

Energieeffiziente Lüftung von Bürogebäuden

Teil 1

Brian Cody, Graz/Österreich

Wie energieeffizient ist eine mechanische Lüftung in Bürogebäuden, verglichen mit einer normalen Fensterlüftung? Wenn öffnbare Fenster in einem Bürogebäude vorgesehen werden, ist eine zusätzliche mechanische Lüftung bei extremen Außenluftbedingungen notwendig bzw. wie ökonomisch oder ökologisch ist es, diese vorzusehen? Wenn eine mechanische Lüftung für extreme Außenluftbedingungen vorgesehen wird, wie ökonomisch bzw. ökologisch ist es, eine Fensterlüftung zusätzlich vorzusehen, die u.U. aufgrund von Wind- bzw. Schallproblemen aufwendig mit Doppelfassaden, automatischer Steuerung etc. ausgebildet werden muss?

Die Frage ist, ob es Lösungen in Form von Hybridsystemen gibt, welche die Vorteile der beiden Systeme Fensterlüftung und kontrollierte Lüftung in einem System vereinen. Welche Anforderungen wären an ein solches Hybridsystem zu stellen und wie könnte ein solches System aussehen? Anhand von Ergebnissen eines Forschungsprojektes am Institut für Gebäude und Energie an der Technischen Universität Graz wird diesen Fragen nachgegangen. Im Beitrag werden die planerischen Kenndaten der üblichen mechanischen Lüftungsanlagen in Bürogebäuden auch kritisch hinterfragt. Mögliche Lösungen werden anhand von Projekten aus der Praxis veranschaulicht.

Aufgaben eines Lüftungssystems in einem Bürogebäude

Die Hauptaufgaben eines Lüftungssystems in einem Bürogebäude sind die Zufuhr der hygienischen erforderlichen Außenluftmenge für die dort sich aufhaltenden Personen und der Abtrans-

port von verbrauchter Luft und Schadstoffen.

Gemäß DIN EN 13379 sind bei Zugrundelegung einer hohen Raumluftqualität (RAL 2) und Nichtraucher-Bereich folgende Außenluftstraten in Bürogebäuden bei mechanischer Lüftung vorzusehen: üblicher Bereich 36-54 m³/h pro Person
Standardwert 45 m³/h pro Person

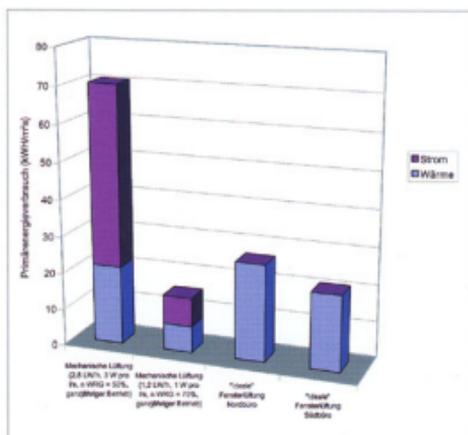
Alternativen für die Lüftung von Bürogebäuden

Die gängigsten Arten der Lüftung in Bürogebäuden heute sind folgende:

- Fensterlüftung (zentrale Steuerung möglich; z.B. für Nachtauskühlung)
- zentrale mechanische Lüftung (Steuerung entweder zentral über ein Zeitprogramm, in Abhängigkeit vom Außenluftzustand und/oder Wind, Einzelraumsteuerung für einzelne Büros bzw. Zonen oder eine Kombination dieser Möglichkeiten)
- dezentrale mechanische Lüftung (beispielsweise ein Gerät pro Geschoss, pro Zone oder pro Raumachse)

Bild 1

Vergleich Primärenergieverbrauch (Lufterwärmung und -förderung) mechanischer Lüftung mit Fensterlüftung



Fragestellungen

□ Wie energieeffizient ist eine mechanische Lüftung in Bürogebäuden, verglichen mit einer normalen Fensterlüftung?

Autor



Univ. Prof. Brian Cody ist Vorstand des Instituts für Gebäude und Energie an der Technischen Universität Graz. In seiner Rolle als Berater des weltweit operierenden Ingenieurbüros Arup wird er hauptsächlich in der High-End konzeptuellen Planung von Projekten konsultiert.

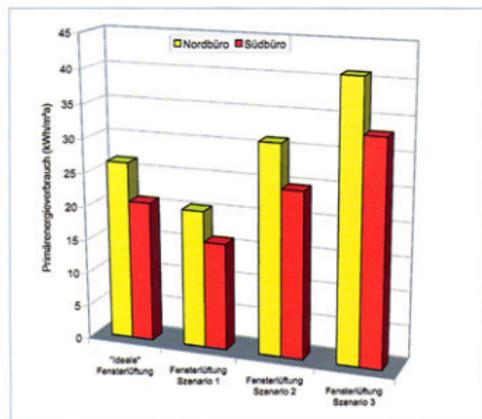


Bild 2a

Einfluss des Nutzerverhaltens bei Fensterlüftung

□ Sind die planerischen Kenndaten der heute üblichen mechanischen Lüftungsanlagen für Bürogebäude sinnvoll?

□ Wenn offenbare Fenster in einem Bürogebäude vorgesehen werden, ist eine zusätzliche mechanische Lüftung bei extremen Außenluftbedingungen notwendig bzw. wie ökonomisch oder ökologisch ist es, diese vorzusehen?

□ Wenn eine mechanische Lüftung für extreme Außenluftbedingungen vorgesehen wird, wie ökonomisch bzw. ökologisch ist es, eine Fensterlüftung zusätzlich vorzusehen, die u.U. aufgrund von Wind- bzw. Schallproblemen mit Doppelfassaden, automatischer Steuerung etc. aufwendig ausgebildet werden muss?

□ Gibt es Lösungen in der Form von Hybridsystemen, welche die Vorteile von beiden Systemen (Fensterlüftung, kontrollierte Lüftung) in einem System vereinen? Welche Anforderungen wären an ein solches Hybridsystem zu stellen und wie könnte ein solches System aussehen?

Untersuchungen

Daten zum untersuchten Raum

Breite: 4 m, Tiefe: 5,5 m, Höhe: 3 m
Arbeitszeit 08:00 – 18:00 Uhr, 2 Personen, 15 W/m² Büromaschinen
Fassade: 80 % Glasanteil, innenliegender

Außentemperatur	< 0 °C	0–5 °C	5–10 °C	10–15 °C	15–20 °C	> 20 °C
Szenario 1	2 Min.	5 Min.	6 Min.	8 Min.	15 Min.	60 Min.
Szenario 2	5 Min.	7 Min.	8 Min.	10 Min.	20 Min.	60 Min.
Szenario 3	7 Min.	9 Min.	10 Min.	12 Min.	30 Min.	60 Min.

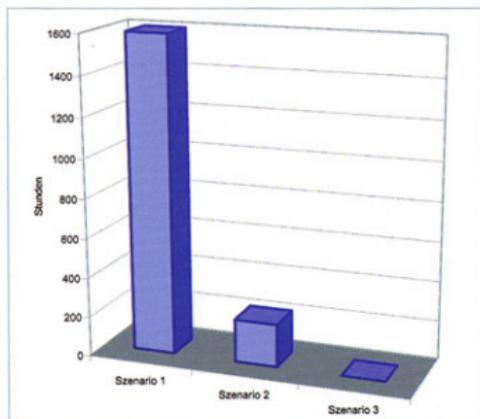


Bild 2b

Anzahl der Stunden mit zu geringer Außenluftvolumenstromversorgung für verschiedene Stoßlüftungsszenarien

Blendschutz

Offenbares Fenster: 0,8 m x 1,5 m hoch, Öffnungsfläche 1,2 m²

Klimadaten: Testreferenzjahrsdaten für Frankfurt-Flughafen

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde von einem spezifischen Luftvolumenstrom von 40 m³/h pro Person ausgegangen. Dieser Wert entspricht der bis Mai dieses Jahres geltenden DIN 1946 und liegt in der Mitte des in der neuen DIN EN 13779 angegebenen Bereiches; allerdings geringfügig weniger als der dort angegebene Standardwert von 45 m³/h.

Fensterlüftung

Die Stoßlüftung über Fenster wird für den Zweck dieser Untersuchungen als rein thermisch bedingter einseitiger Luftaustausch über eine große Öffnung abgebildet. Bei Wind und offenen Innentüren kann sich natürlich eine viel höhere Luftströmung einstellen als in diesem Modell abgebildet. Allerdings kann man davon ausgehen, dass in einer solchen Situation der Nutzer das Fenster schneller wieder schließen würde, so dass der für die vorliegenden energetischen Untersuchungen relevante mittlere Luftaustausch annähernd korrekt abgebildet wird.

Die sich einstellende Luftströmung wird mit folgender Gleichung [1] berechnet:

$$q_v = (C_d) (A/3) (\Delta\theta h_o g / (\theta_m + 273))^{0,5}$$

mit

V Volumenstrom (m³/s)

C_d Öffnungsbeiwert,

A Fläche des Fensters (m²)

Δθ Temperaturunterschied zwischen Raum und Außen (K),

h_o Höhe des Fensters (m)

θ_m mittlere Temperatur (°C).

Während dies sicherlich ein sehr vereinfachtes Modell der Realität darstellt, ist es vor dem Hintergrund des komplexen Verhaltens der Fensterlüftung durch Personen für diesen Zweck ausreichend geeignet. Aufgrund der unberechenbaren Natur dieses Vorgangs lässt eine Erhöhung der Modellkomplexität eine spürbare Verbesserung in der Genauigkeit der Ergebnisse nicht erwarten. Wesentlich ist, dass die Abhängigkeit der Antriebskraft und der Dauer der Lüftung von der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen realitätsnah grob abgebildet wird.

Mechanische Lüftung

Folgende Kenndaten werden verwendet, um die mechanische Lüftung abzubilden:

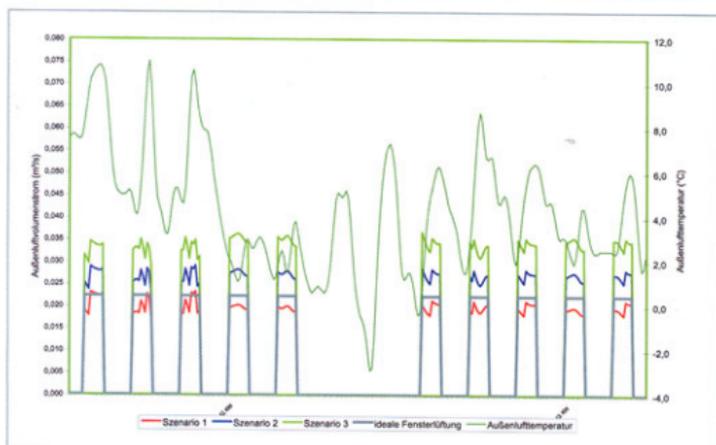
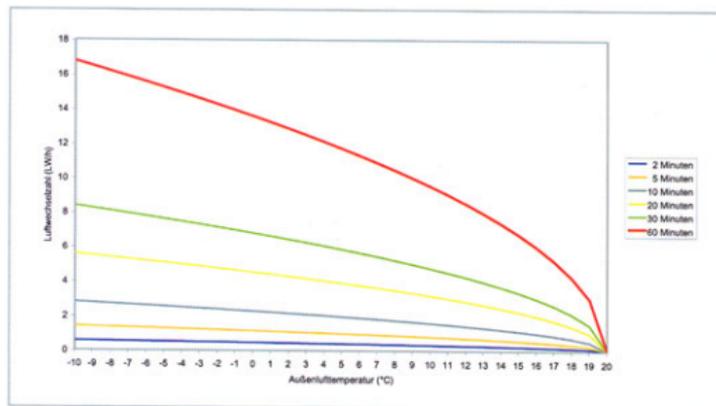
LW/h Luftwechsel pro Stunde

η_{WRG} Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung

P_{System} Gesamtenergiekennzahl des Lüftungssystems (Gesamt-

Tabelle 1

Stoßlüftungsdauer (Minuten pro Stunde)



energieverbrauch sämtlicher im System integrierten Ventilatoren bezogen auf die geförderte Luftmenge (W/l_s^{-1})

Annahmen

- Es wird von einer sehr luftdichten Außenhaut ausgegangen, so dass eine Infiltration vernachlässigt wird
- es wird davon ausgegangen, dass die Fenster während des Betriebs einer mechanischen Lüftung von den Nutzern nicht geöffnet werden
- bei der mechanischen Lüftung wird von einer Quellaftung mit einer Zulufttemperatur von 20 °C ausgegangen
- bei der Umrechnung in Primärenergie wird ein Faktor von 1 für thermische und 3 für elektrische Energie verwendet

Methodik der Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden anhand von dynamischen Berechnungen und

Bild 3b

Stoßlüftungsszenarien

thermischen Computersimulationen durchgeführt.

Für die Berechnung der Wärmeenergie zur Erwärmung der Außenluft bei der mechanischen Lüftung wird folgende Gleichung verwendet:

$$P_T = \rho_R q_{vz} c_p (1 - \eta_{WRG})(\theta_R - \theta_A) - q_{vz} (\Delta p_Z + \eta_{WRG} \Delta p_A) / \eta_V$$

Die Wärmeabgabe der Ventilatoren wird dabei berücksichtigt. Für die Berechnung der elektrischen Energie zur Förderung der Luft wird folgende Gleichung verwendet:

$$P_E = (\Delta p_Z + \Delta p_A) q_{vz} / \eta_V$$

Für die Berechnung der Wärmeenergie zur Erwärmung der Außenluft bei der natürlichen Lüftung wird die Abdeckung

Bild 3a

Luftwechselraten bei Stoßlüftung

einer ggf. vorliegenden Kühllast mitberücksichtigt:

$$P_T = \rho_R q_{vz} c_p (\theta_R - \theta_A) - \Phi_K$$

mit

- P_T thermische Energieleistung (kW)
- θ_R Temperatur der Raumluft (°C)
- P_E elektrische Energieleistung (kW)
- θ_A Temperatur der Außenluft (°C)
- c_p spez. Wärmekapazität (kJ/kgK)
- Δp_Z Druckverlust Zuluftsystem (kPa)
- q_{vz} Zuluftvolumenstrom (m^3/s)
- Δp_A Druckverlust Abluftsystem (kPa)
- η_{WRG} Wirkungsgrad Wärmerückgewinnung
- η_V Gesamtwirkungsgrad Ventilator
- P_K Dichte der Raumluft (kg/m^3)
- Φ_K Kältelast (kW)

Untersuchungen und Ergebnisse

Als Ausgangspunkt der Untersuchungen wurde zunächst der Primärenergiebedarf (für Luftwärmung und -förderung) der folgenden Optionen berechnet (s. Bild 1):

- eine konventionelle mechanische Lüftung, so wie sie in einer Vielzahl der in den letzten Jahren fertig gestellten Bürogebäuden in Deutschland ausgeführt wurde; 2,5 l_w/h , $\eta_{WRG} = 50\%$, $\epsilon_{System} = 3 W$ pro l/s . Es wird angenommen, dass die Anlage ganzjährig während der Arbeitszeit im Betrieb ist
 - eine in Bezug auf die Energieeffizienz optimierte mechanische Lüftung, welche dem Raum mit dem nach DIN EN 13779 hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom versorgt und die folgenden Kennzahlen aufweist; 1,2 l_w/h , $\eta_{WRG} = 70\%$, $\epsilon_{System} = 1 W$ pro l/s . Es wird angenommen, dass die Anlage ganzjährig während der Arbeitszeit im Betrieb ist
 - 'ideale' Fensterlüftung (Fenster werden so gesteuert, dass genau die hygienisch erforderliche Außenluftmenge während der Arbeitszeit zugeführt wird)
- Dem Bild 1 kann man entnehmen, dass die konventionelle mechanische Lüftung in Bürogebäuden bei ganzjährigem Betrieb verglichen mit der idealen Fensterlüftung in Bezug auf Energieverbrauch sehr schlecht abschneidet. Die

Bild 4a

Heizgrenztemperatur

hocheffiziente mechanische Lüftung dagegen bietet eine signifikante Energieeinsparung im Vergleich. Da eine solche ideale Fensterlüftung in der Praxis jedoch nicht realistisch ist, gilt es nun den Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch der Fensterlüftung zu überprüfen. Hierfür werden 3 Szenarien zugrunde gelegt, die ein hypothetisches Nutzerverhalten in Bezug auf die Fensterlüftung annehmen (s. Tabelle 1).

Dem Bild 2a kann der Einfluss des Nutzerverhaltens entnommen werden. Bei Szenario 1 stellt sich ein niedrigerer Energieverbrauch als bei der idealen Situation ein. Dafür wird der Raum mit dem hygienisch erforderlichen Außenluftvolumenstrom für einen Großteil des Jahres nicht versorgt (s. Bild 2b). Szenario 3 zeigt, dass der Energieverbrauch bedingt durch eine Fehlbedienung auch viel höher als im idealen Fall ausfallen kann.

Bild 3a zeigt das Verhältnis zwischen der Außenlufttemperatur und dem sich einstellenden Volumenstrom für verschiedene Dauern der Stoßlüftung bei der angenommenen einseitigen Lüftung. Bild 3b zeigt die Volumenströme, die sich für die verschiedenen Szenarien während zwei Wochen im Frühling einstellen.

Ein wichtiger Grund, weshalb die Fensterlüftung in Bürogebäuden, verglichen mit einer mechanischen Lüftung, gut abschneidet, ist die Tatsache, dass

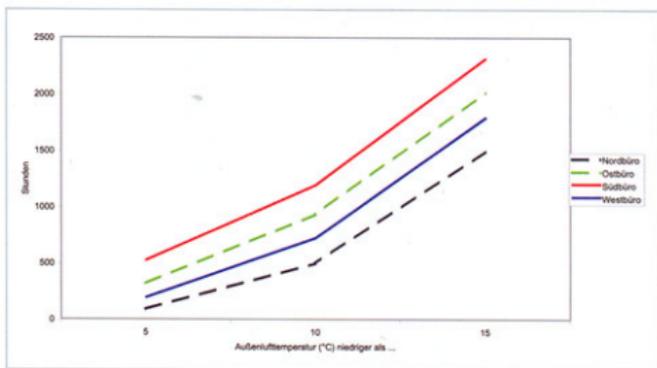
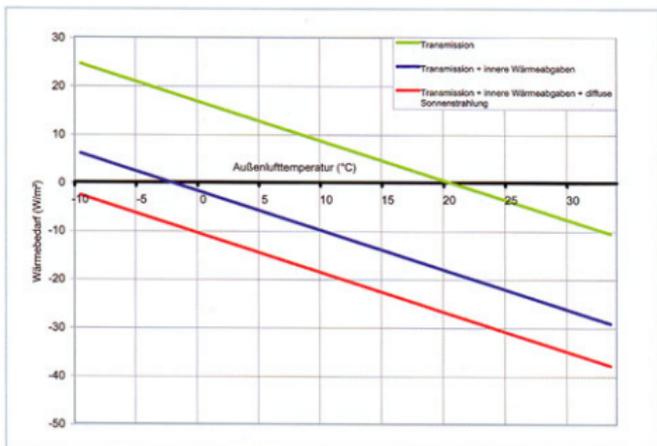


Bild 4b

Anzahl der Stunden mit einem Kühlbedarf bei niedrigen Außenlufttemperaturen

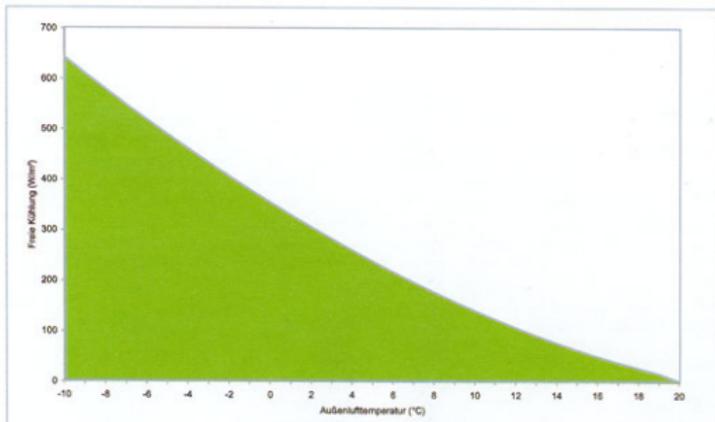


Bild 4c

Freies Kühlungspotential bei $T_r = 24\text{ }^\circ\text{C}$

bei der natürlichen Lüftung ein Potential für freie Erwärmung der Außenluft durch Innenlasten und solare Gewinne gegeben ist. Bild 4a zeigt die Heizgrenztemperaturkurve für das untersuchte Büro. Dem Bild 4b kann die Anzahl der

Stunden, bei denen ein Kühlbedarf bei niedrigen Außenlufttemperaturen entsteht, entnommen werden. Hieraus ist erkennbar, dass die Orientierung eine wichtige Rolle spielt. Die Anzahl der Stunden für das nach Westen ausgerich-

tete Büro ist deshalb geringer als für das nach Osten ausgerichtete Büro, weil die Außenlufttemperatur am Nachmittag, wenn die Westfassade besonnen wird, höher ist. Bild 4c zeigt das Potential der freien Kühlung durch die Fensterlüftung

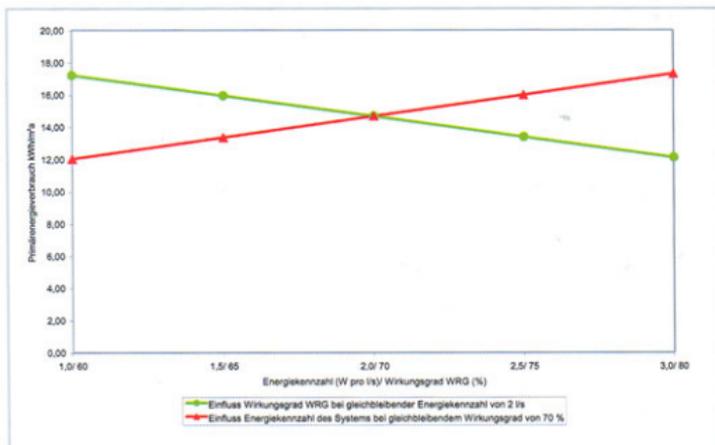
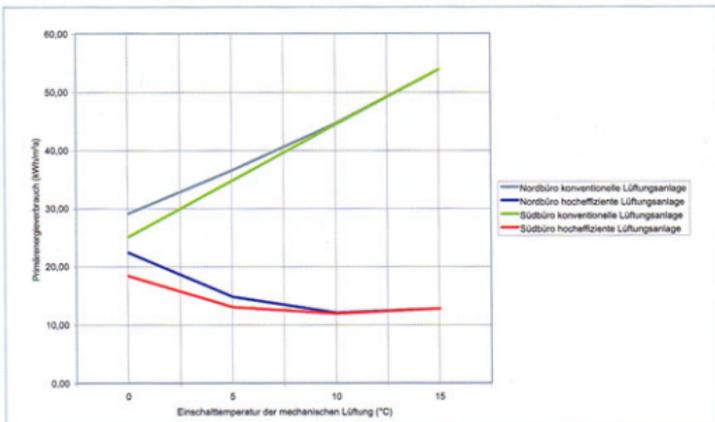


Bild 6

Einfluss der Energiekennzahl und des Wirkungsgrades der WRG

in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Laut der Heizgrenzkurve ergibt sich für das Büro auch bei einer Außenlufttemperatur von 0 °C eine Kühllast. Das freie Kühlungspotential bei dieser Außenlufttemperatur dagegen beträgt ca. 320 W/m²!

Eine in den letzten Jahren in Deutschland häufig ausgeführte Variante ist das so genannte „Mixed-Mode-Lüftungskonzept“, das ursprünglich in England entwickelt wurde. Bei diesem Konzept werden sowohl eine mechanische Lüftung als auch öffnende Fenster vorgesehen. Die mechanische Lüftung wird bei Überschreitung bzw. Unterschreitung bestimmter Grenzwerte der Außenlufttemperatur eingeschaltet, typischerweise

bei Außentemperaturen unterhalb von 5 °C und oberhalb von 22 °C. In den restlichen Zeiten werden die Büros über Fenster natürlich gelüftet. Der Einfluss der Wahl des unteren Grenzwertes für das untersuchte Büro kann man dem Bild 5 entnehmen. Hier zeigt sich, dass bei einer hocheffizienten Lüftungsanlage die optimale Einschalttemperatur bei ca. 10 °C liegt. Bei der konventionellen Anlage dagegen sollte der Einschaltzeitpunkt energetisch gesehen so tief wie möglich liegen. Hier sollte man die Temperatur allein aus Komfortgründen (Zugerscheinungen) wählen. Bei der Wahl der Einschalttemperatur spielt natürlich das thermische Verhalten des Raumes auch eine Rolle, die zu berücksichtigen ist. Der im Bild 5 dargestellte Energieverbrauch beinhaltet den Strombedarf der Ventilatoren in der Winterperiode unterhalb der angegebenen Einschalttemperatur, nicht jedoch den Strombedarf in der Sommerperiode oberhalb der angegebenen Einschalttemperatur.

Bild 5

Einfluss der Wahl der Einschalttemperatur bei der mechanischen Lüftung

Aus Bild 5 lassen sich zudem folgende Daten ableiten:

- eine konventionelle mechanische Lüftung mit einer Einschalttemperatur von 5 °C weist einen Primärenergiebedarf von ca. 35 kWh/m²a auf
- eine hocheffiziente mechanische Lüftung mit einer für das untersuchte Büro optimalen Einschalttemperatur von 10 °C weist einen Primärenergiebedarf von ca. 12 kWh/m²a auf

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde eine Raumtemperatur von 20 °C für alle Varianten zugrunde gelegt. In der Praxis wird jedoch gemäß DIN 1946 bei der mechanischen Lüftung zumeist eine Raumtemperatur von 22 °C gewählt. Die entsprechende energetische Einbuße für die höhere Temperatur liegt laut Ergebnisse dieser Untersuchungen in der Größenordnung von 6 bis 9 %. Nach der gleichen Norm durfte der Außenluftvolumenstrom bei Außenlufttemperaturen unterhalb von 0 °C auf 50 % reduziert werden. Die energetische Ersparnis dieser Maßnahme liegt in der Größenordnung von 6 bis 7 %.

Bild 6 zeigt den Einfluss des Wirkungsgrades der Wärmerückgewinnung und der Energiekennzahl (W pro l/s) des Systems. Ausgehend von einem System mit folgenden Kennzahlen – 1,2 LW/h, $\eta_{WRG} = 70\%$, 2 W pro l/s, Einschalttemperatur 10 °C – sieht man, dass eine Optimierung der Effizienz der WRG von 70 % auf 80 % ungefähr die gleiche Wirkung hat, wie eine Optimierung der Effizienz des Systems von 2 W pro l/s auf 1 W pro l/s bzw. eine Verschlechterung der Effizienz der WRG auf 60 % ungefähr die gleiche Wirkung hat, wie eine Verschlechterung der Effizienz des Systems von 2 W pro l/s auf 3 W pro l/s.

(Wird fortgesetzt)

Literatur

[1] CIBSE Guide, Volume A, Design Data, Chartered Institute of Building Services Engineers, London 1988.