

Glasbau: Perspektiven 2020 bis 2030

Jens Schneider¹

1 Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion, Franziska-Braun-Str. 3, 64287 Darmstadt, Deutschland

Der Glasbau hat sich nach einer Sturm-und-Drang-Phase ab den 1990er Jahren im vergangenen Jahrzehnt kontinuierlich zu einer eigenständigen Ingenieurdisziplin weiterentwickelt. Die aktuellen technischen Entwicklungen zeigen interessante Perspektiven für das Jahrzehnt 2020-2030, die in dem vorliegenden Beitrag anhand von Beispielen und Ausblicken behandelt werden und Anregungen für die Weiterentwicklung im Glasbau aus Sicht des Ingenieurs geben sollen.

Glass Structures – Prospects 2020 to 2030. After its Storm and Stress period beginning from the 1990s, glass structures and the use of structural glass developed towards a discrete field in structural engineering during the last decade. The current technical developments show interesting perspectives for the coming decade 2020-2030 that will be discussed in this contribution based on examples and prospects. They shall stimulate future trends from the engineer's perspective.

Schlagwörter: Glasbau, Forschung, Innovationen, Produktentwicklungen, Normung

Keywords: glass structures, research, innovations, product development, standards

1 Rückblick 2016 - 1993

Der Glasbau hat sich von den Anfängen in den 1990er Jahren bis heute zu einer eigenständigen Ingenieurdisziplin entwickelt. Auslöser waren so prominente Projekte wie die Fassadenkonstruktion am *Cité de sciences, parc de la Vilette/ Paris* (Ingenieure: *Peter Rice* und *Hugh Dutton*), die Seilnetzfassaden am *Kempinski Hotel Flughafen München* (Ingenieure: *Jörg Schlaich* und *Hans Schober*) oder die Verglasung der *Zentralen Glashalle der Neuen Messe* in Leipzig (Ingenieure: *Harald Klimke*, *Josef Ludwig*, *Hans-Ulrich Weiler*, *Gerhard Seele*, *Jan Wörner*, Bild 1-1). Parallel hatten sich die geklebten Glasfassaden (*Structural Sealant Glazing Systems, SSGS*) entwickelt, bei denen das Glas direkt auf Aluminiumprofile aufgeklebt wird.

Schnell erkannte man, dass die Auslegung und Bemessung dieser Konstruktionen und erforderlichen Gläser mit den bis dahin eher handwerklich orientierten Methoden und einfachen Tabellenwerken nicht möglich ist. Die Ingenieure sollten von nun an die weitere Entwicklung beim Bauen mit Glas entscheidend mitprägen. Da traf es sich gut, dass sich im Bereich der statischen Berechnung die Finite-Elemente-Methode im Bauwesen bereits etabliert hatte und mit der Sicherheitstheorie auch Methoden zur Bewertung von Sicherheit und Risiko von Konstruktionen entstanden waren, die sich auf die neuartigen

Konstruktionen anwenden ließen. Zudem gab es besonders im Mittelstand innovative Unternehmen aus dem Glas- und Metallbau, die die Bereitschaft hatten, Innovationen direkt in Produkte und Konstruktionen umzusetzen, z.B. mit der Einführung des teilvorgespannten Glases TVG, mit dem im Verbund-Sicherheitsglas bei Bruch des Glases eine bessere Resttragfähigkeit im Kombination mit Poly-Vinyl-Butyral (PVB-) Folien möglich ist.

Die recht strengen Auflagen der Bauaufsichtsbehörden bei der Realisierung der neuen Glaskonstruktionen konnten dazu meist im Rahmen des wichtigen baurechtlichen Instruments der *Zustimmung im Einzelfall* erbracht werden. Hierzu wurden für viele Projekte Experimente im Maßstab 1:1 durchgeführt, da methodisch die Kette von der Materialmodellierung über die rechnerische Simulation bis zur experimentellen Validierung für Glasprodukte noch nicht ausgereift war und die Bemessungsvorschriften und Normen erst entwickelt werden mussten. Im Spannungsfeld aus architektonischen Ideen und behördlichen Anforderungen konnte mit weiteren Produktinnovationen und ingenieurmäßig geplanten, berechneten und getesteten Konstruktionen die Basis geschaffen werden für die Entwicklung im Glasbau. Von diesen Grundlagen profitieren die Fassaden- und Glasbauunternehmen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz bis heute, denn sie prägen entscheidend den internationalen Markt im Segment der anspruchsvollen Fassaden- und Glaskonstruktionen.



Bild 1-1 Die Dachverglasung der *Zentralen Glashalle* der *Neuen Messe Leipzig*, 1994.

2 Ausblick 2020 - 2030

2.1 Bereiche

Ab der Jahrtausendwende folgte eine Zeit der natürlichen Konsolidierung und Spezialisierung sowie Etablierung als eigenständiger Bereich im Ingenieurwesen. Dazu gehörte die Entwicklung der Bemessungsnorm DIN 18008, die – wie alle Normen – auch eine Gefahr der Blockierung von Innovationen mit sich bringt. Es stellt sich die Frage: Wie geht es weiter? Aus den aktuellen Entwicklungen lassen sich aus der Perspektive des Ingenieurs verschiedene Trends im Glasbau beobachten, die das kommende Jahrzehnt bis ins Jahr 2030 prägen könnten. Diese werden im Folgenden in die Bereiche *Innovationsbereiche für Produktentwicklungen, Normung und Forschung* unterschieden.

2.2 Innovationsbereiche für Produktentwicklungen

Größe

Ein wichtiger Trend für den Glasbau in den vergangenen Jahren war die Veränderung der verfügbaren Abmessungen des Floatglases. Galt vorher das Bandmaß mit den Abmessungen 3,21 m x 6 m als feste Randbedingung für Entwurf, Konstruktion, Bemessung, Transport und Ausführung, sind heute Längen von 16 m und mehr am Markt verfügbar – und diese auch thermisch vorgespannt und laminiert (Bild 2-1). Dazu mussten besonders in der Anlagentechnik und für den Transport und die Logistik umfangreiche Anpassungen vorgenommen werden. Auch wenn diese großen Gläser nur bei besonderen Projekten Anwendung finden, wird sich der Trend zu größeren Abmessungen fortsetzen und noch stärker auch die funktionalen Eigenschaften der Verglasungen erfassen, z.B. Beschichtungen, schaltbare Schichten, Isolierglas und Kombination mit anderen Produkten, (Bild 2-2).

Vakuum-Isolierglas

In Kombination mit den weiter gestiegenen Anforderungen an den Wärmeschutz bei gleichzeitiger Kritik an den immer dickeren Verglasungsaufbauten und organischen Dämmmaterialien könnten bei entsprechenden Größen auch die Vakuum-Isoliergläser nach einigen Jahren der Forschung [3] einen Anteil am Markt der Wärmeschutzverglasungen erreichen. Vorteil ist ihre geringe Gesamtdicke (Bild 2-3). Dazu ist eine intelligente Integration in Rahmensysteme erforderlich, eventuell in Holz-Glas-Konstruktionen oder mit aufgeklebten Rahmenprofilen. Für das Vakuum-Isolierglas müssten auch in Europa Produktionen aufgebaut werden.



Bild 2-1 Verbund-Sicherheitsglas der Fa. Sedak GmbH mit Abmessungen 3,25 m x 10 m, 2013.



Bild 2-2 Neue Kombinationen großer Gläser geklebt auf Sandwichelemente bieten sehr guten Wärmeschutz bei gesteigerter Ästhetik, 2016 (Elementlänge 14,72 m, Bildnachweis: icnoic skin GmbH).

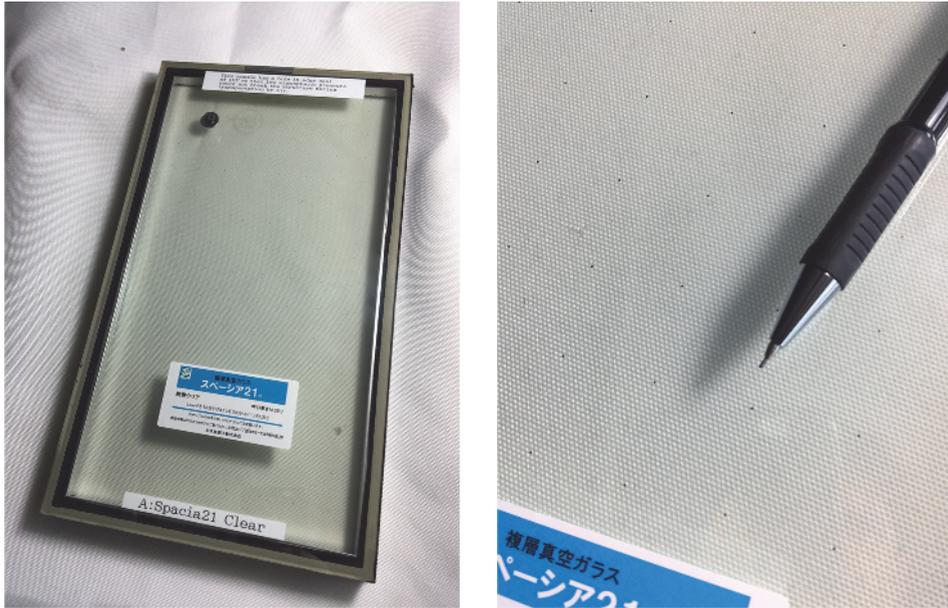


Bild 2-3 Vakuum-Isolierglas aus Japan mit den typischen Mikro-Abstandhaltern – hier als Innenscheibe eines konventionellen Isolierglases (NSG Japan), [2].

Dickglas

Zwei weitere, entgegengesetzte Extreme, die es gilt für die Bau- und Architekturanwendungen weiter zu entwickeln, sind massives Dickglas und Dünnglas. Massives Glas als „Backstein“ wurde seit der ersten Anwendung am *Monument für die Opfer des 11. März 2004* am Bahnhof *Atocha* in Madrid (Bild 2-4, [8]) in neuer Form am *Crystal House* in Amsterdam realisiert (Bild 2-5, [9]). Es ist für dickes Glas – vielleicht auch in Verbindung mit additiver Fertigung – noch sehr viel Gestaltungsspielraum denkbar, vielleicht auch für eher alltägliche Anwendungen mit gestapelten Flachgläsern (Bild 2-6).



Bild 2-4 Zwei von 15.400 massiven Glassteinen für das Denkmal für die Opfer des 11. März 2004 am Bahnhof Atocha, Madrid, 2007 (Bildquelle: Schott AG), [8].

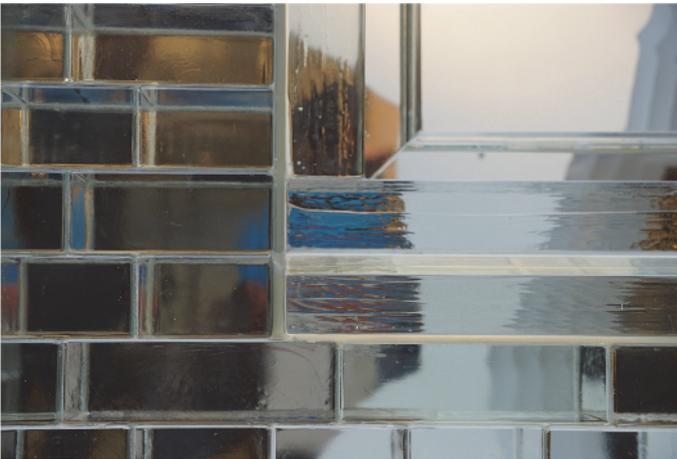


Bild 2-5 Glassteine am *Crystal House* in Amsterdam, 2016 (Bildquelle: U. Knaack), [9].



Bild 2-6 Gestapeltes Flachglas als absturzsichernde Verglasung, 2009.

Dünnglas

Für Dünnglas (Bild 2-7) ergeben sich in Verbindung und Lamination mit anderen Materialien wie Holz, Papier, Polymere, Keramik oder dünnem Stein (Bild 2-8) neue Gestaltungsmöglichkeiten, die auch konstruktive und bauphysikalische Verbesserungen ermöglichen könnten. Besonders interessant sind kaltverformte Dünngläser, die bei entsprechenden Entwürfen mit abwickelbaren Flächen höhere optische Qualität als warmverformte Gläser versprechen. Außerdem wären flexible, membranartige Strukturen umsetzbar. Hier bestehen inhaltliche Verbindungen zu den Forschungsarbeiten in [10]. Entscheidend werden Verfahren zur Herstellung geeigneter Lamine mit polymeren Zwischenschichten und eine Verbesserung der Verfahren zur Festigkeitssteigerung des Glases (chemisches, thermisches Vorspannen) sein. Chemisch vorgespanntes Glas mit seiner sehr geringen Dicke der Druckzone von etwa $40\ \mu\text{m}$ ist für viele Anwendungen und die langen Nutzungszeiträume im Bauwesen nicht ohne weiteres geeignet, da bereits typische Oberflächenschäden, z.B. aus der Reinigung des Glases, die Glasfestigkeit zu stark herabsetzen.

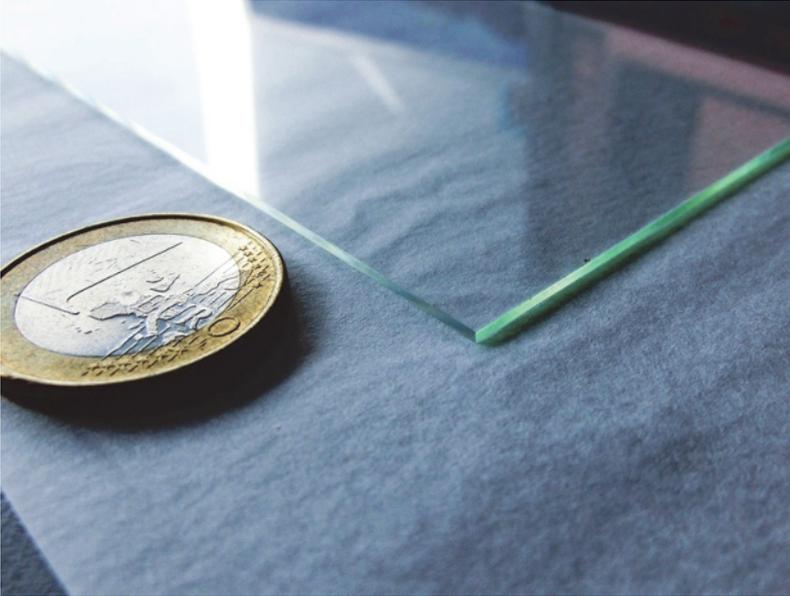


Bild 2-7 Dünnglas zwischen 0,5 mm und 2 mm als Grundlage für flexible Strukturen.



Bild 2-8 Transluzentes Glaslaminat in Kombination mit sehr dünnem Stein (Jogerst Steintechnologie GmbH).

Funktionale Schichten

Aber auch die Ultra-Dünngläser, die sich heute bis nur 50 μm Dicke herstellen lassen, bieten Chancen – z.B. indem das Prinzip der Verbundgläser umgekehrt wird mit dünnen, kratzfesten Glasschichten auf dickeren Polymerschichten. Wenn man in diesen Polymerschichten dann noch gezielt funktionale Eigenschaften einstellen bzw. verändern kann, z.B. über Flüssigkristalle [4], [5], [6] oder elektrochrome Schichten [7] ist die Multifunktionalität von Verglasungen und Interaktion mit Menschen sowie Anwendungen im *Internet of Things* möglich, die im Zusammenhang mit der Digitalisierung neue Anwendungen ergeben. Einfache Elemente im Rahmen der Digitalisierung sind glasintegrierte Sensoren; die Zukunft besteht in interaktiven, individuell reaktiven Gläsern und Sensoren in der Umwelt, die Menschen nicht nur individuell informieren, sondern auch Vorschläge für Handlungsoptionen anbieten.

2.3 Normung

Wichtigste Aufgabe in der Normung wird die erhebliche Verbesserung der europäischen Produktnormen und Weiterentwicklung der bewährten Zulassungsverfahren für innovative Bauprodukte auf europäischer Ebene. Hierzu bedarf es eines stärkeren Engagements der Behörden und des Mittelstands in den Normungsgremien und einer besseren Koordination untereinander sowie stärkerer Lobbyarbeit in Brüssel, damit gerade die Innovationskraft und Produktvielfalt aus kleinen und mittleren Unternehmen nicht behindert wird. Mit der EuGH-Entscheidung [11], die auch einige Produktnormen im Glasbau betrifft, hat sich gezeigt, dass ein Abwarten und die Schaffung eines deutschen Sonderwegs über behördliche Nachregelung zur Gewährleistung angemessener Sicherheit und angemessenen Verbraucherschutzes nicht reicht.

Parallel dazu wird gerade der *Eurocode Structural Glass* auf Basis von Vorarbeiten in [12] entwickelt, der eine wichtige Grundlage für internationale Anwendungen sein wird. Hierbei soll die Bruchempfindlichkeit des Glases konsequent berücksichtigt werden, in dem so genannten „Glass Fracture Consequence Classes“ eingeführt werden, bei denen Ingenieure über einen Risikoansatz das Gefährdungspotential der Verglasung und deren Nachbruchverhalten bewerten sollen. Diese Bewertung ist bisher in den Glasnormen nur indirekt über die Konstruktionsvorschriften eingeflossen.

2.4 Forschung

2.4.1 Bereiche

In der Forschung ergeben sich im Detail in jedem der oben genannten Gebiete sehr interessante Fragestellungen. Eine echte Innovation besteht im Ingenieurwesen nur dann, wenn neuartige Materialien, Methoden oder Prozesse über Produkte oder in Strukturen auch wirklich in die Anwendung gehen können, um sich zu bewähren. Daher bedarf es bei der wissenschaftlichen Bearbeitung oft interdisziplinärer Teams, die Teile oder die

gesamte Entwicklungskette vom Material über das Produkt und das Bauteil bis zur Struktur im Blick haben. Im Folgenden sollen aus der Forschung Aspekte der *Materialien*, *Methoden* und *Prozesse* behandelt werden, die zukünftig starken Einfluss auf den Glasbau haben können.

2.4.2 Materialien

Polymere

Glaskonstruktionen sind ohne das Zusammenspiel mit den Polymeren kaum noch denkbar, z.B. als Zwischenschichten in Verbundgläsern, zur Lagerung des Glases, zur Abdichtung des Randverbundes in Isolierglas und für Verklebungen. In den kommenden Jahren werden daher die Polymere in Kombination mit den Verglasungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit, Festigkeit und Fehlertoleranz bei der Produktion und Anwendung weiterentwickelt. Das Kleben wird einen festen Platz bei Architekturverglasungen erobern und neue Polymerwerkstoffe für Zwischenschichten in Verbundglas werden den Einsatzbereich von Glas mit neuen Funktionen in Richtung adaptive Systeme erweitern. Gleichzeitig werden die Polymere im Glas für Sensoren eingesetzt. Für die Auslegung der Polymere in der Ingenieurbemessung kann die Methode der Finiten Bruchmechanik [13] auf die hyper- und viskoelastischen Materialien erweitert werden.

Ultrahochfestes Glas

Die Anwendung von ultrahochfesten Gläser, wie sie z.B. im Rahmen der Forschungsarbeiten in [14] entwickelt werden, wird sich bei Architektur- und Bauverglasungen vermutlich nur langsam weiter entwickeln. Hier wären weitere Forschungsarbeiten zur Reduzierung der Sprödigkeit bzw. Steigerung der Toleranz bei Oberflächenschäden sowie zur Selbstheilung, z.B. in Kombination mit den Polymeren erforderlich. Dennoch ist zu erwarten, dass die ultrahochfesten Gläser in Sonderanwendungen einen Platz erobern können, bei denen beispielsweise Gewichtseinsparung eine besondere Rolle spielt.

2.4.3 Methoden

Bruchverhalten von Glas und Bruchsimulationen

Die Simulation des Nachbruchverhaltens von Verbundgläsern kann durch neuartige Ansätze in der Finite-Element-Simulation und weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen des Bruchverhaltens von Glas und dynamischen Rissfortschritts in spröden Materialien [15] weiterentwickelt werden. Die heute verfügbaren Methoden auf Basis des Löschens von Elementen in der expliziten FE, die für die Simulationen im Glasbau angewendet werden (Bild 2-9, [16]), erfordern erhebliche Verbesserungen.

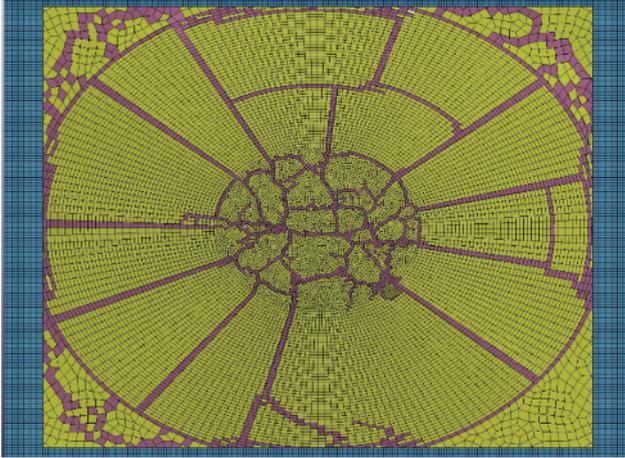


Bild 2-9 Bruchsimulation von Verbund-Sicherheitsglas bei Explosionseinwirkung, [16].

Optische Anisotropien in thermisch vorgespanntem Glas

Optische Anisotropien in thermisch vorgespanntem Glas sind bereits heute stark im Fokus der Diskussion bei vielen Fassadenprojekten (Bild 2-10). Gerade für die oben genannten sehr großen Verglasungen sind die Entwicklung grundlegender Beurteilungskriterien und optischer Methoden zur Qualitätssicherung erforderlich, damit die Qualitätssicherung etabliert und verbessert werden kann. Darauf aufbauend sind Verbesserungen in der Prozesstechnik und bei den Beschichtungssystemen erforderlich.

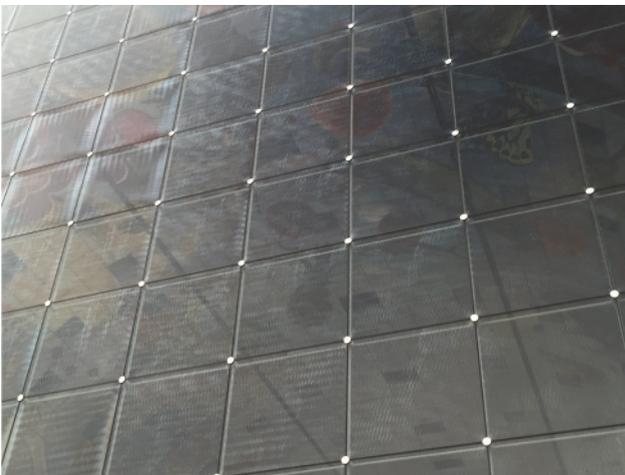


Bild 2-10 Optische Anisotropien bei thermisch vorgespanntem Glas in einer Seilnetzfassade.

Digitaler Entwurf

Der digitale Entwurf und die numerischen Simulationsmethoden werden im kommenden Jahrzehnt noch wichtiger und die Möglichkeiten der Architekten und Ingenieure erweitern, wenn es gelingt, in der Ausbildung auf den Grundkenntnissen des klassischen Entwurfs und der klassischen Konstruktions- und Berechnungsmethoden aufzubauen – und diese nicht durch reine „Black-Box-Anwendungen“ zu ersetzen. Das gilt auch für *Design to Production* und *Building Information Modeling*, die nur erfolgreich sein können und einen Fortschritt bieten, wenn sie die erforderliche Unschärfe des Entwurfs nicht bereits in den frühen Projektphasen zu stark einschränken und die Fortschritte in der Berechnungsmethodik für die Auslegung und Optimierung von Strukturen für die Ingenieure wirklich nutzbar machen. Hierzu besteht Forschungsbedarf an der Schnittstelle von Architektur, Bauinformatik, Tragwerksplanung, Bauphysik, Gebäudesimulation und Gebäudetechnik.

Bemessungskonzept für thermische Beanspruchungen von Verglasungen und Kantenfestigkeit von Architekturglas

Für die Bemessung von Glas bei thermischen Einwirkungen muss in den kommenden Jahren endlich eine Grundlage geschaffen werden, die eine sichere, aber realitätsnahe Auslegung auf Basis einer Kopplung bauphysikalischer und mechanischer Berechnungen erlaubt. Hierzu sind Forschungsarbeiten und Arbeiten zur Standardisierung der Konzepte erforderlich, da die bisher vorliegenden europäischen Normentwürfe [17] weder den Stand von Wissenschaft und Technik wiedergeben noch die heutigen Berechnungsmethoden angemessen berücksichtigen.

Zerstörungsfreie Prüfung und Reparatur von Verglasungen

Mit Zunahme der Größe und Funktionalität sowie der Individualisierung der Verglasungen steigen auch erheblich die Kosten für den Austausch defekter Gläser. Daher müssen Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung und Reparatur von Glas entwickelt werden, die im Bauwesen angewendet werden können. Hierbei müssen sowohl optische als auch mechanische Eigenschaften berücksichtigt werden. Die bisher am Markt verfügbaren Verfahren aus dem Bereich der Automobilverglasungen wie z.B. Nachpolieren und Aufbringen von polymeren Harzen, z.B. [19] oder das Nachschleifen und Polieren von Architekturverglasungen [20] reduzieren vor allem optische Beeinträchtigungen – die Veränderung der mechanischen Eigenschaften, z.B. hinsichtlich Mikrorissen und Eigenspannungsverteilung bleibt dabei bisher völlig unklar.

2.4.4 Prozesse

Prozesstechnik zur Steigerung der Kantenfestigkeit von Architekturglas

Um die hohen Glasfestigkeiten nutzen zu können, die sich aus dem chemischen Vorspannen und den Entwicklungen aus [14] ergeben, muss auch die Prozesstechnik verbessert werden. Insbesondere für die Steigerung der Kantenfestigkeit des Architekturglases sind genauere Analysen der Einflüsse aus Zuschnitt und Kantenbearbeitung auf der Mikroebene erforderlich. Die bisher vorgenommene Einstufung von Kanten nur auf Basis makroskopischer optischer Eigenschaften ist nicht geeignet, unmittelbar Rückschlüsse auf die Kantenfestigkeit zu ziehen [18].

Additive Fertigung

Die additive Fertigung wird auch das Bauwesen erfassen und neben Polymeren und Aluminium wird auch Stahl, Glas und Glasemaille additiv hergestellt werden können, z.B. für gläserne Verbindungen auf Flachglas und für individuelle Sonderbauteile. Weil die heute verfügbaren Prozesse (Bild 2-11, [22]) nur im Produktdesign und für Haushaltswaren eingesetzt werden können und noch keine definierten und mechanisch abgesicherten Eigenschaften aus der additiven Fertigung zulassen, sind Forschungsprojekte zur Verbesserung der Prozesse, Simulation und Prüfung mechanischer Eigenschaften und zerstörungsfreier Prüfung additiv gefertigter Produkte erforderlich.



Bild 2-11 Additiv gefertigte Glaselemente (Bild U. Knaack).

3 Literatur

- [1] Schneider, J., Kuntsche, J.K., Schula, S., Schneider, F., Wörner, J.-D.: Glasbau – Grundlagen, Berechnung, Konstruktion (2. Aufl.), Springer, Berlin, 2016.
- [2] <http://www.nsg-spacia.co.jp>
- [3] Flexibler Randverbund für Vakuumisolierverglas-Systeme (VIG-S). Forschungsvorhaben 03ET1147 A bis B des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie; Koordination Siegfried Glaser, Februar 2016.
- [4] Chen, R. H.: Liquid crystal displays: Fundamental physics and technology. New York, 2011.
- [5] Haase, W., Husser, M., Sobek, W.: Potentiale strukturierter, schaltbarer Verglasungen. In: Glasbau 2016. Ernst & Sohn GmbH, Berlin, 2016, S. 293-306.
- [6] Merck KGaA Performance Materials - display Materials: Liquid-Crystal-Window-Technologie, <http://www.merck-performance-materials.com>
- [7] www.sageglass.com
- [8] Schober, H., Schneider, J., Justiz, S., Gugeler, J., Paech, C., Balz, M.: Innovations with glass, steel and cables. In: Glass Performance Days, Tampere, Finland, 2007, pp. 198-201.
- [9] Oikonomopoulou, F., Veer, F.A., Nijse, R., Baardolf, K.: A completely transparent, adhesively bonded soda-lime glass block masonry system. Journal of Facade Design and Engineering 2015 Vol. 2 (3-4), pp. 201-221.
- [10] DFG SFB-TRR 141: Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture.
- [11] EuGH-Urteil C-100/13, 16.10.2014.
- [12] European Commission, Joint Research Center: Scientific and policy reports: Guidance for European structural design of glass components, 2014.
- [13] Weißgraeber, P., Leguillon, D. & Becker, W: A review of Finite Fracture Mechanics: crack initiation at singular and non-singular stress raisers. Arch Appl Mech (2016) 86: 375. doi:10.1007/s00419-015-1091-7.
- [14] DFG SPP 1594: Topological Engineering of Ultra-Strong Glasses.
- [15] Sharon, E., Cohen, G. und Fineberg, J. (2001): Propagating solitary waves along a rapidly moving crack front, in: *Nature* Bd. 410.6824, S. 68-71.
- [16] Kuntsche, J. (2015): Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

-
- [17] CEN/TC129/WG8 – N199E „Thermal stress calculation method“, 2004.
- [18] Kleuderlein, J., Ensslen, F., Schneider, J. (2014): Investigation of edge strength dependent on different types of edge processing, in: *Engineered Transparency 2014*, Düsseldorf, S. 259-268.
- [19] <http://www.loctite.de/scheibenreparatur-48613.htm>
- [20] www.vetrox.eu
- [21] DFG SFB 814: Additive Fertigung.
- [22] Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J.C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M., Oxman, N.: Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*. September 2015, 2(3): pp. 92-105.

