

A

Allgemeines und Regelwerke

A 1 Gebäudehüllen gestern, heute und morgen

Winfried Heusler, Ksenija Kadija

Prof. Dr.-Ing. Winfried Heusler
Global Building Excellence
Schüco International KG
Karolinenstraße 1–15, 33609 Bielefeld

Studium Maschinenbau an der TU München (1976–1982), anschließend bis 1998 Tätigkeit bei Fa. GARTNER, Gundelfingen. 1991 Abschluss der Promotion an der TU Berlin, Gebiet „Tageslicht“. Seit 1998 Tätigkeit bei der Schüco International KG, Bielefeld. 2004 Ehrenprofessur, Fakultät für Architektur der Nationalen Universität für Bauwesen und Architektur, Kiew. Seit 2007 Dozent an der Hochschule Augsburg, seit 2009 Dozent an der Hochschule Rosenheim, seit 2011 Mitglied im DGNB-Beirat Bauprodukte. 2014 Verleihung der Honorarprofessur durch die Hochschule Ostwestfalen Lippe, Fachgebiet Facade Design and Technology.



Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Ksenija Kadija
Global Building Excellence
Schüco International KG
Karolinenstraße 1–15, 33609 Bielefeld

Architektur-Studium an der Hochschule für Technik, Stuttgart (1996–2001), anschließend Tätigkeit im Architekturbüro. Zusatzstudium Wirtschaftsingenieurwesen an der Fachhochschule Bielefeld (2002–2004). Seit 2005 Tätigkeit bei der Schüco International KG, Bielefeld.



Bauphysik-Kalender 2017: Gebäudehülle und Fassaden.

Herausgegeben von Nabil A. Fouad

© 2017 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2017 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5	5	Konzeptionelle Grundlagen	23	
2	Geschichte der Gebäudehülle	5	5.1	Konstruktive Aspekte	23	
2.1	Gebäudehüllen vor der Industriellen Revolution	5	5.1.1	Standardisierungen von Komponenten und Schnittstellen	23	
2.1.1	Gotik	5	5.1.2	Offene und geschlossene Systeme	24	
2.1.2	Barock	6	5.2	Funktionale Aspekte	25	
2.1.3	Klassizismus	6	5.2.1	Starre Fassaden	25	
2.2	Gusseisenarchitektur	6	5.2.2	Dynamische Fassaden	25	
2.3	Stahlskelettbauweise	7	6	Herausforderungen und Möglichkeiten		
2.4	Europäische Glasarchitektur	7	künftiger Gebäudehüllen	25		
2.5	Amerikanische Wolkenkratzer	7	6.1	Bevölkerungsentwicklung	26	
2.6	Aluminium in der Architektur	8	6.2	Urbanisierung	26	
2.7	Gläserne Wolkenkratzer	8	6.3	Nachhaltigkeit	26	
2.8	Energetische Optimierung	9	6.4	Dearbonisierung	27	
2.9	Computer Aided Design (CAD)	10	6.5	Globalisierung	27	
3	Konstruktive Grundlagen	10	6.6	Digitale Transformation	28	
3.1	Konstruktive Schnittstellen zwischen Außenwand und Primärtragwerk	11	7	Wesentliche Aspekte zukunftsfähiger Gebäude und Gebäudehüllen	28	
3.1.1	Massivbau	11	7.1	Optimierung der Funktion und Gestaltung von Gebäudehüllen	28	
3.1.2	Skelettbau	12	7.2	Methodische Grundlagen der Konzeption und Entwicklung	30	
3.1.3	Membranbau	12	7.3	Nachhaltigkeitsstrategien	31	
3.2	Aufbau von Fassaden	13	8	Konzeptionelle und funktionale Aspekte	zukunftsfähiger Gebäudehüllen	32
3.2.1	Ein- oder mehrschichtige Konstruktionen	13	8.1	Bedeutung der Gebäudehülle	32	
3.2.2	Ein- oder mehrschalige Konstruktionen	13	8.2	Energie effizient gewinnen und nutzen	32	
3.2.3	Ein- oder mehrlagige Konstruktionen	14	8.3	Adaptive Gebäudehüllen	33	
3.3	Konstruktive Schnittstellen innerhalb der Gebäudehülle	15	8.4	Kognitive Gebäudekonzepte	34	
3.3.1	Sprossenkonstruktionen	15	8.5	Konvergenz der Gewerke	35	
3.3.2	Tafelkonstruktionen	15	8.6	High-Tech oder Low-Tech?	35	
3.3.3	Membrankonstruktionen	15	9	Produktarchitektonische Aspekte	zukunftsfähiger Gebäudehüllen	35
3.4	Konstruktive Schnittstellen zu den Füllelementen	15	9.1	Herausforderung Komplexität	35	
3.4.1	Linienförmige Halterungen	16	9.2	Gewerke übergreifende Systemtechnik	35	
3.4.2	Punktförmige Halterungen	16	9.3	Modulare Produktstrukturen	36	
3.5	Montageprinzipien auf der Baustelle	16	9.4	Produktordnungssysteme	38	
3.5.1	Komponentenmontage	17	10	Zukunftsfähige Prozesse und Tools	39	
3.5.2	Modulmontage	17	10.1	Anforderungsmanagement	39	
4	Funktionale Grundlagen	18	10.2	Modulare Fertigung und Montage	39	
4.1	Schutzfunktionen	18	10.3	Vernetzung der Prozesskette	40	
4.1.1	Luft- und Wasserdichtigkeit	18	11	Zusammenfassung	40	
4.1.2	Wärme- und Feuchteschutz	19	12	Literatur	41	
4.1.3	Sonnen- und Blendschutz	19				
4.1.4	Schallschutz	20				
4.2	Nutzfunktionen	20				
4.2.1	Tageslichtnutzung	20				
4.2.2	Passive und aktive Solarenergienutzung	21				
4.2.3	Natürliche und mechanische Lüftung	21				
4.3	Sicherheitsfunktionen	22				
4.3.1	Brand- und Rauchschutz	22				
4.3.2	Einbruchhemmung	22				
4.3.3	Blitzschutz und Radardämpfung	22				

1 Einführung

Die Baubranche sieht sich heute mit unbeständigen, mehrdeutigen und komplexen Herausforderungen konfrontiert. Sollen wir uns deshalb im Blindflug in die Zukunft bewegen? Oder können wir unsere eigene Zukunft selbst gestalten? Zum Glück werden einige grundsätzliche Muster, die in der Vergangenheit zu Veränderungen geführt haben, auch künftig Gültigkeit behalten. Deshalb startet unser Beitrag mit einem Ausflug in die Vergangenheit (Kapitel 2). Dabei zeigt sich, dass die Anforderungen an die Baubranche aus den jeweiligen Gesellschafts-, Wohn- und Arbeitsformen sowie aus den regionalen sozialen Verhältnissen resultieren. Die verfügbaren Technologien und Tools bilden schon seit Jahrhunderten die Grundlage neuer Lösungen. Umgekehrt zeigt sich, wie vielfältig die Auswirkungen der Gebäudehülle auf die ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Eigenschaften des Gebäudes sind. In Kapitel 3 bis 5 unseres Beitrages werden als Basis für weiterführende Überlegungen die konstruktiven, funktionalen und konzeptionellen Grundlagen von Gebäudehüllen vorgestellt.

Schließlich bringen Kapitel 6 bis 10 erfolgskritische Aspekte zukunftsfähiger Gebäudehüllen. Es geht insbesondere um die ganzheitliche Optimierung der Funktion und Gestaltung von Gebäuden und Gebäudehüllen. Dabei wird auch die Frage gestellt, welche Rolle künftig High-Tech- und Low-Tech-Konzepte spielen werden. Eine der vordringlichsten Aufgaben wird darin bestehen, die markt- und wettbewerbsbedingte Variantenvielfalt und Sortimentskomplexität in Bezug auf Produkte und Prozesse intelligent zu beherrschen. Bei derartigen Herausforderungen stößt die heute kleinteilig organisierte Baubranche schnell an ihre Grenzen. Die Zementierung althergebrachter Strukturen ist keine erfolgsversprechende Strategie, um sich auf den Wandel einzustellen. Gefragt sind vielmehr hocheffiziente Netzwerke sowie Planungs- und Bauprozesse. Dabei gilt es insbesondere, die heutigen und künftigen Möglichkeiten der digitalen Transformation zu nutzen.

2 Geschichte der Gebäudehülle

Von der Vorgeschichte, über die Antike und das Mittelalter, über die Industriellen Revolutionen, bis hin zum 21. Jahrhundert, hatte jede Epoche neue Bauaufgaben und eine spezielle Art zu bauen. Diese waren einerseits durch die unterschiedlichen sozialen Verhältnisse sowie Gesellschafts-, Wohn- und Arbeitsformen, andererseits durch die jeweils (regional) verfügbaren Materialien vorgegeben. Letztere reichten von Stein, Lehm und Holz, über Blätter, Flechtwerk, Tierhäute und Textilien bis hin zum Eis für die Iglus der Eskimos. Starken Einfluss hatten zudem das regionale Klima sowie die seit Generationen überlieferten und Schritt für Schritt in der Praxis erprobten Baumethoden. Durch die Gebäu-

dehülle mussten seit jeher drei prinzipielle Aufgaben gelöst werden:

- Sie musste den umbauten Raum vor unerwünschten äußeren Wiedereinflüssen (und Eindringlingen) schützen.
- Der Raum musste betreten werden. Hierfür sorgten Türen und Tore als beweglicher Abschluss einer Wandöffnung.
- Der Raum musste mit Licht und Luft versorgt werden. Das waren die primären Aufgaben der Fenster.

2.1 Gebäudehüllen vor der Industriellen Revolution

Die ersten selbst gestalteten Behausungen waren vor etwa 20000 Jahren Zelte. Sie bestanden aus einem Gerüst aus Holzstangen und einer Abdeckung aus Tierfellen. Vor gut 10000 Jahren wurde der Mensch sesshaft. Es entstanden Hütten, Häuser, Gehöfte aus Holz und Lehm. Aus der Zeit um 7000 v. Chr. liegen die ältesten Nachweise für die Verwendung luftgetrockneter Lehmziegel vor. Die ältesten Dachziegel stammen aus der Zeit um 2000 v. Chr. Etwa 1000 Jahre später wurden Holzschindeln mit Holznägeln oder Lederbändern am Dach befestigt. Das älteste bisher bekannte Beispiel für die Verwendung von Beton ist der Bau der Chinesischen Mauer. Mit ihrem Bau wurde im 7. Jahrhundert v. Chr. begonnen. Schon seit über 2000 Jahren wird Schiefer, insbesondere in gebirgigen Regionen, für Dacheindeckungen verwendet.

Fenster entwickelten sich vom unverschlossenen Loch in der Wand, über eingestellte Fensterplatten aus durchlöcherten Platten oder durchscheinenden Materialien, bis hin zu den heute üblichen beweglichen und verglasten Fensterflügeln. Bereits die Römer verwendeten in Fenstern Glas. Verglaste Fenster waren jedoch in unserer Region bis ins ausgehende Mittelalter – zumindest in den einfachen Häusern der Bauern, Handwerker und Bürger – noch kaum verbreitet.

2.1.1 Gotik

Der für die Gotik (1150–1500) charakteristische Spitzbogen ermöglichte hohe Fenster sowie mit Rosetten durchbrochene Fassaden [1]. Das älteste bekannte Kupferfalzdach stammt aus dem 12. Jahrhundert. Es befindet sich auf dem Heilbronner Dom. Im 15. Jahrhundert brachte Zylinder Glas eine deutliche Verbesserung der Glasqualität. Große bleiverglaste Fensterflächen schaffen diffuses Dämmerlicht; ein freier Ausblick nach draußen oder ein Lesen von Schriften war noch nicht möglich. Beschläge aus Metall machen den Fensterabschluss beweglich, verankern ihn am Rahmen und arretieren ihn in geöffnetem und verschlossenem Zustand [1]. Zu dieser Zeit wurden auch die Mönch-Nonnenziegel und Biberschwanzziegel, später Hohlpannen, die bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts die Hauptformen des Dachziegels darstellten, entwickelt.

In Deutschland fanden Tondachziegel erst im 16. Jahrhundert eine stärkere Verbreitung, als sie wegen der Brandgefahr der bis dahin üblichen Stroh-, Reet- und Holzschindeldeckungen behördlich vorgeschrieben wurden [1].

2.1.2 Barock

Im Barock (1575–1770) lagen lichtdurchflutete Innenräume mit Ausblick nach draußen im Trend. Fenster wurden technisch perfektioniert und konstruktiv durchgebildet. Ihre Bauteile sowie deren Abmessungen und Anordnungen entwickelten sich zum Gegenstand gestalterischer Differenzierung. Rauten-, Butzen- und Rundscheiben wurden durch bleigefasste sechseckige Wabenscheiben ersetzt. Ab dem späten 17. Jahrhundert veränderten glasteilende Sprossen aus Blei oder Holz die Gestaltung von Gebäudehüllen. Neu war in dieser Zeit das Aufkommen von Fensterkitt, Riegelmechaniken und ausgereifte Falze steigerten die Regendichtigkeit. Häufig wurden die Funktionen der Raumausleuchtung durch Tageslicht, des visuellen Kontaktes zur Außenwelt und des Lüftens voneinander getrennt. Dies bedeutete in der Regel eine Festverglasung im oberen Fensterbereich und den Einbau von Drehflügeln im unteren Bereich. Die erste wärmetechnische Verbesserung war ein bei Bedarf von außen in den Ladenfalz eingestelltes zweites Fenster, das Vorfenster. Eine gleichzeitige Nutzung von Vorfenstern und Fensterläden war so nicht möglich.

2.1.3 Klassizismus

Im Klassizismus (1770–1840) wurden Fenster nicht mehr als Teil der Gesamtarchitektur, sondern als gestalterische Einzelelemente begriffen. Die Fensteröffnung blieb in ihren gewohnten Proportionen, nur die Größe nahm zu. Dabei setzte eine Entwicklung zum dauerhaft ausgeführten Doppelfenster ein, an deren Ende das technisch und bauphysikalisch ausgereifte *Kastenfenster* stand. Es besteht aus einer Rahmenkonstruktion mit zwei hintereinanderliegenden, beweglichen Fensterflügeln, die in der Regel einfachverglast sind. Das forstwirtschaftliche Handlungsprinzip der *Nachhaltigkeit* wurde als Begriff erstmals 1713 von *Hans Carl von Carlowitz* eingeführt. Demzufolge sollte nicht mehr Holz geerntet werden als auch wieder nachwächst. Ein kluger Gedanke!

2.2 Gusseisenarchitektur

Mit der Entwicklung der Dampfmaschine durch *James Watt* (1765) begann in England die Industrielle Revolution, die sich erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts auf dem europäischen Festland durchsetzte. Die vorindustrielle technische Produktion war handwerklich. Zünfte bestimmten Herstellungsverfahren sowie Werkzeuge und deren Gebrauch. Die industrielle Revolution führte diesbezüglich zu einschneidenden Veränderungen: Zu neuen Maschinen und Produkti-

onsweisen sowie zu neuen Materialien, in den für das Bauen notwendigen Mengen und zu günstigen Kosten. Dazu zählte auch *Gusseisen*, ein sprödes Material, das nur auf Druck belastbar ist. Es eignet sich im Bauwesen für Säulen, Bögen, Gitter und Platten. Das Gießverfahren erlaubt schlanke Bauteile mit fast beliebigen Formen. Dabei können auch Verbindungselemente und Verzierungen mit feinen Details angepasst werden. In den englischen Industriebauten (z. B. Flachsspinnerei in Shrewsbury von *Boulton* und *Watt* 1776) ersetzte man – um mehr Platz und höhere Deckentragkraft für die Maschinen zu gewinnen – zunächst die hölzernen Stützen durch Gusseisensäulen, dann die Holzbalken durch Deckenträger aus Gusseisen.

Parallel dazu planten Gärtner und Gartenarchitekten – als reine Zweckbauten – die mehr und mehr in Glas aufgelösten Orangerien. Sie stellen Vorläufer der späteren Glasarchitektur dar. Dann ging es insbesondere um große Fabrik-, Ausstellungs- und Bahnhofshallen sowie Passagenüberdachungen. Ab dem Jahr 1805 war es möglich, Zink zu walzen und daraus Bleche herzustellen. Damit konnte das Material auch für Bedachungen eingesetzt werden [2].

Im nächsten Entwicklungsschritt befreite Eisen die Außenwand von ihrer tragenden Rolle. Sie wies im Wesentlichen nur noch Hüll- und Gestaltungsfunktionen auf. Neu waren Mischkonstruktionen mit Stahlskelett und Ausfachung. Letztendlich wurden geschosshohe Glaswände als trennende und doch transparente Elemente möglich, die dem Streben nach Licht und Entmaterialisierung entgegenkamen. Nicht zuletzt die Verwendung der innovativen Materialien führte zur Spaltung des – im Mittelalter aus der Bauhüttentradition hervorgegangenen – generalistischen Baumeisterberufs. Es entstanden die akademischen Fachdisziplinen Architektur und Bauingenieurwesen. Nach dem Vorbild der Pariser „École Polytechnique“ wurde 1831 in Holzminden die erste deutsche Baugewerkschule – ursprünglich zur Ausbildung von Bauhandwerkern – eröffnet. Auf dem Lehrplan standen Baumaterialienkunde, Baukonstruktionslehre, Formen- und Baustillehre, Zeichnen und Bautechniken. Die Etablierung des Ingenieurs als eigener Berufsstand und die Entstehung der modernen Baustatik, ermöglichten feingliedrigere Konstruktionen.

Große Gewächshäuser aus Eisen-Glaskonstruktion in strenger Funktionalität entstanden in den 1830er und 1840er-Jahren besonders in England (z. B. das Gewächshaus in Chatsworth von *J. Paxton* oder das Palmenhaus in Kew von *Burton* und *Richard Turner*). Das imposanteste Bauwerk war der in den Jahren 1850/51 geplante und gebaute Londoner Kristallpalast. Erst ein Jahr vor der geplanten Eröffnung (1. Mai 1851) wurde ein Architekturwettbewerb für die Weltausstellung in London ausgeschrieben. Mitte Juni 1850 legte *Joseph Paxton* seine ersten Skizzen vor. Vier Wochen später folgte sein Angebot für ein 563 m langes und 124 m breites Ausstellungsgebäude. Vier Tage später erhielt er den Auftrag mit engem Kosten- und noch engerem Ter-

minrahmen. Neun Monate später waren 3500 t Gusseisen und 530 t Schmiedeeisen verbaut, 83 600 Glasscheiben eingeglast und die Bauarbeiten abgeschlossen sowie neue Maßstäbe gesetzt! Erste Grundlage waren wenige, für den Kristallpalast neu entwickelte, industriell gefertigte Komponenten, die beliebig addierbar und montierbar waren. Als zweite Grundlage können die speziell entwickelten Hilfseinrichtungen für Transport und Montage sowie die perfekte Koordination und Logistik betrachtet werden.

Zur gleichen Zeit stellte in den USA der Erfinder *James Bogardus* in seiner New Yorker Eisengießerei in großen Stückzahlen standardisierte Säulen und Tragebalken für kostengünstige, bis zu sechzig Meter hohe Gebäude aus Gusseisen her. Er benutzte die katalogisierten Baukonstruktionsteile – mit großem Erfolg – auch als markante Gestaltungselemente für die Gebäudehülle.

2.3 Stahlskelettbauweise

Seit 1850 standen auch L-, U-, und I-Profile aus *Walzstahl* zur Verfügung. Das Material ist zäh und elastisch sowie auf Druck, Zug und Biegung beanspruchbar. Es eignet sich auch für sehr große Spannweiten und kann genietet und verschraubt werden. Das neue Material führte zu neuen konstruktiven Möglichkeiten. Die Mauern konnten dünner gehalten sowie mehr und größere Fenster realisiert werden. So wurden in der „Schule von Chicago“ (im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts) die Stahlskelettkonstruktionen für Geschäfts- und Bürohäuser entwickelt. Sie blieben bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts die übliche Konstruktionsform für Hochhäuser [3]. Das erste Gebäude mit einer vollständigen Skelettkonstruktion war das zehn Stockwerke hohe Chicagoer Home Insurance Building (Architekt *William Le Baron Jenney*, 1884–1885). Die Außenmauern und Decken wurden durch gusseiserne, feuerfeste Stützen und Stahlträger verstärkt.

Bis zur Jahrhundertwende wurde eine große Vielfalt an Eisen-Walzprofilen, auch für Fenster, entwickelt. Bereits 1905 waren aufwendige Verbundfenster-Konstruktionen mit mehreren Anschlüssen und Dichtungsebenen möglich [4]. Bei Fenstern für Wohnräume blieb man jedoch fast ausschließlich bei Holz, Ausnahmen wie die Weißenhofsiedlung, bestätigen die Regel. Neuartig waren bündig in die Fassade eingesetzte Stahlfenster. Architektonisch und konstruktiv boten Metallkonstruktionen weitaus bessere Möglichkeiten, sei es bei Geschäftshausfassaden, Treppenhäusern, Wintergärten oder Laubengängen [4].

2.4 Europäische Glasarchitektur

Im Jahr 1919, kurz nach dem Ende des Ersten Weltkrieges, wurde in Weimar das Bauhaus als Kunstgewerbeschule gegründet. Spätestens mit der Vollverglasung des Traktes der Werkstätten des schlicht-funktionalen Bauhausgebäudes in Dessau (1925–1926) etablierte *Gropius* die Vorhangsfassade als ein Konstruktionsprin-

zip der Moderne und des Internationalen Stils [3]. Die kühnste Idee einer Glasfassade entwickelte *Ludwig Mies van der Rohe* in seinen Entwürfen für ein gläsernes Hochhaus in Berlin am Bahnhof Friedrichstraße (1921 und 1922). Erst dreißig Jahre später konnte er in den USA seinen Traum annähernd verwirklichen.

Bei den Faguswerken in Alfeld an der Leine (1911), von den Behrens-Schülern *Walter Gropius* und *Adolf Meyer* konzipiert, wurde das gitterartige tragende Gerüst vollständig verglast. Eckstützen fehlten erstmals ganz. Die erste echte Glasecke war realisiert. Als schließlich moderne zentrale Heizungsanlagen unabhängig von Wetter- und Nutzereinflüssen ein konstantes Raumklima versprachen, geriet die frühere klimagerechte Architektur mehr und mehr in Vergessenheit. Der dadurch verursachte Energieverbrauch sowie die daraus resultierenden Betriebskosten und die Umweltbelastung spielten lange Zeit keine große Rolle. Dennoch schlug *Le Corbusier* bereits in den 1920er-Jahren zur Minimierung der durch großflächige Glasfassaden verursachten Wärmeverluste und der Überhitzung des Innenraumes zwei Gegenmaßnahmen vor, „la respiration exacte“ und „le mur neutralisant“. Ihnen liegt die Idee zugrunde, im Innenraum ein von der Umgebung unabhängiges Klima zu erzeugen. Im zweiten Fall erfolgt die Temperierung des Innenraumes durch mechanische Kalt- oder Warmluftzirkulation in einem wenige Zentimeter breiten Spalt einer zweischaligen Außenwand. Ende der 1970er-Jahre wurde dieses Prinzip im Abluftfenster (vgl. Abschn. 2.8) weiterverfolgt.

Zur gleichen Zeit wurde in deutschen Forschungsinstituten mit der Untersuchung der wärmetechnischen Eigenschaften von Fenstern begonnen. Sie führten vergleichende Messungen des Wärme- und Luftdurchgangs an verschiedenen Konstruktionen durch. Die ersten Zweischeiben-Isolierverglasungen (mit einem luftdicht abgeschlossenen Zwischenraum von 7 bis 16 mm) kamen in den 1930er-Jahren auf den Markt.

2.5 Amerikanische Wolkenkratzer

Die erste Epoche des amerikanischen Wolkenkratzers reicht etwa von 1920 bis zum Zweiten Weltkrieg. Sie ist gekennzeichnet durch neue Rekordhöhen und den Art Déco Stil. Die beiden markantesten Gebäude wurden in den Jahren 1930/31 in New York errichtet: das Chrysler Building (320 m hoch) und das Empire State Building (380 m hoch). Ihr Tragwerk besteht aus einem Stahlskelett, welches durch Nieten verbunden wird. Die gesamte Bauzeit des Empire State Buildings betrug 18 Monate (einschließlich Gründung) und gilt als eine der bedeutendsten Logistik- und Bauingenieursleistungen. Auf der Baustelle waren über 3400 Bauarbeiter tätig. Sie sorgten dank der guten Organisation und Baulogistik für ein hohes Bautempo. Im Durchschnitt konnten etwa 4,5 Stockwerke pro Woche errichtet werden. Nach exakt einem Jahr wurde auf 381 Metern Höhe der letzte Träger am Gebäude montiert. Die Innenarbeiten dauerten dann noch weitere sechs Wochen. In der Fassade

des Wolkenkratzers wurden 6379 öffentbare Schiebefenster montiert. Die dazwischenliegenden Flächen sind außen mit Kalkstein und Granit bekleidet.

2.6 Aluminium in der Architektur

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts blieb die Anwendung von Aluminium im Hochbau weitgehend auf Dacheindeckungen beschränkt [5]. Erst nach dem Zweiten Weltkrieg, als die Oberflächenveredlung mittels anodischer Oxidation (ELOXAL) marktreif war, entdeckte man mit dem neuen Material vielfältige architektonische Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Form, Farbe und Struktur. So verwendete *Richard Neutra* 1946 beim Haus Kaufmann in Palm Springs in Kalifornien drehbare Sonnenschutz-Lamellen aus Aluminium. 1953 wurde, anknüpfend an die Bauhaus-Idee, die Hochschule für Gestaltung in Ulm gegründet. Der Mitgründer und Gründungsdirektor *Max Bill* war ein Bauhaus-Schüler. Er entwarf nicht nur den Architekturkomplex der HfG Ulm sondern, als Musterbeispiel für Funktionalismus, auch einen Türgriff für das Hochschulgebäude. Dort wurde der Ansatz des Gestaltens von gesamten Systemen entwickelt.

Zu dieser Zeit fanden Aluminiumkonstruktionen auch in Deutschland einen festen Platz im Bauwesen. So wurden im Bereich der Gebäudehülle immer neue Anwendungen erprobt. Dazu gehörten Fensterprofile und -bänke, Türen und Tore, innen- und außenliegender Sonnenschutz, Ankerschienen und Bleche für Fassadenbekleidungen ebenso wie Beschläge für Türen und Fenster (u. a. Griffe und Glasleisten). Bald waren bei der dekorativen Gestaltung von Eingangstüren, Schau-fenstern und Vitrinen verschiedenfarbige (meist goldfarbene) eloxierte Klemmprofile aus Leichtmetall beliebt, die auf tragende Stahl- oder Leichtmetallrahmen montiert wurden [3]. Zu dieser Zeit hatte die in Deutschland steigende Nachfrage die Aluminium-Halbzeugindustrie veranlasst, Systeme für Fenster zu entwickeln. Der Aufbau und die sukzessiven Verbesserungen der Profilsysteme sowie die zugehörigen unterstützenden Dokumentationen verschafften auch kleinen und mittleren Handwerksbetrieben den Zugang zum Fenstermarkt [5]. Die im Vergleich zu anderen Materialien teuren Fenster und Türen erfreuten sich vor allem in Nichtwohngebäuden großer Beliebtheit.

2.7 Gläserne Wolkenkratzer

1948 wurde am Equitable Life Assurance Building von *Pietro Belluschi* in Portland, Oregon (USA), erstmalig eine fast flächenbündige Fassade aus Aluminium, Marmor und grün getöntem Glas realisiert. Sie wies aus gestalterischen Gründen keine Öffnungsflügel auf, weshalb das Gebäude voll klimatisiert war. Mit den Lake Shore Drive Apartments konnte *Mies van der Rohe* in Chicago 1948–1951 schließlich seine Vision vom „gläsernen Wolkenkratzer“ zur Wirklichkeit machen. Die Fassade wurde zum Vorbild der gerasterten, gläsernen

Vorhangsfassade (Curtain Wall), die in den 1950er-Jahren das Erscheinungsbild der modernen amerikanischen Stadt prägte. Die senkrechten, außen vor die Fassade gesetzten T-Träger, sind ihr wichtigstes Gestaltungselement. Sie bestimmen die Ästhetik und den Rhythmus der Fassade und repräsentieren symbolisch Modernität.

Die praktischen Funktionen der Außenwand übernahm damals meist eine sogenannte *Rahmen-Pfosten-Konstruktion*. Bei dieser Bauweise wurden senkrechte, geschoßhohe Pfosten (meist Stahlprofile) über Konsolen an den Vorderkanten der auskragenden Geschoßdecken befestigt. Der Abstand der Pfosten wurde durch das Büroachsmaß vorgegeben. Die Pfosten dienten als Gerüst für geschoßhohe Rahmenelemente aus Stahl- oder Aluminiumprofilen. Üblich waren zwischen diesen Bauteilen Klemmverbindungen. Die Rahmenelemente wurden wie typische Fenster in der Werkstatt komplett vorgefertigt, meist einschließlich Verglasung. Die sich aus der Konstruktion ergebenden Fugen, die gleichzeitig die Dehnungen aufnahmen, wurden meist mit dauerplastischem Material (Kitt) abgedichtet. Eine Ausnahme bildete das General Motors Technical Center in Warren Michigan bei Detroit (1949–56) von *Eero Saarinen*. Hier wurden erstmals synthetische, dauerelastische Kautschukprofile (Neoprene) – wie sie im Flugzeug- und Fahrzeugbau schon seit längerer Zeit eingesetzt wurden – verwendet.

Fast zeitgleich wurde in Deutschland die Vorhangsfassade am Markt eingeführt. Vorbildcharakter hatten insbesondere drei markante Gebäude:

- Das BASF-Hochhaus in Ludwigshafen (1954–57) der Architekten *HPP Hentrich, Pentschnigg & Partner*. Hier überschritt das Stahlbetonskelett zum ersten Mal die Höhenmarke von 100 m.
- Das Mannesmann-Hochhaus (1954–57) der Architekten *Schneider-Esleben und Knothe*. Hier wurde erstmals eine echte Elementfassade montiert.
- Das Phoenix-Rheinrohr-Hochhaus (auch als Dreischeibenhaus bezeichnet) (1957–1960) der Architekten *HPP in Zusammenarbeit mit Fritz Eller*. Hier wurde, bedingt durch den Bauherrn, für Deutschland ungewöhnlicherweise ein Stahlskelettbau umgesetzt.

Ein wesentlicher Schritt in der Glasproduktion war die Erfindung des *Floatglasprozesses* durch *Alastair Pilkington* im Jahr 1955. Mit diesem Verfahren waren die Glashersteller in der Lage, eine noch größere Menge Glas in noch größeren Formaten, mit besseren Eigenschaften und zu günstigeren Preisen anzubieten.

Die o.g. Neoprene-Dichtungen etablierten sich in Deutschland im Fenster- und Fassadenbau erst ab 1962. Die zu dieser Zeit in den USA aufkommende *Structural Sealant Glazing Technik* ermöglichte – knapp 15 Jahre nach dem Equitable Life Assurance Building – umgebungsseitig völlig glatte Gebäudehüllen. Die konstruktive Besonderheit ergibt sich dadurch, dass die üblicherweise mechanische Halterung der Verglasung durch einen Silikonkleber ersetzt wird [5]. Die Klebe-

Verbindung muss alle Kräfte und Verformungen der Glaselemente dauerhaft aufnehmen und an die Aluminiumunterkonstruktion ableiten. Zudem muss der Kleber witterungsbeständig und einfach zu verarbeiten sein.

Der Fassadenbau stellt sich aus heutiger Sicht als Weiterentwicklung des Fensterbaus dar. Fassadenbauer waren meist Metallbauunternehmen, die sich aus Fenster- und Türenbaubetrieben herausgebildet haben [5]. Die fachlichen Anforderungen bei der Planung, Herstellung und Montage von Glas-Metall-Fassaden sind jedoch ungleich höher und vielseitiger. Unerlässlich sind grundlegende Kenntnisse im Bereich Statik und Bauphysik sowie bezüglich bauaufsichtlicher Vorschriften und Normen. Während die Ausführungsverantwortung des Fensterlieferanten an den vergleichsweise klar definierbaren Bauöffnungen endet, umfasst diese bei Glas-Metall-Fassaden die gesamte Außenwand [5].

In den 1980er-Jahren wurden die gestalterischen Möglichkeiten von Gebäudehüllen durch neue Entwicklungen erweitert. So ließ sich mittels *neuer punktförmiger Glashaltesysteme* die Transparenz – insbesondere beim Einsatz von Klarglas – spürbar steigern. Zudem wurden für weitgespannte Fassaden- und Dachkonstruktionen filigrane Fachwerkträger oder Raumtragwerke entwickelt. Neuartige Seilhinterspannungen kamen zum Einsatz, wenn die Konstruktion ein Maximum an Transparenz aufweisen sollte. Es wurden sogar Systeme mit statisch tragenden Rahmen, Trägern und Stützen aus Glas (z. B. Glaspfosten bzw. -träger) realisiert. Dabei traten völlig neue Beanspruchungen auf.

2.8 Energetische Optimierung

Das *Verbundfenster* konnte sich nach dem Ersten Weltkrieg verstärkt gegenüber dem *Kastenfenster* durchsetzen und sich bis in die 1960er-Jahre am Markt halten. Unmittelbar nachdem in Deutschland erstmalig Anforderungen an den Wärmeschutz von Fenstern gestellt wurden (DIN 4108 Ausgabe 1952), kamen die vom Grundkonzept her bis heute unveränderten *Zweischeiben-Isoliergläser* (mit zwischen den Scheiben eingeklebten Abstandhaltern) auf den Markt. Das durch die Energiekrise von 1973 in Behörden und in der Bevölkerung geweckte Energiebewusstsein führte sofort zu Maßnahmen zur Reduzierung der Wärmeverluste von Gebäuden. Fenster wurden als wärmetechnische Schwachstellen in der Gebäudehülle identifiziert. So forderten bereits 1974 die Ergänzenden Bestimmungen zu DIN 4108 die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste. Als daraufhin Isolierglasscheiben und thermisch getrennte Rahmenkonstruktionen ihre wirkliche Marktreife erlangten, wurden Kasten- und Verbundfenster zumindest vom deutschen Markt verdrängt. Wärmedämmte Verbundprofile aus Aluminium bestehen aus einem inneren und einem äußeren stranggepressten Aluminiumprofilteil. Diese beiden Teile sind durch die thermische Trennung verbunden. Zur Herstellung der Verbindung zwischen dem Isoliermaterial

und den beiden Aluminiumprofilen gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten [5]:

- Schäumen bzw. Gießen der Isolierzone,
- Einrollen von Isolierstegen (z. B. aus glasfaserverstärktem Polyamid) in die Aluminiumprofile.

In der Praxis hat sich das Einrollen durchgesetzt. Es stellt heute praktisch weltweit den „Stand der Technik“ dar. In den nachfolgenden vierzig Jahren wurden die nichttransparenten und transparenten Bereiche der Gebäudehülle thermisch kontinuierlich verbessert. Bei Isolierprofilen ging es insbesondere um größere Stegtiefen und um das Ausschäumen von Lufträumen, bei den Isoliergläsern um Edelgasfüllungen (zunächst Argon, dann Krypton und kurzzeitig sogar Xenon) und infrarotreflektierende Beschichtungen. Zwischenzeitlich hat auch ein Wechsel vom Zweifach- zum Dreifachglas, im Extremfall zum Vierfachglas stattgefunden. Zur Gewichtsreduzierung werden die zwischen den äußeren Scheiben liegenden Schichten gelegentlich als Dünnglas oder Folie ausgeführt. Vakuumgläser haben sich bis heute am Markt (noch) nicht durchgesetzt.

Der englische Architekt *Mike Davies* stellte 1981 (130 Jahre nach *Paxtons* Kristallpalast) als Lösungsansatz für die spezifischen Probleme der Glasarchitektur die Entwicklung einer *Polyvalenten Wand* zur Diskussion [6]. Hauchdünne Funktionsschichten sollten u. a. zwei Funktionen erfüllen:

- sich den wechselnden Klimaverhältnissen wie von selbst anpassen und dabei den Energiefluss zwischen außen und innen steuern,

– auftreffende Solarstrahlung in Strom umwandeln. Seitdem arbeiten Forscher und Entwickler an entsprechenden Materialien und Komponenten. Das erste Ziel soll mit schaltbaren Verglasungen erreicht werden.

Sie haben sich am Markt bis heute (35 Jahre „nach *Mike Davies*“) noch nicht durchgesetzt. Als „Überbrückungstechnologie“ können dynamische *Glas-Doppel-Fassaden* (vgl. Abschn. 5.2.2) betrachtet werden, die allerdings in einem anderen geometrischen Maßstab konzipiert sind. Das zweite Ziel wurde in Form der in die Gebäudehülle integrierten *Photovoltaik* tatsächlich umgesetzt. Hier reicht das Spektrum realisierter Anwendungen vom Einsatz in Fassadenelementen und leichten Dachkonstruktionen, bis hin zu außenliegenden Sonnenschutzeinrichtungen – auch beweglichen.

Mitte der 80er-Jahre entdeckten Wissenschaftler, dass Gebäude ihre Nutzer krank machen können („Sick-Building-Syndrom“) [7]. Sie untersuchten gründlich die Ursachen für Beschwerden und Symptome. Eine wesentliche Ursache ist unsachgemäße Lüftung. Ein modernes Bürogebäude muss deshalb – zumindest in moderaten Klimaregionen – beide Möglichkeiten anbieten: Mechanische und natürliche Lüftung. Sowohl bei niedrigen Außentemperaturen im Winter, als auch an sehr heißen Sommertagen, ist eine gut gewartete Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung vorzuziehen, sowohl aus Sicht der Energieeinsparung als auch der Behaglichkeit. Dagegen ist während der Übergangsjahreszeit und bei komfortablen Außenbedingungen nichts besser

als das Öffnen von Fenstern, solange die Qualität der Außenluft dies zulässt. Gewisse Einschränkungen ergeben sich an Gebäuden mit starker Lärmbelastung, z. B. an verkehrsreichen Straßen. Auch bei windexponierten und hohen Gebäuden ist Fensterlüftung bei herkömmlichen Fassaden bekanntermaßen häufig nicht möglich. Gerade hier liegen die bevorzugten Einsatzmöglichkeiten für *Glas-Doppel-Fassaden*.

Ende der 1990er-Jahre führte die zunehmende Abhängigkeit von Rohstoffen und Energie sowie deren Verknappung und insbesondere ihre Verteuerung zu einer intensiven und vielfach kontrovers geführten Debatte über Lebensqualität, Zukunftsverantwortung und damit über Nachhaltigkeit. So rückte auch energiesparendes sowie ressourcenschonendes und abfallfreies Bauen immer mehr in das öffentliche Interesse. Berichte über einen weltweiten Klimawandel heizten die Diskussion in Wissenschaft und Industrie, in Umwelt- und Verbraucherorganisationen sowie in der Politik und letztendlich auch innerhalb der Bevölkerung zusätzlich an. Daraus resultierten zahlreiche Aufgabenstellungen für Forschungsinstitute und Entwicklungsabteilungen. In den nachfolgenden Kapiteln (insbes. Kap. 4 und Kap. 8) werden einige bereits am Markt verfügbare und derzeit im Entwicklungsstadium befindliche Lösungen für innovative Gebäudehüllen vorgestellt.

2.9 Computer Aided Design (CAD)

Nachdem in den 1980er-Jahren mit dem Personal Computer auch erste CAD-Programme in Architektur- und Ingenieurbüros Einzug hielten, veränderte sich die Arbeitsweise Schritt für Schritt. Anfangs diente der Computer lediglich als digitales Zeichenbrett für die Erstellung von 2D-Plänen. Genau wie beim Zeichnen von Hand wurden Ansichten und Schnitte räumlicher Körper erstellt. Die Zeichnungen wurden auf dem Bildschirm sichtbar gemacht und dann auf Papier geplotet oder gedruckt. Der wesentliche Vorteil war, dass Zeichnungen einfach und schnell zu verändern waren. Erst später nutzten Architekten und Ingenieure Computer für das dreidimensionale Konstruieren.

Zwischenzeitlich wurden beachtliche Fortschritte bezüglich Geschwindigkeit, Benutzerfreundlichkeit, Projektvernetzung und Austauschstandards erzielt. Der Trend geht immer deutlicher weg von einzelnen, entkoppelten zweidimensionalen Zeichnungssätzen hin zum bauteilbasierten 3D-Modell. Für extrem komplexe Geometrien wurde z. B. das aus dem Flugzeugbau stammende Programm CATIA verwendet [8]. Damit können entwurfsrelevante Festlegungen auch in späteren Projektphasen revidiert oder adaptiert werden, ohne den Prozess wesentlich zu verzögern. Beim parametrischen Konstruieren werden geometrische Objekte, wie zum Beispiel Linien, Flächen oder Körper, mit ihren Bedingungen und Beziehungen zueinander assoziativ durch Parameter beschrieben. Mittels eines einmal konstruierten Bauteils lassen sich durch Veränderung von Parametern beispielsweise geometrisch ähnliche

Bauteile generieren. Das spart enorm Zeit. Im Umfeld von Gebäudehüllen bietet die Parametrierung nicht nur im Entwurfs- und Konzeptprozess, sondern auch in der Werkstattplanung erhebliche Vorteile.

Die Weiterentwicklung der neuen digitalen Tools in der Architektur ist ein Beispiel dafür, wie neue Entwurfswerkzeuge sogar zu einem neuen architektonischen Stil führen können. Bisher führt jedoch der hohe Aufwand in der Fertigung bei der Realisierung organischer Formen in den meisten Fällen zu derartig hohen Kosten (und Risiken), dass diese nur bei besonders repräsentativen Bauten – z. B. Ausstellungsgebäuden oder Museen – angemessen erscheinen [8]. Ob sich der „Parametrismus“ als eigenständiger Stil in der Breite durchsetzt und längerfristig bestehen wird, hängt auch davon ab, ob es in der Praxis gelingt, die Probleme in der Fertigung und auf der Baustelle zu überwinden. Erfolg versprechend ist diesbezüglich die Anbindung der Produktion an das im Computer generierte 3D-Modell („File-to-factory“-Verfahren). Es wird jedoch bisher nur in Pilotprojekten angewandt. Davon ist die heutige Planungs- und Baupraxis weit entfernt. Im besten Fall werden parametrische Methoden zur iterativen Optimierung einzelner Parameter, wie etwa Konstruktionsraster oder Konturkurven, im Formfindungsprozess angewandt. In der Breite hat sich der Computer noch nicht einmal als Entwurfs- und Visualisierungswerkzeug vollständig durchgesetzt. Er wird in der Mehrzahl der Architektur- und Ingenieurbüros weiterhin vorwiegend als Zeichen-, Tabellenkalkulations- und Textverarbeitungsinstrument genutzt.

3 Konstruktive Grundlagen

Gebäudehüllen können grundsätzlich anhand der konstruktiven Ausbildung ihrer Schnittstellen unterschieden werden. Zum Tragen kommen dabei jeweils die Schnittstellen zwischen Gebäudehülle und Primärtragwerk, Gebäudehülle und Gebäudetechnik, Gebäudehülle und Innenausbau sowie innerhalb der Gebäudehülle selbst [9]. Im Folgenden beschränken wir uns auf die Betrachtung von gegen Außenluft trennenden Wänden, nachfolgend als Außenwände bezeichnet (Bild 1). Als weitere Kriterien zur Klassifizierung von Außenwänden können der jeweilige Aufbau sowie auch das verwendete Montageprinzip herangezogen werden. Anhand dieser Kriterien werden im Folgenden die konstruktiven Grundlagen von Außenwänden beschrieben. Die konstruktiven Aspekte von Gebäudehüllen haben in der Regel ihre größte Bedeutung während der Planungs- und Herstellungsphase. Es geht hierbei um Kosten, Zeit und Qualität. Sie können aber auch die Verschmutzungsanfälligkeit sowie den Aufwand bei Reinigung, Wartung und Instandhaltung maßgeblich beeinflussen.

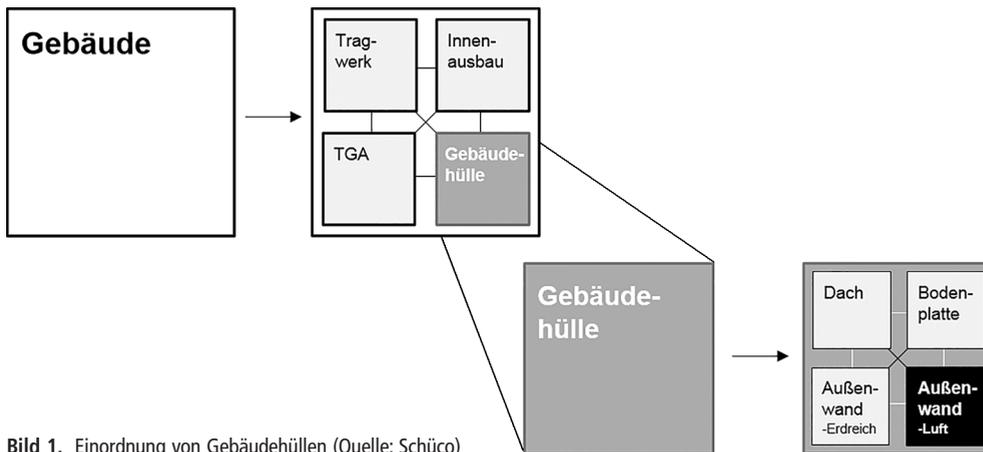


Bild 1. Einordnung von Gebäudehüllen (Quelle: Schüco)

Tabelle 1. Bauweisen von Gebäuden und Außenwänden (Quelle: Schüco)

Bauweisen		Gebäude				
		Massivbau	Tafelbau	Skelettbau	Raumzellenbau	Membranbau
		Misch-Bauweisen				
Außenwände	Massivbau					
	Tafelbau					
	Sprossenbau					
	Membranbau					

3.1 Konstruktive Schnittstellen zwischen Außenwand und Primärtragwerk

Die einem Gebäude zugrundeliegende Bauweise bestimmt maßgeblich die Ausbildung der konstruktiven Schnittstelle der Gebäudehülle zum Primärtragwerk des Gebäudes. Im Wesentlichen wird bei Gebäuden zwischen der Massivbauweise und der Skelettbauweise unterschieden. Darüber hinaus können Gebäude im Tafelbau, Raumzellenbau oder im Membranbau errichtet werden, sowie in den in der Praxis häufig üblichen Mischbauweisen. Auch Außenwände werden generell in unterschiedlichen Bauweisen erstellt (vergl. 3.1.3 und Tabelle 1).

3.1.1 Massivbau

Im Massivbau übernehmen Wände und Geschossdecken neben der raumabschließenden auch die statische Funktion eines Gebäudes. Bei dieser Bauweise werden die massiven Außenwände in der Regel gemauert. Dabei werden verhältnismäßig kleine Öffnungen freigelassen, in die später Fenster eingesetzt und mit elastischen Anschlüssen angedichtet werden („Lochfenster“, siehe Bild 2). Der nichttransparente Bereich dieser Außenwand bleibt eher selten unbekleidet (beispielsweise bei

Außenwänden aus Sichtbeton, Stampfbeton oder Stampflehm) und wird in der Regel, je nach bauphysikalischer Erfordernis, entweder nur verputzt oder auf der Baustelle isoliert und anschließend verputzt (z. B.



Bild 2. Massivbau mit Lochfenstern (Quelle: Schüco)

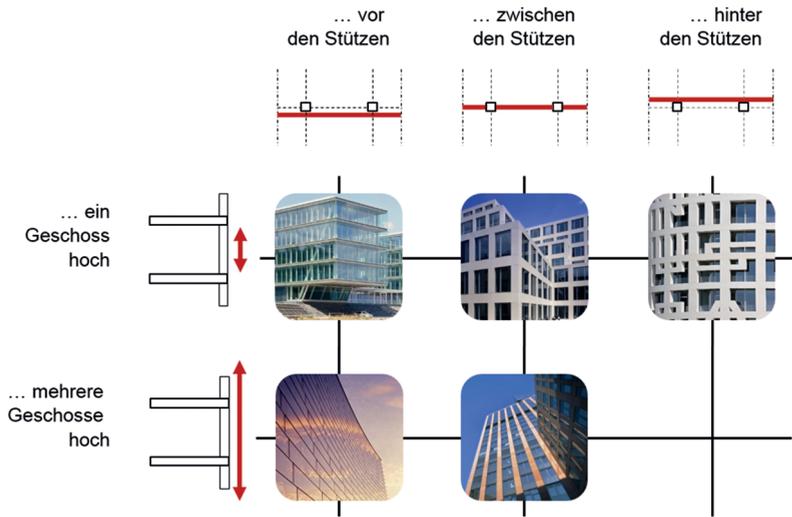


Bild 3. Fassaden im Skelettbau (Quelle: Schüco)

WDVS) oder bekleidet (z. B. VHF). Größere zusammenhängende Fensterflächen sind mit diesem Bauprinzip nicht realisierbar.

3.1.2 Skelettbau

Im Skelettbau erfolgt eine konsequente Trennung zwischen dem Baukörper als Primärstruktur und der Außenhaut als Sekundärstruktur. Stützen und Hauptträger mit aufgelagerten Geschossdecken (sowie die statisch erforderlichen Aussteifungen) bilden die Grundelemente des Skeletts. Dieses ist konstruktiv und funktionell klar von den raumbildenden Elementen der Gebäudehülle und des Innenausbaus getrennt. So erfolgt die komplette Lastabtragung durch das Skelett, die Wände dienen lediglich als nichttragende Raumabschlüsse [10]. Je nach Anordnung der Gebäudehülle wird in sichtbare und nicht sichtbare Skelette unterschieden. Die Außenwand kann demnach als eingestellte Fassade (z. B. Band- oder Rasterfassaden) oder als vorgehängte Fassade ausgeführt werden (Bild 3). Handelt es sich um raumhohe, zwischen zwei Geschossdecken und vor den Stützen verlaufende Elemente, spricht man von *horizontalen Bandfassaden*. Besteht der Rohbau zusätzlich aus durchlaufenden massiven Brüstungen kommen *Fensterbänder* zum Einsatz. Bei *Rasterfassaden* hingegen werden raumhohe Fassadenelemente zwischen zwei Stützen angebracht. Verläuft die Fassade zwischen den Stützen und ist gleichzeitig mehrere Geschosse hoch, spricht man von *vertikalen Bandfassaden*. Das Eigengewicht und die Windlasten der Ausfachungen werden über Anschläge auf das Skelett übertragen. Teile des Skeletts (Geschossdecken und/oder Stützen) bleiben bei eingestellten Fassaden sichtbar. Wie bei Lochfenstern wird unten und oben mit elastischen Anschlüssen an den Rohbau abgedichtet. Die *vorgehängte Fassade* oder „curtain wall“ ist durch eine durchgehende Außenhaut gekennzeichnet. Im Ge-

gensatz zum Rohbau muss die Fassade, zur Erzeugung eines ansprechenden äußeren Erscheinungsbildes und zur Sicherstellung der Dichtigkeit gegen Luft und Wasser, außerordentlich präzise gefügt sein. Dafür ist ein ausgeklügeltes Befestigungssystem nötig, das ein nachträgliches Justieren ermöglichen muss. So wird eine vorgehängte Fassade an vergleichsweise wenigen Punkten mit dem Rohbau verbunden. Über diese Einzelbefestigungen („Konsolen“) werden Eigengewicht und Windlasten der Fassade auf das tragende Skelett übertragen. Die Aufgabe der Befestigung besteht neben der Weiterleitung der Kräfte von der Fassade in den Rohbau im Ausgleich der unvermeidlichen Rohbautoleranzen. Im Interesse einer kurzen Montage sollten die Konsolen bereits im Vorfeld der Fassadenmontage justiert werden. Die Ausbildung der Fugen zwischen den Elementen der vorgehängten Fassade und ihre Befestigung gestatten die Herstellung beliebig großer, ununterbrochener Wandflächen. Die bei eingestellten Fassaden nötigen Anschlüsse an den Rohbau werden ersetzt durch elastische und dichte Fugenausbildungen innerhalb der Außenwand.

3.1.3 Membranbau

Beim modernen Membranbau handelt es sich um eine Leichtbauweise, bei der Membranen als äußere Hülle verwendet werden. Membranen sind beschichtete oder nicht beschichtete technische Gewebe und Folien. Da Membranmaterialien über keine Biegesteifigkeit verfügen und somit nur auf Zug belastbar sind, ist eine entsprechende Vorspannung erforderlich. Die Art der Vorspannung beeinflusst entscheidend die Konstruktion und die Gestalt des Bauwerks. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen mechanisch vorgespannten sowie pneumatisch gestützten Membrankonstruktionen. Mit dem Prinzip der mechanischen Vorspannung werden in der Regel Großstrukturen realisiert, mit pneumatisch

gestützten Konstruktionen können sowohl Groß- als auch Kleinstrukturen verwirklicht werden. Je nach Konstruktionsprinzip ist die Membran Teil des Primärtragwerks und unterstützt die Gesamtstabilität des Bauwerks oder sie fungiert lediglich als Hülle. Die Gestaltungsvielfalt reicht von weitgespannten, filigranen und stützenfreien Membrankonstruktionen, bis hin zu kleinteiligen Strukturen, z. B. in Form von in Rahmen gespannten Kissenkonstruktionen. Die im Membranbau ausgeführten Bauwerke können je nach Zweck permanent oder temporär bzw. mobil oder wandelbar konzipiert sein. Die gebildeten Räume sind je nach Ausführung offen, halboffen oder geschlossen.

3.2 Aufbau von Fassaden

Bevor auf die einzelnen Konstruktionsarten eingegangen wird, soll für ein besseres Verständnis zunächst eine Abgrenzung der Begriffe Schichten, Schalen und Lagen erfolgen. So können Außenwände bezüglich ihres konstruktiven Aufbaus zunächst in einschichtig oder mehrschichtig unterschieden werden. Einschichtige Außenwände zeichnen sich dadurch aus, dass sämtliche Funktionen (Tragen, Dämmen, Dichten usw.) durch einen einzigen Baustoff erfüllt werden. Man spricht bei diesem Prinzip auch von der monolithischen Bauweise. Bei modernen Außenwänden findet hingegen überwiegend das Prinzip der Funktionstrennung Anwendung. Sie bestehen aus mehreren aufeinander abgestimmten Schichten, die jeweils unterschiedliche Aufgaben übernehmen. Ist eine Schicht selbst tragfähig, wird sie als Schale bezeichnet. Sie ist entweder selbst Teil des (Primär- oder Sekundär-)Tragwerks, oder wird daran mit zusätzlichen Befestigungsmitteln befestigt [11]. Verfügt das Material hingegen über keine Biegesteifigkeit, spricht man von einem ein- oder mehrlagigen Aufbau.

Im Folgenden werden diese Prinzipien anhand von Beispielen näher erläutert.

3.2.1 Ein- oder mehrschichtige Konstruktionen

Traditionelles Sichtmauerwerk ist ein Beispiel für eine massive einschichtige Konstruktion. Neben der Tragfunktion ist das Material gleichzeitig für die Erfüllung aller Schutzfunktionen verantwortlich (Wärmeschutz, Schallschutz, Feuchteschutz etc.). Die Eigenschaften einer Außenwand können durch eine Funktionstrennung deutlich optimiert werden. Dafür können beispielsweise im Massivbau weitere Schichten auf die tragende Schale angebracht werden. Die einfachste Form einer mehrschichtigen Konstruktion ist eine verputzte Wand. Beim Wärmedämmverbundsystem (WDVS) werden darüber hinaus Dämmplatten auf der Außenwand befestigt, auf die eine Armierungsschicht und abschließend der Außenputz aufgetragen werden. Durch einen Anstrich kann die Farbe zusätzlich modifiziert werden.

3.2.2 Ein- oder mehrschalige Konstruktionen

Der Begriff ein- oder mehrschalig findet bei selbsttragenden Konstruktionen Anwendung. Sowohl einschalige als auch mehrschalige Konstruktionen können über einen mehrschichtigen Aufbau verfügen (Tabelle 2). Somit kann der oben beschriebene Wandaufbau eines Wärmedämmverbundsystems gleichzeitig als Beispiel für eine mehrschichtige, als auch eine einschalige Konstruktion herangezogen werden. Mehrschalige Konstruktionen unterscheiden sich von einschaligen Konstruktionen jedoch dahingehend, dass mindestens eine ihrer Schichten eine Luftschicht ist. Moderne *einschalige Außenwände*, auch als „Warmfassaden“ bezeichnet, erfüllen genauso wie einschichtige

Tabelle 2. Aufbau von Außenwänden: Schalen (Quelle: Schüco)

Aufbau von Außenwänden		Schalen (selbst tragend)	
Attribute	Funktionen	einschalig	mehrschalig
einschichtig (monolithisch)	keine Trennung / Optimierung	<ul style="list-style-type: none"> - Mauerwerk - Stampfbeton - Stampflehm - ... 	X
mehrschichtig ohne Hinterlüftung	Vertikale Trennung / Optimierung	<ul style="list-style-type: none"> - Mauerwerk verputzt - Mauerwerk mit WDVS - Sandwichpaneel - Curtain Wall ... 	X
mehrschichtig mit Hinterlüftung		X	<ul style="list-style-type: none"> - Mauerwerk zweischalig - Mauerwerk mit VHF - Doppelfassade - ...

Wände alle Schutzfunktionen gleichzeitig. Dazu zählen die Abdichtung gegen Wind und Regen, der Feuchteschutz (meist als „Wasserdampfsperre“) sowie der Wärme- und Schallschutz. Innerhalb des mehrschichtigen Wandaufbaus findet jedoch eine Funktionstrennung statt. Generelle Anforderungen an die äußere Schicht sind Dauerhaftigkeit, Frostbeständigkeit, Lichtechtheit und ein angemessenes Farbangebot. Beispiele für einschalige Außenwände reichen je nach Bauweise des Gebäudes von der verputzten Außenwand mit oder ohne WDVS, über Sandwichelemente bis hin zu einschaligen Glas-Metall-Fassaden (curtain walls).

Mehrschalige Außenwände verfügen über mindestens eine Luftschicht und zeichnen sich üblicherweise durch ein zweistufiges Dichtungsprinzip aus. Die vorgesezte Schale wirkt als Regensperre, die dahinterliegende zweite Ebene als Wind- und Feuchtesperre sowie als Wärmeschutz. Deshalb wird dieser Fassadentyp auch als „Kaltfassade“ bezeichnet. Eine oder mehrere Schichten können transparent oder transluzent sein. Die Beispiele für diesen Fassadentyp reichen von der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) bis hin zu zweischaligen Fassadenkonzepten wie der Doppelfassade oder der Abluftfassade. Letztere stellt in dieser Kategorie eine Ausnahme dar, da ihre äußere Schale wie eine Warmfassade ausgebildet wird [12].

3.2.3 Ein- oder mehrlagige Konstruktionen

Der Begriff ein- oder mehrlagig wird bei nicht biegesteifen Materialien verwendet. Dieser Kategorie werden Membranen zugerechnet (Tabelle 3). Mechanisch vor-

gespannte Membrankonstruktionen werden meist einlagig ausgeführt. Aufgrund der starken Verformung der Membranflächen gilt eine mechanische Vorspannung mehrlagiger Konstruktionen als verhältnismäßig aufwendig realisierbar. Neuere Ansätze verfolgen jedoch das Ziel, den mechanisch vorgespannten Membranbau „aus dem starren Korsett seiner klassischen Großform in eine Bauform aktueller Formensprache und zeitgenössischer Architektur“ zu überführen [13]. Als Lösung werden mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranmodule in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle vorgeschlagen. Gestalterisch wird damit eine ähnliche Wirkung wie bei pneumatischen Kissenkonstruktionen erzielt, ihr Vorteil liegt jedoch in ihrer Unabhängigkeit von Druckluftzufuhr und Luftdichtigkeit [13].

Als Pioniere der luftgestützten Systeme gelten sogenannte „Traglufthallen“, bei denen es sich in der Regel um einlagige Membrankonstruktionen handelt, die ohne ein zusätzliches Tragwerk auskommen (Großstruktur). Dabei grenzt die Membran als Hülle einen gegenüber dem Außenraum abgeschlossenen (unter Über- oder Unterdruck stehenden) Raum ab. Vorteile dieser Bauweise liegen in der Möglichkeit, sehr große Spannweiten mit relativ geringem Aufwand zu überspannen. Die fehlende Modularität sowie aufwendige Schleusenkonstruktionen gelten hingegen als Nachteil [14]. Eine Weiterentwicklung pneumatisch gestützter Membrankonstruktionen sind die bereits erwähnten modular aufgebauten, mehrlagigen luftgefüllten Kissenkonstruktionen (Doppel- oder Mehrfachmembrankonstruktionen), die an ein gesondertes Tragwerk angebracht werden und in der aktuellen Architektur zunehmend Anwendung finden.

Tabelle 3. Aufbau von Außenwänden: Lagen (Quelle: Schüco)

Aufbau von Außenwänden		Lagen (nicht biegesteif)	
		einlagig	mehrlagig
einschichtig	unbeschichtete techn. Gewebe/Folien	<ul style="list-style-type: none"> - Zelte - Traglufthallen (einlagig) - Zweite Haut (z.B. Sonnenschutz) einer Fassade 	X
mehrschichtig ohne Lüftung	beschichtete techn. Gewebe/Folien	<ul style="list-style-type: none"> - Zelte - Traglufthallen (einlagig) - Zweite Haut (z.B. Sonnenschutz) einer Fassade 	X
mehrschichtig mit Lüftung	beschichtete und unbeschichtete techn. Gewebe/Folien	X	<ul style="list-style-type: none"> - Pneumatische Kissenkonstruktionen - Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranmodule - Traglufthallen (mehrlagig)

3.3 Konstruktive Schnittstellen innerhalb der Gebäudehülle

Bezüglich der konstruktiven Ausbildung der Schnittstellen, Verbindungen und Fugen innerhalb der Außenwandkonstruktion, lassen sich Außenwände neben der Massivbauweise grundsätzlich in Sprossen- und Tafelkonstruktionen sowie Membrankonstruktionen unterscheiden. Im Detail geht es um die Ausbildung der Schnittstellen, Verbindungen und Fugen zwischen dem sekundären Tragwerk der Außenwand und den Füllelementen (Fensterflügel, Glas, Paneel, Blech, Naturstein, Membran usw.) sowie zu den Sonnenschutzvorrichtungen. Ferner um die Anbindung bzw. Integration von Sensoren, Antrieben und Steuerungen (aufgesetzt oder integriert). Hier entscheidet sich insbesondere, ob eine Außenwand bezüglich Wasser und Luft langfristig zuverlässig dicht ist [15].

3.3.1 Sprossenkonstruktionen

Sprossenkonstruktionen bestehen in der Regel aus einem Raster rechtwinklig zueinander angeordneter waagerechter und senkrechter Sprossen. Die zwischen den Sprossen entstehenden Felder werden mit Paneelen oder Glas ausgefüllt. Im Normalfall werden nur die Sprossen am Skelett befestigt, denen dann die Aufgabe zufällt, das Eigengewicht der raumabschließenden Konstruktionsbestandteile und die von ihnen aufgenommenen Windlasten auf das tragende Skelett zu übertragen. Das Raster der Sprossen ist in der Fassade ablesbar, gliedert die Fassade und wird dadurch das für die Sprossenkonstruktionen typische Gestaltungsmerkmal. Die konstruktive Ausbildung der Fugen zwischen den Sprossen selbst, zwischen den Sprossen und Platten sowie zwischen Sprossen und Fensterrahmen einerseits und zwischen Fensterrahmen und Fensterflügel andererseits, beeinflusst nicht nur das äußere und innere Erscheinungsbild, sondern auch die Eigenschaften der Außenwand [9].

Als Material für Pfosten und Riegel hat sich Aluminium durchgesetzt. Ursachen hierfür sind das geringe Gewicht von Aluminium, seine Korrosionsbeständigkeit und vor allem aber die durch das Extrusionsverfahren möglich gewordene Formfreiheit bei den Profilquerschnitten. Der Trend zu einer noch individuelleren Gestaltung führte auch zu einer Vergrößerung der Material-, Oberflächen- und Formenvielfalt bei Sprossen, Rahmen, Glas und Paneelen (inkl. Naturstein) (Bild 4).

3.3.2 Tafelkonstruktionen

Die Bezeichnung Tafelkonstruktionen wird im Fassadenbau aus den großformatigen, geschoß- oder halbgeschoßhohen Tafeln hergeleitet, die am tragenden Skelett oder an einem Hilfsskelett, das seinerseits mit dem tragenden Skelett verbunden ist, befestigt sind. Alleinige Konstruktionsbestandteile der Tafelkonstruktionen sind die Tafeln. Diese sind raumabschließend und zu-



Bild 4. Außenwand als Sprossenkonstruktion (Quelle: Schüco)

gleich imstande, ihr Eigengewicht und die von ihnen aufgenommenen Windlasten auf das Skelett zu übertragen. Die konstruktive Ausbildung der Fugen zwischen den Tafeln, zwischen Tafel und Fensterrahmen einerseits und zwischen Fensterrahmen und Fensterflügel andererseits, beeinflusst nicht nur das äußere und innere Erscheinungsbild, sondern auch die Eigenschaften der Außenwand [9].

3.3.3 Membrankonstruktionen

Membrankonstruktionen finden im Fassadenbau entweder Anwendung als äußere Schicht einer Doppelfassade, oder als mehrlagig luftgefüllte Kissenkonstruktionen. Im ersten Fall (meist transparent) fungieren sie als Sonnen- und/oder Wetterschutz (Wind und Regen), verfügen als hinterlüftete zweite Außenhaut jedoch über keine Wärmeschutzeigenschaften. Im zweiten Fall handelt es sich um mehrlagige multifunktionale Membrankonstruktionen (nichttransparent oder teiltransparent), die neben dem Wetterschutz auch die Wärme- und Feuchteschutzfunktion abdecken. Darüber hinaus können vorgesetzte Membranen lediglich die Sonnenschutzfunktion bei konventionellen Glas-Metall-Fassaden übernehmen.

3.4 Konstruktive Schnittstellen zu den Füllelementen

Die konstruktive Ausbildung der Befestigungen und der dabei entstehenden Fugen an Fensterflügeln, an der Verglasung, an Paneelen sowie an Blech- und Natursteinverkleidungen beeinflusst nicht nur das Erscheinungsbild, sondern zum Teil sogar die Funktion der Außenwand. Große Glasflächen mit filigranen Glashalterungen kommen dem Trend der Architektur zu mehr Transparenz entgegen. Die Fassadentechnik bietet dafür vielfältige Möglichkeiten [16]. Grundsätzlich kann zwischen Konstruktionen mit linienförmiger und punktförmiger Halterung der Füllelemente unterschieden werden.

3.4.1 Linienförmige Halterungen

Die linienförmige Halterung von Füllelementen kann als Klemm- oder Klebeverbindung ausgeführt werden. Dabei ist zwischen Konstruktionen mit offenen oder geschlossenen Fugen, mit Glas- oder Pressleisten (auch flächenbündig mit „abgestuftem Glasrand“) sowie mit einer seitlichen Nut in den Kanten der Füllelemente zu unterscheiden. Letztere kann durchlaufend oder lediglich abschnittsweise bzw. punktförmig erfolgen. Bei Deckschalenkonstruktionen werden die Füllelemente am Rahmenwerk i. Allg. über Press- oder Klemmleisten mit zwischengelegten Gummiprofilen fixiert. Alternativ dazu existiert eine Methode, bei der die Füllelemente, von außen ohne sichtbare Halteleisten, auf die Fassadenunterkonstruktion aufgeklebt werden. Diese Variante wird als Structural Silicone Glazing (SSG) bezeichnet. Hierbei erfolgt auch die Abdichtung über die tragende Versiegelung (Bild 5). Häufig wird die Verklebung in der Werkstatt auf einem Adapterrahmen durchgeführt, der an der Baustelle in die Unterkonstruktion eingesetzt wird. Das Verklebungsmittel muss hohen Anforderungen im Hinblick auf seine Beständigkeit gegenüber Feuchte-, Licht- und Temperatureinflüssen sowie Mikroorganismen gerecht werden. Die ausschließliche Befestigung der Scheiben durch Verkleben ist in Deutschland nur bei Einbauhöhen der Elemente bis zu 8 m über Gelände zulässig. Bei größeren Einbauhöhen wird eine zusätzliche mechanische Sicherung gegen das Herabfallen der Scheiben gefordert. Diese Sicherung, die erst dann in Kraft tritt, wenn die Verklebung versagt, kann als umlaufender Halterahmen oder punktwise ausgebildet werden. Unabhängig von der Verklebung muss das Scheibeneigengewicht über Klotzung auf die Unterkonstruktion abgegeben werden. Über die Verklebung dürfen nur die Windsoglasten aufgenommen werden. Daneben existiert eine Mischform, bei der die Glasscheiben an zwei gegenüberliegenden Seiten rahmenlos und an den anderen beiden Seiten über Pressleisten gehalten werden.



Bild 5. Structural Silicone Glazing (Schüco SFC 85)
(Quelle: Schüco)

3.4.2 Punktförmige Halterungen

Heute werden punktförmige Halterungen insbesondere bei Gläsern, aber auch bei Natursteinen und ähnlichen Füllelementen angewendet. Punkthalter ohne Durchdringung des Füllelements, also im Bereich der Fuge, sind in der Regel kostengünstiger als die punktförmige Lagerung innerhalb des Füllelements. Da bei Punkthaltern mit Durchdringung (Durchgangs- oder Sackloch) größere Biege- und Querkraftbeanspruchungen als bei einer linienförmig gelagerten Tafel gleicher Abmessung auftreten, führt die punktförmige Lagerung bei den Füllelementen zu größeren Dicken. Punktgehaltene Füllungen erfordern größere Genauigkeiten bei der Herstellung und Montage als linear gelagerte Konstruktionen, insbesondere bezüglich der Lage der Bohrungen. Auf dem Markt wird eine ganze Reihe unterschiedlicher Punkthaltesysteme angeboten, starre und bewegliche. Generell werden Kugel- und Gelenklager sowie Elastomere verwendet. Die Scheiben kann man mit Spanntellern befestigen, es sind jedoch auch flächenbündige, gesenkte Außenverschraubungen und Hinterschnittbohrungen mit spezieller Dübeltechnik möglich. Im Gegensatz zu den linienförmig gelagerten Verglasungen sind die Ansprüche an die Unterkonstruktion von punktgehaltenen Verglasungen wesentlich höher einzustufen. Die sonst übliche Aufnahme von Fertigungstoleranzen in den Falzkammern entfällt. Die Fuge ist sichtbar und unterliegt damit als besonderes architektonisches Gestaltungselement erhöhten Ansprüchen. Abhängig von der gewählten Fugenbreite ist die Aufnahme von Bautoleranzen nur sehr eingeschränkt möglich. Die punktförmige Abtragung der Lasten bedingt eine aufwendige statische Berechnung der Unterkonstruktion. Auch der Aufwand für die Ermittlung der statisch notwendigen Glasstärken ist um ein vielfaches höher. Wegen des hohen Anspruchs in der Ausführungsqualität, vor allem der Maßgenauigkeit, empfiehlt sich die Gesamtvergabe des Gewerkes Unterkonstruktion, Glashalterung und Glas an eine Firma. Bei punktförmigen Füllelementhalterungen erfolgt die Abdichtung über eine nichttragende Versiegelung oder eingelegte Dichtungsprofile. Bei Isolierglas, Verbundglas, Verbund sicherheitsglas und Drahtglas muss der Falzraum frei von Dichtstoff sein, damit der Dampfdruckausgleich und die Drainage funktionieren [9].

3.5 Montageprinzipien auf der Baustelle

Für Fassadenbauer stellte sich in den vergangenen Jahren immer häufiger die Herausforderung, größere und komplexere Projekte in immer kürzeren Zeiträumen fertigzustellen. Bei dem daraus resultierenden Termindruck ist zu beachten, dass vom Fassadenbauer möglicherweise verursachte Bauverzögerungen erhebliche terminliche Folgen für die nachkommenden Gewerke haben. Der Terminverzug kann sich dann in Form von Konventionalstrafen auf die verursachende Firma aus-

wirken. Eine gut organisierte, industriemäßige Werkstattfertigung und eine Fassadenmontage mit minimiertem Arbeitsaufwand auf der Baustelle geben den Beteiligten Terminalsicherheit und verkürzen die Bauzeit. Bei der Unterscheidung von Außenwänden bezüglich ihres Baustellenmontageprinzips geht es um die Frage, ob auf der Baustelle einzelne Komponenten oder vorgefertigte Module montiert werden [15]. Die erste Variante ist bei Vorhangfassaden noch sehr weit verbreitet. Es handelt sich dabei um Pfosten-Riegel-Fassaden. Im zweiten Fall erfolgt der Zusammenbau von funktionsfertigen Modulen in der Werkstatt und man spricht von Elementfassaden.

3.5.1 Komponentenmontage

Bei der Komponentenmontage werden im Extremfall alle für den Bau einer Fassade erforderlichen Komponenten einzeln an der Baustelle angeliefert und dort zusammengebaut und montiert. Dazu zählen Rahmenbauteile, Füllelemente (Flügel, Glas, Paneel, Blech, Naturstein etc.), Sonnenschutzvorrichtungen, Schrauben und Sensoren sowie Antriebe und Steuerungen für bewegliche Fenster- und Fassadenkomponenten. Üblich ist diese Vorgehensweise bei den o.g. Pfosten-Riegel-Fassaden. Dabei werden senkrechte und waagrechte Rahmenprofile in geeigneten Produktionslängen, z. B. geschoßhoch und modulfertig, linear aneinandergereiht. Zunächst erfolgt die Montage und Justierung der Hauptsprossen am Rohbau über Konsolen, anschließend die Befestigung der Nebensprossen an den Hauptsprossen. An dem aus Haupt- und Nebensprossen gebildeten Gerüst werden zum Schluss die Füllelemente (i. d. R. mit dazwischen angeordneten Gummidichtungen) angeschlagen. Die Längs- und Querverbindungen sind schiebend ausgebildet. Das in dieses Pfosten-Riegel-Werk eingebaute Füllelement (Glas oder Paneel) schwimmt gewissermaßen und wird im Rahmen des freigelassenen Einbauspiels eine Dehnung zulassen. Die Falztiefe muss den zu erwartenden Dehnungen Rechnung tragen. Die Abdichtung der Profilstöße wird in letzter Konsequenz meist durch an der Baustelle eingebrachte Versiegelungen bewerkstelligt. Diese Konstruktion hat den Vorzug, dass man mit weniger Material und geringerem Werkstattaufwand auskommt. Außerdem können die einzelnen Komponenten leicht transportiert werden, da eine zerlegte Außenwand nur geringen Transportraum beansprucht. Die Montage an der Baustelle ist jedoch wetterabhängig. Zudem sind Gerüste erforderlich. Darüber hinaus fallen auf der Baustelle große Mengen Verpackungsmüll an, der fachgerecht entsorgt werden muss.

3.5.2 Modulmontage

Bei der Modulmontage werden die einzelnen Bauteile bereits in der Werkstatt zu Elementen zusammengefügt. Diese werden „im Ganzen“ zur Baustelle transportiert und dort an Konsolen befestigt (Bild 6). Zu den einzelnen Bauteilen zählen im Extremfall:

- Rahmenbauteile
- Füllelemente (z. B. Flügel, Glas, Paneel, Blech, Naturstein usw.),
- Sonnenschutzvorrichtungen
- Sensoren, Antriebe und Steuerungen (für bewegliche Komponenten)
- alle an die Außenwand angrenzenden Komponenten der Gebäudetechnik (z. B. Heizkörper)

Bei Lochfenstern, Fenstereinsatzelementen und bei Fensterbändern ist die Vorfertigung und Vormontage von Blendrahmen, Flügeln, Dichtungen, Beschlägen und Glas (gelegentlich mit elektrischen Antrieben, Sensoren und der zugehörigen Verdrahtung) in der Werkstatt bereits seit vielen Jahren üblich. Seltener sind bis heute unter industriellen Bedingungen vorgefertigte Fassaden und die Modulmontage. Zur Aufnahme der Dehnungen werden die Fassadenprofile getrennt und labyrinthartig ineinandergeschoben. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass in der Werkstatt unter kontrollierten Bedingungen ein Höchstmaß an Automatisierung und Genauigkeit erreicht werden kann. Daraus resultiert eine zuverlässige Qualitätssicherung und damit hohe Qualität. Infolgedessen ergeben sich später ein geringer Wartungsaufwand und eine erhöhte Lebensdauer. Diese Konstruktion erfordert einen größeren Material- und Werkstattaufwand sowie erfahrene Konstrukteure. Planungsfehler sind nicht ohne weiteres durch handwerkliche Zusatzmaßnahmen korrigierbar. Diese Fassadenart ist deshalb in jedem Falle planungsintensiver und erfordert entsprechende planerische Vorlaufzeiten, was u. a. auch bei Vergaben zu berücksichtigen ist.

Exemplarisch wird der Montagevorgang bei Elementfassaden für Hochhäuser vorgestellt [15, 17]: Während der Erstellung des Rohbaus werden im Beton Befestigungsanker (z. B. Halfenschienen) angebracht. Alternativ können auch nach Fertigstellung des Rohbaus Bohrungen ausgeführt werden. Gerade im Bereich der Außenkante der Decken, wo Fassaden naturgemäß befestigt werden, besteht jedoch die Gefahr, dass man mit dem Bohrer auf die eiserne Bewehrung trifft. In beiden Fällen sind möglichst noch vor Beginn der eigentlichen Fassadenmontage über dreidimensional einstellbare Befestigungen (Konsolen) unvermeidliche Rohbautoleranzen auszugleichen. Diese Tätigkeit stellt die Grundlage für eine äußerst rasche Fertigstellung der Außenwände dar. Die Fassadenelemente werden mit LKW „just in time“ zur Baustelle transportiert und durch den Hochkran sofort abgeladen. Das Hochhaus wird über die Höhe in mehrere Montageabschnitte unterteilt. Für jeden Montageabschnitt wird ein darüber liegendes Geschoß als Montagegeschoß eingerichtet. Hierzu wird zunächst eine auskragende Arbeitsbühne installiert. Mit einem Turmdrehkran werden die Fassadenelemente vom LKW auf die Bühne gehoben und mit einem Spezial-Hubstapler ins Gebäude transportiert. Um das Gebäude wird oberhalb des Montagegeschosses eine Montagefahrtschiene mit Laufkatze („Monorail“) befestigt. Der Stapler fährt das jeweilige



Bild 6. Modulmontage (Quelle: Schüco)

Fassadenelement an den Deckenrand, kippt es in die Vertikale, und die Monorail transportiert es zum Einbauort. Die Unterteilung des Montagevorganges gestattet, an verschiedenen Orten gleichzeitig die Außenfassade zu schließen, während die Vertikaltransporte in Abstimmung mit der allgemeinen Organisation der Baustelle in Zeiten verlagert werden können, in denen der Hochkran nicht anderweitig gebunden ist. Ohne weitere Maßnahmen wird somit in kürzester Zeit eine funktionstüchtige Gebäudehülle fertiggestellt, während in den darüberliegenden Geschossen noch betoniert werden kann. Gerüste sind dabei nicht erforderlich! Die Erfahrung zeigt, dass durch Elementfassaden letztendlich Risiken und Kosten sowohl beim Bauherrn als auch beim Fassadenbauer reduziert werden. Insofern rechtfertigen sich im Endeffekt auch Mehrkosten gegenüber zunächst billigeren Fassadenausführungen.

4 Funktionale Grundlagen

Während die konstruktiven Aspekte von Gebäudehüllen ihre größte Bedeutung während der Herstellungsphase haben, spielen die funktionalen Gesichtspunkte in der Nutzungsphase die herausragende Rolle. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Schutz-, Nutz- und Sicherheitsfunktionen gegeben, die es bei der Konzeption von Fassaden zu berücksichtigen gilt (Tabelle 4). Exemplarisch werden Fassaden in Sprossenweise (nachfolgend als „Fassaden“ bezeichnet) betrachtet.

4.1 Schutzfunktionen

Zu den wichtigsten Schutzfunktionen einer Fassade zählen die Sicherstellung einer ausreichenden Luft- und Wasserdichtigkeit sowie ein zweckgemäßer Wärme-, Sonnen-, Blend- und Schallschutz. Die prinzipiellen Erfordernisse und konstruktiven Möglichkeiten sowie die Effizienz der Schutzfunktionen der Fassade stehen immer in Verbindung mit den in Kapitel 3 beschriebenen konstruktiven Aspekten.

4.1.1 Luft- und Wasserdichtigkeit

Die wohl wichtigste Aufgabe von Fassaden zur Vermeidung von feuchtebedingten Bauschäden ist die Sicherstellung der Luft- und Wasserdichtigkeit auch unter extrem ungünstigen Außenbedingungen. Entscheidend für die Anforderung an die Fugendichtigkeit sind einerseits die wirksamen Windlasten sowie Bauwerksverformungen und Bewegungen, andererseits die statische Dimensionierung der Fassade. Die Windangriffskräfte und die Druckverteilung an der Fassade hängen von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und den Druckbeiwerten an der Gebäudeoberfläche ab. Als Einflussgrößen wirken auch die umgebende Bebauung, die Höhe des betrachteten Geschosses über dem Boden sowie die Form und Oberflächenrauigkeit des Gebäudes.

Unter dem Begriff „Schlagregen“ versteht man die horizontale Komponente des Regens, der sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit vergrößert. In welchem Maß eine Fassade luft-, wasser- und wasserdampfdicht ist, hängt von der konstruktiven Ausbildung und der fachgerechten Abdichtung aller konstruktiven Schnittstellen (Fugen) innerhalb der Fassade ab, mit denen ihre Bestandteile zusammengeschlossen werden. Die konstruktiven Mittel mit denen die Fugen zwischen Platten und Sprossen bewältigt werden, sind der Anschlag, Halte- und Dichtungsleisten und das Dichtungsmittel. Die Dichtungsmittel verhindern das Eindringen von Schlagregen in die Fuge und durch die Fuge hindurch an die Innenseite der Wand. Die Anschlüsse innerhalb der Fassade müssen so konstruiert sein, dass diese einerseits zum Innenraum wasser- und dampfdicht sind und dass andererseits ein kontrollierter Wasserabfluss gewährleistet ist, bei dem eine Deponiebildung vermieden wird, da sich ansonsten im Laufe der Zeit eine Schlierenbildung in diesen Bereichen herauskristallisiert. Bei großflächigen Verglasungen entsteht die Notwendigkeit, vertikale und horizontale Fugen zu einem kommunizierenden Drainagesystem zu

Tabelle 4. Übersicht wichtiger Fassadenfunktionen (Quelle: Schüco)

Kategorie	Funktionen
Schutzfunktionen	<ul style="list-style-type: none"> – Luft- und Wasserdichtigkeit – Wärme- und Feuchteschutz – Sonnen- und Blendschutz – Schallschutz
Netzfunktionen	<ul style="list-style-type: none"> – Tageslichtnutzung – Passive und aktive Solarenergienutzung – Natürliche und Mechanische Lüftung
Sicherheitsfunktionen	<ul style="list-style-type: none"> – Brand- und Rauchschutz – Einbruchhemmung – Beschuss- und Sprengwirkungshemmung – Blitzschutz- und Radardämpfung

verbinden. Werden Einfachverglasungen und nicht gedämmte Konstruktionen eingesetzt, können raumseitige Tauwassersammelrinnen notwendig werden.

4.1.2 Wärme- und Feuchteschutz

Ein guter Wärmeschutz erhöht die raumseitigen Oberflächentemperaturen der Fassade, wodurch die Behaglichkeit in Fassadennähe gesteigert, das Risiko der raumseitigen Kondensatbildung reduziert und die maximale Heizleistung gesenkt werden kann, was eine Verringerung der Investitionskosten ermöglicht. Zudem wird die Betriebsdauer der Heizungsanlage verkürzt, wodurch sich Heizenergieverbrauch und Betriebskosten reduzieren lassen. Zur Optimierung des Wärmeschutzes einer Fassade bedarf es einer Gesamtoptimierung von Rahmen, Verglasung (einschließlich Abstandhalter) und nichttransparenten Bereichen mittels Maßnahmen zur Reduzierung von Wärmeleitung, Konvektion und langwelligem Strahlungsaustausch. Dabei können mehr oder weniger gut wärmedämmte Rahmenkonstruktionen, nichttransparente bzw. transluzente Wärmedämmstoffe oder transparente bzw. transluzente Isolierglasscheiben mit wärmedämmender Gasfüllung und/oder Oberflächenbeschichtung zum Einsatz kommen.

Typische wärmetechnische Schwachstellen befinden sich in Fugen, am Randverbund von Gläsern und Paneelen sowie im Bereich von Befestigungsmitteln (hervorgerufen durch lineare oder punktförmige Wärmebrücken und/oder Undichtigkeiten). Als besonders kritisch erweisen sich in der Praxis horizontale und vertikale Außen- und Innenecken, Attiken und Fußpunkte sowie Versprünge in Dämm- oder Dichtebenen, insbesondere an Übergängen zwischen unterschiedlichen Fassadentypen und -aufbauten. Wärmebrücken stellen gleichzeitig feuchtetechnische Schwachstellen dar. Auf raumseitigen Oberflächen und ggf. im Inneren der Fassade führen sie zu einem erhöhten Kondensatrisiko. Das Gleiche gilt für Fassadendetails, bei denen die innere abgewinkelte Oberfläche kleiner als die äußere ist (z. B. bei „schlanken“ Außenecken bzw. bei außenliegenden Profilen, die als Kühlrippen wirken).

Das Kondensatrisiko innerhalb von Fassaden wird darüber hinaus durch die Dampfdurchlässigkeit der einzelnen Komponenten der Fassade sowie durch die tatsächliche Ausführung von Dichtmaßnahmen im Bereich von Fugen und Befestigungsmitteln bestimmt. Ein wirksamer Tauwasserschutz ist daher eine grundlegende Voraussetzung für die Langlebigkeit der Fassade und für ein gesundes Raumklima. Da Schimmelpilze auch ohne sichtbares Tauwasser auftreten können, müssen die kritischen Oberflächentemperaturen beachtet werden. In Mitteleuropa gilt in der Konstruktion und Ausführung der Grundsatz: Innen luft- und dampfdichter als außen. Bei feuchtwarmem Klima muss die Konstruktion „umgedreht“ werden: Außen luft- und dampfdichter als innen. Bei mehrschaligen Fassaden kann sich zudem Kondensat bilden, wenn durch geöffnete raumseitige Fenster feuchte Raumluft

im Fassadenzwischenraum auf kalte Oberflächen trifft. Das Risiko erhöht sich mit der Qualität der Wärmedämmung der Innenfassade, während es sich mit der Qualität der Wärmedämmung der äußeren Ebene und der Durchlüftung des Zwischenraums reduziert.

Ein in der Planung häufig nicht beachtetes Phänomen ist die Bildung von Tauwasser-, Reif- und Eisbildung auf der äußeren Oberfläche der Fassade. Das Risiko erhöht sich mit der Qualität des Wärmeschutzes der Fassade (z. B. bei 3-fach Isolierverglasungen). Dann kann sich die äußere Scheibenoberfläche (insbesondere in klaren Nächten) durch die langwellige Abstrahlung an die Atmosphäre unter die Außenlufttemperatur abkühlen. Wenn dabei der Taupunkt der Außenluft unterschritten wird, entsteht Kondensat, das bei niedrigen Außenlufttemperaturen als Reif oder Eis aufzutreten kann. Zudem wird aufgrund des geringen Wärmedurchgangs die äußere Scheibe kaum noch erwärmt, wodurch das beschlagene Glas langsamer abtrocknet. Der gleiche Effekt tritt natürlich auch an sehr gut gedämmten, nicht transparenten Fassadenbauteilen auf. Es ist jedoch optisch bei weitem nicht so störend.

4.1.3 Sonnen- und Blendschutz

Eine konsequente Energie- und Komfortoptimierung von Gebäuden hat darüber hinaus – insbesondere bei Fassaden mit großem Glasflächenanteil – den sommerlichen Wärmeschutz zu berücksichtigen. Bei nicht gekühlten Gebäuden geht es um die durch Solarstrahlung bedingte Raumaufheizung und den thermischen Komfort, bei gekühlten Räumen um den Kühlenergieverbrauch. Entscheidend ist hier neben der Leistung und Betriebsdauer der Anlage (Betriebskosten) auch die maximale Kühlleistung (Auslegung der Kühleinrichtungen und Investitionskosten).

Besonders in Bürogebäuden mit Bildschirmarbeitsplätzen ist zudem die visuelle Behaglichkeit im Innenraum und damit das Thema Blendschutz in Betracht zu ziehen (Bild 7). Ein guter Sonnenschutz reduziert die in den Raum eindringende Sonnenstrahlung [18, 19]. Durch geeignete Fensterflächenanteile sowie Sonnen-

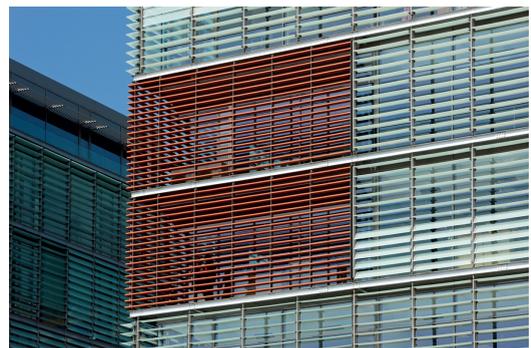


Bild 7. Sonnen- und Blendschutz in der Fassade
(Quelle: Schüco)

schutzeinrichtungen und entsprechende Betriebsstrategien lässt sich der Zeitraum ausdehnen, in dem im Innenraum ohne Hilfs- und Fremdenergieeinsatz behagliche Temperaturverhältnisse aufrechterhalten werden. Je seltener die Kühlung während der Nutzungsdauer zugeschaltet werden muss, desto höher ist die Qualität der Fassade. Zur Beurteilung eines Sonnenschutzsystems sind neben den bauphysikalischen Kenngrößen z-Wert (Abminderungsfaktor Sonnenschutz) und g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung) auch die lichttechnischen Eigenschaften des Sonnenschutzes (z. B. Transmissionsgrad im sichtbaren Wellenlängenbereich) zu werten.

4.1.4 Schallschutz

Die Anforderungen an die Fassade bezüglich der Schalldämmung gegenüber Außenlärm ergeben sich aus dem maßgeblichen Außenlärmpegel sowie aus dem im Innenraum zulässigen und tatsächlichen Geräuschpegel. In der DIN 4109 [20] sind die wesentlichen Anforderungen an den Schallschutz der Fassade geregelt. Wenn die Außenfassade gegenüber Außenlärm im Vergleich zu den Raumtrennwänden und Baukörper- bzw. Trennwandanschlüssen schalltechnisch überdimensioniert oder der Grundgeräuschpegel im Innenraum geringer als angenommen ist, kann sich die subjektive Störwirkung informationshaltiger Geräusche, insbesondere hohe Frequenzen, aus benachbarten Räumen als problematisch erweisen. Die Schalldämmung zwischen benachbarten Räumen resultiert nicht nur aus der Schalldämmung der Trenndecken und -wände, sondern auch aus deren Anschlüssen an die Fassade. Zusätzlich gibt es eine Schalllängsleitung über die Fassade selbst. Dieser Effekt ist bei Pfosten-Riegel-Fassaden deutlich stärker ausgeprägt als bei Elementfassaden, wenn dort die Fugen zwischen den Elementen im Bereich der Decken- und Trennwandanschlüsse liegen. Im Planungs- und Ausführungsprozess gilt es, die geforderten schalltechnischen Eigenschaften der Fassade lang-

fristig sicherzustellen. Die schalldämmende Wirkung von Fassaden sowie Trennwand- und Deckenanschlüssen lässt sich im Wesentlichen durch die in Tabelle 5 dargestellten konstruktiven Maßnahmen steigern.

4.2 Nutzfunktionen

Wenn der Primärenergiebedarf des Gebäudes weiter gesenkt werden soll, müssen hochwertige Fassaden nicht nur gegen negative Witterungseinflüsse schützen, sondern auch positive Effekte des Außenklimas für das Rauminnere nutzbar machen. Die Devise lautet: Nicht gegen das, sondern mit dem Wetter bauen!

4.2.1 Tageslichtnutzung

Mit der optimierten Tageslichtnutzung lässt sich der Komfort im Gebäude steigern sowie ein großes Potenzial zur Reduzierung des Energiebedarfes für die künstliche Beleuchtung und damit auch zur Betriebskostensenkung erschließen [21]. Durch geeignete Fassadenbauteile und energiesparende Betriebsstrategien lässt sich der Zeitraum ausdehnen, in dem im Innenraum ohne Hilfs- und Fremdenergieeinsatz behagliche Lichtverhältnisse aufrechterhalten werden. Je seltener Kunstlicht während der Nutzungsdauer zugeschaltet werden muss, desto höher ist die Qualität der Raumbelichtung, desto geringer sind Stromverbrauch und Umweltbelastung und desto niedriger ist die Wärmeabgabe in den Raum. Höhere Raumbeluchtungsstärken als die geforderten Mindestbeleuchtungsstärken verursachen (bei der künstlichen Beleuchtung) einen höheren Stromverbrauch. Bei einer optimierten Tageslichtnutzung durch Lichtlenkung ergibt sich, neben der Senkung des Energieverbrauches für die künstliche Beleuchtung, auch eine Senkung der Kühllast, da einerseits der Überschuss an Tageslicht in Fassadennähe sowie die dadurch verursachte Wärme abgebaut wird und andererseits das Tageslicht eine höhere Lichtausbeute als Kunstlicht aufweist. Besondere Vorteile bietet wegen

Tabelle 5. Maßnahmen zur Steigerung der schalldämmenden Wirkung von Fassaden (in Anlehnung an [10])

Maßnahme	Beispiel
Erhöhung des Gewichtes der Komponenten	z.B. Sand- bzw. Schwergasfüllung und Bleibepankungen
Erhöhung der Anzahl hintereinanderliegender, entkoppelter Schalen	z.B. Doppelschaligkeit, vorzugsweise mit unterschiedlichen Materialstärken
Erhöhung der Elastizität	z.B. durch Laminierung mehrerer dünner Bleche/Glasscheiben, und ihrer Verbindungen/Einsparungen mit einer entsprechenden schalltechnischen Entkopplung (durch weitere Dichtungen), ...
Erhöhung der Asymmetrie des Aufbaus	z.B. unterschiedliches Gewicht hintereinanderliegender Schichten
Erhöhung des Absorptionsgrades luftschichtbegrenzender Oberflächen	z.B. durch poröse Materialien bzw. durch Labyrinthbildung
Erhöhung des Abstandes luftschichtbegrenzender Oberflächen	z.B. Kastenfenster

ihres hohen photometrischen Strahlungsäquivalentes und der damit verbundenen reduzierten Wärmebelastung die diffuse Himmelsstrahlung. Direkte Sonnenstrahlung sollte zur Raumausleuchtung nur in Ausnahmefällen herangezogen werden und deshalb i. Allg. ausgeblendet werden [21].

4.2.2 Passive und aktive Solarenergienutzung

Bei der passiven Solarenergienutzung wirkt das Gebäude selbst als Sonnenkollektoranlage. Transparente und transluzente Fenster- und Fassadenflächen fangen die Sonnenenergie ein und geben sie direkt oder indirekt („primäre und sekundäre Wärmelieferung“) ins Gebäudeinnere weiter. Die Umwandlung in Wärme geschieht in der Fassade oder an den Raumumschließungsflächen (Wand-, Boden- und Deckenflächen). Hier wird spätestens nach mehrfacher Reflexion und Streuung eine weitgehende Absorption der in den Raum eingetretenen Strahlung erzielt.

Eine weitere Möglichkeit eröffnet die aktive Solarenergienutzung. Hierbei werden in der Fassade zusätzliche technische Einrichtungen benötigt. Die Umwandlung von Solarstrahlung in Wärme (thermische Solarenergienutzung) zur Raumheizung, Brauchwassererwärmung oder Raumkühlung kann mit unterschiedlichen Medien (Wasser, Luft ...), nach unterschiedlichen Prinzipien und auf unterschiedlichen Temperaturniveaus realisiert werden. Mittels Photovoltaikmodulen (Bild 8) erfolgt die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Strom [22]. Grundlage dieser Technologie ist der photoelektrische Effekt.

4.2.3 Natürliche und mechanische Lüftung

Bei zukunftsweisenden Raumklimakonzepten sollten der hygienisch notwendige Außenluftwechsel und die Raumkühlung – zumindest zeitweise – über natürliche Lüftung (ggf. in Verbindung mit wärmespeichernden Gebäudemassen) erfolgen, wenn nicht im überwiegen-



Bild 8. Photovoltaik in der Fassade (Quelle: Schüco)

den Teil des Jahres zwingende Gründe dagegen sprechen. Dazu zählen ein extremes Klima, extremer Außenlärm bzw. starke Luftverschmutzung. Dabei darf die Raumlufttemperatur mit der Außenlufttemperatur gleiten, solange sie innerhalb eines behaglichen Rahmens bleibt. Durch die kontrollierte natürliche Lüftung von Räumen können Bauschäden durch hohe Raumluftfeuchte vermieden und eine bessere Raumluftqualität erreicht werden. Darüber hinaus lässt sich eine weitere Reduzierung der Wärmeverluste und der CO₂-Emissionen erzielen.

In einigen innovativen Gebäuden wurden die Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung dezentralisiert und nur in den Räumen installiert, in denen sie aufgrund der Erstinutzung tatsächlich benötigt wurden. Ein Beispiel hierfür sind mechanische Lüftungsgeräte, die unmittelbar an der Fassade in den Boden bzw. in die Zwischendecke oder in die Brüstung integriert werden. Hochwertige Fassadenlüfter ermöglichen zudem eine Wärmerückgewinnung zwischen Ab- und Zuluft sowie das Vorheizen bzw. Vorkühlen der Zuluft (Bild 9). Wenn bereits in der Planung die entsprechenden Vor-



Quelle: Trox

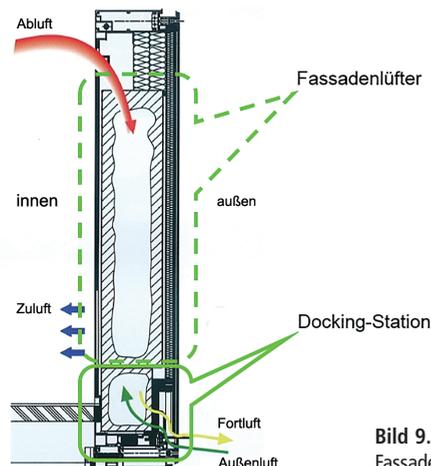


Bild 9. Einsatz von mechanischen Fassadenlüftern (Quelle: Schüco)

kehrungen getroffen werden, ist bei späterer Umnutzung (Nutzer aus- oder -umbau) einzelner Räume eine Nach- bzw. Rückrüstung derartiger Geräte ohne aufwendige Umbauarbeiten möglich. Häufig erweist es sich aber auch als vorteilhafter, wenn die Gebäudetechnik nicht dezentralisiert wird. Dann werden bei hochwertigen Anlagen die Funktionen Lüftung und Raumtemperierung getrennt (z. B. Quelllüftung und Kühldecke statt Vollklimaanlage).

4.3 Sicherheitsfunktionen

Beim Thema Sicherheit in der Fassade geht es einerseits darum, drohenden Gefahren vorzubeugen und andererseits darum, mögliche Risiken zu mindern. Das Thema beinhaltet Brand- und Rauchschutz, Einbruch- und Beschusshemmung sowie Blitzschutz und Radardämpfung.

4.3.1 Brand- und Rauchschutz

Das Thema Brand- und Rauchschutz bei Fassaden betrifft im Wesentlichen Maßnahmen bzw. Vorkehrungen zur Brandverhütung, zur Verhinderung bzw. Verzögerung der Brandentwicklung und Brandausbreitung sowie zum Abzug von Rauch und Wärme. So ist beispielsweise größtes Augenmerk darauf zu richten, dass der Übergang der Fassade an den Rohbau rauchdicht ausgeführt wird. Der im Falle eines Brandes auftretende Rauch und giftige Gase breiten sich bei rauchdichten Anschlüssen in kürzester Zeit über das Gebäude aus und verursachen Risiken für die Bewohner auch dort, wo dies aufgrund des Feuerereignisses an sich absolut vermeidbar wäre. Entrauchungsöffnungen werden im Brandfall entweder automatisch aktiviert oder von den Rettungskräften manuell betätigt. Neben typischen Rauchabzugsanlagen (RWA), lassen sich die erforderlichen Querschnitte auch durch Dreh- oder Klappflügel erfüllen. Die Wirksamkeit des Rauchabzugs wird wesentlich durch eine richtige Dimensionierung der Anlage bestimmt.

Die erforderliche Feuerwiderstandsklasse und die Widerstandsdauer einer Fassade werden in der DIN 4102 [23] bzw. DIN EN 13501 [24] geregelt und normalerweise von der zuständigen Baubehörde festgesetzt. Die Anforderungen gelten in gleichem Maße für Verglasung, Rahmen, Halterungen und Dichtungen. Bei zweischaligen Fassaden sind zusätzlich Maßnahmen (feuerfeste Abschottungen oder Sprinkler) vorzusehen, die ein Übergreifen und Ausbreiten des Feuers bzw. Rauches über die Fassadenzwischenräume verhindern sollen.

4.3.2 Einbruchhemmung

Die DIN EN 1627 [25] regelt die Widerstandsklassen für einbruchhemmende Fenster- und Fassadenbauteile. Die ergänzenden Normen DIN EN 1628 bis DIN EN 1630 [26–28] beschreiben die konkreten Prüfverfahren zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit unter

statischer und dynamischer Belastung sowie gegen manuelle Einbruchversuche. Die Widerstandsklassen RC1N bis RC6 (alt WK1 bis WK6) beschreiben dabei den Grad des Widerstands eines Bauteils gegen Einbruchversuche, wobei RC sich aus dem englischen Begriff „Resistance Class“ ableitet. Ein wichtiger Grundsatz für die Konstruktion einbruchhemmender Bauteile ist die Einhaltung einer durchgehenden Sicherheitskette, da letztlich das Gesamtsystem über das Erreichen einer bestimmten Widerstandsklasse entscheidet. Dabei sind Werkstoffe, Wandanschlüsse, Falzausbildung, Beschläge und Verglasung aufeinander abzustimmen.

Bisher ist nur ein kleiner Teil der existierenden Gebäude mit wirkungsvollen Sicherheitseinrichtungen zur Verhinderung oder Erschwerung von Einbrüchen ausgestattet. Dem stehen heute mehr oder weniger ausgereifte Systeme zur Einbruchhemmung und -meldung – einschließlich kabelloser Funksensorik – zur umfassenden Fassaden- und Innenraumüberwachung von Gebäuden gegenüber. Dabei können verschiedene Komponenten zu einem komplexen System kombiniert werden (zum Beispiel Öffnungs- und Verschlussüberwachung von Fenstern in Verbindung mit Glasbruchmeldern und mit einer Einbruchmeldeanlage).

4.3.3 Blitzschutz und Radardämpfung

Um in der Praxis ein Gebäude vor den negativen Auswirkungen eines Blitzschlages zu schützen, wird das Prinzip des Faradayschen Käfigs angewendet [29]. Ausreichend ist ein Netz von Leitern, die an den Knoten leitend miteinander verbunden sind. Der Abstand benachbarter Leiter, d. h. die Maschenweite des Netzes, liegt je nach Anforderung zwischen 5 und 20 m. Für die äußere Blitzschutzanlage wird elektrische Kontinuität gefordert, d. h. alle Elemente der äußeren Blitzschutzanlage müssen elektrisch verbunden sein, z. B. durch Lötens oder Schweißen. Die metallischen Bauteile der Fassade werden an dieses Netz an mehreren Punkten angeschlossen. Der Blitzschutz wird durch Verringerung der Maschenweite gesteigert. Durch die Erdung der metallischen Bauteile der Fassade über die Blitzschutzanlage wird zugleich Schutz gegen elektrische Unfälle durch beschädigte Leitungen und Schutz gegen statische Elektrizität erreicht. Die Aluminiumteile (Profile und Bleche) von zusammenhängenden Fassadenbereichen sowie die Unterkonstruktionen müssen entsprechend den Richtlinien untereinander elektrisch leitend verbunden sein. Die elektrische Verbindung zur Ableitung statischer Elektrizität an den Fassadenelementen ist i. Allg. durch die im Fassadenbau übliche Verbindungstechnik ausreichend.

Reflexionen der Radarstrahlung von Flugsicherungsradars an Außenwänden von Gebäuden können zu Fehl- und Mehrfacherkennung auf dem Radarschirm und damit zu einer Beeinträchtigung der Flugsicherheit führen, was kritische Situationen oder sogar Unfälle zur Folge haben kann. Die Reflexion der Radarstrah-

lung ist durch geeignete Gestaltung der Fassade und Wahl der in der Fassade eingesetzten Werkstoffe soweit zu reduzieren, dass Störungen ausgeschlossen werden können.

5 Konzeptionelle Grundlagen

Die konzeptionellen Grundlagen beziehen sich einerseits auf konstruktive Aspekte von Gebäudehüllen (Abschn. 5.1), die ihre größte Bedeutung während der Herstellungsphase haben. Sie können aber auch den Aufwand bei Reinigung, Wartung und Instandhaltung maßgeblich beeinflussen. Hierbei wird das Augenmerk auf die Standardisierung von „Gegenständen und Verfahren“ gelegt, um den Unterschied zwischen offenen und geschlossenen Systemen (und genormten sowie geprüften Konstruktionen) zu verdeutlichen. Im Abschnitt 5.2 geht es um funktionale Gesichtspunkte und damit insbesondere um die Nutzungsphase. Hier werden zwei alternative Fassaden-Konzepte vorgestellt: starre und dynamische.

5.1 Konstruktive Aspekte

5.1.1 Standardisierungen von Komponenten und Schnittstellen

Standardisierung bedeutet generell die Vereinheitlichung von Gegenständen und Verfahren. Bei der Standardisierung von Gegenständen wird unterschieden in Normung (Standardisierung von Einzelteilen und Baugruppen) und Typisierung (Standardisierung von Endprodukten). Standardisierung von Verfahrensweisen beinhaltet die Aspekte Technologie und Arbeitsorganisation (Tabelle 6) [30].

Grundsätzlich führt Standardisierung zu einer Reduktion der Vielfalt. Die Vorteile sind Kostensenkungen (infolge von Skaleneffekten, Erfahrungskurveneffekten sowie verringerter Lagerhaltung) sowie eine erhöhte Lieferbereitschaft. Demgegenüber stehen eine reduzierte Produktvielfalt und zusätzliche Aufwendungen. Bei der Standardisierung von Gegenständen muss neben der Sortimentsvielfalt (durch Typung zu beschränken) und der Teilevielfalt (durch Normung zu beschränken) auch die Kunden- und Auftragsvielfalt ausreichend berücksichtigt werden.

Aus produktionstechnischer Sicht erfolgt Typung und Normung durch Baureihen und Baukästen [30]. Als Baureihe bezeichnet man nach [31] „*technische Gebilde (Maschinen, Baugruppen oder Einzelteile), die dieselbe Funktion, mit der gleichen Lösung, in mehreren Größenstufen, bei möglichst gleicher Fertigung in einem weiten Aufgabenbereich erfüllen.*“ Unter einem Baukasten versteht man dagegen „*Maschinen, Baugruppen und Einzelteile, die als Bausteine mit oft unterschiedlichen Lösungen durch Kombination verschiedene Gesamtfunktionen erfüllen. Baukästen enthalten durch mehrere Größenstufungen oft auch Baureihen*“ [31]. Ziel ist es, Varianten erst am Ende der Wertschöpfungskette zu bilden. Im Ext-

remfall kann Standardisierung mit Customization verknüpft werden (z. B. Konfiguration nach Kundenwünschen aus vorgefertigten Bausteinen im Baukastensystem). Wildemann [32 zitiert in 30] stellt das Baukastenprinzip in den übergeordneten Kontext einer modularen Fabrik und betont dabei den Zusammenhang zwischen standardisierten Produkten und standardisierten Verfahrensabläufen. Standardisierung von Verfahren und Abläufen ist eine Voraussetzung für die industrielle Herstellung komplexer, aufwendig zu bearbeitender und zu montierender Produkte. Generell kann jeder sich wiederholende Vorgang oder Teilvorgang standardisiert werden. Ein Hilfsmittel dafür sind Nummernsysteme, die der Identifikation und Klassifikation von Teilen, Baugruppen und Produkten einerseits sowie Vorgängen und Teilvorgängen andererseits dienen [30].

Normung kann auf Unternehmensebene, auf nationaler und auf internationaler Ebene erfolgen. Träger der Normung sind Unternehmen, Verbände sowie nationale und internationale Institutionen. Bezüglich des Geltungsbereiches wird in internationale, regionale und nationale Normen, Verbands- und Werksnormen unterschieden. Normen auf niedrigeren Ebenen (z. B. Werksnormen und Verbandsnormen) haben Einfluss auf die Entwicklung von Normen auf höheren Ebenen (z. B. internationale Normen). Umgekehrt haben diese auch auf niedrigeren Ebenen Gültigkeit (Bild 10). Nor-

Tabelle 6. Gegenstand von Standardisierung (Quelle: Schüco)

Kategorie	Gegenstand
Gegenstände	Einzelteile und Baugruppen (Normung)
	Endprodukte (Typisierung)
Verfahren	Technologie
	Arbeitsorganisation

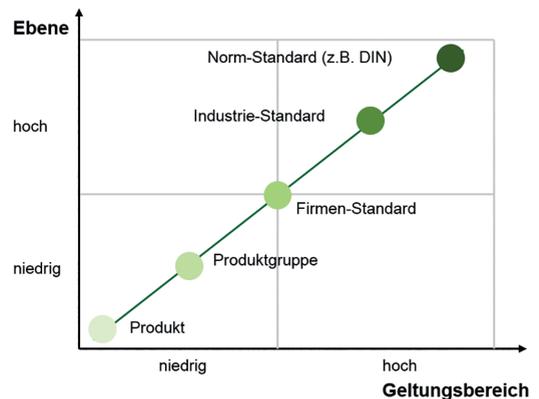


Bild 10. Arten von Standards und ihr Geltungsbereich (Quelle: Schüco)

men auf den unteren Ebenen sind im Unternehmen eher verbindlich und entsprechen dem neueren Stand der Technik. Überbetriebliche Normen sind nicht verbindlich und haben keine unmittelbaren juristischen Konsequenzen. Somit können Normen technische Entwicklung nicht generell verhindern. Dennoch haben überbetriebliche Normen häufig eine mittelbar juristische Wirkung. So gelten beispielsweise in Deutschland DIN-Normen als Bindeglied zwischen Recht und Technik sowie als Maßstab bei der Rechtsprechung, auch wenn sie nicht explizit Vertragsinhalt sind. Üblicherweise ist die Normung der technischen Entwicklung nachgelagert [30].

Im Fassadenbau bringt Systemtechnik gegenüber Unikatbau Sicherheit sowie ökonomische Vorteile und verkürzt die Entwicklungszeiten bei großer Gestaltungsfreiheit für den Architekten. Vorteile, die aus dem hohen Wiederholfaktor und den einfachen, sicheren Systemlösungen resultieren, bestehen in den geringeren Anforderungen an die konstruktive und handwerkliche Qualifikation der Mitarbeiter von Metallbaufirmen. Darüber hinaus kann der Metallbauer auf zeitsparende Software und Datenbanken mit einem umfangreichen, aufeinander abgestimmten Sortiment von Profilen und Zubehör zugreifen. Der Beitrag der Systemtechnik ist, neben Maßnahmen zur Kostensenkung und Nutzwertsteigerung mittels funktionaler Optimierung der Produkte – insbesondere im Bereich der Schnittstellen – die abwicklungs- sowie fertigungs- und montagetechnische Optimierung. Die Projektkomplexität wird durch die geringere Anzahl unterschiedlicher Konstruktionstypen und Teile reduziert. Wirtschaftlich und industriell (vor)gefertigte Komponenten und/oder Module haben als Serienprodukt darüber hinaus eine geringere Komplexität und einen höheren Reifegrad als Sonderanfertigungen. Der Aufwand für Planung, Fertigung und Montage sinkt, während die Qualität steigt. Bei komplexen und architektonisch besonders anspruchsvollen Gebäuden werden auch objektspezifische Sonderkonstruktionen auf Systembasis entwickelt. Da die funkti-

onsrelevanten Komponenten aus dem System übernommen werden, bleiben auch hier die wesentlichen Vorteile des Systems erhalten [9].

5.1.2 Offene und geschlossene Systeme

Bauwerke haben sich immer mehr zu einem vielschichtigen Gefüge differenzierter (Sub-)Systeme entwickelt. So werden zunächst aus Baustoffen oder Bauteilen Bauelemente gefügt. Aus den Bauelementen wird wiederum ein Gebäude zusammengebaut. Der „Zusammenbau“ erfolgt nach jeweils systemspezifischen Regeln. Es wird grundsätzlich in offene, halboffene und geschlossene Systeme unterschieden (Bild 11). Bei *offenen Systemen* handelt es sich um (überbetrieblich) genormte Konstruktionen, bei denen

- (überbetrieblich) genormte Bauprodukte und Systembestandteile nach einer (überbetrieblich) „genormten Einbauvorschrift“ zu Bauteilen mit normativ definierten Mindesteigenschaften zusammengefügt werden,
- die einzelnen Systembestandteile herstellerunabhängig miteinander kombiniert werden können und
- die Eigenschaften (häufig in verschiedenen Normen festgeschrieben) immer im sicheren „Leistungsbereich“ liegen [33].

Bei geschlossenen Systemen handelt es sich hingegen um geprüfte Konstruktionen, bei denen

- alle wesentlichen Bauprodukte und Baustoffe herstellerspezifisch definiert sind und durch Bauteilprüfung nachgewiesen werden,
- der Nachweis durch Prüfinstitute im Auftrag des Herstellers erfolgt.

Daneben gibt es auch halboffene Systeme:

- mindestens ein Bauprodukt ist herstellerspezifisch (und wird durch Prüfung nachgewiesen)
- weitere Bauprodukte sowie der Aufbau und die Montage sind herstellerunabhängig (und wird normativ geregelt) [33].

Genormte Konstruktionen	Geprüfte Konstruktionen	
	halboffene Systeme	geschlossene Systeme
offene Systeme		
Alle wesentlichen Bauprodukte und der Aufbau/Montage sind produkt- und herstellerunabhängig (durch Normen geregelt)	Mindestens ein Bauprodukt ist herstellerspezifisch (durch Prüfung nachgewiesen). Weitere Bauprodukte und Aufbau/Montage sind herstellerunabhängig (durch Normen geregelt)	Alle wesentlichen Bauprodukte und Baustoffe sind herstellerspezifisch (durch Prüfung nachgewiesen)



Bild 11. Offene, halboffene und geschlossene Systeme (in Anlehnung an [33])



Bild 12. Starre Fassade als undurchlässige Barriere (Quelle: Schüco)



Bild 13. Dynamische Fassade als semipermeable Membran (Quelle: Schüco)

Genormte Konstruktionen (offene Systeme) punkten mit einem einfach zugänglichen Nachweis (z. B. nach DIN-Norm) sowie einem möglichen logistischen Vorteil. Geprüfte Konstruktionen (geschlossene Systeme) zeichnen sich dagegen durch eine klar definierte Leistungsfähigkeit aus (aufgrund einer eindeutigen Festlegung sowie optimierten Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten). Sie können die Leistungseigenschaften genormter Konstruktionen oftmals mit einem wirtschaftlicheren Bauteilaufbau erfüllen [33].

5.2 Funktionale Aspekte

Nachfolgend werden zwei alternative Fassadenkonzepte vorgestellt, die sich vor allem dahingehend unterscheiden, ob in der Fassade starre und/oder dynamische Komponenten zum Einsatz kommen, und ob der Nutzer auf die Funktion der Fassade Einfluss nehmen kann.

5.2.1 Starre Fassaden

Starre Fassaden schirmen Räume gegenüber widrigen äußeren Umgebungseinflüssen ab, indem sie gegenüber der Umgebung eine undurchlässige Barriere bilden (Bild 12). Sie verfügen demnach nur über starre Komponenten, die sich im Betrieb nicht beeinflussen lassen. Ein individueller Eingriff des Nutzers (z. B. das Öffnen von Fenstern oder das Betätigen eines Sonnenschutzes) ist nicht möglich. Transparente Flächen sind entweder mit einer Sonnenschutzverglasung ausgestattet oder es kommen auskragende, feststehende Lamellen zum Einsatz. Eine Klimaanlage sorgt ganzjährig für ein behagliches Raumklima.

5.2.2 Dynamische Fassaden

Dynamische Fassaden wirken nicht mehr als undurchlässige Barriere zwischen Raum und Umgebung, sondern als semipermeable Membran (Bild 13). Neben starren Komponenten verfügt sie auch über dynamische Komponenten. Ihre Durchlässigkeit für Sonne, Licht, Luft, Wärme und Schall lässt sich durch den Nutzer in Abhängigkeit wechselnder Nutzeransprüche und Außenbedingungen zielgerichtet beeinflussen. Die technische Gebäudeausrüstung kann so kleiner dimensioniert werden und kommt nur noch in Extremsituationen zum Einsatz. Bewegliche Sonnenschutzeinrichtungen verhindern eine übermäßige Raumerwärmung (sie dienen zum Teil nachts zudem dem Sichtschutz und der temporären Wärmedämmung). Fenster und Sonnenschutz sind (je nach Standard) manuell oder motorisch betrieben. Dynamische Fassaden verfügen demnach über Komponenten, auf deren Position oder Eigenschaften der Nutzer (manuell oder motorisch) Einfluss nehmen kann. Aufgrund der natürlichen Lüftung sowie wegen der Möglichkeit des individuellen Nutzereingriffs gehen dynamische Fassaden häufig mit einer deutlich höheren Nutzerzufriedenheit einher. Ein typisches Beispiel sind dynamische Glas-Doppel-Fassaden.

6 Herausforderungen und Möglichkeiten künftiger Gebäudehüllen

Nach der Betrachtung der Vergangenheit und Gegenwart der Gebäudehülle beschäftigen sich die nachfolgenden Kapitel mit deren Zukunft. Häufig haben wir den Eindruck, dass sich die Welt noch nie so schnell „gedreht“ hat wie heute. Das kann durchaus sein, aber sollen wir uns deshalb ohnmächtig und im Blindflug in

Tabelle 7. Schlüsselfaktoren der Zukunft im Bauwesen (Quelle: Schüco)

Gesetzgebung und Politik	Gesellschaft und Kunde	Wirtschaft und Wettbewerb	Technologie und Innovation
<ul style="list-style-type: none"> – Bauprodukteverordnung – Energiesparverordnung – Energiesteuern – Energiewende – Dekarbonisierung – ... 	<ul style="list-style-type: none"> – Nachhaltigkeit – Bevölkerungsentwicklung – Urbanisierung/ Bevölkerungswanderung – Demografischer Wandel – Polarisierung der Einkommensverteilung – Individualisierung auf der Nachfrageseite – Baukultur – ... 	<ul style="list-style-type: none"> – Globalisierung – Volatilität Rohstoffpreise – Fachkräftemangel – Spezialisierung (Marktsegmente, Wertschöpfungskette ...) – Strategische Allianzen und Partnerschaften – Konsolidierung Hersteller und Zulieferer – Konvergenz der Gewerke und Disziplinen – ... 	<ul style="list-style-type: none"> – Mobiles Internet / IOT... – Cloud Computing – Building Information Modeling (BIM) – Industrie / Handwerk 4.0 – Robotik / 3D-Druck – Modularisierung – Digitals – ...

die Zukunft bewegen? Oder können wir uns auf die Zukunft vorbereiten, um auf Neues rasch reagieren zu können? Können wir unsere eigene Zukunft gar selbst gestalten? Einige grundsätzliche Muster, die in der Vergangenheit zu Veränderungen geführt haben, werden auch in der Zukunft Gültigkeit behalten. So stehen wir – wie schon in früheren Jahrhunderten – einerseits vor neuen Anforderungen, andererseits bieten sich uns neue Möglichkeiten. Die Anforderungen ergeben sich aus den jeweiligen sozialen Verhältnissen sowie aus den Gesellschafts-, Wohn- und Arbeitsformen. Die neuen Möglichkeiten resultieren aus den verfügbaren Technologien und Tools sowie aus den jeweiligen Fähigkeiten der Planer, der Handwerker und der Industrie. Die Schlüsselfaktoren für die künftige Entwicklung im Bauwesen lassen sich in die Kategorien Gesetzgebung und Politik, Gesellschaft und Kunde, Wirtschaft und Wettbewerb sowie Technologie und Innovation einordnen (Tabelle 7). Nachfolgend werden einige Faktoren vorgestellt, die besonderen Einfluss auf die künftigen Anforderungen und Möglichkeiten von Gebäudehüllen haben werden.

6.1 Bevölkerungsentwicklung

Die Weltbevölkerung umfasste zum Jahreswechsel 2015/16 rund 7,4 Milliarden Menschen. Das sind etwa 83 Millionen Menschen mehr als im Jahr zuvor. Das Wachstum entspricht etwa der Zahl der in Deutschland lebenden Bevölkerung. Im Jahr 2050 werden etwa 9,5 Milliarden Menschen auf der Erde leben. In den Entwicklungsländern wird das Wachstum mindestens sechsmal so schnell wie in den Industrieländern sein. Die Bevölkerungsvorausberechnung [34] zeigt auch die künftigen Veränderungen im Altersaufbau der Bevölkerung. So bestand Deutschland im Jahr 2013 zu 21% aus 65-Jährigen und Älteren. Im Jahr 2050 wird dieser Anteil auf etwa 30% ansteigen. Die Bevölkerung im Erwerbsalter (20 bis 64 Jährige) wird davon stark betroffen sein: Sie schrumpft von knapp 50 Millionen Men-

schen in 2013 auf etwa 38 Millionen in 2050. Das bedeutet u. a. eine Herausforderung für die Ausbildung und Verfügbarkeit von Fachkräften.

6.2 Urbanisierung

Lebten im Jahr 1900 nur 10 Prozent der Weltbevölkerung in Städten, waren es 2007 bereits 50 Prozent. Was aber häufig nicht genannt wird: Ein Drittel von ihnen lebt in Städten unter 100.000 Einwohner und nur 12% in den derzeit 28 Megastädten über 10 Mio. Einwohnern. Städte verbrauchen heute rund 75 Prozent aller Ressourcen und stoßen etwa 70 Prozent aller klimawirksamen Treibhausgase aus, obwohl sie weniger als ein Prozent der Erdoberfläche bedecken. Die UNO erwartet auch in der Zukunft eine Zunahme der weltweiten Verstädterung. Der Anteil der Stadtbevölkerung wird bis zum Jahr 2050 auf 70–75% steigen. Dann werden mindestens 3 Milliarden Menschen zusätzlich in Städten leben. Die zunehmende Urbanisierung bringt komplexe Herausforderungen mit sich. Es geht um Energie- und Wasserversorgung, Abfallentsorgung und Luftreinhaltung, um Armutsbekämpfung, Bildungs- und Gesundheitspolitik sowie um Wohnraum. Wir stehen in der Verantwortung, für die nachfolgenden Generationen einen ökologisch, ökonomisch und sozial zukunftsfähigen Lebensraum zu schaffen.

6.3 Nachhaltigkeit

Der Begriff „nachhaltig“ wird heute umgangssprachlich häufig synonym mit „dauerhaft“ und „sich langfristig auswirkend“ benutzt. Der vorliegende Beitrag verwendet den Begriff „Nachhaltigkeit“ im Sinne des Berichtes der Brundtland-Kommission [35]: *„Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“*. *„Nachhaltigkeit bezeichnet einen idealen Zielzustand, während ‚nachhaltige Ent-*

wicklung' als der Weg verstanden werden kann, gegenwärtige Prozesse ... im Hinblick auf eben jenen Zielzustand der Nachhaltigkeit zu gestalten.“ [36]. „In einer globalisierten Welt ist nachhaltige Entwicklung nur möglich, wenn sie sich auf weltweites und international vernetztes Handeln stützt.“ [37]. Nur wenn die Wechselbeziehungen und Wechselwirkungen zwischen Umweltschutz, wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit und sozialer Verantwortung ermittelt, dargestellt und beachtet werden, lassen sich langfristig tragfähige Lösungen identifizieren.

Obwohl sich Nachhaltigkeit primär auf die gesellschaftliche Entwicklung insgesamt bezieht, lässt sich das Prinzip auch auf das Bauwesen anwenden. Dabei geht es um ökologische, ökonomische und soziokulturelle Aspekte. „Ökologie“ berücksichtigt die Schonung von Ressourcen sowie den Schutz der natürlichen Umwelt. Dabei geht es um Primärenergie und Trinkwasser, Schadstoffemissionen sowie um die Gesundheit gefährdende Stoffe. Unter den „ökonomischen Aspekten“ werden vordergründig die Investitionskosten betrachtet. Langfristig treten jedoch die Betriebs- und Bauunterhaltungskosten in den Vordergrund. Die „soziokulturellen Aspekte“ beinhalten sowohl eine Außen- als auch eine Innenperspektive. Entscheidend sind einerseits die Gestalt und Ästhetik des Gebäudes, andererseits der Raum- und Bedienkomfort der Nutzer sowie die Wohn- und Arbeitsgesundheit. Das DGNB System (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen System [38]) bewertet keine einzelnen Maßnahmen, sondern die Gesamtperformance eines Gebäudes bzw. Quartiers. Ende 2015 startete die DGNB die Pilotphase einer Bewertung der gestalterischen und baukulturellen Qualität von Gebäuden anhand der Kriterien Angemessenheit, Kontext, Gestalt, Konstruktion und Grundriss.

6.4 Dekarbonisierung

Bereits in den 1930er-Jahren wurde in der Fachliteratur [39] ein Zusammenhang der beobachteten Klimaerwärmung mit dem Anstieg des CO₂ durch die Industrialisierung diskutiert. Im Jahr 1990 erschien der erste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), der zweite und dritte Bericht folgten 1995 und 2001. Inzwischen halten fast alle Klimatologen eine spürbare anthropogene Klimaerwärmung für hoch wahrscheinlich [40]. Selbst ein geringer Anstieg der Temperatur und des Meeresspiegels führt zu einer starken Steigerung der Intensität und Häufigkeit extremer Wetterereignisse wie tropischer Zyklone, Hochwasser, Dürren und schwerer Niederschläge. Davon werden viele Standorte heutiger Gebäude betroffen sein. Wenn sich die Welt bis 2050 gemäß „Business as usual-Szenarien“ des IPCC verhält, wird sich der durch Gebäude verursachte Energieverbrauch mindestens verdoppeln, der von Klimaanlage wird sich sogar verdreizehnfachen. Der Verbrauch von Ressourcen und der Ausstoß von Treibhausgasen muss vom Bevölkerungswachstum

entkoppelt werden [40]. Mehr als ein Drittel des Endenergieverbrauchs und der globalen Emissionen sind auf den Betrieb und die Nutzung von Gebäuden zurückzuführen. Zudem verbraucht der Bausektor ca. 50% aller Rohstoffe [41].

Im Dezember 2015 bekannte sich die Weltgemeinschaft auf der Weltklimakonferenz in Paris (COP 21) zu dem Ziel, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Bereits 2005 formulierte die deutsche Bundesregierung im fünften Energieforschungsprogramm: „Das Fernziel sind Nullemissionshäuser“ [42]. 2010 beschloss die deutsche Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen bis 2050 im Vergleich zu 1990 um 80 bis 95 Prozent zu vermindern. Im aktuellen Klimaschutzplan 2050 werden die langfristig geplanten nationalen Klimaschutzmaßnahmen beschrieben [43]. Damit soll es gelingen, die Leistungsfähigkeit der deutschen Wirtschaft im internationalen Wettbewerb zu sichern, Planungssicherheit für Unternehmen, private Haushalte und Verbraucher zu schaffen und gleichzeitig sicherzustellen, dass beispielsweise auf technologische Neuerungen flexibel reagiert werden kann. Erneuerbare Energien und Energieeffizienz sollen künftig den Standard bilden. Das Ziel einer weitgehenden Treibhausgasneutralität bis 2050 ist laut Bundesumweltamt [44] technisch möglich. Neben dem Energieverbrauch in der Nutzungsphase geht es auch um graue Energie in der Herstellungs-, Nutzungs- und Abbruchphase. Graue Energie ist die gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse eines Energieträgers oder eines Baustoffs aufgewendet wird. Die graue Energie eines Gebäudes kann dem Betriebsenergieverbrauch von weit über 20 Jahren entsprechen.

6.5 Globalisierung

Die Globalisierung hat in den vergangenen vier Jahrzehnten die Welt verändert. Neu sind vor allem das Ausmaß und die rasante Zunahme des globalen Beziehungsgeflechts. Die Folge ist wachsende Konkurrenz auf globalen Märkten, nicht nur für Konsumgüter, sondern auch für Planer, Zulieferer und ausführende Firmen im Bauwesen. So sind in unserer Branche Arbeitsplätze aus Industrieländern in Niedriglohnländer gewandert. Grundsätzlich bietet die Globalisierung auch uns die Möglichkeit zur Expansion, wenn wir unsere Kreativität und Innovationsfähigkeit zielgerichtet einsetzen. Wer nicht in den Preiskampf einsteigen will, muss sich von seinen Wettbewerbern differenzieren. Dies führt in der Regel zu einer Steigerung der Sortimentskomplexität. Unternehmen, die sich international ausrichten wollen, müssen ihre Produkte zudem am regionalen Klima und den jeweiligen Gesellschafts-, Wohn- und Arbeitsformen sowie an den Fähigkeiten und Kenntnissen der lokalen Baupraktiker ausrichten. Dies führt zu einer immer stärkeren Fragmentierung der Märkte. Aus falsch verstandener Marktnähe und

einem zu sehr auf individuelle Lösungen ausgerichteten Produktprogramm resultieren eine unkontrollierte Variantenvielfalt und der Verlust von Skaleneffekten.

6.6 Digitale Transformation

Die digitale Transformation wird unser Arbeitsleben massiv beeinflussen, von der Logistik über die Produktion bis hin zu Dienstleistungen (Tabelle 8). Der Trend zum Onlineshopping führte bereits dazu, dass Kunden immer mehr im Internet bestellen. Wo früher ganze Lkw-Ladungen an wenige Orte geliefert wurden, müssen heute viele kleine Pakete an viele Adressen verteilt werden. Mit der Vernetzung können sich die Chancen der Menschen und Unternehmen auch verbessern. Gut gestaltete Änderungsprozesse können dazu führen, dass die Lebensqualität erhöht und Ressourcen besser genutzt werden. Ob uns die Digitalisierung vor Probleme

Tabelle 8. Herausforderungen und Möglichkeiten der digitalen Transformation (in Anlehnung an [45])

digitale Daten	elektronische Erhebung und Auswertung von Daten, um in allen Stufen der Wertschöpfung neue Erkenntnisse zu gewinnen und zu nutzen (dabei die Datensicherheit berücksichtigen!)
Netzwerke	Vernetzung und Synchronisation bislang voneinander getrennter Aktivitäten (innerhalb der Wertschöpfungskette und innerhalb des Gebäudes bzw. des Quartiers; z.B. über Cloud-Computing-Lösungen für kollaborative Prozesse)
mobiler Zugriff	Zugriff auf das Internet und interne Netze bietet bisher ungeahnte Potenziale in der Planung, Ausführung und Nutzung von Gebäuden
Automation	Einsatz neuer Technologien schafft autonom arbeitende, sich selbst organisierende Systeme („Smart Home“, „Smart Production“ und „Smart Construction“ ...)

Tabelle 9. Ursachen der materiellen Alterung (in Anlehnung an [47])

Kategorie	Faktor	Subfaktoren
Bauteilqualität	Konstruktionsqualität	Konstruktiver Schutz, Planungsqualität, Komplexität, Qualitätssicherung
	Komponentenqualität	Produktqualität, Komplexität, Nachhaltigkeit
	Ausführungsqualität	Projektmanagement, Einbaubedingungen, Komplexität, Qualitätssicherung
Umgebungsbedingungen	raumseitige Bedingungen	Raumluftbedingungen, Temperatur, chemischer Angriff, biologischer Angriff
	umgebungsseitige Bedingungen	Standort, Sonne, Feuchtigkeit, Temperatur, biologischer Angriff, Erschütterungen, Wind
Gebrauchsbedingungen	Nutzungsintensität	Mechanische Einflüsse, Nutzungsart, Verschmutzungs-/Reinigungsintensität, optischer Anspruch
	Instandhaltungsniveau	Instandhaltungszyklus, Instandhaltungsqualität, Gebäudedokumentation, Zugänglichkeit

stellt oder uns Chancen liefert, hängt davon ab, wie wir uns selbst frühzeitig auf diese Entwicklungen einstellen, ob wir zukunftsfähige Konzepte entwickeln und schließlich, ob wir diese konsequent umsetzen.

7 Wesentliche Aspekte zukunftsfähiger Gebäude und Gebäudehüllen

Es lässt sich schon heute absehen, dass die in Kapitel 6 vorgestellten Schlüsselfaktoren der künftigen Entwicklung auch im Bauwesen umfangreiche Veränderungen verursachen. In der Folge werden von Unternehmen langfristig angelegte Strategien und entschiedenes Handeln erwartet. Die Zementierung althergebrachter Strukturen ist keine erfolgversprechende Strategie, um sich auf den Wandel einzustellen. Vorausschauende Planung und die gezielte Eröffnung neuer technischer Möglichkeiten sind wichtige Bausteine der Gestaltung einer lebenswerten Zukunft. Nachfolgend werden die wesentlichen Aspekte zukunftsfähiger Gebäude und Gebäudehüllen vorgestellt.

7.1 Optimierung der Funktion und Gestaltung von Gebäudehüllen

Heute nehmen Gesetze, Normen und Regeln auf das Bauen entscheidenden Einfluss, auch unabhängig von den Forderungen des Bauherrn. Zukunftsfähige Konzepte erfordern darüber hinaus die Optimierung der Funktion und der Gestaltung von Gebäuden und Gebäudehüllen.

Praktische Qualität

Die praktische Qualität von Gebäudehüllen lässt sich in Funktions- und Lebenszyklusaspekte unterteilen. Dabei geht es einerseits um die im Kapitel 4 vorgestellten Funktionen, andererseits um wirtschaftliche und ökologische Aspekte von Gebäudehüllen. Entscheidend ist auch deren Brauchbarkeit, Beherrschbarkeit und Haltbarkeit sowie Pflege und Instandhaltung. Gerade bei

hochwertigen Immobilien stellen darüber hinaus der Raumkomfort und die Sicherheit der Nutzer ein wesentliches Qualitätskriterium dar. Man sollte sich darüber im Klaren sein, dass kein Gebäude vor dem Älterwerden bewahrt werden kann [46]. Tabelle 9 zeigt – in Anlehnung an [47] – die Ursachen der materiellen Alterung von Gebäudehüllen. Wichtig sind diesbezüglich die für den Standort spezifischen makro- und mikroklimatischen Randbedingungen. Eine sorgsame und sachgemäße Nutzung, eine regelmäßige Reinigung und Wartung sowie Instandsetzungsarbeiten können nur das materielle Altern verlangsamen. Unabhängig davon kann ein Gebäude aber auch immateriell altern. Möglicherweise genügt es nicht mehr den heutigen Komfort- oder Qualitätsansprüchen. Vielleicht wird es nicht mehr den aktuellen Vorschriften gerecht. Veränderte Anforderungen können auch aus einer Umnutzung, also einer Änderung der Zweckbestimmung eines Gebäudes resultieren.

Gestalterische Qualität

Die gestalterische Qualität von Gebäuden lässt sich – in Anlehnung an die an der Offenbacher Hochschule für Gestaltung in den 1970er-Jahren entwickelte Design-Theorie (heute als „Offenbacher Ansatz“ bekannt) [48, 49] – durch formalästhetische und symbolische bzw. soziokulturelle Aspekte beschreiben (Bild 14). Diese sind auf der Betrachter- bzw. Besitzerebene sinnlich bzw. gesellschaftlich wahrnehmbar. Bei den formalästhetischen Aspekten geht es um gestalterische Eigenschaften von Gebäudehüllen und deren ästhetische Ordnung (Bild 15). Die Wirkung symbolischer Aspekte hängt stark vom soziokulturellen Hintergrund ab. Dieser kann in drei Ebenen gegliedert werden: Die kulturelle Ebene (Zeitgeist und gesellschaftliche Leitbilder sowie herrschende ästhetische Normen), die soziale Ebene (Status, Prestige) sowie die persönliche Ebene (Gefühlsbindung, subjektive Sicht).

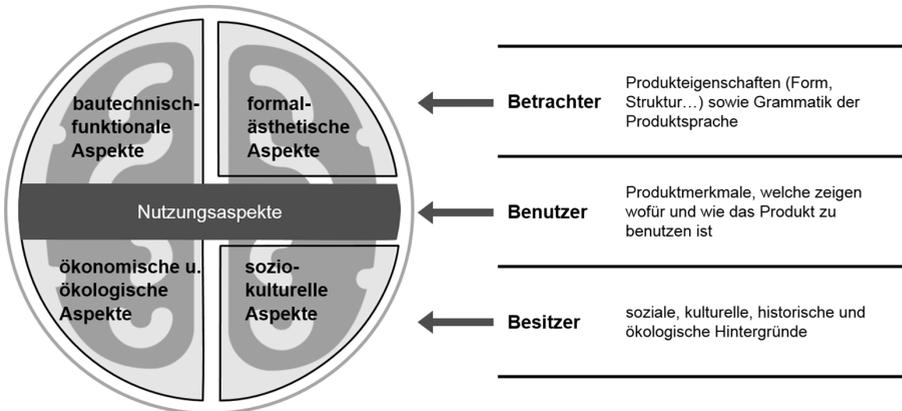
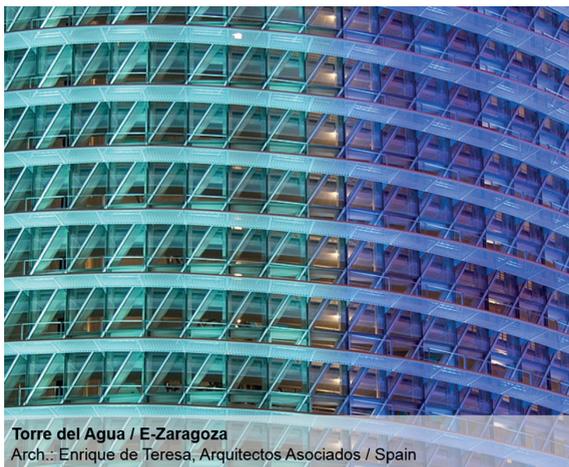


Bild 14. Optimierung der Qualität von Gebäudehüllen (in Anlehnung an [49])



Torre del Agua / E-Zaragoza
Arch.: Enrique de Teresa, Arquitectos Asociados / Spain

Gestalt-Elemente:

- Form
- Material / Materialmix
- Oberfläche (Textur, Struktur)
- Farbe
- Transparenz / Transluzenz
- Fugen / Glashalterungen

Gestalt-Aufbau:

- Komplexität
- Tiefe / Plastizität
- Aufteilung u. Gliederung der Flächen
- Ordnung (Takt, Rhythmus, Raster)

Gestalt-Konzept:

- additiv, integrativ oder integral

Bild 15. Formalästhetische Aspekte bei Gebäudehüllen (Quelle: Schüco)

Nutzungsqualität

Die Nutzungsqualität spielt sich an der Schnittstelle zwischen funktioneller Effizienz und gestalterischer Eleganz sowie zwischen Technik und Mensch ab (Bild 14). In der Gebäudehülle geht es diesbezüglich nicht nur um die Bedienbarkeit großer Öffnungselemente, sondern grundsätzlich um das Ausmaß, in dem ein „System“ durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Kontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv (erfolgreich und fehlerfrei), effizient (mit geringem Aufwand) und zufriedenstellend zu erreichen. In unmittelbarem Zusammenhang damit steht die Nutzerakzeptanz. Aus diesem Grund wird bei Gebäuden mit Automation immer häufiger die Möglichkeit des individuellen Nutzereingriffs berücksichtigt.

Ganzheitliche Optimierung der Funktion und Gestaltung

Im Sinne einer ganzheitlichen Optimierung besteht eine wesentliche Herausforderung darin, praktische und gestalterische Qualität sowie Nutzungsqualität in Einklang zu bringen. Und das in einem Umfeld, in dem Anforderungen einem permanenten Wandel unterliegen. Dabei geht es auch um Baukultur. Im Gegensatz zu Baukunst beinhaltet Baukultur sämtliche Elemente der gebauten Umwelt. Sie geht über die architektonische Gestaltung von Gebäuden weit hinaus und umfasst beispielsweise auch den Städtebau [50]. Gute Baukultur weist über die o. g. praktische und gestalterische Qualität sowie Nutzungsqualität hinaus folgende Merkmale auf: Sie ist im menschlichen Maßstab greifbar und benutzbar, geplant mit Sorgfalt bis ins Detail (Detaildichte und -vielfalt sowie gestalterische Gemeinsamkeiten). Zudem wird sie von den heutigen und künftigen Generationen als lebenswert empfunden. Dies bedingt eine ganzheitliche Optimierung im räumlichen und baugeschichtlichen Kontext. So stützt sich Baukultur – als erweiterter Kulturbegriff – auf die Geschichte und Tradition eines Landes oder einer Region. Da Gebäude im Vergleich zu Kleidung und Gebrauchs-

gegenständen meist eine lange Lebensdauer aufweisen, sollten formelle Übertreibungen und eine „modische“ Gestaltung grundsätzlich kritisch betrachtet werden.

7.2 Methodische Grundlagen der Konzeption und Entwicklung

Aus einer Idee wird nur dann eine Innovation, wenn die Beweggründe und die Zufriedenheit der relevanten Zielgruppe berücksichtigt werden. In der Immobilien- und Baubranche handelt es sich um sehr heterogene Zielgruppen, welche in der Planungs-, Ausführungs- und Nutzungsphase des Gebäudes von Bedeutung sind. Es geht um Investoren, Architekten und Fachplaner, Generalunternehmern und Fachfirmen (z. B. Metallbauer) sowie Nutzer des Gebäudes. Nachfolgend werden methodische Grundlagen der Konzeption und Entwicklung zukunftsfähiger Gebäude und Gebäudehüllen vorgestellt.

Design-Thinking-Methode

Bei der Design-Thinking-Methode [51] geht es darum, Lösungen zu finden, die sich am Nutzer orientieren und dessen Bedürfnisse befriedigen. Die Methode basiert darauf, dass interdisziplinäre Teams in einem die Kreativität fördernden Umfeld zusammenarbeiten, die Bedürfnisse und Motivationen von Menschen verstehen sowie darauf aufbauend Konzepte entwickeln, die dann aus unterschiedlichen Perspektiven geprüft und entsprechend optimiert werden. Entscheidend ist das möglichst frühe „Prototyping“. Dabei wird die Idee veranschaulicht und getestet. Auf Basis der Erkenntnisse wird das Konzept verbessert und solange verfeinert, bis ein optimales, nutzerorientiertes Produkt entstanden ist.

Das Kano-Modell

Die für die Kundenzufriedenheit relevanten Merkmale lassen sich nach dem Kano-Modell [52] in drei Kategorien differenzieren: Basis-, Leistungs- und Begeisterungsfaktoren (Bild 16):

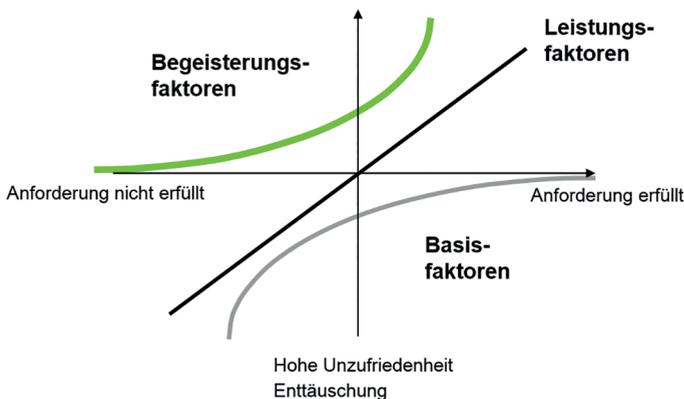


Bild 16. Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit (in Anlehnung an [52])

- Die Erfüllung von *Basisfaktoren* ist für den Kunden eine Selbstverständlichkeit. Mängel an diesen unausgesprochenen Erwartungen (z. B. Brauchbarkeit, Beherrschbarkeit und Haltbarkeit sowie Pflege und Instandhaltung von Gebäudehüllen) verursachen bei Planern, ausführenden Firmen, Nutzern und Betreibern Frust.
- Dagegen werden *Leistungsfaktoren* (beispielsweise Energieeffizienz und erhöhte technische Anforderungen, z. B. Schallschutz, Beschusshemmung usw.) explizit gefordert und detailliert spezifiziert. Bei hoher Ausprägung werden Leistungsfaktoren mit entsprechender Kundenzufriedenheit honoriert.
- Das wirkliche Differenzierungsmerkmal drückt sich in den unausgesprochenen *Begeisterungsfaktoren* aus. Kunden lassen sich durch Produktmerkmale, die sie nicht erwarten, die jedoch ihren Bedarf oder Geschmack besonders treffen, begeistern. Da es sich meist um die subjektive Wirkung symbolischer Funktionen (z. B. Status und Prestige) handelt, welche stark vom soziokulturellen Hintergrund der Besitzer und Nutzer abhängen, muss hier sehr zielgruppenspezifisch gedacht werden. Es geht um Individualqualität, welche zudem rein emotionalen Ursprungs, trendgebunden und schwer vorhersagbar ist.

Innovations- und Technikfeindlichkeit?

Pink [53] bemängelt angesichts der rasanten Anwendungs- und Materialentwicklung in anderen Branchen das zögerliche Verhalten bei Bauprodukten. Wollen die Kunden lediglich bewährte Qualität und nicht (riskante) Innovationen? Sind die Deutschen vielleicht sogar innovations- und technikfeindlich? Mehrere wissenschaftliche Studien, z. B. [54], kamen zu dem Ergebnis, dass bei uns keine generelle Technikfeindlichkeit vorherrscht. Vielmehr zeigt sich, dass etwa ein Drittel der befragten Personen technikbegeistert ist, rund die Hälfte Technik gegenüber ambivalent eingestellt ist und lediglich 20% der Befragten sich ablehnend äußerten.

Die Einstellung zur Technik wird durch drei Faktoren bestimmt [54]: Durch

- den wahrgenommenen Nutzwert,
- die emotionale Beurteilung der Technik,
- die persönliche Nähe zur Technik.

„*Nicht-Verstehen erzeugt Unsicherheit, Unsicherheit erzeugt Unwillen, Unwissen und Unwille erzeugen Feindbilder und/oder Ängste*“ [55]. Technik, die man schnell „begreift“ und von der man unmittelbar profitiert, wird hingegen bereitwillig angenommen. Je höher der empfundene Nutzen einer Technologie und je einfacher die Bedienbarkeit ist, desto größer ist die Akzeptanz und desto eher ist der Anwender bereit, sie zu nutzen.

7.3 Nachhaltigkeitsstrategien

Das Ziel einer Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen Wirtschaft und Gesellschaft bis zur Mitte des Jahrhunderts ist eine große Herausforderung – aber erreichbar [44]. Vor diesem Hintergrund lassen sich die in die öffentliche Diskussion eingebrachten Lösungsansätze drei unterschiedlichen Strategien zuordnen: der Effizienz-, Konsistenz- und Suffizienzstrategie (Bild 17).

Effizienz

Effizienz meint die optimale Umwandlung und Nutzung der begrenzten Ressourcen. Es geht darum, „die Dinge richtig zu tun“. Im Umfeld des nachhaltigen Bauens bedeutet dies, das Verhältnis von Nutzen (z. B. Raumkomfort und Sicherheit) und Aufwand (insbesondere Energie, Material, Zeit und Geld) zu optimieren [46]. Innerhalb des Bauwesens liegen zwei wesentliche Lösungsansätze in ressourceneffizienten Gebäuden und in einem möglichst hohen Anteil erneuerbarer Energien. Dabei darf graue Energie nicht vergessen werden. Zur Steigerung der Materialeffizienz ist der Materialverbrauch für den Bau, die Wartung, Instandhaltung und Modernisierung zu minimieren. Potenzial findet man beispielsweise bei der Lagerhaltung, bei der Verpackung und beim Transport. In der Bauphase können

Nachhaltigkeit	Aspekte		
	Ökologie	Ökonomie	Soziokulturelles
Strategien			
Effizienz Aufwand verringern			
Konsistenz Nebenwirkungen verringern			
Suffizienz Bedarf verringern			

Bild 17. Nachhaltigkeitsaspekte und -strategien (Quelle: Schüco)

Überschüsse an Baumaterialien mittels genauer Planung und konsequenter Organisation verringert werden. Durch geeignete Maßnahmen zur Sicherung der Qualität in der Entwicklung, Planung, Fertigung und Baustellenmontage (vgl. Tabelle 9) lässt sich darüber hinaus eine aus Baumängeln resultierende Materialverschwendung minimieren.

Konsistenz

Konsistenz setzt beim Schließen von Stoff- und Energieströmen an. Wegweisend war diesbezüglich das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz. Die Novelle von 2012 [56] ergänzte die abfallwirtschaftliche Zielhierarchie. Gemäß den ökologischen Bestimmungen der EU-Bauproduktenverordnung von 2013 [57] müssen Bauwerke so entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden. In der Entwicklung zukunftsfähiger Gebäudehüllen sollten deshalb folgende Grundsätze Beachtung finden:

- Über die Rohstoffe der einzelnen Komponenten sind eindeutige Informationen langfristig zuordenbar zu hinterlegen.
- Konstruktiv ist auf die möglichst einfache Trennung der Komponenten und Rückgewinnung der Rohstoffe zu achten.
- Bezüglich der Trennung der Komponenten und Rückgewinnung der Rohstoffe sind energieeffiziente Technologien zu definieren.
- Für nicht mehr nutzbare Rohstoffe ist ein nachhaltiger Entsorgungsweg zu definieren.

In der Übergangszeit kann „Urban Mining“ [58] einen nachhaltigen Ansatz bieten. Der Begriff kommt aus dem Englischen und steht für Bergbau in städtischen Regionen. Damit ist gemeint, (Sekundär-)Rohstoffe einer Stadt wieder zu verwenden. Dann übernimmt die Stadt die Rolle eines Bergwerkes.

Suffizienz

Suffizienz setzt beim Verhalten des Einzelnen an. Demnach soll durch einen genügsamen persönlichen Lebensstil der Verbrauch an endlichen Ressourcen (Energie, Rohstoffe und Fläche) auf ein zukunftsverträgliches Maß reduziert werden [59].

Ziel ist ein kultureller Wandel, nachdem immaterielle Werte höher als materielle geschätzt werden [60]. Modischer und technischer Schnickschnack sollte in Gebäudehüllen eliminiert werden.

Effektivität

Entscheidend ist letztendlich aber die Effektivität. Wir sollten „die richtigen Dinge tun“! Falsche Dinge effizient zu erledigen, führt nicht zum gewünschten Ziel. Bei der Entwicklung und Anwendung zukunftsfähiger Gebäudehüllen ist das Motto: „So viel Technik wie nötig, aber so wenig Technik wie möglich“. Zudem sollte ein Umdenken in Richtung Dauerhaftigkeit und Werterhaltung stattfinden. Aus diesem Grund erreicht man Nachhaltigkeit wahrscheinlich nur unter Berücksichtigung von Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Da sich

die Anforderungen und die technischen Möglichkeiten immer schneller ändern, gewinnt in der Produktentwicklung zudem die Flexibilität der Fassade zwangsläufig an Bedeutung. Gerade hierbei ist das Prinzip der Effektivität zu beachten.

8 Konzeptionelle und funktionale Aspekte zukunftsfähiger Gebäudehüllen

8.1 Bedeutung der Gebäudehülle

Obwohl der Anteil der Gebäudehülle an den Investitionskosten des Gebäudes üblicherweise nur etwa zehn bis zwanzig Prozent beträgt, sind ihre Auswirkungen auf die ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Eigenschaften des Gebäudes sowie die Wechselwirkungen vielfältig. Sie beeinflusst nicht nur das äußere Erscheinungsbild, sondern beispielsweise auch die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Gebäudes sowie den Schutz von Leben und Sachwerten. Darüber hinaus hängt die Dimensionierung bzw. sogar die prinzipielle Notwendigkeit von Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung ganz wesentlich von der energetischen Qualität der Gebäudehülle ab. In jedem Fall werden durch an die geplante Nutzungsdauer und die klimatischen Bedingungen angepasste Bauweisen und Baumaterialien alle späteren Phasen des Gebäudelebenszyklus positiv beeinflusst. Letztendlich ist die Gebäudehülle ein wesentlicher Baustein eines klimaneutralen Gebäudes.

Nachfolgend werden konzeptionelle und funktionale Aspekte zukunftsfähiger Gebäudehüllen vorgestellt. Diese gehen über die in den Abschnitten 8.3 bis 8.5 beschriebenen konstruktiven, funktionellen und konzeptionellen Grundlagen hinaus. Insbesondere werden die oben beschriebene ganzheitliche Optimierung der Funktion und Gestaltung und die zukunftsfähigen methodischen Grundlagen der Konzeption und Entwicklung berücksichtigt. So wird auch die Frage gestellt, welche Rolle künftig High-Tech- und Low-Tech-Konzepte spielen werden.

8.2 Energie effizient gewinnen und nutzen

Der in Deutschland im Juni 2011 gefasste Beschluss zur Energiewende setzt darauf, dass Energie effizient gewonnen und genutzt wird. Es ist technisch prinzipiell machbar, energetisch ineffiziente Gebäude mittels zentral erzeugter „grüner“ Energie zu versorgen. Dieses Konzept würde jedoch vermutlich an der gesellschaftlichen Durchsetzbarkeit scheitern [61]. Windräder und PV-Parks verändern das Landschaftsbild nämlich genauso wie Pumpspeicherkraftwerke, die Täler überfluten. Zudem müssten weitere heutige Acker- und Waldflächen für den Anbau von Energiepflanzen genutzt werden. Ein sinnvollerer Ansatz besteht darin, den Energiebedarf durch eigene Energieerträge zu decken

[61]. In diesem Zusammenhang sind nach anfänglichen Experimentalbauten mittlerweile auch reale Null- und Plusenergiehäuser im Betrieb. Erste Erfahrungen aus der Praxis liegen vor [62]. So sind energieautarke Gebäude, welche ausschließlich auf gebäudehüllen-integrierter Solarthermie und Photovoltaik setzen, in der Regel wirtschaftlich nicht umsetzbar. Unabhängig davon müssen die Gebäudeausrichtung und -form sowie die Gebäudehülle bei derartigen Konzepten vorrangig nach solaren Gesichtspunkten optimiert werden. Die nötigen Voraussetzungen können – zumindest im Gebäudebestand – nicht geschaffen und/oder gestalterisch nicht vertreten werden [61]. Das Problem der Wirtschaftlichkeit könnte durch Netzkopplung und Einspeisung von Stromüberschüssen gelöst werden. Eine steigende Zahl derartiger Plusenergiehäuser verursacht jedoch stark schwankende Lastprofile, die bezüglich der winterlichen Lastdeckung und der Netzstabilität Probleme hervorrufen können. Diese lassen sich umgehen, wenn als zweiter Stromerzeuger gebäudeeigene Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung vorgesehen werden [61]. Vorteilhaft ist – insbesondere bei einer Mischung von Neu- und Altbau sowie Wohnungs- und Nichtwohnungsbau – ein energetischer Verbund auf Quartiers-ebene [63, 64]. Dann stellt ein ausgeklügeltes Energiemanagement sicher, dass zum richtigen Zeitpunkt

- thermische und elektrische Energieerzeuger herunter- und hochgefahren
- Energiespeicher beladen und entladen
- Energieverbraucher an- und abgeschaltet

werden. Da aber weder Biomasse unbegrenzt zur Verfügung steht, noch andere erneuerbare Energien uneingeschränkt vor Ort verfügbar gemacht werden können, muss das oberste Ziel optimale Effektivität („die richtigen Dinge tun...“) unter Beachtung architektonischer Gegebenheiten sein [61]. Besonderes Potenzial bieten Maßnahmen innerhalb der Gebäudehülle, mittels derer einerseits Niveaudifferenzen zwischen dem lokalen Außenklima und einem behaglichen Raumklima abgebaut und andererseits kurzzeitige Schwankungen des Wetters gedämpft bzw. geglättet (d. h. Extremwerte gekappt) werden. Es existieren bereits zahlreiche innovative Lösungsansätze, welche über die in Kapitel 4 und 5 beschriebenen hinausgehen. Exemplarisch wird die Studie „plusFASSADEN“ [65] genannt. Die zum Teil hocheffizienten Dämm- und Speichertechnologien beruhen häufig auf der Vakuum- oder Nanotechnologie bzw. auf Phasenwechselmaterialien (PCM). Die Marktfähigkeit muss jedoch in einigen Fällen noch nachgewiesen werden. Thermische Speichervorgänge werden tendenziell eher kurzzeitig (Zeithorizont zwischen einem Tag und maximal einer Woche) und dezentral innerhalb des einzelnen Gebäudes stattfinden (Bild 18).

Man kann versuchen, durch Wärmespeicherung kurzzeitige Schwankungen der Außenbedingungen komplett zu glätten, um raumseitig ein möglichst konstantes, behagliches Raumklima zu erzeugen. Dies ist in den meisten Fällen jedoch nicht wirtschaftlich möglich und

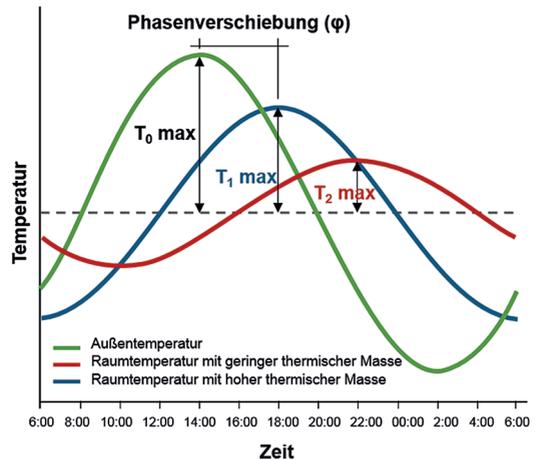


Bild 18. Dämpfung kurzzeitiger Schwankungen des Wetters mittels Speichermassen (Quelle: Schüco)

zudem nicht die energiesparendste Methode. Alternativ lassen sich unterschiedliche Strategien bezüglich der Dämpfung verfolgen. So kann man die Dynamik nach innen

- ungedämpft durchschlagen lassen, ohne Rücksicht auf Raumkomfort,
- (un)gedämpft durchschlagen lassen, so lange die Komfortbedingungen im Innenraum einigermaßen eingehalten werden,
- gedämpft durchschlagen lassen, aber nur innerhalb des Komfortbereiches.

Neben wärmespeichernden Bauteilen in der Gebäudehülle werden insbesondere Gebäudespeichermassen über situationsgerechte natürliche Lüftung gezielt aktiviert. Mit speziellen luft- oder wasserdurchströmten thermischen Speichern lassen sich die Erträge von Thermokollektoren zeitversetzt nutzen.

8.3 Adaptive Gebäudehüllen

Neben den in Abschn. 5.2 vorgestellten starren (Funktion nicht beeinflussbar) und dynamischen Gebäudehüllen (Funktion durch den Nutzer beeinflussbar) gibt es auch noch adaptive. Adaptive Systeme verändern in Echtzeit ihre Durchlässigkeit für Sonne, Licht, Luft, Wärme, Feuchte oder Schall in Abhängigkeit äußerer Einflüsse [66, 67]. Viele Entwicklungen sind bionisch inspiriert [68]. Adaptive Systeme lassen sich in zwei Kategorien eingliedern [69]:

- selbstregierende Elemente (verändern ihre Eigenschaften in Verbindung mit Änderungen der physikalischen oder chemischen Umgebungsgrößen; z. B. thermochrome und photoelektrochrome Systeme)
- fremdgesteuerte (induziert reagierende) Elemente (verändern ihre Eigenschaften durch die Einwirkung einer Steuerung oder Regelung; z. B. elektrochrome und gasotrope Systeme).

Die Systeme der zweiten Kategorie bestehen aus Sensoren und Aktoren sowie einer Steuerung bzw. Regelung:

- Sensoren erfassen äußere Einflüsse (i. d. R. Umgebungs- und Raumbedingungen) und leiten diese weiter.
- Aktoren wandeln Eingangsgrößen in andersartige Ausgangsgrößen um, mit dem Ziel, eine gewünschte Aktion auszulösen.
- Die Steuerung bzw. Regelung hat die Aufgabe Signale der Sensoren zu sammeln, diese ggf. über vorgegebene Algorithmen zu verarbeiten und eine angemessene Reaktion an die Aktoren zu senden.

Das System ist im Idealfall „lernfähig“:

- Es berücksichtigt beispielsweise rückblickend Betriebsverfahren (Monitoring) und voraussichtlich die Wettervorhersage.
- Es bewältigt auch unerwartete und vom Entwickler nicht berücksichtigte Situationen.
- Es antizipiert künftige Wirkungen von Einflüssen und mögliche Zustände sowie das spezifische Benutzerverhalten.
- Der Nutzer kann darüber hinaus individuell Komfortkriterien und Szenarien definieren.

Zu den fremdsteuerten Systemen zählen im weitesten Sinn auch mechatronische Systeme (Bild 19) mit elektromechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Aktoren, welche bewegliche Bauteile betätigen [70]. Seit vielen Jahren gibt es motorisch angetriebene Fenster und Lüftungsklappen, Sonnenschutz- und Tageslichtsysteme sowie Einrichtungen zur temporären Wärmedämmung von Gebäudehüllen. In der Praxis hat es sich hier als vorteilhaft erwiesen, dem Nutzer nur die Einflussnahme zu ermöglichen, solange Schäden (z. B. Zerstörung einer Außenjalousie bei Sturm) ausgeschlossen werden können.

Im Rahmen der digitalen Transformation entstehen auch Produkte, die sich nicht mehr eindeutig einer der Kategorien „analog“ (bzw. rein physisch) oder „digital“ zu-

ordnen lassen [45]. Dabei verschmelzen die digitale und reale Welt. Es geht um Lösungen, die ohne die Integration digitaler Technologien nicht realisierbar wären. So beinhalten die einzelnen Komponenten Identifikatoren, Sensoren, Kommunikationssysteme und die dazugehörige Software.

Einige Konzepte gehen noch einen Schritt weiter. Sie versuchen mit adaptiven Gebäudehüllen nicht nur den Innenraum, sondern auch das städtische Umfeld positiv zu beeinflussen. Wie dies mittels Fassadenbegrünung gelingen kann zeigt eine Studie [71].

8.4 Kognitive Gebäudekonzepte

Zu den kognitiven Fähigkeiten des Menschen zählen u. a. die Wahrnehmung und Erinnerung, das Lernen und Problemlösen sowie die Erkenntnis- und Informationsverarbeitung. Kognitive Fähigkeiten werden auch in der Künstlichen-Intelligenz-Forschung untersucht. Im Rahmen der digitalen Transformation entstehen derzeit auch Konzepte für kognitive Gebäude. Adaptive Gebäudehüllen sind ein wesentlicher Bestandteil derartiger Konzepte. Optimale Ergebnisse liefert ein Gewerke übergreifender Betrieb der Komponenten der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik (Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Beleuchtungstechnik) [72]. Dann kommunizieren deren vernetzbare Komponenten über das „Internet der Dinge und Dienste“. Betriebszustände von Gebäuden werden erfasst und automatisch optimiert, gewünschte Korrekturen am Raumklima per Smartphone an die Gebäudeleittechnik übermittelt. Nötige Wartungsarbeiten werden von den betroffenen Bauteilen eigenständig und vorbeugend an die zuständige Organisation gemeldet. Darüber hinaus kann es vorteilhaft sein, den momentanen Zustand einzelner Komponenten über eingebettete Sensoren (z. B. für Feuchte, Druck oder Temperatur bzw. Spannungen oder Dehnungen) zu überwachen. Dann melden die

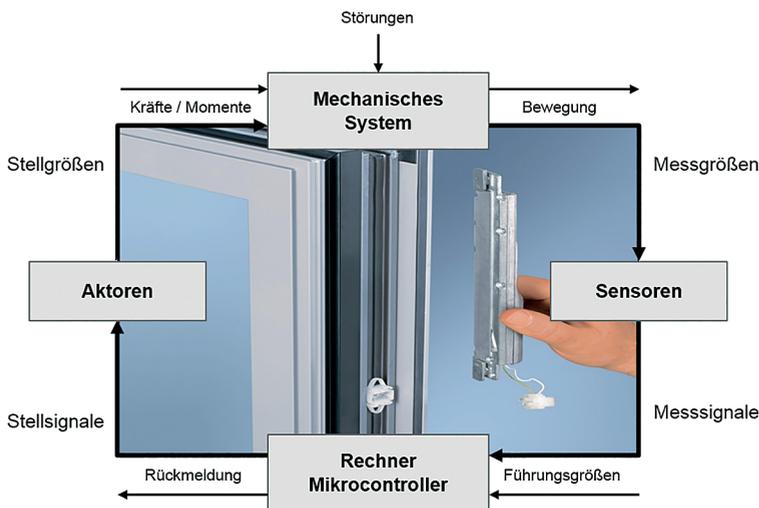


Bild 19. Aufbau mechatronischer Systeme (Quelle: Schüco)

betroffenen Bauteile eigenständig nötige Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten (einschließlich der benötigten Ersatzteile) an die zuständige Organisation – möglichst sogar vorbeugend. Künftige kognitive Gebäudekonzepte integrieren auch noch die Sicherheitstechnik. Spätestens dann wird in Gebäuden die Bedeutung cyber-physischer Systeme wachsen.

8.5 Konvergenz der Gewerke

Wenn sich die o. g. Trends fortsetzen, wird das Thema Konvergenz das Zusammenwachsen von Branchen und das Verschwinden der bisher klar umrissenen Grenzen, innerhalb derer sich einzelne Unternehmen bisher positionierten – auch im Fenster- und Fassadenbau an Bedeutung gewinnen. Die Konvergenz von Sicherheitstechnik und Gebäudeautomation führt zu integrierten Systemen für die Zutrittskontrolle und Videoüberwachung sowie Brand- und Einbruchmeldung. Interessante Effekte verspricht auch die medientechnische Aktivierung der äußeren und inneren Oberflächen von Gebäudehüllen im Sinne der Informations- und Kommunikationstechnologien. Die zunehmende funktionale Konvergenz führte in den vergangenen Jahren zu erhöhter Komplexität in den Wertschöpfungsprozessen. Hersteller von Gebäudehüllen wurden mit den regulatorischen Anforderungen ihnen fremder Gewerke konfrontiert. Dabei ergeben sich heute häufig auch unklare Verantwortlichkeiten.

8.6 High-Tech oder Low-Tech?

Die Frage wurde bereits im Jahr 1998 von *Daniels* aufgeworfen [73]. Und die Antwort auf diese Frage wurde bereits im Kapitel 7 gegeben: Wir sollten die richtigen Dinge tun! So viel Technik wie nötig, aber so wenig Technik wie möglich. Zudem sollte ein Umdenken in Richtung Dauerhaftigkeit und Werterhaltung stattfinden.

9 Produktarchitektonische Aspekte zukunftsfähiger Gebäudehüllen

Nachfolgend werden produktarchitektonische Aspekte bei Gebäudehüllen vorgestellt, mit denen der zunehmenden Komplexität entgegengewirkt werden kann. Es geht dabei um eine die Gewerke übergreifende Systemtechnik sowie um eine konsequente Modularisierung der Produktstruktur.

9.1 Herausforderung Komplexität

Derzeit versucht man die Gewerke Fassade, Rohbau, Gebäudetechnik und Innenausbau im Bauprozess zur Minimierung von Unklarheiten und zur Klärung von Verantwortlichkeiten möglichst zu entkoppeln. Ein gutes Beispiel ist der Skelettbau mit vorgehängter Fassade. Dies muss aber bei den künftigen Gebäudekonzepten

(vgl. Kap. 8) nicht immer die beste Lösung sein, ganz besonders mit Blick auf die zunehmende Konvergenz der Gewerke, mit ihren naturgemäß unterschiedlichen Innovations- und Produktlebenszyklen. Solange das kleinteilig organisierte Bauwesen bei seinen heutigen Insellösungen bleibt, ergeben sich daraus zwangsläufig unklare Verhältnisse und Improvisation in der Planung und Ausführung sowie im Betrieb. Hier kann die digitale Transformation helfen. Sie bietet neue Möglichkeiten zur zielgerichteten Verknüpfung einzelner Komponenten der unterschiedlichen Gewerke.

Ein weiterer Komplexitätstreiber ist die zunehmende Variantenvielfalt. Im Rahmen dieses Beitrags werden unter dem Begriff Varianten Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion verstanden, wobei sich eine Variante von der Grundauführung in wenigstens einem Element und einer Merkmalsausprägung unterscheidet. Während bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts die Möglichkeit, Massenprodukte mit einigen wenigen Varianten in großen Stückzahlen herzustellen, einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für Unternehmen darstellte, hat sich das Bild in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert [74]. So hat die Fokussierung auf Standardprodukte zwangsläufig einen Kostenwettbewerb und damit – zumindest bei mitteleuropäischen Firmen mit hohem Personalkostenanteil – häufig einen Verlust an Marktanteilen zur Folge. Dagegen steht bei zunehmender Individualisierung die Kostensteigerung meist in keinem sinnvollen Verhältnis zum erzielten Kundennutzen. Die Handhabung einer ausufernden Variantenvielfalt stellt auch im Bauwesen alle Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette – Entwickler, Planer und Zulieferer sowie ausführende Unternehmen und Wartungsfirmen – vor große Herausforderungen. Ein zentraler Wettbewerbsfaktor und damit eine der vordringlichsten Aufgaben besteht darin, die markt- und wettbewerbsbedingte Variantenvielfalt und Sortimentskomplexität in Bezug auf Produkte und Prozesse intelligent zu beherrschen. Erfolgsversprechend ist die Übertragung von Erfahrungen aus der Automobilindustrie auf das Bauwesen. Es geht dabei um die Entkopplung externer und interner Vielfalt. Gefragt sind gerade hier hocheffiziente Planungs- und Bauprozesse, welche die praktische und gestalterische Qualität der Gebäudehülle nicht außer Acht lassen und die heutigen Möglichkeiten der digitalen Transformation sowohl projektspezifisch, als auch projektanonym nutzen. Nachfolgend werden produktarchitektonische Aspekte zukunftsfähiger Gebäudehüllen vorgestellt.

9.2 Gewerke übergreifende Systemtechnik

Vor dem oben dargestellten Hintergrund versprechen Systemlösungen, bei denen die Schnittstellen und Verantwortlichkeiten schon im Vorfeld geklärt sind, einen echten Fortschritt. Die Anwendung des Prinzips der Systemtechnik (vgl. 5.1) auf Einzelteile, Baugruppen und Module anderer Gewerke reduziert auch die Teile- und Variantenvielfalt. Auf diese Weise lassen sich Ska-

leneffekte erschließen und somit Kosten senken. Es gilt, die einzelnen Komponenten entsprechend dem Baukastenprinzip zu entwickeln [75]. Die technische Basis des Baukastens auf der verschiedene Baureihen (z. B. für erhöhte Anforderungen oder spezielle Ausstattungsvarianten) aufbauen, wird als Systemplattform bezeichnet. Sie ist charakterisiert durch baureihenübergreifende Funktionsprinzipien, Wiederhol- und Gleichteile, spezifische Konstruktionsmerkmale (wiederkehrende konstruktive Details) sowie typische Füge- sowie Anschlusstechniken. Optimale Ergebnisse lassen sich nur erzielen, wenn werkstoff- und fertigungsgerecht konstruiert wird. Dabei müssen die Wechselwirkungen zwischen Material und Form sowie Herstell- und Verarbeitungsverfahren gründlich durchdacht sein.

9.3 Modulare Produktstrukturen

Während es sich bei der Gleichteile- und Plattformstrategie um Bündelungsstrategien handelt (ausgehend von nicht zerlegbaren Einzelteilen), geht es bei der Modulstrategie um eine Spaltungsstrategie, bei der ein Gesamtprodukt in Teile zerlegt wird (also ausgehend vom Ganzen) [76]. Eine sehr effiziente Methode, die Kosten zu minimieren und gleichzeitig die individuellen Kundenbedürfnisse zu befriedigen, ist die Schaffung einer modularen Produktstruktur, in unserem Fall eine modulare Struktur des Gebäudes und der Gebäudehülle (Bild 20).

Grundlagen modularer Produktstrukturen

Um Missverständnisse zu vermeiden, werden zunächst einige Begriffe definiert. So ist eine Baugruppe ein in sich geschlossener, aus zwei oder mehr Bauteilen (Ein-

zelteile eines technischen Komplexes) oder Unterbaugruppen bestehender Gegenstand. Sie bildet eine räumlich abgeschlossene Einheit. Man unterscheidet nach ihrem Verwendungszweck:

- Funktionsbaugruppen (aus Teilen, die aus funktionaler Sicht strukturiert wurden und einer gemeinsamen Funktion dienen),
- Montage- oder Vormontagebaugruppen (aus Teilen, die aus Montagesicht strukturiert wurden und komplett gefügt in die nächst höhere Struktureinheit montiert werden).

Als Module werden typisierte und skalierbare Funktions- und Montagebaugruppen bezeichnet. Analog zur Systemtechnik werden sie für typische aufgabenspezifische Anforderungen in Baureihen eingeordnet. Zudem werden die geometrischen, mechanischen, elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Schnittstellen zwischen den Modulen harmonisiert, d. h. vereinheitlicht bzw. aufeinander abgestimmt (Bild 21). Man klassifiziert Schnittstellen entsprechend ihrer Bedeutung in solche mit niedriger und hoher Interaktion, sowie solche mit und ohne bauaufsichtlicher Relevanz. Modulare Produktstrukturen reduzieren die Komplexität und erhöhen die Übersichtlichkeit. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die unterschiedlichen Module – nach Definition der Schnittstellen – unabhängig und parallel zueinander entwickelt und gefertigt sowie im Betrieb leicht ausgetauscht werden können.

Modulbauweise im Fassadenbau

Die Fassade (die hier stellvertretend für die Gebäudehülle betrachtet wird) dient gleichzeitig als Raumabschluss (Luft- und Wasserdichtigkeit sowie Wärme-, Feuchte- und Schallschutz) und Gestaltungselement

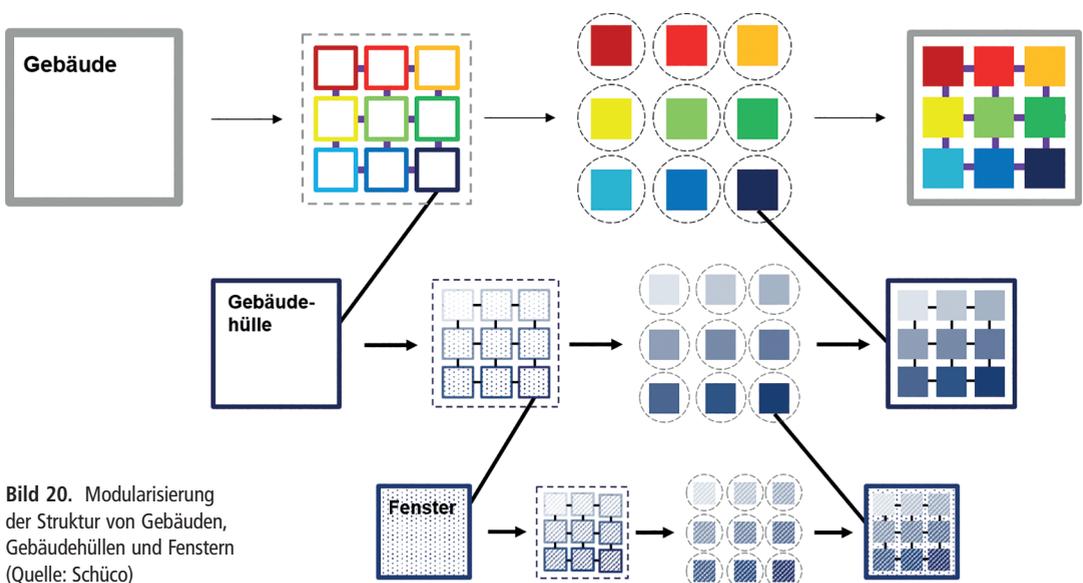


Bild 20. Modularisierung der Struktur von Gebäuden, Gebäudehüllen und Fenstern (Quelle: Schüco)

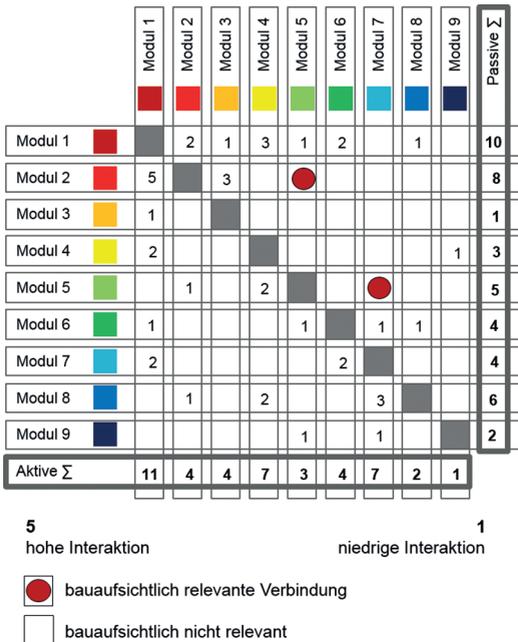


Bild 21. Schnittstellen zwischen den Modulen (in Anlehnung an [77])

(von außen und innen). Wichtig ist zunächst die Trennung von Funktions- und Designelementen. Exemplarisch werden Fassaden in Sprossenbauweise näher betrachtet. Sie lassen sich in Rahmenwerk und Ausfachungen (z. B. Verglasung, Paneele und Einsetzelemente) aufteilen. Das Rahmenwerk hat das Eigengewicht der Fassade sowie Wind-, Schnee-, Verkehrs- und Sonderlasten aufzunehmen und an den Rohbau abzutragen. Im Fassadenbau werden modular aufgebaute Konstruktionen als Elementfassaden bezeichnet (vgl. Abschn. 3.5.2). Die Module werden in der Werkstatt des Fassadenbauers vorgefertigt und bezüglich ihrer Funktion geprüft. Vorfertigung muss nicht zwangsläufig gleichbedeutend mit industrieller oder maschineller Fertigung sein, sondern kann auch manuell in kleinen Serien oder in Einzelfertigung erfolgen. Die Module werden auf der Baustelle über Konsolen (Schnittstelle zwischen den Gewerken) mit dem Rohbau verbunden.

Modulbauweise bei anderen Gewerken

Die obigen Ausführungen gelten sinngemäß auch für (typisierte und skalierbare) Module der anderen Gewerke. Sie werden in spezialisierten Werkstätten oder Fabriken gefertigt und vor der Auslieferung bezüglich ihrer Funktion geprüft. Innerhalb eines Moduls werden entweder nur Komponenten eines Gewerkes oder Untermodule unterschiedlicher Gewerke über definierte Schnittstellen verbunden. Auch hier unterscheidet man nach ihrem Verwendungszweck Funktionsbaugruppen und Montagebaugruppen. Die Flexibilität und Qualität

lässt sich nicht nur im Bauablauf, sondern auch bei Wartung und Instandhaltung sowie bei Umbau und Demontage steigern, wenn innerhalb einzelner Montagebaugruppen nur Komponenten mit ähnlichen Wartungs- und Instandhaltungszyklen sowie mit vergleichbarem Alterungsverhalten (technische Lebensdauer und wirtschaftliche Nutzungsdauer) gruppiert werden [78]. An den äußeren Schnittstellen von Montagebaugruppen müssen demzufolge lösbare Verbindungen angewandt werden. Vorteilhaft sind form- und kraftschlüssige Fügeverfahren, die so gestaltet sind, dass die Lösbarkeit ohne den Einsatz von Spezialwerkzeugen oder technologischen Vorbereitungsprozessen möglich ist. Wichtig ist neben dem Unterbinden von Korrosion an den Verbindungsstellen die gute (visuelle) Erkennbarkeit und Zugänglichkeit der Verbindungsstellen.

Integration von Modulen anderer Gewerke in die Fassade

Die Funktionsgruppe „Fassade“ dient nicht nur als Raumabschluss und Gestaltungselement, sondern auch als Trägerelement und Plattform für die Module der anderen Gewerke. Es ist im Einzelfall abzuwägen, ob diese bereits in der Werkstatt des Fassadenbauers oder erst auf der Baustelle in das Fassadenmodul integriert werden. Innere Schnittstellen liegen innerhalb eines Moduls (zwischen den einzelnen Bausteinen des Baukastens), äußere Schnittstellen beziehen sich auf angrenzende Module. Je interoperabler die Module sind, desto geringer ist der Aufwand zur Integration. Deshalb wird die Schnittstelle zwischen dem Trägerelement und den Modulen der anderen Gewerke vorteilhafterweise als standardisierte „Docking-Station“ ausgebildet. Die Alternative sind spezifische „Adapter“ zwischen unterschiedlichen halboffenen Systemen. Es geht dabei auch um den Medien- und Datenaustausch sowie insbesondere um zweifelsfrei definierte Leistungs- und Haftungsgrenzen. Da bei der Entwicklung der Docking-Station oder der Adapter meist die Normen und Vorschriften mehrerer Gewerke zu berücksichtigen sind, ist es ratsam, alle relevanten Spezialisten schon im Vorfeld „an den Tisch zu holen“. Dies bietet in der späteren Planung, Herstellung und Montage sowie im Betrieb von modularen Gebäudehüllen zahlreiche Vorteile. Insbesondere lässt sich „die Improvisation am Bau“ deutlich reduzieren. Daneben spielt bei komplexen Konzepten die „Mensch-Maschine-Schnittstelle“ eine herausragende Rolle. Hier geht es insbesondere um ergonomische Aspekte.

Trendthema Leichtbau bei modularen Produktstrukturen

Eine in der Baupraxis bei weitem nicht ausgeschöpfte Methode ist der Leichtbau. Dieser bietet gerade in Kombination mit modularen Produktstrukturen ein besonderes Potenzial. Dabei spielen innovative Verfahren und neue Werkstoffe, die sich häufig neben höherer Materialeffizienz auch durch bessere technische Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit und

leichte Verarbeitbarkeit auszeichnen, eine wesentliche Rolle. Besondere Impulse für den Leichtbau liefert die Bionik [68]. Die wesentlichen Grenzen sind die Wirtschaftlichkeit sowie die Betriebsfestigkeit und Betriebssicherheit. Die im heutigen Leichtbau üblichen Methoden sind der Werkstoff-, der Struktur- und der Systemleichtbau:

- Unter *Werkstoffleichtbau* versteht man die für eine spezielle Anwendung optimierte Wahl von Werkstoffen mit einem günstigen Verhältnis von spezifischem Gewicht zu nutzbarer Festigkeit, Dehnung oder Steifigkeit. Üblich sind dabei auch Kombinationen unterschiedlicher Werkstoffe.
- Der *Strukturleichtbau* beschäftigt sich mit der Art, Anzahl, Anordnung und Fügung von Bauteilen, aus denen eine tragende Struktur gebildet wird.
- Als *Systemleichtbau* bezeichnet man das Prinzip, in einem Bauteil neben der Lastabtragung auch noch andere Funktionen zu vereinen.

Dann erfordert die optimale Werkstoffauswahl umfassendes Wissen bezüglich der verschiedenen werkstoffbedingten, die unterschiedlichen Funktionen beeinflussenden Größen. Dabei müssen die Werkstoffkennwerte aller funktionsrelevanten Komponenten in ihrer Gesamtheit und zusammenwirkend betrachtet werden. Idealerweise werden bereits in der Produktentwicklung sowohl die Einzelteile als auch die Gesamtkonstruktion analysiert und optimiert. Ein höherer Materialaufwand lässt sich gegebenenfalls rechtfertigen, falls dadurch erhebliche Vorteile (z. B. ökologische oder ökonomische) in der Herstellungs- oder Nutzungsphase bewirkt werden.

9.4 Produktordnungssysteme

Zur Reduzierung der Komplexität werden in der Automobilindustrie schon seit vielen Jahren Produktordnungssysteme eingesetzt [76]. Ihr Grundprinzip ist Individualisierung nach außen bei gleichzeitiger Standardisierung nach innen.

Die maßgebliche Frage ist dabei, ob die Variantenvielfalt ausschließlich unternehmensintern oder auch unternehmensextern wirkt, ob sie also für den Kunden wahrnehmbar ist oder nicht. Die Unterscheidung von interner und externer Variantenvielfalt beinhaltet die Unterscheidung von „Mittel“ (interne Variantenvielfalt) und „Zweck“ (externe Variantenvielfalt) [79]. Sie ist daher äußerst hilfreich für differenzierte Betrachtungen im Rahmen des Varianten- bzw. Komplexitätsmanagements. Ziel ist letztendlich die konsequente Wiederverwendung von Komponenten in den nicht kundenrelevanten Bereichen. So kombinieren Produktordnungssysteme einerseits die Prinzipien und Vorteile der Gleichteile- und Plattformstrategie, andererseits die der Systemtechnik und Modularisierung. Dabei lassen sich Synergieeffekte zwischen verschiedenen Produktlinien erzeugen.

Wenn in der Produktentwicklung die vier Methodenbausteine zur Gestaltung von Produktarchitekturen (Bild 22) konsequent abgearbeitet werden, wird es möglich, kundenspezifische Anforderungen in der Produktstruktur einfach abzubilden:

- die Anforderungs-Funktions-Matrix definiert die technischen Funktionen entlang der Wertschöpfungskette,
- die Funktions-Modul-Matrix zeigt und bewertet die funktionale Modulstruktur,
- die Schnittstellen-Matrix beschreibt und bewertet die Schnittstellen,
- die Kommunalitäts-Matrix zeigt Gleichheiten zwischen Produktfamilien, Produktgenerationen und Skaleneffekte.

Um in der Produktentwicklung Änderungen möglichst problemlos durchführen zu können, sollte die Anzahl der Schnittstellen zwischen den Modulen möglichst gering sein. Zudem sind Einsatzempfehlungen [80] und Austauschregeln [81] zu definieren.

Wichtig ist auch in diesem Zusammenhang die anforderungsgerechte Ausbildung von Schnittstellen. Sind

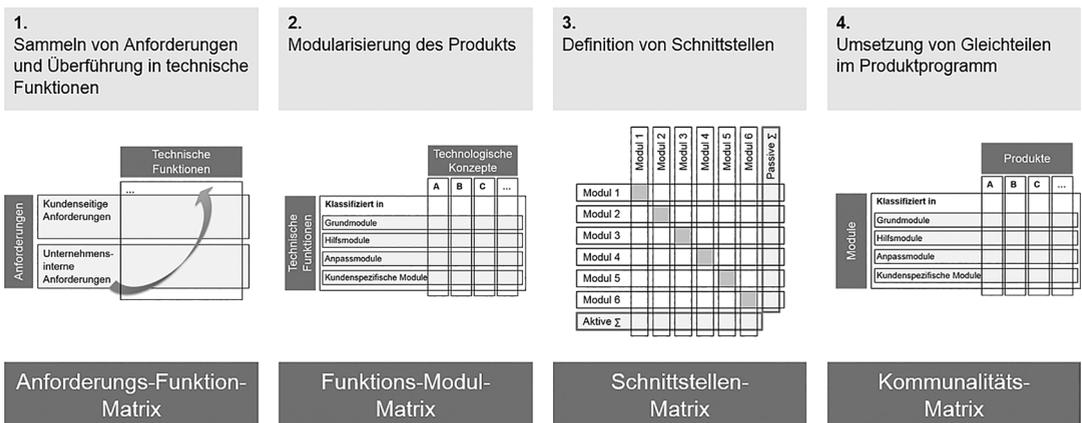


Bild 22. Gestaltung von Produktordnungssystemen (in Anlehnung an [77])

die entsprechenden Module kompatibel, interoperabel oder tatsächlich austauschbar? So bedeutet „Kompatibilität“ die Möglichkeit, Geräte miteinander auf physikalischer Ebene auf Basis z. B. eines Standards kommunizieren zu lassen. Dagegen beschreibt „Interoperabilität“ die Fähigkeit von kompatiblen Geräten im Rahmen eines Gesamtsystems Funktionen und Anwendungen zu realisieren und zu gewährleisten. Schließlich ist „Austauschbarkeit“ die Möglichkeit, Geräte innerhalb eines Systems auszutauschen, ohne dass sich Funktionalität und Systemverhalten ändern.

10 Zukunftsfähige Prozesse und Tools

Zukunftsfähige Prozesse und Tools basieren im Umfeld der Gebäudehülle insbesondere auf einem strukturierten Anforderungsmanagement sowie auf den Prinzipien modularer Fertigung und Montage sowie digitaler Vernetzung der Prozesskette.

10.1 Anforderungsmanagement

Wie in Kapitel 7 dargestellt, besteht ein wesentliches Erfolgskonzept zukunftsfähiger Gebäudehüllen darin, nicht nur die heutigen, sondern auch die künftigen Marktbedürfnisse (vgl. Kap. 6) möglichst exakt zu treffen. Grundlage eines zielführenden Anforderungsmanagement für die einzelnen Marktsegmente sind die strukturierte Produktdefinition und die Kontrolle der Anforderungen während der Produktentwicklung [82]. Entscheidend sind die vom Markt (einschließlich Gesetze, Normen und Richtlinien) geforderten und honorierten Produkteigenschaften, welche sich aus definierten Merkmalen und deren spezifischer Ausprägung zusammensetzen. Hierbei ist zwischen Komponenten- und Systemmerkmalen zu unterscheiden. Unter Komponentenmerkmalen versteht man Merkmale einzelner Bauteile. Dagegen können Systemmerkmale nur einer Gruppe von Bauteilen, also einer Baugruppe oder einem Produkt (in unserem Fall der Gebäudehülle), zugeordnet werden. Zudem ist eine Unterteilung in Beschaffenheits-, Funktions- und Relationsmerkmale sinnvoll [79]. Bei zukunftsfähigen Gebäudehüllen steckt bezüglich des Anforderungsmanagements großes Potenzial im offenen und Branchen übergreifenden Dialog zwischen Architekten, Ingenieuren und Bauherren sowie zwischen Wissenschaft und Industrie. Dies verhindert kostenintensive Entwürfe und Produkte ohne nachvollziehbaren Nutzen und daraus resultierende spätere Enttäuschungen. Hilfreich ist hierbei die in Abschn. 7.2 vorgestellte Unterteilung von Merkmalen unter marketingstrategischen Gesichtspunkten gemäß *Kano* [52]. Nicht zu vernachlässigen ist diesbezüglich die zeitliche Dynamik, der ein subjektiv wahrgenommener Kundennutzen unterliegt. So werden Begeisterungsmerkmale über die Zeit zu Leistungs- und schließlich zu Basismerkmalen, weshalb sich auch deren Priorisierung verschieben muss.

10.2 Modulare Fertigung und Montage

Modulare Produktstrukturen bilden die Grundlage einer regelbasierten Variantenkonstruktion („Parametrie“) und einer wirtschaftlichen (digital vernetzten) Variantenproduktion. Mit Blick auf die Planungs-, Herstell- und Bauphase sind Fertigungs- und Montageprozesse bezüglich Qualität und Wirtschaftlichkeit zu optimieren, beispielsweise durch Minimierung der Wertschöpfung auf der Baustelle mittels Steigerung des Vorfertigungsgrades. Dabei geht es aber auch um die Strukturierung des Herstellungsprozesses. So ist zwischen projektneutralen und projektspezifischen Arbeitsschritten zu unterscheiden. Projektneutrale Schritte erfolgen meist in einer Serienproduktion mithilfe hoch spezialisierter, monofunktionaler Anlagen, Geräte oder Maschinen. Projektspezifisch individuelle Arbeitsschritte mit ihren kleinen Losgrößen erfordern eine wesentlich höhere Flexibilität. Diese wird erreicht durch Unikatproduktion mittels an die wechselnden Anforderungen anpassbare Arbeitsplätze und Maschinen sowie möglichst qualifiziertem Personal. Große Vorteile bietet hier die Modularisierung und Vernetzung skalierbarer Fertigungseinheiten (Bild 23). Mit zunehmender Variantenvielfalt kommt der Werkstatt- und Baustellenmontage eine erhöhte Bedeutung zu, da ein Großteil der Varianten erst hier entsteht. Die Baustelle steht im Rahmen der Leistungserbringung zudem an der letzten Stelle der Wertschöpfungskette. Deshalb müssen hier alle Störungen in der Auftragsabwicklung aus vorgelagerten Bereichen so weit als möglich kompensiert werden. Hilfreich ist hier, neben der Anwendung des Modularisierungsprinzips, der Einsatz digitaler Planungswerkzeuge (vgl. Abschn. 10.3). Diese Kombination ermöglicht auch eine effektive Parallelisierung von Arbeitsschritten in der Projektabwicklung (Planung, Fertigung und Montage). Bei konsequenter Umsetzung stehen der in der Projektplanung benötigten Zusatzkapazität in der Projektausführung wesentlich höhere Zeit- und Kosteneinsparungen gegenüber.



Bild 23. Modulare und vernetzte Fertigung für projektspezifische Arbeitsschritte (Quelle: Schüco)

10.3 Vernetzung der Prozesskette

In Bild 24 ist der typische Ablauf von Bauprojekten dargestellt. Der Begriff Building Information Modeling (BIM) beschreibt eine Methode der optimierten Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden [84].

Das erste langfristige Ziel ist – im Sinne der digitalen Transformation – die Vernetzung aller Planungs-, Bau-, Inbetriebnahme- und Betriebsprozesse in Echtzeit über eine geschlossene digitale Kette bis zur Reinigung, Wartung und Instandhaltung [85]. Dann stehen allen Beteiligten auf jeder Stufe der Wertschöpfung immer die benötigten Informationen zur Verfügung. Potenzielle Fehlerquellen, beispielsweise durch mehrfaches händisches Eingeben, entfallen. Konsequenterweise erfolgt ein Nachführen der Modelle in den „as built“-Status, mit allen Vorteilen für die anschließenden Betriebs- und Umnutzungs- sowie letztlich sogar auch für die Rückbauphase. Dann dienen integrierte Sensor-Transponder der Optimierung des Material- und Informationsflusses in der Fertigung, beim Transport, auf der Baustelle, bei der Wartung und Instandhaltung sowie am Lebensende [86]. Plattformbasierte Cyber-Physische Systeme (CPS) sind Teil einer zukünftig global vernetzten Welt, in der Produkte, Geräte und Objekte mit eingebetteter Hardware und Software über Anwendungsgrenzen hinweg interagieren [87]. Dadurch wird auch im Bauwesen die zielgerichtete und wirtschaftliche Zusammenarbeit global agierender und kooperierender Unternehmensnetzwerke möglich. Grundlagen sind laut [85]:

- die horizontale Vernetzung, also die Nutzung des Internets der Dinge und Dienste in Wertschöpfungssystemen,
- die vertikale Integration, also die Veränderung der Produktarchitektur, vom starren System zum Cyber-Physischen System,

- die Nutzung von strukturierten und unstrukturierten Echtzeit-Daten zur Gestaltung und Optimierung komplexer Wertschöpfungssysteme.

Das zweite langfristige Ziel ist ein umfassendes virtuelles Modell des individuell geplanten Gebäudes. Dann werden wir Gebäude zweimal bauen: zunächst virtuell (mittels Augmented Reality) und dann real (mit CPS-basierten Prozessen und Tools). Jede Komponente der Gebäudehülle hat einen digitalen Zwilling. Dabei entlasten mobile 3D-Assistenz-Systeme Spezialisten von stumpfsinnigen Routinetätigkeiten und ermöglichen ihnen, sich auf kreative und wertsteigernde Tätigkeiten zu konzentrieren. So wird die physikalische Welt mit der virtuellen Welt zu einem Internet der Dinge, Daten und Dienste verknüpft. Spätestens dann hat die vierte industrielle Revolution auf das Bauen und die Architektur des 21. Jahrhunderts einen ebenso signifikanten Einfluss, wie die erste und zweite industrielle Revolution im 19. und 20. Jahrhundert.

11 Zusammenfassung

Die Auswirkungen der Gebäudehülle auf die ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Eigenschaften von Gebäuden sind vielfältig. Von besonderer Bedeutung ist deshalb die ganzheitliche Optimierung der Funktion und Gestaltung von Gebäudehüllen. Wo im Einzelfall welcher Schwerpunkt gesetzt wird, hängt vom jeweiligen Entscheider ab. Dabei handelt es sich in der Planungs-, Ausführungs- und Nutzungsphase von Gebäuden um sehr heterogene Zielgruppen. Nicht zu vernachlässigen ist zudem die zeitliche Dynamik, der ein subjektiv wahrgenommener Kundennutzen unterliegt. Deshalb ist es unerlässlich, in der Produktentwicklung und Projektplanung methodisch sehr stringent vorzugehen.

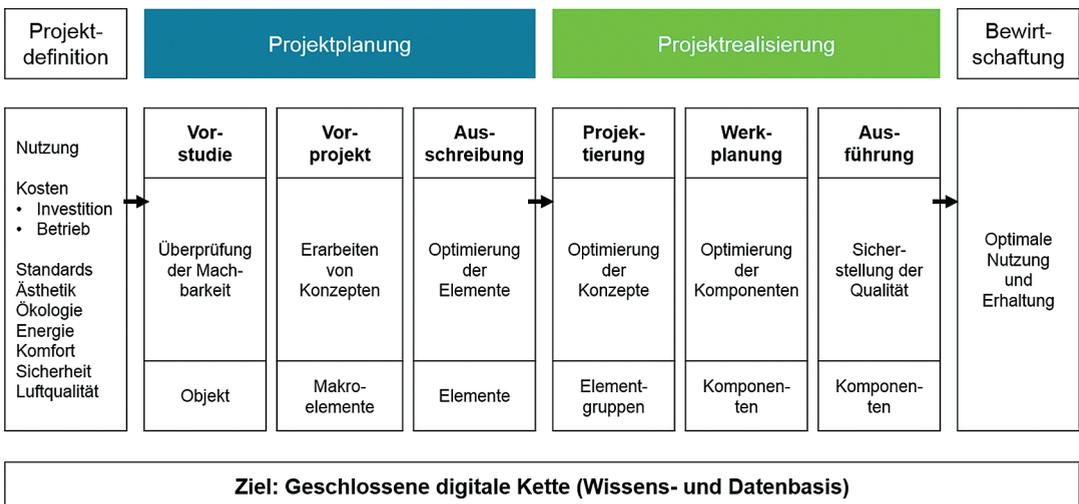


Bild 24. Ablauf von Bauprojekten (in Anlehnung an [83])

Die Analyse früherer und heutiger funktionaler, konstruktiver und konzeptioneller Aspekte von Gebäudehüllen zeigt ein Anwachsen der Komplexität. In der Zukunft werden neue Produkte entstehen, die ohne die Integration digitaler Technologien nicht realisierbar wären. Sie beinhalten Identifikatoren, Sensoren, Kommunikationssysteme und die dazugehörige Software. Besondere Bedeutung werden adaptive Gebäudehüllen erhalten. Sie verändern in Echtzeit ihre Durchlässigkeit für Sonne, Licht, Luft, Wärme, Feuchte oder Schall in Abhängigkeit äußerer Einflüsse. Als integraler Bestandteil kognitiver Gebäude kommunizieren sie mit den vernetzten Komponenten anderer Gewerke und führen eigenständig zielgerichtete Aktivitäten aus. Damit steigt auch die Bedeutung der Konvergenz der Gewerke.

Als wirkungsvolles Mittel zur Beherrschung der Komplexität erweisen sich Produktordnungssysteme. Ihr Grundprinzip ist Individualisierung nach außen bei gleichzeitiger Standardisierung nach innen. Ziel ist letztendlich die konsequente Wiederverwendung von Komponenten, in den nicht kundenrelevanten Bereichen. So kombinieren Produktordnungssysteme die Prinzipien und Vorteile der Gleichteile- und Plattformstrategie sowie der Systemtechnik. Ein weiterer wichtiger Baustein sind modulare Produktstrukturen. Sie bilden die Grundlage einer regelbasierten Variantenkonstruktion und wirtschaftlichen Variantenproduktion. Unterschiedliche Module können – nach Definition der Schnittstellen – unabhängig und parallel zueinander entwickelt und gefertigt sowie im Betrieb leicht ausgetauscht werden. Die Flexibilität und Qualität lässt sich nicht nur im Bauablauf, sondern auch bei Wartung und Instandhaltung sowie bei Umbau und Demontage steigern, wenn innerhalb einzelner Montagebaugruppen nur Komponenten mit ähnlichen Wartungs- und Instandhaltungszyklen sowie mit vergleichbarem Alterungsverhalten gruppiert werden.

Ob uns die digitale Transformation vor Probleme stellt oder uns Chancen eröffnet, hängt davon ab, wann und wie wir uns darauf einstellen, ob wir zukunftsfähige Konzepte entwickeln und schließlich, ob wir diese konsequent umsetzen. So steht unsere Branche in den kommenden Jahren – neben dem o. g. Komplexitätsmanagement – vor zwei großen Herausforderungen:

- Die erste ist die Vernetzung aller Planungs-, Bau-, Inbetriebnahme- und Betriebsprozesse in Echtzeit über eine geschlossene digitale Kette bis zur Reinigung, Wartung und Instandhaltung. Dann stehen allen Beteiligten auf jeder Stufe der Wertschöpfung immer die benötigten Informationen zur Verfügung. Plattformbasierte Cyber-Physische Systeme (CPS) werden Teil einer global vernetzten Welt, in der Produkte, Geräte und Objekte mit eingebetteter Hardware und Software über Anwendungsgrenzen hinweg interagieren.
- Die zweite große Herausforderung steht im Zusammenhang mit der Visualisierung individuell geplanter Gebäude und des projektspezifischen Bauprozesses. Es geht um umfassende virtuelle Modelle. Dann

werden Gebäude zweimal gebaut: zunächst virtuell (mittels Augmented Reality) und dann real (mit CPS-basierten Prozessen und Tools). Dabei entlasten mobile 3D-Assistenz-Systeme Spezialisten von Routinetätigkeiten und ermöglichen ihnen, sich auf kreative und wertsteigernde Tätigkeiten zu konzentrieren.

So wird die physikalische mit der virtuellen Welt zu einem Internet der Dinge, Daten und Dienste verknüpft. Spätestens dann hat die vierte industrielle Revolution auf das Bauen und die Architektur des 21. Jahrhunderts einen ebenso signifikanten Einfluss, wie die erste und zweite industrielle Revolution im 19. und 20. Jahrhundert.

12 Literatur

- [1] Klos, H.: Kastenfenster, Doppelfenster und ihre Varianten. Restaurator im Handwerk, Ausgabe 1 (2011).
- [2] König, K.: Techniken der Zinkbedachung im 19. Jahrhundert. Restaurator im Handwerk, Ausgabe 1 (2011).
- [3] Dorsewagen, D.: Büro- und Geschäftshausfassaden der 50er Jahre – Konservatorische Probleme am Beispiel West-Berlin. Dissertationsarbeit, Technische Universität Berlin (2004).
- [4] Klos, H.: Holzmanufaktur Rottweil – Das Fenster im 20. Jahrhundert. Sonderdruck (mit Ergänzungen) aus: Denkmalpflege in Baden-Württemberg. 41. Jg. Heft 1 und 2 (2012).
- [5] Verein zur Hebung der Information über Aluminiumfenster und Fassaden Aluminium-Fenster-Institut (Hrsg.): Qualitätshandbuch für Fenster und Fassaden aus Aluminium – Ein Leitfaden für Planung, Ausschreibung und Ausführung. Wien, 1997.
- [6] Davies, M.: Eine Wand für alle Jahreszeiten. Arch+ 104 (1990).
- [7] Dompke, M., Kruppa, B., Mayer, E.: Sick-Building Syndrome II (Forschungsstand und Umsetzung). Verlag TGC GmbH, Bonn, 1996.
- [8] Beyer, T.: Der Wandel der Fassade und ihrer Funktionen im 20. Jahrhundert. Dissertation, Europäisches Institut für postgraduale Bildung an der TU Dresden (2005).
- [9] Heusler, W.: Konzeption und Planung innovativer Außenwände. In: Bauphysik-Kalender 2002. Ernst & Sohn, Berlin.
- [10] Hestermann, U., Rongen, L.: Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1. 35. Auflage, S. 228, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2010.
- [11] Hegger, M., Auch-Schwelk, V., Fuchs, M., Rosenkranz, T.: Baustoff Atlas. Hrsg. Institut für intern. Architekturdokumentation München, 2005.
- [12] Heusler, W., Compagno, A.: Mehrschalige Fassaden – Eine Gegenüberstellung verschiedener zweischaliger Fasadensysteme. DBZ 6 (1998), Bertelsmann Fachzeitschriften.

- [13] Grunwald, G.: Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranmodule in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle. Dissertation, Technische Universität Berlin (2007).
- [14] Gengnagel, C.: Mobile Membrankonstruktionen. Dissertation, Technische Universität München (2005).
- [15] Gartner, F., Heusler, W.: Fassadenkonstruktionen im Hochbau. Fassadentechnik 01 (1996), S. 27–31. Fassadentechnik 02 (1996), S. 33–35. Fassadentechnik 03 (1996), S. 40–44, Verlagsges. R. Müller GmbH & Co. KG, Köln.
- [16] Rice, P., Dutton, H.: Transparente Architektur. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995.
- [17] Österle, E., Lieb, R.-D., Lutz, M., Heusler W.: Doppelschalige Fassaden – Ganzheitliche Planung. Callwey Verlag, München, 1999.
- [18] Compagno, A.: Sonnenschutzmaßnahmen. Fassade-Facade. Teil 1: Heft 4 (1995), S. 29–32, Teil 2: Heft 1 (1996), S. 19–23, Verlag Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau.
- [19] Hauser, G., Heibel, B.: Thermische Wirkung einer zusammengesetzten Sonnenschutzvorrichtung. Ingenieur-Hochbau, Berichte aus Forschung und Praxis, Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Erich Cziesielski. Seite 93–110, Werner Verlag, 1998.
- [20] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau.
- [21] Heusler, W., Scholz Chr.: Tageslichtsysteme – Aktuelle Entwicklungen und Tendenzen. Bauphysik 6 (1993), S. 173–178.
- [22] Heusler, W., Scholz C.: Photovoltaik – Integration in Fassaden. TAB, Juni 1994, S. 37–42.
- [23] DIN 4102: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
- [24] DIN EN 13501: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten.
- [25] DIN EN 1627: Türen, Fenster, Vorhangfassaden, Gitterelemente und Abschlüsse – Einbruchhemmung – Anforderungen und Klassifizierung.
- [26] DIN EN 1628: Türen, Fenster, Vorhangfassaden, Gitterelemente und Abschlüsse – Einbruchhemmung – Prüfverfahren für die Ermittlung der Widerstandsfähigkeit unter statischer Belastung.
- [27] DIN EN 1629: Türen, Fenster, Vorhangfassaden, Gitterelemente und Abschlüsse – Einbruchhemmung – Prüfverfahren für die Ermittlung der Widerstandsfähigkeit unter dynamischer Belastung.
- [28] DIN EN 1630: Türen, Fenster, Vorhangfassaden, Gitterelemente und Abschlüsse – Einbruchhemmung – Prüfverfahren für die Ermittlung der Widerstandsfähigkeit gegen manuelle Einbruchversuche.
- [29] DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3): Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen.
- [30] Bhagwati, M. (Hrsg.), 2016, Das Wirtschaftslexikon [online]. Stichwort Standardisierung (Abruf 19.10.2016): <http://www.daswirtschaftslexikon.com/d/standardisierung/standardisierung.htm>
- [31] Feldhusen, J., Grote, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2013.
- [32] Wildemann, H.: Die modulare Fabrik. Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. Technologie-Verlag KG München, 1988.
- [33] RAL-Gütegemeinschaft Trockenbau e.V. (Hrsg.): Merkblatt 02/2014, 2. Auflage – „Genormte Konstruktionen“ und „geprüfte Systeme“ im Trockenbau, Darmstadt, 2014.
- [34] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Bevölkerung Deutschlands bis 2060–13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Wiesbaden (2015).
- [35] Hauff, V. (Hrsg.): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. 1987.
- [36] Fischer, D.: Ernährung, Bildung und Nachhaltigkeit: Konzeptionelle Überlegungen zu einer nachhaltigen Ernährungsbildung. Haushalt & Bildung 84 (2), 2007, S. 13–21.
- [37] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.). Nationale Nachhaltigkeitsstrategie – Fortschrittsbericht 2012. Verfügbar unter: www.nationale-nachhaltigkeitsstrategie.de
- [38] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. Die DGNB Systemversion 2015. Verfügbar unter: www.dgnb.de/system2015.
- [39] Callendar, G.S.: The artificial production of carbon dioxide and its influence on climate. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 64, (1938), p. 223–240.
- [40] Rahmstorf, S., Neu U.: Klimawandel und CO₂: haben die „Skeptiker“ recht? Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften. www.pik-potsdam.de (2004).
- [41] Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., Zeumer, Martin (Hrsg.): Energie Atlas. Nachhaltige Architektur. 1. Aufl., Detail, Institut für internationale Architektur-Dokumentation (Edition Detail), München, 2008.
- [42] Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (Hrsg.): Innovation und neue Energietechnologien. Das 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Berlin, 2005.
- [43] BMUB (Hrsg.): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. BMUB-Hausentwurf vom 06.09.2016.
- [44] Umweltbundesamt, 2013: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Verfügbar unter: <http://www.uba.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050>

- [45] Münchner Kreis (Hrsg.): Neue Produkte in der digitalen Welt. Forschungsprojekt des Münchner Kreis. gefördert durch die Heinz Nixdorf Stiftung (2016).
- [46] Heusler, W.: Nachhaltige Gebäudehüllen – Anforderungen und Lösungsansätze für Büros. In: Spath, D., Bauer, W., Rief, S.: Green Office – Ökonomische und ökologische Potenziale nachhaltiger Arbeits- und Bürogestaltung. Gabler Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010.
- [47] Ritter, F.: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen – Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation TU Darmstadt (2011).
- [48] Gros, J.: Sinnliche Funktionen im Design. In: form, Zeitschrift für Gestaltung, 1. Serie Nr. 74, 2. Serie Nr. 75 (1976).
- [49] Steffen D.: Design als Produktsprache – Der „Offenbacher Ansatz“. In: Theorie und Praxis. Verlag form, Frankfurt/Main, 2000.
- [50] Nagel, R. (Hrsg.): Baukultur ist ... Ansichten über gutes Bauen in achtunddreißig Essays. Bundesstiftung Baukultur, 2015.
- [51] Plattner, H., Meinel, C., Weinberg, U.: Design-Thinking. Innovation lernen – Ideenwelten öffnen. FinanzBuch Verlag, München, 2009.
- [52] Kano, N.: Attractive Quality and Must-be Quality; Journal of the Japanese Society for Quality Control, H. 4 (1984).
- [53] Pink, T.: Innovation oder Stagnation – Findet ein Technologietransfer in der Architektur statt? In: Tagungsunterlagen zum VDI-Fassadenkongress 2008.
- [54] Zwick, M. M., Renn, O.: Wahrnehmung und Bewertung von Technik in Baden-Württemberg. Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart, 1998.
- [55] Jakobs, E.-M.: Technikakzeptanz und Technikteilhabe. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, Jg. 14, Nr. 3 (2005), S. 68–75.
- [56] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) (2012).
- [57] Europäische Bauproduktenverordnung (EUBauPVO) (2013).
- [58] Wittmer, D.: Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt: Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Dissertation Nr. 16325, ETH Zürich (2006).
- [59] Linz, M.: Suffizienz als politische Praxis. Wuppertal Spezial 49; Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2015.
- [60] Hose, D.: Suffizienz im Bauwesen – Erfordernisse und Möglichkeiten. Masterarbeit am Studiengang Nachhaltiges Bauen und Bewirtschaften an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe (2016).
- [61] Musall, E.: Klimaneutrale Gebäude – Internationale Konzepte, Umsetzungsstrategien und Bewertungsverfahren für Null- und Plusenergiegebäude; Dissertation, Bergische Universität Wuppertal (2015).
- [62] Fisch, M. N.: Das Gebäude als Kraftwerk. Netto-Plusenergiegebäude mit E-Mobilität. Technik am Bau tab 6 (2011).
- [63] Sauer, D. U.: Optionen zur Speicherung elektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromerzeugung. Solarzeitalter 4/2006, Verlag Eurosolar e.V. Bonn, 2006.
- [64] Lüking, R.-M., Hauser, G.: Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems. Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [65] Haselsteiner, E.: plusFASSADEN – Internationaler Know-how- und Wissenstransfer über „intelligente Fassadensysteme“ für österreichische AkteurInnen und KompetenzträgerInnen. Berichte aus der Energie- und Umweltforschung. Schriftenreihe 50/2011, Hrsg.: Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- [66] Cody, B.: smart façade – energetische Potentiale von adaptiven Fassadensystemen. In: „Stadt der Zukunft – Intelligente Energielösungen für Gebäude und Städte“, Vernetzungsworkshop für Projekte der zweiten Ausschreibung. Hrsg.: Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2015.
- [67] Haase, W.: Adaptive Verglasung und Großflächen-Display – Potenziale strukturierter, schaltbarer Verglasungen. Vortrag auf den Rosenheimer Fenstertagen 2016.
- [68] Braun, D. H.: Bionisch inspirierte Gebäudehüllen – Konzeption einer Bionisch inspirierter Gebäudehülle nach dem Vorbild natürlicher Hüllen und Häute. Dissertation Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart (2008).
- [69] Haase, W.: Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen. Dissertation, Universität Stuttgart (2004).
- [70] Heusler, W.: Fassade und Mechatronik – ein Erfolgskonzept? Tagungsband zur Konferenz „Fassade15 – Fassade in Bewegung“. Hochschule Augsburg, 2015.
- [71] ARUP (Hrsg.): Cities Alive – Green Building Envelope. Forschungsbericht (2016).
- [72] Grinewitschus, V., Klingner, M., Wittwer, C.: Intelligente Gebäudesysteme: eingebettete Intelligenz, Integration durch Vernetzung, neue Nutzeffekte durch Systemfunktionen. IKM 2003 Plenumsvortrag „Intelligente Gebäudesysteme“.
- [73] Daniels, K.: Low-Tech, Light Tech, High Tech: Bauen in der Informationsgesellschaft. Birkhäuser Verlag, 1998.
- [74] Zenner, C.: Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung. Dissertation, Universität des Saarlandes (2006).

- [75] Renner, I.: Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Dissertation, TU München (2007).
- [76] Wildemann, H.: Produktordnungssysteme – Leitfaden zur Standardisierung und Individualisierung des Produktprogramms durch intelligente Plattformstrategien. TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG; 13. Aufl., München, 2014.
- [77] Schuh, G., Arnoscht, J., Nußbaum, C.: Produktarchitekturen richtig gestalten. *Industrie und Management* 23(6) (2007).
- [78] Bahr C., Lennerts K.: Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. Endbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau. Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (2010).
- [79] Kesper, H.: Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden. Dissertation, TU München (2012).
- [80] IFT (Hrsg.): ift Einsatzempfehlungen – Gegenstand, Verwendung, Voraussetzungen. (2016), Verfügbar unter: <http://www.ift-service.de>
- [81] Matschi, A.: Austauschregeln für Fenster, Türen und Fassaden. Tagungsband Rosenheimer Fenstertage 2009.
- [82] Mayer-Bachmann R.: Integratives Anforderungsmanagement – Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung; Dissertation, Technische Universität Karlsruhe (2007)
- [83] Hofmann, E.: Industrielles Bauen – Neue Wege für innovative KMU: Projekt IBAUKMU. ETH Zürich (1999).
- [84] Westphal, T., Herrmann, E.M. (Hrsg.): Building Information Modeling/Management: Methoden und Strategien für den Planungsprozess. Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2015.
- [85] Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. WGP (Hrsg.): WGP-Standpunkt Industrie 4.0 (2016).
- [86] Zwinger, U., Wagner, S., Kortmann, J., Meins-Becker, A., Kelm, A., Laußat, L., Bredehorn, J.: Nutzung von BIM und RFID im Bauwesen. In: Kreger, M., Irmeler, R. (Hrsg.): Forum Bauinformatik 2014. Darmstadt, 24. – 26. Sept. 2014, Shaker Verlag, 2014.
- [87] acatech (Hrsg.): Cyber-Physical Systems: Innovationsmotoren für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion (acatech POSITION). Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012.