

Wärmepumpe

- Themen
- Wärme pumpen?
- Kostenvergleich
- Umweltwärme nutzen
- Wärmefluss & Kältemittel
- Funktion Wärmepumpe
- Phasenübergänge
- Kältemittel
- Wärmepumpenprozess
- Zustandsänderungen
- 1. Hauptsatz
- Schritt I bis IV
- Animation WP-Prozess
- Enthalpie & Wärmepumpe
- Carnot
- Carnot-Wirkungsgrad η
- Carnot-Wärmepumpe η_C
- COP_{real}
- COP Erfahrungswerte
- Vorlauftemperaturen
- lg p, h Diagramme
- Heizkennlinie
- *Carnot: COP_{MAX} & COP_{real} von VT*
- $COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von AT & VT
- $COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von TC-TV
- COP Internet
- COP Werte
- Quellen

Themen

Technik & Physik	Es soll um physikalische, technische Inhalte gehen.
Einführung	Kostenvergleich anhand Anbieterpreise (Januar 2024).
Idee der Wärmepumpe	Wärme aus kalter Luft gewinnen.
Technik	<ul style="list-style-type: none">• Funktion der Wärmepumpe.• Aufgabe des Kältemittels• Wärmepumpenprozess• Vorlauftemperaturen• lg p, h-Diagramme• Heizkennlinie
Physik	<ul style="list-style-type: none">• Phasenübergänge• Zustandsänderungen• Enthalpie und Wärmepumpe.• Carnot-Wirkungsgrad• COP
Auswertung	COP-Berechnungen

Wärme pumpen?



- Wärme pumpen?
- Mit „gefühlte“ kalter Außenluft heizen?
- Wie kann aus einer kalten (5 °C) Außentemperatur eine hohe Innentemperatur werden?
- Was geschieht, wenn die Außentemperatur unter 0 °C liegt?

Kostenvergleich

	Gas	Strom
Verbrauch	8000 kWh/Jahr	2800 kWh/Jahr
Kosten	15 ct/Jahr (Januar 2024)	30 ct/Jahr (Januar 2024)
Kosten	1200 €	840 €

Wärmepumpe und **elektr. Energie** (grobe Schätzung)

Kennzahl COP $COP = \frac{q_{Nutz}}{W}$ gewonnene Energie / aufgewandte Arbeit

$COP = 3$ $W_E = \frac{q_{Nutz}}{COP}$ $W_E = \frac{8000}{3} = 2666 \text{ kWh}$ untere Grenze...

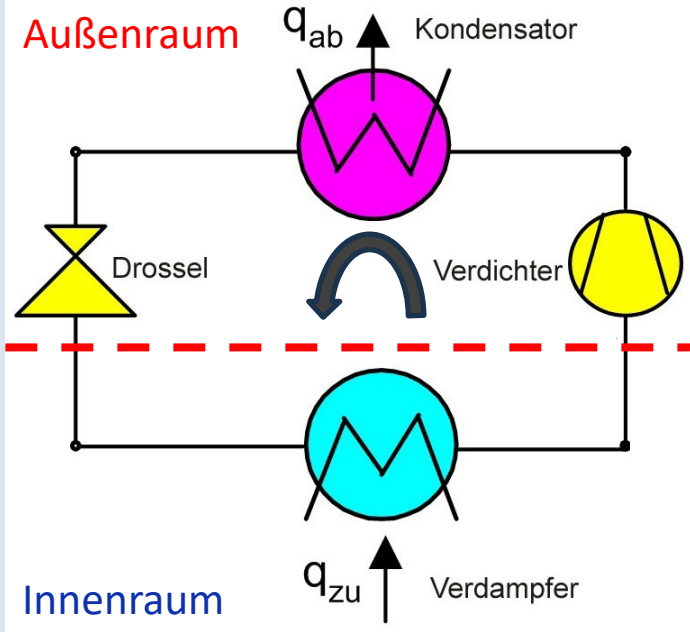
$COP = 4$ $W_E = \frac{8000}{4} = 2000 \text{ kWh}$ anzustreben...

	Brennwert (nur Gasanteil)	Wärmepumpe (nur Stromanteil)
Kosten	1200 € (15 ct/Jahr)	$Kosten_3 = 2666 \times 30 = 800 \text{ €}$
	3200 € (40 ct/Jahr)	$Kosten_4 = 2000 \times 30 = 600 \text{ €}$

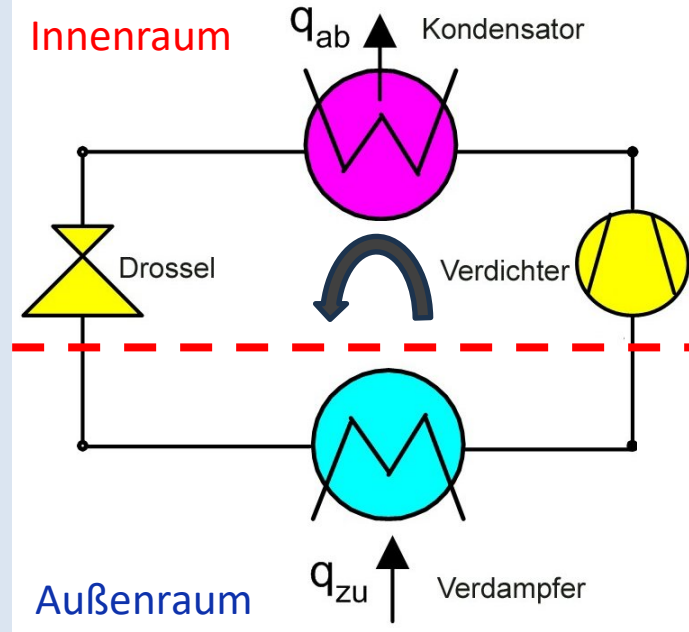
Quelle [1] und [2]

Kühlschrank-Wärmepumpe

Kühlschrank



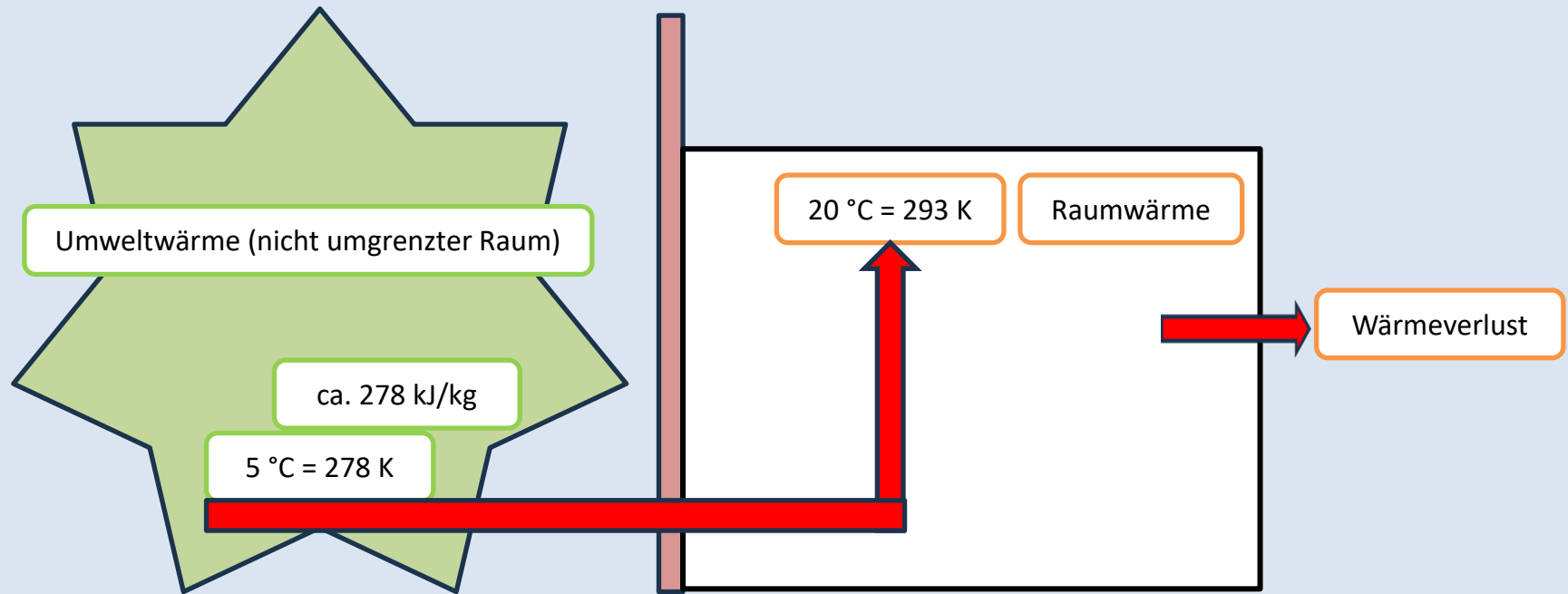
Wärmepumpe



Umweltwärme nutzen

Absolute Temperaturskala in **Kelvin**!

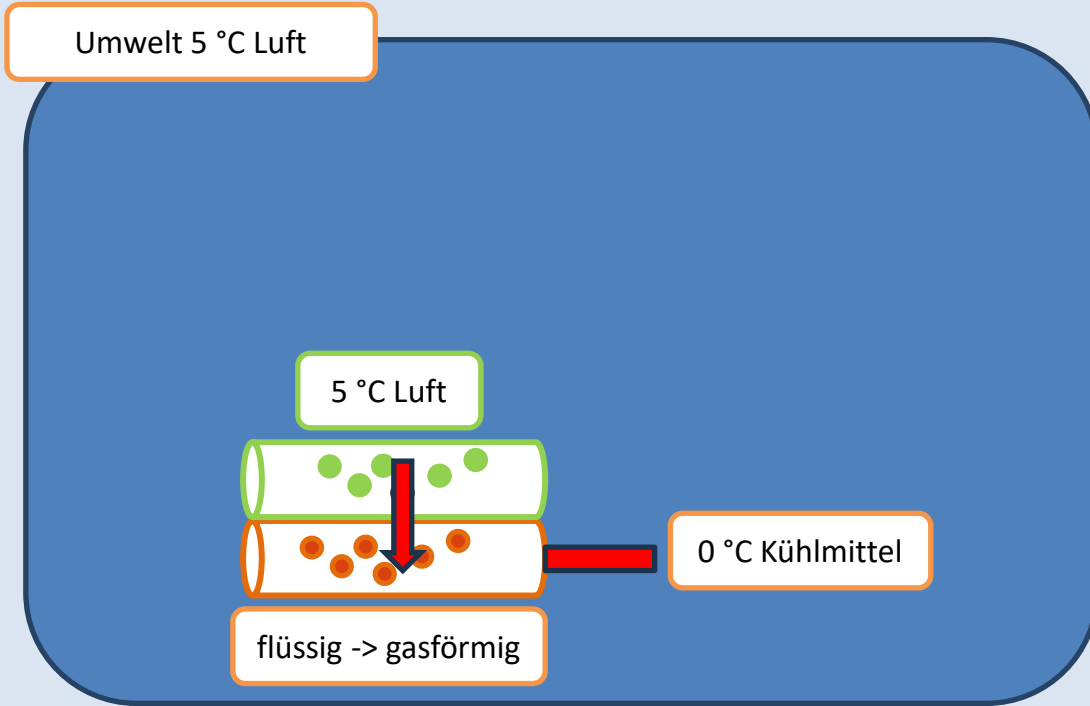
Null Grad Celsius ist nur gefühlt kalt. Tatsächlich liegt eine thermische Energie analog zu 273 K vor.



Aufgabe: Aus Umweltwärme Raumwärme ernten.

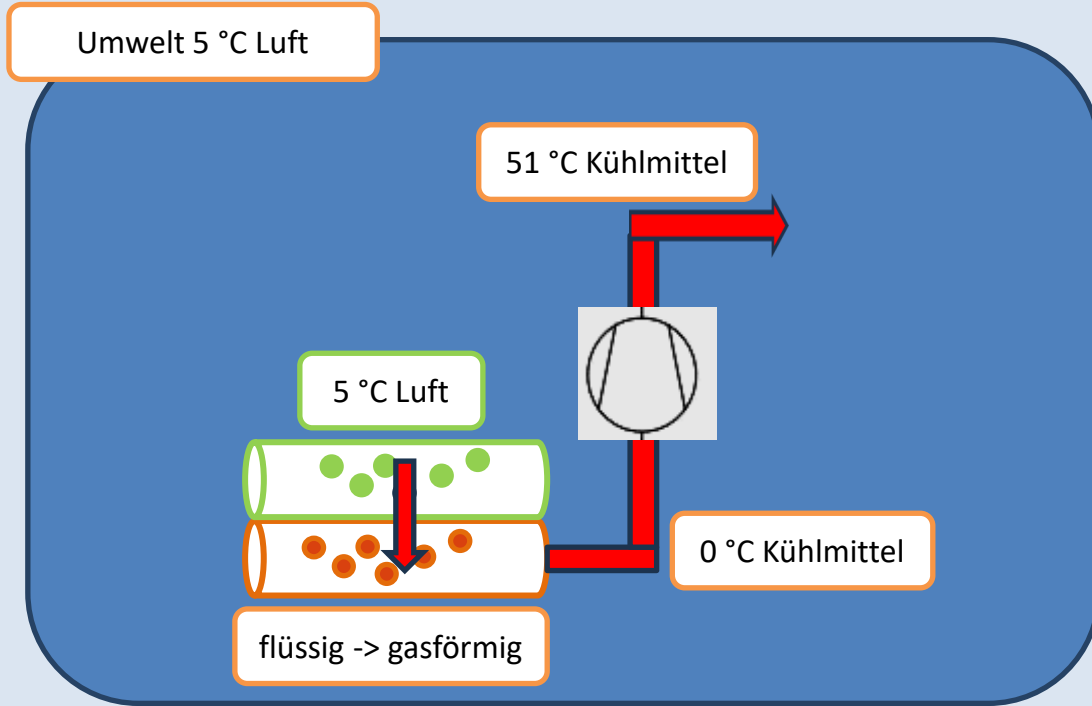
Wärmefluss & Kältemittel I

Aufgabe: Wärmefluss von der warmen Luft an das kühle Kältemittel.



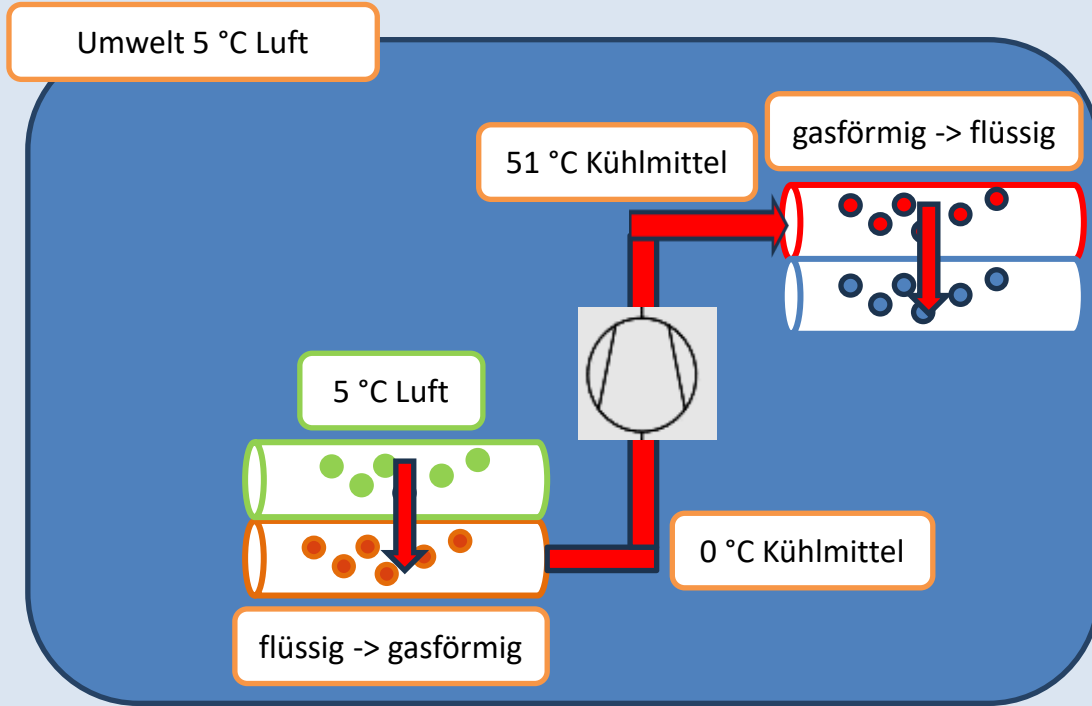
Wärmefluss & Kältemittel II

Aufgabe: Kältemittel von „5 °C“ auf „51 °C“ pumpen.



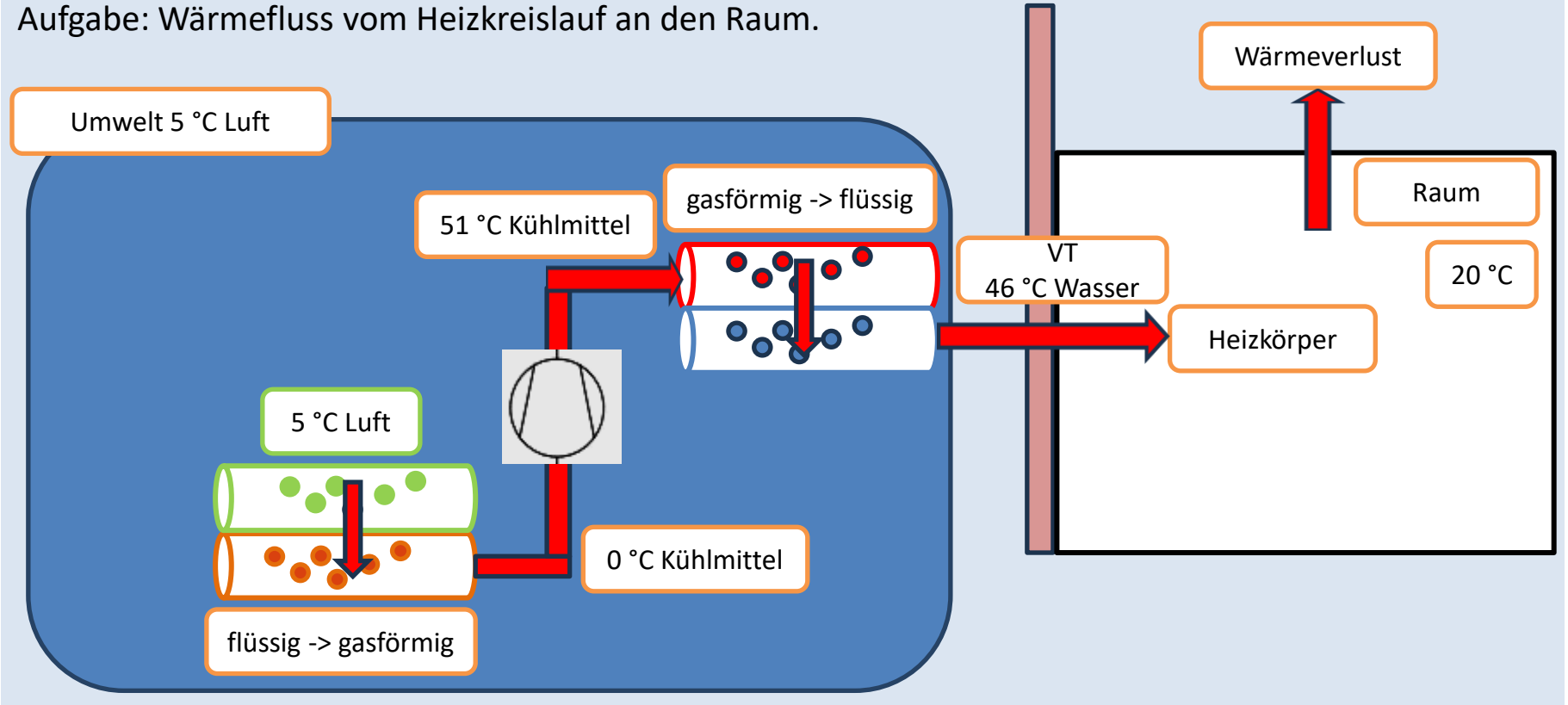
Wärmefluss & Kältemittel III

Aufgabe: Wärmefluss vom warmen Kältemittel an den kühlen Heizkreislauf.



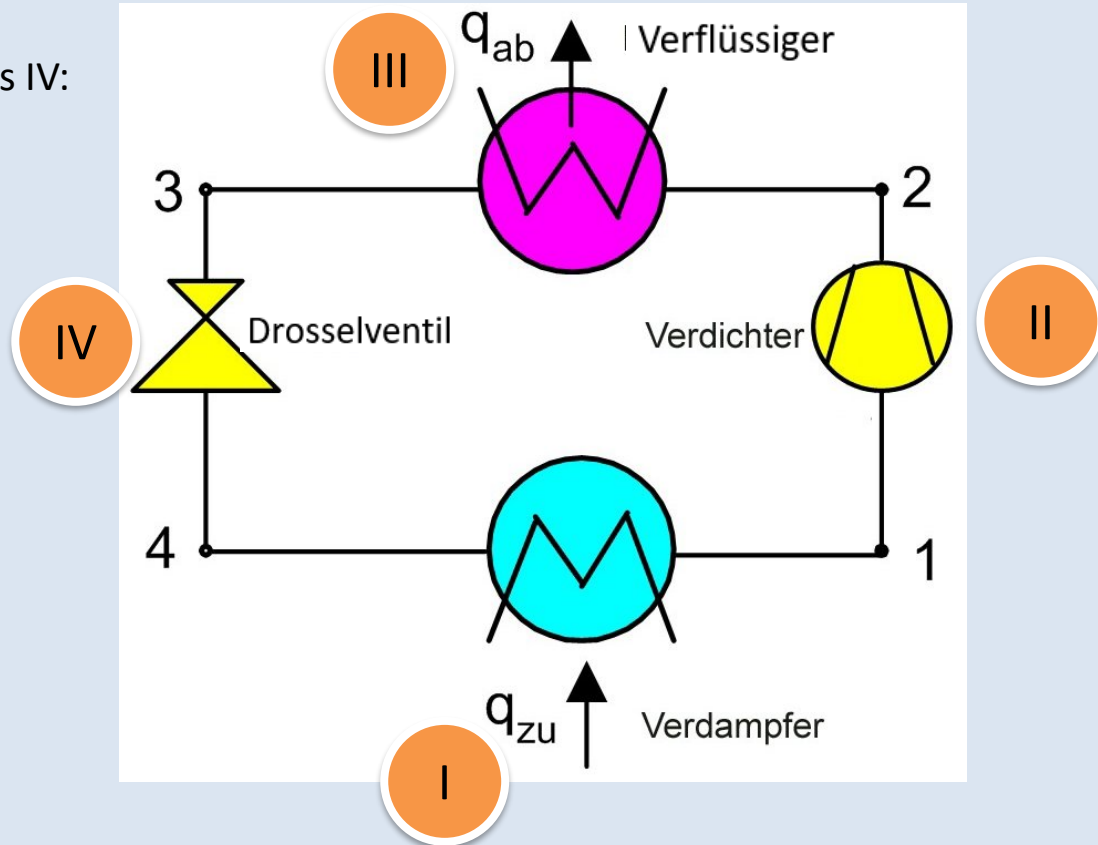
Wärmefluss & Kältemittel IV

Aufgabe: Wärmefluss vom Heizkreislauf an den Raum.



Wärmepumpenprozess

Prozessschritte I bis IV:



Prozessschritte

Schritt	Zustände	Vorgang	
I.	4 → 1	verdampfen	Zufuhr von Wärme. Phasenübergang von „flüssig → gasförmig“.
II.	1 → 2	verdichten	Einbringen von Arbeit (W_{elekt}). Führt zu einer Druck- und Temperaturhöhung. Wärme pumpen.
III.	2 → 3	verflüssigen	Abgabe von Wärme. Phasenübergang von „gasförmig → flüssig“.
IV.	3 → 4	entspannen	Drosselung des flüssigen Kältemittels. Führt zu einer Druck- und Temperatursenkung. Frei werdende Energie geht in das Kältemittel über. Keine Änderung der spez. Enthalpie des Kältemittels.

Zustandsänderungen

		(Definition für ideale Gase)	
Isobare Zustandsänderung	$p = \text{konst}$	Je größer die Temperatur, desto größer das Volumen.	Linien gleichen Druckes: Isobaren
Isotherme Zustandsänderung	$T = \text{konst}$	Je größer der Druck, desto kleiner das Volumen.	Linien gleicher Temperatur: Isothermen
Isentrope (adiabatische) Zustandsänderung	p, T ändern sich	Je größer die eingebrachte Enthalpie, desto größer Druck und Temperatur.	Linien gleicher Entropie: Isentropen
Isochore Zustandsänderung	$v = \text{konst}$	Je größer die Temperatur, desto größer der Druck.	Linien gleichen Volumens: Isochoren

1. Hauptsatz

Wärme und Arbeit.

Erst 1842 sprach Robert Mayer von der „Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit“.

1. Hauptsatz der Wärmelehre^[1]

Wärme kann aus mechanischer Arbeit erzeugt und in solche umgewandelt werden.

Elektrische Arbeit kann in Wärme umgewandelt werden.

Wärmegleichung

$$Q = \Delta U + W$$

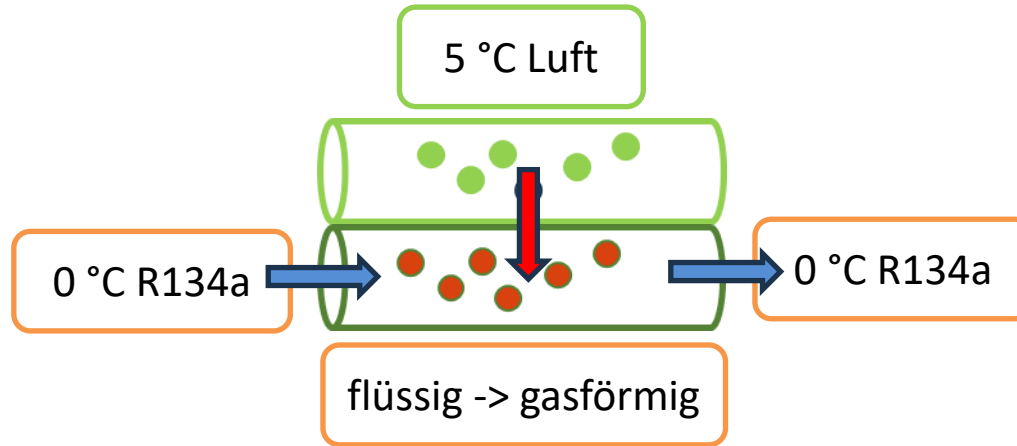
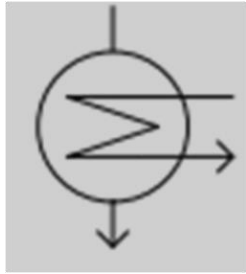
U: Innere Energie

W: Arbeit

Schritt I

Schritt I: verdampfen

(isothermer Prozess)



Vorgang

Zufuhr von Wärme an Kältemittel (infolge Grädigkeit).

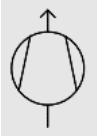
Thermodynamik

Phasenübergang von „flüssig → gasförmig“.
Temperatur bleibt konstant.
Druck bleibt konstant.

Schritt II

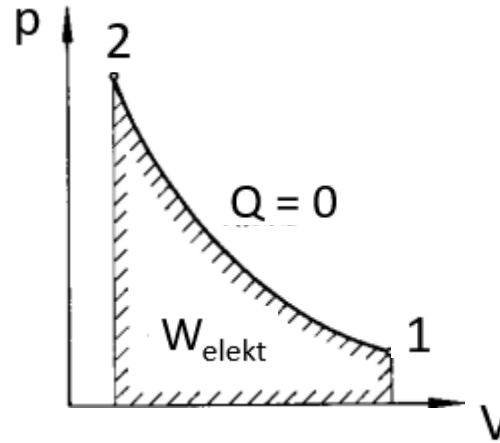
Schritt II: verdichten

$t_2 = 51\text{ °C}$
 $p_1 = 13,51\text{ bar}$
 $v_2 < v_1$



$t_1 = 0\text{ °C}$
 $p_1 = 2,93\text{ bar}$
 v_1

p, V - Diagramm



(isentropen Prozess)

$$Q = \Delta U + W_{\text{elekt}}$$

U : Innere Energie

W_{elekt} : elektrische Arbeit

Annahme: $Q = 0$

Innere Energie:

$$\Delta U = W_{\text{elekt}}$$

Vorgang

Kältemitteltemperatur auf Vorlauftemperatur (+Grädigkeit) erhöhen.

Thermodynamik

Adiabatische (isentropen) Volumenänderungsarbeit W_{elekt} .

Ohne Wärmeverluste (nicht realistisch) Q .

Temperatur erhöht sich. Druck erhöht sich.

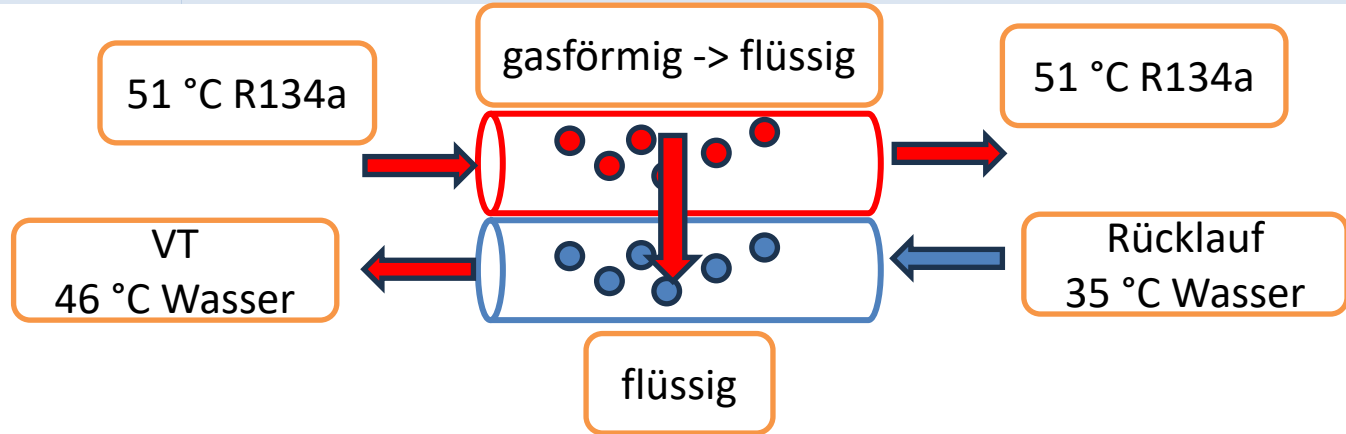
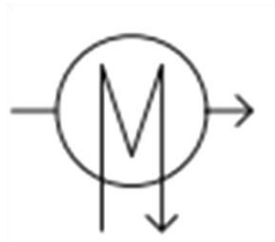
Volumen verkleinert sich.

Quelle [5]

Schritt III

Schritt III: verflüssigen

(isothermer Prozess)



Vorgang

Abgabe von Wärme (infolge Grädigkeit).

Thermodynamik

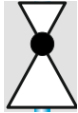
Kältemittel Phasenübergang von „gasförmig → flüssig”.
Kältemittel-Temperatur bleibt konstant.
Kältemittel-Druck bleibt konstant.
Temperatur im Heizkreislauf erhöht sich auf VT.

Schritt IV

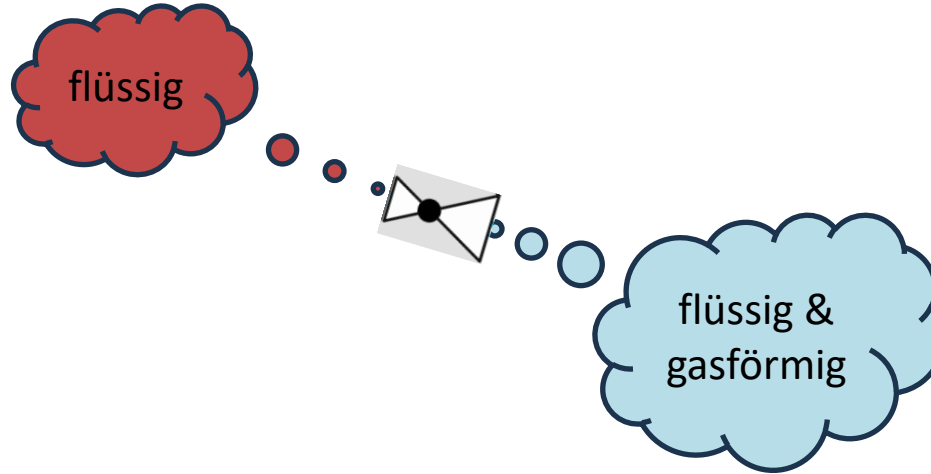
Schritt IV: entspannen

(isentropischer Prozess)

$t_3 = 51\text{ °C R134a}$
 $p_3 = 13,51\text{ bar}$
 v_3



$t_4 = 0\text{ °C R124a}$
 $p_4 = 2,93\text{ bar}$
 $v_4 > v_3$



Vorgang

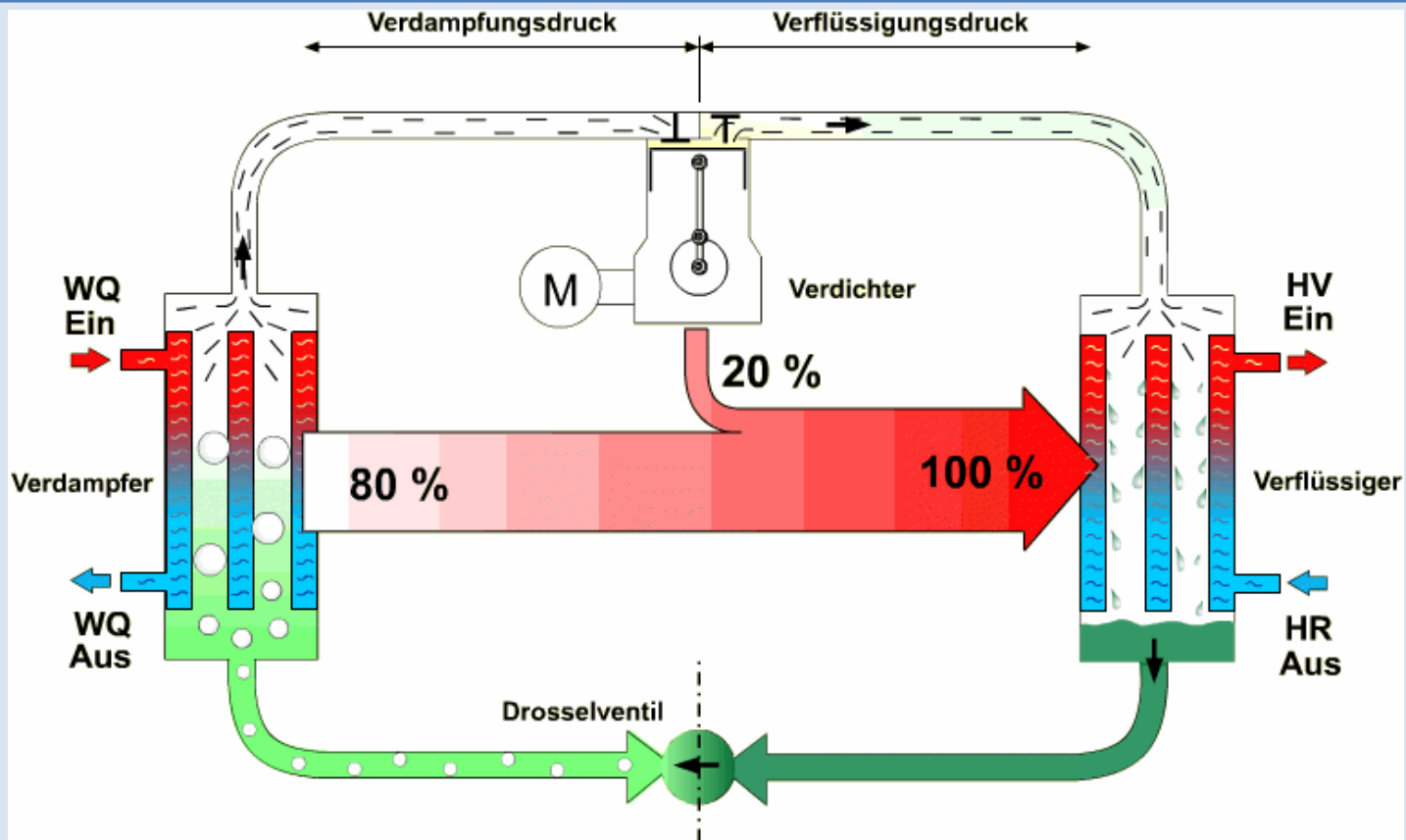
Kältemitteltemperatur auf Umlufttemperatur (-Grädigkeit) senken.

Thermodynamik

Adiabatische (isentropische) Drosselung ohne Wärmeverluste.
Frei werdende Energie geht in latente Wärme über (Isenthalpe).
Phasenübergang von flüssig nach gasförmig.
Temperatur erniedrigt sich. Druck erniedrigt sich.
Volumen erhöht sich.

Animation WP-Prozess

COP = 5?
(AT > 5 °C)



Quelle [6]

Phasenübergänge (Wasser)

Temperatur in °C

Energie in kJ (für 1 kg)

Phasen:

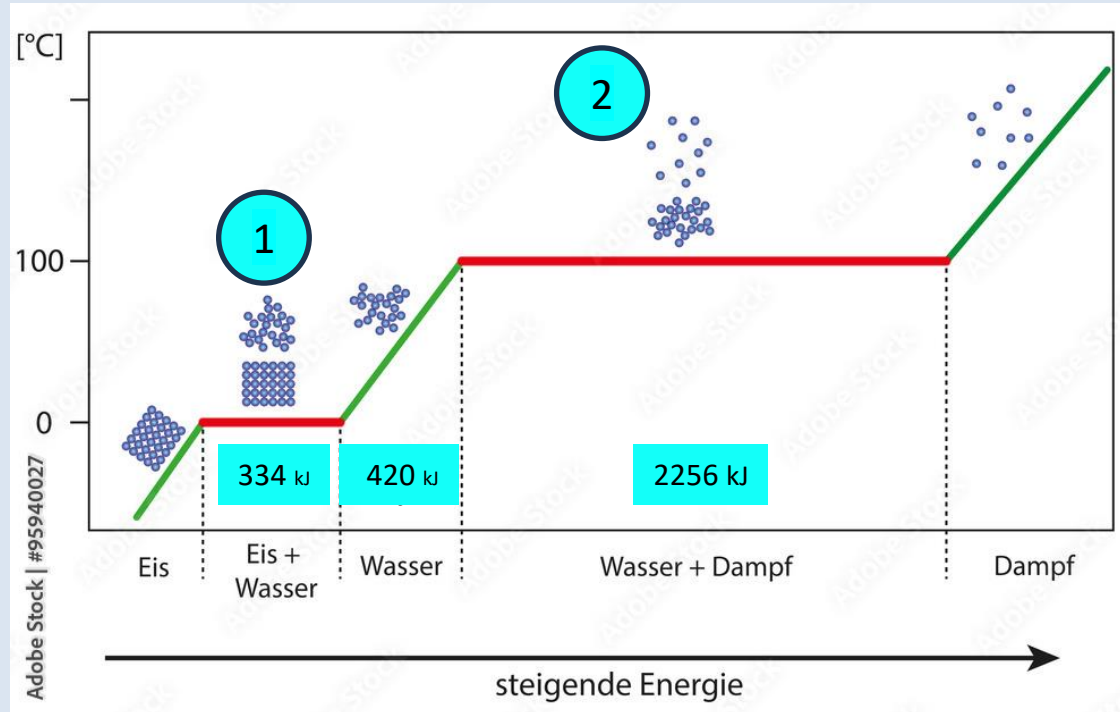
- Festkörper: Eis
- Flüssigkeit: Wasser
- Nassdampf: Wasser und Dampf
- Heißdampf: Dampf

Isotherme: $t = \text{konst}$

$p = \text{konst}$

Phasenübergänge:

- ① Eis & Wasser \rightarrow Wasser
- ② Wasser & Dampf \rightarrow Dampf



Quelle [4]

Folgerungen

Wärmepumpe

Verdampfen

Der Wärmepumpen-Prozess macht sich, die mit dem **Phasenübergang vom flüssigen in den gasförmigen** Aggregatzustand des Kältemittels verbundene physikalische Eigenschaft zu Nutze, ein hohes Maß an thermische Energie aufnehmen zu können.

Verflüssigen

Phasenübergang vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand.

Kältemittel

Warum Wasser nicht geht!

Wasser siedet bei Umgebungsdruck erst bei 100 °C.
Bei ca. 1/100 bar würde Wasser erst bei 0°C sieden.

Anforderungen

- Bei geringen Temperaturen verdampfen
- Bei höheren Temperaturen kondensieren
- Beide Vorgänge müssen bei beherrschbaren Drücken stattfinden.
- Die „latente“ Wärme sollte möglichst groß sein.
- Kein Treibhausgaspotenzial.
- Kein Ozonschädigungspotenzial.
- Optimale Betriebssicherheit (Brennbarkeit)

Enthalpie & Wärmepumpe

Enthalpie

Die Enthalpie H ist die Summe aus innerer Energie „ U “ und der Volumenarbeit „ pV “ (oder W).

Die Enthalpie H ist eine Zustandsgröße, wie v , p , T und U .

Verdampfer

Der Phasenübergang von „flüssig -> gasförmig“, Zufuhr von Wärme, führt zu einer **anwachsenden** spez. Enthalpie h .

Verdichter

Die Einbringung von Arbeit (W_{elekt}) führt zu einer **anwachsenden** spez. Enthalpie h .

Kondensator

Der Phasenübergang von „gasförmig -> flüssig“, Abgabe von Wärme, führt zu einer **abnehmenden** spez. Enthalpie h .

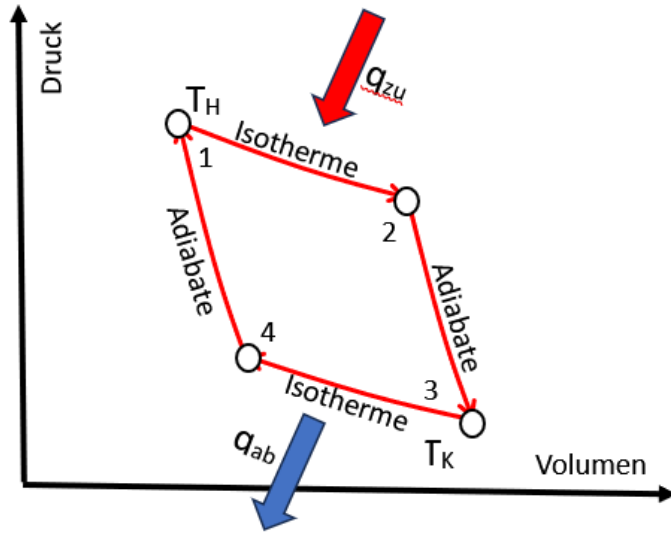
Expansionsventil

Die Drosselung des flüssigen Kältemittels verläuft **ohne Änderung** der spez. Enthalpie h .

Carnot

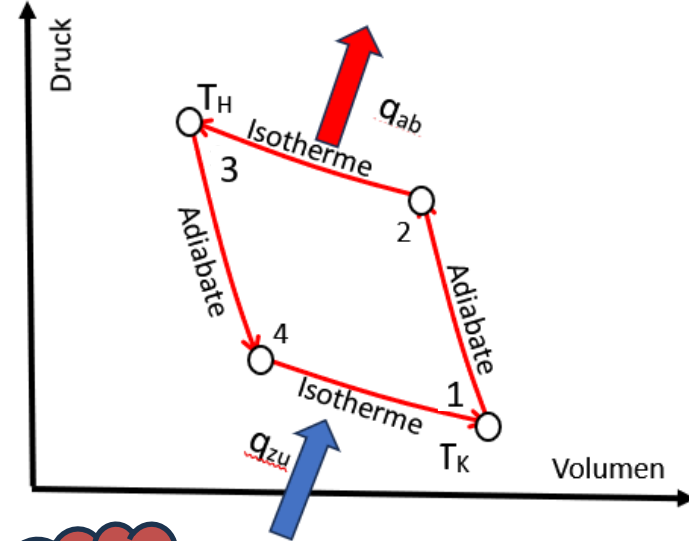
rechtslaufend

linkslaufend



Wärmekraftmaschine

$$\eta = \frac{T_H - T_K}{T_H}$$



Wärmepumpe

$$\eta_c = \frac{T_H}{T_H - T_K}$$

T in K

Carnot-Wärmepumpe η_C

Linkslaufender Carnot-Prozess.		
allgemein	$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$	
Wärmepumpe	$\eta = \frac{q_{\text{Nutz}}}{W}$	gewonnene Energie / aufgewandte Arbeit
Carnot	$\eta = \frac{q_{ab}}{W} \quad W = q_{ab} - q_{zu} \quad \eta = \frac{q_{ab}}{q_{ab} - q_{zu}}$	
Theoretischer Carnot Wirkungsgrad	$\eta_C = \frac{T_H}{T_H - T_K}$	η ist größer als 1 T in Kelvin

COP_{real}

COP

Coefficient of Performance

COP_{real}

COP bewertet mit Gütegrad der Wärmepumpe.

Carnot-Wirkungsgrad

$$\eta_C = \frac{T_H}{T_H - T_K}$$

Gütegrad

$$\eta_{C,WP} = \frac{\text{realer COP}}{\text{Carnot-Wirkungsgrad}}$$

Erfahrungswerte

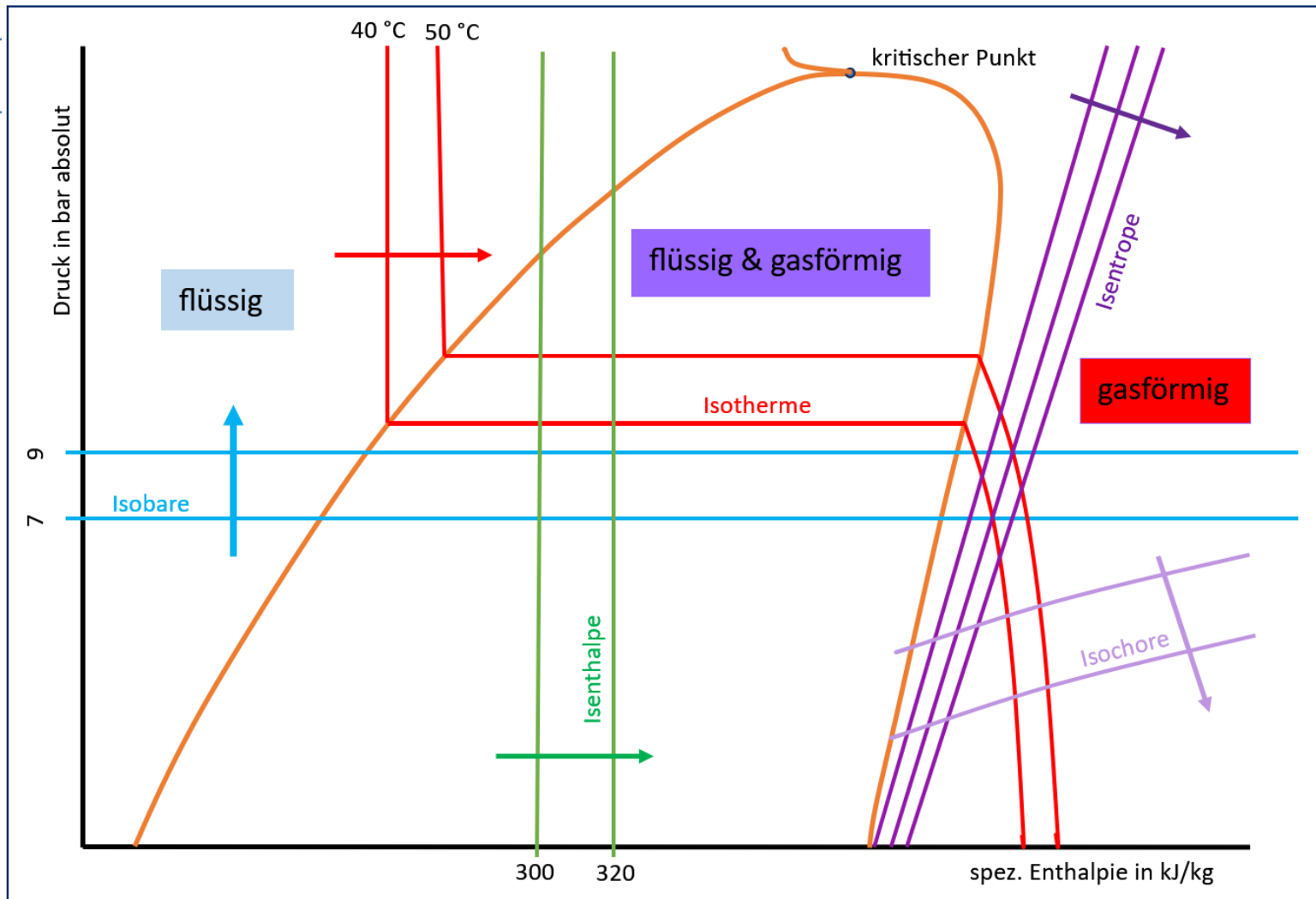
$$\eta_{C,WP} = \mathbf{0,45 \text{ bis } 0,55}$$

COP_{real}

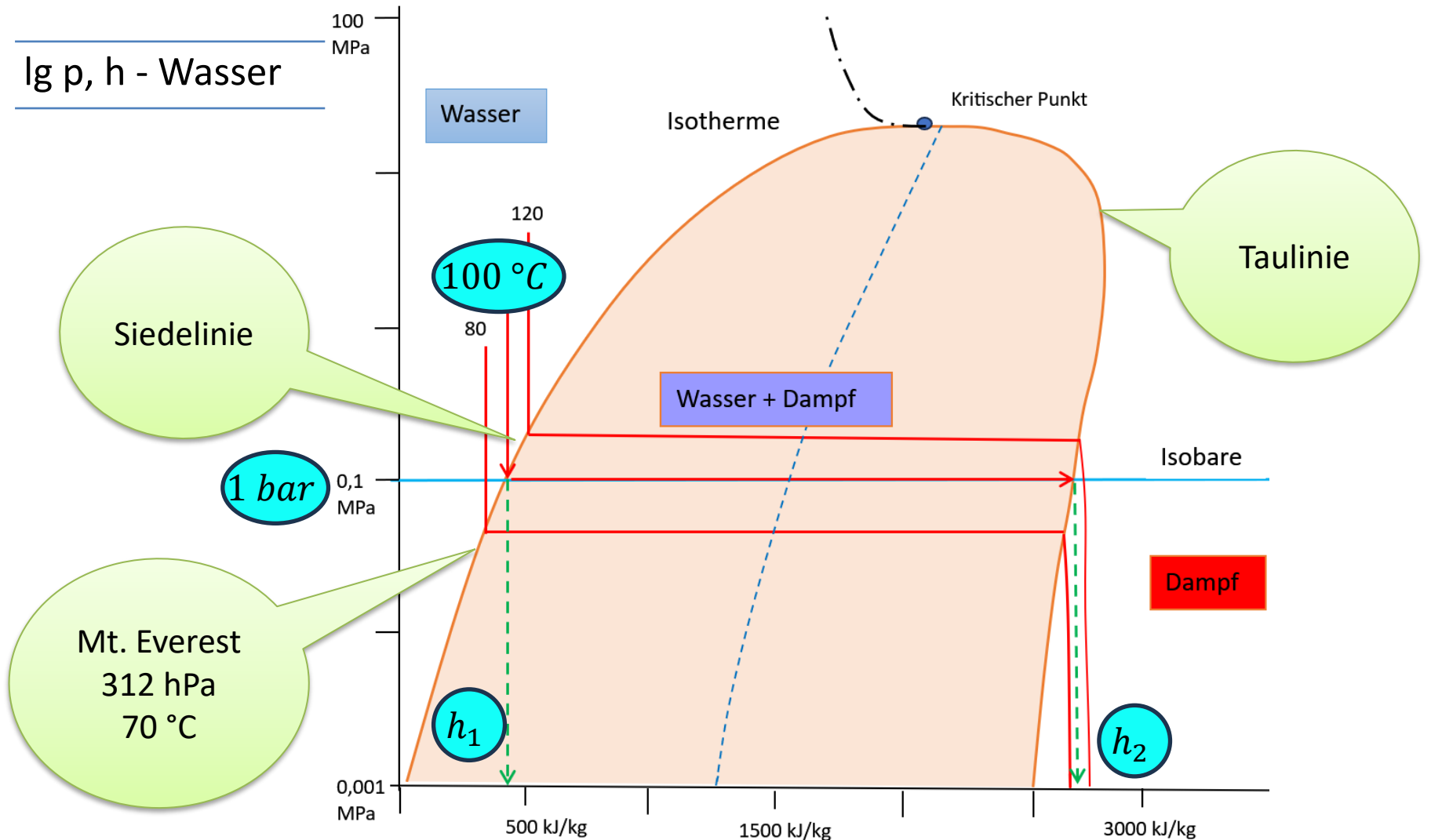
$$COP_{real} = \eta_{C,WP} \times \eta_C$$

$$COP_{real} = \eta_{C,WP} \times \frac{T_H}{T_H - T_K} \quad (\text{auf Kelvin-Temperaturen basierend})$$

Zustands-
diagramm



lg p, h - Wasser

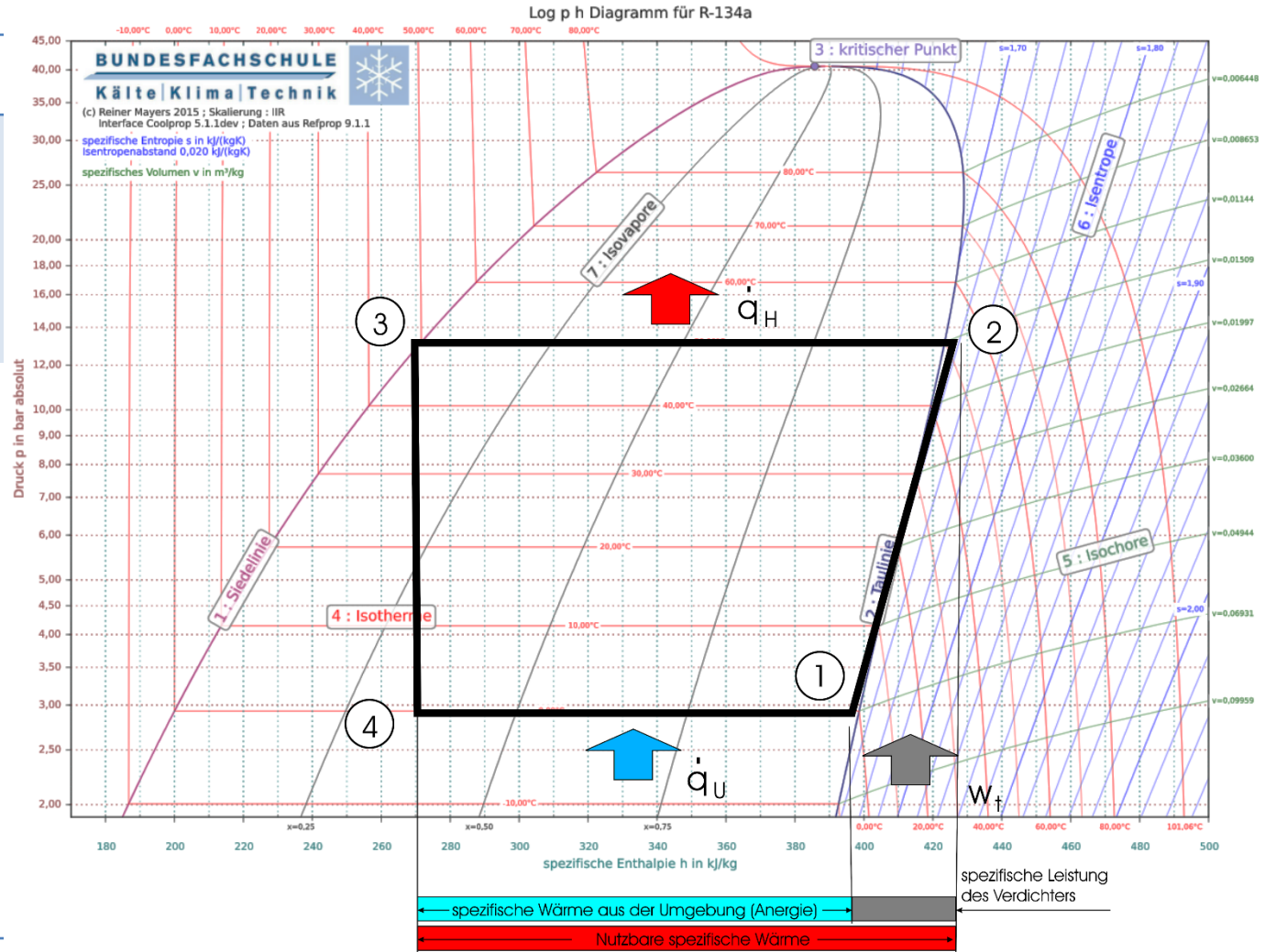


lg p,h R-134a Carnot

- Wärmepumpe
- Carnot-Prozess
- Kältemittel R-134a

$$t_H = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_K = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$



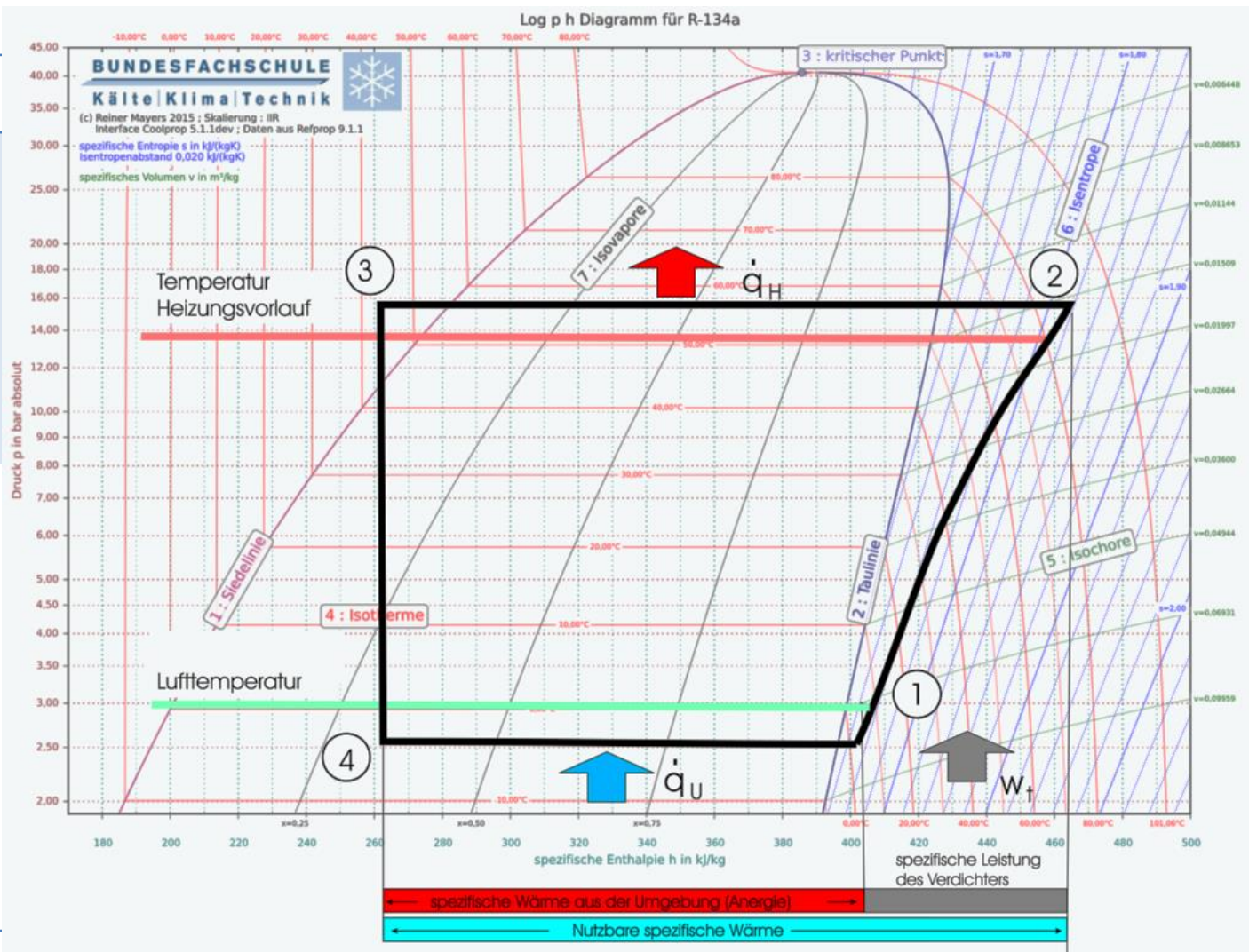
Quelle [9]

lg p,h R-134a real

- Wärmepumpe
- Realer Prozess
- Kältemittel R-134a

Einfluss von:

- Grädigkeit
- Verdichter-
Wirkungsgrad



Quelle [9]

Vorlauftemperaturen

Vaillant

Altbau mit Heizkörpern



90/70 °C, auch mit
75/65 °C möglich

Brennwertsystem



60/45 °C

-5 °C

Fußbodenheizung



40/30 °C

Quelle [8]

Heizkennlinie

Brennwertgerät

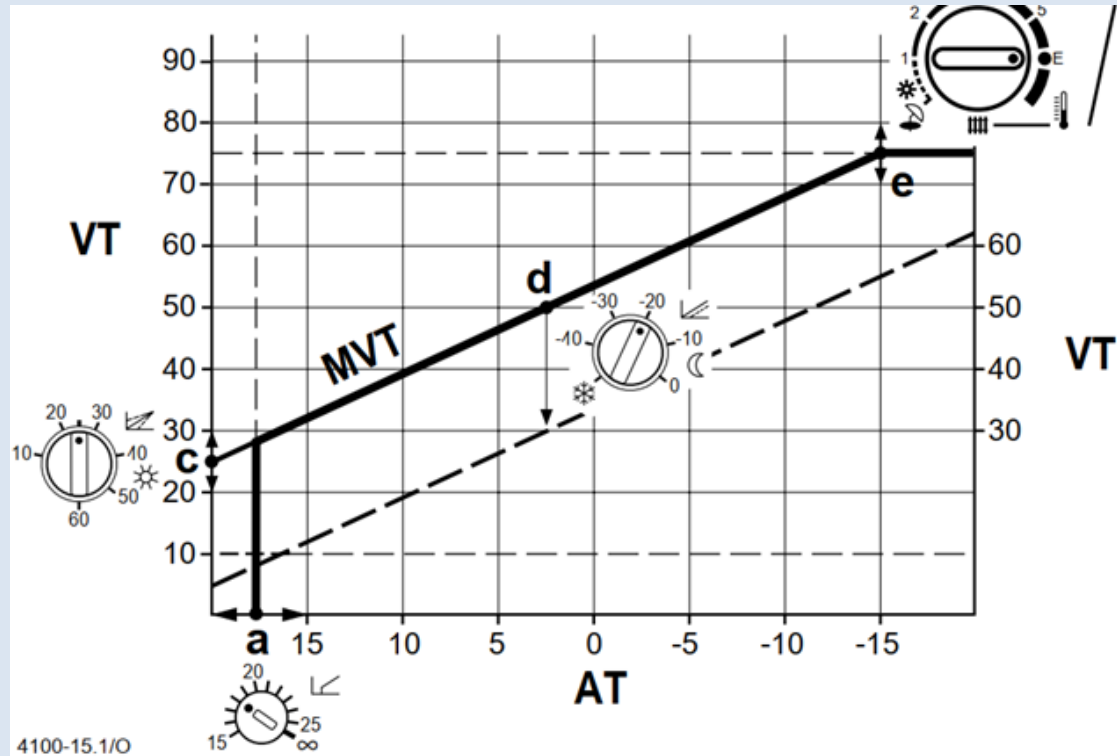
$a = 17,5\text{ °C}$

$c = 25\text{ °C}$

d (Nachtabsenkung)

$e = 75\text{ °C}$

AT °C	VT °C
10	39
5	46
0	54
-5	61
-10	68



Rechnung η_C

Idee Es werden nur Kelvin-Temperaturen verwendet. Das Kältemittel spielt keine Rolle.

Wärmepumpe $\eta = \frac{q_{Nutz}}{W}$ gewonnene Energie / aufgewandte Arbeit

Theoretischer
Carnot Wirkungsgrad $\eta_C = \frac{T_H}{T_H - T_K}$

AT °C	VT °C	T_K K	T_H K
10	39	283	312
5	46	278	319
0	54	273	327
-5	61	268	334
-10	68	263	341

$$\eta_C = \frac{T_H}{T_H - T_K}$$

$$\eta_C = \frac{327}{327 - 273}$$

$$\eta_C \approx 6$$

Fazit Physikalisch maximal möglicher Wert!

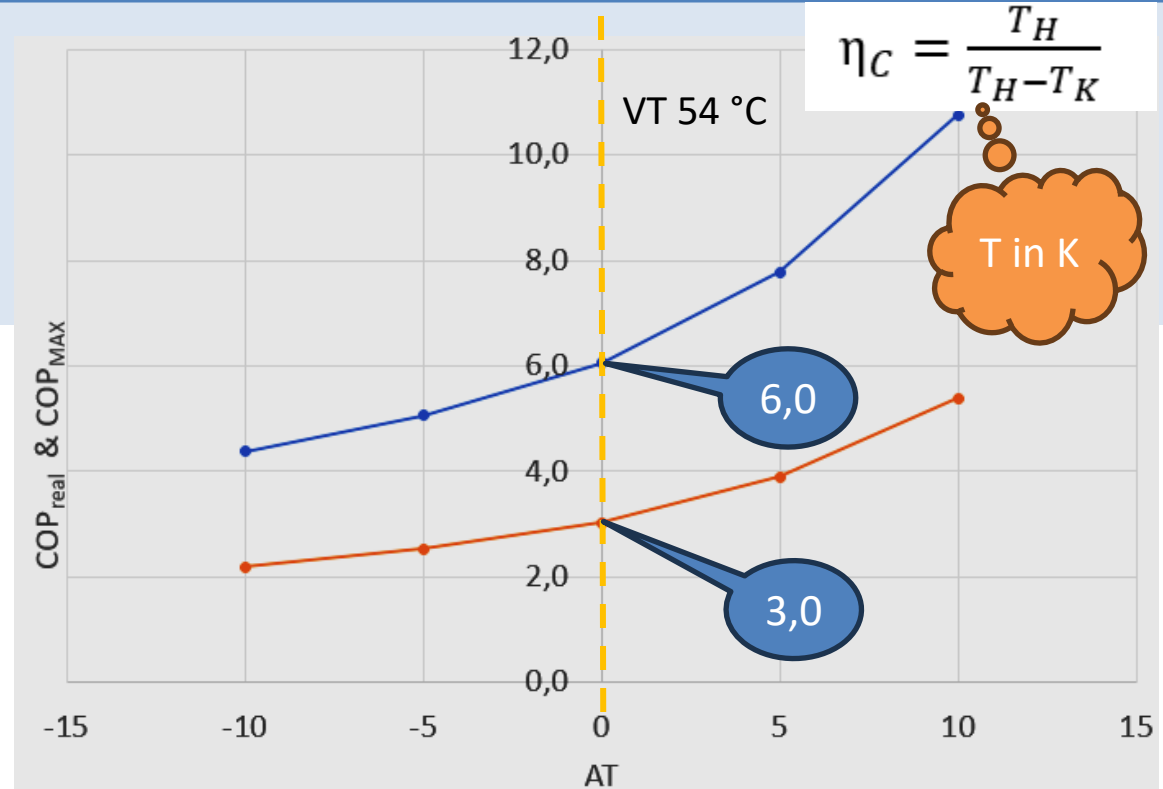
Carnot: COP_{MAX} & COP_{real} von AT

$\eta_{C;WP}$ Gütegrad: $\eta_{C;WP} = 0,5$
 COP_{MAX} Entspricht Carnot-Wirkungsgrad (η_C)
 COP_{real} Bewerteter COP
 AT Außentemperatur
 VT Vorlauftemperatur

AT °C	VT °C	ΔT
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

COP_{MAX} —————
 COP_{real} —————

(vom Kältemittel unabhängig)



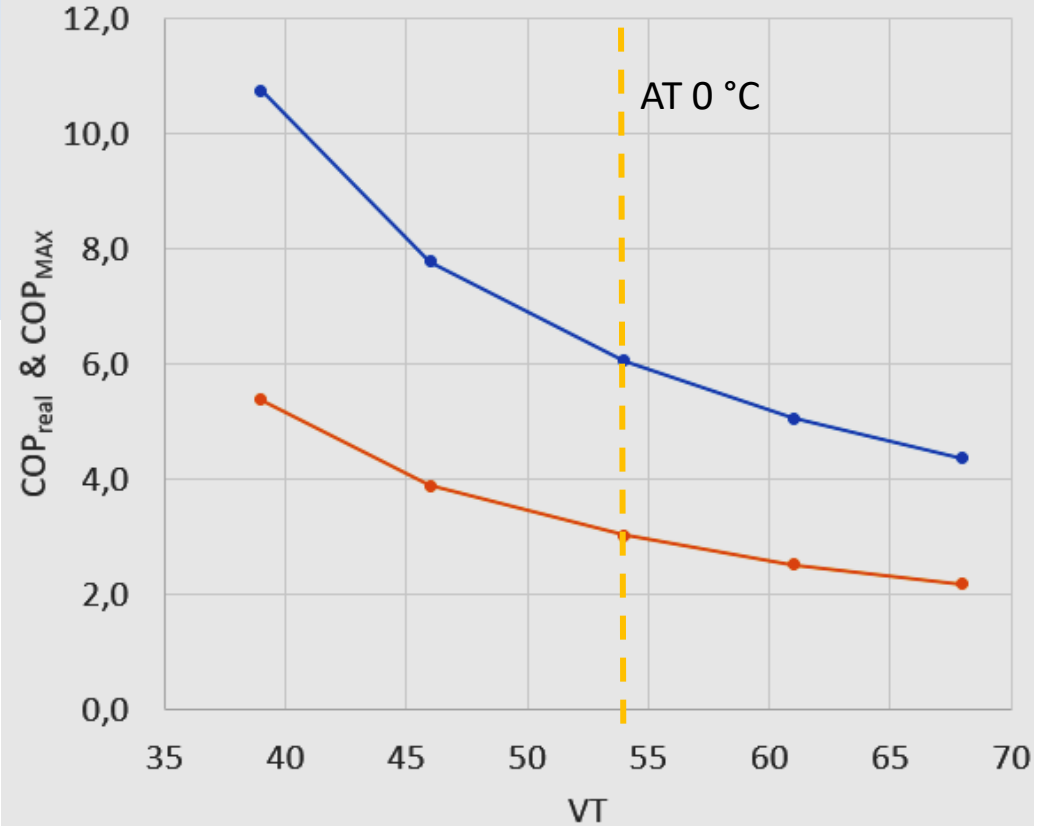
Carnot: COP_{MAX} & COP_{real} von VT

$\eta_{C;WP}$	Gütegrad: $\eta_{C;WP} = 0,5$
COP_{MAX}	Entspricht Carnot-Wirkungsgrad (η_C)
COP_{real}	Bewerteter COP
AT	Außentemperatur
VT	Vorlauftemperatur

AT °C	VT °C	ΔT
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

COP_{MAX} —————
 COP_{real} —————

(vom Kältemittel unabhängig)



Rechnung $COP_{h;1,0}$

Idee

Es werden die spezifischen Enthalpien vom Kältemittel verwendet. Der COP-Wert ist vom Kältemittel abhängig.

Wärmepumpe

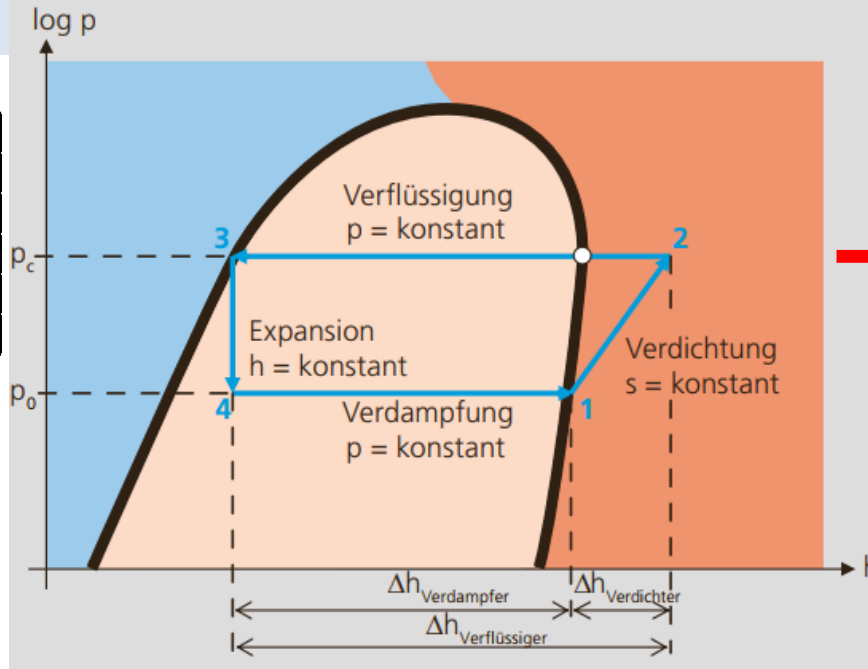
$$COP = \frac{q_{Nutz}}{W}$$

$$COP_h = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

$$COP_h = \frac{\Delta h_{\text{Verflüssiger}}}{\Delta h_{\text{Verdichter}}}$$

log p, h Diagramm

AT °C	VT °C	ΔT
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78



Für R134a:

$\Delta h_{\text{Verflüssiger}}$	$\Delta h_{\text{Verdichter}}$	COP
167,5	18,1	9,3
160,9	25,4	6,3
154,1	33,4	4,6
147,4	40,7	3,6
139,9	48,2	2,9

$$COP_h = \frac{154,1}{33,4}$$

$$COP_h = 4,614$$

Quelle [3]

COP Internet

COP_h

über spez. Enthalpie.

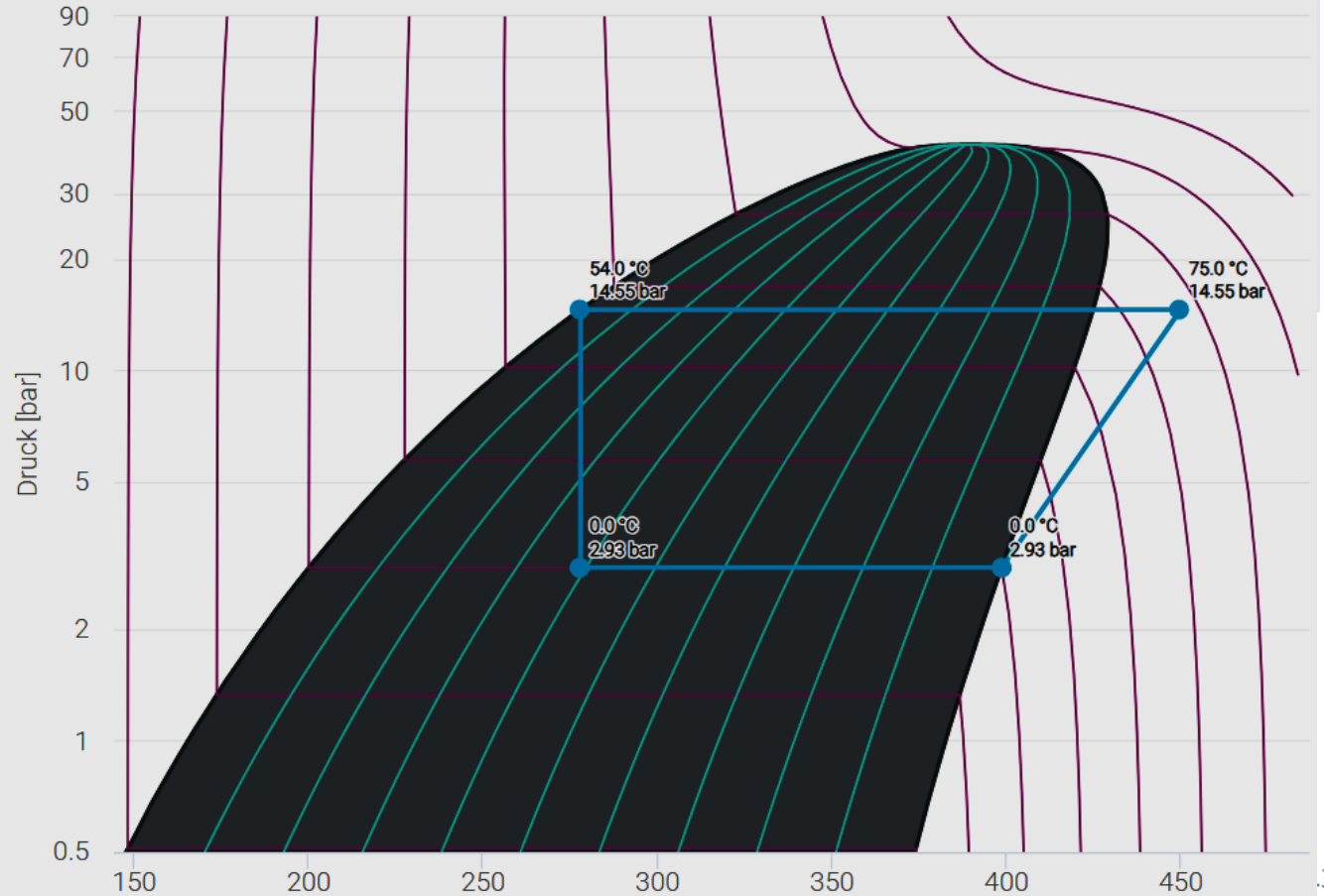
$\eta_{\text{Verdichter}} = 0,65$

$\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_V = 54\text{ }^{\circ}\text{C}$

log(p)-h Diagramm R134A

$COP(\text{Wärmepumpe}) = 3.35 / COP(\text{Kältemaschine}) = 2.35$



Quelle [10]

$COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von AT

R134a

$COP_{h;1,0}$

$COP_{h;0,65}$

$COP_{h;0,65;Gräd.}$

AT

VT

COP über Enthalpie

Verdichter $\eta_v = 1$

Verdichter $\eta_v = 0,65$

Grädigkeit

Außentemperatur

Vorlauftemperatur

AT °C	VT °C	ΔT
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

Grädigkeit	
bei TC	5
bei TV	5

—

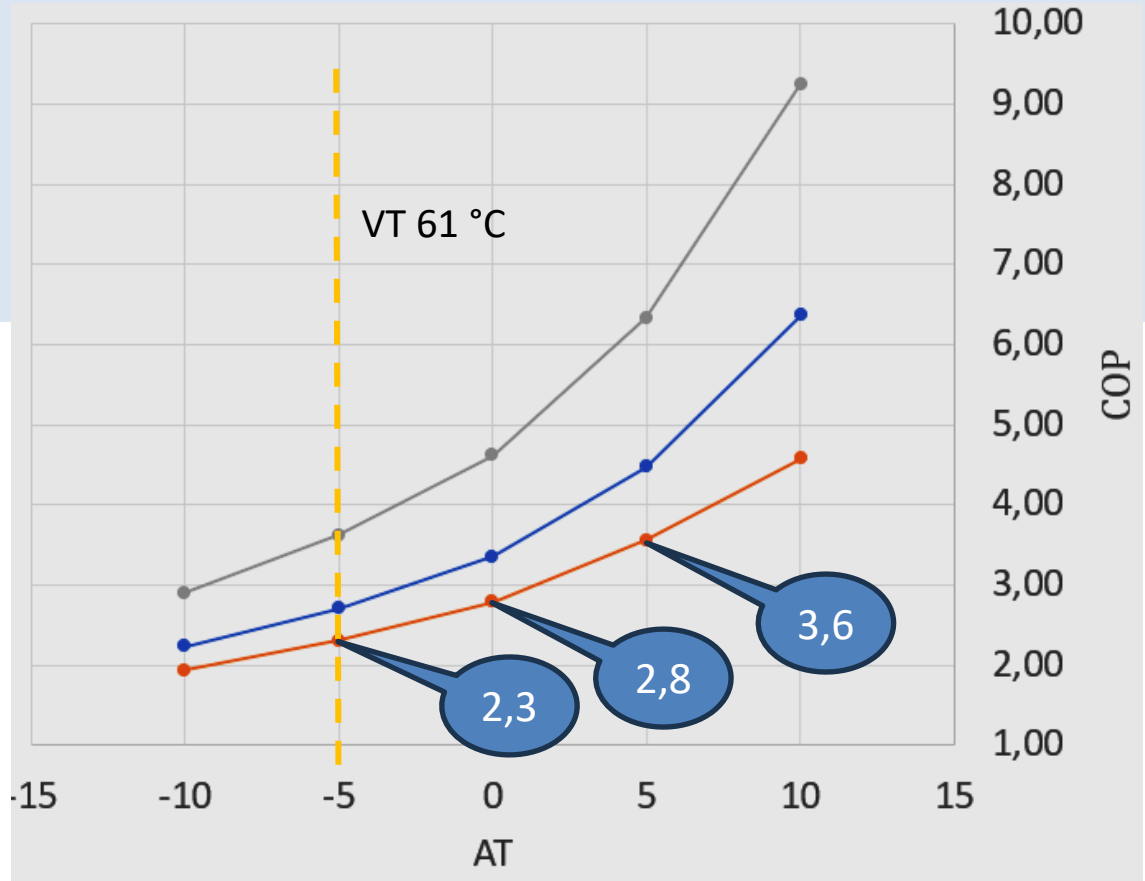
$COP_{h;1,0}$

—

$COP_{h;0,65}$

—

$COP_{h;0,65;Grädigkeit}$



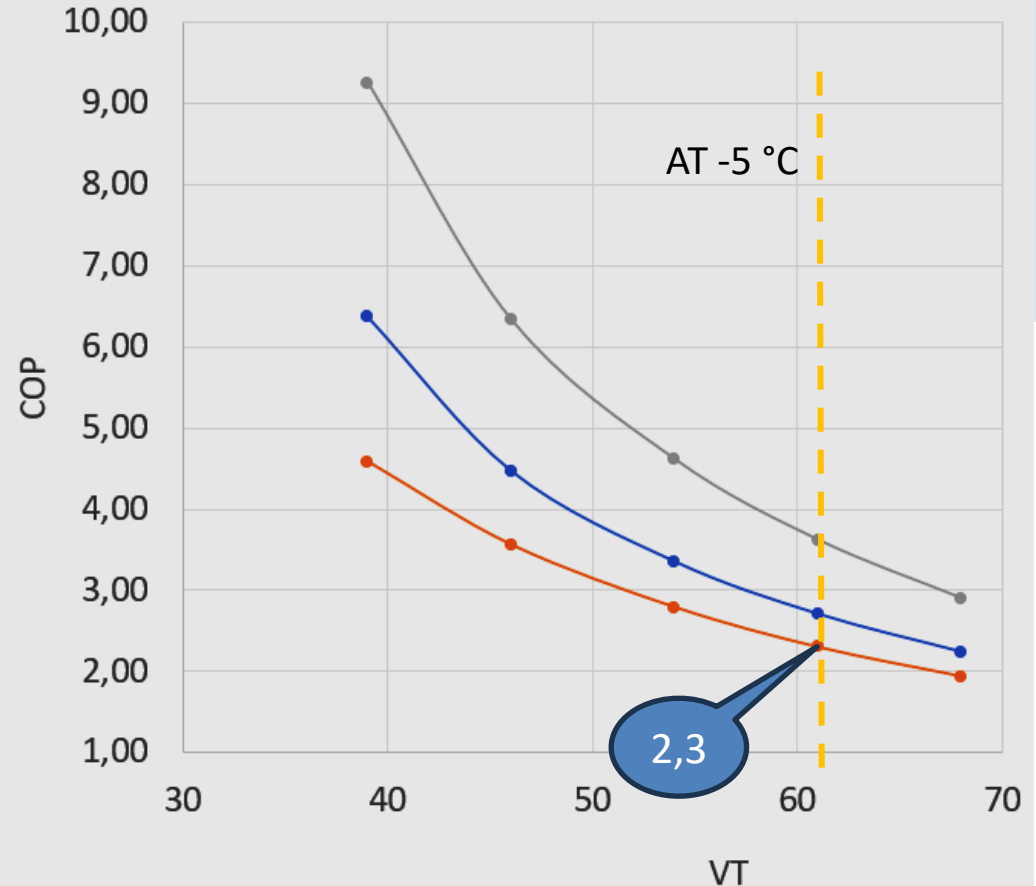
$COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von VT

R134a
 $COP_{h;1,0}$ Verdichter $\eta_v = 1$
 $COP_{h;0,65}$ Verdichter $\eta_v = 0,65$
 $COP_{h;0,65;Gräd.}$ Grädigkeit
 AT Außentemperatur
 VT Vorlauftemperatur

AT °C	VT °C	ΔT
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

Grädigkeit	
bei TC	5
bei TV	5

— $COP_{h;1,0}$
 — $COP_{h;0,65}$
 — $COP_{h;0,65;Grädigkeit}$



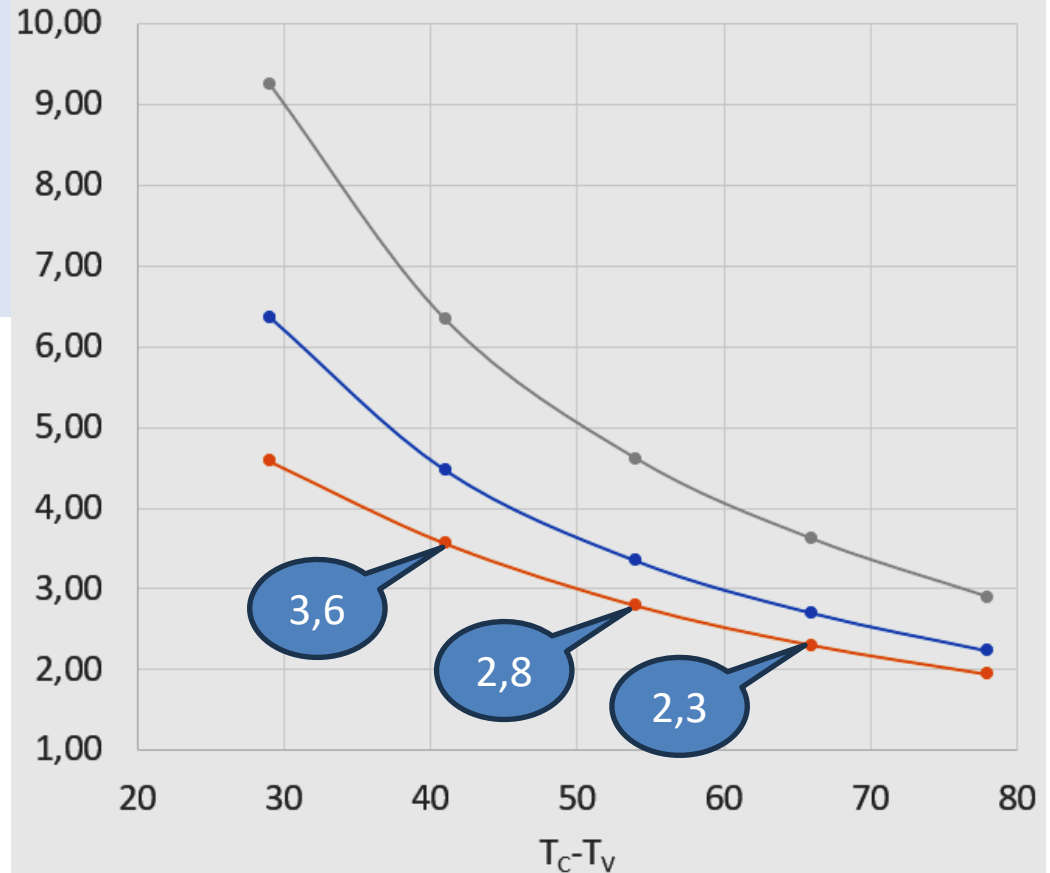
$COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von TC-TV

R134a
 $COP_{h;1,0}$ Verdichter $\eta_v = 1$
 $COP_{h;0,65}$ Verdichter $\eta_v = 0,65$
 $COP_{h;0,65;Gräd.}$ Grädigkeit
 AT Außentemperatur
 VT Vorlauftemperatur

AT °C	VT °C	ΔT
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

Grädigkeit	
bei TC	5
bei TV	5

— $COP_{h;1,0}$
 — $COP_{h;0,65}$
 — $COP_{h;0,65;Grädigkeit}$



COP Erfahrungswerte

Angaben von BOSCH:

- Generell liegen gute COP-Werte zwischen 3 und 5.
- Ein COP **unter 3** spricht in der Regel dafür, dass die Wärmepumpe **nicht wirtschaftlich** arbeitet.
- Für gewöhnlich erreichen Wärmepumpen für Hochtemperatur eine geringere Leistungszahl als herkömmliche Wärmepumpen, da sie mehr Strom verbrauchen.
- Welcher COP-Wert als gut befunden wird, unterscheidet sich je nach Art der Wärmepumpe.
- Für **Luftwärmepumpen** gilt ein **COP ab 3** als **gut**.
- Das bedeutet, dass eine Kilowattstunde Strom drei Kilowattstunden Wärme bereitstellt.

Quelle [7]

Quellen

- | | |
|----|---|
| 1 | Strompreise 2024 vergleichen & bis 850 € sparen VERIVOX |
| 2 | Gaspreis aktuell: So viel kostet die Kilowattstunde NDR.de - Nachrichten - NDR Info |
| 2 | Enthalpie – Wikipedia |
| 3 | energie schweiz: Buch_WP_Web_2018.pdf |
| 4 | Dietzel, Fritz: Technische Wärmelehre, Kamprath-Reihe |
| 5 | FS_Thermodynamik_und_Kaeltetechnik.pdf |
| 6 | https://waerme-mit-system.de/waermepumpe/ |
| 7 | COP Wärmepumpe: Werte, Bedeutung, Berechnung Bosch (boschhomecomfort.com) |
| 8 | Vorlauftemperatur: Die Heizung optimal einstellen Vaillant |
| 9 | Wärmepumpe – Wikipedia |
| 10 | Log ph Diagramm online TLK Energy (tlk-energy.de) |
| 11 | WÄRMEPUMPE: Wie geht das eigentlich? #58 Energie und Klima - YouTube |
| | W10 Wärmepumpe (tu-darmstadt.de) |