# Ein Vorschlag zur verbesserten Darstellung und Messung der operativen Raumtemperatur

Bernd Glück

**Die Behaglichkeitsgleichung stellt eine sehr wertvolle Grundlage zur Bewertung von Raumzuständen, wie sie von Personen mit unterschiedlicher Bekleidung und Aktivität empfunden werden, dar. Zur raschen Bewertung der thermischen Umgebung, zur Auslegung von Heiz- und Kühlanlagen und zu deren Leistungsregelung wird vereinfachend die operative Raumtemperatur (Empfindungstemperatur), die näherungsweise mit einem Globethermometer gemessen wird, verwendet. Die bisherige Ableitung der operativen Raumtemperatur aus der Behaglichkeitsgleichung und ihre messtechnische Umsetzung werden kritisch untersucht und Verbesserungen vorgeschlagen. Es finden dabei unterschiedliche Einsatzbedingungen – Büro- und Wohnräume sowie Fertigungsstätten mit einem breiten Anlagenspektrum – Beachtung.**

## 1. Behaglichkeitsgleichung

Die umfassenden Arbeiten *Fangers* [1] über die Teilwärmeströme am menschlichen Körper, die zusammenfassende Bilanzgleichung – die sogenannte „Behaglichkeitsgleichung" – und ihre Verifizierung an über 1300 Probanden liefern eine feste Basis für angewandte Bewertungen. Die Untersuchungsergebnisse bildeten auch die Grundlage für die DIN EN ISO 7730. In die Behaglichkeitsgleichung finden Eingang: Lufttemperatur, Strahlungstemperatur der Umgebung, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Wärmedämmeigenschaften der Kleidung (Bekleidungsmaßstab), Arbeitsschwere (Aktivitätsrate). Aus der Behaglichkeitsgleichung und den experimentellen Befunden wurden der PMV-Index (Predicted Mean Vote) und der PPD-Index (Predicted Percentage of Dissatisfied) abgeleitet. Sie finden sich ebenfalls in der vorgenannten Norm.

Der abzuführende Wärmestrom des Menschen $\dot{Q}_{ges}$ ergibt sich aus der inneren Wärmeproduktion vermindert um die extern abgegebene mechanische Leistung. Zweckmäßigerweise arbeitet man mit der Wärmestromdichte $\dot{q}_{ges}$ bezogen auf 1 m² Körperoberfläche, wodurch der zusätzliche Parameter – die Körpergröße – entfallen kann. Im Behaglichkeitsfall gilt die Wärmebilanzgleichung

$$\dot{q}_{ges} = \dot{q}_{IT} + \dot{q}_{SV} + \dot{q}_{TA} + \dot{q}_{TW} \qquad (1)$$

mit den nachfolgenden Summanden

$\dot{q}_{IT}$ insensible Transpiration (Feuchtediffusion mit anschließender Hauttrocknung)

$\dot{q}_{SV}$ Schweißverdunstung

$\dot{q}_{TA}$ Atmung (latenter und trockener Anteil)

$\dot{q}_{TW}$ trockene Wärmeabgabe ($\dot{q}_K$ Konvektionswärmestrom plus $\dot{q}_S$ Strahlungswärmestrom).

Dem Gesamtenergieumsatz sind optimale Werte für die Schweißsekretion und die Hauttemperatur zuzuordnen. Diese Werte in Gl. (1) eingesetzt, liefern dann die Behaglichkeitsgleichung nach DIN EN ISO 7730. Die globale thermische Behaglichkeit ist gesichert, wenn die Unzufrie-

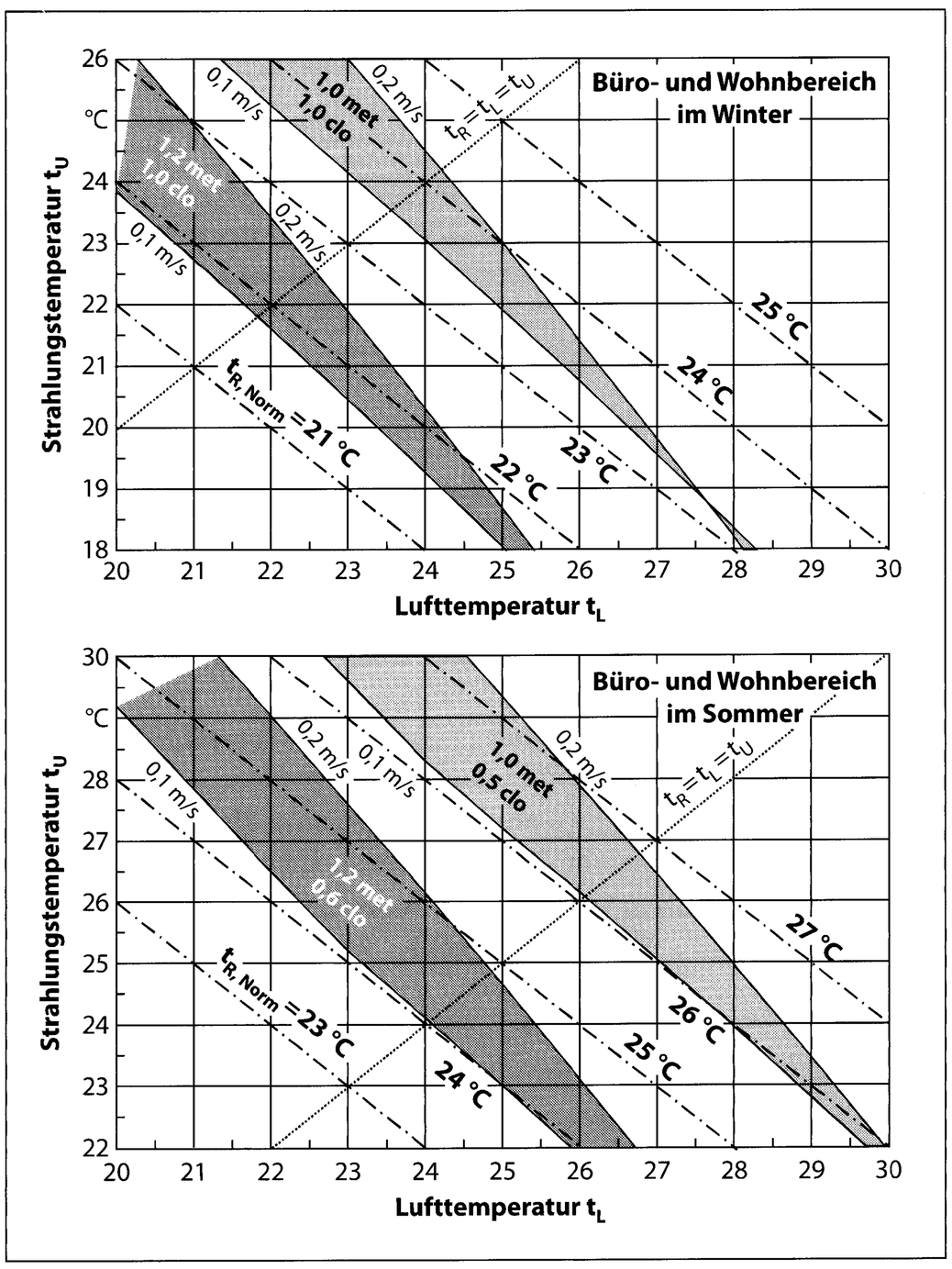


**Bild 1.** Behaglichkeitsdiagramme für Personen in Büro- und Wohnräumen bei ruhigem Sitzen (1,0 met) sowie Tätigkeit im Sitzen (1,2 met) und Luftgeschwindigkeiten von 0,1 m/s bis 0,2 m/s.
oben: bei wintertypischer Bekleidung (1,0 clo) sowie einer Luftfeuchte von 40 %.
unten: bei sommertypischer Bekleidung 0,5 clo bzw. 0,6 clo sowie einer Luftfeuchte von 50 %.
Die Behaglichkeitsdiagramme (Kurven $t_U = f(t_L)$) repräsentieren den Idealfall nach DIN EN ISO 7730 mit nur 5 % Unzufriedenen (PPD = 5 %).
Die strichpunktierten Parameterlinien entsprechen der Raumtemperatur $t_R = 0{,}5\ t_L + 0{,}5\ t_U$ nach DIN EN ISO 7730.

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, F+E TGA, Goethestraße 18, 08547 Jößnitz (Plauen) und Westsächsische Hochschule Zwickau (FH).

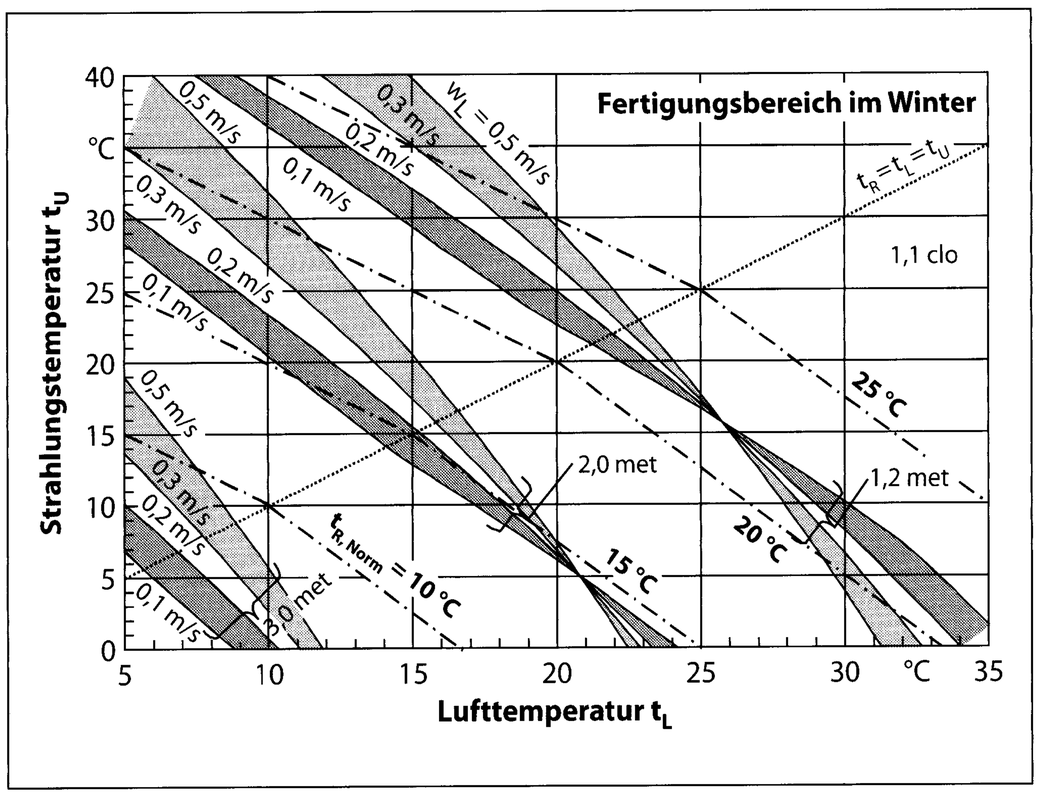


**Bild 2.** Behaglichkeitsdiagramme für Personen in Fertigungsbereichen bei verschiedenen Aktivitäten (1,2 met bis 3 met) bei wintertypischer Arbeitskleidung (1,1 clo) und unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten sowie einer Luftfeuchte von 40 %.
örtliche Heizkörper, Flächen- bzw. Strahlungsheizungen: Luftgeschwindigkeit 0,1 m/s bis 0,2 m/s
Luftheizungen: Luftgeschwindigkeit 0,3 m/s bis 0,5 m/s
Die Behaglichkeitsdiagramme (Kurven $t_U = f(t_L)$) repräsentieren den Idealfall nach DIN EN ISO 7730 mit nur 5 % Unzufriedenen (PPD = 5 %).
Die strichpunktierten Parameterlinien entsprechen den Raumtemperaturen nach DIN EN ISO 7730:
oberhalb $t_L = t_U$ für $w_L = 0{,}1 \ldots 0{,}2$ m/s: $t_R = 0{,}5\, t_L + 0{,}5\, t_U$
unterhalb $t_L = t_U$ für $w_L = 0{,}3 \ldots 0{,}5$ m/s: $t_R = 0{,}6\, t_L + 0{,}4\, t_U$.

denheitsrate von 5 % (PPD = 5 %) bezogen auf neutrales thermisches Empfinden (PMV = 0) erreicht ist.

Die *Bilder 1* und *2* zeigen Diagramme mit den Achsen Lufttemperatur $t_L$ und Strahlungstemperatur der Umgebung $t_U$ gemäß [2; 3], die für ausgewählte Zuordnungen (siehe Bildunterschriften) aus der Behaglichkeitsgleichung gewonnen wurden.

## 2. Operative Raumtemperatur (≡ Empfindungstemperatur)

Für die Beurteilung des thermischen Raumzustandes, zur Anlagenauslegung sowie zur Regelung der Anlagenleistung ist man bestrebt, eine einfache thermische Bezugsgröße zu haben, die zudem möglichst direkt gemessen und als Regelgröße dienen kann. Es liegt nahe, dafür eine Temperatur zu verwenden, wobei folgende Grundüberlegungen bei der Suche nach einer geeigneten operativen Raumtemperatur $t_R$ (≡ Empfindungstemperatur $t_E$) gelten:

- Ist die Behaglichkeitsgleichung erfüllt (PPD = 5 %) und es liegt der messtechnische Idealfall $t_L = t_U$ vor, dann wird der Mensch auch diese Temperatur empfinden. Sie sei $t_R = t_L = t_U$ genannt.
- Unterscheiden sich bei gleicher Aktivität, Bekleidung, Luftgeschwindigkeit und relativer Luftfeuchte sowie bei Einhalten der Behaglichkeit (PPD = 5 %) die Luft- und Strahlungstemperatur voneinander ($t_L \neq t_U$), dann wird der Mensch das gleiche thermische Empfinden wie im Ausgangsfall $t_L = t_U$ haben. Er wird also wieder die Temperatur $t_R$ wahrnehmen.
- *Damit besteht die Aufgabe, im Behaglichkeitsdiagramm eine Temperatur zu definieren, die längs der jeweiligen Behaglichkeitskurve konstant gilt.*

### *2.1 Bisherige Normdefinition*

Nach DIN EN ISO 7730 ist die operative Raumtemperatur $t_R$ als gemittelte Größe aus der Lufttemperatur $t_L$ und der Strahlungstemperatur $t_U$ determiniert:

$$t_R = a\, t_L + (1 - a)\, t_U. \tag{2}$$

Da bei höheren Luftgeschwindigkeiten die Konvektionswärmeabgabe ansteigt, wird die Lufttemperatur stärker wahrgenommen. Der Wichtungsfaktor a ist deshalb von der Luftgeschwindigkeit abhängig:

$w_L < 0{,}2$ m/s $\Rightarrow a = 0{,}5$
$w_L = 0{,}2$ m/s ... $< 0{,}6$ m/s $\Rightarrow a = 0{,}6$
$w_L = 0{,}6$ m/s ... $< 1$ m/s $\Rightarrow a = 0{,}7$.

Bei der praktischen Umsetzung wird in der Regel vereinfacht gesetzt:
*Heizungen mit örtlichen Heizkörpern und Flächenheizungen*

$$t_R = 0{,}5\, t_L + 0{,}5\, t_U \tag{3}$$

*Luftheizungen*

$$t_R = 0{,}6\, t_L + 0{,}4\, t_U. \tag{4}$$

In den *Bildern 1* und *2* sind die Linien konstanter operativer Raumtemperatur in die Behaglichkeitsdiagramme zusätzlich eingetragen. Da *Bild 1* für Büros und Wohnräume gilt, ist $t_R$ nach Gl. (3) gebildet. Im *Bild 2* wird zwischen typischen Strahlungs- und Luftheizungen unterschieden. In der Regel gilt für Flächen- bzw. Strahlungsheizungen $t_U > t_L$ und für Luftheizungen $t_L > t_U$, weshalb den jeweiligen Diagrammbereichen über bzw. unter $t_L = t_U$ die Netzlinien $t_R$ gemäß Gl. (3) bzw. Gl. (4) zugeordnet werden.

In allen Fällen zeigt es sich, dass die Kurven optimaler Behaglichkeit durch die Linien der operativen Raumtemperatur ungenügend wiedergegeben werden. Die Anstiege stimmen nicht überein. Die bisherigen Betrachtungen zur operativen Raumtemperatur gingen stets davon aus, dass die trockene Wärmeabgabe des Menschen, die für $t_L = t_U$ gilt, auch darüber hinaus für $t_L \neq t_U$ konstant bleibt bzw. dass der Unterschied zwischen $t_L$ und $t_U$ gering ist. Folgerichtig beachtete z.B. *Windisch* in [4] nur die Einflüsse Temperatur und Luftgeschwindigkeit auf die Wärmeübergangskoeffizienten, woraus sich dann unterschiedliche Wichtungsfaktoren a für Gl. (2) ergaben.

### *2.2 Vorschlag für eine Neudefinition*

Im Geltungsbereich der Behaglichkeitsdiagramme [1; 8] ändert sich die trockene Wärmeabgabe mitunter beträchtlich. Im Behaglichkeitsfall sinkt bei konstanter relativer Feuchte mit steigender Lufttemperatur die Wärmeabgabe durch Atmung und insensible Transpiration, in gleichem

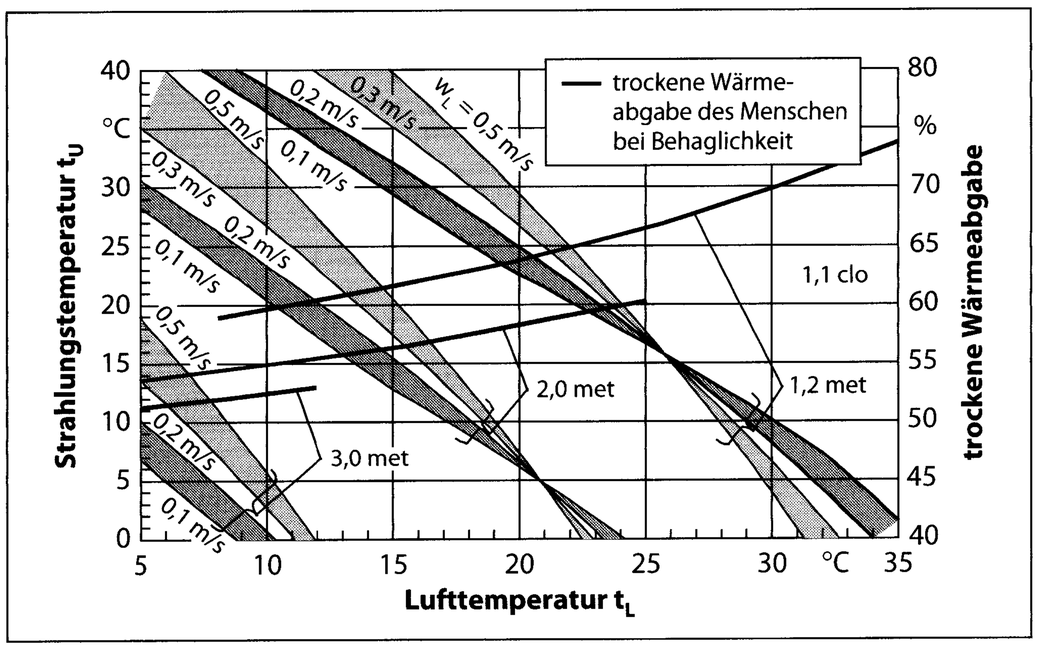


**Bild 3.** Behaglichkeitsdiagramme für Personen in Fertigungsbereichen für die Randbedingungen gemäß *Bild 2* mit Angabe der prozentualen Anteile der trockenen Wärmeabgabe.

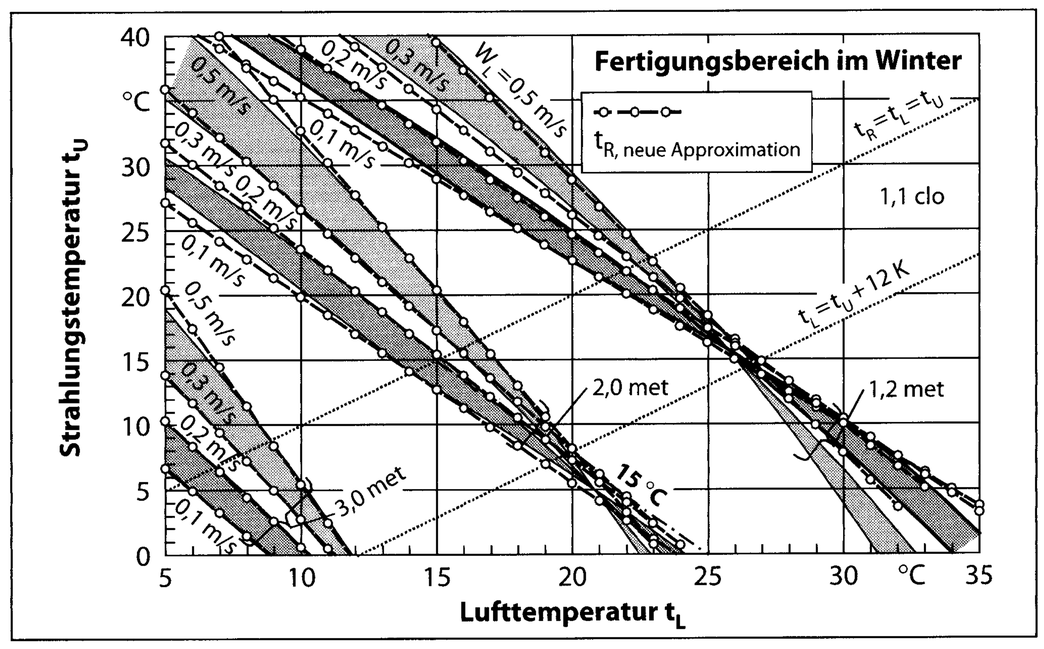


**Bild 5.** Behaglichkeitsdiagramme für Personen in Fertigungsbereichen für die Randbedingungen gemäß *Bild 2* mit Überlagerung der Näherungsgeraden für die neue operative Raumtemperatur gemäß Gl. (2) unter Verwenden des Faktors a nach Gl. (5).

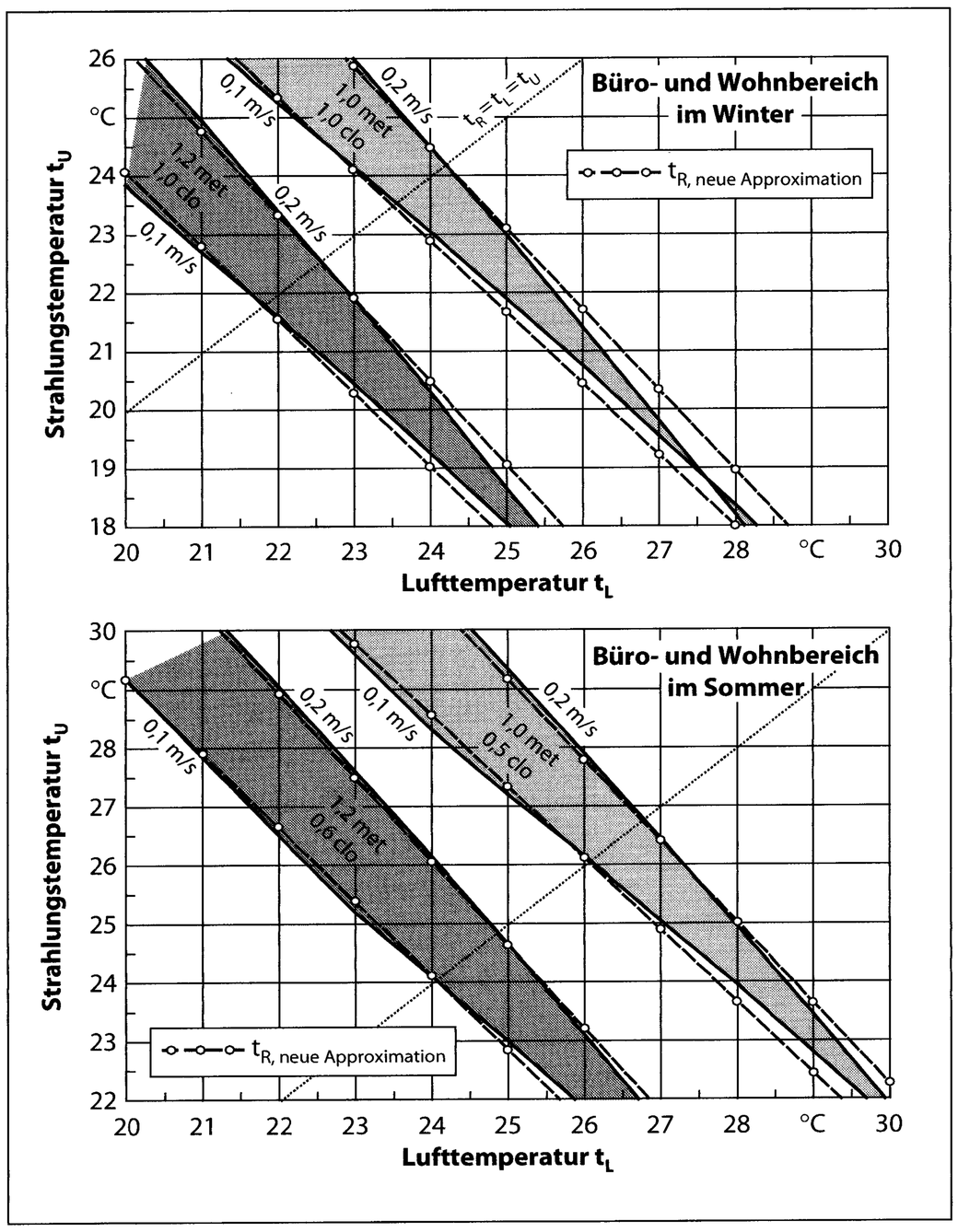


**Bild 4.** Behaglichkeitsdiagramme für Personen in Büro- und Wohnräumen für die Randbedingungen gemäß *Bild 1* mit Überlagerung der Näherungsgeraden für die neue operative Raumtemperatur gemäß Gl. (2) unter Verwenden des Faktors a nach Gl. (5).

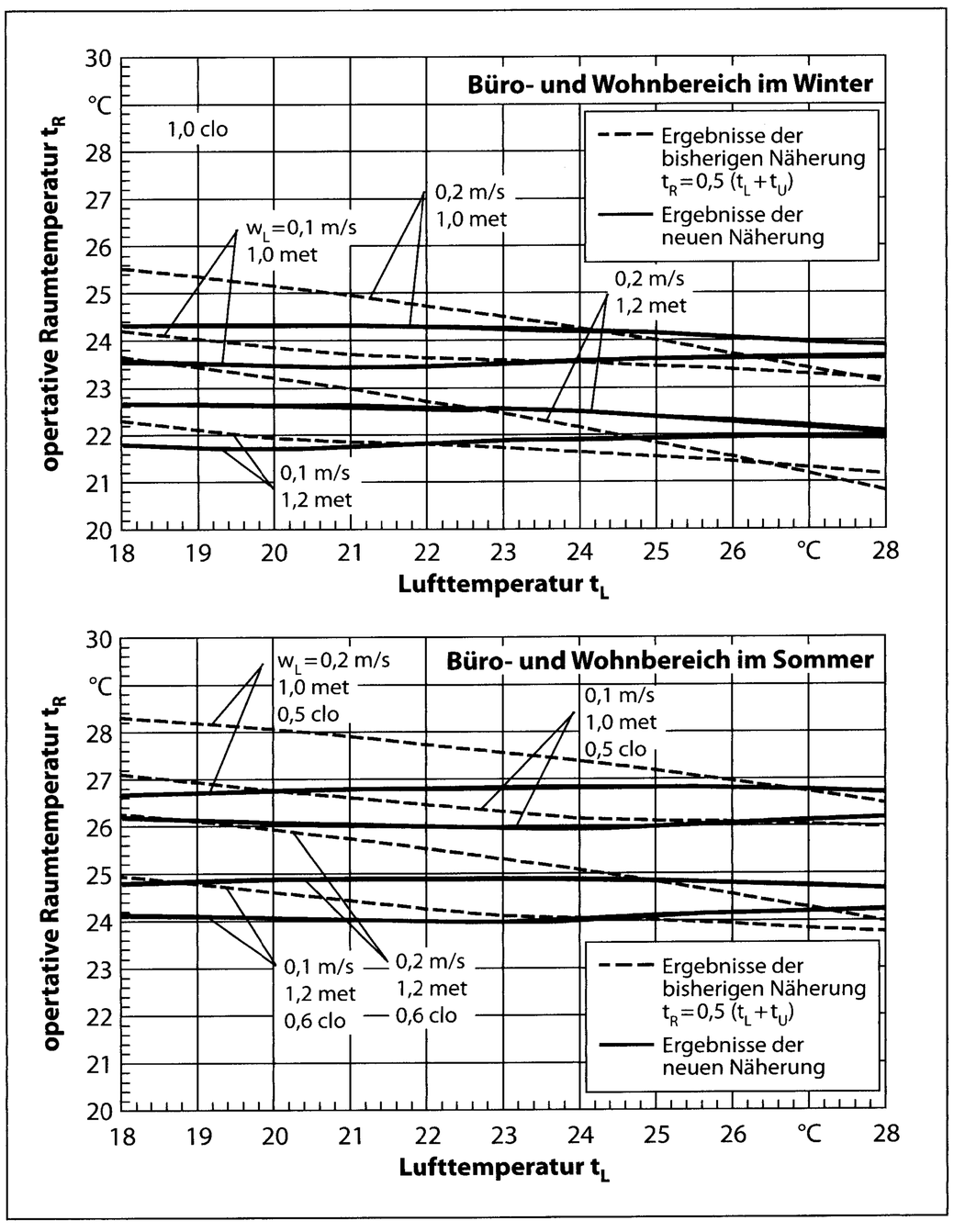


**Bild 6.** Direkte Gegenüberstellung der Raumtemperaturverläufe nach der bisherigen Näherung und der neuen Definition gemäß der Gln. (2) und (5) unter Behaglichkeitsbedingungen in einem durch die Lufttemperatur charakterisierten Untersuchungsbereich für Personen in Büro- und Wohnräumen (Randbedingungen gemäß *Bild 1*). Die Konstanz der Raumtemperatur wäre der Idealfall.

Maße steigt die trockene Wärmeabgabe an. Dies zeigen die im *Bild 3* zusätzlich eingetragenen Kurven deutlich.

In [5] wurde eine neue Beziehung für die operative Raumtemperatur vorgestellt. Hierbei wird der Koeffizient a nicht mehr nach wärmetechnischen Überlegungen (Konvektions- und Strahlungswärmestrom) bestimmt, sondern die Behaglichkeitskurven werden rein mathematisch im Hauptnutzungsbereich als Geraden approximiert. Unter Beibehalten der Gl. (2) auch für die neue operative Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) wird lediglich der Koeffizient a neu definiert:

$$a = 0{,}48 + 0{,}04\ \dot{q}_{ges} + 0{,}3\ w_L \qquad (5)$$

| | | |
|---|---|---|
| $\dot{q}_{ges}$ | met | Gesamtenergieumsatz |
| $w_L$ | m/s | Luftgeschwindigkeit. |

Die *Bilder 4* und *5* beziehen sich auf die Darstellungen der Behaglichkeitskurven in den *Bildern 1* und *2*. Die Grenzkurven werden hierbei der neuen Näherung für die operative Raumtemperatur nach Gl. (2) bei Substitution

**Tabelle 1.** Koeffizient a nach Gl. (5) in Abhängigkeit der Parameter Aktivität und Luftgeschwindigkeit sowie eine globale Empfehlung zur Berechnung der operativen Raumtemperatur.

| | | $w_L$ = 0,1 m/s | $w_L$ = 0,2 m/s | $w_L$ = 0,3 m/s | $w_L$ = 0,5 m/s |
|---|---|---|---|---|---|
| Aktivität | 1,0 met | 0,550 | 0,580 | 0,610 | 0,670 |
| | 1,2 met | 0,558 | 0,588 | 0,618 | 0,678 |
| | 1,6 met | 0,574 | 0,604 | 0,634 | 0,694 |
| | 2.0 met | 0,590 | 0,620 | 0,650 | 0,710 |
| | 3,0 met | 0,630 | 0,660 | 0,690 | 0,750 |
| Empfehlung für die neue operative Raumtemperatur | | a = 0,6 | | a = 0,7 | |

der Gl. (5) gegenübergestellt. Die Übereinstimmung der neuen Näherung mit den Behaglichkeitskurven ist generell gut. Dies wird im Vergleich zu den *Bildern 1* und *2* besonders deutlich, wenn man die Abweichung der dort eingetragenen Raumtemperaturverläufe zu den Behaglichkeitsgrenzkurven (PPD = 5 %) betrachtet.

Als Begrenzung sollte $t_L - t_U < 12$ K eingehalten werden. Beziehungsweise sollte die Oberflächentemperatur des Menschen nicht unter der Lufttemperatur liegen, sodass stets noch eine konvektive Wärmeabgabe erfolgen kann. Damit ist in praxi keine Einschränkung gegeben.

Der direkte Vergleich zwischen der alten und der neuen Raumtemperaturdefinition wird in den *Bildern 6* und *7* deutlich gezeigt. Bei gleicher Aktivität, Bekleidung, Luftfeuchte und -geschwindigkeit muss bei exakter Definition über dem gesamten Behaglichkeitsbereich die charakteristische Raumtemperatur konstant sein. Als Bezugsvariable für den Bereich wird in den Bildern die Lufttemperatur verwendet. Die Forderung wird von der neuen Definition sehr gut erfüllt, während die bisherige Näherung $t_R = 0{,}5\ t_L + 0{,}5\ t_U$ mitunter große Abweichungen aufweist.

## *2.3 Vorschlag für eine Pauschalfestlegung*

In *Tabelle 1* sind die Faktoren a ausgewertet. Daraus kann eine einfach handhabbare Pauschalfestlegung mit Zuordnung des Heizsystems getroffen werden:

*Heizungen mit örtlichen Heizkörpern, Flächen- und Strahlungsheizungen*

$$t_R = 0{,}6\ t_L + 0{,}4\ t_U \tag{6}$$

*Luftheizungen*

$$t_R = 0{,}7\ t_L + 0{,}3\ t_U\ . \tag{7}$$

Die entsprechenden $t_R$-Verläufe sind in den Grafiken der *Bilder 8* und *9* exemplarisch eingetragen. Sie passen sich der Realität ebenfalls besser als die bisherige Definition gemäß der Gln. (3) und (4) an, was der Vergleich mit den *Bildern 1* und *2* verdeutlicht.

# 3. Messung der operativen Raumtemperatur mit dem Globethermometer

Die Bestimmung der operativen Raumtemperatur nach Gl. (2) mit der getrennten Ermittlung der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur sollte Simulationsrechnungen vorbehalten bleiben, da die genaue Erfassung der Strahlungstemperatur nach [2; 3] messtechnisch sehr aufwändig wäre. Zur direkten Messung der operativen Raumtemperatur ist das Globethermometer nach DIN EN ISO 27726 geeignet. Die Normkugel hat einen Durchmesser $d_K$ = 150 mm und den Emissionsgrad $\varepsilon = 0{,}95$. Es gab Diskussionen, dass ein Ellipsoid der menschlichen Gestalt besser entspricht und deshalb Verwendung finden sollte. Aber auch über den geeignetsten Kugeldurchmesser gibt es unterschiedliche Aussagen. Generell gilt das folgende Postulat:

*Für die thermische Behaglichkeit ist die Globetemperatur dann repräsentativ, wenn sie im Verlauf der jeweils geltenden Behaglichkeitskurve (PPD = 5 %) einen konstanten Wert annimmt.*

Aus pragmatischer Sicht ist unter „Verlauf" der praxisrelevante Luft- bzw. Strahlungstemperaturbereich zu verstehen. Die „jeweilige Behaglichkeitskurve" wird bekanntermaßen durch die Aktivität, Bekleidung, Luftgeschwindigkeit und -feuchte repräsentiert.

## *3.1 Modellierung der Globetemperatur*

Im stationären Zustand muss die nachfolgende Wärmebilanz für die Kugel des Globethermometers erfüllt sein

$$\dot{q}_G = \alpha_K\,(t_G - t_L) + \sigma\,\varepsilon\,[(t_G + 273)^4 - (t_U + 273)^4] = 0, \tag{8}$$

wobei gelten

- $t_L$ Lufttemperatur
- $t_U$ Strahlungstemperatur der Umgebung
- $t_G$ Globetemperatur
- $\alpha_K$ konvektiver Wärmeübergangskoeffizient am Globethermometer
- $\sigma$ Strahlungskoeffizient ($\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴))
- $\varepsilon$ Emissionskoeffizient des Globethermometers.

Zur Berechnung von $\alpha_K$ werden in der DIN EN ISO 7726 sehr einfache Zusammenhänge für die freie und erzwungene Konvektion verwendet, die z. B. den Temperatureinfluss auf die Stoffwerte nicht beinhalten. Aus diesem

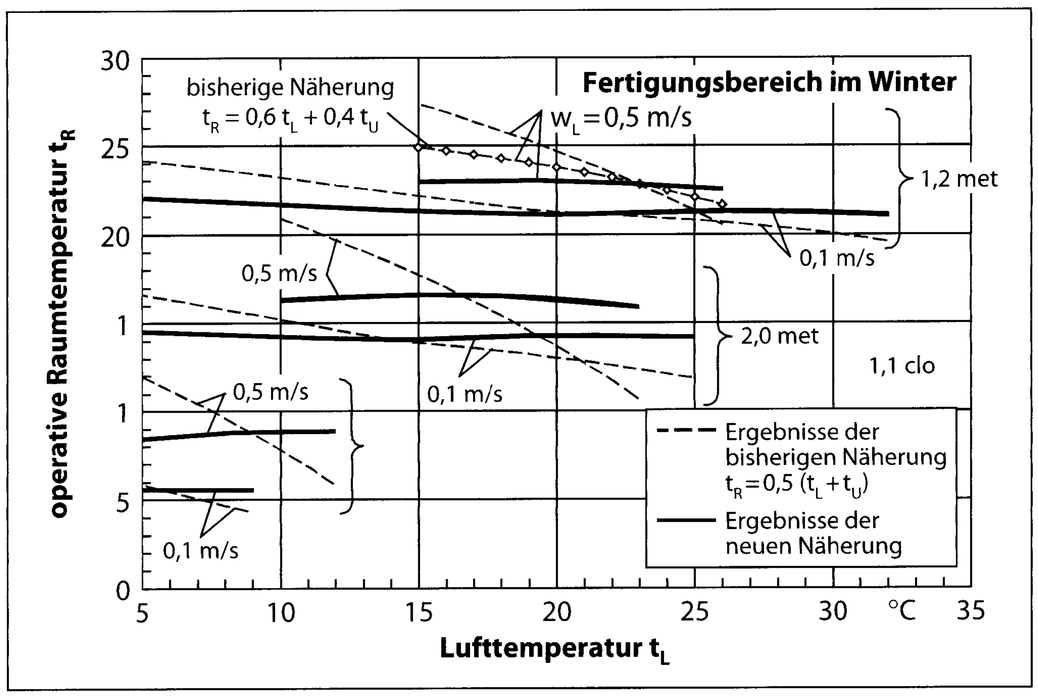


**Bild 7.** Direkte Gegenüberstellung der Raumtemperaturverläufe nach der bisherigen Näherung und der neuen Definition gemäß der Gln. (2) und (5) unter Behaglichkeitsbedingungen in einem durch die Lufttemperatur charakterisierten Untersuchungsbereich für Personen in Fertigungsbereichen (Randbedingungen gemäß *Bild 2*).
Die Konstanz der Raumtemperatur wäre der Idealfall

Grund werden die *Nußelt*gleichungen nach [6; 7] mit dem Kugeldurchmesser $d_K$ verwendet:

*Erzwungene Konvektion* (Stoffwerte für die umströmende Luft)

$$Re = w_L \; d_K / \nu \tag{9}$$

$$Nu_{erz} = 2 + \{0{,}441\, Re\, Pr^{0{,}667} + Re^{1{,}6}\, Pr^2 / [27{,}027 + 66{,}027\, Re^{-0{,}1}\, (Pr^{0{,}667} - 1)]^2\}^{0{,}5} \tag{10}$$

$$\alpha_{erz} = Nu_{erz}\, \lambda / d_K \tag{11}$$

*Freie Konvektion* (Stoffwerte für Luft in der Grenzschicht)

$$Ra = g\, d_K^3\, |t_G - t_L|\, Pr / [\nu^2\, (273 + t_{Grenzschicht})] \tag{12}$$

$$Nu_{frei} = 2 + 0{,}56\, [Pr / (0{,}846 + Pr)\, Ra]^{0{,}25} \tag{13}$$

$$\alpha_{frei} = Nu_{frei}\, \lambda / d_K. \tag{14}$$

Die iterative Berechnung von $t_G$ aus Gl. (8) erfolgt unter Verwendung des Größtwertes $\alpha_{frei}$ oder $\alpha_{erz}$.

## *3.2 Optimaler Kugeldurchmesser*

Die Berechnungen erfolgten für die Kugeldurchmesser $d_K$ = 150 mm, 100 mm und 50 mm. Als Untersuchungsspektrum dienten wiederum die Behaglichkeitsdiagramme der *Bilder 1* und *2*. Ihnen wurden die berechneten Globetemperaturen überlagert, wobei sich zeigte, dass die Konstanz der Globetemperatur im Mittel am besten durch den Kugeldurchmesser von 50 mm erfüllt wurde. Die *Bilder 10* und *11* zeigen die Ergebnisse. In Anbetracht der Tatsachen, dass auch die neue

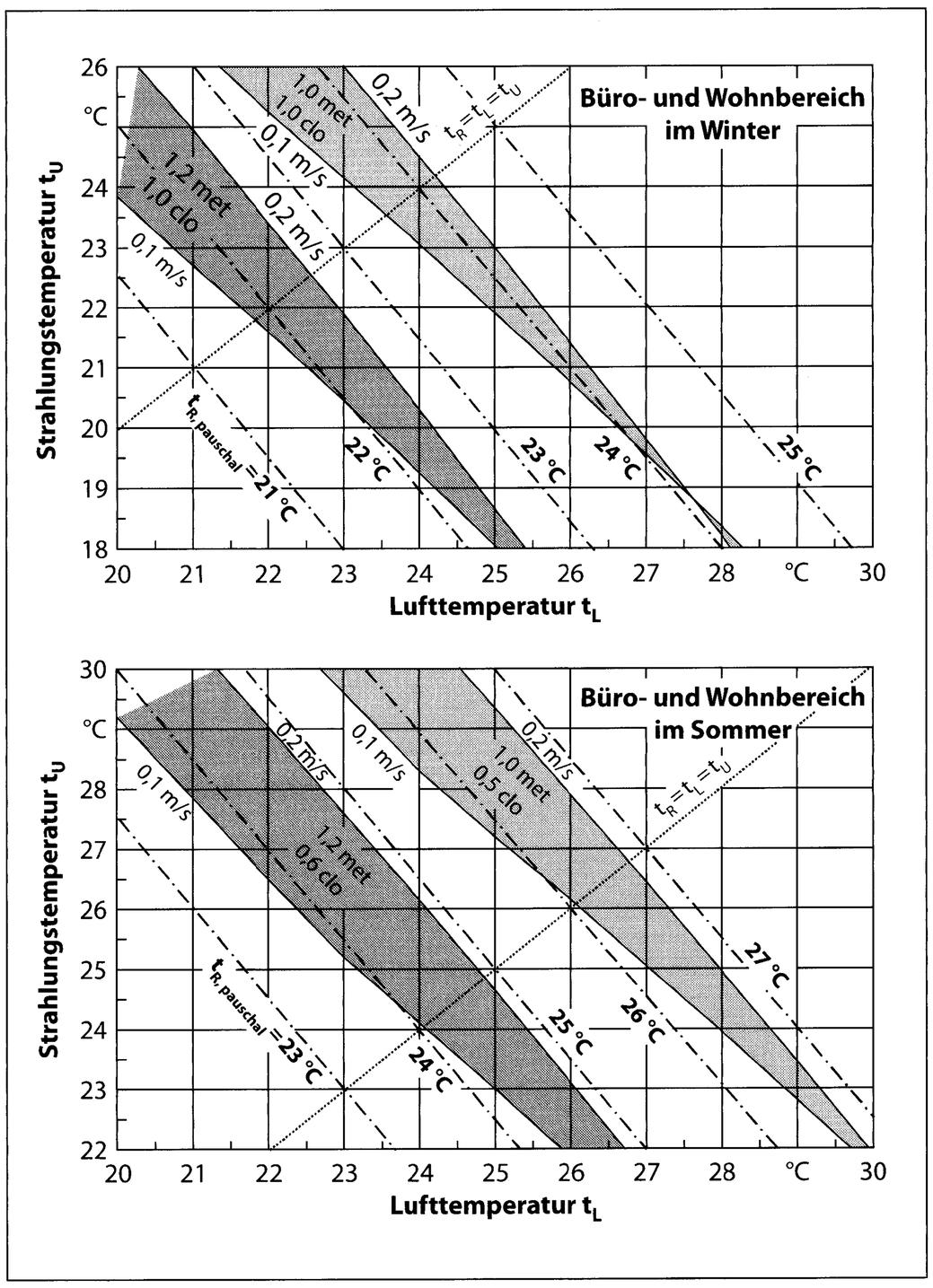


**Bild 8.** Behaglichkeitsdiagramme für Personen in Büro- und Wohnräumen für die Randbedingungen gemäß *Bild 1* mit Überlagerung der Näherungsgeraden für die neue operative Raumtemperatur gemäß Pauschalwerten für a nach *Tabelle 1* bzw. Gl. (6): $t_R = 0{,}6\, t_L + 0{,}4\, t_U$.

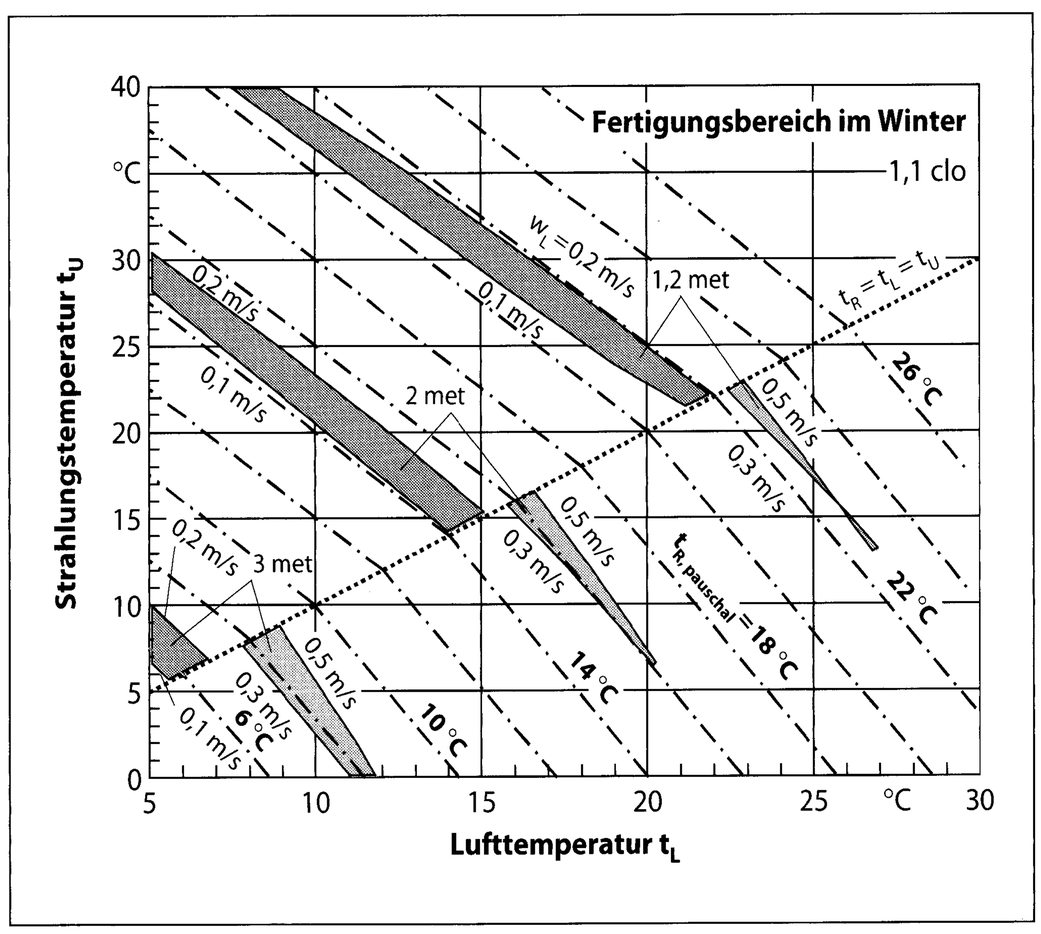


**Bild 9.** Behaglichkeitsdiagramme für Personen in Fertigungsbereichen für die Randbedingungen gemäß *Bild 2* mit Überlagerung der Näherungsgeraden für die neue operative Raumtemperatur gemäß Pauschalwerten für a nach *Tabelle 1* bzw. Gln. (6) und (7) unter Beachten der Anlageneigenschaften:
oberhalb der Linie $t_L = t_U$ (Heizkörper, Flächen- und Strahlungsheizungen): $t_R = 0{,}6\, t_L + 0{,}4\, t_U$
unterhalb der Linie $t_L = t_U$ (Luftheizungen): $t_R = 0{,}7\, t_L + 0{,}3\, t_U$.

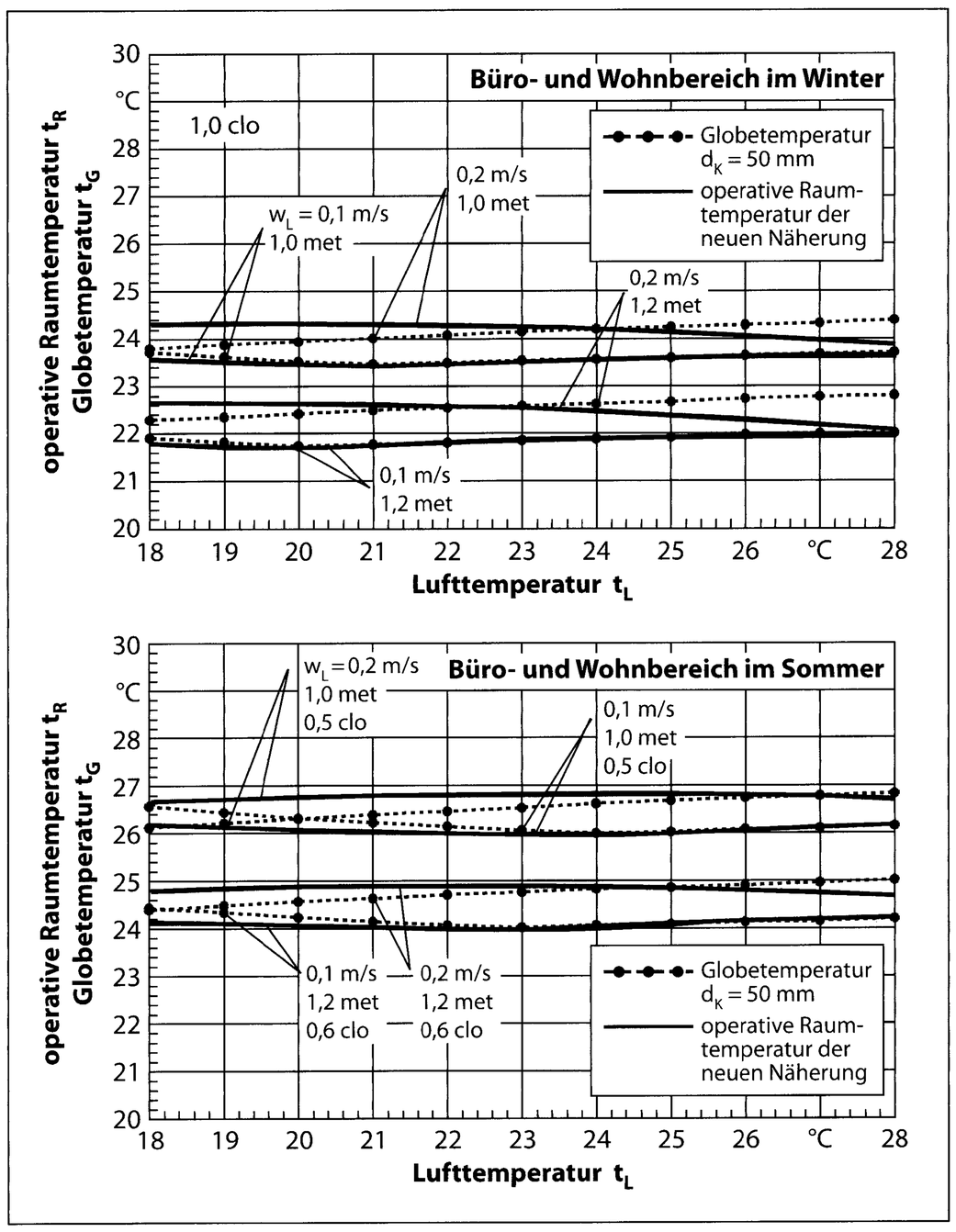


**Bild 10.** Gegenüberstellung der Globetemperatur (Kugeldurchmesser 50 mm) und der operativen Raumtemperatur nach der neuen Definition gemäß der Gln. (2) und (5) unter Behaglichkeitsbedingungen in einem durch die Lufttemperatur charakterisierten Untersuchungsbereich für Personen in Büro- und Wohnräumen für die Randbedingungen gemäß *Bild 1*.
Die Konstanz der Temperaturverläufe wäre der Idealfall.

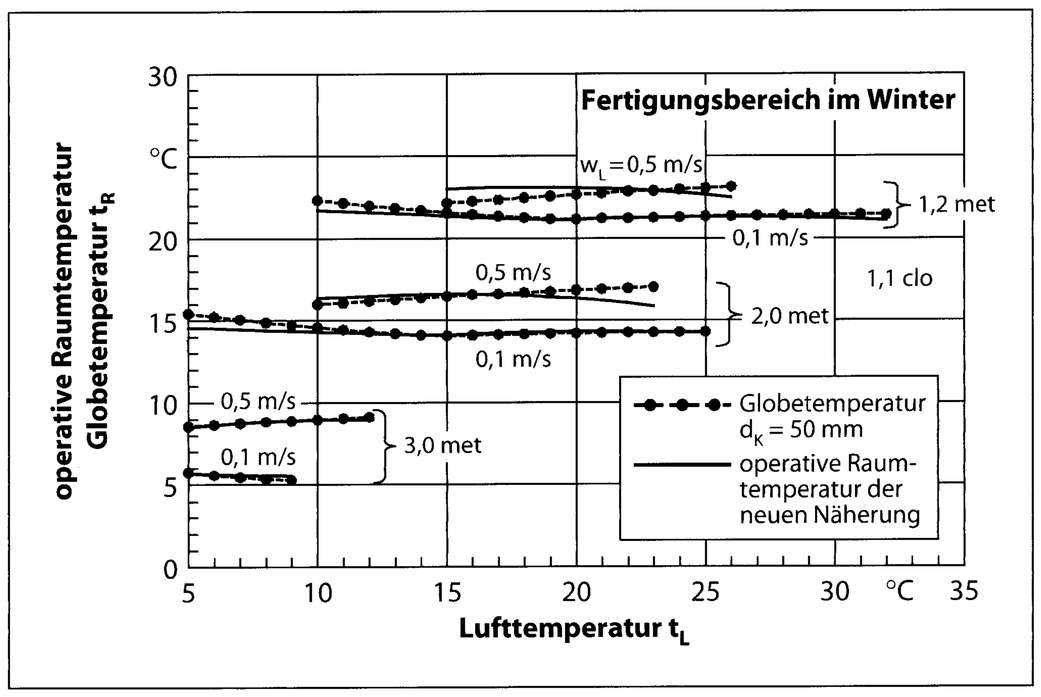


**Bild 11.** Gegenüberstellung der Globetemperatur (Kugeldurchmesser 50 mm) und der operativen Raumtemperatur nach der neuen Definition gemäß der Gln. (2) und (5) unter Behaglichkeitsbedingungen in einem durch die Lufttemperatur charakterisierten Untersuchungsbereich für Personen in Fertigungsbereichen für die Randbedingungen gemäß *Bild 2*.
Die Konstanz der Temperaturverläufe wäre der Idealfall.

Definition der operativen Raumtemperatur nach Gln. (2) und (5) die Behaglichkeitsgleichung nur näherungsweise wiedergeben kann und dass die Erfassung durch das Globethermometer die Lufttemperatur und die Strahlungstemperatur

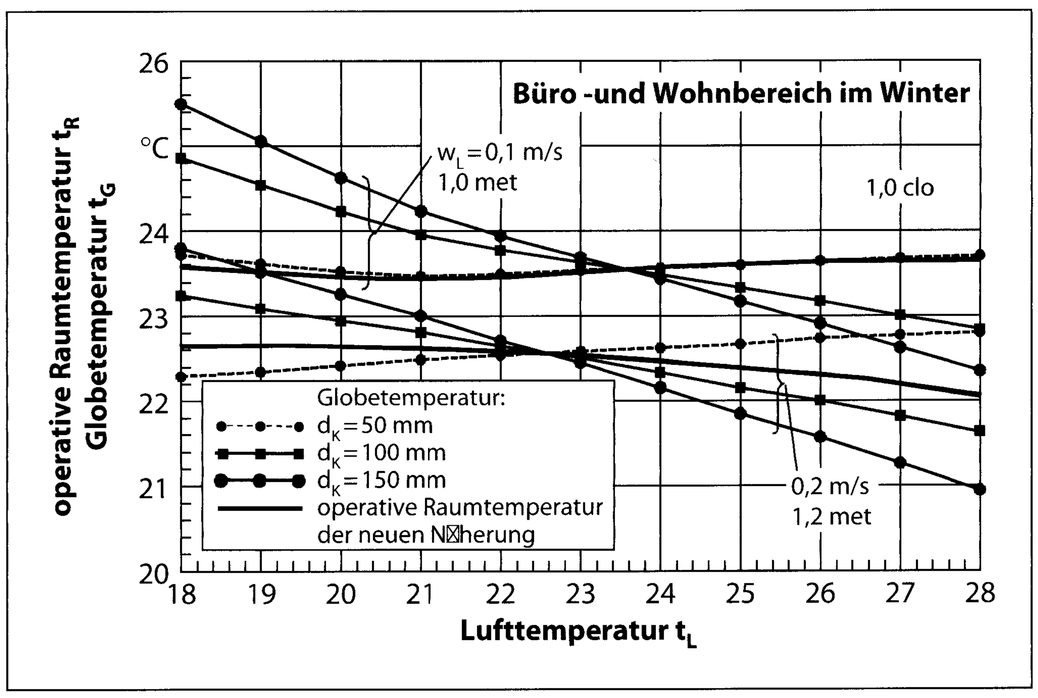


**Bild 12.** Gegenüberstellung der Globetemperaturen für unterschiedliche Kugeldurchmesser (50 mm, 100 mm und 150 mm) und der operativen Raumtemperatur nach der neuen Definition gemäß der Gln. (2) und (5) unter Behaglichkeitsbedingungen in einem durch die Lufttemperatur charakterisierten Untersuchungsbereich für Personen in Büro- und Wohnräumen im Heizfall für die Randbedingungen gemäß *Bild 1*.

der Umgebung komplex erfasst, ist die Übereinstimmung der beiden Werte sehr gut.

Die Optimierung des Kugeldurchmessers kann selbstverständlich noch detaillierter erfolgen. Bisher ist die Kompromisslösung anhand der Auswertungsfälle getroffen worden. *Bild 12* verdeutlicht die Einflüsse der unterschiedlichen Durchmesser für den Einsatzort Büro- bzw. Wohnraum im Heizfall (Bekleidungsmaß 1,0 clo). Bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s und minimaler Aktivität von 1,0 met ergibt der Kugeldurchmesser 50 mm die beste Übereinstimmung mit der Raumtemperatur. Die Durchmesser 100 mm und 150 mm zeigen in dieser Reihenfolge verstärkt Abweichungen. Im Falle typischer Büroaktivität von 1,2 met und der Luftgeschwindigkeit 0,2 m/s verringern sich die Abweichungen der Globetemperatur gegenüber der Raumtemperatur ausgehend von $d_K$ =150 mm beim Übergang zu $d_K$ =100 mm. Der Kugeldurchmesser 50 mm bewirkt bereits eine gegenteilige Abweichung. Im üblichen Einsatzfall werden die Abweichungen zwischen 0 K und 0,5 K zu erwarten sein. Dieser Sachstand wird als ausreichend erachtet.

Falls man dennoch weitere Optimierungen durchführen möchte, sollte jedoch zuerst die wärmetechnische Modellierung des Globethermometers experimentell überprüft und ggf. verbessert werden. Es sind hierbei auch konstruktive Belange der Fühlerkonstruktion zu beachten. Selbstverständlich könnte man sich auch vorstellen, den Kugeldurchmesser des Globethermometers einsatzabhängig zu wählen.

## 4. Fazit

Aufbauend auf der bekannten *Fanger*schen Behaglichkeitsgleichung nach DIN EN ISO 7730 wird vereinfacht die operative Raumtemperatur definiert, indem nach Gl. (2) eine gewichtete Mittelung der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur der Umgebung vorgenommen wird. In der Regel erfolgt eine arithmetische Mittelwertbildung. Verschiedene Ableitungen, die den Wichtungsfaktor a in Abhängigkeit der Einsatzbedingungen bestimmen, gehen von der Konstanz der

trockenen Wärmeabgabe aus. Dies trifft in vielen Fällen nicht zu, weshalb eine Anpassung des Wichtungsfaktors nach Gl. (5) unter Beachten der Luftgeschwindigkeit und der Aktivität vorgeschlagen wird. Die so ermittelte operative Raumtemperatur gibt die Behaglichkeitsbedingungen über einen größeren Bereich korrekter wieder.

Die Messung der operativen Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) erfolgt mit dem Globethermometer nach DIN EN ISO 7726. Die wärmetechnische Modellierung des Gerätes und exemplarische Simulationen weisen auf eine verbesserte Wiedergabe der operativen Raumtemperatur bei verkleinertem Kugeldurchmesser hin. Vorgeschlagen werden 50 mm.

**Literatur**

[1] *Fanger, P. O.*: Thermal Comfort – Analysis and Applications in Enviromental Enginneering. New York, Düsseldorf, London u. a.: McGraw-Hill Book Company 1970 (ISBN 0-07-019915-9).

[2] *Glück, B.*: Strahlungstemperatur der Umgebung. Gesundheits-Ingenieur 118 (1997) H. 6, S. 305–309.

[3] *Glück, B.*: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. http://www.rom-umwelt-stiftung.de (Rubrik: Arbeit bisher; Projekt 14)

[4] *Windisch, K.*: Abschnitt „Wärmephysiologie" in *Glück, B.*: Strahlungsheizung – Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen; Karlsruhe: C. F. Müller Verlag 1982 (ISBN 3-7880-7157-5).

[5] *Glück, B.*: Neue Definition der operativen Raumtemperatur in Fertigungsstätten. Heizung-Lüftung-Haustechnik 55 (2004) H. 3, S. 32–37 und H. 4, S. 51–55.

[6] VDI-Wärmeatlas. 9. Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag 2002.

[7] *Glück, B.*: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990 (ISBN 3-345-00515-8).

[8] *Esdorn, H.*: Rietschel – Raumklimatechnik I. Grundlagen. 16. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer-Verlag 1994 (ISBN 3-540-54466-6).