

Erdreichwärmetauscher bieten eine attraktive Möglichkeit der Frischluftvorwärmung für Wohngebäude. Die Ver-

messung eines solchen Systems ermöglicht Aussagen über Energieeinsparpotentiale, Modellierungstechniken und

auf in der Praxis bei der Auslegung Erdkanalsystem

AIVC 12,478

Erdreichwärmetauscher für Wohngebäude

Vermessung, Modellierung und Anwendung

K. Pottler, I. Haug, A. Beck, J. Fricke, Würzburg

Zur Senkung des Heizenergiebedarfs von Gebäuden auf Niedrigenergieniveau sind neben gut wärmedämmten auch dichte Gebäudehüllen nötig. Durch den dadurch reduzierten natürlichen Luftwechsel ist der Einbau von mechanischen Lüftungsanlagen zur Einhaltung einer ausreichenden Luftqualität und zur Vermeidung von Feuchteschäden unabdingbar. Bei in diesem Sinne ausgeführten Niedrigenergiehäusern bildet der Lüftungswärmebedarf mit einem Anteil von 50 bis 65 % einen wesentlichen Bestandteil des gesamten Heizwärmebedarfs [1]. Damit wird deutlich, daß eine weitere Reduzierung des Gebäudewärmebedarfs nur durch

die Verwendung energieeffizienter Lüftungssysteme möglich ist.

Derzeit kommen meist reine Abluftanlagen oder zentrale Systeme mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz. Die Frischluft-Vorwärmung über Solarfassaden wird erprobt [2]. Eine weitere Möglichkeit ist die Frischluftherwärmung über im Erdreich verlegte Luftkanäle. Die Luft nimmt dabei im Idealfall Erdreichtemperatur an. Sie kann damit im Winter auf Temperaturen über den Gefrierpunkt aufgewärmt werden. Während sommerlicher Hitzeperioden kühlt sich die warme Luft in den Erdkanälen ab und trägt damit zur Gebäudekühlung bei. Diese Methode wird vor allem für den Einsatz

in öffentlichen Gebäuden empfohlen [3]. Sie kann durchaus wirtschaftlich sein, da die konventionelle Kälteerzeugung gegenüber der Wärmeerzeugung in der Regel hohe spezifische Kosten verursacht. Zur Simulation von Erdreichwärmetauschern existieren mittlerweile Berechnungsprogramme, mit denen sich die für den jeweiligen Einsatzzweck und -ort beste Auslegung ermitteln läßt [4]. Wenig Erfahrungen liegen im Wohnungsbau mit Lüftungssystemen vor, bei denen die Frischluft ohne nachgeschalteten Zuluft-Abluft-Wärmetauscher ausschließlich über Erdreichwärmetauscher vorgewärmt wird. Ein solches System wurde vom ZAE Bayern acht Monate lang vermessen. Die Ergebnisse werden in diesem Bericht dargestellt.



Dipl.-Phys. *Klaus Pottler*, Jahrgang 1967, gelernter Landmaschinenmechaniker, studierte Physik an der Universität Würzburg und an der Texas A&M University, USA. Seit März 1996 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern). Er promoviert über die Optimierung von Solar-Luft-Kollektoren, insbesondere für die solare Frischluft-Vorwärmung für energieoptimierte Gebäude.



Dipl.-Phys. *Ingo Haug*, Jahrgang 1972, studierte Physik an der Universität Konstanz, der University of Sussex (England) und der Universität Würzburg. Seit Juni 1997 führt er am ZAE Bayern Untersuchungen zum Energietransport an Fassadensystemen durch. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt fördert diese Arbeit durch ein Promotionsstipendium.



Dr. *Andreas Beck*, Jahrgang 1961, studierte Physik an der Universität Würzburg. Er promovierte über den Strahlungstransport in thermotropen Gelen zur Regelung des Energieeintrags durch transparente Wärmedämmsysteme. Nach Abschluß der Promotion im Jahr 1992 beschäftigte er sich mit der Herstellung und Charakterisierung hochtransparenter Aerogele. Seit 1994 leitet er die Forschergruppe „Solare und Optische Systeme“ am ZAE Bayern in Würzburg.



Prof. Dr. *Jochen Fricke*, Jahrgang 1938, studierte Physik an der Technischen Universität München und promovierte dort im Jahr 1967. Er war anschließend an der TU München und an der University of Pittsburgh, USA, als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Seit 1975 ist er Professor für Experimentelle Physik an der Universität Würzburg. Seit 1991 ist er Vorstandsvorsitzender des ZAE Bayern. Seine derzeitigen Arbeitsschwerpunkte sind die Untersuchung und Optimierung poröser Medien (Pulver, Fasern, Aerogele) im Hinblick auf Struktur, mechanische, optische und thermische Eigenschaften und die Entwicklung opaker und transparenter thermischer Superisolationen.

Energieeinsparpotential

Die Temperatur der Erdoberfläche wird durch das darunter liegende Erdreich, die Außenluft, die solare Einstrahlung, die atmosphärische Gegenstrahlung und den Niederschlag beeinflusst. Die Erdreichtemperatur ändert sich mit der Tiefe und mit der Zeit [5]. In einfacher Näherung kann man diese Temperaturänderungen durch eine gedämpfte in den Untergrund eindringende „Temperaturwelle“ beschreiben. Diese erfährt beim Fortschreiten eine Phasenverschiebung, so daß sich in etwa 4 bis 6 m Tiefe erst im Winterhalbjahr die maximale Erdreichtemperatur einstellt. Der Amplitudenverlauf der Welle und die Phasenverschiebung hängen von der Beschaffenheit und dem Feuchtegehalt des Erdreichs ab. Optimale Wärmeerträge liefern Erdreichwärmetauscher in der oben genannten Tiefe. In der Praxis werden solche Systeme aus Kostengründen meist in geringeren Tiefen verlegt.

Im folgenden wird eine einfache Abschätzung der möglichen Ener-

gieeinsparungen durch einen typischen Erdreichwärmetauscher durchgeführt. Für die Heizgrenztemperatur eines nach der aktuellen Wärmeschutzverordnung errichteten Gebäudes von 12 °C beträgt die mittlere Außentemperatur an den 228 Heiztagen für den Standort Würzburg etwa 4 °C [6]. Bei einer mittleren Erdreichtemperatur von 9 °C und einer mittleren Raumlufttemperatur von 20 °C während der Heizperiode beträgt die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft 16 K und der durchschnittliche Temperaturgewinn bei Einsatz eines Zulufterdkanals 5 K. Somit kann ein Erdreichwärmetauscher unter der Annahme einer ungestörten Erdreichtemperatur einen Anteil von maximal 5/16 oder 31 % der Energie einsparen, die bei Außenluftzufuhr zur Erwärmung anfällt. Diese Abschätzung geht von idealen Bedingungen aus und übertrifft den von Daniels genannten Jahresertrag von 600 bis 650 kWh bei einer konstanten Fördermenge von 100 m³/h um fast 20 % [7]. Allerdings muß davon ausgegangen werden, daß nur ein Teil der Frischluft durch das Kanalsystem befördert wird. Langjährige Untersuchungen zum Lüftungsverhalten im Wohnungsbau zeigen, daß bei Wohnungen mit mechanischen Abluftsystemen die Fenster in der Übergangszeit etwa gleich, häufig nur in der kalten Jahreszeit etwas seltener geöffnet sind, als in Gebäuden mit reiner Fensterlüftung [8]. Die prozentuale Einsparung wird in der Praxis also geringer ausfallen.

Ein positiver Nebeneffekt von Erdreichwärmetauschern ist die Möglichkeit, das Gebäude im Sommer über den Frischluftstrom kühlen zu können. Die Kühlwirkung an heißen Sommertagen ist erwünscht, da in deutschen Wohngebäuden in der Regel keine Kälteerzeuger installiert werden. Allerdings bringt ein für die Wohnungslüftung mit relativ geringen Fördermengen ausgelegtes Kanalsystem nur geringe Kühlleistungen (bei den durchgeführten Messungen waren es maximal 150 Watt). Sonnenschutzmaßnahmen sind wesentlich effektiver, da sie eine sommerliche

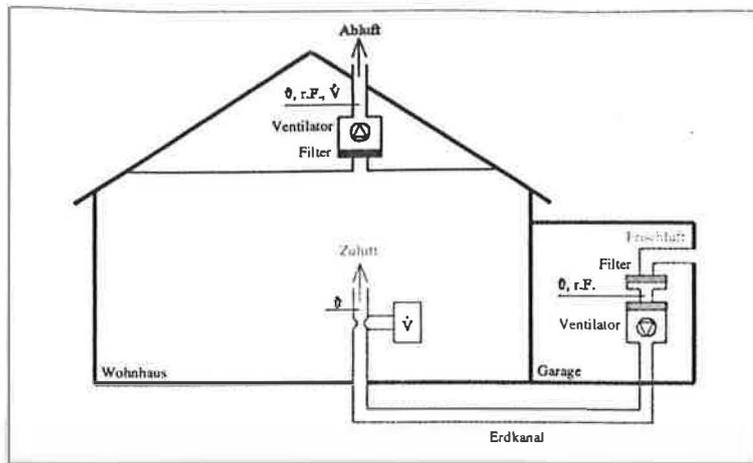


Bild 1 | Schema des Lüftungssystems mit Erdreichwärmetauscher, Abluftkanal und den nötigen Komponenten zur Luftförderung. Gemessen wurden die relevanten Temperaturen (t), die relativen Luftfeuchten ($r.F.$) am Ein- und Auslaßkanal und die Volumenströme (\dot{V}) durch die Erdkanäle und durch den Abluftkanal. Zur Vereinfachung wurde der zweite Erdkanal hier nicht eingezeichnet.

Überhitzung von vornherein vermeiden helfen.

Durchgeführte Messungen

Die Vermessung der Erdreichwärmetauscher fand an einem Einfamilienhaus in Würzburg statt. Es besitzt eine Lüftungsanlage mit Frischluftvorwärmung über zwei Erdkanäle. Die Kanäle wurden in etwa 80 cm Tiefe unter der nicht speziell wärmegeprägten Bodenplatte des zum Teil beheizten Kellers verlegt. Sie verfügen über ein gemeinsames Ansaugrohr mit einem über vier Stufen regelbaren Gleichstrom-Ventilator des Fabrikats „Fresh“ für die Luftförderung. Die Erdkanäle besitzen eine Länge von etwa 13 m bzw. 15 m. Davon verlaufen jeweils etwa 10 m unter der Bodenplatte des Gebäudes. Die Erdkanäle sind U-förmig verlegt, so daß eventuell eintretendes Wasser oder Kondensat nicht abfließen. Im Dachraum des Wohnhauses ist der Abluftkanal montiert, der mit einem Ventilator gleichen Typs ausgestattet ist. Zum Betrieb des Erdkanals laufen beide Ventilatoren (Zu- und Abluft) idealerweise auf gleicher Stufe. In der Betriebsart „Sommer“ läuft nur der Abluftventilator, und die Erdkanäle werden nicht zwangsdurchströmt.

Durch einen Datenlogger wurden die Lufttemperaturen über Thermistoren am Ein- und Ausgang der Erdkanäle und im Abluftkanal erfaßt. Über Feuchtesensoren wurde die relative Feuchte der Zu- und Abluft gemessen. Die Bestimmung der Volumenströme durch die Erdkanäle wurde durch Meßdüsen in Kombination mit kapazitiven Differenzdruckmeßgeräten durchgeführt. Der Abluftvolumenstrom wurde durch ein thermisches Anemometer bestimmt. **Bild 1** zeigt schematisch

das beschriebene Lüftungssystem und den Meßaufbau. Die Meßdatenerfassung fand vom 20. Oktober 1997 bis zum 24. Juni 1998 statt. In diesem Zeitraum wurden im 10-Minuten Takt je 13 Sensoren etwa 25 700 mal ausgelesen. Im folgenden werden die aus den Messungen abgeleiteten Ergebnisse dargestellt.

Volumenströme

Die Volumenströme für die verschiedenen Lüfterstufen sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Die Lüftungsanlage wurde im Meßzeitraum fast ausschließlich in den Leistungstufen 1 und 2 betrieben. Aufgrund eines Fehlers in der (nicht von der Fa. Fresh stammenden) Steuerelektronik der Lüftungsanlage war der Zuluftventilator bei Stufe 1 außer Betrieb. Dadurch zeigte sich, daß die durch eine Blower-Door-Messung bei 50 Pascal Differenzdruck bestimmte Gebäudedichtigkeit von $n_{50} = 1,1 \text{ h}^{-1}$ nicht ausreicht, um bei ausgeschalteten Zuluftventilator einen meßbaren Volumenstrom in den Kanälen zu erzeugen. In der Betriebsstufe 2 wurde nur wenig mehr als die Hälfte der Abluft als Frischluft durch die Erdkanäle befördert. Die restliche Frischluft gelang durch Infiltration in das Gebäude, wodurch die Effizienz des Systemes geschmälert wurde. Analysiert man die Verwendung der verschiedenen Lüftungsstufen, so erkennt man eine durchgängige Nutzung und einen regelmäßigen Nutzereingriff in den Wintermonaten. Erst ab Mai wurde die Anlage auch häufiger ganz außer

Tabelle 1 | In der Kalibrierung im Juni '98 festgestellte Volumenströme in m³/h.

	ABLUF	KANAL 1	KANAL 2	KANÄLE 1&2
Stufe 1	88	0	0	0
Stufe 2	147	37	53	90
Stufe 3	200	50	68	118
Stufe 4	257	64	88	152

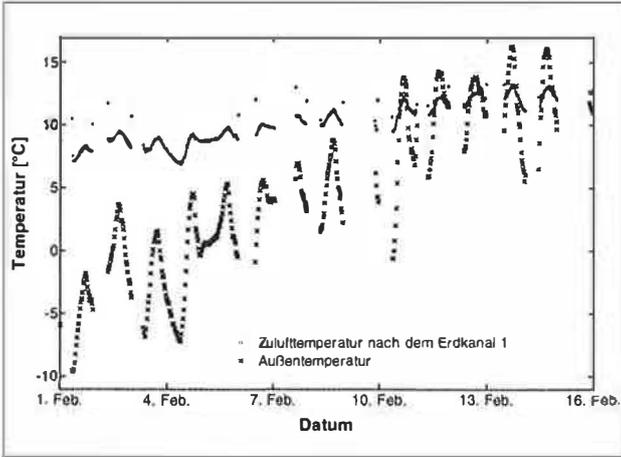


Bild 2 Temperaturen der Frischluft vor und nach dem Erdkanal 1 (entspricht weitgehend den Temperaturen nach dem Erdkanal 2), gemessen vom 1. bis 16. Februar 1998. Ab dem 11. Februar wird die Luft beim Durchgang durch den Kanal tagsüber abgekühlt.

Betrieb gesetzt. Die auf das Gebäudevolumen bezogene Luftwechselzahl durch mechanische Lüftung (Stufe 1: $0,14 \text{ h}^{-1}$, Stufe 2: $0,24 \text{ h}^{-1}$) erscheint niedrig. Nimmt man einen Frischluftbedarf von etwa $30 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person tagsüber an, so stimmt der hieraus berechnete Luftwechsel für eine 5-köpfige Familie allerdings recht gut mit den Meßwerten überein. Die Öffnungszeiten der Fenster sind nicht bekannt. Die Betriebszeiten auf Stufe 1 und 2 sind etwa

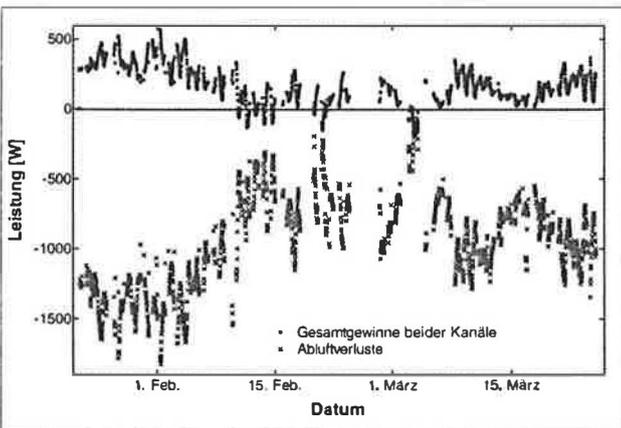


Bild 3 Aus den Meßdaten berechnete Heizleistung der Erdkanäle und Verlustleistung der Abluft.

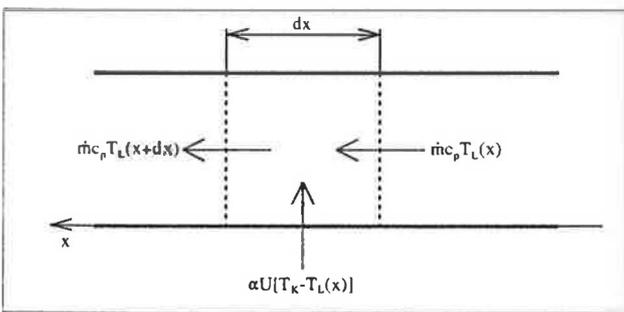


Bild 4 Wärmeströme im infinitesimalen Längenbereich dx des Erdkanals mit von rechts nach links strömender Luft.

gleich, Stufe 3 und 4 wurden im Meßzeitraum nur wenige Stunden lang verwendet.

Temperaturen

Die Lufttemperatur nach Passieren der Erdkanäle war abhängig von der Außentemperatur und lag selbst an kalten Tagen nicht unter $7 \text{ }^\circ\text{C}$, wie **Bild 2** demonstriert. Im Sommer ist eine deutliche Abkühlung der Luft im Erdkanal zu erkennen, was allerdings zu Kondenswasseranfall führen kann.

Thermische Leistung

Aus den Volumenströmen und Temperaturen der Luft wurde die momentane Leistung der Kanäle berechnet. Die dem Erdreich entzogene thermische Leistung betrug bis zu 600 Watt (Kanal 1: 250 W, Kanal 2: 350 W) und war bei niedrigen Außentemperaturen besonders hoch. In **Bild 3** ist dem Energiegewinn beider Erdkanäle der Verlust gegenübergestellt, der sich aus dem Abluftvolumenstrom ergibt.

Die Erdkanäle fangen somit nur einen kleinen Teil, maximal bis zu einem Drittel der thermischen Lüftungsverluste auf. Dieser Wert entspricht nur zufällig dem vorher abgeschätzten Energieeinsparpotential, da sich die vermessenen Erdkanäle durch die ungedämmte Bodenplatte auf einer höheren Temperatur befanden, als es im ungestörten Erdreich zu erwarten gewesen wäre. Der hierdurch gesteigerte Energieeintrag wurde durch die gegenüber den Abluftvolumenströmen geringeren Erdkanalvolumenströme wieder aufgehoben. Mitte Februar und Anfang März 1998 lag die Außentemperatur zeitweise über der Kanaltemperatur. Dabei kam es zu einer Abkühlung der Frischluft in den Erdkanälen und damit zu einem Anstieg des Lüftungswärmebedarfs. Berechnet man die kumulierten Wärmeströme vom 23. Januar bis Ende April 1998, so ergibt sich ein Wärmeverlust durch den Abluftkanal von 1010 kWh und ein Gewinn durch die Erdkanäle von 157 kWh. Die Erdkanäle decken also nur etwa 15 % der Lüftungswärmeverluste ab. Zu beachten ist allerdings, daß wegen der fehlerhaften Steuerung

die Gewinne der Erdkanäle zu niedrig ausgefallen sind, da die Kanäle bei der Lüftungsstufe 1 nicht in Betrieb waren.

Eine wichtige energetische Kenngröße für Erdkanäle ist deren Arbeitszahl. Sie ist definiert als das Verhältnis von gewonnener Wärme zu eingesetzter elektrischer Energie und hat in dieser Zeitperiode den Wert von 16. Wichtet man den Strombedarf primärenergetisch mit dem Faktor 3, so reduziert sie sich auf 5,3.

Luftfeuchtigkeit und Kondensationserscheinungen

Wird die Luft im Erdkanal erwärmt, so sinkt die relative Feuchte bei gleichbleibendem absoluten Feuchtigkeitsgehalt. Wird die Luft im Erdkanal jedoch abgekühlt, so steigt die relative Luftfeuchte an und es kann zu Kondensation im Erdkanal kommen. Die Gefahr einer Kondensation wächst mit steigender Außenlufttemperatur bei hoher relativer Außenluftfeuchte. Während des Meßzeitraumes traten Kondensationen bei Außenlufttemperaturen um die $30 \text{ }^\circ\text{C}$ und relativen Außenluftfeuchten von 80 bis 90 % in beiden Erdkanälen auf.

Berechnungsmodelle für die Erdkanäle

Physikalisches Modell

Zur Analyse eines Erdkanals kann das folgende physikalische Modell benutzt werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Temperatur des Erdkanals unabhängig vom Ort im Kanal ist. Dies ist in der Realität nicht gegeben, da sich der Kanal beispielsweise im Anfangsbereich durch die kalte Frischluft abkühlt. Aus diesem Grund wird die in diesem Kapitel berechnete Kanaltemperatur als effektive Kanaltemperatur bezeichnet, die einer über dem Ort gemittelten Temperatur entspricht. **Bild 4** zeigt die Bilanzierung der Wärmeströme im Erdkanal:

Aus der Energiebilanz folgt:

$$\dot{m}c_p [T_L(x+dx) - T_L(x)] = \alpha U [T_K - T_L(x)] \quad (1)$$

mit $\dot{m} = \dot{V}\rho$ und $U = \pi d$. Dabei ist \dot{m} der Massenstrom, (\dot{V}) der Volumenstrom, ρ die Dichte und c_p die spezifische Wärmekapazität der Luft, U der Kanal-Umfang, d der Kanal-Durchmesser, α der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Kanal und Luft, $T_L(x)$ die Temperatur der Luft an der Stelle x im Kanal und T_K die effektive Kanaltemperatur. Aus Gleichung 1 erhält man die Differentialgleichung:

$$\frac{dT_L(x)}{dx} = \beta [T_K - T_L(x)] \quad (2),$$

mit $\beta = (\alpha U) / (\dot{m} c_p)$.

Die Integration der Gleichung 2 über die Kanallänge s liefert die Zulufttemperatur $T_Z = T_L(s)$ der Luft beim Austritt aus dem Erdkanal in Abhängigkeit der Frischlufttemperatur $T_F = T_L(0)$ und der Kanaltemperatur T_K :

$$T_Z = (1 - e^{-\beta s}) \cdot T_K + e^{-\beta s} \cdot T_F \quad (3).$$

Der Parameter β kann näherungsweise als konstant betrachtet werden, da die Kanalströmung bei den auftretenden Volumenströmen turbulent ist. Für den Wärmeübergangskoeffizienten gilt dann [9]:

$$\alpha \sim \dot{V}^{0,8}$$

und damit $\beta \sim \alpha / \dot{V} = \dot{V}^{-0,2}$.

Eine Verdopplung des Volumenstroms mindert somit den Parameter β nur um etwa 13%. Damit kann die Temperaturänderung der Luft im Kanal als Funktion der Außentemperatur dargestellt werden:

$$\Delta T = T_Z - T_F = A - B \cdot T_F \quad (4).$$

mit der Steigung $B = 1 - e^{-\beta s}$ und dem Offset $A = B \cdot T_K$. Da die Erdreichtemperatur (und somit auch die effektive Kanaltemperatur) im Jahreslauf nicht als konstant angenommen werden kann, gilt die Geradengleichung (4) nur für kurze Zeitperioden. In Bild 5 ist die Auswertung von Meßdaten vom 15.-20.12.1997 zur korrekten Bestimmung des Parameters B gezeigt.

Durch Umformung der Gl. (4) erhält man eine Bestimmungsgleichung für die zeitabhängige effektive Kanaltemperatur $T_K(t)$:

$$T_K(t) = \frac{\Delta T(t)}{B} + T_F(t)$$

mit $B = 0,83$. Berechnet man nun die wöchentlichen Mittelwerte der effektiven Kanaltemperatur, so erhält man den in Bild 6 gezeigten sinusförmigen Verlauf, der sich nach folgender Gleichung beschreiben läßt:

$$T_K(t) = C - D \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (6).$$

mit der Zeit t in Tagen ab Neujahr, der Jahresmitteltemperatur $C = 15,0$ °C, der Temperaturamplitude $D = 3,3$ °C, der Periode $\omega = 0,0172$ d⁻¹ (ein Jahr) und der Zeitverschiebung $\varphi = 0,9410$. Durch Verknüpfung der Gleichungen (6) und (4) ergibt sich die zeitabhängige Bestimmungsgleichung für die Temperaturänderung der Luft im Kanal $\Delta T_i(T_F)$ zu

$$\Delta T_i(T_F) = E - F \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) - B \cdot T_F \quad (7)$$

mit $E = B \cdot C = 12,5$ K, $F = B \cdot D = 2,7$ K und ω , φ , B und T_F wie oben beschrieben.

Vereinfachtes Modell

Interessiert die zeitabhängige Kanaltemperatur nicht oder ist die Änderung der Kanaltemperatur klein, so kann die Charakteristik des Erdreichwärmetauschers auch aus folgender Darstellung erhalten werden. In Bild 7 ist die Temperaturänderung in den Erdkanälen über der Außentemperatur für den gesamten Meßzeitraum aufgetragen.

Durch die Meßpunkte läßt sich eine Gerade legen, aus der sich die Temperaturänderung ΔT im Kanal aus der Außentemperatur T_F berechnen läßt. Für den Kanal 1 gilt dabei die Gleichung:

$$\Delta T(T_F) = A' - B' \cdot T_F \quad (8),$$

mit $A' = 9,7$ K und $B' = 0,68$. Die zeitliche Variation der effektiven Kanaltemperatur äußert sich in diesem Modell durch eine Änderung der Geradensteigung in Bild 7 gegenüber der Steigung in Bild 5. Damit entspricht die Steigung B' nicht mehr dem Parameter B aus Gleichung 4. Wenn die Luft ihre Temperatur im Kanal nicht ändert, erhält man die effektive Kanaltemperatur T_K , die im Mittel des Meß-

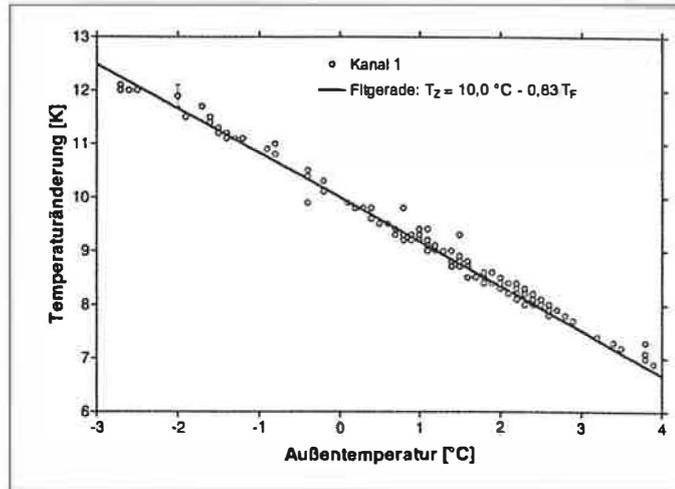


Bild 5 | Darstellung der Meßdaten des Kanals 1 vom 15.-20.12.1997 zur Berechnung des Parameters B . B ist bei gegebenem Volumenstrom eine Systemkonstante und somit zeitunabhängig.

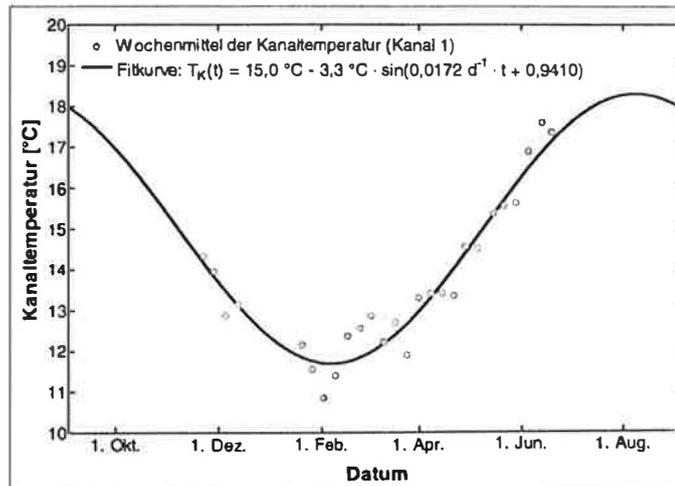


Bild 6 | Wöchentliche Mittelwerte der Kanaltemperatur nach Gleichung 5 mit angefitzter Sinuskurve.

zeitraumes bei etwa 14,3 °C liegt. Die Streuung der Punkte erklärt sich hauptsächlich durch die sich im Meßzeitraum von Oktober bis Juni änderte effektive Erdreichtemperatur.

Vergleich der beiden Modelle

Die Abweichungen der berechneten Kanalausstrittstemperaturen von den Meßdaten betragen beim vereinfachten Modell 2 bis 3 K, beim physikalischen Modell 1 bis 2 K über den Meßzeitraum. Auch die Streuung der Temperaturabweichungen ist beim physikalischen Modell kleiner, was sich durch eine um 36% geringere Standardabweichung äußert. Zur Bestimmung der effektiven Kanaltemperaturen wird das zeitabhängige physikalische Modell empfohlen. Aus den analysierten Meßdaten läßt sich weiterhin ablei-

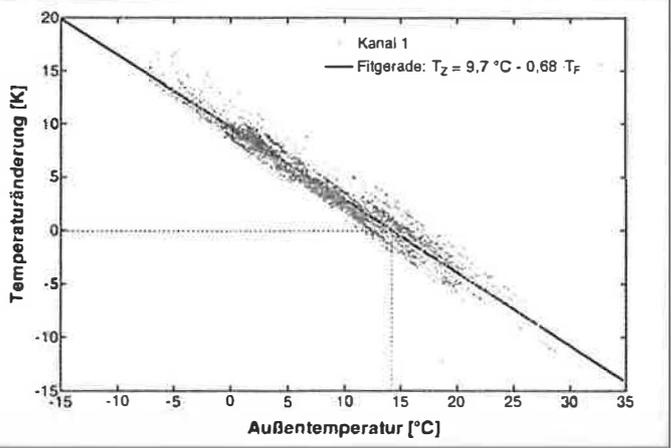


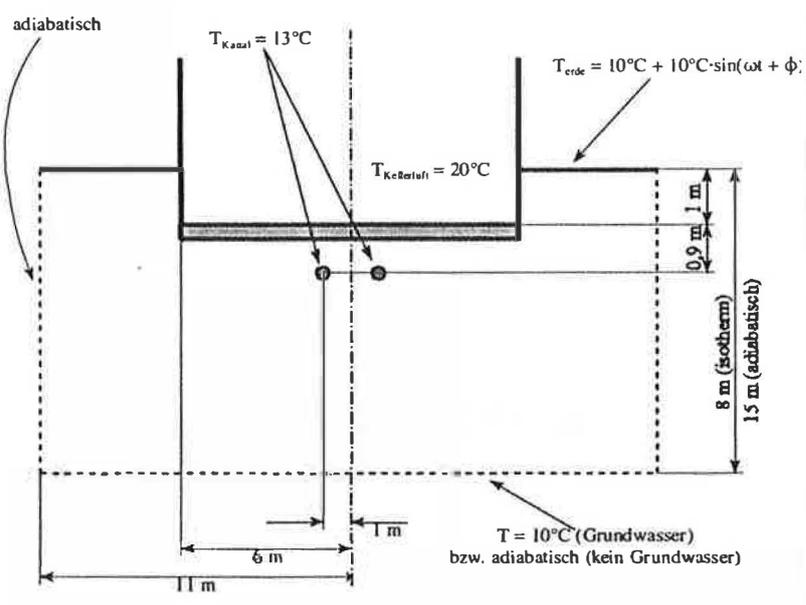
Bild 7 Kennlinie des Erdkanals 1 im Mittel für den gesamten Meßzeitraum als wesentliches Leistungsmerkmal. Entspricht die Außentemperatur der effektiven Kanaltemperatur, so findet im Kanal keine Temperaturänderung statt. Die so ermittelte Kanaltemperatur (gestrichelte Kurven) beträgt 14,3 °C.

ten, daß kurzzeitige Messungen (z.B. einzelne Tage mit genügend großen Außentemperatur-Schwankungen) in größeren zeitlichen Abständen (z.B. monatlich) ausreichen sollten, um für praktische Anwendungen genügend genaue Ergebnisse zur Charakterisierung von Erdreichwärmetauschern zu liefern.

Dynamische Temperaturfeldberechnung

Die vermessenen Erdkanäle waren in geringer Tiefe weitgehend unter der ungedämmten Bodenplatte des Gebäudes verlegt. Die Kellerräume waren zum Teil beheizt. Um festzustellen, wie sich die Wärmeströme unter der Bodenplatte verhalten, wurden mit dem Finite-Differenzen-Programm „HEAT2“ [10] dynamische Temperaturfeldberechnungen mit und ohne Erdkanäle durchgeführt. Bild 8 zeigt den geometrischen Aufbau des Modells.

Bild 8 Geometrie und Randbedingungen der instationären Simulationsrechnungen des Gebäudes mit zwei Erdkanälen unter der Bodenplatte.



Als Randbedingung wurde die Lufttemperatur im (beheizten) Keller zu 20 °C angenommen. Die Oberflächentemperatur des freien Erdreichs wurde als Sinusschwingung mit der Periode eines Jahres und einer Amplitude von 10 K bei einer Mitteltemperatur von 10 °C festgelegt. Die Randbedingung an den Seiten wurde als adiabatisch betrachtet. Die untere Randbedingung wurde einmal als isotherm (Grundwasser in 8 m Tiefe mit $T \approx 10 \text{ °C}$) und einmal als adiabatisch (kein weiterer Wärmeaustausch ab einer Tiefe von 15 m) festgelegt. Die adiabatische Randbedingung ist berechtigt, da die Geowärmeströme aus dem Erdinnern mit 0,05 bis 0,12 W/m² in der Regel vernachlässigt werden können [11]. Bei der Berechnung wird von einer Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von 1,0 W/(mK) und einem Aufbau der Bodenplatte aus 4 cm Estrich, 10 cm Beton und 10 cm Kies ausgegangen. Bild 9 zeigt die Ergebnisse der Simulationen.

In Bild 9 läßt sich für beide untere Randbedingungen erkennen, daß sich ohne Erdkanäle unter der Bodenplatte des Gebäudes eine Wärmeblase ausbildet. Mit Erdkanälen stellt sich eine signifikante Störung des Temperaturfeldes vor allem im Bereich der Kanäle ein. Da das freie Erdreich um das Gebäude wenig an das direkt unter der Bodenplatte liegende Erdreich ankoppelt, muß die durch die Erdreichwärmetauscher entzogene Wärme somit zumindest teilweise vom Gebäude selbst bereitgestellt und über die Bodenplatte an die Erdkanäle abgegeben werden. Diese Situation sollte bei der Installation von Erdkanälen daher vermieden werden.

Um den Wärmespeichereffekt des Erdreichs und damit die thermische Trägheit des Systems zu erfassen, wurden weitere Rechnungen durchgeführt. Für den ungestörten Fall (ohne Erd-

kanal) und die isotherme Randbedingung wurde der Wärmestrom von der Bodenplatte an das umgebende Erdreich ermittelt. Dabei stellt sich in Erdkanaltiefe eine Erdreichtemperatur von 18,2 °C ein. Schaltet man in der Simulation plötzlich einen auf 13 °C temperierten fiktiven Erdkanal zu, so wächst der Wärmestrom von der Bodenplatte an das Erdreich an. Dabei werden innerhalb von 28 Tagen 75 % des Endwertes erreicht. Da die Heizperiode je nach Dämmstandard des Gebäudes etwa sieben Monate (Oktober bis April) lang andauert, kann damit nur von geringen Einflüssen von Wärmespeichereffekten des Erdreichs ausgegangen werden.

Schlußfolgerungen

Die vermessenen Erdreichwärmetauscher wärmen die Frischluft auch bei tiefen Außentemperaturen weit über den Gefrierpunkt auf. Dabei sind beide Kanäle ähnlich effizient. Da die Erdkanäle relativ nahe bei der Bodenplatte liegen, diese nicht wärmegeklämt ist und die Kellerräume teilweise beheizt sind, wird ein Großteil der abgegebenen Wärme vom Gebäude selbst stammen. Somit ist der Aspekt einer Energieeinsparung in diesem Fall zweifelhaft. Eine Verlegung von Erdkanälen unter der Bodenplatte erscheint nur dann sinnvoll, wenn der Keller unbeheizt ist und über seinen Luftwechsel an die Außentemperatur ankoppelt. Die Wärmedämmung zu den Wohnräumen muß dann an der Kellerdecke angebracht sein. Bei einem beheizten Keller sollte die Bodenplatte zur Minimierung der Wärmeverluste thermisch isoliert werden. Um einen möglichst hohen Wärmegewinn während der Heizperiode zu erhalten, ist eine Verlegetiefe von etwa 4 bis 6 m empfehlenswert [7]. Sollen die Erdkanäle nur zur Frostfreihaltung eines nachgeschalteten Wärmetauschers dienen, so ist auch eine geringere Verlegetiefe denkbar.

Bei höheren Außentemperaturen kommt es auch während der Heizperiode zu Betriebsweisen, bei denen die Frischluft in den Erdkanälen

Erdreichwärmetauscher für Wohngebäude

abgekühlt wird und nach dem Austritt aus dem Kanal zusätzlich erhitzt werden muß. In diesen Zeiten könnte durch Ausschalten des Kanals über eine Außentemperaturregelung Heizenergie eingespart werden. Die gleiche Vorgehensweise würde im Sommerbetrieb eine Kondensation im Erdkanal vermeiden. Ein Bypass scheint nicht nötig zu sein, da das Ausschalten des Kanalventilators den Luftdurchsatz weitgehend zum Erliegen bringt. Soll der Erdkanal im Sommer zur Kühlung der Zuluft eingesetzt werden, so kann über mehrere Tage hinweg Kondensat anfallen und den Kanal mit Feuchtigkeit belasten. Da sich z.B. Schimmelpilze schon dann ausbreiten können, wenn die relative Luftfeuchte bei Temperaturen zwischen 0 und 50 °C für länger als drei Stunden pro Tag einen Wert von 65 % überschreitet und Staubablagerungen als Nährboden vorhanden sind [12], sollten Erdkanäle zum Kondensatabfluß mit Gefälle verlegt werden. Sie sollten gereinigt und bei Bedarf desinfiziert werden können. Ein regelmäßiger Filterwechsel ist zur Staubfreihaltung des Kanals anzuraten. Durch die Umsetzung dieser Maßnahmen wird das Gesundheitsrisiko minimiert und ist dann als sehr gering einzustufen [4; 13]. Als lufthygienische Vorsichtsmaßnahme wird vom sommerlichen Betrieb nicht entwässer- und reinigbarer Erdkanäle abgeraten.

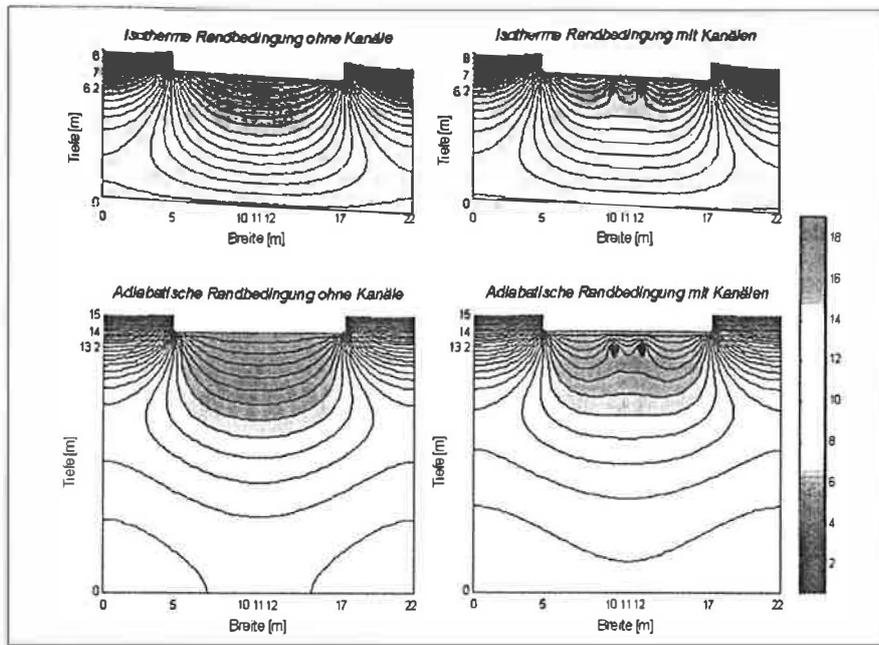


Bild 9 Ergebnisse der dynamischen Simulationen für den Winter. Die beiden linken Grafiken zeigen den ungestörten Fall ohne Erdkanäle mit isothermer bzw. adiabatischer Randbedingung. Die beiden rechten Grafiken stellen den Fall mit zwei nebeneinander liegenden 13 °C warmen Erdkanälen dar. Es zeigen sich lokale Temperaturerniedrigungen an den Erdkanälen, die verstärkte Gebäudewärmeverluste hervorrufen.

Der Volumenstrom durch den Erdkanal sollte etwa dem Volumenstrom durch den Abluftkanal entsprechen. Dies kann durch Einregelung der Zu- und Abluftvolumenströme durch Drosselklappen oder durch die Drehzahlregelung der Ventilatoren erfolgen. Auf den Kanalventilator kann auch bei einem sehr dichten Gebäude in keinem Fall verzichtet werden. Für einen langfristigen sicheren Betrieb wird die Verwendung erprobter Lüftungssteuerungen empfohlen.

Die zusätzlichen Investitionskosten des beschriebenen Systems gegenüber einem Abluftsystem ohne Erdreichwärmetauscher betragen etwa 4800,- DM. Legt man für eine gut abgeglichenen Anlage den gemessenen mittleren Abluftvolumenstrom von 120 m³/h für den Volumenstrom durch die Erdkanäle zugrunde und geht von einem hohen Jahresgewinn von 650 kWh pro 100 m³/h Volumenstrom aus, so könnte man bei einer guten Anlage mit Erdreichwärmetauschern maximal 780 kWh Heizwärme im Jahr einsparen. Bei einem Wärmepreis

von 5 Pf/kWh würde die finanzielle Einsparung nach Abzug der Stromkosten für den zusätzlichen Ventilator etwa 30,- DM pro Jahr betragen. Das System könnte somit nicht wirtschaftlich betrieben werden. Eine wahrscheinlich kostengünstigere Möglichkeit zur Minimierung des Lüftungsbedarfs besteht in der Verminderung des Luftwechsels. Bei bedarfsgeregelten Lüftungssystemen wird dabei die Raumluftqualität über den Feuchtegehalt, die CO₂-Konzentration oder durch sogenannte Luftqualitätssensoren bestimmt und z.B. die Ventilatorzahl dem Frischluftbedarf selbsttätig angepaßt [14].

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Würzburger Architekturbüro Müller + Wördehoff GmbH für die Möglichkeit, an einem ihrer Gebäude Messungen vornehmen zu können. Weiterer Dank gilt der Stadtwerke Würzburg AG für die finanzielle Unterstützung dieser Studie. H 741

Literaturangaben

[1] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten: Energiesparinformationen 8 - Lüftung im Wohngebäude, Ausgabe 8/94.
 [2] Pottler, K.; Beck, A.; Fricke, J.: Solarfassade zur Frischluft-Vorwärmung. 11. Internationales Sonnenforum, Köln, 1998, S. 510-517.
 [3] BINE-Projekt-Info-Service: Thermolabyrinth - Erdwärmenutzung im Stadttheater Heilbronn. Bonn, Dez. 1985.
 [4] Pfafferot, J.; Gerber, A.; Herkel, S.: Erdwärmetauscher zur Luftkonditionierung, Anwendungsgebiete, Simulation und Auslegung. Gesundheits-Ingenieur, 119 (1998) Heft 4, S. 201-213.

[5] Fricke, J.; Borst, W. L.: Energie - Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen. Oldenbourg-Verlag, München, 1984.
 [6] Weindlader, H.: Messung der atmosphärischen IR-Gegenstrahlung und ihr Einfluß auf den Wärmehaushalt von Gebäuden. Diplomarbeit, Universität Würzburg, 1998.
 [7] Daniels, K.: Technologie des ökologischen Bauens. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995.
 [8] Erhorn, H.: Fördert oder schadet die europäische Normung der Niedrigenergiebauweise in Deutschland? Gesundheits-Ingenieur, 119 (1998) Heft 5, S. 236-239.
 [9] Kreith, F.; Kreider, J. F.: Principles of Solar Engineering. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1978, S. 134.
 [10] Blomberg, T.: Heat conduction in two and three dimensions - Computer Model-

ling of Building Physics Applications. Department of Building Physics, Lund University, Schweden, 1996.
 [11] Verein Deutscher Ingenieure: Entwurf VDI 4640 Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrunds. Düsseldorf 1998.
 [12] Sedlbauer, K.; Oswald, D.; König, N.: Schimmelgefahr bei offenen Luftkreisläufen. Gesundheits-Ingenieur, 119 (1998) Heft 5, S. 240-247.
 [13] Gerber, A.; Pfafferot, J.; Dibowski, G.: Luft-/Erdwärmetauscher EWT: Modellierung, Auslegung und Betriebserfahrungen. Forschungsverbund Sonnenenergie: Themen 97/98, S. 47-52.
 [14] Meier, S.: Bedarfsgeregelte Lüftung - Automatisierungskonzept mit Zukunft. TAB 6/97, S. 41-46.

Franke, L.; Gätje, B.; Krause, G.:

Potentiale zur Energieeinsparung im Hamburger Wohnungsbestand

HLH 50 (1999) Nr. 10, S. 30–37, 12 Bilder, 8 Literaturangaben

Es besteht Einigkeit darüber, daß im Wohnungsbestand durch unterschiedliche bauliche Maßnahmen Heizenergie eingespart werden kann. Wie hoch dieses Sparpotential tatsächlich ist, soll am Beispiel des Wohnungsbestandes der Stadt Hamburg näher beleuchtet werden.

Franke, L.; Gätje, B.; Krause, G.:

Potential for energy saving in the stock of residential buildings in Hamburg

HLH 50 (1999) No. 10, p. 30–37, 12 figs., 8 refs.

There is agreement that heating energy can be saved in the stock of residential buildings by means of structural procedures. What the actual potential savings are, is to be reviewed more closely using as the example the stock of residential buildings of the city of Hamburg.

Pottler, K.; Hang, I.; Beck, A.; Fricke, J.:

Erdreichwärmetauscher für Wohngebäude

HLH 50 (1999) Nr. 10, S. 48–53, 9 Bilder, 14 Literaturangaben

Erdreichwärmetauscher bieten eine attraktive Möglichkeit der Frischluftvorwärmung für Wohngebäude.

Pottler, K.; Hang, I.; Beck, A.; Fricke, J.:

Soil heat exchangers for residential buildings

HLH 50 (1999) No. 10, p. 48–53, 9 figs., 14 refs.

Soil heat exchangers provide an attractive possibility for fresh air preheating for residential buildings.

Marko, Armin; Lehr, Walter:

Optimierung von realen Wärmeerzeugern in simulierter Einsatzumgebung

HLH 50 (1999) Nr. 10, S. 54–57, 6 Bilder, 4 Literaturangaben

Mit Hilfe der Simulation von Heizungsanlagen in heutigen und zukünftigen Gebäuden kann aufgezeigt werden, wie bei gleichzeitiger Komfortsteigerung eine Primärenergieeinsparung erreicht wird. Allerdings werden in Simulationen nur idealisierte Abbilder der Wirklichkeit verwendet. Eine Weiterentwicklung stellt die Emulation (emulieren: „nachbilden“) dar.

Marko, Armin; Lehr, Walter:

Optimising actual heat generators in a simulated use environment

HLH 50 (1999) No. 10, p. 54–57, 6 figs., 4 refs.

By means of the simulation of central heating systems in current and future buildings, it is possible to show how a saving in primary energy can be achieved with a simultaneous increase in the level of comfort. However, only idealised versions of the reality are used in simulations. A further development is the emulation.

Zschunke, Tobias:

Berechnung ohne Computer

HLH 50 (1999) Nr. 10, S. 58–61, 3 Bilder

Die Berechnung der Größen rund um die „Black Box“ Heizfläche führt manchmal auf Zusammenhänge, deren Auswertung kleine praktische Probleme bereithält. Ist eine Fehlertoleranz bis zu 3% vertretbar, können direkt die hier vorgestellten Näherungsgleichungen benutzt werden.

Zschunke, Tobias:

Calculating without computers

HLH 50 (1999) No. 10, p. 58–61, 3 figs.

Calculating the dimensions around the “Black Box” heating surface sometimes leads to interrelationships, whose evaluation causes minor practical problems. Where an error tolerance up to 3% is acceptable, the approximation equations presented here can be directly used.

Francke, Dietrich:

Wärmetechnische Sachverhalte der Heizkostenverteilung – Teil 1

HLH 50 (1999) Nr. 10, S. 62–67, 2 Bilder, 1 Tabelle

Die grundsätzlichen wärmetechnischen Sachverhalte und die daraus zwangsläufig resultierenden spektakulären Abweichungen der derzeit üblichen Heizkostenabrechnungen werden im ersten Teil dargelegt und analytisch erläutert.

Francke, Dietrich:

Heat engineering factors for the distribution of heating costs – Part 1

HLH 50 (1999) No. 10, p. 62–67, 2 figs., 1 table

Part 1 describes and analyses the basic heat engineering factors and the resultant, spectacular deviations in the currently customary heating cost accounts.

Schlapmann, Dietrich:

Die Supershow der Heizungs- und Klimatechnik – Teil 2

HLH 50 (1999) Nr. 10, S. 68–71, 7 Bilder

Schlapmann, Dietrich:

The super display of heating and air-conditioning engineering – Part 2

HLH 50 (1999) No. 10, p. 68–71, 7 figs.

Klan, Herbert:

Gestaltete Heizflächen – zertifizierte Qualität

HLH 50 (1999) Nr. 10, S. 72–75, 9 Bilder

Klan, Herbert:

Designed radiator surfaces – certified quality

HLH 50 (1999) No. 10, p. 72–75, 9 figs.