

2017



BAUPHYSIK KALENDER



Gebäudehülle und Fassaden

2017

BAUPHYSIK KALENDER

Gebäudehülle und Fassaden

Herausgegeben von
Univ. Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad

17. Jahrgang

Hinweis des Verlages

Die Recherche zum Bauphysik-Kalender ab Jahrgang 2001 steht im Internet zur Verfügung unter www.ernst-und-sohn.de

Titelbild: Verwaltungsgebäude der August Fichter Gruppe, Raunheim
Mit freundlicher Genehmigung von pauly + fichter, planungsgesellschaft mbH, architekten BDA, Neu-Isenburg
Fotograf: Thomas Ott Fotografie

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2017 Wilhelm Ernst & Sohn,
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including this of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprint, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung: Sonja Frank, Berlin
Herstellung: HillerMedien, Berlin
Satz: Dörr + Schiller GmbH, Stuttgart
Druck und Bindung: CPI Ebner & Spiegel, Ulm

Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISSN 01617-2205
Print ISBN: 978-3-433-03169-8
ePDF ISBN: 978-3-433-60780-0
eMobi ISBN: 978-3-433-60781-7
oBook ISBN: 978-3-433-60779-4
ePub ISBN: 978-3-433-60778-7

Vorwort

Um die komplexen Anforderungen an funktional optimierte Gebäudehüllen bzw. Fassaden zu erfüllen, gewinnen die bauphysikalischen Überlegungen im Bauplanungsprozess, obgleich auf den Teilgebieten Wärme-, Feuchte-, Schallschutz, Brandschutz oder Licht, immer mehr an Bedeutung.

Der vorliegende Bauphysik-Kalender 2017 stellt auf diesen Teilgebieten für die Planung, Ausführung und Bewertung bei Neubauten sowie im Bestand ein aktuelles, verlässliches und praxisgerechtes Nachschlagewerk dar. Die folgenden Ziele sollen mit dem Bauphysik-Kalender erreicht werden, die sich überwiegend auch in seiner Gliederung widerspiegeln:

- Schaffung eines Überblicks über die neuesten Regelwerke und Normen sowie Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Bauphysik,
- materialtechnische Grundlagen sowie materialtechnische Tabellen werden zur Verfügung gestellt,
- bauphysikalische Nachweisverfahren werden vorgestellt und erläutert,
- die konstruktiven Ausbildungen ausgewählter Bauteile und Bauwerke unter Beachtung bauphysikalischer Kriterien werden dargestellt.

Der Bauphysik-Kalender 2017 mit dem Schwerpunkt *Gebäudehülle und Fassaden* enthält neben den jährlich aktualisierten und in Rubrik E abgedruckten Beiträgen zu den materialtechnischen Tabellen insgesamt 18 Beiträge, die das Schwerpunktthema des Bauphysik-Kalenders umfassend abdecken und die neuesten Erkenntnisse auf diesem Gebiet vorstellen.

In der Rubrik A *Allgemeines und Regelwerke* werden in zwei Beiträgen ein geschichtlicher Überblick über die Entwicklung der Gebäudehülle, die Auswirkungen der Entwicklung zu Niedrigenergiegebäuden auf die Gebäudehülle sowie die wesentlichen Aspekte zukunftsfähiger Gebäude bzw. Gebäudehüllen gegeben.

Die Rubrik B *Materialtechnische Grundlagen* beinhaltet den im Bauphysik-Kalender regelmäßig erscheinenden und aktualisierten Beitrag zu Wärmedämmstoffen im Bauwesen. Aerogelputze sowie die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens zum Verhalten derartiger Putze werden in einem weiteren Beitrag in dieser Rubrik vorgestellt.

In der Rubrik C *Bauphysikalische Planungs- und Nachweisverfahren* werden in sechs Beiträgen ausgewählte Themen zum aktuellen Stand sowie Entwicklungen

hinsichtlich der Planung, Prüfung und Ausführung vorgestellt und anhand von Beispielen umfassend erläutert. Zu den ausgewählten Themen gehören: der vereinfachte Tauwasserschutz nach der aktuellen DIN 4108 - Teil 3, der Schlagregenschutz, Wärmebrücken, Luftdichtheit mit den zugehörigen Prüfverfahren sowie Schallschutz der Gebäudehülle und die Tageslichtnutzung bei Gebäuden. Zwei weitere Beiträge widmen sich der Infrarotthermografie im Bauwesen und einem Forschungsvorhaben zu messtechnischen und softwarebasierten Untersuchungen an Fassaden und fassadenintegrierten Kollektoren.

In der Rubrik D *Konstruktive Ausbildung von Bauteilen und Bauwerken* wird im ersten Beitrag die Sanierung der Außenhülle durch Innendämmung abgehandelt. Ausführungsaspekte und Nachweisverfahren nach der DIN, den WTA-Merkblättern sowie mögliche Simulationsverfahren werden hier, auch anhand von Beispielstudien, vorgestellt. Der zweite Beitrag widmet sich der Problematik der Wärmebrücken bei Fensteranschlüssen, deren rechnerischem Nachweis sowie deren Behandlung im Beiblatt 2 der DIN 4108. Weiterhin werden in dieser Rubrik Ergebnisse und Empfehlungen für die Praxis aus mehreren Forschungsvorhaben, die Gebäudehülle betreffend, wie folgt vorgestellt: Untersuchungsergebnisse zu Doppelfassaden in Kombination von Schallschutz und natürlicher Lüftungsmöglichkeit; Beurteilung des Wärmeschutzes unter Berücksichtigung von gemessenen Raumklimaten, des Wärmeschutzniveaus der Gebäudehülle und des Außenklimas in der Klimaregion; Hygrothermisches Verhalten begrünter Dachkonstruktionen; Mikrobieller Bewuchs an Fassaden.

Der Bauphysik-Kalender 2017 will mit der dargestellten Themenvielfalt den Bogen von der Forschung zur Praxis und vom Planungsbüro zur ausführenden Firma spannen und dabei auf neue Entwicklungen und Tendenzen hinweisen.

Für kritische Anmerkungen sind die Autoren, der Herausgeber und der Verlag dankbar.

Der Herausgeber möchte an dieser Stelle allen Autoren für ihre Mitarbeit und dem Verlag für die angenehme Zusammenarbeit herzlichst danken.

Hannover, im Februar 2017

Nabil A. Fouad

Inhaltsübersicht

A Allgemeines und Regelwerke

- A1 Gebäudehüllen gestern, heute und morgen 3
Winfried Heusler, Ksenija Kadija
- A2 Auswirkungen der Entwicklung zu Niedrigstenergiegebäuden auf die Gebäudehülle 45
Tim Schöndube, Svenja Carrigan, Torsten Schoch, Oliver Kornadt

B Materialtechnische Grundlagen

- B1 Dämmstoffe im Bauwesen 77
Wolfgang M. Willems, Kai Schild
- B2 Strukturierte Aerogelputze 153
Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi, Ulrich Pont, Christian Sustr, Samira Aien, Karim Ghazi Wakili, Thomas Stahl

C Bauphysikalische Planungs- und Nachweisverfahren

- C1 Vereinfachter Nachweis des Tauwasserschutzes nach DIN 4108-3:2014 179
Helmut Marquardt
- C2 Schlagregenschutz von Außenwänden nach DIN 4108-3:2014 223
Helmut Marquardt
- C3 Wärmebrücken Berechnung – Bewertung – Vermeidung 237
Wolfgang M. Willems, Kai Schild
- C4 Infrarot-Thermografie der Gebäudehülle 277
Nabil A. Fouad, Torsten Richter
- C5 Messtechnische und softwarebasierte Untersuchungen an Fassaden und fassaden-integrierten Kollektoren anhand von Prototypen 341
Daniel Brandl, Michael Grobbauer, Stefan Holper, Peter Kautsch, Thomas Mach, Mario J. Müller
- C6 Luftdichtheit der Gebäudehülle in Planung, Ausführung und Messung 385
Stefanie Rolfsmeier, Paul Simons, Boris Schwitalski
- C7 Schallschutz der Gebäudehülle 411
Schew-Ram Mehra
- C8 Tageslicht in Gebäuden 431
Heinrich Kaase

D Konstruktive Ausbildung von Bauteilen und Bauwerken

- D1 Nachweisführung für Innendämmsysteme 463
Anatol Worch
- D2 Wärmebrückenproblematik bei Fenstern 507
Marc Klátecki, Anton Maas
- D3 Doppelfassaden mit Kombination von Schallschutz und (natürlicher) Lüftungsmöglichkeit 531
Ardeshir Mahdavi, Egzon Bajraktari, Josef Lechleitner, Ulrich Pont

- D4 Simulation des hygrothermischen Verhaltens begrünter Dachkonstruktionen 543
Daniel Zirkelbach
- D5 Bemessung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle auf der Grundlage von
Raumklimamessungen 577
Markus Hofmann, Christoph Geyer, Oliver Kornadt
- D6 Mikrobieller Bewuchs an Fassaden 603
Heide Ackerbauer

E Materialtechnische Tabellen

- E1 Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz 645
Nina Schjerve, Ulrich Schneider
- E2 Materialtechnische Tabellen 683
Rainer Hohmann

Stichwortverzeichnis 763

Hinweis des Verlages

Die Recherche zum Bauphysik-Kalender ab Jahrgang 2001 steht
im Internet zur Verfügung unter www.ernst-und-sohn.de

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 erfolgversprechende 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. Wärme gedämmte 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.

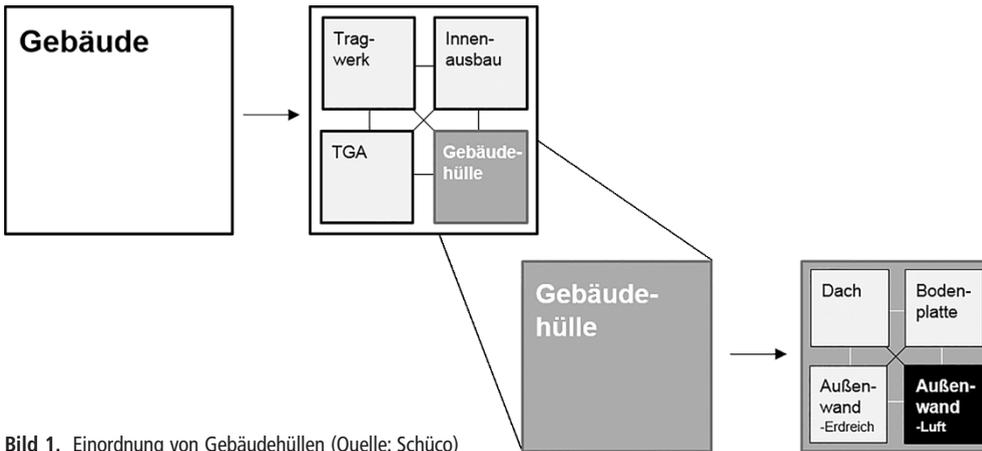


Bild 1. Einordnung von Gebäudehüllen (Quelle: Schüco)

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

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

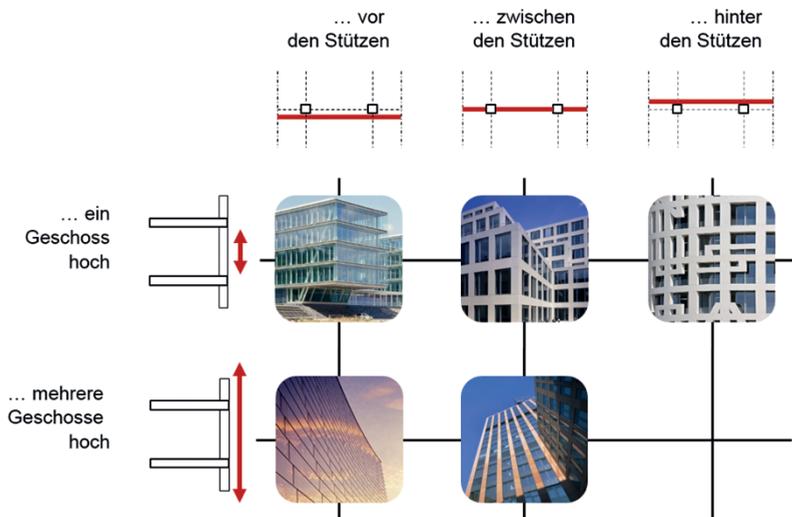


Bild 3. Fassaden im Skelettbau (Quelle: Schüco)

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 modulfest, 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-

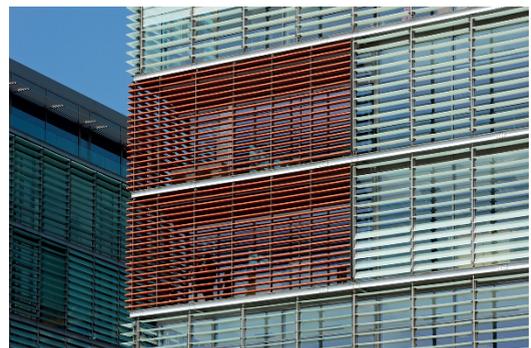


Bild 7. Sonnen- und Blendschutz in der Fassade (Quelle: Schüco)

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-

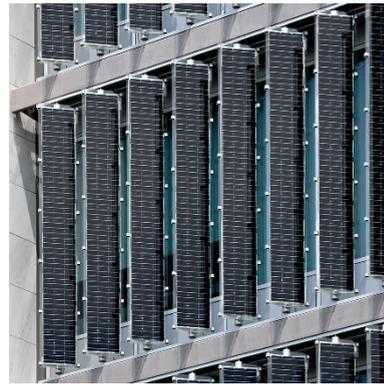


Bild 8. Photovoltaik in der Fassade (Quelle: Schüco)

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

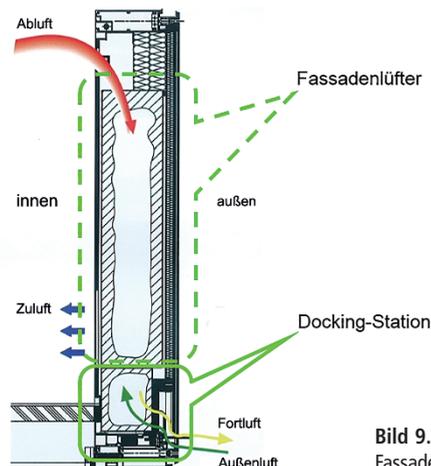


Bild 9. Einsatz von mechanischen Fassadenlüftern (Quelle: Schüco)

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. Quellauf- 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 Löt- oder Schweißverbindungen. 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-