

Bernhard Weller, Silke Tasche (Hrsg.)

Glasbau 2023

- umfasst alle wesentlichen aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet des konstruktiven Glasbaus und der Fassadentechnik
- enthält aktuelle Beispiele ausgeführter Bauwerke
- Autor:innen sind führend in Forschung und Praxis

Der konstruktive Glasbau ist einer der dynamischsten Bereiche des Ingenieurbaus. Namhafte Autorinnen und Autoren berichten über Forschungsergebnisse und aktuelle Bauprojekte. Neben Fragestellungen zum Werkstoff Glas als Teil der Tragstruktur stehen energieeffiziente Gebäudehüllen im Fokus.



2023 · 356 Seiten · 234 Abbildungen ·
51 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03390-6 € 49.90*

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3390

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland, inkl. MwSt.

ÜBER DAS BUCH

Dieses Jahrbuch präsentiert in zahlreichen Beiträgen renommierter Fachleute den aktuellen Stand der Technik im konstruktiven Glasbau. Nachhaltige und resiliente Fassadensysteme der Zukunft stehen im Fokus der Diskussion ebenso wie die Bewertung neuer Materialien und Technologien, mit besonderem Augenmerk auf dem Kleben. Die Planung und die Ausführung wegweisender Glasarchitektur werden anhand von aktuellen herausragenden Projekten ausführlich erläutert. Die Bemessung und die Konstruktion tragender Glasbauteile und die Anwendung neuer Normen und Richtlinien werden praxisnah aufgezeigt. Außerdem wird die Optimierung zukunftsfähiger Gebäudehüllen in gleicher Tiefe behandelt wie die energetische Sanierung denkmalgeschützter Fassaden. Nicht zuletzt vermitteln die jüngsten Ergebnisse anerkannter Forschungseinrichtungen einen zuverlässigen Einblick in die Leistungsfähigkeit des gesamten Glasbaus.

Die thematische Bandbreite des Jahrbuches erstreckt sich über folgende Rubriken:
Bauten und Projekte, Bemessung und Konstruktion, Forschung und Entwicklung, Bauprodukte und Bauarten.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03390-6	Glasbau 2023 [.]	€ 49.90*

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

marketing@ernst-und-sohn.de

Privat

Geschäftlich

Firma, Abteilung

UST-ID Nr.

Name, Vorname

Telefon

Fax

Straße, Nr.

PLZ / Ort / Land

E-Mail

Datum / Unterschrift

www.ernst-und-sohn.de/3390

Glasbau Jahrbuch | 20 Jahre

Bernhard Weller¹, Silke Tasche¹

¹ Institut für Baukonstruktion, Technische Universität Dresden; bernhard.weller@tu-dresden.de; silke.tasche@tu-dresden.de

Jahrtausendwende. Die Entwicklung der Glashäuser, der Glaspassagen im 19. Jahrhundert, der Glasfabriken und der Glashochhäuser im 20. Jahrhundert liegt hinter uns. Glas ist ein faszinierender Werkstoff, zeigt für die Entwicklung der lastabtragenden Transparenz im 21. Jahrhundert aber auch Schwächen. Glas ist bis zu einem gewissen Grad ideal elastisch, dann aber spontan brechend. Ein Versagen mit ausgeprägter Resttragfähigkeit – die Grundlage für jede Bemessung im Konstruktiven Glasbau – ist ein großes Thema. Auch der energetische Paradigmenwechsel zu Beginn des 21. Jahrhunderts verlangt nach neuen Entwicklungen. Ausreichend Grund, die Forschungs- und Entwicklungsarbeit des neu besetzten Dresdner Instituts für Baukonstruktion fortan auf die Fragen des Glasbaus und der Fassadentechnik zu richten.

Mit dem Titel glasbau2004 erscheint ein erstes Buch, das dieser Ausrichtung Rechnung trägt. Es wird auf der Dresdner Glasbau Tagung vorgestellt. Baurecht und Stand der Normung im Glasbau werden beleuchtet, Entwicklung und Forschung in Dresden vorgestellt. Schwerpunktthema ist das lastabtragende Kleben im Konstruktiven Glasbau. Gunter Henn eröffnet die Veranstaltung mit einem Vortrag zur Gläsernen Manufaktur der Volkswagen AG in Dresden, die auf einem Grundstück am Rande des Großen Gartens errichtet wurde. Zuvor stand dort das 1928 erbaute, 1933 abgerissene Kugelhaus des Architekten Heinz Birkenholz, eine experimentierfreudige Konstruktion aus Stahl und Glas. Technik im Park hat Tradition: 1851 der Kristallpalast in London, 1889 die Galeries des Machines in Paris. Das Thema ist Transparenz [1].



Drei prüffähige Glasbauberechnungen beschließen das Buch glasbau2004: Ein Vordach mit linienförmig gelagerter Überkopfverglasung aus VSG, eine FE-Modellierung für eine punktförmig gelagerte Verglasung aus VSG und eine Fassade



mit linienförmig gelagerter Vertikalverglasung aus MIG. Diese Beispiele zu Bemessung und Konstruktion im Konstruktiven Glasbau werden in den kommenden Jahren zu einer umfangreichen Beispielsammlung ausgebaut, die bis heute Grundlage für zahlreiche Weiterbildungsveranstaltungen im In- und Ausland ist [2], [3].

Das dritte Buch dieser Reihe mit dem Titel glasbau2006 ist der energieeffizienten Fassadengestaltung gewidmet: Pushing the Boundaries of Architecture, Enviromental Design and Technology. Im einführenden Aufsatz entwickelt Stefan Behling Visionen für die Stadt der Zukunft anhand von Projekten, die Foster and Partners in London über die letzten Jahre entwickelt haben. Als wesentliche Beispiele werden der Reichstag in Berlin, die Commerzbank Hauptverwaltung in Frankfurt

und die Swiss Re Headquarters in London vorgestellt. Die weiteren Beiträge des Buches gelten überwiegend dem Klima Engineering und der gebäudeintegrierten Photovoltaik. 2006 wird das Buch erstmals ergänzt durch eine Sonderausgabe der Zeitschrift Stahlbau aus dem Verlag Ernst & Sohn. Zehn Jahre Fachverband Konstruktiver Glasbau (FKG) sind der Anlass. Die weitreichenden Impulse des Fachverbandes für Wissenschaft und Praxis werden im Rahmen von fünfzehn Fachaufsätzen gewürdigt. Über dreißig renommierte Ingenieurinnen und Ingenieure vermitteln einen umfassenden Einblick in den aktuellen Stand des Konstruktiven Glasbaus.

Mit dem Titel glasbau2007 erscheint die vierte Ausgabe der Dresdner Glasbau Bücher. In einem einführenden Aufsatz von Hadi Teherani wird der Impuls zu einer kommenden Transparenz gesetzt. Mit zahlreichen ausgeführten Projekten wird die aktuelle Glasarchitektur vorgestellt, im Detail beschrieben und erläutert. So gelten auch die weiteren Beiträge des Buches der Detailausbildung für lastabtragende Glaskonstruktionen. Themen des Fügens und Verbindens in Forschung und Entwicklung, in Planung und Ausführung bilden den Schwerpunkt.

Das Buch glasbau2007 wird wieder ergänzt durch eine Sonderausgabe der Zeitschrift Stahlbau. „Es bleibt noch das Glas zu besprechen ...“. Mit diesen Worten beginnt ein einführender Hinweis auf das zwölfte Buch „De Re Metallica“. Georgius Agricola verfasst die zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen mit pädagogischem Geschick und didaktischer Absicht. Mit zahlreichen Holzschnitten wird die handwerkliche Glasherstellung der frühen Neuzeit anschaulich, aber wissenschaftlich genau vermittelt. Der historische Abriss endet mit



Friedrich Siemens, dessen Entwicklung einer kontinuierlich arbeitenden Schmelzwanne mit regenerativer Feuerung den Übergang zur industriellen Glasfertigung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ermöglicht.

Kleines Jubiläum: glasbau2008 ist die fünfte Ausgabe des Buches, das wie in den Vorjahren auf der Dresdner Glasbau Tagung vorgestellt wird. Schwerpunktthemen sind Transparenz und Ökologie. Impulsgeber ist Werner Sobek. Glasbau Buch und korrespondierende Sonderausgabe der Zeitschrift Stahlbau haben ihren festen Platz in der Welt des Konstruktiven Glasbaus gefunden. Beide Medien berichten aufeinander abgestimmt jedes Frühjahr über den aktuellen Stand der Normung, über jüngste Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung, über neue Wege in der Planung, der Bemessung, der Konstruktion. Die Vorstellung wegweisender Bauten und Projekte ist häufig der Einstieg in eine vertiefte Diskussion der anstehenden Themen.

Dem Verlag Ernst & Sohn, allen voran Herrn Dr. Karl-Eugen Kurrer, ist für die fortwährende Motivation zu danken, die Fragestellungen des Glasbaus weiter und differenzierter zu untersuchen. Die Zahl der eingereichten Beiträge nimmt zu. 2010 sind es bereits über dreißig Fachaufsätze, deren Qualität zu bewerten, deren Inhalt zu lekturieren, deren Satz zu korrigieren ist. Eine Diskussion im Hause Ernst & Sohn, zu der Autoren und die Herausgeber eingeladen sind, führt zu dem Ergebnis, dass die bisherige Herausgabe von Glasbau Buch im Verlag der Technischen Universität Dresden und dem ergänzenden Sonderheft der Zeitschrift Stahlbau nicht mehr sinnvoll ist.

Das Konzept für ein Glasbau 2012 Jahrbuch soll entwickelt werden, das alle im Vorjahr eingereichten Beiträge enthalten und im Verlag Ernst & Sohn erscheinen soll. Manuskripteinreichung und Beitragsverwaltung erfolgen fortan über das System ScholarOne Manuscripts. Für einen zweifachen Review der Aufsätze wird ein Wissenschaftlicher Beirat berufen. Diese Aufgabe übernehmen sechs Hochschullehrer, die einen Schwerpunkt Glasbau in Forschung und Lehre, zum Teil auch in Gutachten und Bauartprüfungen vertreten. Die Kommunikation mit den Autoren und das Lektorat übernehmen die Herausgeber, Herstellung und Vertrieb der Verlag. Nach einem Jahr Vorbereitung erscheint das Jahrbuch Glasbau 2012 mit 32 sorgfältig editierten Beiträgen in den vier Abteilungen: Bauten und Projekte, Bemessung und Konstruktion, Forschung und Entwicklung, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit. Herausragende Beiträge werden ausgewählt zum Vortrag auf der Glasbau 2012 Tagung. Vier Keynotes: Jan Knippers zeigt die Lincoln Centers Canopies, New York. Geralt Siebert bespricht die Neuerungen der DIN 18008 gegenüber den eingeführten Regelungen. Jens Schneider erklärt ein Modell zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von heißgelagertem ESG. Winfried Heusler spricht zur Optimierung zukunftsfähiger Gebäudehüllen. Das neue Jahrbuch wird gut angenommen.



2017 sind es mehr als vierzig Beiträge, die zum Review eingereicht werden. In den Wissenschaftlichen Beirat sind inzwischen zwölf Mitglieder berufen, renommierte Experten im Konstruktiven Glasbau und in der Fassadentechnik. Fünf Jahre später werden über fünfzig Fachbeiträge vorgelegt. Der Wissenschaftliche Beirat wird erweitert auf fünfzehn Mitglieder. Jeder Fachaufsatz wird weiterhin im Rahmen von zwei getrennten Reviews bewertet. Die Einarbeitung der Empfehlungen aus den Reviews wird in einer dritten Durchsicht überprüft, bevor der Beitrag in den Satz geht.



In den Jahren 2021 und 2022 erscheint neben den Glasbau Jahrbüchern jeweils ein Sonderband zur Klebtechnik im Glasbau. Das Kleben als Verbindungstechnologie, insbesondere das qualitätssichere und schadensfreie Kleben von Glas im Bauwesen, ist seit mehreren Jahren das Thema des Netzwerks KLEBTECH, einer Kooperation zwischen fünfzehn mittelständischen Unternehmen und zwei Universitäten. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wird das strukturelle Kleben von Glas im Bauwesen durch anwendungsorientierte Forschung vorangetrieben. Die Netzwerkarbeit, geprägt durch den intensiven Austausch der Kooperationspartner, findet ihren Niederschlag in diesen Sonderbänden zur Klebtechnik mit zahlreichen Beiträgen, die Grundlagen erläutern, von der Qualitätssicherung und der Prozessentwicklung berichten, vor allem die Umsetzung innovativer Klebtechnik im Rahmen von Neubau- und Sanierungsvorhaben veranschaulichen.

Die Forschungsergebnisse werden mit diesen Büchern über das Netzwerk hinaus einem großen Fachpublikum zugänglich gemacht. Hier wird Kleben in die Zukunft gedacht.

Das vorliegende Glasbau 2023 Jahrbuch ist die zwanzigste Ausgabe dieser Reihe. Es berichtet – wie in den neunzehn Jahren zuvor – zuverlässig über wegweisende Bauprojekte, über die aktuelle Normung, über besondere Bemessungsaufgaben, über resiliente Konstruktionen, über Ergebnisse der Forschung, über neue Bauarten. Das Jahrbuch wird auf der Glasbau 2023 Tagung in Dresden vorgestellt. Den Impuls zur Eröffnung setzt – wie vor zwanzig Jahren – Gunter Henn. Er spricht über ein elementares Gestaltungselement der Architektur: Transparenz.

Den Autoren sei für die sorgfältige Erstellung der anspruchsvollen Beiträge herzlich gedankt. Großer Dank gebührt auch den Mitgliedern des Wissenschaftlichen Beirats für die kritische Sichtung der Beiträge. Ein besonderer Dank gilt Frau Stürmer und Frau Rechlin im Verlag Ernst & Sohn für die immer wieder gute Zusammenarbeit. Wesentlicher Dank gebührt schließlich den Mitgliedern des Bundesverbandes Flachglas e. V., die Forschung und Entwicklung im Glasbau nachhaltig fördern und zuverlässig vorantreiben. Der Bundesverband Flachglas e. V. hat die Herstellung des vorliegenden Glasbau 2023 Jahrbuches in entscheidendem Umfang unterstützt.

„Nach dem Gesagten können wir wohl von einer ‚Glaskultur‘ sprechen ... *Schluß!*“ [4]

Literatur

- [1] Stahl-Informations-Zentrum [Hrsg.] (2003) *Gläserne Manufaktur Dresden. Henn Architekten München, Berlin*. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum. S. 12.
- [2] Hess, R; Weller, B.; Schadow, T. (2005) *Glasbau-Praxis in Beispielen*. Berlin: Bauwerk Verlag. Mehrere Ausgaben. Zuletzt: Weller, B.; Engelmann, M.; Nicklisch, F.; Weimar, T. (2013) *Glasbau-Praxis. Konstruktion und Bemessung. Band 2: Beispiele nach DIN 18008*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Beuth Verlag.
- [3] Weller, B.; Reich, S.; Wünsch, J. (2022) *Glasbau*. In: Vismann, U. [Hrsg.] *Wendehorst Beispiele aus der Baupraxis*. 7., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. S. 545–591.
- [4] Scheerbart, P. (1914) *Glasarchitektur*. Berlin: Verlag Der Sturm. Neuausgabe mit einem Nachwort von Rausch, M. (2000) Berlin: Gebr. Mann Verlag. S. 127.

Inhaltsverzeichnis

Glasbau Jahrbuch | 20 Jahre V

Bernhard Weller, Silke Tasche

Formen der Transparenz 1

Gunter Henn

Bauten und Projekte

Strukturell verklebte, wellenförmige Glasfassade mit Blick auf den Central Park 7

Klaus Kräch, Özhan Topcu, Benjamin Peter

Additive Fertigung von freigeformten Stahl-Glas-Konstruktionen 21

Matthias Oppe, Lia Tramontini, Sebastian Thieme

The Well – Neue Lebenskonzepte in Toronto 33

Felix Schmitt, Jonas Hilcken, Stefan Zimmermann

Common Sky – ein Dach als Kunstwerk 47

Tobias Herrmann

**Ganzglaskonstruktion für das Dach des historischen Pützerturms
der TU Darmstadt** 59

Frank Tarazi, Sebastian Schula, Jens Schneider, Daniel Pfanner, Christoph Duppel

Neuer Kanzlerplatz Bonn – Glasfassade in der Schnittstelle zur Gridstruktur 83

Jürgen Einck

Bemessung und Konstruktion

Nachhaltige Fassaden – Zirkularität als Innovationstreiber 95

Winfried Heusler, Ksenija Kadija

Verglasungen im Zeichen des Klimawandels | mit Glas klimatauglich planen 107
Alireza Fadai, Daniel Stephan

Entwicklung von beschusshemmendem Glas ohne Einsatz von Polycarbonat 119
Fritz Schlögl

Aktueller Stand der nationalen Glasbaunormung 135
Geralt Siebert

Explosionsschutz von Fenstern und Fassaden: Angewandte Grundlagen und Methoden 141
Jan Dirk van der Woerd, Matthias Wagner, Achim Pietzsch, Matthias Andrae, Norbert Gebbeken

Forschung und Entwicklung

Irreversible Oberflächenverwitterung von modernem Floatglas und präventive Reinigungsstrategien 155
Gentiana Strugaj, Elena Mendoza, Andreas Herrmann, Edda Rädlein

Überlagerung fertigungsbedingter Inhomogenitäten und beschleunigter Alterung bei Silikonklebstoffen 165
Benjamin Schaaf, Markus Feldmann, Elisabeth Stammen, Klaus Dilger

Hybrides Vakuumisolierglas – Thermische und thermomechanische Charakterisierung 179
Bastian Büttner, Franz Paschke, Matthias Seel, Cornelia Stark, Elias Wolfrath, Helmut Weinländer

Photochromes Verbundglas – Haftverhalten von EVA mit integrierter Funktionsfolie 193
Elena Fleckenstein, Christiane Kothe, Felix Nicklisch, Bernhard Weller

Untersuchungen der Zugluft bei gekippten Fenstern in Hamburger Schulräumen 209
Barbara Weese, Christian Grote, Frank Wellershoff

Geklebte Glasscheiben als Aussteifungselement und Absturzsicherung 223
Johannes Giese-Hinz, Felix Nicklisch, Bernhard Weller, Mascha Baitinger, Jasmin Reichert, Henriette Hoffmann

Numerische Studien zur Glaskantentemperatur im verschatteten Bereich von Isoliergläsern 239
Gregor Schwind, Franz Paschke, Jens Schneider, Matthias Seel

**Versuchsprogramm zur Klebstoffuntersuchung fluidgefüllter
Isolierverglasungen 261**

Alina Joachim, Felix Nicklisch, Bernhard Weller

**Ein Verfahren zum Nachweis von thermisch vorgespannten
Vakuumisolierglas-Hybriden 277**

*Isabell Schulz, Mascha Baitinger, Tommaso Baudone, Franz Paschke,
Miriam Schuster, Matthias Seel*

Bauprodukte und Bauarten

**Effekte der Zusatzstoffe auf die Trübung und Alterung
von Verbundsicherheitsgläsern 293**

*Anton Mordvinkin, Sven Henning, Michael Wendt, Robert Heidrich,
Nishanth Thavayogarajah, Jasmin Weiß, Kristin Riedel, Steffen Bornemann*

Oberflächendefekte bei Dünnglas unter zyklischer Beanspruchung 307

Jürgen Neugebauer, Katharina Schachner

Vogelschutz und funktionale Glasbeschichtungen im Verbundsicherheitsglas 319

Wim Stevels, Alex Caestecker, Matthias Haller

**Fortgeschrittene Methoden für die Schädigungsanalyse von Glaslaminaten
bei dynamischen Beanspruchungen 335**

*Steffen Bornemann, Sven Henning, Konstantin Naumenko, Matthias Pander,
Kristin Riedel, Mathias Würkner*

Autorinnen und Autoren 349

Schlagwörter 351

Keywords 353

Additive Fertigung von freigeformten Stahl-Glas-Konstruktionen

Matthias Oppe¹, Lia Tramontini², Sebastian Thieme³

¹ knippershelbig GmbH, Tübinger Straße 12–16, 70178 Stuttgart, Deutschland; m.oppe@knippershelbig.com

² Architectural Facades and Products Research Group, TU Delft, Niederlande; l.m.tramontini@tudelft.nl

³ Jansen AG, Oberriet, Schweiz; sebastian.thieme@jansen.com

Abstract

Die additive Fertigung (engl.: additive manufacturing, AM) – weitgehend auch als 3D-Druck bezeichnet – eröffnet als zukunftsweisende Technologie eine bisher unvorstellbare Gestaltungsfreiheit für Stahlsystemfassaden. Das aufstrebende und innovative Fertigungsverfahren schreitet in Bezug auf Qualität sowie auf die digitale Prozesskette mit variablen Anwendungsmöglichkeiten und einer breiten Materialpalette schnell voran. Im Rahmen einer Forschungs Kooperation zwischen der Jansen AG, Oberriet/CH, der TU Delft/NL und dem Ingenieurbüro knippershelbig GmbH, Stuttgart/D wird die Anwendung von 3D-Druck-Technologien zur Herstellung von Komponenten für freigeformte Stahl-Glas-Konstruktionen untersucht.

Towards AM Free-form steel and glass structures. AM is explored as a means of producing structural nodes for freeform steel and glass facade construction. AM has the potential to substantially change the way that architectural products are made. The technology is rapidly advancing both in terms of quality and in terms of industrialization for a wide range of materials. Different AM methods are explored, an overview of the respective fabricated node designs is provided. The novel AM methods are demonstrated in a large feature freeform facade being designed and constructed using a parametric digital workflow. The work presented in this paper is part of the exploratory phase of an on-going product development – a collaboration between Jansen AG, TU Delft, and knippershelbig.

Schlagwörter: *additive Fertigung, AM, 3D-Druck, Stahl-Glas-Konstruktion, Freiform*

Keywords: *additive manufacturing, AM, 3D printing, steel and glass construction, free-form*

1 Einführung

Freigeformte Konstruktionen aus Stahl und Glas erfreuen sich immer größerer Beliebtheit im modernen Bauen. Die Fähigkeit, Freiform-Gebäudehüllen zu konstruieren, kann von Architekten genutzt werden, um Gebäude mit einer starken Identität zu schaffen. Ingenieuren ergeben sich Möglichkeiten, hocheffiziente Strukturen mit großen Spannweiten zu entwerfen. Die Verwendung von Glas ist für Architekten unablässig, um Räume mit natürlichem Tageslicht zu versorgen. In Kombination mit Unterkonstruktionen aus Stahl, entstehen schlanke Konstruktionen mit maximaler Transparenz (Bild 1).

In Freiformstrukturen ist die Verwendung von geraden Profilen bzw. Stäben in Kombination mit ebenen Glasscheiben gängige Praxis, um eine Kosten- und Fertigungseffizienz zu erreichen. Die Komplexität des Systems konzentriert sich daher in den Verbindungselementen (Knoten). Die geometrischen Randbedingungen für die Knoten sind besonders herausfordernd, da jeder Knoten in der Regel einzigartig ist.

Die derzeitige Praxis zur Herstellung von Knoten für derartige Anwendungen stützt sich stark auf Computer-Aided Manufacturing (CAM). Bei freigeformten Stahl-Glas-Konstruktionen werden üblicherweise CAM-Technologien wie Laserschneiden, Laserschweißen und CNC-Fräsen (Computer Numerical Control) verwendet, um die Knoten herzustellen. Diese Knoten bestehen entweder aus komplexen Unterkomponentenbaugruppen, die verschiedene unterschiedliche Herstellungsvorgänge erfordern und bei der Fertigung auf erhebliche manuelle oder komplexe digitale Eingriffe angewiesen sind (Bild 2a – Schweißknoten mit geschraubten Anschlüssen).



Bild 1 Bory Mall Bratislava, Slovakei (© Metal Yapi)

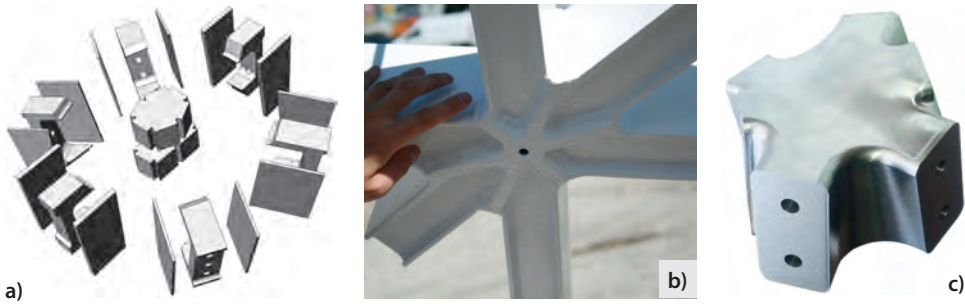


Bild 2 a) geschweißter Knoten (© seele), b) gebrannter Knoten (© Wagner Biro) und c) Vollknoten (© Metal Yapi)

Alternativ ist ihre Geometrie zur Erleichterung der Herstellung (hier Laserschneiden) vereinfacht, was jedoch die Herstellung und/oder den Anschluss der Profile (Bild 2b – geschweißte Verbindungen) erschwert und/oder möglicherweise die Integration der inneren Dichtungsebene beeinträchtigen kann. Die CNC-gefräste Variante (Bild 2c) ist derzeit die gängigste Typologie für die Herstellung solcher Knoten, welche durch die Freiheiten von mehrachsigen CNC-Fräsen die Umsetzung sehr eleganter, scheinbar kontinuierlicher Gitterschalen ermöglichen (Bild 1). Da das subtraktive CNC-Verfahren Abfallmaterial erzeugt und die massiven Vollknoten oft gering ausgelastet und somit viel schwerer als strukturell notwendig sind, ist die Materialeffizienz gering. Es kommt hinzu, dass bei Konstruktionen aus großen Stahlprofilen erhebliche Lasten infolge Eigengewichts der Knoten zu berücksichtigen sind.

AM ist eine neue und sich schnell entwickelnde Technologie, die ein beispielloses Maß an geometrischer Freiheit erlaubt, welche weitere Möglichkeiten in der Entwurfsphase bietet. Am Markt sind derzeit zahlreiche AM-Methoden, die jeweils ihre eigenen charakteristischen Vor- und Nachteile haben, für eine Vielzahl von Materialien verfügbar. Das Ziel der Forschungskooperation ist es, das Potenzial von AM beim Einsatz zur Herstellung von Freiform-Stahl-Glas-Konstruktionen zu untersuchen und das bestehende kommerzielle Fassadensystem VISS der Jansen AG für Freiform-Anwendungen mit AM-Knotenkomponenten auf VISS³ zu erweitern.

2 Systemlösungen für Stahl-Glas-Konstruktionen

2.1 Allgemeines

Eine „Systemlösung“ in Bezug auf den Fassadenbau bezeichnet die Entwicklung von Teileserien innerhalb eines Fassadensystems, die je nach den spezifischen Anforderungen eines bestimmten Projekts ausgetauscht und/oder angepasst werden können, ohne den technischen Kern des Systems zu verändern. Ein solcher Ansatz ermöglicht es den Anbietern von Fassadensystemen, Architekten und Ingenieuren ein breites Spektrum an Gestaltungsmöglichkeiten für ihre Gebäude mit einem hohen Maß an Engineering- und Fertigungseffizienz anzubieten. Im Fassadenbau bedeutet dies, unterschiedliche Profilformen und -abmessungen, Paneeltypen und -abmessungen sowie Dichtungsprofilgeometrien zu berücksichtigen und gleichzeitig einheitliche Schnittstellen zwi-

schen den verschiedenen Elementen derselben Schicht innerhalb der Fassade sowie zwischen den verschiedenen Elementen beizubehalten. Einer der Hauptvorteile dieser Strategie besteht darin, dass Systemkapazitäten vorkonstruiert und die geeigneten Elemente aus dem Teilesatz einfach ausgewählt werden können, sobald die Projektanforderungen festgelegt sind.

2.2 Pfosten-Riegel-Fassaden

Pfosten-Riegel-Fassaden wie z. B. das VISS-Fassadensystem werden typischerweise als mehrschichtige Systeme aufgebaut (Bild 3), wobei jede Schicht eine Reihe spezifischer Funktionen hat.

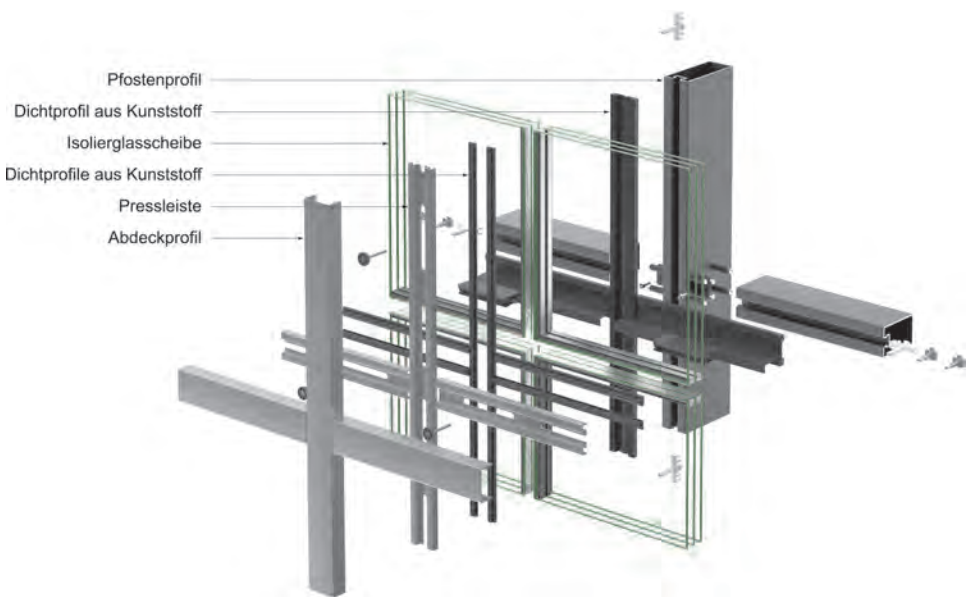


Bild 3 Explosionszeichnung | Knoten einer Pfosten-Riegel-Fassade (© Jansen AG)

2.3 Freigeformte Stahl-Glas-Konstruktionen

Freiformknoten aus Stahl oder Edelstahl sollen für VISS³ objektspezifisch hergestellt werden; die Grundkonstruktion basiert auf Standardkomponenten der VISS-Systemfassade. Die Idee einer „Systemlösung“ ist eine zentrale Voraussetzung für die Entwicklung der AM-Teile. Zunächst werden Standardschnittstellen für die Knoten zur Anbindung an das bestehende VISS-Fassadensystem der Jansen AG entwickelt.

Die Knoten sollen eine parametrisch gesteuerte Geometrie mit festgelegten Dimensionsvariablen haben, die basierend auf den spezifischen Kräften im Projekt und an einem bestimmten Knoten angepasst werden können. Für jedes AM-Fertigungsverfahren ist ein anderes Knotendesign und andere Variablen basierend auf den Vor- und Nachteilen der Technologie zu definieren.

Eine Systemlösung bringt eine Reihe entscheidender Vorteile mit sich: Die Fertigungsabläufe und die Vorgehensweise können konsistent bleiben; Druckparameter, deren Feinabstimmung für qualitativ hochwertige und weniger fehlerhafte Drucke erheblichen Aufwand erfordern kann, können standardisiert werden; und der Planungsprozess kann effizienter gestaltet werden.

3 AM-Fertigungsverfahren

3.1 Allgemeines

AM ist ein Begriff, der eine Vielzahl von Technologien umfasst. Auch im Stahlruck stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Bild 4 zeigt mehrere Metall-AM-Fertigungsverfahren, die grob nach Druckmaßstab, Auflösung/ Teilekomplexität und Kosten organisiert sind. Die erforderliche Größe der Knoten für Freiform-Konstruktionen variiert in Abhängigkeit von den Abmessungen der angeschlossenen Profile sowie der Geometrie der Eindeckung. Für die sich ergebende Bandbreite stehen eine Reihe unterschiedlicher Druckverfahren zur Verfügung.

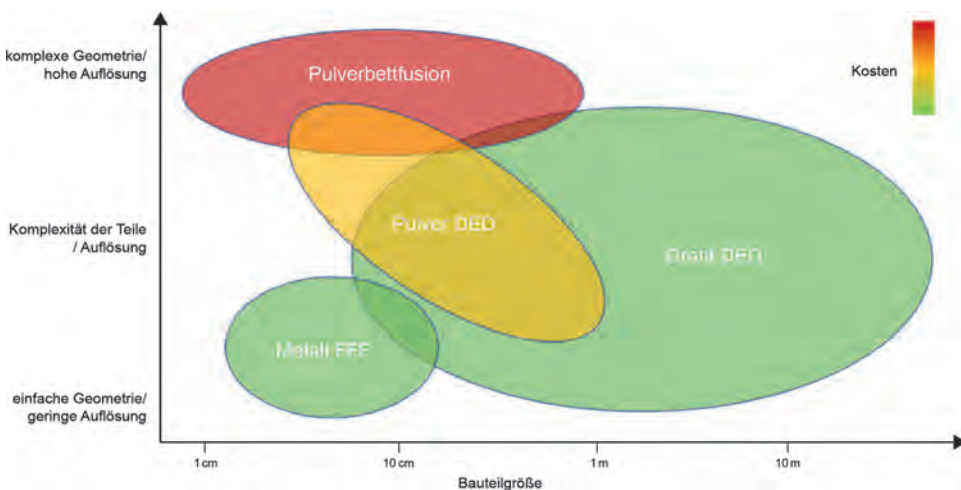


Bild 4 Vergleich verschiedener AM-Verfahren (© Robert Bowerman)

3.2 Laser-basierte Pulverbettfusion

Pulverbettfusion (EN: Powder Bed Fusion oder kurz PBF) ist eine Kategorie von AM-Prozessen, bei denen thermische Energie selektiv Bereiche eines Pulverbetts verschmilzt [3] (Bild 6a). PBF-Druckverfahren werden weiter nach der Art der Quelle kategorisiert, die zum Schmelzen des Metallpulvers verwendet wird, meistens ein Laser- oder Elektronenstrahl. Hier wurde laserbasiertes PBF (d.h. PBF-L), auch bekannt als selektives Laserschmelzen (SLM) oder direktes Metall-Lasersintern (DMLS), verwendet. Die Schichten werden inkrementell aufgebaut, um dreidimensionale Objekte zu bilden.

Der PBF-Druck zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, Teile mit komplexer Geometrie und hoher Detailtreue herzustellen [4]. Die diesem Druckverfahren innewohnende schnelle Abkühlung ergibt auch Teile mit höherer Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Stahlherstellungsverfahren [5] und auch im Allgemeinen im Vergleich zu DED-Druckverfahren. PBF-L ist ein Druckverfahren, das maßgeblich darauf angewiesen ist, die Menge des bedruckten Materials und die Nachbearbeitung im Hinblick auf die Kosteneffizienz zu minimieren [6]. Es hat einen typischen maximalen Überhang von etwa 40–45 Grad [7], wobei größere Überhänge durch die Verwendung von Stützstrukturen ermöglicht werden. Bei entsprechenden Parametern können runde Löcher auch ohne Stützstrukturen hergestellt werden [7].

3.3 Directed Energy Deposition

3.3.1 Allgemeines

Directed Energy Deposition (DED) bezeichnet Metall-3D-Drucktechnologien, bei denen Bauteile durch Schmelzen des Ausgangsmaterials hergestellt werden. Dieses Ausgangsmaterial ist in der Regel ein Metallpulver oder -draht. Das Metallpulver bzw. der Metalledraht wird durch eine Düse zugeführt und mittels fokussierter Wärmequelle (meistens durch einen Laser oder einen Elektronenstrahl) geschmolzen [3]. Beim DED-Drucken ist es möglich, aus unterschiedlichen Ausrichtungen zu drucken, da typischerweise entweder eines oder beide, das Substrat und der Schweißmechanismus, Mehrachsenfreiheit haben. Die DED-Technologie zeichnet sich durch ihre hohe Druckgeschwindigkeit im Vergleich zu PBF-Druckverfahren aus. DED-Druckverfahren werden nach der Art der verwendeten Wärmequelle und des verwendeten Basismaterials unterteilt.

3.3.1 DED-GMA

Beim DED-GMA wird ein Schweißdraht Schicht für Schicht durch einen Lichtbogen verschmolzen, um das Teil aufzubauen (Bild 6b). Diese Art von Technologie ist allgemein auch als Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) bekannt. DED-GMA



Bild 5 Mittels 3D-Druck hergestellte Brücke | Amsterdam, NL (© keystone)

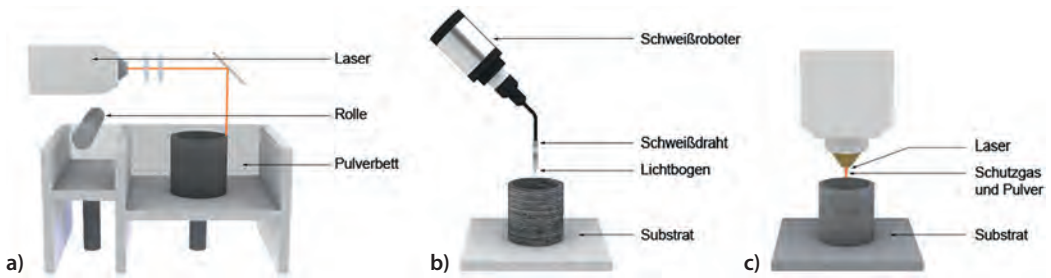


Bild 6 Schematische Darstellung a) PBF-L, b) DED-GMA und c) DED-L (© TU Delft)

zeichnet sich besonders durch seine Fähigkeit aus, sehr großflächige Objekte zu drucken, da es nicht in einer geschlossenen Umgebung erfolgen muss, sowie durch seine hohe Materialabscheidungsgeschwindigkeit [4].

Es verwendet auch Drahtvormaterial, das im Vergleich zu Metallpulver ein zugängliches und kostengünstiges Basismaterial ist. Die 3D-gedruckte Brücke in Amsterdam (Bild 5, [8]) beispielsweise wird mit dieser Technologie hergestellt worden.

3.4 DED-L

DED-L ist eine weitere Unterkategorie der DED-Technologie, bei der Metallpulver auf das Teil geblasen und mit einem Laser verschmolzen wird (Bild 6c). Diese Technologie hat eine höhere Materialabscheidungsgeschwindigkeit als PBF-L [4], obwohl langsamer als WAAM, aber mit einer potenziell glatteren Oberflächenbeschaffenheit. In dieser Studie wurde eine hybride DED-L/CNC-Maschine verwendet. Die mit der DED-L-Technologie aufgebauten Teile können anschließend nach Bedarf CNC-gefräst werden, um die gewünschten Details und Toleranzen mit derselben Maschine und einem einzigen CAM-Programm zu erreichen.

4 Komponenten für eine Systemlösung

4.1 Entwicklung des Knotens

4.1.1 Allgemeines

Es wurden verschiedene Druckverfahren verwendet, um spezifische Vor- und Nachteile zu untersuchen und das optimale Herstellungsverfahren auszusuchen. Im Folgenden sind Details zu Knoten, die im PBF-L- bzw. DED-L- Verfahren aus Edelstahl 316L gedruckt wurden, vergleichend gegenübergestellt.

4.1.2 PBF-L-Knoten

Die Hauptgeometrie des PBF-L-Knotens (Bild 7) besteht aus einem Netz von Stegen, die grob an den Achsen des Knotens und der z-Achse des Druckers ausgerichtet sind. Daher sind die meisten Stege so ausgerichtet, dass ihre Überhänge gut innerhalb der Druckbeschränkungen liegen. Endflächen und Seitenwände bilden das Hauptvolumen des Knotens, in der Mitte befindet sich eine innere Struktur aus konzentrischen zylind-

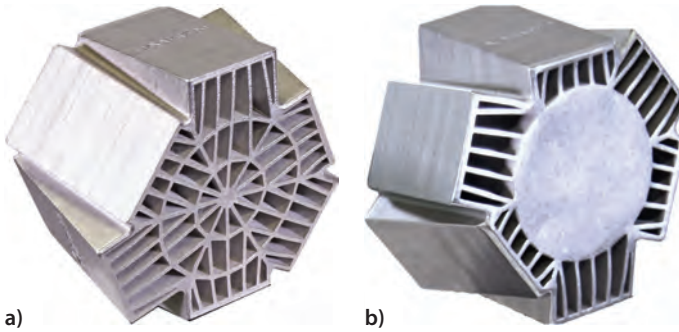


Bild 7 PBF-L-Knoten
a) Innenansicht b) Außenansicht (© Jansen AG)

drischen Stegen mit unterschiedlichen Radien. Platten, die von jeder Endfläche entlang der Normalkraftrichtung jedes Arms verlaufen, verbinden das Netz der Stege, so dass ein strukturelles Gitter entsteht.

Zusätzlich wird am Ende jeden Arms eine Art Kopfplatte, deren Dicke sich aus den statischen Anforderungen ergibt, gedruckt. An der äußeren Oberfläche des Knotens befindet sich eine dünne Platte, die senkrecht zum Druckbett ausgerichtet ist. Die Platte soll die Dichtungsebene stützen. Die so entstehenden radial ausgerichteten Stege der Knotenarme garantieren einen direkten Lastpfad für Normal- und Querkkräfte sowie Biegemomente auf den Zylinder in der Mitte des Knotens. Druckkräfte werden durch Kontakt, Zugkräfte über Schrauben eingeleitet. Der zentrale Zylinder verteilt die Lasten überwiegend über Membranwirkung durch die gekrümmten Wände zu den benachbarten Armen sowie in die angeschlossenen Profile.

4.1.3 DED-L-Knoten

Die Hybridmaschine kombiniert einen 5-Achs-DED-L und eine CNC-Fräse. Bei diesem Design wird der Knoten radial in einem festen Volumen gedruckt, sodass es wenig bis gar keine Überhangbedingungen gibt. Anschließend werden die Stirnflächen und spezifischen Endzustände gefräst, um die hohen erforderlichen Toleranzen zu erreichen (Bild 8).

Die Strukturprinzipien für den Knotenaufbau und die Lastabtragung folgen den oben für den PBF-L-Knoten beschriebenen. Durch den gerichteten Druck zeigt das gedruckte Material ein orthotropes Verhalten. Letzteres wurde durch experimentelle Untersuchungen in Form von Zugversuchen beurteilt: Die Zugfestigkeit des Materials

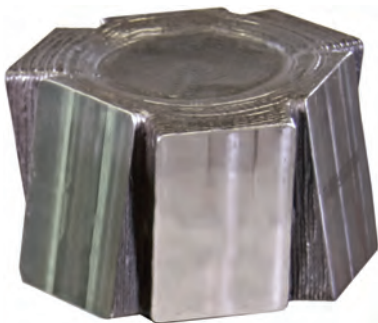


Bild 8 DED-L-Knoten (© Jansen AG)

quer zur Druckrichtung ist geringer als in Längsrichtung, weist aber dennoch eine ausreichende Festigkeit gegenüber dem Grundmaterial auf, so dass sich in Kombination mit der kraftoptimierten Knotengeometrie eine robuste und effiziente Lösung bietet.

4.2 Dichtungsebene

Besonderes Augenmerk galt der Dichtungsebene: Die aufliegenden Dichtungsknoten werden passend zum Verbindungsknoten gedruckt, sodass die Entwässerung über nur eine Dichtungsebene erfolgt. Gleichzeitig gewährleistet die verdeckte Verbindung eine homogene Ansicht.

5 Vom Rendering zur Musterfassade

5.1 Digitale Prozesskette

Die Realisierung der AM-Musterfassade basiert von der Geometrieentwicklung bis zur Generierung der CAM-Modelle auf einer digitalen parametrischen Prozesskette. Dabei findet der parametrische Arbeitsablauf in fünf Phasen statt (Bild 9). Der Zweck der Unterteilung des parametrischen Arbeitsablaufs in dieser Anordnung besteht darin, den Systemansatz für das Knotendesign zu ergänzen. Dieser Arbeitsablauf ermöglicht eine erhebliche Flexibilität im Verlauf der Designuntersuchung und auch beim Voranschreiten in andere Anwendungen.

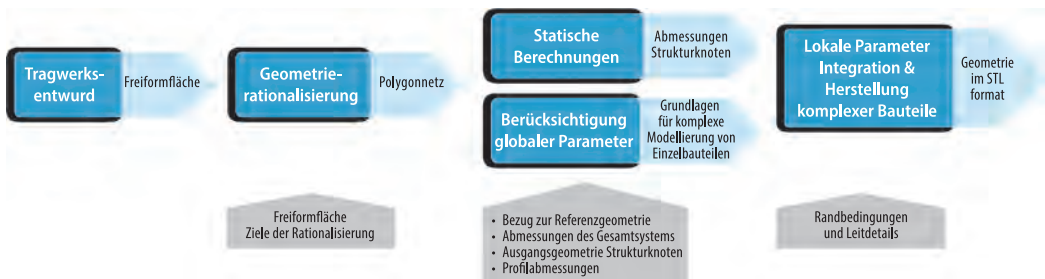


Bild 9 Digitale Prozesskette für die Planung der Musterfassade (© TU Delft)

5.2 Entwurfsprozess

Im Entwurfsprozess wird zunächst die Freiformfläche durch ein Polygonnetz interpretiert, welches die Referenzgeometrie für die ebenen Verglasungselemente und lineare Stahlprofile darstellt. Es dient als Grundlage für die globale Strukturanalyse im Programmsystem SOFISTIK (Bild 10). Des Weiteren werden Submodelle einzelner Knoten erstellt, um die Tragfähigkeit sowie das Lastverformungsverhalten zu untersuchen.

Im Rahmen der lokalen Parameterintegration wird die Knotengeometrie grob herausgearbeitet, indem mehrere Setzvariablen definiert werden, darunter die Gesamt- abmessungen der Profile, Dichtungen und Verglasungen sowie das Vorgeben der Be-

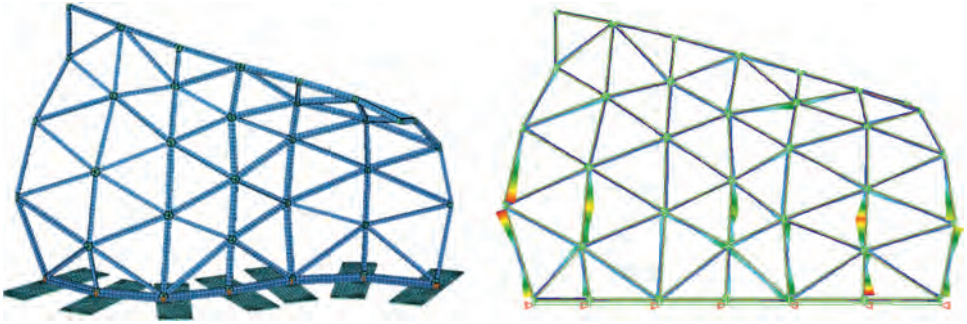


Bild 10 Finite-Elemente-Modell der Musterfassade (© knippershelbig GmbH)

ziehung zur Referenzgeometrie – in diesem Fall wird das Referenznetz an der inneren Verglasungsfuge ausgerichtet.

Eine wesentliche Priorität beim Entwerfen von AM-Strukturknoten hat die Minimierung der möglichen Armlänge, um die Größe der gedruckten Teile zu verringern. Somit wird die minimale Länge jedes strukturellen Knotenarms, die erforderlich ist, um eine 90-Grad-Verbindung herzustellen, in der Grasshopper-Umgebung identifiziert. Dieser Parameter hängt von einer Reihe von Systemvariablen – einschließlich der Form und Abmessungen der angeschlossenen Profile; der Beziehung zur Referenzgeometrie sowie dem erforderlichen Mindestradius zwischen den Armen – ab.

In der letzten Phase des parametrischen Designs wird das konkrete Knotendesign definiert (Bild 11). Die Teile der Knotengeometrie werden basierend auf dem Ergebnis der statischen Berechnung dimensioniert und als Randbedingungen in die Stirnfläche integriert.

Die parametrische Natur des Prozesses ist derart, dass es Gestaltungsfreiheit für die Weiterentwicklung dieses Systems gibt. Die verschiedenen Phasen sind in der Definition unterteilt, damit sie lokal verwaltet werden können, wenn sich das Knotendesign in zukünftigen Projekten ändert. Die Phase der Herstellung komplexer Teile ist nach



Bild 11 3D-gedruckter Knoten in Musterfassade (© Jansen AG)

Merkmale unterteilt, um hohe Rechenzeiten bei der Modellierung hochpräziser Merkmale zu vermeiden. Diese Workflow-Strategie lässt viel Freiheit, um diese Definition später auf einen anderen architektonischen Entwurf, Profilgeometrien usw. anzuwenden.

6 Fazit und Ausblick

Es wurden verschiedene additive Fertigungsverfahren zur Herstellung von Strukturknoten für Freiform-Stahl-Glas-Konstruktionen gegenübergestellt. Für jede der ausgewählten AM-Methoden wurde ein anderes Knotendesign entwickelt. Der für die endgültige Konstruktion ausgewählte Knoten lässt allerdings keine abschließende Einschätzung darüber zu, welches Druckverfahren für diese Art der Anwendung besser geeignet ist, da das am besten geeignete Druckverfahren für ein spezifisches Bauvorhaben von einer ganzen Reihe von Designvariablen wie Größe, strukturelle Anforderungen, gewünschte Form und Oberflächenqualität abhängig ist. Diese Studie versucht, einen ersten Schritt in Richtung AM von freigeformten Stahl-Glas-Konstruktionen zu gehen und ein Beispiel dafür zu geben, was es bedeuten kann, mit verschiedenen AM-Technologien zu arbeiten.

Die Entwicklung der Musterfassade (Bild 12) hat viele der Stärken, aber auch die Herausforderungen der Anwendung von AM aufgezeigt. Die Entwürfe der Knoten wurden für diese Studie konservativ konstruiert und es gibt viel Raum für weitere Materialoptimierungen in der zukünftigen Entwicklung. Darüber hinaus entsteht bei AM-Knoten im Vergleich zu massiven CNC-gefrästen Knoten, die erhebliche Buy-to-Fly-Verhältnisse aufweisen können, eine sehr geringe Menge an Abfallmaterial. Der systemische Entwurfsansatz bietet auch die Grundlage für standardisierte Engineering-Prozesse für Freiform-Strukturen, die es ermöglichen, Planungsrisiken und Kosten zu minimieren. Andererseits war die Integration von CNC-Fräsen für jede der Knoteniterationen in unterschiedlichem Maße erforderlich. Dies wird sich wahrscheinlich nicht ändern, wenn verdeckte mechanische Verbindungen mit geringen Toleranzen

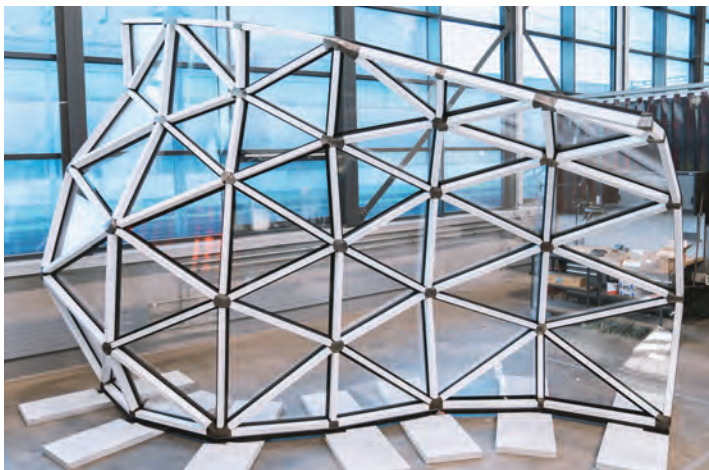


Bild 12 Innenansicht der Musterfassade
(© Jansen AG)

und hoher Maßgenauigkeit gewünscht werden. Insbesondere bei der DED-Technologie ist die richtige Pfadplanung ein integraler Bestandteil des Prozesses und ein großer Faktor für die Effizienz des Druckprozesses.

Unabhängig von der jeweiligen AM-Methode profitiert die Entwicklung von AM-Strukturknoten von der multidisziplinären Zusammenarbeit. Die Gesamtgeometrie der Freiformfassade und deren Diskretisierung diktiert die statischen Anforderungen an die Montage und die Mindestgröße des AM-Eingriffs. Ferner sind die Geometrie der Knoten und das zu ihrer Fertigung ausgewählte Herstellungsverfahren untrennbar mit dem Aussehen, der strukturellen Leistung und ihrer Herstellbarkeit verbunden. Jede AM-Methode hat auch ihre eigenen Stärken und Einschränkungen, die berücksichtigt werden müssen, um zeit- und kosteneffiziente AM-Produkte zu erzielen. Der effektive Einsatz von AM erfordert somit eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Architekten, Fassadenberatern, Tragwerksplanern und Experten auf dem Gebiet der AM.

7 Danksagung

Das laufende Projekt wird von einem multidisziplinären Team, bestehend aus der Jansen AG, der TU Delft und der knippershelbig GmbH, bearbeitet. Federführend sind Sebastian Thieme, Manuel Mueller und Radenko Zoric von der Jansen AG; Lia Tramontini und Ulrich Knaack von der TU Delft sowie Laurent Giampellegrini und Matthias Oppe von der knippershelbig GmbH verantwortlich.

8 Literatur

- [1] Knippers, J.; Helbig, T. (2009) *Digital Process Chain from Design to Execution* in: *Innovative Design*, pp. 30–39.
- [2] Crone, J. (2010) *Een constructieve zeepbel* in: *Bouwwereld*, Doetinchem, pp. 40–47.
- [3] ASTM International (2013) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
- [4] Milewski, J. O. (2017) *Additive Manufacturing of Metals*.
- [5] Liu, L. et al. (2018) *Dislocation network in additive manufactured steel breaks strength–ductility trade-off*. *Mater. Today*, vol. 21, no. 4, pp. 354–361.
- [6] Thomas, D. S.; Gilbert, S. W. (2015) *Costs and cost effectiveness of additive manufacturing*, Gaithersburg, MD.
- [7] Kokkonen, P.; Salonen, L.; Virta, J.; Hemming, B.; Laukkanen, P.; Savolainen, M. (2016) *Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process* in: *Digit. Open Access Repos. VTT*, p. 131.
- [8] Parkes, J. (2021) *Long-awaited 3D-printed stainless steel bridge opens in Amsterdam, dezeen*. [Online]. <https://www.dezeen.com/2021/07/19/mx3d-3d-printed-bridge-stainless-steel-amsterdam/> [Zugriff: 31. Juli 2022]
- [9] Tramontini, L.; Thieme, S.; Giampellegrini, L. (2022) *Towards the additive manufacturing of freeform steel and glass facades*, Advanced Building Skin Conference, Bern.
- [10] Tramontini, L.; Thieme, S.; Mueller, M.; Zoric, R.; Giampellegrini, L.; Oppe, M. (2022) *Towards AM Freeform Steel and Glass Facades*, BE-AM 2022 – Symposium for Additive Manufacturing in the Built Environment, Frankfurt.