

Rechenverfahren zum Energiebedarf von beheizten und klimatisierten Gebäuden

VDI 2067 Blatt 11, Entwurf 6/98

Rainer Hirschberg, Wiesbaden

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen ist die Kenntnis des Jahresenergiebedarfs beheizter und klimatisierter Gebäude Voraussetzung. Der Verfasser hat die Grundzüge des Rechenverfahrens nach Blatt 11 der zukünftigen VDI 2067 bereits in der HLH Bd. 48, Ausgabe 8 [1] dargestellt. Im folgenden wird auf Einzelheiten im Berechnungsverfahren eingegangen und eine Einordnung der erzielbaren Rechenergebnisse anhand eines Beispiel vorgenommen.

Die Berechnung des Jahresenergiebedarfs nach VDI 2067, Blatt 11 (Entwurf 6/98) wird als dynamisches Rechenverfahren nach der Methode der Gewichtsfaktoren [2] durchgeführt. Anders als in der Kühllastberechnung VDI 2078 werden die meteorologischen Randbedingungen nicht für eine Auslegungsperiode angenommen, sondern es wird auf das für den Standort des zu betrachtenden Gebäudes zutreffende Testreferenzjahr (TRY) zurückgegriffen, das ein statistisches Wetter über ein Jahr (8 760 Stunden) enthält. Im TRY ist die äußere Sonneneinstrahlung mit direktem und diffusem Anteil auf Horizontalflächen angegeben, so daß diese Werte für beliebige Bauteilflächen eines Gebäudes umgerechnet werden müssen. Die Sonneneinstrahlung wird durch den Sonnenstand bestimmt, der für den jeweiligen Ort durch Sonnenhöhe und Sonnenazimut in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit beschrieben wird.

Umrechnung der Sonneneinstrahlung aus dem TRY

Die Umrechnung der direkten Strahlung ist wegen der Anwendung der Winkelbeziehungen aus der sphärischen Trigonometrie trivial. Um nicht auf andere Literaturstellen hinweisen zu müssen, sind die Beziehungen innerhalb des Blattes 11 vollständig angegeben, wobei alle Gleichungen so angegeben sind, daß alle Winkelbeziehungen zur Nordrichtung (Sonnenazimut = 0) verwendet werden.



Dr.-Ing. Rainer Hirschberg, Jahrgang 1949, studierte Wärme- und Energietechnik, Heiz- und Raumlufttechnik an der TH Darmstadt und promovierte an der Universität Stuttgart. Seit Abschluß seines Studiums arbeitet er als freiberuflicher Ingenieur und entwickelt die Programmkonzepte für EDV-TGA-Lösungen der Firma GTS mbH. Seit 1985 ist er öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Heiz-, Raumluft- und Sanitärtechnik. Neben der Obmannschaft und Mitarbeit an einer Vielzahl von Richtlinien ist er seit dem 1. Januar 1996 auch Beirat der VDI-Gesellschaft TGA.

Der Winkel η beschreibt den Winkel zwischen Flächennormale und Sonnenstrahlungsrichtung, der bei der Umrechnung auf die Normalenrichtung für die horizontale Fläche einzusetzen ist. Für den Höhenwinkel der Flächennormalen über dem Horizont γ_f (entspricht dem Neigungswinkel der Fläche gegen die Vertikale) ist $\gamma_f = 90^\circ$ bei der Bestimmung von η zu setzen.

Die Umrechnung ergibt dann (Direktstrahlung liegt vor für $\cos \eta > 0$):

$$\dot{Q}_{S,dir,normal} = \frac{\dot{Q}_{S,direkt,horiz}}{\cos \eta} \quad (\eta \text{ für die horizontale Fläche, } \gamma_f = 90^\circ) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{S,dir,F} = \dot{Q}_{S,dir,normal} \cdot \cos \eta_f \quad (\eta_f \text{ für die beliebige Fläche, } \alpha_f, \gamma_f \text{ beliebig}) \quad (2)$$

Für die diffuse Strahlung sind die Verhältnisse sehr viel komplexer. Die Diffusstrahlung teilt sich in einen quasi direkten und damit orientierungsabhängigen und einen isotropen Anteil auf. Die jeweiligen Anteile werden nur durch empirisch gefundene Gleichungen berücksichtigt [3]. Im Entwurf der Richtlinie VDI 2067 Blatt 11 werden die quasi direkten und isotropen Anteile näherungsweise je zur Hälfte angesetzt. Für die Umrechnung der im TRY angegebenen diffusen Strahlung auf horizontale Flächen auf beliebig orientierte Flächen, die in zwei Schritten durchzuführen ist, wird dann die folgende Näherung angegeben:

Umrechnung von der diffusen Strahlung auf die horizontale Fläche in die diffuse Strahlung auf die Normalenfläche:

$$\dot{Q}_{S,diff,normal} = \frac{\dot{Q}_{S,diff,horiz}}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos \eta_{max}} + \frac{\sinh}{m} \right) \quad (3)$$

Umrechnung von der diffusen Strahlung auf die horizontale Fläche in die diffuse Strahlung auf die Normalenfläche:

$$\dot{Q}_{S,diff,F} = \frac{\dot{Q}_{S,diff,normal}}{2} \cdot \left(1 + \cos \eta_f + \frac{\sinh}{m} \right) \quad (4)$$

Hier sind die tatsächlichen Winkel für die beliebig orientierte Fläche (Winkel zwischen Flächennormale und Sonnenstrahlungsrichtung η_f , Flächenazimut und Neigungswinkel der Fläche gegen die Vertikale α_f , γ_f) einzusetzen.

Die Variable m ist in beiden Gleichungen mit $m = 3$ für die Wintermonate (Oktober bis März) und $m = 2$ für die Sommermonate (April bis September) zu berücksichtigen.

In Bild 1 und Bild 2 ist die Auswertung der vorstehenden Beziehungen mit den tabellierten Werten aus VDI 2078 für den 23. Juli (Süden und Osten) eines Jahres verglichen.

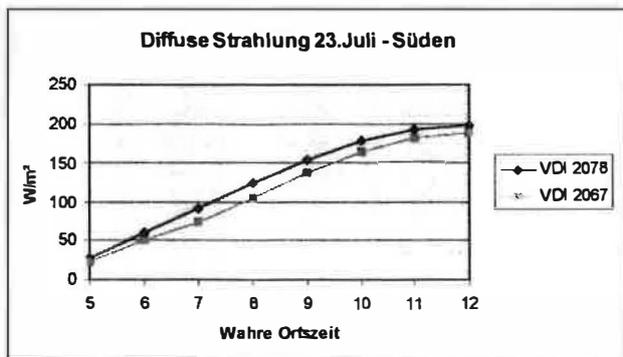


Bild 1 | Berechnete diffuse Strahlung für Süden im Vergleich zu den Werten der VDI 2078.

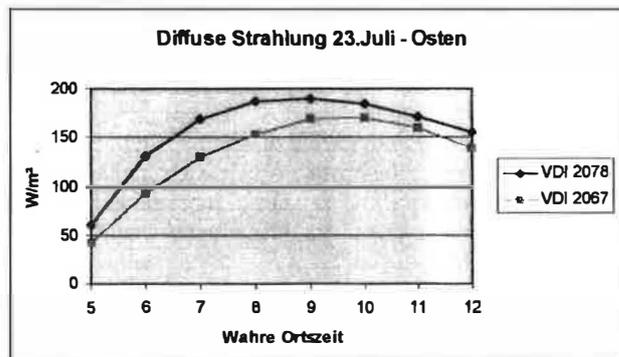


Bild 2 | Berechnete diffuse Strahlung für Osten im Vergleich zu den Werten der VDI 2078.

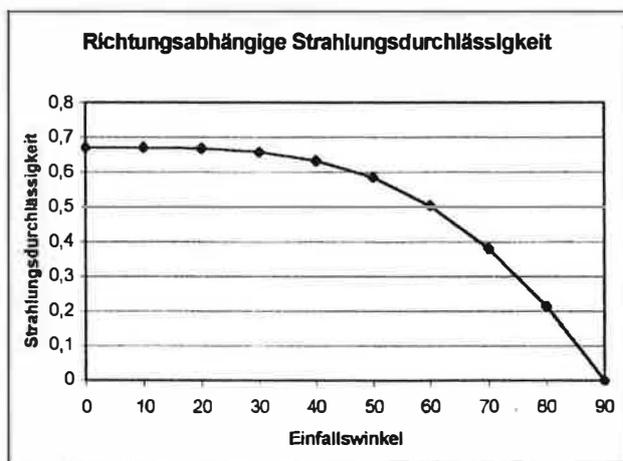


Bild 3 | Richtungsabhängige Strahlungsdurchlässigkeit $\tau(\eta_F)$ für unbeschichtetes Zweischeiben-Isolierglas.

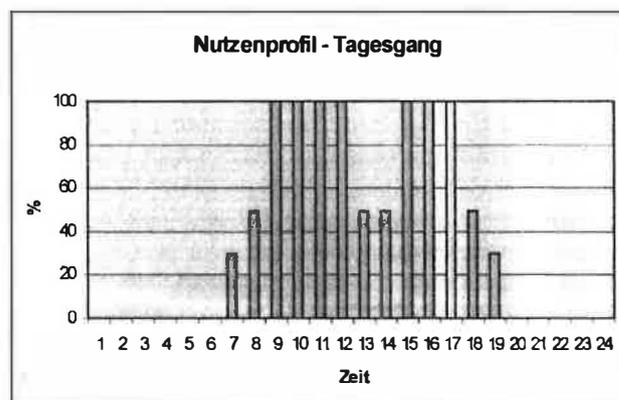


Bild 4 | Beispiel eines Nutzenprofils (in % der jeweils maximalen Last).

Fenstermodell

Die bei transparenten Bauteilen (Fenster) für die Rechnung benötigten Strahlungswerte auf der Rauminnenseite werden über ein einfaches Fenstermodell bestimmt, das jedoch die Abhängigkeit der Strahlungsdurchlässigkeit vom Einfallswinkel widerspiegelt:

Die richtungsabhängige Strahlungsdurchlässigkeit kann näherungsweise mit

$$\tau(\eta_F) = \tau_0 \cdot \left(1 - (1 - \cos \eta_F)^n\right) \quad (5)$$

angegeben werden, wobei τ_0 die Strahlungsdurchlässigkeit für senkrecht einfallende Strahlung kennzeichnet und n den Einfluß des transparenten Bauteils vom Einfallswinkel η_F bestimmt. Für 2-Scheiben-Isolierglas, unbeschichtet, betragen $n = 2$, Gesamtenergiedurchlässigkeit $g = 77\%$, Transmissionsfaktor $\tau_0 = 67\%$, Absorptionsfaktor $a = 21\%$ und Reflexionsfaktor $r = 12\%$. Weitere Werte für gebräuchliche Verglasungen sind in der Richtlinie angegeben.

Die Auswertung von Gl. (5) ist für die genannte Verglasung in Bild 3 dargestellt.

Unter Berücksichtigung der Beschattung und des Sonnenschutzes [4] ergibt sich für die Sonneneinstrahlung hinter dem Fenster:

$$\dot{Q}_S = \left[A_1 \cdot (I_{dir,F} + I_{diff,F}) \cdot \tau(\eta_F) + (A - A_1) \cdot I_{diff,F} \right] \cdot b \quad (6)$$

Mit Gl. (1) bis Gl. (6) sind direkte und diffuse Strahlung auf Horizontalflächen aus dem Testreferenzjahr in direkte und diffuse Strahlung auf beliebig orientierte, transparente und nichttransparente Flächen umgerechnet.

Die Bestimmung der Aktionsgrößen erfolgt in gleicher Weise wie in VDI 2078 [4] beschrieben.

Die inneren Wärmelasten werden zweckmäßigerweise als Nutzenprofile (Bild 4) beschrieben, die durch Aneinanderreihung beliebige Lastverläufe darstellen können.

Raumreaktion konvektive Wärmelast

Die Reaktionswärmelasten $WL(l)$ werden für jeden Zeitpunkt k wie folgt berechnet:

$$WL(l)_k = \sum_{m=0}^3 A(l)_m \cdot E(l)_{k-m} + \sum_{n=1}^2 B(l)_n \cdot WL(l)_{k-n} \quad (7)$$

In Gl. (5) sind $A(l)_m$ und $B(l)_n$ die denormierten Gewichtungsfaktoren, die durch Umrechnung aus den normierten Gewichtungsfaktoren (für vier Raumtypen XL, L, M, S) entstehen (Hinweise für die Einordnung der Raumtypen finden sich im Anhang (Tabellen A 7 und A 8, die zugehörigen normierten Gewichtungsfaktoren in Tabelle A 9 und A 10). Dabei stellen die Denormierungsfaktoren $F(l)$ [4] den Bezug zum Realraum dar. Für den sofort wirksam werdenden Konvektivanteil an der Raumreaktion Wärmelast wird ebenfalls eine Denormierung (Durchgriff) [4] vorgenommen.

Mit dem Luftwert L_k [4] ergibt sich dann die Raumreaktion Wärmelast zu:

$$L_k = \dot{m}_{FL} \cdot c_L + \sum_{NR} (kA)_{NR} + \sum_{NR} \dot{m}_{NR} \cdot c_L + \dot{m}_{sonst} \cdot c_L \quad (8)$$

$$WL_k = \sum_{l=1}^6 [WL(l)_k + D(l) \cdot E(l)_k] + L_k \cdot E(3)_k \quad (9)$$

Stoffliche Raumbelastungen

Die zu berücksichtigenden stofflichen Raumbelastungen sind:

Die Referenzluftmenge m entspricht der Mindestaußenluftmenge, die dem Raum zur Einhaltung vorgegebener Nutzenanforderungen (Index N) zugeführt werden muß. Ihre thermische Raumbelastung geht als konvektives Wärmepotential in die Aktionsgröße $E(2)$ ein.

Der Referenzmassenstrom $\dot{m}_{0,N,L}$ ergibt sich zu:

$$\dot{m}_{0,N,L} = \max \{ \dot{m}_{Zu,Pers}; \dot{m}_{Zu,Stoff}; \dot{m}_{Zu,Prozess} \} \quad (10)$$

mit

$\dot{m}_{Zu,Pers}$ = hygienisch erforderlicher Zuluftmassenstrom

$\dot{m}_{Zu,Stoff}$ = Zuluftmassenstrom zur Einhaltung zulässiger Schadstoffkonzentrationen

$\dot{m}_{Zu,Prozess}$ = Zuluftmassenstrom zur Aufrechterhaltung chemischer Prozesse

Der Be- und Entfeuchtungsmassenstrom bestimmt sich aus vorgegebener Raumluftfeuchte und Außenluftmassenstrom:

$$\dot{m}F_{0,N} = \dot{m}_{Zu} \cdot (x_{0,N} - x_{Au}) \quad (11)$$

Für $\dot{m}F_{0,N} > 0$ liegt Befeuchtung und für $\dot{m}F_{0,N} < 0$ Entfeuchtung vor.

Die Be- und Entfeuchtungsenergie ergibt sich aus der Enthalpiedifferenz:

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_{Zu} \cdot (h_{0,N} - h_{Au}) \quad (12)$$

Für $\dot{Q}_0 > 0$ ergibt sich eine Befeuchtungs- und für $\dot{Q}_0 < 0$ eine Entfeuchtungsenergie.

Die Außenluftfeuchte und -enthalpie sind ebenfalls aus den Angaben des Testreferenzjahres zu bestimmen.

Jahresenergiebedarf

Zur Ermittlung des Jahresenergiebedarfs für Heizen und Kühlen wird die Raumreaktion Wärmelast für 8760 Stunden eines Jahres berechnet und aufsummiert:

$$\text{Jahresheizenergie: } Q_{0,Heiz} = \sum_{k=1}^{8760} WL_k \text{ für } WL_k < 0 \quad (13)$$

$$\text{Jahreskühlenergie: } Q_{0,Kühl} = \sum_{k=1}^{8760} WL_k \text{ für } WL_k > 0 \quad (14)$$

Dabei ist zu beachten, daß nur dann die Werte saldiert werden, wenn die Raumtemperatur bei nicht abgeführter Last die vorgegebenen Grenztemperaturen überschreitet.

Die hierzu benötigte Ist-Raumlufttemperatur ergibt sich durch

$$I\vartheta = \frac{-WL_k}{A(3)_0 + D(3) + L_k} + S\vartheta_{LR,K} \quad (15)$$

Wird die Last nicht abgeführt, weil die Temperaturänderung noch im zulässigen Bereich liegt, sind die Aktionsgröße $E(3)$ und die Reaktionswärmelast $WL(3)_k$ vor Ausführung des nächsten Zeitschrittes mit den Istwerten zu überschreiben:

$$E(3) = I\vartheta_{LR,K} - B\vartheta \quad (16)$$

$$WL(3)_k = WL(3)_k + A(3)_0 \cdot (I\vartheta_{LR,K} - S\vartheta_{LR,K}) \quad (17)$$

Der Jahresenergiebedarf für Befeuchten und Entfeuchten ergibt sich aus der Aufsummierung der Befeuchtungs- und Entfeuchtungsenergien:

Jahresentfeuchtungsenergie:

$$Q_{0,Entf} = \sum_{k=1}^{8760} \dot{m}_{Zu,k} \cdot \Delta h_k \text{ für } \Delta h < 0 \quad (18)$$

Jahresbefeuchtungsenergie:

$$Q_{0,Bef} = \sum_{k=1}^{8760} \dot{m}_{Zu,k} \cdot \Delta h_k \text{ für } \Delta h > 0 \quad (19)$$

Die Jahresenergien für Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten eines Gebäude mit N Räumen ergeben sich durch die zeitliche Überlagerung der stündlichen Raumlaster:

$$Q_{0,Geb} = \sum_{k=1}^{8760} \dot{Q}_{0,Geb,k} = \sum_{k=1}^{8760} \sum_{n=1}^N \dot{Q}_{0,k,n} \quad (20)$$

Beispielrechnungen und Vergleich

Für das im informativen Anhang L des Schlußentwurfs der prnEN 832 abgebildete Beispiel eines einfachen Wohngebäudes, das als „Einzonnenmodell“ berechnet wird, sind nach

- VDI 2067, Blatt 2 – gültige Fassung [5]
- Wärmeschutzverordnung WSV 1995 [6]

- prEN 832 – Schlußentwurf [7]
- VDI 2067, Blatt 11 – Entwurf [8]
- Simulationsrechnung (TRNSYS) [9,10]

mit gleichen Bauteilabmessungen und -eigenschaften die Ergebnisse in Bild 6 zusammengestellt.

In Bild 5 sind die Ergebniswerte für $Q_{0,N}$ und $Q_{3,N}$ für das jeweilige Verfahren gegenübergestellt. Dabei gibt $Q_{0,N}$ den Jahresheizenergiebedarf für den Raum (das Gebäude) ohne Anlagentechnik an, während $Q_{3,N}$ den Jahresheizenergiebedarf einschließlich Anlagentechnik beziffert. Der Index N weist darauf hin, daß in der Berechnung die vorgegebenen Nutzenanforderungen berücksichtigt sind. Prinzipiell sind nicht alle Verfahren direkt vergleichbar, weil in VDI 2067, Blatt 2 ein Teil der eigentlichen Anlagentechnik durch den Faktor f_4 (Einfluß der Regelausstattung und des Nutzerverhaltens) berücksichtigt wird und wie auch in der WSV 95 mit den jeweils standardisierten Werten für die inneren Wärmegewinne gerechnet wurde. Die Werte für $Q_{0,N}$ sind für den Vergleich mit Entwurf VDI 2067, Blatt 11 und Simulation [9, 10] mit gleichem Nutzen berechnet wie in prEN832 vorgegeben. Der Jahresheizenergiebedarf einschließlich Anlagentechnik $Q_{3,N}$ ist vereinfacht mit einer gleichgesetzten Aufwandszahl von $\beta = 1,33$ (75% Nutzungsgrad aus prEN832) bestimmt.

Wie bereits aus früheren Untersuchungen bekannt, wird der Jahresheizenergiebedarf für sehr gut wärmegeämmte Gebäude mit relativ geringen inneren Wärmegewinnen nach der VDI 2067, Blatt 2 und der WSV 95 zu hoch bewertet.

Wesentlich für das hier vorgestellte Verfahren Entwurf VDI 2067, Blatt 11 ist jedoch der Vergleich mit prEN 832 und der Simulationsrechnung. Es zeigt sich gute Übereinstimmung, insbesondere zu den Ergebnissen der Simulationsrechnung.

Zusammenfassung

Die wesentlichen neuen Rechenansätze im Entwurf VDI 2067, Blatt 11 sind vorgestellt und in einem ersten Vergleich an einem einfachen Einfamilienwohnhaus mit anderen Verfahren zur Bestimmung des Jahresheizenergiebedarfs gegenübergestellt. Die gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulationsrechnung ist nicht überraschend. Daß bei dem einfachen Gebäude mit einfachen Randbedingungen auch gute Übereinstimmung mit der prEN 832 besteht, ist ebenfalls nicht überraschend. In weiteren Fallbeispielen wird

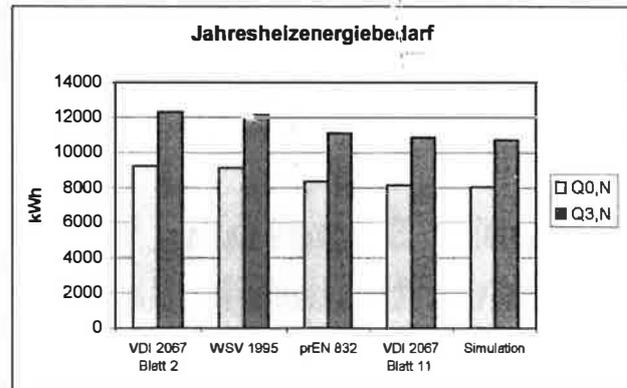


Bild 5 Vergleichende Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs.

untersucht werden, wie sich frei wählbare Randbedingungen hinsichtlich der Nutzenanforderungen auswirken werden.

Eine wesentliche Eigenschaft des Verfahrens nach Entwurf VDI 2067, Blatt 11 blieb im Rahmen der vorstehenden Betrachtungen unerwähnt: Der Rechengang hat für beliebige Gebäude (nicht nur für Wohngebäude) Gültigkeit und liefert quasi gleichzeitig die Jahreskühl-, be- und entfeuchtungsenergie. Eine diesbezügliche Untersuchung wird demnächst vorgestellt.

[H 684]

Literaturangaben

- [1] Hirschberg, R.: Zukünftige VDI 2067 – „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“. Rechenverfahren zum Energiebedarf von beheizten und klimatisierten Gebäuden. HLH 4 (1997) Nr. 8, S. 24–26.
- [2] Stephenson, D.; Mitalas, G.: Room Thermal Response Factors. ASHRAE-Trans. 73 (1967). No. 2019.
- [3] Rietschel, Hrsg. Esdorn, H.: Raumklimattechnik, Band 1 Grundlagen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 16. Auflage 1994.
- [4] VDI 2078: Berechnung der Kühllast klimatisierter Gebäude (VDI-Kühllastregeln). VDI-Verlag, Düsseldorf, Juli 1996.
- [5] VDI 2067, Blatt 2: Raumheizung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [6] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung). Bundesgesetzblatt Teil 1, Bonn, 24.08.94, S. 2121–2132.
- [7] prEN 832: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude. CEN, Brüssel, Schluß-Entwurf Februar 1998.
- [8] Entwurf VDI 2067, Blatt 11: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Rechenverfahren zum Jahresenergiebedarf beheizter und klimatisierter Gebäude. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [9] TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA 1983.
- [10] Bauer, M.: Durchführung der Simulationsrechnung. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Heiz- und Raumlufttechnik. 1998 – unveröffentlicht.