

# Numerische Untersuchungen zum Tauwasserrisiko von Mauerwerksaußenwinkeln und Ecken in Gebäuden

F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
unter Erstellung der Farbgraphiken durch Frau R. Schulz

Die vorliegende Arbeit wurde durch die Stiftung für Forschungen im Wohnungs- und Siedlungswesen gefördert.  
A.-Z.: NA15 Nr. 171/1/87 Op/Fr, 31. August 1987

## Vorwort

Löschwasserschäden an Gebäuden sind je nach Bauart und Nutzung mehr oder weniger beachtlich. Es bereitet gerade im Bereich der Altbausubstanz häufig Probleme, derartige brandbedingte Durchfeuchtungen von solchen abzugrenzen, die ihre Ursache in bauphysikalisch bedingten Mängeln haben.

Die Ausführungen in dem nachfolgenden Artikel sollen daher gerade für die Versicherungswirtschaft Aufschluß über das Zustandekommen von typischen Schäden an einer ohne das Zutun von Löschwasser entstandenen Durchfeuchtung geben. Es kann davon ausgegangen werden, daß dem schadenregulierenden Außendienst damit gute Argumentationshilfen zur Verfügung gestellt werden können.

Die Redaktion

## Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung
2	Untersuchte zwei- und dreidimensionale geometrische Wärmebrückenkonstruktionen (Winkel und Ecken)
3	Grundlagen Feuchtebilanz, Mindestluftwechsel, Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste
3.1	Grundlagen Feuchtebilanz, Mindestluftwechsel und Lüftungswärmeverluste
3.2	Ermittlung der Transmissionswärmeverluste einzelner Außenbauteile mit Wärmebrücken
4	Rechenverfahren und Rechengang
4.1	Rechenverfahren
4.2	Rechengang
5	Ergebnisse und Ergebnisdiskussion
5.1	Oberflächentemperaturen, Tauwasserrisiko, Mindestluftwechsel bei Außenwinkeln (zweidimensionalen Wärmebrückenkonstruktionen)
5.2	Oberflächentemperaturen, Tauwasserrisiko, Mindestluftwechsel bei Außenwinkeln (dreidimensionalen Wärmebrückenkonstruktionen)

5.3	Transmissions- und Lüftungswärmeverluste bei Außenwinkeln (dreidimensionalen Wärmebrückenkonstruktionen)
6	Zusammenfassung
7	Literatur

## Benutzte Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung, Einheit
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient, $W/(m^2K)$
$1/\alpha$	Wärmeübergangswiderstand, $m^2K/W$
A	innere Projektionsfläche eines Bauteils, $m^2$
c	spezifische Wärmekapazität, $J/(kg K)$
$\Delta c$	spezifische Wasserdampfproduktion, $kg/m^3$
$D_x, D_y, D_z$	Schichtdicke in x-, y- bzw. z-Richtung, m
i, j, k	Schichtnummer in x-, y- bzw. z-Richtung
k	Wärmedurchgangskoeffizient, $W/(m^2K)$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit, $W/(m K)$
$1/\lambda$	Wärmedurchlaßwiderstand, $m^2K/W$
$\dot{m}$	Wasserdampfstrom, $kg/h$
$n_L$	Luftwechselzahl, $h^{-1}$
$\varphi$	relative Luftfeuchte, %

$p_s$	Wasserdampfsättigungsdruck, Pa
$\dot{Q}$	Wärmestrom, W
$\rho$	Rohdichte, $kg/m^3$
$R_D$	Gaskonstante des Wasserdampfs, $462 J/(kg K)$
$\vartheta, t$	Temperatur, $^{\circ}C$
$\Theta$	normierte Temperatur
T	Temperatur, K
V	Volumen, $m^3$
x, y, z	Koordinatenachsen

## Benutzte Indizes

a	außen
ab	abfließend
äq	äquivalent
d	gedämmt
D	Dach
F	Fenster
G	gestört
L	Luft
i	innen
min	minimal
N	Norm
O	Oberfläche
R	(im) Raum (erzeugt)
s	Sättigung
T	Transmission
UG	ungestört
V	Vorsatzschale
W	Wand
WB	Wärmebrücke
zu	zugeführt

Dr. rer. nat. F.-J. Kasper, Dipl.-Inform.  
R. Müller, Dr.-Ing. R. Rudolphi, R. Schulz  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
Laboratorium 2.44 „Numerische Methoden der Bauphysik“



## 1 Einleitung und Problemstellung

Einen Schwerpunkt der Fachdiskussion der letzten Jahre und ein Dauerthema, gemessen an der Zahl der Veröffentlichungen, stellt das Problem des Oberflächentauwassers im Zusammenhang mit stoff- und geometriebedingten Wärmebrücken dar, s. z. B. [1–6, 23, 27–33]. Unter der Vielzahl der von Oberflächenkondensation betroffenen Konstruktionen haben sich Außenwinkel und Außenecken als besonders anfällig erwiesen. Die Häufigkeit der hier auftretenden Schäden hat sogar seit Inkrafttreten der novellierten Wärmeschutzverordnung [7] mit ihren erhöhten Anforderungen an die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste der Gebäudeaußenhülle eher zu- als abgenommen.

Verantwortlich hierfür ist ein mit dem verbesserten Transmissions- und dem durch dichtere Fenster erhöhten Lüftungswärmeschutz verbundenes, fehlerhaftes Heizungs- und Lüftungsverhalten vieler Mieter. Das führt dazu, daß ansich „geringfügige“ Schwachstellen in der Außenhülle schwerste Feuchteschäden hervorrufen können, wenn der Tauwasserausfall im Bereich dieser Schwachstellen längere Zeit anhält. Als besonders kritische Zeiträume für die Tauwasserbildung haben sich dabei die Übergangszeiten Frühling und Herbst herausgestellt [13]. Dabei tritt Oberflächenkondensation im Bereich des Außenwinkels zuerst bei Wänden auf, die die Mindestanforderungen an den Wärme- und Feuchteschutz nach DIN 4108 [9, 10] in nicht durch Wärmebrücken gestörten Bereichen erfüllen. Als Folge-schäden ergeben sich Stockflecken und bei entsprechenden Voraussetzungen [19, 20] Schimmelpilzbildung mit einer erheblichen Beeinträchtigung der Wohnbarkeit. Eine langfristige Durchfeuchtung tieferliegender Bauteilschichten vermindert den Wärmeschutz. In ganz schweren Fällen kann es zur Beeinträchtigung der Standfestigkeit kommen [6].

Zur näheren Untersuchung dieser Problemstellung wurden deshalb die Innenoberflächentemperaturen einiger Außenwinkel und Außenecken, d. h. typischer zwei- und dreidimensionaler geometrischer Wärmebrückenkonstruktionen, mit Hilfe des in [30] beschriebenen Rechenprogramms zur Abschätzung des Tauwasserrisikos berechnet. Die bei diesen Untersuchungen ermittelten farbigen Isothermenverläufe erläutern die bei Außenwinkeln und Außenecken vorhandenen Temperaturverhältnisse.

Ziel dieser Studie ist es außerdem, zu überprüfen, ob ein erhöhter Mindestluftwechsel [15] für Konstruktionen mit Mindestwärmeschutz, auch im Bereich von Ecken, also dreidimensionalen geometrischen Wärmebrücken, ausreicht, um die

wichtigsten wärme- und feuchteschutztechnischen Anforderungen [18] an Außenbauteile zu erfüllen:

- Sicherung eines hygienisch einwandfreien (behaglichen) Innenklimas,
- Schutz der Außenbauteile vor thermischen und hygrischen Schäden
- und minimaler Heizenergieeinsatz zur Aufrechterhaltung ausreichender Innentemperaturen.

Der letzte Punkt beinhaltet eine Minderung der heizungsbedingten Schadstoffemissionen und trägt zum Umweltschutz bei, s. z. B. [21].

Die benutzte numerische Methode erwies sich als sehr geeignetes Verfahren zur Berechnung der Temperatur- und Wärmestromverteilungen für die vorliegenden Außenwinkel und Außenecken. Im Gegensatz zu den „einfachen Methoden“ [12] und den Wärmebrückenkatalogen [5, 6, 31, 32] sind numerische Methoden nicht auf spezielle Wärmebrückentypen beschränkt.

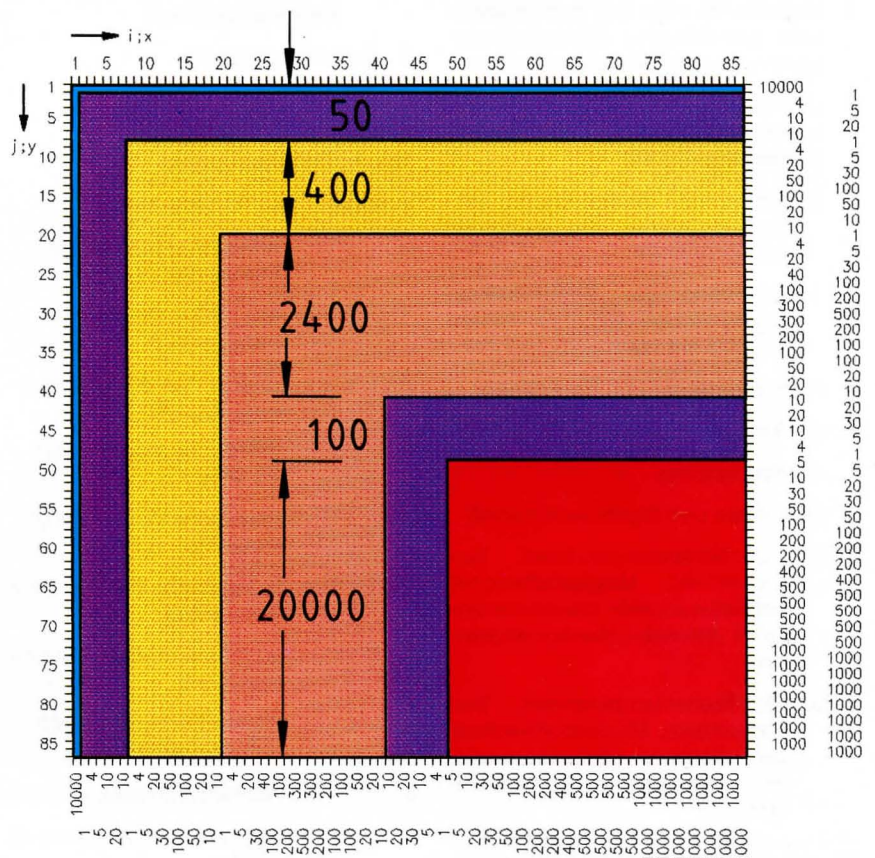
## 2 Untersuchte zwei- und dreidimensionale geometrische Wärmebrückenkonstruktionen (Winkel und Ecken)

Folgende zwei- und dreidimensionale geometrische Wärmebrückenkonstruktionen werden insgesamt untersucht:

- 5 Außenwinkel (Konstruktionen 1 bis 5)
- 2 Außenecken (Konstruktionen 6 und 7)
- 1 Dachgeschoß (Konstruktion 8)

Im einzelnen handelt es sich um die nachstehend aufgeführten Winkel und Ecken:

- Konstruktion 1 (Abb. 1/Titelblatt links) ist ein aus homogenen Leichtbetonwänden mit Innenputz gebildeter Außenwinkel. Der Wärmedurchlaßwiderstand der Wände erfüllt mit  $1/\lambda = 0,56 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108 Teil 2 [9]. Die Dicke der Leichtbetonwände, einschließlich einer 0,01 m dicken Innenputzschicht, beträgt 0,25 m.



$k = 1$ ;  $Dz = 10000$ ; Abm. in  $10^{-4} \text{ m}$

Abb. 3. Elementaufteilung des Mauerwerksaußenwinkels mit Wärmedämmverbundsystem auf der Außenseite und Innenputz (Konstruktion 3)



Da die Innenoberflächentemperatur im Winkel bei Konstruktion 1 nicht den Mindestwert nach DIN 4108 Teil 5 [11] von  $t_s = 9,3^\circ\text{C}$  für die relative Feuchte der Luft  $\varphi = 50\%$  erreicht, werden zusätzlich vier verbesserte Außenwinkelkonstruktionen betrachtet. Dies gibt auch die Möglichkeit, einige grundlegende, konstruktive Möglichkeiten zur Tauwasservermeidung im Winter aufzuzeigen und eine eventuelle Erhöhung des Mindestluftwechsels nach DIN 4701 Teil 1 [16] in den Übergangszeiten zu diskutieren.

- Konstruktion 2 (Abb. 2 / Titelblatt rechts) hat Mindestwärmeschutz und eine zusätzliche Vorsatzschale auf der Außenseite des Winkels aus einem Wärmedämmstoff der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,060 \text{ W/(mK)}$ . Die Dicke der Vorsatzschale beträgt  $d_v = 0,06 \text{ m}$ , die Länge auf den Außenseiten jeweils  $l_y = 0,60 \text{ m}$  und die Dicke der Putzschicht auf der Innenseite  $0,01 \text{ m}$ .
- Konstruktion 3 (Abb. 3) ist ein Außenwinkel mit einem Wärmedämmverbundsystem auf der Außenseite. Die Dicke der Wärmedämmschicht beträgt  $0,04 \text{ m}$ , ihre Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,030 \text{ W/(m K)}$ . Die Dicke der schützenden Putzschicht samt Einlage ist  $0,005 \text{ m}$ , die Dicke des tragenden Mauerwerks  $0,24 \text{ m}$  und die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks  $\lambda = 0,70 \text{ W/(m K)}$ . Für die  $0,01 \text{ m}$  dicke Innenputzschicht wie für die schützende Putzschicht wird ein Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,70 \text{ W/(m K)}$  angesetzt.
- Konstruktion 4 (Abb. 4) unterscheidet sich von der vorhergehenden durch das auf der Innenseite angeordnete Wärmedämmverbundsystem und den Außenputz. Alle übrigen Abmessungen und Kennwerte sind gleich.
- Konstruktion 5 (Abb. 5) ist eine dreischichtige Leichtbau-Sandwich-Konstruktion, bestehend aus einer außenliegenden zementgebundenen Bauplatte, z. B. einer Faserzementplatte von  $0,004 \text{ m}$  Dicke, einer  $0,06 \text{ m}$  dicken Wärmedämmschicht und einer  $0,001 \text{ m}$  dicken Metallabdeckschicht auf der Innenseite. Diese Konstruktion besitzt einen Wärmedurchlaßwiderstand im ungestörten Wandbereich von  $1/\Lambda = 1,51 \text{ m}^2\text{K/W}$  bei einer Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht von  $\lambda = 0,040 \text{ W/(m K)}$  und ist z. B. im Industriebau oder als Paneel unter Fenstern einsetzbar.

An den bisherigen Konstruktionen lassen sich die Probleme der Absenkung der Innenoberflächentemperatur durch zweidimensionale geometrische Wärmebrücken diskutieren und befriedigende Lösungen, auch hinsichtlich des Mindestluftwechsels, aufzeigen. Die Tauwasserprobleme können sich jedoch

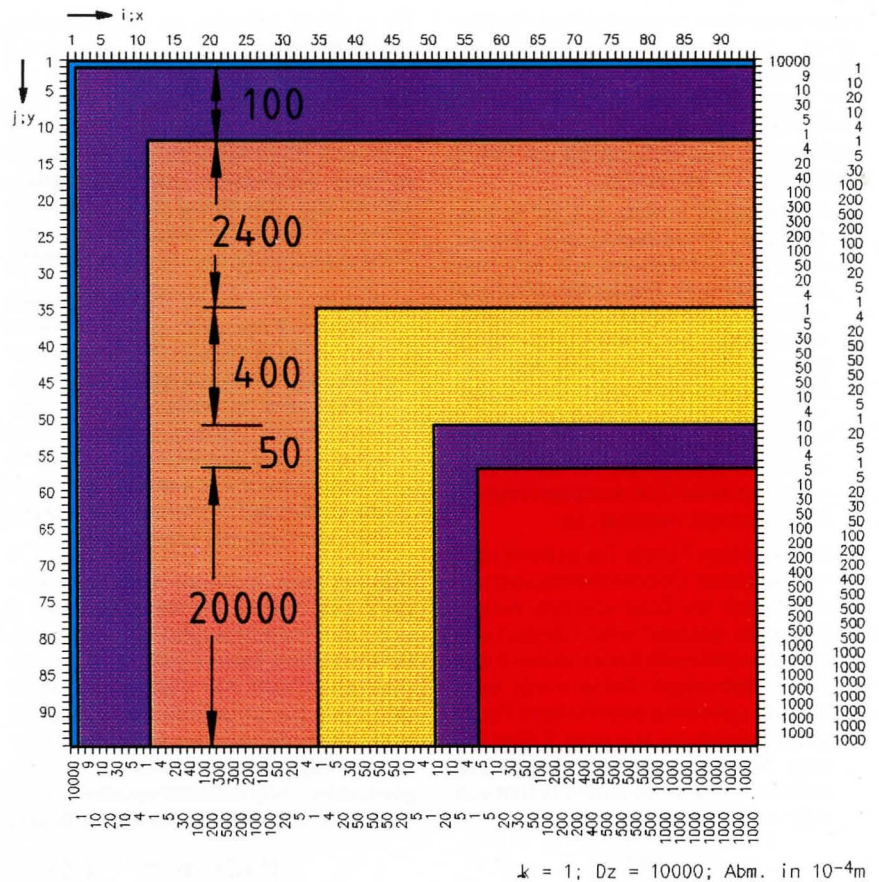


Abb. 4. Elementaufteilung des Mauerwerksaußenwinkels mit Wärmedämmverbundsystem auf der Innenseite und Außenputz (Konstruktion 4)

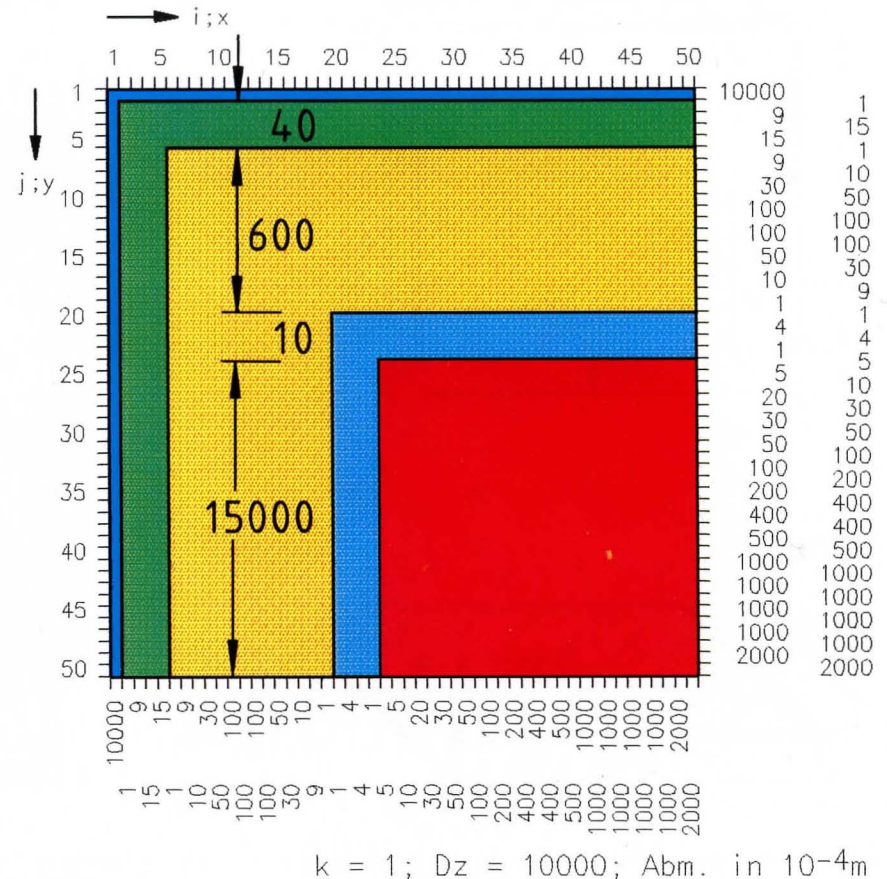


Abb. 5. Elementaufteilung des Paneelaußenwinkels (Konstruktion 5)



noch verstärken, wenn aus dem Kanten-  
effekt im zweidimensionalen Fall ein  
Eckeneffekt für den dreidimensionalen  
Fall wird. Hierzu werden die beiden  
besonders kritischen Konstruktionen 6  
und 7 unter Zugrundelegung der Wand-  
konstruktion 3 betrachtet:

- Konstruktion 6 (Abb. 6 a, b) ist eine  
typische dreidimensionale geome-  
trische Wärmebrücke, die aus zwei  
Außenbauteilen und einem Innenbau-  
teil (Wohnungsdecke) besteht. Dieser  
ist zusätzlich noch eine stoffbedingte  
Wärmebrücke im Bereich des Deck-  
enauflegers überlagert. Grund hier-  
für ist die deutlich höhere Wärmeleit-  
fähigkeit von  $\lambda = 2,1 \text{ W/(mK)}$  der 0,14 m  
dicken Stahlbetondecke, die außen-  
seitig mit einer 0,06 m dicken Wärmedämm-  
schicht versehen ist.
- Konstruktion 7 (Abb. 7 a, b) beinhaltet  
ein erhöhtes Oberflächentauwasser-  
risiko, weil die Ecke von drei Außen-  
bauteilen gebildet wird, nämlich aus  
den Wänden nach Konstruktion 3 und  
einem Warmdach. Dabei wurde nach  
[14] ein schweres einschaliges Flach-  
dach, bestehend aus einer 0,16 m dik-  
ken Stahlbetondecke, ausgewählt,  
auf die eine Wärmedämmschicht von  
0,06 m Dicke aufgebracht ist.

Da in einem Gebäude im ungünstigsten  
Fall beide Typen von Ecken gleichzeitig  
auftreten (Dachgeschoß) und sich auf  
den Energieverbrauch auswirken, wird  
der in Abb. 8 a (Seite 48) unter der  
Annahme eines symmetrischen Decken-  
aufbaus dargestellte Dachgeschoßaus-  
schnitt zur Ermittlung der minimalen  
Innenoberflächentemperaturen und der  
Transmissionswärmeverluste betrachtet.

- Konstruktion 8 (Abb. 8 a) besteht also  
aus dem Flachdach, zwei Außenwän-  
den und der halben (Symmetrieaus-  
nutzung) Geschoßdecke. Zugrunde  
gelegt wird optimaler Wärmeschutz.  
Beim Dach werden Dachhaut und  
Kiesbett, bei den Wänden die dünne  
Außenputzschicht vernachlässigt, da  
ihr Einfluß auf die Innenoberflächen-  
temperaturen der Ecken gering ist.

Dies hat auch noch den Vorteil, daß sich  
die Anzahl der für die Konstruktionen 6  
und 7 durchzuführenden Parametervari-  
ationen halbiert. Dazu werden am Dach-  
geschoßausschnitt die Wärmedurchlaß-  
widerstände  $1/\Lambda$  der Wände bzw. des Dachs  
über die Änderung der Wärmeleitfähig-  
keit des Wärmedämmstoffes variiert. Die  
gewählten Wärmeleitfähigkeiten sind  
Tab. 2 auf Seite 48 (Konstruktion 6) und

Tab. 3 auf Seite 48 (Konstruktion 7) zu ent-  
nehmen. Die Elementaufteilung des Ver-  
tikalschnitts C-C für die Varianten mit Min-  
destwärmeschutz bzw. mit optimalem  
Wärmeschutz gehen aus den Abb. 8 b, c  
(Seite 49) hervor. Für alle Konstruktionen  
werden die minimalen Innenoberflächen-  
temperaturen ermittelt, um die Frage  
eines Tauwasserausfalls und eine damit  
notwendige Erhöhung des Mindestluft-  
wechsels zu klären. Bei den beiden Eck-  
konstruktionen werden außerdem noch  
Energiebilanzbetrachtungen an einem  
Raum mit drei Außenbauteilen durchge-  
führt. Diese Energiebilanzbetrachtungen  
können die notwendigen Hinweise lie-  
fern, wie ein energiesparender und mit  
geringem Tauwasserrisiko in den Ecken  
verbundener Wärmeschutz aussehen  
sollte, der die in der Einleitung genannten  
Anforderungen erfüllen kann.

### 3 Grundlagen Feuchtebilanz, Mindest- luftwechsel, Lüftungs- und Transmis- sionswärmeverluste

#### 3.1 Grundlagen Feuchtebilanz, Mindestluftwechsel und Lüftungswärmeverluste

Ausgehend von den berechneten minimalen  
Innenoberflächentemperaturen

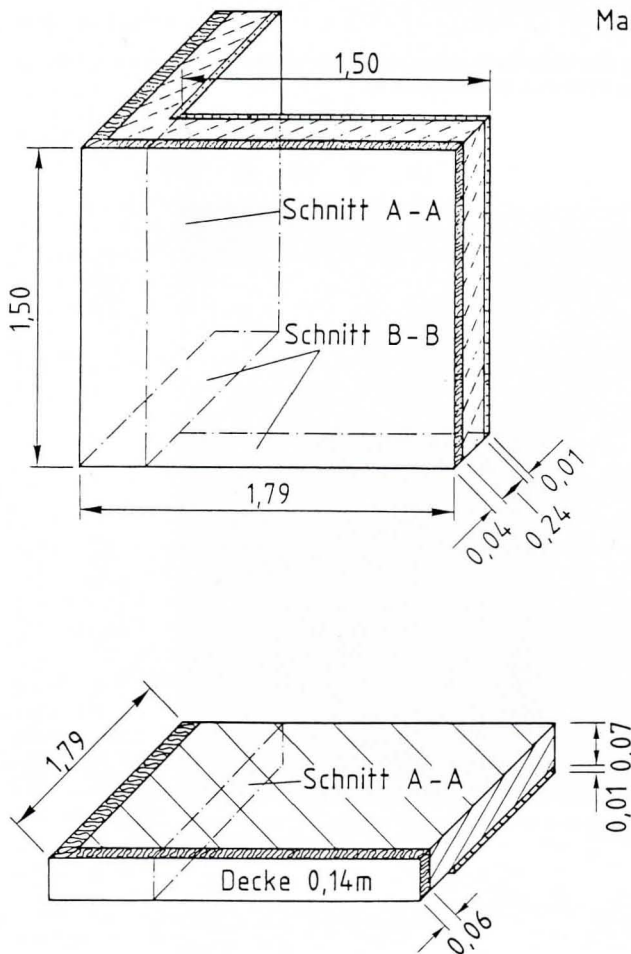


Abb. 6a. Ecke aus zwei Außenwänden und einer Zwischendecke,  
dargestellt für den Fall des optimalen Wärmeschutzes  
(Konstruktion 6)

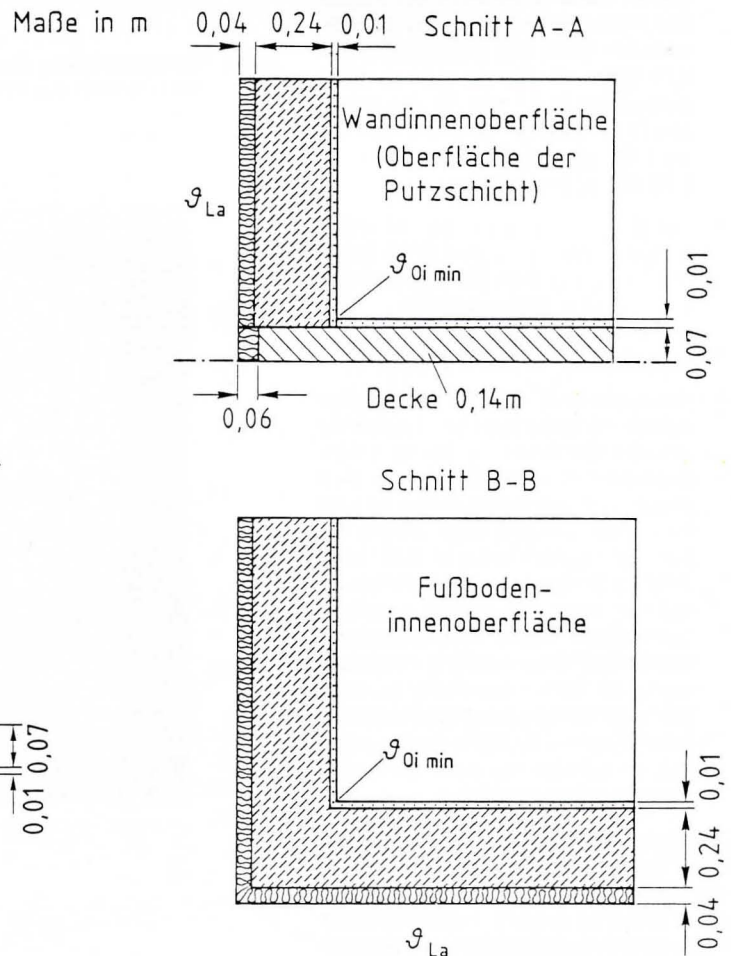


Abb. 6b. Vertikalschnitt (Schnitt A-A) und Horizontalschnitt  
(Schnitt B-B) von Konstruktion 6, dargestellt für den Fall  
des optimalen Wärmeschutzes

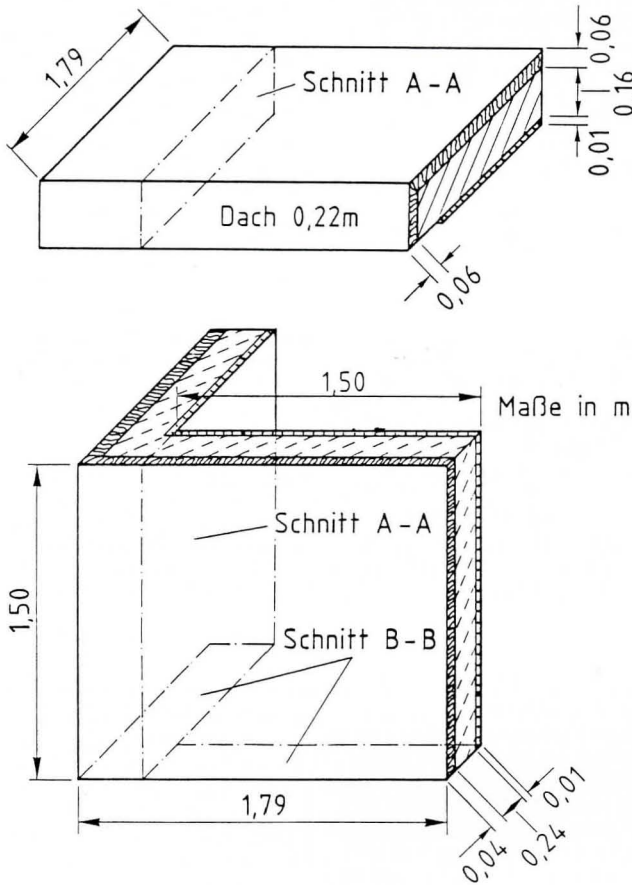


Abb. 7a. Ecke aus zwei Außenwänden und einem Flachdach, dargestellt für den Fall des optimalen Wärmeschutzes (Konstruktion 7)

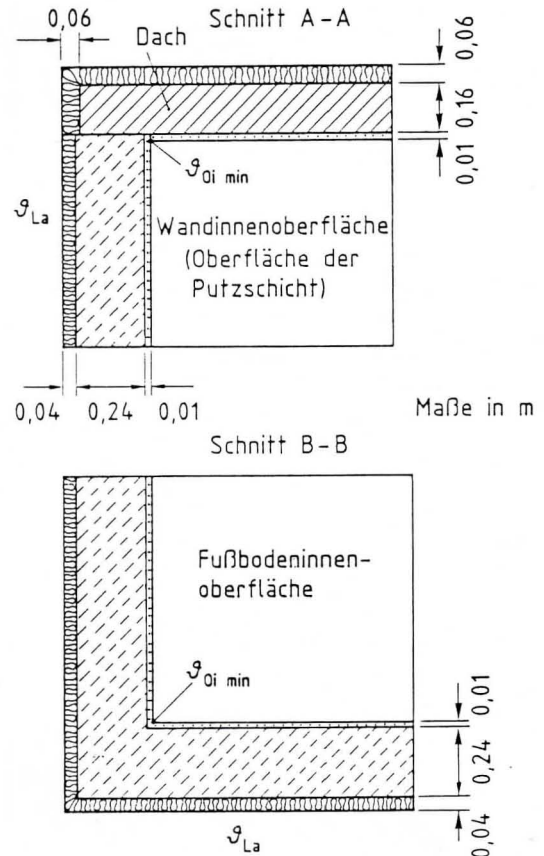


Abb. 7b. Vertikalschnitt (Schnitt A-A) und Horizontalschnitt (Schnitt B-B) von Konstruktion 7, dargestellt für den Fall des optimalen Wärmeschutzes

läßt sich nach [15] unter Berücksichtigung der Bilanz der zufließenden und abfließenden sowie der erzeugten Was-

$$\dot{m}_{ab} = \dot{m}_{zu} + \dot{m}_R$$

serdampfströme prüfen, ob und wann für den hier als Beispiel betrachteten Raum mit einem umbauten Volumen von  $V_R = 50 \text{ m}^3$  und einer Wasserdampfproduktion von  $\dot{m}_R = 150 \cdot 10^{-3} \text{ kg/h}$  bei einem Mindestluftwechsel von  $n_L = 0,5 \text{ h}^{-1}$  nach DIN 4701 [16] eine der ausgewählten Konstruktionen versagt. Falls Tauwasser im Winter oder/und in der Übergangszeit auftritt, kann bzw. muß je nach Dauer des Tauwasserausfalls eine Erhöhung des Luftwechsels vorgenommen werden. Dabei hat es sich für den Vergleich zwischen minimaler Innenoberflächentemperatur  $t_{O_i}$  und Taupunkttemperatur  $t_s$  als vorteilhaft [15] erwiesen, folgende normierte Größen einzuführen:

- Die normierte Innenoberflächentemperatur der Wärmebrücke

$$\Theta_{WB} = \frac{t_{O_i} - t_{La}}{t_{L_i} - t_{La}} = 1 - \frac{k_{\dot{a}q}}{\alpha_i} \quad (1)$$

Dabei ist  $k_{\dot{a}q}$  der äquivalente k-Wert der Wärmebrücke, der nicht nur vom Wärmedurchlaßwiderstand  $1/\lambda$  der Wand, sondern der z. B. auch von

der Schichtenfolge abhängt, und  $\alpha_i$  der Wärmeübergangskoeffizient zur Abschätzung des Tauwasserrisikos nach DIN 4108 Teil 3 [10].

- Die normierte Taupunkttemperatur bei der jeweiligen relativen Feuchte der Innenluft  $\varphi_i$

$$\Theta_s = \frac{t_s - t_{La}}{t_{L_i} - t_{La}} \quad (2)$$

mit  $t_s = f(\Delta c, t_{L_i}, t_{La}, \varphi_i)$ .

Dabei ist  $\Delta c$  die spezifische Wasserdampfproduktion in  $\text{kg/m}^3$ . Sie errechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta c = \dot{m}_R / (V_R \cdot n_L) \quad (3)$$

Für die vorliegende Untersuchung werden Luftwechselzahlen  $n_L$  von 0,5, 0,75 und 1,5  $\text{h}^{-1}$  gewählt. Bei dem hier als Beispiel betrachteten Raum entspricht dies spezifischen Wasserdampfproduktionen von 0,002 bis 0,006  $\text{kg/m}^3$ .

Die sich bei diesen Wasserdampfproduktionen  $\Delta c$  einstellende relative Luftfeuchte im Raum  $\varphi_i$  läßt sich wie folgt ermitteln:

$$\varphi_i = \left[ \frac{R_D \cdot T}{p_s} \right]_{Li} \left[ \frac{(\varphi_a \cdot p_s)_{La}}{R_D \cdot T_{Li}} + \Delta c \right] \quad (4)$$

In Gl. (4) bedeuten  $R_D$  die Gaskonstante des Wasserdampfs mit  $R_D = 462 \text{ J/(kg K)}$ ,

$T_{L_i}$  die Innenlufttemperatur in K,  $p_s$  die zur Innen- bzw. zur Außenlufttemperatur zugehörigen Wasserdampfgesättigungsdrücke und  $\varphi_a$  die mittlere relative Feuchte der Außenluft. Diese mittlere relative Luftfeuchte läßt sich nach [15, 17] mit Hilfe einer linearen Beziehung im Temperaturbereich zwischen  $-15^\circ\text{C}$  und  $20^\circ\text{C}$  in guter Näherung beschreiben:

$$\varphi_a = (470 - t_{La})/6 \quad (5)$$

Ermittelt man mit Hilfe der Gl. (2) und (4) die zu  $\varphi_i$  gehörende normierte Taupunkttemperatur  $\Theta_s$  für verschiedene spezifische Wasserdampfproduktionsraten  $\Delta c$ , so kann durch den Vergleich zwischen  $\Theta_s$  und  $\Theta_{WB}$  beurteilt werden, ob der Luftwechsel ausreicht oder nicht. Solange  $\Theta_s$  kleiner als  $\Theta_{WB}$  ist, reicht der Mindestluftwechsel aus, vgl. a. Abschnitt 5. Die mit dem Mindestluftwechsel ( $n_L = 0,5 \text{ h}^{-1}$ ) verbundenen Lüftungsverlustwärmeströme  $\dot{Q}_L$  können nach [16] auf folgende Weise ermittelt werden:

$$\dot{Q}_L = n_L \cdot V_R \cdot c_L \rho_L (t_{L_i} - t_{La}) \quad (6)$$

Dabei ist  $V_R$  das Raumvolumen,  $c_L$  die spezifische Wärmekapazität der Luft und  $\rho_L$  die Dichte der Luft. Die Lüftungsverlustwärmeströme  $\dot{Q}_L$  werden bei der Gesamtenergiebilanz berücksichtigt.



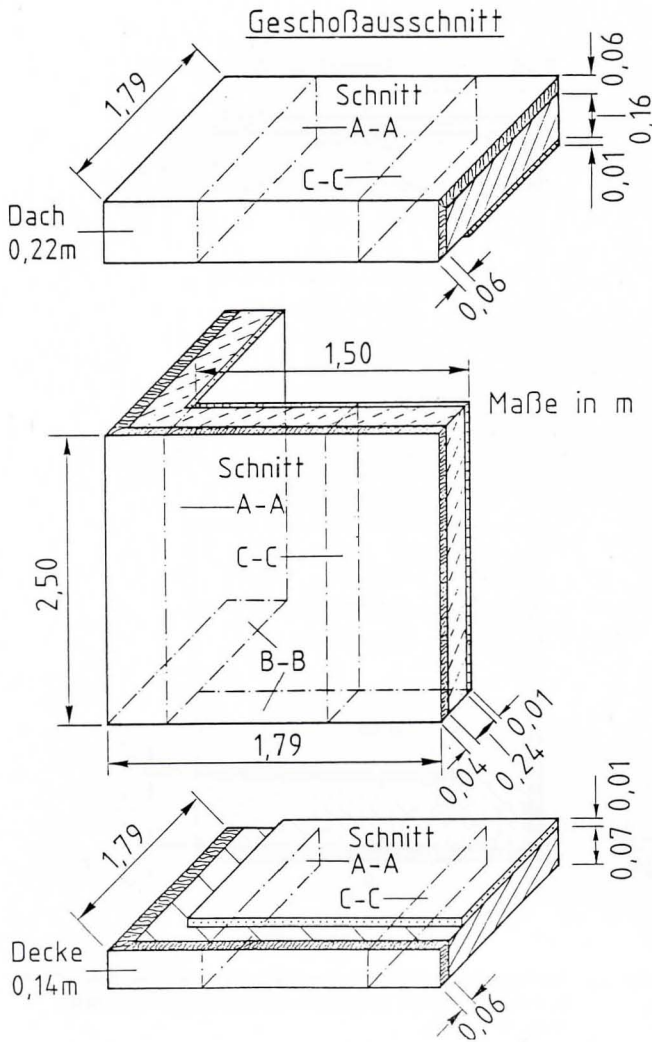


Abb. 8a. Dachgeschoß, bestehend aus den zwei Eckkonstruktionen 6 und 7, dargestellt für den Fall des optimalen Wärmeschutzes (Konstruktion 8)

### 3.2 Ermittlung der Transmissionswärmeverluste einzelner Außenbauteile mit Wärmebrücken

Für die Energiebilanzbetrachtungen am untersuchten Wohnraum mit einem Volumen von  $V_R = 50 \text{ m}^3$  müssen neben den nach Gl. (6) in Abschnitt 3.1 ermittelten Lüftungswärmeverlusten auch noch die Transmissionswärmeverluste durch die drei Außenbauteile (schweres, einschaliges Flachdach, Außenwand ohne Fenster und Außenwand mit Fenster) bei Temperaturrandbedingungen nach DIN 4701 Teil 2 [24] berücksichtigt werden. Zur Ermittlung dieser Transmissionswärmeverluste werden dabei für die genannten Außenbauteile die folgenden inneren Projektionsflächen angenommen. Bei diesen Projektionsflächen muß noch zwischen den durch die Wärmebrückenwirkung gestörten und ungestörten Flächenanteilen unterschieden werden.

- Für das Flachdach ergeben sich bei einer Gesamtfläche von  $A_D = 5,00 \text{ m} \cdot 4,00 \text{ m} = 20,00 \text{ m}^2$  eine ungestörte innere Dachfläche  $A_{DUG} = 3,50 \text{ m}$

$\cdot 4,50 \text{ m} = 15,75 \text{ m}^2$  und eine gestörte innere Dachfläche von  $A_{DG} = 0,50 \text{ m} \cdot 8,50 \text{ m} = 4,25 \text{ m}^2$ , die entlang des Winkels mit den Außenwänden liegt.

- Bei der Außenwand ohne Fensteröffnung findet man bei einer Gesamtfläche  $A_W = 4,00 \text{ m} \cdot 2,50 \text{ m} = 10,00 \text{ m}^2$  einen gestörten Flächenanteil  $A_{WG} = 1,50 \text{ m} \cdot 2,50 \text{ m} = 3,75 \text{ m}^2$  und einen ungestörten Flächenanteil  $A_{WUG} = 2,50 \text{ m} \cdot 2,50 \text{ m} = 6,25 \text{ m}^2$ .
- Bei der Außenwand mit Fenstern wird die gesamte innere Projektionsfläche  $A_{WI} = 5,00 \text{ m} \cdot 2,50 \text{ m} = 12,50 \text{ m}^2$  in die in Abb. 10 (Seite 51) angegebenen Flächenanteile aufgeteilt, und zwar in den durch die Ecke gestörten Anteil  $A_{WIG} = 3,75 \text{ m}^2$ , in den durch Fensteranschluß gestörten Anteil  $A_{WFG} = 4,55 \text{ m}^2$ , in den ungestörten Anteil  $A_{WUG} = 2,50 \text{ m}^2$  und den Fensteranteil  $A_F = 1,70 \text{ m}^2$ .

Zusätzlich zu den Flächenanteilen sind in Abb. 10 noch der k-Wert für das in die Wand eingesetzte Holzfenster nach [4] sowie die für die Wand bei Mindestwär-

meschutz und bei optimalem Wärmeschutz ermittelten k-Werte angegeben. Die k-Werte der Wand im durch das Fenster gestörten Bereich werden um den in [4] angegebenen Zuschlag für den Fensteranschluß erhöht, und zwar um 3% beim Mindestwärmeschutz und um 1,5% beim optimalen Wärmeschutz. Die übrigen k-Werte für die Wände mit und ohne Fenster und das Dach sind den Tab. 5a und 5b in Abschnitt 5.3 (siehe Fortsetzung Heft 4/88) zu entnehmen. Mit Hilfe der einzelnen Flächenanteile der drei Außenbauteile und der zugehörigen k-Werte läßt sich dann der mittlere k-Wert jedes Außenbauteils nach den folgenden Beziehungen ermitteln:

$$k_D = (k_{DG} \cdot A_{DG} + k_{DUG} \cdot A_{DUG}) / A_D \quad (7a)$$

$$k_W = (k_{WG} \cdot A_{WG} + k_{WUG} \cdot A_{WUG}) / A_W \quad (7b)$$

$$k_{WI} = (k_{WIG} \cdot A_{WIG} + k_{WFG} \cdot A_{WFG} + k_{WUG} \cdot A_{WUG} + k_F \cdot A_F) / A_{WI} \quad (7c)$$

Konstruktion Nr.	1	2	3	4	5
Wärmedurchlaßwiderstand im ungest. Bereich $1/\Lambda$ in $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$	0,56	0,56	1,69	1,69	1,51
Innenoberflächentemperatur im Winkel $t_{\text{Winkel}}$ in $^\circ \text{C}$	7,2	12,2	13,6	14,9	15,9
ungest. Innenoberflächentemperatur $t_{iG}$ in $^\circ \text{C}$	12,3	12,3	16,9	16,9	16,5
zulässige rel. Luftfeuchte $\varphi$ in % bei $t_{i1} = 20^\circ \text{C}$	43	61	67	72	77

Tabelle 1. Kennwerte und Rechenergebnisse für die ausgewählten Außenwinkel (zweidimensionalen Wärmebrückenkonstruktionen) bei Tauwasserrandbedingungen

Konstruktion Nr.	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht der Wand $\lambda_{dW}$ in $\text{W}/(\text{mK})$	-	0,06	0,05	0,04	0,03
Wärmedurchlaßwiderstand der Wand im ungest. Bereich $1/\Lambda$ in $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$	0,56	1,02	1,15	1,36	1,70
Innenoberflächentemperatur $t_{\text{Ecke}}$ in $^\circ \text{C}$ A: $\alpha_i = 5,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$	6,30	10,50	11,30	12,30	13,50
Innenoberflächentemperatur $t_{\text{Ecke}}$ in $^\circ \text{C}$ B: $\alpha_i = 4,00 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$	4,40	8,80	9,80	10,50	12,30

Tabelle 2. Kennwerte und Rechenergebnisse für die Außeneckenkonstruktionen 6.1 bis 6.5 (zwei Außenwände, Zwischendecke)

Konstruktion Nr.	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5
Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht der Wand $\lambda_{dW}$ in $\text{W}/(\text{mK})$	-	0,06	0,05	0,04	0,03
Wärmedurchlaßwiderstand der Wand im ungest. Bereich $1/\Lambda$ in $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$	0,56	1,02	1,15	1,36	1,70
Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht des Dachs $\lambda_{dD}$ in $\text{W}/(\text{mK})$	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03
Wärmedurchlaßwiderstand des Dachs im ungest. Bereich $1/\Lambda$ in $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$	1,10	1,10	1,30	1,60	2,10
Innenoberflächentemperatur $t_{\text{Ecke}}$ in $^\circ \text{C}$ A: $\alpha_i = 5,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$	3,40	6,10	7,30	8,70	10,50
Innenoberflächentemperatur $t_{\text{Ecke}}$ in $^\circ \text{C}$ B: $\alpha_i = 4,00 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$	1,20	4,00	5,20	6,80	8,80

Tabelle 3. Kennwerte und Rechenergebnisse für die Außeneckenkonstruktionen 7.1 bis 7.5 (zwei Außenwände, Flachdach)



Aus den mittleren k-Werten für die drei wärmeübertragenden Außenbauteile und den zugehörigen inneren Projektionsflächen errechnen sich die gesamten Transmissionswärmeverluste des Wohnraums nach der folgenden Gleichung:

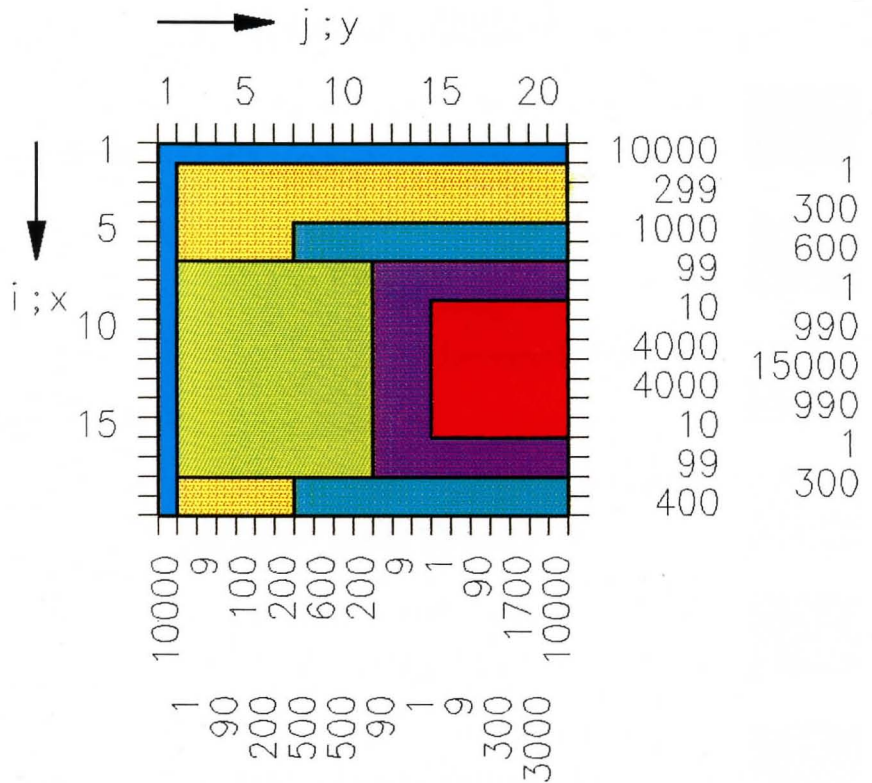
$$\dot{Q}_T = (k_D \cdot A_D + k_W \cdot A_W + k_{WI} \cdot A_{WI}) \cdot (t_{Li} - t_{La}) \quad (8)$$

Als Lufttemperaturen sind in Gl. (8) nach DIN 4701 Teil 2 [24] als Innenlufttemperatur  $t_{Li} = 20^\circ\text{C}$  und als Außenlufttemperatur für den Standort Berlin  $t_{La} = -14^\circ\text{C}$  anzusetzen. Da die untersuchten Außenbauteile schwere Bauart aufweisen, muß zu  $t_{La}$  noch  $\Delta t = 2\text{ K}$  addiert werden.

#### 4 Rechenverfahren und Rechengang

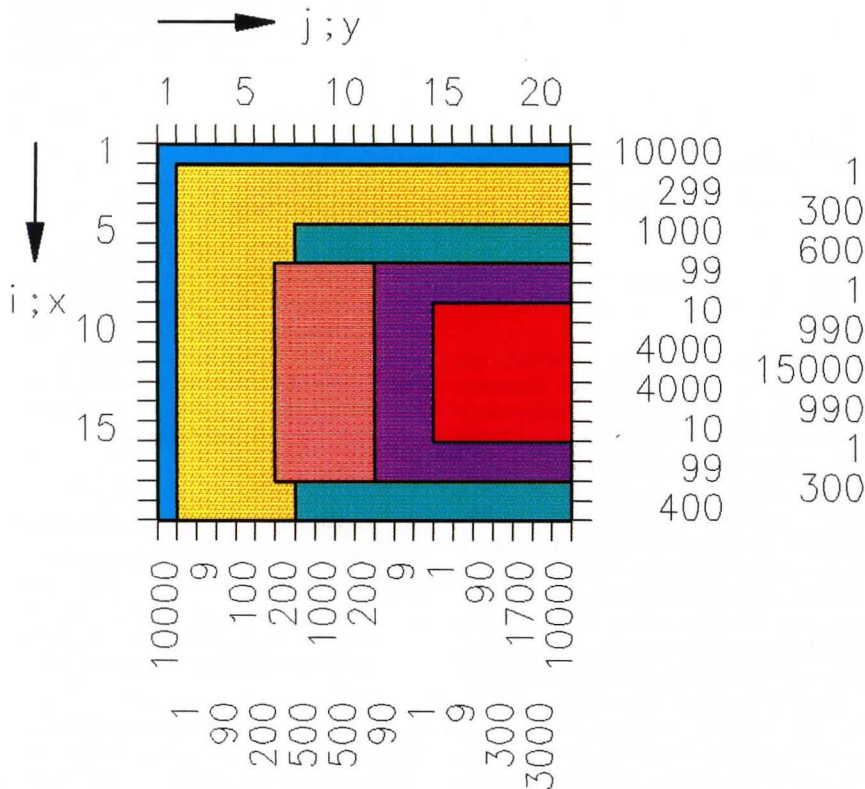
##### 4.1 Rechenverfahren

Zur Bestimmung der minimalen Innenoberflächentemperaturen und der Transmissionswärmeverluste der untersuchten Winkel und Ecken wurde das im Labor 2.44 der BAM entwickelte Rechenprogramm STAT3D eingesetzt, das die Berechnung dreidimensionaler Temperatur- und Wärmestromverteilungen unter stationären Randbedingungen erlaubt und in [30] ausführlich dokumentiert ist.



$$k = 21; Dz = 10000; \text{Abm. in } 10^{-4}\text{m}$$

Abb. 8b. Elementaufteilung des Dachgeschosses mit Mindestwärmeschutz (Abb. 8a, Schnitt C-C)



$$k = 21; Dz = 10000; \text{Abm. in } 10^{-4}\text{m}$$

Abb. 8c. Elementaufteilung des Dachgeschosses mit optimalem Wärmeschutz (Abb. 8a, Schnitt C-C)

In diesem Programm wird die stationäre Wärmeleitungsgleichung für mehrschichtige Bauteile mit Hilfe der Methode der finiten Differenzen gelöst. Dazu wird die jeweilige Konstruktion unter Ausnutzung vorhandener Symmetrien in rechtwinklige, quaderförmige Volumenelemente unterteilt. Jedem Volumenelement wird im Schwerpunkt ein Knoten zugeordnet, dessen Temperatur als Bestimmungsgröße eingeführt wird. Aus einer Energiebilanz für jeden Knoten entsteht dann ein positiv definites, symmetrisches Gleichungssystem. Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt mit Hilfe eines direkten Lösungsverfahrens. Dabei wird das auf der Wechselplatte gespeicherte Gleichungssystem blockweise im Hauptspeicher gelöst. Mit der vorhandenen Rechenprogrammversion lassen sich stationäre Wärmeleitungsprobleme, wie die hier untersuchten geometrischen Wärmebrücken, mit bis zu 9000 unbekanntenen Temperaturen und je 6 Wärmeströmen am quaderförmigen Volumenelement berechnen. Zusatzprogramme erlauben außerdem, normierte, farbige Elementaufteilungen und maßstäbliche, farbige oder schwarzweiße Isothermenverläufe in jeder Schichtebene zu erstellen.

## BAUSTOFFE UND RANDBEDINGUNGEN

	Wärmeübergang, aussen $\vartheta_{La} = -15.0\text{ °C} ; \alpha_a = 25.00\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
	Beton $\lambda = 2.100\text{ W}/(\text{mK})$
	Wärmedämmstoff
	Mauerwerk $\lambda = 0.700\text{ W}/(\text{mK})$
	Innen- bzw. Aussenputz $\lambda = 0.700\text{ W}/(\text{mK})$
	Aluminium $\lambda = 200.000\text{ W}/(\text{mK})$
	Bauplatte $\lambda = 0.580\text{ W}/(\text{mK})$
	Leichtbeton $\lambda = 0.440\text{ W}/(\text{mK})$
	Wärmeübergang, innen $\vartheta_{Li} = 20.0\text{ °C} ; \alpha_i = 5.88\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Abb. 9. Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeiten der Baustoffe, Randbedingungen (Fall A) und Farbuordnung

### 4.2 Rechengang

Für alle untersuchten Außenwinkel bzw. Außenecken werden Ausschnitte mit innenseitigen Wandlängen von 1,50 bzw. 2,00 m zugrunde gelegt. Die Aufteilung in Volumenelemente erfolgte nach [30]. Für die Außenwinkel 1 bis 5 (zweidimensionale geometrische Wärmebrückenkonstruktionen) sind die Anzahl der Schichten in x- und y-Richtung und die Elementaufteilungen den Abb. 1 bis 5 zu entnehmen. In z-Richtung wird bei diesen Konstruktionen jeweils eine Einheitstiefe von  $\Delta z = 1\text{ m}$  angenommen. Die Kennwerte der Baustoffe sind in Abb. 9, die Wärmedurchlaßwiderstände in Tab. 1 (Seite 48) zusammengestellt. Der Dachgeschoßausschnitt mit den beiden dreidimensionalen geometrischen Wärmebrücken (Konstruktionen 6 und 7) wurde in 21 Schichten in y-sowie in 21 Schichten in z-Richtung und in 19

Schichten in x-Richtung unterteilt, vgl. Abb. 8b, c und 11a, b. Zur genauen Bestimmung der Innenoberflächentemperaturen wurden bei allen betrachteten Wänden sowie auf der Innenseite des Dachs und auf der Oberfläche der Decke dünne Schichten auf der Innenseite eingeführt. Während für die Mauerwerksaußenwinkel 1 bis 5 der Wärmedurchlaßwiderstand der Wände als konstant angenommen wurde, wurden für den Dachgeschoßausschnitt (Konstruktion 8) die Wärmeleitfähigkeiten der in den Abmessungen konstanten Wärmedämmschichten der Wände und des Dachs von  $\lambda = 0,030$  bis  $0,060\text{ W}/(\text{mK})$  variiert. Zusätzlich zu diesen Parametervariationen wurde noch eine Vergleichsrechnung für den Fall des Mindestwärmeschutzes von Dach und Wänden durchgeführt. Die sich ergebenden Wärmedurchlaßwiderstände für den ungestörten Bereich der

Wände bzw. des Dachs sind Tab. 2 (Seite 48) bzw. Tab. 3 (Seite 48) zu entnehmen. Die Mindestwerte der Wärmedurchlaßwiderstände für Dächer und Wände sind in DIN 4108 Teil 2 [9] aufgeführt, vgl. a. die Konstruktionen 6.1 und 7.1. Bei allen Konstruktionen wurden zur Abschätzung des Tauwasserrisikos die folgenden Temperatur- und Wärmeübergangsrandbedingungen nach DIN 4108 Teil 3 [10] zugrunde gelegt:

Außenlufttemperatur	$t_{La} = -15\text{ °C}$
äußerer Wärmeübergangswiderstand	$1/\alpha_a = 0,04\text{ m}^2\text{ K/W}$
innerer Wärmeübergangswiderstand (Fall A)	$1/\alpha_i = 0,17\text{ m}^2\text{ K/W}$
Innenlufttemperatur	$t_{Li} = 20\text{ °C}$

Den Berechnungen mit Tauwasserrandbedingungen nach DIN 4108 Teil 3 [10] (Fall A) wurde für das Dachgeschoß noch der Fall stark behinderter Luftzirkulation (Fall B) gegenübergestellt, der z. B. durch in den Ecken aufgestellte Möbel verursacht wird. Hierfür wurde auf der Innenseite ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand angenommen:

innerer Wärmeübergangswiderstand (Fall B)	$1/\alpha_i = 0,25\text{ m}^2\text{ K/W}$
---	---

Neben den bisher genannten Untersuchungsvarianten, die der Klärung des Tauwasserrisikos und damit verbunden der Frage nach hygienisch einwandfreien Wohnverhältnissen dienen, sind noch die Transmissionswärmeverluste beim Dachgeschoß ermittelt worden. Zu ihrer Berechnung wurde ein

innerer Wärmeübergangswiderstand (k-Wert-Berechnung)	$1/\alpha_i = 0,13\text{ m}^2\text{ K/W}$
--	---

nach DIN 4108 Teil 4 [8] zugrunde gelegt. Die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeiten wurden ebenfalls [8] entnommen. Sie sind zusammen mit den für alle Konstruktionen gleichartigen Farbuordnungen der Baustoffe und den Randbedingungen (Fall A) aus Abb. 9 sowie dem Textteil und den Tab. 2 und 3 ersichtlich.

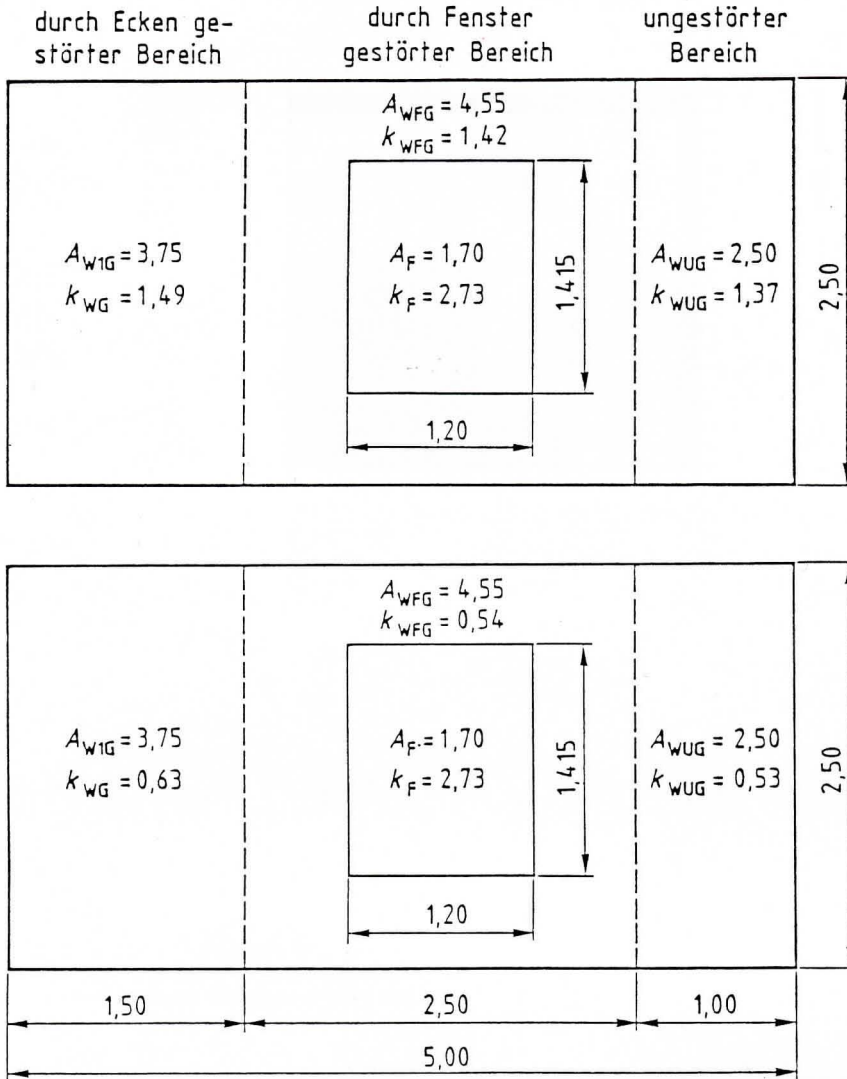
## 5 Ergebnisse und Ergebnisdiskussion

### 5.1 Oberflächentemperaturen, Tauwasserrisiko, Mindestluftwechsel bei Außenwinkeln (zweidimensionalen Wärmebrückenkonstruktionen)

Die mit Hilfe des Rechenprogramms STAT3D ermittelten Innenoberflächentemperaturen im Winkel für die zweidimensionalen geometrischen Wärmebrückenkonstruktionen 1 bis 5 sind zusammen mit den Innenoberflächentemperaturen und den Wärmedurchlaßwiderständen im ungestörten Bereich der



## Innere Projektionsfläche



$A$  in  $m^2$ ,  $k$  in  $W/(m^2K)$ , Maße in  $m$

Abb. 10. Innere Projektionsflächen  $A_W$  und  $k$ -Werte für Wand mit Fenster im untersuchten Wohnraum  
 - Wand mit Mindestwärmeschutz (oben)  
 - Wand mit optimalem Wärmeschutz (unten)

Wände in Tab. 1 aufgeführt. Zusätzlich sind die unter Berücksichtigung der minimalen Innenoberflächentemperaturen gerade noch zulässigen relativen Luftfeuchten eingetragen.

Man erkennt, daß nur die Konstruktion 1 mit Mindestwärmeschutz der Wände im Winkel die sich nach DIN 4108 Teil 5 [11] für  $\varphi = 50\%$  ergebende Taupunkttemperatur von  $t_s = 9,3^\circ C$  unterschreitet und deshalb oberhalb von  $\varphi = 43\%$  mit Oberflächentauwasser zu rechnen ist. Jedoch läßt sich durch die Vorsatzschale, entsprechend Konstruktion 2, die Innenoberflächentemperatur im Winkel nahezu auf das Niveau im ungestörten Wandbereich erhöhen. Diese Verbesserung wird auch beim Vergleich der farbigen Isothermenverläufe, Abb. 12 und 13

(siehe Fortsetzung Heft 4/88), deutlich. Dabei liegt die Innenoberflächentemperatur zwischen Winkel und ungestörtem Bereich sogar noch höher, wie man in Abb. 13 erkennt.

Eine weitere Anhebung der Innenoberflächentemperaturen ist sonst nur bei gleichzeitiger Anhebung des Wärmeschutzes möglich, wie die Konstruktionen 3 und 4 zeigen. Allein unter dem Gesichtspunkt der Temperaturabsenkung im Winkel betrachtet, ist die innengedämmte Konstruktion günstiger einzustufen als die außengedämmte, s. a. Abb. 14 und 15 (siehe Fortsetzung Heft 4/88). Da jedoch bei Innendämmung u. U. Maßnahmen gegen die Durchfeuchtung des Wandinneren getroffen werden müssen und außerdem im Bereich des Fensteran-

schlusses weitere Wärmebrückenprobleme auftauchen können [2, 4], ist eine außenliegende Wärmedämmung beim Wohnungsneubau im allgemeinen als vorteilhafter anzusehen, vgl. hierzu auch [22].

Eine noch günstigere Innenoberflächentemperatur im Winkel bei sogar etwas geringerem Wärmedurchlaßwiderstand findet man für Konstruktion 5, weil dort die Schicht hoher Wärmeleitfähigkeit auf der Innenseite der Konstruktion liegt.

Die Innenoberflächentemperatur im Winkel unterschreitet die Innenoberflächentemperatur im ungestörten Bereich nur um  $0,6 K$ . Die Innenoberflächentemperatur ist, wie auch der farbige Isothermenverlauf von Abb. 16 (siehe Fortsetzung Heft 4/88) zeigt, nahezu überall gleich groß.

Um auch die Frage des Tauwasserausfalls in der Übergangszeit zu klären, wurden mit Hilfe der in Tab. 1 angegebenen minimalen Innenoberflächentemperaturen die normierten Innenoberflächentemperaturen  $\Theta_{WB}$  der zweidimensionalen Wärmebrücken bestimmt. Diese wurden mit den normierten Taupunkttemperaturen  $\Theta_s$  verglichen, die für die spezifischen Wasserdampfproduktionen  $\Delta c$  von  $0,002 kg/m^3$ ,  $0,004 kg/m^3$  und  $0,006 kg/m^3$  in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur mit Hilfe der Gl. (2) und (4) aus Abschnitt 3 berechnet wurden.

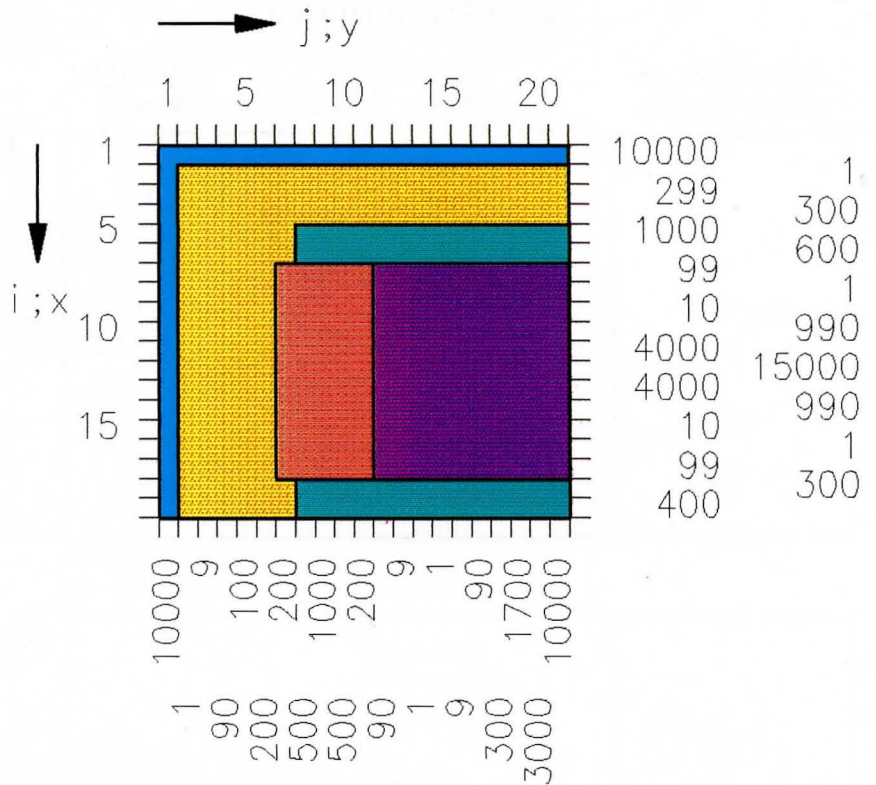
Man erkennt aus Abb. 17 (siehe Fortsetzung Heft 4/88), daß im Winter alle Konstruktionen bis zu der hier angenommenen spezifischen Wasserdampfproduktion von  $0,006 kg/m^3$  von der Oberflächenkondensation verschont bleiben. Ihre normierten Innenoberflächentemperaturen liegen mit den Werten von  $0,63$  für die Konstruktion mit Mindestwärmeschutz (Konstruktion 1) bis zu  $0,88$  für die Sandwichkonstruktion (Konstruktion 5) oberhalb der höchsten normierten Taupunkttemperatur. Eine nur geringe Erhöhung der spezifischen Wasserdampfproduktion oder eine Verringerung der Luftzirkulation im Winkel läßt jedoch Konstruktion 1 sofort versagen. Wesentlich ungünstiger verhalten sich alle Konstruktionen in den Übergangszeiten (Herbst bzw. Frühjahr). In den Übergangszeiten kann Oberflächentauwasser nur verhindert werden, wenn der Mindestluftwechsel auf beispielsweise  $0,75 h^{-1}$  erhöht wird. Bei den besser wärmedämmten Konstruktionen 2 bis 5 ist nach Abb. 17 mit Tauwasserausfall erst bei höheren Außenlufttemperaturen zu rechnen. Im Vergleich zu Konstruktion 1 verkürzen sich bei den Konstruktionen 2 bis 5 während der Übergangszeiten jedoch die Zeiträume, in denen eine höhere Luftwechselzahl notwendig ist. Beim Mindestwärmeschutz sind also zusätzlich zu den erhöhten Transmissionswärmeverlusten noch über das notwendige Maß hinaus erhöhte Lüftungswärmeverluste in Rechnung zu stellen, wenn Tauwasserausfall vermieden werden soll.



Faßt man die Ergebnisse bei zweidimensionalen geometrischen Wärmebrücken zusammen, so läßt sich folgendes feststellen:

- Hohe Innenoberflächentemperaturen im Winkel, und damit geringeres Tauwasserrisiko, lassen sich im Winter durch Verbesserung des Wärmedurchlaßwiderstandes der Außenbauteile, durch wärmedämmende Vorsatzschalen und durch Bauteilschichten hoher Wärmeleitfähigkeit auf der Innenseite erreichen.
- Vermeidung von Tauwasser macht bei allen Konstruktionen während der Übergangszeiten eine Anhebung des Mindestluftwechsels über den Wert der DIN 4701 hinaus nötig, jedoch für unterschiedlich lange Zeiträume.
- Bei Einhaltung des Mindestwärmeschutzes sind nicht nur die Transmissions-, sondern auch die Lüftungswärmeverluste am größten. Diese Aussage wird noch bei den Ecken ausführlicher behandelt.

Im Hinblick auf die beim Mindestwärmeschutz zur Vermeidung von Tauwasser ausfall in Winkeln erforderlichen Lüftungswärmeverluste ist der Mindestwärmeschutz nicht als energiesparende Bauweise anzusehen.



$k = 14; Dz = 1; \text{Abm. in } 10^{-4}\text{m}$

Abb. 11a. (oben)  
Elementaufteilung Innenoberfläche Wand in der Putzebene beim Dachgeschoß mit optimalem Wärmeschutz (Abb. 8a, Schnitt A-A)

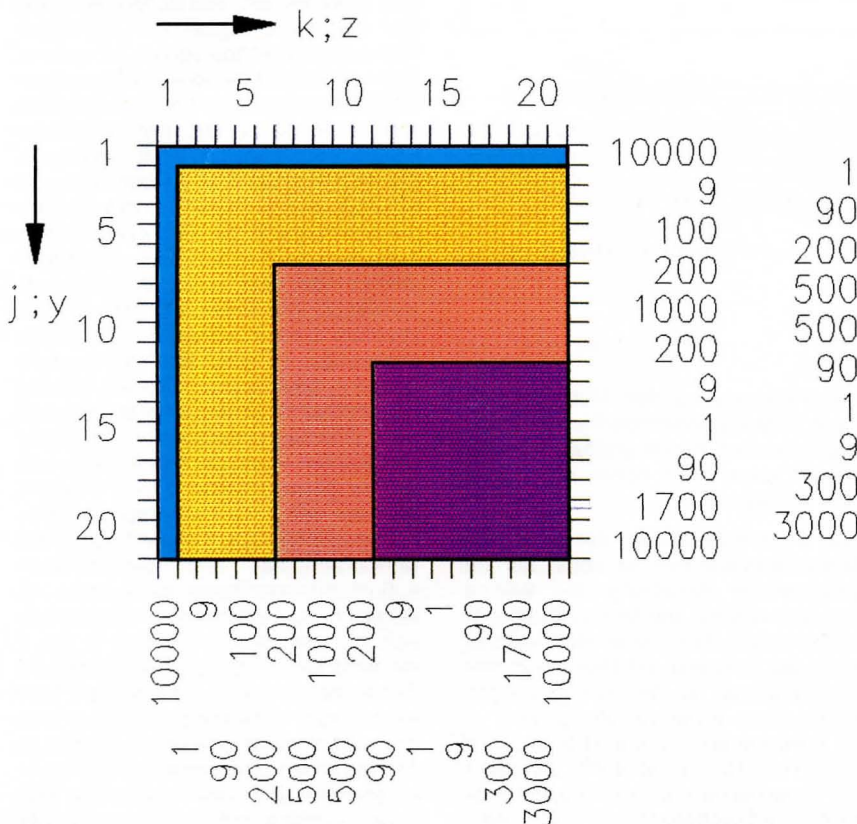


Abb. 11b. (links)  
Elementaufteilung Innenoberfläche Fußboden in der Putzebene beim Dachgeschoß mit optimalem Wärmeschutz (Abb. 8a, Schnitt B-B)

$i = 8; Dx = 1; \text{Abm. in } 10^{-4}\text{m}$

Fortsetzung des Artikels mit den Abbildungen 12 bis 17 in Heft 4/88