

## **BAUPHYSIK**

Protokollband der 11. Sitzung  
des Arbeitskreises  
**ENERGIEBERATUNG**  
am 26. September 1988

Der Arbeitskreis ENERGIEBERATUNG  
wird im Auftrag des Hessischen Ministers  
für Wirtschaft und Technik durchgeführt.  
Die in diesem Protokollband  
veröffentlichten Ergebnisse wurden im  
Auftrag des Hessischen Ministers für  
Wirtschaft und Technik zusammengestellt.

Herausgeber: Dipl.-Ing. Michael Rentz

Darmstadt, Mai 1991

## **Bauphysik**

Protokollband der 11. Sitzung  
des Arbeitskreises ENERGIEBERATUNG  
am 26. September 1988

Der Arbeitskreis ENERGIEBERATUNG wird im Auftrag des Hessischen Ministers für Wirtschaft und Technik durchgeführt. Die in diesem Protokollband veröffentlichten Ergebnisse wurden im Auftrag des Hessischen Ministers für Wirtschaft und Technik zusammengestellt.

Herausgeber: Dipl.-Ing. Michael Rentz

Darmstadt, Mai 1991

Tagungsorganisation: Gudrun Rühl

Schreibarbeiten: Birgit Weingärtner

Reprotechnik: Reda Hatteh

1. Auflage

Darmstadt im Mai 1991

ISBN-R.: 3-927846-08-2

Institut Wohnen und Umwelt

Annastraße 15

6100 Darmstadt

Tel.: (0 61 51) 29 04 - 0

## Inhaltsverzeichnis

## Seite

Bauphysik - was Energieberater zusätzlich zu beachten haben  
(Kurzfassung des Vortrags von Prof. Dr. G. Hauser, GH Kassel;  
von M. Rentz)

1

Dipl.-Ing. Norbert Stärz, Fa. Solarplan, Darmstadt  
Ökologisches Bauen trotz Bauphysik?

15

Dipl.-Ing. Reinhard Lamers, Aachener Institut für Bauschadens-  
forschung und angewandte Bauphysik  
Bauschäden, Schadensursachen und Nutzerverhalten  
(Diavortrag)

Dipl.-Ing. Michael Rentz, Institut Wohnen und Umwelt GmbH,  
Darmstadt  
Rechenverfahren, Luftfeuchte und Vorschriften

29

Nachwort "Ökologisches Bauen"  
(Dipl.-Phys. Wolfgang Feist, Institut Wohnen und Umwelt GmbH,  
Darmstadt)

43

# Bauphysik - was Energieberater zusätzlich zu beachten haben

(Kurzfassung des Vortrags von Prof. G. Hauser, GH Kassel; von M. Rentz)

Um Bauschäden als Folge von Energieeinsparmaßnahmen zu vermeiden, müssen Energieplaner neben dem Energieverbrauch andere Dinge, die im Bauwesen von Bedeutung sind, zusätzlich beachten. Bauphysik ist dabei eine wichtige Randbedingung. Bauphysik beinhaltet Brandschutz, Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz und Tageslichttechnik. Die Themengebiete greifen ineinander: Wärmeschutztechnische Maßnahmen beeinflussen den Feuchteschutz und den Schallschutz, und bei speziellen Konstruktionen (z.B. Wintergärten) kann auch die Versorgung des Gebäudes mit Tageslicht durch energieeinsparende Maßnahmen verändert werden. Die einzelnen Berührungspunkte zwischen Bauphysik und energieeinsparenden Maßnahmen werden im folgenden angesprochen, wobei der Schwerpunkt in den Gebieten Wärme- und Feuchteschutz liegen wird.

## Brandschutz

Wenn wärmeschutztechnische Maßnahmen ergriffen werden, handelt es sich in erster Linie um Dämmmaßnahmen. Speziell durch Dämmmaßnahmen kommt man in Bereiche, die den Brandschutz betreffen.

In der DIN 4102<sup>1</sup> werden Baustoffe nach Brandschutzklassen eingeteilt. Mineralische Faserdämmstoffe, Glaswolle und Steinwolle werden in die Bereiche A1 (nicht-brennbar, ohne Nachweis) bis B1 (schwerentflammbar) eingestuft, je nach dem, welche Bindemittel beigefügt sind. Andere Dämmstoffe, wie z.B. Kork oder Kokosmatten, sind der Klasse B2 (normalentflammbar) zugeordnet.

Bei der Auswahl eines Dämmstoffes im Rahmen des baulichen Wärmeschutzes ist das Augenmerk in erster Linie auf die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes zu

---

<sup>1</sup>DIN 4102 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen"

richten, es muß aber zusätzlich beachtet werden, ob ein solcher Dämmstoff im jeweiligen Bereich überhaupt eingesetzt werden darf.

Die Anforderungen, die in der Bundesrepublik gelten, unterscheiden sich von Bundesland zu Bundesland, so daß nicht generell gesagt werden kann, welche Produkte z.B. bei Gebäuden bis zu 2 Vollgeschossen oder bis zu 5 Vollgeschossen eingesetzt werden dürfen.<sup>2</sup>

## Wärmeschutz

### Energiebilanzen und Wärmeströme

Bei der Energiebilanz über ein Außenbauteil im Winter liegt im allgemeinen auf der Innenseite eine höhere Temperatur und auf der Außenseite eine tiefere Temperatur vor. Durch einen Wärmestrom von der warmen zur kalten Seite findet ein Ausgleich statt. Dabei sind innen die Wärmetransportvorgänge der Konvektion und der Wärmestrahlung zu beachten, im Bauteil selbst findet Wärmeleitung und Wärmespeicherung statt, und außen treten Gewinne durch Sonneneinstrahlung und Wärmeverluste durch Konvektion und Wärmeabstrahlung auf, abhängig von der Umgebung des Gebäudes.

Die Hauptaufgabe beim Wärmeschutz besteht darin, die Wärmeleitung durch ein Bauteil möglichst gering zu halten. Andere Wärmeübertragungsvorgänge neben der Wärmeleitung können zwar ebenfalls beeinflußt werden, jedoch sind Maßnahmen wie z.B. beschichtete Folien, die raumseitig angeordnet werden, um den langwelligen Strahlungsaustausch zwischen Raumumschließungsflächen und Außenwand zu reduzieren, wenig effizient im Vergleich zu Dämmmaßnahmen.

Auf der Außenwandoberfläche beeinflußt die Sonneneinstrahlung die Energiebilanz. Diese ist jedoch bei normalen Außenbauteilen relativ wenig wirksam, da die Wärme unmittelbar auf der Oberfläche freigesetzt wird und zum Großteil wieder direkt nach außen abfließt. Die Ausnahme sind hier Konstruktionen, bei denen die Absorption der Sonneneinstrahlung nicht auf der Oberfläche stattfindet, sondern mehr

---

<sup>2</sup> nähere Hinweise enthalten die Landesbauordnungen

im Inneren der Konstruktion (s.a. folgende Seite). Die Wärmeübertragung durch Konvektion wird in erster Linie durch den Wind beeinflusst, ihr Einfluß auf die Energiebilanz wird geringer, je besser das Gebäude gedämmt ist. Der Einfluß der Wärmeabstrahlung kann - besonders bei Flachdächern in klaren Winternächten - relativ stark sein. Hier gibt es bautechnisch jedoch nur wenige Möglichkeiten, etwas zu verändern, da die gegenwärtig verwendeten Baumaterialien praktisch alle Emissionskoeffizienten von der gleichen Größenordnung haben.

### k-Werte und äquivalente k-Werte

In der Praxis wird in der Regel keine komplizierte Energiebilanz erstellt, sondern es wird mit einer sehr viel einfacheren Größe gerechnet, dem k-Wert.

Der Wärmedurchgangskoeffizient (oder auch k-Wert) wird üblicherweise aus in der Norm<sup>3</sup> festgelegten Wärmeübergangskoeffizienten innen und außen und Rechenwerten der Wärmeleitfähigkeit berechnet<sup>4</sup>.

Auch der Effekt, daß Sonnenenergie auf übliche Außenwände auftrifft und dann absorbiert wird, kann relativ leicht mit einem k-Wert quantifiziert werden, dieser muß nur geringfügig modifiziert werden. Durch die Multiplikation des k-Wertes mit einem **Strahlungsgewinnfaktor** erhält man den äquivalenten k-Wert. Der Strahlungsgewinnfaktor hängt von der Gebäudeorientierung ab.

Beispiel: Transmissionswärmeverluste durch ein Dach

$$WV_D = \sum A_D * k_D * S_D$$

$WV_D$ : Wärmeverlust Dach,  $A_D$ : Dachfläche,  $k_D$ : k-Wert der Dachfläche,  $S_D$ : Strahlungsgewinnfaktor, z.B. 0,9 für Dach

---

<sup>3</sup> DIN 4108

<sup>4</sup> Diese Vorgehensweise führt nicht mehr zu richtigen Ergebnissen, wenn die Strahlungsabsorption nicht auf der äußeren Oberfläche, sondern weiter innen stattfindet.

Der Effekt der Sonneneinstrahlung ist bei üblichen Außenwänden und Dächern relativ gering, maximal sind hier etwa 10 % Minderung des k-Werts durch Sonneneinstrahlung möglich (s.o.).

Anders sieht es bei sogenannten **Kollektorwänden** aus. Durch eine einfache Glasscheibe - vor die Wand gestellt - wird bereits eine Absorption innerhalb der Konstruktion erreicht. Der Strahlungsgewinnfaktor reduziert sich durch diese relativ einfache Maßnahme von sonst minimal etwa 0.9 auf einen Wert von 0.6. Wesentlich deutlicher wird die Wirkung, wenn zusätzlich noch ein transparenter Wärmedämmstoff eingesetzt wird. Damit können Strahlungsgewinnfaktoren erreicht werden, die im Bereich von 0 oder sogar darunter liegen.

Als transparente Dämmstoffe werden Acrylglasschaum, Kapillarglas (Aussehen wie aufgeschichtete Glasstrohhalm) oder Glasfaservlies verwendet<sup>5</sup>. Die Probleme liegen hier beim sommerlichen Wärmeschutz. Diese Systeme können nicht ohne Sonnenschutz betrieben werden<sup>6</sup>. Auch hier haben Energieberater nicht nur an die Energieeinsparung zu denken, sondern zusätzliche Randbereiche zu beachten.

Bei **Fenstern** müssen Sonnenenergiegewinne berücksichtigt werden, da der Einfluß der Sonnenstrahlung erheblich sein kann. Allerdings kann auch mit einem äquivalenten k-Wert gerechnet werden, wie im folgenden gezeigt wird.

Die Wärmegewinne einer Verglasung können mit dem Gesamtenergiedurchlaßgrad (oder g-Wert) beschrieben werden. Er gibt an, wieviel der auftreffenden Strahlungsenergie in den Raum gelangt. Diese Wärmegewinne ergeben gemeinsam mit den Wärmedurchgangsverlusten, beschrieben durch den k-Wert, einen äquivalenten k-Wert als Rechengröße. Man erhält ihn, indem man vom tatsächlichen k-Wert das Produkt  $g_F \cdot S_F$  subtrahiert,  $S_F$  ist der Strahlungsgewinnkoeffizient.

$$k_{eq} = k_F - g_F \cdot S_F$$

---

<sup>5</sup> Mit einem sogenannten Aerogel, das seit kurzem auf dem Markt erhältlich ist, können noch wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden, es treten jedoch noch Probleme bezüglich des feuchte-technischen Verhaltens auf (Feuchtigkeit führt zur Verfärbung, damit ändert sich das energetische Verhalten). Bei den vorher genannten transparenten Wärmedämmstoffen liegen bereits langjährige praktische Erfahrungen vor.

<sup>6</sup> Damit ist eine Markteinführung gegenwärtig aufgrund der hohen zusätzlichen Kosten nicht vorstellbar. Es sind Entwicklungen dahingehend im Gange, daß sich durch spezielle Farbschichten, die auf eine Glasscheibe aufgebracht werden, die Transluzenz der Oberfläche temperaturabhängig verändert, sodaß bei hohen Temperaturen die Kollektorwirkung sehr stark abnimmt, hier bleiben jedoch die Entwicklungen abzuwarten.

$S_F$  ist von der Himmelsrichtung abhängig und liegt zwischen  $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  und  $2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Beispiel: Bei einem Fenster mit  $k=2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g=0,8$  und  $S_F=2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  erhält man

$$k_{\text{eq}} = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K} - 0,8 * 2,4 \text{ W/m}^2\text{K} = \underline{0,7 \text{ W/m}^2\text{K}},$$

d.h. dieses Bauteil Fenster verhält sich energetisch gesehen und über die gesamte Heizperiode betrachtet wie ein Bauteil mit einem k-Wert von  $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Auf diese Weise sind die Sonnenenergiegewinne eines Fensters oder einer Verglasung einfach quantifizierbar.<sup>7</sup>

Die Berücksichtigung eines **temporären Wärmeschutzes** in einem äquivalenten k-Wert erfolgt mit der folgenden Gleichung:

$$k_{\text{eq},F} = k_F - g_F * S_F - D * k_F$$

bzw. 
$$WV_F = \Sigma A_F * (k_F - g_F * S_F - D * k_F)$$

Es handelt sich dabei um eine Erweiterung der oben genannten Formel für den äquivalenten k-Wert um das Produkt  $D * k_F$ ; D ist der sogenannte Deckelfaktor<sup>8</sup>.

Hinweis: Der äquivalente k-Wert bekommt einen negativen Wert, wenn über die Heizperiode gemittelt mehr Energie durch das Fenster gewonnen wird als ver-

---

<sup>7</sup> Zur Ermittlung des Strahlungsgewinnkoeffizienten s. Hauser: **Näherungsformel zur einfachen Berechnung von Strahlungsgewinnkoeffizienten**, Bauphysik 10 (1988), Heft 2, S. 43 ff.

<sup>8</sup> Anm.: Der Deckelfaktor kann näherungsweise mit der Gleichung  $D = 0,375 (1 - k_{F+tW}/k_F)$  ermittelt werden. Dabei ist  $k_{F+tW}$  der k-Wert des Fensters mit temporärem Wärmeschutz.

lorenght. Bei Verwendung einer Wärmeschutzverglasung verliert der Einfluß eines (teueren) temporären Wärmeschutzes an Bedeutung.

Mit der vorgestellten Methode lassen sich genaue Berechnungen des Energieverbrauchs eines Gebäudes durchführen, ohne komplizierte Gleichungen einführen zu müssen. Es müssen weiterhin lediglich -äquivalente- k-Werte mit Flächen und Temperaturdifferenzen multipliziert werden.

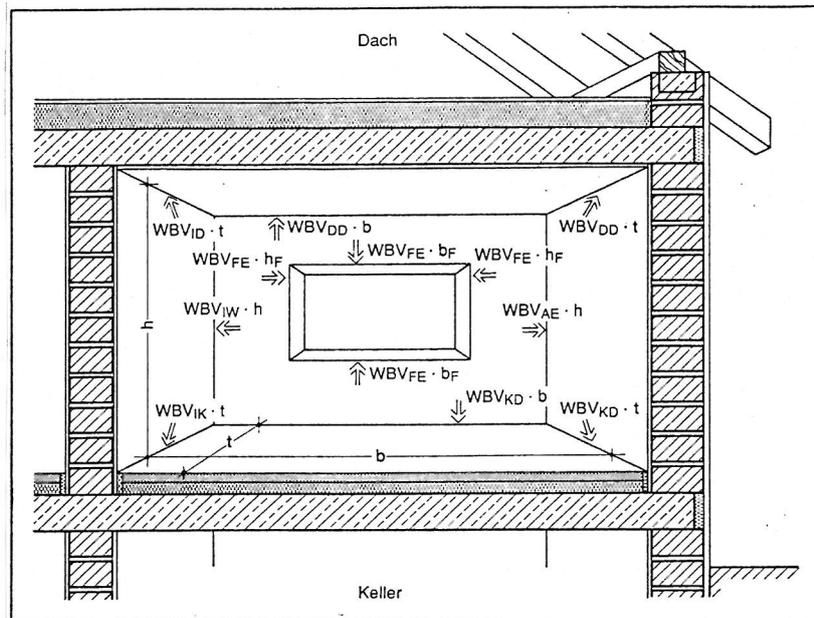
#### Wärmebrücken / -verlustkoeffizienten

Auf ähnlich einfache Weise können auch die Einflüsse von Wärmebrücken quantifiziert und berechnet werden. Wärmebrücken sind Bereiche, in denen unterschiedliche Materialien in der Ebene aufeinanderstoßen oder aufgrund der Geometrie die wärmeaufnehmende Fläche eine andere Größe besitzt als die wärmeabgebende Fläche. Bisher wurden diese zusätzlichen Wärmeverluste in der Regel vernachlässigt. Dadurch können ganz erhebliche Fehler zustande kommen.

Wärmebrücken mit zwei- oder dreidimensionalen Temperatur- und Wärmestromfeldern können mit finiten Elementen- oder Differenzenmethoden berechnet werden, der Zeitaufwand ist jedoch erheblich. Ein wesentlich einfacheres Verfahren zur richtigen Berücksichtigung der Wärmebrücken in der Energiebilanz eines Gebäudes erhält man mit der Einführung **längenbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizienten**, in der folgenden Abbildung mit WBV bezeichnet<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Die WBV-Werte entsprechen den verschiedentlich schon in der Literatur erwähnten  $k_f$ -Werten, also längenbezogenen k-Werten; die Bezeichnung als "k-Wert" führt jedoch zu Verwechslungen und sollte vermieden werden.



Bei  $WBV_{DD}$  bedeutet "DD" in der obigen Abbildung "Dach-Decke",  $WBV_{DD}$  quantifiziert die Verluste dieser speziellen Wärmebrücke. Die  $WBV$ -Werte müssen noch mit der Länge der jeweiligen Wärmebrücke multipliziert werden (s. Abb.), dann erhält man die zusätzlichen Wärmeverluste in diesem Bereich.

Die gesamten Transmissionswärmeverluste (in kWh pro Jahr) beschreibt dann die folgende Gleichung:

$$Q_T = [ \sum k_{eq,i} \cdot A_i + \sum WBV_j \cdot l_j ] \cdot Gt \cdot 0,024$$

Dabei werden die äquivalenten  $k$ -Werte (d.h. Berücksichtigung von Solargewinnen und temporärem Wärmeschutz) mit den jeweiligen Flächen und die Wärmebrückenverlustkoeffizienten mit den Längen der entsprechenden Kanten multipliziert ( $Gt$ : Gradtagszahl).

Die zusätzlichen Wärmeverluste durch Wärmebrücken können bei innengedämmten Konstruktionen erheblich sein und bei Vernachlässigung - besonders bei sehr niedrigen k-Werten der Wände - zu einer Fehlauslegung der Heizanlage führen.

Verluste durch Wärmebrücken können aber auch bei normalerweise wenig wärmebrückengefährdeten Konstruktionen (z.B. zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung) von nennenswerter Größenordnung sein. Auch hier wächst deren relativer Anteil mit dem Grad der Wärmedämmung insgesamt. Beim **zweischaligen Mauerwerk** mit durchgehender Dämmung treten diese Effekte an den Fensteranschlüssen auf<sup>10</sup>.

Auch bei anderen Anschlußdetails läßt sich mit Hilfe der WBV-Werte zumindest entscheiden, ob im Einzelfall bestimmte Wärmebrücken bei der Energiebilanz des Gebäudes berücksichtigt werden müssen oder vernachlässigt werden können. Kataloge der WBV-Werte verschiedenster Anschlußdetails und Ausführungsvarianten sind im Buchhandel erhältlich<sup>11</sup>.

### Feuchteschutz

Im vorherigen Abschnitt wurden ausschließlich die energetischen Wirkungen von Wärmebrücken angesprochen. Im Bereich von Wärmebrücken treten aber auch niedrige Oberflächentemperaturen an Bauteilen auf. Damit ist - als weiterer Bereich der Bauphysik - auch der Feuchteschutz zu beachten.

---

<sup>10</sup> Als Wärmebrückenverlust für ein Fenster mit einem WBV-Wert von 0,4 W/mK, 1 m Höhe und 1,5 m Breite erhält man 2 W/K, dies entspricht den Transmissionsverlusten einer Wandfläche von 6,7 m<sup>2</sup> bei einem k-Wert von 0,3 W/m<sup>2</sup>K.

<sup>11</sup> z.B.:

Mainka, G.-W. / Paschen, H.: **Wärmebrückenkatalog**, Teubner-Verlag, Stuttgart 1986, DM 54.--

Hauser / Stiegel: **Wärmebrückenkatalog für den Mauerwerksbau** Bauverlag, Wiesbaden 1990, DM 120.-

Die verschiedenen Einwirkungspfade von Feuchtigkeit auf ein Bauteil sind

- Schlagregen, der unter einem bestimmten Winkel auf das Bauteil auftrifft,
- Wasserdampfdiffusion,
- Kapillarleitung,
- Oberflächentauwasserbildung
- und Konvektion.

Andere Effekte (z.B. Effusion) sind von untergeordneter Bedeutung. Die wesentlichen Überschneidungsbereiche von Feuchteschutz und Wärmeschutz in Verbindung mit der Tätigkeit eines Energieberaters werden im folgenden angesprochen.

#### Schlagregen:

In Verbindung mit Thermohautkonstruktionen bzw. Wärmedämmverbundsystemen hat es in der Vergangenheit verschiedentlich Probleme mit Schlagregen gegeben. Die Systeme sind jedoch inzwischen so ausgereift, daß diese Probleme als gelöst gelten können.

#### Diffusion und Kapillarleitung:

Mit Diffusion und Kapillarleitung sind hier Wasser- und Wasserdampftransportvorgänge durch ein Bauteil in horizontaler Richtung gemeint. Probleme treten dann auf, wenn es zu dauerhaften Wasseransammlungen innerhalb der Konstruktion kommt. Das ist dann der Fall, wenn mehr Wasser zu einer Stelle hintransportiert wird als von dort aus abfließen kann. Zur Abhilfe werden in der Regel dampfbremsende Schichten verwendet.

### Konvektion:

Ein Effekt, der in den vergangenen Jahren zu sehr vernachlässigt wurde, ist die Konvektion, d.h. feuchtwarme Luftströme, die durch Undichtigkeiten in eine Konstruktion gelangen und in kalten Bereichen zur Tauwasserbildung führen. Dadurch können wesentlich größere Mengen an Wasserdampf in eine Konstruktion gelangen, die transportierte Wassermenge beträgt etwa das Hundertfache der Menge, die durch Diffusion möglich wäre. Daher ist es wichtig, Konstruktionen wirklich dicht auszubilden, um ungewollte Hinterlüftungen und Durchströmungen zu verhindern. Bei Dachaufbauten ist hierauf ein besonderes Augenmerk zu richten.

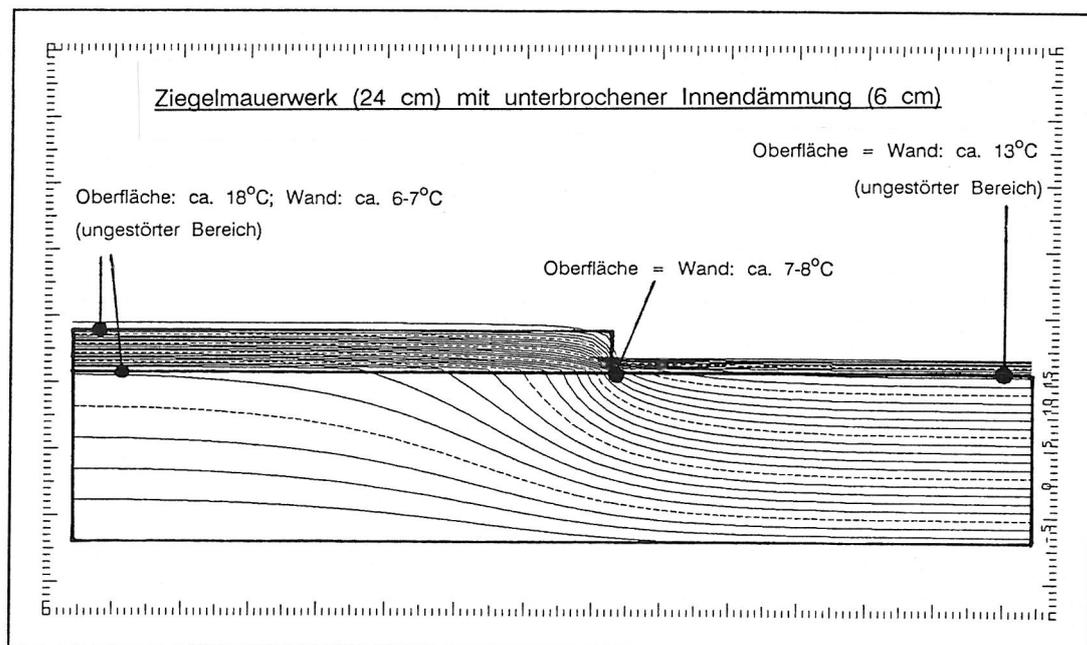
### Tauwasserbildung auf Oberflächen:

Die Tauwasserbildung auf Oberflächen ist in vielen Fällen die Ursache der Schimmelpilzbildung, eines Hauptproblems im Feuchteschutz. Die Schimmelpilzbildung ist nicht nur eine sichtbare, sondern auch eine gesundheitsschädliche Folge des Nichtbeachtens bauphysikalischer Randbedingungen.

Tauwasserbildung setzt ein, wenn die Raumluft sich an kälteren Oberflächen abkühlt und die in der Luft gebundene Feuchtigkeit nicht mehr halten kann. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bauteiloberflächentemperatur und der zulässigen Luftfeuchte. Aus der Sicht des Feuchteschutzes ist die Bauteiloberflächentemperatur immer nur relativ zu niedrig: Wenn aufgrund ungewöhnlicher Nutzung in Wohnungen über mehrere Tage hinweg Raumluftfeuchten von über 90 % gemessen werden, dann ist eine Tauwasserbildung praktisch nicht zu vermeiden.

Abhilfe wird durch eine raumseitige Anhebung der Oberflächentemperaturen geschaffen. Dies ist durch eine verstärkte Beheizung sowie durch eine Verbesserung des Wärmeschutzes möglich. Probleme entstehen durch wärmeschutztechnische Maßnahmen im allgemeinen nicht.

Eine Ausnahme kann die **unterbrochene Innendämmung** darstellen: Durch wärme-schutztechnische Maßnahmen wird im allgemeinen die raumseitige Oberflächentemperatur angehoben, das gilt sowohl für die Innendämmung als auch für die Außendämmung. Der wesentliche Unterschied ist der, daß bei einer Außendämmung die Wand insgesamt **wärmer** wird und bei einer Innendämmung **kälter**<sup>12</sup>. Wird die Innendämmung unterbrochen, dann stößt ein kalter Wandbereich an einen warmen Wandbereich, was dazu führt, daß die warme Wand im Randbereich der Innendämmung durch den benachbarten kalten Wandbereich abgekühlt wird und die Raumoberflächentemperatur dort weiter absinkt, als das ohne Innendämmung der Fall wäre (s. Abbildung).



### Dimensionslose Temperaturen

Wenn man sich oft mit bauphysikalischen Fragen - insbesondere aus dem Bereich der Wärmebrückenproblematik - befaßt, bietet es sich an, mit dimensionslosen Temperaturen zu arbeiten. In Wohnungen oder Gebäuden finden sich oft die gleichen Konstruktionsdetails an verschiedenen Stellen des Gebäudes mit unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen wieder. In dem

<sup>12</sup> da die raumseitige Wandoberfläche dann durch die Oberfläche des Dämmmaterials dargestellt wird und nicht mehr durch die Wand selbst.

bereits erwähnten Wärmebrückenkatalog<sup>13</sup> ist daher jeweils die Außentemperatur mit "0" angenommen und die Innentemperatur mit "1", dies hat den Vorteil, daß das jeweils untersuchte Bauteil mit beliebigen Innen- und Außentemperaturen betrachtet werden kann. Die angegebenen Zwischentemperaturen können jederzeit einfach umgerechnet werden.

Es ist zu erwarten, daß zukünftig verstärkt derartige Details mit Katalogen zu bearbeiten sein werden, da die aufgetretenen Feuchteprobleme in Wohnungen keine einmaligen Probleme nur aufgrund des Einbaus neuer Fenster waren. Bei der Nutzung von Gebäuden wird heute wesentlich mehr Wasser an die Raumluft abgegeben als früher, die Werte sind in den letzten Jahren deutlich angestiegen. Aufgrund einer stärkeren Bepflanzung in den Räumen gibt es mehr Feuchteproduzenten innerhalb eines Gebäudes; dadurch, daß heute mehr geduscht als gebadet wird, entsteht ebenfalls mehr Wasserdampf in den Wohnungen. Es ist mit einer Aufgabe eines Energieberaters, den Nutzer darauf aufmerksam zu machen, daß er, wenn er zu viel Feuchtigkeit in seiner Wohnung produziert, dafür Sorge tragen muß, daß diese Feuchtigkeit auch wieder abgeführt wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß "atmende" Wände in diesem Zusammenhang nicht zu einer Entfeuchtung beitragen, da dieser Effekt - Diffusion durch die Wände - gegenüber dem natürlichen Luftwechsel vernachlässigbar gering ist.

Insgesamt läßt sich sagen, daß die Raumluftfeuchte primär vom Nutzer bestimmt wird, über sein Lüftungsverhalten und über die Feuchteproduktion. Durch die bauphysikalischen Randbedingungen wird jedoch festgelegt, welche praktischen Auswirkungen dieses Verhalten haben wird. Daher ist es für Energieberater wichtig, diese Randbedingungen bewerten zu können.

#### Wintergärten:

Wintergärten sind aus Energieeinspargründen durchaus sinnvoll, auch wenn nicht in dem Maße Energie eingespart werden kann, wie es früher angenommen wurde. Über Wintergärten wird aber nicht nur vorgewärmte Luft dem Raum zugeführt, sondern auch zusätzlich noch vorbefeuchtete Luft. Untersuchungen haben gezeigt,

---

<sup>13</sup>Hauser / Stiegel: **Wärmebrückenkatalog für den Mauerwerksbau** Bauverlag, Wiesbaden 1990

daß die Lüftung über einen Wintergarten, selbst wenn dieser Wintergarten ohne Pflanzen ausgestaltet ist, d. h. trocken ist, die durchschnittliche Luftfeuchte in den benachbarten Räumen um bis zu 10% ansteigen läßt. Bei bepflanzten Wintergärten ist dieser Effekt noch wesentlich deutlicher. Wenn also aus energetischen Gründen ein Wintergarten empfohlen wird, dann ist darauf zu achten, daß direkte Lüftungsmöglichkeiten zwischen dem Raum und der Außenluft vorhanden sind, um hohe Anstiege in der Feuchtigkeit zu vermeiden.

#### Hinterlüftete Konstruktionen:

Zum Abschluß des Kapitels über die Feuchtigkeit soll noch auf eine weitere Besonderheit bei hinterlüfteten Konstruktionen (z.B. Dächer) hingewiesen werden. Lüftungskanäle sind aufgrund des im Verlauf des Kanals eindiffundierenden Wasserdampfs ab einer bestimmten Länge hygri-sch tot, d.h. sie verhalten sich ab dieser Länge wie unbelüftete Konstruktionen. Daher ist auf eine geeignete Unterkonstruktion zu achten. Die in solchen Fällen erforderlichen großen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken lassen sich einfach mit einer Dampfsperre erreichen. Undichtigkeiten wie Fugen, Risse oder nachlässig ausgeführte Randanschlüsse sind unbedingt zu vermeiden.

#### Schallschutz

Auch der Schallschutz wird durch Dämmmaßnahmen beeinflusst. Es gibt Untersuchungen über die Änderung des bewerteten Schalldämmmaßes durch eine zusätzliche Wärmedämmschicht. Als wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen hat sich herausgestellt, daß sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen der Schalldämmung unabhängig von der Art der Wärmedämmung möglich sind. Befestigungstechniken spielen dabei eine Rolle, weiterhin gibt es einen Zusammenhang zwischen der Schallfrequenz und Dämmstoffdicke.

Ein anderer Zusammenhang zwischen Schallschutz und Wärmeschutz besteht in der Schallschutzwirkung eines temporären Wärmeschutzes. Angesprochen ist hier der optimale Abstand zwischen Fensterscheibe und Rolladen.

Aus der Sicht des Wärmeschutzes liegt das theoretische Optimum für diesen Abstand bei etwa 40 mm. Abweichungen wirken sich auf den Energieverbrauch jedoch nur geringfügig aus. Bei einem Abstand von 40 mm ist aber nur eine kaum meßbare Verbesserung des Schallschutzes zu erreichen, eine schalldämmende Wirkung tritt erst im Bereich von 60-80 mm auf. Wenn also durch einen temporären Wärmeschutz auch eine Verbesserung des Schallschutzes erreicht werden soll, muß der Abstand größer als bei einer rein energetischen Optimierung sein, ohne daß sich deswegen die Energieverluste spürbar erhöhen.

### Tageslicht

Das letzte Thema betrifft das Tageslicht. Die Versorgung der Räume eines Gebäudes mit Tageslicht kann auch durch Maßnahmen des Wärmeschutzes beeinflusst werden. Die im Gebäude verwendete Glassorte sowie der Anbau eines Wintergartens beeinflussen die vorherrschenden Verhältnisse.

Daß bei der Auswahl des Glases nicht nur auf den k-Wert, sondern auch auf den Gesamtenergiedurchlaßgrad zu achten ist, wurde bereits im Abschnitt über die äquivalenten k-Werte angesprochen. Eine weitere wichtige Kenngröße ist der **Tageslichttransmissionsgrad**. Dieser sollte über 0,6 liegen, um eine angemessene Tageslichtversorgung zu gewährleisten.

Auch bei der Planung von Wintergärten ist zu beachten, daß der Wintergarten den dahinter angeordneten Räumen Tageslicht nimmt. Aufgrund der Transmission des Glases, der Konstruktionsanteile in Verbindung mit Verschmutzung kann die Minderung der Tageslichtversorgung erheblich sein. Bei zweijährigen Messungen in Fulda wurden in einem Fall innerhalb des Wintergartens nur noch 40 % des außen auftreffenden Energieangebots gemessen.

Dipl.-Ing. Norbert Stärz, Fa. Solarplan, Darmstadt

## Ökologisches Bauen trotz Bauphysik?

Zur Diskussion dieser Fragestellung ist zunächst der Begriff des "Ökologischen Bauens" in der Unterscheidung zum "Normalen Bauen" zu betrachten.

In der Darstellung verschiedener Ströme wird die gegenwärtige überwiegende Verbrauchsstruktur deutlich:

Das "normale Haus" verbraucht Luft, Energie, Wasser, Material, es erzeugt Abluft, Abwärme, Abwasser, Abfälle (vgl. Bild 1, S. 23).

Demgegenüber ergibt sich die Idealvorstellung des "ökologischen Hauses" als eine vollständige Einbindung in den Naturhaushalt.

Das "ökologische Haus mit seinen Bewohnern ist eingebunden in 4 miteinander vernetzte Hauptkreislaufsysteme:

Lufthaushalt - Energiehaushalt  
Wasserhaushalt - Materialhaushalt

Diese Kreislaufsysteme durchdringen das Haus, die Nutzung des Hauses ist in sie eingebunden, ohne daß Schäden verursacht werden (vgl. Bild 2, S. 24).

Diese ganzheitliche Betrachtung von Mensch-Material-Umwelt ist jedoch nicht nur in der Nutzungsphase des Hauses anzuwenden, sondern auch bei der Gewinnung, Herstellung und Beseitigung der Materialien, bei der Bereitstellung von Energie und Wasser.

Dieses Ideal des "ökologischen Hauses" ist offensichtlich nicht realisierbar, die Kreise schließen sich nicht auf einfachem, überschaubarem Weg.

Ziel des ökologischen Bauens ist daher, diesem Ideal soweit wie möglich nahezukommen durch

- weitestgehende Einbindung in den Naturhaushalt
- sparsamen, effektiven Einsatz von Material, Wasser, Energie, Luft

In der Konsequenz des realen Bauens heißt dies, die Zu- und Abgänge zu minimieren; sie sollen sich nicht negativ auf die weitere Umwelt auswirken (vgl. Bild 2).

Allgemeine Ziele des "Ökologischen Bauens" sind also:

- keine nachteilige Beeinflussung der Umwelt
- Schaffung eines Wohn- und Arbeitsbereiches, der frei ist von negativen Auswirkungen auf den Menschen.

Diese Oberziele müssen natürlich konkretisiert werden, um real umgesetzt werden zu können.

Die folgenden Prinzipien, deren Reihung keine Gewichtung darstellt, sind zur Erreichung der Ziele anzuwenden:

- Minimierung des Energieverbrauchs für Heizung durch geeignete Gebäudeausrichtung (Frage des Bebauungsplans) d.h. nach Süden orientiert; Gestaltung des Baukörpers mit kompakter Außenhülle; hochwertiger Wärmeschutz der Gebäudehülle; Anordnung von thermischen Pufferzonen
- Nutzung der Solarenergie durch passive und aktive Systeme, überwiegende Deckung des Warmwasser-Wärmebedarfs durch Solaranlage; Einsatz der Photovoltaik
- Nutzung von Wärme aus Abluft, Abwasser
- Einsatz einer wenig umweltbelastenden Primärenergie zur Deckung des Rest-

- Energiebedarfs, d.h. Gas, evtl. Biogas
- Minimierung des Strombedarfs, z.B. Waschmaschine mit separatem Warmwasseranschluß für solar erwärmtes Brauchwasser
  - Verwendung von Wasserspar-Techniken bei Armaturen, Sanitärausstattung
  - Nutzung von Regen- bzw. Grauwasser, ggf. nach Klärung; Versickerung bzw. Verdunstung über begrünte Dächer
  - Einsatz von Trockentoiletten
  - Getrenntsammlung recyclingfähiger Stoffe, Kompostierung organischer Abfälle

Für die Materialien, die für den Bau sowie Ausbau verwendet werden, gelten die folgenden Prinzipien:

- ohne schädliche Beeinflussung während der Verarbeitung, Nutzung, Beseitigung; aus nicht umweltbelastender Herstellung
- geringer Primärenergieeinsatz bei Herstellung, Transport, Verarbeitung

Ein wesentliches Prinzip ist, ein den Nutzungszweck entsprechendes Material zu verwenden. Als Beispiel sei hier Aluminium genannt, das sehr energieaufwendig in der Herstellung ist. Dieses Material ist durchaus richtig eingesetzt bei Sonnenkollektor-Anlagen mit den Vorteilen einer guten Wärmeleitfähigkeit, des niedrigen Gewichts.

Aluminium ist aber fehl am Platz im Fenster-/Türenbau, ebenso wie Kunststoff oder Holz aus dem tropischen Regenwald. Stattdessen ist hier eine heimische Holzart zu verwenden.

Prinzipien zur Schaffung eines unbedenklichen Wohn- und Arbeitsbereichs, soweit sie nicht bereits vorstehend aufgeführt sind:

- Erreichung einer hohen Innenluftqualität in Bezug auf Temperatur, Feuchte, Luftbewegung sowie Zusammensetzung bzw. Verunreinigung der Luft
- Vermeidung von Materialien, die Gase oder Stäube freisetzen, insbesondere wenn diese gesundheitsgefährdend, kanzerogen oder mutagen sind

--- Verwendung von Materialien, die eine hohe Diffusionsfähigkeit für Feuchtigkeit haben, und somit eine ausgleichende Funktion für den Feuchtegehalt der Raumluft wahrnehmen.

Diese Prinzipien können nicht zum Dogma erhoben werden, vielmehr ist die jeweilige örtliche Situation zu berücksichtigen. Die Bewohner, sprich Nutzer, eines nach ökologischen Prinzipien gebauten Hauses müssen sich in die Kreisläufe integrieren.

Z.B. wird das Streben nach einer hohen Innenluftqualität durch Auswahl natürlichen Materialien bei einem stark rauchenden Bewohner zur Farce.

An diese grundsätzliche Darstellung der Prinzipien des "ökologischen Bauens" möchte ich ein Beispiel des "ökologischen Sanierens" anschließen.

Ein wesentliches Anliegen des ökologischen Bauens bzw. Sanierens ist die Verringerung bzw. Minimierung des Heizenergieverbrauchs, wobei in der Regel gleichzeitig die für die Wohnqualität bedeutende Temperatur der Innenoberfläche der Außenwand angehoben wird.

Im Fall der Sanierung eines Altbaus mit denkmalgeschützter bzw. schützenswürdiger Außenfassade, oder auch bei Maßnahmen durch Mieter, kommt eine aus verschiedenen Gründen effektivere Außendämmung nicht in Betracht, sondern eine sogenannte Innendämmung.

Unter Anwendung der Prinzipien des ökologischen Bauens sowie den Maßgaben der anzuwendenden DIN-Normen, insb. DIN 4108, ist nur eine Lösung dieser Aufgabe möglich, die in einer im folgenden vom Verfasser "Unbedenklichkeitsliste" genannten Aufstellung der DIN 4108 Teil 3 enthalten ist (Bauteile mit ausreichendem Wärmeschutz, für die kein rechnerischer Nachweis des Tauwasserausfalls erforderlich ist):

Die raumseitige Anbringung von Holzwolle-Leichtbauplatten, Innenseite verputzt.

Die Verwendung von Mineralfaserdämmstoffen, natürlichen Dämmstoffen (z.B. Kork) bei Einsatz einer raumseitigen Dampfsperrschicht sowie von Polystyrolprodukten ist zwar möglich, entspricht aber nicht den vorne genannten "ökologischen Prinzipien" (Mineralfaser wegen lungengängiger Feinstäube, möglicherweise kanzerogen; Polystyrol wegen Restgehalten von Styrol, kanzerogen, hoher Energieaufwand bei Herstellung, Brandverhalten; Dampfsperrschicht wegen möglicher negativer Beeinflussung des Raumklimas, Art des Materials).

Führt man für eine solche mit Holzwolle-Leichtbauplatten gedämmte Außenwand eine Dampfdiffusionsberechnung durch, erhält man das in Bild 3 dargestellte Ergebnis (S. 25). Der k-Wert der gedämmten Wand beträgt  $0,6 \text{ W/qmK}$ , die errechnete Tauwassermenge  $1,51 \text{ kg/qm}$ , die Verdunstungswassermenge  $1,71 \text{ kg/qm}$ .

Dieses Beispiel macht deutlich, daß in der DIN 4108 nach der "Unbedenklichkeitsliste" Konstruktionen zulässig sind, die den an anderer Stelle in der gleichen DIN aufgeführten Anforderungen (z.B. Tauwassermenge kleiner als  $1 \text{ kg/qm}$ ) nicht genügen.

Die Aufnahme als dennoch bauphysikalisch unbedenkliche Konstruktion erfolgte aufgrund der baupraktischen Erfahrung, daß hier keine schädliche Tauwasserbildung auftritt. Dies gilt in ähnlicher Form für die anderen in der "Unbedenklichkeitsliste" enthaltenen Bauteile.

Bislang wird bei der Diskussion von Feuchtigkeitsströmen bzw. Tauwasserausfall die DIN 4108, d.h. die Dampfdiffusion zugrundegelegt.

Neuere Betrachtungsweisen, die auch im Rahmen dieses Arbeitskreises bereits angesprochen wurden, machen deutlich, daß Dampfdiffusion nur eine kleine Rolle spielt; daß Luftströmungen und nicht Dampfdiffusion fast immer der Grund starker Kondensaterscheinungen ist. Diese Luftströmungen treten insbesondere bei Leichtbaukonstruktionen im Wand- und Dachbereich auf.

Das Glaser-Verfahren, dem die DIN 4108 zugrundeliegt, berücksichtigt jedoch nur die Wasserdampfdiffusion. Daneben tritt jedoch in verschiedenen Materialien ein kapillarer Wassertransport auf, dessen Leistungsfähigkeit wesentlich größer ist als der der Dampfdiffusion. Im Normalfall überlagern sich die unterschiedlichen Trans-

portmechanismen, sie verlaufen aber nach unterschiedlichen Gesetzen.

Flüssige Feuchtigkeit zieht mit Hilfe von vorhandenen Kapillarkräften dorthin, wo es relativ trockener ist; Wasserdampf diffundiert dorthin, wo es absolut trockener ist.

Gerade in der Tauperiode ist dies der Fall, wo aufgrund des raumseitig höheren Partialdruckes gegenüber außen ein entsprechender Diffusionsstrom nach außen erfolgt. Im Fall ausreichender Feuchtigkeit sowie bei kapillar wirksamen Poren im Bauteil ergibt sich ein nach innen gerichteter Kapillarstrom, da es innen relativ trockener ist, die Feuchtigkeit verdunstet an der Innenoberfläche. Die Kondensation von Feuchtigkeit in den Kapillaren beginnt, je nach Geometrie der Kapillare, bereits bei einer relativen Feuchte von ca. 80 %.

Die Randbedingungen während der Tauperiode sowie die Mechanismen sind in Bild 4 dargestellt (S. 26).

Die komplexen Zusammenhänge des Feuchteverhaltens von Außenwänden werden hiermit sicher nicht vollständig wiedergegeben.

Beim heutigen Kenntnisstand erscheint dem Verfasser eine wirklichkeitsnahe Idealisierung des Porengefüges der verschiedensten Baustoffe und die mathematische Erfassung des Zusammenwirkens der unterschiedlichen Speicher- und Transportmechanismen der Baustoff-Feuchte sowie deren Darstellung in einem praktikablen Rechenverfahren für alle am Markt befindlichen Bauprodukte in absehbarer Zeit nicht verwirklichtbar.

Es ist anzustreben, den "Unbedenklichkeitskatalog der DIN 4108 um weitere Konstruktionen bzw. Materialien zu ergänzen. Denn es leuchtet nicht ein, daß eine Innendämmung mit Holzwolleleichtbauplatten, bei einem Tauwasseranfall von 1,51 kg/qm zulässig ist; während eine Innendämmung z.B. mit Holzfaserdämmplatten bei einem Tauwasserausfall von 1,19 kg/qm, bei gleichem k-Wert von 0,6 W/qmK, unzulässig ist. (vgl. Bild 5, S. 27).

Insgesamt gesehen liegt das Glaser-Verfahren auf der sicheren Seite, d.h. wenn sich für eine Konstruktion Tauwasserfreiheit ergibt, wird dies mit Sicherheit eingehalten.

Wird eine Konstruktion jedoch als bedenklich bzw. unzulässig eingestuft, kann sie trotzdem schadensfrei bleiben.

In dieser Diskussion ist natürlich auch das Nutzerverhalten, insbesondere die Lüftungsgewohnheiten, zu berücksichtigen. Bei üblichen Luftwechselraten und winterlichen Außentemperaturen beträgt die durch Diffusion transportierte Feuchtigkeitsmenge jedoch nur 1-2 % der durch den Luftwechsel abgeführten Menge. Dessen ungeachtet kommt dieser relativ kleinen Feuchtigkeitsmenge große Bedeutung zu.

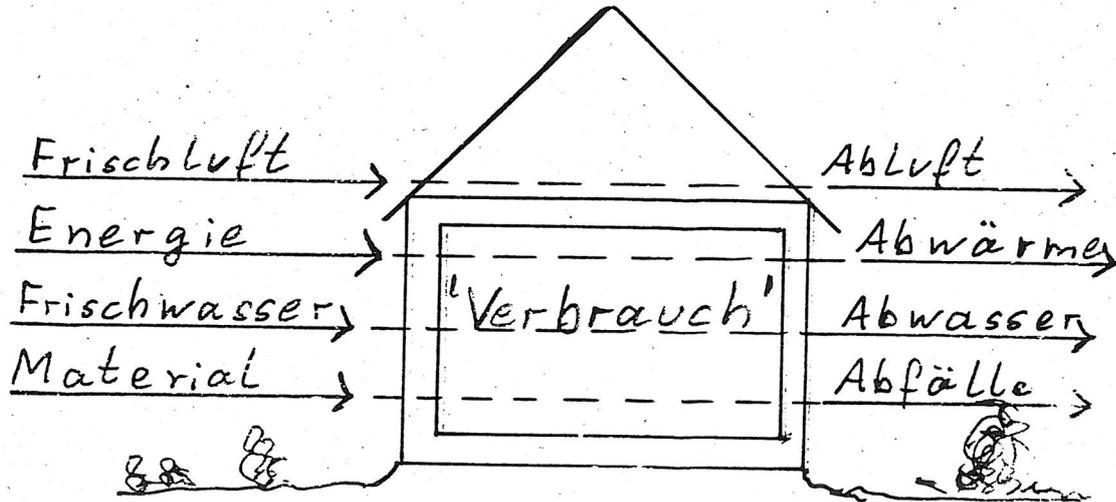
Die im Thema dieses Vortrags gestellte Frage "Ökologisches Bauen trotz Bauphysik" möchte ich zusammenfassend dahingehend beantworten, daß die Bauphysik nur einen Teilbereich des ökologischen Bauens betrifft.

Energieverbrauchsminimierung und Erhaltung eines ausgewogenen Raumklimas ist entsprechend den Erkenntnissen der Bauphysik mit nach den Prinzipien des ökologischen Bauens ausgewählten Baustoffen durchführbar.

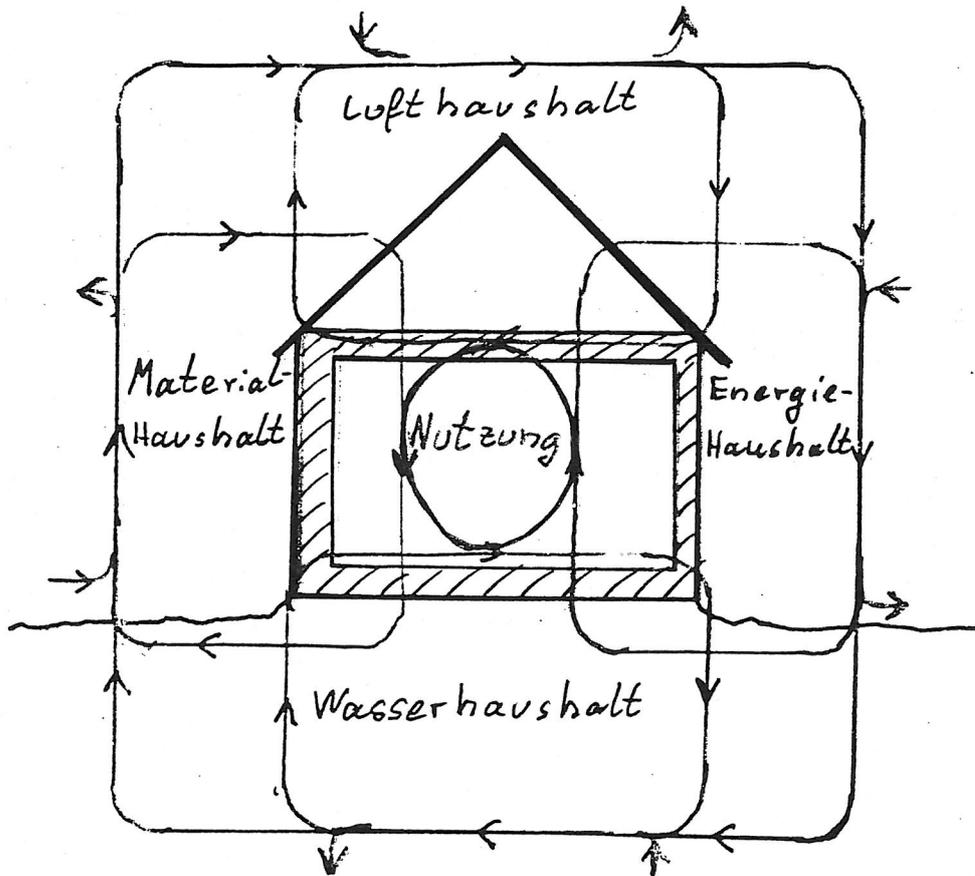
Die DIN 4701 behindert jedoch in Teilbereichen den Einsatz ökologisch akzeptierter Materialien und sollte entsprechend modifiziert werden.

Literatur

- F. Eichler, Bauphysikalisches Entwerfen, Berechnungsgrundlagen des Wärme- und Feuchtigkeitsschutzes, 1. Auflage Köln/Braunsfeld, 1969
- Lutz u. a., Lehrbuch der Bauphysik, Schall/Wärme/Feuchte/Licht/Brand, Darmstadt, Teubner 1985
- Trethowen, H. A., Feuchtigkeit in Wohnräumen - Luft, Erde, Wasser - die Quellen der Feuchte, in ki Klima Kälte Heizung Heft 6/88 S. 272-276
- Achtziger, J., Praktische Untersuchung der Tauwasserbildung im Innern von Bauteilen mit Innendämmung, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München, Reihe IV, Nr. 28, 1985
- Lühr, H. P., Kerndämmung - Probleme des Schlagregens, der Diffusion, der Ausführungstechnik, aus: Aachener Bausachverständigentage 1984, Bauverlag, 1984, S. 47-58
- Krusche, P. u. M, u. a. Ökologisches Bauen, Hrsg. Umweltbundesamt Bauverlag, 1982



normales Haus



ökologisches Haus

D A M P F D I F F U S I O N S B E R E C H N U N G

\*\*\*\*\*

PROJEKT: INNENDG.  
 BAUTEIL: AUSSENWAND  
 DATUM: 18.9.88

\*\*\*\*\*

\* TAUPERIODE \*

\*\*\*\*\*

-----  
 RANDBEDINGUNGEN (Gemäß DIN 4108 Teil 3):

	INNENKLIMA	AUSSENKLIMA
LUFTTEMPERATUR (DEG. C):	20.00	- 10.00
RELAT. FEUCHTE (%):	50.00	80.00
DAMPFSÄTT.DRUCK (PA):	23400.00	260.00
DAMPFTEILDRUCK (PA):	1170.00	208.00

-----  
 B E R E C H N U N G E N

	1	2	3	4	5	6	7	8
	(?)	(-)	(m)	(W/m <sup>2</sup> )K	(qm <sup>2</sup> K/W)	(grd. C)	(pa)	(pa)
Wärmeübergangswiderstand innen) - - - - -						20.0	2340.0	1170.0
								.13
INNENPUTZ	2.0	10.00	0.20	0.70	0.03	17.6	2017.7	1170.0
HOLZWOLLEPL.	10.00	2.00	0.20	0.09	1.08	17.1	1952.7	1115.0
MAUERWERK	24.00	10.00	2.40	0.68	0.35	- 2.4	499.6	499.6
AUSSENPUTZ	2.00	35.00	0.70	0.87	0.02	-8.9	287.6	273.8
(Wärmeübergangswiderstand außen) - - - - -						-9.3	277.2	208.0
								.04
						-10.0	260.0	208.0

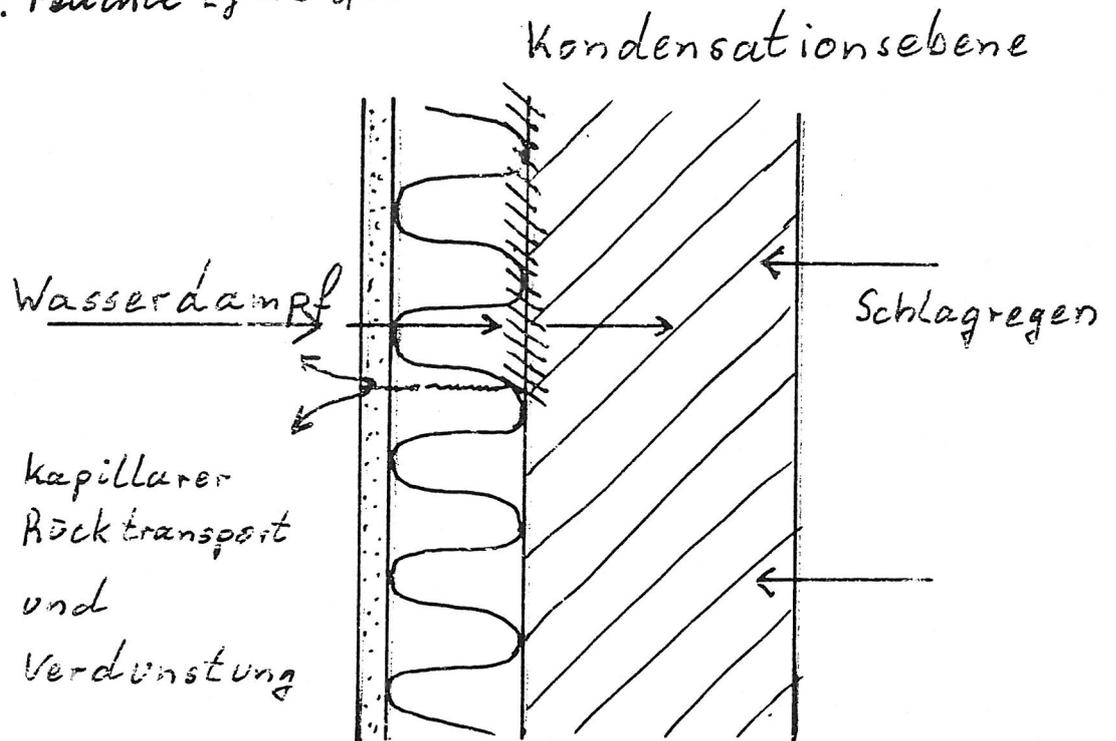
-----  
 K-WERT = .6 (W/qm<sup>2</sup>K)

Verdunstungsmenge 1,71 kg/m<sup>2</sup>

TAUWASSERMENGE: 1.51 (KG/QM)

=====

	innen	außen
Lufttemperatur [°C]	20	-10
rel. Feuchte [%]	50	80
Partialdruck [Pa]	1170	208
abs. Feuchte [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	8,65	1,2



## DAMPFDIFFUSIONSBERECHNUNG

\*\*\*\*\*

PROJEKT: INNENDG.  
 BAUTEIL: AUSSENWAND  
 DATUM: 18.9.88

\*\*\*\*\*

\* TAUPERIODE \*

\*\*\*\*\*

-----  
 RANDBEDINGUNGEN (Gemäß DIN 4108 Teil 3):

	INNENKLIMA	AUSSENKLIMA
LUFTTEMPERATUR (DEG. C):	20.00	- 10.00
RELAT. FEUCHTE (%):	50.00	80.00
DAMPFSÄTT.DRUCK (PA):	23400.00	260.00
DAMPFTEILDRUCK (PA):	1170.00	208.00

## BERECHNUNGEN

	1	2	3	4	5	6	7	8
	(?)	(-)	(m)	(W/m <sup>2</sup> )K	(qm <sup>2</sup> K/W)	(grd. C)	(pa)	(pa)
Wärmeübergangswiderstand innen) - - - - -						20.0	2340.0	1170.0
						17.6	2017.7	1170.0
INNENPUTZ	2.0	10.00	0.20	0.70	0.03			
HOLZFASERPLATTE	6.00	5.00	0.30	0.06	1.07	17.1	1952.7	1115.0
MAUERWERK	24.00	10.00	2.40	0.68	0.35	- 2.4	500.3	500.3
AUSSENPUTZ	2.00	35.00	0.70	0.87	0.02	-8.9	287.6	274.0
(Wärmeübergangswiderstand außen) - - - - -						-9.3	277.2	208.0
						-10.0	260.0	208.0

-----  
 K-WERT = .6 (W/qm<sup>2</sup>K)Verdunstungsmenge 1,41 kg/m<sup>2</sup>

TAUWASSERMENGE: 1.19 (KG/QM)

=====

Dipl.-Ing. Reinhard Lamers, Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik

## Bauschäden, Schadensursachen und Nutzerverhalten

Bei diesem Vortrag handelte es sich um einen Lichtbildervortrag, zu dem keine schriftliche Kurzfassung vorliegt.

Dipl.-Ing. Michael Rentz, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt

## Rechenverfahren, Luftfeuchte und Vorschriften

Die 11. Sitzung des Arbeitskreises ENERGIEBERATUNG hat das Thema "Bauphysik". In diesem Vortrag sollen Rechenverfahren vorgestellt und beschrieben werden, die sich mit Themen aus der Bauphysik befassen, und die für die Energieberatung in der Praxis wichtig sind. Diese sind:

- die Wärmebedarfsberechnung
- die Tauwasserberechnung
- die Berechnung des Wärmedurchgangs durch Bauteile.

Bei den Begriffen Wärmebedarfsberechnung und Tauwasserberechnung handelt es sich um "besetzte" Begriffe: Sie bezeichnen im fachlichen Sprachgebrauch üblicherweise die Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden nach der DIN 4701 und das "Glaser-Verfahren" (Teil 5 der DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau). Wärmebedarfsberechnungen und Tauwasserberechnungen können jedoch auch auf andere Weise durchgeführt werden.

Eine **Wärmebedarfsberechnung** ist die Berechnung des Wärmestroms durch die (Systemgrenze) Gebäudehülle. Es wird zwischen der Berechnung der Wärmeleistung (maximaler Wärmebedarf im stationären Fall) und dem Energiebedarf (Aufsummierung der über das Jahr benötigten Wärmeleistung; auch: Energiebilanz) unterschieden.

Wärmebedarfsberechnungen werden u.a. benötigt, um die Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen an Gebäuden zu beurteilen und um das Ausmaß der Umweltwirkungen (Energieverbrauch, Schadstoffemission) zu bestimmen.

Eine **Tauwasserberechnung** ist die Berechnung der Menge des innerhalb einer Konstruktion in einer bestimmten Zeit kondensierenden und nicht wieder verdunstenden Wasserdampfs abhängig vom Wasserdampf-Diffusionsstrom. Der Diffusionsstrom hängt vom Dampfdruckgefälle und dem materialspezifischen Diffusionswiderstand ab.

Die **Berechnung des Wärmedurchgangs** durch Bauteile (k-Wert-Berechnung) ist ein grundlegendes Rechenverfahren auch für die o.g. weitergehenden Berechnungen.

### Wärmeübertragung und Transportgleichungen

Bei der Aufstellung einer Gleichung zur Berechnung des Wärmestroms durch ein Bauteil müssen die bekannten Wärmetransportmechanismen berücksichtigt werden:

#### 1. Konvektion:

Kalte **Außenluft** strömt an einer warmen Gebäudefläche vorbei, erwärmt sich und kühlt die Wand ab. Heißes **Heizwasser** strömt in ein kaltes Heizungsrohr, kühlt ab und erwärmt das Rohr. Kühlere **Raumluft** umströmt das Rohr, erwärmt sich und kühlt das Rohr ab. Wie gut oder schlecht die Wärmeübertragung im Einzelfall erfolgt, wird durch den jeweiligen **Wärmeübergangskoeffizienten** angegeben (z.B.  $\alpha_i$ ,  $\alpha_a$  in der DIN 4108).

#### 2. Wärmeleitung:

Von einer warmen Stelle aus breitet sich der *"Zustand höherer Temperatur"* nach allen Richtungen aus. Dabei wird die Wärme von warmen Bereichen in kalte Bereiche transportiert: Bei einem Warmwasserspeicher fließt Wärme von innen nach außen, ebenso bei einem Heizkörper, bei einem Kühlschrank von außen nach innen. Der gewünschte Gleichgewichtszustand muß durch ständiges Nachheizen (oder Kühlen) aufrecht erhalten werden.

Wie gut (oder wie schlecht) sich die Wärme in einem festen Stoff ausbreiten kann, wird durch die **Wärmeleitfähigkeit** (bzw. den Wärmewiderstand) des Materials angegeben.

### 3. Wärmestrahlung:

Für den Wärmetransport durch Strahlung wird kein "Medium" wie Luft, Flüssigkeiten, feste Materialien benötigt. Er findet überall dort statt, wo Strahlung sich ausbreiten kann, also auch im leeren Raum. Wärmetransport durch Strahlung erfolgt zwischen allen Körpern, die unterschiedliche Temperaturen oder ein unterschiedliches Emissionsvermögen haben (sofern die Oberflächen so angeordnet sind, daß die Körper sich gegenseitig "sehen" können). Der Netto-Wärmestrom fließt dabei vom wärmeren Körper zum kälteren (z.B. vom warmen Heizkessel zu den kälteren Kellerwänden, vom warmen Hausdach zum kälteren Nachthimmel). Der Wärmeübergang durch Strahlung wird - wie bei der Konvektion - durch **Wärmeübergangskoeffizienten** angegeben.

### 4. Wärmeabgabe durch Stofftransporte:

Ein typisches Beispiel für die Wärmeübertragung durch Stofftransport ist die Gebäudelüftung: Die Luft verläßt mitsamt der in ihr enthaltenen Wärme das Gebäude. Andere Beispiele sind: Kaltes Wasser kommt durch die Wasserleitung ins Gebäude, wärmt sich beim Stehen in der Leitung teilweise bis auf Raumtemperatur auf und verläßt das Gebäude mit Raumtemperatur als Abwasser. Kesselabgase verlassen das Gebäude mit der in ihnen enthaltenen Wärme. Die Wärmeabgabe über Stoffströme wird über die jeweiligen **Volumenströme** und die **Wärmekapazitäten** ermittelt.

### Transportgleichungen

Aus der Elektrizitätslehre ist bekannt: Um einen Strom fließen zu lassen, benötigt man eine "treibende Kraft", eine **Potentialdifferenz** (bzw. Spannung). Dem fließenden Strom stellt sich ein **materialabhängiger Widerstand** entgegen.

Ohm'sches Gesetz:

$$I = \frac{U}{R}$$

$$\text{Strom} = \frac{\text{Potentialdifferenz bzw. Spannung}}{\text{materialabhängiger Widerstand}}$$

Aus dem Ohm'schen Gesetz in der obigen, bekanntesten Form wird durch die Einführung der Leitfähigkeit ( $\Lambda = 1/R$ ) und der Potentialdifferenz ( $U = \Phi_2 - \Phi_1$ ):

$$I = U/R = \underline{\underline{\Lambda \cdot (\Phi_2 - \Phi_1)}}$$

(Strom = Leitfähigkeit · Potentialdifferenz)

In dieser Schreibweise wird die Analogie zur Berechnung des Wärmedurchgangs erkennbar:

$$q = k \cdot \Delta T = \underline{\underline{k \cdot (T_2 - T_1)}}$$

(Wärmestromdichte = Wärmedurchgangskoeffizient · Temperaturdifferenz)

Die gleiche Struktur weist die Formel zur Berechnung des Wasserdampf-Diffusionsstroms auf<sup>14</sup>:

$$i = \frac{p_i - p_a}{1/\Delta} = \underline{\underline{\Delta \cdot (p_i - p_a)}}$$

(Diffusionsstromdichte = Wasserdampf-Diffusionsdurchlässigkeit · Partialdruckdifferenz)

---

<sup>14</sup>  $1/\Delta$ : Wasserdampf-Diffusionsdurchlaßwiderstand

Der jeweilige Widerstand ( $R$ ,  $1/k$ ,  $1/\Delta$ ) ist wie beim Ohm'schen Gesetz keine einfache Zahl, sondern von mikroskopischen Größen innerhalb der beteiligten Stoffe und Materialien abhängig. In Ausnahmefällen kann jedoch mit "Materialkonstanten" gerechnet werden. Die genannten Rechenverfahren unterstellen solche Ausnahmefälle und liefern für die jeweiligen Anwendungsfälle hinreichend genaue Ergebnisse.

Bei der Berechnung des Wärmedurchgangs durch ein Bauteil nach DIN 4108 werden die folgende Vereinfachungen zugrundegelegt:

1. Es handelt sich um eindimensionale Wärmeströme.
2. Der Wärmewiderstand berücksichtigt sowohl den Wärmetransport durch Wärmeleitung als auch den durch Konvektion:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a}$$

Konvektion innen
Wärmeleitung
Konvektion außen

(Setzt man die Wärmeübergangszahlen als Konstanten ein, hat man z.B. vernachlässigt, daß der Wärmeübergang von der Windgeschwindigkeit abhängt.)

3. Die Wärmeübergangskoeffizienten ( $\alpha_i$ ,  $\alpha_a$ ) berücksichtigen den Wärmeübergang durch Strahlung mit und vernachlässigen die  $T^4$ -Abhängigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes.

Die Näherung ist daher nicht mehr ausreichend bei unebenen Geometrien (insbesondere Ecken oder Kanten), bei nichtstationären Wärmeströmen, bei Baustoffen mit abweichendem Emissionsvermögen ( $\epsilon < 1$  oder wellenlängenabhängig) und bei großen Temperaturdifferenzen zwischen Bauteil und Umgebung.

Die Genauigkeit des Glaser-Verfahrens zur Tauwasserberechnung (DIN 4108) hängt von der Anwendbarkeit der obigen Formel zur k-Wert-Berechnung mit ab, da die Temperaturen an den Schichtgrenzen über den Wärmestrom durch das Bauteil bei stationärer Betrachtung ermittelt werden.

### Wann muß gerechnet werden?

Die wesentliche Grundlage für die Berechnung bauphysikalischer Größen ist die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge und Hintergründe. Bei konkreten Projekten stellt sich für den Energieberater jedoch zunächst die Frage "Sind Berechnungen überhaupt erforderlich?" und dann erst die Frage "Wie ist die Berechnung durchzuführen und welches Rechenverfahren ist anzuwenden?"

Berechnungen müssen immer dann durchgeführt werden,

- wenn Berechnungen (Nachweise) durch gesetzliche Bestimmungen verlangt werden,
- wenn ein Auftraggeber / Kunde Berechnungen ausdrücklich verlangt,
- wenn die sachgemäße und richtige Bearbeitung einer Fragestellung unter Berücksichtigung der Erfahrung des Energieberaters anders nicht hinreichend genau möglich ist.

### Vorschriften

Die die wichtigsten rechtlichen Grundlagen im Zusammenhang mit "Rechenverfahren zur Bauphysik" und "Energieberatung" sind die Landesbauordnungen - in Verbindung mit bauaufsichtlich eingeführten DIN-Normen - und die Wärmeschutzver-

ordnung. Die Wärmeschutzverordnung ist eine Rechtsverordnung zum Energieeinsparungsgesetz (EnEG). Das EnEG fordert die Begrenzung der Wärmeverluste von Gebäuden; die Wärmeschutzverordnung gibt die konkreten Anforderungen an, die zum Nachweis des gesetzlichen Wärmeschutzes mindestens erfüllt werden müssen. Sie zielt damit auf eine Verringerung des Energieverbrauchs, während die Bestimmungen der Landesbauordnungen dem Schutz des Lebens und der Gesundheit sowie der öffentlichen Sicherheit und Ordnung dienen.

DIN-Normen mit darin enthaltenen Berechnungsmethoden bilden einen Maßstab für eine einwandfreie technische Ausführung und für die Beachtung der allgemein anerkannten Regeln der Technik. DIN-Normen geben nicht notwendig den Stand der Technik wieder.

Ein Rechenverfahren zur Ermittlung der Energiekennzahl von Gebäuden, das aber nicht als Rechenvorschrift zu bezeichnen ist, enthält der Leitfaden "Energie im Hochbau - Energiebewußte Gebäudeplanung" des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft und Technik. Darin werden Grenz- und Zielwerte für einen nach heutigem Stand der Technik vorbildlichen Energieverbrauch von Gebäuden angegeben.

### Rechenverfahren

In der Wärmeschutzverordnung werden **Wärmedurchgangskoeffizienten** (k-Werte) und **Fugendurchlaßkoeffizienten** für ein Gebäude vorgegeben. Die Vorgabe der Wärmedurchgangskoeffizienten zielt auf die Begrenzung der Transmissionswärmeverluste (Anlage 1 der WärmeschutzV), die Vorgabe der Fugendurchlaßkoeffizienten zielt auf die Begrenzung der Wärmeverluste infolge Undichtigkeiten (Anlage 2 der WärmeschutzV).

Die Art und Weise, wie die in der WärmeschutzV vorgegebenen Werte zu berechnen sind, wird ebenfalls vorgegeben: In der Anlage 1 zur WärmeschutzV heißt es "Die Begrenzung der Transmissionswärmeverluste ist entweder nach Nr. 1 oder Nr. 2 nachzuweisen." Im Verfahren nach Nr. 1 ist ein mittlerer k-Wert des Gebäudes in Abhängigkeit vom Oberflächen / Volumen (A/V)-Verhältnis zu errechnen.

Im Verfahren nach Nr. 2 sind die k-Werte der einzelnen Außenbauteile des Gebäudes zu ermitteln. Diese k-Werte sind dann auch die eigentlichen Nachweisgrößen.

Im Falle der Anwendung von § 13 Abs. 4 der Wärmeschutzverordnung (Ausnahmeregelung) brauchen die Werte der Anlagen 1 und 2 nicht eingehalten werden.

In anderen Rechenverfahren werden zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste k-Äquivalentwerte eingeführt, um Wärmebrückeneffekte und Solargewinne mit zu berücksichtigen<sup>15</sup>. Diese zielen auf die eigentlich zu regelnde Größe, nämlich den Energieverbrauch des Gebäudes.

Im Leitfaden "Energiebewußte Gebäudeplanung" des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft und Technik ist der Energieverbrauchswert des Gebäudes - die **Energiekennzahl** - die eigentliche Nachweisgröße. Zur Bestimmung der Energiekennzahl sind selbstverständlich auch die Transmissionswärmeverluste des Gebäudes zu errechnen.

### k-Wert-Berechnung

Unabhängig vom tatsächlich gewählten Verfahren kommt man sowohl bei der Berechnung der Transmissionswärmeverluste als auch bei der Tauwasserberechnung an der k-Wert-Berechnung nicht vorbei. Der k-Wert ist ein Wärmedurchgangskoeffizient, d.h. der Kehrwert des k-Werts ist - wie vorne bereits gezeigt - ein Widerstand gegen den Wärmestrom. Analog zur Elektrizitätslehre werden im Wandaufbau hintereinander liegende Schichten wie hintereinander geschaltete Widerstände betrachtet, d.h. die Einzelwiderstände werden addiert<sup>16</sup>.

---

<sup>15</sup>s.a. vorne Vortrag Prof. Hauser

<sup>16</sup>ebenso bei parallelen Widerständen die Kehrwerte der Einzelwiderstände

Ermittlung des k-Wertes:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{s_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_a} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_a}$$

Von der Summe (=Gesamtwiderstand) wird dann der Kehrwert als Wärmedurchgangskoeffizient genommen.

$$k = \left(\frac{1}{k}\right)^{-1}$$

Der Wärmestrom durch das betreffende Bauteil (pro m<sup>2</sup>) ist dann

$$q = k \cdot (T_a - T_i)$$

bzw.

$$q = k \cdot (\vartheta_a - \vartheta_i)$$

(In der DIN 4108/5 werden die Grenzschichttemperaturen mit dem griechischen Buchstaben  $\vartheta$  bezeichnet).

Die Formeln und Zusammenhänge sind im einzelnen in der DIN 4108 nachzulesen.

### Tauwasserberechnung

Der Wasserdampfdiffusionsstrom folgt dem Konzentrationsgefälle des Wasserdampfgehalts der Luft beiderseitig eines Bauteils (hier in der Regel eine Außenwand). Wesentlich ist dabei der tatsächliche Wasserdampfgehalt der Luft innen und außen (z. B. in "Milligramm pro Kubikmeter Luft"). Ein anderes Maß für den tatsächlichen Wasserdampfgehalt in der Luft ist der Wasserdampfteildruck. Er gibt an, welcher

*Anteil* des Gesamtluftdrucks durch den in der Luft enthaltenen Wasserdampf verursacht wird. Die "treibende Kraft" für das Zustandekommen eines Wasserdampfdiffusionsstroms ist die Differenz dieser *Anteile am Gesamtluftdruck* zwischen innen und außen.

Diesem Strom stellt sich - materialabhängig - der Wasserdampfdiffusionsdurchlaß-widerstand entgegen.

Das bauphysikalisch Bedeutsame im Zusammenhang mit der Wasserdampfdiffusion ist die **Tauwasserbildung**, nämlich die Eigenschaft des Wasserdampfs - wenn ein bestimmter (zulässiger) Teildruck überschritten wird - zu Wasser zu kondensieren. Erst dadurch wird die Wasserdampfdiffusion zu einer bauphysikalisch relevanten Größe.

Der maximal mögliche Anteil des Wasserdampfs am Gesamtdruck hängt von der Temperatur am jeweiligen Ort ab. Bei niedrigerer Temperatur ist auch der maximale Wasserdampfteildruck niedriger; d.h. bei höheren Temperaturen kann die Luft mehr Wasserdampf aufnehmen, ohne daß es zur Kondensation kommt.

Der maximale Wasserdampfteildruck (Sättigungsdruck) - abhängig von der Temperatur - ist z. B. in der DIN 4108 tabelliert.

Innerhalb einer Wand stellt sich - abhängig von den Bedingungen (Temperatur, Wasserdampfteildruck) innen und außen - ein Wasserdampf-Druckgefälle ein. Ähnlich wie das Spannungsgefälle in einer Serie hintereinander geschalteter, elektrischer Widerstände ist jeder Schicht in der Wand ein bestimmter Anteil des Druckgefälles zwischen innen und außen zuzuordnen. Mit anderen Worten: Jede Schicht stellt eine - unterschiedlich starke - Staustufe für den Wasserdampfstrom dar, und jeder Staustufe (Schicht) entspricht ein bestimmter Wasserdampfteildruck.

Da die Eigenschaften von Baumaterialien hinsichtlich der Wärmeleitung anders sind als hinsichtlich der Dampfdurchlässigkeit, kann es sein, daß die Temperatur in einem Bauteil von innen nach außen schneller abnimmt als das Wasserdampfdruckgefälle. Wenn jetzt an einer Stelle die Temperatur so niedrig wird, daß der

maximal mögliche Wasserdampfteildruck (zu dieser Temperatur) niedriger ist, als der Wasserdampfdruck, der sich - allein aufgrund des Druckgefälles zwischen innen und außen - einstellen würde, kondensiert der überflüssige Wasserdampf an dieser Stelle zu Wasser.

Mit Hilfe des Glaser-Diagramms (s. DIN 4108/5) läßt sich überschlägig ermitteln, ob es in einer Wandkonstruktion überhaupt zu Tauwasserbildung (Kondensation) kommt, bzw. welche Mengen an Tauwasser im Verlauf eines Jahres innerhalb Konstruktion anfallen oder verdunsten können.

Zur Berechnung der Wasserdampfdiffusion durch ein Bauteil werden neben dem Wärmestrom, den Wärmeübergangszahlen und den Schichtdicken und Wärmeleitfähigkeiten weitere Größen benötigt (Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  bzw. die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$ ).

Es ist zwischen Konstruktionen mit und ohne Tauwasserausfall zu unterscheiden. Kommt es nach dem graphischen Verfahren innerhalb einer Konstruktion zu keiner Tauwasserbildung, so errechnet sich der Wasserdampfdiffusionsstrom bei dem Teildruck  $p_i$  innen und  $p_a$  außen mit der Gleichung

$$i = \frac{p_i - p_a}{1/\Delta}$$

$1/\Delta$  ist der Wasserdampfdiffusionsdurchgangswiderstand, der von den verwendeten Materialien abhängt. Er ergibt sich additiv aus den wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken der verwendeten Materialien (s. a. DIN 4108). Kommt es innerhalb einer Konstruktion zu einer Taupunktunterschreitung (s. Abb. nächste Seite), so ist

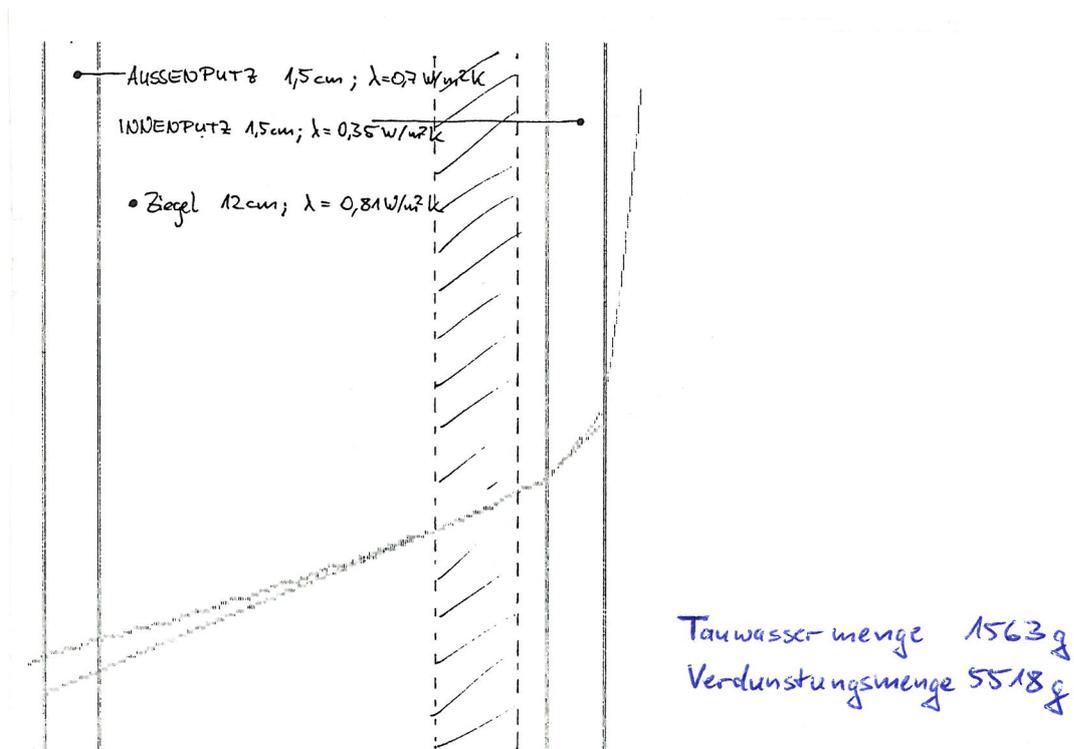
$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{1/\Delta_i}$$

der Diffusionsstrom von der Innenseite der Wand bis zur Kondensationsstelle und

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a}$$

der Diffusionsstrom von der Kondensationsstelle nach außen. Die Differenz dieser beiden Ströme - multipliziert mit der Zeit - ergibt die Tauwassermenge, die sich in dieser Zeit ansammelt bzw. die verdunsten kann:

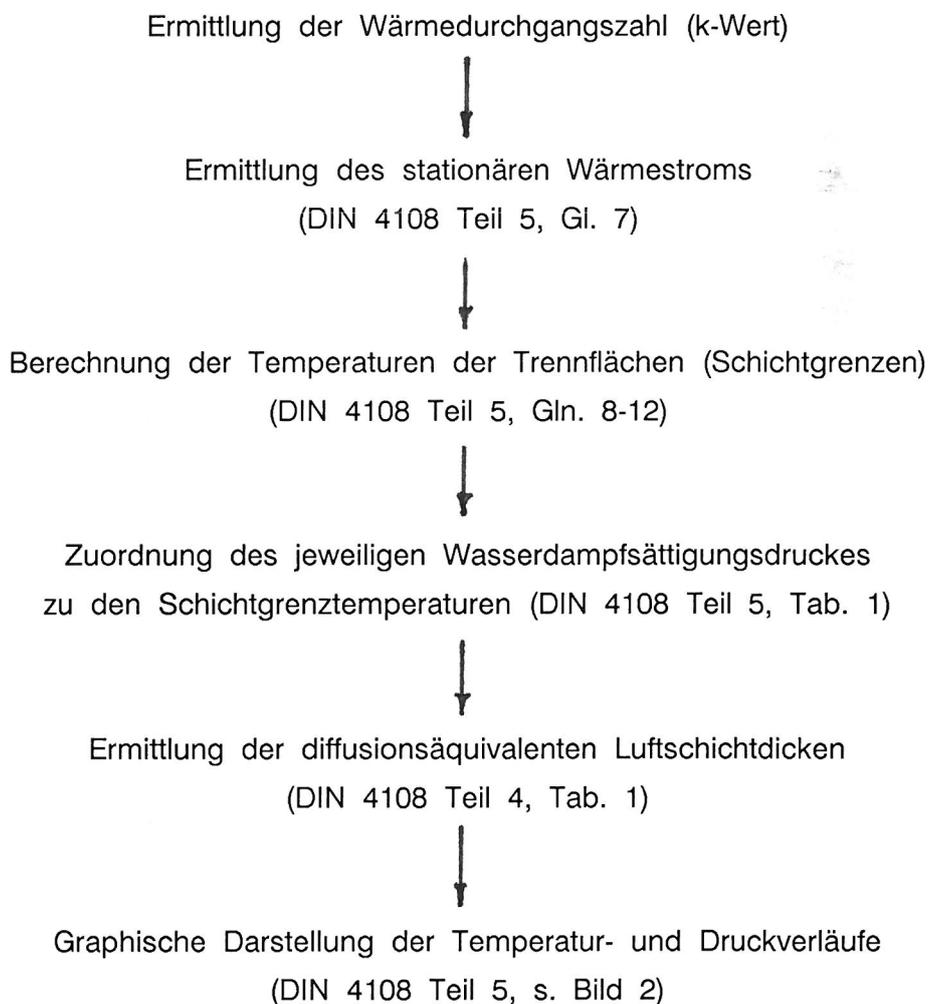
$$W_T = (i_i - i_a) \cdot t_T$$



**Abb. 1:** Im schraffierten Bereich kommt es zu einer Taupunktunterschreitung während der Heizperiode.

Das Glaser-Verfahren ist als Nachweisverfahren ein Nährungsverfahren für die "sichere Seite", d.h. Konstruktionen, die nach dem Glaser-Verfahren tauwasserfrei sind, sind unbedenklich hinsichtlich Tauwasserbildung. Andere Konstruktionen können sich bei exakter Berechnung jedoch auch als tauwasserfrei herausstellen.

#### Berechnungsgang Glaser-Verfahren:



Bei nicht tauwasserfreien Konstruktionen ist anschließend der Tauwasserausfall sowie die Verdunstungsmenge zu berechnen (s. DIN 4108 Teil 5, Anhang A).

## Nachwort "Ökologisches Bauen"

Wolfgang Feist, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt

### Das Einhalten bauphysikalischer Erfordernisse ist eine Grundvoraussetzung für ökologisches Bauen

Dieser Arbeitskreis hatte nicht das ökologische Bauen zum Gegenstand. Da dieser Begriff im vorausgehenden Beitrag aber angesprochen wurde, möchte ich darauf hinweisen, daß das Institut Wohnen und Umwelt in mehreren Publikationen [Feist/Greif et al 1986], [Feist/ Klien 1989], [Greiff 1991] **das ökologische Bauen** klar definiert und untersucht hat. Danach wird vom ökologischen Bauen erwartet, daß **negative Auswirkungen auf den Menschen und seine natürliche Umwelt bei der Errichtung, Nutzung und Beseitigung des Gebäudes so weit wie möglich reduziert werden**. Wichtige Erkenntnis ist dabei, daß Einflüsse auf die Umwelt nie vollständig vermieden, sondern immer nur möglichst weitgehend minimiert werden können. Wird partiell eine völlige Ausschaltung von Nebenwirkungen versucht, so sind die Folgen an anderer Stelle oft umso nachteilhafter. Ansätze zu der daher erforderlichen umfassenden ökologischen Bilanzierung sind in den genannten Publikationen des IWU zu finden.

Insbesondere bei der Frage der Materialwahl für ökologische Bauprojekte ist für die ökologische Bewertung immer die **Bilanz** der Umweltauswirkungen von Herstellung, Nutzung und Beseitigung zu betrachten. So sagt ein "hoher Herstellungsenergieeinsatz" z. B. bei einem Dämmstoff allein noch gar nichts aus: wie in [Feist 1986] nachgewiesen, wird selbst vom energieintensiv hergestellten Dämmstoff Polystyrol im Laufe seiner Nutzungsdauer an einem Gebäude mehr als 30-mal soviel Primärenergie eingespart, wie zu seiner Herstellung erforderlich war. Vor diesem Hintergrund sind konventionelle Wärmedämmstoffe wegen ihres bedeutenden Beitrags zur Energieeinsparung und Umweltentlastung als **ökologischen Prinzipien in hohem Maße entsprechend** einzustufen. Unbelegte Verdachtsmomente, die häufig (und leider auch im vorausgehenden Beitrag) gegenüber Mineralwollgedämmstoffen und Polystyrolämmmaterial vorgebracht werden, verändern diese Einschätzung nicht, wie dies mehrfach vom Umweltbundesamt und vom Bundesgesundheitsamt dargelegt wurde. Wenn von Feinstäuben aus Mineralwolleprodukten oder von Reststyrol aus Polystyrolplatten Risiken ausgehen sollten, so wären diese in jedem Fall extrem gering. Wissenschaftliche Sorgfalt gebietet es, **in keinem Fall** vollständige ökologische und hygienische Unbedenklichkeitserklärungen ab-

zugeben - wissenschaftlich festgestellt werden kann allenfalls eine nachweisliche schädliche Auswirkung. Sind solche in der Vergangenheit nicht nachweisbar - wie dies z. B. für Polystyrol und Mineralwolle der Fall ist - so sind möglicherweise sich später doch noch erweisende Auswirkungen auf der Basis der Breite heute vorliegender Erfahrungen nur geringfügig. Die Erkenntnis ökologisch und gesundheitlich bedenklicher Auswirkungen kann im übrigen "Naturprodukte" ebenso betreffen wie Materialien aus industrieller Fertigung (z. B. sind Hartholzstäube nachgewiesenermaßen karzinogen).

Ausgangspunkt des IWU bei der Bilanzierung ökologischer Einflüsse ist der **Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis und die naturwissenschaftliche Methodik**. Hierzu gibt es heute keine überzeugende Alternative: entscheidendes Kriterium der wissenschaftlichen Forschung ist die intersubjektive Überprüfbarkeit und Hinterfragbarkeit. Auch angesichts der Erkenntnis, daß die naturwissenschaftliche Methodik niemals eine "volle, endgültige und umfassende Wahrheit" erfassen kann, ist sie doch jeden subjektiven Methoden der "Erleuchtung" oder dem Glauben an die Weisheit von Gurus überlegen. Ihr einziger Nachteil mag in einigen Fällen sein, daß ihr Vertreter für diese wird eingestehen müssen, daß hierzu "(noch) keine gesicherten Erkenntnisse" vorliegen.

Nach dem Stand von Wissenschaft und Forschung gibt es aber **keinen Grund**, weshalb Materialien in der Außenhülle von Gebäuden (Außenwände, Böden, Dächer, Fenster) generell eine **hohe Wasserdampfdiffusionsfähigkeit** haben müssen. Ein solcher Mythos ist ausschließlich von den sog. "Baubiologen" aufgebaut worden. Er ist aber sicher kein Kriterium des ökologischen Bauens. Wissenschaftliche Untersuchungen belegen vielmehr eindeutig, daß es **keinen** bedeutenden Einfluß der Diffusionsfähigkeit von Außenbauteilen auf das Raumklima, insbesondere auf den Wasserdampfgehalt der Raumluft, gibt [Künzel 1978] (vgl. auch Energiesparinfo Nr. 8 des HMWT, bearbeitet durch das Energie- und Umweltzentrum am Deister), weil die Gesamtmenge des durch Diffusion transportierten Wasserdampfes auch bei sehr diffusionsoffenen Konstruktionen **immer unbedeutend** ist gegenüber den durch Lüftung bewegten Wasserdampfmengen. Außenkonstruktionen könnten daher aus lufthygienischer Sicht sogar vollkommen dampfdicht gebaut werden, ohne daß dies den Wasserdampfaushalt erkennbar verändern würde (davon zu unterscheiden ist die unten dargestellte Wasserdampfpufferung in raumseitigen Oberflächenschichten). Probleme mit der Dampfdiffusion können im Gegenteil allein bei auf der Raumseite ungenügend **diffusionsdichten** Aufbauten entstehen. Der (für die Feuchtbilanz im Raum unbedeutend kleine) Wasserdampfstrom, welcher in eine solche Konstruktion eindiffundiert, kann an kälteren äußeren Schichten austauen: schon geringe Wassermengen reichen dann aus, um Konstruktionen zu schädigen und zu gesundheitlich bedenklichem Schimmelpilzbefall zu führen. Eben diese Schäden, die

in hoher Frequenz in Gebäuden **aufgetreten sind**, haben dazu geführt, den Teil 3 "Feuchteschutz" in die DIN 4108 aufzunehmen. Um schwerwiegende Bauschäden und damit einhergehende Gesundheitsschäden zu verhindern, ist daher die Einhaltung bauphysikalischer Regeln gerade für das ökologische Bauen eine Grundvoraussetzung.

Es gibt kein begründetes Argument, weshalb beim ökologischen Bauen Dampfsperren und Dampfbremsen um jeden Preis vermieden werden sollen. Ganz im Gegenteil haben die Erfahrungen am IWU gezeigt, daß gerade die **luftdichtende** und die **dampfbremsende** Funktion solcher Lagen (in der Regel Folien) entscheidend für die Wirksamkeit und Bauschadensfreiheit von Außenkonstruktionen beim Holzbau und bei Innendämmungen ist. Vor allem die durch Undichtheiten in solchen Konstruktionen austretende feuchte Raumluft ist die häufigste Ursache von Bauschäden **und** für nicht eingetretene Erwartungen bzgl. der Energieeinsparung. Diese Erkenntnisse werden im übrigen durch jahrzehntelange Erfahrungen in Schweden und die dortige Bauforschung bestätigt. In den Publikationen des IWU sind wir daher insbesondere stark bemüht, dem Praktiker die Notwendigkeit sorgfältig dichter Konstruktionen zu vermitteln (vgl. 16. Sitzung des Arbeitskreis Energieberatung: "Luftdichtigkeit von Dachaufbauten" und die Energiesparinformation Nr. 7 des HMWT).

Ein ökologischer oder hygienischer Nachteil durch die Verwendung einer dampfdichtenden Folie entsteht nicht. Eine quantitativ bedeutsame Aufnahme von Stoffen aus der Raumluft (z. B. Wasserdampf) spielt sich nur in den innersten raumseitigen Millimetern eines Bauteils ab, so daß hierfür z. B. eine **raumseitige Verkleidung** aus Gipskarton- oder Gipsfaserplatten ausreicht.

Des weiteren trifft es nicht zu, daß nach heutigem Kenntnisstand eine **wissenschaftlich fundierte Behandlung der komplexen Speicher- und Transportmechanismen von Feuchtigkeit** in Bauteilen nicht möglich sei. Diese ist vielmehr in der thermodynamischen Theorie des Feuchtepotentials geleistet [Bogoslovskij 1982] und in der UdSSR sogar normiert [CNIPSa]. Diese Theorie gibt den Feuchtetransport in der Tat auch qualitativ anders wieder als das (einfachere) Glaser-Verfahren, da in einem solchen Ansatz **alle** Transportmechanismen unabhängig von ihrer physikalischen Natur berücksichtigt sind. Alle Mechanismen folgen jedoch in Häusern den thermodynamischen Grundgesetzen: Ströme (hier: Feuchtigkeit) können im Netto (räumliches/zeitliches Mittel) immer nur entlang eines fallenden Potentials (hier: Feuchtepotential) erfolgen (2. Hauptsatz). Es ist es daher unhaltbar, Transportmechanismen zu unterstellen, die im Netto einen Feuchtestrom entgegen dem Potentialgefälle bewirken.

Es soll nicht bestritten werden, daß eine genaue Untersuchung des Feuchte-transportes in den betroffenen Bauteilen (experimentell oder mit Hilfe des Feuchtepotentials) zeigen könnte, daß die Gefahr von Bauschäden durch Tauwasserausfall gering ist. Eine Ursache dafür wäre aber nicht in einem Feuchterücktransport, sondern eher in einer beschleunigten Feuchteausbreitung und -speicherung zu suchen. Bevor solche Untersuchungen aber nicht durchgeführt und dokumentiert wurden, erweist man solchen Konstruktionen (gerade wenn man sie selbst propagiert) unter Umständen einen schlechten Dienst, wenn ihnen voreilig Unbedenklichkeitszertifikate ausgestellt werden. Unabhängig von dieser Frage jedoch sind alle Konstruktionen, die eine **unbedingt erforderliche Luftdichtheit** (bedeutet nicht Diffusionsdichtheit) **nicht** einhalten, **äußerst gefährdet**.

**Zusammenfassend** ergibt sich: die Einhaltung bauphysikalischer Regeln ist für das ökologische Bauen eine Grundvoraussetzung. Bauphysikalische Regeln entspringen gerade dem Bemühen und sind Ausdruck der Erfahrungen um das gesunde Wohnen und Bauen. **Die Bauphysik ist damit wichtiges Hilfsmittel bei der Umsetzung des ökologischen Bauens.**

Literatur:

- |                           |   |
|---------------------------|---|
| [Bogoslovskij 1982]       | Bogoslovskij: <b>Wärmetechnische Grundlagen</b> , Wiesbaden 1982  |
| [Feist/Greiff et al 1986] | W.Feist, R.Greiff, J.Klien, P.Werner: <b>Sozialer Mietwohnungsbau nach ökologischen Prinzipien</b> ; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1986 |
| [Feist 1986]              | W.Feist: <b>Primärenergie- und Emissionsbilanzen von Dämmstoffen</b> ; Institut Wohnen und Umwelt 1986  |
| [Feist/Klien 1989]        | W.Feist, J.Klien : <b>Das Niedrigenergiehaus</b> ; Band 24 der Reihe Fundamente alternativer Architektur; Karlsruhe 1989                        |
| [Künzel 1978]             | Künzel: <b>Die "atmende" Wand</b> ; in Gesundheitsingenieur 1978, Seiten 20, 29-32  |
| [CNIPSa 1940]             | Vlasov, O.E.: <b>Grundlagen der Theorie der kapillaren Diffusion</b> ; Moskva Izd-vo CNIPSa 1940  |
| [Greiff 1991]             | R.Greiff, P.Werner: <b>Ökologischer Mietwohnungsbau</b> ; C. F. Müller - Verlag, Karlsruhe 1991   |