

Freie Kühlung von Rechenzentren mit zentralen Raumlufttechnischen Geräten

Rechenzentren benötigen auch heute trotz einer geringeren spezifischen Verlustleistung der Informationstechnik (IT) immer noch große Rückkühllleistungen, da auf geringerem Raum eine immer höhere spezifische Rechnerleistung installiert wird. Moderne große Rechenzentren benötigen Kühllleistungen von 1 bis 4 MW.

Traditionell wurden Rechenzentren durch sogenannte Präzisionsklimageräte oder auch Klimaschränke dezentral im Umluftverfahren gekühlt. Dabei erzeugt meist eine Kompressionskälteanlage die erforderliche Kälteleistung, um die Abluft von z. B. 35 °C auf eine mittlere Zulufttemperatur von 23 °C zu kühlen. Bei einem Kühllleistungsbedarf durch die Abwärme der IT von zum Beispiel 1 MW wird damit eine Gesamtluftmenge von 250 000 m³/h erforderlich.

Aus **Tabelle 1** erkennt man, dass der kostenbestimmende Faktor die Kälteerzeugung ist, da 24 h pro Tag die Kälteleistung von 1 MW zu erbringen ist, wenn man die zu kühlende IT-Abwärmeleistung während des Jahres als konstant annimmt.

Freie Kühlung durch Außenluft

Grundsätzlich kann jedoch die Außenluft als Wärmesenke zur Kühlung herangezogen werden, da die Außenluft

Autor



Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup ist Honorarprofessor der Hochschule Trier, Umweltcampus Birkenfeld für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Geschäftsführender Gesellschafter der HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 16798-3, EN 13053 und EN 1886 sowie Richtlinienausschüssen wie beispielsweise VDI 6022 und VDI 3803.

Konventionelle Kühlung Umluft	1.006 kW	35 °C auf 23 °C	(ohne Außenluftanteil)
Laufzeit	8.760,0 h		
Kälteenergie	8.812.560 kWh		323.127 €
Ventilatorleistung (Umluft)	64,8 kW	dP 350 Pa	568.018 kWh → 62.482 €
gesamt konventionell			385.609 €

Tabelle 1

Beispiel für Leistungen und Betriebskosten einer reinen Umluftkühlung

im Jahresverlauf meistens kälter als 23 °C ist und in nur ca. 600 bis 800 Stunden pro Jahr eine Kühlung bei Außenlufttemperaturen über 23 °C erforderlich wird. Es besteht entweder die Möglichkeit, die Außenluft direkt zu verwenden, also das Rechenzentrum ohne Umwege mit Außenluft zu belüften und damit zu kühlen, oder aber die Außenluft über einen Wärmeübertrager indirekt zur Kühlung zu nutzen.

Die direkte Kühlung eines Rechenzentrums mit Außenluft ist von verschiedenen Bedingungen abhängig. Gelangt sie direkt in das Rechenzentrum, ist ihre Qualität für die Rechner-technik von großer Bedeutung. Liegt standortbedingt stark belastete Außenluft vor, kann von einer direkten Nutzung abgeraten werden. Einige Betreiber nutzen die Außenluft direkt, da die Rechner-technik oft nach rund drei bis fünf Jahren Betriebszeit sowieso ausgetauscht wird, um den neuesten Stand der Digitaltechnik zu gewährleisten.

Die direkte Kühlung hat den großen Vorteil, dass weder der Wärmewiderstand noch die Investition eines sonst notwendigen Wärmeübertragers berücksichtigt werden muss. Sie hat aber auch den Nachteil, dass die Zuluft im Winter befeuchtet und im Sommer entfeuchtet werden muss, weil die Außenluftfeuchte im Jahresverlauf stark variiert.

Gemäß ASHRAE TC 9.9¹⁾ werden als Grenzwerte für die relative Feuchte ca. 30 bis 60 % bei Umgebungstemperaturen von 18 bis 27 °C empfohlen (zulässig 20 bis 80 % bei 15 bis 32 °C Klasse A1). In der Praxis werden häufig Grenzwerte für die absolute Feuchte der Zuluft von 4 g/kg im Winter als unterer

Grenzwert und 10 g/kg im Sommer als oberer Grenzwert gefordert.

Die Zuluft darf nicht zu trocken werden, da ansonsten elektrostatische Ladungseffekte zum Problem für die IT-Systeme werden können, sie darf aber auch nicht zu feucht werden, da dann ebenfalls Probleme beispielsweise durch lokale Kondensation und Korrosion an den IT-Systemen entstehen können. Da sich in einem Rechenzentrum auch Menschen aufhalten können, ist üblicherweise ein geringer Mindestaußenluftanteil von zum Beispiel 5 bis 10 % zu berücksichtigen.

Freie Kühlung, unterstützt durch indirekte Verdunstungskühlung

Im Folgenden wird nun die direkte Freie Kühlung betrachtet, die zum einen durch eine konventionelle Kältemaschine unterstützt werden kann und zum anderen zusätzlich durch eine indirekte Verdunstungskühlung, die die dann noch benötigte Kälteleistung mittels Rückkühlwerk zur Verfügung stellt (siehe **Bild 1**).

Die benötigte Kühllleistung hängt bei Verwendung der Außenluft als Wärmesenke vom Standort des Rechenzentrums ab. Als Beispiel wird in der folgenden Darstellung Bremerhaven als Standort gewählt. Der Standort eines Rechenzentrums hat natürlich eine große Auswirkung auf den Nutzen der Freien Kälte.

In **Tabelle 2** erkennt man für den gewählten Standort die spezifischen Au-

¹⁾2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance

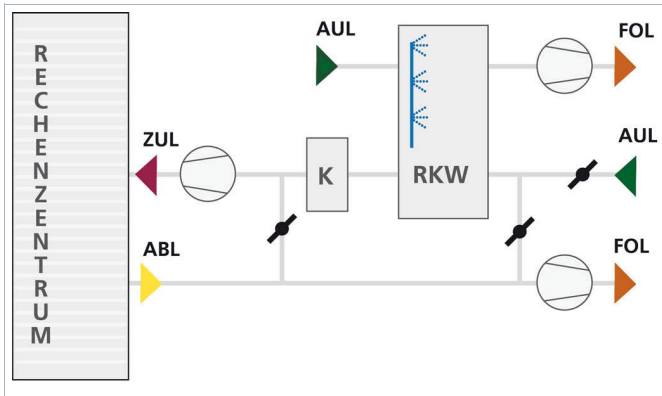


Bild 1
Direkte Freie Kühlung mit mechanischer Kühlung (K) sowie einer indirekten Verdunstungskühlung mittels Rückkühlwerk (RKW)

Tabelle 2
Häufigkeit der Außenluftzustände nach VDI 4710²⁾

Klimazone 1 nach VDI 4710; Bremerhaven; 24 h pro Tag p= 1014 hPa Zeitraum 1991-2005
mittlere jährliche Anzahl in Zehntelstunden

x - t - Temperatur in °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Summe	
39																						0
38																						0
37																						0
36																						0
35																						1
34																						2
33																						8
32																						26
31																						27
30																						73
29																						127
28																						164
27																						196
26																						298
25																						374
24																						516
23																						691
22																						797
21																						1.130
20																						1.622
19																						2.145
18																						2.716
17																						3.387
16																						3.894
15																						4.236
14																						4.635
13																						4.509
12																						4.102
11																						3.904
10																						3.721
9																						3.698
8																						4.117
7																						4.348
6																						4.824
5																						4.742
4																						4.210
3																						3.716
2																						3.255
1																						2.862
0																						2.459
-1																						1.532
-2																						1.299
-3																						897
-4																						641
-5																						543
-6																						432
-7																						292
-8																						186
-9																						122
-10																						76
-11																						41
-12																						21
-13																						12
-14																						6
-15																						3
Summe	6	1081	4813	9932	14720	13018	9984	9754	8719	6690	4305	2557	1314	553	143	35	10	3	0	0	87.637	

462 h Entfeuchtungsrückkühlung
114 h trockene Kühlung
6.089 h Freie direkte Kälte (mischen)
1.583 h Freie direkte Kälte (mischen) und befeuchten
592 h isotherm ohne Luftbehandlung

Tabelle 3
Zustände der benötigten Luftaufbereitung

ßenluftkonditionen während eines Jahres und deren Summenhäufigkeiten.

Im grün dargestellten Feld zwischen beispielsweise 18 und 23 °C sowie zwischen 4 und 10 g/kg kann die Außenluft ohne eine Luftbehandlungsfunktion in ca. 600 h/a direkt verwendet werden. Unterhalb einer Außenlufttemperatur von 18 °C und unter einer absoluten Feuchte von 4 g/kg wird unter Berücksichtigung des Mindestaußenluftan-

teils in fast 1 600 h/a durch Mischung der Außenluft mit der Abluft die geforderte Zulufttemperatur erreicht. Durch die Mischung (Umluftanteil) wird nicht nur die geforderte Zulufttemperatur sichergestellt, sondern auch die notwendige Befeuchtungsleistung minimiert, da die Außenluft (< 4 g/kg) im Winter trockener ist als die feuchtere Raumluft mit mindestens 4 g/kg im Winter. Energieeffizient befeuchtet wird die Zuluft dann durch einen Hybridbefeuchter, der im Kühler (K) integriert werden kann.

Unterhalb von 18 °C und über 4 g/kg kann in mehr als 6 000 h/a die minimale Zulufttemperatur durch einfaches Mischen von Außenluft mit Abluft energetisch effizient gewährleistet werden, da der Einsatz weiterer Luftbehandlungsfunktionen nicht erforderlich wird. Im Bereich über 23 °C Außenluft und unterhalb einer Außenluftfeuchte von 10 g/kg kann durch trockene sensible Kühlung die geforderte Zulufttemperatur in ca. 120 h/a sichergestellt werden (siehe Tabelle 3).

Die notwendige Kühlung kann nun entweder durch einen Kühler – zum Beispiel über mechanische Kühlung mittels Kältemaschine – und/oder durch ein Rückkühlwerk (RKW) auf Basis eines Wärmeübertragers mit indirekter Verdunstungskühlung (siehe Bild 1) bereitgestellt werden.

Durch die Verwendung eines Rückkühlwerkes, das meist mit Außenluft betrieben wird, da die Außenluft in der Regel ein niedrigeres Temperaturniveau als die Abluft mit beispielsweise 35 °C besitzt, wird die Temperatur nach dem Rückkühlwerk je nach Außenluftkondition auf ca. 18 bis 28 °C reduziert, ohne dass eine zusätzliche Kältemaschine benötigt wird (siehe Tabelle 4 und in Bild 3, Prozess 3). Liegt der Energieinhalt der Abluft niedriger als der Energieinhalt der Außenluft, kann auch ein Verfahren mittels Wärmerückgewinnung (WRG) gemäß Bild 2 zum Einsatz kommen. Hierbei besteht aber der Nachteil, dass der Abluftvolumenstrom um den möglichen Umluftanteil gemindert wird.

Erst bei nicht mehr ausreichender Kühlleistung der indirekten Verdunstungskühlung wird eine zusätzliche Kältemaschine (siehe Bild 3, Prozess 4)

²⁾ VDI 4710 Blatt 3 Meteorologische Grundlagen für die Technische Gebäudeausrüstung – t,x-Korrelationen der Jahre 1991 bis 2005 für 15 Klimazonen in Deutschland, 03–2011.

Indirekte Verdunstung Rückkühler		ETA _{WRG} 0,75													
Temperatur Abkühlung		ETA _{Befeuchtung} 0,90													
x _l in g/kg	t _l - Temperatur in °C	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
39															
38															
37															
36															
35															
34															
33															
32															
31															
30															
29	18,9	19,5	20,1	20,7	21,3	21,9	22,4	24,0	24,6	25,3	25,8	26,2			
28	18,3	18,9	19,6	20,2	20,8	21,3	21,9	23,6	24,3	25,0	25,5	25,9	24,4		
27	17,7	18,4	19,0	19,6	20,2	20,8	21,3	22,9	23,0	24,0	24,7	25,2	25,7	26,1	26,5
26	17,1	17,8	18,4	19,0	19,6	20,2	20,8	22,9	23,7	24,4	24,9	25,4	25,8	26,3	
25	16,6	17,2	17,8	18,5	19,1	19,7	20,2	22,5	23,3	24,1	24,6	25,1	25,5	26,0	
24	16,0	16,6	17,3	17,9	18,5	19,1	19,7	22,2	23,0	23,8	24,3	24,8	25,2	25,7	
23								21,8	22,6	23,5	24,0	24,5			
22								21,4	22,3	23,2	23,7	24,2			
21								21,0	21,9	22,8	23,4	23,9			
20								20,7	21,6	22,5	23,1	23,6			
19								20,3	21,2	22,2	22,7				
18								19,9	20,9	21,9					
17								19,5	20,5						
16								19,1	20,2						
15								18,7							

Tabelle 4
Zulufttemperatur nach der indirekten Verdunstungskühlung

Q Kühler V = 250.000 m³/h		in kW													
x _l in g/kg	t _l - Temperatur in °C	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
39															
38															
37															
36															
35															
34															
33															
32															
31															
30															
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,9	76,3	106,0	127,8	148,9		
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,2	61,2	92,3	114,5	135,9	156,4	
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	45,9	78,5	101,0	122,7	143,6	163,6
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,4	64,5	87,3	109,3	130,5	150,9
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,9	50,4	73,5	95,9	117,4	138,1
24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,2	59,6	82,3	104,1	
23															
22															
21															
20															
19															
18															
17															
16															
15															

Tabelle 5
Zusätzlich erforderliche mechanische sensible Kühlleistungen

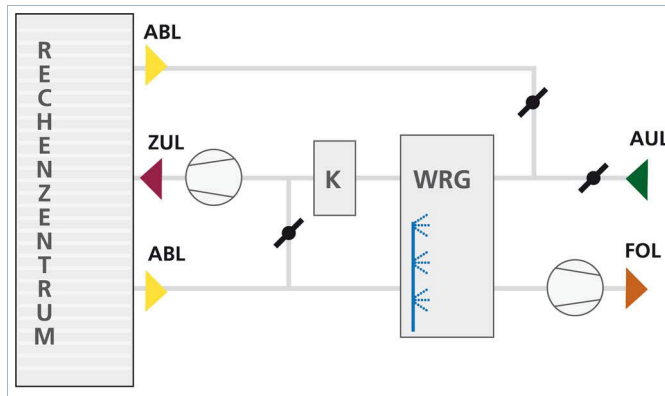


Bild 2
Direkte Freie Kühlung mit mechanischer Kühlung (K) sowie einer indirekten Verdunstungskühlung mittels Wärmerückgewinnung (WRG)

sensiblen Kühlleistung, die benötigt wird, um eine Zulufttemperatur von 23 °C zu erreichen, ergibt sich aus **Tabelle 5**.

Im Bereich über 23 °C Außenlufttemperatur und über 10 g/kg Außenluftfeuchte wird trotz der höheren Ablufttemperatur gegenüber der meist niedrigeren Außenlufttemperatur ein hoher Anteil an Umluft genutzt, da die absolute Feuchte der zu kühlenden Mischluft geringer ausfällt als bei Verwendung rei-

Tabelle 7
Entfeuchtungsleistungen

Feuchten nach Mischen		in g/kg														
x _l in g/kg	t _l - Temperatur in °C	4	5	6	7	8	9	10	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
39																
38																
37																
36																
35																
34																
33																
32																
31																
30																
29																
28																
27																
26																
25																
24																
23																
22																
21																
20																
19																
18																
17																
16																
15																

Tabelle 6
Feuchten nach dem Mischen im Sommerbetrieb für x > 10 g/kg

notwendig. Denn ohne RKW müsste die Kühlleistung vollständig durch die Kältemaschine erbracht werden. Der Umfang der dann noch notwendigen

Entfeuchtungsleistung Mischung: 44,8 % zur Nacherwärmung		in kW														
x _l in g/kg	t _l - Temperatur in °C	4	5	6	7	8	9	10	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
39																
38																
37																
36																
35																
34																
33																
32																
31																
30																
29																
28																
27																
26																
25																
24																
23																
22																
21																
20																
19																
18																
17																
16																
15																

ner Außenluft (siehe **Tabelle 6** und **Bild 3** Prozess 1). Denn ein hoher Anteil an Entfeuchtungsleistung benötigt einen deutlich höheren Energieeinsatz als ein höherer Anteil an sensibler Kühlung.

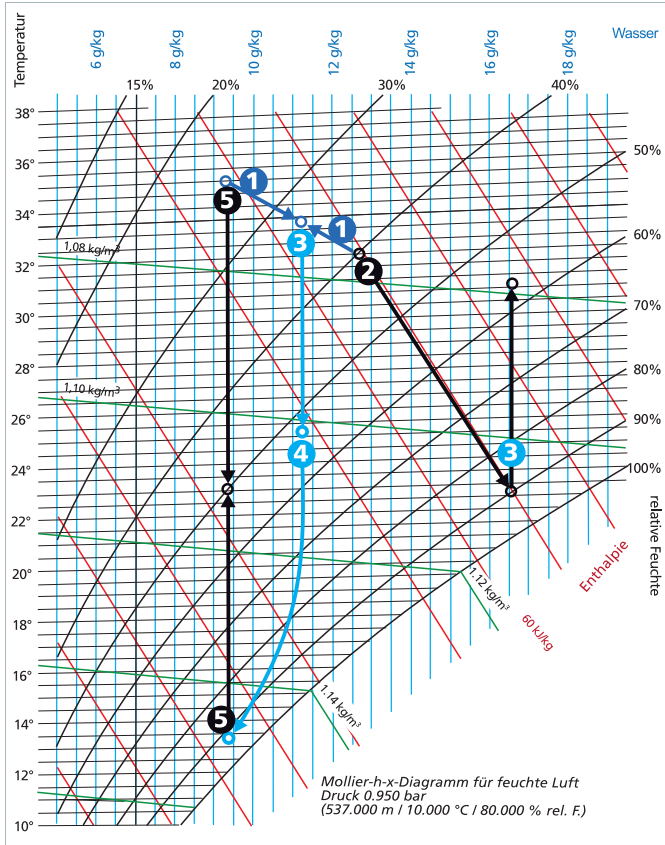


Bild 3

HX-Prozess der direkten Freien Kühlung (3) mit mechanischer Kühlung (4) und Mischprozess zur Nacherwärmung (5) sowie einer indirekten Verdunstungskühlung (2) und Mischprozess von Außenluft mit Abluft (1)

x - in l	217	29,130	94,488	105,928												71,616	36,411	16,100	4,467	1,162	344	86
in l	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
39																						
38																						
37																						
36																						
35																						
34																						
33																						
32																						
31																						
30																						
29																						
28																						
27																						
26																						
25																						
24																						
23																						
22																						
21																						
20																						
19																						
18																						
17																						
16																						
15																						
14																						
13																						
12																						
11																						
10																						
9																						
8																						
7																						
6																						
5																						
4																						
3																						
2																						
1																						
0																						
-1																						
-2																						
-3																						
-4																						
-5																						
-6																						
-7																						
-8																						
-9																						
-10																						
-11																						
-12																						
-13																						
-14																						
-15																						

x - in g/kg	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
39																		
38																		
37																		
36																		
35																		
34																		
33																		
32																		
31																		
30																		
29																		
28																		
27																		
26																		
25																		
24																		
23																		
22																		
21																		
20																		
19																		
18																		
17																		
16																		
15																		
14																		
13																		
12																		
11																		
10																		
9																		
8																		
7																		
6																		
5																		
4																		
3																		
2																		
1																		
0																		
-1																		
-2																		
-3																		
-4																		
-5																		
-6																		
-7																		
-8																		
-9																		
-10																		
-11																		
-12																		
-13																		
-14																		
-15																		

Tabelle 8

Energiebedarf der Ventilatoren (Zuluft-, Abluft- und Rückkühlventilator)

Verdunstungskühlung	
Kühlung sensibel	3.810 kWh
Kühlung Entfeuchtung	195.545 kWh
Summe	199.355 kWh
Wasserverbrauch	900 m ³
Ventilatorleistung	418.208 kWh
gesamt Freie Kälte	17,5 %

Tabelle 10

Leistungen und Betriebskosten bei Nutzung der Freien Kälte mit Verdunstungskühlung

Soll nun eine absolute Feuchte der Außenluft von maximal 10 g/kg eingehalten werden, muss die Mischluft unter den Taupunkt auf eine Temperatur von 13,3 °C gekühlt werden. Die sich dann ergebenden Entfeuchungskälteleistungen können aus **Tabelle 7** entnommen werden.

Nach der Entfeuchungskühlung wird durch weiteres Mischen der Abluft mit dem entfeuchteten Luftstrom die erforderliche Zulufttemperatur erreicht (siehe **Bild 3**, Prozess 5). Da der Mischluftanteil der Abluft (ca. 45 %) nicht gekühlt werden muss, reduziert sich die Entfeuchungskälteleistung erheblich, da nur noch 55 % des Gesamtvolumenstromes unter den Taupunkt gekühlt werden müssen (siehe **Bild 3**, Prozess 3 und 4).

Tabelle 9

Wasserbedarf zur Luftbefeuchtung und zur indirekten Verdunstungskühlung

Die Entfeuchtungskälteleistung wird in ca. 460 h/a, also in rund 5,3 % der Laufzeit der Anlage, benötigt.

Neben der Kälteleistung muss der Elektroenergiebedarf der drei notwendigen Ventilatoren (Zuluft, Fortluft und Rückkühlvolumenstrom (siehe Bild 1)) berücksichtigt werden, der bei dieser Lösung insgesamt bei 418 500 kWh/a liegt (siehe **Tabelle 8**).

Da der Fortluftlüfter drehzahl geregelt betrieben und der Rückkühlventilator nur in wenigen Stunden des Jahres benötigt wird, liegt der Elektroenergiebedarf dieser Lösung nur bei einem Faktor von 1,38 gegenüber der reinen Umluftkühlung, bei der nur ein Ventilator benötigt wird.

Aus **Tabelle 10** ergibt sich die folgende Energie- und Kostensituation. Es

wird deutlich, dass die Elektroenergiekosten bei Nutzung der Freien Kälte mit Verdunstungskühlung deutlich sinken. Insgesamt werden nur noch rund 200 000 kWh/a, also nur noch ein Bruchteil der ursprünglichen Kältarbeit für die mechanische Kälte benötigt. Gleichzeitig steigt der Bedarf an Elektroenergie für die Ventilatorantriebe von ca. 304 000 kWh/a (reiner Umluftbetrieb) auf 418 500 kWh/a.

Des Weiteren müssen die Kosten für die Befeuchtung berücksichtigt werden, die einerseits notwendig ist, um im Winter die Zuluft auf mindestens 4 g/kg zu befeuchten und andererseits die indirekte Verdunstungskühlung im Sommer zu betreiben (**Tabelle 9**).

Insgesamt reduzieren sich die Gesamtkosten exorbitant von rund

357 000 Euro pro Jahr bei reiner Umluftkühlung auf rund 62 300 Euro pro Jahr, wenn für die Elektroenergie 0,11 €/kWh und für die Wasserkosten 10 €/m³ veranschlagt werden.

Zusammenfassung

Die Nutzung der Außenluft als Mittel zur Absenkung der Temperatur ist eine Technologie, die in diesem Zusammenhang bevorzugt werden sollte. Gegenüber der traditionellen Kühlung im Umluftverfahren mittels einer Kompressionskälteanlage sind die Betriebskosten bedeutend geringer und betragen weniger als 20% der Kosten bei reiner Umluftkühlung.

Die höheren Investitionskosten des Raumlufttechnischen Gerätes werden teilweise durch die kleinere zu installierende Kälteleistung kompensiert.