

Autor

Dipl.-Ing. Norbert Nadler
CSE Nadler, 16515 Oranienburg

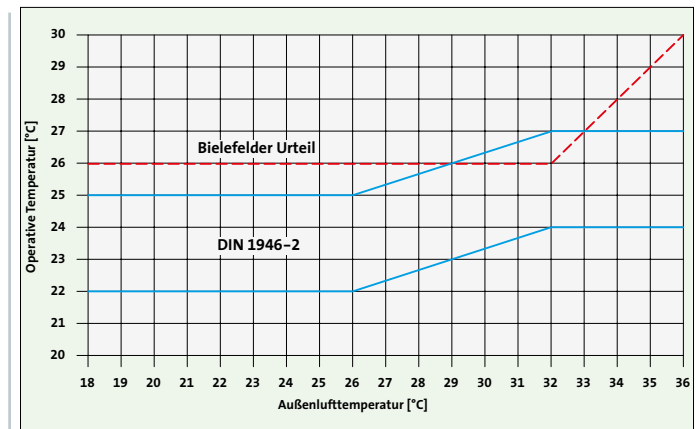


Bild 1: Bereiche zulässiger operativer Raumtemperaturen

Thermische Behaglichkeit

Auslegungskriterien für Heiz- und Kühllastberechnungen

Durch die Herausgabe der DIN EN 15 251 wurden die Auslegungskriterien für das thermische Raumklima bei der Kühl- und Heizlastberechnung auch auf europäischer Ebene festgelegt. Die Norm bestimmt, dass die Auslegungswerte für die operative Raumtemperatur aus dem Prozentsatz der Unzufriedenen (PPD-Wert nach DIN EN ISO 7730) zu ermitteln sind. Die genaue Festlegung soll auf nationaler Ebene für typische Aktivitäten und Wärmedämmwerte der Bekleidung erfolgen. Alternativ ist auch die direkte Verwendung des PPD-Wertes bei der Auslegung möglich. Es wird gezeigt, dass diese Methode zu bevorzugen ist und dass die meisten am Markt erhältlichen Kühllastprogramme den allgemein anerkannten Regeln der Technik nicht mehr entsprechen.

Behaglichkeitsmodelle und Begriffe

Zum leichteren Verständnis sollen zunächst einige grundlegende Begriffe aus dem Thema „Thermische Behaglichkeit“ kurz erläutert werden.

a) Erwartungsmodell

Thermische Behaglichkeit stellt sich dann ein, wenn das Umgebungsklima den Erwartungen entspricht. Demnach tolerieren wir im Sommer höhere und im Winter niedrigere Raumtemperaturen. Aus diesem Modell resultieren die Grenzkurven für eine Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, z. B. in der DIN 1946-2 [3] oder im Bielefelder 26 °C-Urteil [4].

Problematisch ist hierbei, dass die Außenlufttemperatur den täglichen Schwankungen unterliegt und sich dadurch die Anforderungen ständig ändern. Besser ist es, für die Außenlufttemperatur einen statistischen Wert (täglichen Mittelwert oder Extremwert) heranzuziehen.

b) Wärmebilanzmodell

Nach dem Wärmebilanzmodell stellt sich thermische Behaglichkeit dann ein, wenn ein thermisches Gleichgewicht zwischen Wärmeabgabe des Körpers und seiner inneren Wärmeproduktion (Aktivität) vorliegt. Fanger hat hierfür bereits 1964 seine Fanger'schen Komfortgleichungen aufgestellt, die in der DIN EN ISO 7730 [2] seit 1984 international anerkannt sind. Die Komfortgleichungen sind abhängig von:

- der mittleren Raumlufttemperatur,
- der mittleren Strahlungstemperatur,
- der relativen Luftgeschwindigkeit an der Person,
- der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum,
- dem Bekleidungsgrad (Wärmedämmwert, Einheit in clo = 0,155 m² K/W),
- dem Aktivitätsgrad (innere Wärmeproduktion, Einheit in met = 58,15 W/m²).

Man erkennt hier schon, dass wesentlich mehr und qualifiziertere Parameter den thermischen Komfort bestimmen, als beim Erwartungsmodell. Mit den Komfortgleichungen wird letztlich ein Prozentsatz Unzufriedener (PPD-Wert) berechnet, der ein Maß für den thermischen Komfort in einem Raum darstellt und damit als ein Klimasummenmaß verstanden werden kann. Der minimale PPD-Wert ist nach unten begrenzt, da 5 % immer unzufrieden sind. Die PPD-Bewertung betrifft den Körper insgesamt und wird daher als globales thermisches Behaglichkeitskriterium bezeichnet.

c) Lokale thermische Behaglichkeit

Erwärmung oder Abkühlung bestimmter Körperteile, wie z. B. durch Zugluft, vertikale Lufttemperaturunterschiede, warme und kalte Fußböden, Asymmetrie der Strahlungstemperatur üben ebenfalls einen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit aus. In der DIN EN ISO 7730

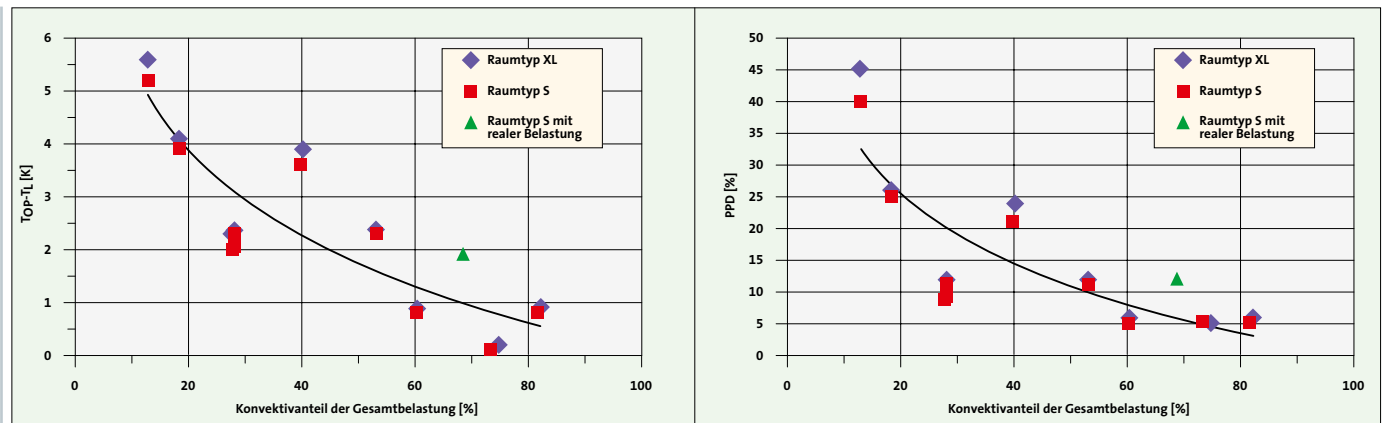


Bild 2: Temperaturdifferenz $T_{op} - T_L$ und PPD-Wert in Abhängigkeit des Konvektivanteils der Gesamtbelastung (Sonnenstrahlung + innere Wärmequellen) für das Rechenbeispiel „Zeichensaal“

führen auch diese Parameter zu einer Berechnung des Prozentsatzes an Unzufriedenen (PPD-Wert). Die DIN EN 15 251 [1] enthält daher nur einen Verweis auf diese Norm, betont aber, dass auch die lokale thermische Behaglichkeit bei der Auslegung zu berücksichtigen ist.

d) Raumlufttemperatur

Die Temperatur der Raumluft ist maßgeblich für die konvektive Wärmeabgabe des Menschen und nimmt somit auch Einfluss auf die Wärmeabgabe des Körpers. Sie kann örtlich verschieden sein, es wird aber nur der Mittelwert betrachtet. Die Raumlufttemperatur muss strahlungsgeschützt gemessen werden.

e) Operative Raumtemperatur

Die operative Raumtemperatur wird in der Literatur als eine Empfindungstemperatur angesehen und setzt sich aus der Raumlufttemperatur und der mittleren Raumumschließungsflächentemperatur zusammen. Letztere wird auch Strahlungstemperatur genannt, da sie für die Strahlungswärmeabgabe der Person verantwortlich ist. Sie kann mit einem Globe-Thermometer gemessen werden. Die Norm-Innentemperatur in der Heizlastberechnung nach DIN EN 12 831 [5] entspricht der operativen Raumtemperatur.

Berechnungsansatz

Berechnet wird die operative Raumtemperatur durch

$$T_{op} = a \times T_L + (1 - a) \times T_s$$

T_{op} operative Raumtemperatur in [°C]

T_L Raumlufttemperatur in [°C]

T_s Strahlungstemperatur in [°C]

$$a = \frac{\alpha_k}{\alpha_k + \alpha_s} \text{ Wichtungsfaktor}$$

α_k konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in [W/(m² K)]

α_s langwelliger Strahlungswärmeübergangskoeffizient in [W/(m² K)]

Der Wichtungsfaktor a wird im Wesentlichen von der Luftgeschwindigkeit bestimmt. Im Bereich 0 bis 0,2 m/s liegt er bei 0,43 bis 0,57. In der Literatur wird oft ein Wert von $a = 0,5$ empfohlen, wodurch sich eine arithmetische Mittelung von T_L und T_s ergibt.

Berücksichtigt man die Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, stellt die operative Raumtemperatur eine relativ aussagekräftige Klimasummengröße dar. Sie beinhaltet jedoch nicht den Einfluss der Raumluftfeuchte sowie der Aktivität und Bekleidung. D.h., bei gleicher operativer Raumtemperatur sind sehr unterschiedliche PPD-Werte möglich. Wahrscheinlich verzichtete man deshalb auf den Begriff „Empfindungstemperatur“ und verwendet dafür die Bezeichnung „operative Raumtemperatur“.

Sowohl der PPD-Wert als auch die operative Raumtemperatur beinhalten nicht die direkte Absorption der kurzwelligigen Strahlung auf der Körper- bzw. Kleidungsoberfläche durch die Sonne oder Beleuchtung. Diese Vorgänge wirken sich nur indirekt über die Erhöhung der Raumoberflächentemperatur infolge kurzwelliger Absorption aus, wodurch eine Umwandlung in langwellige Strahlung stattfindet. Insofern sind diese beiden Klimasummenmaße in Räumen mit viel Glasflächen kritisch zu betrachten. Allerdings würde die Berücksichtigung der kurzwelligigen Strahlung in einem Klimasummenmaß den zusätzlichen Parameter „Farbe der Bekleidung“ erfordern, der im Planungsstadium eher selten bekannt ist.

Einleitung

Die operative Raumtemperatur als Auslegungskriterium wird schon seit der Herausgabe der DIN 1946-2 [3] im Jahr 1994 gefordert. Die Ausgabe von 1983 stellte noch Anforderungen nur an die Raumlufttemperatur. Man wollte somit der Erkenntnis Rechnung tragen, dass die Raumlufttemperatur alleine nicht den thermischen Komfort bestimmt.

Diese Änderung hatte zur Folge, dass sich insbesondere bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078 [6] Probleme bezüglich die Auslegungstemperatur zur Einhaltung thermischer Behaglichkeitsanforderungen ergeben. Mit dieser Richtlinie ist die Ermittlung der Kühllast für eine bestimmte Soll-Raumlufttemperatur bzw. die Überprüfung

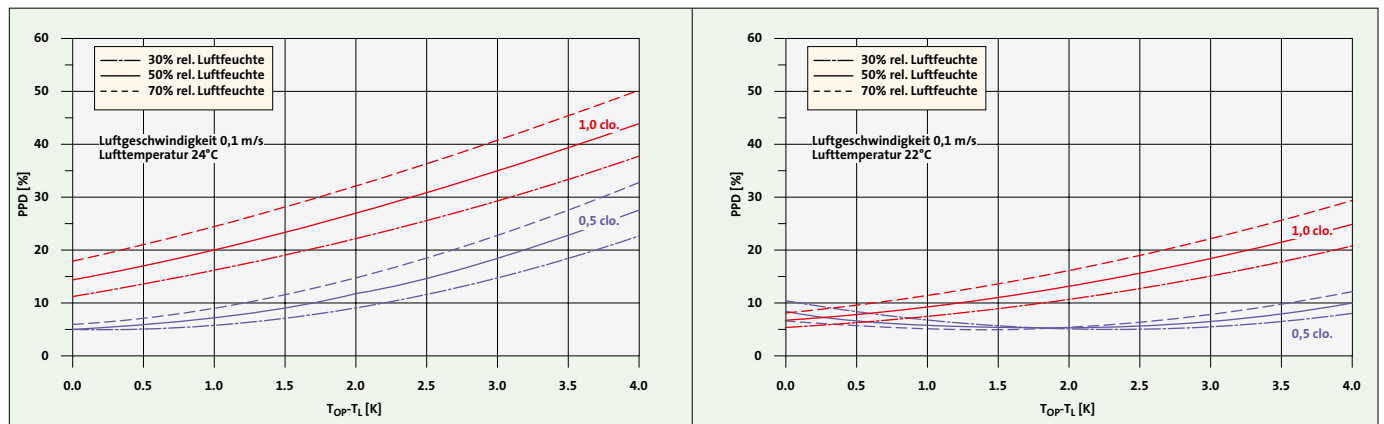


Bild 3: Prozentsatz der Unzufriedenen (PPD) in Abhängigkeit der Differenz zwischen operativer Temperatur und Lufttemperatur für verschiedene Bekleidungsgrade und relative Luftfeuchten; Weitere Annahmen: Aktivität 1,4 met, Luftdruck 10^5 Pa

der Ist-Raumlufttemperatur bei Unterdimensionierung der Kühlleistung möglich. Die Angabe der operativen Raumtemperatur ist in der Richtlinie nicht vorgesehen. Damit kann nicht überprüft werden, ob die Bedingungen der thermischen Behaglichkeit nach den o.g. Normen eingehalten werden.

In der Praxis wurde dieser Umstand bisher ignoriert. Die Vorgehensweise der VDI 2078 ist jedoch für die meisten Anwendungsfälle korrekt. Als Zielgröße der Berechnung sollte immer die Temperatur gewählt werden, die am Raumregler der ausgeführten Anlage auch gemessen wird. In der Regel ist diese eine Lufttemperatur, nur in einigen Ausnahmefällen auch eine empfundene Temperatur mit einem Globe-Temperaturfühler.

Der Mangel der VDI 2078 liegt nur in der fehlenden Berechnungsgleichung für die operative Temperatur. In [7] wurde jedoch gezeigt, wie die sich unter den gegebenen thermischen Bedingungen einstellende operative Temperatur aus den vorhandenen und bekannten Größen der VDI 2078 errechnet lässt. Die Untersuchung in [8] wies eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen eines thermischen Simulationsprogrammes aus. Inzwischen konnte der Algorithmus auch so erweitert werden, dass die Vorgabe einer Soll-Operativtemperatur bei der Kühllastberechnung möglich ist. Damit finden auch Globe-Temperaturfühler im Raumregler Berücksichtigung. Für die Berechnung wird eine Iteration nicht benötigt.

Als Gegenbeispiel sei hier die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 angeführt, die für eine vorgegebene Norm-Innentemperatur durchgeführt wird. Die Messfühler für die Raumregler sind allerdings auch hier i.d.R. Lufttemperaturfühler. Sofern andere Größen, wie z.B. die Heizwassertemperatur, nur einen geringen Einfluss ausüben, wird sogar beim Thermostatventil weitestgehend die Raumlufttemperatur erfasst. Die Leistungsangabe der Heizkörper bezieht sich auch auf eine Lufttemperatur, da die Art der Leistung überwiegend konvektiv ist. Der Lüftungswärmeverlust müsste eigentlich mit der Lufttemperaturdifferenz zwischen

innen und außen berechnet werden. Stattdessen wird die Norm-Innentemperatur und die Norm-Außentemperatur verwendet. Letztere enthält eine Außentemperaturkorrektur abhängig von der Gebäudezeitkonstante, obwohl der Lüftungsanteil in der Heizlast sofort wirksam wird.

Eine solche Vorgehensweise bedingt einen nicht definierten Planungszustand. Allerdings verlangt das Hauptblatt der Heizlastnorm die DIN EN 12831 [5] im informativen Anhang B.2 Korrekturen, wenn die Abweichung zwischen Luft- und operativer Temperatur mehr als 1,5 K beträgt. Die Frage ist, ob hiervon in den gängigen Heizlastprogrammen Gebrauch gemacht wird.

Auslegungskriterien in verschiedenen Richtlinien und Normen

Neben der operativen Raumtemperatur sind allerdings noch weitere Zustandsgrößen, z.B. die Raumluftfeuchte (s.o.), für die thermische Behaglichkeit maßgeblich. Folgende Auslegungskriterien sind daher z.Z. in den Richtlinien und Normen zu finden:

- Berufsgenossenschaftliche Informationen BGI 7003 (vorher BGI 5012): Auslegungskriterien für die Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte in Form eines Risikographen.
- Arbeitsstättenrichtlinie ASR6 [9]: Auslegungskriterien für die Raumlufttemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (wird aber z.Z. überarbeitet).
- DIN 4108-2 [10]: Diese Norm gehört zu den Normen der Energieeinsparverordnung (EnEV) und ist bauaufsichtlich eingeführt. Im Zusammenhang mit dem sommerlichen Wärmeschutznachweis werden Grenzwerte der Innentemperatur festgelegt (25 bis 27 °C je nach Klimaregion). Es ist anzunehmen, dass mit der Innentemperatur die operative Raumtemperatur gemeint ist.
- DIN EN 15251 [1]: Auslegungskriterien für die operative Raumtemperatur und Raumluftfeuchte, alternativ auch für den PPD-Wert nach DIN EN ISO 7730 [2].

Tabelle 1: Behaglichkeitskategorien nach DIN EN 15251 [1]

Kategorie	PPD in [%]	Beschreibung
I	< 6	hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z.B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen
II	< 10	normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude
III	< 15	annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden
IV	> 15	Werte außerhalb der oben genannten Kategorien; diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden

■ VDI 4706-1 Entwurf [11]:

Geplant als nationales Beiblatt der DIN EN 15251. Auslegungskriterien für die operative Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Raumluftfeuchte in Form einer Graphik für einen Standardfall.

■ VDI 3804 [12]:

Im Abschnitt 6.3 heißt es hierzu: „Als Bewertungsmaßstab für die Temperatur ist die operative Raumtemperatur heranzuziehen... Für die Beurteilung der empfundenen Temperatur ist darüber hinaus der Einfluss der relativen Feuchte zu berücksichtigen.“ Die Auslegungswerte für die operative Raumtemperatur sind aus dem informativen Anhang A der DIN EN 15251 Tab. A.2 für Büroräume entnommen.

■ Fachinstitut Gebäude-Klima FGK Status-Report 8 [13]:

Arbeitsmediziner fordern eine Raumluftfeuchtigkeit von 40 %. Dieser Empfehlung schließt sich das Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. an.

■ ASHRAE Standard 55-2004 [14]:

Graphische Methode in Abhängigkeit von der operativen Raumtemperatur und Raumluftfeuchte für einen Standardfall. Ansonsten PPD-Wertmethode gem. DIN EN ISO 7730 [2] für alle anderen Fälle.

Zukünftig soll die DIN EN 15251 die zentrale Norm für die Auslegungskriterien werden. Sie definiert Behaglichkeitskategorien (Tabelle 1) und gibt an, wie Auslegungskriterien für die Anlagendimensionierung erstellt und verwendet werden können. Innentemperaturen für die Heiz- und Kühllastberechnung sind auf nationaler Ebene festzulegen. Ein Vorläufer dieser nationalen Festlegung ist die VDI 4706. Der Entwurf dieser Richtlinie behandelt jedoch nur einen Standardfall (Aktivität 1,2 met, Kategorie II). Im informativen Anhang A der DIN EN

15251 sind dagegen noch weitere Beispiele für empfohlene Auslegungswerte der Innenraumtemperatur enthalten (Tabelle 2).

Nach der europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD 2002) kann gemäß Artikel 7, Abs. (3) die Bandbreite der empfohlenen und aktuellen Innentemperaturen und gegebenenfalls weitere relevante Klimaparameter deutlich sichtbar im Energieausweis angegeben werden. Das ist auch sinnvoll, da der Energieverbrauch im Zusammenhang mit dem thermischen Komfort und damit mit einem Qualitätsmerkmal zu bewerten ist.

Die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) sieht in ihrem Gebäudezertifikat ebenfalls eine Berücksichtigung von thermischen Behaglichkeitsparametern getrennt nach Sommer und Winter vor (Kriterium 18 und 19). Dabei haben die Behaglichkeitskategorien nach DIN EN 15251 einen direkten Einfluss auf die Punktvergabe. Allerdings geht der thermische Komfort im Sommer und Winter nur zu insgesamt 4,018 % in das Endergebnis ein [15]. Das geht aus den Steckbriefen zum BNB-Bewertungssystem vom BMVBS (www.nachhaltigesbauen.de) hervor, welche die DGNB zum größten Teil übernommen hat. Wie Abweichungen von der besten Behaglichkeitska-

Beschreibung der Varianten in Tabelle 3 und 4:

Abmessungen:	Zeichensaal der VDI 2078
Berechnungsmonat:	Juli
Betriebszeit:	7 bis 17 Uhr
Anlagenbetriebszeit:	7 bis 17 Uhr (nur Kühlung, Heizung aus)

Tabelle 2: Beispiele für empfohlene Auslegungswerte der Innentemperatur (Auszug aus DIN EN 15251 [1, Tab. A.2])

Gebäude- bzw. Raumtyp	Kategorie	Operative Temperatur in [°C]	
		Mindestwert für Heizperiode (Winter), ~ 1,0 clo	Höchstwert für Kühlperiode (Sommer), ~ 0,5 clo
Einzelbüro Sitzend ~ 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Kaufhaus Stehend, gehend ~ 1,6 met	I	17,5	24,0
	II	16,0	25,0
	III	15,0	26,0

Beschreibung der Variante in Tabelle 5:

Abmessungen:	Zeichensaal der VDI 2078
Berechnungsmonat:	Juli
Belegung:	48 Personen von 7 bis 12 und 13 bis 17 Uhr, 1,4 met, 0,5 clo
Anlagenbetriebszeit:	7 bis 17 Uhr (nur Kühlung, Heizung aus)
Fugenlüftungswechsel:	0,05 1/h ganztägig
Beleuchtung:	keine, da durch Fenster tageslichtversorgt
Maschinen und Geräte:	3 W/m ² außerhalb, 10 W/m ² innerhalb der Betriebszeit
Sonnenschutz:	wenn Gesamtstrahlung vor der Fassade 200 W/m ² übersteigt
Raum:	Luftgeschwindigkeit 0,1 m/s, Soll-Raumluftfeuchte 50 %

Tabelle 3: Maximalwerte für Kühllast, Temperaturen und PPD-Wert, Raumtyp XL

Variante	U-Wert AW in [W/(m ² K)]	U-Wert FE in [W/(m ² K)]	g-Wert FE –	Abminderungsfaktor F _c –	Innenlast in [W/m ²]	Konvektivanteil in [%]	Kühllast in [W/m ²]	T _L in [°C]	T _{OP} in [°C]	T _{OP} -T _L in [K]	PPD in [%]
1	0,65	3,0	0,75	0,5	0	0	24,3	24	24,9	0,9	6
2					25	100	49,3	24	24,9	0,9	6
3					25	0	43,8	24	26,3	2,3	11
4	0,24	1,3	0,75	0,5	0	0	24,3	24	24,8	0,8	6
5					25	10	49,3	24	24,8	0,8	6
6					25	0	46,1	24	26,4	2,4	12
7					50	0	67,8	24	28,1	4,1	26
8					50	50	71,1	24	26,4	2,4	12

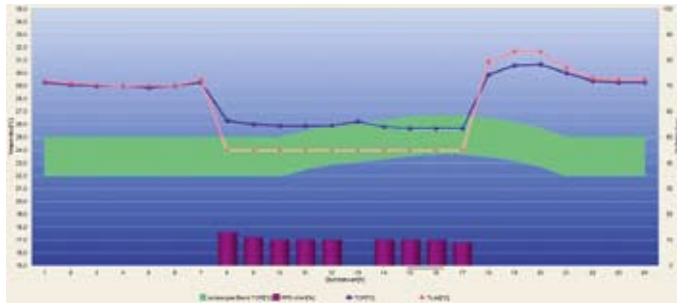


Bild 4: Behaglichkeitsauswertung im C.A.T.S.-Kühllastprogramm

tergie I bewertet werden, ist wohl nur zu erfahren, wenn man das DGNB-Handbuch erwirbt. Der Klimaerlass 2008 des BMVBS [16] verlangt, dass für Bauvorhaben des Bundes die Raumtemperaturen dem informativen Anhang A der DIN EN 15 251 (Tabelle 2) entsprechen. Für Neubauten sind grundsätzlich die Temperaturgrenzen der Kategorie II, für Sanierungsvorhaben die der Kategorie III einzuhalten.

Beispielrechnungen für die globale Behaglichkeit

Die Umrechnung einer PPD-Wertvorgabe entsprechend der Behaglichkeitskategorie in eine bestimmte operative Raumtemperatur als Auslegungskriterium in der DIN EN 15 251 bzw. VDI 4706 ist eigentlich überflüssig, wenn man im Programm für die Lastberechnung direkt den PPD-Wert benutzt. Der Nachteil der Umrechnung in einer normativen Festlegung – was im Grunde eine Rückrechnung ist – liegt darin, dass für die Parameter Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, Bekleidungsgrad und Aktivitätsgrad Annahmen zu treffen sind, wodurch der Anwendungsbereich der operative Raumtemperatur als Auslegungskriterium einschränkt wird. Neben diesen Annahmen musste in Tabelle 2 auch vorausgesetzt werden, dass Raumlufttemperatur und operative Raumtemperatur gleich groß sind.

Anhand einiger Rechenbeispiele soll gezeigt werden, welche Größenordnung die Differenz zwischen operativer Temperatur und Lufttem-

peratur in Abhängigkeit verschiedener Parameter hat. Hierfür wird das Zeichensaal-Beispiel der VDI 2078 [6] verwendet, wobei alle Innenlasten durch die Angabe einiger spezifischer Werte in W/m^2 mit dem zugehörigen Konvektivanteil ersetzt werden. Dadurch können neben der Belastung durch die Sonne weitere Strahlungsbelastungen untersucht werden. U- und g-Werte der Außenbauteile sowie der Speichertyp werden ebenfalls variiert, um auch die neuen Wärmeschutzanforderungen der EnEV 2009 zu berücksichtigen. Die Berechnungen wurden mit dem C.A.T.S.-Kühllastprogramm durchgeführt.

Um einen praxisnahen Eindruck zu erhalten sind in Tabelle 5 zusätzlich die Ergebnisse des Zeichensaaus mit realen Innenlasten dargestellt. Als Vorlage diente dabei der Klimaerlass 2008 des BMVBS [16]. Die Tabellen 3 bis 5 enthalten die jeweiligen Maximalwerte innerhalb der Betriebszeit. Eine zunehmende Strahlungsbelastung – bzw. ein abnehmender Konvektivanteil – bewirkt einen Anstieg der inneren Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen. Das hat zur Folge, dass die operative Temperatur größer als die Raumlufttemperatur wird. Die Differenz ist in der Spalte $T_{op} - T_L$ aufgeführt.

Die Beispiele zeigen, dass mit zunehmendem Strahlungsanteil die max. Kühllast durch die Speicherung in den Bauteilen zwar abnimmt, die operative Temperatur aber zunimmt (Bild 2). Diese Erscheinung geht einher mit einer Zunahme des PPD-Wertes. Wärmedämmung und Raumtyp (Bauschwere) haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Differenz.

Ferner zeigt das Beispiel in Tabelle 5 Spalte T_{op} , dass trotz geringer Unterschreitung der max. Temperatur im Sommer von $26^\circ C$ gem. Tabelle 2 die Kategorie II nicht eingehalten wird, da der PPD-Wert hier 12 % statt < 10% (Tabelle 1) beträgt. Die Differenz $T_{op} - T_L$ beträgt auch hier 1,9 K.

Bewertung

Die Einteilung der Behaglichkeitskategorien nach DIN EN 15 251 erfolgt in 4 bis 5 %-Schritten beim PPD-Wert (Tabelle 1) und in 0,5 bis 1 K-Schritten bei der operativen Temperatur (Tabelle 2). Die Beispielrechnungen belegen jedoch, dass die Sensibilität gegenüber dem Strahlungsanteil der Belastung so groß ist, dass die Grenzen der Behaglichkeitskatego-

Tabelle 4: Maximalwerte für Kühllast, Temperaturen und PPD-Wert, Raumtyp S

Variante	U-Wert AW in $[W/(m^2K)]$	U-Wert FE in $[W/(m^2K)]$	g-Wert FE	Abminderungsfaktor $F_c -$	Innenlast in $[W/m^2]$	Konvektivanteil in [%]	Kühllast in $[W/m^2]$	T_L in $[^\circ C]$	T_{op} in $[^\circ C]$	$T_{op} - T_L$ in [K]	PPD in [%]
1	0,65	3,0	0,75	0,5	0	0	23,3	24	24,8	0,8	5
2					25	100	48,3	24	24,8	0,8	5
3					25	0	41,4	24	26,1	2,1	10
4	0,24	1,3	0,75	0,5	0	0	23,8	24	24,8	0,8	5
5					25	10	48,8	24	24,8	0,8	5
6					25	0	45,1	24	26,3	2,3	11
7					50	0	66,4	24	27,9	3,9	25

Tabelle 5: Maximalwerte für Kühllast, Temperaturen und PPD-Wert, Raumtyp S, Zeichensaal mit realen Innenlasten und Betrieb

Variante	U-Wert AW in $[W/(m^2K)]$	U-Wert FE in $[W/(m^2K)]$	g-Wert FE -	Abminderungsfaktor F_c	Innenlast in $[W/m^2]$	Konvektivanteil in [%]	Kühllast in $[W/m^2]$	T_L in $[^\circ C]$	T_{op} in $[^\circ C]$	$T_{op} - T_L$ in [K]	PPD in [%]
1	0,24	1,30	0,60	0,80	39	69	72,9	24	25,9	1,9	12

rien nach DIN EN 15 251 sehr leicht überschritten werden können. Die Berechnungen wurden für eine Soll-Lufttemperatur von 24 °C durchgeführt. In der Praxis wurde beobachtet, dass einige Planer einen Sollwert für die Lufttemperatur von 26 °C bevorzugen. Hintergrund sind hierfür wohl die bekannten Gerichtsurteile und die ASR6 [9]. Gemäß den obigen Beispielen kann die operative Temperatur in normalen Anwendungsfällen 1 bis 4 K über der Lufttemperatur liegen. Damit wären die Auslegungskriterien nach den einschlägigen und aktuellen Normen, nämlich die operative Temperatur oder der PPD-Wert, erheblich überschritten. Das Problem ist, dass der Planer hierüber gar keine Kenntnis erhält, da die VDI 2078 [6] die Angabe der operativen Temperatur nicht vorsieht. Das enge Raster in Tabelle 2 (≤ 1 K) verlangt eigentlich, dass nur der PPD-Wert das Auslegungskriterium sein müsste. Die Empfehlungen der DIN EN 15 251 zu den operativen Temperaturen in Tab. A.2 enthalten Annahmen, die einen starken Einfluss auf den PPD-Wert ausüben. Wie bereits ausgeführt, gelten die angegebenen Temperaturen nur unter der Voraussetzung der Gleichheit zwischen Luft- und Operativtemperatur, was aber durch obige Beispiele widerlegt wird. Bild 3 zeigt beispielhaft, dass der Einfluss dieser Differenz sowie weiterer Größen auf den PPD-Wert sehr hoch sein kann. Die Abhängigkeit des PPD-Wertes von der Temperaturdifferenz $T_{op} - T_L$ ist jedoch nicht einheitlich, wie das rechte Diagramm in Bild 3 zeigt. Wenn die Lufttemperatur 22 °C gewählt wird, wirkt sich eine höhere Strahlungstemperatur bis $T_{op} - T_L = 2,0$ K positiv auf den PPD-Wert aus, d.h. der PPD-Wert nimmt mit höherer Temperaturdifferenz ab. Für höhere Luftgeschwindigkeiten wird diese Richtungsumkehr noch verstärkt. Außerdem wurde ein bestimmter Bekleidungsgrad und eine bestimmte Raumluftfeuchte angenommen. Beides ließe sich durch eine Variationsbreite für den Bekleidungsgrad und durch eine Feuchtebilanz im Kühllastprogramm viel besser erfassen.

Folgerungen und Lösungen

Für die Einordnung des thermischen Komforts bei der Kühllastberechnung

DIN EN ISO 7730- Parameter	C.A.T.S.-Kühllastprogramm
mittlere Raumlufttemperatur	wird als Istwert berechnet oder als Sollwert vorgegeben
mittlere Strahlungstemperatur	wird berechnet mit [7]
relative Luftgeschwindigkeit	wird vorgegeben entsprechend der Aktivität und dem Luftführungssystem (0...0,2 m/s)
relative Luftfeuchtigkeit	wird aus der Feuchtebilanz berechnet oder vorgegeben, wenn ohne Luftstrom gerechnet wird
Bekleidungsgrad	wird ermittelt für minimalen PPD und begrenzt auf $\pm 0,15$ clo (s. [17]) \rightarrow demnächst mit Bereichsvorgabe z.B. 0,5...0,7 clo entsprechend der Raumnutzung
Aktivitätsgrad	wird vorgegeben entsprechend der Raumnutzung

nung sind nach den obigen Ausführungen die Raumlufttemperatur, die operative Temperatur und der PPD-Wert zu betrachten. Für die Einschätzung der Temperaturen ist noch die Darstellung eines sog. Behaglichkeitsbandes gemäß diverser Erwartungsmodelle hilfreich. Damit können alle o.g. älteren und neueren Auslegungskriterien überprüft werden.

Der PPD-Wert nach DIN EN ISO 7730 gilt eigentlich nur für Beharungszustände. Die Kühllastberechnung stellt dagegen ein dynamisches Verfahren in Stundenschritten dar. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Akklimatisierung des Körpers innerhalb einer Stunde vollzogen ist und somit stundenweise Berechnungen des PPD-Wertes sinnvoll sind. Allerdings sollten nach [2] die Temperaturänderungen weniger als 2K/h betragen.

In Tabelle 6 wird dargelegt, wie im C.A.T.S.-Kühllastprogramm für die Berechnung des PPD-Wertes vorgegangen wird. Gemäß DIN EN 13 779 [18] sind Aktivität und Bekleidung für jeden Raum zu definieren und zu dokumentieren. Ferner sind die Auslegungswerte für die Luftgeschwindigkeiten festzulegen. Die Raumluftfeuchte kann auch als absolute Feuchte, z.B. Wintermindestwert 6 g/kg und/oder Sommerhöchstwert 12 g/kg vorgegeben werden. Die Personenbelegung ist als ein Tagesgang anzugeben, z.B. durch Festlegung von stündlichen Werten an typischen Tagen.

Die relative Luftfeuchtigkeit hat nicht nur einen Einfluss auf den PPD-Wert, sondern auch auf die Berechnung der Personenwärme (feuchte Last) und auf die Beurteilung der Raumluftqualität (Schimmelpilzkriterium, trockene Luft). Ihr gebührt daher eine größere Aufmerksamkeit. Zum Erhalt der sich einstellenden relativen Raumluftfeuchte wird eine Feuchtebilanz durchgeführt, in der auch der Feuchteeintrag eines Außenluftwechsels Berücksichtigung findet. Wenn die Kühllast als reine Leistung ermittelt wird – z.B. bei Kühldecken – und keine weitere Lüftung im Raum angegeben wurde, kann man auch die relative Feuchte als festen Wert vorgeben. Ansonsten würden sich bei Vorhandensein von Feuchtequellen im Raum sehr hohe relative Luftfeuchten einstellen, da kein Luftstrom zur Abfuhr der Feuchtelast eingetragen ist. Wird im C.A.T.S.-Kühllastprogramm dagegen eine RLT-Anlage gewählt, ist damit eine Zustandsermittlung des Zuluftstroms aufgrund der Lasten verbunden, mit der automatisch auch die Bilanzierung der Feuchte ausgelöst wird.

In der nächsten Programmversion kann der Anwender die Feuchtebilanz zu- oder abschalten. Ist sie abgeschaltet, wird mit dem eingetragenen Wert gerechnet. Bei Zuschaltung wird unabhängig davon, ob ein Luftstrom vorhanden ist, die Feuchtebilanz durchgeführt. Die Speicherung der Feuchte in den Raumumschließungsflächen wird näherungsweise durch ein fiktives größeres Raumvolumen berücksichtigt. Wahlweise ist auch eine stationäre Bilanzierung möglich. Die DIN EN 15 251 sieht für den Sommer einen Bekleidungsgrad von 0,5 clo und für den Winter 1,0 clo vor. Sollte ein anderer Bekleidungsgrad erwünscht sein, z.B. in Veranstaltungsräumen oder in der Übergangsjahreszeit, wird in der nächsten Programmversion die Vorgabe eines zumutbaren Bereiches möglich sein, in dem vom Nutzer eine

Tabelle 7: Gesamtkategorien für die Zuordnung der globalen und lokalen thermischen Behaglichkeit (in Anlehnung an DIN EN ISO 7730 [2, Tab. A.1])

Gesamt-Kategorie	Globale Unbehaglichkeit	Lokale Unbehaglichkeit			
		Zugluft	vertikaler Lufttemperaturunterschied	warmer oder kalter Fußboden	asymmetrische Strahlung
	PPD	DR	PDvert	PDFb	PDasy
	%	%	%	%	%
I	< 6	< 10	< 3	< 10	< 5
II	< 10	< 20	< 5	< 10	< 5
III	< 15	< 30	< 10	< 15	< 10
IV	sonst (Langzeitbewertung notwendig)				

gewisse Anpassungsfähigkeit bezüglich der Bekleidung an wechselnde Temperaturen erwartet werden kann. Innerhalb des vorgegebenen Bereiches wird der minimale PPD-Wert ermittelt.

Die Festlegung auf 0,5 bzw. 1,0 clo entspricht nicht immer der Praxis. In manchen Büros ist eine Kleiderordnung vorgeschrieben. So kann es vorkommen, dass auch im Sommer mit 1,0 clo für einen Anzug gerechnet werden muss. Damit werden mit dem C.A.T.S.-Kühllastprogramm auch Raumnutzungen erfasst, die in den Normen nicht enthalten sind. Vorteilhaft wäre, wenn die Normen verschiedene Bekleidungsgradbereiche für unterschiedliche Nutzungstypen festlegen würden. Bisher muss man typische Bekleidungskombinationen z.B. aus der DIN EN ISO 7730 [2, Anhang C] selbst ermitteln.

Bild 4 vermittelt einen Eindruck, wie die Behaglichkeitsauswertung im C.A.T.S.-Kühllastprogramm erfolgt. Das Balkendiagramm gibt Auskunft über den PPD-Wert während der Belegungszeit. Bewegt man den Cursor auf einen Datenpunkt wird der Wert als Quickinfo angezeigt. Alternativ ist auch eine permanente Wertanzeige im Diagramm möglich. Das grüne Band folgt aus dem zulässigen Bereich der DIN 1946-2 (s. Bild 1), welches für die operative Temperatur gilt. Die blaue Kurve (Ist-Operativtemperatur) sollte daher während der Belegungszeit innerhalb des Bandes liegen. Der Bogenverlauf des Behaglichkeitsbandes resultiert aus dem nachmittäglichen Anstieg der Außenlufttemperatur. Vorgesehen ist im Programm ein frei definierbares Band, welches auch die unterschiedlichen statistischen Definitionen der Außenlufttemperaturen erfasst, z.B. den Tageshöchstwert.

Die orangene Kurve stellt den Verlauf der Ist-Lufttemperatur dar. Wenn nicht gekühlt wird, bzw. bei frei schwingenden Temperaturen (Anlage aus) ist der Unterschied zwischen Luft- und Operativtemperatur gering. Der Anwender erhält durch die schnelle grafische Darstellung nach einem Rechenlauf die Möglichkeit, weitere Optimierungen vorzunehmen, um z.B. die mit den Bauherren vereinbarte Behaglichkeitskategorie einzuhalten. Im vorliegenden Beispiel beträgt der max. PPD-Wert 12 %. Will man die Kategorie II erreichen (< 10 %), müsste man z.B. die Anlage früher einschalten oder eine Soll-Lufttemperatur von 23 °C wählen. Auch eine stärkere Zuluftentfeuchtung könnte sich positiv auf den PPD-Wert auswirken.

Lokale thermische Behaglichkeit

Die Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit lassen sich mit der nächsten Programmversion partiell untersuchen. Anhand der Tabelle 7 ist dadurch eine Gesamtzuordnung der thermischen Behaglichkeit möglich. Der US-amerikanische ASHRAE Standard 55-2004 [14] schreibt nur Anforderungen entsprechend der Gesamtkategorie II vor. Auf eine Differenzierung nach Behaglichkeitskategorien wird in den USA demnach verzichtet.

Zugluft

Durch die zusätzliche Angabe eines Turbulenzgrades (Empfehlung: 40% für Mischlüftung, 25% für Quelläuftung) kann auch die Zugluft-rate DR nach [2] ermittelt werden. Im Sommer hat die Luftgeschwindigkeit einen gegenläufigen Einfluss zwischen PPD-Wert und Zugluft-rate, wodurch ein zu hoher Schätzwert für die Luftgeschwindigkeit

automatisch begrenzt wird. D.h., nimmt man einen zu hohen Wert für die Luftgeschwindigkeit an, um einen günstigeren PPD-Wert zu erhalten, steigt dadurch auch das Zugluftrisiko und der DR-Wert nimmt zu.

Vertikale Lufttemperaturunterschiede

Gemäß den meßtechnisch verifizierten Algorithmen in [19] kann der vertikale Lufttemperaturanstieg bei Quelläuftanlagen berechnet werden. Daraus lässt sich der Prozentsatz an Unzufriedenen für vertikale Lufttemperaturunterschiede „PDvert“ nach [2] ermitteln.

Warme und kalte Fußböden

Die mittlere Oberflächentemperatur des Fußbodens ist eine Auslegungsgröße für Fußbodenheiz- und -kühlssysteme. Daher ist hierfür eine Abschätzung notwendig und in das Programm einzutragen. Bei der Auswahl ist darauf zu achten, dass die vereinbarte Gesamtkategorie erhalten bleibt. Der minimale Prozentsatz an Unzufriedenen von 5,5 % ergibt sich bei einer Temperatur von 23,6 °C. Dieser Wert kann auch als Ersatzwert bei unbeheizte bzw. ungekühlte Fußböden verwendet werden, um diesen Einfluss aus der Gesamtzuordnung auszuschließen.

Asymmetrie der Strahlungstemperatur

Die VDI 2078 [6] sieht keine Berechnung der Oberflächentemperatur einzelner Bauteile vor. Es wird nur eine mittlere Oberflächentemperatur aller Bauteile ermittelt (mittl. Strahlungstemperatur). Für die Beurteilung der Strahlungsasymmetrie ist daher ein anderes Programm erforderlich. Bei Kühldecken spielt dieses Kriterium jedoch kaum eine Rolle, da die Verhinderung der Taupunktunterschreitung wesentlich engere Grenzen setzt. Eine warme Decke ist dagegen eher problematisch und sollte anhand anderer Methoden untersucht werden. Der berechnete Wert der asymmetrischen Strahlungstemperaturdifferenz ist in das Kühllastprogramm händisch zu übernehmen, um die Gesamtkategorie nach Tabelle 7 zu ermitteln.

Beispielrechnungen für die lokale Behaglichkeit

Anhand einer Beispielrechnung für o.g. Zeichensaal mit Quelläuftung soll verdeutlicht werden, wie die Bewertung der globalen und lokalen Behaglichkeit vollzogen werden könnte. Dazu sind in Tabelle 8 die Ergebnisse des neuen Rechenkerns vom C.A.T.S.-Kühllastprogramm für den eingeschwungenen Tag auszugsweise dargestellt.

Um die Gesamtkategorie II zu erreichen, musste eine Soll-Raumlufttemperatur von 22,5 °C gewählt werden. Das liegt hauptsächlich am Bekleidungsgrad von 0,7 clo (Unterwäsche, Hemd, Hose, Socken, Schuhe gem. [2, Tab. C.1]), der für einen Zeichensaal als angemessen angesehen wird. Die Kühllast änderte sich dadurch auf 74,7 W/m² und die operative Raumtemperatur „TOPIst“ erreicht zum Zeitpunkt des Kühllastmaximums (11. Std) 24,5 °C. Da bei der Quelläuftung die Luftgeschwindigkeit „vLuft“ und der Turbulenzgrad „TuLuft“ gering sind, ist die Zugluftrate DR mit 7,3 % unproblematisch. Der vertikale Lufttemperaturunterschied „dTLz“, der bei der Quelläuftung besondere Beachtung verdient, beträgt 2,5 K. Daraus ergeben sich 3 % Unzufriedene, was keine Veränderung der Gesamtkategorie bewirkt (Tabelle 7). „PDFb“ und „PDasy“ haben bei RLT-Anlagen keinen Einfluss. Sie sind daher auf ihren Minimalwert gesetzt.

Tabelle 8: Bewertung der thermischen Behaglichkeit für den Zeichensaal mit Quelläuftung

Tag [d]	Std [h]	Anz. [-]	Aktiv [met]	Bekl [clo]	vLuft [m/s]	TuLuft [%]	relFeu [%]	TList [°C]	TSist [°C]	TOPIst [°C]	dTLz [K]	PPD [%]	DR [%]	PDvert [%]	PDFb [%]	PDasy [%]	KAT [-]
11	11	48	1.4	0.7	0.1	25	50	22.5	26.5	24.5	2.5	9.4	7.3	3.0	5.5	0.0	II
11	12	48	1.4	0.7	0.1	25	50	22.5	26.4	24.4	2.5	9.3	7.3	2.9	5.5	0.0	II
11	13	0	0	0.0	0.1	25	50	22.5	26.3	24.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	II
11	14	48	1.4	0.7	0.1	25	50	22.5	26.3	24.4	2.3	9.0	7.3	2.5	5.5	0.0	II

Fazit

- Die Anlagen sind so zu planen, wie sie auch gebaut werden. D.h., wenn ein Lufttemperaturfühler in der Raumregelung vorgesehen ist, sollte die Eingangsgröße für die Lastberechnung auch eine Lufttemperatur sein. Bei einem Globe-Temperaturfühler stellt die operative Temperatur den Sollwert der Berechnung dar. Ansonsten erhält man undefinierte Planungszustände. Im Anschluss an die Lastberechnung ist zu kontrollieren, ob die Bedingungen für eine thermische Behaglichkeit eingehalten sind.
- Der PPD-Wert ist ein seit Jahren international anerkanntes Maß für die thermische Behaglichkeit. Die DIN EN 15251 hat auf Grundlage des PPD-Wertes Behaglichkeitskategorien festgelegt, die mit dem Bauherren zu vereinbaren sind. Darüber hinaus gibt sie noch empfohlene Innentemperaturen in der Tab. A.2 an, die aus der festgelegten Kategorie und weiteren Annahmen bezüglich Aktivität, Bekleidung, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte errechnet wurden. Eine zu starke Vereinfachung dieser Annahmen ist die Gleichsetzung von Lufttemperatur und operativer Temperatur. Der Bekleidungsgrad für den Sommer (0,5 clo) wurde für einige Raumnutzungen zu niedrig angesetzt. Die Empfehlungen aus der Tabelle A.2 wurden jedoch von einigen Planungsrichtlinien übernommen.
- Weiterhin schränken die Annahmen den Anwendungsbereich derart ein, dass eine projektbezogene Auslegung erschwert wird. Außerdem steht die feine Temperaturunterteilung in der Tabelle A.2 nicht im Einklang mit der möglichen Rechengenauigkeit von Heiz- und Kühllastberechnungen nach den anerkannten Normen und Richtlinien. Es empfiehlt sich daher, direkt den PPD-Wert als Auslegungskriterium bzw. die Gesamtkategorie nach Tabelle 7 zu benutzen.
- Mit dem C.A.T.S.-Kühllastprogramm ist eine solche normkonforme Auslegung möglich und auch für internationale Projekte anwendbar. Mit entsprechenden Klimadaten wäre mit diesem Programm auch eine dynamische Heizlastberechnung denkbar, die im Sinne der genannten Auslegungskriterien die Anforderungen erfüllt.
- Unstrittig ist, dass zumindest die operative Raumtemperatur und nicht die Lufttemperatur ein Auslegungskriterium nach den neueren o.g. Richtlinien und Normen ist. Die gängigen Kühllastprogramme geben aber weder den PPD-Wert noch die operative Raumtemperatur aus. Auch die Vorgabe einer Soll-Operativtemperatur ist bei diesen Programmen nicht möglich. Wenn bei der Lastberechnung die einschlägigen Behaglichkeitskriterien aus aktuellen Normen und Richtlinien nicht überprüft werden, würde das als ein Planungsfehler zu werten sein. Selbst wenn mit dem Auftraggeber eine Anforderung z.B. nur an die Raumlufttemperatur vereinbart wurde, muss der Planer darauf hinweisen, dass dieses Kriterium alleine nicht ausreicht, um thermische Behaglichkeit zu erreichen. Je nach Art der Belastung kann der Unterschied zwischen Lufttemperatur und operativer Temperatur 1 bis 4 K betragen. Beim Rechnungsansatz für eine Soll-Raumlufttemperatur könnten somit sehr schnell eine oder mehrere Behaglichkeitskategorien übersprungen werden, ohne dass der Programmanwender und damit auch der Bauherr hierüber informiert ist.

Die Literaturhinweise zu diesem Beitrag finden Sie im Internet nach Eingabe des Webcode „TAB0J01K“.