

Glasbau 2019

Bernhard Weller,
Silke Tasche (Hrsg.)

Glasbau 2019

2019 · 394 Seiten

ISBN 978-3-433-03260-2

€ 79*



Der konstruktive Glasbau ist einer der dynamischsten Bereiche des Ingenieurbaus. Namhafte Autoren beschreiben in diesem jährlich erscheinenden Buch den aktuellen Wissensstand in Theorie und Praxis.

Bestellschein

Bitte senden Sie mir:

__ St.	978-3-433-03260-2	Glasbau 2019 print	€ 79,-*
__ St.	909046	Ernst & Sohn Gesamtverzeichnis	€ 0

**Senden Sie Ihren ausgefüllten
Bestellschein als E-Mail-Anhang
marketing@ernst-und-sohn.de
oder Fax **+49 (0) 30 47031-240****

Liefer und Rechnungsanschrift privat geschäftlich

Firma / Name

Kundennummer

Ust.-ID Nr.

Straße / Hausnummer

Telefon

PLZ / Ort / Land

Fax

E-Mail-Adresse für Online-Registrierung

Ansprechpartner

Datum / Unterschrift

www.ernst-und-sohn.de/

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt. Die Versandkosten für Deutschland, Österreich, Schweiz, Liechtenstein und Luxemburg entfallen. Für alle anderen Länder gilt der Preis zzgl. Versandkosten.

Fortsetzungsbezug ist die Belieferung im Abonnement. Sie erhalten zukünftig erscheinende Kalender automatisch zum günstigen Fortsetzungspreis zugeschickt. Eine Kündigung des Abonnements kann bis zu drei Monate vor Erscheinen des neuen Kalenders erfolgen.

Widerruf: Dieser Auftrag kann innerhalb zwei Wochen beim Verlag Ernst & Sohn, Wiley-VCH, Boschstr. 12, D-69469 Weinheim, schriftlich widerrufen werden.

Wiley-VCH GmbH & Co.KGaA
Kundenservice
Boschstraße 12
69469 Weinheim
Deutschland

Bei Fragen wenden Sie sich an:
• +49(0)30 47031-236

Irrtum und Änderungen vorbehalten
Stand: 4/2019

Vorwort

Das vorliegende Buch Glasbau 2019 gliedert sich in vier wesentliche Abschnitte, in denen namhafte Autoren in etwa vierzig Beiträgen den aktuellen Stand des Wissens im konstruktiven Glasbau und in der Fassadentechnik erläutern sowie aus den Bereichen Planung, Bemessung, Ausführung und Forschung berichten.

Der Teil „Bauten und Projekte“ zeigt in diesem Jahr jüngste Beispiele herausragender Glasarchitektur in Neubau und Bestand, die in Entwurf und Planung, konstruktiven Details sowie Herstellung beschrieben werden. Planungshinweise für den Entwurf und die Verwendung von gekrümmtem Glas ergänzen das Kapitel anschaulich.

Der Teil „Bemessung und Konstruktion“ berichtet den aktuellen Stand der CEN-TS als Vornorm für den Eurocode sowie über Untersuchungen und die Modellierung von Verbundglas und dessen Zwischenschichten. Weitere Beiträge diskutieren die Verwendung von Dünnglas und primär tragende Bauteile aus Glas.

Im Teil „Forschung und Entwicklung“ werden geklebte Anwendungen beschrieben. Sie zeugen von der steten Weiterentwicklung dieser Verbindungstechnik. Die Anwendung der DIN 2304 und die Umsetzung von qualitätssicheren und schadensoleranten Klebungen von Glas im Bauwesen sind Thema des Netzwerkes KLEBTECH.

Die Rubrik „Bauprodukte und Bauarten“ stellt Materialien für den Einsatz in der Fassade vor. Ein innovatives und nachgiebiges Randverbundmaterial wurde für den Einsatz in kaltgebogenen Structural-Sealant-Glazing-Fassaden entwickelt. Spezielle Verbundfolien wurden für den Einsatz in klimatisch anspruchsvollen Regionen untersucht.

Herzlicher Dank gilt den Autoren für die Erstellung der Beiträge. Gleichermaßen auch den Mitgliedern des Wissenschaftlichen Beirates für die kritische Sichtung der Beiträge. Ein besonderer Dank gilt Frau Franka Stürmer und Frau Sylvia Rechlin im Verlag für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Wesentlicher Dank gebührt dem Bundesverband Flachglas e. V. und dem Fachverband Konstruktiver Glasbau e. V., die Forschung und Entwicklung im Glasbau maßgeblich anregen und vorantreiben. Beide Fachverbände haben die Herstellung des Buches entscheidend unterstützt.

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

Dresden, März 2019

Inhaltsverzeichnis

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

Bauten und Projekte

Zukunft ist aus Glas gebaut – Aktuelle Projekte der seele Unternehmensgruppe	1
Martien Teich	
Glas aus China ... für die Ikone Neue Nationalgalerie Berlin	9
Martin Lutz, Jochen Schindel	
Zwei Stahl-/Glasdächer in geometrischer Freiform – zwei unterschiedliche Herangehensweisen	23
Stefan Zimmermann, Felix Schmitt	
Ganzglasecken mit tragender Verklebung	33
Barbara Siebert	
Optimierung der entspiegelten Schutzverglasung vor Glasmalereien am Kölner Dom	45
Felix Busse, Ulrich Huber	
Entwerfen und Konstruieren mit gekrümmtem Glas	59
Thiemo Fildhuth, Matthias Oppe, Roman Schieber	
Shadow Boxes – Erkenntnisse aus technischen Untersuchungen und internationalen Projekten	75
Daniel Arztmann	
Entwicklung und Monitoring von PV-T Kollektoren zur Einbindung in Pfosten-Riegel- und Elementfassaden	85
Paul-Rouven Denz, Julia Seeger, Ronja Fartmann	

Bemessung und Konstruktion

Die CEN-TS »Design of Glass Structures« als Vornorm für den Eurocode	95
Markus Feldmann, Pietro Di Biase	
Absturzsichernde Verglasungen in Aufzug, Fahrtreppe und Geländer – vergleichende Betrachtungen	105
Geralt Siebert	
g-Wert Ermittlung innovativer großformatiger Membranelemente	117
Matthias Kersken, Herbert Sinnesbichler	
Flächige Bewertung des Spannungszustandes an Baugläsern mittels Spannungsoptik	129
Marcus Glaser, Jörg Hildebrand, Jean Pierre Bergmann, Benjamin Schaaf, Björn Abeln, Carl Richter, Markus Feldmann	

Beiträge mit Bezug zu Energieeffizienz und Nachhaltigkeit sind im Inhaltsverzeichnis farbig gekennzeichnet.

Zur Normung thermomechanischer Untersuchungen an polymeren Verbundglaszwischen-schichten	141
Michael A. Kraus, Miriam Schuster, Martin Botz, Jens Schneider, Geralt Siebert	
Strukturelle Klebungen im Konstruktiven Glasbau	155
Liana Sonntag, Martien Teich, Peter Eckardt	
Bemessung von ein- und zweiachsig kaltgebogenen Schalenstrukturen aus Dünnglas	169
Gordon Nehring, Geralt Siebert	
Starre, bewegliche und adaptive Dünnglaskonstruktionen	187
Jürgen Neugebauer, Markus Wallner-Novak, Christian Wrulich, Marco Baumgartner, Tim Lehner	
Untersuchungen zur thermomechanischen Modellierung der Resttragfähigkeit von Verbundglas	203
Martin Botz, Michael A. Kraus, Geralt Siebert	
Robustheit und Schadenstoleranz von primär tragenden Bauteilen aus Glas	215
Pietro Di Biase, Markus Feldmann	
Statistische Auswertung und Vorhersage des Bruchbildes von thermisch vorgespanntem Glas	229
Michael A. Kraus, Navid Pourmoghaddam, Geralt Siebert, Jens Schneider	

Forschung und Entwicklung

Dünnglaskonzepte für architektonische Anwendungen	241
Christian Louter	
Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen im Kontext der Forschung im Konstruktiven Glasbau	253
Michael A. Kraus	
Verbund von Glas-Hartschaum-Beton-Sandwichelementen	267
Thorsten Weimar, Christian Hammer	
Ressourceneffiziente Holz-Holzleichtbeton-Glasfassaden Entwicklung und Bewertung	281
Alireza Fadaei, Alex Müllner	
Entwicklung innovativer Mehrscheiben-Isoliergläser mit Angriffshemmung ...	293
Thorsten Weimar, Laura Vuylsteke	
Mechanisches Verhalten zweischnittiger Metall-Silikonverklebungen unter Schubbelastung	305
Vlad Alexandru Silvestru, Oliver Englhardt, Jens Schneider	
Fraktographische Bruchspannungs-Analyse von Acrylglas	319
Christopher Brokmann, Marcel Berlinger, Peer Schrader, Stefan Kolling	
Fassadenintegration eines lastabtragend geklebten PVT-Systems	333
Christian Popp, Bernhard Weller	

Schadensdetektion an strukturellen Glasverbindungen mittels mikroverkapselter Farbstoffe	349
Martin Kahlmeyer, Andreas Winkel, Stefan Böhm	
Experimentelle Untersuchung von Klebverbindungen zwischen lackiertem Glas und holzbasierten Werkstoffen	367
Johannes Giese-Hinz, Bernhard Weller	
Netzwerk KLEBTECH – Qualitätssicheres und schadenstolerantes Kleben von Glas im Bauwesen	381
Felix Nicklisch, Bernhard Weller	
Anwendung der DIN 2304 im Konstruktiven Glasbau	397
Stefan Böhm, Martin Kahlmeyer	

Bauprodukte und Bauarten

Fassaden im digitalen Wandel – Vom Entwurf zum Rückbau	403
Winfried Heusler, Ksenija Kadija	
Analyse thermisch induzierter Spannungen in Glas – Planungsgrundlagen ..	415
Michaela Polakova, Steffen Schäfer, Michael Elstner	
Ködispace 4SG, der Schlüssel für energieeffiziente kaltgebogene Structural-Glazing-Fassaden	439
Christian Scherer, Thomas Scherer, Ernst Semar, Wolfgang Wittwer	
Verbundfolien für den Einsatz in Fassadenanwendungen in klimatisch anspruchsvollen Regionen	451
Steffen Bornemann, Jasmin Weiß, Kristin Riedel, David Daßler, Hamed Hanifi, Matthias Pander, Ulli Zeller	
Intelligente Verglasungen – Bewertung des Einflusses auf die Energieeffizienz	467
Bernhard Weller, Leonie Scheuring, Martin Rauhut	
Freie Fassadengestaltung mittels 3D-Druck	481
Frank Schneider, Johannes Franz, Jörg Petri, Sufyan Rasheed	
Autorenregister	491
Schlagwortverzeichnis	493
Keywordverzeichnis	495
Inserentenverzeichnis	497

Starre, bewegliche und adaptive Dünnglaskonstruktionen

Jürgen Neugebauer¹, Markus Wallner-Novak¹, Christian Wrulich¹, Marco Baumgartner¹, Tim Lehner¹

¹ University of Applied Sciences, FH-Joanneum, Josef Ressel Zentrum für Dünnglastechnologie für Anwendungen im Bauwesen, Alte Post Straße 149, 8020 Graz, Austria

Fassaden prägen nicht nur das äußere Erscheinungsbild, sondern spielen ebenso eine wichtige Rolle bei der Steuerung des Energieflusses und des Energieverbrauchs in Gebäuden, da sie die Schnittstelle zwischen der Außenumgebung und dem Innenraum darstellen. Das interne Raumklima durch die Fassade zu regulieren, gewinnt für nachhaltige Gebäudelösungen immer mehr an Bedeutung. Studien zu klimadaptiven Fassaden zeigen ein sehr hohes Potenzial für verbesserte Raumklimabedingungen in Innenräumen und Energieeinsparungen durch bewegliche Fassaden. Eine Reihe von beweglichen Fassaden wurden in der Vergangenheit realisiert, aber die Verwendung von dünnem Glas mit einer Dicke von 0,5 mm bis 2 mm eröffnet ein brandneues Feld, in dem mit der Geometrie der Außenhaut gespielt werden kann und sie dadurch adaptiv durch Bewegung zu machen.

Rigid, movable and adaptive thin glass constructions. Façades not only shape the appearance of a building, but also play an important role in the control of energy flow and energy consumption in buildings as they represent the interface between the outdoor environment and the indoor occupied space. Regulating internal climate conditions acquires great relevance in new approaches to sustainable building solutions. Studies on climate adaptive façades show a very high potential for improved indoor environmental quality conditions and energy savings by moveable façades. A number of movable façades were realized in the past, but the use of thin glass with a thickness of 0.5 mm to 2 mm opens a brand-new field, that allows for playing with the geometry of the outer skin and the opportunity to make it adaptive by movement.

Schlagwörter: Dünnglas, abwickelbare Flächen, adaptive Systeme

Keywords: thin glass, developable surfaces, adaptive systems

1 Einleitung

Fassaden spielen eine wichtige Rolle bei der Steuerung des Energieflusses und des Energieverbrauchs von Gebäuden, da sie die Schnittstelle zwischen der Außenumgebung und dem Innenraum darstellen. Die Möglichkeit, interne Bedingungen durch die Fassade regulieren zu können, bekommt bei neuen Ansätzen für nachhaltige Gebäudelösungen eine immer größer werdende Bedeutung. So kann z.B. der Wärmestrom durch bewegliche Dünnglaselemente reguliert oder das Tageslicht im Inneren durch Lichtlenkungssysteme optimiert werden. Bauphysikalische Studien zu klimaanpassenden Fassaden zeigen ein sehr hohes Potenzial für verbesserte Raumklimabedingungen bzw. mehr Behaglichkeit in Innenräumen sowie Energieeinsparungen durch bewegliche bzw. adaptive Fassaden. Eine Reihe von beweglichen Fassaden wurde in der Vergangenheit realisiert. In den meisten Fällen wurden starre Elemente gelenkig gekoppelt. Die Verwendung von dünnem Glas

mit einer Dicke von 0,5 mm bis 2 mm eröffnet hingegen ein brandneues Feld, in dem mit der Geometrie der Außenhaut gespielt werden kann und der Möglichkeit, sie adaptiv durch Bewegung zu machen.

Dünnes Glas hat eine sehr geringe Biegesteifigkeit und erfordert demnach eine gekrümmte Geometrie, um eine statische Steifigkeit zu erzielen. Bei kinetischen Fassaden ermöglicht diese hohe Flexibilität des Dünnglases neue Optionen für Größen- und Positionsänderungen durch Biegen von Elementen, anstatt Scharniere in einem System aus faltbaren starren Platten zu implementieren. Die Geometrien basieren auf der bekannten Theorie der „abwickelbaren Flächen“. Die Anwendung dieser Theorie ermöglicht Fassaden, die aus kaltgebogenen Dünngläsern oder aus den, beim sogenannten „Laminations-Biegen“ vorgekrümmten, Verbundsicherheitsgläsern (VSG) hergestellt werden.

Durch Sensoren können die Umwelteinflüsse wie z.B. Temperatur, Sonneneinstrahlung oder Feuchtigkeit gemessen werden und als elektronische Information an ein Kontrollsystem weitergeleitet werden. Diese Steuerungssysteme geben die Ansteuerungssignale an die Aktuatoren, die eine Bewegung in der Fassade einleiten. Neben diesen gesteuerten Systemen besteht auch die Möglichkeit, diese Bewegung autonom durch z.B. Bi-Metalle zu initiieren.

2 Bewegungsprinzipien

Als Grundlage für die Bewegungen in der Fassade müssen deren Prinzipien definiert werden. Die Translation, Rotation und Kombinationen beider, in Form von ein-, zwei- und dreidimensionalen Kurven von Objekten, bilden die Grundlage für die sogenannten „abwickelbaren“ Flächen. In Bild 2-1 sind die wesentlichen Bewegungsprinzipien abgebildet. [1]

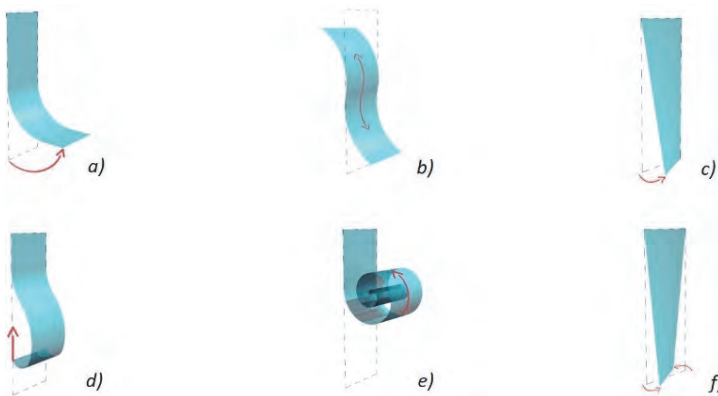


Bild 2-1 Bewegungsprinzipien: a) Biegen, b) Flattern, c) Punkt drehen, d) Raffen, e) Rollen und f) Verdrehen.

3 Gauß'sche Krümmung

Die Bewertung, ob eine Fläche „abwickelbar“ ist oder nicht, kann mit Hilfe der Gauß'schen Krümmung durchgeführt werden. Bei der Gauß'schen Krümmungsanalyse wird mittels mathematischer Formeln eine bestehende dreidimensionale Oberfläche analysiert. Normalebenen werden durch den zur Oberfläche rechtwinkligen Normalvektor eines beliebigen Punktes definiert. Aus dem Verschneiden von den Normalebenen, die diesen Normalvektor beinhalten, und der Geometrie der Oberfläche entstehen Raumkurven. [2]

Minimal- und Maximalwerte der Krümmung dieser Raumkurve ergeben sich durch analysieren der weiteren Punkte an der Oberfläche und werden als Hauptkrümmungen k_1 , k_2 der Oberfläche bezeichnet, wie in Bild 3-1 dargestellt.

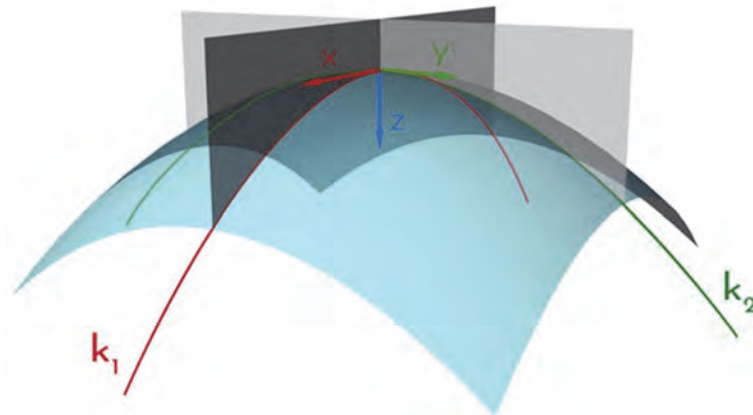


Bild 3-1 Gauß'sche Krümmung.

Durch Multiplikation beider Hauptkrümmungen, gemäß der Gleichung (3.1), entsteht die Gauß'sche Krümmung K . Diese Krümmung kann einen positiven, negativen oder neutralen (Null) Wert annehmen, siehe Bild 3-2. Nur bei Geometrien mit einer neutralen Gauß'schen Krümmung ist die Fläche abwickelbar und eine Herstellung bzw. Bearbeitung als kaltgebogenes Dünnglas durchführbar. [2]

$$K = k_1 \cdot k_2 \quad (3.1)$$

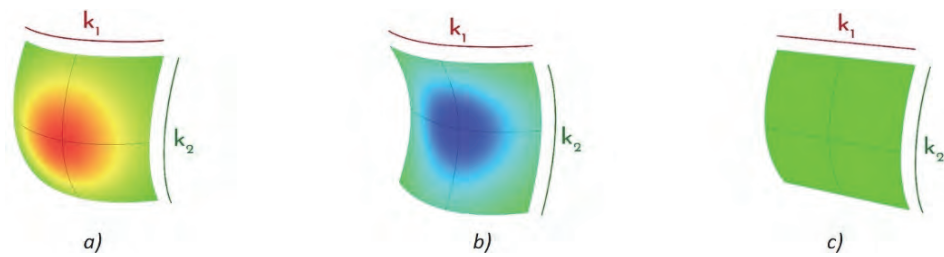


Bild 3-2 Arten der Gauß'schen Krümmung; a) positiv, b) negativ und c) neutral/null.

4 Festigkeiten von Dünnglas und Biegeradien

Um abwickelbare Flächen hinsichtlich der zuvor beschriebenen Herstellbarkeit beurteilen zu können, sind ebenso die Glasfestigkeiten zu beachten. Hierbei ist es als ersten Näherungsansatz hilfreich, Werte für minimale Radien bzw. maximale Krümmungen zu kennen. Bei beweglichen Systemen ist außerdem eine mögliche Abminderung der Festigkeiten durch zyklische Ermüdung zu beachten. [3]

Die Gläser können entweder thermisch (durch Erwärmung über den Transformationspunkt T_g) oder chemisch (durch Ionenaustausch unterhalb des Transformationspunktes T_g) vorgespannt werden. Die charakteristischen Werte für die Festigkeiten (Floatglas $f_k = 45 \text{ N/mm}^2$, TVG $f_k = 70 \text{ N/mm}^2$, ESG $f_k = 120 \text{ N/mm}^2$ [4], und CVG - chemisch vorgespanntes Glas - $f_k = 150 \text{ N/mm}^2$ [5]) werden in Normen angegeben. Aus diesen charakteristischen Festigkeitswerten kann auf der Basis der Differentialgleichungen der Biegetheorie ein minimaler Krümmungsradius (bzw. maximale Krümmung) gemäß der Gleichung (4.1) ermittelt werden. In der folgenden Tabelle 4-1 sind beispielhaft einige Werte für den kleinsten Biegeradius in Abhängigkeit von der Glasdicke d dem E -Modul von Glas E und den lt. Normen angegeben. [2]

Tabelle 4-1 Minimale Biegeradien zufolge der charakteristischen Festigkeit von Glas.

Glasdicke d [mm]	Floatglas r_{min} [mm]	TVG r_{min} [mm]	ESG r_{min} [mm]	CVG r_{min} [mm]
0,5	389	250	146	117
1,0	778	500	292	233
1,5	1167	750	438	350
2,0	1556	1000	583	467

$$r_{min} = E \cdot d / (2 \cdot f_k) \quad (4.1)$$

5 Konstruktionen aus Dünnglas

Dünnglas besitzt eine hohe Flexibilität und ist daher sehr gut für Glaselemente oder Fassaden geeignet, die aus kaltgebogenen Dünngläsern oder aus beim sogenannten „Laminations-Biegen“ vorgekrümmten Verbundsicherheitsgläsern (VSG) hergestellt werden. Bei beweglichen Fassaden ermöglicht außerdem diese hohe Flexibilität neue Möglichkeiten für Größen- und Positionsänderungen durch Biegen von Elementen, anstatt dem Implementieren von Scharnieren in einem System aus faltbaren starren Elementen.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil, der für die Anwendung von Dünnglas spricht, ist der ökologische Fußabdruck. Neben der positiven Auswirkung auf die Umweltbeeinflussungen durch geringeren Materialbedarf können auch noch sekundäre Einflüsse wie z.B. geringeres Gewicht beim Transport genannt werden. Die einfachere Montage ist ein weiterer Aspekt, der berücksichtigt werden kann. Durch das geringere Eigengewicht der einzelnen Glaselemente kann eventuell auf den Einsatz von Kränen bei der Montage verzichtet werden. Konstruktionen aus Dünnglas können in starre, bewegliche und adaptive Strukturen eingeteilt werden.

5.1 Starre Strukturen

Die Definition von starren Strukturen im Vergleich zu beweglichen Strukturen kann einfach beschrieben werden. Bei starren Strukturen nutzt man die Flexibilität der dünnen Gläser aus, um diese kalt zu verformen. Diese Gläser behalten ihre verformte Geometrie über ihre gesamte Lebensdauer. Beispielhaft für mögliche Anwendungen starrer Systeme werden im Folgenden das Isolierglas oder das Verbundsicherheitsglas in einem realisierten Projekt beschrieben.

5.1.1 Isolierglas

Bei Mehrscheibenisoliergläsern mit zwei oder mehr Kammern sind die innenliegenden Gläser schon seit längerem als Dünnglas analysiert und auch schon in laufende Produktionen eingeflossen. Hier ergibt die Gewichtsreduktion mehrfach Vorteile wie z.B. für die Auslegung der Befestigungen oder Beschläge von Fenstern.

Zusätzlich gibt es Überlegungen einerseits, die hohe Flexibilität (kaltverformte Gläser) und andererseits das günstige Verhalten beim Lastabtrag durch Membrankräfte in der Glasfläche für den Einsatz bei gekrümmten Isoliergläsern auszunutzen.

5.1.2 Science Tower

Das Beispiel des Science Towers in Graz zeigt das hohe Potenzial von Dünngläsern. Die äußere Hülle der zweischaligen Fassade, wie sie in Bild 5-1 a) dargestellt ist, wurde im

unteren Bereich bis zur siebten Etage mit einem VSG aus 2 x 2 mm thermisch vorgespanntem Dünnglas realisiert. Diese Gläser wurden an den vier Ecken bzw. an vier Punkten der Längskanten, wie in Bild 5-1 b) dargestellt gelagert.

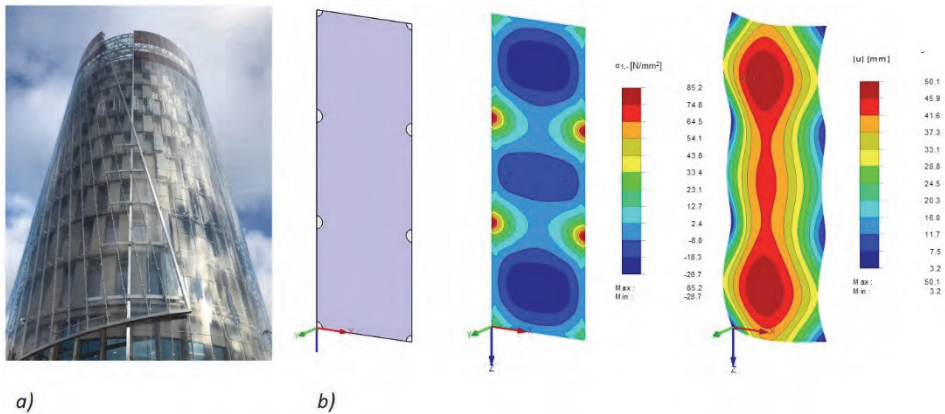


Bild 5-1 Anwendungsbeispiel für starre Systeme am Science Tower in Graz.

Diese qualitativ durchgeführte FE-Berechnung mit einer Einheitsflächenlast von $q = 1,0 \text{ kN/m}^2$ zeigt für den anzusetzenden Wind von ca. $w = 0,3 \text{ kN/m}^2$ für die äußere Hülle, dass der Spannungsnachweis erbracht werden kann, aber der Verformungsnachweis nicht erfüllt wird. Hier muss für den statischen Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eine Diskussion über maximal zulässige Verformungen eröffnet werden. Diese Diskussion muss aber ebenso eine mögliche Festigkeitsreduktion durch eine zyklische Ermüdung inkludieren.

5.2 Bewegliche adaptive Strukturen

Im Gegensatz zu starren Strukturen, wie im vorangegangenen Kapitel 5.1 beschrieben, sind bewegliche bzw. adaptive Dünnglassysteme einer permanenten zyklischen oder einer anlassbezogenen Verformung unterlegen. Als Beispiel für bewegliche bzw. adaptiven Systeme sind die folgenden studentischen Arbeiten von Architekturstudierenden auf Masterlevel angeführt. Sie dienen beispielhaft für das enorme Potenzial, das sich durch die Anwendung von Dünnglas mit dessen Flexibilität ergibt.

5.2.1 Blüte

Als biologisches Vorbild für diese Studie diente die Venusfliegenfalle „*Dionaea muscipula*“ oder die fleischfressende Unterwasserpflanze „*Aldrovanda vesiculosa*“ mit deren

Fallenbewegung. Bestandteile dieser Falle sind zwei seitliche Lappen, die mit einer Mittelrippe gelenkig verbunden sind und durch trickreiche Auslösemechanismen zur Falle werden.

Die Lappen und der zentrale Bereich weisen eine höhere Steifigkeit auf, als die flexiblen Gelenkzonen, die eine gekrümmte Faltkurve bilden. Nach dem Auslösen durch die Beute ändert sich die Biegungskrümmung der Mittelrippe, hervorgerufen durch eine Änderung des Turgor-Drucks. Die Krümmung wird von Faltmechanismen verstärkt und führt zu einem vollständigen Verschluss der Falle.

Als Vorstudien für die Abstraktion und technische Anwendbarkeit wurden Schleicher 2016 sowie Tachi 2009 herangezogen, die in Acadia 2016 [6] zusammengefasst wurden. Das Bild 5-2 zeigt die Ergebnisse einer Parameterstudie in geöffneter bzw. geschlossener Stellung, die auf der Basis der vorab erwähnten Literatur durchgeführt wurde.

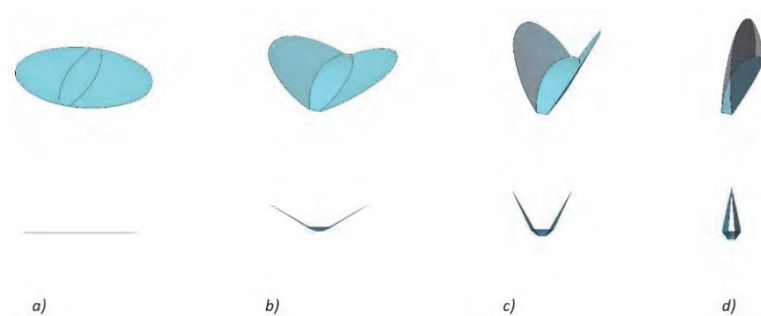


Bild 5-2 Parameterstudie a) offen, b) $\approx 30^\circ$ Schließvorgang, c) $\approx 60^\circ$ Schließvorgang, d) geschlossen.

Durch die Anordnung in der Fassade lassen sich die unterschiedlichsten Varianten des Erscheinungsbildes erzeugen. In Bild 5-3 ist beispielhaft eine mögliche Struktur der Fassade, die sich durch unterschiedliche geöffnete bzw. geschlossene Blüten ergibt, abgebildet.

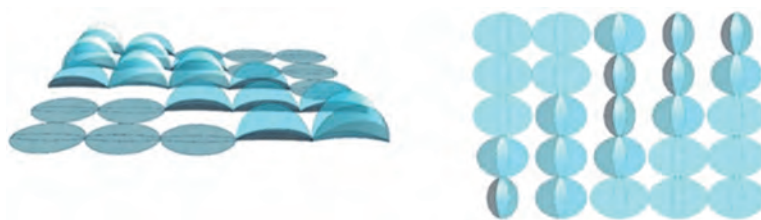


Bild 5-3 Anordnungskomposition der Blüten, beispielsweise als Fassadensystem.

5.2.2 Dancing Façade

Architektur ist eine facettenreiche Disziplin, welche im ständigen Diskurs mit dem Menschen steht und den Raum von morgen formt. Es bedarf daher an kreativen Ideen, um neue innovative Schritte für die Zukunft zu gestalten. Ein Instrument dafür bietet die Entwicklung einer vertikal funktionierenden Stadt im urbanen Kontext der Metropole „Manhattan“. Die Organisation im Stadthochhaus ist ein Zusammenspiel aus privaten und öffentlichen Bereichen, welche durch Freiräume miteinander vernetzt werden. Eine innovative Dünnglasfassade gibt diesem vertikalen Konzept die entsprechende architektonische Hülle.

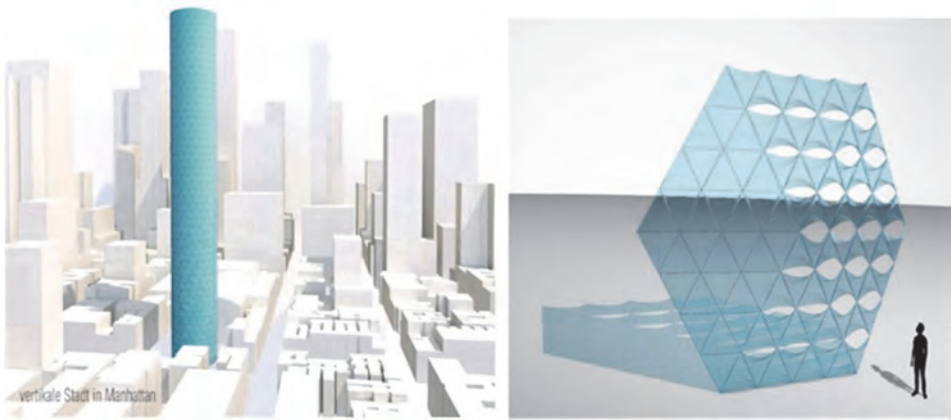


Bild 5-4 Bewegliche Dünnglasfassade bei einem Hochhaus in Manhattan.

Die Flexibilität von Dünnglas bietet neue Maßstäbe in der Entwicklung eines intelligenten Fassadensystems. Die architektonische Antwort dazu zeigt sich in der „dancing façade“, die es ermöglicht, natürliches Licht tief in den Innenraum zu lenken und die konventionellen Blend- und Sonnenschutzanforderungen in einem System zu verknüpfen. Das Tageslicht wird dabei über Reflexionen an der Glasoberfläche in den Innenraum reflektiert und erzeugt eine diffuse Tageslichtstimmung. Die „tanzenden“ Fassadenmodule lassen sich dabei stufenlos verstellen, womit der Sonnenlichteintrag über den Tagesverlauf maximiert wird. Das optische Erscheinungsbild der Fassade wird demnach von den Bedürfnissen der Nutzer und den Abhängigkeiten der Tageslichtnutzung gesteuert.

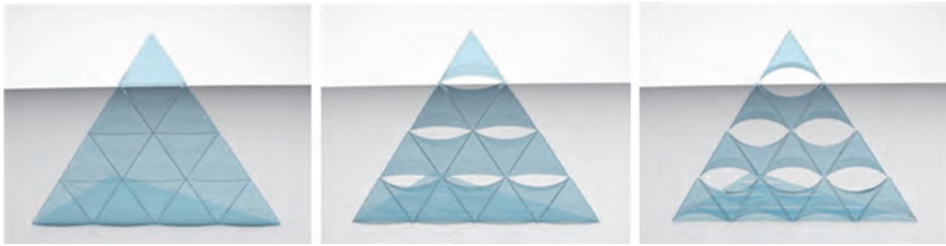


Bild 5-5 Mögliche Positionen der „dancing façade“.

Nach den Entwurfsangaben wurde ein 1:1 Modell gebaut, siehe in Bild 5-6 a). Dieses Modell dient einerseits dazu, den Bewegungsmechanismus zu studieren und andererseits wurde die Fassadengeometrie vermessen. Die Aufnahme der Naturmaße wurde mit der Hilfe des Systems Proliner der Firma Prodim durchgeführt. Durch eine sehr große Anzahl von Messpunkten, wie in Bild 5-6 b) dargestellt, erstellt das Softwaresystem eine 3-D Geometrie der Flächen. Durch die Weiterbearbeitung mittels CAD Softwareprogramm wurden vertikale und horizontale Schnitte durch Flächen gelegt. Anhand dieser Schnitte, siehe Bild 5-6 c), und den daraus ermittelten Biegeradien wurden die Ergebnissen der FE-Berechnungen validiert.

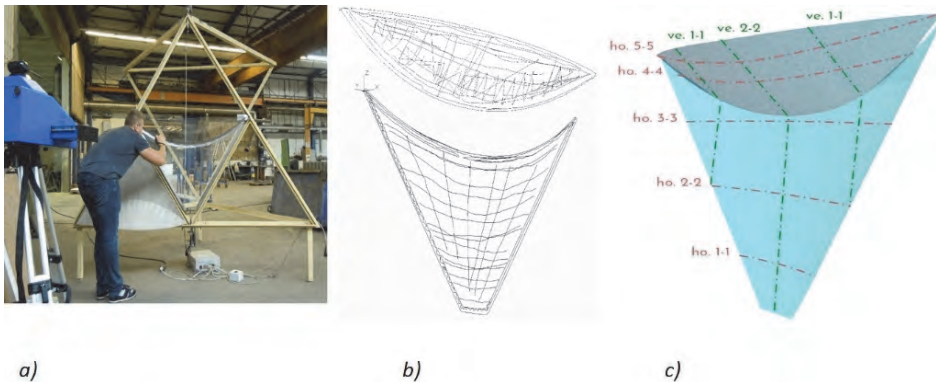


Bild 5-6 Analyse der Geometrie an einem Muster der „dancing façade“.

5.2.3 Chamäleon Fassade

Arthur Schopenhauer bezeichnete Architektur als „gefrorene Musik“, doch ist diese Beschreibung heute noch zeitgemäß oder kann Architektur im 21. Jahrhundert auch etwas Dynamisches sein? Bildet man eine Symbiose aus Dünnglas und Bi-Metallstreifen ist eine Fassade nicht länger nur „gefrorene Musik“ – sondern Musik. Die Utopie eines

„Gleitzeithauses“, das sich ohne hohen technischen Aufwand auf sämtliche Umwelteinflüsse autonom abstimmt, wird dadurch Realität. Ein Gebäude ist somit kein statisches Objekt mehr – es wird dank der Fassade anpassungsfähig wie ein Chamäleon.

Ein Bi-Metallstreifen besteht aus zwei kraftschlüssig miteinander verbundenen Metallen mit möglichst unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Das bedeutet sie dehnen sich unter Wärmeeinfluss unterschiedlich stark aus. Daraus resultiert, dass bei der Erhitzung eines Bi-Metallstreifens sich dieser in eine Richtung verbiegt, da sich eines der beiden Metalle stärker ausdehnt als das andere. Diese Eigenschaft macht sich die „Chamäleon Fassade“ zu Nutze.

Die Funktionsweise der „Chamäleon Fassade“ ist denkbar einfach. Eine 40 x 40 cm große zylindrisch gebogene Verbunddünnglasscheibe mit einer Gesamtdicke von etwa 2 mm wird auf der Vorderseite mit Bi-Metallstreifen (1 cm breit) umrandet, welche kraftschlüssig mit der Dünnglasscheibe verklebt werden. Drei Ecken der Glasscheibe werden mit der Unterkonstruktion fest verankert, sind somit also starr. Die vierte Ecke wird ausschließlich mit einem Abstandhalter von der Unterkonstruktion auf Distanz gehalten, bleibt daher nach außen hin frei beweglich. Erhitzen sich aufgrund von Sonneneinstrahlung die Bi-Metallstreifen, beginnen sich diese zu krümmen. Aufgrund des kraftschlüssigen Verbundes zwischen Dünnglas und Bimetall nimmt die Glasscheibe die Bewegung des Streifens auf, was zu einem Spalt in der Fassade führt. Dieser kann beispielsweise zu einer autonomen und energiesparenden Belüftung eines Raumes dienen.

Ein weiteres Feature, dass sich diese Fassade zu Nutzen macht, ist eine thermochrome Folie. Die Folie befindet sich zwischen zwei Glasscheiben und reagiert auf Wärme. Erhöht sich mit zunehmender Sonneneinstrahlung die Oberflächentemperatur des Glases – und somit der Folie – wird diese undurchsichtig. Man kennt diesen Effekt vor allem von elektrochromen Folien, welche denselben Effekt erzielen, dafür allerdings Strom benötigen und dadurch nicht autonom sind.

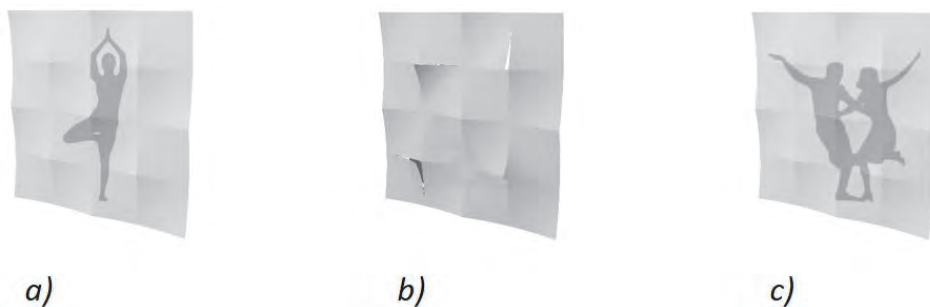


Bild 5-7 Anwendung: Tagesablauf eines Gebäudes mittels „Chamäleon Fassade“.

Bei Tagesanbruch ist die Außentemperatur noch niedrig und die ersten Sonnenstrahlen fallen auf die Hülle des Gebäudes. Aufgrund der zu geringen Wärmeeinstrahlung durch die Sonne bleiben die Scheiben transparent und geschlossen, siehe in Bild 5-7 a).

Zu Mittag steht die Sonne am Zenit, mittlerweile würde die Innentemperatur des Gebäudes deutlich erhöht sein. Mit der zunehmenden Wärmeentwicklung durch die Sonne haben sich die thermochromen Folien verdunkelt. Des Weiteren herrscht ein angenehmer Luftzug im Gebäude, denn einige der Glaselemente sind als Belüftungselemente auserkoren worden und haben sich aufgrund der Hitze und der daraus resultierenden Bewegung der Bi-Metallstreifen bereits aufgeklappt, siehe in Bild 5-7 b).

Die Abendsonne strahlt auf die Fassade, die meisten der Scheiben sind allerdings bereits wieder transparent geworden und alle Elemente der Fassade sind geschlossen, da die Kraft der Sonne nicht mehr ausreicht, um die Bimetalle zum „Tanzen“ zu bringen. Die Durchlüftung des Gebäudes ist somit ebenfalls bereits beendet, siehe in Bild 5-7 c).

Das Resultat ist eine Fassade, welche sich völlig autonom seinen Umwelteinflüssen anpasst, wodurch eine Fassade nicht mehr länger nur die Hülle, sondern im wahrsten Sinne des Wortes die Haut eines Gebäudes ist, welche atmet und lebt.

5.3 Adaptive Strukturen

Adaptivität (von lat. adaptare: anpassen) beschreibt im Zusammenhang mit Dünnglas die Fähigkeit, autonom auf äußere Einflüsse zu reagieren. Diese Reaktion kann auf verschiedene Arten erfolgen. Änderungen an der Geometrie können durch Aktoren vorgenommen werden. Die Steuerung und Regelung der Aktorik benötigt eine Sensorik, die in der Lage ist, die Auswirkungen der Umgebungseinflüsse auf das System zu erfassen. Daraufhin kann eine gesteuerte oder geregelte Reaktion der Aktorik erfolgen und das System optimal für die vorherrschende Situation konfigurieren [7]. Neben den gesteuerten Systemen gibt es auch Systeme, die autonom reagieren, wie es schon am Beispiel der Chamäleon Fassade beschrieben wurde. So können adaptive Systeme mit dem folgenden Organigramm in Bild 5-8 einfach beschrieben werden.



Bild 5-8 Adaptive Systeme.

5.3.1 Sensoren

Mittels Sensoren wie z.B. Thermometer, Hygrometer oder Pyranometer werden Umwelteinflüsse wie z.B. Temperatur, Feuchtigkeit oder Sonneneinstrahlung gemessen und in elektrische Impulse umgewandelt. Diese Impulse dienen der Systemsteuerung zur Erzeugung der Ansteuerungssignale der Aktuatoren.

5.3.2 Aktuatoren

Bei Aktuatoren handelt es sich meist um Elektromotoren oder elektromagnetische Ventile, die in der Motorsteuerung und in Komfortsystemen zum Einsatz kommen. Sie sind dafür zuständig, die Signale des Steuergerätes in eine Aktion umzusetzen.

5.3.3 Gesteuerte Aktuatoren

Ein Impuls, welcher von Sensoren erfasst wird, steht bei den kontrollierten Systemen am Anfang der Prozess-Kette. Zum Aktuator wird ein Befehl weitergeleitet, der dann die Bewegung auslöst. Zum Beispiel wandeln Elektro-Linearaktuatoren elektrische Energie in geradlinige Bewegung um.



Bild 5-9 Elektrolinearaktor [8].

5.3.4 Autonome Aktuatoren

Intelligente oder „smarte“ Materialien führen, bedingt durch ihre Eigenschaften, den Kontroll-Prozess selbst ohne Technologie-Einsatz durch. Adaptive Materialien können in zwei Gruppen unterteilt werden. „Semi smarte“ Materialien können Veränderungen ein- bis mehrmalig aufnehmen, während „smarte“ Materialien permanent reversible Eigenschaften aufweisen. Physikalische Einflüsse wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Licht, Druck, elektrische, magnetische oder chemische Impulse können solche Veränderungen bei diesen Materialien auslösen. [1]

Thermobimetall-Aktuatoren

Aktoren aus Thermobimetall sind thermisch aktive Bauteile, die bei Temperaturänderung eine kontinuierliche Bewegung ausführen. Neben den Bi-Metallen in Streifenform oder

in aufgewickelter Form stellen die thermischen Schnappscheiben und Schnappelemente, die auf Grund ihrer Geometrie diskontinuierliche Arbeit verrichten, eine Sonderanwendung dar, wie in Bild 6-4 dargestellt.

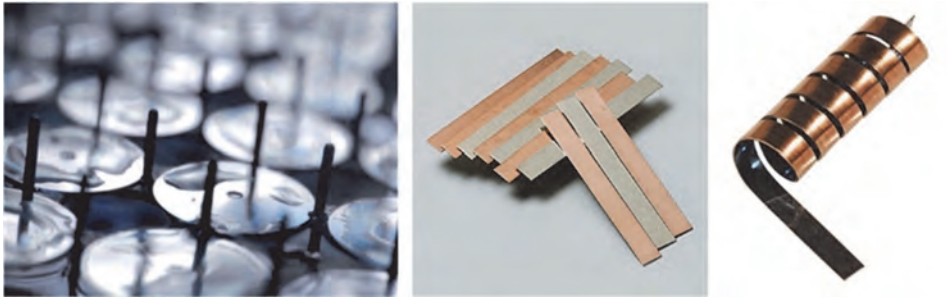


Bild 5-10 Bi-Metall Aktuatoren [9].

Bi-Wood Aktuatoren

„Das Quellverhalten von Holz zunutze machen“. Dieser Ansatz ist ein Pendant zu thermisch aktiven Bauteilen. Während bei Thermobimetallen Temperaturänderungen die Bewegung steuern, ist die Luftfeuchtigkeit für Formveränderungen bei feuchte-aktiven Elementen verantwortlich. In der Natur finden solche Prozesse ständig statt, ein Beispiel dafür ist der den unterschiedlichen Witterungseinflüssen ausgesetzte Zapfen. Im feuchten Zustand geschlossen, öffnet sich die Struktur durch windbedingte Trocknung. Bei Holz wird diese Feuchtigkeitsverformung als Quellen und Schwinden bezeichnet, mit zwei möglichst quellunterschiedlichen Holzelementen entsteht so ein Typ des Antriebs, aufgegriffen in der Natur und ermöglicht durch natürliche Prozesse. [10]



Bild 5-11 Bi-Wood Aktuatoren, a) Naturvorbild Zapfen feucht bzw. trocken, b) Holzschindel, c) Holzschindel [1].

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bauphysikalische Prinzipien zeigen als die Schnittstelle zwischen der Außenumgebung und dem Innenraum die wichtige Rolle der Fassade bei der Steuerung des Energieflusses und des Energieverbrauchs von Gebäuden. Adaptive bzw. bewegliche Fassadenelemente zeigen, dass die Behaglichkeit im Gebäudeinneren positiv beeinflusst werden kann. Hierbei eröffnet der Einsatz von dünnem Glas mit einer Dicke von 0,5 mm bis 2 mm ein brandneues Feld für neue Anwendungen in der Gebäudehülle. Mit der Möglichkeit mit Geometrie der Außenhaut zu spielen und sie durch Bewegung adaptiv zu machen, entstehen neue spannende Werkzeuge für den architektonischen Entwurf. Dünnglas besitzt eine hohe Flexibilität und ist daher sehr geeignet für Glaselemente oder Fassaden, die aus kaltgebogenen Dünngläsern oder aus beim sogenannten „Laminations-Biegen“ vorgekrümmten Verbundsicherheitsgläsern (VSG) hergestellt werden. Konstruktionen aus Dünnglas können ihrem Prinzip nach in starre, bewegliche oder adaptive Strukturen eingeteilt werden. Ein Ziel für die Zukunft ist die Weiterentwicklung von möglichen Anwendungsfeldern für Dünnglas.

7 Wissenswertes

Diese Forschung wurde im Rahmen eines von der Christian Doppler Forschungsgesellschaft geförderten Forschungsprojektes am „Josef Ressel Zentrum für Dünnglastechnologie für Anwendungen im Bauwesen“ in Zusammenarbeit mit den wirtschaftlichen Partnern LISEC Austria GmbH und SFL technologies GmbH durchgeführt.

8 Literatur

- [1] Schumacher, M.; Schaeffer, O.; Vogt, M.; MOVE: Architektur in Bewegung – Dynamische Komponenten und Bauteile; Berlin: Walter de Gruyter, 2012.
- [2] Neugebauer, J.; Lehner, T.; Baumgartner, M.; Wallner-Novak, M.; Wrulich, Ch.; Adaptive and Moveable Structures Made from Thin Glass; in: GlassConGlobal Conference Proceedings. Innovation in glass technology. Chicago. Hg. v. FCA International, September 2018.
- [3] Hilcken, J; Zyklische Ermüdung von thermisch entspanntem und thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas; Springer; 2015.
- [4] ÖNORM B 3716-1; Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau, Teil 1: Grundlagen; 2012.
- [5] EN 12337-1; Glas im Bauwesen – Chemisch vorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1: Definition und Beschreibung.
- [6] Körner, A.; Mader, A.; Saffarian, S., Knippers, J.: Bio-Inspired Kinetic Curved-Line Folding for Architectural Applications. ITKE/University of Stuttgart. In: Acadia2016.1993.

-
- [7] <https://www.ibb.uni-stuttgart.de/forschung/nichtlinear-und-adaptiv/Institut>; Institut für Baustatik und Baudynamik; Universität Stuttgart.
 - [8] <https://www.rarodriguez.co.uk/products/gears-and-drives/drives/framo-actuators>.
 - [9] G.RAU GmbH & Co. KG. Katalog: Thermische Aktuatoren.
 - [10] Poppinga, S.; Zollfrank, C.; Prucker, O.; Rühle, J.; Menges, A.; Cheng, T.; Speck, T.: Toward a New Generation of Smart Biomimetic Actuators for Architecture. In: Advanced Materials. 1703653. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2017.