



HINTERGRUND // MÄRZ 2016

# Wärmedämmung Fragen und Antworten

Für Mensch & Umwelt

Umwelt   
Bundesamt

# Impressum

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Fachgebiet I 2.4  
Postfach 14 06  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

**Autoren:**

Michael Bade  
Frauke Eckermann  
Dr. Jürgen Fischer  
Dr. Heinz-Jörn Moriske  
Dr. Wolfgang Plehn  
Jens Schuberth  
Dr. Johanna Wurbs

Publikationen als pdf:  
[www.umweltbundesamt.de/publikationen/waermedaemmung](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/waermedaemmung)

**Bildquellen:**

Titelbild: malins | fotolia.com

Stand: März 2016

ISSN 2363-829X

# Inhalt

Einleitung	4
1. Warum brauchen Gebäude Wärmedämmung?	5
2. Welche Dämmstoffe eignen sich für Wärmedämmung?	6
3. Lohnt sich Wärmedämmung auch finanziell?	7
4. Welche Umweltwirkungen haben Dämmstoffe?	10
5. Belasten Biozide in Fassaden die Umwelt?	14
6. Wann ist Innendämmung eine Alternative zur Außendämmung?	15
7. Führt Wärmedämmung zu Schimmel?	16
8. Beeinträchtigt Wärmedämmung die Ästhetik der Gebäude?	16
9. Was gilt es beim Brandschutz zu beachten?	18

## Einleitung

Der Klimawandel ist eine globale Herausforderung. Um die bereits heute sichtbaren Folgen des Wandels beherrschbar zu halten, muss der globale Temperaturanstieg auf zwei Grad Celsius begrenzt werden – hier ist sich die Staatengemeinschaft einig. Zentrale Aufgabe muss es sein, Treibhausgasemissionen zu vermindern. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis 2020 die Emissionen von Treibhausgasen um mindestens 40 Prozent gegenüber dem Stand von 1990 zu senken und bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 Prozent. Eine Studie des Umweltbundesamts aus dem Jahr 2014 zeigt, dass ein (nahezu) treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 machbar ist. Eine Schlüsselstellung nimmt hierbei der Umstieg des Energiesystems – einschließlich der Gebäude – auf 100 Prozent erneuerbare Energien ein.

Der schnellste und einfachste Weg, um das Klima zu schützen, ist Energiesparen. Nicht verbrauchte Energie verursacht keine Emissionen – und kostet, nach der anfänglichen Investition, auch kein Geld. Je weniger Energie heute verbraucht wird, desto weniger schlagen Energiekosten zu Buche, selbst wenn sie weiter steigen.

Der größte Energiefresser in privaten Haushalten ist die Heizung; rund 70 Prozent des Endenergieverbrauchs im Bereich Wohnen verbraucht das Heizen. Der Anteil des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für Heizen am Gesamtausstoß im Bereich Wohnen liegt bei knapp 60 Prozent (Statistisches Bundesamt 2014/2015). Und mehr als die Hälfte der fürs Heizen freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen stammen aus Energie, die für die Heizung bestimmt war, aber entweder nie dort ankam oder dem Gebäude zu schnell entwichen ist. Hier zeigt sich das Einsparpotenzial. Energetische Sanierungen wie Wärmedämmung von Fassaden, Dach und Keller helfen nicht nur, das Klima zu schützen, sondern entlasten auch die Haushaltskasse: Investitionen rechnen sich durch die geringeren Energiekosten.

Das vorliegende Papier möchte generelle Fragen rund um die Wärmedämmung beantworten und einen Beitrag zur Diskussion leisten. Das Papier stellt verschiedene Dämmmaßnahmen vor, zeigt, welche Kosten dafür entstehen können, welche Dämmmaterialien zum Einsatz kommen und worauf beim Brandschutz zu achten ist. Es will helfen, Lösungen zu finden. Individuell geplant, auf das einzelne Gebäude abgestimmt und von Experten durchgeführt ist Wärmedämmung eine sinnvolle Maßnahme, um Gebäude zu heizen und nicht das Klima.

# 1. Warum brauchen Gebäude Wärmedämmung?

Wärmedämmung lohnt sich – sie hilft etwa Heizkosten zu sparen und so dem Klimaschutz, verbessert die Behaglichkeit und trägt zur Wertsteigerung des Gebäudes bei.

Durch die umfassende energetische Sanierung eines Gebäudes kann der Primärenergiebedarf um bis zu 90 Prozent gesenkt werden. Eine energetische Komplettisanierung erhöht die gesamte Energieeffizienz eines Gebäudes. Geeignete Maßnahmen sind die Wärmedämmung von Fassade, Dach und Keller, der Einbau von Fenstern mit moderner Wärmeschutzverglasung, der Einsatz effizienter Heiztechnik mit niedrigen Heizwassertemperaturen sowie der Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung.

Durch derartige Maßnahmen ist der durchschnittliche Endenergieverbrauch für Raumwärme seit 2000 bereits um 27 Prozent auf 132 kWh/m<sup>2</sup>a im Jahr 2013 gesunken (temperaturbereinigt). Gleichzeitig ist jedoch die beheizte Wohnfläche um 11 Prozent gestiegen (Statistisches Bundesamt, 2015).

Gut gedämmte Gebäude bilden die Grundlage für einen klimaneutralen Gebäudebestand: Integrierte Gebäudeplanung kann es erleichtern, die energieeffizienten Gebäude mit Wärme aus hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung, erneuerbaren Energien oder Abwärme wirtschaftlich zu versorgen.

## Heizkosten senken

Ein Großteil der Wärme entweicht bei einem nicht oder unzureichend gedämmten Gebäude über den Keller, durch die Außenwände und das Dach. Eine gute Wärmedämmung reduziert den Wärmeverlust und kann damit die Heizkosten deutlich senken. Auch vor dem Hintergrund mittel- bis langfristig weiter steigender Energiepreise ist ein guter Wärmeschutz sehr sinnvoll.

## Behaglichkeit verbessern

Eine höhere Raumlufttemperatur allein reicht nicht aus, um sich in einem Raum behaglich zu fühlen. Wichtig ist außerdem die Temperatur an der Inneno-

berfläche der Wände. Eine von außen gut gedämmte Außenwand führt dazu, dass sich die Wandoberflächentemperaturen im Wohnraum nur unwesentlich von den Temperaturen im Raum unterscheiden. Das Gleiche gilt für eine sachgerecht angebrachte Dämmung der Außenwände von innen. Beide Möglichkeiten – Außen- wie Innendämmung – tragen bei geringen Außentemperaturen zu einer Verbesserung der Behaglichkeit bei. Außendämmung ist bautechnisch die bevorzugte Lösung (siehe Kapitel 6. Wann ist Innendämmung eine Alternative zur Außendämmung?).

## Gebäudewert steigern

Investitionen in einen besseren Wärmeschutz steigern den Wert des Gebäudes. Die Vermietbarkeit verbessert sich, ebenso lassen sich höhere Verkaufspreise erzielen.

## Bauschäden vermeiden

Bauschäden können entstehen, wenn Bauteile eines Gebäudes durchfeuchtet werden. Eine gute Wärmedämmung erhöht die Oberflächentemperatur raumseits der gedämmten Bauteile und reduziert damit die Möglichkeit, dass Wasser entlang der Außenwände kondensiert. Außerdem sollten Wärmebrücken (bauliche Mängel wie Risse, Undichtigkeiten oder unzureichend gedämmte Stellen), über die Wärme schnell durch die Gebäudehülle nach außen transportiert wird, vermieden werden, da hier auf geringer Fläche übermäßig viel Wärme verloren geht (und die Gefahr von Feuchte und Schimmelbildung steigt). Bei einer Innendämmung kann eine Dampfsperre oder Dampfbremse (z. B. eine Folie, die verhindert, dass Wasserdampf aus dem Raum in die Baukonstruktion gelangt) helfen, das Eindringen von Feuchtigkeit in die Wand zu verhindern.

## Übrigens: Dicke und massive Wände ersetzen keine Wärmedämmung

Auch dicke Wände schützen nicht vor Wärmeverlusten in der Heizperiode! Eine Wand aus Hochlochziegeln müsste mehr als drei Meter dick sein, um so gut vor Wärmeverlusten zu schützen wie eine 36 cm starke Wand plus 15 cm Wärmedämmung. Massive Wän-

de (wie in den meisten Altbauwohnungen vorhanden) haben jedoch einen wichtigen Vorteil im Sommer: Sie dienen dann als Wärmespeicher und halten dadurch die Räume länger kühl.

## Übrigens: Wände atmen nicht

Es ist ein Gerücht, dass der Austausch von Luft zwischen Innenraum und Außenluft auch über Wände und Decken stattfindet. Das ist schlichtweg falsch. Über Wände und Wandputze – z. B. bei Kalk- oder Lehmputz und Holzverkleidungen – kann lediglich vorübergehend anfallende Feuchte (z. B. nach dem Duschen) gepuffert, d. h. Feuchtigkeit aufgenommen

werden, die in trockenen Zeiten wieder an die Raumluft abgegeben wird. Luftaustausch findet nicht über die Wände statt, sondern nur durch Lüften – entweder klassisch, über die Fenster, oder mittels Lüftungsanlagen. Wände können in der Regel nur wenig Feuchtigkeit puffern. Die anfallende Feuchtigkeit muss in jedem Fall regelmäßig über Lüften abgeführt werden. Eine diffusionsoffene Bauweise verhindert, dass sich Wasserdampf im Laufe der Jahrzehnte in der Wand ansammelt. Beim Dachgeschossausbau und Leichtbaukonstruktion hingegen verhindert eine Dampfsperre oder Dampfbremse, dass Feuchtigkeit in die Baukonstruktion eindringt.

## 2. Welche Dämmstoffe eignen sich für Wärmedämmung?

Für jedes Gebäude und jeden Anwendungsfall gibt es einen geeigneten Dämmstoff. Planer/-innen und Bauherren/-herrinnen können zwischen Dämmstoffen aus mineralischen, nachwachsenden oder synthetischen Rohstoffen wählen, allerdings muss das Material bei der Sanierung von Bestandsgebäuden zur vorhandenen Struktur und Bauphysik passen. Entscheidend ist am Ende die erreichbare Dämmwirkung.

keit eines Materials, desto besser ist seine Dämmwirkung. Dämmstoffe müssen eine Wärmeleitfähigkeit unter  $0,1 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$  haben. Die Materialien sind nach Wärmeleitfähigkeitsgruppen (WLG) zu unterscheiden. Eine WLG von 040 bedeutet beispielsweise, dass der Dämmstoff eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda=0,04 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$  aufweist. Üblich am Bau sind heute WLG 040 und WLG 035 (letztere sind teurer, benötigen aber weniger Dämmstoff für den gleichen Zweck). Man unterscheidet zwischen **anorganischen Dämmstoffen** und **organischen Dämmstoffen aus nachwachsenden oder fossilen Rohstoffen**. Die nachstehende Tabelle fasst gängige Dämmstoffe zusammen.

Die Dämmwirkung wird mit der **Wärmeleitfähigkeit**  $\lambda$  beschrieben ( $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ ). Je geringer die Wärmeleitfähig-

Tabelle 1

### Übersicht gängiger Dämmstoffe und Produktformen (in Anlehnung an UBA 2013)

Dämmstoffe und Produktformen
<b>mineralische Dämmstoffe</b> Platten, Matten: Kalzium-Silikat, Glaswolle, Perlit, Steinwolle, Vermikulit Schäume: Beton, Gips, Glas, Perlit Einblasprodukte: Glaswolle, Steinwolle Schüttungen, Stopfmassen: Blähton, Glaswolle, Perlit, Steinwolle, Vermikulit
<b>organische Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen</b> Platten, Matten: Baumwolle, Flachs, Hanf, Holzweichfaserplatte, Holzwolle-Leichtbauplatte, Kokos, Kork, Polyester, Schafwolle, Zellulose Einblasprodukte: Baumwolle, Flachs, Hanf, Holz (Wolle, Späne), Zellulose Schüttungen, Stopfmassen: Baumwolle, Flachs, Hanf, Holzwolle, Hobelspäne, Jute, Kokos, Kork, Schafwolle, Zellulose
<b>organische Dämmstoffe aus fossilen (synthetischen) Rohstoffen</b> Hartschaumplatten: Melaminharz, Phenolharz, Polystyrol, Polyurethan Ortschäume: Harnstoff-Formaldehyd (UF), Polyurethan
<b>Verbundsysteme</b> Wärmedämmverbundsysteme, Hartschaum- und Mineralfaser Mehrschicht-Leichtbauplatten, Vakuum-Isolationspaneele, Sonstige Verbundplatten

Quelle: UBA



## Anwendungsfälle von Dämmstoffen

Dämmstoffe werden in verschiedenen **Produktformen** angeboten. Darunter sind Platten, Matten, Schäume, Produkte, die über Einblasvorrichtungen eingebracht werden und Verbundsysteme (Sprenghard et al. 2013). Für nahezu jeden Anwendungsfall gibt es heute geeignete Dämmstoffe. Die Dämmung kann an der obersten Geschossdecke hin zum kalten (unausgebauten) Dachboden, am Dach selbst, an den Außenwänden bis hinein ins Erdreich und der Kellerdecke angebracht werden. Die verschiedenen Anwendungsfälle beschreibt die Norm DIN 4108-10. Während beim Neubau viele Möglichkeiten zur Verfügung stehen, sind die Möglichkeiten bei der Sanierung des Bestands deutlich eingeschränkter. Sofern es sich bei den Außenwänden nicht um zweischaliges Mauerwerk handelt, wo Dämmstoffe auch in den Zwischenraum eingebracht werden können, greifen viele Hausbesitzer zur Außendämmung auf **Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)** zurück. Dies sind Systeme, bei denen ein Dämmstoff auf die Außenwand i.d.R. geklebt und anschließend mit verschiedenen Putzschichten abgedichtet wird. Die beiden gebräuchlichsten Dämmstoffe für WDVS sind Mineralwolle und Polystyrol.

Besonders bei der energetischen Sanierung ist es wichtig, dass das Dämmsystem bauphysikalisch zum Gebäude passt. Schwierig kann es z. B. werden, wenn es an Platz mangelt oder die Fassade optisch nicht beliebig verändert werden kann und viele Sicken und Nischen aufweist. In diesem Fall haben Dämmstoffe mit einer besonders geringen Wärmeleitfähigkeit Vorteile, da bei gleicher Dämmwirkung eine gerin-

gere Dämmstärke nötig ist. Bei einer umfassenden energetischen Sanierung eines Gebäudes kann zum Einbau von Dämmstoffen weiterhin der Austausch der Fenster und der Heizungsanlage sowie ggf. der Einbau einer Lüftung hinzukommen.

## Die Wahl des geeigneten Dämmstoffes

Es gibt in gesetzlichen Regelungen – maßgeblich ist die Energieeinsparverordnung – und Förderprogrammen keinen Zwang, einen bestimmten Dämmstoff zu verwenden. Vorgeschrieben ist bei bestehenden Gebäuden lediglich die Einhaltung von U-Werten (Maß für die Güte der Wärmedämmung) bestimmter Bauteile wie Wänden oder Dach. Diese Verpflichtung gilt bei bestehenden Gebäuden nur, wenn ohnehin eine Sanierung an den betreffenden Bauteilen durchgeführt wird (Beispiel: Putzerneuerung der Fassade).

Viele Eigenschaften beeinflussen die Wahl des Dämmstoffes: beispielsweise das resultierende Dämmvermögen (Wärmedurchgangswiderstand, U-Wert), Verarbeitbarkeit, Brennbarkeit, Preis und Diffusionsoffenheit. Deswegen geben gesetzliche Regelungen (z. B. die Energieeinsparverordnung) und Förderprogramme (z. B. die KfW-Programme) keine Materialien für Dämmstoffe vor, sondern überlassen die Entscheidung den Gebäudeeigentümern, beraten von möglichst fachkundigen Planern. Allerdings sollten bestimmte Schadstoffe in Dämmstoffen vermieden werden (siehe Kapitel 4. Welche Umweltwirkungen haben Dämmstoffe?). Im Mittelpunkt der Diskussion über Wärmedämmung steht Polystyrol. Auch für diesen Dämmstoff gilt: Es gibt keinen Zwang, ihn als Dämmstoff einzusetzen.

## 3. Lohnt sich Wärmedämmung auch finanziell?

Ob sich Wärmedämmung wirtschaftlich lohnt, hängt von mehreren Faktoren ab: Dazu gehören der Ausgangszustand des Gebäudes, die künftige Entwicklung der Energiepreise, die fachgerechte Ausführung der Wärmedämmung und die Frage, ob die Wärmedämmung in ohnehin anstehende Sanierungsmaßnahmen integriert wird.

Bleibt die erwartete Energieeinsparung aus, kann das viele Ursachen haben, die oft gar nicht mit der Wärmedämmung zusammenhängen. Baubegleitung und die Auswertung von Verbrauchsdaten sind geeignete Hilfsmittel, um diese Ursachen zu identifizieren und zu beheben. Aus volkswirtschaftlicher Sicht sichert und schafft Wärmedämmung Arbeitsplätze und verringert gesellschaftliche Folgekosten durch Umwelt- und Gesundheitsschäden, da ein geringerer Energieverbrauch die Emission von Treibhausgasen und Luftschadstoffen wie Feinstaub verringert.

## Betriebswirtschaftliche Sicht

Am wirtschaftlichsten ist die Dämmung der obersten Geschosdecke, die für Bestandsgebäude grundsätzlich verpflichtend ist. Hier rechnen sich die Investitionen in der Regel schon nach wenigen Jahren. Die Gebäudehülle zu dämmen, ist ebenfalls eine sehr wirksame, aber demgegenüber vergleichsweise teure Maßnahme. Die Energieeinsparverordnung fordert daher nur eine energetische Sanierung von z. B. Fassade und Dach, wenn diese ohnehin saniert werden (d. h. auf mehr als zehn Prozent der jeweiligen Fläche geändert werden).

Immer wieder wird behauptet, das Anbringen von Wärmedämmung lohne sich wirtschaftlich nicht, weil die Kosten zu hoch seien und die Ersparnisse zu gering ausfielen. Diese Argumentation blendet aus, dass sich Sanierungsmaßnahmen, insbesondere die Verbesserung des Wärmeschutzes, in der Regel erst dann wirtschaftlich lohnen, wenn sie mit einer oh-

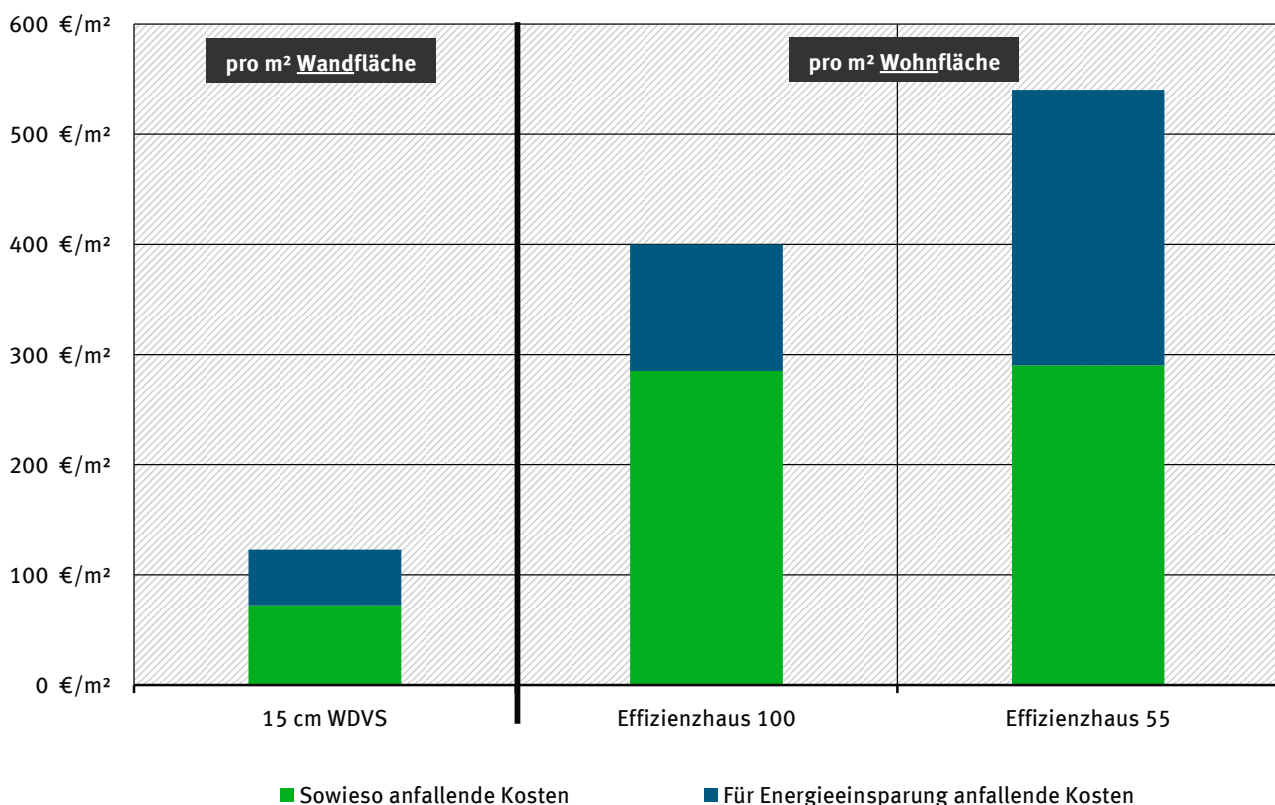
nehin anstehenden Sanierung wie dem Erneuern des Außenwandputzes verbunden werden. Daher unterscheiden belastbare Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zwischen **Ohnehin- bzw. Sowieso-Kosten** (für die ohnehin fälligen Arbeiten oder Reparaturen: Gerüst, Putz usw.) und den **energiebedingten Mehrkosten** (für die Wärmedämmmaßnahmen). Zu diesen Kosten liegen verschiedene Studien vor. Sie zeigen, dass der Anteil der Ohnehin-Kosten erheblich sein kann (siehe Abbildung 1): So fallen 59 Prozent der Gesamtkosten beim Anbringen eines 15 cm starken Wärmedämmverbundsystems ohnehin an, nur 41 Prozent der Kosten entfallen auf die Kosten für Energieeinsparung. Bei der Sanierung eines Einfamilienhauses auf Effizienzhaus-100-Standard sind es gar 71 Prozent der Kosten, die ohnehin anfallen.

Der Anteil der Mehrkosten variiert also von Fall zu Fall. Weil sich die Gebäude und sonstige Randbedingungen wie die Konditionen der Finanzierung auch unterscheiden, sind pauschale Aussagen über die

Abbildung 1

### Ohnehin und speziell für Energieeinsparung anfallende Kosten

Für das Anbringen von Wärmedämmung (links) oder für umfassende Sanierung (Mitte, rechts)



Anteile der ohnehin und der zusätzlich anfallenden Kosten für das Anbringen eines Wärmedämmverbundsystems, bezogen auf die Wandfläche bzw. für umfassende energetische Sanierungen, bezogen auf die Wohnfläche

Quelle: BMVBS 2012, dena 2012



Wirtschaftlichkeit nicht möglich. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass Förderprogramme für Gebäudesanierung die Wirtschaftlichkeit verbessern: Zum Beispiel bietet die KfW in den Programmen „Energieeffizient Bauen“ und „Energieeffizient Sanieren“ vergünstigte Kredite oder Zuschüsse an. In Fällen, in denen sich Wärmedämmung als unwirtschaftlich herausstellt, sollten andere, ggf. wirtschaftliche Maßnahmen in Betracht gezogen werden, wie die Erneuerung der Heizungsanlage.

Die Wirtschaftlichkeit hängt nicht nur von den Investitionskosten, sondern auch von langfristigen **Kosteneinsparungen** ab. Für die Einsparungen wiederum sind zwei Faktoren entscheidend: die erzielte Minderung des Energieverbrauchs und die künftige Entwicklung der Energiepreise. Ende 2014 ist der Rohölpreis eingebrochen. Heizöl und, in geringerem Umfang, Erdgas wurden günstiger. Die seitdem niedrigen Energiepreise sind jedoch keine geeignete Grundlage, um die Wirtschaftlichkeit einer Wärmedämmung zu kalkulieren, denn die Energiepreise schwanken sehr stark. So stiegen die Ölpreise nach dem letzten großen Preiseinbruch 2008 auf ein noch höheres Niveau als vor dem Einbruch. Weil Wärmedämmung mehrere Jahrzehnte hält, sollten Gebäudeeigentümer über mindestens zwei Jahrzehnte kalkulieren. Professionelle Energieberater führen dabei sogenannte Sensitivitätsanalysen durch, die die Unsicherheit durch unterschiedliche Preissteigerungen bewerten. Konzepte, die den Energieverbrauch stark verringern, erweisen sich oft als verhältnismäßig stabil gegenüber solchen Unsicherheiten.

Differenzierter stellt sich die Situation in vermieteten Mehrfamilienhäusern dar, weil viele Menschen mit unterschiedlichen Heiz-Gewohnheiten zusammen wohnen und der Betrag, der auf die Modernisierungsmieterhöhung entfällt, von den Energiekosteneinsparungen abweichen kann. Letztlich sind pauschale Aussagen nicht möglich, weil es sich stets um Einzelfälle handelt.

Um herauszufinden, wie viel Energie und Energiekosten Gebäudeeigentümer mit welchen Maßnahmen und Maßnahmenpaketen einsparen können, empfiehlt sich eine individuelle **Energieberatung** durch fachlich geschulte und versierte Berater (siehe [www.energie-effizienz-experten.de](http://www.energie-effizienz-experten.de)). Diese Leistung wird staatlich gefördert. Gezielte Fragen nach Referenzen,

Erfahrungen, Fortbildungen des Beraters oder auch tatsächlich erzielten Einsparungen können die Auswahl erleichtern. Professionelle Energieberatungen bieten auch die örtlichen Verbraucherzentralen an.

Bei einer energetischen Gebäudesanierung werden viele Maßnahmen umgesetzt – Wärmedämmung, Fenstertausch, Einbau einer neuen Heizung usw. Das erfordert eine fachkundige Planung. Werden die Maßnahmen dann auch sachgerecht umgesetzt, sinkt der Energieverbrauch eines Hauses stark. Manchmal kann es dennoch Abweichungen geben und die Einsparung an Energie und Energiekosten kleiner ausfallen als erwartet.

Die **möglichen Ursachen für geringere Kostensparnis als erwartet** sind zahlreich:

- ▶ Nicht die ganze Gebäudehülle wurde gedämmt, sondern nur größere, zusammenhängende Flächen
- ▶ Wärmedämmung wurde fehlerhaft angebracht
- ▶ Nicht alle Wärmebrücken wurden beseitigt – hier kann auf kleinem Raum viel Wärme verloren gehen
- ▶ Das Nutzerverhalten hat sich geändert, d. h. die Bewohner bevorzugen eine höhere Raumtemperatur als zuvor rechnerisch zugrunde gelegt
- ▶ Die Berechnung des Energiebedarfs ist fehlerhaft: Falsche Gebäudedaten (z. B. Wandstärken, Abmessungen), ungenaues Berechnungsverfahren und falsche Ausgangswerte für den Energieverbrauch oder -bedarf vor der Sanierung führen zu Abweichungen
- ▶ Die Betriebsoptimierung (hydraulischer Abgleich, Einstellung der Heizung) wurde vergessen: Die Heizungsanlage arbeitet nicht im optimalen Betriebspunkt und verschwendet Energie

Nach der ausschlaggebenden Ursache zu suchen ist schwierig. Erfahrene Fachleute können diese Aufgabe bewältigen. Lohnend ist das allemal, denn die hohen Investitionen können nur wirtschaftlich sein, wenn sich die Energiekosteneinsparung tatsächlich einstellt. Schon während der Bauphase vermeidet eine Baubegleitung Fehler, und Voraussetzung für die spätere Fehlersuche ist ein transparentes Monitoring, das heißt eine nachvollziehbare Aufzeichnung und Auswertung der Energieverbräuche.

## Volkswirtschaftliche Sicht

Die energetische Gebäudesanierung bietet auch aus gesamtwirtschaftlicher Sicht immense Vorteile. Zahlreiche Studien belegen, dass Investitionen in die Wärmedämmung und andere Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs in Gebäuden die Beschäftigung steigern (Dehnen et al. 2015, Lehr et al. 2013). So haben zum Beispiel die Programme der Kreditanstalt für Wiederaufbau zur Energieeffizienzförderung von Wohngebäuden 420.000 Arbeitsplätze im Jahr 2013 gesichert oder geschaffen, wobei 79.000 Arbeitsplätze durch das Programm „Energieeffizient Sanieren“ gesichert oder geschaffen wurden und 341.000 Arbeitsplätze durch das Programm „Energieeffizient Bauen“ (Diefenbach, N. et al. 2014). Vor allem das Handwerk und die Bauindustrie profitieren erheblich von der Wärmedämmung. Darüber hinaus verringert Wärmedämmung die **gesellschaftlichen**

**Folgekosten durch Umwelt- und Gesundheitsschäden.** Vor allem die Verringerung der emittierten Luftschadstoffe und Treibhausgase spielt hierbei eine wichtige Rolle. Geringere Emissionen tragen beispielsweise dazu bei, dass Atemwegserkrankungen seltener auftreten. Detaillierte Informationen finden sie dazu in der UBA-Publikation „Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr – Empfehlungen des Umweltbundesamtes“ (UBA 2014).

Tabelle 2 zeigt die Umweltkosten der Wärmeerzeugung pro Kilowattstunde für das Jahr 2010. Heizen mit Kohle und Strom verursacht mit Abstand die höchsten Umweltkosten. Mit deutlichem Abstand folgen die Fernwärmeversorgung und das Heizen mit Erdgas und Heizöl. Insgesamt wurden 2010 durch Privathaushalte und Gewerbe, Dienstleistungen und Handel durch die Wärmeerzeugung über 19 Milliarden Euro Umweltkosten verursacht.

Tabelle 2

### Umweltkosten der Wärmeerzeugung der Haushalte in Deutschland (in Cent/kWh)

Wärmeerzeugung durch	Umweltkosten durch		Umweltkosten gesamt
	Luftschadstoffe	Treibhausgase	
Heizöl	0,80	2,52	3,32
Erdgas	0,26	2,02	2,28
Braunkohle (Brikett)	2,74	3,43	6,17
Fernwärme m. Netzverlusten	0,88	2,60	3,48
Stromheizung mit Netzverlusten	1,14	5,15	6,29
Erneuerbare Energien			
Solarthermie	0,54	0,55	1,10
Oberflächengeothermie	0,39	1,75	2,13
Biomasse*	1,63	0,25	1,88

\* Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert für Biomasse gasförmig, flüssig und fest (Haushalte und Industrie), Bandbreite von 0,56-3,2 €-Cent/kWh. Werte in Euro-Cent pro kWh Endenergie (Kaufkraft von 2010)

Quelle: UBA 2014

## 4. Welche Umweltwirkungen haben Dämmstoffe?

Über ihr ganzes Leben betrachtet, sparen alle Wärmedämmstoffe deutlich mehr Energie, als ihre Herstellung benötigt. Auch die meisten anderen Umweltwirkungen (Luftschadstoffe, Flächenverbrauch bei der Gewinnung von [Energie-]Rohstoffen) gehen dadurch in der Bilanz zurück. Das heißt: Der höhere Energieverbrauch eines ungedämmten Gebäudes belastet die Umwelt stärker als die Herstellung des Dämmstoffs.

Trotzdem ist sehr wichtig, die Umweltbelastungen bei der Dämmstoffherstellung möglichst gering zu halten, Verfahren zur Rückgewinnung und Wiederverwertung der Rohstoffe zu entwickeln und Schadstoffe in den Produkten zu vermeiden. Eine Orientierung bietet das Umweltzeichen „Blauer Engel“, mit dem verschiedene umwelt- und gesundheitsverträgliche Dämmstoffe und Wärmedämmverbundsysteme ausgezeichnet sind.

## Energiebilanz

Der größte Beitrag von Dämmstoffen zur Ressourcenschonung besteht in der **Energieeinsparung**, die sie ermöglichen. Alle Dämmstoffe haben eine sehr positive Energiebilanz, d.h. der Energieaufwand zu ihrer Herstellung liegt um ein Vielfaches unter der Energiemenge, die im Laufe ihrer Nutzungsphase eingespart wird – und mit der eingesparten Energie entfallen auch alle negativen Umweltwirkungen, die mit deren Bereitstellung verbunden wären.

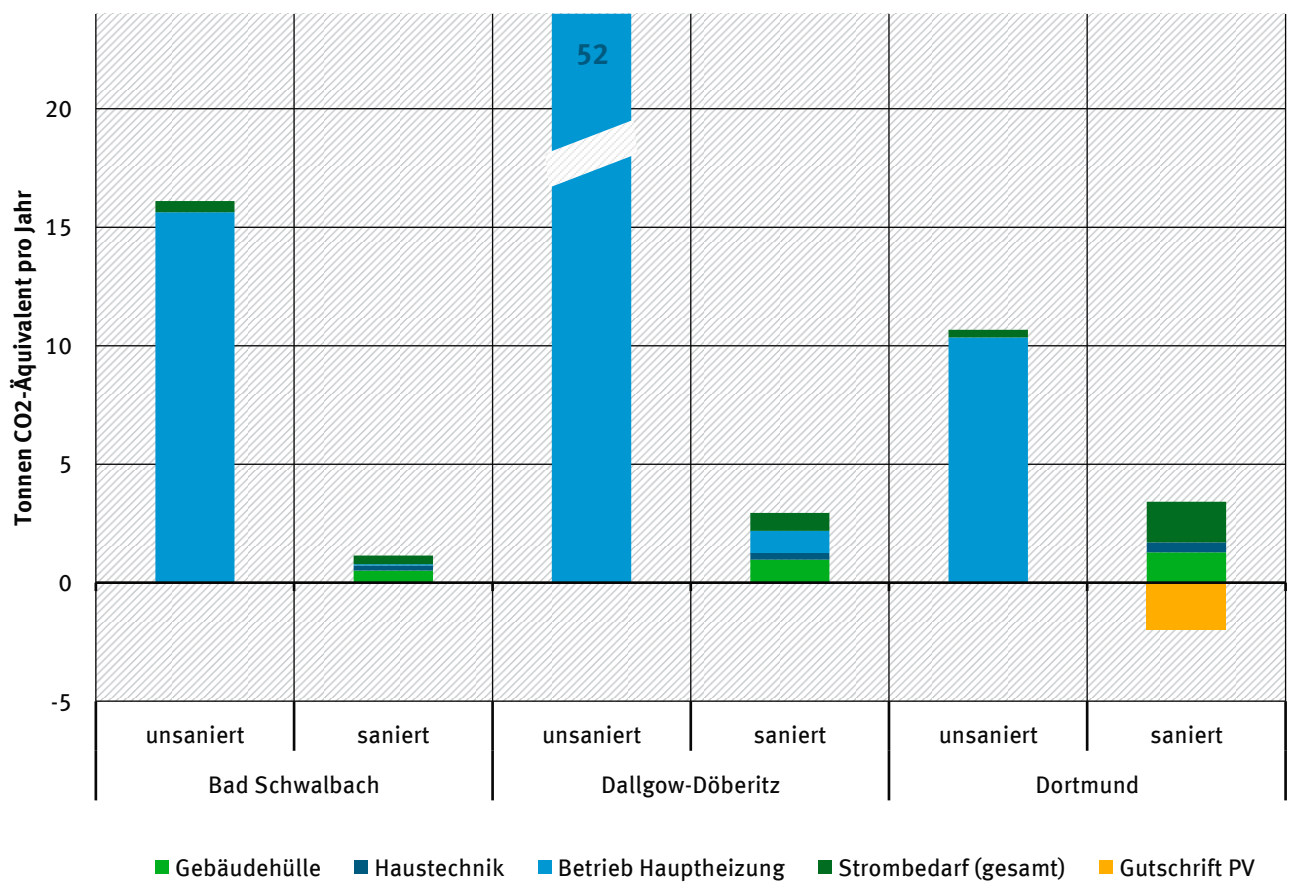
Der **Primärenergiebedarf für die Herstellung** des jeweiligen Dämmmaterials ist recht unterschiedlich. Während beispielsweise für Zellulosedämmstoff (lose) nur 30 bis 60 kWh/m<sup>3</sup> aufgewendet werden müssen, sind es bei Polyurethan 840 bis 1.500 kWh/m<sup>3</sup>.

Allen Dämmstoffen gemeinsam ist jedoch, dass sich der Primärenergieaufwand durch die erzielte Energieeinsparung innerhalb einer relativ kurzen Zeit energetisch amortisiert (UBA 2013).

Abbildung 2

## Klimabelastung im Lebenszyklus

Treibhausgasemissionen dreier Einfamilienhäuser, unsaniert und saniert



Die drei Beispiele zeigen: Die Sanierung zu einem sehr energieeffizienten Gebäude senkt nicht nur die Treibhausgasemissionen für Heizung. Auch die gesamte Klimabelastung im Lebenszyklus sinkt, wenn die Ökobilanz die Herstellung der Baustoffe und der Haustechnik umfasst. Das gilt auch für die meisten anderen Umweltwirkungen.

Quelle: ifeu 2014

## Kreislaufwirtschaft und Schadstoffe

Dämmstoffe sollten bei der Herstellung wenig Umweltbelastungen erzeugen und am Ende der Nutzungsphase wieder zu verwenden oder stofflich zu verwerten (recyceln) sein – entsprechend der im

Kreislaufwirtschaftsgesetz festgelegten Hierarchie der Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen. Erst wenn dies nicht möglich ist, sollten sie einer energetischen Verwertung zugeführt oder, als letzte Maßnahme, fachgerecht beseitigt werden. In der Praxis sind Wiederverwendung oder Recycling von Dämmstoffen

jedoch oft schwierig und spielen bislang nur eine untergeordnete Rolle. Dies liegt daran, dass Dämmstoffabfälle häufig nicht sortenrein gesammelt werden können, weil sie mit anderen Baustoffen verschmutzt sind (z. B. Putzreste), oder aber bereits werkseitig als Verbundprodukte hergestellt werden.

Ein weiteres Hemmnis für das Recycling von Dämmstoffen ist ihre Belastung mit Schadstoffen. Daher gilt es, den Einsatz problematischer Stoffe nicht nur wegen möglicher unmittelbarer Gefährdungen für die Nutzer oder die Umwelt zu reduzieren, sondern auch um eine zukünftige Wiederverwendung bzw. ein Recycling – auch in anderen Produktbereichen – zu ermöglichen. Um die recycelte Menge zu steigern, ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung sowohl der Zusammensetzung und des Aufbaus der Dämmstoffe als auch der Verfahren zum Rückbau und zur Aufbereitung erforderlich.

Wesentliche **Umweltaspekte bei der Herstellung und Entsorgung von Dämmstoffen** unterscheiden sich, je nachdem ob ihre Basis mineralische (anorganische) Rohstoffe, fossile (organische) Rohstoffe oder nachwachsende (ebenfalls organische) Rohstoffe sind (zur Einteilung der Dämmstoffe siehe Kapitel 2, Tabelle 1).

Bei **Dämmstoffen aus fossilen Rohstoffen** bildet Erdöl in der Regel die stoffliche Basis ebenso wie den Hauptenergieträger. Bei der Herstellung des Dämmstoffs und in der Vorkette von Erdöl (Extraktion, Raffination, Transport) kommt es zu Umweltauswirkungen (Flächennutzung und -zerstörung bei der Gewinnung von Erdöl, Umweltverschmutzung durch Leckagen und Unfälle beim Erdöltransport, Verbrennungsemissionen bei der Nutzung als Energieträger). Fossile Rohstoffe sind endlich; im Dämmstoff eingesetzt helfen sie allerdings nachhaltig Energie für die Heizung zu sparen. Nach Rückbau und Trennung kann der Restenergiegehalt bei der thermischen Verwertung zurückgewonnen werden.

Die Rohstoffe für **Dämmstoffe auf Basis mineralischer Rohstoffe** sind quasi unendlich. Die Herstellungsenergie einschließlich Transporte wird in der Regel auf Basis endlicher, fossiler Energieträger bereitgestellt. Umweltauswirkungen bei der Rohstoffgewinnung sind quantitativ nicht gut dokumentiert (Flächendegradation, Eingriffe in den Wasserhaus-

halt). Wenn ein stoffliches Recycling nicht möglich ist, können mineralische Dämmstoffe deponiert werden.

**Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe** benötigen – neben der Energie für die Produktion und den Transport – Anbaufläche und Wasser. Die Anbauflächen sind begrenzt und beim Anbau kann es je nach Pflanzenart zu unterschiedlichen Umweltauswirkungen kommen (Düngemittel, Pestizideinsatz u. a.). Der Energiegehalt kann nach Rückbau und Trennung bei der thermischen Verwertung weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral zurückgewonnen werden.

Wie für andere Baustoffe gilt auch für Dämmstoffe, dass diese möglichst wenige **Schadstoffe** enthalten bzw. freisetzen sollten. Für eine Reihe von Chemikalien mit kritischen Wirkungen auf Umwelt oder Gesundheit ist die Verwendung in Bauprodukten in den letzten Jahren bereits durch das Stoffrecht oder das Baurecht eingeschränkt oder ganz verboten worden. Für weitere Chemikalien gilt, dass zwar keine gesetzlichen Beschränkungen vorliegen, ihr Einsatz aber sorgfältig geprüft und möglichst vermieden werden sollte. Dies betrifft Stoffe, die krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend oder erbgutverändernd sind (CMR-Stoffe), ein hohes sensibilisierendes Potenzial für Haut oder Atemwege haben, in der Umwelt persistent und bioakkumulierend sind (vPvB-Stoffe, PBT-Stoffe, langlebige organische Schadstoffe POP) oder das Klima schädigen können.

Als relevante Schadstoffgruppen sind dabei Flammschutzmittel (siehe auch Kapitel 9. Was gilt es beim Brandschutz zu beachten?), klimaschädigende Treibmittel, biopersistente Fasern und Biozide (siehe auch Kapitel 5. Belasten Biozide in Fassaden die Umwelt?) sowie die Summe der Emissionen in den Innenraum zu nennen. Tabelle 3 fasst ausgewählte Schadstoffe in Dämmstoffen zusammen. Dabei handelt es sich zum einen um Stoffe, deren Verwendung in den letzten Jahren bereits verboten wurde und die somit nur beim Rückbau besondere Maßnahmen erfordern. Zum anderen betrifft es Stoffe, die in aktuell vermarkteten Dämmstoffen vorkommen können, für die es aber Alternativen gibt oder die verzichtbar sind. Im Zweifelsfall hilft eine Nachfrage beim Hersteller, ob diese Stoffe eingesetzt wurden. Umweltzeichen helfen außerdem beim Wahl umwelt- und gesundheitsverträglicher Dämmstoffe.

Tabelle 3

## Auswahl bekannter Schadstoffe in Wärmedämmungen und umweltfreundliche Alternativen

Dämmstoff	Schadstoff / Funktion/ ggf. rechtliche Regelung
<b>Mineralwolle</b>	<p><b>Fasern:</b> krebserzeugende Fasern sind seit 2000 verboten, beim Rückbau älterer Mineralwollen sind diese getrennt zu sammeln und es sind entsprechende Schutzmaßnahmen gegen Faserstäube zu treffen. Sachgerecht eingebaute Mineralwollen, beispielsweise hinter einer Dampfsperre, setzen keine Fasern in die Innenraumluft frei.</p> <p>Bei Verwendung im Innenraum ist auf eine geringe Freisetzung (Emission) von <b>Formaldehyd</b> zu achten. Orientierung bietet der Blaue Engel RAL-UZ 132.</p>
<b>Phenolharz, Melaminharz</b>	<p>Bei Verwendung im Innenraum ist die mögliche Freisetzung von Formaldehyd ein hygienisches Risiko; sie sollte so gering wie möglich sein.</p> <p>Phenolharze sollten nicht mit gesundheitsschädlichem <b>Treibmittel Chlorpropan</b> geschäumt werden, da dieses später in die Wohnumwelt abgegeben werden kann.</p>
<b>UF-Ortschäume (Urea-Formaldehyd)</b>	<b>Formaldehyd:</b> Da die Formaldehydfreisetzungen nur schwierig zu reduzieren sind, sollte auf den Einsatz in Wohngebäuden (z. B. als Kerndämmung) verzichtet werden.
<b>Polystyrol (expandiert/ EPS, extrudiert/XPS)</b>	<p><b>Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD):</b> Wegen seiner persistenten, bioakkumulierenden und toxischen Eigenschaften als SVHC und als POP bewertet. In neuen Dämmstoffen aus EPS kann es noch bis voraussichtlich 2017 enthalten sein. Die Vermarktung HBCD-haltiger Dämmstoffe aus XPS wird kurzfristiger verboten. Sowohl Dämmstoffe aus EPS als auch XPS sind bereits ohne HBCD erhältlich. Beim Rückbau ist in Zukunft auf getrennte Sammlungen solcher PS-Dämmstoffe und Vorkehrungen zur Vermeidung von Staubfreisetzung zu achten.</p> <p><b>HFKW (teilfluorierte Kohlenwasserstoffe) als Treibmittel für XPS:</b> Auf diese Stoffe sollte freiwillig verzichtet werden, da sie ein sehr hohes Treibhauspotenzial haben. Einige Firmen stellen XPS ohne HFKW her, als alternatives Treibmittel dient meist Kohlendioxid mit niedrigerem Treibhausgaspotenzial.</p>
<b>Polyurethan (PUR)</b>	<p><b>Flammschutzmittel Tris(chlorethyl)phosphat (TCEP):</b> wegen seiner reproduktionstoxischen Eigenschaften als SVHC bewertet, wurde es von den Herstellern in der Regel schon vor vielen Jahren durch TCCP (Tris(chlorpropyl)phosphat) oder halogenfreie Phosphorverbindungen ersetzt, TCEP spricht gegen das Recycling von älteren PU-Schäumen.</p> <p><b>FCKW (Flurchlorkohlenwasserstoffe):</b> als Treibmittel wegen der schädigen Wirkung auf die Ozonschicht seit 1995 verboten, beim Rückbau auf getrennte Sammlung solcher PUR-Dämmstoffe achten.</p> <p><b>HFKW (teilfluorierte Kohlenwasserstoffe) als Treibmittel für PUR:</b> Auf diese Stoffe – die als Ersatz für die ozonschädigenden FCKW dienen – sollte freiwillig verzichtet werden, da sie ein sehr hohes Treibhauspotenzial haben. Deutsche Hersteller setzen bei der Herstellung von Dämmstoffplatten keine HFKW ein; bei Formteilen kommen dagegen HFKW häufig zum Einsatz.</p>
<b>Naturfasern</b>	<b>Borate (Salze der Borsäure),</b> die sich gleichzeitig als Flammschutzmittel und Biozide eignen, werden wegen ihrer reproduktionstoxischen Eigenschaften als SVHC bewertet. Auf sie sollte freiwillig verzichtet werden. Als Alternative kann beispielsweise Ammoniumpolyphosphat eingesetzt werden.
<b>Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)</b>	<b>Biozide</b> im Putz von Wärmedämmverbundsystemen: Biozidfreie Materialien oder Bauweissen sind zu bevorzugen. Orientierung bietet der Blaue Engel RAL-UZ 140.
<b>alle Dämmstoffe mit Verwendung im Innenraum</b>	Emissionen <b>flüchtiger organischer Verbindungen (VOC)</b> sollten minimiert werden. Dies kann mit Hilfe einer Emissionsprüfung nachgewiesen werden. Orientierung bietet der Blaue Engel RAL-UZ 132.
<b>Rohrdämmungen aus Kunststoffen (Kautschuk, Polyethylen, Polypropylen)</b>	<b>Flammschutzmittel Chlorparaffine</b> (kurzkettig, SCCP, und mittelkettig, MCCP): SCCP sind wegen ihrer persistenten, bioakkumulierenden und toxischen Eigenschaften als SVHC und als POP bewertet und ihre Verwendung bereits verboten. Bei den MCCP sind diese Eigenschaften etwas weniger stark ausgeprägt, auf sie sollte jedoch freiwillig verzichtet werden.

Quelle: Wurbs et al. 2014, erweitert

SVHC = besonders besorgniserregender Stoff (substance of very high concern) nach den Kriterien der Chemikalienverordnung REACH (siehe <http://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach>); Verwendungen dieser Stoffe sind größtenteils nicht verboten, aber grundsätzlich meldepflichtig, vielfach zulassungspflichtig und ihr Ersatz anzustreben

POP = persistenter, organischer Schadstoff nach den Kriterien der Stockholm Konvention / POP-Verordnung (siehe <http://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-management/stockholm-konvention>); Verwendungen dieser Stoffe sind verboten oder stehen kurz vor einem Verbot



Am Umweltzeichen Blauer Engel lassen sich emissionsarme Dämmstoffe für den Innenraum (RAL-UZ 132) und schadstoffarme Wärmedämmverbundsysteme (RAL-UZ 140) erkennen. Die Vergabekriterien und ausgezeichneten Produkte sind abrufbar unter

[www.blauer-engel.de](http://www.blauer-engel.de). Auch weitere Produktkennzeichen schließen Schadstoffe aus oder begrenzen deren Emissionen. Details geben die jeweiligen Vergabekriterien.

## 5. Belasten Biozide in Fassaden die Umwelt?

Ja, Biozide in Fassaden können die Umwelt belasten. Der Einsatz von biozidhaltigen Produkten zum Schutz vor Algen und Pilzen an der Fassade von Neu- oder saniertem Altbau ist aber oft vermeidbar – geeignete Planung und Materialauswahl vorausgesetzt.

An Gebäudefassaden können sich Algen und Pilze ansiedeln, die als grau-grünlicher bis schwarzer Belag sichtbar werden. Betroffen sind Bauprodukte wie Putz, Farbe, Holz, Metall, Glas, Klinker, Kunststoff oder Sichtbeton meist zur sonnenabgewandten Gebäudeseite hin. Diese „lebenden“ Verschmutzungen sind nur ästhetischer Natur und beeinträchtigen nicht die bauphysikalische Funktionalität. Dennoch werden sie von vielen Eigentümerinnen und Eigentümern als störend empfunden. Neben den eingesetzten Baustoffen beeinflussen die Konstruktion einer Fassade und standortbedingte Faktoren das Risiko des Befalls. Gerade in Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) greifen viele Hausbesitzer zu mit Bioziden ausgerüsteten Anstrichen und Putzen, um auf chemischem Weg dem unschönen Bewuchs vorzubeugen. Inzwischen sind viele Fassadenfarben mit Bioziden ausgerüstet; Dachanstriche und Betondachsteine folgen.

Seit Neuerem setzen einige Hersteller auch auf die Zugabe von mikroverkapselten Bioziden in Farben und Putzen, um deren Freisetzung zu verzögern. Die langfristige, kontinuierliche Abgabe der Biozide ändert sich dadurch jedoch nicht, da sie für die notwendige Wirkung erforderlich ist. Die Biozide gelangen über die Auswaschung in den Boden oder das Ablaufwasser, das vor Ort versickert oder zum Teil ungeklärt in Gewässern landet.

Es gibt demnach viele Pfade, wie die Biozide die Umwelt belasten oder sogar wieder zum Menschen zurückgelangen können. Entscheidendes Argument ist

die zeitlich sehr begrenzte Schutzdauer der Biozide, so dass bei Abwägung von „dafür“ und „dagegen“ ein Verzicht auf Biozide empfohlen wird.

Der Einsatz von biozidhaltigen Produkten zum Schutz vor Bewuchs am Neubau oder bei der Sanierung ist oft vermeidbar, da sich das mögliche Befallsrisiko planerisch minimieren lässt. Wichtig ist eine individuell zugeschnittene Planung der Fassade. Oberflächen, die trocken bleiben bzw. schnell abtrocknen, werden weniger von Algen und Pilzen befallen. Dies lässt sich z. B. durch ausreichende Dachüberstände, entsprechende Umgebungsgestaltung (hohe Bepflanzung nicht direkt am Gebäude) sowie geeignete Struktur und Materialien der Oberflächen erreichen. Eine weitere Möglichkeit ist das Anbringen einer Vorhangfassade z. B. aus Schindeln an der besonders gefährdeten „Wetterseite“. In einigen Gegenden Deutschlands ist dies seit Jahrhunderten üblich.

Die Gesetzgebung fordert, den Einsatz von Bioziden generell auf das notwendige Mindestmaß zu beschränken und wirksame, aber weniger bedenkliche Alternativen stets zu bevorzugen (siehe [www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/biozide](http://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/biozide) und [www.biozid.info/deutsch/biozidverfahren](http://www.biozid.info/deutsch/biozidverfahren)).

Biozide sind an der Fassade nur begrenzt stabil: Fachleute gehen von fünf bis maximal sieben Jahren aus, wobei die ersten drei Jahre bei allen Systemen auch ohne Biozide nicht sichtbar veralgen, so dass sich ein zusätzlicher Schutz von maximal zwei bis vier Jahren ergibt. Da Biozide also nur einen temporären Schutz gegenüber Algen und Schimmel bewirken, sind andere Lösungen zu bevorzugen. Beispielsweise enthalten mineralische Putze und Silikatfarben, die vor Ort mit Wasser angerührt werden, keine Biozide und sind nach den vorliegenden Erfahrungen nicht anfälliger für eine Veralgung. Mittlerweile werden auch Wärmedämmverbundsysteme mit dem Blauen Engel (RAL-UZ 140) angeboten, die keine Biozide enthalten.



## 6. Wann ist Innendämmung eine Alternative zur Außendämmung?

Ein Gebäude von innen zu dämmen, anstatt eine Außenwanddämmung anzubringen, kommt immer dann in Betracht, wenn die Fassade optisch nicht verändert werden darf, das Gebäude denkmalgeschützt ist oder wenn die Innendämmung rasch und kostengünstig realisierbar ist.

Innendämmung verbessert, fachgerecht angebracht, das Wärmedämmniveau bei schwierigen Baukonstruktionen und hilft auf einfache Weise, die Oberflächentemperaturen der Außenwände zum Raum hin zu erhöhen; das beugt Tauwasseranfall und Schimmel vor.

Da Innendämmungen auch hygienische Risiken in sich bergen, sollten sie immer nachrangig zur Außendämmung in Betracht gezogen werden.

Bei Innendämmungen gibt es aus der Sicht der Innenraumhygiene einige Punkte zu beachten. In folgenden Fällen ist eine Innendämmung sinnvoll:

- ▶ Falls einzelne Räume nacheinander modernisiert werden sollen
- ▶ Falls einzelne Räume schnell aufheizbar sein sollen (z. B. Gästezimmer)
- ▶ Falls die Außenfassade denkmalgeschützt und daher eine Außendämmung nicht möglich ist

Gegen eine Innendämmung sprechen folgende Gründe:

- ▶ Die mögliche Dämmstoffdicke ist begrenzt (Platzmangel), die Wohnfläche wird verkleinert
- ▶ Wärmebrücken und Leckstellen (Durchbrüche) sind unbedingt zu vermeiden; im Einzelfall kann das schwierig sein, wenn z. B. viele Durchbruchstellen (Steckdosen, Leitungsrohre) an der zu dämmenden Wand existieren – Bausachverständige können hier Rat und Tipps geben

Bei der Innendämmung wird eine Tragkonstruktion an der Wand befestigt und zwischen Wand und Tragkonstruktion der Dämmstoff eingebaut. Seit Kurzem gibt es auch Dämmsysteme (z. B. Silikatplatten), die vollflächig innen entlang der Außenwände verklebt werden ohne zusätzliches Ständerwerk. In jedem Fall ist die Konstruktion so zu gestalten, dass die Feuchtigkeit aus der Raumluft dauerhaft nicht in und hinter die Wärmedämmkonstruktion gelangt. Je nach Konstruktion und Material kann dazu eine Dampfbremse oder Dampfsperre erforderlich sein. Bei Dämmstoffen, die Feuchtigkeit im Material binden, wie z. B. Mineral-

dämmplatten aus Kalziumsilikat, kann man darauf auch verzichten. An Steckdosen oder (Bohr-) Löchern in der Wand ist besonders darauf zu achten, dass dabei die Dampfsperre nicht zerstört wird, da ansonsten Feuchtigkeit aus der Raumluft hinter die Konstruktion gelangt. Wichtig ist auch, dass innerhalb der Konstruktion keine Spalte zwischen Wand und Dämmstoff oder zwischen den Dämmstoffstücken bleiben, in die Feuchte eindringen kann. Um Wärmeverluste zu verringern, sind die Nischen an Heizkörpern nicht nur zur Wand hin, sondern auch an den Seiten zu dämmen. Gleiches gilt auch dort, wo die Innenwände oder Decken an eine Außenwand mit Innendämmung und an Fensterlaibungen stoßen. Es empfiehlt sich zudem, die Innendämmung „ums Eck“ herum noch ein Stück weit in den Raum hinein zu verlängern.

Um die Innenraumluft nicht durch Schadstoffe aus dem Dämmmaterial, der Dampfbremse oder der Dampfsperre zusätzlich zu belasten, ist es vor allem bei der Innendämmung wichtig, auf emissionsarme Produkte zu achten. Diese sind beispielsweise am Umweltzeichen „Der Blaue Engel, weil emissionsarm“ zu erkennen. Nach dem Einbau der Innendämmung wird eine ausreichende Lüftung empfohlen.



Bild: Jürgen Fälchle | www.fotolia.de

## 7. Führt Wärmedämmung zu Schimmel?

Generell vermeidet oder behebt Wärmedämmung bauliche Mängel, die zu Schimmel führen (z. B. kalte Wände; undichte Stellen im Gebäude). Entsteht Schimmel in wärmegeämmten Gebäuden, ist dies vor allem auf Fehler bei der Planung/Ausführung oder geänderte Nutzung zurückzuführen.

Eine ausreichende Lüftung ist zudem erforderlich, da die gedämmten Gebäude stets sehr luftdicht sind (und sein sollen). Nicht die Dämmung ist daher innenraumhygienisch das Problem, sondern die Luft“dichtheit“; eine sachgerechte Lüftung und Lüftungskonzepte, die schon bei der Planung mitgedacht werden, sorgen aber verlässlich dafür, dass die Luftdichtheit der Gebäude gesundheitlich nicht zum Problem wird.

Neue, energieeffiziente Gebäude und energetisch sanierte Gebäude müssen luftdicht ausgeführt sein, um unnötige Wärmeverluste zu vermeiden. Dies bedeutet, dass die Raumluft dann nicht mehr durch Ritzen und Spalten in der Gebäudehülle nach außen entweichen kann. Die **Luftdichtheit** spart Energie und Geld. Sie hilft zudem, dass keine Feuchtigkeitsansammlungen entlang undichter Gebäudestellen im Winter auftreten, was zu Schimmelbewuchs führen kann. Wenn beispielsweise Wärmebrücken in Ecken oder Fensterlaibungen nicht beseitigt werden, schlägt sich dort Feuchtigkeit nieder und Schimmel kann entstehen. In Häusern, an denen Energiesparmaßnahmen durchgeführt wurden, liegen die Ursachen für Schimmelbildung vor allem in Planungs- oder Ausführungsfehlern.

Durch die erhöhte Luftdichtheit nach Sanierung ist unbedingt für ausreichende **Lüftung** zu sorgen. Am besten geschieht dies, wenn den Raumnutzern eine Lüftungsanleitung an die Hand gegeben wird. Auch Lüftungskonzeptionen bereits bei der Planung eines Neubaus oder der Sanierung sind wichtig. Reicht eine natürliche Lüftung über Fenster dabei nicht aus, kommen **Lüftungsanlagen** infrage, die nutzerunabhängig für einen ausreichenden Luftwechsel sorgen. Lüftungsanlagen bieten den Vorteil, dass darüber ein Teil der durch die Gebäudenutzung entstehenden Wärme zurückgewonnen werden kann und sich die Installation und der Betrieb solcher Anlagen dadurch schnell rechnet. Lüftungsanlagen sind darüber hinaus bei sehr energieeffizienter Bauweise (Passivhäuser, Niedrigstenergiehäuser, Plus-Energie-Häuser) unerlässlich. Sie müssen jedoch regelmäßig gewartet werden, damit sie nicht selbst zu Verkeimung der Raumluft mit Bakterien führen. Auch hier ist sorgfältige Planung und Ausführung nötig.

### Sachgerechtes Lüften

Lüften ist das beste Mittel, um Feuchtigkeit und evtl. unerwünschte Stoffe aus der Innenraumluft zu entfernen. Bei Lüften über Fenster sollen diese morgens und abends für jeweils 5 bis 10 Minuten (im Sommer für jeweils 20 bis 30 Minuten) weit geöffnet werden. Lüften über Kippstellung der Fenster ist nicht ratsam, weil dabei unnötig Heizenergie vergeudet wird. Beim Betrieb von Lüftungsanlagen sollen diese bedarfsgeregelt sein, d.h. immer dann „lüften“, wenn die Raumluftqualität es erfordert. Sensorsteuerungen helfen dies zu bewerkstelligen.

## 8. Beeinträchtigt Wärmedämmung die Ästhetik der Gebäude?

Äußere Wärmedämmung kann – wie andere Arbeiten an der Fassade – natürlich das Aussehen von Gebäuden verändern. Sie bietet aber gleichzeitig eine Gelegenheit, das Aussehen eines Gebäudes zu verbessern. Viele Beispiele zeigen gute architektonische Lösungen. Auch für Gebäude mit erhaltenswürdigen Fassaden (z. B. Gründerzeitgebäude mit intakten Außenfassaden) gibt es inzwischen gestalterische Lösungen, die das Wärmeschutzniveau verbessern, ggf. kommt auch eine Innendämmung in Betracht.

Eine energetische Sanierung im Allgemeinen und Wärmedämmung im Besonderen kann in das Er-

scheinungsbild eines Gebäudes stark eingreifen. In ungünstigen Fällen verschlechtert sich das Erschei-

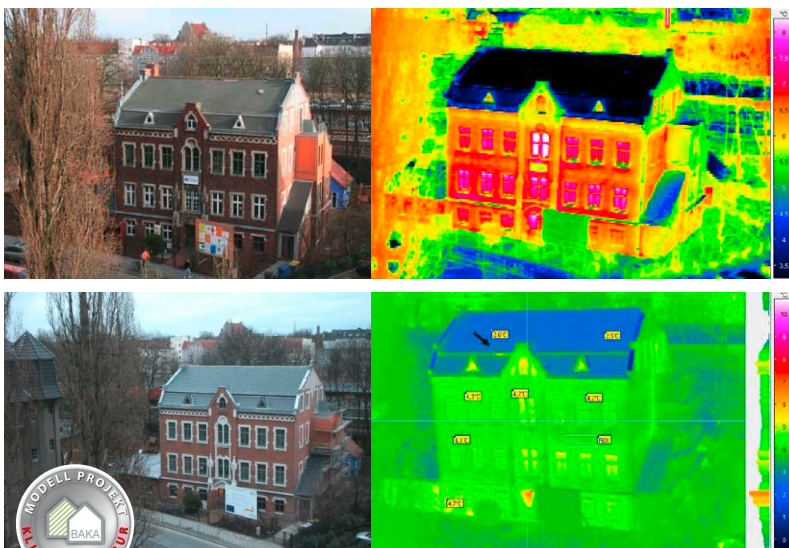
nungsbild erheblich. Deshalb sollten in einem ganzheitlichen Planungskonzept alle Möglichkeiten der energetischen Sanierung geprüft werden.

Unästhetische, „Schießscharten“-artige Fensteröffnungen lassen sich vermeiden, indem Fenster nach außen in die Dämmebene versetzt werden. Anderen Nebenwirkungen wie Algenbefall kann man durch geeignete Wahl der Materialien oder der Konstruktion vorbeugen. So kann eine Sanierung eine gute Gelegenheit sein, ein Gebäude gestalterisch aufzuwerten. Eine gleichzeitige Aufstockung verleiht einem Mehrfamilienhaus neuen Charakter. Auch Neubauten können architektonisch anspruchsvoll gestaltet werden, sofern die Bauherren Wert darauf legen.

**Alte Gebäude** prägen unsere Kultur und Landschaft auf besondere Weise. Umso wichtiger ist es, das baukulturelle Erbe zu bewahren. Das betrifft nicht nur Gebäude, die explizit unter Denkmalschutz stehen, sondern auch erhaltenswerte Bauten aus der Gründerzeit und anderen Epochen. Die baukulturelle Verantwortung besteht darin, Sanierungsmaßnahmen in baukulturellem, architektonischem und denkmalpflegerischen Zusammenhang zu betrachten und vorzunehmen. So können bei erhaltenswerter Bausubstanz Lösungen gefunden werden, die den Energieverbrauch eines Gebäudes verringern und gleichzeitig das ursprüngliche Erscheinungsbild erhalten, statt Ornamente abzuschlagen und mit Wärmedämmung zu „überkleben“. In solchen Fällen ist



Bilder: Günther Ludwig (Solidar)  
Vorher-Nachher: Sanierung eines Einfamilienhauses aus den 1930er Jahren mit Außendämmung aus Zellulosefasern, Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, Holzpellet-Heizung. Schräge Fensterleibungen vermeiden den „Schießscharten-Effekt“ und wahren zusammen mit dem verlängerten Dachüberstand die ursprünglichen Proportionen des Hauses. Der Endenergiebedarf sank von 311 kWh/m<sup>2</sup>a auf 49 kWh/m<sup>2</sup>a.



Bilder: Ulrich Zink (BAKA)  
Sanierung einer denkmalgeschützten Schule mit Innendämmung aus Vakuum-Isolierpaneelen, denkmalgerechten, 3-fach-verglasteten Fenstern und sanierten Kastenfenstern, Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und Erd-Wärmepumpe. Der gemessene Endenergieverbrauch sank von 107.000 kWh vor der Sanierung um 90 % auf 9.000 kWh.

oft Innendämmung eine Alternative, die in Kombination mit anderen Maßnahmen zu guten Ergebnissen führen kann. Modellprojekte, z. B. der Deutschen

Energie-Agentur dena, haben gezeigt, dass auch bei erhaltenswerten Gebäuden eine beachtliche Verbesserung erreicht wurde.

## 9. Was gilt es beim Brandschutz zu beachten?

Je größer ein Gebäude, desto anspruchsvoller sind die Anforderungen des Baurechts an das Brandverhalten der Wärmedämmung. Das Gesetz unterscheidet hier nicht brennbare, schwer entflammbar und normal entflammbar Materialien. Die Musterbauordnung legt die Anforderungen an das Brandverhalten für Baustoffe und Bauteile für Wände, Decken und Dächer fest. In brennbaren Dämmstoffen werden Flammenschutzmittel eingesetzt, um die Entzündlichkeit herabzusetzen. Brandschutzgerechte Gebäudedämmung muss aber keine Umwelt- und/oder Gesundheitsfolgen haben.

Das **Brandverhalten von Wärmedämmstoffen** hängt vom eingesetzten Material selbst, dessen Kombination mit anderen Materialien sowie der konkreten Verarbeitung ab. Dämmstoffe auf Basis mineralischer Rohstoffe (Mineralwolle, Mineralschaum, Kalziumsilikat, Schaumglas, u. a.) sind nicht brennbar. Dämmstoffe auf Basis organischer Rohstoffe sind hingegen brennbar. Dies gilt für Dämmstoffe natürlichen Ursprungs (Holzwolle, Holzfasern, Hanf, Flachs, Zellulose, Kork, Schafwolle, u. a.) ebenso wie für Dämmstoffe aus synthetischen organischen Rohstoffen (Polystyrol, Polyurethan, Phenolharz, u. a.).

Innerhalb der brennbaren Dämmstoffe lassen sich **schwerentflammbar und normalentflammbar Baustoffe** unterscheiden – den Einsatz leichtentflammbarer Baustoffe verbieten die Bauordnungen. Um die Entzündlichkeit organischer Materialien herabzusetzen, werden in der Regel Flammenschutzmittel zugesetzt. Bei diesen handelt es sich um sehr unterschiedliche chemische Stoffe, sowohl was den chemischen Aufbau – von einfachen anorganischen Salzen bis hin zu großen organischen Molekülen – als auch deren (öko)toxikologische Eigenschaften betreffen (siehe unten). Zudem eignen sich mineralische Bindemittel, um die Brennbarkeit organischer Dämmstoffe herabzusetzen, beispielsweise bei zementgebundenen Holzfasern. Neben der Brennbarkeit sind die Rauchentwicklung sowie die Möglichkeit

des brennenden Abtropfens eines geschmolzenen Dämmstoffes oder des Abfallens von Dämmstoffteilen wichtig für die Auswirkungen im Brandfall, daher gehören diese Faktoren ebenfalls zur Charakterisierung ihres Brandverhaltens.

Die **Musterbauordnung** legt in Abschnitt vier (§ 26 bis § 32) Anforderungen an das Brandverhalten für Baustoffe und Bauteile für Wände, Decken und Dächer fest. Die Anforderungen sind länderspezifisch in den jeweiligen Landesbauordnungen umgesetzt. Je nach Gebäudeklasse, Konstruktionsweise und Nutzung der Bauwerke unterscheiden sich diese. Kurz zusammengefasst lässt sich sagen: Je größer ein Gebäude ist und je mehr Leute es nutzen, desto strenger werden die Anforderungen. Wesentliche Unterschiede bestehen zwischen den Gebäudeklassen (GK) 1 bis 3 (bis 7 m Fußbodenoberkante des obersten Geschosses), den Gebäudeklassen 4 und 5 (bis 22 m Fußbodenoberkante des obersten Geschosses) und allen anderen, noch größeren Gebäuden und Sonderbauten. Zudem unterscheiden sich die Anforderungen auch bei den einzelnen Bauteilen wie Außenwänden, Trennwänden, Decken, u. a. Während in GK 1 bis 3 an der Fassade normalentflammbar Baustoffe verwendet werden können, sind in GK 4 und 5 nur schwerentflammbar und bei Hochhäusern und vielen Sonderbauten nur nichtbrennbare Baustoffe zulässig (Holm et al. 2014, Eberl-Pacan 2012).

Die Zuordnung von Dämmstoffen zu einer Baustoffklasse (nicht brennbar, schwerentflammbar, normalentflammbar) erfolgt auf der Grundlage von **Brandprüfungen** am konkreten Produkt. Für die Baustoffe an sich legte in der Vergangenheit die deutsche Norm DIN 4102 die notwendigen Prüfungen des Brandverhaltens fest, diese wurde inzwischen bei vielen genormten Dämmstoffen durch die europäische Norm DIN EN 13501-1 abgelöst. Dies führt bei fast allen Dämmstoffen zu vergleichbaren Einstufungen.

Bei Dämmstoffen aus Polystyrol ändert sich die Einstufung durch das neue Prüfverfahren jedoch von



„schwerentflammbar“ zu „normalentflammbar“. Einen Sonderfall stellen hier aber die **Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) aus Polystyrol** dar. Das Brandverhalten dieser Wärmedämmverbundsysteme wird nicht nach den oben genannten Normen eingestuft, sondern sie benötigen in jedem Fall als Gesamtsystem eine Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt).

Hierzu werden sie in Prüfvorrichtungen getestet, die speziell auf die großflächige Anwendung der WDVS an Fassaden ausgerichtet sind. Wichtig ist im Brandfall vor allem, dass das Aufschmelzen des Polystyrols unmittelbar über Öffnungen in der Fassade wie Fenstern entweder ganz verhindert wird oder aber die über dem Polystyrol liegende Putzschicht nicht einreißt. Mit der Zulassung von WDVS werden daher auch die notwendigen Brandschutzmaßnahmen bei der Verwendung festgelegt, beispielsweise wo und wie viele Brandriegel aus nicht brennbaren Materialien eingezogen werden.

Dem Brandschutz wird hohe Aufmerksamkeit gewidmet, trotzdem kam es in den letzten Jahren zu Fassadenbränden. Bei der Zulassung von WDVS fordert das DIBt seit Dezember 2014 zusätzliche konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des Brandverhaltens. Im Juli 2015 hat das DIBt diese Maßnahmen nochmals konkretisiert (DIBt 2015a). Auch hier steht es Bauträgern und Planenden jedoch frei, sich für nicht brennbare Dämmstoffe zu entscheiden. Die Bauministerkonferenz bestätigt, „dass entsprechend der Zulassung hergestellte WDVS mit Polystyrol-Dämmstoffen sicher sind“ (DIBt 2015b).

Wie bereits angesprochen, werden zur Herabsetzung der Entflammbarkeit bei organischen Dämmstoffen

häufig **Flammschutzmittel** eingesetzt. Dabei kann es sich um unkritische Stoffe wie Ammoniumpolyphosphate in Dämmstoffen aus Naturfasern handeln. Für einige Flammschutzmittel hat es jedoch in den letzten Jahren chemikalienrechtliche Regulierungen gegeben. Hier ist insbesondere das Flammschutzmittel HBCD (Hexabromcyclododecan) für Dämmstoffe aus Polystyrol zu nennen, das als sogenannter POP (persistenter organischer Schadstoff) nach der Stockholmer POP-Konvention weltweit nicht länger verwendet werden darf.

In Europa wird es lediglich noch eine Übergangszeit für den Einsatz in neuen Dämmstoffen und den Verkauf von Lagerbeständen geben. Die genauen Fristen sind Ende 2015 noch in Abstimmung der EU Kommission und finden sich nach ihrer Festlegung auch in einer neuen Auflage von UBA (2015). (Weitere problematische Flammschutzmittel für organische Dämmstoffe sind in Kapitel 4, Tabelle 3 angegeben – in der Regel gibt es zu diesen Alternativen.)

Das Umweltbundesamt hält halogenhaltige Flammschutzmittel aus Vorsorgegründen generell für problematisch, insbesondere, wenn sie nicht fest in das Baustoffmaterial eingebunden sind, da viele halogenierte Flammschutzmittel eine Tendenz zu Persistenz (schlechter Abbaubarkeit) und Bioakkumulation (Anreicherung) in der Umwelt haben und sie im Brandfall zur Bildung saurer und toxischer Brandgase neigen. Da es in der Regel jedoch Alternativen zu problematischen Flammschutzmitteln und auch Dämmstoffe gibt, die von sich aus nicht brennbar sind, bedeutet brandschutzgerechte Gebäudedämmung keineswegs unvermeidlich die Inkaufnahme umwelt- und gesundheitsschädlicher flammhemmender Chemikalien.

## Literaturverzeichnis

BAKA (2015): Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung e.V., persönliche Information von Ulrich Zink am 6.2.2015, <http://montessori.bakaberlin.de/>

BMVBS (2012): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation 07/2012

DIBt (2015a): Konstruktive Ausbildung von Maßnahmen zur Verbesserung des Brandverhaltens von als „schwerentflammbar“ einzustufenden Wärmedämmverbundsystemen mit EPS-Dämmung, DIBt-Newsletter 3/2015, S. 9-17. [http://www.dibt.de/de/dibt/data/newsletter/03\\_2015.pdf](http://www.dibt.de/de/dibt/data/newsletter/03_2015.pdf)

DIBt (2015b): Empfehlungen zur Sicherstellung der Schutzwirkung von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) aus Polystyrol, Merkblatt der Bauministerkonferenz (Stand 18.06.2015), DIBt-Newsletter 3/2015, S. 8. [http://www.dibt.de/de/dibt/data/newsletter/03\\_2015.pdf](http://www.dibt.de/de/dibt/data/newsletter/03_2015.pdf)

Dehnen, N. et al. (2015): Die Beschäftigungseffekte der Energiewende, DIW ECON, Berlin

dena (2012): Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), dena-Sanierungsstudie, Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden, Berlin 2012

Diefenbach, N. et al. (2014): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2013, Gutachten für die KfW Bankengruppe

DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 1: Baustoffe – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Mai 1998.

DIN 4108-10: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe, Juni 2008.

DIN EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten, Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. Januar 2010.

Eberl-Pacan, Reinhard (2013): Wärmedämmverbundsysteme und Brandschutz. FeuerTrutz Magazin, Nr. 4, 2013.

Holm, Andreas; Tremel, Sebastian; Sprengard, Christoph (2014): Anforderungen aus dem Brandschutz. In: Susanne Rexroth, Friedrich May, Ulrich Zink (Hrsg.): Wärmedämmung von Gebäuden - Zeitgemäß und wandlungsfähig. VDE Verlag GmbH, Berlin.

ifeu (2014): ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Hrsg.), 100 % Wärme aus erneuerbaren Energien? Auf dem Weg zum Niedrigstenergiehaus im Gebäudebestand, Förderkennzeichen 0325358A, Heidelberg.

Lehr, U. et al. (2013): Gesamtwirtschaftliche Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen und –instrumenten, Ökonomische Analyse der Politikszenerarien für den Klimaschutz VI, Climate Change 21/2013, Umweltbundesamt, Dessau.



Musterauordnung - MBO – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012.

Solidar: Solidar Architekten und Ingenieure, Berlin, <http://www.solidar-architekten.de/projekte/altbau/solidar-rodensteinstrasse.html>

Sprengard, Christoph; Treml, Sebastian; Holm, Andreas (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. Forschungsinstitut Wärmeschutz e.V.

Statistisches Bundesamt (Stat. BA) 2015: Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 2: Vorbericht Energie, 10. April 2015

UBA (2013): Das Energiesparschwein – Informationen zum Wärmeschutz und zur Heizenergieeinsparung für Eigenheimbesitzer und Bauherren. Dessau-Roßlau 2013.

UBA (2014): Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr - Empfehlungen des Umweltbundesamtes



UBA (2015): Häufig gestellte Fragen und Antworten zu Hexabromcyclododecan, Fassung 2/2015. Umweltbundesamt, Dessau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/haufig-gestellte-fragen-antworten-zu>

UBA 2016 (in Vorbereitung): Leitfaden zur Vorbeugung, Bewertung und Sanierung bei Schimmelbefall („Schimmelleitfaden neu - 2016“).

Wurbs, Johanna; Dettling, Folke; Walther, Mareike; Bolland, Til; Plehn, Wolfgang (2014): Lebenszyklus und Ressourcenschonung. In Susanne Rexroth, Friedrich May, Ulrich Zink (Hrsg.): Wärmedämmung von Gebäuden, Zeitgemäß und wandlungsfähig. VDE Verlag GmbH, Berlin.



► **Diese Broschüre als Download**  
<http://bit.ly/1PbQANa>

 [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](http://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)  
 [www.twitter.com/umweltbundesamt](http://www.twitter.com/umweltbundesamt)