

Bernd Glück

Atmosphärische Luft als Wärmesenke für die thermische Bauteilaktivierung

Die thermische Bauteilaktivierung gewinnt gegenüber der Nur-Luftklimatisierung zunehmend an Bedeutung. Dabei wird im Weiteren unter dem Begriff thermische Bauteilaktivierung die instationär arbeitende Betonkernkühlung und die stationär wirkende Flächenkühlung verstanden. Letztere kann zunehmend – beispielsweise bei der in [1] dargestellten Baukastenlösung – auch mit relativ hohen Kaltwassertemperaturen betrieben werden. Somit ergeben sich Temperaturanforderungen für das Kaltwasser im Bereich von 16 °C bis 21 °C. Damit ist die Luftatmosphäre als Wärmesenke besonders interessant geworden. Auf der Grundlage der meteorologischen Daten wird das mögliche Nutzungspotenzial abgeleitet.

Atmospheric air as heat sink for the thermal activation of building construction

The thermal activation of building construction has an increasing importance in relation to the only air A/C. Further on the term thermal activation of building construction is understood as the intermittent working concrete core cooling and the constant working surface cooling. The latter can increasingly be operated – for example with in [1] described modular system solution – also with relatively high chilled water temperatures. The temperature requirements for the chilled water are within the range of 16 °C to 21 °C. Therefore the atmospheric air becomes particularly interesting as heat sink. On the basis of the meteorological data the possible potential of usage is derived.

Keywords: free cooling, cooling tower use, environmental energy use, thermal activation of building construction, cooling ceilings

Prof. Dr.-Ing. habil. B. Glück, F+E TGA Jöbnitz (Plauen) und Westsächsische Hochschule Zwickau (FH)

Einführung über die technischen Nutzungsmöglichkeiten

Die Luftatmosphäre als Wärmesenke zu verwenden ist allerorts möglich. Zur Erschließung der Wärmesenke Luft gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Systeme und eine Verbundlösung:

Trockenkühler

Das Kühlwasser durchströmt einen Wärmeübertrager in einem geschlossenen System (keine Veränderung der Wasserqualität, keine wasserseitigen Korrosionsprobleme).

Die theoretisch erreichbare Wassertemperatur entspricht der Lufttemperatur. Im praktischen Fall liegt diese bei großen Wärmeübertragerflächen ca. 4 bis 6 K über der Lufttemperatur.

Beim Einsatz von Kältemaschinen zwischen der Wärmesenke Luft und dem Verbraucher ist es aus thermodynamischer Sicht günstiger die Beaufschlagung mit Kältemittel vorzunehmen und auf den Wasserkreislauf zu verzichten.

Nasskühler (Kühlturm)

Das Kühlwasser steht im direkten Kontakt mit der Luft. Die Kühlung erfolgt zum größten Teil durch Verdunstung und zum kleineren Teil durch Konvektion. Ein Teil des versprühten Kühlwassers verdunstet und sättigt die Luft nahezu. Dadurch erfolgt einerseits eine Anreicherung der Mineralstoffe im Kühlwasser, d. h. eine Qualitätsverschlechterung tritt ein, und andererseits besteht die Gefahr der Nebelbildung in der Nähe des Kühlturms.

Die theoretisch erreichbare Wassertemperatur bildet in diesem Falle die Feuchtkugelmitteltemperatur. Üblicherweise liegt die Kühlwassertemperatur 3,5 bis 6 K darüber.

Hybridkühler

Die Hybridkühler stellen eine Kombination zwischen Trocken- und Nasskühler dar. Sie werden eingesetzt, um einerseits die Leistung gegenüber den Trockenkühlern zu steigern und andererseits den

Betrieb weitestgehend ohne Nebelschwaden zu gestalten. Unter dem Namen Hybridkühler werden aber verschiedene Konstruktionen subsummiert.

Variante 1

Das Kühlwasser fließt zuerst durch einen Trockenkühler und anschließend offen durch den Nassteil. Die Luft strömt im Gegenstrom zuerst durch den offenen Kühlturmteil und nimmt einen hohen Feuchtegehalt an. Sie passiert dann den Trockenkühler und wird dadurch erwärmt, sodass die relative Feuchte sinkt. Er arbeitet somit ohne Nebelschwaden.

Variante 2

Das Kühlwasser strömt durch einen geschlossenen „Trockenkühler“, der zur Leistungssteigerung bei hohen Außenlufttemperaturen mit Wasser berieselt wird. Damit tritt eine zusätzliche Verdunstung des Rieselwassers auf. Bei hohen Lufttemperaturen ist die Nebelbildung relativ selten. Der Wasserkreislauf ist geschlossen. Diese Konstruktion wird auch direkt als Verdunstungskondensator eingesetzt.

Variante 3

Es gibt auch Konstruktionen, die aus je einem parallel durchströmten Trocken- und einem Nasskühler bestehen, deren Fortluftanteile in einer gemeinsamen Mischkammer in den ungesättigten Zustand gebracht werden.

Ist die erzeugte Kaltwassertemperatur nicht tief genug, um den Verbraucher zu versorgen, wird in der Regel eine Kältemaschine zur Kaltwassererzeugung zwischen Wärmesenke und Kaltwasserverbraucher geschaltet. Im Sinne einer hohen Umweltenergienutzung bei der Raumkühlung mittels thermischer Bauteilaktivierung sollte eine solche Schaltung möglichst vermieden werden. Ist der Einsatz notwendig, dann ist das Betreiben der Kältemaschine zeitlich auf Extremfälle zu reduzieren.

Meteorologische Basisdaten

Um die möglichen Potenziale der atmosphärischen Luft für Kühlzwecke beurteilen zu können, müssen die Außenluftzustände und die Häufigkeiten ihres Auftretens bekannt sein. In der DIN 4710 (Ausgabe 1982) sind die Lufttemperatur t in $^{\circ}\text{C}$ und die absolute Feuchte x in $\text{g}_\text{w}/\text{kg}_\text{tL}$ sowie die mittleren Häufigkeiten in 0,1 Stunden für 13 deutsche Wetterstationen wiedergegeben.

Die Tabellenwerte basieren auf stündlichen Messungen der Jahre 1951 bis 1970. Es ist jeweils die mittlere jährliche Anzahl der Fälle vermerkt. D. h., wenn in den 20 Beobachtungsjahren 1 Stunde des Zustandes auftrat, ist er in der Tabelle vermerkt ($1 \text{ h}/20 = 0,05 \text{ h} \Rightarrow 0,5$ Zehntelstunden $\Rightarrow$ gerundet 1 Zehntelstunde). Aufgrund der Rundungsfehler ergibt sich in den Tabellen ein Gesamtzeitraum für das Jahr, der in der Regel von 8760 h abweicht.

Der Datenbezug auf DIN 4710 ist bedeutend genauer als die Angaben der Testreferenzjahre [2].

Im Weiteren wird auf die Daten der Stationen *Berlin-Tempelhof* und *München-Riem* Bezug genommen. Als Besonderheiten der nachfolgenden Auswertungen sind zu nennen:

- Für jede Korrelationstabelle der DIN 4710 wird in der vorliegenden Ausarbeitung ein Korrekturfaktor gebildet, der zur Umrechnung auf die exakte Jahresstundenzahl dient. Es gelten für
Berlin 24 h/d (DIN-Tabelle 3.1a) $\Rightarrow$ Korrekturfaktor: 0,9982110
Berlin 12 h/d (DIN-Tabelle 3.1b) $\Rightarrow$ Korrekturfaktor: 0,9970634
München 24 h/d (DIN-Tabelle 3.9a) $\Rightarrow$ Korrekturfaktor: 0,9981655

München 12 h/d (DIN-Tabelle 3.9b) $\Rightarrow$ Korrekturfaktor: 0,9971315.

- Die in DIN 4710 auftretenden Wertebereiche für $t = +0^{\circ}\text{C}$ und $t = -0^{\circ}\text{C}$ werden zu einem Bereich $t = 0^{\circ}\text{C}$ zusammengefasst (Bild 1). Dadurch entsteht beispielsweise in den geordneten Häufigkeitsverteilungen ein veränderter Anstieg. Auf die weitere Auswertung hat dies aber keinen Einfluss.
- Die in der DIN 4710 verwendeten Tabellenformen a umfassen den gesamten Tag (24 h), die Formen b den Zeitraum 7⁰⁰ Uhr bis 18⁰⁰ Uhr (12 h). Die Tabellenform b basiert allerdings auf der „Mittleren Ortszeit“. Damit sind kleine Abweichungen zwischen den beiden Formen zu erklären.

Auswertung für die Lufttemperatur

In der Tabelle 1 sind für die Stadt Berlin die Jahresstundensummen für Lufttemperaturen $\geq t$ und $< t$ ermittelt. Die Auswertungen für die Lufttemperatur und nachfolgend auch für die Feuchtkugelttemperatur wurden sowohl für den Standort Berlin als auch München vorgenommen. Aus Platzgründen konnten im Beitrag nur die Daten für den Standort Berlin abgedruckt werden. Interessenten für die Daten des Standortes München können diese im Verlag anfordern.

Daraus ist dann beispielsweise ermittelbar, über welche Zeiträume die atmosphärische Luft zur Kühlung eingesetzt werden kann.

Besonders interessant sind die Verhältnisse für die unterschiedlichen Zeitabschnitte „Tag“ und „Nacht“, da diese für die direkte Nutzung – beispielsweise den Kühldeckenbetrieb – und für die zeitversetzte Nutzung – beispielsweise die

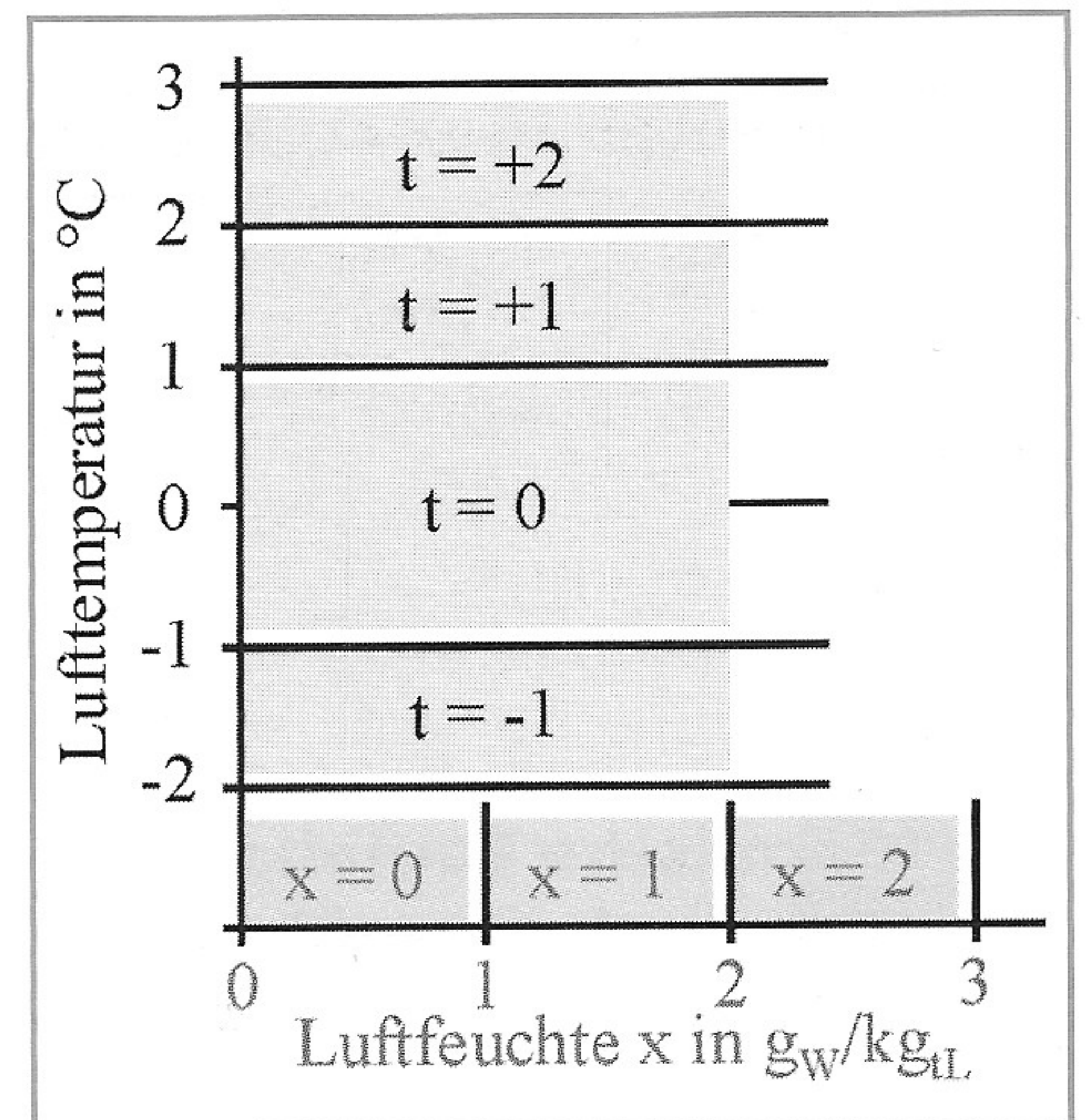


Bild 1 Zuordnung der realen Wertebereiche zu den t- und x-Klassen
Der Bereich $t = 0^{\circ}\text{C}$ weicht von der DIN 4710 ab. Es sind dort +0 und -0 getrennt ausgewiesen.

Ladung von passiven Speicherbauteilen – relevant sind. Aus den Datensätzen des Deutschen Wetterdienstes wurden diese speziellen Daten ermittelt und in der zusätzlichen Tabelle 2 wiedergegeben. Geringe Auswertungsfehler ergeben sich aus den unterschiedlichen Messzeiten.

Anhand der Prozentangaben können den Einsatzvarianten die möglichen Nutzungszeiträume übersichtlich zugeordnet werden.

Die Visualisierungen der geordneten Summenjahresstunden für Lufttemperaturen $\geq t$ für

- den 24-Stunden-Tag
- den 12-Stunden-Zeitraum am Tage
- den 12-Stunden-Zeitraum in der Nacht

sind in den Bildern 2 und 3 gegeben. Die Darstellung der geordneten, prozentualen Summenhäufigkeiten für Lufttem-

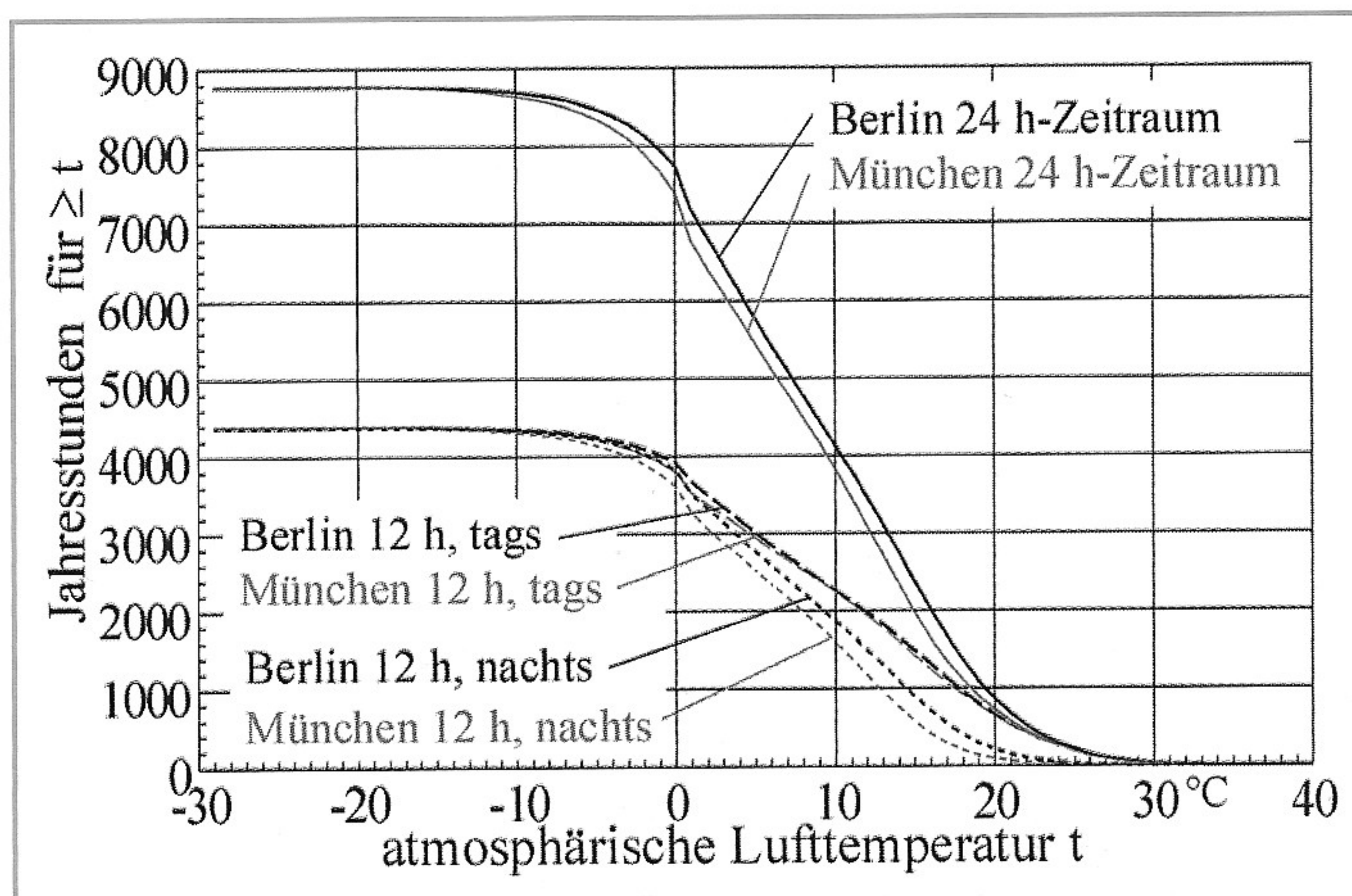


Bild 2 Summe der Jahresstunden einer Lufttemperatur $\geq t$ für die Wetterstationen Berlin-Tempelhof und München-Riem für die Messzeiträume 0⁰⁰ Uhr bis 24⁰⁰ Uhr, 7⁰⁰ Uhr bis 18⁰⁰ Uhr und 19⁰⁰ Uhr bis 6⁰⁰ Uhr

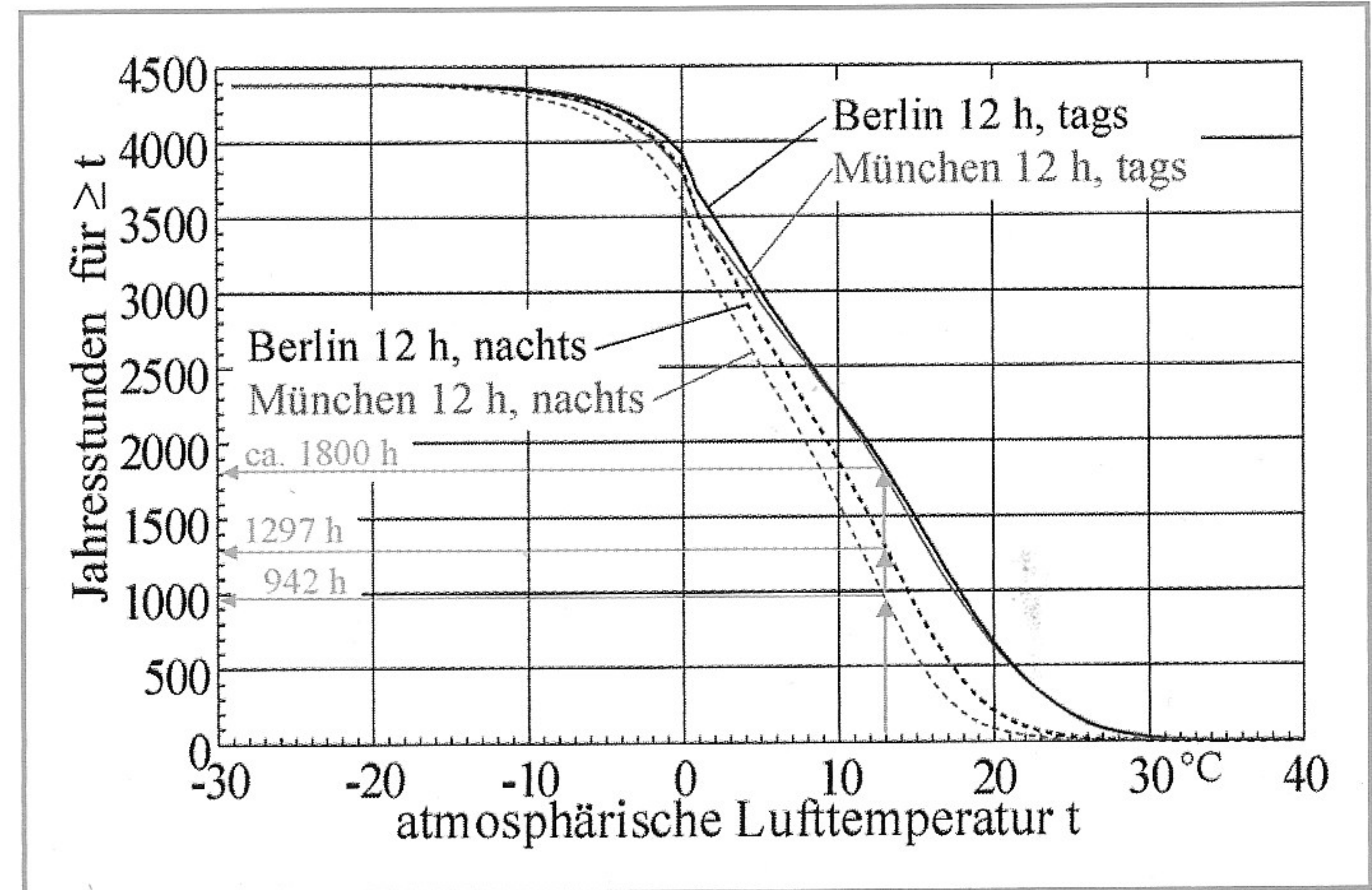


Bild 3 Summe der Jahresstunden einer Lufttemperatur $\geq t$ für die Wetterstationen Berlin-Tempelhof und München-Riem für die Messzeiträume 7⁰⁰ Uhr bis 18⁰⁰ Uhr und 19⁰⁰ Uhr bis 6⁰⁰ Uhr

Tab. 1 Jahresstunden der Lufttemperaturen $\geq t$ und $< t$ für Berlin*)

Betrachtungszeitraum 0 ⁰⁰ Uhr bis 24 ⁰⁰ Uhr					Betrachtungszeitraum 7 ⁰⁰ Uhr bis 18 ⁰⁰ Uhr				
t °C	Stunden pro Jahr		Zeit %	Zeit %	t °C	Stunden pro Jahr		Zeit %	Zeit %
	$\geq t$	$< t$	$\geq t$	$< t$		$\geq t$	$< t$	$\geq t$	$< t$
39	0.0	8760.0	0,0	100,0	39	0.0	4380.0	0,0	100,0
38	0.1	8759.9			38	0.1	4379.9		
37	0.3	8759.7			37	0.3	4379.7		
36	0.8	8759.2			36	0.7	4379.3		
35	1.0	8759.0			35	0.8	4379.2		
34	2.0	8758.0			34	1.7	4378.3		
33	4.4	8755.6			33	3.9	4376.1		
32	8.7	8751.3			32	8.0	4372.0		
31	14.0	8746.0			31	13.0	4367.0		
30	23.5	8736.5	0,3	99,7	30	21.9	4358.1	0,5	99,5
29	40.1	8719.9			29	37.3	4342.7		
28	63.0	8697.0	2,3	97,7	28	57.9	4322.1	4,0	96,0
27	95.2	8664.8			27	86.1	4293.9		
26	141.6	8618.4			26	125.7	4254.3		
25	203.5	8556.5			25	176.7	4203.3		
24	287.2	8472.8			24	244.4	4135.6		
23	388.4	8371.6			23	323.3	4056.7		
22	515.5	8244.5			22	417.3	3962.7		
21	671.7	8088.3			21	529.5	3850.5		
20	864.1	7895.9	9,9	90,1	20	660.1	3719.9	15,1	84,9
19	1092.0	7668.0			19	803.6	3576.4		
18	1363.7	7396.3	27,1	72,9	18	961.8	3418.2	33,9	66,1
17	1670.7	7089.3			17	1129.2	3250.8		
16	2011.8	6748.2			16	1304.9	3075.1		
15	2370.3	6389.7			15	1483.0	2897.0		
14	2744.4	6015.6			14	1655.8	2724.2		
13	3120.7	5639.3			13	1823.9	2556.1		
12	3474.3	5285.7			12	1980.7	2399.3		
11	3806.5	4953.5			11	2121.3	2258.7		
10	4130.7	4629.3	47,2	52,8	10	2262.3	2117.7	51,7	48,3
9	4456.2	4303.8			9	2405.2	1974.8		
8	4779.7	3980.3	65,9	34,1	8	2552.8	1827.2	68,7	31,3
7	5108.8	3651.2			7	2702.6	1677.4		
6	5438.0	3322.0			6	2853.4	1526.6		
5	5768.9	2991.1			5	3010.8	1369.2		
4	6121.9	2638.1			4	3174.0	1206.0		
3	6483.5	2276.5			3	3340.8	1039.2		
2	6826.6	1933.4			2	3503.9	876.1		
1	7179.8	1580.2			1	3667.1	712.9		
0	7740.5	1019.5	88,4	11,6	0	3921.3	458.7	89,5	10,5
-1	7966.9	793.1			-1	4024.9	355.1		
-2	8141.3	618.7	96,7	3,3	-2	4103.2	276.8	97,1	2,9
-3	8284.0	476.0			-3	4165.6	214.4		
-4	8387.9	372.1			-4	4215.2	164.8		
-5	8472.0	288.0			-5	4253.3	126.7		
-6	8540.7	219.3			-6	4284.8	95.2		
-7	8600.2	159.8			-7	4310.8	69.2		
-8	8638.3	121.7			-8	4327.8	52.2		
-9	8667.4	92.6			-9	4340.9	39.1		
-10	8692.8	67.2	99,2	0,8	-10	4351.7	28.3	99,4	0,6
-11	8710.7	49.3			-11	4358.9	21.1		
-12	8728.0	32.0	99,9	0,1	-12	4365.7	14.3	99,9	0,1
-13	8738.3	21.7			-13	4370.5	9.5		
-14	8746.2	13.8			-14	4373.6	6.4		
-15	8752.0	8.0			-15	4376.3	3.7		
-16	8755.2	4.8			-16	4377.5	2.5		
-17	8757.2	2.8			-17	4378.3	1.7		
-18	8758.5	1.5			-18	4379.0	1.0		
-19	8759.1	0.9			-19	4379.5	0.5		
-20	8759.5	0.5	100,0	0,0	-20	4379.6	0.4	100,0	0,0
-21	8759.9	0.1			-21	4379.9	0.1		
-22	8760.0	0.0			-22	4380.0	0.0		

*) Tabelle 1a für München bei Bedarf beim Verlag anfordern.

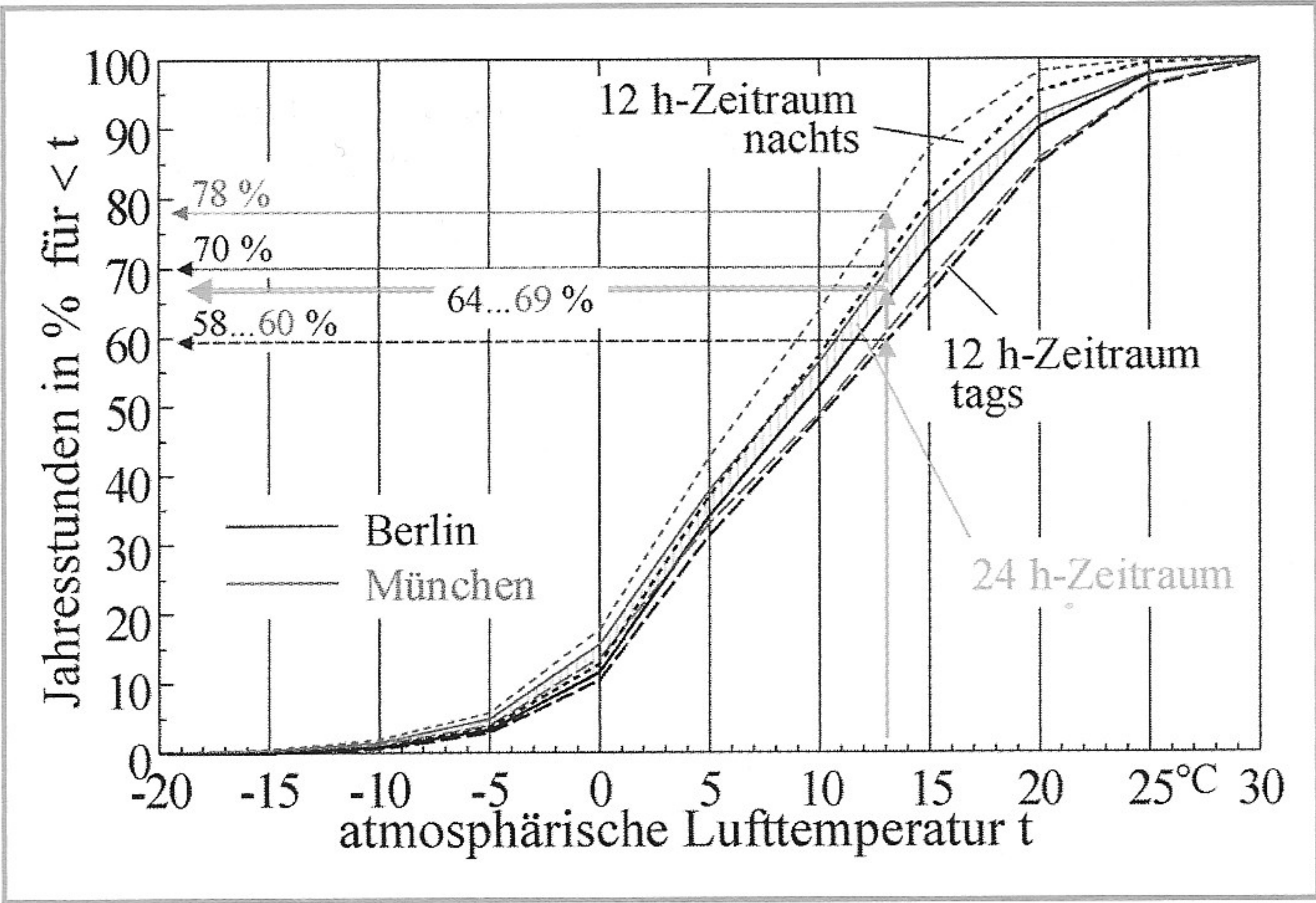


Bild 4
Geordnete, prozentuale Summenhäufigkeit der Jahresstunden einer Lufttemperatur < t für die Wetterstationen Berlin-Tempelhof und München-Riem für die Messzeiträume 000 Uhr bis 2400 Uhr, 700 Uhr bis 1800 Uhr und 1900 Uhr bis 600 Uhr

peraturen < t, wiederum für die genannten drei Fälle, erfolgt im Bild 4.

Auswertung für die Feuchtkugeltemperatur

Als Datenbasis für die repräsentativen Standorte Berlin und München werden die Tabellen 3.1 und 3.9 der DIN 4710 mit den beschriebenen Besonderheiten (z. B. Bereich 0 °C) verwendet. Für das weitere Vorgehen gelten:

- Für jeden Wert der t,x-Korrelation erfolgte eine Berechnung der Feuchtkugeltemperatur t_f nach dem in [3] gegebenen Algorithmus. Die ermittelte Feuchtkugeltemperatur t_f wird in Klassen (Bild 5) eingeteilt, wie dies in analoger Weise auch bei der Lufttemperatur t geschah.
- Infolge der Ausgangsklassifizierung von t und x sowie wegen der erneuten Einteilung können natürlich kleine Abweichungen auftreten. In den neu ermittelten t_f -Korrelationen macht sich dies durch heterogene Verteilungen der

Stundenzahlen innerhalb der jeweiligen Klasse bemerkbar.

- Die zu den t_f -Werten gehörigen Zehnstelstunden werden für die t_f -Wertepaarung übernommen. Führen mehrere t_f -Paare zu gleichen t_f -Paaren, erfolgt die Addition der Stunden.
- Bei der t_f -Bestimmung wird bei Wasserdampfpartialdrücken < 100 Pa und $t < -20$ °C vereinfachend $t_f = t$ gesetzt. Dies ist für die vorliegende Auswertung völlig unbedeutend.

Die ermittelten t_f -Korrelationen sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die geordneten Summenhäufigkeiten finden sich in den Tabellen 4 und 5.

Die Summenhäufigkeiten für Feuchtkugeltemperaturen $\geq t_f$ sind in den Bildern 6 und 7 grafisch veranschaulicht.

Die geordneten, prozentualen Verteilungen für Feuchtkugeltemperaturen < t_f finden sich im Bild 8.

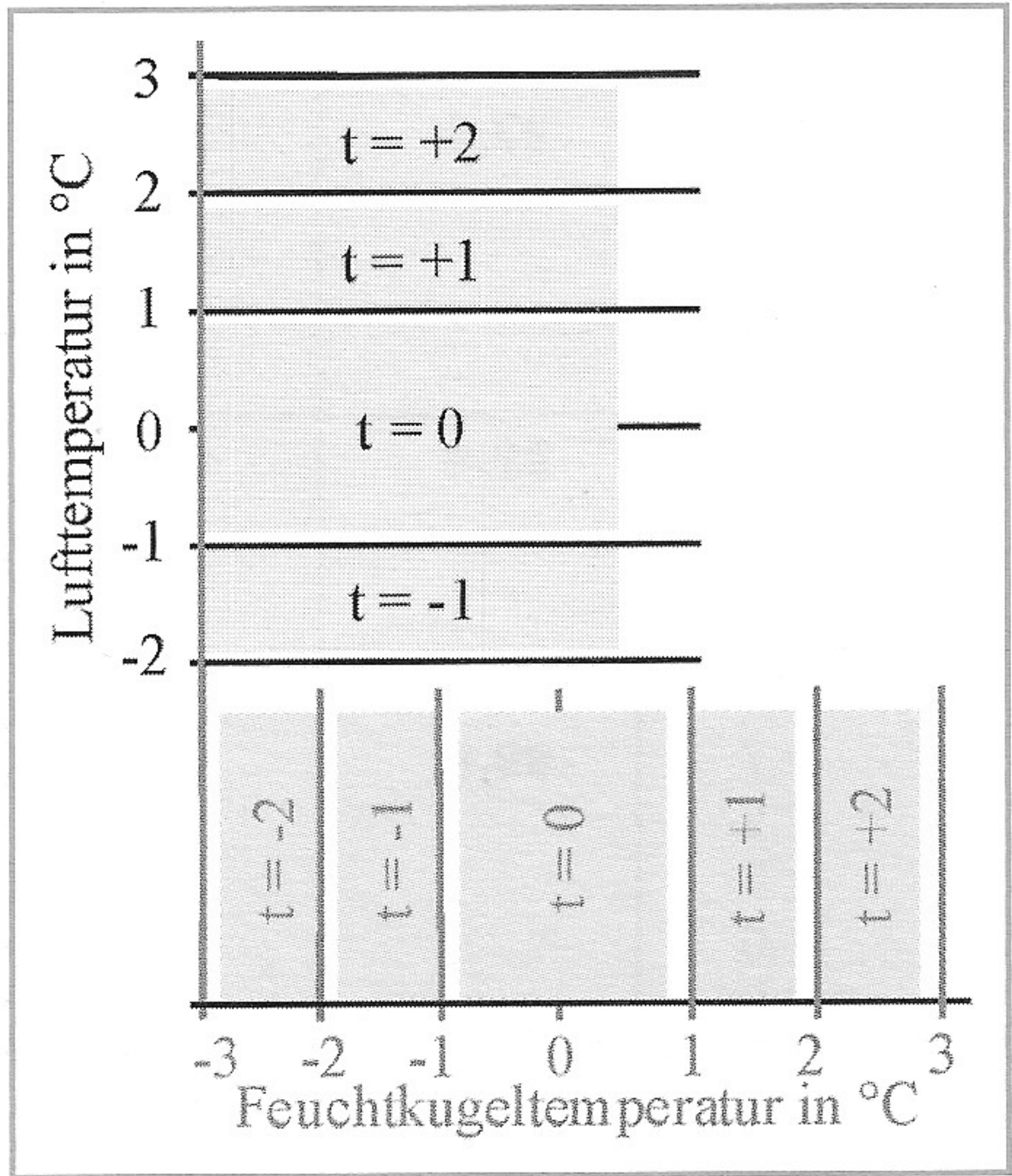


Bild 5 Einteilung der Wertebereiche für t und t_f in Tabelle 3

Einsatz von Trockenkühlern

Ausgehend von den Summenhäufigkeiten der Lufttemperaturen t (Tabellen 1 und 2) werden in Tabelle 6 die Zeiträume der Nutzbarkeit der Außenluft zur Wasserkühlung bzw. Solekühlung mit t_{KW} bei typischen Anwendungsfällen betrachtet. Als solche seien einbezogen:

- Luftkonditionierung mit $t_{KW} = 6$ °C
- Kühldecken mit $t_{KW} = 16$ °C
- Betonkühlung mit $t_{KW} = 18$ °C
- denkbare Kombinationssysteme (siehe Abschnitt Ausblick bzw. [1]) mit $t_{KW} = 20$ °C.

Pauschal wird zugehörig stets eine um mindestens 5 K niedrigere Lufttemperatur betrachtet (Grädigkeit für die Wärmeübertrager). Da die Auswertung für Werte unterhalb des jeweiligen Temperaturbereiches erfolgt, gelten real sogar Temperaturdifferenzen von 5 K bis 6 K.

Tab. 2 Jahresstunden der Lufttemperaturen $\geq t$ und < t für Berlin, nachts*)

Berlin 1900 Uhr bis 600 Uhr				
t °C	Stunden pro Jahr		Zeit %	Zeit %
	$\geq t$	< t	$\geq t$	< t
37	0.0	4380.0	0,0	100,0
36	0.1	4379.9		
35	0.2	4379.8		
34	0.3	4379.7		
33	0.5	4379.5		
32	0.7	4379.3		
31	1.0	4379.0	0,0	100,0
30	1.5	4378.5		
29	2.8	4377.2		
28	5.1	4374.9		
27	9.1	4370.9		
26	15.9	4364.1		
25	26.9	4353.1	0,6	99,4
24	42.8	4337.2		
23	65.1	4314.9		
22	98.2	4281.8		
21	142.2	4237.8		
20	204.0	4176.0	4,7	95,3
19	288.4	4091.6		
18	401.9	3978.1		
17	541.5	3838.5		
16	706.9	3673.1		
15	887.2	3492.8	20,3	79,7
14	1088.6	3291.4		
13	1296.8	3083.2		
12	1493.6	2886.4		
11	1685.2	2694.8		
10	1868.4	2511.6	42,7	57,3
9	2051.0	2329.0		
8	2227.0	2153.0		
7	2406.2	1973.8		
6	2584.6	1795.4		
5	2758.0	1622.0	63,0	37,0
4	2948.0	1432.0		
3	3142.7	1237.3		
2	3322.7	1057.3		
1	3512.7	867.3		
0	3819.3	560.7	87,2	12,8
-1	3942.0	438.0		
-2	4038.1	341.9		
-3	4118.3	261.7		
-4	4172.7	207.3		
-5	4218.7	161.3	96,3	3,7
-6	4255.9	124.1		
-7	4289.4	90.6		
-8	4310.6	69.4		
-9	4326.5	53.5		
-10	4341.1	38.9	99,1	0,9
-11	4351.8	28.2		
-12	4362.2	17.8		
-13	4367.8	12.2		
-14	4372.6	7.4		
-15	4375.7	4.3	99,9	0,1
-16	4377.7	2.3		
-17	4378.9	1.1		
-18	4379.5	0.5		
-19	4379.6	0.4		
-20	4379.9	0.1	100,0	0,0
-21	4380.0	0.0		

*) Tabelle 2a für München bei Bedarf beim Verlag anfordern.

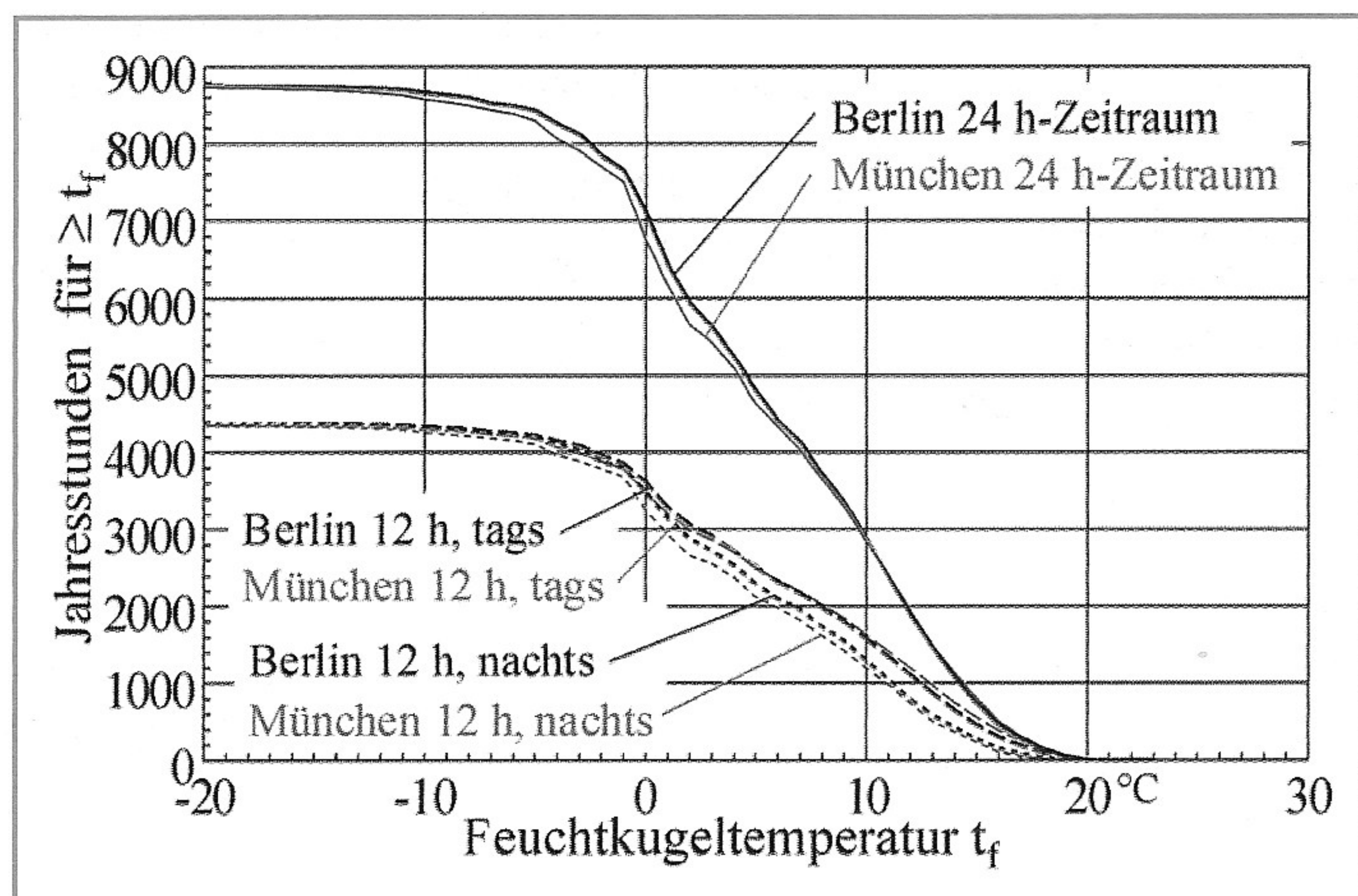


Bild 6 Summe der Jahresstunden einer Feuchtkugeltemperatur $\geq t_f$ für die Wetterstationen Berlin-Tempelhof und München-Riem für die Messzeiträume 0⁰⁰ Uhr bis 24⁰⁰ Uhr, 7⁰⁰ Uhr bis 18⁰⁰ Uhr und 19⁰⁰ Uhr bis 6⁰⁰ Uhr

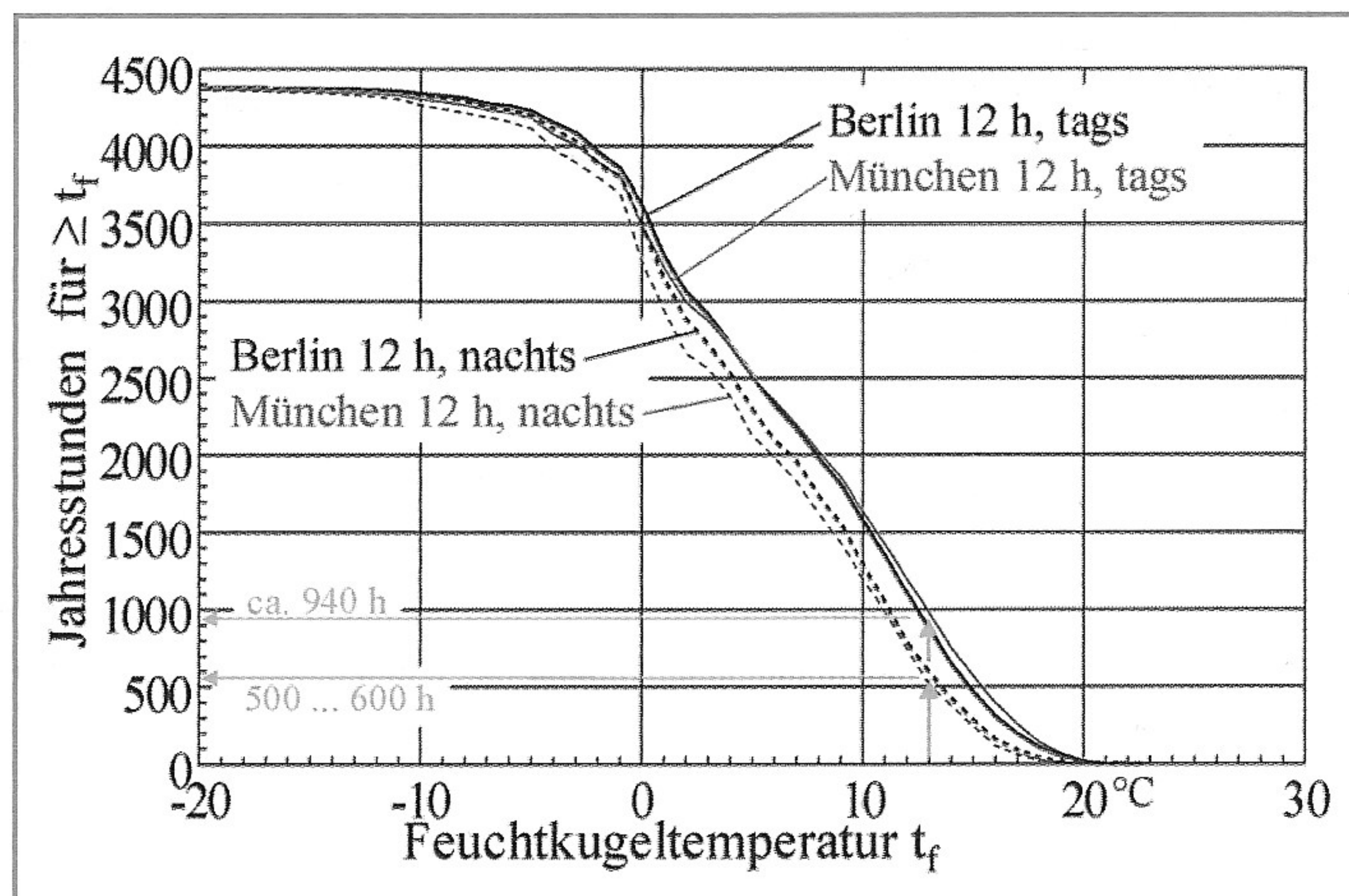


Bild 7 Summe der Jahresstunden einer Feuchtkugeltemperatur $\geq t_f$ für die Wetterstationen Berlin-Tempelhof und München-Riem für die Messzeiträume 7⁰⁰ Uhr bis 18⁰⁰ Uhr und 19⁰⁰ Uhr bis 6⁰⁰ Uhr

Tab. 3 Korrelation der Lufttemperatur t und der Feuchtkugeltemperatur t_f für Berlin für 24 h/d, Angaben in Zehntelstunden*)
Tabellenteil 1

	Feuchtkugeltemperatur t _f in °C																					
t °C	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
5																				1	12	
4																						16
3																				17		
2																				27	240	
1																			33	344		
0																		82		1241	4277	
-1																1		85	1232		950	
-2																1		78		1424	244	
-3																	110		1314	5		
-4																	150	891				
-5																200		643				
-6															302		386					
-7															498	98						
-8											1		379	2								
-9										2		289										
-10										3		252										
-11										4		175										
-12									10		163											
-13								16		88												
-14							29		50													
-15						45		13														
-16						32																
-17					20																	
-18			13																			
-19			6																			
-20			4																			
-21		4																				
-22	1																					
Σ	1	4	23	0	20	77	29	29	60	95	165	428	289	379	802	299	647	1612	1481	2694	1874	5495

*) Tabelle 3a für München bei Bedarf beim Verlag anfordern.

Die Werte der Tabelle 6 führen zu den folgende Aussagen:

- Die *Luftkonditionierung* über den konventionellen Kaltwasserkreislauf zu führen, ist praktisch uninteressant, da die Nutzungszeiten am Tage zu klein und die technischen Aufwendungen zu groß sind. Eine direkte Außenluftent-

nahme für den Klimaprozess ist üblich und bekanntermaßen bedeutend sinnvoller.

- Die Kaltwasserbereitstellung für die Beaufschlagung von *Kühldecken* ist mit über 50 % des Jahres durchaus gegeben. Dieser Zeitraum stellt eine untere Grenze dar, da in der Übergangszeit,

d. h. bei verringerter Kühldeckenleistung, auch höhere Wassertemperaturen nutzbar sind.

Interessant ist auch, dass die nächtliche Kühlmöglichkeit um 10 % bis 16 % größer ist. Eine eingeschränkte nächtliche Nutzung wird dann möglich sein, wenn eine große Wärmespeicherung

Tab. 3 Korrelation der Lufttemperatur t und der Feuchtkugeltemperatur t_f für Berlin für 24 h/d, Angaben in Zehntelstunden*)
Tabellenteil 2

t °C	Feuchtkugeltemperatur t _f in °C																											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
38																			1									
37																			1	1								
36																			1	2	1		1					
35																			1	1								
34																		2	1	5		1	1					
33																			6	2	4	8	3	1				
32																	4	2	8	8	12	3	5	1				
31																1	4	3	7	22	7	8	1					
30																3	6	24	22	14	23		2				1	
29															2	10	13	30	35	62	7	5	3					
28													1	6	6	15	32	43	69	28	16	11	1			1		
27													1	5	9	30	89	49	53	40	41	2	2			2		
26												2	4	18	39	62	65	91	122	37	15	8	1	1				
25												2	11	25	55	86	98	201	71	48	20	2	1					
24												1	13	37	208	151	114	125	91	85	9	4						
23											2	21	50	120	162	185	147	234	64	22	6		1					
22											7	23	83	155	213	402	179	112	63	34	2							
21										9	36	104	194	253	280	232	189	151	109	7	1							
20										16	48	153	262	316	324	266	408	97	33	4								
19								2	18	61		178	331	763	304	275	195	130	27									
18								7	28	75	215	340	495	432	387	358	272	112										
17							7	40		104	236	428	564	544	463	676	14											
16							7	64	131	275	474	649	645	580	509	83												
15					2	13	71		171	329	537	732	762	704	267	3												
14				3		13	77	212	386	601	858	884	677	37														
13				1	16	106		241	451	747	1062	959	187															
12			3	0	17	122	284	523		851	1167	569	6															
11			8	23	155		330	566	987	1150	109																	
10		2		35	168	362	770		1253	657	1																	
9		6	57	201		444	943	1440	170																			
8	8		68	246	616	1253		1049	1																			
7	10	78	271		906	1698	334																					
6	102		340	1343	1497		15																					
5	121	495		1794	892																							
4	144	783	2325	269																								
3	1411	2193		1																								
2	1747	1423																										
1	3162																											
0	17																											
Σ	6722	4980	3072	3916	4269	4011	2838	4144	3596	4875	4752	5045	4286	3995	3228	2838	1829	1406	785	422	164	52	22	3	3	1		

Summe der Zehntelstunden: 87757 *) Tabelle 3a für München bei Bedarf beim Verlag anfordern.

des Interieurs vorhanden ist und einbezogen wird.

- Die *Betonkühlung* mit Kaltwasser aus dem Trockenkühler eröffnet aufgrund der hohen Kaltwassertemperatur die besten Einsatzmöglichkeiten. Die übliche nächtliche Betriebszeit kann zu 70 % bis 80 % genutzt werden.

Dieser Zeitraum stellt wiederum eine untere Grenze dar, da in der Übergangszeit, d. h. bei verringerter Kühllast, auch höhere Wassertemperaturen einsetzbar sind.

Für eine Nachkühlung am Tage besteht zu etwa 60 % eine Nutzungsmöglichkeit.

Einsatz von Nasskühlern

Für die Abschätzung der Nutzzeiträume sind die Summenhäufigkeiten der Feuchtkugelttemperaturen t_f (Tabellen 4 und 5) maßgebend. In Tabelle 7 werden wiederum die gleichen markanten Anwendungsfälle wie vorher betrachtet.

Tab. 4 Jahresstunden der Feuchtkugelttemperaturen $\geq t_f$ und $< t_f$ für Berlin*)

Betrachtungszeitraum 0 ⁰⁰ Uhr bis 24 ⁰⁰ Uhr					Betrachtungszeitraum 7 ⁰⁰ Uhr bis 18 ⁰⁰ Uhr				
t °C	Stunden pro Jahr		Zeit %	Zeit %	t °C	Stunden pro Jahr		Zeit %	Zeit %
	$\geq t$	$< t$	$\geq t$	$< t$		$\geq t$	$< t$	$\geq t$	$< t$
26	0.0	8760.0	0,0	100,0	26	0.0	4380.0	0,0	100,0
25	0.1	8759.9			25	0.1	4379.9		
24	0.4	8759.6			24	0.3	4379.7		
23	0.7	8759.3			23	0.5	4379.5		
22	2.9	8757.1			22	2.3	4377.7		
21	8.1	8751.9			21	6.6	4373.4		
20	24.5	8735.5	0,3	99,7	20	19.8	4360.2	0,5	99,5
19	66.6	8693.4			19	52.9	4327.1		
18	144.9	8615.1			18	107.9	4272.1		
17	285.3	8474.7			17	196.1	4183.9		
16	467.9	8292.1			16	307.6	4072.4		
15	751.2	8008.8			15	466.2	3913.8	10,6	89,4
14	1073.4	7686.6			14	649.1	3730.9		
13	1472.2	7287.8			13	878.1	3501.9		
12	1900.0	6860.0			12	1109.6	3270.4		
11	2403.6	6356.4			11	1351.1	3028.9		
10	2877.9	5882.1	32,9	67,1	10	1579.7	2800.3	36,1	63,9
9	3364.6	5395.4			9	1811.3	2568.7		
8	3723.5	5036.5			8	1984.0	2396.0		
7	4137.2	4622.8			7	2172.5	2207.5		
6	4420.5	4339.5			6	2325.7	2054.3		
5	4820.9	3939.1			5	2519.0	1861.0	57,5	42,5
4	5247.0	3513.0			4	2719.4	1660.6		
3	5637.9	3122.1			3	2916.0	1464.0		
2	5944.5	2815.5			2	3060.3	1319.7		
1	6441.7	2318.3			1	3294.6	1085.4		
0	7112.7	1647.3	81,2	18,8	0	3620.6	759.4	82,7	17,3
-1	7661.2	1098.8			-1	3859.5	520.5		
-2	7848.2	911.8			-2	3962.2	417.8		
-3	8117.2	642.8			-3	4087.6	292.4		
-4	8265.0	495.0			-4	4154.1	225.9	96,5	3,5
-5	8425.9	334.1			-5	4227.8	152.2		
-6	8490.5	269.5			-6	4259.2	120.8		
-7	8520.3	239.7			-7	4273.2	106.8		
-8	8600.4	159.6			-8	4310.8	69.2		
-9	8638.2	121.8			-9	4327.8	52.2		
-10	8667.1	92.9	98,9	1,1	-10	4340.8	39.2	99,1	0,9
-11	8709.8	50.2			-11	4358.4	21.6		
-12	8726.3	33.7			-12	4364.7	15.3		
-13	8735.7	24.3			-13	4369.3	10.7		
-14	8741.7	18.3			-14	4371.6	8.4		
-15	8744.6	15.4			-15	4372.9	7.1	99,8	0,2
-16	8747.5	12.5			-16	4374.3	5.7		
-17	8755.2	4.8			-17	4377.5	2.5		
-18	8757.2	2.8			-18	4378.3	1.7		
-19	8757.2	2.8			-19	4378.3	1.7		
-20	8759.5	0.5	100,0	0,0	-20	4379.6	0.4	100,0	0,0
-21	8759.9	0.1			-21	4379.9	0.1		
-22	8760.0	0.0			-22	4380.0	0.0		

*) Tabelle 4a für München bei Bedarf beim Verlag anfordern.

Auch hier wird wiederum eine um 5 K bis 6 K niedrigere Feuchtkugeltemperatur in Ansatz gebracht, um die Grädigkeit für die Wärmeübertrager zu berücksichtigen. Die Werte der Tabelle 7 ergeben folgende Aussagen:

- Die *Luftkonditionierung* über den Kaltwasserkreislauf vorzunehmen, ist wie beim Trockenkühler trotz eines erweiterten Einsatzbereiches nicht praktikabel.

Tab. 5 Jahresstunden der Feuchtkugeltemperaturen ≥ t_f und < t_f für Berlin, nachts*)

Berlin 19 ⁰⁰ Uhr bis 6 ⁰⁰ Uhr				
t °C	Stunden pro Jahr		Zeit %	
	≥ t _f	< t _f	≥ t _f	< t _f
25	0.0	4380.0	0,0	100,0
24	0.1	4379.9		
23	0.2	4379.8		
22	0.6	4379.4		
21	1.5	4378.5		
20	4.6	4375.4	0,1	99,9
19	13.6	4366.4		
18	37.1	4342.9		
17	89.2	4290.8		
16	160.3	4219.7		
15	284.9	4095.1	6,5	93,5
14	424.3	3955.7		
13	594.0	3786.0		
12	790.4	3589.6		
11	1052.5	3327.5		
10	1298.2	3081.8	29,6	70,4
9	1553.3	2826.7		
8	1739.6	2640.4		
7	1964.7	2415.3		
6	2094.8	2285.2		
5	2301.9	2078.1	52,6	47,4
4	2527.6	1852.4		
3	2721.9	1658.1		
2	2884.3	1495.7		
1	3147.1	1232.9		
0	3492.0	888.0	79,7	20,3
-1	3801.6	578.4		
-2	3886.0	494.0		
-3	4029.6	350.4		
-4	4110.9	269.1		
-5	4198.1	181.9	95,8	4,2
-6	4231.3	148.7		
-7	4247.1	132.9		
-8	4289.6	90.4		
-9	4310.5	69.5		
-10	4326.3	53.7	98,8	1,2
-11	4351.4	28.6		
-12	4361.5	18.5		
-13	4366.4	13.6		
-14	4370.1	9.9		
-15	4371.7	8.3	99,8	0,2
-16	4373.2	6.8		
-17	4377.7	2.3		
-18	4378.9	1.1		
-19	4378.9	1.1		
-20	4379.9	0.1	100,0	0,0
-21	4380.0	-0.0		

*) Tabelle 5a für München bei Bedarf beim Verlag anfordern.

- Die Kaltwasserbereitstellung für die Beaufschlagung von *Kühldecken* ist über rund zwei Drittel des Jahres (67 % bis 69 %) möglich und damit sehr interessant.
Auch in diesem Fall stellt dieser Zeitraum die untere Grenze der Nutzung dar, da bei verringerter Kühldeckenleistung während der Übergangszeit auch höhere Wassertemperaturen einsetzbar sind.
Die nächtliche Kühlmöglichkeit liegt um 7 % bis 10 % höher.
- Die *Betonkühlung* ergibt die beste Nutzungsmöglichkeit. Die nächtliche Betriebszeit kann sich über 86 % bis 88 % des Jahres erstrecken, wobei in der Übergangszeit angehobene Wassertemperaturen zusätzlich bereitgestellt werden können.
Die Nachkühlung am Tage ist zu fast 80 % des Jahres gegeben.

Fazit und Ausblick

Die zwischenzeitlich sehr gut eingeführten Systeme der thermischen Bauteilaktivierung arbeiten im Kühl- und im Heizfall mit Wassertemperaturen, die den Raumtemperaturen sehr nahe kommen. Dadurch ist generell eine umfangreiche Nutzung von Umweltenergie gegeben.
Zur Raumkühlung ist es sinnvoll, die atmosphärische Luft als Wärmesenke zu verwenden, wobei Trocken- und Nasskühler zum Einsatz kommen. Bekanntermaßen ist der Kühlturmeinsatz besonders effektiv. Um die bezüglich des Temperaturanspruches unterschiedlichen Raumkühlsysteme hinsichtlich der Nutzbarkeit von Umweltenergie objektiv bewerten zu können, wurde auf der Grundlage der

DIN 4710 ein einheitlicher Datensatz abgeleitet. Bisher sind häufig die Effizienzbetrachtungen für unterschiedliche Systeme mit nichtkonsistenten Daten geführt worden. Vor der Anwendung der Testreferenzjahrsdaten wird gewarnt [2], vor allem wenn die Luftfeuchte – wie beim Kühlturmeinsatz – bedeutungsvoll ist.

Die Entwicklung in den letzten Jahren zeigt sehr deutlich, dass die Flächenkühl- und Flächenheizsysteme große exergetische und wärmephysiologische Vorteile aufweisen (siehe z. B. auch [4, 5]). Diese Entwicklungsrichtung birgt nach Ansicht des Autors noch beträchtliches Potenzial in sich. Dabei sollte nicht die Einschränkung des thermischen Komforts vorrangig verfolgt werden, wie bei der stationär arbeitenden Massivdeckenkühlung üblich, sondern es sollten Systeme kreiert werden, die weiterhin auf den anerkannten Behaglichkeitskriterien der DIN 1946 Teil 2 und der ISO 7730 basieren. Diese Forderungen lassen sich durchaus mit energetisch effizienten Systemen realisieren, wenn beispielsweise große, leistungsfähige Wärmeübertragerflächen in die Raumumfassungen integriert werden.

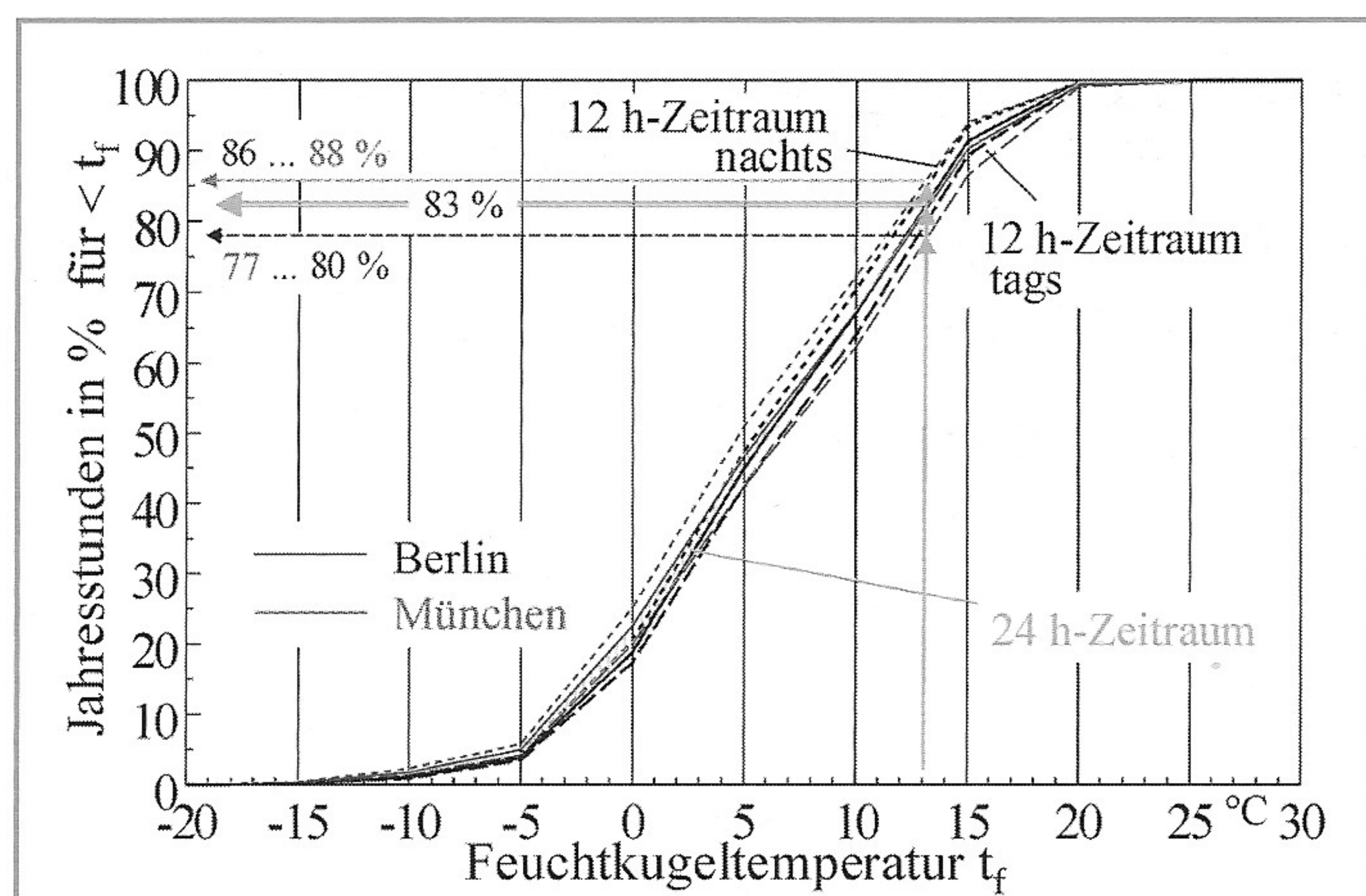
Beispielsweise ist es nach [1] vorteilhaft, zusätzlich zu einer Kühl-/Heizdecke stets noch die Brüstung thermisch aktiv zu gestalten. Ist wie bei Vollglasfassaden keine Brüstung vorhanden, dann wird ein fasadennaher Fußbodenstreifen einbezogen. Werden alle aktiven Flächen an den gleichen Wasserkreis angeschlossen, die Konstruktionen mit gleichen Wärmeübertragerelementen versehen und baukastenförmig gestaltet, müssten Kosten-

Tab. 6 Jahreszeiträume zur Nutzung eines Trockenkühlers zur Kaltwasserbereitstellung

markante Anwendungsfälle	t _{kw} °C	t °C	Berlin				München			
			tags		nachts		tags		nachts	
			h/a	%	h/a	%	h/a	%	h/a	%
Luftkonditionierung	6	1	713	16	867	20	868	20	1132	26
Kühldecke	16	11	2259	52	2695	62	2301	53	3015	69
Betonkühlung	18	13	2556	58	3083	70	2617	60	3438	78
Kombinationssysteme	20	15	2897	66	3493	80	2979	68	3824	87

Tab. 7 Jahreszeiträume zur Nutzung eines Nasskühlers zur Kaltwasserbereitstellung

markante Anwendungsfälle	t _{kw} °C	t °C	Berlin				München			
			tags		nachts		tags		nachts	
			h/a	%	h/a	%	h/a	%	h/a	%
Luftkonditionierung	6	1	1085	25	1233	28	1151	26	1424	33
Kühldecke	16	11	3029	69	3328	76	2944	67	3381	77
Betonkühlung	18	13	3502	80	3786	86	3391	77	3857	88
Kombinationssysteme	20	15	3914	89	4095	93	3803	87	4128	94



degressionen umsetzbar sein. Die denkbaren, erweiterten Nutzungszeiträume für derartige Lösungen sind in den Tabelle 6 und 7 bereits als Kombinationssysteme vermerkt worden.

Literatur

- [1] Glück, B.: Kombinationen verschiedener Aktivflächensysteme im Raum und ihre Einflüsse auf die Behaglichkeit und die erforderlichen Wassertemperaturen. Heizung-Lüftung-Haustechnik 53 (2002) 4, S. 38–47

Bild 8
Geordnete, prozentuale Summenhäufigkeit der Jahresstunden einer Feuchtkugeltemperatur $< t_f$ für die Wetterstationen Berlin-Tempelhof und München-Riem für die Messzeiträume 0⁰⁰ Uhr bis 24⁰⁰ Uhr, 7⁰⁰ Uhr bis 18⁰⁰ Uhr und 19⁰⁰ Uhr bis 6⁰⁰ Uhr

- [2] Glück, B.: Vergleichsprozesse der Klimatechnik. Heidelberg: C. F. Müller Verlag (1998) (ISBN 3-7880-7643-7)
- [3] Glück, B.: Zustands- und Stoffwerte – Wasser, Dampf, Luft – Verbrennungsrechnung. Berlin: Verlag für Bauwesen (1991), 2. Auflage (ISBN 3-345-00487-9)
- [4] Glück, B.: Wärmeübertragung durch raumbegrenzende Heiz- und Kühlflächen mit geringem Exergieverlust – Lehren aus der Bionik. gi Gesundheits-Ingenieur 121 (2000) 4, S. 189–196
- [5] Glück, B.: Luftheizung oder wasserbeaufschlagte Flächenheizung in Gebäuden mit niedrigem Heizwärmebedarf? gi Gesundheits-Ingenieur 122 (2001) 4, S. 179–188

Schlüsselwörter

Freie Kühlung
Kühlturmnutzung
Umweltenergienutzung
Thermische Bauteilaktivierung
Kühldecken