



Schimmelpilzbildung



eine Folge

falscher Bauweise?

# Schimmelpilzbildung und Luftdichtung, ein Zusammenhang?

Schimmelpilzbildung in Neubauten und auch - z.B. bei Fenstererneuerungen - im Altbau:  
Ist die Luftdichtungsanforderung an die Gebäude schuld - oder liegt es am Nutzer?

Jörg Brandhorst, Flammersfeld

## Einleitung

Das Niedrigenergiehausniveau ist mit der Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) Standard geworden. Je besser die wärmedämmende Gebäudehülle wird, desto höher werden im Verhältnis dazu die Lüftungswärmeverluste. Deshalb verlangte schon die letzte Wärmeschutzverordnung eine luftdichtende Schicht in der Gebäudehülle.

Andererseits benötigen die Bewohner aus hygienischen Gründen einen Mindestluftwechsel zur CO<sub>2</sub>- und Feuchteabfuhr, der - wie auch immer - sichergestellt werden muss.

Weitere Betrachtungen sind nötig in den Bereichen

- kalte Bauteilflächen (Wärmebrücken, Laibungen, Anschlüsse, etc.),
- Oberflächenmaterialien (hygroskopisches Verhalten),
- Baustoffe und deren Schichtung,
- Lage und der Art des Gebäudes bzw. der Wohnung,
- Heiz- und Lüftungsgewohnheiten der Nutzer,
- Anzahl der Bewohner, der produzierten Wasserdampfmenge je Wohneinheit sowie die Möblierung der Wohnungen.

Einige dieser Parameter sind berechenbar und im Rahmen der Normung erfaßt. Über die anderen - nicht statischen - Gegebenheiten gibt es zwar Rechenmethoden, die aber noch nicht geregelt sind (Simulationsrechnungen) oder es muss geschätzt und gemutmaßt werden. Diese Situation macht es dem Planer nicht gerade einfach, die komplexe Aufgabe Gebäude so zu erfassen, daß langlebige, selbstregulierende, preiswerte und - für Bewohner und Umwelt - unschädliche Konstruktionen entstehen. Die unüberschaubare Anzahl der verschiedensten Bauprodukte macht diese Situation noch problematischer.

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf den Teilaspekt Luftdichtung und Feuchte mit den daraus erwachsenden Problemen der Schimmelpilzbildung und anderen nicht gewünschten - weil evtl. krankmachenden - Resultaten der derzeitigen Bauweise und Baukultur.

## Die Anforderungen an eine luftdichte Gebäudehülle

Die EnEV beschreibt in Anhang 4 die "Anforderungen an die Dichtheit und den Mindestluftwechsel". Danach müssen die Gebäude bei Fensterlüftung einen n<sub>50</sub>-Wert von 3h<sup>-1</sup>, bei mechanischer Lüftung den n<sub>50</sub>-Wert von 1,5h<sup>-1</sup> einhalten.<sup>1</sup>

Der Grund liegt am vermeidbaren Energieverlust sowie der Reduzierung von Bauschäden aufgrund Konvektion.

Folgende Tabelle zeigt den Energieverlust bei einer Wohnung/einem Haus mit 500 m<sup>3</sup> Luftvolumen:

Luftwechsel h <sup>-1</sup>	Energieverlust durch Luftwechsel h <sup>-1</sup>
0,5	85 W/K
0,75	128 W/K
1	170 W/K
1,25	213 W/K
1,5	255 W/K

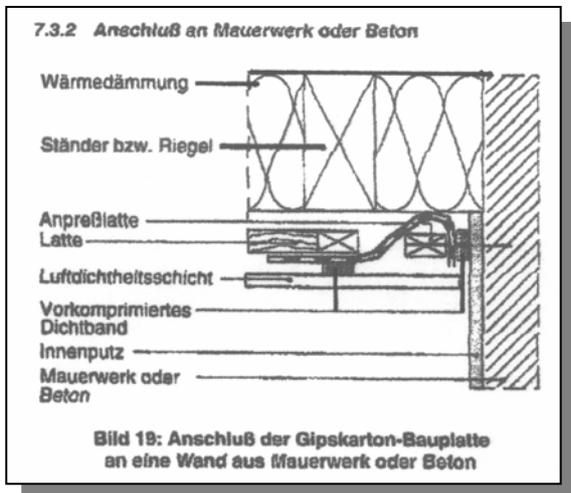
Je höher der Luftwechsel, desto höher ist zwangsläufig der Wärmeverlust. Je besser die Gebäudehülle gedämmt ist, desto größer werden im Verhältnis dazu die Lüftungswärmeverluste und sind daher zu begrenzen.

Um diese Konvektion – also das Durchströmen von Luft durch eine Fehlstelle – zu vermeiden, ist die gesamte Gebäudehülle daher dauerhaft luftdicht herzustellen!

Bei erfolgreicher Dichtigkeitsprüfungen werden verminderte Anforderungen an den Wärmeschutz gestellt. Eine Prüfung mit einer "blower-door" ist jedoch nicht zwingend vorgeschrieben. Im Sinne der Bauschadensvermeidung, der Energieersparnis sowie der Qualitätssicherung wäre dies sicherlich wünschenswert.

<sup>1</sup> n<sub>50</sub>-Wert: Prüfung der Gebäudehülle mit einem Differenzdruckverfahren bei 50 Pascal auf Leckagen

Die DIN 4108 - 7 als Bezugsnorm zur EnEV zeigt auf, wie die Luftdichtung hergestellt werden kann, wobei die Fläche nicht das Problem ist, sondern die dauerhaften Fugenausbildungen.



Beispiel aus der DIN 4108-7

## Bauphysikalische Grundlagen

In Zeiten, in denen wir unsere Häuser heizen, werden alle Öffnungen geschlossen, damit die erzeugte Wärme im Haus bleibt.

Es entsteht dadurch zwangsläufig ein unterschiedliches Klima zwischen „innen“ und „außen“.

Ähnlich wie bei einem Wasserkessel der auf den Herd gesetzt wird, muss die Hüllfläche des beheizten Objektes diese unterschiedlichen Klimata und deren detaillierten Anforderungen „aushalten“. Tut es dies nicht, ist die Hüllfläche ungeeignet für diese Aufgabe.

## Wasserdampfdiffusion

Durch das Beheizen der Innenräume führen wir der Luft und der inneren Umschließungsflächen Energie zu. Dadurch verändern sich die physikalischen Parameter dieser Stoffe. Warme Luft z.B. nimmt wesentlich mehr Wasser in Form von Wasserdampf auf als kalte Luft. Hierdurch entsteht ein „Dampfdruckgefälle“ gegenüber der kalten Außenluft. Dies bedeutet, daß der Wasserdampf gegen die Hüllflächen drückt. Geschieht dies in einem Kochtopf, so wird dieser Dampfdruck irgendwann einmal den Kochtopfdeckel hochheben, um einen Druckausgleich zwischen innen und außen herzustellen. Schließt der Deckel des Topfes allerdings nicht richtig, so entweicht laufend der Wasserdampf über Konvektion, ohne daß der Deckel angehoben werden muß (Fugen sind nicht dicht). Ist

andererseits der Deckel extrem dicht - z.B. bei einem Dampfdruckkochtopf - muß ein „Ventil“ eingebaut werden, sonst geht irgendwann die schwächste Stelle des Systems kaputt.

Ist kein Deckel auf dem Topf, so gleicht sich der Dampfdruck schnell dem Außenklima an („Sommerbetrieb“ mit offenen Fenstern).

Gleiches passiert nun in umbauten Räumen: wird das Haus weitgehend luftdicht abgeschlossen, so entsteht - neben dem normalen Winddruck - ein erhöhter Dampfdruck. Dieser Dampfdruck ist jedoch nur für relativ geringe Wassertransportmengen „verantwortlich“ (siehe Tabelle unten).

Schließen die Umschließungsflächen allerdings nicht dicht - was meist in den Bauteilfugen und Anschlüssen der Fall ist - so entweicht hier die warme - und teuer aufgeheizte - Luft über Konvektion (was nichts mit Dampfdiffusion zu tun hat). Gleichzeitig werden diese Fugen mit feuchter Luft belastet. Kondensiert diese Feuchtigkeit innerhalb der Fuge, so entsteht ein Bauschaden.

Bei weitgehend luftdichten Gebäuden erhöht sich also der Dampfdruck auf die Innenseiten der Gebäudehülle zwangsläufig. Die eindiffundierende Wasserdampfmenge in  $g/m^2$  Bauteilfläche ist jedoch gering im Verhältnis zu Konvektion. Treten in umbauten Räumen Fugen auf - so kann man die „Dampfdiffusion“, d.h. die Luft- und Feuchtwanderung durch die Umschließungsflächen getrost vernachlässigen. Erst wenn wirklich die „Kunst der Fuge“ beherrscht wird, sind die physikalischen Parameter der Diffusion zu beachten.

In folgender Tabelle ist als Beispiel an einem Dachfeld mit  $6 \times 10$  m mit einer Querfuge von 10 m der stündliche Wasserdampftransport als Vergleich Diffusion zu Konvektion dargestellt.

	Diffusion		Konvektion		Fugenbreite:
	Mittel	Stark	Mittel	Stark	
Diffusionswert	$\Delta Wd = 4g/m^2$ g/h	$\Delta Wd = 4g/m^2$ g/h	$\Delta p = 5 Pa$ g/h	$\Delta p = 20 Pa$ g/h	
$S_d = 1m$	20	40	100	350	1mm
$S_d = 2m$	2	4	200	700	3mm
$S_d = 100m$	0,2	0,4	300	1100	10mm

Randbedingungen:

Innen:  $20^\circ C$  bei 50% r.F.

Außen: Diffusion mittel:  $5^\circ C$  bei 80% r.F.

Diffusion stark:  $-10^\circ C$ , 80% r.F.

Konvektion mittel: Windstärke 1-2

Konvektion stark: Windstärke 3-4

nach IBP Holzkirchen

Der Anteil der Konvektion ist also um Potenzen höher, als der über Diffusion.

Andererseits wird in den Bauteiloberflächen oder in den Möbeln, Büchern, Kleidern, usw. eine insgesamt nicht zu vernachlässigende Menge Wasser(dampf) zwischengespeichert:

Ab- und Adsorption sowie Desorption, (Feuchtaufnahme und -abgabeverhalten) von Bauprodukten, Möbeln und Vorhängen bestimmen somit die Raumluftfeuchte mit.

Die Feuchtwanderung findet weitestgehend an der Oberfläche der Objekte im Austausch mit der Luft (-feuchte) statt. Im Gegensatz zu Temperaturabgabe ist die Sorption bzw. die Desorption relativ langsam.

Durch Sorption wird viel Feuchtigkeit der Raumluft entzogen bzw. kann wieder an die Luft abgegeben werden. Hygroskopische Materialien tragen daher aufgrund ihrer Sorptionsfähigkeit wesentlich zur Dämpfung der schädlichen Feuchtespitzen bei. Kann jedoch die zwischengespeicherte Feuchte über einen Mindestluftwechsel nicht mehr abgegeben werden, so schaukelt sich die Gesamtfeuchte auf.

Beispiel (realistische Situation eines Schlaf- oder Kinderzimmers während der Nacht):

20° warme Raumluft mit 40% rel. Feuchte nimmt bei einer Erhöhung auf 80% r.F. 7 g/m<sup>3</sup> Wasser-(dampf) auf. Ein Quadratmeter tapetezierte und verputzte Wand nimmt bei gleicher Feuchteänderung innerhalb einer Stunde ca. 20g/m<sup>2</sup>, innerhalb von drei Stunden ca. 40g/m<sup>2</sup> Wasser auf; Naturfaserteppich ca. 30 bis 60g/m<sup>2</sup> (nach H. Künzel, FIB).

Dies bedeutet bei einem 15 m<sup>2</sup> großen Raum mit etwa 38 m<sup>3</sup> Raumluftvolumen:

- die Luft nimmt bei Verdoppelung der rel. Feuchte (von 40% auf 80%) etwa 260 g Wasserdampf auf
- die Umschließungsflächen in der ersten Stunde - je nach Oberflächen 1.500 bis 2.000 g.

Daraus ergibt sich, dass mit einmaliger Stoßlüftung der Feuchtegehalt der Raumluft nicht geregelt werden kann, da die Feuchteabgabe der Oberflächen an die Luft viel zu langsam verläuft. Bei Stoßlüftung wird die feuchtwarme Innenluft durch kalte Außenluft (z.B. 0°C und 80% r.F) ersetzt. Diese nimmt bei Erwärmung auf 20°C knapp 5g/m<sup>3</sup> (Luft) Wasser(dampf) auf (50%). Für o.g. Raum bedeutet ein Totalaustausch der Raumluft die Möglichkeit von etwa 190 g Wasseraufnahme, also etwa 10% dessen, was in einer Stunde in den Oberflächenmaterialien eingespeichert wurde. Die Wand bleibt also feucht, kühlt gleichzeitig - vor allem in Fensterlaibungen - ab, wodurch wieder Wasser kondensiert, .... und der Schimmel wuchert.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus falscher Nutzergewohnheit: Wird morgens nicht gelüftet, so muß abends mind. doppelt so lange gelüftet werden, wie dies morgens aus hygienischen Gründen der Fall wäre, da sich tagsüber die gesamte Feuchte in den sorptiven Materialien "verkrochen" hat und nur langsam wieder daraus entfernt werden kann. Dies wissen die Nutzer nicht - und lüften daher abends nicht entsprechend lange, was jedoch notwendig wäre, um die Feuchte zu "entsorgen".

## Kapillare Leitung

Die kapillare Leitfähigkeit beschreibt die Feuchtwanderung in (Bau-)Stoffen.

Als Beispiel: ein Baum hat auch in 30 m Höhe immer noch grüne Blätter (Nadeln), obwohl nach dem Schwerkraftgesetz Wasser eigentlich nicht hinaufsteigen kann. Durch die engen Röhrchen (Kapillare) des Holzes wandert Wasser jedoch wegen der erhöhten Adhäsion (Anhangskraft) nach oben - entgegen der Schwerkraft. Dabei entsteht gleichzeitig ein osmotischer Strom, der die Wasserwanderung fördert. Gleiches geschieht nun in normalen Baustoffen: Die Feuchtigkeit wird durch Kapillare abtransportiert - meist an die Oberflächen, an denen durch Desorption die Feuchtigkeit wieder an die Luft abgegeben wird. Gäbe es diese Feuchtwanderung nicht - die meisten Außenwände wären vollständig durchfeuchtet.

Moderne Dämmkonstruktionen machen sich dies Verhalten von Baustoffen zunutze: Durch diffusionsoffenes Bauen und Einsatz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist es möglich, "verzeihende" Baukonstruktionen zu erstellen, die eine sehr hohe Verdunstungskapazität haben und sich somit selbst (und auch während der Heizperiode - dann nach innen, entgegen dem Dampfdruckgefälle) - austrocknen.

## Konvektion

Wird ein Haus beheizt, so wird auch die Luft erwärmt, die dann nach oben steigt. Es entsteht also in jedem Haus ein „Hochdruckgebiet“ Die Druckdifferenz alleine aus dieser Erwärmung beträgt in ca. 10m Höhe (also im 2.OG bzw. DG) 5 - 6 Pa (Pascal).

Weiter entsteht Luftbewegung auch durch Wind, wobei Luv- und Lee eines Hauses oder Düsenwirkung durch enge oder hohe Bebauung die Windgeschwindigkeiten noch erhöhen.

Ist nun eine Fuge nicht luftdicht abgeschlossen, so entweicht durch die natürliche Thermik so-

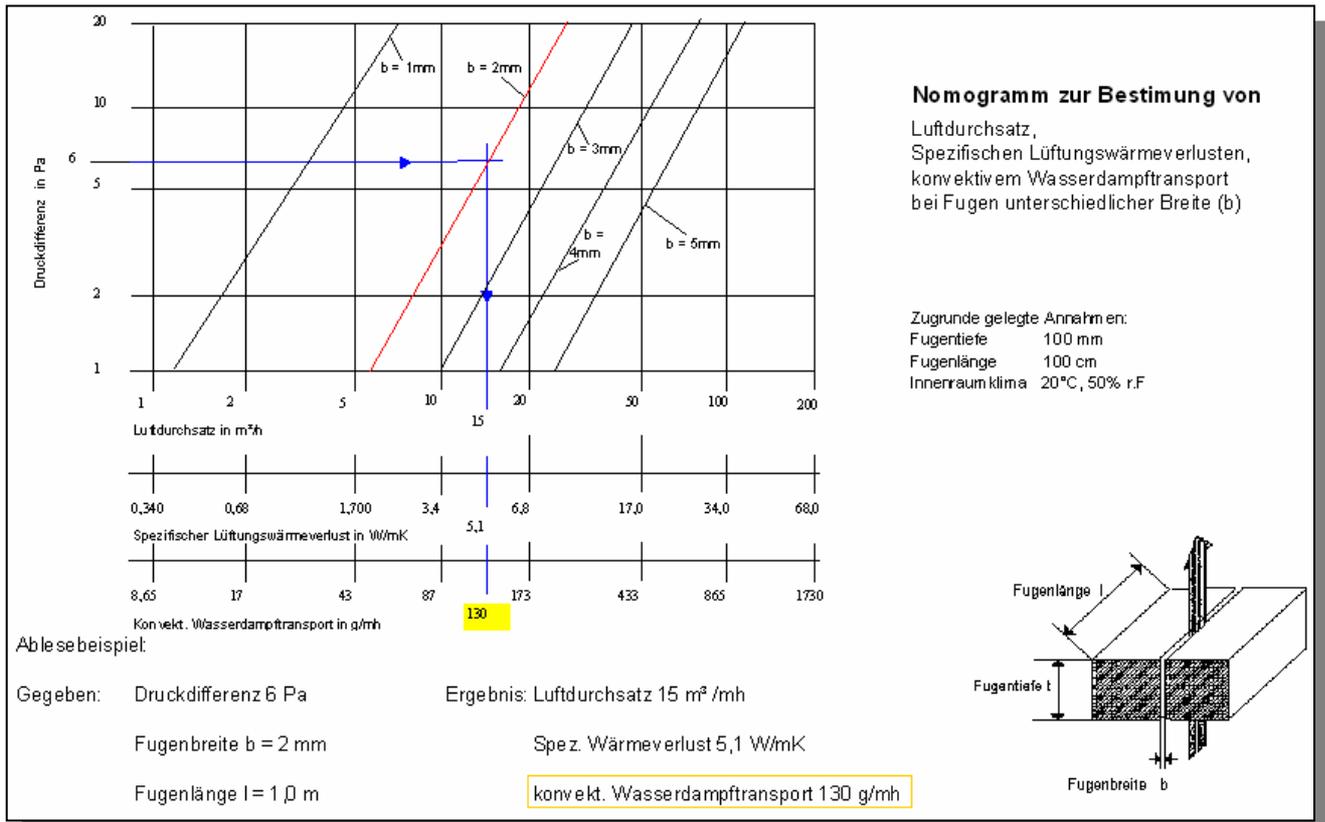
wie durch den Winddruck warme Luft bzw. wird Kaltluft angesaugt.

Die EN 832 gibt in Tabellenform die Gebäudedichtheit an:

An der Luftaustrittsstelle entweicht warme Luft, die mehr Feuchtigkeit gespeichert hat, als die kalte Zone, in die diese Warmluft entweicht, überhaupt aufnehmen kann. Es entsteht über 100% r.F. und damit Kondensat. Gleichzeitig wird auch die Heizenergie nach außen getragen. Das folgende Nomogramm zeigt die Zusammenhänge zwischen Luftdurchgang, Wärmeverlust und Feuchteaustrag.

### Einfamilienhäuser

Abschirmungsklasse	Gebäudedichtheit		
	niedrig	mittel	hoch
Keine Abschirmung	1,5	0,8	0,5
Durchschnittlich	1,1	0,6	0,5
deutliche Abschirmung	0,7	0,5	0,5



### NOMOGRAMM © nach W.H.Pohl

Diese Wärme- und Feuchtwanderung durch undichte Fugen ist wesentlich größer, als die möglichen Diffusionsmengen durch die Umschließungsflächen, allerdings muss dann immer kräftig nachgeheizt werden (während gleichzeitig die Raumluft austrocknet). An der Lufteintrittsstelle wird Kaltluft angesaugt. Dies führt zu unerwünschten Zugerscheinungen („Steckdosenorkanen“).

Aus der luftdichten Gebäudehülle entstehen nun Gefahren, wenn eine Fuge offen bleibt. Diese letzte Fuge ist bei Luftaustritt hohen Feuchtebelastungen ausgesetzt.

**Daher muss konsequent bis zu Ende luftdicht gebaut werden, sollen Schäden vermieden werden.**

In der gleichen Norm kann mit Hilfe einer Formel (Formel 9) der Luftvolumenstrom durch Undichtigkeiten ermittelt werden.

### Mehrfamiliengebäude

mehr als eine windexponierte Seite			nur eine windexponierte Seite		
niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
1,2	0,7	0,5	1,0	0,6	0,5
0,9	0,6	0,5	0,7	0,5	0,5
0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Wie in obiger Tabelle wird dabei unterschieden in Gebäuden mit mehr als einer exponierten Fassade (freistehendes Haus) oder mit nur einer exponierten Fassade (geschlossene Bebauung bzw. Mehrfamilienhäuser).

Folgende Rechenergebnisse ergeben sich bei einem Gebäude mit 500 m<sup>3</sup> Luftvolumen und einem geprüften n<sub>50</sub>-Wert (die Luftleckrate ist also bei allen Gebäuden gleich):

Fall a) mehr als eine exponierte Fassade (freistehendes Haus)

"Abschirmungsklasse"	Luftvolumenstrom (Luftwechselrate) h <sup>-1</sup>
Gebäude in offenem Gelände	1,0
Gebäude im Gelände mit Bäumen oder in bebauten Gebieten, vorstädtische Bebauung	0,5
Durchschnittlich hohe Gebäude in Stadtkernen, Gebäude in Wäldern	0,2

Fall b) nur eine exponierte Fassade (geschlossene Bebauung, Mehrfamilienhäuser)

"Abschirmungsklasse"	Luftvolumenstrom (Luftwechselrate) h <sup>-1</sup>
Gebäude in offenem Gelände	0,07
Gebäude im Gelände mit Bäumen oder in bebauten Gebieten, vorstädtische Bebauung	0,03
Durchschnittlich hohe Gebäude in Stadtkernen, Gebäude in Wäldern	0,01

Berechnungen (F9) nach EN 832; J. Brandhorst

Die Vorgaben der EN 832 entsprechen somit nicht den eigenen vorgeschlagenen Rechenwegen und sind eher als Wunschdenken oder als Angaben für den hygienisch notwendigen Luftwechsel zu sehen, da die realen Luftwechsel unter Praxisbedingungen in der Regel niedriger sind!

Somit ist - zumindest in geschlossener Bebauung mit hoher Luftdichtung und nur einer exponierten Fassade - der hygienisch notwendige „natürliche“ Luftwechsel in den meisten Fällen gar nicht gegeben! Dies ist auch logisch, da Geschoßwohnungen i.d.R. mit einer dichten Wohnungseingangstür mit Rauch- und Schallex ausgestattet sind. Ein Luftaustausch durch Fugen oder durch Fensterlüftung ist mangels Luv und Lee nun einmal nur begrenzt möglich.

(Beispiel Ein Mehrfamilienhaus in freier Lage, mit 2 (exponierten) Fassaden, einem n<sub>50</sub>-Wert = 1h<sup>-1</sup> muß bereits aus hygienischen Gründen 6 x täglich je 30 Minuten gelüftet werden! [Prof. Dr. W. Richter, TU Dresden in: Luftwechselproblematik im Niedrigenergiehaus] Ein gleich dichtes

Gebäude - jedoch in geschlossener Bebauung oder in windgeschützter Lage - muß entsprechend mehr gelüftet werden, was durch Fensterlüftung durch den Nutzer nur schwerlich erfolgen kann).

Aus wohnhygienischen Gründen muss also – wenn durch den Nutzer eine regelmäßige Lüftung nicht sicher gestellt werden kann – in Gebäuden mit nur einer exponierten Fassade eine Lüftungsanlage eingebaut werden.

## Der Wärme- und Feuchtehaushalt von Gebäuden (Wohnhäuser) - früher und heute

Bis zum 2. Weltkrieg gab es - je nach geografischer Lage - Einzelöfen, Kachelöfen oder Hypokaustenheizung. Es wurde so geheizt, dass mittags oder/und abends zumindest die „Stube“ warm war. Dabei gab es in den Häusern oder Wohnungen die unterschiedlichsten „Wärmezonen“ von sehr warm direkt am Ofen bis völlig unbeheizt; das individuelle Wärmebedürfnis der Bewohner wurde durch entsprechenden Aufenthalt, die Tätigkeit bzw. der Kleidung geregelt.

Bis in die 80er Jahre (1. WschVo von 1977) gab es keine Anforderungen an den Wärmeschutz eines Gebäudes (aus dem Mindestwärmeschutz nach DIN 4108 aus hygienischen Gründen). Je nach Lage des Hauses und der regionalen Baukultur wurde ein Wärmeschutz eingebaut, ohne dass dieser genauer definiert war.

Durch die Einführung der ersten Wärmeschutz-Verordnung wurden höhere Ansprüche an die wärmedämmende Hülle der Gebäude gestellt. Gleichzeitig wuchsen die Ansprüche der Nutzer an die Wohnräume. Größer, heller, schöner, bequemer, sich selbst regulierend, usw.. Auch das Nutzerverhalten änderte sich mit der Zeit: der „Zweitverdiener“anteil wurde größer, die Räume wurden tagsüber weniger genutzt.

Die Gebäudehülle veränderte sich anfänglich an den Fenstern (Doppelverglasung) sowie teilweise im Dachbereich (Wärmeschutzverordnung). Damit einher ging die Änderung der Heizung von Einzelöfen (Holz, Kohle, Öl, Gas) zur Zentralheizung mit Heizkörpern (in Heizkörpernischen).

Durch die Zentralheizung wurde es erstmals ohne großen Aufwand möglich, die ganze Wohnung zu beheizen. Wurde es zu warm in der Wohnung, öffnete man ganz einfach die Fenster. Das Bewußtsein, die Temperatur über

Heizkörperventile zu regeln, d.h. "Energie zu sparen" war i.A. noch nicht vorhanden.

Durch das "Dauerheizen" wurde verständlicherweise die relative Luftfeuchte erheblich niedriger, als dies vorher der Fall war. Die zu trockene Luft wurde nun durch Luftbefeuchter wieder aufgefuehctet.

Damit aber tauchten die ersten größeren Probleme auf: Warmes stehendes Wasser in diesen Luftbefeuchtern sind hervorragende Bakterien- und Keim-Kultur-Anlagen, die die Schadstoffe durch die langsame Verdunstung an die Raumluft abgeben. (Die ehemaligen „Wasserschiffe“ in den Küchenherden waren wärmer, zumindest einmal am Tag über 60°C, so daß hier die Keime und Bakterien abgetötet wurden.)

Nach der ersten Energiekrise kamen dann Thermostatventile an die Heizkörper, die mittlere Raumlufttemperatur sank wieder beträchtlich. "Energiesparfenster" mit Doppelverglasung und Einhandbedienung wurden eingebaut.

Mit diesen Änderungen kamen dann die Probleme mit feuchten Wänden und Pilzbefall (die es vorher im Allgemeinen nur in un- oder schwachbeheizten Räumen in nennenswertem Umfang gab).

Was geschah nun durch diese Änderungen aus der Sicht der Bauphysik? Warum tauchten nun plötzlich Probleme auf?

Folgende (technische) Einzelmaßnahmen wurden durchgeführt, ohne die Konsequenzen zu erkennen oder zu berücksichtigen:

1. die Strahlungsheizung (der Ofen) wurde durch einen Konvektionsheizkörper ersetzt
2. die "Lüftungsanlage" Ofen/Schornstein wurde abgeschafft
3. die Fenstererneuerung bedeutete gleichzeitig die Abschaffung der bisherigen „Kondensatfalle“ Einfachverglasung
4. das Dämmen der obersten Decke erfolgte relativ luftdicht (Heraklith mit Putz)
5. Einbaumöbel ersetzen frei stehende Schränke - vor Außenwänden aufgebaut bedeutet das eine Innendämmung

Dieses führte zu folgenden Resultaten (Betrachtungszeitraum Heizperiode):

1. Durch den Austausch der Öfen in zentrale Heizungsanlagen änderte sich die Raumlufttemperatur: sie wurde insgesamt wärmer (betrachtet auf die gesamte Wohnung). Verursacht wurde dies durch:

- a) Bequemlichkeit (keinen Brennstoff mehr holen müssen, nicht einzeln anfeuern müssen)
- b) Ersetzen von Wärmestrahlung des Ofens durch „heiße Luft“ der Konvektionsheizkörper (Wärmestrahlung ist lufttemperaturenabhängig und heizt immer. Beispiel: bei Sonne und Wind-stille wird es einem auch bei +- 0°C durch die (langwellige) Sonnenstrahlung warm, gleiche Behaglichkeit stellt sich erst bei einer Lufttemperatur von mind. 18° - 22° ein
- c) nachts durchheizen (eine „Nachtabsenkung“ gab es anfänglich nur durch Drehen eines Rades am Heizkörper, der aber durch Möblierung zum Teil nur schwer erreichbar war und deswegen kaum benutzt wurde
- d) den Austausch der (zugigen und kalten) Fenster durch Doppelverglasung oder zumindest zugfreiere Konstruktionen

2. Durch den Austausch von undichten Fensterkonstruktionen in fugendichte und wärmeschutzverglaste Fensteranlagen und den (relativ) dichten Ausbau der obersten Geschoßdecke oder des Daches wurde neben dem Kaminzug weitere Entlüftungsöffnung geschlossen bei gleichzeitiger (gewollter) Erhöhung der Raumluftfeuchte (da es sich ja gezeigt hatte, daß Zentralheizungen trockene Luft bewirken).

3. Durch die Veränderung der Heizung und der Raumlufttemperatur wurde die absolute Menge Wasser in g/m³ Luft (in Form von Wasserdampf) erhöht. (Wärmere Luft nimmt mehr Feuchtigkeit auf, als kühle Luft.) Gleichzeitig konnte sich Feuchtigkeit nicht mehr in großen Mengen als Kondensat an den Scheiben niederschlagen. Und letztendlich wurde die "Lüftungsanlage" abgeschaltet, die bis dato die verbrauchte, warme und feuchte Luft „entsorgt“ hatte. Der "Abluftmotor" Schornstein wurde zugemauert, die Zuluftöffnungen der Fensterspalten und Leichtbaufugen (Dach, Türen, etc.) wurden geschlossen.

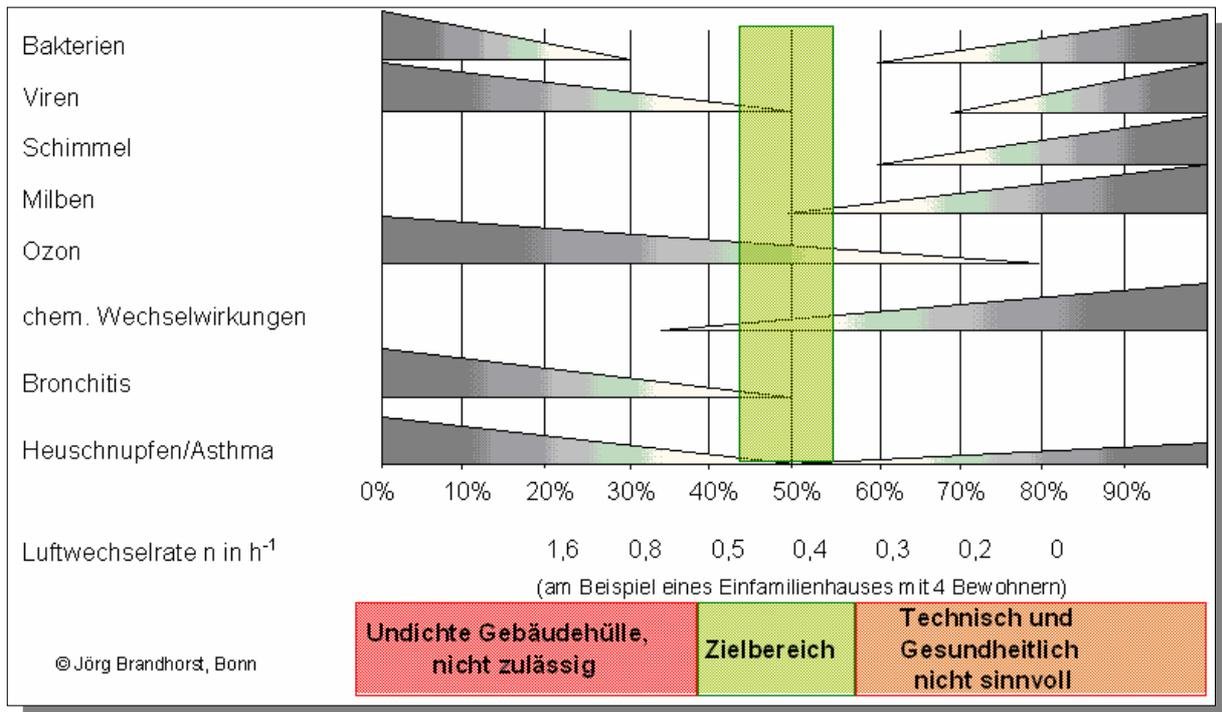
Kalte Bauteile wurden nicht mehr per Wärmestrahlung aufgeheizt und kühlten daher stärker aus.

4. Die Frischluftzufuhr bzw. der Luftaustausch wurde drastisch reduziert.

Wärmetechnisch gesehen waren diese Maßnahmen sicherlich sinnvoll, aus hygienischer

und feuchtetechnischer Sicht ergeben sich jedoch ernste Probleme.

In folgendem Diagramm sind die Belastungen bei verschiedenen Raumlufffeuchten durch Pilze, Keime, Sporen, etc. aufgetragen. Gleichzeitig kann man aus diesem Diagramm den mittleren Luftwechsel (durchschnittliches Einfamilienhaus) ablesen. Hier zeigt sich sehr deutlich der direkte Zusammenhang von Luftwechsel, relativer Luftfeuchte und gesundheitlicher Belastung (siehe auch unten unter "Schimmel").



Dachgeschoss) wurde wie beschrieben die Luftfeuchte erhöht. Dies geschah durch:

- fehlende Kondensationsmöglichkeit (von überhöhter Luftfeuchte) und
- geringere Lüftung

Da nun die Kondensatfläche "Fenster" nicht mehr vorhanden war, suchte die Feuchtigkeit "neue" Wege - und kondensierte an den nun kältesten Flächen.

Dies sind:

© D. Murphy/J. Brandhorst

Bis Anfang der 70er Jahre gab es entschieden zu trockene Luft durch die unregelmäßigen Zentralheizungen. Wegen des relativ hohen Luftaustausches wurden jedoch die Keime, Bakterien und Viren nach außen befördert. Nur in (unbeheizten) Schlafzimmern gab es hier Probleme (weswegen die Bettdecken tagsüber auf das Fensterbrett gelegt wurden, da die solare Strahlung (Wärmestrahlung) und der UV-Lichtanteil diese Krankheitserreger abtöten).

Weiter wurden damals Kalkfarben und Kalkputze eingesetzt, die durch ihre Alkalität pilzwidrig waren.

Es gab daher vergleichsweise wenig Erkrankungen im Verhältnis zu den möglichen Gefahren durch Bakterien, Viren und Keime.

Durch den Einbau neuer Fenster und die Abschaffung der „Lüftungsanlage Kaminofen“ (bzw. offenes Treppenhaus, nicht ausgebautes

- Wärmebrücken (material- oder konstruktionsbedingt)
- schlecht gedämmte Bauteile, wie z.B. Heizkörpernischen
- Bauteilflächen, an denen kalte Luft entlang strömen kann (z.B. Fensterlaibungen bei Kippstellung der Fenster)
- Bauteilfugen (mit ausströmender feuchter Warmluft)
- hinter Einbaumöbeln oder Schränken ohne Hinterlüftung (faktische Innendämmung)

Selbst bei relativ trockener Luft (um 30% r.F.) können an diesen Schwachpunkten erhöhte Feuchtigkeitsprobleme auftreten, da an den kalten Wandoberflächen sich die relative Luftfeuchte stark erhöht (je nach Unterschied zwischen Raumlufftemperatur und Oberflächentemperatur kann die relative Luftfeuchte an Fensterlaibungen 80% oder mehr betragen).

Es kam, wie es kommen mußte, wenn nur Einzelaspekte berücksichtigt und berechnet werden:

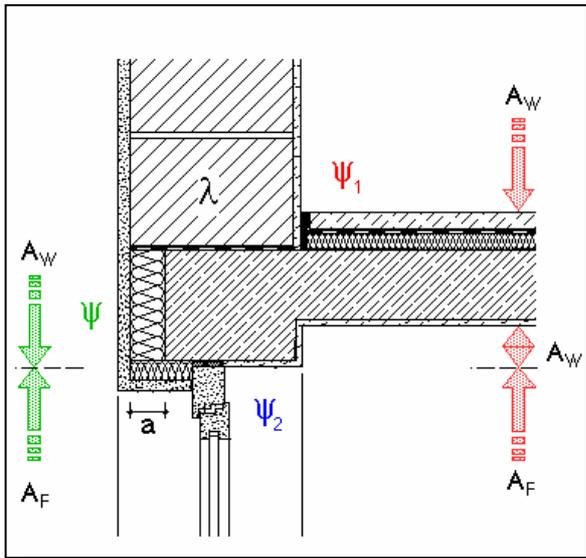
Die Menschen und Gebäude wurden krank - und das gilt unverändert bis heute.



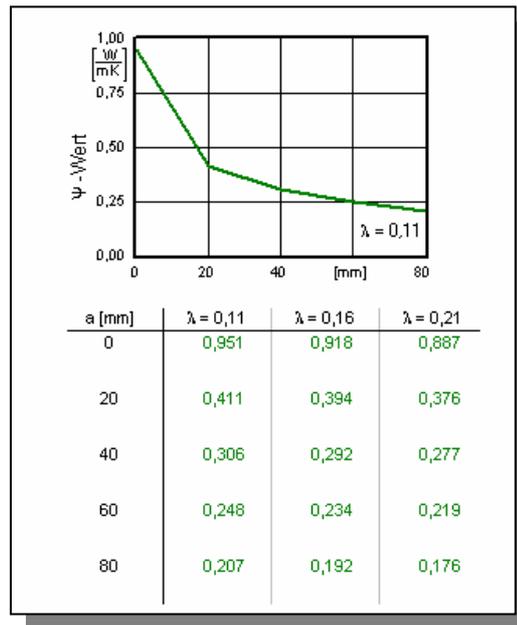
Einbau von neuen Fenstern, ein Jahr nach "Sanierung", Foto Brandhorst

### Wärmebrücken und Feuchteprobleme

Aus hygienischen Gründen ist die Berechnung von Wärmebrücken (einschl. der Ermittlung der Oberflächentemperaturen) bei „schwachen“ Bauteilen erforderlich.



Aus: Wärmebrückenatlas auf CD-ROM (Hauser)



Mit modernen Berechnungsprogrammen ist dies eine zu lösende Aufgabe. Betrachtet man neben den Wärmebrückeneffekten zusätzlich die jeweils entstehenden Innenoberflächentemperaturen, kann bereits in der Planungsphase genaue Auskunft über evtl. gefährdete Konstruktionen gegeben werden. Diese Leistungen sollten im Altbau aus hygienischen Gründen grundsätzlich erfolgen. (DIN 4108-2)

Wird nach EnEV auf eine Wärmebrückenberechnung verzichtet und ein pauschaler Abschlag des U-Wertes der Gebäudehülle von 0,05 bzw. 0,1 W/m<sup>2</sup>K je m<sup>2</sup> Bauteiloberfläche angesetzt, nützt dies leider nichts, wenn dann im Innenbereich an diesen Schwachstellen Schimmel entsteht.

Es sollte Standard sein, dass an der warmen Seite der Konstruktionen an den schwächsten Stellen (Wärmebrücke oder/und Einbaumöbel an Außenwänden) die Wandoberflächentemperatur mind. 12,6°C beträgt (Schimmelpilzkriterium nach DIN 4108-2).

Eine weitere problematische Situation besteht in den Fensterlaibungen.

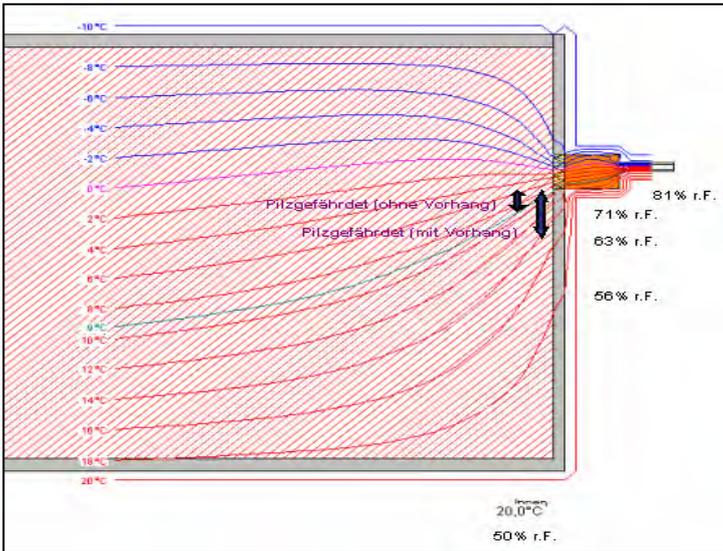
Bei einfach verglasten Fenstern wurde innerhalb der Laibung durch Kondensation an der Glasscheibe die Luftfeuchte reduziert und der Temperatur der Fensternische angepasst. Gleichzeitig wurden bei undichten Fenstern und Ofenbetrieb die Nische mit Kaltluft durchströmt, die bei Aufwärmung zusätzliche Feuchtigkeit aufnahm.

Durch den Wegfall dieser beiden Komponenten verschärft sich die Situation in der Laibung durch den Abfall der Temperatur und - dadurch bedingt durch die Erhöhung der relativen Luftfeuchte: es kommt zu Kondensatbildung in der

Fensterbänke. Dieser Effekt wird umso größer, je dicker das Mauerwerk ist - also auch bei modernen monolithischen Mauerwerkskonstruktionen.

Laibungen in Massivmauerwerk müssen daher - um Kondensatfrei zu bleiben - außen oder innen gedämmt werden.

Zu berücksichtigen ist weiter die Möglichkeit, daß von Seiten des Nutzers ein Vorhang vor die Fensterbänke gehängt wird. Die nachstehende Skizze zeigt die gefährdeten Zonen.



© J. Brandhorst, berechnet mit "Dämmwerk"

Weiter wurde bisher immer davon ausgegangen, daß es nur einen (genormten) inneren Wärmeübergangswiderstand gibt:

$$a_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W},$$

dies entspricht einer Dämmdicke von 0,5 cm  $\ddot{a}D_d$  (= äquivalente Dämmdicke bei WL 040) also 5 mm Dämmstoff der WL 040.

Sind jedoch vor der Außenwand Vorhänge oder Schränke, so ist es einleuchtend, daß der innere Wärmeübergangswiderstand höher sein muß, da es sich ja dabei um eine faktische Innendämmung handelt.

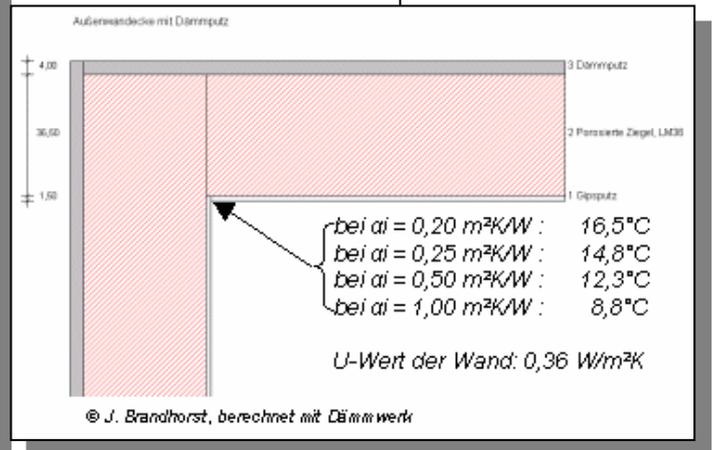
Prof. Dr. E. Cziesielski (TU Berlin) schlägt daher vor, für unterschiedliche Situationen unterschiedliche Rechenansätze anzusetzen: (bei -5° Außentemperatur):

ungestörte Wand:	0,20 m <sup>2</sup> K/W
entspricht	0,80 cm Dämmung (040)
bei Vorhängen:	0,25 m <sup>2</sup> K/W
entspricht	1,00 cm Dämmung (040)
freist. Schränke:	0,50 m <sup>2</sup> K/W
entspricht	2,00 cm Dämmung (040)
Einbauschränke:	1,00 m <sup>2</sup> K/W
entspricht	4,00 cm Dämmung (040)

Geht man weiter davon aus, daß es an Wandoberflächen bis zu 80% r.F. sein kann und möchte man darüber hinaus eine kleine Sicher-

heit haben (Statiker rechnen i.A. mit dreifacher Sicherheit - gesundheitliche Belange bedürfen dies anscheinend bis heute nicht?!), so sollte die Oberflächentemperatur von Außenbauteilen an jeder Stelle 14,6°C nicht unterschreiten! (Die DIN 4108-2 sieht hier 12,6°C vor.)

Da die meisten gefährdeten Stellen konstruktive oder materialbedingte Wärmebrücken sind, sollte es daher - aus wohngygienischen Gründen - zu einer Grundleistung der Architekten gehören, die Oberflächentemperaturen zu berechnen.



© J. Brandhorst, berechnet mit "Dämmwerk"

Aus obiger Skizze geht hervor, daß bei einem frei stehenden Schrank in der Gebäudeaußen-ecke die Grenze erreicht ist, wo es unter schlechten Bedingungen zu Schimmelpilzbefall kommen kann (ohne Berücksichtigung einer dreidimensionalen Wärmebrücke). Einbauschränke führen unweigerlich zu pilzgefährdeten Stellen!

## Schimmelpilz

Pilze und Bakterien sind recht spartanisch, was ihre Lebensbedingungen angeht.

Drei Dinge müssen vorhanden sein:

1. Sie brauchen eine Temperatur von 18-25°C -- diese finden sie in Innenräumen vor.
2. Sie brauchen Feuchtigkeit. Auch dies ist in Innenräumen, wie oben beschrieben, ausreichend vorhanden.
3. Sie brauchen Nahrung. Dabei sind geringe Mengen organischer Substanz ausreichend.

Schimmelpilzsporen sind allgegenwärtig. Finden sie geeignete Lebensumstände, beginnen sie zu wachsen.

Schimmel kann erst dann wachsen, wenn "freies Wasser" (also z.B. Kondensat) auf der Oberfläche oder in oberflächennahen Materialporen vorhanden ist. Dies ist i.A. dann gegeben, wenn Tauwasserniederschläge vorhanden sind. Wei-

ter spielen eine Rolle die (Ab- und Ad-) Sorption, die Desorption, Kapillarität, Regenwasserdichte der Außenhaut, Alkalität der Oberflächenmaterialien, u.a..

In Zusammenhang mit Tauwasser steht immer die relative Luftfeuchte und die Oberflächentemperatur des Bauteils, an dem Tauwasser ausfällt. Eine weitere Situation ist die Abkühlung durch Kaltluft infolge Luftleckagen oder Fenster auf Kippstellung in Fensterlaibungen, da dadurch Bauteilflächen örtlich begrenzt auskühlen bzw. auffeuchten.

Bei Konvektion von Warmluft nach außen infolge einer Luftleckage (offene Fuge) kondensiert an solchen Schwachstellen die feuchtwarme Luft (u.U. erst innerhalb der Konstruktion - es erfolgt eine Befeuchtung von innen - sichtbar u.a. an Pilzbefall von Silikon auf der Fugeinnenseite).

Hier besteht nun die Notwendigkeit, das Nutzerverhalten mit zu berücksichtigen oder/und zu beeinflussen. Falsche Lüftungsgewohnheiten, zu viele Pflanzen, zu wenig geheizte Räume sind in den meisten Fällen Ursache der Schimmelpilzbildung. Nach Meinung des Autors dürfen sich die Bauschaffenden allerdings auf dieser Aussage nicht ausruhen; es gilt zumindest für die Zukunft, Konstruktionen zu entwerfen, die dieses Pilzwachstum gar nicht erst ermöglichen.

Dies verlangt jedoch ein differenziertes Herangehen - nicht nur bei Wärmebrücken, Heizung oder Lüftung sondern auch bei dem Aufbau der Außenwände und deren wärme- und feuchte-technischen Berechnungen.

Die biologischen Luftschadstoffe nennt man Microbial Volatile Organic Compounds (MVOC), übersetzt heißt dies "Flüchtige Organische Verbindungen aufgrund mikrobieller Aktivität". Diese Begriffsbestimmung wurde in Anlehnung an die Volatile Organic Compounds (VOC) gewählt. Letztere haben ihre Ursache hauptsächlich in der Ausgasung von Schadstoffen aus Einrichtungsgegenständen und Baustoffen.

Es handelt sich also um Schadstoffe, die durch das Wachstum von Pilzen und Bakterien entstehen.

Wie jeder lebende Organismus haben auch Pilze und Bakterien einen Stoffwechsel, sie nehmen Nahrung auf und scheiden (Abfall-) Produkte aus. Bei diesen Ausscheidungen handelt es sich u. a. um Alkohole, die in die Umgebungsluft übergehen.

Bei Pilz- und/oder Bakterienwachstum werden Sporen und Stoffwechselprodukte produziert. Durch diese Pilz- oder Bakterienbelastung entstehen verschiedene Krankheiten, so u.a.:

- Infektionen durch die vorhandenen Pilze oder/und Bakterien. Diese Form der Erkrankung ist jedoch äußerst selten und tritt nur in Extremfällen (Immunschwäche) auf.
- Mykotoxikose, häufig verwechselt mit "Allergische" Reaktion auf Sporen oder Stoffwechselprodukte. (Es ist keine Allergie, denn es handelt sich hierbei um eine Abwehr von krankmachenden Fremdstoffen durch das Immunsystem. Bei einer Infektion wird i.A. "der Feind besiegt". Bei einer ständigen Belastung ist nicht mit einem Abklingen der Krankheitssymptome zu rechnen. Der Körper kämpft daher ständig gegen den Einfluß an mit der Folge von "ungenauen" Krankheitsbildern. Ein Arzt stellt i. A. geringe Entzündungszeichen fest, meistens diagnostiziert er jedoch, daß der Patient völlig gesund ist. Der Betroffene ist hingegen anhaltend krank. Schulmedizinisch wird viel zu häufig die Mykotoxikose mit einer Allergie verwechselt, da die Symptome wie Bronchitis, Asthma, Hautreizungen, Augenbeschwerden, Muskelschmerzen oder chronische Erschöpfungszustände i.d.R. (nach Meinung der Schulmedizin) auf eine Allergie hinweisen. Nachweisen läßt sich eine Veränderung der weißen Blutkörperchen und des Immunsystems. Zu einem brauchbaren Ergebnis kommt man jedoch erst dann, wenn nicht nur der Patient, sondern auch die befallene Wohnung untersucht wird.
- Weiter stellt sich - nach langanhaltender Belastung - die echte Allergie in Verbindung mit der Mykotoxikose ein, wenn der Körper mit der Dauerbelastung nicht mehr fertig wird.

Bei Verdacht auf eine Schimmelpilz- oder Bakterienbelastung sollten folgende Maßnahmen ergriffen werden:

1. Bestimmung des sichtbaren Befalls durch Abklatschmethode oder besser durch Materialuntersuchung.
2. Bestimmung der Luftbelastung durch Luftkeimsammlung.

Es sollten immer beide Untersuchungsmethoden eingesetzt werden, da sichtbare Kolonien nicht unbedingt Sporen werfen und andererseits Sporen aus nicht sichtbarem Bewuchs in der Raumluft vorhanden sein können.

Manchmal führen diese Untersuchungen im Sinne der Gesundheit der Bewohner nicht zu einem Erfolg, da die Stoffwechselprodukte mit diesen Messmethoden nicht erkannt und gemessen werden können. Selbst bei okkultem (nicht sichtbarem) Befall (z.B. unter einer Tape-

te) sind die Ausscheidungsprodukte in der Raumluft vorhanden.

Leider gibt es derzeit noch kein verifizierbares Messverfahren, das allgemein anerkannt ist. In solchen Fällen kann man z.B. mit Schimmelpilzspürhunden weiteren Schadstoffquellen ermitteln.

Die weitere Sanierung hängt ab von

- a) der Größe des Befalls
- b) der Gattung (Gefährdungsklasse) sowie
- c) der Art und Weise des Baumangels.

Dabei sind die einschlägigen Vorschriften einzuhalten (siehe z.B. Unterlagen der Energieagentur NRW).

## Schlussbetrachtung

Ein sinnvoller Wärmeschutz erfordert zwingend eine hohe Luftdichte der Gebäudehüllen.

Ein Gebäude ist jedoch ein komplexes System, in dem man nicht Einzelmaßnahmen (z.B. die Luftdichtigkeit) durchführen kann, ohne daß an anderer Stelle Probleme auftauchen (z.B. überhöhte Feuchtigkeit). Diese "Fehler" lassen sich auch nicht z.B. durch nachträgliches Entfernen von Gummilippendichtungen der Fenster beheben, da dadurch keine - dem Nutzen angepaßte - Lüftung gewährleistet ist - es fehlt der „Motor“ - früher der Kamin, heute ein E-Motor.

*Auch wird nicht berücksichtigt, daß durch luftdichte Bauweise die letzte offene Fuge, die bleibt oder die durch den Nutzer versehentlich hergestellt wird, unweigerlich zu Bauschäden führen muß, da an dieser Stelle konzentriert ein Luftein- bzw. -austritt entsteht (s.o.).*

Nachhaltiges, d.h. langlebiges und schadenfreies Bauen ohne gesundheitliche Schädigung der Bewohner ist aber grundsätzlich möglich.

Werden die richtigen Baustoffe eingesetzt und miteinander kombiniert - **und** - wird der Nutzer aufgeklärt, wie er sich zu verhalten hat (und hält er sich auch daran), ist ein Schaden im Allgemeinen nicht zu erwarten.

Werden jedoch Bauprodukte eingesetzt, die nicht zueinander "kompatibel" sind, so sind Schäden unausweichlich. Selbst eine Lüftungsanlage wird solche Konstruktionen nicht retten können.

Nach Meinung des Autors sind die Wege aus der Krise eigentlich einfach - wenn wir es denn wollen.

Diese können mit folgenden Begriffen kurz zusammengefaßt werden:

- Schadstofffreie bzw. -arme Bauprodukte einsetzen

- Gut dämmen und damit
- Warme Innen-Oberflächen schaffen
- Wärmebrücken reduzieren
- Heizflächen mit hohen Strahlungsanteilen einsetzen
- Lüftungsanlagen einbauen
- "Verzeihendes" Bauen, d.h. Diffusionsoffen mit sorptiven Bauprodukten
- Reduzieren der „rechnerischen“ Lösungen in der Architektur; Hinwendung zu bewährten und langlebigen Konstruktionen
- Energieverträglich (solare Ausrichtung, Vermeidung von Windschneisen, etc.)
- Ausbildung in Uni, FH, Meisterschulen, Berufsausbildung, etc. dem notwendigen Wechsel der Baukultur (gesundes Wohnen, schadstoffarm, energiegerecht, nutzergerecht, usw.) anpassen, Ökobilanzen integrieren
- Nutzeraufklärung
- „Betriebsanleitungen“ mit Wartungsplänen erstellen
- Nutzerverhalten berücksichtigen

Für die Zukunft ist es wichtig, eine erhöhte Sensibilität im Bereich der Materialwahl und der Baukonstruktion zu entwickeln, damit die gesundheitlichen Belastungen aus umbauten Räumen möglichst gering gehalten werden können. Dies ist auch im Sinne einer nachhaltigen Bauwirtschaft, die z.B. Stoffströme von fragwürdigen Verbundbaustoffen mit berücksichtigt.

Für notwendig hält es der Autor, daß Dämmung und Lüftung im Gesamtkonzept des Gebäudes geplant werden. Eigenleistungen oder/und ungeplante "zufällige" Ausführungen führen i.d.R. zu massiven Problemen.

**Weiterführende Unterlagen und Literatur erhalten Sie über:**

Arbeitskreis Ökologischer Holzhausbau (AKÖH)  
Stedefreunder Str. 306  
32051 Herford  
Tel.: 05221 - 34 79 43

Energieagentur NRW  
REN-Impuls Bau und Energie  
Kasinostr. 19-21  
42103 Wuppertal  
Tel.: 0202 - 245 52 60

Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) Holzkirchen  
PF 1152  
83601 Holzkirchen  
Tel.: 08024 - 643 - 0

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe,  
Hofplatz 1  
18276 Gülzow  
Tel.: 03843 - 69 30 - 0

C.A.R.M.E.N. e.V.  
Technologiepark 13  
97222 Rimpfing  
Tel.: 09365 - 8069-0

IRB-Verlag,  
PF 80 04 69  
70504 Stuttgart,  
Tel.: 0711 - 970-2500

Technische Universität Dresden  
Fakultät Architektur  
Institut für Bauklimatik  
01062 Dresden

**Literatur:**

Prof. Dr. Dipl.Ing. Klaus Sedlbauer:  
Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen  
TU Stuttgart, Lehrstuhl Bauphysik

DIN - Dt. Institut für Normung - Normenausschuß  
Bauwesen, Koordinierungsausschuß KOA 03:  
"Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz"

AKÖH: Bauprodukte - Positivliste

IBP: Diverse Veröffentlichungen

IRB-Verlag: Diverse Veröffentlichungen zu Schaden-  
freiem Bauen und Bauschäden

TU Dresden, Institut für Bauklimatik:  
Tagungsband:  
"10. Bauklimatisches Symposium", 1999

Umweltbundesamt und Landesgesundheitsamt  
Baden-Württemberg:  
Sanierungsrichtlinien Schimmelpilz

Biostoffverordnung

TRBA 460 (techn. Regeln biol. Arbeitsstoffe);  
Einstufung von Pilzen in Risikogruppen

TRBA 461; Einstufung von Bakterien in Risiko-  
gruppen

TRBA 500; Allg. Hygienemaßnahmen: Min-  
destanforderungen

TRGS 540 (techn. Regel Gefahrstoffe);  
Sensibilisierende Stoffe

TRGS 907; Verzeichnis sens. Stoffe

TRGS 908; Begründung zur TRGS 907