



www.guentner.de

## Autor



**Michael Freiherr**  
Leiter Produktmanagement

Güntner GmbH & Co. KG  
Hans-Güntner-Straße 2 – 6  
82256 FÜRSTENFELDBRUCK  
GERMANY

Member of Güntner Group



# Auslegung von Verdampfern und Verflüssigern für Kältemittel-Gemische mit hohem Temperatur-Gleit

## 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 bspw. den Güntner Product Calculator zurückgegriffen werden. Der Fachbeitrag beleuchtet die physikalischen Hintergründe und bietet einen praxisgerechten Lösungsansatz für die Auslegung von Verflüssigern sowie Verdampfern an.

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
Grundlagen	2
Einfluss des Temperatur-Gleits	4
Berechnung mit Mittel-Temperatur	10
Exkurs: Bemessung von Wärmeübertragern nach Norm	14

## Einleitung

Die novellierte F-Gase-Verordnung (EU 517/2014) ist seit 01. Januar 2015 in Kraft. Das Ziel dieser Verordnung ist es, den Klimawandel zu verlangsamen, indem die durch F-Gase, und hierzu zählen alle synthetischen Kältemittel, verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2031 drastisch reduziert werden sollen.

Die Reduzierung des gesamten CO<sub>2</sub>-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 Kältemittel 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 CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> 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.

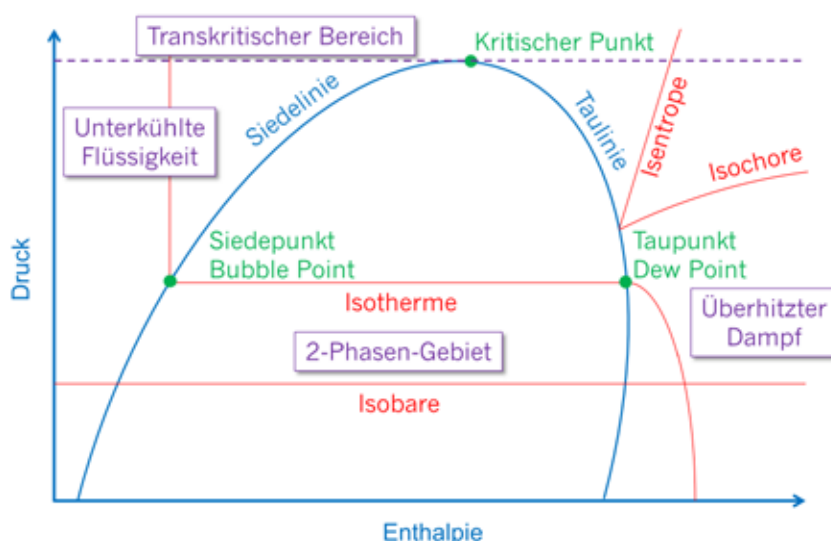
Mit den hohen Temperatur-Gleits der neuen Gemische, hier sind beispielhaft zu nennen: R-407F, R-448A, R-449A und R-452A, stellt sich natürlich auch die Frage, welchen Einfluss diese Kältemittel bei der Auswahl von Verdampfern und Verflüssigern haben.

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.

## 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.



**Abbildung 1: Azeotropes Kältemittel-Gemisch oder Einstoff-Kältemittel im log p,h-Diagramm**

**Abbildung 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.

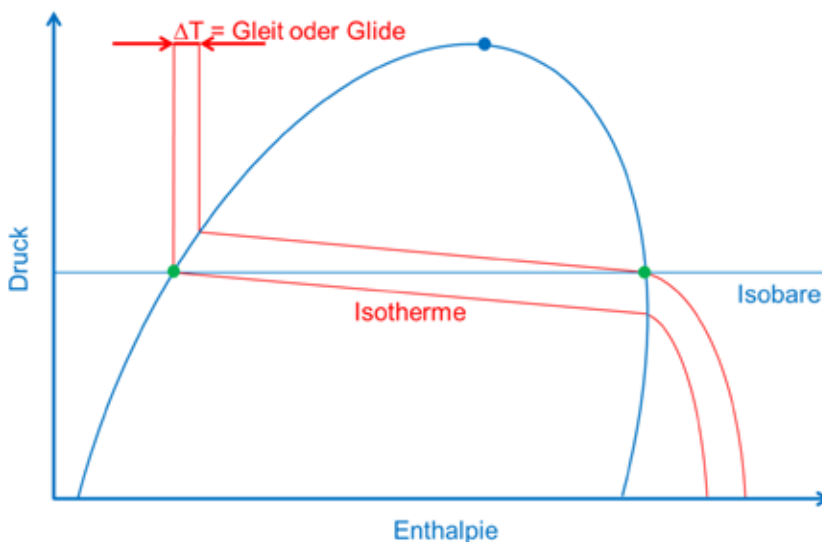
**Zeotrope Kältemittel-Gemische**

Die Zusammensetzung von Flüssigkeit und Dampf in zeotropen Gemischen, oftmals auch „nicht-azeotrope Gemische“ genannt, ist im Zwei-Phasen-Gebiet stets unterschiedlich. Der Grund hierfür ist in den stark unterschiedlichen Siedetemperaturen der Einzelkomponenten zu suchen – siehe auch **Tabelle 1**.

**Tabelle 1: Zusammensetzung des Kältemittels R-449A**

	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

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 sieden. Da deren Siedepunkte nun aber höher liegen, steigt die mittlere Verdampfungstemperatur beim Durchschreiten des Zwei-Phasen-Gebietes, wie in **Abbildung 2** dargestellt, stetig an.



**Abbildung 2: Zeotropes Kältemittel-Gemisch im log p,h-Diagramm**

Somit liegt die Temperatur am Ende des Zwei-Phasen-Gebietes eines Verdampfers, die sogenannte Taupunkt-Temperatur (dew point), stets oberhalb der 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 am „Austritt eines Verflüssigers“ (Siedepunkt-Temperatur) immer niedriger als an seinem „Eintritt“ (Taupunkt-Temperatur).

Dieses Phänomen wird als Temperatur-Gleit bezeichnet und bedarf besonderer Aufmerksamkeit bei der Auslegung von Verdampfern und Verflüssigern.

## Einfluss des Temperatur-Gleits

### Auf den Verflüssiger

Als Beispiel soll ein Verflüssiger mit einer Nennleistung von 10,2 kW mit R-404A als Kältemittel dienen. Die technischen Daten dieses Verflüssigers sind in **Abbildung 3** auszugsweise dargestellt. Hier ist zu beachten, dass sich die Leistungsangabe von 10,2 kW 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  $\Delta T_{L1}$  von 10 K ausgelegt.

Verflüssiger	GCHC RD 040.1/12-45	UI: 000025M
<b>Leistung:</b>	10.2 kW	<b>Kältemittel:</b> R404A <sup>(1)</sup>
Luftvolumenstrom:	7084 m <sup>3</sup> /h	Heißgastemperatur: 75.0 °C
Luft Eintritt:	35.0 °C	Verflüssigungsbeginn: 45.0 °C
Geodätische Höhe:	0 m	Kondensataustritt: 43.1 °C
Luftgeschwindigkeit:	3.3 m/s	Heißgasvolumenstr.: 2.23 m <sup>3</sup> /h
K-Wert:	38.98 W/(m <sup>2</sup> ·K)	Massenstrom: 235 kg/h
		Druckabfall: 0.31 bar / 0.65 K

**Abbildung 3: Beispiel-Verflüssiger für Betrieb mit R-404A**

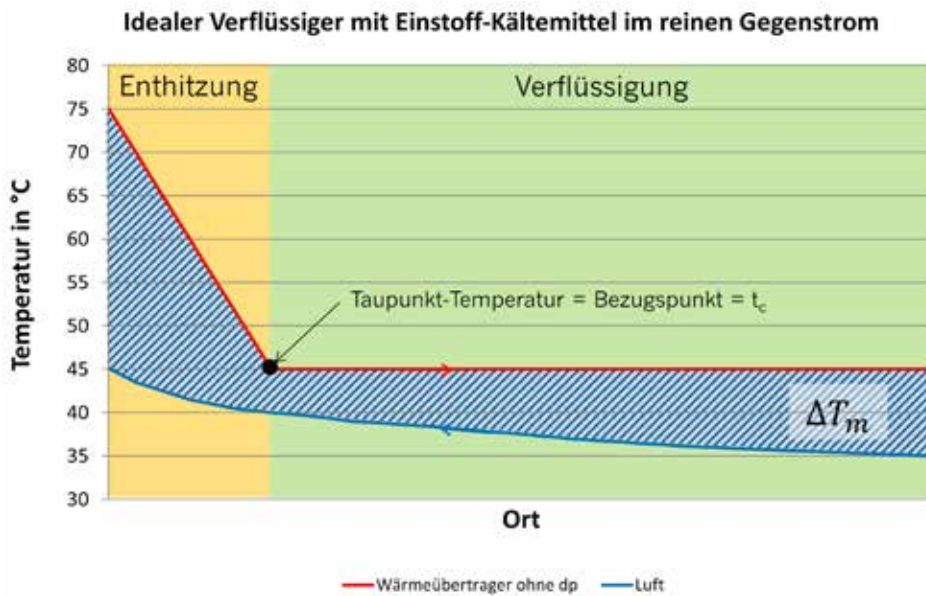
Soll dieser Verflüssiger nun mit dem Kältemittel R-449A betrieben werden, ergibt die Nachrechnung ein anderes Bild (siehe **Abbildung 4**). Durch das höhere Temperatur-Gleit von R-449A sinkt die Temperatur des Kältemittels am Austritt des Verflüssigers deutlich. Hierbei handelt es sich also nicht um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

Verflüssiger	GCHC RD 040.1/12-45	UI: 000025M
<b>Leistung:</b>	8.5 kW	<b>Kältemittel:</b> R449A <sup>(1)</sup>
Luftvolumenstrom:	7084 m <sup>3</sup> /h	Heißgastemperatur: 75.0 °C
Luft Eintritt:	35.0 °C	Verflüssigungsbeginn: 45.0 °C
Geodätische Höhe:	0 m	Kondensataustritt: 39.1 °C
Luftgeschwindigkeit:	3.3 m/s	Heißgasvolumenstr.: 1.99 m <sup>3</sup> /h
K-Wert:	38.59 W/(m <sup>2</sup> ·K)	Massenstrom: 161 kg/h
		Druckabfall: 0.19 bar / 0.41 K

**Abbildung 4: Beispiel-Verflüssiger für Betrieb mit R-449A**

Als Resultat führt dies zu einer niedrigeren mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  [m bitte tiefgestellt] 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 jedoch zu Verzerrungen bei der Wahl des „richtigen Verflüssigers“ einfügen.

Um die Gründe hierfür zu erkunden, sehen wir uns zunächst den Wärmeübergang in einem R-404A-Verflüssiger im reinen Gegenstrom, dargestellt in **Abbildung 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.



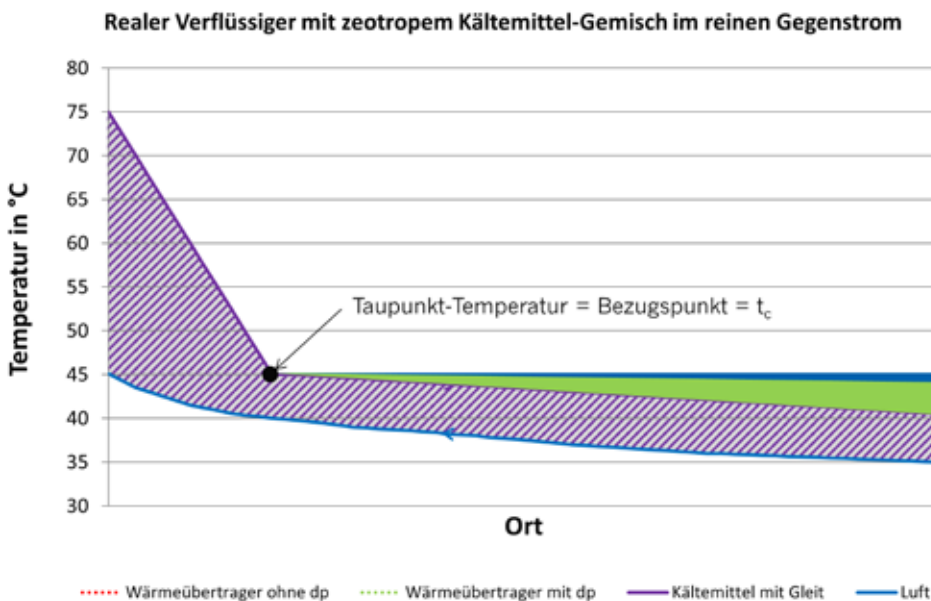
**Abbildung 5: Idealer Verflüssiger mit Einstoff-Kältemittel im reinen Gegenstrom**

Die Darstellung in **Abbildung 5** greift die Temperaturen des Beispiel-Verflüssigers aus **Abbildung 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:

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

soll nochmals in Erinnerung rufen, dass die mittlere Temperatur-Differenz  $\Delta T_m$  in linearem Verhältnis zur Wärmeübertrager-Leistung  $\dot{Q}$  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 und somit einer Verkleinerung der mittleren Temperatur-Differenz  $\Delta T_m$  wie in **Abbildung 6** als blaue Fläche dargestellt. Dies gilt in vollem Umfang auch für alle Einstoff-Kältemittel oder azeotropen Kältemittel-Gemische.



### **Abbildung 6: Realer Verflüssiger mit zeotropem Kältemittel-Gemisch im reinen Gegenstrom**

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 thermodynamisch 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 **Abbildung 2** dargestellt, die Siedetemperatur immer unterhalb der Taupunkt-Temperatur liegt. Somit wird durch das Temperatur-Gleit des Kältemittels die mittlere Temperaturdifferenz weiter reduziert (**Abbildung 6**, hellgrüne Fläche). Die nach Abzug aller Verluste für die Wärmeübertragung übrigbleibende und effektiv nutzbare Temperatur-Differenz wird durch die lila schraffierte Fläche repräsentiert.

#### **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.**

### 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 Lufteintrittstemperatur  $t_{L1}$  von +8 °C angestrebt.

Die Auswahl-Software errechnet einen passenden Verdampfer, dessen technische Daten in **Abbildung 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.

 Verdampfer	GACC RX 050.1/2-70.A		UI: 1820867P	
<b>Leistung:</b>	21.8 kW		<b>Kältemittel:</b>	R404A <sup>(1)</sup>
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 %		
Luftdruck:	1013 mbar		Massenstrom:	788 kg/h
Kondensat	3.38 kg/h		Sens. Wärmeanteil:	89.3 %
K-Wert:	49.86 W/(m²·K)			

**Abbildung 7: Beispiel-Verdampfer für Betrieb mit R-404A**

Wird der selbe Verdampfer mit dem Kältemittel R-449A berechnet, erhält man technische Daten wie in **Abbildung 8** dargestellt. Die Geräte-Leistung liegt mit 27,5 kW um ca. 20 % höher gegenüber dem Betrieb mit R-404A.

 Verdampfer	GACC RX 050.1/2-70.A		UI: 1820867P	
<b>Leistung:</b>	27.5 kW		<b>Kältemittel:</b>	R449A <sup>(1)</sup>
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 %		
Luftdruck:	1013 mbar		Massenstrom:	738 kg/h
Kondensat	7.13 kg/h		Sens. Wärmeanteil:	82.0 %
K-Wert:	51.84 W/(m²·K)			

**Abbildung 8: Beispiel-Verdampfer für Betrieb mit R-449A**

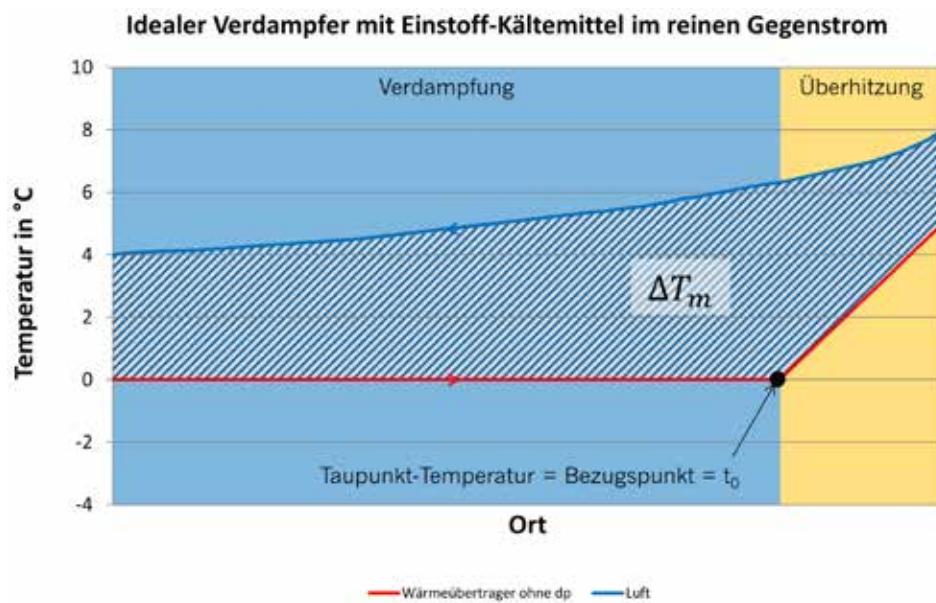
Bei oberflächlicher Betrachtung könnte nun der Eindruck entstehen, dass Verdampfer unter Verwendung zeotroper Kältemittel-Gemische nun kleinere Flächen bei gleicher Leistung benötigen und somit erheblich günstiger in der Anschaffung wären.

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

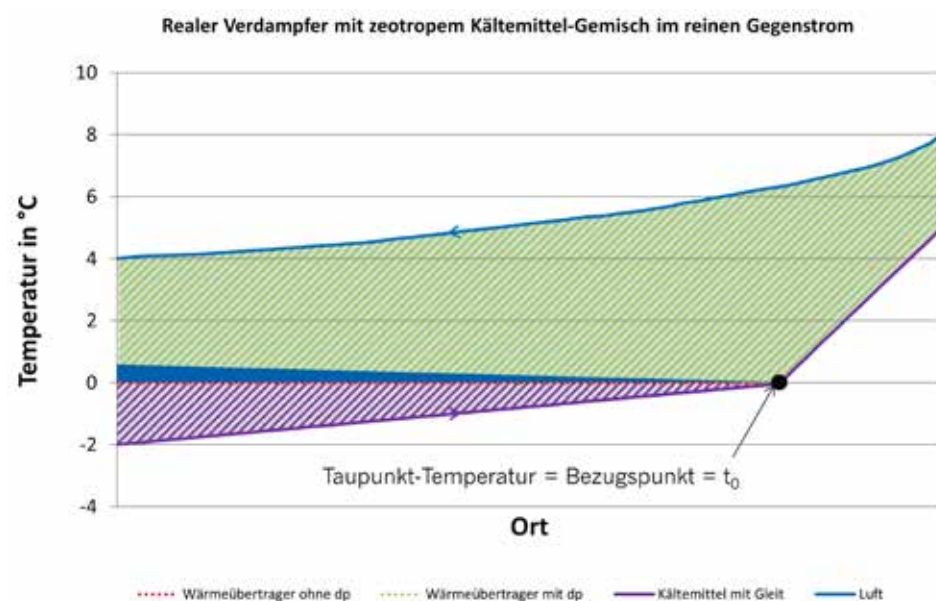
Die Hintergründe sollen wieder mit Hilfe der Diagramme für die Temperatur-Verhältnisse im reinen Gegenstrom erläutert werden.

Die Temperatur-Verhältnisse in einem „idealen“ Verdampfer, betrieben mit einem Einstoff-Kältemittel, sind in **Abbildung 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 Kältemittel-Strom. Der Bereich zwischen beiden Linien repräsentiert, wie beim Verflüssiger auch, die mittlere Temperatur-Differenz (hellblau schraffierte Fläche).



**Abbildung 9: Idealer Verdampfer mit Einstoff-Kältemittel im reinen Gegenstrom**

Natürlich weist jeder Verdampfer in der Realität einen kältemittelseitigen Druckverlust auf. Wie in **Abbildung 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.





### **Abbildung 10: Realer Verdampfer mit zeotropem Kältemittel-Gemisch im reinen Gegenstrom**

Wird der Verdampfer nun mit einem zeotropen Kältemittel-Gemisch betrieben, verringert sich die Kältemittel-Eintrittstemperatur gegenüber der Auslegung mit einem Einstoff-Kältemittel beträchtlich, da ja nach Norm die Taupunkt-Temperatur für die Auslegung des Verdampfers maßgeblich ist und somit konstant gehalten wird. Das Kältemittel 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 Kühlgutes führt.

#### **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.**

## Berechnung mit Mittel-Temperatur

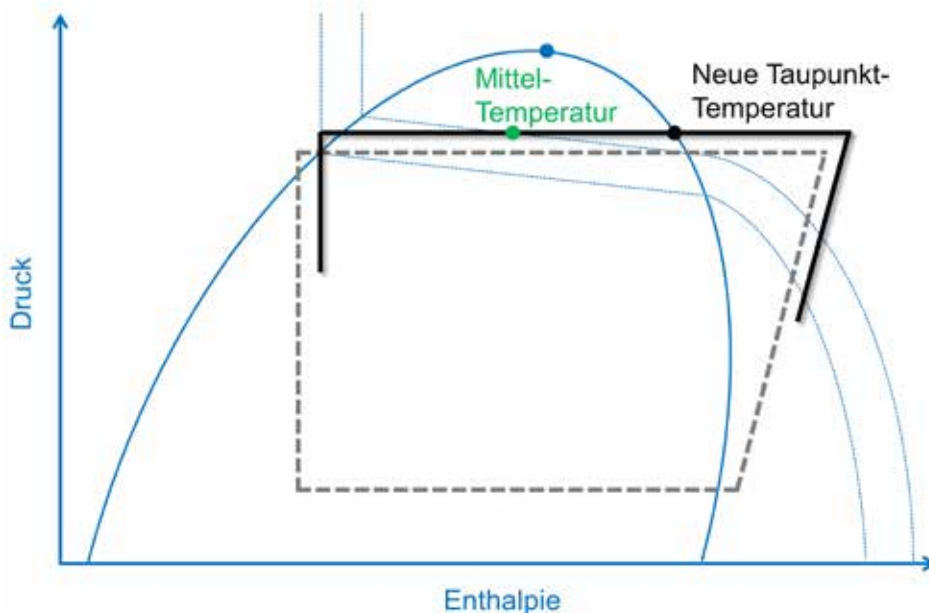
Um die Auswirkungen des Temperatur-Gleits auf die Wärmeübertrager nahezu zu negieren, sollte die Auswahl von Verflüssiger und Verdampfer per Mittel-Temperatur-Methode erfolgen. Was die Mittel-Temperatur ist und welche Ergebnisse diese Methode liefert, wird im folgenden Kapitel erläutert.

### Verflüssiger

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

Der in **Abbildung 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 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!



**Abbildung 11: Verflüssiger-Auslegung mit Mittel-Temperatur im log p,h-Diagramm**

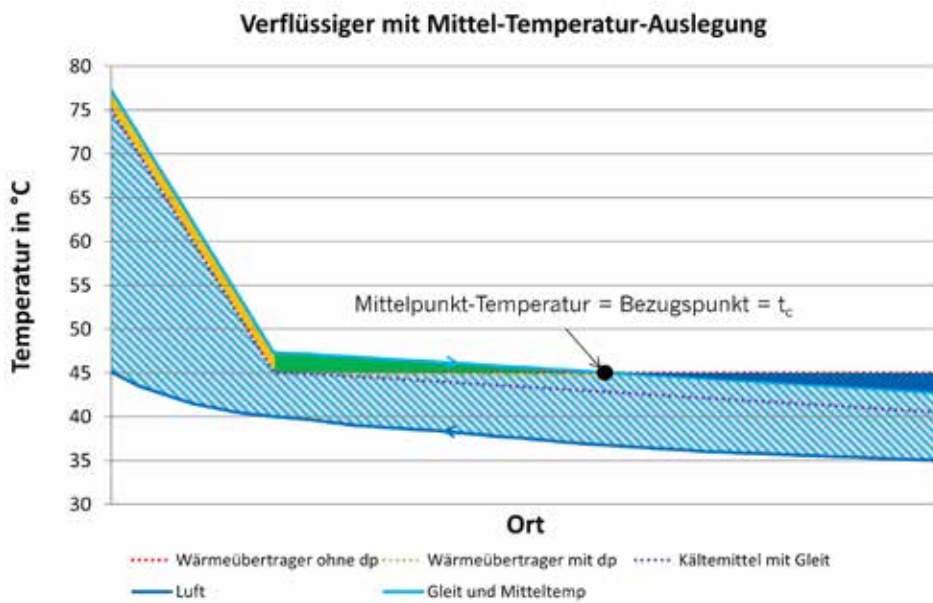
Sofern die Auswahlsoftware des Herstellers nicht ohnehin die Berechnung mit Mittel-Temperatur unterstützt, muss man, um den Verflüssiger dennoch mit Mittel-Temperatur berechnen zu können, die zur Mittel-Temperatur gehörige Taupunkt-Temperatur in das Berechnungsprogramm als Kondensationstemperatur eingegeben. In **Tabelle 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.

**Tabelle 2: Umrechnungstabelle für Verflüssiger mit R-449A**

<b>R-449A</b>			
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

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 **Abbildung 12** sind die Gründe hierfür dargestellt.

Wird die Verflüssigungstemperatur von der Taupunkt- zur Mittel-Temperatur 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.

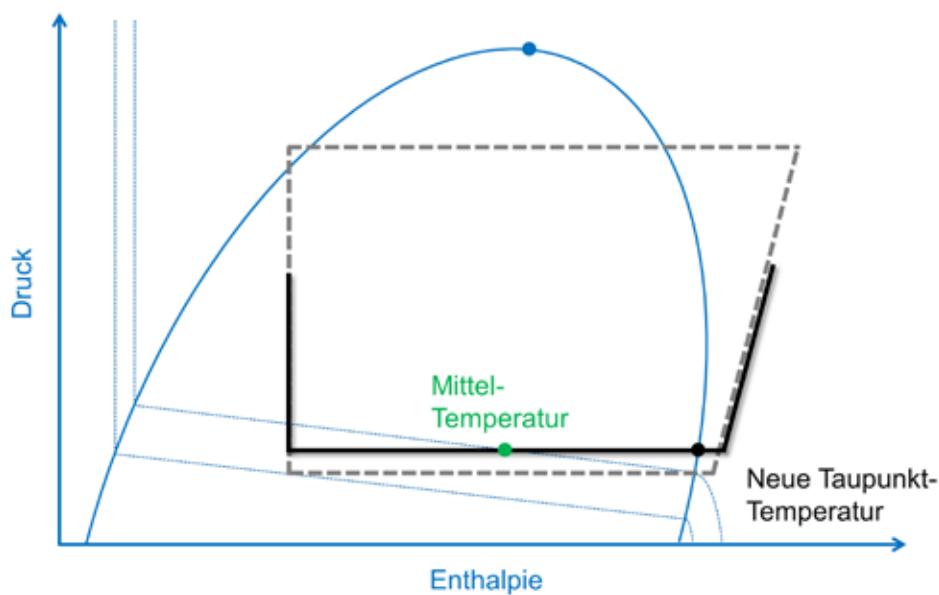


**Abbildung 12: Temperaturverhältnisse am Verflüssiger mit Mittel-Temperatur-Berechnung**

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 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 aufwändiger 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 Mittel-Temperatur nicht mehr einfach über das arithmetische Mittel zwischen Siede- und Taupunkt-Temperatur ermitteln, sondern sie muss in einem iterativen Verfahren bestimmt werden. Wie in **Abbildung 13** dargestellt, erhöhen sich aber auch hier Druck und Taupunkt-Temperatur.



**Abbildung 13: Verdampferauslegung mit Mittel-Temperatur im log p,h-Diagramm**

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 **Tabelle 3**: Umrechnungstabelle für Verdampfer mit R-449A 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 Mittel-Temperatur am Verdampfer hat, muss auch dieser berücksichtigt werden. So ergibt sich für eine Unterkühlung von 0 K und die vorgenannten Rahmenbedingungen eine Taupunkt-Temperatur von 1,94 °C.

**Tabelle 3: Umrechnungstabelle für Verdampfer mit R-449A (Auszug)**

Umrechnungs-Tabelle für R-449A Verdampfer, tc = +45°C								
Unter- kühlung in K mittlere Verdampfungs- Temperatur in °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

Wird ein Verdampfer nach dieser Methode ausgelegt, ergeben sich Änderungen an den Temperaturverläufen wie in **Abbildung 14**: Temperaturverhältnisse am Verdampfer mit Mittel-Temperatur-Berechnung dargestellt.

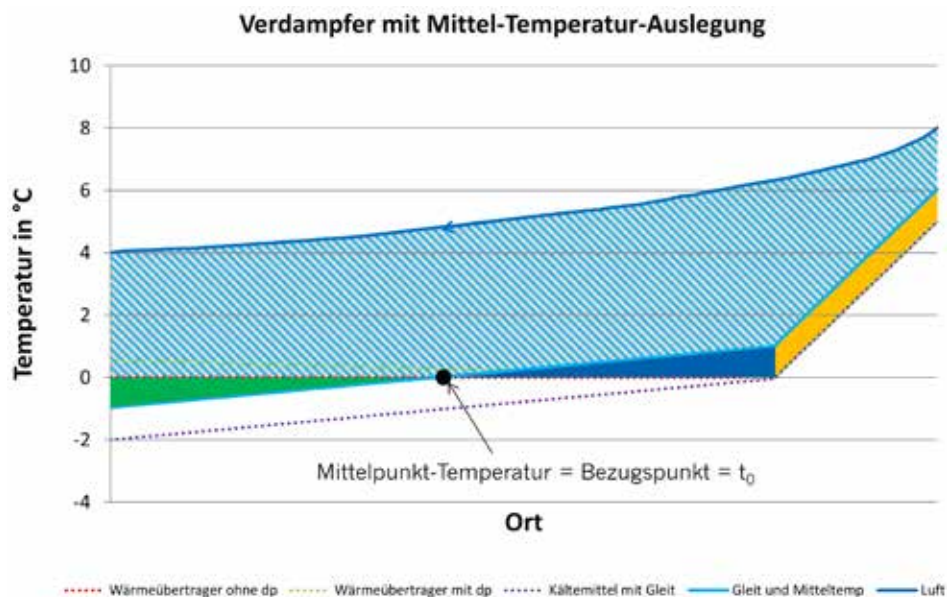


Abbildung 14: Temperaturverhältnisse am Verdampfer mit Mittel-Temperatur-Berechnung

Im Diagramm ist zu erkennen, dass die mittlere Verdampfungstemperatur bei den ursprünglich angestrebten  $\pm 0\text{ °C}$  liegt. Am Eintritt liegt sie mit  $-1\text{ °C}$  etwas darunter, aber am Ende des Zwei-Phasen-Gebietes liegt sie mit  $+1\text{ °C}$  ebensoviel darüber. Die im Diagramm grün dargestellte Fläche stellt daher wieder hinzugewonnene Temperatur-Differenz dar, während die blaue Fläche verlorene Temperatur-Differenz repräsentiert. 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.

### Exkurs: Bemessung von Wärmeübertragern 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**.