

Zur Personenwärme bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078

CSE Nadler

Dipl.-Ing. Norbert Nadler

Arnstädter Str. 7, 16515 Oranienburg

Tel. : (03301) 579 39-0

Fax : (03301) 579 39-1

n.nadler@cse-nadler.de

www.cse-nadler.de

Oranienburg, den 31. Mai 2005

Die Tabelle A1 mit Zahlenwerten für die Wärmeabgabe des Menschen (Personenwärme) aus der VDI 2078 [1] ist die wohl am häufigsten verwendete Datenquelle bei Lastberechnungen für Versammlungsräume und Büros. Die Herkunft dieser Daten ist jedoch leider nicht mehr nachvollziehbar.

Mit den Algorithmen aus der DIN EN ISO 7730 [2] kann sowohl der Prozentsatz der Unzufriedenen (PPD-Wert) bei abweichenden Bedingungen vom thermischen Behaglichkeitszustand als auch die Personenwärmeabgabe berechnet werden.

Aus der Anwendung der DIN EN ISO 7730 lassen sich neue international anerkannte Werte für die Personenwärme ableiten. In diesem Beitrag wird eine sinnvolle Methodik zur Ermittlung dieser Werte vorgestellt.

Einleitung

Die Wärmeabgabe des Menschen ist nach DIN EN ISO 7730 von folgenden Faktoren abhängig:

t_a	mittlere Raumlufthtemperatur
\bar{t}_r	mittlere Strahlungstemperatur
v_{ar}	relative Luftgeschwindigkeit an der Person
φ	relative Luftfeuchtigkeit im Raum
act	Aktivitätsgrad
gar	Bekleidungsgrad

Es ist anzunehmen, dass bei der Ermittlung der Tab. A1 in der VDI 2078 t_a und \bar{t}_r gleich gesetzt wurden. Der Aktivitätsgrad act und die Raumlufthtemperatur t_a sind Parameter der Tabelle. Welche Annahmen allerdings für v_{ar} , φ und gar getroffen wurden, ist nicht bekannt. Besonders der Bekleidungsgrad kann einen starken Einfluss auf die Personenwärme ausüben.

Tabelle 1 gibt die Werte der VDI 2078 Tab. A1 in der Ausgabe von 10/1994 wieder. In der Ausgabe 7/1996 [1] hat sich bei der trockenen Wärmeabgabe für den Aktivitätsgrad III und 25 °C Raumlufthtemperatur offenbar ein Druckfehler eingeschlichen. Die Summe aus trockener und feuchter Wärmeabgabe ergibt in [1] nicht den Wert 190 W für die Gesamtwärmeabgabe.

Der Begriff "Aktivitätsgrad" ist in der DIN 1946 Teil 2 [3, Tab. 1] definiert und wird dort allerdings als "Aktivitätsstufe" bezeichnet. Mit der Aktivitätsstufe I..IV ist eine bestimmte Gesamtwärmeabgabe (120...270 W) bei 22 °C Raumtemperatur festgelegt. Unerklärlich ist, warum die **Tabelle 1** die Aktivitätsstufe I und II zusammenfasst, aber dennoch für 22 °C den Wert 120 W (entspricht I) angibt. Der Aktivitätsstufe II müsste ein Wert von 150 W zugeordnet werden. Für "I und II" müsste daher im Falle einer Zusammenfassung bei 22 °C der Wert 135 W stehen.

Gem. **Tabelle 1** ist die trockene Wärmeabgabe temperaturabhängig. Diese Abhängigkeit ist bei der Lastberechnung zu berücksichtigen, insbesondere bei dem Berechnungsfall "freischwingende Raumlufttemperatur".

Der **Tabelle 1** ist zu entnehmen, dass die Gesamtwärmeabgabe (trocken und feucht) über den Temperaturbereich 18...26 °C konstant bleibt. Das ist nur unter der Annahme möglich, dass der Bekleidungsgrad mit der Raumlufttemperatur variiert. Inwieweit diese Annahme realistisch und für den Nutzer zumutbar ist, soll hier Gegenstand der Untersuchung sein.

Tabelle 1: Wärme- und Wasserdampfabgabe des Menschen nach VDI 2078 Tab. A1
Ausgabe 10/1994

Aktivitätsgrad	Raumtemperatur	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	°C
I und II	Wärmeabgabe											
	- trocken	100		95		90	85	75	75	70		W
	- feucht	25		25		30	35	40	40	45		W
	- gesamt	125		120		120	120	115	115	115		W
	Wasserdampfabgabe	35		35		40	50	60	60	65		g/h
III	Wärmeabgabe											
	- trocken	125		115		105	100	95	90	85		W
	- feucht	65		75		85	90	95	100	105		W
	- gesamt	190		190		190	190	190	190	190		W
	Wasserdampfabgabe	95		110		125	135	140	145	150		g/h
IV	Wärmeabgabe											
	- trocken	155		140		120	115	110	105	95		W
	- feucht	115		130		150	155	160	165	175		W
	- gesamt	270		270		270	270	270	270	270		W
	Wasserdampfabgabe	165		185		215	225	230	240	250		g/h

Methodik

Mit einer Gleichung aus der DIN EN ISO 7933 [4] kann ein Zusammenhang zwischen dem Aktivitätsgrad (bzw. Gesamtwärmeabgabe bei 22 °C) und der relativen Luftgeschwindigkeit an der Person hergestellt werden.

$$v_{ar} = v_a + 0,0052 \left(\frac{\dot{Q}_{ges}}{A_{Du}} - 58 \text{ W / m}^2 \right) \quad (1)$$

v_{ar} relative Luftgeschwindigkeit an der sich bewegenden Person in m/s

v_a Luftgeschwindigkeit bezogen auf eine stillstehende Person in m/s
(Raumluftgeschwindigkeit)

\dot{Q}_{ges} Gesamtwärmeabgabe (trockene plus feuchte Wärmeabgabe) in W

$A_{Du} = 1,724 \text{ m}^2$ Körperoberfläche nach Dubois in m^2

Das heißt, zusätzlich zur Raumluftgeschwindigkeit tritt noch ein weiterer Anteil hinzu, der von der Aktivität der Person abhängig ist.

Um die Abhängigkeit vom Bekleidungsgrad aufzuzeigen, werden folgende Annahmen getroffen:

- 1) Raumlufthtemperatur = Strahlungstemperatur (= Raumtemperatur) gesetzt
- 2) Raumlftgeschwindigkeit $v_a = 0 \text{ m/s}$
- 3) relative Luftfeuchtigkeit im Raum $\varphi = 50 \%$

Bild 1 zeigt die trockene Personenwärmeabgabe in Abhängigkeit von der Raumtemperatur für verschiedene Variationen des Bekleidungsgrades. Für beide Kurvenscharen (durchgezogen und gestrichelt) wurde zunächst bei der Raumtemperatur von 22 °C ein optimaler Bekleidungsgrad ermittelt, bei dem der PPD-Wert sein Minimum von 5 % annimmt. **Tabelle 2** gibt über die Höhe der gefundenen Werte Auskunft.

Bei den durchgezogenen Linien wurde der jeweilige optimale Bekleidungsgrad für andere Raumtemperaturen beibehalten. Der PPD-Wert erreicht dabei unzulässig hohe Werte (> 15 %). Bei den gestrichelten Linien wurde der Bekleidungsgrad derart variiert, dass für jede Raumtemperatur der minimale PPD-Wert vorliegt. Ab einer gewissen Raumtemperatur ist diese Anpassung jedoch nicht mehr möglich, da der Bekleidungsgrad den Wert 0 clo

erreicht hat. Die gestrichelten Linien fallen daher bei höheren Raumtemperaturen ab, was wiederum mit einem Ansteigen des PPD-Wertes einhergeht.

Table 2: Optimale Bekleidungsgrade für verschiedene Aktivitätsgrade
($v_a = 0 \text{ m/s}$, $\phi = 50 \%$)

Tätigkeit	Aktivitätsgrad	Gesamt-wärmeabgabe bei 22 °C in W	rel. Luft-geschwindigkeit v_{ar} in m/s	optimaler Bekleidungs-grad in clo	Bereich für Bekleidungs-grad in clo
Statische Tätigkeit im Sitzen wie Lesen und Schreiben	I	120	0,06	0,91	0,76...1,06
Sehr leichte körperliche Tätigkeit im Stehen oder Sitzen	II	150	0,15	0,67	0,52...0,82
Leichte körperliche Tätigkeit	III	190	0,27	0,46	0,31...0,61
Mittelschwere bis schwere körperliche Tätigkeit	IV	270	0,51	0,18	0,18...0,33

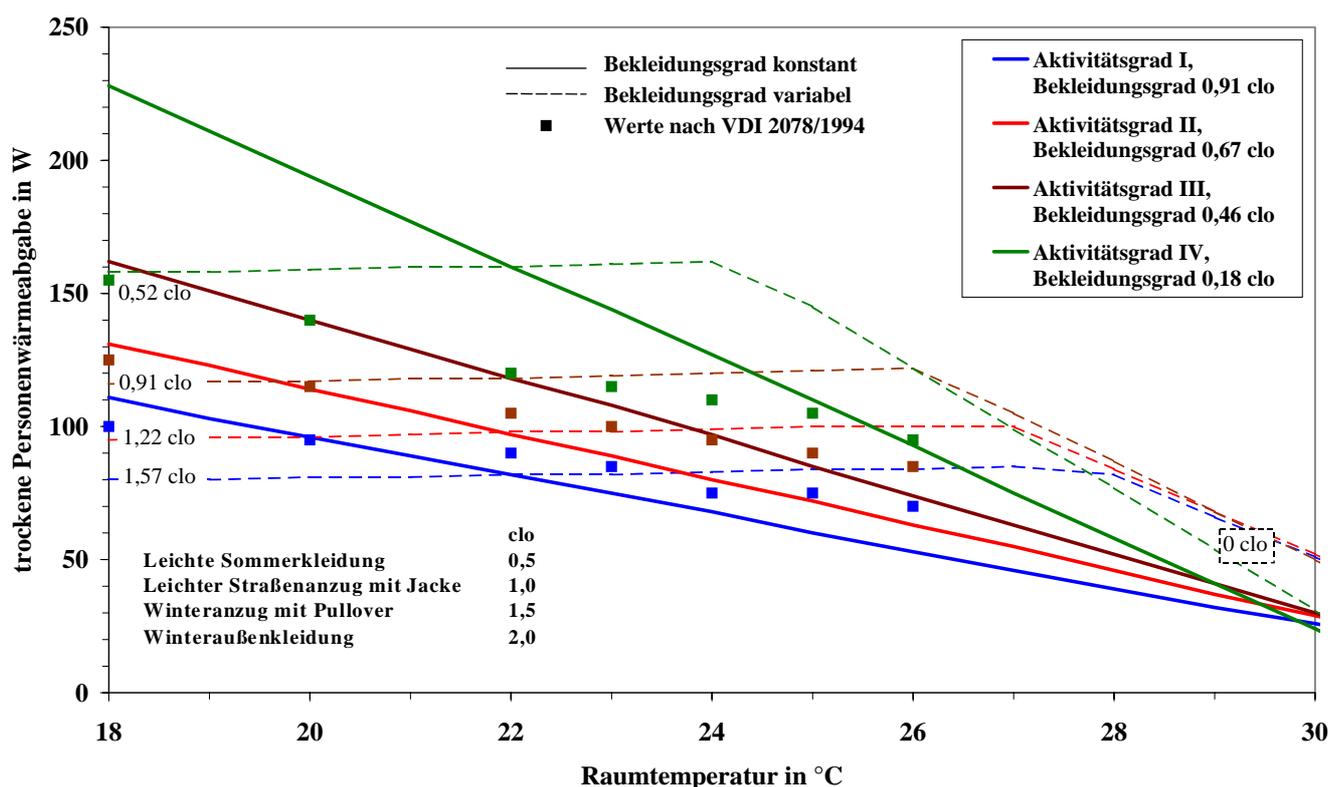


Bild 1: Trockene Personenwärmeabgabe in Abhängigkeit von der Raumtemperatur für konstanten und variablen Bekleidungsgrad ($v_a = 0 \text{ m/s}$, $\phi = 50 \%$).

Für den Aktivitätsgrad I wäre zum Erhalt der thermischen Behaglichkeit in der Kategorie A ($PPD < 6 \%$) eine Anpassung des Bekleidungsgrades an den Raumtemperaturbereich 18...28 °C von 0...1,57 clo notwendig. Eine dermaßen hohe Anpassungsfähigkeit sollte vom Nutzer nicht erwartet werden.

Eine realistische Anpassung des Bekleidungsgrades an verschiedene Raumtemperaturen wird zwischen der jeweils durchgezogenen und gestrichelten Linie liegen. Die zusätzlich im **Bild 1** eingetragenen Punkte nach VDI 2078 deuten dies zwar an, jedoch weicht das Niveau dieser Werte zum Teil erheblich von den Ergebnissen der DIN EN ISO 7730 ab. Die großen Differenzen zwischen den Linien und den Punkten machen deutlich, dass die Angabe des zugrundegelegten Bekleidungsgrades unerlässlich ist.

Um eine definierte Berechnungsgrundlage zu erhalten, wird im folgenden von einer zulässigen Anpassung in Höhe von $\pm 0,15$ clo um den optimalen Bekleidungsgrad herum ausgegangen. Der zul. Bekleidungsgradbereich für die jeweilige Aktivität geht aus **Tabelle 2** letzte Spalte hervor. Beim Aktivitätsgrad IV wurde auf eine Erweiterung des unteren Bereiches verzichtet. Außerhalb des zul. Bereiches bleibt der Bekleidungsgrad auf dem oberen bzw. unteren Wert konstant.

Wärme- und Wasserdampfabgabe

Bild 2 zeigt den Verlauf der trockenen Wärmeabgabe über der Raumtemperatur unter den genannten Bedingungen.

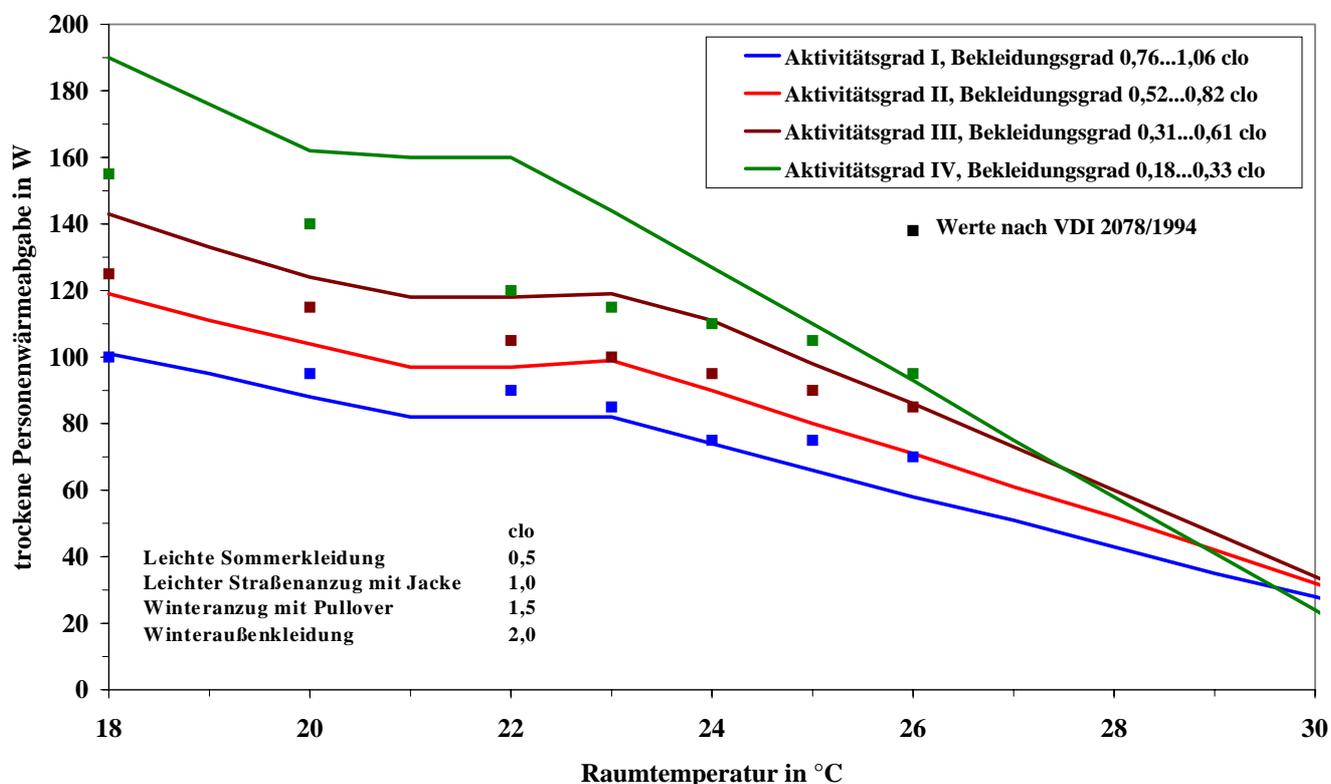


Bild 2: Trockene Personenwärmeabgabe in Abhängigkeit von der Raumtemperatur für einen begrenzten Bereich des Bekleidungsgrades ($v_a = 0$ m/s, $\phi = 50$ %)

Die Werte nach VDI 2078 für den Aktivitätsgrad I/II fügen sich in der Mitte der beiden Linien für I und II ein. Eine Zusammenlegung beider Aktivitätsgrade ist jedoch nicht gerechtfertigt. Bei den Werten für Aktivitätsgrad III und IV bestehen große Abweichungen von der VDI 2078.

Tabelle 3: Wärme- und Wasserdampfabgabe des Menschen berechnet mit der
DIN EN ISO 7730 [2] ($v_a = 0 \text{ m/s}$, $\phi = 50 \%$, $t_a = \bar{t}_r$, v_{ar} nach **Glg. (1)**)

Aktivitätsgrad Bekleidungsgrad rel. Luftgeschw.	Raumtemperatur	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	°C
I 0,76...1,06 clo 0,06 m/s	Wärmeabgabe											
	- trocken	101	95	88	82	82	82	74	66	59	51	W
	- feucht	40	40	39	39	38	38	37	36	36	35	W
	- gesamt	141	135	127	121	120	120	111	102	95	86	W
	Wasserdampfabgabe	57	57	56	55	54	53	52	51	50	49	g/h
	Konvektivanteil	50	49	48	48	48	47	47	46	45	44	%
PPD-Wert	14,2	9,2	6,1	5,0	5,0	5,0	6,6	11,0	18,3	28,4	%	
II 0,52...0,82 clo 0,15 m/s	Wärmeabgabe											
	- trocken	119	111	104	97	98	99	90	80	71	61	W
	- feucht	55	54	54	53	52	52	51	50	50	49	W
	- gesamt	174	165	158	150	150	151	141	130	121	110	W
	Wasserdampfabgabe	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	g/h
	Konvektivanteil	55	55	55	54	54	54	53	53	53	53	%
PPD-Wert	11,6	7,8	5,6	5,0	5,0	5,0	5,9	9,4	15,5	24,3	%	
III 0,31...0,61 clo 0,27 m/s	Wärmeabgabe											
	- trocken	143	133	124	118	118	119	111	98	86	73	W
	- feucht	74	73	73	72	72	71	70	69	68	68	W
	- gesamt	217	206	197	190	190	190	181	167	154	141	W
	Wasserdampfabgabe	105	104	103	102	101	100	99	98	97	95	g/h
	Konvektivanteil	62	62	62	61	61	61	60	60	60	60	%
PPD-Wert	10,8	7,3	5,3	5,0	5,0	5,0	5,6	9,0	15,4	24,9	%	
IV 0,18...0,33 clo 0,51 m/s	Wärmeabgabe											
	- trocken	190	176	162	160	160	144	127	110	93	75	W
	- feucht	112	112	111	110	110	109	108	107	106	105	W
	- gesamt	302	288	273	270	270	253	235	217	199	180	W
	Wasserdampfabgabe	160	159	158	156	155	154	153	151	150	148	g/h
	Konvektivanteil	69	69	69	68	68	68	68	68	68	68	%
PPD-Wert	11,2	6,8	5,1	5,0	5,0	6,8	12,5	22,1	35,5	51,4	%	

Die **Tabelle 3** stellt die Ergebnisse vergleichbar zur **Tabelle 1** (bzw. Tab. A1 VDI 2078) zusammen. Besonders auffällig sind die Abweichungen beim Aktivitätsgrad IV. Die

feuchte Wärmeabgabe bzw. die Wasserdampfabgabe wird bei dieser Aktivität in der VDI 2078 zu hoch bewertet.

Der PPD-Wert bleibt bei den Aktivitätsgraden I-III im Raumtemperaturbereich 18...25 °C unter 15 %. Beim Aktivitätsgrad IV im Temperaturbereich 18...24 °C.

Tabelle 4 vergleicht die optimalen Bekleidungsgrade für verschiedene Raumluftgeschwindigkeiten mit dem festgelegten Bereich aus **Tabelle 2**. Es zeigt sich, dass auch bei höheren Raumluftgeschwindigkeiten der Begrenzungsbereich nur geringfügig überschritten wird. Auf eine Bereichsverlagerung bei höheren Raumluftgeschwindigkeiten wird daher verzichtet.

Tabelle 4: Optimale Bekleidungsgrade für verschiedene Aktivitätsgrade und Raumluftgeschwindigkeiten v_a ($\varphi = 50 \%$)

Aktivitäts-grad	rel. Luft-geschwin-digkeit v_{ar} in m/s $v_a = 0$ m/s	optimaler Bekleidungs-grad in clo	rel. Luft-geschwin-digkeit v_{ar} in m/s $v_a = 0,15$ m/s	optimaler Bekleidungs-grad in clo	rel. Luft-geschwin-digkeit v_{ar} in m/s $v_a = 0,25$ m/s	optimaler Bekleidungs-grad in clo	Bereich für Bekleidungs-grad in clo
I	0,06	0,91	0,21	1,07	0,31	1,13	0,76...1,06
II	0,15	0,67	0,30	0,79	0,40	0,84	0,52...0,82
III	0,27	0,46	0,42	0,54	0,52	0,57	0,31...0,61
IV	0,51	0,18	0,66	0,23	0,76	0,25	0,18...0,33

Konvektivanteil

Eine weitere Größe, die für eine Kühllastberechnung nach VDI 2078 [1] benötigt wird, ist der Konvektivanteil der trockenen Personenwärme. Mit den Algorithmen aus der DIN EN ISO 7730 kann auch diese Größe ermittelt werden. Man muss hier 2 Definitionen unterscheiden

$$\beta_{Konv} = \frac{\text{Konvektive Wärmeabgabe (einschl. durch Atmung)}}{\text{Gesamte trockene Wärmeabgabe (einschl. durch Atmung)}} \quad (2)$$

$$\beta_{Hu} = \frac{\alpha_K}{\alpha_S + \alpha_K} \quad (3)$$

α_S Wärmeübergangskoeffizient durch langwellige Strahlung

α_K Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion

Der tatsächliche Konvektivanteil der trockenen Wärmeabgabe ist β_{Konv} , da er auch die trockene Atmungswärme enthält und die Temperaturverhältnisse berücksichtigt. β_{Hu} dient zur Bestimmung der operativen Raumtemperatur (s. [2] und [3]) und wird häufig als Näherungswert für den Konvektivanteil eingesetzt.

Bild 3 zeigt beide Konvektivanteile in Abhängigkeit der relativen Luftgeschwindigkeit für den Aktivitätsgrad I. Eingetragen sind Mittelwerte für einen Temperaturbereich von 18...27 °C. Die blauen Kurven gelten für den Fall, dass die Lufttemperatur der Strahlungstemperatur entspricht (Fall a). Bei der roten Kurve wurde angenommen, dass die Lufttemperatur 2 K unter der Strahlungstemperatur liegt (Fall b).

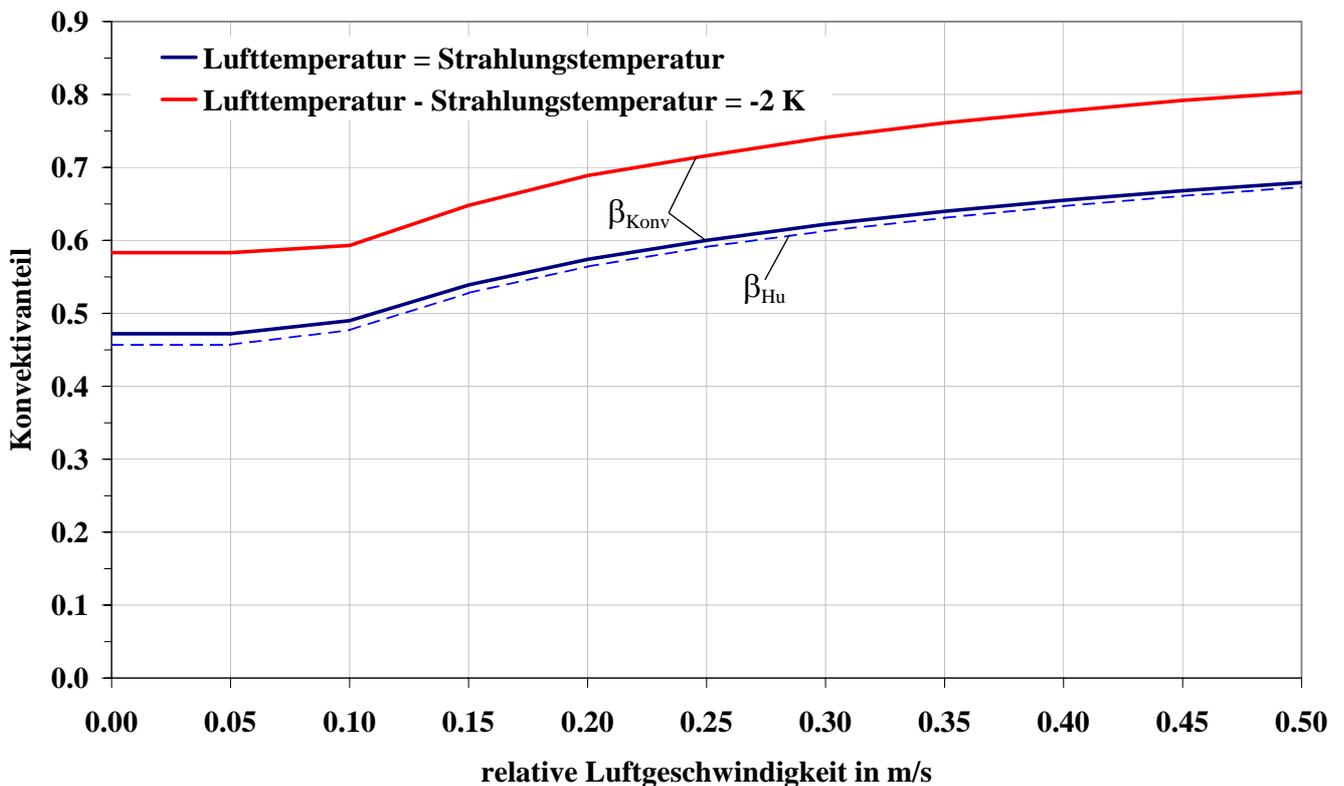


Bild 3: Konvektivanteil der Personenwärme für Aktivitätsgrad I und optimierten bzw. limitierten Bekleidungsgrad ($\varphi = 50\%$)

Im Fall a zeigen sich nur geringe Differenzen zwischen β_{Konv} und β_{Hu} . Die Kurven gelten auch für höhere Aktivitätsgrade, da die Unterschiede weniger als 3 %-Punkte betragen.

Mit zunehmender rel. Luftgeschwindigkeit nimmt auch der Konvektivanteil zu. In der VDI 2078 findet sich die Empfehlung, für den Konvektivanteil 50 % anzusetzen. Ab einer rel.

Luftgeschwindigkeit von 0,20 m/s sollte diese Empfehlung nach oben korrigiert werden (vgl. auch **Tabelle 3**). D.h., für Räume mit RLT-Anlagen beträgt der Konvektivanteil bei der Personenwärme im Fall a 60...70 %.

Einen wesentlichen Einfluss auf β_{Konv} übt der Unterschied zwischen Luft- und Strahlungstemperatur aus. β_{Hu} bleibt hiervon weitgehend unberührt, weshalb auf eine Darstellung im Fall b verzichtet wurde.

Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass Bekleidungsgrad und Personenwärme eng miteinander verbunden sind. Folglich gehört zur Angabe der Personenwärme auch die Nennung des für diese Daten zugrundegelegten Bekleidungsgrades. Je nach Aktivität ist ein sinnvoller und zumutbarer Bereich des Bekleidungsgrades für einen Raumtemperaturbereich festzulegen. Nur so können realistische Daten für die Personenwärme in eine Last- bzw. Energieverbrauchsrechnung einfließen.

Die Philosophie "Wenn es zu warm wird, muss man sich entsprechend entkleiden" ist nur begrenzt zu vertreten und könnte als nutzerunfreundlich verstanden werden. Als zumutbare Anpassung des Bekleidungsgrades an einen Raumtemperaturbereich wurden hier $\pm 0,15$ clo angesetzt.

Die Tab. A1 der VDI 2078 gibt über diesen wichtigen Parameter keine Auskunft. Die Tabelle ist für die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit in einem EDV-Programm lückenhaft und bei hohen Aktivitätsgraden sind die Werte zweifelhaft.

Zur Ermittlung der Personenwärme wurde eine Methodik entwickelt, die bei entsprechender Software auch für jede Stunde des Tages in der Kühllastberechnung anwendbar ist. Dies ist besonders dann zu empfehlen, wenn Raumlufttemperatur und Strahlungstemperatur stark voneinander abweichen. In [5] wurde gezeigt, dass die Ermittlung der Strahlungstemperatur auch im EDV-Verfahren der VDI 2078 möglich ist.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Personenwärme wäre wie folgt zu umschreiben:

1. Vorgabe des Aktivitätsgrades, der Raumluftgeschwindigkeit und der rel. Luftfeuchte
2. Raumlufttemperatur und Strahlungstemperatur erhält man aus den Algorithmen des EDV-Verfahrens der VDI 2078

3. Mit diesen Parametern wird der optimale Bekleidungsgrad gesucht, für den der PPD-Wert ein Minimum annimmt.
4. Sofern der gefundene Bekleidungsgrad außerhalb des Bereiches der **Tabelle 4** letzte Spalte liegt, wird er auf den zulässigen Bereich begrenzt.
5. Mit dem so ermittelten Bekleidungsgrad wird die trockene und feuchte Wärmeabgabe sowie der Konvektivanteil, die Wasserdampfabgabe und zur Kontrolle der thermischen Behaglichkeit der PPD-Wert berechnet.

Unter Festlegung einiger Randbedingungen wurde **Tabelle 3** mit dieser Methode ermittelt. Sie stellt eine Alternative zur Tab. A1 der VDI 2078 [1] dar.

Literatur

- [1] **VDI 2078 Ausgabe Juli 1996** : Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).
- [2] **DIN EN ISO 7730 Ausgabe 1995-09**: Gemäßigtes Umgebungsklima. Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit.
- [3] **DIN 1946 Teil 2 Ausgabe Januar 1994** : Raumluftechnik. Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln).
- [4] **DIN EN ISO 7933 Ausgabe 2004-12** : Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung.
- [5] **Nadler, N.** : Korrekturvorschläge zum EDV-Verfahren der VDI 2078. Teil 1b: Algorithmen. HLH Bd. 54 (2003) Nr. 9, S. 62-66