

Nachhaltige Fassadensysteme – Beispiele aus Forschung und Praxis

Lucio Blandini^{1,2}, Giulia Peretti³, Florian Starz²

¹ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 14, 70569 Stuttgart, Deutschland

² Werner Sobek AG, Albstraße 14, 70597 Stuttgart, Deutschland

³ Werner Sobek Green Technologies GmbH (WSGT), Albstraße 14, 70597 Stuttgart, Deutschland

Abstract

Glasfassaden spielen in der modernen Architektur eine zentrale Rolle. Sie öffnen den Blick nach außen und bringen Tageslicht nach innen. Diese Transparenz bringt aber auch verschiedene bauphysikalische und energetische Herausforderungen mit sich, denen man auf unterschiedliche Weise begegnen kann. Verschiedene Technologien können dabei helfen, klimaangepasste und ressourcenschonende Fassaden zu planen und zu bauen: Während der Planungsphase sind Simulationen und präzise Modellierungsstrategien ein wichtiges Werkzeug; eine dynamische Anpassungsfähigkeit der Fassade hinsichtlich ihrer Transparenz und ihrer bauphysikalischen Eigenschaften könnte in Zukunft einen weiteren wichtigen Schritt Richtung Ressourcen- und Energieeffizienz bedeuten. Der vorliegende Artikel präsentiert ausgewählte Forschungsansätze und einige aktuelle Projektbeispiele, die aufzeigen, wie nachhaltige Fassadensysteme in der Zukunft aussehen könnten.

Sustainable facades: case studies in research and praxis. Glass facades play an important role in modern architecture: they open the view to the outside and let natural light inside. Their transparency entails certain energetic challenges, which can be addressed in different ways. Technologies can support the design process, in order to build sustainable facades and optimize overall use of resources. Today simulation and modelling software are already a useful tool during the design phase; in the future adaptive facade systems could provide answers to the quest for more energy and resource efficiency. This paper presents recent research work as well as innovative case studies, which show a variety of answers to the demand for more sustainable facades.

Schlagwörter: *Ressourceneffizienz, energetische Performance, Adaptivität*

Keywords: *resource efficiency, energetic performance, adaptivity*

1 Einleitung

Es ist mehr denn je zwingend erforderlich, dass auch das Bauwesen sorgfältiger mit den verfügbaren Ressourcen umgeht als bisher: Unsere gebaute Umwelt steht für mehr als die Hälfte des weltweiten Ressourcenverbrauchs und für mehr als ein Drittel der Treibhausgasemissionen [1]. Dies zeigt, welche Hebelwirkung Maßnahmen im Bauwesen entfalten können, um hierdurch essenzielle Klima- und umweltpolitische Ziele wie beispielweise das Klimaschutzabkommen von Paris zu erreichen. Damit dies passiert, braucht es aber mehr Innovationsgeist und einige grundlegende Änderungen jenseits der immer strikter werdenden normativen Anforderungen. Es muss darum gehen, klare Ziele zu definieren und sich nicht allein auf bestimmte vorgefasste Maßnahmen zu fokussieren. Dieses Ziel lässt sich nach Ansicht der Autoren am einfachsten mit dem Triple Zero® Konzept von Werner Sobek beschreiben: Unsere Gebäude sollten keine fossilbasierten Energieträger nutzen (Zero Fossil Energy), sollten keine Emissionen erzeugen (Zero Emissions) und sollten zu 100% in technische oder biologische Stoffkreisläufe rückführbar sein (Zero Waste).

Der vorliegende Aufsatz zeigt anhand ausgewählter Fassadenbeispiele aus unterschiedlichen Klimazonen, wie das Bauwesen schon heute mit vertretbarem Aufwand einen Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit leisten kann. Im Blickpunkt stehen dabei insbesondere neuartige Sonnenschutzelemente, Systeme zur Fassadenbegrünung und andere Ansätze, welche die ganzheitliche Bilanz einer Fassade deutlich verbessern können. Kreativität ist gefragt, um den erforderlichen Wechsel hin zu neuen Denk- und Arbeitsweisen zu realisieren. Dies gilt für die gesamte Wertschöpfungskette des Bauwesens: von der Planung über die Fertigung bis zu Betrieb, Sanierung und Rückbau. Glasbau wird dabei immer eine wichtige Rolle spielen, denn es bleibt essenziell für die Nutzer, den Blick nach außen richten zu können und hinreichend mit Tageslicht versorgt zu sein [2]. Glasfassaden werden aber zunehmend mit anderen Fassadensystemen kombiniert, um eine optimale Synthese unterschiedlicher Eigenschaften zu erreichen.

Immer präzisere und leistungsfähigere Modellierung- und Simulationsprogramme unterstützen bei der Planung solcher System-Kombinationen und tragen zur Optimierung des Fassadenbereichs bei. Dank dieser Programme können schon früh präzise Aussagen zu den zu erwartenden externen und internen Bedingungen gemacht werden. Hierdurch können die Gestaltung und die Konstruktion der Fassade optimal auf Faktoren wie solare Einstrahlung, interne Lasten, Verschattung, Lüftung usw. eingestellt werden. Ziel ist es, den höchsten Komfort bei einer gleichzeitigen Steigerung der energetischen Effizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu gewährleisten.

Zu den einfachsten, aber sehr effektiven Studien zählen Verschattungs- und Einstrahlungsanalysen. Diese Art von Studie ermöglicht bereits in sehr frühen Entwurfsphasen eine gute Einschätzung der zu erwartenden thermischen Lasten und möglichen solaren Gewinne. Dies hilft den Planern bei der frühzeitigen Dimensionierung von Dachvorsprüngen, Verschattungselementen und PV-Modulen. Mit fortschreitender Planung können dann umfangreichere Simulationen angesetzt werden, die bei spezifischen Fragestellungen unterstützen. Zu den am häufigsten verwendeten Analysen gehört die Tageslichtsimulation. Hierbei werden lichttechnische Eigenschaften und visueller Komfort eines Raums untersucht. Hinzu kommen thermische Simulationen, um die energetischen Eigenschaften der Fassade in Zusammenhang mit den internen und



Bild 1 Renderings des Demonstrator-Hochhauses (ILEK)

externen Lasten zu optimieren. Strömungssimulationen werden für komplexe Untersuchungen (zum Beispiel bei Doppelfassaden) verwendet.

Eine zukünftige Alternative zu statischen Systemen in der Fassade sind adaptive Systeme, mithilfe derer sich Eigenschaften wie Lichttransmission, Reflexion und Energiedurchlässigkeit steuern und gezielt manipulieren lassen (Bild 1). Solche Systeme werden eine viel dynamischere Gebäudehülle ermöglichen [3]. Dies könnte zur Entstehung einer neuartigen Architektur führen, welche auch eine neue Dimension in der Interaktion zwischen Mensch und Raum eröffnet. Hinzu kommt eine Erhöhung der Resilienz gegenüber den Folgen des Klimawandels. 14 Institute der Universität Stuttgart aus den Fakultäten Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Informatik und Flugzeugbau haben sich zusammengeschlossen, um solche Systeme zu erforschen und in die baupraktische Anwendung bringen zu können. Dies wird seit 2017 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsprogramms SFB 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ gefördert.

Drei aktuelle Fassadenprojekte sowie ein Bericht aus der SFB Forschung zeigen in den zwei folgenden Kapiteln auf, welche Lösungen und Ansätze möglich sind.

2 Innovative Fassadenprojekte

2.1 Unser Neues Haus 2.0, Wien

Die Wiener Zentrale des Hauptverbandes der österreichischen Sozialversicherungsträger wurde nach dem EnerPHit-Standard (Passivhausstandard) modernisiert und durch zwei Neubauten ergänzt und erweitert. Aufgrund der energetischen und Kom-



Bild 2 Unser Neues Haus 2.0, Wien (Wolfgang Thaler, Wien)

fortanforderungen und zur Gewährleistung des gewünschten Schallschutzes wurde die neue Gebäudehülle als Doppelfassade ausgebildet. Die Architekten Chaix & Morel aus Paris legten dabei nicht nur auf Transparenz Wert, sondern wollten auch die Vertikalität betonen. (Bild 2)

Bei der Hauptfassade wurde eine neutrale Wärmeschutzverglasung mit außenliegendem Sonnenschutz (F_c -Wert: 9–21 %) angesetzt, sodass g -Werte zwischen 0,03 und 0,07 erreicht werden können. Die Lichttransmission der Verglasung beträgt dabei bis zu 47 %. Die Doppelfassade ist eine thermisch optimierte Elementfassade mit einer hinterlüfteten Prallscheibe.

Vertikal verlaufende Doppellisenen dienen als Tragelemente für die Prallscheibe und als optische Elemente zur Betonung der Vertikalität. Die Lisenen wurden als perforiertes Lochblech ausgeführt, um die Luftzirkulation zu optimieren: das Perforationsmuster wurde auf Grundlage der statischen und bauphysikalischen Simulationen definiert. Das Brüstungspaneel ist in die Fassade integriert. Auf eine massive gemauerte Brüstung wurde verzichtet. Die Brüstungsbereiche sind mit einer Mineralfaserdämmung A1 mit der verbesserten Wärmeleitgruppe WLG 032 versehen, um die bauphysikalischen Anforderungen zu erfüllen. (Bild 3)

In Rahmen der Planung wurde eine Untersuchung zur Einschätzung der Temperaturverhältnisse innerhalb des Fassadenzwischenraumes bei unterschiedlichen Varianten durchgeführt. Bei den Auswertungen der Studie war es wichtig, die methodischen Grenzen der thermisch-dynamischen Gebäudesimulation zu berücksichtigen (z. B. konnten Staueffekte in schlechten belüfteten Bereichen des Fassadenzwischenraumes rechnerisch nicht erfasst werden). Die parametrischen Simulationen eines Fassadenabschnitts wurden jeweils für ein ganzes Jahr durchgeführt. Dabei wurden die maximale Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum sowie die maximale Temperatur der Prallscheibe ausgewertet.

Als Parameter für die Analyse wurden Eigenschaften wie der Reflexionsgrad der Lamellenraffstoren und der opaken Außenoberflächen der Fassade, die Größe der Öff-

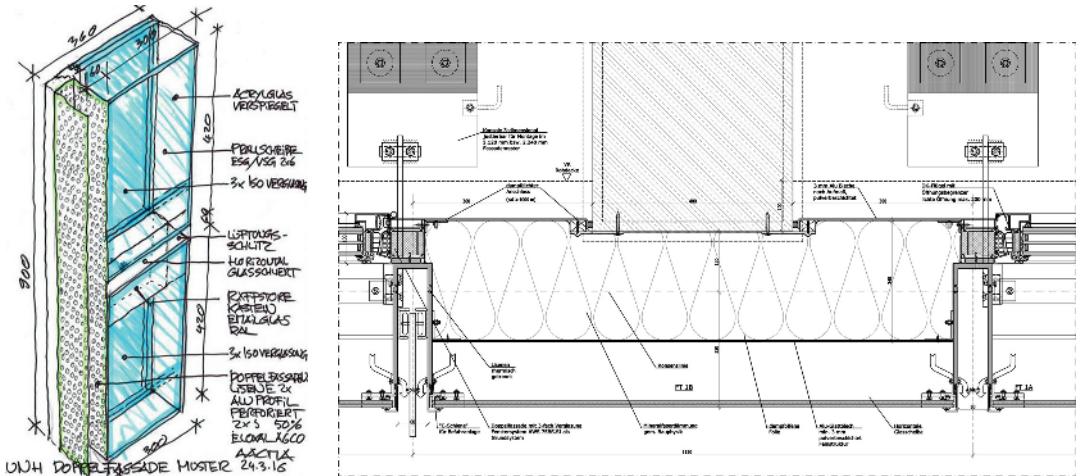


Bild 3 Unser Neues Haus 2.0, Wien – Fassadenkonzept (Chaix & Morel) und Detailierung (Werner Sobek)

nungsflächen für die Hinterlüftung sowie die strahlungsphysikalischen Eigenschaften der Prallscheibe identifiziert. Die Studie zeigte deutlich, welche Eigenschaft den größten Einfluss auf die Performance der Fassade hat. Sie ermöglichte so eine fundierte Berechnung des zu erwartenden Kühlbedarfs der Innenräume. Durch diese interaktive Planung im Zusammenspiel von Fassade und TGA konnte der Entwurf deutlich optimiert werden.

Bei dem aktuell in Arbeit befindlichen Entwurf einer Doppelfassade in Düsseldorf wird dieser Ansatz noch weiterentwickelt. Numerische Strömungssimulationen (CFD – Computational Fluid Dynamics) liefern hier detaillierte Informationen zur optimalen Anordnung der Lüftungsöffnungen und zu den zu erwartenden Temperaturen im Fassadenzwischenraum (Bild 4). Untersucht wird hierbei auch die Temperaturverteilung.

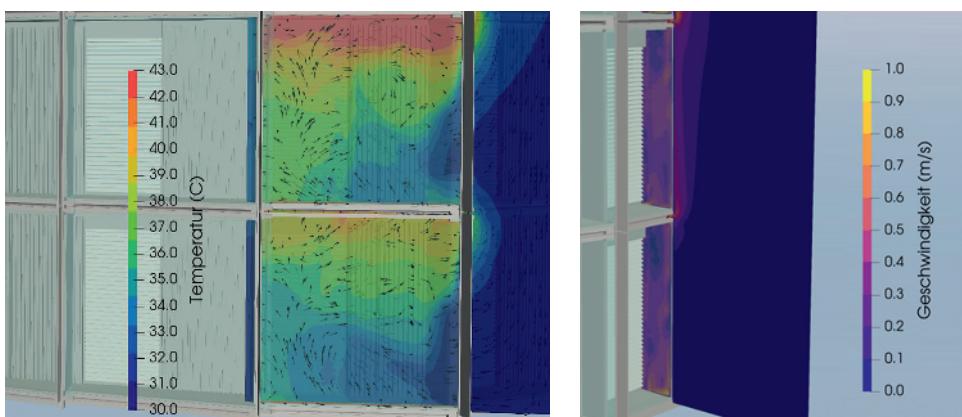


Bild 4 Auszug aus der CDF Simulation einer Doppelfassade; Links: Darstellung der Temperatur; Rechts: Darstellung der Luftgeschwindigkeit (WSGT)

lung über die Höhe der Fassadenzwischenräume sowie die durchschnittliche Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum in unterschiedlichen klimatischen Situationen. Auf diese Weise können auch die Bereiche mit potentieller Stagnation, also fehlender Durchlüftung und stehender Luft, identifiziert werden.

Solche Simulationen sind einerseits wichtige Werkzeuge, die eine Optimierung des Entwurfs erlauben; andererseits ermöglichen solche Simulationen manche neuartigen Lösungen überhaupt erst, da sie klar aufzeigen, was sich wie realisieren lässt (und was nicht).

2.2 Grüne Fassaden

Die Diskussion über das Begrünen der Städte wird für Planer immer wichtiger, auch aufgrund der spürbar zunehmenden Wetterextreme. Auch bei den Fassaden können begrünte sinnvoll mit transparenten Bereichen kombiniert werden. Europas größte Grünfassade – der Kö-Bogen 2 mit 8 km Hainbuchen in Düsseldorf – und das Leuchtturmprojekt „Calwer Passage“ in Stuttgart mit mehr als 2 km Mischkulturen sind hier wirkliche Meilensteine.

Beide Projekte sind durch die Zusammenarbeit von Ingenhoven Architects mit der Fassadenabteilung des Büros Werner Sobek entstanden. Sie kombinieren geschlossene und begrünte Fassadenflächen mit verglasten Bereichen und einer vorgelagerter Bepflanzung. Die Begrünung als lebendige und nachwachsende „Fassadenhaut“ leistet somit einen Beitrag zu einer nachhaltigen Fassadenlösung nicht nur in Bezug auf Wärmeschutz. Sie dient auch der Lärmreduktion und dem verbesserten Schallschutz. Gleichermaßen gilt für den Sichtschutz vor verglasten Fassaden, vor allem in innerstädtischen Lagen. Lokal werden durch die verschattende Wirkung der Pflanzen die Oberflächen-



Bild 5 Kö Bogen 2, Düsseldorf (HG Esch, Hennef)

temperaturen verringert; der Wärmeeintrag in das Gebäude wird somit reduziert, die erforderliche Kühlleistung nachhaltig gesenkt. (Bild 5)

Bei Starkregen fungieren die Begrünung und der Substrataufbau als Zwischenspeicher für die Wassermassen; die Verdunstungskühlung verhindert lokale Hitzeinseln und sichert so einen Komfortgewinn für dicht bebaute Innenstädte. Darüber hinaus können die Pflanzen auch lokale Feinstaubkonzentrationen reduzieren, CO₂ binden und in Sauerstoff umwandeln und somit einen Teil zum CO₂ neutralen Bauen bei gleichzeitiger Frischluftversorgung urbaner Gebiete beitragen.

Grüne Fassaden wirken der ansonsten zu beobachtenden sommerlichen Überhitzung von stark bebautem Gebiet („Urban Heat Island“-Effekt) mit natürlichen Mitteln entgegen. Das Mikroklima vor Ort wird so entscheidend verbessert und das Wohlbefinden erhöht. Einzelne Gebäude können natürlich nur bedingt und lokal zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen. Die Begrünung der Fassaden und Dächer bei der Calwer Passage und beim Kö-Bogen 2 bringen aber ein Stück Natur und Biodiversität zurück in die Herzen urbaner Lebensräume und können der Anstoß für weitere solche Projekte sein.

2.3 Wasl Tower, Dubai

Der neue Al Wasl Tower wurde von UNStudio zusammen mit Werner Sobek geplant. Ziel war es hierbei, eine neue, nachhaltige Art von Hochhäusern im Kontext des zukunftsorientierten Expo 2020 zu realisieren (Bild 6). Die Geometrie des Entwurfs ist von einer Drehbewegung geprägt. Das Gebäude liegt zwischen der zentralen Sheikh Zayed Road und dem 828 m hohen Burj Khalifa. Im Hochhaus finden sich neben Wohnungen und Büros auch ein 5-Sterne-Hotel, Restaurants und ein Spa-Bereich.



Bild 6 Wasl Tower, Dubai – Bauzustand im September 2020 (Werner Sobek) und Rendering (UNStudio)

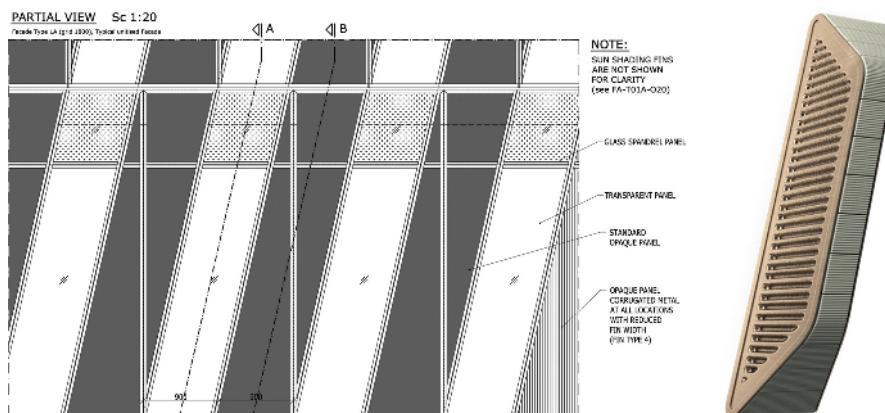


Bild 7 Wasl Tower, Dubai – Fassadenansicht und Rendering der Sonnenschutzelemente (Werner Sobek)

Zentrales Element des Planungsprozesses waren das BIM-Modell (Building Information Modeling-Modell) und die damit verbundene parametrisch programmierte Geometrie. Diese unterstützten die Koordination zwischen den Projektbeteiligten und ermöglichen es, während der Planung besser auf die unterschiedlichen Anforderungen und Rahmenbedingungen reagieren zu können. Das Fassadenraster variiert je nach Sonnenausrichtung, sodass mehr als 50 % der transparenten Flächen Richtung Norden und mit Meerblick ausgerichtet sind. Insgesamt bietet die Fassade durch solche Ansätze mehr farbneutrale und transparente Glasfläche als andere vergleichbare Bauten in der Region.

Die Sonneneinstrahlung wird – insbesondere in den Sommermonaten – durch Sonnenschutzelemente aus Keramik zurück nach außen reflektiert; diese Keramikelemente sind um 13° geneigt (Bild 7). Sie folgen der komplexen Geometrie des Gebäudegrundrisses und sind auch parametrisch in der Breite und Tiefe variabel, sodass sie einen optimalen Sonnenschutz bilden. In der Nacht werden die Elemente durch LED-Beleuchtung inszeniert und nehmen hierdurch Bezug auf das pulsierende Stadtleben. Als Energiequelle für die Fassadenbeleuchtung dienen PV-Paneele, die auf dem benachbarten Parkhaus platziert sind.

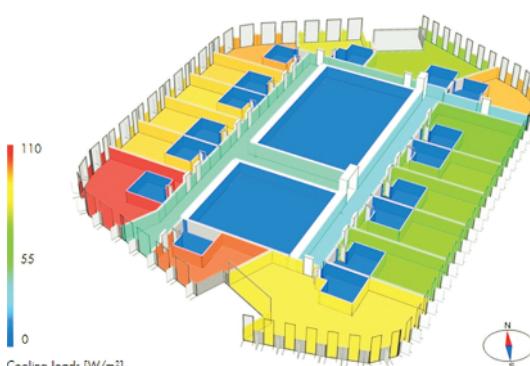


Bild 8 Wasl Tower, Dubai – Thermische Simulationen (WSGT)

Es wurden mehrere Simulationen durchgeführt, um die Fassade durch verschiedene passive Maßnahmen optimal auf die lokalen Umweltbedingungen abzustimmen. Mittels Einstrahlungsanalysen wurden in den frühen Planungsphasen Fassadenvarianten hinsichtlich der jeweils anfallenden Besonnung untersucht. Diese Studien wurden immer weiter verfeinert, sodass schließlich je nach Ausrichtung eine optimale Teilung von opaken und transparenten Fassadenbereiche definiert werden konnte. In einem zweiten Schritt wurden die lichttechnischen und energetischen Eigenschaften der Verglasung simuliert, um Aspekte wie den visuellen und den thermischen Komfort zu analysieren (Bild 8). Durch die Betrachtung der Beleuchtungsstärke, der operativen Temperatur und der Lufttemperatur wurde die Fassade weiter optimiert; hierbei wurden auch die Lichttransmission und der g -Wert definiert.

3 Forschungsausblick: Adaptive Fassaden

Aufbauend auf den Forschungen des ILEK (Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren) im Bereich der schaltbaren Verglasungen [3] werden an der Universität Stuttgart in Rahmen des SFB 1244 seit 2017 neuartige Adaptivitätskonzepte für alle Bereiche der gebauten Umwelt in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit erforscht. Ein solcher Ansatz erfordert eine grundlegende Transformation der architektonischen Konzeption von Gebäuden: es geht dabei sowohl um die Entwicklung einzelner Komponenten als auch um deren Einbindung in das Gesamtsystem. In den vergangenen drei Jahren wurde ein 36,5 m hohes Testgebäude geplant [4]; die Fertigstellung des Stahltragwerks erfolgt bis Anfang 2021 (Bild 9).



Bild 9 Bau des adaptiven Demonstrator-Hochhauses an der Universität Stuttgart (ILEK)

Anhand dieses Versuchsgebäudes werden die Forschungen und Entwicklungen im Bereich der adaptiven Gebäudehülle hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit getestet. Bei adaptiven Fassaden geht es darum, durch eine Manipulation der bauphysikalisch relevanten Fassadeneigenschaften dynamisch auf Einwirkungen wie Sonneneinstrahlung, Schall, Feuchte, etc. zu reagieren. In den letzten 3 Jahren wurden verschiedene Ansätze und deren bauphysikalische Auswirkungen untersucht [5]. Im Komponentenbereich erweisen sich insbesondere Sandwichstrukturen mit aktivierten Elementen als besonders vielversprechend; diese Strukturen wurden am Institut für Flugzeugbau (IFB) erforscht und werden zurzeit am ILEK für die Anwendung im Fassadenbau weiterentwickelt [6] (Bild 10, links). Es handelt sich dabei um sogenannte PALEOs (*plastically annealed lamina emergent origami structures*), welche die Steifigkeit eines flachen Halbzeuges derart verändern, dass ohne jegliche zusätzliche Bauteile oder Fertigungs-schritte robuste Gelenke mit einstellbarer Rückstellung entstehen (Bild 10, rechts). Das Potential für die Integration dieser Technologie in textile Fassadensysteme soll in den kommenden Jahren erforscht werden. Textile Fassaden bieten eine sehr gute Basis für die Integration von verschiedenen Technologien und werden deshalb schon seit langem am ILEK erforscht [7].

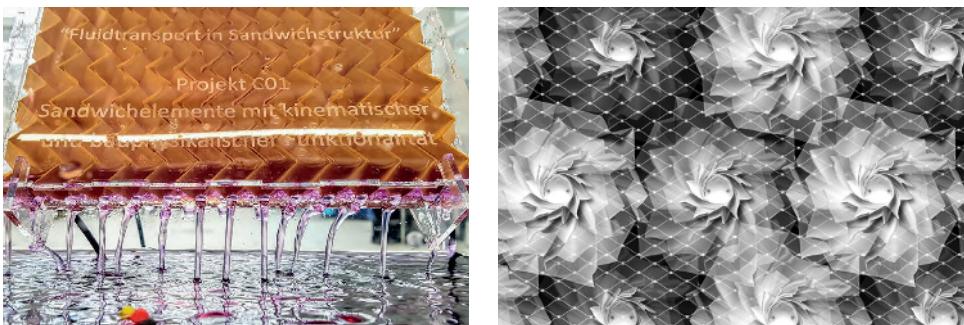


Bild 10 Links: Sandwichelemente mit kinematischer und bauphysikalischer Funktionalität (IFB, Universität Stuttgart); Rechts: adaptiver Sonnen- und Blendschutz (ILEK)

Ein weiterer Fokus der Forschung im Bereich der adaptiven Gebäudehülle liegt auf thermischen Speichermöglichkeiten. Durch die im Leichtbau stark reduzierte Gebäudemasse wird nämlich die thermische Pufferwirkung gegenüber Tag-Nacht-Schwankungen reduziert. Dieser Effekt kann durch adaptive Hüllelemente ausgeglichen werden. Das Potential dieses Ansatzes soll in den kommenden Jahren in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Thermodynamik des DLR und dem Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart untersucht werden.

Das im Rahmen des SFB 1244 entstehende Demonstrator-Hochhaus wird in den kommenden Jahren eine ideale Versuchsplattform bieten, um die oben genannten Ansätze und Technologien ebenso wie viele andere Innovationen zu testen und zu validieren. Auch die durch die Adaptivität steigende Interaktion zwischen Mensch und Gebäudehülle wird in die Validierungsphase einbezogen; es geht nämlich nicht nur um die technologische Qualität der entwickelten Lösungen, sondern auch um die soziokulturellen Akzeptanz neuartiger Technologien, die unsere gebaute Umwelt in den kommenden Jahrzehnten sicher entscheidend prägen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier präsentierten Projekte zeigen, wie unterschiedlich nachhaltige Fassadenlösungen sein können, die eine bewusste Ressourcenverwendung mit einem hohen Komfort kombinieren. Der Bogen spannt von der Fassade im „Passivhaustandard“ in Wien über den Einsatz von begrünten Bereichen bis zur Verwendung von parametrisch konstruierten Sonnenschutzelementen im Nahen Osten. Eine sinnvolle Kombination und Integration von Glas und opaken Flächen ist bei allen drei Beispielen wichtig: Auf natürliches Licht bzw. auf den freien Blick nach Außen muss hierbei nicht verzichtet werden, da dies Komfort und Lebensqualität bedeutet.

Simulation- und Modellierungstechnologien erlauben eine präzise Bewertung der Konsequenzen der angedachten Konzepte. Wichtig ist dabei zu beachten, dass alle diese Simulationen lediglich Instrumente sind und die Kompetenz des Planers nicht ersetzen, sondern nur unterstützend begleiten können. Die komplexen Ergebnisse müssen interpretiert, plausibilisiert, kritisch beobachtet und letztlich in den Entwurf integriert werden.

Noch mehr Ressourceneffizienz und Komfort wird in Zukunft im Fassadenbau durch die Verwendung von adaptiven Fassadentechnologien möglich sein. Dies bestätigen die ersten Ergebnisse des Sonderforschungsbereiches 1244 der Universität Stuttgart, welcher von Werner Sobek initiiert wurde. Der Bau eines 36,5 m hohen adaptiven Demonstrator-Hochhauses und die Untersuchung der hierfür entwickelten Fassadensysteme wird in den kommenden Jahren zeigen, was für eine Architektur daraus entstehen kann – und welche Lösungen für die dringend erforderliche Reduktion des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen sich hieraus ableiten lassen.

5 Literatur

- [1] Sobek, W. (2016) Ultraleichtbau / Ultra-Lightweight Construction, *GAM.12 Architecture Magazine*, Basel: Birkhäuser, S. 156–167.
- [2] Blandini, L.; Grasmug, W. (2018) The search for dematerialized building envelopes – the role of glass and steel, *Steel Construction* 11 (2), Ernst & Sohn, Berlin, S. 140–145.
- [3] Haase, W. et al. (2017) Adaptiv schaltbare Verglasungen – Übersicht ausgewählter Systeme, *Glasbau 2017* (Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.)), Ernst & Sohn, Berlin, S. 1–15.
- [4] Weidner, S. et al. (2018) The implementation of adaptive elements into an experimental high-rise building, *Steel Construction* 11 (2), Ernst & Sohn, Berlin, S. 140–117.
- [5] Harder, N. et al. (2019) Bauphysikalische und ökologische Bewertung adaptiver Fassadenkonstruktion auf Raumebene. *Bauphysik* 41 (6), Ernst & Sohn, Berlin, S. 1–12.
- [6] Klett, Y. et al. (2017) Potential of origami-based shell elements as next-generation envelope components, IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics.
- [7] Eisenbarth, C. et al (2019) *Adaptive membrane façades*, in 14th International Conference on Advanced Building Skins, October 28–29, 2019, Bern.

- Institut für Stahlbetonbewehrung e. V. (ISB) (Hrsg.)

Bewehren von Stahlbetontragwerken

nach DIN EN 1992-1-1 mit Nationalem Anhang

- über Jahrzehnte entwickelte Arbeitshilfe erstmals als Fachbuch erhältlich

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3308

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand



2019 · 150 Seiten · 91 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03308-1

€ 19,90*



Sicherheits- und Isolierglas · Digitaldruck · Heat-Soak-Test · CNC- und Kantenbearbeitung

THIELE GLAS
TRANSPARENTE INNOVATION.

www.thiele-glas.de | info@thiele-glas.de