Einfluß der Reflexionen bei der Temperaturmessung mit der Infrarotkamera

Bernd Glück

Die Intensität der von jeder festen, schwarzen Körperoberfläche ausgehenden Wärmestrahlung ist nach dem *Planck*schen Strahlungsgesetz

$$I_s(\lambda, T) = 0{,}374 \cdot 10^{-15} \frac{\lambda^{-5}}{e^{1{,}439 \cdot 10^{-2}/(\lambda T)} - 1} \text{ in } W/m^3 \quad (1)$$

von der Wellenlänge λ und der Körpertemperatur T abhängig. Integriert über den gesamten Wellenlängenbereich folgt nach dem *Stefan-Boltzmann*schen Gesetz die Gesamtenergiestromdichte $\dot{e}_s$. Sie berechnet sich für den grauen Strahler unter Beachtung des Emissionskoeffizienten ε zu

$$\dot{e} = \varepsilon \sigma T^4. \quad (2)$$

Der Detektor der Infrarotkamera nimmt nur einen bestimmten Wellenlängenbereich wahr, der durch die spektrale Empfindlichkeit der Kamera festgelegt ist. Die möglichen Unterschiede zur Gesamtenergiestromdichte $\dot{e}$ sind für die weiteren Betrachtungen bedeutungslos, deshalb wird im folgenden auf $\dot{e}$ bezogen.

Der Flächenausschnitt j, auf den die Kamera gerichtet ist, emittiert als Eigenstrahlung $\dot{e}_j$. Bei bekanntem Emissionsgrad ε_j könnte aus dieser Größe – das Signal des Empfängers ist äquivalent dazu – die Oberflächentemperatur gemäß Gl. (2) berechnet werden:

$$T_j = \left(\frac{\dot{e}_j}{\varepsilon_j \sigma}\right)^{0{,}25}. \quad (3)$$

In Wirklichkeit empfängt die Kamera aber nicht nur die Eigenemission $\dot{e}_j$, sondern auch die reflektierten Anteile aller übrigen Umfassungsflächen und sonstiger Oberflächen *k*, die mit der angepeilten Oberfläche j im Strahlungsaustausch – vereinfacht ausgedrückt im Sichtkontakt – stehen. Die Summe aus emittierter und reflektierter Strahlung wird als Flächenhelligkeit $\dot{f}_j$ bezeichnet.

Es wird vorausgesetzt, daß die reflektierte Strahlung die gleichen Eigenschaften wie die emittierte (diffuse Verteilung) aufweist.

Der von der Fläche k – auf ihr liegt die Flächenhelligkeit $\dot{f}_k$ – in Richtung der Fläche j fließende Energiestrom beträgt nach Einführen der Einstrahlzahl $\Phi_{k,j}$

$$\dot{E}^*_{k,j} = \Phi_{k,j} \dot{f}_k A_k. \quad (4)$$

Davon wird der Anteil

$$\dot{E}^0_{k,j} = \varepsilon_j \dot{E}^*_{k,j} \quad (5)$$

absorbiert und der Anteil

$$\dot{E}^{00}_{k,j} = (1 - \varepsilon_j) \dot{E}^*_{k,j} = (1 - \varepsilon_j) \Phi_{k,j} \dot{f}_k A_k \quad (6)$$

reflektiert.

Gemäß der Reziprozitätsbeziehung für Einstrahlzahlen

$$\Phi_{k,j} A_k = \Phi_{j,k} A_j \quad (7)$$

kann Gl. (6)

$$\dot{E}^{00}_{k,j} = (1 - \varepsilon_j) \Phi_{j,k} \dot{f}_k A_j \quad (8)$$

geschrieben werden, woraus die reflektierte Energiestromdichte

$$\dot{e}^{00}_{k,j} = (1 - \varepsilon_j) \Phi_{j,k} \dot{f}_k \quad (9)$$

folgt.

Damit ergibt sich die Flächenhelligkeit der Oberfläche j zu:

$$\dot{f}_j = \dot{e}_j + (1 - \varepsilon_j) \sum_{k=1}^{n} \Phi_{j,k} \dot{f}_k. \quad (10)$$

Für alle n Flächen eines umschlossenen Raumes sind die zu Gl. (10) analogen Gleichungen der Flächenhelligkeiten anzuschreiben und das lineare Gleichungssystem zu lösen. Vereinfachend ist es bei annähernd gleichen Emissionskoeffizienten der Raumoberflächen möglich, in Gl. (10)

$$\dot{f}_k = \dot{e}_k + (1 - \varepsilon_k) \sum_{l=1}^{n} \Phi_{k;l} \dot{f}_l = \dot{e}_k + (1 - \varepsilon_k) \dot{f}_{mittel} \quad (11)$$

mit

$$\dot{f}_{mittel} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{e}_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i A_i} \quad (12)$$

zu substituieren. Damit folgt:

$$\dot{f}_j = \dot{e}_j + (1 - \varepsilon_j) \sum_{k=1}^{n} \Phi_{j,k} [\dot{e}_k + (1 - \varepsilon_k) \dot{f}_{mittel}]. \quad (13)$$

Sind alle Emissionsgrade gleich

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \ldots = \varepsilon_n, \quad (14)$$

so gilt weiter:

$$\dot{f}_j = \dot{e}_j + (1 - \varepsilon) \sum_{k=1}^{n} \Phi_{j,k} \dot{e}_k + (1 - \varepsilon)^2 \dot{f}_{mittel}. \quad (15)$$

Bei $\varepsilon > 0{,}9$ wird die Zulässigkeit der getroffenen Näherung deutlich.

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, c/o ROM Zentrale.

Die Infrarotkamera kann nur die in ihrem Schacht fallende Energiestromdichte $\dot{f}_j$ bewerten und nicht separat die Eigenemission $\dot{e}_j$, wie dies nach Gl. (3) erforderlich gewesen wäre. Der Unterschied zwischen einer fiktiven Temperatur T_f und der realen Temperatur T_r beträgt:

$$(T_f^4 - T_r^4)\,\varepsilon\sigma = \dot{f}_j - \dot{e}_j =$$
$$= \varepsilon\sigma(1-\varepsilon)\sum_{k=1}^{n} \Phi_{j,k} T_k^4 + (1-\varepsilon)^2 \dot{f}_{mittel} =$$
$$= \varepsilon\sigma(1-\varepsilon)\sum_{k=1}^{n} \Phi_{j,k} T_k^4 + (1-\varepsilon)^2 \frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon\sigma T_i^4 A_i}{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon A_i} \qquad (16)$$

$$T_f^4 - T_r^4 = (1-\varepsilon)\sum_{k=1}^{n} \Phi_{j,k} T_k^4 + \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon}\,\frac{\sum_{i=1}^{n} T_i^4 A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}\ (\equiv R). \qquad (17)$$

Mit $T = t + 273\,K$ ergibt sich weiter nach Vorgabe der bekannten Temperatur t_r:

$$\Delta t = t_f - t_r = [(273 + t_r)^4 + R]^{0,25} - 273 - t_r. \qquad (18)$$

Die Temperaturabweichung ist somit von der Raumgeometrie, dem Meßort, den Strahlungseigenschaften der Oberflächen und den Temperaturen abhängig. Dies bedeutet, daß sie in jedem Fall und an jedem Ort unterschiedlich sein wird.

Beispiel

Der im *Bild 1* dargestellte Prüfraum wurde bezüglich der Meßorte A bis E untersucht. Sehr aufwendig war die Ermittlung der zugehörigen Einstrahlzahlen auf die einzelnen Raumumfassungen und die Möblierungsebene. Gemäß des in [1] vorgestellten Modells wurden die genannten Flächen in 32 Flächenabschnitte unterteilt. *Bild 2* gibt dazu eine Übersicht (Nummer 22 wurde nicht vergeben). Die Koordinaten der Flächen, die Flächen und Temperaturen sind der *Tabelle 1* zu entnehmen. Die Berechnung der Einstrahlzahlen erfolgte numerisch nach dem in [2] aufgezeigten Verfahren. Die Ergebnisse enthält *Tabelle 2*.

Die Auswertung der Gln. (17) und (18) wurde mit einem kleinen Programm vorgenommen. Die Temperaturen einschließlich der Realtemperaturen t_r sind *Bild 1* entnehmbar.

Die Endergebnisse lauten:

Meßort	t_r °C	t_f °C	Δt K	Meßort	t_r °C	t_f °C	Δt K
A	24	29,48	5,48	D	24	29,45	5,45
B	18	23,92	5,92	E	35	39,90	4,90
C	18	23,89	5,89				

Die von der Infrarotkamera aufgenommenen Signale werden elektronisch gespeichert und sind nach verschiedenartigen Fragestellungen auswertbar. Dabei kann auch eine mittlere Umgebungstemperatur und somit eine mittlere, reflektierte Strahlungsdichte Beachtung finden. So ist es ohne weiteres möglich, durch eine Vergleichsmessung der Oberflächentemperatur – beispielsweise mit

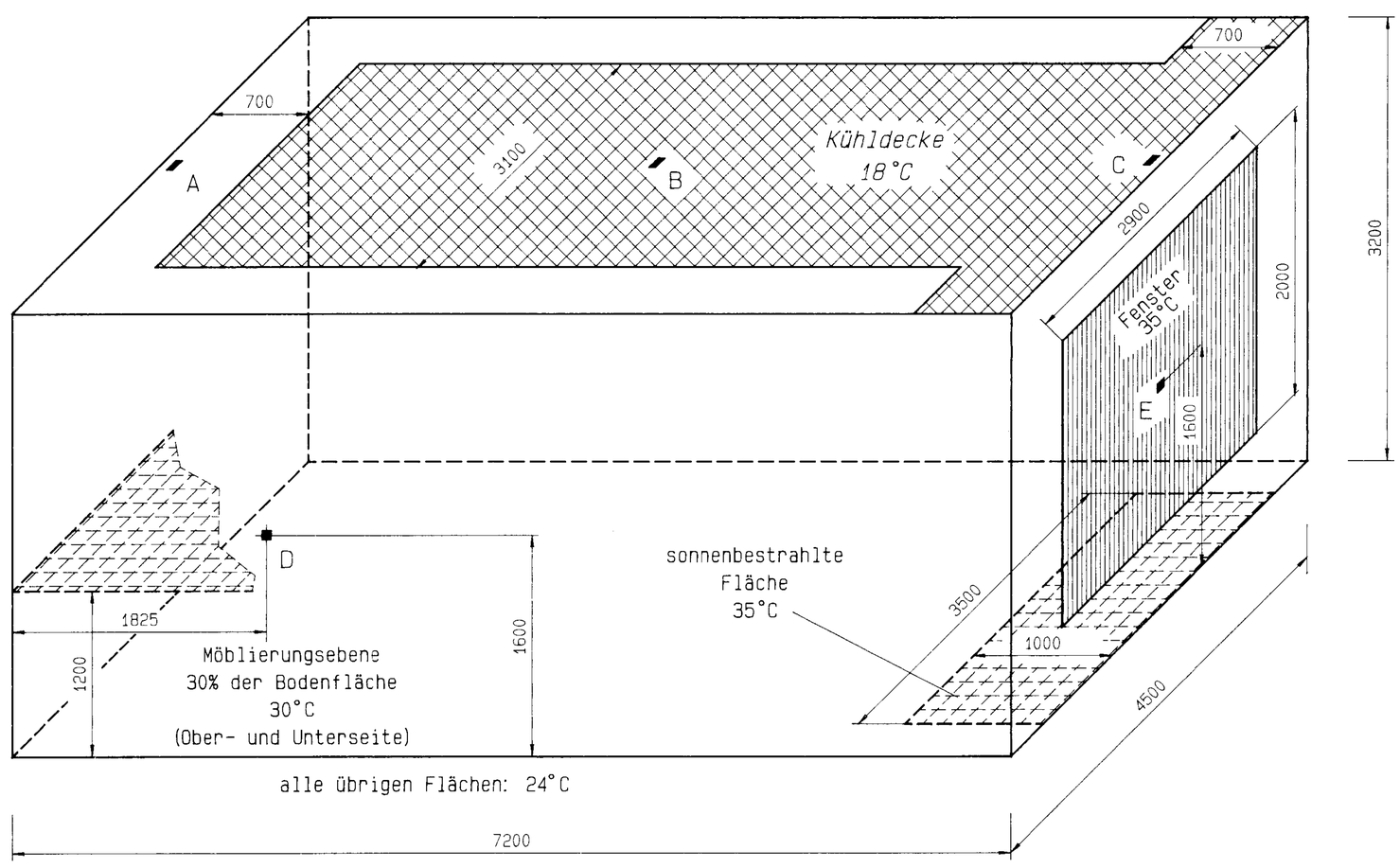

Bild 1. Prüfraum mit Kennzeichnung der thermisch aktiven Flächen sowie deren Temperaturen und Fixierung der Meßorte A bis E.

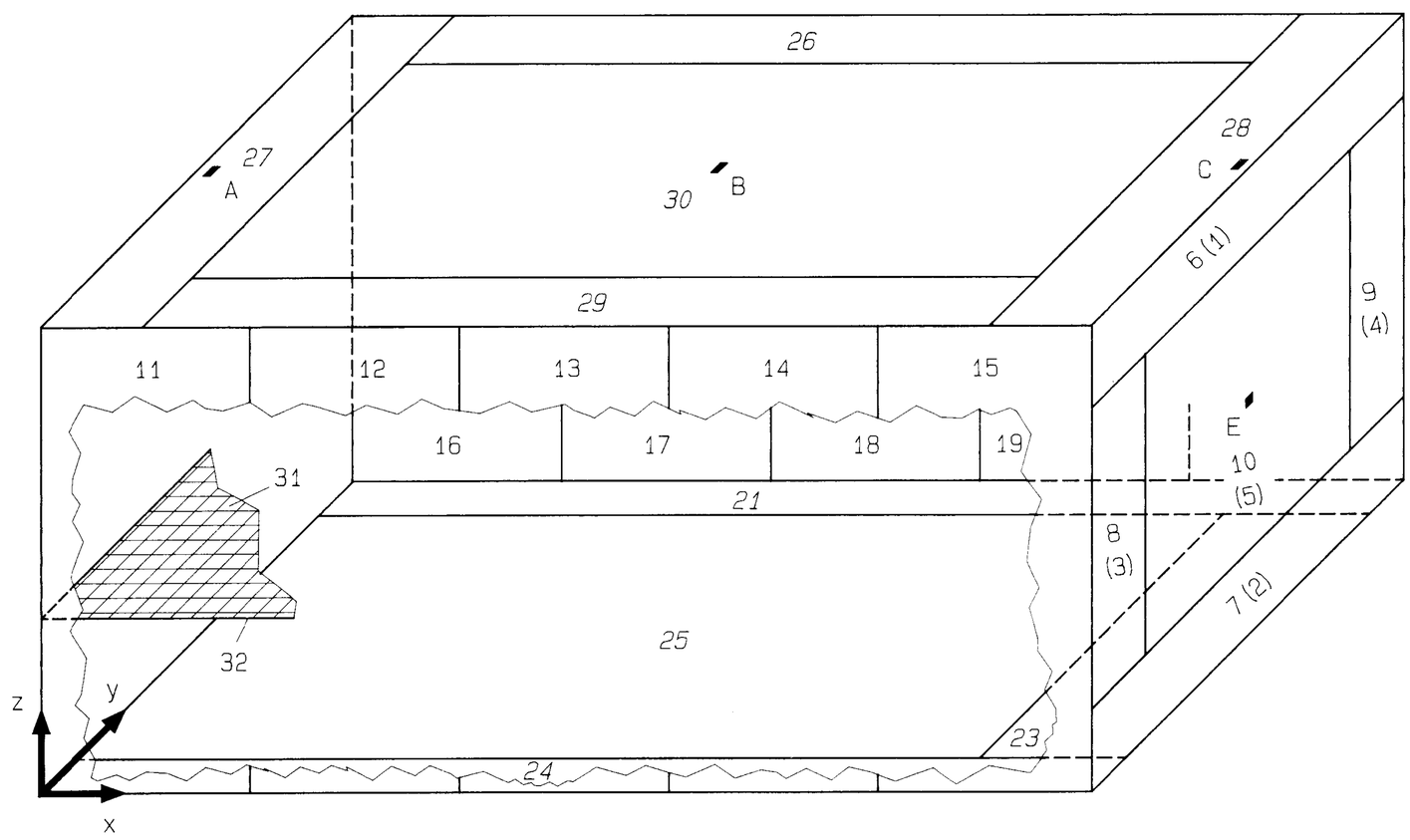

Bild 2. Unterteilung der Raumflächen zur numerischen Berechnung der Einstrahlzahlen. Linke Wand: Unterteilung wie rechte Wand gemäß Klammerzahlen.

Tabelle 1. Koordinaten, Flächen und Temperaturen der im *Bild 2* fixierten Raumflächen.

Linke Wand Al = 14,40 m²								
i	x min	x max	y min	y max	z min	z max	A(i)	t(i)
1	0,00	0,00	0,00	4,50	2,60	3,20	2,70	24,0
2	0,00	0,00	0,00	4,50	0,00	0,60	2,70	24,0
3	0,00	0,00	0,00	0,80	0,60	2,60	1,60	24,0
4	0,00	0,00	3,70	4,50	0,60	2,60	1,60	24,0
5	0,00	0,00	0,80	3,70	0,60	2,60	5,80	24,0
Rechte Wand Ar = 14,40 m²								
i	x min	x max	y min	y max	z min	z max	A(i)	t(i)
6	7,20	7,20	0,00	4,50	2,60	3,20	2,70	24,0
7	7,20	7,20	0,00	4,50	0,00	0,60	2,70	24,0
8	7,20	7,20	0,00	0,80	0,60	2,60	1,60	24,0
9	7,20	7,20	3,70	4,50	0,60	2,60	1,60	24,0
10	7,20	7,20	0,80	3,70	0,60	2,60	5,80	35,0
Vordere Wand Av = 23,04 m²								
i	x min	x max	y min	y max	z min	z max	A(i)	t(i)
11	0,00	1,44	0,00	0,00	0,00	3,20	4,61	24,0
12	1,44	2,88	0,00	0,00	0,00	3,20	4,61	24,0
13	2,88	4,32	0,00	0,00	0,00	3,20	4,61	24,0
14	4.32	5,76	0,00	0,00	0,00	3,20	4,61	24,0
15	5,76	7,20	0,00	0,00	0,00	3,20	4,61	24,0
Hintere Wand Ah = 23,04 m²								
i	x min	x max	y min	y max	z min	z max	A(i)	t(i)
16	0,00	1,44	4,50	4,50	0,00	3,20	4,61	24,0
17	1,44	2,88	4,50	4,50	0,00	3,20	4,61	24,0
18	2,88	4,32	4,50	4,50	0,00	3,20	4,61	24,0
19	4,32	5,76	4,50	4,50	0,00	3,20	4,61	24,0
20	5,76	7,20	4,50	4,50	0,00	3,20	4,61	24,0
Boden Ab = 32,40 m²								
i	x min	x max	y min	y max	z min	z max	A(i)	t(i)
21	0,00	7,20	4,00	4,50	0,00	0,00	3,60	24,0
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
23	6,20	7,20	0,50	4,00	0,00	0,00	3,50	35,0
24	0,00	7,20	0,00	0,50	0,00	0,00	3,60	24,0
25	0,00	6,20	0,50	4,00	0,00	0,00	21,70	24,0
Decke Ad = 32,40 m²								
i	x min	x max	y min	y max	z min	z max	A(i)	t(i)
26	0,70	6,50	3,80	4,50	3,20	3,20	4,06	24,0
27	0,00	0,70	0,00	4,50	3,20	3,20	3,15	24,0
28	6,50	7,20	0,00	4,50	3,20	3,20	3,15	18,0
29	0,70	6,50	0,00	0,70	3,20	3,20	4,06	24,0
30	0,70	6,50	0,70	3,80	3,20	3,20	17,98	18,0
Möblierungsebene								
i							A(i)	t(i)
31							9,72	30,0
32							9,72	30,0

Koordinaten in m; Flächen in m²; Temperaturen in °C

einem Berührungsthermometer – am Meßort D unter Beachtung des realen Emissionskoeffizienten den Einfluß der reflektierten Energiestrahlung am Meßort zu berücksichtigen. Diese Korrektur mittels der mittleren Oberflächentemperatur wird dann jedoch auch auf alle anderen Meßorte angewandt.

Tabelle 2. Einstrahlzahlen kleiner Flächen um die Meßorte A bis E auf die im *Bild 2* gekennzeichneten Raumflächen.

Meßort	A	B	C	D	E
PHI (1) =	0,449	0,003	0,000	0,028	0,015
PHI (2) =	0,001	0,012	0,003	0,019	0,010
PHI (3) =	0,001	0,007	0,001	0,009	0,008
PHI (4) =	0,001	0,007	0,001	0,020	0,008
PHI (5) =	0,035	0,032	0,006	0,095	0,032
PHI (6) =	0,000	0,003	0,449	0,007	0,000
PHI (7) =	0,003	0,012	0,001	0,005	0,000
PHI (8) =	0,001	0,007	0,001	0,005	0,000
PHI (9) =	0,001	0,007	0,001	0,001	0,000
PHI(10) =	0,006	0,032	0,035	0,016	0,000
PHI(11) =	0,051	0,014	0,002	0,054	0,009
PHI(12) =	0,024	0,037	0,004	0,059	0,016
PHI(13) =	0,009	0,057	0,009	0,046	0,031
PHI(14) =	0,004	0,037	0,024	0,027	0,058
PHI(15) =	0,002	0,014	0,051	0,015	0,044
PHI(16) =	0,051	0,014	0,002	0,000	0,009
PHI(17) =	0,024	0,037	0,004	0,000	0,016
PHI(18) =	0,009	0,057	0,009	0,000	0,031
PHI(19) =	0,004	0,037	0,024	0,000	0,058
PHI(20) =	0,002	0,014	0,051	0,000	0,044
PHI(21) =	0,016	0,027	0,016	0,012	0,012
PHI(22) =	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PHI(23) =	0,003	0,019	0,064	0,003	0,040
PHI(24) =	0,016	0,027	0,016	0,009	0,012
PHI(25) =	0,167	0,274	0,106	0,168	0,133
PHI(26) =	0,000	0,000	0,000	0,030	0,024
PHI(27) =	0,000	0,000	0,000	0,031	0,004
PHI(28) =	0,000	0,000	0,000	0,003	0,033
PHI(29) =	0,000	0,000	0,000	0,016	0,024
PHI(30) =	0,000	0,000	0,000	0,194	0,198
PHI(31) =	0,117	0,215	0,117	0,131	0,132
PHI(32) =	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Im betrachteten Beispiel führt dies dann zu den verbleibenden Abweichungen Δt^*:

Meßort	Δt^* K	Meßort	Δt^* K	Meßort	Δt^* K
A	0,03	C	0,44	E	−0,55
B	0,47	D	0		

Schlußfolgerung

Während die Infrarotaufnahmen beispielsweise von freistehenden Gebäudefassaden oder von sich abkühlenden Werkstücken in Fabrikhallen, die eine große räumliche Ausdehnung gegenüber den Probanden aufweisen, sehr aussagefähig sind, treten bei den Aufnahmen in Prüfräumen mitunter örtlich stark unterschiedliche Reflexionen auf. Diese können die realen Temperaturen verfälschen. Vorschläge, Teile der thermisch aktiven Flächen abzuschalten und die gemessenen, die Reflexionen beinhaltenden Daten im realen Betriebszustand bei der Auswertung zu überlagern, scheitern daran, daß das gesamte Strahlungsregime gesamtheitlich an die verschiedenen Betriebszustände gebunden ist.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Bewertungsmaßstab zur optimalen Anordnung von Heiz- und Kühlflächen im Raum. Gesundheits-Ingenieur (1991) H. 2, S. 65–71.

[2] *Glück, B.:* Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: Verlag für Bauwesen 1990, 2. Auflage.