

D II Energieeffizienz und Mauerwerksbau: Passivhaus-Gebäudehülle mit KS als Grundlage für „Zero Emission Buildings“ [1]

Burkhard Schulze Darup, Nürnberg

1 Grundlagen – Effizienz

Die EU-Gebäudeeffizienzrichtlinie wird in wenigen Jahren den Standard von „Zero Emission Buildings“ für die Errichtung neuer Gebäude fordern. Das gilt ab 2019 für öffentliche Gebäude und ab 2021 für alle Neubauten. Die Techniken für diesen neuen Standard sind bereits am Markt verfügbar. Es geht um die Verbindung einer hocheffizienten Gebäudehülle bei gleichzeitigem Einsatz regenerativer Energien.

Hinsichtlich der Gebäudehülle liegen seit zwanzig Jahren Erfahrungen mit Passivhaus-Komponenten vor. Über 20.000 Gebäude wurden mit dieser Technik errichtet. Ein hoher Anteil dieser Projekte wurde durch ein anschließendes Monitoring erfasst, das die Wirksamkeit der Technik auf wissenschaftlich hohem Niveau belegt. Passivhäuser sind durch einen sehr niedrigen Energiebedarf bei hoher Behaglichkeit und bestem Komfort gekennzeichnet. Die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sind so gering, dass sie fast vollständig durch kostenlose „passive“ Energiebeiträge (nutzbare Energiegewinne) ausgeglichen werden. Das sind solare Gewinne durch Fenster und sonstige transparente Flächen, Wärmeabgabe von Beleuchtung, Geräten und Prozessen sowie Körperwärme der Personen im Gebäude. Verbleibt nur ein minimaler Heizwär-

mebedarf von $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, so ist das Hauptkriterium für ein Passivhaus erfüllt [2].

Der Begriff beschreibt einen technischen Standard, keinen Gebäudetyp. Dem Planer erschließen sich durch die Anwendung der energiesparenden Komponenten vor allem neue Möglichkeiten der Gestaltung, die Einschränkungen sind eher gering. Ausgerüstet mit ein wenig zusätzlichem energetischem Handwerkszeug erweitern sich die Spielräume für Entwurfskonzepte. Bei vielen Architektenwettbewerben wird der Passivhausstandard als selbstverständliche Grundlage des Entwurfs gesehen und der Architekturpreis Passivhaus wurde 2010 das erste Mal vergeben an erstklassig gestaltete Projekte aus dem Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude.

Durch eine sorgfältige Ausbildung der Gebäudehülle können gebäudetechnische Installationen reduziert werden und die Behaglichkeit und der Komfort der Gebäude erhöhen sich. Zum Vergleich: Gebäude aus den 1960er-Jahren und davor haben einen Heizwärmebedarf von 200 bis 300 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, das entspricht ca. 20 bis 30 Litern Öl. In den 1980er-Jahren wurden 10- bis 15-Liter-Häuser gebaut. Gebäude nach der Energieeinsparverordnung (EnEV 2009) liegen bei 5 bis 8 Litern – und das Passivhaus kann als 1,5-Liter-Haus bezeichnet werden. Wird die benötigte Energie für Heizen, Warm-

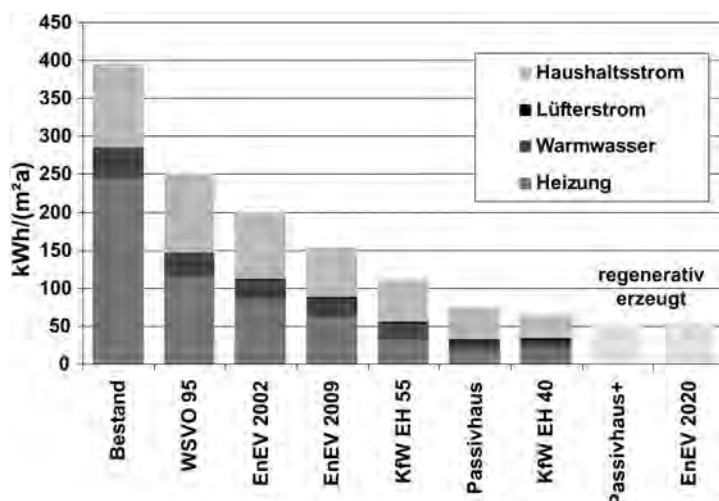


Bild 1. Primärenergie-Kennwerte von Baustandards

wasser und Strom durch erneuerbare Energien gedeckt, so wird das Gebäude auch als Null- oder Plusenergiehaus bezeichnet.

2 Grundlagen – Plusenergietechnik

Effizienzmaßnahmen stellen sich auf Basis bisheriger Erfahrungen durchweg wirtschaftlicher dar als die Bereitstellung des verbleibenden Energiebedarfs mit erneuerbaren Energien. Deshalb ermöglicht es die hohe Effizienz von Passivhäusern auf wirtschaftliche Art und Weise, eine Plusenergiebilanz für Gebäude zu erzielen. Die Definition des „Zero Emission Buildings“ steht noch aus. Von deutscher Seite aus sollte der Vorsprung bei den Effizienztechnologien genutzt werden, um auf dieser Basis hoch wirtschaftliche Versorgungskonzepte zu entwickeln. Heizwärme- und Warmwasserbedarf werden mit regenerativ hochwertigen Techniken mit günstigem Primärenergiekennwert bereitgestellt werden müssen und darüber hinaus wird Strom mit erneuerbaren Techniken zu erzeugen sein. Ein Plusenergiehaus kann dies innerhalb seiner Gebäudestrukturen, z. B. in Form von Photovoltaik im Dach- und ggf. Wandbereich erbringen. Bild 2 stellt dar, wie sich die Techniken vermutlich innerhalb der nächsten Jahrzehnte weiter entwickeln werden: Gebäude werden zunehmend mehr Energie ins Netz liefern. Die Berechnung erfolgte beispielhaft für charakteristische Gebäude unter alleiniger Nutzung der Dachfläche mit leicht südlich geneigter Pultdachform für PV. Es ist erkennbar, dass nicht nur der Bedarf für Heizen, Warmwasser und Strom abgedeckt wird, sondern zudem Ressourcen z. B. für den Verkehr zur Verfügung stehen. Bei der Definition der Plusenergietechnik muss bedacht werden, dass es zwar sinnvoll ist, einen großen Teil der

Energie direkt innerhalb der Gebäudestrukturen zu gewinnen. Die Bilanzgrenze kann jedoch ebenso in einer städtebaulichen Struktur oder einer Region liegen. De facto sind die Grenzen international, da ein über-europäisches Verbundnetz zunehmend Realität wird. Je umfassender dieses zunehmend regenerative Netz hinsichtlich seiner Technikauslegung ist, desto einfacher ist es möglich, die Energieanforderungen in ihrem Tages- und Jahresgang kontinuierlich regenerativ bereitzustellen. Die Energieversorgung der Zukunft wird zu großen Teilen mit gestalterisch und technisch hochwertigen Lösungen innerhalb der Siedlungsstrukturen und einzelnen Häuser funktionieren. Dabei ist der richtige regenerative Mix der Versorgung mit Photovoltaik und klein strukturierten regenerativen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Verbindung mit Windkraft, Wasser- und Gezeitenkraftwerken verschiedener Ausprägung bis hin zu geothermischer und solarthermischer Stromerzeugung erforderlich. Die Regelung über einen Netzverbund ermöglicht mit der hohen Anzahl von dezentralen Anlagen eine kontinuierliche und krisensichere Energieversorgung.

3 Energetische Berechnung

Für den Energiebedarf eines Gebäudes werden bereits beim Vorentwurf die wichtigsten Festlegungen getroffen. Deshalb sollte schon in diesem Stadium eine begleitende Untersuchung zur thermischen Bauphysik und zum Jahresheizwärmebedarf durchgeführt werden. Die Energieeinsparverordnung (EnEV) verlangt den Nachweis nach DIN 18599. Für Wohngebäude ist alternativ noch das Berechnungsverfahren nach EN 832 / DIN V 4108-6 möglich. Baulicher Wärmeschutz und Heizungsanlagentechnik können auf diesem Weg simuliert

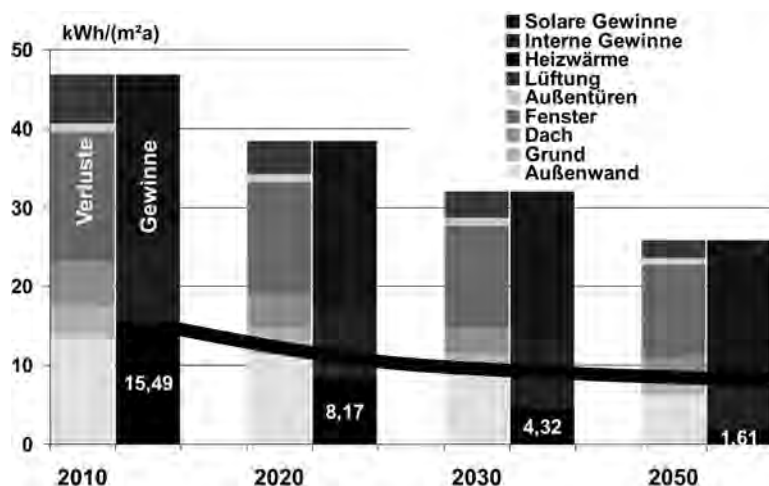


Bild 2. Mögliche Entwicklung der Effizienzstandards bis 2050 unter Anwendung innovativer Komponenten und voraussichtliche wirtschaftlich optimale Entwicklung des Heizwärmebedarfs (schwarze Linie)

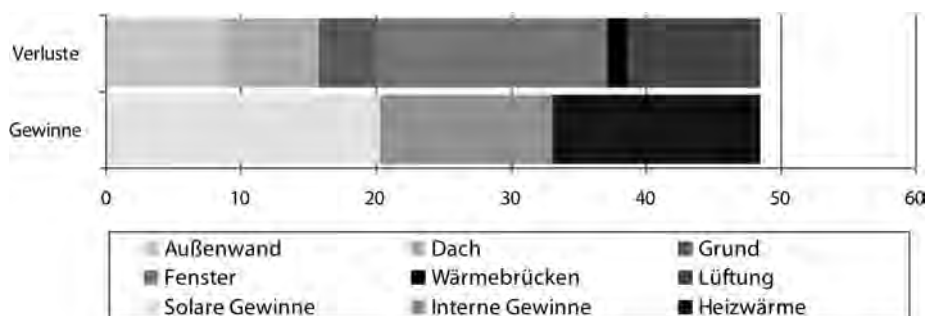


Bild 3. Jahres-Heizwärmebilanz für ein charakteristisches Passivhaus – den Transmissionswärmeverlusten durch Wand, Grund, Dach, Fenster und Wärmebrücken und Lüftungswärmeverlusten stehen die nutzbaren Gewinne gegenüber: solare Gewinne, interne Wärme und der resultierende Heizwärmebedarf, der beim Passivhaus unter 15 kWh/(m²a) liegt

werden. Wenn es allerdings darum geht, ein sehr energieeffizientes Gebäude zu optimieren, so müssen die spezifischen Anforderungen durch den Rechengang präzise beschrieben werden. Für Kennwerte im Bereich des Passivhauses hat sich seit Jahren das Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) in der Praxis bewährt [3]. Bei einer sehr hohen Anzahl von Gebäuden wurden Rechenergebnisse durch später durchgeführte Energieverbrauchs-Messungen bestätigt. Es handelt sich um ein Excel-Programm auf Grundlage der EN 832, bei dem zunächst wie bei den Rechenwegen nach EnEV zur Ermittlung der Transmissionswärmeverluste die Außenoberflächen der wärmeübertragenden Gebäudehülle mit Bauteilaußenmaßen sowie die entsprechenden U-Werte eingegeben werden. Sehr genau können dabei zur Ermittlung der solaren Gewinne die Rahmenbedingungen der Fenster inklusive der vorliegenden Verschattung erfasst werden. Wärmebrücken werden mit ihren Wärmebrückenverlustkoeffizienten längenbezogen eingegeben. Lüftungswärmeverluste und interne Gewinne sind auf einfachem, aber sehr präzisiertem Weg ermittelbar. Dabei sind Standardwerte im Programm vorgegeben, die jedoch alternativ mit sehr hoher Tiefenschärfe individuell berechnet werden können und somit die Spezifika hocheffizienter Gebäude sehr genau abbilden. Aus diesen Eingaben ergeben sich u. a. der Jahresheizwärmebedarf sowie die Heizwärmelast und eine Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes. Die Berechnung erfolgt auf der Basis der Energiebezugsfläche, also der tatsächlich beheizten Fläche. Darüber hinaus sind Rechenblätter zur Ermittlung des Warmwasserbedarfs sowie des Hilfs- und Haushaltsstrombedarfs enthalten. Als Ergebnis werden Primärenergiekennwert und CO₂-Emissionen ermittelt. Zugleich dient das Programm als Qualitätsnachweis, in dem die konstruktiven und energetischen Kennwerte zusammengefasst sind. Zudem wird die Erfüllung der Passivhaus-Kriterien nachgewiesen. Das sind der Heizwärmebedarf, der $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ aufweisen soll, die Heizlast-Anforderung mit $\leq 10 \text{ W}/\text{m}^2$ sowie der Primärenergiebedarf für Heizung, Klimatisierung, Warmwas-

serbereitung, Hilfsenergien und (Haushalts)-Strom mit dem Kennwert $\leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

In den nächsten Jahren muss für die Planer ein einfach handhabbares Recheninstrumentarium zur Projektierung von Plusenergiegebäuden geschaffen werden, das die Vorteile des PHPP mit einer einfach handhabbaren Berechnung der Gebäudetechnik-Aspekte verbindet unter Einbeziehung der noch festzulegenden Plusenergie-Kriterien.

4 Entwurfskriterien und Komfortfaktoren

Das bestimmende energetische Kriterium für energieeffizientes Bauen ist eine hervorragende thermische Gebäudehülle. Die Konstruktionen von Wand, Dach und Grund sollten einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aufweisen. Vorteilhaft sind darüber hinaus eine günstige Gebäudegeometrie, die Reduzierung der wärmeabgebenden Oberflächen im Verhältnis zum Heizvolumen (A/V-Verhältnis) durch eine kompakte Form des beheizten Bereichs, große Bautiefe und den Verzicht auf Versprünge innerhalb der thermischen Gebäudehülle. Der Wärmedurchgang für die Fenster in der Gesamtbetrachtung von Verglasung, Rahmen und Wärmebrücken sollte $U_w \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ betragen. Ein möglichst hoher Energiedurchlassgrad wirkt sich vorteilhaft aus, vor allem für die Südfenster ist ein Wert von $g \geq 50$ bis 60% anzustreben. Die Ausrichtung der Fensterflächen entscheidet über das Ausmaß der Wärmegewinne: Je geringer die Abweichung von der Südorientierung, desto günstiger. Möglichst weitgehende Verschattungsfreiheit dient der vollständigen Ausnutzung passiver Solargewinne. Wärmebrückenfreiheit bei Außenmaßbezug der Transmissionsfläche muss Ziel der Detaillösungen sein. Die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle und eine schadensfreie Konstruktion sind die Voraussetzung für eine funktionierende Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage mit mini-

mierten Leckageverlusten. Der Nachweis erfolgt mittels Blower-Door-Test, der für Passivhäuser einen Luftdurchsatz unterhalb des 0,6-fachen Gebäudevolumens bei einem Differenzdruck von 50 Pa vorsieht. Das heißt, der n_{50} -Wert sollte $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ betragen.

Behaglichkeit und hochwertiges Raumklima stellen sich bei energetisch hochwertigen Gebäuden als höchst willkommene Begleiterscheinung ein. Hoch wärmegeämmte Außenbauteile erfüllen die bauphysikalische Behaglichkeitsanforderung nach einer hohen inneren Oberflächentemperatur, die nahe an der Raumlufttemperatur liegt. Tauwasser und mithin Schimmelprobleme können bei solchen Konstruktionen nicht auftreten. Hochwertige Fenster weisen ausreichende Behaglichkeitskriterien auf, ohne durch Heizwärme einen Ausgleich schaffen zu müssen. Strahlungs-Asymmetrien werden in Passivhäusern auf ein sehr komfortables Maß minimiert. Als Folge der geringen Thermik und der minimalen Heizlast liegen auftretende Luftgeschwindigkeiten deutlich unter der Anforderungsschwelle von 0,15 m/s, in den meisten Bereichen unter 0,05 m/s. Die Lüftungsanlage erzeugt nur in sehr kleinen Einblasbereichen eine erhöhte Luftgeschwindigkeit, die bei richtiger Planung aufgrund der geringen stündlichen Luftmengen keinerlei Zugempfinden aufkommen lässt. Sehr wesentlich für das Wohlbefinden ist die ständig erneuerte Frischluft. Dies hat nicht nur Vorteile für die Raumluftqualität. Es stellt sich auch eine kontinuierlich angemessene Raumluftfeuchte ein, da eine ständige Abfuhr der anfallenden (Wohn-)Feuchte im Gebäude sichergestellt ist. Aufgrund des relativ geringen erforderlichen Luftwechsels von etwa $30 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person fällt bei richtiger Planung an kalten Tagen die Raumluftfeuchte dennoch nicht in zu trockene Bereiche.

Die hohe bauphysikalische Behaglichkeit führt zu Wohlbefinden und besten hygienischen und gesundheitlichen Raumklimabedingungen. Dies schlägt sich nicht nur beim Wohnen in positiven Kommentaren der Bewohner nieder – gerade bei gewerblichen Objekten ist eine Betrachtung dieser „weichen“ Komfortfaktoren sinnvoll: Durch gute Arbeitsbedingungen aufgrund der hohen bauphysikalischen Behaglichkeit mit der Folge eines niedrigeren Krankenstandes amortisieren sich nicht nur die geringen Mehrinvestitionen sehr schnell. Obendrein stimuliert ein komfortables Arbeitsumfeld ein positives Arbeitsklima und stellt eine gute Voraussetzung für erhöhtes Engagement der Mitarbeiter dar.

5 Hocheffiziente Wandkonstruktionen

Als Voraussetzung für Energieeffizienz muss ein hochwertiger Wärmeschutz der thermischen Gebäudehülle gegeben sein. An dieser Stelle sollen charakteristische Mauerwerkskonstruktionen aus Kalksandstein dargestellt werden, die mit einem guten Preis-Leistungs-Verhältnis energetisch hochwertige Lösungen ermöglichen und zusätzlich zum Passivhausstandard eine hohe Anzahl von weiteren Qualitätskriterien erfüllen. Dies betrifft neben den statischen Aspekten den Schall- und Brandschutz und insbesondere den sommerlichen Wärmeschutz.

5.1 Vorhangfassaden

Aus gestalterischer Sicht ermöglichen Vorhangfassaden viele Optionen mit einer hohen Anzahl von Fassadenmaterialien in Verbindung mit hoch witterungsbeständigen Konstruktionslösungen. Als Bekleidungslemen-

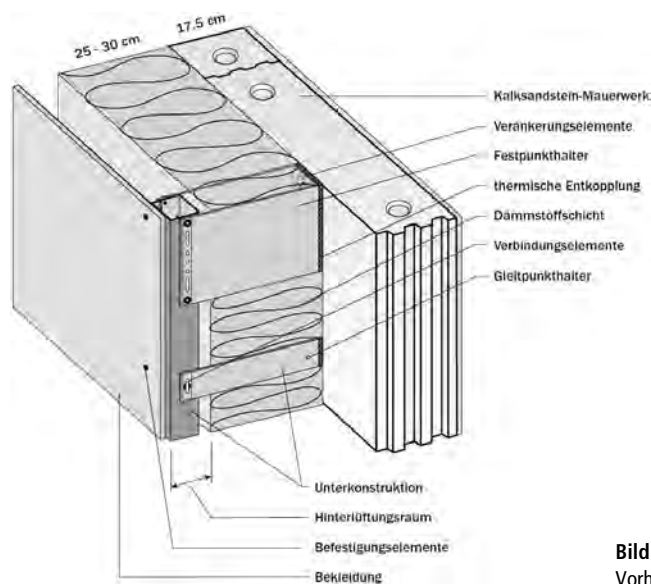


Bild 4. Systemzeichnung einer Vorhangfassade (KS)



Bild 5. Vorhangfassade auf KS-Mauerwerk

te werden mineralische Platten, Metalle, Glas, Holzwerkstoffe, Holzverkleidungen und zahlreiche weitere Produkte angeboten.

Die Befestigung der Bekleidungs-elemente erfolgt in Abhängigkeit von dem Bekleidungs-material und dem Format und muss möglichst wärmebrückenfrei erfolgen. Deshalb wird im Metallsektor zunehmend umgestellt von Aluminium- auf Edelstahlsysteme, die möglichst thermisch getrennt sind. Alternativ können Holzkonstruktionen zum Einsatz kommen. Die Wärmebrückeneffekte, die sich aus der Befestigung ergeben, müssen bei der U-Wert-Berechnung von vorneherein mit einbezogen werden. Die Befestigungsmittel können dabei als Gestaltungselemente für die Fassadengestaltung genutzt werden.

Die Wärmedämmung erfolgt bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden in vielen Fällen mit Dämmstoffen aus Mineralfasern, es können aber auch zahlreiche weitere Materialien, insbesondere aus dem Bereich der nachwachsenden Rohstoffe sinnvoll eingesetzt werden, soweit es dem Brandschutz nicht widerspricht. Zwischen Dämmstoff und Hinterlüftungsebene sollte eine Trenn-

schicht eingebracht werden, damit Abrieb und Fasern nicht in die Außenluft gelangen.

Der tragende Untergrund muss für die Verankerung der Unterkonstruktion ausreichend bemessen sein. In den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der Verankerungselemente ist der zulässige Verankerungsgrund mit Angabe der zulässigen Kräfte für jeden Verankerungs- und Dübeltyp angegeben, wobei sich Wände aus KS-Mauerwerk wegen der hohen Festigkeit als sehr guter Verankerungsgrund erweisen, was zu wirtschaftlich günstigen Systemlösungen führt [4].

5.2 KS mit WDVS

Eine hochwirtschaftliche Außenwandkonstruktion kann mittels schlankem KS-Mauerwerk in Verbindung mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) auf der Außenseite erzielt werden. Durch die klare Funktionstrennung kann das Mauerwerk die Belange Statik, Wärmespeicherung und sommerlichen Wärmeschutz sowie vor allem den Schallschutz hervorragend abdecken. Das WDVS erfüllt sehr kostengünstig die energetischen und bauphysikalischen Aspekte sowie den Witterungsschutz.

Als Dämmstoff kommen zahlreiche Produkte infrage wie Polystyrol-Partikelschaum, künstliche Mineralfasern, Polyurethan, Mineralschaum und Mineralschaum-Mineralfaserlamellen-Verbundplatten. Auch Holzweichfaserplatten und andere biogene Materialien sind bei einigen Systemherstellern als Dämmstoff einsetzbar. Die Dämmdicken sind bei vielen Systemherstellern bis deutlich über 30 cm möglich, sodass U-Werte im Bereich bis deutlich unter $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erzielt werden können. Grundsätzlich kann in WDVS-Systeme auch transparente Wärmedämmung einbezogen werden, dabei sollte aber beachtet werden, dass sich einzelne aufgehende Elemente möglicherweise in der Fassade abzeichnen können.

Die Dämmplatten des Wärmedämmverbundsystems werden mittels eines Klebers auf dem Mauerwerk befestigt, wozu der tragende Untergrund tragfähig, tro-

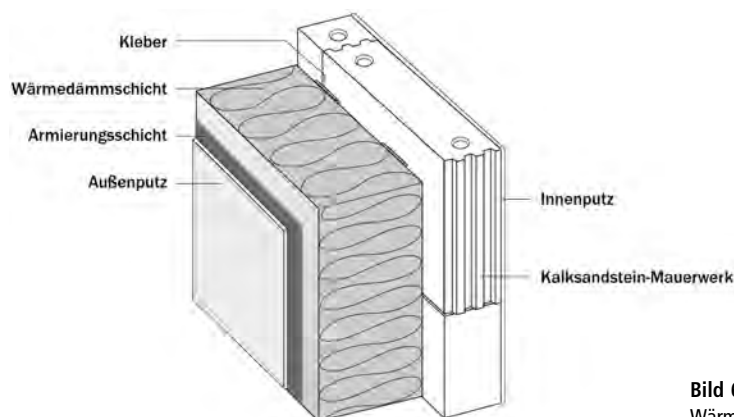


Bild 6. Systemzeichnung eines Wärmedämmverbundsystems (KS)



Bild 7. WDVS mit wärmebrückenoptimierter Befestigung eines Brüstungsstabes an einem Fenster

cken, staub- und fettfrei sowie ausreichend eben sein muss. Wände aus KS-Mauerwerk gelten ohne weiteren Nachweis auch für ausschließlich verklebte WDVS als ausreichend tragfähig. Die außenseitigen Putzsysteme bestehen aus Unterputz mit Bewehrungsgewebeeinlage und Oberputz. Bei den Materialien kann zwischen Kunstharzputzen und mineralischen Putzen unterschieden werden, wobei Letztere im Allgemeinen kunststoffmodifiziert bzw. kunststoffvergütet sind. Bei der Dicke kann zwischen Dünn- und Dickputzen gewählt werden. Das Bewehrungsgewebe (Glasgewebe) im Putzsystem hat die Aufgabe, die in jedem mineralischen Baustoff auftretenden Rissbreiten auf ein unschädliches Maß zu beschränken.

5.3 Zweischalige Außenwand

Zweischalige Außenwände bestehen aus einer massiven Mauerschale auf der Innenseite der Konstruktion, der

Wärmedämmschicht, optional einer Luftschicht und dem massiven Vormauerwerk. Es besteht eine klare Trennung der Funktionen. Das Mauerwerk auf der Innenseite hat vor allem statische Aufgaben und dient der Wärmespeicherung durch seine Masse, was vor allem dem sommerlichen Wärmeschutz zugutekommt. Die innen liegende Dämm- und ggf. Luftschicht bestimmt die energetisch-bauphysikalischen Aspekte der Konstruktion. Die Außenschale ist vor allem für den Witterungsschutz zuständig und erfüllt diese Aufgabe insbesondere in Regionen mit problematischen Witterungsverhältnissen hervorragend. Schallschutz wird vor allem durch das Zusammenwirken von Innen- und Außenmauerwerk bestimmt.

Folgende zweischalige KS-Außenwandkonstruktionen sind zu unterscheiden:

- zweischaliges Mauerwerk mit Luftschicht und Wärmedämmung,
- zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung,
- zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung und verputzter Vormauerschale.

Die baurechtlichen Aspekte werden für zweischaliges Mauerwerk in DIN 1053-1 und in der Bauregelliste A, Teil 1 sowie in den Technischen Regeln des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) geregelt. Für einzelne Konstruktionskomponenten können darüber hinaus Prüfzeugnisse (z. B. für Drahtankervarianten) oder allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (z. B. für Flachstahlanker oder Kerndämmmaterialien) erforderlich werden.

Die zugelassenen Anker ermöglichen eine Dämmdicke bis zu 20 cm, was in Verbindung mit hochwertiger Dämmung mit λ_R knapp über 0,02 W/(mK) zu passivhaustauglichen U-Werten führt. Es ist hilfreich, weitergehende Informationen zur Kerndämmung und zu den damit verbundenen Spezifika für Wärme-, Feuchte-, Witterungs- und Schallschutz zu beachten. Besondere Regelungen gelten für den Einsatz von Ankern für die Verblendschale, Abfangungen und Dehnfugen [5].

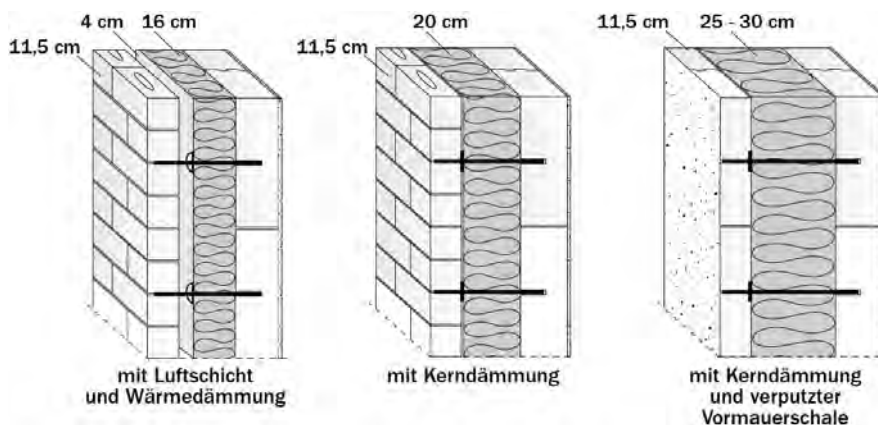


Bild 8. Systemzeichnung von drei zweischaligen Wandkonstruktionen (KS)



Bild 9. Sockelausführung bei zweischaligem Mauerwerk mit Verblender

5.4 Vakuumdämmung

Vakuumdämmung in Form von Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP-Dämmung) ermöglicht eine etwa fünfmal geringere Dämmschichtdicke als übliche Dämmstoffe bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert). Sie basiert auf der Entwicklung des Physikers *James Dewar*, der im Jahr 1890 den Zwischenraum von doppelwandigen Glasgefäßen auf 10^{-6} mbar extrahierte – das Prinzip der Thermoskanne. Soll dieses Prinzip auf ebene Flächen (im Baubereich) übertragen werden, muss vor allem das Problem der Druckkräfte gelöst werden, die aufgrund des Vakuums entstehen. Bei Vakuum-Isolations-Paneelen geschieht dies mittels nanoporöser Füllmaterialien aus gepresstem Pulver, Glasfasern oder offenporigem Schaum. Durch die extrem kleinen Hohlräume von etwa 100 nm (= 0,0001 mm) reicht ein mäßiges Vakuum von 1 mbar, um die Wärmeleitung über das Gas in diesen Materialien zu unterdrücken.

Am günstigsten verhalten sich nanoporöse Pulverkerne aus pyrogener Kieselsäure. Erst bei Nachlassen des Vakuums auf 100 mbar verdoppelt sich die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung. Bei vollständigem Versagen liegt der Lambda-Wert immer noch bei $0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Hochbarrierefolien aus mehreren Lagen verschiedener Kunststoffe mit dünner Metallbeschichtung hüllen das Material ein. Auf der Grundlage von Tests wird mit solchen Konstruktionen eine Standzeit für das Vakuum von 30 bis 50 Jahren belegt.

VIP-Elemente sind deutlich teurer als konventionelle Dämmung und werden deshalb sinnvollerweise vor allem in Sonderbereichen eingesetzt: zur Wärmebrückenreduktion in schwierigen Fällen, als Paneel für Fenster und Türen und beim flächensparenden Bauen. Bei industrieller Vorfertigung können im Baubereich zahlreiche weitere Anwendungsgebiete erschlossen werden, sowohl im Fertigbausektor, bei hochwertigen Bauteilen und in der Gebäudetechnik. Es muss mit vorkonfektionierten Platten gearbeitet werden und die Hülle darf nicht beschädigt werden. Die Detailplanung muss sehr präzise erfolgen. Befestigungen müssen in den Stoßbereichen der Platte erfolgen. Zudem bilden die Ränder der Platten erhöhte Wärmeübergänge – insbesondere wenn Fugen verbleiben. Dies wird am besten durch eine versetzte zweite Lage ausgeglichen.

Wichtig beim Einsatz innovativer Technik sind ausgereifte Grundkonzepte und Materialien, die den Einsatz auf der Baustelle vereinfachen.

6 Solare Gewinne – transparente Bauteile

Durch die solare Einstrahlung können transparente Flächen insbesondere auf der Südseite in der Gesamtbilanz während der Heizsaison einen Wärmegewinn generieren. Voraussetzung dafür ist eine günstige Ausrichtung,

Tabelle 1. U-Werte $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ von KS-Wänden mit 17,5 cm dick in Verbindung mit verschiedenen Dämmdicken in Abhängigkeit vom Lambda-Wert λ_R $[\text{W}/(\text{mK})]$ des Dämmmaterials

λ_R	Dämmdicke [mm]					VIP-Dämmung		
	350	300	250	200	160	80	50	40
0,007						0,085	0,133	0,165
0,008						0,097	0,151	
0,022			0,085	0,106	0,139			
0,025		0,081	0,097	0,120	0,148			
0,032	0,089	0,103	0,122	0,151				
0,035	0,097	0,112	0,133	0,165				
0,040	0,110	0,127	0,151					
0,045	0,123	0,142						



Bild 10. Holzfenster in Passivhaus-Ausführung



Bild 11. Holz-Alu-Fenster mit Dreischeibenverglasung und vorgesetzter Glasebene zur Abdeckung des Verschattungselements

weitgehende Verschattungsfreiheit, eine optimierte Größe der Fensterflächen und eine sehr gute Ausführung von Verglasung, Rahmen und Einbaudetails. Transparente Flächen bilden allerdings zugleich die wärmetechnisch schwächsten Bauteile eines Gebäudes mit dem höchsten Wärmedurchgang. Dies gilt für die längste Zeit der Heizperiode – für die Nächte und die strahlungsarmen Tage. Insofern ist eine hochwertige Planung bei der Gestaltung der Fenster von hoher Bedeutung.

Nahezu alle Hersteller bieten Fenster und Außentüren mit Passivhaus Qualität an, ein großer Anteil dieser Bauteile ist vom Passivhaus Institut zertifiziert. Der resultierende U-Wert der Fenster U_w liegt dabei unter $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Im eingebauten Zustand inklusive der Einbauwärmehücken sollte U_w unter $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegen. Ermittelt werden die Werte für ein Standardfenster von $1,23/1,48 \text{ m (b/h)}$. Folgende Aspekte sind bei den Fenstern zu beachten:

- Rahmenausführung mit einem möglichst günstigen U-Wert für den Rahmen mit U_f unter $0,8 \text{ W}/(\text{mK})$ sowie einem niedrigen Fensterrandverbundkoeffizienten Ψ_f ,
- hoher Glaseinstand des Randverbundes in den Rahmen,
- Wärmebrückenreduzierung beim Einbau durch hohe Rahmenüberdeckung mit Dämmung,
- möglichst schlanke Rahmenansichten, je höher der Glasanteil der Fenster, desto günstigere energetische Kennwerte sind erzielbar,
- Verglasung mit $U_g \leq 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, es sind kostengünstige Lösungen bis $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ möglich,
- wärmebrückenminimierter Randverbund der Verglasung mit einem thermisch optimierten Abstandhalter aus Kunststoff oder Edelstahl (mit einer sehr geringen Wandstärke unter $0,2 \text{ mm}$) und einem daraus resultierenden Verlustkoeffizienten Ψ_g im Bereich von $0,025$ bis $0,035 \text{ W}/(\text{mK})$.

Da der Randverbund den kältesten Bereich des Fensters bildet, haben großflächige Fenster bei gleicher Ausführung die besten wärmetechnischen Eigenschaften. Bei

Fensterteilungen, Sprossen und kleinen Fensterformaten liegen die U_w -Werte durchaus um $0,1$ bis $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ schlechter. Bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs wird im Rahmen der PHPP-Berechnung der Einzelnachweis der Fenster durchgeführt. Fenstergrößenoptimierung im Vorentwurfsstadium sollte allerdings nicht nur hinsichtlich der thermischen Optimierung erfolgen. Ebenso wichtig sind Formate, die kostengünstig gefertigt werden können, was von Hersteller zu Hersteller variieren kann. Vorteilhaft für das Erreichen des Passivhaus-Standards ist ein möglichst günstiger Energiedurchlassgrad der Scheiben – vor allem der südausgerichteten Fenster – von mindestens 50% , im Optimalfall 60% . Zudem ist es sehr hilfreich, die Verschattungssituation genau zu betrachten und beim Entwurf zu optimieren: Dabei sind neben Verschattungen aus der umgebenden Topografie, Gebäuden und Bäumen auch gebäudeeigene Aspekte wie Überstände, Versprünge, Balkons oder Vordächer sowie die Tiefe der Fensterlaibungen zu beachten.

Passivhausfenster verbessern den bisher bauphysikalisch schwächsten Punkt von Gebäuden so grundlegend, dass bei üblichen Fensterhöhen kein thermischer Ausgleich durch Heizkörper vor den Fenstern zur Erzielung ausreichender Behaglichkeit mehr erforderlich ist. Bei sehr kalten Außentemperaturen fallen die Werte an der Innenseite der Scheiben kaum unter 16 bis 17°C . Aufgrund dessen ist es möglich, bei Passivhäusern die Heizwärmezufuhr vollständig von den bisher gängigen Behaglichkeitsanforderungen zu trennen. Die Wärmezufuhr kann also auch über die Lüftungsanlage oder Heizkörper auf der Innenseite der Gebäude erfolgen.

Fenster erhalten beim Passivhaus als Gestaltungselemente neue Aspekte – die beschriebenen Anforderungen können Auswirkungen auf den Entwurf haben. Viele gebaute Passivhäuser zeigen inzwischen, dass die Architektursprache dadurch nicht eingeschränkt, sondern dass durch sie bei konsequenter Anwendung eher noch mehr gestalterischer Freiraum besteht.

7 Qualitätssicherung

7.1 Luft- und Winddichtheit

Die Anforderungen der Luft- und Winddichtheit werden in der Energieeinsparverordnung (EnEV) in § 6 beschrieben. Präzisiert werden sie in Anlage 4: „Wird bei Anwendung des § 6 Absatz 1 Satz 3 eine Überprüfung der Anforderungen nach § 6 Abs. 1 durchgeführt, darf der nach DIN EN 13829:2001-02 bei einer Druckdifferenz zwischen innen und außen von 50 Pa gemessene Volumenstrom – bezogen auf das beheizte oder gekühlte Luftvolumen – bei Gebäuden ohne raumlufttechnische Anlagen $3,0 \text{ h}^{-1}$ und mit raumlufttechnischen Anlagen $1,5 \text{ h}^{-1}$ nicht überschreiten.“ Ansonsten wird auf den Stand der Technik verwiesen. In DIN 4108-7 wird die Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen behandelt und es werden Planungs- und Ausführungsempfehlungen gegeben.

Bei Gebäuden mit Zu-/Abluftanlagen sollten erweiterte Anforderungen zur Anwendung kommen. Für Passivhäuser gelten erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit: Der n_{50} -Wert beträgt $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$. Eine luft- und winddichte Ausführung bewirkt für den Nutzer zahlreiche Vorteile:

- Funktionsfähigkeit der Wärmedämmung, deren Wirkung nicht durch Luftströme reduziert wird.
- Luftschallschutz ohne Senkung des Schalldämmmaßes durch Undichtheiten.
- Bautenschutz zur Vermeidung von baukonstruktiven Schäden, die aufgrund von Kondensatanfall bei Abkühlung der durchströmenden Luft in Leckagebereichen entstehen können.
- Thermischer Komfort durch Vermeidung von Zugscheinungen, Kaltluftseen und vertikaler Temperaturschichtung.
- Verringerter Heizenergieverbrauch.
- Höhere Luftqualität ohne unkontrollierte Luftströme, die Schadstoffe und Fasern aus Konstruktionen oder durch die Thermik aus tiefer gelegenen Räumen (z. B. Mikroorganismen) eintragen.
- Gezielter Luftwechsel durch Lüftungsanlagen statt Luftaustausch durch Winddruck oder Thermik (hoher Luftaustausch nur in unerwünschten Wettersituationen wie bei starkem Wind und in sehr kalten Witterungsperioden).
- Nahezu vollständiger Luftwechsel über den Wärmetauscher der Zu-/Abluftanlagen – Leckage-Luftwechsel von $0,1 \text{ h}^{-1}$ entsprechen Lüftungswärmeverlusten von etwa 5 bis 7 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Der Nachweis der Dichtheit eines Gebäudes nach DIN EN 13829 wird mittels eines Blower-Door-Tests durchgeführt. Durch einen Ventilator in einer dicht eingebauten Blower-Door wird eine Druckdifferenz erzeugt. Der resultierende Luftvolumenstrom für die Unterdruck- als auch Überdruckmessung wird für die Druckdifferenz von 50 Pa ermittelt. Gewöhnlich liegen die beiden Werte eng beieinander, sofern kein Klappenventil-Effekt einer Leckage vorliegt oder die Windeinflüsse zu

hoch sind. Der Mittelwert ist der gemessene n_{50} -Wert. Bei Unterdruck können mittels Anemometer, durch Nebel oder Infrarot-Thermografie Leckagen festgestellt werden. Die Kosten von Blower-Door-Messungen liegen für eine Wohneinheit bzw. ein Haus bei etwa 300 bis 600 € und umfassen die Installation der Messtechnik, die Begehung des Gebäudes zur Feststellung der Leckagen sowie ein Messprotokoll, in dem der n_{50} -Wert dargestellt wird.

Der Test sollte ausgeführt werden, sobald alle luftdichtenden Bauteile eingebaut sind, jedoch bevor die darüber liegenden Verkleidungen ausgeführt werden, üblicherweise nach Fenstereinbau, Ausführung der Dampfbremse und des Innenputzes. Sind Handwerker erstmals bei solch einem Bauvorhaben involviert, ist es empfehlenswert, sie zur Messung einzuladen. Die Erfahrung zeigt, dass die Nachbesserung von Luftundichtheiten während des Blower-Door-Tests am zielführendsten ist. Selbst detaillierte Mängelprotokolle können Handwerkern nicht in der Deutlichkeit die Leckagen nahebringen, wie dies mit Anemometer oder Nebelröhrchen während des Tests gezeigt werden kann.

Undichtheiten treten üblicherweise an folgenden Stellen auf:

- Anschlüsse zwischen massiven Bauteilen und Leichtbaukonstruktionen; hierbei ist zu beachten, dass Anschlüsse auch bei den vorhersehbaren Setzungen und Bewegungen dicht bleiben müssen.
- Anschlüsse von Dichtungsmaterialien innerhalb von Leichtbaukonstruktionen.
- Jede Form von Durchdringung bei Holzkonstruktionen, z. B. Anschluss von Pfetten, Zangen etc. bei Dachstühlen, Anschlüsse von Gauben, Deckenauflagern etc.



Bild 12. Blower-Door-Messung



Bild 13. Charakteristische Luftundichtheit an einer Steckdose in der Außenwand bzw. mit Leerrohrverbindung in den Außen- oder unbeheizten Bereich

- Nicht verputzte Flächen und Durchdringungen im Außenmauerwerk und doppelschaligen Haustrennwänden, z. B. hinter Vorwandinstallationen, Anschlüssen von Trockenbauwänden, unsaubere Putzanschlüsse zum Boden im Bereich des Estrichs etc.
- Fensteranschlüsse zum Rohbau rundum sowie Fugen zwischen Stockrahmen und Fensterflügel; besonders anfällig sind Haustüren an den oberen und unteren Anschlagseiten; Dichtheit ist im Allgemeinen nur durch Abschließen der Haustür zu erreichen.
- Elektrodoosen und Leerrohre, welche die dichtende Putzebene von Außenbauteilen durchdringen oder innerhalb des Gebäudes in einen unbeheizten Bereich führen (z. B. Leerrohre zum Keller).
- Installationsleitungen von Sanitär, Heizung und Lüftung, die dichtende Ebenen durchstoßen; auf eine schadensträchtige Entwässerungs-Dachentlüftung kann z. B. mittels einer internen Entlüftung verzichtet werden.

Diese Punkte stellen nur eine kleine Auswahl der zu beachtenden Luft- und Winddichtigkeitsuntersuchungen dar. Gute Ergebnisse werden nur dann erzielt, wenn bereits beim Entwurf auf ein einfaches Gebäudekonzept mit möglichst wenigen Materialübergängen geachtet wird, bei der Werkplanung die Details hinsichtlich der Dichtheit optimiert werden und bei der Bauüberwachung gezielt die Handwerker zur sorgfältigen Arbeit angehalten werden.

7.2 Wärmebrücken

Bei der energetischen Berechnung nach Energieeinsparverordnung ist es möglich, einen pauschalen Wert für die Wärmebrücken in Ansatz zu bringen. Die ermittelten U-Werte werden nach DIN V 4108-6 um $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erhöht. Bei Anwendung von Wärmebrückendetails, die im Beiblatt 2 dargestellt werden, kann der Ansatz auf $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ halbiert werden. Beide Lösungen sind für den Nachweis von Effizienzhäusern und Passivhäusern nicht geeignet, da dort im Allgemeinen deutlich günstigere Wärmebrückenlösungen angewandt werden müssen. Dies gilt sowohl für die Erzielung der Passivhaus-Anforderungen als auch hinsichtlich des Erreichens bauphysikalisch einwandfreier Lösungen. Die Bauteillängen der einzelnen Wärmebrücken müssen in einem detaillierten Rechengang ermittelt werden. Sie werden jeweils mit dem längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi \text{ [W}/(\text{mK})]$ multipliziert und aufsummiert. Sind die Ψ -Werte für die angewandten Konstruktionen bekannt, z. B. aus einem Wärmebrückenkatalog, ist der Aufwand eher gering. Die Berechnung von individuellen Wärmebrücken erzeugt Kosten in Höhe von 150 bis 400 € pro Wärmebrücke. Im Passivhaus Projektierungspaket werden die Wärmebrücken im Arbeitsblatt „Flächen“ ermittelt und die Längen und Ψ -Werte eingetragen. Das Ergeb-

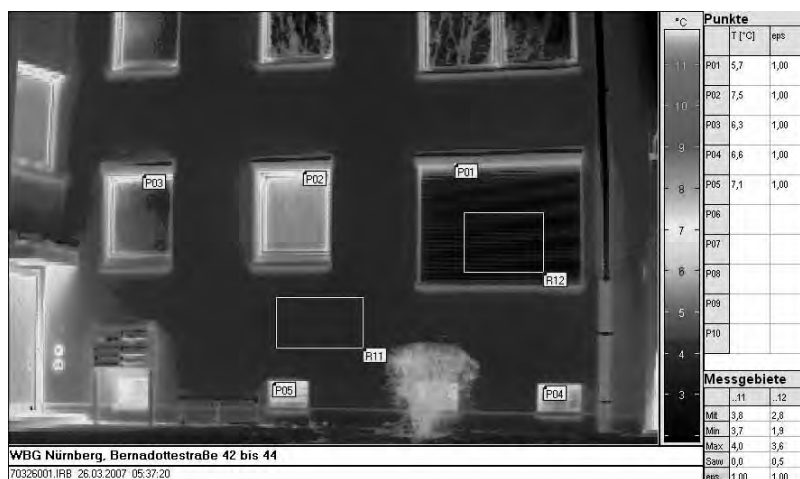


Bild 14. Thermografie zur Überprüfung von Wärmebrücken

nis wird dann selbsttätig in den weiteren Rechenvorgang eingebunden, z. B. für die Berechnung der Heizwärme und der Heizwärmelast. Für Kalksandstein-Konstruktionen liegt ein umfangreicher Wärmebrücken-katalog inkl. Passivhaus-Details vor [7].

Die Qualitätssicherung zur Feststellung von Mängeln hinsichtlich der Wärmebrückensituation wird mittels Infrarotthermografie ausgeführt. Diese sollte baubegleitend durchgeführt werden, um mögliche Fehler rechtzeitig beheben zu können (Bild 14).

8 Gebäudetechnik – Lüftung

8.1 Anforderungen an die Raumlufthygiene

Aus raumlufthygienischen und bauphysikalischen Gründen erfüllt die Lüftung von Gebäuden vor allem zwei Aufgaben.

1. Frischluftzufuhr zum Ausgleich von Schadstoffbelastungen durch
 - Luftverunreinigungen durch Hausstaub sowie nutzerbedingte Belastungen aus Haushaltsgegenständen, Lagerung und Zubereitung von Lebensmitteln, Haushaltschemikalien,
 - Schadstoffe aus Baumaterialien, insbesondere Ausbaumaterialien, Einrichtungsgegenständen und Möbeln,
 - Stoffwechselprodukte der Nutzer aus Atmung, Transpiration etc.
2. Regulierung der Raumluftfeuchtigkeit durch
 - Abtransport der in den Räumen anfallenden (Wohn-)Feuchte,
 - Begrenzung der relativen Luftfeuchte auf einen behaglichen und gesundheitsverträglichen Bereich von 30 bis 65 % relativer Feuchte,
 - Vermeidung von Kondensatanfall und Schimmelbildung an Bauteilen.

Manuelle Fensterlüftung kann diesen Aufgaben nur bedingt gerecht werden. Durch Erfahrungen mit gut ausgeführten Lüftungsanlagen und zahlreiche Vergleichsmessungen hinsichtlich der Raumluftqualität hat sich in den letzten Jahren zunehmend die Fachmeinung etabliert, dass bei Neubauten und Modernisierungen grundsätzlich ventilatorgestützte Lüftungsanlagen installiert werden sollten. Dies spiegelt sich auch in der DIN 1964-6 wider. Sie verlangt grundsätzlich die Erstellung eines Lüftungskonzeptes für Neubauten und für Renovierungen für den Fall, wenn im Ein- und Mehrfamilienhaus mehr als 1/3 der vorhandenen Fenster ausgetauscht bzw. im Einfamilienhaus mehr als 1/3 der Dachfläche neu abgedichtet wird. Die Anforderungen sind so formuliert, dass eine wirkliche Planungssicherheit vor allem durch ventilatorgestützte Systeme erzielt wird. Dabei wird unterschieden nach

- Feuchteschutz
Unter üblichen Nutzungsbedingungen müssen die Anforderungen ständig und nutzerunabhängig sicher gestellt sein.

- reduzierte Lüftung
Zur Gewährleistung des hygienischen Mindeststandards. Diese Stufe muss ebenfalls weitestgehend unabhängig von den Nutzern sein.
- Nennlüftung
Notwendige Lüftung zur Gewährleistung der hygienischen und gesundheitlichen Erfordernisse sowie des Bautenschutzes bei Normalnutzung der Wohnung. Dazu kann der Nutzer teilweise mit aktiver Fensterlüftung herangezogen werden.
- Intensivlüftung
Zum Abbau von Lastspitzen (z. B. durch Kochen, Waschen) kann der Nutzer ebenfalls teilweise mit aktiver Fensterlüftung herangezogen werden.

8.2 Auslegung von Lüftungsanlagen

Bei der Auslegung von Lüftungsanlagen ist der Kohlendioxidgehalt der Raumlufte der ausschlaggebende Leitwert, weil dieser durch die Nutzer verursacht und nicht veränderbar ist. Ein CO₂-Gehalt von 1000 ppm (Pettenkofer-Wert) bzw. 1500 ppm nach Norm sollte nicht überschritten werden. Bei völliger Ruhe sind dazu für einen erwachsenen Menschen etwa 20 m³ Frischluft pro Stunde erforderlich, bei leichter Arbeit etwa 30 m³. Damit korrespondiert die Mindestanforderung DIN 1946-6 von 30 m³ Frischluft pro Stunde für jede Person bei normaler Betätigung.

Schadstoffe und Gesundheit beeinträchtigende Einflüsse müssen so gering gehalten werden, dass durch den festgelegten Luftwechsel Rest-Schadstoffe ausreichend abgeführt werden. Zudem muss dafür gesorgt werden, dass eine ausreichende Durchströmung jedes einzelnen Raumes entsprechend seiner Nutzung gegeben ist. Am Beispiel einer Wohneinheit mit 120 m² Wohnfläche wird in Bild 15 das Lüftungskonzept dargestellt.

Die frische Außenluft wird in die Aufenthaltsräume geführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Räume möglichst vollständig durchlüftet werden und möglichst keine Kurzschluss-Luftströme entstehen. Der Zuluftbereich hat in diesem Fall eine Fläche von etwa 75 m², was bei 120 m³/h einem mittleren Luftwechsel von 0,66 h⁻¹ entspricht. Das entspräche bei manueller Lüftung einer ausgiebigen Querlüftung alle eineinhalb Stunden, was Mietern gerichtlich attestiert nicht zugemutet werden kann. Die Luft wird durch den Überströmbereich (Flure, Treppenraum, Nebenräume, ungenutzte Teile von offenen Wohnräumen) in die Ablufträume geleitet. Die Lüftungsanforderungen werden dort vollständig erfüllt: Küche 40 bis 60 m³/h, Bad 40 m³/h und WC 20 m³/h. Der Luftwechsel über die gesamte Fläche beträgt im vorliegenden Fall etwa 0,4 h⁻¹. Bei kleineren Wohneinheiten mit höherer Belegungsichte pro m² ist von höheren Raten auszugehen, bei großzügigen Wohnungen oder Häusern mit geringer Personenbelegung kann der Luftwechsel bis zu einem Wert von 0,3 h⁻¹ reduziert werden. Bei Nichtwohngebäuden gilt das Prinzip in gleicher Form: Qualität und Energieeffizienz eines Lüftungs-

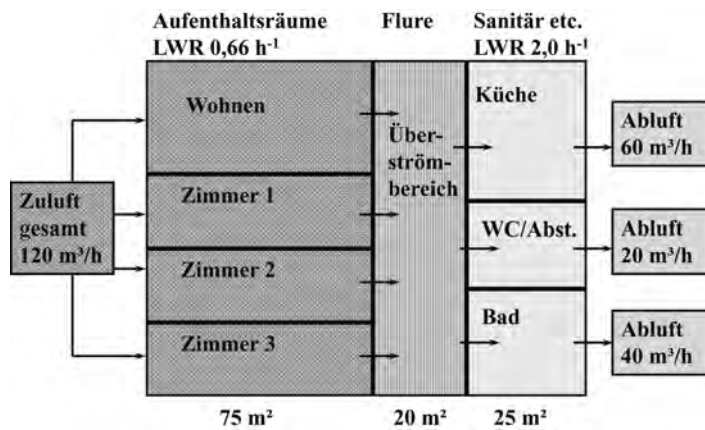


Bild 15. Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung; Auslegungsschema für eine Wohnung

systems hängen davon ab, wie geschickt Zuluftbereich (Arbeitsbereich, Aufenthaltsräume), Überströmzone und Abluftbereich festgelegt werden (Sanitär-, Neben-, Technikräume und vor allem Räume mit hoher interner Wärmelast zur Reduktion der sommerlichen Kühllast).

Lüftungsanlagen sollten den gewünschten Luftwechsel regelungstechnisch in möglichst einfacher Form erfüllen. In Abhängigkeit von Nutzung und Belegungsichte kann die geförderte Luftmenge geändert werden. Bei Wohnnutzung reicht im Allgemeinen eine Zwei- bis Drei-Stufen-Regelung mit Auslegungsvolumen, abgesenktem Betrieb und Bedarfslüftung, wobei Letztere auch durch manuelle Fensterlüftung leistbar ist, um kostengünstige Konzepte, z. B. im Geschosswohnungsbau zu erhalten.

Bei komplexeren Anlagen kann die Stimmigkeit der Regelung sehr stark über das Funktionieren des Energiekonzepts entscheiden. So kann bei Büronutzung außerhalb der Betriebszeiten eine starke Absenkung bis hin zur Abschaltung gewählt werden. Für Schulen sollte eine genaue Überprüfung des Bedarfs durchgeführt werden. Es gibt mehrere gut gelungene Lüftungskonzepte mit Auslegungsvolumina von 15 bis knapp über 20 m³ pro Stunde und Schüler. Großzügigere Anlagen verteuern die Investitionskosten deutlich und sind hinsichtlich der Luftbewegungen und Geräuschentwicklung deutlich schwieriger zu planen. Normgerechte Ausführungen von Lüftungsanlagen führen mitunter zu recht aufwendigen Systemen mit hohen Investitions- und Betriebskosten, sodass in den nächsten Jahren auf diesem Feld weitere Entwicklungen zu erwarten sind. Bei zahlreichen Raumluftmessungen wurde auch für kostengünstig ausgelegte Anlagen belegt, dass durch ventilatorgestützte Lüftungsanlagen die Raumluftqualität signifikant verbessert wird [8/9].

8.3 Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung

Die Reduzierung der Lüftungswärmeverluste über eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung ist eine der wesentlichen Maßnahmen, um den niedrigen Energieverbrauch eines Passivhauses zu erreichen und zugleich für die Bewohner einen hohen Komfort und gute Raumluftqualität zu erzielen. Durch die Lüftungsanlage wird die Wärme der Abluft über einen Wärmetauscher auf die hereinströmende Außenluft übertragen. Um den hohen energetischen und technischen Ansprüchen eines Passivhauses gerecht zu werden, müssen das Gerät und die damit verbundene Anlage folgende Kriterien erfüllen.

1. Behaglichkeitskriterium: Eine minimale Zulufttemperatur von 16,5 °C wird vom Gerät ohne zusätzliche Einrichtungen auch bei einer Außenlufttemperatur von -10 °C erreicht.
2. Effizienzkriterium (Wärme): Effektiver trockener Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{\text{WBG,t,eff}} \geq 75\%$, am Laborprüfstand mit balancierten Massenströmen auf der Außen-/Fortluftseite gemessen.
3. Effizienzkriterium (Strom): Elektrische Leistungsaufnahme des Gerätes inklusive Steuerung jedoch ohne Frostschutzheizung $\leq 0,45 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$ bei einer externen Pressung von 100 Pa.
4. Dichtheit und Dämmung: Leckvolumenströme $\leq 3\%$ des mittleren Volumenstroms des Wohnungslüftungsgerät-Einsatzbereiches entsprechend den DIBt-Richtlinien sowohl für Unter- als auch Überdruck.
5. Abgleich und Regelbarkeit: Disbalance von maximal 10% für Außen- und Fortluftmassenstrom (bei Aufstellung des Gerätes innerhalb der wärmegeämmten Gebäudehülle) bzw. Zuluft- und Abluft-Massenstrom (bei Aufstellung des Gerätes außerhalb der wärmegeämmten Gebäudehülle).
6. Schallschutz: Schalldruckpegel im Aufstellraum $\leq 35 \text{ dB(A)}$, in Wohnräumen unter 25 dB(A) und in Funktionsräumen unter 30 dB(A).



Bild 16. Blick in ein Zentralgerät einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung für ein Einfamilienhaus



Bild 17. Lüftungszentrale für ein Gebäude mit ca. 1500 m² Nutzfläche

7. Raumlufthygiene: Das Zentralgerät einschließlich Wärmeübertrager sollte einfach zu inspizieren und zu reinigen sein. Der Filterwechsel kann vom Betreiber (kein Fachpersonal) selbst durchgeführt werden, Filterqualitäten: Außenluftfilter als Feinfilter (F7) mit frontständiger Anordnung und Abluftfilter als Grobfilter (G4). Filterüberwachung sollte durch Druckdifferenzmessung an den Filtern erfolgen in Verbindung mit halbjährlichem Filterwechsel. Wird das Gerät im Sommer nicht betrieben, sollte der Filter vor der Wiederinbetriebnahme gewechselt werden. Der Gerätehersteller hat entweder durch Gerätebestandteile oder durch obligatorisch beigefügtes Zubehör dafür Sorge zu tragen, dass die Raumlufthygiene nach dem neuesten Erkenntnisstand sichergestellt wird.
8. Frostschutzschaltung: Auch bei winterlichen Extremtemperaturen (-15°C) muss sowohl ein Zufrieren des Wärmeübertragers als auch das Einfrieren eines hydraulischen Nachheizregisters ausgeschlossen werden. Beim ungestörten Frostschutzbetrieb muss die reguläre Funktion des Gerätes dauernd sichergestellt sein [10].

8.4 Erdreichwärmetauscher

Durch einen Erdwärmetauscher (ERW), der die Außenluft vorwärmt, kann der Wirkungsgrad einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung geringfügig verbessert und vor allem das Einfrieren des Wärmetauschers verhindert werden. Für einen Luft-ERW kann handelsübliches Rohrmaterial, z. B. Kabelschutzrohr HDPE, KG-Rohr oder spezifisches Material für Erdwärmetauscher verwendet werden. Als Querschnitte sind in Abhängigkeit von der Luftmenge für den Bereich einer Wohneinheit DN 150 oder DN 200 zu wählen. Die Länge und Anordnung ergibt sich aus der Anforderung an die minimale Lufttemperatur am Wärmetauscher des Gerätes. 15 bis 40 m Rohrlänge werden üblicherweise

für ein Einfamilienhaus ausgeführt. Je höher die Erdüberdeckung (möglichst $> 2,00\text{ m}$ oder Führung unterhalb der Bodenplatte) und je besser leitend das umgebende Erdmaterial ist (z. B. gut verdichtetes lehmiges Material), desto günstiger ist der Wirkungsgrad. Die Leitungen sollten mit mindestens 2% Gefälle zu einem Reinigungs- und Entwässerungsschacht verlegt sein, damit Kondensat ablaufen kann, und mit einem Ansaugfilter ausgestattet sein. Zudem ist sicherzustellen, dass eine Reinigung möglich ist und jederzeit eine hygienisch einwandfreie Situation gegeben ist. Eine gute Alternative stellt ein Sole-Luft-Wärmetauscher dar. Dabei wird eine Erdleitung mit Sole durchströmt und die so gewonnene Erdwärme vor dem Lüftungsgerät mittels Wasser-Luft-Wärmetauscher auf die angesaugte Außenluft der Lüftungsanlage übertragen. Die Anlage ist einfach herstellbar und mittels einer kleinen Umwälzpumpe gezielt regelbar.

9 Gebäudetechnik – Plusenergiekomponenten

Der sehr geringe Restwärmebedarf, der im Passivhaus zum Heizen bereitgestellt werden muss, ermöglicht einen Kostensprung zur Reduzierung der Investitionskosten, wenn ein gesondertes Heizsystem überflüssig wird und das ohnehin vorhandene Zuluftsystem die erforderliche Heizwärme transportieren kann. Damit dies unter bauphysikalisch behaglichen Kriterien geschehen kann, muss die Auslegungs-Heizleistung unter 10 W/m^2 und die maximale Temperatur im Wärmetauscher bei 50°C liegen. Ein deutlicher wirtschaftlicher Vorteil ist allerdings auch bei der Trennung von Lüftungs- und Heizungstechnik gegeben. Bei der Planung im Wohngebäudebereich ist zu beachten, dass der Bedarf für Warmwasserbereitung oftmals höher liegt als der Bedarf für die Raumwärme. Zahlreiche Heizsysteme er-

möglichen eine weitestgehend regenerative Bereitstellung der Wärme.

9.1 Gebäudetechnik – Heizung, Warmwasserbereitung und Prozesswärme

In den nächsten Jahren wird ein Paradigmenwechsel im Heizanlagenbau erfolgen. Die Umsetzung von Gebäuden mit sehr hochwertiger Gebäudehülle in der Breite entzieht der bisherigen Konstruktionsweise von Heizungssystemen die Grundlage. Folgende Aspekte müssen bei der Konzeption bedacht werden:

- Die Heizwärmelast von deutlich unter 10 W/m² ermöglicht, wie oben bereits erläutert, einfachste Heizsysteme, die Synergien mit Lüftungstechnik und Warmwasserbereitung nutzen müssen, wie es bereits beim Wärmepumpenkompaktaggregat umsetzbar ist. Der erhöhten Investition in die Gebäudehülle steht eine Reduktion bei der „klassischen“ Gebäudetechnik entgegen. Allerdings wird das Gesamtpaket Gebäudetechnik durch Lüftungsanlagen und Einsatz erneuerbarer Energien an Umfang zunehmen.
- Warmwasserbereitstellung übersteigt vom Energiebedarf zunehmend den Heizbereich mit der daraus erwachsenden Anforderung, effizientere Systeme zu entwickeln. Gerade in diesem Bereich sind intensive Entwicklungen notwendig, einerseits Maßnahmen zur Senkung der Warmwassermengen bei gleichem Komfort und auf der anderen Seite die deutliche Erhöhung des Anlagenaufwands durch die Systemkonfiguration bzw. Wärmerückgewinnungstechniken, die bisher beständig in ihrer Entwicklung an Grenzen gestoßen sind. Parallel dazu ist Solarthermie – synergetisch mit PV – weiterzuentwickeln.
- Teure Heizungsregelungs-, Monitoring- und Abrechnungstechniken sind in Zukunft unnötig und stellen bei integraler Kommunikationstechnik nur kleine Zusatzmodule dar, die zusammen mit der Unterhaltungselektronik im Handyformat untergebracht werden können.
- Die Energie- und Wärmeflüsse im Wohnbereich liegen nahe, Küchentechnik integral mit der Gebäudetechnik zu verbinden. Statt singulärer additiver Komponenten können vernetzte Strukturen oder integrale Systeme unter Nutzung von Synergien entwickelt werden.

9.2 Versorgungskonzepte für Quartiere und Kommunen

Hocheffiziente Gebäude bei Neubau und Sanierung verändern Versorgungsstrukturen auf städtebaulicher Ebene. So wird z. B. die Gasversorgung mittelfristig in gering verdichteten Gebieten nicht mehr wirtschaftlich aufrechterhalten bleiben können. Eine monovalente Stromversorgung wird in Einfamilienhausgebieten zum Standard werden, sodass die Gebäudetechniksysteme darauf abgestellt werden müssen.

9.3 Strom

Haushalts-, Betriebs- und Hilfsstrom müssen in die Planung gezielt einbezogen und optimiert werden. Einsparungen sind im Anschaffungsturnus im Allgemeinen sehr kostengünstig zu erzielen. Dabei entstehen zusätzliche Vorteile hinsichtlich der internen Wärmelasten und des sommerlichen Wärmeschutzes.

9.4 Sommerlicher Wärmeschutz und Kühlung

Die hochwertige Gebäudehülle birgt durchweg Vorteile für den sommerlichen Wärmeschutz, wenn eine gezielte Planung der transparenten Flächen und deren Verschattung durchgeführt werden. Bei Einsatz von genügend aktivierbarer Gebäudemasse, was insbesondere bei Massivbauten mit schwerem Steinmaterial wie Kalksandstein gegeben ist, kann die sommerliche Temperatur im Tagesrhythmus durch die Nutzung der Nachtkühle allein durch passive Maßnahmen im komfortablen Bereich gehalten werden. Bei Bedarf können Gebäudetechniksysteme für Heizen und Kühlen in einfacher Form und geringen Investitionskosten zusammenwirken. Aktive Kühlsysteme können weitestgehend vermieden und bei Erfordernis in Sonderfällen mit solar gekoppelter Technik ausgeführt werden.

9.5 Erneuerbare Energien

Die Einbeziehung erneuerbarer Energien für Gebäudetechnik und Stromversorgung wird zur zentralen Aufgabe der Objekt- und Bebauungsplanung. Es sollte das Ziel sein, ein Höchstmaß an erneuerbaren Energien innerhalb der Siedlungsstrukturen bereitzustellen, um Energieimporte sowie zentrale Kraftwerkstechniken und die Nutzung von Freiflächen für regenerative Stromerzeugung auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Es ist davon auszugehen, dass städtebauliche Strukturen diesen Anforderungen angepasst werden müssen. Mit marktverfügbarer Technik können bereits heute kostengünstig Plusenergiegebäude erstellt werden.

10 Wirtschaftlichkeit und Ausblick

Die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern führt zu einer hohen Unsicherheit hinsichtlich der Energiepreisentwicklung der nächsten Jahre. Selbst ohne größere globale Konflikte können aufgrund hoher Nachfrage dramatische Preissteigerungen eintreten: von 1998 bis 2011 stiegen die Rohölweltmarktpreise von 15 auf etwa 120 Dollar pro Barrel mit besonders starken Preissprüngen im Jahr 2008. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft noch deutlichere Ausschläge zu verzeichnen sein werden. Erst wenn wir unsere Energie auf regionaler bzw. nationaler Ebene weitestgehend regenerativ bereitstellen können, werden sich die Kosten verstetigen. Dabei ist davon auszugehen, dass sich die Preise für erneuerbare Energien auf dem Preisniveau einpen-

deln, auf dem sie in ausreichender Menge bereitgestellt werden können. Im Umkehrschluss ist daraus abzuleiten, dass durch hohe Effizienz sowohl eine ausreichende Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien sichergestellt wird als auch ein wirtschaftliches Preisniveau deutlich früher erreicht werden kann.

So gesehen ist es neben dem Klimaschutzaspekt also vor allem eine volkswirtschaftliche Notwendigkeit, dass wir in wenigen Jahrzehnten eine weitestgehend regenerative und regional orientierte Energieversorgung erzielen. Energieeffizienz im Gebäudebereich bietet sich als strategische Maßnahme dafür besonders gut an, denn dort sind Einsparungen bei sehr gutem Kosten-Nutzen-Verhältnis möglich. Dabei ist zu beachten, dass Investitionsentscheidungen für 30 bis 50 Jahre tragen müssen: Die Effizienzkomponenten eines Gebäudes sollten also so hochwertig sein, dass vor Ablauf der Abschreibungszeit vor allem für die Außenbauteile keine teuren Nachbesserungen erfolgen müssen.

10.1 Kosten und Mehrinvestitionen

Das Passivhaus-Konzept ist deshalb so erfolgreich, weil einerseits konsequent auf Energieeffizienz und die Entwicklung optimierter Komponenten gesetzt wird. Auf der anderen Seite werden diejenigen Techniken angewandt, die wirtschaftlich möglichst günstig zu bewerten sind. Voraussetzung ist eine Optimierung der Kosten bei der Gebäudeplanung. Für die Konstruktionen der gedämmten Hülle gilt die Maxime: Raum für Dämmung schaffen ohne konstruktiven Mehraufwand. Daraus resultieren höchst wirtschaftliche Beträge für die Mehrinvestitionen. Dies gilt insbesondere für alle Effizienzmaßnahmen mittels Wärmedämmung. Die Mehrinvestitionen für erhöhte Dämmdicken liegen bei 0,80 bis 1,80 € pro cm Dämmdicke und m² Konstruktionsfläche. Selbst bei hohen Dämmdicken im Passivhausbereich kosten die auf diesem Weg eingesparten Kilowattstunden nur 0,01 bis 0,05 €/kWh.

Passivhausfenster kosten derzeit 15 bis 30% mehr als Standardfenster. Die Tendenz ist seit einigen Jahren deutlich fallend. In wenigen Jahren wird Passivhaus-Qualität den üblichen Standard darstellen. Hinsichtlich der Dreischeibenverglasung ist dies schon heute gegeben.

Den Investitionen für die Zu-/Abluftanlage mit Wärmehückgewinnung sind die Kosten für eine Abluftanlage gegenüberzustellen, die für die Raumlufthygiene ohnehin erforderlich ist. Den Mehrinvestitionen für die Passivhaustechnik stehen folgende Einsparungen gegenüber:

- Die Heizwärmeübertragung kann aufgrund der minimierten Heizleistung unter 10 W/m² durch die Lüftungsanlage übernommen werden oder mit reduziertem Aufwand für Leitungen und Heizflächen.
- Bei Kühlbedarf kann Betonkernaktivierung für Heizung und Kühlung gleichermaßen verwendet werden.
- Die Heizzentrale fällt deutlich kleiner aus als bei Vergleichsbauten und die Technik ist deutlich kostengünstiger.
- Da die Kühllast ebenfalls deutlich gesenkt werden kann, ist für zahlreiche Anwendungen bei gleichbleibend hohem thermischem Komfort der Verzicht auf herkömmliche teure Klimatechnik möglich.
- Aufgrund des geringeren Technikeinsatzes reduzieren sich Funktionsflächen z. T. deutlich.

10.2 Wirtschaftlichkeit

Beispielrechnungen bezüglich des Mehraufwands für ein optimiert geplantes Einfamilienhaus (125 m² WF) führen gegenüber einem Haus nach EnEV-Standard zu Mehrinvestitionen in Höhe von 8.000 bis 15.000 € (70 bis 120 €/m² Wohnfläche), bei Reihenmittelhäusern und im Geschosswohnungsbau liegen die Werte mit 50 bis 100 €/m² WF nochmals niedriger. Dies liegt am günstigeren A/V-Verhältnis, das die Investitionen bei der Gebäudehülle reduziert.

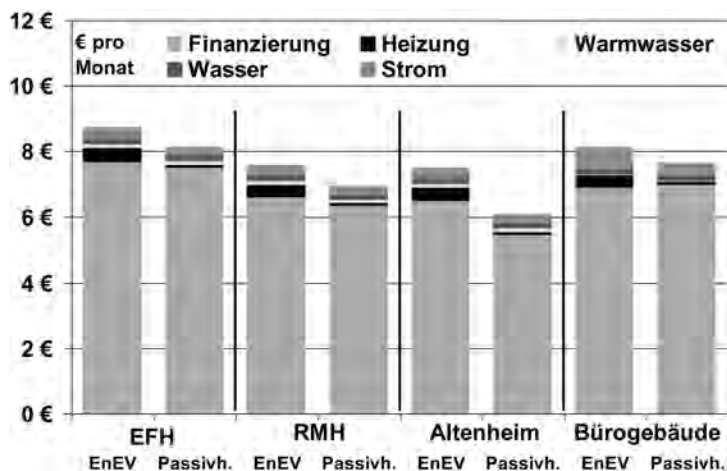


Bild 18. Monatliche Belastung für Finanzierungskosten und Betriebskosten von vier Gebäudetypen – aufgrund der KfW-Förderung für die ersten drei Beispielgebäude ist die Gesamtbelastung bei Passivhäusern günstiger als für die EnEV-Varianten

Relevant ist jedoch nicht die Betrachtung der Investitionskosten, sondern der daraus resultierenden monatlichen Belastung inklusive der Betriebskosten. In Bild 18 sind Ergebnisse für vier Gebäudetypen dargestellt: Aufgrund der KfW-Förderung (s. Abschn. 10.3) liegen die Finanzierungskosten für die Passivhaus-Ausführung günstiger als für die EnEV-Variante.

Nochmals günstiger können Funktionsbauten abschneiden, wenn ohnehin erforderliche Maßnahmen oder Komfortanforderungen durch Synergieeffekte der Passivhaus-Technik belegt werden können: So bieten Senioren- und Pflegeheime extrem günstige Voraussetzungen, da einerseits hocheffiziente Lüftungstechnik ohnehin erforderlich ist und zudem sehr günstige Rahmenbedingungen durch die KfW-Förderung gegeben sein können. Zahlreiche Bürogebäude sind in Passivbauweise mit höchstem Komfort errichtet worden ohne den Einsatz klassischer aufwendiger Klimatechnik. Dort können hohe Einsparungseffekte erzielt werden, welche die Mehrinvestitionen im Bereich der Gebäudehülle mehr als aufwiegen.

Bei der Betrachtung von Betriebs- und Finanzierungskosten liegt bereits bei heutigen Rahmenbedingungen unter Einbeziehung der aktuellen Förderprogramme die jährliche Belastung von optimiert geplanten Passivhäusern in den meisten Fällen niedriger als die für Standardgebäude. Bei steigenden Energiepreisen wird sich dieser Effekt verstärken. Bereits nach der Hälfte einer Abschreibungszeit von z. B. 40 Jahren wird sich die wirtschaftliche Situation völlig anders darstellen. Es kann sicher prognostiziert werden, dass auf die Lebenszeit gesehen Passivhäuser die mit Abstand wirtschaftlichere Variante gegenüber den bisherigen EnEV-Standards darstellen.

10.3 Förderung

Passivhäuser werden durch die KfW Förderbank im Rahmen des Programms Energieeffizient Bauen (Programm 153) gefördert. Die Rahmenbedingungen sind im Internet unter www.kfw-foerderbank.de einzusehen. Weiterhin sollte für jedes Bauvorhaben recherchiert werden, ob Landesprogramme oder kommunale Fördermöglichkeiten zur Verfügung stehen.

Eine umfassende Recherche von Förderprogrammen bietet der BINE-Informationdienst mit seinem Programm „FISKUS“ www.bine.info sowie die Fördermiteldatenbank für Endverbraucher der fe.bis GmbH unter www.foerderdata.de.

11 Nutzerverhalten

Passivhäuser sind äußerst nutzerfreundlich und komfortabel. Die Bewohner schätzen die hohe Behaglichkeit aufgrund der guten Gebäudedämmung. Zudem werden die Lüftungsanlagen als angenehm empfunden. „Die Luft ist frisch und klar, wenn ich nach Hause komme,“ ist die durchgängig positive Auskunft von Passivhaus-

Bewohnern, die seit einiger Zeit in ihrem neuen Haus mit Lüftungsanlage wohnen „Nicht wie früher, als ich jedes Mal beim Nachhausekommen die Fenster aufreißen musste.“

Das Öffnen der Fenster ist natürlich nach wie vor möglich und in der Übergangszeit sowie im Sommer eindeutig sinnvoll und geboten. Zahlreiche Untersuchungen belegen aus sozialwissenschaftlicher und technischer Sicht, dass Passivhäuser von ihren Bewohnern angenommen werden. Sie kommen ohne hohen Eingewöhnungsaufwand mit den Gegebenheiten bestens zurecht. Eine kurze Anleitung für die wenigen Besonderheiten ist hilfreich. Dort sollten z. B. folgende Punkte beschrieben werden:

- Lüftungsanlage: Einstellung des Luftwechsels, Filterwechsel, zusätzliche Fensterlüftung außerhalb der Heizzeit.
- Heizung: Umgang mit der Restwärmebereitstellung, Einfluss der Raumtemperatur.
- Dichtheit der Gebäudehülle: z. B. Wartung von Fenstern und Haustüren.
- Nutzen der Komfortfaktoren des Passivhauses.

Das System Passivhaus ist fehlertolerant hinsichtlich des Verhaltens der Bewohner. Durch gelegentliches manuelles Lüften oder erhöhte Raumtemperaturen steigt der Energieverbrauch nur in sehr geringem Maße. Das wird belegt durch zahlreiche Untersuchungen über den Heizenergieverbrauch von Passivhäusern.

Zahlreiche durchgeführte Passivhäuser wurden über Jahre hinsichtlich ihres Heizenergieverbrauchs betrachtet. Es ist festzustellen, dass die Technik langfristig auf gleich hohem Niveau funktioniert.

12 Projektbeispiel 1: Mehrfamilien-Passivhaus Erdmannstraße, Hamburg-Ottensen

Planung: Huke-Schubert Berge Architekten, Hamburg
Ein paar hundert Meter östlich des Bahnhofes Altona im Herzen des Hamburger Stadtteils Ottensen wurde nördlich der Erdmannstraße ein ehemals gewerblich genutztes Hofgrundstück im Blockinneren durch den Altonaer Spar- und Bauverein mit hochwertigen verdichteten Geschosswohnungen bebaut. Die Planung durch Beata Huke-Schubert, die schon zahlreiche Gemeinschaftsbauvorhaben in Hamburg begleitet hat, und Steffen Berge mit großem Erfahrungshintergrund im nachhaltigen und energieeffizienten Bauen führte zu einer hochqualitativen Lösung, die Bezug nimmt auf die gründerzeitliche städtebauliche Situation und zugleich sehr attraktiven innerstädtischen Wohnraum schafft. Es werden ruhige Wohnungen für unterschiedliche Nutzergruppen mit Stadthauskonzepten für Familien verbunden. Die Freiflächen im Blockinneren stellen für die Bewohner eine Ruhezone inmitten des urbanen Umfeldes dar. Die Blockkernbebauung ermöglicht einen Durchgang zwischen dem Straßenzug Am Born und der Erdmann-



Bild 19. Ansicht von Südwest aus der Erdmannstraße



Bild 20. Hofansicht



Bild 21. Lageplan – Isometrie
(Huke-Schubert Berge Architekten)

straße. Für alle Gebäude galt ein hochwertiger energetischer Standard. Ein T-förmiger Baukörper mit Südausrichtung zur Erdmannstraße wurde als Passivhaus ausgeführt. Die vier Geschosse zuzüglich eines Staffelgeschosses beinhalten 34 Wohneinheiten mit 2880 m² Wohnfläche sowie drei Gewerbeeinheiten im Erdgeschoss der Erdmannstraße mit 390 m² Nutzfläche.

12.1 Gebäudehülle und Konstruktion

Die statische Funktion der Gebäude wird durch die Kalksandstein-Schottenwände übernommen, sodass die Außenwände nichttragend aus KS mit 11,5 cm Dicke ausgeführt werden konnten. Aufgrund zahlreicher Durchdringungen der ursprünglich geplanten Luftdichtheitsebene des Innenputzes wurde zur erhöhten Sicherheit eine adaptive Dampfsperre auf der Außenseite des Mauerwerks als einfach aufzubringende Luftdichtheitsebene gewählt, die direkt mit den Fenstern verklebt werden konnte. Die Vorhangfassade wurde zur Redu-

zierung der Wärmebrückeneffekte mittels TJI-Trägern mit Mineralwolldämmung abgedeckt durch eine diffusionsoffene Unterspannbahn erstellt. In Abhängigkeit von den Brandschutzanforderungen wurden darauf zementgebundene Spanplatten (B1) bzw. Eternit Duripaneel 22 m (A2) montiert. Auf einer Unterkonstruktion aus Alu-Z-Profilen mit 3 cm Hinterlüftungsebene erfolgte die Bekleidung mit 8 mm Resoplan. Die eingesetzten Brandschutzriegel bestehen aus nicht brennbaren Materialien mit Zinkblechverkleidung. Im Bereich der Gebäudeteile mit Putzfassade erhielt die 11,5er-Kalksandsteinwand ein Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol und in Brandschutzbereichen mit Mineralwolle mit einer Dämmdicke von 30 cm. Der U-Wert beträgt im Mittel aller Außenwandkonstruktionen 0,16 W/(m²K).

Die Stahlbeton-Kellerdecke weist eine Dämmlage aus 200 mm Polystyrol dämmung $\lambda_R = 0,035$ W/(mK) in Verbindung mit einer zusätzlichen Trittschalldämmung 10 mm unter dem Estrichaufbau auf. Daraus ergibt sich ein U-Wert von 0,16 W/(m²K).

Das Flachdach wurde als Warmdach auf der Stahlbetondecke über dem obersten Geschoss aufgebracht und wird mit einer 400 mm dicken PS-Lage gedämmt, die gleichzeitig der Ausbildung des Gefälles dient. Darüber



Bild 22. Rohbau (Huke-Schubert Berge Architekten)



Bild 23. Barrierereduzierter Übergang Wohnen – Balkon
(Huke-Schubert Berge Architekten)

befindet sich die Dachbahn mit einer Bekiesung. Die Gesamtkonstruktion hat einen mittleren U-Wert von $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die Fenster wurden aus Holzrahmen mit gedämmten Aluminium-Deckschalen erstellt. Die Holzinnenansichten sorgen für hohe Wohnlichkeit und die Alu-Außenverkleidung für eine hohe Lebensdauer ohne großen Wartungsaufwand. Die Rahmenkennwerte sind sehr hochwertig, der Wert für U_f beträgt $0,71 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Dreischeibenwärmeschutzverglasung wurde mit einem Ug-Wert von $0,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ in einem sehr wirtschaftlichen Bereich gewählt in Verbindung mit einem g-Wert von $0,52$. Dem Glasrandverbund von $\Psi = 0,038 \text{ W}/(\text{mK})$ steht ein äußerst optimierter Wärmebrückenkoeffizient für die Einbausituation von $\Psi = 0,038 \text{ W}/(\text{mK})$ gegenüber, sodass sich als Ergebnis aus diesen Kennwerten ein sehr günstiger U_w -Wert von $0,74 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ergibt. Wichtig für diesen günstigen Wert ist die Wahl von angemessen großen Verglasungsflächen bei der Gestaltung der Fenster unter Verzicht auf kleine Flügelformate. Die Übergänge von den Wohnungen zu den Außenflächen und Balkons wurden barrierereduziert mit minimierter Schwellenausbildung ausgeführt. Sie wirken sehr großzügig durch den Übergang vom Parkett auf der Innenseite zu einem vergleichbaren Holzbelag auf den Balkons in jeweils gleicher Höhenebene. Für das Verschattungskonzept hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes dienen Außenraffstores.

12.2 Qualitätssicherung

Der Blower-Door-Test ergab für die Luft- und Winddichtheit einen hervorragenden mittleren Wert für n_{50} von $0,36 \text{ h}^{-1}$. Dies ist auf die sorgfältige Detailkonzeption im Zuge der Werkplanung und die konsequente Umsetzung auf der Baustelle zurückzuführen. Gerade bei solch einem komplexen Gebäude ist es wichtig, dass die Details ein fehlertolerantes System darstellen, sodass kleine Schwächen in der Ausführung die Kennwerte nicht stark verschlechtern.

12.3 Lüftung, Heizung und Warmwasser

Für die innerstädtische Situation bietet sich eine Lüftungsanlage an. Durch die mechanisch betriebene Lüftung kann für die Bewohner Schallschutz und zugleich hohe Raumluftqualität gewährleistet werden. Selbstverständlich dürfen die Fenster jedoch geöffnet werden. In den Übergangszeiten und im Sommer gehört dies ohnehin zum Lüftungskonzept. Eine Zu-/Abluftanlage mit 85% Wärmebereitstellungsgrad bringt pro Person stündlich 30 m^3 frische Luft in die Wohnungen. Die Luft strömt über einen F-7-Filter, der Staubpartikel und einen großen Teil von Pollen herausfiltert und für hohe Raumluftqualität sorgt. Über drei Stufen kann die Luftmenge durch die Mieter eingestellt und den Erfordernissen angepasst werden.

Heizung und Warmwasser werden durch den städtischen Fernwärmeanschluss bereitgestellt. Die Heizwärmeverteilung erfolgt über eine zentrale Nacherwärmung der Zuluft in jeder Wohnung. Die Wärme wird über die Luft mit komfortabel niedrigen Temperaturen auf die Wohnungen übertragen. Die Temperatur kann durch die Benutzer individuell geregelt werden. Im Bedarfsfall stehen in jeder Wohnung ein bis zwei Heizkörper zusätzlich zur Verfügung, um den Komfort für die Bewohner auch bei längerer extremer Kälte zu sichern. Der Frostschutz des Wärmetauschers im Lüftungsgerät erfolgt wie die Heizung über Fernwärme. Dabei muss durch die Regelung sichergestellt sein, dass erst ab etwa -4°C Außenlufttemperatur vor dem Gerät das Vorheizregister eingeschaltet wird. Bei richtiger Einstellung sind nur minimale Wärmemengen für den Frostschutz erforderlich, im Allgemeinen $0,2$ bis $0,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, bezogen auf die beheizte Fläche.

Die Warmwasserbereitung wird über Wärmetauscher im Durchlaufsystem unter Auskopplung der Zirkulationslast betrieben. Ein Pufferspeicher sorgt dafür, dass die Leistungsanforderung aus dem Fernwärmenetz begrenzt bleibt, um auf diesem Weg niedrige Bereitstellungskosten zu sichern.



Bild 24. Lüftungsanlage

12.4 Resümee

Die hochwertige städtebauliche und architektonische Gestaltung wertet den Stadtteil auf und schafft für die Bewohner zusammen mit der stimmigen Freiflächengestaltung ein liebenswertes Umfeld mit hoher Identifikationsmöglichkeit. Architekten und Bauherr haben gezeigt, dass es möglich ist, Energieeffizienz mit erstklassiger differenzierter Architektur zu verbinden. Auf der 14. Internationalen Passivhaustagung in Dresden wurde das Projekt im Rahmen des 2010 erstmals verliehenen „Architekturpreises Passivhaus“ mit dem, gleich dem 1. Preis dotierten, Sonderpreis des BMVBS für Geschosswohnungsbau ausgezeichnet.

13 Projektbeispiel 2: MFH Ackermannstraße in Frankfurt

Bauherr: ABG Holding, 60329 Frankfurt
Planung: FAAG Technik GmbH, 60329 Frankfurt
Mit einem Bestand von rund 50.000 Wohnungen bietet die ABG Frankfurt Holding Wohnraum für fast ein Viertel der Frankfurter Bevölkerung. Ziel ist es, für



Bild 25. Südwestansicht Ackermannstraße



Bild 26. Gartenansicht Idsteiner Straße,
Architekt Stefan Forster, Frankfurt

hohe Lebensqualität und sozial ausgewogene Wohnquartiere in Frankfurt zu sorgen. Der Umgang mit Gebäuden und deren Bewohner erfordert deshalb nicht nur technisches und wirtschaftliches Know-how, sondern eine hohe soziale Kompetenz, um die Wünsche der Bewohner nicht nur in der aktuellen Situation erfüllen zu können, sondern auch zukünftig dem Zeitgeist, dem demografischen Wandel und den sich ändernden Komfortanforderungen gerecht zu werden. Die ABG besitzt umfangreiche Erfahrungen in der Umsetzung innovativer Projekte, die Modelle für zukünftige Wohnformen darstellen. Dies umfasst auch Wohnmodelle mit Serviceangeboten für ältere Menschen.

Die Friedrich-Ebert-Siedlung mit etwa 600 Wohneinheiten wurde 1930 gebaut und nach starken Zerstörungen im Krieg 1949/1950 wieder errichtet. Ein großer Teil des Quartiers wurde in den letzten Jahren grundlegend saniert. Der neu errichtete Ersatzneubau in der Ackermannstraße 41 b, c, d bildet den östlichen Abschluss des Gebietes. Statt des vorherigen Zeilenbaus mit fünf Treppenhäusern und 43 kleinen Wohnungen wurden drei Zweispänner mit jeweils 10 Wohnungen mittels eines viergeschossigen Baukörpers und einem zusätzlichen Staffelgeschoss erstellt. Es entstand eine Tiefgarage mit 31 Stellplätzen.

Nach dem gleichen Grundkonzept erstellte die ABG wenige hundert Meter entfernt in einem städtebaulich hochwertigen Quartier mit Klinkerfassaden einen Neubau anstelle eines schadensträchtigen 50er-Jahre-Gebäudes. Das Gebäude in der Idsteiner Str. 123–125 weist ebenfalls den Passivhaus-Standard auf. Die Architektenleistungen wurden erbracht durch den Architekten Stefan Forster, Frankfurt.

13.1 Gebäudehülle und Konstruktion

Der Ersatzneubau in der Ackermannstraße wurde in Massivbauweise mit Wänden aus Kalksandstein und Stahlbetondecken erstellt. Die Außenwände bestehen aufgrund von Schallschutz- und Statikaspekten aus 20 cm KS RDK 1,8 in Verbindung mit einem Wär-



Bild 27. Rohbau Ackermannstraße (ABG Frankfurt Holding)



Bild 28. Fenster zur Stadt – im Hintergrund der Messeturm

medämmverbundsystem aus 30 cm PS-Dämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_R = 0,032 \text{ W/(mK)}$ und einem resultierenden U-Wert von $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Die Stahlbeton-Kellerdecke über der Tiefgarage weist oberhalb einen schwimmenden Estrich mit einer doppelagigen Dämmung mit 7,5 cm Dicke und unterhalb eine dübfrei geklebte Dämmkonstruktion mit 30 cm Mineralwolldämmung $\lambda_R = 0,035 \text{ W/(mK)}$ auf (s. Bild 28). Der U-Wert beträgt $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Das Flachdach über dem Staffgeschoss wurde als Warmdach ausgeführt. Auf der Stahlbetondecke befindet sich Gefälledämmung mit einer 30 bis 50 cm dicken PS-Lage in Verbindung mit einer Folienabdichtung. Die Gesamtkonstruktion hat einen mittleren U-Wert von $0,08 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Im Dachterrassenbereich wurde die Aufbauhöhe bei einem U-Wert von $0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ optimiert, sodass der Austritt auf zwei möglichst niedrige Stufen beschränkt bleibt.

Die Kunststofffenster wurden in Passivhaus-Qualität erstellt. Die Rahmenkennwerte sind sehr hochwertig, der Wert für U_f beträgt $0,74 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Die Dreischeibenwärmeschutzverglasung wurde mit einem U_g -Wert von $0,53 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ in Verbindung mit einem g-Wert von 0,51 gewählt. Dem Glasrandverbund von $\Psi = 0,030 \text{ W/(mK)}$ steht ein optimierter Wärmebrückenkoeffizient für die Einbausituation von ebenfalls $\Psi = 0,030 \text{ W/(mK)}$ gegenüber. Da allerdings in Teilbereichen aus Schallschutzgründen deutlich ungünstigere Gläser mit einem $U_g = 0,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ in Verbindung mit einem g-Wert von 0,47 eingebaut werden mussten, ergibt sich im Mittel über alle Fenster ein U_w von $0,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Das Verschattungskonzept zur Sicherstellung des sommerlichen Wärmeschutzes sieht Außenraffstores in Verbindung mit einer selbsttätigen Regelung vor, um Schäden bei starkem Sturm entgegenzuwirken.

Qualitätssicherung

Der Blower-Door-Test war bei der Projektierung auf einen ehrgeizigen Wert von $n_{50} = 0,5 \text{ h}^{-1}$ konzipiert worden. Aufgrund der präzisen Ausführung konnte für die Luft- und Winddichtheit ein hervorragender gemessener mittlerer Wert für $n_{50} = 0,3 \text{ h}^{-1}$ erreicht werden. Die Treppenhäuser liegen innerhalb der thermischen Gebäudehülle. Jedes Gebäude wird zudem barrierefrei durch einen Aufzug erschlossen. Die erforderliche Entlüftung im Brandfall erfolgt über eine motorisch betriebene gedämmte Dunkelklappe geregelt durch ein Kontrollsystem mit Rauchsensoren.

13.2 Lüftung, Heizung und Warmwasser

Das Lüftungskonzept basiert auf einer semidezentralen Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Für jedes der drei Gebäude wurde jeweils eine Zentraleinheit für die Luftaufbereitung auf dem Dach installiert. Der Wärmebereitstellungsgrad des zentralen Wärmetauschers beträgt 80%. Jede Wohneinheit erhielt je einen eigenen



Bild 29. Einfache Lüftungsregelung mit Dreistufenschalter, direkt daneben die Verschattungsregelung



Bild 30. Pelletskessel in der Technikzentrale

Zu- und Abluftventilator, der mit einem einfachen Drei-Stufen-Schalter geregelt werden kann. Die Lüftungsanlage liefert gefilterte, frische Zuluft für die Wohnräume, inkl. Kinder- und Schlafzimmer. Von da ab strömt die Luft durch Türunterschnitte über den Flur in die Ablufträume wie Bäder, WCs und Küchen. Für die Nutzer ergibt sich durch die Anlage in der innerstädtischen Lage ein hoher Komfort mit gutem Schallschutz in Verbindung mit hoher Raumluftqualität.

Der Gebäudekomplex wird über einen zentralen Pelletskessel mit 69 kW in der Heizzentrale im Keller geheizt. Die Wärmeverteilung erfolgt im Zweirohrsystem. Die Isolierstärken der Rohrleitungen betragen 200% der EnEV-Anforderungen. In den jeweiligen Wohneinheiten befinden sich Wohnungsstationen, welche einerseits für die statische Beheizung der Räume, andererseits für die Warmwassererzeugung der jeweiligen Wohnung sorgen. Die Wärmeübertragung erfolgt über Heizkörper.

13.3 Resümee

Die ABG Frankfurt gehört zu den engagierten Wohnungsbaugesellschaften, die mit hoher Konsequenz zukunftsfähige Konzepte verfolgen und ihre Gebäude energetisch hochwertig erstellen. Durch die umfangreiche Erfahrung mit innovativen Techniken können die Bauten kosteneffizient erstellt und bereits heute sehr wirtschaftlich mit hoher Breitenwirkung umgesetzt werden. Die Wohnungsbaugesellschaft zeigt in Frankfurt beispielhaft die Einführung neuer Technologien in den Markt und ist wegweisend für die weitere Entwicklung in Deutschland. Derzeit ist eine umfangreiche Siedlung in der Planung, bei der auf Basis einer hochwertigen Gebäudehülle wie in der Ackermannstraße zusätzlich Plusenergie-technik zur Anwendung kommt. In der Bilanz wird diese Bebauung mehr Energie erzeugen als verbrauchen.

14 Literatur

- [1] Der Beitrag wurde erstellt auf Basis der Kalksandstein-Broschüre „Passivhaus-Plusenergiehaus“, Autor: Dr. Burkhard Schulze Darup; Hrsg.: Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V. Hannover 2011 http://www.kalksandstein.de/bv_ksi/infomaterial/images/path319/KS-Passivhaus.pdf.
- [2] Passivhaus Institut Darmstadt. Die Anforderungen für Passivhäuser wurden entwickelt in verschiedenen Arbeitskreisen und Untersuchungen, die im Wesentlichen koordiniert und ausgeführt wurden durch das Passivhaus Institut Darmstadt, Dr. Wolfgang Feist, 64283 Darmstadt, www.passiv.de.
- [3] Passivhaus Projektierungs Paket PHPP, Passivhaus Institut Darmstadt, www.passiv.de.
- [4] Vorhangfassaden mit KS. Detaillierte Angaben auf der KS-Homepage http://www.kalksandstein.de/bv_ksi/fach/bv_index.htm.
- [5] Zweischaliges Mauerwerk mit Kalksandstein – Detaillierte Angaben auf der KS-Homepage http://www.kalksandstein.de/bv_ksi/fach/bv_index.htm.
- [6] Grundlagenforschung zum Thema z. B. ZAE Bayern www.zae-bayern.de, Praxisfähige Konstruktionskonzepte z. B. Fa. Variotec, Neumarkt www.variotec.de.
- [7] Wärmebrückenkatalog. Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V. Hannover.
- [8] Schulze Darup, B. (Hrsg.): Passivhaus Projektbericht: Energie und Raumluftqualität, Messtechnische Evaluierung und Verifizierung der energetischen Einsparpotenziale und Raumluftqualität an Passivhäusern in Nürnberg. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt; Projektpartner: LGA Nürnberg, Energieagentur Mittelfranken Nürnberg, AnBUS Fürth, N-ERGIE Nürnberg, Architekturbüro Schulze Darup Nürnberg, Verlag AnBUS Fürth 2002.
- [9] Schulze Darup, B. (Hrsg.): Projektbericht Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. Zusammenstellung der Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitforschung durch das Passivhaus Institut Darmstadt, FIW München, AnBUS Fürth und Architekturbüro Schulze Darup, Nürnberg 2005.
- [10] Passivhaus Institut Darmstadt: Anforderungen – Zertifizierung von Lüftungsanlagen, Kriterien für die Beurteilung der Eignung von Lüftungsanlagen als Passivhaus-geeignete Komponente: www.passiv.de.

