

Auslegung von Verdampfern und Verflüssigern

Kältemittel mit hohem Temperatur-Gleit

Dipl.-Ing. Michael Freiherr, Leitung Projektmanagement

1 EINLEITUNG

Die novellierte F-Gase-Verordnung (EU 517/2014) ist seit Anfang 2016 in Kraft. Das Ziel dieser Verordnung ist es, den Klimawandel zu verlangsamen, indem die durch F-Gase,

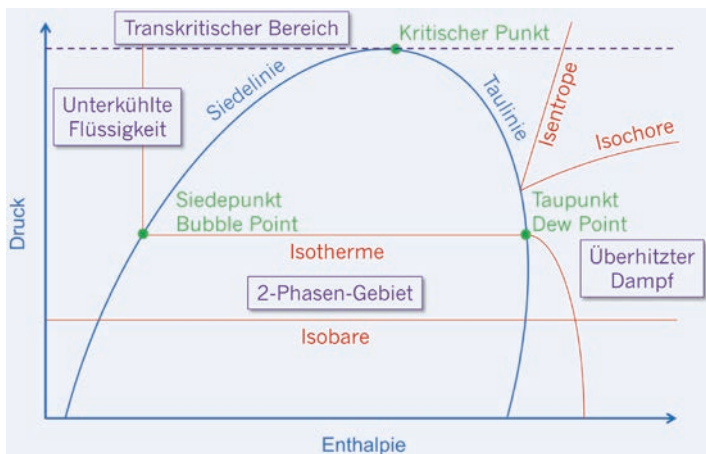


Abb. 1: Azeotropes Kältemittel-Gemisch oder Einstoff-Kältemittel im log p,h-Diagramm

und hierzu zählen alle synthetischen Kältemittel, verursachten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2031 drastisch reduziert werden sollen.

Die Reduzierung des gesamten CO₂-Äquivalentes innerhalb der EU, das sogenannte „Phase-Down-Szenario“, stellt eine große Herausforderung für die Kälte- und Klimabranche dar. Um die sehr ehrgeizigen Ziele zu erreichen, müsste das durchschnittliche GWP aller verwendeten Kälte-

mittel von derzeit ca. 2.200 bis 2.300 auf unter 500 fallen. An dieser Stelle wird klar, weshalb es bereits heute von größter Wichtigkeit ist, Kältemittel mit einem möglichst niedrigen GWP einzusetzen. Hierfür bieten sich neben den natürlichen Alternativen CO₂, NH₃ und Propan auch synthetische Kältemittel(-Gemische) an. Diese sogenannten low GWP-Kältemittel(-Gemische) weisen jedoch teils sehr hohe Temperatur-Gleits von bis zu 8 K auf.

Temperatur-Gleits treten generell bei allen Kältemitteln der 400er-Reihe auf, also auch bei R-404A. Hier ist das Gleit jedoch so gering, dass es in der Praxis bisher unberücksichtigt bleiben konnte. R-404A wurde also bei der Auslegung der Komponenten wie ein quasi azeotropes Gemisch oder ein Reinstoff betrachtet.

Mit den hohen Temperatur-Gleits der neuen Gemische, hier sind beispielhaft zu nennen: R-407F, R-448A, R-449A und R-452A, stellt sich natürlich auch die Frage, welchen Einfluss diese Kältemittel bei der Auswahl von Verdampfern und Verflüssigern haben.

Dieser Thematik widmet sich der hier vorliegende Fachartikel. Er soll Planern, Anlagenbauern und Praktikern die Auswirkungen des Temperatur-Gleits auf die Wärmeübertrager in möglichst anschaulicher Art und Weise näherbringen und beschränkt sich daher auf die hierfür notwendigen Aspekte. Herleitungen oder Erklärungen aus der Theorie werden deshalb nur dort angeführt, wo sie für das Verständnis zwingend notwendig erscheinen.

2 GRUNDLAGEN

AZEOTROPE KÄLTEMITTEL-GEMISCHE

Das Wort ‚Azeotrop‘ entstammt dem Griechischen und steht für: a- „nicht“, zeo- „siedend“, tropos „Wendung“. Mit Azeotrop wird also immer ein Gemisch mindestens zweier Stoffe bezeichnet, dessen Dampfphase dieselbe Zusammensetzung hat wie die Flüssigphase. Ein azeotropes Gemisch verhält sich also wie ein Reinstoff und weist somit auch kein Temperatur-Gleit auf.

Abb.1 veranschaulicht dieses Verhalten im log p,h-Diagramm. Es ist zu erkennen, dass Siede- und Taupunkt auf derselben Isothermen liegen. Oder anders ausgedrückt: Die Isothermen verlaufen im Zwei-Phasen-Gebiet parallel zu den Isobaren. Aufgrund dieses Verhaltens gibt es bei der Auslegung der Wärmeübertrager im Vergleich zu Einstoff-Kältemitteln keine Besonderheiten zu beachten. Anders sieht dies jedoch bei der Verwendung zeotroper Kältemittel-Gemische aus.

ZEOTROPE KÄLTEMITTEL-GEMISCHE

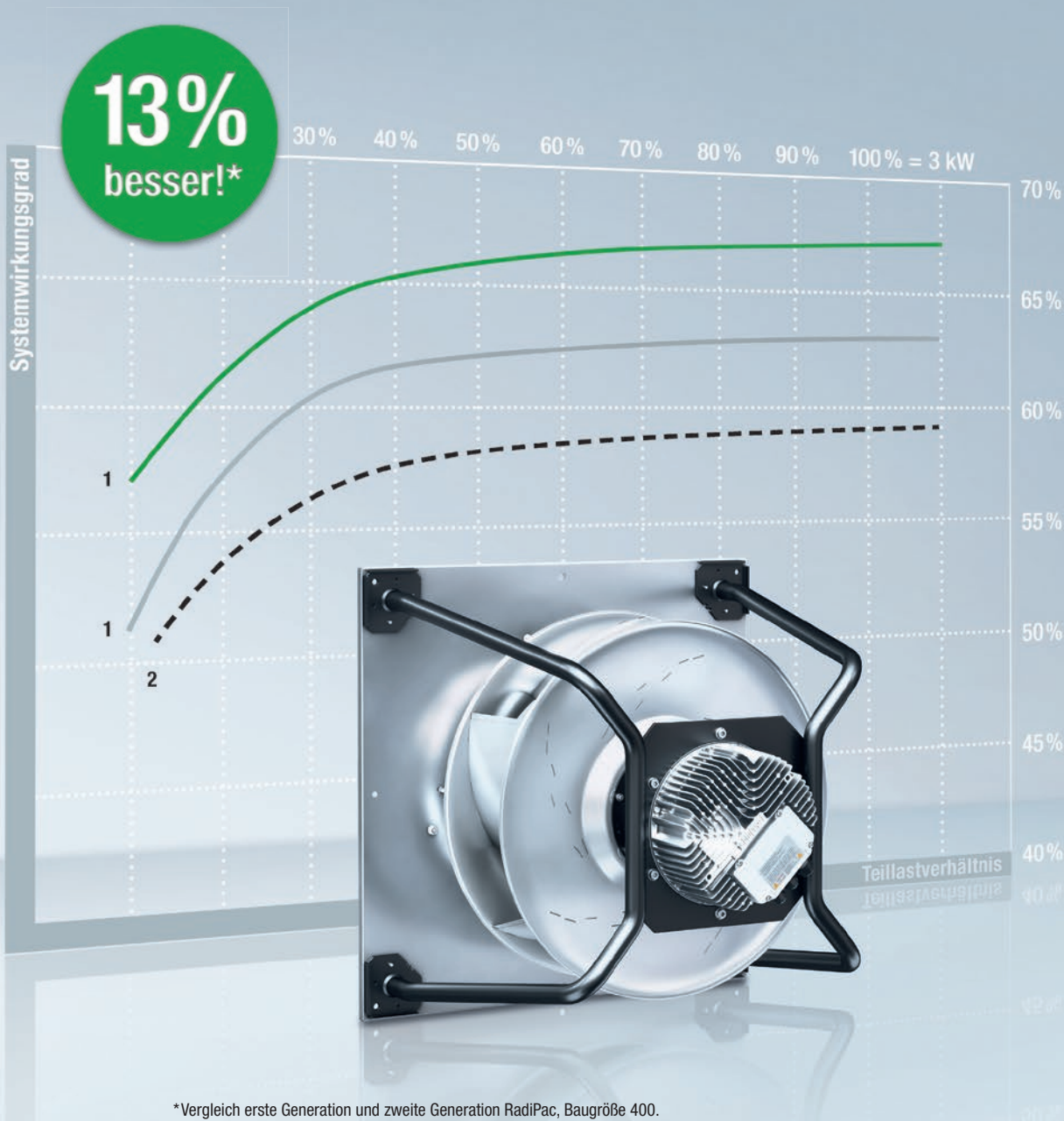
Die Zusammensetzung von Flüssigkeit und Dampf in zeotropen Gemischen, oft mals auch „nicht-azeotrope Gemische“

	Massen-% in %	Normalsiedepunkt in °C
R-32	24,3	-52
R-125	24,7	-48
R-1234yf	25,3	-30
R-134a	25,7	-26

Tab. 1: Zusammensetzung des Kältemittels R-449A



Eine Klasse besser: der neue RadiPac.



*Vergleich erste Generation und zweite Generation RadiPac, Baugröße 400.

Die Ergebnisse sind ¹⁾ aus dem Fachbericht ILK-B-31-15-3981a (Erstellungsdatum 09.03.2015) vom Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) Dresden und ²⁾ eigenen Labormessungen entnommen. Mehr Infos zur Studie unter www.ebmpapst.com/ilk

Neue Markt-Standards setzt der RadiPac mit hocheffizientem Laufrad, kompaktem EC-Außenläufermotor und integrierter Steuerelektronik.*

- Um 13% geringere Leistungsaufnahme – gemessen im RLT-Gerät
- Besser als handelsübliche Lösungen mit PM-Motoren
- Zuverlässige Leistungsdaten bei Nenn- und Teillastbetrieb
- Unkomplizierte Montage und einfache Inbetriebnahme

Weitere Informationen unter www.ebmpapst.com/radipac

ebmpapst

Die Wahl der Ingenieure

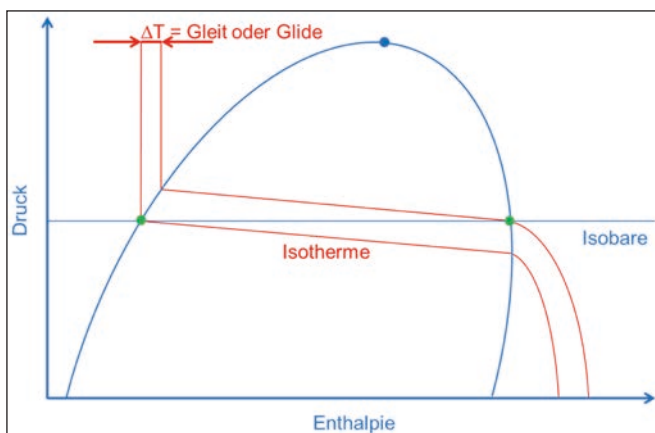


Abb. 2: Zeotropes Kältemittel-Gemisch im log p,h-Diagramm

genannt, ist im Zwei-Phasen-Gebiet stets unterschiedlich. Der Grund hierfür ist in den stark unterschiedlichen Siedetemperaturen der Einzelkomponenten zu suchen – siehe auch Tab. 1.

Verdampfer-Eintrittstemperatur. Beim Verflüssiger verhält es sich ebenso, nur dass das Zwei-Phasen-Gebiet in umgekehrter Richtung durchlaufen wird. Daher ist die Temperatur des Kältemittels

Verflüssiger	GCHC RD 040. 1/12-45	UI: 0000025M
Leistung:	10,2 kW	R404A ⁽¹⁾ 75,0 °C
Luftvolumenstrom:	7084 m ³ /h	Verflüssigungsbeginn:
Luft Eintritt:	35,0 °C	Kondensataustritt:
Geodätische Höhe:	0 m	Heißgasvolumenstr.:
Luftgeschwindigkeit:	3,3 m/s	Massenstrom:
K-Wert:	38,98 W/(m ² K)	Druckabfall:
		0,31 bar / 0,65 K

Abb. 3: Beispiel-Verflüssiger für Betrieb mit R-404A

Verflüssiger	GCHC RD 040. 1/12-45	UI: 0000025M
Leistung:	8,5 kW	R449A ⁽¹⁾ 75,0 °C
Luftvolumenstrom:	7084 m ³ /h	Verflüssigungsbeginn:
Luft Eintritt:	35,0 °C	Kondensataustritt:
Geodätische Höhe:	0 m	Heißgasvolumenstr.:
Luftgeschwindigkeit:	3,3 m/s	Massenstrom:
K-Wert:	38,59 W/(m ² K)	Druckabfall:
		0,19 bar / 0,41 K

Abb. 4: Beispiel-Verflüssiger für Betrieb mit R-449A

Zwar verdampfen alle Einzelkomponenten gleichzeitig, jedoch wird die Komponente mit dem niedrigsten Siedepunkt in viel stärkerem Maß verdampfen als die restlichen Komponenten mit einem höheren Normalsiedepunkt (NSP). Dies führt dazu, dass die Komponente mit dem kleinsten NSP zuerst vollständig verdampft ist, während alle verbleibenden Komponenten weiterhin siedend. Da deren Siedepunkte nun aber höher liegen, steigt die mittlere Verdampfungstemperatur beim Durchschreiten des Zwei-Phasen-Gebietes, wie in Abb. 2 dargestellt, stetig an. Somit liegt die Temperatur am Ende des Zwei-Phasen-Gebietes eines Verdampfers, die sogenannte Taupunkttemperatur (dew point), stets oberhalb der

am „Austritt eines Verflüssigers“ (Siedepunkt-Temperatur) immer niedriger als an seinem „Eintritt“ (Taupunkt-Temperatur). Dieses Phänomen wird als Tem-

peratur-Gleit bezeichnet und bedarf besonderer Aufmerksamkeit bei der Auslegung von Verdampfern und Verflüssigern.

3 EINFLUSS DES TEMPERATUR-GLEITS ... AUF DEN VERFLÜSSIGER

Als Beispiel soll ein Verflüssiger mit einer Nennleistung von 10,2kW mit R-404A als Kältemittel dienen. Die technischen Daten dieses Verflüssigers sind in Abb. 3 auszugsweise dargestellt. Hier ist zu beachten, dass sich die Leistungsangabe von 10,2kW auf die Verflüssigungstemperatur von 45° C, bezogen auf den Eintritt des Verflüssigers (= Taupunkt-Temperatur oder Verflüssigungsbeginn), bezieht. Mit einer Lufteintrittstemperatur von 35° C ist dieser Verflüssiger auf ein ΔT_{Li} von 10 K ausgelegt.

Soll dieser Verflüssiger nun mit dem Kältemittel R-449A betrieben werden, ergibt die Nachrechnung ein anderes Bild (s. Abb. 4). Durch das höhere Temperatur-Gleit von R-449A sinkt die Temperatur des Kältemittels am Austritt des Verflüssigers deutlich. Hierbei handelt es sich also nicht um eine Unterkühlung des Kältemittels!

Als Resultat führt dies zu einer niedrigeren mittleren Temperaturdifferenz und somit zu einer um ca. 17 % geringeren Leistung gegenüber dem Betrieb mit R-404A. Diese Berechnungsmethode nach Taupunkt-Temperatur ist gemäß EN 327 völlig korrekt, führt bei Kältemitteln mit einem hohen Temperatur-Gleit

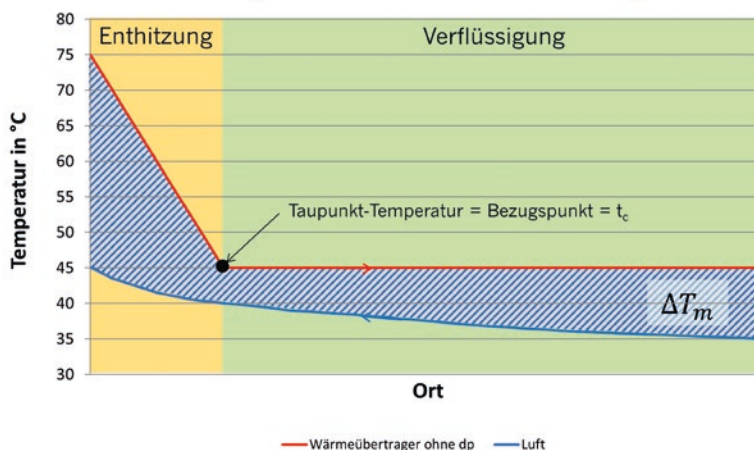


Abb. 5: Idealer Verflüssiger mit Einstoff-Kältemittel im reinen Gegenstrom

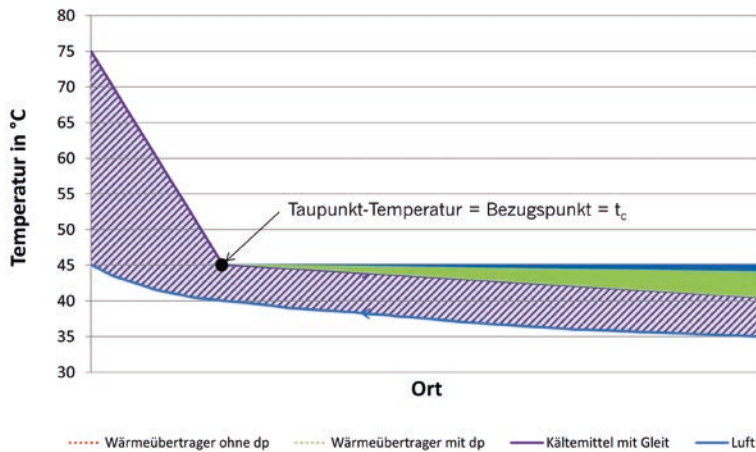


Abb. 6: Realer Verflüssiger mit zeotropem Kältemittel-Gemisch im reinen Gegenstrom

jedoch zu Verzerrungen bei der Wahl des „richtigen Verflüssigers“.

Um die Gründe hierfür zu erkunden, sehen wir uns zunächst den Wärmeübergang in einem R-404A-Verflüssiger im reinen Gegenstrom, dargestellt in Abb. 5, an. Hierbei sei angemerkt, dass es sich in der Realität zumeist um Kreuz-Gegenstrom handelt. Die Verhältnisse lassen sich jedoch am Ideal des reinen Gegenstromes besser verdeutlichen. Zur weiteren Vereinfachung wird der Verflüssiger ohne Unterkühlung des Kältemittels und zunächst auch ohne kältemittelseitigen Druckverlust betrachtet. Die Darstellung in Abb. 5 greift die Temperaturen des Beispiel-Verflüssigers aus Abb. 3 auf. Der Temperatur-Verlauf des Kältemittels durch den Verflüssiger ist als rote Linie dargestellt. Zunächst wird das Heißgas enthitzt, danach folgt die Verflüssigung des Kältemittels bei konstanter Temperatur. Die im Diagramm als blaue Linie dargestellte Temperatur der Luft steigt im Verlauf kontinuierlich an. Das Flächenintegral (blau schraffierte Fläche) zwischen beiden Temperatur-Verläufen bildet die mittlere Temperatur-Differenz.

Die allgemein bekannte Formel:

$$\dot{Q} = k * A * \Delta T_m$$

Verdampfer	GACC RX 050.1/2-70.A	UI: 1820867P
Leistung:	21.8 kW	Kältemittel: R404A ⁽¹⁾
Flächenreserve:	0.1 %	Verdampfungstemp.: 0.0 °C
Luftvolumenstrom:	13360 m³/h	Überhitzung: 5.0 K
Luftgeschwindigkeit:	2.7 m/s	Kondensationstemp.: 45.0 °C
Luft Eintritt:	8.0 °C 72 %	Unterkühlungstemp.: 44.7 °C
Luft Austritt:	3.9 °C 91 %	Massenstrom: 788 kg/h
Luftdruck:	1013 mbar	Sens. Wärmeanteil: 89.3 %
Kondensat:	3.38 kg/h	
K-Wert:	49.86 W/(m² K)	

Abb. 7: Beispiel-Verdampfer für Betrieb mit R-404A

Verdampfer	GACC RX 050.1/2-70.A	UI: 1820867P
Leistung:	27.5 kW	Kältemittel: R449A ⁽¹⁾
Flächenreserve:	-0.1 %	Verdampfungstemp.: 0.0 °C
Luftvolumenstrom:	13360 m³/h	Überhitzung: 5.0 K
Luftgeschwindigkeit:	2.7 m/s	Kondensationstemp.: 45.0 °C
Luft Eintritt:	8.0 °C 72 %	Unterkühlungstemp.: 40.5 °C
Luft Austritt:	3.3 °C 91 %	Massenstrom: 738 kg/h
Luftdruck:	1013 mbar	Sens. Wärmeanteil: 82.0 %
Kondensat:	7.13 kg/h	
K-Wert:	51.84 W/(m² K)	

Abb. 8: Beispiel-Verdampfer für Betrieb mit R-449A

RICHTIG LÜFTEN UND SPAREN



Aereco Bedarfsführung:

Die richtige Menge Luft am richtigen Ort zur richtigen Zeit

- Schimmelvermeidung
- Referenztechnik der EnEV
- Energieeinsparung
- Nutzerunabhängig

Bedarfsgeführtes Abluftsystem
 Bedarfsgeführtes Abluftsystem mit WRG durch Abluftwärmenutzung
 Bedarfsgeführtes dezentrales Lüftungssystem mit WRG
 Bedarfsgeführtes Zu- und Abluftsystem mit WRG



Zwischen-Fazit:

Das Temperatur-Gleit zeotroper Kältemittel-Gemische führt zu kleineren Temperaturdifferenzen am Verflüssiger. Die Verflüssigerleistung sinkt. Erfolgt die Auslegung mittels Taupunkt-Temperatur, müssen die Verflüssiger im Vergleich zu Kältemitteln ohne Temperaturgleit größer werden. Dies führt letztlich jedoch zu niedrigeren Verflüssigungsdrücken, was einen positiven Effekt auf den Wirkungsgrad der Gesamt-Kälteanlage haben kann.

soll nochmals in Erinnerung rufen, dass die mittlere Temperatur-Differenz in linearem Verhältnis zur Wärmeübertrager-Leistung steht. Nimmt sie ab, sinkt die Leistung eines bestimmten Wärmeübertragers in gleichem Maße und umgekehrt. In der Realität wird ein Verflüssiger jedoch immer auch einen kältemittelseitigen Druckverlust aufweisen. „Druckverlust im Verflüssiger“ bedeutet, dass der Druck am Verflüssiger-Eintritt stets höher ist als am Austritt des Verflüssigers. Dieser Umstand führt somit ebenfalls zu einer Reduzierung der Verflüssigungstemperatur am Verflüssigeraustritt

Die Absenkung der Kältemittel-Austrittstemperatur um 0,5 K senkt die mittlere Temperatur-Differenz um ca. 2 %. Ein Effekt, der in der Praxis vernachlässigt werden kann bzw. durch thermodyna-

Die nach Abzug aller Verluste für die Wärmeübertragung übrigbleibende und effektiv nutzbare Temperatur-Differenz wird durch die lila schraffierte Fläche repräsentiert.

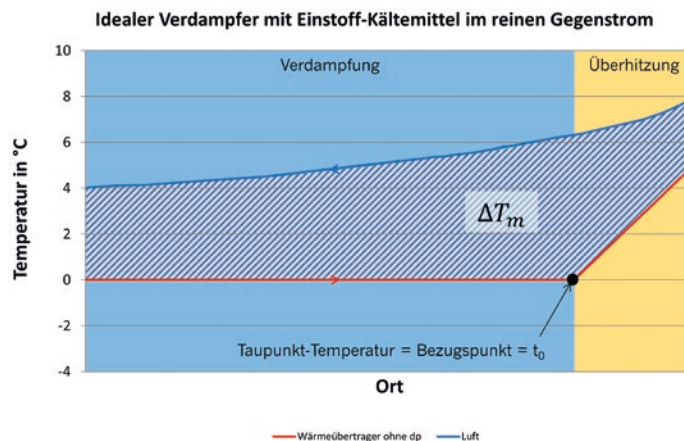


Abb. 9: Idealer Verdampfer mit Einstoff-Kältemittel im reinen Gegenstrom

misch rechnende Auswahlprogramme mit berücksichtigt wird, aber die Auswirkung einer sich am Verflüssiger-Austritt absenkenden Verflüssigungstemperatur prinzipiell verdeutlicht. Denn ähnlich wie der Druckabfall im Verflüssiger wirkt auch das Temperaturgleit zeotroper Kältemittel-Gemische, da, wie in Abb. 2 darge-

... AUF DEN VERDAMPFER

Ein hohes Temperatur-Gleit hat natürlich auch Auswirkungen auf die Verdampfer einer Kälteanlage. Bevor die Gründe hierfür erläutert werden, sollen zunächst die Auswirkungen beispielhaft dargestellt werden.

Gesucht ist ein Verdampfer mit einer Leistung von ca. 22 kW für eine NK-Anwendung unverpackter Lebensmittel bei einer Raumtemperatur von +6° C. Als Kältemittel soll R-404A zum Einsatz kommen. Da der Verdampfer im Beispiel mit einem elektronischen Einspritzventil betrieben werden soll, wird eine Überhitzung von 5 K und ein $DT_1 = t_{L1} - t_0$ von 8 K angenommen. Die Luftabkühlung soll wegen der feuchtesensiblen Ware auf ca. 4 K begrenzt werden. Daher wird eine Verdampfungstemperatur t_0 von 0° C und eine Lufttemperatur t_{L1} von +8° C angestrebt.

Die Auswahl-Software errechnet einen passenden Verdampfer, dessen technische Daten in Abb. 7 dargestellt sind. Die Leistung beträgt 21,8 kW und wird bei einer Verdampfungstemperatur von ±0,0° C erreicht. Die Abkühlung der Luft um 4,1 K führt zu einer Entfeuchtungsleistung von 3,38 kg/h.

Wird derselbe Verdampfer mit dem Kälte-

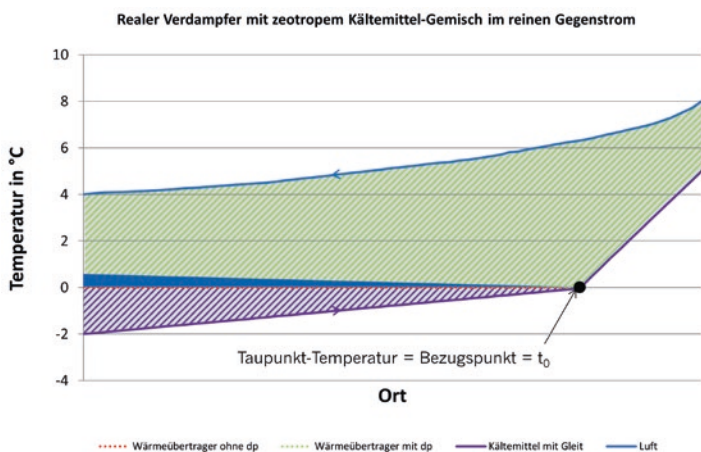


Abb. 10: Realer Verdampfer mit zeotropem Kältemittel-Gemisch im reinen Gegenstrom

und somit einer Verkleinerung der mittleren Temperatur-Differenz wie in Abb. 6 als blaue Fläche dargestellt. Dies gilt in vollem Umfang auch für alle Einstoff-Kältemittel oder azeotropen Kältemittel-Gemische.

stellt, die Siedetemperatur immer unterhalb der Taupunkt-Temperatur liegt. Somit wird durch das Temperatur-Gleit des Kältemittels die mittlere Temperaturdifferenz weiter reduziert (Abb. 6, hellgrüne Fläche).

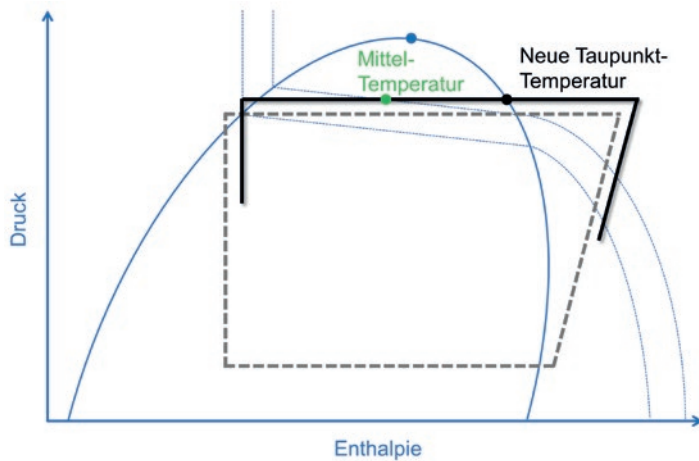


Abb. 11: Verflüssigerlegung mit Mittel-Temperatur im log p,h-Diagramm

Die Hintergründe sollen wieder mit Hilfe der Diagramme für die Temperatur-Verhältnisse im reinen Gegenstrom erläutert werden. Die Temperatur-Verhältnisse in einem „idealen“ Verdampfer, betrieben mit einem Einstoff-Kältemittel, sind in Abb. 9 dargestellt. „Ideal“ meint, dass der Druckverlust durch das Gerät zunächst vernachlässigt wird. Es ist gut ersichtlich, dass die Kältemittel-Temperatur (rote Linie) an jeder Stelle im Zwei-Phasen-Gebiet gleich ist.

Die Lufttemperatur (blaue Linie) nimmt zu Beginn stark ab und überhitzt dabei den aus dem Verdampfer austretenden

mittel R-449A berechnet, erhält man technische Daten wie in Abb.8 dargestellt. Die Geräte-Leistung liegt mit 27,5 kW um ca. 20 % höher gegenüber dem Betrieb mit R-404A. Bei oberflächlicher Betrachtung könnte nun der Eindruck entstehen, dass Verdampfer unter Verwendung zeotroper Kältemittel-Gemische nun kleinere Flächen bei gleicher Leistung benötigen und somit erheblich günstiger in der Anschaffung wären. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass die Entfeuchtungsleistung des R-449A-Verdampfers mehr als das Doppelte des R-404A-Verdampfers beträgt! Ursächlich hierfür ist die größere Luftabkühlung (+0,6 K) und die im Mittel

Zwischen-Fazit:

Das Temperatur-Gleit zeotroper Kältemittel-Gemische führt zu größeren Temperatur-Differenzen am Verdampfer. Die Verdampferleistung steigt. Erfolgt die Auslegung mittels Taupunkt-Temperatur, werden die Verdampfer im Vergleich zu Kältemitteln ohne Temperatur-Gleit kleiner. Dies führt im Betrieb jedoch zu einer größeren Luftabkühlung sowie niedrigeren Oberflächen-Temperaturen, was wiederum zu einer höheren Entfeuchtung der Kühlraumluft führt. Dieser Effekt hat besonders negative Auswirkungen auf die Qualität unverpackten, feuchtesensiblen Kühlgutes im Normalkühlbereich.

R-449A			
mittlere Kondensations-Temperatur in °C	Taupunkt-Temperatur in °C für die Berechnung	mittlere Kondensations-Temperatur in °C	Taupunkt-Temperatur in °C für die Berechnung
20	22.60	50	52.11
21	23.58	51	53.09
22	24.57	52	54.06
23	25.56	53	55.04
24	26.55	54	56.01
25	27.54	55	56.99
26	28.53	56	57.96
27	29.51	57	58.93
28	30.50	58	59.90
29	31.49	59	60.87
30	32.47	60	61.84
31	33.46	61	62.81
32	34.44	62	63.77
33	35.43	63	64.74
34	36.41	64	65.70
35	37.40	65	66.66
36	38.38	66	67.63
37	39.37	67	68.58
38	40.35	68	69.54
39	41.33	69	70.49
40	42.32	70	71.45
41	43.30	71	72.40
42	44.28	72	73.34
43	45.26	73	74.28
44	46.24	74	75.22
45	47.22	75	76.15
46	48.20	76	77.08
47	49.18	77	77.99
48	50.16	78	78.90
49	51.14	79	79.78

Tab. 2: Umrechnungstabelle für Verflüssiger mit R-449A

um 0,9 K niedrigere Temperatur der Wärmeübertrager-Oberfläche (hier nicht aus den Datenblatt-Auszügen ersichtlich).

Kältemittel-Strom. Der Bereich zwischen beiden Linien repräsentiert, wie beim Verflüssiger auch, die mittlere Tempera-

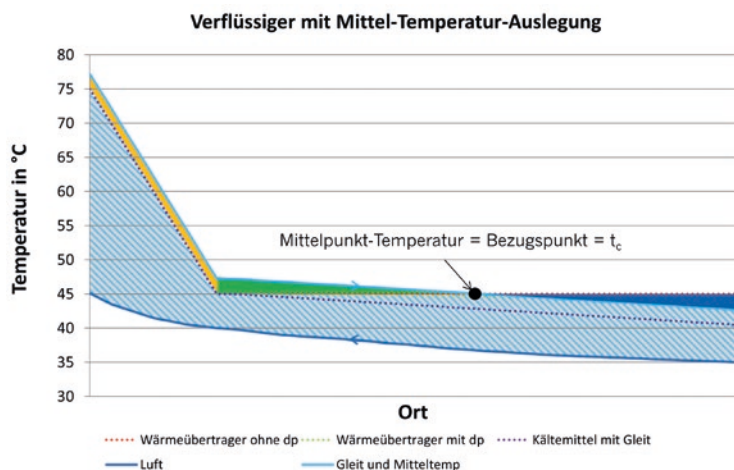


Abb. 12: Temperaturverhältnisse am Verflüssiger mit Mittel-Temperatur-Berechnung

tur-Differenz (hellblau schraffierte Fläche). Natürlich weist jeder Verdampfer in der Realität einen kältemittelseitigen Druckverlust auf.

beträchtlich, da ja nach Norm die Taupunkt-Temperatur für die Auslegung des Verdampfers maßgeblich ist und somit konstant gehalten wird. Das Käl-

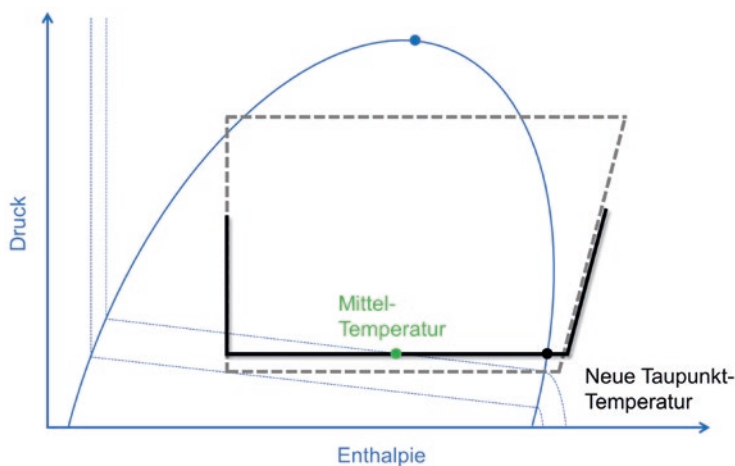


Abb. 13: Verdampferauslegung mit Mittel-Temperatur im log p,h-Diagramm

Wie in Abb.10 dargestellt, erhöht sich durch den Druckverlust (dargestellt als blaue Fläche) die Temperatur des Kältemittels am Verdampfer-Eintritt. Dies wiederum führt zu einer kleineren Temperatur-Differenz (hellgrün schraffierte Fläche) und resultiert somit schlussendlich in einer etwas geringeren Leistung des Verdampfers.

Wird der Verdampfer nun mit einem zeotropen Kältemittel-Gemisch betrieben, verringert sich die Kältemittel-Eintrittstemperatur gegenüber der Auslegung mit einem Einstoff-Kältemittel

temittel muss also mit einer tieferen Temperatur in den Verdampfer eintreten, wenn die Taupunkt-Temperatur gleich bleiben soll.

Diese niedrigere Eintrittstemperatur führt einerseits zu einer zusätzlich nutzbaren Temperatur-Differenz (lila schraffierte Fläche), resultierend in einer größeren Verdampfer-Leistung, andererseits aber auch zu einer niedrigeren Oberflächen-Temperatur, welche wiederum zu einer wesentlich höheren Entfeuchtung der Kühlraumluft und nicht zuletzt des Kühl-gutes führt.

4 BERECHNUNG MIT MITTEL-TEMPERATUR

Um die Auswirkungen des Temperatur-Gleits auf die Wärmeübertrager nahezu zu negieren, sollte die Auswahl von Verflüssiger und Verdampfer per Mittel-Temperatur-Methode erfolgen. Was die Mittel-Temperatur ist und welche Ergebnisse diese Methode liefert, wird im folgenden Kapitel erläutert.

VERFLÜSSIGER

Bei der Mittel-Temperatur handelt es sich im Falle eines Verflüssigers um die arithmetische Mittel-Temperatur zwischen Siede- und Taupunkt-Temperatur.

Der in Abb.11 hellgrau gestrichelte Verlauf zeigt den Kreislauf mit einem Verflüssiger, der nach Taupunkt-Temperatur ausgelegt wurde. Die schwarze Linie stellt einem Verflüssiger mit Mittel-Temperatur-Auslegung dar. Die Taupunkt-Temperatur des mit einer hellgrau gestrichelten Linie dargestellten Verflüssigers (bspw. 45 °C) wird nun zur Mittel-Temperatur des mit einer schwarzen Linie dargestellten Verflüssigers.

Es wird ersichtlich, dass der Verflüssigungsdruck und somit die zur Mittel-Temperatur zugehörige Taupunkt-Temperatur entsprechend höher liegen muss. Die Differenz zwischen diesen beiden Temperaturen ist dabei abhängig vom Temperatur-Gleit des jeweiligen Kältemittels und der Drucklage. Die spezifischen thermophysikalischen Eigenschaften des jeweils zu betrachtenden Kältemittels müssen also allen weiteren Berechnungen zugrunde liegen! Sofern die Auswahlsoftware des Herstellers nicht ohnehin die Berechnung mit Mittel-Temperatur unterstützt, muss man, um den Verflüssiger dennoch mit Mittel-Temperatur berechnen zu können, die zur Mittel-Temperatur gehörige Taupunkt-Temperatur in das Berechnungsprogramm als Kondensationstemperatur eingeben. In Tab.2 sind beispielhaft die Umrechnungsdaten für das Kältemittel-Gemisch R-449A dargestellt. Für eine mittlere Verflüssigungstemperatur von 45 °C müsste also mit einer Taupunkt-Temperatur von 47,22 °C gerechnet werden.



IQ-BUSINESS CENTER, KIEW

mit hygienischer Luftbefeuchtung durch
Dampf-Luftbefeuchter von Condair

Mit dem IQ Business-Center hat die architektonisch vielgestaltige ukrainische Hauptstadt ein weiteres Highlight setzen können. Der 19-stöckige Tower verfügt über eine Gesamtfläche von 45.121qm, einen Konferenzraum, mehrere Restaurants, einen Fitness- und Saunabereich, ein Schwimmbad sowie einen Hubschrauberlandeplatz auf dem Dach.

Die außergewöhnliche 360° Verglasung sorgt nicht nur für ein einzigartiges Erscheinungsbild, sondern auch dafür, dass in jedes Zimmer natürliches Licht dringen kann. Für eine perfekte Luftfeuchte sorgen Dampf-Luftbefeuchter von Condair.



Condair GmbH
Parkring 3, 85748 Garching
Tel. (0) 89 207 008 - 0, Fax (0) 89 207 008 - 140
www.condair.de

Luftbefeuchtung und Verdunstungskühlung

 **condair**

Umrechnungstabelle für R-449A Verdampfer, $t_c = +45^\circ\text{C}$								
Unter- kühlung in K mittlere Verdampfungs- Temperatur in $^\circ\text{C}$	15	10	5	4	3	2	1	0
-30	-27.97	-28.08	-28.18	-28.21	-28.23	-28.25	-28.27	-28.30
-29	-26.97	-27.07	-27.18	-27.20	-27.22	-27.24	-27.27	-27.29
-28	-25.96	-26.06	-26.17	-26.19	-26.21	-26.23	-26.26	-26.28
-27	-24.95	-25.05	-25.16	-25.18	-25.20	-25.23	-25.25	-25.27
-26	-23.94	-24.05	-24.15	-24.17	-24.20	-24.22	-24.24	-24.27
-25	-22.94	-23.04	-23.14	-23.17	-23.19	-23.21	-23.23	-23.26
-24	-21.93	-22.03	-22.14	-22.16	-22.18	-22.20	-22.23	-22.25
-23	-20.92	-21.02	-21.13	-21.15	-21.17	-21.20	-21.22	-21.24
-22	-19.91	-20.01	-20.12	-20.14	-20.17	-20.19	-20.21	-20.23
-21	-18.91	-19.01	-19.11	-19.13	-19.16	-19.18	-19.20	-19.23
-20	-17.90	-18.00	-18.11	-18.13	-18.15	-18.17	-18.19	-18.22
-19	-16.89	-16.99	-17.10	-17.12	-17.14	-17.16	-17.19	-17.21
-18	-15.88	-15.98	-16.09	-16.11	-16.13	-16.16	-16.18	-16.20
-17	-14.88	-14.98	-15.08	-15.10	-15.13	-15.15	-15.17	-15.19
-16	-13.87	-13.97	-14.07	-14.10	-14.12	-14.14	-14.16	-14.19
-15	-12.86	-12.96	-13.07	-13.09	-13.11	-13.13	-13.15	-13.18
-14	-11.85	-11.95	-12.06	-12.08	-12.10	-12.12	-12.15	-12.17
-13	-10.84	-10.94	-11.05	-11.07	-11.09	-11.12	-11.14	-11.16
-12	-9.84	-9.94	-10.04	-10.06	-10.09	-10.11	-10.13	-10.15
-11	-8.83	-8.93	-9.03	-9.06	-9.08	-9.10	-9.12	-9.15
-10	-7.82	-7.92	-8.03	-8.05	-8.07	-8.09	-8.11	-8.14
-9	-6.81	-6.91	-7.02	-7.04	-7.06	-7.08	-7.11	-7.13
-8	-5.81	-5.90	-6.01	-6.03	-6.05	-6.08	-6.10	-6.12
-7	-4.80	-4.90	-5.00	-5.02	-5.05	-5.07	-5.09	-5.11
-6	-3.79	-3.89	-3.99	-4.02	-4.04	-4.06	-4.08	-4.11
-5	-2.78	-2.88	-2.99	-3.01	-3.03	-3.05	-3.07	-3.10
-4	-1.77	-1.87	-1.98	-2.00	-2.02	-2.04	-2.07	-2.09
-3	-0.77	-0.87	-0.97	-0.99	-1.01	-1.04	-1.06	-1.08
-2	0.24	0.14	0.04	0.02	-0.01	-0.03	-0.05	-0.07
-1	1.25	1.15	1.05	1.02	1.00	0.98	0.96	0.93
0	2.26	2.16	2.05	2.03	2.01	1.99	1.97	1.94

Tab. 3: Umrechnungstabelle für Verdampfer mit R-449A (Auszug)

Als Resultat dieser Berechnung erhält man einen Verflüssiger, der die ursprünglich angestrebte Temperatur-Differenz aufweist und deswegen auch nicht mehr Wärmeübertrager-Oberfläche zur Erreichung der Leistung benötigt. In Abb.12 sind die Gründe hierfür dargestellt. Wird die Verflüssigungstemperatur von der Taupunkt- zur Mitteltemperatur hin verschoben, verändert sich auch die treibende Temperatur-Differenz am Verflüssiger. Am Eintritt wird, gegenüber dem Verflüssiger mit Einstoff-Kältemittel, etwas Temperatur-Differenz hinzugewonnen (grüne Fläche), am Austritt hingegen etwas Temperatur-Differenz verloren (blaue Fläche). Da beide Flächen gleich groß sind, sind die mittleren Temperatur-Differenzen für

beide Verflüssiger im Zwei-Phasen-Gebiet wieder identisch.

Durch die etwas höhere Taupunkt-Temperatur muss das Heißgas jedoch auf einem höheren Temperatur-Niveau in den Verflüssiger eintreten. Dies führt zu einer abermals höheren Temperatur-Differenz (gelbe Fläche) gegenüber der Taupunkt-Auslegung.

Die Verflüssiger werden mit dieser Methode also immer etwas mehr Leistung gegenüber herkömmlich berechneten Verflüssigern mit Einstoff-Kältemitteln aufweisen.

VERDAMPFER

Die Bestimmung der Mittel-Temperatur zur Verdampfer-Auslegung ist etwas auf-

wändiger als bei der Verflüssiger-Auslegung. Durch die Drosselung des Kältemittels vor dem Verdampfer befindet sich der Zustand des Kältemittels am Eintritt des Verdampfers bereits im Zwei-Phasen-Gebiet. Daher lässt sich die Mitteltemperatur nicht mehr einfach über das arithmetische Mittel zwischen Siede- und Taupunkt-Temperatur ermitteln, sondern sie muss in einem iterativen Verfahren bestimmt werden. Wie in Abb.13 dargestellt, erhöhen sich aber auch hier Druck und Taupunkt-Temperatur. Stellt die Auswahlsoftware die Mittel-Temperatur-Methode für die Berechnung nicht zur Verfügung, kann, wie bei den Verflüssigern auch, die Berechnung über eine höhere Taupunkt-Temperatur erfolgen. Die Ermittlung der korrekten Taupunkt-Temperatur für die Berechnung kann ebenfalls über Umrechnungstabellen erfolgen. Aus der beispielhaft für R-449A abgebildeten Umrechnungstabelle s. Tab. 3 wird für die gewünschte Verflüssigungstemperatur (hier 45°C) und die gewünschte mittlere Verdampfungstemperatur (hier 0°C) die für die Berechnung notwendige, korrigierte Taupunkt-Temperatur ermittelt.

Da der Zustand des Kältemittels nach dem Verflüssiger Einfluss auf die Mitteltemperatur am Verdampfer hat, muss auch dieser berücksichtigt werden. So ergibt sich für eine Unterkühlung von 0 K und die vorgenannte Rahmenbedingungen eine Taupunkt-Temperatur von $1,94^\circ\text{C}$.

Wird ein Verdampfer nach dieser Methode ausgelegt, ergeben sich Änderungen an den Temperaturverläufen, wie in Abb. 14 (Temperaturverhältnisse am Verdampfer mit Mittel-Temperatur-Berechnung) dargestellt. Im Diagramm ist zu erkennen, dass die mittlere Verdampfungstemperatur bei den ursprünglich angestrebten $\pm 0^\circ\text{C}$ liegt. Am Eintritt liegt sie mit -1°C etwas darunter, aber am Ende des Zwei-Phasen-Gebietes liegt sie mit $+1^\circ\text{C}$ ebensoviel darüber.

Die in dem Diagramm grün dargestellte Fläche stellt daher wieder hinzugewonnene Temperatur-Differenz dar, während die blaue Fläche verlorene Temperatur-Differenz repräsentiert.

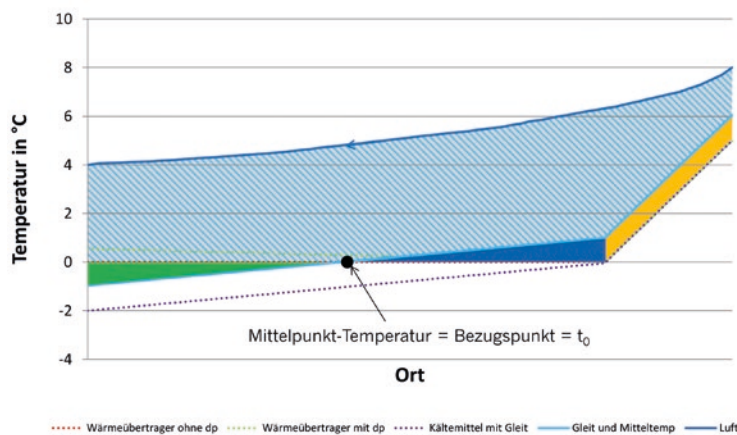


Abb. 14: Temperaturverhältnisse am Verdampfer mit Mittel-Temperatur-Berechnung

Da beide Flächen identisch sind, ergibt sich im Zwei-Phasen-Gebiet eine mittlere Temperatur-Differenz, die ebenso groß ist wie jene bei Einstoff-Kältemitteln. Die gelbe Fläche markiert die aufgrund der etwas höheren Taupunkt-Temperatur verlorene Temperatur-Differenz in der Überhitzungszone. Das bedeutet, dass Verdampfer, die mit dieser Methode berechnet wurden, immer etwas weniger Leistung gegenüber der Berechnung mit Einstoff-Kältemitteln aufweisen. In jedem Fall erhält man so jedoch einen Verdampfer mit der gewünschten mittleren Temperatur-Differenz und somit auch mit der gewünscht niedrigen Entfeuchtung des Kühlgutes.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Das Temperatur-Gleit zeotroper Kältemittel-Gemische hat einen bedeutenden Einfluss auf die Auslegung bzw. den Betrieb der Wärmeübertrager. Dabei haben große Temperatur-Gleits einen höheren Einfluss als kleine Temperatur-Gleits.

Während das Kältemittel den Verflüssiger durchläuft, nimmt seine Temperatur, bedingt durch das Temperatur-Gleit, stetig ab. Im Verdampfer verhält es sich genau umgekehrt. Hier steigt die Temperatur des Kältemittels allmählich an. Dieses Verhalten führt zu sich deutlich verändernden mittleren Temperatur-Differenzen im Vergleich zu Einstoff-Kältemitteln. Beim Verflüssiger verlangt die kleiner werdende Temperatur-Differenz

nach größeren Wärmeübertrager-Oberflächen, während Verdampfer scheinbar kleiner ausgelegt werden können, da ihre mittlere Temperatur-Differenz größer wird.

Jedoch spricht die dramatisch höhere Entfeuchtungsleistung kleinerer Verdampfer in einigen Anwendungen gegen die normierte Berechnungsmethode mittels Taupunkt-Temperatur. Im Besonderen ist hier die Kühlung unverpackter, feuchtesensibler Lebensmittel in NK-Anwendungen zu nennen. Bei TK-Anwendungen ist dieser Umstand weniger relevant, da die absolute Entfeuchtung bei sehr tiefen Temperaturen ohnehin gering ist.

Dennoch empfiehlt es sich, die Wärmeübertrager mittels Mittel-Temperatur-Methode auszulegen. Für die Praxis kann auf entsprechende Umrechnungstabellen oder auf entsprechende Berechnungssoftware wie beispielsweise den Günstner Product Calculator zurückgegriffen werden.

EXKURS: BEMESSUNG VON WÄRME-ÜBERTRAGERN NACH NORM

Um die Leistung der Wärmeübertrager in Laborversuchen nachvollziehen zu können, müssen die Randbedingungen hierfür normativ festgelegt sein. Diese Aufgabe erfüllen die beiden Normen „DIN EN 327 – Wärmeübertrager – Ventilatorbelüftete Verflüssiger – Prüfverfahren zur Leistungsfeststellung“ und „DIN EN 328 –

Wärmeübertrager – Ventilatorluftkühler – Prüfverfahren zur Leistungsfeststellung“. In ihnen ist beschrieben, wie der Wärmeübertrager vermessen werden muss, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Hierfür wird beispielsweise auch definiert, auf welche Bezugstemperatur für Kondensation bzw. Verdampfung sich die Nennleistung der Geräte bezieht. Für Verflüssiger und Verdampfer gilt nach diesen Normen immer die Taupunkt-Temperatur als Bezugspunkt für die Leistungsangabe!

Dies ergibt auch Sinn, da die Verdichter-Hersteller die Leistung der Verdichter ebenfalls bezogen auf die Taupunkt-Temperatur angeben müssen. Die Taupunkt-Temperatur bildet also die Schnittstelle zwischen Verdichter und Wärmeübertrager. Nur so ist gewährleistet, dass Verdichter und Wärmeübertrager bezüglich ihrer Leistungsangabe auch tatsächlich zueinander passen.

So sinnvoll diese Regelung auch ist:

Bei der Verwendung zeotroper Gemische sollte die Auslegung der Wärmeübertrager immer nach Mittel-Temperatur erfolgen.

Die Leistungsangabe bezieht sich jedoch nach wie vor auf die der Mittel-Temperatur zugehörigen und etwas höher als diese liegenden Taupunkt-Temperatur.

Autor:

Dipl.-Ing. Michael Freiherr,
Leitung Produktmanagement
Güntner GmbH

82256 Fürstenfeldbruck
Fotos/Grafiken: Güntner
www.guentner.de

