

# ZUM EINFLUSS MEHRDIMENSIONALER WÄRMELEITUNG AUF DAS WÄRMESPEICHERVERMÖGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

Klaus Kreč<sup>1</sup>, Joachim N. Nackler<sup>1</sup> und Tomasz Kornicki<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Institut für Architektur und Entwerfen, TU Wien, Österreich  
<sup>2</sup>Dienstleistungen in EDV & IT, Wien, Österreich

## KURZFASSUNG

Der Einfluss von Wärmebrücken auf das thermische Verhalten der Gebäudehülle wird heute meist nur zeitunabhängig behandelt. Die Effekte der Wärmespeicherung bleiben auf diese Weise unberücksichtigt. Unter Verwendung der verallgemeinerten Leitwert-Theorie wird anhand von beispielhaft durchgeführten Parameterstudien ausgelotet, wie stark die Wärmespeicherung den Wärmedurchgang beeinflussen kann. Als wesentliches Ergebnis wird die Erkenntnis gewonnen, dass bei der Erstellung des thermisch eindimensionalen Modells der Gebäudehülle im Zuge einer thermischen Gebäudesimulation auf Innenmaße und nicht – wie fast allgemein üblich – auf Außenmaße Bezug genommen werden sollte. Zudem zeigt sich deutlich, dass stationäre oder quasi-stationäre Berechnungsansätze für die Beschreibung des Wärmedurchgangs durch erdbodenberührte Bauteile ungeeignet sind.

The influence of thermal bridges on the thermal performance of the building envelope is generally treated time-independent. In this way the effects of heat storage are not taken into consideration. Using the generalized conductance theory - by means of exemplary parameter studies - it is examined how strong the influence of heat storage can be to the heat transfer. As a major result, the recommendation can be given, that the creation of the thermally one-dimensional model of the building envelope should be based on inside dimensions and not on outside dimensions as it is in common practice. In addition, it is clearly shown that stationary or quasi-steady-state calculation approaches are unsuitable for analyzing the heat transfer through earth-coupling components.

## EINLEITUNG

Das indirekte Verfahren der „Wärmebrücken-Norm“ EN ISO 10211 (ÖNorm EN ISO 10211, 2007) wird zwecks Berücksichtigung der Auswirkung von Wärmebrückeneffekten in der Gebäudehülle derzeit nahezu generell und sehr oft unhinterfragt verwendet. Dem Verfahren liegt die Fiktion zugrunde, dass die Gebäudehülle aus plattenförmigen, homogen geschichteten Bauteilen zusammen gesetzt ist, deren thermische (Teil-)Leitwerte mittels Multiplikation von Wärmedurchgangskoeffizienten und Bauteilflächen berechnet werden können. Der Gesamtleit-

wert der Gebäudehülle ergibt sich durch Aufsummieren der Teil-Leitwerte.

Der Fehler des solcherart aufgebauten thermisch eindimensionalen Modells der Gebäudehülle wird im Nachhinein durch das Aufsummieren von Leitwert-Zuschlägen zu kompensieren getrachtet. Diese Zuschläge bestehen aus Produkten von Korrekturfaktoren - meist „ $\psi$ -Werte“ genannt - und der Längserstreckung der jeweiligen Wärmebrücke. Die  $\psi$ -Werte werden entweder mittels zweidimensionaler, stationärer Berechnung mit einem geeigneten Wärmebrückenprogramm ermittelt oder einem Wärmebrücken-katalog entnommen.

Als Vorteil des indirekten Verfahrens ist dessen einfache Handhabung zu nennen. Sind die  $\psi$ -Werte bekannt, kann der Gesamtleitwert der Gebäudehülle ohne weiteres per Handrechnung ermittelt werden.

Ein gravierender Nachteil des indirekten Verfahrens ist dessen Mehrdeutigkeit. Das Verfahren wird dann und nur dann zum richtigen Ergebnis führen, wenn der Ermittlung des  $\psi$ -Werts genau die gleichen Annahmen zugrunde gelegt werden wie der Flächenermittlung im Zuge der Erstellung des eindimensionalen Modells. Der Versuch, die Art der Flächenermittlung normativ festzulegen (z. B. Verwendung von Außenabmessungen gemäß ÖNorm B8110-6, 2010) vermag die Vieldeutigkeit des Verfahrens zwar zu reduzieren, nicht aber zu beheben.

Ein weiterer, meist nicht berücksichtigter Nachteil des indirekten Verfahrens ist im Umstand begründet, dass die „Wärmebrückenkorrektur“ generell stationär, also zeitunabhängig erfolgt. Der Einfluss mehrdimensional ablaufender Wärmeleitungsvorgänge auf die Wärmespeicherfähigkeit bleibt somit unberücksichtigt. In diesem Beitrag soll auf diese Thematik genauer eingegangen werden und die Größenordnung der durch diese Vernachlässigung induzierten Fehler ausgelotet werden.

## DIE LEITWERT-THEORIE

Das im Buch „Wärmebrücken“ (Heindl et al., 1987) für den stationären Fall vorgestellte theoretische Konzept der Thermischen Leitwerte erwies sich als Sonderfall eines instationären, auf zeitlich periodisch ablaufende Vorgänge beschränkte verallgemeinerte Konzept der „harmonischen, thermischen Leitwerte“ (Kreč, 1993). Diese Theorie wurde in seinen Ansät-

zen in die internationale Norm EN ISO 13786 (ÖNorm EN ISO 13786, 2008) übernommen und vermittelt den Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf des Wärmeverlusts eines Raums und den zeitlichen Verläufen der Lufttemperaturen in den anderen Räumen eines Gebäudes; auch die äußere Umgebung geht als „Außenraum“ in diese Beschreibung ein. Sollen auch die Effekte der Sonneneinstrahlung und der langwelligen Zu- und Abstrahlung an den äußeren Bauteiloberflächen in das Berechnungsmodell übernommen werden, so ist dies durch Einführen von „Strahlungslufttemperaturen“ (Koch, Pechinger, 1977) jederzeit möglich; dies resultiert dann meist in einer größeren Anzahl verschiedener Außenräume.

Der grundlegende Zusammenhang der verallgemeinerten Leitwert-Theorie lautet:

$$\hat{\Phi}_i = -\sum_j \tilde{L}_{i,j} \cdot \hat{\Theta}_j \quad (1)$$

Die komplexe Amplitude der Wärmeverlustleistung  $\hat{\Phi}_i$  eines mit dem Index  $i$  gekennzeichneten Raums erweist sich als proportional zu den komplexen Amplituden der Lufttemperaturen  $\hat{\Theta}_j$  in allen in das Berechnungsmodell aufgenommenen Räumen. Als Proportionalitätsfaktoren treten die komplexwertigen harmonischen, thermischen Leitwerte  $\tilde{L}_{i,j}$  auf. Zu summieren ist in Gleichung (1) über alle Räume, also auch über den Raum  $i$  selbst.

Mit Gleichung (1) können – nach Fourier-Synthese – die Zeitverläufe von durch Temperaturschwankungen verursachten Wärmeströmen berechnet werden. Hierbei gibt es keine Einschränkungen in Hinblick auf die Form und die Materialzusammensetzung der betrachteten Baukonstruktion; auch die Anzahl der beteiligten Räume ist nicht beschränkt. Gleichung (1) bildet somit die Grundlage eines mit dreidimensionalen thermischen Modellen arbeitenden Gebäudesimulationsprogramms zur Beschreibung zeitlich periodisch ablaufender Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsvorgänge (Kreč, 2000).

Anzumerken ist, dass Gleichung (1) natürlich auch für die nullte Harmonische, also die stationäre Berechnung gilt. In diesem Fall sind  $\Phi_i$  als Mittelwert des Wärmeverlusts und  $\Theta_j$  als mittlere Lufttemperaturen reelle Größen. Auch die Leitwerte  $L_{i,j}$  sind im stationären Fall reell. Aufgrund der Energieerhaltung muss die Summe der Leitwerte für einen Raum (nur) im stationären Fall verschwinden, also

$$\sum_j L_{i,j} = 0 \quad (2)$$

gelten. Mit Beziehung (2) kann Gleichung (1) leicht in die eher gewohnte Form

$$\Phi_i = \sum_{j \neq i} L_{i,j} \cdot (\Theta_i - \Theta_j) \quad (3)$$

gebracht werden.

Die Anwendung der verallgemeinerten Leitwert-Theorie ist nur möglich, wenn auf ein Programm zur Berechnung der harmonischen thermischen Leitwerte zurückgegriffen werden kann. Hier wird die Instationär-Version des Wärmebrückenprogramms AnTherm (AnTherm, 2012) verwendet, die u. a. als eines der numerischen Berechnungsergebnisse die Matrizen harmonischer thermischer Leitwerte für jede interessierende Harmonische ausgibt.

## SIMULATION WANDKANTE

Die bei Vernachlässigung von Wärmespeichereffekten induzierten Fehler treten natürlich bei massiven Baukonstruktionen am Klarsten zu Tage. Aus diesem Grund sollen in einem ersten Schritt die sich in einer durch 80 cm dickes Vollziegelmauerwerk gebildeten, beiderseits verputzten Wandkante einstellenden Wärmeströme berechnet werden.

Die Berechnung erfolgt für die Tagesperiode, d. h. eine Periodenlänge von 86400 Sekunden. Gemäß EN ISO 10211 (ÖNorm EN ISO 10211, 2007) wird das Berechnungsmodell – ein Horizontalschnitt durch die Kante – im Abstand von 2,52 m von der Kante, gemessen an der Innenseite, durch adiabatische Ebenen begrenzt. Die Länge der inneren Abwicklung des Berechnungsmodells ergibt sich somit zu 5,04 m. Bei der angenommenen Wanddicke von 0,84 m ist die Länge der Abwicklung an der Außenseite der Wandkante mit 6,72 m um 1/3 größer.

Die folgende Abbildung zeigt das vom Programm AnTherm (AnTherm, 2012) als Eingabedokumentation erzeugte Bild des zweidimensionalen Berechnungsmodells.

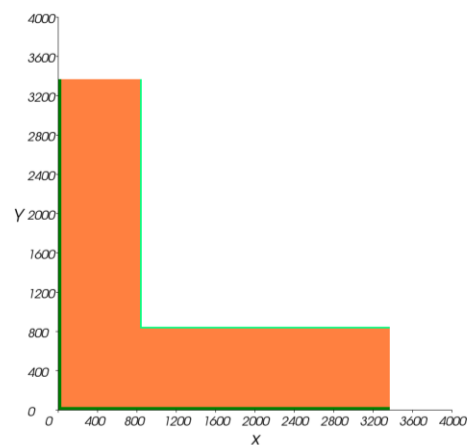


Abbildung 1 Wandkante: 2D-Berechnungsmodell (Maße in mm)

Als Berechnungsergebnis werden die Leitwert-Matrix der stationären, sowie die Matrizen harmonischer thermischer Leitwerte für 12 Harmonische erhalten. In der folgenden Tabelle ist die errechnete Leitwert-Matrix und – exemplarisch – die Matrix der harmonischen thermischen Leitwerte für die 1. Harmonische dargestellt.

Tabelle 1

Beispiel Wandkante: errechnete Leitwert-Matrizen  
(Ergebnis der zweidimensionalen Berechnung)

Stationärer Leitwert [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]

|        | AUSSEN   | INNEN    |
|--------|----------|----------|
| AUSSEN | -----    | 4,269307 |
| INNEN  | 4,269307 | -----    |

Harmonische thermische Leitwerte (1. Harmonische)

|        | AUSSEN            | INNEN            |
|--------|-------------------|------------------|
| AUSSEN | -41,5534-29,2466j | 0,0187-0,0186j   |
| INNEN  | 0,0187-0,0186j    | -21,3733-7,7993j |

Im Zuge der Berechnung des Gesamtleitwerts der Gebäudehülle und auch bei der Modellierung der Gebäudehülle im Zuge thermischer Simulationen wird thermisch eindimensional unter Verwendung von Außenabmessungen gerechnet. Für das thermisch eindimensionale Modell wird anstelle der Wandkante eine ebene Wand mit der äußeren Abwicklung der Wandkante als Länge verwendet (siehe z. B. ÖNorm B8110-6, 2010). Im hier untersuchten Fall beträgt diese Länge 6,72 m.

Um die Werte des thermisch eindimensionalen Modells mit den numerisch in zweidimensionaler Modellierung errechneten und in Tab. 1 ausgewiesenen Werten vergleichen zu können, ist somit im stationären Fall der Wärmedurchgangskoeffizient mit 6,72 m zu multiplizieren. Für die erste Harmonische des instationären Falls sind die gemäß EN ISO 13786 (ÖNorm EN ISO 13786, 2008) errechneten flächenbezogenen harmonischen thermischen Leitwerte  $Y_{i,j}$  ebenso mit der Länge von 6,72 m zu multiplizieren. Das Ergebnis dieser der Handrechnung zugänglichen Berechnungen zeigt folgende Tabelle.

Tabelle 2

Beispiel Wandkante: Leitwert-Matrizen des 1D - Ersatzmodells (6,72 m lange Wand)

Stationärer Leitwert [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]

|        | AUSSEN   | INNEN    |
|--------|----------|----------|
| AUSSEN | -----    | 5,269306 |
| INNEN  | 5,269306 | -----    |

Harmonische thermische Leitwerte (1. Harmonische)

|        | AUSSEN            | INNEN            |
|--------|-------------------|------------------|
| AUSSEN | -42,1494-29,0077j | 0,0250-0,0242j   |
| INNEN  | 0,0250-0,0242j    | -28,4263-10,493j |

Der Fehler des eindimensionalen Modells beträgt für den stationären Fall somit

$$\psi = 4,269307 - 5,269306 = -1,000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}.$$

Der große, negative Korrekturfaktor  $\psi$  bedeutet natürlich nicht, dass es sich bei der Wandkante um eine „wärmebrückenfreie“ Konstruktion handelt. Vielmehr ist er ein Zeichen dafür, dass mit dem eindimensionalen Ersatzmodell (Rechnung mit Außenab-

messungen) der Wärmeverlust im betrachteten Fall stark überschätzt wird.

Gemäß Gleichung (1) ist das instationäre Verhalten der Wandkante durch die Elemente der Matrizen harmonischer thermischer Leitwerte charakterisiert. Ein Vergleich zwischen Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigt, dass im eindimensionalen Modell die Matrizenelemente für die Innenseite der Konstruktion viel zu groß sind; die anderen Elemente der Matrix der harmonischen thermischen Leitwerte sind zumindest in der gleichen Größenordnung.

In der EN ISO 13786 (ÖNorm EN ISO 13786, 2008) wird als Kennzeichen für das Wärmespeichervermögen einer Baukonstruktion die sog. „wirksame Wärmekapazität“ eingeführt. Sie ist im allgemeinen Fall einer an viele Räume grenzenden Baukonstruktion gemäß

$$C_m = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \left| \sum_n L_{m,n} \right| \quad (4)$$

definiert (Kreč, 2007), wobei für T die Periodenlänge in Sekunden einzutragen ist. Die wirksame Wärmekapazität  $C_m$  wird damit in  $JK^{-1}$  erhalten.

Im hier untersuchten Spezialfall der Wandkante treten nur 2 Räume auf. Gleichung (4) erhält in diesem Fall die Form

$$C_i = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \left| L_{i,i} + L_{i,e} \right| \quad , \quad (5)$$

wenn der Index  $i$  den Innen- und der Index  $e$  den Außenraum bezeichnet<sup>1</sup>.

Als Kennzahl für das Wärmespeichervermögen an der Innenseite der Wandkante wird durch Einsetzen der Matrizenelemente aus Tabelle 1 die längenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität zu  $C_i = 312,7 \text{ kJm}^{-1}\text{K}^{-1}$  erhalten. Das eindimensionale Ersatzmodell (siehe Tab. 2) liefert hingegen mit  $C_i = 416,5 \text{ kJm}^{-1}\text{K}^{-1}$  einen um 33% zu hohen Wert.

Werden anstelle von Außenabmessungen Innenabmessungen zur Konstruktion des eindimensionalen thermischen Ersatzmodells verwendet, so errechnet sich der stationäre thermische Leitwert zu  $3,95198 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  und der Fehler des eindimensionalen Modells zu  $\psi = 0,317 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

Die wirksame Wärmespeicherkapazität stimmt bei dieser Modellierung mit  $C_i = 312,3 \text{ kJm}^{-1}\text{K}^{-1}$  mit dem in zweidimensionaler Modellierung errechneten Wert weit besser überein.

Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist allerdings zu beachten, dass die wirksame Wärmespeicherkapazität als Einzahl-Angabe die Wärmespeicherfähigkeit einer Baukonstruktion nur grob angenähert charakterisieren kann. Wie in Tab. 1 und 2

<sup>1</sup> Der entsprechende Ansatz in der EN ISO 13786 enthält einen Vorzeichenfehler, der trotz mehrfacher Urgenz noch nicht behoben ist.

gezeigt, sind zur Beschreibung des instationären thermischen Verhaltens einer Baukonstruktion bei sinusförmigen Randbedingungen, d.h. bei Rechnung mit nur einer Harmonischen, 1 reelle Zahl – der stationäre Leitwert - und 3 komplexe Zahlen (die Elemente der symmetrischen Matrix harmonischer thermischer Leitwerte) notwendig. Im Fall einer Simulation mit der Genauigkeit einer Fourier-Interpolation unter Zugrundelegung der Tagesperiode sind bei Vorgabe von Stundenwerten 12 Harmonische zu berücksichtigen. Die Anzahl der für die Beschreibung des thermischen Verhaltens einer Baukonstruktion notwendigen Kenngrößen ergibt sich somit zu  $12 \cdot 3 = 36$  komplexen und einer reellen, bzw. zu 73 reellen Zahlen.

Einen weit besseren Eindruck von der Genauigkeit der untersuchten Näherungsansätze liefert eine Simulation des thermischen Verhaltens der Wandkante unter periodisch eingeschwungenen Bedingungen. Da die Wärmespeicherfähigkeit insbesondere beim sommerlichen Raumverhalten eine Rolle spielt, wird im Folgenden der Wärmefluss durch die Wandkante während eines heißen Sommertags untersucht. An der Außenseite wird die Außenlufttemperatur entsprechend dem Norm-Sommertag nach ÖNorm B8110-3 (ÖNorm B8110-3, 2012) mit einem Tagesmittelwert von 23,0 °C und einer Tagesschwankung von  $\pm 7,0$  K angesetzt. Der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf das Berechnungsergebnis wird hier ignoriert, da er zur Beantwortung der hier gestellten Frage nicht wesentlich ist. In diesem Zusammenhang soll aber nochmals angemerkt werden, dass die Einflüsse der Sonneneinstrahlung und der langwelligen Zu- und Abstrahlung mittels Verwendung des Konzepts der Strahlungslufttemperatur (Koch, Pechinger, 1977) problemlos in das Leitwertkonzept integriert werden können.

Bezüglich des Tagesverlaufs der Innenlufttemperatur wird angenommen, dass diese am Nachmittag zwischen 14 und 18 Uhr mit 26 °C nach oben hin begrenzt wird und in der Nacht aufgrund verstärkter Nachtlüftung bis auf ein Minimum von 20,2 °C (7 Uhr früh) abfällt.

Als ein Ergebnis der Simulation wird der zeitliche Verlauf des längenbezogenen Wärmestroms durch die innere Oberfläche der Wandkante erhalten. In Abbildung 2 ist der in zweidimensionaler Modellierung errechnete Tagesverlauf den für die eindimensionalen Berechnungsmodelle erhaltenen Verläufen gegenüber gestellt.

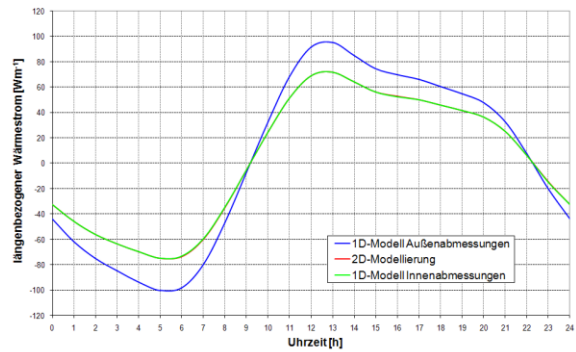


Abbildung 2 berechnete Tagesverläufe des Wärmestroms

Es zeigt sich, dass bei eindimensionaler Modellierung die Wahl von Innenabmessungen zu einem mit der zweidimensionalen Modellierung nahezu übereinstimmenden Verlauf führt. Die größte Abweichung stellt sich um 21 Uhr mit  $0,24 \text{ Wm}^{-1}$  ein.

Wird beim indirekten Verfahren der EN ISO 10211 hingegen mit Außenabmessungen gerechnet, so führt dies zu einer stark ausgeprägten Überschätzung der Wärmespeicherfähigkeit. Der zeitliche Verlauf des Wärmestroms zeigt in diesem Fall eine viel zu hohe Tagesschwankung. Die Abweichung vom Berechnungsergebnis unter Zugrundelegung des zweidimensionalen Modells erreicht um 5 Uhr mit  $25,2 \text{ Wm}^{-1}$  ihr Maximum.

Als Ergebnis dieser Parameterstudie ergibt sich die klare Empfehlung zur Verwendung von Innenabmessungen bei der Modellierung der Gebäudehülle nach dem indirekten Verfahren der EN ISO 10211.

## SIMULATION FUNDAMENTPLATTE

Die Berechnung der Wärmeverluste über erdbodenberührte Bauteile spielt bei der Ermittlung der Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle eine Sonderrolle. Zum einen erfordert diese Berechnung in den meisten praxisrelevanten Fällen eine dreidimensionale Modellierung. Zwei- oder gar eindimensionale Berechnungsmodelle vermögen die Ansprüche auf hohe Planungssicherheit nicht zu erfüllen. Zum anderen sind weite Bereiche im Umfeld des Gebäudes vom Wärmeabfluss aus dem Gebäudeinneren betroffen. Aus diesem Grund spielt die Wärmespeicherfähigkeit des Erdreichs eine keinesfalls vernachlässigbare Rolle. Die Erfassung der Wärmeverluste über erdbodenberührte Bauteile muss somit instationär erfolgen. Wie im Folgenden gezeigt wird, können quasistationäre oder stationäre Berechnungsansätze zu groben Fehleinschätzungen führen.

Die Bedeutung der Wärmespeicherfähigkeit in Zusammenhang mit erdbodenberührten Baukonstruktionen soll im Folgenden anhand der Fundamentplatte eines Passivhauses demonstriert werden (Nackler, 2011). Die folgende Abbildung zeigt die Ausbildung des Anschlusses der Fundamentplatte an die Außenwand anhand eines Vertikalschnitts.

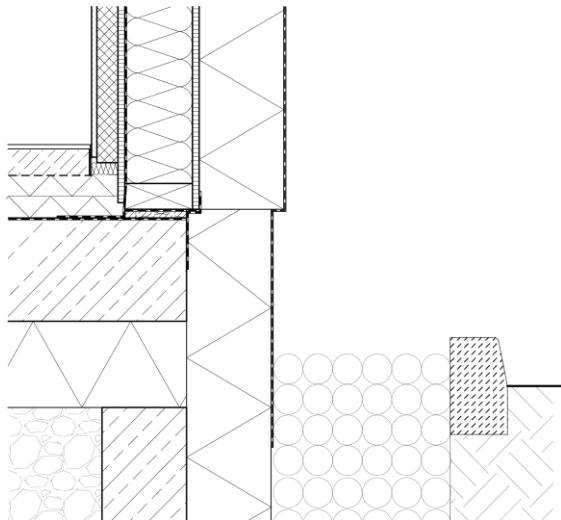


Abbildung 3 Vertikalschnitt durch die modellierte Baukonstruktion

Die dreidimensionale, instationäre Berechnung des Wärmeverlusts über den Erdboden erfordert im allgemeinen Fall die Modellierung der gesamten Fundamentplatte unter Einbeziehung sehr großer Bereiche des das Gebäude umgebenden Erdreichs. Die entsprechenden Vorgaben der EN ISO 10211 sind dabei einzuhalten.

Im Fall eines rechteckigen Gebäudegrundrisses kann das Berechnungsmodell jedoch ohne Genauigkeits-einbußen gemäß folgender Skizze vereinfacht werden.

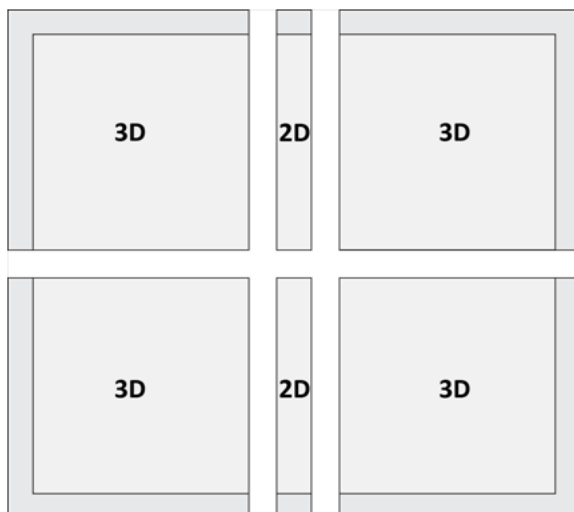


Abbildung 4 Berechnungsmodelle bei rechteckigem Gebäudegrundriss

Mit einer dreidimensionalen und einer zweidimensionalen Berechnung können die gesuchten Leitwert-Matrizen gemäß

$$L^{\text{gesamt}} = 4 \cdot L^{3D} + 2 \cdot 1 \cdot L^{2D} \quad (6)$$

für beliebige Gebäudelängen berechnet werden, wobei  $L^{3D}$  die stationäre oder harmonische Leitwert-Matrix der dreidimensionalen Berechnung und

$L^{2D}$  die entsprechenden Matrizen der zweidimensionalen Berechnung symbolisieren. Die Länge  $l$  in Gleichung (6) ist der zweidimensionalen Berechnung zugeordnet und als Länge senkrecht zum modellierten Vertikalschnitt zu verstehen – siehe Abb. 4.

Für die in Abbildung 3 skizzierte Baukonstruktion werden in zwei- und dreidimensionaler Modellierung unter Verwendung der Beziehung (6) der stationäre Leitwert und die Matrizen harmonischer Leitwerte berechnet, wobei neben der Fundamentplatte und dem angrenzenden Erdreich auch die Außenwand bis zu einer Höhe von 1,0 m, gemessen von der Fußbodenoberkante in das Berechnungsmodell aufgenommen wird.

Als Periodenlänge wird hierbei ein Jahr herangezogen, wobei für die außerklimatischen Bedingungen der langjährige Jahresverlauf für den Gebäudestandort Klagenfurt angesetzt wird. Der Jahresverlauf der Innenlufttemperatur wird vereinfachend mit konstant 20 °C angesetzt.

Mit diesen Annahmen können unter Verwendung der Beziehungen (1) und (3) die komplexen Amplituden des Jahresverlaufs der Transmissionswärmeverluste und der Jahresmittelwert des Transmissionswärmeverlusts über die Fundamentplatte errechnet werden. Fourier-Synthese führt daraufhin unmittelbar zum Jahresverlauf der Transmissionswärmeverluste.

In folgender Abbildung wird der für einen rechteckigen Gebäudegrundriss von 8,7 x 10,4 m (Außenabmessungen) errechnete Jahresverlauf der Transmissionswärmeverluste zwei normgemäßen Berechnungsergebnissen gegenüber gestellt.

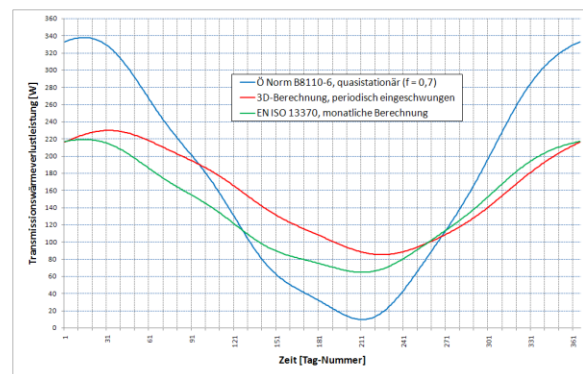


Abbildung 5 Berechnete Jahresverläufe der Transmissionswärmeverlustleistungen

Es zeigt sich, dass das noch immer übliche und auch in neu entwickelten Normen verankerte Arbeiten mit Reduktionsfaktoren („f-Werten“) zu grob falschen Ergebnissen führen kann. Als Beispiel ist in Abb. 5 das Ergebnis des Berechnungsansatzes gemäß ÖNorm B8110-6 (ÖNorm B8110-6, 2010) gezeigt. Obwohl der stationäre Leitwert bei Verwendung des normgemäßen f-Faktors von 0,70 nur 8% über dem in dreidimensionaler Modellierung ermittelten stationären Leitwert liegt, bewirkt der quasistationäre Berechnungsansatz – also die Vernachlässigung der

Effekte der Wärmespeicherfähigkeit – eine viel zu hohe Jahresschwankung der Transmissionswärmeverluste. Dies bewirkt, dass in den Wintermonaten der Wärmeverlust über die bodenberührten Bauteile stark überschätzt wird.

Im Berechnungsansatz der EN ISO 13370 (ÖNorm EN ISO 13370, 2007) werden hingegen die Effekte der Wärmespeicherung näherungsweise berücksichtigt, was zu einer wesentlich besseren Übereinstimmung mit dem in dreidimensionaler, periodisch eingeschwungener Modellierung ermittelten Berechnungsergebnis führt.

Für die Berechnung des Heizwärme- und Heizenergiebedarfs wesentlich ist die Frage, in welcher Genauigkeit vereinfachende Norm-Verfahren den Wärmeverlust während der Heizsaison über die bodenberührten Teile der Gebäudehülle wiedergeben können. Zu diesem Zweck wird der Wärmeverlust mittels Integration der in Abbildung 5 gezeigten Jahresverläufe ermittelt. Als Integrationsbereich wird hierbei eine mit 1. November beginnende und am 28. Februar endende Heizsaison angenommen.

Die folgende Abbildung zeigt die über die 4 Wintermonate errechneten Transmissionswärmeverluste in Abhängigkeit von der Gebäudelänge.

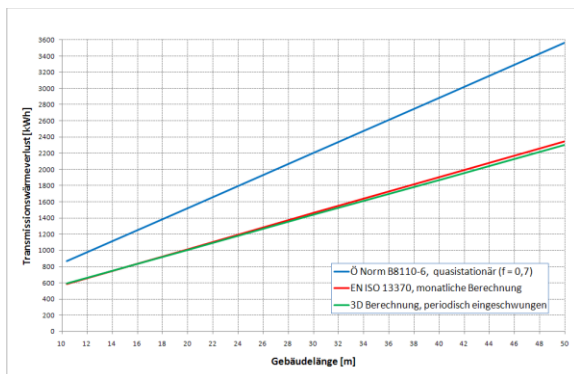


Abbildung 6 berechnete Wärmeverluste über die Heizsaison (November-Februar)

Auch hier zeigt sich deutlich, dass mit dem quasistationären Ansatz der ÖNorm B8110-6 der Wärmeverlust über die bodenberührten Bauteile während der Heizsaison grob überschätzt wird, wobei der Fehler mit steigender Gebäudelänge ansteigt.

Der vereinfachende Ansatz der EN ISO 13370 führt im hier untersuchten Fall zu einer äußerst guten Übereinstimmung mit den dreidimensional, periodisch eingeschwungen ermittelten Ergebnissen. Ein Blick auf Abbildung 5 zeigt jedoch, dass diese ausgezeichnete Übereinstimmung sich bereits bei einer Veränderung der Annahmen zur Länge der Heizsaison verschlechtern würde.

Als Ergebnis dieser Parameterstudie kann festgehalten werden, dass die Effekte der Wärmespeicherung bei erdbodenberührten Bauteilen keinesfalls vernachlässigt werden dürfen. Stationäre oder quasistationäre Berechnungsansätze können zu groben Fehl-

einschätzungen in Hinblick auf die sich einstellenden Wärmeflüsse führen.

Obzwar im Falle der hier untersuchten Baukonstruktion der Berechnungsansatz der EN ISO 13370 zu einer sehr guten Approximation der winterlichen Wärmeverluste führt, kann dieses Ergebnis ohne weitere Untersuchungen nicht auf beliebige Gebäudegeometrien und Bauteilaufbauten verallgemeinert werden.

Die Berechnung der Wärmeverluste über erdbodenberührte Bauteile kann nur dann mit hoher Genauigkeit erfolgen, wenn dreidimensional modelliert und ein instationärer Berechnungsansatz verwendet wird.

## ZUSAMMENFASSUNG

Unter Verwendung der Leitwert-Theorie ist es möglich, den Einfluss von mehrdimensional ablaufenden Wärmeleitungsprozessen auf die Wärmespeicherung mit hoher Genauigkeit zu analysieren. Da diese Theorie mittlerweile auch in leistungsfähigen Simulationsprogrammen umgesetzt ist, kann der lange Zeit unberücksichtigten Thematik der Wärmespeichereffekte in thermisch nicht eindimensional beschreibbaren Baukonstruktionen nun erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Im Rahmen von Parameterstudien wurde herausgefunden, dass die weithin übliche Modellierung der Gebäudehülle in eindimensionaler Näherung unter Verwendung von Außenabmessungen die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudehülle deutlich überschätzt. Für die Betrachtung der Auswirkung täglich auftretender Temperaturschwankungen zeigt sich unter Verwendung des periodisch eingeschwungenen Berechnungsansatzes, dass die Verwendung von Innenabmessungen beim Aufbau des eindimensionalen Modells der Gebäudehülle zu einer weitaus besseren Übereinstimmung mit einem zwei- oder dreidimensionalen Berechnungsmodell führt. In Hinblick auf Langzeitspeichereffekte ist zu dieser Thematik noch Forschungsbedarf gegeben.

Erdbodenberührte Bauteile haben für die Gebäudehülle insofern eine besondere Bedeutung, als eine eindimensionale Modellierung von vornherein zum Scheitern verurteilt ist. Zudem zeigt sich, dass auch stationäre oder quasistationäre Berechnungsansätze zu grob falschen Ergebnissen und damit zu Fehleinschätzungen führen können. In diesem Zusammenhang wurde hier gezeigt, dass das Ignorieren dieser Problematiken und das Verwenden von Wärmedurchgangskoeffizienten und Reduktionsfaktoren (siehe z. B. ÖNorm B8110-6, 2010) zu einer starken Überschätzung der Wärmeverluste über die Fundamentplatte führt und somit die Planungssicherheit aber auch die Einschätzung der thermischen Qualität der Gebäudehülle negativ beeinflusst.

Die Berechnung des thermischen Verhaltens erdbodenberührten Bauteile ist in dreidimensionaler, periodisch eingeschwungener Modellierung unter Zugrundelegung der Jahresperiode in hoher Genauigkeit

möglich. Durch die Verfügbarkeit benutzerfreundlicher Simulationsprogramme (AnTherm, 2012; TheSim\_earth, 2012) erfordert der Schritt von der stationären Modellierung zum instationären, periodisch eingeschwungenen Berechnungsmodell vom Benutzer nur geringen Mehraufwand.

## LITERATUR

- AnTherm, V6.110, Programm für die Analyse des thermischen Verhaltens von Bauteilen mit Wärmebrücken, © 2012, Kornicki, T. (2012)
- Heindl W., Kreč, K., Panzhauser, E. & Sigmund, A., 1987. Wärmebrücken, Springer Verlag Wien New York, Wien Österreich.
- Koch, H. A. & Pechinger, U., Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Sonnen- und Wärmestrahlungseinflüssen auf Gebäudeoberflächen, Gesundheits-Ingenieur **98**, H. 10, S. 265-280, (1977)
- Kreč, K., Zur Wärmespeicherung in Baukonstruktionen, Gesundheits-Ingenieur **114**, Heft 1, 11-18 (1993)
- Kreč, K., Zur dreidimensionalen Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden, Gesundheits-Ingenieur **121**, Heft 6, 293-304 (2000)
- Kreč, K., Produktdeklaration für Hochlochziegel, Forschungsbericht im Auftrag der Initiative Ziegel im Fachverband der Stein- und keramischen Industrie (2007)
- Nackler, J. N., Wärmeverluste erdbodenberührter Bauteile im Passivhausstandard – Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren, Masterarbeit, Fakultät für Architektur und Raumplanung, TU Wien (2010)
- ÖNorm B8110-6: 2010, Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf
- ÖNorm EN ISO 13370: 2007, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren
- ÖNorm EN ISO 10211: 2007, Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen
- ÖNorm EN ISO 13786: 2008, Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren
- TheSim\_earth, Programm zur Berechnung des Jahresverlaufs der Wärmeverluste über erdbodenberührte Bauteile, © 2012 Kreč, K. & Nackler, J. N. (2012)

