprodukte

#### 4 Herstellung der laminationsgebogenen sphärisch gekrümmten VSG-Scheiben

Das sphärische Krümmen der VSG-Scheiben erfolgt während der Lamination und wird deshalb als Laminationsbiegen bezeichnet. Laminationsbiegen ist ein Kaltbiegeverfahren, bei dem die Biegespannungen aus der Verformung dauerhaft im Glas verbleiben. Die Krümmung der Scheiben wird ausschließlich über die Folie gehalten. Die sphärisch laminationsgebogenen, begehbaren Verbundglasscheiben wurden weltweit zum ersten Mal bei der Erweiterung des Städelmuseums eingebaut. Der dauerhafte Schubverbund durch Glascobond®-Verbundsicherheitsglas zeichnet sich durch ein spezielles Herstellungsverfahren und die Verwendung der schubsteifen Sentryglas 5000 Folie von Dupond aus. Sonst übliche Verbundsicherheitsgläser aus Polyvinylbutyral (PVB) verfügen nicht über einen dauerhaft wirkenden Schubverbund und eignen sich deshalb nicht zum Laminationsbiegen ohne zusätzlich stützende Maßnahmen.

Die Lamination von Glascobond® wird ausschließlich im Foliensackverfahren durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen manuellen Herstellungsprozess mit dem höchste Qualitätsansprüche an den Verbund zwischen Glas und Folie erreicht werden. Hierzu wird um den Scheibenstapel aus Glas und Verbundfolie ein Foliensack angeordnet, welcher evakuiert wird. Durch das Absaugen der Luft aus dem Foliensack während der Lamination wird verhindert, dass Luftblasen zwischen der Verbundfolie und den Glasscheiben verbleiben. So wird ein besonders hohes Adhäsionsniveau erreicht. Der Verbund zwischen Glas und Sentryglas 5000 wird in einem Autoklaven bei ca. 13 bar Druck und bei bis zu 140 °C hergestellt.



**Bild 4-1** Glasscheiben im Foliensack beim Einbringen in den Autoklaven © seele\_sedak

Ein Autoklav ist ein mit Überdruck beaufschlagbarer Raum, der zusätzlich beheizt und gekühlt werden kann. Bei über 100 °C verfügt die Verbundfolie über keinerlei Schubverbund. Wird der Scheibenstapel vor dem Abkühlen verformt, verbleibt eine Krümmung in dem Verbundglas, welche durch die hohe Schubfestigkeit der Folie dauerhaft über den baupraktischen Temperaturbereich erhalten bleibt.

Für die sphärisch gebogenen Scheiben im Städtelmuseum mussten spezielle Biegevorrichtungen konstruiert werden, welche die extrem hohen Verformungslasten in die Scheiben einbringen konnten. Die synklastisch gekrümmten Scheiben gehen beim Biegen – ab etwa einer Verformung über die Dicke der Einzelscheiben des Laminats hinaus – in einen nichtlinearen Membranbiegezustand über. Dabei werden in den Einzelscheiben radiale Zugspannungen und tangentielle Druckspannungen hervorgerufen. Da die Scheiben über die Schubsteifigkeit der Folie in ihrer Form gehalten werden, konzentriert sich die Schubspannung in der Folie zum Rand hin und erzeugt ihrerseits Zug und Druckspannungen auf den Scheibenoberflächen. Beim Lösen aus der Form federn die sich nun im Verbund befindlichen Scheiben im Verhältnis der Steifigkeiten vor und nach der Lamination und in Abhängigkeit von der Scheibengeometrie um einen gewissen Betrag zurück. Dabei kommt es stellenweise zum Spannungsaufbau aber auch zum Spannungsabbau in den Einzelscheiben.

Zur Erfassung des Rückfederverhaltens bzw. zur Berechnung der Biegegeometrie für laminationsgebogene Verbundglasscheiben, wurde im Vorfeld des Projekts ein Berechnungstool mit Ansys 13.0 entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen iterativen Vorfindungsprozess, mit dem das Rückfederverhalten vorweggenommen wird, um eine überhöhte Biegeform zu erzeugen. So wird sichergestellt, dass die gebogene Verbundglasscheibe nach dem Rückfedern der Sollgeometrie entspricht. Das Tool ermöglicht auch den statischen Nachweis im Montagezustand unter Berücksichtigung sämtlicher

Lastfallkombinationen inkl. der Klimalasten. Inzwischen wurde für die statische Bemessung des Schubverbundes von Glasobond®-Verbundsicherheitsglas eine AbZ (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung) vom DiBt für Glasobond®-Verbundsicherheitsglas mit Schubverbund erteilt. Das Biegeverfahren selbst erzeugt die Geometrie durch das Aufbringen von Flächenlasten. So wird eine möglichst schonende Kraftübertragung auf die empfindliche Sonnenschutzbeschichtung der konkaven Seite gewährleistet.

## 5 Nachweisverfahren (Zustimmung im Einzelfall)

Unabhängig von den statischen Nachweisen wurden für die Isolierglasscheiben Untersuchungen zur Resttragfähigkeit und Stoßsicherheit erforderlich. Die Scheibenformate der Isolierglasscheiben (Größe, gebogenes VSG), gleichwohl die Art der Konstruktion, weichen von den technischen Regeln für liniengelagerte Verglasungen [1] ab und sind deshalb als nicht geregelte Bauart im Sinne des §20 Abs. 1 HBO gesondert nachzuweisen. Im Rahmen der dazu erforderlichen ZiE (Zulassung im Einzelfall) durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffe und Mechanik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider, experimentelle Untersuchungen der Stoßsicherheit und der Resttragfähigkeit durchgeführt [2]. Die Versuche wurden analog des Merkblatts des Deutschen Institutes für Bautechnik (DiBt) „Anforderungen an begehbare Verglasungen“ [3] durchgeführt. Die Untersuchungen zur Stoßsicherheit und zur Resttragfähigkeit wurden an zwei Glasaufbauten mit erhöhten Temperaturen (40 °C), als sie in [2] vorgesehen sind, durchgeführt, um der besonderen Einbausituation und dem Verbundtragverhalten Rechnung zu tragen.

Zum einen wurde die größte und damit statisch am höchsten beanspruchte Scheibe mit einem Durchmesser von 2500 mm ausgewählt und zum anderen wurde die am häufigsten vorkommende und kleinste Scheibe mit 1500 mm Durchmesser untersucht. Ziel der Versuche war es, das Impact- und Nachbruchverhalten der Glaskonstruktion zu ermitteln. Da die oberen Scheiben auf der Oberfläche einen punktuellen rutschhemmenden Siebdruck aufweisen, wurden die oberen Scheiben der Versuchskörper vollflächig bedruckt, um damit „auf der sicheren Seite“ zu sein. Die Lagerung der Scheiben erfolgte umlaufend auf elastomerer Bettung und damit in Anlehnung an die originale Bauweise, ohne jedoch die Isolierglaseinheit in den Rahmen zu verkleben. Die Stoßsicherheit wurde mit dem Torpedofallversuch, bei dem ein zylindrischer Stoßkörper mit einer Masse von 40 kg aus 800 mm Höhe punktuell mit dem Kopf einer M12 Schraube auf die Scheibe schlagen muss, durchgeführt.



**Bild 5-1** Torpedofallversuch bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C © seele\_sedak

Zunächst wurde das Scheibenzentrum als Aufschlagpunkt ausgewählt. Die Scheiben sind entsprechend der Forderung aus [2] während des Impacts mit Sandsäcken als Flächenlast zu belasten. Kam es zu keiner oder nur zur Teilschädigung der oberen Verbundglasscheibe wurde, ein zweiter Abwurf des Zylinders mit einem Aufschlagpunkt in der Nähe des Randes bzw. des Auflagers vorgenommen.

Direkt im Anschluss an den Torpedofallversuch wurden die Scheiben der oberen Scheibe, insofern sie noch intakt waren, an der Kante angeschlagen und damit zerstört, sodass sämtliche Scheiben des Verbundglases geschädigt waren. Für den ersten Teil der Untersuchung zur Resttragfähigkeit wurde die Temperatur bei 40 °C über eine Stunde gehalten und die vorher aufgebraute und ebenfalls gegenüber [2] erhöhte Flächenlast von 2,5 KN/m<sup>2</sup> beibehalten. Im zweiten Teil der Beurteilung des Resttragverhaltens wurde eine Flächenlast von 0,5 KN/m<sup>2</sup> bei Raumtemperatur von 25 °C über 24 Stunden auf die geschädigten Scheiben aufgebracht. Die Ergebnisse zeigen das gutmütige Impact- und Nachbruchverhalten von Glascobond® aus ESG.



**Bild 5-2** Reststandversuch bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C / 25 °C © seele\_sedak

Weder konnte der Stoßkörper die Verbundglasscheiben durchschlagen, noch konnte er in sie eindringen. Bei keinem der Stoß- oder Reststandversuche haben sich gefährliche Bruchstücke aus dem Verbund gelöst. Interessant erscheint, dass auch nach einer Standzeit von 24 Stunden noch ein gewisser Rest der Vorkrümmung in den in ihrer ursprünglichen Position verharrenden Scheiben nachgewiesen werden konnte. Mit den erforderlichen Gutachten, statischen Nachweisen und Versuchsergebnissen wurde am 09.02.2011 die ZiE für die begehbaren laminationsgebogenen Oberlichter für den Innenhof des Städelmuseums von der obersten Bauaufsichtsbehörde des Landes Hessen erteilt.



**Bild 5-3** Der fertige Innenraum kurz vor der Eröffnung, Januar 2012  
© Städel Museum/Norbert Miguletz



## 6 Projektbeteiligte Oberlichtplanung

Planende Firmen:

- Architektur: schneider+schumacher
- Projektarchitekten: Michael Schumacher, Kai Otto
- Projektleitung: Miriam Baake
- Bauleitung: Hans Eschmann
- Tragwerksplanung: B+G Ingenieure / Bollinger und Grohmann GmbH  
Manfred Grohmann, Jörg Schneider, Michael Wagner
- Lichtplanung: Ulrike Brandi Licht, Lichtplanung und Leuchtenentwicklung  
GmbH (Wettbewerb)  
LKL – Licht Kunst Licht AG (Ausführung)  
Tanja Baum
- Bauphysik: TOHR Bauphysik GmbH & Co. KG  
Dirk Heimann
- Fassadenberatung: Office for Structural Design – OSD GmbH & Co. KG  
Harald Kloft, Florian Mähl

Ausführende Firmen:

- Oberlicht: seele\_sedak GmbH & Co. KG  
Ralf Scheurer, Heiko Schmid, Hanno Sastre
- Beleuchtung: Zumtobel Lighting GmbH

## 7 Literatur

- [1] Technische Regeln für die Verwendung von liniengelagerten Verglasungen (TRLV). Berlin: Deutschen Institutes für Bautechnik, August 2006.
- [2] Versuchsbericht: Nr. 103.01.10; Experimentelle Untersuchungen der Stoßsicherheit und Resttragfähigkeit, Begehbare Oberlichtverglasungen Städel Museum, Frankfurt a.M.. Darmstadt: Institut für Werkstoffe und Mechanik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt; Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider.
- [3] Anforderungen an begehbare Verglasungen; Empfehlungen für das Zustimmungsverfahren, Berlin: Deutschen Institutes für Bautechnik, November 2009.