

Die Lufttemperatur im unbeheizten Kellergeschoß; eine Fallstudie

Klaus Kreč

Kurzfassung

Der Jahresverlauf der sich in einem unbeheizten Kellergeschoß einstellenden Lufttemperatur wird für verschiedenste Dämm-Varianten unter Zugrundelegung eines dreidimensionalen, zeitlich periodisch eingeschwungenen thermischen Modelles berechnet. Die Untersuchung der Wirksamkeit von Dämm-Maßnahmen im Bereich der Kellerdecke führt zum Ergebnis, daß die Reduktion der Wärmeverluste an den unbeheizten Kellerraum aufgrund von Zusatzdämmung wesentlich kleiner ausfällt als es bei Verwendung der üblicherweise angewandten eindimensionalen rechnerischen Abschätzungen zu erwarten wäre.

1. Einleitung

Die Kenntnis des Jahresverlaufes der Raumlufthtemperatur eines nicht beheizten Kellergeschoßes ist im allgemeinen aus mehreren Gründen von Bedeutung. Zum einen bestimmt die Temperaturdifferenz zwischen dem über dem Keller gelegenen, beheizten Geschoß und dem Kellergeschoß den Transmissionswärmeverlust durch die Kellerdecke und hat damit auch Einfluß auf den Heizenergiebedarf für das beheizte Gebäudevolumen. Zum anderen ist die Temperatur im Kellergeschoß entscheidend für die Möglichkeiten, dieses zu nutzen. So ist es interessant zu wissen, inwieweit der Keller zur Lagerung verderblicher Güter - z. B. von Lebensmitteln - geeignet ist. Insbesondere kommt auch der Frostsicherheit im Winter große Bedeutung zu.

Zudem kann es gerade in unbeheizten Kellerräumen zu Oberflächenkondensation und in der Folge zu Schimmelbildung kommen, wenn die Oberflächentemperaturen der bodenberührten Bauteile über längere Zeit stark unter die Raumlufthtemperatur absinken.

Aus den genannten Gründen ist es erstrebenswert, den im langjährigen Schnitt zu erwartenden Jahresverlauf der Lufttemperatur in einem unbeheizten Kellergeschoß und die Temperaturen der dem Kellergeschoß zugewandten Bauteiloberflächen berechnen zu können. Die hier vorliegende Arbeit befaßt sich ausschließlich mit der erstgenannten Problemstellung. Die Schilderung der auf die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung aufbauenden Berechnung der Oberflächentemperaturen soll einer späteren Publikation vorbehalten bleiben.

Die üblicherweise für derartige Fragestellungen heranzuziehenden Programme zur instationären Simulation des thermischen Verhaltens von Raumgruppen oder Gebäuden können in diesem Falle nicht verwendet werden, da sie bis zum derzeitigen Zeitpunkt sämtlich auf die Behandlung eindimensionaler Wärmeleitungsvorgänge beschränkt sind. Der Wärmestrom durch den Erdboden, der die Raumlufthtemperatur des Kellergeschoßes entscheidend mitbeeinflußt, kann jedoch grundsätzlich nicht durch ein thermisch eindimensionales Modell erfaßt werden.

Die Berechnung des Jahresverlaufes der Kellertemperatur kann in zwei Schritten erfolgen. Zuerst sind die Matrizen der thermischen Leitwerte unter Verwendung eines dreidimensionalen thermischen Modelles zu errechnen. Die Berechnung dieser Matrizen erfordert grundsätzlich den Einsatz eines geeigneten, leistungsfähigen Computerprogrammes. Für die im folgenden präsentierte Fallstudie wurde das PC-Programmpaket WAEBRU V5.0 [1] zur Berechnung von thermischen Leitwerten, Temperaturverteilungen und Wärmeströmen verwendet.

Im zweiten Schritt ist unter Zugriff auf die vorweg berechneten thermischen Leitwerte die Wärmebilanzgleichung für das Kellergeschoß aufzustellen und nach der Kellertemperatur aufzulösen. Im stationären, also zeitunabhängigen Fall erhält man auf diese Weise den Jahresmittelwert der Kellertemperatur. Eine einfache Möglichkeit, auch den Jahresverlauf der Kellertemperatur zu berechnen bietet das in [2] entwickelte Konzept der verallgemeinerten thermischen Leitwerte. Auf dieses soll auch hier zugegriffen werden.

2. Der Jahresmittelwert der Kellertemperatur

Zur Berechnung der Lufttemperatur in einem Kellergeschoß ist vorerst die Wärmebilanzgleichung für diesen hier als unbeheizt angesehenen Gebäudeteil anzuschreiben. Vereinfachend wird hierbei angenommen, daß im Kellergeschoß wie auch in allen anderen betrachteten Räumen einheitliche Lufttemperatur vorliegt. Somit kann jedem Raum - auch die äußere Umgebung wird als Raum ("Außenraum") verstanden - ein Zeitverlauf der Lufttemperatur eindeutig zugeordnet werden.

Wie in [3] bereits besprochen, genügt es, sich bei der Erfassung des thermischen Verhaltens bodenberührter Bauteile auf die Betrachtung der Jahresverläufe der Lufttemperaturen zu beschränken. Im folgenden werden jeweils im langjährigen Schnitt zu erwartende Temperaturverläufe verwendet und die Jahresverläufe der Temperaturen als periodisch eingeschwungen angesehen. Es ist naheliegend, diese periodischen Zeitverläufe der Temperatur als *Fourier-Reihen* zu approximieren.

Eine stationäre, also zeitunabhängige Behandlung kann als Berechnung für den Mittelwert der *Fourier*-Entwicklung angesehen werden. Der im folgenden skizzierte, stationäre Berechnungsgang liefert somit den im langjährigen Schnitt zu erwartenden Jahresmittelwert der Lufttemperatur im Kellerraum.

Der Transmissionswärmeverlust Q_i^T durch die raumbegrenzenden Bauteile eines Raumes i ergibt sich aus dem Mittelwert des zeitlichen Verlaufes der Lufttemperatur T_i in diesem Raum und den Mittelwerten der Zeitverläufe der Lufttemperaturen T_j aller anderen in Betracht gezogenen Räume gemäß

$$Q_i^T = -\sum_j L_{i,j} \cdot T_j \quad (1)$$

- siehe [2,3].

Die Summe ist über sämtliche mit Raum i in thermischer Verbindung stehenden Räume zu erstrecken, wobei auch das Glied mit $j = i$ zu berücksichtigen ist. Als Proportionalitätsfaktoren $L_{i,j}$ treten die zwischen betrachtetem Raum i und Raum j anzusetzenden thermischen Leitwerte auf. Diese sind unter Verwendung eines geeigneten Computerprogrammes vorweg zu berechnen.

Findet zwischen Raum i und Raum j ein Luftwechsel statt, so ist dieser mit einem Wärmetransport verbunden, sofern die Lufttemperaturen T_i und T_j unterschiedlich sind. Der gesamte Lüftungswärmeverlust Q_i^V des Raumes i ergibt sich als Summe über die Lüftungswärmeverluste zu den Räumen j gemäß

$$Q_i^V = \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} c \cdot \rho \cdot \dot{V}_{i,j} \cdot (T_i - T_j) \quad (2)$$

Die in Gleichung (2) auftretenden Proportionalitätsfaktoren

$$c \cdot \rho \cdot \dot{V}_{i,j} = L_{i,j}^V \quad (3)$$

werden üblicherweise als Lüftungsleitwerte bezeichnet. Sie enthalten neben der spezifischen Wärmekapazität c und der Massendichte ρ der Luft jenen Luftvolumenstrom $\dot{V}_{i,j}$, der von Raum j dem betrachteten Raum i zugeführt wird.

Soll sich die Temperatur in Raum i nicht ändern, so müssen sich die Wärmeverluste und die Wärmegewinne im Raum die Waage halten. Da wir uns hier auf die Betrachtung eines unbeheizten Raumes beschränken, sind keine Wärmegewinne durch Heizung anzusetzen. Es soll jedoch auch von der Annahme ausgegangen werden, daß sonstige Wärmegewinne im Raum, wie sie durch Personenbelegung, Beleuchtung, Geräte und Sonneneinstrahlung durch die Fenster auftreten können, vernachlässigbar sind. Diese vereinfachende Annahme wird im Falle unbeheizter Kellerräume kaum zu nennenswerten Fehlern führen.

Für einen Raum i ohne Wärmequellen im Inneren hat die Wärmebilanzgleichung die einfache Form

$$Q_i^T + Q_i^V = 0 \quad . \quad (4)$$

Setzt man nun (1), (2) und (3) in die Bilanzgleichung (4) ein, so ergibt sich

$$-\sum_j L_{i,j} \cdot T_j + \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} L_{i,j}^V \cdot (T_i - T_j) = 0 \quad . \quad (5)$$

Die gesuchte Raumlufttemperatur T_i des Raumes i errechnet sich aus der Bilanzgleichung (5) zu

$$T_i = \frac{\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} (L_{i,j} + L_{i,j}^V) \cdot T_j}{\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} L_{i,j}^V - L_{i,i}} \quad . \quad (6)$$

Für den hier betrachteten stationären Fall gilt die Beziehung - siehe [4] -

$$\sum_j L_{i,j} = 0 \quad (7)$$

oder gleichbedeutend

$$-L_{i,i} = \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} L_{i,j} \quad . \quad (8)$$

Die Gleichung (6) zur Berechnung des Mittelwertes der Lufttemperatur T_i für Raum i erhält damit die Form

$$T_i = \frac{\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} (L_{i,j} + L_{i,j}^V) \cdot T_j}{\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} (L_{i,j} + L_{i,j}^V)} \quad . \quad (9)$$

Ersichtlich ergibt sich die Lufttemperatur T_i als Gewichtsmittel aus den Temperaturen T_j aller mit Raum i in thermischer Verbindung stehender Räume. Als Gewichtungsfaktoren treten Summen aus Transmissions- und Lüftungsleitwerten auf.

3. Der Jahresverlauf der Kellertemperatur

Wie in [2] gezeigt, führt die Beschränkung auf zeitlich periodische Vorgänge zu engen Analogien zwischen stationärer und instationärer Rechnung. Anstelle der zeitlichen Mittelwerte treten bei der Behandlung des periodisch eingeschwungenen Falles die komplexen Amplituden der *Fourier*-Entwicklungen. Die komplexe Amplitude des Transmissionswärmeverlustes q_i^T ergibt sich aus der zu (1) analogen Beziehung

$$q_i^T = - \sum_j l_{i,j} \cdot t_j \quad . \quad (10)$$

Die Proportionalitätsfaktoren $l_{i,j}$ sind die in [2] eingeführten komplexwertigen, verallgemeinerten thermischen Leitwerte. Sie verknüpfen die komplexen Amplituden der Lufttemperaturverläufe in sämtlichen in Betracht gezogenen Räume t_j mit der Amplitude des Transmissionswärmeverlustes von Raum i und sind mit einem geeigneten Computerprogramm vorweg zu berechnen.

Für die komplexen Amplituden des Lüftungswärmeverlustes q_i^V gilt in Analogie zu Gleichung (2)

$$q_i^V = \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} L_{i,j}^V \cdot (t_i - t_j) \quad . \quad (11)$$

Die Proportionalitätsfaktoren $L_{i,j}^V$ sind also auch für die instationäre Rechnung durch die in (3) eingeführten Lüftungsleitwerte gegeben [5]. Die zu (5) analoge Bilanzgleichung

$$- \sum_j l_{i,j} \cdot t_j + \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} L_{i,j}^V \cdot (t_i - t_j) = 0 \quad (12)$$

ist für sämtliche zu berücksichtigende Harmonische aufzustellen. Für den hier betrachteten Fall eines Kellergeschoßes spielt neben der nullten Harmonischen (stationäre Rechnung) die erste Harmonische zur Periodenlänge von einem Jahr die dominierende Rolle. Zumeist erweist sich die Beschränkung auf nullte und erste Harmonische als ausreichend.

Die Amplitude des Jahresverlaufes der Lufttemperatur im Kellergeschoß t_i errechnet sich schließlich nach der zu (6) analogen Beziehung

$$t_i = \frac{\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} (l_{i,j} + L_{i,j}^V) \cdot t_j}{\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} L_{i,j}^V - l_{i,i}} \quad . \quad (13)$$

Sind die Amplituden der Raumlufthtemperatur für alle in Betracht gezogenen Harmonischen nach Gleichung (13) bestimmt, so bereitet die Berechnung des Jahresverlaufes der Lufttemperatur in Raum i keine Schwierigkeiten mehr; es ist lediglich eine *Fourier*-Synthese durchzuführen.

4. Ein Fallbeispiel

Im Zuge einer Fallstudie sollen nun die Auswirkungen von Dämm-Maßnahmen auf die Lufttemperatur eines unbeheizten Kellergeschoßes rechnerisch untersucht werden. Bezüglich der Geometrie und der für die einzelnen Berechnungsvarianten angenommenen Dämmstoff-Dicken schließt diese Untersuchung direkt an die in [3] vorgestellte Fallstudie an. Betrachtet wird ein quaderförmiges Kellergeschoß, dessen bodenberührte Bauteile außen gedämmt sein sollen.

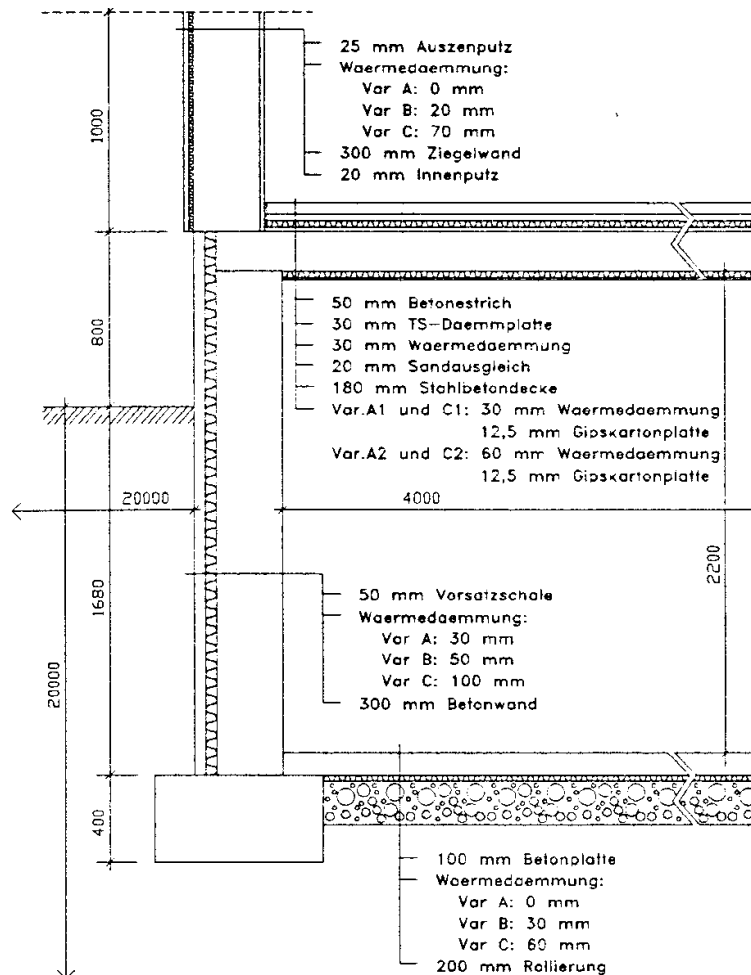


Bild 1: Vertikalschnitt durch das betrachtete Kellergeschoß (Maße in mm)

Bild 1 zeigt anhand eines Vertikalschnittes die angenommene Geometrie und die Schichtaufbauten der das Kellergeschoß umschließenden Bauteile. Zudem informiert Bild 1 über die den einzelnen Varianten zugrunde liegenden Dämmstoff-Dicken. Um Aufschluß über die Auswirkung einer Zusatzdämmung der Kellerdecke auf die Lufttemperatur im unbeheizten Kellergeschoß und auf die Transmissionswärmeverluste des Erdgeschoßes an das Kellergeschoß zu erhalten, wurden über die bereits in [3] untersuchten Dämm-Varianten A, B und C hinausgehend zusätzlich die Varianten A1 und A2 bzw. C1 und C2 eingeführt. Einen zusammenfassenden Überblick über die Zuordnung zwischen Varianten-Bezeichnung und Dämmstoff-Dicken gibt Tabelle 1.

Variante	Dicke der Perimeterdämmung [mm]	Dicke der Dämmung der Bodenplatte [mm]	Dicke der Zusatzdämmung der Kellerdecke [mm]
A	30	0	0
A1	30	0	30
A2	30	0	60
B	50	30	0
C	100	60	0
C1	100	60	30
C2	100	60	60

Tabelle 1: Zuordnung zwischen Varianten-Bezeichnung und Dämmstoff-Dicke

4.1 Berechnung des Jahresmittelwertes der Lufttemperatur im Kellergeschoß

Zwecks Vereinfachung der Schreibweise werden die im betrachteten Beispiel vorkommenden Räume nun durchnummeriert. Der Außenraum, für den der Jahresverlauf der Außenlufttemperatur als Randbedingung vorgegeben wird, soll im folgenden als Raum 0 bezeichnet werden, das Erdgeschoß als Raum 1 und das eigentlich interessierende Kellergeschoß als Raum 2.

Gesucht ist vorerst der Jahresmittelwert der Lufttemperatur des Kellergeschoßes, also T_2 . Nimmt man an, daß die Auswirkungen eines etwaigen Luftwechsels zwischen Kellergeschoß und Erdgeschoß auf die Lufttemperatur des Kellergeschoßes vernachlässigbar sind und bezeichnet den Lüftungsleitwert zwischen Kellergeschoß und außen vereinfacht mit L^V , so ergibt sich für den Jahresmittelwert der Lufttemperatur des Kellerrames T_2 gemäß Gleichung (9) die einfache Beziehung

$$T_2 = a \cdot T_0 + (1 - a) \cdot T_1 \quad , \quad (14)$$

wobei der Gewichtungsfaktor a die Form

$$a = \frac{L_{2,0} + L^V}{L_{2,0} + L^V + L_{2,1}} \quad (15)$$

annimmt.

Die in (15) auftretenden thermischen Leitwerte können der Leitwert-Matrix, die eines der Ergebnisse der unter Verwendung des Programmpaketes WAEBRU V5.0 [1] durchgeführten stationären Rechnung ist, entnommen werden. Beispielhaft ist die für Variante C errechnete Matrix der thermischen Leitwerte in Tabelle 2 aufgelistet.

Thermische Leitwerte [WK ⁻¹]			
Raum	0	1	2
0	-71.12	8.48	62.64
1	8.48	-48.80	40.32
2	62.64	40.32	-102.96

Tabelle 2: Leitwert-Matrix (stationär) für ein Kellergeschoß mit $8.0 \cdot 8.0 \text{ m}^2$ Fußbodenfläche; Dämm-Variante C

Wie bereits in [3] ausführlich dargelegt, kann durch die Berücksichtigung des Umstandes, daß durch Symmetrieebenen kein Wärmestrom fließt, der Rechenaufwand erheblich reduziert werden. So genügt es, für einen quadratischen Grundriß von $8.0 \cdot 8.0 \text{ m}^2$ Bruttofläche nur eine dreidimensionale Durchrechnung für eine Viertel des Gebäudes durchzuführen. Freilich muß man hierbei - wie in [3] gezeigt - weite Bereiche des umliegenden Erdreiches in der Berechnung berücksichtigen. Die als Ergebnis einer solchen Durchrechnung erhaltenen Teil-Leitwerte sind lediglich mit dem Faktor 4 zu multiplizieren, um zu den in Tabelle 2 angeführten Leitwerten zu kommen.

Zur Berechnung des Jahresmittelwertes der Lufttemperatur im Kellergeschoß muß man lediglich auf den Leitwert zwischen Kellergeschoß und außen $L_{2,0}$ (Var. A: $L_{2,0} = 101.52 \text{ WK}^{-1}$) und jenen zwischen Kellergeschoß und Erdgeschoß $L_{2,1}$ (Var. A: $L_{2,1} = 38.64 \text{ WK}^{-1}$) zugreifen und in die Formeln (15) und (14) einsetzen. Den zudem benötigten Lüftungsleitwert zwischen Kellerraum und außen L^V erhält man durch Multiplikation des Luftvolumenstromes in m^3h^{-1} mit dem Faktor $0.33 \text{ Whm}^{-3}\text{K}^{-1}$; für einen angenommenen 0.3-fachen Luftwechsel ergibt sich $L^V = 13.94 \text{ WK}^{-1}$.

Variante	Gewichtungsfaktor a	Lufttemperatur im Kellergeschoß T_2 [°C]
A	0.749	12.39
A1	0.802	11.85
A2	0.829	11.57
B	0.708	12.81
C	0.655	13.34
C1	0.716	12.73
C2	0.749	12.39

Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren a gemäß Gleichung (15) und Jahresmittelwert der Lufttemperatur im Kellergeschoß T_2 für Wien

Annahmen: Quadratischer Grundriß (8m · 8m; Innenabmessung)
 Lüftungsleitwert: 13.94 [WK^{-1}] (LWZ=0.3 h^{-1})
 Außenlufttemperatur: 9.84°C (langjähriger Jahresmittelwert für Wien)
 Lufttemperatur EG: 20.00 °C

In Tabelle 3 sind für alle in Betracht gezogenen Dämm-Varianten die in Gleichung (15) auftretenden Gewichtungsfaktoren a aufgelistet. Durch Einsetzen in Gleichung (14) läßt sich hieraus für beliebige Kombinationen von Jahresmittelwerten der Außenlufttemperatur und der Lufttemperatur im Erdgeschoß leicht der sich einstellende Jahresmittelwert der Lufttemperatur im unbeheizten Kellergeschoß errechnen. Beispielhaft ist in Tabelle 3 zusätzlich der Jahresmittelwert der Lufttemperatur des Kellergeschoßes für einen Gebäudestandort in Wien ($T_0 = 9.84 \text{ °C}$) und eine mittlere jährliche Lufttemperatur im Erdgeschoß von 20°C ausgewiesen.

Die am Beispiel des Standortes Wien für verschiedene Dämm-Varianten errechneten Jahresmittelwerte der Lufttemperatur des Kellergeschoßes schwanken - wie Tabelle 3 zeigt - nur innerhalb eines relativ engen Temperaturintervalles. Bei Variante A, also schlecht gedämmtem Kellergeschoß, liegt der errechnete Temperatur-Wert T_2 bei 12.4 °C. Bei sehr guter Dämmung der erdberührten Bauteile (Variante C) steigt T_2 lediglich um knapp 1 K auf 13.3 °C an.

Das Anbringen einer Zusatzdämmung an der Kellerdecke (Varianten A1, A2 und C1, C2) bewirkt aufgrund der Reduktion des Wärmeabflusses vom Erdgeschoß in das Kellergeschoß eine

Absenkung des Jahresmittelwertes der Lufttemperatur im Kellergeschoß. Auffallend ist hierbei, daß das Verstärken der Zusatzdämmung von 3 cm auf 6 cm nur noch relativ wenig Einfluß auf T_2 hat. Der Grund hierfür wird durch Bild 2, einem Bild der Wärmestromlinien, deutlich. Die im Bereich des Kellerdeckenanschlusses auftretende Wärmebrücke tritt durch das Zusammenrücken der Wärmestromlinien klar zu Tage.

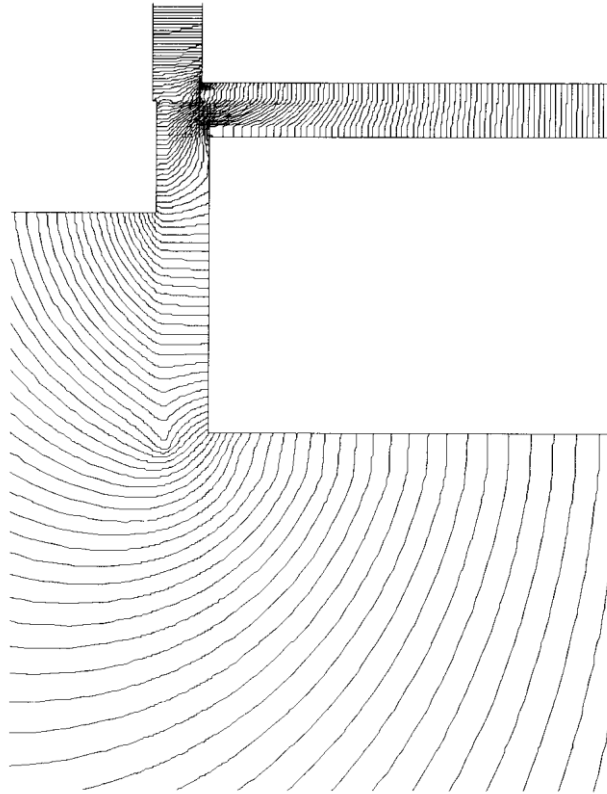


Bild 2: Ausschnitt aus einem Bild der Wärmestromlinien für Variante A2

Auch bei diesem Fallbeispiel erweist sich die Behauptung als richtig, daß bei Verwendung größerer Dämmstoff-Dicken der Einfluß von Wärmebrücken-Effekten deutlich steigt. Vergleicht man den dreidimensional gerechneten thermischen Leitwert zwischen Kellergeschoß und Erdgeschoß $L_{2,1}$ mit einer eindimensionalen Abschätzung, so ergibt sich für Variante A bei der eindimensionalen Rechnung mittels Multiplikation von k-Wert und Decken-Fläche ein um 6.5% zu kleiner Wert. Bei Variante A2 liegt die eindimensionale Abschätzung aufgrund des wachsenden Einflusses der Wärmebrücke bereits um 11.7% zu niedrig.

Die in Tabelle 3 angegebenen Werte beziehen sich auf ein Gebäude mit quadratischem Grundriß. Es soll nun untersucht werden, inwieweit der Übergang zu rechteckigen Grundrissen die sich einstellende Lufttemperatur im Kellerraum beeinflusst. Führt man zusätzlich zur dreidimensionalen Berechnung eine zweidimensionale Berechnung - d. h. eine Berechnung für den in Bild 1 gezeigten Schnitt - durch, so gelingt es durch geeignetes Zusammensetzen [3] der errechneten Teilleitwerte die in (15) benötigten Leitwerte für Gebäude variabler Gebäudebreite zu errechnen. Bild 2 zeigt die für Gebäudebreiten zwischen 8 m und 100 m (jeweils Innenmaß) errechneten Kellertemperaturen für den Gebäudestandort Wien. Die Gebäudetiefe bleibt hierbei mit 8 m konstant. Bezüglich der Lüftung des Kellergeschoßes wurde das Vorliegen eines 0.3-fachen Luftwechsels mit der Außenluft angenommen.

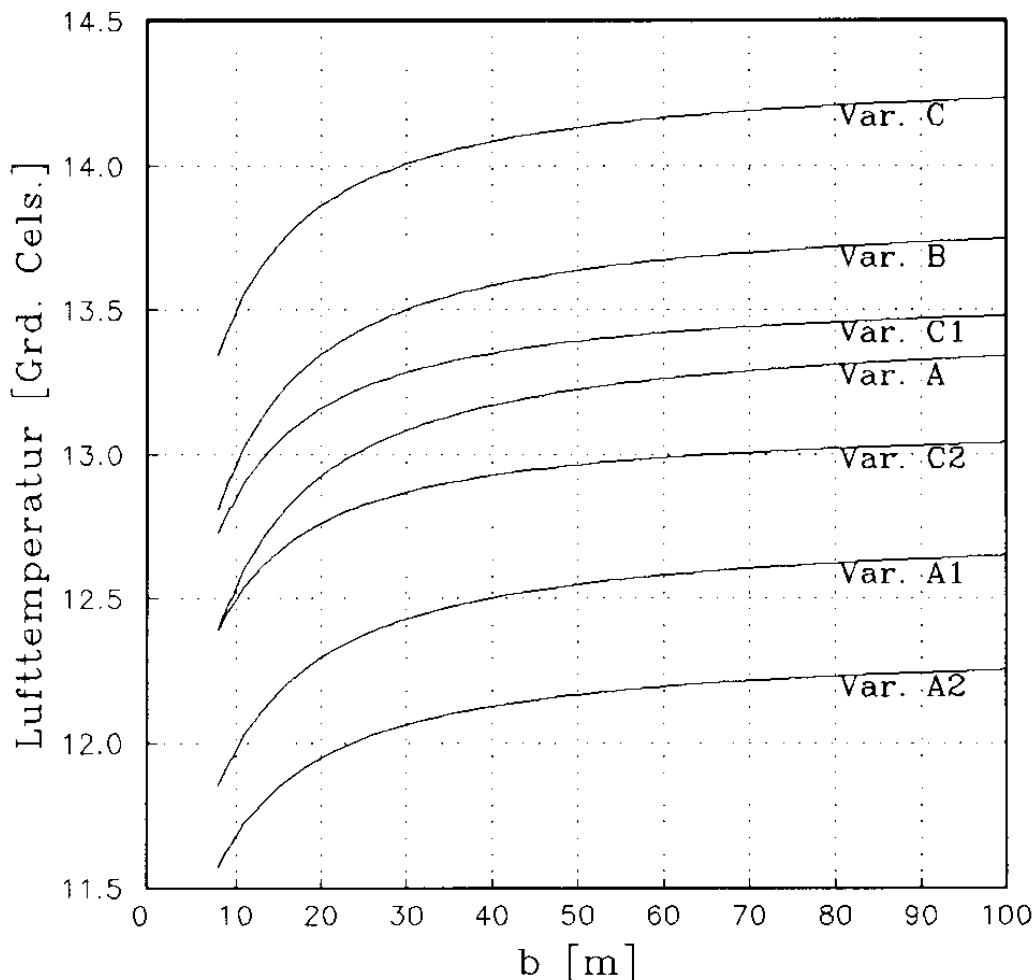


Bild 3: Abhängigkeit der Lufttemperatur des Kellergeschoßes von Gebäudebreite b und Dämmmaßnahmen

Annahmen: Konstante Gebäudetiefe (8m; Innenabmessung)
 Lüftungsleitwert: 13.94 [WK-1] (LWZ=0.3 h-1)
 Außenlufttemperatur: 9.84°C (langjähriger Jahresmittelwert für Wien)
 Lufttemperatur EG: 20.00 °C

Bild 3 zeigt, daß sich die Geometrie des Kellergeschoßes im Vergleich zum Einfluß der Dämm-Maßnahmen nur unwesentlich auf den Jahresmittelwert der Lufttemperatur im Kellergeschoß auswirkt. Die folgenden Untersuchungen sollen daher auf ein Kellergeschoß mit quadratischem Grundriß ($8 \cdot 8 \text{ m}^2$ Bruttofläche) beschränkt bleiben.

4.2 Berechnung des Jahresverlaufes der Lufttemperatur im Kellergeschoß

Eine detailliertere Beschreibung des im langjährigen Mittel zu erwartenden thermischen Verhaltens eines unbeheizten Kellergeschoßes erfordert das Eingehen auf den jahreszeitlichen Verlauf der Lufttemperatur. Aufgrund der sehr großen Wärmespeicherfähigkeit des umgebenden Erdreiches kann bei Kellergeschoßen im allgemeinen auf die Berücksichtigung von Tagesschwankungen der Lufttemperaturen verzichtet werden. Die Untersuchung soll daher auf zeitlich periodische Verläufe mit der Periodenlänge von einem Jahr beschränkt bleiben.

Vereinfachend soll angenommen werden, daß der Jahresverlauf der Außenlufttemperatur durch die Angabe des Jahresmittelwertes, der Jahresamplitude und der Phasenlage allein beschrieben werden kann. Diese Beschränkung auf die Berücksichtigung nur der ersten Harmonischen erweist sich als gerechtfertigt, da der im langjährigen Schnitt anzutreffende, geglätt-

ete Jahresverlauf der Außenlufttemperatur bereits in guter Näherung durch einen sinusartigen Verlauf dargestellt werden kann.

Unter den im vorhergehenden Abschnitt für die Berechnung des Jahresmittelwertes getroffenen Annahmen nimmt Formel (13) zur Berechnung der komplexen Amplitude der Lufttemperatur für den vorliegenden Fall des unbeheizten Kellergeschoßes die einfache Form

$$t_2 = \frac{(l_{2,0} + L^V) \cdot t_0 + l_{2,1} \cdot t_1}{L^V - l_{2,2}} \quad (16)$$

an.

Die zur Berechnung der komplexen Amplitude des Jahresverlaufes der Lufttemperatur im Kellerraum t_2 gemäß Gleichung (16) benötigten verallgemeinerten thermischen Leitwerte wurden für die erste Harmonische, also für eine Periodenlänge von 31536000 s, unter Verwendung des Programmes WAEBRU [6] errechnet. Die Matrix der verallgemeinerten thermischen Leitwerte ist beispielhaft für die Dämm-Variante C in Tabelle 4 aufgelistet.

Verallgemeinerte thermische Leitwerte [WK ⁻¹]			
Raum	0	1	2
0	-1488.48 - 1372.32 <i>i</i>	8.44 - 0.24 <i>i</i>	29.08 - 11.76 <i>i</i>
1	8.44 - 0.24 <i>i</i>	-48.80 - 1.88 <i>i</i>	40.32 - 0.84 <i>i</i>
2	29.08 - 11.76 <i>i</i>	40.32 - 0.84 <i>i</i>	-113.04 - 25.12 <i>i</i>

Tabelle 4: Matrix der verallgemeinerten thermischen Leitwerte für ein Kellergeschoß mit 8.0 · 8.0 m² Fußbodenfläche; Dämm-Variante C; Periodenlänge: 1 Jahr

Um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern, soll vereinfachend angenommen werden, daß die Lufttemperatur im Erdgeschoß ganzjährig den konstanten Wert von 20 °C beibehält, die erste Harmonische der Lufttemperatur im Erdgeschoß t_1 also verschwindet.

Der gesuchte Jahresverlauf der Lufttemperatur im Kellergeschoß ergibt sich durch Errechnen des Jahresmittelwertes T_2 gemäß Gleichung (14) und der komplexen Amplitude t_2 gemäß Gleichung (16) und nachfolgender *Fourier*-Synthese. Als Beispiel für ein solcherart erhaltenes Ergebnis sind in Bild 4 die Jahresverläufe der Lufttemperaturen im unbeheizten Kellergeschoß für Variante C und Variante A2 dem Verlauf der Außenlufttemperatur gegenübergestellt.

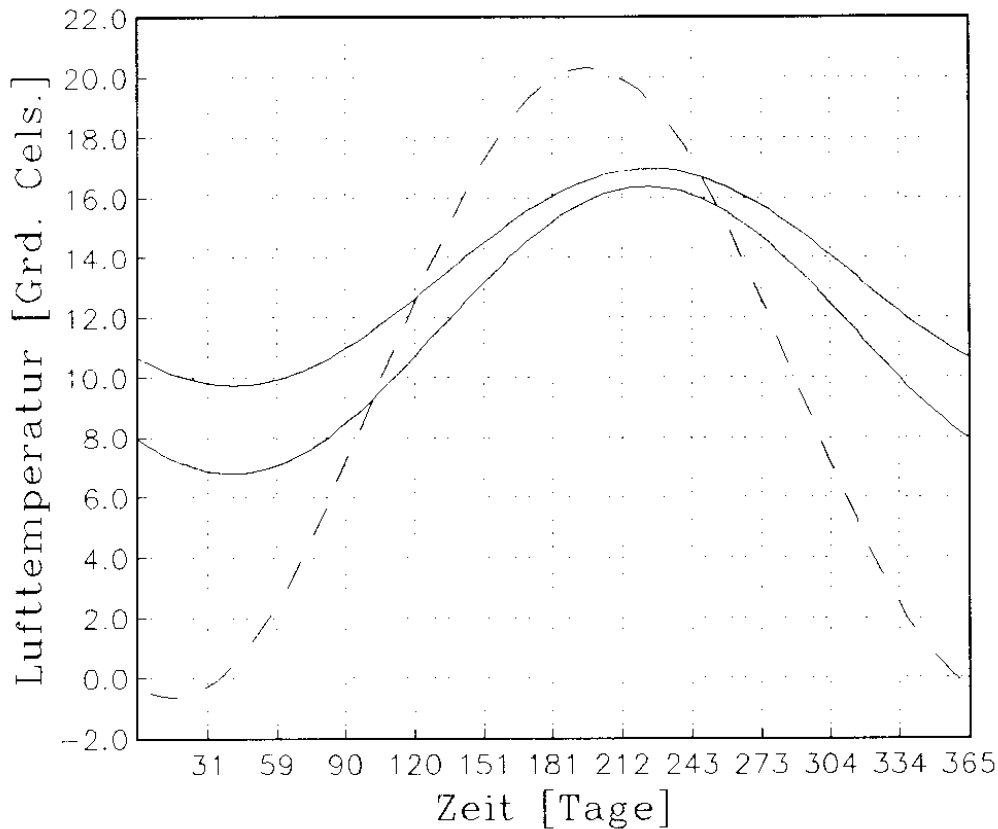


Bild 4: Jahresverlauf der Lufttemperatur des unbeheizten Kellergeschoßes
 Durchgezogene Linien: Obere Kurve → Variante C
 Untere Kurve → Variante A2
 Unterbrochene Linie: Außenlufttemperatur

Bild 4 zeigt, daß für Variante C, also jene Variante mit dem höchsten Jahresmittelwert der Lufttemperatur, die Jahresschwankung mit ± 3.6 K niedrig bleibt. Im Gegensatz hierzu zeigt Variante A2 eine erheblich größere Jahresschwankung der Kellerlufttemperatur, die dazu führt, daß das im Februar auftretende Minimum der Lufttemperatur mit 6.8 °C um 2.9 K niedriger liegt, als jenes der Variante C ($T_{\min} = 9.7$ °C). Deutlich zeigt sich auch die Phasenverschiebung von etwa 1 Monat zwischen dem Jahresverlauf der Außenlufttemperatur und jenem der Lufttemperatur im Kellergeschoß.

Mit der Kenntnis des Jahresverlaufes der Lufttemperatur im unbeheizten Kellergeschoß ist es ohne weiteres möglich, die während der Heizsaison auftretenden Wärmeverluste an das Kellergeschoß zu berechnen. Der Jahresmittelwert dieser Wärmeverluste interessiert hingegen wenig, da er ja auch den im Sommer auftretenden - meist erwünschten - Wärmeabfluß in den Keller enthält. Die zumeist übliche, auch in Normen festgelegte Art der Abschätzung des Wärmeverlustes an einen unbeheizten Kellerraum besteht darin, die Kellerdecke als luftberührten Aussenbauteil anzusehen, dessen k-Wert mit einem Abminderungsfaktor zu multiplizieren ist. Der Abminderungsfaktor (üblicherweise 0.5) ist hierbei unabhängig von der Gebäudegeometrie und den für die bodenberührten Bauteile verwendeten Dämmstoff-Dicken.

In Tabelle 5 ist für die untersuchten Dämm-Varianten die im langjährigen Mittel für den Standort Wien während der Heizsaison (Oktober bis einschließlich April) an das unbeheizte Kellergeschoß abfließende Wärmemenge ausgewiesen. Die unter Verwendung der hier vorgestellten, dreidimensional instationären Berechnungsmethode erhaltenen Werte Q^{3D} sind hierbei den Ergebnissen Q^{1D} einer eindimensionalen Abschätzung unter Verwendung eines Abminderungsfaktors von 0.5 gegenübergestellt.

Variante	Berechnete Wärmemenge Q^{3D} [kWh]	Abgeschätzte Wärmemenge Q^{1D} [kWh]
A	1913	1659
A1	1477	1166
A2	1258	914
B	1839	1674
C	1713	1712
C1	1391	1203
C2	1223	944

Tabelle 5: Wärmeverluste während einer Heizsaison an das unbeheizte Kellergeschoß
Gebäudegeometrie: 8m·8m (Innenmaß); Standort Wien

Mit Ausnahme von Dämm-Variante C sind die in eindimensionaler Rechnung abgeschätzten Werte des Wärmeverlustes an das Kellergeschoß generell - mitunter ganz erheblich - zu klein. Insbesondere stört, daß die Wirksamkeit einer Zusatzdämmung der Kellerdecke in eindimensionaler Näherung ganz wesentlich überschätzt wird. So führt die eindimensionale Näherung im Falle vom Übergang von Variante C auf Variante C2 (6 cm Zusatzdämmung) auf die Erwartung, daß der Wärmeverlust durch die Kellerdecke auf 55% seines ursprünglichen Wertes gesenkt wird. Die dreidimensional instationäre Berechnung zeigt jedoch auf, daß im langjährigen Mittel lediglich mit einer Reduktion auf 71% des ursprünglichen Wärmeverlustes zu rechnen ist. Auch im Falle unbeheizter Kellergeschoße zeigt sich somit, daß die üblicherweise verwendeten eindimensionalen Abschätzungsmethoden zu mitunter erheblichen Fehleinschätzungen führen können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Kenntnis des Jahresverlaufes der Lufttemperatur in einem unbeheizten Kellergeschoß ist einerseits notwendig, um dessen Nutzbarkeit richtig einschätzen zu können. Zum anderen bestimmt die Differenz der Lufttemperaturen zwischen Erdgeschoß und Kellergeschoß die Transmissionswärmeverluste des beheizten Gebäudevolumens an das Kellergeschoß. Wie gezeigt, führen die üblicherweise verwendeten eindimensionalen Näherungsmethoden zur Berechnung der Wärmeverluste an unbeheizte Kellerräume zu groben Fehleinschätzungen. Eine realistische rechnerische Abschätzung der im langjährigen Mittel zu erwartenden Zeitverläufe von Kellertemperatur und Wärmeströmen hat dreidimensional instationär zu erfolgen, wobei auf geeignete, leistungsfähige Rechenprogramme zurückgegriffen werden muß.

Die Berechnung des Jahresverlaufes der Lufttemperatur innerhalb eines unbeheizten Kellergeschoßes läuft auf die instationäre, zeitlich periodisch eingeschwungene Simulation des thermischen Verhaltens eines Raumes unter Berücksichtigung dreidimensional ablaufender Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsvorgänge hinaus. Das hier vorgestellte Simulationsmodell ist insofern vereinfacht, als etwaige Innenwärmen im Kellergeschoß vernachlässigt werden. Die Berücksichtigung von Innenwärmen bereitet - wie in [7] gezeigt - keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, sodaß auch die Entwicklung eines dreidimensional, periodisch eingeschwungen arbeitenden Rechenprogrammes zur Beschreibung des thermischen Verhaltens ganzer Gebäude prinzipiell realisierbar erscheint.

Literatur

- [1] PC-Programmpaket WAEBRU V5.0, Copyright E. Panzhauser, TU Wien, 1993
- [2] K. Kreč, "Zur Wärmespeicherung in Baukonstruktionen", Gesundheitsingenieur 114, Heft 1, 11-18, 1993
- [3] K. Kreč, "Wärmeverluste über erdbodenberührte Bauteile Fallstudie beheizter Kellerraum", WKSB, Heft 33, 32-35 (1993)
- [4] W. Heindl, K. Kreč, E. Panzhauser & A. Sigmund "Wärmebrücken", Springer-Verlag Wien-New York, 1987
- [5] Fr. Haferland, W. Heindl & H. Fuchs, "Ein Verfahren zur Ermittlung des wärmetechnischen Verhaltens ganzer Gebäude unter periodisch wechselnder Wärmeeinwirkung und rechnerische Untersuchungen zur Ermittlung der Größenordnung bestimmter Einflüsse von Bauweise und Konstruktion sowie sonstiger Parameter auf die Temperaturstabilität in Räumen", Berichte aus der Bauforschung, Heft 99, Verlag Wilhelm Ernst&Sohn Berlin-München-Düsseldorf, 1975
- [6] PC-Programmpaket WAEBRU, erweiterte Experimental-Version, 1993
- [7] K. Kreč, "Wärmeleitung in Baukonstruktionen unter Berücksichtigung von Wärmequellen", Gesundheitsingenieur 114, Heft 6, 313-318, 1993

Manuskript für:

K. Kreč, "Lufttemperatur im unbeheizten Kellergeschoß; eine Fallstudie", WKSB **34**, 42-47 (1994)