

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

3

AUSSENSTELLE HOLZKIRCHEN

Amtlich anerkannte Prüfstelle für die Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten

Institutsleitung: Prof. Dr. F. P. Mechel

26. Sept. 1983

"Rechnerische Untersuchung über die thermische Wirkung von Wärmebrücken"

B Ho 8/83-III

durchgeführt in der
Außenstelle Holzkirchen des
Fraunhofer-Instituts für Bauphysik

Leiter der Außenstelle: Dr.-Ing. H. Künzel

Verfasser : Dr. H. Werner
Dipl.-Ing. H. Schaube

Holzkirchen, den 26. September 1983

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Instituts
für Bauphysik gestattet.



Inhaltsverzeichnis

Einleitung

1. Kurzbeschreibung des Rechenverfahrens
2. Zugrunde gelegte Randbedingungen
3. Thermische Auswirkung des Bodenplattenschnitts
4. Wärmebrückenwirkung im Bodeneckenbereich der Versuchsräume
5. Rechnerische Ermittlung von Wärmebrückeneffekten in Wohnbauten
 - 5.1 Die berücksichtigten Wärmebrücken
 - 5.2 Ergebnis der Ermittlung

Tabellen und Bilder

Einleitung

Ergänzend zu experimentellen Untersuchungen an Versuchsräumen (siehe Bericht B Ho 8/83-II, "Meßtechnische Untersuchungen über den effektiven Wärmeschutz verschiedener Ziegelaußenwandkonstruktionen") wurden mehrere Simulationsrechnungen durchgeführt, um allgemein den Einfluß von Wärmebrückeneffekten auf den Transmissionswärmeverlust von Gebäuden zu analysieren. Dabei wurden speziell in den erstellten Versuchsräumen auftretende Effekte, aber auch andere in der Praxis in Wohngebäuden vorkommende berücksichtigt. Detaillierte Angaben zu den Versuchsräumen und der dort vorkommenden Wärmebrücken sind dem oben genannten Bericht zu entnehmen.

1. Kurzbeschreibung des Rechenverfahrens

Mit Hilfe einer numerischen Rechenmethode zur zweidimensionalen stationären Wärmeleitung wurde die thermische Auswirkung von verschiedenen Wärmebrücken unter vorgegebenen Randbedingungen quantitativ bestimmt.

Die Methode im einzelnen:

Unter Anwendung des Differenzenverfahrens wird das untersuchte zweidimensionale Feld, hier der Querschnitt durch die Wärmebrücke, mit einem Netz von Gitterpunkten überzogen, und so in seiner Form und Ausdehnung angenähert. Nach Aufstellung der Energiebilanz für jeden Gitterpunkt stellt sich die Berechnung des zweidimensionalen Temperaturfeldes dann als die numerische Lösung eines Systems von partiellen Differentialgleichungen (Laplace-Gleichungen) dar, zu dessen Auflösung bekannte Verfahren, wie z. B. die Gauß-Seidel-Iteration herangezogen werden können. Die Kenntnis der Temperaturverteilung an den Bauteilinnenoberflächen gestattet es, die Transmissionswärmeverluste im Wärmebrückenbereich mit Hilfe des Wärmeübergangskoeffizienten und der Differenz zwischen Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur zu berechnen.

Wegen des hohen Rechenaufwandes mußte zur Lösung der gestellten Aufgabe ein Rechenprogramm für eine elektronische Rechenanlage entwickelt werden.

2. Zugrunde gelegte Randbedingungen

Bei allen durchgeführten Variationsrechnungen wurden die gleichen Randbedingungen simuliert:

- Außenlufttemperatur 0°C
- Innenlufttemperatur 20°C
- Lufttemperatur im Keller 12°C
- Wärmeübergangskoeffizient an den Außenoberflächen:
 $23 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wärmeübergangskoeffizient an den Innenoberflächen:
lineare Zunahme von 4 auf $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ bis 4 cm
(Außenecke 20 cm) Abstand von der Ecke, dann konstant $8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Eindimensionaler Temperaturverlauf im Bauteil in
ca. $1,5 \text{ m}$ Abstand von der Ecke

3. Thermische Auswirkung des Bodenplatteneinschnitts

Während des ersten Untersuchungsabschnitts^{*)} zeigte sich, daß der Wärmebrückeneffekt im Bereich der Bodenecke (Fußboden-Wandanschluß) in allen Versuchsräumen stark ausgeprägt war. Um den Effekt zu mindern, wurden die auskragenden Bodenplatten bündig zur Außenwand abgeschnitten und die daraus resultierenden Spalte mit Dämmstoff (extrudiertes Polystyrol) ausgefüllt. Die Ergebnisse der Variationsrechnungen ohne und mit Einschnitt sind in Tabelle 1 exemplarisch für den Raum 5 dargestellt und sollen die rechnerische Abschätzung der Auswirkung dieser Maßnahme verdeutlichen. Hierzu werden die Transmissionswärmeverluste im Bereich der Wärmebrücke unter gleichen Randbedingungen für beide Fälle gegenübergestellt. Zur besseren Übersicht ist in Tabelle 1 der konstruktive Aufbau der Wärmebrücke schematisch dargestellt und der k-Wert der Außenwand angegeben. Tabellarisch zusammengefaßt sind die bis 1 m Abstand von der Ecke aufsummierten Wärmeströme (q_T) im Wand- und Fußbodenbereich, bezogen auf 1 m Kantenlänge (Wärmestromdichten)

^{*)} siehe Bericht B Ho 8/83-II, Meßtechnische Untersuchungen über den effektiven Wärmeschutz verschiedener Ziegelaußenwandkonstruktionen.

ohne Berücksichtigung des Wärmebrückeneinflusses (eindimensional, jeweils gleich) und der Wärmestrom (q_{WB}) im Wand-Fußbodenbereich unter Berücksichtigung des Wärmebrückeneinflusses (zweidimensional). Zusätzlich sind noch die Differenz aus diesen Werten (absolut und prozentual) angegeben. Aus der minimalen Abweichung zeigt sich, daß der Bodenplatteneinschnitt keinen wesentlichen Einfluß auf die Wärmebrückenwirkung hat.

4. Wärmebrückenwirkung im Bodeneckenbereich der Versuchsräume

Die Messung der Heizenergieverbräuche für die einzelnen Versuchsräume hat gezeigt, daß der spezifische Transmissionswärmeverlust von Gebäudeaußenteilen deutlich vom rechnerischen k-Wert abweichen kann, und zwar umso mehr, je niedriger der rechnerische k-Wert der Außenwand liegt. Diese Abweichungen sind eine Folge von Wärmebrückenwirkungen in verschiedenen Bereichen. Eine erhebliche thermische Auswirkung für die Versuchsräume haben die Wärmebrücken im Bodeneckenbereich. Aus diesem Grund wurden in Tabelle 2 die Ergebnisse aus Variationsrechnungen für diesen Bereich in den Versuchsräumen 3, 5 und 4a vergleichend gegenübergestellt. In der Tabelle sind die unterschiedlichen Konstruktionen durch eine schematische Darstellung und die Angabe des k-Wertes der Außenwand beschrieben. Aufgelistet sind für jede Bodenecke die auf 1 m Kantenlänge bezogenen und bis 1 m Abstand von der Ecke aufsummierten Wärmeströme (Wärmestromdichten) für den Wand- und Fußbodenbereich im eindimensional gerechneten Fall (ohne Wärmebrückenwirkung) und im zweidimensional gerechneten Fall (mit Wärmebrückenwirkung). Die Differenzen aus diesen Werten sind als Absolutbeträge und in Prozent angeführt.

Der Vergleich der Räume 5 und 4a zeigt z.B., daß die wesentlich besser gedämmte Wand ($k_W = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$) nicht nur prozentual (158% zu 83%), sondern auch absolut einen durch den Wand-Fußbodenanschluß bewirkten höheren Mehrverlust ($7,9 \text{ W/m}^2$ gegenüber $7,0 \text{ W/m}^2$) aufweist. Allerdings der Gesamttransmissionswärmeverlust einschließlich des Wärmebrückeneffekts erniedrigt sich bei der extrem gedämmten Wand dennoch ($12,9 \text{ W/m}^2$ gegenüber $15,4 \text{ W/m}^2$).

Daraus ist zu folgern, je niedriger der k-Wert der Außenwand ist, desto größer kann der durch die Wärmebrücke verursachte Mehrverlust an Transmissionswärme im Bereich der Bodenecke werden; und zwar nicht nur prozentual, sondern auch in Bezug auf die Absolutbeträge der Differenzen.

5. Rechnerische Ermittlung von Wärmebrückeneffekten an Wohnbauten

Da aufgrund der speziellen Versuchsanordnung (siehe B Ho 8/83-II) mit der beispielartig die Abhängigkeit des Heizenergieverbrauchs vom k-Wert der Wand meßtechnisch gezeigt werden sollte, man nicht in direkter Ableitung der gewonnenen Ergebnisse auf die heizenergetische Auswirkung von Wärmebrücken im Wohnungsbau schließen kann, wurde eine rechnerische Abschätzung der Wirkung typischer Wärmebrücken für ein Ein- und Mehrfamilienhaus durchgeführt. Dabei sollte auch die Frage geklärt werden, ob sich in Bezug auf den Transmissionswärmeverlust mit Wärmebrückeneinfluß Gebäude mit einer monolithischen und Gebäude mit einer außengedämmten Außenwand unterscheiden. Der k-Wert der Wand beträgt in beiden Fällen $0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$, wobei die folgenden Außenwandkonstruktionen zugrunde gelegt werden:

- Leichtziegelmauerwerk (Dicke 49 cm, $\lambda = 0,25 \text{ W/mK}$),
monolithisch

- Hochlochziegelmauerwerk (Dicke 24 cm, $\lambda = 0,6$ W/mK)
mit Außendämmung (Dicke 6 cm, $\lambda = 0,04$ W/mK)

5.1 Die berücksichtigten Wärmebrücken

In die Modellrechnung wurden gemäß Tabelle 3 typische Wärmebrücken einbezogen, und zwar:

- die "Deckenecke" (DE), oberster Decken (Dach)-Wand-Anschluß
- die Einbindung der "Geschoßdecke" (GD) in die Außenwand
- Die Einbindung der Kellerdecke in die Außenwand ("Bodenecke" BE)
- die "Außenecke" (AE)
- und der Anschluß einer Trennwand ("Zwischenwand" ZW) an die Außenwand.

Konstruktiver Aufbau:

In den Bildern 1 bis 5 ist u.a. der konstruktive Aufbau der einzelnen Wärmebrücken schematisch dargestellt. Für die Decke im obersten Geschoß, die Zwischengeschoßdecke, die Kellerdecke und die Trennwand werden bei der außengedämmten Wand die gleichen Bauteile verwendet wie bei der monolithischen Wand; sie werden hier kurz beschrieben:

Die Decke im obersten Geschoß, bestehend aus den Einzelschichten Beton (18 cm), Dämmstoff (10 cm) und Estrich (5 cm), hat einen k-Wert von $0,36$ W/m²K. Zwischen den einzelnen Geschoßen ist eine einfache Betondecke (Dicke 18 cm) eingezogen und für die Trennwände (Zwischenwände)

wird ein Hochlochziegelmauerwerk (Dicke 17,5 cm) verwendet. Mit den Schichten Beton (18 cm), Dämmstoff (7 cm) und Estrich (5 cm) ergibt sich für die Kellerdecke ein k-Wert von $0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Im eng begrenzten Bereich der Deckenaufleger (Deckenecke, Zwischengeschoßdecke) weichen die monolithische und die ausgedämmte Wand im Hinblick auf den konstruktiven Aufbau voneinander ab:

Bei der Deckenecke (Bild 1) ist in beiden Fällen an der Stirnseite der Betondecke ein Dämmstreifen (Dicke 7 cm) angebracht, an den sich das gleiche Mauerwerk anschließt, wie es für die Außenwand verwendet wird. Die Geschoßdecke (Bild 2) endet bei der Außendämmung bündig mit dem Mauerwerk; bei der monolithischen Wand ist an der Stirnseite ein Dämmstreifen (Dicke 7 cm) angebracht und die außen verbleibende Lücke ist mit einer Deckenabmauerung aus Mauerziegeln (11,5 cm dick) verschlossen. Bei beiden Lagerungen liegt im Falle der monolithischen Außenwand die Decke auf einer Schicht Vollziegel (kreuzweise schraffierter Bereich auf).

Thermische Auswirkung:

Maßgebend für den Transmissionswärmestrom im Bereich der Wärmebrücken ist die Temperaturverteilung an den Bauteilinnenoberflächen. Die mit Hilfe des eingangs erwähnten Rechenprogramms ermittelten Temperaturverteilungen bis 1 m Abstand von der Ecke zeigen die Bilder 1 bis 5 jeweils für die monolithische und die außengedämmte Wand. In den einzelnen Bildern sind die Ecktemperaturen und die jeweiligen inneren Oberflächentemperaturen in Eckennähe dargestellt, woraus die Ausdehnung der einzelnen

Wärmebrücke zu ersehen ist. Es fällt auf, daß trotz des gleichen k -Wertes die Temperaturverteilungen in den jeweiligen Eckbereichen für die monolithische und für die außengedämmte Wand sehr unterschiedlich sein können.

Eine Übersicht der die Wärmebrücken charakterisierenden Größen ist in Tabelle 3 gegeben. Die Abmessungen s_1 , s_2 und s_3 kennzeichnen die Bereiche, in denen die innere Oberflächentemperatur mehr als $0,1$ K unter der Oberflächentemperatur für den eindimensionalen Fall liegt. Die schwarzen Pfeile bzw. q_1 , q_2 stehen für die Wärmestromdichten des eindimensionalen Wärmedurchgangs. Die weißen Pfeile versinnbildlichen den durch die Anordnung der Bauteile (Wärmebrücke) verursachten erhöhten Wärmestrom pro 1 m Kantenlänge auf der Innenoberfläche. Zur Orientierung sind noch die jeweils tiefsten Temperaturen t_{\min} und die Oberflächentemperaturen t_1 und t_2 angegeben. Bemerkenswert ist, daß die Ausdehnung (s_1 , s_2 , s_3) der Wärmebrücken bei monolithischer bzw. außengedämmter Außenwand ebenfalls unterschiedlich sein kann, obwohl die k -Werte der jeweiligen Außenwand gleich sind ($k_w = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Damit die einzelnen Wärmebrücken je nach Außenwandkonstruktion in ihrer thermischen Auswirkung verglichen werden können, sind in Tabelle 4 die Wärmestromdichten in den einzelnen Eckbereichen für die monolithische und die außengedämmte Wand zusammengefaßt. Es handelt sich dabei um die auf 1 m Kantenlänge bezogenen und bis 1 m Abstand von der Ecke aufsummierten Wärmeströme im Bereich der Außenwand und des Anschlußteils (Decke, Trennwand). Bei der Berechnung der Werte für q_{WB} (zweidimensional) wird die Wärmebrückenwirkung berücksichtigt, bei der Berechnung von q_T (eindimensional) dagegen nicht. Die angegebene Differenz ist der durch die Anordnung der Bauteile verursachte Mehrverlust an Transmissionswärme, der in der Tabelle Absolut ($\Delta = q_{WB} - q_T$) und prozentual ($\Delta = q_{WB} - q_T / q_T$) angegeben ist. Der Vergleich zwischen außengedämmter

und monolithischer Wand fällt unterschiedlich aus.

Die Außendämmung schneidet im Hinblick auf den Mehrverlust bei der Geschoßdecke (14,7% zu 19,6%) und bei der Deckenecke (23,8% zu 25,6%) etwas günstiger ab, dagegen ist dies umgekehrt bei der Aueßnecke (16,3% zu 12,0%) und bei der Zwischenwand (11,4% zu 8,7%). Am deutlichsten ist der Unterschied bei der Bodenecke; hier ist die monolithische Wand erheblich günstiger (13,8% zu 35,4%).

An dieser Stelle muß darauf hingewiesen werden, daß bei der Interpretation der durch die Wärmebrückenwirkung verursachten Mehrverluste an Transmissionswärme man die prozentuale Veränderungen mit Vorsicht bewerten muß, und es unbedingt notwendig ist, auch die absoluten Differenzbeträge zu beachten.

5.2 Ergebnis der Ermittlung

Die Abschätzung der unterschiedlichen Wirkung der Wärmebrücken bei monolithischer und außengedämmter Außenwand wurde an zwei Modellgebäuden durchgeführt, wie sie in Tabelle 5 in Grund- und Seitenansicht schematisch dargestellt sind. Das Einfamilienhaus ist eingeschößig, hat eine quadratische Grundfläche von 10 x 10 m und vier Trennwände, die an die Außenwand anstoßen. Das Mehrfamilienhaus ist 10 m breit, 40 m lang und hat vier Vollgeschoße. Der durchschnittliche Abstand der Zwischenwände beträgt 3,33 m. Beide Gebäude besitzen ein Flachdach und sind voll unterkellert. Da, wie die Messungen gezeigt haben, der unterschiedliche Fensterflächenanteil solcher Gebäude sich nicht typischerweise unterscheidet, blieb dieser Einfluß in der Modellrechnung unberücksichtigt.

In der Modellrechnung wurde, unter Zugrundelegung von 20 K Temperaturdifferenz (8 K zum Keller), der Transmissionswärmeverlust der beiden Gebäude durch Aufsummierung der einzelnen Wärmeströme in ungestörten Bereichen (bei eindimensionaler Temperaturvertei-

lung) und in Bereichen mit zweidimensionaler Temperaturverteilung (im Bereich der Wärmebrücke) unter Berücksichtigung der in Tabelle 5 aufgeführten Wärmebrücken ermittelt. Das Ergebnis dieser Rechnung ist in Tabelle 5 in der drittletzten Zeile dargestellt. Vergleichsweise dazu ist in der Zeile darüber der Transmissionswärmeverlust ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken aufgeführt. Die nicht eingeklammerten Werte ergeben sich dadurch, daß bei der Berechnung der wärmeübertragenden Flächen lichte Maße (Innenabmessungen) in Anlehnung an die DIN 4701 zugrunde gelegt wurden. Wie sich die Transmissionswärmeverluste ändern, wenn zur Flächenberechnung die Außenabmessungen (bei gleichem eingeschlossenem Volumen) herangezogen werden, zeigen die eingeklammerten Werte.

In der letzten Zeile der Tabelle 5 sind die prozentualen Abweichungen der durch die Wärmebrücken verursachten Verluste gegenüber herkömmlicher Ermittlung der Wärmeverluste dargestellt. Das Ergebnis zeigt, daß sich beim Mehrfamilienhaus kein wesentlicher Unterschied in der Wärmebrückenwirkung zwischen monolithischer und außengedämmter Wand ergibt, da sich gegenläufige Effekte durch Art und Anzahl der einzelnen Wärmebrücken nahezu ausgleichen. Beim Einfamilienhaus jedoch ist dies nicht der Fall, da sich vor allem der negative Einfluß der Außendämmung bei der Bodenecke verstärkt bemerkbar macht. Ihre Vorteile, z.B. beim Geschoßdeckenanschluß, kommen hier nicht zum tragen. Ergänzend dazu muß noch darauf hingewiesen werden, daß die negative Wirkung der Außendämmung bei der Bodenecke durch Anbringung einer zusätzlichen Perimeterdämmung deutlich reduziert werden kann.

Hinweis:

In die Modellrechnung wurden die in jedem Gebäude vorkommenden Wärmebrücken einbezogen. In der Praxis gibt es dagegen noch weitere typische Fälle, wie Innenecken, auskragende Balkenplatten, Fensterstürze usw., deren Wärmebrückenwirkung den Transmissionswärmeverlust bei bestehenden Gebäuden beeinflussen kann, so daß sich Abweichungen von den hier gezeigten Ergebnissen ergeben können.

Abschließend bleibt festzustellen, daß nicht eine Konstruktionsart (Außendämmung oder monolithisch) grundsätzlich bei allen Wärmebrücken Vorteile hat. Bei großen Gebäuden heben sich aufgrund der größeren Anzahl der verschiedenen und der Vielzahl der gleichen Wärmebrücken gegenläufige thermische Auswirkungen meistens auf, so daß keine Konstruktionsart deutliche Vorteile gegenüber der anderen hat. Bei kleinen Gebäuden können je nachdem welcher Wärmebrückentyp überwiegt, Vorteile in der Größenordnung von bis zu 10% Transmissionswärmeverlust entstehen. Um die Wärmebrückeneffekte größenordnungsmäßig mit zu erfassen, sollten bei der Flächenberechnung die Außenabmessungen zugrundegelegt werden. Die Abweichungen gegenüber einer genaueren Berücksichtigung von Wärmebrücken werden dadurch relativ niedrig. Bei kleinen Gebäuden und verhältnismäßig dicken Wänden, entsprechend dem gerechneten Beispiel, ist der erhaltene Transmissionswärmeverlust größer als bei der exakten Rechnung, so daß die monolithische Konstruktion benachteiligt wird.

Tabelle 1: Auswirkung des Bodenplatteneinschnitts auf die Wärmebrückenwirkung der Bodenecke im Versuchsraum 5.

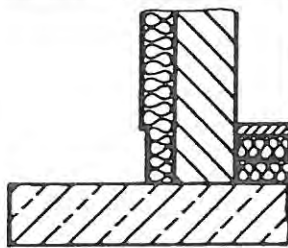
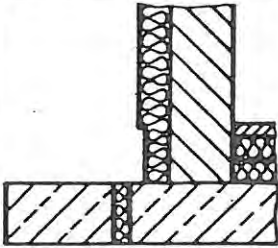
| Wärmestromdichten im Bodeneckenbereich | | | |
|---|---|--|------|
| Raum ⑤ | Durchgehende Bodenplatte | Schnitt in der Bodenplatte | |
| Konstruktion |  |  | |
| k Wand [W/m ² K] | 0.32 | | |
| eindimens. q_T [W/m ²] | 8.36 | 8.36 | |
| zweidimens. q_{WB} [W/m ²] | 15.57 | 15.42 | |
| $\frac{q_{WB}}{q_T}$ | Δ [W/m ²] | 7.21 | 7.06 |
| | Δ [%] | 86.2 | 84.5 |

Tabelle 2: Vergleich der Wärmebrückenwirkung im Bodeneckbereich für einige Versuchsräume mit unterschiedlichem k-Wert der Außenwand.

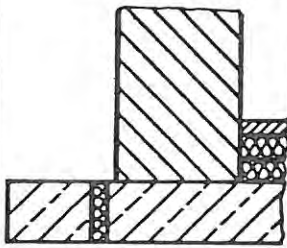
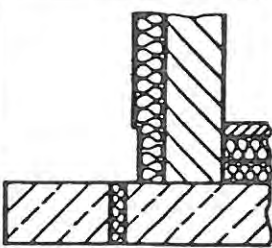
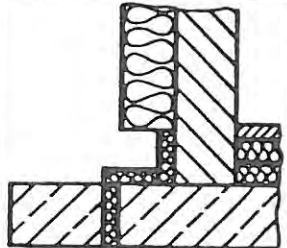
| Wärmestromdichten im Bodeneckbereich | | | | |
|--|--|---|--|-------|
| Raumnr. | ③ | ⑤ | ④a | |
| Konstruktion |  |  |  | |
| k_{Wand} [W/m ² K] | 0.46 | 0.32 | 0.16 | |
| eindimens. q_T [W/m ²] | 11.0 | 8.4 | 5.0 | |
| zweidimens. q_{WB} [W/m ²] | 14.8 | 15.4 | 12.9 | |
| $q_{\text{WB}} - q_T$ | Δ [W/m ²] | 3.8 | 7.0 | 7.9 |
| | Δ [%] | 34.5 | 83.3 | 158.0 |

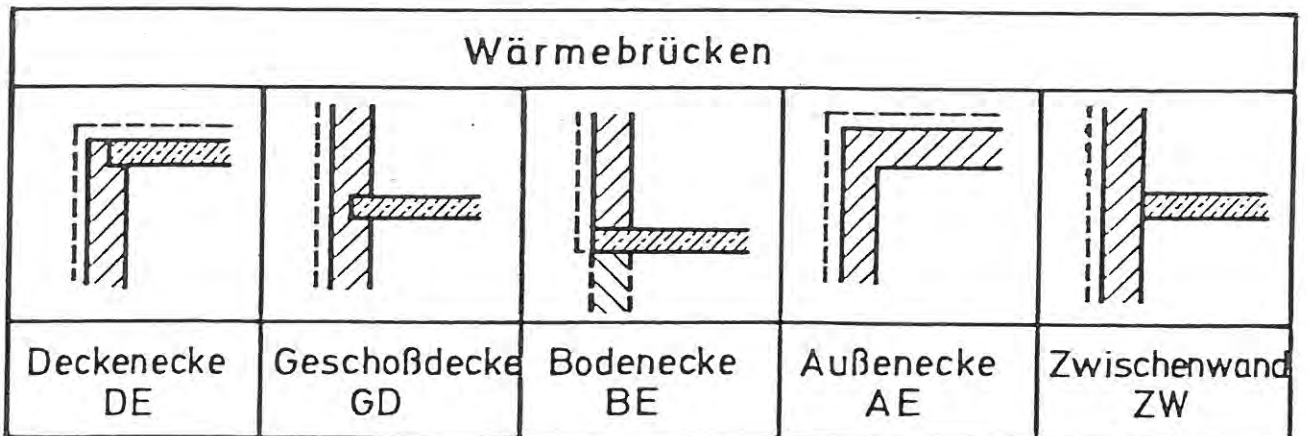
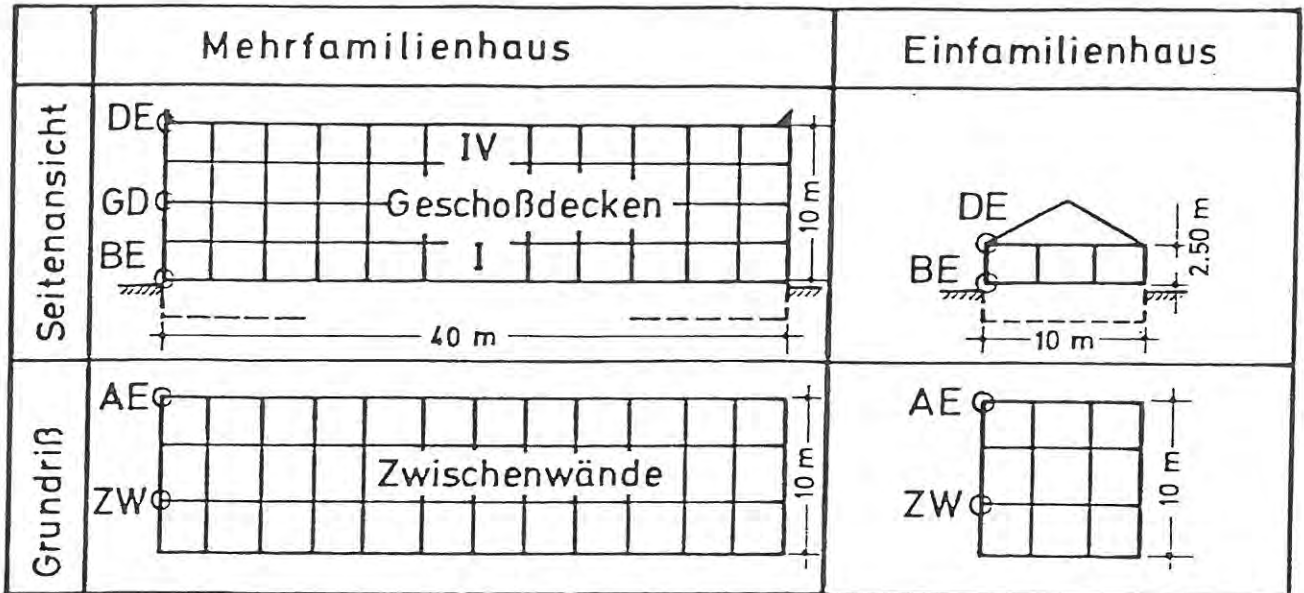
Tabelle 3: Übersicht charakteristischer Größen der Wärmebrücken, die bei der Berechnung des Transmissionswärmeverlustes der Modellhäuser gemäß Tabelle 5 einbezogen wurden.

| Ausdehnung und thermische Größen für die Wärmebrückenbereiche | | Deckenecke DE | | Geschloßdecke GD | | Bodenecke BE | | Außenecke AE | | Zwischenwand ZW | | |
|---|--------|---------------|--------|------------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|-----------------|--------|------|
| | Monol. | AD | Monol. | AD | Monol. | AD | Monol. | AD | Monol. | AD | Monol. | AD |
| s_1 [cm] | 65 | 55 | 3 | 1 | 30 | 60 | 35 | 45 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| s_2 [cm] | 9 | 55 | 7 | 1 | 25 | 30 | 35 | 45 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| s_3 [cm] | - | - | 45 | 40 | - | - | - | - | - | 25 | 25 | 25 |
| t_{min} [°C] | 16,5 | 17,7 | 18,1 | 18,7 | 16,5 | 15,0 | 15,9 | 16,5 | 18,6 | 18,6 | 18,6 | 18,6 |
| t_1 [°C] | 19,0 | 19,0 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 |
| t_2 [°C] | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 19,4 | 19,4 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 |
| Q_{WB1} [W/m] | 8,5 | 5,8 | 0,2 | 0,1 | 3,7 | 8,9 | 4,2 | 5,5 | 0,4 | 0,9 | 0,4 | 0,9 |
| Q_{WB2} [W/m] | 1,1 | 6,8 | 0,8 | 0,1 | 1,6 | 2,0 | 4,2 | 5,5 | 0,4 | 0,9 | 0,4 | 0,9 |
| Q_{WB3} [W/m] | - | - | 2,1 | 1,4 | - | - | - | - | - | - | 0,7 | 0,7 |
| q_1 [W/m ²] | 7,2 | 7,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 |
| q_2 [W/m ²] | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 3,8 | 3,8 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 |

Tabelle 4: Vergleich der bei der Modellrechnung berücksichtigten Wärmebrücken für eine monolithische (Monol.) und eine ausgedämmte (AD) Wand im Hinblick auf ihre thermische Auswirkung.

| Wärmestromdichten im Bereich der Wärmebrücken | | | | | | | | | | |
|--|---------------|------|-----------------|------|--------------|------|--------------|------|-----------------|------|
| k-wand [W/m ² K] 0,46 | Deckenecke DE | | Geschoßdecke GD | | Bodenecke BE | | Außenecke AE | | Zwischenwand ZW | |
| | Monol. | AD | Monol. | AD | Monol. | AD | Monol. | AD | Monol. | AD |
| eindimens. q _T [W/m ²] | 16,4 | 16,4 | 18,4 | 18,4 | 13,0 | 13,0 | 18,4 | 18,4 | 18,4 | 18,4 |
| zweidimens. q _{WB} [W/m ²] | 20,6 | 20,3 | 22,0 | 21,1 | 14,8 | 17,6 | 20,6 | 21,4 | 20,0 | 20,5 |
| Δ [°%] | 4,2 | 3,9 | 3,6 | 2,7 | 1,8 | 4,6 | 2,2 | 3,0 | 1,6 | 2,1 |
| | 25,6 | 23,8 | 19,6 | 14,7 | 13,8 | 35,4 | 12,0 | 16,3 | 8,7 | 11,4 |

Tabelle 5: Berechneter Transmissionswärmeverlust eines Ein- und Mehrfamilien-Modellhauses bei außengedämmter und monolithischer Außenwand mit und ohne Berücksichtigung typischer Wärmebrücken.



k-Wert der Außenwand : $0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\vartheta_i = 20^\circ\text{C}$, $\vartheta_a = 0^\circ\text{C}$

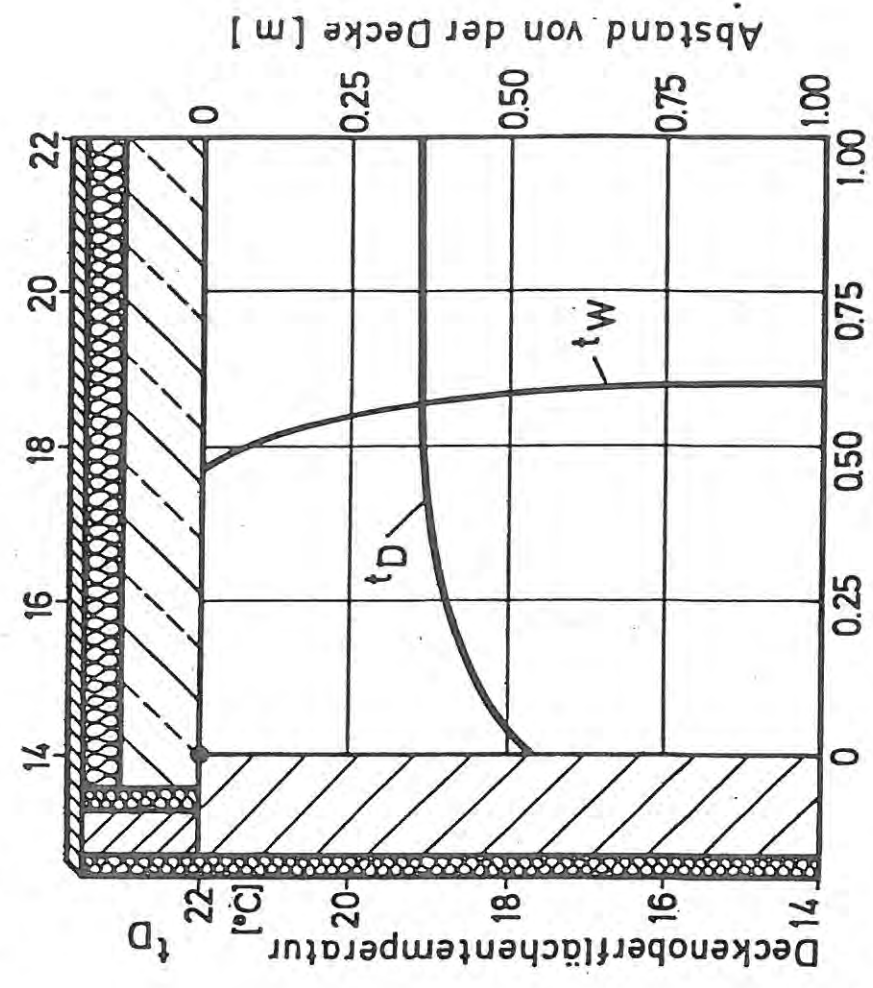
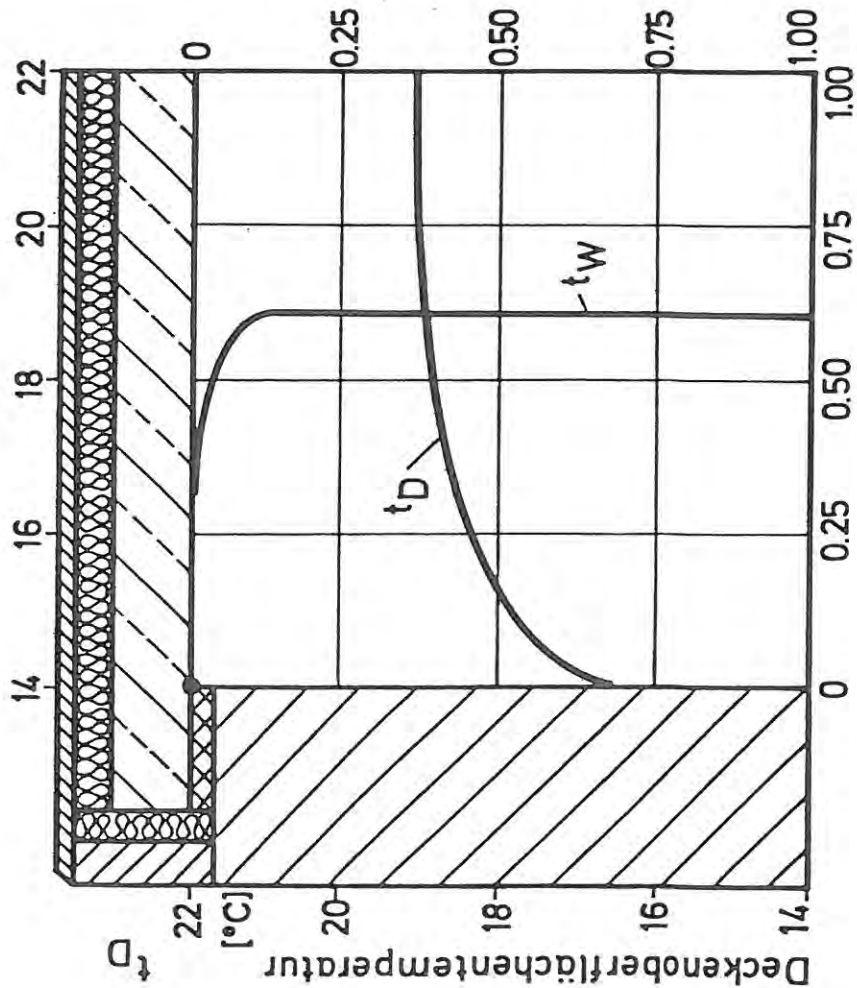
| | | Mehrfamilienhaus | | Einfamilienhaus | |
|--|---------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | | Monolithisch | Außendämmung | Monolithisch | Außendämmung |
| Transmis- sionswärme- verluste [W] | $\sum k_j \cdot A_j \cdot \Delta T_j$ | 12803 (14800) | 12803 (14496) | 1947 (2364) | 1947 (2258) |
| | Mit Wärme- brücken | 14995 | 14876 | 2227 | 2365 |
| Diffe- renz | Δ [W] | 2192 (195) | 2073 (380) | 280 (-137) | 418 (107) |
| | Δ % | 17,1 (1,5) | 16,2 (2,6) | 14,4 (-5,8) | 21,5 (4,7) |

Monolithisch

Deckenecke

Außendämmung

Außenwandoberflächentemperatur t_W [°C]

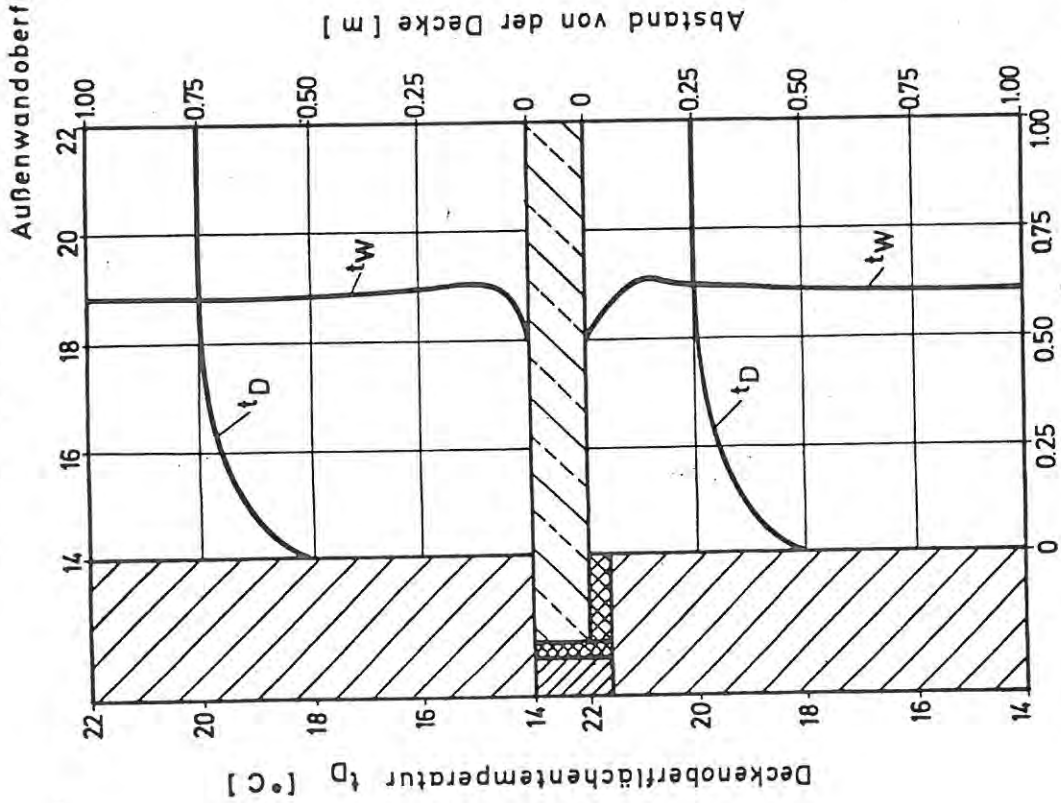


Abstand von der Außenwand [m]

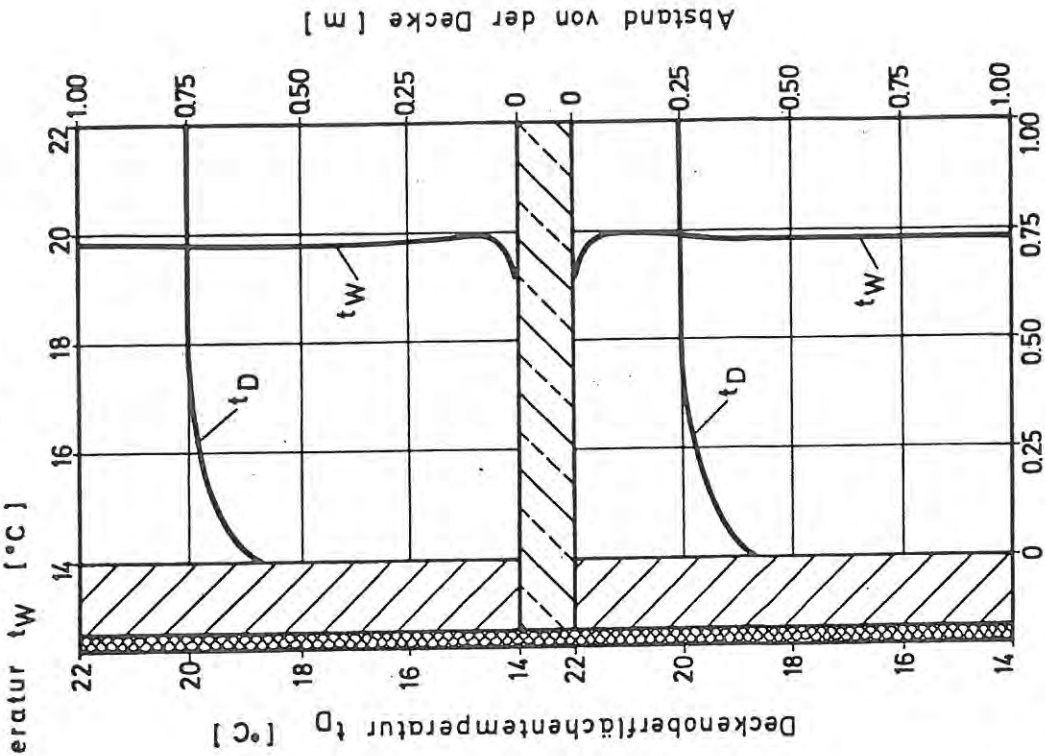
Bild 1: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Deckenwand-Anschlussbereich.

Geschoßdecke

Monolithisch



Außendämmung



Abstand von der Außenwand [m]

Bild 2: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Geschoßdecken-Wand-Anschlußbereich.

Monolithisch

Bodenecke

Außendämmung

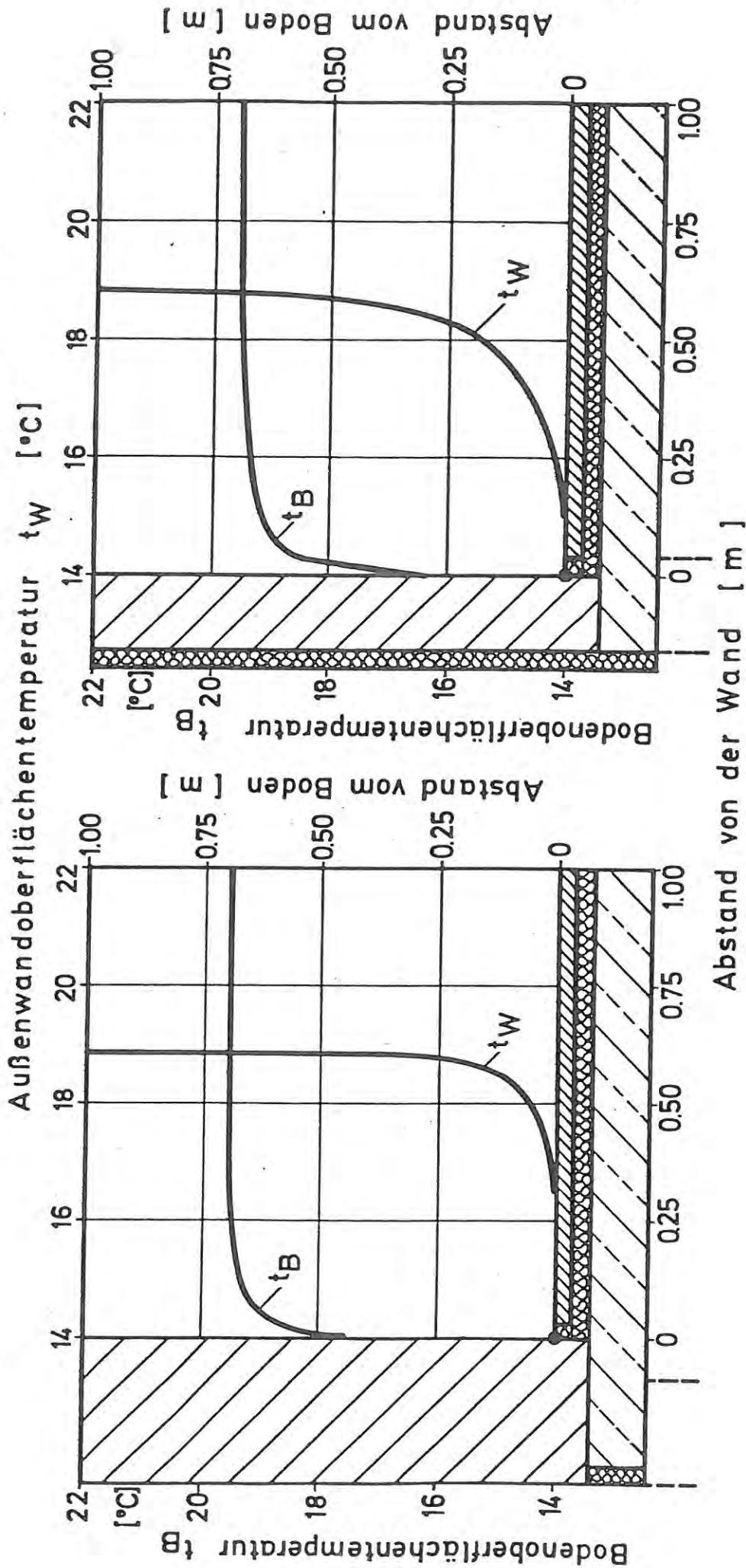


Bild 3: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Kellerdecken-Wand-Anschlussbereich.

Monolithisch

Außenecke

Außendämmung

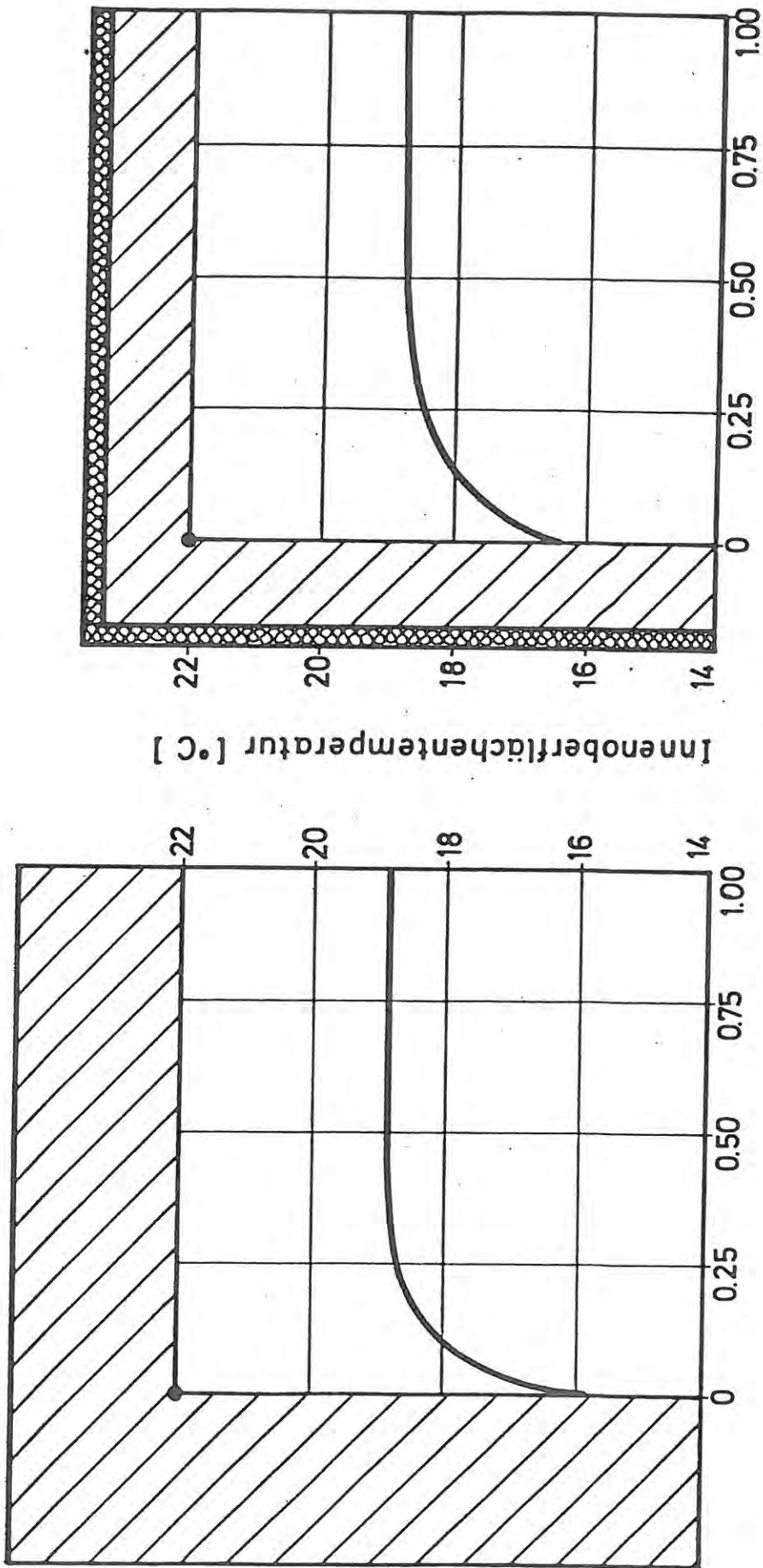


Bild 4: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Bereich der Außenecke.