

Dünnglaskonzepte für architektonische Anwendungen

Louter, Christian

DOI

[10.1002/cepa.1007](https://doi.org/10.1002/cepa.1007)

Publication date

2019

Document Version

Final published version

Published in

Glasbau 2019

Citation (APA)

Louter, C. (2019). Dünnglaskonzepte für architektonische Anwendungen. In B. Weller, & S. Tasche (Eds.), *Glasbau 2019* (pp. 148-160). Ernst & Sohn. <https://doi.org/10.1002/cepa.1007>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Dünnglaskonzepte für architektonische Anwendungen

Christian Louter¹

1 TU Delft, Faculty of Architecture and the Built Environment, Chair of Structural Design,
Julianalaan 134, 2628 BL Delft, The Netherlands

Dieser Beitrag untersucht das Potenzial von Dünnglas für architektonische Anwendungen und berichtet über zwei Dünnglaskonzepte, die an der TU Delft in einer Reihe von Masterarbeiten unter der Leitung des Autors entwickelt wurden. Das erste Konzept thematisiert flexible und adaptive Dünnglasscheiben, die ihre Form als Reaktion auf externe Parameter verändern können. Das zweite Konzept untersucht dünne Glasverbundplatten, bei denen dünne Glasverkleidungen mit (3D-gedruckten) Kernelementen kombiniert werden, um starke, steife und dennoch leichte Glasfassadenplatten herzustellen. Von ersten Designstudien bis hin zur Entwicklung von Prototypen zeigt sich, dass beide Konzepte sehr vielversprechend und für weitere vertiefende Untersuchungen geeignet sind. Dieser Beitrag ist weitestgehend aus [1] übersetzt.

Thin Glass Concepts for Architectural Applications. This paper explores the potential of thin glass for architectural applications and reports on two thin glass concepts that have been developed at TU Delft in a series of MSc theses supervised by the author. The first concept concerns flexible and adaptive thin glass panels that can change their shape in response to external parameters. The second concept concerns thin glass composite panels in which thin glass facings are combined with (3D printed) core elements to create strong, stiff yet lightweight glass façade panels. From initial design explorations and prototyping, it can be seen that both concepts are very promising and viable for further in depth investigations. This paper is largely translated from [1].

Schlagwörter: Dünnglas, Dünnglaskonstruktionen, adaptive Systeme

Keywords: thin glass, thin glass constructions, adaptive systems

1 Einführung

Dünnes chemisch gehärtetes Aluminosilikatglas wird überwiegend in der Elektronikindustrie für Displays auf Smartphones, Tablets und anderen Geräten eingesetzt. Für solche Anwendungen sind besonders die hohe Festigkeit, Kratzfestigkeit, Stoßfestigkeit, optische Qualität sowie die geringe Dicke und damit das geringe Gewicht von Interesse. Diese speziellen Eigenschaften könnten auch für neuartige Glasanwendungen im Bauwesen genutzt werden [2]. Aufgrund seiner geringen Dicke (z.B. 0,1-2 mm) und hohen Biegefestigkeit (Richtbereich 200-1000 MPa [2]) kann dieses Dünnglas leicht in architektonisch ansprechende Krümmungen kalt gebogen werden, was die Möglichkeit bietet, gebogene und verformbare Gebäudehüllen zu erzeugen. Darüber hinaus kann durch die geringe Dicke eine deutliche Gewichtsreduzierung gegenüber herkömmlichen Fensterverglasungen (typischerweise ≥ 4 mm) erreicht werden. Der Einsatz von Dünnglas in der Architektur ist ein relativ neues Anwendungsfeld, in dem

bisher nur vereinzelte Untersuchungsergebnisse vorliegen. Einige Beispiele hierfür sind in den Referenzen [3]–[7] angegeben. Der hier vorliegende Beitrag beschreibt die Konstruktion weiterer Dünnglasanwendungen. Er berichtet über verschiedene Konzepte der Einbindung von Dünnglas in eine Konstruktion und erste Prototypen, die kürzlich an der TU Delft in einer Reihe von MSc-Thesis-Projekten entwickelt und untersucht wurden. Dieser Beitrag beinhaltet die Vorstellung sowie Erläuterung zweier Grundkonzepte: der Abschnitt 2 beschreibt die Herstellung von adaptiven Dünnglasscheiben und der Abschnitt 3 die Herstellung von Verbundglasscheiben aus Dünnglas.

2 Adaptive Dünnglasscheiben

2.1 Grundkonzept

Das erste Konzept nutzt die hohe Flexibilität von Dünnglas für die Umsetzung von adaptiven Glasfassaden. Grundsätzlich ist die Idee, dass solche Fassaden aufgrund äußerer Einwirkungen immer wieder ihre Form verändern können. So können beispielsweise durch Biegen des Dünnglases Lüftungsöffnungen erstellt werden, die einen Luftstrom durch den Hohlraum einer Doppelhaut-Fassade erzeugen. Darüber hinaus könnte die Krümmung von dünnen Glasfassadenpaneelen angepasst werden, um einer erhöhten Windbelastung besser zu widerstehen. Insbesondere bei Dünnschicht-Photovoltaikzellen, die der Dünnglasschicht hinzugefügt werden können, kann die Ausrichtung zur besseren Energieausbeute kontinuierlich optimiert werden. Die folgenden Abschnitte berichten über die untersuchten Konzepte und die Prototypen, die in einer Reihe von MSc-Thesis-Projekten an der TU Delft entstanden sind.

2.2 Adaptive Dünnglas-Fassadenpaneele

In den Arbeiten von Ribeiro Silveira [8]–[9] und Topcu [10] wurden erste Schritte zur Entwicklung adaptiver Dünnglasfassaden an der TU Delft unternommen. Nach ersten Designstudien wurden finale Designvorschläge erarbeitet und deren grundsätzliche Umsetzbarkeit an ersten Prototypen getestet.

In der Arbeit von Ribeiro Silveira [8] entstand ein Entwurf und Prototyp einer doppel-schaligen adaptiven Dünnglasfassade. Diese Konstruktion besteht aus dünnen Glasscheiben mit einer zentralen Scherenführung, die sich nach außen bewegen und so das Glas nach außen biegen kann (Bild 2-1). Das Dünnglas wird entlang der langen (vertikalen) Kanten des Glases eingespannt und über einen Stift oben und unten in ein Schienensystem eingebunden. Mit dieser Konstruktion können, jeweils an der Ober- und Unterseite der Scheibe, unterschiedliche Krümmungen erzeugt werden.

Um die Machbarkeit zu prüfen, wurde ein erstes Modell (500 x 800 mm) gebaut (Bild 2-1). Im Mock-up wurden die Scherenführungen durch Kettenantriebe mit einem Hub von 250 mm ersetzt, die das Glas nach außen drücken konnten. Für das Mock-up wurde eine monolithische, chemisch gehärtete Alumosilikatglasscheibe mit einer Dicke von

$t = 2 \text{ mm}$ verwendet. Das Endergebnis des Mock-ups war sehr zufriedenstellend, da es die grundsätzliche Durchführbarkeit des Konzepts bestätigte.



Bild 2-1 Entwurf und Mock-up der vorgeschlagenen adaptiven Dünnglassassade; Masterprojekt von Ribeiro Silveira [8].

Die Arbeiten von Topcu [10] vertieften die Auseinandersetzung mit dem adaptiven Dünnglassassadenkonzept und konzentrierten sich zusätzlich auf Möglichkeiten zur Gewährleistung der Wasser- und Luftdichtigkeit der Fassade im geschlossenen Zustand. Verschiedene Konstruktionslösungen wurden untersucht (Bild 2-2), wie (a) das Hinzufügen eines Magnetstreifens entlang des Glasrandes, der die Platte im geschlossenen Zustand, ähnlich einer Kühlschrankschür, abdichten würde. In (b) ist zu sehen, wie eine bidirektionale Zugkraft auf die Glasplatte in ihrem geschlossenen Zustand aufgebracht wird, um eine Bewegung im Außenbereich zu verhindern und somit einen dichten Abschluss der Platten zu gewährleisten. In (c) ist das Hinzufügen eines elastischen (dehnbaren) Gewebes entlang der gekrümmten Seiten des Glases gezeigt, um die Platte an ihren Längsseiten kontinuierlich abzudichten.

Das Konzept des Magnetstreifens wurde als am besten realisierbar erachtet und an einem 500 x 800 mm großen Modell erprobt (Bild 2-3). Das Mock-up bestätigte die einwandfreie Funktion und Machbarkeit dieses Systems.

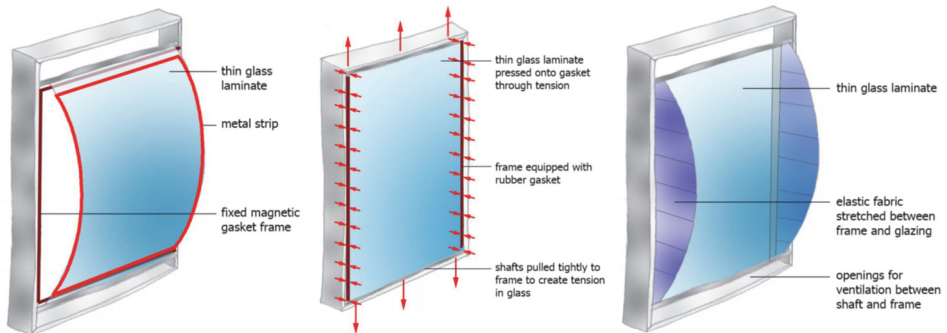


Bild 2-2 Entwurfslösungen für die Wasser- und Luftdichtigkeit einer adaptiven Dünnglasfassade; Masterprojekt von Topcu [10].

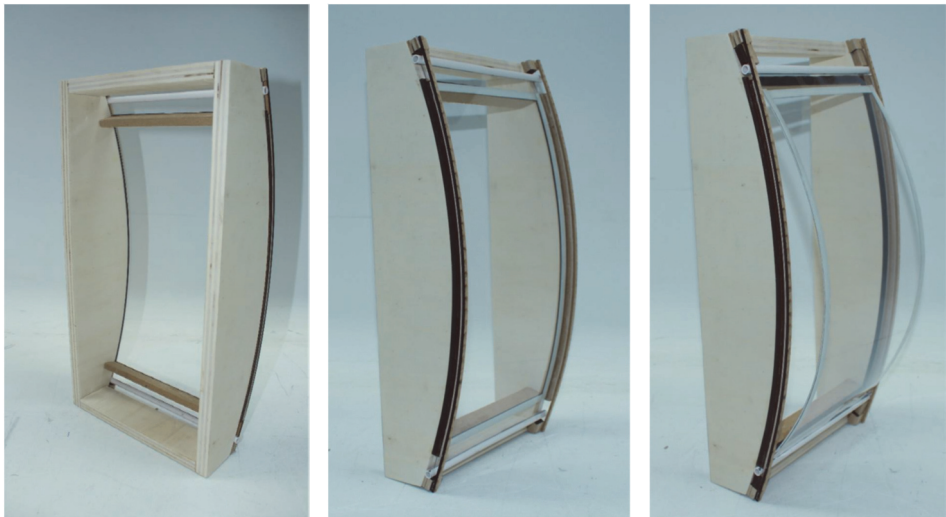


Bild 2-3 Modellierung einer adaptiven Dünnglasfassade mit magnetischer Abdichtung an den Kanten; Masterprojekt von Topcu [10].

2.3 Adaptive Dünnglasfassadenpaneele mit Formgedächtnislegierung

Das Konzept der adaptiven Dünnglasfassaden wurde von Miri [11] weiter untersucht. In dieser Studie wurde die Verformung des Dünnglases mittels einer Formgedächtnislegierung (SMA = Shape Memory Alloy) untersucht. Das Grundkonzept besteht darin, einen

dünnen SMA-Draht in die Konstruktion der Dünnglassassade zu integrieren. Wenn der SMA-Draht erwärmt wird, z.B. durch Sonneneinstrahlung oder durch Anlegen eines elektrischen Stroms, verkürzt sich der Draht und biegt die dünne Glasscheibe.

Zur Prüfung der Idee wurde ein 500 x 800 mm großes Modell angefertigt (Bild 2-4). In diesem Modell wurden chemisch gehärtete Alumosilikat-Dünnglasscheiben mit einer Dicke $t = 0,55$ mm und den Abmessungen 360 x 710 mm mit einem 0,51 mm Flexinol® SMA-Draht verformt. Der SMA-Draht wird in den Hohlraum zwischen zwei dünnen Glasscheiben gelegt und in den oberen Teil des Rahmens verlängert. Durch das Anlegen eines elektrischen Stroms ($\sim 10V$, $\sim 1,2A$) erwärmt und verkürzt sich der SMA-Draht und hebt dadurch den Boden des Dünnglases. Der SMA-Draht kann maximal 3,65 kg heben [11] und hat einen Hub von ca. 5 %. Bei einer Drahtlänge von 1400 mm entspricht das einem Hub von 70 mm. Daraus ergibt sich ein Biegeradius des Dünnglases von ca. 415 mm. Die Reaktionszeit beim Öffnen bzw. Krümmen des Fensters beträgt ca. 20 Sekunden. Das Mock-up konnte die Machbarkeit des Konzeptes erfolgreich nachweisen.

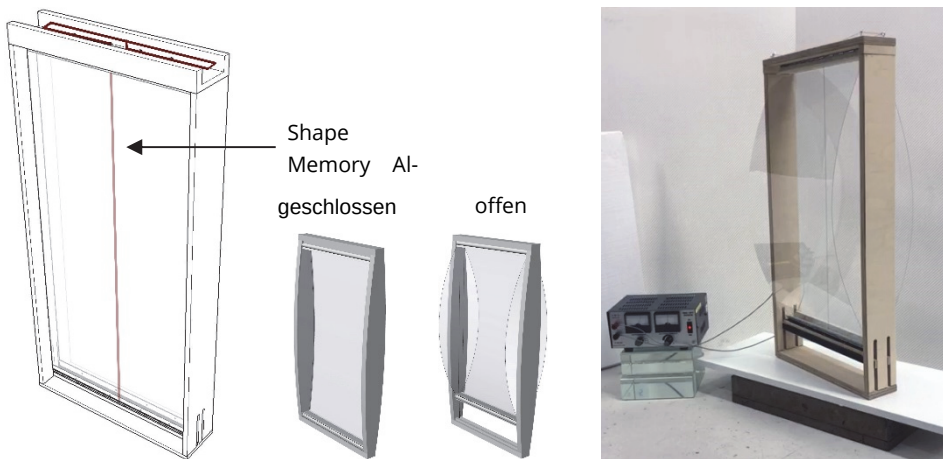


Bild 2-4 Visualisierung und Mock-up des adaptiven Dünnglassassadenkonzeptes mit Formgedächtnislegierung; Masterprojekt von Miri [11].

2.4 Adaptive Dünnglassassadenpaneele mit Soft-Pneumatiksteuerung

Die Arbeit von Zha [12] untersuchte die Verformung einer adaptiven dünnen Glasfassade durch Soft-Pneumatik-Aktoren. Die Grundidee ist, eine Reihe von weichen Polymer-Luftkammern auf die dünne Glasfassadenplatte zu kleben und das Glas durch Aufpumpen der Luftkammern zu biegen (Bild 2-5). Die weichen Polymer-Luftkammern dehnen sich durch das Aufblasen wie ein Ballon aus und beginnen, sich gegenseitig zu berühren, wodurch eine Druckkraft zwischen den Luftkammern erzeugt wird. Diese Druckkraft wirkt in einem gewissen Abstand zum Dünnglas und erzeugt dadurch ein Biegemoment, welches letztendlich zur Verformung des Glases führt.

Als Konzeptnachweis wurde ein 300 x 300 mm großes Modell einer adaptiven Isolierglasscheibe aus Dünnglas mit weichpneumatischen Stellgliedern hergestellt (Bild 2-5). Das Mock-up bestand aus zwei 300 x 300 mm chemisch gehärteten dünnen Alumosilikatglasscheiben mit der Nominaldicke $t = 0,55$ mm sowie einer Reihe von Gummi-Luftkammern, die mittels doppelseitigem Acrylband mit dem Glas verbunden wurden. Um das Biegen der gesamten Isolierglasscheibe zu ermöglichen, wurde ein flexibler Schaumabstandhalter (Edgetech Super Spacer) angebracht, der der Einfachheit halber ebenfalls mit dem doppelseitigen Acrylband auf dem Glas verklebt wurde. Die Luftkammern wurden mithilfe von Silikonschläuchen miteinander verbunden. Durch manuelles Aufblasen mit Luftpumpe konnte das gesamte Paneel gebogen werden. Aufgrund eines nicht geplanten Luftaustritts konnte die Glasscheibe nicht im vollen Umfang gebogen werden. Nichtsdestotrotz demonstrierte das Mock-up erfolgreich die Machbarkeit der Idee.

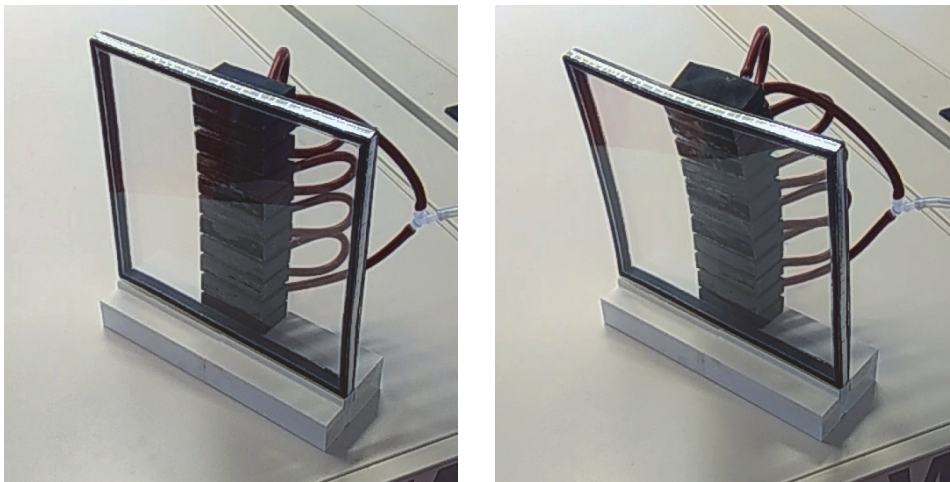


Bild 2-5 Mock-up des adaptiven Dünnglasfassadenpaneels mit Soft-Pneumatiksteuerung; in flacher (links) und leicht gekrümmter Lage (rechts); Masterprojekt von Zha [12].

3 Verbundglasscheiben aus Dünnglas

3.1 Grundkonzept

Das zweite vorgeschlagene Konzept beinhaltet die Herstellung von tragfähigen, steifen und dennoch leichten, dünnen Verbundglasscheiben. Dünnglas ist in der Regel zu flexibel, um flache herkömmliche Fensterverglasungen im Eins-zu-eins-Verfahren zu ersetzen. Der Einsatz von dünnerem Glas ohne zusätzliche Maßnahmen würde zu einer zu starken Verformung der Fensterverglasung führen und damit die Anforderungen an den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit überschreiten. Zudem können die große Verformung und die damit verbundenen potenziell auftretenden Vibrationen und optischen Verformungen zu Verunsicherungen der Gebäudebewohner führen. Um solch große Verformungen zu vermeiden, setzt das im Weiteren vorgestellte Konzept auf Kernmaterialien

zur Versteifung dünner Glasscheiben. Hierbei wird der innere Versteifungskern zwischen den Außenschichten aus Dünnglas verklebt. Der Hauptvorteil dabei ist, dass sehr leichte, aber dennoch stabile und steife Fassadenplatten entstehen. Entscheidend ist, dass die in der aktuellen Studie nicht Dünnglas mit festen Kernmaterialien wie z.B. Polycarbonat [7] kombiniert wird, sondern Hohlkernmuster verwendet werden, um das Gewicht der Platte weiter zu optimieren. Obwohl diese undurchsichtigen oder lichtdurchlässigen Kernmuster einerseits die allgemeine Transparenz des Glasverbundes beeinträchtigen können, tragen sie andererseits zur architektonischen Ausstrahlung und zu speziellen Tageslichteigenschaften des Glasverbundes bei. Die folgenden Unterabschnitte berichten über die untersuchten Konzepte und die Prototypen, die in einer Reihe von MSc-Thesis-Projekten an der TU Delft entstanden sind.

3.2 Dünnglas mit 3D-gedruckten Fachwerk- und Hyparkernmustern

Die Arbeit von Akilo [13], die in Zusammenarbeit mit der Universität Bologna durchgeführt wurde, konzentrierte sich auf die Entwicklung eines dünnen Glasverbundes mit einem 3D-gedruckten Polymerkern. Die Studie von Akilo untersucht die Möglichkeiten des 3D-Drucks eines offenzelligen pyramidenförmigen Fachwerkkerns und eines hyparförmigen Kerns, der die Dünnglasverbundplatte im Inneren versteift. Der Fachwerkkern sorgt für eine optisch offene Struktur, während der hyparförmige Kern eine transparente und strukturierte Optik schafft. Durch zusätzliche kleine Perforationen im hyparförmigen Kern wird der Verbundscheibe ein gewisses Maß an Transparenz verliehen.

Um das Prinzip zu demonstrieren und seine Machbarkeit zu untersuchen, wurden 210 x 297 mm große, dünne Glasverbundplatten konstruiert, die entweder einen Fachwerkkern oder einen perforierten hyparförmigen Kern verwenden (Bild 3-1). Für die Außenscheiben der Verbundplatte wurden einzelne Schichten aus chemisch gehärtetem Alumosilikat-Dünnglas der Dicke $t = 0,7$ mm verwendet. Der 11 mm dicke Kern wurde aus einem Polyethylenterephthalat-Glykol (PETG) modifiziertem Filament mittels Fused Deposition Modelling (FDM)-Technik mit einem Leapfrog-Drucker "Creatr HS" für den Fachwerkkern und einem Kossel XL-Drucker für den hyparförmigen Kern gedruckt. Aufgrund der Größenbeschränkung der Drucker wurde der Fachwerkkern in vier Teilen und der hyparförmige Kern in zwei Teilen gedruckt, die anschließend verklebt wurden. Um das Glas und den PETG-Kern sowie die einzelnen Teile des PETG-Kerns zu verkleben, wurde ein transparenter Zweikomponentenkleber auf Epoxidharzbasis gewählt (Versa-Chem's 5 Minuten Epoxid-System).

Die kleinformatischen Paneele zeigten die architektonische Qualität sowie das Potenzial des Konzepts und erwiesen sich in einem 3-Punkt-Biegeversuch als strukturell effizient. Darüber hinaus wurde ihre strukturelle Steifigkeit erfolgreich mit Allens Sandwichtheorie vorhergesagt [13].

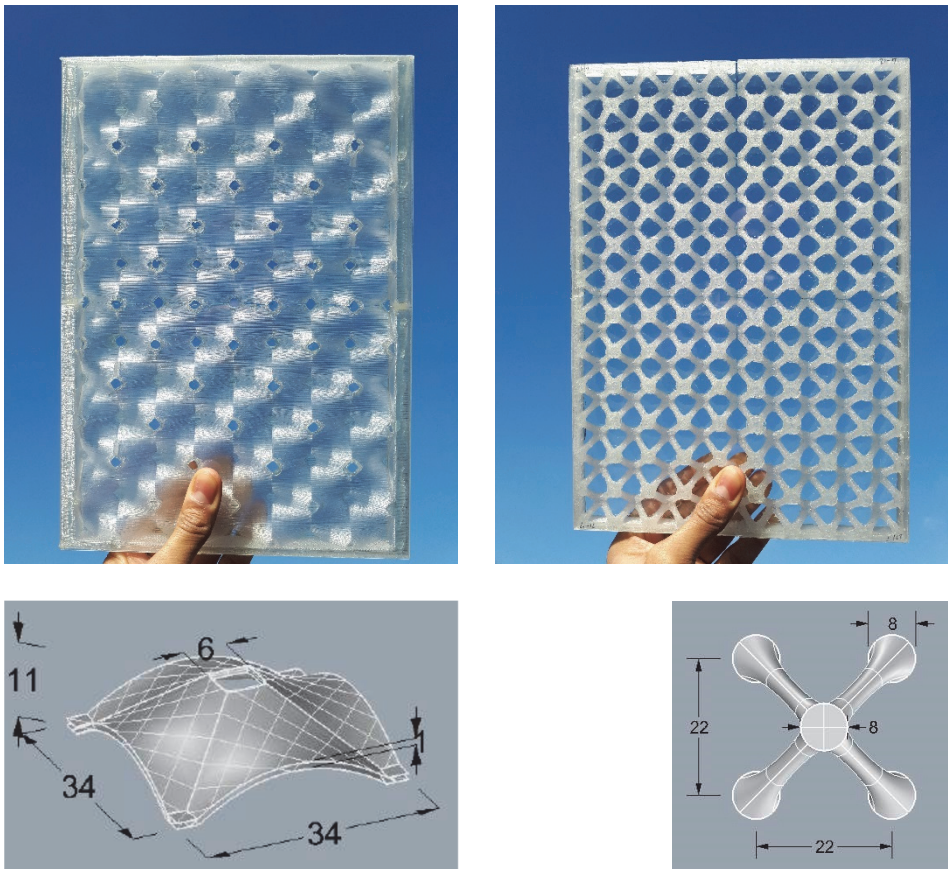


Bild 3-1 Dünnglasverbundplatte mit 3D bedrucktem Fachwerkern (links) und 3D gedrucktem perforiertem hyparförmigem Kern (rechts); Masterprojekt von Akilo [13].

3.3 Dünnglas mit 3D-gedrucktem Voronoi-Kernmuster

Das Konzept des 3D-Druckens eines Polymerkerns für die Herstellung einer dünnen Glasverbundplatte wurde in der Arbeit von Neeskens [14] weiter genutzt. In dieser Arbeit war die untersuchte Strategie, ein strukturell optimiertes Kernmuster zu erzeugen, indem das Kernmaterial nur dort eingesetzt wurde, wo es strukturell am effizientesten ist, um Material und Gewicht zu sparen. Dazu wurde ein Voronoi-Muster angewandt, dessen präzise Geometrie durch Topologieoptimierung erzeugt wurde. In einer Parameterstudie wurden die Auswirkungen der sich ändernden Randbedingungen und der angestrebten Musterdichte untersucht.

Um die Prinzipien und die praktische Machbarkeit zu demonstrieren, wurden kleinformatige Glasverbundplatten mit den Abmessungen 150 x 300 mm hergestellt (Bild 3-2).

Diese bestehen aus den 3D-bedruckten PETG-Kernen mit einer Nenndicke von $t = 8$ mm und zwei Außenschichten aus chemisch gehärtetem Alumosilikatglas mit einer Dicke von je $t = 1$ mm. Um das 3D-gedruckte Voronoi-Kernmuster mit den äußeren Glasschichten zu verbinden, wurde entweder ein TESA 51966 PET-Band mit Acrylklebeschicht oder ein UV-härtender Acrylatklebstoff (Delo Photobond) verwendet.

Die kleinformatischen Prototyp-Paneele veranschaulichten den architektonischen Ausdruck der Verbundkonstruktion. Außerdem wurde die Tragfähigkeit des Systems in einem 3-Punkt-Biegeversuch erfolgreich nachgewiesen. Es zeigte sich jedoch, dass insbesondere der Verbund zwischen den äußeren dünnen Glasscheiben und dem Polymerkern mithilfe des PET-Bandes nur unzureichend gewährleistet war. Die Klebung mit einem Acrylatklebstoff erwies sich jedoch als sehr belastbar [14].

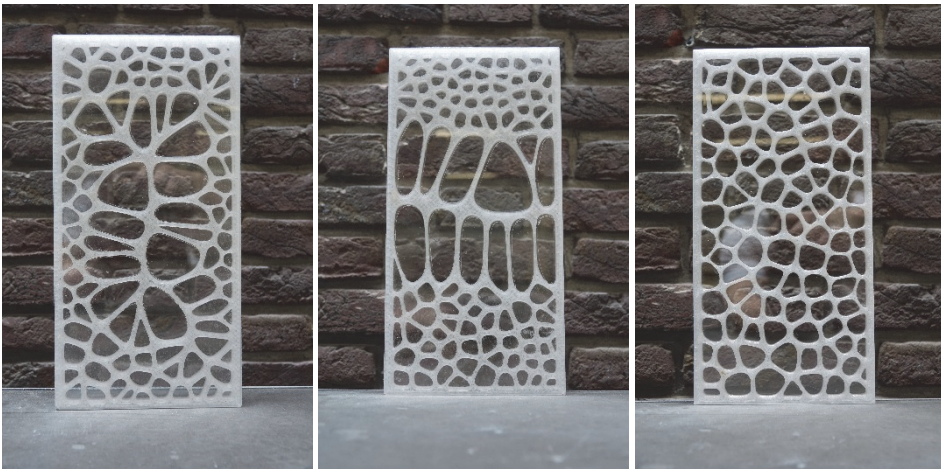


Bild 3-2 Dünnglas mit 3D-gedrucktem Voronoi-Kernmuster; Masterprojekt von Neeskens [14].

4 Diskussion und Zusammenfassung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Projekte zeigen das Potenzial der Anwendung von Dünnglas in der Architektur in Form von adaptiven oder Verbund-Dünnglasscheiben. Der Vorteil der adaptiven Dünnglasscheiben besteht darin, dass sie für die Realisierung von Glashüllen genutzt werden können, die ihre Form in Abhängigkeit von äußeren Parametern anpassen können. Der Vorteil der Verbundglasscheiben aus Dünnglas, die z.B. mit 3D-bedruckten Polymerkernen ausgestattet sind, besteht darin, dass die Scheiben im Vergleich zu herkömmlichen Verbundglasscheiben ein geringeres Gewicht sowie eine höhere Festigkeit und Steifigkeit aufweisen können. Obwohl die vorgestellten Projekte nur von experimenteller Art sind, liefern sie alle architektonisch ansprechende und strukturell vielversprechende Ergebnisse.

Es ist jedoch anzumerken, dass die vorgestellten Prototypen noch relativ klein sind und dass eine weitere Skalierung erforderlich ist, um die volle Machbarkeit der adaptiven und Verbund-Dünnglaskonzepte nachzuweisen. In diesem Zusammenhang ist auch eine weitere Skalierung der verfügbaren Dünnglasscheibengrößen erforderlich, um den Abmessungen für architektonische Anwendungen gerecht zu werden, aber die Glasindustrie schreitet in dieser Hinsicht schnell voran.

Darüber hinaus ist bei den vorgestellten adaptiven Dünnglas-Prototypen zu beachten, dass diese derzeit in monolithischem Glas ausgeführt sind, während in der Baupraxis oft Verbundglas erforderlich ist. Da das Laminieren von zwei oder mehr dünnen Glasschichten zu einer steiferen Platte führen würde, sind die Auswirkungen einer solchen Laminierung auf die Flexibilität und damit die Anpassungsfähigkeit der dünnen Glasscheibe weiter zu untersuchen. Um die Biegebarkeit zu erleichtern, sollte eine solche Laminierung vorzugsweise mit Zwischenlagen mit geringer Steifigkeit erfolgen, die gegebenenfalls speziell für diesen Zweck zu entwickeln sind. Außerdem müssen die Auswirkungen von repetitiven Biegungen und potenziellen Delaminierungsrisiken untersucht werden.

Darüber hinaus ist bei den Verbund-Dünnglasscheiben zu beachten, dass die vorgestellten 3D-Druckkernmuster weiterentwickelt werden können, um die Möglichkeiten der 3D-Formgebung voll auszuschöpfen. Die hier vorgestellten Kernmuster sind noch recht regelmäßig und können auch mit konventionellen Produktionsmethoden hergestellt werden. So könnten beispielsweise die Voronoi-Muster auch durch Schneiden (Laser- oder Wasserstrahl) aus einer Polymerplatte gewonnen werden. Damit könnte die 3D-Drucktechnik genutzt werden, um Muster herzustellen, die weiter auf strukturelle, thermische und optische Eigenschaften optimiert sind und dadurch deutlich von den hier vorgestellten Mustern abweichen. Weitere Masterarbeiten konzentrieren sich derzeit auf die Verwendung von recyceltem PET [15], die Wärmedämmleistung der Verbundplatten und die Möglichkeiten zur Herstellung von kaltgebogenen Dünnglasplatten mit 3D-gedruckten Kernen (Bild 4-1) [16].

Schließlich lässt sich der Schluss ziehen, dass sowohl adaptive als auch Verbund-Dünnglasscheiben vielversprechende Möglichkeiten für architektonische Anwendungen bieten und dass weitere Studien erforderlich sind, um ihr Potenzial voll auszuschöpfen.

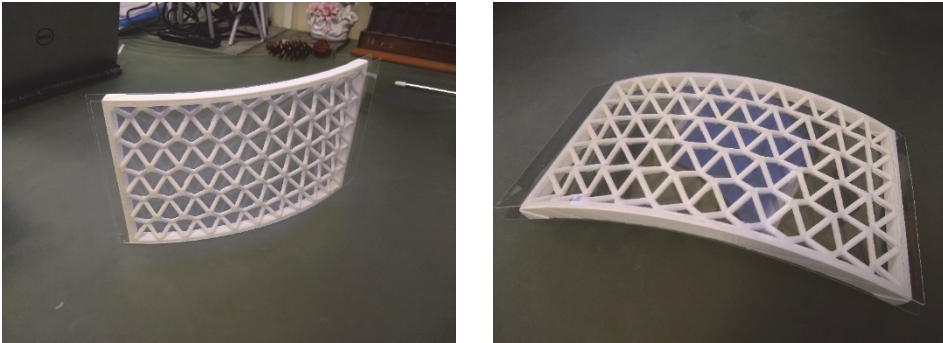


Bild 4-1 Kalt gebogene Dünnglasscheiben mit 3D-gedrucktem, gebogenem Kern; Masterprojekt von Guidi [16].

5 Danksagungen

Der Autor würdigt dankbar die Studienarbeiten von Rafael Ribeiro Silveira, Özhan Topcu, Bahareh Miri, Michele Akilo, Tim Neeskens, Charbel Saleh und Marina Guidi, über die in diesem Beitrag auszugsweise berichtet wurde. Darüber hinaus wird der AGC für die Unterstützung der Versuche durch Bereitstellung der Dünnglasproben gedankt. Großer Dank gilt der Unterstützung durch die Mentoren Marcel Bilow, Telesilla Bristogianni, Tillmann Klein, Lennert van der Linde, Rob Nijse, James O’Callaghan, Frank Schnater und Michela Turrin sowie Tudor Cosmatu (TU Delft), Peter Eigenraam (TU Delft), Fred Veer (TU Delft), Francesco Laccone (Pisa University), Prof. Tomaso Trombetti (University of Bologna), Peter van de Rotten (Octatube), Frank Huijben (ABT) und Chris van der Ploeg (ABT). Ebenso gilt der Dank dem Techniker Kees Baardolf (TU Delft) für die Vorbereitung der Testaufbauten und Montage der Prototypen. Abschließend möchte der Autor dem Team der TU Dresden dafür danken, dass sie den deutschen Text dieses Papiers überprüft haben.

6 Literatur

- [1] Louter, C., Akilo, M., Miri, B., Neeskens, T., Ribeiro Silveira, R., Topcu, Ö., van der Weijde, I., Zha, C., Bilow, M., Turrin, M., Klein, T. & O’Callaghan, J., 2018, Adaptive and composite thin glass concepts for architectural applications, In : Heron. 63, 1/2. Pages 199–218 20 p., 9, <http://heronjournal.nl/63-12/9.html>.
- [2] Schneider, J., Thin Glasses - A future envelope? The Future Envelope 9 – Conference on the Building Envelope. Pages 54–69, Delft, 2015.
- [3] Lambert, H., O’Callaghan, J., 2013. Ultra-thin High Strength Glass Research and Potential Applications. Proceedings of the Glass Performance Days 2013. Pages 95–99, Tampere, 2013.

- [4] Hundevad, J., Super lightweight glass structures – a study, In Proceedings of the GlassCon Global Conference. Pages 314–327, Philadelphia, 2014.
- [5] Neugebauer, J., A movable canopy. In Proceedings of the International Conference on Building Envelope Design and Technology. Advanced Building Skins. Pages 318–325, Graz, 2015.
- [6] Neugebauer, J., Wallner-Novak, M., Lehner, T., Wrulich, C., Baumgartner, M., Movable thin glass elements in façades. In Challenging Glass Conference Proceedings, volume 6,.Pages 195–202, Delft, 2018. doi: 10.7480/cgc.6.2133.
- [7] Weimar, T., Andrés López, S., Research on Thin Glass-Polycarbonate Composite Panels. In Challenging Glass Conference Proceedings, volume 6,.Pages 271–280, 2018. doi: 10.7480/cgc.6.2148.
- [8] Ribeiro Silveira, R., Flexible transparency: A study on thin glass adaptive façade panels. Master's thesis, Delft University of Technology, 2016. uuid:fd32f4fc-6dab-4468-83f2-53abcc12e715.
- [9] Ribeiro Silveira, R., Louter, C., Klein, T., Flexible Transparency - A Study on Adaptive Thin Glass Façade Panels. In Challenging Glass Conference Proceedings, volume 6.Pages 135–148, Delft, 2018. doi: 10.7480/cgc.6.2129.
- [10] Topcu, Ö., Kinetic thin glass façade. Master's thesis, Delft University of Technology, 2017. uuid:77099af6-9d82-4d24-95e9-919fac11d0e8.
- [11] Miri, B., Flexible Transparency With Smart Materials: A study on adaptive thin glass facade developed with Shape memory alloy. Master's thesis, Delft University of Technology, 2018. uuid:79c04819-e826-44fa-ab1b-6db8b617da11.
- [12] Zha, C., Thin glass window embedded with soft pneumatic actuator. Master's thesis, Delft University of Technology, Delft, 2018. uuid:9d10377d-351f-4b17-994c-0e7cb693b3bf.
- [13] Akilo, M., Design and analysis of a composite panel with ultra-thin glass faces and a 3D-printed polymeric core. MSc thesis, University of Bologna, 2018.
- [14] Neeskens, T., Thin glass composites: based on a structural efficiency increasing design strategy. Master's thesis, Delft University of Technology, 2018. uuid:676851fc-0556-4e1e-ac6a-dcdf4b7cfc0a.
- [15] Saleh, C., Ultra Thin composite panel; A research on the durability and stiffness of a composite panel of (thin) glass and Recycled PET, Master's thesis, Delft University of Technology, in progress.
- [16] Guidi, M., Thin glass cold bent sandwich panel, Master's thesis, Delft University of Technology, in progress.