

Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10

Dr. Burkhard Schulze Darup



Wir fördern Innovationen.



Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10

Dr. Burkhard Schulze Darup (Hrsg.)

Projektpartner:

Dr. Wolfgang Feist, Passivhaus Institut (PHI), Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt
Peter Friemert/Simona Weisleder/Jan Gerbitz, Zentrum für Energie, Bauen, Architektur
und Umwelt GmbH (ZEBAU), Große Elbstraße 146, 22767 Hamburg
Ehrenfried Heinz, Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken (IEMB) e. V.
an der TU Berlin, Salzufer 14, 10587 Berlin

Industriepartner:

Aerex/Maico
Aerex, Königsweg 3, 37534 Eisdorf
MAICO Elektroapparate-Fabrik GmbH, Steinbeisstraße 20, 78056 Villingen-Schwenningen
Knauf Marmorit GMBH, Ellighofen 6, 79283 Bollschweil
Rehau AG + Co, Eltersdorf, Ytterbium 4, 91058 Erlangen
Variotec, Weißmarterstraße 3, 92318 Neumarkt

Darstellung der Projektergebnisse des Forschungsvorhabens »Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10« gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU-Projekt AZ 19208)

Wir fördern Innovationen.



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

- 5 Grußwort**
- 6 10 Argumente für hocheffiziente Sanierung**
- 7 Planungsfaktoren**
- 8 Bauphysik und Komfort**
 - 8 Oberflächentemperaturen – Wärmebrücken
 - 9 Thermische Behaglichkeit und Komfort
 - 10 Raumluftfeuchtigkeit
- 11 Hygiene und Gesundheit**
- 12 Energetische Berechnung**
- 13 Kosten energetischer Maßnahmen**
- 14 Gebäudetypen**
 - 14 Gebäudetypen 1880 bis 1930
 - 15 Gebäudetypen 50er-Jahre
 - 16 Gebäudetypen 60er-Jahre
 - 17 Gebäudetypen 70er-Jahre
- 18 Gebäudehülle**
 - 19 Wand
 - 20 Dach/oberste Geschossdecke
 - 21 Kellerdecke/Bodenplatte
- 22 Wärmebrücken**
 - 22 Sockelbereich
 - 23 Kellerdecke zur Innenwand
 - 24 Traufbereich
 - 25 Ortgangbereich
 - 26 Fenster
 - 27 Fenster – seitlicher Anschluss
 - 28 Holzfenster – Haustür
- 29 Luft- und Winddichtheit**
- 30 Lüftung**
 - 30 Aufgaben der Lüftung
 - 31 Freie Lüftung und ihre Grenzen
 - 32 Ventilatorgestützte Lüftung – Abluftanlagen
 - 33 Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung
 - 34 Dezentrale Anlagen
 - 35 Zentrale Anlagen
- 36 Gebäudetechnik – Heizung**
 - 37 Anlagenaufwand
 - 38 Anlagenvergleich
- 40 Ökologische Bewertung**
- 41 Ökologisch-ökonomische Bewertung**
- 42 Energetisch-ökonomische Bewertung**
- 44 Sanierungsbeispiele**
- 46 Förderungs-Aspekte**
- 47 Ausblick**
- 48 Glossar**
- 50 Literatur und Quellen**
- 51 Impressum – DBU-Forschungsbericht – Bildnachweis**



Die Zukunft des Bauens in Deutschland liegt in der Sanierung des baulichen Bestandes. Fakt ist, dass die Umweltbelastung durch Neubautätigkeiten etwa um das 4-fache höher ist, als für vergleichbare Erneuerungsaktivitäten im Bestand. Derzeit sind bereits rund 100 Mrd. Tonnen Material im deutschen Gebäudebestand verarbeitet. Daher muss die langfristige Nutzung der vorhandenen Gebäude das zentrale Ziel einer nachhaltigen Baupolitik sein.

Mit diesem Ziel verbinden sich vielfältige Aufgaben und Chancen: Es gilt, vorhandene Stadtquartiere und Siedlungen städtebaulich und architektonisch zu modernisieren und neu zu strukturieren. Technisch und funktional veraltete Gebäude müssen den heutigen Nutzungsanforderungen angepasst werden. Die Ansprüche an Komfort, Wohn- und Gesundheit, räumliche Flexibilität und das äußere Erscheinungsbild haben sich grundlegend gewandelt.

Aus Sicht des Klimaschutzes und der notwendigen Reduzierung des CO₂-Ausstoßes nach dem Kyoto-Abkommen liegen die größten Potenziale in einer durchgreifenden energetischen Sanierung. Etwa 40 % des gesamtdeutschen Endenergiebedarfs resultieren aus Energieverbräuchen für Raumbeheizung, Warmwasseraufbereitung und Strombereitstellung in Gebäuden. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, nachhaltige Planungs- und Baupraktiken zu etablieren und das mit der ökologischen Erneuerung im baulichen Bestand verbundene

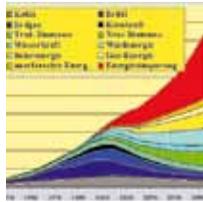
Umweltentlastungspotenzial zu erschließen. Mit dieser »Faktor-10-Broschüre« wird aufgezeigt, dass eine 90 %ige Verbrauchsreduzierung technisch und ökonomisch machbar ist.

Der Baubereich ist traditionell und bis heute – das gilt besonders für das ökologische Bauen – von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägt. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat sich zur Aufgabe gemacht, umweltentlastende und modellhafte Innovationen bei kleinen und mittelständischen Unternehmen zu fördern.

Wenn es gelingt, mithilfe der hier aufgezeigten Ansätze, Planer und Handwerker für neue Aufgabenstellungen zu interessieren und nachhaltige Sanierungspraktiken im Baualltag zu verankern, wäre dies ganz im Sinne dieser Zielstellung.

Dr.-Ing. E. h. Fritz Brickwedde
Generalsekretär der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

10 Argumente für hocheffiziente Sanierung



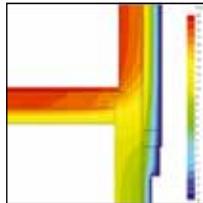
Ressourcenschutz

Angesichts des nahenden Förderzeits fossiler Energieträger bei steigender Nachfrage kann im Gebäudebestand mit hoher Effizienz Energie eingespart werden.



Behaglichkeit & Wohlfühlen

Rundum warme Wände sorgen für hohe bauphysikalische Behaglichkeit und besten raumklimatischen Komfort, Seite 8–9



Bautenschutz

Gute Dämmung, Wärmebrückenreduktion, Luftdichtheit und mechanische Lüftung verhindern Tauwasserniederschlag und Schimmelpilzbildung, Seite 10



Raumluftqualität & Gesundheit

Ständige Zufuhr frischer Außenluft sorgt für hohe Raumlufthygiene: Schadstoffe aus Konstruktion, Einbauten und Nutzung werden kontinuierlich abgeführt, Seite 11/30/31



Zukunftsfähiger Gebäudewert

Die eingesetzten Passivhaus-Komponenten in der Gebäudehülle sind zukunftsfähig – ein erneuter Sanierungszyklus nach 15–20 Jahren ist nicht erforderlich, Seite 18–19

Dauerhaft gute Vermietbarkeit

Durch die hohen Standards und den Wohnkomfort ist der Wohnraum langfristig attraktiv für Mieter, Leerstands- und Fluktuationsraten sind niedriger



Klimaschutz

CO₂-Einsparung um 90 % ist im Gebäudebestand bei gutem Kosten-Nutzen-Verhältnis mit hoher Breitenwirkung möglich, Seite 40–41



Versicherung

gegen steigende Energiekosten Auch bei stark steigenden Energiekosten bleibt die »zweite Miete« langfristig niedrig, Seite 42–43



Qualifizierung & Arbeitsbeschaffung

Durch gezielt eingesetzte Förderung kann ein Potenzial von bis zu 400.000 Arbeitsplätzen neu geschaffen werden, Seite 46



Städtebauliche Aufwertung

Zur Sanierung anstehende 30er bis 70er-Jahre-Quartiere erfahren neben der technischen Ertüchtigung eine soziale, kulturelle und urbane Aufwertung



Planung

Sanierungsplanung erfordert die Optimierung aller umfassenden Parameter des Bauens, die von jeher Aufgabe des Architekten sind. Unter Nachhaltigkeitsaspekten erhalten drei Bereiche besondere Bedeutung:

- Ökologie
- Ökonomie und
- Sozial-/Kulturverträglichkeit.

Energieeffizientes Bauen berührt in seinem integralen Planungsansatz alle drei Bereiche intensiv, wie die 10 Argumente auf der vorigen Seite zeigen.

Die **technischen Anforderungen** sind erstaunlich einfach (Abb.): Gute Dämmung von **Wand, Dach und Grund**, dazu hochwärmedämmende **Fenster** sowie der Einsatz von **Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung**. Qualitätssicherung ist heute selbstverständlich – unter anderem durch **Wärmebrückenoptimierung** sowie Sichern von **Luft- und Winddichtheit**.

Die beschriebenen Maßnahmen führen dazu, dass ein Gebäude weitestgehend durch solare und interne Warmegewinne »passiv« geheizt wird und nur noch geringe Restwärme zugeführt werden muss, was sehr kostengünstig und komfortabel erfolgen kann. Empfehlenswert ist natürlich **rationelle Gebäudetechnik**, möglichst unter Einsatz **regenerativer Energieträger**.

Folgende **Entwurfsparameter** können zu einer weiteren Optimierung des Gebäudes führen:

Gebäudegeometrie:

Warmer Gebäudebereich möglichst kompakt (ungeheizte/gestalterische Bereiche ggf. außerhalb); Vermeiden/Reduzieren von Versprünge (horizontal und vertikal); Verdichtung, Aufstockung

Ausrichtung:

Solare Optimierung der Fassade, z. B. durch Vergrößern oder Ergänzen von Südfenstern

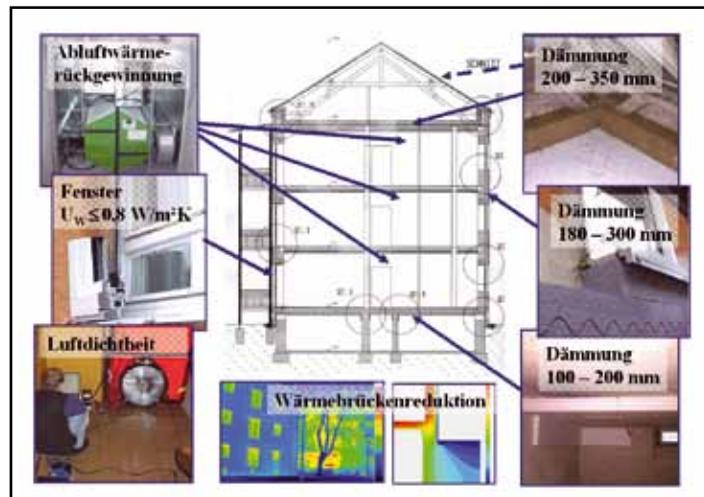
Verschattung:

Überprüfen und ggf. Ändern der städtebaulichen Situation (falls möglich); Vermeiden von verschattenden Anbauteilen und Konstruktionen; geringe Leibungstiefe

Zonierung/Raumzuordnung:

Wohn-/Kinderzimmer nach Süden und Küche, Bad, Nebenräume nach Norden; keine ungeheizten Räume in den gedämmten Bereich ragen lassen

Integrale Planung unter Einbeziehung interdisziplinärer Fachleute bereits ab den ersten Planungsschritten ist eine grundlegende Voraussetzung für das Gelingen von energetisch anspruchsvollen Projekten. Die Aspekte der folgenden Kapitel können zu gewissen Teilen durch einen erfahrenen Architekten fachlich abgedeckt sein. Ein guter Architekt sieht sich aber zugleich als Generalist und Koordinator in einem kompetenten Planungsteam, für dessen sinnvolle Zusammensetzung er die Verantwortung trägt.



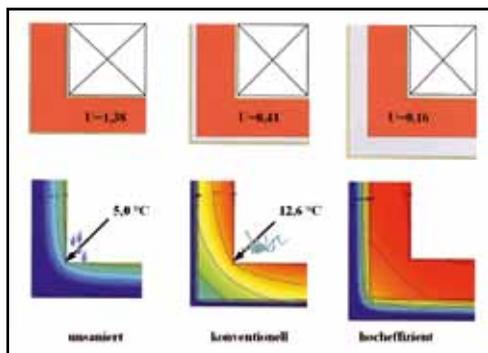
Einsatz von Passivhaus-Komponenten für energieeffiziente Sanierung

Oberflächen- temperaturen – Wärmebrücken

Schimmelpilzbefall ist für Bewohner gesundheitsschädigend und kann zu einer schwerwiegenden Gefährdung der Bausubstanz führen. Für das Auskeimen von Pilzsporen und das Wachsen von Pilzmyzelen reicht bereits eine relative Feuchte an der Oberfläche des betreffenden Bauteils von 80 %.

Bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C, Außenlufttemperatur –5 °C und einer relativen Raumluftfeuchte von 50 % liegt die Grenze für Tauwasserbildung bei einer Temperatur von 9,3 °C und zur sicheren Vermeidung von Schimmelwachstum bei mindestens 12,6 °C.

Bei Anwendung dieser Rahmenbedingungen auf eine standardmäßige Situation einer Hausaußenecke mit »Innendämmung« in Form eines Möbelstücks ergibt sich



Standard-Vergleich: Bestandswand (links): Tauwasser- ausfall; 6 cm Dämmung (Mitte): Schimmelpilzbildung; 20 cm Dämmung: schadensfrei

folgendes Bild, das in der unten stehenden Abbildung illustriert wird:

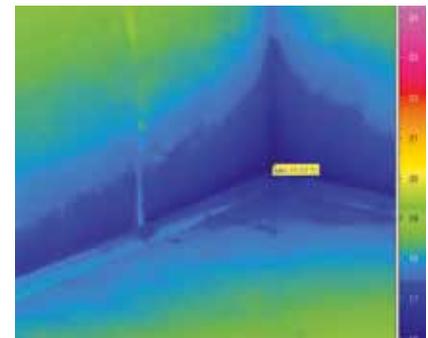
- Bei einem ungedämmten Bestandsgebäude mit einem 38er-Vollziegelmauerwerk (oder Wandkonstruktionen der 50er-/60er-Jahre mit porosiertem Steinmaterial) liegt die Temperatur in der Ecke bei 5 °C mit der Folge von Tauwasserausfall.
- Wird dieses Gebäude mit 6 cm Wärmedämmverbundsystem gedämmt, verbessert sich die Situation nicht ausreichend: Die Temperatur liegt mit 12,6 °C immer noch so niedrig, dass Schimmelpilzwachstum vorprogrammiert ist. Die Bilder rechts wurden in solch einem Gebäude aufgenommen.
- Erst ab einer hochwertigen Dämmung (in diesem Fall 20 cm WLГ 035) ist hohe Sicherheit gegenüber Schadenssituationen gegeben. Zu beachten ist dabei, dass bei ungenügender Lüftung höhere Raumluftfeuchten anzutreffen sind. Zudem ergibt sich eine nochmals erhöhte Anforderung bei der Betrachtung dreidimensionaler Wärmebrücken (s. Bild unten rechts).



Schimmel in einem Gebäude mit 6 cm Dämmung in einer Außenecke hinter einem Schrank



Schimmelpilzbildung hinter einem Vorhang aufgrund zu niedriger Oberflächentemperaturen



Sanierung mit 20 cm WDVS: 16 °C in der Außenecke verhindern Schimmel zuverlässig (Quelle: PHI)

Thermische Behaglichkeit und Komfort

»Je gleichmäßiger das thermische Feld in einem Raum ist, desto größer ist die erwartete Anzahl der unzufriedenen Personen« [Fanger 1972]. Es ist daher das wichtigste Ziel der Bauphysik, ein gleichmäßiges und zeitlich konstantes thermisches Feld im Raum sicher zu stellen.

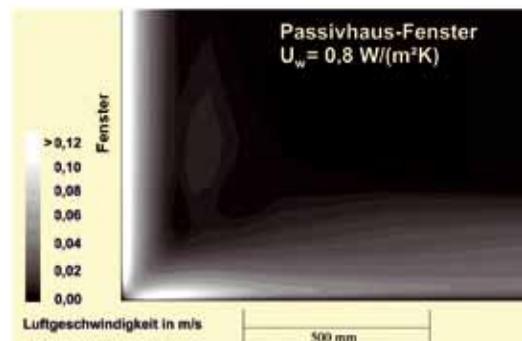
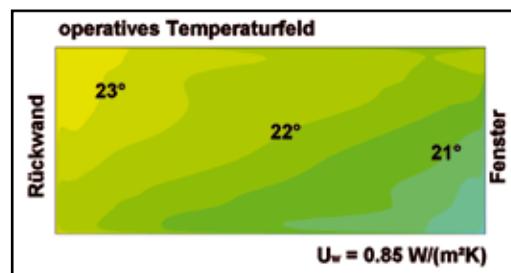
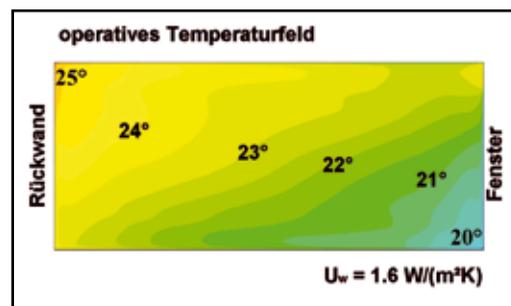
Die DIN EN ISO 7730 bzw. die erhöhte Anforderung in ASHRAE-55 [ASHRAE 2003] führen zu folgenden Komfortkriterien:

- Schwankungen der »empfundenen« bzw. »operativen« Temperatur (arithmetisches Mittel aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der Raumflächen) im Aufenthaltsbereich um maximal 0,8 K
- Begrenzung des Zugluftrisikos durch Senkung der Raumluftbewegung auf Geschwindigkeiten $\leq 0,08$ m/s
- Strahlungstemperatur-Asymmetrie (Decke/Boden) unter 5 K
- Vertikaler Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Fußknöchel bei einer sitzenden Person unter 2 K
- Geringe Schwankungsbreite der operativen Temperatur

Bild oben: Durch gute Wärmedämmung der Gebäudehülle und den Einsatz von Passivhausfenstern entsteht ein gleichmäßiges thermisches Feld im Raum als wesentliche Grundvoraussetzung für hohe Behaglichkeit.

Bilder Mitte: Bei Einsatz von bodentiefen Standardfenstern mit $U_w = 1,6$ W/(m²K) ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 5 Kelvin im Raum, bei Einsatz von Passivhausfenstern mit $U_w = 0,85$ W/(m²K) sinkt die Temperaturdifferenz auf deutlich behaglichere 3 Kelvin. Wärmezufuhr über einen Heizkörper im Bereich des Fensters ist nicht mehr erforderlich. Randbedingungen: Außenlufttemperatur -14 °C, keine Einstrahlung.

Bild unten: Durch die geringere Temperaturdifferenz in Verbindung mit hoher Luftdichtheit reduziert sich die Luftgeschwindigkeit selbst am Fußpunkt eines bodentiefen Fensters mit $U_w = 0,85$ W/(m²K) (Innentemperatur 22 °C, Außentemperatur -14 °C) auf unter 0,07 m/s in 30 cm Entfernung vom Fenster. [Feist 2004].



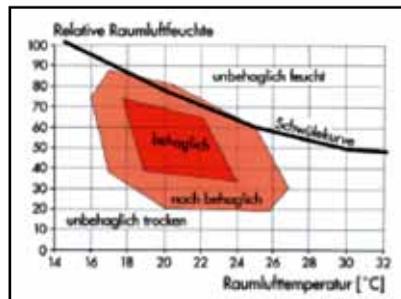
Raumlufffeuchte

Luftfeuchtigkeit kann durch den Menschen nicht unmittelbar wahrgenommen werden. Sie wird im Bereich von 35 bis 60 % relativer Feuchte als behaglich empfunden, ideal sind Werte um 45 % r. F.

Durch die Nutzung einer Wohnung wird ständig **Wohnfeuchte** in Form von Wasser und Wasserdampf in die Räume eingetragen. Bei einem Vierpersonenhaushalt handelt es sich um ca. 10 Liter Wasser täglich. Bei schnell anfallender Feuchte wie beim Kochen, Duschen oder dem Aufenthalt vieler Personen in der Wohnung erhöht sich der Wohnkomfort, wenn große Flächen der Wohnung diese Wassermenge durch **Sorption** in der Oberfläche aufnehmen und zwischenspeichern können. Dazu reichen einige Millimeter Eindringtiefe in die Oberfläche der Umfassungsstrukturen. Es ist nicht möglich, dass die Wohnfeuchte über die Umfassungsflächen abgeführt wird. Dies erfolgt durch **Diffusion** allenfalls zu einem Anteil von **2 %** der anfallenden Wassermenge. Die restlichen **98 %** müssen durch **Lüften** aus der Wohnung hinausgetragen werden.

Auswirkungen hoher Feuchte
hohe Luftfeuchte wird als unbehaglich empfunden (Schwitzen, flache Atmung)
feuchter Staub fördert Mikroorganismen
Hausstaubmilben vermehren sich
Schimmelpilzbildung ab 80 % r. F. der Umfassungsflächen

Auswirkungen geringer Feuchte
Austrocknungserscheinungen an den Schleimhäuten (bei Staubbelastung)
unter 45 % r. F. sterben Milben ab
Konzentration von Schwebstaub erhöht sich
elektrostatische Aufladung erhöht sich unterhalb 40–30 % r. F.



Anforderungen an die Lüftung

Die täglich auszutauschende Luftmenge muss so gewählt werden, dass die anfallende Wohnfeuchte abgeführt werden kann. Während der Heizsaison entspricht dies der Luftmenge, die sich aus den hygienischen Parametern ergibt, nämlich 30 m³ pro Person in der Stunde (s. S. 11). Während kalter Wintertage darf der Luftwechsel nicht höher liegen, um keine zu niedrige Raumlufffeuchte zu erhalten.

Wasserdampfgehalt der Luft in g/m³ in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur

Lufttemperatur	relative Luftfeuchte	
	100 %	50 %
20 °C	17,29	8,65
16 °C	13,63	6,82
10 °C	9,41	4,70
0 °C	4,85	2,42
-10 °C	2,14	1,07
-20 °C	0,88	0,44

Die Höhe der Entfeuchtung ist vom Wasserdampfgehalt der zugeführten Außenluft abhängig. Die Tabelle zeigt den unterschiedlichen Gehalt in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Das heißt, in der Übergangszeit und im Sommer muss intensiver gelüftet werden, was durch zusätzliche Fensterlüftung zu bewerkstelligen ist.

Raumlufthygiene

Die Sicherstellung der Raumlufthygiene ist ein wesentlicher Aspekt der Planung. Folgende Parameter sind dabei von Bedeutung:

Baustoffe können Raumlufthygiene in Form von Gasen, Dämpfen, Stäuben und Aerosolen belasten. Es muss für minimierte Emissionen gesorgt werden. Dies gilt sowohl für neu eingebrachte Materialien als auch für den Bestand. Bei Verdacht auf Schadstoffe sollten Messungen vorgenommen werden.

Heizungen in Form von raumlufthygiene-abhängigen Feuerstätten können durch ihre Emissionen Belastung der Aufenthaltsräume verursachen. Einzelöfen stellen in den meisten Fällen eine Immissionsquelle dar.

Heizflächen sollten niedrige Temperaturen aufweisen zur Reduzierung von Luftbewegungen, die Zug und Staubaufwirbelungen verursachen. Zudem führt ab 55 °C Pyrolyse von Staub zu Raumlufthygienebelastungen.

Ausstattungsgegenstände und **Möbiliar** beeinflussen wie Baustoffe die Raumlufthygienequalität. Deshalb gelten die gleichen Kriterien wie bei der Baustoffauswahl.

Nutzerbedingte Belastungen erfolgen in vielfacher Form:

- CO₂-Produktion durch die Atmung im Mittel 20–30 Liter/h
- Stoffwechselprodukte über Atmung, Transpiration etc.
- Belastungen durch Nahrungszubereitung und aus dem Biomüll
- Emissionen aus Haushaltschemikalien
- Tabakrauch

Hausstaub aus Einträgen von außen, aus Abrieb von Materialien und Fasern sowie Partikeln ist ein gutes Adsorptions- und Transportmedium für biogenes Material und viele toxische schwerflüchtige Substanzen. Besonders gefährlich sind Staubpartikel, die kleiner sind als 1 µm aufgrund ihrer Lungengängigkeit.

Tierische und pflanzliche Allergene können allergische Reaktionen beim Menschen auslösen. Besondere Bedeutung haben dabei Hausstaubmilben, deren Exkremente sich an Staub anlagern und hochallergen wirken. Pilzsporen erhalten eine besondere Relevanz, wenn dauerhafte Feuchte zu Pilzwachstum führt (s. Seite 8/10).

Die weitgehende **Vermeidung dieser Belastungen** in Verbindung mit ausreichender **Zufuhr frischer Außenluft** muss durch die Planung eines Gebäudes sichergestellt werden.

Auslegung einer Zu-/Abluftanlage für eine 3-Zimmer-Wohnung mit 3 Personen

	Fläche	Luft	Luft- wechsel
	m ²	m ³ /h	h ⁻¹
Zuluft			
Wohnen	25	40	0,7
Eltern	14	30	0,9
Kind	10	20	0,8
Abluft			
Küche	8	50	2,6
Bad	7	40	2,4
gesamt	75	90	0,5

Anforderungen an die Lüftung

Als Leitwert zur Festlegung des Luftwechsels eignet sich der Kohlendioxidgehalt der Raumlufthygiene, weil er durch die Nutzer verursacht und nicht veränderbar ist. Der hygienische Grenzwert nach DIN 1946-2 von 1.500 ppm Kohlendioxid (CO₂) kann pro Person durch die Zufuhr von etwa 20 m³ frischer Außenluft pro Stunde bei einfacher Betätigung sichergestellt werden. Der strengere Pettenkofer-Wert von 1.000 ppm erfordert 30 m³/h. Mit diesen Zahlen korrespondiert die Mindestanforderung der DIN 1946 Teil 6 von 30 m³ Außenluft pro Stunde und Person bei normaler Betätigung. Das entspricht im Geschosswohnungsbau Luftwechseln im Bereich von 0,5 bis 1,0 h⁻¹.

Mietern wird gerichtlich attestiert, dass zweimal tägliches Querlüften ausreichend ist. Durch diese Art der Lüftung wird nur ein deutlich geringerer Luftwechsel um 0,2 h⁻¹ erzielt (vgl. Seite 31). Aus Gründen der Wohnhygiene und der Schimmelpilzvermeidung sind Vermieter gemäß DIN 1946-6 in der Verantwortung, für eine nutzerunabhängige Mindest- bzw. Grundlüftung zu sorgen, z. B. über eine ventilatorgestützte Lüftung.

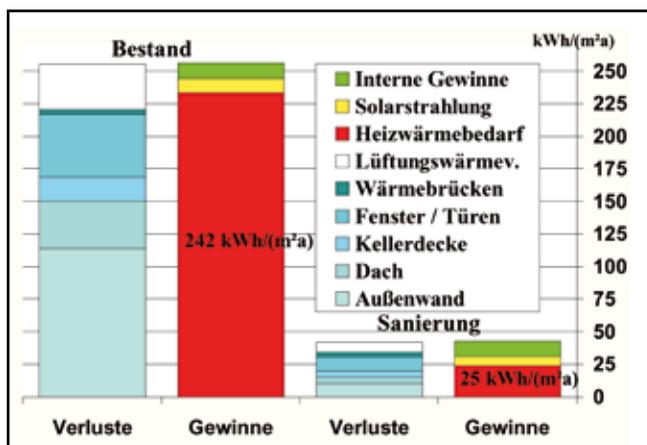
Der **Heizwärmebedarf** von unsanierten Mehrfamilienhäusern bis zu Baujahren um 1975 liegt im Spektrum von 200 bis 250 kWh/(m²a). Das entspricht einem Bedarf von 20 bis 25 Litern Heizöl bzw. Kubikmetern Gas pro m² Wohnfläche im Jahr. Der tatsächliche Verbrauch liegt oftmals niedriger, weil nicht alle Räume beheizt werden und der Luftwechsel niedriger als der berechnete Wert liegt.

Die Tabelle stellt Sanierungsstandards mit Maßnahmenpaketen für Mehrfamilienhäuser gegenüber, die jedoch in Abhängigkeit von der individuellen Situation differieren können.

Die energetische Berechnung erfolgt nach dem Rechengang der EnEV. Die Anforderungen für Sanierungen liegen deutlich unter dem EnEV-Neubau-Standard. Da daraus

Sanierungsmaßnahmen resultieren, die bauphysikalisch nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen (vgl. S. 8), ist es auf jeden Fall sinnvoll, einen erhöhten energetischen Standard zu wählen. Dies ist zudem unter dem Aspekt sinnvoll, dass Investitionen in die Gebäudehülle einen Abschreibungszeitraum von 40 Jahren nicht unterschreiten sollten.

	Bestand	EnEV-Sanierung Neubau 140 %	KfW 100	KfW 85	KfW 70	KfW 55 Passivhaus-Komp.
	U-Wert	Dämmung	Dämmung	Dämmung	Dämmung	Dämmung
	W/(m ² K)	mm/λ _r = 0,035				
Wand	1,56	100	160	180	200	220
Dach	1,2	120	200	220	240	250
Grund	1,23	60	100	120	140	160
Fenster	2,60	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8
Wärmebrücken		ΔU _{WB} = 0,1 W/m ² K	ΔU _{WB} = 0,1 W/m ² K	ΔU _{WB} = 0,5 W/m ² K	ΔU _{WB} = 0,5 W/m ² K	ΔU _{WB} = 0,08 W/m ² K
Luftdichtheit		n ₅₀ ≤ 1,5 h ⁻¹	n ₅₀ ≤ 1,5 h ⁻¹	n ₅₀ ≤ 1,0 h ⁻¹	n ₅₀ ≤ 0,6 h ⁻¹	n ₅₀ ≤ 0,6 h ⁻¹
Lüftung	manuell	Ventilatorgestützte Abluftanlage			Zu-/Abluftanlage mit WR	
Heizung/WW		Geringer regenerativer Anteil			Mittlerer regenerativer Anteil	



Bilanzierung von Wärmegewinnen und -verlusten für eine Faktor-10-Sanierung vor und nach der Sanierung (Berechnung nach PHPP)

Energetisch hochwertige Gebäude weisen Rahmenbedingungen auf, die mit der Berechnung nach EnEV nur bedingt zu erfassen sind. Deshalb empfiehlt sich die Berechnung durch ein Programm, das die Spezifika von Passivhaus-Komponenten erfasst. Die Berechnung links wurde nach dem Passivhaus Projektierungs-Paket [PHPP 2007] erstellt.

Gebäudetypen 1880 bis 1930

Durch die Untersuchung von charakteristischen Gebäudetypen kann ein Überblick geschaffen werden, welche Energieeinsparpotenziale in Richtung Faktor 10 es in den Baualterstufen gibt und welche Maßnahmen und letztendlich Kosten mit diesen verbunden sind. Ein Schwerpunkt wird auf die Baujahre 1950 bis 1975 gelegt, welche in nächster Zeit vor allem saniert werden.

Für jedes Gebäude wurde eine energetische Planung und Berechnungen nach EnEV und Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) durchgeführt.

Die Einsparpotenziale liegen im Durchschnitt bei 85 %. Bei Einsatz regenerativer Energien oder nochmals verbesserten Anlagenaufwandszahlen werden 90 % überschritten. Es ist also ablesbar, dass der Faktor 10 grundsätzlich für alle Baualterstufen erreichbar ist.



Typologie	Gründerzeit Blockrandbebauung		20er Jahre Blockrandbebauung		30er Jahre 2-Spanner freihstehend	
Charakteristik	Sandsteinfassade mit Schmuckelementen		denkmalgeschützte Klinkerfassade		kompaktes Gebäude mit Putzfassade	
Region	allg. Deutschland		Schwerpunkt Norddeutschland		Schwerpunkt Süd- und Ostdeutschland	
Baujahr:	1885		1927/1954		1930	
Wohnungen:	5		61		6	
Volumen:	2.873		14.547		4.027	
Geschosse:	5		5		3	
Fläche A_{EB} :	597		3.206		897	
Fläche A_{san} :	919		4.655		1.289	
A/V-Verhältnis m^{-1}	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung
	0,34	0,28	0,33	0,31	0,45	0,42
Bauteil	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}
	Außenwand	1,80	0,53	1,64	0,27	1,58
Decke ü. OG	0,83	0,17	2,01	0,14	0,13	0,13
Grund	1,39	0,20	0,89	0,25	1,39	0,20
Fenster	2,80	1,00	2,25	0,82	2,80	0,85
Energetische Kennwerte	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung
	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)
Jahres-Heizwärmebedarf	164,5	29,2	216,2	36,6	203,5	25,9
Trinkwassererwärmung	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Anlagenaufwand primärenerg.	1,40	1,15	1,40	1,15	1,40	1,15
Jahres-Primärenergiebedarf	254,1	53,1	326,5	61,6	308,7	49,3
	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
Faktor der Einsparung	201,00	79 %	264,80	81 %	259,30	84 %
Ergebnisse nach EnEV	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)
	Jahres-Heizwärmebed. $q_h(A_N)$	109,4	23,5	122,5	32,1	131,9
Bezug: Beheizte Fläche A_{EB}	168,3	36,1	177,8	46,7	189,5	36,8
Trinkwassererwärmung	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Anlagenaufwandszahl e_p	1,4	0,9	1,4	0,9	1,4	0,9
Jahres-Primärenergiebedarf q_p	170,7	32,4	189,0	40,1	202,2	34,4
	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
Faktor der Einsparung	138,20	81 %	148,8	79 %	167,90	83 %

Gebäudetypen

50er-Jahre



Typologie	50er-Jahre Punkthaus		50er-Jahre 4-Spänner gereiht		30er-Jahre 2-Spänner Zeilen		50er-Jahre Blockrandbebauung	
Charakteristik	Klinkerfassade, Loggien, Flachdach		kompaktes Gebäude mit Putzfassade und Loggien		Putzfassade, DG ausgebaut		Putzfassade	
Region	Schwerpunkt Norddeutschland		Schwerpunkt Süddeutschland		allg. Deutschland		allg. Deutschland	
Baujahr:	1950		1951		1953		1954	
Wohnungen:	6		12		12		36	
Volumen:	2.582		3.321		2.022		5.357	
Geschosse:	4		3		2 + D		4	
Fläche A_{EB} :	679		892		710		1.662	
Fläche A_{san} A_N :	826		1.063		647		1.714	
A/V-Verhältnis m^{-1}	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung
	0,55	0,51	0,52	0,47	0,83	0,68	0,38	0,36
Bauteil	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}
	Außenwand	1,70	0,17	0,42	0,15	1,57	0,16	1,98
Decke ü. OG	3,58	0,13	1,79	0,13	0,97	0,14	0,59	0,16
Grund	2,27	0,26	1,15	0,14	1,15	0,18	0,55	0,21
Fenster	4,39	0,83	2,80	0,85	2,80	0,85	2,93	0,79
Energetische Kennwerte	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung
	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)
Jahres-Heizwärmebedarf	407,6	32,2	169,1	23,9	231,0	28,1	150,9	16,9
Trinkwassererwärmung	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Anlagenaufwand primärenerg.	1,40	1,15	1,40	1,15	1,40	1,15	1,40	1,15
Jahres-Primärenergiebedarf	594,4	56,6	260,5	47,0	347,2	51,9	235,1	39,0
	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
Faktor der Einsparung	537,90	90 %	213,60	82 %	295,30	85 %	196,00	83 %
Ergebnisse nach EnEV	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)
	Jahres-Heizwärmebed. $q_h(A_N)$	276,1	27,7	123,1	26,0	238,6	34,1	124,9
Bezug: Beheizte Fläche A_{EB}	336,0	33,7	146,6	31,0	217,5	31,1	128,8	24,7
Trinkwassererwärmung	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Anlagenaufwandszahl e_p	1,4	0,9	1,4	0,9	1,4	0,9	1,4	0,9
Jahres-Primärenergiebedarf q_p	404,0	36,2	189,8	34,7	351,5	41,9	192,4	32,8
	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
Faktor der Einsparung	367,90	91 %	155,10	82 %	309,60	88 %	159,50	83 %

Gebäudetypen

60er Jahre



Typologie	60er-Jahre Zeile		60er-Jahre 2-Spänner freistehend		60er-Jahre Zeilen		60er-Jahre 2-Spänner-Zeile		
Charakteristik	Putzfassade, Loggien,		Putzfassade, Loggien		Putzfassade, Loggien		Putzfassade, Loggien		
Region	allg. Deutschland		allg. Deutschland		allg. Deutschland		allg. Deutschland		
Baujahr:	1960		1960		1961		1964		
Wohnungen:	20		9		18		24		
Volumen:	5.481		2.413		4.736		7.262		
Geschosse:	4		3		3		4		
Fläche A_{EB} :	1.387		620		1.193		1.726		
Fläche $A_{san} A_N$:	1.754		772		1.515		2.324		
A/V-Verhältnis m^{-1}	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	
	0,43	0,40	0,53	0,48	0,50	0,44	0,45	0,41	
Bauteil	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	
	Außenwand	1,36	0,15	1,51	0,16	1,20	0,16	1,04	0,15
	Decke ü. OG	1,79	0,13	1,79	0,13	1,79	0,13	0,49	0,13
	Grund	1,15	0,14	1,15	0,20	1,15	0,20	0,50	0,14
	Fenster	2,80	0,85	2,80	0,85	2,80	0,85	2,80	0,85
Energetische Kennwerte	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	
	Ergebnisse nach PHPP								
	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	
	Jahres-Heizwärmebedarf	206,1	20,5	250,5	25,1	216,5	24,5	157,7	23,5
	Trinkwassererwärmung	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
	Anlagenaufwand primärenerg.	1,40	1,15	1,40	1,15	1,40	1,15	1,40	1,15
	Jahres-Primärenergiebedarf	312,3	43,1	374,5	48,4	326,9	47,7	244,6	46,6
		absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
	Faktor der Einsparung	269,20	86 %	325,70	87 %	279,50	85 %	197,90	81 %
	Ergebnisse nach EnEV	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)
Jahres-Heizwärmebed. $q_h(A_N)$		140,6	22,5	171,1	25,9	151,6	25,9	108,5	25,0
Bezug: Beheizte Fläche A_{EB}		177,8	28,5	213,1	32,3	192,6	33,0	146,1	33,7
Trinkwassererwärmung		12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Anlagenaufwandszahl e_p		1,4	0,9	1,4	0,9	1,4	0,9	1,4	0,9
Jahres-Primärenergiebedarf q_p		214,3	31,5	257,0	34,6	229,7	34,6	169,4	33,8
		absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
Faktor der Einsparung		182,80	85 %	222,50	87 %	195,20	85 %	135,60	80 %

Gebäudetypen

70er-Jahre



Typologie	70er-Jahre Punkthaus		70er-Jahre Plattenbau		70er-Jahre freistehend		
Charakteristik	Stahlbetonsandwichplatten, Flachdach		Stahlbetonsandwichplatten, Flachdach		Beton sandwichplatten, Loggien, Flachdach		
Region	allg. Deutschland		Schwerpunkt Ostdeutschland		allg. Deutschland		
Baujahr:	1970		1972		1970		
Wohnungen:	100		112		16		
Volumen:	9.483		30.253		5.298		
Geschosse:	10		11		4		
Fläche A_{EB} :	2.640		8.767		1.407		
Fläche A_{N} :	3.035		9.681		1.695		
A/V-Verhältnis m^{-1}	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	
	0,29	0,28	0,27	0,25	0,45	0,42	
Bauteil	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	U-Wert _{Bestand}	U-Wert _{San}	
	Außenwand	0,77	0,14	1,70	0,17	0,67	0,18
	Decke ü. OG	0,94	0,12	0,65	0,10	0,43	0,14
	Grund	1,00	0,19	1,09	0,19	0,76	0,14
	Fenster	2,80	0,85	3,00	0,85	2,83	0,78
Energetische Kennwerte	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	Bestand	Sanierung	
	Ergebnisse nach PHPP						
	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	
	Jahres-Heizwärmebedarf	127,9	14,6	138,4	12,0	124,3	23,1
	Trinkwassererwärmung	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
	Anlagenaufwand primärenerg.	1,40	1,15	1,40	1,15	1,40	1,15
	Jahres-Primärenergiebedarf	202,9	36,3	217,6	33,4	197,8	46,1
		absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
	Faktor der Einsparung	166,40	82 %	184,20	85 %	151,70	77 %
	Ergebnisse nach EnEV	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)
Jahres-Heizwärmebed. $q_h(A_N)$		91,5	19,4	106,3	18,7	93,8	27,2
Bezug: Beheizte Fläche A_{EB}		105,1	22,3	117,40	20,6	113,0	32,8
Trinkwassererwärmung		12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Anlagenaufwandszahl e_p		1,4	0,9	1,4	0,9	1,4	0,9
Jahres-Primärenergiebedarf q_p		145,60	28,7	166,30	28,1	148,8	35,7
		absolut	in %	absolut	in %	absolut	in %
Faktor der Einsparung		116,90	80 %	138,30	83 %	113,10	76 %

Bei der Bestandssanierung ist die hochwertige Ausführung der Gebäudehülle ein zentraler Punkt für die Wertbeständigkeit des Anwesens. Die Investitionen sollten mindestens 40 Jahre Bestand haben. Kostengünstigere Lösungen mit schlechten U-Werten, die ein erneutes Eingreifen in 15 bis 25 Jahren erforderlich machen, sind betriebswirtschaftlich gesehen äußerst schlecht zu bewerten.

Für die wärmeübertragenden Transmissionsflächen muss zunächst das A/V-Verhältnis (Fläche/Volumen) durch sinnvolle Planung optimiert werden (vgl. Seite 7). Dann geht es im Sinn der Energieeffizienz darum, durch gute **Dämmung** die Transmissionswärmeverluste zu minimieren und dadurch eine zukunftsfähige Konstruktion im oben beschriebenen Sinn zu erhalten. Die Planungsmaxime dafür lautet: Detaillösungen so ausführen, dass ohne konstruktiven Mehraufwand eine hohe Dämmdicke ermöglicht wird. Dämmung selbst ist so kostengünstig, dass sie sich innerhalb kurzer Zeit amortisiert.

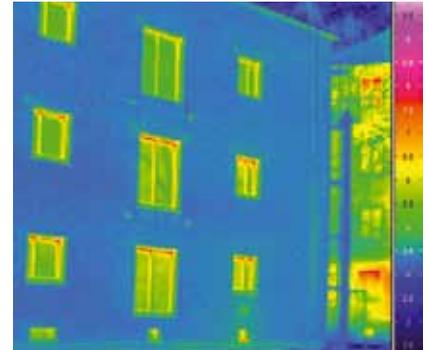
Fenster sollten ebenfalls hochwertig ausgeführt werden. Transparente Bauteile mit U_w -Werten von 0,9 bis 0,8 $W/(m^2K)$, also bis hin zum Passivhausstandard, sind in den letzten Jahren sehr kostengünstig geworden. Grundsätzlich sollte Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung angewandt werden, weil Zweischeibenverglasung in wenigen Jahren zu einem deutlichen Wertverlust eines Gebäudes führen wird. Die hochwertigen Fenster bieten darüber hinaus bauphysikalische

Sicherheit und einen deutlich höheren Komfort.

Wärmebrücken werden minimiert zur Reduzierung von Energieverlusten und zur Erzielung ausreichend hoher Temperaturen an den Innenoberflächen. Letzteres ist wichtig zur Vermeidung von Tauwasserniederschlag und Schimmelpilzbildung (vgl. Seite 8).

Zudem müssen **Luft- und Winddichtheit** gewährleistet werden als Voraussetzung für Schadensfreiheit und hohen Komfort (vgl. Seite 29).

Besondere Beachtung erfordern Problembereiche des Gebäudes wie z. B. Kellerabgang, Treppenhaukopf und Balkon- bzw. Loggia-situationen.



Infrarot-Thermografie eines Gebäudes mit Passivhaus-Komponenten (Quelle: PHI)



Hochwertige Fenster mit gedämmtem Rahmen und 3-fach-Wärmeschutzverglasung



Baubegleitende Qualitätssicherung mittels Infrarot-Thermografie



Kellerabgang: Wärmebrückenarm und luftdicht

Wand

Die einfachste und bauphysikalisch sicherste Form des Wärmeschutzes besteht in einer Außendämmung. Als kostengünstigste Lösung bietet sich dafür ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) an. Es gibt eine Vielzahl von Lösungen. Systemhersteller bieten hervorragenden Service zu den Detaillösungen und zur Baustellenüberwachung an, sodass problemlos auch große Dämmdicken von 20 bis über 30 cm realisiert werden können.

Als Dämmstoffe kommen Polystyrol, Mineralwolle, Mineralschaumdämmung, Vakuumdämmung und zahlreiche nachwachsende Rohstoffe in Frage. Letztere sind bei höheren Dämmstärken am sinnvollsten mit vorgefertigten Tragkonstruktionen herstellbar. Gestalterisch ergeben sich daraus gute Optionen, weil alternativ zu den Putzen andere Oberflächen gestaltet werden können.

Bei denkmalgeschützten Fassaden ist der Einsatz von Innendämmung in den meisten Fällen unumgänglich. Eine detaillierte bauphysikalische Überprüfung ist in diesen Fällen besonders wichtig. Hilfreich ist die Sicherstellung von Schlagregensicherheit, Luftdichtheit, Heizflächen im Außenwandbereich sowie Einsatz mechanischer Lüftung zur Senkung der Innenraumfeuchte.



Wärmedämmverbundsystem (WDVS) am Jean-Paul-Platz 4, Nürnberg



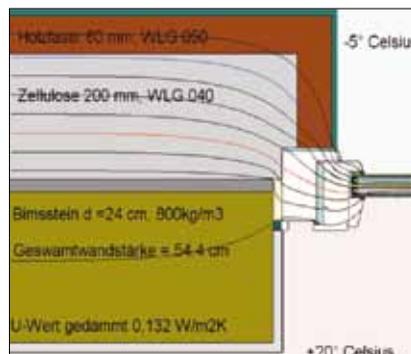
Dämmung 20 cm WLG 035 gedübelt und z. T. verspachtelt (Ingolstädter Straße, Nürnberg)



Sorgfältige Detaillösung, z. B. im Bereich des Fensterblechs (Quelle Marmorit)



Innendämmung bei einem Gründerzeitgebäude 6–12 cm dick



WDVS aus nachwachsenden Rohstoffen als Fertigteilelement (Quelle Variotec)



Wärmedämmverbundsystem getarnt als historisches Backsteinmauerwerk



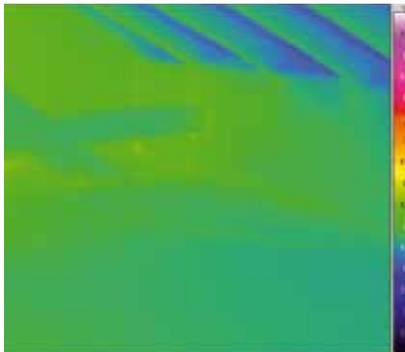
I-Profil mit 36 cm Höhe: Raum für ausreichend Wärmedämmung



Schrägdach-Dämmung mit Zellulose-Einblasdämmung



Luftdichtung, 25 cm Dämmung und Estrich auf der obersten Geschossdecke



Infrarot-Thermografie der Konstruktion links nach Fertigstellung (Quelle: PHI)



Qualitätssicherung hinsichtlich Wärmebrücken und Luftdichtheit



Einsatz von vorgefertigten Vakuumdämmelementen (Quelle: Variotec)

Dach/oberste Geschossdecke

Im Dachbereich ist es in den meisten Fällen unproblematisch, hohe Dämmdicken von 25 bis 40 cm auszuführen.

Es geht darum, mit möglichst geringem konstruktivem Aufwand Raum für Dämmung zu schaffen. Dies kann bei Sparrenkonstruktionen durch Aufdopplung, seitliches Anlaschen von Bohlen oder (Halb)-I-Profilen oder durch Abhängung beim Trockenbau geschehen.

Bei Flachdächern kann auf bestehende Dämmung in vielen Fällen kostengünstig aufgedoppelt werden.

Oberste Geschossdecken können extrem einfach durch Aufblas-Dämmungen oder für begehbare Bereiche durch Dämmung in Verbindung mit Estrich oder Plattenabdeckungen thermisch grundlegend verbessert werden.

Wenn das Dach allein ohne die anderen Bauteile saniert wird, ist es wichtig, Anschlussdetails so vorzubereiten, dass z. B. eine ausreichend dicke Wanddämmung später ohne Extraaufwand angeschlossen werden kann.

Kellerdecke/ Bodenplatte

Die Dämmung der Kellerdecke ist grundsätzlich sehr einfach auszuführen, indem entweder unterhalb der Decke eine Dämmung verklebt bzw. abgehängt wird oder bei einer grundlegenden Sanierung unter dem Estrich im Erdgeschoss die Dämmung eingebracht wird. Anzustreben sind Dämmdicken zwischen 15 und 20 cm mit Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035.

Ein Problem ergibt sich bei den Gebäuden, die keine ausreichenden Raumhöhen aufweisen. Dort sind individuelle Lösungen zu suchen, z. B. eine Kombination aus den oben angegebenen Konstruktionen oder die Anwendung eines Dämmmaterials mit sehr geringem Lambda-Wert bis hinab zur Vakuumdämmung. Mit nur drei bis vier Zentimetern Dämmdicke kann ein U-Wert unter $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erzielt werden.

Bei Gebäuden ohne Unterkellerung wird im allgemeinen oberhalb der **Bodenplatte** unter dem Estrich gedämmt. Bei fehlender Raumhöhe ist einerseits wiederum der Einsatz von Vakuumdämmung möglich. Als Alternative bietet sich ein Mindestwärmeschutz von 6–10 cm unter dem Estrich in Verbindung mit einer ausreichend tief greifenden Dämmung der Außenfundamente rund um das Gebäude. Diese Lösung muss allerdings hinsichtlich der Wärmeverluste präzise berechnet werden.



Dämmung der KG-Decke mit Mineralfaserdämmung 20 cm dick



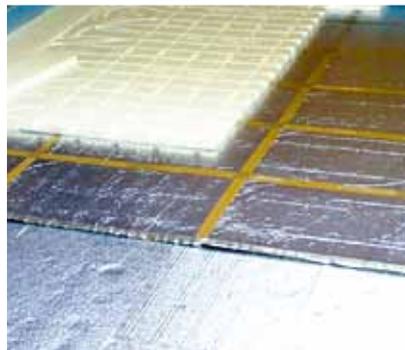
Kellerdeckendämmung mit 14 cm Polystyrol



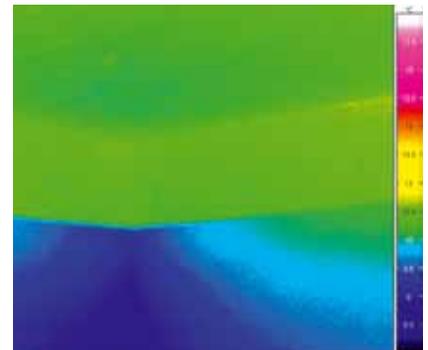
Leitungsführung innerhalb der gedämmten Gebäudehülle im Bereich der Kellerdeckendämmung



Fertige Spachtelung der Konstruktion oben



Vakuum-Wärmedämmung mit minimaler Aufbauhöhe (Quelle: Variotec)



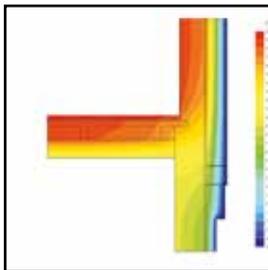
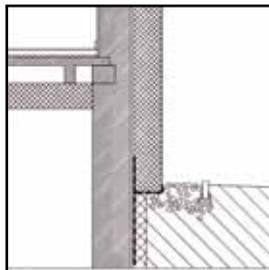
Infrarot-Thermografie: Deutlich sichtbarer Dämmeffekt; Wandecke kälter als seitliche Kellerwand

Wärmebrücken können bei ungünstiger Ausführung 15–30 % der Transmissionswärmeverluste ausmachen. Zudem wird die Oberflächentemperatur auf der Innenseite im gestörten Bereich herabgesetzt, was zu Feuchteschäden führen (s. S. 8) kann. Auf den folgenden Seiten werden Beispiele für die Baujahre 1950 bis 1975 dargestellt mit Angaben zu den U-Werten vor und nach der Sanierung sowie dem Wärmebrückenverlustkoeffizienten (Ψ) und der Temperatur auf der Innenseite der Wärmebrücke bei Temperaturen innen von 20 °C und außen –5 °C.

Die Wärmebrückenberechnungen auf den Seiten 22–25 wurden im Rahmen des DBU-Projekts durchgeführt [Marmorit-EBÖK 2004].

Sockelbereich

Eine sorgfältige Betrachtung des Sockelbereiches ist hinsichtlich der Wärmebrückensituation besonders wichtig. Die Dämmung muss ausreichend in das Erdreich eingreifen – senkrecht nach unten oder horizontal. Bei feuchtem Mauerwerk ergeben sich zu Anfang bis zur vollständigen Austrocknung des Sockelmauerwerks gegenüber der Berechnung möglicherweise ungünstigere Werte und niedrigere Oberflächentemperaturen an der Innenwand. Zusätzlich können Salze im Mauerwerk zu einer weiteren Erhöhung der Mauerwerksfeuchte führen.



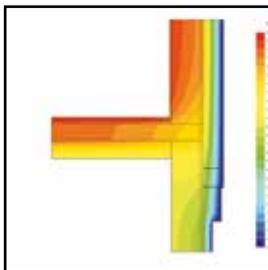
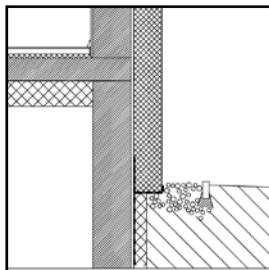
50er-Jahre: Sockel

Wand, $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Decke über OG, $U = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi- (Ψ) Wert $0,077 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur $\text{min } 17,4 \text{ }^\circ\text{C}$



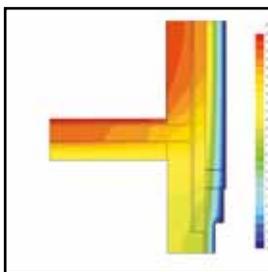
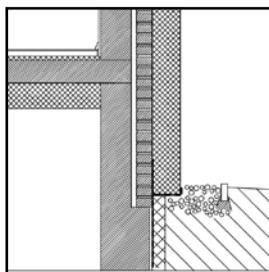
60er-Jahre: Sockel

Wand, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Decke über OG, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi- (Ψ) Wert $0,096 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur $\text{min } 17,1 \text{ }^\circ\text{C}$



70er-Jahre: Sockel

Wand, (verklindert) $U = 1,0-1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Decke über OG, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

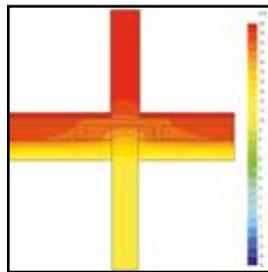
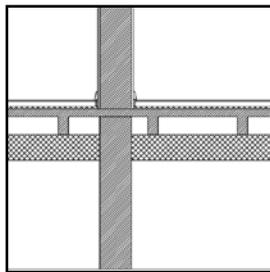
Psi- (Ψ) Wert $0,15 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur $\text{min } 16,8 \text{ }^\circ\text{C}$

Wärmebrückensituationen Kellerdecke zur Innenwand

Der Wärmebrückeneffekt ist besonders gravierend bei Innenwänden, welche die Kellerdecke durchdringen. Rechnerisch ergeben sich die hohen Werte im Gegensatz zu den Außenwandanschlüssen aus dem bei dieser Situation nicht vorhandenen Bonus des Außenmaßbezuges. Eine Verbesserung ist zu erzielen, wenn der Weg der Wärmeleitung verlängert wird, z. B. durch einen Dämmstreifen an der Wand unterhalb der Dämmung mit einer Höhe von 30 bis 50 cm. Die Verbesserung hängt vor allem von der Wärmeleitfähigkeit und Dicke der betroffenen Wand ab.

Für die Auslegung der Heizung sollte in den Erdgeschossen der Effekt der Wärmebrücken berücksichtigt werden.

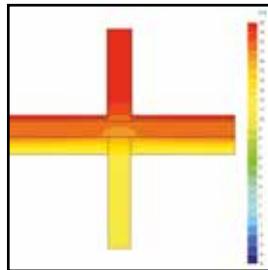
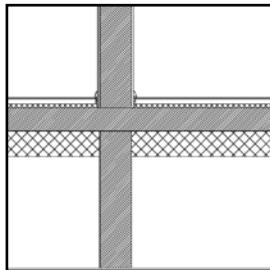


50er-Jahre: Decke/Innenwand

Decke über OG, $U = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $0,39 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$

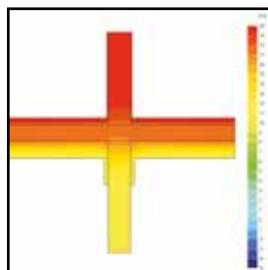
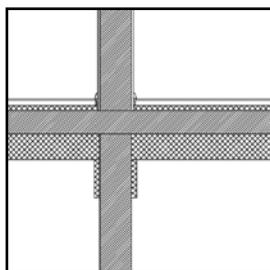


60er-Jahre: Decke/Innenwand

Decke über OG, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $0,45 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $18,3 \text{ }^\circ\text{C}$



70er-Jahre: Decke/Innenwand

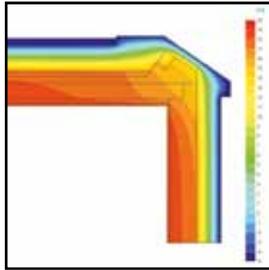
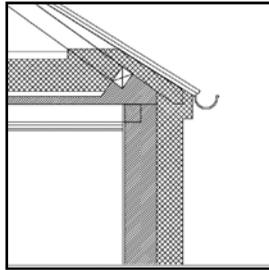
Decke über OG, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $0,32 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Wärmebrücken im Traufbereich

Durch den Außenmaßbezug können bei optimierter Wärmebrückengestaltung negative Wärmebrückenverlustkoeffizienten (Psi-(Ψ)Werte) resultieren.



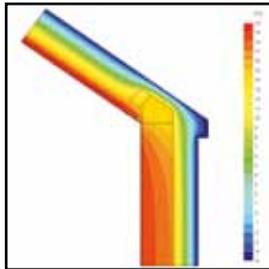
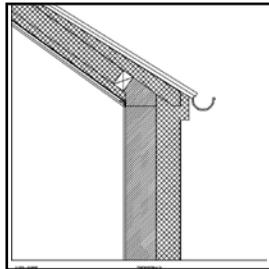
50er-Jahre: Traufe/Decke zum Dachboden als Rippendecke

Bestand: Wand, $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Bestand: Decke zum Dachboden, $U = 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $-0,001 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $17,4 \text{ }^\circ\text{C}$



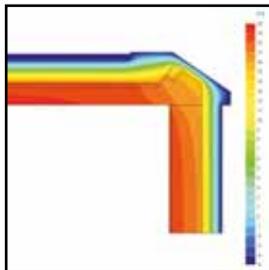
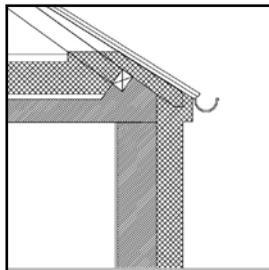
50er-Jahre: Traufe/Treppenhaus

Bestand: Wand, $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Bestand: Dachschräge, $U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $0,045 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $16,4 \text{ }^\circ\text{C}$



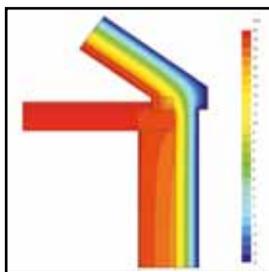
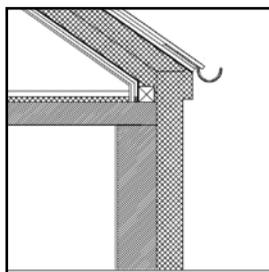
60er-Jahre: Sockel: Traufe/Betondecke

Bestand: Wand, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Bestand: Decke zum unbeheizten Dachboden, $U = 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $0,011 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $17,4 \text{ }^\circ\text{C}$



70er-Jahre: Traufe/mit ausgebautem Dach

Bestand: Wand, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

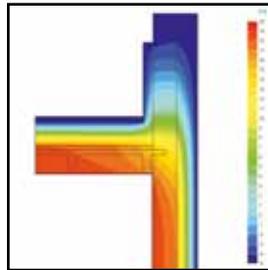
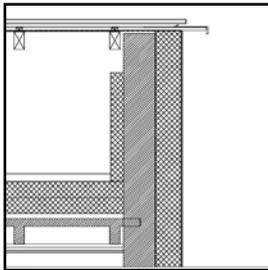
Bestand: Decke, $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $-0,031 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$

Wärmebrücken im Ortgangbereich

Bei nicht ausgebauten Dachgeschossen muss im Giebelwandbereich die Dämmung innen und außen hochgezogen werden, um die Wärmebrückeneffekte über die Giebelwand zu minimieren. Die Höhe des Hochzugs innen ist von der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks abhängig und liegt im Bereich von 0,50 bis 1,00 m. Bei Mauerwerk mit senkrechter Lochung weicht die vertikale Wärmeleitfähigkeit möglicherweise vom Nennwert ab. Besonders ist der dreidimensionale Anschluss im Ortgang-Traubereich zu beachten. Dort ist auch die Wandkrone oberhalb zu dämmen.



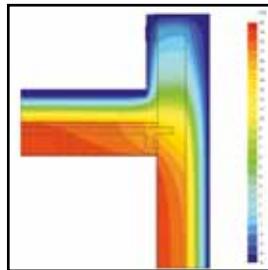
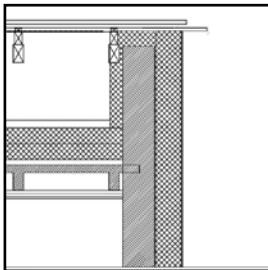
50er-/60er-Jahre: Ortgang (Decke zum unausgebauten Dachboden)

Bestand: Wand, $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Bestand: Decke zum Dachboden, $U = 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $0,011 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $17,4 \text{ }^\circ\text{C}$



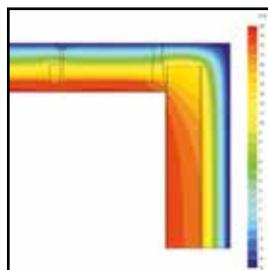
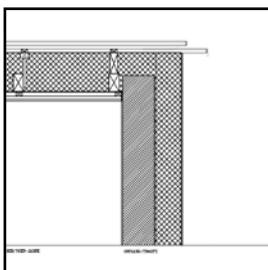
50er-/60er-Jahre: Ortgang im Traufbereich

Bestand: Wand, $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Bestand: Decke zum Dachboden, $U = 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $0,011 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $17,4 \text{ }^\circ\text{C}$



70er-Jahre: Ortgang

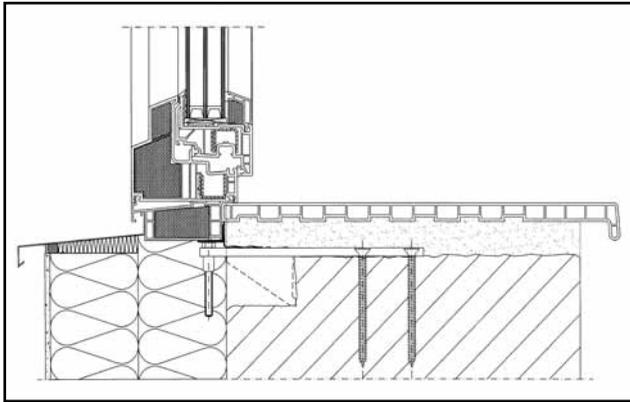
Bestand: Wand, $U = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vor/ $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

Bestand: Decke zum Dachboden; $U = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach Sanierung mit PS 20 WLG 035 250 mm

Psi-(Ψ)Wert $-0,029 \text{ W}/(\text{mK})$

Temperatur_{min} $17,1 \text{ }^\circ\text{C}$

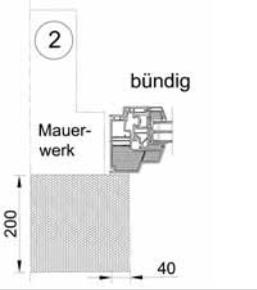
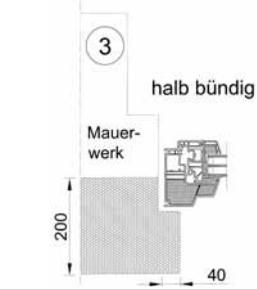
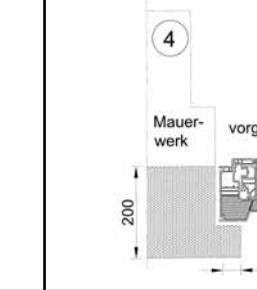
Wärmebrücken Fenster



Anschluss eines Passivhausfensters mit Montagewinkel in wärmedämmter Wandkonstruktion.

Der wärmebrückenminimierte Einbau von Fenstern wird für verschiedene Einbausituationen in der Tabelle unten analysiert. Zufriedenstellende Ergebnisse hinsichtlich des Wärmebrückenverlustkoeffizienten ergeben sich nur beim Einbau »halb bündig« und »vorgehängt«. Der Befestigungsaufwand mit herkömmlichen Materialien wird durch diese Einbauvarianten höher. Ziel weiterer Entwicklungen sind kostenneutrale Lösungen für wärmebrückenfreie Lösungen. Links wird das Detail eines Montagewinkels am unteren Fensteranschluss dargestellt [Rehau 2004].

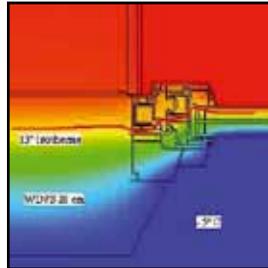
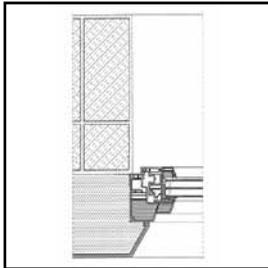
Einbauvarianten Passivhausfenster

	bündig	halb bündig, Überdämmung 40 mm bzw. 70 mm		vorgehängt
				
Überdämmung	40 mm	40 mm	70 mm	40 mm
Psi-(Ψ)Werte seitlich (W/mK)	0,037	0,0174	0,08 mm	0,0129
Psi-(Ψ)Werte unten (W/mK)	0,103	0,0612	0,0612 mm	0,0458
frsi > 0,70	0,87	0,88	0,88	0,89
U-Window vor Einbau 1.230x1.480 W/(m²K)	0,789	0,789	0,789	0,789
U-Window nach Einbau 1.230x1.480 W/(m²K)	0,93	0,87	0,84	0,84
Verlust der Wärmemenge über die Baufuge in L/a Heizöl	2,27	1,2	0,89	0,89
Kosten Montagemittel in Euro	ca. 6,00 (Montageschrauben)	ca. 34,00 (Montagewinkel, ungeprüf-tes Befestigungssystem)		ca. 52,00 (Montagewinkel, geprüf-tes Befestigungssystem)

0,84 = Passivhauskriterien erfüllt

Wärmebrückensituationen Fenster (seitlicher Anschluss)

Für charakteristische Detailausbildungen von Fensteranschlüssen verschiedener Baujahre wurden Wärmebrückenberechnungen durchgeführt unter Verwendung eines für Passivhäuser zertifizierten Fensters. Bei allen Varianten wurde dabei die optimierte Variante des Einbaus im Bereich der Dämmung gewählt [Rehau 2004].



30er-Jahre: PVC-Fenster

Bestand: Fenster U_w (nach Einbau) = 3,1 W/(m²K)

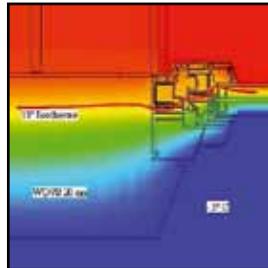
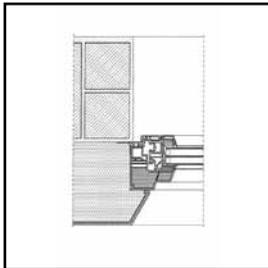
Sanierung: Fenster U_w (nach Einbau) = 0,845 W/(m²K)

WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

f_{rsi} : 17,7°/0,91

Psi-(Ψ)Wert (seitlich): 0,0477 W/mK

Psi-(Ψ)Wert (unten): 0,053 W/mK



30er-Jahre: PVC-Fenster

Bestand: Fenster U_w (nach Einbau) = 3,03 W/(m²K)

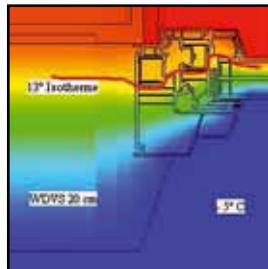
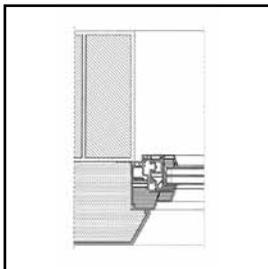
Sanierung: Fenster U_w (nach Einbau) = 0,86 W/(m²K)

WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

f_{rsi} : 17,4°/0,89

Psi-(Ψ)Wert (seitlich): 0,0187 W/mK

Psi-(Ψ)Wert (unten): 0,0459 W/mK



60er-Jahre: PVC-Fenster

Bestand: Fenster U_w (nach Einbau) = 3,1 W/(m²K)

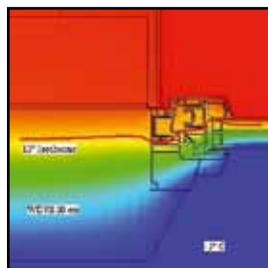
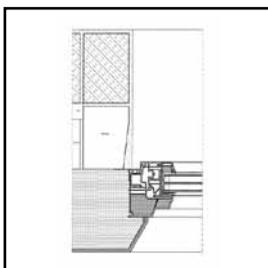
Sanierung: Fenster U_w (nach Einbau) = 0,84 W/(m²K)

WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

f_{rsi} : 17,4°/0,90

Psi-(Ψ)Wert (seitlich): 0,01 W/mK

Psi-(Ψ)Wert (unten): 0,0438 W/mK



60er-Jahre/Norddeutschland: PVC-Fenster

Bestand: Fenster U_w (nach Einbau) = 3,2 W/(m²K)

Sanierung: Fenster U_w (nach Einbau) = 0,847 W/(m²K)

WDVS PS 15 WLG 035 200 mm

f_{rsi} : 17,7°/0,91

Psi-(Ψ)Wert (seitlich): 0,0122 W/mK

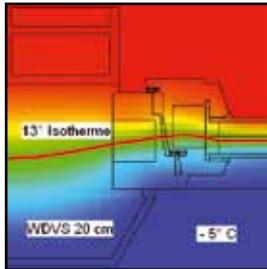
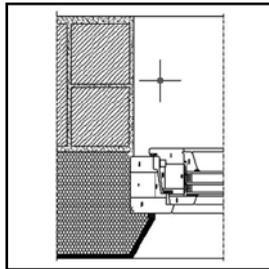
Psi-(Ψ)Wert (unten): 0,0415 W/mK

Wärmebrücken – Holzfenster und Haustür

Im Rahmen des DBU-Projektes wurden Holzfenster entwickelt, die aus heimischen Nadelhölzern hergestellt sind und durch thermische Behandlung die Resistenzklasse von Eiche erhalten. Das Profil ist so ausgelegt, dass ein U_w -Wert von $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht wird.

Die dargestellte Haustür ist ebenfalls aus Holz gefertigt und als Passivhaustür zertifiziert.

Neben der Betrachtung der seitlichen Anschlüsse ist besonders der Wärmebrückeneffekt am unteren Abschluss der Haustüren zu überprüfen.



Holzfenster seitlicher Anschluss

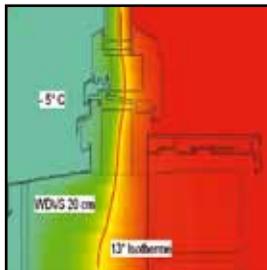
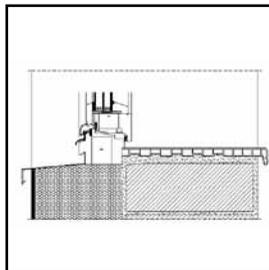
$$U_w \text{ (Einbau)} = 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Kurzangaben zum Fenster:

Einbausituation:

$$f_{rsi}: 17,7^\circ/0,91$$

$$\text{Psi-}(\Psi)\text{Wert (seitlich): } -0,0128 \text{ W/mK}$$



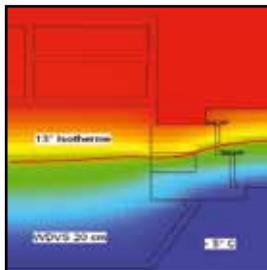
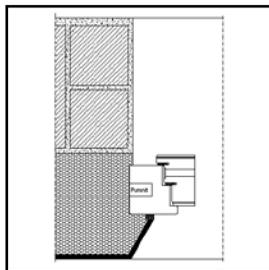
Holzfenster unterer Anschluss

$$U_w \text{ (nach Einbau)} = 0,845 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Einbausituation:

$$f_{rsi}: 17,7^\circ/0,91$$

$$\text{Psi-}(\Psi)\text{Wert (unten): } -0,0011 \text{ W/mK}$$



Haustür

$$U_w \text{ (nach Einbau)} = 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Besonderheiten:

$$f_{rsi}: 17,4^\circ/0,90$$

$$\text{Psi-}(\Psi)\text{Wert (seitlich/oben): } 0,006 \text{ W/mK}$$

(Quelle: Variotec)

In der **Energieeinsparverordnung** wird gefordert, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig entsprechend dem Stand der Technik abgedichtet ist.

Eine **wind- und luftdichte Ausführung ist unabdingbar für energieeffizientes Bauen**, komfortables Raumklima sowie Schallschutz und verhindert zugleich Feuchteschäden durch Kondenswasserbildung.

Konstruktiv muss bei der **Detailplanung** die Dichtheitsebene festgelegt werden. Während der Bauphase muss die Planung konsequent umgesetzt und die Ausführung überprüft werden.

Die Überprüfung erfolgt mit einem **Blower-Door-Test**: Mittels Ventilator wird ein Unter- und Überdruck von 50 Pascal im Gebäude erzeugt. Der daraus zu berechnende Volumenstrom darf nach EnEV $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ (bezogen auf das Luftvolumen des Gebäudes) nicht überschreiten. Bei Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen ist es dringend geboten den Passivhaus-Kennwert von n_{50} einzuhalten.



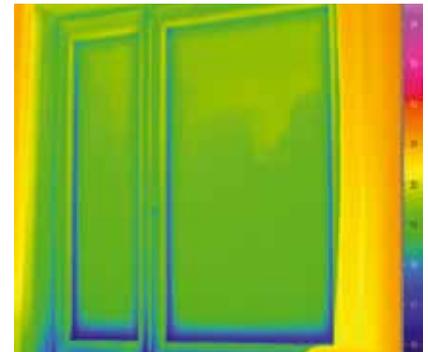
Blower-Door-Test: Bei Unter-/Überdruck wird der Volumenstrom pro Stunde gemessen.



Fehlerquellen beim Estrich: Lecks in Decke, Innenputz, Fenster-Verklebungen und Durchbrüchen



Innenputz als luftdichtende Schicht: besonders anfällig bei porosiertem und gelochtem Mauerwerk



Blower-Door-Test – mittels Unterdruck-Messung durch Infrarot-Thermografie: keine Leckagen im Bereich des Fensterrahmens



Luftdichtung in der Kleber-Ebene des WDV bei Sanierung im bewohnten Zustand



Gebäudetechnik: Lecks an Elektrolehrröhren und -Unterputzdosen sowie Durchbrüchen von Leitungen

Aufgaben der Lüftung

Die Lüftung von Wohnungen dient der Sicherstellung einer hygienisch und gesundheitlich unbedenklichen Raumluft-Qualität (vgl. Seite 11) sowie der Regulierung der Raumluftfeuchtigkeit in einer für die Bewohner und das Bauwerk zuträglichen Form (vgl. Seite 10).

Die Aufgaben der Lüftung sind also:

1. **Frischluftezufuhr** zum Ausgleich von **Raumluftbelastungen**
 - Schadstoffe aus Baumaterialien, gebäudetechnischen Einrichtungen, Einbauegegenständen und Möbeln
 - Luftverunreinigungen durch Hausstaub, Mikroorganismen und Allergenen in der Luft
 - Nutzerbedingte Belastungen aus Haushaltsgegenständen, Lagerung und Zubereitung von Lebensmitteln, Haushaltschemikalien
 - Stoffwechselprodukte der Nutzer aus Atmung, Transpiration etc.
2. **Sicherstellen** einer **angemessenen Raumluftfeuchte**
 - Begrenzung der relativen Luftfeuchte auf einen behaglichen und gesundheitsverträglichen Bereich von 35 bis 65 % r. F.
 - Abtransport von in der Wohnung anfallender Wohnfeuchte
 - Vermeidung von Kondensatanfall an Bauteilen.

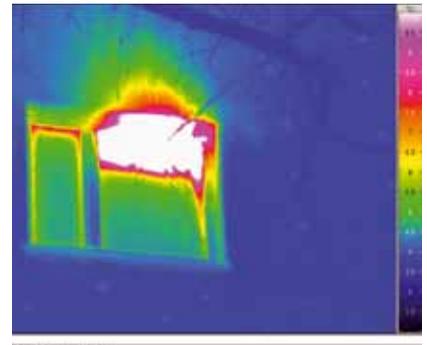
Für Wohnungen in Deutschland war bis vor wenigen Jahrzehnten ein geregelter Luftaustausch gegeben in Form von sehr hoher Fugen- und dichtigkeit bei den Fenstern und Türen in Verbindung mit Einzelöfen in den Aufenthaltsräumen. Durch die Ansaugung von Verbrennungsluft war ein kontinuierlicher Luftwechsel sichergestellt. Der Preis dafür war eine äußerst mangelhafte Behaglichkeit in den Räumen: An kalten Tagen war es nur in der Nähe des Ofens angenehm warm und die angesaugte Kaltluft führte zu äußerst unangenehmen Zugserscheinungen im Bereich der Fenster und Türen.

Durch Einbau von Zentralheizungen wurde der Luftauftrieb unterbunden. Seit Ende der sechziger Jahre wurden dichte Fenster eingebaut, verbunden mit einer Abdichtungswelle im Zuge der ersten Ölpreiskrise 1973. Das Lüftungsverhalten wurde jedoch nicht der neuen Situation angepasst. Dadurch entstanden hohe Raumluftbelastungen mit der Folge erhöhter Allergiefähigkeit und Atemwegsbeschwerden.

Bei Einbau von neuen Fenstern ohne angemessene Dämmung der Fassade ist mit hoher Sicherheit davon auszugehen, dass in den charakteristischen Wärmebrückenbereichen der Räume insbesondere hinter Möbeln und Vorhängen in Schlafzimmern, Bädern und Küchen Schimmel auftritt (vgl. Seite 8).



Mieterselbsthilfe gegen zugige Fenster im Winter



Gekippte Fenster: Wärmeverlust – aber wenig Luftaustausch (Quelle PHI)

Freie Lüftung und ihre Grenzen

Freie oder natürliche Lüftung stellt die Zuführung von (frischer) Außenluft auf folgenden beiden Wegen dar:

- Luftaustausch mittels Wind und Temperaturunterschieden zwischen innen und außen als **Quer- und Schachtlüftung** (thermische Auftriebslüftung)
- Luftaustausch über Winddruck mittels **reiner Querlüftung**: Außenluft strömt auf einer oder zwei Fassadenseiten in die Wohnung hinein und auf der Gegenseite mit einem Teil der unerwünschten Beimengungen wieder hinaus.

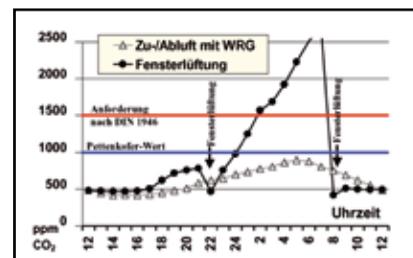
Die **Effektivität der freien Lüftung** ist sowohl bei Vorhandensein von Lüftungseinrichtungen wie Schächten oder Außenluftdurchlässen als auch bei Fensterlüftung abhängig von den jeweils vorherrschenden Wetterkomponenten Wind und Außentemperatur. Das bedeutet, dass sie großen zeitlichen und quantitativen Schwankungen unterworfen ist. Bei Windstille und etwa 20 °C Außentemperatur führt das z. B. zu ihrer völligen Wirkungslosigkeit. Bei tiefen Außentemperaturen und windexponierter Lage muss dagegen nicht nur mit einer hohen, sondern nicht selten sogar mit stark überhöhter

Lüftungswirkung gerechnet werden. Die Folge können **Zugluftprobleme**, unnötiger **Mehrbedarf an Heizenergie** und **niedrige Raumluftfeuchte** sein.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Antriebskräfte der freien Lüftung häufig gerade dann am geringsten sind, wenn die höchste Lüftungsintensität gefordert wird. Das ist z. B. in der **Übergangsjahreszeit** der Fall. Dann kann die Außenluft wegen ihrer höheren Temperatur und dem damit verbundenen höheren Feuchtigkeitsgehalt nur noch wenig Raumluftfeuchtigkeit aufnehmen. Um trotzdem noch ausreichend freigesetzte Luftfeuchtigkeit binden und abführen zu können, muss der Luftvolumenstrom vergrößert werden. Wegen der relativ geringen Antriebskräfte geschieht aber nicht selten das Gegenteil, wenn nicht gleichzeitig die Fenster öfter, weiter und länger geöffnet werden. Das bedingt jedoch, dass die Nutzer sich intensiv auf die unterschiedlichen Lüftungsanforderungen einstellen. Bei Rechtsstreitigkeiten wird Mietern per Gerichtsurteil zugestanden, dass zweimaliges tägliches Querlüften ausreichend sei. Dies führt im Mittel zu einem Luftwechsel von 0,2 h⁻¹. Erforderlich sind aber bei üblichen Wohnsituationen Luftwechsel in den Aufenthaltsräumen zwischen 0,4 h⁻¹ und 0,8 h⁻¹. Die Schlussfolgerung daraus besteht in der Anforderung an Wohnungseigentümer, für eine ergänzende Mindest- bzw. Grundlüftung zu sorgen,

wie dies in der DIN 1946-6 gefordert ist.

Um allein durch Fensterlüftung einen ausreichenden Luftwechsel von ca. 0,6 h⁻¹ zu erzielen, müsste etwa alle eineinhalb bis zwei Stunden eine Stoßlüftung als Querlüftung durchgeführt werden. Dies entspricht bei Weitem nicht der bundesdeutschen Praxis. Kipp- bzw. Spaltlüftung stellt ebenfalls keine befriedigende Lösung dar. Zahlreiche Tracer-Gas-Messungen belegen, dass der resultierende Luftwechsel deutlich niedriger liegt, als bisher angenommen wurde [PHI 2003].



Vergleich Fensterlüftung und ventilatorgestützte Lüftung: Die CO₂-Belastung übersteigt bei manueller Lüftung in einem Schlafzimmer nachts die Anforderungswerte deutlich.

Ventilatorgestützte Lüftung – Abluftanlagen

Mit mechanischen Lüftungsanlagen ist es möglich, kontinuierlich frische Außenluft in der gewünschten Menge in Wohnräume zu leiten.

In einfachster Form geschieht dies durch Abluftanlagen, bei denen die verbrauchte Luft aus den Abluft-räumen (WC, Küche) abgesaugt wird. Grundsätzlich sind zwei Konzeptionen möglich:

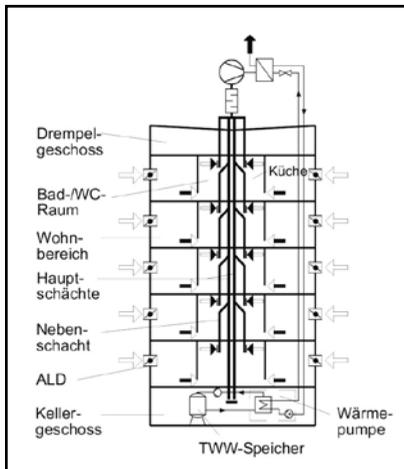
■ **zentrale Abluftanlagen** (Abb. Strangschema einer Zentralventilatoren-Anlage mit Sammelschacht und Wärmerückge-winnung) mit Ventilator bzw. Abluftgerät außerhalb der Wohnung auf dem Dach- bzw. Abseitenraum; Rohr- oder Kanal-(Luftleitungs-)Netz für eine oder mehrere Wohnungen

■ **Einzelventilatoren-Anlagen** mit Ventilatoren in einem der Abluft-räume und direkter Absaugung aus Küche, Bad und ggf. Abstell-raum

Beiden Anlagenvarianten ist gemein, dass die abgesaugte Raumluft wie bei der Schachtlüftung durch frei **nachströmende Außenluft** ersetzt wird. Der lüftungstechnische Vorteil der Anlagen liegt darin, dass eine fest definierte Luftmenge in die Aufenthaltsräume geleitet wird. Voraussetzung dafür ist eine dichte Hüllkonstruktion (s. S. 29) mit ge-regelten Außenluftdurchlässen in allen Zulufräumen (Wohn-, Arbeits- und Schlafräume).

Für die energetisch hocheffiziente Modernisierung von Mehrfamilien-häusern kommen vorzugsweise zentrale Abluftanlagen in Betracht. Sie bieten bei Einsatz von Wärme-pumpen (s. u.) zusätzlich die Möglich-keit der Nutzung von Abluftwärme zur Trink- bzw. Heizwassererwärmung.

Grundsätzlich sollte bei der Aus-legung des stündlichen Luftvolumens eine Beschränkung auf den Mindest-luftwechsel geplant werden. Erhöhte Bedarfslüftung kann zeitlich begrenzt über einen Anforderungstaster oder mittels freier Lüftung per Fenster ausgeführt werden.



Strangschema einer Zentralventilatoren-Anlage mit Sammelschacht und Wärmerückgewinnung aus der Abluft mittels Wärmepumpe (Quelle IEMB). Einsatz von vorgefertigten Vakuum-dämmelementen (Quelle: Variotec)



Abluftventilator für einen Steigstrang als Zentralgerät auf dem Dach mit Schalldämpfer im Sockel



Abluftgeräte für vier Wohnungen [Aerex 2004]



Kellerabgang: Wärmebrückenarm und luftdicht

Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung

Bei (kombinierten) Zu- und Abluftanlagen werden nicht nur die Abluft, sondern zusätzlich auch noch die Außenluft mittels Ventilatoren aus den Ablufträumen heraus bzw. in die Zulufräume hinein gefördert.

Durch Übertragung des Wärmeinhalts der Abluft auf die angesaugte Außenluft kann **Wärmerückgewinnung** (WR) mit Jahresbereitstellungsgraden von über 80 % realisiert werden. Dadurch wird auch bei niedrigen Außentemperaturen die angesaugte Außenluft nahezu auf Raumlufttemperatur vorgewärmt.

Die Lüftungswärmeverluste reduzieren sich durch die Wärmerückgewinnung von 30 bis 50 kWh/(m²a) auf Werte im Bereich von 5 bis 8 kWh/(m²a). Voraussetzung ist eine hohe Luftdichtheit des Gebäudes von $n_{50} \leq 0,6/h$. Zudem sollten die Vorteile der ventilatorgestützten Lüftung vom Nutzer angenommen werden und in der Heizsaison weitgehend auf Fensterlüftung verzichtet werden. Gemessene Projekte zeigen, dass sich trotz individueller Abweichungen auch bei Mietobjekten ein adäquates Lüftungsverhalten einstellt.

Durch die kontinuierliche Zufuhr frischer Außenluft wird für eine gute Luftqualität gesorgt. Die Filterung mit Außenluftfilter (Filterklasse F7/F8; Abluftfilter G4) sorgt für eine weitere Verbesserung der Raumluftqualität.

Für Allergiker bedeutet dies eine besondere Entlastung.

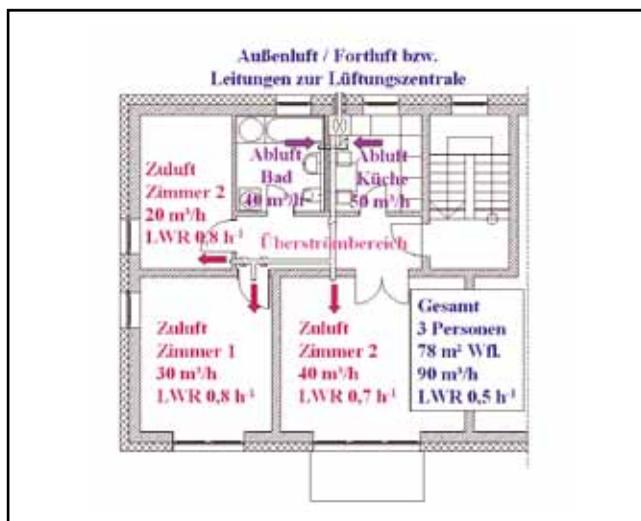
Zu- und Abluftanlagen können als **Luftheizungsanlagen** konzipiert werden. Dies ist aus Komfortgründen jedoch nur sinnvoll, wenn die maximale Heizleistung unter 10 W/m² liegt.



Zuluftleitung im Flur vor der Verkleidung mit Gipskarton

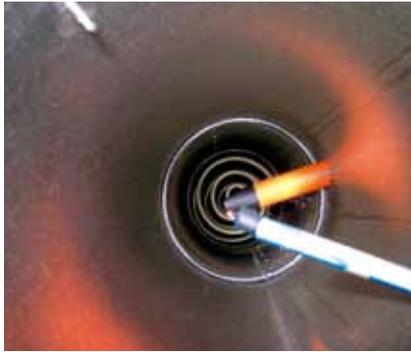
Checkpunkte Zu-/Abluftanlagen

- Wärmebereitstellungsgrad des Gerätes $\eta_{WBG,t,eff} \geq 75 \%$
- Elektroeffizienz $p_{el} \leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$
- Frostsicherheit
- Dichtheit des Gerätes: Leckluftstrom $\leq 3 \%$ des Nenn-Abluftstroms
- Gerätedämmung: Gesamt-Transmissionsleitwert $\leq 5 \text{ W/K}$
- Einfache und kostengünstige Inspektion, Wartung und Filterpflege
- Druckschallpegel in Aufenthaltsräumen $< 25 \text{ dB(A)}$
- Balance der Zu- und Abluft-Massenströme, Disbalance $\leq 10 \%$
- $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$



Anlagenschema einer Zu-/Abluftanlage: komfortable Luftwechsel (LW) von 0,7-0,8 h⁻¹ in Aufenthaltsräumen, Gesamt-LW 0,5 h⁻¹

Dezentrale Anlagen



Vorheizregister zum Frostschutz mit Temperatursensoren und Heizspindel



Außenluftdurchlass

Bei dezentralen Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung befindet sich die gesamte Lüftungstechnik weitgehend in der jeweiligen zu lüftenden Wohnung. Das Lüftungsgerät sollte in einem Nebenraum platziert werden, der möglichst direkt an der Außenhülle liegt. Dadurch können die kalten Außenluft- und Fortluftleitungen kurz gehalten werden. Dennoch müssen diese Leitungen hochwertig wärmegeklämt werden.

Das Anlagenschema links zeigt die Komponenten:

- Außenluftdurchlass zum Gerät
- Frostschutz/Vorheizregister
- Lüftungsgerät
- Rohrnetz (s. S. 33)
- Fortluftdurchlass

Vorteile dezentraler Anlagen:

- Brandschutz kein Problem
- Planung/Installation weniger komplex
- Stromabrechnung direkt über den Haushaltsstrom

Nachteile dezentraler Anlagen:

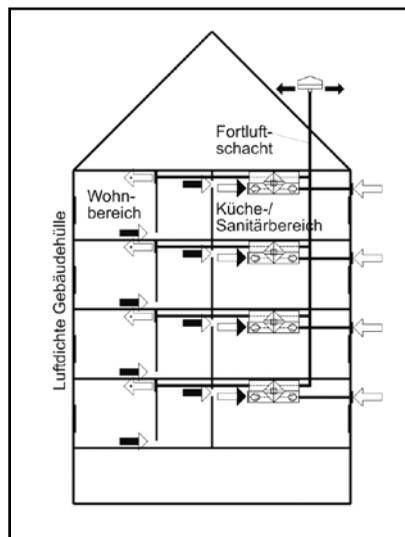
- Platzbedarf für Gerät
- Bei Mietwohnungen: Regelmäßige Begehung der Wohnung für die Wartung erforderlich
- Aufstellort in der Wohnung – im Aufstellraum Ventilatorgeräusche hörbar
- Elektroeffizienz geringer



Lüftungsgerät für eine Wohneinheit



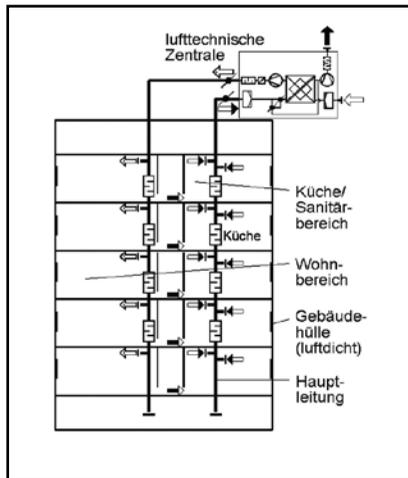
Filterwechsel: möglichst einfach (durch den Mieter)/kostengünstige Ersatzfilter



Schema für dezentrale Zu- und Abluft (wichtig: zentrale Fortluft außerhalb des beheizten Bereichs oder wohnungsweise direkt nach außen). Quelle: IEMB

Zentrale Anlagen

Zentrale Zu- und Abluftanlagen ver- und entsorgen über jeweils nur einen Zu- und Abluftventilator sowie einen Wärmetauscher mehrere Wohnungen eines Mehrfamilienhauses.



Schema einer zentralen Zu- und Abluftanlage
(Quelle: IEMB)

Der Steigstrang lässt sich grundsätzlich in zwei Varianten ausführen:

- zentral mit zwei Leitungen: Brandschutz und Schallschutz wohnungs- oder geschossweise; Vorteil: geringerer Schachtquerschnitt
- Zu- und Abluftleitung pro Wohnung: Brandschutz z. B. mittels Brandschutzklappe zum Lüftungsraum und Leitung in Brandschutzausführung (L-30); Vorteil: guter Schallschutz, Brandschutz einfacher

Vorteile zentraler Anlagen:

- einfache Wartung ohne Begehung der einzelnen Wohnungen
- geringer Stromverbrauch
- geringere Geräuschanfälligkeit

Nachteile zentraler Anlagen:

- Aufwendungen für Brandschutz
- Lüftungsraum erforderlich
- Abrechnung des Lüftungsstroms über Allgemeinstrom
- kalte Leitungen möglichst nicht im Bereich der thermischen Hülle führen

Zusätzlich gibt es zahlreiche Zwischenlösungen zu den dargestellten Systemen. So können **semizentrale Anlagen** ausgeführt werden mit Zentralventilatoren und dezentralen Wärmetauschern (Nachteil: kalte Leitungen im beheizten Bereich) oder das umgekehrte Prinzip mit dezentralen Ventilatoren und zentralem Wärmetauscher (Nachteil: viele Ventilatoren mit entsprechender Wartungsanfälligkeit).



Verteilung: direkter Anschluss der Schalldämpfer an die Brandschutzklappen



Brandschutzklappe



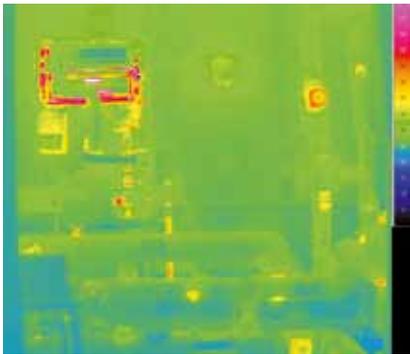
Lüftungszentrale für zehn Wohneinheiten mit hochwertigem Schalldämpfer für die Zuluft



Steigstrang mit Abzweig von Zu- und Abluftleitung für eine Wohnung



Gas-Brennwert-Anlage für ein energieeffizientes Mehrfamilienhaus mit 1.000 m² Wohnfläche



Gas-Brennwert-Anlage als Infrarot-Thermografie



Heizverteilung

Der Restwärmebedarf muss auch bei optimierter energetischer Sanierung durch ein Heizsystem gedeckt werden. Es handelt sich um die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, die durch solare Gewinne und interne Quellen nicht ausgeglichen werden. Die Sanierungsbeispiele auf den Seiten 12 bis 15 zeigen, dass im Allgemeinen ein äußerst geringer Heizwärmebedarf unter 30 kWh/(m²a) verbleibt. Dazu kommt der Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung, der sehr stark vom Nutzerverhalten abhängig ist und im Bereich von 10 bis 30 kWh/(m²a) liegt. Nach EnEV liegt der Wert bei 12,5 kWh/(m²a), bezogen auf AN.

Die EnEV betrachtet richtigerweise nicht nur den Bedarf, sondern den Anlagenaufwand für Übergabe-, Verteilungs-, Speicherungs- und Erzeugerverluste sowie einen Primärenergiefaktor für den gewählten Brennstoff. Mit der daraus resultierenden Primärenergieaufwandszahl für das Heizsystem werden der Heizwärmebedarf für Heizung und Trinkwassererwärmung inkl. elektrischer Hilfsenergien multipliziert.

Über die primärenergetische Betrachtung hinaus sollten bei der Festlegung des Heizsystems auch die resultierenden Emissionen betrachtet werden. Neben den klassischen Emittenten Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid, Staub etc. ist die Betrachtung der CO₂-Emission von entscheidender Bedeutung aufgrund der Klimaschutzaspekte.

Ein weiterer zentraler Punkt bei der Auswahl des Heizsystems liegt natürlich im daraus resultierenden Komfort für den Bewohner. Ausschlaggebend dafür ist im Wesentlichen die heizzeitige Ausführung des Systems, d. h. die Art der Wärmeübertragung an den Raum. Da bei Faktor-10-Sanierungen nur eine sehr geringe Heizlast im Bereich von ca. 10 bis 15 W/m² gegeben ist, können Systeme mit sehr niedrigen Vorlaufemperaturen gewählt und Flächenheizungssysteme kostengünstig ausgeführt werden. Dies ist die Grundlage für günstige Aufwandszahlen bei Wärmepumpenkonzepten. Darüber hinaus besteht bei einer Heizlast unter 10 W/m² die Möglichkeit zur kompletten Einsparung eines konventionellen Warmwasser-Heizsystems, da die Heizwärme wie beim Passivhaus über die Lüftungsanlage verteilt werden kann.

Bei Sanierungen im bewohnten Zustand kann es sich hinsichtlich der Akzeptanz bei den Mietern als sinnvoll erweisen, ein System auszuführen, das dem ursprünglichen Konzept vor der Sanierung ähnlich ist und die Nutzer nicht hinsichtlich ihrer Gewohnheiten überfordert.

Anlagenaufwand

Es ist sinnvoll, die Auswahl des Heizsystems nach dem Anlagenaufwand auszuführen, also dem Verhältnis vom Aufwand zum Nutzen jeder eingesetzten Kilowattstunde Primärenergie. Gute Standardanlagen liegen bei Werten um 1,4. Bei Verbesserung der Anlage wandert der Wert nach unten und bei Einsatz regenerativer Energiequellen kann der Quotient deutlich unter 1,0 sinken.

Die Berechnung für die Anlagenaufwandszahl wurde nach DIN 4701-10 (Tabellenverfahren) für verschiedene Versorgungssysteme am Beispiel eines Mehrfamilienhauses (900 m² Wohnfläche, 3-geschossig, Baujahr 1951) mit hochwertiger Dämmung bei einem Heizwärmebedarf von 25 kWh/(m²a) durchgerechnet. Die Rahmenbedingungen für die **Heizung**: Kessel, Speicherung und Verteilung innerhalb der thermischen Hülle, Vor-/Rücklauftemperaturen 55/45 °C, freie Heizflächen, Thermostatventile mit einem Proportionalbereich von 1 K, geregelte Umwälzpumpe, **Trinkwarmwasser** gebäudezentral, Verteilung und Zirkulation innerhalb der thermischen Hülle.

Die resultierende primärenergiebezogene Anlagenaufwandszahl e_p wird in der nachfolgenden Tabelle für verschiedene Heizsysteme dargestellt.

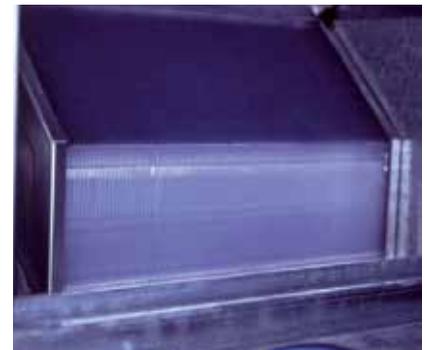
Heizsystem	e_p
Gas-Niedertemperatur	1,49
Gas-Brennwert-Technik	1,42
Öl-Brennwert-Technik	1,42
Wärmepumpe Wasser-Wasser	1,01
Wärmepumpe Sole-Wasser	1,10
Wärmepumpe Luft-Wasser	1,22
Wärmepumpe Luft-Wasser mit Erdreichwärmetauscher	1,21
Wärmepumpe Abluft-Wasser	1,03
Heizwerk fossil	1,69
Heizwerk erneuerbar	0,22
Kraft-Wärme-Kopplung fossil	0,96
Kraft-Wärme-Kopplung erneuerbar	0,10
Elektrische Direktheizung	3,53
Elektrische Speicherheizung	2,83
Braunkohle Einzelofen	2,60
Steinkohle Einzelofen	2,51
Gas-Brennwert-Technik mit solarer Trinkwassererwärmung	1,14
Gas-Brennwerttechnik mit Zu-/Abluft (Luftwechsel 0,58 h ⁻¹ /eff. Wärmebereitstellungsgrad 75 %	1,33
Gas-Brennwerttechnik mit solarer Trinkwassererwärmung, Zu-/Abluft (Luftwechsel 0,58 h ⁻¹ /eff. Wärmebereitstellungsgrad 75 %	1,05



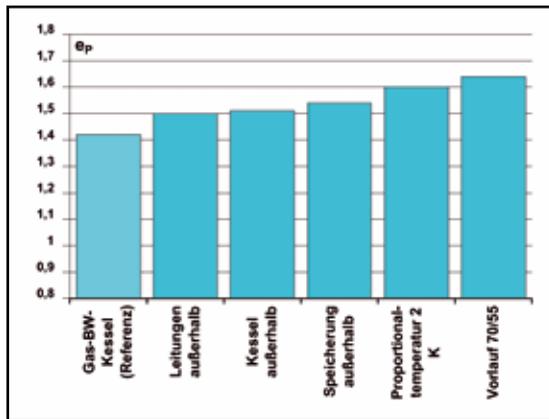
Günstig für den Anlagenaufwand:
Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung



Optimierung durch den Einsatz von Solarthermie

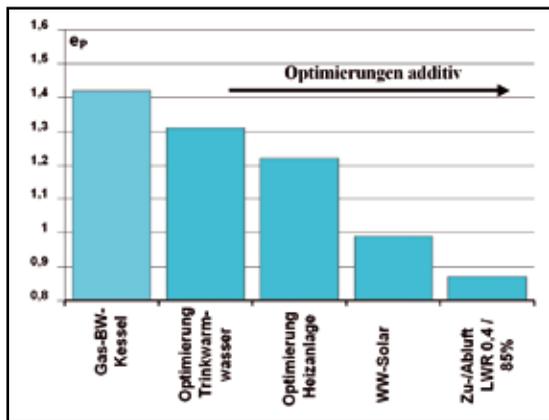


Verbesserung durch Zu-Abluftanlage
mit Wärmerückgewinnung



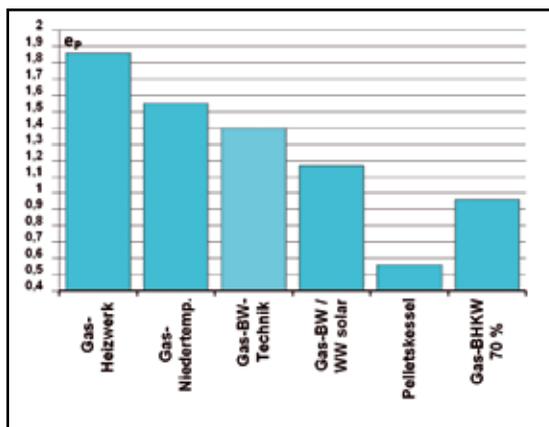
Für jede der auf Seite 37 berechneten Anlagen können die individuellen **Anlagenparameter** geändert werden. Ausgehend vom Referenzfall Gas-Brennwert-Kessel werden folgende **verschlechternde Maßnahmen** untersucht, wobei die Effekte jeweils addiert werden:

- Horizontale Verteilungen und Zirkulation für Heizung und Trinkwarmwasser außerhalb der thermischen Hülle
- Kessel außerhalb der thermischen Hülle
- Speicherung außerhalb der thermischen Hülle
- Proportionaltemperatur der Thermostatventile 2 Kelvin
- Vorlauf 70/55 °C statt 55/45 °C.



Anlagenoptimierung kann durch zahlreiche Maßnahmen erzielt werden, die bei EnEV-Programmen mit individueller Erfassung der Parameter gezielt geplant werden können:

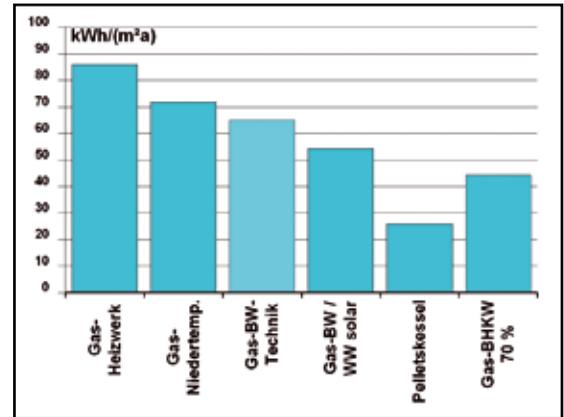
- Optimierung Trinkwarmwasser durch kurze Leitungswege, gute Leitungsdämmung, gute Kessel-, Speicher- und Regelparameter
- Optimierung Heizanlage mittels minimierter Leitungsverluste (Länge und Dämmung) und hochwertigem Kessel
- Solare Trinkwarmwasserbereitung mit 56 % Deckungsanteil
- Zu-/Abluftanlage mit optimiertem effektiven Jahresbereitstellungsgrad von 85 %, Luftwechselrate von 0,4 h⁻¹ und minimiertem Stromverbrauch.



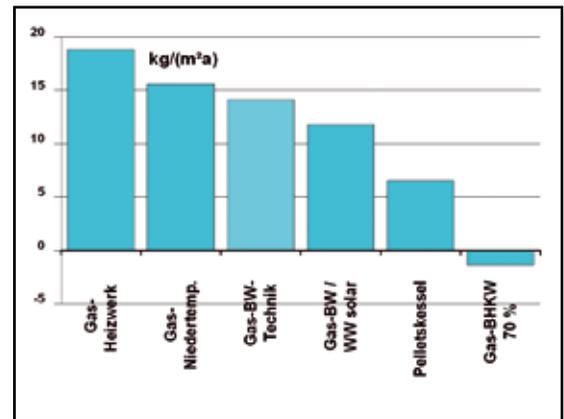
Anlagenvergleich für Faktor-10-Sanierung

Da das Rechenverfahren nach EnEV nicht auf hoch energieeffiziente Gebäude zugeschnitten ist, ergeben sich Abweichungen gegenüber spezifizierten Rechenprogrammen. Nebenstehende Ergebnisse wurden mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket PHPP [PHPP 2004] ermittelt für die **primärenergiebezogene Anlagenaufwandszahl** e_p verschiedener Anlagenkonzepte. Neben dem Referenzfall Gas-Brennwert-Technik wurden die Werte für ein Gasheizwerk, für Gas-Niedertemperaturkessel ebenso ermittelt wie für Optimierungen mit solarer Trinkwassererwärmung, einer Anlage mit Pelletskessel und ein Gas-BHKW mit 70 % Kraft-Wärme-Kopplung. Eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung ist bei allen Anlagen gegeben, wird aber im Gegensatz zur EnEV-Berechnung bei e_p nicht berücksichtigt.

Der **Jahres-Primärenergiebedarf** ergibt sich aus der primärenergiebezogenen Anlagenaufwandszahl e_p des vorhergehenden Diagramms und dem Wärmebedarf für Heizung (Beispielprojekt 25 kWh/m²a) und Trinkwassererwärmung (21 kWh/m²a). Bezugsfläche im Diagramm ist die beheizte Wohnfläche, nicht die Bezugsfläche A_N nach EnEV, die im allgemeinen 15 bis 30 Prozent höher liegt. Entsprechend ist der Kennwert für den Primärenergiebedarf nach EnEV 15 bis 30 Prozent niedriger als dargestellt.



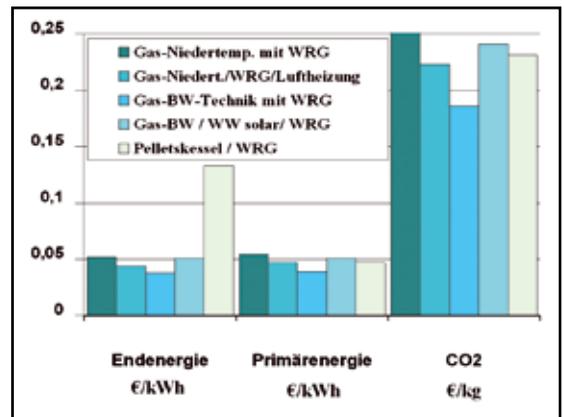
Die **CO₂-Emissionen** für die Anlagenvarianten berechnen sich nach PHPP aus Energiebedarf und Anlagenaufwand mittels der Umrechnungswerte nach GEMIS 3.0. Besonders signifikant sind die guten Werte für Pelletanlagen und Kraft-Wärme-Kopplung.



Wirtschaftlichkeit – Kosten pro eingesparter kWh

Auf Grundlage der ermittelten Endenergie werden die Kosten pro eingesparter Kilowattstunde für fünf Anlagenkonfigurationen dargestellt. Dabei werden berücksichtigt die verbrauchsgebundenen Kosten, die Investitionskosten umgerechnet auf die Annuität, Wartungskosten und Aufwendungen für die Ablesung und Abrechnung. Alle Anlagen beinhalten eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung.

- Referenz: Gas-Niedertemperaturtechnik
- Gas-Niedertemperatur, Verzicht auf ein wassergebundenes Heizungssystem, stattdessen Wärmeverteilung über die Lüftungsanlage
- Gas-Brennwerttechnik
- Gas-Brennwerttechnik mit solarer Trinkwassererwärmung
- Pelletkessel



Lebenszyklusbetrachtung

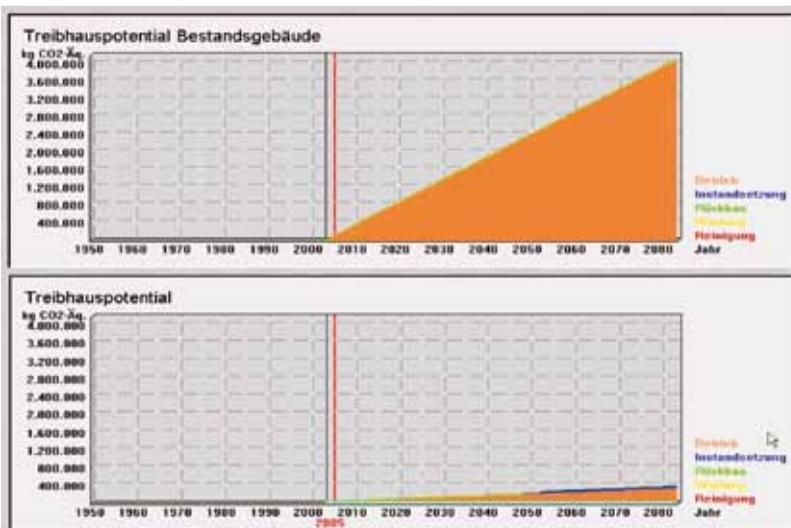
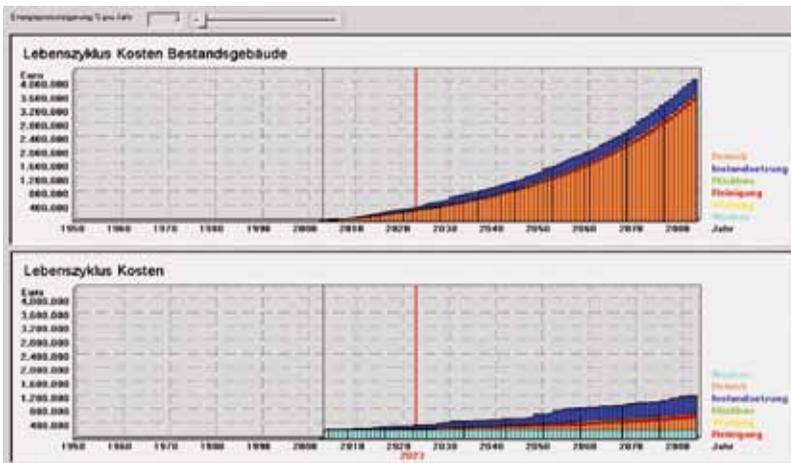
Vor der breitenwirksamen Anwendung neuer Technologien ist es angezeigt, in umfassender Form Nachhaltigkeitsaspekte zu überprüfen. Deshalb wurde an einem charakteristischen Sanierungsbeispiel (vgl. Projekt 3/ Seite 14) eine Lebenszyklusbetrachtung unter verschiedensten Blickwinkeln vorgenommen [LEGEF 2004].

Der **Lebenszykluskostenvergleich** dokumentiert die Gesamtnutzungskosten (Herstellung, Betrieb, Reinigung, Wartung, Instandsetzung) und vergleicht das Bestandsgebäude mit dem modernisierten Gebäude. Die Abbildung links zeigt oben das Bestandsgebäude und darunter die Faktor-10-Sanierung.

Die Reduktion des Energieverbrauchs durch die Maßnahmen wird in folgender Tabelle dargestellt:

	Reduktion
Nach EnEV	%
Heizwärmebedarf	81 %
Jahres-PE-Bedarf	83 %
Nach PHPP	
Heizwärmebedarf	87 %
Jahres-PE-Bedarf	84 %

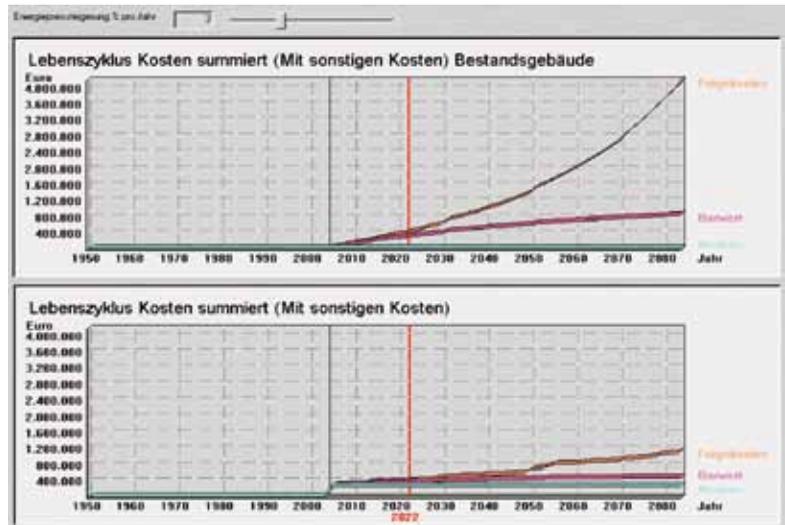
Die CO₂-Bilanz wird im Diagramm links dargestellt mit überzeugendem Ergebnis. Trotz der unten angesetzten Beiträge für erneute Sanierungszyklen (Instandsetzung: blau) wird der Faktor 10 überschritten.



Kapitalwertberechnung

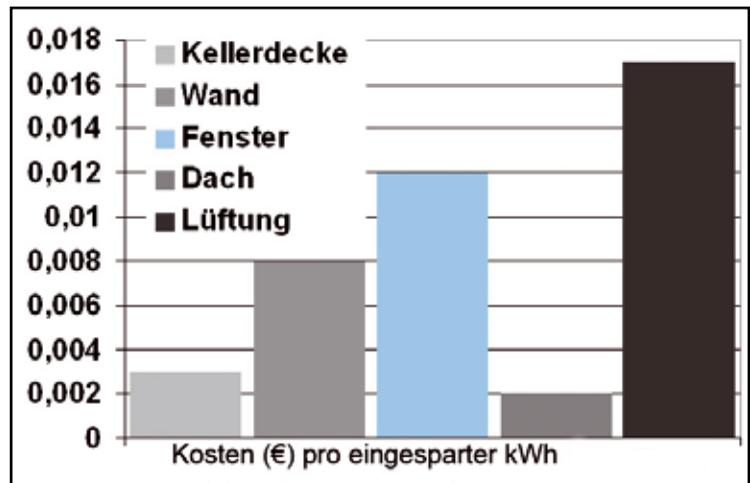
Die Kapitalwertmethode ist ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung. Sie geht von den Einzahlungs- und Auszahlungsströmen aus und betrachtet diese bis zum Ende der Nutzungsdauer des Investitionsobjektes.

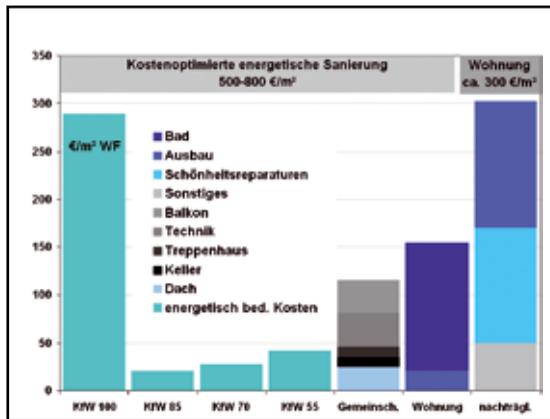
Das Diagramm rechts zeigt am Beispiel des betrachteten Projekts den Vergleich im unsanierten Zustand (oben) mit der energieeffizienten Sanierung. Der Break-Even-Punkt liegt im Jahr 2022. Für kurzfristige Renditebetrachtungen ist das Ergebnis ungünstig. Mit gleicher Deutlichkeit ist allerdings zu erkennen, dass unter Langfristbetrachtungen die grundlegende hochwertige Sanierung den ökonomisch einzig sinnvollen Weg darstellt.



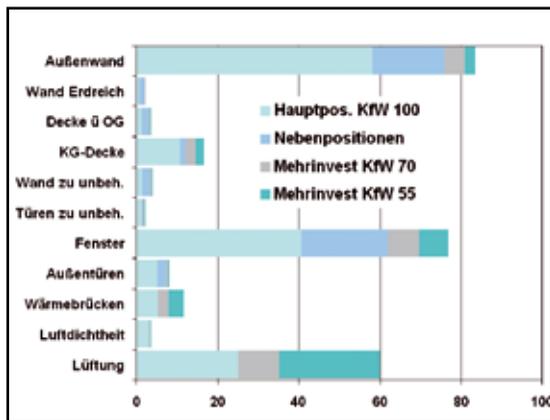
Kosten pro eingesparter kWh

Die Kosten pro eingesparter Kilowattstunde pro Jahr lassen sich mit Bezug auf die Lebensdauer für jede Einzelmaßnahme darstellen. Die Ergebnisse liegen zwischen 0,002 und 0,017 €/kWh. Diese sehr günstigen Werte ergeben sich wiederum auf Grundlage der sehr langfristigen Betrachtungsweise. Bei den üblichen kürzeren Berechnungszeiträumen liegen diese Werte höher.

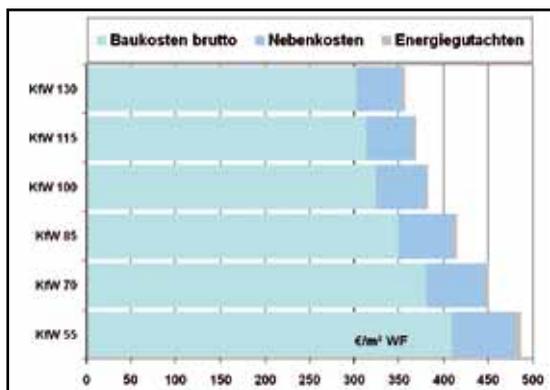




Sanierungskosten hängen vom Maßnahmenmix ab: Die energetisch bedingten Kosten liegen bei 300 bis 400 € pro m² Wohnfläche, Arbeiten im Gemeinschaftsbereich bei 100–200 €/m² und ein sparsames Maßnahmenpaket in den Wohnungen bei etwa 150 €/m². Bei Mieterwechsel können dann Schönheitsreparaturen und ein weiterer Ausbau in den Wohnungen ausgeführt werden mit etwa 200–300 €/m². Es ist erkennbar, dass Mehrinvestitionen für die Standards KfW 85, 70 und 55 eine eher geringe Summe ausmachen, die zudem noch mit Förderungen hinterlegt ist (s. Seite 46). Bei Verzicht auf diese Energiestandards besteht die Gefahr, dass aus Klimaschutzgründen vor Ablauf der Abschreibungszeit neue erneute energetische Ertüchtigungen mit ungleich höheren Kosten erforderlich werden.

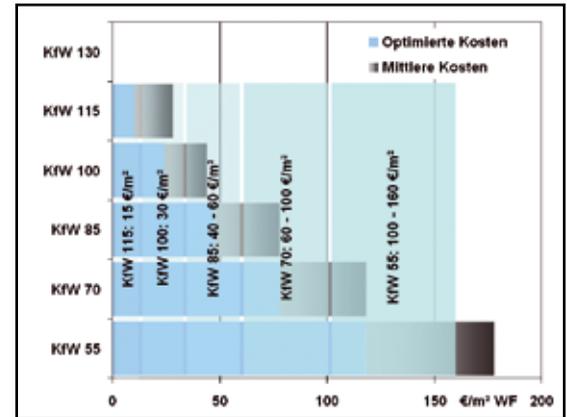


Mehrinvestitionen der Komponenten aufgrund höherer Standards variieren individuell für jedes Bauteil und jedes Gebäude. Zudem hängen die spezifischen Kosten von der Erfahrung der Planer und ausführenden Handwerker ab. Beispielhafte Differenzkosten (Kostengruppen 300/400 nach DIN 276 inkl. MwSt.) zum EnEV-Neubau-Standard (KfW 100) werden in der Abbildung links für die einzelnen Energieeffizienzkomponenten für die Standards KfW 70 und KfW 55 anhand des Beispiels eines optimiert geplanten Mehrfamilienhauses mit 24 Wohneinheiten dargestellt. Bei Einfamilienhäusern liegen die Kosten im Allgemeinen etwas höher.

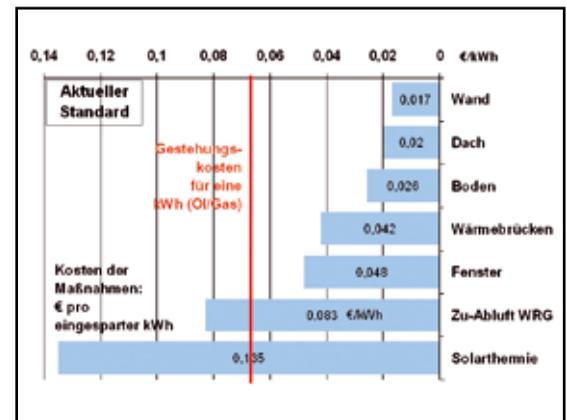


Energiebedingte Kosten für die Standards KfW 115, 100, 85, 70 und 55 werden in der Abbildung links am Beispiel eines charakteristischen Mehrfamilienhauses mit 24 Wohneinheiten und drei Geschossen dargestellt im Vergleich zum Standard KfW 130. Nicht dargestellt sind die Kosten für die Gemeinschaftsbereiche und in den Wohnungen, die bei sehr zurückhaltender Sanierung im Bereich von etwa 200 € pro m² Wohnfläche liegen und im Fall einer Gesamtmaßnahme auch bei 600 bis über 800 €/m² (Kostengruppen 300/400 nach DIN 276 inkl. MwSt.).

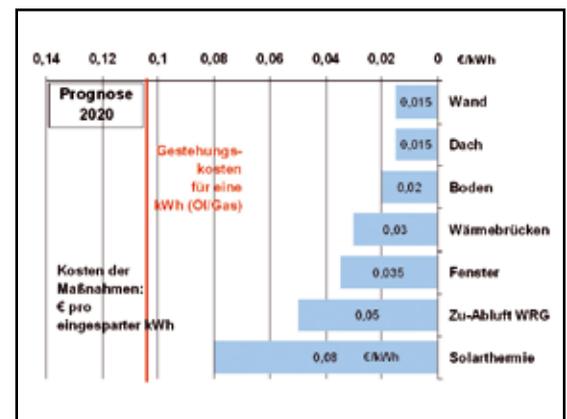
Die **Ableitung charakteristischer Mehrinvestitionen** für die Standards KfW 115, 100, 85, 70 und 55 erfolgte im Rahmen eines Forschungsvorhabens [GdW 2010] auf Basis der oben beschriebenen Kosten für Mehrfamilienhäuser der 1930er- bis 1970er-Jahre. In der Abbildung rechts werden optimierte Werte für die jeweiligen Mehrinvestitionen der Standards blau dargestellt und in Grau das Spektrum mittlerer Kennwerte abgebildet. Die vertikalen Balken beinhalten mittlere Mehrkosten pro m² Wohnfläche im Vergleich zum Standard KfW 130.



Kosten pro eingesparter Kilowattstunde sind bei kostenoptmierter Planung vor allem im Bereich der Dämmmaßnahmen auch bei hohen Dämmdicken schon heute hoch wirtschaftlich. Die Kosten für effiziente Fenster mit gedämmten Rahmen und Dreischeibenverglasungen sind in den letzten Jahren zunehmend günstiger geworden, sodass grundsätzlich Drei- statt Zweischeibenverglasung verwendet werden sollte. Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung und der Einsatz regenerativer Energieträger werden ebenfalls in den nächsten Jahren kostengünstiger werden. Verglichen werden die Einsparungskosten pro Kilowattstunde mit den Gestehungskosten mittels Brennwerttechnik (rote Linie; nur Brennstoffkosten ohne Ansatz für das Gerät).



Prognosen über die Kostenentwicklung der Komponenten und des Energiepreises sind unzuverlässig, weil sie von zahlreichen Parametern abhängig sind, die sehr stark den politisch-wirtschaftlichen Gegebenheiten der nächsten Jahre unterliegen. Je verlässlicher politische Rahmenbedingungen abzusehen sind, desto einfacher kann sich der Markt auf die Anforderungen einstellen. Effizienz-Komponenten werden günstiger, wenn sie in die Mainstream-Fertigung mit hoher Auflage gelangen. Für Planer und Bauherren gilt, dass sie nur dann zukunftssichere Investitionen tätigen, wenn die Bauteile über die Dauer ihrer Abschreibungszeit energetisch aktuell bleiben. Kurz formuliert: wenn schon saniert wird, dann richtig mit energetisch hochwertigen Komponenten: WENN SCHON – DENN SCHON!





3-Liter-Haus Ludwigshafen



Fenster mit Schiebeladen



Haustür in Passivhaus



Zentrale der Zu-/Abluftanlage

3-Liter-Haus, Ludwigshafen

Im Rahmen der Sanierung des Brunckviertels in Ludwigshafen wurde ein Mehrfamilienhaus aus den 50er-Jahren mit Passivhaus-Komponenten saniert:

- Wärmedämmung: 20 cm WLG o35
 - Fenster: $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Zentrale Zu-/Abluftanlage mit 85 % Wärmerückgewinnung
 - Wärmeversorgung mittels Brennstoffzelle in Verbindung mit Gas-Spitzenkessel
 - Latentwärmespeicherung im Putz
- Fertigstellung: 2001
 Heizwärmebedarf: $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
 Gemessener Heizwärmeverbrauch: $20\text{--}25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
 Bauherr: LUWOG, Ludwigshafen



3-Liter-Haus Nürnberg



Wärmedämmverbundsystem

3-Liter-Haus, Nürnberg

In der Nürnberger Südstadt wurde mit Förderung des bayerischen Wirtschaftsministeriums und EU-Ziel-2-Mitteln ein 6-Familienhaus aus den 30er-Jahren mit folgenden Maßnahmen saniert:

- Wärmedämmung: Wand 20 cm/Dach 25 cm/KG-Decke 14 cm WLG o35
- Fenster: $U_w = 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Dezentrale Zu-/Abluftanlage mit 85 % Wärmerückgewinnung
- Wärmeversorgung: Gasbrennwerttherme in Verbindung mit Solarthermie

Fertigstellung: 2002
 Heizwärmebedarf:
 Vor Sanierung: $204 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
 Nach Sanierung: $27 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
 Gemessener Heizwärmeverbrauch:
 Saison 2002/2003: $27 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
 Saison 2003/2004: $24 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
 CO_2 -Reduktion: 90 % (Faktor 10)
 Bauherr: WBG Nürnberg



Fensteranschluss



Dezentrales Lüftungsgerät



Ingolstädter Straße vor Sanierung



... nach Sanierung



Ansicht Bernadottestraße 42–48

Montage der Passivhauswohnungen
im Dach

KfW-40-Haus

Im Rahmen von »NEH im Bestand« der dena wurde das 1951 errichtete Mehrfamilienhaus in der Ingolstädter Straße in Nürnberg grundlegend saniert. Aus 24 Kleinstwohnungen entstanden 12 Wohnungen mit je 75 m² Wohnfläche. Energetische Maßnahmen wurden mit Passivhaus-Komponenten ausgeführt:

- Wärmedämmung:
 - Wand: WDVS 20 cm WLG 035
 - Dach: Estrich mit 25 cm WLG 035
 - KG-Decke: 20 cm WLG 035
 - Fenster: $U_w = 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Zentrale Zu-/Abluftanlage mit 85 % WR
 - Fernwärme in Verbindung mit Solarthermie
- Fertigstellung: September 2004
 Heizwärmebedarf: vor Sanierung: 170 kWh/(m²a)
 nach Sanierung: 24 kWh/(m²a)
 gemessener Heizenergiebedarf: 18–19 kWh/(m²a)
 Bauherr: WBG Nürnberg



Passivhausfenster



Lüftungszentrale im Bauzustand

Standard EnEV minus 50 %

In der zweiten dena-Modellphase »NEH im Bestand« wurden 24 Wohnungen aus dem Jahr 1964 energetisch im bewohnten Zustand saniert und gleichzeitig im Dachbodenbereich sechs Passivhauswohnungen aufgestockt.

- Wärmedämmung:
 - Wand: WDVS 20–24 cm WLG 035
 - Wände: im Dach 30 cm WLG 035
 - Dach: 45 cm WLG 035
 - KG-Decke: 12–20 cm WLG 035
 - Fenster: $U_w = 0,80\text{--}0,88 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Lüftung: Zentrale Zu-/Abluftanlage mit 85 % Wärmerückgewinnung
 - Wärmeversorgung: Fernwärme
- Fertigstellung: September 2006
 Heizwärmebedarf: vor Sanierung: 204 kWh/(m²a),
 nach Sanierung: 26 kWh/(m²a),
 gemessen 24–26 kWh/(m²a)
 Bauherr: WBG Nürnberg



Detailansicht im Dachbereich



Lüftungszentrale für 15 Wohnungen

nahezu klimaneutral gestaltet wird. Dieses engagierte Ziel erfordert ein Miteinander von staatlicher Lenkung und Unterstützung mit privatwirtschaftlichen Aktivitäten, wobei alle Akteure ihren Beitrag leisten müssen:

Die **Bauindustrie** muss in Vorleistung treten, indem sie Entwicklungen von Energieeffizienz-Techniken mit Sanierungs-Spezifika vorantreibt und ihre Kunden in diese Richtung berät. Das Ziel müssen kostengünstige Komponenten sein, die möglichst schnell ihren Weg auf die Hauptfertigungslinien finden.

Architekten und Fachplaner dürfen sich dieses wichtige Thema nicht nehmen lassen, sondern müssen es als Protagonisten und im Sinne nachhaltiger Projektentwicklung vorantreiben. Dazu gehört sowohl Fortbildung als auch »Learning by doing«.

Handwerker können durch kompetente Initialberatung einen wesentlichen Beitrag am Markt in vorderster Front leisten und sich auf diesem Weg neue Arbeitsfelder sichern.

Bauherren müssen durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit und durch die Baupartner gut beraten werden. Zugleich ist es hilfreich, bei Investitionen langfristig zu denken und sich der Anforderung zu stellen: »Eigentum verpflichtet«. Jedes Bauteil, das saniert wird, sollte mit einem wirtschaftlichen hoch effizienten Standard ausgeführt werden, um nicht nach fünfzehn bis zwanzig Jahren ein weiteres Mal energetisch sanieren zu müssen.

Wohnungsbaugesellschaften haben als professionelle Bauherren die Möglichkeit, durch grundlegende Information und Beratung für ihren Bestand ein Optimum an Entwicklung zu erreichen. Im Sinne des Portfoliomanagements ist es auch bei enger Liquidität möglich, langfristig ausgelegte Sanierungsstandards bei denjenigen Gebäuden durchzuführen, die grundlegend saniert werden. Darüber hinaus sollten Förderprogramme auf die Anforderungen der Wohnungswirtschaft angepasst werden. Insbesondere müssen in den nächsten Jahren nicht nur Einzelprojekte wegweisend saniert werden, sondern ganze Quartiere.

Banken und Investoren haben eine Schlüsselstellung bei der Entscheidungsfindung: Da Langfrist-Nachhaltigkeitsmodelle auch wirtschaftlich die sinnvolle Variante darstellen, kann durch eine angepasste Finanzierung der Weg dazu geebnet werden. Zurzeit wächst zudem das Investoren-Interesse an nachhaltig ausgerichteten Immobilien-Fonds.

Politik und Verwaltung können neben Förderinstrumentarien die gesetzgeberischen Mittel einsetzen und vor allem Motivation durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit und moderierende Unterstützung von Netzwerkbildungen und Initiativen bewirken. Besonders auf kommunaler Ebene gibt es hervorragende Ansätze für umsetzungsorientierte nachhaltige Strategien. Grundlage dafür ist es, einen gesellschaftlichen

Konsens für die Priorität des Nachhaltigkeitsgedankens herbeizuführen.

Letztendlich geht es aber darum, unsere Welt in einer Art zu formen, die uns zufriedenstellt und uns vielleicht auch Freude bereitet – nicht zuletzt in dem Sinn, dass wir unsere Umwelt den nächsten Generationen mit einem guten Gefühl weitergeben können.

Abluft: aus einem Raum ausströmende belastete Luft

Abluftanlage: Gesamtheit der Bauteile, Baugruppen und Geräte zur Luftabsaugung aus einer oder mehreren Wohnung(en)

Aufwandszahl: Verhältnis von Aufwand zu Nutzen bei einem Energiesystem. Anlagenverluste drücken sich durch eine Aufwandszahl $> 1,0$ aus

Brennwertkessel: Heizkessel, der die im Abgas enthaltene Energie nutzt, indem der Wasserdampf bei etwa 50 °C zur Kondensation gebracht wird

Dampfdiffusionswiderstand (μ -Wert): Maß der Durchlässigkeit eines Baustoffes für Wasserdampf

Energiebezugsfläche AEB: die Fläche, auf die sich der Kennwert eines Energiebilanzverfahrens bezieht: beheizte Wohn-/Nutzfläche eines Gebäudes (vgl. Nutzfläche $A_{N,N}$)

Energiedurchlassgrad (g-Wert): Kennzahl von Gläsern, die angibt, wieviel Prozent der auf die Scheibe treffenden Sonnenenergie diese durchdringt

Energieeinsparverordnung (EnEV): Folgeverordnung zur Wärmeschutzverordnung und Heizanlagenverordnung, in Kraft seit 1.2.2002

Gebäudehülle: Summe aller Bauteile, die einen Innenbereich vom Freien bzw. von direkt anschließenden Gebäuden abgrenzen

Grundlüftung: vorzugsweise ständige ventilatorgestützte Lüftung zur Gewährleistung des Bautenschutzes sowie der hygienischen und gesundheitlichen Erfordernisse in einer durchschnittlich genutzten Wohnung

g-Wert: siehe Energiedurchlassgrad

Heizenergiebedarf (QH): Energie, die dem Heizsystem zugeführt werden muss, um den Heizwärmebedarf decken zu können

Heizlast: thermischer Energiestrom, der infolge von Transmissions- und Lüftungs-Wärmeverlusten eines Raumes diesem zugeführt werden muss, um eine bestimmte Soll-Raumlufttemperatur aufrechtzuerhalten

Heizwärmebedarf ($Q_{H,N}$): Wärme, die den beheizten Räumen zugeführt werden muss, um die gewünschte Raumtemperatur einzuhalten

Interne Wärmegewinne: Energiegewinne aus Abwärme von elektrisch betriebenen Geräten, von anderen Wärmequellen wie Gasherden und von in den Räumen lebenden Menschen

Luftfeuchte (Luftfeuchtigkeit): in trockener Luft enthaltenes Wasser in dampfförmiger, flüssiger oder fester Form

Lüftung: Lufterneuerung in Räumen durch Austausch von Raumluft gegen Außenluft (Luftwechsel)

Lüftungswärmebedarf: Wärmebedarf für die Erwärmung der Frischluft

Luftwechselrate (LWR): gibt an, wie oft die Innenraumluft, bezogen auf das gesamte Gebäudeluftvolumen, pro Stunde ausgetauscht wird

Nutzfläche ($A_{N,N}$): nach Energieeinsparverordnung festgelegt als $= 0,32 \cdot \text{Volumen}$, meist deutlich größer als A_{EB} (vgl.: Energiebezugsfläche), dadurch erscheint der Heizwärmebedarf eines Gebäudes niedriger, wenn keine Umrechnung auf die tatsächlich beheizte Fläche erfolgt

Passivhaus: Gebäude mit hohem bauphysikalischen Komfort und einem Heizwärmebedarf $\leq 15\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ /Primärenergiebedarf für Heizen, Trinkwassererwärmung und Haushaltsstrom $\leq 120\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

Primärenergiebedarf (Q_p): Energiemenge, die zur Deckung des Jahresheizenergiebedarfs und des Trinkwasserbedarfs benötigt wird unter Berücksichtigung der zusätzlichen Energiemenge, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Gebäudes bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen

Quer-Lüftung: freie Lüftung in Wohnungen, die nach unterschiedlichen Gebäudeseiten orientiert sind

Relative Luftfeuchte: Wasserdampfdruck der Luft bezogen auf den Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei gleicher Trockenkugel-Temperatur bzw. Verhältnis der je Raumeinheit feuchter Luft vorhandenen Wasserdampfmenge zur Höchstmenge bei gleichem Druck und gleicher Trockenkugel-Temperatur

Solare Wärmegewinne: nutzbare Sonnenenergie, die durch transparente Bauteile ins Haus gelangt

Sonnenkollektoren: Anlagen zur Erzeugung von warmem Wasser mit Sonnenenergie

Transmissionswärme: Wärmestrom durch die Hüllkonstruktion eines Raumes infolge eines Temperaturunterschieds

U-Wert: siehe Wärmedurchgangskoeffizient

Wärmedurchgangskoeffizient

(U-Wert): gibt den Wärmestrom (in Watt) an, der durch einen Quadratmeter eines Bauteils bei einer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen von 1 Kelvin fließt (in $W/m^2 \cdot K$)

Wärmerückgewinnung: Maßnahme zur Wiedernutzung von thermischer Energie der Abluft

Wärmeleitfähigkeit (λ -Wert): gibt an, welche Wärmemenge durch eine Fläche von $1 m^2$ eines Baumaterials von 1 m Dicke strömt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten 1 Kelvin beträgt in $W/(mK)$

Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG): gibt die Dämmwirkung von Dämmstoffen an als (aufgerundeter) λ -Wert

WLG: siehe Wärmeleitfähigkeitsgruppe

λ -Wert: siehe Wärmeleitfähigkeit

μ -Wert: siehe Dampfdiffusionswiderstand

- AEREX Sanierung mit Lüftung. – Aerex Haus-technik Systeme, Eisdorf 2004.
- ASHRAE 55-2003 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy; THIRD PUBLIC REVIEW, MAY 2003.
- DENA Modellprojekt – Niedrigenergiehaus im Bestand. – Deutsche Energie Agentur, Berlin 2004, www.neh-im-bestand.de.
- DIN EN ISO 7730 Gemäßigtes Umgebungsklima; Beuth Verlag, Berlin 1987.
- FANGER Fanger, P.O.: Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering; USA: New York 1972, © P.O. Fanger 1970.
- FEIST Feist, W.: Wärmebrücken und Verbesserung der Luftdichtheit im Altbau. In: Protokollband 24 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- FEIST Feist, W.; John, M.; Kah, O.: Passivhaus-technik im Gebäudebestand – Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. – Passivhaus Institut, Darmstadt, im Auftrag der WBG, Nürnberg 2003.
- FEIST Feist, W.: Anforderungen zur thermischen Behaglichkeit in Passivhäusern. In: Protokollband 25 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 2004.
- GdW 2010 Neitzel, Schulze Darup, Vogler: Energieeffizienz mit städtebaulicher Breitenwirkung. – Forschungsvorhaben des GdW, Projektteam: Dr. Burkhard Schulze Darup, Michael Neitzel InWIS, Ingrid Vogler GdW unter Beteiligung von acht Wohnungsbaugesellschaften, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) AZ 26422, Berlin 2010.
- HEINZ Heinz, E.: Grundlagen Lüftungssysteme für Wohnungen in sanierten Mehrfamilienhäusern. – IEMB Berlin 2004 im Rahmen des DBU-Förderprojektes 19208.
- HEINZ Heinz, E.: Kontrollierte Wohnungslüftung. – Berlin 2000.
- IWU Wirtschaftlichkeitstool zur energetischen Sanierung von Gebäuden – IWU, Darmstadt 2004.
- LEGEF König, H.: Anwendung von LEGOE/LEGEP auf den Gebäudebestand – Gebäudeauswertungen im Auftrag der ARGE Faktor 10, Dachau 2004.
- LUWOGÉ Das 3-Liter-Haus. – Hrsg. LUWOGÉ Wohnungsbauunternehmen der BASF GmbH, Ludwigshafen 2004, www.LUWOGÉ.de.
- MARMORIT-EBÖK EBÖK: Wärmebrückenberechnungen für Gebäudesanierung mit Faktor 10. – Im Auftrag von Marmorit/Krautol, Tübingen 2004.
- PHI Tagungsreader 7. Internationale Passivhaustagung. – Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- PHPP Passivhaus Projektierungs Paket. – Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- PHPPsan Passivhaus Projektierungs Paket für Sanierungsprojekte. – Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- REHAU Fensteranschluss-Wärmebrückenberechnungen für Gebäudesanierung mit Faktor 10. – Rehau, Erlangen 2004.
- SCHULZE DARUP Schulze Darup, B. (Hrsg.): Passivhaus Projektbericht: Energie und Raumluftqualität. – Gefördert durch die DBU, Verlag AnBUS, Fürth 2002.
- SCHULZE DARUP Schulze Darup (Hrsg.): Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten: Projektbericht Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. – In Zusammenarbeit mit Passivhaus Institut, Darmstadt, FIW München, nBUS Fürth, Nürnberg 10-2004.
- SCHULZE DARUP Schulze Darup: CO₂-Neutralität im Gebäudesektor bis 2050 – Vision oder Notwendigkeit? – In: Pöschk (Hrsg.) Energieeffizienz in Gebäuden – Jahrbuch 2010, Berlin 2010.

Herausgeber

Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU
An der Bornau 2, 49090 Osnabrück

Dr. Burkhard Schulze Darup, Architekt
Augraben 96, 90475 Nürnberg

Texte und Redaktion

Seiten 14–17: S. Weisleder und J. Gerbitz, ZEBAU
Seiten 26–27: K. Lipphardt, Rehau
Seite 28: Stölzel/Munzinger, Variotec
Sonstige Seiten und Redaktion: Dr. B. Schulze Darup

Layout

Helga Kuhn
Sabine Lohaus
Birgit Stefan
Zentrum für Umweltkommunikation
der DBU gGmbH

Verantwortlich

Dr. Markus Große Ophoff
Zentrum für Umweltkommunikation
der DBU gGmbH

Druck

STEINBACHER DRUCK GmbH, Osnabrück

Stand

Juli 2010

Gedruckt auf 100 % Altpapier

Fotos und Grafiken

Aerex Haustechnik Systeme	S. 10 S. 32 rechts
AnBUS	S. 19 rechts Mitte
IEMB Berlin	S. 32 Mitte S. 34 Mitte S. 35 links
König, Holger	S. 40, 41
Marmorit/EBÖK	S. 22, 23, 24, 25 Isothermen-Darstellungen
Passivhaus Institut	S. 8 unten S. 9 S. 18 oben S. 20 Mitte S. 21 Mitte, rechts unten S. 29 rechts Mitte S. 30 unten S. 36 oben
Rehau	S. 26, 27
Variotec	S. 19 unten S. 20 rechts unten S. 28
ZEBAU Hamburg	S. 14 Mitte S. 15 links S. 17 rechts
Schulze Darup	alle sonstigen Abbildungen



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Postfach 1705 · 49007 Osnabrück
An der Bornau 2 · 49090 Osnabrück
Telefon 0541|9633-0
Telefax 0541|9633-190
www.dbu.de