

Heiko Schiller, Ronny Mai

# **Berechnungs-Algorithmen für Freie und Regenerative Kühltechnologien in Nichtwohngebäuden**

F 2859

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8998-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

# Abschlussbericht

## Berechnungs-Algorithmen für Freie und Regenerative Kühltechnologien in Nichtwohngebäuden

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft –  
Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Ak-  
tenzeichen SF-10.08.18.7.10.7 / II 3 – F20-10-022).  
Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Dipl.-Ing. Heiko Schiller

Dipl.-Ing. Ronny Mai

Zertifiziert nach ISO 9001

# Inhaltsverzeichnis

<b>AP 1</b>	<b>Freie Kühlung durch verstärkte Fensterlüftung (Sommerlüftung) während der Nutzungszeit</b>	<b>4</b>
<b>AP 2</b>	<b>Freie Kühlung durch natürliche Sommernachtlüftung</b>	<b>15</b>
<b>AP 3</b>	<b>Freie Kühlung mittels Anlagentechnik</b>	<b>21</b>
3.1	Freie Kühlung mit Rückkühlwerken	21
3.2	Freie Kühlung mit luftgekühlten Kältemaschinen mit integrierten Freikühlregistern	27
<b>AP 4</b>	<b>Indirekte Verdunstungskühlung</b>	<b>31</b>
4.1	Simulationsergebnisse und Bewertungsmethodik	32
4.2	Jährliche Komponentenlaufzeiten	34
4.3	Maximale Komponentenleistung	37
4.4	Teillastfaktoren Kälteerzeugung	38
<b>AP 5</b>	<b>Sorptionsgestützte Kühlung / DEC-Technik</b>	<b>40</b>
5.1	Allgemein	40
5.2	Modellbildung Sorptionstrockner	41
5.3	Simulationsergebnisse und Bewertungsmethodik	45
5.4	Jährliche Komponentenlaufzeit	49
5.5	Maximale Komponentenleistung	49
<b>AP 6</b>	<b>RLT-Anlagen-integrierte Kältetechnik</b>	<b>51</b>
<b>AP 7</b>	<b>Sonstige energieeffiziente Kühltechnologien</b>	<b>59</b>
7.1	Geothermieanlagen	59
7.1.1	Grundwassernutzungsanlagen	59
7.1.2	Erdsondenanlagen	61
7.2	Sorptionskälteanlagen	64
7.3	Sonstige effiziente Kühltechnologien	67
<b>AP 8</b>	<b>Kältespeicherung</b>	<b>70</b>
8.1	Speichernutzungsgrad	71

8.2 Speicherfaktoren	73
<b>AP 9 Mehrerzeugeranlagen</b>	<b>76</b>
9.1 Sequenzregelung	76
9.2 Parallelbetrieb	79
<b>AP 10 Teilkenwerte für regenerative Kühltechnologien</b>	<b>83</b>

## AP 1 Freie Kühlung durch verstärkte Fensterlüftung (Sommerlüftung) während der Nutzungszeit

Durch natürliche Lüftung (Fensterlüftung) können nicht nutzbare Wärmegevinne in der Übergangszeit abgeführt werden und damit entweder die Kühlung ganz vermieden oder der Kühlbedarf verringert werden.

Eine erhöhte Lüftung in Sommer und Übergangszeit mit dem Ziel der Wärmeabfuhr, die über den hygienisch notwendigen Mindestluftwechsel hinausgeht, ist nach dem derzeitigen Stand der Norm DIN V 18599 nicht vorgesehen.

Beispiel Büronutzung:

- Der im Fall der natürlichen Lüftung angesetzte Fensterluftwechsel würde mit  $4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$  ca. 1,4-fach je Stunde (Raumhöhe 2,80 m) betragen.
- Im Vergleich dazu: Beim Rechenverfahren zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108 – 2 wird zur Vermeidung von sommerlichen Überhitzungen ein bis zu 3,0-facher Fensterluftwechsel während der Nutzungszeit zugrunde gelegt.

Diese erhöhte Lüftung kann als „direkte freie Kühlung“ bezeichnet werden. Gebäude, die diese Möglichkeit bieten, weisen energetische Vorteile gegenüber Gebäuden mit geschlossener Außenfassade oder Gebäuden mit großen Raumtiefen auf. Ein Bonus bei der energetischen Gebäudebewertung ist derzeit nicht möglich.

Hinweis: Für Räume ohne Kühlung wird per se davon ausgegangen, dass die nicht nutzbaren Wärmegevinne „weggelüftet“ werden.

Ziel der Untersuchungen im AP 1 war darüber hinaus auch, das Monatsbilanzverfahren in Hinblick auf den Nutzkältebedarf einer Gebäudezone generell noch einmal auf Plausibilität geprüft werden. Aufgrund der inzwischen mehrjährigen Erfahrung mit der Ausstellung von Energieausweisen für hochtechnisierte Nichtwohngebäude (Laboratorien, Einkaufszentren, Parlamentsgebäude) erscheinen die errechneten Nutzkältebedarfe tendenziell niedriger als die Verbrauchswerte. Die Ursachen können verfahrensbedingter Natur (DIN V 18599 – 2) oder in der Definition der Nutzungsrandbe-

dingungen nach DIN V 18599 – 10 begründet sein. Bevor durch die Modellierung der freien Kühlung mittels Fensterlüftung die Nutzkältebedarfswerte unter Umständen marginalisiert werden, sollten möglicherweise bestehende Differenzen aufgezeigt werden.

Hierzu erfolgte ein rechnerischer Vergleich zwischen Monatsverfahren (DIN V 18599) und Simulationsverfahren. Die dynamische Gebäudesimulation wurde mit der Software GEBSIMU (Prof. Rouvel) vorgenommen, welche bereits im Rahmen des BMFT-geförderten Forschungsprojektes SANIREV (TU München) im Rahmen der Grundlagenentwicklung zur DIN V 18599 für die Validierung eingesetzt wurde.

Die Auswirkung der Randbedingungen wurde bei den Vergleichsrechnungen zunächst nicht bei der Simulation bewertet. Um die verfahrenstechnischen Unterschiede herauszuarbeiten, unterlagen Monatsverfahren und dynamische Simulation identischen Nutzungsprofilen.

Für Abweichungen gegenüber der Praxis (Verbrauch) sollten jedoch folgende Aspekte hinterfragt werden.

1. Lüftungszeiten: Die Lüftungszeiten werden bei den standardisierten Randbedingungen von der Anwesenheitszeit der Personen losgelöst bewertet. Dies ist bei mechanischen Lüftungsanlagen ohne bedarfsgerechte Einzelraumregelung realistisch, da Ein- und Ausschaltzeitpunkte zentraler Lüftungsanlagen in derartigen Fällen festen Zeitprogrammen unterliegen. Die Übernahme identischer Lüftungszeiten auch für den Fall der Fensterlüftung ist dagegen unrealistisch. Beispiel Nutzungsart „Nr. 1 Einzelbüro“ nach DIN V 18599 - 10: Während für die mittlere Personenanwesenheitszeit von 6 h/d wird die Fensterlüftung über gesamte Nutzungszeit von täglich 11 h/d bilanziert (07:00 – 18:00). Im Tagesmittel werden somit Luftwechsel bilanziert, die höher als der mittlere Außenluftbedarf sind. Bedingt durch das Monatsverfahren führt die natürliche Lüftung immer zu einer Wärmesenke, da die mittlere Außenlufttemperatur auch im wärmsten Monat unterhalb der Bilanztemperatur Kühlfall liegt. Die Folge ist ein geringerer Nutzenergiebedarf Raumkühlung (und ein erhöhter Nutzenergiebedarf Raumheizung).
2. Interne Wärmequellen: Auch hier wird die häufigste Nutzungsart in Nichtwohngebäuden betrachtet, die Büronutzung. Nach DIN V 18599 – 10 wird von internen Wärmequellen für Personen und Arbeitshilfen in Höhe von 72 Wh/(m<sup>2</sup>d) bei Einzel- und Gruppenbüros sowie

102 Wh/(m<sup>2</sup>d) bei Großraumbüros ausgegangen. Im Gegensatz dazu wird für interne Wärmegewinne von Nichtwohngebäuden zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108 – 2 von 144 Wh/(m<sup>2</sup>d) ausgegangen. Zwar kann der letztgenannte Wert einen Anteil für die Beleuchtung beinhalten, allerdings kann die künstliche Beleuchtung an Sommertagen nicht zu einer Verdoppelung der Wärmegewinne führen.

Ein Widerspruch besteht auch im Verhältnis Mindestluftvolumenstrom zu Personenwärme. Aus dem mittleren flächenbezogenen Mindestluftvolumenstrom von 4 m<sup>3</sup>/(h m<sup>2</sup>) und dem Ansatz 40 m<sup>3</sup>/h je Person lässt sich für die Belegung in DIN V 18599 – 10 ein Flächenansatz von 10 m<sup>2</sup> je Person rückrechnen. Dagegen unterliegt die Tageswärmebilanz von Personen und Arbeitshilfen in DIN V 18599 – 10 einem Flächenansatz von 14 m<sup>2</sup> je Person. Die sensible Personenwärme wird mit 70 W angesetzt, was nach VDI 2078 bei einer Raumtemperatur von 26 °C zutrifft (Aktivität: „körperlich nicht tätig bis leichte Arbeit im Stehen“). Bei einer Bilanztemperatur Kühlung von 24 °C und einem Schwankungsbereich von 2 K dürften im Jahresmittel jedoch höhere sensible Belastungen je Person auftreten (bei 22 °C: 90 W je Person nach VDI 2078).

Auch bei thermisch stark belasteten Nutzungszonen wie z. B. Nr. 21 „Serverraum / Rechenzentrum“ erscheint der mittlere Ansatz für interne Wärmequellen von 150 W/m<sup>2</sup> zu niedrig. Praktisch üblich sind Belegungsdichten, die zu spezifischen Leistungen > 1.000 W/m<sup>2</sup> führen.

In den nachfolgenden Betrachtungen wurden die Nutzungsrandbedingungen nach DIN V 18599 – 10 jedoch nicht geändert. Für die Vergleichsrechnung lagen sowohl bei der Monatsbilanzierung als auch bei der Simulation gleiche Randbedingungen für die Nutzungsart „Gruppenbüro“ zugrunde. Lediglich aus Gründen der Vereinfachung wurden folgende Veränderungen vorgenommen:

1. **Die Anzahl der Tage mit Hauptnutzung wurde einheitlich von 250 auf 365 erhöht.** Dadurch entfiel die zweite Bilanzierung von Wochenend- und Feiertagen.
2. Die monatlichen Wärmeeinträge aus der künstlichen Beleuchtung wurden den Ergebnissen der Simulation (Monatssummen) entnommen und als monatliche Wärmegewinne im Monatsverfahren bilanziert. Dadurch konnten kleinere Unterschiede der Tageslichtmodelle beider Verfahren und deren Einfluss auf den Kühlenergiebedarf vermieden werden.

Den Vergleichsrechnungen wurde ein typisches Dreiachsbüro (Achsraster 3 x 1,35 m) mit einer Raumtiefe von 5 m gemäß Abbildung 1 zugrunde gelegt.

Variiert wurden der Gesamtenergiedurchlassgrad  $g_{\text{total}}$  (Sonneneintrag „mittel:  $g = 0,25$ “ und „hoch:  $g = 0,50$ “) der Verglasung sowie die Außenwand- und Deckenaufbauten hinsichtlich ihrer Wärmespeicherfähigkeit (Bauschwere „leicht“ und „mittel“). Die genauen bauphysikalischen Daten zeigt Tabelle 1.

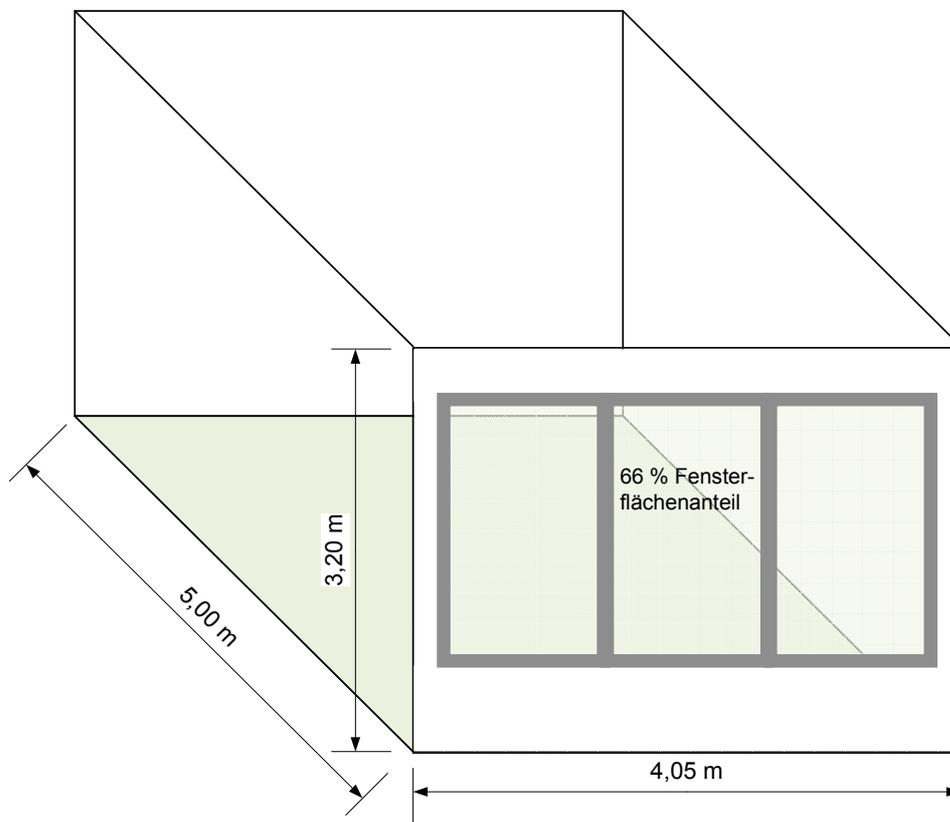


Abbildung 1: Darstellung des Musterraums – Grundlage der Vergleichsrechnungen

Geometrie	NGF: 19,65 m <sup>2</sup> V <sub>N</sub> : 55,0 m <sup>3</sup> Fensterflächenanteil: 66 %
Außenwandaufbau	U = 0,35 W/(m <sup>2</sup> K) Variante „leicht“: Porenbeton Variante „mittel“: Beton + Dämmung außen
Fenster	Verglasungsanteil: 70 % Abminderung durch Verschattung: 0,90 (Pauschalwert Umgebung) Orientierung: Süden Variante „g = 0,25“: Gesamtenergiedurchlassgrad g = 0,25 Variante „g = 0,50“: Gesamtenergiedurchlassgrad g = 0,50
Innenbauteile	Innenwände: Gipskarton / Mineralwolle Fußboden: Teppich / Holzfaserplatten / Luftschicht / Beton Decke Variante „leicht“: Mineralfaser / Luftschicht / Beton Decke Variante „mittel“: Beton
Lüftung	Fensterlüftung: 4,0 m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> ) Luftwechsel Infiltration: 0,14 h <sup>-1</sup> / (n <sub>50</sub> = 2,0 h <sup>-1</sup> )
Wärmebrücken	Pauschalzuschlag: 0,05 W/(m <sup>2</sup> K)
Wirksame Wärmespeicherkapazität C <sub>Wirk</sub>	Detaillierte Berechnung („10-cm-Regel“) Variante „leicht“: 28 Wh/(m <sup>2</sup> K) Variante „mittel“: 119 Wh/(m <sup>2</sup> K)

Tabelle 1: Bauphysikalische Kennwerte des Musterraums

Die Ergebnisse für den jährlichen Nutzkältebedarf werden in Abbildung 2 und Tabelle 2 gegenübergestellt. Die monatliche Gegenüberstellung der Bedarfswerte beider Verfahren für die unterschiedlichen Testräume zeigen Abbildung 3 bis Abbildung 6.

Bauschwere	$C_{\text{wirk}}$	$g_{\text{total}}$	DIN V 18599	Simulation	Abweichung	
	[Wh/(m <sup>2</sup> K)]	[-]	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]	[-]
mittel	119	0,25	15,9	19,7	- 3,8	-19%
mittel	119	0,50	44,7	46,1	- 1,4	-3%
leicht	28	0,25	24,8	23,5	1,3	5%
leicht	28	0,50	57,1	53,6	3,6	7%

Tabelle 2: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für den jährlichen Nutzkältebedarf

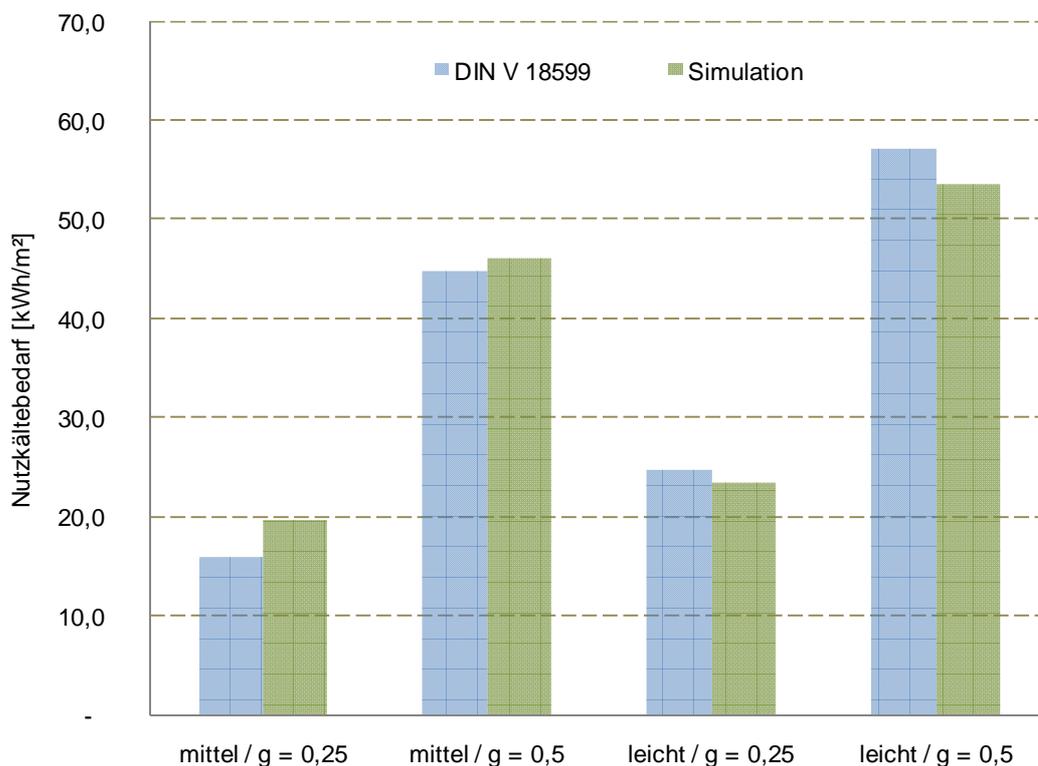


Abbildung 2: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für den jährlichen Nutzkältebedarf: Monatsverfahren DIN V 18599 – dynamische Simulation

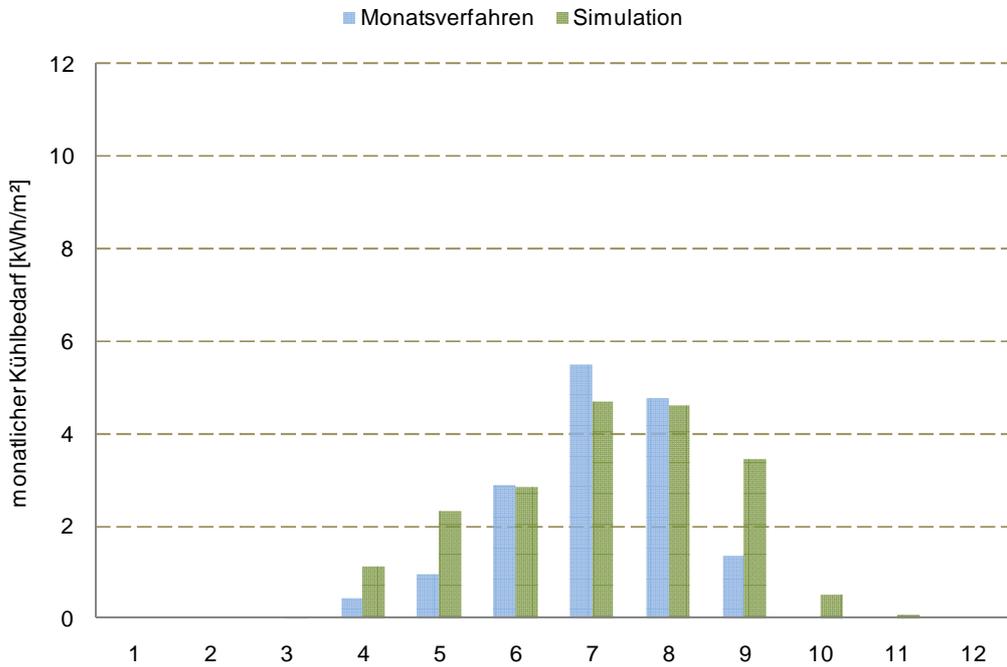


Abbildung 3: Vergleich der Monatsergebnisse Nutzkältebedarf: Testraum Bauschwere „mittel“ /  $g_{total} = 0,25$

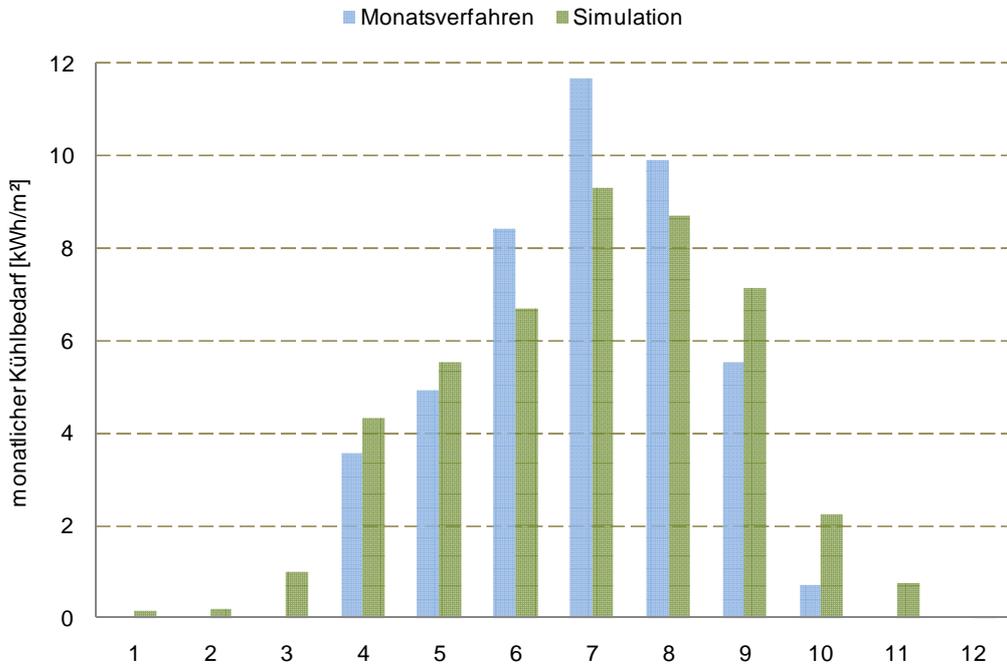


Abbildung 4: Vergleich der Monatsergebnisse Nutzkältebedarf: Testraum Bauschwere „mittel“ /  $g_{total} = 0,50$

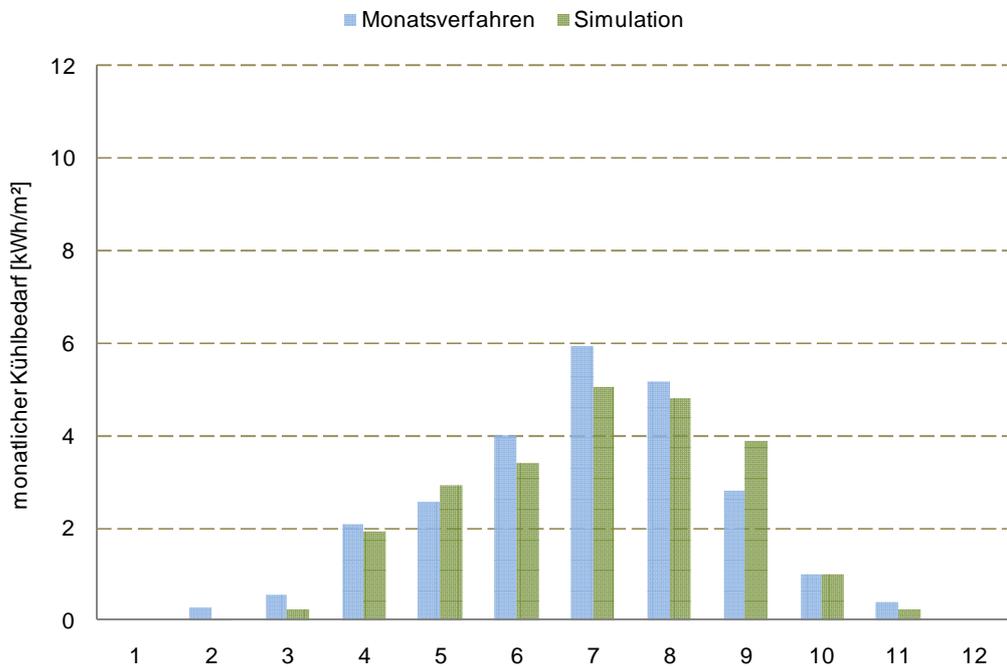


Abbildung 5: Vergleich der Monatsergebnisse Nutzkältebedarf: Testraum Bauschwere „leicht“ /  $g_{\text{total}} = 0,25$

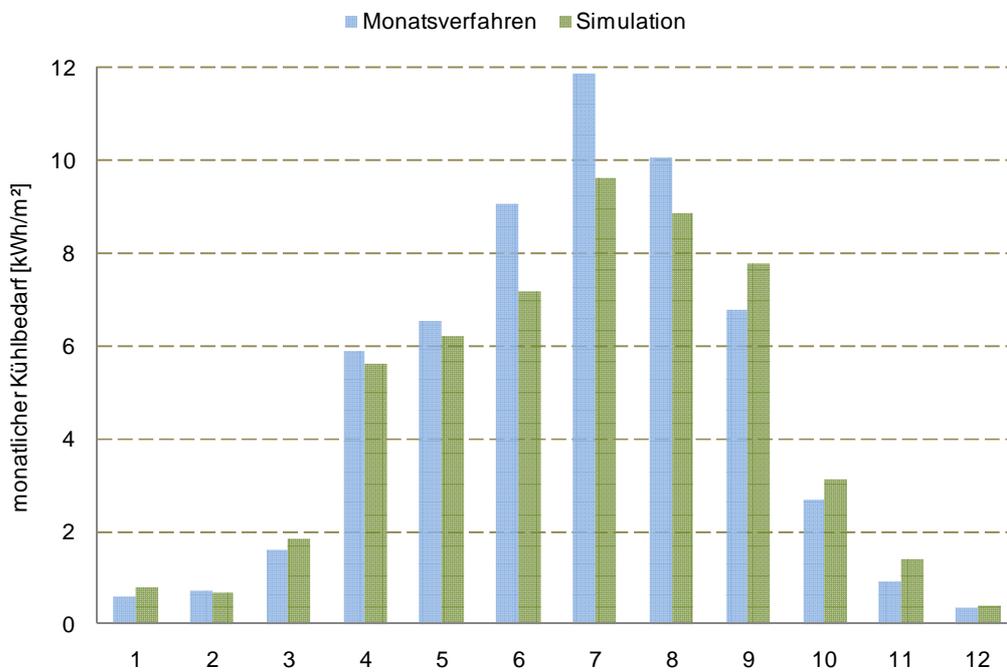


Abbildung 6: Vergleich der Monatsergebnisse Nutzkältebedarf: Testraum Bauschwere „leicht“ /  $g_{\text{total}} = 0,50$

Die Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu.

1. Grundsätzlich liefert das Monatsverfahren für die untersuchten Büroräumen bei identischen Randbedingungen eine teils außerordentlich gute Übereinstimmung in den Jahresbedarfswerten mit den Ergebnissen der dynamischen Simulation
2. Die relativen Abweichungen sind bei höheren Beträgen (hoher Sonnenenergieeintrag) geringer, als bei niedrigen Beträgen.
3. Bei leichter Bauweise ergibt das Monatsbilanzverfahren tendenziell eher höhere Werte, bei mittlerer Bauweise tendenziell niedrigere Ergebnisse. Wählt man für die Normberechnung den (zulässigen) Ansatz pauschaler Beträge für die wirksame Wärmespeicherfähigkeit nach DIN V 18599 - 2, kann die Tendenz aber umgekehrt ausfallen. Insgesamt reagiert das Monatsverfahren bzw. der Ausnutzungsgrad recht sensibel auf geänderte Wärmespeicherkapazitäten.
4. Beim Vergleich der monatlichen Bedarfswerte zeigt sich die Tendenz, dass die Sommermonate tendenziell höher und die Übergangsmonate (besonders September und Mai) tendenziell niedriger durch das Monatsverfahren bewertet werden. Diese Abweichungen fallen bei der schwereren Bauweise höher aus und führen dann zu den entsprechenden Abweichungen im Jahresergebnis.

In einer weiteren Variantenuntersuchung wurde der Fensterluftwechsel an die Personenanwesenheitszeit angepasst (6 h/d statt 11 h/d). Den Ergebnisvergleich zeigt Abbildung 7. Es ergibt sich eine durchschnittliche Reduzierung des Nutzkältebedarfs von 11 %. Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zu Abbildung 2, dass das Monatsverfahren auch hierbei die Zusammenhänge richtig wiedergibt. Die Reduktion des Nutzkältebedarfs beim Monatsverfahren von durchschnittlich 12 % deckt sich ausgezeichnet mit der mittleren Reduktion aus den Simulationsrechnungen von 11 %.

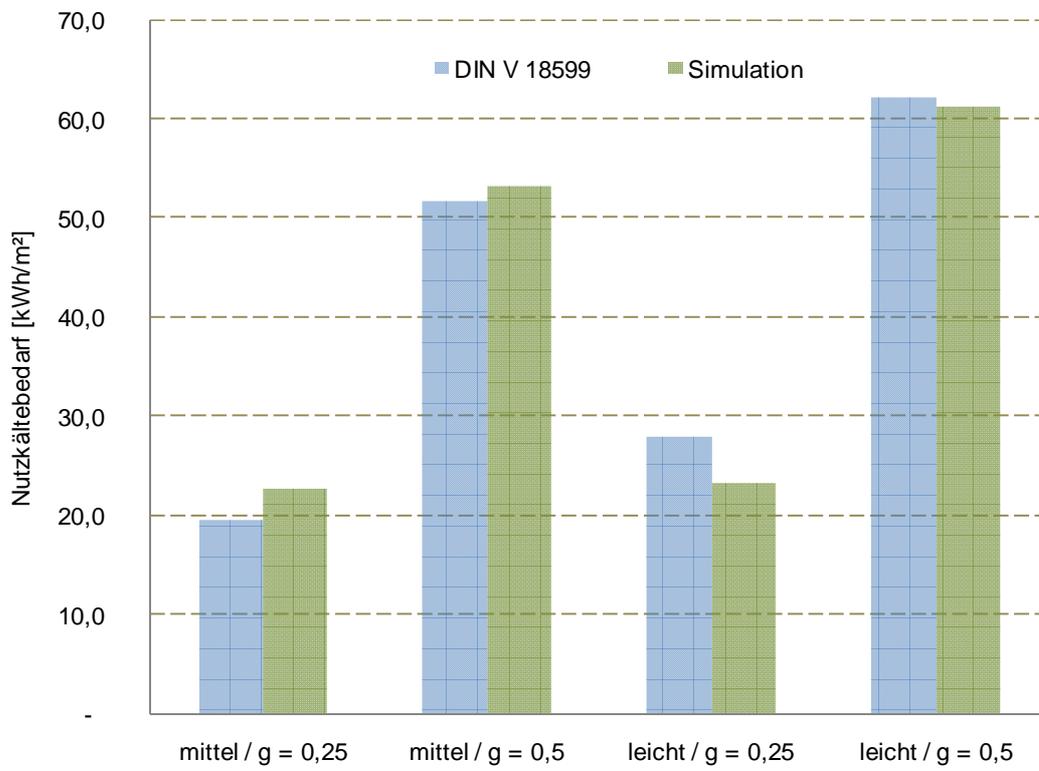


Abbildung 7: Vergleichsrechnung für den jährlichen Nutzkältebedarf bei Anpassung der täglichen Fenster-Lüftungsdauer an die Personenanwesenheitszeit (6 h/d)

Bezogen auf den Ansatz einer erhöhten Sommerlüftung leiten sich aus den Ergebnissen folgende Empfehlungen ab.

- Aus den Ergebnissen des Monatsbilanzverfahrens lässt sich kein zwingender Handlungsbedarf für Weiterentwicklungen, bezogen auf den Nutzkältebedarf, ableiten. Die Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Ergebnissen der dynamischen Simulation ist hinreichend gut.
- Die Analyse der Nutzungsrandbedingungen lässt eher die Vermutung zu, dass die Ansätze zu einer Unterbewertung des Nutzkältebedarfs führen. Praxisfern erscheint der Ansatz, dass bei Einzel- und Gruppenbüros einer 6-stündigen Personenanwesenheitszeit eine 11-stündige Bereitstellung des Mindestvolumenstroms für die Maximalbelegung per Fensterlüftung erfolgen soll. Bei einer Geschosshöhe von 2,80 m und einem flächenbezogenen Mindestaußenluftvolumenstrom von  $4,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$  ergibt sich ein 1,43-facher Raumlufwechsel je Stunde. Bei den Ansätzen der DIN 4108 – 2 (sommerlicher Wärmeschutz) wird der Raum-

luftwechsel auf den Betrag  $3,0 \text{ h}^{-1}$  begrenzt. Die Nutzungsrandbedingungen nach DIN V 18599 – 10 würden, bezogen auf die Anwesenheitszeit (und damit auch auf die internen Wärmeeinträge) zu einem 2,62-fachen Raumlufthechsel während der 6-stündigen Personenanwesenheit führen. Damit würden die derzeit gültigen Randbedingungen die erhöhte Fensterlüftung für die Nutzungszeit größtenteils bereits vorweg nehmen. **Eine weitere Erhöhung erscheint derzeit nicht gerechtfertigt.**

- Die Nutzungsrandbedingungen befinden sich innerhalb der Normungsgremien in Überarbeitung. Änderungen würden eine saisonal angepassten Fensterluftwechsel sowie ein Modell der bedarfsgerechten Fensterlüftung beinhalten. Wie sich diese Veränderungen auf den Nutzkältebedarf auswirken, kann erst nach Abschluss der Normungsarbeit genau beurteilt werden. Möglicherweise kann das Modell der erhöhten Sommerlüftung zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll angewendet werden.
- Die Vergleichsrechnungen zeigen, dass das Monatsverfahren die Zusammenhänge eines erhöhten oder reduzierten Luftwechsels ohne weiteren Anpassungsbedarf ausreichend genau wiedergibt. Somit verbliebe bei späteren Änderungen lediglich die Notwendigkeit, praxiserichte Nutzungsrandbedingungen für die Mindestlüftung und für die verstärkte Sommerlüftung zu definieren.

## AP 2 Freie Kühlung durch natürliche Sommernachtlüftung

Die so genannte Sommernachtlüftung kann zur Minderung der Kühllasten und damit des Nutzenergiebedarfs für die Raumkühlung beitragen. Momentan gestattet das Verfahren EnEV / DIN V 18599 hier keine qualitative Unterscheidung zwischen Gebäuden, bei denen dies technisch möglich ist und solchen, bei denen dies nicht möglich ist.

Mögliche Ansatzpunkte innerhalb des bestehenden Verfahrens werden darin gesehen,

- a) den mittleren Luftwechsel unter Berücksichtigung der Sommernachtlüftung saisonal zu erhöhen
- b) die mittlere Zulufttemperatur unter Berücksichtigung der Sommernachtlüftung saisonal zu vermindern.

Die Untersuchungen wurden anhand der in Arbeitspaket 1 erstellten Typraummodelle durchgeführt werden, die dann um den Aspekt der Sommernachtlüftung weiterentwickelt wurden. Verglichen wurden die Ergebnisse des modifizierten Monatsverfahrens wieder mit den dynamischen Simulationsergebnissen der Software GEBSIMU.

Maßstab war das Nachtlüftungsmodell der DIN 4108 – 2, wonach der nächtliche Luftwechsel max.  $2,0 \text{ h}^{-1}$  betragen kann. Diese Begrenzung ist sinnvoll, da im Regelfall Innenräume gegen Einbruch und Schlagregen zu schützen sind, wodurch größere, dauerhaft geöffnete Lüftungsquerschnitte als nicht praxisgerecht anzusehen sind.

Bei der Simulation wurde vom ungünstigen Fall der rein thermisch angetriebenen Luftströmung ausgegangen. Durch die Abwesenheit von Personen in der Nacht kann der Lüftungsquerschnitt nur konstant und nicht als variabel nachgeführt wie am Tag modelliert werden. Konstante Querschnitte führen zu variablen Volumenströmen, weshalb in der Simulation ein variabler Ansatz für den Fensterluftwechsel außerhalb der Nutzungszeit  $n_{L,NL}$  angesetzt wurde, der von der Temperaturdifferenz Raum zur Außenumgebung abhängt.

$$n_{L,NL} = 2,0 \text{ h}^{-1} \sqrt{\frac{\text{abs}(\theta_i - \theta_e)}{10 \text{ K}}}$$

Somit variiert die Höhe des maximalen thermisch induzierten Luftwechsels im Simulationsmodell einerseits saisonal und andererseits stündlich aufgrund der veränderlichen Temperaturdifferenz.

In der Realität und in der Simulation würde zusätzlich die Dauer der Sommernachtlüftung variieren. Durch eine variable Lüftungsdauer soll vermieden werden, dass die Räume in der Übergangszeit zu stark auskühlen, was zu einer Erhöhung des Heizbedarfs bzw. zu Komforteinbußen führen würde. Beim Simulationsmodell wurde berücksichtigt, dass die Steuerung der Nachtlüftung die Kühlung des Raumes auf 21 °C begrenzt. Bei den instationären Raumtemperaturverläufen und der physikalischen Modellierung darauf reagierender Regelstrategien gelangt das Monatsschrittverfahren an seine Grenzen. Daher wurde für die Modifizierung des Monatsverfahrens ein empirischer Ansatz verfolgt.

Abbildung 8 zeigt zunächst den Einspareffekt der Sommernachtlüftung, der aus den Ergebnissen der dynamischen Simulation folgt.

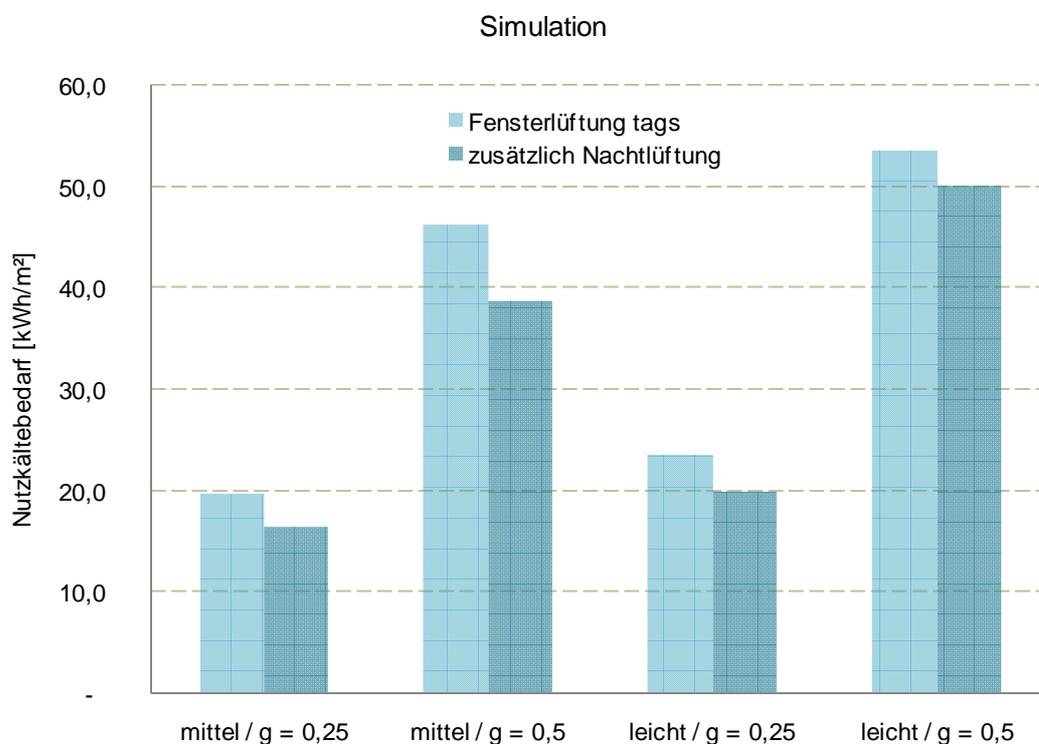


Abbildung 8: Reduzierung des Nutzkältebedarfs infolge Sommernachtlüftung – Ergebnisse der dynamischen Simulation

Bei den vier simulierten Typräumen ergibt die Sommernachtlüftung eine Reduktion des Nutzkältebedarfs zwischen 6 und 17 % bzw. 3,3 bis 7,5 kWh/(m<sup>2</sup> a). Erwartungsgemäß steigt die Einsparung mit zunehmender Bauschwere und mit zunehmendem Sonnenenergieeintrag. Absolut weisen die Reduzierungen bei den vier Lastfällen verhältnismäßig geringe Streuungen auf.

Abbildung 9 zeigt, dass der Effekt sich über nahezu alle Monate mit Kühlbedarf erstreckt

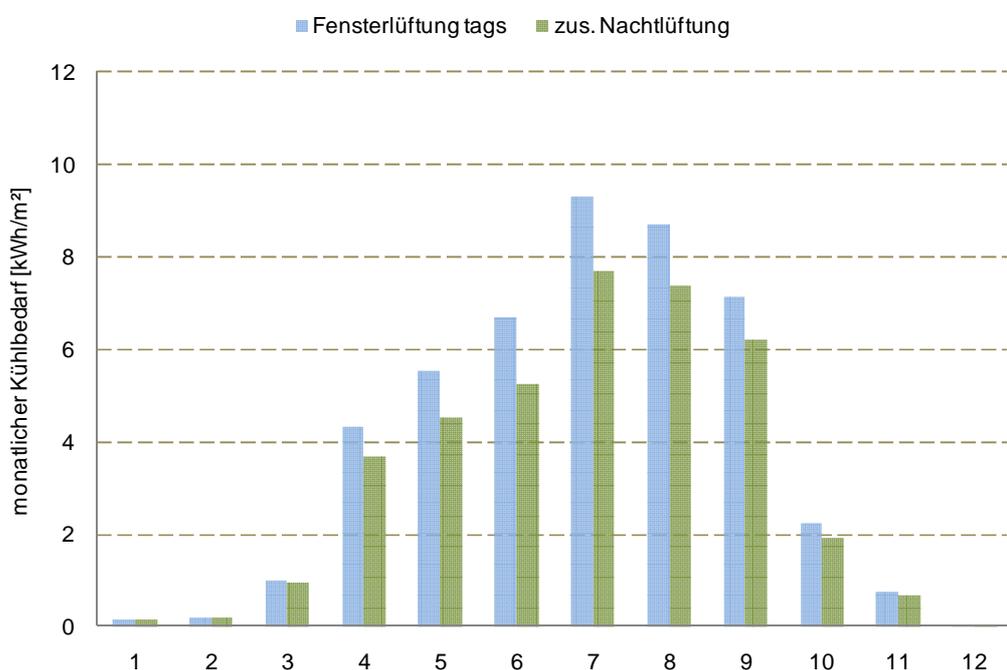


Abbildung 9: Monatlicher Einfluss der Sommernachtlüftung am Beispiel: Bauschwere „mittel“ / g = 0,50 (Simulationsergebnis)

Für den empirischen Ansatz, den Effekt der Sommernachtlüftung in das Monatsverfahren zu implementieren, wurden folgende Wege untersucht:

- Korrektur der Außentemperatur
- Erhöhung des Fensterluftwechsels in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur
- Erhöhung des Fensterluftwechsels um einen konstanten Betrag.

Angesichts der Komplexität der instationären Wärmespeichervorgänge war es unerwartet, dass das der einfachste der drei Ansätze, die konstante Erhöhung des Fensterluftwechsels, die beste Korrelation zwischen Monatsverfahren und dynamischer Simulation ergab.

Eine für alle der vier simulierten Testräume beste Übereinstimmung ergab sich, wenn der Fensterluftwechsel  $n_{win}$  um konstant 50 % erhöht wurde.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse des modifizierten Monatsverfahrens, die Darstellung korrespondiert mit den Simulationsergebnissen nach Abbildung 8.

Zur besseren Vergleichbarkeit zeigen Abbildung 11 und Abbildung 12 die Veränderungen beider Rechenmodelle in relativer und absoluter Darstellung.

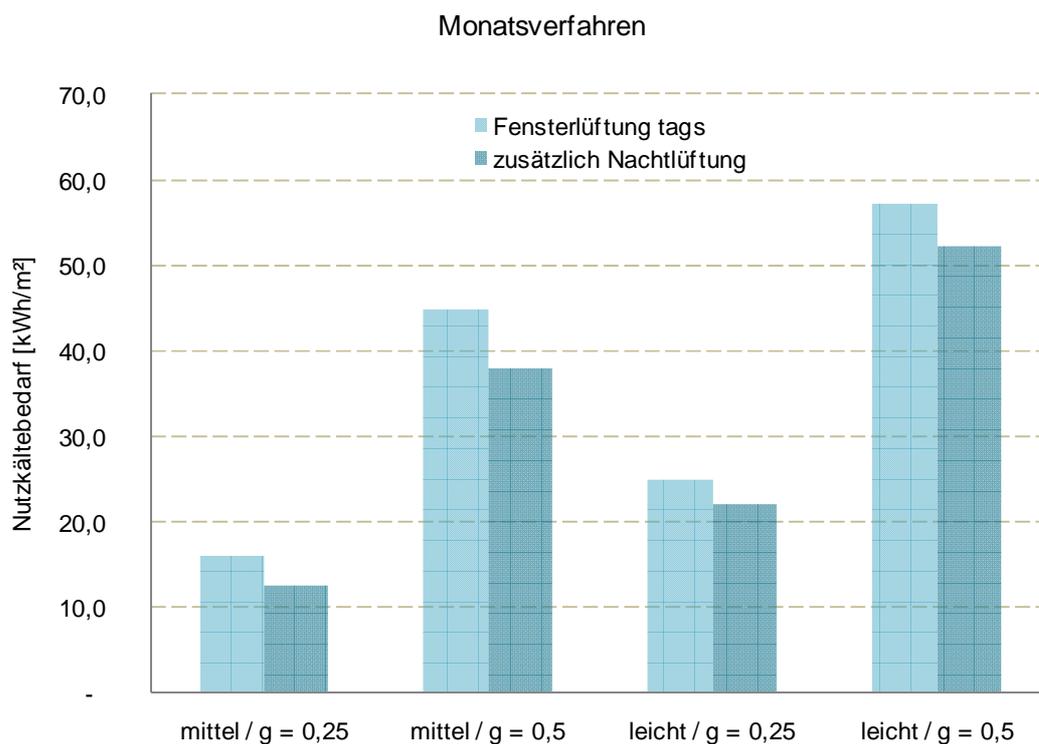


Abbildung 10: Reduzierung des Nutzkältebedarfs infolge Sommernachtlüftung – Ergebnisse des modifizierten Monatsverfahrens

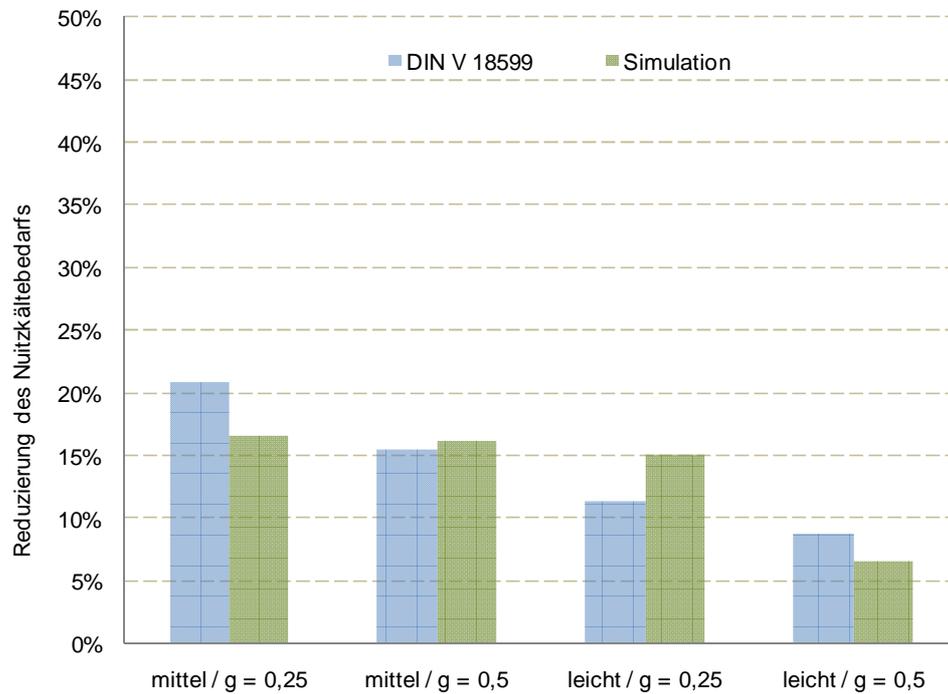


Abbildung 11: Reduktion des Nutzkältebedarf durch Sommernachtlüftung (relativ): Monatsverfahren DIN V 18599 – dynamische Simulation

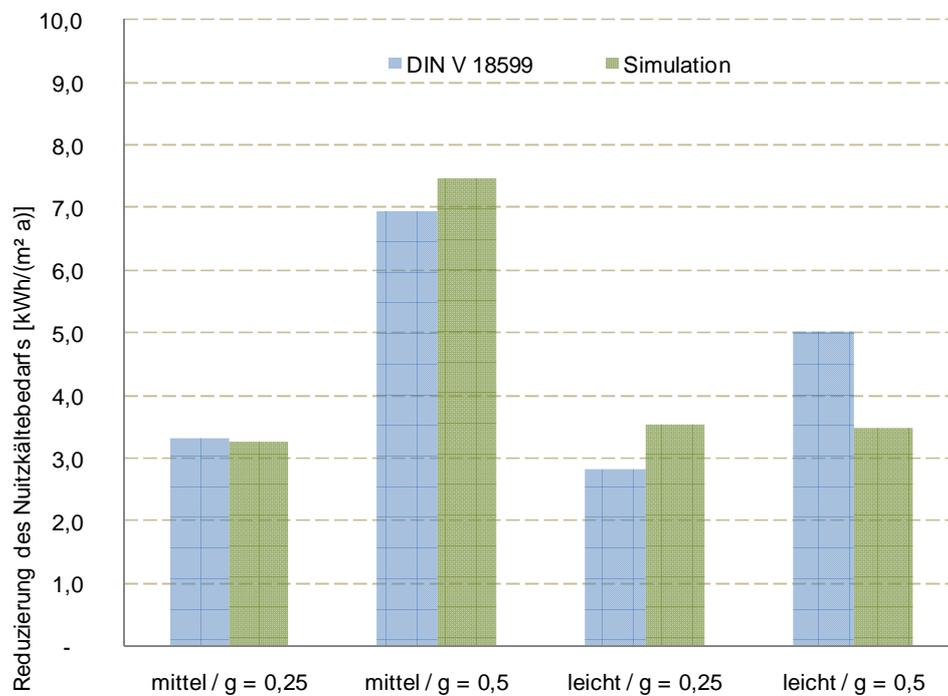


Abbildung 12: Reduktion des Nutzkältebedarf durch Sommernachtlüftung (absolut): Monatsverfahren DIN V 18599 – dynamische Simulation

Zur besseren Übertragbarkeit auf andere Nutzungsprofile sollte der Fensterluftwechsel nicht prozentual sondern um einen absoluten Betrag erhöht werden. Beim vorliegenden Fall der Büronutzung, führt der Faktor 1,5 zu einer absoluten Erhöhung des mittleren 24-h-Luftwechsels von  $0,60 \text{ h}^{-1}$  auf  $0,90 \text{ h}^{-1}$ . Die Differenz des 24-h-Mittelwertes von  $0,30 \text{ h}^{-1}$  würde, bezogen auf die tägliche Nichtnutzungszeit von 13 h, einem zusätzlichen Luftwechsel in Höhe von  $0,55 \text{ h}^{-1}$  entsprechen und die Einflüsse von Außenwitterung und Steuerung beinhalten.

Normativ wäre Gleichung (66) in DIN V 18599 - 2 wie folgt zu ersetzen:

$$H_{V,win} = (n_{win} + \Delta n_{NL}) \cdot V \cdot c_{p,a} \cdot \rho_a$$

mit  $\Delta n_{NL}$ :  $= 0 \text{ h}^{-1}$ ;

wenn keine Lüftungsmöglichkeit mit Sicherungseinrichtungen gegen Einbruch und Schlagregen vorgesehen sind

$= 0,3 \text{ h}^{-1}$ ;

wenn eine uneingeschränkte Möglichkeit zur freien Lüftung außerhalb der Hauptbetriebszeit vorhanden ist.

Die beschriebene Modifikation für die Nachtlüftung würde nur die Bilanzierung der Nutzkälte betreffen und bei der Bilanzierung des Heizfalls nicht zur Anwendung gelangen.

## AP 3 Freie Kühlung mittels Anlagentechnik

Die Freie Kühlung unter Nutzung von energieeffizienter Anlagentechnik ist integraler Bestandteil vieler aktueller Gebäudekühlkonzepte und kann maßgeblich zur Reduzierung des Endenergiebedarfes für die Raum-/RLT-Kühlung beitragen. Diese Technologie kann jedoch nach DIN V 18599 augenblicklich nicht bewertet werden. Für folgende Konzepte wurden daher Berechnungsvorschriften in Anlehnung an den Berechnungsalgorithmus nach DIN V 18599 entwickelt:

- Freie Kühlung mit Kühlturm durch Bypassschaltung wassergekühlter Maschinen
- Freie Kühlung durch luftgekühlte Kältemaschinen mit integrierten Freikühlregistern

### 3.1 Freie Kühlung mit Rückkühlwerken

Bei der Freien Kühlung mittels Rückkühlwerken werden vorhandene Rückkühlwerke in Zeiten reduzierter thermischer Belastungen und damit geringerer Kühllasten direkt zur Kälteversorgung genutzt. Die Kältemaschine wird dabei nicht in Betrieb genommen (Alternativbetrieb) oder kann bei mehreren Rückkühlwerken gemeinsam mit der Freien Rückkühlung genutzt werden (Parallelbetrieb).

Die hydraulische Einbindung erfolgt dabei in der Regel mit einer Bypassschaltung mit Wärmeübertrager zur Systemtrennung zwischen Kühl- und Kaltwasserkreislauf mit kaltwasserseitiger Einbindung in den Pufferspeicher oder die hydraulische Weiche gemäß Abbildung 13 und Abbildung 14.

Wesentliche Einflussgrößen auf das Potential der Freien Kühlung sind dabei:

- die Nutzungsart der gekühlten Zone (nach DIN V 18599-10),
- die Bauschwere der gekühlten Zone (das resultierende zeitbezogene Kühllastprofil),
- die Art des Rückkühlers (Trocken-/Verdunstungsrückkühler),
- das Temperaturniveau des Kaltwasserkreislaufs (Regelgröße Rücklauftemperatur),
- Parallelbetrieb / Alternativbetrieb mit Kältemaschine und
- die Dimensionierung des Zwischenwärmeübertragers (ZWÜ).



Die teilweise Lastdeckung durch die Freie Kühlung bewirkt einen veränderten (mittleren) Belastungszustand der Kältemaschine und hat damit auch direkten Einfluss auf den PLV-Wert. Darüber hinaus erhöht sich die Betriebszeit  $t_{RK,OP}$  und der Nutzungsgrad  $f_{R,RK}$  der Rückkühler.

Anhand von Simulationsrechnungen wurde der Einfluss der Freien Kühlung für jede Nutzungsart unter Berücksichtigung und Variation der wesentlichen Einflussgrößen für Raumkühlsysteme untersucht. Dabei wurden die direkten Deckungsanteile der Freien Rückkühlung, die Betriebszeiten und Nutzungsgrade der Rückkühler unter der Annahme ermittelt, dass keine Zwischenspeicherung in Kältespeichern oder Bauwerksmassen erfolgt. Eine Betrachtung von RLT-Kühlsystemen erfolgte nicht, da hier das Kühlpotential der Außenlufttemperatur in der Regel direkt als Kühlleistung zur Verfügung steht und nur in Ausnahmefällen (zentrale Umluftsysteme zur Raumkühlung) über den Umweg des Kaltwassersystems bereitgestellt wird.

Aus regelungstechnischer Sicht ist eine Kaltwasser-Rücklauftemperaturregelung berücksichtigt, bei der die Kältemaschine nur dann zugeschaltet bzw. in den Kältemaschinenbetrieb umgeschaltet wird, wenn die gewählte Rücklauftemperatur (12°C, 15°C bzw. 18°C) durch die Freie Kühlung alleine nicht mehr eingehalten werden kann.

Die Dimensionierung des Zwischenwärmeübertragers ist für alle Nutzungen auf 50 % der Nennkälteleistung festgelegt, was praxisrelevanten Auslegungsbedingungen entspricht und den im Übergangszeitraum zu erwartenden Kälteleistungsanforderungen der Versorgungsbereiche. Lediglich für den Serverraum erfolgte die Auslegung auf die Nennkälteleistung, was ebenfalls als praxisnah einzustufen ist..

Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 bis Abbildung 18 dargestellt. Sie bestätigen die starke Abhängigkeit der direkten Deckungsgrade von den o.g. Einflussgrößen.

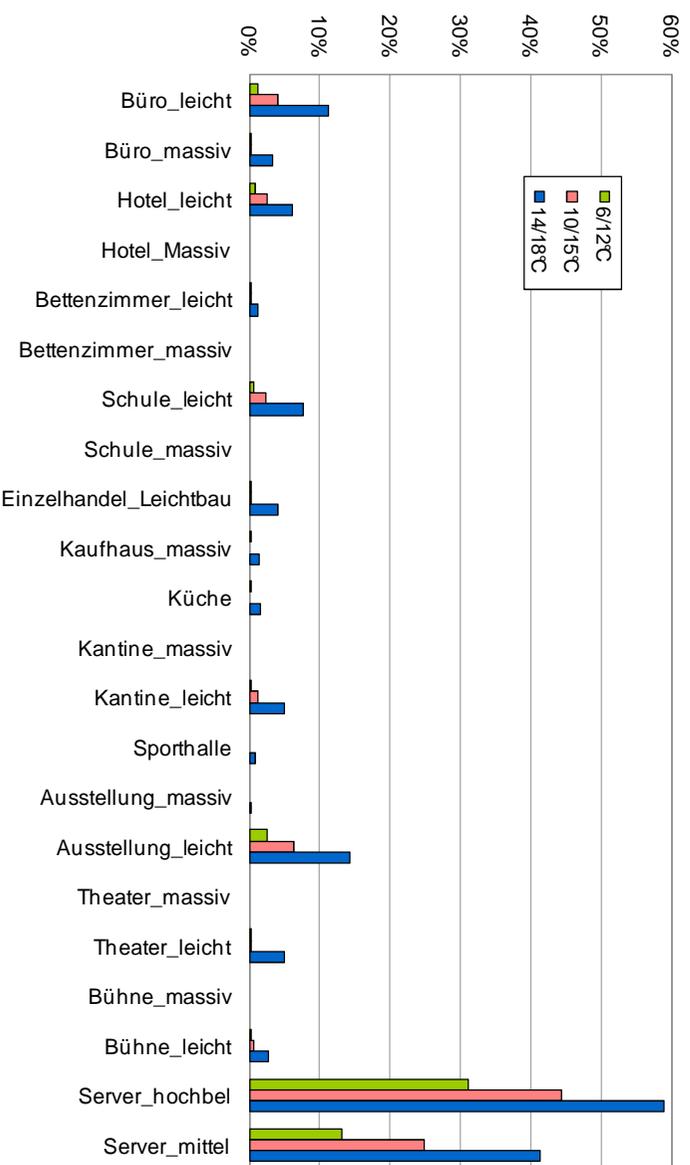


Abbildung 15: direkte Deckungsanteile der Freien Kühlung bei Trockenrückkühlern in Abhängigkeit des Kaltwassertemperaturniveaus (Parallelbetrieb)

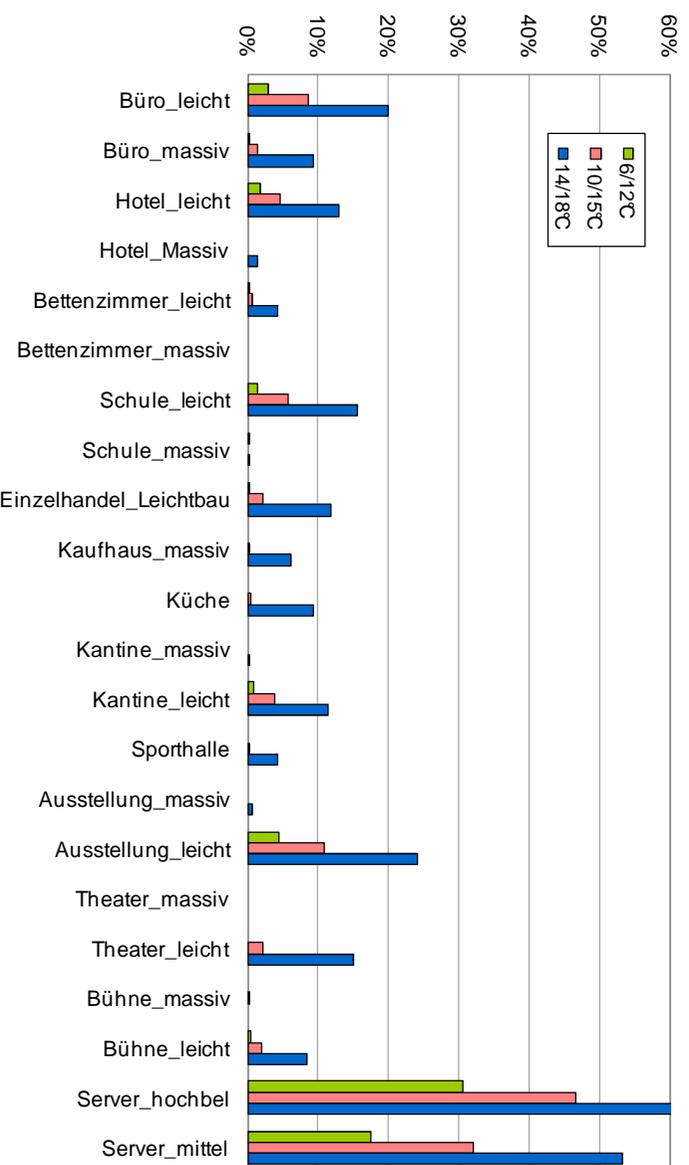


Abbildung 16: direkte Deckungsanteile der Freien Kühlung bei Verdunstungsrückkühlern in Abhängigkeit des Kaltwassertemperaturniveaus (Parallelbetrieb)

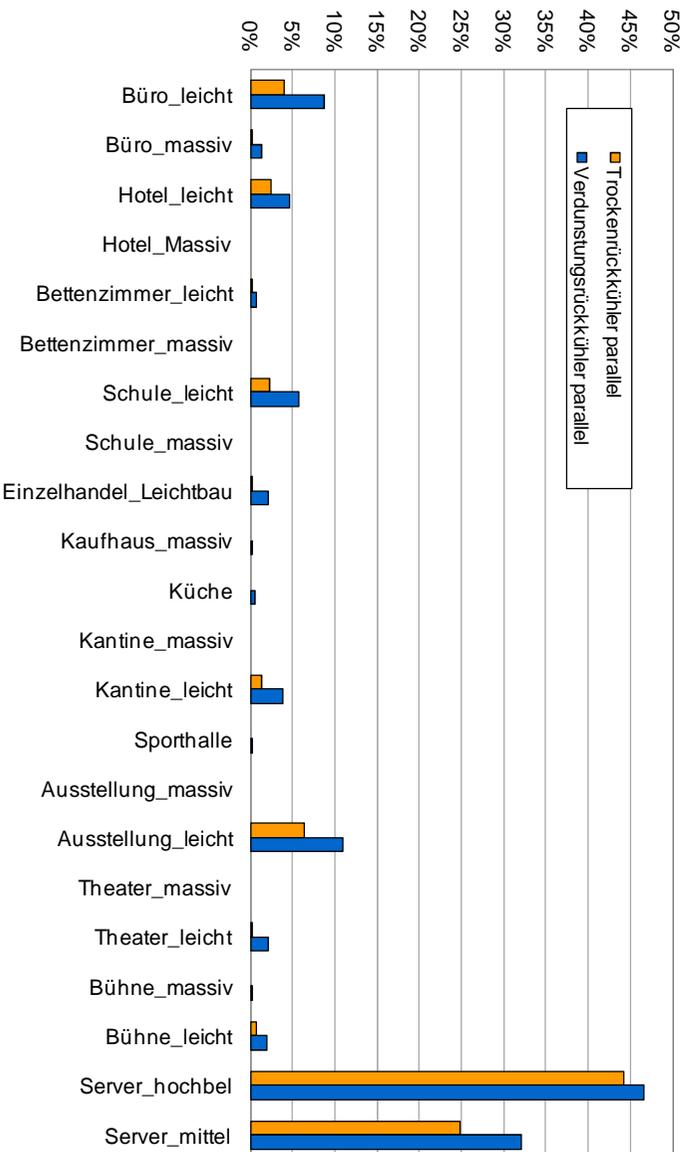


Abbildung 17: Vergleich der direkten Deckungsanteile der Freien Kühlung bei Verdunstungsrückkühlern und Trockenrückkühlern für Kaltwassertemperaturniveau 10/15°C

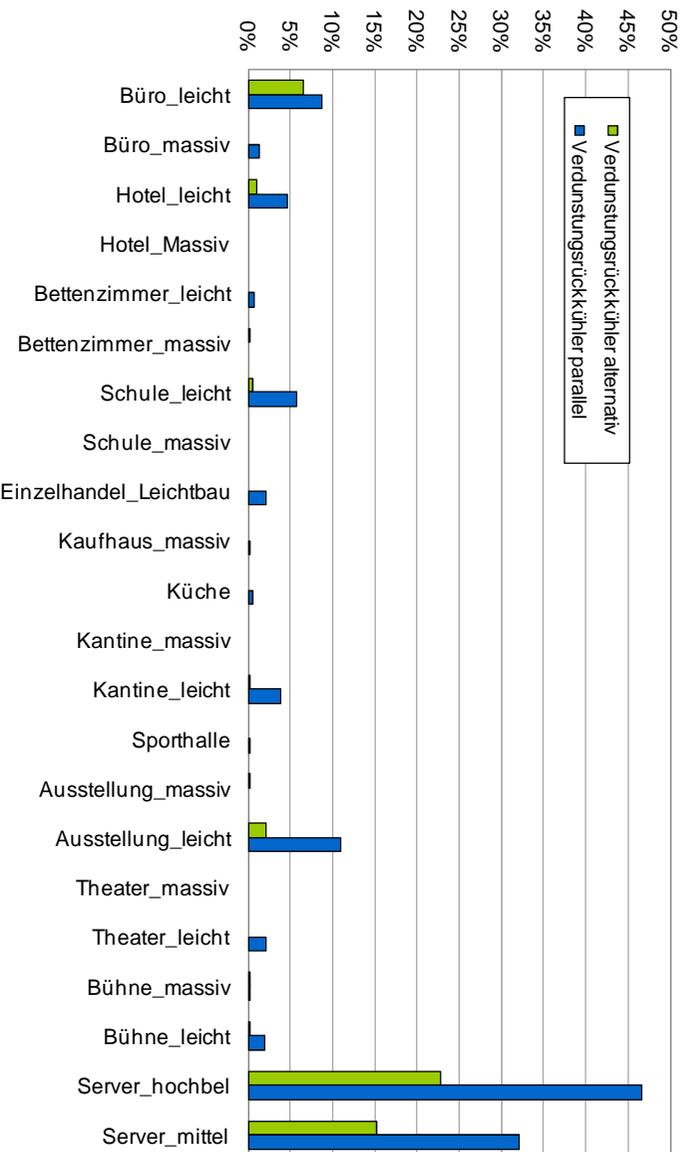


Abbildung 18: Vergleich der direkten Deckungsanteile der Freien Kühlung bei Verdunstungsrückkühlern im Parallel- und Alternativbetrieb für Kaltwassertemperaturniveau 10/15°C

Die Deckungsanteile insbesondere in Massivgebäuden sind häufig nur sehr gering. Die höchsten Deckungsanteile sind wie erwartet mit Verdunstungsrückkühlern im Parallelbetrieb zur Kältemaschine zu erreichen. Bei höheren Kaltwassertemperaturen steigen die Deckungsanteile generell an, allerdings müssen bei sehr hohen Kaltwassertemperaturen auch die Raumkühlflächen entsprechend großzügig dimensioniert sein. Parallel zu den Deckungsanteilen wurden die Betriebszeiten und die Nutzungsgrade der Rückkühler im Freikühlbetrieb ermittelt. Die Ergebnisse sind in Anhang A enthalten.

Durch die anteilige Nutzung der Freien Kühlung verändert sich neben der vom Kälteerzeuger bereit gestellten absoluten Kühlenergiemenge auch der relative Verlauf der verbleibenden maschinellen Kälteleistung und damit die Teillasthäufigkeit bzw. die Belastungssituation der Kältemaschine. Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurde daher auch der Einfluss der Freien Kühlung auf den mittleren Teillastfaktor  $PLV_{AV}$  der Kältemaschine geprüft. Dieser setzt sich aus einem Faktor  $f_1$ , der die maschineninternen Verluste beschreibt, und einem Faktor  $f_2$ , der die Ankopplung an die variablen Kühlwasserbedingungen beschreibt, zusammen.

Prinzipiell verschiebt die Nutzung der Freien Kühlung die Teillasthäufigkeit hin zu höheren Belastungsgraden der Kältemaschine (Eliminierung von Schwachlastzeiten), was in der Regel dazu führt, dass der Faktor  $f_1$  geringfügig ansteigt. Gleichzeitig erfolgt die maschinelle Kälteversorgung im Mittel bei höheren Außenluft- und damit Kühlwassertemperaturen, wodurch der Faktor  $f_2$  sinkt. In Summe kompensieren sich beide Effekte weitestgehend, so dass der mittlere PLV-Wert nahezu unverändert bleibt (absolute Abweichung  $PLV_{AV}$  kleiner 5 %). Der Einfluss der Freien Kühlung auf die Leistungszahl der mittlere Jahresarbeitszahl der Kältemaschine SEER kann damit vernachlässigt werden und muss im Kennwertverfahren nach DIN V 18599-7 nicht gesondert berücksichtigt werden.

Die normative Abbildung der Freien Kühlung mit Rückkühlwerken im Kennwertverfahren der DIN V 18599-7 erfolgt innerhalb eines separaten Kapitels „Freie Kühlung“ im Textteil der Norm. Im Rahmen einer tabellarischen Abbildung wird der Deckungsanteil der Freien Kühlung  $d_{FC}$ , die Betriebszeiten des Rückkühlers  $t_{RK,OP,FC}$  und der Kältemaschine  $t_{C,OP,FC}$  sowie der Nutzungsgrad des Rückkühlers  $f_{R,RK,FC}$  in Abhängigkeit der Nutzung, der Bauschwere und des Nutztemperaturniveaus dargestellt. Dabei wird tabellarisch in die Betriebsarten Parallel- und Alternativbetrieb und die Rückkühlerarten Trockenrückkühler und Verdunstungsrückkühler unterschieden.

### 3.2 Freie Kühlung mit luftgekühlten Kältemaschinen mit integrierten Freikühlregistern

Die maschinenintegrierte Freie Kühlung wird von den Kältemaschinen-Herstellern mit verschiedenen Verfahren realisiert. Am häufigsten werden so genannte Freikühlregister im Parallelbetrieb mit den Kondensatoren betrieben, die kaltwasserdurchströmt und rücklaufseitig angeordnet sind. Andere Technologien sind nur herstellerspezifisch verfügbar und würden in einer Produktbewertung münden.

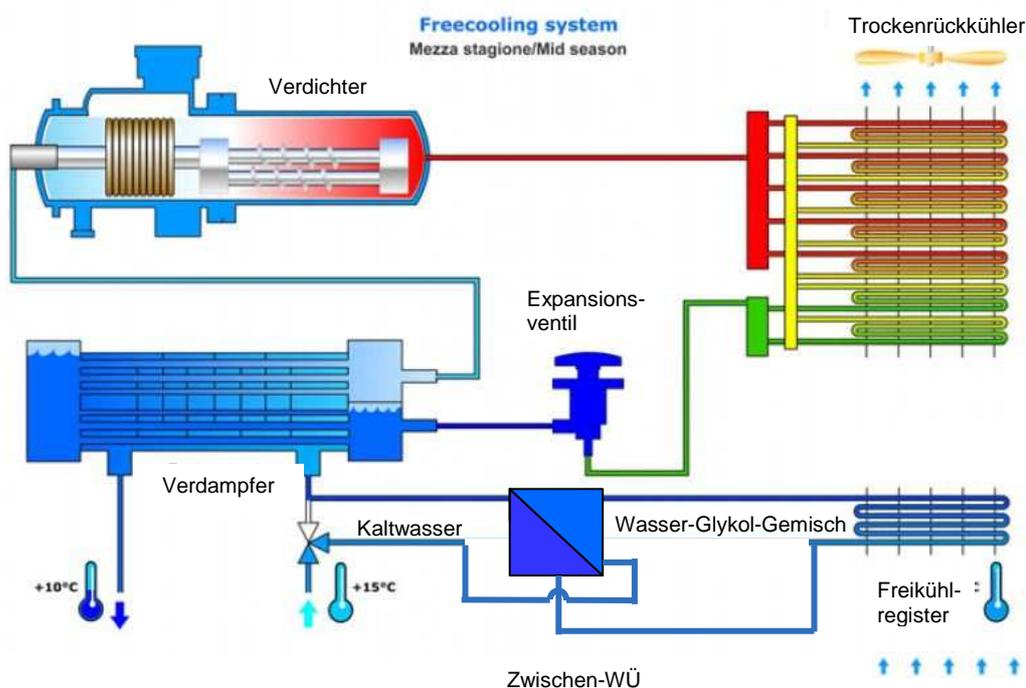


Abbildung 19: Schaltschema einer Kompressionskältemaschine mit integriertem Freikühlregister (Hersteller: Climaveneta)

Für die Bauart mit integriertem Freikühlregister werden ebenfalls Deckungsanteile der Freien Kühlung mit Simulationsmodellen ermittelt. Dabei ist neben der veränderten Teillastsituation für die Kältemaschine auch die geänderte Lufttemperatur in den Kondensator zu berücksichtigen. Im Ergebnis wird anhand der stündlich ermittelten Jahresleistungszahl der Freien Kühlung einerseits und der Kältemaschine andererseits eine mit der Jahreskühlarbeit gewichtete Jahresleistungszahl der Gesamttechnologie  $SEER_{FC}$  ermittelt. Durch einen Vergleich zum konventionellen Betriebsfall ohne Freie Kühlung ergibt sich für die jeweilige Kältemaschine der Freikühlfaktor  $f_{FC}$ , der die Verbesserung der Leistungszahl durch die Verwendung der Freien Kühlung beschreibt.

Als Teillastregelarten werden aus Sicht der am Markt verfügbaren Technologien folgende luftgekühlte Kälteerzeuger in die Betrachtung einbezogen:

- Kolbenverdichter mehrstufig - Teillastregelart (B) nach DIN V 18599-7
- Schraubenverdichter mit Steuerschieber - Teillastregelart (C) nach DIN V 18599-7
- Schraubenverdichter frequenzgeregelt - Teillastregelart (D) nach DIN V 18599-7

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigen Abbildung 23 bis Abbildung 22.

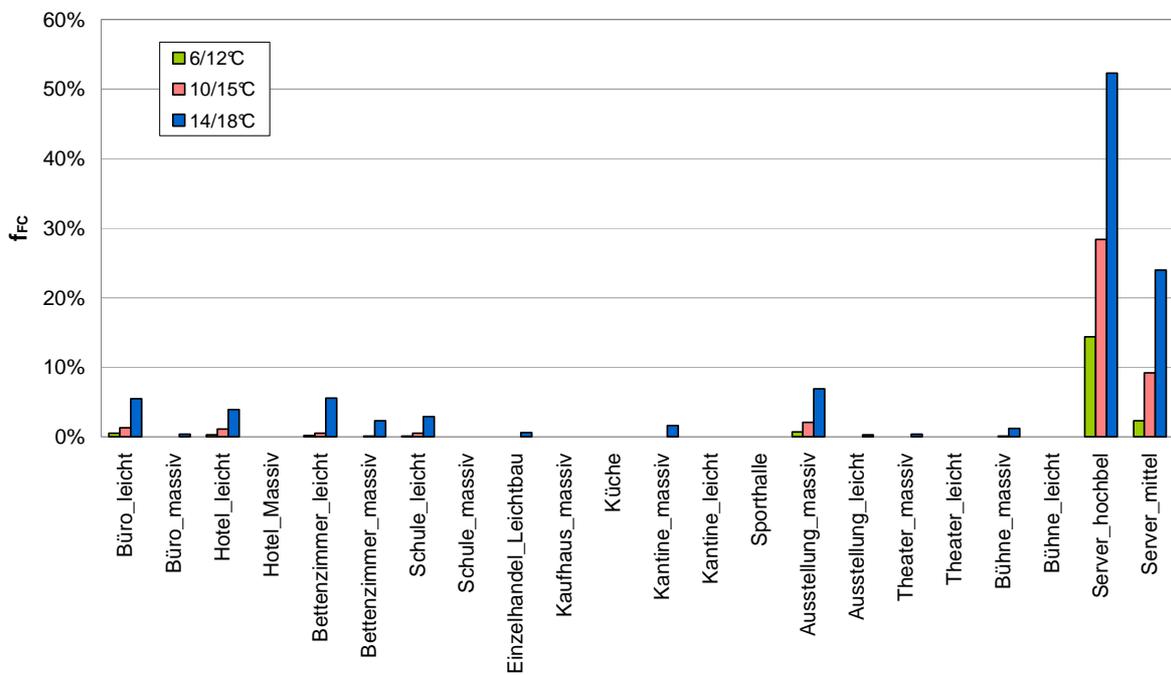


Abbildung 20: Effizienzfaktor der Freien Kühlung  $f_{FC}$  (Freikühlfaktor) für mehrstufige Kolbenverdichteranlagen in Abhängigkeit des Kaltwassertemperaturniveaus

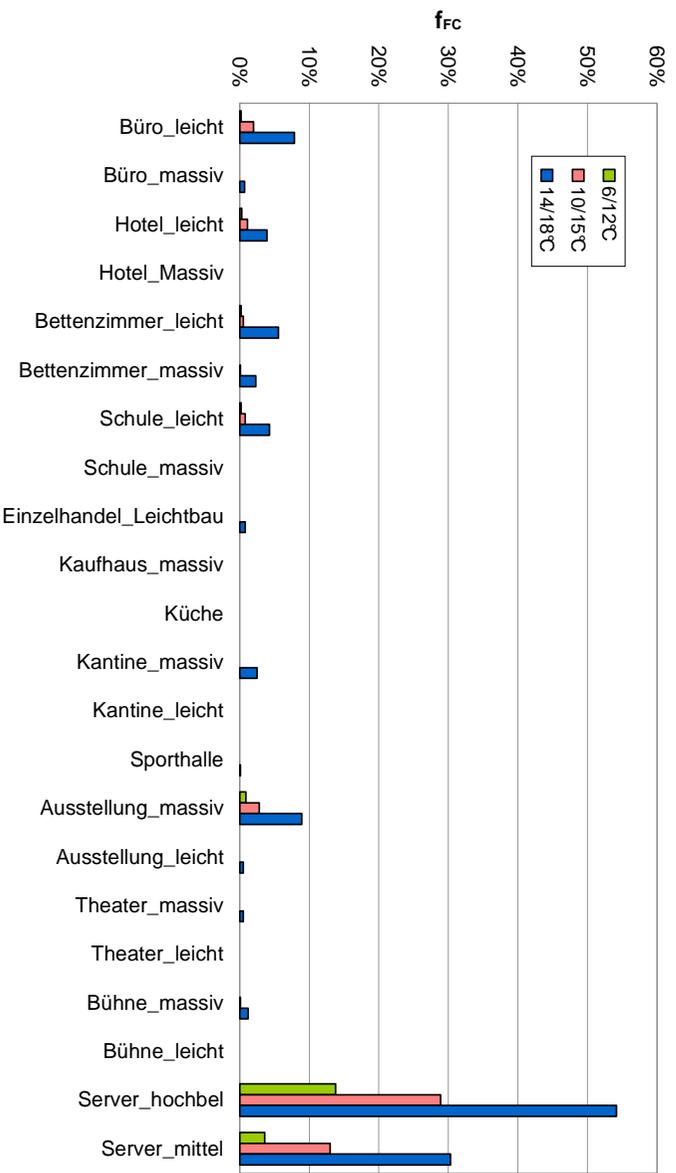


Abbildung 21: Effizienzfaktor der Freien Kühlung  $f_{FC}$  für Schraubenverdichter mit Steuerung in Abhängigkeit des Kaltwassertemperaturniveaus

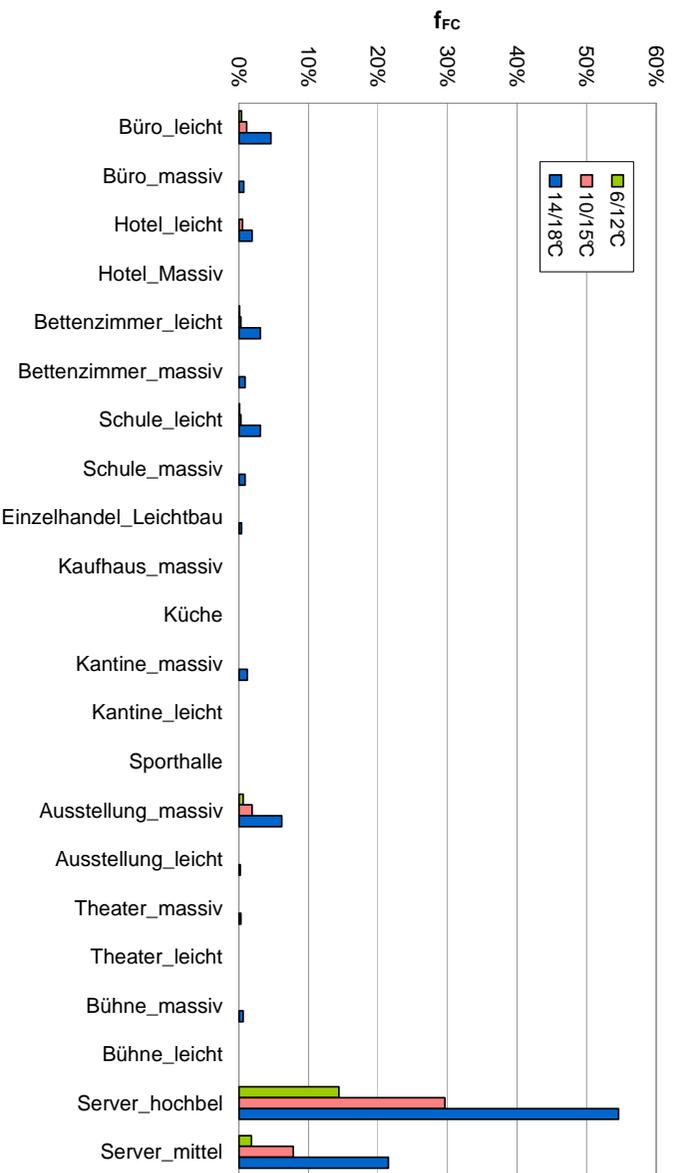


Abbildung 22: Effizienzfaktor der Freien Kühlung  $f_{FC}$  (Freikühlfaktor) für Schraubenverdichter mit Inverterregelung in Abhängigkeit des Kaltwassertemperaturniveaus

Die normative Abbildung der Freien Kühlung mit integrierten Freikühlregistern im Kennwertverfahren der DIN V 18599-7 erfolgt innerhalb eines separaten Kapitels „Freie Kühlung“ im Textteil der Norm. Im Rahmen einer tabellarischen Abbildung wird der Freikühlfaktor  $f_{FC}$  in Abhängigkeit der Nutzung, der Bauschwere und des Nutztemperaturniveaus dargestellt. Die Jahresleistungszahl unter Beachtung der Freien Kühlung  $SEER_{FC}$  kann anhand des Freikühlfaktors  $f_{FC}$  und der Jahresleistungszahl bei konventionellem Betrieb ohne Freie Kühlung  $SEER$  ermittelt werden.

$$SEER_{FC} = SEER \cdot f_{FC}$$

## AP 4 Indirekte Verdunstungskühlung

Bei der indirekten Verdunstungskühlung (oder auch: „adiabate Kühlung“) handelt es sich um einen lufttechnischen Teilprozess, bei der der Verdunstungseffekt zur Kühlung von Außenluft genutzt wird. Während die direkte Verdunstungskühlung (Befeuchtung der Zuluft) in extrem trockenen Klimaten genutzt werden kann, kann die indirekte Verdunstungskühlung (Befeuchtung der Abluft) auch in gemäßigten Klimazonen erfolgreich angewendet werden.

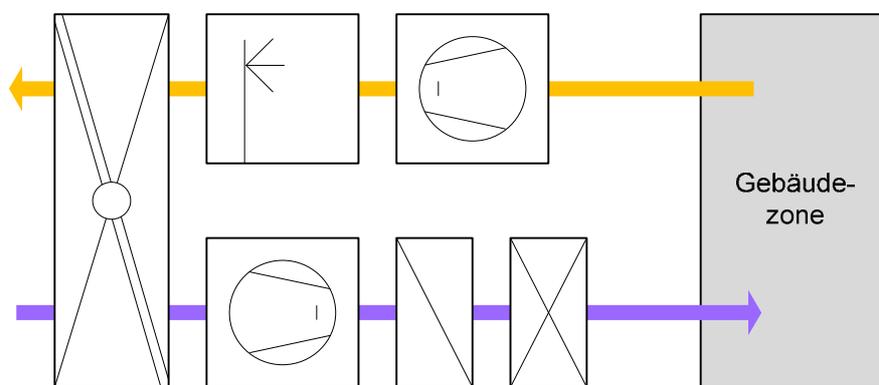


Abbildung 23: Schaltschema – Teilklimaanlage mit indirekter Verdunstungskühlung

Im Arbeitspaket 4 sollte ein Vorschlag erarbeitet werden, auf Basis der bestehenden Anlagenmatrix nach DIN V 18599-3 den energetischen Effekt einer indirekten Verdunstungskühlung rechnerisch abzubilden. Diese Arbeiten sind weitgehend abgeschlossen. Es liegt ein Vorschlag vor, der eine nachträgliche Einarbeitung in das bestehende Regelwerk DIN V 18599 - 3 gestattet. Dieser Vorschlag basiert auf folgenden Grundsätzen.

1. Das Kennwertverfahren und die Variantenmatrix nach DIN 18599 – 3, bestehend aus 46 Anlagenvarianten, soll im Kern beibehalten werden.
2. Der Nutzenergiebedarf RLT-Kälte wird durch einen entsprechenden Abschlag reduziert, der von folgenden Parametern abhängt:
  - Typ des Wärmerückgewinners (nur trockene Wärmerückgewinnung ist zulässig)
  - Rückwärmzahl
  - Feuchteanforderung
  - Soll-Zulufttemperatur.

3. Der Abschlag für die indirekte Verdunstungskühlung soll durch einen „Jahresfaktor“, also für alle 12 Monate einheitlich, erfolgen, um den rechnerischen Aufwand, z. B. auch für Handrechnungen, überschaubar zu halten.
4. Die Komponentenlaufzeiten sollen analog zum bestehenden Verfahren DIN V 18599 – 3 Anhang B für den Abluftbefeuchter und den Luftkühler ermittelt. Die Kennwerte für die relative Anlagenbetriebszeit werden durch Simulationsrechnungen in Stundenschritten ermittelt und zur Verfügung gestellt.

#### **4.1 Simulationsergebnisse und Bewertungsmethodik**

Zunächst wurden alle 46 Anlagenvarianten der DIN V 18599 – 3 mit einem neu entwickelten Stundenschrittverfahren unter Berücksichtigung der Randbedingungen nach DIN V 18599 – 3 Anhang C neu gerechnet. Für alle Anlagenvarianten mit trockener Wärmerückgewinnung wurde die indirekte Verdunstungskühlung in der Simulation berücksichtigt. Dies betrifft insgesamt 21 Varianten, für die übrigen 25 Varianten wurden die Normkennwerte lediglich neu gerechnet.

Im zweiten Schritt wurde untersucht, ob ein absoluter Abschlag besser eine relative Abminderung praktikabler ist. Bei einer relativen Abminderung werden praktische Vorteile gesehen, da keine Gefahr besteht, dass das Verfahren durch numerische Ungenauigkeiten negative Bedarfskennwerte generiert. Tabelle 3 zeigt die Kennwerttabelle für Reduktionsfaktoren durch Indirekte Verdunstungskühlung für den Zulufttemperatur-Sollwert: 18 °C analog DIN V 18599 – 3 für den Normungsvorschlag.

Varianten-Nr.	Feuchteanforderung			Befeuchter-Typ			WRG-Typ			Rückwärmzahl			Abminderungsfaktor für $\delta_{V,mech} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $t_{V,mech} = 12 \text{ h}$ Gesamtjahr		
	keine	mit Toleranz	ohne Toleranz	Verdunstung nicht regelbar	Verdunstung regelbar	Dampfbefeuchter	keine	nur Wärme	Wärme und Feuchte	45%	60%	75%	$f_{IEC}$	$g_{IEC,u}$	$g_{IEC,o}$
1	x						x						1,000	-	-
2	x							x		x			0,588	0,052	0,070
3	x							x			x		0,462	0,066	0,076
4	x							x				x	0,351	0,076	0,075
5		x		x			x						1,000	-	-
6		x		x				x		x			0,691	0,031	0,005
7		x		x				x			x		0,590	0,041	0,000
8		x		x				x				x	0,496	0,049	0,000
9		x		x					x	x			1,000	-	-
10		x		x					x		x		1,000	-	-
11		x		x					x			x	1,000	-	-
12		x			x		x						1,000	-	-
13		x			x			x		x			0,624	0,044	0,018
14		x			x			x			x		0,505	0,057	0,014
15		x			x			x				x	0,392	0,068	0,004
16		x			x				x	x			1,000	-	-
17		x			x				x		x		1,000	-	-
18		x			x				x			x	1,000	-	-
19		x				x	x						1,000	-	-
20		x				x		x		x			0,612	0,067	0,016
21		x				x		x			x		0,488	0,087	0,011
22		x				x		x				x	0,383	0,103	0,003
23		x				x			x	x			1,000	-	-
24		x				x			x		x		1,000	-	-
25		x				x			x			x	1,000	-	-
26			x	x			x						1,000	-	-
27			x	x				x		x			0,837	0,000	0,000
28			x	x				x			x		0,782	0,000	0,000
29			x	x				x				x	0,726	0,000	0,000
30			x	x					x	x			1,000	-	-
31			x	x					x		x		1,000	-	-
32			x	x					x			x	1,000	-	-
33			x		x		x						1,000	-	-
34			x		x			x		x			0,838	0,000	0,000
35			x		x			x			x		0,785	0,000	0,000
36			x		x			x				x	0,731	0,000	0,000
37			x		x				x	x			1,000	-	-
38			x		x				x		x		1,000	-	-
39			x		x				x			x	1,000	-	-
40			x			x	x						1,000	-	-
41			x			x		x		x			0,826	0,004	0,000

Tabelle 3: Kennwerttabelle für Reduktionsfaktoren durch indirekte Verdunstungskühlung

Die Umrechnung des Reduktionsfaktors  $f_{IEC}$  auf von 18 °C abweichende Soll-Temperaturen erfolgt analog zum Kennwertverfahren DIN V 18599 – 3 durch Extrapolation mittels vorgegebener Gradienten  $g$  aus der nachfolgenden Definition.

$$g = \frac{|\Delta f_{IEC}|}{|\Delta \vartheta_{HC}|} = \frac{|f_{IEC, \vartheta_{HC}, 12h} - f_{IEC, 18^\circ C, 12h}|}{|\vartheta_{HC} - 18^\circ C|}$$

Für die Berechnung der Hilfsenergien des Abluftbefeuchters in DIN V 18599 – 7 kann das dortige Rechenverfahren angewendet werden.

#### **4.2 Jährliche Komponentenlaufzeiten**

Benötigt wird zunächst die Pumpenlaufzeit für die Berechnung des Hilfsenergiebedarfs nach DIN V 18599 - 7, die sich aus der tatsächlichen Anlagenbetriebszeit und der relativen Komponentenlaufzeit nach DIN V 18599 – 3 Anhang B errechnet. Tabelle 4 liefert die notwendigen Ergänzungen für den Abluftbefeuchter. Die Werte sind durch Auszählung der stündlich simulierten Betriebsstunden entstanden.

Varianten-Nr.	Feuchteanforderung			Befeuchter-Typ			WRG-Typ			Rückwärmzahl			relative Komponentenlaufzeit Abluftbefeuchter $t_{V,mech} = 12$ h Gesamtjahr	
	keine	mit Toleranz	ohne Toleranz	Verdunstung nicht regelbar	verdunstung regelbar	Dampfbefeuchter	keine	nur Wärme	Wärme und Feuchte	45%	60%	75%	$\vartheta_{V,mech} = 14$ °C	$\vartheta_{V,mech} = 22$ °C
1	x						x						-	-
2	x							x		x			0,375	0,140
3	x							x			x		0,375	0,140
4	x							x				x	0,376	0,140
5		x		x			x						-	-
6		x		x				x		x			0,427	0,268
7		x		x				x			x		0,427	0,268
8		x		x				x				x	0,429	0,268
9		x		x					x	x			-	-
10		x		x					x		x		-	-
11		x		x					x			x	-	-
12		x			x		x						-	-
13		x			x			x		x			0,358	0,159
14		x			x			x			x		0,358	0,159
15		x			x			x				x	0,359	0,159
16		x			x				x	x			-	-
17		x			x				x		x		-	-
18		x			x				x			x	-	-
19		x				x	x						-	-
20		x				x		x		x			0,376	0,165
21		x				x		x			x		0,376	0,165
22		x				x		x				x	0,377	0,165
23		x				x			x	x			-	-
24		x				x			x		x		-	-
25		x				x			x			x	-	-
26			x	x			x						-	-
27			x	x				x		x			0,342	0,365
28			x	x				x			x		0,343	0,365
29			x	x				x				x	0,343	0,365
30			x	x					x	x			-	-
31			x	x					x		x		-	-
32			x	x					x			x	-	-
33			x		x		x						-	-
34			x		x			x		x			0,316	0,278
35			x		x			x			x		0,316	0,278
36			x		x			x				x	0,316	0,278
37			x		x				x	x			-	-
38			x		x				x		x		-	-
39			x		x				x			x	-	-
40			x			x	x						-	-
41			x			x		x		x			0,391	0,297
42			x			x		x			x		0,391	0,297
43			x			x		x				x	0,392	0,297
44			x			x			x	x			-	-
45			x			x			x		x		-	-
46			x			x			x			x	-	-

Tabelle 4: Relative Komponentenlaufzeit des Abluftbefeuchters (DIN V 18599 – 3 Anhang B)

Der Vergleich der relativen Komponentenlaufzeiten eines konventionellen Kühlers (ohne indirekte Verdunstungskühlung) und der simulierten Laufzeiten des Abluftbefeuchters zeigen entsprechend Abbildung 24 eine gute Übereinstimmung. Im Sinne einer einfachen Normengestaltung kann daher in guter Näherung die Laufzeit des Abluftbefeuchters mit der Laufzeit des konventionellen Kühlers gleichgesetzt werden.

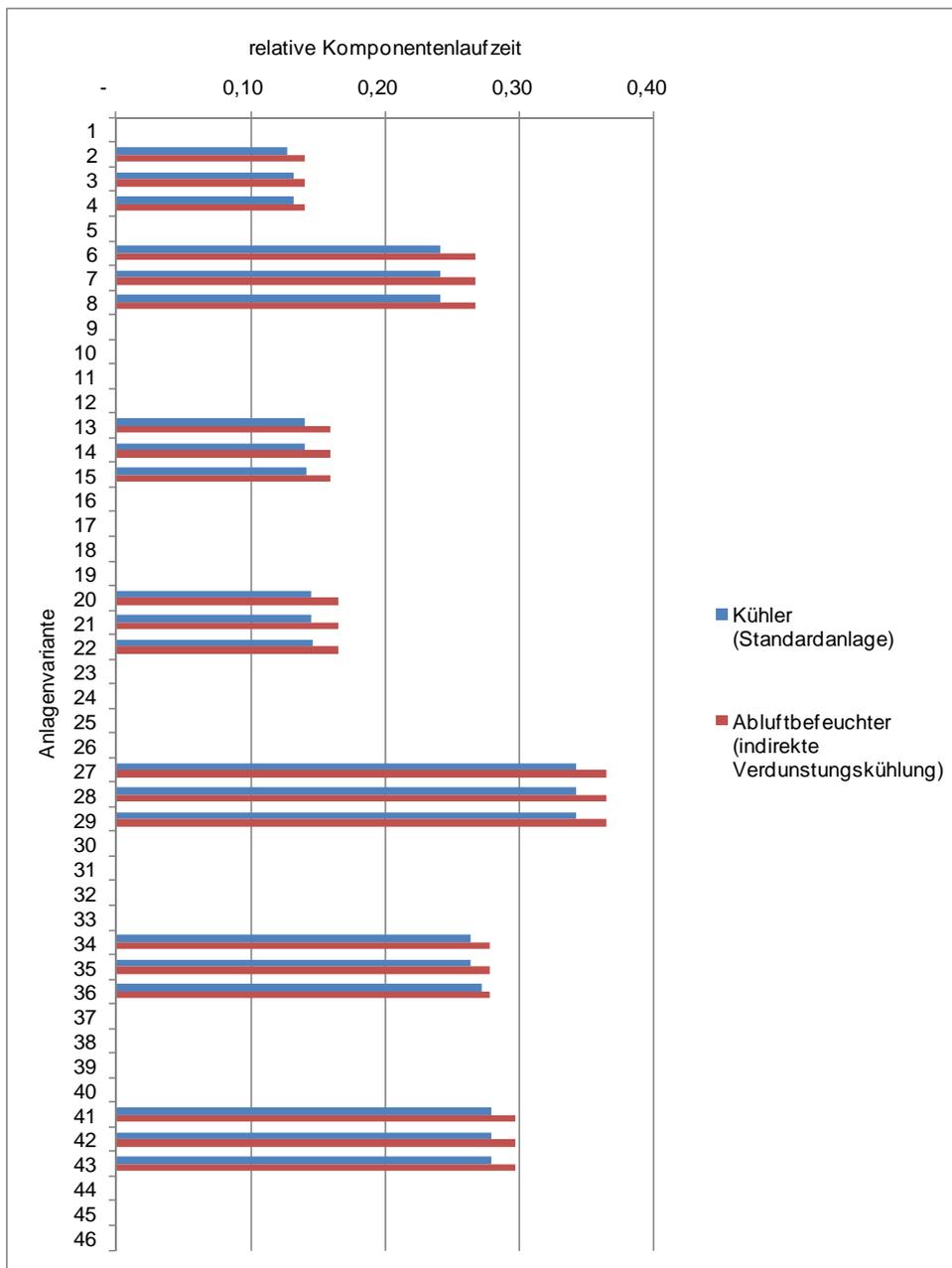


Abbildung 24: Vergleich der Komponentenlaufzeit des Luftkühlers (konventionelle Anlage) und des Abluftbefeuchters (indirekte Verdunstungskühlung) Zulufttemperatur 22 °C

In der Übergangszeit kann der Einsatz maschinell erzeugter Kälte zeitweilig durch die indirekte Verdunstungskühlung vollständig substituiert werden. Dadurch verringert sich die Laufzeit des Luftkühlers, was Auswirkungen auf den Hilfsenergiebedarf hätte.

Die relative Komponentenlaufzeit des Standard-Kühlers kann durch Multiplikation mit dem Reduktionsfaktor  $f_{t,IEC}$  gemäß Tabelle 5 reduziert werden, wenn die nachfolgenden Voraussetzungen vorliegen:

- Soll-Zulufttemperatur  $\vartheta_{V,mech} \geq 18 \text{ °C}$
- keine Feuchteanforderungen oder Feuchteanforderungen mit Toleranzbereich.

In allen übrigen Fällen wirkt sich die indirekte Verdunstungskühlung zwar auf den Nutzenergiebedarf, nicht jedoch auf die Laufzeit aus.

	Rückwärmzahl	$\vartheta_{V,mech} = 18 \text{ °C}$	$\vartheta_{V,mech} = 22 \text{ °C}$
Keine Feuchteanforderungen	45 %	0,94	0,53
	60 %	0,87	0,39
	75 %	0,81	0,26
Feuchteanforderungen mit Toleranzbereich	45 %	0,96	0,68
	60 %	0,93	0,58
	75 %	0,87	0,50

Tabelle 5: Reduktionsfaktor  $f_{t,IEC}$  für die relative Komponentenlaufzeit des Luftkühlers bei indirekter Verdunstungskühlung

### 4.3 Maximale Komponentenleistung

Die maximale Leistung des RLT-Kühlers verringert sich bei Einsatz der indirekten Verdunstungskühlung ebenfalls. Das in DIN V 18599 beschriebene direkte Berechnungsverfahren kann grundsätzlich beibehalten werden, wenn ein korrigierter Abluftzustand „Sommer“ in Tabelle 6 der Norm eingeführt wird, da der Kälterückgewinn durch das WRG-System im Verfahren bereits implementiert ist. Der korrigierte Zustand, der dem Luftzustand nach dem Abluftbefeuchter entspricht, ergibt

sich näherungsweise aus der gleichen Abluftenthalpie, wie in Tabelle 6 bereits aufgeführt, und neuen Austrittstemperaturen und –feuchten, die sich aus der Annahme einer relativen Feuchte am Befeuchteraustritt von 95 % ergeben.

Tabelle 6 der Norm wäre um die nachfolgend aufgeführte Zeile zu ergänzen.

<b>Sommer,</b> bei indirekter Verdunstungs- kühlung	Keine Feuchteanforderungen	$\vartheta_{ABL,So}$	°C	20,3
		$x_{ABL,So}$	kg/kg	0,014
		$h_{ABL,So}$	kJ/kg	56,9
	Feuchteanforderungen mit Toleranz	$\vartheta_{ABL,So}$	°C	19,7
		$x_{ABL,So}$	kg/kg	0,014
		$h_{ABL,So}$	kJ/kg	54,3
	Feuchteanforderungen ohne Toleranz	$\vartheta_{ABL,So}$	°C	17,1
		$x_{ABL,So}$	kg/kg	0,012
		$h_{ABL,So}$	kJ/kg	46,7

Tabelle 6: Ergänzung von DIN V 18599 Teil 3 Tabelle 6 für den Fall der indirekten Verdunstungskühlung

#### 4.4 Teillastfaktoren Kälteerzeugung

Unter Verwendung der neuen Lastprofile wurde der Einfluss der Indirekten Verdunstungskühlung auf die Teillastkennwerte der Kältemaschinen durch den reduzierten maschinellen Deckungsbeitrag untersucht. Die Untersuchungen (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8) zeigen, dass die Abweichungen der PLV-Werte und der Nutzungsgrade der Rückkühler 5% nicht überschreiten.

Lastverlauf \ Faktor	PLV_f1 (basic)												
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
RLT_2	0.95	1.20	0.65	0.46	0.79	0.82	0.88	1.36	1.15	1.27	0.87	1.43	1.62
RLT_3	0.94	1.19	0.66	0.47	0.80	0.84	0.88	1.35	1.15	1.28	0.89	1.43	1.60
RLT_4	0.94	1.19	0.67	0.49	0.82	0.85	0.90	1.33	1.16	1.28	0.91	1.42	1.59
RLT_6	0.97	1.22	0.64	0.45	0.77	0.81	0.87	1.39	1.19	1.31	0.88	1.50	1.70
RLT_7	0.96	1.21	0.65	0.46	0.78	0.82	0.88	1.38	1.19	1.31	0.89	1.49	1.68
RLT_8	0.95	1.20	0.66	0.46	0.79	0.82	0.88	1.36	1.19	1.31	0.91	1.48	1.67
RLT_13	0.95	1.20	0.64	0.45	0.78	0.82	0.87	1.37	1.15	1.27	0.86	1.44	1.62
RLT_14	0.95	1.19	0.65	0.46	0.80	0.83	0.88	1.35	1.15	1.27	0.87	1.43	1.61
RLT_15	0.94	1.19	0.66	0.48	0.81	0.84	0.89	1.34	1.16	1.28	0.89	1.42	1.60
RLT_20	0.95	1.20	0.64	0.45	0.78	0.82	0.87	1.37	1.15	1.28	0.86	1.44	1.63
RLT_21	0.95	1.20	0.65	0.46	0.80	0.83	0.88	1.36	1.15	1.28	0.88	1.44	1.62
RLT_22	0.94	1.19	0.66	0.48	0.81	0.84	0.89	1.34	1.16	1.28	0.90	1.43	1.60
RLT_27	0.94	1.19	0.64	0.45	0.78	0.81	0.87	1.36	1.18	1.31	0.90	1.49	1.69
RLT_28	0.94	1.19	0.65	0.46	0.79	0.82	0.87	1.35	1.19	1.31	0.91	1.48	1.68
RLT_29	0.94	1.19	0.65	0.47	0.79	0.83	0.88	1.34	1.19	1.31	0.92	1.48	1.67
RLT_34	0.94	1.18	0.65	0.46	0.79	0.82	0.87	1.35	1.17	1.30	0.91	1.47	1.66
RLT_35	0.93	1.18	0.65	0.47	0.80	0.83	0.88	1.34	1.18	1.30	0.92	1.46	1.65
RLT_36	0.93	1.18	0.66	0.48	0.81	0.84	0.88	1.33	1.18	1.30	0.93	1.46	1.64
RLT_41	0.94	1.19	0.64	0.46	0.78	0.82	0.87	1.36	1.18	1.31	0.90	1.48	1.68
RLT_42	0.94	1.19	0.65	0.46	0.79	0.83	0.88	1.35	1.19	1.31	0.92	1.48	1.67
RLT_43	0.94	1.19	0.66	0.47	0.80	0.83	0.88	1.34	1.19	1.31	0.93	1.48	1.66

Tabelle 7: PLV / f1 ohne adiabate Verdunstungskühlung

Lastverlauf \ Faktor	PLV_f1 (adiabat)												
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
RLT_2	0.96	1.20	0.63	0.44	0.76	0.80	0.86	1.38	1.14	1.26	0.83	1.44	1.63
RLT_3	0.96	1.20	0.64	0.45	0.78	0.81	0.87	1.37	1.14	1.27	0.85	1.44	1.62
RLT_4	0.95	1.19	0.65	0.45	0.78	0.81	0.87	1.35	1.14	1.27	0.85	1.43	1.61
RLT_6	0.97	1.22	0.62	0.43	0.74	0.78	0.85	1.41	1.18	1.32	0.85	1.52	1.73
RLT_7	0.97	1.21	0.63	0.43	0.75	0.79	0.85	1.39	1.19	1.32	0.86	1.53	1.73
RLT_8	0.96	1.19	0.63	0.44	0.75	0.79	0.85	1.36	1.19	1.32	0.88	1.52	1.72
RLT_13	0.96	1.21	0.63	0.44	0.76	0.80	0.86	1.38	1.14	1.27	0.83	1.45	1.64
RLT_14	0.96	1.20	0.64	0.45	0.77	0.81	0.87	1.37	1.14	1.27	0.84	1.44	1.63
RLT_15	0.95	1.18	0.65	0.46	0.78	0.81	0.87	1.34	1.14	1.27	0.85	1.43	1.61
RLT_20	0.96	1.21	0.63	0.44	0.76	0.80	0.86	1.38	1.14	1.27	0.83	1.45	1.65
RLT_21	0.96	1.20	0.64	0.44	0.77	0.81	0.87	1.37	1.14	1.27	0.84	1.44	1.63
RLT_22	0.95	1.18	0.65	0.45	0.78	0.81	0.87	1.34	1.14	1.27	0.85	1.43	1.61
RLT_27	0.94	1.19	0.63	0.44	0.76	0.80	0.86	1.36	1.18	1.31	0.89	1.50	1.70
RLT_28	0.94	1.19	0.64	0.45	0.77	0.81	0.86	1.36	1.19	1.32	0.90	1.50	1.70
RLT_29	0.94	1.18	0.64	0.45	0.78	0.81	0.87	1.34	1.19	1.32	0.91	1.50	1.70
RLT_34	0.93	1.18	0.64	0.45	0.78	0.81	0.86	1.35	1.17	1.30	0.90	1.48	1.67
RLT_35	0.93	1.18	0.64	0.45	0.78	0.82	0.87	1.34	1.18	1.31	0.91	1.48	1.67
RLT_36	0.93	1.17	0.65	0.46	0.80	0.83	0.87	1.33	1.19	1.31	0.92	1.48	1.67
RLT_41	0.94	1.19	0.64	0.45	0.78	0.81	0.87	1.36	1.19	1.32	0.90	1.50	1.70
RLT_42	0.94	1.19	0.65	0.46	0.79	0.82	0.87	1.36	1.19	1.32	0.91	1.50	1.69
RLT_43	0.94	1.19	0.65	0.46	0.80	0.83	0.88	1.34	1.20	1.33	0.93	1.50	1.69

Tabelle 8: PLV / f1 mit adiabater Verdunstungskühlung

Im Ergebnis der exemplarischen Berechnungen ist keine Anpassung der aktuellen Teillastkennwerte für die adiabate Verdunstungskühlung erforderlich.

## AP 5 Sorptionsgestützte Kühlung / DEC-Technik

### 5.1 Allgemein

Bei der DEC-Technik handelt es sich um einen lufttechnischen Vollklimaprozess, der maschinell erzeugte Kälte in vielen Fällen vollständig substituieren kann. Die Lufttemperatur kann durch direkte und indirekte Wasserverdunstung abgesenkt werden, wenn die Außenluft durch einen Sorptionsvorgang vorgetrocknet wird. Das Gesamtverfahren benötigt Wärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau als Absorptionskältemaschinen und ist deshalb auch für den Einsatz regenerativer Energien (Stichwort: „solare Klimatisierung“) interessant. Bislang war es nicht möglich, eine Bewertung dieses Verfahrens durch die DIN V 18599 - 3 vornehmen zu können. Ziel der Untersuchung soll ein Vorschlag sein, auf Basis der bestehenden Anlagenmatrix den energetischen Effekt der DEC-Technik rechnerisch abzubilden.

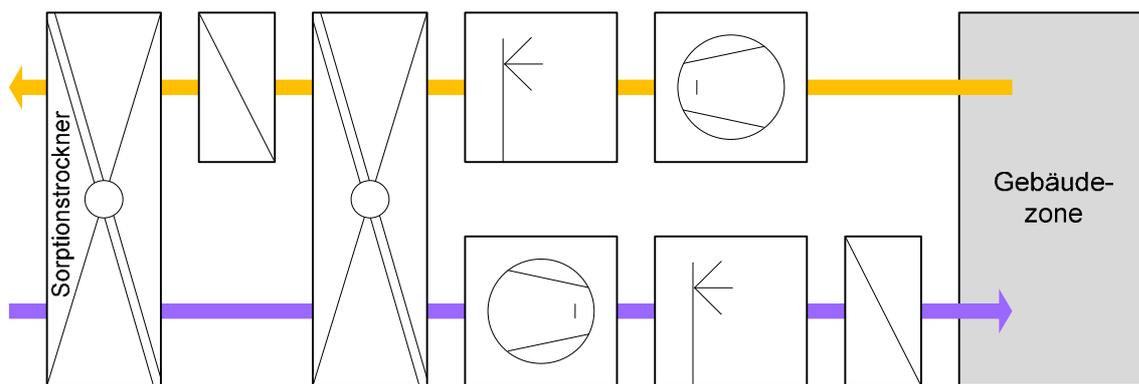


Abbildung 25: Schaltschema – sorptionsgestützte Vollklimaanlage mit rotierendem Sorptionstrockner

Die bekannten technischen Lösungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Anlagen mit festen Sorbentien (in der Regel Rotationsspeicher, beschichtet mit hygroskopischen Materialien wie Silicagel oder LiCl)
- Anlagen mit flüssigen Sorbentien (in der Regel betrieben mit umlaufenden wässrigen Salzlösungen wie LiCl).

Weitere Unterscheidungsmerkmale sind:

- Anlagen mit vollständigem Verzicht auf konventionelle Kälteerzeugung
- Anlagen zur Unterstützung / Minimierung der konventionellen Kälteerzeugung.

Der Energiebedarf für die Speicherregenerierung (Wärme für die Desorption) korreliert grundsätzlich mit dem Nutzkältebedarf einer konventionellen Klimaanlage. Je niedriger die Zulufttemperatur und je geringer die Zuluftfeuchte im Sommer, desto höher ist der Heizbedarf für die Desorption.

Es wurde angestrebt, den mit dem bestehenden Verfahren zu ermittelnden Nutzenergiebedarf Kälte mit Hilfe einer saisonalen Arbeitszahl in ein Nutzwärmeäquivalent umzurechnen. Das Ziel sollte darin bestehen, ein saisonales Wärmeverhältnis analog zu den Absorptions-Kaltwassermaschinen mit Hilfe des Simulationsmodells zu ermitteln.

## 5.2 Modellbildung Sorptionstrockner

In einem ersten Schritt musste die bestehende Simulationssoftware SIMHX um ein Modell für den Sorptionstrockner ergänzt werden. Der Trocknungsprozess (Absorption) führt zu einer Abnahme des Wasserdampfgehaltes in der Außenluft bei gleichzeitigem Anstieg der Temperatur und Enthalpie. Für die Berechnung von Sorptionstrocknern wurde auf Messergebnisse einer früheren Untersuchung am ILK [1] zurückgegriffen. Für den vorliegenden Fall konnte die Anzahl der freien Parameter reduziert werden. Nenndrehzahl und Nennluftgeschwindigkeit konnten konstant gehalten werden. Notwendig war lediglich die Ermittlung des Prozessluftaustritts bei vorgegebenen:

- Lufteintrittszuständen auf der Prozessluftseite
- Lufteintrittszuständen auf der Regenerationsluftseite.

Die erzielbare Grenzfeuchte ist durch die relative Feuchte der Luft am Eintritt auf der Regenerationsseite vorgegeben. Die Enthalpiezunahme auf der Prozessluftseite hängt ähnlich wie bei Wärmerückgewinnern von der maximalen Enthalpiedifferenz am Rotor ab.

In Analogie zum Temperaturverhältnis (Rückwärmzahl nach VDI 2071) wurden zwei Verhältnis- bzw. Übertragungsfaktoren für die Änderung der relativen Feuchte und der Enthalpie auf der Prozessluftseite definiert.

$$f_h = \frac{h_{proz,2} - h_{proz,1}}{h_{reg,1} - h_{proz,1}}$$

$$f_\varphi = \frac{\varphi_{proz,2} - \varphi_{proz,1}}{\varphi_{reg,1} - \varphi_{proz,1}}$$

Die Beträge der beiden Übertragungsfaktoren wurden aus den gemessenen Leistungsdaten eines LiCl-Rotors 0 zurückgerechnet.

Die Darstellung im Mollier-h,x-Diagramm (Abbildung 26) verdeutlicht den Zusammenhang grafisch.

PROZESS								REGENERATION				Übertragungs-faktoren	
EINTRITT				AUSTRITT				EINTRITT				$f_h$	$f_\varphi$
$t$	$x$	$h$	$\varphi$	$t$	$x$	$h$	$\varphi$	$t$	$x$	$h$	$\varphi$		
$^{\circ}\text{C}$	$\text{g/kg}$	$\text{kJ/(kgK)}$	-	$^{\circ}\text{C}$	$\text{g/kg}$	$\text{kJ/(kgK)}$	-	$^{\circ}\text{C}$	$\text{g/kg}$	$\text{kJ/(kgK)}$	-	-	-
28,06	10,07	54,05	43%	42,57	5,92	58,27	11%	60,00	8,08	81,71	7%	0,15	0,87
28,16	10,04	54,08	42%	43,03	5,80	58,43	11%	60,00	6,92	78,68	6%	0,18	0,86
27,90	10,23	54,30	44%	41,58	6,47	58,68	13%	60,00	12,09	92,19	10%	0,12	0,90
28,07	10,18	54,34	43%	41,41	6,54	58,68	13%	60,00	13,09	94,80	10%	0,11	0,91
27,94	10,26	54,41	44%	37,19	7,66	57,25	19%	50,00	13,09	84,46	17%	0,09	0,91
28,01	10,13	54,15	43%	37,76	7,34	57,01	18%	50,00	12,04	81,73	16%	0,10	0,91
27,94	10,02	53,80	43%	39,53	6,36	56,30	14%	50,00	7,09	68,89	9%	0,17	0,85
27,97	10,19	54,27	43%	39,42	6,58	56,75	15%	50,00	8,08	71,46	11%	0,14	0,87
28,03	10,01	53,87	42%	44,94	5,56	59,76	9%	70,00	7,03	89,20	4%	0,17	0,85
27,94	10,12	54,06	43%	44,87	5,58	59,74	9%	70,00	8,27	92,46	4%	0,15	0,87
27,94	10,09	53,98	43%	44,17	5,81	59,62	10%	70,00	12,18	102,75	6%	0,12	0,89
28,00	10,14	54,17	43%	44,22	5,89	59,88	10%	70,00	12,92	104,70	7%	0,11	0,90
								Mittelwerte:				0,13	0,88

Tabelle 9: Ermittlung der Übertragungsfaktoren für den Sorptionstrockner aus vorhandenen Messdaten

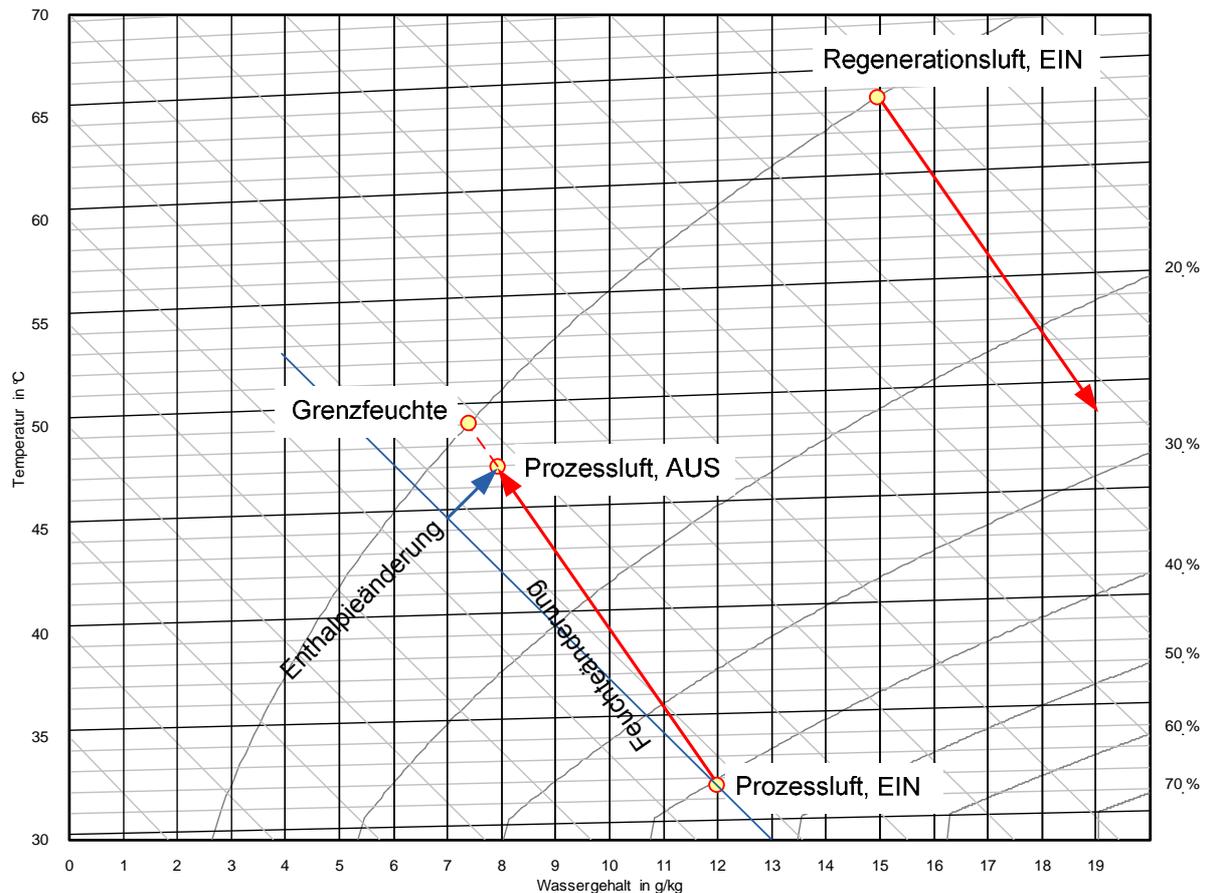


Abbildung 26: Darstellung der Luftzustandsänderung im Mollier-h,x-Diagramm

Das so gewonnene Sorptionstrocknermodell wurde in die bestehende Simulationssoftware SIMHX implementiert. Nach Erarbeitung und Programmierung einer Regelstrategie für Temperatur und Feuchte stand ein adäquates Rechenmodell zur Bestimmung der Energiekennwerte in zahlreichen Varianten zur Verfügung.

Weitere Festlegungen waren:

- Rückwärmzahl 75 % in Analogie zur Systematik DIN V 18599 – 3
- Ventilatorleistungen entsprechend Standardfall DIN V 18599 – 3
- Stützstellen für die Zulufttemperatur entsprechend DIN V 18599 – 3
- Definitionen der Soll-Feuchtebereiche entsprechend DIN V 18599 – 3.

Der Lastfall „keine Feuchteanforderungen“ musste für die sorptionsgestützten Klimasysteme modifiziert werden. Da der Zuluftbefeuchter im Prozess zur direkten Verdunstungskühlung eingesetzt wird, würde ohne sommerliche Feuchtebegrenzungen unerträgliche Schwülezustände entstehen.

Aus diesem Grund wurde davon ausgegangen, dass im Fall „keine Feuchteanforderungen“ die gleiche maximale Feuchtegrenze von 11 g/kg wie im Lastfall „Feuchteanforderungen mit Toleranz“ regelungstechnisch einzuhalten ist.

Dies hatte zur Folge, dass eine Unterscheidung zwischen den beiden Lastfällen im Kühlfall nicht mehr begründet ist, was das Verfahren wiederum vereinfacht.

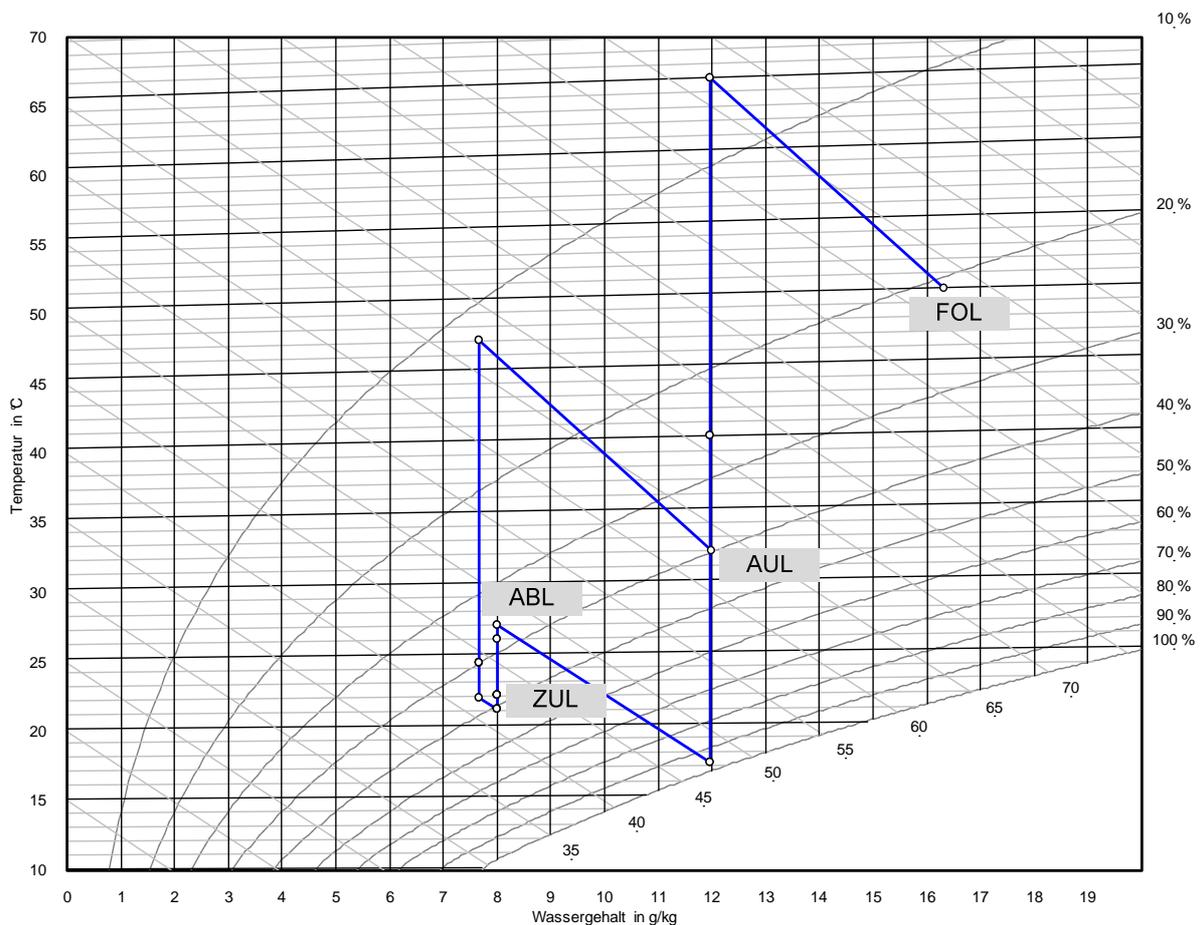


Abbildung 27: Prozessverlauf im Mollier-h,x-Diagramm bei Auslegungsbedingungen: „Feuchteanforderungen ohne Toleranz“ oder „keine Feuchteanforderungen“ / Zulufttemperatur 22 °C

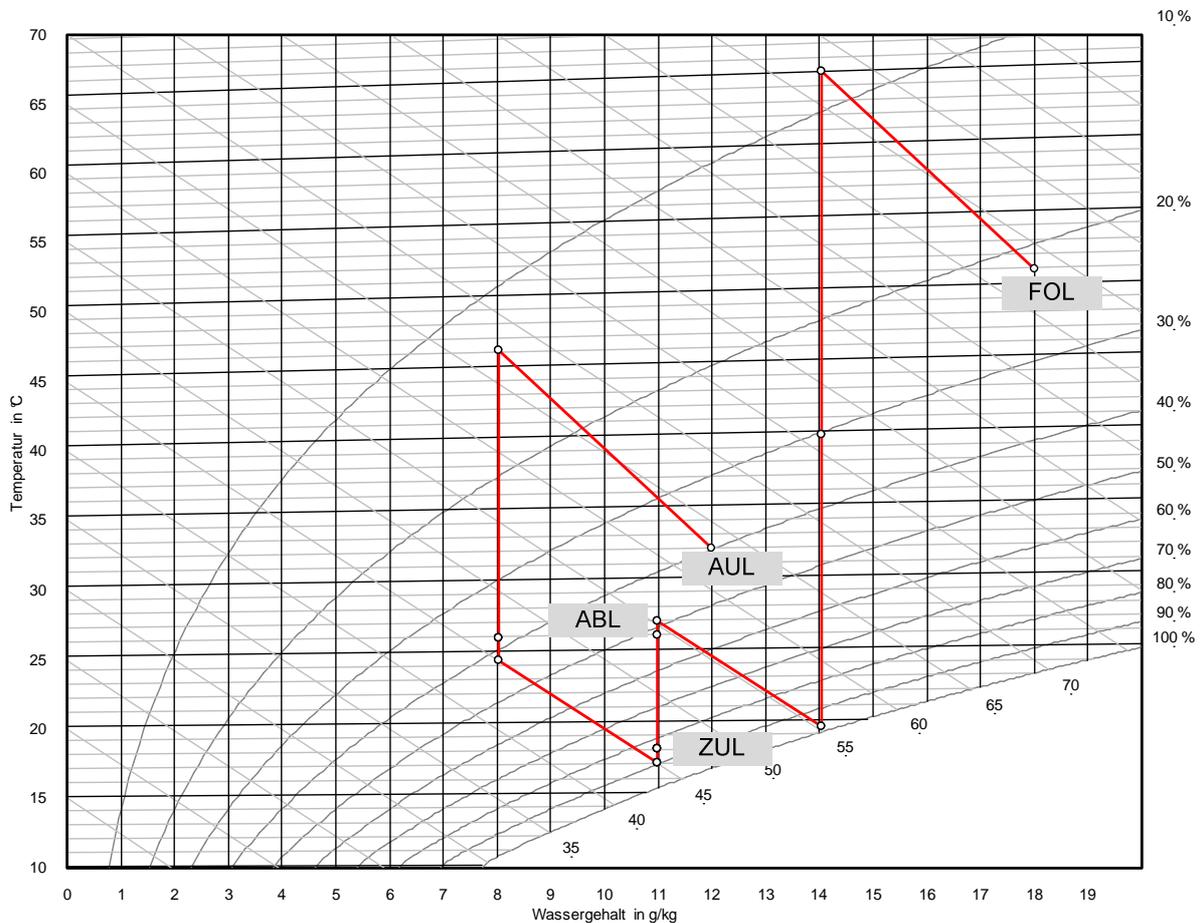


Abbildung 28: Prozessverlauf im Mollier-h,x-Diagramm bei Auslegungsbedingungen: Feuchteanforderungen mit Toleranz / Zulufttemperatur 18 °C

### 5.3 Simulationsergebnisse und Bewertungsmethodik

Die sorptionsgestützte Klimatisierung wirkt sich im Vergleich zu einer analogen konventionellen Klimaanlage energetisch wie folgt aus:

- der Nutzenergiebedarf Kälte wird deutlich substituiert
- es entsteht ein Nutzenergiebedarf Wärme für die Regeneration des Sorptionstrockners
- der Energiebedarf zur Nacherwärmung im Entfeuchtungsfall reduziert sich bzw. entfällt.

Das ursprüngliche Ziel, den Einsatz an Regenerationswärme durch ein saisonales Wärmeverhältnis  $\zeta$  zu beschreiben, ließe sich definitorisch auf zwei verschiedenen Wegen lösen.

- $\zeta_1$ : definiert, als substituierte Nutzkälte bei konventioneller Kühlung im Verhältnis zur eingesetzten Regenerationswärme
- $\zeta_2$ : definiert, als substituierte Nutzkälte bei konventioneller Kühlung unter Berücksichtigung der indirekten Verdunstungskühlung im Verhältnis zur eingesetzten Regenerationswärme

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erbrachte folgende Ergebnisse.

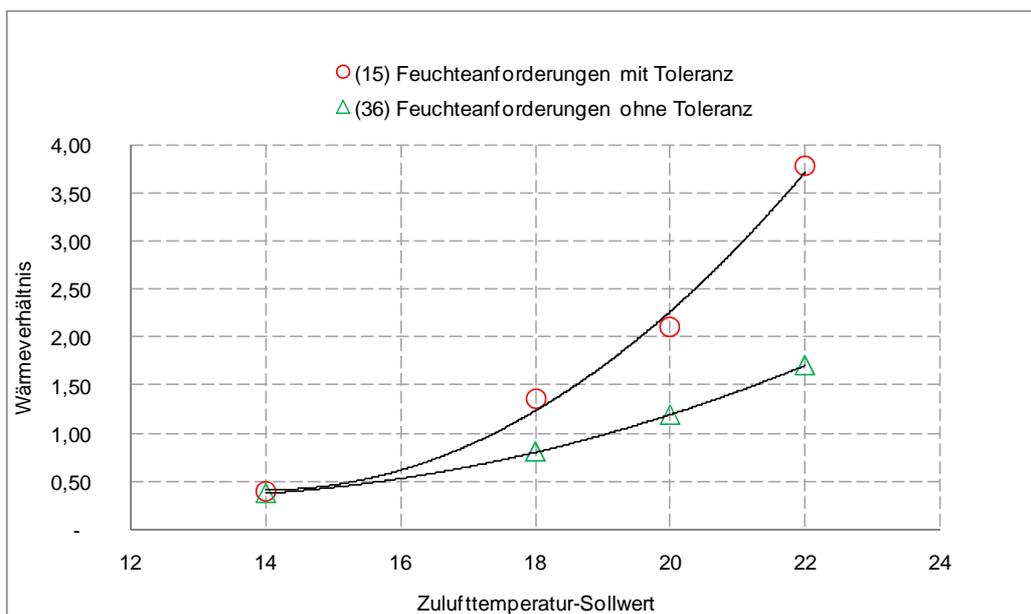


Abbildung 29: Saisonales Wärmeverhältnis  $\zeta_1$

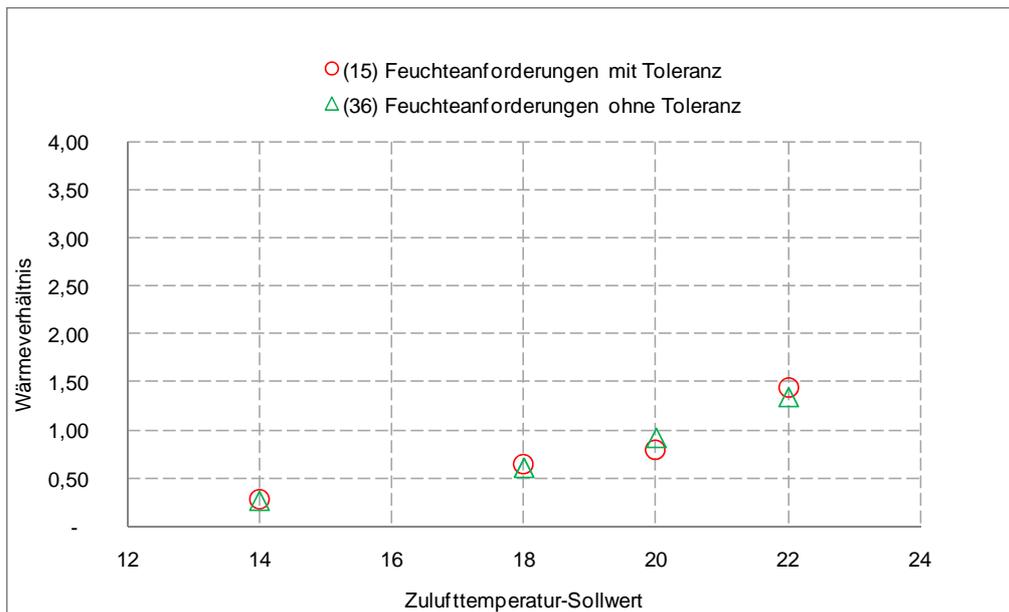


Abbildung 30: Saisonales Wärmeverhältnis  $\zeta_2$

Es wird deutlich, dass der Bezug auf die substituierte Nutzkälte mit Berücksichtigung der indirekten Verdunstungskühlung zu einer besseren Korrelation mit der eingesetzten Regenerationswärme führt. Dies ist plausibel, da die indirekte Verdunstungskühlung ein Bestandteil des sorptionsgestützten Klimaprozesses ist. Mit Einsatz von  $\zeta_2$  vereinfacht sich das Verfahren, da als einziger freier Parameter die Zuluft-Solltemperatur verbleibt.

Der Regenerationswärmebedarf errechnet sich dann wie folgt:

$$\dot{Q}_{h,reg} = \zeta_2(\vartheta_{V,mech}) \cdot f_{IEC} \cdot \dot{Q}_C$$

Deutlich wird, dass die Effizienz mit sinkenden Zulufttemperaturen deutlich nachlässt. Für einen Zulufttemperatur-Sollwert von 14 °C ist das Verfahren energetisch kaum geeignet. Daher wird vorgeschlagen, von vornherein eine Verfahrensbegrenzung auf 18 °C vorzunehmen.

Bei niedrigen Zuluft-Solltemperaturen oder Zuluft-Sollfeuchten wird eine konventionelle Nachkühlung erforderlich. Dies zeigen bereits Abbildung 27 und Abbildung 28. Für den Lastfall „Feuchteanforderungen mit Toleranz“ ist der Effekt vernachlässigbar, wenn die Anwendung auf Zulufttemperaturen  $\geq 18$  °C begrenzt wird.

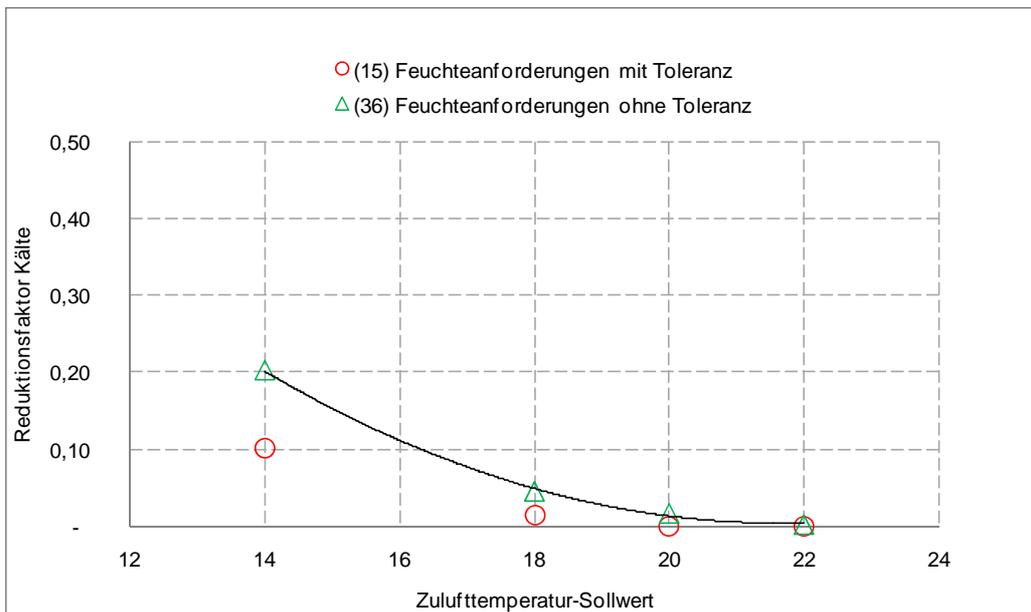


Abbildung 31: Reduktionsfaktor Nutzkälte (Basiswert inkl. indirekter Verdunstungskühlung)

Die Reduktion des Energiebedarfs für die Nacherwärmung im Entfeuchtungsfall ergibt sich aus nachfolgendem Bild. Für den Lastfall „Feuchteanforderungen mit Toleranz“ ist der Effekt vernachlässigbar.

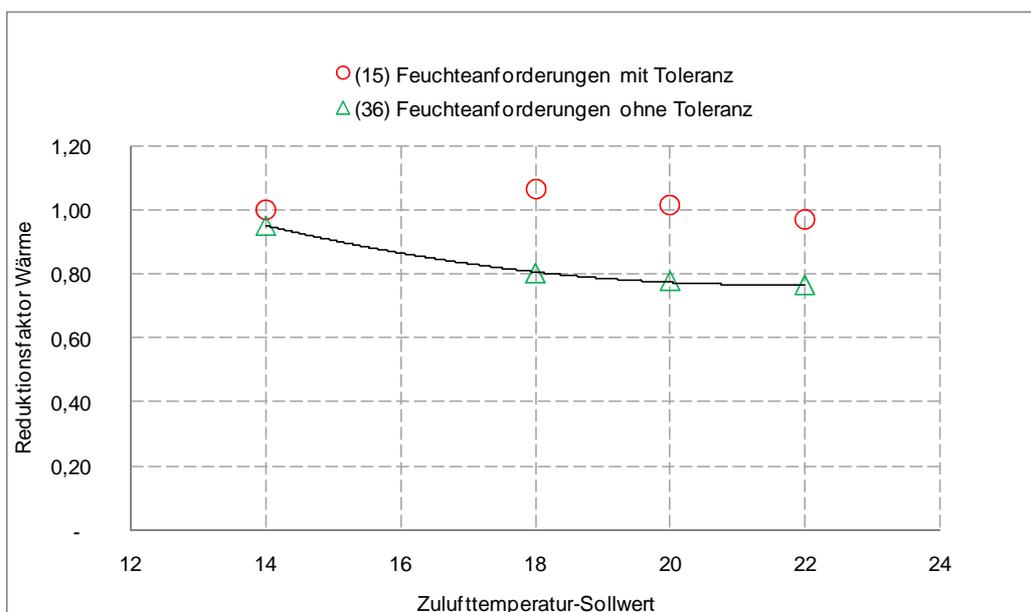


Abbildung 32: Reduktionsfaktor Nutzwärme (Nacherwärmung im Entfeuchtungsfall)

#### 5.4 Jährliche Komponentenlaufzeit

Die Komponentenlaufzeit des Abluftbefeuchters kann analog Abschnitt 4.2 berechnet werden. Ebenso muss sich die Laufzeit des Regenerationsluftherhitzers mit der Laufzeit des Kühlers im Fall der indirekten Verdunstungskühlung decken.

Die Laufzeit des konventionellen Luftkühlers reduziert sich dagegen bei Sorptionsunterstützung deutlich. Tabelle 10 gibt die Reduktionsfaktoren an. Analog Abschnitt 5.3 ist die Laufzeit für den Lastfall „Feuchteanforderungen mit Toleranz“ vernachlässigbar.

Varianten		relative Komponentenlaufzeit
		Kühler
(15) Feuchteanforderungen mit Toleranz	18 °C	0,003
	20 °C	0,000
	22 °C	0,000
(36) Feuchteanforderungen ohne Toleranz	18 °C	0,051
	20 °C	0,024
	22 °C	0,005

Tabelle 10: Relative Komponentenlaufzeit des Luftkühlers bei sorptionsgestützter Klimatisierung

#### 5.5 Maximale Komponentenleistung

Da einerseits:

- die Anzahl der verbleibenden Anlagenvarianten für die sorptionsgestützte Klimatisierung gering ist
- andererseits die Beschreibung eines direkten Rechenalgorithmus zur Bestimmung der maximalen Leistungen aufwendig ist

wird vorgeschlagen, die Leistungsdaten als spezifische, volumenstrombezogene Kennwerte direkt tabellarisch anzugeben.

Varianten		Maximale Auslegungsleistung Sommerfall	
		Kühler [W/(m <sup>3</sup> /h)]	Regenerationsluftherhitzer [W/(m <sup>3</sup> /h)]
(15) Feuchteanforderungen mit Toleranz	18 °C	0,53	8,43
	20 °C	-	7,54
	22 °C	-	4,96
(36) Feuchteanforderungen ohne Toleranz	18 °C	2,22	8,40
	20 °C	1,52	8,33
	22 °C	0,81	8,27

Tabelle 11: Spezifische maximale Komponentenleistungen bei sorptionsgestützter Klimatisierung

## AP 6 RLT-Anlagen-integrierte Kältetechnik

Aufgrund geringer Anforderungen an Aufstellflächen und der Möglichkeit des autarken Betriebes mit idealer Bedarfsanpassung werden in den letzten Jahren Kältemaschinen vermehrt direkt in RLT-Anlagen integriert. Durch die Vermeidung von Verteilungs-, Speicher und Übergabeverlusten arbeiten diese RLT-integrierten Kälte-Anlagen sehr wirtschaftlich. Im Unterschied zu konventionellen luft- oder wassergekühlten Kälteerzeugern erfolgt die Rückkühlung hier jedoch durch den Abluftstrom der RLT-Anlage. Die Teillastbedingungen sind damit nicht mit den bisher berücksichtigten Standardtechnologien vergleichbar. Eine energetische Bewertung mit dem Kennwertverfahren der DIN V 18599-7 ist daher derzeit nicht möglich.

Als RLT-integrierte Kältemaschinen kommen im wesentlichen luftgekühlte Kompressions-Kältemaschinen mit Kolben- und Scrollverdichtern zum Einsatz, deren Kondensator im Fortluftstrom der RLT-Anlage integriert ist. Zur Teillastregelung kommen folgende Regelarten zum Einsatz, die im Rahmen des Kennwertverfahrens abgebildet werden:

- Heißgasbypassregelung - Teillastregelart (4) nach DIN V 18599-7,
- Taktbetrieb (EIN/AUS) - Teillastregelart (A) nach DIN V 18599-7,
- Verdichterverbund - Teillastregelart (B) nach DIN V 18599-7,
- Digitaler Scrollverdichter - Teillastregelart (F) nach DIN V 18599-7.

Für diese Teillastregelarten existieren Teillastkennwerte über den gesamten Leistungsbereich  $PLV_n$  für die Standardrandbedingungen und Standardnutzungen nach DIN V 18599-7. Für die integrierte Kältetechnik erfolgt daher eine Umrechnung dieser Teillastkennwerte für die o.g. Teillastregelarten über die Carnot-Leistungszahl (analog dem Verfahren nach DIN V 18599-100) und den Verdichtergütegrad  $v$ . Abbildung 33 zeigt die diesbezügliche Approximation des Verdichtergütegrades in Abhängigkeit der Kondensationstemperatur im relevanten Temperaturbereich.

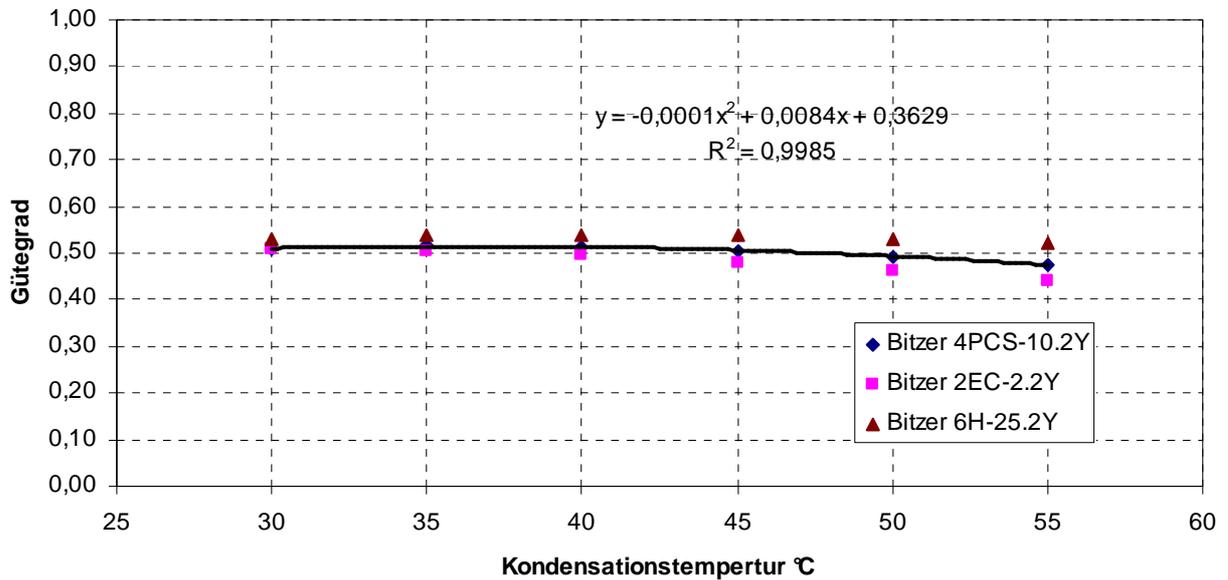


Abbildung 33: Verdichtergütegrad  $v$  in Abhängigkeit der Kondensationstemperatur für halbhermetische Kolbenverdichter

Tabelle 12 zeigt exemplarisch die Temperaturapproximation der vorhandenen PLV-Werte zur Ermittlung der Teillastfaktoren  $f_1$  und  $f_2$  für eine Kolben-/Scrollverdichterverbundanlage in Analogie zu den wassergekühlten Technologien.

Ablufttemperatur $T_{AB}$	Teillaststufe ( $Q/Q_{max}$ )	Teillastfaktor $PLV = f(T_{AB}, def)$	Temperatur- approxiamtion	PLV = $f_1 \times f_2$ $f_1=f(Q/Q_{max}), f_2=f(T_{AB}, var)$	
				$f_1$	$f_2$
12.0	0.1	1.60	0.45	0.87	1.83
14.2	0.2	1.75	0.41	1.03	1.70
16.5	0.3	1.66	0.37	1.05	1.58
18.7	0.4	1.56	0.32	1.06	1.47
20.9	0.5	1.42	0.27	1.03	1.38
23.1	0.6	1.40	0.23	1.08	1.29
25.3	0.7	1.32	0.17	1.09	1.21
27.6	0.8	1.21	0.12	1.07	1.13
29.8	0.9	1.10	0.06	1.03	1.07
32.0	1	1.00	0.00	1.00	1.00

Tabelle 12: Temperaturapproximation der PLV-Werte für eine mehrstufige Verdichterverbundanlage mit Teillastregelart (B)

Der Faktor  $f_1$  berücksichtigt das reale maschineninterne Teillastverhalten bei konstanten Rückkühlbedingungen. Dazu zählen die Verdichterverluste durch die Leistungsregelung (Verlust) und

die relative Überdimensionierung der Wärmeübertrager bei Teillast-Kältemittelstrom (Gewinn). Der Faktor  $f_2$  berücksichtigt die thermodynamische Ankopplung des Systems an die Außen- bzw. Ablufttemperatur.

Abbildung 34 zeigt die ermittelten Teillastfaktoren  $f_1$  für die betrachteten Verdichterteillastregelarten bei RLT-integrierten Kältetechnologien.

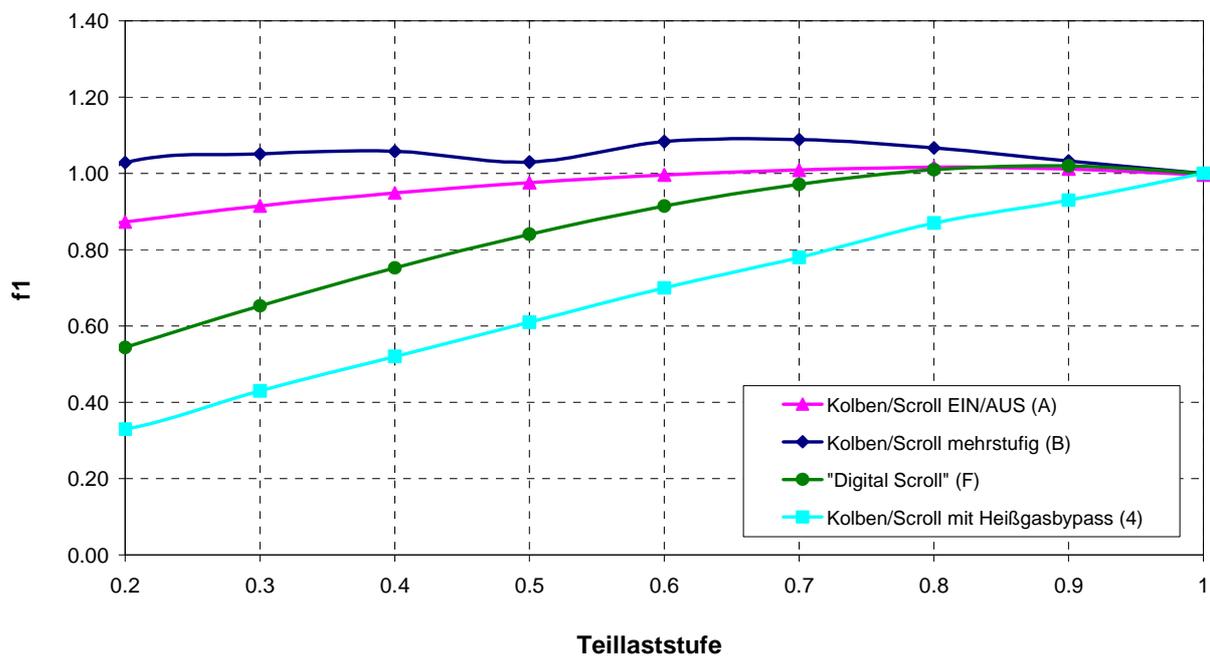


Abbildung 34: Teillastfaktor  $f_1$  für RLT-integrierte Kältetechnologien

Als wesentliche Einflussgröße auf die Effizienz dieser Kältemaschinen ist die variable Kondensatortemperatur (Ablufttemperatur nach WRG) zu berücksichtigen, insbesondere bei RLT-Anlagen, deren Kühlbedarf in Verbindung mit einer indirekten Verdunstungskühlung mit adiabater Abluftbefeuchtung bereitgestellt wird. Bei diesen RLT-Anlagen (Abbildung 35) ist die Ablufttemperatur nach der WRG und damit die Eintrittstemperatur in den (Fortluft-)Kondensator niedriger als bei konventioneller RLT-Anlagentechnik (Abbildung 36).

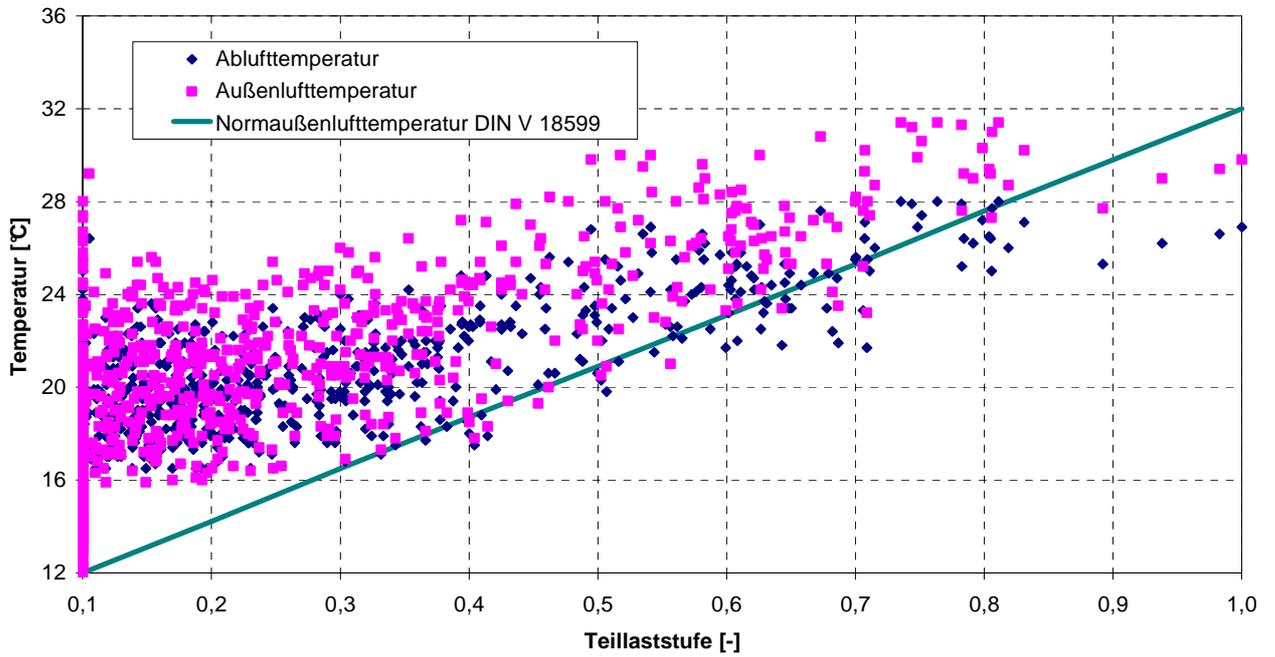


Abbildung 35: Außen- und Ablufttemperatur in Abhängigkeit der Teillaststufe (RLT29 mit Indirekter Verdunstungskühlung, Nutzung Büroraum)

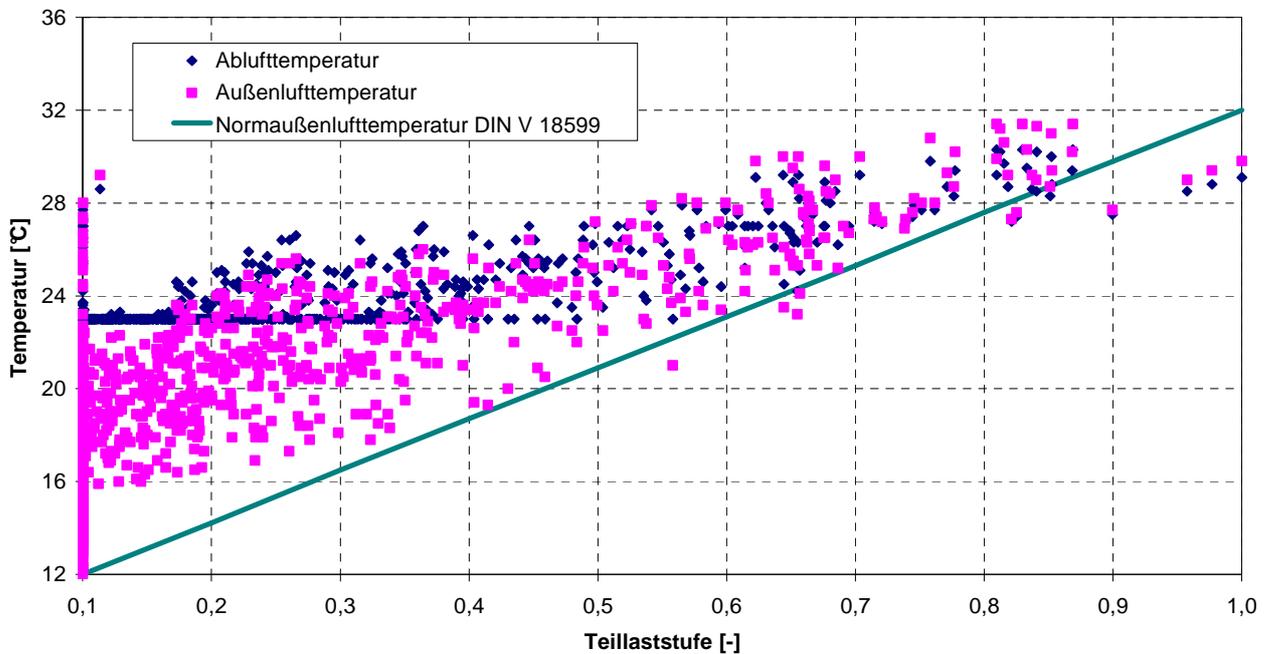


Abbildung 36: Außen- und Ablufttemperatur in Abhängigkeit der Teillaststufe (RLT29 ohne Indirekte Verdunstungskühlung, Nutzung Büroraum)

Die niedrigere Fortlufttemperatur führt bei leistungsregelbaren Kühltechnologien zu einer Verbesserung der Erzeugereffizienz (Erhöhung Teillastfaktor  $f_2$ ). Bei den RLT-integrierten Kühltechnologien ist daher eine Unterscheidung der Teillastkennwerte nach vorhandener und nicht vorhandener indirekter Verdunstungskühlung erforderlich.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Abluftvolumenströme in der Regel nicht dem erforderlichen Kondensator-Mindestluftvolumenstrom entsprechen und daher über einen anlagenseitigen Bypass normalerweise Außenluft in die Abluft beigemischt oder reiner Außenluftbetrieb gefahren wird. Die höhere Außenlufttemperatur führt zu einer Verschlechterung der Erzeugereffizienz (Reduzierung Teillastfaktor  $f_2$ ).

Zur Berücksichtigung der variablen Parameter Fortlufttemperatur und Fortluftvolumenstrom bei RLT-integrierten Technologien im Kennwertverfahren ist daher eine Unterscheidung der Teillastkennwerte in Abhängigkeit der Parameter

- Außenluftanteil und / oder
- Berücksichtigung der Indirekten Verdunstungskühlung

erforderlich. Zusätzlich sind, wie bei allen Technologien, die Art der RLT-Anlage und die Gebäudenutzung zu berücksichtigen, da diese Parameter über den Zeitpunkt des Kühlbedarfes entscheiden. So wird bei sehr guter Wärmerückgewinnung erst bei höheren Außenlufttemperaturen ein Betrieb der maschinellen Kühlung erforderlich sein. Bei einer Serverraumnutzung wird auch nachts ein Kühlbedarf entstehen, der im Bürogebäude zu dieser Zeit normalerweise nicht erforderlich ist.

Tabelle 13 zeigt, dass die Abhängigkeit vom RLT-Anlagentyp sowohl bei  $f_1$  als auch bei  $f_2$  nur in sehr geringem Maße gegeben ist. Es ist jedoch eine deutliche Abhängigkeit des Teillastfaktors  $f_2$  von der Lufttemperatur zu erkennen, wobei der reine Abluftbetrieb bei RLT-Anlagen ohne Indirekte Verdunstungskühlung (basic) aufgrund der im Jahresmittel höheren Temperaturen geringe Werte liefert. Bei RLT-Anlagen mit konstruktiv vorhandener Möglichkeit zur Integration der Indirekten Verdunstungskühlung (fettgedruckte Werte) kehrt sich der Effekt um, die Teillastfaktoren  $f_2$  bei Abluftbetrieb (adiabat) sind größer als bei reinem Außenluftbetrieb (basic).

Nutzungstyp		Einzel- und Gruppenbüro						
RLT	Faktor	f1 (basic)				f2 (basic)		f2 (adiabat)
		EIN/AUS	mehrstufig	Drehzahl	HGBP	T_AU	T_AB	T_AB
RLT_1		0.92	1.02	1.28	0.45	1.26	1.21	1.21
RLT_2		0.93	1.03	1.29	0.48	1.26	1.20	1.37
RLT_3		0.94	1.03	1.30	0.49	1.26	1.20	1.33
RLT_4		0.94	1.03	1.30	0.50	1.26	1.20	1.30
RLT_5		0.93	1.02	1.29	0.46	1.32	1.22	1.22
RLT_6		0.93	1.03	1.30	0.48	1.31	1.21	1.36
RLT_7		0.94	1.03	1.31	0.48	1.31	1.21	1.39
RLT_8		0.94	1.03	1.31	0.48	1.31	1.21	1.37
RLT_9		0.93	1.03	1.31	0.48	1.31	1.22	1.22
RLT_10		0.94	1.03	1.31	0.49	1.31	1.22	1.22
RLT_11		0.94	1.03	1.32	0.49	1.31	1.21	1.21
RLT_12		0.93	1.02	1.28	0.46	1.25	1.21	1.21
RLT_13		0.94	1.03	1.29	0.48	1.25	1.20	1.37
RLT_14		0.94	1.03	1.30	0.49	1.25	1.20	1.33
RLT_15		0.94	1.03	1.30	0.49	1.25	1.20	1.30
RLT_16		0.93	1.03	1.30	0.48	1.25	1.20	1.20
RLT_17		0.94	1.03	1.30	0.49	1.25	1.20	1.20
RLT_18		0.94	1.03	1.31	0.50	1.25	1.20	1.20
RLT_19		0.92	1.02	1.28	0.45	1.26	1.21	1.21
RLT_20		0.93	1.03	1.29	0.48	1.26	1.20	1.37
RLT_21		0.93	1.03	1.29	0.48	1.26	1.20	1.33
RLT_22		0.93	1.03	1.30	0.48	1.26	1.20	1.30
RLT_23		0.93	1.03	1.29	0.48	1.26	1.20	1.20
RLT_24		0.94	1.03	1.30	0.48	1.26	1.20	1.20
RLT_25		0.94	1.03	1.30	0.49	1.26	1.20	1.20
RLT_26		0.93	1.02	1.29	0.46	1.32	1.22	1.22
RLT_27		0.93	1.03	1.30	0.47	1.32	1.22	1.43
RLT_28		0.93	1.03	1.30	0.47	1.32	1.22	1.40
RLT_29		0.93	1.03	1.30	0.47	1.32	1.21	1.37
RLT_30		0.93	1.03	1.31	0.48	1.32	1.23	1.23
RLT_31		0.94	1.03	1.31	0.49	1.32	1.24	1.24
RLT_32		0.94	1.04	1.32	0.50	1.32	1.24	1.24
RLT_33		0.93	1.03	1.30	0.47	1.30	1.22	1.22
RLT_34		0.93	1.03	1.30	0.48	1.30	1.21	1.42
RLT_35		0.94	1.03	1.30	0.48	1.30	1.21	1.39
RLT_36		0.94	1.03	1.31	0.49	1.30	1.21	1.35
RLT_37		0.94	1.03	1.31	0.49	1.30	1.23	1.23
RLT_38		0.94	1.03	1.31	0.50	1.30	1.23	1.23
RLT_39		0.94	1.04	1.32	0.51	1.30	1.24	1.24
RLT_40		0.93	1.02	1.29	0.46	1.31	1.22	1.22
RLT_41		0.93	1.02	1.29	0.47	1.31	1.21	1.43
RLT_42		0.93	1.03	1.29	0.47	1.31	1.21	1.40
RLT_43		0.93	1.03	1.29	0.47	1.31	1.21	1.36
RLT_44		0.93	1.03	1.30	0.47	1.31	1.23	1.23
RLT_45		0.93	1.03	1.30	0.48	1.31	1.24	1.24
RLT_46		0.94	1.03	1.31	0.49	1.31	1.24	1.24

Tabelle 13: Teillastfaktoren f1 und f2 für RLT-Integrierte Kälteanlagen ohne (basic) und mit (adiabat) Indirekter Verdunstungskühlung (Nutzung Büroraum)

Die bisherige Zusammenfassung der RLT-Anlagen zu Geräte-Klassen mit Zuordnung zur Feuchteanforderung und zur Art der Wärmerückgewinnung (siehe farbige Kennzeichnung) kann auch bei den Systemen mit indirekter Verdunstungskühlung angewendet werden. Die Streuung der Kennwerte ist ausreichend gering, was auch für diese Technologie eine normkonforme Verdichtung der Datenmenge ermöglicht.

Für die Kennwertermittlung zur Klassenbildung werden dabei nur die Werte der RLT-Anlagen mit konstruktiv möglicher Abluftbefeuchtung (fettgedruckte Werte) herangezogen. Bei RLT-Anlagen ohne WRG (grün) bzw. mit sorptiv beschichteten Wärmerückgewinnern (blau) macht der Einsatz der adiabaten Abluftbefeuchtung technologisch keinen Sinn. Tabelle 13 zeigt die abgeleiteten Teillastkennwert  $PLV_{AV}$  für die einzelnen Klassen exemplarisch für die Büronutzung.

Nutzungstyp	Einzel- und Gruppenbüro						
	Faktor	f1 (basic)			f2 (basic)		f2 (adiabat)
RLT	EIN/AUS	mehrstufig	Drehzahl	HGBP	T_AU	T_AB	T_AB
Feuchte: keine/m. Tol. WRG: keine	0.93	1.02	1.28	0.45	1.27	1.21	1.21
Feuchte: keine/m. Tol. WRG: mit	0.94	1.03	1.30	0.48	1.27	<b>1.20</b>	<b>1.34</b>
Feuchte: ohne Tol. WRG: keine / nur Wärme	0.93	1.03	1.30	0.47	1.31	<b>1.21</b>	<b>1.40</b>
Feuchte: ohne Tol. WRG: Wärme und Feuchte	0.94	1.03	1.31	0.49	1.31	1.24	1.24

Tabelle 14: Teillastfaktoren f1 und f2 nach Klassen für RLT-Integrierte Kälteanlagen ohne (basic) und mit (adiabat) Indirekter Verdunstungskühlung (Nutzung Büroraum)

Anhand der Teillastfaktoren f1 und f2 kann sowohl für den reinen Außenluftbetrieb als auch für den reinen Abluftbetrieb (mit / ohne Berücksichtigung der adiabaten Verdunstungskühlung) der Teillastkennwert PLV anhand folgender Gleichungen ermittelt werden.

$$PLV_{AV} = f_1 \times f_2(T_{AU\_basic})$$

$$PLV_{AV,EXH} = f_1 \times f_2(T_{AB\_basic})$$

$$PLV_{AV,EXH,IC} = f_1 \times f_2(T_{AB\_adiabat})$$

Diese Teillastfaktoren wurden für alle Nutzungen der DIN V 18599-10 ermittelt. Die Ergebnisse sind in Anhang B enthalten.

Die Umsetzung im Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 erfolgt analog zum derzeitigen Berechnungsverfahren mit mittleren Teillast-Kennwerten für RLT-integrierte Kältemaschinen (Teillastfaktoren  $PLV_{AV,EXH}$ ) für die betrachteten Teillastregelarten. Die Kennwerte werden bei den luftgekühlten Technologien (A), (B) und (F) in einer separaten Spalte in den Kennwerttabellen im Anhang A DIN V 18599-7 für reinen Abluftbetrieb jeweils mit /ohne Berücksichtigung der Indirekten Verdunstungskühlung nutzungsspezifisch angegeben.

Bei der Heißgasbypassregelung (4) erfolgt in der Regel eine luftmengenseitige Kondensationsdruckregelung auf einen konstanten Kondensationsdruck, so dass der Einfluss der Lufttemperatur nicht oder nur sehr gering vorhanden ist. Der Faktor  $f_2$  ist damit nicht relevant. Hier kann mit den PLV-Standardwerten der wassergekühlten Technologien gerechnet werden, die ebenfalls keine variable Temperaturankopplung berücksichtigen.

Bei reinem Außenluftbetrieb gelten die Standardwerte im Anhang A DIN V 18599-7. Bei einer Außenluftbeimischung kann zwischen den Teillastkennwerten entsprechend dem Mischungsverhältnis linear interpoliert werden. Das Mischungsverhältnis ist abhängig vom typischen Anwendungsfall und kann frei definiert werden. Als Standardwert ist 50% Außenluftbeimischung anzusetzen.

Für die Nennleistungszahl EER muss darüber hinaus eine temperaturabhängige Umrechnung der Standardwerte entsprechend DIN V 18599-100 erfolgen. Für die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur werden dazu folgende Standardwerte vorgegeben:

- Grädigkeit  $\Delta T_{Verd} = 6 \text{ K}$  (Verdampfungstemperatur:  $0^\circ\text{C}$ )
- Grädigkeit  $\Delta T_{Kond} = 20 \text{ K}$  (Kondensationstemperatur  $55^\circ\text{C}$ )

## AP 7 Sonstige energieeffiziente Kühltechnologien

### 7.1 Geothermieranlagen

In Anlehnung an das Kennwertverfahren nach DIN V 18599-7 und die dort verwendeten Kennwerte für konventionelle Kältemaschinen (Nennleistungszahl EER und Teillastfaktor PLV) sollen für folgende regenerative Technologien ebenfalls Energiekennwerte zur Beschreibung des Aufwandes zur Bedarfsdeckung und zum Betriebsverhalten bei der Bedarfsdeckung ermittelt werden:

- Grundwassernutzungsanlagen mit offener Brunnentechnologie
- Geothermieranlagen mit geschlossenen Erdsondenanlagen

#### 7.1.1 Grundwassernutzungsanlagen

Für die Grundwassernutzungsanlagen wird eine hydraulische Bewertung von praxisrelevanten Anlagenkonzepten durchgeführt. Dabei werden verschiedene Effizienzklassen der Pumpen berücksichtigt. Abbildung 37 zeigt exemplarisch die Nennleistungszahlen  $EER_{GW}$  dieser Technologien in Abhängigkeit der Temperaturspreizung bzw. der Sondentiefe.

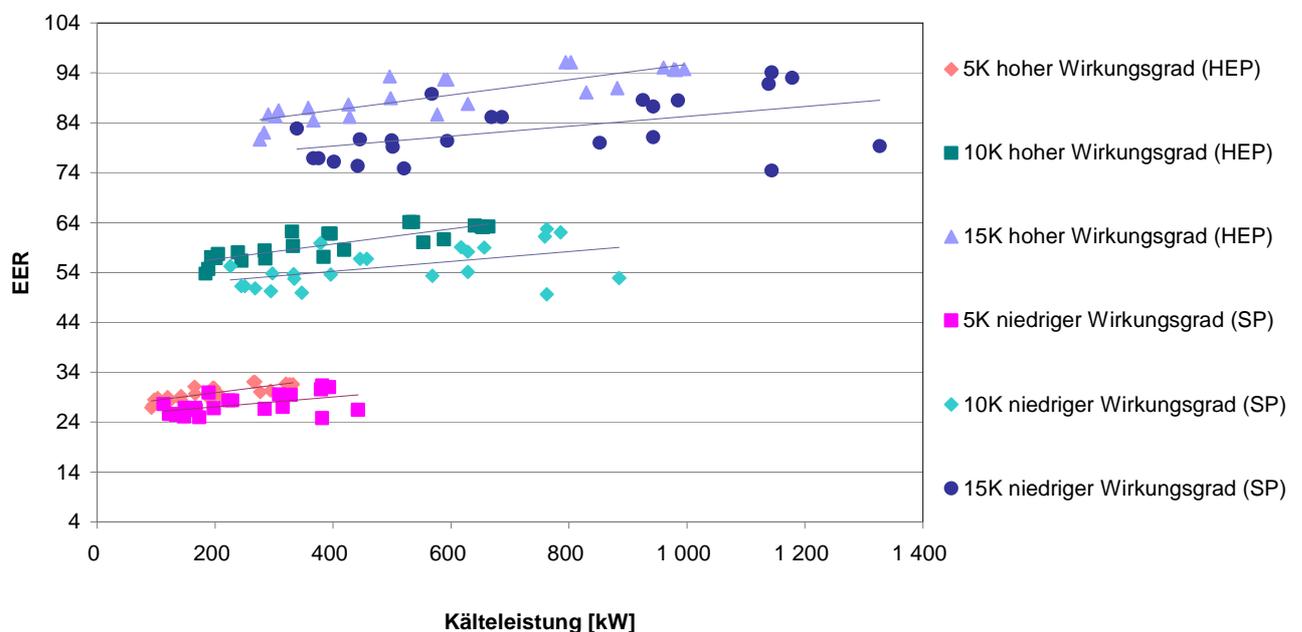


Abbildung 37: Nennleistungszahlen  $EER_{GW}$  von Grundwassernutzungsanlagen mit Standardpumpen (SP) und Hocheffizienzpumpen (HEP) in Abhängigkeit von Temperaturspreizung (bei 40m Förderhöhe)

Die Ermittlung der Kennwerte erfolgt auf Basis einer thermodynamischen und strömungstechnischen Systembewertung unter Verwendung verschiedener Pumpentypen und wird anhand von Messwerten ausgeführter Objekte (Deutsches Hygiene Museum Dresden, Albertinum Dresden, Uni-Bibliothek Rostock) validiert.

Die Teillastregelung der Grundwassernutzungsanlagen ist durch die Art der Pumpenregelung definiert. Im Kennwertverfahren wird in die gängigsten Verfahren Pumpendrehzahlregelung (Konstantdruckregelung) und unregelte Pumpen (Drosselregelung) unterschieden. Abbildung 38 zeigt die Kennlinien der Teillastkennwerte PLV der Pumpenregelarten und deren Validierung.

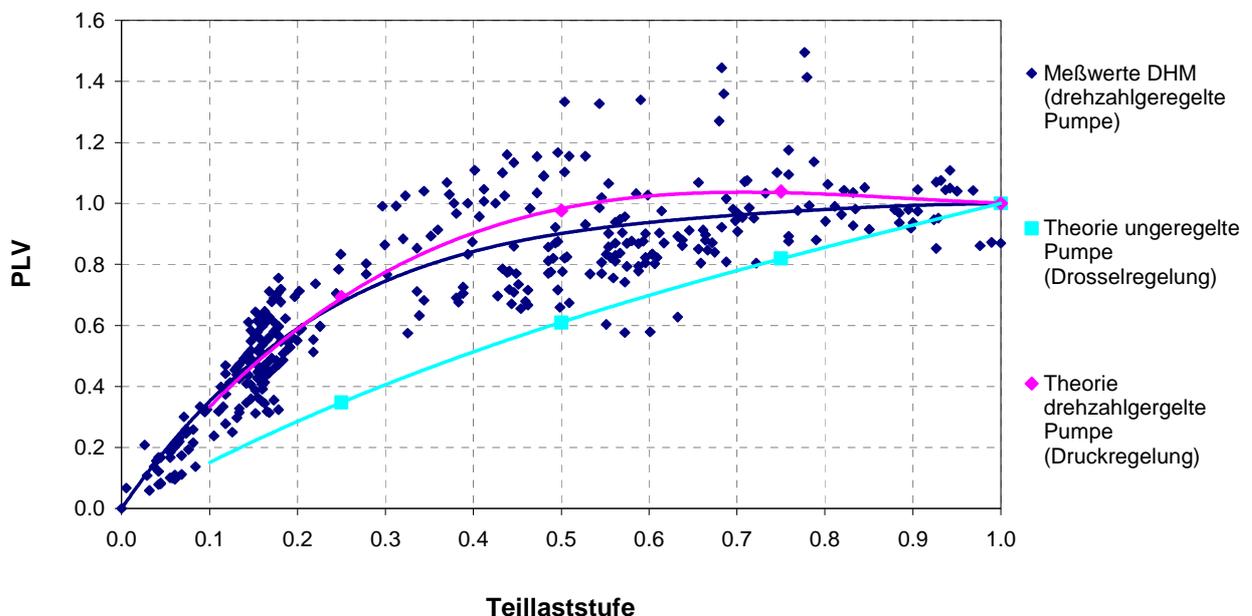


Abbildung 38: Teillastfaktoren für Pumpen in Grundwassernutzungsanlagen (Validierung anhand BV Deutsches Hygiene-Museum Dresden - DHM)

Die theoretisch ermittelten Kennlinien und die praktischen Werte stimmen gut überein. Die theoretischen Teillastkennlinien der dargestellten Pumpenregelarten wurden anschließend mit den spezifischen Lastprofilen der verschiedenen Nutzungen nach DIN V 18599-10 korreliert und die mittleren nutzungsabhängigen Teillastkennwerte  $PLV_{AV}$  ermittelt. Diese Kennwerte werden in die tabellarischen Übersichten im Anhang A DIN V 18599-7 als Teillastfaktoren  $PLV_{av}$  neu aufgenommen.

Die Berechnungsergebnisse erlauben die Vorgabe von Standardwerten für die Effizienz von Grundwassernutzungsanlagen  $EER_{GW}$  und für die energetischen Effekte beim typischen Betriebs-

verhalten der Anlagen in Form eines Teillastkennwertes  $PLV_{AV}$  für das normative Verfahren. Alternativ ist die getrennte ausführliche Berechnung des Aufwandes (Pumpenstrombedarf) und des Nutzens (Entzugsleistung Brunnen) möglich. Der Nutzen kann dabei projektspezifisch in Abhängigkeit der Parameter

- maximal genehmigten Grundwasserentnahmemenge,
- Quelltemperatur des Grundwassers und
- maximal zulässigen Einleittemperatur in den Grundwasserleiter / Vorflut

ermittelt werden. Der Aufwand kann anhand der ausführlichen Hydraulikberechnung nach DIN V 18599-7 ebenfalls detailliert unter Beachtung der mittleren Belastung des Grundwasserkreislaufs ermittelt werden.

### 7.1.2 Erdsondenanlagen

Für die Berechnung einer Einfach-U-Sonde wird ein vorhandenes Berechnungsmodell einer äquivalenten Sonde nach [2] verwendet. Dieses Modell ermöglicht die Ermittlung von Sondaustritts-temperatur und der Entzugsleistung von Einfach-U-Sonden in Abhängigkeit der Parameter:

- Sondenbauart und –durchmesser,
- Erdreichbeschaffenheit (Wärmeleitfähigkeit),
- Sondentiefe.

Praktisch werden am häufigsten Doppel-U-Sonden in Erdsondenfeldern eingesetzt, welche bei gleicher Bohrtiefe eine höhere Entzugsleistung erreichen. Eine exakte Abbildung der thermodynamischen Vorgänge im Erdreich ist bei diesen Sonden nur mit extrem hohen Berechnungsaufwand mit Finiten-Elemente-Methoden möglich. Für eine praxisgerechtere Betrachtung der Entzugsleistungen werden aus diesem Grund vereinfacht Korrelationsfaktoren für die Entzugsleistung zwischen der Doppel-U-Sonde und der Einfach-U-Sonde anhand von Literaturangaben [3] und Herstellerunterlagen [4] angenommen.

Die Ermittlung der Energiekennwerte erfolgt auf Basis einer thermodynamischen und strömungstechnischen Systembewertung unter Beachtung der Hydraulik der Wassersysteme und verschiedener Pumpentypen. Die Ergebnisse der Berechnung zeigen Abbildung 39 und Abbildung 40.

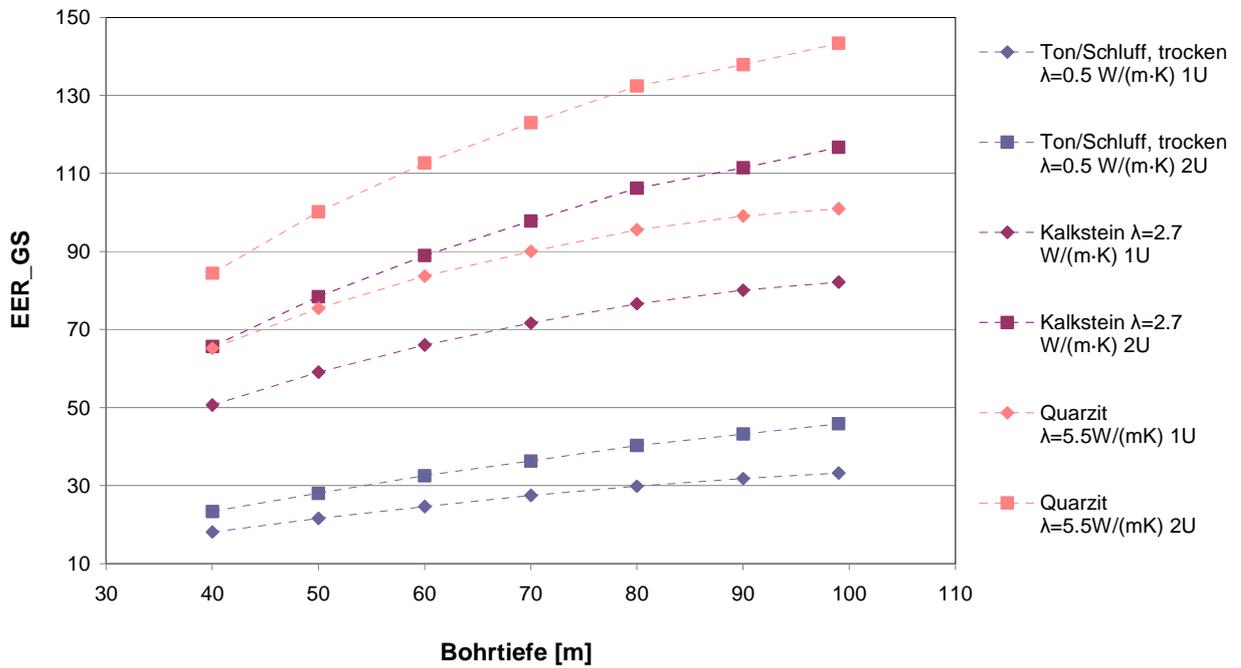


Abbildung 39: EER<sub>GS</sub> Einfach- u. Doppel-U-Sonden PE-Xa- Rohr DN25 (mit Hocheffizienzpumpe Klasse A)

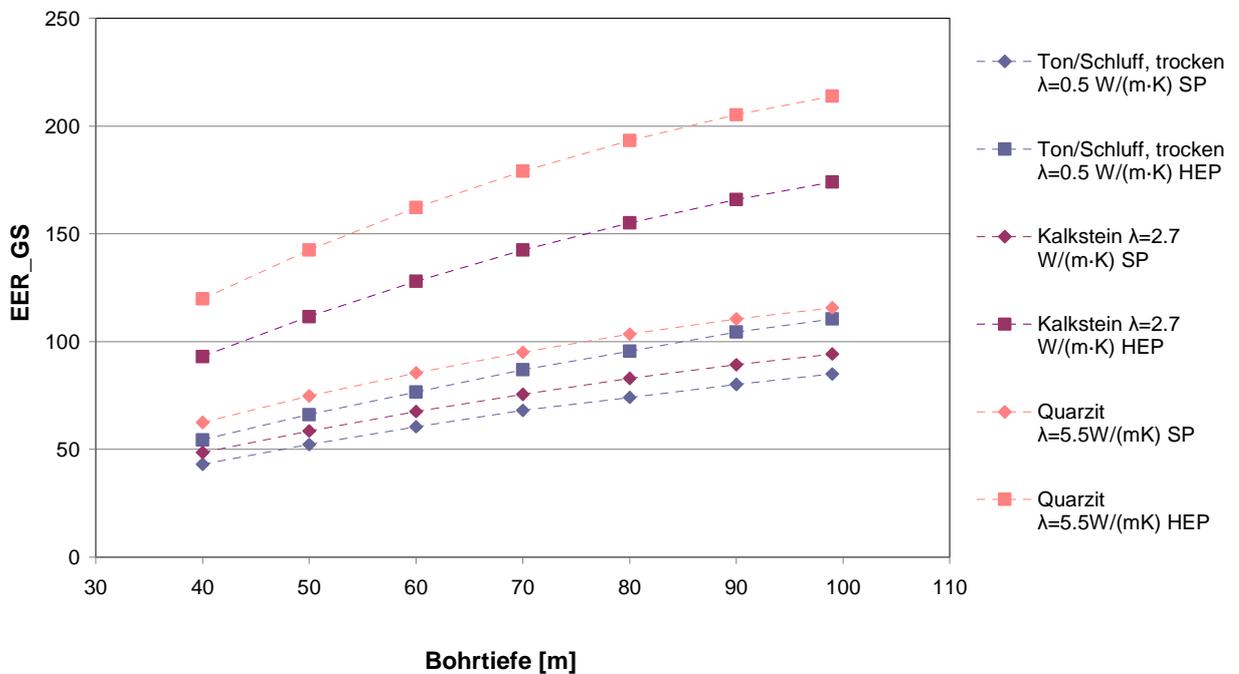


Abbildung 40: EER<sub>GS</sub> für Doppel-U-Sondenfelder mit 24 Sonden PE-Xa- Rohr DN25 mit Hocheffizienzpumpe (HEP- Klasse A) und Standardpumpe (SP- Klasse D)

Die Teillastregelung der Erdsondenanlagen ist durch die Art der Pumpenregelung definiert. Im Kennwertverfahren wird in die gängigsten Verfahren Pumpendrehzahlregelung (Konstantdruckregelung) und unregelte Pumpen (Drosselregelung) unterschieden. Abbildung 41 zeigt die Kennlinien der Teillastkennwerte PLV der Pumpenregelarten und deren Validierung.

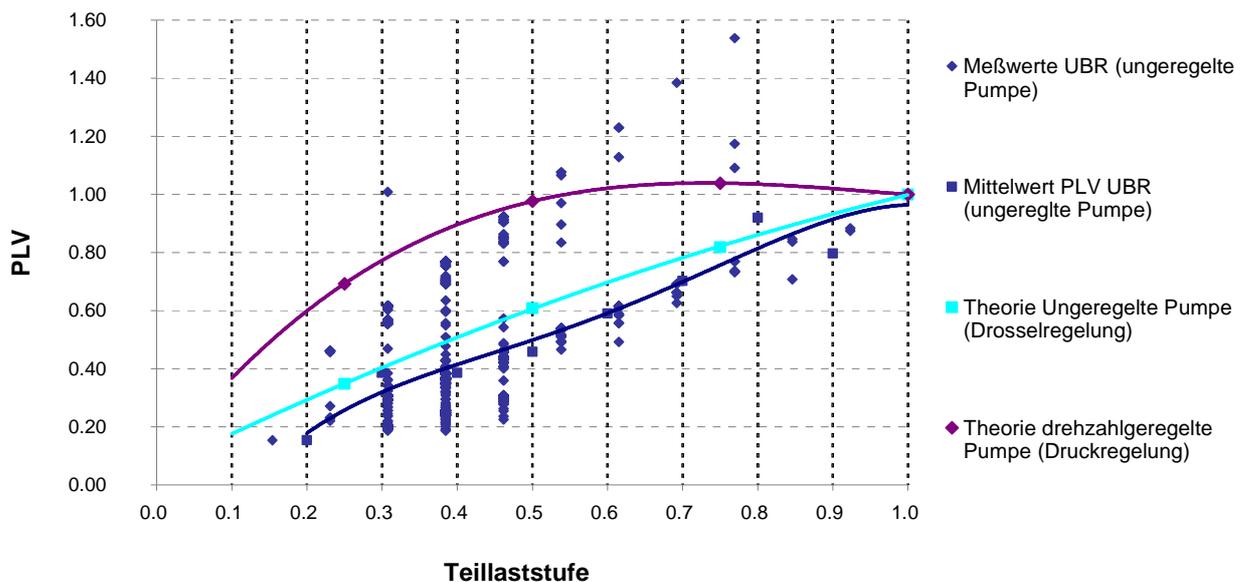


Abbildung 41: Teillastfaktoren für Pumpen in Erdsondenanlagen (Validierung anhand BV Universitätsbibliothek Rostock - UBR)

Die theoretisch ermittelten Kennlinien und die praktischen Werte stimmen auch für die Erdsondenanlagen gut überein und können daher zur weiteren Berechnung der mittleren nutzungsabhängigen Teillastkennwerte  $PLV_{AV}$  verwendet werden.

Die Berechnungsergebnisse erlauben die Vorgabe von Standardwerten für die Effizienz von Erdsondenanlagen  $EER_{GS}$  und für die energetischen Effekte beim typischen Betriebsverhalten der Anlagen in Form eines Teillastkennwertes  $PLV_{AV}$  für das normative Verfahren. Alternativ ist die getrennte ausführliche Berechnung des Aufwandes (Pumpenstrombedarf) und des Nutzens (Entzugsleistung Erdsonde) möglich. Die Entzugsleistung kann dabei projektspezifisch in Abhängigkeit der Parameter Sondenart, Sondentiefe und Bodenbeschaffenheit anhand Abbildung 42 ermittelt werden. Der Aufwand kann anhand der ausführlichen Hydraulikberechnung nach DIN V 18599-7 detailliert unter Beachtung der mittleren Belastung des Erdsondenkreislaufs ermittelt werden.

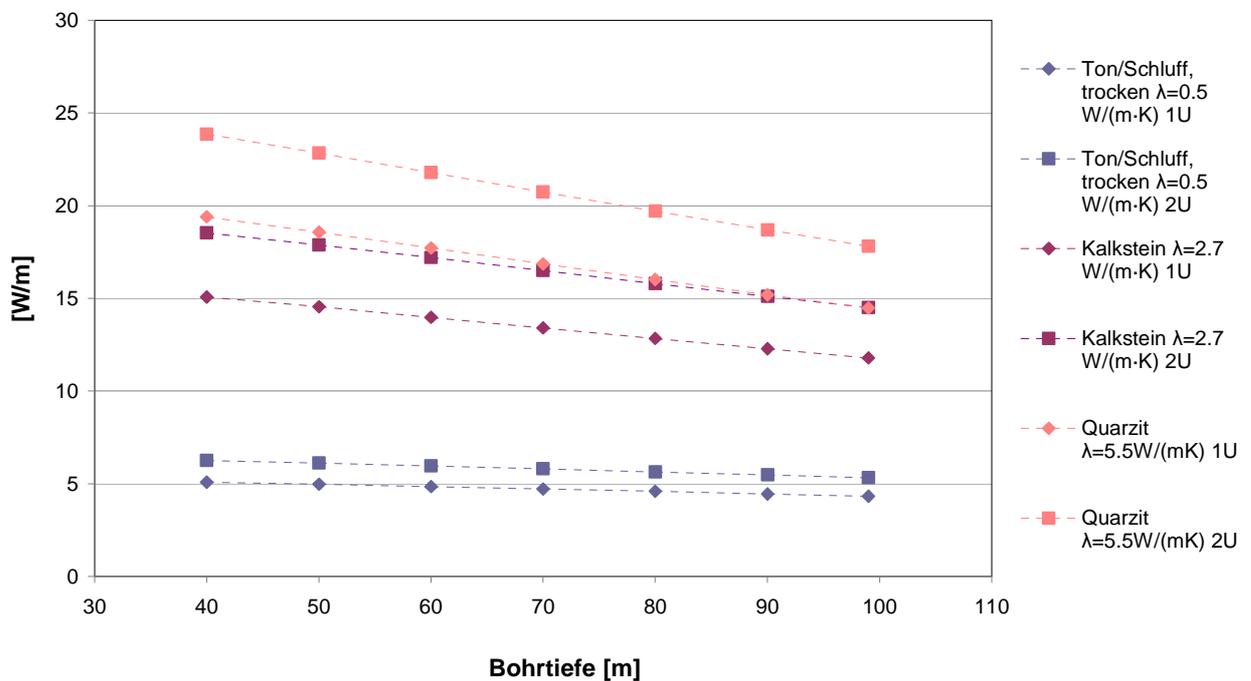


Abbildung 42: spez. Entzugsleistung für Einfach- u. Doppel-U-Sonden PE-Xa- Rohr DN25 (Sonden-Eintrittstemperatur 18°C)

## 7.2 Sorptionskälteanlagen

In das Kennwert-Verfahren werden Sorptionskälteanlagen kleiner Leistung (<200 kW) und indirekt beheizte Double-Effect-Wasser/LiBr-Absorptionskälteanlagen neu aufgenommen. Die Bedarfsberechnung erfolgt in Analogie zum normativen Kennwertverfahren anhand der Kennwerte Nennwärmeverhältnis  $\zeta_N$  und mittlerer Teillastfaktor  $PLV_{AV}$ .

Dazu wurden Herstellerdaten folgender Hersteller ausgewertet:

- Sonnenklima, EAW, Jasaki
- Pink, Solarice, Ago
- Invensor, Sortech

Tabelle 15 zeigt die ermittelten marktüblichen Nennwärmeverhältnisse.

Heizmedien- temperatur- niveau	Kühlwasser- temperatur- niveau	Kaltwasser- austritts- temperatur	Nennwärmeverhältnis $\zeta_N$		
			H <sub>2</sub> O/LiBr-Absorptions- kältemaschine	NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O-Absorptions- kältemaschine	H <sub>2</sub> O/Silikagel-Zeolith- Adsorptions- kältemaschine
70/60°C	27/33°C	6°C	0,65	0,50	-
		12°C	0,70	0,56	0,59
		16°C	0,75	0,62	0,63
	40/45°C	6°C	-	-	-
		12°C	-	-	-
		16°C	-	-	-
80/70°C	27/33°C	6°C	0,69	0,52	-
		12°C	0,72	0,60	0,52
		16°C	0,77	0,64	0,60
	40/45°C	6°C	-	-	-
		12°C	-	-	-
		16°C	0,50	-	-
90/75°C	27/33°C	6°C	0,70	0,57	-
		12°C	0,73	0,62	0,51
		16°C	0,77	0,64	0,55
	40/45°C	6°C	-	-	-
		12°C	0,50	-	-
		16°C	0,60	0,45	0,34
110/95°C	27/33°C	6°C	-	0,53	-
		12°C	-	0,56	-
		16°C	-	0,58	-
	40/45°C	6°C	0,50	0,42	-
		12°C	0,60	0,52	-
		16°C	0,70	0,58	-

Tabelle 15: Nennwärmeverhältnis  $\zeta_N$  für einstufige Sorptionskälteanlagen kleiner Leistung

Für den internen Energiebedarf der Kältemaschine (z.B. interne Pumpen) werden spez. Leistungswerte vorgegeben:

- einstufige Wasser/LiBr-AKM kleiner Leistung: 15 W<sub>el</sub>/kW<sub>Kälte</sub>
- Ammoniak/Wasser-AKM: 40 W<sub>el</sub>/kW<sub>Kälte</sub>
- Adsorptionskältemaschinen: 0 W<sub>el</sub>/kW<sub>Kälte</sub>

Ergänzend zu den Nennwärmeverhältnissen und zum internen Energiebedarf wird für alle Technologien gleichermaßen ein Teillastwirkungsgrad (PLV<sub>AV</sub>) als Jahresmittelwert vorgegeben. Dieser berücksichtigt den ganzjährigen Betrieb der Anlage bei wechselnden Betriebsbedingungen, An- und Abfahrvorgänge etc. Hier wird zunächst in Anlehnung an "taktende Kompressionskältemaschinen" einen Wert von 0,95 vorgegeben, da langjährige praktische Erfahrungen, die eine detaillierte Validierung zuließen, für diese „neuen“ Technologien noch nicht in ausreichendem Maße

vorliegen. Für den Nutzungsfaktor des Rückkühlers ( $f_{R,av}$ ) wird ebenfalls für alle Technologien gleich geltend ein Wert von 0,65 vorgegeben. Dieser berücksichtigt den geringeren Elektroenergiebedarf zum Erreichen der Nenn-Kühlwassertemperatur bei niedrigen Außentemperaturen. Erfolgt kein Regelbetrieb, ist für den Nutzungsfaktor des Rückkühlers ein Wert von 1,0 anzusetzen.

Anhand einer praktischen Validierung ausgeführter Anlagen müssen in Zukunft, z. B. durch Messungen und Monitoring, weitere Erfahrungen zum Teillastwirkungsgrad und zum Nutzungsfaktor der Rückkühlung gesammelt werden, um diese dann in einer folgenden Überarbeitung der Norm ggf. auch technologie- und nutzungsabhängig definieren zu können.

Für indirekt beheizte Double-Effect-Wasser/LiBr-Absorptionskälteanlagen wurden ebenfalls Leistungsdaten folgender Hersteller ausgewertet:

- York, Broad, EAW.

Tabelle 16 zeigt die ermittelten marktüblichen Nennwärmeverhältnisse.

Heizmedien-temperatur-niveau	Kühlwasser-temperatur-niveau	Kaltwasser-austritts-temperatur	Nennwärmeverhältnis
170/155°C bzw. (Satt-)Dampf 0,6...0,8 Mpa	27/33°C	6°C	<b>1,20</b>
		12°C	<b>1,25</b>
		16°C	<b>1,30</b>
	40/45°C	6°C	-
		12°C	-
		16°C	-

Tabelle 16: Nennwärmeverhältnis  $\zeta_N$  für indirekt beheizte Double-Effect-Wasser/LiBr-Absorptionskälteanlagen

Für den Teillastwirkungsgrad  $PLV_{AV}$  und die Hilfsenergien können mit guter Genauigkeit die Kennwerte der bereits im Verfahren berücksichtigten einstufigen Maschinen Verwendung finden.

### 7.3 Sonstige effiziente Kühltechnologien

In das normative Berechnungsverfahren werden leistungsgeregelte luft- und wassergekühlte Kälteerzeuger mit Scroll-, Schrauben- und Turboverdichter neu aufgenommen. Wie bei der RLT-integrierten Kältetechnik werden dabei die bisher einer festen Zuordnung der Außenlufttemperatur zur Teillaststufe unterliegenden Teillastkennwerte PLV in 2 Faktoren ( $f_1$  und  $f_2$ ) aufgesplittet, was die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse erhöht und eine detaillierte Berücksichtigung von verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen ermöglicht.

Zur Ermittlung der Nennleistungszahlen und PLV-Kennlinien wurden eine Vielzahl von Herstellern angefragt und die übergebenen Datenreihen ausgewertet. Für folgende Technologien liegen diese Kennwerte im Ergebnis vor:

- frequenzgeregelter Schraubenverdichteranlagen (luft- und wassergekühlt)
- frequenzgeregelter Turboverdichteranlagen (luft- und wassergekühlt)
- digital geregelte Scrollverdichteranlagen (luftgekühlt)

Die Nennleistungszahlen der Kompressionskälte-Technologien liegen unter Beachtung der 30/70-Regel (30 % der verfügbaren Anlagen besitzen höhere EER – 70 % der verfügbaren Anlagen besitzen niedrigere EER) innerhalb der augenblicklich in DIN V 18599-7 verwendeten Standardwerte der Nennkälteleistungszahl. Die tabellarisch aufgeführten Standardwerte für luft- und wassergekühlte Kompressionskälte-Maschinen können damit unverändert weiter verwendet werden.

Bezüglich des Teillastbetriebes liegen Teillastfaktoren abweichend zum bisherigen Verfahren nicht für 10%-Stufen sondern in Anlehnung an die ESEER-Bewertung in 25%-Stufen vor. Gleichzeitig wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, mit dem die bei Eurovent unter Prüfstandsbedingungen ermittelten ESEER-Stufenkennwerte ( $EER_{25,50,75,100}$ ) in nationale Teillastkennwerte  $PLV_{25,50,75,100}$  umgerechnet werden können. Damit wird eine Verwendung dieser Produktkennwerten auch im Teillastbereich möglich.

Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen die Teillastkennlinien der neuen der luft- und wassergekühlten Technologien (fett dargestellt) im Vergleich zu ausgewählten verfügbaren Teillastregelarten.

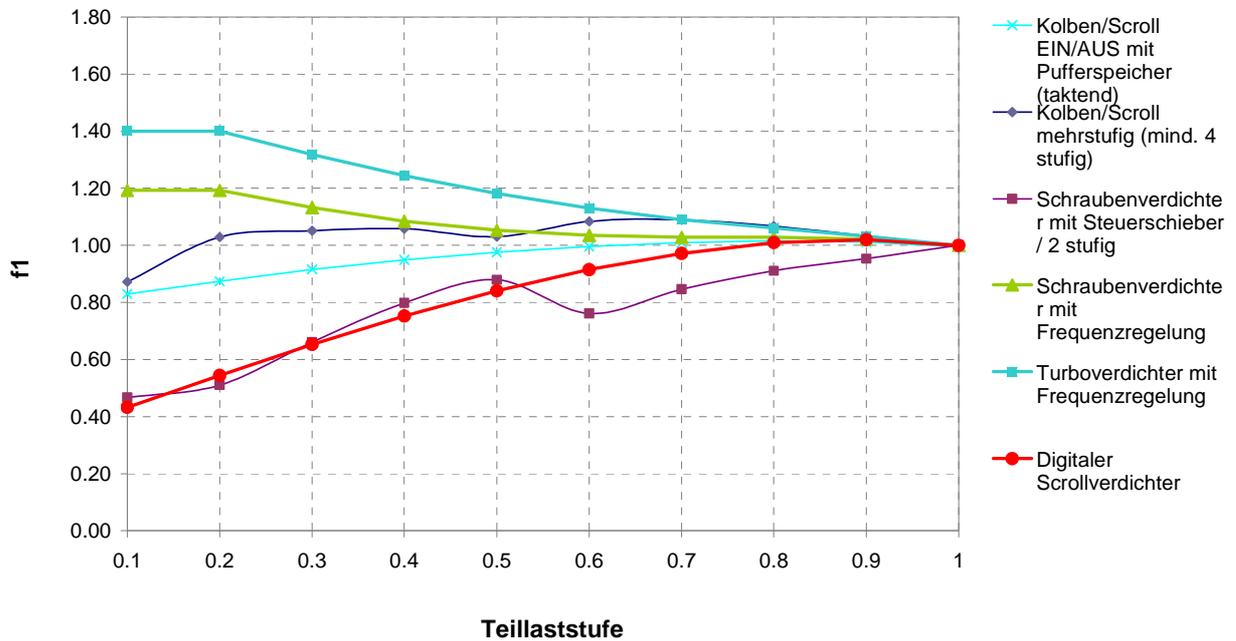


Abbildung 43: Teillastfaktoren  $f_1$  luftgekühlter KKM für verschiedene Teillastregelarten

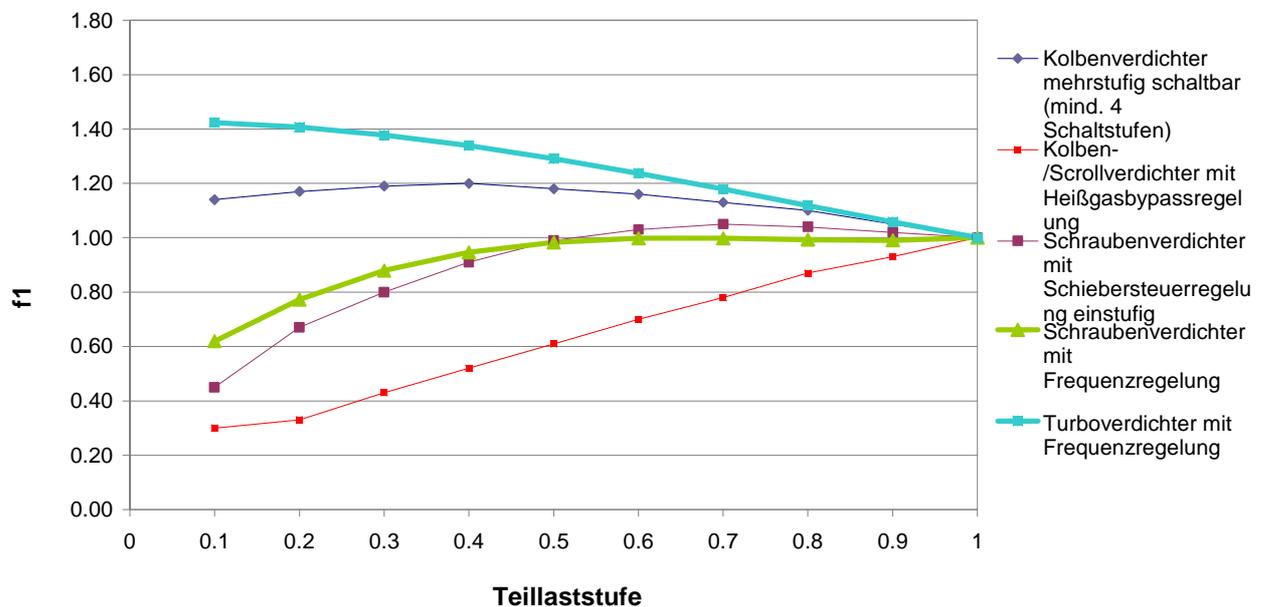


Abbildung 44: Teillastfaktoren  $f_1$  wassergekühlter KKM für verschiedene Teillastregelarten

Die theoretischen Teillastkennlinien der dargestellten Teillastregelarten wurden anschließend mit den spezifischer Lastprofilen der verschiedenen Nutzungen nach DIN V 18599-10 korreliert und die mittleren nutzungsabhängigen Teillastkennwerte  $PLV_{AV}$  ermittelt. Bei allen aufgeführten Technologien (insbesondere Grundwassernutzungsanlagen und Erdsondenanlagen) wird dabei in Anlehnung an die bisherige Berechnungsphilosophie davon ausgegangen, dass der Kühlbedarf vollständig gedeckt wird und die Sollwerte in der gekühlten Zone eingehalten werden. Das Verfahren berücksichtigt damit keine Ankühlung (Istwert > Sollwert nach DIN V 18599).

Die Integration der neuen Technologien in das Berechnungsverfahren nach DIN V 18599-7 erfolgt analog zum derzeitigen Berechnungsverfahren durch die Abbildung der ermittelten Teillastfaktoren  $PLV_{av}$  für die genannten Teillastregelarten, was zu einer Erweiterung der Tabellen im Anhang A zur DIN V 18599-7 führt.

## AP 8 Kältespeicherung

Speichersysteme werden häufig in Gebäudekühlkonzepte integriert und dienen vordergründig der Reduzierung der Nennkühlleistung. Das Potential zur Reduzierung des Endenergiebedarfes für die Raum-/RLT-Kühlung wird jedoch oft überschätzt. Nur wirtschaftlich geplante und betriebene Systeme tragen tatsächlich zur Energieeinsparung bei. Eine explizite Bewertung der Speicherung erlaubt DIN V 18599-7 bisher nicht.

Die geplante Betriebsweise und das damit verbundene Regelkonzept der Speichertechnologie hat neben der Baugröße und der Bauart entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf der Kältemaschine. Um diese Einflussfaktoren ausreichend genau abzubilden, wird vorgeschlagen, im normativen Verfahren Speichernutzungsgrade und Effizienzfaktoren (Speicherfaktoren) in Abhängigkeit der Betriebsweise des Speichers gemäß Tabelle 17 zu berücksichtigen.

Speichernutzung	$\eta_{c,s}$	$f_{SP, \text{Wasser}}$	$f_{SP, \text{Eis}}$	Betriebsweise / Regelkonzept
optimal	0.95 ... 1.00	0.95 ... 1.14	0.87 ... 1.30	Wetterprognoseregulierung
normal	0.83 ... 0.98	0.96 ... 1.35	0.69 ... 1.24	Speicherentladung am Folgetag (kein Spitzenlastspeicher), ggf. Parallelbetrieb mit Kältemaschine
schlecht	0.66 ... 0.97	0.95 ... 1.14	0.87 ... 1.30	Spitzenlastspeicher
Redundanz	0.42 ... 0.91	0.95 ... 1.25	0.78 ... 1.27	Bereitstellung von Redundanzleistung (z.B. Serverraum), sonst keine geregelte Entladung

Tabelle 17: Speichernutzungsgrad und Speicherfaktoren in Abhängigkeit der Betriebsweise (mit Standard-Werten)

$\eta_{c,s}$  .... Speichernutzungsgrad

$f_{sp,Wasser}$  ... Speicherfaktor für sensible (Wasser-)Speicher (berücksichtigt die Erhöhung des Teillastwirkungsgrades PLV der Kältemaschine durch geringere Teillasthäufigkeit, bei Speicherladebetrieb EER ~ konstant)

$f_{sp,Eis}$  ... Speicherfaktor für latente (Eis-)Speicher (berücksichtigt die Erhöhung des Teillastwirkungsgrades PLV der Kältemaschine durch die geringere Teillasthäufigkeit und die schlechtere Leistungszahl durch die niedrigere Verdampfungstemperatur bei Speicherladebetrieb)

## 8.1 Speichernutzungsgrad

Der Speichernutzungsgrad berücksichtigt die Erhöhung der Erzeugernutzkälteabgabe durch die Speicherverluste. Er ist maßgeblich von der Betriebsweise des Speichers (Vorhaltezeit) abhängig.

Bei der Wetterprognoseregulierung (optimale Speichernutzung) wird der Speicher nur dann geladen, wenn am Folgetag eine Speichernutzung aufgrund der klimatisch bedingten Lasteinflüsse im Versorgungsbereich erforderlich ist. Gleichzeitig kann der Zeitpunkt der Speicherentladung prognostiziert werden und somit das Beladeregime (Speicherladebeginn) angepasst werden. Die Vorhaltezeit reduziert sich damit auf insgesamt weniger Tage mit einem noch dazu kürzeren Zeitraum als bei „normaler“ Speichernutzung.

Bei „normaler“ Speichernutzung wird der Speicher in jedem Fall am Folgetag ggf. im Parallelbetrieb mit der Kältemaschine entladen. Dieses Konzept erzeugt geringe Speicherverluste, trägt aber nicht zu einer Reduzierung der Nennkälteleistung der Kältemaschine bei. Es wird eher selten z. B. im Zusammenhang mit baulich verfügbaren Speichern (z. B. Sprinklerbehälter) oder aufgrund definierter regelungstechnischer Vorgaben angewendet. Aus Sicht der Gesamteffizienz treten hier insbesondere bei Eisspeichern hohe Verluste durch die ineffizientere Beladung mit niedrigen Verdampfungstemperaturen auf.

Typischer Anwendungsfall der Kältespeicher ist der Spitzenlastspeicher, bei dem zur Reduzierung der Nennkälteleistung der Kältemaschine meist latente Kältespeicher eingesetzt werden. Aus Sicht der Speicherverluste ist die Nutzung als „schlecht“ zu bewerten, da aufgrund der meist erst nachmittäglichen Spitzenlastanforderungen die Vorhaltezeit der Speicher in der Regel größer als bei normaler Nutzung ist. Die Speichereffizienz (respektive die Speicherfaktoren) latenter Speicher liegen jedoch über denen bei „normaler“ Nutzung, da die Beladung zwar auch nachts stattfindet, bei der Entladung jedoch ineffiziente Zeiträume maschineller Kälteerzeugung bei hohen Kondensationstemperaturen durch den Speicherentladebetrieb eliminiert werden.

Bei bestimmten Nutzungen und Sicherheitsanforderungen werden Speicher gezielt zur Bereitstellung von redundanter Kälteleistung eingesetzt. Durch die langen Vorhaltezeiten sind die Speichernutzungsgrade von allen Konzepten hier am geringsten.

Die Berechnung der Speichernutzungsgrade erfolgt anhand der nach DIN V 18599-10 unter Berücksichtigung verschiedene Bauwerkskonzepte ermittelten stündlichen Kühllastprofile. Für die Berechnung wurden folgende Randbedingungen angenommen:

Speichernutzungsdauer: 50 Tage für „optimal“  
150 Tage (Mai – September) für „normal“ / „schlecht“  
250 Tage für „Redundanz“

Wasserspeicher: Speichergröße: 1 kWh / kW Nennkälteleistung  
Speichersolltemperatur: 6°C  
Dämmstoffdicke: 25 mm ( $\lambda = 0,035$  W/mK)

Eisspeicher: Speichergröße: 3 kWh / kW Nennkälteleistung  
Speichersolltemperatur: 0°C  
Dämmstoffdicke: 50 mm ( $\lambda = 0,035$  W/mK)

Die Speichernutzungsgrade  $\eta_{C,S}$  in Abhängigkeit der Betriebsweise zeigt Abbildung 45 exemplarisch für Wasserspeicher.

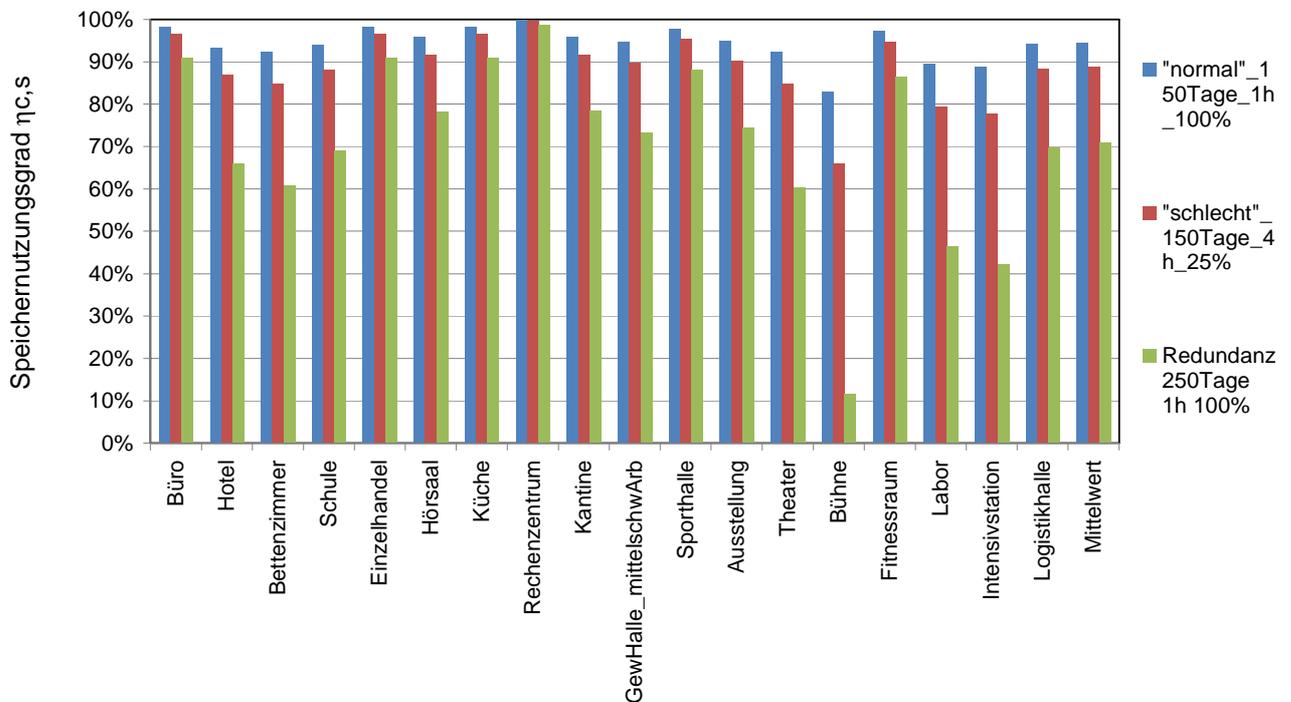


Abbildung 45: Speichernutzungsgrad  $\eta_{C,S}$  für Wasserspeicher in Abhängigkeit der Betriebsweise

Die Speichernutzungsgrade von Eisspeichern sind etwas höher, da diese Speicher relativ zur unwesentlich geringeren Speichertemperatur in der Regel besser gedämmt sind. Neben dem Regelkonzept ist die Nutzungsart des Kälteversorgungsbereiches von Bedeutung, die mit Ihrem Kühllastprofil über den Zeitpunkt der Speicherentladung und damit indirekt auch die Vorhaltezeit bestimmt. Die Speichernutzungsgrade müssen im normativen Verfahren daher nutzungsabhängig vorgegeben werden. Diese können im Kapitel 6 der Norm anstelle des bisherigen Standardwertes (Speichernutzungsgrad  $\eta_{C,S} = 1 \rightarrow$  Speicherlust  $Q_{C,S} = 0$ ) direkt in tabellarischer Form integriert werden.

## 8.2 Speicherfaktoren

Die Speicherfaktoren berücksichtigen die Veränderung des Teillastwirkungsgrades PLV der Kältemaschine durch die geringere Teillasthäufigkeit und die Veränderung der Leistungszahl der Kältemaschine durch die geänderten Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen bei Speicherladebetrieb. Dieser Einfluss ist bei Wasserspeichern geringer als bei Eisspeichern, da die Temperaturänderung zwischen Lade- und Entladebetrieb gering ist und zusätzlich der über den Speicher umgesetzte Anteil am gesamten Nutzenergiebedarf geringer ist als bei Eisspeichern.

Die Berechnung der Speicherfaktoren erfolgt anhand der nach DIN V 18599-10 unter Berücksichtigung verschiedener Bauwerkskonzepte ermittelten stündlichen Kühllastprofile. Es wird dabei einerseits die Veränderung der Teillasthäufigkeit und deren Auswirkungen auf den Teillastfaktor PLV bzw.  $f_1$  ermittelt. Andererseits werden die Temperaturbedingungen im Belade- und Entladezeitraum des Speichers ermittelt und daraus die Änderung der Leistungszahl der Kältemaschine berechnet. Beide Effekte werden im Speicherfaktor  $f_{SP}$  berücksichtigt. Das bietet den Vorteil, diesen Speicherfaktor im normativen Verfahren direkt mit der Jahresleistungszahl zu korrelieren, ohne die Tabellenwerte im Anhang A der Norm für die Kältespeicherung erweitern zu müssen.

$$SEER_{SP} = SEER \cdot f_{SP}$$

Die Berechnungsergebnisse der Speicherfaktoren  $f_{SP}$  für alle im Kennwertverfahren berücksichtigten Teillastregelarten zeigen Abbildung 46 und Abbildung 47 in Abhängigkeit der Betriebsweise des Speichers exemplarisch für die Nutzungsart Büro und Ausstellung.

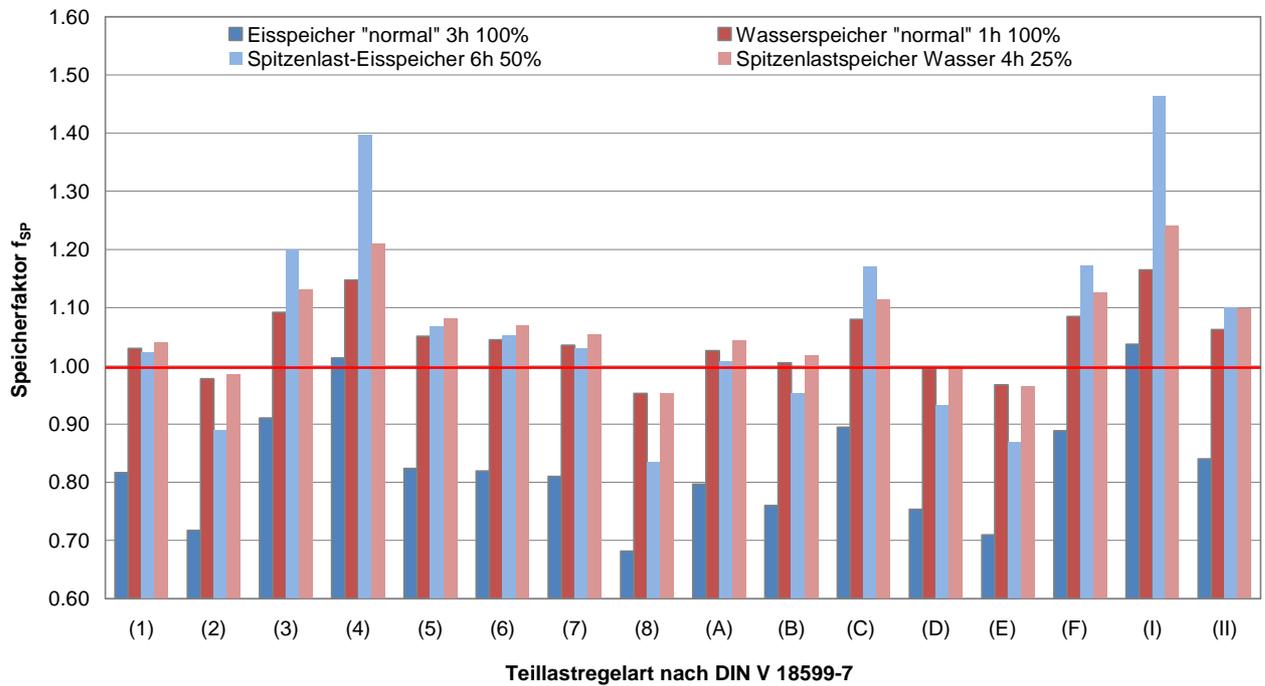


Abbildung 46: Speicherfaktor  $f_{SP}$  bei Speichernutzung in Abhängigkeit der Betriebsweise für die Nutzung Büro

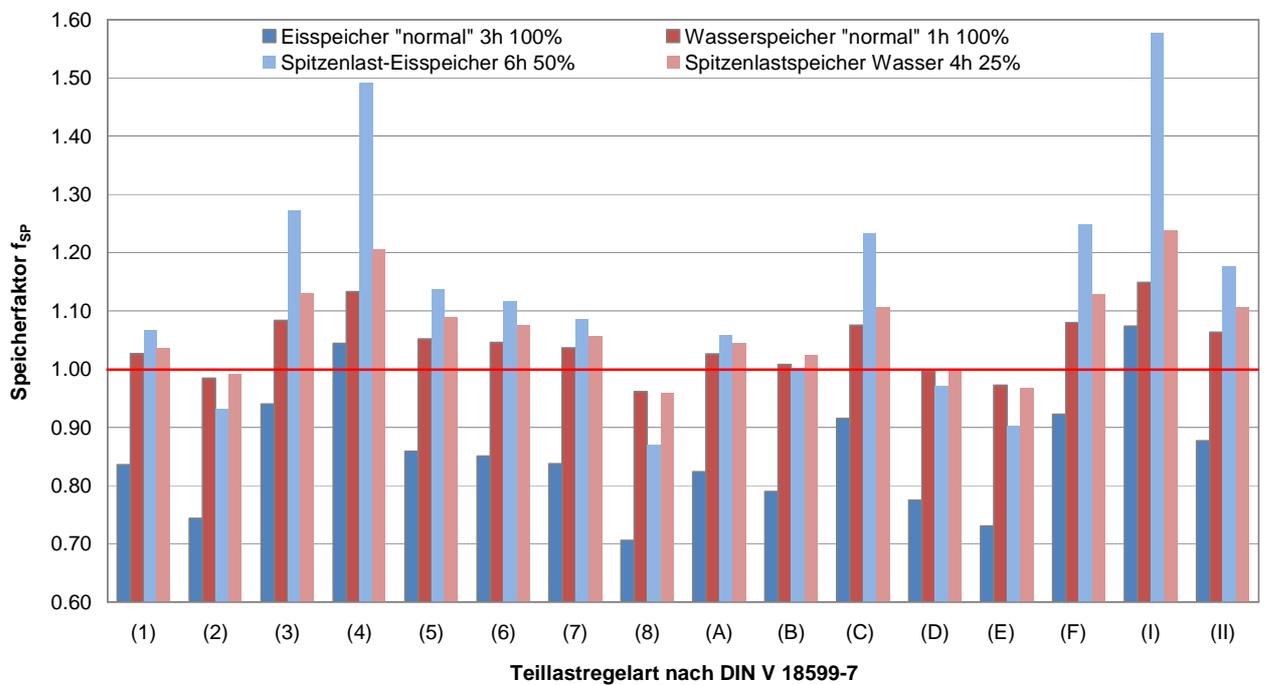


Abbildung 47: Speicherfaktor  $f_{SP}$  bei Speichernutzung in Abhängigkeit der Betriebsweise für die Nutzung Ausstellung

Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Teillastfaktoren von der Betriebsart und der Teillastregelart. Die Abhängigkeit von der Nutzung hingegen ist für alle Nutzungen nach DIN V 18599-10 gering. Der Speicherfaktor muss im normativen Verfahren entsprechend dem Vorschlag in Tabelle 17 daher anlagenspezifisch vorgegeben werden. Aufgrund der Vielzahl der Teillastregelarten erscheint eine Zusammenfassung mehrerer Teillastregelarten jedoch möglich.

Die Speicherfaktoren für die Betriebsweise „optimal“ (Wetterprognoseregulierung) werden aus der Spalte Spitzenlastspeicher übernommen, da das Beladeszenarium eines prognosegeregulierten Speichers dem eines Spitzenlastspeichers sehr nahe kommt. Für die Redundanzspeicher wird der Mittelwert aus „normaler“ Speichernutzung und Spitzenlastspeicher (Speichernutzung „schlecht“) verwendet, da eine nachvollziehbare Nutzungsszenario eines Redundanzspeichers aufgrund der stochastischen Speichernutzung nicht definierbar und damit nicht rechnerisch ermittelbar ist.

## AP 9 Mehrerzeugeranlagen

Insbesondere bei Gebäuden mit großen Kühlleistungsanforderungen decken häufig mehrere Kälteerzeuger die Gesamtkühlleistung. Für die parallel oder in Sequenz betriebenen Kälteerzeuger ergeben sich dabei andere Teillastbedingungen als bei Alleinbetrieb einer Einzelanlage. Der Einfluss auf den Energiebedarf ist abhängig von der Teillasteffizienz jedes einzelnen Kälteerzeugers. Eine explizite Bewertung von Mehrerzeuger-Kälteanlagen erlaubt DIN V 18599-7 bisher nicht.

Beim Einsatz mehrerer Kälteanlagen verändert sich die Teillasthäufigkeit der Einzelmaschine. Anhand vorgegebener Szenarien für Mehrerzeugeranlagen kann ein lastgewichteter Teillastfaktor aller Einzelmaschinen bestimmt werden. Setzt man diesen ins Verhältnis zum Teillastfaktor einer Einzelerzeugeranlage, kann man direkt das Potential der Mehrerzeugeranlage in einem Faktor abbilden und diesen für die normative Berechnungsverfahren verwenden. Das bietet den Vorteil, die Tabellenwerte im Anhang A der Norm auch für Mehrerzeugeranlagen ohne wesentliche Erweiterung der tabellarischen Übersichten unverändert verwenden zu können.

$$\text{SEER}_{\text{MEZ}} = \text{SEER} \cdot f_{\text{MEZ}}$$

### 9.1 Sequenzregelung

Bei der Sequenzregelung werden mehrere Kälteerzeuger gleicher oder verschiedener Baugröße in Sequenz bzw. Folgeschaltung betrieben. Diese Art der Folgeregelung ist auch als Master-Slave-Schaltung bzw. Grundlast- / Spitzenlastschaltung bekannt. Jede einzelne Kältemaschine wird dabei mit anderer Teillasthäufigkeit (Belastungsgrad) betrieben als eine Einzelmaschine.

Abbildung 48 zeigt für die Sequenzregelung die Änderung der gewichteten Teillastkennlinie bei Nutzung mehrerer Maschinen exemplarisch für wassergekühlte Schraubenverdichteranlagen mit Steuerschieberregelung. Es zeigt sich insbesondere bei geringer Lastanforderung (geringer Teillaststufe) eine deutliche Verbesserung des gewichteten Teillastfaktors, was in einer Erhöhung der Gesamteffizienz des Anlagensystems gegenüber der Einzelerzeugeranlage mündet. Insbesondere bei teillastoptimierten Regelstrategien (z.B. mehrstufige Verdichterverbundanlagen, frequenzgeregelte Turboverdichter) kann es bei einer zusätzlichen Aufteilung auf mehrere Anlagen bei der Sequenzregelung aber auch zu einer Verschlechterung der Effizienz des Gesamtsystems kommen.

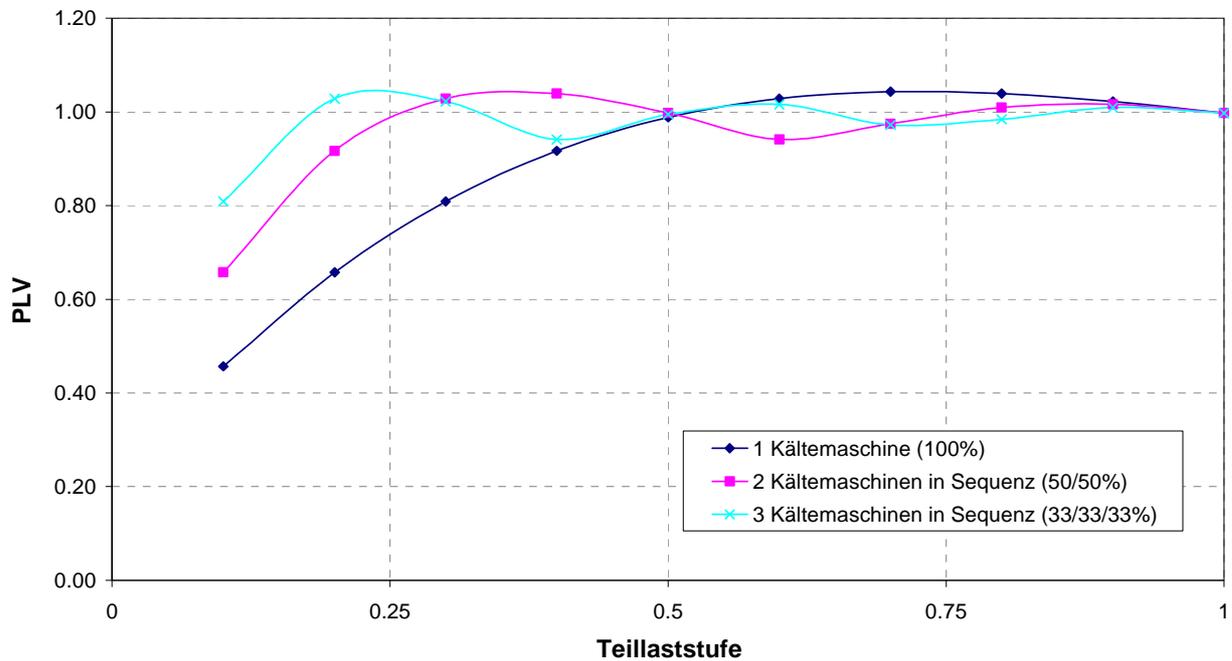


Abbildung 48: Teillastfaktor PLV bei Sequenzregelung für Schraubenverdichter wassergekühlt (5)

Unter Berücksichtigung der Lasthäufigkeit kann anhand der Teillastkennlinien eine relative Änderung der Teillasteffizienz in Bezug auf die Einzelmaschine ermittelt werden, welche mit einem Faktor  $f_{MEZ, Sequ}$  tabellarisch abgebildet werden kann. Dabei wird die Leistungsaufteilung der Teilanlagen entsprechend realistischer Praxis-Annahmen variiert. Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen die Veränderung der Teillasteffizienz für alle Teillastregelarten der DIN V 18599-7 in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung exemplarisch für die Nutzungsarten Büro und Ausstellung.

Im Ergebnis der Simulationsrechnungen ist eine starke Abhängigkeit des Effizienzfaktors von der Teillastregelart erkennbar. Bei den teillastoptimierten Anlagensystemen (2), (8), (D) und (E) bewirkt die Leistungsaufteilung eine Reduzierung der Gesamteffizienz. Bei den energetisch schlechten Teillastregelarten (3, (4), (C), (F) und (I) hingegen zeigt sich eine starke Verbesserung der Effizienz, da für den Einzelerzeuger im Mittel eine bessere Auslastung (höhere Teillaststufe) erreicht wird. Dabei ist insbesondere auch ein starke Abhängigkeit von der Größe der Führungsanlage fest zu stellen. Je kleiner diese ist, desto höher ist die Gesamteffizienz, da diese im Extremfall dann praktisch bei Nennleistung durchläuft.

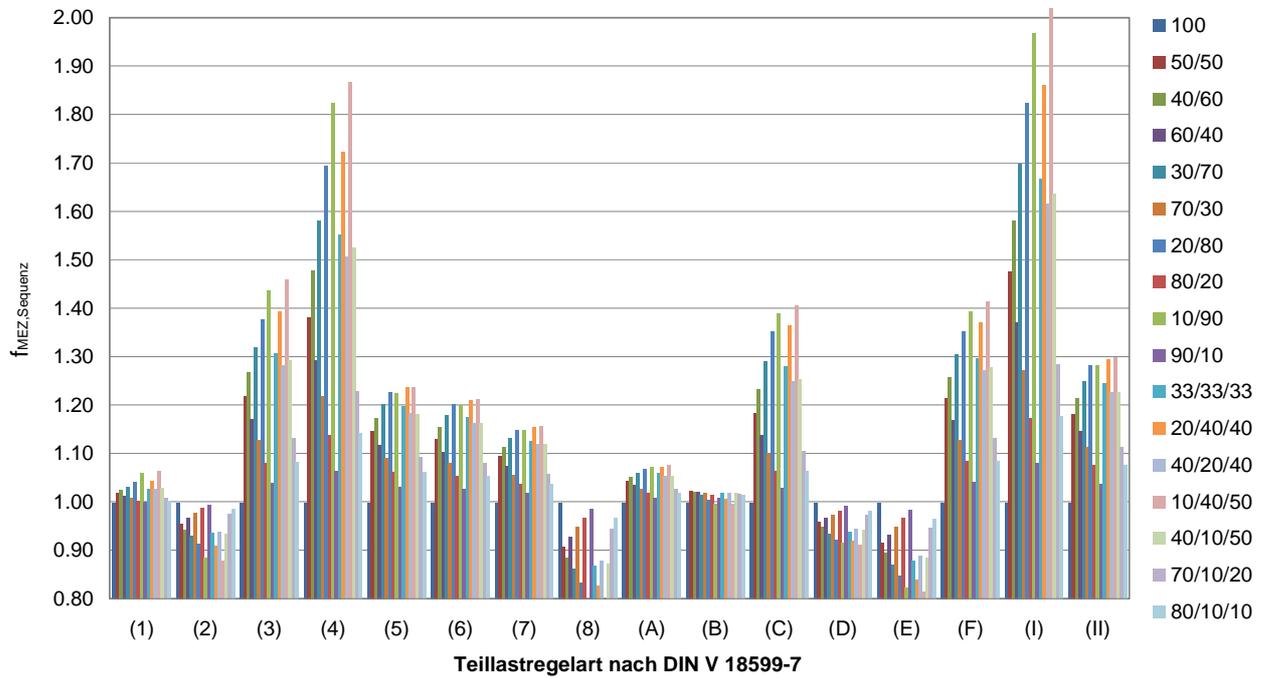


Abbildung 49: Effizienzfaktor  $f_{MEZ,Sequenz}$  für Mehrerzeugeranlagen im Sequenzbetrieb in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung bei Nutzungsart Büro

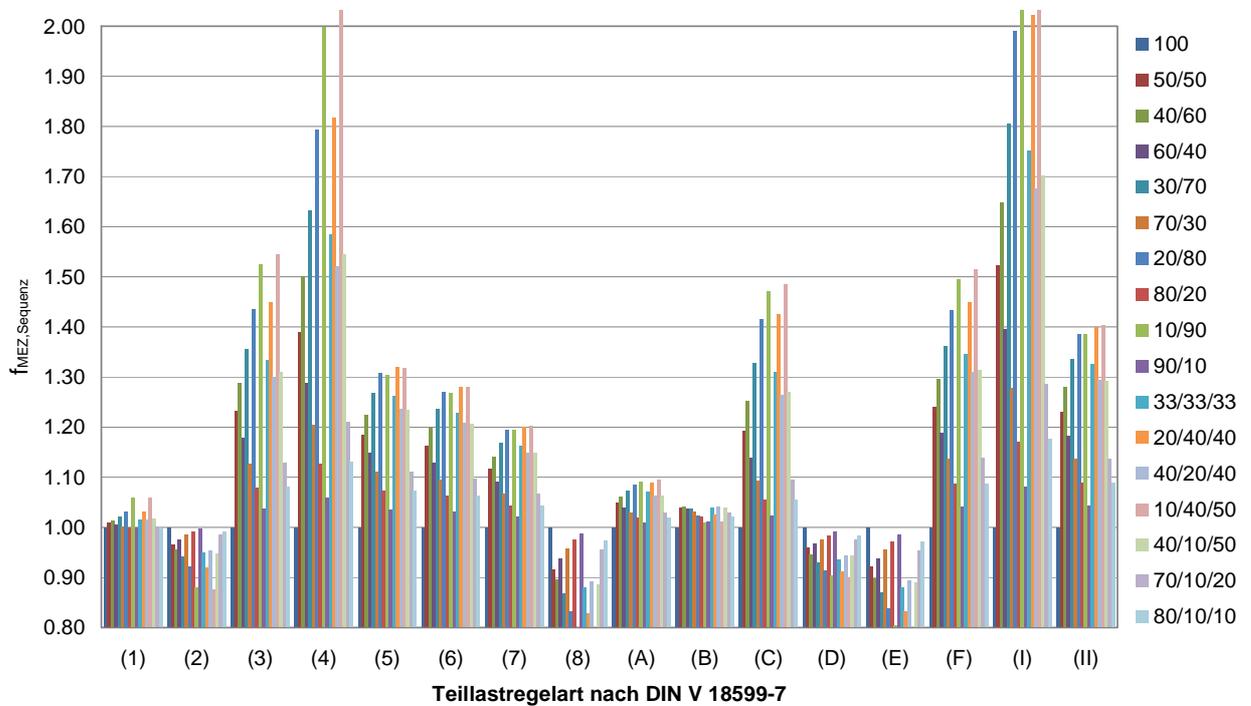


Abbildung 50: Effizienzfaktor  $f_{MEZ,Sequenz}$  für Mehrerzeugeranlagen im Sequenzbetrieb in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung bei Nutzungsart Ausstellung

Die Abhängigkeit von der Nutzung ist für alle Nutzungen nach DIN V 18599-10 gering. Der Effizienzfaktor  $f_{MEZ}$  muss im normativen Verfahren daher anlagenspezifisch und in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung vorgegeben werden. Aufgrund der Vielzahl der Teillastregelarten erscheint eine Zusammenfassung mehrerer Teillastregelarten jedoch möglich. Die dargestellten Ergebnisse berücksichtigen eine Leistungsaufteilung auf gleichartige Erzeugertechnologien mit gleichartigen Teillastregelarten, was den praktisch häufigsten Anwendungsfall darstellt.

Die Sequenzregelung unterschiedlicher Erzeugerarten ist im Rahmen der Untersuchungen ebenfalls betrachtet worden. Um weitere Tabellen mit Effizienzfaktoren praktisch möglicher, unzähliger Erzeugerkombinationen zu vermeiden, ist die Verwendung der Effizienzkenwerte bei gleichartiger Erzeugertechnologie auch für die Berechnung unterschiedlicher Erzeugerkonzepte untersucht worden. Im Ergebnis der vergleichenden Betrachtung kann für die Berechnung unterschiedlicher Erzeugerkombinationen in sehr guter Näherung der Mittelwert der Effizienzkenwerte bei Leistungsaufteilung auf gleichartige Maschinen verwendet werden. Die erforderliche Zuordnung der Tabellenwerte muss dabei nach der Größe der Führungsmaschine erfolgen.

Die im praktischen Einsatz häufig zu findende Absorptionskälteanlage als Grundlasttechnologie in Verbindung mit einer konventionellen Spitzenlastkältemaschine wird im normativen Verfahren separat betrachtet und durch gesonderte Kennwerttabellen abgebildet.

## 9.2 Parallelbetrieb

Beim Parallelbetrieb werden mehrere Kälteerzeuger gleicher oder verschiedener Baugröße parallel und damit gleichzeitig betrieben. Bei einer Leistungsaufteilung auf mehrere gleichgroße Maschinen, die parallel mit entsprechend geringer Leistung betrieben werden, bleibt die Effizienz der Einzelmaschine unverändert gleich. Das ändert sich jedoch bei einer ungleichmäßigen Leistungsaufteilung, da sich die relative Teillasthäufigkeit der Einzelmaschinen verändert und die kleinere Maschine eher ihre Leistungsgrenze erreicht.

Abbildung 51 zeigt für den Parallelbetrieb die Änderung der gewichteten Teillastkennlinie bei Nutzung mehrerer Maschinen exemplarisch für wassergekühlte Schraubenverdichteranlagen mit Steuerschieberregelung. Es zeigt sich insbesondere bei geringer Lastanforderung (geringer Teillaststufe) eine geringe Verbesserung des gewichteten Teillastfaktors, was in einer Erhöhung der

Gesamteffizienz des Anlagensystems gegenüber der Einzelerzeugeranlage mündet. Insbesondere bei teillastoptimierten Regelstrategien (z. B. mehrstufige Verdichterverbundanlagen, frequenzge-regelte Turboverdichter) kann es bei einer zusätzlichen Aufteilung auf mehrere Anlagen aber auch zu einer Verschlechterung der Effizienz des Gesamtsystems kommen.

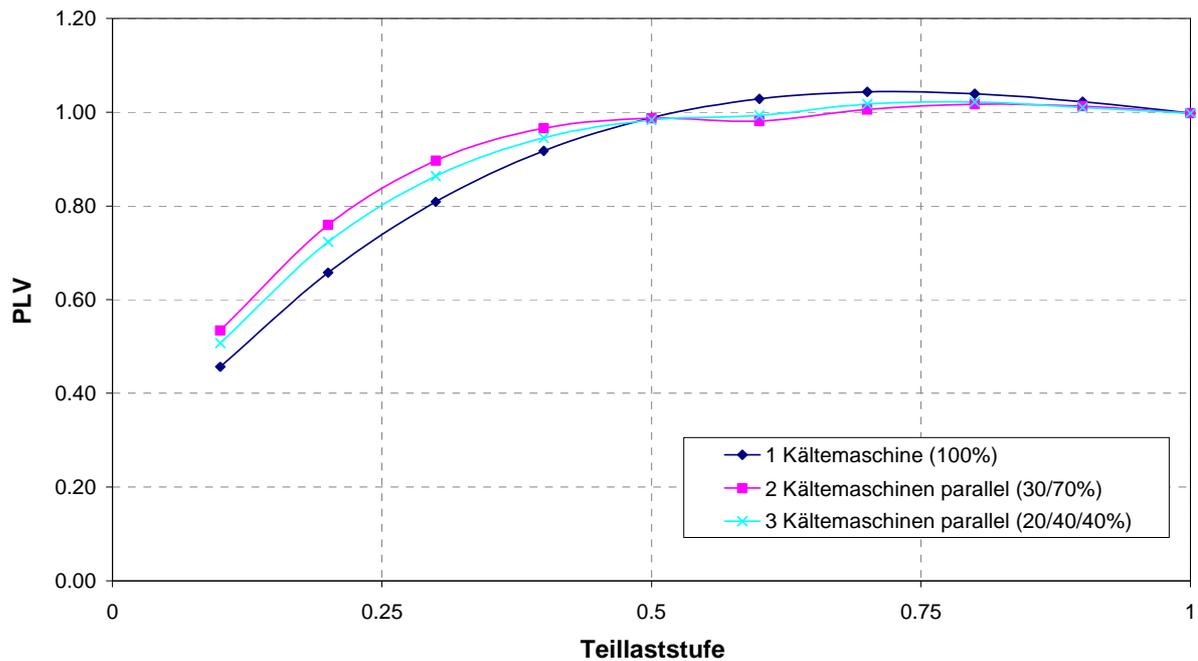


Abbildung 51: Teillastfaktor PLV bei Parallelregelung für Schraubenverdichter wassergekühlt (5)

Unter Berücksichtigung der Lasthäufigkeit der verschiedenen Nutzungen nach DIN V 18599-10 kann anhand der Teillastkennlinien eine relative Änderung der Teillasteffizienz in Bezug auf die Einzelmaschine ermittelt werden, welche mit einem Faktor  $f_{MEZ, Sequ}$  tabellarisch abgebildet werden kann. Dabei wird die Leistungsaufteilung der Teilanlagen entsprechend realistischer Praxis-Annahmen variiert. Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Veränderung der Teillasteffizienz für alle Teillastregelarten der DIN V 18599-7 in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung exemplarisch für die Nutzungsarten Büro und Ausstellung.

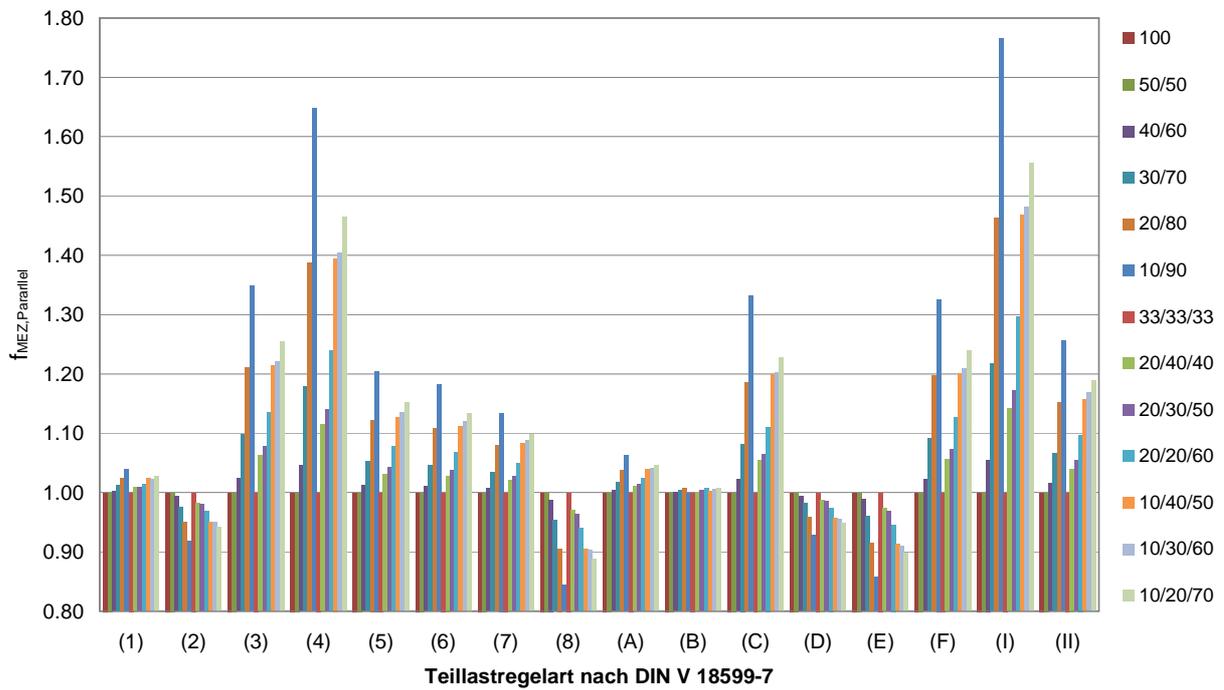


Abbildung 52: Effizienzfaktor  $f_{MEZ,parallel}$  für Mehrerzeugeranlagen im Parallelbetrieb in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung bei Nutzungsart Büro

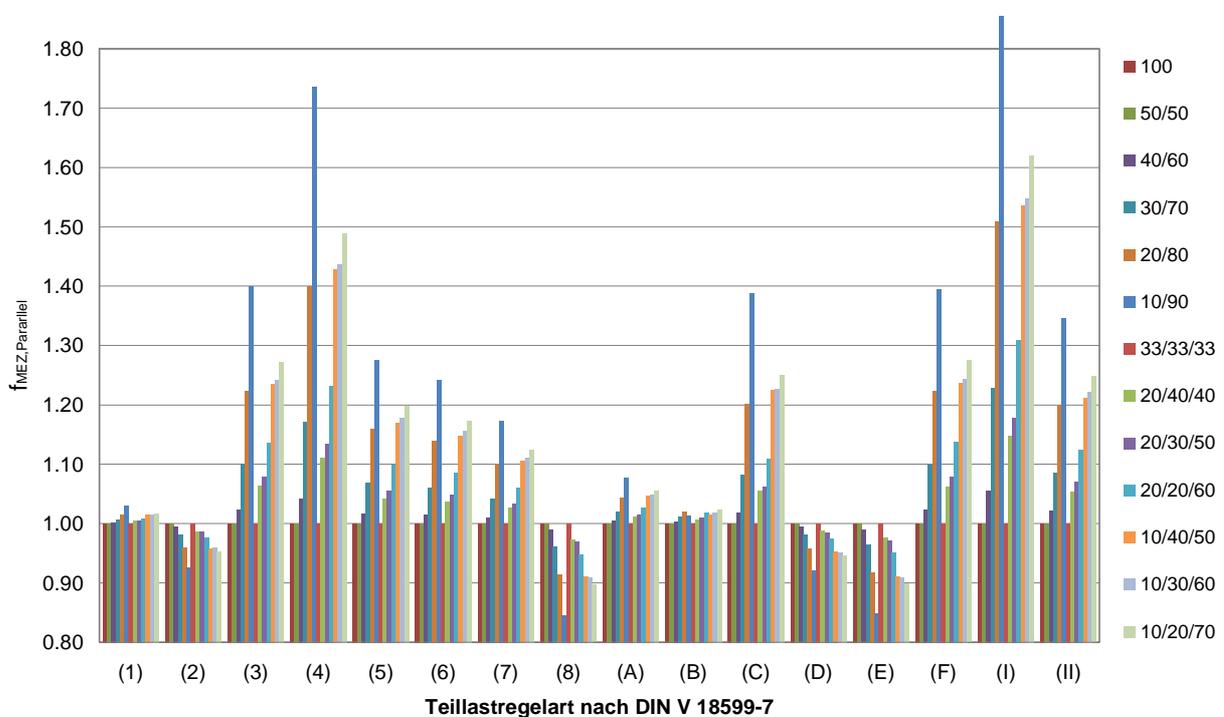


Abbildung 53: Effizienzfaktor  $f_{MEZ,parallel}$  für Mehrerzeugeranlagen im Parallelbetrieb in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung bei Nutzungsart Ausstellung

Im Ergebnis der Simulationsrechnungen ist analog zur Sequenzregelung eine starke Abhängigkeit des Effizienzfaktors von der Teillastregelart erkennbar. Bei den teillastoptimierten Anlagensystemen (2), (8), (D) und (E) bewirkt die Leistungsaufteilung eine Reduzierung der Gesamteffizienz. Bei den energetisch schlechten Teillastregelarten (3, (4), (C), (F) und (I) hingegen zeigt sich eine starke Verbesserung der Effizienz, da für den Einzelerzeuger im Mittel eine bessere Auslastung (höhere Teillaststufe) erreicht wird. Insbesondere bei steigendem Leitungsunterschied zwischen der kleinsten und größten Kältemaschine nimmt der Effekt stark zu. Insgesamt ist der Einfluss der Mehrerzeugeranlagen auf die Effizienz des Gesamtsystems jedoch weniger stark ausgeprägt als bei der Sequenzregelung.

Die dargestellten Ergebnisse berücksichtigen eine Leistungsaufteilung auf gleichartige Erzeugertechnologien mit gleichartigen Teillastregelarten, was den praktisch häufigsten Anwendungsfall darstellt. Die Parallelregelung unterschiedlicher Erzeugerarten ist im Rahmen der Untersuchungen ebenfalls betrachtet worden. Im Ergebnis der vergleichenden Betrachtung kann auch hier für die Berechnung unterschiedlicher Erzeugerkombinationen in sehr guter Näherung der Mittelwert der Effizienzkennwerte bei Leistungsaufteilung auf gleichartige Maschinen verwendet werden. Für die Zuordnung der Tabellenwerte ist dabei auch hier die Größe der Führungsmaschine verantwortlich.

Die Abhängigkeit von der Nutzung ist wie bei der Sequenzregelung für alle Nutzungen nach DIN V 18599-10 gering. Der Effizienzfaktor  $f_{MEZ}$  muss im normativen Verfahren daher anlagenspezifisch und in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung vorgegeben werden. Aufgrund der offensichtlichen Analogie der Tendenzen einzelner Teillastregelarten erscheint eine Zusammenfassung mehrerer Teillastregelarten analog zur Sequenzregelung gemäß dem Vorschlag in Tabelle 18 möglich.

$f_{MEZ}$	<b>Teillastregelart</b>	<b>3, 4, C, F, I, II <sup>1)</sup></b>	<b>5, 6, 7 <sup>1)</sup></b>	<b>1, A, B <sup>2)</sup></b>	<b>2, 8, D, E</b>
	Einfluss	positiv	gering	kein	negativ
<b>Sequenzbetrieb</b>	<b>2 Teilerzeuger</b>	1.31	1.14	1.03	0.93
	<b>3 Teilerzeuger</b>	1.38	1.16	1.03	0.91
<b>Parallelbetrieb</b>	<b>Nennleistungsverhältnis Min/Max &gt;0.25</b>	1.10	1.07	1.01	0.96
	<b>Nennleistungsverhältnis Min/Max ≤0.25</b>	1.28	1.12	1.02	0.94

Tabelle 18: Effizienzfaktor  $f_{MEZ}$  für Sequenz- und Parallelbetrieb in Abhängigkeit der Teillastregelart

## AP 10 Teilkennwerte für regenerative Kühltechnologien

Um eine schnelle und aussagekräftige Bewertungsmöglichkeit der regenerativen Kühlsysteme im Vergleich zu konventioneller Kältetechnik zu ermöglichen, erscheint eine Bewertung des gesamten Kälteerzeugungssystems anhand eines einzigen Teilkennwertes für die Kälteerzeugung zweckmäßig. Für eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Systeme sind in diesem Teilkennwert neben der Kälteerzeugung auch die Energieanteile der Verteilung, Speicherung und Übergabe des Gesamtkälteerzeugungssystems zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgte die Herleitung einer Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Teilkennwertes Kältetechnik basierend auf den im Berechnungsalgorithmus nach DIN V 18599-7 verwendeten Energiekennwerte (EER, PLV, etc.). Dieser Teilkennwert berücksichtigt folgende wesentlichen Einflussfaktoren:

- Erzeugereffizienz mit Berücksichtigung des Teillastbetriebes,
- Hilfsenergie der Rückkühlung und
- Hilfsenergie der Verteilung

und damit alle wesentlichen Bestandteile des Kühlsystems. Der Teilkennwert entspricht damit inhaltlich einer Systemjahresleistungszahl unter Berücksichtigung aller wesentlichen Systemverluste (ohne Übergabe- und Speicherverluste). Die Berechnung erfolgt quasienergetisch anhand der Bilanzierung der mittleren jährlichen Erzeugungsleistung  $\dot{Q}_{KK,el,m}$ , Rückkühlleistung  $\dot{Q}_{KR,el,m}$  und Verteilungsleistung  $\dot{Q}_{KV,el,m}$  nach folgender Bilanzgleichung.

$$E_{KK} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{KK,el,m}} + \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{KR,el,m}} + \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{KV,el,m}}$$

Unter Verwendung der im Kennwertverfahren nach DIN V 18599-7 bereitgestellten Bilanzgleichungen für die mittleren elektrischen Leistungsanteile ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den Teilkennwert Kälteerzeugung  $E_{KK}$  nach folgender Gleichung:

$$E_{KK} = \frac{EER \times PLV_{KK,av}}{1 + q_{R,elektr} \times PLV_{KK,av} \times f_{KK,R,av} (1 + EER) + EER \times PLV_{KK,av} \times \dot{q}_{Verteilung}}$$

$E_{KK}$	Teilkennwert Kälterzeugung
EER	Nennkälteleistungszahl EER (nach DIN V 18599-7 Kap. 7.1)
$PLV_{KK,av}$	gewichteter mittlerer Teillastfaktor (nach DIN V 18599-7 Anhang A)
$q_{R,elektr}$	Spezifischer Elektroenergiebedarf Rückkühler (nach DIN V 18599-7 Tabelle 29)
$f_{KK,R,av}$	gewichteter mittlerer Nutzungsfaktor Rückkühlung (nach DIN V 18599-7 Anhang A)
$\dot{q}_{Verteilung}$	mittlere gewichtete Pumpenleistung (nach DIN V 18599-7 Anhang D)

Bei der Berechnung muss berücksichtigt werden, dass die Kälteversorgungseinheit verschiedene Nutzungseinheiten (Zonen) versorgt. Die Berechnung des Teilkennwertes für die Kälterzeugung kann daher für jede Nutzungseinheit getrennt, mit flächengewichteten Faktoren oder arbeitsgewichtet erfolgen:

1. Berechnung für jede Nutzungseinheit des Gebäudes getrennt –  $E_{KK,NE}$
2. Soweit die Berechnung für das Gesamtgebäude nach DIN V 18599 nicht vorliegt, sind die flächengewichteten Faktoren  $PLV_{KK,av}$  und  $f_{KK,R,av}$  für die Kälteversorgungseinheit nach folgender Regel zu berechnen -  $E_{KK,A}$ :

a) Nur Raumkühlung

Die Kennwerte sind der jeweiligen Zeile Raumkühlung zu entnehmen.

b) Nur RLT-Kühlung

Die Kennwerte sind der Zeile "keine Feuchteanforderung mit WRG" zu entnehmen.

c) RLT und Raumkühlung

Der Mittelwert der Kennwerte nach a und b. ist zu verwenden.

Für Gebäude verschiedener Nutzungsarten sind die Kennwerte flächengewichtet zu mitteln.

3. Im Rahmen einer vollständigen Berechnung kann der Teilkennwert arbeitsgewichtet berechnet werden –  $E_{KK,Q}$ .

Bei der Berechnung kleiner Anlagensysteme kann auf die Bilanzierung der Verteilungsverluste unter Umständen verzichtet werden, da der Aufwand z. B. im Rahmen der Datenerfassung bei Energetischen Inspektion unverhältnismäßig hoch im Vergleich zum anteiligen Energieverbrauch der Verteilung ist. Die Bilanzgleichung reduziert sich damit um den Anteil der Hilfsenergie der Verteilung. Im Ergebnis kann der Teilkennwert nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$E_{KK} = \frac{EER \times PLV_{KK,av}}{1 + q_{R,elektr} \times f_{KK,R,av} (1 + EER)}$$

## Literaturverzeichnis

- [1] Meßwertgestütztes Programm zur Simulation von Sorptionsregeneratoren (SISOR) und Leistungsmessungen bei abweichenden Nennbedingungen, ILK Dresden, Fachbericht ILK – B – 4 /98 – 2636, 1998
  
- [2] Zhou, Yasu/Zhang, Xu/Chen, Peilin (2001): Heat Transfer and Reasonable Distance Analysis for Vertical U-tubes Used in GSHP. In: Journal of Dong Hua University (Oct.2001/Vol.27, No.5), S.11-13
  
- [3] VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Beuth-Verlag, September 2001
  
- [4] <http://www.amasond.com/uploaded-docs/eTRTdeWeb.pdf>

**Anhang A: Deckungsanteil, Nutzungsgrad und Betriebszeit der Freien (Rück-)Kühlung**

Profil	Temperatur- niveau	Kennwert	trocken			feucht		
			max	alternativ	parallel	max	alternativ	parallel
Rechenzentrum hochbelastet	6/12°C	Deckung	31,9%	15,0%	31,2%	31,6%	7,9%	30,5%
		h_KM	8760	7057,5	7057,5	8760	7813,5	7813,5
		h_FC	0	1702,5	4581	0	946,5	5305
	10/15°C	Deckung	45,1%	27,1%	44,3%	48,6%	22,8%	46,6%
		h_KM	8760	5846	5846	8760	6271	6271
		h_FC	0	2914	5647	0	2489	6328
	14/18°C	Deckung	60,0%	42,2%	59,0%	68,1%	42,5%	65,3%
		h_KM	8760	4457,5	4457,5	8760	4437	4435,5
		h_FC	0	4302,5	6704	0	4323	7383
Rechenzentrum mittlere Belastung	6/12°C	Deckung	14,8%	1,7%	13,2%	20,4%	4,4%	17,5%
		h_KM	6944	6169	4775	6944	5605,5	4654
		h_FC	0	775	2765	0	1338,5	3489
	10/15°C	Deckung	26,8%	9,1%	24,9%	37,2%	15,2%	32,1%
		h_KM	6944	4871	3985	6944	4211,5	3746
		h_FC	0	2073	3831	0	2732,5	4512
	14/18°C	Deckung	43,8%	24,6%	41,4%	60,2%	33,0%	53,2%
		h_KM	6944	3458	3059,5	6944	2898,5	2599,5
		h_FC	0	3486	4888	0	4045,5	5567
Büro_Leichtbau	6/12°C	Deckung	1,7%	0,3%	1,3%	5,6%	0,5%	2,9%
		h_KM	1704	1673	1595,5	1704	1654,5	1528
		h_FC	0	31	152,5	0	49,5	297,5
	10/15°C	Deckung	5,2%	0,8%	4,1%	13,2%	1,4%	8,7%
		h_KM	1704	1624	1467	1704	1565	1374
		h_FC	0	80	392	0	139	613
	14/18°C	Deckung	12,6%	3,3%	11,2%	26,3%	6,5%	20,0%
		h_KM	1704	1437	1294	1704	1274	1178
		h_FC	0	267	729	0	430	946
Büro_Massivbau	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,6%	0,0%	0,1%
		h_KM	1187,5	1187,5	1186,5	1187,5	1187,5	1173
		h_FC	0	0	1	0	0	17,5
	10/15°C	Deckung	0,7%	0,0%	0,2%	6,5%	0,0%	1,4%
		h_KM	1187,5	1187,5	1155	1187,5	1186,5	1079
		h_FC	0	0	37,5	0	1	153,5
	14/18°C	Deckung	5,0%	0,1%	3,3%	18,1%	0,9%	9,4%
		h_KM	1187,5	1170	1011,5	1187,5	1103	886,5
		h_FC	0	17,5	255	0	84,5	457,5
Hotel_Leichtbau	6/12°C	Deckung	1,1%	0,1%	0,9%	3,9%	0,3%	1,8%
		h_KM	1771	1759,5	1731,5	1771	1748,5	1703,5
		h_FC	0	11,5	67,5	0	22,5	120
	10/15°C	Deckung	3,0%	0,5%	2,5%	10,3%	1,1%	4,7%
		h_KM	1771	1734,5	1678,5	1771	1707,5	1594
		h_FC	0	36,5	154,5	0	63,5	263,5
	14/18°C	Deckung	7,7%	2,0%	6,2%	24,3%	3,6%	12,9%
		h_KM	1771	1665	1542,5	1771	1589	1338
		h_FC	0	106	343	0	182	597,5
Hotel_Massivbau	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	372,5	372,5	372,5	372,5	372,5	372,5
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	0,0%	0,0%
		h_KM	372,5	372,5	372,5	372,5	372,5	372,5
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,5%	0,0%	0,0%	7,1%	0,0%	1,4%
		h_KM	372,5	372,5	371	372,5	372,5	341,5
		h_FC	0	0	1,5	0	0	36

Profil	Temperatur- niveau	Kennwert	trocken			feucht		
Bettzimmer_Leichtbau	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	0,0%	0,1%
		h_KM	1153,5	1153,5	1153,5	1153,5	1153,5	1147
		h_FC	0	0	0	0	0	6,5
	10/15°C	Deckung	0,3%	0,0%	0,1%	5,3%	0,0%	0,7%
		h_KM	1153,5	1153,5	1141,5	1153,5	1153,5	1114,5
		h_FC	0	0	13,5	0	0	47
	14/18°C	Deckung	2,1%	0,1%	1,3%	17,2%	0,3%	4,3%
		h_KM	1153,5	1147	1097,5	1153,5	1129	1000
		h_FC	0	6,5	73	0	24,5	173,5
Bettzimmer_Massivbau	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	310,5	310,5	310,5	310,5	310,5	310,5
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	310,5	310,5	310,5	310,5	310,5	310,5
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,2%	0,0%	0,0%
		h_KM	310,5	310,5	310,5	310,5	310,5	310,5
		h_FC	0	0	0	0	0	0
Schule_Leichtbau	6/12°C	Deckung	0,9%	0,1%	0,6%	4,1%	0,2%	1,4%
		h_KM	706,5	701	682	706,5	696	662,5
		h_FC	0	5,5	37	0	10,5	79
	10/15°C	Deckung	3,1%	0,3%	2,3%	11,1%	0,6%	5,7%
		h_KM	706,5	688	645	706,5	676	594,5
		h_FC	0	18,5	110	0	30,5	205
	14/18°C	Deckung	9,1%	1,6%	7,7%	23,9%	3,4%	15,7%
		h_KM	706,5	640,5	563,5	706,5	586,5	507
		h_FC	0	66	256,5	0	120	360
Schule_Massivbau	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	266	266	266	266	266	266
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%
		h_KM	266	266	266	266	266	266
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	9,6%	0,0%	0,1%
		h_KM	266	266	266	266	266	263
		h_FC	0	0	0	0	0	3
Einzelhandel_Leichtbau	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,1%	0,0%	0,1%
		h_KM	1553,5	1553,5	1552	1553,5	1553,5	1544
		h_FC	0	0	2	0	0	11,5
	10/15°C	Deckung	0,9%	0,0%	0,3%	7,9%	0,0%	2,1%
		h_KM	1553,5	1553,5	1522,5	1553,5	1551,5	1424,5
		h_FC	0	0	40,5	0	2	201,5
	14/18°C	Deckung	5,7%	0,1%	4,0%	20,9%	1,2%	11,9%
		h_KM	1553,5	1542,5	1378	1553,5	1444,5	1240
		h_FC	0	11	322,5	0	109	597,5
Einzelhandel_Massivbau	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	0,0%	0,0%
		h_KM	1327,5	1327,5	1327,5	1327,5	1327,5	1327,5
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,1%	0,0%	0,0%	4,5%	0,0%	0,3%
		h_KM	1327,5	1327,5	1326,5	1327,5	1327,5	1302,5
		h_FC	0	0	1	0	0	43,5
	14/18°C	Deckung	2,9%	0,0%	1,4%	16,6%	0,1%	6,1%
		h_KM	1327,5	1327,5	1255,5	1327,5	1316,5	1118,5
		h_FC	0	0	113	0	11	350

Profil	Temperatur- niveau	Kennwert	trocken			feucht		
Hörsaal_leicht	6/12°C	Deckung	0,2%	0,0%	0,1%	2,8%	0,0%	0,4%
		h_KM	629	629	627	629	629	616
		h_FC	0	0	3	0	0	22
	10/15°C	Deckung	1,7%	0,0%	1,0%	8,7%	0,1%	3,4%
		h_KM	629	629	598	629	626	531
		h_FC	0	0	49	0	3	136
	14/18°C	Deckung	6,1%	0,6%	4,7%	20,5%	2,4%	11,4%
		h_KM	629	607	506	629	538	457
		h_FC	0	22	182	0	91	280
Hörsaal_Massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	387	387	387	387	387	387
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,9%	0,0%	0,0%
		h_KM	387	387	387	387	387	387
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,3%	0,0%	0,0%	12,9%	0,0%	0,9%
		h_KM	387	387	384	387	387	349
		h_FC	0	0	3	0	0	41
Küche_leicht	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%
		h_KM	1735	1735	1735	1735	1735	1729
		h_FC	0	0	0	0	0	6
	10/15°C	Deckung	0,3%	0,0%	0,0%	6,5%	0,0%	0,5%
		h_KM	1735	1735	1712	1735	1735	1625
		h_FC	0	0	23	0	0	113
	14/18°C	Deckung	3,9%	0,0%	1,6%	19,9%	0,1%	9,3%
		h_KM	1735	1729	1504	1735	1686	1261
		h_FC	0	6	263	0	49	661
Küche_Massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%
		h_KM	1475	1475	1475	1475	1475	1475
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%	0,0%	0,0%
		h_KM	1475	1475	1475	1475	1475	1475
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	1,8%	0,0%	0,0%	17,1%	0,0%	4,6%
		h_KM	1475	1475	1448	1475	1475	1153
		h_FC	0	0	27	0	0	401
Kantine_leicht	6/12°C	Deckung	0,3%	0,0%	0,2%	3,3%	0,0%	0,8%
		h_KM	798	798	789	798	797	774
		h_FC	0	0	13	0	1	40
	10/15°C	Deckung	2,0%	0,0%	1,3%	8,8%	0,3%	3,9%
		h_KM	798	795	752	798	785	670
		h_FC	0	3	73	0	13	161
	14/18°C	Deckung	6,4%	0,9%	5,1%	19,9%	2,8%	11,4%
		h_KM	798	758	652	798	685	582
		h_FC	0	40	217	0	113	330
Kantine_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	475	475	475	475	475	475
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	475	475	475	475	475	475
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,1%	0,0%	0,0%	11,1%	0,0%	0,3%
		h_KM	475	475	475	475	475	454
		h_FC	0	0	0	0	0	21

Profil	Temperatur- niveau	Kennwert	trocken			feucht		
GewHalle_mittelschwere Arbeit_leicht	6/12°C	Deckung	0,5%	0,0%	0,3%	3,3%	0,0%	1,0%
		h_KM	913	913	902	913	912	889
		h_FC	0	0	19	0	1	45
	10/15°C	Deckung	2,0%	0,1%	1,4%	8,9%	0,5%	3,5%
		h_KM	913	907	870	913	894	796
		h_FC	0	6	71	0	19	148
	14/18°C	Deckung	6,3%	1,3%	4,8%	20,8%	2,7%	11,6%
		h_KM	913	869	767	913	807	679
		h_FC	0	44	202	0	106	350
GewHal- le_mittelschwere_Arbeit_ massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	378	378	378	378	378	378
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%
		h_KM	378	378	378	378	378	378
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	6,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	378	378	378	378	378	378
		h_FC	0	0	0	0	0	0
Sporthalle_leicht	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	1162	1162	1162	1162	1162	1160
		h_FC	0	0	0	0	0	2
	10/15°C	Deckung	0,1%	0,0%	0,0%	5,2%	0,0%	0,3%
		h_KM	1162	1162	1158	1162	1162	1149
		h_FC	0	0	4	0	0	18
	14/18°C	Deckung	1,6%	0,0%	0,8%	16,5%	0,1%	4,3%
		h_KM	1162	1160	1140	1162	1154	1019
		h_FC	0	2	46	0	8	168
Sporthalle_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	895	895	895	895	895	895
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%
		h_KM	895	895	895	895	895	894
		h_FC	0	0	0	0	0	2
	14/18°C	Deckung	0,7%	0,0%	0,1%	11,9%	0,0%	2,0%
		h_KM	895	895	884	895	895	838
		h_FC	0	0	11	0	0	88
Ausstellung_leicht	6/12°C	Deckung	3,1%	0,5%	2,6%	7,2%	0,7%	4,5%
		h_KM	3337	3264	3132	3337	3227	3043
		h_FC	0	73	359	0	110	609
	10/15°C	Deckung	7,4%	1,6%	6,4%	16,0%	2,1%	10,9%
		h_KM	3337	3149	2915	3337	3065	2742
		h_FC	0	188	768	0	272	1152
	14/18°C	Deckung	16,1%	4,7%	14,3%	31,5%	6,9%	24,1%
		h_KM	3337	2853	2492	3337	2629	2205
		h_FC	0	484	1412	0	708	1969
Ausstellung_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	572	572	572	572	572	572
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	0,0%	0,0%
		h_KM	572	572	572	572	572	572
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,4%	0,0%	0,1%	9,1%	0,0%	0,6%
		h_KM	572	572	571	572	572	555
		h_FC	0	0	4	0	0	27

Profil	Temperatur-niveau	Kennwert	trocken			feucht		
Theater_leicht	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	0,0%	0,0%
		h_KM	303	303	303	303	303	300
		h_FC	0	0	0	0	0	3
	10/15°C	Deckung	0,9%	0,0%	0,2%	5,9%	0,0%	2,2%
		h_KM	303	303	291	303	303	268
		h_FC	0	0	12	0	0	52
	14/18°C	Deckung	8,0%	0,0%	5,1%	22,5%	0,8%	15,0%
		h_KM	303	300	244	303	276	225
		h_FC	0	3	88	0	27	165
Theater_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	378	378	378	378	378	378
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%
		h_KM	378	378	378	378	378	378
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	6,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	378	378	378	378	378	378
		h_FC	0	0	0	0	0	0
Bühne_leicht	6/12°C	Deckung	0,1%	0,0%	0,1%	2,6%	0,0%	0,5%
		h_KM	771	771	770	771	771	765
		h_FC	0	0	3	0	0	13
	10/15°C	Deckung	0,9%	0,0%	0,7%	7,7%	0,1%	2,0%
		h_KM	771	771	764	771	768	729
		h_FC	0	0	23	0	3	56
	14/18°C	Deckung	4,1%	0,6%	2,7%	18,8%	1,5%	8,5%
		h_KM	771	759	712	771	735	617
		h_FC	0	12	92	0	36	207
Bühne_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	207	207	207	207	207	207
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	207	207	207	207	207	207
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,4%	0,0%	0,0%
		h_KM	207	207	207	207	207	207
		h_FC	0	0	0	0	0	0
Fitnessraum_leicht	6/12°C	Deckung	0,9%	0,1%	0,6%	4,4%	0,2%	1,7%
		h_KM	2489	2481	2440	2489	2470	2371
		h_FC	0	8	90	0	19	217
	10/15°C	Deckung	3,4%	0,3%	2,6%	11,8%	0,8%	6,3%
		h_KM	2489	2458	2311	2489	2411	2130
		h_FC	0	31	331	0	78	617
	14/18°C	Deckung	10,1%	1,6%	8,3%	26,3%	4,5%	17,8%
		h_KM	2489	2310	2026	2489	2086	1812
		h_FC	0	179	815	0	403	1250
Fitnessraum_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	1216	1216	1216	1216	1216	1216
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	1216	1216	1216	1216	1216	1216
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,2%	0,0%	0,0%	13,5%	0,0%	0,6%
		h_KM	1216	1216	1216	1216	1216	1130
		h_FC	0	0	0	0	0	89

Profil	Temperatur- niveau	Kennwert	trocken			feucht		
Labor_leicht	6/12°C	Deckung	0,3%	0,0%	0,2%	2,8%	0,0%	0,8%
		h_KM	1019	1019	1013	1019	1018	997
		h_FC	0	0	14	0	1	38
	10/15°C	Deckung	1,5%	0,1%	1,1%	7,7%	0,3%	2,6%
		h_KM	1019	1014	985	1019	1005	923
		h_FC	0	5	58	0	14	117
	14/18°C	Deckung	4,8%	1,0%	3,5%	19,1%	1,9%	9,2%
		h_KM	1019	981	900	1019	936	782
		h_FC	0	38	164	0	83	318
Labor_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	285	285	285	285	285	285
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	285	285	285	285	285	285
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,7%	0,0%	0,0%
		h_KM	285	285	285	285	285	285
		h_FC	0	0	0	0	0	0
ITS_leicht	6/12°C	Deckung	0,1%	0,0%	0,0%	1,6%	0,0%	0,2%
		h_KM	1438	1438	1432	1438	1438	1417
		h_FC	0	0	6	0	0	21
	10/15°C	Deckung	0,6%	0,0%	0,3%	6,6%	0,0%	1,1%
		h_KM	1438	1438	1404	1438	1432	1352
		h_FC	0	0	38	0	6	99
	14/18°C	Deckung	2,9%	0,2%	1,7%	20,0%	0,5%	6,3%
		h_KM	1438	1417	1335	1438	1380	1172
		h_FC	0	21	135	0	58	312
ITS_massiv	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	309	309	309	309	309	309
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	309	309	309	309	309	309
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	309	309	309	309	309	309
		h_FC	0	0	0	0	0	0
Logistikhalle_XL_Süd	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
		h_KM	513	513	513	513	513	513
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	1,6%	0,0%	0,0%
		h_KM	513	513	513	513	513	513
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	10,2%	0,0%	0,0%
		h_KM	513	513	513	513	513	512
		h_FC	0	0	0	0	0	1
Logistikhalle_M_West	6/12°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	197	197	197	197	197	197
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	10/15°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%
		h_KM	197	197	197	197	197	197
		h_FC	0	0	0	0	0	0
	14/18°C	Deckung	0,0%	0,0%	0,0%	5,0%	0,0%	0,0%
		h_KM	197	197	197	197	197	197
		h_FC	0	0	0	0	0	0

**Anhang B: Teillastkennwerte  $PLV_{AV}$  für RLT-integrierte Kältetechnik**

Nutzung	RLT-Typ	Kennwert	PLV <sub>AV</sub> (T_AU)			PLV <sub>AV,EXH</sub> (T_AB)			f <sub>2</sub> (T_AU)	f <sub>2</sub> (T_AB)	T_AU,m	T_AB,m
		Regelung	(A)	(B)	(F)	(A)	(B)	(F)				
Büro_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine		1.15	1.27	0.80	1.15	1.27	0.79	1.29	1.24	23.38	24.61
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit		1.16	1.28	0.85	1.14	1.26	0.83	1.31	1.24	22.96	24.62
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme		1.18	1.30	0.87	1.14	1.26	0.83	1.36	1.25	21.83	24.35
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte		1.18	1.31	0.89	1.16	1.28	0.86	1.37	1.27	21.57	23.64
Büro_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine		1.15	1.27	0.80	1.15	1.27	0.79	1.29	1.24	23.38	24.61
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit		1.16	1.28	0.82	1.24	1.33	0.86	1.30	1.31	23.12	22.76
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme		1.18	1.31	0.86	1.28	1.38	0.90	1.36	1.39	21.71	20.98
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte		1.18	1.31	0.89	1.16	1.28	0.86	1.37	1.27	21.57	23.64
Hotel_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine		1.11	1.23	0.72	1.12	1.24	0.71	1.26	1.22	24.05	24.91
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit		1.11	1.24	0.74	1.10	1.22	0.73	1.28	1.23	23.72	24.94
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme		1.12	1.26	0.76	1.09	1.23	0.72	1.31	1.23	23.06	24.79
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte		1.12	1.26	0.76	1.11	1.25	0.75	1.31	1.26	22.98	24.11
Hotel_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine		1.11	1.23	0.72	1.12	1.24	0.71	1.26	1.22	24.05	24.91
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit		1.12	1.25	0.74	1.21	1.30	0.76	1.27	1.29	23.87	23.20
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme		1.12	1.26	0.76	1.22	1.34	0.79	1.31	1.35	23.02	21.76
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte		1.12	1.26	0.76	1.11	1.25	0.75	1.31	1.26	22.98	24.11
Bettzimmer_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine		1.06	1.17	0.69	1.09	1.20	0.70	1.22	1.20	25.10	25.46
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit		1.07	1.19	0.73	1.07	1.19	0.72	1.23	1.20	24.90	25.63
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme		1.08	1.21	0.74	1.07	1.20	0.72	1.23	1.20	24.87	25.64
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte		1.08	1.21	0.74	1.08	1.21	0.74	1.24	1.21	24.79	25.26
Bettzimmer_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine		1.06	1.17	0.69	1.09	1.20	0.70	1.22	1.20	25.10	25.46
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit		1.07	1.19	0.72	1.17	1.25	0.75	1.22	1.26	25.09	23.94
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme		1.08	1.21	0.73	1.19	1.31	0.78	1.23	1.31	24.89	22.82
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte		1.08	1.21	0.74	1.08	1.21	0.74	1.24	1.21	24.79	25.26

Schule_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.16	1.28	0.83	1.14	1.26	0.81	1.30	1.24	23.11	24.55
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.17	1.29	0.85	1.14	1.25	0.83	1.31	1.24	22.91	24.51
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.86	1.14	1.26	0.82	1.32	1.24	22.54	24.48
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.19	1.31	0.90	1.16	1.28	0.88	1.33	1.27	22.42	23.84
Schule_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.16	1.28	0.83	1.14	1.26	0.81	1.30	1.24	23.11	24.55
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.16	1.28	0.80	1.24	1.33	0.85	1.30	1.31	23.13	22.69
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.85	1.28	1.38	0.89	1.32	1.37	22.52	21.38
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.19	1.31	0.90	1.16	1.28	0.88	1.33	1.27	22.42	23.84
Einzelhandel_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.15	1.28	0.80	1.15	1.28	0.79	1.29	1.24	23.39	24.56
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.16	1.28	0.84	1.14	1.26	0.82	1.31	1.24	22.98	24.52
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.85	1.13	1.26	0.80	1.35	1.25	21.92	24.30
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.18	1.31	0.86	1.15	1.28	0.84	1.36	1.28	21.71	23.54
Einzelhandel_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.15	1.28	0.80	1.15	1.28	0.79	1.29	1.24	23.39	24.56
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.16	1.28	0.80	1.24	1.33	0.84	1.30	1.31	23.17	22.75
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.84	1.27	1.38	0.87	1.36	1.38	21.83	21.02
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.18	1.31	0.86	1.15	1.28	0.84	1.36	1.28	21.71	23.54
Hörsaal_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.20	1.31	0.93	1.17	1.28	0.90	1.32	1.24	22.60	24.36
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.20	1.32	0.94	1.17	1.28	0.91	1.32	1.25	22.47	24.32
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.21	1.32	0.94	1.16	1.27	0.90	1.34	1.25	22.00	24.27
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.22	1.32	0.98	1.19	1.29	0.95	1.35	1.27	21.93	23.64
Hörsaal_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.20	1.31	0.93	1.17	1.28	0.90	1.32	1.24	22.60	24.36
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.19	1.31	0.88	1.27	1.35	0.93	1.31	1.32	22.72	22.43
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.21	1.33	0.93	1.31	1.40	0.98	1.34	1.38	22.01	21.09
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.22	1.32	0.98	1.19	1.29	0.95	1.35	1.27	21.93	23.64

Küche_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.18	1.31	0.80	1.18	1.31	0.79	1.28	1.24	23.54	24.62
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.18	1.30	0.83	1.16	1.28	0.81	1.30	1.24	22.99	24.49
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.81	1.12	1.25	0.76	1.37	1.25	21.55	24.15
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.17	1.30	0.82	1.14	1.27	0.79	1.37	1.29	21.41	23.29
Küche_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.18	1.31	0.80	1.18	1.31	0.79	1.28	1.24	23.54	24.62
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.17	1.30	0.80	1.26	1.35	0.83	1.30	1.31	23.12	22.72
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.80	1.26	1.37	0.83	1.37	1.39	21.47	20.79
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.17	1.30	0.82	1.14	1.27	0.79	1.37	1.29	21.41	23.29
Rechenzentrum_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.21	1.35	0.88	1.16	1.29	0.83	1.38	1.26	21.11	23.84
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.23	1.36	0.89	1.16	1.29	0.87	1.39	1.26	20.87	23.83
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.31	1.44	1.00	1.19	1.31	0.89	1.48	1.27	18.94	23.58
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.34	1.46	1.09	1.24	1.35	0.99	1.49	1.30	18.79	22.87
Rechenzentrum_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.21	1.35	0.88	1.16	1.29	0.83	1.38	1.26	21.11	23.84
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.23	1.36	0.86	1.28	1.37	0.90	1.39	1.35	20.99	21.73
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.32	1.46	1.02	1.38	1.47	1.01	1.49	1.44	18.84	19.70
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.34	1.46	1.09	1.24	1.35	0.99	1.49	1.30	18.79	22.87
Kantine_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.14	1.26	0.78	1.15	1.28	0.78	1.27	1.23	23.79	24.73
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.14	1.26	0.82	1.13	1.25	0.81	1.29	1.23	23.31	24.67
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.14	1.27	0.83	1.12	1.24	0.79	1.32	1.24	22.68	24.53
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.15	1.28	0.84	1.14	1.26	0.82	1.33	1.27	22.54	23.83
Kantine_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.14	1.26	0.78	1.15	1.28	0.78	1.27	1.23	23.79	24.73
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.14	1.26	0.80	1.23	1.32	0.84	1.29	1.30	23.51	22.94
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.14	1.27	0.82	1.25	1.36	0.86	1.32	1.37	22.66	21.43
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.15	1.28	0.84	1.14	1.26	0.82	1.33	1.27	22.54	23.83

GewHallen_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.10	1.21	0.75	1.11	1.23	0.75	1.26	1.23	24.08	24.86
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.11	1.22	0.78	1.09	1.21	0.77	1.28	1.23	23.75	24.91
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.12	1.24	0.80	1.10	1.23	0.78	1.29	1.23	23.49	24.88
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.12	1.25	0.82	1.12	1.24	0.81	1.29	1.25	23.36	24.30
GewHallen_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.10	1.21	0.75	1.11	1.23	0.75	1.26	1.23	24.08	24.86
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.11	1.22	0.76	1.20	1.28	0.80	1.27	1.29	23.94	23.20
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.12	1.25	0.79	1.23	1.34	0.84	1.29	1.35	23.48	21.91
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.12	1.25	0.82	1.12	1.24	0.81	1.29	1.25	23.36	24.30
Sporthalle_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.13	1.26	0.76	1.14	1.27	0.76	1.27	1.23	23.88	24.76
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.13	1.25	0.79	1.12	1.24	0.78	1.28	1.23	23.46	24.70
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.13	1.26	0.79	1.11	1.24	0.76	1.31	1.24	22.93	24.58
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.14	1.27	0.81	1.13	1.26	0.80	1.31	1.26	22.84	23.92
Sporthalle_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.13	1.26	0.76	1.14	1.27	0.76	1.27	1.23	23.88	24.76
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.13	1.26	0.77	1.23	1.31	0.81	1.28	1.30	23.67	23.01
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.13	1.27	0.78	1.24	1.35	0.82	1.31	1.36	22.93	21.60
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.14	1.27	0.81	1.13	1.26	0.80	1.31	1.26	22.84	23.92
Ausstellung_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.14	1.26	0.77	1.14	1.26	0.76	1.28	1.23	23.54	24.70
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.14	1.27	0.79	1.12	1.24	0.78	1.30	1.23	23.20	24.70
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.16	1.28	0.81	1.11	1.24	0.77	1.34	1.24	22.30	24.53
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.16	1.29	0.83	1.14	1.26	0.80	1.34	1.27	22.14	23.86
Ausstellung_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.14	1.26	0.77	1.14	1.26	0.76	1.28	1.23	23.54	24.70
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.15	1.27	0.77	1.24	1.31	0.81	1.29	1.30	23.41	22.95
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.16	1.29	0.80	1.25	1.36	0.83	1.34	1.37	22.24	21.30
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.16	1.29	0.83	1.14	1.26	0.80	1.34	1.27	22.14	23.86

Theater_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.16	1.28	0.83	1.15	1.26	0.81	1.31	1.25	22.84	24.33
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.17	1.28	0.84	1.14	1.25	0.81	1.32	1.25	22.68	24.32
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.18	1.31	0.84	1.13	1.25	0.79	1.36	1.25	21.84	24.32
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.19	1.32	0.85	1.15	1.28	0.82	1.36	1.27	21.77	23.66
Theater_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.16	1.28	0.83	1.15	1.26	0.81	1.31	1.25	22.84	24.33
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.17	1.29	0.83	1.26	1.33	0.85	1.31	1.32	22.85	22.56
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.19	1.31	0.84	1.27	1.38	0.87	1.36	1.38	21.82	21.05
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.19	1.32	0.85	1.15	1.28	0.82	1.36	1.27	21.77	23.66
Bühne_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.07	1.18	0.73	1.10	1.21	0.74	1.22	1.20	25.20	25.56
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.08	1.20	0.77	1.08	1.20	0.76	1.23	1.20	24.96	25.77
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.08	1.20	0.77	1.07	1.20	0.75	1.24	1.20	24.68	25.66
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.09	1.21	0.78	1.09	1.21	0.78	1.25	1.21	24.62	25.27
Bühne_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.07	1.18	0.73	1.10	1.21	0.74	1.22	1.20	25.20	25.56
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.08	1.19	0.74	1.17	1.25	0.79	1.23	1.26	25.10	23.98
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.08	1.20	0.76	1.20	1.31	0.81	1.24	1.31	24.72	22.73
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.09	1.21	0.78	1.09	1.21	0.78	1.25	1.21	24.62	25.27
Fitnessraum_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.18	1.30	0.80	1.17	1.30	0.78	1.30	1.24	23.17	24.45
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.17	1.29	0.81	1.14	1.26	0.79	1.32	1.25	22.71	24.34
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.81	1.12	1.25	0.77	1.36	1.25	21.76	24.17
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.17	1.30	0.83	1.14	1.27	0.80	1.36	1.28	21.63	23.41
Fitnessraum_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.18	1.30	0.80	1.17	1.30	0.78	1.30	1.24	23.17	24.45
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.17	1.30	0.79	1.26	1.34	0.83	1.31	1.32	22.91	22.60
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.17	1.30	0.80	1.26	1.37	0.83	1.36	1.39	21.71	20.94
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.17	1.30	0.83	1.14	1.27	0.80	1.36	1.28	21.63	23.41

Labor_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.07	1.18	0.73	1.10	1.21	0.74	1.23	1.20	25.01	25.46
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.08	1.20	0.77	1.08	1.20	0.77	1.24	1.20	24.77	25.65
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.09	1.21	0.78	1.08	1.21	0.76	1.25	1.20	24.52	25.56
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.09	1.22	0.80	1.09	1.22	0.79	1.25	1.22	24.44	25.13
Labor_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.07	1.18	0.73	1.10	1.21	0.74	1.23	1.20	25.01	25.46
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.08	1.19	0.74	1.17	1.25	0.79	1.23	1.27	24.88	23.84
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.09	1.21	0.78	1.21	1.32	0.83	1.25	1.32	24.55	22.60
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.09	1.22	0.80	1.09	1.22	0.79	1.25	1.22	24.44	25.13
Logistikhalle_basic	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.04	1.15	0.70	1.07	1.19	0.72	1.20	1.20	25.73	25.68
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.05	1.17	0.73	1.05	1.17	0.73	1.21	1.19	25.57	26.02
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.06	1.18	0.74	1.06	1.19	0.74	1.20	1.18	25.77	26.07
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.06	1.19	0.76	1.07	1.20	0.76	1.20	1.20	25.68	25.81
Logistikhalle_adiabat	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: keine	1.04	1.15	0.70	1.07	1.19	0.72	1.20	1.20	25.73	25.68
	Feuchteanf: keine,m. Toleranz WRG: mit	1.05	1.16	0.71	1.15	1.23	0.76	1.20	1.25	25.81	24.36
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG: keine, nur Wärme	1.06	1.18	0.74	1.18	1.30	0.80	1.20	1.29	25.85	23.33
	Feuchteanf: ohne Toleranz WRG:Wärme und Feuchte	1.06	1.19	0.76	1.07	1.20	0.76	1.20	1.20	25.68	25.81