



BUNDESFACHSCHULE

KÄLTE - KLIMA - TECHNIK



LANDESINNUNG

KÄLTE - KLIMA - TECHNIK
HESSEN-THÜRINGEN/BADEN-WÜRTTEMBERG



EUROPÄISCHE STUDIENAKADEMIE

KÄLTE - KLIMA - LÜFTUNG

KÄLTEBLICK live



Die angemessene Verdampfungs- und
Kälte­träger­vor­lauftem­peratur-
Energieeffizienz von Anfang an



Motivation für diesen Vortrag

- Die Festlegung der Temperaturverhältnisse bei Hochleistungsluftkühlern ist einer der ersten und wichtigen Projektschritte.
- Die getroffene Festlegung hat unmittelbaren Einfluss auf den Gütegrad der Kälteanlage und damit auch auf die Energieeffizienz und die Betriebskosten.
- Die Qualität der Kühlgüter wird negativ beeinflusst, wenn die geforderten Lagerungsbedingungen nicht eingehalten werden.



Inhalt

1. Die Bedeutung der Verdampfungstemperatur im Projektumfeld
2. Bestimmung der Verdampfungstemperatur bei Anlagen mit Direktverdampfung
3. Die Ein- und Austrittsparameter bei Anlagen mit Kälteträgern



1. Die Bedeutung der Verdampfungstemperatur im Projektumfeld

■ Verdampfungstemperatur, Kälteleistung, Antriebsleistung

Mit sinkender Verdampfungstemperatur wird die Anlagenkälteleistung erkennbar niedriger. Der Grund dafür liegt in folgenden Einflüssen:

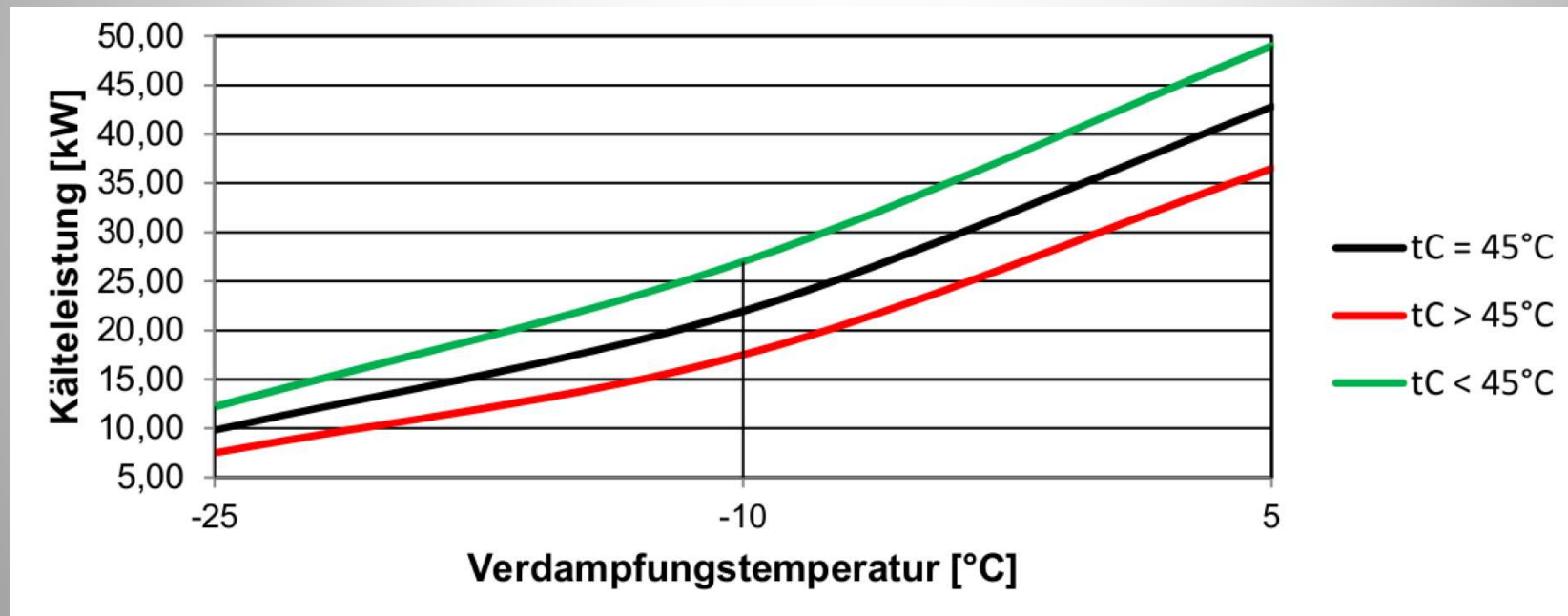
- Bei steigendem Druckverhältnis sinkt der Liefergrad des Verdichters wesentlich ab. Der tatsächlich geförderte Volumenstrom fällt deutlich.
- Mit sinkendem Verdampfungsdruck fällt die Dichte des Sauggases zu Beginn der Verdichtung. Der vom Verdichter geförderte Kältemittelmassestrom sinkt.
- Ebenfalls eine Funktion der Verdampfungstemperatur ist die nutzbare Enthalpiedifferenz am Verdampfer. Auch hier ist eine Reduzierung bei fallender Verdampfungstemperatur zu erkennen.
- Der Verlauf der Antriebsleistung wird wesentlich von zwei Einflüssen bestimmt:
 - Von dem geförderten Kältemittelmassenstrom und
 - von der spezifischen Verdichtungsarbeit,
 - Obwohl die spezifische Verdichtungsarbeit bei fallendem Verdampfungsdruck erheblich ansteigt, sinkt das Produkt aus Massenstrom und Arbeit deutlich ab, da der geförderte Massenstrom überproportional kleiner wird.



1. Die Bedeutung der Verdampfungstemperatur im Projektumfeld

■ Verdampfungstemperatur, Kälteleistung, Antriebsleistung

- Anhand von Leistungsdaten realer Verdichter lässt sich eine teilquantitative Darstellung von Anlagenkälteleistung in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur für unterschiedliche Verflüssigungstemperaturen darstellen:



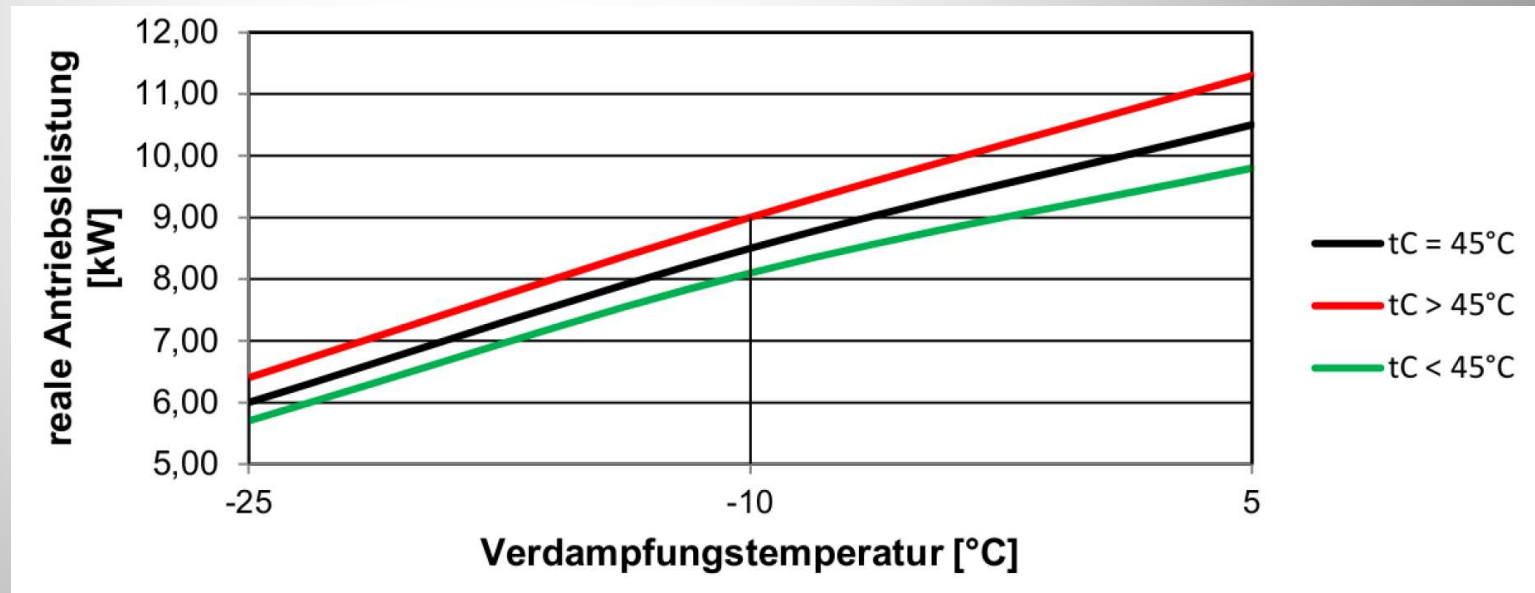


1. Die Bedeutung der Verdampfungstemperatur im Projektumfeld

■ Verdampfungstemperatur, Kälteleistung, Antriebsleistung

➤ Der Verlauf der Antriebsleistung wird wesentlich von zwei Einflüssen bestimmt:

- Von dem geförderten Kältemittelmassenstrom und
- von der spezifischen Verdichtungsarbeit,
- Obwohl die spezifische Verdichtungsarbeit bei fallendem Verdampfungsdruck erheblich ansteigt, sinkt das Produkt aus Massenstrom und Arbeit deutlich ab, da der geförderte Massenstrom überproportional kleiner wird.





1. Die Bedeutung der Verdampfungstemperatur im Projektumfeld

■ Die Produktqualität bei der Lagerung von Obst und Gemüse

An dieser Stelle soll auszugweise eine Übersicht gezeigt werden, die im Bereich der Lebensmittelforschung entstanden ist.

In der Quelle (F. Thompson et al. 2002) wird auch darauf hingewiesen, dass wenn die Maximale Gewichtsreduzierung überschritten wird, dann ist damit zu rechnen, dass die Produkte unverkäuflich sind.

Die Gewichtsreduzierung wiederum entsteht durch den Verlust an Wasser, welches durch die Differenz der Partialdrücke des Wasserdampfes an der Oberfläche des Produkts und der Kühlraumluft entsteht. Um die Verdunstung an der Oberfläche auszugleichen, wird aus dem Inneren beständig Wasser nachgeführt.

Kühlgut	Maximale Gewichtsreduzierung (% vom Frischegewicht)	Grund für den Verlust
Spinat	3	Welken
Broccoli	4	Geschmack verwelkt
Rüben mit Blättern	4	Verwelken
Tomaten	4	Verschrumpeln
Blattsalat	3-5	Welken, Verfall
Weintrauben	5	Traubenwelke
Birnen	6	Verschrumpeln
Kohl	6	Verschrumpeln
Apfel	7	Verschrumpeln
Kresse	7	Welken
Kaki Frucht	7	Verschrumpeln
Möhren	8	Welken



2. Bestimmung der Verdampfungstemperatur bei Anlagen mit Direktverdampfung

Der Planungsansatz

Wenn von Seiten des Kunden bzw. des Betreibers zu den erforderlichen Lagerungsbedingungen keine konkreten Angaben erfolgen, dann können die Grundwerte aus den sog. Kühlguttabeln entnommen werden.

In der Projektdokumentation sollten eigene Annahmen immer kommuniziert werden!

Lagerung von Kühlgut

Kühlgut	Lager-temperatur [°C]	relative Feuchtig-keit [%]	Lagerdauer	höchster Gefrierpkt. [°C]	spezifische Wärme-kapazität vor dem Erstarren [kJ/kg K]	spezifische Wärme-kapazität nach dem Erstarren [kJ/kg K]	Erstar-rungs-wärme [kJ/kg]	Atmungs-wärme [kJ/kg d]	Bemerkungen
Gemüse									
Artischocke	-1/0	90-95	1- 2 Wo	+1,0	3,64	1,88	280		
Spargel	0/+2	95	2- 3 Wo	-0,5	3,94	2,00	312	11,10	hochempfindlich
Grüne Bohnen	+4/+7	90-95	7-10 Ta	-0,7	3,81	1,97	298	11,60	
Rote Rüben	0	95	3- 5 Mo	-1,0	3,77	1,92	293	3,10	
Spargelkohl	0	90-95	10-14 Ta	-0,6	3,85	1,97	302	8,70	weniger empfindlich
Rosenkohl	0	90-95	3- 5 Wo	-0,8	3,68	1,93	284	6,70	
Kohl	0	90-95	3- 4 Mo	-0,9	3,94	1,97	307	1,40	
Mohrrübe	0	90-95	4- 5 Mo	-1,4	3,76	1,93	293	2,40	
Blumenkohl	0	90-95	2- 4 Wo	-0,8	3,89	1,97	307	4,50	
Sellerie	0	90-95	2- 3 Mo	-0,5	3,98	2,00	314	1,90	weniger empfindlich
Mais	0	90-95	4- 8 Ta	-0,5	3,31	1,76	246	10,80	
Gurken	+7/+10	90-95	10-14 Ta	-0,5	4,06	2,05	319		hochempfindlich
Endivie	0	90-95	2- 3 Wo	-0,6	3,94	2,00	307		
Blanchierlauch - trocken	0	65-70	6- 7 Mo	-0,8	2,89	1,67	207		
Blanchierlauch	0	90-95	1- 3 Mo	-0,7	3,68	1,93	293		
Salat	0	95	2- 3 Wo	-0,1	4,02	2,00	316	3,90	weniger empfindlich
Melone	+2/+4	85-90	5-15 Ta	-1,1	3,89	2,00	307	1,50	
Honigmelone	+7/+10	85-90	3- 4 Wo	-0,9	3,94	2,00	307	1,20	
Wassermelone	+4/+10	80-85	2- 3 Wo	-0,4	4,06	2,00	307		
Champignons	0	90	3- 4 Ta	-0,9	3,89	1,97	302	7,20	
Oliven - frisch	+7/+10	85-90	4- 6 Wo	-1,5	3,35	1,76	251	1,00	
Zwiebel	0	65-70	1- 8 Mo	-0,8	3,77	1,93	288	1,00	wenig empfindlich
Erbsen	0	90-95	1- 3 Wo	-0,6	3,31	1,76	246	9,60	wenig empfindlich
Pfeffer	+7/+10	90-95	2- 3 Wo	-0,7	3,94	1,97	307	3,14	hochempfindlich
Frühkartoffeln	+10/+13	90		-0,6	3,56	1,84	270	3,00	
Spätkartoffeln	+3/+10	90		-0,6	3,43	1,80	258	1,80	hochempfindlich
Rhabarber	0	95	2- 4 Wo	-0,9	4,02	2,00	312		
Spinat	0	90-95	10-14 Ta	-0,3	3,94	2,00	307	11,10	
Tomaten -unreife	+13/+21	85-90	1- 3 Wo	-0,5	3,98	2,00	312	7,20	
-reife	+7/+10	85-90	4- 7 Ta	-0,5	3,94	2,00	312	4,30	hochempfindlich



2. Bestimmung der Verdampfungstemperatur bei Anlagen mit Direktverdampfung

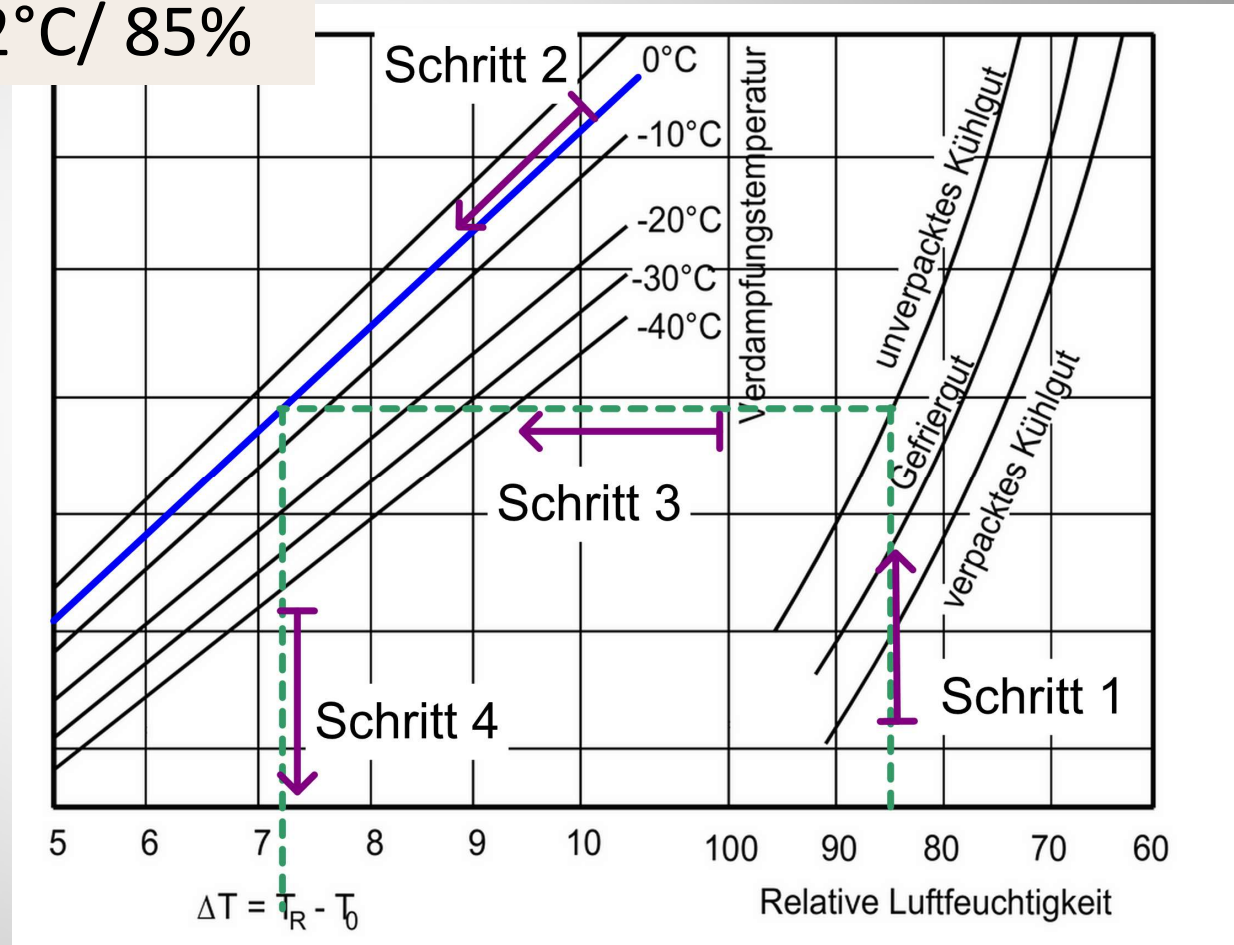
Der Planungsansatz für +2°C/ 85%

Schritt 2

Hierbei wird eine erste Annahme für die Verdampfungstemperatur t_0 getroffen. In der VDMA 24247-8 wird hierzu empfohlen:
...Es ist ein ΔT_1 von 7 K anzustreben...
Hier: $T_{01} = T_R - \Delta T = +2^\circ\text{C} - 7\text{K} = -5^\circ\text{C}$
Die blaue Linie kann eingezeichnet werden.

Schritt 4

Es wird das Lot von dem Schnittpunkt aus Schritt 2 und 3 auf die Abszisse gefällt und die arithmetische Temperaturdifferenz abgelesen mit $\Delta T = 7,3\text{K}$.
Nun kann T_0 ausgerechnet werden:
 $T_0 = T_R - \Delta T = +2^\circ\text{C} - 7,3\text{K} = -5,3^\circ\text{C}$





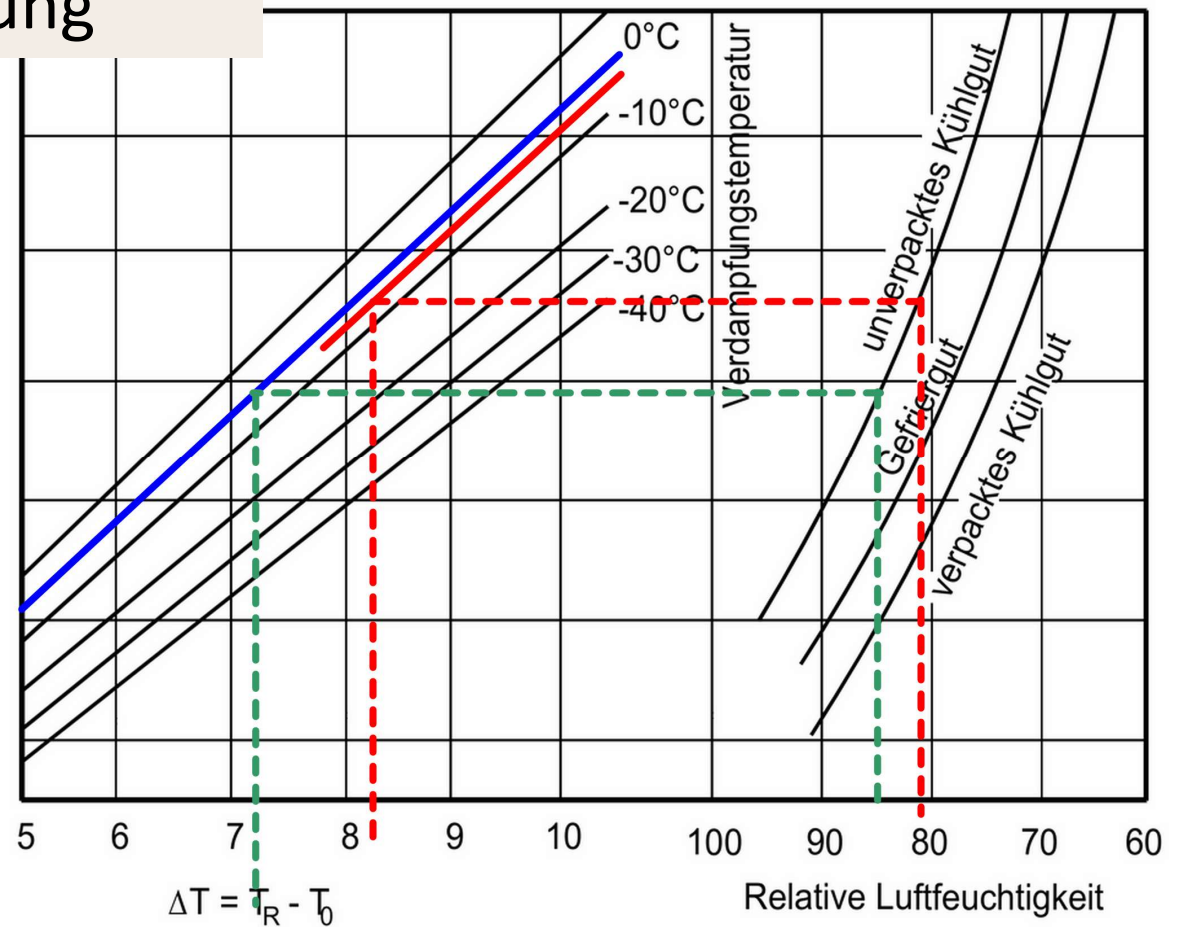
2. Bestimmung der Verdampfungstemperatur bei Anlagen mit Direktverdampfung

■ Prüfung der gewählten Lösung

Variantenvergleich bei $t_0 = -5,3^\circ\text{C}$ und $-6,3^\circ\text{C}$

Im weiteren Planungsverlauf wird aus den Herstellerangaben der Verdampfer und daraus resultierend auch der Verdichter aus Katalogen oder Softwarelösungen ausgewählt.

Es ist möglich, dass aus der Kombination der beiden Komponenten eine höhere Temperaturdifferenz zwischen Lufteintrittszustand und Verdampfungsniveau entsteht. Die Folge wäre eine Senkung der Verdampfungstemperatur. Hier soll eine Differenztemperaturvergrößerung um 1 K analysiert werden

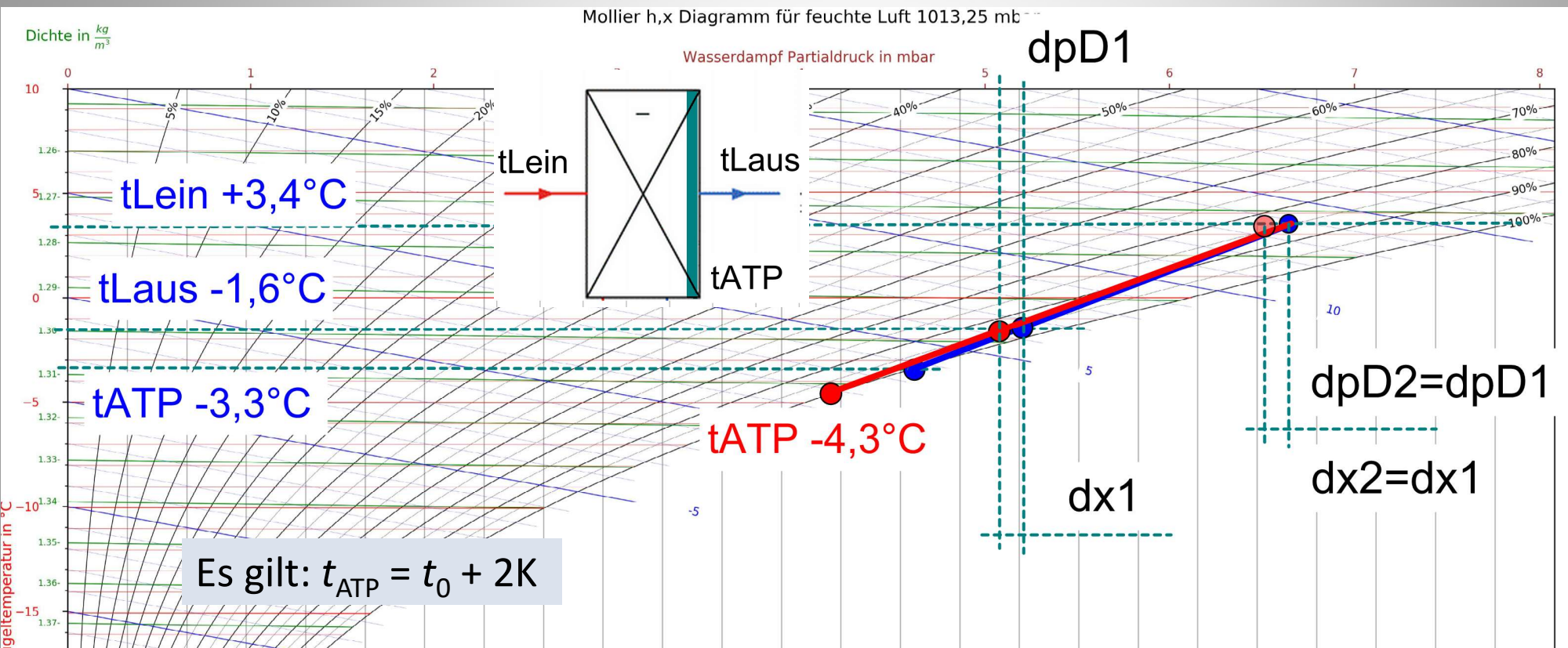




2. Bestimmung der Verdampfungstemperatur bei Anlagen mit Direktverdampfung

■ Prüfung der gewählten Lösung

Variantenvergleich bei $t_0 = -5,3^\circ\text{C}$ und $-6,3^\circ\text{C}$





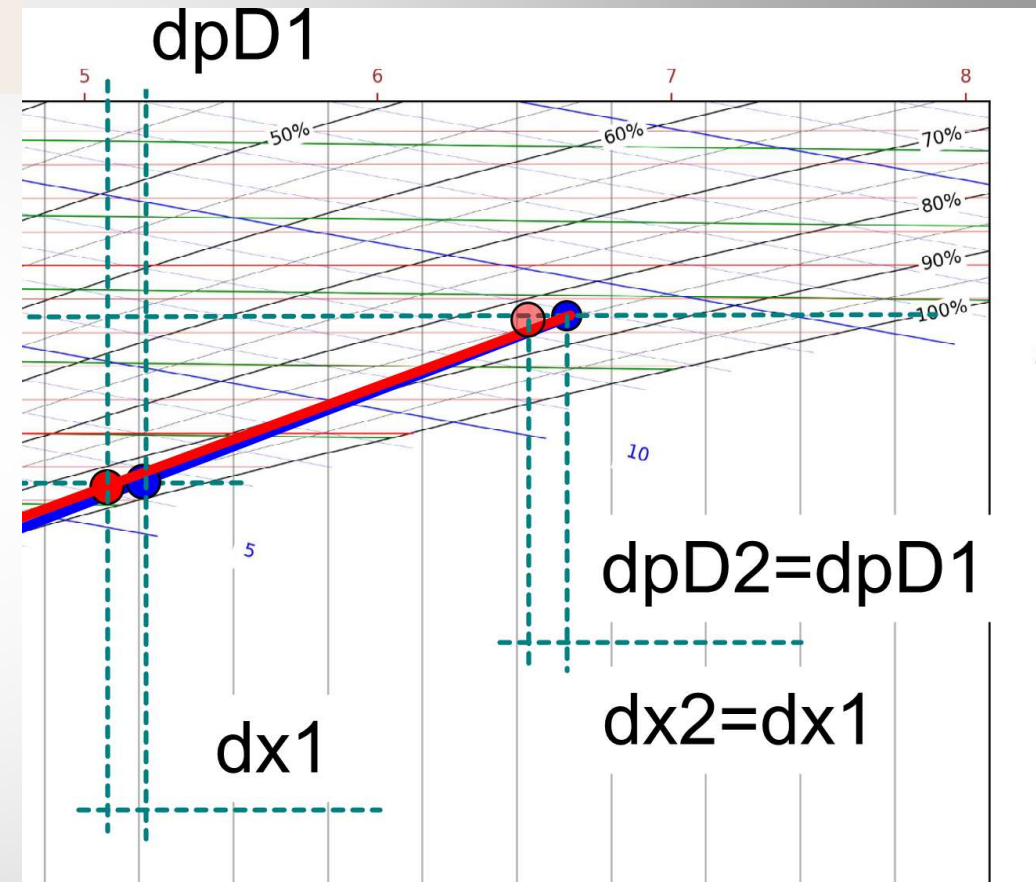
2. Bestimmung der Verdampfungstemperatur bei Anlagen mit Direktverdampfung

■ Prüfung der gewählten Lösung

Variantenvergleich bei $t_0 = -5,3^\circ\text{C}$ und $-6,3^\circ\text{C}$
Die Folge einer denkbaren Absenkung von t_0 :

Wenn die Verdampfungstemperatur absinkt, dann wird die Kühlluft stärker entfeuchtet.

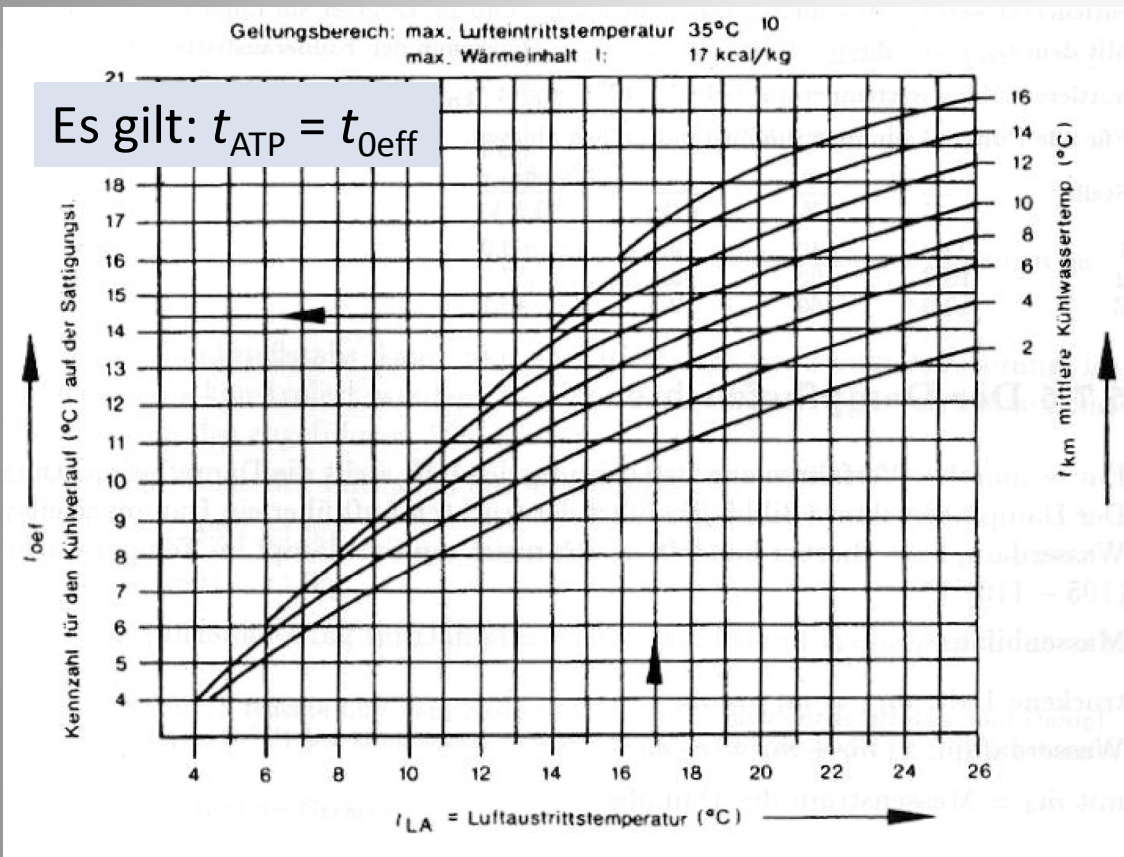
Der sich einstellende Raumzustand im Hinblick auf die absolute Luftfeuchtigkeit und die Partialdruckdifferenz folgt der Absenkung der absoluten Luftfeuchtigkeit über der Kühloberfläche





3. Die Ein- und Austrittsparameter bei Anlagen mit Kälteträgern

■ Konzept für die Raumlufttechnik



Mit Hilfe eines durch empirisch ermittelte Einflussgrößen aufgestellten Diagramms (Quelle GEA-Happel) lassen sich mit einer voraus ermittelten Kühleroberflächentemperatur t_{ATP} und der Austrittstemperatur der Luft aus dem Kühlregister $t_{Luft,aus}$ die mittlere Temperatur des Kälteträgers bestimmen. Anschließend kann in Vor- und Rücklaufemperatur differenziert werden. Bei Flächentemperierung gilt 2K für $\Delta t_{Vor,Rück}$

$$t_{km} = \frac{t_{Vor} + t_{Rück}}{2}$$

$$\Delta t_{Vor,Rück} = 5 \dots 6K$$

$$t_{Vor} = t_{km} - \frac{\Delta t_{Vor,Rück}}{2}$$

$$t_{Rück} = t_{km} + \frac{\Delta t_{Vor,Rück}}{2}$$



3. Die Ein- und Austrittsparameter bei Anlagen mit Kälteträgern

■ Konzept für die Lebensmittelkühlung

Für die Berechnung der Kühleroberflächentemperatur findet man in der Fachliteratur einen allgemein gültigen Ansatz:

$$t_{O,eff} = t_{KM(KT)} + 0,15..0,18 \dots 0,20 \cdot (t_{LE} - t_{KM(KT)})$$

Durch Umformung und Anwendung eines mittleren Faktors von 0,18 erhält man die praxistaugliche Form:

$$t_{KM(KT)} = 1,22 * t_{O,eff} - 0,22 * t_{LE}$$

Die Vor- und Rücklauftemperaturen können anschließend durch den bereits bekannten Ansatz berechnet werden.

Die Kühleroberflächentemperatur kann überschlägig durch Eintragung der Ein- und Austrittsparameter der Luft am gewählten Luftkühler bestimmt werden. Prinzipiell können die Kühleroberflächentemperaturen aus der Herangehensweise bei Direktverdampfung übernommen werden.

$$t_{km} = \frac{t_{Vor} + t_{Rück}}{2}$$

$$\Delta t_{Vor,Rück} = 5 \dots 6K$$

$$t_{Vor} = t_{km} - \frac{\Delta t_{Vor,Rück}}{2}$$

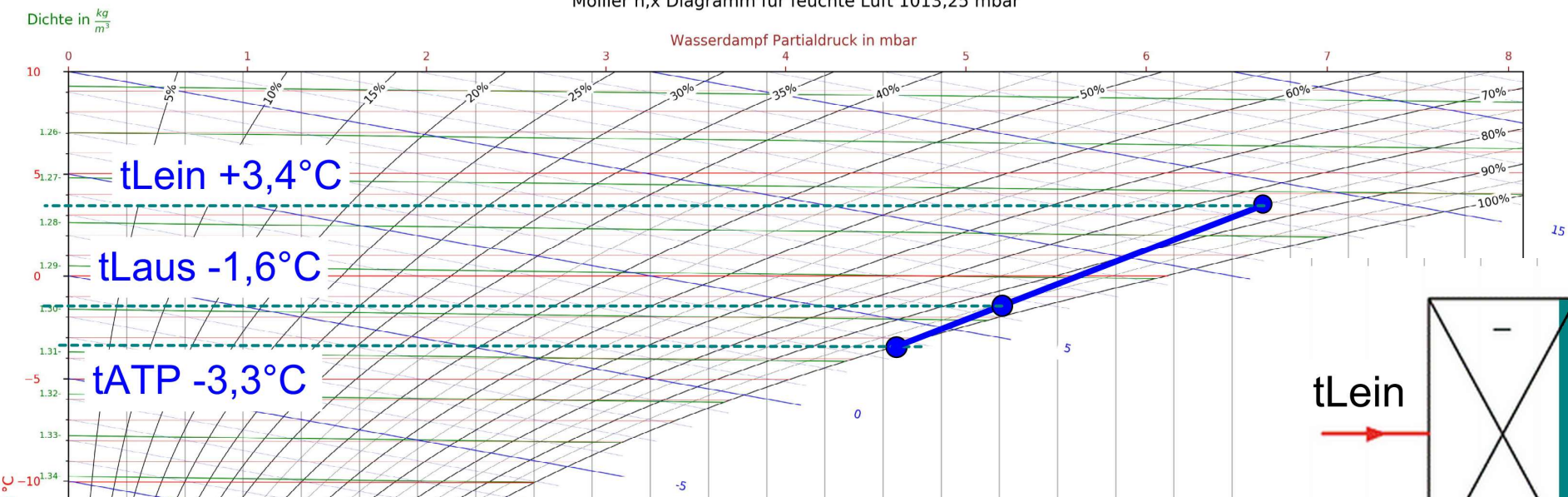
$$t_{Rück} = t_{km} + \frac{\Delta t_{Vor,Rück}}{2}$$



3. Die Ein- und Austrittsparameter bei Anlagen mit Kälteträgern

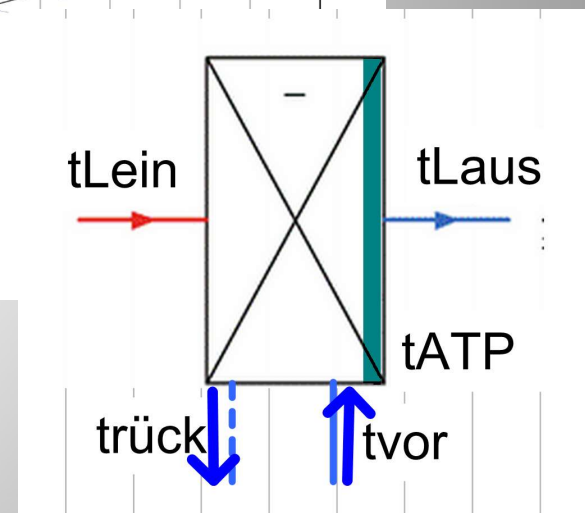
■ Konzept für die Lebensmittelkühlung

Mollier h,x Diagramm für feuchte Luft 1013,25 mbar



$$t_{KM(KT)} = 1,22 * (-3,3) - 0,22 * 3,4 = -4,8^{\circ}C \quad t_{Vor} = -4,8^{\circ}C - 3K = -7,8^{\circ}C$$

$$t_{Rück} = -4,8^{\circ}C + 3K = -1,8^{\circ}C$$





Fragen

Diskussion





Quellennachweis

- Commercial Cooling of Fruits, Vegetables, and Flowers von James F. Thompson, F. Gordon Mitchell, Tom R. Rumsay (2002)
- VDMA 24247–8: 2011–05 Energieeffizienz von Kälteanlagen – Teil 8: Komponenten – Wärmeübertrager, Berlin: Beuth



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**



**Bundeschule
Kälte-Klima-Technik**

**Bruno-Dressler-Straße 14
63477 Maintal**

Tel.: 06109 / 69 54 - 0

E-Mail: info@bfs-kaelte-klima.de

<http://www.bfs-kaelte-klima.de>