

Notwendigkeit oder Luxus?

Prof. Fritz Steimle*

In den letzten Jahren ist eine deutliche Tendenz zum umweltbewußten Umgang mit Energie zu beobachten. Neben ökologischen stehen aber immer häufiger ökonomische Gesichtspunkte im Mittelpunkt. Dies führte zu zum Teil drastischen Energieeinsparungen, die im Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung unerwünschte Begleiterscheinungen, wie z. B. das Sick-Building-Syndrome, mit sich brachten.

Bei allen Anreizen, Energie und Geld zu sparen, indem die Gebäude so wirtschaftlich wie möglich betrieben werden, sollte der Raumnutzer, der Mensch mit seinen Bedürfnissen, nicht vergessen werden. Denn die Leistung, die er erbringen kann, ist wesentlich von seinen subjektiven Empfindungen abhängig. Diese beziehen sich nicht nur auf seine Arbeitsaufgabe, seine Vorgesetzten und Kollegen, sondern auch auf sein Behaglichkeitsempfinden in bezug auf die Umgebungsbedingungen. Menschen befinden sich heute häufig an einem Arbeitsplatz, dessen Umgebungsbedingungen sie weitgehend nicht mehr selbst, wie durch Öffnen des Fensters, Betätigen des Heizkörperventils, etc., beeinflussen können. Diese Aufgaben werden meist durch die Regelung bzw. das Gebäudema-

nagement übernommen, bei dem die Behaglichkeitsanforderungen des Menschen soweit wie möglich berücksichtigt werden sollten.

Der Heizenergiebedarf in Gebäuden wird infolge besserer Wärmedämmung immer mehr durch die Lufterneuerungsrate bestimmt. Aus dieser Betrachtung wird die Minimierung des Luftaustausches angestrebt, was sehr schnell zu einer starken Verschlechterung der Luftqualität führt. Dies ist häufig die wichtigste Ursache des Sick-Building-Syndroms. Dabei fühlen sich die Menschen sowohl in klimatisierten als auch in nichtklimatisierten Gebäuden unwohl und klagen über gesundheitliche Beeinträchtigungen wie Kopfschmerz, Schwindel oder Übelkeit.

Einfluß der Lufterneuerung

Die einem Aufenthaltsraum zugeführte Luft muß neben der Wärme und dem Wasserdampf auch das von den Menschen ausgeatmete CO_2 und die Geruchsstoffe aus dem Raum transportieren: Geht man von einer durchschnittlichen Atemluftmenge von $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person und einer CO_2 -Konzentration der ausgeatmeten Luft von 4 % aus, so ist zur Verdünnung dieser Atemluftmenge auf eine CO_2 -Konzentration von 0,14 % eine Frischluftmenge von ca. $14 \text{ m}^3/\text{h}$ notwendig. Hierbei wurde vorausgesetzt, daß die zugeführte Luft völlig CO_2 -frei war. Der CO_2 -Gehalt der Außenluft liegt jedoch heute im Mittel bei 0,033 %. In Ballungsgebieten ist dieser Anteil noch etwas höher. Rechnet man mit einer CO_2 -Konzentration der zugeführten Luft von 0,04 Volumenprozent, so ist zur Verdünnung der Atemluft auf eine CO_2 -Konzentration von 0,14 % eine Luftmenge von $20 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person notwendig. Bei einem Anstieg der CO_2 -Konzentration der zugeführten Luft auf 0,1 % müssen $50 \text{ m}^3/\text{h}$ Luft je Person zugeführt werden.

Eine CO_2 -Konzentration von 0,14 Volumenprozent wird als oberer Grenzwert für Büros und Versammlungsräume angesehen; es ist jedoch ein Wert von 0,10 Volumenprozent als noch hygienisch zulässiger Grenzwert für dauernd bewohnte Räume anzustreben. Bei einem zulässigen CO_2 -Gehalt der Raumluft von 0,1 % und einer Konzentration der zugeführten Luft von 0,04 % müssen ca. $35 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person zur Verdünnung der Atemluft aufgewendet werden.

Bemessung der Außenluftfrate

Bei der Bemessung der zugeführten Luftmenge geht man davon aus, daß die Luftverschlechterung im wesentlichen durch die anwesenden Personen verursacht wird und bezieht deshalb die zuzuführende Luftmenge auf die Zahl der Personen. In DIN 1946 sind Mindestmengen für die zuzuführende Außenluftfrate von 20 (Räume mit Rauchverbot) bzw. $30 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person (Räume mit Raucherlaubnis) angegeben. Die Norm empfiehlt eine Erhöhung um $10 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person aus hygienischen Gründen. In DIN 1946, Blatt 2, werden als Außenluftfraten für Büroräume 30 bis $50 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person angegeben. Untersuchungen haben gezeigt, daß in Räumen, in denen geraucht wird, ca. $70 \text{ m}^3/\text{h}$ Außenluft je Person zuzuführen sind. Bei Räumen mit Rauchverbot wären $50 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person anzustreben. Diese oberen Werte gelten besonders für Räume mit festverglasteten Fenstern.

Bei diesen Werten orientiert sich die Ermittlung des Lufterneuerungsbedarfs ausschließlich am Menschen als Schadstoffquelle, der durch seine Atmung die Raumluft mit CO_2 anreichert. Bild 1 zeigt den Anstieg der CO_2 -Konzentration in einem fugendichten Raum bei einer Belegung mit zwei Personen. Ebenfalls eingezeichnet ist der MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration), der angibt wie hoch die Schadstoffkonzentration in der Raumluft sein darf, wenn der Mensch ihr an einem Arbeitstag von durchschnittlich acht Stunden ausgesetzt ist. In den MaRaK-Werten (Maximale Raumkonzentration) ist dagegen eine Aufenthaltsdauer von 24 Stunden berücksichtigt, wie dies zum Beispiel in Wohnungen, Krankenhäusern und Pflegeheimen der Fall ist. Der MaRaK-Wert entspricht hierbei der CO_2 -Konzentration von 0,1 Volumenprozent, der bereits im Jahre 1858 von Pettenkofer gefordert wurde und daher auch Pettenkofer-Zahl heißt. In Büros und öffentlichen Versammlungsräumen darf die Konzentration nicht mehr als 0,15 Volumenprozent CO_2 betragen.

* Prof. Dr.-Ing. Fritz Steimle, Universität Essen, Fachbereich Angewandte Thermodynamik, Postfach 10 37 64, 45037 Essen, Telefon (02 01) 1 83 26 00, Telefax (02 01) 1 83 25 84, E-Mail: fritz.steimle@uni-essen.de

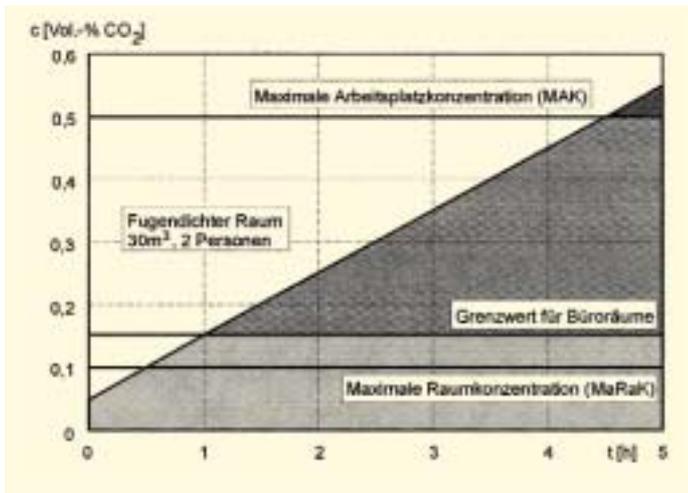


Bild 1 Anstieg der CO₂-Konzentration in einem fugendichten Raum

Aus Bild 1 kann man entnehmen, daß bereits nach 30 Minuten der MaRaK-Wert, nach einer Stunde der zulässige Grenzwert für Büros und nach 4,5 Stunden der MAK-Wert erreicht wird. Eine ausreichende Raumbelüftung ist daher zwingend notwendig. Diese ist jedoch nicht nur abhängig von der Personenzahl und der Aufenthaltsdauer, sondern auch vom Aktivitätsgrad der Raumnutzer (Bild 2). Die Norm sieht eine Verminderung der Außenluftfrate bei Außentemperaturen unterhalb 0 °C und oberhalb 26 °C vor, um unwirtschaftlich große Erhitzer bzw. Kühler zu vermeiden. Man sollte aber davon absehen, die Außenluftfrate unter 30 m³/h je Person abzusenkten.

Fanger, olf und dezipol

In den letzten Jahren verstärkten sich die Tendenzen, auch alle anderen, emissionsverursachenden Objekte oder Tätigkeiten bei der Berechnung der Luftmenge zu berücksichtigen. Zu den Schadstoffquellen in einem Raum sind insbesondere Baumaterialien und Einrichtungsgegenstände zu zählen, des weiteren Tätigkeiten wie z. B. Rauchen, Drucken und Kopieren. Auch die Außenluft, insbesondere in Ballungsgebieten, kann zur Schadstoffbelastung beitragen. Die Bandbreite der Schadstoffe reicht dabei von CO₂ über biologische Aerosole, Formaldehyd, Radon und Asbest bis hin zu Tabakrauch und Gerüchen. Vorreiter auf diesem Gebiet war Fanger, der die von einer „Normperson“ ausgehende Luftverunreinigung mit der Einheit 1 olf (abgeleitet von olfaction = Geruch) bezeichnete. Diese „Normperson“ entspricht einem durchschnittlichen Erwachsenen, der sitzend in einem Büro oder ähnlichem nicht gewerblichen Arbeitsraum mit einer behaglichen Raumtemperatur und einem Hygienestan-

dard von 0,7 Bädern pro Tag beschäftigt ist. Ein Raucher, der raucht, bringt es dabei auf 25 olf und ein Raucher, der nicht raucht, weist noch eine erhöhte Luftverunreinigung von immerhin 6 olf auf.

Weiterhin definierte Fanger den Begriff dezipol (abgeleitet von „pollution“ = Verunreinigung): Ein dezipol ist die Luftverunreinigung, die entsteht, wenn 10 l/s reine Luft mit einem olf verunreinigt werden. Diese Erkenntnisse setzten sich zunehmend durch und wurden in die DIN 1946 Teil 2 aufgenommen, was zur Definition des schadstoffbezogenen Außenluftvolumenstromes führte:

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{G}}{c_i - c_o}$$

\dot{G} = gesamte Belastung
 c_i = zulässige Konzentration
 c_o = Außenluftkonzentration

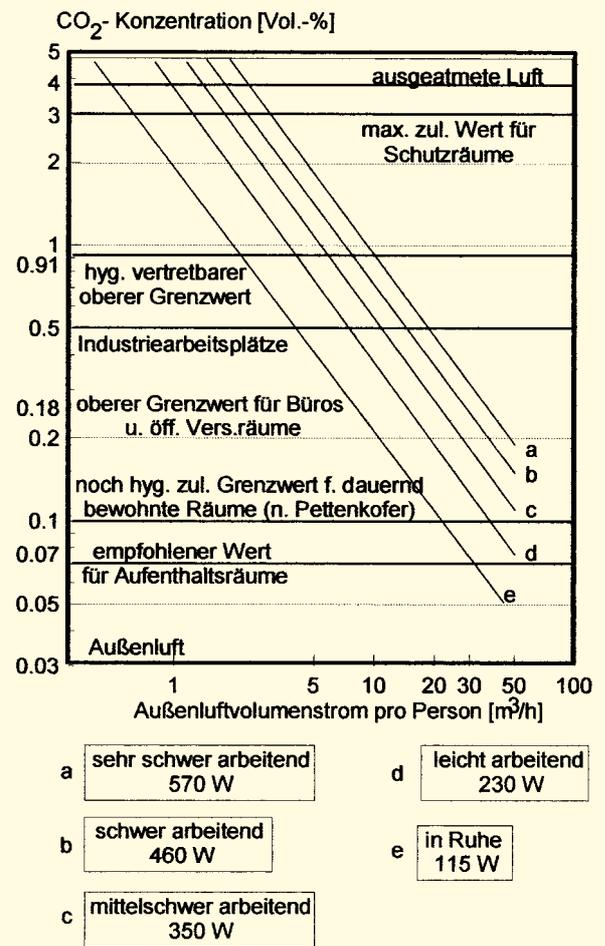


Bild 2 Erforderliche Mindest-Frischluftfrate

Zur Erzielung eines reduzierten Luftvolumenstromes und damit verringerter Kosten, ist bereits bei der Planung und Einrichtung darauf zu achten, daß baubiologisch einwandfreie Stoffe verwendet, bzw. schadstoffemittierende Produkte aus den Räumen entfernt werden. Dies wußte schon Pettenkofer, der bereits 1858 schrieb: „Ein Raum, welcher einen verwesenden Misthaufen einschließt, wird trotz aller Ventilation eine ekelhafte Wohnstätte, ein Herd für schlechte Luft bleiben. Erst wo die Reinlichkeit durch rasche Entfernung oder sorgfältigen Verschluß luftverderbender Stoffe nichts mehr zu leisten vermag, beginnt das Feld für die Ventilation.“ Eine Möglichkeit, den Luftwechsel im Raum zu kennzeichnen, ist die Angabe einer Luftwechselzahl. Die Luftwechselzahl ist das Verhältnis von stündlich umgewälztem Luftvolumen zum Raumvolumen. Für die Raumbelugung mit Personen ist jedoch nicht das Raumvolumen maßgebend, sondern die Grundfläche. Es empfiehlt sich daher, die stündlich umgewälzte Luftmenge auf die Fläche (m² Grundfläche) zu beziehen.

Lüftungswärmebedarf

Während durch die hochwärmedämmte Bauform der Gebäude der Transmissionswärmeverlust durch die Wände und Fenster so stark absinkt, daß pro m² Wohnfläche Werte um oder unter 20 W erreichbar sind, verändert sich der Lüftungswärmebedarf durch solche Bauformen nicht. Unabhängig von der Art der Lufterneuerung ist bei vorgegebener Raumluftenergieerzeugung eine bestimmte Energie erforderlich, um diese Erneuerungsluft von Außentemperatur auf Raumtemperatur zu erwärmen. Die erforderlich gehaltene Lufterneuerungsrate kann nicht nur auf die Personenbelegung ausgelegt werden, da zusätzlich Geruchsstoffe durch Einrichtungsgegenstände und Pflanzen etc. auftreten.

Die Lufterneuerungsrate in einem Wohngebäude sollte daher bei ca. 0,8fach pro Stunde liegen. Dies bedeutet, daß pro 100 m³ Rauminhalt je Stunde 80 m³ Frischluft zugeführt werden sollten. Legt man die für die Erwärmung dieser Luftmenge erforderliche Heizenergie unter normalen Auslegungsbedingungen auf die Wohnfläche um, so ergibt sich pro m² eine Heizleistung für die Lufterneuerung von 25 Watt. Durch Vergleich dieser Lüftungswärme mit dem Transmissionswärmeverlust wird deutlich, daß die Lüftungswärme durch die hochwärmedämmte Bauweise zu einer dominierenden Größe geworden ist. Bei dem Streben nach weiterer Energieeinsparung ist es daher notwendig, Schadstoffquellen zu minimieren und gegebenenfalls an Wärmerückgewinnung aus der Fortluft zu denken.

Schadstoffquellen

Wie erwähnt, tritt neben dem Menschen und entsprechenden maschinellen Einrichtungen vor allem die Raumausstattung als Schadstoffquelle auf. Auch dabei gilt, daß diese Angaben nicht auf ein Volumen bezogen, sondern nur flächenbezogen angegeben werden können. Liegen entsprechende Daten vor, so ist es möglich, mit Hilfe der jeweiligen Flächenanteile die erforderliche Lufterneuerung zu bestimmen. In Bild 3 sind Anhaltswerte für Fußbodenbeläge gegeben. Daraus ergibt sich, daß zur Beseitigung der Schadstoffe bei einem Marmorfußboden nur 0,1 m³ je Stunde und m² erforderlich sind. Dies bedeutet, daß der dafür erforderliche Luftwechsel auf jeden Fall in

	Lufterneuerung		Luftwechsel		Energiebedarf
Marmorboden	0,1 m ³ /m ² h	⇔	0,04 h ⁻¹	⇔	1 W/m ²
Teppichboden	2 m ³ /m ² h	⇔	0,08 h ⁻¹	⇔	25 W/m ²
	bis zu		bis zu		bis zu
	8 m ³ /m ² h	⇔	3,2 h ⁻¹	⇔	100 W/m ²

Bild 3 Energiebedarf zur Lufterneuerung

der für den Menschen bestimmten Lufterneuerung enthalten ist. Bei Teppichböden, die eine Lufterneuerung zwischen 2 und 8 m³ je Stunde und m² benötigen, kann man auf keinen Fall auf die getrennte Berücksichtigung verzichten. Andere Fußbodenbeläge liegen in ihren Zahlenwerten zwischen den angegebenen Beispielen. Bei Kenntnis der einzelnen Einflußgrößen ist es dem Architekten als Planer möglich, durch entsprechende Werkstoffwahl die Luftmenge, die stündlich ausgetauscht werden muß, stark zu reduzieren. Ein erhöhter Luftaustausch bedeutet zwangsläufig einen erhöhten Wärmebedarf bei der Beheizung. Die starken Unterschiede sind ebenfalls aus der Tabelle zu erkennen. Diese Einflüsse des Energiebedarfs in einem Gebäude sind deutlich höher, als die bisherigen Diskussionen um die Wärmedämmung ausgemacht haben. Energiebewußte Planer sollten daher durch eine geeignete Werkstoffwahl den Energieverbrauch so weit wie möglich senken, ohne dabei Einschränkungen bei der Behaglichkeit in Kauf nehmen zu müssen.

Umfangreiche Untersuchungen sind jedoch noch notwendig, um für die verschiedenen Materialien der Raumgestaltung entsprechende Werte für die Lufterneuerung bestimmen zu können. Das Ziel muß aber sein, daß bei der Warenbeschreibung nicht nur Farbe, Struktur und gegebenenfalls Zusammensetzung aufscheinen, sondern die nach bestimmten Kriterien ermittelte Lufterneuerung pro Stunde und m².

feilten Klima-, Regelungs- und Energiemanagement-Technik nicht gelingen, alle in einem Raum anwesenden Personen zufriedenzustellen. Ein Prozentsatz Unzufriedener (auch „Meckerquote“ genannt) von 5 bis 10 % kann in der Regel nicht unterschritten werden. Zum Verständnis der Anforderungen, die der Mensch an einen angemessenen Raumluftzustand stellt, ist zunächst die Darstellung einiger physiologischer Grundlagen erforderlich. Aufgrund seines Stoffwechsels produziert der Mensch Wärme, die er zum Teil an seine Umgebung abgeben muß. Hierbei ist es für das Wohlbefinden erforderlich, daß die Bilanz zwischen momentaner Wärmeproduktion des Menschen und momentaner Wärmeabfuhr – beeinflusst durch die Umgebungsbedingungen – ausgeglichen ist.

Diese Wärmeabgabe beruht auf den Mechanismen der Konvektion, der Strahlung und der Verdunstung. In Bild 4 ist die Wärmeabgabe eines Menschen durch die drei vorgenannten Mechanismen dargestellt. Die

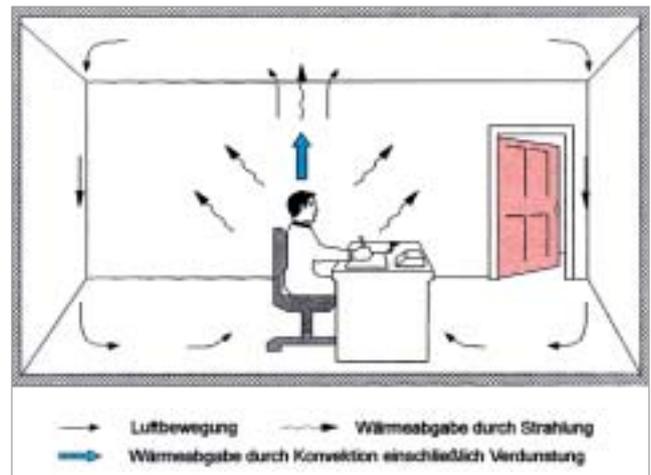


Bild 4 Wärmeabgabe eines Menschen durch Konvektion, Strahlung und Verdunstung

Anforderung an das Raumklima

Behaglichkeit oder Komfort sind gemäß ASHRAE definiert als ein positives Gefühl, nicht nur das Fehlen von Unbehagen. Da Behaglichkeit stets eine subjektive Empfindung ist, wird es auch einer noch so ausge-

Beschäftigung	Q [W]
Liegend	86
Sitzend und in Ruhe	112
Stehend und in Ruhe	126
Ankleiden und Entkleiden	137
Leichte Arbeit, stehend	163
Maschinenschreiben (rasch)	165
leichte Arbeit am Schraubstock	250
Zimmermann	279
Kellner in einem Restaurant	291
Marsch, Geschwindigkeit 5 km/h	314
Tanz oder Marsch, Geschw. 6,5 km/h	407
Maurer, Steinhauer	436
Arbeiter beim Holzsägen	523
Lauf, Geschwindigkeit 8,5–9 km/h	675
Maximale Leistung je nach persönlicher Kraft und Ausdauer	870–1400

Bild 5 Wärmeabgabe eines Mannes mittlerer Größe bei verschiedenen Beschäftigungen

Wärmeabgabe durch Konvektion führt zu einer Erwärmung der den Menschen umgebenden Luft, die dann aufgrund des thermischen Auftriebs nach oben steigt. Die Luft strömt an der Decke und den Wänden entlang wieder in den Fußbodenbereich, so daß sich die dargestellte Raumlufthalbe ergibt. Die bewegte Luftmenge kann dabei in der dargestellten Bürosituation bis zu 150 m³/h betragen. Unterstützt wird diese Raumluftbewegung durch die Wärmeabgabe durch Verdunstung. Hierdurch steigt der Feuchtegehalt der Luft, so daß deren Partialdruck sinkt und sie ebenfalls nach oben strömt. Die Strahlungswärmeabgabe dagegen wird nur wirksam zwischen der Körperoberfläche des Menschen und den im Raum befindlichen Oberflächen wie Möblierung, Wände und Decke.

Temperaturempfinden

Die oben genannten Zusammenhänge lassen sich in Formeln darstellen und alle Einflußgrößen bestimmen. Doch der Mensch verspürt lediglich den Gesamt-Wärmeentzug und kann nicht differenzieren, aufgrund welcher der drei Wärmeübertragungsmechanismen er zustande kommt. So ist es dem Menschen nicht möglich zu bestimmen, ob eine große Wärmeabgabe zum Beispiel aufgrund von zu hoher Raumlufgeschwindigkeit

oder zu niedriger Temperatur der Raumlufthe beziehungsweise der Umschließungsflächen oder aber durch eine zu geringe Raumluftheuchte zustande kommt. Um eine thermische Behaglichkeit zu erzielen, ist daher die Beachtung aller folgenden Faktoren erforderlich:

- Aktivitätsgrad des Menschen
- Bekleidung des Menschen
- Raumluftheemperatur
- Raumluftheuchtigkeit
- Raumlufthegeschwindigkeit
- Temperatur der Umschließungsflächen

Die beiden ersten Einflußgrößen sind nicht von der Klimatechnik zu beeinflussen. Jedoch kann man bezogen auf die Bürosituation von einigermaßen einheitlichen Bedingungen ausgehen.

Aktivitätsgrad und Wärmeabgabe

Die Wärmeproduktion des Menschen wird im wesentlichen durch den Aktivitätsgrad bestimmt, wobei ein Mensch sitzend in Ruhe ca. 120 W, bei der Arbeit am Computer jedoch schon ca. 170 W abgibt (Bild 5). Der Grenzwert liegt für die Dauerbeschäftigung bei ca. 350 W. In Abhängigkeit vom Wärmeumsatz ändern sich die Anteile der verschiedenen Wärmeübergangsmechanismen an der Gesamtwärmeabgabe (Bild 6). Da sich die Körperoberflächentemperatur des Menschen bei steigendem Wärmeumsatz nur leicht erhöht, nimmt die Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion nur langsam zu. Dies ist unter anderem auch auf die Veränderung der Bekleidung zurückzuführen.

Bei steigendem Wärmeumsatz transportiert der Organismus mehr Wasser an die Körperoberfläche, so daß die Verdunstungswärmeabgabe stark ansteigt. Sie ist somit als die eigentliche Regelgröße des Organismus

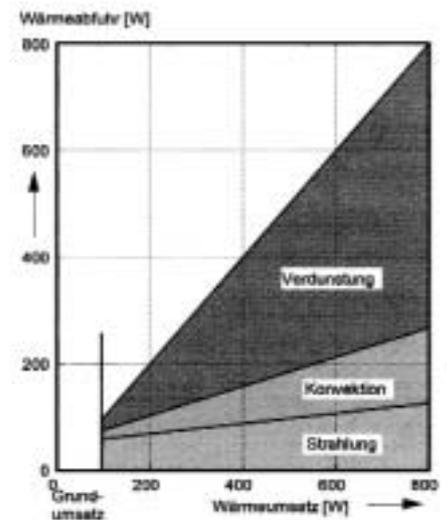


Bild 6 Anteile der Wärmeabgabe bei steigendem Wärmeumsatz des menschlichen Körpers

mus zu betrachten. Erst wenn die Wärmeabfuhr durch Verdunstung nicht mehr ausreicht, bilden sich Wassertröpfchen auf der Haut und der Mensch beginnt zu schwitzen. In Bild 7 sind die Anteile der Wärmeabfuhr des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur dargestellt. Bei einer Temperatur von ca. 33 °C werden Strahlung und Konvektion zu Null, da aufgrund der fehlenden Temperaturdifferenz zwischen Körperoberfläche und Raumlufthe keine Wärme mehr übertragen werden kann.

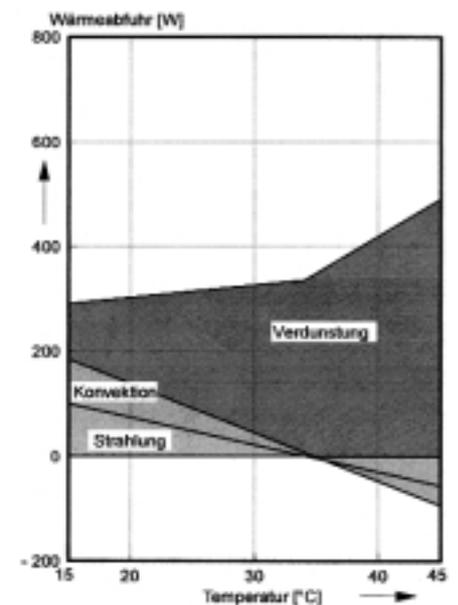


Bild 7 Anteile der Wärmeabfuhr des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Voraussetzung: Keine direkte Sonnenbestrahlung)

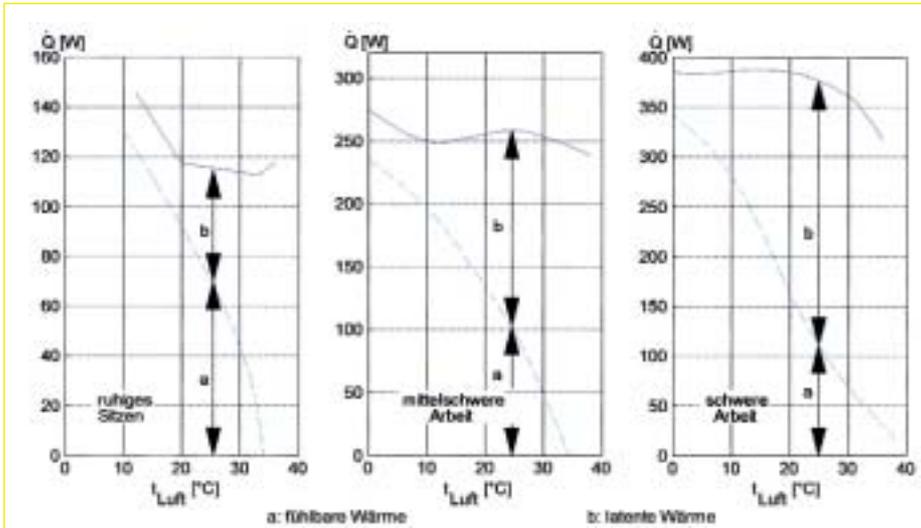


Bild 8 Wärmeabgabe von Personen in üblicher Kleidung in Abhängigkeit vom Aktivitätsgrad

Bei Temperaturen oberhalb von 33 °C kommt es dagegen zu einer Wärmeaufnahme des Menschen. Um nun noch eine ausreichende Wärmeabfuhr zu gewährleisten, muß die Verdunstungswärme entsprechend steigen.

Differenziert man die Wärmeabgabe nach sensiblem und latentem Anteil, so zeigt sich eine starke Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Bild 8). Bei $t_R = 25$ °C und ruhigem Sitzen beträgt die sensible Wärme 70 W und die latente 45 W. Während sich bei mittelschwerer Arbeit die Werte auf 100 W und 160 W verändern, bleibt bei noch höherer Aktivität (schwere Arbeit) der konvektive Wert konstant, während der latente sogar auf 260 W ansteigt. Zu beachten ist auch, daß bei ruhigem Sitzen und Raumtemperaturen unterhalb von 20 °C die Wärmeabgabe des Menschen stark ansteigt, was zu starker Unbehaglichkeit führen kann. Bereits aus diesem Diagramm wird deutlich,

daß es sehr schwierig ist, für Raumnutzer mit unterschiedlichen Tätigkeiten einen für alle behaglichen Raumzustand herzustellen. Bild 9 verdeutlicht nochmals, daß die im Raum befindlichen Personen nur über die Verdunstungswärmeabgabe die Möglichkeit besitzen, sich dem vorhandenen Raumluftzustand anzupassen. Dies verlangt jedoch eine geringe relative Luftfeuchtigkeit.

Raumlufttemperatur

Der oben erwähnte Bereich für die Raumlufttemperatur hat auch in der DIN 1947 Teil 2 (Raumlufttechnik, Gesundheitliche Anforderungen) seinen Niederschlag gefunden. Bild 10 zeigt den Zusammenhang zwischen der operativen Raumtemperatur und der Außenlufttemperatur. Die operative Raumtemperatur entspricht dem arithmetischen Mittelwert der Raumluft- und der Strahlungstemperatur:

$$t_o = 0,5 \cdot (t_a + t_r)$$

mit der Strahlungstemperatur:

$$t_r = \frac{n}{k=1} \sum \varphi_k \cdot t_k$$

φ_k = Einstrahlzahl zwischen Raumpunkt und Fläche k

t_k = Temperatur der Fläche k

Bereits Hettinger hat 1980 in seinem Buch „Ergonomie am Arbeitsplatz“ u. a. auf die Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit des Menschen und der Raumtemperatur deutlich hingewiesen (Bild 11) und betont, daß „Klimatisierung des Arbeitsraumes . . . nicht nur eine soziale, sondern auch eine echte wirtschaftliche Maßnahme“ ist. Die effektive Temperatur, die in Bild 11 aufgetragen ist, setzt sich zusammen aus der

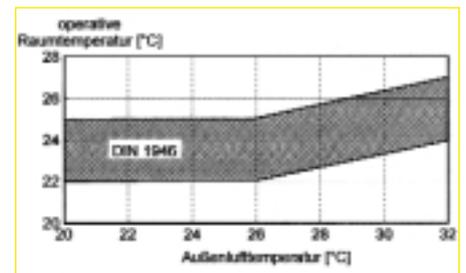


Bild 10 Zulässige operative Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur nach DIN 1946 Teil 2

Trocken- und der Feuchttemperatur sowie der herrschenden Luftgeschwindigkeit und kann aus entsprechenden Diagrammen entnommen werden. Um die thermische Behaglichkeit zu gewährleisten, darf der Temperaturunterschied durch Schichtung in einem Raum nicht mehr als 2 K pro Meter Raumhöhe betragen.

Raumluftfeuchte

Die relative Feuchte ϕ der Raumluft ist ein Maß für die Sättigung der Raumluft mit Wasserdampf. Aus Behaglichkeitsgründen sollte eine relative Feuchte von 30 % nicht unterschritten werden, da ansonsten bei der Atmung den Schleimhäuten zuviel Wasser entzogen wird und sie unter anderem ihre Reinigungsfunktion nicht mehr wahrnehmen können. Eine relative Feuchte von 65 % sollte dagegen nicht überschritten werden, damit die Verdunstungswärmeabgabe noch in ausreichendem Maß stattfinden kann. Aus diesem Grund darf auch der absolute Wassergehalt x der Raumluft nicht größer als 11,5 g_W/kg_{tr.L.} werden. Darstellungen lassen sich diese Werte unter Berücksichtigung

	20 °C					26 °C				
	Q _{ges} [W]	Q _s [W]	Q _k [W]	Q _v [W]	W [g/h]	Q _s [W]	Q _k [W]	Q _v [W]	W [g/h]	
Sitzen	120	45	45	30	45	30	30	60	90	
Maschine-schreiben	150	50	50	50	72	33	33	85	125	
Reden (Vortrag)	20	60	55	85	125	40	37	123	180	
Kellnern	250	65	70	115	170	43	45	162	230	
Tanzen	300	65	80	155	220	43	50	207	300	

Bild 9 Wärmeabgabe bei unterschiedlichen Aktivitäten und gleicher Kleidung

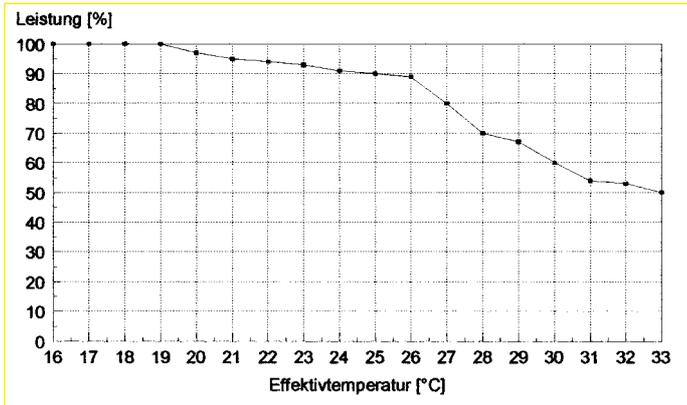


Bild 11 Leistungsabfall in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur nach Werten von Hasse, Ehrismann, Lehmann, Szakall, Mackwoth

sichtigung der zulässigen Werte für die Raumlufttemperatur als Behaglichkeitsfeld im h,x-Diagramm (Bild 12).

Es ist jedoch zu beobachten, daß der Mensch einen Luftzustand von 26 °C und eine relative Feuchte von 40 % als kälter empfindet als einen Luftzustand von 24 °C und 60 %. Dies liegt an der verstärkten Wärmeabgabe über Verdunstung bei der niedrigeren Raumluftfeuchte. Daher liegen die für den Menschen optimalen Werte auf den ebenfalls in Bild 12 eingezeichneten Linien. Bei Betrachtung der Feuchtigkeit muß auch berücksichtigt werden, daß der Mensch Feuchtigkeit produziert und auch durch Tätigkeiten Wasser an die Raumluft abgegeben wird (Bild 13). Geht man von einer mittleren Wasserabgabe einer Person von 80 g/h aus, und wird dieser Person bei einfacher sitzender Tätigkeit und bei 20 °C die erforderliche Zuluftmenge von 20 m³/h, das heißt von 24 kg/h zugeführt, so ergibt sich ein Mindestwert der Entfeuchtung von:

$$\Delta x = \frac{M_W}{M_L} = \frac{80 \text{ g}_W}{24 \text{ kg}_{\text{tr.L.}}} = 3,3 \frac{\text{g}_W}{\text{kg}_{\text{tr.L.}}}$$

So daß die Zuluft zur Einhaltung des Behaglichkeitskriteriums $x < 11,5 \text{ g}_W/\text{kg}_{\text{tr.L.}}$, lediglich eine maximale Zuluftfeuchte von $x_{\text{ZL}} = 8,2 \text{ g}_W/\text{kg}_{\text{tr.L.}}$ aufweisen darf.

Fazit

Der Mensch stellt an die Raumluft die drei Anforderungen Luftqualität, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Diese Anforderungen hängen für die Behaglichkeit eng zusammen. So wird z. B. bei hoher Temperatur und hoher Feuchtigkeit die gegebene Luftqualität noch schlechter empfunden als bei niedrigen Werten von Temperatur und Feuchtigkeit. Höhere Temperaturen lassen sich mit niedrigen Feuchtigkeiten besser ertragen, während höhere Feuchtigkeiten niedrigere Temperaturen erfordern.

Die Zukunft wird darin bestehen, daß alle drei Größen (Temperatur, Feuchtigkeit und Luftqualität) durch Sensoren gemeinsam erfaßt werden und dann eine bedarfsgerechte Regelung erfolgt. □

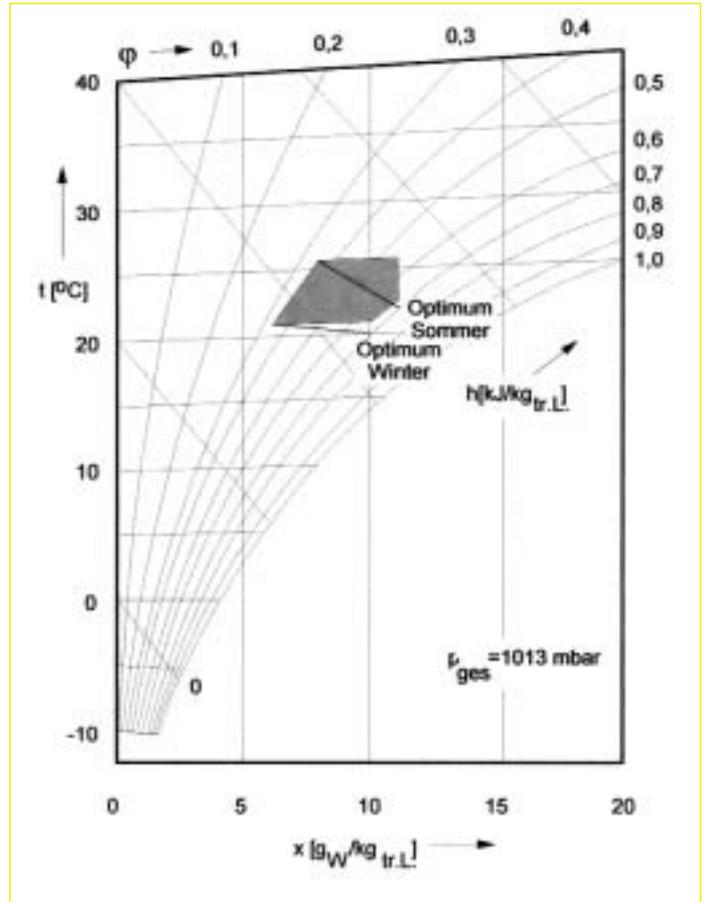


Bild 12 Behaglichkeitszone im h,x-Diagramm

Mensch	leichte Aktivität	30–60 g/h
	mittlere Aktivität	120–200 g/h
	schwere Aktivität	200–300 g/h
Bad	Wannenbad	ca. 700 g/h
	Duschen	ca. 2600 g/h
Küche	Kochen usw.	600–1000 g/h
Pflanzen	jeweils	5–20 g/h
	Wäschetrocknen	
	geschleudert	50–200 g/h
	tropfnaß	100–500 g/h
Wasseroberfläche	je m ²	ca. 40 g/h

Bild 13 Feuchteproduktion bei verschiedenen Tätigkeiten