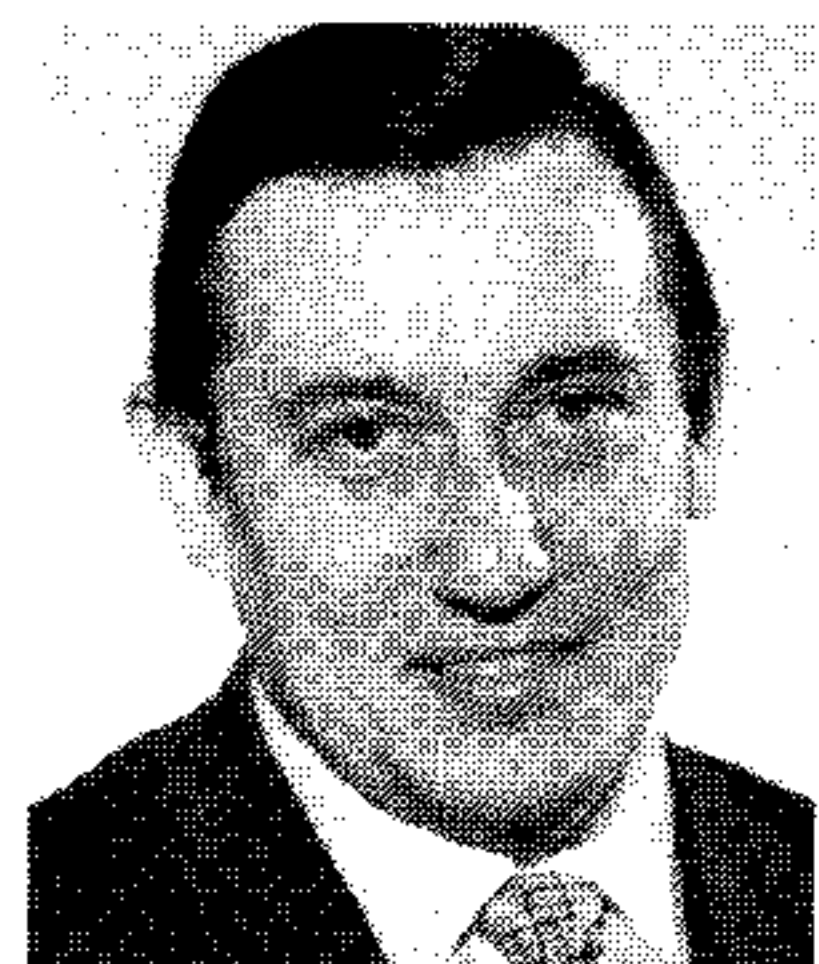


# Leistungskennlinien von Strahlplatten

Normungsvorschlag zur Ermittlung der Kennlinie unter realen Einsatzbedingungen



Die Leistungsmessung von Strahlplatten erfolgt in einem Prüfraum nach DIN V 4706, Teil 1. Teil 2 dieser Norm soll ein Rechenverfahren beinhalten, das auf der Grundlage des Prüfberichtes das Aufstellen einer Leistungskennlinie unter realen Einsatzbedingungen – die idealisiert oder speziell angegeben werden können – ermöglicht. Ein inhaltlicher Vorschlag für diese Norm wird vorgestellt.

Dr.-Ing. habil. **Bernd Glück, Hamburg**

Dr.-Ing. habil. **Bernd Glück, Hamburg**

In [1] wurden die Messungen im Prüfraum und die Einflüsse im realen Einbauzustand beschrieben. Zwischenzeitlich erfolgten im WSPLab unter Leitung von Dipl.-Ing. *Mangelsdorf* an drei unterschiedlich breiten Spezialstrahlplatten weitere Leistungsmessungen mit genauer Erfassung der thermischen Umgebungsbedingungen [2]. Die Spezialstrahlplatten bestanden aus aneinandergereihten Rechteckrohren mit den Abmessungen 70 mm × 11 mm × 1,5 mm, so daß die Oberflächentemperaturen über die Plattenbreite sehr gleichmäßig waren und nahe den Wassertemperaturen lagen. Die drei untersuchten Strahlplatten waren aus 4, 14 bzw. 18 parallelen Rohren zusammengesetzt, so daß die Plattenbreiten 280 mm, 980 mm und 1 260 mm realisiert wurden.

Die Auswertung der Meßergebnisse erfolgte mit einem speziell für diese Strahlplattenkonstruktion erstellten Rechenprogramm [3]. Aus den Meß- und Rechenergebnissen leiten sich Aussagen und Umrechnungsvorschläge ab, die Gegenstand der Norm, Teil 2 sein könnten.

## Wärmetechnische Zusammenhänge bei der Prüfung

In Abhängigkeit der Wärmeleistung und der Abmessungen des Prüflings ergeben sich bei einer Bezugstemperatur von 20 (0,5)°C nachfolgende statistisch gesicherte Zusammenhänge. Sie wurden an völlig ebenen Strahlplatten ermittelt und sind auf reale Strahlplatten in guter Näherung übertragbar.

Die ungedämmte Strahlplattenfläche  $A_s$  setzt sich aus der unteren Plattenfläche einschließlich der Erhebungen – z.B. Rohrumhüllungen – und den seitlichen Aufkantungen zusammen.

Die Plattenbreite  $b$  beinhaltet ebenfalls die Umfänge von Erhebungen und die Aufkantungen längs der Strahlplatte.

### Kabinentemperaturen

Mit der ermittelten Wärmeleistung  $\dot{Q}$  in W gelten:  
Lufttemperatur – Plattenunterseite (Höhe 2,35 m)

$$t_i = 20,5 + 0,00123 \dot{Q} - 1,604 \cdot 10^{-7} \dot{Q}^2 \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Lufttemperatur – Plattenoberseite (Höhe 2,50 m)

$$98 \quad t_a = 20,8 + 0,00123 \dot{Q} - 1,057 \cdot 10^{-7} \dot{Q}^2 \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Umgebungstemperatur – Plattenunterseite

$$t_{iU} = 20,2 - 0,00160 \dot{Q} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

Umgebungstemperatur – Plattenoberseite

$$t_{aU} = 20,3 - 0,00148 \dot{Q} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

Anmerkung:

Die Meßwerte und die zugehörigen Regressionskurven sind im Bild 1 dargestellt. Mit zunehmender Leistung sinken die Wandtemperaturen, da über die Wände die Lasteinbringung erfolgt; die Luft-

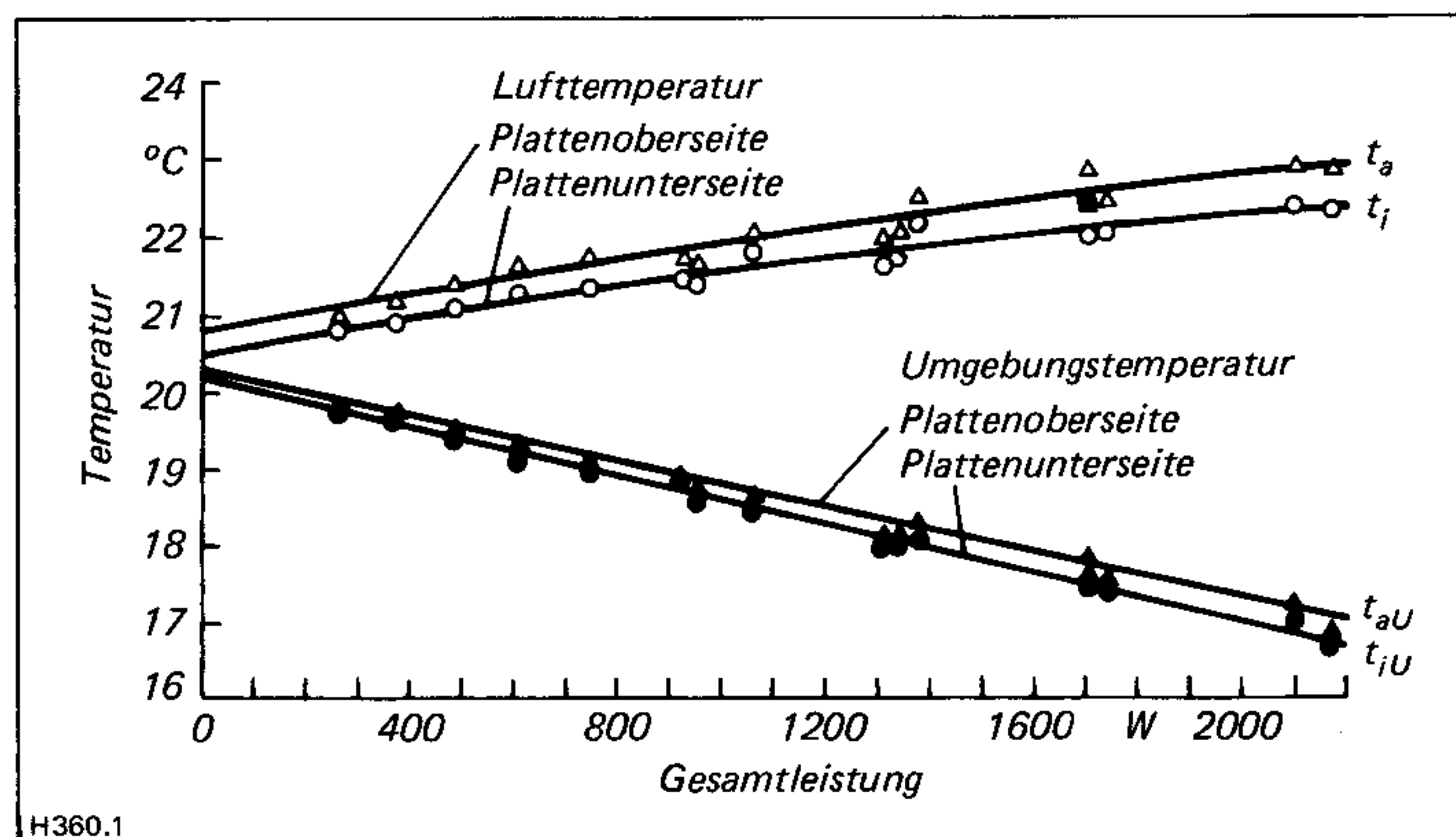


Bild 1: Luft- und Umgebungstemperaturen im Prüfraum in Abhängigkeit der Gesamtwärmeleistung  $\dot{Q}$  des Prüflings

temperaturen steigen dagegen an. Die Bezugstemperatur – mit dem Globusthermometer gemessen – bleibt konstant. Obwohl die Wand- und Lufttemperaturverläufe nicht der Realität des Praxisfalls entsprechen, sind die Verhältnisse realistischer, als wenn die Wand- oder Lufttemperatur konstant gehalten würde.

### Strahlungsanteil

In Abhängigkeit der Plattenbreite  $b$  in mm gilt für den Strahlungsanteil  $s$  der ungedämmten Strahlplattenfläche bezogen auf die gemessene Wärmeleistung

$$s = 0,313 b^{0,127} \quad (5)$$

Anmerkung:

Die Einzelergebnisse gemäß Auswertungsprogramm betragen:

	Plattenbreite in mm		
	280	980	1 260
Strahlungsanteil $s$	0,64	0,75	0,77

**Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient**

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_K$  der ungedämmten Strahlplattenfläche ergibt sich näherungsweise in Abhängigkeit der Plattenbreite  $b$  in mm und der mittleren Übertemperatur, gebildet aus der mittleren Strahlplattentemperatur der ungedämmten Fläche  $t_S$  und der Lufttemperatur an der Plattenunterseite  $t_i$  jeweils in °C zu

$$\alpha_K = 24,2 b^{-0,525} (t_S - t_i)^{0,25} \text{ in W/(m}^2 \text{ K)} \quad (6)$$

**Anmerkung:**

Für den Faktor  $K_K = \alpha_K (t_S - t_i)^{-0,25}$  ergeben sich nach dem Auswertungsprogramm eine starke Abhängigkeit von der Plattenbreite und eine schwache, nicht eindeutige Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz:

	Plattenbreite in mm		
	280	980	1 260
zunehmende Temperaturdifferenz	1,28	0,63	0,58
	1,28	0,71	0,58
	1,24	0,68	0,58
	1,22	0,63	0,52
Mittelwert	1,26	0,66	0,57

Unterdrückt man den Temperatureinfluß, so ergibt sich der Zusammenhang  $K_K = 24,2 b^{-0,525}$  mit  $b$  in mm.

**Oberflächentemperatur der Deckenstrahlplatte (Strahlplattentemperatur)**

Ausgehend von der ermittelten Wärmeleistung  $\dot{Q}$  in W, der ungedämmten Strahlplattenfläche  $A_S$  in m<sup>2</sup>, deren Emissionskoeffizienten  $\epsilon$ , der unterhalb der Platte herrschenden Umgebungstemperatur  $t_{iU}$  in °C und des Strahlungsanteils  $s$  folgt die Strahlplattentemperatur

$$t_S = \sqrt[4]{\frac{s \dot{Q}}{A_S \epsilon 5,67 \cdot 10^{-8}} + (t_{iU} + 273)^4} - 273 \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

**Anteile der Wärmeleistung bei Prüfbedingungen**

Auf der Grundlage der realen Plattenkonstruktion und der bereits vorgestellten Zusammenhänge werden die Teilwärmeströme berechnet und zur Gesamtwärmeleistung zusammengefaßt. Anschließend erfolgt eine Korrektur der Teilwärmeströme, so daß die neue rechnerische Gesamtwärmeleistung mit der Norm-Wärmeleistung übereinstimmt.

**Strahlungswärmestrom der ungedämmten Strahlplattenfläche**

$$\dot{Q}_{S,r} = s \dot{Q} = 0,313 b^{0,127} \dot{Q} \text{ in W} \quad (8)$$

**Konvektionswärmestrom der ungedämmten Strahlplattenfläche**

$$\dot{Q}_{K,r} = \alpha_K A_S (t_S - t_i) = 24,2 b^{-0,525} A_S (t_S - t_i)^{1,25} \text{ in W} \quad (9)$$

**Strahlungs- und Konvektionswärmestrom der gedämmten Strahlplattenfläche**

$$\dot{Q}_{D,r} = \left[ \frac{1}{\alpha} + \left( \frac{\delta}{\lambda} \right)_{\text{Dämmung}} \right]^{-1} A_D \left( t_S - \frac{t_a + t_{aU}}{2} \right) \quad (10)$$

Für den Wärmeübergang auf der gedämmten Oberfläche kann näherungsweise

$$\alpha = 2 + 5,67 \epsilon_D \text{ in W/(m}^2 \text{ K)} \quad (11)$$

angenommen werden; weiter gilt nach DIN V 4706, Teil 1 im Prüffall

$$\left( \frac{\delta}{\lambda} \right)_{\text{Dämmung}} = 1 \text{ m}^2 \text{ K/W.}$$

Es bedeuten:

- $\epsilon_D$  Emissionskoeffizient der Dämmschichtoberfläche,
- $A_D$  Fläche aller von der Dämmung umschlossener, beheizter Strahlplattenflächen (Lamellenbleche, Rohrregister).

**Korrektur der rechnerischen Teilwärmeströme**

Der rechnerische Gesamtwärmestrom ergibt sich zu

$$\dot{Q}_r = \dot{Q}_{S,r} + \dot{Q}_{K,r} + \dot{Q}_{D,r} \quad (12)$$

Die Teilwärmeströme werden mit dem bei der Normprüfung ermittelten Wert  $\dot{Q}$  korrigiert:

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{S,r} \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_r} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_{K,r} \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_r} \quad (14)$$

$$\dot{Q}_D = \dot{Q}_{D,r} \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_r} \quad (15)$$

Die Summe der Teilwärmeströme ergibt somit  $\dot{Q}$ .

**Wärmetransportkoeffizient der Strahlplattenkonstruktion**

Nach einem vereinfachten Modell wird die Summe der Widerstände, die beim Wärmetransport vom Heizfluid mit der mittleren Temperatur  $t_F$  bis zur Strahlplattenoberfläche mit der mittleren Temperatur  $t_S$  auftreten, durch den Wärmetransportkoeffizienten

$$\kappa = \frac{\dot{Q}}{t_F - t_S} \quad (16)$$

der auch die zugehörigen Querschnittsflächen global einschließt, erfaßt.

**Wärmeleistung unter realen Einsatzbedingungen**

Die korrigierten Teilwärmeströme können nachfolgend auf veränderte Umgebungsbedingungen umgerechnet werden. Die bei veränderten Bedingungen geltenden Größen sind mit dem Zeiger „\*“ versehen.

**Strahlungswärmestrom der ungedämmten Strahlplattenfläche**

$$\dot{Q}_S^* = \dot{Q}_S \frac{(t_S + 273)^4 - (t_{iU}^* + 273)^4}{(t_S + 273)^4 - (t_{iU} + 273)^4} \quad (17)$$

**Konvektionswärmestrom der ungedämmten Strahlplattenfläche**

$$\dot{Q}_K^* = \dot{Q}_K \left( \frac{t_S - t_i^*}{t_S - t_i} \right)^{1,25} \quad (18)$$

Die Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten infolge veränderter Temperaturen ist in der vorgeschlagenen Umrechnung enthalten. Änderungen, die durch eine größere oder kleinere Luftge-



schwindigkeit verursacht werden, sind durch einen zusätzlichen Faktor  $f_a$  zu erfassen. Nähere Untersuchungsergebnisse folgen hierzu im Heft 3, 1993.

*Strahlungs- und Konvektionswärmestrom der gedämmten Strahlplattenfläche*

$$\dot{Q}_D^* = \dot{Q}_D \frac{t_S - 0,5(t_a^* + t_{aU}^*)}{t_S - 0,5(t_a + t_{aU})} \quad (19)$$

Falls sich außer den aufgeführten Umgebungsbedingungen auch die Dämmschichtdicke ändert, so ist als weiterer Korrekturfaktor

$$\frac{1}{\alpha} + \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{\text{Dämmung}}$$

$$\frac{1}{\alpha} + \left(\frac{\delta}{\lambda}\right)_{\text{Dämmung}}^*$$

anzufügen.

*Gesamtwärmestrom und Kennlinie*

Der Gesamtwärmestrom unter realen Einsatzbedingungen berechnet sich zu

$$\dot{Q}^* = \dot{Q}_S^* + \dot{Q}_K^* + \dot{Q}_D^* \quad (20)$$

Die zu  $\dot{Q}^*$  und  $t_S$  gehörige mittlere Temperatur des Heizfluids folgt unter Bezug auf den Wärmetransportkoeffizienten  $\kappa$  zu

$$t_F^* = t_S + \frac{\dot{Q}^*}{\kappa} \quad (21)$$

Die wiederholte Abarbeitung des Algorithmus (Gln. (1) bis (21)) ermöglicht die Umrechnung der durch die Prüfung bestimmten Normkennlinie

$$\dot{Q} = C \Delta t^n \quad (22)$$

gemäß DIN V 4706, Teil 1 in eine reale Leistungskennlinie. Es sind mindestens drei Stützstellen zu verwenden:  $\Delta t = 30; (30 \cdot 70)^{0,5}; 70$  K. Die für eine einheitliche wärmetechnische Bezugstemperatur  $t_{WTB} = t_i = t_a = t_{iU} = t_{aU} = 20$  °C und den Faktor  $f_a$ , dessen Größe noch festzulegen ist, berechnete Leistungskennlinie wird als *Grundkennlinie* bezeichnet.

$$\dot{Q} = C^* (\Delta t)^{n^*} \quad (23)$$

mit

$\Delta t = t_F - t_{WTB}$  mittlere Übertemperatur des Heizfluids in K.

Weiterhin ist die zugehörige mittlere Strahlplattenübertemperatur als lineare Funktion von  $\Delta t$  aufzustellen:

$$t_S^* - t_{WTB} = C_S + n_S \Delta t \quad (24)$$

### Annahmen bei Planungen

Die realen Einsatzbedingungen können im Planungsstadium nur näherungsweise angenommen werden. Ausgehend von der geforderten Raumtemperatur  $t_R$  (empfundene Temperatur) nach DIN 4701 folgt die charakteristische Übertemperatur zur Leistungsermittlung aus der Grundkennlinie nach [4] zu

$$100 \quad \Delta t_{\text{chark}} = (t_F - t_R) (1 + 0,5 \phi_{P,S}) - 0,35 (h_S - h_M) g_{LT} \text{ in K} \quad (25)$$

Es gelten:

$t_R$  Empfundene Temperatur in der Aufenthaltszone (Punkt P: Raummitte,  $h_M = 1$  m über Fußboden). Sie ist nicht identisch mit einer zur Ermittlung des Wärmebedarfs von Hallen angenommenen, korrigierten Raumtemperatur, die um (1 bis 4) K über  $t_R$  liegen kann.

$\phi_{P,S}$  Mittlere Einstrahlzahl einer Kugel am Punkt P auf die Gesamtheit der installierten Strahlplatten  
Es gilt

$$\phi_{P,S} = \frac{v}{\pi} \arctan \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (26)$$

mit

$$a = \frac{L/2}{h_S - h_M}; \quad b = \frac{B/2}{h_S - h_M}; \quad v = \frac{A_{SF}}{A_{DE}}$$

$L$  Hallenlänge;  $B$  Hallenbreite;  $h_S$  Aufhängehöhe der Strahlplatten;  $h_M = 1$  m;  $v$  = Strahlplattenbelegungsgrad;  $A_{SF}$  Summe aller Strahlplattenflächen;  $A_{DE}$  Deckenfläche ( $A_{DE} = L \cdot B$ ).

$g_{LT}$  Lufttemperaturgradient

Für eine Schätzung mit der Hallenhöhe  $H$  in m kann nach [5]

$$g_{LT} = 1,56 - 0,39 \ln H \text{ in K/m} \quad (27)$$

angenommen werden (Geltungsbereich:  $H \leq 20$  m).

Damit ist nach [1] der Geometrieinfluss und die Temperaturschichtung in Hallenbauten auf die Wärmeabgabe von Strahlplatten hinreichend genau erfaßt.

Die mittlere Strahlplattenübertemperatur ist lediglich für wärme-physiologische Betrachtungen – z.B. zur Ermittlung der Strahlungsasymmetrie – zu verwenden.

### Beispiel

Die Normprüfung nach DIN V 4706, Teil 1 ergab die Kennlinie

$$\dot{Q} = 12,415 \Delta t^{1,178}$$

Es sind die Grundkennlinie, die mittlere Strahlplattenübertemperatur und eine Leistungstabelle für reale Einsatzbedingungen zu ermitteln. Des weiteren ist die charakteristische Übertemperatur für den Einsatz von Strahlplatten in einem vorgegebenen Großraum zu bestimmen.

*Vorgaben zum ersten Aufgabenteil:*

Plattenbreite einschließlich der Abwicklung der Rohrerhebungen und der seitlichen Aufkantungen

$$b = 1116 \text{ mm}$$

Ungedämmte Strahlplattenfläche ( $b \cdot$  Länge)  $A_S \sqrt{F} = 3,348 \text{ m}^2$

Gedämmte Strahlplattenfläche einschließlich der Abwicklung des Rohrregisters und der seitlichen Aufkantungen

$$A_D = 3,348 \text{ m}^2$$

(Übereinstimmung von  $A_S$  und  $A_D$  ist zufällig!)

Emissionskoeffizient – Strahlplattenoberfläche  $\varepsilon = 0,93$   
– Dämmschichtoberfläche  $\varepsilon_D = 0,20$

*Lösung des ersten Aufgabenteils:*

Die Auswertung der Gln. (1) bis (24) mit einem Rechenprogramm [6] liefert den im *Bild 2* gezeigten Ausdruck. Die zur Grundkennlinie gehörigen internen Annahmen sind vermerkt.

Norm-Kennlinie:

$$\dot{Q} = 12,415 \cdot \Delta t \wedge 1,178 \quad \text{in W}$$

Reale Kennlinie bei der wärmetechnischen Bezugstemperatur:

Wärmetechnische Bezugstemperatur = 20,0 °C  
 Konvektionskorrektur = 2,0  
 Dämmschichtdicke = 40 mm  
 Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht = 0,040 W/(m K)

$$\dot{Q} = 14,005 \cdot \Delta t \wedge 1,176 \quad \text{in W}$$

Kennlinie der Strahlplattenübertemperatur:

$$t_s - t_{WTB} = 0,73 + 0,794 \cdot \Delta t \quad \text{in } ^\circ\text{C}$$

Reale Leistungstabelle pro Laufmeter:

Temperaturdifferenz $t_F - t_{WTB}$ °C	Wärmeleistung $\dot{Q}$ W/m	Strahlplatten- übertemperatur $t_s - t_{WTB}$ K
20	158	16,6
25	206	20,6
30	255	24,5
35	306	28,5
40	358	32,5
45	411	36,5
50	465	40,4
55	520	44,4
60	577	48,4
65	633	52,3
70	691	56,3
75	750	60,3
80	809	64,2
85	869	68,2
90	929	72,2
95	990	76,1
100	1 051	80,1
105	1 114	84,1
110	1 176	88,1
115	1 239	92,0
120	1 303	96,0

**Bild 2: Rechnerausdruck für die Umrechnung der Normkennlinie in die für den praktischen Einsatz geltende Grundkennlinie, Ermittlung der Kennlinie für die Strahlplattenübertemperatur und tabellarische Ergebnisdarstellung**

Vorgaben zum zweiten Aufgabenteil:

Vorlauftemperatur	$t_{FV} = 110 \text{ } ^\circ\text{C}$
Rücklauftemperatur	$t_{FR} = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$
Raumtemperatur	$t_R = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$
Hallenlänge	$L = 90 \text{ m}$
Hallenbreite	$B = 30 \text{ m}$

Hallenhöhe

$$H = 12 \text{ m}$$

Aufhängehöhe der Strahlplatten

$$h_S = 9,6 \text{ m}$$

Heizflächenbelegungsgrad

$$v = 0,2$$

(Dies ist ein geschätzter Wert, der nach der Heizflächenbestimmung gegebenenfalls korrigiert werden muß. Iterationen!)

Lösung des zweiten Aufgabenteils:

Mittlere Heizmedientemperatur

$$t_F = t_R + \frac{t_{FV} - t_{FR}}{\ln \frac{t_{FV} - t_R}{t_{FR} - t_R}} = 18 \text{ } ^\circ\text{C} + \frac{110 - 70}{\ln \frac{110 - 18}{70 - 18}} \text{ K} = 88,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Einstrahlzahl nach Gl. (26)

$$a = \frac{L}{2(h_S - h_M)} = \frac{90}{2(9,6 - 1)} = 5,23$$

$$b = \frac{B}{2(h_S - h_M)} = \frac{30}{2(9,6 - 1)} = 1,74$$

$$\phi_{P,S} = \frac{0,2}{\pi} \arctan \frac{5,23 \cdot 1,74}{\sqrt{5,23^2 + 1,74^2 + 1}} = 0,065$$

$$g_{LT} = (1,56 - 0,39 \ln 12) \text{ K/m} = 0,591 \text{ K/m}$$

$$\Delta t_{\text{chark}} = [(88,1 - 18)(1 + 0,5 \cdot 0,065) - 0,35(9,6 - 1)0,591] \text{ K}$$

$$\Delta t_{\text{chark}} = 70,6 \text{ K}$$

[H 360]

### Literaturangaben

- [1] Glück B.: Leistungen von Strahlplatten. HLH (1992) Nr. 9, S. 465/71.
- [2] Mangelsdorf, R.: Versuchsprogramm an Deckenstrahlplatten zur Ermittlung von Grundlagen für die Umrechnung von Leistungen im WSPLab (Dr. Bitter). (1992) (unveröffentlicht).
- [3] ROM: Rechenprogramm zur Auswertung der in [2] geprüften Strahlplatten. (1992) (unveröffentlicht).
- [4] Glück, B.: Wärmeabgabe von Strahlplatten unter Prüfbedingungen und im praktischen Einsatz. Gesundheits-Ingenieur (1989) Heft 3, S. 113/26.
- [5] Windisch, K.: Bericht über die Weiterentwicklung von Heizungssystemen. TU Dresden 1978 (unveröffentlicht).
- [6] ROM: Rechenprogramm zur Umrechnung der Normkennlinie von Strahlplatten auf eine für den Praxiseinsatz geeignete Betriebskennlinie. (1992) (unveröffentlicht).