


Burkhard Schulze Darup

# Energieeffiziente Wohngebäude

3., vollständig überarbeitete Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

 **BINE**  
Informationsdienst

BINE-Fachbuch

# Energieeffiziente Wohngebäude

3., vollständig überarbeitete Auflage

Burkhard Schulze Darup

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**

Leibniz-Institut für  
Informationsinfrastruktur

**Fraunhofer IRB**  **Verlag**

 **BINE**  
Informationsdienst

Der BINE Informationsdienst bietet Kompetenz in neuen Energietechniken. Der intelligente Umgang mit knappen, wertvollen Energiere Ressourcen, insbesondere in Gebäuden und der Gebäudetechnik, sowie die Nutzung erneuerbarer Energien sind die BINE-Kernthemen. Zu diesen Inhalten vereinen wir vielfältiges Know-how aus Forschung, Technik und Anwendung. Eine Übersicht über unser komplettes Produkt- und Dienstleistungsangebot finden Sie unter [www.bine.info](http://www.bine.info). Gerne senden wir Ihnen die Informationen auch zu.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Für weitere Fragen stehen Ihnen zur Verfügung:

Dorothee Gintars, Micaela Münster

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstr. 185-197, 53113 Bonn

Tel. 02 28/9 23 79-0, [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de), [www.bine.info](http://www.bine.info)

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.  
ISBN: 978-3-8167-8322-0

ISBN (Print): 978-3-8167-8322-0 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-8702-0

Herstellung: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, -Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by FIZ Karlsruhe, 2009 (Unveränderter Nachdruck 2012)

Verlag und Vertrieb: Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart | Telefon (0711) 9 70-25 00

Telefax (0711) 9 70-25 08 | E-Mail: [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

<http://www.baufachinformation.de>

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.



<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	7
<b>2</b>	<b>Gebäudekonzept</b>	10
2.1	Energieeffizienz – ein neues Architekturkonzept?	10
2.2	Entwurfsprinzipien für passives solares Bauen	12
2.3	Energetische Standards und Berechnungsverfahren	17
<b>3</b>	<b>Raumklima und Raumluftqualität</b>	26
3.1	Bauphysik	26
3.2	Raumluftqualität	31
3.3	Raumlufthygienische Anforderungen an die Lüftung	35
<b>4</b>	<b>Konstruktion</b>	37
4.1	Opake Außenbauteile	37
4.2	Transparente Bauteile	41
4.3	Wärmebrücken	48
4.4	Luftdichtheit und Winddichtheit	54
<b>5</b>	<b>Gebäudetechnik – Lüftung</b>	62
5.1	Lüftungssysteme	63
5.2	Hygienische Anforderungen und Luftwechsel	68
5.3	Komponenten von Lüftungsanlagen	70
5.4	Auslegung und Planungseckdaten	80
5.5	Nutzererfahrungen mit der Lüftungstechnik im Wohnungsbau	84
<b>6</b>	<b>Gebäudetechnik – Restwärmeversorgung und Trinkwassererwärmung</b>	85
6.1	Heizungssysteme	88
6.2	Heizwärmeverteilung	96
6.3	Heizflächen	97
6.4	Regelung	99
6.5	Trinkwassererwärmung	100
6.6	Solarthermie	101
6.7	Kühlung	107
<b>7</b>	<b>Strom</b>	108
7.1	Stromsparen	108
7.2	Dezentrale und regenerative Stromerzeugung	110
<b>8</b>	<b>Nachhaltigkeit</b>	113
8.1	Primärenergie	114
8.2	Investitionskosten und Wirtschaftlichkeit	119
8.3	Wirtschaftlichkeit – Vereinigung von Ökologie und Ökonomie?	124

<b>9</b>	<b>Beispiele</b> .....	125
9.1	Standard EnEV 2009: Reihenhäuser im Wohnhof Erlangen-Büchenbach .....	126
9.2	KfW-40-Standard: Reihenhäuser Veitsbronn .....	128
9.3	Plusenergiehaus: EFH Erlangen, Dorfmeisterweg 14 .....	130
9.4	Reihenhäuser in Passivbauweise: Stuttgart-Feuerbach .....	132
9.5	Passivhaus: EFH in Herzogenaurach .....	134
9.6	Passivhaus: EFH mit Vakuumdämmung in Voggenthal .....	136
9.7	Passivhäuser: Vier Reihenhäuser in Immenhofen .....	138
9.8	Passivhaus: EFH in Nürnberg-Fischbach .....	140
<b>10</b>	<b>Ausblicke</b> .....	142
<b>11</b>	<b>Zitierte Literatur und Abbildungsnachweis</b> .....	145
11.1	Zitierte Literatur .....	145
11.2	Abbildungsnachweis .....	147
<b>12</b>	<b>Laufende und abgeschlossene Forschungsvorhaben aus der Energieforschung der Bundesregierung</b> .....	149
<b>13</b>	<b>Weiterführende Literatur</b> .....	154
13.1	Literatur .....	154
13.2	CD-ROMs .....	157
13.3	BINE Informationsdienst .....	157
<b>14</b>	<b>Autorenangaben</b> .....	158



## Vorwort

Im Wohnungsbau hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten ein Wandel vollzogen. Wurden noch vor zwanzig Jahren Wohngebäude gebaut, die über 150 kWh/m<sup>2</sup>a an Heizwärme verbrauchten, ist dieser Wert mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) mehr als halbiert worden. Mit der Novellierung der EnEV, die am 01. Oktober 2007 in Kraft getreten ist, hat sich das Anforderungsniveau an die energetische Qualität generell nicht verändert. Dies soll sich jedoch in 2009 ändern. Die EnEV 2009 strebt eine Reduktion des Primärenergiebedarfs in Gebäuden für Heizung und Warmwasser von ca. 30 % an.

Grundprinzip des energiesparenden Bauens ist es, die Wärmeverluste durch eine sehr gute Wärmedämmung, den reduzierten Einfluss von Wärmebrücken sowie durch eine weitgehend luftdichte Gebäudehülle zu verringern. Diese Maßnahmen können durch die passive Nutzung der Sonnenenergie und eine energieeffiziente Haustechnik ergänzt werden. Energiesparende Gebäude lassen sich in Massiv- und Leichtbauweise realisieren und ermöglichen dem Planer zahlreiche Gestaltungsvarianten beim Entwurf.

5

Energiesparendes Bauen kann weit über das Niedrigenergiehaus hinausgehen. Neben dem Niedrigenergiehaus wurden verschiedene Konzepte entwickelt und umgesetzt, wie z. B. Passivhäuser, Nullheizenergiehäuser und Plusenergiehäuser. Die Passivhausbauweise hat zu Gebäuden geführt, die einer Heizung im konventionellen Sinne nicht mehr bedürfen. Es ist ausreichend, die über eine Lüftungsanlage zugeführte Frischluft über die abzuführende Raumluft nachzuheizen, so dass die passiven internen Gewinne zur Raumheizung genutzt werden.

Das vorliegende Buch, das sich an Planer, Investoren, Bauherren und Studierende wendet, stellt viele bauliche und konzeptionelle Möglichkeiten vor, die für energieeffiziente Wohngebäude geeignet sind. Erfahrungen aus Beispielhäusern und die anschauliche Darstellung mit zahlreichen Bildern, Grafiken und Tabellen ermöglichen eine interessante Beschäftigung mit dem Thema des energiesparenden Bauens.

FIZ Karlsruhe  
BINE Informationsdienst



# 1 Einleitung

Fossile Energieträger werden in nennenswertem Ausmaß seit etwa 150 Jahren genutzt. In dieser menschheitsgeschichtlich verschwindend kleinen Epoche entstanden exponentielle Wachstumskurven hinsichtlich unserer Wirtschaftskraft, unseres Wohlstands und des weltweiten Bevölkerungswachstums – aber auch hinsichtlich zahlreicher Umweltbelastungen.

Klimaschutz ist in den letzten Jahren zu einem dominierenden Aspekt der globalen Politik geworden. Gleichzeitig ist in absehbarer Zeit der Oil-peak zu erwarten, die maximal jährlich förderbaren Ölmengen werden zumindest hinsichtlich der kostengünstig bereitzustellenden Ölvorräte bald erreicht sein.

Rohölpreise sind Börsenpreise und unterliegen stark spekulativen Optionskäufen. Die Preise haben sich seit dem letzten Tiefstand 1998 von etwa 12,50 Dollar pro Barrel innerhalb von 10 Jahren auf deutlich mehr als das Zehnfache erhöht. Es ist davon auszugehen, dass wieder preisberuhigte Phasen eintreten. Genauso sicher ist allerdings, dass deutliche weitere Preissteigerungen zu verzeichnen sein werden, und es ist als wahrscheinlich anzunehmen, dass im Jahr 2020 Öl als Brennstoff eine geringere Bedeutung haben wird.

Die Entwicklung zur Energieeffizienz im Wohnungsbau ist eine der Voraussetzungen, um den politischen Herausforderungen dieses Jahrhunderts ohne Komforteinbuße begegnen zu können. Je eher bei der Errichtung von Gebäuden diese Herausforderungen offensiv angenommen werden, desto verträglicher wird die Entwicklung aus volkswirtschaftlicher Sicht sein. Für den individuellen Bauherrn bedeutet ein energetisch schlechter Baustandard einen hohen Wertverlust innerhalb weniger Jahre und die Notwendigkeit zur energetischen Sanierung lange vor Ablauf der Gebrauchstauglichkeit der Gebäudehülle.

Bei Betrachtung der letzten fünfzig Jahre zeigt sich, dass sich bis zur ersten Ölpreiskrise in den siebziger Jahren die Energiestandards an den bauphysikalischen Mindeststandards orientierten. Während mit einer zeitlichen Verzögerung danach die drei Stufen der Wärmeschutzverordnung in Abständen von fünf bis acht Jahren auf den Weg gebracht wurden, beherrschten bis tief in die achtziger Jahre solare Bauten mit großen südgerichteten Glasfassaden die Hochglanztitel der Bauzeitschriften. Komplementär dazu entstand ein Bewusstsein für bessere Wärmedämmung und eine umfassende bauphysikalische Betrachtung der Gebäude: die daraus entstehende Niedrigenergiebauweise stellte bald das Optimum der Energieeffizienz dar.



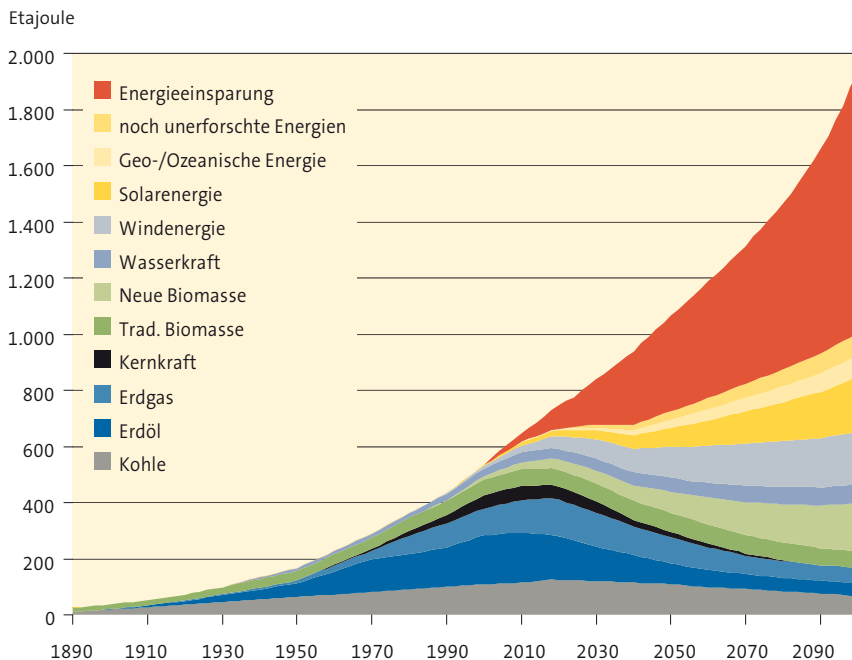


Abb. 1: Entwicklung des Weltenergieverbrauchs bei verstärktem Einsatz von regenerativen Energien und hohen Anstrengungen zur Energieeinsparung (Angaben in Exajoule)

Die konsequente Weiterentwicklung dieser Ansätze führte neben zahlreichen weiteren Ideen Anfang der neunziger Jahre zum Bau des ersten Passivhauses in Darmstadt-Kranichstein und des ersten energieautarken Gebäudes in Freiburg. Vor allem durch das Passivhaus-Konzept wurden sehr viele Innovationen für Energiesparkomponenten angestoßen und ein Markt für die daraus entstehende Industrie geschaffen.

Das energieeffiziente Bauen führt zu sehr hohem Wohnkomfort und insbesondere durch die ventilatorgestützten Lüftungsanlagen zu deutlich verbesserter Raumluftqualität. Der Einfachheit halber wird im Folgenden von der Passivbauweise gesprochen, die jedoch als Oberbegriff für besonders energiesparend realisierte Wohngebäude stehen soll.

Die Niedrigenergiebauweise benötigte etwa zwanzig Jahre von den ersten Modellgebäuden bis zur Erfassung des Standards durch die EnEV 2002. Ähnlich wird es sich mit der Passivhaus-Technik verhalten. Etwa 2015 wird das gesetzliche Anforderungsniveau bei diesem Standard angekommen sein.

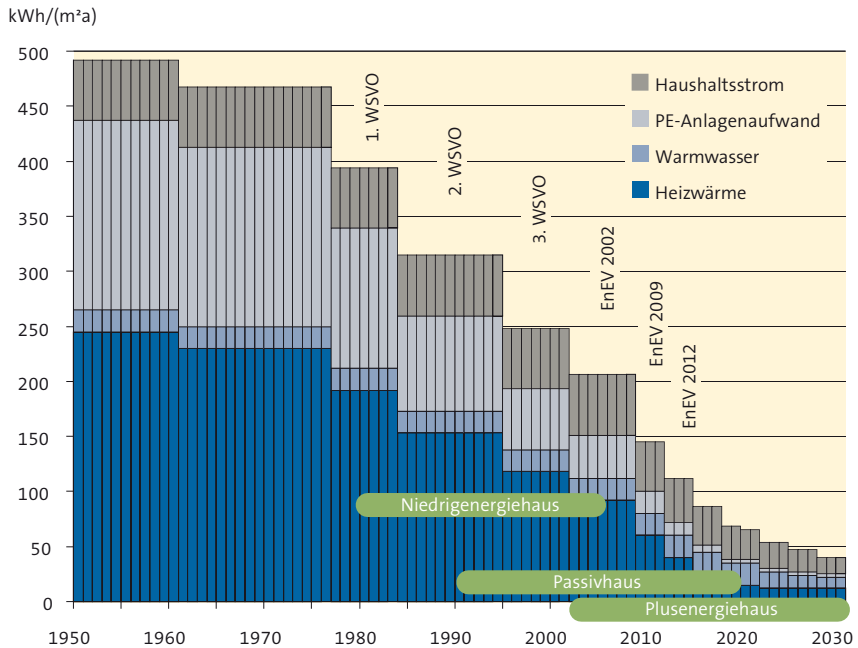


Abb. 2: Entwicklung der Anforderungen zur Energieeffizienz: in den Jahren 2009 und 2012 wird es jeweils eine Novellierung der EnEV geben, etwa ab 2015 wird das energetische Niveau des Passivhauses der allgemein übliche Gebäudestandard.

## 2 Gebäudekonzept

Die Einbeziehung von kulturellen, sozialen und technischen Neuerungen in den Entwurf ist seit jeher eine wichtige Aufgabe für Baumeister und Architekten. Dabei prägten für Jahrhunderte landschaftstypische handwerkliche Traditionen die Bauformen. In den letzten Jahrzehnten erwuchs daraus eine Vielschichtigkeit von Gestaltungsmöglichkeiten und technischen Baukonzepten, die zunehmend die regionalen Bezüge überlagern.

### 2.1 Energieeffizienz – ein neues Architekturkonzept?

Die Anforderungen der Energieeffizienz stellen einen ökologisch-ökonomisch bedingten Teilaspekt der zahlreichen Parameter dar, die das Entwerfen zunehmend komplexer und anspruchsvoller werden lassen. Es ist selbstverständlich, dass innovative Ansätze zu neuen Formen führen können.



Abb. 3: Bilder von verschiedenen energetisch optimierten Gebäuden

Zunächst bei der Niedrigenergie- und dann bei der Passivhaus-Bauweise konnte in den letzten fünfundzwanzig Jahren die Vielfältigkeit der Gestaltungsmöglichkeiten nachgewiesen werden. Energieeffiziente Konzepte wurden in der Anfangsphase oft als klare Baukörper mit Pultdach ausgeführt. Diese Bauform ist besonders kostengünstig, ermöglicht durch die optimale Gebäudegeometrie ein Höchstmaß an passiven Solargewinnen und unterstützt einfache Konstruktionsdetails hinsichtlich Luftdichtheit und der Vermeidung von Wärmebrückeneffekten. Durch ein wenig zusätzliches energetisches Handwerkszeug und die Anwendung von energiesparenden Komponenten erschließen sich dem Planer neue Möglichkeiten der Gestaltung – die Einschränkungen sind eher gering (Abb. 3).

### Ökologie und Ökonomie beim Planen

Der Mythos von der Unvereinbarkeit zwischen Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit ist in den letzten Jahren zunehmend durch eine fundierte wissenschaftliche Betrachtungsweise ersetzt worden. Selbstverständlich verursachen umweltschonende Maßnahmen im Allgemeinen zunächst Investitionskosten, die mit bisher üblichen Amortisationsrechnungen zeitnah noch nicht rentabel sind. Bei der Planung von Wohngebäuden sollte allerdings eine zukunftsfähige Entscheidung für die nächsten dreißig bis fünfzig Jahre getroffen werden. Eine langfristige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung führt immer zu dem Ergebnis, dass hoch effiziente Techniken in der Bilanz die wirtschaftlichere Lösung darstellen. Gebäude nach EnEV 2007 werden bei dem zu erwartenden Energiepreinsniveau in fünfzehn bis zwanzig Jahren bereits wieder einen energetischen Sanierungsfall darstellen. Wird darüber hinaus eine volkswirtschaftliche Vollkostenbetrachtung durchgeführt, sind energetisch-ökologische Maßnahmen in noch höherem Maß wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen.

11

### Partner bei der Planung und Bauausführung

Bauen ist eines der letzten Abenteuer unserer Zeit – das weiß jeder bauerfahrene Hausbesitzer. Insofern ist es äußerst hilfreich, erfahrene und zuverlässige Partner für Planung und Bauausführung heranzuziehen, die möglichst engagiert für die Bauherrenwünsche eintreten.

Architekten haben den Vorteil, in hohem Maß individuelle Bedürfnisse des Bauherrn umsetzen zu können. Sie führen die Planung vom Entwurf über die Bauantragstellung, Werkplanung, Ausschreibung und Vergabe bis zur Bauüberwachung aus. Der Architektenvertrag wird nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) geschlossen. Sinnvoll ist ein Vertrag, der Kostenbewusstsein unterstützt, z. B. ein Pauschalvertrag mit Bonus-Regelung für Kostenunterschreitung.

Bei der Bauträger-Variante erwirbt der Bauherr das Gebäude zu einem Festpreis, der an den einen Vertragspartner zu zahlen ist. Bei diesem Vertragsverhältnis ist es besonders wichtig, vor Unterschrift alle Festlegungen, Bemusterungen und Standards im Vertrag genau niedergelegt zu haben. Änderungswünsche und Unwägbarkeiten, die kein Bauherr vorhersehen kann, können zu hohen Mehrkosten führen.

Erfahrung und Engagement in der Anwendung hoher Energieeffizienz ist ein wichtiges Entscheidungskriterium. Hilfreich ist in jedem Fall die Angabe von Referenzobjekten, um sich zu vergewissern, dass eigene Anliegen vom zukünftigen Projektpartner gewissenhaft umgesetzt werden. Wichtig sind zudem Vertrauen und die Fähigkeit, während der Bauphase auch Probleme lösungsorientiert gemeinsam zu bewältigen.

Energieeffiziente Gebäude erfordern eine interdisziplinäre Planung unter Einbeziehung der Aspekte der Gebäudetechnik und thermischen Bauphysik sowie der klassischen Belange der Statik und der Überprüfung des Baugrundes. Darüber hinaus ergeben sich Anforderungen an die Raumlufthygiene und die Qualitätssicherung. Bei komplexen Gebäuden ist es sinnvoll, bereits ab der Vorentwurfsphase mit einem Planungsteam interdisziplinär zusammenzuarbeiten. Beim Einfamilienhaus wird das zu teuer. Es bleibt dem Geschick von Architekt und Bauherren überlassen, die genannten Aspekte bei vertraglichem Kostenaufwand einzubeziehen.

Partnerschaften beim Bauen in Form von Bauherrengemeinschaften können zu kreativen und kostengünstigen Lösungen führen. Ein wichtiger Rat: vorher sehr gut informieren, vertragliche Dinge umfangreich und professionell regeln und keine überhöhten Erwartungen an eine später sich einstellende Nachbarschaft haben [1].

## 2.2 Entwurfsprinzipien für passives solares Bauen

Die Behaglichkeit in einem Gebäude ist besonders groß, wenn die Hülle thermisch hochwertig ausgeführt wird (vgl. Kap. 3.1). Ideal ist ein Gebäude, das kein aktives Heizsystem mehr erfordert, um hohen Wohnkomfort für die Bewohner sicher zu stellen. Transmissions- und Lüftungswärmeverluste werden nahezu vollständig durch kostenlose „passive“ Energiebeiträge ausgeglichen. Das sind:

- solare Gewinne durch Fenster und sonstige transparente Flächen,
- Wärmeabgabe von Beleuchtung, Geräten und Prozessen und
- Körperwärme der Personen im Gebäude.

In Abb. 4 wird die energetische Wirksamkeit verschiedener Entwurfsaspekte vergleichend dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass jeder individuelle Entwurf Besonderheiten unterworfen ist, die im Einzelfall untersucht werden müssen. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Aspekte passiver Solararchitektur genauer

beschrieben. Darüber hinaus gehende Einflüsse wie Kleinklima, Wärmespeicherung und Absorption haben auf die Energieeinsparung nur sehr geringe Auswirkungen.

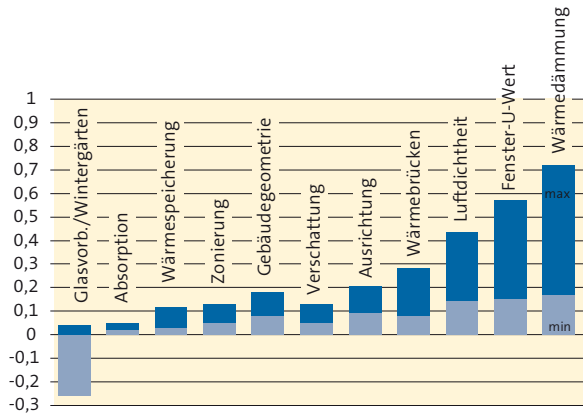


Abb. 4: Energetische Wirksamkeit verschiedener Entwurfsaspekte

13

## Gebäudegeometrie

Eine Kostenermittlung nach der Bauteilmethode zeigt, dass die Außenfläche eines Gebäudes einen hohen Kostenanteil ausmacht. Pro Quadratmeter Hüllfläche sind 150 bis 250 € (brutto) zu veranschlagen, was in etwa den doppelten Kosten sonstiger Bauteile entspricht. Kostenoptimierte Planung sollte also Wohnfläche bzw. Wohnvolumen mit einem möglichst geringen Anteil Außenhüllfläche bereit stellen.

Die energetischen Anforderungen sind deckungsgleich: ein möglichst günstiges Verhältnis von Außenfläche (A) zu Gebäudevolumen (V) reduziert die Transmissionswärmeverluste pro Quadratmeter Nutzfläche. Dieses A/V-Verhältnis ist eine wesentliche Kenngröße bei der Heizwärmebedarfsberechnung für die Energieeinsparverordnung (EnEV). Abb. 5 zeigt das A/V-Verhältnis verschiedener Haustypen.

Hohe Kompaktheit hat mehrere Aspekte:

- Wahl einer sinnvollen geometrischen Form: im Vergleich zu einem in der Höhe halbierten Würfel (100 %) weist ein länglicher Quader mit gleichem Volumen eine Umfassungsfläche von 115 % auf, eine Zeltform (Satteldach) 111 %, eine Pyramide 109 %, ein flacher Zylinder 94 % und eine Halbkugel 90 %. Dennoch ist es aus wirtschaftlicher Sicht wenig sinnvoll, exotische Formen zu bauen, weil die Kostenrelation nicht stimmen würde.
- Wahl einer möglichst großen Gebäudetiefe: diese Entscheidung muss in Zusammenhang mit Belichtung und Ausrichtung getroffen werden.

- Anzahl der Geschosse: Dreigeschossige Wohngebäude liegen aus wirtschaftlicher und energetischer Sicht günstig. Sie weisen eine hohe Kompaktheit auf, ohne Sonderkosten bei höheren Gebäuden für Brandschutz, Erschließung (Fahrstuhl) etc. zu verursachen.
- Der Verzicht auf Vor- und Rücksprünge in der Fassade ist sehr vernünftig. Allerdings besteht das Leben – und schon gar nicht der Gebäudeentwurf – nur aus Vernunftgründen. Entwürfe sollten nicht unter energetischen Anforderungen leiden. Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Möglichkeiten hochwertiger, klarer Gestaltung, ohne die thermische Hülle zu zerklüften.

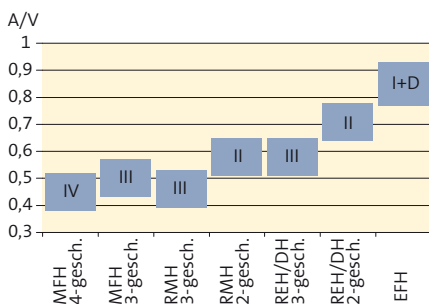


Abb. 5: A/V-Verhältnis von Gebäudetypen  
(die römischen Ziffern geben die Anzahl der Geschosse an)

Es wäre konsequent, dass bei ungünstigem A/V-Verhältnis die Energiekennwerte keinen Bonus erhalten, wie dies bei der EnEV geschieht: sinnvoll ist der Ansatz der Passivhaus-Kriterien, wo ein fester Wert gefordert wird. Wer sich den Vorteil eines freistehenden Hauses gönnt, muss 1–2% Baukosten für eine erhöhte Dämmung mehr investieren. Auch aus städtebaulichen Gründen bietet sich eine kompakte Bauweise an, um einen möglichst geringen Flächenverbrauch durch neue Gebäude zu erhalten.

## Ausrichtung

Weitgehende Südausrichtung der Fensterflächen ist ideal für die Nutzung solarer Gewinne. Dabei sind Abweichungen bis zu 30° vom Südazimut nur mit geringen Verschlechterungen des solaren Eintrags verbunden. Die täglichen Mittelwerte der Gesamtstrahlung betragen von November bis Januar ca. 1 kWh/m<sup>2</sup> bei Südausrichtung. Ost-West ausgerichtete Flächen haben etwa halb so hohe Werte aufzuweisen. Im Sommer verhält es sich genau umgekehrt: durch den hohen Sonnenstand von 63° (Höhe 50. Breitengrad, Frankfurt) beträgt der Wert auf der Südseite bei senkrechter Verglasung 1,5 kWh/m<sup>2</sup> und im Osten/Westen 2,0 kWh/m<sup>2</sup>. Südausrichtung ist also auch für den sommerlichen Wärmeschutz von Vorteil. Abb. 6 stellt die Mittelwerte (Deutschland) der Haupthimmelsrichtungen während der Heizzeit für die Globalstrahlung gegenüber. Sie beinhaltet die Summe aus direkter Sonneneinstrahlung und diffuser Himmelsstrahlung.

Ausrichtung der Fensterfläche	Passivhaus Projektierungs Paket* [kWh/(m²a)]	EnEV (vereinfachtes Verfahren)** [kWh/(m²a)]
Ost	220	155
Süd	370	270
West	230	155
Nord	140	100
Horizontal	360	
* Heiztage mit einer Außentemperatur ≤ 12 °C; ** verkürzte Heizzeit		

Abb. 6: Mittelwerte (Deutschland) für die Globalstrahlung der Haupthimmelsrichtungen

Verschattung

Der Solareintrag wird durch verschiedene Faktoren gemindert. Dabei ist zunächst die Verschattung des äußeren Horizonts durch Topografie, Gebäude und Pflanzen zu berücksichtigen. Weiterhin entstehen Verschattungen durch Vorsprünge, auskragende Bauteile, Geländer und Fensterleibungen. Nicht zu vergessen ist der Verschmutzungseffekt von Fensterflächen.

Für eine einfache rechnerische Abschätzung ist für freie Lagen der Solareintrag mit einem Verschattungsfaktor von etwa 85 % zu multiplizieren. Bei gängigen städtischen Situationen mit mäßiger Besonnung der Südfassade, auskragenden Bauteilen und teiltransparenten Brüstungen liegt ein realistischer Ansatz bei einem Faktor von 63 % [2]. Sinnvoll ist eine realitätsnahe Berechnung im Rahmen der Heizwärmebedarfs-ermittlung [3] [4].

Passive solare Gewinne

Der Ansatz der Solararchitektur in den achtziger Jahren ging davon aus, dass durch die Maximierung von Glasflächen ein Optimum an nutzbarer Solarwärme zur Verfügung steht. Fensterflächen zeichnen sich jedoch zunächst vor allem durch hohe Transmissionswärmeverluste aus. Das gilt für die Nächte und die zahlreichen strahlungsarmen Tage.

Die Solareinträge dürfen auf der anderen Seite nicht so hoch sein, dass die Räume überhitzt werden. Der solare Ausnutzungsgrad hängt unter anderem davon ab, wie hoch die Temperatur bei Einstrahlung sein darf und wie die wirksame Speichermasse des Gebäudes beschaffen ist. Die Tagesamplitude ergibt sich dabei aus der Beschaffenheit der raumseitigen fünf bis zehn Zentimeter der Bauteile und Einrichtungsgegenstände. Die Heizenergieeinsparung aufgrund der Wärmespeicherung ist allerdings eher gering und bewegt sich im Rahmen von wenigen Prozentpunkten. Die Bedeutung der Speichermasse für ausgeglichen kühle Räume im Sommerfall ist wichtiger.



Durch die umfassenden Entwicklungen bei der Glas- und Fenstertechnik sind Ansätze aus den achtziger Jahren mit Wintergärten und großflächigen Verglasungen gegenstandslos geworden. In der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung sind gut dimensionierte und ausgerichtete Fenstersysteme aufwendigen Systemen wie Glasvorbauten und Wintergärten, transparenter Wärmedämmung und Trombé-Wänden mittlerweile deutlich überlegen (vgl. Kap. 4.2.2).

Transparente Wärmedämmung ist nur bei sehr guter Planung sinnvoll und wirtschaftlich einsetzbar. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Investitionskosten, die resultierenden U-Werte, Wartungsfreiheit und vor allem auf den sommerlichen Wärmeschutz zu legen.

### Zonierung und Raumzuordnung

Es ist sinnvoll, die Aufenthaltsräume mit höherem Temperaturniveau, wie den Wohn-/Essbereich, Kinderzimmer und Arbeitszimmer, auf der Südseite eines Gebäudes zu positionieren und Räume mit geringeren Temperaturanforderungen, wie Küche, Elternschlafzimmer, WC, Treppenbereich und Nebenräume, auf der nördlichen Seite des Gebäudes. Je besser ein Gebäude gedämmt ist, desto geringer wiegt allerdings der Einfluss dieser Zonierung. Die Temperatur innerhalb der thermischen Gebäudehülle gleicht sich zwischen den Räumen an.

Deutlich wichtiger ist die klare Trennung zwischen unbeheizten und warmen Bereichen: kalte Räume sollten möglichst nicht wie eine Kühlrippe in die thermische Hülle hineinragen. Das betrifft sowohl die horizontale Betrachtung als auch übereinander liegende Räume: beim Kellerabgang muss klar definiert sein, wo die lückenlose Dämmung verläuft. Am besten wird der Abgang in einem kalten Windfang außerhalb des beheizten Bereiches untergebracht – auf keinen Fall offen vom Wohnzimmer aus. Einzelne beheizte Räume im Keller verschlechtern bei einer exakten energetischen Berechnung die Transmissionswärmeverluste eines Gebäudes gravierend. Sinnvoll ist es, den Keller vollständig als kalten Bereich auszubilden oder auf den Keller zu verzichten und einen beheizten Kellerersatzraum in den Wohnbereich zu integrieren in Verbindung mit außen liegenden kalten Lagerräumen.

Der zunächst verständliche Wunsch vieler Bauherrn nach einem unterschiedlichen Temperaturniveau verschiedener Räume stellt sich bei genauerer Betrachtung meist als unnötig heraus: z. B. wird die Schlafzimmertemperatur auch im Winter bei 19 °C als äußerst angenehm empfunden, sobald die Zufuhr frischer Außenluft durch die Lüftungsanlage kontinuierlich sicher gestellt ist.

## 2.3 Energetische Standards und Berechnungsverfahren

### 2.3.1 Entwicklung der energetischen Standards

Unsanierete Gebäude aus dem Bestand bis zu den sechziger Jahren weisen im Durchschnitt einen Heizwärmebedarf von 200 bis 300 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf. Das entspricht einem jährlichen Bedarf von 20 bis 30 Litern Heizöl bzw. Kubikmeter Gas pro Quadratmeter. Kompakte mehrgeschossige Gebäude liegen günstiger, freistehende Einfamilienhäuser können bis über 400 kWh/(m<sup>2</sup>a) erfordern. In den letzten Jahrzehnten wurde der Bedarf von Neubauten durch die Wärmeschutzverordnungen und die Energieeinsparverordnungen deutlich gesenkt. Die Techniken für sehr grundlegende weitere Einsparungen sind seit mehreren Jahren in zahlreichen Forschungsvorhaben, durch viele erfolgreiche Modellprojekte und inzwischen in großer Marktbreite erprobt und weitgehend eingeführt. Abb. 7 zeigt die Entwicklung der Energiestandards und ihre charakteristischen Primärenergiekennwerte.

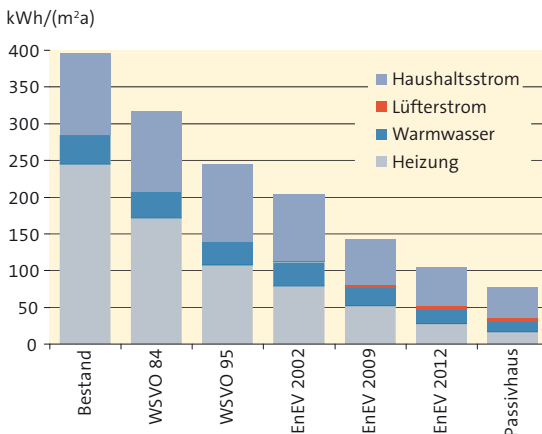


Abb. 7: Entwicklung der Energiestandards

Nach der Ölpreiskrise 1973 wurden Anforderungen aufgestellt, die in der ersten Wärmeschutzverordnung (WSVO) Ende der siebziger Jahre ihren Niederschlag fanden. In der Novellierung der WSVO 1984 erfolgte eine Festlegung des Heizwärmebedarfs auf etwa 140 bis 170 kWh/(m<sup>2</sup>a) und durch die WSVO 1995 eine weitere Absenkung um ein knappes Drittel. Niedrigenergiehäuser (NEH) entstanden seit Mitte der achtziger Jahre. Der Begriff war weder durch den Gesetzgeber noch durch Normung definiert, wurde aber aufgrund von Förderungsrichtlinien für einen Heizwärmebedarf, der 25 bis 30 % unterhalb der WSVO 95 lag, angesetzt.

1991 wurde das erste Passivhaus in Darmstadt-Kranichstein mit einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) gebaut. Knapp zeitversetzt entstand im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

das erste energieautarke Haus in Freiburg. Durch die damit verbundene fundierte wissenschaftliche Begleitforschung wurde in den darauf folgenden Jahren eine sehr dynamische Entwicklung energieeffizienter Gebäude eingeleitet, wobei sich das Profil des Passivhauses aufgrund seiner hohen Wirtschaftlichkeit zunehmend durchsetzt und erkennbar wird, dass sich in den nächsten Jahren die Entwicklung in großer Breite auf Grundlage der dort entwickelten Komponenten fortentwickeln wird. Parallel dazu entwickelte sich durch die KfW-Förderung „Ökologisch Bauen“ der KfW-60- und KfW-40-Standard, bei dem sechzig bzw. vierzig Kilowattstunden Primärenergiebedarf pro Quadratmeter unterschritten werden müssen. Die Berechnung bei diesen Standards erfolgt nach EnEV.

	WSVO [kWh/(m²a)]	EnEV 2002 [kWh/(m²a)]	EnEV 2009* [kWh/(m²a)]	EnEV 2012** [kWh/(m²a)]	Passivhaus [kWh/(m²a)]
Wände	0,4–0,6	0,25–0,5	0,24	0,15–0,22	< 0,16
Dach	0,3–0,5	0,20–0,4	0,20	0,10–0,20	< 0,16
Grund	0,4–0,5	0,25–0,4	0,30	0,15–0,25	< 0,16
Fenster	1,3–1,8	1,3–1,6	1,0	0,8–1,0	< 0,80
Lüftung	1	1, (2/3)	2, (3)	3	3
Lüftung: freie Lüftung (1), ventilatorgestützte Abluftanlage (2), Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (3) * Kennwerte des Referenzgebäudes gemäß EnEV 2009 ** hochgerechnete Werte auf Basis der Annahme von 30 % Reduktion					

Abb. 8: Spektrum der U-Werte verschiedener energetischer Gebäudestandards und Entwicklung der Lüftungsstandards

Abb. 8 stellt das Spektrum sinnvoll anwendbarer U-Werte verschiedener energetischer Gebäudestandards gegenüber. Die energetischen Standards der EnEV 2002 hatten über alle EnEV-Novellierungen bis 2007 Bestand. Die EnEV 2009 und EnEV 2012 senken das Anforderungsprofil gemäß der Meseberger Beschlüsse vom August 2008 um jeweils 30%. Laut Empfehlung der EU-Kommission soll bis zum Jahr 2015 beim Neubau der Passivhausstandard erreicht sein. Dies entspricht einer weiteren EnEV-Anpassungsstufe wie in der Tabelle dargestellt.

2.3.2 Energieeinsparverordnung

Durch die Energieeinsparverordnung wurde im Jahr 2002 (EnEV 2002) als Anforderungsgröße der Primärenergie-Kennwert eingeführt. Er erfasst den Wärmebedarf für Heizen und Trinkwassererwärmung. Die Anlagenverluste des Heizsystems und Primärenergie-Faktoren des Energieträgers gehen über Aufwandszahlen in die Berechnung mit ein (vgl. Kap. 2.3.5). Dieser Ansatz hat sich grundsätzlich bewährt, allerdings mit der Einschränkung, dass in der Praxis oftmals vor allem die Gebäudetechnik zu Lasten der Gebäudehülle optimiert wurde.

Mit der EnEV 2009 wird ein Referenzgebäudeverfahren gemäß DIN 18599 eingeführt, das für den Wohnungsbau in einem vereinfachten Verfahren gerechnet wird. Das kann zunächst parallel zum bisherigen EnEV-Rechenverfahren erfolgen. Es ist zu wünschen, dass durch dieses Verfahren die Planer dazu angehalten werden, die Gebäudehülle hochwertig auszuführen, weil die Gebäudetechnik bereits nach 15 bis 20 Jahren erneuert wird, die Hülle aber 30 bis 50 Jahre nicht mehr angetastet werden sollte – nicht nur aus ökologischer, sondern vor allem aus ökonomischer Sichtweise.

Nach der EnEV 2009 sind zu errichtende Wohngebäude so auszuführen, dass der „Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Kühlung“ den Vergleichswert eines „Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung“ mit den Kennwerten der EnEV-Anlage 1 Tabelle 1 nicht überschreitet. In Abb. 8 sind die wichtigsten Anforderungsgrößen dieses Referenzgebäudes unter der Spalte „EnEV 2009“ zusammengefasst. Parallel zu den EnEV-Anforderungen werden durch das KfW-Programm „Ökologisch Bauen“ Neubauten gefördert, welche die EnEV-Anforderungen unterschreiten ([www.kfw-foerderbank.de](http://www.kfw-foerderbank.de)).

19

### [www.energiefoerderung.info](http://www.energiefoerderung.info)

Zusätzlich gibt es weitere Förderprogramme des Bundes und der Bundesländer sowie von Kommunen und Energieversorgern, die den Einsatz von erneuerbaren Energien und energieeffizienten Gebäudekomponenten unterstützen. Sie können zinsgünstige Darlehen oder direkte, nicht rückzahlbare Zuschüsse erhalten. Wichtig ist, dass bei den meisten Programmen vor Beginn der Maßnahme ein Antrag gestellt werden muss. Aktuelle und kostenfreie Informationen zu Förderprogrammen in Deutschland für private Investoren bietet Ihnen der BINE Informationsdienst online unter [www.energiefoerderung.info](http://www.energiefoerderung.info). Umfassende Informationen für alle Zielgruppen hält der „Förderkompass Energie – eine BINE Datenbank“ für Sie bereit. Alle relevanten Förderprogramme von EU, Bund, Bundesländern und Kommunen sowie Energieversorgern sind in einer zentralen Datenbank mit Internet-Update rund um die Uhr verfügbar. Weitere Informationen erhalten Sie unter [www.bine.info](http://www.bine.info).

### 2.3.3 Passivhaus-Standard

Passivhäuser zeichnen sich durch einen sehr niedrigen Energiebedarf bei hoher Behaglichkeit und bestem Komfort aus. Die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sind so gering, dass sie fast vollständig durch kostenlose „passive“ Energiebeiträge (Energiegewinne) ausgeglichen werden, also durch die solaren Gewinne durch Fenster und sonstige transparente Flächen, durch Wärmeabgabe von Beleuchtung, Geräten und Prozessen sowie durch die Körperwärme der Personen im Gebäude. Verbleibt nur ein minimaler Heizwärmebedarf von weniger als  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , so sind die Kriterien für ein Passivhaus erfüllt.

Grundvoraussetzung für die Errichtung eines Passivhauses 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. 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. Wärmebrückenfreiheit bei Außenmaßbezug der Transmissionsfläche muss Ziel der Detaillösungen sein. Die Luftdichtheit der Gebäudehülle und schadensfreie Konstruktion ist Voraussetzung für die Funktion der erforderlichen Komfortlüftung als Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Die wichtigsten Kriterien werden in Abb. 9 ausgewiesen [5].

20

Das Passivhaus-Konzept ist hoch wirtschaftlich, wenn ein optimierter Entwurf in Verbindung mit einer ökonomisch optimierten Ausführung gegeben ist. Die monatliche Belastung liegt in diesem Fall von Anfang an günstiger als bei einem Standardgebäude (vgl. Kap. 8). Es ist allerdings richtig, dass die Akteure in der Bauwirtschaft sich erst das Wissen um die wirtschaftliche Ausführung aneignen müssen, bevor sie in kostenoptimierter Form hoch energieeffiziente Gebäude errichten können.

Jahresheizwärmebedarf	$\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
Maximale Heizwärmelast	$\leq 10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
Gebäudehülle	$U \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
Fenster	$U_w \leq 0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}), g = 50 \dots 60 \%$
Weitestgehende Wärmebrückenfreiheit	
Luft- und Winddichtheit	$n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$
Lüftungsanlage als Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung	$\eta_{\text{WBG,t,eff}} \geq 75 \%$
Elektroeffizienz	$p_{\text{el}} \leq 0,40 \text{ Wh}/\text{m}^3$
Jahresprimärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Haushaltsstrom	$\leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

Abb. 9: Passivhaus-Kriterien

2.3.4 Entwicklungen Richtung Nullenergiehaus

Auf Grundlage des Passivhaus-Konzepts und seiner Komponenten gibt es weitere Entwicklungen: bei Null-Energie-Häusern wird versucht, ganz auf zusätzliche Wärmezuführung zu verzichten bzw. diese ausschließlich regenerativ zu erbringen. Plus-Energie-Häuser liefern unter dem Strich mehr Energie als zu ihrem Betrieb erforderlich ist – meist durch den Einsatz großer Photovoltaik-Flächen oder auch durch die Ankoppelung von Windenergieparks. Dies stellt inzwischen durch die flächendeckende Lieferung grünen Stroms überhaupt kein Problem mehr dar. Bei all solchen Ultra-Häusern reduziert sich das Grundkonzept jedoch zunächst darauf, eine sehr gute Gebäudehülle

zu schaffen in Verbindung mit einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Die darüber hinausgehende Gebäudetechnik kann ganz einfach und kostengünstig sein wie beim Passivhaus – aber auch beliebig kreativ und kostenintensiv.

### 2.3.5 Berechnung des Energiebedarfs

#### Heizwärmebedarf – Wärmegewinne und Verluste der Gebäudehülle

Der Heizwärmebedarf bezeichnet die Wärme, die den beheizten Räumen zugeführt werden muss, um die gewünschte Raumlufttemperatur einzuhalten. Bei allen Rechenverfahren wird als Grundlage der weiteren Berechnung zunächst dieser Wert ermittelt. Er lässt sich, besonders mit Hilfe von Rechenprogrammen, mit nur geringem Eingabeaufwand errechnen. Als Grundlage der Berechnung dient die EN 832/DIN 4108-6. Dabei werden Wärmeverluste und Gewinne des Gebäudes bilanziert. Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten stehen solare und interne Gewinne gegenüber. Um die Bilanz auszugleichen, muss die verbleibende Differenz durch die Zuführung von Heizwärme ausgeglichen werden. Abb. 10 zeigt am Beispiel eines Passivhauses die Bilanzierung der Transmissionswärmeverluste durch die Gebäudehülle sowie die Lüftungswärmeverluste und auf der Gegenseite solare und interne Gewinne sowie den verbleibenden Heizwärmebedarf.

kWh/(m<sup>2</sup>a)

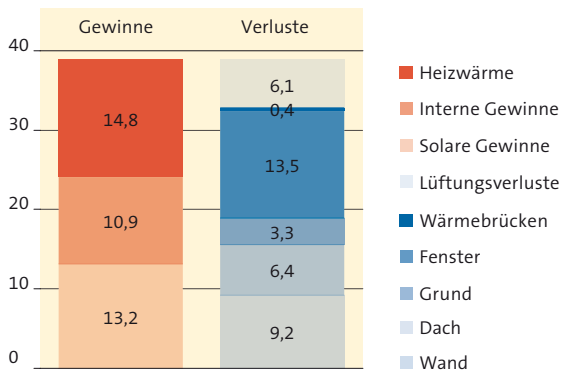


Abb. 10: Bilanzierung der Wärmegewinne und Verluste am Beispiel eines Passivhauses pro m<sup>2</sup> beheizter Fläche (Doppelhaushälfte mit 126 m<sup>2</sup> Wohnfläche)

In Abb. 11 wird die energetische Bilanzierung nach EN 832/DIN 4108-6 schematisch dargestellt. Ergänzend zur grundlegenden Ermittlung des Heizwärmebedarfs werden End- und Primärenergiebedarf sowie Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung in die Betrachtung einbezogen.

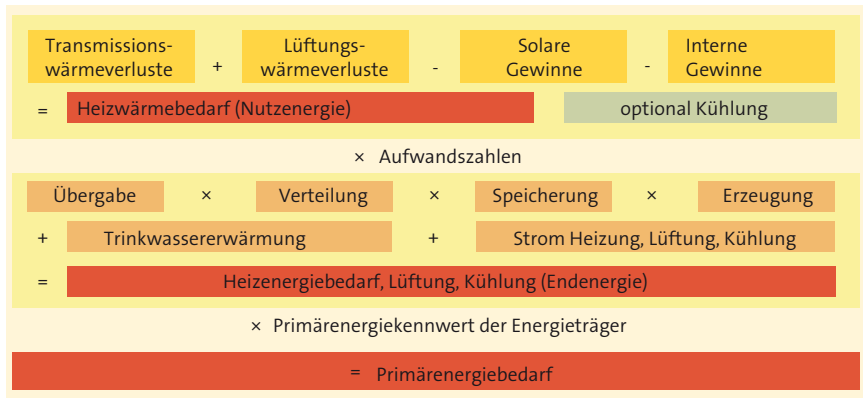


Abb. 11: Vereinfachtes Schema der energetischen Bilanzierung nach EnEV

Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der Berechnung von Gewinnen und Verlusten zusammengestellt. Grundlage ist der Rechengang nach EnEV, wobei die Besonderheiten von sehr energieeffizienten Gebäuden, insbesondere Passivhäusern sowie die Berechnungsansätze nach dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) dargestellt werden:

Die Transmissionswärmeverluste ( $Q_{Tf}$ ) über die wärmeübertragende Umfassungsfläche ergeben sich als Produkt aus Fläche, U-Wert, Reduktionsfaktor ( $f_r$ ) und einem Faktor, der die Heizgradstunden ( $G_H$ ) abbildet. Die Fläche muss ermittelt werden bezogen auf die Außenabmessung, d. h. die zu ermittelnden Flächen ergeben sich durch die äußere Begrenzung der beheizten Zone inkl. der Konstruktionsdicken. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) können für Außenwand, Dach, Bodenplatte etc. berechnet oder für die fertigen Bauteile von Herstellern abgefragt werden.

In die U-Wert-Berechnung der Fenster gehen die verglasten Flächen, die Rahmenanteile, die Wärmebrückenverlustkoeffizienten des Glasrandverbunds und des Fenstereinbaus ein (vgl. Kap. 4.2).

Der EnEV-Rechengang verwendet einen niedrigeren Faktor für die Gradtagstunden von 66 kWh/a gegenüber dem PHPP-Wert von 84 kWh/a. Ein gegenläufiger Effekt ist bei den solaren Einträgen gegeben.

Wärmebrückenverluste können pauschal mit einem Aufschlag zum U-Wert von 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) gerechnet werden oder bei Verwendung von vorgegebenen Standard-details nach DIN 4108 (Beiblatt 2) mit 0,05 W/(m<sup>2</sup>K). Bei energieeffizienten Gebäuden ist es sinnvoll, die Wärmebrücken einzeln zu berechnen (vgl. Kap. 4.3). Bei Passivhäusern ist das auf jeden Fall erforderlich.

Die Lüftungswärmeverluste ( $Q_{L\dot{}}$ ) ergeben sich durch die Multiplikation des Luftwechsels ( $n$ ) mit Volumen, spezifischer Wärmespeicherfähigkeit der Luft und Heizgradstunden ( $G_H$ ). Der Ansatz für den Luftwechsel beträgt bei freier manueller Lüftung  $n = 0,7 \text{ h}^{-1}$ , für luftdichtheitsgeprüfte Gebäude ( $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ ) kann  $n = 0,6 \text{ h}^{-1}$  angesetzt werden. Bei der EnEV-Berechnung werden die Einflüsse bzw. Einsparungen von Lüftungsanlagen bei der Gebäudetechnik über den Anlagenaufwand berechnet. Da Effekte durch Wärmerückgewinnung direkte Einsparungen beim Heizwärmebedarf bedingen, ist der Rechenweg des Passivhaus Projektierungs Pakets (PHPP) einfacher nachzuvollziehen. Dort wird der Wärmebereitstellungsgrad  $\eta_v$  mit einem Wert von 0,8 bis 0,9 für gute Anlagen direkt in die Berechnung einbezogen. Sind pro Person etwa  $30 \text{ m}^2$  Wohnfläche gegeben, kann für den Luftwechsel  $n_L$  ein Wert von 0,3 bis  $0,4 \text{ h}^{-1}$  eingesetzt werden bzw. mittels einer Nebenrechnung die Anlage mit mehreren Parametern auf das Gebäude hin optimiert werden. Einbezogen werden muss darüber hinaus der Infiltrationsluftwechsel infolge Undichtheiten und Fensteröffnen mit einem Rechenwert von  $0,042 \text{ h}^{-1}$  nach PHPP. Dieser Ansatz hat sich bewährt. Nach EnEV (DIN 4108-6) werden für den Infiltrationsluftwechsel  $0,15 \text{ h}^{-1}$  für Abluft- und  $0,2 \text{ h}^{-1}$  für Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung angesetzt. Dies weicht von der tatsächlichen Situation bei gut luftdichten Gebäuden deutlich ab. Gemessene Werte bei Passivhäusern betragen zwischen  $0,015$  bis  $0,04 \text{ h}^{-1}$  [6]. Der EnEV-Ansatz führt gegenüber der PHPP-Rechnung zu erhöhten rechnerischen Lüftungswärmeverlusten von etwa  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

Die solaren Wärmegegewinne errechnen sich aus dem Produkt von Fensterfläche (Rohbaumaß), Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert, vgl. Abb. 26), solarer Einstrahlung und Reduktionsfaktor  $r$ . In Letzteren gehen ein: der Rahmenanteil der Fensterfläche, die Verschattung, Verschmutzung und der nicht senkrechte Strahlendurchgang. Als Standardwert kann  $r = 0,45$  angesetzt werden. Der EnEV-Rechengang legt geringere Werte für die Mittelwerte der eintreffenden Globalstrahlung an als die PHPP-Variante. Es ist sinnvoll im Monatsverfahren zu rechnen, um die tatsächliche Heizzeit und damit auch die tatsächlich relevanten solaren Gewinne richtig abzuschätzen.

Die internen Wärmegegewinne umfassen die im Gebäude erzeugte Wärme von Personen, Elektrogeräten, Kochen, Waschen etc. Die Ansätze nach EN 832 und PHPP weichen deutlich voneinander ab. Es kann sinnvoll sein, die tatsächlich zu erwartenden Wärmegegewinne exakt zu ermitteln, wozu jeweils Rechentools zur Verfügung stehen. Rechen- und Projektbeispiele der letzten Jahre zeigen, dass die PHPP-Werte der Realität sehr nahe kommen.



Werden die Zwischenergebnisse für solare und interne Wärmegewinne mit dem Faktor für den Nutzungsgrad multipliziert, ergibt sich das Ergebnis für die Gewinne. Die Gesamtbilanzierung der Gewinne und Verluste ergibt den Heizwärmebedarf pro Jahr für das Gebäude. Wird dieser Wert durch die Fläche dividiert, ergibt sich der Kennwert für den Heizwärmebedarf in  $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Dabei muss berücksichtigt werden, dass nach EnEV die Fläche aus dem Gebäudevolumen ermittelt wird ( $A_N = 0,32 \times V$ ). Dieser Wert liegt bei kleinen Wohngebäuden ca. 20 bis 30 % über der tatsächlich beheizten Wohnfläche. Im Umkehrschluss liegt der Kennwert um diesen Prozentsatz günstiger als bei Bezugsflächen, die identisch mit der beheizten Wohnfläche (AEB) sind.

Der Rechengang nach EnEV (DIN 4108-6) führt bei Gebäuden mit sehr geringem Heizwärmebedarf im Allgemeinen zu deutlich niedrigeren Werten als die Berechnung nach PHPP. Die zahlreichen PHPP-Berechnungen wurden bei vielen hundert Gebäuden mit den späteren Verbrauchswerten abgeglichen. Dabei wurde eine hohe Übereinstimmung festgestellt.

### Jahresprimärenergiebedarf – Gebäude und Haustechnik als System

Das Gebäude muss als Gesamtsystem gesehen werden. Deshalb ist eine primärenergetische Betrachtung für Erstellung (vgl. Kap. 8.1) und Betrieb zu erstellen. Sowohl nach dem Rechenverfahren der EnEV (DIN 4108-6) als auch nach dem PHPP wird der Jahresprimärenergiebedarf ermittelt.

Nach dem EnEV-Verfahren wird zunächst zu dem oben ermittelten Heizwärmebedarf für den Warmwasserwärmebedarf pauschal ein flächenbezogener Wert von  $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bei Wohngebäuden addiert. Außerdem werden die Hilfsenergien einbezogen sowie der Aufwand für Kühlung und Lüftung. Diese Summe wird mit einer primärenergiebezogenen Anlagenaufwandszahl multipliziert, um die Anforderungsgröße der EnEV, den Jahresprimärenergiebedarf, zu erhalten.

Die Anlagenaufwandszahl lässt sich entweder in einfacher Form aus Tabellen entnehmen, die für gängige Anlagenkonzepte in der DIN 4107-10 vorliegen. Bei Rechenprogrammen lassen sich diese Werte sehr schnell auf einfache Art aktivieren. Dabei wird allerdings von eher mäßigen Anlagenkomponenten ausgegangen. Sinnvoller ist eine detaillierte Ermittlung aller anlagenspezifischen Kennwerte, durch die eine gute Optimierung von Anlagen ermöglicht wird. Einzelne Aspekte der sehr umfangreichen DIN 4107-10 (Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen; Teil 10 Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung) werden in Kapitel 6 bei den Anlagenkomponenten beschrieben.

Die Anforderungsgröße für den Jahresprimärenergiebedarf bei Wohngebäuden ist entweder nach dem Rechenverfahren der EnEV 2002 zu bestimmen oder mittels des Referenzverfahrens der DIN 18599, bei dem – wie bereits beschrieben – Wohngebäude so auszuführen sind, dass der Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Kühlung den Vergleichswert eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung mit den vorgegebenen Kennwerten nicht überschreitet.

## 3 Raumklima und Raumluftqualität

Energiesparen ist durchaus kein Feld für Puristen. Im Gegenteil – Energiesparkünstler haben gleichzeitig einen Sinn für Komfort und hohe Behaglichkeit. Das ergibt sich aus den Grundregeln der Bauphysik, welche die zentralen Anforderungen an gesundes Wohnen und die Schaffung eines möglichst optimalen Raumklimas erklären. Obwohl seit Langem bekannt, werden sie in der gängigen Baupraxis nicht umfassend angewandt. Interdisziplinäre Planung von Architekt, Bauphysiker und Haustechniker in Abstimmung mit dem Bauherrn führt zu sinnvollen Hauskonzepten. Werden bauphysikalische Problemzonen bereits beim Gebäudeentwurf vermieden, müssen sie nicht mehr durch kostenträchtige Eingriffe in die Haustechnik behoben werden.

26

Die Raumluftqualität ist bisher kaum Bestandteil der Planung. Sie ergibt sich mehr zufällig aus der Wahl der Baumaterialien, Ausstattungsgegenstände und den Nutzereinflüssen samt Lüftungsverhalten. Ein erstaunlicher Zustand angesichts der Tatsache, dass wir der uns umgebenden Luft nicht ausweichen können.

### 3.1 Bauphysik

Die Bauphysik beschreibt schon seit Langem sehr exakt die Faktoren für die Schaffung eines guten Raumklimas. Die DIN 1946 führt als Komponenten für die Behaglichkeit die bauphysikalische Ausbildung des Raumes und das individuelle Befinden des Menschen an. Die klassischen Raumklima-Faktoren sind Lufttemperatur, Temperatur der Umschließungsflächen, relative Feuchte sowie Luftbewegung und Luftschichtung im Raum.

Eine gleichrangige Bedeutung haben Tätigkeitsart und Kleidung der Bewohner. Darüber hinaus gibt es zahlreiche individuelle Einflüsse wie die Konstitution und Sensibilität der Nutzer etc. Weitere Rahmenbedingungen sind nutzungsbedingte Faktoren wie u. a. die Raumbelegung, die Art der Lüftung und nicht zu vergessen der Einfluss von akustischen Einflüssen, Licht sowie Sonneneinstrahlung.

#### 3.1.1 Wärme

Ein möglichst ausgeglichener Wärmehaushalt des Körpers ist Grundvoraussetzung für das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen. Unsere Körpertemperatur beträgt konstant ca. 37°C mit Abweichungen einzelner Organe und Körperteile. Die Kleidung übt einen starken Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden aus. DIN 33403 stellt diesen bauphysikalischen Aspekt in clo-Einheiten (clothing) dar:  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$  (entspricht der Wärmedurchlasszahl  $\Lambda = 5,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Um sich bei 20°C ohne Bewegung wohl zu fühlen, benötigen die meisten Menschen normale Kleidung mit Pullover.

Ausschlaggebend für die wärmetechnische Gestaltung des Raumes ist die empfundene Raumlufttemperatur. Sie ermittelt sich näherungsweise als arithmetisches Mittel aus der Raumumschließungsflächentemperatur (Außen- und Innenwände, Decke, Fußboden, Fenster, Möbel) und Raumlufttemperatur. Sie sollte ca. 19–20 °C betragen.

Größere Abweichungen als 4 °C zwischen Raumluft- und Raumumschließungsflächentemperatur sowie zwischen den einzelnen Oberflächentemperaturen werden als unbehaglich empfunden. Gleichmäßig hohe Temperaturen der Umschließungsflächen möglichst nahe an der Raumlufttemperatur führen zu hoher Behaglichkeit und wirken äußerst günstig auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bewohner.

Bei Erhöhung des baulichen Wärmeschutzes ergibt sich von selbst eine angenehme innere Wandoberflächentemperatur der Konstruktionsteile (Abb. 12). Hohes Wärmedämmvermögen führt mithin zu einer deutlichen Verbesserung der Behaglichkeit und der gesundheitsrelevanten Faktoren. Dies gilt sowohl für den winterlichen als auch für den sommerlichen Wärmeschutz.

Die Raumlufttemperatur, bei der sich Behaglichkeit einstellt, liegt bei gut gedämmten Gebäuden niedriger als bei Gebäuden mit kalten Innenoberflächen der Außenbauteile (Abb. 13 und Abb. 14). Dieser Effekt wird auch bei Flächenheizungen genutzt (vgl. Kap. 6.3).

Außen- temp. in °C	Wärmedurchgangskoeffizient/U-Wert [W/(m²K)]												
	5,6	4	2	1,5	1,1	0,9	0,7	0,55	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1
-15	-5,5	1,8	10,9	13,2	15	15,9	16,8	17,5	18,2	18,6	19,1	19,3	19,5
-10	-1,8	4,4	12,2	14,2	15,7	16,5	17,3	17,9	18,4	18,8	19,2	19,4	19,6
0	5,4	9,6	14,8	16,1	17,1	17,7	18,2	18,6	19	19,2	19,5	19,6	19,7
10	12,7	14,8	17,4	18,1	18,6	18,8	19,1	19,3	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9
14	15,6	16,9	18,4	18,8	19,1	19,3	19,5	19,6	19,7	19,8	19,8	19,9	19,9
18	18,5	19	19,5	19,6	19,7	19,8	19,8	19,9	19,9	19,9	19,9	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
22	21,5	21	20,5	20,4	20,3	20,2	20,2	20,1	20,1	20,1	20,1	20	20
24	22,9	22,1	21	20,8	20,6	20,5	20,4	20,3	20,2	20,2	20,1	20,1	20,1
30	27,3	25,2	22,6	22	21,4	21,2	20,9	20,7	20,5	20,4	20,3	20,2	20,1

Abb. 12: Raumseitige Oberflächentemperatur von Außenbauteilen in Abhängigkeit von U-Wert und Außentemperatur bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C

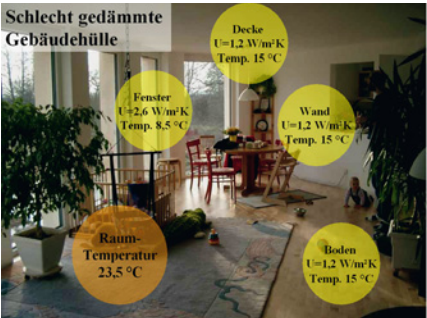


Abb. 13: Oberflächentemperatur und Raumtemperatur bei schlechter Dämmung

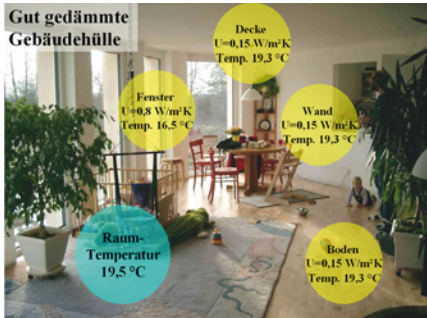


Abb. 14: Hohe Behaglichkeit und ausgeglichene Temperaturen bei guter Wärmedämmung

### 3.1.2 Feuchte

Der Mensch kann die Raumluftfeuchte nicht unmittelbar wahrnehmen. Sie wird in einem Bereich zwischen 35 und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit als behaglich empfunden. Ideal sind Werte um 45 % r. F. (Abb. 15).

Durch die Nutzung eines Gebäudes wird ständig Wohnfeuchte in Form von Wasserdampf und Wasser in die Räume eingetragen. Bei einem 4-Personen-Haushalt werden täglich ca. 10 Liter Wasser freigesetzt.

hohe Feuchte über 65 % r. F.	geringe Feuchte unter 45 % r. F.
Ab 65 % r. F. überwiegt Wärmeabgabe durch Verdunstung (Schwitzen, flache Atmung)	Austrocknungserscheinungen an den Schleimhäuten (bei Staubbelastung)
Feuchter Staub fördert Mikroorganismen	Ausbreitung von Gerüchen wird begünstigt
Hausstaubmilben vermehren sich	Unter 45 % r. F. sterben Milben ab
Schimmelpilzbildung (ab 65 % r. F. einige Aspergillus-Arten, ab 80 % r. F. Cladosporium herbarum und Penicillium-Arten)	Bildung von Staub und die Verbreitung in der Raumluft wird begünstigt
	elektrostatische Aufladung erhöht sich unterhalb 40–30 % r. F.

Abb. 15: Aspekte hoher und geringer Raumluftfeuchte

### Dampfdiffusion

Dampfdiffusion ist die Eigenbewegung des Wasserdampfes durch eine Konstruktion hindurch. Der Diffusionsvorgang wird durch unterschiedliche Wasserdampfteildrücke auf beiden Seiten des Bauteils bewirkt. Der Vorgang ist abhängig von der relativen Luftfeuchte und Temperatur. Im Winter ist der Druck auf der Innenseite höher. Also wandert der Wasserdampf durch die Wand nach außen. Bei schwülen Sommersituationen läuft der Vorgang in der umgekehrten Richtung. In Abb. 16 wird der Wasserdampfgehalt der Luft in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur dargestellt.

Lufttemperatur	Relative Luftfeuchte [%]		
	100	80	40
20 °C	17,29	13,83	8,65
16 °C	13,63	10,9	6,82
10 °C	9,41	7,52	4,70
0 °C	4,85	3,88	2,42
-10 °C	2,14	1,71	1,07
-20 °C	0,88	0,70	0,44

Abb. 16: Wasserdampfgehalt der Luft in g/m<sup>3</sup> in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur



Abb. 17: Atmende Wände gibt es nicht: Feuchtigkeit muss hinausgelüftet werden.

Bauteile setzen dem Wasserdampfdurchgang Widerstände entgegen. Ein Maß dafür ist die dimensionslose Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Den tatsächlichen Diffusionswiderstand, bezeichnet als diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$ , erhält man durch Multiplikation von  $\mu$  mit der Bauteildicke  $d$ . Wasserdampftransport vom Innenraum zur Außenluft findet nur zu geringsten Teilen auf dem Weg durch die Außenbauteile statt. Dabei handelt es sich um Anteile im untersten Prozentbereich von z.B. 0,3 Liter/m<sup>2</sup> im Jahr

bei standardmäßigen Außenbauteilen. Feuchtetransport muss also durch die Lüftung, nicht durch Diffusion gewährleistet werden (Abb. 17).

## Kondenswasserbildung

Wasserdampf ist ein trockenes Gas, welches keine Bauschäden verursachen kann. Wenn allerdings wasserdampfhaltige Luft abkühlt und sich die relative Luftfeuchte auf 75 bis 100 % erhöht, fällt Kondenswasser in Tropfenform an. Kondenswasseranfall und in der Folge Schimmelpilzbildung können aufgrund von Kapillarkondensation bereits bei Feuchten über 75 % bzw. 80 %, bezogen auf die dazugehörige Oberflächentemperatur, entstehen. Im Wohnbereich stellen Oberflächentemperaturen unterhalb von etwa 15 °C Probleme dar. Das gilt für alle Außenbauteile mit einem U-Wert ca.  $> 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , aber auch für Wärmebrückenbereiche von Konstruktionen, die in der Fläche deutlich günstiger liegen. In der Praxis werden Kondenswasserprobleme ab Konstruktionen mit einem U-Wert unter  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  nur noch bei sehr ungünstigen Wärmebrückenkonstellationen auftreten.

Wasserdampfkonvektion

Die meisten Feuchteschäden in Außenbauteilen entstehen nicht durch Dampfdiffusion sondern durch Wasserdampfkonvektion: durch undichte Fugen (vgl. Kap. 4.4.2) strömt wasserdampfhaltige Luft nach außen und lässt während der Abkühlung die enthaltene Feuchte auskondensieren. In einer Saison können durch eine Luftundichtigkeit mit 2,5 cm Durchmesser bis zu 30 Liter Wasser freigesetzt werden. Abb. 18 gibt Vergleichszahlen an.

		Wasserdampfdurchgang pro Stunde
Dampfkonvektion	Fuge 1 mm × 1,00 m	16–38 g
	Fuge 5 mm × 1,00 m	42–109 g
Dampfdiffusion	diffusionsoffener Aufbau ( $s_d = 0,9$ m)	0,71 g/m <sup>2</sup>
	diffusionsbremsender Aufbau ( $s_d = 3,7$ m)	0,17 g/m <sup>2</sup>
	diffusionsdichter Aufbau ( $s_d = 33$ m)	0,02 g/m <sup>2</sup>

Abb. 18: Wasserdampftransport durch Konvektion und Diffusion

Kapillare Wasserwanderung

Kapillaren sind haarfeine, röhrenartige Poren, die aufgrund der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten Wasser transportieren können. Bekannt sind kapillar aufsteigende Feuchte im Mauerwerk und hygroskopische Wasseraufnahme bei Schlagregen. Ebenso kann im Bauteil ausfallendes Kondenswasser kapillar weitergeleitet werden. Bei winterlichen Verhältnissen (außen kalt, innen warm) verläuft die kapillare Wasserwanderung entgegen der Diffusion von außen nach innen, das heißt, der Diffusionsstrom wird durch die gegenläufige kapillare Wasserwanderung gemindert.

Sorption

Sorption ist die Aufnahme von Wasser durch Baustoffe. Sie ist auch als Speicherung von sehr schnell anfallender Feuchte in Form kapillarer Wasserwanderung auf den raumseitigen Bauteiloberflächen zu beschreiben. Entscheidend für das Raumklima sind die obersten 5–20 mm der raumumfassenden Fläche. Gutes Sorptionsverhalten der Oberflächenstoffe führt zu einem ausgeglichenen Feuchteverhalten der Raumluft.

3.1.3 Raumluftbewegung

Die Bewegung der Raumluft ist ein wichtiges Behaglichkeitskriterium. Insbesondere wenn die bewegte Luft kälter als die Raumluft ist, wird sie als „Zugluft“ wahrgenommen, wobei die subjektive Empfindlichkeit der Menschen in diesem Punkt unterschiedlich ausgeprägt ist. Luftgeschwindigkeiten über 0,15 m/s (bei 20 °C) in Bereichen, in denen sich Menschen aufhalten, sollten möglichst deutlich unterschritten werden. Mit gut gedämmten luftdichten Konstruktionen sind selbst in den ungünstigsten fensternahen Bereichen deutlich niedrigere Werte erzielbar. Für den gesamten Raum sollte die Luftschichtung so gering wie möglich ausgeprägt sein. Dies ist am

besten zu realisieren, wenn die Oberflächentemperaturen der Umfassungsflächen sehr nah beieinander liegen (vgl. Kap. 2.1).

### 3.1.4 Licht

Ausreichende Belichtung ist eine Grundvoraussetzung für das Wohlbefinden im Gebäude. Die Bauordnungen schreiben Fensterflächen (Rohbaumaß) von einem Achtel der Raumfläche vor. Für Rückzugsräume ist dies ausreichend. Nebenräume können auch geringer belichtet werden. Die Hauptaufenthaltsräume sollten größere Fensterflächen aufweisen und aus Gründen der Optimierung solarer Gewinne möglichst nach Süden ausgerichtet werden. Sinnvoll ist es, das Licht hoch in den Raum einstrahlen zu lassen, das heißt, die Fensteroberkante wird bis direkt unter die Decke gezogen. Eine geringere Auswirkung für die Belichtung haben die Fensterteile im unteren Bereich. Eine gute natürliche Belichtung ist Voraussetzung für den möglichst weitestgehenden Verzicht auf Kunstlicht.

Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes sind bei hochwärmegedämmten Gebäuden die transparenten Flächen ausschlaggebend. Als Maßnahme bietet sich eine temporäre Verschattung vor allem in Form von außen liegenden Raffstores an. Diese können mit geringem Mehraufwand so ausgeführt werden, dass sie im oberen Fensterbereich lichtlenkend wirken und den Raum trotz Verschattung bis in eine große Tiefe ausleuchten.

## 3.2 Raumlufthqualität

Die Belastung der Luft in Innenräumen ist seit archaischen Zeiten gegeben. Seit Entdeckung des Feuers wurden zum Heizen, Kochen und zur Beleuchtung in allen Kulturen in Höhlen, Zelten, Hütten und sonstigen Gebäuden verschiedenste Materialien verbrannt mit der Folge starker Raumlufthbelastung. Zahlreiche Baustoffe für die Erstellung und Ausgestaltung von Gebäuden auch vor der industriellen Produktion waren stark toxisch.

„Reine Luft“ ist die Zusammensetzung von Stickstoff (78,09 Vol.-%), Sauerstoff (20,95 Vol.-%), Edelgasen und Wasserstoff. Luftverunreinigungen finden statt in Form von Gasen, Dampf, Stäuben, Aerosolen und Mikroorganismen. Der klassische Leitwert für die Raumlufthbelastung ist das Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Dies beruht auf der Annahme, dass der Mensch der Hauptemissionsfaktor im Innenraum ist. Max von Pettenkofer (1810–1901), der Grundlagen für eine wissenschaftliche Betrachtung der Wohnhygiene legte, forderte einen  $\text{CO}_2$ -Wert in Innenräumen von maximal 0,1 Vol.-% (Konzentration in der Außenluft: ca. 0,3–0,5 Vol.-%). Weitere Anforderungen und erforderliche Luftwechselraten werden in Kapitel 5.2 dargestellt.



Grundsätzlich ist die Innenluftqualität von der umgebenden Außenluft abhängig. Das muss bei der Auswertung von Raumluftmessungen berücksichtigt werden. Gegebenfalls sind Kontrollmessungen der Außenluft zusätzlich zur Innenraumluft durchzuführen. Aufgrund der Sedimentation von Schwebstoffen in ruhiger Innenluft, Sorption und chemischer Reaktionen ist die Belastung durch einige Schadstoffe in Innenräumen niedriger als außerhalb (Abb. 19). Schadstoffe, die innerhalb der Wohnung entstehen oder freigesetzt werden, führen jedoch in der Regel zu einer deutlich höheren Konzentration als in der Außenluft.

Stoff	Luftbelastung I/A	Grundlage für die Konzentrationsverschiebung
Kohlenmonoxid CO	$\leq 1$	nichtreaktives, unpolares, inertes Gas; Wechselwirkung gering
Schwefeldioxid SO <sub>2</sub>	0,4–0,5	irreversible Sorption: basische Wandbestandteile
Stickstoffoxide NO <sub>x</sub>	$\leq 1$	wie Schwefeldioxid, jedoch nicht so reaktionsfreudig
Ozon (Sommer)	0,06	sehr reaktives Gas, Wärme und hohe Luftfeuchte wirken beschleunigend
Staub, kleiner als 1 µm	0,4–1	Sedimentation (Herabsinken), abhängig von Luftbewegung
Staub, größer als 1 µm	0,2–0,5	Sedimentation
Pollen, 20–40 µm	0,26–0,45	Sedimentation
Formaldehyd	10	
Schimmelpilze	0,4–0,5	Bei erhöhter Belastung in den Räumen liegt eine interne Quelle vor

I/A: Mittelwerte für das Verhältnis von Innen- zu Außenluft; I/A = 0,5 bedeutet: Innenluftbelastung halb so hoch wie Außenluftbelastung; I/A = 1: gleich hohe Belastung; I/A = 2: Innenluft doppelte Belastung wie Außenluft

Abb. 19: Größenordnung des Verhältnisses der Luftbelastung Innen/Außen (I/A)

### Auswirkungen von Baustoffen

Die Festlegung der Baustoffe geschieht zum einen bereits in der Vorentwurfsphase und im Detail bei der Konstruktionsauswahl im Zuge der Werkplanung und Ausschreibung. Diese Planungsschritte bieten dem Planer und Bauherrn die Möglichkeit, die Umweltbelastung beim Bauen möglichst gering zu halten. Dabei sollten im Sinne einer Produktlinienanalyse die wesentlichen Phasen, die von Baustoffen durchlaufen werden, möglichst umfassend bewertet werden: Rohstoffgewinnung, Produktion, Verarbeitung, Nutzung und Verwertung.

Die Minimierung der Emissionen aus den Baumaterialien ist eine essenzielle Aufgabe des Architekten. In Kapitel 8.1 werden weitere Angaben zu Entscheidungskriterien gegeben. Die Planungsentscheidungen müssen das Emissionsverhalten der Materialien beinhalten. Produkte ohne ausreichende Angaben zu den Inhaltsstoffen sollten nicht eingesetzt werden.

Wer sicher gehen will, sollte einen Etat für die Materialbeurteilung mit der Option auf Prüfkammermessungen von Materialien vor dem Einbau sowie Raumlufthmessungen zur Qualitätssicherung vorsehen und einen Fachingenieur für Raumlufthqualität in Abstimmung mit dem Planer hinzuziehen.

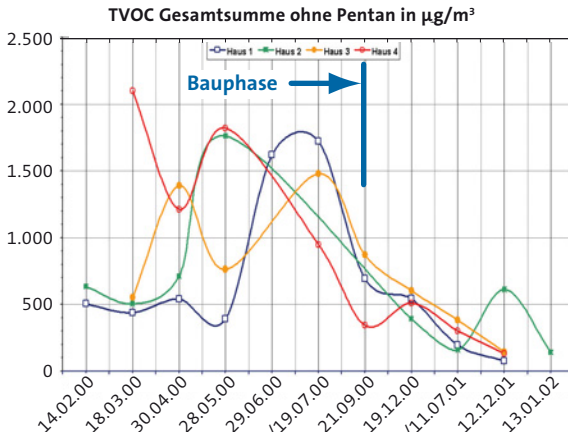


Abb. 20: Ergebnis von Raumluftqualitätsmessungen beim Neubau von vier Passivhäusern in Nürnberg-Wetzendorf. Die erreichten Werte unter 300 Mikrogramm/m³ weisen auf sehr gute Raumlufthqualität hin.

## Auswirkungen der Technischen Gebäudeausrüstung

Heizungstechnik kann aus physiologischer Betrachtungsweise vor allem auf zweierlei Arten gesundheitsschädigend wirken:

1. Belastung der Innen- und Außenluft durch Abgase aus dem Verbrennungsprozess: dies ist besonders relevant bei Gebäuden mit Einzelofenfeuerung. Bei der Kombination mit Lüftungsanlagen muss darauf geachtet werden, dass auf keinen Fall durch eine Unterdrucksituation im Raum Abgase in die Raumlufth gelangen. Öfen bzw. Brenner müssen daraufhin überprüft werden.
2. Beeinflussung der Raumlufth durch die Heizfläche (Ofen-/Heizkörperoberfläche): Alle Heizsysteme heizen aufgrund eines Anteils von Strahlungswärme und eines Anteils von Konvektionswärme (vgl. Kap. 6.3). Bei der Konvektion wird Raumlufth an den Heizflächen entlanggeführt und erwärmt. Durch die Zirkulation der aufgewärmten Luft tritt der Heizungseffekt ein. Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Heizfläche und Raumlufth ist, desto angenehmer für die Nutzer des Raumes:
  - Durch eine niedrige Luftbewegung wird weniger Staub aufgewirbelt und Partikel können sich eher absetzen. Je staubfreier die Atemluft, desto geringer die gesundheitliche Belastung.
  - Pyrolyse von Staub beginnt ab einer Temperatur von 55 °C, das heißt, Staubbestandteile und angelagerte Schadstoffmoleküle erfahren chemische Umwandlungsreaktionen und es können neue Schadstoffe entstehen.

Niedrigtemperatur-Heizflächen sind insbesondere in gut gedämmten Gebäuden kosteneffizient und sinnvoll einsetzbar.

### Ausstattungsgegenstände und Mobiliar

Neben Baustoffen beeinflussen zusätzliche Materialien wie Bodenbeläge, Vorhänge, Regal-Einbauten und Mobiliar aufgrund ihres großen Oberflächenanteils in sehr wesentlichem Maß die Innenraumluft. Deshalb gelten für deren Inhaltsstoffe grundsätzlich die gleichen Kriterien wie für die Baustoffe. Beim Einkauf sollte auf Prüfzeugnisse und Zertifikate geachtet werden, die aussagekräftig sind und ein minimiertes Maß an Emissionen erwarten lassen.

### Nutzerbedingte Belastungen

Im Gebäude fallen durch die Nutzung zusätzliche Belastungen der Raumluft an. Der Mensch gibt Stoffwechselprodukte über die Atmung, Transpiration, den Verdauungs- und Urogenitaltrakt an die Raumluft ab. Das Atemvolumen beträgt im Normalzustand ca. 0,5 m<sup>3</sup> je Stunde. Die dabei entstehende CO<sub>2</sub>-Produktion beträgt normalerweise 20–30 Liter je Stunde (12 l/h bei ruhendem Zustand - 180 l/h bei Schwerstarbeit). Zusätzlich werden in geringen Mengen Kohlenmonoxid, Ethanol, Methan und Aceton ausgeatmet. Raucherhaushalte sind deutlich stärker von schädlichen Belastungen der Raumluft betroffen. Nutzerbelastungen ergeben sich weiterhin aus der Lagerung und Zubereitung von Lebensmitteln, aus Haushalts- und Körperpflegemitteln sowie aus Heimwerkermaterialien.

### Hausstaub, Mikroorganismen und allergisierende Stoffe

Staub ist ein gutes Adsorptions- und Transportmedium für biogenes Material und viele schwerflüchtige organische Substanzen. Die Staubbelastung von Innenräumen wird vor allem durch folgende Faktoren hervorgerufen [7]:

- biogene Stäube (z. B. Hausstaubmilben und ihre Exkremente, Haare und Hautepithelien, Absonderungen von Wohnungsungeziefer, Pilzsporen, tierische und pflanzliche Produkte wie Wollteppiche, Bettwäsche sowie Holzstaub),
- Luft- und Bodenstaubeinträge von außen,
- offene Feuerstellen und Flammen (Ruß und Asche),
- mechanischer Abrieb (von Bodenbelägen, Putz, Textilien etc.),
- Tabakrauch,
- Fasern und sonstige Partikel, die z. B. aus Baumaterialien stammen oder durch Undichtigkeiten austreten.

Staub kann durch Hautkontakt, über den Magen-/Darmtrakt und vor allem über die Atemluft aufgenommen werden. Besonders gefährlich sind Staubpartikel, die kleiner als  $1\text{ }\mu\text{m}$  sind, da sie bis in die Lungenbläschen eindringen können und dort abgelagert werden. Von  $1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$  erreichen sie nur die oberen Luftwege, oberhalb  $10\text{ }\mu\text{m}$  dringen sie nur in den Nasen-Rachen-Raum ein.

Pilzsporen gelangen durch Lebensmittel oder durch die Außenluft in Aufenthaltsräume. Die Innenraumkonzentration liegt im Vergleich zur Außenluft gewöhnlich bei 40–50 % der Sporen. Ist die Innenkonzentration höher, so ist von einem Schimmelpilzbefall auszugehen. Gute Voraussetzungen für Pilzbefall sind hohe Raumluftfeuchte und feuchte Wände (vgl. Kap. 3.1.2). Schimmelpilze finden im Hausstaub ideale Wachstumsbedingungen. Pro Gramm Staub können bis zu eine Million Sporen vorkommen. Schimmelpilze scheiden Stoffe mit hohem Allergisierungspotenzial aus und können Pilz- und Infektionskrankheiten auslösen. Einige der über 150 verschiedenen Aspergillus-Arten haben Ausscheidungsprodukte mit hohem toxischen und karzinogenem Potenzial (Aflatoxine). Sie schwächen bei Mensch und Tier das Immunsystem [8].

Tierische Allergene wie Haare, Federn, Schuppen und Exkremente von Tieren im Haus sowie Teilchen von verendeten Insekten können allergische Reaktionen beim Menschen auslösen. Besondere Bedeutung kommt dabei der Hausstaubmilbe zu. Bevorzugte Aufenthaltsbereiche sind Matratzen, Bettzeug, Teppichboden und Polstermöbel. Das Hauptallergen ist ihr Kot, der sich wiederum an Staubpartikeln anlagert.

Pflanzliche Allergene und Pollen können ebenfalls gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen haben. Durch Filter von Lüftungsanlagen lassen sich Pollen und Stäube ausfiltern.

### 3.3 Raumlufthygienische Anforderungen an die Lüftung

Anforderungen der Raumlufthygiene haben Priorität vor der Energieeinsparung. Durch Lüftung können viele der aufgeführten Raumlufthprobleme gelöst werden. Dabei sind folgende Aspekte zu beachten:

1. Die Anforderung an die Frischluftzufuhr beträgt im Wohnungsbau  $30\text{ m}^3/\text{h}$  pro Person. Daraus resultieren Luftwechsel für die Aufenthaltsräume von  $0,5\text{--}1,0\text{ h}^{-1}$  und für Gesamtwohneinheiten/-häuser von  $0,3$  bis  $0,6\text{ h}^{-1}$  (vgl. Kap. 5.2).
2. Der Abtransport der anfallenden Wohnfeuchte wird durch einen Luftwechsel von  $0,3\text{--}0,5\text{ h}^{-1}$  in den Kern-Heizmonaten November bis Februar sicher gestellt. In den Übergangsmonaten muss der Wert bei steigenden Außentemperaturen erhöht werden. Da zu dieser Zeit im Allgemeinen in Passivhäusern nicht mehr geheizt wird, kann dies durch zusätzliche Fensterlüftung erfolgen.

3. Alleinige manuelle Lüftung (Fensterlüftung) führt in den Wintermonaten in den meisten Fällen zu unbefriedigenden Ergebnissen (vgl. Kap. 5.1.1) und die Raumluftqualität ist in vielen Fällen nicht ausreichend.
4. Eine ventilatorgestützte Lüftung ermöglicht kontinuierlich frische Außenluftzufuhr und kann durch einen optimierten Luftwechsel sowohl den Aspekten der Raumlufthygiene als auch der Energieeinsparung dienen (vgl. Kap. 5.1.2). Bei Verwendung von Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung werden zusätzlich die Lüftungswärmeverluste auf ein energetisches Optimum reduziert (vgl. Kap. 5.1.4).
5. Die Baustoffauswahl muss so ausgeführt werden, dass der Luftwechsel für eine ausreichend niedrige Schadstoffkonzentration in der Raumluft sorgt. Dabei müssen zusätzliche Einträge durch Einrichtungsgegenstände und Nutzereinflüsse berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse von Schadstoffuntersuchungen [9], [10] zeigen, dass die Raumluftqualität in Wohngebäuden mit Lüftungsanlagen deutlich günstiger liegt als die durchschnittlichen Werte in Wohngebäuden mit Fensterlüftung [11].

## 4 Konstruktion

In die Wahl der Konstruktion fließen die zahlreichen Überlegungen der vorangegangenen Kapitel ein: die energetischen Anforderungen, die ökologische Bewertung der Baustoffe, das Emissions- sowie Dämmverhalten und schließlich auch die subjektive Einschätzung: fühle ich mich wohl in dieser Haut? Dazu kommen die konstruktive Tauglichkeit und nicht zuletzt die Abwägung der Kosten. Alle Kostenangaben beziehen sich immer auf die reinen Baukosten der Kostengruppen 300/400 nach DIN 276 inkl. 19 % MwSt. Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit lassen sich dann vereinbaren, wenn kein erhöhter konstruktiver Aufwand erforderlich ist, um die höheren Dämmstoffdicken unterzubringen – das Dämmmaterial selbst fällt mit 60–100 €/m³ (brutto) nicht so stark ins Gewicht.

Während über die Wahl der Dach- und Bodenplatten-/Kellerdeckenausführung selten länger diskutiert wird, fällt die Entscheidung über die Außenwandkonstruktion oftmals sehr schwer: Holzbau oder Massivbau wird zur Grundsatzentscheidung. Dabei handelt es sich nur um 30 bis 40 % der Hüllfläche und etwa 20 % aller Konstruktionsflächen. In Abb. 21 werden stichpunktartig die Vor- und Nachteile von Holz- und Massivbau aufgelistet.

Vorteile Holzbau	Nachteile Holzbau
Kohlenstoff-Zwischenlagerung mit günstiger Auswirkung auf die Klimabilanz, Primärenergieinhalt des Gebäudes ca. 30 % niedriger als Massivbau (Einsparung ca. 150–200 kWh/m²), freiere Wahl der Dämmstoffe, Eigenleistungen in hohem Umfang möglich	Schallschutz, Brandschutz, Holzschutz, Emissionsverhalten von Holzflächen und vor allem Holzwerkstoffen
Vorteile Massivbau	Nachteile Massivbau
Kosten, Schallschutz (KS, Beton), Brandschutz, praktisch keine Emissionen aus mineralischen Bauteilen mit mineralischem Putz und Anstrich	Primärenergiebilanz, schwierigere Dämmstoffauswahl: PS und Mineralfasern gängig, nachwachsende oder rein mineralische Dämmstoffe möglich, aber teurer

Abb. 21: Vor- und Nachteile von Holz- und Massivbau

### 4.1 Opake Außenbauteile

Im Folgenden werden für die wesentlichen Konstruktionsteile Varianten gegenübergestellt mit Aussagen zum Aufbau, zur Konstruktionsdicke sowie zu Kosten pro Quadratmeter Konstruktionsfläche (günstige bis mittlere Kosten inkl. MwSt.) und Primärenergieinhalt (PEI) für die Erstellung der Konstruktion (vgl. Kap. 8.1). Alle Aufbauten weisen den Passivhaus-Standard mit  $U=0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  auf. Angefügt ist noch eine überschlägige Bewertung der Umweltverträglichkeit (UV) von ++ über o bis --. [12]

4.1.1 Bodenplatte und Kellerdecke

Verglichen werden Standardaufbauten in Massivbauweise mit Dämmung unterhalb und oberhalb der Bodenplatte. Die wesentlichen Kennwerte werden für die vergleichbare Ausführung als Kellerdeckenkonstruktion über einem unbeheizten Keller angegeben. Dazu wird eine Variante in klassischer Holzbauweise dargestellt: der untere Gebäudeabschluss als aufgeständerte Balkenkonstruktion mit Unterlüftung (Abb. 22).

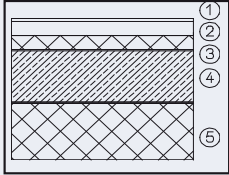
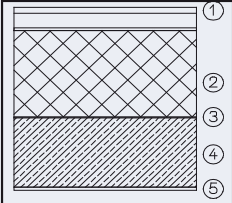
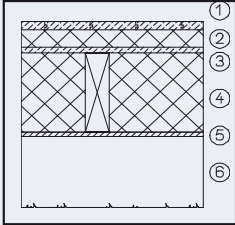
Bodenplatte Dämmung unten		Dicke [cm]	PEI [kWh/m²]	Kosten [€/m²]	UV + 0 -
	1 Bodenbelag Parkett	1,0	8	60	+
	2 Zementestrich	5,0	25	16	+
	3 PS-Hartschaum 0,040	4,0	11	7	0
	4 Betonbodenplatte	15	83	30	+
	5 extrud. PS-Hartschaum 0,035	18	85	55	0
	Summe	43,0	211	168	
Bodenplatte Estrich – Dämmung					
	1 Bodenbelag Parkett	1,0	8	60	+
	2 Zementestrich	6,0	30	18	+
	3 PS-Hartschaum 0,040	24,0	65	7	0
	4 Betonbodenplatte	15	83	30	+
	5 Schotter (Putz/KG)	15,0	12	14	+
	Summe	46,0	197	143	
Holzboden unterlüftet					
	1 Fertigparkett, Dielen	2,0	16	108	+
	2 Holzweichfaserplatte	3,0	8	24	++
	3 Spanplatte	2,0	16	20	+
	4 Zellulose 0,040	24,0	15	23	++
	4 Holzkonstruktion		18	30	++
	5 OSB-Platte	2,0	16	21	0
	6 Luftraum	25,0			
Summe		58,0	89	226	

Abb. 22: Bodenplattenkonstruktionen

4.1.2 Außenwände

Bei den Außenwänden muss ein Vergleich zwischen Holzbau und Massivbau durchgeführt werden. Für den Holzbau wird die klassische Ständerkonstruktion mit Installationsebene auf der Innenseite dargestellt. Für den Massivbau bietet sich das Mauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem als die einfachste Form an: einmal die kostenoptimierte Ausführung mit Kalksandstein, zum Vergleich eine Variante mit porositertem Material, wobei für Porenbeton und Ziegel jeweils ein mittlerer Wert von  $\lambda_R = 0,16 \text{ W/(mK)}$  angenommen wird (Abb. 23).

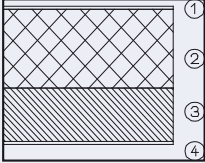
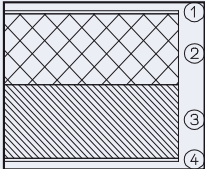
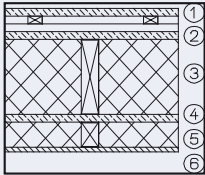
	Massivbau (Kalksandstein mit WDVS)	Dicke [cm]	PEI [kWh/ m²]	Kosten [€/m²]	UV + 0 -
	1 Außenputz	1,0	5	36	+
	2 PS-Hartschaum 0,040	25,0	67	48	0
	3 KS-Mauerwerk	17,5	53	50	++
	4 Innenputz	1,0	5	16	++
	Summe	44,5	129	150	
	Porositertes Mauerwerk mit WDVS				
	1 Außenputz	1,0	5	36	+
	2 PS-Hartschaum 0,040	20,0	54	38	0
	Ziegel/Porenbeton 0,16	24,0	143	70	++
	4 Innenputz	1,0	5	16	++
	Summe	46,0	206	160	
	Holzständerwand mit Installationsebene				
	1 Sichtschalung/Lattung	7,0	6	82	+
	2 Holzweichfaserplatte	2,0	5	18	++
	3 Zellulose 0,040	22,0	14	20	++
	3 Holzkonstruktion		17	29	++
	4 OSB-Platte	2,0	16	21	0
	5 Dämmung/Lattung	8,0	7	8	++
	6 Gipskarton	1,5	11	29	+
	Summe	42,5	76	206	

Abb. 23: Wandkonstruktionen

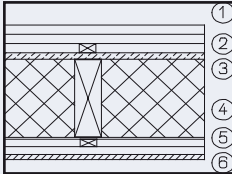


Einschalige Massivkonstruktionen mit  $\lambda_R$  bis herab zu einem Wert von  $0,08\text{ W}/(\text{mK})$  sind ebenfalls möglich, aber im Allgemeinen kostenintensiver und mit einem höheren Primärenergiekennwert versehen. Die U-Wert-Entscheidung sollte über die Lebensdauer des Bauteils sinnvoll sein – z. B. bei Wänden mindestens 40 Jahre.

Konstruktionen mit Vormauerklinker sind bei Einzelzulassung der Komponenten mit Dämmdicken bis zu 20 cm möglich. Bei Einsatz von Dämmmaterialien mit einem  $\lambda_R$ -Wert von  $0,22\text{ W}/(\text{mK})$  sind Passivhaus-Konstruktionen ausführbar. Die Mauerwerksanker für die Vormauerschale sind am einfachsten montierbar, indem wie bei einem Wärmedämmverbundsystem nach Aufbringen der Dämmung die Anker per Dübel eingebracht werden.

4.1.3 Dächer

Es werden zwei Konstruktionsvarianten in Holzbauweise gegenübergestellt (Abb. 24). Die zimmermannsmäßige Ausführung mit Vollhölzern und ein Tragwerk aus Profil-Trägern. Ergänzend werden unterschiedliche Dacheindeckungen verglichen, so dass Aussagen für übliche geneigte Dächer Flachdachkonstruktionen und blechgedeckten Dächern gegenüberstehen. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass Hinterlüftungen und bauphysikalische Feinheiten je nach Anwendung von diesem schematisierten Aufbau abweichen können und in jedem Einzelfall berechnet werden müssen. Des weiteren wird eine Dachkonstruktion in Massivbauweise dargestellt, wobei oberhalb ein hinterlüftetes Dach oder auch ein unbeheizter Dachboden liegen kann.

	Dachkonstruktion mit Vollholz-Sparren	Dicke [cm]	PEI [kWh/m²]	Kosten [€/m²]	UV + 0 -
	1 Betondachstein/Lattung	9,0	21	30	+
	2 Holzweichfaserplatte	2,0	5	18	++
	3 Zellulose 0,040	30,0	19	27	++
	3 Holzkonstruktion		18	31	++
	4 Dampfbremse		10	11	0
	5 Lattung/Konterlattung	5,0	2	2	++
	6 Gipskarton	1,5	11	29	+
	Dach (Dachziegel)	47,5	86	148	
	alt.: extens. Begrünung	60,0	92	198	
	alt.: Alublech	45,0	160	186	

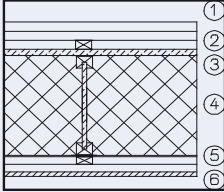
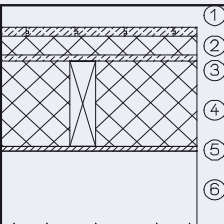
Dachkonstruktion mit I-Profilen		Dicke [cm]	PEI [kWh/m <sup>2</sup> ]	Kosten [€/m <sup>2</sup> ]	UV + 0 -
	1 Betondachstein/Lattung	9,0	21	30	+
	2 Holzwefchaserplatte	2,0	5	18	++
	3 Zelloulose 0,040	26,0	17	24	++
	3 Holz-I-Profil		13	42	0/+
	4 Dampfbremse		10	11	0
	5 Lattung/Konterlattung	5,0	2	2	++
	6 Gipskarton	1,5	11	2-	+
	Summe	43,5	78	156	
alt.: extens. Begrünung		56,0	84	191	
Massivdecke zu belüftetem Dachraum					
	1 Dachhaut pauschal		35	48	
	2 Winddichtungsbahn		2	6	0
	3 Zelloulose 0,040	26,0	17	24	++
	4 Stahlbetondecke	18,0	137	72	+
	5 Innenputz	1,0	5	16	++
	Summe	45,0	196	165	
	alt.: extens. Begrünung	57,5	202	200	
	alt.: Alublech	52,5	272	188	

Abb. 24: Dachkonstruktionen

## 4.2 Transparente Bauteile

Transparente Flächen können durch den Glashauseffekt solare Gewinne erzielen. Die Sonnenstrahlung liegt im Spektralbereich von 0,3–2,5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge. In diesem Bereich weisen Fenstergläser einen hohen Transmissionsgrad (Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$ ) auf. Die außen auf der Scheibe auftreffende Strahlungsmenge gelangt, multipliziert mit dem  $g$ -Wert, in das Gebäudeinnere (Abb. 25). Dort wird die auftreffende Strahlung absorbiert und in Wärmestrahlung mit einer Wellenlänge über 4  $\mu\text{m}$  umgewandelt. Diese liegt oberhalb des Transmissionsbereichs von Glas. Damit ist die Wärme im Raum gefangen.

Das für ein menschliches Auge sichtbare Licht hat ein abweichendes Wellenlängenspektrum zwischen 0,38 und 0,78  $\mu\text{m}$  [13] und liegt im maximalen Transmissionsbereich von Klarglas. Der Gesamtfaktor des einfallenden sichtbaren Lichtes (Licht-Transmissionsgrad  $\tau$ ) liegt höher als der Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$ .

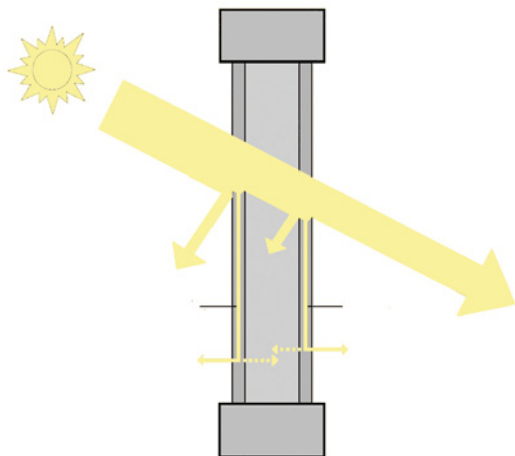


Abb. 25: Strahlungsdurchgang bei Verglasungen, schematisch am Beispiel einer Zweischeibenverglasung

#### 4.2.1 Verglasung

Die Entwicklung der Glasqualität hat für das energieeffiziente Bauen eine wesentliche Katalysatorfunktion ausgeübt: proportional zu den Quantensprüngen bei der Verglasungstechnik wurde eine entsprechend höhere Dämmung der opaken Hülle sinnvoll. In den fünfziger Jahren war die Einfachverglasung mit  $U_g = 5,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  Stand der Technik. Durch das Zweischeiben-Isolierglas wurde der Wert halbiert. Mitte der achtziger Jahre kam die Wärmeschutzverglasung auf den Markt: die Gasfüllung des Scheibenzwischenraumes erfolgte mit Argon mit  $U_g = 1,1 - 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Zudem wurde eine selektive Beschichtung einer inneren Scheibenoberfläche mit Edelmetall- oder Halbleiter-Oxidschichten durchgeführt. Als Edelmetall wird meist das farbneutrale Silber verwendet mit Schichtdicken um 100 nm. Als Folge der WSVÖ 1995 wurde Wärmeschutzverglasung kostenneutral zu Isolierverglasung angeboten.

In den folgenden Jahren verbesserten sich die Verglasungen durch das Hinzufügen einer dritten Glasschicht und einer Optimierung der Beschichtungen. Je dünner und homogener diese low-e-Schichten ausgeführt werden, desto höher die Solargewinne. Zusätzliche entspiegelnde Schichten oder der Einsatz von Dielektrika können optimierend wirken. Verbessernd, aber auch vertuernd, wirkt der Einsatz von Krypton für den Glaszwischenraum.

Es ist davon auszugehen, dass der Einsatz von Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung ab 2009 die Standardverglasung darstellen wird. Entsprechend liegt der Kostenunterschied zwischen Zwei- und Dreischeibenverglasung sehr niedrig, sodass es aus energetisch-ökonomischer Sicht nicht mehr sinnvoll ist, Zweischeibenverglasungen einzubauen. Der Wertverlust von Gebäuden mit Zweischeibenverglasung wird in wenigen Jahren spürbar werden.

Weitere Entwicklungen gehen in Richtung von Vakuum-Füllungen: Etwa ab 2012 sollen solche Verglasungen mit einem  $U_g$ -Wert um  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  marktfähig sein. Der Vorteil liegt darin, dass dafür zwei Scheiben von je 4 mm Dicke in Verbindung mit einem Vakuumzwischenraum unter 1 mm ausreichen. Dadurch sind sehr schlanke Scheibenprofile mit besten energetischen Kennwerten möglich. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert Forschungsprojekte zu Vakuumverglasung. Details dazu enthält das BINE-Projektinfo „Vakuumverglasung: Wenn Vakuum Edelgas ersetzt“ (01/08). Weitere Verbesserungen in Richtung von U-Werten um  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  sind heute schon realisierbar. Einen Überblick über die wichtigsten Verglasungstypen gibt Abb. 26.

Verglasungsart <sup>b</sup>	Glasdicke und Scheiben-zwischenraum <sup>c</sup> [mm]	$U_g$ -Wert [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ] <sup>a</sup>	Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert	Licht-Transmissionsgrad $\tau$
Einfachglas	4	5,8	0,9–0,85	0,9–0,88
2 IV	4/12/4	3,0–2,8	0,8–0,76	0,82–0,80
3 IV	4/12/4/12/4	2,1–1,8	0,70–0,55	0,75
DV	4/20–100/4	2,8	0,76	0,82
DV (1*IV)	4/20-100/4/12/4	2,0	0,7	0,75
2 WSV, Luft	4/12–16/#4	2,0–1,3	0,7–0,55	0,80–0,70
2 WSV, Argon	4(#)/12–16/#4	1,4–1,1	0,63–0,53	0,80–0,75
2 WSV, Krypton	4(#)/10–16/#4	1,1–1,0	0,63–0,50	0,80,77
3 WSV, Argon	4#/10–16/4/10–16/#4	0,8–0,6	0,53–0,47	0,72–0,68
3 WSV, Krypton	4#/8–12/4/8–12/#4	0,7–0,5	0,52–0,47	0,72–0,68
Zum Vergleich:				
4 WSV, Argon	4#/15/4/15/4/15#4	0,5–0,3	0,45–0,40	
3 WSV, Xenon	4#/8/4/8/#4	0,4–0,5	0,5–0,42	0,64
2 Vakuum	4/1#4	0,4 <sup>d</sup>		
3 Vakuum	6#/1/#4#/1/#6	< 0,2		
2 Aerogelgranulat (im Scheiben-zwischenraum)	4/30–60/4	0,6–0,3	0,35–0,10	
<sup>a</sup> $U_g$ -Werte nach Bundesanzeiger <sup>b</sup> IV = Isolierverglasung, DV = Doppelverglasung (bei Kasten- oder Verbundfenstern), WSV = Wärmeschutzverglasung <sup>c</sup> von außen nach innen; #: Lage der low- $\epsilon$ -Schichten/Metalloxid-Beschichtung <sup>d</sup> Vorgaben für ein Forschungsprojekt				

Abb. 26: Thermische und optische Kennwerte von Verglasungen

### 4.2.2 Rahmensystem

Rahmenhersteller und Fensterbauer blieben hinter der Glasentwicklung zunächst zurück. Den hervorragenden  $U_g$ -Werten standen deutlich schlechtere Rahmenwerte von  $U_f = 1,4 - 2,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  gegenüber. Die Fensterrahmen stellten im Gebäudegefüge eine deutliche Wärmebrücke dar. Erst seit Ende der neunziger Jahre wurden wärmegeädämmte Rahmenprofile zunehmend marktföhrbar. Inzwischen gibt es eine hohe Auswahl verschiedener Profile, mit denen  $U_w$ -Werte  $\leq 0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  bei  $U_g = 0,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  erreicht werden können [14]:

- Holzprofile mit innenliegender Dämmung aus Purenit, Kork etc. (Abb. 28),
- PVC-Profil mit PUR-geschäumten Kammern (Abb. 29),
- Holz/Alu Pfosten-Riegel-Konstruktion mit Dämmvorsatz (Abb. 30),
- Holzprofile mit großer Rahmenbreite oder als Kasten- oder Verbundfenster-Konstruktion.

Diese Rahmen haben  $U_f$ -Werte von  $0,6 - 0,78 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Wichtig ist ein ausreichender Glaseinstand in das Profil, um den Wärmebrückenverlustkoeffizienten des Glasrandes ( $\Psi$ ) gering zu halten. Das Verbundmaterial des Glasrandes sollte gering wärmeleitend sein, also statt aus Aluminium aus Kunststoff, Butyl-Material o. ä. hergestellt sein. Der  $\Psi$ -Wert sollte  $\leq 0,035 \text{ W/(mK)}$  betragen. Eine weitere Verbesserung der Rahmenteknik ist absehbar. Eine Designstudie in Abb. 27 zeigt ein Rahmenprofil mit  $U_f = 0,34 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  und  $\Psi = 0,022 \text{ W/(mK)}$  und ermöglicht Fenster-Werte von  $U_w = 0,62 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  [15].

Die Mehrkosten der Rahmenprofile werden bei Serienfertigung entgegen der aktuell hohen Mehrpreise nur noch bei wenigen € pro Meter Rahmenmaterial liegen. Darüber hinaus gibt es wirtschaftlich optimierte Entwicklungen, die nah an die beschriebenen Werte herankommen und bei einem Rahmen-Wert von  $U_f = 0,8 - 0,9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  in Verbindung mit Gläsern im Bereich von  $U_g = 0,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  Passivhaus-Qualität erreichen (Abb. 30).

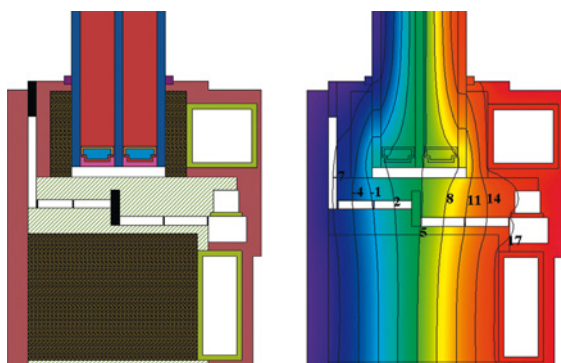


Abb. 27: Designstudie: a links) Rahmenprofil mit  $U_f = 0,34 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ / $\Psi = 0,022 \text{ W/(mK)}$ / $U_w = 0,62 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  b rechts) Isothermen-Verlauf

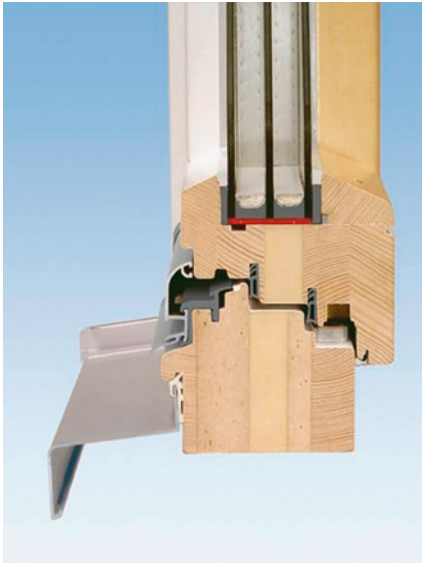


Abb. 28: Holzprofil mit innenliegender Dämmung

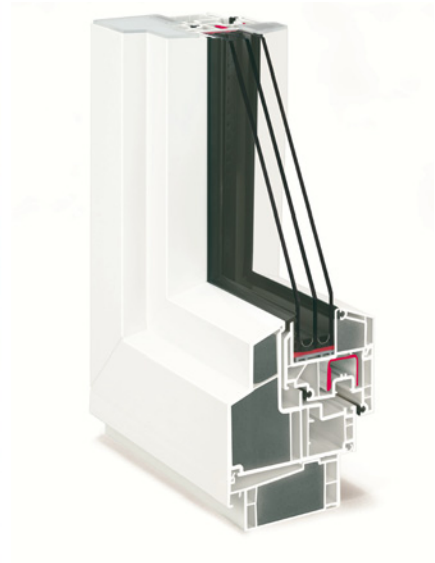


Abb. 29: PVC-Profil mit PUR-geschäumten Kammern

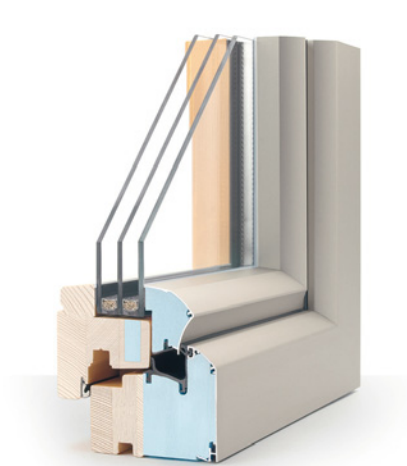


Abb. 30: Holz/Alu-Fenster mit CO<sub>2</sub>-Thermoschaum



Abb. 31: Kunststoffprofil mit faserverstärktem Kunststoff ohne Metall-Tragprofil und alternativem Einsatz von Dämmeinlagen im Profil U<sub>f</sub> ca. 0,9W/(m<sup>2</sup>K)

## Fenster

Die energetische Effizienz von Fenstern wird in Abb. 32 dargestellt. Durch den Einfluss des Rahmenverbunds und der Einbauwärmeebrücken ergibt sich für den Fenster-U-Wert ( $U_w$ ) eine deutlich ungünstigere Kenngröße als die Einzelwerte für Rahmen und Verglasung. Ein optimierter Standard um  $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ermöglicht bei unverschatteten Fensterflächen mit Südausrichtung einen negativen resultierenden U-Wert: in der Summe aus Transmissionsverlusten und Solargewinnen ergeben sich über die Heizsaison Wärmegewinne. Voraussetzung ist eine optimale Planung mit angemessener Fenstergröße, damit die Wärmegewinne weitestgehend genutzt werden können und nicht zu übermäßiger Überhitzung führen. Zudem ist die Fensterfläche deutlich teurer als die Wandkonstruktion, so dass ein zu hoher Fensteranteil zu überhöhten Kosten führt.

Die Kosten von passivhaus-geeigneten Fenstern liegen etwa 30 bis 70% über den Kosten von heutigen Standardfenstern mit Wärmeschutzverglasung. Sobald die Komponenten in die Massenproduktion gehen, werden sich Mehrkosten von 15 bis 25 % oberhalb des heutigen Standards einstellen.

	Verglasung Gas/ Scheiben- Zwischenraum	Verglasung $U_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	Rahmen $U_f$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$U_w$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
Aluminium	Argon 1×16 mm	1,2	2,0–2,2	1,7–1,8
PVC (3-Kammer)	Argon 1×16 mm	1,2	1,7–1,8	1,5–1,6
PVC (5-Kammer)	Argon 1×16 mm	1,2	1,2	1,3–1,4
Holz	Argon 1×16 mm	1,2	1,4–1,5	1,4–1,6
Holz	Krypton 1×11 mm	1,0	1,4–1,5	1,3–1,4
Holz	Argon 2×16 mm	0,6–0,7	1,4–1,5	1,1–1,2
Kunststoff	Argon 2×16 mm	0,6–0,7	1,1–1,2	1,0–1,1
Kunststoff	Krypton 2×11 mm	0,5–0,6	1,1–1,2	0,9–1,0
Kunststoff opt.	Argon 2×16 mm	0,6–0,7	0,9	0,9–1,0
Kunststoff opt.	Krypton 2×11 mm	0,5–0,6	0,9	0,8–0,9
Rahmen 0,7	Argon 2×16 mm	0,6–0,7	0,7	ca. 0,80
Rahmen 0,7	Krypton 2×11 mm	0,5–0,6	0,7	ca. 0,75
Rahmen 0,6	Krypton 2×11 mm	0,5–0,6	0,6	ca. 0,70
<sup>a</sup> berechnet nach PHPP, Fenstermaß 1,23 × 1,48 m; Schwankungsbreite in Abhängigkeit von Rahmenverbund und Einbau-Wärmeebrücke				

Abb. 32:  $U_w$  in Abhängigkeit von Verglasung und Rahmen

Dachflächenfenster sind energetisch ungünstig konzipiert, weil sie nur sehr schmale Profildbreiten und schwierige Einbausituationen aufweisen. Bei der Betrachtung des U-Werts muss beachtet werden, dass von den meisten Herstellern als Bezugsfläche die Seitenhöhen des Fensters zusätzlich zur Draufsicht-Fläche einbezogen werden. Entwicklungen im Bereich des Passivhaus-Standards sind allerdings vorhanden.

### Glaswand-Systeme und Transparente Wärmedämmung

Durch die beschriebenen Entwicklungen bei der Glas- und Fenstertechnik sind viele solare Versuche der beiden letzten Jahrzehnte gegenstandslos geworden. In der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung sind gut dimensionierte und ausgerichtete Fenster allen aufwendigen Systemen wie Glasverbauten, transparenter bzw. transluzenter Wärmedämmung und Trombé-Wänden überlegen.

- Wintergärten waren sinnvoll, solange Verglasungen überproportional hohe Verluste bei U-Werten zwischen 2,6 und 5,6 W/(m<sup>2</sup>K) aufwiesen. Die Gesteungskosten für eine eingesparte Kilowattstunde durch Wintergärten liegen bei solch einer Konstellation bei 0,40 €. In Verbindung mit einer hochwertigen Verglasung zwischen Wintergarten und beheizten Räumen steigen die Kosten auf 1,00 €/kWh. Zudem werden fast alle Wintergärten geheizt, um das Problem des Kondensatniederschlags auf der Innenseite der Wintergartenverglasung in den Griff zu bekommen und den teuren Raum auch an Wintertagen kontinuierlich nutzen zu können. Die Energiebilanz des Wintergartens wird somit deutlich negativ.
- Solarabsorption auf nichttransparenten ungedämmten Außenflächen bringt nur sehr geringe Energieerträge. Der dagegen stehende Wärmeverlust der ungedämmten Wand beträgt ein Vielfaches.
- Trombé-Wände verbessern die Solarabsorption. Sie bestehen aus einer Verglasung vor einer dunkel beschichteten Speicherwand. Sie können aber nur sinnvoll funktionieren, wenn sie mit einer temporären Wärmedämmung versehen werden, weil sonst auch in diesem Fall die Transmissionswärmeverluste deutlich überwiegen.
- Transparente Wärmedämmung (TWD) liegt bezüglich der U-Werte eher ungünstig, um deutliche Vorteile gegenüber standardmäßiger Fenstertechnik zu bewirken. Für Sonderanwendungen wie zeitphasenversetzten Solarenergieeintrag oder bei ungünstigen Gebäudeausrichtungen oder im Sanierungsfall kann der Einsatz sinnvoll sein, wobei neben der winterlichen Situation der sommerliche Wärmeschutz sehr genau betrachtet werden muss. Der Kosten-Nutzen-Effekt liegt nur bei besonders intelligenten Konstruktionslösungen ähnlich günstig wie bei Fenstersystemen [16].



- TWD mit Warmluftumwälzung kann ergänzende sinnvolle Effekte bringen und nähert sich von der Systematik Luftkollektoren an. Der Einsatz im Wohnungsbau ist kostenaufwendig und liegt im Vergleich zu Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung ungünstiger.
- TWD mit Warmwassenumwälzung weist fließende Übergänge zu Fassaden-Solkollektoren auf. Nicht nur aus gestalterischen Gründen ist dies ein spannender Ansatz, der vor allem in Vorarlberg zu architektonischen Highlights geführt hat. Engagierte Bauherren mit Sinn für Ästhetik und einem ausreichenden finanziellen Polster können hier gute Ansätze auch für weitere energetische Optimierungen finden. Von der Gestaltung her können vollverglaste Südfassaden eine hervorragende Option sein, die allerdings zu 40–70 % aus TWD-Paneelen mit solarthermischer Bestückung bestehen. Ein interessanter Ansatz ist dabei die Verbindung mit Betonkerntemperierung, um sehr niedrige Temperaturen ab 22 °C für die Gebäudeheizung nutzbar zu machen. In Verbindung mit Wärmepumpensystemen können nochmals tiefere Temperaturniveaus aus der Solarthermie energetisch genutzt werden.

### 4.3 Wärmebrücken

Wärmebrücken sind Bereiche der Gebäudehülle, an denen gegenüber der sonstigen Fläche erhöhte Transmissionswärmeverluste auftreten. Bei mäßiger Detailausbildung liegt ihr Verlustanteil bei 10 bis 20 % – in ungünstigen Fällen bei über 30 %. Aus bauphysikalischer Sicht sind die Auswirkungen ungünstiger Anschlussdetails bei schlecht gedämmten Gebäuden am gravierendsten: da bei hohen Dämmdicken die Oberflächentemperatur auf der Innenseite der Bauteile höher liegt, entsteht zur Wärmebrücke hin ein Wärmestrom, der an der ungünstigsten Stelle ebenfalls zu einer höheren – also günstigeren – Temperatur führt als bei einer vergleichbaren Konstruktion mit geringerer Dämmung. Die Auswirkungen hinsichtlich der niedrigen raumseitigen Oberflächentemperaturen und der sich daraus ergebenden Schimmelpilzproblematik werden in Kapitel 3.1.2 beschrieben.

Wärmebrückenverluste werden nach EnEV pauschal mit einem Aufschlag zum U-Wert von  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gerechnet, bei Einhaltung der vorgegebenen Standarddetails nach DIN 4108 (Beiblatt 2) mit  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (vgl. Kap. 2.3.5). Eine kleine Auswahl solcher Details wird in Abb. 33 dargestellt.

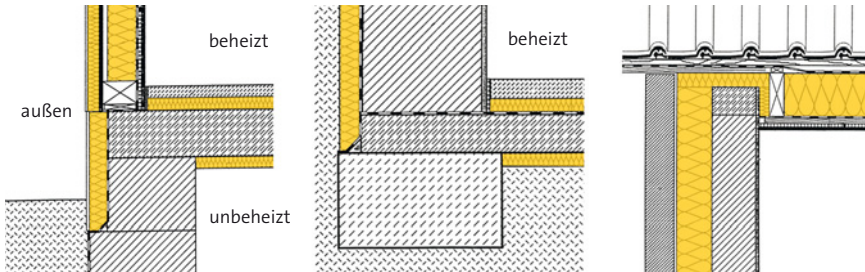


Abb. 33: Wärmebrückendetails nach DIN 4108 (Beiblatt 2) a) links) Anschluss Holzaußenwand zur Kellerdecke b) mitte) Gedämmte Massivwand zur Bodenplatte c) rechts) Ortgang-Detail

Es ist sinnvoll, alle Details in möglichst optimierter Form auszuführen und die Wärmebrücken in der Berechnung exakt zu bilanzieren, um im Resultat einen geringeren U-Wert-Aufschlag zu erhalten. Bei KfW-40- und Passivhäusern ist dieses Vorgehen auf jeden Fall erforderlich. Dazu müssen die Wärmebrücken des Gebäudes im Einzelnen ermittelt werden. Bei der Heizwärmebedarfsberechnung werden alle Wärme übertragenden Flächen der Gebäudehülle mit Außenmaßbezug berechnet. Wird ein Detailanschluss im Vergleich dazu hinsichtlich des Wärmeverlustes betrachtet, ergibt sich als Differenzwert der Wärmebrückenverlustkoeffizient ( $\Psi$ ) längenbezogen in  $W/(mK)$ . Wird die Dämmung in voller Dicke um eine Außenecke herumgeführt, ergibt sich aus dem geometrischen Vorteil ein negativer Wert für  $\Psi$ . Optimierte Detaillösungen können deshalb für ein Gebäude zu einem Bonus hinsichtlich der Wärmebrückensituation gegenüber dem aus den Flächen berechneten Heizwärmebedarf führen. Charakteristische Wärmebrücken werden in Abb. 35 aufgeführt. Dort werden anhand einiger schematischer Details Lösungen mit den Wärmebrückenverlustkoeffizienten dargestellt mitsamt einigen Anmerkungen zur Konstruktion. Es empfiehlt sich, derartige Details aus Wärmebrückenkatalogen zu verwenden [17], [18], [19]. Der Aufwand zur exakten Berechnung der Wärmebrückenverlustkoeffizienten ( $\Psi$ ) [20] ist sehr hoch und liegt bei 200 bis 400 € pro Wärmebrückenberechnung.

49

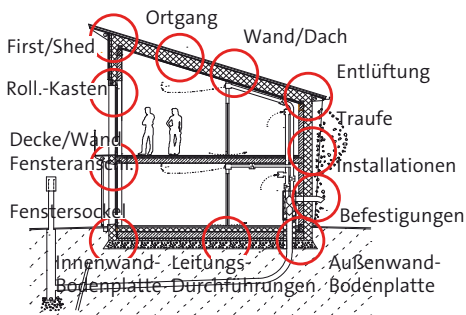
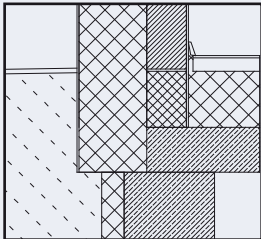
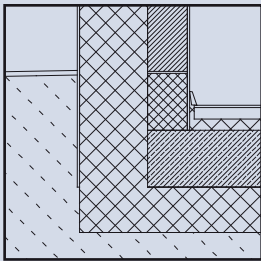
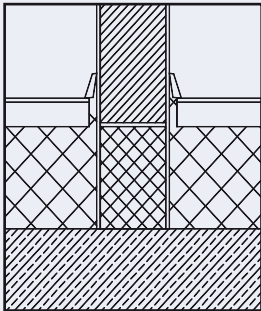
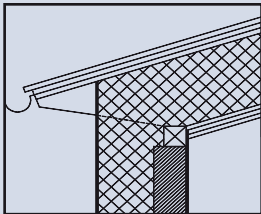


Abb. 34: Schnitt mit beispielhaften Wärmebrücken

Detail	Beschreibung	$\Psi$ [W/mK]	Anmerkungen
	<b>Außenwand/Bodenplatte</b> Stahlbetonbodenplatte mit Streifenfundamenten, Mauerwerk 17,5 cm dick, unterste Lage $\lambda_R = 0,12$ W/(mK) 25 cm hoch, 30 cm Dämmung außen, 25 cm Estrichdämmung	$\Psi = -0,026$	Der $\Psi$ -Wert ist sehr stark von der untersten Steinlage des Mauerwerks abhängig: $\Psi \approx -0,014$ bei $\lambda_R = 0,16$ , $\Psi \approx -0,002$ bei $\lambda_R = 0,20$ , $\Psi \approx 0,020$ bei $\lambda_R = 0,30$ , $\Psi \approx 0,085$ bei $\lambda_R = 0,70$ .
	<b>Außenwand/Bodenplatte</b> optimierte Ausführung mit schwimmender Bodenplatte und übergangsfreier äußerer Dämmung (20 cm unter Bodenplatte, 5 cm Estrichdämmung)		Höhere Kosten für die Dämmung (extrudiertes PS; PUR-Schaum oder Schaumglas), Druckfestigkeit der Dämmung statisch nachweisen, Frostsicherheit der Konstruktion sicherstellen
	<b>Innenwand/Bodenplatte</b> Stahlbetonbodenplatte, Mauerwerk 17,5 cm dick, unterste Lage $\lambda_R = 0,12$ W/(mK) 25 cm hoch, 25 cm Estrichdämmung	$\Psi = 0,012$	Verbesserung der Situation durch Dämmung unter der Bodenplatte; Schallschutz und Druckfestigkeit des Mauerwerks beachten
	<b>Traufausbildung</b> 30 cm dicke Wandsdämmung direkt übergehend in 40 cm dicke Dachdämmung	$\Psi = -0,051$	Übergang zwischen Dach- und Wandsdämmung möglichst wärmebrückenfrei ausführen

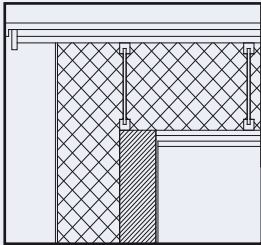
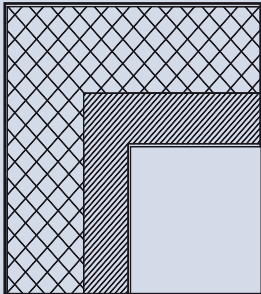
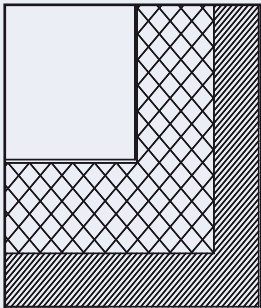
Detail	Beschreibung	$\Psi$ [W/mK]	Anmerkungen
	Ortgangausbildung 30 cm dicke Wanddämmung direkt übergehend in 40 cm dicke Dachdämmung	$\Psi = -0,051$	Der Wärmebrückeneffekt des Dach-Tragwerks wird bereits bei der Berechnung der Dach-U-Wertes berücksichtigt
	Außenwand horizontal Außenecke mit 30 cm dicker Dämmung	$\Psi = -0,052$	Die Außenkanten des Gebäudes haben bei optimierter Ausführung aufgrund des Außenmaßbezuges einen negativen Wärmebrückenkoeffizienten
	Außenwand horizontal Innenecke mit 30 cm dicker Dämmung	$\Psi = 0,029$	

Abb. 35: Wärmebrückendetails

Zusätzlich zu den Rechenwerten in der Tabelle ein paar Anmerkungen aus der Baupraxis: Innenwände im untersten beheizten Geschoss bilden im Allgemeinen den größten Wärmebrückeneffekt, da die Lastabtragung nach unten erfolgt. Dies gilt für Massivbau und Holzbau gleichermaßen. Im Holzbau sind wärmebrückenarme Konstruktionen einfacher zu erreichen. Allerdings ist darauf zu achten, dass Schwellhölzer möglichst schlank ausgeführt werden. Der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit liegt für Holz bei  $\lambda_R = 0,13 \text{ W/(mK)}$ . Günstige  $\lambda_R$ -Werte für porositätes Mauerwerk beginnen bei  $0,10 \text{ W/(mK)}$ . Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass Ziegel diesen Wert aufgrund ihrer Wabenstruktur nur in der horizontalen Richtung aufweisen und deshalb

als unterste Steinlage nicht gut geeignet sind. Druckfeste Dämmstoffe auf PUR- oder Schaumglas-Basis erreichen  $\lambda_R$ -Werte bis hinunter zu 0,07 W/(mK), sind jedoch teuer und weisen meist geringere Dämnhöhen auf.

Schon beim Entwurf kann optimiert werden, indem Außenwände die Tragfunktion übernehmen und Innenwände möglichst reduziert werden. Wärmetechnisch optimal sind nichttragende Innenwände auf dem Estrich. Es ist allerdings auf Schallschutz, Rissbildung und nicht zuletzt auch auf den Bauablauf zu achten. Ein weiterer Lösungsansatz kann in der Reduzierung der Auflagerfläche von Innenwänden liegen, z. B. durch Stürze, die nur punktwise abgetragen werden und in den entstehenden Zwischenräumen mit Dämmstoff unterlegt werden.

Fenster wurden hinsichtlich ihrer Wärmebrücken schon in Kapitel 4.2 berücksichtigt. Grundsätzlich gilt, dass die Rahmen möglichst weit durch Wärmedämmung überdeckt werden sollten. Dies ist im Holzbau sehr einfach möglich durch einen Anschlag, der aus Holz – oder besser – aus Wärmedämmung (z. B. Holzweichfaserplatten) bestehen kann. Der optimale Einbau im Massivbau sieht die Innenkante des Fensters an der Außenkante des Mauerwerks vor, damit der Rahmen möglichst weit vom Dämmstoff umfasst werden kann. Dabei dürfen nicht nur die seitlichen Anschlüsse betrachtet werden – auch die untere Detailausbildung am Fensterbrett muss wärmebrückenoptimiert ausgeführt werden (Abb. 37).

Durchmesser der Durchdringung	Edelstahl $\lambda_R$ 15–30 W/(mK)	Stahl $\lambda_R$ 60 W/(mK)	Aluminium $\lambda_R$ 200 W/(mK)	Kupfer $\lambda_R$ 380 W/(mK)
1 cm	0,004–0,008 W/K	0,016 W/K	0,05 W/K	0,1 W/K
4 cm	0,06–0,13 W/K	0,25 W/K	0,84 W/K	1,6 W/K

Abb. 36: Punktförmiger Wärmebrückenverlustkoeffizient ( $\Psi$ ) einer Durchdringung mit 30 cm Länge (z. B. Befestigung/Durchführung durch ein Wärmedämmverbundsystem mit 30 cm Dicke)

Rollladenkästen bilden eine klassische Wärmebrücke, die in der Detailplanung mit den Fenstern gelöst werden muss. Grundsätzlich sollte eine Dämmung von etwa 10 cm zwischen (aufgedoppeltem) Fensterrahmen und Rollladenkasten angestrebt werden, um in der Gesamtbetrachtung keine Wärmeverluste zu erhalten. Die Gewinne durch den temporären Wärmeschutz werden sonst durch die Wärmebrückenverluste aufgezehrt.

Punktförmige Wärmebrücken ergeben sich vor allem für Befestigungen von Geländern, selbsttragenden Balkons, Regenfallrohren, Treppen, Markisen, Briefkästen, Lampen etc. Grundsätzlich sollte die wirksame wärmeübertragende Fläche möglichst gering sein, d. h. hohe Festigkeit der Befestigungsmittel bei geringem Querschnitt. Am günstigsten liegen dabei Edelstahl-Befestigungen (Abb. 36). Ergänzend zu den Werten der Tabelle: ein normales fünfadriges Kupferkabel weist etwa einen  $\Psi$ -Wert von

0,01 W/K auf, d. h. gut 10 Kabeldurchführungen entsprechen bei optimaler Verlegung dem Wärmeverlust von einem Quadratmeter Wandfläche eines Passivhauses.

Plattenförmige oder flächige Befestigungen können durch das Unterlegen mit einem hochdruckfesten Dämmstoff in ihrer Wärmebrückenwirkung reduziert werden.

Leitungsdurchdringungen erfolgen am sinnvollsten von unten, weil die Transmissionswärmeverluste dort am niedrigsten liegen. Eine gedämmte Ausführung der Durchführungen kann in vielen Fällen in einfacher Form erstellt werden, solange keine druckdichte Feuchteabdichtung erforderlich ist. Darüber hinaus gilt es, die Anzahl der Durchdringungen zu minimieren. Bei Leitungen, die über das Dach geführt werden, überwiegen die Probleme von Luftabdichtung und Konvektion innerhalb der Leitung gegenüber den Wärmebrückenverlusten. Deshalb sollte auf jede überflüssige Dachdurchführung verzichtet werden. Ein besonderes Beispiel, das auf jeder Infrarotaufnahme von Gebäuden sofort ins Auge sticht, ist die Entlüftung der Entwässerungsleitung über das Dach. Als Alternativlösung können Innenraum-Entlüfter eingebaut werden. Allerdings haben diese keine Zulassung und müssen vom Bauherrn ausdrücklich akzeptiert werden.

53

Zur Qualitätskontrolle von Wärmebrückenlösungen eignet sich vor allem die Infrarot-Thermografie, durch die Temperaturunterschiede sichtbar gemacht werden können. Abb. 38 zeigt ein schlecht ausgeführtes Gebäude mit zahlreichen Problempunkten. Für die Auswertung ist große Erfahrung erforderlich, da zahlreiche Faktoren das Ergebnis der Thermografie beeinflussen können. Ideal sind Außentemperaturen um den Gefrierpunkt am frühen Morgen vor Sonnenaufgang, um möglichst wenig Störeinflüsse bei den Aufnahmen zu erhalten.

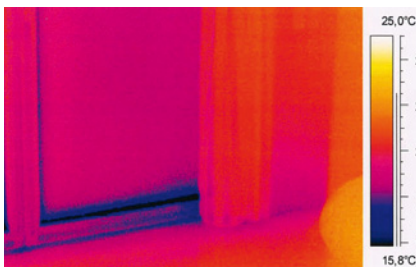


Abb. 37: Infrarot-Thermografie eines Fensters

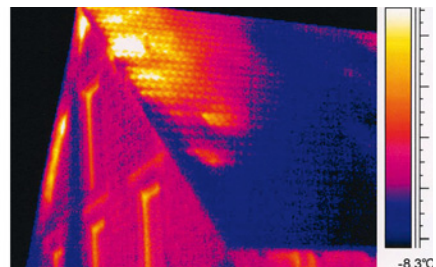


Abb. 38: Infrarot-Thermografie eines schlecht ausgeführten Gebäudes mit zahlreichen Wärmebrücken

#### 4.4 Luftdichtheit und Winddichtheit

„Zu errichtende Gebäude sind so auszuführen, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig entsprechend dem Stand der Technik abgedichtet ist.“ [21] Eine luft- und winddichte Ausführung bewirkt für den Nutzer zahlreiche Vorteile:

##### Vermeidung von baukonstruktiven Schäden

Werden undichte Bauteile von innen nach außen mit Luft durchströmt, kondensiert aufgrund der Abkühlung in der Konstruktion der Wasserdampf und fällt im Bauteil in Tropfenform an mit der Folge von Bauschäden (vgl. Kap. 3.1.2).

##### Funktion der Wärmedämmung

Wenn zwar die innere luftdichtende Schicht funktionsfähig ist, jedoch auf der Außenseite der Dämmung kein winddichter Schutz vorhanden ist, kann die Wärmedämmung von Kaltluft durchströmt werden. In diesem Fall wird die Wärmedämmfähigkeit der Konstruktion in der Praxis deutlich herabgesetzt.

##### Luftschallschutz

Jede Leckage verschlechtert den Luftschallschutz. Gute Luftdichtheit ist daher Bestandteil des Schallschutzkonzepts.

##### Höhere Luftqualität

Unkontrollierter Eintritt von Luft in Aufenthaltsräume kann zu erhöhter Schadstoffkonzentration führen. So kann Luft, die durch eine Konstruktion strömt, die Raumluft mit faserigen Dämmstoffen belasten. Wird Luft durch den thermischen Auftrieb aus dem Keller in die darüber liegenden Wohnbereiche geführt, können Belastungen durch Mikroorganismen, Schadstoffe aus im Keller gelagerten Materialien (Heimwerkerutensilien, Heizöl) und ggf. Radon auftreten.

##### Optimierte Lüftung

Bei Undichtheiten erfolgt der Luftaustausch durch Winddruck oder Thermik, die sehr stark von der Wettersituation abhängig sind. Es stellen sich genau dann überhöhte Luftwechsel ein, wenn sie nicht erwünscht sind: bei starkem Wind und in sehr kalten Witterungsperioden. Während der üblichen austauscharmen Witterung weisen fast alle standardmäßigen Neubauten unabhängig von ihrer Dämmung und dem energetischen Standard nur einen Luftwechsel von etwa  $0,10 \text{ h}^{-1}$  auf. Eine Lüftung über Undichtheiten ist also bei weitem nicht ausreichend. Für den sinnvollen Betrieb von Lüftungsanlagen muss das Gebäude luftdicht ausgeführt sein. Bei weitgehender Unabhängigkeit externer Einflüsse kann der Luftwechsel für die einzelnen Räume gezielt eingestellt werden. Bei Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung sollte

die gesamte zugeführte frische Außenluft über den Wärmetauscher des Gerätes laufen. Ein Leckage-Luftwechsel von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  entspricht Lüftungswärmeverlusten in Höhe von etwa 5 bis  $7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

### Thermischer Komfort

Durch Undichtheiten einströmende Kaltluft führt zu Zugerscheinungen, Kaltluftseen mit der Folge von Fußkälte und zu einer unangenehmen vertikalen Temperaturschichtung in den einzelnen Räumen sowie dem gesamten Gebäude.

### Verringerter Heizenergieverbrauch

Aus den beschriebenen Gründen führt die Dichtheit eines Gebäudes zu einer deutlichen Energie- und Kosteneinsparung.

#### 4.4.1 Anforderungen der EnEV

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) fordert in §5 Luftdichtheit und präzisiert die Anforderungen in Anlage 4: bei einer Druckdifferenz zwischen Innen und Außen von 50 Pascal (Blower-Door-Test:  $n_{50}$ -Wert; vgl. Kap. 4.4.3) darf der gemessene Volumenstrom  $3 \text{ h}^{-1}$  nicht überschreiten – bezogen auf das beheizte Luftvolumen. Bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen gilt der Wert von  $1,5 \text{ h}^{-1}$ . Ansonsten wird auf den Stand der Technik verwiesen. In DIN 4108, Teil 7 wird die Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen behandelt und es werden Planungs- und Ausführungsempfehlungen gegeben. Bei Passivhäusern gelten erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit: der  $n_{50}$ -Wert beträgt  $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ .

Bei der Planung eines Gebäudes muss frühzeitig das Dichtheitskonzept erarbeitet werden (Abb. 39). Stichpunktartig einige wichtige Aspekte dazu:

- Möglichst einfache Form der wärmeübertragenden Gebäudehülle mit wenig Materialwechseln wählen.
- Lage der wind- und luftdichten Ebene festlegen, klare Abtrennung zu unbeheizten Bereichen (z. B. Keller).
- Länge der Anschlüsse minimieren, möglichst homogene Flächen festlegen.
- Einfache Konstruktionen wählen, Durchdringungen vermeiden (z. B. Zangen im Dachstuhl).
- Haustechnik-Durchdringungen minimieren; ggf. Installationsebene einplanen.
- Flächen- und fugendichtende Materialien und Montagetechnik festlegen.
- Präzise Detailplanung und Abstimmung mit den Handwerkern.



#### 4.4.2 Bauteile und Anschlüsse

Eine Luftdichtheitsschicht dient dazu, die Strömung durch Bauteile zu verhindern. Diese Funktion kann in Abhängigkeit von der Konstruktion von verschiedenen Materialien übernommen werden. Sie müssen dauerhaft auch bei Bewegungen und Setzungen wirksam sein.

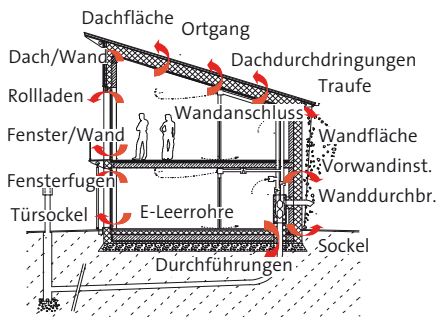


Abb. 39: Schnitt mit charakteristischen Stellen für Luft- und Windundichtheit

Außenwand – Anschluss an eine foliengedichtete Dachfläche und eine Leichtbau-Innenwand

penanschlüsse, Flächen hinter Kaminen und die unteren Putzanschlüsse, die sauber bis auf den Boden gezogen werden müssen etc.

Holzbau und Leichtbaukonstruktionen: Als Materialien, die Luftdichtheit herstellen, können Kunststofffolien oder geeignete Baupappen verwendet werden, weiterhin Plattenmaterialien wie Holzwerkstoffe, Gipsfaser- und Gipskartonplatten sowie Faserzementplatten. In der Fläche müssen Anschlüsse zwischen den Luftdichtungs-Materialien erstellt werden. Grundsätzlich sollten großflächige Bahnen oder Platten verwendet werden, um Anschlusslängen zu minimieren (Abb. 40).

Installationsebenen (s.u. Gebäudetechnik) vereinfachen den Baustellenablauf und bieten Auflager- und Anschlussmöglichkeiten für Decken und Innenwände, führen auf der anderen Seite jedoch zu erhöhten Kosten.

Auflager oder Anschlusskanten, die später nicht mehr erreicht werden, können durch vorheriges Einlegen und Anpressen von Anschlussbahnen abgedichtet werden. Auf der Außenseite der Konstruktion muss eine winddichte Schicht angebracht sein, die ein Durchströmen der Dämmschicht verhindert.

#### Außenwand

Mauerwerk und Betonbauteile: Betonbauteile gelten als luftdicht. Mauerwerk benötigt zur Abdichtung im Allgemeinen eine durchgehende Innenputzschicht. Besondere Beachtung erfordern beim Mauerwerk alle Stellen, an denen aufgrund der Konstruktion oder des Bauablaufs keine vollständige Putzschicht vorhanden ist oder diese z.B. während des Bauablaufs beschädigt wird. Das sind Wandanschlüsse (besonders vor dem Verputz ausgeführter Trockenbau), Vorwandinstallationen, Fugen, Durchbrüche und Öffnungen, seitliche Treppenanschlüsse, Flächen hinter Kaminen und die unteren Putzanschlüsse, die sauber bis auf den Boden gezogen werden müssen etc.

## Dach

Für Dachkonstruktionen gelten die gleichen Grundüberlegungen wie bei Leichtbauwänden. Bereits bei der Planung ist es sinnvoll, die Anzahl der Anschlüsse und Pfettenauflager zu minimieren. Größere Konstruktionshöhen der Sparren können helfen, Zwischenaufleger zu vermeiden, und sind ohnehin für hohe Dämmdicken erforderlich. Durchdringungen und Anschlüsse, z. B. bei Gauben, Erken und Vorsprüngen, sind aufwendig in der Detailplanung und der Ausführung. Zangenverbindungen sind nur mit sehr hohem Aufwand abzudichten.



Abb. 40: Platten als luftdichtende Schicht einer Außenwand – Anschluss an eine foliengedichtete Dachfläche und eine Leichtbau-Innenwand

In der Fläche muss bei Foliensystemen darauf geachtet werden, dass die Latung ohne Zwischenraum auf der Folie aufliegt, um etwaige Verletzungen der Folie durch Schrauben mittels der Pressung abzudichten. Die Ausgleichslattung wird z. T. auf Abstand montiert und sollte erst in der nächsten Ebene liegen. Bei der abschließenden Montage der Verkleidung ist die Verwendung von ausreichend kurzen Schrauben zu beachten, damit die dichtende Folie nicht verletzt wird.

57

Massiv ausgeführte Dächer oder oberste Deckenabschlüsse aus Beton oder Porenbeton sind luftdicht, soweit Anschlussfugen dicht ausgeführt werden. Ziegelemente müssen innenseitig verputzt werden.

## Bodenplatte und Kellerdecke

Kellerdecken aus Beton sind luftdicht. Deckendurchbrüche müssen vor der Verkleidung der Installationen dicht geschlossen werden. Wesentlich ist die luftdichte Ausführung eines evtl. vorhandenen Kellerzugangs. Durch die Thermik entsteht dort eine hohe Druckdifferenz. Bei Holzbalkendecken muss auf eine gesonderte Ausführung der luftdichtenden Ebene geachtet werden. Für Bodenplatten gilt sinngemäß das Gleiche.

## Anschlüsse

Die Verbindung von Massivbau- und Leichtbauflächen untereinander kann u. a. mit folgenden Anschlüssen durchgeführt werden:

**Folie-Folie:** in der Praxis überwiegen Klebeanschlüsse. Dabei ist auf eine Zulassung des Materials und ihre dauerhafte Klebefestigkeit zu achten. Sinnvoll sind in jedem

Fall Anpresslatten in Verbindung mit dauerelastischem Unterlegmaterial. In der DIN 4108-7 werden zu diesem Zweck vorkomprimierte Dichtbänder genannt, die sich in der Praxis allerdings nur bei sehr geringen Unebenheiten der Anschlussflächen bewähren. Unebenheiten bis zu 10 mm sind besser durch dauerelastische Massen (Bänder oder Kartuschenware), z. B. auf Kautschuk-Basis auszugleichen. Die Überlegungen gelten sowohl für Bahnen-Anschlüsse in der Fläche als auch für Eckverbindungen.



Abb. 41: Anschluss einer Abdichtungsbahn an das Mauerwerk: Überprüfung beim Blower-Door-Test mit dem Anemometer

**Massivbauteil-Folie:** der Anschluss zum Mauerwerk oder Betonbauteil kann aus der oben beschriebenen Anpresslatte mit untergelegtem dauerelastischem Dichtungsmaterial bestehen. Eine äußerst sinnvolle und einfache Alternative besteht im Einputzen von gut 5 cm Folie, die vor dem Putzen durch einen Streckmetallstreifen am Rand der Putzfläche gesichert worden ist (Abb. 41).

**Anschluss von Platten:** die luftdichte Verbindung von Platten kann in Abhängigkeit vom Material in verschiedenen Formen ausgeführt werden, z.B. Klebean-schlüsse bzw. Klebe- oder Folienanschlüsse mit Anpresslatten überwiegen bei Holzwerkstoffen. Verspachtelung der Stöße mit Einlegen von Bewehrungsstreifen oder Stoßverklebung werden bei Gipsplatten angewandt.

Bei allen Anschlüssen ist darauf zu achten, dass Bewegungen und Setzungen ausgeglichen werden können und nicht zum Reißen der Materialien führen.

### Punktförmige Anschlüsse und Durchdringungen



Abb. 42: Manschettenanschluss bei der Durchdringung einer Entlüftungsleitung

Die oben beschriebenen zweidimensionalen Anschlüsse müssen bei der Detailausbildung auch auf ihre dreidimensionalen Eckanschlüsse hin überprüft werden. Gleiches gilt für Durchdringungen. Diese sind mit Manschetten- oder Flanschanschlüssen abzudichten, die von Systemanbietern vorgefertigt angeboten werden oder auf der Baustelle von Hand erstellt werden können (Abb. 42).

## Fenster und Außentüren



Abb. 43: Fenstereinbau beim Holzbau

Der Fenstereinbau nach RAL beinhaltet den luftdichten Einbau. Die DIN 4108-7 weist drei grundsätzliche Dichtungsmethoden aus: dauerelastisches Fugenmaterial, Dichtleiste mit eingelegtem Komprimband zum Putz auf der Innen- und Außenseite und die Verklebung. Die letztgenannte Variante wird in der Praxis vorwiegend angewandt. Dabei kommen Klebebänder z. B. auf Butyl-Kautschuk-Basis zum Einsatz (Abb. 43). Neben der Einbau-Abdichtung muss bei Fenstern auf die Funktionsfähigkeit der Gummi-

lippendichtung zwischen Stockrahmen und Fensterflügel geachtet werden. Dachflächenfenster müssen besonders präzise eingebaut werden, um Luftdichtheit zu erzielen.

Haustüren sind besonders anfällig für Luftundichtheiten, besonders an den oberen und unteren Anschlagseiten, da die Beschläge die Tür nicht umlaufend in die Dichtung drücken wie bei Fenstern. Dichtheit ist nur durch sehr hochwertige Konstruktionen und Verarbeitung zu erzielen und wird in der Praxis oft nur durch das Abschießen der Haustür erreicht. Dies kann auch durch eine elektronisch selbstschließende Tür geschehen.

## Gebäudetechnik



Abb. 44: Luftdichte Verspachtelung des Mauerwerks hinter der Vorwandinstallation

Sanitär-, Lüftungs- und Heizungsinstallation: Die Reduzierung der Anzahl von Durchführungen ist eine wesentliche erste Planungsempfehlung. Alle Durchdringungen der thermischen Gebäudehülle müssen fachgerecht abgedichtet werden. Dies kann z. B. mittels Manschette oder Flansch erfolgen. Das gilt sowohl für die Bodenplatte bzw. die Kellerdecke, in der zahlreiche installationsbedingte Durchbrüche verlaufen, als auch für Außenwände und Wohnungstrennwände sowie für das Dach. Zeitliche Koordination und klare Zuständigkeit der Handwerker sind erforderlich – die

nachträgliche Durchdringung einer fertigen Dachkonstruktion mit einer Dachentlüftung ist für Sanitärinstallateure eine schwierige Aufgabe. Die Flächen hinter Vorwandinstallationen müssen vor der Montage auf Dichtheit überprüft werden, weil sie nachträglich nicht mehr zugänglich sind (Abb. 44).

Bei Heizungen ist besonders die Abgasführung rechtzeitig zu planen. Kamine sind ein großes Problem hinsichtlich der Luftdichtheit, insbesondere wenn sie hinterlüftet sind. Eine große Herausforderung bereitet sich der Planer mit einer Festbrennstoff-Heizung: nicht nur die Abgasführung ist luftdicht auszuführen, auch die Verbrennungsluftzuführung muss raumluftunabhängig und luftdicht ausgeführt sein, ebenso die Brennkammer selbst. Zusätzlich zur Luftdichtheit sind die Anforderungen des Kaminkehrers zu erfüllen, insbesondere die Abstimmung mit möglichen Unterdrucksituationen durch die Lüftungsanlage. Ofen und Abgassystem müssen für den maximal auftretenden Luftdruckunterschied zugelassen sein.

60



Abb. 45: Steckdosen-„Tornado“ beim Blower-Door-Test

**Elektroinstallation:** Durch die Installation von Elektrokabeln und Leerrohren entsteht ein hohes Potenzial für Luftundichtheiten. Einige Punkte, die beachtet werden sollten:

- Verteilerschrank innerhalb der thermischen Hülle unterbringen
- Abdichtung aller Leerrohre, welche die Luftdichtheitsebene durchstoßen
- Holzbau: Installationsebene für Elektro-Installation schaffen als zusätzliche innenliegende Wandschale, zwischen Folie und Beplankung oder in einem Kabelkanal im Fußbodenaufbau
- Massivbau: Montagedosen durchstoßen die luftdichtende Putzschicht – dichte Dosen verwenden und satt in Gips luftdicht einsetzen (Abb. 45)
- Präzise frühzeitige Einweisung der Monteure

#### 4.4.3 Qualitätskontrolle und Messmethoden

Ein Verfahren zum Nachweis der Dichtheit eines Gebäudes nach DIN EN 13829 ist der Blower-Door-Test (Abb. 46). Dazu wird ein Ventilator in der Haustür luftdicht eingebaut und eine Druckdifferenz erzeugt, die in Stufen auf 50 Pascal hochgefahren wird. Das entspricht einem Druck von 5 mm Wassersäule oder dem Staudruck auf eine Fläche bei einer Windgeschwindigkeit von 9 m/s (32 km/h).



Abb. 46: Blower-Door-Test

Die gemessenen Werte werden aufgelistet und in ein Koordinatensystem (Volumenstrom/Druckdifferenz) abgetragen. Der Schnittpunkt bei 50 Pascal sowohl für die Unterdruck- als auch die Überdruckmessung wird abgelesen. 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, der den Luftwechsel bei der Druckdifferenz von 50 Pascal angibt.

61

Der Test muss 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. Es ist empfehlenswert, die betroffenen Handwerker zur Messung einzuladen. Die Erfahrung zeigt, dass sie beim Feststellen von Leckagen gerne bereit sind, sofort nachzuarbeiten – die Abdichtungsmaterialien sollten sinnvollerweise auf der Baustelle sein!

Die Leckagen können durch ein Anemometer geortet werden, mit dem die Luftgeschwindigkeit einströmender Luft an schadensträchtigen Stellen bei Unterdruck gemessen wird. Alternativ kann ein Rauchgenerator in Form eines kleinen Röhrchens genommen werden, mit dem Luftbewegungen sichtbar werden. Bei schwer zugänglichen Leckagen kann auch ein Nebelgenerator gewählt werden: in Verbindung mit Überdruck wird der Nebel an der Außenhülle an den Austrittsorten sichtbar.

Sollen die Leckagestellen dauerhaft visualisiert werden, ist Infrarot-Thermografie ein aufwendigeres aber wirkungsvolles Medium. Bei Unterdruck wird Außenluft angesaugt und thermografisch die Eintrittsstellen festgehalten. Je höher die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, desto wirkungsvoller ist diese Methode.

Die Kosten für 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 ermittelt wird [22], [23], [24].

## 5 Gebäudetechnik – Lüftung

Im Gegensatz zu zahlreichen anderen Ländern beginnen sich bei uns Lüftungsanlagen im Wohnungsbau erst in den letzten Jahren zunehmend durchzusetzen. Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren Lüftungsanlagen zum Standard werden. Das hat zahlreiche Gründe: Bis in die sechziger Jahre existierte in den meisten Gebäuden ein effizienter Antrieb für beständigen Luftaustausch. Durch Einzelöfen wurde die Verbrennungsluft angesaugt und beständig frische Außenluft in die Räume transportiert. Dem standen selbstverständlich die erheblichen Nachteile des Zugs und des oftmals rauchbelasteten Wohnraums gegenüber. Mit dem Einbau von Zentralheizungsanlagen verschwand diese Art der Zwangsdurchlüftung.

62

Wenige Jahre später lag die Markteinführung von Gummilippendichtungen für Fenster und Türen, womit die Gebäude weitestgehend dicht waren. Trotz dieser gravierenden Einschnitte prägte sich kein angemessenes Lüftungsverhalten aus. Blumenbeladene Fensterbänke zeugen noch heute in vielen Haushalten von diesem Defizit. Im Gegenteil – durch die Ölpreiskrise 1973 wurde noch vehementer abgedichtet und Ratsschläge zum Lüftungsverhalten wurden oftmals grundsätzlich falsch verstanden, so dass ab diesem Zeitpunkt in vielen Gebäuden „dicke Luft“ herrschte. Die Folgen in Form von Gesundheitsbelastungen, Allergien und „Sick Building Syndrom“ wurden in den achtziger Jahren heftig diskutiert. Die anfänglich polarisierende Diskussion „Ökobaustoffe versus Chemieprodukte“ hat sich versachlicht: maßgeblich für die Beurteilung ist die Raumluftqualität. Diese stellt sich ein, wenn die Immissionen aus Baustoffen und Einbaumaterialien möglichst gering sind und die Raumluftbelastungen durch die Bewohner mit angemessener Außenluftzufuhr ausgeglichen werden.

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) trägt dieser Tatsache Rechnung. Das Referenzgebäude der Berechnung zur EnEV 2009 beinhaltet eine ventilatorgestützte Abluftanlage, bei der EnEV 2012 wird für die Vergleichsrechnung konsequenterweise eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung angesetzt. Diese Ansätze sind sinnvoll, weil sich die Qualität von mechanischen Lüftungsanlagen in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert hat. In Fachkreisen ist seit Jahren unbestritten, dass ventilatorgestützte Lüftung baldmöglichst zum Standard bei Neubau und Sanierung werden muss. Dafür sprechen Gründe der Raumlufthygiene und des Komforts (vgl. Kap. 5.2) genauso wie das Potenzial zur Energieeinsparung, das sich aus dieser Technik ergibt. Ohne Zu-/Ablufttechnik mit Wärmerückgewinnung sind Gebäude hinsichtlich der Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Minderung nicht wirklich zukunftsfähig.



## 5.1 Lüftungssysteme

Fensterlüftung kann nur so gut sein wie der Informationsstand und das tatsächliche Lüftungsverhalten der Bewohner. Auch für bestens informierte Gebäudenutzer ist es schwierig, ausreichend zu lüften, ohne zu viel Energie zum Fenster hinaus zu schicken. So wird bei Inversionswetterlagen mit ohnehin schlechter Außenluftqualität der Luftaustausch immer geringer sein als an klaren kalten Tagen, wo in einem Bruchteil der Zeit ein vollständiger Luftaustausch in den Wohnräumen stattfindet.

Durch den Einsatz von ventilatorgestützten Lüftungssystemen kann der Luftwechsel zielgerichtet eingestellt werden. Die Luftmenge kann reguliert werden und sorgt für beständig frische Außenluftzufuhr – nicht nur tagsüber, sondern auch kontinuierlich während der Nacht. Die Auslegung von Wohnungslüftungsanlagen geht von einer Frischlufterate von  $30 \text{ m}^3$  pro Person und Stunde aus. Dies sorgt für angenehmen Schlaf bei frischer Raumluft statt zur Diskussion über Kippstellung oder geschlossenes Fenster.

63

### 5.1.1 Manuelle Lüftung

Fensterlüftung ist eine effiziente Form der Lüftung, erfordert aber ein gewisses Maß an Aufmerksamkeit durch die Bewohner. Normalerweise müsste eine Querlüftung alle 2 Stunden ausgeführt werden. Die übliche Lüftungsfrequenz liegt allerdings im Mittel deutlich niedriger, viele Räume werden täglich nur ein- bis zweimal gelüftet, was einem 15- bis 25-prozentigen stündlichen Luftwechsel entspricht.

Bei den üblichen Formen der Fensterlüftung können korrekte Angaben zum Luftwechsel nur sehr bedingt gegeben werden. Bei geschlossenen Fenstern liegen die Werte sowohl bei Niedrigenergiehäusern als auch bei Standardgebäuden im Mittel bei ca.  $0,1 \text{ h}^{-1}$ . Diese Werte sind auf keinen Fall ausreichend, um eine gesunde Raumluftqualität zu gewährleisten, auch wenn durch Perforierung der Gummilippendichtungen der Fenster eine etwas erhöhte Rate erzielt werden kann. Diese stellt sich aber in hoher Abhängigkeit von der Wittersituation ein – besonders stark bei großer Kälte und höheren Windstärken.

Sinnvoll ist die regelmäßige Ausführung einer Querlüftung. Dafür wird ein 40-facher Luftwechsel pro Stunde angegeben, das heißt, rechnerisch hat sich die Luft nach 90 Sekunden komplett ausgetauscht. Dies ist allerdings nur bei optimalen Rahmenbedingungen gegeben. Abb. 47 stellt den Luftwechsel dar, der sich bei vollständigem Luftaustausch (100 %) oder bei Austausch von 75 bzw. 50 % der Raumluft in Abhängigkeit von der Häufigkeit des Lüftens ergibt. Um einen Luftwechsel von  $0,5$  bis  $0,8 \text{ h}^{-1}$  zu erreichen, müsste alle 60 bis 90 Minuten eine Querlüftung durchgeführt werden.



Der wesentliche Nachteil der Fensterlüftung liegt in der Abhängigkeit von den äußeren Faktoren. Es kann weder die Richtung der Luftströmung beeinflusst noch der tatsächliche Luftwechsel eingeschätzt werden. Bei austauscharmen Wettersituationen erfolgt der Luftaustausch eher langsam und unvollständig. Eine gute Durchlüftung findet bei starkem Wind statt und erst recht bei sehr niedrigen Temperaturen. Insbesondere bei Häusern oder Wohnungen über mehrere Stockwerke wird durch die Thermik bei sehr kalter Witterung eine sehr starke Durchlüftung bewirkt. Dies hat einen überproportional hohen Austausch der Raumluft mit hohem Energieverlust zur Folge. Die gleichen Aspekte gelten für Lüftungsarten, die durch den Auftrieb und den äußeren Luftdruck durch Klappen und Lüftungsschächte bewirkt werden.

Luftaustausch beim Lüften	Zeitraum zwischen den Lüftungsvorgängen:			
	1 Stunde	2 Stunden	3 Stunden	4 Stunden
100 %	1,0 h <sup>-1</sup>	0,50 h <sup>-1</sup>	0,33 h <sup>-1</sup>	0,25 h <sup>-1</sup>
75 %	0,75 h <sup>-1</sup>	0,38 h <sup>-1</sup>	0,25 h <sup>-1</sup>	0,19 h <sup>-1</sup>
50 %	0,50 h <sup>-1</sup>	0,25 h <sup>-1</sup>	0,17 h <sup>-1</sup>	0,13 h <sup>-1</sup>

Abb. 47: Luftwechsel bei der Fensterlüftung in Abhängigkeit vom tatsächlich erreichten Luftaustausch bei der Querlüftung und dem Zeitraum zwischen den Lüftungsvorgängen

### 5.1.2 Ventilatorgestützte Abluftanlagen

Eine kostengünstige Lösung, um wetterunabhängige Luftwechselraten zu erhalten, stellt eine ventilatorgestützte Abluftanlage dar. Die Luft wird mittels eines Ventilators aus Küche, Bad, WC und ggf. weiteren durch Gerüche oder Feuchtigkeit belasteten Räumen abgesaugt. Die frische Außenluft strömt durch Wanddurchlässe in den Außenwänden nach. Die dort eingesetzten Düsen können schalldämpfend ausgeführt und mit Filtern versehen werden. Am sinnvollsten ist die Positionierung unter der Decke und oberhalb von Heizkörpern, um Zugscheinungen zu vermeiden. Die Luft strömt gezielt vom Aufenthaltsraum durch Überströmöffnungen zu den Ablufträumen (vgl. Kap. 5.3.6). Zu beachten ist, dass zwischen Gerät und Abluftöffnungen und ggf. vor der Ausblasöffnung nach außen ein Schalldämpfer erforderlich ist.

Der Ventilator des Abluftgerätes sollte eine hohe Elektroeffizienz aufweisen ( $p_{el} \leq 0,15 \text{ Wh/m}^3$ ), das heißt, bei einem Abluftstrom von  $100 \text{ m}^3$  sollte die Ventilatorleistung unter 15 W liegen. Die Kosten einer montierten Abluftanlage betragen 750 bis 2.000 € (brutto) inkl. des Rohernetzes und der Strömungselemente.

Abluftanlagen bewirken keine direkte Energieeinsparung, sondern dienen vor allem einer guten Raumluftqualität und einem erhöhten Komfort für die Bewohner. Dennoch kann Heizenergie eingespart werden, weil der Luftwechsel gezielt eingestellt wird und damit Lüftungswärmeverluste minimiert werden.

### 5.1.3 Abluftanlage mit Wärmepumpe zur Wärmerückgewinnung

Die Abwärme aus der Abluft einer kontrollierten Lüftungsanlage kann mittels einer Wärmepumpe für die Beheizung des Gebäudes genutzt werden. Die Idee ist gut, weil die Abwärme nicht nach draußen abgegeben wird, sondern im Haus wieder genutzt wird. Für das Wärmepumpenaggregat wird kostengünstig eine Wärmequelle mit einem hohen Temperaturniveau von 20 bis 22 °C zur Verfügung gestellt.

Der Nachteil besteht darin, dass ein hoher technischer und kostenmäßiger Aufwand getrieben wird und dennoch ein zusätzliches Heizsystem erforderlich ist. Etwa 20 kWh/(m²a) betragen die verwertbaren Gewinne aus der Abluft, die mittels Wärmepumpenanlage erschlossen werden können (Annahme: mittlere Luftwechselrate 0,4 h<sup>-1</sup>, 180 Tage Heizzeit, nutzbare Temperaturdifferenz aus der Abluft 15 K). Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe wird inkl. Lüfterstrom zwischen dem Faktor 3,5 und 4,5 liegen. Zum Vergleich: eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Kap. 5.1.4) ist drei- bis fünfmal so effizient – die Faktoren liegen bei 8,0 bis 20,0. Die Abluftanlage mit Wärmepumpe kostet ca. 5.000 bis 10.000 € (brutto).

65

### 5.1.4 Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung

Das Anlagenkonzept der Abluftanlage kann um die Zuluftseite ergänzt werden. Die Außenluft wird gezielt über einen Filter angesaugt und durch einen Wärmetauscher geleitet. Dort wird die Wärme der Fortluft auf die zuströmende frische Außenluft übertragen. Sie wärmt sich so z. B. von 0 °C auf 17 °C auf und wird dann über ein Rohrsystem in die Aufenthaltsräume geführt. Solch eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung stellt einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung dar und ist bei vielen KfW-40- und allen Passivhäusern unabdingbarer Bestandteil des Hauskonzepts (Abb. 48, Abb. 49).

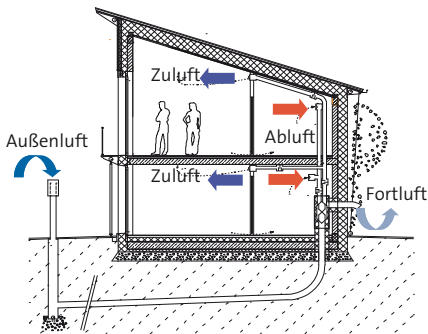


Abb. 48: Anlagenschema einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung



Abb. 49: Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung

Ein Vergleich der Lüftungswärmeverluste wird in Abb. 50 dargestellt. Während bei der Fensterlüftung bei einer Luftwechselrate von  $0,7\text{ h}^{-1}$  die Lüftungswärmeverluste etwa  $50\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  betragen, ist dieser Wert durch eine ventilatorgestützte Abluftanlage mit einem gezielt eingestellten Luftwechsel von z.B.  $0,4\text{ h}^{-1}$  auf  $27,7\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  zu senken. Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung weisen einen Jahresrückwärmgrad von 75 bis über 90 % auf bei einer hervorragenden Stromeffizienz von  $\text{pel} \leq 0,45\text{ W}/\text{m}^3$ . Daraus ergibt sich die Reduktion der jährlichen Lüftungswärmeverluste auf Werte bis unter  $5\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Als Jahresarbeitszahl errechnet sich daraus ein Wert von 8 bis 20, das heißt, pro eingesetzte Kilowattstunde Strom werden 8 bis 20 kWh Heizwärme eingespart.

Luftwechsel [h <sup>-1</sup> ]	Fensterlüftung / ventilatorgest. Lüftung [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Jahresrückwärmgrad Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung* [kWh/(m <sup>2</sup> a)]		
		50 %**	75 %	90 %
0,7	48,5	31,2	15,0	6,6
0,6	41,6	27,7	13,3	5,9
0,5	34,0	24,3	11,6	5,2
0,4	27,7	20,8	9,8	4,5
0,3	20,8	17,3	8,1	3,8

\* Leckagerate: 50 %:  $0,1\text{ h}^{-1}$ ; 75 %:  $0,042\text{ h}^{-1}$ ; 90 %:  $0,025\text{ h}^{-1}$   
\*\* zum Vergleich: altes Gerät mit ungünstigen Werten

Abb. 50: Vergleich der jährlichen Lüftungswärmeverluste pro m<sup>2</sup> beheizter Fläche bei Fensterlüftung/ventilatorgestützter Abluft und Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung mit verschiedenen Jahresrückwärmgraden

In Abb. 51 werden Kriterien für eine passivhaus-geeignete Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung kurz zusammengefasst. Die Anlagenkomponenten werden in Kapitel 5.3 dargestellt.

Die Kosten (brutto) für eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung liegen inkl. Montage für eine Wohneinheit mit ca. 120 m<sup>2</sup> Wohnfläche zwischen 4.000 und 9.000 €. Dezentrale Einzelraumgeräte mit Wärmerückgewinnung kosten pro Raum ca. 1.500 €. Sie können direkt in die Außenwand eingesetzt werden und sind unabhängig von einem Rohrsystem. Diese Geräte können bei Sanierungen sinnvoll sein. Bei einem Neubau wird sich eine zentrale Anlage im Allgemeinen als günstiger erweisen, weil der Gesamtluftwechsel bei Einzelgeräten für das gleiche hygienische Ergebnis deutlich höher ist. Zudem ist sehr auf den Schallschutz zu achten.

Wärmebereitstellungsgrad des Gerätes $\eta_{\text{WBG,t,eff}} \geq 75 \%$
Elektroeffizienz $p_{\text{el}} \leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$ (Leistungsaufnahme für Ventilator und Regelung pro $\text{m}^3$ geförderte Luft)
Zulufttemperatur $\geq 16,5^\circ\text{C}$ als Behaglichkeitskriterium für den Aufenthaltsraum
Schallpegel in Aufenthaltsräumen $< 25 \text{ dB(A)}$ , in Nebenräumen $< 30 \text{ dB(A)}$
Abgleich der Zu- und Abluft-Massenströme, Disbalance $\leq 10\%$
Dichtheit des Gerätes Leckluftstrom $\leq 3\%$ des Nenn-Abluftstroms
Dämmung des Gerätes: Gesamt-Transmissionsleitwert $\leq 5 \text{ W/K}$
Frostschutz: Kein Zufrieren des Wärmetauschers
Außenluftfilter F7 und Abluftfilter G4
Möglichst kurze und direkte Leitungsführung des Rohrnetzes
Wartungsmöglichkeit insbesondere für die Zuluft- und Außenluftleitungen mit Filtern
Einfache Inspektion und kostengünstige Wartung des Gerätes

Abb. 51: Kriterien für eine passivhaus-geeignete Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung

### 5.1.5 Lüftungsanlage und Raumheizung

Hat ein Gebäude nur noch einen sehr geringen Heizwärmebedarf, kann die Heizwärme über ein Lüftungssystem verteilt werden. Der bauphysikalische Hintergrund ist recht einfach: das Lüftungsvolumen beträgt pro Person  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  (vgl. Kap. 5.2), das entspricht etwa einem Kubikmeter pro Quadratmeter Wohnfläche pro Stunde [ $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ]. Bei einer Temperaturbegrenzung von  $\delta < 50^\circ\text{C}$  im Nacherhitzer ergibt sich als  $\Delta\delta = 30 \text{ K}$ . Wird die Zulufttemperatur höher, wird sie nicht mehr als angenehm empfunden. Daraus folgt als maximale Heizleistung  $P_{\text{Hz}} = 1 \text{ m}^3/(\text{hm}^2) \times 0,33 \text{ Wh}/(\text{Km}^3) \times 30 \text{ K} = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Wohnfläche})$ .

Bei Passivhäusern ist diese Heizleistung ausreichend. Daher ergibt sich die Möglichkeit, auf ein standardmäßiges Heizsystem zu verzichten und damit Kosten einzusparen. Aus dieser Überlegung heraus ist die Anforderung  $P_{\text{Hz}} = 10 \text{ W}/\text{m}^2$  ein Hauptkriterium für ein Passivhaus. Die Heizung kann mit hohem Komfort über ein kostengünstiges Nachheizregister in der Lüftungsanlage realisiert werden. Die Auslegung erfordert sehr viel Erfahrung. Eine Einzelraumregelung ist mit einer Einfach-Ausführung nicht möglich.

Der wesentliche Vorteil solch einer Heizwärmeverteilung liegt in den günstigen Kosten und der einfachen raumsparenden Installation. Als Nachteil ergeben sich Einschränkungen beim Regelungskomfort. Eine sinnvolle Ergänzung zum Wärmetransport über die Lüftungsanlage kann ein Heizkörper im Wohnbereich und ggf. im Bad darstellen.

### 5.1.6 Umluftanlagen und Luftkonditionierung

Liegt die Heizleistung über dem Passivhaus-Wert von  $10 \text{ W/m}^2$ , so bestehen verschiedene Möglichkeiten für die Luftheizung.

- Erhöhung der Temperatur: dies ist nicht sinnvoll, weil ab einer Temperatur von etwa  $55^\circ\text{C}$  am Heizregister die Staubpartikel in der Luft einem Pyrolyseprozess unterliegen und der subjektive Eindruck trockener verschwelter Raumluft entsteht.
- Erhöhung des Luftwechsels: mit mehr Luft kann mehr Wärme transportiert werden. Zugleich muss aus energetischer Sicht allerdings auch mehr Luft erwärmt werden, was zu erhöhtem Energiebedarf führt. Mehr Luftaustausch insbesondere an kalten Tagen hat zudem den Nachteil einer starken Entfeuchtung, so dass mit zu trockener Raumluft zu rechnen ist.
- Umluftbetrieb: statt erhöhte Mengen Außenluft zu erwärmen, kann auch die vorhandene Raumluft mehrfach über das Heizregister geführt werden, um eine zusätzliche Heizleistung zu erzielen. Die Raumluftqualität leidet dabei und die Konzentration von Mikroorganismen kann sich möglicherweise erhöhen. Zudem kann nicht die Abluft aus den feuchte- und geruchsbelasteten Nebenräumen verwandt werden.

Durch Luftkonditionierung können bei komplexen Lüftungsanlagen die genannten Nachteile aufgehoben werden. Befeuchtung gegen trockene Raumluft, Filter und Entkeimung gegen mikrobielle Belastungen durch Feuchte sowie Entfeuchtung bei Lüftungsanlagen mit Klimatisierung im Sommerbetrieb sind einige der Möglichkeiten. Es entstehen hohe Investitions- und Betriebskosten. Wohngebäude sollten aus Kosten-, Energie- und Raumluftgründen so konzipiert werden, dass beim Einbau von Lüftungsanlagen weder Umluftbetrieb noch Luftkonditionierung erforderlich sind.

## 5.2 Hygienische Anforderungen und Luftwechsel

Ausgehend davon, dass die Raumluftqualität oberste Priorität bei der Planung genießt, müssen bei der Lüftungsplanung für die Auslegung des Luftwechsels folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Als Leitwert kann der Kohlendioxidgehalt der Raumluft gewählt werden, weil er durch die Nutzer verursacht und nicht veränderbar ist. Der hygienische Grenzwert nach DIN 1946 von  $0,15 \text{ Vol-\%}$  kann bei der Zufuhr von  $20 \text{ m}^3$  frischer Außenluft pro Stunde und Person bei einfacher Betätigung eingehalten werden. Für den strengeren Pettenkofer-Wert von  $0,1 \text{ Vol-\% CO}_2$  entsprechend  $1.000 \text{ ppm}$  sind folgende Luftmengen erforderlich: bei leichter Arbeit etwas über  $30 \text{ m}^3$ , bei geringer Betätigung etwa  $25 \text{ m}^3$  und bei völliger Ruhe werden zur Einhaltung des Pettenkofer-Wertes für einen erwachsenen Menschen etwa  $20 \text{ m}^3$  Frischluft pro Stunde benötigt. Mit diesen Zahlen korrespondiert die Mindestanforderung der DIN 1946 Teil 6 von  $30 \text{ m}^3$  Frischluft pro Stunde für jede Person bei normaler Betäti-

gung. Zur Veranschaulichung wird in Abb. 52 der Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in einem Schlafzimmer mit Fensterlüftung sowie mit ventilatorgestützter Lüftung dargestellt.

- Die Schadstoff-Konzentration im Gebäude und gesundheitsbeeinträchtigende Einflüsse müssen so gering gehalten werden, dass der festgelegte Luftwechsel ausreichend ist, Rest-Schadstoffe ausreichend abzuführen. Das heißt für die Gebäudeplanung eines energiesparenden Gebäudes: Einsatz von Materialien mit minimiertem Emissionsverhalten. Insofern ist energetisches Bauen immer auch gesundheitsverträgliches Bauen.
- Die Raumluftfeuchte stellt einen weiteren Leitwert für den Luftwechsel dar (vgl. Kap. 3.1.2). Für die Heizzeit von Passivhäusern (November bis März) sind die  $\text{CO}_2$ -bedingten Werte ausreichend für den Abtransport des täglichen Feuchteanfalls, der bei einem 4-Personen-Haushalt immerhin ca. 10 Liter Wasser pro Tag beträgt. In der angrenzenden Übergangszeit ist ein erhöhter Luftwechsel erforderlich. Muss zu dieser Zeit noch geheizt werden, wie z. B. beim Niedrigenergiehaus, erhöht sich dadurch der Lüftungswärmeverlust entsprechend.
- Eine ausreichende Durchströmung jedes einzelnen Raumes entsprechend seiner Nutzung muss erzielt werden. Bad, Küche und WC bedürfen eines erhöhten Luftwechsels.
- Die Lüftungsanlage sollte auf einfache Art und Weise in hygienisch einwandfreiem Zustand zu erhalten sein. Das bezieht sich auf Luftansaugung, Filter, Rohrnetz und Gerät. In den folgenden Kapiteln wird jeweils ein Hinweis auf die erforderliche Wartung gegeben.

69

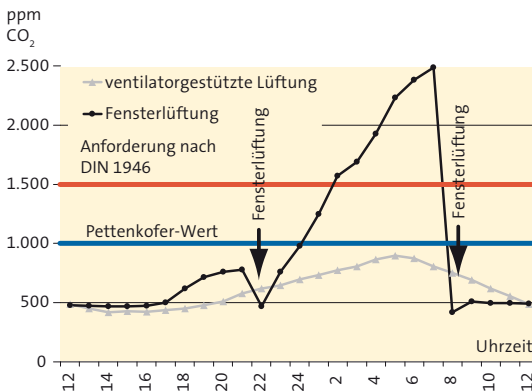


Abb. 52: Charakteristischer  $\text{CO}_2$ -Verlauf in einem Schlafzimmer: Vergleich Fensterlüftung – ventilatorgestützte Lüftung

## 5.3 Komponenten von Lüftungsanlagen

Die hier dargestellten Komponenten entsprechen dem Aufbau einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Es gibt zahlreiche Systeme auf dem Markt, die nach dem gleichen Prinzip aufgebaut sind, sich in den Bauteilen jedoch unterscheiden. Grundsätzlich sind Anlagen zu bevorzugen, die mit einfachen Mitteln eine möglichst hohe Effizienz erbringen.

### 5.3.1 Luftansaugung und Filter

Die Luftansaugung kann individuell auf die Anforderungen des jeweiligen Gebäudes zugeschnitten werden. Vorteilhaft sind folgende Aspekte:

- Der Luftzutritt sollte sich in mindestens 1,50 m Höhe befinden, um die Ansaugung von Mikroorganismen aus der direkten Umgebung zu reduzieren (die DIN fordert sogar 2,50 m Höhe); keine Ansaugung in belastetem Umfeld, z. B. neben dem Komposthaufen.
- Zu- und Abluftöffnung auf der gleichen Seite eines Gebäudes bieten den Vorteil, dass bei Winddruck keine Disbalance in der Anlage entsteht. Der Abstand muss so groß sein, dass die Abluft nicht wieder angesaugt wird.
- Erfolgt die Ansaugung auf der Südseite, so liegen temporär etwas erhöhte Lufttemperaturen im Vergleich zur Nordseite vor. Der Effekt ist allerdings gering, so dass dafür kein erhöhter Bauaufwand getrieben werden sollte.
- Wird die Anlage ohne Erdreichwärmetauscher betrieben, kann die Ansaugung kostengünstig über das Dach erfolgen.
- Die Ansaugung sollte nicht beliebig zugänglich sein.

Der Abscheidegrad verschiedener Filter wird in Abb. 53 dargestellt. Die Anforderungen gemäß DIN EN 779 an Filter in Lüftungsgeräten sind nicht sehr hoch: Filterklasse G3 auf der Zuluftseite und G2 für den Abluftfilter. Hygienisch strenge Anforderungen stellen die Empfehlungen des Passivhaus Instituts dar. Sie fordern für Außenluftfilter in der Ansaugbox vor Erdreichwärmetauschern F7-Filter und für die Abluft G4-Filter [26]. Bei starker Außenluftbelastung ist ein zusätzlicher, kostengünstiger G3-Vorfilter in der Ansaugung sinnvoll. Durch die Filterung der Luft soll einerseits der Niederschlag von Staub in der Anlage verhindert werden, um ständig hygienisch einwandfreie Oberflächen innerhalb des Rohrsystems und des Gerätes zu erhalten. Auf der anderen Seite wird die Raumluftqualität gegenüber der üblichen Fensterlüftung verbessert. Für Allergiker kann durch den gezielten Einsatz von Filtern die Belastung durch Pollen oder andere Allergene reduziert oder verhindert werden. Auch der Sporeneintrag wird durch geeignete Filter reduziert.

Filtertyp	Herausgefilterte Pollen in %	Herausgefilterte Sporen in %
Vorfilter G3	ca. 40	ca. 30
Vorfilter G4	ca. 60	ca. 50
Pollenfilter F6	100	ca. 65
Pollenfilter F8	100	90

Abb. 53: Abscheidegrad von Filtern für Sporen und Pollen

Ein regelmäßiger Filterwechsel alle 2 bis 3 Monate für die Vorfilter und mindestens jedes Jahr für die Feinfilter muss sichergestellt werden. Wird eine Anlage über den Sommer ausgestellt, muss vor der Wiederinbetriebnahme im Herbst der Filtersatz getauscht werden.

Der dafür erforderliche Arbeitsaufwand sollte gering und durch den Nutzer einfach zu bewerkstelligen sein. Zudem müssen die Kosten für die Ersatzfilter niedrig liegen. Bereits bei der Ausschreibung der Anlage sollte die Wartung des Gerätes eine Position darstellen, um unliebsame Überraschungen zu vermeiden.

71

### 5.3.2 Frostschutz für den Wärmetauscher des Lüftungsgerätes

Der Wärmetauscher im Lüftungsgerät muss vor sehr kalter Außenluft geschützt werden, damit die in der Abluft enthaltene Raumluftfeuchte nicht am Ende der Wärmetauscherflächen kondensiert und die entstehenden Wassertropfen einfrieren. Solch eine Vereisung lässt das Lüftungsgerät wirkungslos werden und kann zu Schäden am Gerät führen. Auf jeden Fall entsteht eine Disbalance, weil die frische Außenluft weiter einströmt, während die Abluft unterbrochen ist. Die Druckdifferenz in Form des entstehenden Überdrucks wird dazu führen, dass Luft über Leckagen in der Gebäudehülle entweicht. Die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung wird damit stark eingeschränkt.

Im Wesentlichen gibt es folgende Konzepte, um diese Problematik zu lösen:

1. Luft-Erdreichwärmetauscher,
2. Sole-Erdreichwärmetauscher,
3. Elektrisches Vorheizregister,
4. Warmwasser-Vorheizregister,
5. Intelligente Geräteregelung.



## Luft-Erdreichwärmetauscher

Durch einen Erdreichwärmetauscher (Abb. 54), der die Außenluft vorwärmt, wird der Wirkungsgrad einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung verbessert und vor allem das Einfrieren des Wärmetauschers verhindert. Es können handelsübliche Rohrmaterialien wie z. B. Kabelschutzrohr HD-PE oder PE-Spezialrohre für Erdreichwärmetauscher verwendet werden. In Abhängigkeit von der erforderlichen Luftmenge werden Wohneinheit bzw. eines Einfamilienhauses Durchmesser von 150 bis 200 mm gewählt. Die Länge und Anordnung ergibt sich aus der Anforderung an die minimale Lufttemperatur am Wärmetauscher des Gerätes.



Abb. 54: Kondensatablauf am Ende eines Erdreichwärmetauschers im Keller

15–40 m Rohrlänge werden üblicherweise ausgeführt. Je höher die Erdüberdeckung (möglichst > 2,00 m; oder Führung unterhalb der Bodenplatte) und je besser leitend das umgebende Erdmaterial ist (z. B. gut verdichtetes lehmiges Material) desto günstiger der Wirkungsgrad. Ein Erdreichwärmetauscher bewirkt je nach Ausführung eine Energieeinsparung von etwa 0,5 bis 1,5 kWh pro m<sup>2</sup> beheizter Fläche im Jahr. Der Einfluss auf die Temperatur wird in Abb. 55 über eine Heizsaison dargestellt.

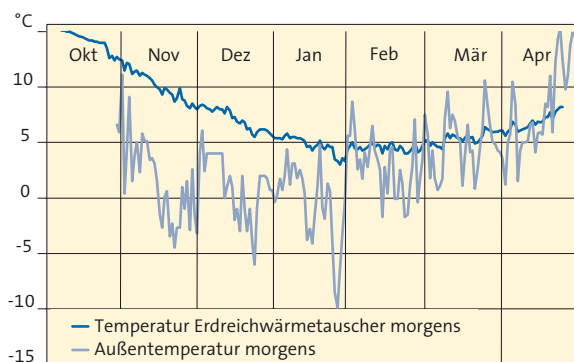


Abb. 55: Erdreichwärmetauscher-Temperatur und Außentemperatur (am Beispiel EFH Erlangen-Büchenbach Heizsaison 1999/2000)

Die Leitungen sollten mit mindestens 2 % Gefälle zu einem Reinigungsschacht verlegt sein, damit eventuell anfallendes Kondensat ablaufen kann. Zudem ist sicherzustellen, dass eine Reinigung möglich ist und jederzeit eine hygienisch einwandfreie Situation gegeben ist. Dies ist wichtig, weil der Erdreichwärmetauscher den einzigen Bereich des Rohrsystems einer Lüftungsanlage mit Abluftwärmerückgewinnung aus-

macht, in dem Feuchte anfallen kann und mithin die Möglichkeit für die Ausbildung von Mikroorganismen besteht. Für regelmäßige Reinigung sollte gesorgt werden, obwohl bei bisherigen Untersuchungen keine mikrobielle Belastung festgestellt wurde [27], [10], [28]. Die Reinigung kann z. B. zweimal jährlich mittels Schornsteinfegerbürsten erfolgen, mit denen bis zu 25 m lange Rohre durchgeputzt werden können. Anhand von Schmutzanfall und Geruch geben diese einen Hinweis auf den Zustand des Wärmetauschers. Die Bauherren des Autors führen diese Reinigung z. T. regelmäßig durch und berichten jeweils von einem einwandfreien hygienischen Zustand. Besonders beim ersten Putzen wurde allerdings in nicht wenigen Fällen Erdreich oder Verschmutzungen aus der Bauzeit festgestellt.

### **Sole-Erdreichwärmetauscher**

Alternativ zu den luftdurchströmten Erdreichwärmetauschern können kostengünstig PE-Rohre mit einem Querschnitt von etwa 35 mm im Arbeitsraum der Baugrube oder unter der Bodenplatte verlegt werden. Darin zirkuliert eine Soleflüssigkeit, welche die Erdwärme über einen Wasser-Luft-Wärmetauscher auf die einströmende frische Außenluft der Lüftungsanlage überträgt. Erforderlich ist dazu eine einfache Regelung, die eine Zirkulationspumpe in Betrieb setzt. Die Vorteile eines solchen Konzepts bestehen neben der Einfachheit darin, dass die Luft nicht durch das Erdreich geführt werden muss und alle Teile der Ansaugleitung visuell überprüfbar sind. Zudem kann die Regelung sehr gezielt erfolgen, z. B. nach der Außenluft, die bei den meisten Anlagen ca. minus 4 °C nicht unterschreiten darf, damit der Wärmetauscher des Lüftungsgerätes nicht einfriert. Alternativ kann die Regelung nach der Fortlufttemperatur eingestellt werden. Dadurch wird eine nochmals genauere Einregulierung ermöglicht.

73

### **Elektrisches Vorheizregister**

Eine einfache Lösung zur Erhöhung der Außenlufttemperatur liegt in der Installation eines elektrischen Vorheizregisters. Die Regelung erfolgt wie im vorherigen Absatz beschrieben und schaltet die Heizfunktion ein, sobald die erforderlichen Temperaturen unterschritten werden. Bei optimierter Betriebsweise liegt der jährliche Strombedarf für ein Einfamilienhaus zwischen 25 und 75 kWh. In Gebieten mit sehr niedrigen Temperaturen ist diese Variante nicht empfehlenswert.

### **Warmwasser-Vorheizregister**

Wie bei der elektrisch betriebenen Variante wird die zuströmende Außenluft über einen Wärmetauscher mit gleicher Regelungsart vorerwärmt. Der Vorteil liegt darin, die Energie primärenergetisch günstiger bereitstellen zu können. Der Nachteil liegt in den etwas höheren Aufwendungen, insbesondere einem zusätzlichen kleinen Heizkreis mit Soleflüssigkeit, der über einen Wärmetauscher an das Heizungssystem des Gebäudes gebunden ist, um das Einfrieren im Wasser-Luft-Wärmetauscher am Vorheizregister auszuschalten. Bei Einfamilienhäusern ergibt sich zudem der Nachteil,

dass die Heizungsregelung auf die Anforderungen des Frostschutzes eingestellt sein muss. Das heißt, es muss insbesondere nachts warmes Heizwasser vorgehalten werden. Dies kann bei vielen Heizungskonstellationen zu einem unwirtschaftlichen Heizungsbetrieb führen, der die benannten Vorteile in deutliche Nachteile gegenüber einem elektrischen Vorheizregister verwandeln kann.

### Intelligente Geräterege lung

Viele Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung schalten bei Frostgefahr für den Wärmetauscher den Außenluftventilator herunter oder ganz aus und erhalten durch die hohe relative Fortluftmenge eine erhöhte Temperatur am Wärmetauscher. Diese Regelung erhält die Funktion der Geräte, führt aber zu einer Verschlechterung des Rückwärmgrades, weil gerade in den kältesten Betriebsstunden die Funktion des Gerätes herabgesetzt wird und ein Leckagestrom durch die Disbalance induziert wird. Effektiver sind Lösungen, die das Luftvolumen in Abhängigkeit von der Fortlufttemperatur herabsetzen und auf diesem Weg den Frostschutz gewähren. Weitere Konzepte arbeiten mit Bypasslösungen, um die Fortluft ausreichend warm zu halten, sodass keine Vereisung entsteht. Solche Lösungen sind einfacher möglich, wenn die Räume nicht über die Lüftungsanlage, sondern über ein getrenntes System beheizt werden.

### 5.3.3 Lüftungsgerät

Die Reduzierung der Lüftungswärmeverluste erfolgt durch das Herzstück der Lüftungsanlage, durch den Luft-Luft-Wärmetauscher im Lüftungsgerät. Während bei Abluftanlagen sehr einfache Lüftungsgeräte mit einem einzelnen Ventilator ausreichen, werden bei Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung im Allgemeinen zwei getrennte Ventilatoren für Zu- und Abluftseite verwendet. Die Wärme der Fortluft wird über einen Wärmetauscher an die hereinströmende Außenluft übertragen. Dabei wurde der lange angewandte Kreuzstromwärmetauscher zunehmend durch Gegenstrom-Platten- und Gegenstrom-Kanal-Wärmetauscher abgelöst. Effiziente Geräte müssen folgende Kriterien erfüllen [29]:

- Wärmebereitstellungsgrad des Gerätes  $\eta_{\text{WBG,teff}} \geq 75\%$ : Dabei handelt es sich um den effektiven trockenen Wärmebereitstellungsgrad mit balancierten Massenströmen bei Außentemperaturen zwischen  $-15$  und  $10^\circ\text{C}$  und trockener Abluft ( $21^\circ\text{C}$ ). Bei Kondensationsanfall im Wärmetauscher erhöht sich der Wärmebereitstellungsgrad im Allgemeinen deutlich (z. B. von  $75\%$  auf über  $90\%$  bei  $-10^\circ\text{C}$  und  $60\%$  rel. Feuchte).
- Die spezifische elektrische Leistungsaufnahme des Gerätes pro  $\text{m}^3$  geförderter Luft soll eine Elektroeffizienz von  $p_{\text{el}} \leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$  aufweisen, das heißt, bei einer Luftmenge von  $120 \text{ m}^3$  zur Lüftung eines Vier-Personen-Haushaltes hat das Gerät eine Leistungsaufnahme von maximal  $54 \text{ Watt}$  für den Ventilator und die gesamte Regelung.

- Als Behaglichkeitskriterium für Aufenthaltsräume sollte die Temperatur an der Zuluftdüse mindestens 16,5 °C betragen.
  - Die einfache Regelbarkeit des Gerätes ist Voraussetzung für eine sinnvolle Nutzung der Anlage. Neben der Standard-Lüfterstufe, die sich im Allgemeinen aus den 30 m<sup>3</sup> pro Stunde und Person ergibt, ist für den Nachtbetrieb oder bei Abwesenheit der Bewohner ein abgesenktes Lüftungsvolumen auf etwa 75 % zweckmäßig. Beim Duschen, Kochen und der Anwesenheit mehrerer Gäste ist eine erhöhte Lüfterstufe (Stoßlüftung) sinnvoll.
  - Das Gerät muss dicht ausgeführt sein. Ein Leckluftstrom sollte maximal 3 % des Nenn-Abluftstroms ausmachen. Die Dichtheit des Gerätes ist Voraussetzung für einen guten Wirkungsgrad. Zudem ist es für die Raumlufthygiene wesentlich, dass der Außenluft keine Abluft beigemischt wird. Deshalb sollte das Gerät so konzipiert sein, dass der Außenluft-/Zulufttrakt unter Überdruck steht.
  - Das Gerät muss ebenso wie das Gebäude gut gedämmt sein. Der Gesamt-Transmissionsleitwert soll  $\leq 5 \text{ W/K}$  betragen.
  - Um ein Zufrieren des Wärmetauschers zu verhindern, muss auf einen gesonderten Frostschutz geachtet werden. Als Maßnahme kann wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben ein ausreichend dimensionierter Erdreichwärmetauscher oder ein Vorheizregister eingesetzt werden. Bei Einfrieren des Wärmetauschers entsteht eine Disbalance in der Anlage, weil bei den Geräten der Außenluftstrom abgeschaltet wird. Dadurch wird die Infiltration von kalter Außenluft durch die verbliebene Undichtheit erzwungen, wodurch die auftretenden Heizlasten unzulässig hoch werden.
  - Außenluftfilter (min. G3) und Abluftfilter (min. G2) im Gerät müssen einfach zu inspizieren und austauschbar sein. Die Kosten für das Filtermaterial sollten möglichst günstig sein. Das Gerät inklusive des Wärmetauschers muss mit geringem Aufwand zu reinigen sein.
- Erhöhter Komfort ergibt sich durch eine Bypass-Regelung, durch die im Sommerbetrieb die Luft mit der Außentemperatur in das Gebäude eingeblasen werden kann.

Lüftungsgeräte unterliegen noch keiner Normung, werden aber an verschiedenen Stellen auf ihre Effizienz untersucht, wie z. B. beim Europäischen Testzentrum für Wohnungslüftungsgeräte in Dortmund [30]. Eine Liste von Passivhaus zertifizierten Geräten ist auf der Homepage des Passivhaus Instituts zu finden [5].

### 5.3.4 Leitungen

Leitungssysteme für Lüftungsanlagen in Einfamilienhäusern können grundsätzlich in zwei Arten verlegt werden: einerseits als Rohrsystem, bei dem nacheinander in Serie die einzelnen Luftauslässe montiert werden. Dabei beginnt der Querschnitt im Einfamilienhaus mit einem Rohr mit Durchmesser 160 bis 125 mm und verjüngt sich im letzten Bereich auf 100 bis 80 mm. Bei einem parallelen System wird dagegen von einem Verteiler aus jeder Luftauslass einzeln angefahren. Entsprechend können die Rohrquerschnitte gering sein und liegen in etwa bei Durchmessern von etwa 70 bis 80 mm.

In den letzten Jahren sind sehr unterschiedliche Rohrsysteme auf den Markt gekommen, die sich zu großen Teilen bewähren. Neben den klassischen Wickelfalzrohr-Systemen werden sehr unterschiedliche Kunststoff- und Verbundrohrsysteme angeboten, die z. T. unterhalb des Estrichs oder innerhalb von Stahlbetondecken verlegt werden.

Grundsätzlich sollten Leitungssysteme eine Revision und Reinigung kostengünstig ermöglichen. Das kann über Revisionsöffnungen erfolgen, die in der Planung festgelegt werden müssen. Sehr einfach sind diesbezüglich Systeme, bei denen von einem Verteiler aus alle Rohre ohne störende Formteile in den Leitungen mit Reinigungsequipment bis zum Luftauslass durchfahren werden können. Das Rohrmaterial sollte innen möglichst glattwandig sein. Es haben sich allerdings auch leicht geriffelte Rohre bewährt, wenn für sie ein Reinigungskonzept mit entsprechendem Werkzeug gegeben ist.

Wenn die Luftkanäle möglichst kurz und geradlinig ohne Formstücke verlegt werden, ist die Anlage nicht nur kostengünstig, sondern erzeugt auch nur einen geringen Druckabfall, wodurch sich der Stromverbrauch des Lüftungsgerätes verringert. Parallel geführte Systeme mit Verteiler können auch bei einem insgesamt längeren Leitungsnetz mit einem sehr geringen Verlust auskommen.

Durch eine sorgfältige Planung kann eine möglichst druckverlustarme Ausführung sichergestellt werden. Dabei hat die Lüftungsrohr-Führung stets Vorrang vor sonstigen Leitungen. Den geringsten Druckabfall weisen runde Wickelfalzrohre bei geradliniger Verlegung auf (Abb. 56). Wie sich andere Rohrquerschnitte auf den Druckverlust auswirken, zeigt Abb. 57. Formstücke wie Bögen und Abzweige müssen hinsichtlich ihres Druckverlustes und ihrer Kosten mit einbezogen werden. Flexible Aluminiumrohre sollten auf Grund ihrer ungünstigen Strömungs- und Hygieneigenschaften möglichst vermieden werden. Bei regelmäßiger Filterwartung weisen Lüftungssysteme auch nach fünfzehn Jahren keinen bzw. nur einen sehr geringen Staubbelag an den Rohrwandungen auf.

Durchmesser [mm]	Luftvolumen [m³/h]	Geschwindigkeit v ( $< 3 \text{ m/s}$ )	Widerstand R [Pa/m]	
			Wickelfalzrohr	Flexrohr
100	20	0,71	0,08	0,12
100	30	1,06	0,18	0,27
100	40	1,42	0,31	0,48
125	60	1,36	0,23	0,35
125	100	2,26	0,64	0,98
150	150	2,36	0,58	0,89
150	190	2,99	0,93	1,43
200	250	2,21	0,38	0,59

Abb. 56: Strömungsgeschwindigkeit und Druckverluste von runden Rohren

Kanalform	Druckverlust [%]
Rund	100
Oval	106
Quadratisch	118
Rechteckig ca. 1:2	128
Rechteckig ca. 1:4	177
Rechteckig ca. 1:8	260

Abb. 57: Einfluss der Kanalform auf den Druckverlust

Die Lüftungskanäle müssen luftdicht ausgeführt werden. Wird über die Lüftung geheizt, ist die Dämmung der Rohre sehr präzise zu planen, damit die Wärme im berechneten Umfang wirklich in den Zulufräumen ankommt.

### 5.3.5 Schalldämpfer

Der Schallpegel in Aufenthaltsräumen sollte höchstens bei 25 dB(A), in Nebenräumen bei maximal 30 dB(A) liegen. Der Schallschutz muss bei der Geräteauswahl und Anlagenkonzeption sorgfältig geplant werden. In innerstädtischen Gebieten und Stadtrandlagen führt eine Lüftungsanlage durchweg zu einer Verbesserung des Schallpegels im Haus gegenüber der Situation mit z. B. gekippten Fenstern. In sehr ruhigen Lagen ist besondere Sorgfalt notwendig.

Schalldämpfer müssen zwischen dem Lüftungsgerät und den Zu- und Abluftöffnungen in den Räumen eingebaut werden, um Ventilator- und Strömungsgeräusche zu dämpfen. Bei üblichen Rahmenbedingungen sind Schalldämpfer-Längen zwischen ein und zwei Metern ausreichend. Wichtig ist weiterhin die Unterdrückung des Telefoneschalls zwischen den Räumen. Hier werden jeweils Schalldämpfer mit ca. 0,5 m Länge eingesetzt. Geeignet sind Rohrschalldämpfer mit Schalldämmung, die nach



Abb. 58: Leitungsrohre einer Lüftungsanlage mit Schalldämpfer

78

Bei besonders hohen Ansprüchen, z. B. an Ruheräume und Schlafzimmer, können Geräte- und Telephonieschalldämpfer in Reihe geschaltet werden. Die betreffenden Räume am Ende des Rohrsystems sind dann besonders gegen das Anlagegeräusch geschützt. Anlagen mit Luftverteiler und parallel geführtem Leitungssystem können auf relativ einfache Art eine Schalldämpfung über den Verteiler und die Rohre erzielen.

innen durch ein Lochblech abgedeckt werden. Die Auslegung ist abhängig vom Schallleistungspegel des Lüftungsgerätes und der Anordnung des Rohrnetzes. Ein Orientierungswert für die Dämpfung bei hochwertigen Schalldämpfern liegt je nach Ausführung bei ca. 17 dB(A) für einen 0,5 m langen Schalldämpfer und bei ca. 20 dB(A) für eine 1,0-m-Ausführung.

Für den Planer kann es hilfreich sein, bei der Anlagekonzeption hinter dem Lüftungsgerät die Möglichkeit für den einfachen nachträglichen Einbau eines zusätzlichen Schalldämpfers offen zu lassen. Bei Beschwerden ist dann mit geringem Kostenaufwand endgültig Ruhe herzustellen. Weiterhin ist bei der Planung der Anlage zu überprüfen, ob bei der Außenluftansaugung und der Fortluft Schalldämpfung erforderlich ist, damit keine Beeinträchtigung im Außenbereich bzw. für die Nachbarschaft entsteht.

### 5.3.6 Luftdurchlasselemente und Überströmöffnungen

Die Luft wird über Durchlasselemente in die Räume eingebracht und abgesaugt. Die Luftmenge muss mit einfachen Mitteln regulierbar sein. Die Ventile sorgen für einen zusätzlichen Schallschutz und vor allem für eine gezielte Verteilung im Raum. Die Eigengeräuscherzeugung in Form von Strömungsgeräuschen muss möglichst gering sein. Folgende Elemente können z. B. als Zuluftdurchlass verwendet werden (Abb. 59):

- Zuluftdurchlass als rundes Tellerventil: geringer Strömungswiderstand, keine gezielte Strömungsrichtung, muss am entgegengesetzten Ende der Abluft-/Überströmöffnung im Raum angebracht werden, was zu längeren Zuluftleitungen führt,
- Schlitzdurchlass für Wand-, Decken- oder Fußbodeneinbau: Kastenförmiges Ventil, Einbausituation wie o. a. Tellerventil,
- Weitwurfdüse in verschiedenen Formen: gezielte Luftführung mehrere Meter in den Raum hinein ermöglicht kurze Leitungsstrecken für die Zuluftverteilung; Nachteil: erhöhter Druckverlust durch die Düse.

Abluftdurchlässe können von der Form her ähnlich vielfältig gebaut werden. Ein wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit zum Einbau eines leicht zu wechselnden Filters insbesondere in Bereichen mit fettbelasteter Abluft, wie z. B. in der Küche. Grundsätzlich sollten Ventile leicht zu reinigen sein.

Überströmelemente sind zwischen Aufenthaltsräumen und Überströmbereichen (Flure, Überströmräume) sowie den Ablufträumen hin anzubringen. Der Druckverlust sollte nicht größer als 1 Pascal sein bzw. die Strömungsgeschwindigkeit maximal 1 m/s. Es gibt zahlreiche Lösungsmöglichkeiten (Abb. 61):



Abb. 59: Zuluftdurchlässe:  
a. links als Tellerventil b. rechts als Weitwurfdüse

Abb. 60: Abluftdurchlass mit  
Filtermöglichkeit

- Türblatt unten kürzen: einfach, aber optisch gewöhnungsbedürftig; 15 mm ermöglichen einen Luftdurchsatz von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Überströmgitter im Türblatt, auch in schalldämmender Ausführung,
- Wanddurchführungen mit Schalldämmung,
- Eine nicht sichtbare Ausführung ist möglich im oberen Bereich der Türzarge: die Abdeckrahmen werden jeweils auf der gesamten Breite zur Wand hin um 1 cm ausgefräst und zwischen Sturz und Rahmen ein Zwischenraum von mindestens 2 cm vorgesehen [31].



Abb. 61: Überströmmöglichkeiten:  
a. links Überströmelement in einer Tür b. rechts Überströmquerschnitt 15 mm hoch zwischen Tür und Boden





Abb. 62: Visualisierung der Luftströmung bei einem Weitwurfventil mittels eines Nebelversuchs: Der Coanda-Effekt führt den Luftstrom während der ersten Meter entlang der Decke, danach ist die gleichmäßige Luftverteilung bei minimaler Luftgeschwindigkeit ohne Zugempfinden gewährleistet.

#### 5.4 Auslegung und Planungseckdaten

In Abb. 63 wird am Beispiel einer Wohneinheit mit 120 m<sup>2</sup> Wohnfläche das Lüftungskonzept einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung dargestellt. Die frische Außenluft von 120 m<sup>3</sup>/h für 4 Personen à 30 m<sup>3</sup>/h wird in die Aufenthaltsräume mit einer Fläche von etwa 75 m<sup>2</sup> geführt. Das entspricht einem mittleren Luftwechsel von 0,6 bis 0,7 h<sup>-1</sup>. Die Luft wird durch den Überströmbereich (Flure, Treppenraum, Nebenräume, ungenutzte Teile von offenen Wohnräumen) in die Ablufträume geleitet. Die Anforderungen dafür werden vollständig erfüllt: Küche 40–60 m<sup>3</sup>/h, Bad 40 m<sup>3</sup>/h und WC 20 m<sup>3</sup>/h. In Abhängigkeit von den jeweiligen Flächen dieser Räume werden Luftwechsel im Abluftbereich um 2,0 h<sup>-1</sup> erreicht.

Der Luftwechsel über die gesamte Fläche beträgt im vorliegenden Fall etwa 0,4 h<sup>-1</sup>. In Abhängigkeit von der Nutzung kann sich der tatsächlich eintretende Wert ändern. Bei Abwesenheit der Bewohner und im Nachtbetrieb kann die Luftmenge z. B. auf 90 m<sup>3</sup>/h reduziert werden. Daraus ergibt sich im Durchschnitt ein mittlerer Luftwechsel bis hinab zu 0,3 h<sup>-1</sup>. Wird oftmals eine erhöhte Stoßlüftung mit 200 bis 250 m<sup>3</sup>/h getätigt, erhöht sich der mittlere Wert entsprechend. Eine mit vier Personen belegte Wohnung mit 90 m<sup>2</sup> Wohnfläche wird einen erhöhten Luftwechsel von z. B. 0,5 h<sup>-1</sup> aufweisen,

während ein Haus mit  $140\text{ m}^2$  Wohnfläche und 3 Bewohnern bei einem geringeren Luftwechsel ausreichend mit frischer Außenluft versorgt ist. Ein Wert von  $0,3\text{ h}^{-1}$  sollte nicht unterschritten werden.

Bei der Auslegung muss die Entfeuchtungseigenschaft von Lüftungsanlagen beachtet werden: Insbesondere in den kalten Wintermonaten wird mit jedem ausgetauschten Kubikmeter Luft ein Feuchtegehalt von 6 bis 10 Gramm Wasserdampf aus den Wohnräumen ausgetragen. Der Luftwechsel darf in dieser Zeit nicht zu hoch eingestellt sein, weil sonst eine zu niedrige Raumluftfeuchte entsteht. Gerade bei Gebäuden mit hoher Wohnfläche und geringer Belegung, wie hochwertige Einfamilienhäuser, muss dieser Aspekt bei der Auslegung der Anlage bedacht werden. Gegebenenfalls kann ein Rotationswärmetauscher gewählt werden, der einen deutlich geringeren Entfeuchtungseffekt aufweist.

81

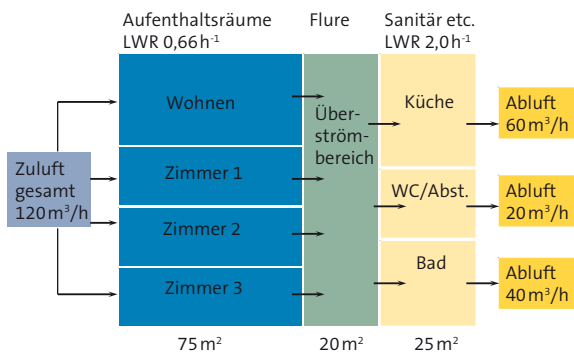


Abb. 63: Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung: Auslegungsschema mit den resultierenden Luftwechseln am Beispiel eines Hauses mit  $120\text{ m}^2$  Wohnfläche

Die Luftverteilung muss entsprechend dem in Abb. 63 dargestellten Schema erfolgen: Zuluftleitungen führen in die Aufenthaltsräume und die Abluft wird aus belasteten Räumen und Feuchträumen abgesaugt. Für Raucherhaushalte sollte ein Raucherraum als zusätzlicher Abluftraum ausgebildet werden, wenn nicht ohnehin die Küche (=Abluftzone) diesem Zweck dient oder die Raucher auf Balkon oder Terrasse ausweichen. Je kürzer die Lüftungsleitungen ausgelegt werden und je einfacher das Schema ist, desto wirtschaftlicher ist die Anlage bei Erstellung und Betrieb. Jeder Meter Rohr und vor allem jeder Abzweig, Bogen, Filter, Schalldämpfer und Register führt zu Druckverlusten. Sie sollten bei einer üblichen Hausinstallation 100 Pascal nicht überschreiten. Eine Berechnung des Druckverlustes und der Schallpegel des Netzes ist zur Optimierung von Anlagen sinnvoll.

Bei der Dimensionierung der Leitungsquerschnitte wird von einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s in der Auslegungsstufe (Normalbetrieb) ausgegangen (Abb. 56). Das führt bei üblichen Wohngebäuden zu Querschnitten von DN 150 (entspricht 150 mm Durchmesser) bis DN 100, in der Verteilung direkt hinter dem Gerät eventuell zu DN 200. Für einzelne Zuluftauslässe kann das letzte Leitungsstück auch mit DN 80 erstellt werden. Dieser Durchmesser ergibt sich auch bei Parallelverteilungen von einem Verteiler aus, bei denen pro Auslass eine gesonderte Leitung verlegt wird.

Für die Leitungsführung gibt es verschiedene Ausführungsvarianten:

- Verlegung in Schächten und unterhalb der Decke, daraus resultieren im Wohngeschoss meist ein paar Verkleidungen (Gipskarton); im Schlafgeschoss ist die Verlegung unter der Flurdecke möglich (Flurhöhe 20 cm geringer als sonstige Räume); bei Wohnungen auf einer Ebene dient ebenfalls der Flur als Verteilbereich und wird nachträglich abgehängt; als Vorteil ergibt sich der relativ einfache Zugang für Reinigungszwecke etc.
- Verlegung im Bodenbereich (unterhalb des Estrichs oder in der Decke); dazu werden meist flache Querschnitte gewählt, die einen erhöhten Druckverlust aufweisen und schwer zugänglich sind; der Vorteil liegt in der einfacheren Planung und der Erreichbarkeit fast jeden Punktes im Gebäude ohne sichtbare Verkleidungen; die Baukosten erhöhen sich, wenn deshalb ein erhöhter Fußbodenaufbau gewählt werden muss.
- Statt eines sich verzweigenden Rohrsystems gibt es auch die Möglichkeit, die einzelnen Räume von einem Verteiler mit jeweils einer Leitung anzufahren; die Leitungslängen sind höher, aber bei den meisten dieser Systeme kann auf Formstücke verzichtet werden. Zudem ergibt sich die Möglichkeit, die Räume einzeln zu regeln.

Der Aufstellort des Lüftungsgerätes entscheidet oftmals, ob eine wirtschaftliche Ausführung der Anlage möglich ist. Wichtig ist nicht nur die wohnungsseitige Verteilung, sondern auch ein möglichst kurzer Weg von Rohren mit einem abweichenden Temperaturniveau: steht das Gerät im unbeheizten Bereich, müssen die Leitungen ins Gebäude hinein gut gedämmt werden (Fort- und Außenluft gegen Kondenswasseranfall dämmen), steht es im beheizten Bereich, müssen Fort- und Außenluftleitung gut gedämmt werden. Es macht wenig Sinn, die Gebäudehülle mit etwa 30 cm Dämmstoff zu versehen, die Leitungen mit gleich niedrigem Temperaturniveau jedoch nur mit 3 cm. Vereinfacht wird die Aufgabe, wenn das Lüftungsgerät möglichst direkt an der thermischen Gebäudehülle steht. Es sollte nicht vergessen werden, frühzeitig die Lage der verschiedenen Anschlussstutzen zu überprüfen, damit vermieden wird, dass mehrere Leitungen samt Dämmung jeweils vollständig um das Gerät herumzuziehen sind, um an die passenden Rohrstutzen zu gelangen. Am Gerät, dem Erdreichwärme-

tauscher und am niedrigsten Punkt der Fortluftleitung ist ein Kondensatablauf mit Geruchsverschluss erforderlich.

Für die Dunstabzugshaube in der Küche empfiehlt sich eine Umlufthaube ( $400\text{--}600\text{ m}^3/\text{h}$ ), um Gerüche und Fett aus der Luft abzusondern, da selbst bei einer Stoßlüftung das Abluftvolumen der Wärmerückgewinnungsanlage im Küchenbereich nur ca.  $100\text{ m}^3/\text{h}$  beträgt. Ein Einbinden der Ablufthaube in die Lüftungsanlage ist zwar prinzipiell möglich, erfordert aber einen sehr guten Filter und Maßnahmen zum Abgleich der o. a. Luftmengen. Außerdem sollten die ersten Meter der Abluftleitung gut überprüfbar und ggf. austauschbar sein, falls sich doch Fett an den Wandungen niederschlägt.

Der Abgleich der Luftströme ist ausschlaggebend für einen effizienten Betrieb der Anlage. Die Disbalance zwischen Zu- und Abluftseite sollte 10 % nicht übersteigen, ansonsten wird durch Leckagen des Gebäudes Luft geführt. Ein Kubikmeter, der nicht über den Wärmetauscher des Lüftungsgerätes geführt wird, entspricht ca.  $8\text{ m}^3$  Luftwechsel mit etwa 80 % Wärmerückgewinnung.

83

Der Abgleich wird im Allgemeinen durch die Installationsfirmen ausgeführt. Das Ergebnis sollte kritisch überprüft werden, weil Ausrüstung und Wissen zu diesem Thema nicht immer ausreichen. Zudem wirken sich auf die Luftbalance der Verschmutzungszustand der Filter, die Lüfterstufe, geöffnete Türen im Gebäude und weitere Aspekte aus. Durch jeden dieser Faktoren ergeben sich Abweichungen. Üblich sind deshalb Geräte mit dynamischer Massenstrombalance durch die Ventilatoren.

Die Regelung der Lüftungsanlage müsste im Idealfall auf die Personenbelegung und die Art der Tätigkeit reagieren und einzelne Räume mit entsprechenden Luftmengen versorgen. Der Gesamtluftwechsel könnte beständig den aktuellen Erfordernissen angepasst werden und Raumluftqualität und Luftwechselrate optimiert werden. Dies erfordert allerdings einen unangemessen hohen Aufwand. Pragmatischerweise sollte davon ausgegangen werden, dass ein Gesamtverbund der Räume einer Wohneinheit gegeben ist. Die Bewohner halten sich für eine begrenzte Zeit in einem Raum auf, so dass sich dort zwar die  $\text{CO}_2$ -Belastung punktuell erhöht, sich aber anschließend – zumindest bei temporär offenen Türen – wieder ausgleicht. Dieser Effekt zeigt sich bei Luftqualitätsmessungen, wenn in einzelnen Räumen z. B. kurzfristig eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration simuliert wird. Es wird allerdings zunehmend kostengünstiger, Feuchte- oder  $\text{CO}_2$ -Sensoren in die Regelung einzubeziehen, sodass diese Optionen bei höherem Komfortanspruch ggf. umgesetzt werden können.

Grundsätzlich sollte jede Anlage jedoch in möglichst einfacher Form die Möglichkeit bieten, den Luftwechsel zu regeln. Ausgehend von der Auslegungsrate (z. B.  $120 \text{ m}^3/\text{h}$  bei vier Personen) ist eine Reduzierung für den Nachtbetrieb oder bei Abwesenheit auf etwa 75 % der Leistung und eine erhöhte Stoßlüftung sinnvoll. Letztere kann z. B. mit einem Taster von der Küche aus betätigt werden, um bei erhöhten Anforderungen wie beim Kochen oder bei der Anwesenheit vieler Gäste problemlos die Lüftungsgegebenheiten anzupassen. Bei einer hohen Personenbelegung im Haus gibt es natürlich die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen. Im Passivhaus reichen vier bis fünf zusätzliche Personen, um durch die Körperwärme ausreichend Heizwärme für einen großen Wohnraum zu haben, so dass auch Wärmeverluste ausgeglichen werden.

## 5.5 Nutzererfahrungen mit der Lüftungstechnik im Wohnungsbau

84

Die Erfahrungen der letzten Jahre mit Lüftungsanlagen im Wohnungsbau zeigen, dass die Bewohner den erhöhten Komfort mindestens so hoch schätzen wie die Energieeffizienz der Anlagen. Umfragen zeigen ein hohes Maß an Zufriedenheit [32], [33]. Als angenehm wird die ständig frische Raumluft empfunden. Die Aktion des Fensteröffnens bei der abendlichen Heimkehr ist nicht mehr erforderlich und in der Nacht ist die Lüftungsfrage ebenfalls ausgestanden. Selbstverständlich können bei Bedarf trotzdem Fenster kurzzeitig geöffnet werden – und außerhalb der Heizsaison wird das Gerät ausgeschaltet und manuell gelüftet.

Als Besucher empfindet man keine „dicke“ Luft, die bei manuell gelüfteten Häusern des Öfteren angetroffen wird. Bauherren von Gebäuden ohne Lüftungsanlage würden sich im Nachhinein oftmals für die Lüftungstechnik entscheiden. Und auch im Geschosswohnungsbau weicht nach ersten Erfahrungen die Skepsis. Am bildhaftesten ist die Anekdote über die Besichtigung eines fertiggestellten Sanierungsvorhabens. Als die Prominenz schließlich eine ältere Bewohnerin sorgenvoll fragt, wie sie denn mit der ungewohnten Technik ihrer neuen Lüftungsanlage zurechtkommt, antwortet diese: „Wissen Sie, ich habe seit dreißig Jahren Öl aus dem Keller geholt und den Ofen mit seinen zahlreichen Tücken versorgt. Glauben Sie mir, mit den drei Lüfterstufen, zwischen denen ich jetzt wählen kann, da komm ich bestens zurecht.“ [34].

## 6 Gebäudetechnik – Restwärmeversorgung und Trinkwassererwärmung

Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, die durch interne Quellen und solare Gewinne nicht ausgeglichen werden, müssen Gebäuden durch Heizsysteme zugeführt werden. Durch die Auswahl der Heiztechnik wird intensiv Einfluss auf den dadurch bedingten Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen genommen.

In Kapitel 2.3.5 wird beschrieben, wie im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) in sinnvoller Weise diesem Tatbestand Rechnung getragen wird (vgl. Abb. 11). Abb. 65 zeigt die Bilanzierung für ein Gebäude mit Standard nach EnEV 2009. Mittels Aufwandszahlen werden Verluste für Übergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung berechnet. Die Aufwendungen für Trinkwassererwärmung und elektrische Hilfsenergien für die Heizanlage werden hinzugerechnet. Mit den Primärenergieaufwandszahlen der eingesetzten Energieträger wird das Ergebnis multipliziert (Abb. 64).

85

Energieträger	DIN 4701-10 kWh <sub>prim</sub> /kWh <sub>End</sub>	CO <sub>2</sub> GEMIS 4.14 kg/kWh <sub>End</sub>
Heizöl	1,1	0,31
Erdgas	1,1	0,25
Flüssiggas	1,1	0,27
Steinkohle	1,1	0,44
Holz	0,2	0,05
Strom-Mix	2,7	0,68
Gas-BHKW 70 %KWK	0,7	-0,07
Öl-BHKW 70 % KWK	0,8	0,10

Abb. 64: Primärenergiefaktoren nach DIN 4701-10 (EnEV) und GEMIS 4.14, CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der Einsatz von regenerativen Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung ist mit günstigen Kennwerten verbunden, Stromnutzung wird entsprechend der ungünstigen primärenergetischen Erzeugungskette mit dem Faktor 2,7 belegt. Das Ergebnis der Berechnung ergibt den Primärenergiebedarf, der die zentrale Anforderungsgröße der EnEV darstellt.

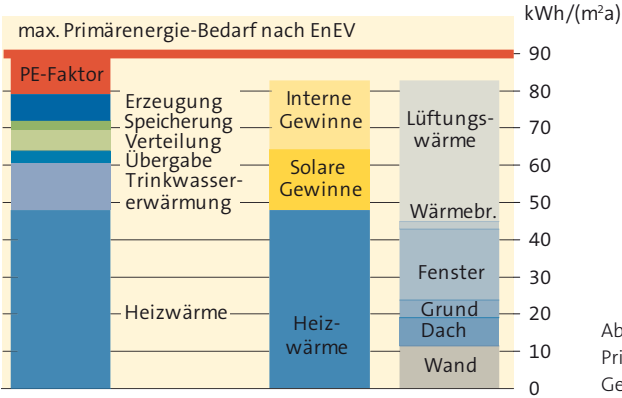


Abb. 65: Bilanzierung des Primärenergiebedarfs für ein Gebäude nach Standard EnEV

Die Auswirkungen des Heizsystems auf Endenergie-, Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emission eines Gebäudes im Vergleich zeigt Abb. 66 am Beispiel eines Einfamilienhauses in Passivbauweise [35].

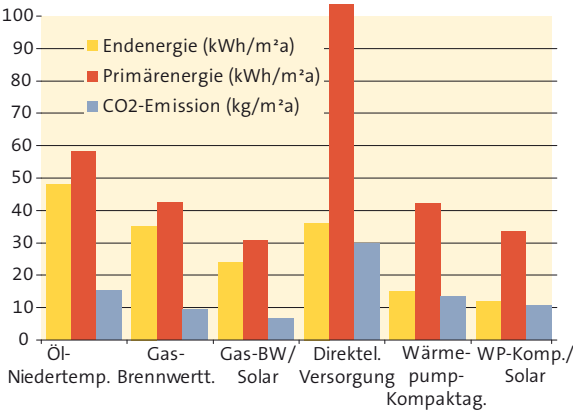


Abb. 66: Ergebnis einer vergleichenden Untersuchung für ein Einfamilienhaus in Passivbauweise

In Abb. 67 werden die primärenergiebezogenen Anlagenaufwandszahlen nach EnEV für verschiedene Heizungssysteme gegenübergestellt. Wird der Gas-Brennwertkessel als Referenzanlage genommen und auf dieser Grundlage eine Optimierung zahlreicher Faktoren vorgenommen, ergeben sich die  $e_p$ -Werte aus Abb. 68.

Anlage für EFH 160 m <sup>2</sup>	e <sub>p</sub>
Öl-/Gas-Niedertemperaturkessel, 70/55 °C	1,58
Gas-Brennwertkessel, 55/40 °C	1,50
Wasser-Wasser-Wärmepumpe, Flächenheizung, 35/28 °C	1,03
Nah-/Fernwärme, fossil, 70/55 °C	0,99
Nah-/Fernwärme, regenerativ, 70/55 °C	0,10
Direktelektrische Beheizung	2,57
Holzpellets	0,48

Abb. 67: Werte für die primärenergiebezogene Anlagenaufwandszahl für verschiedene Anlagenkonfigurationen

Maßnahme	e <sub>p</sub>	Wirkung [%]
Horizontale Verteilung außerhalb therm. Hülle	1,58	3,4
Speicher und Kessel außerhalb therm. Hülle	1,52	1,8
Gas-Brennwerttechnik	1,50	Referenz
Thermostatventil Auslegungsproportionalbereich 1 K	1,46	3,1
Verteilleitungen doppelter EnEV-Standard	1,42	2,1
Optimierung Verteilleitungslänge (33 % Einsparung)	1,40	1,7
Optimierter Gasbrennwertkessel	1,29	7,9
Solarthermie für Brauchwasser (47 % Deckung)	1,14	11,2
Solare Heizungsunterstützung nach EnEV	1,06	8,0
Zu- / Abluftanlage mit 80 % Wärmerückgewinnung	0,82	21,7%
Rahmenbedingungen: Gas-Brennwertanlage, Einfamilienhaus 160 m <sup>2</sup> Wohnfläche; prozentuale Auswirkung der jeweiligen Maßnahme im Vergleich zum vorhergehenden Standard		

Abb. 68: Anlagenoptimierung mit den resultierenden Werten für die primärenergiebezogene Anlagenaufwandszahl e<sub>p</sub>

### Haus mit oder ohne Heizung?

Alle bisher erstellten Gebäude im Bereich der mitteleuropäischen Klimazone benötigen Heizwärmezuführung. Allerdings ist es bei sehr niedrigen Heizleistungen möglich, auf ein separates Heizungs-Verteilsystem zu verzichten und Heizwärme über die dafür ohnehin erforderliche Lüftungsanlage zu verteilen. Das ist allerdings unter komfortablen Rahmenbedingungen erst ab einer Heizleistung von unter 10 W/m<sup>2</sup> möglich. Dies ist eines der Passivhaus-Kriterien, wodurch es grundsätzlich möglich ist, bei diesen Gebäuden einen Kostensprung nach unten zu erreichen.



## 6.1 Heizungssysteme

Die Entwicklung der Heiztechnik führte in den letzten Jahren zu ausgezeichneten Ergebnissen hinsichtlich der Brennstoffausnutzung und Emissionen. Dennoch werden sich Heizsysteme angesichts der durchgreifenden Entwicklungen bei der Gebäudehülle in den nächsten Jahren grundlegend weiterentwickeln. Die Heizleistung sinkt für Eigenheime nach dem Standard der Energieeinsparverordnung auf Werte zwischen 3 und 5 kW, für Passivhäuser auf 1–1,5 kW. Die klassische Heizungsindustrie muss dafür kostengünstige Versorgungssysteme entwickeln, um ihre Klientel nicht an Hersteller von Lüftungsanlagen mit integrierten Wärmepumpen zu verlieren. Den etwas erhöhten Aufwendungen für die verbesserten Maßnahmen an der Gebäudehülle stehen sinkende Kosten für Heizungs- und Lüftungstechnik gegenüber. Zusätzlich wird Solartechnik immer mehr an Bedeutung gewinnen. In der Summe sind damit die Gebäudetechnikkosten höher als bei Standardgebäuden mit Zentralheizung vor zwanzig Jahren. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Bewohner stellt sich durch die Brennstoffeinsparungen jedoch als äußerst vorteilhaft dar.

### 6.1.1 Gasheizung

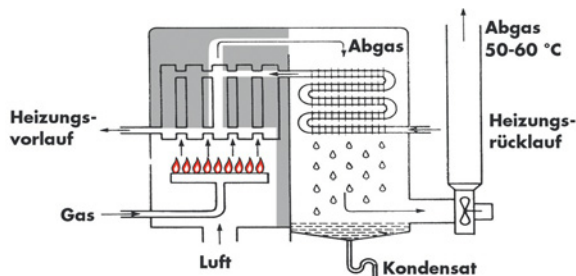


Abb. 69: Schema einer Gasbrennwertheizung

Gebäudeheizung mit Gas hat sich in den letzten Jahrzehnten auf breiter Ebene durchgesetzt. Das Emissionsverhalten wurde extrem optimiert und tendiert bei Bestgeräten zu Werten unter 0,005 g/kWh für Kohlenmonoxid und Stickoxide. Brennwertgeräte nutzen durch die Abkühlung des Abgases die Kondensationswärme des darin enthaltenen Wasserdampfes (Abb. 69). Sie nähern sich hinsichtlich der energetischen Optimierung dem physikalischen Grenzbereich.

Der untere Heizwert ( $H_u$ ) beträgt für Erdgas etwa  $10,4 \text{ kWh/m}^3$ , der obere Heizwert mit Nutzung der Kondensationswärme  $H_o = 11,5 \text{ kWh/m}^3$ . Das ergibt eine nutzbare Brennwertdifferenz von 11 % (Flüssiggas  $H_u = 12,75 \text{ kWh/kg}$ ). Die Kondensationstemperatur für die Brennwertnutzung beträgt bei Erdgas  $59,2^\circ\text{C}$ . Der Nutzungsgrad von Gasheizgeräten liegt bei Altgeräten um 75–85 % in Abhängigkeit von der Betriebsweise, bei Gas-Wandheizkesseln bei 93–96 %, Gas-Spezialheizkesseln bei 94–96 %

und bei Brennwertgeräten bei 105–109 %, wobei die hohen Werte nur mit sehr guten Geräten und niedrigen Rücklauftemperaturen um 30 °C realisierbar sind. Die Kosten für Brennwertgeräte liegen nur geringfügig oberhalb von Niedertemperaturkesseln.

Gasgeräte können nicht nur in Wohnungen, sondern auch in Einfamilienhäusern innerhalb der thermischen Hülle in einer kleinen Nische, im Abstellraum oder Bad mit minimalem Platzaufwand installiert und raumluftunabhängig betrieben werden. Ideal ist zur Kostenoptimierung die Aufstellung im obersten Geschoss mit direkter Abgasabführung über das Dach.

Die nach der EnEV vorgegebenen primärenergiebezogenen Anlagenaufwandszahlen  $e_p$  von Niedertemperatur- und Brennwertkessel-Anlagen werden in Abb. 70 dargestellt. Für Bauten mit einem Heizwärmebedarf unter 40 kWh/(m<sup>2</sup>a) sind in den Tabellen der DIN 4701-10 keine Angaben enthalten. Für Gebäude mit niedrigem Energiebedarf ist es sinnvoll, nicht mit diesen pauschalen Ansätzen zu rechnen, sondern die Anlagenkonstellation im Detail zu optimieren. Dadurch werden in der Regel deutlich günstigere Werte erzielt. Bei Passivhäusern muss darauf hingewiesen werden, dass marktübliche Regelungen oftmals zu erhöhtem Verbrauch und vor allem unnötigen Hilfsstromeinsatz führen. Da es reicht bei Bedarf, z. B. am frühen Abend, die Anlage für dreißig bis sechzig Minuten laufen zu lassen, kann ansonsten der Betrieb von Pumpen abgeschaltet werden und die Regelung in der restlichen Zeit stromlos sein. Innovative Hersteller ermöglichen zunehmend solche sehr einfachen Regelstrategien zusätzlich zu ihrer deutlich aufwendigeren Standardregelung.

Anlagen- beschreibung  $A_N$ in m <sup>2</sup>	Niedertemperatur-Kessel (außerhalb therm. Hülle), zentrale Trinkwasser- bereitung			Brennwert-Kessel (außerhalb therm. Hülle), zentrale Trinkwasser- bereitung			Brennwert-Kessel (innerhalb therm. Hülle), solare Trinkwasserbereitung		
	100	150	200	100	150	200	100	150	200
Heizwärme- bedarf kWh/(m <sup>2</sup> a)	Anlagenaufwandszahl (primärenergiebezogen)								
40	2,29	2,01	1,87	2,11	1,86	1,74	1,21	1,16	1,14
50	2,13	1,89	1,77	1,96	1,75	1,64	1,19	1,15	1,14
60	2,01	1,80	1,70	1,85	1,67	1,57	1,18	1,15	1,13
70	1,92	1,74	1,65	1,76	1,60	1,52	1,17	1,14	1,13
80	1,85	1,69	1,60	1,70	1,55	1,48	1,17	1,14	1,13
90	1,79	1,64	1,57	1,64	1,51	1,45	1,16	1,14	1,13

Abb. 70: Primärenergiebezogene Anlagenaufwandszahl  $e_p$  von Niedertemperatur- und Brennwertkesseln

### 6.1.2 Ölheizung

Die klassische Form der Zentralheizung wird seit Mitte des letzten Jahrhunderts mit Öl-Zentralheizungen durchgeführt. Öl als Brennstoff für die Gebäudeheizung lässt den Hauseigentümer direkt die Ungewissheit der kostengünstigen Energieversorgung spüren, da bei nachlassender Verfügbarkeit durch die börsennotierten Preise extreme Entwicklungssprünge zu verzeichnen sind.

Die Emissionswerte von Ölkesseln wurden in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich verbessert, reichen aber nicht an Vergleichszahlen von Gasgeräten heran. Die Zahlen für den unteren Heizwert ( $H_u$ ) von leichtem Heizöl ( $E_l$ ) liegen bei 10,0 kWh/l (12,1 kWh/kg). Unter Einberechnung des Kondensationswärme-Anteils wird der obere Heizwert ( $H_o$ ) mit 10,6 kWh/l erreicht. Die Kondensationstemperatur liegt bei 48 °C. Die Nutzungsgrade liegen bei guten Öl-Blaubrennern bei 94 bis 96 %, bei Geräten mit Brennwertnutzung können Werte von 100–102 % erreicht werden. Altgeräte liegen je nach Betriebsweise zwischen 70 und 85 %. Es ist mithin durch Installation von Neuanlagen eine sehr hohe Energieeinsparung möglich. Die Kosten von Brennwertgeräten liegen auf Grund des hohen Aufwandes für die Wärmetauscherflächen deutlich höher als konventionelle Kessel.

Bei der Öllagerung sollte neben den üblichen Sicherheitsvorkehrungen darauf geachtet werden, dass keine Geruchs- und Schadstoffbelästigung entsteht, z. B. kann durch die Thermik die belastete Luft aus dem Tankraum im Keller in die Aufenthaltsräume getragen werden.

### 6.1.3 Festbrennstoffe und Biomasse

Brennstoffe aus nachwachsenden regionalen Rohstoffen, wie z. B. Holzhackschnitzel und Holz-Pellets, stellen durch die indirekte Nutzung der Solarenergie eine Form der erneuerbaren Energien dar. Hinsichtlich der Klimasituation ist ihre Verwendung ein äußerst sinnvoller Lösungsansatz, wenn die biogenen Brennstoffe aus regionalen Wirtschaftskreisläufen nachhaltig bereitgestellt werden können. Heimische Biomasse wird allerdings für die Bereitstellung komfortabler Raumwärme bei weitem nicht ausreichend sein, wenn der Heizwärmebedarf von Neubauten und Bestandsgebäuden nicht drastisch reduziert wird. Eine weitere wichtige Voraussetzung für den breiten Einsatz von Biomasse liegt in der deutlichen Reduktion der Emissionen.

Festbrennstofföfen bestehen aus einer Brennkammer zum Ausbrand des Holzgases und einem Wärmetauscher zur Weiterleitung der gewonnenen Energie. Bei Holzöfen werden etwa 60 % des Holzgewichtes bei Temperaturen zwischen 300 und 400 °C zu Holzgas. Die Freisetzung des Gases sollte kontinuierlich geschehen, damit die Brennerleistung nicht überschritten wird und als Folge unvollständig verbranntes Holzgas den Ofen verlässt. Dies führt zu einem schlechten Wirkungsgrad und einer Abgasbelas-

tungen durch Ruß und Teer. Zur optimalen Verbrennung sollten eine hohe Temperatur in der Brennkammer und damit hohe Flammtemperaturen vorhanden sein. Erstluft wird dazu dem Feuer z.B. über den Feuerungsrost zugeführt. Vergaste Brennstoffanteile und Schwelgase werden mit vorgewärmter Zweitluft vermischt und in der Nachverbrennungszone unter möglichst hohen Temperaturen von 600–800 °C verbrannt. Die Effizienz der Nachverbrennung ist essenziell für Wirkungsgrad und geringe Emissionen.

Die Emissionen liegen in der Anheizphase extrem hoch und übertreffen oftmals die Abgasmengen im Betriebszustand um mehrere Zehnerpotenzen. Empfehlenswert ist es, Holzheizsysteme in Verbindung mit einem Pufferspeicher zu wählen, der Wärme für mehrere Tage vorhalten kann. Die weitere Einbindung von Solaranlagen ergänzt solch ein Konzept gut, um im Sommer den Ofen möglichst nicht anheizen zu müssen. Sowohl hinsichtlich der Emissionen als auch des Wirkungsgrades ist am sinnvollsten der Einsatz von Pelletöfen (Abb. 71). Sie sind genauso wie Hackschnitzel-Heizungen automatisch zu befeuern. Für sehr energiesparende Gebäude sind sie einsetzbar mit 20 % Wärmeleistung in den Raum und 80 % in den Warmwasserspeicher.

91

Bei gleichzeitigem Einsatz von Lüftungsanlagen ist darauf zu achten, dass durch einen eventuell auftretenden Unterdruck in den Räumen kein Abgas in den Aufenthaltsbereich gesaugt wird, da dann Vergiftungsgefahr besteht. Bauaufsichtliche Zulassungen für Festbrennstofföfen als „raumluftunabhängige“ Feuerungsstätten werden von mehreren Herstellern angeboten. Ebenso werden seitens einiger Lüftungsanlagenhersteller Geräteregelelungen für gleichzeitigen Einsatz von Festbrennstoff-Feuerstätten angeboten.



Abb. 71: Pelletofen

### 6.1.4 Direktelektrische Heizung

Wegen des hohen Primärenergieeinsatzes für die Erzeugung von Strom ist eine direktelektrische Beheizung von Gebäuden nicht sinnvoll. Das gilt grundsätzlich auch für Gebäude mit extrem niedrigem Heizwärmebedarf wie z.B. Passivhäuser. Für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom werden im Durchschnitt im Kraftwerk knapp 2,7 kWh Primärenergie verfeuert.

Werden extrem energieeffiziente Gebäude allerdings zu etwa 90% durch ein Solar-system oder ein Wärmepumpenkompaktaggregat beheizt, kann ein minimaler Rest bis zu etwa drei Kilowattstunden pro m<sup>2</sup> Wohnfläche im Jahr direktelektrisch bereitgestellt werden, ohne die primärenergetische Bilanz zu sehr zu belasten. Wird dieser Anteil dann noch über einen Anbieter von regenerativ bereitgestelltem Strom geliefert, ist die Ökobilanz einwandfrei.

### 6.1.5 Wärmepumpe

Elektrisch betriebene Wärmepumpen können bei günstigen Rahmenbedingungen äußerst sinnvoll eingesetzt werden (Abb. 72). Das Anlagenkonzept sollte so ausgelegt sein, dass die Leistungszahl ( $\epsilon$ ) im Jahresmittel möglichst über 4 liegt. Gute Anlagen überschreiten diesen Wert deutlich. Dazu gilt grundsätzlich: Je niedriger der Temperaturabstand zwischen der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage, desto höher ist  $\epsilon$ . Die Wärmequelle kann Umgebungswärme aus dem Erdreich, dem Grundwasser, der Umgebungsluft oder die Restwärme aus anderen Systemen sein.

Niedrigtemperatur-Heizsysteme wie z. B. Flächenheizungen mit Vorlauftemperaturen von 30–35 °C sind hier vorteilhaft. Bei der Festlegung der Leistungszahl ist die Warmwasserbereitung zu beachten, die auf Grund des höheren erforderlichen Temperaturniveaus zu einer Verschlechterung des Kennwerts führt.

Es ist zu empfehlen, Wärmepumpen mit dem Einsatz von thermischen Solaranlagen zu verbinden, um den weniger effizienten Bereich der Warmwasserbereitung zu einem größeren Anteil regenerativ zu versorgen. Darüber hinausgehend kann in Verbindung mit einer größeren solarthermischen Anlage der solare Eintrag auch als Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt werden. Der Vorteil liegt darin, dass bereits solare Gewinne auf einem minimalen Temperaturniveau durch die Wärmepumpe nutzbar werden. Der Temperaturabstand zwischen der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage wird auf diese Weise in weiten Teilen der Heizzeit sehr gering und ermöglicht mithin eine sehr günstige Leistungszahl.

Wärmepumpen eignen sich in Verbindung mit einem Flächenheizsystem zum Kühlen eines Gebäudes mit nur geringem investivem Mehraufwand.

Gasmotor-Wärmepumpen erlauben eine erhöhte Ausnutzung des Brennstoffs gegenüber Gasbrennwertgeräten in Höhe von ca. 20 %. Auf Grund der höheren Investitionskosten und Betriebskosten ist im Einzelfall eine sehr genaue Analyse erforderlich, ob die Wärmepumpe effektiv einsetzbar ist. Der Einsatz ist i.d.R. nicht in Einfamilienhäusern, sondern nur bei größeren Leistungen im Rahmen von Nahwärmesystemen sinnvoll.

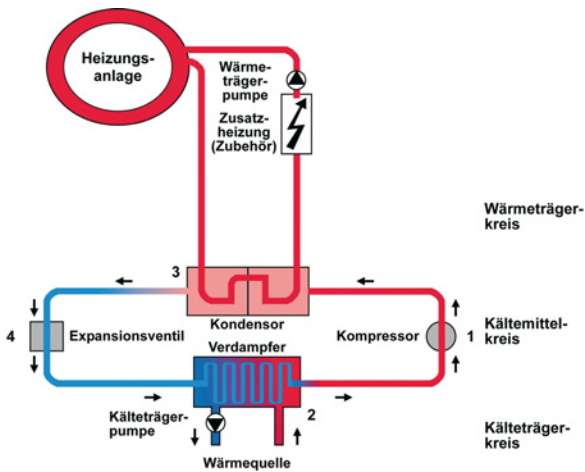


Abb. 72: Funktionsschema einer Wärmepumpe

### 6.1.6 Wärmepumpen-Kompaktaggregat

Bei Gebäuden mit extrem geringem Heizwärmebedarf, z.B. bei Passivhäusern, kann durch die Kombination von Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung und Kleinstwärmepumpe eine sinnvolle Heizungsversorgung sichergestellt werden. Bei solch einem Wärmepumpen-Kompaktaggregat wird die Restenergie in der Fortluft der Lüftungsanlage mittels einer Kleinstwärmepumpe mit zwei Verflüssigern für die Beheizung des Gebäudes und die Warmwasserbereitung genutzt. Die Wärmepumpe führt die Wärme alternativ entweder in die Luft direkt über das Lüftungssystem oder in den Warmwasserspeicher (Abb. 73).

Den größten Teil des Jahres reicht die Wärmemenge aus, um Warmwasser- und Heizwärmebedarf zu decken. Nur in sehr kalten Phasen und bei besonders hohem Warmwasserbedarf muss direktelektrisch nachgeheizt werden: das Warmwasser über den Warmwasserspeicher und die Raumheizung über kleine Elektroheizkörper oder besser zwei Heizkörper z.B. im Bad und Wohnzimmer, die an den Speicher durch eine einfache Zirkulationsleitung angebunden sind. Durch solch einen zusätzlichen Heizkörper kann die transportierte Wärmemenge in Sondersituationen von der Lüftungsanlage abgekoppelt werden.

Die Vorteile des Wärmepumpenkompaktaggregats liegen vor allem in folgenden Punkten:

- keine Kosten für die Bereitstellung eines weiteren Wärmeträgers (Gas, Öl, Holz),
- Wegfall des konventionellen Warmwasser-Heizsystems,
- kompakte Installation auf engem Raum,
- bei Eintritt in die Serienfertigung kostengünstiger als die meisten anderen Systeme.

Als Nachteile stehen dem gegenüber:

- keine individuelle Temperaturregelung der einzelnen Räume,
- Anfälligkeit gegenüber erhöhten Leistungsanforderungen durch Nutzerverhalten oder mangelnde Qualitätssicherung beim Gebäude – erhöhte direktelektrische Nachheizung schlägt sich durch den Primärenergiefaktor negativ in der Gesamtbilanz nieder.

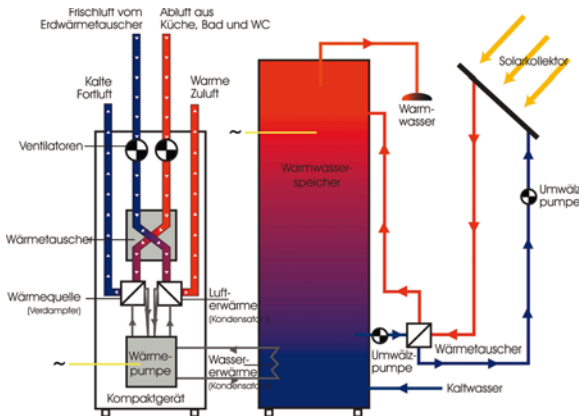


Abb. 73: Funktionsschema eines Wärmepumpen-Kompaktaggregats

### 6.1.7 Blockheizkraftwerk (BHKW)

Werden Wärme und Strom mit einem kleinen Aggregat dezentral bereitgestellt, so kann die Abwärme bei der Stromerzeugung ohne hohen Aufwand vor Ort genutzt werden (Abb. 74, Abb. 75). Der Vorteil dieser Anlagen besteht in der Möglichkeit, Strom- und Wärmebereitstellung individuell auf die jeweilige Anwendung hin zu optimieren und ohne hohe Systemverluste die freiwerdende Wärmeenergie vor Ort für Prozess- oder Heizwärme zu nutzen. Die Verluste bei einem BHKW betragen etwa 10 % gegenüber 35–60 % bei herkömmlicher getrennter Strom- und Wärmeerzeugung in zentralen Kraftwerken und dezentralen Heizungskesseln. BHKW-Module sparen primärenergetisch 30 bis 40 % gegenüber der Standardtechnik ein.



Abb. 74: Blick in ein Kleinst-BHKW



Abb. 75: BHKW-Aggregat in einer Heizzentrale

Bei der Nutzung im Wohn- und Bürobereich zur Raumheizung und Warmwassererwärmung werden die Anlagen vor allem nach den Erfordernissen der Wärmeerzeugung geregelt. Die Leistung des BHKWs wird auf etwa 20–30 % der maximalen Heizleistung ausgelegt. Auf Grund des Verlaufs der Jahresdauerlinie beträgt der Anteil der geleisteten Arbeit 60–80 %. Die Spitzenleistung wird durch einen Kessel oder sonstigen Energieerzeuger erbracht, der nur eine sehr geringe Jahreslaufzeit aufweist. Ziel der Anlagenkonzeption muss eine möglichst hohe Jahreslaufzeit des BHKW-Moduls von 4.000 bis 6.000 Vollbenutzungsstunden sein, um eine ausreichende Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Günstig sind Gebäude mit hohem Wärmedämmstandard, so dass auf Grund der gleich bleibenden Brauchwarmwassererwärmung auch im Sommer noch ein hoher Anteil an Wärmeerzeugung erforderlich ist.

Anlagengrößen für KWK-Module reichen von  $5 \text{ kW}_{\text{elektrisch}}/10 \text{ kW}_{\text{thermisch}}$  (Mehrfamilienhäuser, Kosten ca.  $2.000 \text{ €/kW}_{\text{elektrisch}}$ ) bis hinein in den Megawattbereich (Gewerbebetriebe, Nahwärme für Wohngebiete, Kosten ca.  $1.000 \text{ €/kW}_{\text{elektrisch}}$ ). Die Emissionen



von BHKW-Anlagen orientieren sich an Werten der TA-Luft. Dies gilt auch für Kleinanlagen, die in ihrer Auslegung der Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen unterliegen.

BHKW-Anlagen eignen sich im Allgemeinen nicht für Ein- und Zweifamilienhäuser, da ein wirtschaftlicher Betrieb auf Grund der geringen Wärmeverbräuche nicht gegeben ist.

### 6.1.8 Brennstoffzelle

Wasserstofftechnik wird in einigen Bereichen wie der Chemie und Raumfahrttechnik bereits seit Jahrzehnten angewandt. Eine vielversprechende weitere Nutzungsmöglichkeit liegt in der Entwicklung der Brennstoffzelle. Sie funktioniert nach dem Grundprinzip der ihr verwandten Primärzelle (Batterie), jedoch mit dem Unterschied der kontinuierlichen Zufuhr ihrer Reaktionsstoffe. Dafür kommen Gase oder Flüssigkeiten in Frage, deren Reaktionsprodukte ebenfalls flüssig oder gasförmig sind, besonders Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ). Derzeit wird vor allem Erdgas als Ausgangsstoff verwandt, aus dem über einen vorgeschalteten Reformator Wasserstoff gewonnen wird. Die Brennstoffzelle besteht vor allem aus zwei porösen Elektrodenflächen mit Gaszuführung (Anode: Brenngas, Kathode: Sauerstoff) getrennt durch einen Elektrolyten (Abb. 76). Mittelfristig können Brennstoffzellen als Alternative zu motorischen BHKW-Modulen verwandt werden. Die Emissionswerte werden deutlich niedriger liegen. Erste Pilotanlagen laufen bereits, mit einer Markteinführung ist in 5 bis 10 Jahren zu rechnen.

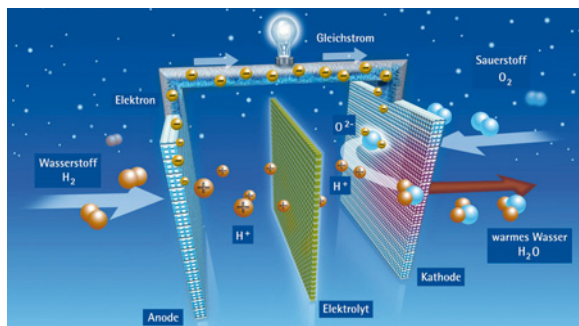


Abb. 76: Funktionsschema einer Brennstoffzelle

## 6.2 Heizwärmeverteilung

Die Verteilung der Wärme im Gebäude kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen: in der üblichen Form des zentralen Warmwasser-Heizungssystems oder über die Luft. In allen Fällen sollte die Leitungsführung innerhalb der thermischen Hülle verlaufen (Abb. 77), damit möglichst alle Leitungsverluste dem Gebäude als Heizwärme zur Verfügung stehen. Alle Leitungen, die trotz optimierter Planung in unbeheizten Bereichen

geführt werden, müssen nach den Vorschriften der Energieeinsparverordnung gedämmt werden, möglichst darüber hinaus.

Warmwasser-Heizleitungen sind grundsätzlich im Zweirohr-System auszuführen, um an allen Heizflächen die gleiche Temperatur zu erreichen und eine möglichst niedrige Vorlauf-Temperatur zu ermöglichen. Bei sehr gut gedämmten Gebäuden, bei denen keine innere Bauteiloberfläche mehr als 4 Kelvin unterhalb der erforderlichen Raumlufttemperatur liegt (vgl. Kap. 3.1.1), können sehr kurze Heizungsanbindungen gewählt werden – die Heizkörper müssen nicht unter den Fenstern liegen sondern können an den Innenwänden montiert werden.



Abb. 77: Verteilleitungen innerhalb der gedämmten Hülle

Heizwärmeverteilung über Flächenheizungen an Wand oder Boden kann den Wohnkomfort erhöhen, bringt aber bei hoch energieeffizienten Gebäuden keine besonderen Vorteile. Es ist meistens deutlich sinnvoller, diese Mehrkosten in die Gebäudehülle zu investieren. Bei hochwärmegedämmten Gebäuden mit einer Heizlast unterhalb  $10 \text{ W/m}^2$  (Passivhaus-Kriterium) kann die Wärmeverteilung bei hohem Komfort über die ohnehin erforderliche Lüftungsanlage erfolgen (vgl. Kap. 5.1.5).

### 6.3 Heizflächen

Je besser ein Gebäude gedämmt ist, desto einfacher ist es, die Heizflächen kostengünstig und komfortabel auszubilden. In solch einem Fall liegen die raumseitigen Oberflächentemperaturen der Außenbauteile bereits ohne zusätzliche Heizwärmezufuhr nur knapp unterhalb der Raumtemperatur und die zuzuführende Wärmemenge ist sehr gering.

Es sind folgende Faktoren für ein gesundes und ein behagliches Raumklima ausschlaggebend:

- Heizflächentemperatur: je geringer, desto besser; Maximaltemperatur  $55^\circ\text{C}$  (bei höheren Temperaturen beginnen Pyrolysereaktionen in Bezug auf Staub und angelagerte Schadstoffe).
- Raumtemperatur-Unterschiede: möglichst gleiche Verteilung der Temperatur, vor allem hinsichtlich der vertikalen Schichtung.

- möglichst geringe Luftbewegung durch Konvektion, einerseits aus Behaglichkeitskriterien, vor allem jedoch zur Vermeidung von Staubaufwirbelung.
- Niedertemperatursysteme erwärmen oftmals direkt oder indirekt Flächen, von denen die Wärme in Form von Strahlung abgegeben wird. Ein hoher Anteil an Strahlungswärme ist bei niedrigen Heiztemperaturen nicht wichtig, weil der negative Einfluss der Konvektion nicht auftritt.
- Reinigungsmöglichkeiten für Staubablagerungen an den Heizflächen müssen gegeben sein.

Folgende Heizflächen stehen für den Wohnungsbau üblicherweise zur Auswahl:

- Heizkörper sind technisch gesehen Wasser-Luft-Wärmetauscher. Die Wärme des durchfließenden Warmwassers soll möglichst effizient auf die Luft übertragen werden. Moderne Heizkörper mit geringem Wasserinhalt reagieren am schnellsten auf Regelungsänderungen. In hochwärmedämmten Häusern reichen einfache Heizkörper für einen hohen Komfort völlig aus.
- Randheizleisten stellen eine Sonderform von Heizkörpern in sehr niedriger Bauhöhe dar. Ziel ist eine gleichmäßige Erwärmung aller Wandflächen, indem die Wärmezuführung im gesamten Sockelbereich verteilt stattfindet und dadurch ein hoher Strahlungswärmeanteil erzielt wird. Die Vorteile kommen erst bei hohem Heizwärmebedarf des Gebäudes richtig zum Tragen.
- Fußbodenheizungen sind wegen ihrer Masse nur langsam regelbar und werden deshalb als unvereinbar mit passiver Solarnutzung angesehen. Das ist grundsätzlich richtig, verliert allerdings seine Relevanz, wenn die Oberflächen-Heiztemperatur 22 °C nicht stark übersteigt, was zur Beheizung von gut gedämmten Gebäuden ausreicht. Die Raumtemperatur bei Sonneneinstrahlung liegt im gleichen Temperaturbereich. Aus physiologischen Gründen sollte die Oberflächentemperatur von Fußbodenheizungen 25 °C prinzipiell nicht überschreiten.
- Wandflächenheizungen bestehen aus Rohrregistern mit einer Vorlaufleitung an der oberen Begrenzung, dünnen Leitungen im Heizbereich und einer Rücklaufsammeleitung am unteren Rand. Darauf wird Putz aufgebracht (Abb. 78). Die Heizleistung pro m<sup>2</sup> Wandfläche beträgt 100–120 Watt bei ca. 50/30 °C Vor-/Rücklauf-temperatur. Sinnvoll sind niedrigere Vorlauftemperaturen von 30–40 °C. Auf Grund der etwas geringeren raumseitigen Masse ist das Regelungsverhalten etwas günstiger als bei Fußbodenheizungen.
- Betonkerntemperierung als eine kosteneffiziente Sonderform der Fußboden- und Flächenheizung mit minimierten Vorlauftemperaturen.

Alle Flächenheizsysteme eignen sich auch zum Kühlen eines Gebäudes.



Abb. 78: Rohrsystem einer Wandflächenheizung



Abb. 79: Betonkernaktivierung

## 6.4 Regelung

Die Heizungsregelung hat die Aufgabe, ausreichende Wärme und Behaglichkeit im gesamten Gebäude sicherzustellen und dabei den Heizflächen die geringstmögliche Wärmemenge zukommen zu lassen. Dabei sind zahlreiche Faktoren zu berücksichtigen:

- Transmissionswärmeverluste, bedingt durch die Außentemperatur,
- Lüftungswärmeverluste bzw. Änderung der Lüftungsverhältnisse,
- Erwärmung durch solare Einstrahlung,
- Erwärmung durch interne Quellen (Bewohner, eingeschaltete Elektrogeräte),
- Unterscheidung des Wärmebedarfs einzelner Räume.

Bei schlecht gedämmten Gebäuden überwiegen Transmissionswärmeverluste, so dass andere Einflüsse vergleichsweise gering sind. Je besser der Wärmeschutz ist, desto höhere Anforderungen müssen an die Heizungsregelung gestellt werden. Es ist eine schnelle Reaktion auf Temperaturveränderungen erforderlich. Bei sehr energiesparenden Gebäuden sinkt die Temperatur bei ausbleibender Heizleistung nur sehr langsam ab (0,5–1 Kelvin am Tag), deshalb kann die Regelung sehr einfach gestaltet werden. Heizleistung kann z. B. abends zugeführt werden, wenn eine erhöhte Raumlufttemperatur aus Komfortgründen gewünscht wird. Diese Art der Regelung gilt vor allem für die derzeit überdimensionierten Heizleistungen vieler Systeme.

Die technischen Eingriffsmöglichkeiten bei einer Heizanlage bestehen in:

- Anpassung der Vorlauftemperatur an den Wärmebedarf in Abhängigkeit von Außen- und Raumlufttemperatur,
- Regelung der zirkulierenden Wassermenge durch die Pumpenleistung,
- Reduzierung des Wasserdurchflusses einzelner Heizflächen zur unterschiedlichen Beheizung verschiedener Räume,
- Abstellen von Wärmeerzeuger und Heizungszirkulation bei fehlendem Wärmebedarf,

- Temperaturregelung (Sollwertverstellung) durch den Nutzer für individuelle Bedürfnisse der Temperaturgestaltung; dies kann mit einer Zeitregelung verbunden werden.

Intelligente Regelungssysteme auf vernetzter EDV-Basis (BUS-Systeme etc.) werden zunehmend auch im Wohnungsbau eingesetzt. Ein Einbau ist grundsätzlich sinnvoll und ermöglicht viele weitere Regelungsoptionen, sollte aber von der Kosten-Nutzen-Relation her abgewogen werden.

Derzeit besteht das Problem, dass viele Heizanlagen einen deutlich zu hohen Hilfsenergiebedarf aufweisen. Heizanlage und Zirkulationspumpen sollten nur dann laufen, wenn sie tatsächlich benötigt werden, ansonsten müssen sie vollständig ausgeschaltet sein. Die Regelung der Anlage darf nur eine minimale Stand-by-Leistung haben.

100

## 6.5 Trinkwassererwärmung

In Bestandsgebäuden werden 10 bis 20 % des Energieverbrauchs im Haushalt für die Bereitung des Warmwassers benötigt. Nach EnEV werden rechnerisch 12,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) angesetzt. Abb. 80 zeigt modellhaft den Vergleich verschiedener Versorgungssysteme hinsichtlich der Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der tatsächliche Verbrauch beim Warmwasser deutlich stärker von den Nutzern abhängig ist als bei der Heizung. Allerdings sind zahlreiche Einsparmöglichkeiten gegeben:

- Sanitärbereiche horizontal und vertikal eng beieinander anordnen,
- Minimierung der Steigstränge und Verteilleitungen in Länge und Querschnitt,
- Besonders enge Anbindung zwischen Warmwasserspeicher und den Hauptverbrauchsstellen wie Waschbecken und Dusche im Bad,
- getrennte Zuführung der Küchenleitung mit einem minimierten Rohrquerschnitt (wenn die Küche etwas Abstand zu den sonstigen Sanitärbereichen hat, fällt dies am wenigsten ins Gewicht),
- Warme Leitungen innerhalb der beheizten Gebäudehülle führen,
- Verzicht auf Zirkulation (falls doch: keine Zeitschaltuhr sondern Anforderungstaster in Bad und Küche, mit denen bei Bedarf die Zirkulationspumpe für den erforderlichen Zeitraum in Betrieb gesetzt wird),
- Warmwasseranschlüsse für Spülmaschine und Waschmaschine (auf geeignete Geräte oder Zwischengeräte achten),
- Reduzierung der Durchflussmengen an den Zapfstellen und in der Dusche,
- Einhebel-Spararmaturen, die in der Standard-Mittelstellung kein Warmwasser ziehen.

	Anlage mit BWW-Speicher			Durchlauferhitzer	
	Ölkessel	Gasbrennwertgerät	Strom	Gas	Strom
Warmwasser-Nutzwärme pro Jahr	2.710 kWh	2.710 kWh	2.710 kWh	2.710 kWh	2.710 kWh
Erzeugerverluste (Faktor)	1,2	1,05	1,05	1,2	1,1
Speicherverluste (Faktor)	1,2	1,2	1,2	1	1
Zirkulationsverluste (Faktor)	1,15	1,15	1,15	1	1
Energieverbrauch pro Jahr (kWh)	4.490 kWh	3.930 kWh	3.930 kWh	3.550 kWh	2.980 kWh
Kosten je kWh (Endenergie)	0,09 €	0,09 €	0,20 €	0,09 €	0,20 €
Kosten pro Jahr	404,10 €	353,70 €	786,00 €	319,50 €	596,00 €
CO <sub>2</sub> -Emissionen im Jahr (kg)	1.316	900	2.708	813	2.053
Kostenvergleich Solaranlage					
Einsparung bei 55% Deckungsgrad (€/a)	222,26 €	194,54 €	432,30 €	175,73 €	327,80 €
Einsparung bei 70% Deckungsgrad (€/a)	282,87 €	247,59 €	550,20 €	223,65 €	417,20 €
Rahmenbedingungen: 4-Personen-Haushalt, Verbrauch je Person und Tag: 40 l, $\Delta_t$ : 50–10 = 40 K; 0,00116 kWh/l Grad					

Abb. 80: Vergleich von Systemen zur Warmwasserbereitung für einen 4-Personen-Haushalt

## 6.6 Solarthermie

Die aktive Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärme mittels Sonnenkollektoren wird als Solarthermie bezeichnet. Für Gebäude findet diese Technik in den Bereichen der Wassererwärmung und Heizung Anwendung.

Sonnenstrahlung (Wellenlängen von 0,29 bis 2,5  $\mu\text{m}$ ) trifft mit ca. 1.340 W/m<sup>2</sup> auf die Atmosphäre der Erde, verliert durch Reflexion und Absorption durch die atmosphärische Hülle an Intensität und gelangt bei wolkenlosem Himmel mit etwa 1.000 W/m<sup>2</sup> auf die Erde. An einem trübem Wintertag kann sich die Leistung auf 50 W/m<sup>2</sup> verringern. Die jährliche Einstrahlung auf horizontale bzw. 45° nach Süden geneigte Flächen beträgt 900–1.200 kWh/m<sup>2</sup>. Die Ausrichtung und Neigung der Solarkollektoren ist wesentlich für den Ertrag. Abb. 81 zeigt, dass mittlere Abweichungen vom Optimum nur zu relativ geringen Ertragseinbußen führen.

### 6.6.1 Kollektoren

Kollektoren bestehen grundsätzlich aus folgenden Bauteilen:

Die Glasabdeckung gewährleistet Schutz gegenüber Witterungseinflüssen und Beschädigungen. Das Glas ist meist 3 mm stark, entspiegelt und hochtransparent. Der Anteil der senkrecht durch dieses Glas hindurchtretenden Sonnenstrahlung wird mit dem Transmissionsfaktor  $\tau$  bezeichnet, der bei guten Gläsern im Bereich von 0,9–0,92 liegt.

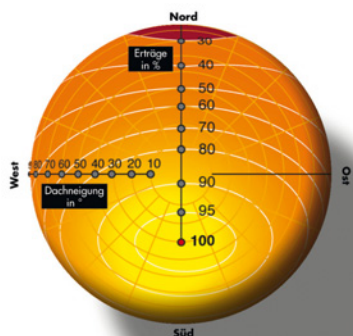


Abb. 81: Solare Ausbeute in Abhängigkeit von der Ausrichtung und Dachneigung der Kollektoren

Der Absorber besteht meistens aus Kupferrohr in Verbindung mit Lamellen aus Kupfer oder Aluminium, die direkt der Sonne zugewandt und mit einer selektiven Beschichtung versehen sind. Die Beschichtung bewirkt, dass der Absorber ein hohes Absorptionsvermögen für die einfallende Solarstrahlung aufweist, jedoch nur geringe Wärmeverluste durch Abstrahlung im infraroten Bereich hat. Bis vor wenigen Jahren dominierten galvanisch aufgebraute Schwarzchrom- und Schwarznickelbeschichtungen den Markt. Diese erfordern hohe Aufwendungen für Umwelt- und Gesundheitsschutz bei Produktion und Entsorgung.

Aktuelle Verfahren arbeiten z.B. mit einer Titan-Nitrit-Oxid-Schicht in einer hundertmal dünneren Schichtdicke. Die Umweltbelastung bei der Produktion liegt deutlich niedriger und die Bleche können ohne Sonderbehandlung entsorgt werden. Der Energieaufwand für die Beschichtung liegt mit  $1,0\text{--}1,2\text{ kWh/m}^2$  deutlich günstiger als bei Schwarzchrombeschichtung ( $2,7\text{--}25\text{ kWh/m}^2$ ). Solche TiNOX-Absorber weisen zudem etwa 10 % Mehrerträge auf als Schwarzchromkollektoren. Weitere Verfahren mit einer Keramik-Metall-Struktur (Cermets) oder Kohlenwasserstoffen mit Titan- oder Chromdotierung sind marktverfügbar bzw. in der Entwicklung.

Das Langzeitverhalten der Absorber muss gemäß der Internationalen Energieagentur (IEA Task X) nach einer Mindestlebensdauer von 25 Jahren eine Kollektorleistung von 95 % des Anfangswertes gewährleisten [36]. Galvanische Beschichtungen haben diese Stabilität bereits in Langzeituntersuchungen bewiesen. Tests lassen auch für die neueren Materialien ähnliche Ergebnisse erwarten.

Der Unterschied zwischen Arbeits- und Außentemperatur führt zu Wärmeverlusten des Absorbers. Wärmedämmung stellt sicher, dass der Einstrahlungsgewinn mit möglichst hohem Wirkungsgrad an das System weitergegeben wird. Bei Flachkollektoren werden die Rückseiten mit 60–80 mm hitzebeständiger Dämmung versehen. Der U-Wert des Gesamtkollektors (Vorder- und Rückseite) beträgt ca.  $4\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ . Dieser Wert ist ausschlaggebend für den Wirkungsgrad. Bei Vakuumkollektoren stellt das Vakuum der Röhre die Wärmedämmung dar.

Bei solchen Flachkollektoren betragen die jährlichen Kollektorenergieerträge ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste durch Rohrleitungen und Wärmespeicher 400 bis 500 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Abb. 82, Abb. 83, Abb. 84). Der Kollektor-Wirkungsgrad bei 800 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und Umgebungstemperatur (z. B. Absorber 25 °C, Außenluft 25 °C) beträgt zwischen 72,9 und 82,5 %. Bei 70 ° Übertemperatur der Absorberfläche gegenüber der Außenluft (z. B. Absorber 70 °C, Außenluft 0 °C) betragen die Wirkungsgrade zwischen 27,8 und 39,7 % [37].

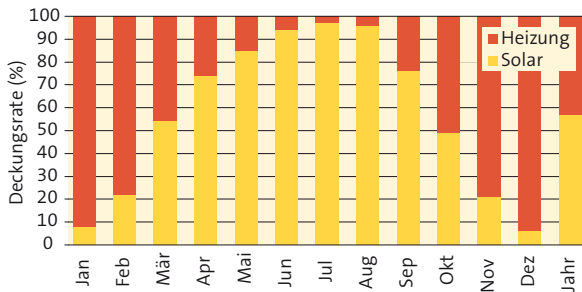


Abb. 82: Symptomatische monatliche solare Deckungs-raten einer standardmäßig ausgelegten Solaranlage (Warmwassererwärmung)

Vakuum-Röhrenkollektoren werden mit Glasröhren (z. B. aus Borosilikatglas mit Wandungsdicken von 2,5 mm) erstellt. Die Dämmung wird mittels Vakuum von ca. 10–8 bar (= 10<sup>-3</sup> Pa) erzielt. Am oberen Ende der Röhren schafft eine Metallkappe o. ä. in Verbindung mit einer Rohrdurchführung einen luftdichten Abschluss. Von dort erfolgt der Abtransport der gewonnenen Wärme durch ein mit Dämmstoffen ummanteltes Vor- und Rücklaufrohr. Die Ausrichtung der Absorber kann bei einigen Kollektortypen abweichend von der Montageebene eingestellt werden. Dies erfolgt durch Drehen der Röhren oder der Absorberflächen innerhalb der Röhren.

Die jährlichen Kollektorenergieerträge ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste durch Rohrleitungen und Wärmespeicher betragen 480–600 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Kollektor-Wirkungsgrad bei 800 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und Umgebungstemperatur (z. B. Absorber 25 °C, Außenluft 25 °C) beträgt zwischen 55,7 und 78,9 %, d. h. weniger als die Werte von Flachkollektoren. Der Vorteil der Vakuumkollektoren liegt jedoch in der hervorragenden Dämmung, so dass der Wirkungsgrad bei 70 °C Übertemperatur der Absorberfläche gegenüber der Außenluft (z. B. Absorber 70 °C, Außenluft 0 °C) deutlich höher liegt als bei anderen Bauarten: die gemessenen Wirkungsgrade betragen zwischen 47,3 und 63,9 % [37]. Besonders für Nutzungsschwerpunkte im Winter weisen Röhrenkollektoren deshalb Vorteile auf. Sonderformen der Vakuumkollektoren werden mit Heatpipe erstellt oder als Flachkollektoren mit Vakuum- bzw. Unterdruckausbildung.





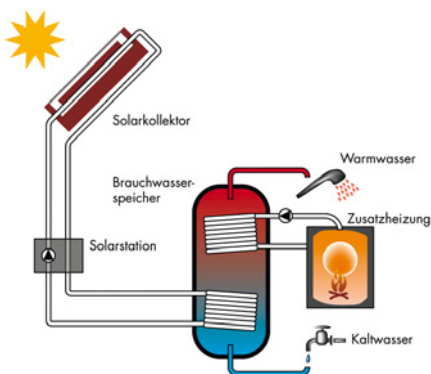
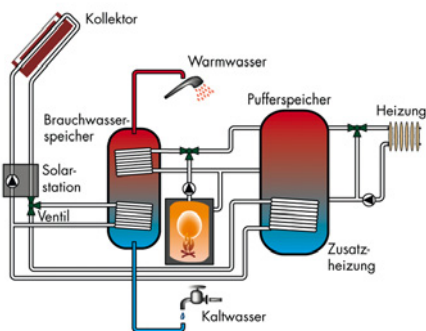
Abb. 83: Integrierte Solarkollektoranlage

Abb. 84: Flachkollektor als Fassadenkollektor:  
hohe winterliche Solarausbeute

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis gestaltet sich üblicherweise beim Flachkollektor am günstigsten, wenn genügend Fläche vorhanden ist. Vorteile kann der Vakuum-Röhrenkollektor in Sonderfällen bieten.

### 6.6.2 Anlagensysteme

Neben den Kollektoren und dem Speicher umfassen thermische Solaranlagen als Komponenten Regelung, Zirkulationspumpe, Wärmetauscher und ein Ausdehnungsgefäß. Aus diesen einfachen Grundkomponenten können verschiedene Anlagensysteme konzipiert werden.

Abb. 85: Solaranlage mit Zweikreisssystem  
zur WarmwasserbereitungAbb. 86: Kombinierte solare Raum- und  
Warmwasserheizung mit Zweispeichersystem

Das klassische System der Warmwasserbereitung ist das Zweikreisssystem (Abb. 85): die Solarwärme wird mittels eines internen Wärmetauschers auf das Trinkwasser im Solarspeicher übertragen. Reicht das Solarangebot nicht aus, wird im oberen Bereich des Speichers mit dem Heizsystem nachgeheizt. Abb. 87 zeigt Größenordnungen für die Dimensionierung. Im Allgemeinen erfolgt die Übertragung der Wärme mittels

eines frostsicheren Wasser-Glykol-Gemischs. Alternativ kann der Solarkreis Heizungswasser enthalten und wird durch die Regelung des Systems auf Frostschutz überwacht und mittels gezielter Zirkulation bei Frostgefahr mit einem Aufwand von 30 bis 70 kWh/a für eine Anlage eines Einfamilienhauses frostfrei gehalten.

Soll die Solaranlage auch das Heizsystem unterstützen, werden Zweispeichersysteme (Abb. 86) oder Anlagen mit Thermosyphon- bzw. Schichtenspeicher eingesetzt. Eine große Zahl von Herstellern bietet mittlerweile eine unübersichtlich hohe Anzahl von Konzepten an. Eine Heizungseinbindung ist bei den meisten Systemansätzen ohne nennenswerten Mehraufwand zu bewerkstelligen.

Für den KfW-60- und KfW-40-Bereich sind zahlreiche Anlagenkonzeptionen auf dem Markt, die nahezu eine solare Vollversorgung sicherstellen sollen. Diese Anlagen beinhalten aber im Allgemeinen einen hohen Aufwand mit 30 bis 40 m<sup>2</sup> Solarabsorberfläche und großen Speicherinhalten in Richtung Saisonspeicher mit bis zu 10 m<sup>3</sup> Wassereinhalten. Üblicherweise verbleibt bei diesen Systemen ein Restheizbedarf, der oft mit Biomasse bewerkstelligt wird, in Höhe von 10 bis 20 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Wenn eine möglichst weitgehende solare Versorgung angestrebt wird, ist es ökonomisch sinnvoller zunächst den Heizwärmebedarf auf Passivhaus-Niveau zu bringen und dann eine Solarthermieanlage mit ca. 12 bis 18 m<sup>2</sup> Solarabsorber mit steiler oder vertikaler Ausrichtung zu installieren. Damit könnten Heizung und Warmwasserbereitung zu knapp 90 % gedeckt werden. Die erforderliche Restwärmebereitstellung liegt dann im Bereich von etwa 3 kWh/(m<sup>2</sup>a) und könnte entweder über einen Ethylenofen, einen kleinen Gasbrenner mit Flüssiggas oder direktelektrisch erfolgen.

Personen	Energiebedarf/Tag [kWh]	Netto Absorberfläche (Flachkollektor) [m <sup>2</sup> ]	Speichervolumen [m <sup>3</sup> ]	zu erwartende Wärmegewinne [kWh/a]
2	3,7	3,0	200–300	1.100
3	5,6	4,0	250–300	1.700
4	7,4	6,0	300–400	2.400
6	11,1	7,5	500–600	3.000
10	18,5	12,0	700–1.000	5.000
20	37	20,0	1.500–2.000	8.400
40	74	35–40	2.500–3.000	16.000

Abb. 87: Größenordnungen für die Dimensionierung von Brauchwarmwasser-Solaranlagen und zu erwartende Wärmegewinne (inkl. Anlagenverluste)

Voraussetzung ist es, die solare Wärme auf sehr niedrigem Temperaturniveau für die Heizung nutzen zu können. Eine erträgliche Ausbeute kann ggf. durch eine direkte solare Bauteiltemperierung ab 22 °C gewährleistet werden. Vorteil ist die Verschiebung der Solaramplitude um einige Stunden in den Abend. Wenn das Rohrsystem bivalent als Heizsystem nutzbar ist, können auch Kosten senkende Synergien genutzt werden.

Die Verbindung der Solaranlage mit einer Wärmepumpe ist eine weitere Alternative. Ein Anlagenkonzept dazu wird in Kapitel 6.1.5 dargestellt.

### 6.6.3 Speicher

Standardmäßige Solarspeicher sind gut gedämmte vertikale Wasserbehälter, in denen Trinkwasser erwärmt wird. Die Solarwärme wird über den unteren Wärmetauscher übertragen, die Nachheizung erfolgt im oberen Speicherbereich.

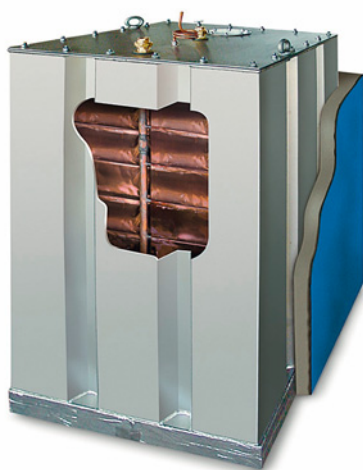


Abb. 88: Latentwärmespeicher auf Basis Natriumacetat: 115 kWh Speichervermögen auf 750/750/ 1.500 mm

Schichten- oder Thermosyphonspeicher bevorraten im Allgemeinen Heizungswasser und unterscheiden sich vor allem durch die Art der Wärmeladung. Über einen externen Wärmetauscher und durch physikalisch wirkende Schichtungssysteme wird erreicht, dass die Wärme in der passenden Wärmeschichtungsebene des Speichers eingebracht wird. So wird z. B. bei einstündiger Sonnenscheindauer im Winter ein sinnvoll nutzbares höheres Temperaturniveau im oberen Bereich des Speichers nachgeladen. Beim Standardspeicher wäre die Temperatur des Gesamtspeichers nur um wenige Grad angehoben worden.

Zur direkten solaren Beheizung kann das Gebäude als Speicher genutzt werden:

Wand- oder Betonkerntemperierung kann bei sehr energiesparenden Gebäuden oder im Fall von ungünstigen Fensterausrichtungen bzw. Verschattung ein sinnvoller Weg mit aktiver Solarenergienutzung sein.

Wasser-Saisonspeicher stellen eine sinnvolle Option bei ausreichend großen Nahwärmesystemen dar, sind im Einfamilienhausbereich allerdings bisher nicht mit wirklichem Erfolg umgesetzt worden, weil die Probleme von Schichtung, Speicherverlust und Regelung bei kleinen Saisonspeichern kaum befriedigend und kosteneffizient zu lösen sind.

Latentwärmespeicher auf der Basis von Glaubersalz, Paraffinen u.ä. wurden über Jahre vorangetrieben. Konzepte mit PCM-Graphitmatrix, Zeolithen und Natriumacetat (ca. 4-fache Speicherkapazität von Wasser, Abb. 88) befinden sich mittlerweile auf dem Markt. Bei Gebäuden mit sehr geringem Restwärmebedarf ist eine solare Saisonsversorgung möglich. Bei einem jährlichen Wärmebedarf von 3.000 kWh/a liegen die Kosten für den Speicher derzeit bei etwa 20.000 € zuzüglich der Kosten für die Solaranlage. Bei Serienfertigung ist mittelfristig mit einer Kostenhalbierung zu rechnen. Die Technik der Latentwärmespeicherung kann Gebäude auf die Dauer von fossilen Energieträgern unabhängig machen.

## 6.7 Kühlung

Wohngebäude lassen sich im Allgemeinen so planen, dass eine aktive Kühlung nicht erforderlich ist. Wird dennoch ein erhöhter Kühlkomfort gewünscht, so sollte das Kühlsystem in Verbindung mit der Heizung geplant werden. So können auf einfache Weise Kostensynergien genutzt werden.

Durch passive Maßnahmen lässt sich die Kühllast bei Wohngebäuden äußerst gering halten. Deshalb ist Kühlung mit einfachen Mitteln möglich. Der einfachste Weg geht über die Erdkühle in Verbindung mit einem Wärmepumpensystem, für das ohnehin eine Erdsonde vorhanden ist. Im Sommer reicht das Temperaturniveau der Erdsonde aus, um Temperaturen im Bereich von 17 bis 18 °C bereitzustellen, die in das vorhandene Flächenheizsystem eingespeist werden und dadurch eine sanfte, aber ausreichende Kühlung sicher stellen. Die Kühlung über Erdsonde und das vorhandene Flächenheizsystem kann auch in Verbindung mit einem Sole-Erdreichwärmetauscher eines Lüftungssystems verbunden werden. Dabei muss allerdings die Dimensionierung beachtet werden bzw. die Erwartungen an die Kühlfunktion.

Wärmepumpenaggregate können durch Umkehren ihrer Funktion auf einfache Art als aktive Kühlung genutzt werden.

# 7 Strom

Je geringer der Energieverbrauch für die Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasserbereitung wird, desto mehr fällt der Verbrauch von Haushaltsstrom ins Gewicht. Während in einem Bestandsgebäude der Stromverbrauch nur einen kleinen Teil des Gesamtverbrauchs ausmacht, kehrt sich die Bilanz bei Energiespargebäuden um. Besonders relevant wird dies bei der primärenergetischen Betrachtung: jede Kilowattstunde aus der Steckdose benötigt im Bundesmix den Einsatz von knapp 3 Kilowattstunden für die Stromgewinnung. Jede eingesparte Kilowattstunde entspricht im Bundesdurchschnitt einer Emission von 660 Gramm Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) [38].

## 7.1 Stromsparen

Stromsparen ist deshalb eine äußerst effiziente Form der Umweltentlastung. Wer Strom sinnvoll nutzt und effiziente Technik einsetzt, spart pro Kilowattstunde (kWh) etwa 0,20 €. Das ist in vielen Bereichen äußerst rentabel. Der Stromverbrauch im Haushalt hängt von der Wohnfläche, von den elektrischen Geräten und deren Zustand sowie vom Verhalten der Bewohner ab (Abb. 89).

Bewertung	1 Person [kWh/Jahr]	2 Personen [kWh/Jahr]	3 Personen [kWh/Jahr]	4 Personen [kWh/Jahr]	5 Personen [kWh/Jahr]
sehr gut	unter 700	unter 900	unter 1.500	unter 2.000	unter 2.400
gut	700–1000	900–1.500	1.500–1.800	2.000–3.000	2.400–3.200
zu verbessern	1.000–1.300	1.500–1.800	1.800–2.400	3.000–4.200	3.200–4.400
hoch	1.300–1.800	1.800–2.400	2.400–3.200	4.200–6.000	4.400–6.500
zu hoch	über 1.800	über 2.400	über 3.200	über 6.000	über 6.500

Abb. 89: Stromverbrauch nach Haushaltsgröße (ohne Warmwasserbereitung)

## Geräte

Im Haushalt sind die größten Stromverbraucher die Elektrogeräte wie Herd, Kühlschrank und Waschmaschine. Die Energieeffizienz der Geräte variiert sehr stark. Elektrogeräte sind in Energieklassen von A bis F eingeteilt. Energieklasse A steht für einen niedrigen, Energieklasse F für einen hohen Stromverbrauch. Um bei den Bestgeräten eine weitere Differenzierung zu erzielen, ist eine weitere Unterscheidung bis A++ erstellt worden. Zusätzlich können die Geräte durch eine sinnvolle Anwendung möglichst sparsam betrieben werden:

- Kühl- und Gefriergeräte: Je kühler der Aufstellort, desto geringer der Energieverbrauch, ungünstig neben Herd, Spülmaschine oder Heizung; Hinterströmung des Wärmetauschers hinter dem Gerät sicherstellen; Gefrierfach regelmäßig abtauen.

- Waschmaschine: Warmwasseranschluss ist sinnvoll, wenn die Warmwasserbereitung durch den Heizkessel oder solar bereitgestellt wird; „Kochwäsche“ bei 40 bis 60 °C ist ausreichend, Buntess bei 20 bis 30 °C, Waschen ohne den Vorwaschgang spart 15 %.
- Wäschetrockner: Wäsche vor dem Trocknen gut schleudern, mindestens 1.000 U/min, besser 1.600 U/min; Trocknen auf der Leine bevorzugen oder in einem Trockenschrank (in Verbindung mit einer Lüftungsanlage); für den Trockner: Wäsche nach Textilart sortieren, um gleiche Trockenzeiten zu erreichen; Flusensieb regelmäßig reinigen und Fassungsvermögen ausnutzen.
- Geschirrspüler an das Warmwasser anschließen (s. o.); Sparprogramme nutzen, wenn das Geschirr nur normal verschmutzt ist.
- Kochen: Gasherde sind primärenergetisch deutlich günstiger als Elektroherde; Kochen mit Dampfdrucktopf oder bei geschlossenem Deckel, mit wenig Wasser, Restwärme beim E-Herd nutzen; Wasser im Wasserkocher erhitzen.
- Beleuchtung: Für die Beleuchtung werden fast 10 % des Stroms im Haushalt benötigt, das Einsparpotenzial ist groß: sinnvoll sind Leuchtstoff- und Energiesparlampen, keine Halogenleuchten mit Trafo als Dauerverbraucher.
- Stand-by-Modus: Geräte ohne Stand-by-Modus kaufen: moderne Geräte verfügen statt dessen über automatische Abschaltungen; ansonsten Geräte ausschalten; zu den heimlichen Stromfressern gehören Computer, Router, Fernsehgeräte, SAT-Receiver und Stereoanlagen, Telefonanlagen, Anrufbeantworter, Faxgeräte und andere; Alternative: Zwischenschalten von Stromspargeräten, welche den Stand-by-Verbrauch erheblich reduzieren [39].

## Gebäudetechnik

Alle haustechnischen Geräte benötigen Hilfsstrom zu ihrer Funktion bzw. Regelung. Eine übliche Hausinstallation weist durchaus zwei Pumpen à 80 Watt und zwei Regelungen à 20 Watt auf. Bei einer mittleren jährlichen Laufzeit von 3.000 Stunden ergibt das einen Stromverbrauch von 600 kWh, multipliziert mit dem Primärenergiefaktor ergeben sich daraus knapp 1.800 kWh – mit der Energiemenge kann man ein kleines Passivhaus komplett heizen. Grundsätzlich sollten Haustechnik-Systeme so einfach wie möglich ausgeführt werden. Dabei sind folgende Aspekte zu beachten:

- System mit möglichst einfacher Regelung und geringer Anzahl von Pumpen und Hilfsaggregaten wählen.
- Regelungen so einfach wie möglich und mit minimalem Stand-by-Verbrauch ausführen; komplette Abschaltung der geregelten Anlage für nicht erforderliche Zeitbereiche muss möglich sein.

- Kessel und Aggregate mit optimierter Elektrik, Pumpen und Ventilatoren wählen, Leistungsaufnahme von den Herstellern abfragen. Da die Kessel für sehr energie-sparende Gebäude ohnehin zu groß dimensioniert sind, ist zu überprüfen, ob der Betrieb für wenige Stunden am Tag ausreicht (z. B. kurz morgens und abends) und die Geräte ansonsten stromlos sind.
- Pumpen mit möglichst geringer Leistung einbauen und genau auf ein optimiertes Rohrnetz abstimmen, hydraulischen Abgleich ausführen und Inbetriebnahme überprüfen; geregelte Pumpen sind sinnvoll, wo variierende Durchflüsse auftreten, ansonsten können exakt dimensionierte nicht geregelte Pumpen Vorteile aufweisen. [40]
- Zirkulation (z. B. Warmwasser) möglichst vermeiden durch zentrale Anordnung der Gebäudetechnik mit kurzen Leitungswegen und möglichst klein dimensionierten Leitungsquerschnitten.
- Lüftungstechnik mit optimierten Gleichstromventilatoren einsetzen (vgl. Passivhaus-Anforderung: Stromeffizienz  $p_{el} \leq 0,40 \text{ W/m}^3$ ).

### Checkliste

Es ist relativ einfach, die Verbrauchsgeräte im Haushalt unter die Lupe zu nehmen. Man kann Haushaltsgeräte und Anwendungen anhand einer Checkliste zusammenstellen. Daran ist der Jahresverbrauch darstellbar und es können lohnende Einsparpotenziale aufgespürt bzw. ein überschlüssiges Verbrauchskonzept aufgestellt werden. Die Aufnahmeleistungen in Watt (W) oder Kilowatt (kW) sind aus den Betriebsanleitungen oder an den Typenschildern der Geräte ersichtlich. Wer es genau wissen will, kann auch kostengünstig ein Strommessgerät, mit dem Leistung und Verbrauch gemessen werden können, erwerben oder bei Energieberatungsstellen ausleihen [4], [41], [42], [43].

## 7.2 Dezentrale und regenerative Stromerzeugung

Das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) hat im Anschluss an die Liberalisierung am Strommarkt dazu geführt, dass dezentrale und regenerative Konzepte zur Stromerzeugung in den letzten Jahren hohe Zuwachszahlen zu verzeichnen haben. Für den Bereich der Einfamilienhäuser hat die Photovoltaik die höchste Bedeutung. Die anderen Techniken sind nur in Ausnahmefällen, im Allgemeinen in einem Betreiberverbund, sinnvoll anzuwenden. Allerdings kann „grüner“ Strom über Lieferverträge von jedem Haushalt zur Versorgung des Gebäudes bezogen und mithin das Gebäude – je nach Stromanbieter bis zu 100 % regenerativ mit Strom versorgt werden.

## Photovoltaik

Der Begriff Photovoltaik bedeutet Spannung (Voltaik) aus Licht (Photo). Der französische Physiker Alexandre Edmond Becquerel entdeckte im Jahre 1839 den photoelektrischen Effekt von zwei in einen Elektrolyten getauchten Elektroden, von denen eine mit Licht bzw. Röntgen- oder ultravioletter Strahlung bestrahlt wurde. 1883 stellte Charles Fritts (USA) eine Selen-Photozelle her. Erst 1954 wurde die erste Silicium-Solarzelle in den Bell-Laboratories (USA) entwickelt und 1974 die erste amorphe Zelle. 1983 wurde das erste Photovoltaik-Kraftwerk mit einer Leistung über 1 MW erstellt.

Polykristalline Solarzellen werden aus gegessenen Siliziumblöcken geschnitten. Bei Solarzellen aus amorphem Silizium wird relativ wenig Halbleitermaterial benötigt. Durch Aufdampfen mehrerer Siliziumschichten auf ein Substrat, meist Glas, scheiden sich dort Atome in einer amorphen, ungeordneten Anordnung ab (Abb. 90). Die energetischen Rücklaufzeiten liegen je nach Quelle zwischen 2–6 Jahren Amortisationszeit für kristalline Zellen. Amorphe Zellen werden im Vergleich dazu mit 1–3,5 Jahren angegeben [44].

Um nutzbare Leistungen zu erreichen, werden meist ca. 20–40 Wafer zu einem Modul zusammengefasst. Dabei können nach Art der Schaltung die gewünschten Leistungsmerkmale erzielt werden. Bei Serienschaltungen bestimmt die Solarzelle, die der geringsten Solarstrahlung ausgesetzt ist, die Leistung des gesamten Moduls. Deshalb darf keine Teilverschattung der Module gegeben sein.

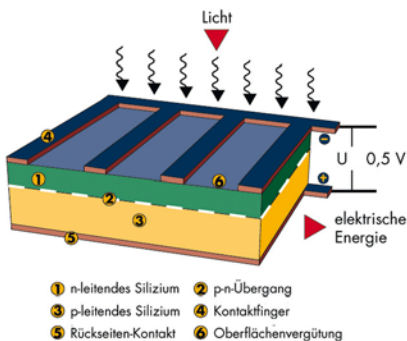


Abb. 90: Schemaaufbau einer Solarzelle

Photovoltaikanlagen können in Verbindung mit Akkus autark betrieben werden. Deutlich sinnvoller ist allerdings der netzgekoppelte Betrieb. Ein Wechselrichter formt den gewonnenen Gleichstrom mit einem Wirkungsgrad von etwa 90 % in 230-Volt-Wechselspannung um.

Die variablen Parameter für den Ertrag sind die einfallende Solarstrahlung und die Ausrichtung des Moduls (vgl. Abb. 81).



Die Investitionskosten für eine Photovoltaikanlage liegen bei 3.000 bis 5.000 € pro kW<sub>peak</sub>. Die Gestehungskosten für eine Kilowattstunde liegen zwischen 0,40 und 0,80 €. Die Investition in Photovoltaik ist durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) sehr interessant. Informationen dazu gibt es beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, [www.bmu.de](http://www.bmu.de)) und darüber hinaus bietet der BINE Informationsdienst online einen Wegweiser durch die Vielzahl der Förderprogramme in Deutschland unter [www.energiefoerderung.info](http://www.energiefoerderung.info). Ab Inbetriebnahme der Anlage wird 20 Jahre lang für Anlagen bis 30 kW<sub>peak</sub> eine Einspeisevergütung gezahlt in Höhe von 0,4441 €/kWh im Jahr 2009 und danach mit einer jährlichen Degression von 5 % für neu erstellte Anlagen im Jahr 2010 ein Betrag von 0,4219 €/kWh bis hin zum Jahr 2013 ein Betrag von 0,3618 €/kWh.

112



Abb. 91 Beispiel für Photovoltaik-Nutzung

Überschlägig gelten folgende Zahlen für die Auslegung einer Anlage: 1 kW<sub>peak</sub> entspricht ca. 10 m<sup>2</sup> Fläche und bringt 850–1.050 kWh pro Jahr.

Es gibt wunderschöne Beispiele von gelungener Photovoltaik-Integration bei Gebäuden: die Module können als ganzflächige Dächer ausgeführt werden oder in die Fassadengestaltung einbezogen werden (Abb. 91).

### Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet die gleichzeitige Bereitstellung von Strom und Wärme mittels eines Aggregats. Die Technik wird in Kapitel 6.1.7 beschrieben. Gegenüber konventioneller zentraler Kraftwerkstechnik kann ein besserer Wirkungsgrad durch Nutzung der Abwärme erzielt werden. KWK-Strom wird durch das EEG gefördert. Die Technik ist für Einfamilienhäuser nur in besonderen Konstellationen sinnvoll. Bei Versorgung eines kleinen Gebietes mit Nahwärme kann die Technik allerdings höchst interessant sein, wenn die Leitungsverluste durch eine günstige Trassenführung gering gehalten werden können.

### Sonstige

Stromversorgung aus Wasserkraft, Biomasse, Tiefengeothermie und Windenergie ist für ein einzelnes Einfamilienhaus nur in Ausnahmefällen geeignet. Über einen Verbund oder Stromlieferverträge ist diese Art der regenerativen Stromgewinnung äußerst sinnvoll einsetzbar.

## 8 Nachhaltigkeit

„Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.“ [45]

Das übliche Drei-Säulen-Modell geht auf die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt“ zurück. Dort wurde ein Konzept für die Nachhaltigkeit vom Leitbild zur Umsetzung entworfen. „Nachhaltigkeit ist die Konzeption einer dauerhaft zukunftsfähigen Entwicklung der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension menschlicher Existenz. Diese drei Säulen der Nachhaltigkeit stehen miteinander in Wechselwirkung und bedürfen langfristig einer ausgewogenen Koordination.“ [46] Energieeffizienz hat vor allem Anteil an den Aspekten der Ökonomie und Ökologie. Es ist im Sinne der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung geboten, auch die darüber hinaus gehenden Gesichtspunkte mit der entsprechenden Gewichtung in die Planung einzubeziehen.

113

In den achtziger Jahren hatte sich zunächst vor allem eine intensive Auseinandersetzung mit der Gesundheitsverträglichkeit und der Materialbeschaffenheit beim Bauen ergeben. Daraus entwickelten sich Kriteriensammlungen, Datenbanken und Informationssysteme [47], [48], [49], [50], [51], [52], die Hilfestellung für Entscheidungen in der Baupraxis geben können. Darüber hinaus gab es Ansätze zur Qualitätssicherung mittels Gebäudebrief oder -pass, die von zahlreichen Institutionen auch heute noch angeboten werden.

Fragen zu Produktspezifika von Baumaterialien können all diese allgemein gehaltenen Informationsmedien nicht beantworten. Dazu sind Datenbanken auf Produktebene erforderlich, die obendrein eine beständige Qualitätssicherung der geprüften Materialien zusichern. Es besteht die Möglichkeit, bei Herstellern nach vertieften Angaben nachzufragen. Aber selbst wenn konkrete Inhaltsangaben mit Messergebnissen oder Zertifikaten geliefert werden, sollten diese kritisch betrachtet werden. Im Ernstfall hilft nur die Analyse der einzubauenden Produkte.

Seitens des Bauministeriums wurde der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ herausgegeben. [53] Dort werden Aussagen zu Planungsgrundsätzen, ökologischer Bewertung von Bauen, Betreiben, Nutzen und Rückbau, zur Wirtschaftlichkeit, Behaglichkeit, Gesundheit und soziokulturellen Aspekten gegeben. Darauf basierend erfolgte eine Weiterbearbeitung in Richtung eines Zertifizierungssystems für Gebäude. Die Regelsetzung und Festlegung der Kriterien erfolgen über den Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Das Zeichen wird seitens des BMVBS vergeben. Die eigentliche Zertifizierung der Gebäude erfolgt durch privatwirtschaftliche Berater, die wiederum Eignungsnachweis

und regelmäßige Überprüfung über einen eigenen Verband nachweisen müssen. Besonders zu erwähnen ist die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen DGNB ([www.dgnb.de](http://www.dgnb.de)). Das Nachhaltigkeitszertifikat kann wie ein erweiterter Energieausweis gesehen werden, bei dem zusätzlich Angaben zur Qualität des Standortes, der Ökologie, Ökonomie, Technik, Funktion und der sozialen Qualität gemacht werden. Daraus ergibt sich bei entsprechender Gewichtung dieser Einzelbereiche eine Gesamtnote für das Gebäude. [54]

Dieses Zertifizierungssystem ist ein sehr fundierter Gegenpart zum „Leed“-System, das vor allem in den angelsächsischen Ländern ein international beachtetes Zertifizierungskonzept darstellt. Dabei handelt es sich um ein Rating System, das durch das US Green Building Council verwaltet wird. Anhand von Leitfäden und Checklisten können vier Zertifizierungsstufen für den Neubau erreicht werden: Zertifiziert, Silber, Gold und Platin. Grundlage sind die fünf Bewertungskategorien nachhaltiger Standort, Wasser-Effizienz, Energie und Atmosphäre, Materialien und Ressourcen sowie (Innenraum-)Umweltqualität.

In den folgenden Kapiteln sollen aus den umfangreichen Nachhaltigkeits-Parametern nur gezielt Aspekte herausgegriffen werden, die den Energieverbrauch betreffen. In die Betrachtung des Primärenergieeinsatzes muss der Bereich der Gebäudeerstellung einbezogen werden, da bei sehr energieeffizienten Gebäuden dieser Aspekt zunehmend interessanter wird. Zudem ist für die Baupraxis wichtig, das Spannungsverhältnis zwischen Investitionskosten und Wirtschaftlichkeit unter der besonderen Berücksichtigung der Betriebskosten und der resultierenden monatlichen Gesamtbelastung zu betrachten.

## 8.1 Primärenergie

Um den Energieverbrauch sinnvoll vergleichen zu können, muss zwischen folgenden Begriffen unterschieden werden:

Nutzenergie stellt den tatsächlichen Nutzen für ein Gebäude dar: hinsichtlich der Gebäudeheizung die Wärmemenge, die über die Heizkörper ein Gebäude erwärmt.

Endenergie entspricht pragmatisch ausgedrückt der Energiemenge am Zähler des Kunden, das heißt, die Anlagenverluste sind zusätzlich zur Nutzenergie enthalten.

Primärenergie (PE) stellt den Energieinhalt der natürlichen Energieträger in ihrer Lagerstätte dar. Durch Gewinnung, Bearbeitung und Transport entstehen Verluste, die mit dem daraus resultierenden Primärenergie-Faktor beziffert werden können.

Der Primärenergieinhalt (PEI) eines Baustoffes ist die Energiemenge, die für die Produktion eines Kubikmeters oder einer Tonne des Materials benötigt wird. Dabei wird die Produktlinie von der Rohstoffgewinnung bis zum Einbau betrachtet.

### 8.1.1 PE-Kennwerte von Baustoffen und Hinweise für die Planung

Die Bauwirtschaft ist ein sehr materialintensiver Wirtschaftszweig und verursacht etwa die Hälfte der Abfallmengen im produzierenden Gewerbe. Durch eine gezielte Planung und Baustoffauswahl können Ressourcen eingespart werden. Die Kennwerte für den Primärenergieinhalt eines Baustoffes sind dabei eine wichtige Planungsgrundlage. In Abb. 92 werden sie für einige wesentliche Baustoffe vergleichend gegenübergestellt.

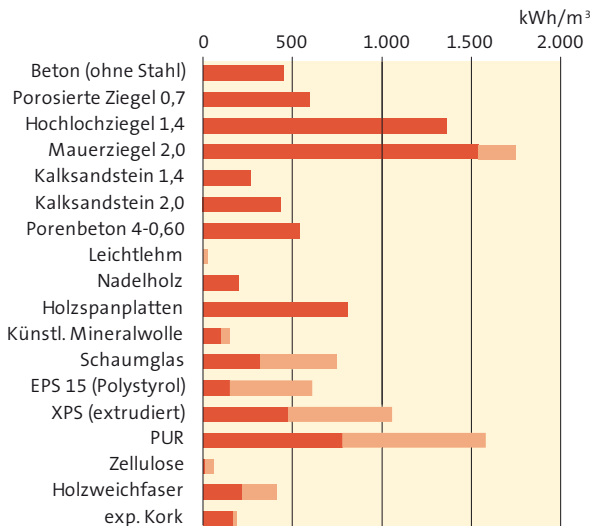


Abb. 92: Vergleich des Primärenergieinhalts von Baustoffen, dargestellt ist das Spektrum in Abhängigkeit von Fertigung und Quellenangabe

Bereits beim Vorentwurf werden wesentliche Festlegungen für den Ressourcenverbrauch getroffen. Alle erdberührten Bauteile führen zu konstruktiven Anforderungen, die mit hohem Energieeinsatz verbunden sind: das betrifft Abdichtungssysteme bzw. wasserundurchlässige Betonbauteile sowie die Dämmstoffe im feuchten Bereich.

Beim Mauerwerksbau weist Kalksandstein die günstigsten Werte auf und kann auf Grund der hohen statischen Festigkeit mit geringem Materialeinsatz verbaut werden. Natürlich ist Lehm in der Primärenergiebilanz nicht zu schlagen – ideal für Bauherren, die sehr viel Zeit haben und beim Rohbau viel Eigenleistung durchführen wollen. Wichtig ist aber die Gesamtbetrachtung der Konstruktion. Erst durch die Dämmung wird die Wandkonstruktion vollständig. Der Holzbau liegt primärenergetisch deutlich

günstiger. Das gilt besonders, wenn optimale Dämmstoffe wie z.B. Zellulosedämmung gewählt werden. Die ökologischen Vor- und Nachteile von Holz- und Massivbau sind in Kapitel 4 dargestellt.

Die Baustoff-Matrix in Abb. 93 gibt Kennwerte zum Primärenergieinhalt und zur Bauphysik an, die bei der Auswahl hilfreich sein können. In Abb. 92 werden die Primärenergieinhalte von zahlreichen Baustoffen grafisch gegenübergestellt

	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	PEI [MJ/m <sup>3</sup> ]	PEI [kWh/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda_R$ [W/(mK)]	Diffusions- widerstands- zahl $\mu$
<b>Dämmstoffe</b>					
Blähton	300–800	1.530	425	0,16	1,1
Blähperlite	80	680	189	0,055	3–4
exp. Kork	180	650	181	0,04–0,045	
Holzwoleleichtbaupl.	200–350	900	250	0,093	2–5
Kokosfaser-Platten	125	340	94	0,04–0,045	1
Kork-Dämmplatte	90–110	540–1.600	180–444	0,045–0,05	1,5–3
künstliche Mineral- wolle	20	360	100	0,035–0,045	1–2
	30	540	150	0,035–0,045	1–2
Exp. PS- Hartschaum	15	540–2.200	151–611	0,035–0,4	20–100
	20	680–2.900	189–806	0,035–0,4	20–100
Extrud. PS-Hart- schaum	25	1.700–3.800	472–1.056	0,035–0,04	80–250
	40	4.300	1.194	0,035–0,04	80–250
PUR- Hartschaum	30	2.800–5.700	777–1.580	0,03–0,035	30–100
Schaumglas	130	1.150–2.700	319–750	0,045–0,6	1.000
Zellulosedämmstoff	35–70	50–230	14–64	0,04–0,045	1–2

	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	PEI [MJ/m <sup>3</sup> ]	PEI [kWh/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda_R$ [W/(mK)]	Diffusions- widerstands- zahl $\mu$
<b>Mineralische Baustoffe</b>					
Beton	2.300	1.600	444	2,1	70–150
Kalksandstein	1.000	680	189	0,5	5–10
	1.400	960	267	0,7	5–10
	2.000	1.570	436	1,1	15–25
Ziegel LHLz 0,7	700	2.140	594	0,36*	5–10
Ziegel LHLz 1,0	1.000	1.700–3.700	472–1.028	0,45	5–10
Ziegel HLz 1,2	1.200	2.030–4.170	564–1.158	0,5	5–10
Ziegel HLz 1,6	1.600	4.890	1.358	0,68	5–10
Klinker KMz	2.000	5.540–6.300	1.539–1.750	0,81	50–100
Porenbeton	500	1.460	406	0,22*	5–10
	600	1.950	542	0,24	5–10
	800	2.600	722	0,29	5–10
Leichtlehm	800	0–110	0–31	0,25	2
Kalkzementmörtel	1.800	620	172	0,87	15–35
Kalkputz	1.800	1.100	306	0,87	15–35
Gips	1.200	1.700	472	0,7	10
Gipsfaserplatten	1.200	3.000	833	0,36	11
Gipskartonplatten	900	2.700	750	0,21	8
Glas	2.500	52.000– 54.000	14.444– 15.000	0,8	
<b>Holz und Holzwerkstoffe</b>					
Fichte, Kiefer, Tanne	700	720	200	0,13	40
Laubholz	800	2.700	750	0,2	80
Brettschichtholz	600–800	1.800–4.100	500–1.140	0,2	50
Holzspanplatten	700	2.900	806	0,13	50–100
Holzweichfaserplatten	200–350	790–1.500	219–416	0,045–0,05	5–10
Hartfaserplatten	1.000	2.300	639	0,17	70
Tischlerplatten	600–800	2.880–4.300	800–1.194	ca. 0,17	50–400
<b>Metalle</b>					
Aluminium	2.702	288.200	80.056	200	
Betonstahl		78.000	21.667	60	
Kupfer	8.900	480.600	133.500	380	
* bei niedrigerer Rohdichte bis 0,11 W/(mK)					

Abb. 93: Baustoff-Matrix mit Kennwerten

### 8.1.2 PE-Bilanzierung für die Gebäudeerstellung

Es stellt sich die Frage, in welchem Verhältnis sich die Energieaufwendungen für die Gebäudeerstellung und für den Gebäudebetrieb verhalten. Wie liegt die energetische Amortisation für die Mehraufwendungen der Energiespar-Komponenten? Die Berechnung kann nach einer überschlägigen Bauteilmethode durchgeführt werden oder positionsgenau nach den einzelnen Materialien.

Für das Berechnungsbeispiel einer Doppelhaushälfte in Nürnberg wurde die genauere, zweite Möglichkeit gewählt [10], [55]. Das Ergebnis korrespondiert in der Gesamtsumme mit früheren Berechnungen zu anderen Haustypen nach der Bauteilmethode (Abb. 94) [56]. Der Primärenergieinhalt des Gebäudes in primärenergetisch optimierter Massivbauweise beträgt etwa 800 kWh pro m<sup>2</sup> Wohnfläche für die Standardausführung (Standard WSV0 95). Die Mehraufwendungen für den Standard nach EnEV 2002 betragen etwa 2–3 %, für den Passivhaus-Standard 10–12 %. Prozentual beträgt der Mehraufwand der einzelnen Maßnahmen bezogen auf die Standardvariante: Außenwände 3,2 %, Dach 0,7 %, Boden 1,3 %, Fenster 3,2 %, Lüftungsanlage 2,5 %, Erdreichwärmetauscher 0,9 % und Heizung (Minderaufwand) -1,0 %. Die Passivhaus-Komponenten amortisieren sich energetisch innerhalb von 1,5 Jahren.

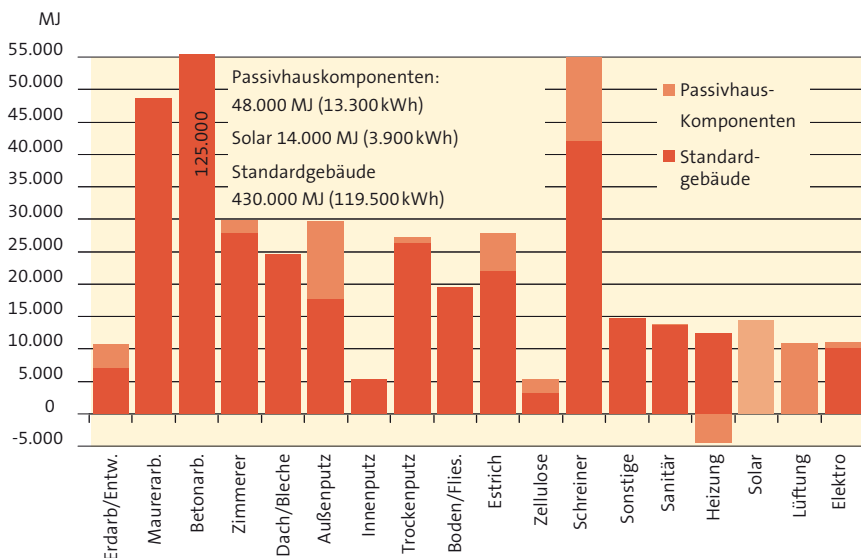


Abb. 94: Primärenergiebilanz am Beispiel Passivhaus Nürnberg-Wetzendorf (DHH 126 m<sup>2</sup> Wohnfläche/25 m<sup>2</sup> Nutzfläche)

### 8.1.3 PE-Bilanzierung für den Gebäudebetrieb

kWh/m<sup>2</sup> in 50 Jahren

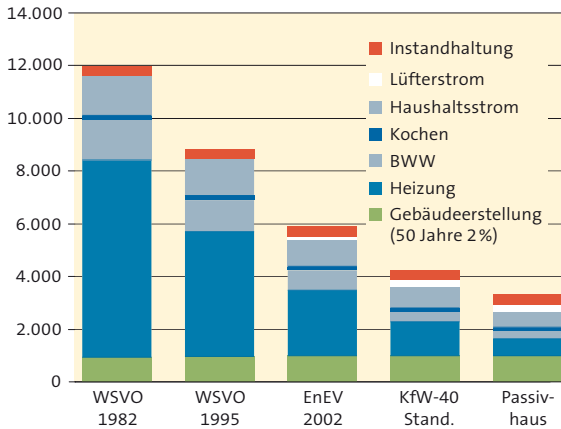


Abb. 95: Kumulierter Primärenergieaufwand pro m<sup>2</sup> Wohnfläche – Betrachtungszeitraum 50 Jahre

119

Der Energieaufwand für den Gebäudebetrieb überwiegt den Gestehungsaufwand bei weitem. Abb. 95 stellt den kumulierten Primärenergieaufwand pro m<sup>2</sup> Wohnfläche für verschiedene Gebäudestandards dar [57]. Es zeigt sich an der Darstellung auch, dass es durchaus Sinn macht, bei der Konstruktions- und Materialwahl auf primärenergetische Aspekte zu achten. Bei der Auswahl von Konstruktionen, Materialien und Gebäudetechnik-Komponenten sollte darauf geachtet werden, dass langlebige Produkte verwandt werden, um den Instandhaltungsaufwand zu minimieren. Beim Gebäudebetrieb sind sinnvolle Eingriffe möglich, die sich positiv auf ökologische Belange und nicht zuletzt auf den Geldbeutel auswirken. Bei komplexeren Gebäuden ist es sinnvoll, eine Betreuung in Form von Facility Management durchzuführen.

## 8.2 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeit

€/m<sup>2</sup>a

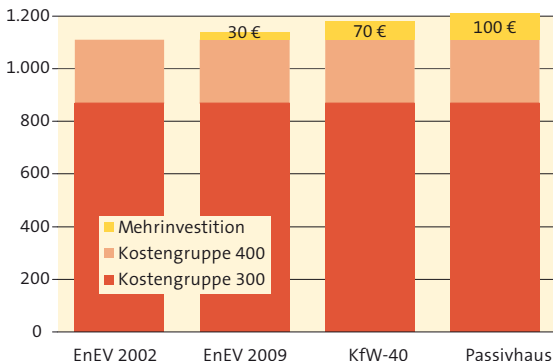


Abb. 96: Mehrinvestitionen verschiedener Gebäudestandards im Vergleich am Beispiel eines Einfamilienhauses mit 125 m<sup>2</sup> Wohnfläche.



Die Baukosten sind für jedes Bauvorhaben zunächst die wesentliche Entscheidungsgröße. Im Vergleich zu einem Gebäude nach EnEV 2002 ergeben sich durch die Anforderungen der EnEV 2009 Mehrkosten in Höhe von etwa 3 %. In Abbildung 96 wird darüber hinaus dargestellt, dass sich gegenüber der EnEV 2009 für ein KfW-40-Haus etwa 4 bis 10 % und für ein Passivhaus 6 bis 12 % Mehrinvestitionen ergeben. Die Angaben beziehen sich auf ein optimiert geplantes Gebäude durch einen im energieeffizienten Bauen erfahrenen Planer. Im Markt werden z.T. deutlich höhere Zusatzkosten verlangt.[58]

Die Wirtschaftlichkeit einzelner Maßnahmen lässt sich ermitteln, wenn die Investitions-Mehrkosten und der jährliche Ertrag bzw. die jährlichen Einsparungen durch diese Maßnahme vorliegen. Werden diese Zahlen auf die Lebenserwartung (Abschreibung) des Bauteils umgerechnet, ergeben sich die Gestehungskosten, die für die Einsparung von einer Kilowattstunde anfallen. In Abbildung 97 wird diese Berechnung für zahlreiche Beispiele dargestellt. Es ist gut ablesbar, dass besonders die Dämmung der Außenhülle durchweg hoch rentierlich ist.

Maßnahme	Investitions-Mehrkosten [€ pro m²/Stück]		Abschreibung [Jahre]	Betriebskosten [€/a]		Wartungs-kosten [€/a]		Jährlicher Ertrag [kWh/a]	Gestehungs-kosten pro kWh [€/kWh]	
	niedrig	hoch		niedrig	hoch	niedrig	hoch		niedrig	hoch
Außenwand aus Kalksandstein 17,5 cm mit Wärmedämmverbundsystem WLK 040										
Dämmung 14 statt 10 cm	6,0	18,0	40	0	0	0	0	19,8	0,008	0,023
Dämmung 20 statt 10 cm	10,5	30,0	40	0	0	0	0	25,3	0,010	0,030
Dämmung 30 statt 10 cm	18,0	40,0	40	0	0	0	0	29,8	0,015	0,034
Außenwand in Holzständerbauweise, Dämmung Zellulose oder Mineralfasern WLK 040										
Dämmung 20 statt 12 cm	5,6	10,0	40	0	0	0	0	11,3	0,012	0,022
Dämmung 25 statt 12 cm	9,0	15,0	40	0	0	0	0	14,9	0,015	0,025
Dämmung 30 statt 12 cm	12,5	20,0	40	0	0	0	0	17,2	0,018	0,029
Dämmung 35 statt 12 cm	16,0	25,0	40	0	0	0	0	19,0	0,021	0,033

Maßnahme	Investitions-Mehrkosten [€ pro m²/Stück]		Abschreibung [Jahre]	Betriebskosten [€/a]		Wartungskosten [€/a]		Jährlicher Ertrag [kWh/a]	Gestehungskosten pro kWh [€/kWh]	
	niedrig	hoch		niedrig	hoch	niedrig	hoch		niedrig	hoch
Dachkonstruktion, Dämmung Zellulose oder Mineralfasern WLK 040										
Dämmung 25 statt 16 cm	6,3	10,5	40	0	0	0	0	7,9	0,020	0,033
Dämmung 30 statt 16 cm	9,7	15,0	40	0	0	0	0	10,2	0,024	0,037
Dämmung 35 statt 16 cm	13,2	20,0	40	0	0	0	0	12,0	0,028	0,042
Dämmung 40 statt 16 cm	16,7	25,0	40	0	0	0	0	13,3	0,031	0,047
Bodenplatte und Kellerdecke, Stahlbeton, Dämmung WLK 040										
Dämmung 12 statt 8 cm	3,7	8,0	40	0	0	0	0	5,4	0,017	0,037
Dämmung 15 statt 8 cm	8,4	14,0	40	0	0	0	0	8,7	0,024	0,040
Dämmung 20 statt 8 cm	12,4	22,0	40	0	0	0	0	10,3	0,030	0,053
Dämmung 25 statt 8 cm	16,5	30,0	40	0	0	0	0	11,9	0,035	0,063
Fenster: Holzrahmen mit 2-fach Wärmeschutzverglasung im Vergleich zu Passivhaus-Fenstern U <sub>W</sub> = 0,76 W/(m <sub>2</sub> K)/g = 53 %										
Passivhaus-Fenster	110,0	280,0	40	0	0	0	0	50,0	0,055	0,140
Transparente Wärmedämmung										
Putzsystem	200,0	250,0	40	0	0	0	0	70,0	0,071	0,156
Paneelsystem	450,0	700,0	40	0	0	0	0	125,0	0,090	0,233
Wintergarten: Südseite, unverschattet, 5 m breit, 5 m hoch, hausseitige Fensterfläche und Wandfläche je 50 %										
Standard EnEV	15.000	30.000	30	0	0	0	0	400,0	1,250	2,500
Standard Passivhaus	18.000	40.000	30	0	0	0	0	120,0	5,000	11,111
Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung für 140 m² Wohnfläche (im Vergleich zur Fensterlüftung LWR 0,7 h <sup>-1</sup> )										
AWR 70 %, Luftw. 0,4 h <sup>-1</sup>	4.000	8.000	20	24	35	20	75	5.200	0,047	0,106
AWR 85 %, Luftw. 0,3 h <sup>-1</sup>	4.500	10.000	20	23	35	20	75	6.000	0,045	0,109

Maßnahme	Investitions-Mehrkosten [€ pro m²/Stück]		Abschreibung [Jahre]	Betriebskosten [€/a]		Wartungs-kosten [€/a]		Jährlicher Ertrag [kWh/a]	Gestehtungs-kosten pro kWh [€/kWh]	
	niedrig	hoch		niedrig	hoch	niedrig	hoch		niedrig	hoch
Brennwertkessel statt Niedertemperaturkessel (Einfamilienhaus, Standard EnEV)										
Brennwert-kessel	250	1.200	15	wie Niedertemperaturkessel				2.200	0,008	0,036
Solaranlage Variante 1: für einen 4-Personen-Haushalt/ Variante 2 für eine Hausgruppe/MFH mit 5 Einheiten										
5 m²/ 300-Liter-Speicher	4.000	6.000	20	10	15	25	40	1.800– 2.200	0,107	0,197
Solaranlage Variante 2: für eine Hausgruppe/MFH mit 5 Einheiten, 20 Personen										
25 m²/ 1.500-Liter-Speicher	15.000	20.000	20	25	40	50	100	9.000– 10.500	0,079	0,127
Solares Nahwämesystem mit saisonaler Wärmespeicherung										
Saisonale Solarnutzung									0,075	0,250
Photovoltaik 1 kW <sub>peak</sub>	4.000	6.000	20	0	0	75	150	900	0,306	0,643
Photovoltaik 3 kW <sub>peak</sub>	10.500	16.000	20	0	0	150	300	2.700	0,250	0,524

Abb. 97: Kosten (brutto) und Wirtschaftlichkeit energetischer Maßnahmen beim Bauen, dargestellt anhand der Gestehungskosten je Kilowattstunde

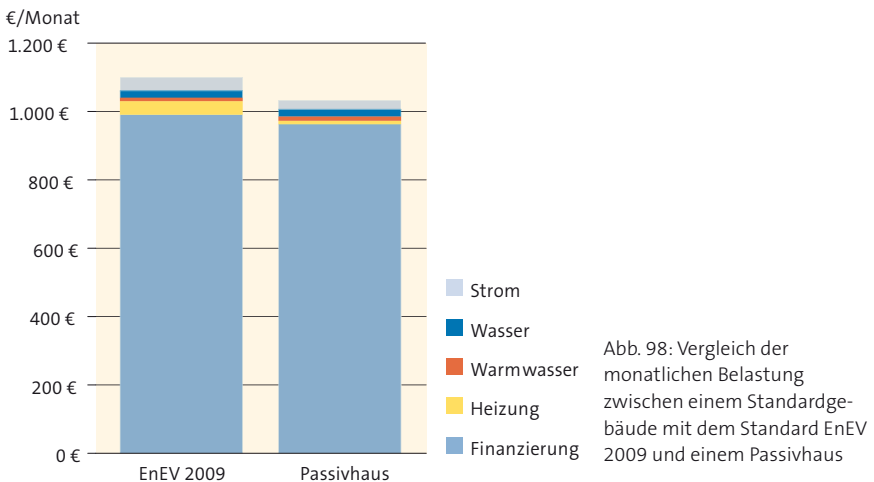
### Betriebskosten und monatliche Belastung

Entscheidend ist für den Bauherrn jedoch, was er jeden Monat für sein Gebäude zahlen muss. Deshalb darf er bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit nicht bei der Betrachtung der Investitionskosten stehen bleiben. Folgende Punkte müssen bei der Finanzierung beachtet werden:

- Effizient geplante Energiesparmaßnahmen führen zu bedeutenden Einsparungen bei den Betriebskosten (Gas, Strom, Wasser).
- Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) finanziert mit zinsgünstigen Krediten Energiesparmaßnahmen im Rahmen des Programms „Ökologisch Bauen“. Das betrifft z. B. Gebäude mit dem Standard Passivhaus oder KfW Energiesparhaus 40. Die aktuellen Programminformationen sind unter [www.kfw-foerderbank.de](http://www.kfw-foerderbank.de) nachzulesen.

- Einzelne Banken unterstützen ökologische Maßnahmen durch einen Bonus bei der Finanzierung [59].
- Zahlreiche Kommunen fördern Passivhäuser (2.500–6.000 €).
- Programme für regenerative oder rationelle Energieverwendung von Bund, Ländern und Kommunen stehen zur Verfügung; eine systematische Information zu verfügbaren Programmen gibt der BINE-Informationssdienst unter [www.energiefoerderung.info](http://www.energiefoerderung.info).

Werden diese Aspekte in einer Finanzierungsrechnung berücksichtigt, ergibt sich für die monatliche Belastung eines effizient geplanten Gebäudes in überwiegenden Fällen eine geringere monatliche Gesamtbelastung von Passivhäusern gegenüber Standardgebäuden (Abb. 98).



### 8.3 Wirtschaftlichkeit – Vereinigung von Ökologie und Ökonomie?

Darüber hinaus wird die Kostenentwicklung für Energiesparkomponenten in den nächsten Jahren nach unten gehen, weil sowohl im Bereich der Dämmsysteme als auch bei Fenstern und Lüftungsanlagen in den letzten Jahren die Marktreife zahlreicher Produkte gegeben war und weitere Fortentwicklungen zu erwarten sind. Die Konkurrenz wird den Preiskampf beleben und die Handwerker gewöhnen sich an die neuen Standards – auch hinsichtlich ihrer Angebotspreise.

Die verschiedenen Aspekte dieses Kapitels zeigen, dass Energiespartechniken zu einer Vereinigung der Ziele von Ökologie und Ökonomie führen können. Besonders sollte dabei bedacht werden, dass Gebäude für eine Lebenserwartung von vierzig bis über hundert Jahren geplant werden. Innerhalb dieser Zeit werden die Vorteile eines hoch energieeffizienten Gebäudes immer deutlicher werden, wie Abb. 99 zeigt. Das Passivhaus weist gegenüber dem Standardgebäude nicht nur eine deutlich günstigere monatliche Belastung auf, die sich mit den Jahren immer stärker niederschlägt. Während das Passivhaus nach 30 Jahren auch bei der – eher niedrig angesetzten – Energiepreissteigerung von 6 % pro Jahr immer noch eine höchst vertretbare Belastung aufweist, ist das Standardhaus bei Ablauf der Finanzierungsfrist nach dreißig Jahren spätestens ein Sanierungsfall und erfordert eine neue hohe Investition.

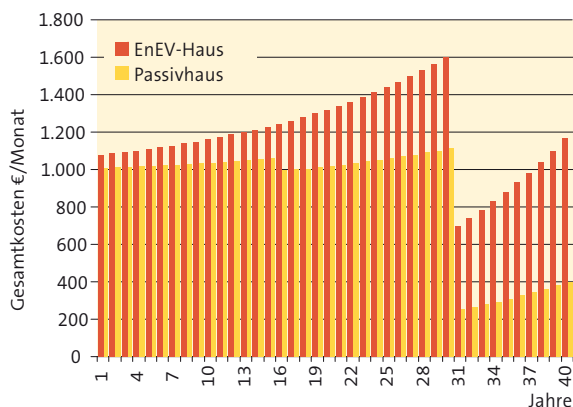


Abb. 99: Entwicklung der monatlichen Belastung im Vergleich zwischen Standardhaus und Passivhaus am Beispiel eines Einfamilienhauses mit 125 m<sup>2</sup> Wohnfläche

## 9 Beispiele

An Beispielen kann gut die schnell fortschreitende Entwicklung des energieeffizienten Bauens der letzten Jahre aufgezeigt werden. Fiel noch vor kurzer Zeit die Entscheidung allenfalls zu Gunsten eines KfW-60-Hauses, wird jetzt immer mehr deutlich, dass KfW-40-Häuser und Passivhäuser in wenigen Jahren zu gängigen Gebäudestandards werden. Der Einsatz von Energieeffizienzkomponenten wie Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung, hocheffiziente Fenster mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und hochwärmedämmende Außenbauteile werden zunehmend attraktiv.

Die nachfolgenden Beispiele sind chronologisch geordnet. An den ersten beiden wird deutlich, dass Bauherren, die vor fünfzehn Jahren auf innovative Lösungen gesetzt haben, in Gebäuden leben, die heute energetisch aktuell sind. Das heißt, ihre Gebäude sind komfortabel und haben einen deutlich geringeren Wertverlust als Vergleichsgebäude des gleichen Baujahrs.

125

Die Baukosten umfassen jeweils die Kostengruppen 300 (Baukonstruktion) und 400 (technische Anlagen). Die Angaben zu den Mehrkosten im Vergleich zum EnEV-Standard sind Erfahrungswerte aus zahlreichen Projekten unterschiedlicher energetischer Standards. Die dort analysierten Werte für die Mehrinvestitionen von erhöhten energetischen Standards wurden im Bauteilverfahren auf die unterschiedlichen Konstruktionen umgelegt und umfassen sowohl die erhöhte Dämmdicke als auch die konstruktiven Mehraufwendungen.



Abb. 100: Passivhaus im Bau

## 9.1 Standard EnEV 2009: Reihenhäuser im Wohnhof Erlangen-Büchenbach



Abb. 101: Reihenhauseile im Wohnhof Erlangen-Büchenbach



Abb. 102: Reihenhauseile in der Bauphase

126

Ort	David-Morgenstern-Weg, 91056 Erlangen
Baujahr:	1995
Planung	Architektengemeinschaft Koch, Meyer, Schellinger, Schulze Darup
Wohnfläche	gesamt 3.954 m <sup>2</sup> , je RH: ca. 130 m <sup>2</sup> zzgl. ca. 55 m <sup>2</sup> Nutzfläche (KG)
Baukosten	960 – 1.030 €/m <sup>2</sup> Wohn-/Nutzfläche
Wand	Kalksandstein 17,5 cm, Dämmung (WDVS) 14 cm, $U = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Dach	Holzkonstruktion mit Zellulosedämmung 35 cm, $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Kellerdecke	Ziegeldecke mit 15 cm Estrichdämmung, $U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fenster	Holzfenster mit Wärmeschutzverglasung, $U_w = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , $g = 62 \%$
Lüftung	manuelle Fensterlüftung
Heizung und Warmwasser	Klein-BHKW ausgelegt auf 25 % der Wärmeleistung in Verbindung mit einer Gasbrennwertheizung
Regenwasserzisterne	mit 30 m <sup>3</sup> Wasservolumen für Gartenbewässerung und WC
Heizwärmebedarf	59,8 kWh/(m <sup>2</sup> a) nach EN 832 (PHPP)
Primärenergiebedarf nach EnEV	42,8 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Heizwärmeverbrauch	(gemessen, mehrere Gebäude über 2 Jahre): 38 – 78 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Das Baugebiet 403 a im Westen von Erlangen sollte laut Stadtratsbeschluss aus dem Jahr 1990 in ökologischer Bauweise durchgeführt werden. Zahlreiche Treffen mit interessierten Bauträgern wurden durchgeführt und die umweltbedingten Planungsanforderungen besprochen. Nach grundsätzlicher Zustimmung der Beteiligten folgte allerdings nach Vergabe der Grundstücke von zahlreichen Seiten eine Rücknahme der Zusagen mit der Begründung zu hoher Kosten.

Eine Bauherrengemeinschaft nahm die Herausforderung jedoch an und errichtete 11 Reihenhäuser und ein Mehrfamilienhaus mit 21 Wohneinheiten. Ein segmentbogenförmiger Baukörper öffnet sich nach Süden und fasst auf seiner Nordseite einen Gemeinschaftsbereich mit einem Kinderspielplatz.

127

Die Bauherren versuchten, die ökologischen Anforderungen möglichst sinnvoll einzuhalten: In Massivbauweise wurden die Gebäude unter Einsatz von möglichst umweltverträglichen Materialien in einem engagierten Niedrigenergiestandard gebaut. Das Gebäudetechnikkonzept umfasste ein BHKW in Verbindung mit einem Brennwert-Spitzenkessel. Dadurch konnte ein günstiger Primärenergiewert für die Energieversorgung realisiert werden. Die Bauherrengemeinschaft war ihrer Zeit um fünfzehn Jahre voraus und erfüllte bereits das Anforderungsniveau der EnEV 2009.



## 9.2 KfW-4 o-Standard: Reihenhäuser Veitsbronn



Abb. 103: Reihenhäuser in Veitsbronn, Südansicht



Abb. 104: Reihenhäuser in Veitsbronn, Nordansicht

128

Ort	Heide 42, 90587 Veitsbronn
Baujahr:	1996
Planung	Meyer und Schulze Darup
Wohnfläche	3 Reihenhäuser mit 128–145 m <sup>2</sup> , ebenerdige Nebengebäude, kein Keller
Baukosten	1.150 €/m <sup>2</sup> Wohn-/Nutzfläche inkl. Eigenleistung
Wand	Holzständerbauweise mit 26 cm Zellulosedämmung, $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Haustrennwände in Kalksandstein für den sommerlichen Wärmeschutz
Dach	Holzkonstruktion mit 32 cm Zellulosedämmung, $U = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Bodenplatte	Betonbodenplatte mit 15 cm Estrichdämmung, $U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fenster	Holzfenster mit Wärmeschutzverglasung, $U_w = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , $g = 62 \%$
Lüftung	manuelle Fensterlüftung
Heizung und Warmwasser	Heizung mit Gasbrennwerttechnik in Verbindung mit Biomasseheizung; Solarthermieanlage mit 13 m <sup>2</sup> Flachkollektoren mit 750-L-Schichtenspeicher
Heizwärmebedarf	49 kWh/(m <sup>2</sup> a) nach PHPP
Primärenergiebedarf nach EnEV	39,8 kWh/(m <sup>2</sup> a) (Bezug $A_N$ )
Heizwärmeverbrauch	(gemessen): i. M. 45 kWh/(m <sup>2</sup> a), Verbrauch für Warmwasserbereitung i. M. 8 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Drei befreundete Familien errichteten bei einem minimalen Kostenziel mit viel Eigenleistung eine Reihenhaushgruppe um einen kleinen Gemeinschaftshof. Die Pultdachform und die leicht bogenförmige Gestaltung des Baukörpers entsprachen nicht den Festsetzungen des Bebauungsplans, wurden von der Gemeinde jedoch genehmigt, da innovative Gebäudekonzepte für das Gebiet gewünscht waren.

Die energetischen Standards standen aufgrund des geringen Budgets in einem Spannungsfeld zu den Kosten. Deshalb konnten keine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen und keine Lüftungsanlage eingebaut werden. Dennoch wurde mit den drei Gebäuden bereits der KfW-40-Standard erreicht.

Der Mut der Gemeinde zur Genehmigung der Pultdachform hat sich gelohnt: das Gebäude erhielt einen SOLID-Preis für solare Gestaltung.

### 9.3 Plusenergiehaus: EFH Erlangen, Dorfmeisterweg 14



Abb. 105: Passivhaus in Erlangen, Südansicht



Abb. 106: Passivhaus in Erlangen, Detail Solaranlage in der Bauphase

130

Ort	Dorfmeisterweg 14, 91056 Erlangen
Baujahr:	1998/99
Planung	Schulze Darup & Partner
Wohnfläche	Einfamilienhaus mit 139 m <sup>2</sup> Wohnfläche, nicht unterkellert
Baukosten	965 €/m <sup>2</sup> Wohnfläche zzgl. Passivhaus-Komponenten 137 €/m <sup>2</sup> , Solaranlage (5.800 €) und Photovoltaikanlage (10.000 €)
Wand	Kalksandstein 17,5 cm, Dämmung (WDVS) 32 cm, $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Dach	Holzkonstruktion mit Zellulosedämmung 42 cm, $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Bodenplatte	schwimmend auf 10 cm XPS-Dämmung zzgl. 15 cm Estrichdämmung, $U = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fenster	gedämmte Rahmen und 3-fach-Wärmeschutzverglasung, $U_w = 0,74 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , $g = 60\%$
Lüftung	Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, Erdreichwärmetauscher 25 m lang, 160 mm Durchmesser
Heizung und Warmwasser	Gasbrennwertheizung in Verbindung mit Solarthermie: 9 m <sup>2</sup> Fassaden-Flachkollektoren mit 350-L-Schichtenspeicher
Heizwärmebedarf	15,0 kWh/(m <sup>2</sup> a) nach EN 832 (PHPP)
Heizenergieverbrauch	gemessene Werte im Jahr 2000 (2001 in Klammern): 12,6 (6,6) kWh/(m <sup>2</sup> a), für Warmwasserbereitung 3,4 (2,2) kWh/(m <sup>2</sup> a), Solargewinne 7,0 (9,0) kWh/(m <sup>2</sup> a)
Photovoltaik-Anlage	4,0 kW <sub>peak</sub> (Ausbau in 2 Stufen zum Plusenergiehaus)
Primärenergie-Kennwert	in der Bilanz ein Plusenergiehaus für Heizen, Warmwasser, Haushaltsstrom und Aufladen des Elektromobils

Das erste Passivhaus der Region Nürnberg entstand 1998/99 in Erlangen unter großem öffentlichen Interesse. Der Bauherr ist Physiker und führte eine wissenschaftliche Begleitung des Projektes durch. Das Baugebiet eignete sich durch die Vorgaben des Bebauungsplans hervorragend für energieeffiziente Gebäude.

Die Gebäudegeometrie des zweigeschossigen Pultdach-Baukörpers ermöglicht die direkte Südbesonnung aller Aufenthaltsräume. Die Nordseite weist keine Fenster auf. Durch die Pultdachform mit etwa 18 Grad Dachneigung wird in etwa der winterliche Sonnenstand aufgenommen. Trotz dichter Bebauung ergibt sich daraus eine gute Besonnung für alle Gebäude in diesem Baugebiet und eine günstige Bilanz hinsichtlich der solaren Gewinne.

131

Der Bauherr wurde treibende Kraft bei zahlreichen Energieeffizienz-Projekten und bei Photovoltaik-Anlagen auf Schuldächern und unterstützte so Erlangens gute Platzierung in der „Solar-Bundesliga“. Der Erlanger Stadtrat beschloss in der Folge im Jahr 2000 die Förderung von Passivhäusern, was zu zahlreichen weiteren Projekten führte.

## 9.4 Reihenhäuser in Passivbauweise: Stuttgart-Feuerbach



Abb. 107: Reihenhäuser Stuttgart-Feuerbach, Südansicht



Abb. 108: Reihenhäuser Stuttgart-Feuerbach, Nordansicht zum Ende der Bauphase

132

Ort	Linzer Straße/Schelmenecker Weg, 70469 Stuttgart
Baujahr:	(Bezug: 2000)
Planung	Rainfried und Hana Rudolf, Stuttgart; Haustechnik und thermische Bauphysik: EBÖK, Tübingen; Energetische Messtechnik durch das Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart im Rahmen eines Forschungsvorhabens des BMWi
Wohnfläche	Reihenhäuser mit 110–130 m <sup>2</sup> Wohnfläche zzgl. Nutzfläche der Nebenräume und ggf. Keller
Baukosten	992 €/m <sup>2</sup> Wohnfläche inkl. Passivhaus-Komponenten (ohne Wandfliesen, Maler-, Bodenbelagsarbeiten)
Wand	Kalksandstein 17,5 cm, Dämmung (WDVS) 30 cm WLK 035, $U = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Dach	massive Betonkonstruktion mit aufgesattelter wärmebrückenarmer Holzkonstruktion mit Mineralfaserdämmung 40 cm WLK 035, $U = 0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Bodenplatte	Beton mit 25 cm Estrichdämmung, $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fenster	gedämmte Rahmen und 3-fach-Wärmeschutzverglasung, $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , $g = 53 \%$
Lüftung, Heizung und Warmwasser	Wärmepumpen-Kompaktaggregat pro Reihenhaus, Erdreichwärmetauscher 30 m lang, 200 mm Durchmesser
Heizwärmebedarf	14,8 kWh/(m <sup>2</sup> a) nach EN 832 (PHPP)

Im Baugebiet Schelmenecker in Stuttgart-Feuerbach wurden nach einem Bauträgerwettbewerb der Stadt 14 Wohngebäude mit 52 Reihenhauseinheiten errichtet. Die topografischen Vorteile der Hanglage werden geschickt durch fünf unterschiedliche Haustypen mit zwei Vollgeschossen und Pultdach ausgenutzt. Die Baukörper sind höhenversetzt angeordnet, so dass eine gute Grundstücksausnutzung mit minimierter Verschattung kombiniert werden kann.

Im Rahmen eines zweijährigen Messprogramms, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), wurden Daten zu Strom- und Wärmeverbrauch, Außenklima sowie zum Nutzerverhalten erfasst und bewertet. Gemäß den Anforderungen der EnEV wäre ein Primärenergiebedarf von 105 kWh/m<sup>2</sup>a zulässig. Gemessen wurden ca. 30 kWh(m<sup>2</sup>a) (Flächenbedarf nach EnEV, Gebäudenutzfläche  $A_N$ ).

133

Die Bewohner können in der Heizperiode die mittlere Raumlufttemperatur individuell an einem zentralen Gerät einstellen. Die zusätzlichen Elektroheizkörper sind so geregelt, dass der Stromkreis nur dann freigegeben wird, wenn die Leistung der Wärmepumpe nicht ausreicht, um die gewünschte Temperatur zu erreichen.

## 9.5 Passivhaus: EFH in Herzogenaurach



Abb. 109: Alle Aufenthaltsräume sind nach Süden ausgerichtet.



Abb. 110: Nordansicht des Einfamilienhauses in Herzogenaurach

Ort	Welkenbacher Kirchweg, 91074 Herzogenaurach-Welkenbach
Baujahr:	2002
Planung	Schulze Darup & Partner
Wohnfläche	163 m <sup>2</sup> inkl. Nebenräumen, nicht unterkellert
Baukosten	1.100 €/m <sup>2</sup> Wohn-/Nutzfläche; Mehrinvestition gegenüber EnEV-Standard 110 €/m <sup>2</sup>
Wand	KS-Mauerwerk mit WDVS aus 32 cm PS, $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Dach	Holzkonstruktion mit Tragwerk aus Brettschichtholz 60/400 mm, 40 cm Zellulosedämmung, $U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Bodenplatte	Stahlbetonbodenplatte mit Streifenfundamenten, 25 cm Estrichdämmung, $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fenster	Kunststofffenster $U_w = 0,78 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ , g-Wert = 50 %
Wärmebrücken	Detaillierte Ermittlung der Wärmebrücken, $\Delta_{UWB} = -0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Lüftung	Zentrale Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{WRG,eff} = 82 \%$ , Lüftungsverteilung unter dem Estrich, Erdreichwärmetauscher 20 m lang mit Rohrdurchmesser 160 mm
Heizung und Warmwasser	Gas-Brennwert-Therme in Verbindung mit 10 m <sup>2</sup> Fassaden-Solarkollektoren und 400 Liter Schichtenspeicher; Gasversorgung über Flüssiggas in Flaschen
Heizwärmebedarf	14,5 kWh/(m <sup>2</sup> a) nach PHPP
Primärenergiebedarf nach EnEV	29 kWh/(m <sup>2</sup> a) (Bezug $A_N$ )
Heizwärmeverbrauch	13,5 kWh/(m <sup>2</sup> a), Verbrauch für Warmwasserbereitung 11 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Luftdichtheit	Blower-Door-Test: $n_{50} = 0,30 \text{ h}^{-1}$

Das Grundstück am südöstlichen Rand des Herzogenauracher Ortsteils Welkenbach mit diagonalen Lage zur Südausrichtung war die Grundlage für die Planung des Einfamilienhauses in einer segmentbogenartigen Form. Dadurch konnten alle Fenster der Aufenthaltsräume nach Süden ausgerichtet werden. Darüber hinaus schafft der Dachverlauf angemessen niedrige Räume bei den nördlich situierten Kellerersatzräumen und ausreichend Höhe für Hochbetten bzw. Spielebenen in den Kinderzimmern.

Der Versatz zwischen Erdgeschoss und Dachgeschoss mit der gegenläufigen Dachfläche ermöglichte nicht nur eine optimierte Ausbalancierung der EG- zu den OG-Flächen, sondern wurde seitens der Herzogenauracher Baubehörde wohlwollend als hinreichendes Attribut an die umgebende Bebauung gewertet, um eine Genehmigung für diese Passivhaus-Form geben zu können.



9.6 Passivhaus: EFH mit Vakuumdämmung in Voggenthal



Abb. 111: Passivhaus mit Vakuumdämmung in Neumarkt-Voggenthal, Südansicht



Abb. 112: Anlieferung eines vakuumgedämmten Dachelementes

136

Ort	92318 Neumarkt-Voggenthal
Baujahr:	2006
Planung	Architekt Martin Forstner, Neumarkt
Wohnfläche	280 m <sup>2</sup> , Nutzfläche 84 m <sup>2</sup>
Wand	VIP-kerngedämmte Holz-Fertigelemente, d = 16,7 cm, U = 0,12 W/(m <sup>2</sup> K)
Kellerwand	VIP-kerngedämmte Beton-Fertigelemente, d = 27 cm, U = 0,11 W/(m <sup>2</sup> K)
Flachdach	VIP-gedämmte Holz-Fertigelemente, d = 13 cm, U = 0,12 W/(m <sup>2</sup> K)
Satteldach	VIP-kerngedämmte Holzfertigelemente, d = 22 cm, U = 0,12 W/(m <sup>2</sup> K)
Bodenplatte	VIP-gedämmte tragende Stahlbetonbodenplatte, 40 cm U = 0,06 W/(m <sup>2</sup> K)
Fenster	Holz-Alu-Fenster U <sub>w</sub> = 0,72 W/m <sup>2</sup> K, g-Wert = 50 %
Lüftung	Zentrale Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{WRG,eff}$ = 85 %, Erdschleuchtungsrohr 20 m lang mit Rohrdurchmesser 160 mm
Heizung und Warmwasser	Wärmepumpe in Verbindung mit einer Wärmespeicherzisterne 11.000 Liter; Deckenheiz- und -kühlsystem mit Zisternenkühlung (Komfort Klima System) 12.500 Liter; Solarthermie mit 12 m <sup>2</sup> Vakuumröhrenkollektor und 1.050 Liter Solarschichtenspeicher
Heizwärmebedarf	14,8 kWh/(m <sup>2</sup> a) nach PHPP
Primärenergiebedarf nach EnEV	24 kWh/(m <sup>2</sup> a) (Bezug A <sub>N</sub> )
Photovoltaikanlage	Photovoltaikanlage 36,8 m <sup>2</sup> , 4,05 kW <sub>peak</sub> ; Ertrag ca. 3.500 kWh/Jahr
Wärmebrücken	Detaillierte Ermittlung der Wärmebrücken, $\Delta_{UWB}$ = - 0,02 W/(m <sup>2</sup> K)
Luftdichtheit	Blower-Door-Test: n <sub>50</sub> = 0,33 h <sup>-1</sup>

Das Einfamilienhaus in Voggenthal ist ein Pilotbauvorhaben für eine Technik, die in den letzten Jahren zunehmend ein Marktsegment besetzt. Vakuum Isolationspaneele (VIP) können mit 4 - 8 cm Dämmdicke den gleichen U-Wert erreichen, wie Standardkonstruktionen mit 20 bis 40 cm Dämmung. Dazu wird eine mehrschichtige, widerstandsfähige Folie um ein Trägermaterial verschweißt und der entstandene Raum evakuiert. Die Firma Variotec in Neumarkt hat mit dem Architekten darüber hinausgehend Fertigkonstruktionen entwickelt, die auf der Baustelle gut einsetzbar und mit Befestigungssystemen ausgestattet sind, die einfach und wärmebrückenoptimiert funktionieren.

Das Bauvorhaben ist in mehrere Forschungsvorhaben eingebunden. Neben der VIP-Technologie wurde ein Wärmepumpensystem mit Primärkreislauf aus einer Zisterne installiert sowie ein Kühlsystem, das ebenfalls aus einer Zisterne mit 12.500 Liter Inhalt gespeist wird. Sowohl die Wärme im Winter als auch die Kühle im Sommer wird über Deckenheizelemente bereitgestellt. Übertemperatur kann im Sommer mit diesem Kühlsystem sicher ausgeschlossen werden. Als passive Maßnahme wurden PCM-Latent-Wärmespeicherflächen in Form von 120 m<sup>2</sup> Gipsplatten ausgeführt, die durch die Latentwärme im Phasenübergang bei ca. 25 °C zusätzlich für ein ausgeglichenes Raumklima sorgen.

Die Photovoltaikanlage mit gut 4 kW<sub>peak</sub> bringt das Gebäude nah ein Plusenergiehaus.

## 9.7 Passivhäuser: Vier Reihenhäuser in Immenhofen



Abb. 113: Reihenhausezeile im Passivhausstandard in Immenhofen, Südansicht



Abb. 114: Reihenhausezeile im Passivhausstandard in Immenhofen, Nordansicht

138

Ort	Walburgastraße, 87674 Immenhofen
Baujahr:	2006/2007
Planung	may.schurr.architekten, Bad Wörishofen
Wohnfläche	2 Eckhäuser à 110 m <sup>2</sup> , 2 Mittelhäuser à 79 m <sup>2</sup> , nicht unterkellert
Baukosten	1.630,00 €/m <sup>2</sup> Wohn-/Nutzfläche inkl. Keller ohne Verkehrsflächen; Mehrinvestition gegenüber EnEV-Standard 110 €/m <sup>2</sup>
Wand	Lärchen-Stülpchalung, 12 cm Holzweichfaserdämmung WL 040, Holzständer mit Einblasdämmung 16 cm WL 040, ausgedämmte Installationsebene 10 cm WL 040, U-Wert = 0,11 W/(m <sup>2</sup> K)
Dach	Holzweichfaserdämmung 16 cm WL 040, Massivholzsparren 20 cm mit Zwischensparrendämmung WL 040, Installationsebene 10 cm mit Flachs WL 040, U-Wert = 0,091 W/(m <sup>2</sup> K)
Bodenplatte	Stahlbetonbodenplatte mit horizontaler Frostschräge, 12 cm Dämmung zwischen Lagerhölzer WLG 040, 12 cm XPS-Perimeterdämmung WL 035, U-Wert = 0,15 W/(m <sup>2</sup> K)
Fenster	Massivholzfenster $U_w = 0,80$ bis $0,93$ W/(m <sup>2</sup> K), g-Wert = 52 %
Lüftung	Zentrale Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, Wärmebereitstellungsgrad Lüftungsmodul $\eta_{WRG,eff} = 85 - 93$ %, Mittelhäuser: Erdreichwärmetauscher DN 200, Länge 25 m, PE-Leitung 2 – 2,5 m tief, Randhäuser: Solewärmetauscher DN32, 300 m, 2,5 – 5 m tief im Grundwasser
Heizung und Warmwasser	Wärmepumpenkompaktgeräte, 200 Liter Brauchwasserspeicher je Gebäude, Übertragung Heizwärme mittels Fußbodenheizung und Luft Randhäuser, Luft Mittelhäuser
Heizwärmebedarf	15 kWh/(m <sup>2</sup> a) nach PHPP, Warmwasser 21 – 24 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Wärmebrücken	Detaillierte Ermittlung der Wärmebrücken, $\Delta_{UWB} = -0,01$ W/(m <sup>2</sup> K)
Luftdichtheit	Blower-Door-Test: $n_{50} = 0,32$ h <sup>-1</sup>

Der Entwurf einer Reihenhauszeile im Passivhausstandard war die Aufgabe der Architekten May & Schurr für ein Hanggrundstück in Immenhofen. Um das Gebäude dem Hangverlauf des Grundstückes optimal anzupassen, wurde die Split-Level-Bauweise gewählt. Jede Wohneinheit besteht aus 4 Wohn – Ebenen die jeweils um ein halbes Geschoss zueinander versetzt sind. Dies verschafft mehr Wohnfläche durch Minimierung der Treppen- und Flurräume. Die Split-Level-Bauweise unterstützt die Zonierung der Räume, durch die unterschiedlichen Raumhöhen wird eine abwechslungsreiche Wohnatmosphäre geschaffen.

Sowohl der Eingang als auch die Terrasse sind ebenerdig angebunden. Der kompakte Grundriss der Häuser bewirkt, dass alle Leitungen in der gedämmten Hülle über kurze Wege geführt werden können. Die dezentralen Lüftungsgeräte stehen ebenfalls in der gedämmten Gebäudehülle und sind jeder Wohneinheit direkt zugeordnet.

139

Die Gebäude wurden 2008 mit dem Klimahaus-Preis Bayern ausgezeichnet.

9.8 Passivhaus: EFH in Nürnberg-Fischbach



Abb. 115: Einfamilienhaus als Passivhaus in Nürnberg-Fischbach, Südansicht



Abb. 116: Einfamilienhaus als Passivhaus in Nürnberg-Fischbach, Nordansicht

140

Ort	Willy-Wunder-Straße, 90475 Nürnberg
Baujahr:	2008
Planung	Schulze Darup & Partner
Wohnfläche	185 m², nicht unterkellert
Baukosten	1.350 €/m² Wohn-/Nutzfläche; Mehrinvestition gegenüber EnEV-Standard 100 €/m²
Wand	KS-Mauerwerk mit WDVS aus 30 cm PS, $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Dach	Holzkonstruktion mit Tragwerk aus Brettschichtholz 60/400 mm, 40 cm KMF, $U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Bodenplatte	tragende Stahlbetonbodenplatte, 25 cm Dämmung unterhalb der Bodenplatte, $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fenster	Holz-Alu-Fenster $U_w = 0,80 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ , g-Wert = 50 %
Lüftung	Zentrale Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{\text{WRG,eff}} = 84 \%$ , Erdreichwärmetauscher 20 m lang mit Rohrdurchmesser 160 mm
Heizung und Warmwasser	Wärmepumpe mit Erdsonde in Verbindung mit 8 m² Fassaden-Solarkollektoren und 300 Liter Schichtenspeicher; Kühlmöglichkeit mit Nutzung der natürlichen Erdkühle über die Erdsonde der Wärmepumpe mittels Betonkernaktivierung und Flächenheizung
Heizwärmebedarf	14,8 kWh/(m²a) nach PHPP
Primärenergiebedarf nach EnEV	< 24 kWh/(m²a) (Bezug $A_N$ )
Photovoltaikanlage	2,5 kW <sub>peak</sub>
Wärmebrücken	Detaillierte Ermittlung der Wärmebrücken, $\Delta_{\text{UWB}} = -0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Luftdichtheit	Blower-Door-Test: $n_{50} = 0,40 \text{ h}^{-1}$

In einem zentrumsnahen Wohngebiet in Nürnberg am Rand eines Naturschutzgebietes entstand dieses Passivhaus, bei dem hoher Komfort und niedrigster Energieverbrauch verbunden werden sollten. Die Gebäudehülle entspricht dem Passivhausstandard. Die Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung sorgt für kontinuierlich frische Außenluft. Bei der Gebäudetechnik wurde auf ein komfortbetontes System gesetzt: Ein Wärmepumpensystem ermöglicht sowohl die Wärmebereitstellung im Winter über ein Flächenheizungssystem als auch eine milde Kühlmöglichkeit im Sommer.

Obwohl die passiven Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz mittels hoher Baumasse durch die Kalksandsteinwände und durch die Verschattung mittels Raffstores gemäß PHPP-Projektierung keine Überschreitung von 26 °C erwarten lassen, war den Bewohnern eine zusätzliche Kühloption ein Anliegen. Dazu wird das vorhandene Heizsystem genutzt, indem im Sommer die Kühle aus der Erdsonde ohne Zwischenschalten der Wärmepumpe bei einem Temperaturniveau um 18 Grad durch die Heizflächen geschickt wird. Dazu ist nur der Pumpenstrom erforderlich, das heißt, der Energieaufwand lässt sich in einer Saison mit wenigen kWh berechnen. Als zusätzlicher Effekt wird das angekoppelte Erdreich um die Sonde leicht erwärmt, sodass die Wärmepumpen-Arbeitszahl für den Winterbetrieb etwas günstiger liegt.

141

Abgerundet wird das Energiekonzept durch eine Photovoltaikanlage. Wäre die Leistung von 2,5 kW<sub>peak</sub> verdoppelt worden, läge das Gebäude fast im Bereich des Plusenergiehauses.

## 10 Ausblicke

Niedrigenergie- und Passivhaus-Technologien haben in den letzten Jahren zu einem energetischen Quantensprung geführt. Es ist gelungen, innerhalb von 25 Jahren vom 20-Liter-Haus zum 1,5-Liter-Haus zu gelangen. Das Faszinierendste ist die Tatsache, dass die zugrunde liegenden Techniken durchweg einfach und in der Breite anwendbar sind. Zudem ermöglichen sie ein großes Maß an Kreativität. Dies betrifft sowohl die architektonische Gestaltung als auch die Vielfalt der technischen Lösungskonzepte.

Und die weitere Entwicklung wird spannend bleiben. Es ist überhaupt nicht davon auszugehen, dass sich die technischen Innovationen verlangsamen werden. In allen Bereichen sind weitere Entwicklungen abzusehen:

- Die Ausführung der Gebäudehülle mit U-Werten um  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  wird durch die breite Markteinführung geeigneter Produkte einfacher und kostengünstiger. Wärmebrückenminimierung und Luftdichtungskonzepte werden zur Regel und durch entsprechende Produkte unterstützt. Dämmmaterialien werden auf ihre Primärenergiebilanz und Umweltverträglichkeit hin weiter optimiert. Schließlich wird es zusätzliche Materialien und Techniken geben. Vakuumdämmung ist bereits marktverfügbar, ermöglicht sehr geringe Dämmdicken und wird in den nächsten Jahren kostengünstiger werden. Dämmschäume auf Grundlage von Nanotechnologie werden in absehbarer Zeit auf den Markt kommen und Lambda-Werte um  $0,010$  bis  $0,015 \text{ W}/(\text{mK})$  aufweisen, das heißt, Passivhaus-Konstruktionen sind mit  $10 \text{ cm}$  Dämmdicke möglich.
- Verglasungen und Rahmenteknik haben sich immer katalytisch auf die energetische Fortentwicklung ausgewirkt. Die Angebotspalette wird sich ausweiten und die spezifischen Kosten werden niedriger. Weitere Optimierungen bei Gläsern und Rahmen werden folgen. So werden in den nächsten Jahren Rahmensysteme mit einem  $U_f$ -Wert von  $0,8$  bis  $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  kostenneutral zu den bisherigen Standard-Holz- und Kunststoffprofilen angeboten werden. Weitere Verbesserungen bei optimierten Passivhaus-Profilen werden umgesetzt werden. Dreischeibenverglasungen werden gegenüber der Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung nur noch Mehrkosten von  $10$ – $20 \text{ €/m}^2$  aufweisen und mithin nicht nur die energetische sondern auch die ökonomische Premium-Verglasung werden. Ab etwa 2012 wird Zweischeiben-Vakuumverglasung auf den Markt kommen mit  $U_g$ -Werten um  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Es ist absehbar, dass diese Gläser mittelfristig sehr kostengünstig herstellbar sind und obendrein bei weiterer Entwicklung bzw. als Dreifachverglasung nochmals eine deutliche energetische Optimierung nach unten ermöglichen.

- In der Gebäudetechnik werden die klassischen Kesselkonzepte der letzten fünfzig Jahre durch völlig neue Systemstrukturen abgelöst. Erfolgreiche Heizungshersteller werden künftig nicht mehr dem Kesselleistungsdenken verhaftet sein, sondern ihr Portfolio durch innovative Systeme mit einem möglichst hohen Anteil regenerativ erzeugter Energie ersetzen, bei denen Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und mittelfristig auch die Küchentechnik integral verbunden werden. Kleine, einfache Wärmepumpensysteme werden für Passivhaus-Anforderungen mit 2 kW Heizleistung ausgelegt und zu einem Viertel heutiger Kosten verfügbar sein – allerdings ergänzt z. B. um Solarthermie und die bereits oben benannten Features.

Darüber hinaus wird dezentrale Kleinst-Technik im unteren kW-Bereich vernetzt werden mit dezentralen Nahwärmeverbünden bei abnehmender Bedeutung von zentraler Großtechnik. Kraft-Wärme-Kopplung wird über die Brennstoffzellenentwicklung mittelfristig in jeder Anforderungsgröße verfügbar sein. Regenerative Energieerzeugung wird durch die geringen Leistungsanforderungen an Marktanteil stark zunehmen und kann durch dezentrale Strukturen jeweilige Standorte mit ihren individuellen Vorteilen nutzen, sei es Solarthermie, Biomassetechnik, Wind-, Wasserkraft, Photovoltaik, Geothermie oder Sonstige. Gebäude werden auf dem Weg zunehmend eine Plusenergie-Bilanz aufweisen.

- Energiemanagement wird in einem freien Energiemarkt als zusätzlicher Motor für eine dezentrale Energieerzeugung wirken. Durch die Entwicklungen bei der Gebäudetechnik wird der anfallende Überschuss an Energie bei den Gebäuden in einem Verbundsystem gemanagt werden müssen. Durch Vernetzung und Lastmanagement wird eine krisensichere Energieversorgung ohne hohe zentrale und kostenintensive Vorhaltungskapazitäten ermöglicht.
- Facility Management wird für alle Gebäude eine wirtschaftliche Selbstverständlichkeit.

Das Miteinander von Ökonomie und Ökologie ist eine immanente Folge dieser Entwicklung. Die Rahmenbedingungen dazu sind durch die zunehmende Energieeffizienz beim Bauen bereits gelegt. Kostenzuordnung nach dem Verursacherprinzip wird zunehmend zum wirtschaftspolitischen Grundprinzip werden und für die Ressourcenschonung weitere Impulse geben. Es ist davon auszugehen, dass diese Entwicklungen in wenigen Jahren deutlich die Rahmenbedingungen des Bauens prägen werden. In weniger als zehn Jahren werden minimalenergetische Anforderungen den üblichen Baustandard darstellen. Da unsere Investitionsentscheidungen im Immobilienbereich zu Festlegungen für dreißig bis über fünfzig Jahren führen, können nur weitsichtige Entscheidungen bei der heutigen Planung betriebs- und volkswirtschaftlich sinnvoll sein. Darüber hinaus wird sich eine gesamtheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit beim Bauen zunehmend durchsetzen.



Selbstverständlich wird die energetische Sanierung des Gebäudebestands innerhalb kürzester Zeit nach den gleichen Entscheidungskriterien wie der Neubaubereich behandelt werden. Während Neubau auch bei optimalen energetischen Standards immer noch eine zusätzliche Belastung der Umwelt darstellen wird, bietet der Sanierungsbereich die Möglichkeit, Verbesserungen zu bewirken und eine deutliche Entlastung des Ressourcenverbrauchs herbeizuführen. Eine Steigerung der Sanierungstätigkeit von derzeit knapp 2 % jährlich auf über drei bis 4 % des Gebäudebestandes wird zudem einen Konjunkturschub für die regional strukturierte Bauwirtschaft geben. Diese wird hoch energieeffizienten Standards und eine Energie- und Emissionseinsparung in Richtung von 90 % auf ein Zehntel des Bestandswertes erreichen. Da immer mehr Gebäude in der Bilanz zu Energielieferanten werden, liegt im Baubestand das wesentliche Potenzial für eine mittelfristig neutrale CO<sub>2</sub>-Bilanz, die zunächst in Regionen erreicht wird und langfristig als umfassendes Ziel gesehen werden muss.

# 11 Zitierte Literatur und Abbildungsnachweis

## 11.1 Zitierte Literatur

- /1/ Schulze Darup, B.: Bauökologie. Wiesbaden: Bauverl., 1996. ISBN 3 7625 3301-6, S. 97ff
- /2/ Feist, W. (Hrsg.): Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewusstes Bauen. Heidelberg: Müller, 1998. 5., durchges. Aufl., ISBN 3-7880-7638-0, S. 85
- /3/ DIN EN 832. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs, Wohngebäude. Juni 2003
- /4/ Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.): PHPP 2007: Passivhaus Projektierungs Paket 2007. Handbuch + CD-ROM, 7., überarb. Aufl.
- /5/ vgl. Passivhaus Institut, Darmstadt; Internet: [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- /6/ Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.): 11. Internationale Passivhaustagung 2007. Bregenz (Österreich), 13.–14. April 2007. Tagungsband. 2007. 530 S.  
Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.): 12. Internationale Passivhaustagung 2008. Nürnberg, 11.–12. April 2008. Tagungsband. 2008. 596 S., ISBN 978 3-00 024074 4
- /7/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Ref. Öffentlichkeitsarbeit, Bonn (Hrsg.): Bericht über den Stand der Umsetzung der Maßnahmenvorschläge der „Konzeption der Bundesregierung zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen“. Febr. 1996. 90 S., Download unter: [www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/raumluft.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/raumluft.pdf)
- /8/ Streit, B.: Lexikon Ökotoxikologie. Weinheim: VCH Verl., 1994. 2., aktualisierte und erw. Aufl., S. XIII
- /9/ Grün, L.: Untersuchungen zur Bewertung der Luftqualität im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein. In: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt (Hrsg.): Luftqualität im Passivhaus. Febr. 1995. S. 27ff. Passivhaus-Bericht. Nr. 10
- /10/ Schulze Darup, B. (Hrsg.): Passivhaus Projektbericht: Energie & Raumluftqualität. Messtechnische Evaluierung und Verifizierung der energetischen Einsparpotentiale und Raumluftqualität an Passivhäusern in Nürnberg. Analyse und Bewertung von UmweltSchadstoffen (AnBus) e.V., Fürth (Hrsg.). 2002. ca. 800 S. + CD-ROM, ISBN 3-9808428-01-9
- /11/ Untersuchung des Bundesgesundheitsamtes (BGA) in ca. 500 Wohnräumen: Konzentrationen flüchtiger organischer Substanzen.
- /12/ Schulze Darup, B.: Bauökologie. Wiesbaden: Bauverl., 1996. 446 S. ISBN 3 7625 3301-6
- /13/ Zimmermann, M.: Handbuch der passiven Sonnenenergienutzung. Planungsunterlagen zu Energie und Gebäude. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Zürich (Schweiz) (Hrsg.); Bundesamt für Energie (BFE), Bern (Schweiz) (Hrsg.). 1986; SIA/BFE-Dokumentation. D 010
- /14/ Herstellerliste von Passivhaus-geeigneten Komponenten: [www.passivhaus-info.de](http://www.passivhaus-info.de)
- /15/ Schnieders, J.: Passivhaus geeignete Fensterrahmen – das Prinzip. In: EB EnergieEffizientes Bauen. Jg. 2 (2001), H. 2, S. 87–92
- /16/ Gertis, K. u. a.: Untersuchungen zur TWD. Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart (Hrsg.). 2000
- /17/ Hauser, G.; Stiegel, H.: Wärmebrückenatlas für den Mauerwerksbau. Wiesbaden: Bauverl., 1996. 425 S., ISBN 3-7625-3324-5
- /18/ Hauser, G.; Stiegel, H.: Haupt: Wärmebrückenkatalog – Computergestütztes Wärmebrückenprogramm.
- /19/ Wärmebrückenkatalog [www.kalksandstein.de](http://www.kalksandstein.de)
- /20/ Berechnung nach DIN EN ISO 10211:2008-04 (D): Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen. 2007.
- /21/ Energieeinsparverordnung (EnEV) § 5. 24. Juli 2007
- /22/ Bolender, T.; Eicke-Hennig, W.: Luftdichtheit der Gebäudehülle. IMPULS-Programm Hessen, Darmstadt (Hrsg.). 2001. 46 S.
- /23/ Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V., Kassel [www.flib.de](http://www.flib.de)

- /24/ Pohl u. a.: Synergie Haus, Luftdicht – Prima-Klima-Programm. PreussenElektra, Hannover (Hrsg.). 1997
- /25/ Feist, W.; Werner, J.; Pflüger, R. u. a.: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Passivhaus Institut, Darmstadt. (Hrsg.). Okt. 1999. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser – Phase II. Protokollband. Nr. 17 (zahlreiche Grundlagen für Kap. 5)
- /26/ Feist, W.: Anforderungen an die Wohnungslüftung im Passivhaus. In: Passivhaus Institut, Darmstadt. (Hrsg.). Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Okt. 1999. S. 9. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser – Phase II. Protokollband. Nr. 17
- /27/ Flückiger, B.; Wanner, H.-U.; Lüthy, P.: Mikrobielle Untersuchungen von Luftansaug-Erdregistern. ETH Zürich. Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie. Fachbereich Umwelthygiene (Hrsg.). Febr. 1997. 64 S.
- /28/ FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.): Raumluftkonditionierung mit Erdwärmetauschern. 2000. BINE-Projektinfo. Nr. 2/00
- /29/ Grundlagen:/25/ und Feist, W.: Wärmerückgewinnungsgerät – Zertifizierungskriterien für Passivhaus geeignete Komponenten. Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.). [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- /30/ Europäisches Testzentrum für Wohnungslüftungsgeräte (TZWL) e. V., Dortmund (Hrsg.): TZWL-Bulletin, Liste für Wohnungslüftungsgeräte mit und ohne Wärmerückgewinnung. Okt. 2007. 10. Aufl. [www.TZWL.de](http://www.TZWL.de)
- /31/ Werner, J.; Laidig, M.: Grundlagen der Wohnungslüftung im Passivhaus. In: Passivhaus Institut, Darmstadt. (Hrsg.). Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Okt. 1999. S. 25 – 54. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser – Phase II. Protokollband. Nr. 17
- /32/ Loga, T.; Knissel, J.; Ebel, W. u. a.: Nutzerverhalten. Passivhaus Institut, Darmstadt. (Hrsg.). Nov. 1997. 92 S. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser. Protokollband. Nr. 9
- /33/ Arbeitsgruppe 6 – Wohnerfahrungen, Messergebnisse. In: 4. Passivhaus Tagung. Kassel 10. – 11. März 2000. Tagungsband. Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.). 2000. S. 429ff
- /34/ Haase, W.: Erfolgreiche Sanierung eines Wohnblocks – 95 % CO<sub>2</sub>-Einsparung. In: eza! Energie- und Umweltzentrum Allgäu gGmbH, Kempten (Hrsg.). Das Passivhaus – Ziel und Maßstab im Altbau. eza!-Symposium. Kaufbeuren, 18. Mai 2001. 2001
- /35/ Feist, W.: Varianten für die Wärmeversorgung von Passivhäusern im Vergleich. In: Passivhaus Institut, Darmstadt. (Hrsg.). Passivhaus-Versorgungstechnik. Sept. 2000. S. 91 – 176. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser – Phase II. Protokollband. Nr. 20
- /36/ FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.): Selektive Absorberbeschichtungen in Solarkollektoren. 1999. BINE-Projektinfo. Nr. 5/99
- /37/ Test Solarkollektoren und -systeme. In: ÖKO-TEST. (2004), H. 3, Sonderdruck 4 S. Solaranlagen zur Warmwasserbereitung. In: Stiftung Warentest, Berlin (Hrsg.). Test. (2008), H. 3, S. 70 – 71 Vom Kollektor in die Badewanne. In: Stiftung Warentest, Berlin (Hrsg.). Test. (2008), H. 3, S. 72 – 75
- /38/ Informationen im Internet: [www.bund.net](http://www.bund.net)
- /39/ Stand-By-Modus: [www.bund.net/bundnet/service/oekotipps/strom\\_sparen](http://www.bund.net/bundnet/service/oekotipps/strom_sparen)
- /40/ Werner, J.: Stromeinsparung bei der Lüftungs- und Pumpentechnik. In: Passivhaus Institut, Darmstadt. (Hrsg.). Stromsparen im Passivhaus. 1997. S. IV1 – IV20. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser. Protokollband. Nr. 20
- /41/ Weitere Informationen bei Energieversorgern und Energieberatungsstellen
- /42/ siehe /1/ S. 376ff
- /43/ Excel-Rechenblatt zur Ermittlung des Stromverbrauchs. In: /4/
- /44/ FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.): Photovoltaik. 2007. BINE basisEnergie. Nr. 3
- /45/ Hauff, V. (Hrsg.): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Ascheberg: Eggenkamp, 1987. 421 S., ISBN 978-3-3983166-16-9
- /46/ Deutscher Bundestag, Berlin. Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt (Hrsg.): Abschlussbericht – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung. Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung. 26. Juni 1998. 252 S. Deutscher Bundestag 13. Wahlperiode. Drucksache 13/11200
- /47/ Zwiener, G.; Mötzl, H.: Ökologisches Baustoff-Lexikon. Bauprodukte, Chemikalien, Schadstoffe, Ökologie, Innenraum. Heidelberg: Müller, 2006. ISBN 978-3-7880-7686-3

- /48/ Zwiener, G.: Handbuch Gebäude-Schadstoffe für Architekten, Sachverständige und Behörden. Köln: Müller, 1997. ISBN 978-3-481-01176-5
- /49/ siehe /1/ S. 159-281
- /50/ Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Zürich (Schweiz) (Hrsg.): Deklaration ökologischer Merkmale von Bauprodukten nach SIA 493 – Erläuterung und Interpretation. 1997. 88 S. SIA-Dokumentation. D 093
- /51/ Bayerische Architektenkammer, München (Hrsg.): ECOBIS 2000 – Das ökologische Baustoffinformationssystem. 2000. CD-ROM
- /52/ LEGEP – Lebenszyklus Gebäude Planung. Ein Programmwerkzeug für die lebenszyklusbezogene Planung und ökologisch-ökonomische Bewertung von Gebäuden. Software. Internet: [www.legoe.de](http://www.legoe.de)
- /53/ Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn (Hrsg.): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. 2001. 121 S., 2. Nachdruck
- /54/ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin (Hrsg.): Zertifizierungssysteme zum Leitfaden Nachhaltiges Bauen. (Geplant ist die Freischaltung der nationalen Internetplattform zum nachhaltigen Bauen mit allen Daten für die Zertifizierung im Herbst 2008)
- /55/ Schulze Darup, B.: Ökologische Bewertung von Passivhäusern. In: Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.). 4. Passivhaus Tagung. Kassel 10.–11. März 2000. Tagungsband. 2000. S. 546
- /56/ Schulze Darup, B.: Optimierung von Niedrigenergiehäusern zu Passivhäusern beim kostengünstigen Bauen. In: Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.). 2. Passivhaus Tagung. Düsseldorf, 27.–28. Febr. 1998. Tagungsband. 1998. S. 181–190
- /57/ Schulze-Darup, B.: Optimierung von Niedrigenergiehäusern zu Passivhäusern beim kostengünstigen Bauen. In: Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.). 2. Passivhaus Tagung. Düsseldorf, 27.–28. Febr. 1998. Tagungsband. 1998. S. 181
- /58/ Maurer; Reuter; Schulze Darup, B. u. a.: Energieeffiziente Bauleitplanung. Gutachten im Auftrag der Stadt Nürnberg. 2007
- /59/ z. B. bis zu 0,3% Zinsvergünstigung bei der Hypothekenfinanzierung, Umweltbank, Nürnberg

## 11.2 Abbildungsnachweis

Alle hier nicht aufgeführten Abbildungen stammen vom Autor.

Nummern in eckigen Klammern verweisen auf die entsprechenden Literaturangaben in Kap. 11.1

- |             |   |
|-------------|---|
| Titelbild   | may.schurr.architekten, Bad Wörishofen  |
| Abb. 1      | Werte bis 2000: Deutsche Shell AG, Hamburg (Hrsg.). Energie im 21. Jahrhundert. Shell-Studie zur Entwicklung des Welt-Energieverbrauchs. 1995; Werte ab 2000: Schema-Szenario des Autors  |
| Abb. 9      | Passivhaus Institut, Darmstadt, <a href="http://www.passivhaus.de">www.passivhaus.de</a>  |
| Abb. 16     | Künzel, H.: Porenbeton, Wärme- und Feuchteschutz. Bundesverband Porenbetonindustrie, Wiesbaden (Hrsg.). 1994. S. 11   |
| Abb. 18     | Borsch-Laaks, R.: Sorption, Diffusion, Kapillarleitung, Technische Information. Isoflocc Ökologische Bautechnik, Hessesch-Lichtenau (Hrsg.), 1994. S. 11  |
| Abb. 19     | Schulze Darup, B.: Bauökologie. Wiesbaden: Bauverl., 1996. ISBN 3 7625 3301-6, S. 43ff mit Datenverwendung aus: Witthauer, J.; Horn, H.; Bischof, W.: Raumluftqualität. Karlsruhe: Müller, 1993. S. 17–23 und Lahmann, E.: Luftverunreinigung – Luftreinhaltung. Berlin: Parey, 1990. S. 57 |
| Abb. 20     | siehe /10/  |
| Abb. 25, 26 | Wagner, A.: Energieeffiziente Fenster und Verglasungen. FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.). Berlin: Solarpraxis, 2007. 3., vollständig überarb. Aufl., ISBN 978-3-934595-61-3. BINE-Informationspaket. S. 21, 63  |
| Abb. 27     | Fenster Striegel GmbH, Bad Saulgau-Bierstetten, <a href="http://www.fenster-striegel.de">www.fenster-striegel.de</a>  |
| Abb. 28, 30 | REHAU AG + Co, Rehau, <a href="http://www.rehau.de">www.rehau.de</a>  |
| Abb. 29     | Internorm Fenster GmbH, Traun (Österreich), <a href="http://www.internorm.at">www.internorm.at</a>  |
| Abb. 31     | Jürgen Schnieders (Passivhaus Institut, Darmstadt)  |
| Abb. 32     | Inhalte aktualisiert nach: Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.): Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP). 2007   |

- Abb. 33 DIN 4108, Beiblatt 2: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Wärmebrücken. Planungs- und Ausführungsbeispiele. März 2006
- Abb. 35 Schulze Darup, B. mit Datenverwendung aus: Feist, W. (Hrsg.): Wärmebrückenfreies Konstruieren. Passivhaus Institut, Darmstadt. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser (Hrsg.), 1999. Protokollband. Nr. 16 sowie Berechnungen des Ing. Büro ebök, Tübingen
- Abb. 42 Ökologische Bausysteme B. I. Moll GmbH + Co KG, Schwetzingen
- Abb. 51 siehe /25/
- Abb. 53, 56, 57 Westaflexwerk GmbH, Gütersloh (Hrsg.): Kontrollierte Wohnungslüftung. Planung und Projektierung. 2001. S. 21, 35, 147
- Abb. 64 DIN V 4701, Teil 10 Beiblatt 1: Energetische Bewertung heiz- und raumlüftungstechnischer Anlagen. Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung; Beiblatt 1: Anlagenbeispiele. Febr. 2007
- Abb. 70 Haas-Arndt, D.; Ranft, F.: Altbauten sanieren – Energie sparen. FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.). Berlin: Solarpraxis, 2008. 2., vollständig überarb. Aufl., ISBN 978-3-934595-78-1. BINE Informationspaket. S. 98
- Abb. 71 ÖkoFEN Forschungs- und Entwicklungs GmbH, Niederkeppel (Österreich), [www.pelletsheizung.de](http://www.pelletsheizung.de)
- Abb. 72 Baumann, M.; Laue, H.-J.; Müller, P.: Wärmepumpen. Heizen mit Umweltenergie. FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.). Berlin: Solarpraxis, 2007. 4., erw. und vollst. überarb. Aufl., ISBN 978-3-934595-60-6. BINE-Informationspaket. S. 12
- Abb. 73 Maico Elektroapparate-Fabrik GmbH, Villingen-Schwenningen, [www.maico.de](http://www.maico.de)
- Abb. 74, 75 SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH, Schweinfurt, [www.senertec.de](http://www.senertec.de)
- Abb. 76 Initiative Brennstoffzelle (IBZ), [www.ibz-info.de](http://www.ibz-info.de)
- Abb. 81 Grafik: FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn; Daten: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg
- Abb. 83 Solvis GmbH & Co KG, Braunschweig, [www.solvis.de](http://www.solvis.de)
- Abb. 85, 86 Schüle, R.; Ufheil, M.: Thermische Solaranlagen. Marktübersicht. CD-ROM. Öko-Institut e.V., Freiburg (Hrsg.). 1997
- Abb. 88 Alfred Schneider GmbH, Lahr, [www.alfredschneider.de](http://www.alfredschneider.de)
- Abb. 89 Energieagentur NRW, Wuppertal: REN-Impuls-Programm „Bau und Energie“, [www.energieagentur.nrw.de](http://www.energieagentur.nrw.de)
- Abb. 90 FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.): Photovoltaik. 2007. BINE-basisEnergie. Nr. 3. S. 2, Abb. 4.
- Abb. 91 J. Eberspächer GmbH & Co. KG, Esslingen; [www.eberspaecher.com](http://www.eberspaecher.com)
- Abb. 99 May; Riedel; Schulze Darup, B.: Rechentool. Nürnberg, 2007
- Abb. 107 Kalksandstein Information GmbH + Co KG, Hannover
- Abb. 108 Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart
- Abb. 111, 112 Variotec Sandwichelemente GmbH + Co. KG, Neumarkt i. d. Oberpfalz, [www.variotec.de](http://www.variotec.de)
- Abb. 113, 114 may.schurr.architekten, Bad Wörishofen

## 12 Laufende und abgeschlossene Forschungsvorhaben aus der Energieforschung der Bundesregierung

Im Folgenden werden Forschungsvorhaben zum Thema Energieeffiziente Wohngebäude vorgestellt, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert werden.

Einen umfassenden Überblick über die Projekte der Energieforschung finden Sie auch in der Datenbank „Förderkatalog“ im Internet unter [www.foerderkatalog.de](http://www.foerderkatalog.de).

Die Sortierung der Projekte erfolgt nach dem Förderkennzeichen (FKZ).

### **Verbundprojekt: Energieoptimiertes Bauen (EnOB): Elektrochrome Verbundscheiben für intelligente Fenster – Weiterentwicklung und Optimierung eines Verbundglassystems mit komplementären elektrochromen Schichten.**

GESIMAT GmbH – Gesellschaft für intelligente Materialien und Technologien, Berlin  
FKZ **0327233F**, Laufzeit 01.09.2002 – 31.12.2007

### **Verbundvorhaben: Energieoptimiertes Bauen: Gaschrom schaltende Fassadensysteme – GasBlau.**

Interpane Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH & Co. KG, Lauenförde  
FKZ **0327233L**, Laufzeit 01.11.2006 – 30.04.2009

Werner Herr GmbH, Ebringen  
FKZ **0327233M**, Laufzeit 01.11.2006 – 30.04.2009

ISATT innovatives Steuerungs- und Automatisierungstechnik Team GmbH, Bonn  
FKZ **0327233N**, Laufzeit 01.11.2006 – 30.04.2009

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg  
FKZ **0327233O**, Laufzeit 01.12.2006 – 31.05.2009

### **Energieoptimiertes Bauen: Studie zur Energieeffizienz innovativer Gebäude-, Beleuchtungs- und Raumklimakonzepte (EnEff-Studie).**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg; Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart  
FKZ **0327240C**, Laufzeit 01.04.2007 – 30.09.2008

### **Verbundprojekt: Energieoptimiertes Bauen: Forschungsinitiative aus der Deutschen Bauindustrie für die Entwicklung eines neuen, ressourceneffizienten Baustandards der Zukunft – Ressourceneffiziente Gebäude für die Welt von Übermorgen.**

Ed. Züblin AG. Direktion Zentrale Technik, Stuttgart  
FKZ **0327240E**, Laufzeit 01.04.2008 – 31.07.2009

Bilfinger Berger AG. Creativ Center Hochbau (CCH), Frankfurt  
FKZ **0327240D**, Laufzeit 01.04.2008 – 31.07.2009

### **Energieoptimiertes Bauen: Entwicklung eines Systems der Betriebsoptimierung durch Nutzung von Messergebnissen aus GLT und Sondermesstechnik für energieoptimierte Gebäude.**

Brandenburgische Technische Universität Cottbus. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung. Lehrstuhl Technischer Ausbau  
FKZ **0327245B**, Laufzeit 01.04.2008 – 31.03.2011

### **Verbundprojekt: Entwicklung und Einsatz eines energiesparenden dezentralen Heizungspumpensystems: Entwicklung notwendiger System-Teilfunktionen und Verfahren zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit.**

WILO AG, Dortmund  
FKZ **0327294G**, Laufzeit 01.03.2006 – 31.03.2009

### **Verbundprojekt Vakuum-Isolationstechnik in Gebäuden.**

**Teilprojekt:** Entwicklung eines hoch wärmedämmenden Ziegelverbundsteins unter Verwendung von Vakuumpaneelen.

Georg Rimmele KG, Ehingen  
FKZ **0327321A**, Laufzeit 01.07.2002 – 31.01.2009

**Teilprojekt:** Entwicklung vakuumisolierter Paneele als wärmedämmende Elemente in Ziegel-Verbundsteinen.  
WOSCHKO WINLITE GmbH, Weinsberg  
FKZ **0327321B**, Laufzeit 01.07.2002 – 31.01.2009

**Teilprojekt:** Entwicklung von vakuumgedämmten Verbundfertigteilen im Passivhausstandard und deren Anwendung in einem Prototypen.  
VARIOTEC Sandwichelemente GmbH & Co KG, Neumarkt  
FKZ **0327321D**, Laufzeit 01.05.2003 – 30.04.2007

**Teilprojekt:** Weiterentwicklung von Vakuumisoliationspaneelen für den dauerhaften und universellen Einsatz als Dämmelement im Fenster- und Fassadenbau.  
Boetker GmbH & Co KG, Stuhrl  
FKZ **0327321G**, Laufzeit 01.06.2003 – 30.04.2007

**Teilprojekt:** VIP-PROVE, Vakuumisoliationspaneele – Bewährung in der Baupraxis – wissenschaftliche Begleitforschung.  
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) e. V. Abt. Funktionsmaterialien der Energietechnik, Würzburg  
FKZ **0327321N**, Laufzeit 01.03.2007 – 28.02.2010

#### **Verbundvorhaben LowEx.**

**Teilprojekt:** Niedrigexergiesysteme für die Heiz- und Raumluftechnik; Systemuntersuchung.  
Technische Universität Berlin. Hermann-Rietschel Institut. FG Heiz- und Raumluftechnik  
FKZ **0327370A**, Laufzeit 01.09.2004 – 31.12.2007

**Teilprojekt:** Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung.  
Westfälische Hochschule Zwickau (FH). Fachgruppe Versorgungs- und Umwelttechnik  
FKZ **0327370B**, Laufzeit 01.12.2004 – 30.06.2008

**Teilprojekt:** Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung.  
Clima Heiz- und Kühlelemente GmbH, Berlin  
FKZ **0327370C**, Laufzeit 01.07.2005 – 30.06.2008

**Teilprojekt:** Niedrigexergiesysteme für die Heiz- und Raumluftechnik; HLK-Techniken.  
TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn  
FKZ **0327370D**, Laufzeit 01.09.2004 – 31.12.2007

**Teilprojekt:** Niedrigexergiesysteme für die Heiz- und Raumluftechnik; Verfahrensentwicklungen.  
Imtech Deutschland GmbH & Co. KG – Zentrale Ingenieur Technik (ZIT), Hamburg  
FKZ **0327370E**, Laufzeit 01.09.2004 – 31.08.2007

**Teilprojekt:** Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des thermischen Beladungsgrades von PCM-Paraffin-Speichern.  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus. Fakultät Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik – Lehrstuhl für Angewandte Physik/Thermophysik sowie Lehrstuhl Polymermaterialien  
FKZ **0327370F**, Laufzeit 01.11.2004 – 29.02.2008

**Teilprojekt:** Aktive PCM-Speichersysteme für Gebäude, Simulation und Auslegung.  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg  
FKZ **0327370G**, Laufzeit 01.09.2004 – 31.08.2008

**Teilprojekt:** Aktive PCM-Speichersysteme, Entwicklung von neuen Bausystemen.  
Technologiecenter maxit, Breisach  
FKZ **0327370H**, Laufzeit 01.09.2004 – 29.02.2008

**Teilprojekt:** Aktive PCM-Speichersysteme, Entwicklung von PCM-Beschichtungsmassen für aktive Wärmespeichersysteme.  
Deutsche Amphibolin-Werke von Robert Murjahn Stiftung & Co. KG, Ober-Ramstadt  
FKZ **0327370J**, Laufzeit 01.09.2004 – 31.08.2008

**Teilprojekt:** Aktive PCM-Speichersysteme, PCM-Optimierung, Auslegung und Marketing.  
BASF SE. Abt. GKD/B-B1, Ludwigshafen  
FKZ **0327370K**, Laufzeit 01.09.2004 – 29.02.2008

**Teilprojekt:** Nutzung von regenerativen Energiequellen in Gebäuden durch den Einsatz von Niedrigexergiesystemen.  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart  
FKZ **0327370N**, Laufzeit 01.08.2005 – 31.07.2008

**Teilprojekt:** Kühlung von Hallen in Gewerbe- und Produktionsbetrieben.  
Institut für Kältetechnik gGmbH, Dresden  
FKZ **0327370P**, Laufzeit 01.07.2005 – 31.12.2007

**Teilprojekt:** Einsatz von Phasenwechselmaterialien in Holzbauten und Holzbauteilen zur Verbesserung des thermischen Komforts im Dachgeschoss.  
Rensch-Haus GmbH, Kalbach  
FKZ **0327370Q**, Laufzeit 01.12.2005 – 31.12.2008

**Teilprojekt:** Heizen und Kühlen mit Niedrigexergie – Systemintegration, Regelung, Betriebsoptimierung, Energieeinsparung mittels informationsvernetzter Heiz- und Kühlsysteme für Neubau und Sanierung.

Technische Universität Dresden. Fakultät Maschinenwesen. Institut für Thermodynamik und technische Gebäudeausrüstung  
FKZ **0327370R**, Laufzeit 01.08.2005 – 31.07.2008

**Teilprojekt:** Entwicklung und praxisnaher Test der Performance von Gebäudekomponenten mit PCM in Demonstrationsobjekten.

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) e.V. Abt. Funktionsmaterialien der Energietechnik, Würzburg  
FKZ **0327370U**, Laufzeit 01.07.2006 – 31.12.2009

**Energieoptimiertes Bauen: Einsatz innovativer Textilien und Funktionsmembranen für energetisch optimierte Fassaden- und Klimasysteme.**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart  
FKZ **0327382B**, Laufzeit 01.12.2005–30.11.2008

**Projektverbund Dezentrale Lüftung.**

**Teilprojekt:** Dezentrale Lüftung in Bürogebäuden – Mikroklimatische und baukonstruktive Einflüsse. Bergische Universität Wuppertal. Fachbereich F – Architektur, Design, Kunst. Lehrgebiet Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung  
FKZ **0327386A**, Laufzeit 01.09.2005 – 28.02.2009

**Teilprojekt:** DeAL – Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme in Bürogebäuden.

Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik (STZ-EGS), Stuttgart  
FKZ **0327386B**, Laufzeit 01.09.2005 – 30.06.2008

**Bedarfsgerechte Lüftung durch eine ereignisgesteuerte Regelung mit spezialisierten Luftqualitätssensoren.**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen (IBP-H), Valley  
FKZ **0327388A**, Laufzeit 01.12.2005 – 30.11.2008

**Energieoptimiertes Bauen: Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes. Messung des Betriebsverhaltens in 5 Wohneinheiten über 3 Jahre.**

Institut Wohnen und Umwelt (IWU) GmbH, Darmstadt  
FKZ **0327398A**, Laufzeit 01.10.2006 – 31.03.2011

**Dezentrale Frischluftklimatisierung für Büro-, Schulungs- und Wohnraumbelüftung.**

Kampmann GmbH, Lingen  
FKZ **0327399A**, Laufzeit 01.11.2006 – 31.10.2008

**Sensornetzwerkbasierte Datenerfassung zur flexiblen, kostengünstigen Bewertung der Behaglichkeit und Energieeffizienz von Gebäuden.**

Technische Universität Berlin. Hermann-Rietschel Institut. FG Heiz- und Raumlufttechnik, Berlin  
FKZ **0327402A**, Laufzeit 01.10.2006 – 30.09.2008

**Energieoptimiertes Bauen: Potential und Einsatzgrenzen der Bauteilaktivierung im Wohnungsbau.**

Technische Universität München. Fakultät für Architektur. Institut für Entwerfen und Bautechnik. Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, München  
FKZ **0327413A**, Laufzeit 01.12.2007 – 31.07.2009

**Verbundprojekt: Produktionstechniken für Vakuumisolierglas (ProVIG).**

**Teilprojekt:** Untersuchung und Bewertung thermischer und mechanischer Eigenschaften von Vakuumisolierglas.

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) e.V. Abt. Funktionsmaterialien der Energietechnik, Würzburg  
FKZ **0327419A**, Laufzeit 01.06.2007 – 30.11.2009

**Teilprojekt:** Einsatz und Optimierung des Demonstrators und Nachweis der Praxistauglichkeit.

Visio-Glas GmbH, Sülzfeld  
FKZ **0327419B**, Laufzeit 01.06.2007 – 30.11.2009

**Teilprojekt:** Technologiegrundlagen und Mechanik des Randverbundes von Vakuumisolierglas.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg  
FKZ **0327419C**, Laufzeit 01.06.2007 – 30.11.2009



**Teilprojekt:** Entwicklung, Herstellung und Erprobung einer Ultraschall-Technologie zur Herstellung von Vakuumisoliertglas.  
Schunk Sonosystems GmbH, Wettenberg  
FKZ 0327419D, Laufzeit 01.06.2007–30.11.2009

**Teilprojekt:** Entwicklung und praktische Erprobung von neuartigen Maschinen und Anlagen (Prozess- und Verfahrenstechnik).  
FHR Anlagenbau GmbH, Ottendorf-Okrilla  
FKZ 0327419E, Laufzeit 01.06.2007–30.11.2009

**Teilprojekt:** Entwicklung und Herstellung von schlanken hochwärmedämmenden Wohndachfenster-Systemen.  
ROTO FRANK Bauelemente GmbH,  
Bad Mergentheim  
FKZ 0327419F, Laufzeit 01.06.2007–30.11.2009

**Teilprojekt:** Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme einer Versuchsvorrichtung zur Herstellung von Vakuumisoliertglas.  
Grenzbach Maschinenbau GmbH,  
Asbach-Bäumenheim  
FKZ 0327419G, Laufzeit 01.06.2007–30.11.2009

#### **Energieoptimiertes Bauen: Monitoring und Betriebsoptimierung Solar Decathlon Haus 2007.**

Technische Universität Darmstadt. Fachbereich Architektur. FG Entwerfen und Energieeffizientes Bauen  
FKZ 0327431H, Laufzeit 01.07.2007–30.06.2011

#### **Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren.**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) e. V. Abt. 1 – Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien, Garching  
FKZ 0327453A, Laufzeit 01.11.2007–31.03.2011

#### **Energieoptimiertes Bauen, Verbundprojekt: Hochwärmedämmende Fenster- und Fassadensysteme (HWFF).**

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern) e. V. Abt. Funktionsmaterialien der Energietechnik, Würzburg; ROTO FRANK Bauelemente GmbH, Bad Mergentheim; VEKA AG, Sendenhorst u. a.  
FKZ 0327654B-F, Laufzeit 01.08.2006–31.01.2009

#### **Verbundprojekt: Energieoptimiertes Bauen: Energieoptimierte Beleuchtung bei gleichzeitiger Verbesserung der Lebensqualität durch Nutzung von Tageslicht und neuer Lampen- und Vorschalttechnik.**

Technische Universität Berlin. Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik. Institut für Energie- und Automatisierungstechnik. Fachgebiet Lichttechnik  
FKZ 0329037L, Laufzeit 01.12.2007–30.11.2010

#### **Energieoptimiertes Bauen: Entwicklung innovativer Produkte zur Vermeidung von Algenbewuchs auf Bauteiloberflächen.**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen (IBP-H), Valley  
FKZ 0329663G, Laufzeit 01.09.2004–28.02.2009

#### **Energieoptimiertes Bauen: Erstellung eines Feuchteatlas zur Vermeidung planungsbedingter Feuchteschäden an Gebäuden.**

Technische Universität Dresden. Fakultät Architektur. Institut für Bauklimatik  
FKZ 0329663H, Laufzeit 01.04.2005–30.09.2008

#### **Verbundprojekt: Energieoptimiertes Bauen: Hochtransparente Verglasung für den Baubereich (HVB)**

**Teilprojekt:** Entwicklung von neuen Systemen auf Basis von Antireflexglas für Architektur- und Gebäudeverglasungen zur energetischen Verbesserung der Gebäudehülle.  
CENTROSOLAR Glas GmbH & Co. KG, Lauenförde  
FKZ 0329800E, Laufzeit 01.11.2006–31.11.2009

MERCK KGaA. Abt. LSS/PM/R&D, Gernsheim  
FKZ 0329800F, Laufzeit 01.11.2006–31.12.2009

#### **Verbundvorhaben: Multifunktionelle Position 1. Beschichtungen auf Glas.**

Interpane Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH & Co. KG, Lauenförde  
FKZ 0329800G, Laufzeit 01.01.2007–31.01.2010

REMIS Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb von technischen Elementen mbH, Köln  
FKZ 0329800J, Laufzeit 01.03.2007–28.02.2010

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg  
FKZ 0329800H, Laufzeit 01.02.2007–31.01.2010

### **Entwicklung thermochromer Polymerfolien für den Sonnenschutz in Gebäuden.**

Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP), Golm  
FKZ 0329820E, Laufzeit 01.08.2005 – 31.07.2008

### **Energieoptimiertes Bauen: KENWO – Entwicklung eines Kostengünstigen Energiemanagements für Wohn- und Bürogebäude auf Basis optimierter Energiekonzepte.**

Ennovatis GmbH, Niederlassung Stuttgart. Abt. Forschung und Entwicklung, Kornwestheim  
FKZ 0329828F, Laufzeit 01.12.2004 – 30.11.2007

### **Energieoptimiertes Bauen, Teilkonzept 3: Messprogramm und Evaluierung zum energetisch optimierten Neubau des Umweltbundesamtes in Dessau.**

Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken (IEMB) e. V. an der Technischen Universität Berlin  
FKZ 0335007R, Laufzeit 01.05.2003 – 31.01.2009

### **Energie optimiertes Bauen, Demonstration: Neubau der Kreisverwaltung in Eberswalde, Einsatz innovativer Komponenten.**

Landkreis Barnim. Kreisverwaltung Eberswalde  
FKZ 0335007V, Laufzeit 01.07.2004 – 30.04.2008

### **Energieoptimiertes Bauen: EnBau: Monitoring in der Projektphase II zu energetischen, thermischen, komfortbezogenen und nutzerspezifischen Daten am Neubau des Dienstleistungs- und Verwaltungszentrums Barnim in Eberswalde.**

Brandenburgische Technische Universität Cottbus. Fakultät Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik. Lehrstuhl für Angewandte Physik/Thermophysik sowie Lehrstuhl Polymermaterialien  
FKZ 0335007W, Laufzeit 01.10.2005 – 31.03.2010

## 13 Weiterführende Literatur

Dieses Literaturverzeichnis weist auf deutschsprachige Publikationen hin, die im Buchhandel oder bei den angegebenen Bezugsadressen erhältlich sind. Die Titel können auch in öffentlichen Bibliotheken, Fach- und Universitätsbibliotheken ausgeliehen werden. Das Verzeichnis ist alphabetisch nach Autoren oder Herausgebern sortiert.

Für ausführliche Literaturrecherchen, z. B. nach unselbstständiger Literatur wie Zeitschriftenartikel oder Tagungsbeiträge, bietet das FIZ Karlsruhe, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, fachspezifische Datenbanken an. Informationen über das Datenbankangebot (Literatur- und Faktendatenbanken), Preise und Konditionen für Recherchen sowie Suchmöglichkeiten per Internet senden wir gerne zu. Informationen hierzu sind auch unter [www.fiz-karlsruhe.de](http://www.fiz-karlsruhe.de) erhältlich.

### 13.1 Literatur

154

Brinkmann, S. (Red.); Diestelmeier, B. (Red.); Meyer, G. (Red.) u. a.:

**KALKSANDSTEIN. Das Passivhaus.**

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V., Hannover (Hrsg.)

Jan. 2006. 52 S., 5,00 Euro (Schutzgebühr)

Vertrieb: Kalksandstein Dienstleistung GmbH,

Entenfangweg 15, 30419 Hannover,

Tel.: 0511 279 54-0, Fax: 0511 279 54-54,

[info@kalksandstein.de](mailto:info@kalksandstein.de), [www.kalksandstein.de](http://www.kalksandstein.de)

*Passivhäuser sind besonders wirtschaftlich, denn die beste Versicherung gegen steigende Energiekosten ist das Investieren in energieeffiziente Gebäude.*

Feist, W.:

**Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser.**

Darmstadt: Verl. Das Beispiel, 2000. 143 S.,

ISBN 978-3-95243-00-1, 14,40 Euro

*Der Autor schreibt in diesem Bericht über die grundsätzlichen Kriterien und Überlegungen, die bei der Gestaltung von Passivhäusern beachtet werden müssen. Anhand von farbigen Bildern und Grafiken werden die einzelnen Kapitel anschaulich erläutert. Die Zielgruppen dieses Buches sind sowohl interessierte Laien als auch Fachleute, wie z. B. Architekten.*

Feist, W.:

**Heizung im Niedrigenergiehaus.**

**Ein Systemvergleich. Kurzfassung der Studie.**

Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.)

April 1999. 54 S., 2. Aufl., 12,70 Euro

Fachinformation. PHI-1998/2

Vertrieb: Passivhaus Institut, Dr. Wolfgang Feist,

Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt,

Tel.: 06151 826 99-0, Fax: 06151 826 99-11,

[mail@passiv.de](mailto:mail@passiv.de), [www.passiv.de](http://www.passiv.de)

*In der Studie wird ein Vergleich verschiedener Heizungs- und Warmwasserbereitungssysteme für ein typisches Niedrigenergiehaus (NEH) durchgeführt. Dabei werden End- und Primärenergieverbräuche, CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Investitionen und jährliche Gesamtkosten ermittelt. Die Wärmedämmung des Gebäudes bleibt jeweils unverändert.*

Feist, W. (Hrsg.):

**Das Niedrigenergiehaus:**

**Neuer Standard für energiebewusstes Bauen.**

Heidelberg: Müller, (geplant für Nov. 2008).

ca. 250 S., 6., überarb. Aufl.,

ISBN 978-3-7880-7728-0, ca. 32,00 Euro

*In diesem Buch werden alle für die Planung eines Niedrigenergiehauses relevanten Faktoren dargestellt und die Entscheidungsfindung für jede einzelne Maßnahme durch objektive Beurteilungskriterien erleichtert.*

Feist, W. (Hrsg.):

**Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser.**

**Protokollbände.**

Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.)

1997 ff

Vertrieb: Passivhaus Institut, Dr. Wolfgang Feist,

Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt,

Tel.: 06151 826 99-0, Fax: 06151 826 99-11,

[mail@passiv.de](mailto:mail@passiv.de), [www.passiv.de](http://www.passiv.de)

*Das Passivhaus Institut gibt die Protokollbände des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser heraus. Eine Gesamtübersicht kann bei o. g. Adresse angefordert werden.*

Feist, W. (Hrsg.):

**12. Internationale Passivhaustagung. Nürnberg, 11.–12. April 2008. Tagungsband.**

Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.)

2008. 596 S., ISBN 978-3-00-024074-4

Vertrieb: Passivhaus Institut, Dr. Wolfgang Feist, Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt, Tel.: 06151 826 99-0, Fax: 06151 826 99-11, mail@passiv.de, www.passiv.de

*Auf der Passivhaustagung wird nicht nur über Klimaschutz geredet. Die Passivhaustagung zeigt, wie Klimaschutz in der Praxis wirksam durchgeführt werden kann. Die internationale Passivhaustagung ist der eingeführte Treffpunkt für den Gedankenaustausch zwischen Architekten, Planern, Entwicklern, Bauträgern und der Wissenschaft. Zu den jährlichen Passivhaustagungen gibt es Tagungsbände.*

Gieseler, U. (Projektltr.); Heidt, F. D. (Projektltr.) u. a.: **Bewertung der Energieeffizienz verschiedener Maßnahmen für Gebäude mit sehr geringem Energiebedarf. Endbericht zum Projekt.**

Universität Siegen. Lehr- und Forschungsgebiet Bauphysik und Solarenergie (Hrsg.); Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau (IRB), Stuttgart (Hrsg.)

Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2005. 128 S., ISBN 978-3-8167-6875-3, 35,50 Euro

Vertrieb: Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau (IRB), Fraunhofer IRB Verlag, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Tel.: 0711 970 25-00, Fax: 0711 970 25-08, irb@irb.fraunhofer.de, www.irb.fraunhofer.de

*Die erfolgreiche Umsetzung von Gebäudekonzepten mit hohem thermischem Komfort und geringem Energieverbrauch in einem realistischen Finanzierungsrahmen erfordert einen effektiven Einsatz von Maßnahmen zur Energieeinsparung. Der Schlüssel hierzu ist eine quantitative Bewertung dieser Maßnahmen bezüglich ihrer Energieeffizienz. Ein Vergleich der Ausführung eines Teilaspektes durch Messungen in verschiedenen realen Gebäuden kann jedoch nicht zu einer geeigneten Bewertung führen, da die Unterschiede der Gebäude im Allgemeinen sehr komplex sind und auch das Nutzungsverhalten zu großen Variationen im Energieverbrauch führen kann. Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung von Simulationen für das thermische Verhalten von Gebäuden, mit der durch Variationen von Teilaspekten unter sonst identischen Randbedingungen eine quantitative Bewertung von verschiedenen Maßnahmen zur Energieeinsparung möglich ist. Ebenso wird der Einfluss der Randbedingungen wie Lage, Wetterdaten und Benutzerprofile beurteilt.*

Hastings, R.; Hoffmann, C.; Voss, K.:

**Wohnbauten mit geringem Energieverbrauch. 12 Gebäude: Planung, Umsetzung und Realität.**

Heidelberg: Müller, 2005. XI, 260 S.,

ISBN 978-3-7880-7749-5, 86,00 Euro

*Zwei Architekten und ein Bauphysiker haben zwölf Passivhäuser in Deutschland, Österreich und der Schweiz untersucht. Im Buch beschreiben sie Aufgabenstellung und Lösungen bei Konstruktion, Außenhülle, Energiekonzept, Lüftung, Heizung und Warmwasser sowie energetische Besonderheiten der Gebäude. Eine messtechnische Überprüfung der Ergebnisse sowie Wirtschaftlichkeitsberichte schließen sich an. Einleitend wird der Kontext für energiegeRechtes Bauen beschrieben. Die Autoren möchten „die Planung von energieeffizienten und kostengünstigen Häusern der nächsten Generation unterstützen“.*

Hegger, M.; Fuchs, M.; Stark, T. u. a.:

**Energie Atlas. Nachhaltige Architektur.**

Basel (Schweiz): Birkhäuser, 2007. 280 S.,

ISBN 978-3-7643-8385-5, 110,00 Euro

*Während die Effizienz- und Nachhaltigkeitsoffensive in den meisten Wirtschaftsbereichen in vollem Gang ist, steht das Bauen damit noch ganz am Anfang – ökonomisch wie ökologisch. Die Politik auf globaler, europäischer und nationaler Ebene nimmt sich dieses Defizits inzwischen zunehmend an und versucht es durch rechtliche Anforderungen und Gesetze wie EnEV und Energiepass, Ökobilanzierung, Gebäudezertifizierungen und Wettbewerbe wettzumachen. Der Energie Atlas gibt in der bewährten Form der Atlanten eine umfassende Darstellung der konstruktiven Parameter von Energieeffizienz und Nachhaltigkeit wieder. Er nimmt die von der EU geplanten gesetzlichen Regulierungen vorweg und weist als unmittelbar verwendbare Arbeitshilfe für die tägliche Arbeit von Architekten, Ingenieuren und Designern den Weg zu effizientem und nachhaltigem Bauen und Betreiben von Gebäuden. Mit seiner Orientierung am gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes leistet er eine ganzheitliche Betrachtung – eine unverzichtbare Voraussetzung für nachhaltiges Wirtschaften.*

Joos, L. (Hrsg.):

**Energieeinsparung in Gebäuden.  
Stand der Technik – Entwicklungstendenzen.**

Essen: Vulkan, 2004. XVIII, 494 S., 2. Aufl.,  
ISBN 978-3-8027-2376-6, 110,00 Euro

*Das Handbuch behandelt die technischen Möglichkeiten der Energieeinsparung für den Hochbau und skizziert Entwicklungstendenzen. Es erfasst die gesamte Energieanwendung im Hochbau und ist so gegliedert, dass sowohl dem akademisch als auch dem praktisch interessierten Leser dieses Thema verständlich dargelegt wird. Das Buch ergänzt die technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse um in der Praxis gemachte Erfahrungen. Der aktuelle Wissensstand auf diesem Gebiet wird vermittelt.*

Laible, J. (Hrsg.); Lambek, M. (Red.):

**Passivhaus Kompendium 2007.**

Allensbach: Laible Verlagsprojekte, 2007. 96 S.,  
ISBN 978-3-00-020230-8, 6,40 Euro

*Das Jahresmagazin informiert über alle Aspekte des besonders energieeffizienten Passivhauses. Der Leser erfährt alle wichtigen Grundlagen zur Passivhaus-Bauweise und bekommt Antworten auf die wichtigsten Fragen und Problemstellungen rund ums energieeffiziente Bauen. Viele Einzelaspekte des Passivhauses werden behandelt, wie etwa die Vakuum-Isolierung, Vor- und Nachteile von Dachflächenfenstern, mögliche Stärken von Passivhäusern in Fertigbauweise oder aktuelle Förderungen in der Finanzierung. In einem detaillierten Marktüberblick werden Lüftungskompaktanlagen vorgestellt und verglichen. Ein umfangreicher Adressteil listet Hersteller und Lieferanten rund ums Passivhaus sowie Architekten und Fachplaner auf.*

Lückmann, R.:

**Baudetail-Atlas. Energieeffiziente Gebäude.**

WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, Kissing (Hrsg.)  
2007. 276 S., 1. Aufl., ISBN 978-3-8277-5667-1,  
84,53 Euro

*Der Baudetail-Atlas unterstützt Sie bei der Planung und Realisierung von energieeffizienten Konstruktionen. Die Details werden anhand verschiedener Bauvorhaben vorgestellt und bewertet. Jedes Projekt wird zusätzlich mit Kurzbeschreibung, Kennwerten, Abbildungen, z. T. Verbrauchsdaten sowie bauphysikalischen und haustechnischen Maßnahmen vorgestellt. Alle im Baudetail-Atlas enthaltenen Konstruktionsdetails sind im Internet als Download verfügbar. Mit Ihrem persönlichen Freischaltcode haben Sie hier unbeschränkten Zugriff. Die Dateien in den Standardformaten DWG und DXF können Sie problemlos in Ihre CAD-Software übernehmen.*

Richter, W.; Hartmann, T.:

**Thermische Behaglichkeit im Niedrigenergiehaus. Teil 1: Winterliche Verhältnisse. Planungsleitfaden für Architekten und Fachplaner.**

Deutsche Energie-Agentur (dena) GmbH, Berlin (Hrsg.)

Febr. 2007. 59 S., 1. Aufl.

zukunft haus. Energie sparen. Wert gewinnen  
Vertrieb: Deutsche Energie-Agentur (dena) GmbH,  
Chausseestraße 128a, 10115 Berlin,  
Tel.: 030 726 165-600, Fax: 030 726 165-699,  
info@dena.de, www.dena.de,  
www.zukunft-haus.info

Wirth, S.; Wirth, H.:

**Gebäudetechnik für Niedrigenergiehäuser.**

Wiesbaden: Teubner, (geplant für Febr. 2009).  
ca. 300 S., ISBN 978-3-519-15073-2, 29,90 Euro

*Wie kann man Energiesparmaßnahmen einfach und sicher umsetzen und dabei alle gesetzlichen Regelungen einhalten? Dieser Leitfaden zeigt dazu genaue Lösungswege. Dabei berücksichtigt der Autor das Zusammenspiel aller Faktoren, damit am Ende eine ganzheitliche Lösung für jede Gebäudeart entworfen werden kann.*

Zelger, T.:

**Ökologie der Dämmstoffe. Grundlagen der Wärmedämmung, Lebenszyklusanalysen von Wärmedämmstoffen. Optimale Dämmstandards.**

IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie Donau-Universität Krems (Österreich).  
Zentrum für Bauen und Umwelt (Hrsg.)  
Berlin: Springer, 2000. 195 S.,  
ISBN 978-3-211-83523-4, 79,95 Euro

### 13.2 CD-ROMs

Feist, W.; Baffia, E.; Schnieders, J. u. a.:

**Passivhaus Projektierungs Paket 2007. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser.**

Passivhaus Institut, Darmstadt (Hrsg.)

2007. Handbuch + CD-ROM, 7., überarb. Aufl., 93,00 Euro

Vertrieb: Passivhaus Institut, Dr. Wolfgang Feist, Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt,

Tel.: 06151 826 99-0, Fax: 06151 826 99-11, mail@passiv.de, www.passiv.de

*Das PHPP umfasst: Die Berechnung von Energiebilanzen – die Projektierung der Komfortlüftung – die Auslegung der Heizlast – und viele weitere nützliche Werkzeuge für die zuverlässige Projektierung von Passivhäusern – den Nachweis für die Förderung von Passivhäusern für mehrere Landesförderprogramme sowie für die KfW – den vereinfachten Nachweis nach der Energieeinsparverordnung (EnEV).*

### 13.3 BINE Informationsdienst

Der BINE Informationsdienst von FIZ Karlsruhe bietet Kompetenz in neuen Energietechniken. Der intelligente Umgang mit knappen, wertvollen Energieressourcen, insbesondere in Gebäuden und der Gebäudetechnik, sowie die Nutzung erneuerbarer Energien sind die Kernthemen. Der BINE Informationsdienst gibt dazu u. a. zwei Informationsreihen heraus. Zum Thema „Energieeffiziente Wohngebäude“ sind folgende Titel erschienen, die kostenfrei angefordert werden können und auch als download unter [www.bine.info](http://www.bine.info) zur Verfügung stehen

- Vakuumverglasung: Wenn Vakuum Edelgas ersetzt (BINE-Projektinfo 01/2008)
- Vakuumgedämmte Bauteile in der Baupraxis (BINE-Projektinfo 9/2007)
- Dezentrale Heizungspumpen (BINE-Projektinfo 13/2006)
- Evaluierung energieeffizienter Wohngebäude (BINE-Projektinfo 4/2005)
- Vakuum-Isolation in Fassadenelementen (BINE-Projektinfo 8/2004)
- Hausenergiesysteme mit Brennstoffzellen (BINE-Projektinfo 6/2004)
- Fenster optimal einbauen (BINE-Projektinfo 10/2003)
- Heizen und kühlen mit Kapillarrohrmatten (BINE-Projektinfo 6/2003)
- Wohnen in Passivhäusern (BINE-Projektinfo 4/2003)
- Latentwärmespeicher in Baustoffen (BINE-Projektinfo 06/2002)
- Neue Wärmepumpen-Konzepte für energieeffiziente Gebäude (BINE-Projektinfo 14/2001)
- Stromsparende Pumpen für Heizungen und solaranlagen (BINE-Projektinfo 13/2001)
- Tragkonstruktionen für Solarkollektoren auf Flachdächern (BINE-Projektinfo 11/2001)
- Solare Heizungsunterstützung mit Kombianlagen (BINE-Projektinfo 4/2001)
- Raumluftkonditionierung mit Erdwärmetauschern (BINE-Projektinfo 02/2000)
- Energieeffiziente Einfamilienhäuser mit Komfort (BINE-Themeninfo II/2003)
- Klimatisieren mit Sonne und Wärme (BINE-Themeninfo I/2004)

Über aktuelle Förderprogramme zum Thema „Energieeffiziente Wohngebäude“ und alle übrigen neuen Energietechniken informiert der „Förderkompass Energie – eine BINE Datenbank“.

Für einzelne Anfragen bietet der BINE Informationsdienst die Informationen zu Förderprogrammen auch auf dem Webportal [www.energiefoerderung.info](http://www.energiefoerderung.info) an.

## 14 Autorenangaben

### Dr. Burkhard Schulze Darup



Studium der Architektur an der TU Berlin von 1973 bis 1979; 1980 bis 1982 quartiersbezogene Stadtentwicklungsplanung und objektplanerische Begleitung von Häusern in Berlin-Kreuzberg;

Promotion an der Universität Hannover

Als freischaffender Architekt beschäftigt er sich mit der Durchführung von Sanierungs- und Neubauprojekten im Sinne der Ressourceneffizienz und passiver Solararchitektur unter Anwendung von Niedrigenergie- und Passivhaus-Komponenten.

Neubauten von Wohnhöfen mit Bauherrengemeinschaften sowie zahlreiche Einfamilienhäuser, Doppel-

häuser und Reihenhausanlagen sowie Geschosswohnungsbau und Gewerbebauten wurden von ihm begleitet. Weitere Arbeitsfelder sind die Entwicklung von Konzepten zum energieeffizienten Bauen, vor allem zur energetischen Sanierung, städtebauliche Planungen und Gutachten sowie Forschungsarbeiten, Vorträge und Veröffentlichungen zum umweltverträglichen und energiesparenden Bauen.

#### Kontakt:

Dr. Burkhard Schulze Darup

Au graben 96

90475 Nürnberg

[schulze-darup@schulze-darup.de](mailto:schulze-darup@schulze-darup.de)

[www.schulze-darup.de](http://www.schulze-darup.de)



**Burkhard Schulze Darup**

# Energieeffiziente Wohngebäude

## 3., vollständig überarbeitete Auflage

Jeder Neubau schafft in puncto Wärmebedarf Fakten für Generationen. In der Bauphase können mit überschaubarem Mehraufwand beträchtliche Energieeinsparungen in der Zukunft gesichert werden. Diese Investitionen sorgen für hohen Wohnkomfort bei geringen Betriebskosten.

Dieses BINE-Fachbuch stellt das Passivhauskonzept und verschiedene Konzepte für Konstruktion und Gebäudetechnik in den Mittelpunkt. Erfahrungen aus Beispielgebäuden und die sehr anschauliche Darstellung machen das Buch zu einer inspirierenden Fundgrube für Planer, Investoren und Bauherren.

### Der Autor:

Dr. Burkhard Schulze Darup, verfügt als freischaffender Architekt in Nürnberg über langjährige Erfahrungen mit energieeffizienten Neubauten und Sanierungen. Er hat sich auch durch Gutachten, Forschungsarbeiten, Vorträge und Veröffentlichungen einen Namen gemacht.

ISBN 978-3-8167-8322-0



9 783816 783220