

Untersuchungen über den effektiven
Wärmeschutz verschiedener
Ziegelaußenwandkonstruktionen. Teil I
Rechnerische Untersuchung über
die thermische Wirkung von
Wärmebrücken. Teil. II

T 1187

T 1187

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



BERICHT AUS DEM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

B Ho 8/83-II

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN EFFEKTIVEN
WÄRMESCHUTZ VERSCHIEDENER ZIEGELAUSSEN-
WANDKONSTRUKTIONEN

durchgeführt in der
Außenstelle Holzkirchen des
Fraunhofer-Instituts für Bauphysik

im Auftrag des
Ziegelforum e.V., München

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

AUSSENSTELLE HOLZKIRCHEN

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

Institutsleitung: Prof. Dr. F. P. Mechel

Untersuchungen über den effektiven Wärmeschutz verschiedener Ziegelaußenwandkonstruktionen

Bericht über den 1. und 2. Untersuchungsabschnitt

B Ho 8/83-II

durchgeführt in der
Außenstelle Holzkirchen des
Fraunhofer-Instituts für Bauphysik

Leiter der Außenstelle : Dr.-Ing. H. Künzel
Projektleiter und Verfasser: Dr.-Ing. H. Werner
Versuchsdurchführung : Dipl.-Math (FH) R. Marquardt
Dipl.-Ing. H. Schaub
Auftraggeber : Ziegelforum e.V.

Holzkirchen, den 5. Juli 1983

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



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Versuchsdurchführung
 - 2.1 Versuchsanordnung
 - 2.2 Meßaufbau und Durchführung der Messungen
 - 2.3 Simulationsrechnungen
3. Ergebnisse
 - 3.1 Rechnerische Voruntersuchung
 - 3.2 Heizenergieverbrauch
 - 3.2.1 Allgemeiner Überblick
 - 3.2.2 Analyse der Wärmeverluste
 - 3.3 Temperaturen und Wärmeströme
 - 3.4 Maßnahmen zur Minderung der Wärmebrückeneffekte
4. Zusammenfassung und Schlußfolgerung
5. Literatur

Tabellen und Bilder

Untersuchungen über den effektiven Wärmeschutz verschiedener Ziegelaußenwandkonstruktionen

1. Einleitung

Als nach der Energiekrise eine Verordnung zur Begrenzung des Heizwärmeverbrauches zu erarbeiten war, war es naheliegend, den k-Wert als Grundlage für die Verordnung zu übernehmen. Dieser Wert war der bekannteste wärmeschutztechnische Kennwert bei Architekten und Heizungsplanern. Bei dem Wärmedämm-Niveau in den sechziger Jahren war auch der Transmissionswärmeverlust durch Außenbauteile (einschließlich Fenster, die vielfach einfach verglast und oft übermäßig groß waren) der größte Anteil am Heizwärmeverbrauch. In dieser Situation war auch die Einführung der k_m -Methode richtig, weil sie eine große Flexibilität der Maßnahmen ermöglichte und keine starre Festlegung von Einzelanforderungen bedeutete.

Durch die Wärmeschutzverordnung vom September 1977 und die dadurch angeregte Entwicklung wurde das Dämmniveau so angehoben, daß heute die Transmissionswärmeverluste etwa gleich groß sind wie die Lüftungswärmeverluste bzw. diese sogar unterschreiten [1], [2].

Bei reduzierten Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten - wobei das Nutzerverhalten eine nicht unwesentliche Rolle spielt - kommen andere Einflußgrößen, die bisher weniger beachtet worden sind, mehr zur Auswirkung. Es sind dies insbesondere die passive Solarenergie-Nutzung durch Fenster oder allgemein durch transparente Bauteile und die Auswirkung von Wärmebrücken und anderen "Randeffekten".

Die hier durchgeführten Untersuchungen sollen zeigen, ob die einfache k-Wert-Theorie (linearer Zusammenhang mit dem Heizenergieverbrauch) auch bei extremer Wärmedämmung der Außenwand unter Einbeziehung instationärer, d.h. zeitlich veränderlicher, Temperaturen und praktischer Wärmebrückeneffekte (Ecken, Fußboden- und Deckenanschlüsse) noch mit Berechtigung angewendet werden kann, um auf den Heizenergieverbrauch zu schließen.

Bekanntlich beschreibt der k-Wert den Wärmedurchgang durch ebene Bauteile unter stationären bzw. quasistationären Bedingungen. Die örtlichen, homogenen Temperaturverteilungen dürfen dabei nicht durch sog. Wärmebrücken gestört sein, wie sie z.B. Ecken, Kanten, Anschlüsse usw. darstellen. Die thermische Wirkung einer solchen Wärmebrücke hängt im Gegensatz zum stationären Wärmedurchgang ebener Bauteile auch von ihrem konstruktiven Aufbau ab, so daß Schichtanordnungen dabei eine große Rolle spielen. Dies wurde durch vorausgegangene Simulationsrechnungen für verschiedene Konstruktionen festgestellt (siehe Abschnitt 3.1).

Experimentelle Untersuchungen bieten den Vorteil, daß alle noch ungenügend theoretisch beschreibbaren physikalischen Zusammenhänge naturgetreu erfaßt werden. So sind z.B. die Auswirkungen der Sonneneinstrahlung und der Heizkörperanordnung auf die Konvektions- und damit Wärmeübergangsverhältnisse an Kanten und Ecken noch weitgehend unbekannt. Daher wurden im Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen vergleichende Untersuchungen über die Auswirkung verschieden wärmedämmter Außenwandkonstruktionen auf den Heizenergieverbrauch unter natürlichen Klimabedingungen durchgeführt. Mit Hilfe einer begleitenden theoretischen Untersuchung wurden die experimentellen Ergebnisse verglichen, wobei die unbekannteren Randbedingungen

entsprechend dem Experiment angepaßt wurden. Dadurch war es möglich, rechnerisch Verallgemeinerungen durchzuführen.

Vor dem Hintergrund der zu untersuchenden Einflußgrößen auf den Heizenergieverbrauch wurde der Versuchsbau und der Grundriß der Testräume festgelegt. Es wird ausdrücklich vermerkt, daß diese Untersuchungen nicht so zu verstehen sind, mittels der Ergebnisse Quantifizierungen für den praktischen Wohnungsbau zu erhalten. Die Untersuchungen sollen anhand eines meßtechnischen Vergleichs in Versuchsräumen zeigen, ob und inwieweit bei relativ hohem Wärmedämmungsniveau die Anwendung der lineare k-Wert Theorie zur Bestimmung des Heizenergieverbrauches noch sinnvoll ist und was die Ursachen von eventuellen Abweichungen sind.

2. Versuchsanordnung und -durchführung

Im folgenden wird kurz auf das Versuchsgebäude, dem Meßaufbau und auf die durchgeführten begleitenden Simulationsrechnungen eingegangen.

2.1 Versuchsanordnung

Um einerseits in relativ kurzer Zeit die gestellten Fragen beantworten zu können und andererseits den Aufwand in Grenzen zu halten, wurde, wie in Bild 1 ersichtlich, ein Versuchsaufbau mit sechs nebeneinander liegenden Testräumen erstellt, die mit der Fensterfassade jeweils nach Süden orientiert sind. Alle Räume sind geometrisch gleich. Um Aussagen über den energetischen Einfluß des Fensters zu erhalten, wurde ein Raum (Raum 2) ohne Fenster ausgestattet. Mittels eines direkten Vergleiches der Räume 1 (mit Fenster) und 2, die beide die gleichen Außenwände besitzen, kann die energetische Wirkung des Fensters erfaßt werden. Da die Außenwandkonstruktionen das wesentliche Untersuchungsobjekt sind, wurde der aus Bild 2 ersichtliche Grundriß gewählt. Damit gelang es bei der gegebenen Raumgröße und -anordnung einerseits eine möglichst große Außenwandfläche zu erhalten und andererseits die Wirkung einer einspringenden Ecke - einer sog. "Innenecke" im Vergleich zu ausspringenden - sog. "Außenecken" zu untersuchen. Diese verschiedenen Gesichtspunkte waren für die Grundrißgestaltung maßgebend. Es sollten keine "normalen" Wohnräume gebaut werden, sondern auf die Untersuchungsaufgaben abgestimmte Testräume (vergl. [3]).

Die Räume können von einem gemeinsamen Gang betreten werden, in dem sich auch die Datenerfassungsanlage befindet. Um eine gegenseitige Beeinflussung der Räume auszuschalten wurden die Trennwände zweischalig ausgeführt und wie die Bauteile Decke und Fußboden extrem wärmedämmend (20 cm Polystyrol-Hartschaum). Die Raumlufttemperatur wurde konstant auf 20°C gehalten mit Ausnahme zweier Meßperioden im Sommer 1981 (siehe Zwischenbericht II, B Ho 11/81) und einer Meßperiode im Winter 1982/83. Beheizt wurden die Räume elektrisch direkt mit Öl gefüllten Radiatoren, die über Kontaktthermometer geregelt wurden. Überheizungen über 24°C, was insbesondere in den Übergangsmonaten infolge Sonneneinstrahlung möglich war, wurde mit Hilfe automatisch gesteuerter Rolläden vermieden. Um einen einheitlichen und definierten Luftwechsel zu gewährleisten wurden jedem Raum mit Hilfe eines Gebläses 10 m³/h Luft zugeführt. Dies entspricht einem Luftwechsel von 0,2 h⁻¹,

Auf eine wohnzimmerähnliche Ausstattung (Möblierung, interne Wärme- und Feuchtequellen) wurde im Hinblick auf die hier zu untersuchenden Fragen in diesem Forschungsabschnitt verzichtet. Einflüsse nutzungsspezifischer Phänomene (thermische und hygri-sche Parameter, die durch den Bewohner verursacht werden) wurden im Rahmen der hier gestellten Forschungsaufgabe vorerst noch nicht untersucht. Da auch eine Meßperiode mit Nachtabenkung der Raumlufttemperatur vorgesehen war, wurden im Winter 1982/83 die Fußböden der Räume mit einem Teppichfilzboden bedeckt, um die Speicherwirkung des Fußbodenestrichs üblichen Verhältnissen anzupassen

Eine Übersicht der untersuchten Außenwandkonstruktionen ist in Bild 3 wiedergegeben. Dort sind der baukonstruktive Aufbau der Wände, ihre wesentlichen bauphysikalischen Daten und die im Bericht verwendeten Raumnummern und Kurzbezeichnungen dargestellt. Ergänzend dazu sind in Bild 4 die Decken- und Fußbodenanschlüsse für die einzelnen Wandtypen zu sehen.

2.2 Meßaufbau und Durchführung der Messungen

Die Meßaufgabe bestand in erster Linie darin, den Heizenergieverbrauch der sechs Räume unter gleichen Randbedingungen zu erfassen. Ergänzend dazu wurden, um den Wärmedurchgang in bestimmten Bereichen der Außenwand und des Fensters zu analysieren, in jeden Raum 14 Thermoelemente und zwei Wärmeflußmeßscheiben installiert. Außerdem wurden noch die Raumlufttemperatur, die Temperatur der eingeblasenen Außenluft und zur Erfassung der meteorologischen Daten die Außenlufttemperatur und die Intensität der auf die Südfassade einwirkenden Sonneneinstrahlung gemessen.

Die Oberflächentemperaturen wurden sowohl in relativ ungestörten Wandbereichen außen und innen, als auch im Bereich der Außen- und Innenkanten im Decken- und Fußbodenanschlußbereich registriert.

Aus meßtechnischen Gründen wurden die Testräume mit elektrisch betriebenen Radiator-Heizkörpern beheizt.

Da alle insgesamt 128 Meßstellen kontinuierlich erfaßt werden mußten, wurden die Daten in einer Scanzeit von ca. 2 Minuten über eine elektronische Datenerfassungsanlage abgefragt und einem Prozeßrechner (Minc 11/03 von DEC) zugeführt, mit Hilfe dessen stündliche Mittelwerte gebildet wurden, die auf Magnetplatten abgespeichert wurden.

Die Messungen selbst begannen im März 1981 und endeten im April 1983. Über die erste Meßperiode der Heizperiode 1980/81 und über die Sommerperiode 1981 wurde in den Teilberichten I und II berichtet. Die hier vorliegenden Ergebnisse wurden hauptsächlich aus einer relativ langfristig ununterbrochenen Meßperiode vom November 1981 bis Februar 1982 gewonnen (1. Untersuchungsabschnitt) und - nachdem einige Wärmebrücken noch nachträglich gedämmt worden waren - aus den Monaten März und April 1982 (2. Untersuchungsabschnitt).

Vor der Winterperiode 1982/83 wurde im Raum 4 die ursprüngliche Außenwand mit Innendämmung abgerissen und eine neue Außenwand (Grundkonstruktion entsprechend Raum 5) mit 23 cm Außendämmung (Thermohautprinzip) erstellt, um sie als Vertreter extremer Wärmedämmung ($k = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$) mit den übrigen Konstruktionen im Winter 1982/83 zu vergleichen.

Ergänzende Vergleichsuntersuchungen bei stationärem und instationärem Heizbetrieb sowie der Einfluß des äußeren Farb-anstriches mit unterschiedlichen Absorptionsvermögen wurden während der zweiten Winterhälfte 1982/83 vorgenommen. Es konnten jedoch nur ein Teil der Ergebnisse in den vorliegenden Bericht mit aufgenommen werden, da bei nicht zeitgleicher Messung aufgrund sehr unterschiedlicher meteorologischer Randbedingungen die Langzeitergebnisse nicht zu vergleichen waren. Die damit gewonnene Erfahrung hat gezeigt, daß derartige Einflußparameter (Zeitverlauf des Heizbetriebs und Strahlungsabsorptionseffekte) bei derartig niedrigen k-Werten, wie sie hier vorliegen, nur bei zeitgleicher Messung möglich sind. Es ist vorgesehen, diesen Vergleich in der nächsten Winterperiode noch durchzuführen.

2.3 Simulationsrechnung

Einleitend und ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurden begleitende Simulationsrechnungen über die zweidimensionale stationäre Wärmeleitung durch Außenbauteile durchgeführt, um die Auswirkungen von Wärmebrückeneffekte allgemeiner zu analysieren.

Mit Hilfe der Methode der finiten Elemente wurde entsprechend dem Verfahren wie es in [4] beschrieben ist das zweidimensionale Temperaturfeld sowie die örtlichen Wärmestromdichten für aus- und einspringende Ecken und für die vorliegenden Decken- und Fußbodenanschlüsse berechnet. Eine weitere rechnerische Untersuchung über die thermische Wirkung von Wärmebrücken im Bereich der Außenwand sowie eine Abschätzung der energetischen Auswirkungen bei einem Ein- und Mehrfamilienhaus erfolgte in [7].

3. Ergebnisse

Ausgehend von rechnerischen Voruntersuchungen werden im folgenden die Meßergebnisse der Winterperiode 1981/82 dargestellt und interpretiert. Dabei werden der Heizenergieverbrauch, Oberflächentemperaturen und Wärmeströme sowie Wärmebrückeneffekte näher behandelt.

3.1 Rechnerische Voruntersuchung

Um die Auswirkungen zusätzlicher Wärmedämmschichten im Bereich von Außen- und Innenecken eingehender studieren zu können, wurden verschiedene Variationsrechnungen durchgeführt. Einige Ergebnisse dieser rechnerischen Voruntersuchungen wurden auf der 6. Internationalen Mauerwerkskonferenz in Rom [5] bereits veröffentlicht. Wie sich beispielsweise die Wandinnenoberflächentemperaturen bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des tragenden Mauerwerks bei Außen- und Innendämmung grundsätzlich verändern, wird aus Bild 5 ersichtlich. Man erkennt, daß bei der Innendämmung die Grenzwerte der ungestörten Wandbereiche eher erreicht werden als bei der Außendämmung. Diese theoretischen Voruntersuchungen haben gezeigt, wie auch aus Bild 6 hervorgeht, daß sich monolithische Außenwände bei gleichem k-Wert gegenüber Innen- bzw. Außendämmung im Bereich der Außen- und Innenecken relativ neutral verhalten.

In Bild 7 ist graphisch verdeutlicht, wie sich der Wärmestrom im Bereich einer Außen- bzw. Innenecke im Vergleich zu einer ungestörten Wand bei $k = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $\Delta\theta = 20 \text{ K}$ entsprechend des Wärmestromverlaufes des Bildes 6 prozentual verändert. Die Außendämmung schneidet bei der Außenecke gegenüber einer monolithischen Wand demnach um ca. 10% ungünstiger ab. Bei der Innenecke hat die Außendämmung dagegen einen um etwa 5% niedrigeren Verbrauch als die monolithische Konstruktion.

Der Einfluß instationärer Temperatureinwirkung auf Wärmebrücken wurde wegen des enormen Rechenaufwandes nicht untersucht. Daß dieser Einfluß aber unbedeutend für die Beurteilung der Wärmebrücke ist, hat Heindl [6] erbracht.

3.2 Heizenergieverbrauch (Meßergebnisse)

3.2.1 Allgemeiner Überblick

Das Hauptziel der Untersuchung war die Ermittlung des Heizenergieverbrauchs, wobei vor allem eine längerfristige Meßperiode zugrunde liegen sollte.

In Bild 8 sind die mittleren Heizleistungen der sechs Räume während eines Zeitraumes von 105 Tagen vergleichsweise histogrammartig gegenübergestellt. Die einzelnen Heizleistungen können prozentual (100% = Heizleistung des Raumes 1) und absolut in Watt entnommen werden. Die mittlere Außenlufttemperatur betrug in diesem Zeitraum (im Winter 81/82) $-2,1^\circ\text{C}$; als mittlere Strahlungsintensität auf die Südfassade wurden 81 W/m^2 ermittelt. Um eine Relation der Heizleistungen gegenüber den Wärmedämmwerten der Außenwandkonstruktionen zu bekommen, wurden die Heizleistungen in Säulenform über den rechnerischen k-Wert aufgetragen.

Ergänzend zu Bild 8 ist in Bild 9 die mittlere Heizleistung in einem 25-tägigem Zeitraum im Januar 1983 für die sechs Räume dargestellt. Allerdings ist anstelle der Innendämmung in Raum 4, mit der Raumbezeichnung 4a, die mittlere Heizleistung

bei einer extrem gedämmten Wand mit 23 cm Außendämmung aus Polystyrol ($k = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$) im Vergleich zu den übrigen Wandkonstruktionen graphisch dargestellt.

Bei proportionaler Abhängigkeit des Wärmeverbrauchs vom k -Wert müßten sich die Säulenenden unabhängig von der Bauart der Wand mit einer Geraden verbinden lassen. Dies ist offensichtlich, wie aus den Bildern 8 und 9 hervorgeht, nicht allgemein der Fall. Lediglich die Konstruktionen 1 (monolithisch 36,5 cm), 6 (zweischalig) und 3 (monolithisch 49 cm) liegen nahezu auf einer Geraden. Die Wände 2 (monolithisch, 36,5 cm ohne Fenster), 4 (Innendämmung), 4a (Außendämmung extrem) und 5 (Außendämmung) weichen dagegen deutlich davon ab, und zwar um so stärker, je niedriger der rechnerische k -Wert ist. Für Raum 2 ist das Ergebnis sofort verständlich, da dieser Raum als einziger kein Fenster besitzt.

Da sich die Räume 1 und 2 nur durch das Fenster unterscheiden, kann hier der thermische Einfluß des Südfensters während einer relativ kalten Winterperiode mit mäßiger Einstrahlung ($< 100 \text{ W/m}^2$) direkt ersehen werden. Bei der gegebenen Versuchsanordnung (Fensterflächenanteil ca. 20%) hatte der fensterlose Raum 2 in den beiden Meßperioden einen um ca. 10% niedrigeren Energieverbrauch*).

Dies ist keine generell zutreffende Aussage, sondern gilt nur für die beschriebene Meßperiode. In einer Meßperiode in der Übergangszeit bei einer mittleren Außenlufttemperatur von $9,5^\circ\text{C}$ und einer Strahlungsintensität von ca. 100 W/m^2 verbrauchte der fensterlose Raum 2 um ca. 13% mehr Heizenergie als der Raum 1 mit gleichen Außenwänden (siehe Zwischenbericht I).

*) kein temporärer Wärmeschutz am Fenster

Die relativ großen Abweichungen der Räume 4 (Innendämmung), 4a und 5 (Außendämmung) von der Geraden in Bild 8 und 9 sind auf den konstruktiven Aufbau und auf die damit verbundene Wärmebrückenwirkung hauptsächlich im Fußboden- und Deckenanschluß und im Bereich der Außenecken zurückzuführen, wie im folgenden noch näher gezeigt wird.

3.2.2 Analyse der Wärmeverluste

Erfassung der Grundwärmeverluste

Die zur Deckung des Wärmeverlustes der Räume aufgebrachte mittlere Heizleistung wird natürlich nicht nur von der Außenwand und dem Fenster verursacht. Weitere Verluste entstehen über Fußboden und Decke sowie über die Lüftung. Wie groß die einzelnen Anteile sind, ist in Bild 10 zu ersehen, wo für einen 62-tägigen Zeitraum eine Quantifizierung der Anteile vorgenommen wurde.

Die einzelnen Anteile wurden über Messung bestimmter physikalischer Daten und über folgende Beziehung ermittelt:

Lüftungswärmeverluste:

$$\dot{Q}_L = \dot{V} \rho_L c_{pL} \cdot (\vartheta_R - \vartheta_{LE}) \quad (1)$$

Transmissionswärmeverluste über Fußboden und Decke *)

$$\dot{Q}_{FB} = \dot{q}_{FB} \cdot A_{FB} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_D = \dot{q}_D \cdot A_D \quad (3)$$

Verluste am Fenster:

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_{H1} - \dot{Q}_{H2} + \dot{Q}_{FW} \quad (4)$$

$$\text{wobei } \dot{Q}_{FW} = k_W (\vartheta_R - \vartheta_{La}) A_F \quad (5)$$

| | | | |
|------------------|----|-------------------------------|--|
| \dot{V} | in | m^3/h | zugeführter Luftvolumenstrom (gemessen) |
| ρ_L | in | kg/m^3 | Dichte der Luft (= $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$) |
| c_{pL} | in | Wh/kgK | spezifische Wärmekapazität der Luft (= $0,25 \text{ Wh}/\text{kgK}$) |
| ϑ_R | in | $^{\circ}\text{C}$ | Raumlufttemperatur (gemessen) |
| ϑ_{LE} | in | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatur der zugeführten Außenluft (gemessen) |
| ϑ_{LA} | in | $^{\circ}\text{C}$ | Außenlufttemperatur (gemessen) |
| \dot{q}_{FB} | in | W/m^2 | mittlere Wärmestromdichte des Fußbodens (gemessen) |
| \dot{q}_D | in | W/m^2 | mittlere Wärmestromdichte der Decke (gemessen) |
| A_{FB} | in | m^2 | Fläche des Fußbodens (= 20 m^2) |
| A_D | in | m^2 | Fläche der Decke (= 20 m^2) |
| \dot{Q}_{H1} | in | W | mittlere Heizleistung des Raumes 1 (gemessen) |
| \dot{Q}_{H2} | in | W | mittlere Heizleistung des Raumes 2 (gemessen) |
| \dot{Q}_{FW} | in | W | Wärmeverlust des anstelle des Fensters befindlichen Wandteils |
| k_W | in | $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ | rechnerischer k-Wert, da Wandanteil im Fensterbereich ungestört ist |
| A_F | in | m^2 | Fensterfläche (= $5,1 \text{ m}^2$) |
| A_W | in | m^2 | Fläche der Außenwand (Innenmaße) |

*) Die Verluste durch die Innenwände können wegen geringer Temperaturdifferenz vernachlässigt werden.

Die Grundwärmeverluste (\dot{Q}_G), d.h. alle Wärmeverluste mit Ausnahme des Transmissionswärmeverlustes über die Außenwände, ergeben sich für die Räume 1 und 2 dann nach folgenden Beziehungen:

$$\dot{Q}_{G1} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_{FB} + \dot{Q}_D + \dot{Q}_{F1} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{G2} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_{FB} + \dot{Q}_D \quad (7)$$

Die gemessene Heizleistung (\dot{Q}_H) kann man unter Einbeziehung der Wärmebrückeneffekte formal auf drei verschiedene Weisen nach folgenden Beziehungen ausdrücken:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_G + k_W A_W (\vartheta_R - \vartheta_{La}) + \Delta\dot{Q}_{WB} - \dot{Q}_A \quad (8)$$

oder

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_G + k'_W A'_W (\vartheta_R - \vartheta_{La}) - \dot{Q}_A \quad (9)$$

oder

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_G + k_W A'_W (\vartheta_R - \vartheta_{La}) - \dot{Q}_A \quad (10)$$

Dabei bedeuten:

$\Delta\dot{Q}_{WB}$: zusätzlicher Transmissionswärmeverlust infolge Wärmebrückenwirkung;

\dot{Q}_A : von der Wand absorbiertes Wärmestrom infolge Sonneneinstrahlung;

k'_W : modifizierter k-Wert der Außenwand, der alle Wärmebrückeneffekte im Außenwandanschlußbereich berücksichtigt. Dazu zählen z.B. auch erhöhte Transmissionswärmeverluste im Decken- und Fußbodenbereich in Außenwandnähe;

A'_W : thermisch wirksame Wandfläche bei herkömmlich angenommenen k-Wert der Außenwand.

Die Größen stehen im folgenden Zusammenhang

$$k'_W = k_W + \frac{\Delta Q_{WB}}{A_W (\vartheta_R - \vartheta_{La})} \quad (11)$$

$$A'_W = A_W + \frac{\Delta Q_{WB}}{k_W (\vartheta_R - \vartheta_{La})} \quad (12)$$

Die Versuchsergebnisse in einer relativ strahlungsarmen Periode (siehe Bild 10) haben gezeigt, daß die gemessenen mittleren Heizleistungen der Räume 1, 6 und 3 auf einer Geraden liegen, deren Steigung nahezu die gleiche ist, wie die, die sich aus Beziehung (8) wie folgt ableiten läßt:

$$m \approx \tan(\alpha + \beta) = (\vartheta_R - \vartheta_{La}) \cdot (A_F + A_W) \quad (13)$$

Aus der Ableitung der Beziehung (5) erhält man für

$$\tan \beta = (\vartheta_R - \vartheta_{La}) \cdot A_F \quad (14)$$

Dies beweist zusammen mit den Ergebnissen aus Bild 8 und 9, daß für monolithische Konstruktionen die lineare Abhängigkeit des Wärmeverbrauchs vom rechnerischen k-Wert entsprechend der Beziehung (8) in guter Näherung gilt. Der Ordinatenabstand der beiden praktisch parallelen Geraden in Bild 10 entspricht dem Term $(\Delta Q_{WB} - Q_A)$.

Weiterhin zeigt die Parallelität der Geraden, daß summarisch der Wärmebrückeneffekt und die Strahlungsabsorption sich bei den monolithischen Konstruktionen und der zweischaligen Wand nahezu gleich auswirken.

Einfluß von Außentemperatur und Strahlung

Die wesentlichen meteorologischen Einflußgrößen auf den Heizenergieverbrauch sind die Außenlufttemperatur und die Strahlungsintensität. In Bild 11 ist vergleichsweise dargestellt, welche mittleren Heizleistungen sich in den einzelnen Räumen bei verschiedenen außerklimatischen Bedingungen ergaben (1. Untersuchungsabschnitt). Im linken Diagramm ist die Strahlung und Außenlufttemperatur relativ hoch (sonniges Frühjahr), im mittleren Diagramm ist die Strahlung geringer und die Außenlufttemperatur relativ niedrig (kalte, sonnige Winterperiode) und im rechten Diagramm schwanken die Außenlufttemperaturen um den Gefrierpunkt und die Strahlung ist sehr niedrig (typische Winterperiode mit bedecktem Himmel).

Im linken Diagramm ist wegen der milden Bedingungen die mittlere Heizleistung niedrig, die Abhängigkeit vom k-Wert relativ gering (Gerade flach), der fensterlose Raum 2 ungünstiger als der Fensterraum 1.

Bei kalten Winterbedingungen mit mittlerem Sonnenschein (mittleres Diagramm) steigt die Heizleistung wesentlich, die Abhängigkeit der Heizleistung vom k-Wert wird deutlich (Gerade steil), der fensterlose Raum ist wegen der niedrigen Außenlufttemperaturen trotz der Einstrahlung etwas günstiger im Energieverbrauch.

In einer typischen Winterperiode mit bedecktem Himmel ist die k-Wert Abhängigkeit des Energieverbrauches noch deutlich, obwohl die Steigung der Geraden im Vergleich zum mittleren Diagramm infolge der etwas höheren Außenlufttemperaturen geringer ist. Es ist bemerkenswert, daß der gegenläufige Effekt der geringen Einstrahlung die Tendenz der Steigungsabnahme nicht kompensiert. Deutlich wirkt sich allerdings die geringe Einstrahlung auf die Relation des Heizenergieverbrauches von Räumen mit und ohne Fenster aus. Räume mit Fenster (wie Raum 1) haben bei geringer Sonneneinstrahlung einen höheren Verbrauch als gleichartige Räume ohne Fenster (wie Raum 2).

Um festzustellen, wie die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwand von der Lufttemperaturdifferenz (Raumluft - Außenluft) im hier durchgeführten Experiment abhängen, wurden Perioden mit möglichst unterschiedlichen mittleren Außenlufttemperaturen ausgewertet und die Transmissionsverluste der Außenwände durch Abzug der Grundwärmeverluste (siehe entsprechend Bild 10) bestimmt. In Bild 12 ist das Ergebnis dieser Auswertung mittels einer linearen Regression graphisch dargestellt. Der Übersicht halber wurden nur die ermittelten Werte der 36,5 cm dicken Wand des Raumes 1 eingetragen. Das Ergebnis der Regression kann als relativ gut bezeichnet werden (die Regressionskoeffizienten lagen bei ca. 0,95) zumal die einzelnen Perioden doch unterschiedliche Strahlungsintensitäten aufwiesen.

Legt man die Regressionsgeraden des Bildes 12 als lineare Abhängigkeiten des Transmissionswärmeverlustes der Außenwände von der Lufttemperaturdifferenz zugrunde, so entspricht die Steigung m einer Geraden dem jeweiligen "spezifischen" Transmissionswärmeverlust k' (physikalisch einem k -Wert gleichzusetzen) einer Außenwand gemäß folgender Beziehung:

$$\dot{q}_W = k' \cdot \Delta\vartheta_L \quad (13)$$

$$m = \frac{\dot{q}_W}{\Delta\vartheta_L} = k' \quad (14)$$

Ermittelt man nach Beziehung (14) mittels Bild 12 den spezifischen Transmissionswärmeverlust der Außenwände und ordnet sie dem rechnerischen k -Werten zu, so ergibt sich die Darstellung in Bild 13.

Diese Zuordnung zeigt exemplarisch eine veränderte k -Wert-Relation im Vergleich zum herkömmlichen rechnerischen k -Wert.

Die Ursache, warum die Werte für den spezifischen Transmissionswärmeverlust nicht auf der 45°-Geraden des Bildes 13 liegen (also gleich den rechnerischen k -Werten sind), ist in erster Linie in der unterschiedlichen Wirkung der Wärmebrücken bei den einzelnen Konstruktionen zu suchen.

Zum Verständnis des Bildes 13 muß darauf hingewiesen werden, daß bei der Ermittlung der auf die Fläche bezogenen Transmissionswärmeverluste durch die Außenwand gemäß Bild 12, entsprechend der DIN 4701, die Innenabmessungen der Außenwände zugrunde gelegt wurden. Dies bedeutet, daß in dem angegebenen spezifischen Transmissionswärmeverlust in Bild 13 die gemessenen Wärmebrückenwirkungen beinhaltet sind. Wollte man in physikalisch richtiger Weise den Wärmebrückeneffekt berücksichtigen, müßte bei nicht eindimensionalen Problemen, die hier vorliegen, die thermisch wirksame Fläche zugrunde gelegt werden, die in rechnerisch aufwendiger Weise (Berechnung der zwei- bzw. dreidimensionalen Wärmeleitung) für jede Konstruktionsart zu bestimmen wäre. In einer ergänzenden Untersuchung [7] wurde auf diese Problematik bei der Bestimmung der effektiven Transmissionswärmeverluste näher eingegangen.

Da aufgrund der Ermittlung der Regressionsgeraden Strahlungsabsorptionseffekte inbegriffen sind, wird aus der Lage der Punkte in Bild 13 deutlich, daß die negative Wirkung der Wärmebrückeneffekte durch Strahlungsabsorption bei den Versuchswänden nicht aufgewogen werden.

Die Abweichungen der Punkte zu höheren Werten zeigt, daß grundsätzlich alle Konstruktionen von negativen thermischen Effekten betroffen sind. Diese Wärmebrückeneffekte sind bei den monolithischen Konstruktionen und der zweischaligen Wand, die sich anscheinend ähnlich einer monolithischen Wand verhält, geringer als bei den zusatzgedämmten Konstruktionen.

Die Frage nach dem Einfluß der Strahlungsabsorption in der Außenwand auf den Heizenergieverbrauch sollte in der Meßperiode 1982/83 näher untersucht werden. Leider waren aufgrund der gegebenen Versuchsanordnung und der besonderen meteorologischen Bedingungen im Winter 1982/83 keine Vergleichsergebnisse auf der Grundlage einer längerfristigen Periode zu gewinnen. Nur in einem Kurzzeitvergleich (30 Stunden) war es möglich Perioden mit ähnlichen Einstrahlbedingungen zu finden.

In Bild 14 sind die mittleren Heizleistungen bei hellem ($A=0,3$) und dunklem ($A=0,8$) Anstrich an einem strahlungsreichen Tag unter Einbeziehung der 6 Morgenstunden des Folgetages gegenübergestellt. Da die Farbe der zweischaligen Wand des Raumes 6 nicht verändert wurde, wurde dieser Raum als Bezugspunkt für den jeweiligen Tag zugrunde gelegt. Der dunkle Anstrich (braune Farbe) brachte eine Erniedrigung der Heizleistung zwischen 3% (Raum 4a, extreme Außendämmung) und 8% (Raum 3, monolithisch, 49 cm). Eine allgemeine Schlußfolgerung über die energetische Wirkung der Strahlungsabsorption ist aus Bild 14 jedoch nicht möglich, da bei einem derartigen Kurzzeitvergleich, aufgrund der unterschiedlichen meteorologischen Vorgeschichte, noch instationäre Effekte überlagert sind. Um stichhaltige Ergebnisse zu erhalten, müssen derartige Einflußgrößen zeitgleich bei den selben meteorologischen Bedingungen in einem Langzeitversuch von minimal 4 Wochen untersucht werden. Dies ist vorgesehen in einem dritten Untersuchungsabschnitt im Winter 1983/84.

3.3. Temperaturen und Wärmeströme

Zur Untersuchung der Wärmebrückeneffekte wurden im Bereich der Ecken, Fußboden- und Deckenanschlüsse Temperaturfühler (Thermoelemente) angebracht, um die örtliche Temperaturveränderung an der Oberfläche zu messen, denn als kennzeichnendes Merkmal einer Wärmebrücke kann die örtliche Temperaturveränderung sehr leicht nachgewiesen werden. In einem, von keiner Wärmebrücke beeinflussten, ungestörten Bauteil treten keine örtlichen Temperaturveränderungen auf.

Welche Temperaturen beispielweise an der Innenoberfläche einer Außenecke in Abhängigkeit vom Abstand der Wandkante gemessen und im Vergleich dazu errechnet wurden, geht aus Bild 15 hervor. Die für die einzelnen Wände unterschiedlich gekennzeichneten Punkte stellen Meßwerte (Mittelwerte einer bestimmten Meßperiode im Winter 81/82: $\vartheta_{La} = -1^{\circ}\text{C}$, $I_S = 32 \text{ W/m}^2$), die Kurven errechnete Werte dar.

Es zeigte sich, daß die Wärmeübergangsrandbedingungen bei der Rechnung entsprechend den Ergebnissen der Messung variiert werden mußten, da allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten über die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten vom Eckabstand nicht vorliegen. Dies deutet die Grenzen rein theoretischer Untersuchungen an.

Bild 15 zeigt z. B., daß an einer Außenecke die Wärmebrückewirkung der Innendämmung (Raum 4) geringer ist, als die einer Außendämmung (Raum 5). Der Vergleich über die Höhe der Oberflächentemperaturen ist in diesem Fall unmittelbar möglich, da die Wärmedämmwerte im ungestörten Bereich dieser beiden Konstruktionen weitgehend übereinstimmen. Aufgrund der geringeren Wärmedämmung der übrigen Konstruktionen weisen diese natürlich niedrigere Temperaturen im Eckbereich auf.

Die Temperaturverteilungen im Fußboden/Wand - und Wand/Deckenbereich sind für die gleiche Meßperiode in Bild 16 dargestellt. Auch hier wurde Rechnung und Messung verglichen. Aufgrund guter Übereinstimmung wurden aus Gründen der Übersicht die Meßpunkte nicht eingezeichnet. Deutlich ist hier zu erkennen, daß im Raum 5 im Wandbereich, in der Nähe des Fußbodens, ein Wärmebrückeneffekt auftritt, denn die Ecktemperatur ist trotz der hohen Außendämmung relativ niedrig. Eine ähnliche Wärmebrücke, wenn auch nicht so ausgeprägt, zeigt Raum 4 (Innendämmung) im Deckenbereich, in der Nähe der Außenwand.

Entsprechend zu Bild 16 sind in Bild 17 die örtlichen Wärmeströme für die einzelnen Konstruktionen aufgetragen. Um die Wärmeströme besser vergleichen zu können, sind die Werte auf der Abszisse prozentual angegeben, und zwar entspricht 100 % der höchsten Wärmestromdichte im Fußboden/Wandbereich der Außendämmung des Raumes 5. Auch Bild 17 zeigt, trotz der hohen Dämmung, die relativ großen Wärmestromdichten (hohe Transmissionswärmeverluste) der zusatzgedämmten Konstruktionen 4 bzw. 5 im Decken- bzw. im Fußbodenanschlußbereich.

Interessant ist die Verteilung der Wärmestromdichte der Innendämmung (Raum 4) an der Wand, in der Nähe des Deckenanschlusses. Der Wärmestrom wird kurz vor der Decke kleiner und steigt dann plötzlich zur Decke hin stark an, weil über die Decke sehr viel Wärme im Anschlußbereich aufgrund der konstruktiven Ausbildung abfließt. Solche anscheinenden Anomalitäten sind die Folge einer relativ komplizierten Temperaturverteilung in der Nähe solcher Wärmebrücken, wie sie derartige Deckenanschlüsse darstellen.

Oberflächentemperaturmessungen in der Meßperiode 82/83 auf der Wandinnenseite in Fensterlaibungsnähe haben gezeigt, daß alle Wandkonstruktionen tagsüber aufgrund des Strahlungseinfalles am Fenster keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Bei diffuser Einstrahlung trat zur Laibung bzw. Brüstung hin kein Temperaturabfall auf. Während der Nachtzeit war eine geringfügige Abkühlung zum Fenster meßbar (weniger als 1 K). Deutliche Unterschiede bei den einzelnen Wänden waren jedoch nicht festzustellen.

Um noch einmal quantitativ zu verdeutlichen, welche Mehrverluste Außenecken, Fußboden- und Deckenanschlüsse bei den hier zugrunde gelegten Konstruktionen im Vergleich zum ungestörten Fall bewirken, ist in der beiliegenden Tabelle 1 der Anteil einzelner Wärmebrückenbereiche mit 1 m Kantenlänge am Gesamtmehrverlust aufgeführt, der sich aus der Summe der erwähnten Einzelmehrverluste gegenüber dem ungestörten Fall ergibt. Die einzelnen Bereiche sind in der Tabelle, wie folgt, nummeriert:

- I: Deckenbereich in Wandnähe
- II: Wandbereich in Deckennähe
- III: Wandbereich in Fußbodennähe
- IV: Fußbodenbereich in Wandnähe
- V: Außenecke

Man sieht, daß z. B. im Raum 4 (Innendämmung) der Deckenbereich in Wandnähe (Bereich I) mit ca. 68 % den weitaus höchsten Anteil am Mehrverlust verursacht. Ähnliches gilt auch im Raum 5 (Außendämmung) für den Wandbereich in Fußbodennähe (Bereich III), der mit 38 % am Gesamtmehrverlust beteiligt ist. Die weitaus meisten Mehrverluste gegenüber dem ungestörten Fall (keine Wärmebrückenwirkung) ergeben sich demnach im Raum 5, bei dem die Summe der Mehrverluste der fünf Einzelbereiche 11,9 W pro 1 m Kantenlänge beträgt.

3.4 Maßnahmen zur Minderung der Wärmebrückeneffekte

Nachdem in den zusatzgedämmten Räumen 4 und 5 die eklatanten Wärmebrückeneffekte im Decken- und Wand-/Fußbodenbereich in der 1. Untersuchungsperiode festgestellt waren, wurde versucht, durch nachträgliche Wärmedämmmaßnahmen die betreffenden Wärmebrückeneffekte zu mindern. Dazu wurde in Raum 4 an der Unterseite der Decke in Wandnähe eine 1 m breite und 2 cm dicke Polystyrolplatte geklebt und an der Außenwand 5 (Außen-dämmung) außen im Sockelbereich und auf der auskragenden Bodenplatte eine 6 cm dicke Dämmung aus extrudiertem Polystyrol angebracht. Einen Überblick über den Aufbau der Decken- und Fußbodenanschlüsse der Räume 4 und 5 vor und nach Anbringung der zusätzlichen Wärmedämmung gestattet Bild 18.

Das Ergebnis einer Vergleichsmessung vor und nach Anbringung der Zusatzdämmung in den Räumen 4 und 5 zeigt Bild 19. Da der Vergleich nicht parallel sondern zeitlich versetzt durchgeführt werden mußte, bestand die Schwierigkeit darin, möglichst ähnliche Perioden im Temperaturniveau und Strahlungsangebot zu finden.

Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, wurden die mittleren Heizleistungen in Bild 19 prozentual dargestellt, wobei 100 % der jeweilige Wert des Raumes 1 ist. Vergleicht man die Räume 4 und 5 in Relation zu den übrigen Räumen, so ist festzustellen, daß beide Räume nach Anbringung der Zusatzdämmung ("nachher") geringere Energieverluste aufwiesen. In Raum 4 wurde anscheinend eine größere Effektivität erzielt, da die Differenz der Energieverbräuche der beiden Räume zunahm. Die geringere Auswirkung der nachträglichen Wärmedämmung in Raum 5 läßt sich damit erklären, daß die Zusatzdämmung an der Außenseite des Sockels und der Bodenplatte den über Außenwand und Bodenplatte abfließenden Wärmestrom nicht wesentlich erniedrigen konnte. Eine außen angebrachte zusätzliche Wärmedämmung ist dort eben uneffektiv.

In Bild 20 und 21 sind zur Überprüfung der Auswirkung der nachträglichen Dämm-Maßnahmen auch die Innenoberflächentemperaturen an der Decke in Außenwandnähe (Bild 20) und an der Außenwand in Bodennähe (Bild 21) vergleichend gegenübergestellt. Auffallend ist, daß sich im Raum 4 die inneren Oberflächentemperaturen der Decke "nachher" deutlich erhöht haben; die Relation zu den übrigen Räumen hat sich vollkommen verändert. Dies deutet darauf hin, daß der Wärmebrückeneffekt an der Decke deutlich erniedrigt werden konnte.

Anders sieht der Vergleich bei den Innenoberflächentemperaturen der Außenwände im Fußbodenbereich aus (Bild 21). Die Werte bei der Außenwand 5 haben sich in Relation zu den übrigen Konstruktionen kaum verändert, woraus zu schließen ist, daß die nachträgliche Maßnahme wenig effektiv war. Als wesentlich bleibt auch festzustellen, daß mit Ausnahme der Innendämmung (Raum 4) die Temperaturabsenkung der Außenwände zum Fußboden hin relativ groß ist. Es wurde nach der 1. Untersuchungsperiode vermutet, daß dieser Effekt im Zusammenhang mit der auskragenden Bodenplatte stehen würde. Daraufhin wurde vor Beginn des Winters 82/83 die Bodenplatte in unmittelbarer Nähe der Außenwand abgeschnitten, mit dem Ziel, den mit auskragenden Balkonplatten zu vergleichenden Kühlrippeneffekt zu mindern.

Wie die späteren Messungen (Bild 9) und die Rechnungen in einer begleitenden Untersuchung [7] gezeigt haben, wirkte sich dies jedoch nicht wesentlich auf die Wärmebrückenwirkung im Wand-/Fußbodenbereich aus. Die rechnerisch ermittelten Wärmestromdichten im Eckbereich ohne und mit Bodenplattenabschnitt sind in Tabelle 2 vergleichend gegenübergestellt.

Um abschließend die Randeinflüsse auf den k-Wert einer Wand abzuschätzen, wurde mit Hilfe der berechneten Wärmebrückeneffekte der vorliegenden Konstruktion ein Gedankenmodell aufgestellt, das gemäß Bild 22 verdeutlicht, wie die thermischen Randeinflüsse bei Zunahme der Wandfläche abnehmen. Berücksichtigt man z.B. an einer quadratischen Wand an den vier Seiten die Wärmebrückeneffekte zweier Außenecken, eines Decken- und eines Fußbodenanschlusses entsprechend der vorliegenden Konstruktionen mit dem sog. "spezifischen" Transmissionswärmeverlust, so zeigt Bild 22, wie der Randeinfluß bei Zunahme der Kantenlänge der quadratischen Außenwandfläche abnimmt. Man sieht vor allem aus dem rechten Diagramm, wie dominierend Wärmebrückeneffekte bei kleinen Wandflächen sein können, wenn nahezu keine ungestörten Bereiche mehr vorhanden sind. Auch in dieser Darstellung zeigt die Konstruktion 5 die größten Abweichungen der zugrunde gelegten Fälle.

Im allgemeinen kann man überschlägig davon ausgehen, daß sich Wärmebrückeneffekte praktisch bis zu einem 1 m Abstand vom Rand in die Fläche ausdehnen können. Im Einzelfall kann es jedoch wesentlich weniger sein und zwar hängt dies eben vom konstruktiven Aufbau der Wärmebrücke und vom Wärmedämmniveau ab. Wie die begleitenden Berechnungen des zweidimensionalen Temperaturfeldes verschiedener Wärmebrücken (Außenecken, Decken-, Wandanschlüsse) gezeigt haben [7] kann nicht unbedingt davon ausgegangen werden, daß durch erhöhte (zusätzliche) Wärmedämmung eine Minderung des Wärmebrückeneffektes auftritt; es kann sogar vorkommen, daß diese sich dadurch verstärkt. Wie aus Bild 9 zu ersehen ist, erhöht sich der Wärmebrückeneffekt bei der extrem gedämmten Wand 4a gegenüber Wand 5, die die gleiche Konstruktionsart (Außendämmung) besitzt, da der geringe Minderverbrauch des Raumes 4a in keinem Verhältnis zur k-Wert-Erniedrigung steht.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Vor dem Hintergrund der allgemeinen Energieeinsparungsdiskussion wurden im Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen vergleichende Untersuchungen über die Auswirkung verschieden wärmegeämmter Außenwandkonstruktionen auf den Heizenergieverbrauch unter natürlichen Klimabedingungen durchgeführt. Dazu wurde ein Versuchsgebäude erstellt, das aus sechs nebeneinander liegenden Räumen gleicher Größe besteht.

Um den Einfluß der Wärmedämmung der Außenwand auf den Heizenergieverbrauch feststellen zu können, wurden die Räume mit unterschiedlichen Außenwandkonstruktionen (monolithisch, zweischalig, Außen- und Innendämmung) im k-Wert-Bereich von $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ bis $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ erbaut, wobei zur Ermittlung der energetischen Wirkung des Fensters ein Raum vergleichsweise ohne Fenster ausgestattet wurde.

Über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren wurden bei nahezu konstanter Raumlufthemperatur von 20°C Messungen über den Heizenergieverbrauch der einzelnen Räume durchgeführt. Zur Analyse der Wärmeströme wurden in verschiedenen Bereichen der Außenwand, der Decke und des Fußbodens Oberflächentemperaturen gemessen und begleitende Rechnungen durchgeführt.

Der Vergleich der Heizenergieverbräuche in einem längerfristigen Meßzeitraum ergab, daß die Räume mit den zusatzgedämmten Außenwandkonstruktionen (Außen- und Innendämmung mit Polystyrol-Hartschaum) nicht die erwarteten niedrigen Heizenergieverbräuche aufwiesen, wie sie entsprechend ihres niedrigen k-Wertniveaus im Vergleich zu den übrigen Räumen haben sollten. Wie auch theoretische Vergleichsrechnungen gezeigt haben, beruhen diese Abweichungen auf besonderen Wärmebrückeneffekten, vor allem im Fußboden- und Deckenanschlußbereich der Außenwand.

Aber auch ausspringende Ecken (Außenecken) verursachen bei Außendämmung höhere Mehrverluste gegenüber ebenen Bauteilen als monolithische Wandkonstruktionen. Die Innendämmung wirkt sich vor allem im Deckenanschlußbereich negativ auf die Wärmebilanz aus.

Welche energetische Auswirkungen solche Wärmebrückeneffekte an Ecken, Kanten, Fenerlaibungen, Fußboden- und Deckenanschlüssen bei Versuchsräumen haben können, die aus experimentellen Gründen relativ stark mit Wärmebrücken durchsetzt sind, wird aus einem mittels linearer Regression erhaltenen "spezifischem" Transmissionswärmeverlust (physikalisch mit einem praktisch ermittelten k-Wert gleichzusetzen) deutlich, der neben dem herkömmlichen Transmissionswärmeverlust des ebenen Bauteils noch die zusätzlichen Mehrverluste infolge Wärmebrücken beinhaltet. Da in der Praxis vorkommende Gebäude weniger häufig derartige Wärmebrücken aufweisen können bzw. sich bei unterschiedlichen Konstruktionsarten gegenläufige thermische Auswirkungen aufheben können, wurde versucht, ausgehend von den hier erhaltenen Ergebnissen eine Abschätzung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes bei praktischen Gebäuden durchzuführen. In Bild 23 ist der "praktisch wahrscheinliche Bereich" des spezifischen Transmissionswärmeverlustes in Abhängigkeit vom rechnerischen k-Wert schraffiert dargestellt. Die hier erhaltenen Meßergebnisse entsprechen dem sehr ungünstigen Fall. Der "ideale Grenzfall", bei dem der spezifische Transmissionswärmeverlust und der rechnerische k-Wert gleich sind, wird auch in der Praxis nicht erreicht werden, da es kein Haus ohne Wärmebrücken gibt.

Die theoretischen und meßtechnischen Untersuchungen haben gezeigt, daß die zusatzgedämmten Wandkonstruktionen im allgemeinen problematischer im Wärmebrückeneffekt sind als monolithische Konstruktionen. Die zweckmäßigen Maßnahmen zur Verminderung der Wärmebrückeneffekte sind bei den unterschiedlichen Wandkonstruktionen verschieden und unterscheiden sich oftmals beträchtlich im Aufwand.

Wichtig ist jedoch die Feststellung, daß es bei höherer Wärmedämmung eines Gebäudes nicht mehr genügt, den realen Wärmeschutz "nur" mit dem k-Wert zu beschreiben, denn Wärmebrücken können, wie die Messungen gezeigt haben, heizenergetisch relativ große negative Effekte bewirken. Je kleiner der rechnerische k-Wert von Gebäudeaußenbauteilen ist, desto größer können die bisher nicht erfaßten unterschiedlichen Auswirkungen der speziellen Konstruktions- und Randbedingungen werden und desto mehr kann der spezifische Transmissionswärmeverlust vom rechnerischen k-Wert abweichen.

Da es unmöglich ist, die spezifischen konstruktionsbedingten Randeffekte - z.B. im Rahmen einer Wärmeschutzverordnung - zu erfassen, nimmt mit abnehmendem rechnerischen k-Wert die Genauigkeit und Repräsentanz seiner Aussage für den Heizenergieverbrauch ab.

Mit den hier durchgeführten Untersuchungen konnte das Problem der Wärmebrücken und seine Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch exemplarisch aufgezeigt werden. Es sind aber noch weitere ergänzende Arbeiten notwendig, um eine Quantifizierung dieser Einflüsse im praktischen Wohnungsbau zu bekommen.

5. Literatur

- [1] Werner, H.: Wirtschaftlich optimaler Wärmeschutz im Hochbau. BMFT Forschungsbericht FB-T82-131

- [2] Gertis, K.: Wie muß die Heizenergie-Einsparung im Wohnungen künftig vor sich gehen?
Bundesbaublatt, Juli 1981, H. 7

- [3] Gertis, K. und Erhorn, H.: Jetzt: Wärmebrücken im Kreuzfeuer? Bauphysik 4 (1982) Heft 4, S. 135 - 139

- [4] Wolfseher, U.: Rechnerische Ermittlung mehrdimensionaler Temperaturfelder unter stationären und instationären Bedingungen.
Diss. Universität Essen (1978).

- [5] Werner, H.: Effektiver Wärmeschutz von verschiedenen Ziegelkonstruktionen.
Proc. 6th I. B. Ma. C, Rom (1982), S. 1326 - 1336.

- [6] Heindl, W.: Zum instationären Wärmeverhalten von Wärmebrücken. Bauphysik 4 (1982), H. 4, S. 145 - 146.

- [7] Werner, H. u. Schäume, H.: Rechnerische Untersuchung über die thermische Wirkung von Wärmebrücken in Bereich der Außenwand. Unveröffentlichter Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, B Ho 8/83-III (1983).

Tabelle 1; Vergleich der Wirkung verschiedener Wärmebrückenbereiche.

| Raum Nr. | Gesamtverlust der Wärmebrückenbereiche im Vergleich zum un- gestörtem Fall [W] | | Anteil des Einzelbereiches am Gesamtverlust [%] | | | | |
|-------------|--|--|---|------|------|------|------|
| | Summe I bis V | | I | II | III | IV | V |
| 1 u. 2 | 8,0 | | 43,9 | -4,9 | 13,5 | 13,6 | 35,0 |
| 3 | 7,5 | | 43,0 | -1,1 | 13,3 | 11,8 | 32,1 |
| 4 | 6,0 | | 68,3 | -7,3 | 0,7 | 25,0 | 13,3 |
| 5 | 11,9 | | 14,7 | 13,3 | 38,0 | 10,9 | 23,1 |
| 6 | 5,7 | | 37,6 | -1,0 | 12,1 | 16,4 | 34,9 |

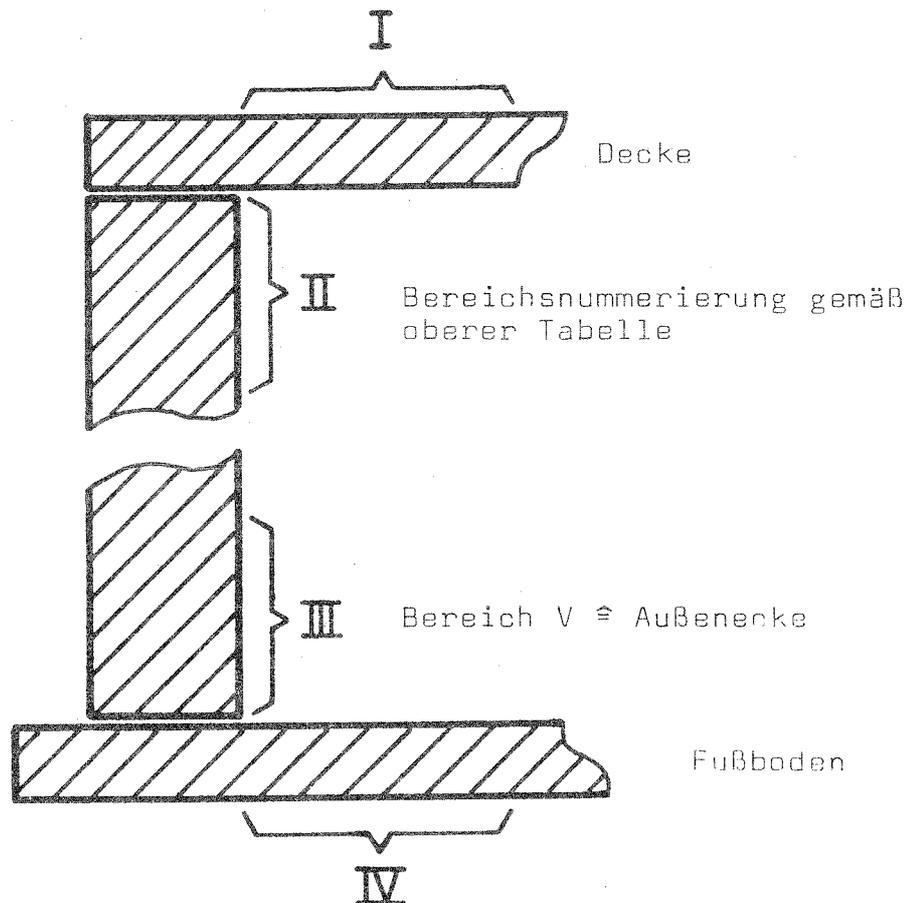
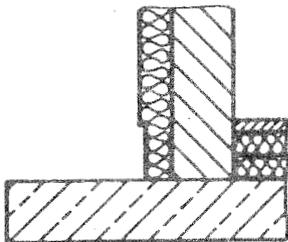
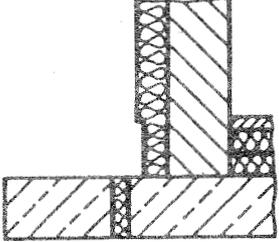


Tabelle 2: Auswirkung des Bodenplatteneinschnitts mit zusätzlicher Wärmedämmung der Stirnfläche auf die Wärmebrückenwirkung der Bodenecke im Versuchsraum 5 (Ergebnis einer Rechnung).

| 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 | |
| $q_{WB} - q_T$ | Δ [W/m ²] | 7.21 | 7.06 |
| | Δ [%] | 86.2 | 84.5 |

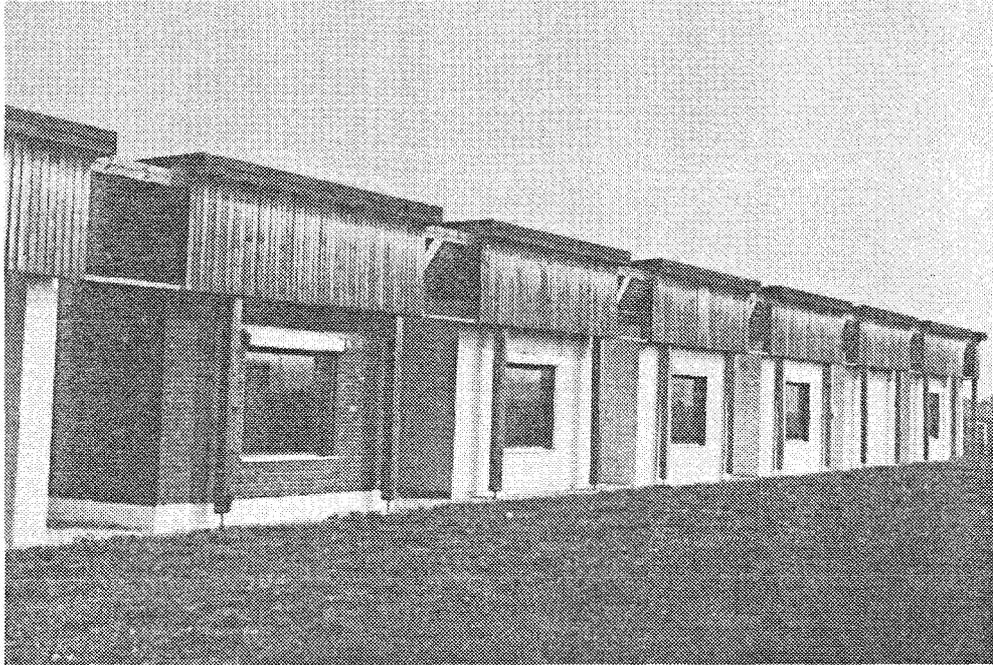


Bild 1: Ansicht des Versuchsgebäudes auf dem
Freilandversuchsgelände in Holzkirchen

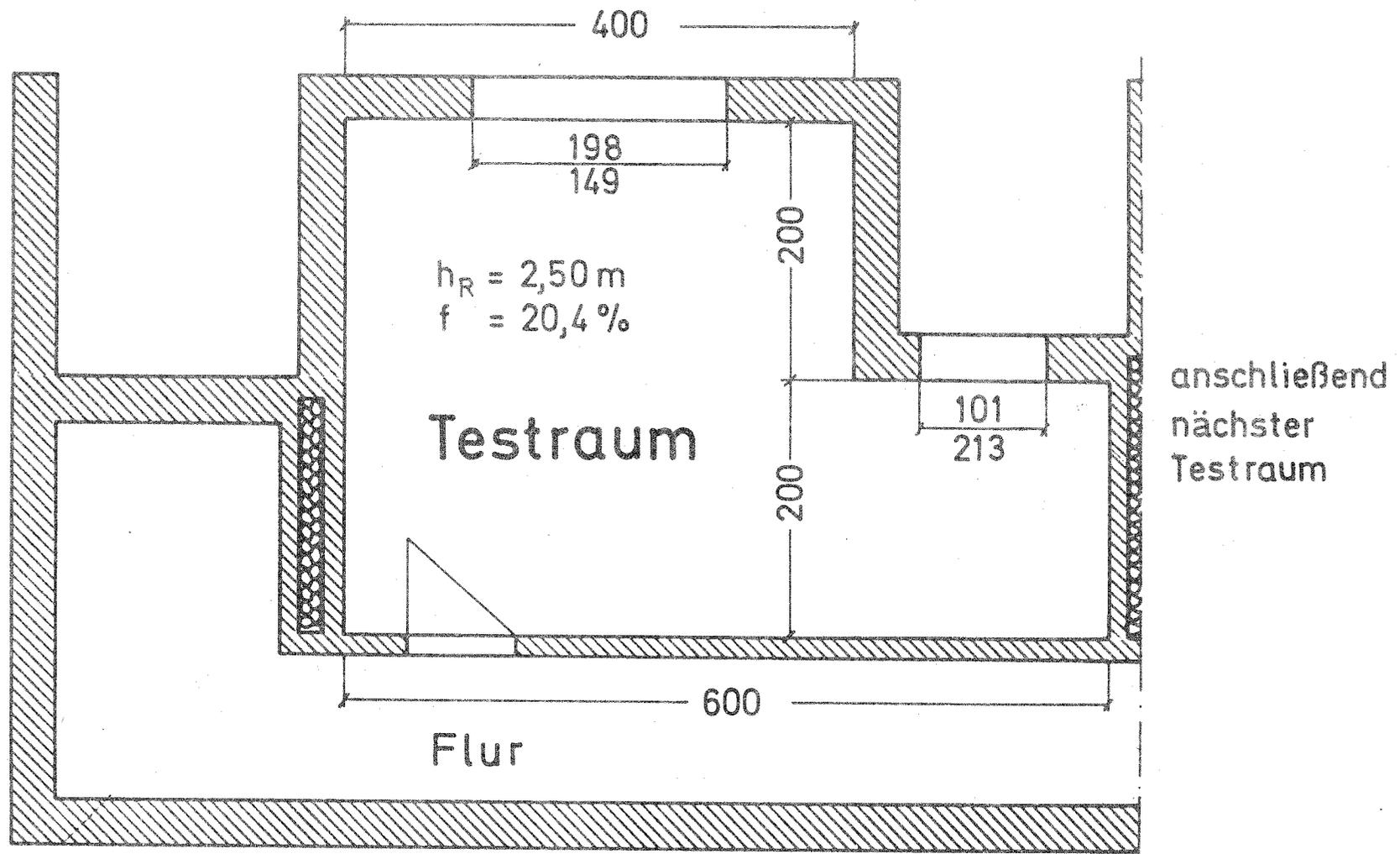


Bild 2: Grundriß eines Testraumes. Sechs solche Räume sind nebeneinander angeordnet. Die Fenster sind nach Süden orientiert.

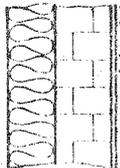
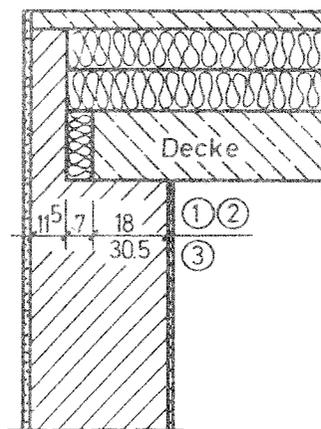
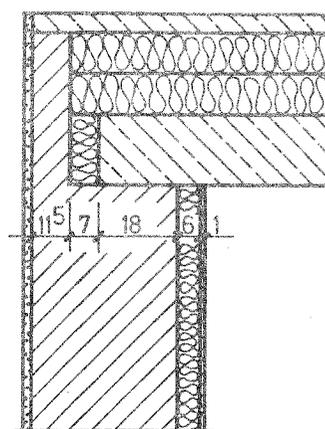
| Raum Nr. | Kurz-bez. | Aufbau | λ [W/mK] | g [kg/m ³] | k [W/m ² K] |
|---------------|---------------|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ① und ② | M 36 M36oF |  2 cm Außenputz 36,5 cm LZ-Mauermörtel (Baustellenmörtel) 1,5 cm Innenputz | 0,87 0,34 0,70 | 800 | 0,78 |
| ③ | M 49 |  2 cm Außenputz 49 cm LZ-Mauerwerk (Leichtmörtel) 1,5 cm Innenputz | 0,87 0,25 0,70 | 700 | 0,46 |
| ④ | ID |  2 cm Außenputz 36,5 cm LZ-Mauerwerk (Leichtmörtel) 6 cm Dämmschicht 1,25 cm Gipskartonplatte | 0,87 0,28 0,04 0,18 | 800 | 0,33 |
| ④a | AD23 |  23 cm Dämmschicht 24 cm HLZ-Mauerwerk (Normalmörtel) 1,5 cm Innenputz | 0,04 0,60 0,70 | 1400 | 0,16 |
| ⑤ | AD10 |  10 cm Dämmschicht 24 cm HLZ-Mauerwerk (Normalmörtel) 1,5 cm Innenputz | 0,04 0,60 0,70 | 1400 | 0,32 |
| ⑥ | Z |  11,5 cm Vormauerschale 6 cm Luftschicht 24 cm LZ Mauerwerk (Leichtmörtel) 1,5 cm Innenputz | 0,70 0,17 0,22 0,70 | 1600 700 | 0,62 |

Bild 3: Aufbau und bauphysikalische Daten der in den Räumen 1 bis 6 eingesetzten Außenwände.

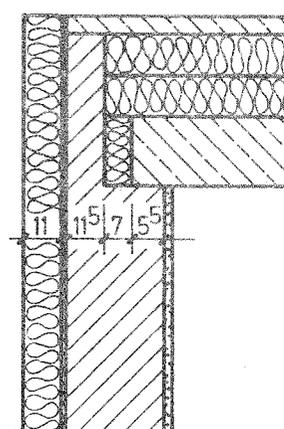
Raum ①-③



Raum ④



Raum ⑤



Raum ⑥

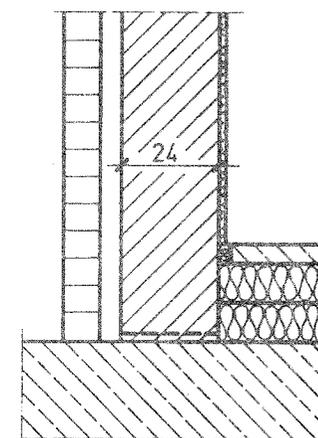
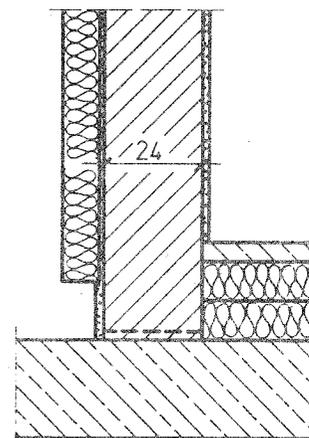
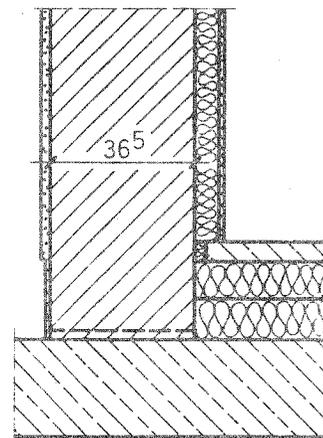
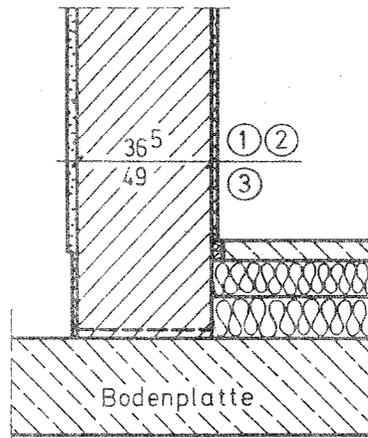
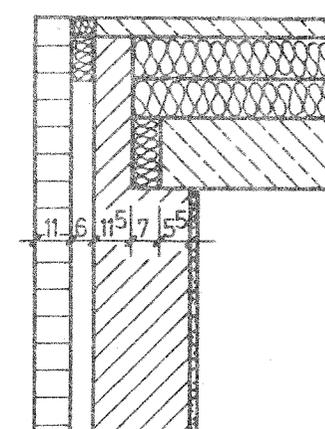
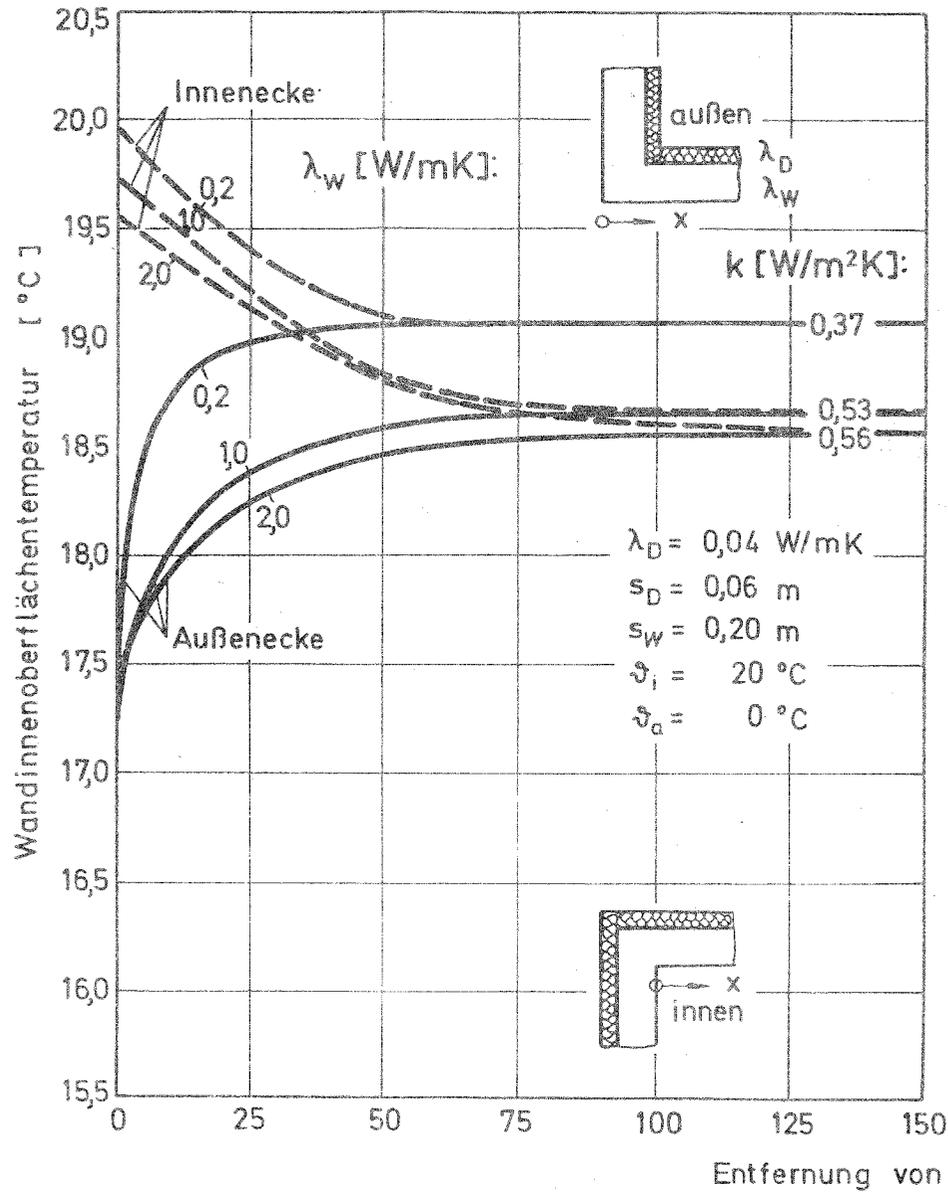


Bild 4: Fußboden- und Deckenanschlüsse in den einzelnen Räumen

Außendämmung



Innendämmung

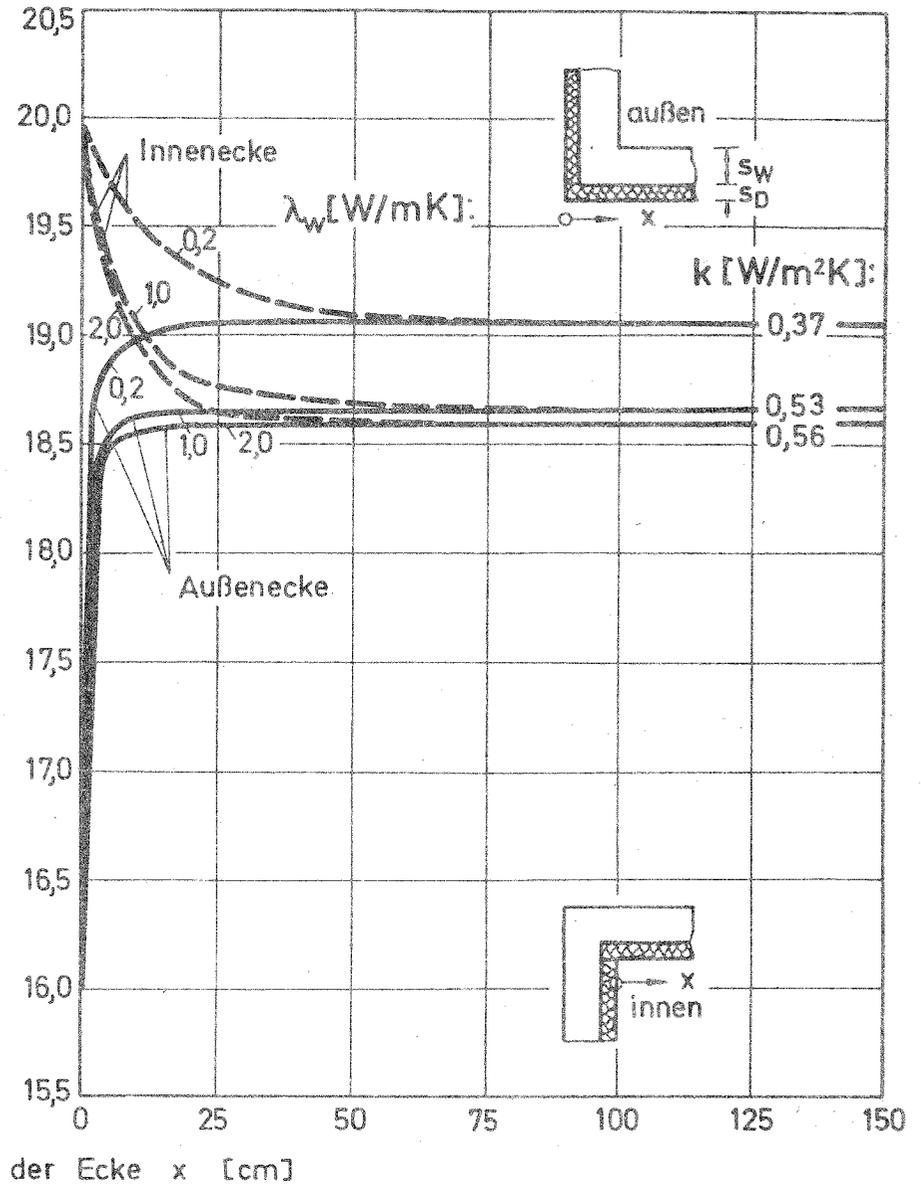


Bild 5: Wandinnenoberflächentemperatur von Außen- u. Innenecken bei Außen- u. Innendämmung bei verschiedener Wärmeleitfähigkeit des tragenden Mauerwerks.

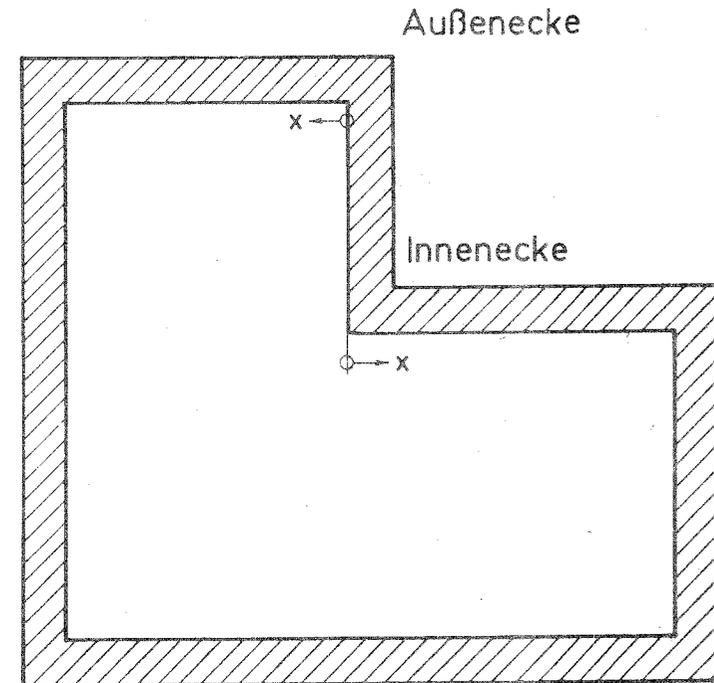
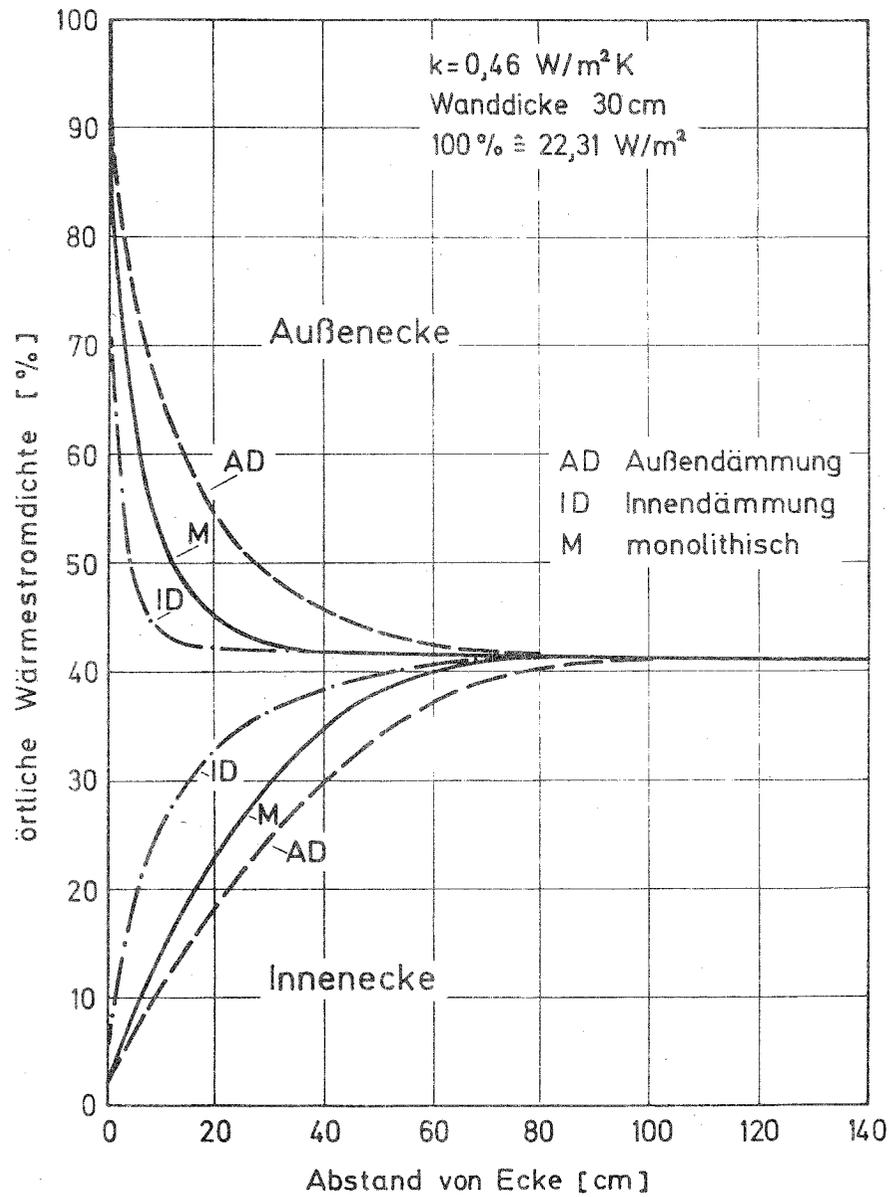


Bild 5: Verlauf der örtlichen Wärmestromdichten in Abhängigkeit vom Eckabstand bei unterschiedlichen Konstruktionen gleicher Wärmedämmung.

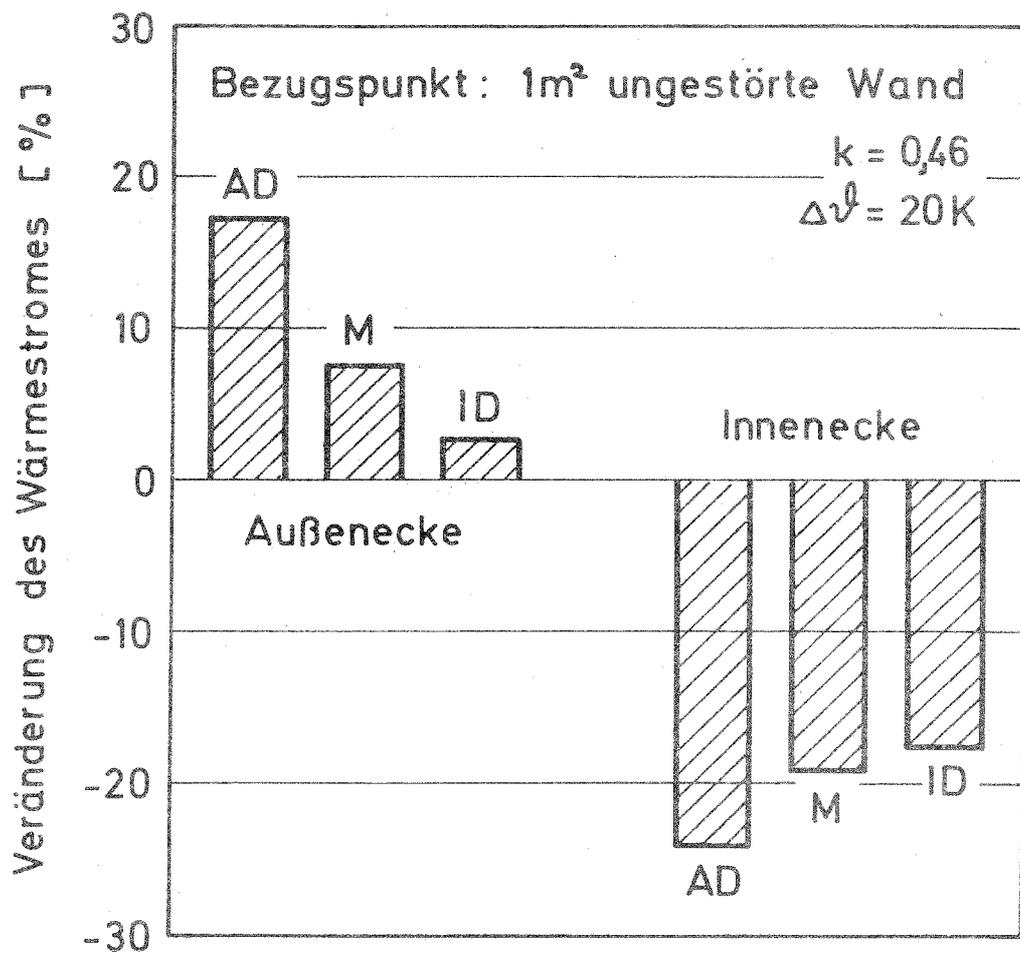
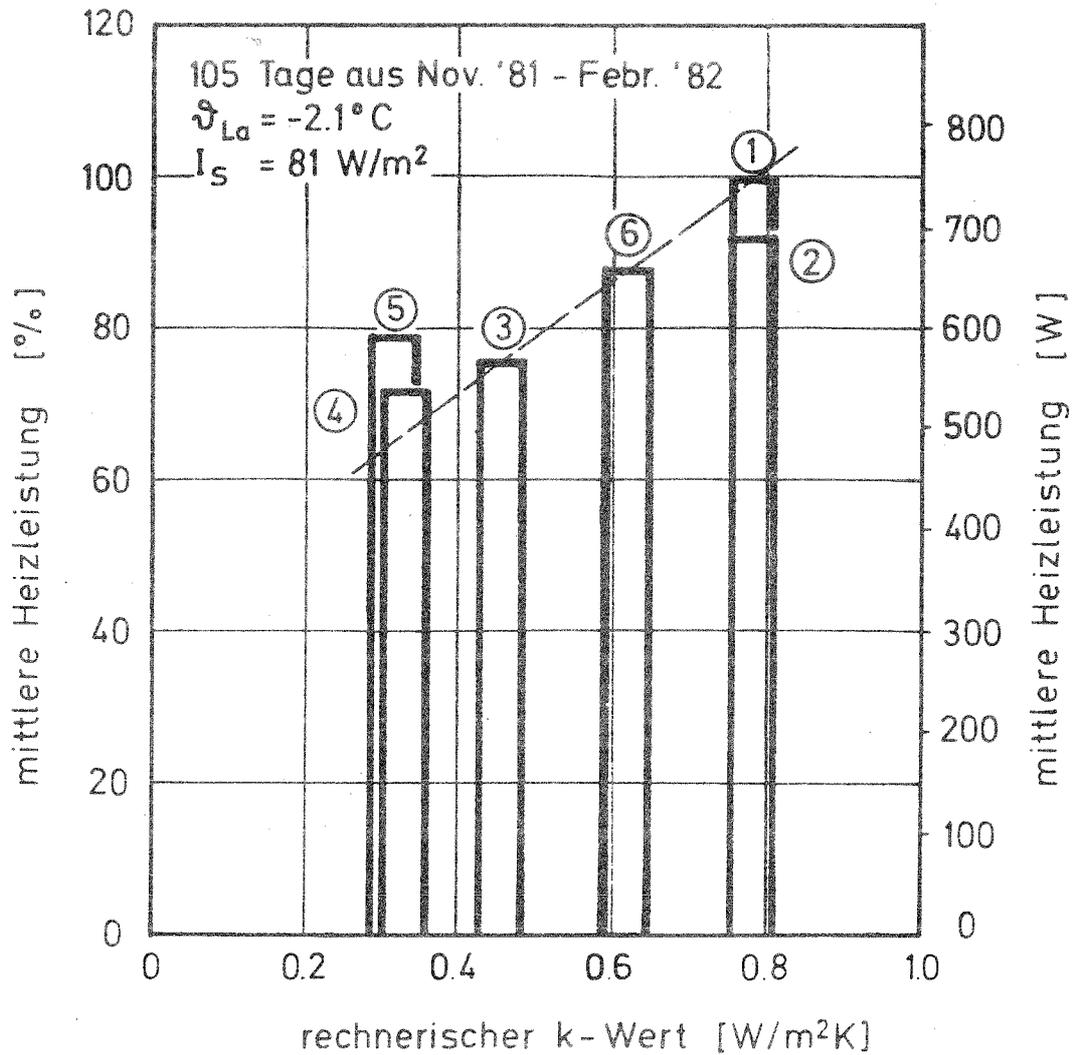
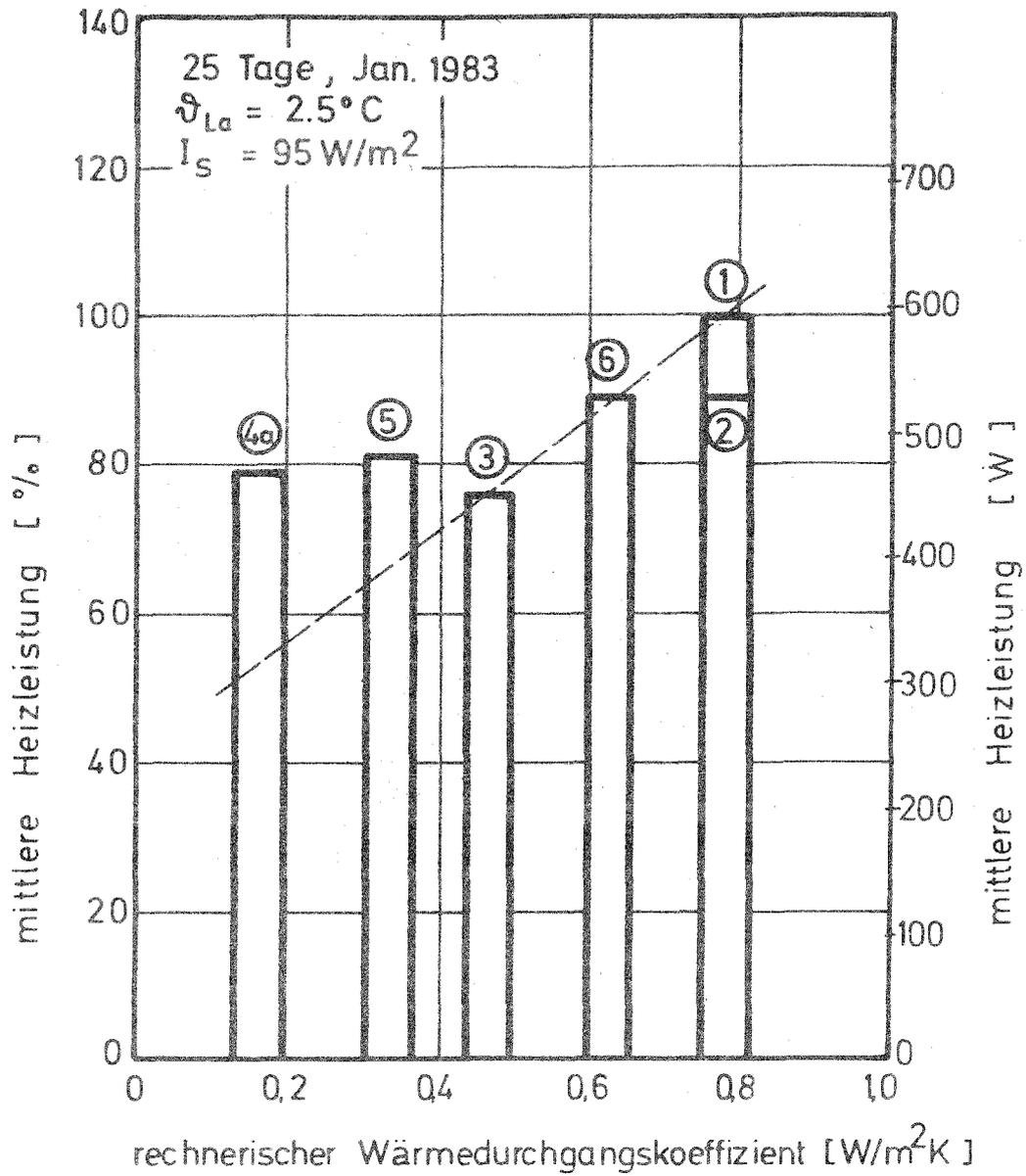


Bild 7: Veränderung des Wärmestromes (Transmissionswärmeverlust) unterschiedlicher Konstruktionen bei Außen- und Innenecken im Vergleich zur ungestörten Wand.



| Raum Nr. | Wandkonstruktion | Kurzbezeichnung |
|----------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | monolithisch 36,5 cm mit Fenster | (M 36) |
| 2 | monolithisch 36,5 cm ohne Fenster | (M 36 oF) |
| 3 | monolithisch 49 cm mit Fenster | (M 49) |
| 4 | Innendämmung | (ID) |
| 5 | Außendämmung | (AD 10) |
| 6 | zweischalig | (Z) |

Bild 8: Gemessene mittlere Heizleistung der Testräume in einem längerfristigen Zeitraum (105 Tage: November '81 bis Februar '82). Die mittlere Außenlufttemperatur betrug $-2,1^\circ\text{C}$, die mittlere Strahlungsintensität 81 W/m^2 .



| Raum Nr. | Wandkonstruktion | Kurzbezeichnung |
|----------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | monolithisch 36,5 cm mit Fenster | M 36 |
| 2 | monolithisch 36,5 cm ohne Fenster | M 36 oF |
| 3 | monolithisch 49 cm mit Fenster | M 49 |
| 4 a | Außendämmung (23 cm) mit Fenster | AD 23 |
| 5 | Außendämmung (10 cm) mit Fenster | AD 10 |
| 6 | zweischalig mit Fenster | Z |

Bild 9: Gemessene mittlere Heizleistung in der Meßperiode Januar 1983, in der eine extrem gedämmte Wand (Raum 4a) in den Vergleich aufgenommen wurde.

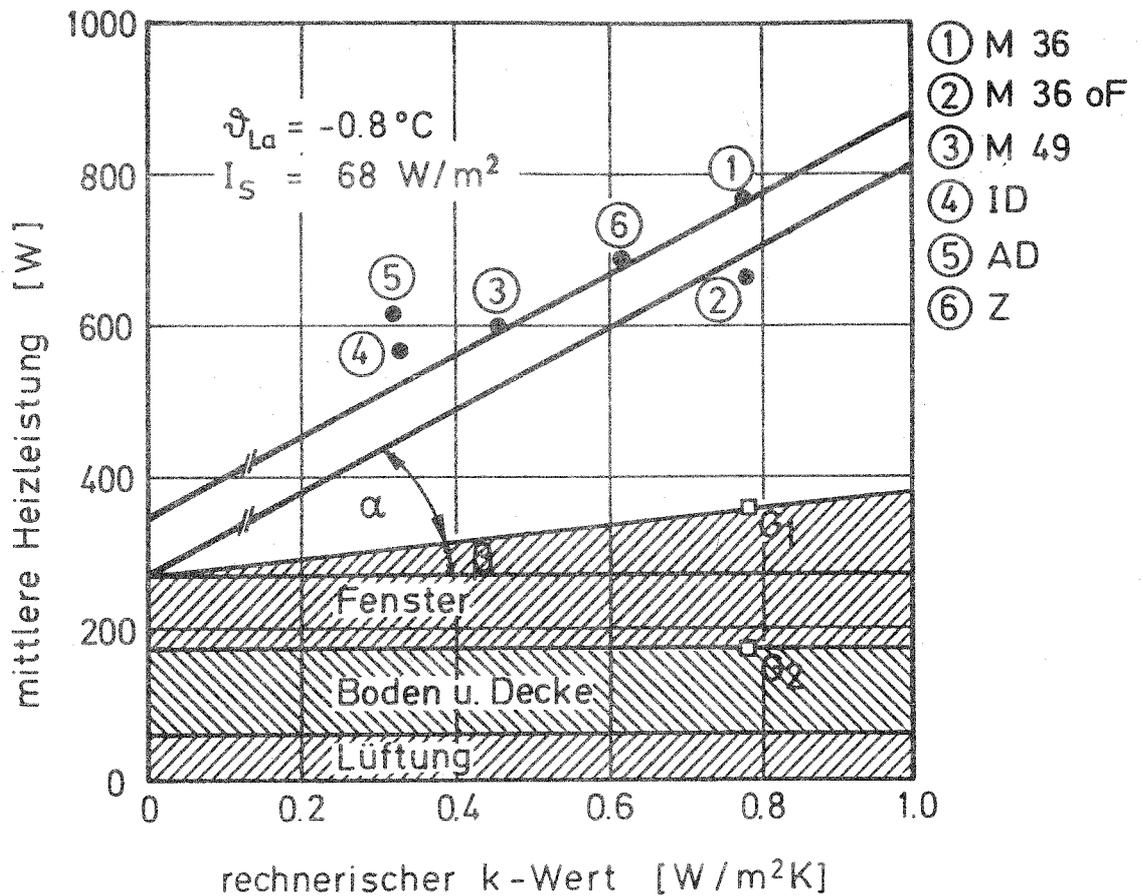


Bild 10: Gemessene mittlere Heizleistung der Testräume in einem Zeitraum von 62 Tagen bei einer mittleren Außenlufttemperatur von $-0,8^\circ\text{C}$ und einer Strahlungsintensität von 68 W/m^2 . Die schraffierten Bereiche stellen die Wärmeverluste der Testräume durch Lüftung, Fußboden, Decke und Fenster dar. Beim Fenster ist der Nettoverlust infolge Transmission und Strahlung aufgetragen.

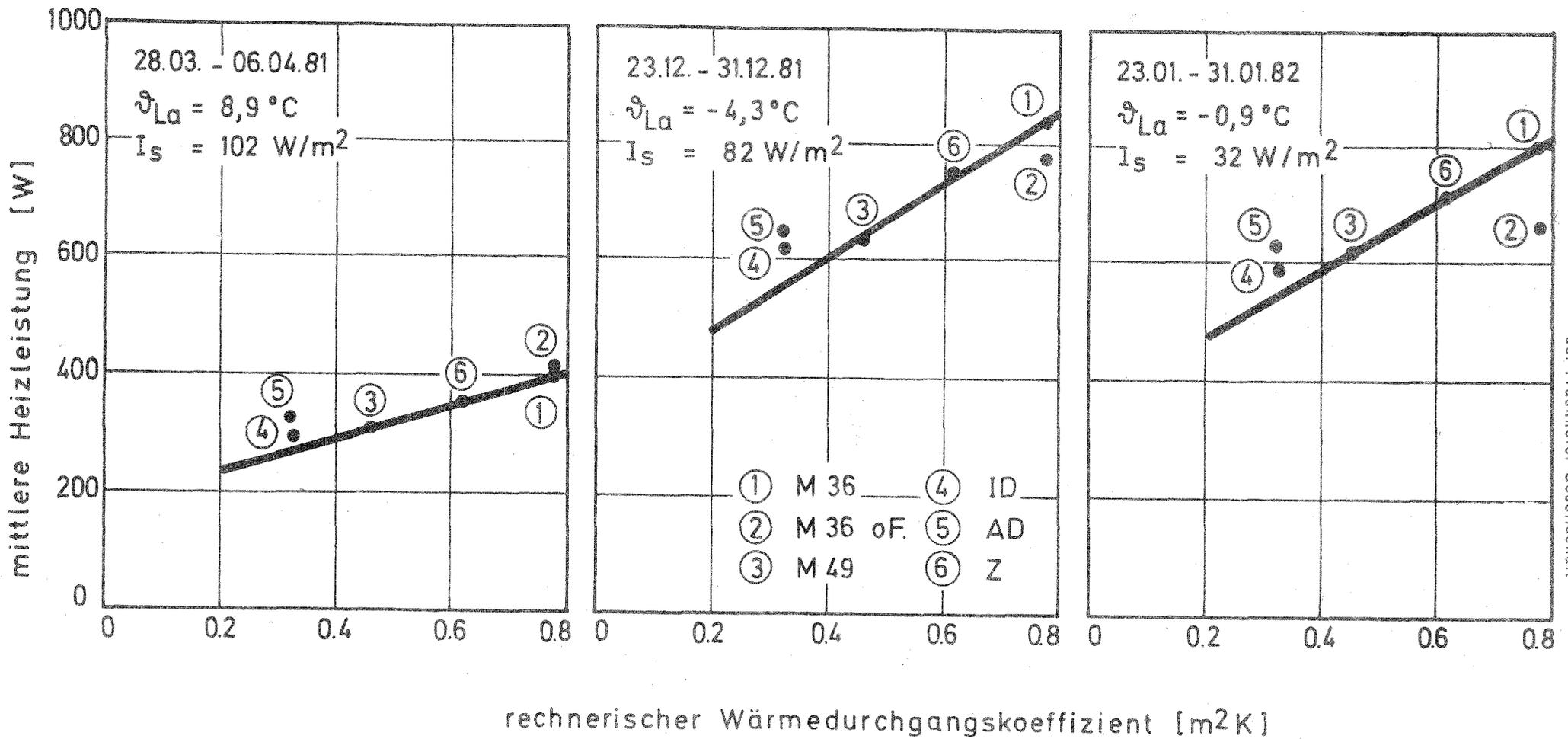


Bild 11: Vergleich der mittleren Heizleistungen der Testräume bei verschiedenen außenklimatischen Bedingungen.

linkes Bild: relativ warm mit viel Sonne
mittleres Bild: kalt mit durchschnittlicher Besonnung
rechtes Bild: mäßig kalt mit wenig Sonne

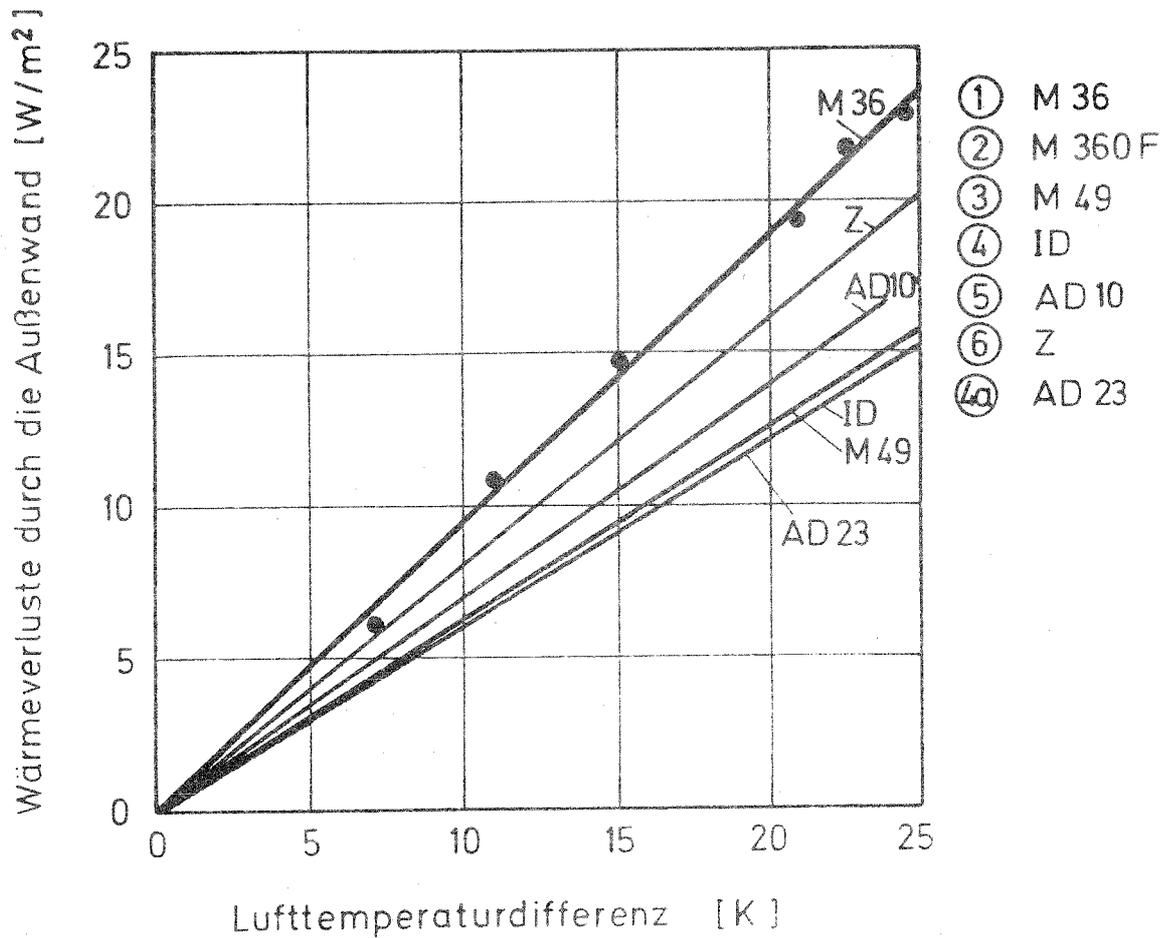


Bild 12: Abhängigkeit der Transmissionswärmestromdichten der untersuchten Wände von der Differenz der Außen- und Raumlufthtemperatur. Die Geraden wurden mit Hilfe linearer Regression anhand der Mittelwerte verschiedener Meßperioden ermittelt. Der Übersicht halber wurden nur die Meßpunkte für die 36,5 cm dicke Wand eingetragen. Für die Fläche der Außenwände wurden Innenmaße zugrunde gelegt.

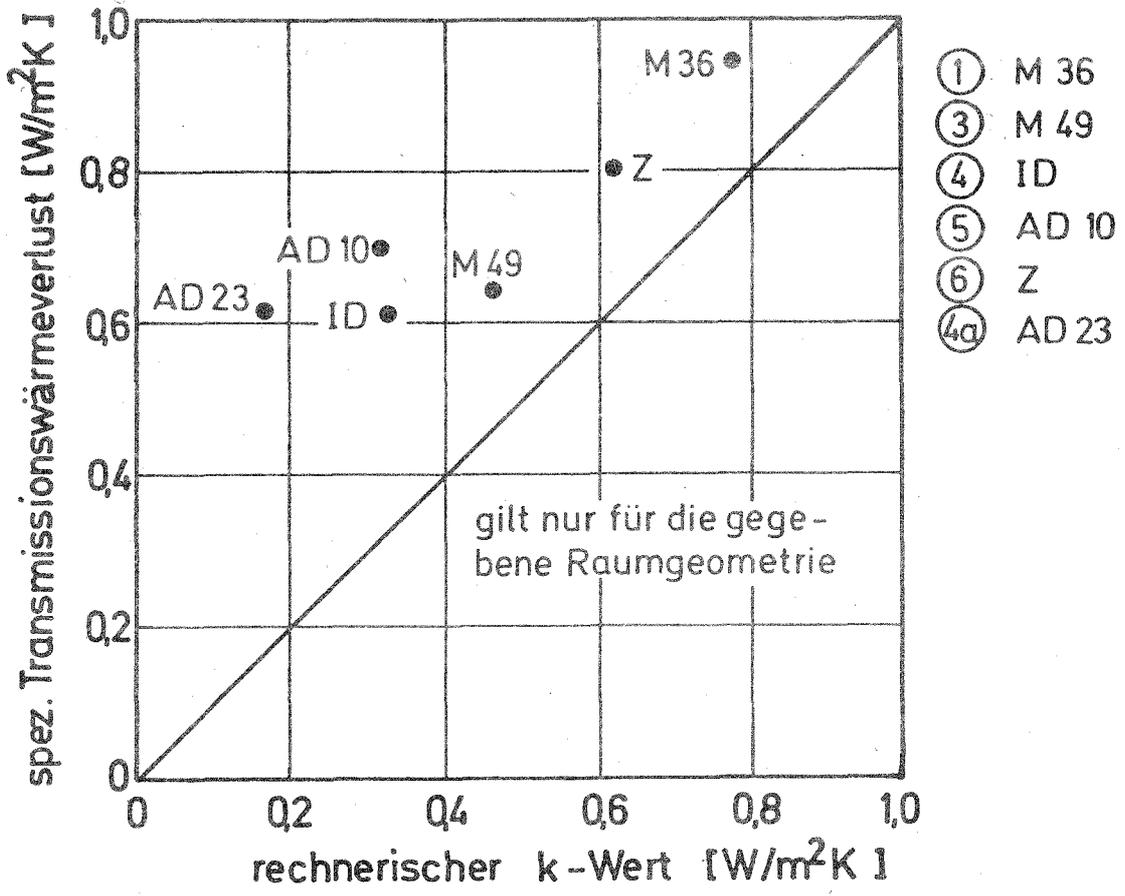


Bild 13: Zuordnung des über Regression ermittelten "spezifischen" Transmissionswärmeverlustes der Wände und des herkömmlichen "rechnerischen" k-Wertes. Der spezifische Transmissionswärmeverlust beinhaltet alle Wärmebrückeneffekte im Wandbereich. Die Zuordnung gilt nur für die vorliegenden Versuchsräume und kann quantitativ nicht verallgemeinert werden.

hell

Anstrich

dunkel

Kurzzeitvergleich

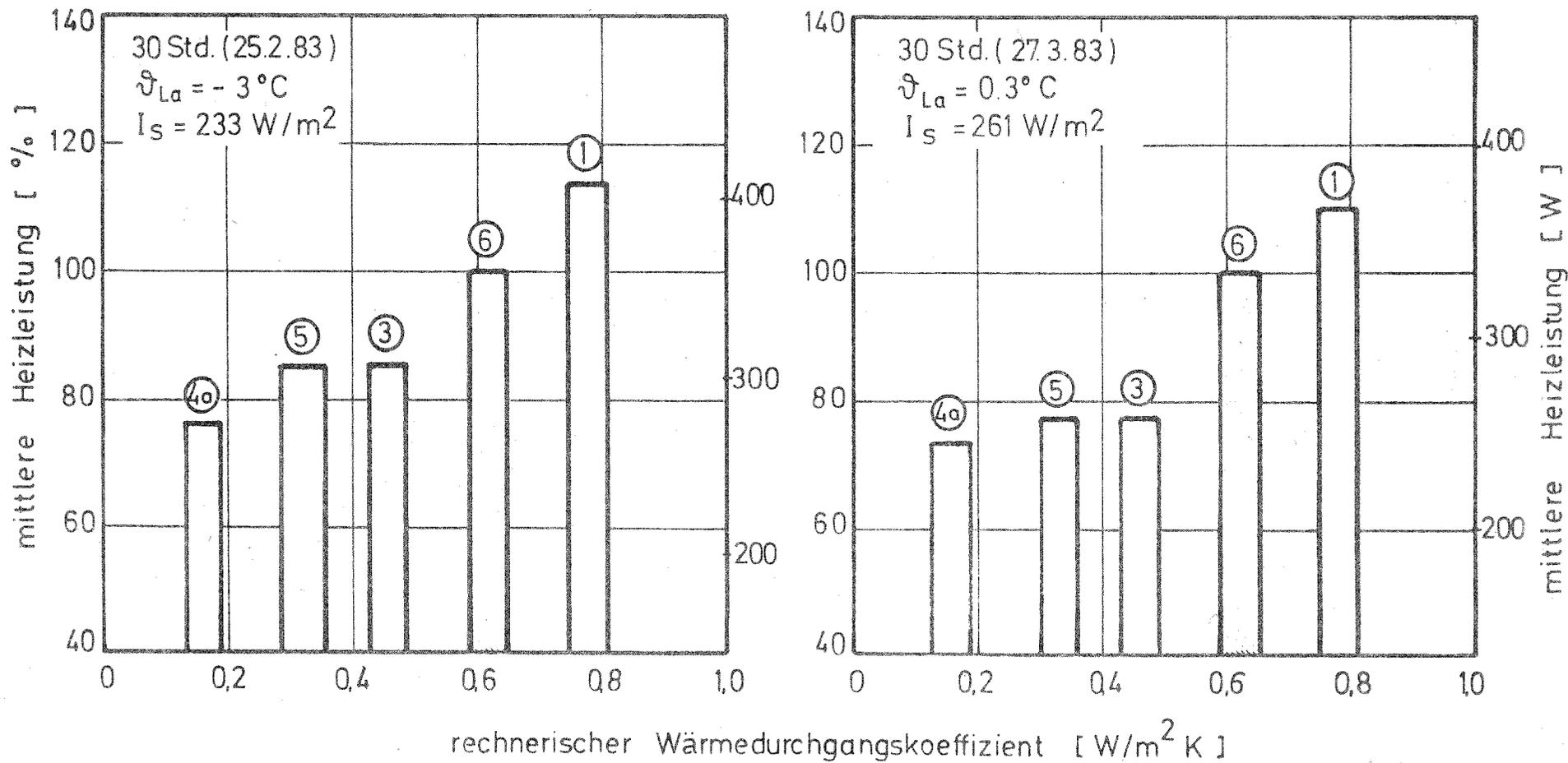


Bild 14: Vergleich über die Wirkung der Strahlungsabsorption auf der Außenoberfläche der Wände.

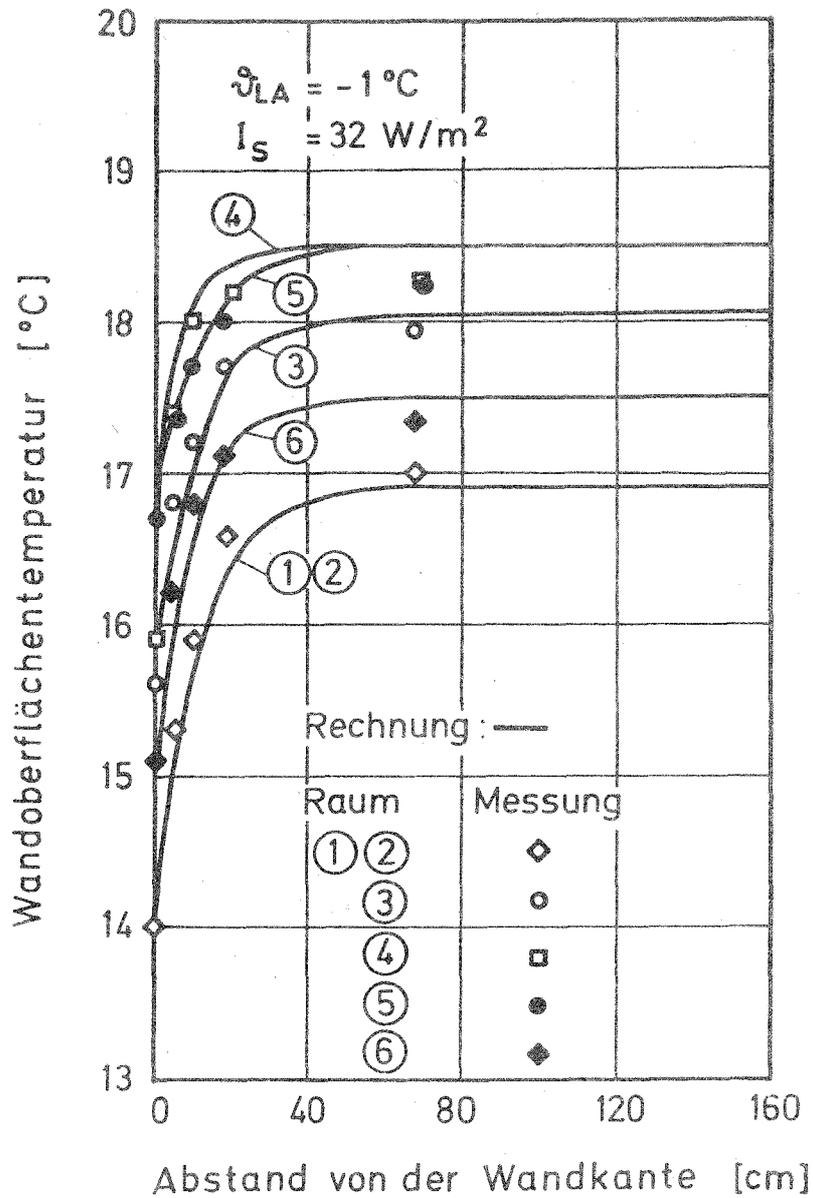


Bild 15: Vergleich zwischen gemessenen (Punkte) und errechneten (Kurven) Wandinnenoberflächentemperaturen an einer ausspringenden Ecke (Aus-senecke) in Abhängigkeit vom Abstand von der inneren Wandecke.

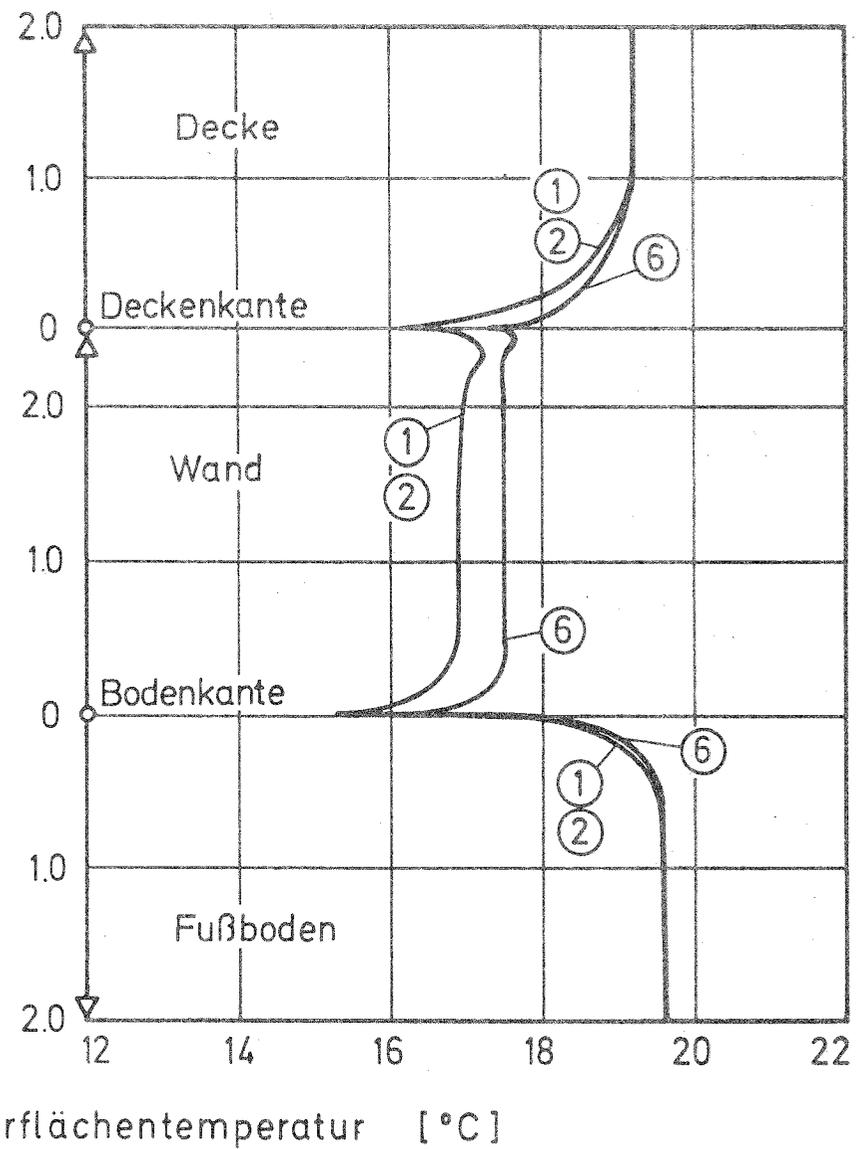
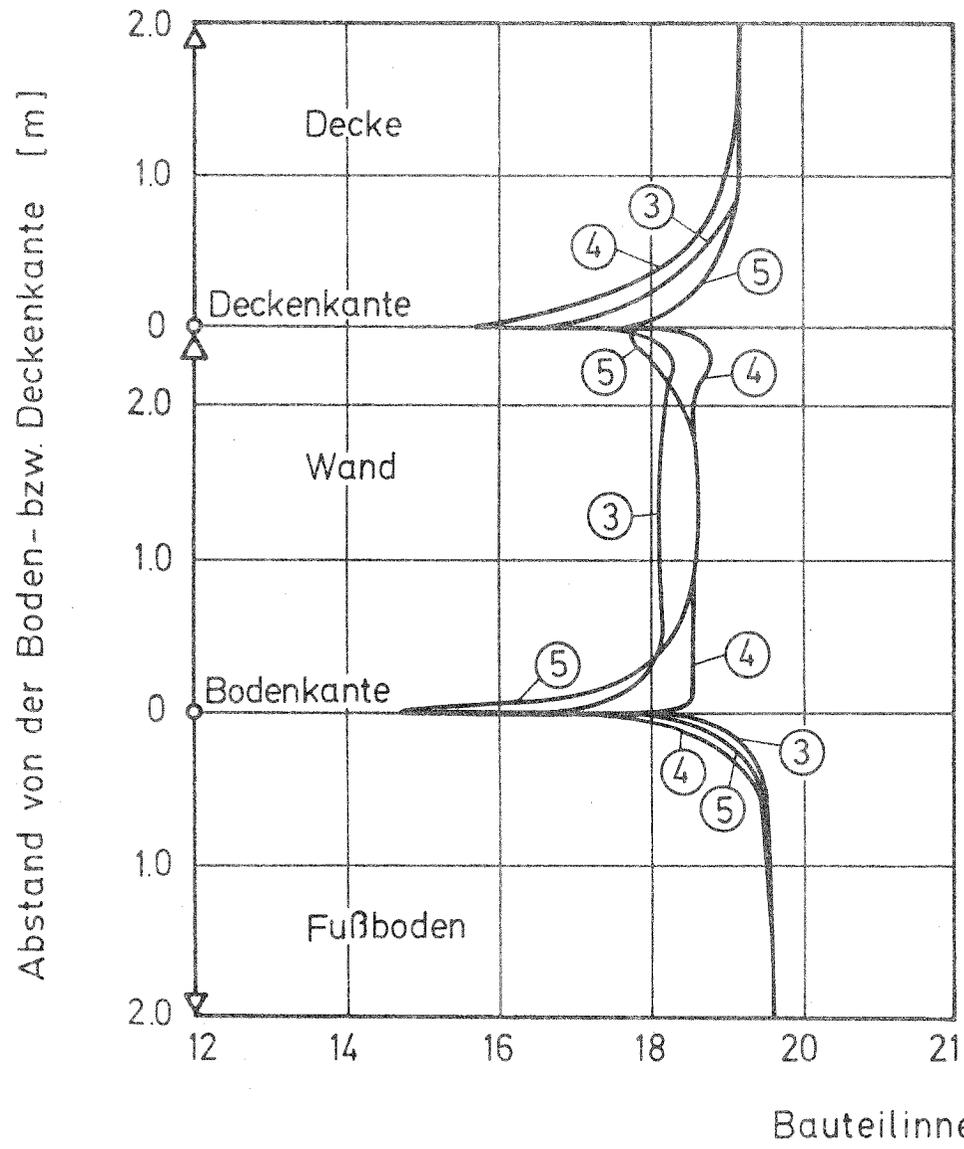


Bild 19: Rechnerisch ermittelte Temperaturverteilungen an den inneren Oberflächen der Bauteile im Fußboden - Wand- (Bodenkante) und Wand - Decken-Bereich (Deckenkante). Angepaßt an eine Meßperiode mit einer Außenlufttemperatur von -1°C bei einer Raumlufttemperatur von 20°C .

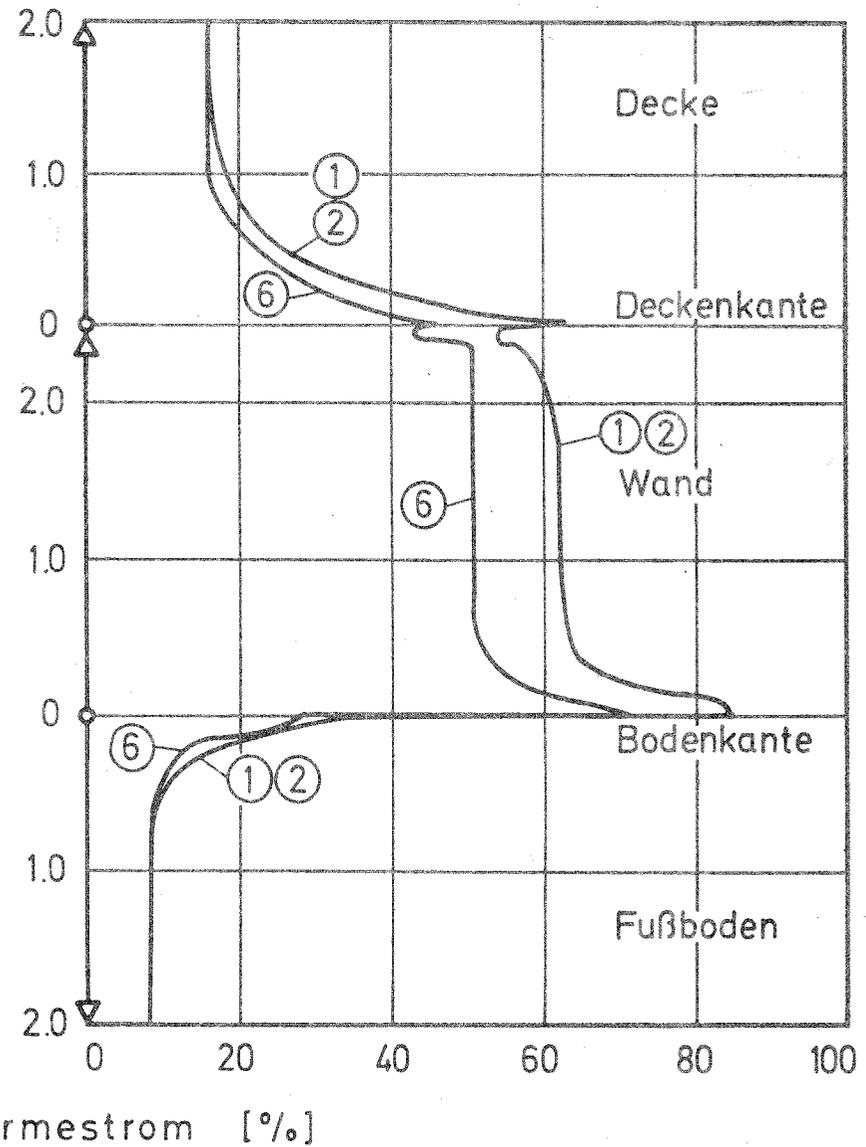
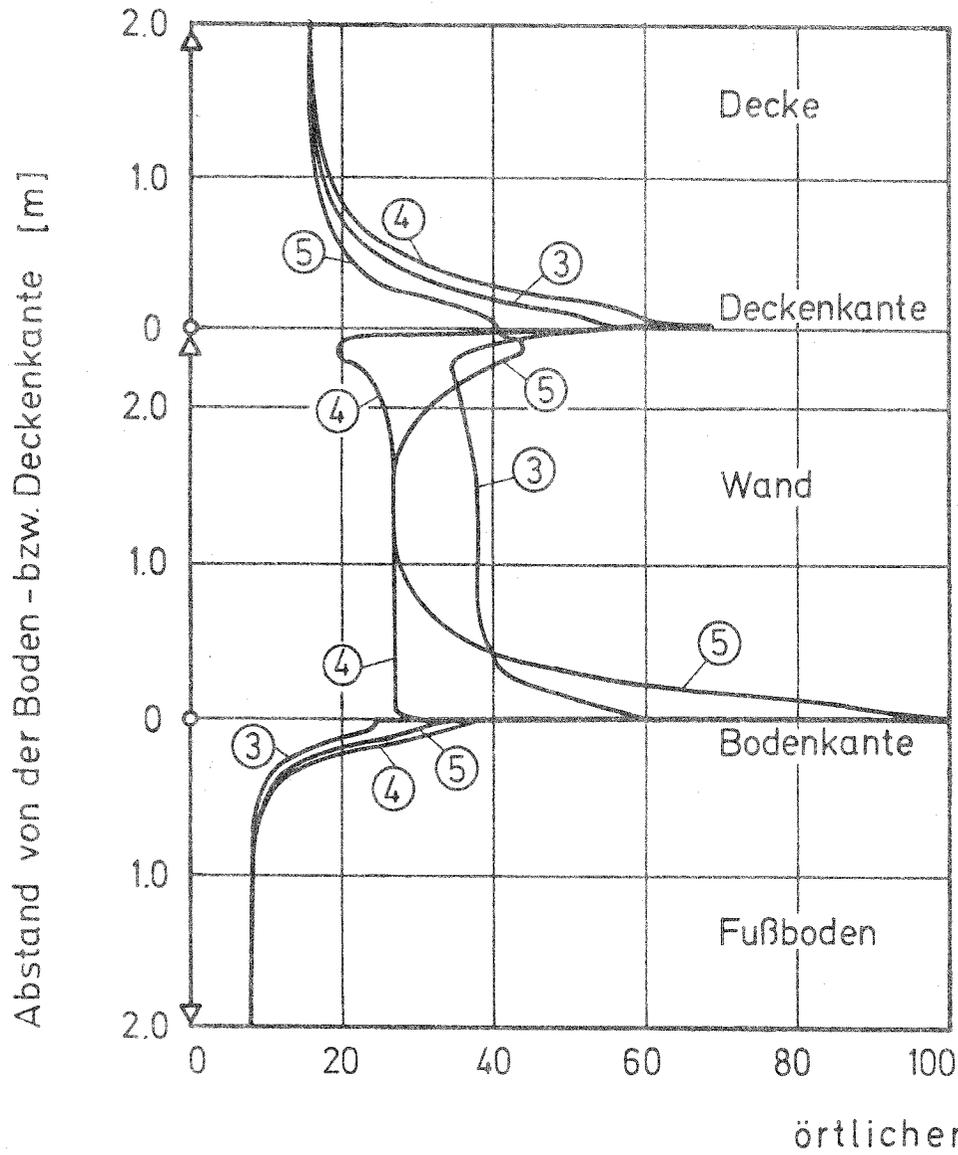


Bild 17: Darstellung der örtlichen Wärmeströme in Prozent vom Höchstwert (Bodenkante Raum 5, AD) aufgrund der Temperaturverteilung nach Bild 14 und der dortigen Randbedingungen.

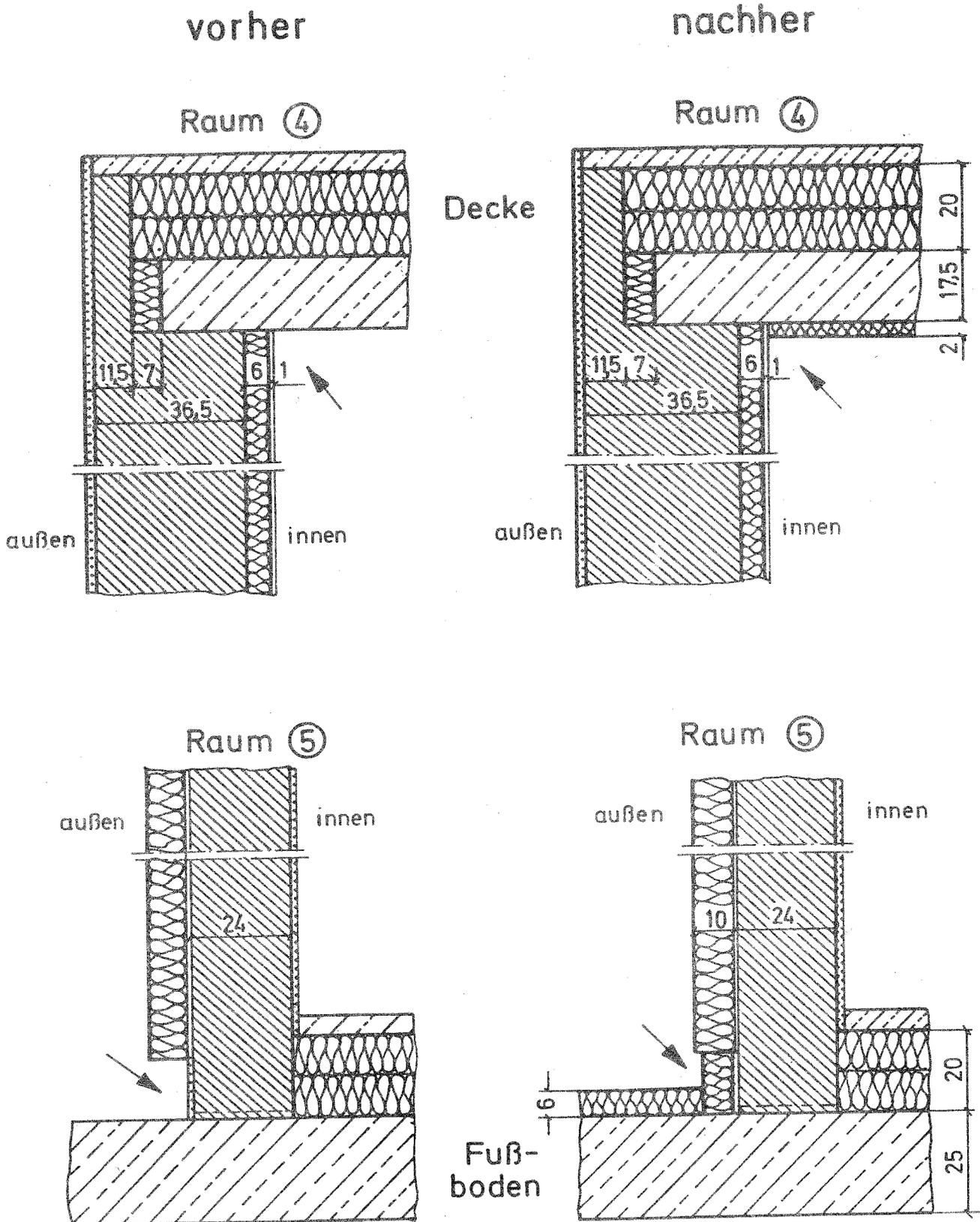


Bild 18: Konstruktionsansichten der Räume 4 (ID) und 5 (AD) im Decken- und Fußbodenbereich vor ("vorher") und nach ("nachher") Anbringung einer zusätzlichen Wärmedämmung zur Abminderung der dortigen Wärmebrückeneffekte.

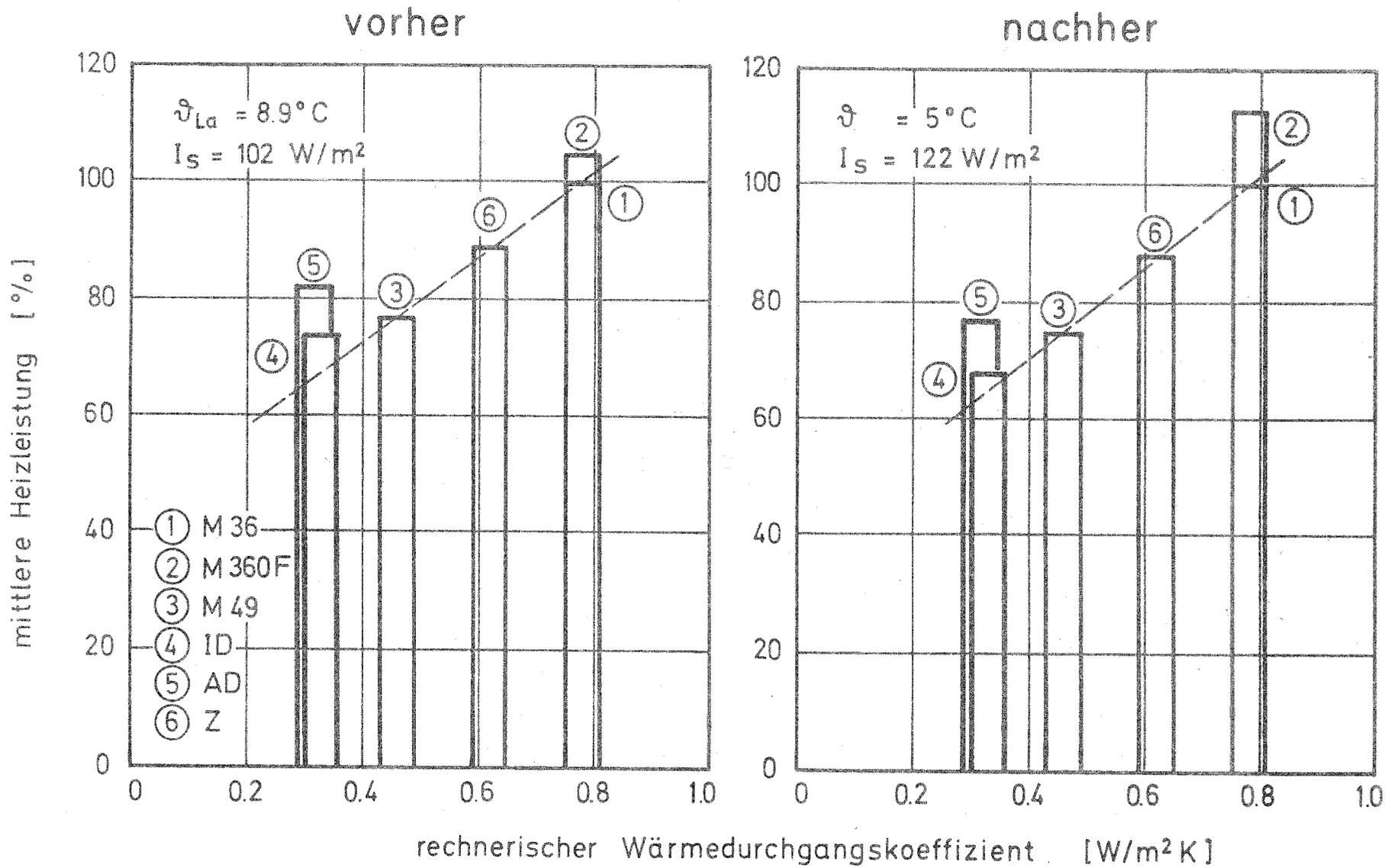


Bild 19: Vergleich der mittleren Heizleistungen der einzelnen Räume (Raum 1 $\hat{=}$ 100%) vor ("vorher") und nach ("nachher") Anbringung der Zusatzdämmung gemäß Bild 16.

Wärmebrückeneffekt an der Decke

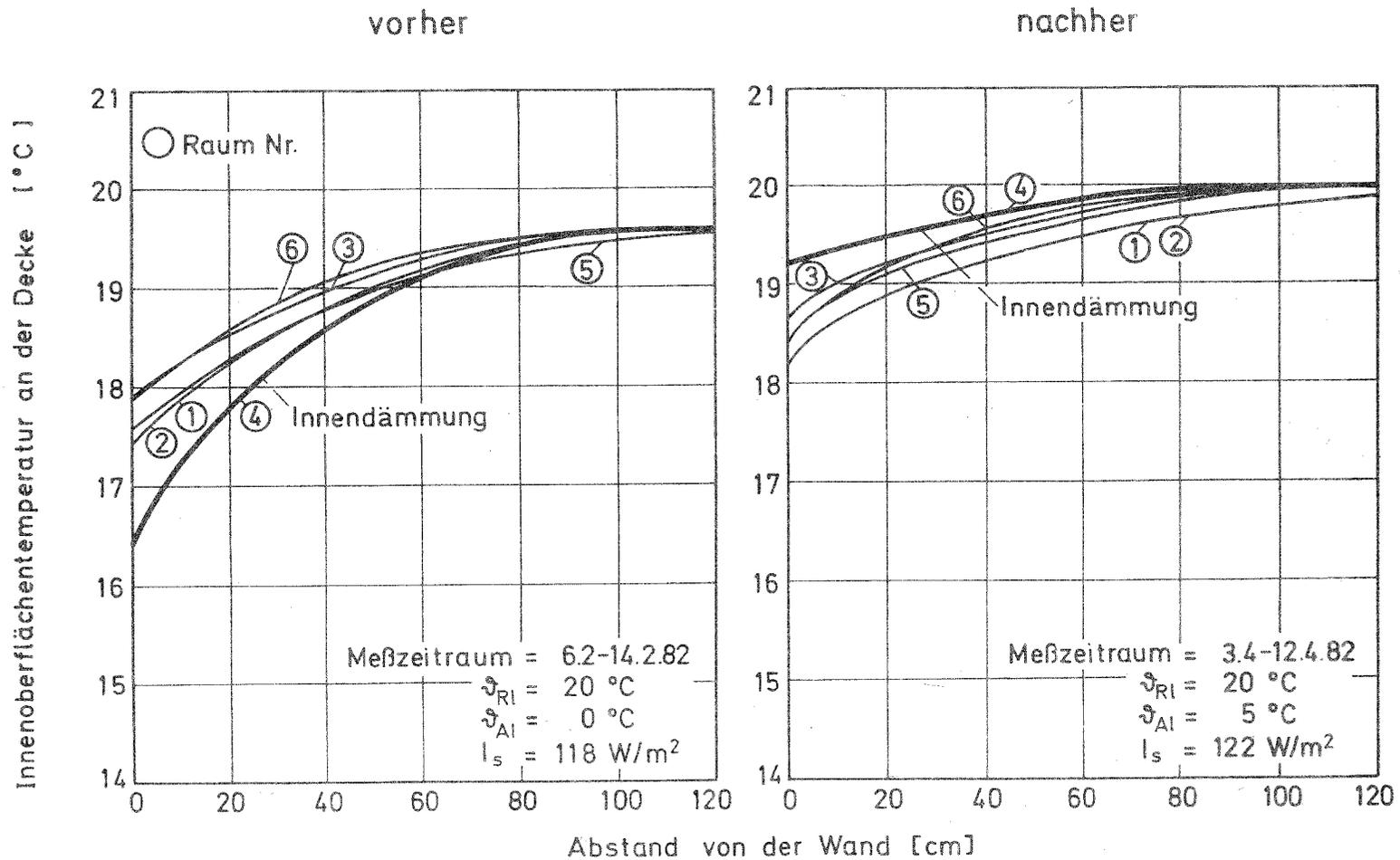


Bild 20: Auswirkung der nachträglichen Zusatzdämmung ("nachher") an der Decke im Raum 4 (ID) auf die innere Oberflächentemperatur der Decke im Wandanschlußbereich. Ergebnis einer Messung.

Wärmebrückeneffekt an der Wand

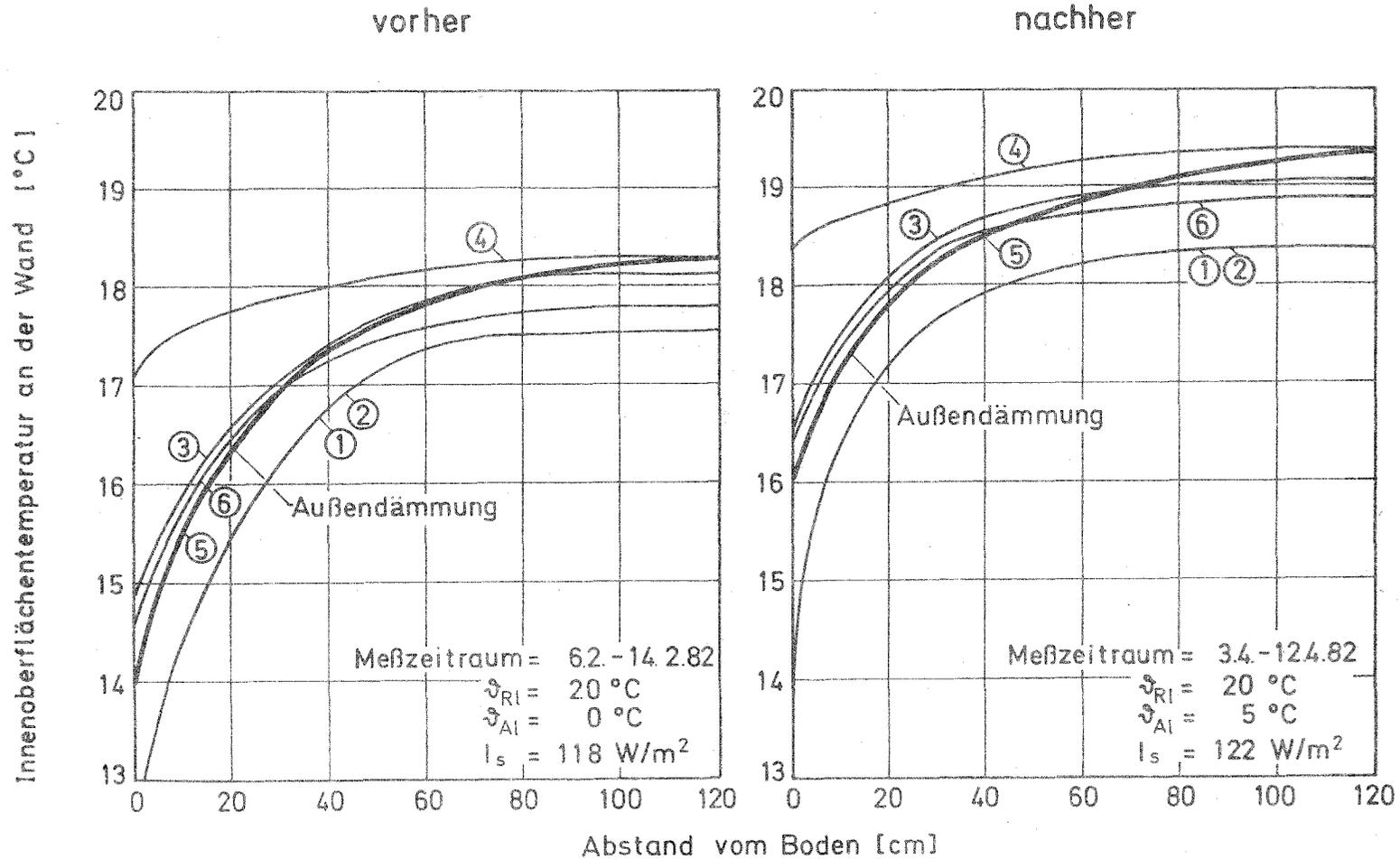
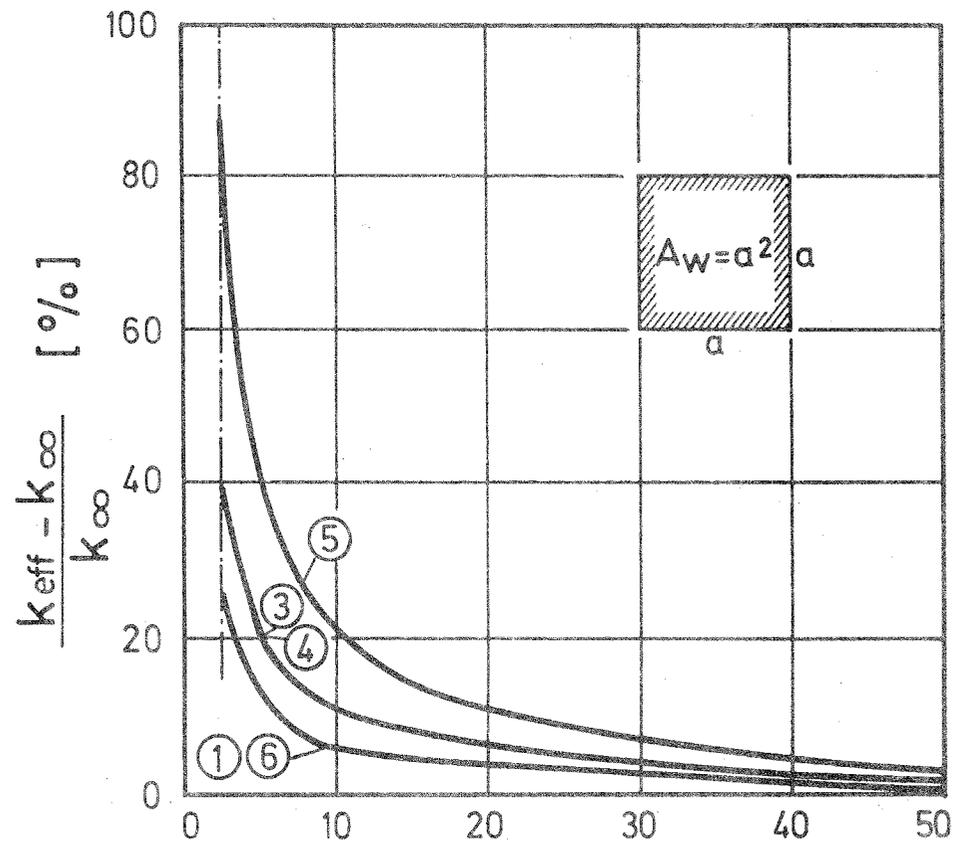
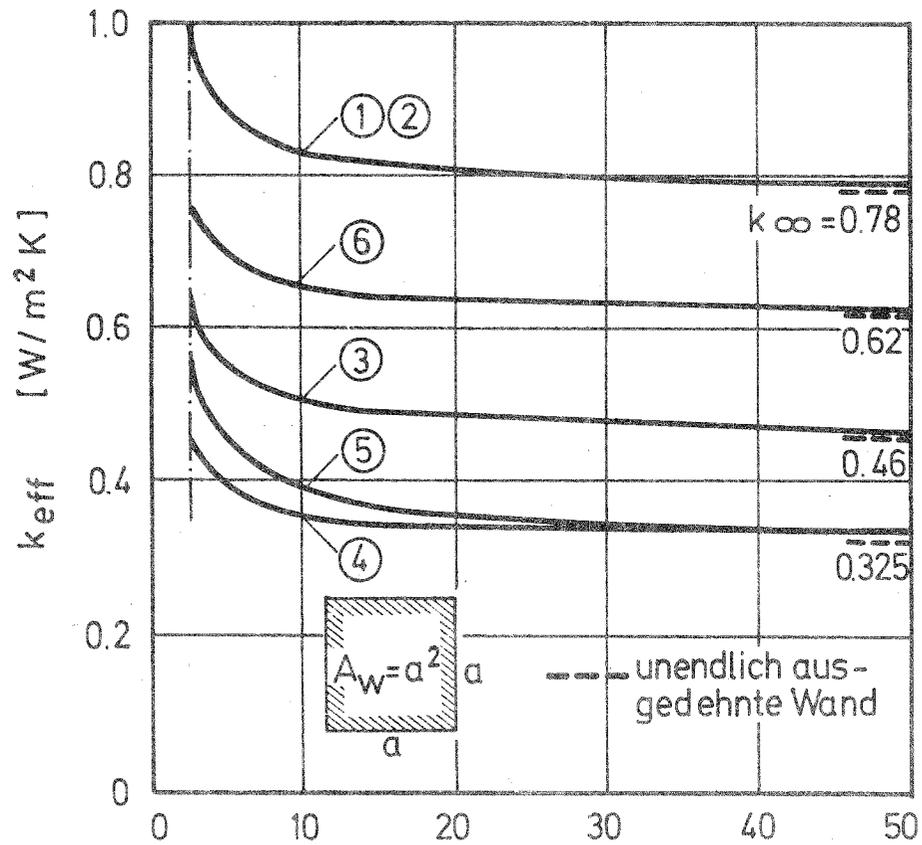


Bild 21: Auswirkung der nachträglichen Zusatzdämmung der Außenwand des Raumes 5 (AD) auf die Innenoberflächentemperatur der Außenwand in unterschiedlichen Abständen vom Boden. Ergebnis einer Messung.

Randeinflüsse auf den k-Wert einer Wand



Kantenlänge einer quadratischen Fläche [m]

Bild 22: Abhängigkeit des spezifischen Transmissionswärmeverlustes eines gerandeten quadratischen Wandfläche von deren Kantenlänge. Im Randbereich wurden die für die hier vorliegenden Konstruktionen errechneten Wärmebrückeneffekte an Außenecke, Boden- und Deckenanschluß berücksichtigt. Die Diagramme sollen verdeutlichen, daß die durch Wärmebrücken bedingten Heizenergieverbräuche bei Zunahme ungestörter Wandflächen relativ abnehmen.

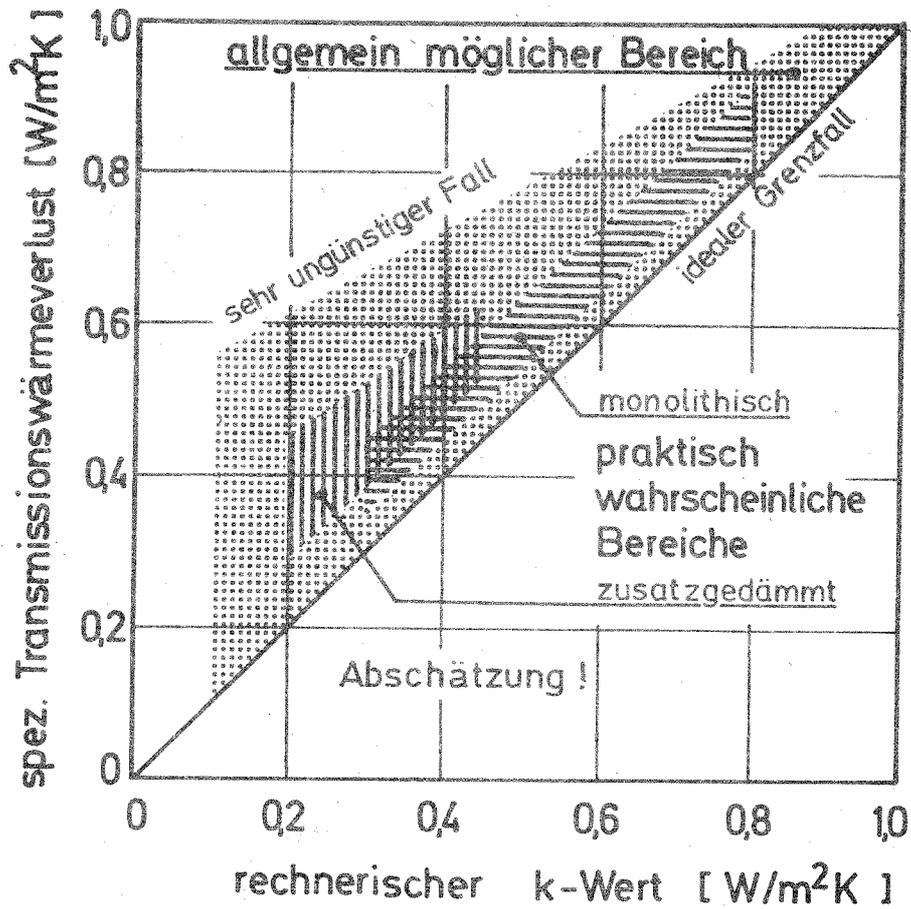


Bild 23: Abschätzung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes von monolithischen und zusatzgedämmten Außenwänden bei in der Praxis vorkommenden Gebäuden aufgrund der hier durchgeführten Untersuchungen.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

AUSSENSTELLE HOLZKIRCHEN

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

Institutsleitung: Prof. Dr. F. P. Mechel

"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

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 kon-
stant $8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 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 Aueßenecke (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 Balkonplatten, 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 | |
| $q_{WB} - q_T$ | 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.

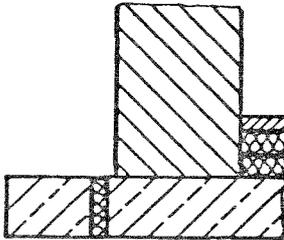
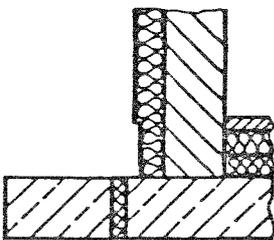
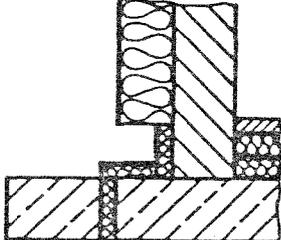
| Wärmestromdichten im Bodeneckenbereich | | ③ | ⑤ | ④a |
|--|------------------------------|--|---|--|
| Raumnr. | | | | |
| Konstruktion | |  |  |  |
| k_{Wand} [W/m ² K] | | 0.46 | 0.32 | 0.16 |
| eindimens. q_T [W/m ²] | | 11.0 | 8.4 | 5.0 |
| zweidimens. q_{WB} [W/m ²] | | 14.8 | 15.4 | 12.9 |
|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

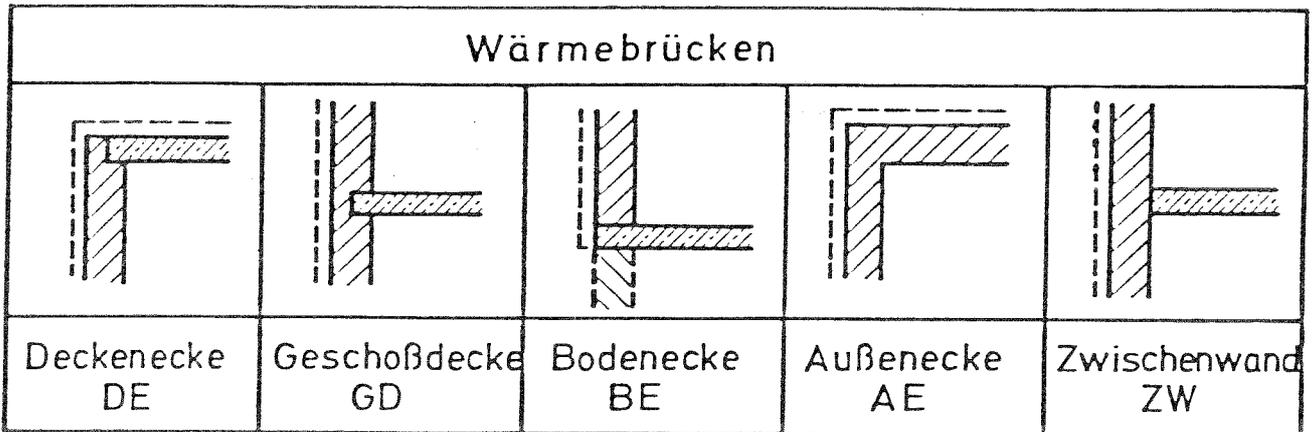
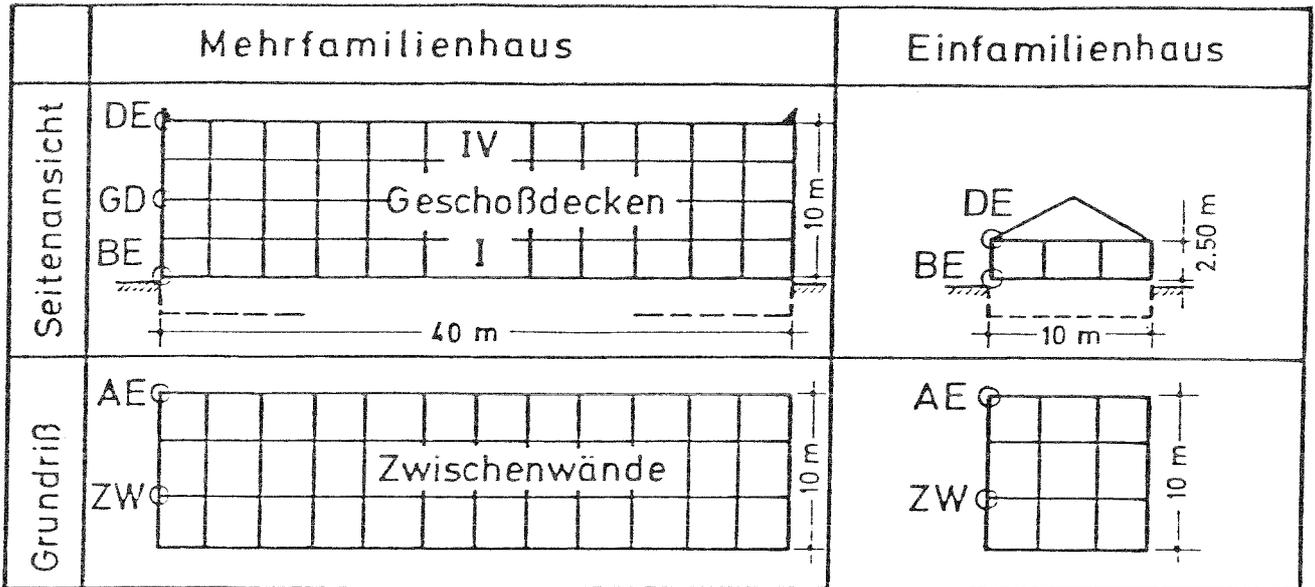
Tabelle 3: Übersicht charakteristischer Größen der Wärmebrücken, die bei der Berechnung des Transmissionswärmeverlustes der Modellhäuser gemäß Tabelle 5 einbezogen wurden.

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

Tabelle 4: Vergleich der bei der Modellrechnung berücksichtigten Wärmebrücken für eine monolithische (Monol.) und eine außengedämmte (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 | |
| q _{WB} - q _T | Δ [W/m ²] | 4,2 | 3,9 | 3,6 | 2,7 | 1,8 | 4,6 | 2,2 | 3,0 | 1,6 | 2,1 |
| | Δ [%] | 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 außengedämmt 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] | $\sum k_i \cdot A_j \cdot \Delta T_j$ | 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

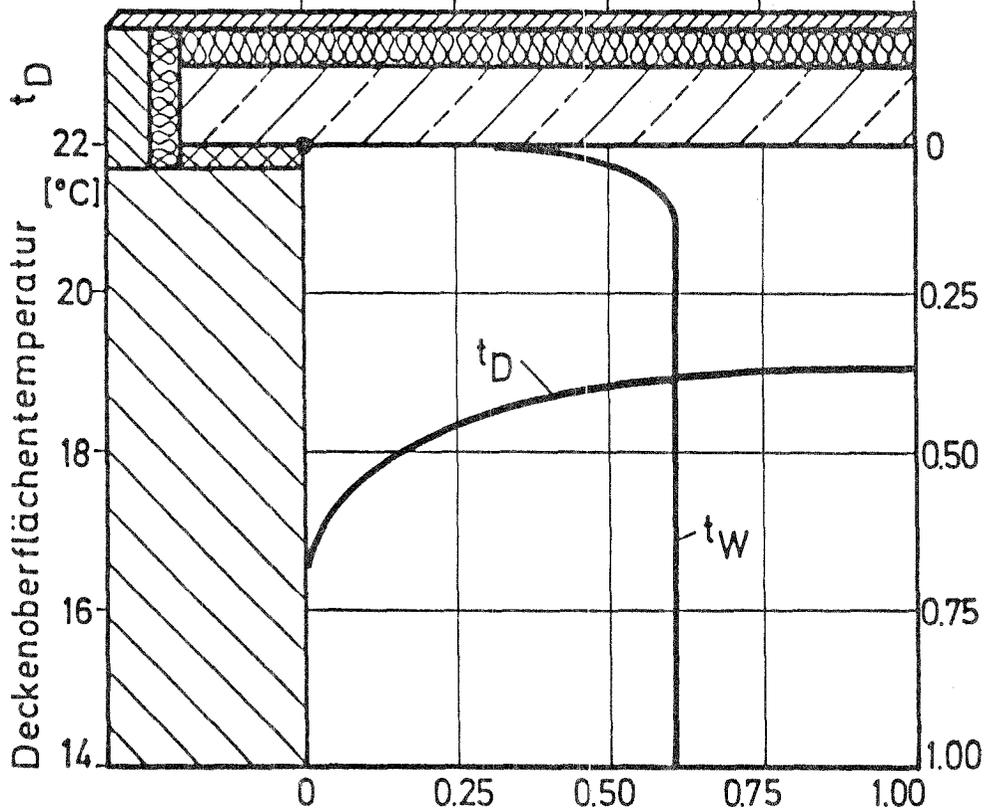
Deckenecke

Außendämmung

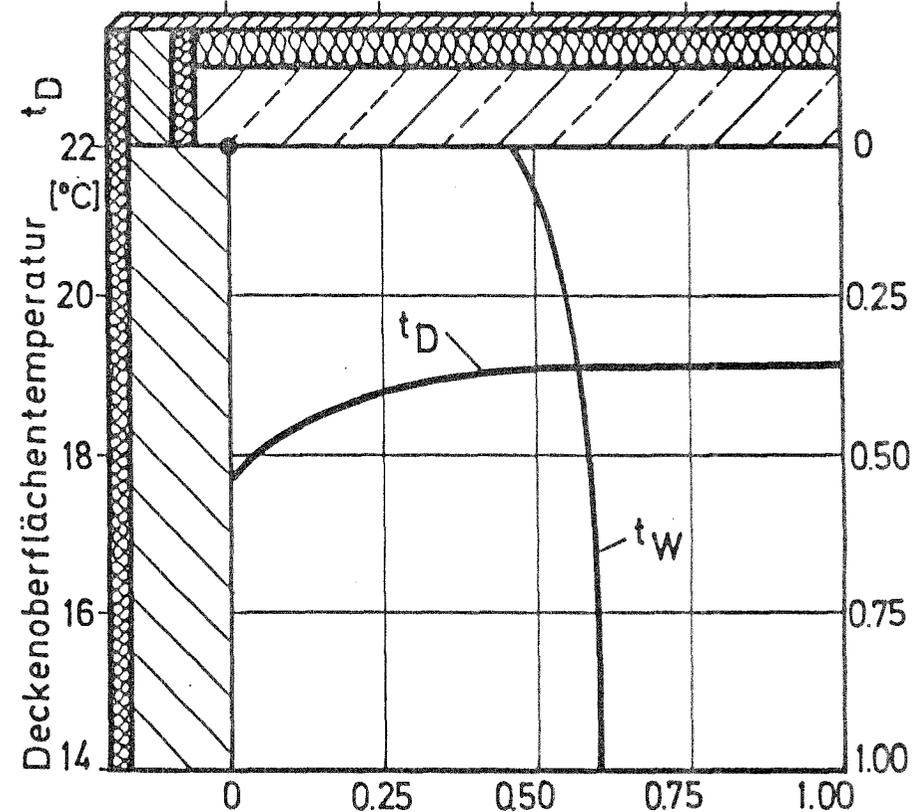
Außenwandoberflächentemperatur t_W [°C]

14 16 18 20 22

14 16 18 20 22



Abstand von der Decke [m]



Abstand von der Decke [m]

Abstand von der Außenwand [m]

Bild 1: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Decken-Wand-Anschlußbereich.

Geschoßdecke

Monolithisch

Außendämmung

Außenwandoberflächentemperatur t_W [$^{\circ}\text{C}$]

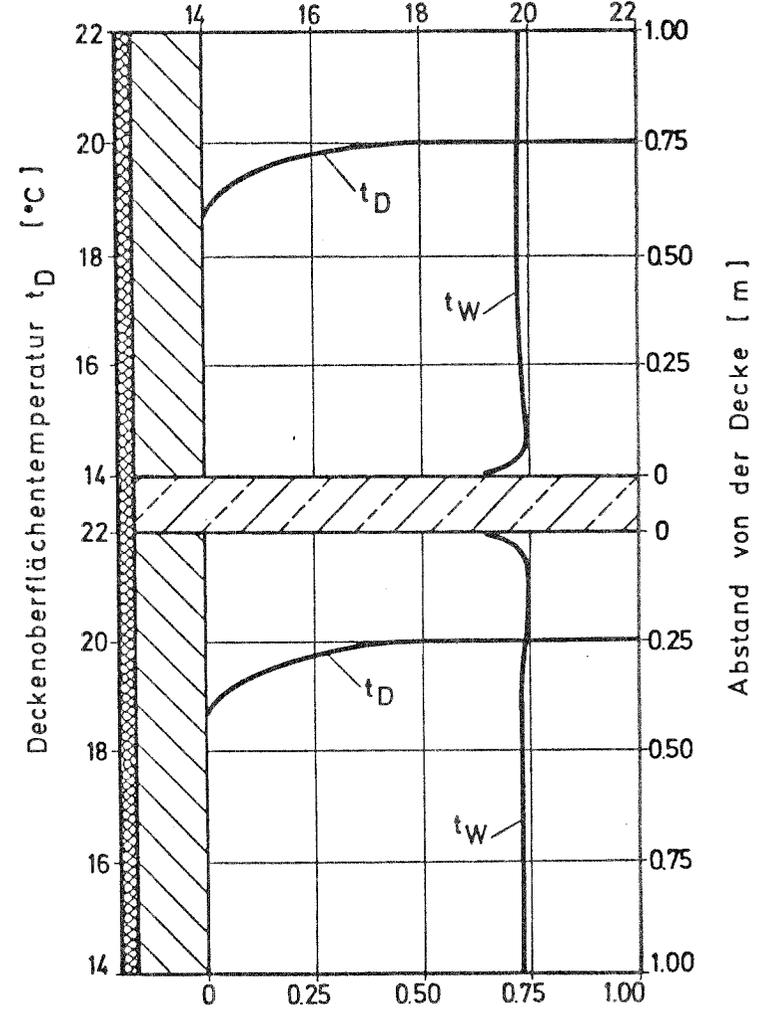
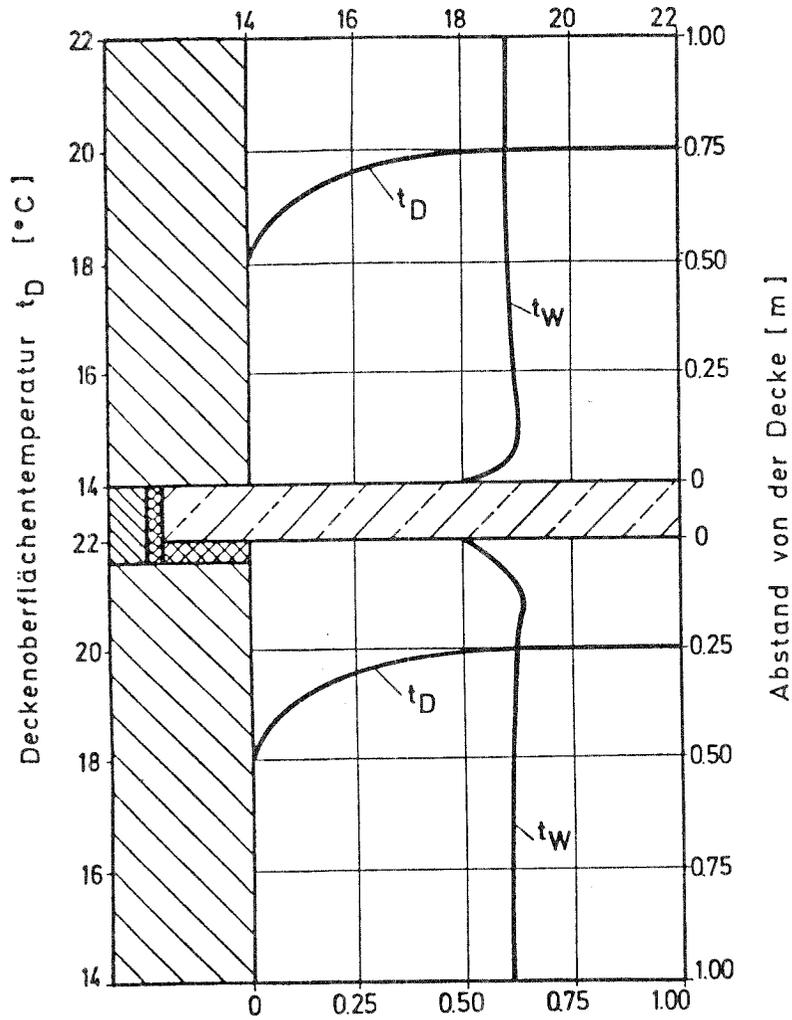


Bild 2: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Geschoßdecken-Wand-Anschlußbereich.

Monolithisch

Bodenecke

Außendämmung

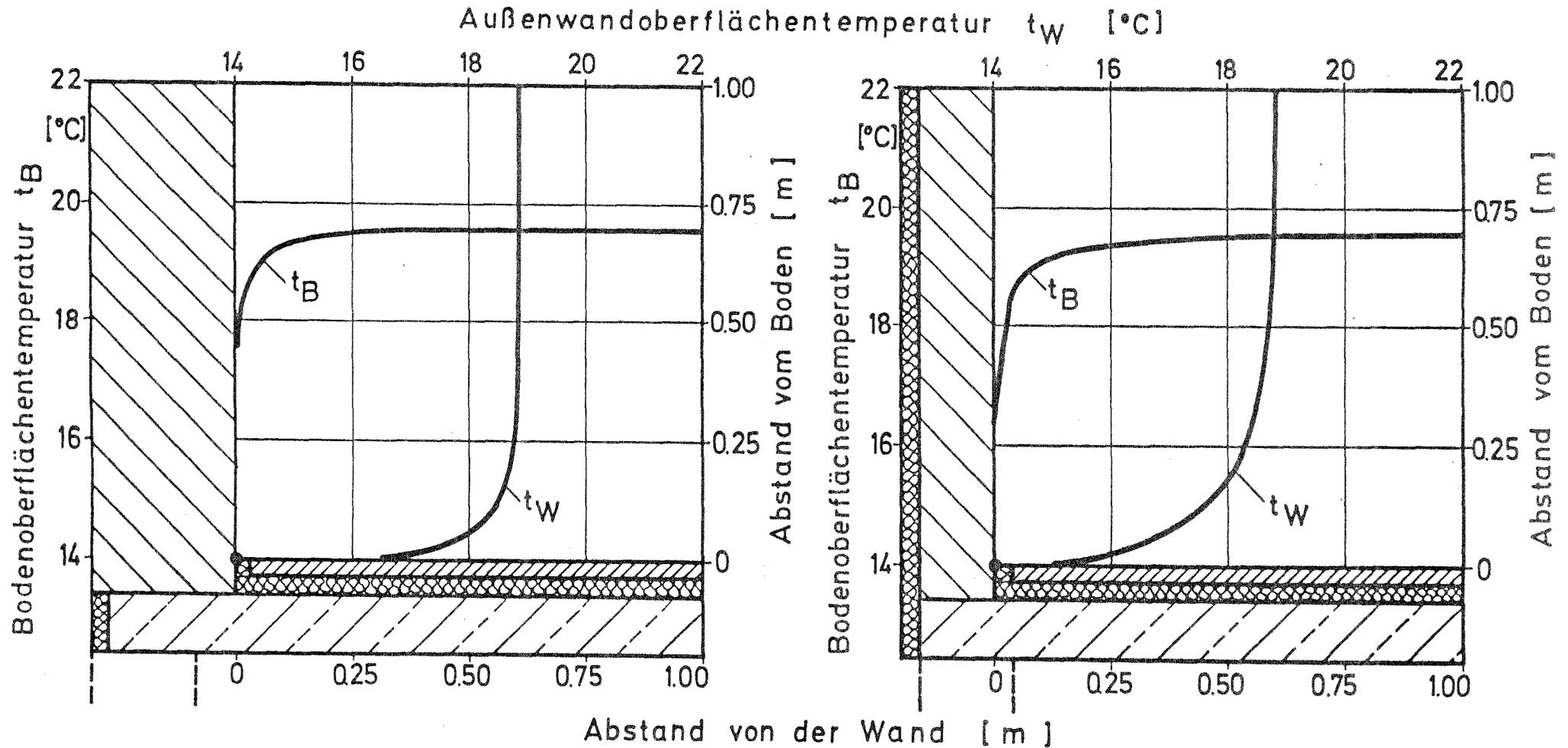


Bild 3: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Kellerdecken-Wand-Anschlußbereich.

Monolithisch

Außenecke

Außendämmung

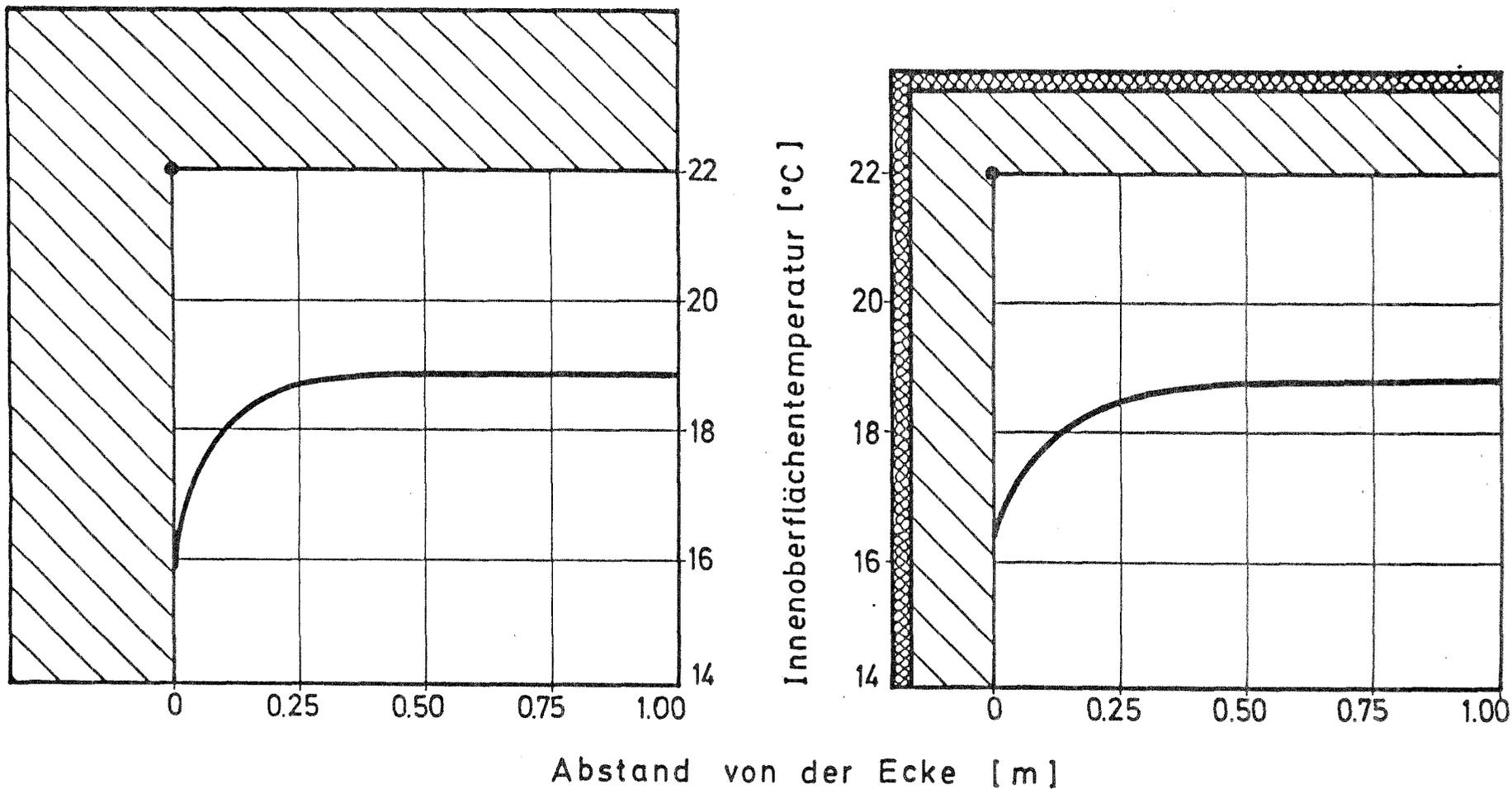


Bild 4: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Bereich der Außenecke.

Monolithisch

Zwischenwand

Außendämmung

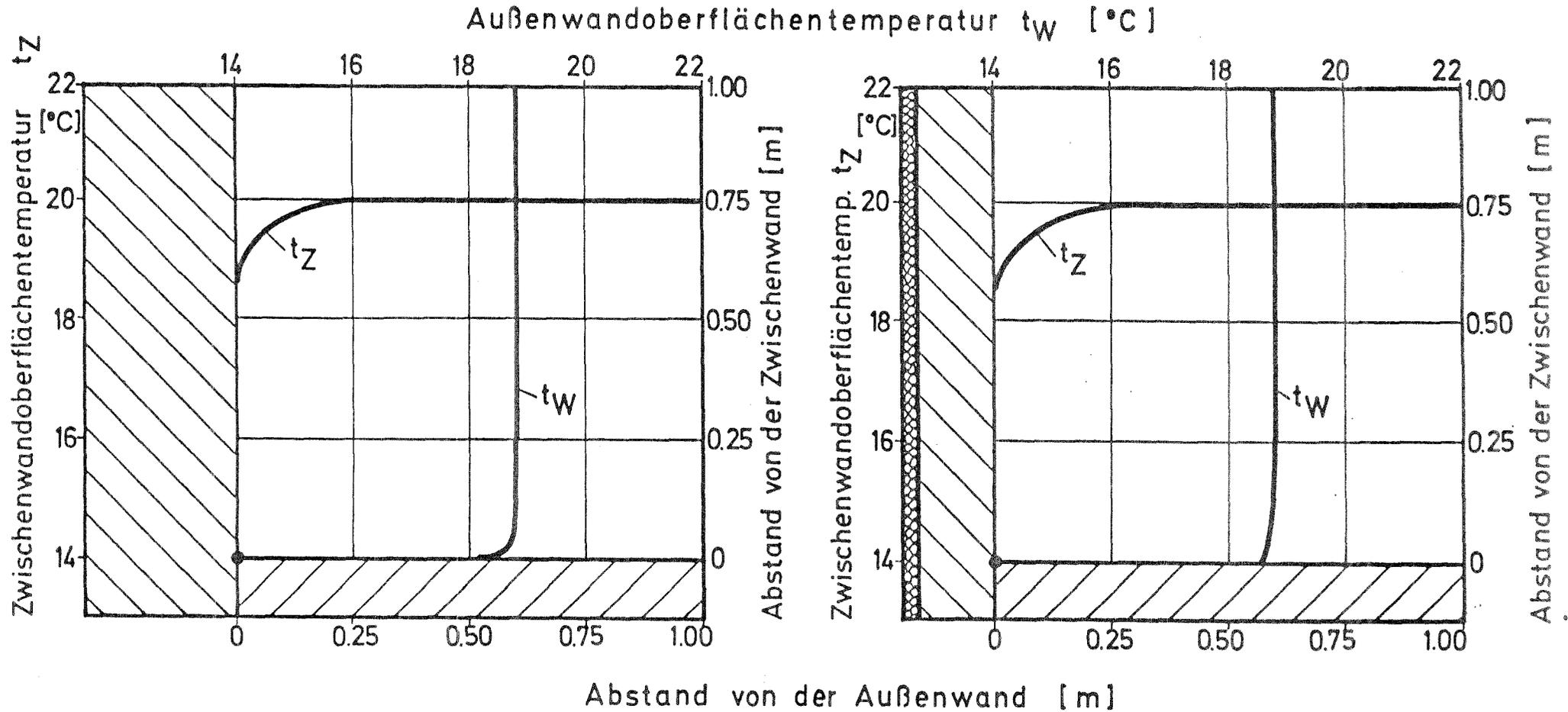


Bild 5: Bauteilinnenoberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Eckabstand im Zwischenwand-Außenwand-Anschlußbereich.