

Neue Definition der operativen Raumtemperatur in Fertigungsstätten

Teil 2

Bernd Glück, Jößnitz (Plauen)

Während in Wohn- und Bürobereichen für die Auslegung der klimatechnischen Anlagen die operative Raumtemperatur nach DIN 1946/02 herangezogen werden kann, sind in Fertigungsstätten andere Voraussetzungen gegeben, so dass für deren Definition neue Überlegungen zur Diskussion gestellt werden.

Im 1. Teil dieses Beitrages¹⁾ wurden die Themenbereiche Wärmephysiologische Zielsetzung, Verordnung und praktische Handhabung sowie die für die Behaglichkeit optimalen wärmephysiologischen Bedingungen diskutiert. Teil 2 knüpft an dem im 1. Teil begonnenen Abschnitt „Ableitung der operativen Raumtemperatur“ an.

Grundlage für die bisherige Definition der operativen Raumtemperatur

Die üblichen Definitionen der operativen Raumtemperatur gemäß der Gln. (7) und (8) resultieren aus der Betrachtung, dass die trockene Wärmeabgabe des Menschen, die für $t_L = t_U$ gilt, auch darüber hinaus für $t_L \neq t_U$ in weiten Grenzen konstant bleibt. Von Windisch wurde in [3]²⁾ zwar beachtet, dass sich die Wärmeübergangskoeffizienten temperaturabhängig ändern, woraus auch unterschiedliche Wichtungsfaktoren a für Gl. (6) abgeleitet wurden. Diese Überlegungen und Ableitungen sind für Aufenthaltsräume mit den üblichen Schwankungen der Luft- und der Strahlungstemperatur ausreichend. Für Großräume bzw. Fertigungsstätten mit Heizsystemen, die ganz bewusst einen sehr großen Unterschied zwischen Luft- und Strahlungstemperatur herbeiführen, gilt dies – wie aus den Bildern 2 und 3 folgend – aber nicht mehr a priori.

Vorschlag für eine neue Definition der operativen Raumtemperatur

Um den Sinn der operativen Raumtemperatur nach Abschnitt „Sinn der operativen Raumtemperatur“ (im 1. Teil dieses Beitrages) zu erfüllen, wird mit einfach handhabbaren Mitteln versucht, die Behaglichkeitskurven für PPD = 5 % gemäß Bild 1 zu beschreiben. Da bei $t_L \neq t_U$ die trockene Wärmeabgabe im Behaglichkeitsfall mit steigender Lufttemperatur ansteigt und die Wärmeabgabe durch Atmung und insensible Transpiration (bei konstanter relativer Feuchte) in gleichem Maße sinkt, liegt es nahe, die eingeführte Approximation nach Gl. (6) nicht allein auf die trockene Wärmeabgabe zu beschränken. Somit 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. (6) auch für die neue operative Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) wird lediglich der Koeffizient a neu definiert:

$$a = 0,48 + 0,04 \cdot q_{\text{ges}} + 0,3 \cdot w_L \quad (9),$$

wobei nachfolgende Größen einzusetzen sind:

q_{ges} met Gesamtenergieumsatz
 w_L m/s Luftgeschwindigkeit.

Die Auswertung dieser Beziehung ergibt das Diagramm im Bild 7 mit den Feststellungen:

- Die Übereinstimmung der neuen Näherung gemäß Gln. (6) und (9) mit den Originalkurven ist generell sehr gut.
- Als Begrenzung sollte $t_L - t_U < 12$ K eingehalten werden. Beziehungsweise sollte die Oberflächentemperatur des Men-

schen nicht unter der Lufttemperatur liegen, so dass stets noch eine konvektive Wärmeabgabe erfolgen kann.

□ Die gute Qualität der neuen Näherung wird im Vergleich zu Bild 6 besonders deutlich, wenn man die Abweichung der dort eingetragenen Raumtemperaturverläufe im Verhältnis zu den Behaglichkeitskurven betrachtet.

□ Der direkte Vergleich der bisherigen Raumtemperaturdefinition $t_R = 0,5(t_L + t_U)$ zur neuen Näherung der Raumtemperatur nach Gl. (6) in Verbindung mit Gl. (9) ist im Bild 8 gezeigt. Bei gleicher Aktivität, Bekleidung und Luftgeschwindigkeit sowie -feuchte muss bei ordnungsgemäßer Definition über dem gesamten Behaglichkeitsbereich die charakteristische Raumtemperatur konstant sein. Dies wird von der neuen operativen Raumtemperatur sehr gut erfüllt, während die bisherige Definition nach Gl. (7) bzw. Gl. (8) zu bedeutenden Abweichungen führt.

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, betreibt ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig.

¹⁾ Teil 1 des Beitrages ist erschienen in HLH Bd. 55 (2004) Nr. 3, S. 32-37.

²⁾ Literaturverzeichnis im 1. Teil des Beitrages

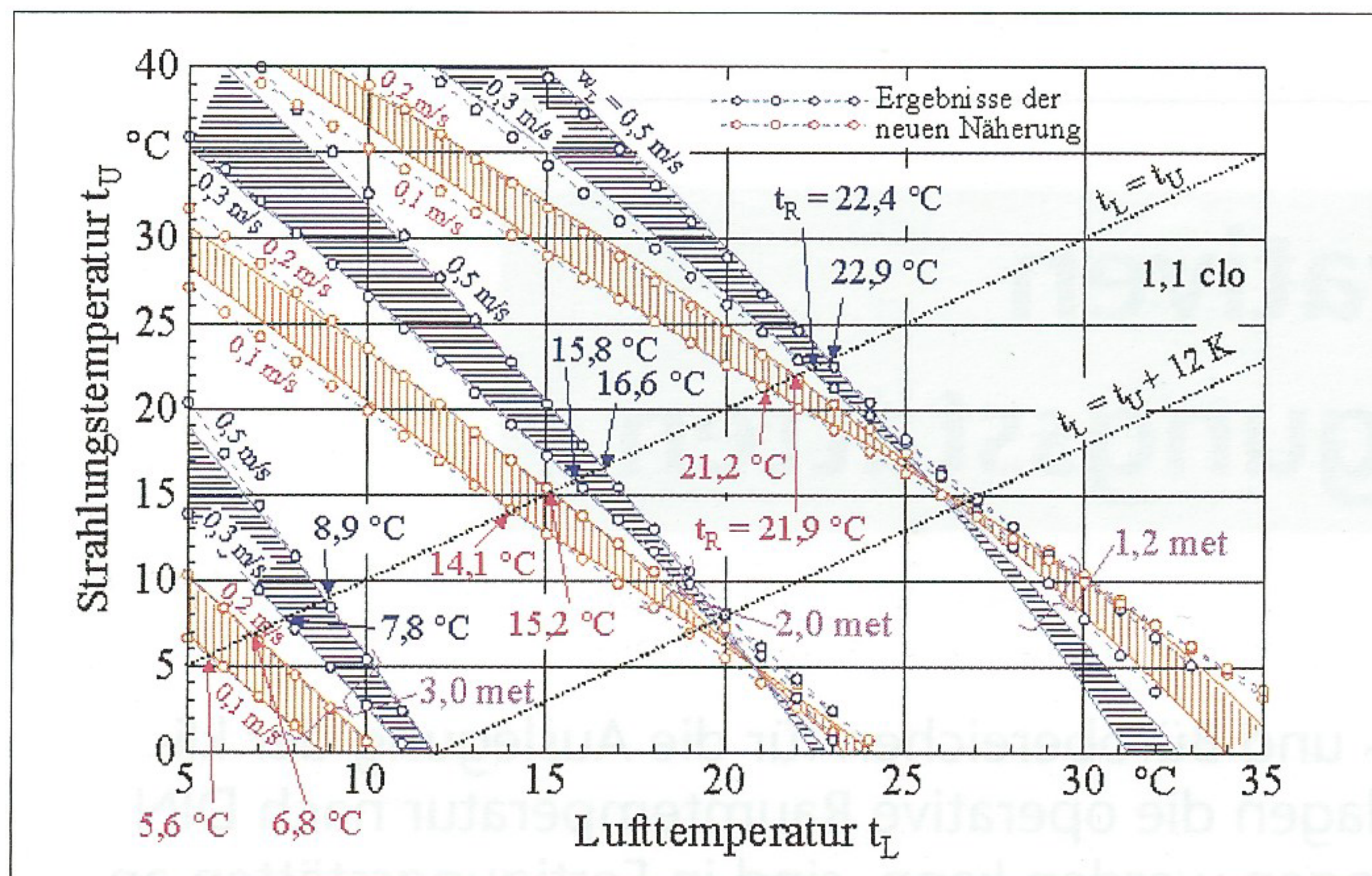


Bild 7

Behaglichkeitskurven für die Aktivitäten (1,2 ... 3 met) bei einem Wärmeleitwiderstand der Kleidung von 1,1 clo (winterliche Arbeitsbekleidung), bei der relativen Luftfeuchte 40 % und für ausgewählte Luftgeschwindigkeiten analog Bild 1

Der rote Bereich (0,1 ... 0,2 m/s) gilt für Strahlungsheizungen und der blaue Bereich (0,3 ... 0,5 m/s) trifft in der Regel für Luftheizungen zu. Die Kurven $t_U = f(t_L)$ repräsentieren den Idealfall nach DIN EN ISO 7730 mit nur 5 % Unzufriedenheit (PPD = 5 %). Den Behaglichkeitskurven sind die Ergebnisse der neuen Näherung für die Raumtemperatur nach Gln. (6) und (9) überlagert. Für sie gilt jeweils $t_R = t_L = t_U$ bei PPD = 5 % (Werte sind eingetragen)

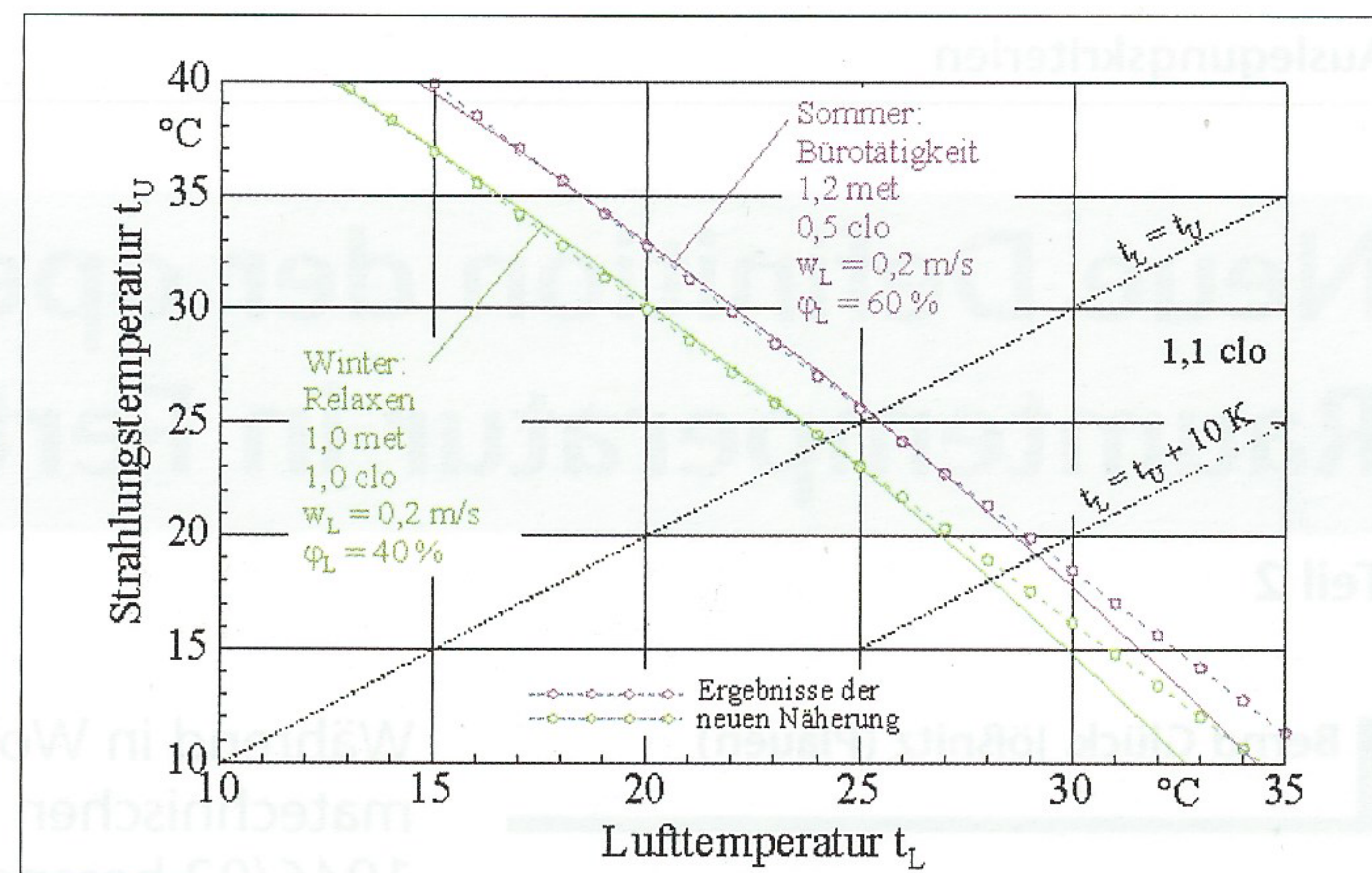
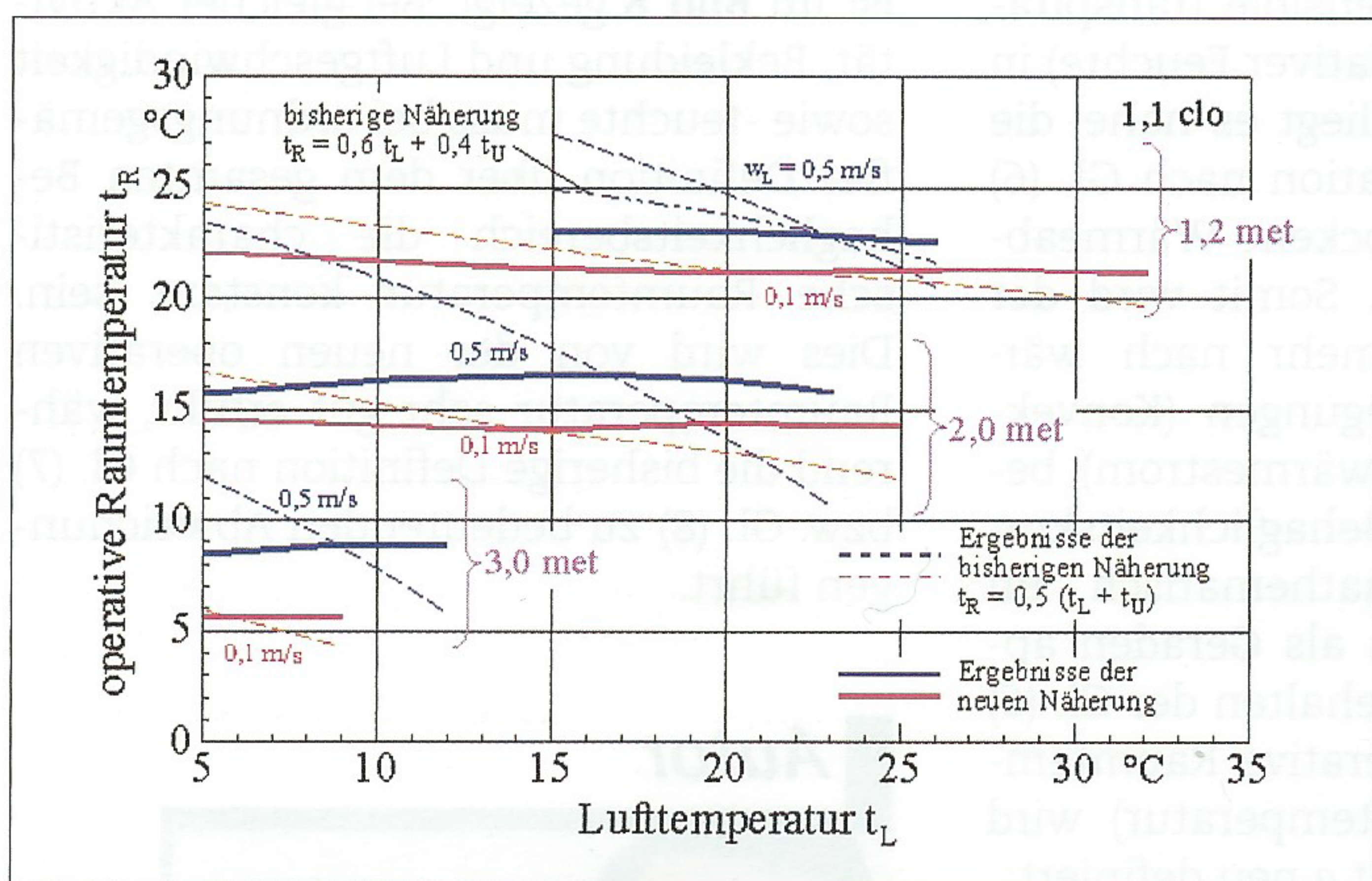


Bild 9

Ergänzende Betrachtung zur Qualität der neuen Näherung für die operative Raumtemperatur nach Gln. (6) und (9) im Vergleich zu den Behaglichkeitskurven nach DIN EN ISO 7730 für ausgewählte Komfortbereiche bei geringer Aktivität und unterschiedlicher Bekleidung

- In der Regel ist die Näherung bei kleinen Luftgeschwindigkeiten mit einem kleineren Fehler als bei großen Luftgeschwindigkeiten behaftet.
- Die neue operative Raumtemperatur gilt übrigens auch in einem erweiterten Bereich, beispielsweise im winterlichen Ruhefall oder aber bei sommerlicher leichter Betätigung recht gut, wie Bild 9 ergänzend zeigt.

Zur Bemessung von Strahlungs- und Luftheizungen in Großräumen sowie zur detaillierten Bewertung der Behaglichkeit kann die Gl. (6) mit dem Koeffizienten a nach Gl. (9) bzw. nach Tabelle 1 mit sehr guter Genauigkeit verwendet werden. Eine

Bild 8

Gegenüberstellung der Raumtemperaturverläufe im Behaglichkeitsbereich bei Definition nach der bisherigen Methode gemäß der Gl. (7) bzw. nach Gl. (8) und nach der neuen Approximation auf der Grundlage der Gl. (6) in Verbindung mit Gl. (9)
Die Konstanz der operativen Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) ist ein Maß für die Qualität der Näherung.

		Strahlungsheizung		Luftheizung	
		$w_L = 0,1 \text{ m/s}$	$w_L = 0,2 \text{ m/s}$	$w_L = 0,3 \text{ m/s}$	$w_L = 0,5 \text{ m/s}$
Aktivität	1,2 met	0,558	0,588	0,618	0,678
	2 met	0,590	0,620	0,650	0,710
	3 met	0,630	0,660	0,690	0,750
Empfehlung für die neue operative Raumtemperatur		0,6		0,7	

Tabelle 1

Koeffizient a nach Gl. (9) zur Nutzung der Gl. (6) bei Kenntnis der detaillierten Parameter (Aktivität und Luftgeschwindigkeit) sowie eine globale Empfehlung zur Berechnung der operativen Raumtemperatur in Fertigungsstätten

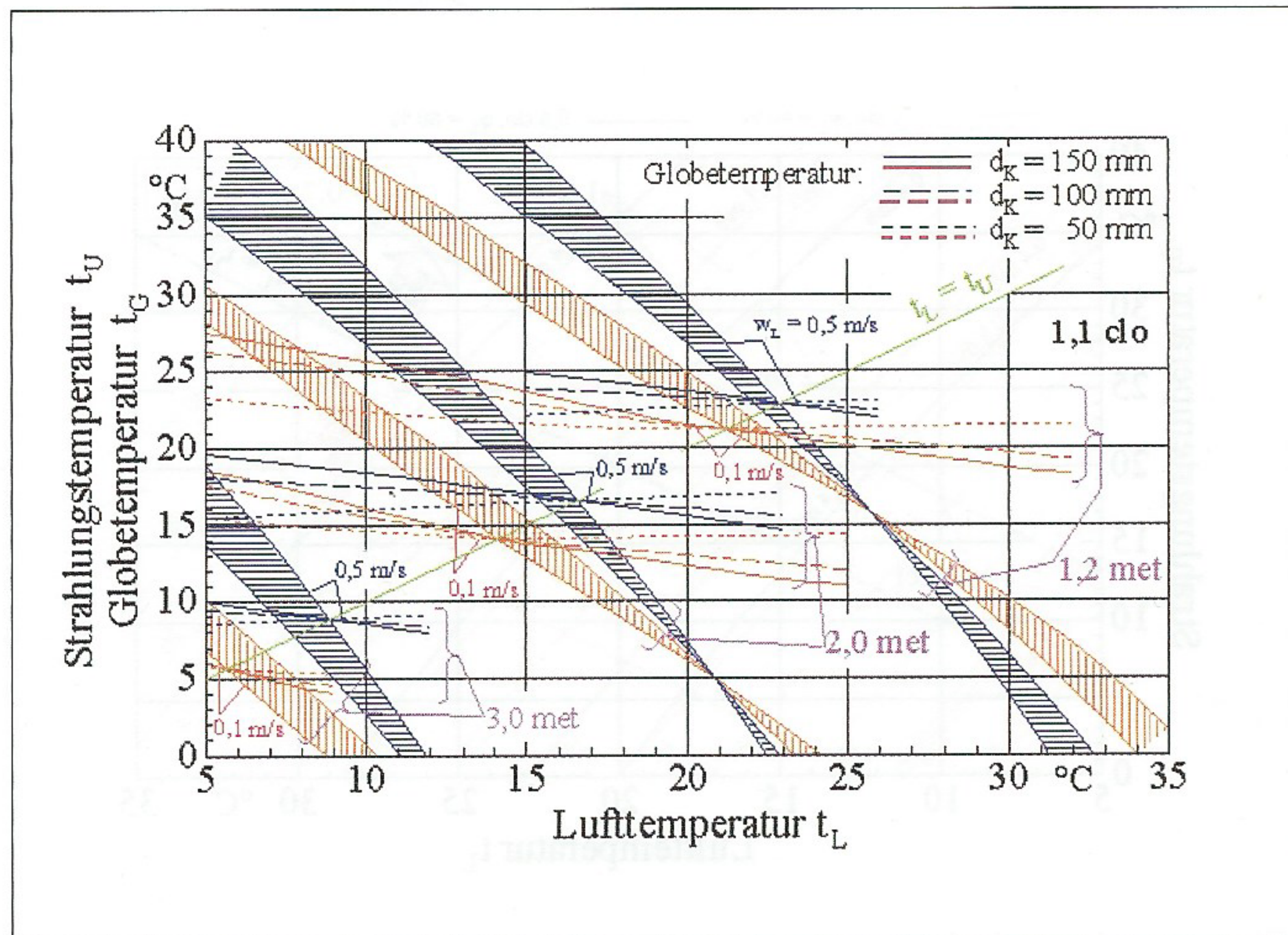


Bild 10

Behaglichkeitsdiagramme für verschiedene Aktivitäten (1,2 ... 3 met) bei winterlicher Arbeitsbekleidung (1,1 clo), der relativen Luftfeuchte von 40 % und den Luftgeschwindigkeiten 0,1 ... 0,2 m/s (rote Linien) für Strahlungsheizungen sowie 0,3 ... 0,5 m/s (blaue Linien) für Luftheizungen

Für alle Kurven, die die schraffierten Bereiche begrenzen, gilt die prozentuale Unzufriedenheit PPD = 5 %. Überlagert sind die berechneten Globetemperaturen für die Kugeldurchmesser von 50 mm (kurz gestrichelte Linien), 100 mm (lang gestrichelte Linien) und 150 mm (durchgezogene Linien)

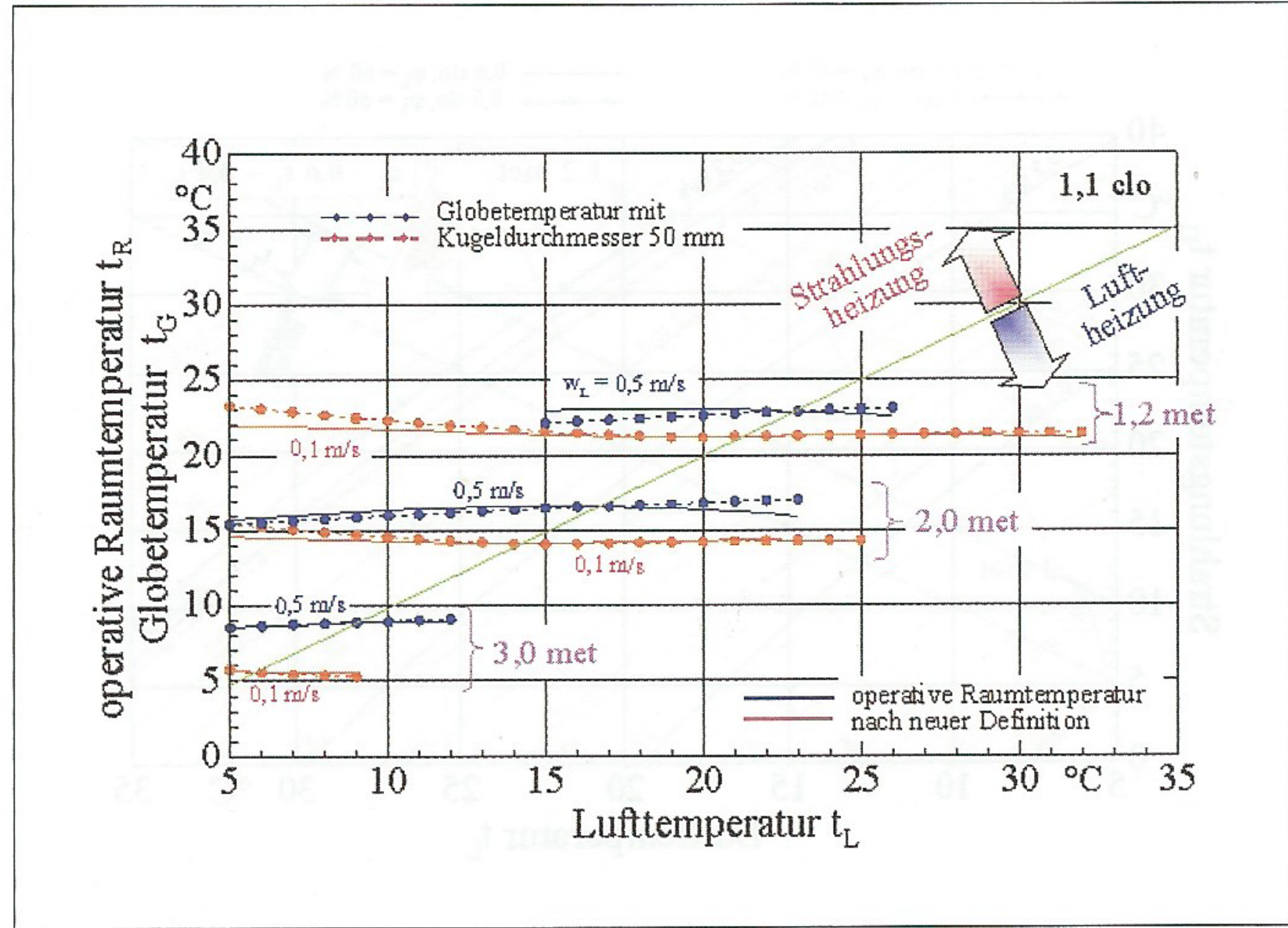


Bild 11

Gegenüberstellung der Globetemperaturen für ein Gerät mit dem Kugeldurchmesser von 50 mm (gestrichelte Linien mit Kreissymbolen) und der operativen Raumtemperaturen nach der neuen Definition gemäß Gln. (6) und (9) für ausgewählte Aktivitäten (1,2 ... 3 met) und Grenzluftgeschwindigkeiten (0,1 m/s sowie 0,5 m/s)

Die zu vergleichenden Kurven sind den Bildern 8 und 10 entnommen

Mittelung der Angaben in Tabelle 1 ergibt die Empfehlungen: Strahlungsheizungen und Heizungen mit örtlichen Heizkörpern

$$t_R = 0,6 t_L + 0,4 t_U \quad (10)$$

Luftheizungen

$$t_R = 0,7 t_L + 0,3 t_U \quad (11)$$

Messtechnische Erfassung der operativen Raumtemperatur

Die zur Auswertung der Gln. (10) und (11) nötige Lufttemperatur ist durch Messung leicht bestimmbar; die Strahlungstemperatur der Umgebung kann beispielsweise aus den gemessenen Oberflächentemperaturen des Raumes nach [4] ermittelt werden. Dies ist jedoch relativ aufwändig.

Zur direkten Messung der operativen Raumtemperatur ist das Globethermometer nach DIN EN ISO 27726 geeignet. Der Durchmesser der Normkugel beträgt $d_K = 150$ mm und für den Emissionsgrad sollte $\varepsilon = 0,95$ (mattschwarz gestrichen) gelten. Untersuchungen zeigten, dass ein Ellipsoid anstelle einer Kugel der menschlichen Gestalt besser entspräche. Aber auch über den geeignetsten Kugeldurchmesser gibt es unter-

schiedliche Aussagen. Als Bewertungsmaßstab gilt:

Die Globetemperaturen sind dann für die thermische Behaglichkeit repräsentativ, wenn die für eine bestimmte Aktivität, Bekleidung und Luftzustand (Geschwindigkeit sowie Feuchte) geltenden Behaglichkeitskurven für PPD = 5 % über dem gesamten Bereich möglichst konstant bleiben.

In diesem Falle würde den operativen Raumtemperaturen nach der neuen Definition (vgl. Bild 8) ideal entsprochen.

Ableitung des geeigneten Kugeldurchmessers

Im Weiteren wird untersucht, welcher Kugeldurchmesser d_K die operative Raumtemperatur am besten repräsentiert. Für den stationären Zustand muss die nachfolgende Wärmebilanz erfüllt sein

$$\dot{q}_G = \alpha_K (t_G - t_L) + \sigma \varepsilon \left[(t_G + 273)^4 - (t_U + 273)^4 \right] = 0 \quad (12)$$

wobei gelten

t_L Lufttemperatur

t_U Strahlungstemperatur der Umgebung

t_G Globetemperatur

α_K konvektiver Wärmeübergangskoeffizient am Globethermometer

σ Strahlungskoeffizient ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$)

ε Emissionskoeffizient des Globethermometers.

Für die Berechnung von α_K werden in der DIN EN ISO 27726 Angaben für die freie und die erzwungene Konvektion gemacht. Sie sind sehr einfach strukturiert und beinhalten beispielsweise den Temperatureinfluss auf die Stoffwerte nicht. Aus diesem Grund werden die in [5; 6] angegebenen Nußeltgleichungen verwendet:

Erzwungene Konvektion (Stoffwerte für die umströmende Luft)

$$Re = w_L d_K / \nu \quad (13)$$

$$Nu_{\text{erz}} = 2 + \{0,441 Re Pr^{0,667} + Re^{1,6} Pr^2 / [27,027 + 66,027 Re^{-0,1} (Pr^{0,667} - 1)]\}^{0,5} \quad (14)$$

$$\alpha_{\text{erz}} = Nu_{\text{erz}} \lambda / d_K \quad (15)$$

Freie Konvektion (Stoffwerte für Luft in der Grenzschicht)

$$Ra = 9,81 d_K^3 |t_G - t_L| Pr / [\nu^2 (273 + t_{\text{Grenzschicht}})] \quad (16)$$

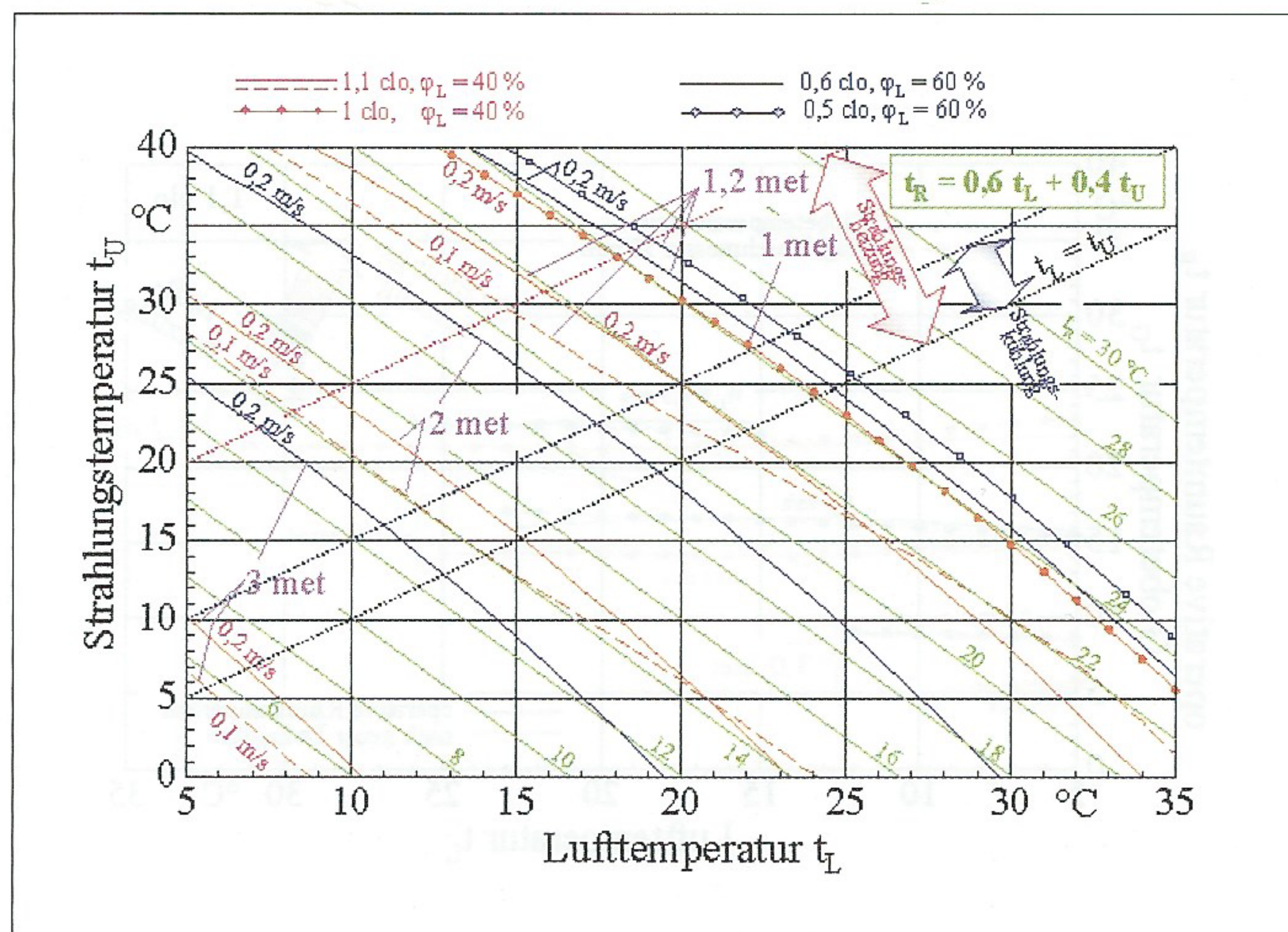


Bild 12

Behaglichkeitsdiagramm mit einem Netz (grüne Linien) für die operative Raumtemperatur $t_R = 0,6 t_L + 0,4 t_U$ und Überlagerung mit Behaglichkeitskurven unterschiedlicher Parameter im Nutzbereich Strahlungsheizung und -kühlung

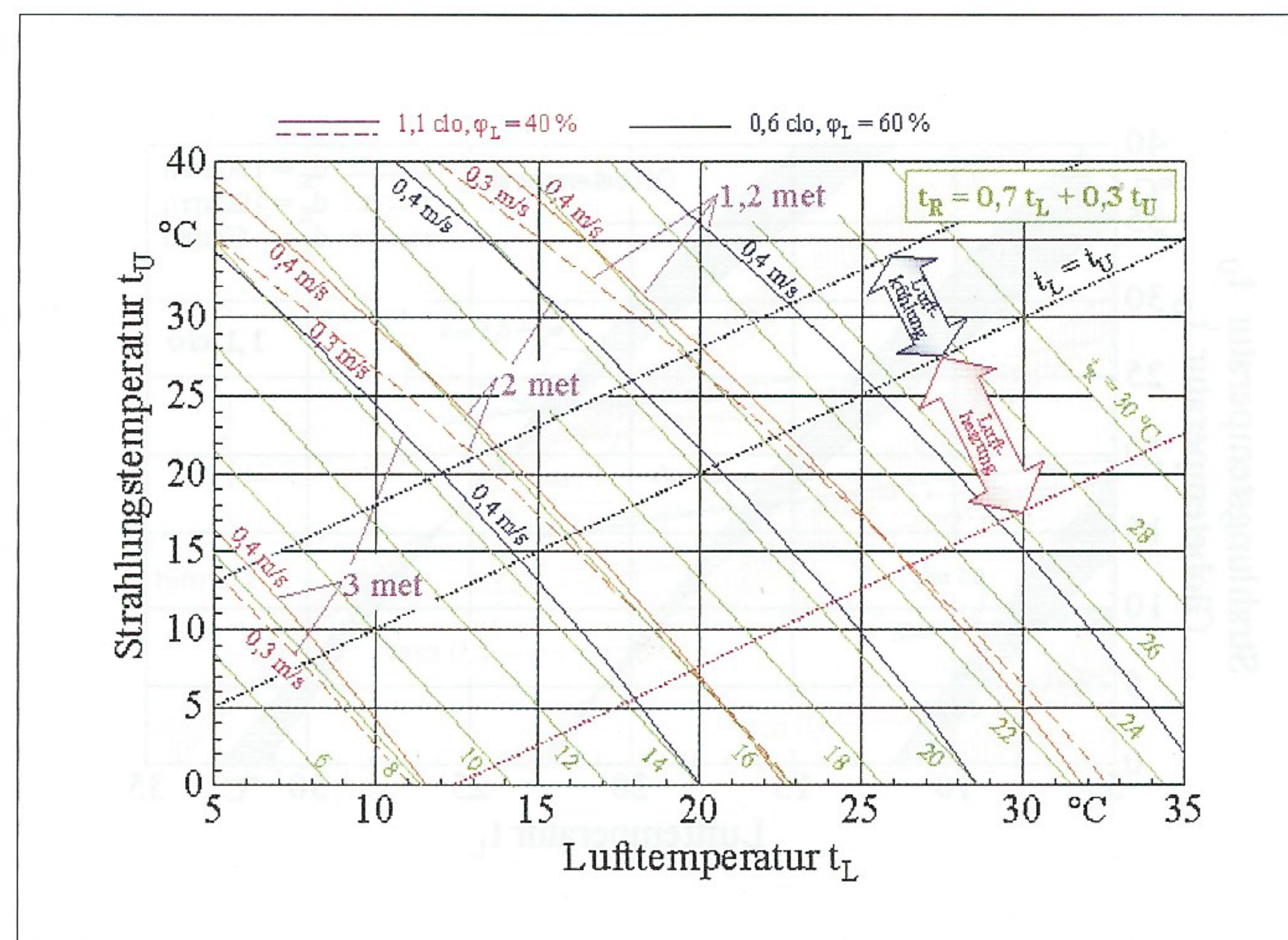


Bild 13

Behaglichkeitsdiagramm mit einem Netz (grüne Linien) für die operative Raumtemperatur $t_R = 0,7 t_L + 0,3 t_U$ und Überlagerung mit Behaglichkeitskurven unterschiedlicher Parameter im Nutzbereich Luftheizung und -kühlung

$$Nu_{\text{frei}} = 2 + 0,56 [Pr / (0,846 + Pr) Ra]^{0,25} \quad (17)$$

$$\alpha_{\text{frei}} = Nu_{\text{frei}} \lambda / d_K \quad (18)$$

Der Größtwert aus α_{frei} und α_{erz} wird für die Berechnung verwendet, die selbstverständlich iterativ bezüglich t_G durchzuführen ist.

Die Berechnungen erfolgten für die Kugeldurchmesser $d_K = 150$ mm, 100 mm und 50 mm. Als Untersuchungsspektrum dienten wiederum die im Bild 1 vorgestellten Behaglichkeitsdiagramme. Ihnen werden die berechneten Globetemperaturen überlagert (Bild 10). Die Ergebnisse sagen aus:

- Wenn sich der Messwert des Globethermometers bei gleichbleibender Behaglichkeit (PPD = 5 %) nicht ändert, stellt diese Größe einen Indikator für die Behaglichkeit dar.
- Am besten erfüllt diese Forderung der kleine Kugeldurchmesser von 50 mm.
- Bei der detaillierten Auswertung ist zu beachten, dass die Globetemperaturen bei hohen Luftgeschwindigkeiten (blaue Linien) rechts von der Geraden $t_L = t_U$ bedeutungsvoll sind, während die den niedrigen Luftgeschwindigkeiten zugeordneten Globetemperaturen (rote Linien) links von der grünen Geraden relevant sind.

Vergleich zwischen operativer Raumtemperatur und Globetemperatur

Letztlich ist es bedeutungsvoll, wie die operative Raumtemperatur nach der

neuen Definition durch die Globetemperatur wiedergegeben wird. Aus Bild 11 ist dies erkenntlich:

- Die Näherung für die operative Raumtemperatur (Empfindungstemperatur) gemäß der Gln. (10) und (11) befindet sich in sehr guter Übereinstimmung mit der durch das Globethermometer kom-

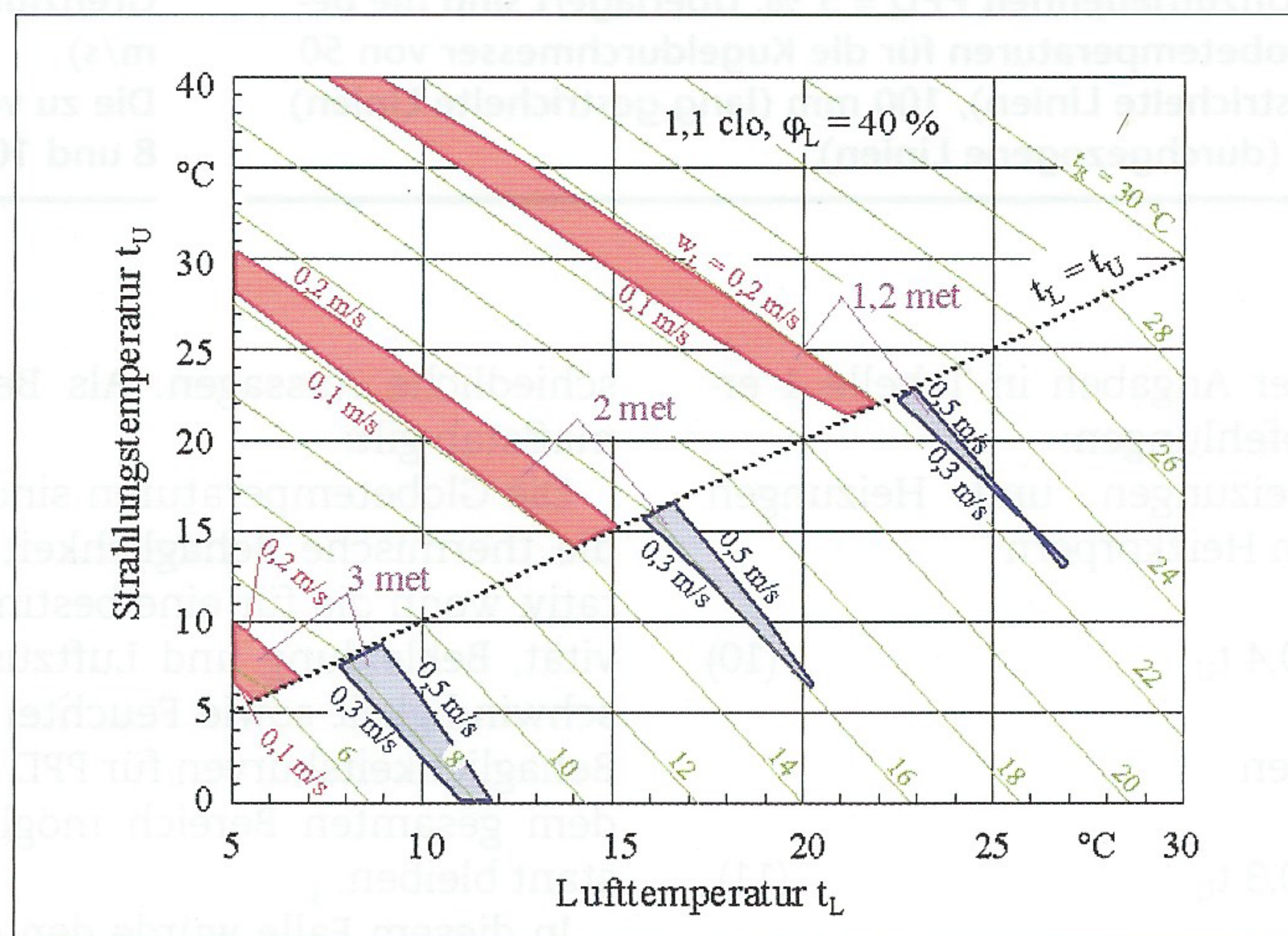


Bild 14

Behaglichkeitsdiagramm mit einem kombinierten, dem Heizanlageneinsatz angepassten Netz für die operative Raumtemperatur (grüne Linien) und Überlagerung mit möglichen Behaglichkeitsbereichen verschiedener Aktivitäten in Großräumen bei winterlicher Bekleidung von 1,1 clo sowie einer relativen Luftfeuchte von 40 %
rote Bereiche: Strahlplattenheizungen und Gasstrahlersysteme
blaue Bereiche: Luftheizungen
Für das Liniennetz der operativen Raumtemperaturen gelten:
oberhalb der Linie $t_L = t_U$ (Strahlungsheizungen): $t_R = 0,6 t_L + 0,4 t_U$ unterhalb der Linie $t_L = t_U$ (Luftheizungen): $t_R = 0,7 t_L + 0,3 t_U$

plex erfassten Luft- und Strahlungstemperatur. Am geeignetsten erweist sich der Kugeldurchmesser von 50 mm.
□ Bei Geschwindigkeiten zwischen den betrachteten Grenzwerten ist über große Bereiche die Übereinstimmung noch besser als bei den gezeigten Darstellungen.

Fazit zur Neudefinition der operativen Raumtemperatur

Als operative Raumtemperatur wird für Strahlungsheizungen die Nutzung der Gl. (10) empfohlen. Im **Bild 12** ist dieser Zusammenhang als Netz mit grünen Linien dargestellt. Der Vergleich mit unterschiedlichen Nutzfällen wird anschließend diskutiert:

- Die rot durchgezogenen Behaglichkeitskurven – Aktivitäten 1,2 met, 2 met sowie 3 met, winterliche Arbeitskleidung von 1,1 clo, Luftfeuchte 40 %, Luftgeschwindigkeit 0,2 m/s – repräsentieren den Haupteinsatzbereich der Strahlplatten- und Gasstrahlerheizungen in Hallenbauten. Nach Bild 5 liegt der reale Einsatzbereich dieser Anlagen oberhalb der Linie $t_L = t_U$.
- Die Behaglichkeitskurven im Haupteinsatzbereich werden durch die Gl. (10) sehr gut wiedergegeben. Dies trifft in guter Näherung auch auf die minimal mögliche Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s (rot gestrichelte Kurven) zu.
- Wie die Behaglichkeitskurve für die Aktivität von 1 met zeigt, gilt sogar für diesen Extrembereich die Approximation nach Gl. (10) sehr gut.
- Im sommerlichen Einsatzfall (blau durchgezogene Linien) – Aktivitäten 1,2 met, 2 met sowie 3 met, sommerliche Arbeitskleidung von 0,6 clo, Luftfeuchte 60 %, Luftgeschwindigkeit 0,2 m/s – liegen auch bei einer vorwiegenden Strahlungskühlung erfahrungsgemäß die thermischen Raumzustände ebenfalls über der Linie $t_L = t_U$. Wie ersichtlich, wird auch dieser Anlagen- und Nutzungsbereich sehr gut durch die Gl. (10) beschrieben.

Für Luftheizungen wird Gl. (11) empfohlen. Im **Bild 13** ist dieser Zusammenhang wiederum als Netz mit grünen Linien dargestellt. Die denkbaren Einsatzfälle werden nachfolgend bewertet:

- Die rot durchgezogenen und gestrichelten Behaglichkeitskurven – Aktivitäten 1,2 met, 2 met sowie 3 met, winterliche Arbeitskleidung von 1,1 clo, Luftfeuchte 40 %, Luftgeschwindigkeit 0,3 m/s und 0,4 m/s – repräsentieren den Haupteinsatzbereich der Luftheizungen in Hallenbauten. Nach Bild 5 liegen die Einsatzbereiche dieser Anlagen unterhalb der Linie $t_L = t_U$.
- Die Behaglichkeitskurven im Haupteinsatzbereich werden durch die Gl. (11) sehr gut approximiert.
- Die sommerliche Luftkühlung (blau durchgezogene Linien) – Aktivitäten 1,2 met, 2 met sowie 3 met, sommerliche Arbeitskleidung von 0,6 clo, Luftfeuchte 60 %, Luftgeschwindigkeit 0,4 m/s – ist im Bild 13 ebenfalls charakterisiert. Für sie kann Gl. (11) auch vorteilhaft verwendet werden.

In Auswertung der beiden Bilder 12 und 13 erscheint es zweckmäßig, mit einem kombinierten Netz für die operative Raumtemperatur t_R zu arbeiten. Oberhalb der Linie $t_L = t_U$ werde die Gl. (10) und unterhalb die Gl. (11) verwirklicht. Diese Darstellung erfolgt im **Bild 14**. Gleichzeitig ist die relevante Einordnung der Anlagenbetriebsbereiche im Heizfall dokumentiert. Mit **Bild 14** ist eine optimale Grundlage für die praktische Nutzung der neuen Definition der operativen Raumtemperatur gegeben.