

Lisa Maria Kurzmann

STRUCTURAL GLASSBLOCK

Der Glasstein als konstruktives Fassadenelement

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom - Ingenieurin

Studienrichtung: Architektur

Technische Universität Graz
Erzherzog-Johann-Universität
Fakultät für Architektur

INSTITUT FÜR TRAGWERKSENTWURF
Technische Universität Graz
Betreuer:
Stefan PETERS, Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Andreas TRUMMER, Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.tech.

EIDESSTAATLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

date

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt hat. Ihr habt euch mit mir nicht nur über jeden Erfolg gefreut sondern ward mir auch in schwierigen Zeiten eine große Stütze. Dafür möchte ich mich von ganzem Herzen bedanken.

Danken möchte ich auch meinem Freund Martin, der mir während der gesamten Diplomarbeitszeit nicht nur eine mentale Stütze war, sondern auch immer für eine fachliche Diskussion offen war.

Ein weiterer Dank gilt meinen Freundinnen und Freunden, die mich die letzten Jahre begleitet haben. Ich möchte mich bei euch für die wunderschönen Freundschaften bedanken und hoffe, dass sich unsere Wege auch in Zukunft immer wieder kreuzen werden.

Besonderer Dank gilt auch Stefan Peters und Andreas Trummer für die aufgeschlossene und intensive Betreuung während dieser Diplomarbeit. Auch Gernot Parmann möchte ich für seine wertvollen Hilfestellungen und die vielen Gespräche außerhalb beschlossener Termine danken.

KURZFASSUNG

Glas zählt seit Ende des 19. Jahrhunderts zu den bedeutendsten Baustoffen in der Architektur. Mit dem Bau des Crystal Palace für die erste Weltausstellung 1851 in London, setzte der britische Architekt Joseph Paxton nicht nur einen ästhetischen, sondern vor allem auch einen technischen Wegbereiter modernen Bauens. Der ausgesprochen ambivalente Baustoff ist einerseits ein sehr hartes, sprödes sowie hochtechnisches Material, andererseits besitzt er eine Menge sinnlicher und ästhetischer Qualitäten. Als architektonisches Gestaltungselement ermöglicht Glas durch den hohen Grad an Transparenz nicht nur ausreichend natürliche Belichtung der Innenräume, sondern führt auch zur optischen Aufhebung der Grenzen zwischen Innen und Außen, zu einem offenem Raumfluss zwischen Wohnen oder Arbeiten und der Natur. In der zeitgenössischen Glasarchitektur findet man sowohl Prestigeprojekte im privaten Wohnbau, als auch repräsentative Bürogebäude zahlreicher Firmen von namhaften Architekten wieder. Einerseits wird Glasbau als Mainstream für Zweckbauten angesehen und andererseits in Hinblick auf Energieeffizienz zum Teil kritisiert.

Glas wird aktuell im Bauwesen hauptsächlich nicht tragend in Form von Fensterverglasungen oder in Kombination mit hoch technischen Stahlkonstruktionen als Glasüberdachung oder Glasfassade eingesetzt. Die Gitterstruktur aus Stahl und Glas ist meist eine Pfosten- Riegelkonstruktion, mit welcher äußerst filigrane Glasfassaden hergestellt werden. Die Bauteillasten werden über die senkrechten Pfosten abgeleitet, an denen die horizontalen Riegel angeschlossen sind. Das Glas dient dabei als raumabschließendes Element und als Schutz vor äußeren Umwelteinwirkungen.

Welche konstruktiven Lösungsansätze werden jedoch bei Bauvorhaben geboten, deren Anforderungen nicht von großflächigen Fensterverglasungen erfüllt werden können, aber auch zu klein sind um die Effizienz einer Stahl- Glaskonstruktionen zu nützen?

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde eine Methode entwickelt, mit der selbsttragende Gebäudehüllen aus Glas errichtet werden können, welche die funktionalen Anforderungen einer Fassade vereint und folglich auf eine zusätzliche Tragstruktur aus Stahl, Aluminium oder Holz verzichtet. Auf Grund der Materialeigenschaften des Baustoffes Glas eignen sich nur rein auf Druck beanspruchte Gebäudehüllen. Folglich bieten sich Flächentragwerke in Form von Bögen oder Schalen an. Da ein Schalentragwerk jedoch nicht aus einem einzigen Glaselement gefertigt werden kann, muss die Fläche in kleinere Segmente unterteilt werden. Um die Herstellungskosten der benötigten Steine gering zu halten ist es vorteilhaft, die Gebäudehülle aus einigen wenigen, oder im besten Fall aus einem einzigen Typ Stein aufzumauern.

Bislang bediente man sich im Glasbau nicht an diesem Potential für ebene oder gekrümmte Fassadenkonstruktionen. Durch eine Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten von Glas können mit der Verwendung des Structural Glassblocks architektonisch hochwertige Akzente im Fassadenbau gesetzt werden.

INHALT

1. GRUNDLAGEN	13
1.1 Der Baustoff Glas	13
1.1.1 Die Entwicklung des Glases	13
1.1.2 Glaseigenschaften	15
1.1.3 Verwendung im Fassadenbau	16
1.2 Tragverhalten von Schalen	29
1.3 Beispiele	32
1.3.1 Monumento Atocha	32
1.3.2 Glastonnendach Stadthaus Zürich	34
1.3.3 Optical Glass House, Japan	36
1.4 Definition des Projektziels	38
2. FORMFINDUNG VON SCHALEN	41
2.1 Formfindung über virtuelle Hängemodelle	42
2.1.1 Verwendung von Kangaroo Physics	44
2.1.2 Polygonnetze	45
2.2 Beispiele für virtuelle Hängemodelle	48
3. ELEMENTIERUNG	55
3.1 Realisierte Schalentragwerke	55
3.2 Elementierung von Freiformflächen	61
3.2.1 Herleitung der Elementform	62
3.3 Orientierung der Elemente	68
3.3.1 Elementieren von NURBS - Flächen	68
3.3.2 Orientierung im Punktraster	74
4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS	87
4.1 Einflussfaktoren	88
4.1.1 Elementgröße	88
4.1.2 Tragfähigkeit sowie bauphysikalische Anforderungen	89
4.1.3 Glaseigenschaften	92
4.2 Glassteinmodul	93
4.2.1 Element aus Einzelanfertigung	94

4.2.2 Element aus Serienproduktion	99
4.3 Fertigung	106
4.4 Belichtung und gestalterische Vielfalt	110
4.5 Fugenausbildung	114
4.6 Anwendungsbeispiele	117
5. HERSTELLUNG EINES PROTOTYPS	125
6. AUSBLICK	135
7. QUELLENANGABEN	139

1. GRUNDLAGEN

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde der Einsatz von Glas in der Architektur immer bedeutender. Die Auflösung des traditionellen massiven Gebäudekubuses durch große transparente Glasflächen wirkte der räumlichen Trennung zwischen Innen- und Außenraum entgegen. Durch die Verwendung von Glas, als neues raumabschließendes Element, entstand ein völlig neuer Raumfluss. Entwürfe bekannter Architekten wie Ludwig Mies van der Rohe oder Frank Lloyd Wright waren davon geprägt. Es entstanden großflächige Glasfassaden, ohne Faktoren wie Wärme-, Schall- oder Brandschutz zu berücksichtigen.

Nach der Ölkrise in den 1970er Jahren wuchs die Kritik an der Glasarchitektur der vergangenen Jahrzehnte. Zuvor galt es als Fortschritt, allseitig versiegelte Gebäudehüllen aus Glas sowohl im Winter als auch im Sommer klimatisch regulieren zu können. Die Verwendung von Lüftungsgeräten und die damit verbundene Verschwendung wertvoller Ressourcen waren mit zunehmendem Umweltbewusstsein und dem wachsendem Energieverbrauch nicht mehr vereinbar.¹

Es wurde nach neuen Konzepten und technischen Lösungen gesucht, um die Situation zu verbessern und Energie einsparen zu können. Durch die Verwendung von Mehrscheiben-Isoliergläsern in Verbindung mit verschiedenen Glasbeschichtungen wurden neue Maßstäbe gesetzt. In Kombination mit Pfosten-Riegel-Konstruktionen werden aktuell äußerst filigrane nichttragende Glasfassaden hergestellt. Trotz umfangreichem Fachwissen und zahlreichen Innovationen der vergangenen Jahre ist das Potential des Baustoffs noch lange nicht ausgeschöpft.

Um das Ziel, eine selbsttragende Gebäudehülle aus Glas zu entwickeln, welche die funktionalen Anforderungen einer Fassade vereint und gleichzeitig auf eine zusätzliche Tragstruktur verzichten kann, müssen zu Beginn die Eigenschaften sowie die Be- und Verarbeitungsweisen des Baustoffes Glas untersucht werden.

1.1 DER BAUSTOFF GLAS

1.1.1 DIE ENTWICKLUNG DES GLASES

Der tatsächliche Ursprung der Glaserzeugung kann bis heute nicht genau festgestellt werden, jedoch belegen Funde um das Ende des 5. Jahrtausends v. Chr. in Mesopotamien und Anfang des 4. Jahrtausends v. Chr. in Ägypten erste Schlacken als Glasur auf Keramiken. 3500 v. Chr. stieß man bei der Öffnung ägyptischer Königsgräber auf grünliche Glasperlen, welche auf eine erste gezielte Glasproduktion für Schmuck hindeuteten. Etwas später wurden auch Ringe und kleine Glasfiguren entdeckt.

Die älteste erhaltene Glasrezeptur befindet sich auf einer Tontafel des assyrischen Königs Assurbanipal (669-627 v. Chr.), welche der heutigen schon sehr ähnlich ist. 200 v. Chr. gelang es den Glasbläsern erstmals mit der Erfindung der syrischen Glasmacherpeife dünnwandiges Glas herzustellen. Glas als raumabschließendes Element wurde erstmals durch Funde in den Villen von Pompeji, Herculaneum und in Thermen nachgewiesen.²

¹ Vgl. Schittich/Staib/Balkow/Schulter/Sobek 2006, 36.

² Vgl. Schittich/Staib/Balkow/Schulter/Sobek 2006, 10

Um Christi Geburt wurde die Herstellung von Flachglas mittels verschiedener Streck- und Guss-techniken vereinfacht. Noch zähflüssiges Glas wurde auf eine nasse oder mit Sand bestreute Fläche gegossen und mit Werkzeugen flach gezogen. Diese Fenstergläser fand man als Raumabschluss in römischen Thermen und später in Kirchen und Klöstern. Bis ins 19. und frühe 20. Jahrhundert etablierte sich das Zylinderstreckverfahren, mit welchem Zylinderlängen bis zu 2 m und einem Durchmesser bis 30 cm erreicht werden konnten. Es wurden die Kappen an beiden Enden abgeschnitten und der Länge nach ein weiterer Schnitt gesetzt. Nach erneutem Erwärmen konnte der Zylinder zu Flachglas ausgerollt werden. Dieses Verfahren verdrängte das für die damalige Zeit ebenfalls gängige Mondglasverfahren. Bei diesem Verfahren wurde nach Erzeugung einer geblasenen Kugel, das Glas abgesprengt und auf einem Eisenstab zu einer flachen Scheibe geschleudert.³

³ Vgl. Siebert/Maniatis 2012, 12-13.

Abb. 1.1.1 Herstellungsablauf von Tafelglas im Zylinderstreckverfahren

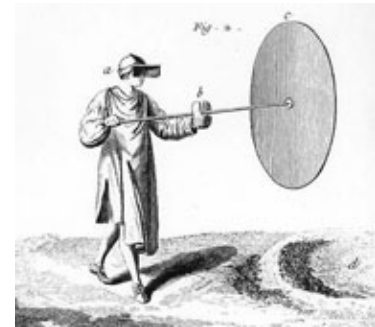
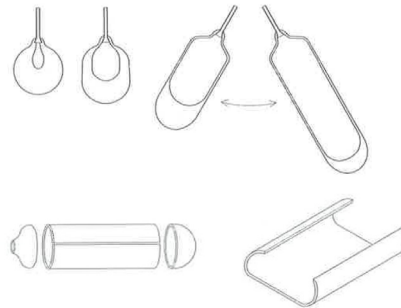


Abb. 1.1.1

Um die nun immer größer werdende Glasnachfrage zu bewältigen, wurde stetig nach neuen verbesserten Herstellungsverfahren gesucht. Einen Durchbruch verzeichnete der Franzose Bernard Perrot 1687 mit der Entwicklung des Gussglasverfahrens. Erstmals in der Geschichte der Flachglaserzeugung wurde eine Produktion ohne arbeitsaufwändige Umwege möglich, indem die zähe Glasmasse mit einer gekühlten Metallwalze ausgewalzt wurde. Seitlich verstellbare Einfassschienen steuerten zusätzlich die Glasdicke.⁴

⁴ Vgl. Schittich/Staib/Balkow/Schulter/Sobek 2006, 11.

Eine weitere Entwicklung dieses Verfahrens ist das Gusswalzverfahren, erfunden von Max Bicheroux im Jahr 1919. Die zuvor unterschiedlichen Arbeitsschritte konnten von nun an in einem Herstellungsprozess vereint werden, da mit Hilfe von Walzwerken und beweglichen Tischen gearbeitet wurde. Obwohl die Glasproduktion immer mehr vereinfacht wurde, galt es bis Ende des 18. Jahrhunderts als ein sehr wertvolles Material. Im 19. Jahrhundert wurde, neben weiteren verbesserten Herstellverfahren, auch der Schmelzofen weiterentwickelt. Friedrich Siemens ließ zum Beispiel 1856 einen Schmelzofen patentieren, welcher die Hälfte an benötigten Brennstoffen einsparte. Die Effizienz der Produktion stieg somit und die Preise sanken.⁵

⁵ Vgl. Ebda., 12.

Anfang 20. Jahrhundert gelang es dem Belgier Emile Fourcault erstmals Glastafeln maschinell zu produzieren, indem diese direkt aus der Glasschmelze gezogen wurden. Gleichzeitig ließ

1. GRUNDLAGEN

1905 auch der Amerikaner Irving Colburn ein ähnliches Ziehverfahren namens Libbey-Owens-Verfahren patentieren. Bei diesem Verfahren wird das Glas nicht senkrecht wie bei Fourcault in die Höhe gezogen, sondern über Walzen horizontal in den Kühlkanal umgelenkt, um danach geschnitten werden zu können.

Der richtige Durchbruch gelang Alastair Pilkington 1959 mit der Erfindung des Floatglasverfahrens, welches bis heute die Grundlage der Glasproduktion bildet. Durch die industrielle Fertigung kann Glas nun in großen Mengen produziert werden.

1.1.2 GLASEIGENSCHAFTEN

Glas kann als ein amorpher Festkörper aus einer eingefrorenen unterkühlten Schmelze definiert werden, welcher aus zahlreichen völlig ungeordneten Molekülen besteht. Bei Temperaturen zwischen 1400 °C und 1650 °C schmilzt der Werkstoff, bei ca. 1000 °C ist das Glas verformbar und bei Zimmertemperatur nimmt es einen festen Zustand ein. Die Druckfestigkeit von Glas ist mit 1000 N/mm² gegenüber der Biegefestigkeit von etwa 45 N/mm² sehr hoch. Dies bedeutet, dass man eine Last von 10 Tonnen benötigt, um einen Glaswürfel mit einer Seitenlänge von 1 cm zu zerstören.

Glas kann weiters als ausgesprochen ambivalenter Baustoff bezeichnet werden, da es einerseits ein sehr hartes und sprödes Verhalten aufweist und gleichzeitig jede Menge ästhetische Qualitäten besitzt. Glas lässt Licht durchscheinen, kann aber auch reflektieren. Es kann Licht bündeln, lenken und fokussieren, brechen und in seine Spektralfarben zerlegen. Es ist transparent und gleichzeitig stofflich präsent.

Momentan wird Glas hauptsächlich nicht tragend als Flachglas in Form von Isolierverglasung oder als Verbundglas eingesetzt. Es übernimmt die Rolle des raumabschließenden Elements, trägt jedoch nicht zum statischen Tragsystem bei.

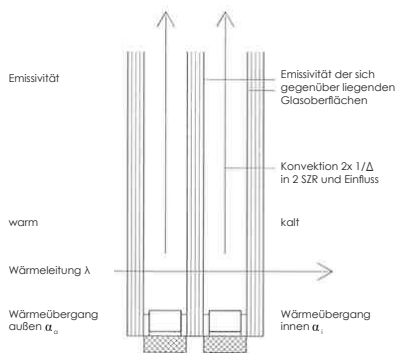


Abb. 1.1.2

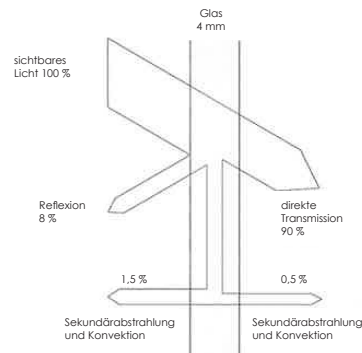


Abb. 1.1.3

Abb. 1.1.2 Physikalische Zusammenhänge des U-Wertes bei Isolierglas mit zwei Scheiben zwischenräumen

Abb. 1.1.3 Energie und Tageslichtbilanz für sichtbare Licht an einer 4 mm Glasscheibe

1.1.3 VERWENDUNG IM FASSADENBAU

DAS FLOATGLAS

Floatglas wird seit den 1960er Jahren industriell hergestellt und hat seither die meisten anderen Flachglasherstellungsverfahren verdrängt. Etwa 95 Prozent des gesamten Flachglases aller Anwendungsbereiche wie Fensterglas, Autoscheiben und Spiegel werden so erzeugt.

Der Herstellungsprozess von Floatglas:⁶

1 Gemengeeinfüllung

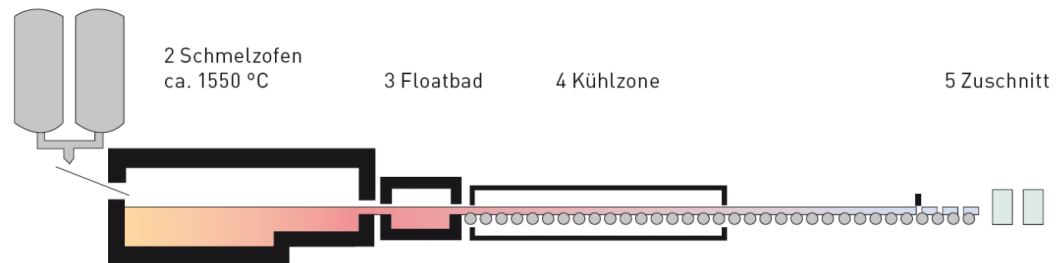


Abb. 1.1.4

Das Silicatglas setzt sich hauptsächlich aus Siliciumdioxid, dem wichtigsten Rohstoff, Kalziumoxid zur Erhöhung der chemischen Beständigkeit und Härte, Natriumoxid als Flussmittel, Magnesiumoxid zum Herabsetzen der Schmelztemperatur und Aluminiumoxid als Form von Feldspat zur Beseitigung von Trennstellen zusammen. Diese Bestandteile werden bei einer Temperatur von etwa 1560 °C zu einer glasigen Masse verarbeitet. Dieses flüssige Glasgemenge fließt auf ein angekoppeltes, ebenes Zinnbad. Durch die vorhandene Oberflächenspannung formt sich eine planparallele Glasplatte. Die Glasdicke wird mit Rollen, welche sich am Rand befinden, reguliert. Herstellbar sind Glasstärken zwischen 2 und 28 mm. Nach vollständigem Durchlaufen des Zinnbades hat das Glas eine Temperatur von 600°C. Nach dem kontrollierten Abkühlprozess, wodurch unnötige Spannungen verhindert werden, wird das fertige Glas mit Hilfe eines Diamanten angeritzt und gebrochen, um weiter verarbeitet werden zu können. Das aktuelle maximale Bandmaß beträgt 320 x 1500 cm. Üblicherweise werden zur Fensterscheibenproduktion jedoch Scheiben mit einer Länge von 600 cm verwendet. Die gesamte Anlage benötigt mehrere hundert Meter und produziert zwischen 500 und 800 t Glas pro Tag.

Für die Weiterverarbeitung der Glasscheiben müssen die relativ unregelmäßigen und noch scharfen Bruchkanten mechanisch nachbearbeitet werden. Dies erfolgt durch Schleifen oder Polieren mittels eigener Maschinen. Man spricht je nach Bearbeitungsweise von gesäumter maßgeschliffener, geschliffener oder polierter Kante. Diverse Glättungsverfahren und Bohrungen können mittels Diamant-Bohrern oder mit Wasserstrahl-schneidetechnik erfolgen.⁷

⁶ Vgl. Schittich/Staib/Balkow/Schulter/Sobek 2006, 60-61.

Abb. 1.1.4 Herstellungsverfahren von Floatglas

⁷ Vgl. Siebert/Maniatis 2012, 16-17.

1. GRUNDLAGEN

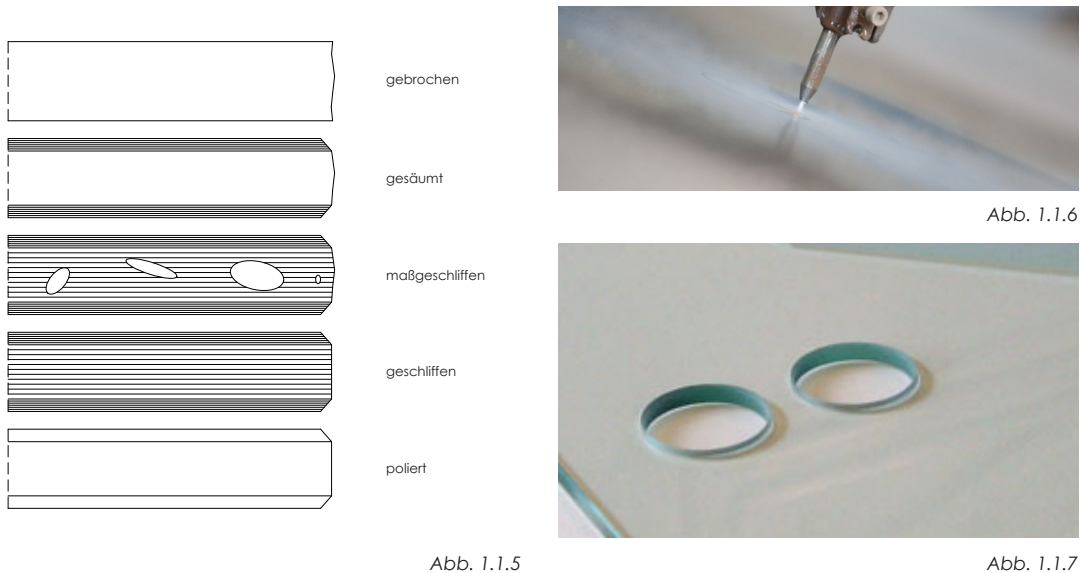


Abb. 1.1.5 Bearbeitungsstufen von Glaskanten

Abb. 1.1.6 Beispiel für Wasserstrahl-schneidetechnik

Abb. 1.1.7 Darstellung von fertigen Bohrlöchern

Neben der mechanischen Nachbearbeitung der Kanten gibt es weitere Verarbeitungsverfahren, wie zum Beispiel die Oberflächenbehandlung sowie die thermische und chemische Nachbearbeitung von Glas.

Wird die Glasoberfläche durch Emaillierung, Ätzung oder Sandstrahlmattierung bearbeitet, so verändert sich das optische Erscheinungsbild bzgl. der unterschiedlichen Durchsicht des Glases. Je nach Bearbeitungsart kann eine einheitliche transluzente Wirkung erzeugt werden oder auch einzelne Muster bzw. Bilder aufgebracht werden.

Bei der thermischen Bearbeitung von Gläsern unterscheidet man zwischen gebogenem Glas und thermisch vorgespanntem Glas. Um Glas nachträglich biegen zu können, muss es über den Transformationspunkt erhitzt werden. Es erreicht dadurch wieder seinen weichen Zustand und kann sich in eine vorgefertigte Form biegen. Danach kann es entweder normal abgekühlt werden oder auch zu vorgespanntem Glas oder Verbund- bzw. Verbundsicherheitsglas weiterverarbeitet werden. Gebogene Scheiben sind im Gegensatz zu ebenen Scheiben durch ihre Form starrer, können sich jedoch bei Belastungen weniger verformen was zu einer höheren Bruchgefahr führt.

Um bessere mechanische Eigenschaften der Flachgläser zu erreichen, werden die Glasescheiben vorgespannt. Dies erfolgt im Bauwesen überwiegend durch thermische oder auch teilweise durch chemische Vorspannung, sodass ein Eigenspannungszustand mit Druckspannung im Oberflächenbereich und Zugspannung im Inneren des Glases entsteht.

Man unterscheidet zwischen Einscheibensicherheitsglas (ESG), auch genannt thermisch vorgespanntes Sicherheitsglas, und teilvorgespanntem Glas (TVG).

Bei der Bearbeitung des Glases zu ESG wird die gesamte Glasscheibe bis zum Transformationspunkt erhitzt und anschließend schlagartig mit kalter Luft abgekühlt. Durch die rasche Abkühlung der Glasoberfläche von ESG und die dadurch entstandene Druckspannung an der Oberfläche können bei Belastung größere Zugkräfte aufgenommen werden als bei normal abgekühltem Glas. Bei Überbelastung bricht es und zerfällt in zahlreiche kleine stumpfkantige Stückchen. ESG zählt auf Grund der höheren Biegebruchfestigkeit und der kleinen Glasbruchstücke, welche zu einer geringeren Verletzungsgefahr führen, zu den Sicherheitsgläsern.

Um TVG zu erhalten, wird die Glasscheibe ebenfalls erwärmt. Anders wie bei ESG wird es jedoch nicht rasch, sondern langsam und gezielt abgekühlt. Es entstehen Oberflächenspannungen, die gerade so groß sind, dass sie bei Bruch nur Radialbrüche von Kante zu Kante zulassen. TVG hat im Vergleich zu normalem Floatglas auch eine höhere Biegebruchfestigkeit und ist beständiger gegenüber Temperaturwechsel. Es gehört auf Grund des Bruchbildes aber nicht zu den Sicherheitsgläsern.

Abb. 1.1.8 Bruchbild von ESG

Abb. 1.1.9 Bruchbild von VSG

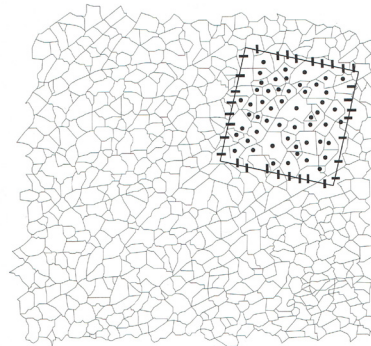


Abb. 1.1.8

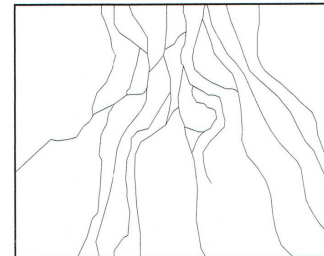


Abb. 1.1.9

Der chemische Vorspannungsprozess erfolgt nicht durch das Einwirken von Hitze, sondern durch Ionenaustausch. Die Glasscheibe wird in eine Salzsäure getaucht, wobei die kleineren Natriumionen der Glasfläche mit den größeren Ionen der Salzsäure ausgetauscht werden. Dies führt wiederum zur Erhöhung der Druckspannung an der Oberfläche. Es besitzt eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische und thermische Beanspruchung und verhält sich bei Überbelastung gleich wie normales Floatglas.

1. GRUNDLAGEN

Ein wichtiger Anwendungsbereich von Glas im Bauwesen ist die Verwendung von Verbund- bzw. Verbundsicherheitsglas (VG bzw. VSG). Hierbei handelt es sich um eine Nachbearbeitung zu Glaspaketen aus mindestens zwei Scheiben, welche mit einer fest verschmolzenen, elastischen Zwischenschicht verbunden sind. Je nach Einsatzbereich können sowohl ESG und TVG, als auch beide in Kombination verwendet werden. Als Trennschicht werden aktuell häufig PVB-Folien verwendet, welche zwischen die Glasscheiben gelegt werden und im Autoklav unter Hitze- und Druckeinwirkung verpresst werden. Von Verbundsicherheitsglas kann dann gesprochen werden, wenn nach eingetretenem Bruch die einzelnen Glassplitter an der Folie haften bleiben und somit einerseits nicht zu Boden fallen und andererseits auch eine Resttragfähigkeit gewährleistet wird. VSG und seine Anforderungen sind in der europäischen Norm DIN EN 12 543 Teil 2 definiert.

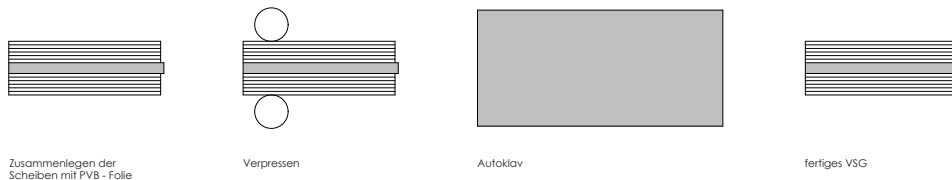


Abb. 1.1.10

Im konstruktiven Glasbau unterscheidet man grundsätzlich zwischen verschiedenen Typen von Verglasungen, nämlich Überkopfverglasungen, Vertikalverglasungen, Absturzsichernde Verglasungen, begehbare sowie betretbare Verglasungen und Tragwerkselemente aus Glas. Alle Arten bringen spezifische Anforderungen mit sich, deren Regelungen in Vorschriften und den technischen Regeln und Normen definiert sind.⁸

Als Überkopfverglasung kommt zur Sicherstellung ausreichender Resttragfähigkeit VSG aus Floatglas (FG) oder VSG aus TVG zum Einsatz. Für Vertikalverglasungen sind alle Glasarten denkbar, sofern sie das Verkehrsaufkommen neben bzw. unter der Verglasung sowie die Lagerung der Scheiben berücksichtigen. Auch bei absturzsichernden Verglasungen kommen unterschiedliche Glasarten zum Einsatz. Unterschieden wird, ob die Verglasung der alleinige Schutz gegen Absturz ist, ein unabhängiger Handlauf vorhanden ist oder die Verglasung nur aufstufende Funktion eines ansonsten selbst ausreichend tragfähigen Geländers hat. Für begehbare Verglasungen muss 3-lagiges VSG verwendet werden, bei betretbare Verglasungen kann bereits 2-lagiges VSG ausreichen. Bei der Anwendung von ganzen Tagwerkselementen aus Glas muss in der Regel ein Nachweis durch Bauteilversuche erbracht werden.⁹

In der Abbildung 1.1.11 werden diese veranschaulicht. Auch Kombinationen der jeweils genannten Verglasungsarten sind in der Praxis üblich.

Abb. 1.1.10 Herstellungsprozess von VSG mit PVB-Folie

⁸ Vgl. Ebda., 2-4.

⁹ Vgl. Ebda., 2-3.

Abb. 1.1.11 Typbezeichnungen
verschiedener konstruktiver
Verglasarten.

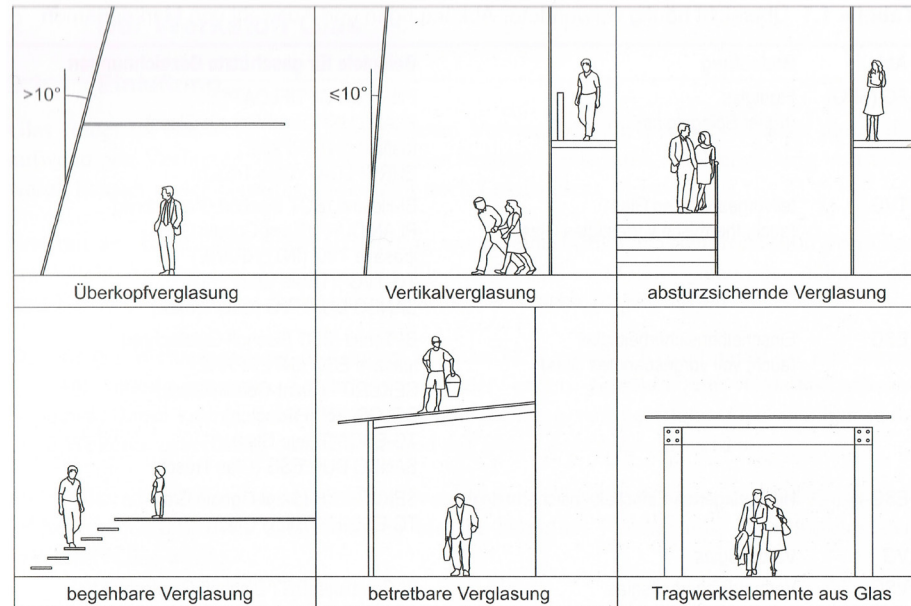


Abb. 1.1.11

Um den bauphysikalischen Anforderungen einer Gebäudehülle gerecht zu werden, kommen momentan meist Isolierverglasungen zum Einsatz. Sie bestehen aus mindestens zwei Glasscheiben, jedoch sind diese anders wie beim Verbundglas nicht flächig miteinander verklebt, sondern durch den Randverbund bzw. einen Abstandhalter voneinander getrennt. Zwischen den Glasscheiben und dem Abstandhalter befindet sich eine erste Dichtebene aus Butyl, welche das Eindringen von Feuchtigkeit von außen verhindert und gleichzeitig beide Elemente miteinander verklebt. Die zweite dauerelastische Dichtebene, zum Beispiel aus Silikon, liegt gleich hinter dem Abstandhalter zwischen den beiden Glasscheiben. Der Abstandhalter beinhaltet zusätzlich ein hygroskopisches Entfeuchtungsmittel, welches die Bildung von Tauwasser im Scheibenzwischenraum verhindert. Der Scheibenzwischenraum beinhaltet häufig ein Edelgas, wie etwa Argon oder Krypton, um die Wärmedämmung des Glases im Vergleich zu getrockneter Luft zusätzlich zu verbessern. Auch Beschichtungen der Glasoberflächen können einen positiven Effekt auf die Dämmfähigkeit haben.

Vgl. Abb. 1.1.12

Die Herstellung von Isoliergläsern muss sehr sorgfältig vorgenommen werden, da schon bei kleinsten Fehlern ein Luftaustausch zwischen dem Scheibenzwischenraum und der Außenluft stattfindet und sich so unerwünschtes Kondensat an der Glasoberfläche bilden kann. Durch vorhandene Temperaturveränderungen bedingt durch die vier Jahreszeiten sowie auch zwischen Tag und Nacht entsteht ein unterschiedlicher Luftdruck. Auf diese Schwankungen reagiert auch der Luftdruck im Scheibenzwischenraum. Die Scheiben werden bei zuneh-

1. GRUNDLAGEN

mendem Außendruck zusammengedrückt und umgekehrt bei geringerem Außendruck auseinander gedrückt. Diese Bewegungen sind mit dem bloßen Auge im eingebauten Zustand als Verzerrungen minimal zu erkennen.

Vgl. Abb. 1.1.13

Je nach Konstruktion und Anzahl verwendeter Scheiben sowie möglichen Wärmedämmbe-
schichtungen erhält man einen besseren bzw. schlechteren bauphysikalischen Wert. Durch
die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten, auch U-Wert genannt, kann die Dämmfä-
higkeit bzw. der Wärmeverlust einzelner Bauteile genau berechnet werden. Dabei setzt sich
der U_w -Wert (W für Window) von Fenstern aus dem U_g -Wert für das Glas und dem U_f -Wert für
den Rahmen zusammen. Es ist zu beachten, dass der U_g -Wert für den so genannten ungestör-
ten Bereich gilt, das heißt ohne Einfluss des Randbereiches. Dort ist der Wärmefluss in der Regel
wesentlich größer. Erst der U_w -Wert berücksichtigt sowohl den Wert des Glases als auch den
des Rahmens. Nach der OIB Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz müssen Fenster
und Fenstertüren in Wohngebäuden einen U_w -Wert von $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreichen und in Nicht-
Wohngebäuden $1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ einhalten. Aktuell werden mit dreifach- Isoliergläsern U_g -Werte bis
zu $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht und je nach Beschaffenheit des Rahmens U_w -Werte bis zu $0,67 \text{ W/m}^2\text{K}$ im
Passivhaus Bereich.

Abb. 1.1.12 Randverbund von
Isolierglas

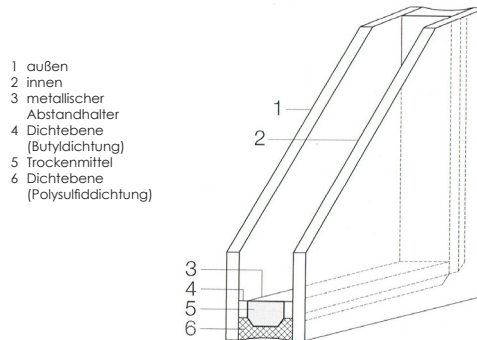


Abb. 1.1.12

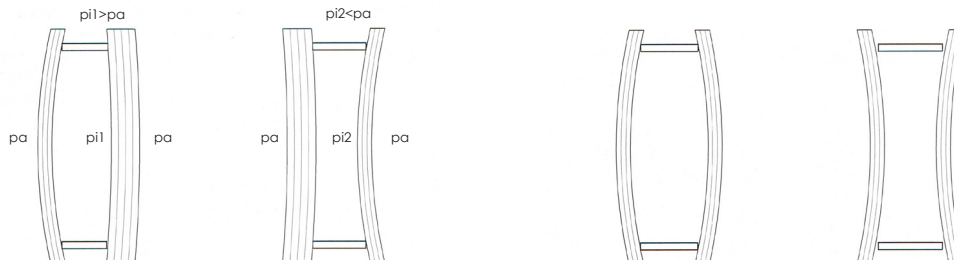


Abb. 1.1.13 Verhalten von
Isolierglasscheiben bei Luft-
druckänderung

Abb. 1.1.13

DER GLASBAUSTEIN

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts wuchs das Interesse, Glas nicht nur als Fensterflächen zu verwenden sondern auch als begehbare Elemente zur Belichtung im Deckenbereich. Thaddeus Hyatt konstruierte erstmals eine Metallrahmenkonstruktion gefüllt mit Glassteinen, um Untergeschoße über den Gehsteig zu belichten. 30 Jahre später fand man ein Glasprodukt, welches als Wandbaustein verwendet werden konnte. Als großer Erfinder mundgeblasener Glasbausteine ist an dieser Stelle der Franzose Gustave Falconnier zu nennen. Er entwickelte 1886 eine serienreife Glassteinproduktion in ovaler und sechseckiger Form. Obwohl diese geringe Mängel bzgl. Belastbarkeit und Probleme mit Schwitzwasser aufwiesen, erfuhren sie große Beliebtheit bei zeitgenössischen Architekten. Weitere Steinentwürfe entstanden 1899 von der Luxfer-Prismen-Gesellschaft, 1907 von Friedrich Kepplers sowie der Nevada-Stein von Saint-Gobain Glaswerke.¹⁰ „In den 1930er-Jahren gelingt es der Owens Illinois Glass Corporation erstmals einen aus zwei Hälften unter Hitze und Druck zusammengefügtten Stein, wie wir ihn heute kennen, herzustellen.“¹¹

Die Blütezeit des Glasbausteines lag in den 1960er und 70er Jahren. Damals fanden Glasbausteine häufig im Eingangsbereich sowie im Stiegenhaus Verwendung, um den Innenraum mit Licht zu versorgen. Konstruktiv gesehen übernehmen sie, gleich wie Isolierverglasungen, keine tragende Rolle, da sie keine Kräfte aus dem Mauerwerk aufnehmen dürfen. Zum Einsatz kamen schlichte quadratische, oft transluzente Steine, die den Blick nach innen verwehren. Auf Grund der schlechten thermischen Trennung des Bauteils von Innen- und Außenraum ging sehr viel Energie verloren. Mit wachsendem Bewusstsein für energieeffizientes Bauen verlor man folglich das Interesse an den Glassteinen. Der Trend entwickelte sich bis hin zur Passivhausbauweise, wo der Glasbaustein auf Grund seiner Eigenschaften keine Verwendung fand.

¹⁰ Vgl. Schittich/Staib/Balkow/
Schulter/Sobek 2006, 12.

¹¹ Ebda., 12.

Abb. 1.1.14 Glassteindesign
der Firma SOLARIS



Abb. 1.1.14

Abb. 1.1.15 Mundgeblasener
Glassteine von Gustave
Falconnier



Abb. 1.1.15

1. GRUNDLAGEN

HERSTELLUNG

Wie im Kapitel 1.1.1 Die Entwicklung des Glases bereits beschrieben, wird ein zähflüssiges Glasgemenge hergestellt. Dieses tropft mit einer Temperatur von 1 800°C von oben in eine aus Metall gefertigte Negativform. Diese Form besitzt genau die Geometrie eines halben Steines. Von oben übt ein Druckkörper Druck auf die Glasmasse aus und presst es in die vom Werkzeug vorgegebene Form. Anschließend wird es durch beblasen mit kalter Luft von 1 800°C auf 1 100°C abgekühlt, bis es wieder seinen festen Zustand erreicht hat.



Abb. 1.1.16 Herstellungsablauf eines hohlen Pressglassteins.

Abb. 1.1.16

Nach Erreichen eines festen Zustandes, kann der Glasstein aus der Form genommen werden. Für die Fügung beider Glassteinhälften werden die oberen Kanten erneut erhitzt und mit jeweils der zweiten Steinhälfte verschweißt. Während des gesamten Vorganges darf die Temperatur der Glaserzeugnisse nicht unter 500°C sinken, da es sonst zu rasch abkühlt und zu unerwünschten Rissbildungen kommt. Nach der Fertigstellung werden die Steine folglich über mehrere Stunden kontrolliert abgekühlt. Die Auskühlzeit richtet sich dabei nach der jeweiligen Glasart, der Dicke beziehungsweise der Glasstärke.

Durch diesen Prozess entsteht im Inneren des hohlen Glasbausteins eine luftverdünnte Kammer, welche die Wärmedämmeigenschaft verbessert. Laut einschlägigem Fachpersonal besteht bei korrekter Herstellung der Steine, das heißt bei Erzeugung einer völlig luftdichten Kammer, keine Gefahr von unerwünschter Kondensatbildung im Zwischenraum. Zum Abschluss wird der Stein fugenseitig mit weißer Farbe versehen, um ein einheitliches Erscheinungsbild zu garantieren.

Abb. 1.1.16 (Fortsetzung) Herstellungsablauf eines hohlen Pressglassteins.

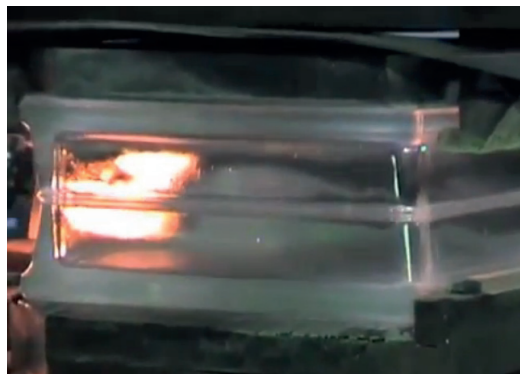
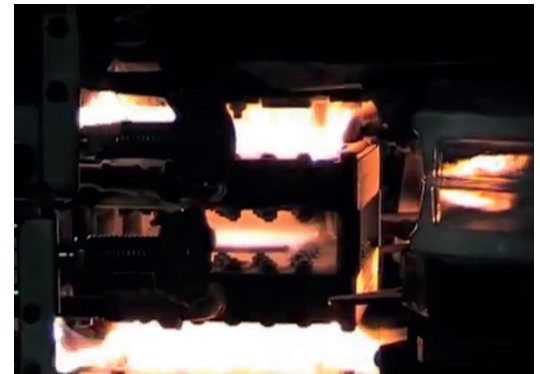
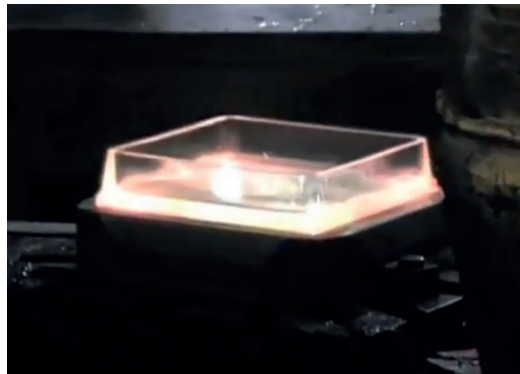


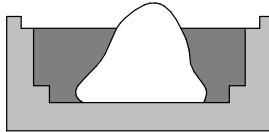
Abb. 1.1.16

1. GRUNDLAGEN

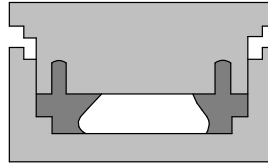
Prinzip des Pressformens im Überblick:¹²

¹² Vgl. Kalweit/Paul 2012, 244.

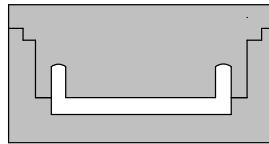
Einfüllen der Glasschmelze



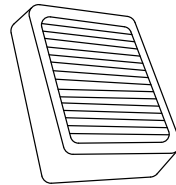
Schließen der Formhälften



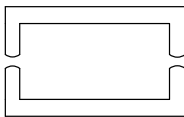
Pressen



Fertige Glasbausteinhalfte



Fügen der beiden Hälften



Fertiger Glasbaustein

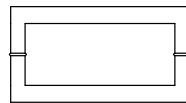


Abb. 1.1.17

Um Glasbausteinwände gegen Horizontalkräfte auszusteifen, werden Bewehrungen entlang der Fuge verlegt, wofür ein rechnerischer Nachweis der Standsicherheit erforderlich ist. Heute werden hauptsächlich Innenräume, wo der Aspekt der Wärmedämmung vernachlässigbar ist, mit den verschiedensten Glasbausteinen gestaltet. Wände sind ausschließlich vertikal und lassen nur geringe gestalterische Spielräume der Geometrie zu. Es gibt die Möglichkeit Wände aus lauter gleich formatigen Steinen gebogen auszuführen, wobei die Krümmung über die Fugen gebildet wird. Diese Verlegeart ist vergleichbar mit der von Ziegelsteinen, jedoch weisen sie keinen Versatz auf.

Abb. 1.1.18 Anschlussdetail einer frei stehenden Glasbausteinwand der Firma SOLARIS.

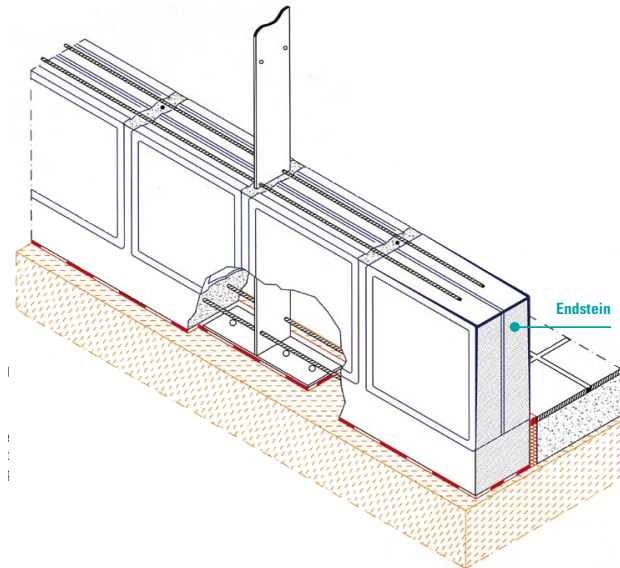
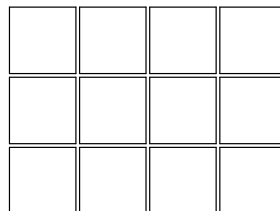


Abb. 1.1.18

Abb. 1.1.19 Verlegeart einer Glasbausteinwand und einer Ziegelwand.

Glasbausteinwand



Ziegelwand

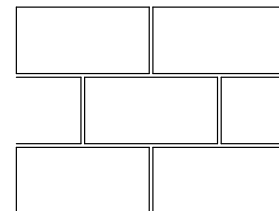


Abb. 1.1.19

1. GRUNDLAGEN

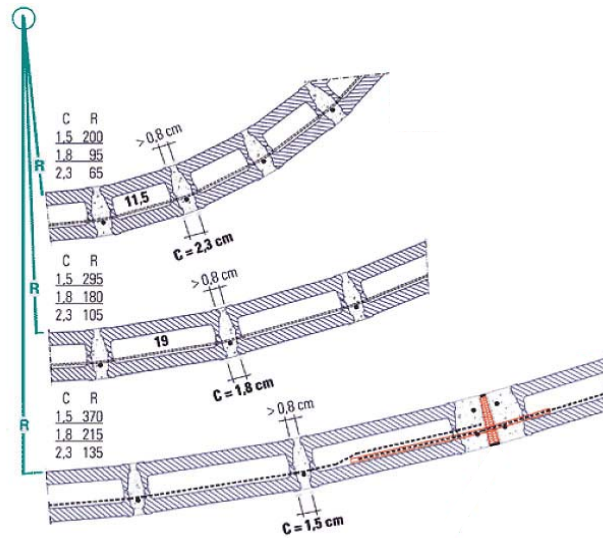


Abb. 1.1.20

VERGLEICH GLASBAUSTEIN - ISOLIERGLAS

Vergleicht man Glasbausteine mit aktuellen Isoliergläsern, so erkennt man einen deutlichen Unterschied bzgl. der Wärmedämmfähigkeit. Durch den mehrschichtigen Aufbau der Isoliergläser in Verbindung mit zusätzlich verwendeten Gasfüllungen im Scheibenzwischenraum kann auf das Problem des Wärmeverlustes reagiert werden. Der klassische Glasbaustein ist weniger komplex aufgebaut und daher auch mit seiner einzigen Kammer weniger dämmend. Die Firma SOLARIS entwickelte einen Wärmeschutzstein mit verbessertem U-Wert von $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.¹³ Der Fortschritt gegenüber herkömmlichen Steinen wird auf Grund des Prinzips der Kammern, durch das Einsetzen einer zusätzlichen Floatglasscheibe mit geringem Emissionsgrad zwischen den beiden Hälften, erzielt. Es entstehen somit zwei Kammern, welche zusätzlich mit Argon Gas gefüllt sind. Gegenüber herkömmlichen Steinen mit einem U-Wert von $2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ¹⁴ kann man durchaus von einer Verbesserung sprechen. Verglichen mit aktuell verwendeten Isoliergläsern mit U-Werten bis zu $0,67 \text{ W/m}^2\text{K}$ geben sie jedoch immer noch relativ viel Energie an die Außenluft ab.

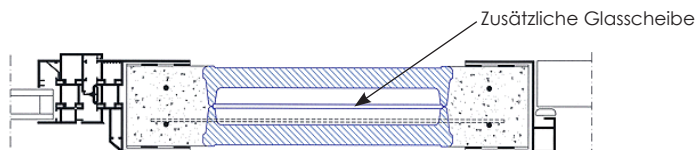


Abb. 1.1.21

Abb. 1.1.20 Darstellung einer gebogene Glassteinwand der Firma SOLARIS mit der Ausführung von Dehnungsfugen mindestens alle 6 m.

¹³ Vgl. <http://www.solaris-glasstein.de/architekten-planer/technische-daten/produkt-daten/waerme-schutz.html>, 11.7.2014.

¹⁴ Vgl. Ebda., 11.7.2014.

Abb. 1.1.21 Schnittdarstellung eines Glasbausteines mit zusätzlich eingearbeiteter Glasscheibe.

Im Fassadenbau haben beide Verwendungsarten von Glas, sprich die Verarbeitung von Floatglas zu Isolierglas und der gepresste Glasbaustein, eines bezüglich der Tragfähigkeit gemeinsam. Keines der beiden Systeme darf Lasten aus dem Haupttragwerk aufnehmen. Diese werden mit Hilfe von Überzügen über ein separates Tragsystem geleitet. Das Glas wird ausschließlich als raumabschließendes Element der Fassade verwendet und leistet somit keinen Beitrag zum Gesamttragssystem. Auch die Aussteifung von Bauwerken erfolgt über eine separate Tragkonstruktion.

In den vorigen Kapiteln wurden die Eigenschaften von Glas genau erarbeitet. Fakt ist, dass Glas sehr gut auf Druck beansprucht werden kann, jedoch diese Eigenschaft beim derzeitigen Fassadenbau leider kaum in einem Anwendungsbereich genutzt wird. Bei der Entwicklung einer selbsttragenden Gebäudehülle aus Glas, eignet sich folglich die Anwendung von Bogen- bzw. Schalenkonstruktionen auf Grund deren günstigem Tragverhalten. Da sie hauptsächlich auf Druck beansprucht werden, ist Glas als Baustoff gut denkbar. In den folgenden Kapiteln werden die Vorzüge eines solchen Tragwerks näher erläutert und Anwendungsbeispiele aus der Praxis analysiert.

1. GRUNDLAGEN

1.2 TRAGVERHALTEN VON SCHALEN¹⁵

Spricht man von einer Schale, so versteht man im bautechnischen Sinne ein flächiges, doppelt gekrümmtes Tragwerk. Um deren Tragverhalten näher zu erläutern, bietet sich die Abstraktion eines zweidimensionalen Bogens an. Beim Konstruieren eines Bogens ist die Berücksichtigung der Stützlinie wichtig, da diese maßgebend zur Stabilität beiträgt. Je näher sich die Bogenachse an der Stützlinie befindet und somit der Exzentrizitätswert e gegen null geht, desto besser gelingt die Verteilung der Druckspannungen. Wenn die Bogenachse genau der Stützlinie folgt, befinden sich im Bogenquerschnitt theoretisch nur Axialkräfte und kein Biegemoment. Um diese ideale Stützlinie physikalisch zu ermitteln, lässt man in der Modellsituation ein schlaffes Seil bei Belastung durch sein Eigengewicht durchhängen. Die umgekehrte Seillinie ergibt die erwünschte Stützlinie. Die kontinuierlich gekrümmte Stützlinie entspricht bei Gleichlast grundsätzlich einem Parabelbogen.

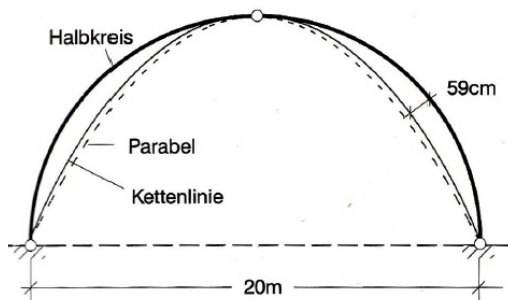


Abb. 1.2.1

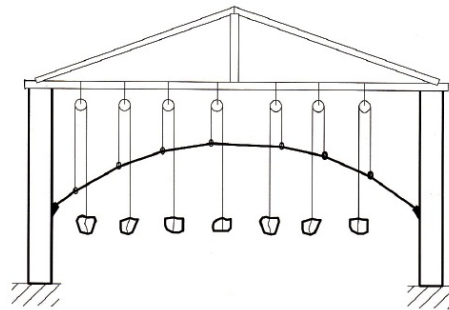


Abb. 1.2.2

Wichtig ist, dass sich die Seillinie bei Zu- oder Abnahme der Lastgröße nicht verändert, sehr wohl jedoch bei Veränderungen der Belastungsverteilung. Unter der sogenannten Kettenlinie versteht man die Stützlinie unter Seileigengewicht, welche unter Gleichlast geringfügig von der Stützlinie abweicht. Grundsätzlich treten unter Eigengewicht, einer Gleichlast, aber auch bei einer horizontalen Verschiebung der Auflager die größten Momente an den Kämpfern und am Scheitel auf, wo es zu Gelenkbildungen kommen kann. Ein Bogen ist bis zu drei Gelenken stabil, zusätzliche führen zu instabilen Systemen. Gründe dafür sind die Annäherung der Stützlinie an den Querschnittsrand und zusätzliche Gelenkbildungen. Je nach Art der Belastung kommt es zu symmetrischen oder unsymmetrischen Versagen. Durch Vergrößerung des Querschnitts kann verhindert werden, dass sich die Stützlinie in einen Randbereich verlagert. Eine andere Möglichkeit ist die Ankopplung an andere Bauelemente, wie zum Beispiel beim Brückenbau. Die Biegesteifigkeiten der horizontalen Fahrbahn und des Bogens wirken bei Ankopplung zusammen.

¹⁵ Vgl. Heinle/Schlaich 1996, 196-222.

Abb. 1.2.1 Vergleich einer typischen Stützlinie mit einem Halbkreisbogen.

Abb. 1.2.2 Versuch zur Ermittlung der Stützlinie mit vorgegebener Lastverteilung.

Abb. 1.2.3 Verformungen, Momenten- und Axialkraftverlauf unter verschiedenen Belastungen (Halbkreis- und Parabelbögen)

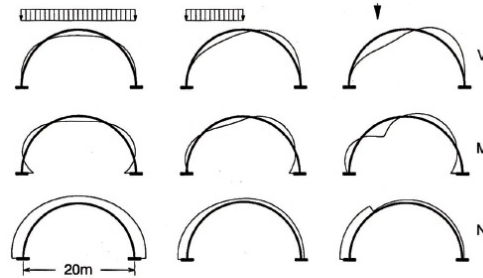


Abb. 1.2.4 Lagerung eines Bogens: links ideal, rechts schlecht

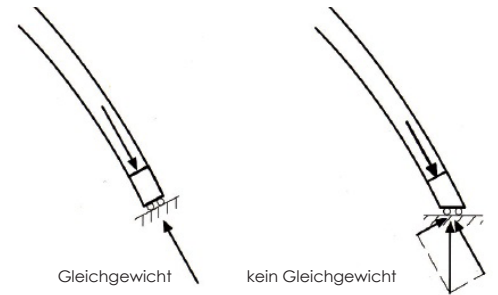


Abb. 1.2.4

Abb. 1.2.5 Gelenkbildung bei Halbkreisbögen infolge antisymmetrischer und symmetrischer Belastung

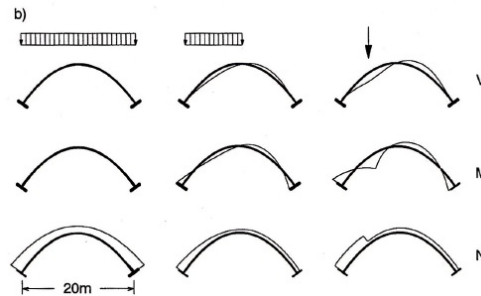


Abb. 1.2.3

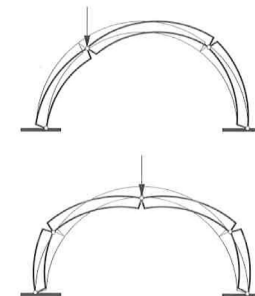


Abb. 1.2.5

Das Tragverhalten des Bogens als zweidimensionales Tragwerk, ist Grundbaustein für das Verständnis dreidimensionaler bzw. doppelt gekrümmter Strukturen. „Schalen verdanken ihre Festigkeit nicht primär der Festigkeit ihres Werkstoffs wie bei einer Stütze, sondern dessen räumlicher, dreidimensionaler Anordnung.“¹⁶ Zur Veranschaulichung dient ein Blatt Papier als Beispiel: Lässt man ein zylindrisch gekrümmtes Blatt Papier horizontal auskragen, so behält es seine Form bei. Durch die Krümmung steigt die aktive Bauteilhöhe gegenüber eines ebenen Blattes um ein Vielfaches, wodurch Membranspannungen zunehmen, Biegespannungen abnehmen und Druckkräfte ideal aufgenommen werden können. Es wird die Wirkungsweise der Scheibe und die der Platte kombiniert und somit die Tragfähigkeit der Schalengeometrie erhöht.

Bei äußerer Lasteinwirkung reagiert der Bogen aufgrund der Einachsigkeit mit inneren Axialkräften entlang der Bogenachse. An Hand der Abbildung 1.1.8 lässt sich erkennen, dass in der Schale nicht nur Meridiankräfte wirken, sondern rechtwinklig dazu auch Ringkräfte in Breitenkreisrichtung. Bei nicht rotationssymmetrischen Lasten wie Wind nützt die Schale ihre günstige Geometrie und leitet die Kräfte auch über den Umfang ihrer Schalenfläche ab. Schalen folgen meistens der Stützlinie und reagieren somit allein mit Axialkräften entlang der Schalenachse ohne Exzentrizität. „Man spricht von der Membrantheorie, weil nur Axial- oder Membrankräfte und –spannungen verfolgt werden [...]“¹⁷

¹⁶ Ebda. 1996, 207.

Vgl. Abb. 1.2.9

¹⁷ Ebda. 1996, 209.

1. GRUNDLAGEN

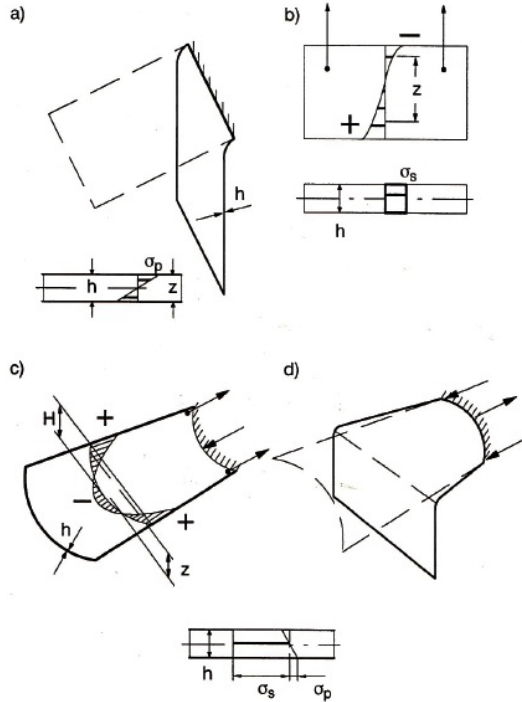


Abb. 1.2.6

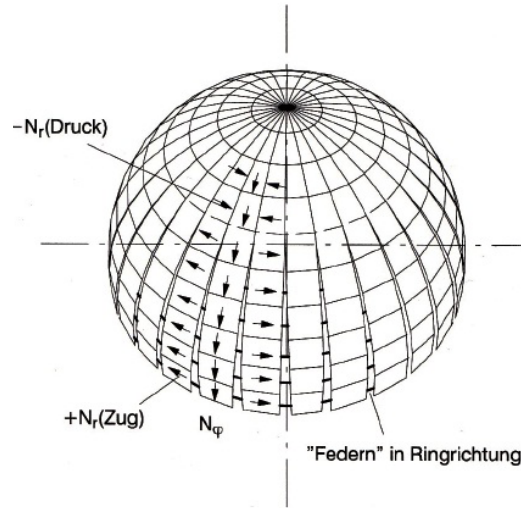


Abb. 1.2.8

Abb. 1.2.6 Veranschaulichung des Membranspannungszustandes an Hand eines Blatt Papiers

Abb. 1.2.7 Gleichsinnig und gegensinnig gekrümmte Schalen

Abb. 1.2.8 Tragverhalten einer Kugelschale mit Ringkräften in Breitenkreisrichtung

Abb. 1.2.9 Darstellung von Membrankräften in Meridian- und Ringrichtung eines Flächenelements

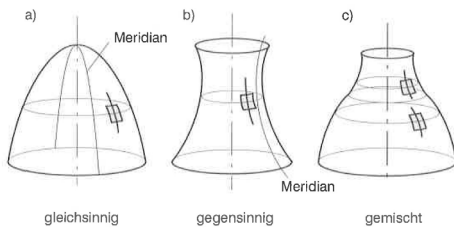


Abb. 1.2.7

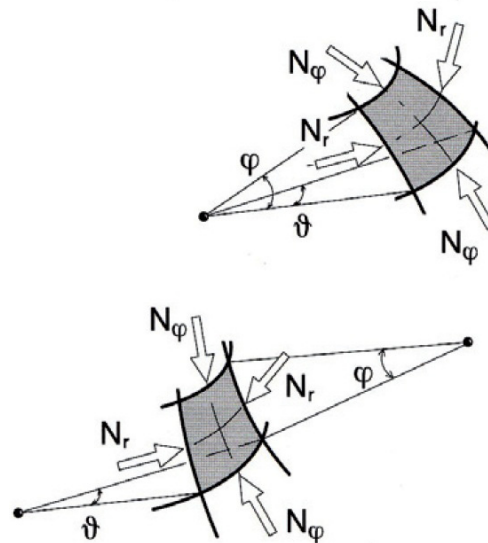


Abb. 1.2.9

1.3 BEISPIELE

1.3.1 MONUMENTO ATOCHA

Abb. 1.3.1 Mahnmal in Atocha



Abb. 1.3.1

Das Mahnmal Atocha befindet sich gegenüber vom Bahnhof-Rundbau in Atocha, Madrid. Es wurde im März 2007 anlässlich des schlimmsten Terroranschlages in der Geschichte Spaniens als Gedenkstätte für dessen Opfer errichtet. Bei dem Attentat am 11. März 2004 wurden mehrere Züge durch Bombenanschläge beschädigt. Es starben 191 Menschen und zahlreiche weitere wurden verletzt. Die Gedenkstätte besteht aus zwei Teilen: einem unterirdischen Raum, der durch zwei Luftschleusen von der Bahnhofspassage erreichbar ist, und einem darüber liegenden Memorial aus Glas. Der 500 m² große, in blau gehaltene Raum bietet Platz für zahlreiche Botschaften an die Opfer, die Passanten am Tag nach dem Vorfall dort hinterließen.

Abb. 1.3.2 Unterirdischer Raum mit Blick auf den Glaszylinder mit den Botschaften an die Opfer



Abb. 1.3.2

1. GRUNDLAGEN

Der darüber befindliche Glaszylinder hat eine Höhe von 11 Meter und einen Durchmesser von 8 mal 10,5 Meter. Der Turm, dessen Tragverhalten sich wie eine einfach gekrümmte Wand verhält, besteht aus insgesamt 15.600 Vollglassteinen aus Borosilicatglas. Diese zeichnen sich durch hohe Widerstandsfähigkeit gegen Hitze und raschen Temperaturveränderungen aus, bei gleichzeitig hoher Lichtdurchlässigkeit und mechanischer Festigkeit. Jeder dieser Steine hat eine Abmessung von 30 x 20 x 7 cm und ist auf der einen Seite konkav, auf der anderen konvex und wiegt 8,4 kg. Das Gesamtgewicht des Zylinders beträgt ca. 135.000 kg. Verklebt wurden die einzelnen Steine mit einem durch UV-Licht gehärteten Acrykleber zu einem offenen System. Auf Stahl wurde bei der Zylinderkonstruktion völlig verzichtet. Überdacht ist der Turm ebenfalls mit einer reinen Glaskonstruktion aus Borosilicat-Flachgläsern.¹⁸

Das Architektenteam estudio fam überzeugte bei dem internationalen, offenen Ideenwettbewerb mit ihrem Entwurf. Das Ingenieurbüro Schlaich Bergemann & Partner war für die Berechnung der Statik verantwortlich und die Firma SCHOTT AG lieferte die benötigten Glaskomponenten.

¹⁸ Vgl. Steiner 2007, 1-4.



Abb. 1.3.3

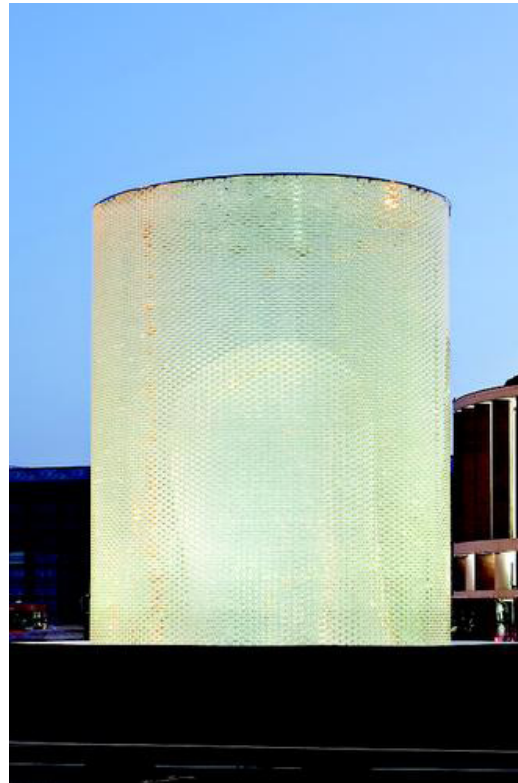


Abb. 1.3.4

Abb. 1.3.3 Vollglassteine aus Borosilicatglas

Abb. 1.3.4 Außenansicht des Glaszylinders

1.3.2 GLASTONNENDACH STADTHAUS ZÜRICH

Abb. 1.3.5 Historisches Glas-
tonnendach des Stadthauses
in Zürich



Abb. 1.3.5

Das Stadthaus Zürich besteht aus zwei Gebäuden, welche sich jedoch durch planerisches Geschick wie eines präsentieren. Der erste Eckbau wurde 1883 durch Arnold Geiser errichtet, der Anbau erfolgte dann im Jahr 1898 durch Gustav Gull.¹⁹ Im Zuge von Totalsanierungsarbeiten des Stadthauses in den Jahren 2007 bis 2010 unter der Leitung von Pfister Schiess Tropeano & Partner Architekten öffnete man das historische Glastonnendach, welches aus dem Jahr 1901 stammt, über der Eingangshalle wieder. Zur Überprüfung des Tragsystems wurde die Firma Synaxis zusammen mit Bauingenieur Carlo Galmarini als Koreferenten beauftragt.

Das Tonnendach besteht aus sieben doppelseitig gekrümmten Bögen aus vermörtelten Glasbausteinen. Diese sind ein Entwurf von Gustave Falconnier, welcher jene mundgeblasenen Glassteine bereits in den 1880er Jahren entwickelte. Die zweiseitige Wölbung trägt einerseits von Bogenträger zu Bogenträger etwa 2,65 m und andererseits von Wand zu Wand mit einer Spannweite von 13,12 m.

Über dem Tonnendach befinden sich sieben Stahlfachwerkbinder, welche sich im Obergurt zu einem Satteldach formen. Dieses ist ebenfalls verglast und erzeugt eine Art Pufferzone zwischen der Außenluft und dem Innenraum. Folglich können bei der Tonnendachkonstruktion aus Glas bauphysikalische Aspekte vernachlässigt werden. Es stehen daher in erster Linie gestalterische Aspekte sowie Belichtungszwecke im Vordergrund.

¹⁹ Vgl. <http://www.nextroom.at/article.php?id=33662>,
14.7.2014

1. GRUNDLAGEN

Verbunden sind die beiden Tragsysteme über je fünf Kopplungsstäbe aus Flachstahl von den Fachwerkknoten zu den einzelnen Bogenträgern. Die Stäbe stehen dabei je nach Lastfall im Sommer unter Druck und im Winter unter Zug. Weiters werden die beiden statisch bestimmten Systeme auf Grund der Kopplung zu einem statisch unbestimmten System.²⁰

²⁰ Vgl. Ciari/Russenberger 2010, 42-45.

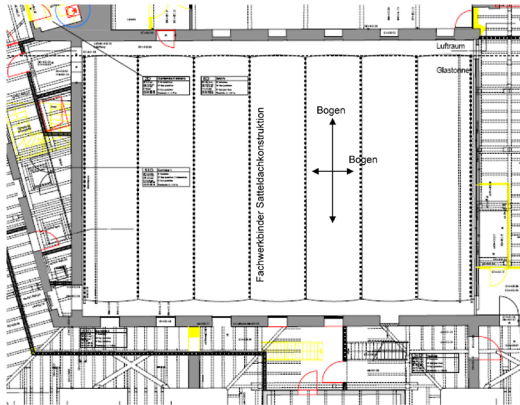


Abb. 1.3.6

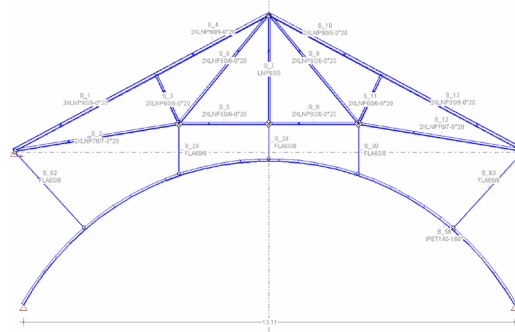


Abb. 1.3.7

Im Zuge der Sanierungsarbeiten wurde eine Kartierung der Schadstellen durchgeführt. Es wurden Beschädigungen verschiedener Art verzeichnet, die meisten befanden sich jedoch an den Randzonen. Erstaunlicherweise wurde ein Teil der beschädigten Steine durch Originale ersetzt, der Rest wurde von der Glasmanufaktur Harzkristall GmbH & Co nachproduziert.

Abb. 1.3.6 Grundriss Glastonnendach

Abb. 1.3.7 Schnittdarstellung Fachwerk



Abb. 1.3.8



Abb. 1.3.9

Abb. 1.3.8 Ansicht Fachwerk-
konstruktion des Satteldaches

Abb. 1.3.9 Glasbausteine des
Tonnendachs: Vor allem die
halben Steine am Rand waren
zerstört und mussten ersetzt
werden.

1.3.3 OPTICAL GLASS HOUSE, JAPAN

Abb. 1.3.10 Straßenansicht
Optical Glass House

Abb. 1.3.10

Das vom Architekten Hiroshi Nakamura & NAP geplante dreigeschoßige Wohnhaus befindet sich an einer hoch frequentierten sechsspurigen Straße in der Nähe des Peace Boulevards in Hiroshima, Japan. Bei dem Entwurf ging der Architekt auf die extremen Bedingungen, wie urbane Überfüllung und enorme Grundstückspreise, japanischer Großstädte ein. Um den Wohnraum vom urbanen Treiben bestmöglich fernzuhalten, setzt er eine 13 Tonnen schwere Glaswand als Trennapparat ein, hinter der eine naturbezogene Wohnatmosphäre entsteht. Trotz Abgeschirmtheit nach außen wird der Wohnraum mit Licht durchflutet und bietet Platz für Erholung. Unterstützt wird dies durch gezielt platzierte Bäume, welche fast die ganze Breite des Baukörpers einnehmen.²¹

²¹ Vgl. Reischer, Peter 2013, 30-35.

1. GRUNDLAGEN

Für den Bau der Glaswand wurden rund 6000 handgegossene Borosilikatglassteine verwendet. Die Steine haben eine Abmessung von 5 x 23 x 5 cm. Bei der Herstellung musste sehr genau auf den Abkühlungsprozess geachtet werden. Durch das langsame Abkühlen der Blöcke konnten die vorhandenen Restspannungen entfernt werden. Um die Wand gegen horizontal einwirkende Kräfte wie zum Beispiel Wind stabilisieren zu können, wurden die Glassteine auf 75 Edelstahlgewindestangen von unten versetzt aufgefädelt. Diese sind wiederum auf einem im Dachbereich befestigten Stahlträger montiert. T-förmige Stahlbleche in der Fuge, welche an zwei dünnen vertikalen Stahlschwertern montiert sind, bieten eine zusätzliche horizontale Aussteifung. Durch die geringe und vor allem einheitliche Fugenbreite von 6 mm kann die Glaswand als eine durchgehende transluzente Glashaut wahrgenommen werden.

Die Konstruktion wirkt wie eine selbsttragende Wand aus Glas, ist es jedoch nicht, da die Steine einzeln auf den Edelstahlgewindestangen fixiert sind. Das Gewicht der Konstruktion wird folglich nicht von den Steinen getragen, sondern vom Stahlträger darüber.

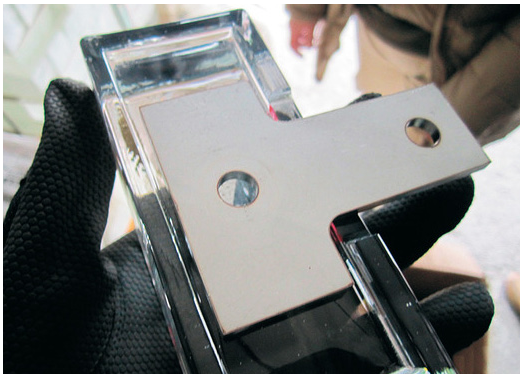


Abb. 1.3.11 Montagearbeiten der Glaswand und verschiedene Ansichten der Glassteine

Aus den bereits realisierten Glasprojekten der Praxis sind folgende Erkenntnisse abzuleiten:

Die beschriebenen Glaskonstruktionen bestehen alle prinzipiell nicht aus einem großen Glasstück, sondern aus zahlreichen kleinteiligen Einzelstücken. Da Glas, anders wie zum Beispiel Beton, vor Ort nicht in eine gewünschte Form gegossen werden kann, muss eine Art von Elementierung der Konstruktion stattfinden. Je nach Tragverhalten und Lastfall können die Einzelsteine hohl oder massiv ausgeführt werden.

Weiters hängt die Art der Fügung sehr eng mit der Formgebung zusammen. Der einfach gekrümmte Zylinderturm des Monumento Atochas wird mit einer exakt auf die Konstruktion abgestimmten Steingeometrie erzeugt und kann somit beinahe fugenlos ausgeführt werden. Die Krümmung des Tonnendachs des Stadthauses in Zürich wird nicht durch die Geometrie des Steins gebildet, sondern durch die Ausbildung der Fuge.

Bei allen drei Projekten wird ein konstruktives Verhalten der Glassteine vermutet. Nach näherer Betrachtung wird jedoch ersichtlich, dass die Steine der Glaswand in Japan keine konstruktive Rolle übernehmen. Hier wird das Glas aus optischen und akustischen Gründen eingesetzt.

1.4 DEFINITION DES PROJEKTZIELS

Glas wird aktuell im Bauwesen hauptsächlich nicht tragend in Form von Fensterverglasungen oder in Kombination mit hoch technischen Stahlkonstruktionen als Glasfassade oder Glasüberdachung eingesetzt. Ein Beispiel hierfür ist die Hofüberdachung Schlüterhof des Deutschen Historischen Museums, geplant von dem Ingenieurbüro Schlaich Bergermann und Partner. Durch die Zusammenarbeit von Architekten und Ingenieuren entstand eine Stahl- Glaskonstruktion, welche eine Spannweite von über 40 m zulässt.

Abb. 1.4.1 Hofüberdachung
Schlüterhof des Deutschen
Historischen Museums

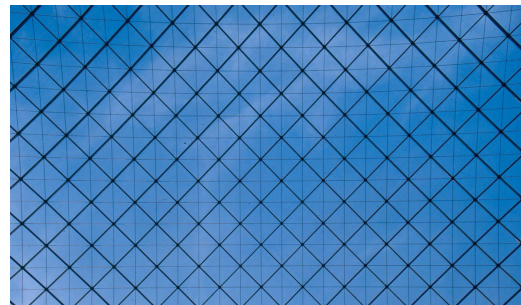


Abb. 1.4.1

1. GRUNDLAGEN

Welche Lösungsansätze werden jedoch für Bauvorhaben geboten, deren Anforderungen zwischen diesen beiden Verwendungsbereichen liegen? Wie zum Beispiel für Teile einer Gebäudehülle, welche für flächige Isolier- oder Verbundverglasungen zu groß sind, aber auch zu klein um die Effizienz einer Stahl- Glaskonstruktionen zu nützen. Durch die Verwendung von Glas als konstruktives Fassadenelement soll ein Mittelweg geschaffen werden, bei dem auf separate Tragstrukturen aus Stahl oder Holz verzichtet werden kann.

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll eine Entwurfsmethode entwickelt werden, mit welcher selbsttragende Gebäudehüllen aus Glas errichtet werden können. Der Fokus richtet sich dabei auf Faktoren wie Transparenz, Tragfähigkeit, Belichtung und Gestaltungsvielfalt. Da die Gebäudehülle die Schnittstelle zwischen Innen- und Außenraum darstellt wird durch Rücksichtnahme der klimatischen Rahmenbedingungen versucht, Raumkomfort und folglich Wohlbefinden der Nutzer zu schaffen.

Auf Grund der Materialeigenschaften des Baustoffes Glas eignen sich nur rein auf Druck beanspruchte Gebäudehüllen. Folglich bieten sich als Grundlage im Entwurfsprozess Flächentragwerke in Form von Bögen und Schalen an. Zu einer effektiven Formfindungsmethode solcher Strukturen zählt die Simulation von Hängemodellen. Da ein Schalentragswerk nicht aus einem einzigen Glaselement gefertigt werden kann, muss die Fläche effizient in kleinere Segmente unterteilt werden.

Um nun das Ziel, eine selbsttragende Gebäudehülle aus Glas zu entwickeln, welche funktionale Anforderungen einer Fassade vereint und folglich auf eine zusätzliche Tragstruktur verzichtet, müssen folgende Aspekte bei der Entwicklung des Steins berücksichtigt werden:

- Größe des Elements
- Materialeigenschaften
- Tragfähigkeit
- Bauphysikalische Anforderungen
- Sonnenschutz
- Mögliche Fugenbildung
- Wirtschaftlicher Herstellungsprozess

2. FORMFINDUNG VON SCHALEN

In der zeitgenössischen Glasarchitektur ist der Einsatz von Glas einerseits zur optischen Auflösung der Gebäudefassade sowie andererseits zu Belichtungszwecken des Innenraumes unumgänglich. Durch die Kombination von Eleganz und dem hoch technologisierten Entwicklungsstand des Baustoffes entstanden langlebige Gebäudehüllen, die nicht nur repräsentative Zwecke erfüllen, sondern auch höchsten Schutz vor äußeren Umwelteinwirkungen bieten. Aktuell wird Glas im Fassadenbau hauptsächlich nichttragend, in Kombination mit Pfosten-Riegel-Konstruktionen verwendet. Hierbei erfolgt die Lastabtragung über eine separate Tragstruktur, bestehend aus senkrechten Pfosten, an denen horizontale Riegel angeschlossen sind. Diese bestehen meist aus Stahl, Aluminium oder Holz. Als Füllelemente werden aus wärmedämmtechnischen Gründen Verbund- bzw. Isoliergläser eingesetzt.

Bei dem Vorhaben, eine selbsttragende Gebäudehülle aus Glas zu entwickeln, welche funktionale Anforderungen einer Fassade vereint und folglich auf eine zusätzliche Tragstruktur verzichtet, müssen folgende Punkte im Entwurfsprozess berücksichtigt werden:

- Tragfähigkeit
- Ästhetisches Erscheinungsbild
- Nachhaltigkeit bzgl. Herstellung und Nutzung
- Effiziente Herstellung
- Flexibler Anwendungsbereich
- Automatisierter Herstellungsprozess
- Tragsystembildung in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften

Die zuvor erarbeiteten Materialeigenschaften lassen auf ein großes Potential zum Einsatz von Glas bei druckbeanspruchten Konstruktionen schließen. Dafür eignen sich Tragsysteme wie Bögen oder Schalen, da diese hauptsächlich auf Druck beansprucht werden. Da Bögen jedoch nur eine eingeschränkte architektonische Vielfalt erlauben, werden demnach Schalenkonstruktionen bevorzugt.

Für die Errichtung einer selbsttragenden Schalenkonstruktion aus Glas, muss diese in kleinere Teile unterteilt werden. Die Analyse der Referenzprojekte zeigte, dass die Fügung der Steine sowie die Bildung der Krümmung auf unterschiedliche Arten möglich ist. Bevor diese Unterschiede jedoch genauer untersucht werden, soll zuerst eine effektive Formfindungsmethode für druckbeanspruchte Schalenkonstruktionen vorgestellt werden.

Vgl. Kapitel 1.1.2 Glaseigenschaften

2.1 FORMFINDUNG ÜBER VIRTUELLE HÄNGEMODELLE

Es ist naheliegend, die Formfindung von Schalenkonstruktionen, welche hauptsächlich auf Druck beansprucht werden, in einer Softwareumgebung fortzusetzen. Dabei scheint das 3D-Konstruktionsprogramm Rhinoceros 3D mit zahlreichen Erweiterungen die geeignete Plattform zur Umsetzung der definierten Ziele zu sein.

Speziell der grafische Algorithmus Editor Grasshopper scheint über die richtigen Anwendungen zu verfügen. Durch die erweiterte Nutzung der Plugins Kangaroo Physics und Weaverbird können die nötigen Bedingung für die Formfindung mittels Hängemodelle eingehalten werden.²² Warum sich Hängemodelle als Formfindungsmethode für Flächentragwerke aus Glas sehr gut eignen, beruht auf dem Prinzip der Umkehrung. Es handelt sich zuerst um rein auf Zug beanspruchte Gittermodelle, welche nach der Umkehr rein auf Druck beanspruchte Stabtragwerke aufweisen. Da Glas auf Druck sehr gut beanspruchbar ist, bietet dieses System zur Formfindung eine gute Grundlage für die Planung.

Grasshopper bietet mit seiner graphischen Oberfläche und den zahlreichen Logikbausteinen auch weniger spezialisierten Anwendern die Möglichkeit, mit derartig komplexen Geometrien zu arbeiten. Es steht eine Vielzahl an vorgefertigten Bausteinen zur Verfügung, welche mit bestimmten Funktionen bzw. Verknüpfungen kombinierbar sind. So kann auch ohne umfangreichen Programmierkenntnissen das gewünschte Ergebnis erreicht werden.

Folgendes beliebig editierbares Geometriebeispiel dient zur Erklärung der grundsätzlichen Funktionsweise eines parametrisierten Grasshopper-Skripts:

Abb. 2.1.1 Ausgehend von einem definierten Basispunkt erstellter rechteckiger Raster mit einer Seitenlänge von 0.5 (über Size veränderbar) und einer Flächenanzahl (über Ex und Ey definiert) von 5x9.

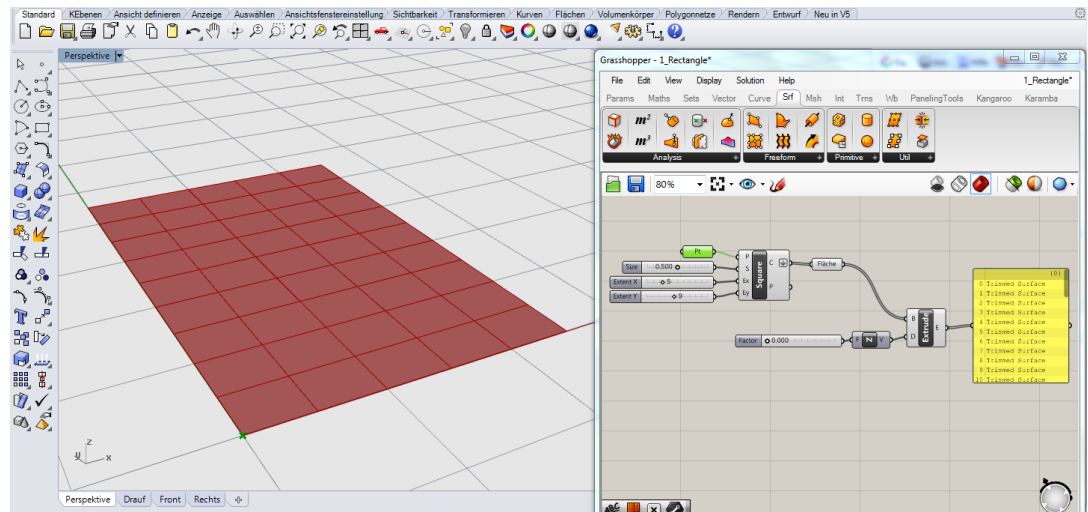


Abb. 2.1.1

2. FORMFINDUNG VON SCHALEN

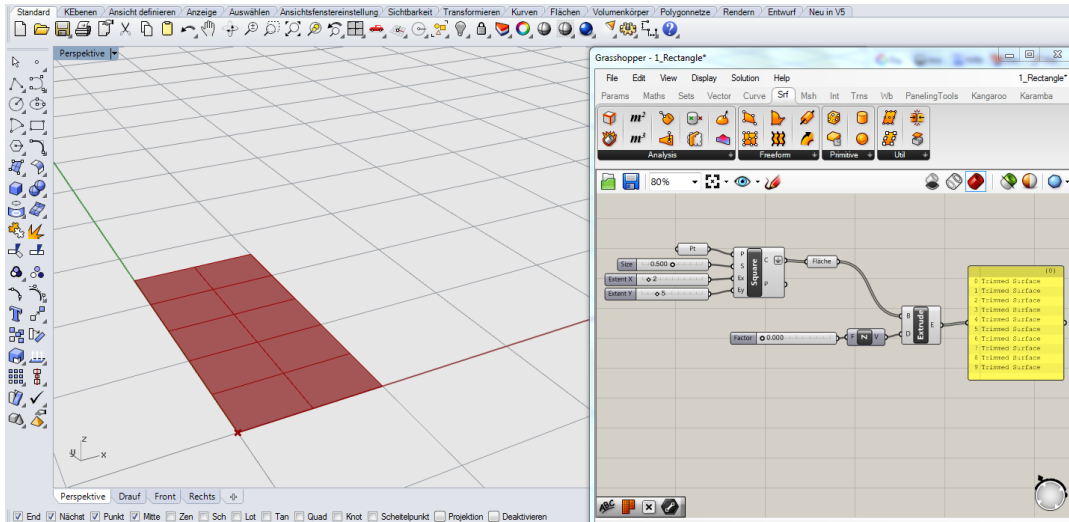


Abb. 2.1.2

Abb. 2.1.2 Verkleinerung des Rasters über die Anzahl der Flächen auf 2x5.

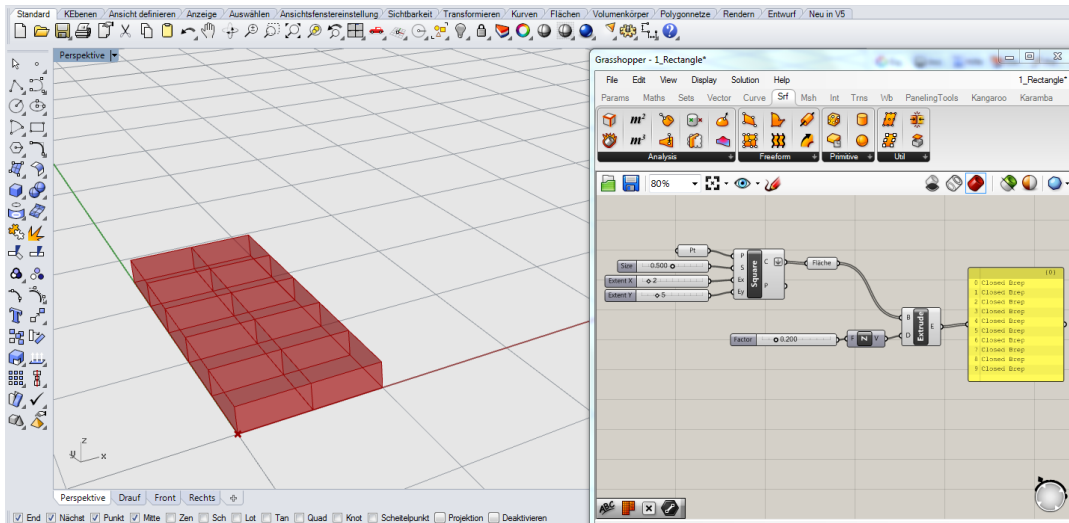


Abb. 2.1.3

Abb. 2.1.3 Extrudieren des Rasters in Z-Richtung. Die Länge kann über den Vektor definiert werden. Alle Variablen sind dabei editierbar.

²³ Vgl. <http://www.food4rhino.com/project/kangaroo>

2.1.1 VERWENDUNG VON KANGAROO PHYSICS:²³

Mit Hilfe von Kangaroo Physics können Hängemodelle unter gleichzeitiger Berücksichtigung verschiedener physikalischer Gegebenheiten, wie zum Beispiel Gravitationskraft, simuliert werden. Gearbeitet wird dabei prinzipiell mit Polygonnetzen bestehend aus Massepunkten und Federn. Bei Massepunkten handelt es sich um Punkte, welche durch Position, Masse und Geschwindigkeit definiert sind. Zusätzlich besitzen sie noch die Eigenschaft, Kräfte empfangen zu können. Um das Arbeiten mit einem Hängemodell zu ermöglichen, müssen einzelne Massepunkte weiters als fix positionierte Ankerpunkte definiert werden.

Zwischen den Massepunkten befindet sich ein Netz aus Federn, welche Aktions- und Reaktionskräfte übertragen können. Folglich wirken definierte Kräfte auf das gesamte System ein. Über die Variablen, wie Steifigkeit, Dämpfungskonstante, Restlänge und Elastizität, können die Federeigenschaften verändert werden und somit Einfluss auf die gesamte Formfindung genommen werden. Basierend auf dem ersten und zweiten Newtonschen Gesetz sowie auf den vom Benutzer eingestellten Einwirkungen ermittelt Kangaroo über Differenzialgleichungen die Positionen aller Massepunkte.

Abb. 2.1.4 Systemdarstellung des Kangaroo Bausteins sowie der Federn

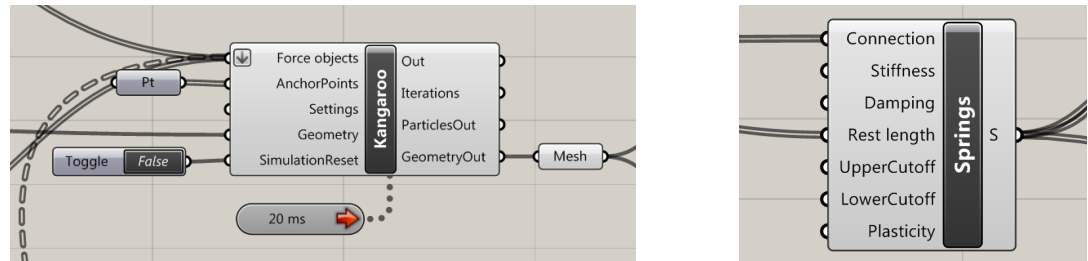


Abb. 2.1.4

Abb. 2.1.5 Zwei Hängemodelle aus Kangaroo Physics;

Ein ringsum gelagertes Polygonnetz dessen Linien sich wie elastische Stäbe verhalten.

Ein an den vier Eckpunkten fixiertes Polygonnetz aus regelmäßigen Vierecken. Durch die Durchhängung entstehen rautenförmige Netzmaschen.

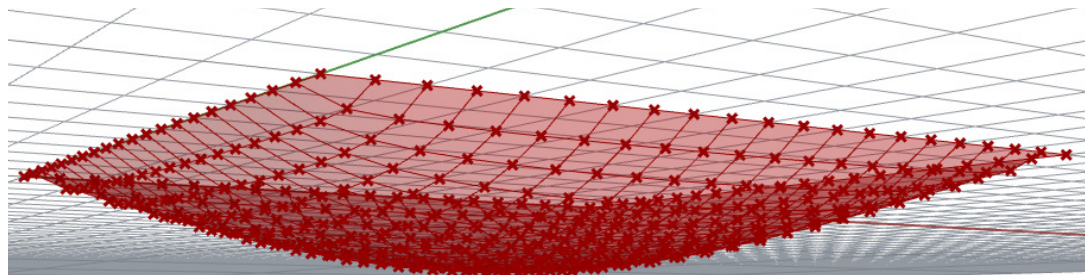


Abb. 2.1.5

2. FORMFINDUNG VON SCHALEN

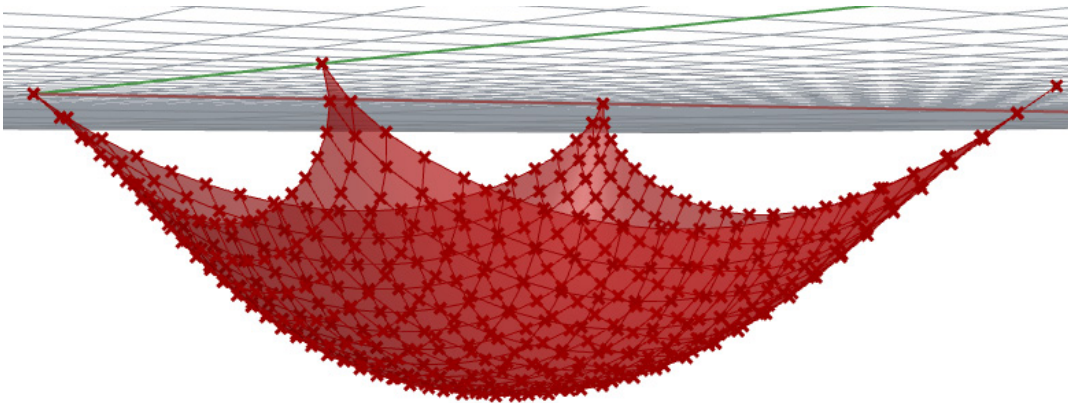


Abb. 2.1.5

2.1.2 POLYGONNETZE

Um mit einem Hängemodell in Kangaroo Physics arbeiten zu können, muss zu Beginn ein Polygonnetz bestehend aus Punkten und Linien erzeugt werden. Durch die Bildung dieses Netzes entsteht eine inhärente Elementierung der Grundfläche. Wie zuvor beschrieben, verhalten sich die Linien des Polygonnetzes wie Federn und beeinflussen folglich durch deren Art der Anordnung die gesamte Form der Schale.

Da die Erstellung von Polygonnetzen die wichtigste Grundlage für das Hängemodell darstellt, sollte noch etwas genauer auf diese eingegangen werden. Um diese nicht per Hand, mittels Punkte und Linien erstellen zu müssen, bietet sich ein effektiveres Tool an, nämlich das Plugin Weaverbird. Dabei werden automatisch aus ebenen Flächen Polygonnetze erstellt, welche sehr einfach weiter bearbeitet werden können. Anschließend können aus denen wiederum Polygonkanten und Schnittpunkte extrahiert werden. Um die einzelnen Ergebnisse in die verschiedenen Berechnungen überführen zu können, werden sie als Mesh verpackt. Alle nötigen Informationen werden dabei in einer Geometrie verpackt.²⁴

Wird die Ausgangsfläche durch orthogonale, gerade Randlinien gebildet, so entstehen bei der Polygonnetzbildung gleiche Recht- oder Dreiecke. Dabei erfolgt die Triangulierung der Rechtecke über eine ihrer Diagonalen. Handelt es sich bei einer der Randkurven um keine orthogonale, entstehen unregelmäßige Randbereiche, welche folglich in weitere unterschiedliche Dreiecke unterteilt werden, um sich der Ausgangsfläche bestmöglich anzunähern. Dieser Umstand zeigt, dass die gleichmäßige Elementierung einer Fläche sehr stark mit der Geometrie der Ausgangsfläche zusammenhängt. Um nun ein gleichmäßiges Netz zu erzeugen, muss der Umriss der Ausgangsfläche entlang der Polygonnetzkurven verlaufen bzw. muss die Fläche entlang diesen beschnitten werden.

Abb. 2.1.5 (Fortsetzung) Zwei Hängemodelle aus Kangaroo Physics;

Ein ringsum gelagertes Polygonnetz dessen Linien sich wie elastische Stäbe verhalten.

Ein an den vier Eckpunkten fixiertes Polygonnetz aus regelmäßigen Vierecken. Durch die Durchhängung entstehen rautenförmige Netzmaschen.

Vgl. Abb. 2.1.8

²⁴ Vgl. <http://www.giuliopiacentino.com/weaverbird/>

²⁵ Vgl. Heesch, Heinrich/Kienzle, Otto 1963, 45-53.

Die geometrische Vielfalt hängt dabei von der Art der Elementierung ab. Je feiner die Auflösung ist, desto mehr Möglichkeiten der Unterteilung gibt es. Dabei können alle Geometrien verwendet werden, vorausgesetzt sie lassen sich restlos Kante an Kante fügen und werden dabei nicht überdeckt.²⁵

Bei rundum gelagerten Hängemodellen ist weiters drauf zu achten, dass bei Elementierung durch Dreiecke, sich die am Eck befindliche Fläche nicht über beide Seiten erstreckt. Da in diesem Fall alle drei Eckpunkte als Ankerpunkte definiert sind, ist die Fläche auf der Ebene fixiert und kann keine gleichmäßige Schalengeometrie bilden. Durch bewusste Wahl des Polygonnetzes kann diesem Problem entgegengewirkt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Zusammenhang des Polygonnetzes mit der Formfindung des Hängemodells:

Abb. 2.1.6 Rechteckige Unterteilung ermöglicht nur einen orthogonalen Umriss der Gesamtfläche. Wird die Fläche frei beschnitten, ohne auf die Elementierung zu achten, entstehen an den Randbereichen ungleichmäßige Dreiecke. Diese können zu unerwünschten Verzerrungen bei der Formfindung führen.

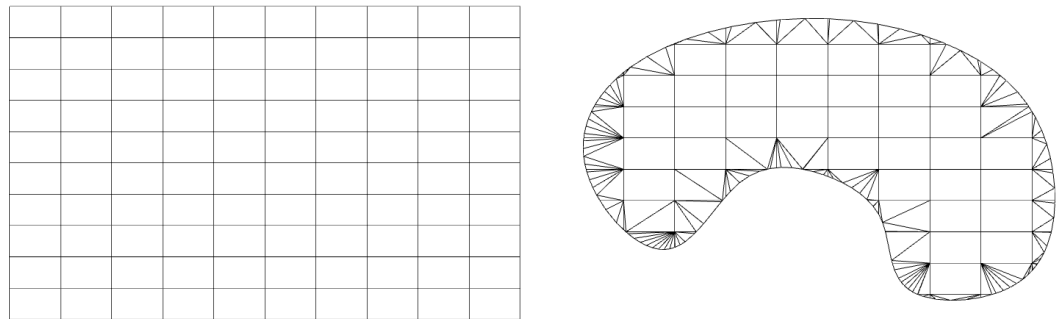


Abb. 2.1.6

Abb. 2.1.7 Hängemodell erstellt mit Kangaroo Physics. Das Polygonnetz besteht aus einem rechteckigen Mesh. Das Ergebnis der Simulation zeigt eine regelmäßige Schalengeometrie und ist somit zufriedenstellend.

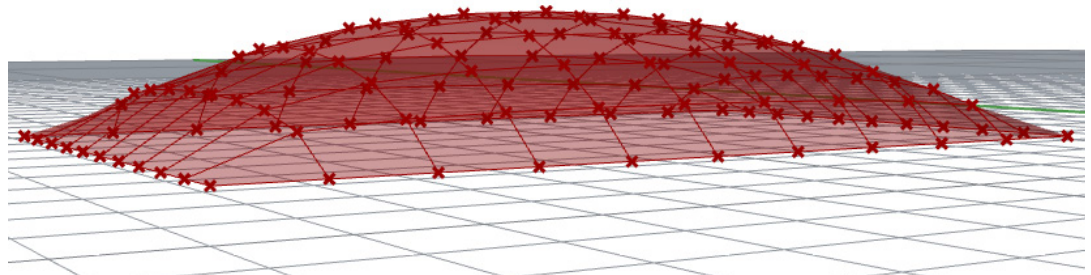


Abb. 2.1.7

2. FORMFINDUNG VON SCHALEN

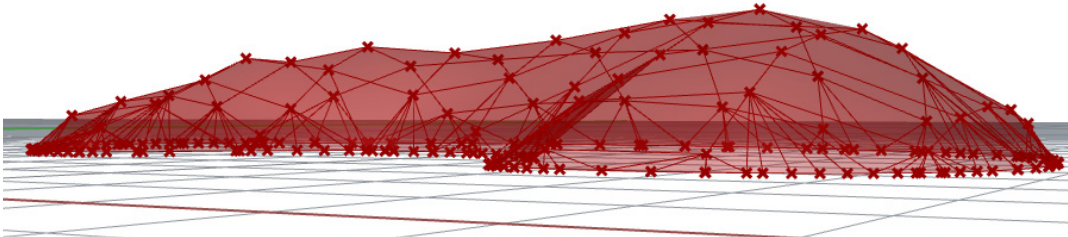


Abb. 2.1.8

Abb. 2.1.8 Hängemodell erstellt mit Kangaroo Physics. Durch den wahllosen Beschnitt des Polygonnetzes bilden sich bei der Simulation des Hängemodells an den Rändern unerwünschte Knickbildungen. Diese entstehen an einzelnen Massepunkten, wo sich mehr Federn als üblich treffen. Folglich sollten unregelmäßige Polygonnetze vermieden werden.

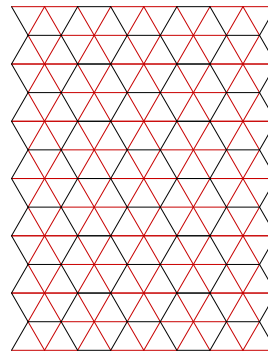
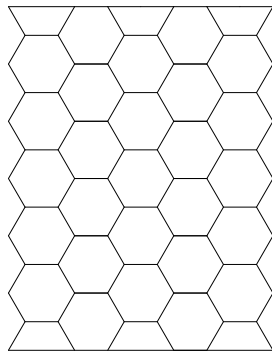


Abb. 2.1.9 Beispiele für unterschiedliche Polygonnetze. Durch weitere Unterteilungen des Polygonnetzes in Dreiecke ergeben sich vielseitigere Möglichkeiten für den Umriss der Grundfläche.

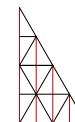
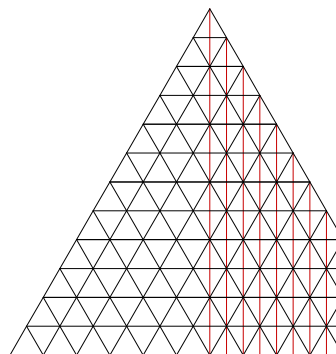
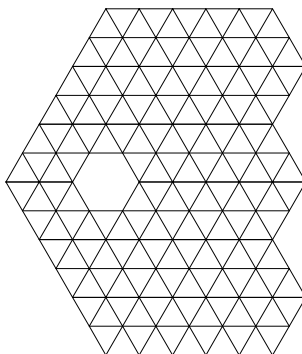
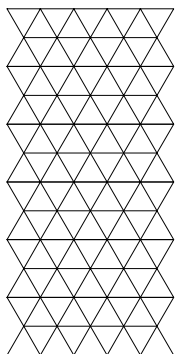


Abb. 2.1.9

2.2 BEISPIELE FÜR VIRTUELLE HÄNGEMODELLE

Bei der ersten Variante besteht das Polygonnetz aus lauter gleichschenkeligen trapezförmigen Flächen, welche im Grundriss ebene Vierecke mit zwei parallel zueinander liegenden Seiten abbilden. Bei der Vereinigung jeweils zwei dieser Trapeze, würde man gleichförmige ebene Hexagone erhalten. Weiters ist die ausgewählte Fläche rundum gelagert.

Abb. 2.2.1 Polygonnetz erstellt in Rhinoceros 3D;

Links:
Grundrissdarstellung des Polygonnetzes bestehend aus trapezförmigen Flächen.

Rechts:
In rot wird die Grundfläche des Hängemodells markiert. Dabei verläuft der Umriss genau entlang der Polylinien.

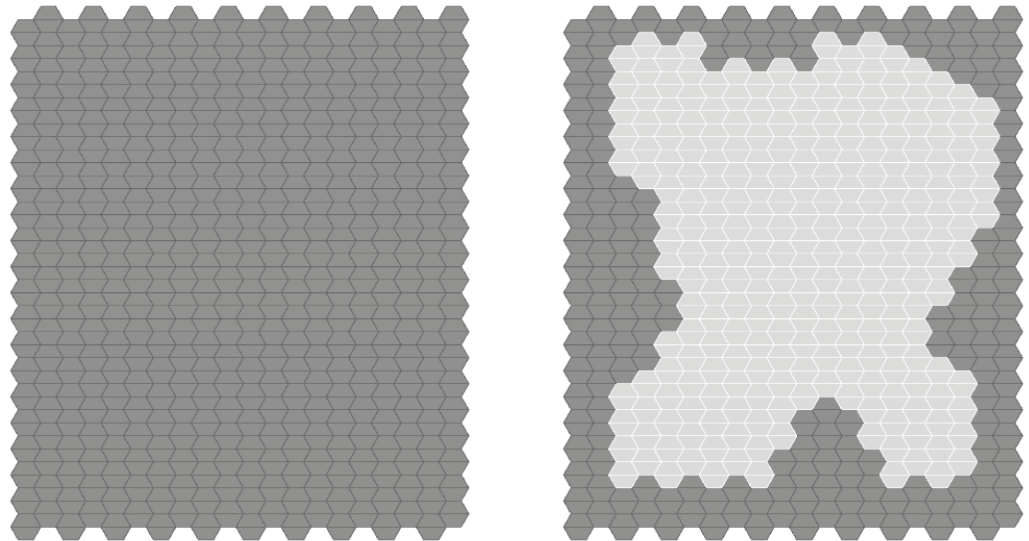


Abb. 2.2.1

Bei der Simulation des Hängemodells lassen sich nun verschiedene Erkenntnisse einer solchen Elementierung des Polygonnetzes ableiten. Vor allem an den Randbereichen sind diese sehr gut zu erkennen. Da das Netz rundum gelagert ist, bleiben einzelne Flächen auf der Ebene liegen und tragen nicht zur Formgebung bei. Grund dafür ist die Definition aller vier Eckpunkte der Flächen als Ankerpunkte. Weiters zeigt die Hängemodellsimulation, dass sich die einzelnen Teilflächen völlig unterschiedlich krümmen und es sich folglich nach der Simulation nicht mehr um Ebenen handelt. Am deutlichsten ist dies ebenfalls an den Randbereichen erkennbar, wo drei Eckpunkte eines Trapezes als Ankerpunkte definiert sind. Die Fläche erhebt sich zwar, jedoch geschieht dies nur zur Hälfte. Ein Dreieck bleibt auf der Ebene liegen, das andere erhebt sich. Dieses Verhalten zeigt sehr deutlich, dass viereckige Teilflächen nicht zwingend eine Ebene bilden. Ist ein Ergebnis mit planaren Teilflächen erwünscht, müssten diese in weitere Dreiecke unterteilt werden. In Abb. 2.2.3 ist jedoch erkennbar, dass diese folglich nicht mehr annähernd die selbe Geometrie aufweisen. Je nach Grad der Krümmung, werden sie in zwei oder vier Dreiecke unterteilt.

Vgl. Abb. 2.2.2

Vgl. Abb. 2.2.3

2. FORMFINDUNG VON SCHALEN

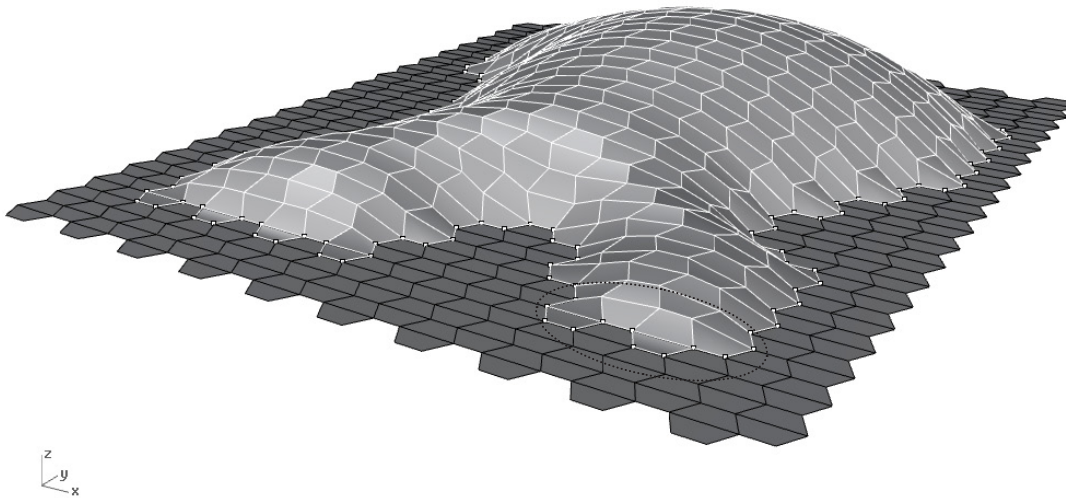


Abb. 2.2.2

Abb. 2.2.2 Hängemodell erstellt mit Kangaroo Physics. An den Randbereichen erkennt man Schwachpunkte aufgrund der gewählten Parkettierung sowie des Maßstabes.

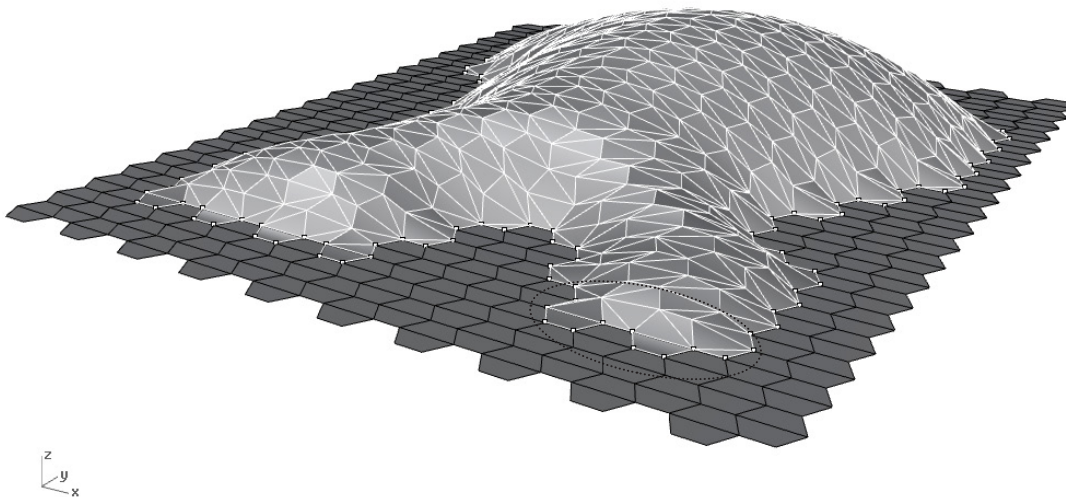


Abb. 2.2.3

Abb. 2.2.3 Hängemodell erstellt mit Kangaroo Physics. Weitere Unterteilung des Meshes in Dreiecke.

Bei der zweiten Simulation bleibt die Grundform des Hängemodells gleich, jedoch wird das Polygonnetz verändert. Es wird von Beginn an in weitere Dreiecke unterteilt, wobei ähnlich wie bei der ersten Variante durch Zusammenschluss von nun jeweils sechs Dreiecken ein Hexagon entsteht. Durch die Veränderung des Netzes soll herausgefunden werden, ob die zuvor entstandenen Probleme bzgl. der Formfindung umgangen werden können.

Abb. 2.2.4 Polygonnetz erstellt in Rhinoceros 3D;

Links:
Grundrissdarstellung des Polygonnetzes bestehend aus gleichseitigen Dreiecken.

Rechts:
In rot wird die Grundfläche des Hängemodells dargestellt. Dabei verläuft der Umriss genau entlang der Polylinien.

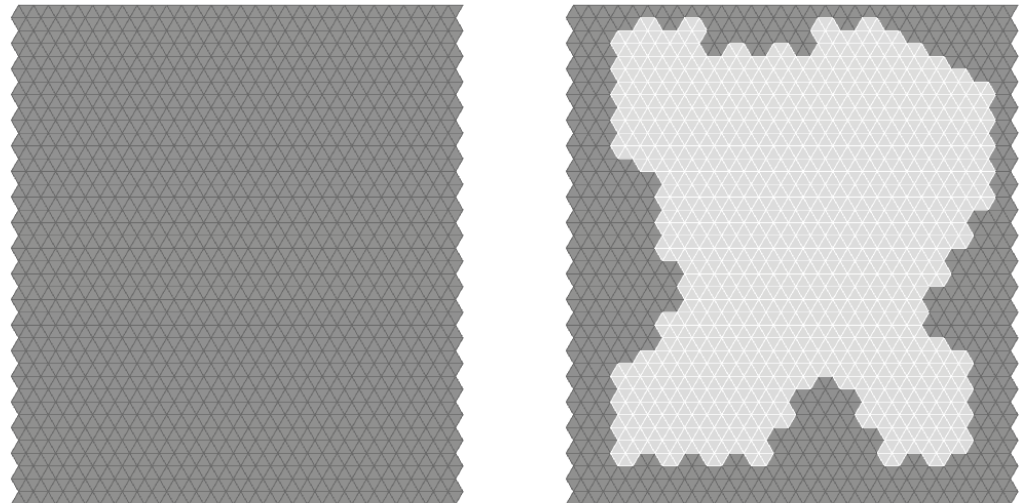


Abb. 2.2.4

Vgl. Abb. 2.2.5

An Hand der Hängemodellsimulation ist eine etwas homogenere Schalengeometrie als zuvor zu erkennen. Durch die weitere Unterteilung des Polygonnetzes in Dreiecke im Grundriss, bleiben nun keine Teilflächen mehr auf der Ebene liegen. Dies wird möglich, da es keine Dreiecksflächen mehr gibt, deren drei Eckpunkte als Ankerpunkte definiert sind. Folglich tragen alle Teilflächen zur Formfindung bei.

Auffällig sind jedoch immer noch die Randflächen, deren Richtungen im Grundriss stark variieren. Es bilden sich starke Krümmungen mit spitzeren Winkeln als üblich aus, was zu dem Anschein führt, als würden sie nicht wirklich zur Gesamtkonstruktion gehören sondern sich von dieser ablösen. Folglich lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass nicht nur die inhärente Elementierung des Polygonnetzes sondern auch der Umriss der Ausgangsfläche die Formfindung beeinflusst. Bei der nächsten Simulation wird speziell auf diesen Aspekt geachtet.

2. FORMFINDUNG VON SCHALEN

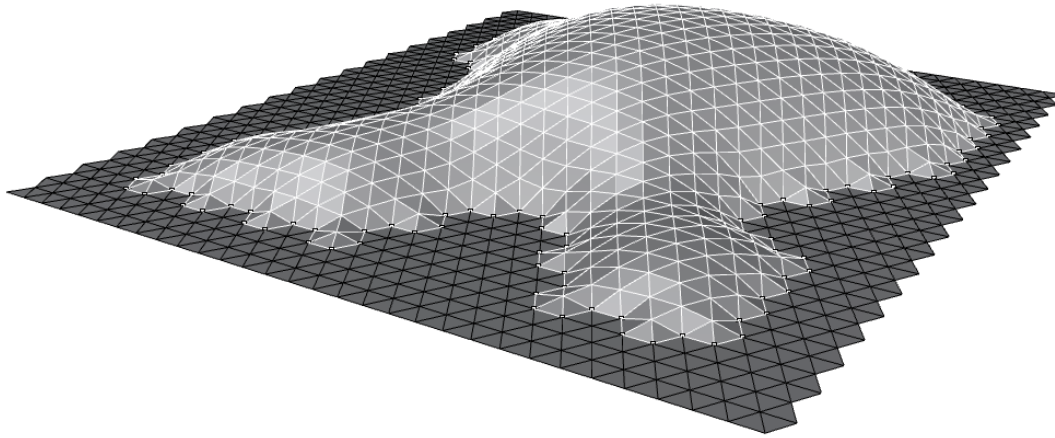


Abb. 2.2.5 Hängemodell erstellt mit Kangaroo Physics. An den Randbereichen erkennt man deutliche Verbesserungen. Dies ist zurück zu führen auf die Parkettierung.

Abb. 2.2.5

Bei der dritten Simulation wird die selbe Unterteilung des Polygonnetzes verwendet wie zuvor, jedoch wird die Ausgangsfläche des Hängemodells verändert. Es wird dabei auf die Wahl eines klaren Umrisses geachtet, dessen Richtung nicht oft variiert. Die Lagerung des Netzes erfolgt bei der ersten Simulation rundum und bei der zweiten nur an den Eckpunkten. Dabei werden die Ankerpunkte auf insgesamt 18 Stück reduziert.

Abb. 2.2.6 Polygonnetz erstellt in Rhinoceros 3D;

Links:
Grundrissdarstellung des Polygonnetzes bestehend aus gleichseitigen Dreiecken.

Rechts:
In rot wird die Grundfläche des Hängemodells dargestellt. Dabei wird auf eine klare Form der Grundfläche geachtet.

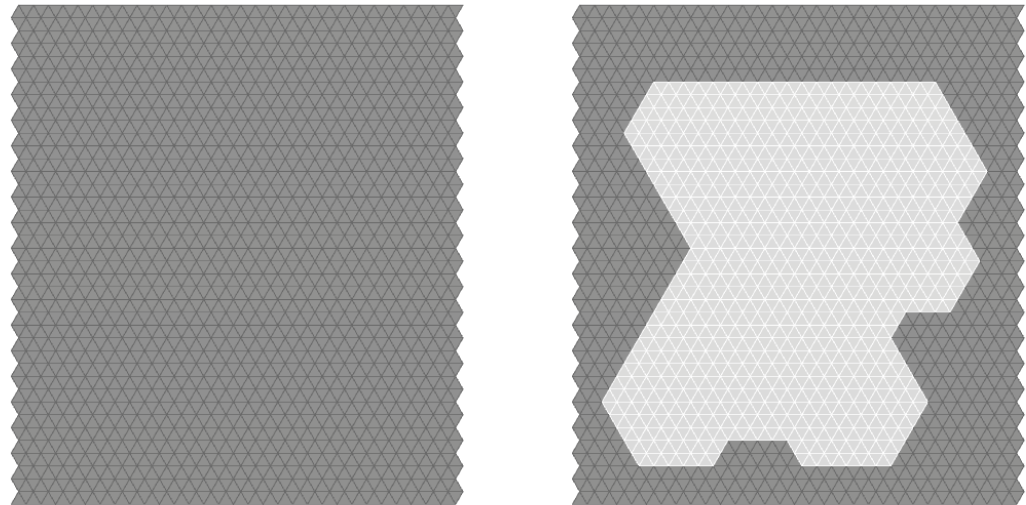


Abb. 2.2.6

Die Abb. 2.2.7 zeigt, dass sich unter Berücksichtigung einer geeigneten Unterteilung des Polygonnetzes sowie durch die Wahl einer klaren Form der Ausgangsfläche, die Formfindungsmethode mittels Hängemodellen sehr gut für die Erstellung von Schalentragwerken eignet. Durch das Prinzip der Umkehr entsteht unter der Annahme einer Gleichlast, eine rein auf Druck beanspruchte homogene Schalengeometrie. Um die Schalenkonstruktion aus einzelnen Glaselementen errichten zu können, muss diese nun effizient elementiert werden.

Vgl. Abb. 2.2.8

In einem weiteren Schritt wurden die Ankerpunkte auf 18 Stück reduziert und nur an den Eckpunkten der Grundform platziert. Das Gesamtergebnis ist ebenfalls zufriedenstellend, jedoch zeigt es die Auswirkungen unterschiedlich vieler Massepunkte zwischen zwei Auflagern. Befindet sich zwischen diesen nur ein einziger Massepunkt, so entsteht eine stark geknickte Krümmung. Daraus folgt, umso mehr Massepunkte sich zwischen zwei Auflagern befinden, desto homogener wird die Krümmung.

2. FORMFINDUNG VON SCHALEN

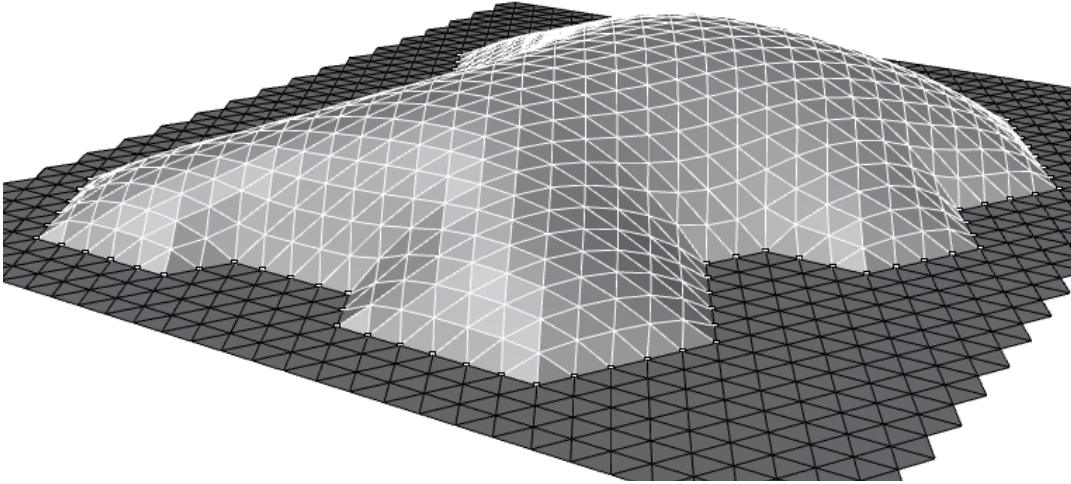


Abb. 2.2.7

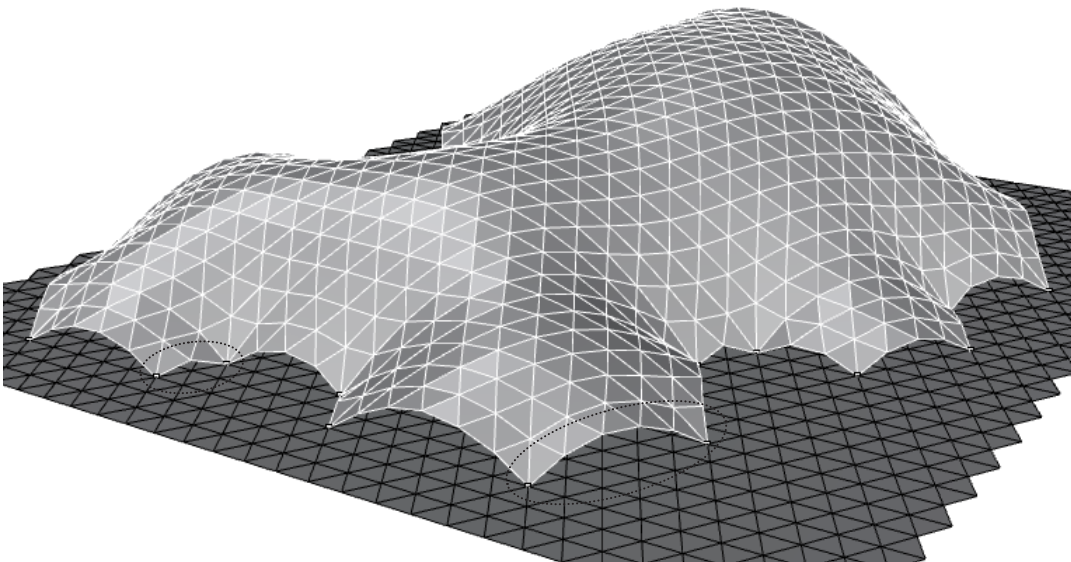


Abb. 2.2.8

Abb. 2.2.7 Hängemodell erstellt mit Kangaroo Physics. Durch die Berücksichtigung einer geeigneten Parkettierung sowie der Wahl einer klaren Grundform entsteht eine homogene Schale.

Abb. 2.2.8 Hängemodell erstellt mit Kangaroo Physics. Durch die Reduktion der Auflager auf 18 Stück, entsteht eine neue Geometrie der Schale. Je nach der Distanz zwischen zwei Auflagern, werden die Auswirkungen der Krümmung auf die Öffnung deutlich.

Erfolgt bei der Hängemodellsimulation sowohl eine Optimierung des Polygonnetzes als auch der Schalengeometrie selbst, erhält man effiziente Schalenträgerwerke, deren Formen nicht fremdbestimmt sind sondern aus selbstgefundenem Gleichgewicht resultieren. Man kann von einem natürlichen Prozess sprechen, an welchem sich bereits viele Architekten wie Heinz Isler, Felix Candela oder Pier Luigi Nervi bedienten. Bereits seit dem frühen 20. Jahrhundert erforschten sie dieses Prinzip für die Realisierung und Fertigung ihrer Betonschalen. Im Bereich der gegenwärtigen Glasarchitektur ist der italienische Architekt Massimiliano Fuksas als bedeutender Pionier zu nennen.

Die Fertigungsmöglichkeiten für Schalenträgerwerke sind maßgebend mit den Eigenschaften der verwendeten Materialien verbunden. Im nächsten Kapitel werden diese Unterschiede näher analysiert.

3. ELEMENTIERUNG

3.1 REALISIERTE SCHALENTRAGWERKE

Allgemein handelt es sich bei Schalenkonstruktionen um sehr leistungsfähige Systeme, deren Konstruktionsstärke im Vergleich zu den anderen Abmessungen sehr gering ist. Das Schalen-tragwerk an sich ist hauptsächlich druckbelastet. Zugkräfte und Biegemomente innerhalb der Konstruktion entstehen erst durch einseitige Lastenwirkungen wie zum Beispiel Wind- oder Schneelast. Nicht nur im Bauwesen sondern auch in der Natur findet man Beispiele dieses Phänomens. Auch der menschliche Schädel lässt diese Eigenschaften erkennen. Stellt man sich vor, dass eine doppelt gekrümmte Schale eine fünfzig Mal höhere Tragfähigkeit über die selbe Spannweite erzielt als eine flache Platte, so bekommt man einen Eindruck von ihrer Effizienz. Schon in den frühen Anfängen der Baugeschichte bediente man sich an diesem Wissen und nutzte es für den Bau von Gewölben und Kuppeln zahlreicher Kirchen und Klöster. Bis heute ist das Interesse an dieser Bauweise nicht verloren gegangen.

BETONSCHALEN

Die Einführung des Stahlbetons ab dem 20. Jahrhundert löste die traditionell gemauerte Kuppel ab. Dabei wurde dem Schalenbau durch die Entdeckung und Erforschung neuer Materialien neuer Anreiz gegeben. Zu wichtigen Vertretern der Schalenarchitektur aus Beton zählen unter anderem die Architekten Heinz Isler, Felix Candela und Pier Luigi Nervi.



Abb. 3.1.1



Abb. 3.1.2

Abb. 3.1.1 Autobahnraststätte Deitingen Süd, dreieckiges Schalenflügeldach aus Beton von Heinz Isler

Abb. 3.1.2 L'Oceanogràfic von Felix Candela in Valencia, Spanien. Die Konstruktion besteht aus der Verschneidung von vier hyperbolischen Paraboloiden.

Der bekannte Schweizer Ingenieur Heinz Isler forschte schon seit den 1950er Jahren an experimentellen Formfindungsmethoden für die Erstellung verschiedenster Schalenstrukturen aus Beton mit minimaler Konstruktionsstärke. An Hand seiner Trägerwerke erkennt man den rationalen Einsatz des Materials, realisierbar auf Grund einer effizienten Planung der Konstruktion sowie der Herstellung. Er versuchte stets seine aufwendig konstruierten Schalungen wirtschaftlich herzustellen und projektübergreifend einzusetzen.²⁶

²⁶ Vgl. Chilton/Isler 2000, 32-47.

Zahlreiche weitere Schalenkonstruktionen aus Stahlbeton setzte der spanische Architekt Felix Candela in die Realität um. Für die Planung und Formfindung seiner Schalen nutzte er seinen geschickten Umgang mit der Geometrie. Dabei entstanden Konstruktionen basierend auf hyperbolischen Paraboloiden, Kegeln, sphärischen Abschnitten und Rotationsparaboloiden. Auch Felix Candela erzielt mit seinen effizienten Formfindungsmethoden und seinen speziell gefertigten Schalungen minimale Konstruktionsstärken von bis zu vier Zentimeter.²⁷

²⁷ Vgl. Faber 1965, 204-209.

Allesamt haben diese Betonschalen eine minimale Konstruktionsstärke bei maximaler Spannweite gemeinsam. Zur Errichtung jedes einzelnen Werkes werden exakt konstruierte Schalungen benötigt, um die gewünschte Form zu erhalten. Dafür wird eine Fertigungsmethode angewandt, bei der die Schalenträgerwerke von Isler und Co. aus Ortbeton am Bauplatz hergestellt werden. Folglich bestehen sie aus einem großen Betonelement. Programme, welche zur ingenieurmäßigen Betrachtung von Membranträgerwerken verwendet werden, konzentrieren sich auf Formfindung, Optimierung und Bemessung von Schalengeometrien. Dabei wird jedoch die Editierbarkeit in Bezug auf die Elementierung von Geometrien vernachlässigt und somit ist diese Vorgehensweise als Methode in dieser Arbeit nicht zielführend.

ZIEGELSCHALEN

Ein bedeutender Vertreter für Fertigungsmethoden von Schalen aus Ziegeln ist der Architekt und Ingenieur Eladio Dieste. Er spezialisiert sich bei seinen Projekten auf ganz spezielle Ziegelkonstruktionen, die große Spannweiten und Auskragungen ohne den Einsatz massiver Stützen erlauben. Diese meist dünnen Schalenkonstruktionen bestehen aus zwei Steinschichten, welche Großteils aus der jeweiligen Umgebung stammen. Er nennt diese Konstruktion das Gaußsche Gewölbe. Eine weitere wichtige Komponente seiner Entwürfe ist das Lichtverhältnis im Innenraum, welches gemeinsam mit den gekrümmten Ziegelformen ein ästhetisch anspruchsvolles und expressives Raumgefüge auf höchstem architektonischen Niveau schafft.

Eines seiner Hauptwerke ist die 1958 fertig gestellte Pfarrkirche Cristo Obrero in Atlántida. Das Tragsystem der Kirche Cristo Obrero besteht aus verschiedenen Wand- bzw. Dachmembranen aus Ziegel. Beide haben eine ähnlich Form, unterscheiden sich jedoch trotzdem voneinander. Die Wände erheben sich von einer geradlinigen Spur, unter denen sich Streifenfundamente befinden, und formen sich nach oben in eine Art Sinuswelle. Sie bestehen aus Normalziegeln und sind im Verband gemauert. Die Fugen wurden zusätzlich mit einer dünnen

3. ELEMENTIERUNG

Bewehrung versehen, um das Tragverhalten zu verbessern. Die ebenfalls doppelt gekrümmte wellige Dachkonstruktion liegt auf den Wänden auf. Sie besteht aus einer leichten, kreuzweise bewehrten Ziegelschale. Die Wellenschale entspricht einer Kettenlinie und weist eine Spannweite von 16 bis 18,80 Meter auf.²⁸

„Die Schale ist so flach, dass das Zugband im Wellental verschwindet. Statisch gesehen entwickelt sich eine hybride Tragwirkung irgendwo zwischen Bogen und Balken. Die im Grundriss gewellte Auflagerlinie wirkt in jedem Joch wie ein Ringanker, der die Schubkräfte an die Zugbänder in den Wellentälern weiterleitet.“²⁹

Da sich der Baustoff Ziegel gleich wie Glas, nicht in unbegrenzt großen Formen herstellen lässt, werden die Schalensstrukturen von Dieste aus zahlreichen planaren Ziegelsteinen errichtet. Erst durch die kleinteilige Auflösung der Konstruktion und Fügetechnik der Steine erzeugt der Architekt optisch eine weiche geschmeidige Form des Objekts.

²⁸ Vgl. Jaeger, Falk 2011, 52-54.

²⁹ Ebd., 52-54.



Abb. 3.1.3

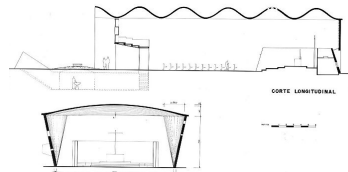


Abb. 3.1.3 Außenansicht der Pfarrkirche Cristo Obrero



Abb. 3.1.4

Abb. 3.1.4 Schnitt und Innenansicht der Pfarrkirche Cristo Obrero

GLASSCHALEN

Aktuell werden Schalentragwerke aus Glas hauptsächlich aus innovativen Stahl-Glas-Konstruktionen errichtet. Die Lastabtragung erfolgt dabei nicht über das Glas selbst, sondern über speziell gefertigte Stahlkonstruktionen. Das Glas dient der räumlichen Trennung zwischen Innen- und Außenraum.

Bei der Erzeugung Geodätischer Kuppeln handelt es sich um die Unterteilung von Kugelflächen bzw. Kugelausschnitten in ebene Flächen. Dies erfolgt durch die Projektion eines im Zentrum befindlichen platonischen Körpers auf die Kugeloberfläche. Um eine Kuppel möglichst kugelförmig zusammen setzen zu können, sollten vorzugsweise gleichseitige Dreiecke für die Unterteilung verwendet werden. Einige dieser in der Praxis umgesetzten Werke findet man vom Architekten Buckminster Fuller, der maßgebend für die Entwicklung Geodätischer Kuppeln tätig war. Kommt für die Unterteilung der Kugelkalotte ein Oktaeder oder ein Tetraeder zum Einsatz, weicht die Projektion durch die grobe Auflösung des Rasters sehr stark von der ursprünglichen Kugelfläche ab. Verwendet man im Gegensatz dazu einen Ikosaeder, dessen Einzeldreiecke weiter in kleinere Dreiecke unterteilt werden, so ergeben sich durch den feingliedrigen Raster nur geringe Abweichungen der ebenen Flächen an der tatsächlichen Kugelfläche. Durch diese Vorgehensweise kann zwar ein annähernd homogenes Netz erzeugt werden, jedoch ist es nicht möglich ausschließlich gleiche Dreiecke zu erzeugen. An den jeweiligen Ecken des Ikosaeders treffen sich nämlich anstatt den üblichen sechs Flächen nur fünf. Die projizierten Dreiecke wirken weiters auf den ersten Blick gleichseitig und gleich groß, sind es in Wirklichkeit jedoch nicht. Da der Abstand zwischen der ebenen Dreiecksfläche des Ikosaeders und der gekrümmten Kugeloberfläche bei der Projektion variiert, werden immer verschiedene Seitenlängen am Umfang erzeugt. Trotz verschiedener Vorgangsweisen zur Verbesserung der Ergebnisse, bleiben die Einzelteile minimal verschieden.³⁰

³⁰ Vgl. Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg 1996, 155-157.

Abb. 3.1.5 Unterteilung des gleichseitigen Dreiecks des Ikosaeders in 4, 9, 16 Teile für die Projektion

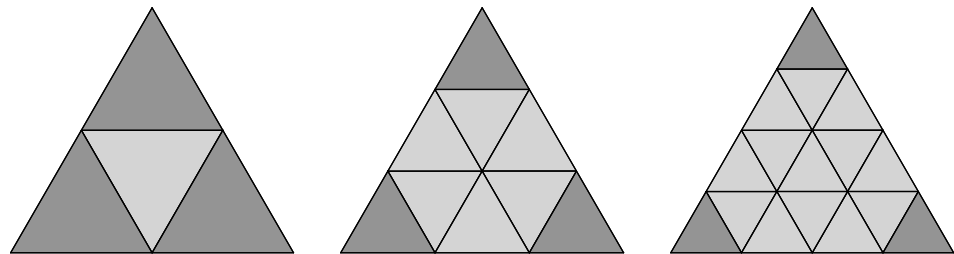


Abb. 3.1.5

In der Praxis muss auf diese geringen Abweichungen bei der Herstellung von Geodätischen Kuppeln eingegangen werden. Dieser zusätzliche Aufwand müsste betrieben werden, ob-

3. ELEMENTIERUNG

wohl durch die vorgeschriebene Kugelgeometrie eine äußerst eingeschränkte Formensprache und Verwendbarkeit in der Architektur bleibt. Auf Grund dessen stellt diese Herangehensweise zur Erstellung von Gebäudehüllen als nicht zielführend dar.

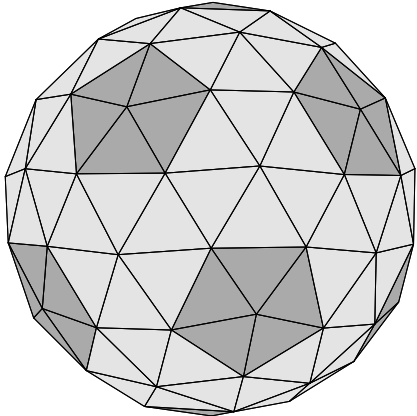


Abb. 3.1.6

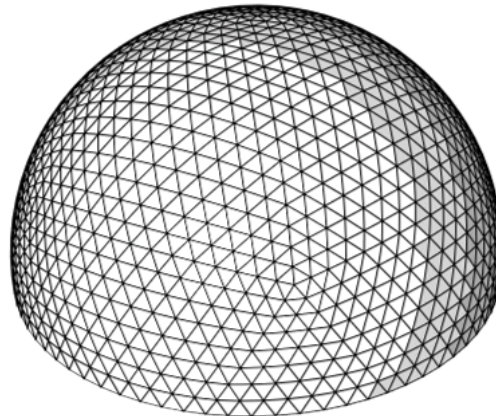


Abb. 3.1.7

Abb. 3.1.6 Geodätische Kuppel: Elementierte Kuppel, welche wiederkehrende Zonen mit gleichen Elementen aufweist. Leicht erkennbar ist dies bei den dunkelgrauen Bereichen, wo sich Dreiecke zu einem Fünfeck statt zu einem Sechseck zusammensetzen.

Abb. 3.1.7 Geodätischer Kuppel mit sehr feingliedriger Rasterung. Gute Annäherung an die ursprüngliche Kugeloberfläche.



Abb. 3.1.8

Abb. 3.1.8 Die Biosphère in Montreal, entworfen von Architekt Buckminster Fuller.

Für futuristische sowie parametrische Entwürfe aus Stahl und Glas ist der italienische Architekt Massimiliano Fuksas bekannt. An seinem Werk, die Neue Messe Mailand: Logo & Vela, lassen sich die hoch technischen Anforderungen sowohl an die Planung, als auch an die Realisierung erahnen. Die Stahl-Glas-Konstruktionen derartige Projekte werden meist in einzelnen Strukturelementen im Werk vorgefertigt und an die Baustelle geliefert. Anschließend verschrauben Monteure die einzelnen Komponenten vor Ort. Bei den Glaselementen handelt es sich nicht um gleichförmige Scheiben, sondern um individuelle, exakt auf die benötigte Form zugeschnittene Glaspakete.

Abb. 3.1.9 Neue Messe
Mailand: Logo & Vela von
Massimiliano Fuksas.

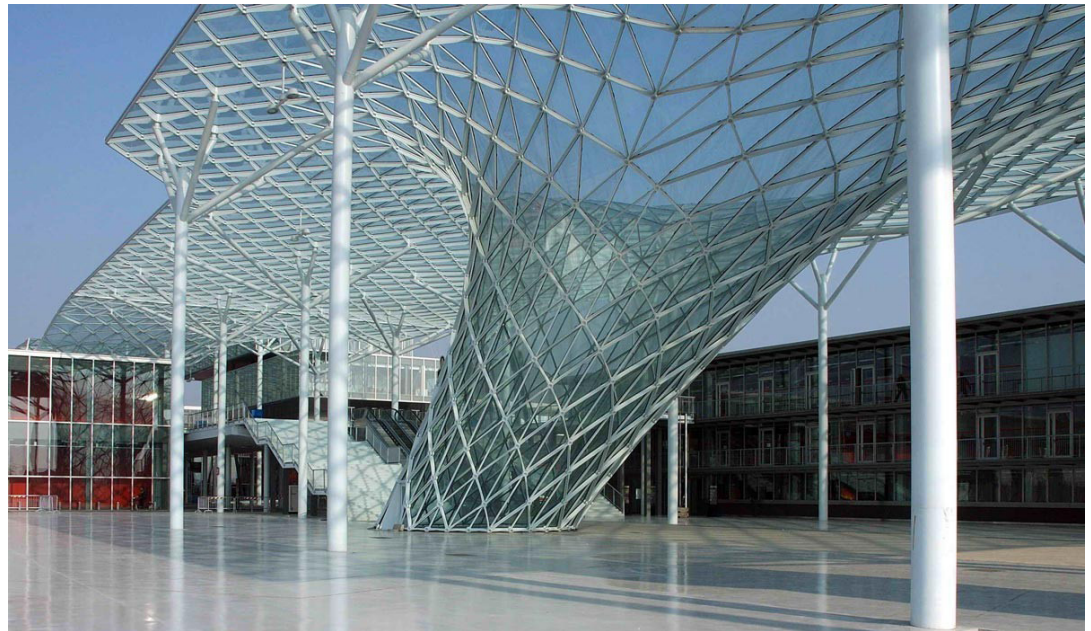


Abb. 3.1.9

Als Alternative zur Lastabtragung über die Stahlkonstruktion, kann diese auch über das Glas selbst erfolgen. Dafür werden die Glasscheiben untereinander nicht mit metallischen Verbindungsmitteln zusammengefügt, sondern mit einem speziellen Glasklebstoff kraftschlüssig verklebt. Bei dieser Konstruktionsart spricht man von Structural Glazing. Durch die stumpfe Verklebung der Scheiben kann eine noch größere Transparenz erzielt werden, als bei Stahl-Glaskonstruktionen. Das Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart verdeutlicht dies sehr gut mit der Umsetzung der Stuttgarter Schale.

3. ELEMENTIERUNG



Abb. 3.1.10 Stuttgarter Schale,
ILEK, Universität Stuttgart.

Abb. 3.1.10

Die realisierten Glasschalen zeigen alle unterschiedliche Elementierungsmöglichkeiten, abgestimmt auf die jeweilige Konstruktion. Für die Herstellung selbsttragender Schalenkonstruktionen aus Glas muss folglich eine Methode gefunden werden, wie die Schalenfläche möglichst effektiv unterteilt werden kann.

3.2 ELEMENTIERUNG VON FREIFORMFLÄCHEN

Da die selbsttragende Gebäudehülle aus Glas, ähnlich wie ein Mauerwerk, aus einzelnen Glaselementen aufgemauert werden soll, ist es sinnvoll, die Fläche möglichst effizient zu elementieren. Wäre es möglich, ganze Schalengeometrien in annähernd gleich große Teile zu unterteilen, könnte die komplette Konstruktion mittels eines einzigen Steinformats errichtet werden.

Bei der Herleitung eines solchen Steinformats müssen Einflussfaktoren wie Geometrie, Herstellbarkeit der Elemente aus Glas und die Handhabung einer möglichen Fugenbildung mit berücksichtigt werden. Im den folgenden Kapiteln wird nun eine Methode zur Elementierung von Flächen vorgestellt.

3.2.1 HERLEITUNG DER ELEMENTFORM

Bei der Elementierung einer Kugelfläche durch ebene Elemente wurde die Verwendung von möglichst gleichseitigen Dreiecken empfohlen. Durch folgende Untersuchungen soll herausgefunden werden, welche Geometrie die am geeignetste Form für die Elementierung von Freiformflächen darstellt. Prinzipiell können alle Geometrien für die Teilflächen verwendet werden, welche sich Kante an Kante gefügt restlos überdecken lassen. Handelt es sich bei dem Flächenschluss um lauter gleichförmige Teilflächen, spricht man von einer Platonischen Parkettierung, setzen sie sich jedoch aus verschiedenen, sich wiederholenden Grundformen zusammen, spricht man von einer Archimedischen Parkettierung.³¹ Folgende Abbildung zeigt verschiedene Beispiele der Elementierung:

³¹ Vgl. Heesch/Kienzle, 45-53.

Abb. 3.2.1 Darstellung verschiedener Elementierungsarten.

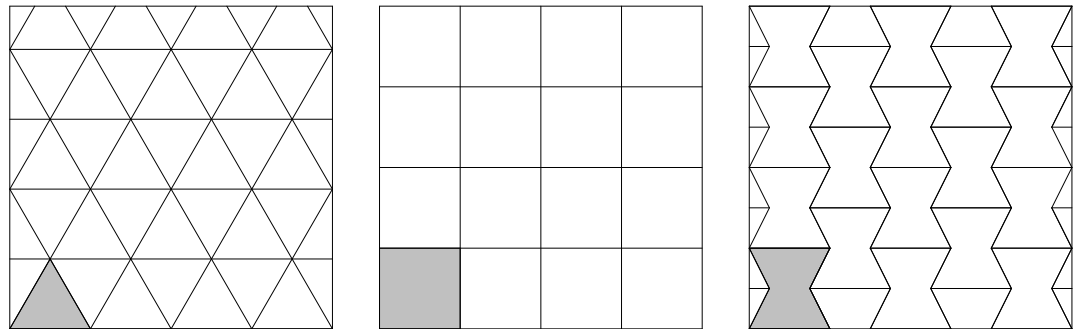


Abb. 3.2.1

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass bei der Dimensionierung der einzelnen Elemente auf eine möglichst geringe Abweichung von der Stützlinie der Schalengeometrie geachtet werden soll, um unnötige Spannungen in der Konstruktion zu vermeiden. Die Annäherung an die Stützlinie wird dabei von der Elementgröße beeinflusst. Das heißt, je feiner die Elementierungsauflösung, desto größer ist die Annäherung an die Stützlinie durch ebene Elemente.

Vgl. Kap. 1.2 Tragverhalten von Schalen

Abb. 3.2.2 Darstellung der Annäherung an die ideale Stützlinie durch ebene Elemente; je feiner die Auflösung umso größer die Annäherung an die Stützlinie.

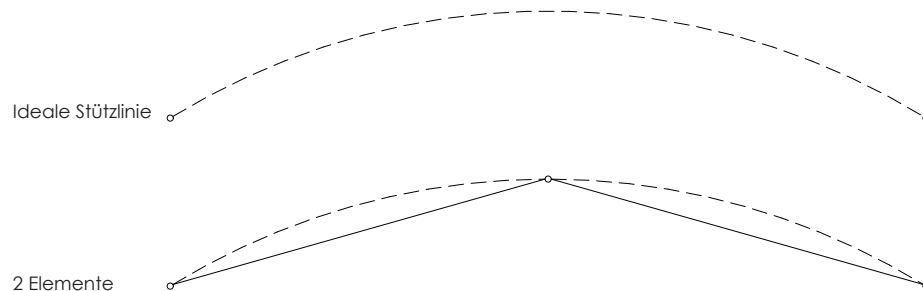


Abb. 3.2.2

3. ELEMENTIERUNG

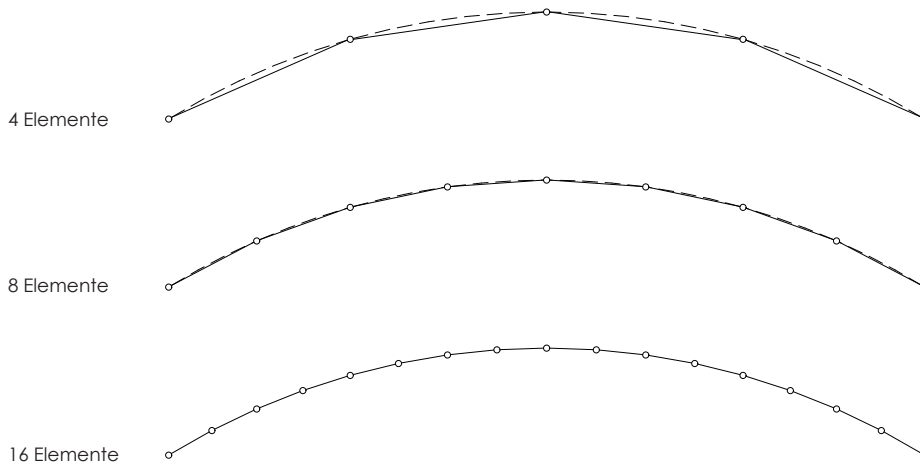


Abb. 3.2.2

An Hand folgender Schalengeometrie, resultierend aus einer Hängemodellsimulation erstellt mit Rhinoceros 3D, wird geprüft, welche Formen sich für eine effektive Herstellung der Schale mit ebenen Teilflächen eignen. Um die Auswirkungen der verschiedenen Geometrien deutlicher zu erkennen, wird für die vorhandene Krümmung eine eher grobe Elementierungsaufösung gewählt. Zuerst wird versucht, die Teilflächen bündig, das heißt ohne Abstand zueinander, auf der Fläche zu orientieren.

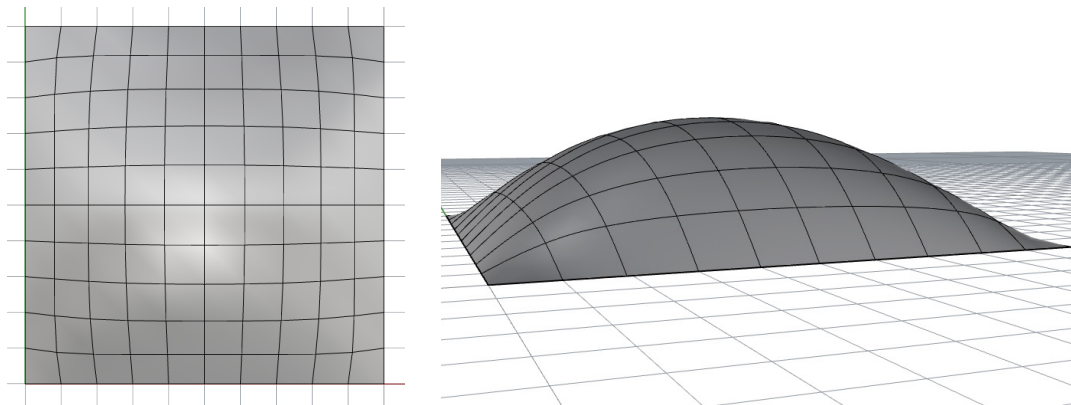


Abb. 3.2.3

Abb. 3.2.2 (Fortsetzung)
Darstellung der Annäherung an die ideale Stützlinie durch ebene Elemente; je feiner die Auflösung umso größer die Annäherung an die Stützlinie.

Abb. 3.2.3 Doppelt gekrümmte Fläche erstellt in Rhinoceros 3D mit Hilfe von Kangaroo Physics.

Abb. 3.2.4 Bündige Anordnung von ebenen gleichförmigen Teilflächen auf der Schalen-geometrie.
 Oben: Verwendung eines Vierecks
 Unten: Verwendung eines Dreiecks

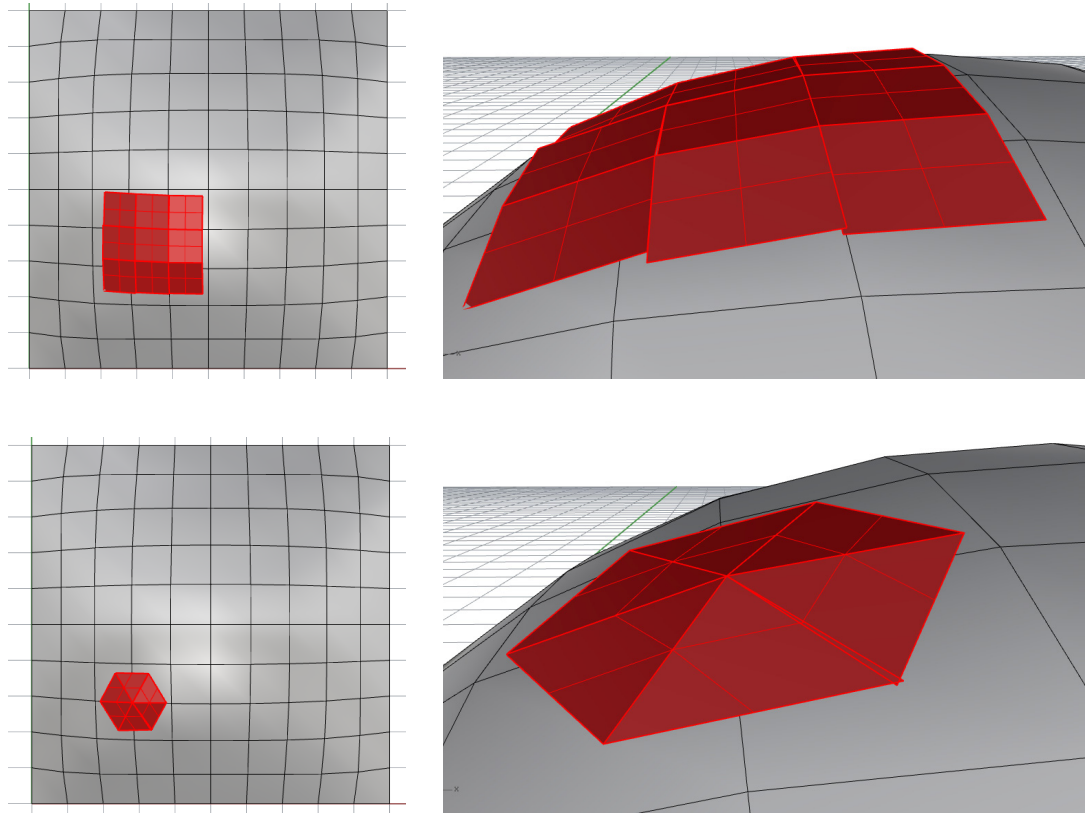


Abb. 3.2.4

An Hand der beiden Abbildungen ist gut zu erkennen, dass die Errichtung beliebig gekrümmter Schalengeometrien durch ebene gleichförmige Teilflächen ohne Abstand zueinander nicht möglich ist. Beide Versuche zeigen gleich zu Beginn Überschneidungen der einzelnen Teilflächen. Bei der Anordnung der Vierecksflächen entstehen starke Abweichungen von der Stützlinie. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine Ebene bereits durch drei Punkte definiert ist. Der vierte Eckpunkt weicht bei der flächenbündigen Orientierung je nach Krümmung mehr oder weniger von der Form ab. Folglich können sich Dreiecke dementsprechend besser an die Fläche annähern.

Wenn Schalenkonstruktionen flächenbündig hergestellt werden sollen, können die einzelnen Teilflächen nicht gleichförmig sein, sondern müssen auf die Krümmung der Schale abgestimmt werden. Sollen alle Teilflächen gleich sein, bleiben gezielte Abstände zwischen den Teilflächen, welche als Fuge ausgebildet werden müssen.

Vgl. Abb. 3.2.5

3. ELEMENTIERUNG

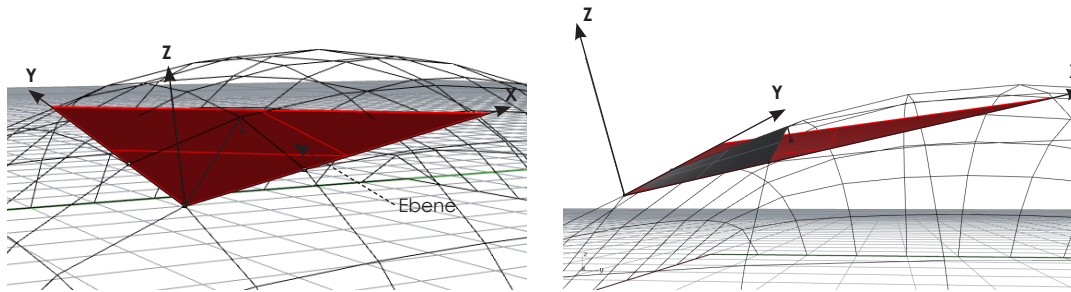


Abb. 3.2.5

Folgende Simulationen zeigen, dass die Errichtung beliebig gekrümmter Schalengeometrien mit ebenen gleichförmigen Teilflächen mit Hilfe von Fugenbildungen möglich ist. Simuliert wird einerseits mit Vierecken und andererseits mit Dreiecken:

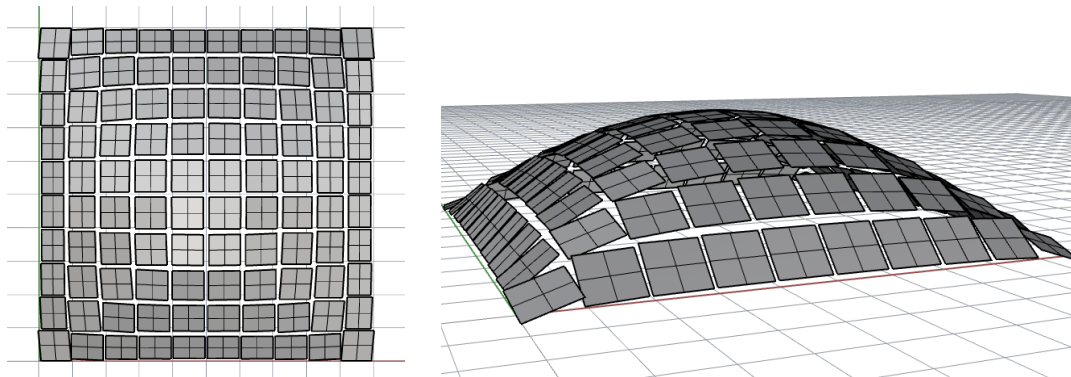


Abb. 3.2.6

Abb. 3.2.5 Gitterschalendarstellung erstellt in Rhinoceros 3D durch Erzeugung eines Punktrasters an der Oberfläche. Dies zeigt die Abweichungen der Vierecksflächen der Schalengeometrie von der Ebene.

Abb. 3.2.6 Darstellung der doppelt gekrümmten Fläche zusammengesetzt aus 4-eckigen ebenen Elementen.

Abb. 3.2.7 Darstellung der doppelt gekrümmten Fläche zusammengesetzt aus 3-eckigen ebenen Elementen.

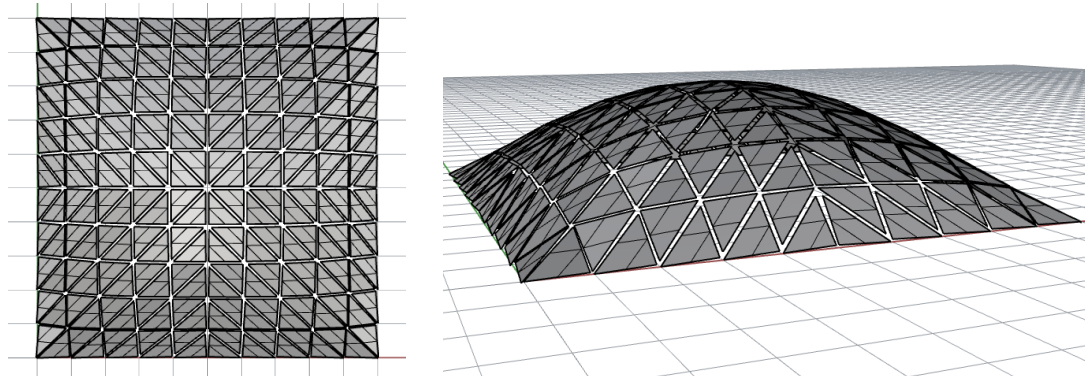


Abb. 3.2.7

Abb. 3.2.8 Gegenüberstellung der beiden Elementierungsarten; es ist deutlich erkennbar, dass sich die Schalensfläche mit Dreiecken exakter nachbilden lässt als mit Quadraten.

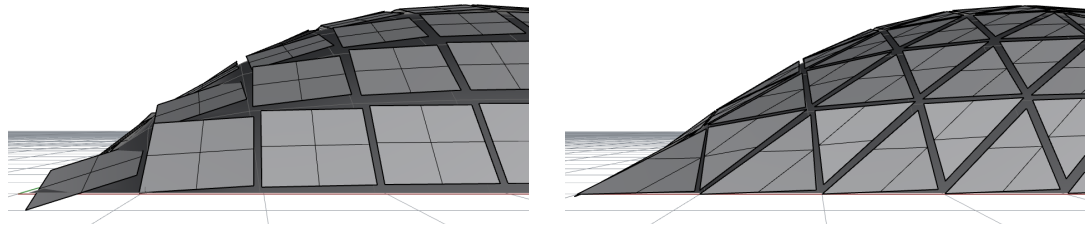


Abb. 3.2.8

Prinzipiell können für Konstruktionen mit Fugenbildung beide Geometrien verwendet werden, im direkten Vergleich erkennt man jedoch deutliche Vor- und Nachteile. Bei geringer Krümmung der Fläche eignen sich beide Formen für die Elementierung.

Bei der Verwendung von dreieckigen Teilflächen kann an den Eckbereichen, wo sich die Fläche stärker krümmt als üblich, ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden. Da sie sich sehr gut an die Schalensfläche annähern, weichen sie kaum von der idealen Stützlinie ab und der Fugenanteil kann folglich reduziert werden.

Bei der Verwendung von viereckigen Elementen hebt sich jeweils ein Eckpunkt sehr stark von der Schalensfläche ab, wodurch einerseits in der Konstruktion unnötige Spannungen entstehen können und andererseits der Fugenanteil zunimmt. Weiters ist auf Grund von Vor- und Rücksprüngen eine homogenen Fugenbildung auf der Schalensoberfläche nicht möglich. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Abweichungen durch den Einsatz von Geometrien mit zusätzlichen Seiten verstärkt wird.

3. ELEMENTIERUNG

Durch die Verwendung kunstvoller Geometrien kann zwar die Individualität des Projekts gefördert werden, jedoch werden die Grenzen der Machbarkeit schneller erreicht. Da im Zuge dieser Arbeit eine doppelte Krümmung der Konstruktion gewünscht ist, stellt sich das Dreieck für die Elementierung am geeignetsten dar. Um die Steine ideal auf der Fläche anordnen zu können, werden nun verschiedene Parameter vorgestellt, welche den Entwurf maßgebend beeinflussen.

Soll eine Fugenbildung prinzipiell vermieden werden, kann der Aufbau auch über Glassteine erfolgen, deren Form exakt auf die Krümmung der Schale abgestimmt ist. Durch die individuelle Anfertigung der Steine passen diese folglich exakt zueinander. Die Elementierung ist frei wählbar, jedoch gilt auch hier das Prinzip der Elementierungsauflösung. Durch die doppelte Krümmung der Konstruktion kann keine Regelmäßigkeit bzgl. des Steinformats abgelesen werden, wodurch ein komplexer und zeitintensiver Produktionsablauf unumgänglich wird.

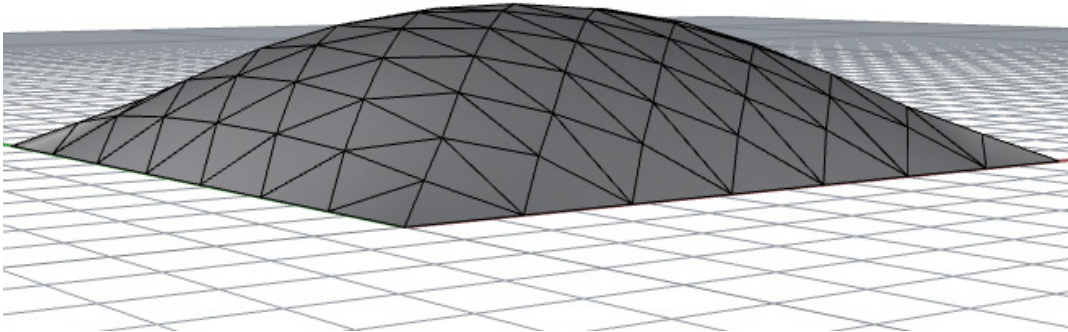


Abb. 3.2.9

Abb. 3.2.9 Kuppelkonstruktion;
Aufbau durch flächenschlüssige,
unregelmäßige Glassteine.

3.3 ORIENTIERUNG DER ELEMENTE

Soll die Krümmung der Konstruktionen über die Fuge erfolgen, müssen die Dreiecke bestmöglich auf der Schalenfläche orientieren werden. Für die Umsetzung ist die Entwicklung einer geeigneten Methode unumgänglich.

Durch die Erstellung eines möglichst regelmäßigen Punktrasters auf der Oberfläche wird die Grundlage zur Orientierung geschaffen. Das Nurbs-modeling Programm Rhinoceros 3D scheint die geeignete Plattform für dieses Vorhaben zu sein. Mit Hilfe der Software können die benötigten Schalengeometrien erstellt und anschließend weiter bearbeitet werden. Durch zahlreiche Plugins kann sie erweitert werden, um individuelle Benutzeranforderungen zu erfüllen. Für die Erstellung des benötigten Punktrasters bietet sich die Verwendung des Plugins Paneling Tools an.³²

³² Vgl. <http://www.rhino3d.com>

³³ NURBS-Flächen sind Non-uniform rational B-Splines (deutsch: nicht-uniforme rationale B-Splines). Es handelt sich um mathematisch definierte Kurven oder Flächen, die im Computergrafik-Bereich zur Modellierung beliebiger Formen verwendet werden.

3.3.1 Elementieren von NURBS - Flächen³³

Ein für die Elementierung von Flächen sehr hilfreiches Tool ist das Plugin Paneling Tools. Hierbei werden aus Nurbs-Flächen so genannte Paneling Grids extrahiert, welche als Hilfestellung bei der Anordnung der Elemente auf der Fläche dienen sollen. Das Plugin bietet fünf verschiedene Möglichkeiten, wie Punkte auf einer Fläche angeordnet werden können. Wichtig für dieses Vorhaben sind die Befehle „Grid Surface Distance“ und „Grid Surface Domain Length“, bei denen die Distanz zwischen den Punkten vom Benutzer definiert wird.

An Hand folgender Simulationsversuche am Rechner wird die unterschiedliche Funktionsweise beider Befehle gezeigt und resultierende Kenntnisse zur Orientierung ebener Dreiecke auf der Fläche abgeleitet:

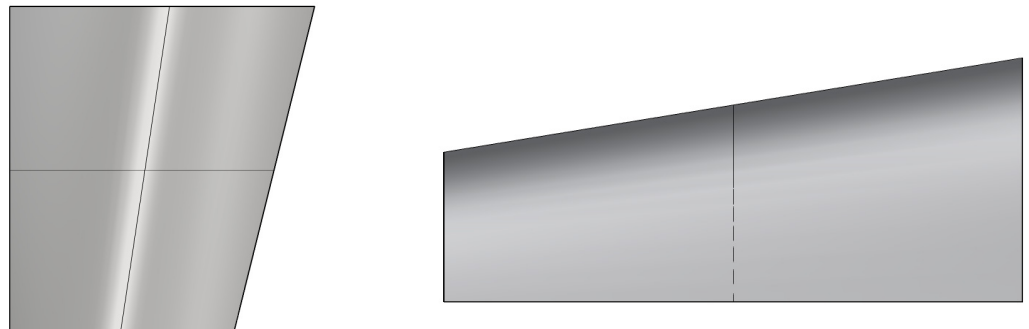


Abb. 3.3.1 Eine in Rhinoceros 3D konstruierte Nurbs-Fläche; Erstellt indem eine Kurve entlang zwei definierten Randkurven aufgezoogen wird. Links: Grundrissdarstellung; Rechts: Ansicht

3. ELEMENTIERUNG

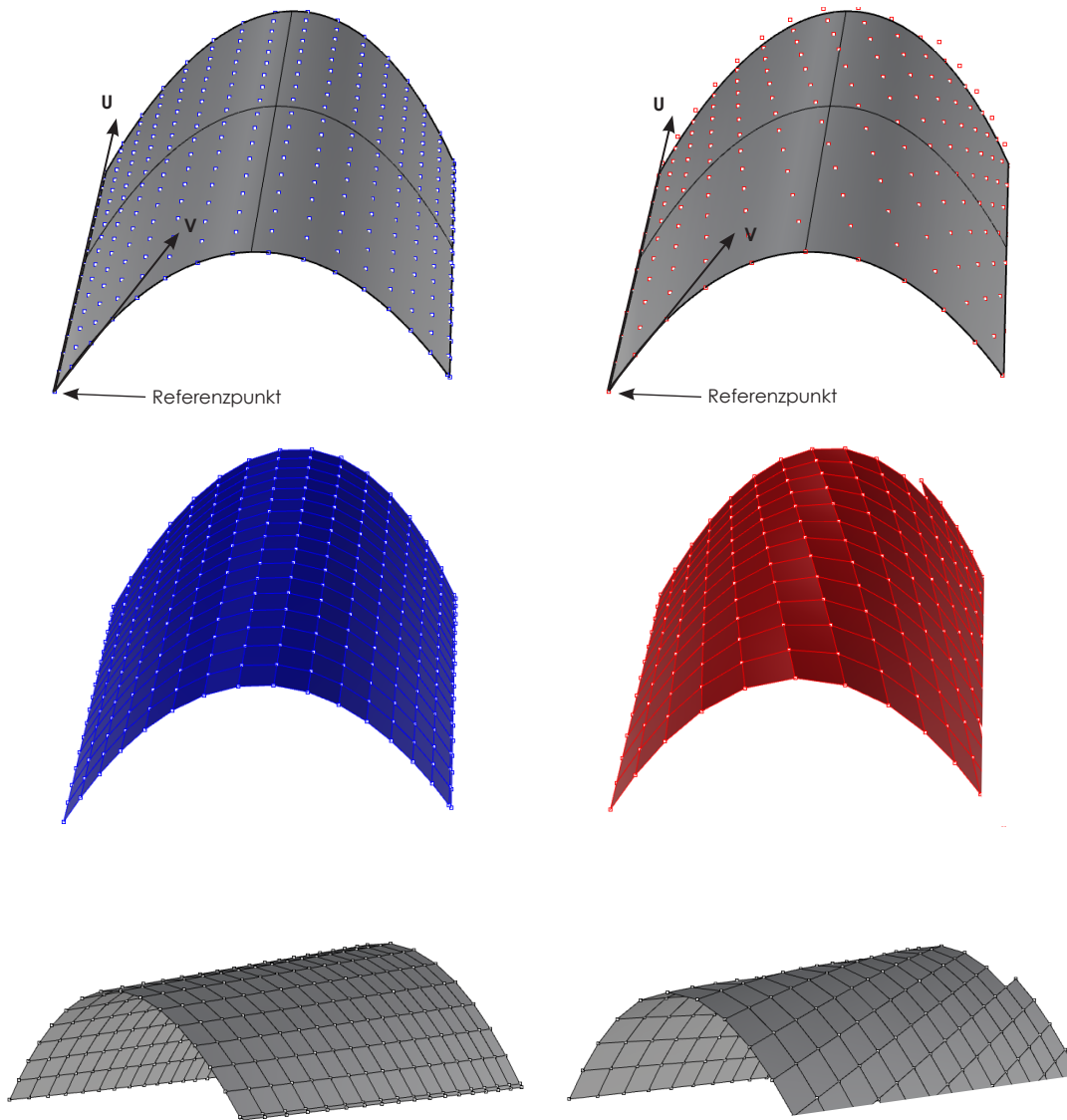


Abb. 3.3.2 Links: Paneling Grid erstellt mit dem Befehl „Grid Surface Domain Length“.

Rechts: Paneling Grid erstellt mit dem Befehl „Grid Surface Distance“.

Über den Befehl „Grid Surface Distance“ wird der Abstand zwischen allen Punkten fix definiert. Die sich zwischen den Punkten bildenden Teilflächen sind somit zwar gleich groß, weisen jedoch Verzerrungen auf. Diese entstehen durch das Variieren der eingeschlossenen Winkel von Teilfläche zu Teilfläche. Das Grid kann über den Randbereich hinaus geführt werden, jedoch entstehen dort Randelemente mit völlig unterschiedlichen Geometrien.

Mit dem Befehl „Grid Surface Domain Length“ wird ebenfalls der Abstand zwischen den Punkten vorgegeben. Dies erfolgt jedoch am Referenzpunkt entlang der Randkurven. Da der Befehl auch die Proportion der Fläche mit berücksichtigt und die Anzahl an Punkten in U- und V- Richtung beibehalten wird, kann die gesamte Fläche überspannt werden, jedoch ändern sich die Punktabstände enorm. Die Abweichung betrifft nicht nur die Distanz zwischen den Punkten, sondern verändert auch die eingeschlossenen Winkel.³⁴

Die Abbildung 3.1.2 zeigt, dass eine völlig regelmäßige Anordnung der Punkte auf frei geformten NURBS - Flächen nicht möglich ist. Die Erkenntnis aus Kapitel 3.2.1 Herleitung der Elementform, dass sich gekrümmte Freiformflächen nicht in regelmäßige ebene Teilflächen bündig unterteilen lassen, wird hier bestätigt. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass es sich bei diesen frei definierten Flächen noch nicht um Geometrien handelt, welche im Sinne des Tragverhaltens optimiert wurden.

Bei stärker doppelt gekrümmten Flächen, deren Grundfläche nicht annähernd rechteckig ist, sind die beschriebenen Unterschiede der Befehle noch deutlicher zu erkennen.

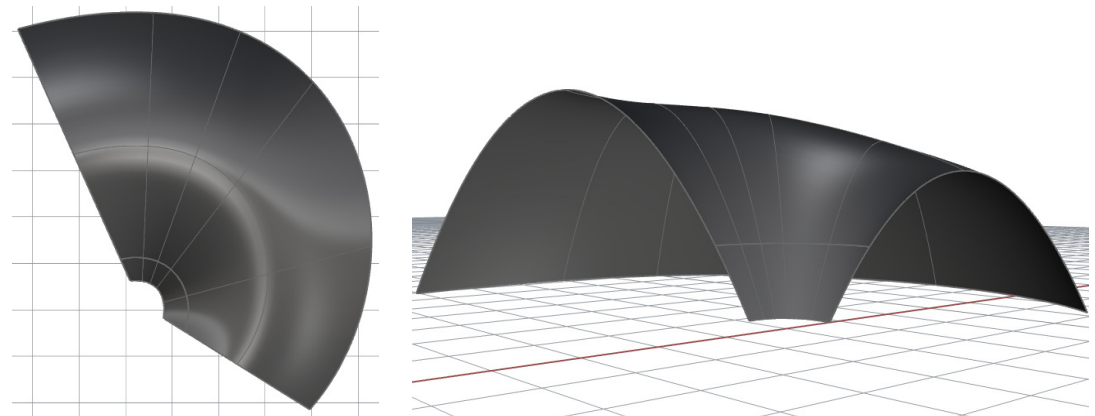


Abb. 3.3.3

³⁴ Vgl. <http://wiki.mcneel.com/labs/panelingtools>

Abb. 3.3.3 Darstellung einer doppelt gekrümmten NURBS-Fläche erstellt in Rhinoceros 3D.

Links: Grundrissdarstellung;

Rechts: Perspektive

3. ELEMENTIERUNG

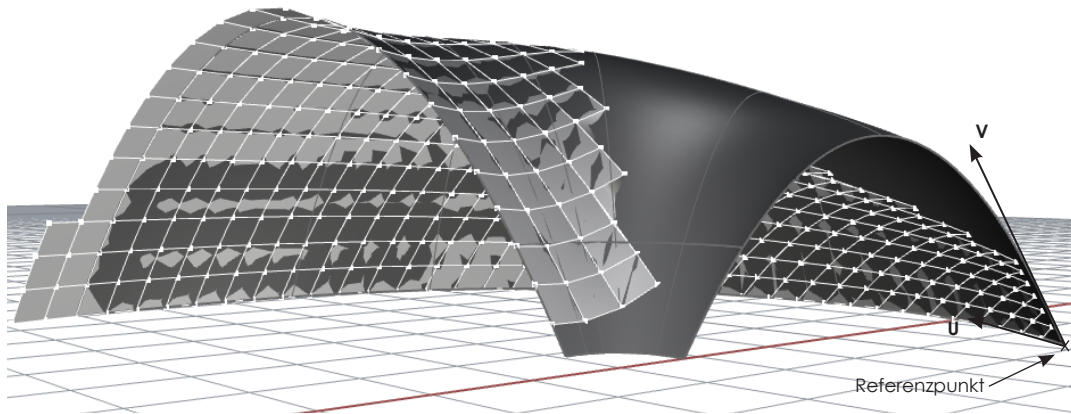


Abb. 3.3.4

In der Abbildung 3.3.4 wurde das Grid mit fix definierten Seitenlängen in U- sowie in V- Richtung erstellt. Das heißt, ausgehend vom Referenzpunkt, wurden alle 40 cm in beide Richtungen Punkte angeordnet. Durch die starke Krümmung der Schale, sowie die extreme Verjüngung der Fläche kann kein gleichmäßiger Punktraster gebildet werden. Folglich sind am rechten Rand Verzerrungen zu erkennen sowie das völlige Ausbleiben des Rasters.

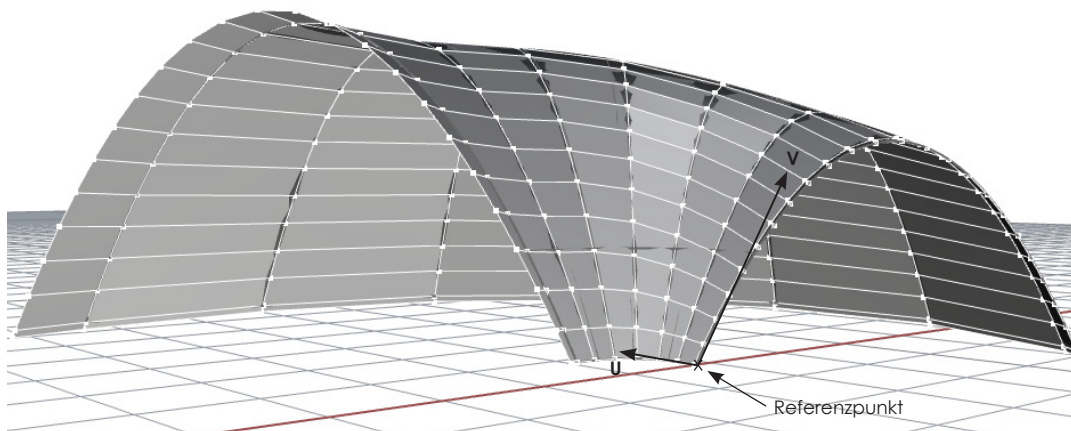


Abb. 3.3.5

Abb. 3.3.4 Paneling Grid erstellt mit dem Befehl „Grid Surface Distance“.

Abb. 3.3.5 Paneling Grid erstellt mit dem Befehl „Grid Surface Domain Length“.

Abb. 3.3.5 (Fortsetzung)
 Paneling Grid erstellt mit dem
 Befehl „Grid Surface Domain
 Length“.

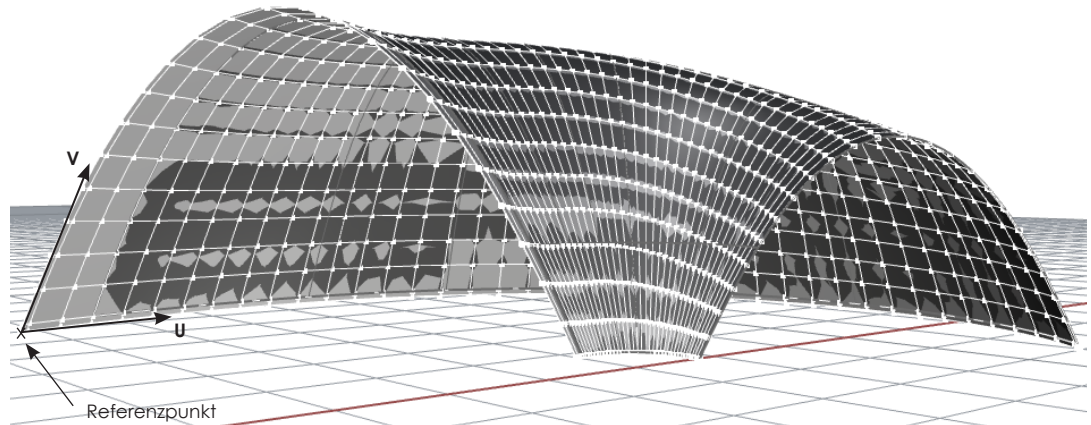


Abb. 3.3.5

In der Abbildung 3.3.5 wurde das Paneling Grid ebenfalls ausgehend vom Referenzpunkt erstellt. Auch hier beträgt der Abstand zwischen den Punkten 40 cm in U- sowie in V- Richtung. Anders jedoch wie bei dem Befehl zuvor, wird hier die Anzahl der Punkte in beiden Richtungen beibehalten. Durch den starken Längenunterschied zwischen der äußeren und der inneren Leitkurve variiert die Größe der Teilflächen extrem. Befindet sich der Referenzpunkt an der kurzen Leitkurve, vergrößern sie sich nach außen hin immer mehr. Umgekehrt entstehen an der kurzen Seite äußerst kleine Teilflächen wenn der Referenzpunkt an der langen Leitkurve definiert ist.

Um die Dreiecke regelmäßig auf der Schalenfläche anordnen und orientieren zu können, ist ein möglichst gleichmäßiger Punktraster notwendig. Beide Simulationen liefern jedoch kein völlig zufriedenstellendes Ergebnis. Die Erstellung des Grids mittels „Grid Surface Distance“ kommt dem geplanten Vorhaben schon nahe, jedoch können bei der Verwendung dieses Befehls die unterschiedlichen Randelemente nicht vermieden werden.

Da bei der Bildung des Hängemodells eine inhärente Elementierung zur Erstellung des Polygonnetzes notwendig ist, sollte dieses bereits Bezug auf die Geometrie des gewünschten Glassteines nehmen. Dies führt zu einer kontrollierten Fugenbildung und zur Vermeidung von Randelementen.

Prinzipiell sollte die Fuge so minimal wie möglich gehalten werden, da sie eine Schwachstelle der Konstruktion darstellt. Folglich ist bei der Erstellung des Hängemodells auf eine möglichst geringe Verzerrung des Netzes zu achten.

3. ELEMENTIERUNG

Eine Möglichkeit ist die Definition einer hohen Federsteifigkeit, um eine geringe Dehnungen der Federn zu erhalten. Zusätzlich kann über den Input „Rest length“ die gewünschte Restlänge angegeben werden. Definiert man diese gleich der Ursprungslänge, versuchen alle Federn ihre Ausgangslänge einzunehmen. Durch das Verschieben der Auflagerpunkte können in bestimmten Fällen ebenfalls entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

Da die Parkettierung schon während des Formfindungsprozesses mit virtuellen Hängemodellen berücksichtigt wird, stellt sich diese Methode als sehr effizient dar. Die resultierenden Erkenntnisse aus den Simulationsversuchen bieten eine gute Grundlage sowohl für die Formfindung des Membrantragwerks, als auch für die Entwicklung des konstruktiven Glassteines.

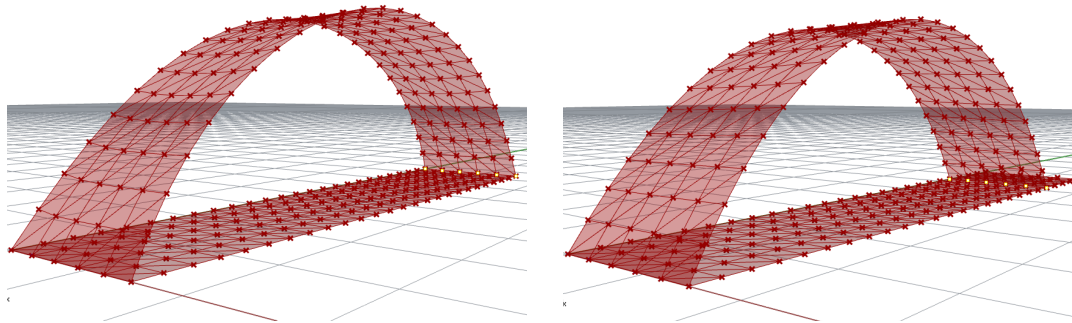


Abb. 3.3.6

Vgl. Kapitel 2.1 Formfindung über virtuelle Hängemodelle

Abb. 3.3.6 Hängemodell erstellt in Rhinoceros 3D. Durch Veränderung der Federparameter sowie Verschiebung der Auflager wird eine geringe Verzerrung des Meshes möglich.

Bei weiteren Simulationsversuchen zur Orientierung des ebenen Dreiecks auf der Schalenfläche, müssen folgende Aspekte mit berücksichtigt werden:

- Durch die Elementierung der Fläche kann von planaren Grundelementen ausgegangen werden.
- Bei Verwendung ebener Elemente, ist die Gliederung in Dreiecke am effizientesten.
- Die Art der Elementierung beeinflusst den Umriss der Gesamtform.
- Durch die Formfindung über Hängemodelle resultieren bei Gleichlast rein auf Druck beanspruchte Schalenträgerwerke.
- Je feiner die Elementierung, desto größer ist die Annäherung an die Ausgangsform.
- Durch die Beeinflussung der Federparameter bzw. durch das Verrücken der Ankerpunkte nähert man sich einer regelmäßigen Parkettierung an.
- Bei der Verwendung völlig identischer ebener Elemente entstehen auf Grund der Flächenkrümmung Zwischenräume, welche als Fuge ausgebildet werden müssen.

3.3.2 ORIENTIERUNG IM PUNKTRASTER

Grundlage für die Elementorientierung im Raum, ist das gewonnene Mesh der Hängemodell-simulation. Es setzt sich aus den bereits im Polygonnetz definierten Massepunkten und den dazwischen liegenden Linien zusammen. Bei der Meshausgabe sind sowohl die Punkte, als auch die Linien mit einer fortlaufenden Nummerierung versehen. Über die Befehle `Flatten` oder `Graft` kann die Struktur der Nummerierungen verändert werden, welche im Hintergrund in so genannten List Items verpackt werden. Durch festgelegte Filterfunktionen können zum Beispiel bestimmte Punkte heraus sortiert oder Reihen erstellt werden. Auch das Dreieck selbst wird über drei Eckpunkte 0, 1 und 2 definiert. Es gibt nun mehrere Herangehensweisen, wie das Element im Polygonnetz orientiert werden kann.

Abb. 3.3.7 Darstellung der Punkt-nummerierung des Elements und des Meshes.

Unten: Visualisierung zur Punkt-nummerierung als List Item.

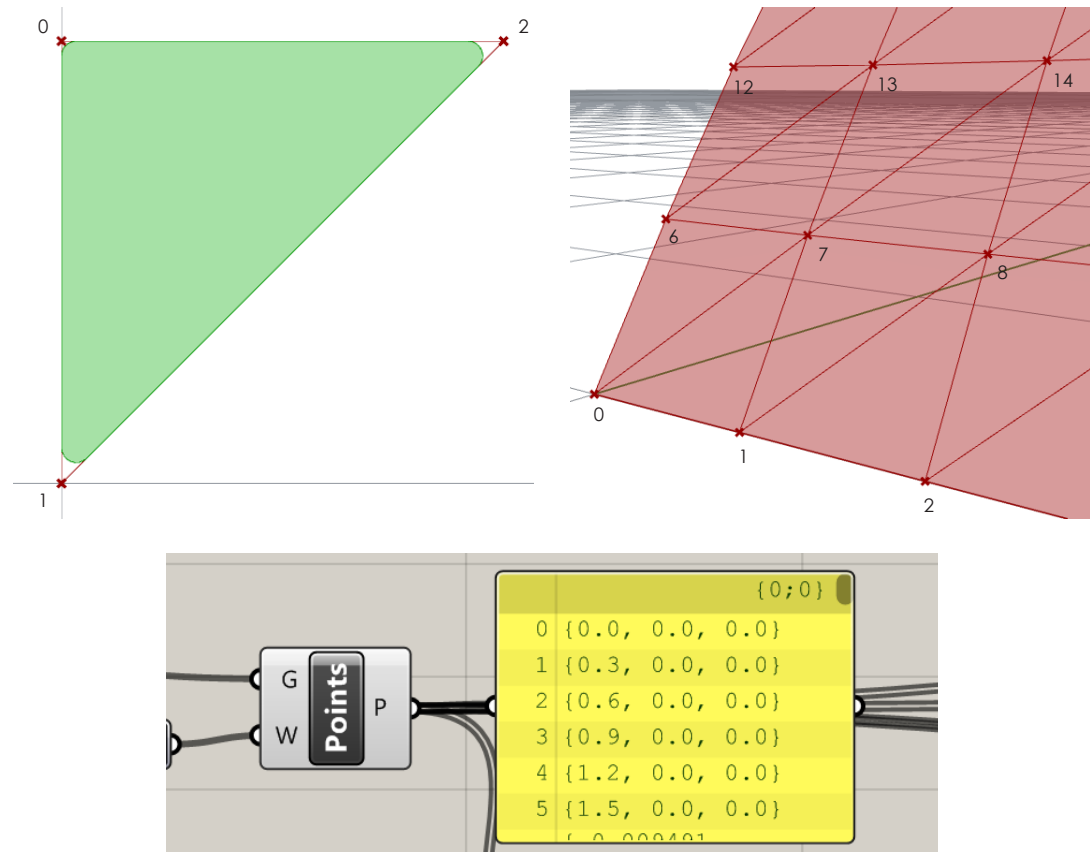


Abb. 3.3.7

3. ELEMENTIERUNG

ANORDNUNG ÜBER DEN INNKREISMITTELPUNKT

Um die Dreiecke möglichst regelmäßig auf der Schalenfläche anordnen zu können, muss eine Methode gefunden werden, wie sie sich bestmöglich im Punktraster platzieren lassen. Folglich muss ein zentraler Basispunkt eines jeden Dreiecks definiert werden, der auch bei geringen Verzerrungen des Dreiecks ähnlich positioniert ist. Für diesen Zweck bietet sich der Innkreismittelpunkt an, da er sich im Zentrum aller Dreiecke befindet und von allen drei Seiten gleich weit entfernt ist. Um den Innkreismittelpunkt zu erhalten, muss von mindestens zwei Seiten die Winkelsymmetrale konstruiert werden. Der Schnittpunkt bildet den Mittelpunkt des Inkreises. Da die geometrische Bestimmung des Innkreismittelpunktes IMP für alle Segmente der Konstruktion nicht effizient durchgeführt werden kann, wird dieser mittels Vektorrechnung mathematisch bestimmt.

$$\vec{\text{IMP}} = \frac{a\vec{A} + b\vec{B} + c\vec{C}}{a + b + c}$$

Abb. 3.3.8

Die Vektoren \vec{A} , \vec{B} und \vec{C} stellen die jeweiligen Koordinaten der Eckpunkte 0,1 und 2 dar. Die Seitenlängen a, b, c werden über den Betrag der Differenz der jeweiligen Eckpunkte ermittelt.

$$\begin{aligned} a &= |\vec{C} - \vec{B}| \\ b &= |\vec{C} - \vec{A}| \\ c &= |\vec{B} - \vec{A}| \end{aligned}$$

Abb. 3.3.9

Abb. 3.3.8 Formel für die Berechnung des Innkreismittelpunktes IMP.

Abb. 3.3.9 Formel für die Berechnung der Seitenlängen a, b und c .

Abb. 3.3.10 Funktionsweise des mathematischen Berechnungsverfahrens zur Ermittlung des Inkreismittelpunktes.

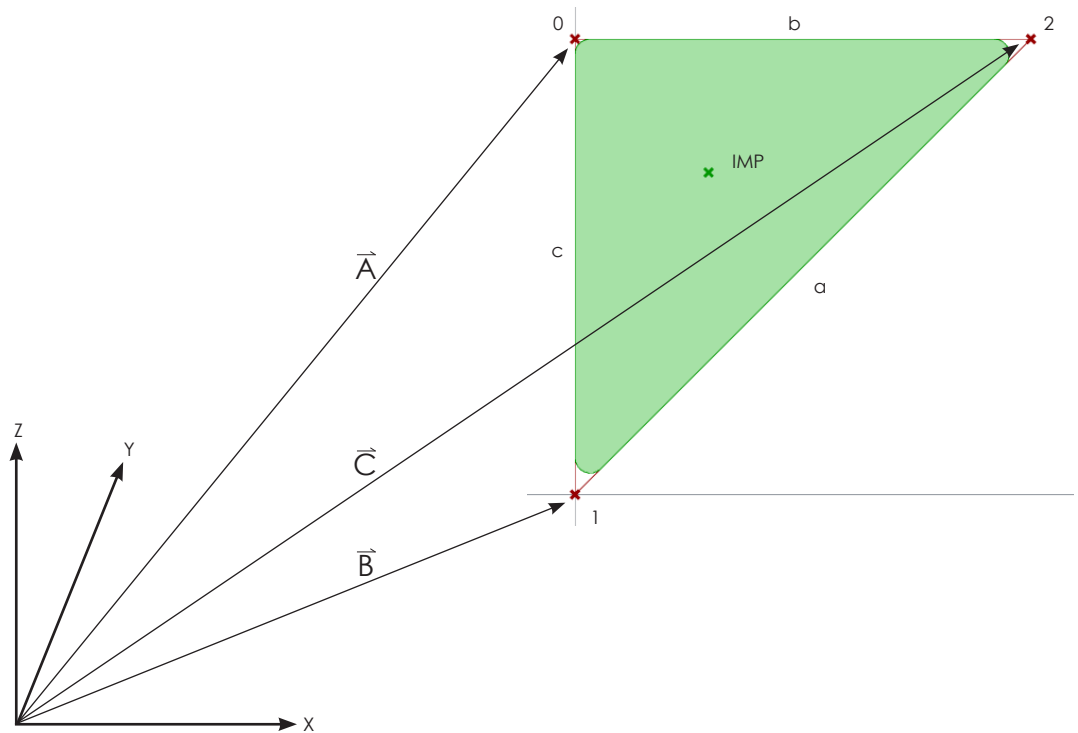


Abb. 3.3.10

Um die Dreiecke nun in den verzerrten Dreiecken des Meshes zu orientieren, muss eine übereinstimmende Punktnummerierung zwischen Dreieck und Polygonnetz getroffen werden. Da das Dreieck über die drei Eckpunkte 0, 1 und 2 definiert ist, müssen auch die Punkte des Polygonnetzes so umbenannt werden. Dies erfolgt, wie zuvor schon beschrieben, über bestimmte Filterbefehle. Als Ergebnis entsteht eine Vielzahl an Dreiecken mit der selben Nummerierung von 0 bis 2. Dadurch haben die einzelnen Punkte nun nicht mehr nur eine Nummernbezeichnung, sondern sind mehrfach belegt. Da im nächsten Schritt die jeweiligen Inkreismittelpunkte für die Orientierung benötigt werden, bekommen auch diese eine fortlaufende Nummerierung.

3. ELEMENTIERUNG

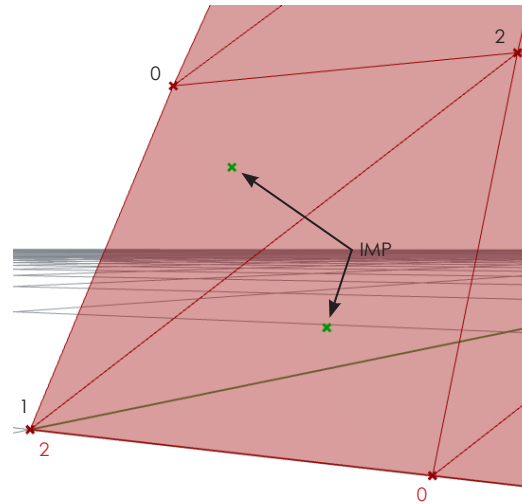
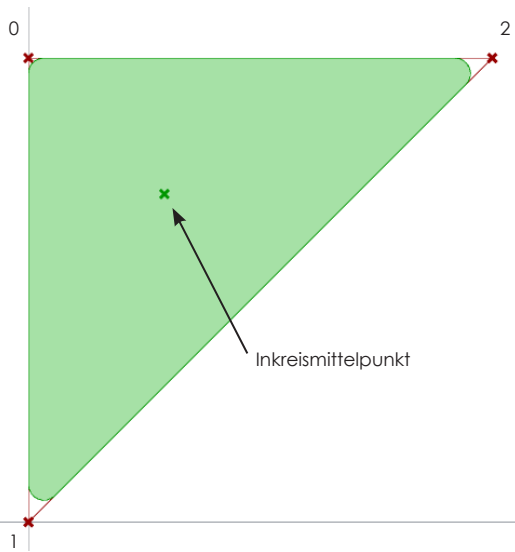


Abb. 3.3.11

Abb. 3.3.11 Visualisierung der übereinstimmenden Punktnummerierung und Darstellung der Inkreismittelpunkte.

Mit Hilfe des Grasshopperbefehls Orient können Geometrien über definierte Koordinatensysteme neu orientiert werden. Als Input für den Befehl dient als erstes die gewünschte Geometrie, in diesem Fall also die Fläche des Dreiecks. Über den zweiten und den dritten Input werden mittels Ebenen sowohl ein Ursprungs- als auch ein Ziel - Achssystem definiert, über welche die Orientierung stattfindet. Um das Element so zentral wie möglich in den Dreiecken des Polygonnetzes zu orientieren, wird als Ursprung der Achssysteme jeweils der Inkreismittelpunkt definiert. Das Achssystem der Ursprungsebene wird, ausgehend vom Inkreismittelpunkt, zwischen der virtuellen Linie (IMP - 0) und (IMP - 1) gebildet. Für die Zielebene werden die selben Punkte des Meshes verwendet. Bei der Orientierung ist auf die Wahl der passenden Eckpunkte zu achten, da das Verändern der Punkte unterschiedliche Ergebnisse erzielt.

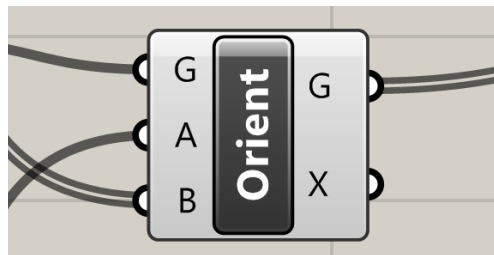


Abb. 3.3.12

Abb. 3.3.12 Orientierung der Elemente im Raum über die Ebene (IMP - 0) und (IMP - 1)

Abb. 3.3.13 Orientierung des Dreiecks im Raum über die Ebene (IMP - 0) und (IMP - 1)

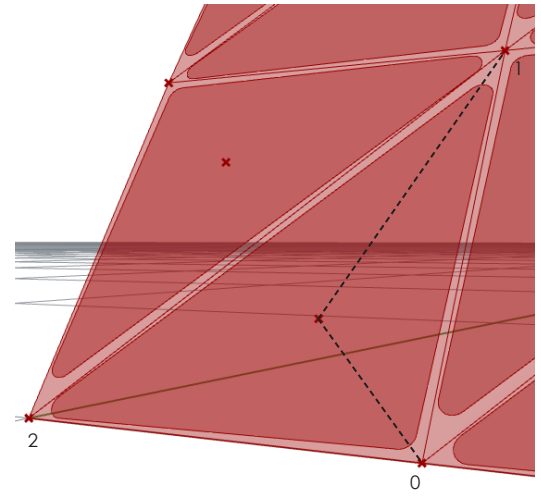
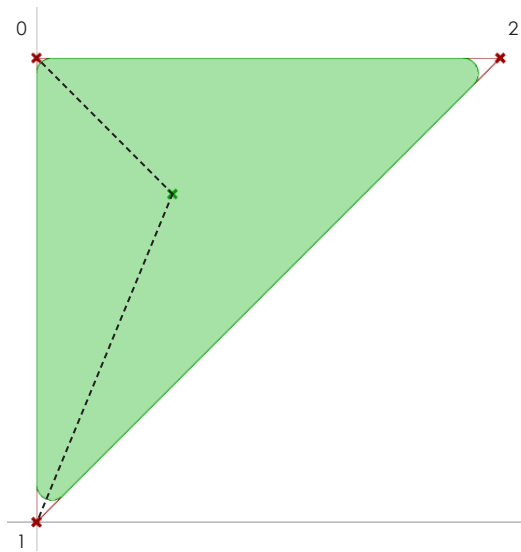


Abb. 3.3.13

3. ELEMENTIERUNG

Das Prinzip der Orientierung nochmals an Hand eines einfachen Bogenbeispiels:

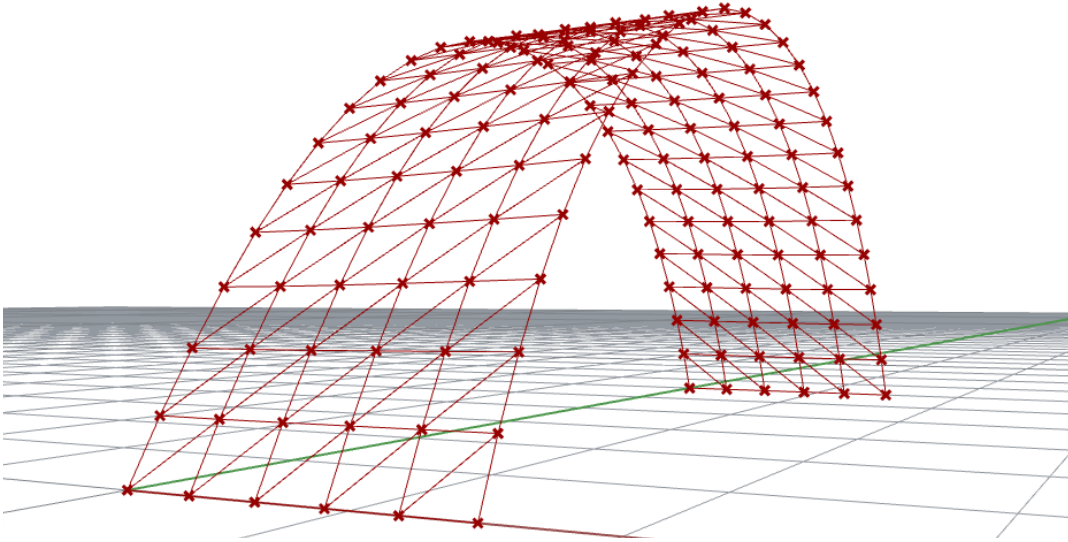


Abb. 3.3.14

Abb. 3.3.14 Darstellung des Hängemodells: Das Mesh besteht aus Punkte und Linien.

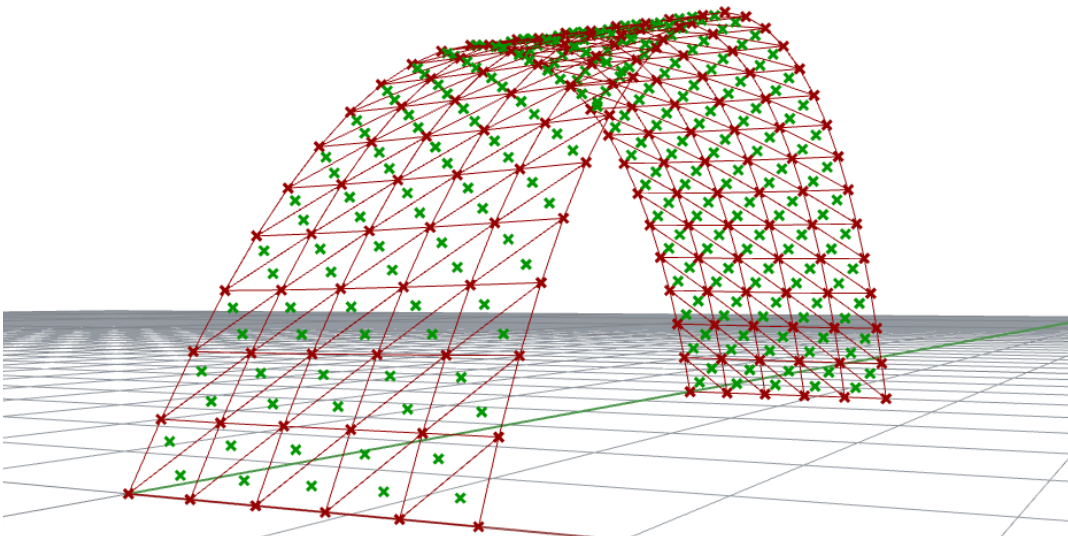


Abb. 3.3.15

Abb. 3.3.15 Ermittlung und Visualisierung der Inkreismittelpunkte.

Abb. 3.3.16 Ausrichtung der Elemente am Polygonnetz über den Befehl Orient.

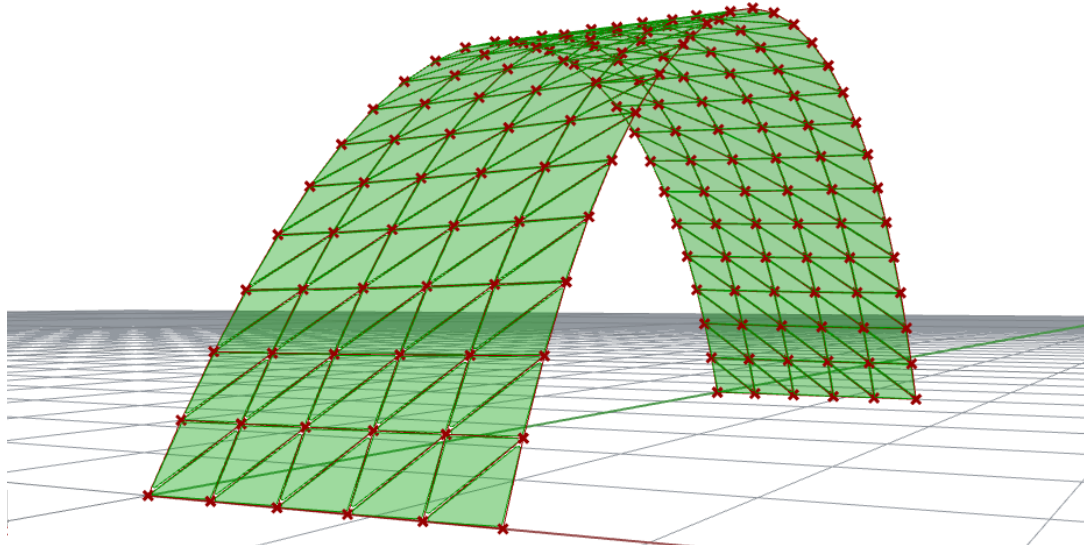


Abb. 3.3.16

Abb. 3.3.17 Darstellung einer 7 cm dicken Konstruktion. Die Extrusion der Elemente erfolgt entlang des Normalvektors. Zwischen den einzelnen Elementen bildet sich die Fuge aus.

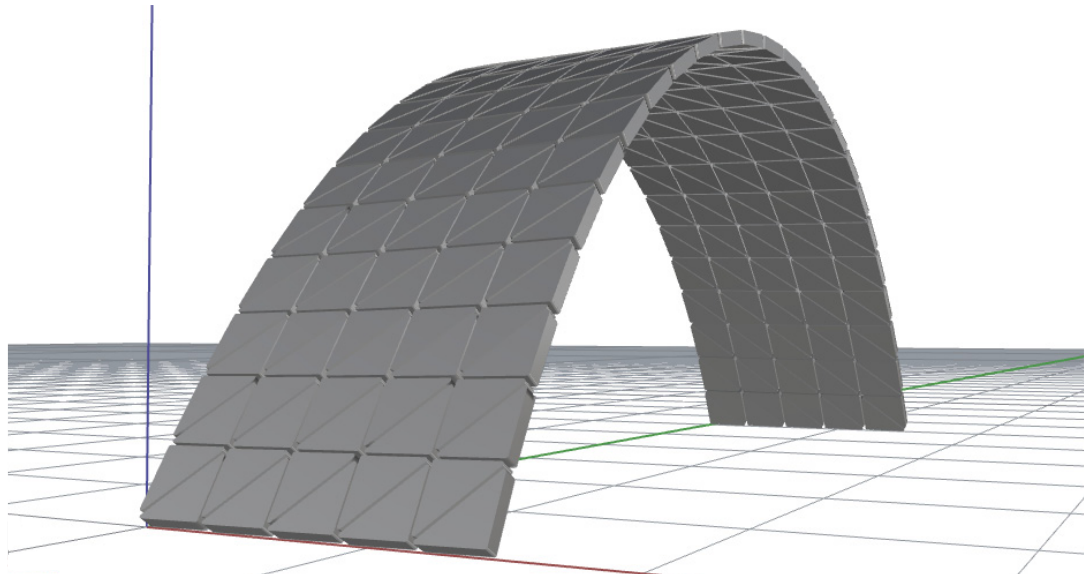


Abb. 3.3.17

3. ELEMENTIERUNG

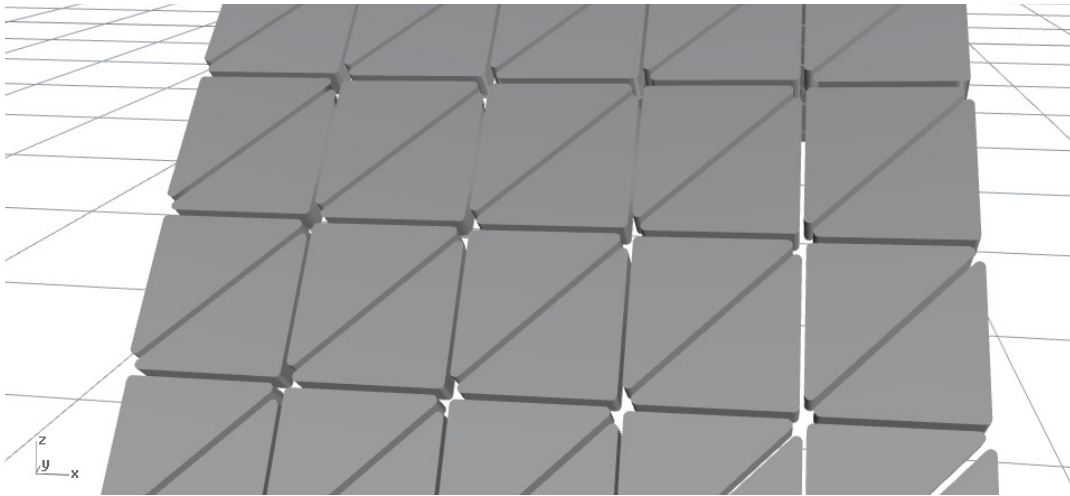


Abb. 3.3.18 Darstellung der 7 cm dicken 3D - Konstruktion.

Abb. 3.3.18

Wie in der Abbildung 3.3.18 zu erkennen ist, entstehen durch die abgerundeten Kanten der Glassteine an den Stellen, wo sich sechs Dreiecke treffen, so genannte Knotenpunkte. Diese vergrößerten Steinabstände bewirken eine massivere Fugenausbildung. Je nach Entwurfsabsicht und verwendeter Steinform tragen diese mehr oder weniger zum Gesamterscheinungsbild der Konstruktion bei.

Je nach Entwurf müssen speziell angefertigte Auflager für die Glassteine errichtet werden um diese optimal positionieren zu können. Bei Konstruktionen, deren Ränder nicht alle bis zum Boden geführt werden, müssen fugenseitige Randprofile angebracht werden, welche einen kontrollierten Abschluss der Konstruktion ermöglichen. Für deren Verkleidung können je nach Wunsch verschiedenste Materialien verwendet werden.

ANZIEHUNG ÜBER DIE ECKPUNKTE

Wurde das gewünschte Ergebnis nach der Anordnung der Dreiecke über den Befehl Orient auf der Schalenfläche noch nicht erreicht, gibt es weitere Möglichkeiten diese zu positionieren.

Sind die Dreiecke bereits, wie zuvor beschrieben in den Zieldreiecken positioniert, können sie zusätzlich über den Kangaroo Physics Befehl Power Low bearbeitet werden. Der Befehl erzeugt zwischen zwei Punkten eine bestimmte Kraft F , welche je abhängig von dem Parameter „Exponents“ eine Anziehung oder Abstoßung bewirken. Pro Dreieck sind folglich drei Kräfte in Form von Vektoren vorhanden, welche die Position der Dreiecke so lange ändern, bis sie sich in einem statischen Gleichgewicht befinden.

Vereinfacht gesagt, versuchen die jeweiligen Eckpunkte 0, 1 und 2 des Dreiecks, sich so nahe wie möglich an die selben Eckpunkte des Polygonnetzes anzunähern ohne ihre eigene Geometrie dabei zu verändern. Um ganz bestimmte Ergebnisse zu erzielen, kann darüber hinaus einzelnen Eckpunkten eine höhere Kraft zugeschrieben werden als anderen. Die Verwendung dieser Variablen ist jedoch individuell auf jedes einzelne Projekt abzustimmen und kann somit nicht verallgemeinert werden.

Abb. 3.3.19 Systemdarstellung eines frei gewählten Dreiecks. Die strichlierte Linie stellt die Anziehungskraft zwischen den Punkten dar.

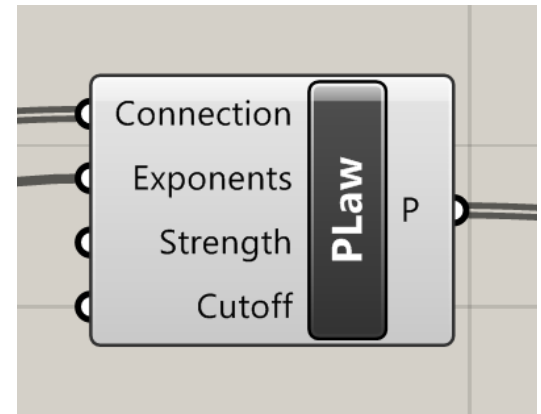
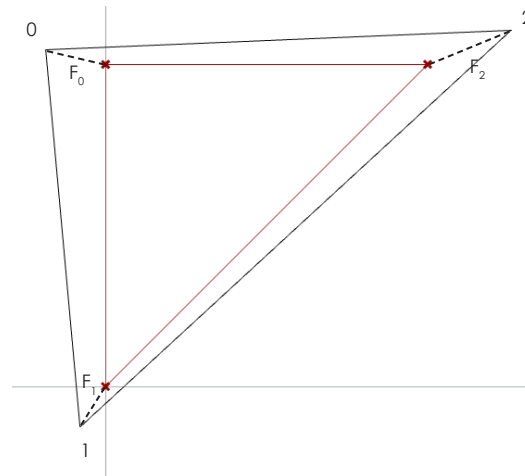


Abb. 3.3.19

Orientierung über Parallelität

Eine weitere Möglichkeit, die Dreiecke ideal auf der Schalenfläche zu positionieren, bietet der Kangaroo Physics Befehl Align. Mit Hilfe dieses Befehls können sich Elemente entlang zwei Linien orientieren, in dem sie versuchen sich so parallel wie möglich aus zu richten. Als Input des Befehls werden jeweils Anfangs- und Endpunkt der beiden Linien benötigt, welche sich möglichst parallel zueinander ausrichten sollen.

Für eine gleichmäßige Orientierung der Dreiecke ist es natürlich sinnvoll, alle drei Seiten mit ein zu schließen. Weiters kann über den Input „AlignStrength“ die Wichtigkeit der einzelnen Linien ausgewählt werden. So ist es zum Beispiel möglich, das Element entlang der Linie zwischen den Punkten 1 und 2 stärker aus zu richten als entlang den Punkten 0 und 1 oder 2 und 0. Wie bereits im Kapitel 2.3.2 Anziehung über die Eckpunkte erwähnt, muss auch hier die Verwendung dieser Funktion individuell auf das Projekt abgestimmt werden und kann ebenfalls nicht verallgemeinert werden. Um ein optimales Ergebnis erreichen zu können, ist die Orientierung auch aus einer Kombination der beiden Funktionen „Power Law“ und „Align“ möglich.

3. ELEMENTIERUNG

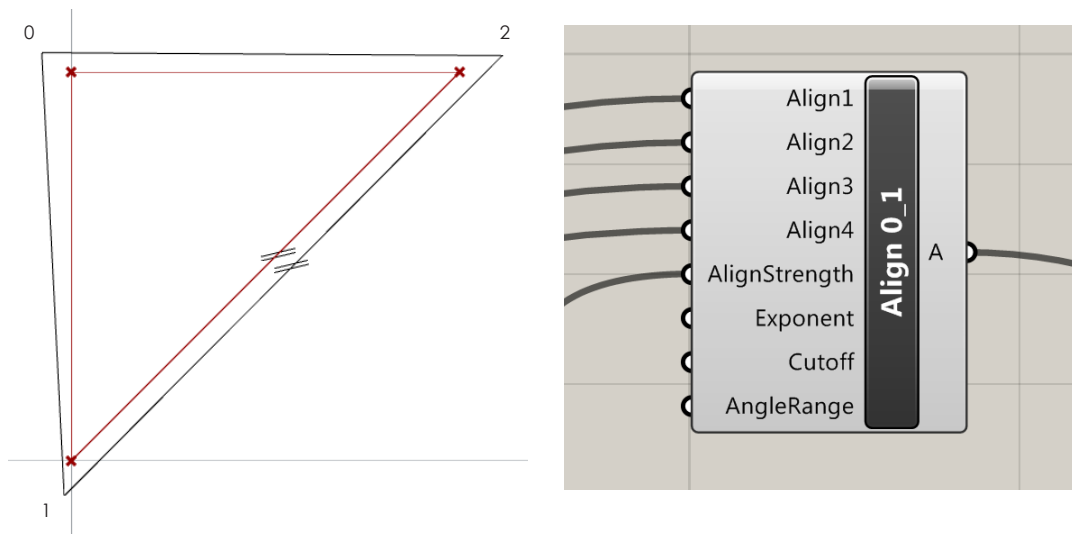


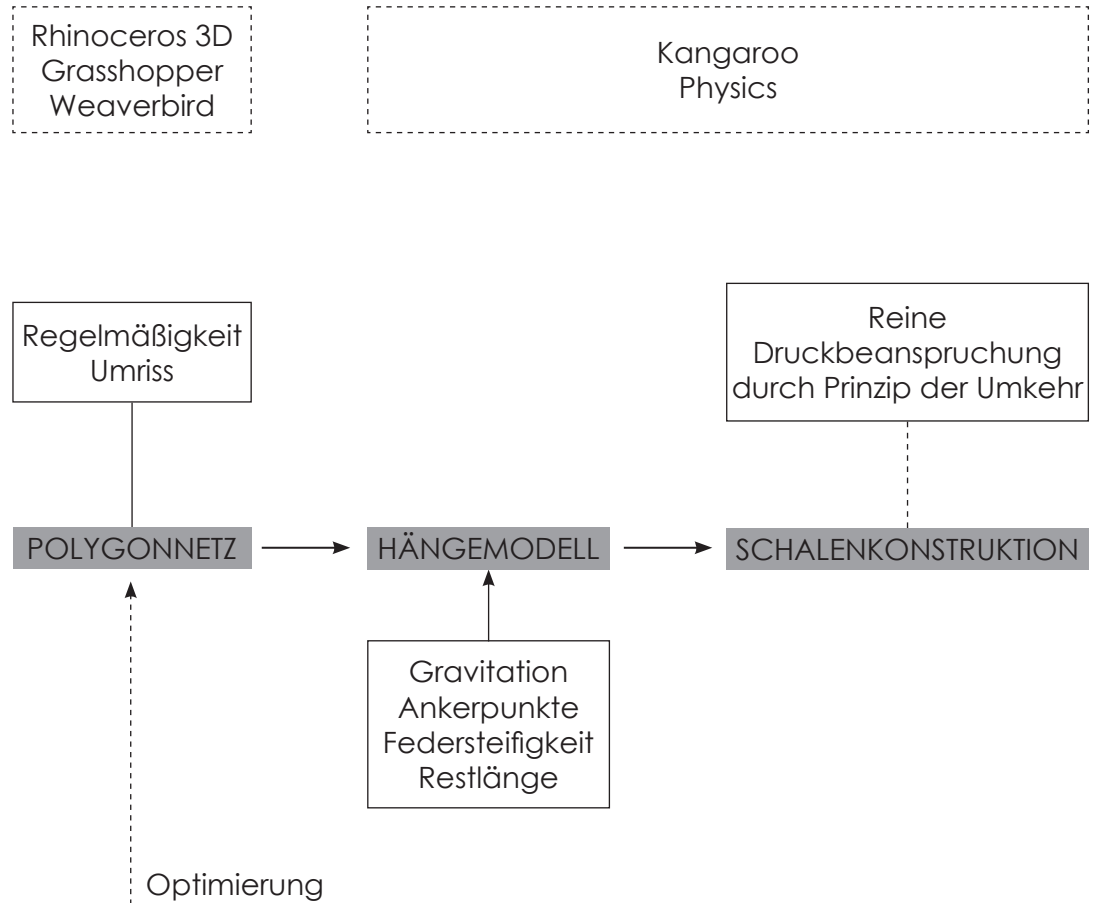
Abb. 3.3.20 Orientierung eines Dreiecks über den Kangaroo Physics Befehl Align mit besonderer Gewichtung auf die Linie zwischen den Punkten 1 und 2.

Abb. 3.3.20

Infolge einer derart flexiblen softwareunterstützten Planung während des gesamten Entwurfsprozesses, kann auf die unterschiedlichsten Einflussfaktoren bzgl. der Elementorientierung und der damit verbundenen Fugenbildung rasch reagiert werden. Da die Fuge das einzige opake Element der sonst völlig transparenten Glaskonstruktion ist, muss gezielt Einfluss auf deren Gestaltung genommen werden.

Ein weiterer Vorteil einer detaillierten digitalen Planung wird bei der Entwicklung und Planung der benötigten Schalung deutlich. Da sich die Oberfläche einer doppelt gekrümmten Schale nicht in eine ebene Fläche abwickeln lässt, ist eine digitale Ermittlung der Schalungsform unumgänglich.

Ist schlussendlich eine optimale Orientierung der Elemente auf der Schalenoberfläche gefunden, muss diese statisch überprüft werden. Wichtig ist dabei nicht nur eine Berechnung unter Gleichlast, sondern vor allem auch die Auslastung und Verformung bei Schnee- und Windlast. Basierend auf den resultierenden Ergebnissen kann das Tragwerk, beginnend bei der Polygonnetzbildung beziehungsweise der Hängemodellsimulation optimiert werden. Dazu folgendes Ablaufdiagramm.



3. ELEMENTIERUNG

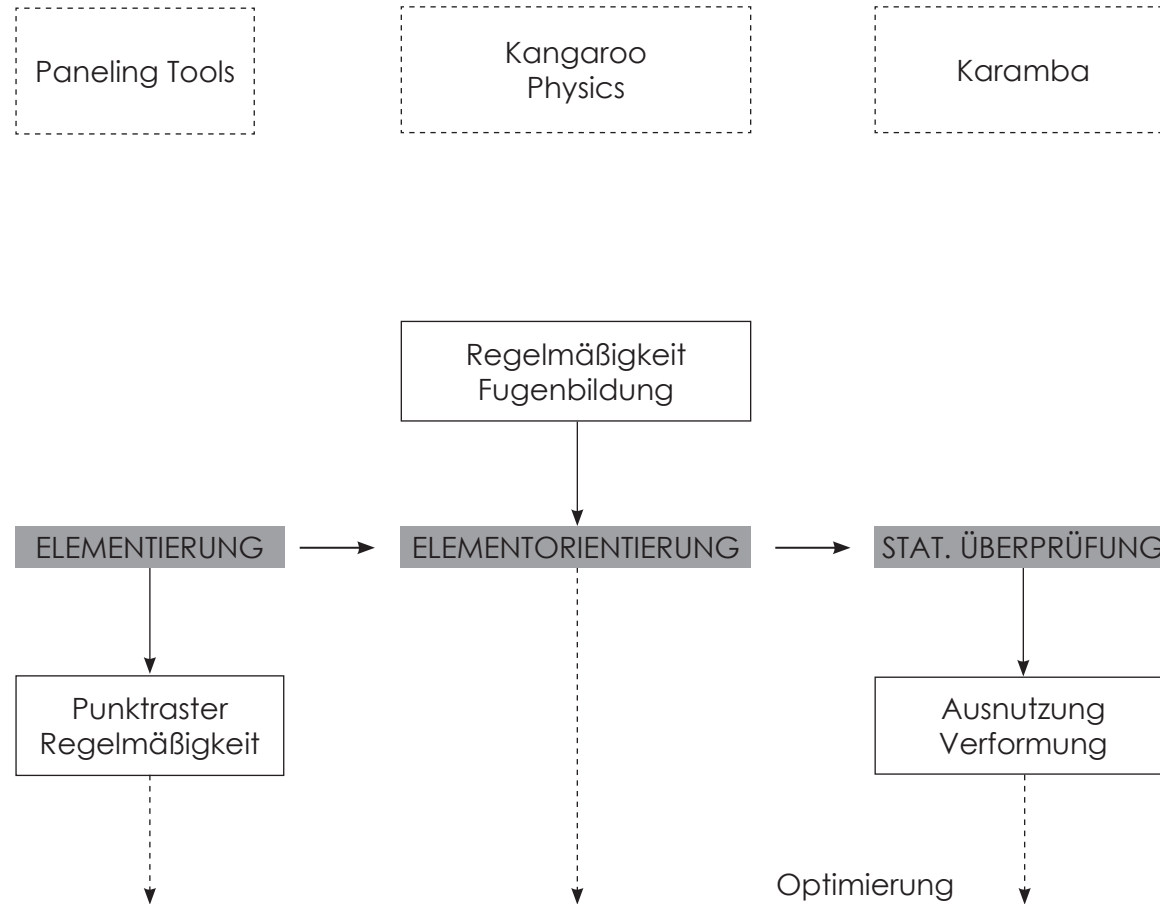


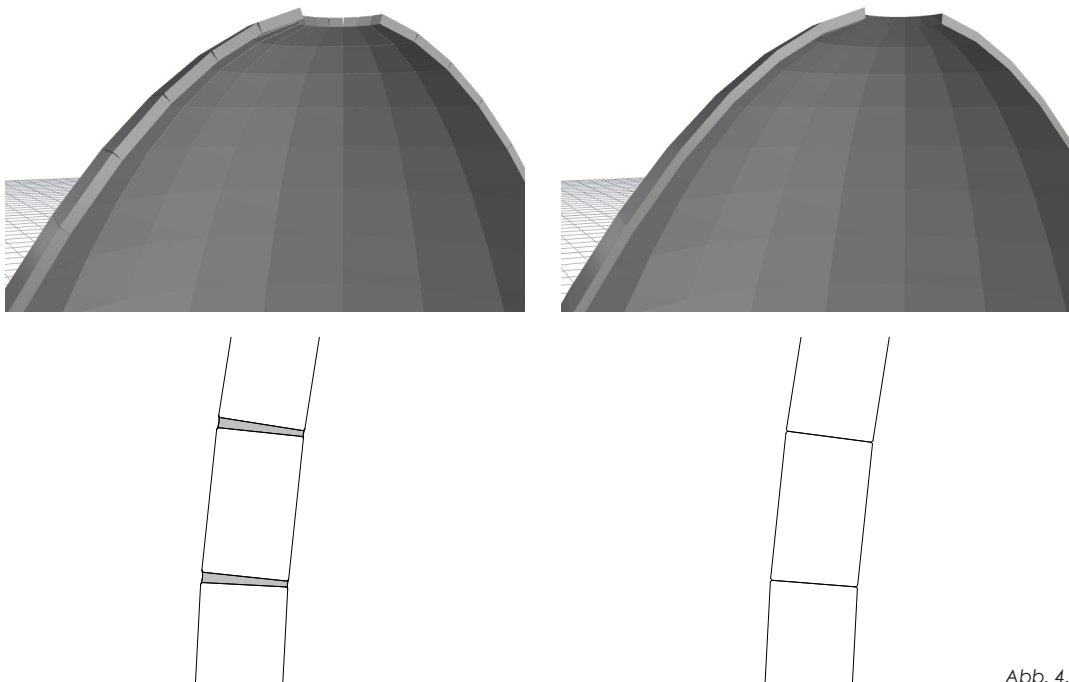
Abb. 3.3.21 Ablaufdiagramm zur Erzeugung von Schalen-geometrien als Grundlage zur Orientierung der Elemente.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

Die vorgenommenen Simulationen zur Elementierung einer Schalenfläche in ebene Segmente zeigen, dass es prinzipiell zwei verschiedene Lösungsansätze gibt. Entweder wird sie in unregelmäßige flächendeckende Elemente gegliedert, oder in gleichförmige Teile, welche in Abhängigkeit der Flächenkrümmung verschiedene Abstände zueinander aufweisen.

Bei der Verwendung des ersten Systems wird eine äußerst exakte Planung und Anfertigung der einzelnen Glassegmente vorausgesetzt, da jeder Stein die exakte Größe sowie die benötigten Winkel der Seitenflächen aufweisen muss. Da die Steine flächig verklebt werden, kann eine Fugenbildung umgangen werden. Die Herstellung des zweiten Systems ist weniger komplex, da die Steine gleichförmig sind und die Krümmung über die Fuge entsteht. Die Funktionsweise ist vergleichbar mit dem eines gemauerten Ziegelwerks. Wesentlich ist hier die regelmäßige Anordnung der Glassteine auf der Fläche, um ein einheitliches Fugenbild zu erhalten. Dieses beeinflusst das Erscheinungsbild der Gebäudehülle und soll somit so filigran wie möglich ausgeführt werden.

Zu Beginn der Elemententwicklung werden neben den Einflussfaktoren wie Elementgröße, Tragfähigkeit, Materialeigenschaften und Bauphysik auch die Vor- bzw. Nachteile beider Konstruktionssysteme analysiert. Zur Veranschaulichung der Möglichkeiten folgende Kuppeldarstellung:



Vgl. Kapitel 3.2.1 Herleitung der Elementform

Abb. 4.1 Kuppeldarstellung zur Veranschaulichung der Stoßflächen der einzelnen Elemente.

Unten links:
Durch die Krümmung der Fläche klaffen die Fugen nach außen hin auseinander.

Unten rechts:
Die Winkel der einzelnen Elemente sind perfekt aufeinander abgestimmt. Es entsteht dadurch kein Zwischenraum.

Abb. 4.1

4.1 EINFLUSSFAKTOREN

4.1.1 ELEMENTGRÖSSE

Für die Errichtung von tragenden, doppelt gekrümmten Gebäudehüllen aus Glas, wurde im Kapitel 3.2.1 Herleitung der Elementform das Dreieck als ideales Steinformat ermittelt. Ob es sich dabei um ein rechtwinkeliges oder gleichseitiges Dreiecke handelt, ist vom Entwurf der Gebäudehülle abhängig.

Abb. 4.1.1 Darstellung von dreieckigen Grundformen.

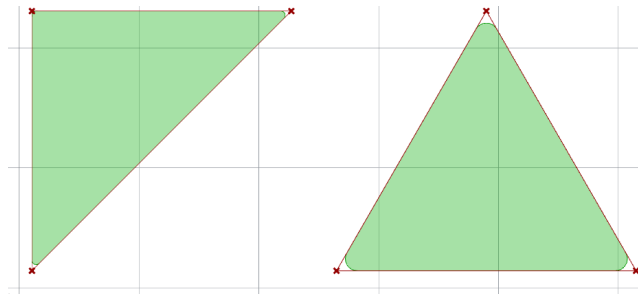


Abb. 4.1.1

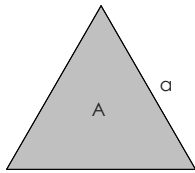
Um die ideale Größe der Glassteine bestimmen zu können, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Einerseits ist sie abhängig vom resultierenden Gesamtgewicht unter Berücksichtigung der benötigten Konstruktionsstärke beziehungsweise der gewünschten Handhabbarkeit am Bauplatz und andererseits gibt es auch bezüglich der Herstellung massiver Glassteine mittels dem Pressverfahren Grenzen der Machbarkeit.

Die während der Formgebung entstehenden Spannungen müssen durch kontrollierte Temperaturreduktion abgebaut werden, um Rissbildungen zu verhindern. Die Dauer dieser Abkühlungszeit ist abhängig von der Glasart sowie der Steingröße. Dabei gilt je größer das Steinvolumen, desto länger dauert der Abkühlungsprozess.

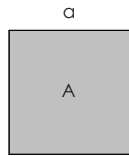
Ist eine Montage vor Ort ohne maschineller Hebeegeräte erwünscht, das heißt es soll eine manuelle Transportarbeit möglich sein, ist ein maximales Steingewicht von 25 kg einzuhalten. Wird die Handhabung der Steine jedoch durch Hebebühnen erleichtert, sind auch größere Formate denkbar.

Unterschiedliche Steingrößen haben neben den Auswirkungen auf die Herstellung und den Transport auch Einfluss auf die Fugenbildung. Durch die Verwendung kleiner Steinformate ist der Fugenanteil eher groß. Kommt jedoch ein größeres Format zum Einsatz, kann dieser Anteil folglich verringert werden. Um einen Vergleich von unterschiedlichen Steingeometrien mit gleichem Gewicht anstellen zu können, muss zuerst die für die Schale benötigte Konstruktionsstärke ermittelt werden. Diese variiert von Entwurf zu Entwurf und muss für jedes Projekt je nach Lastfall separat ermittelt werden. Bei gleichbleibender Grundfläche kann der sich ergebende Fugenanteil verglichen werden. Folgende Geometrien sind denkbar:

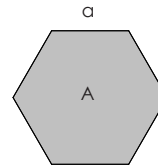
4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS



Seitenlänge $a = 25,0$ cm
Grundfläche $A = 270,63$ cm²



$a = 16,4$ cm
 $A = 268,96$ cm²



$a = 10,2$ cm
 $A = 270,30$ cm²

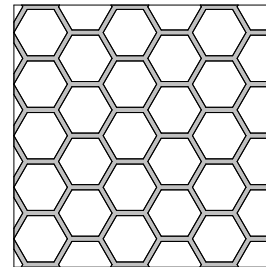
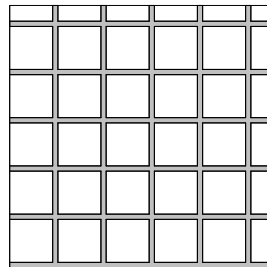
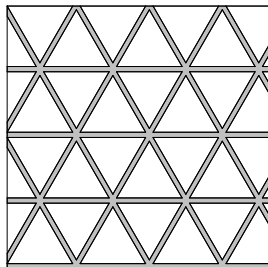


Abb. 4.1.2

Das Ergebnis zeigt, dass der Fugenanteil bei der Konstruktion aus Dreiecken bei 22% liegt, bei den Vierecken bei 21% und bei den Sechsecken bei 20%. Das Dreieck fügt sich von den drei Formaten bei der Anordnung auf doppelt gekrümmten Flächen am besten, wodurch schlankere Fugen möglich werden. Diese Tatsache wurde bei der Untersuchung vernachlässigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich folglich diese Unterschiede bei der Orientierung auf gekrümmten Flächen weitestgehend ausgleicht.

4.1.2 TRAGFÄHIGKEIT SOWIE BAUPHYSIKALISCHE ANFORDERUNGEN

Bei der Elemententwicklung des Glassteins muss auf zwei Dinge separat eingegangen werden. Einerseits muss eine Tragfähigkeit erreicht werden und andererseits sollen auch die bauphysikalischen Anforderungen einer Gebäudehülle wie Wärmedämmung und Sonnenschutz berücksichtigt werden.

Die Tragfähigkeit der Glassteine wird durch die Herstellung einer massiven Glasschicht aus Borosilikatglas erzeugt. Da der Baustoff Glas auf Druck sehr gut beanspruchbar ist, kann er den in der Schale wirkenden Druckkräften standhalten. Die Dimensionierung der Konstruktion ist dabei abhängig von der Schalengeometrie und der Größe. Wichtig ist eine flächendeckende Verfugung bzw. Verklebung, um die Lasten von Stein zu Stein gleichmäßig übertragen zu können. Es ist darauf zu achten, dass keine extremen Punktlasten auf die Steine einwirken, da sonst die Möglichkeit eines Bruches besteht.

Abb. 4.1.2 Darstellung verschiedener Steinformate mit annähernd gleicher Grundfläche und deren Auswirkungen auf das Fugenbild. Die Fugenbreite wurde fiktiv mit einer regelmäßigen Stärke von 2 cm angenommen.

Um den Innenraum gegen äußere Temperatureinwirkungen zu schützen, muss der Glasstein zusätzlich thermisch getrennt bzw. gedämmt werden. Dies erfolgt über eine separate Schicht auf der Außenseite.

Abb. 4.1.3 Grundriss- und Schnittdarstellung eines Glassteins mit dämmender Wirkung.

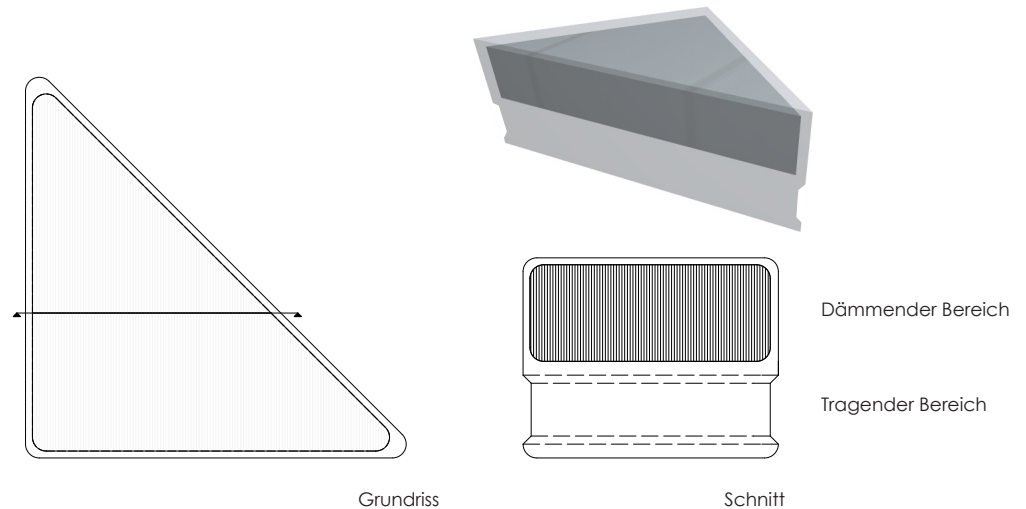


Abb. 4.1.3

Von Isolierverglasungen aus der Flachglasindustrie ist das Prinzip der Kammern als Dämmsystem bekannt. Durch die eingeschlossene Luft entsteht eine isolierende Wirkung, welche den Innenraum vor eindringender Kälte schützt. Durch dieses Art der Wärmedämmung bleibt die hoch transparente Wirkung des Glases erhalten und ermöglicht Blickbeziehungen vom Inneren des Gebäudes nach Außen und umgekehrt.

Abb. 4.1.4 Systemdarstellung der Luftkammern

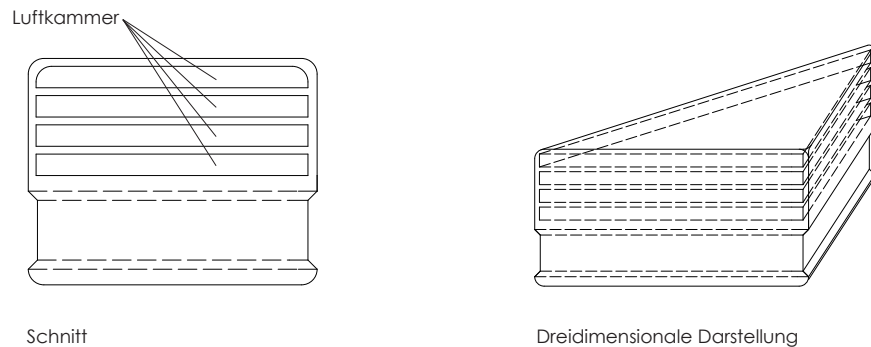


Abb. 4.1.4

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

Um den Innenraum im Sommer auch vor zu großer solarer Erwärmung zu schützen, ist bei großflächigen Verglasungen der Sonnenschutz ein wichtiges Thema. Aus diesem Grund ist es naheliegend, ein weiteres Dämmsystem zu entwickeln.

An Stelle der einzelnen Luftkammern wäre es sinnvoll, ein Dämmmaterial zu integrieren. Da bei der Verwendung der meisten Dämmstoffe jedoch keine natürliche Belichtung mehr möglich ist, scheint die transluzente Wärmedämmung der Firma Wacotech GmbH & Co. KG passend zu sein. Bei dem Produkt TIMax GL/S handelt es sich um sehr dünn gesponnene Glasfasern, welche mit einem lichtstabilen Binder versehen und zu einem sehr leichten und lichtdurchlässigen Glasgespinnst verwoben werden. Im Inneren entstehen wiederum Kammern, welche die eingeschlossene Luft vor Zirkulation bewahren. Das Glasgespinnst sorgt für eine gute Wärmedämmung und außerdem für eine blendfreie und gleichmäßige Verteilung des einfallenden Sonnenlichtes (Lichtdurchlässigkeit von 30-50 %). Im Sommer wird zusätzlich durch die gute Sonnenschutzwirkung der Wärmeeintrag durch den niedrigen g-Wert (Gesamtenergiedurchlasswert) reduziert.³⁵



³⁵ Vgl. http://wacotech.de/wacotech/?page_id=181

Abb. 4.1.5 Oben: Musterfoto für die transluzente Wärmedämmung TIMax GL/S der Firma Wacotech.

Unten: Zwei Anwendungsbeispiele der transluzenten Wärmedämmung.



Abb. 4.1.5

4.1.3 GLASEIGENSCHAFTEN

Für die Auswahl der passenden Glasart für die tragenden Glassteine bietet sich auf Grund dessen Eigenschaften die Verwendung von Borosilikatglas an. Verglichen mit Kalk - Natron - Silikatglas ergeben sich folgende Werte:

	Kalk - Natron - Silikatglas	Borosilikatglas
Dichte ρ	2,5 g/cm ³	2,2 g/cm ³
Elastizitätsmodul E	ca. 70 kN/mm ²	64 kN/mm ²
Quercontraktionszahl μ	0,22	0,2
Knoop`sche Härte	470 H/K _{0,1/20}	480 H/K _{0,1/20}
Wärmeleitfähigkeit	1,05 W/mK	1,2 W/mK
Thermischer Längenausdehnungs- koeffizient	$9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Biegezugfestigkeit σ	45 MPa	25 MPa
Theoretische Druckfestigkeit	700 - 900 N/mm ²	2000 N/mm ²

Abb. 4.1.6

Borosilikatglas besitzt durch den niedrigen Alkalienanteil eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Hitze und extreme Temperaturwechsel bei gleichzeitig hoher Transmission und mechanischer Festigkeit. Bei der Dimensionierung von Glasbauteilen müssen neben der theoretischen Festigkeit des Materials auch lokale Spannungsspitzen, verursacht durch Kerben in der Oberfläche, feine Risse oder Materialverunreinigungen, berücksichtigt werden.

Durch den geringen thermischen Längenausdehnungskoeffizient können Spannungen auf Grund von Temperaturveränderungen im Tragwerk reduziert werden. Borosilikatglas dehnt sich um 60% weniger aus als herkömmliches Fensterglas. Weiters besitzt es im Vergleich zu Kalk - Natron - Silikatglas ein niedriges spezifisches Gewicht, was eine Gewichtsreduktion der Gesamtkonstruktion ermöglicht. Borosilikatglas ist ein klares durchsichtiges Weißglas mit einem hohen Reinheitsgrad. Zusätzlich verfügt es über eine hohe Wasser-, Säure- und Laugenbeständigkeit. Wird das Glas nach benötigter Einsatzdauer abgebaut, kann es durch Stoffrecycling wieder verwendet werden.

Borosilikatgläser werden von den verschiedensten Firmen angeboten. Die Firma SCHOTT AG, welche auch die Glaskomponenten für das Mahnmahl in Madrid lieferte, führt zum Beispiel ein Produkt unter dem Namen BOROFLOAT®.³⁶ Preislich gesehen ist Borosilikatglas etwa fünf Mal so teuer wie Kalk - Natron - Silikatglas.

Abb. 4.1.6 Materialkennwerte von Kalk - Natron - Silikatglas und Borosilikatglas.

³⁶ Vgl. <http://www.schott.com/borofloat/german/attribute/optical/index.html?so=austria&lang=german>

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

4.2 GLASSTEINMODUL

Wie zu Beginn schon erwähnt wurde, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten für die Errichtung der Schalenkonstruktion. Einerseits kann sie durch unregelmäßige flächenschlüssige Glassteine errichtet werden, andererseits durch lauter gleichförmige Steine. Diese Möglichkeiten bringen unterschiedliche Vor- bzw. Nachteile mit sich:

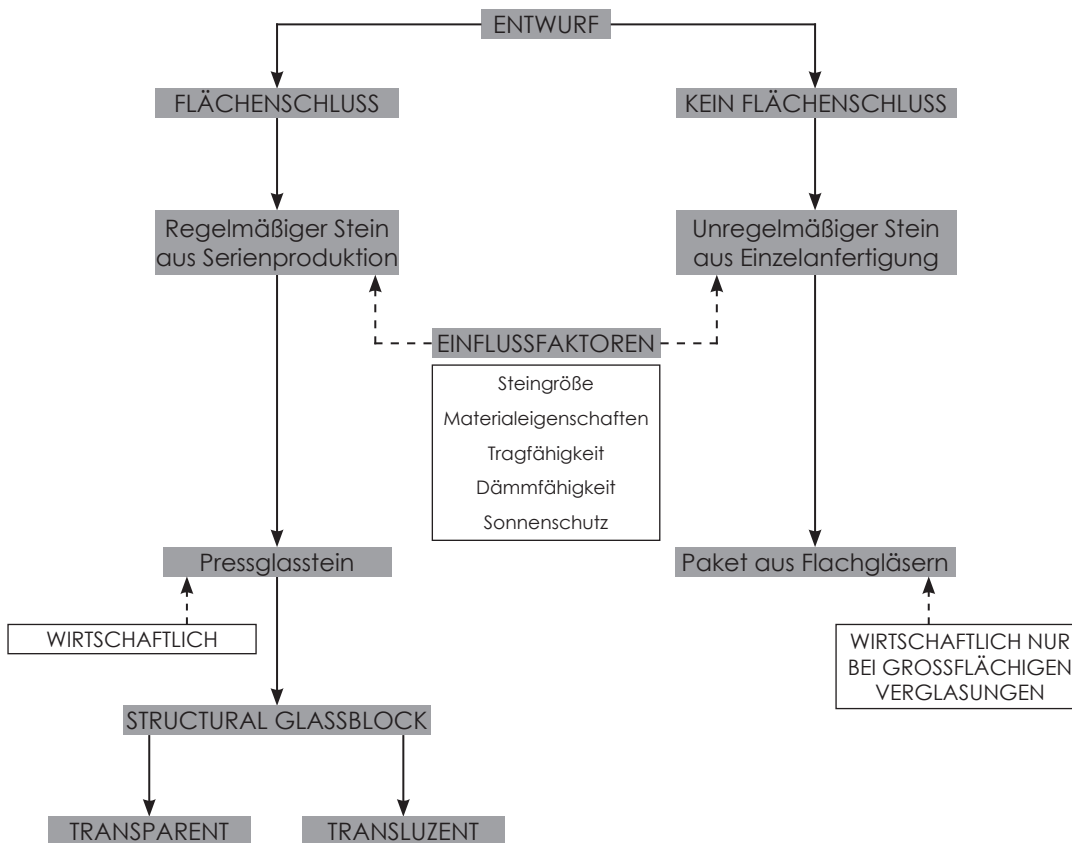


Abb. 4.2 Gegenüberstellung der zwei Konstruktionssysteme

Abb. 4.2

4.2.1 ELEMENT AUS EINZELANFERTIGUNG

Um eine Schale nahezu fugenlos herstellen zu können, muss eine sehr exakte Planung der gesamten Schalenskonstruktion vorausgesetzt werden. Da die Seitenflächen der Steine untereinander wie bei einem Puzzlespiel genau zueinander passen müssen, ist vor allem beim Herstellungsprozess auf eine hohe Genauigkeit zu achten.

Prinzipiell gibt es im konstruktiven Glasbau, anders als für Stahl- und Betonbau, keine einheitlichen Normen und Regeln, auf welche man sich stützen kann. Nach Recherche einschlägiger Literatur lässt sich jedoch eine Tendenz bzgl. konstruktivem Glasbau, in Form von VSG-Paketen bestehend aus TVG, ableiten. Diese benötigen prinzipiell eine Erteilung der Zustimmung im Einzelfall (ZIE) für nicht geregelte Bauarten. Dafür müssen experimentelle Nachweise vorgelegt werden, welche die Tragfähigkeit der Konstruktion beweisen. Verglasungen im Überkopfbereich sind meist nicht für Personenverkehr ausgelegt. Kurzfristig können sie in Einzelfällen jedoch zu Reinigungszwecken betreten werden.

Vgl. Kapitel 1.1.3 Verwendung im Fassadenbau, Seite 20 - 22.

Da der Glasstein sowohl tragende als auch dämmende Wirkung besitzen soll, könnte sich folgender Lösungsansatz für den Aufbau abzeichnen:

Auf der Innenseite des Elements befindet sich der tragende Kern aus einem Verbund sicherheitsglas - Paket, bestehend aus 12 mm dicken VSG - Scheiben. Bei der untersten Scheibe muss es sich laut TRLV (Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen) zwingend um eine VSG Scheibe handeln. Die dazwischen befindliche verschweißte PVB - Folie muss eine Mindestdicke von 0,76 mm aufweisen. Im Falle eines Bruches, hält diese die gebrochenen Glassplitter zusammen und verhindert sie vor dem Herabfallen. Dieses Verhalten von Glasbauteilen wird als Resttragfähigkeit bezeichnet.

Auf der Außenseite befindet sich, ähnlich wie bei Isolierverglasungen, eine über den Abstandhalter positionierte 4 mm dicke ESG - Scheibe. Der zwischen den Scheiben befindliche Hohlraum, welcher luftdicht verschlossen ist, dient der Wärmedämmung. Da die Luftzirkulation im Scheibenzwischenraum verhindert wird, schützt dies im Winter vorm Eindringen der Kälte. Da ESG im Falle eines Bruches in zahlreiche kleine und vor allem stumpfe Teilchen zerfällt, ist es für darunter befindliche Personen ungefährlich. Abgesehen von der Dämmeigenschaft schützt das ESG das VSG - Paket zusätzlich vor möglichem Bruch durch Stöße oder physische Kräfteinwirkungen.

Um die Glassteine auf Gehrung miteinander verkleben zu können, muss jedes einzelne Element speziell auf die Konstruktion zu geschneidert werden. Alle vier Seiten der Steine müssen dementsprechend die exakt benötigten Winkel der vorgegebenen Krümmung besitzen. Die Komplexität des Systems liegt darin, dass kein Stein einem anderen gleicht und somit jeder individuell angefertigt werden muss.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

Abgesehen von dem komplexen Herstellungsprozess, ergibt sich auf Grund der fix vorgegebenen Seitenwinkel auch ein Vorteil. Da die Schalenkonstruktion der Reihe nach aufgemauert wird, ohne dabei von der gewünschten Form abzukommen, kann auf eine Schalung verzichtet werden.

Bei der Verwendung dieses Systems ist es denkbar, keine dreieckigen Steine zu entwickeln, sondern rechteckige. Durch einen Knick über eine der beiden Diagonalen entstehen wiederum zwei Dreiecke. Basierend auf der Triangulierung der Fläche können die Vorteile bzgl. der Geometrie trotzdem genutzt werden. Weiters kann auf Grund des Zusammenschlusses zweier Dreiecke der Klebeanteil der Konstruktion reduziert werden.

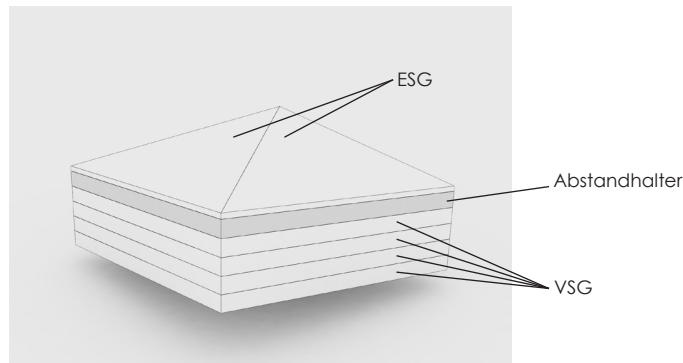


Abb. 4.2.1

Abb. 4.2.1 Illustration eines vier-eckigen Glassteins mit Knick über die Diagonale.

Der Herstellungsprozess der Glassteine erfolgt folgendermaßen:

Als erstes muss mittels des Floatglasverfahrens ein Basisglas hergestellt werden. Dieses wird vorerst nach dem Abkühlungsprozess in Standardgrößen abgeschnitten. Durch die softwareunterstützte Planung der Schalenkonstruktion, kann jeder einzelne Glasstein mit einer Nummer und einer exakten Position versehen werden. Dies dient nicht nur der Orientierung während der Produktion, sondern auch später beim Aufbau vor Ort. Zusätzlich können die genauen Größen sowie die benötigten Winkel der Seitenflächen einfach ermittelt werden. Diese Daten werden für den Zuschnitt der Scheiben sowie für die genaue Nachbearbeitung der Kanten benötigt. Bevor die Glasscheiben thermisch bearbeitet werden können, müssen alle Kantenbearbeitungen abgeschlossen sein. Ist dies der Fall, werden die Scheiben in luftdichte Pakete verpackt und in einem Autoglasfenster zu VSG verarbeitet. Gleichzeitig erfolgt durch eine vorgefertigte Unterkonstruktion auch die Knickbildung. Nach Beendigung dieses Prozesses kann mittels dem RAA - Verfahren sowohl der Silikonschaum - Abstandhalter als auch die Isolierverglasung am Glaspaket angebracht werden. Das RAA - Verfahren ist eine Roboter Assisted Application, bei dem die Herstellung von Isolierverglasungen durch den Einsatz von Robotern vollautomatisch stattfindet.

Für die Fixierung der einzelnen Elemente untereinander, gibt es verschiedene Lösungsansätze. Bei einer ersten Variante werden die Elemente rein über eine Silikonfuge kraftschlüssig miteinander verklebt. Lediglich an der Innenseite des Bauteils werden T - Profile angebracht, welche einen exakten Fugenabschluss ermöglichen.

Bei einer anderen Verbindungstechnik werden die Steine ebenfalls verklebt, jedoch kommt eine zusätzliche innenliegende Seilkonstruktion zum Einsatz, welche fix in das Glaspaket mit eingefoliet ist. Es handelt sich dabei um ein rechteckiges Metallstück, welches jeweils mit zwei Seilkanälen ausgestattet ist. Da die Konstruktion, bestehend aus rechteckigen Steinen, über zwei Hauptachsen definiert ist, kann für die eine Richtung der obere Kanal verwendet werden und für die andere der untere. Für die Herstellung der Steine bedeutet das zweite System zusätzlichen Aufwand, da die Seitenflächen der Metallstücke ebenfalls individuell nachbearbeitet werden müssen. In den folgenden Abbildungen wird sowohl der Aufbau, als auch beide Varianten zur Fixierung der Steine dargestellt.

Abb. 4.2.2 Schnittdarstellung einer kraftschlüssigen Silikonfuge; 4 TVG - Scheiben bilden im Verbund den tragenden Kern. Über den Abstandhalter wird die zusätzliche ESG - Scheibe positioniert.

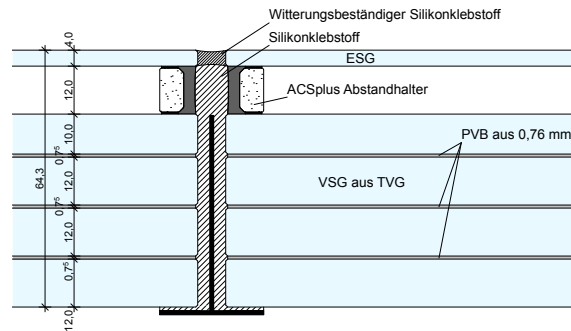


Abb. 4.2.2

Abb. 4.2.3 Systemdarstellung mit einem Winkel von 10°.

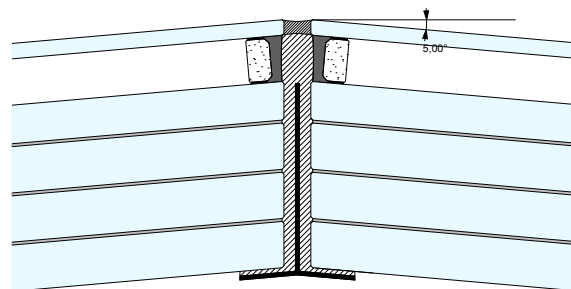


Abb. 4.2.3

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

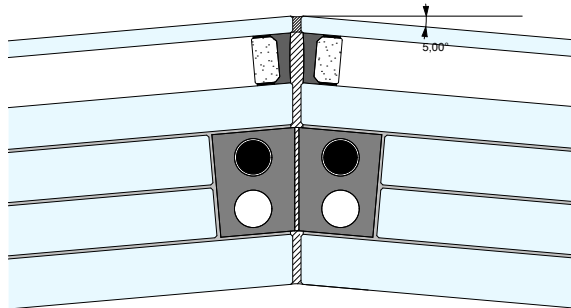


Abb. 4.2.4

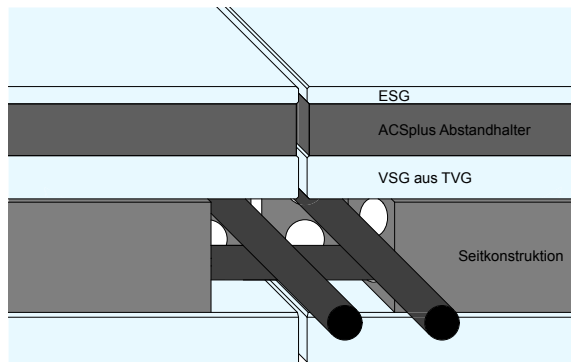


Abb. 4.2.5

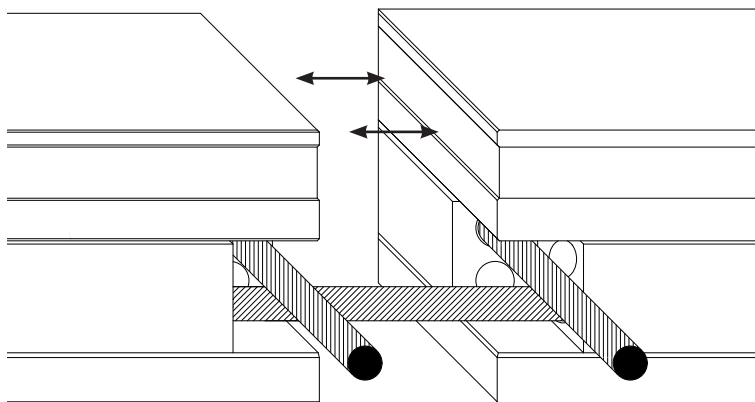


Abb. 4.2.6

Abb. 4.2.4 Systemdarstellung von geklebten Elementen mit innenliegendem Seilssystem.

Abb. 4.2.5 Detaildarstellung zur Funktionsweise der innenliegenden Seilkonstruktion.

Abb. 4.2.6 Detaildarstellung zur Funktionsweise der innenliegenden Seilkonstruktion in den Eckbereichen.

Soll auf der Baustelle eine gewünschte Handhabbarkeit der Glassteine möglich sein, muss ein maximal zulässiges Gewicht eingehalten werden. Um dieses bei der Verwendung derartiger Glaspakete nicht zu überschreiten, werden für Schalenkonstruktionen folglich sehr viele kleine Einzelsteine notwendig. Bei der Herstellung der Steine werden großformatige Floatglasscheiben in kleine Stücke geschnitten und deren Kanten anschließend, angesichts der doppelseitigen Krümmung der Konstruktion, aufwändig bearbeitet. Dieser Vorgang ist sehr kosten- und zeitintensiv, da jeder Stein individuell bearbeitet werden muss und ist somit als nicht effizient zu beurteilen. Der Transport der zahlreichen Einzelsteine zum Einsatzort ist wiederum in Hinblick auf deren Größe als sehr praktisch einzustufen.

Würde man in einem größeren Maßstab denken und Elemente erzeugen, die das Maximum an produzierbaren Glasscheibengrößen ausreizen, könnte sich die Anzahl der Teile um ein vielfaches verringern und dadurch Produktionskosten gespart werden. Neben der effizienten Herstellung wird jedoch der Transport und Aufbau wieder komplexer. Benötigt werden Spezialtransporter für übergroße Lieferungen sowie Kräne für die Montage auf der Baustelle.

Es stellt sich nun die Frage, ob man sich bei der Steinherstellung mittels Serienproduktion nicht auf den hoch technologisierten Entwicklungsstand der Flachglaserzeugung stützt, sondern sich stattdessen an dem Wissen über traditionell hergestelltem Pressglas bedienen soll. Da herkömmliche Glasbausteine jedoch keine statischen Aufgaben übernehmen und auch ihre Dämmfähigkeit aus heutiger Sicht nicht ausreichend ist, müssen Aspekte wie Tragfähigkeit, Materialeigenschaften, Größe sowie bauphysikalische Anforderungen einer Gebäudehülle in die Entwicklung mit einbezogen werden. Auch die Fuge, über welche bei dieser Art des Aufbaus die Krümmung der Schale erzeugt wird, muss separat entwickelt werden.

Für weitere Planungsschritte werden folgende Grundsätze definiert:

- Um eine Gebäudehülle aus ungleichförmigen Elementen errichten zu können, ist eine aufwändige und kostenintensive Einzelanfertigung der Glassteine nötig.
- Durch die Verwendung eines gleichförmigen Elements, dessen Seitenflächen nicht an die Krümmung der Schale angepasst sind, wird für den Aufbau der Konstruktion eine Schalung benötigt.
- Beim Einsatz gleicher Elemente entsteht in den Steinzwischenräumen eine Fuge, durch welche die Krümmung erzeugt wird.
- Durch den Gebrauch kleinteiliger Elemente wird ein unkomplizierter Transport zum Einsatzort möglich und der Aufbau per Hand durchführbar.
- Da die Krümmung über die Fuge entsteht und nicht über den Stein fix definiert ist, wird ein gewisses Maß an Kunsthandwerk der Arbeiter vorausgesetzt bzw. gefordert.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

4.2.2 ELEMENT AUS SERIENPRODUKTION

Basierend auf den zuvor erarbeiteten Erkenntnissen wird nun ein gleichförmiger Stein für selbsttragende Gebäudehüllen aus Glas entwickelt, unter der Berücksichtigung der funktionalen Anforderungen einer Fassade. Bei der Planung fließen sowohl die erworbenen Erkenntnisse der Referenzprojekte, als auch das erlangte Wissen über Geometrie, Glaseigenschaften, Glasverarbeitung und Bauphysik mit ein. Der Steinaufbau gliedert sich prinzipiell in zwei Bereiche, dem tragenden Teil auf der Gebäudeinnenseite und dem dämmenden Teil auf der Außenseite. Wie bereits im Kapitel 4.1.2 Tragfähigkeit sowie bauphysikalische Anforderungen beschrieben, werden zwei unterschiedliche Dämmsysteme ausgearbeitet. Aus dem einen resultiert ein völlig transparenter Glasstein, welcher Blickbeziehungen von innen nach außen ermöglicht, aus dem anderen ein transluzenter Glasstein mit integriertem Sonnenschutz. Der konstruktive Teil des Glassteins bleibt hingegen bei beiden Varianten gleich.

Da sich die Serienproduktion gegenüber der Einzelanfertigung als effizienter und kostengünstiger darstellt, werden die Glaskomponenten mittels eines Pressverfahrens hergestellt. Bereits seit Jahrzehnten werden herkömmliche Glasbausteine mit diesem Fertigungsverfahren produziert. Da diesen jedoch bislang keine konstruktive Bedeutung zugekommen ist, steigt nun die Komplexität der zur Fertigung notwendigen Pressformen. Dies muss während der gesamten Detaillierungsphase beachtet werden.

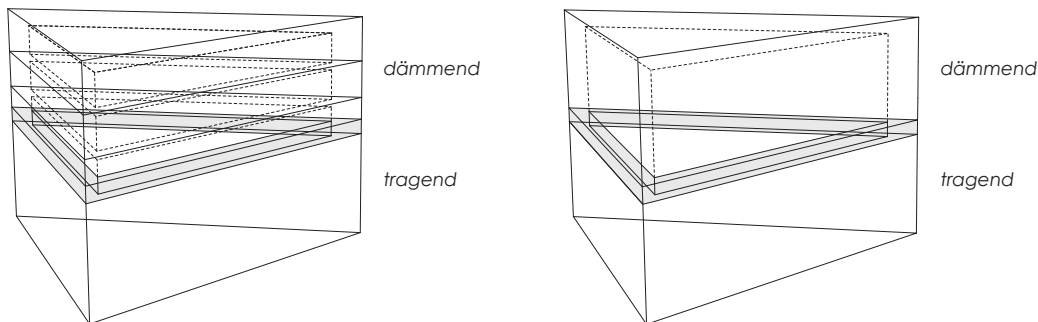


Abb. 4.2.7

Abb. 4.2.7 Darstellung beider Dämmsysteme.
Links: Transparente Variante
Rechts: Transluzente Variante

Für die Form des Glassteins wird ein gleichseitiges Dreieck mit einer Seitenlänge von 50 cm gewählt. Durch die Annahme, dass der tragende Glasteil über eine Materialstärke von 7 cm verfügt, kann durch die Ermittlung des Gewichts die Handhabbarkeit der Steine am Bauplatz garantiert werden. Das für den tragenden Glasstein verwendete Borosilikatglas ist auf Grund seines geringen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten und seiner geringen Dichte von $2,2 \text{ g/cm}^3$ besser geeignet als Kalk - Natron - Silikatglas. Weiters wird, basierend auf dem Reinheitsgrad, ein hohes Maß an Transparenz erzielt.

TRANSPARENTER GLASSTEIN

Abb. 4.2.8 Grundriss- und Schnittdarstellung des Glassteins

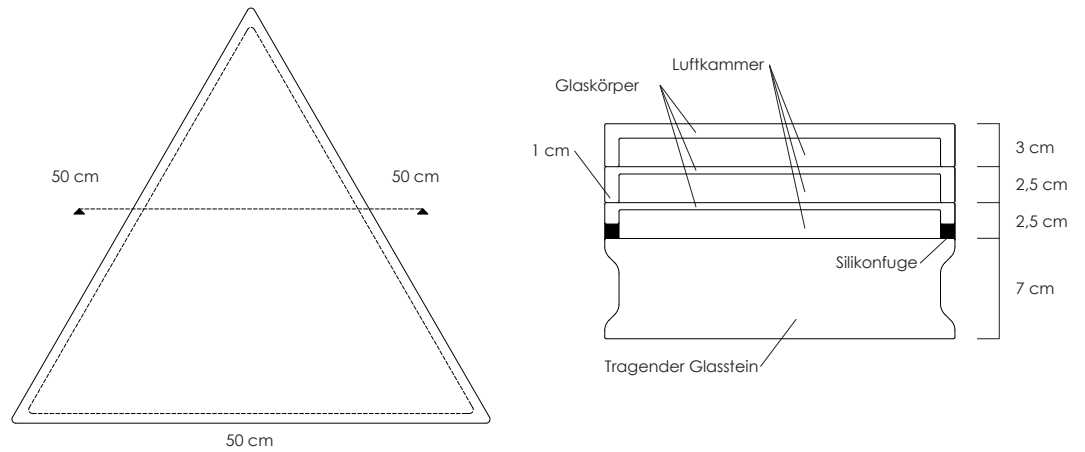


Abb. 4.2.8

Abb. 4.2.9 3D Darstellung erstellt in Rhinoceros 3D.

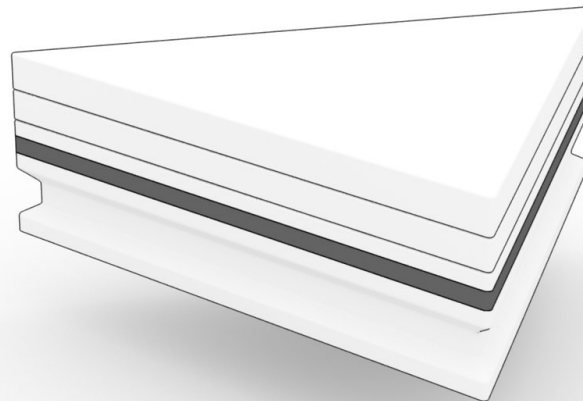


Abb. 4.2.9

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

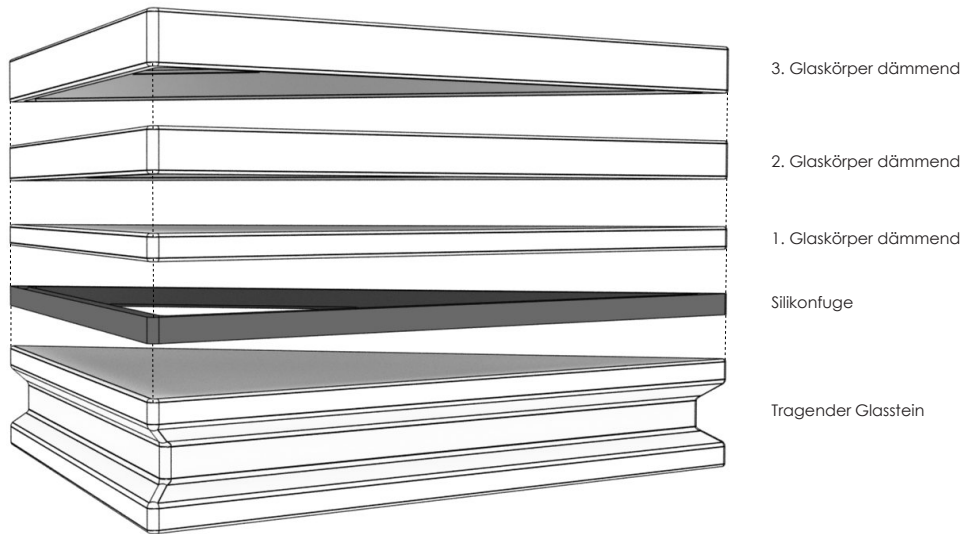


Abb. 4.2.10 Aufbau der verschiedenen Steinkomponenten.

Abb. 4.2.10

Der transparente Glasstein besteht aus insgesamt vier Glaskomponenten, wobei eine dem tragenden Teil angehört und drei dem dämmenden Teil. Allgemein ist bei der Entwicklung darauf zu achten, dass scharfkantige Ränder vermieden werden, um unnötige Spannungen im Stein zu verhindern. Folglich werden alle Kanten abgerundet hergestellt. Der massive tragende Glasstein hat eine Seitenlänge von 50 cm und eine Konstruktionshöhe von 7 cm. An der Fugenseite verjüngt er sich zur Mitte hin gering, um sich besser mit dem Mauermörtel verzahnen zu können. Es entsteht eine formschlüssige Verbindung zwischen Glasstein und Fuge, wodurch ein Ausbrechen nach Innen oder Außen verhindert wird.

Die drei Glaskörper des dämmenden Teils haben die gleiche Grundfläche wie der tragende Glasstein und insgesamt ebenfalls eine Höhe von 7 cm. Sie sind jedoch nicht massiv, sondern verfügen über einen Hohlraum. Durch das zusammenfügen aller Glaskörper entsteht jeweils eine 2 cm dicke, mit verdünnter Luft gefüllte Kammer. Auf Grund der geringen Abstände wird die Zirkulation der Luft verhindert und folglich die Dämmeigenschaft verbessert. Die Stärke der seitlichen Glasstege beträgt jeweils 1 cm, die der Deckplatten zwischen 0,5 und 1 cm. Bei den beiden innen liegenden Glaskörpern ist eine Dicke von 0,5 cm ausreichend, um jedoch die Gefahr vor Brüchen durch physische Krafteinwirkungen von außen zu reduzieren, ist die äußerste Deckplatte doppelt so stark ausgeführt. Um den Glaszwischenraum konstant zu halten, müssen die Längen der seitlichen Glasstege, abhängig von der Glasplattenstärke sowie der Verbindungstechnik, angepasst werden.

Abb. 4.2.11 Darstellung der unterschiedlichen Größen der dämmenden Glaskörper, bestehend aus Glasplatte und Glassteg.

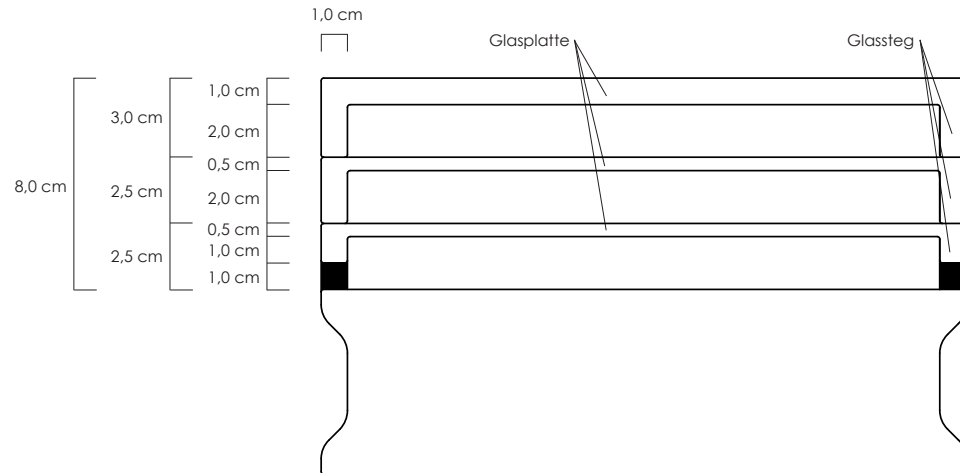


Abb. 4.2.11

Um den Energieverlust beziehungsweise die Wärmedämmfähigkeit der Gebäudehülle abzuschätzen und den Glaserstein mit konventionellen Verglasungen vergleichen zu können, wird der U-Wert berechnet. Er gibt an, wie viel Wärme durch eine bestimmte Bauteilfläche von innen nach außen verloren geht. Dabei gilt, je höher der Wert eines Bauteils ist, umso schlechter ist seine Wärmedämmung. Für die Ermittlung des U_w -Werts wird der Glaserstein in 2 Zonen geteilt, in den Glasbereich und den Rahmenbereich. Die jeweiligen Bereiche werden dabei prozentuell auf die Fläche bezogen gerechnet. Nach der OIB Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz müssen Fenster und Fenstertüren in Wohngebäuden einen U_w -Wert von 1,4 W/m²K erreichen und in Nicht-Wohngebäuden 1,7 W/m²K einhalten.

Bei der folgenden Berechnung wird erstmals nur der Glaserstein berechnet. Um einen Wert für die gesamte Fassadenfläche FF zu erhalten muss in einem weiteren Schritt die Fuge F mit berücksichtigt werden.

Abb. 4.2.12 Berechnungsschema für den U_w -Wert.

$$U_w \text{- Wert} = \frac{U_f \cdot A_f + U_g \cdot A_g}{A_w}$$

Abb. 4.2.12 Berechnungsschema für den U_{FF} -Wert.

$$U_w \text{- Wert} = \frac{1,56 \cdot 0,0144 + 0,38 \cdot 0,04372}{0,1082} = 0,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{FF} \text{- Wert} = \frac{U_w \cdot A_{w/m^2} + U_f \cdot A_{f/m^2}}{A_{FF}}$$

$$U_{FF} \text{- Wert} = \frac{0,54 \cdot 8790,2 + 0,47 \cdot 1209,2}{10000} = 0,53 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Abb. 4.2.12

Abb. 4.2.13

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

TRANSLUZENTER GLASSTEIN

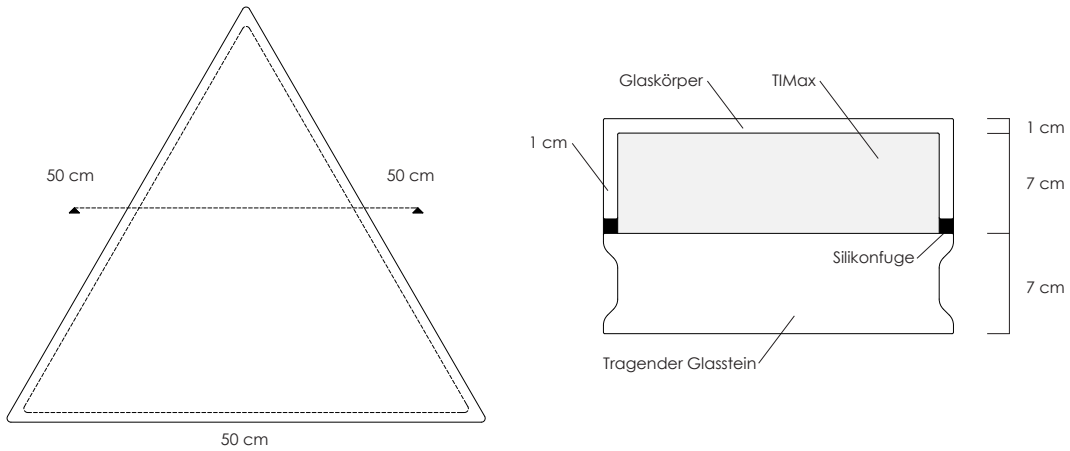


Abb. 4.2.14

Abb. 4.2.14 Grundriss- und Schnittdarstellung des Glassteins



Abb. 4.2.15

Abb. 4.2.15 3D Darstellung erstellt in Rhinoceros 3D.

Abb. 4.2.16 Darstellung der verschiedenen Glaskomponenten sowie der transluzenten Wärmedämmung.

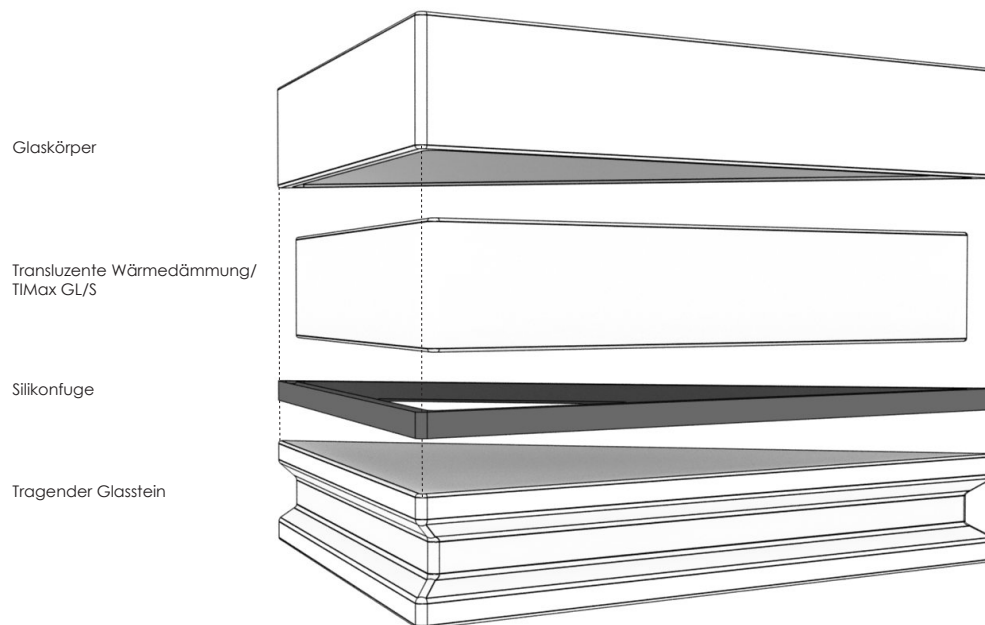


Abb. 4.2.16

Der transluzente Glasstein besteht aus zwei Glaskomponenten. Zum einen aus dem bereits zuvor beschriebenen tragenden Stein und zum anderen aus einem hohlen Glaskörper, welcher als Schutz und zur Abdichtung der transluzenten Wärmedämmung dient.

Der Glaskörper des dämmenden Teils hat ebenfalls die gleiche Grundfläche wie der tragende Glasstein und eine Höhe von 7 cm. Sowohl der Glassteg als auch die Glasplatte haben eine Stärke von 1 cm. Beide Glashälften werden über eine 1 cm dicke Silikonfuge verklebt. Dadurch wird der Hohlraum abgedichtet und in Verbindung mit der transluzenten Wärmedämmung entsteht eine gute Wärmedämmeigenschaft. Da sich im Inneren viele kleine Kammern bilden, wird die eingeschlossene Luft vor Zirkulation bewahrt und die Wärmeleitung verschlechtert. Bei dem Produkt TIMax GL/S handelt es sich um ein sehr dünn gesponnenes Glasgespinnst, welches neben der dämmenden Eigenschaft auch einen Schutz vor direktem einfallendem Sonnenlicht bietet. Die Lichtdurchlässigkeit beträgt zwischen 30 und 50% wodurch im Sommer der Wärmeeintrag durch den niedrigen g-Wert (Gesamtenergiedurchlasswert) reduziert wird.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

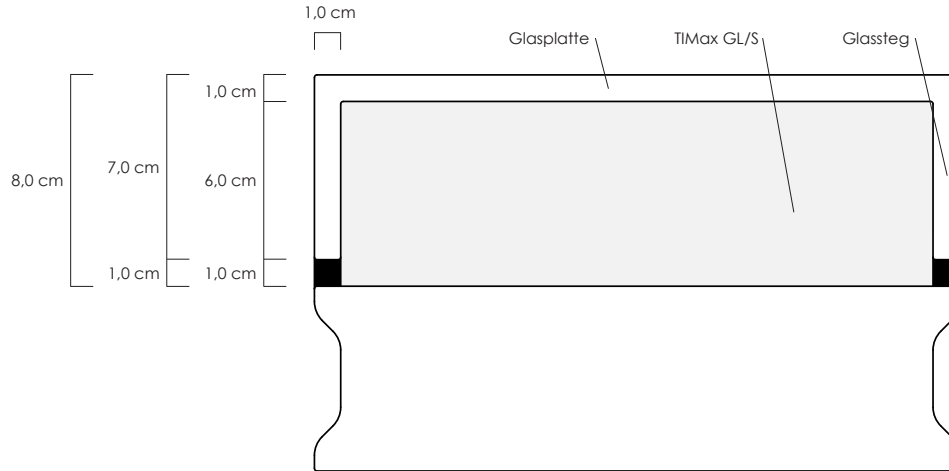


Abb. 4.2.17

Wie bereits für den transparenten Glasstein, wird nun auch der U- Wert für den transluzenten Glasstein berechnet. Es herrschen dabei die selben Bedingungen wie zuvor.

$$U_w \text{- Wert} = \frac{U_f \cdot A_f + U_g \cdot A_g}{A_w}$$

$$U_w \text{- Wert} = \frac{1,56 \cdot 0,0144 + 0,90 \cdot 0,04372}{0,1082} = 0,57 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Abb. 4.2.18

$$U_{FF} \text{- Wert} = \frac{U_w \cdot A_{w/m^2} + U_F \cdot A_{F/m^2}}{A_{FF}}$$

$$U_{FF} \text{- Wert} = \frac{0,57 \cdot 8790,2 + 0,9 \cdot 1209,2}{10000} = 0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Abb. 4.2.19

Der U-Wert des transluzenten Glassteins ist mit 0,57 W/m²K minimal schlechter als der Wert des transparenten Glassteins mit 0,54 W/m²K. Beide Ergebnisse sind laut OIB Richtlinie 6 sowohl für Wohnbauten, als auch für andere Nutzungsarten zulässig. Es ist zu erwähnen, dass zwar der transparente Glasstein im Vergleich zum transluzenten über eine etwas bessere Dämmeigenschaft verfügt, jedoch keinen Sonnenschutz bietet. Eine Kombination der beiden Steine, orientiert an den Himmelsrichtungen, ermöglicht einen guten Grundstein für die Planung einer effizienten tragenden Gebäudehülle aus Glas.

Abb. 4.2.17 Darstellung der Größenverhältnisse zwischen dem dämmenden Glaskörper und dem Dämmstoff TIMax GL/S.

Abb. 4.2.18 Berechnungsschema für den U_w- Wert.

Abb. 4.2.19 Berechnungsschema für den U_{FF}- Wert.

4.3 FERTIGUNG

Wie bereits erwähnt, werden die Glaskomponenten mittels eines Pressverfahrens hergestellt. Dementsprechend wird für jede Glaskomponente eine speziell angefertigte Pressform benötigt.

Der Produktionsablauf der Steine sieht folgendermaßen aus:

Das flüssige Glasgemenge, dessen Gewicht exakt berechnet ist, tropft von oben in die aus Metall gefertigte Negativform. Von oben wird ein Druckkörper in die Glasmasse gepresst und bringt diese in die gewünschte Form. Für die Herstellung des massiven Glassteins muss auf Grund der fugenseitigen Verjüngung eine Seitenwand der Negativform abnehmbar sein, um ihn nach dem Erstarren entformen zu können. Die dämmenden Glaskörper können einfach von oben aus der Form genommen werden. Während der Herstellung der Steine entstehen bei der Formgebung mechanische Spannungen als Folge von Dehnungsunterschieden der verschiedenen Glasbestandteile. Nach Vollendung der Formgebung müssen diese Spannungen durch einen kontrollierten thermischen Abkühlungsprozess ausgeglichen werden. Je nach Glasart und Glasstärke müssen die einzelnen Komponenten bis zu 24 Stunden lang von 480 °C auf 420 °C abgekühlt werden. Erfolgt die Abkühlung zu rasch, kommt es zu unerwünschten Sprüngen und Rissbildungen.

Die Fertigung des massiven Glassteins sieht für beide Steinvarianten gleich aus, lediglich der dämmende Teil variiert:

Abb. 4.3.1 Darstellung der Pressform zur Herstellung des tragenden Glassteins. Durch das Abnehmen einer Seitenwand kann der Stein entnommen werden.

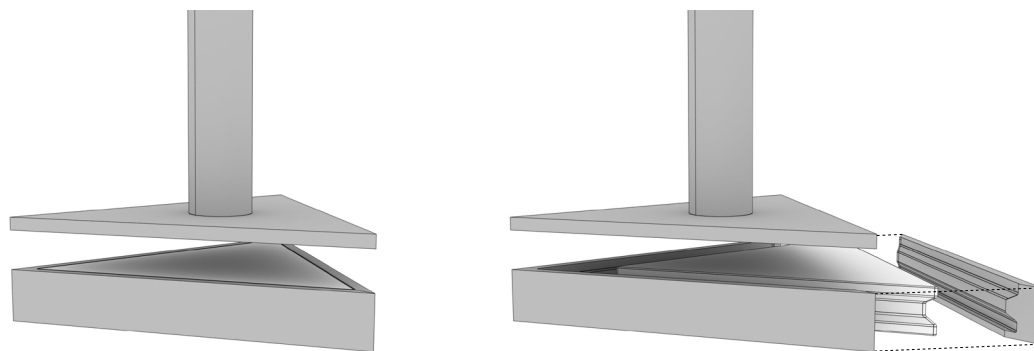


Abb. 4.3.1

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

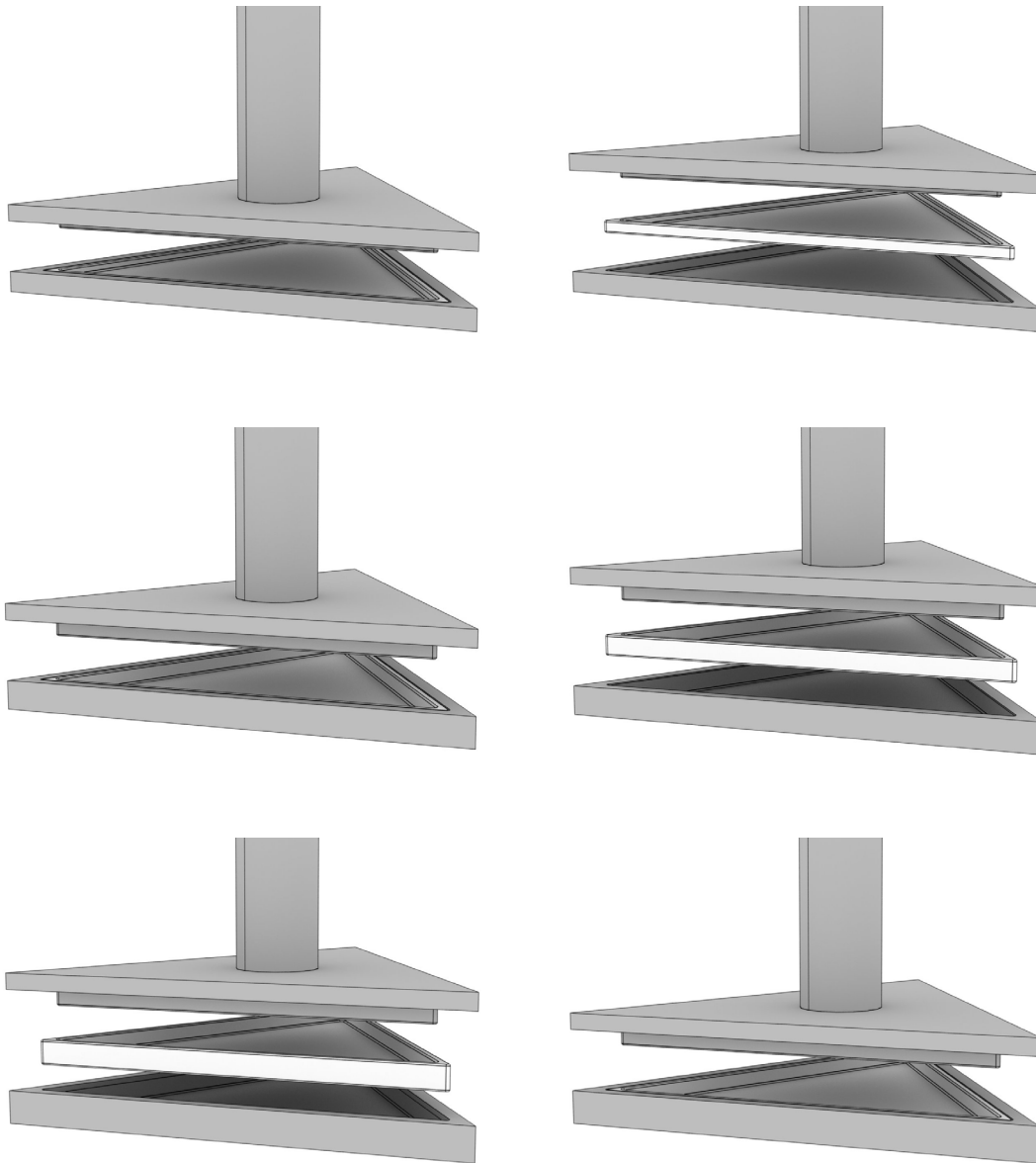


Abb. 4.3.2 Darstellung der Pressform zur Herstellung der drei Dämmschichten für den transparenten Stein.

Vor der vollständigen Abkühlung des Glases, werden die dämmenden Glasteile zu einem Stein zusammen gefügt. Dafür werden die Stegenden des zweiten und dritten Glaskörpers nochmals erhitzt und mit dem jeweils nächsten Stück verschweißt. Durch die hohen Temperaturen bei der Herstellung wird die eingeschlossene Luft verdünnt, was sich positiv auf die Dämmfähigkeit der Steine auswirkt.

Das fertige Dämmpaket wird anschließend mit dem tragenden Glasstein über eine 1 cm dicke Silikonfuge luftdicht verklebt. Verwendet wird dafür ein 2-Komponenten Silikonkleb- und -dichtstoff, zum Beispiel das Produkt Sikasil® SG-500 der Firma SIKA oder das Produkt Dow Corning® 993 Structural Glazing Sealant der Firma DOW CORNING. Um den Blick auf die schwarze Silikonfuge und das Fugenmaterial zu verhindern, werden beide Steinhälften vor dem Verkleben mit dem Silikon noch mit einem weißen Anstrich versehen. Der gesamte Stein weist ein Gewicht von 24,1 kg auf.

Abb. 4.3.3 Darstellung der beiden Verbindungsarten.

Abb. 4.3.4 Darstellung des weißen Anstrichs vor der Verklebung.

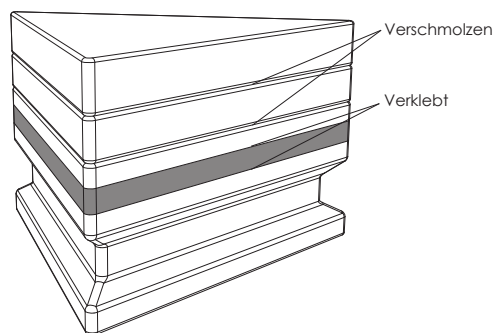


Abb. 4.3.3

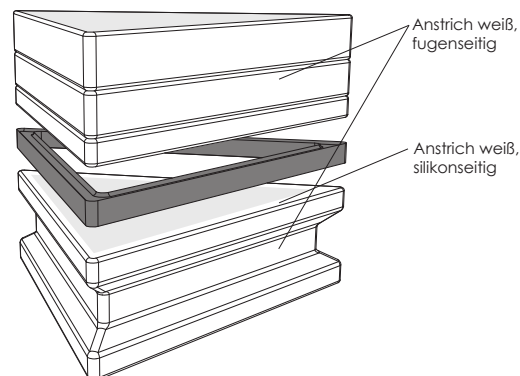


Abb. 4.3.4

Für den transluzenten Glasstein muss neben dem massiven Glasstein nur ein zusätzliches Glasstück gefertigt werden. Für diesen hohlen Glaskörper ist eine separate Negativform sowie ein passender Druckkörper aus Metall notwendig. Die transluzente Wärmedämmung kann bereits in den benötigten Maßen geliefert werden und muss bei der Verklebung der Steine nur richtig positioniert werden. Davor bekommen auch diese fugenseitig einen weißen Anstrich, um ein regelmäßiges Erscheinungsbild zu gewähren.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

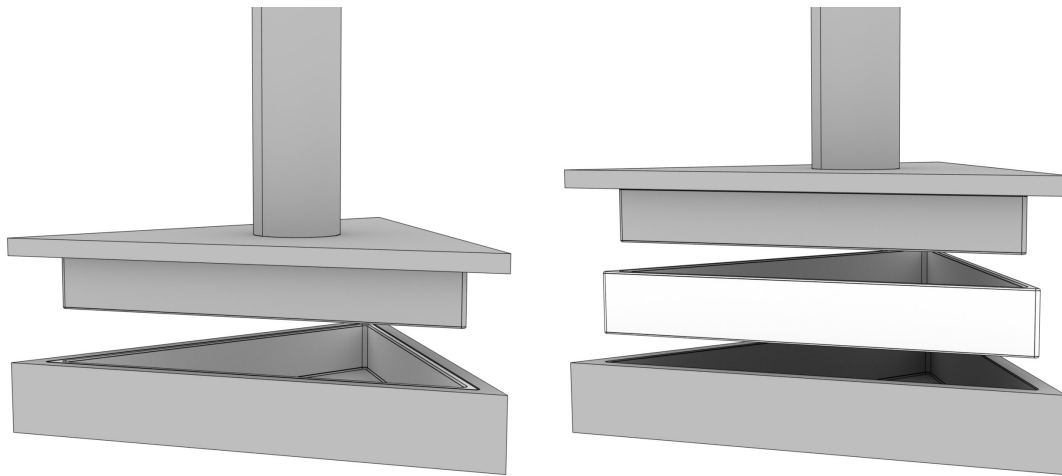


Abb. 4.3.5

Abb. 4.3.5 Darstellung der Pressform zur Herstellung der Glasdämmkammer.

Nachdem das Glas vollständig abgekühlt ist, können die Glasteile zu einem Stein zusammengefügt werden. Zuerst wird das Silikon am massiven Glasstein aufgetragen. Anschließend kann die Glaskammer samt der Wärmedämmung von oben darauf gesetzt werden. Da die Wärmedämmung den gesamten Hohlraum ausfüllt, muss diese nicht separat fixiert werden. Nach der vollständigen Aushärtung des Silikons ist der Glasstein einsatzbereit. Der gesamte Stein weist ein Gewicht von 20,0 kg auf.

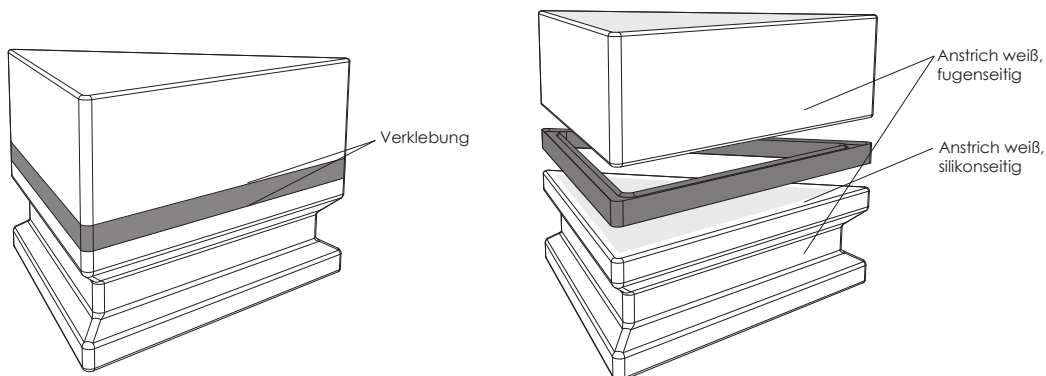


Abb. 4.3.6

Abb. 4.3.7

Abb. 4.3.6 Darstellung der Verbindungsart der Steinhälften.

Abb. 4.3.7 Darstellung des weißen Anstrichs vor der Verklebung.

Abb. 4.3.8 Aufsetzen des Glaskörpers über die Wärmedämmung.

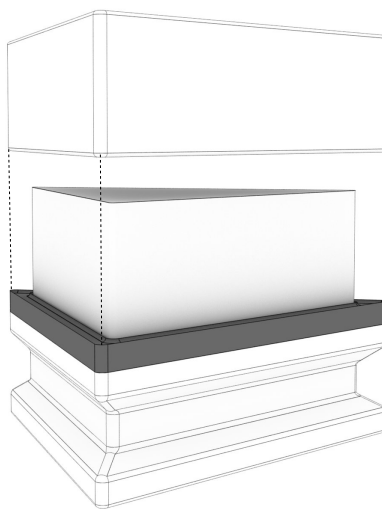


Abb. 4.3.8

4.4 BELICHTUNG UND GESTALTERISCHE VIELFALT

Die Fassade ist die Schnittstelle zwischen dem Außen- und Innenraum und übernimmt neben energie- und wärmetechnischen Aspekten auch Belichtungs- sowie Gestaltungszwecke. Je nach Nutzung werden unterschiedliche Anforderungen an die Belichtung gestellt, welche die visuelle Wahrnehmung des Raums maßgebend beeinflussen. Durch den unterschiedlichen Aufbau der zwei Steintypen, können folglich unterschiedliche Belichtungssituationen geschaffen werden. Zusätzlich kann bei der Herstellung der Glassteine durch das Pressverfahren auch die Gestaltung der Glasoberfläche individuell beeinflusst werden. Das Erscheinungsbild der Fassade wird dabei am meisten von der Oberfläche der letzten Deckplatte beeinflusst. Neben völlig glatten, regelmäßigen Oberflächen kann durch spezielle Bearbeitung der Negativform eine Vielzahl an unterschiedlichen Designs erzeugt werden. Nicht nur durch unterschiedliche Formen und Muster, sondern auch durch die Verwendung verschiedener Farben sind der gestalterischen Vielfalt keine Grenzen gesetzt. Neben der Erzeugung stimmungsvoller Lichteffekte im Inneren des Gebäudes, wird auch das äußere Erscheinungsbild der Fassade geprägt.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

Folgende Abbildung zeigt verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten der Glasoberfläche:

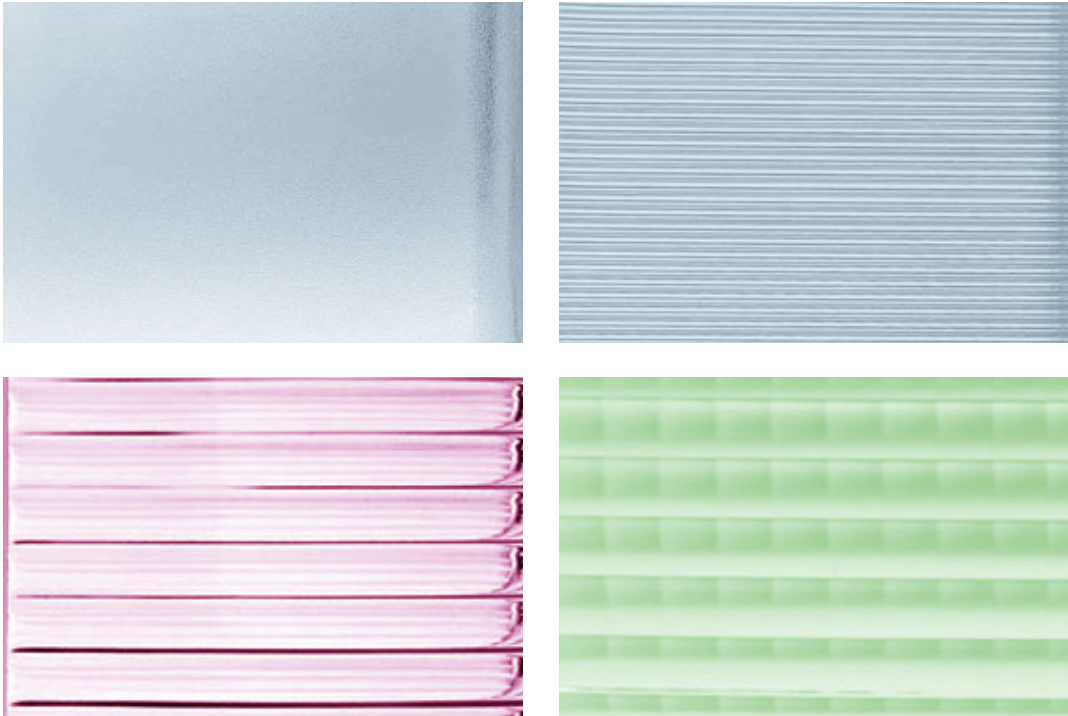
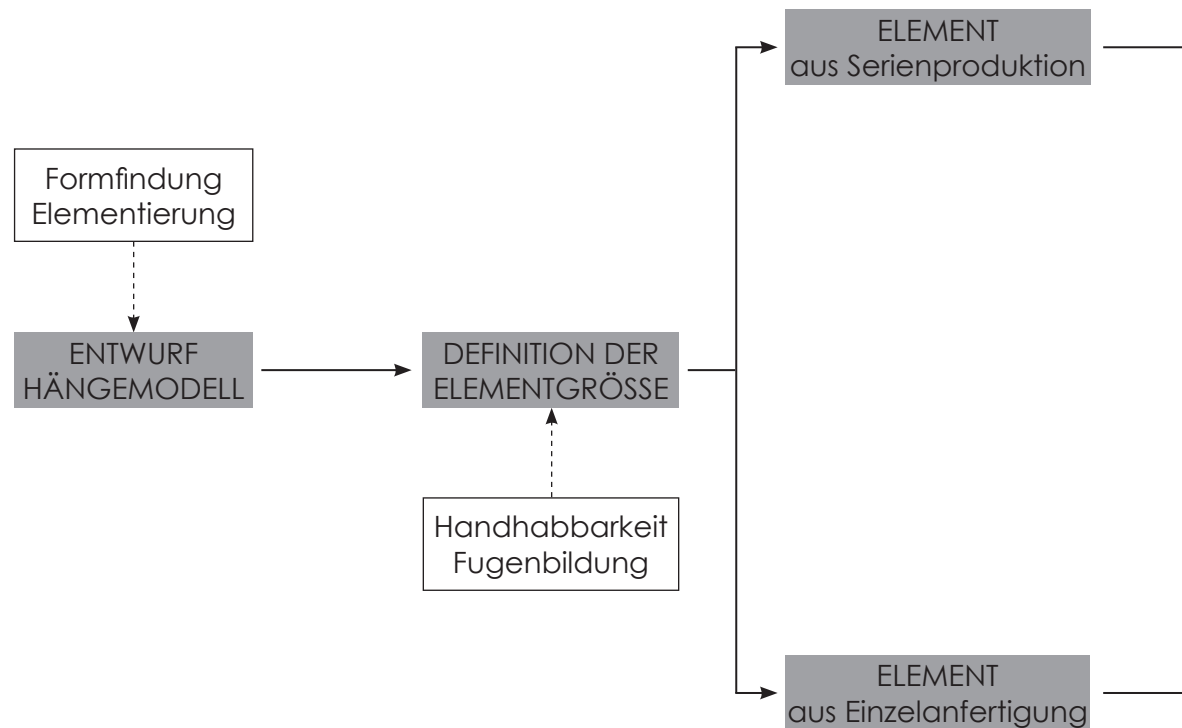


Abb. 4.4.1 Mögliche Gestaltungen der Glasoberfläche.

Abb. 4.4.1

Zusammenfassend die gewonnen Erkenntnisse bezüglich unterschiedlicher Herstellungsverfahren der Glassteine:



4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

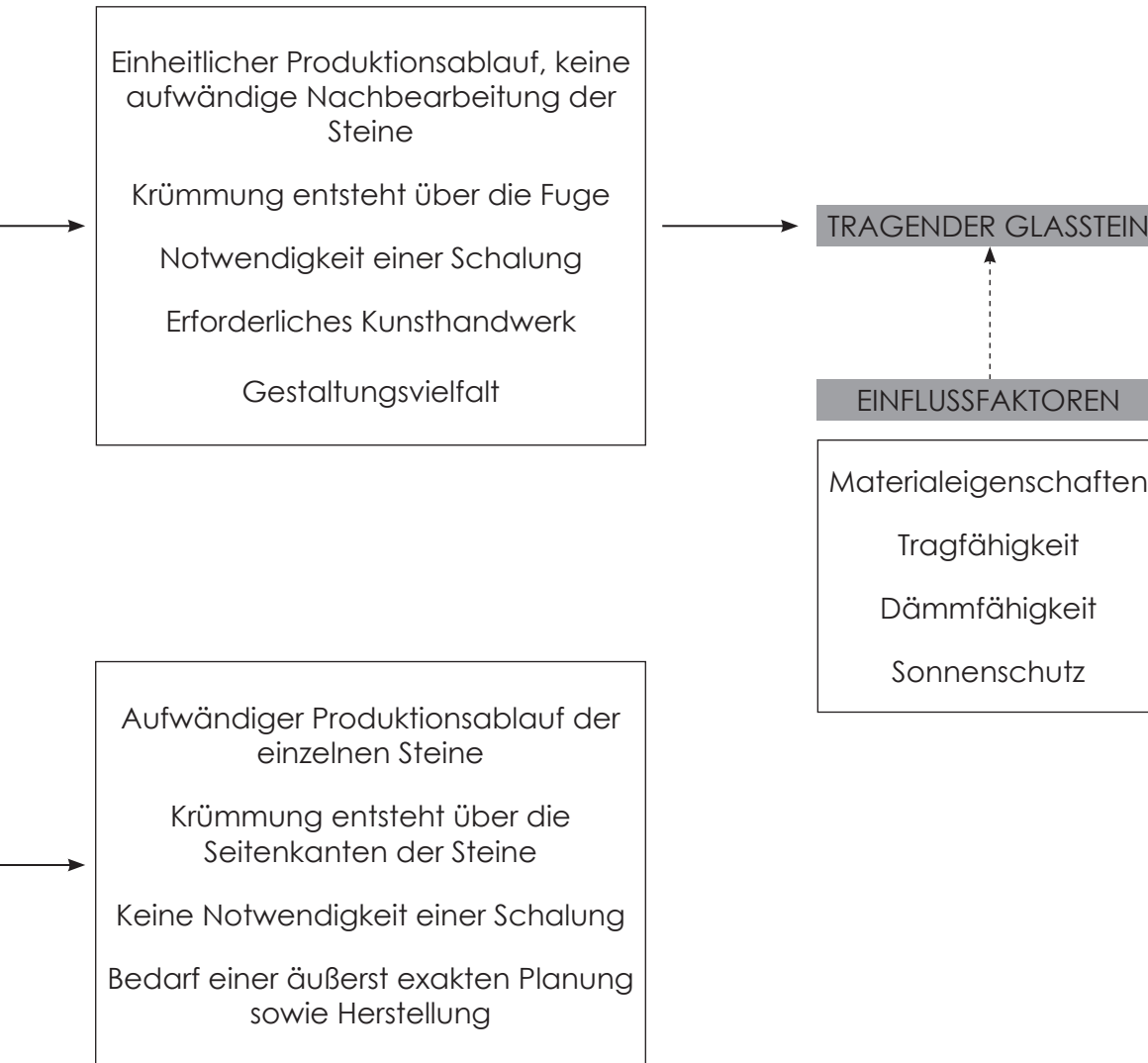


Abb. 4.4.2 Ablaufdiagramm und Einflussfaktoren während der Entwicklung und Produktion der Glassteine.

4.5 FUGENAUSBILDUNG

Der Fuge, welche sich zwischen den einzelnen Glassteinen bildet, kommt eine große Bedeutung zu, da sie mehrere Anforderungen zu erfüllen hat. Eine Aufgabe ist die gleichmäßige Übertragung der in der Schale wirkenden Druckkräfte von Stein zu Stein. Dabei ist darauf zu achten, dass sich das Fugenmaterial bei Temperaturveränderungen gleich verhält wie das Borosilikatglas. Bei gleicher Längenausdehnung können somit Spannungen in der Konstruktion vermieden werden. Neben der tragenden Funktion übernimmt sie weiters auch die Bildung der Krümmung.

Es besteht die Notwendigkeit, die Fugen nach außen hin abzudichten. Die gesamte Gebäudehülle, sowohl der Glasstein als auch die Fuge, muss vor eindringender Feuchtigkeit geschützt werden, damit sich kein unerwünschtes Kondensat bildet. Dafür ist es wichtig, das äußere Ende der Fuge mit einem witterungsbeständigen Silikon auszuführen.

In der Dämmebene bietet sich als Hinterfüllmaterial die Verwendung einer isolierenden Leichtschüttung an. Dadurch kann die Dämmeigenschaft der Fuge verbessert werden und gleichzeitig wird das Gewicht der Gesamtkonstruktion nicht maßgebend beeinflusst. Weiters wird in dieser Ebene ein Fugenband zur zusätzlichen Abdichtung eingelegt.

Für die Errichtung der Schalenkonstruktion am Bauplatz muss als erstes die Schalung aufgebaut werden sowie die benötigten Auflager errichtet werden. Wie auch beim Bauen mit Ziegelsteinen, wird zuerst ein Stein gesetzt. Anschließend wird das tragende Fugenmaterial aufgebracht um den nächste Stein setzen und positionieren zu können. Es muss darauf geachtet werden, dass das Material exakt am Ende des tragenden Steins abgezogen wird. Da der dämmende Teil nicht tragend ist, könnte dieser unter Lasteinwirkung brechen. Sind alle Steine gesetzt, kann die isolierenden Leichtschüttung sowie das Fugenband eingearbeitet werden. Um die Fuge nach außen abzudichten, wird sie mit einer UV- und witterungsbeständigen Silikonfuge versiegelt. Nach vollständiger Aushärtung der Fuge kann die Schalung entfernt werden. In den folgenden Abbildungen werden die einzelnen Arbeitsschritte veranschaulicht.

Abb. 4.5.1 Nach Errichten der Unterkonstruktion kann mit dem Aufmauern der Glassteine begonnen werden.

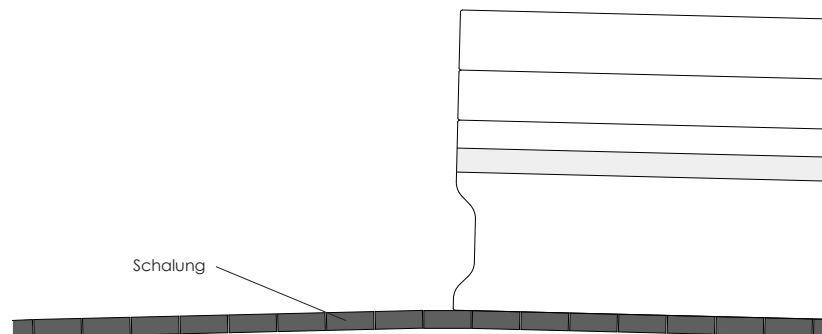


Abb. 4.5.1

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

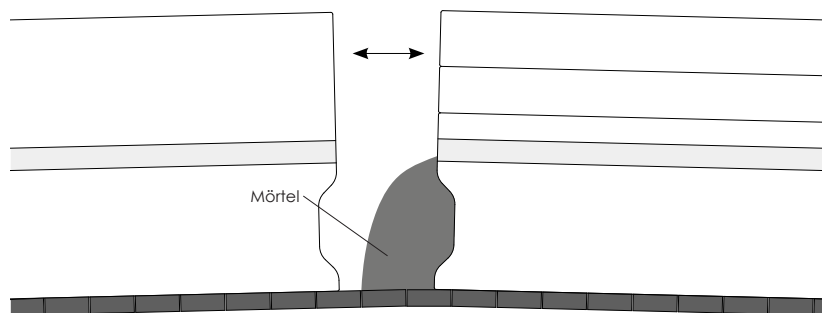


Abb. 4.5.2

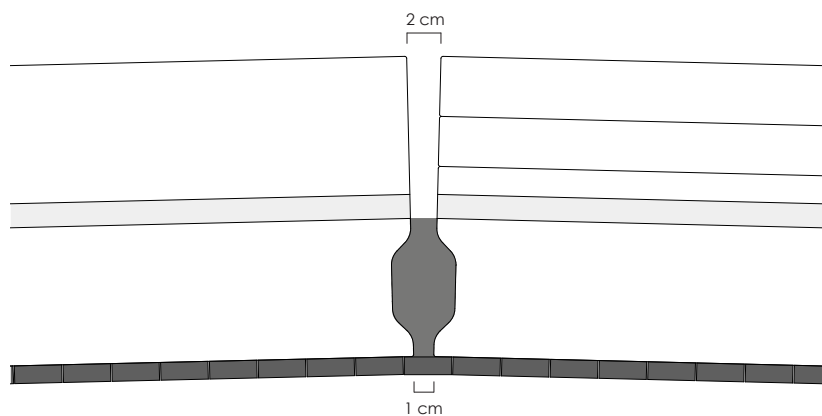


Abb. 4.5.3

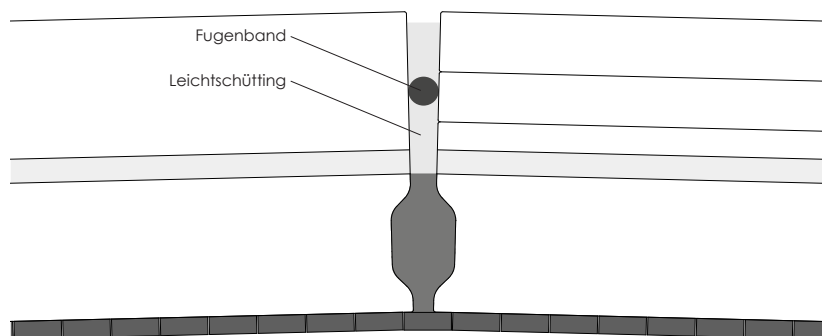


Abb. 4.5.4

Abb. 4.5.2 Nach setzen des ersten Steins wird der Mauermörtel fugenseitig angebracht.

Abb. 4.5.3 Der zweite Stein wird anschließend exakt positioniert und der überschüssige Mörtel abgezogen.

Abb. 4.5.4 Nach Abschluss der Maurerarbeiten wird das Dichtband in der isolierenden Leichtschüttung verlegt.

Abb. 4.5.5 Zum Schluss wird die Fuge nach Außen mit Silikon abgedichtet und somit witterungsbeständig gemacht.

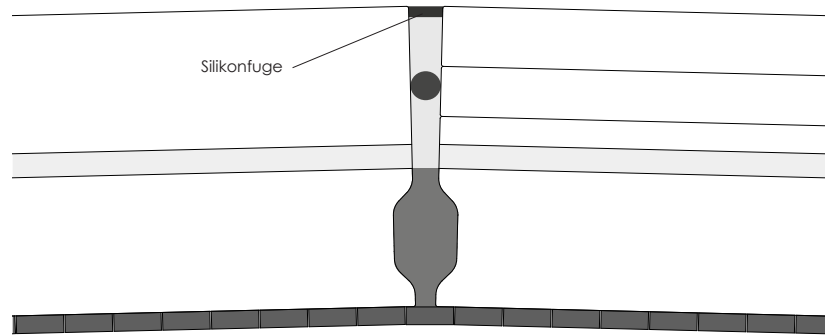


Abb. 4.5.5

Durch die vielfältige Formensprache der Konstruktion herrschen zwischen den einzelnen Glassteinen unterschiedliche Winkel. Bei der Ausbildung der soeben beschriebenen Fuge, ist die Ausführung einer Silikonfuge an der Außenseite, welche direkt der Witterung ausgesetzt ist, unumgänglich. Es werden zwar Spezialsilikone für langfristig Witterungseinflüsse angeboten, jedoch können Wartungsarbeiten nicht vermieden werden.

Da keine Regelmäßigkeit bezüglich der Winkel abzulesen ist, stellt sich die Entwicklung einer überlappenden Fügetechnik als schwierig dar. Diese hätte den Vorteil, dass die dichtende Silikonfuge nicht direkt der Witterung ausgesetzt wäre und somit langfristig hält. Um eine derartige Fügetechnik anwenden zu können, müsste eine Einschränkung der möglichen Formenvielfalt vorgenommen werden.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

4.6 ANWENDUNGSBEISPIELE

Durch den Einsatz des konstruktiven Glassteins sind folgende Anwendungsbeispiele denkbar:

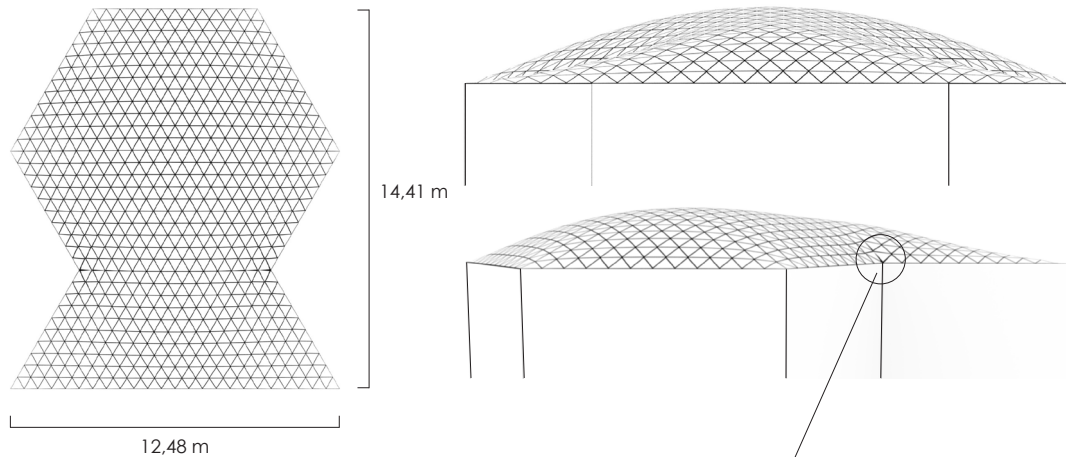


Abb. 4.6.1

Abb. 4.6.1 Grundriss und Ansichten einer beispielhaften Überdachung

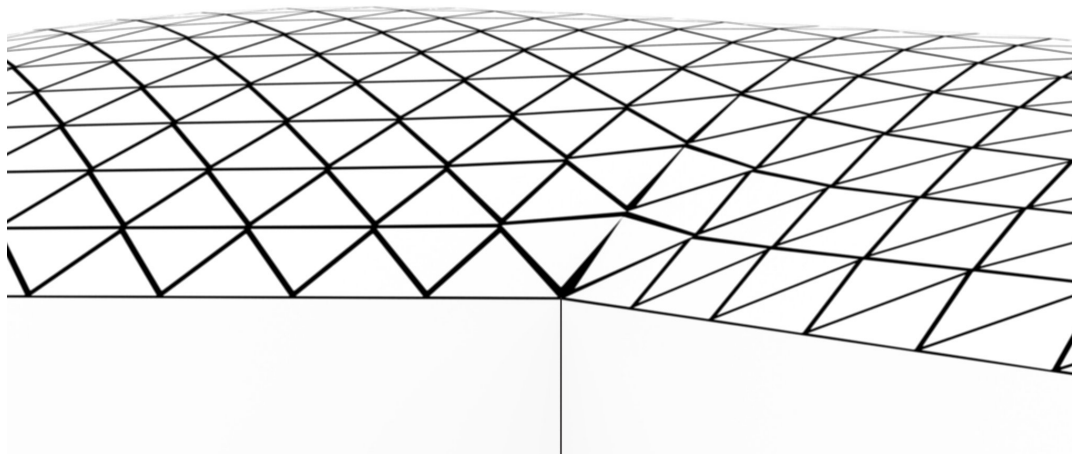


Abb. 4.6.2

Abb. 4.6.2 Detailansicht eines stark gekrümmten Knickbereichs.

Die Dreiecke lassen sich prinzipiell sehr regelmäßig auf der Fläche orientieren. Lediglich an den beiden nach innen ragenden Randbereichen werden die Grenzen der Machbarkeit deutlich. Durch die starke Krümmung der Konstruktion verdrehen sich die betroffenen Dreiecke und wirken dadurch leicht erzwungen. Sollen derartige Schnittstellen vermieden werden, können diese Steine im Randbereich entweder durch kleine Steine ersetzt werden oder aber auch als massive Auflager ausgeführt werden:

Abb. 4.6.3 Detailansicht; Stark gekrümmte Teilstellen der Konstruktion können im Randbereich als Auflager ausgeführt werden.

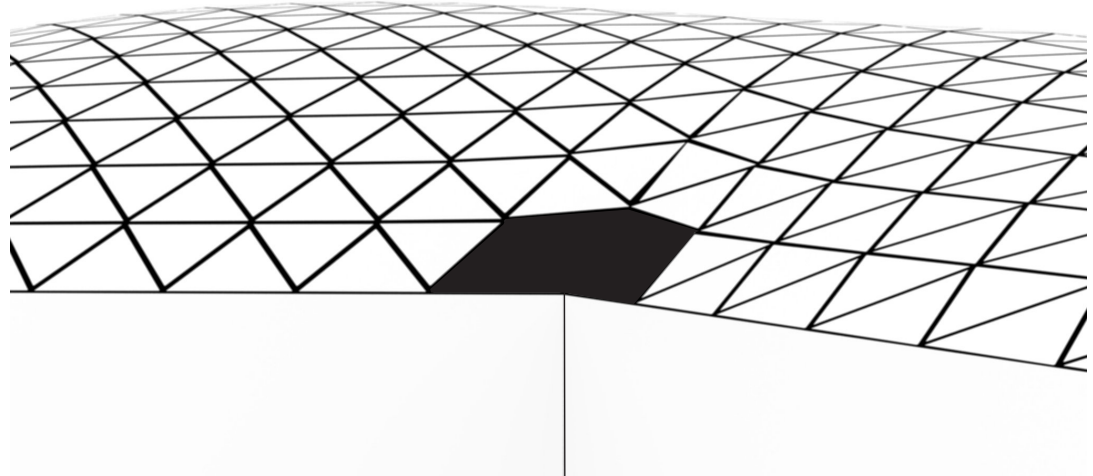


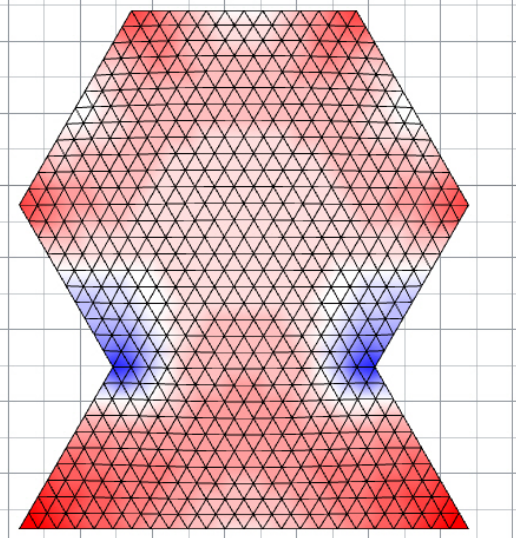
Abb. 4.6.3

Für die statische Berechnung der Überdachung wird eine durchgehende, 7 cm dicke Glas-konstruktion angenommen. Einerseits werden die in der Konstruktion herrschenden Spannungen untersucht, andererseits die daraus entstehende Verformung. Unterschieden werden zwei Lastfälle, der Eigenlast (Lastfall 1) und einer einseitigen Schneelast (Lastfall 2).

Die Abbildung zu Lastfall 1 zeigt, dass sich die meisten Spannungen in den Randzonen bilden, wo sich die stark nach innen gerichteten Knicke befinden. Deutlich wird dies durch die Verfärbung der Konstruktion von rot über weiß auf blau. Genau in diesen Bereichen stellte sich zuvor auch schon die Orientierung der Glassteine als schwierig dar. An den übrigen Randbereichen ergeben sich keine starken Spannungen. Durch eine minimale Verformung des Materials entsteht unter Lasteinwirkung eine geringe Abweichung von der ursprünglichen Konstruktion. Der Lastfall 2, bei dem eine einseitige Schneelast von 3 kN/m^2 angenommen wird, zeigt eine einseitige Erhöhung der Spannungen im Knickbereich. Zur gegenüberliegenden Seite hin nehmen die Spannungen ab. An Hand der Graphik sind die Abweichungen von der ursprünglichen Konstruktion auf der mit Schnee bedeckten Seite stärker ausgeprägt als auf der gegenüberliegenden.

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

Spannung:



Verformung:

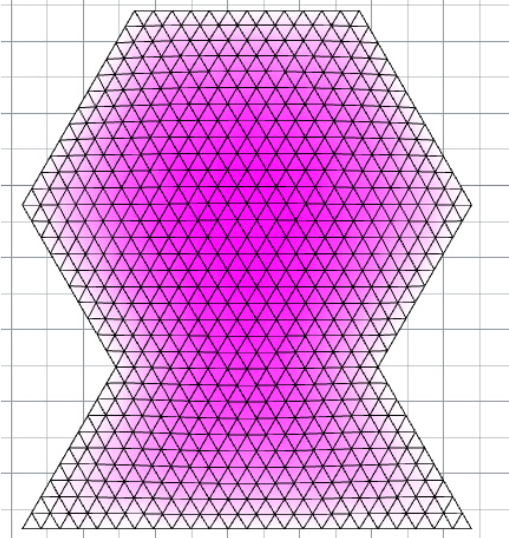


Abb. 4.6.4

Abb. 4.6.4 Lastfall 1

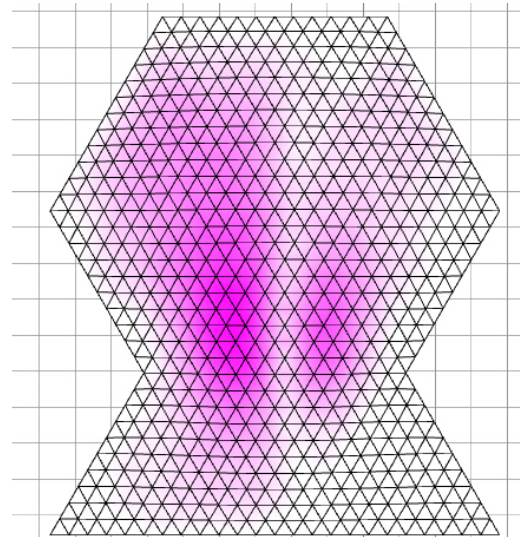
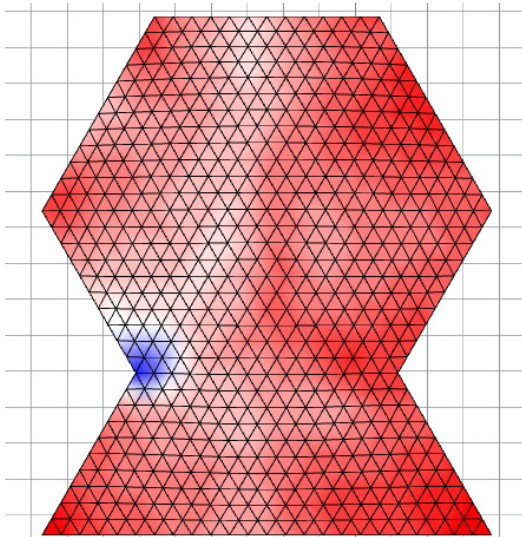


Abb. 4.6.5

Abb. 4.6.5 Lastfall 2

Abb. 4.6.6 Grundriss und Ansichten einer beispielhaften Überdachung

Eine weitere Variante für Überdachungen:

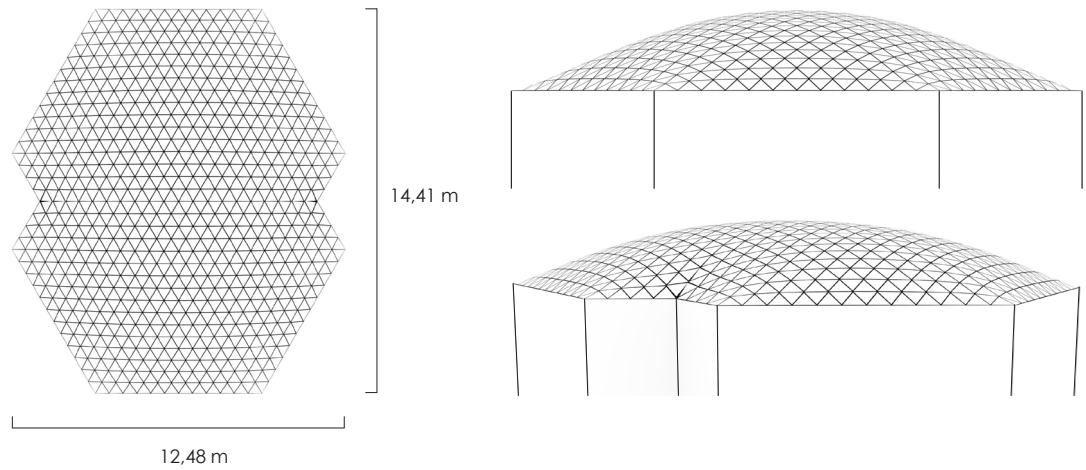


Abb. 4.6.6

Abb. 4.6.7 Darstellung der Überdachungsvariante

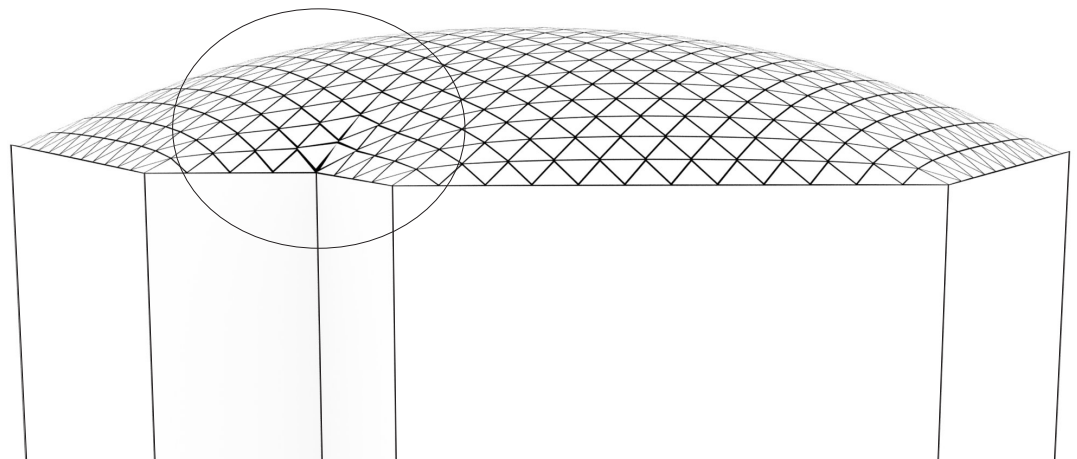


Abb. 4.6.7

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

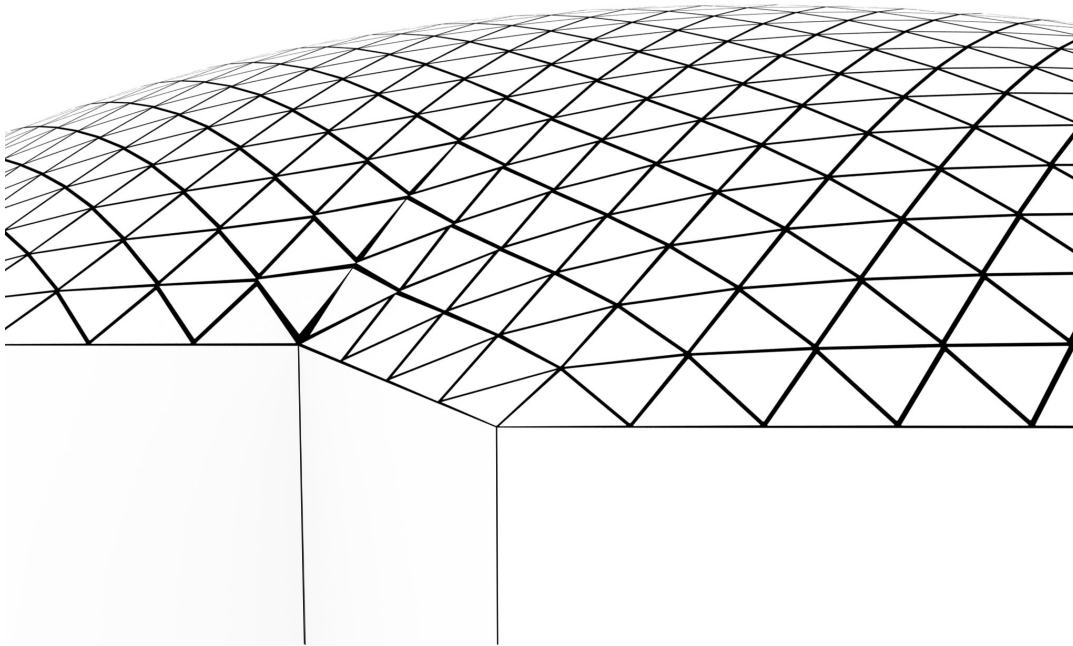


Abb. 4.6.8

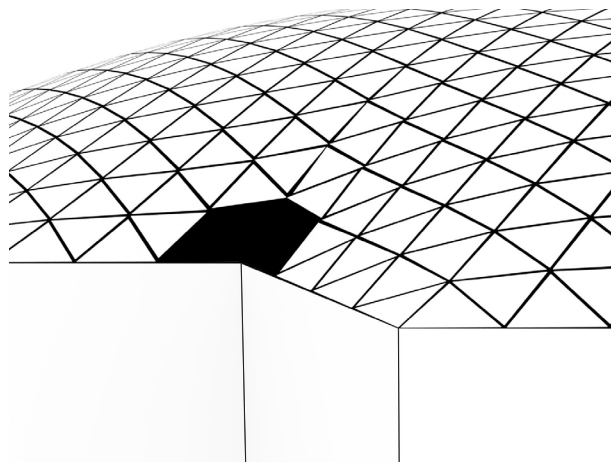


Abb. 4.6.9

Abb. 4.6.8 Detailsicht einer Grenzstelle der Konstruktion.

Abb. 4.6.9 Detailsicht; Stark gekrümmte Teilstellen der Konstruktion können im Randbereich als Auflager ausgeführt werden.

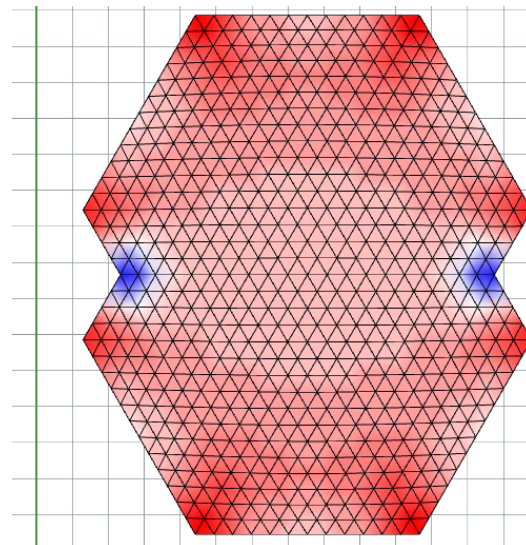
Für die statische Berechnung der Überdachung werden die selben Bedingungen angenommen wie zuvor. Einerseits werden wieder die in der Konstruktion herrschenden Spannungen untersucht, andererseits die daraus entstehende Verformung. Dies erfolgt ebenfalls unter den zwei verschiedenen Lastfällen.

Die Abbildung zu Lastfall 1 zeigt, dass sich auch bei dieser Geometrie die meisten Spannungen in den Randzonen bilden, wo sich der nach innen gerichtete Knick befindet. An den übrigen Randbereichen ergeben sich keine starken Spannungen. An den übrigen Ecken nehmen sie sogar eher ab. Auch bei dieser Variante entsteht unter Lasteinwirkung eine geringe Abweichung von der ursprünglichen Konstruktion.

Der Lastfall 2 zeigt ähnliche Auswirkungen wie zuvor. Sowohl die Spannungen, als auch die Verformungen nehmen auf der mit Schnee belasteten Hälfte zu, auf der gegenüberliegenden ab.

Abb. 4.6.10 Lastfall 1

Spannung:



Verformung:

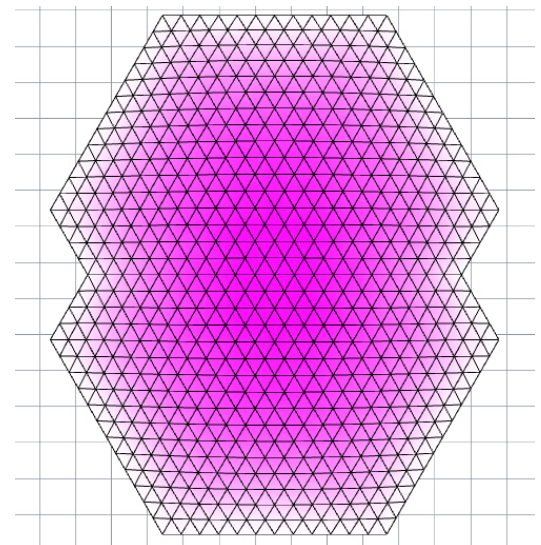
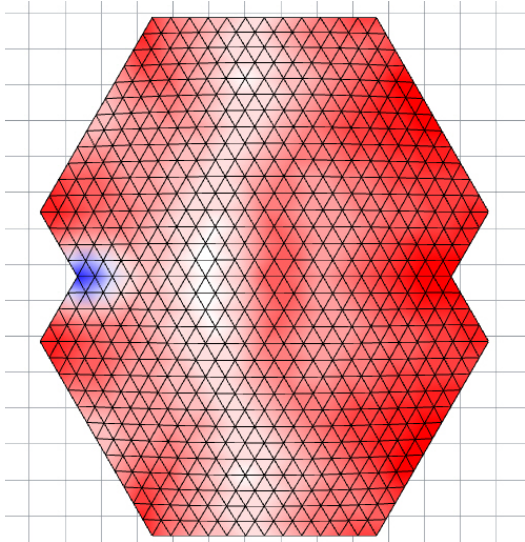


Abb. 4.6.10

4. ENTWURF DES GLASSTEINMODULS

Spannung:



Verformung:

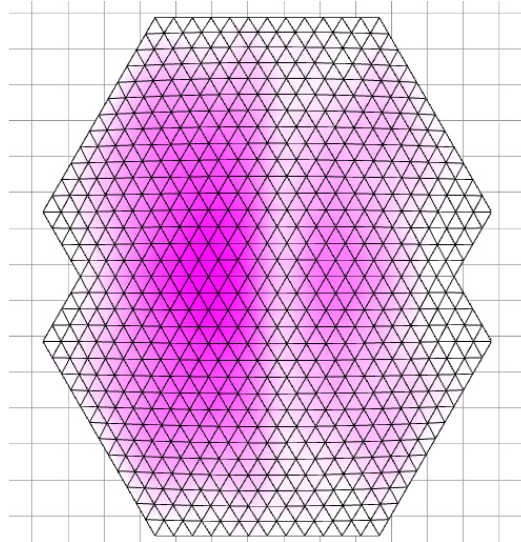


Abb. 4.6.11 Lastfall 2

Abb. 4.6.11

5. HERSTELLUNG EINES PROTOTYPS

In Zusammenarbeit mit der Voralpenland Glashütte in Schwanenstadt konnte die Herstellung eines Prototypen realisiert werden. Gemeinsam mit dem Geschäftsführer Herrn Hintermüller und seinen Glasbläsern wurde eine passende Methode zur Herstellung des Glassteines gewählt. Da die Herstellung mittels einer Glaspresse aus finanziellen Gründen nicht möglich war, wurde ein Gussverfahren angewandt.

Insgesamt wurden zwei Glaskomponenten gegossen, der massive tragende Glasstein und der hohle. Als Gussform diente eine dreieckige Metallform, mit einer Wandstärke von 5mm, welche an einer Ecke mit einem Scharnier ausgestattet ist um ein leichtes Entformen zu ermöglichen.

Folgende Bilder zeigen die Herstellung des hohlen Glassteins:



Bevor mit der Herstellung des hohlen Glassteins begonnen wird, muss die Metallform auf etwa 500°C erwärmt werden. Dies ist erforderlich, um beim Befüllen der Form unnötige Spannungen im Glas durch zu hohe Temperaturunterschiede zu vermeiden.



Vom Glasbläser wird zuerst eine kleine Menge der Glasmasse aus dem Ofen entnommen. Diese hat bei der Entnahme eine Temperatur von 1160°C und haftet auf der Glasmacherpfeife. Diese muss laufend gedreht werden, da sonst das Glas von der Pfeife tropft.

Fotos zur Herstellung des Prototyps von Kurzmann, Lisa.



Die Glasmasse wird unter ständigem Drehen mithilfe von Holzwerkzeugen zu einer ovalen Glaskugel geformt. Durch das Befeuhen des Holzes bildet sich eine Dampfschicht, welche das Holz vor dem verbrennen schützt.



Durch das Einblasen von Luft entsteht im Inneren der Kugel ein Hohlraum. Während der Bearbeitung der Glasmasse wird die Glasmacherpfeife laufend gedreht. Je mehr die Glasmasse an Temperatur verliert, desto fester wird sie.



Der Vorgang der Glasentnahme und des Einblasens von Luft wird mehrmals wiederholt um das gewünschte Volumen zu erreichen. Während der Bearbeitung muss darauf geachtet werden, dass die Temperatur des Glases nicht unter 500°C sinkt, da dies zu Sprüngen führen könnte.

5. HERSTELLUNG EINES PROTOTYPS



Nach Erreichen der benötigten Größe wird die Kugel annähernd zu einem Dreieck geformt um das Einblasen in die Metallform zu erleichtern.

Bevor sie endgültig in die Form geblasen werden kann, muss sie erneut erwärmt werden.





Nach dem Erwärmen wird die Glasblase in der Form richtig positioniert.



Um die Glasblase in die Form zu pressen, helfen drei Glasmacher zusammen. Einer hält die Metallform zusammen, einer bläst das Glas von oben in die Form und einer drückt die Glasmasse mit einem Holzwerkzeug nach unten.



Die Glasmasse verliert immer mehr an Temperatur und wird dadurch fester.

5. HERSTELLUNG EINES PROTOTYPS

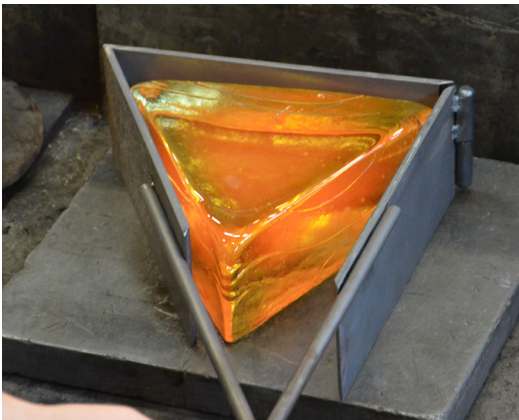
Nachdem das Glas einen festen Zustand erreicht hat, kann es aus der Form genommen werden. Der Überstand der Glasblase wird zurecht gebogen, um ihn nach dem Abkühlungsprozess absägen zu können. Bevor der Glasstein angeritzt und von der Glasmacherpfeife abgeschlagen wird, muss er mit kalter Luft etwas abgekühlt werden. Anschließend wird der Stein in einen 500°C heißen Ofen gelegt.



Nach der Fertigstellung des hohlen Glassteins wurde der massive Glasstein hergestellt. Da zu Beginn nicht sicher war, ob die Erzeugung der Hinterschneidung mit Holz durchführbar ist, wurde zuerst ein Stein mit geraden Seitenflächen gegossen. Dafür wird mit der Glasmacherpeife Glas aus dem Ofen entnommen und direkt in die zuvor erwärmte Metallform gefüllt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis die richtige Füllmenge erreicht ist. Sobald das Glas wieder seinen festen Zustand erreicht hat, kann der Glasstein aus der Form genommen und ebenfalls in den Ofen gestellt werden.



5. HERSTELLUNG EINES PROTOTYPS



Um den massiven Glasstein mit der fugenseitigen Verjüngung herzustellen, müssen im Anschluss fünf Löcher pro Seite in die Metallform gebohrt werden. Zwei Löcher dienen jeweils zur Befestigung der Holzleisten von außen, durch die drei weiteren können die Gase entweichen, welche während dem Gießvorgang durch das Verbrennen des Holzes entstehen. Der Herstellungsprozess erfolgt auf die gleiche Weise wie zuvor.

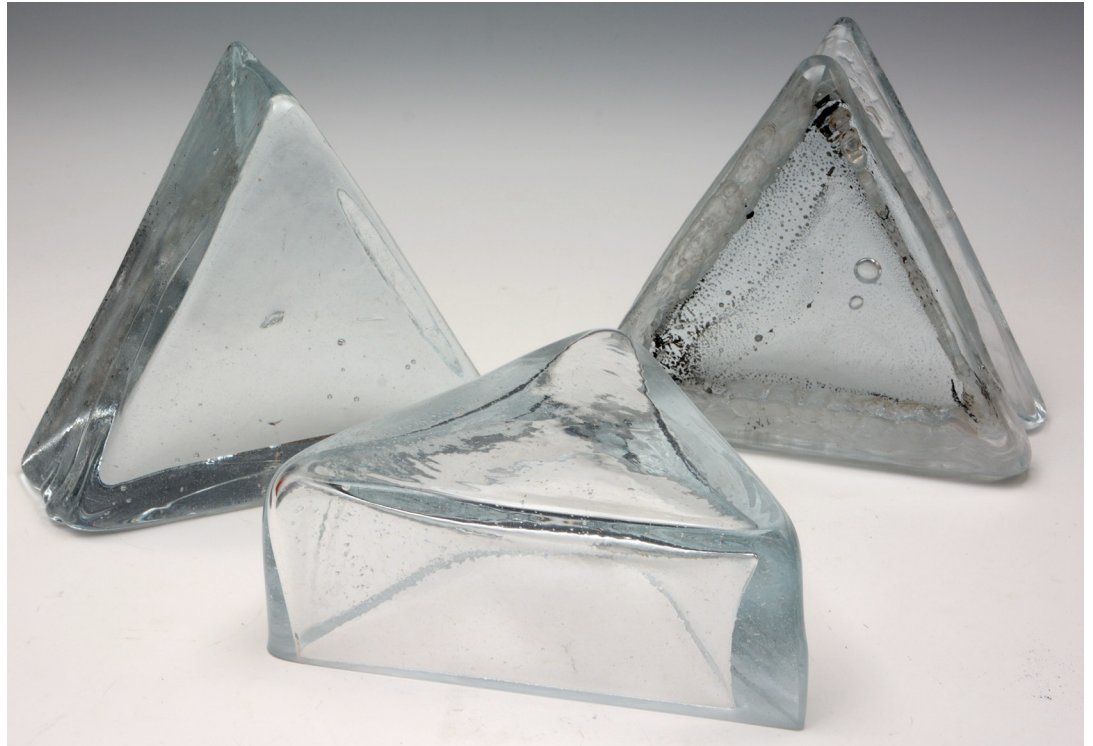


5. HERSTELLUNG EINES PROTOTYPS



Um die entstandenen Spannungen im Glas abzubauen, müssen die Glaskomponenten kontrolliert von 480°C auf 420°C abgekühlt werden. Bei einem solchen Glasvolumen dauert dieser Prozess zwischen acht und zehn Stunden. Nach vollständiger Abkühlung können die Gläser geschnitten und poliert werden.

Folgendes Resultat wurde bei der Herstellung des Prototypen erreicht:



6. AUSBLICK

Durch die entwickelte Entwurfsmethode können selbsttragende doppelt gekrümmte Gebäudehüllen aus Glas hergestellt werden. Durch die Verwendung von Structural Glassblocks können druckbeanspruchte Bauteile ohne ein zusätzliches Stahltragwerk realisiert werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde mit festgelegter Größe und Geometrie der Steine gezeigt, dass schalenartige Überdachungen bis zu einer Hauptspannweite von ca. 15 Meter realisierbar sind.

Bei der Dimensionierung der Konstruktion müssen neben der theoretischen Festigkeit des Materials auch lokale Spannungsspitzen, verursacht durch Kerben in der Oberfläche, feine Risse oder Materialverunreinigungen, berücksichtigt werden. Glas weist ein sehr sprödes Verhalten auf, was zur Folge hat, dass es nach dem Überschreiten der ertragbaren Spannung zu keiner ausgeprägten plastischen Verformung kommt, sondern dass Materialversagen eintritt. Folglich wird bei der Konzeptentwicklung die Effizienz des Baustoffs nicht ausgereizt.

Der Fokus richtet sich auf Faktoren wie Transparenz, Tragfähigkeit sowie Belichtung und Gestaltungsvielfalt. Da die Gebäudehülle die Schnittstelle zwischen Innen- und Außenraum darstellt, wird durch die Berücksichtigung bauphysikalischer Aspekte notwendiger Raumkomfort erzeugt. Durch die Entwicklung zwei unterschiedlicher Dämmsysteme wird einerseits auf den Aspekt der Wärmedämmung eingegangen und gleichzeitig das Maß der Sonneneinstrahlung geregelt. Eines der beiden Systeme ermöglicht eine völlige Transparenz der Gebäudehülle, das andere bewahrt den Innenraum vor Überhitzung und schützt weiters die Privatsphäre der NutzerInnen.

Aktuell wird in den Medien laufend von Nachhaltigkeit sowie von schonendem Umgang mit natürlichen Ressourcen gesprochen. Da sich Glas beliebig oft einschmelzen und wiederverwerten lässt, ist der Werkstoff in dieser Hinsicht ein ideales Material. Leider kommt in der Flachglasherstellung die Verwendung von Altglas nicht zum Einsatz, da es innerhalb der Abfallwirtschaft zu Vermischungen des Altglases kommt. Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit sowie die Gestaltungsvielfalt ist durch die Verwendung von Altglas für die Steinherstellung auch die Entstehung äußerst spannender Projekte denkbar.

Neben der Realisierung von kompletten Gebäudehüllen beziehungsweise Überdachungen ist auch ein segmentartiger Einsatz im konventionellen Bauwesen, in Form von Lichtkuppeln oder Wänden denkbar. Beispiele für derartige Glaswände könnten wie auf der folgenden Seite abgebildet aussehen:

Abb. 6.1.1 Darstellungsbeispiele für gekrümmte Wände

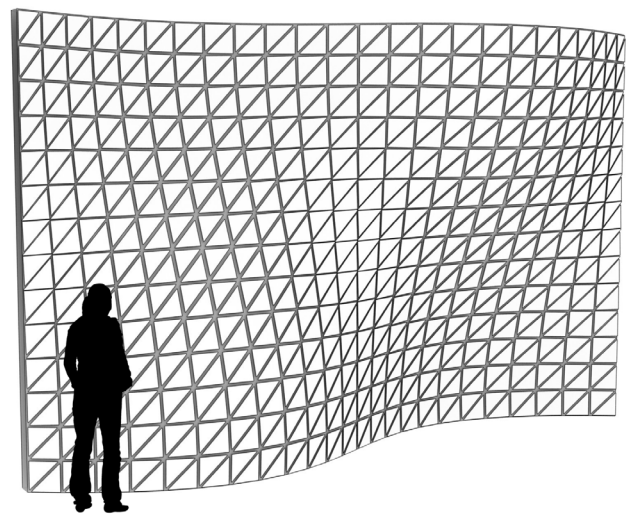
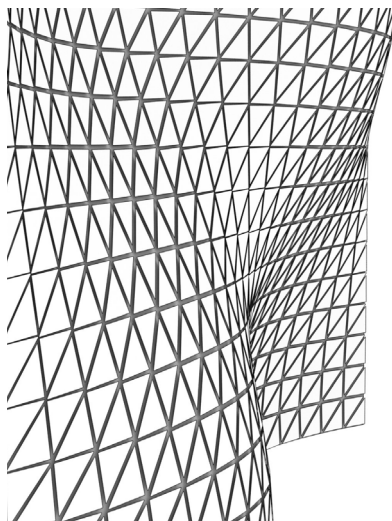
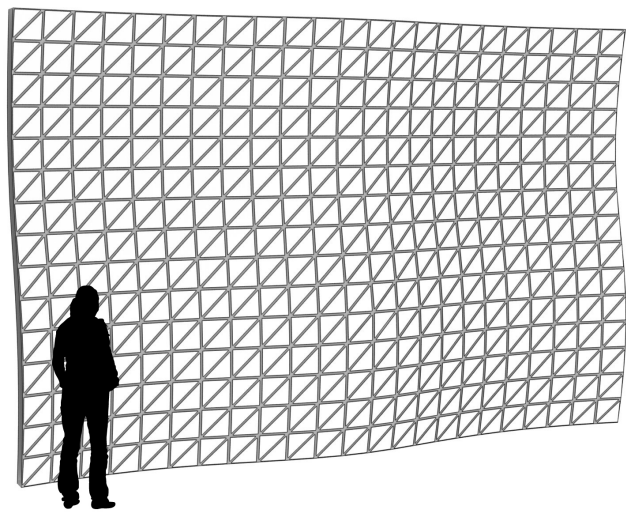
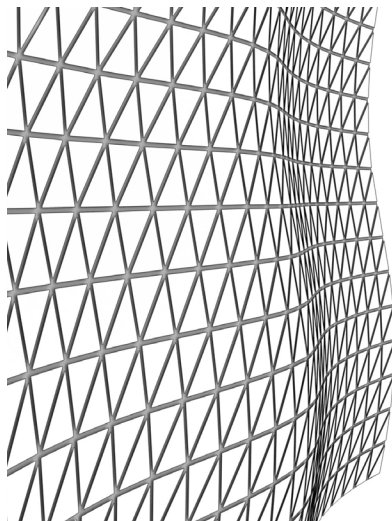


Abb. 6.1.1

6. AUSBLICK

Es ist zu erwähnen, dass mit der in dieser Arbeit konzipierten Bauweise nicht versucht wird, bekannte Gitterschalen aus Stahl und Glas zu ersetzen, sondern diese eine weitere Möglichkeit bieten soll, tragende Glasfassaden zu errichten. Im Vergleich der beiden Konstruktionsarten lassen sich folglich auch verschiedene architektonisch- gestalterische Unterschiede ableiten.

Überdachungen aus Gitterkonstruktionen sind geprägt durch großflächige Verglasungen und der dahinter befindlichen Stahlkonstruktion. Durch diese Art der Konstruktionsmethode lassen sich äußerst filigrane Glasfassaden mit hoher Transparenz und großen Spannweiten errichten. Die großflächigen Isolierverglasungen haben einerseits den Vorteil, dass ihre maximal herstellbaren Maße stetig wachsen, andererseits wird dadurch ein einheitliches Erscheinungsbild und geringe Gestaltungsvielfalt erzeugt.

Ganz anders kann auf dieses Thema mit der Verwendung des Structural Glassblocks reagiert werden. Bei der Herstellung kann neben der Form auch die Oberfläche und die Farbgebung der Steine beeinflusst werden. Da prinzipiell für jeden Entwurf eine eigene, speziell auf die Konstruktion abgestimmte Steingeometrie denkbar ist, kann auf die Individualität eines jeden Projekts eigens eingegangen werden.

Durch die Kleinteiligkeit der Steine kann sich die gesamte Konstruktion einerseits besser an Freiformen annähern als großflächige Verglasungen, andererseits entsteht dadurch aber ein größerer Fugenteil mit Wartungsbedarf. Welche Konstruktionsmethode schließlich für ein Projekt gewählt wird, ist zum einen beeinflusst von der gewünschten gestalterischen Aussage und zum anderen auch eine Frage des Maßstabs.

7. QUELLENANGABEN

Bücher

Chilton, John/Isler, Heinz: Heinz Isler. The engineer's contribution to contemporary architecture, London 2000

Dieste, Eladio/Barthel, Rainer: Eladio Dieste. Form und Konstruktion, Darmstadt 2001

Faber, Colin: Candela und seine Schalen. München 1965

Fuksas, Massimiliano/Mandrelli, Doriana O.: Fuksas building. Barcelona 2011

Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg: Kuppeln. aller Zeiten aller Kulturen, Stuttgart 1996

Heesch, Heinrich/Kienzle, Otto: Flächenschluß. System der Formen lückenlos aneinanderschließender Flachteile, Hannover 1963

Kalweit, Andreas/Paul, Christof: Handbuch für Technisches Produktdesign. Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure, Berlin/Heidelberg 2012

Schittich, Christian/Staib, Gerald/Balkow, Dieter/Schulter, Matthias/Sobek, Werner: Glasbau Atlas. Basel u. a. 2006

Siebert, Geralt/Maniatis, Iris: Tragende Bauteile aus Glas. Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele, Berlin 2012

Weller, Bernhard/Tasche, Silke: Glasbau 2013. Bauten und Projekte, Bemessung und Konstruktion, Forschung und Entwicklung, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit, Berlin 2013

Aufsätze, Publikationen, Broschüren

Ciari, Anna: 1892 Stadthaus Zürich. Glasdach Eingangshalle - Untersuchungsbericht, Zürich 2008

Ciari, Anna/Russenberger, Judith: Historisches Tonnendach aus Glasbausteinen. in: TEC21 2010, H. 136, 42-45

Gürtler Berger, Theresia: Provisorien leben länger, <http://www.nextroom.at/article.php?id=33662>, in: <http://www.nextroom.at>, 14.7.2014

Jaeger, Falk: WIE EINE FLIEGENDE MÖWE. INGENIEURPORTRÄT: ELADIO DIESTE (1917–2000) UND SEINE SCHALENTRAGWERKE, Deutsche Bauzeitung, Herausforderung Tragwerk, 10. 2011

Piker, Daniel,(2012): Using Kangaroo, a draft manual, <http://www.food4rhino.com/project/kangaroo>, in: <http://www.food4rhino.com>, 11.7.2014

Preisinger, Clemens,(2012): Karamba User Manual, <http://www.karamba3d.com/downloads>, in: <http://www.karamba3d.com>, 11.7.2014

Plessen, Elisabeth: Denkmal für die Terroropfer von Atocha, <http://www.nextroom.at/building.php?id=29900>, in: <http://www.nextroom.at>, 11.7.2014.

Reischer, Peter: Optical Glass House. Wohnhaus/Hiroshima/Hiroshi Nakamura & NAP Co., Ltd., in: architektur 2013, H. 03, 30-35.

Steiner, Jürgen: Gläsernes Denkmal für die Terror-Opfer von Madrid. SCHOTT liefert Glas-komponenten, Press Information Nr. 37, Mainz 2007

7. QUELLENANGABEN

Online

<http://www.brefeld.homepage.t-online.de/geodaetische-kuppeln.html>, 11.7.2014

<http://www.food4rhino.com>, 11.7.2014

<http://www.giulipiacentino.com/weaverbird>, 11.7.2014

<http://www.grasshopper3d.com>, 11.7.2014

<http://www.karamba3d.com>, 11.7.2014

<http://www.rhino3d.com>, 11.7.2014

<http://www.schott.com>, 23.7.2014

<http://www.wacotech.de>, 23.7.2014

Abbildungsnachweis

- Abb. 1.1.1 Schittich, Christian/Staib, Gerald/Balkow, Dieter/Schulter, Matthias/Sobek, Werner: Glasbau Atlas. Basel u. a. 2006, 11.
- Abb. 1.1.2 Ebda., 72.
- Abb. 1.1.3 Ebda., 121.
- Abb. 1.1.4 <http://www.glastroesch.ch/services/wissen/herstellung-und-physikalische-begriffe/herstellung-von-floatglas.html>, 25.8.2014
- Abb. 1.1.5 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 1.1.6 <http://www.karodur.de/portfolio/wasserstrahlschneiden/>, 4.3.2014
- Abb. 1.1.7 <http://www.glasdersch.de/produkte/glasbearbeitung.html>, 4.3.2014
- Abb. 1.1.8 Schittich, Christian/Staib, Gerald/Balkow, Dieter/Schulter, Matthias/Sobek, Werner: Glasbau Atlas. Basel u. a. 2006, 66.
- Abb. 1.1.9 Ebda., 68.
- Abb. 1.1.10 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 1.1.11 Siebert, Geralt/Maniatis, Iris: Tragende Bauteile aus Glas. Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele, Berlin 2012, 3.
- Abb. 1.1.12 Schittich, Christian/Staib, Gerald/Balkow, Dieter/Schulter, Matthias/Sobek, Werner: Glasbau Atlas. Basel u. a. 2006, 71.
- Abb. 1.1.13 Ebda., 72.
- Abb. 1.1.14 <http://www.solaris-glasstein.de/architekten-planer/produkte/dekor.html>, 11.7.2014.
- Abb. 1.1.15 http://www.glassian.org/Falconnier/falconnier_half.jpg, 3.10.2014.
- Abb. 1.1.16 <https://www.youtube.com/watch?v=zBZv6xLtVyc>, 11.7.2014.
- Abb. 1.1.17 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 1.1.18 <http://www.solaris-glasstein.de/architekten-planer/prospekte/prospekte.html>, 26.8.2014.
- Abb. 1.1.19 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 1.1.20 <http://www.solaris-glasstein.de/architekten-planer/prospekte/prospekte.html>, 26.8.2014.
- Abb. 1.1.21 <http://www.glasbausteine.ch/techdaten/konstr4.htm>, 26.8.2014.
- Abb. 1.2.1 Heinle, Erwin/Schlaich, Jörg: Kuppeln. aller Zeiten aller Kulturen, Stuttgart 1996, 205.
- Abb. 1.2.2 Ebda., 202.
- Abb. 1.2.3 Ebda., 205.
- Abb. 1.2.4 Ebda., 202.
- Abb. 1.2.5 Ebda., 205.
- Abb. 1.2.6 Ebda., 207.
- Abb. 1.2.7 Ebda., 209.
- Abb. 1.2.8 Ebda., 209.
- Abb. 1.2.9 Ebda., 209.

7. QUELLENANGABEN

- Abb. 1.3.1 <http://www.schott.com/architecture/german/references/memorial-madrid.html>, 11.7.2014.
- Abb. 1.3.2 <http://www.detail.de/architektur/themen/mahnmal-in-madrid-2007-000671.html>, 11.7.2014.
- Abb. 1.3.3 http://www.schott.com/magazine/german/sol107/sol107_01_stage_1.html?so=austria&lang=german, 11.7.2014.
- Abb. 1.3.4 <http://www.detail.de/architektur/themen/mahnmal-in-madrid-2007-000671.html>, 11.7.2014.
- Abb. 1.3.5 https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Ueber_das_Departement/Grafik%20und%20Foto/Medien/stadthaus_halle.jpg, 14.7.2014.
- Rechts: <https://www.stadt-zuerich.ch/portal/de/index/service/medien/impressions.html>, 14.7.2014.
- Abb. 1.3.6 Ciari, Anna: 1892 Stadthaus Zürich. Glasdach Eingangshalle - Untersuchungsbericht, Zürich 2008, 4.
- Abb. 1.3.7 Ebda., 5.
- Abb. 1.3.8 Ciari, Anna/Russenberger, Judith: Historisches Tonnendach aus Glasbausteinen. in: TEC21 2010, H. 136, 44.
- Abb. 1.3.9 <http://die-neue-sammlung.de/sammlung/depot/neuerwerbungen/selektion-2011/gustave-falconnier/>, 10.10.2014.
- Abb. 1.3.10 Optical Glass House, Foto: Koji Fuji / Nacasa & Partners
- Abb. 1.3.11 Ebda.
- Abb. 1.4.1 http://www.sbp.de/de/build/show/811-Überdachung_Schlüterhof,_Deutsches_Historisches_Museum, 4.10.2014.
- Abb. 2.1.1 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 2.1.2 Ebda.
- Abb. 2.1.3 Ebda.
- Abb. 2.1.4 Ebda.
- Abb. 2.1.5 Ebda.
- Abb. 2.1.6 Ebda.
- Abb. 2.1.7 Ebda.
- Abb. 2.1.8 Ebda.
- Abb. 2.1.9 Ebda.
- Abb. 2.2.1 Ebda.
- Abb. 2.2.2 Ebda.
- Abb. 2.2.3 Ebda.
- Abb. 2.2.4 Ebda.
- Abb. 2.2.5 Ebda.
- Abb. 2.2.6 Ebda.
- Abb. 2.2.7 Ebda.
- Abb. 2.2.8 Ebda.

- Abb. 3.1.1 Autobahn-Raststätte Deitingen Süd, dreieckige Schalenflügeldächer (Isler-Schale) aus Beton des Schweizer Bauingenieurs Heinz Isler, gebaut 1968; Solothurn, Schweiz. Fotograf: Christian Kleis, 2009
- Abb. 3.1.2 L'Océanogràfic (Valencia, Spain). Fotograf: Felipe Gabaldón, 2010
http://www.sbp.de/de/build/show/811-Überdachung_Schlüterhof,_Deutsches_Historisches_Museum, 3.10.2014.
- Abb. 3.1.3 <http://www.bravepraxis.com/thematic/the-work-of-eladio-dieste>, 10.3.2014.
- Abb. 3.1.4 Ebda., 10.3.2014.
- Abb. 3.1.5 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 3.1.6 Ebda.
- Abb. 3.1.7 <http://www.3d-meier.de/tut12/Seite0.html>, 15.7.2014.
- Abb. 3.1.8 Biosphère de Montréal en juillet 2011, Fotograf: Idej Elixé.
- Abb. 3.1.9 http://www.sbp.de/de/build/show/1221-Neue_Messe_Mailand:_Logo_&_Vela, 4.10.2014.
- Abb. 3.1.10 Stuttgarter Schale, Foto: ILEK.
- Abb. 3.2.1 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 3.2.2 Ebda.
- Abb. 3.2.3 Ebda.
- Abb. 3.2.4 Ebda.
- Abb. 3.2.5 Ebda.
- Abb. 3.2.6 Ebda.
- Abb. 3.2.7 Ebda.
- Abb. 3.2.8 Ebda.
- Abb. 3.2.9 Ebda.
- Abb. 3.3.1 Ebda.
- Abb. 3.3.2 Ebda.
- Abb. 3.3.3 Ebda.
- Abb. 3.3.5 Ebda.
- Abb. 3.3.6 Ebda.
- Abb. 3.3.7 Ebda.
- Abb. 3.3.8 Ebda.
- Abb. 3.3.9 Ebda.
- Abb. 3.3.10 Ebda.
- Abb. 3.3.11 Ebda.
- Abb. 3.3.12 Ebda.
- Abb. 3.3.13 Ebda.
- Abb. 3.3.14 Ebda.
- Abb. 3.3.15 Ebda.
- Abb. 3.3.16 Ebda.
- Abb. 3.3.17 Ebda.

7. QUELLENANGABEN

- Abb. 3.3.18 Ebda.
- Abb. 3.3.19 Ebda.
- Abb. 3.3.20 Ebda.
- Abb. 3.3.21 Ebda.
- Abb. 4.1 Ebda.
- Abb. 4.1.1 Ebda.
- Abb. 4.1.2 Ebda.
- Abb. 4.1.3 Ebda.
- Abb. 4.1.4 Ebda.
- Abb. 4.1.5 Dämmstoff TIMax GL/S, Foto: Wacotech GmbH.
- Abb. 4.1.6 Erstellt von Kurzmann, Lisa.
- Abb. 4.2 Ebda.
- Abb. 4.2.1 Ebda.
- Abb. 4.2.2 Ebda.
- Abb. 4.2.3 Ebda.
- Abb. 4.2.4 Ebda.
- Abb. 4.2.5 Ebda.
- Abb. 4.2.6 Ebda.
- Abb. 4.2.7 Ebda.
- Abb. 4.2.8 Ebda.
- Abb. 4.2.9 Ebda.
- Abb. 4.2.10 Ebda.
- Abb. 4.2.11 Ebda.
- Abb. 4.2.12 Ebda.
- Abb. 4.2.13 Ebda.
- Abb. 4.2.14 Ebda.
- Abb. 4.2.15 Ebda.
- Abb. 4.2.16 Ebda.
- Abb. 4.2.17 Ebda.
- Abb. 4.2.18 Ebda.
- Abb. 4.2.19 Ebda.
- Abb. 4.3.1 Ebda.
- Abb. 4.3.2 Ebda.
- Abb. 4.3.3 Ebda.
- Abb. 4.3.4 Ebda.
- Abb. 4.3.5 Ebda.
- Abb. 4.3.6 Ebda.
- Abb. 4.3.7 Ebda.
- Abb. 4.4.1 <http://www.solaris-glasstein.de/architekten-planer/produkte/dekor.html>,
11.7.2014.
- Abb. 4.4.2 Erstellt von Kurzmann, Lisa.

Abb. 4.5.1 Ebda.
Abb. 4.5.2 Ebda.
Abb. 4.5.3 Ebda.
Abb. 4.5.4 Ebda.
Abb. 4.5.5 Ebda.
Abb. 4.6.1 Ebda.
Abb. 4.6.2 Ebda.
Abb. 4.6.3 Ebda.
Abb. 4.6.4 Ebda.
Abb. 4.6.5 Ebda.
Abb. 4.6.6 Ebda.
Abb. 4.6.7 Ebda.
Abb. 4.6.8 Ebda.
Abb. 4.6.9 Ebda.
Abb. 4.6.10 Ebda.
Abb. 4.6.11 Ebda.
Abb. 6.1.1 Ebda.