

# 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  $\eta$
- Carnot-Wärmepumpe  $\eta_C$
- $COP_{real}$
- 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 <b>physikalische, technische Inhalte</b> gehen.
Einführung	Kostenvergleich anhand Anbieterpreise (Januar 2024).
Idee der Wärmepumpe	<b>Wärme aus kalter Luft gewinnen.</b>
Technik	<ul style="list-style-type: none"><li>• Funktion der Wärmepumpe.</li><li>• Aufgabe des Kältemittels</li><li>• Wärmepumpenprozess</li><li>• Vorlauftemperaturen</li><li>• lg p, h-Diagramme</li><li>• Heizkennlinie</li></ul>
Physik	<ul style="list-style-type: none"><li>• Phasenübergänge</li><li>• Zustandsänderungen</li><li>• Enthalpie und Wärmepumpe.</li><li>• Carnot-Wirkungsgrad</li><li>• COP</li></ul>
Auswertung	COP-Berechnungen

# Wärme pumpen?



- Wärme pumpen?
- Mit „gefühl“ 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/kWh (Januar 2024)	30 ct/kWh (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...

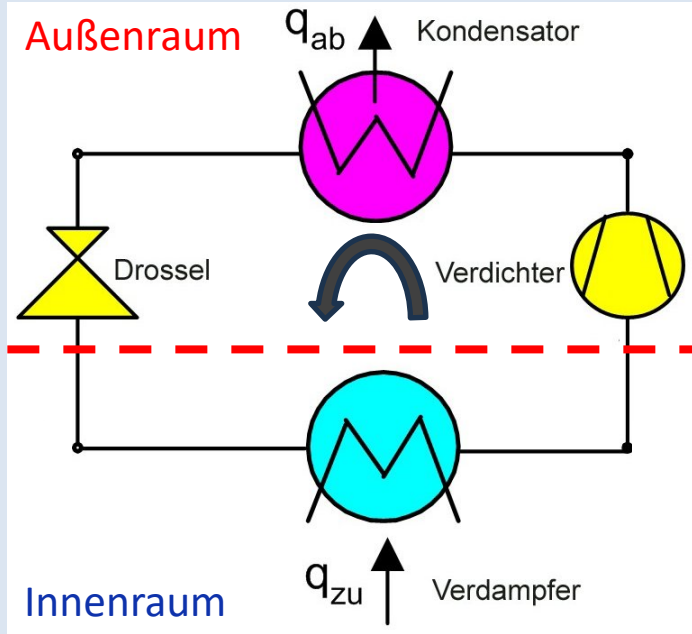
**$COP = 4$**        $W_E = \frac{8000}{4} = 2000 \text{ kWh}$       anzustreben...

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

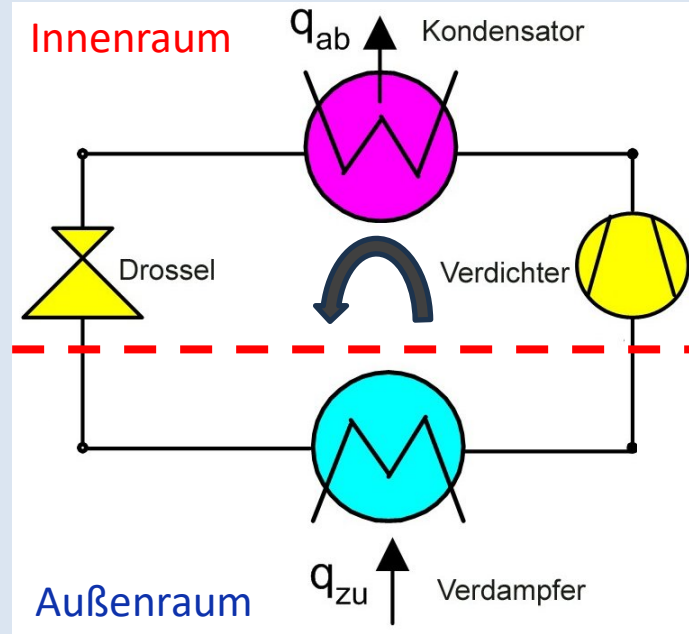
Quelle [1] und [2]

# Kühlschrank-Wärmepumpe

## Kühlschrank



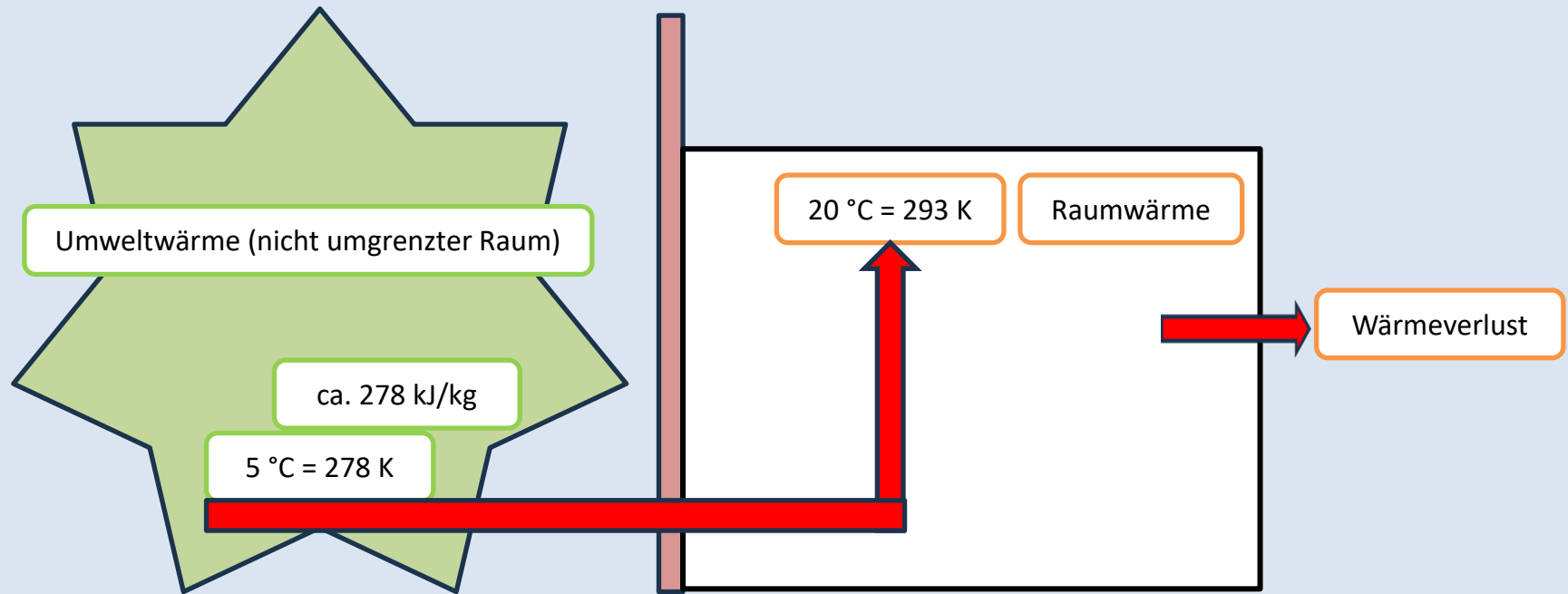
## Wärmepumpe



# Umweltwärme nutzen

Absolute Temperaturskala in **Kelvin**!

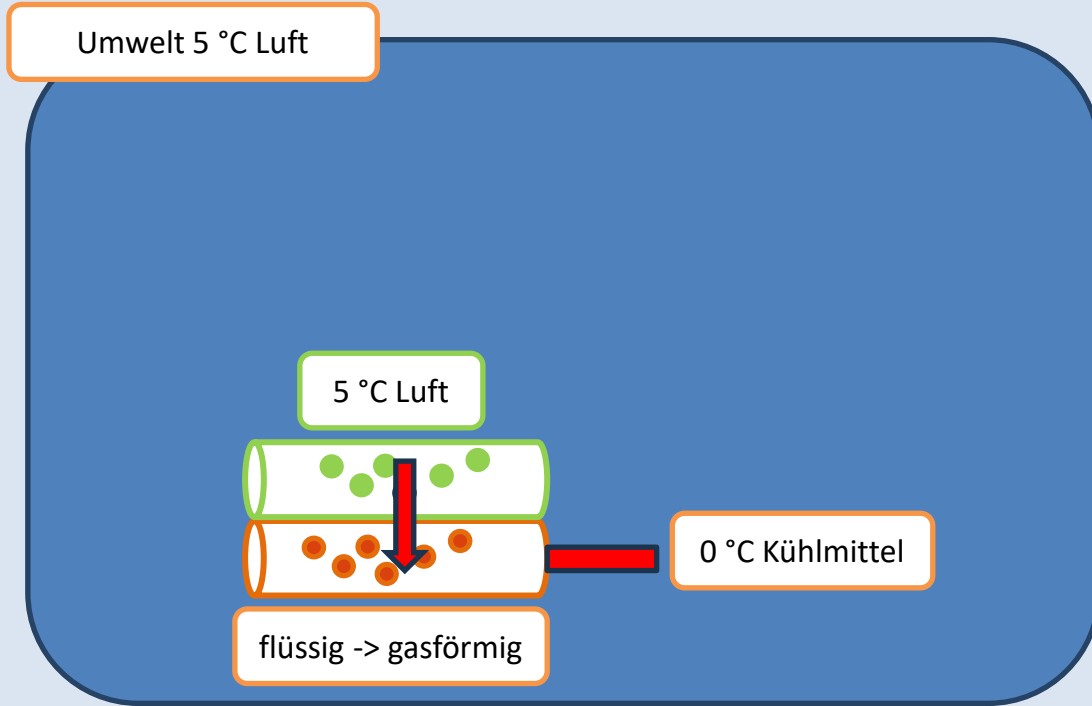
Null Grad Celsius ist nur gefühlt kalt. Tatsächlich liegt eine thermische Energie analog zu 273 K vor.



**Aufgabe: Aus Umweltwärme Raumwärme ernten.**

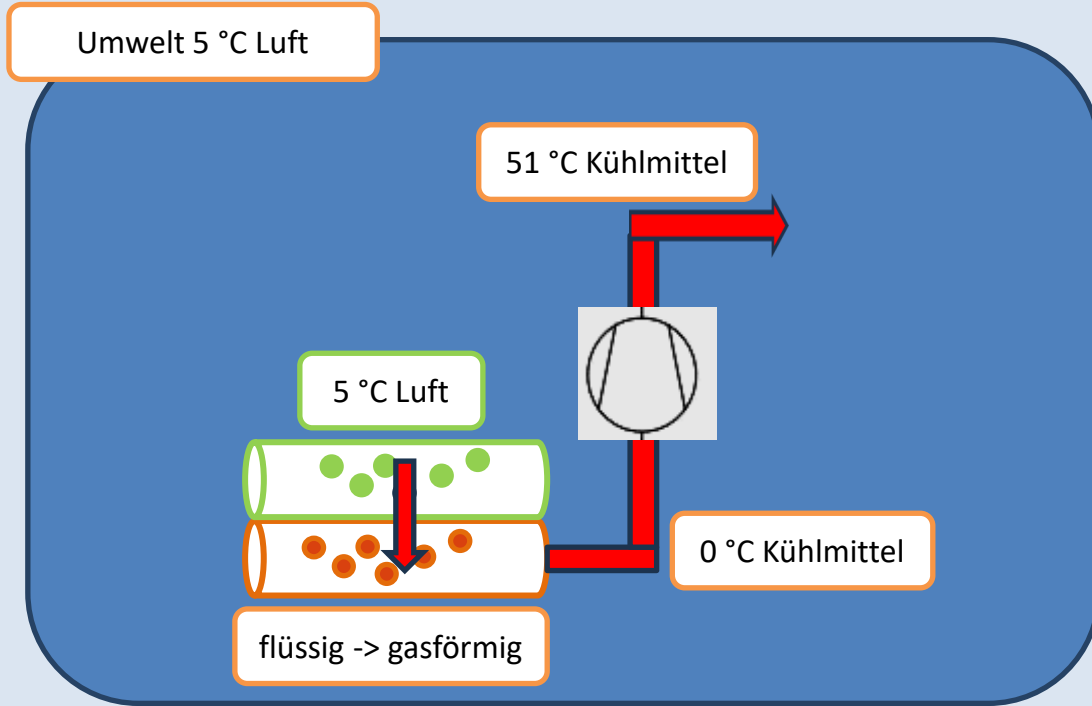
# Wärmefluss & Kältemittel I

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



# Wärmefluss & Kältemittel II

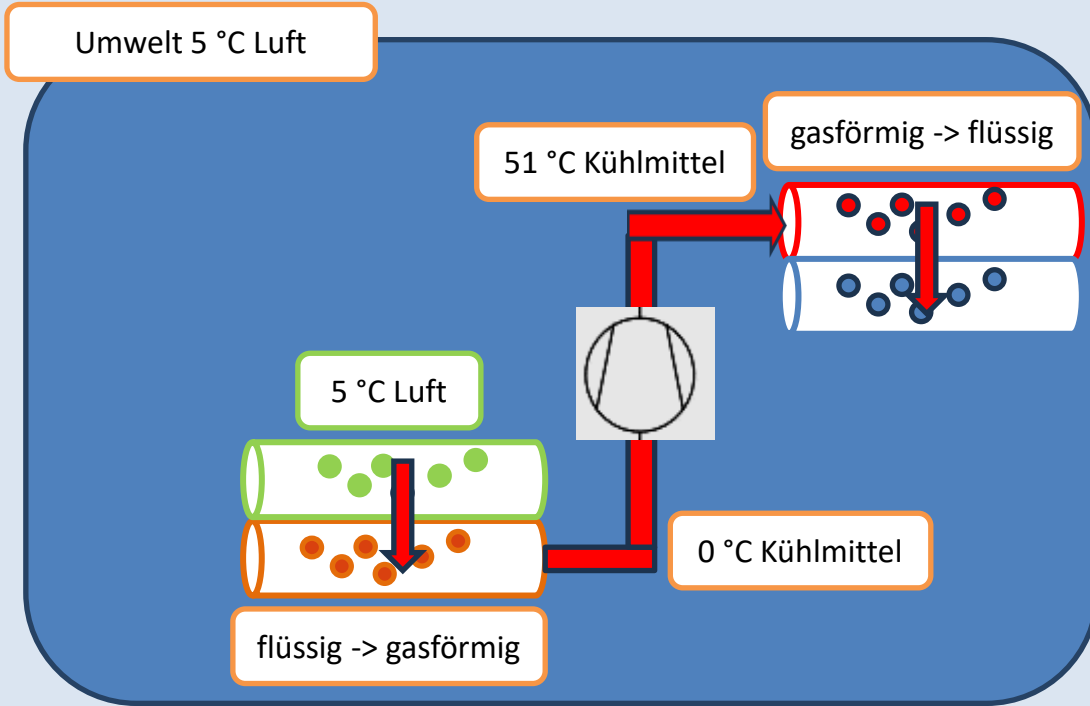
Aufgabe: Kältemittel von „5 °C“ auf „51 °C“ pumpen.





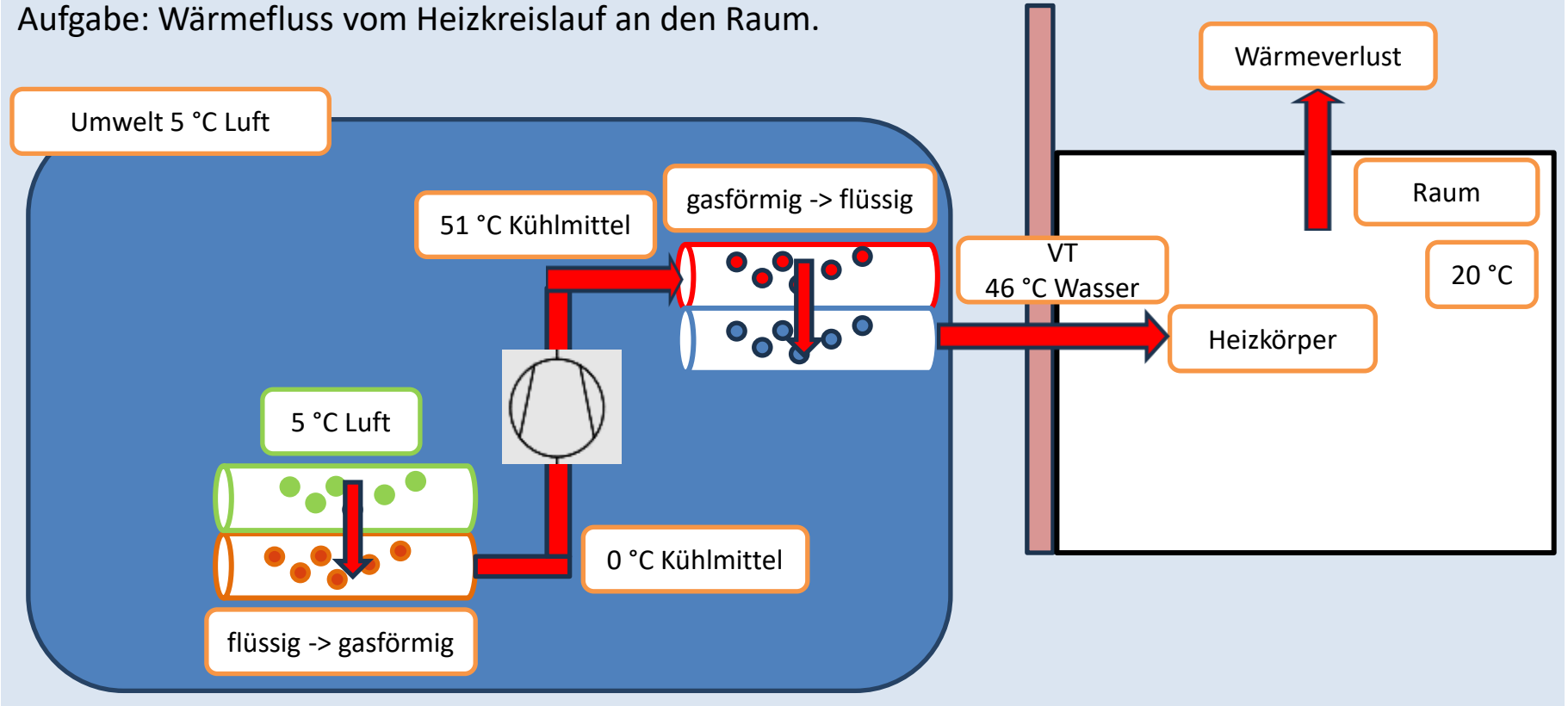
# Wärmefluss & Kältemittel III

Aufgabe: Wärmefluss vom warmen Kältemittel an den kühlen Heizkreislauf.



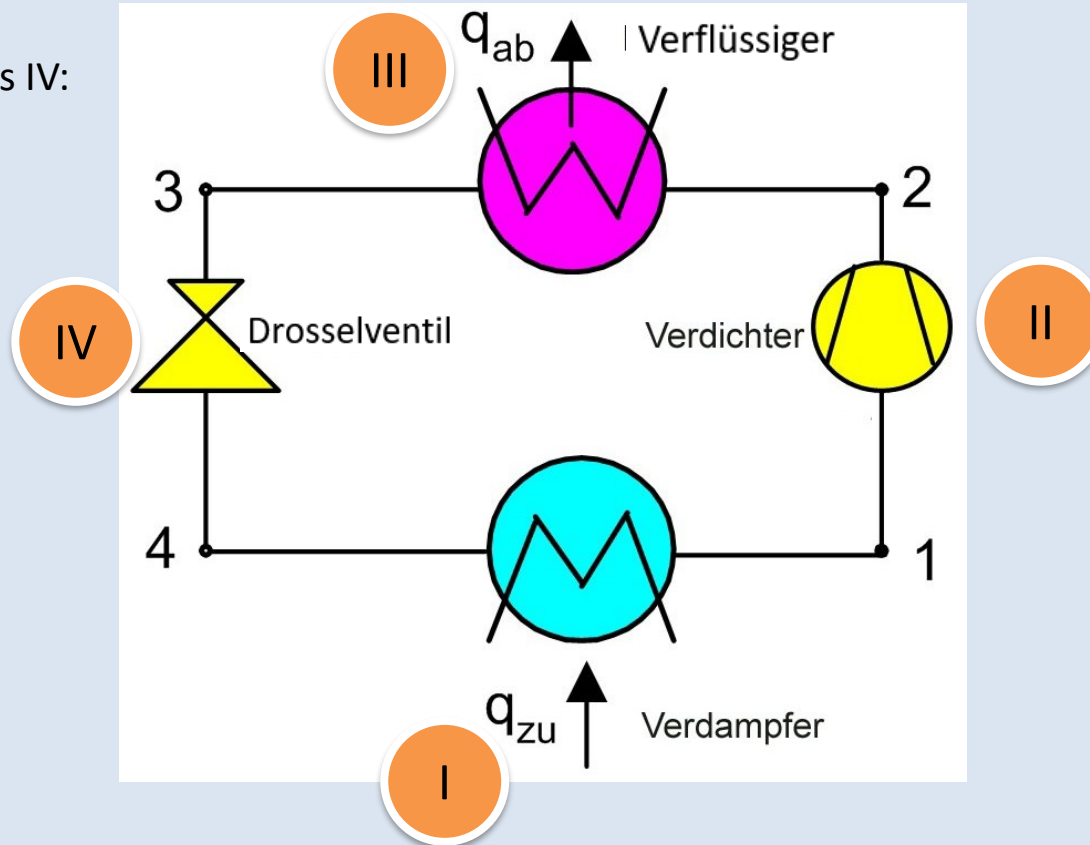
# Wärmefluss & Kältemittel IV

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 ( $W_{\text{elekt}}$ ). Führt zu einer Druck- und Temperaturhöhung. <b>Wärme pumpen.</b>
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: <b>Isobaren</b>
Isotherme Zustandsänderung	$T = \text{konst}$	Je größer der Druck, desto kleiner das Volumen.	Linien gleicher Temperatur: <b>Isothermen</b>
Isentrope (adiabatische) Zustandsänderung	$p, T$ ändern sich	Je größer die eingebrachte Enthalpie, desto größer Druck und Temperatur.	Linien gleicher Entropie: <b>Isentropen</b>
Isochore Zustandsänderung	$v = \text{konst}$	Je größer die Temperatur, desto größer der Druck.	Linien gleichen Volumens: <b>Isochoren</b>

---

# 1. Hauptsatz

Wärme und Arbeit.

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

1. Hauptsatz der Wärmelehre<sup>[1]</sup>

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

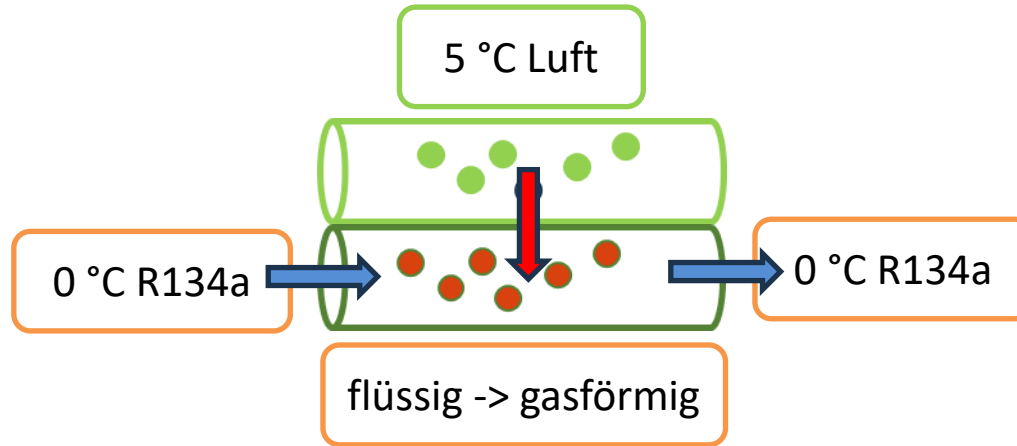
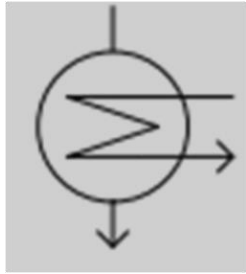
W: Arbeit

---

# Schritt I

Schritt I: verdampfen

(isothermer Prozess)



Vorgang

Zufuhr von Wärme an Kältemittel (infolge Grädigkeit).

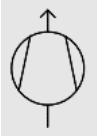
Thermodynamik

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

## Schritt II

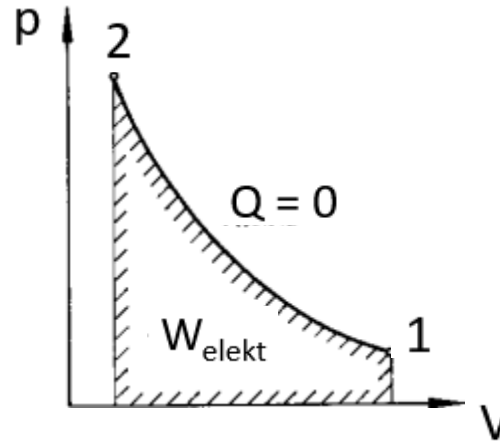
Schritt II: verdichten

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



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

$p, V$  - Diagramm



(isentropen Prozess)

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

$U$ : Innere Energie

$W_{\text{elekt}}$ : elektrische Arbeit

Annahme:  $Q = 0$

Innere Energie:

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

Vorgang

Kältemitteltemperatur auf Vorlauftemperatur (+Grädigkeit) erhöhen.

Thermodynamik

Adiabatische (isentropen) Volumenänderungsarbeit  $W_{\text{elekt}}$ .

Ohne Wärmeverluste (nicht realistisch)  $Q$ .

Temperatur erhöht sich. Druck erhöht sich.

Volumen verkleinert sich.

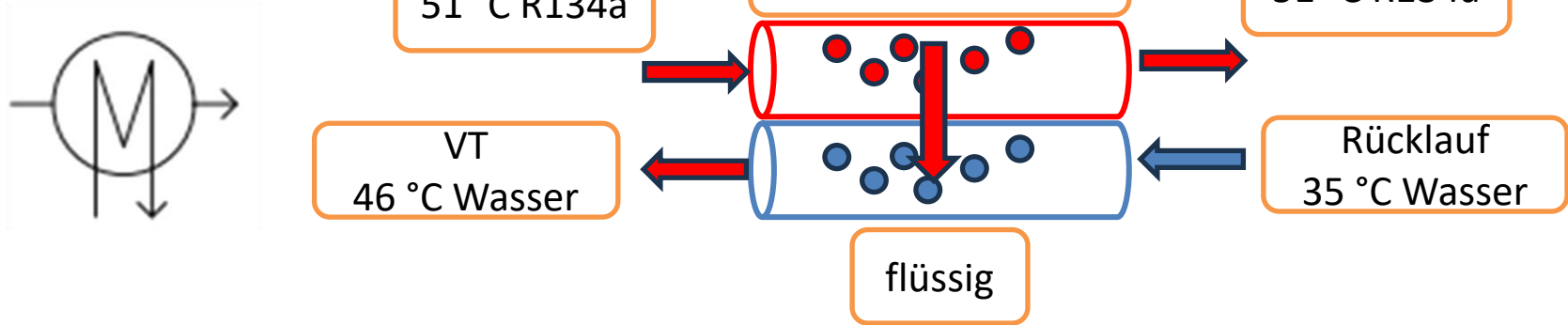
Quelle [5]



## Schritt III

Schritt III: verflüssigen

(isothermer Prozess)



Vorgang

Abgabe von Wärme (infolge Grädigkeit).

Thermodynamik

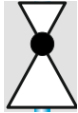
Kältemittel Phasenübergang von „gasförmig → flüssig.“  
Kältemittel-Temperatur bleibt konstant.  
Kältemittel-Druck bleibt konstant.  
Temperatur im Heizkreislauf erhöht sich auf VT.

## Schritt IV

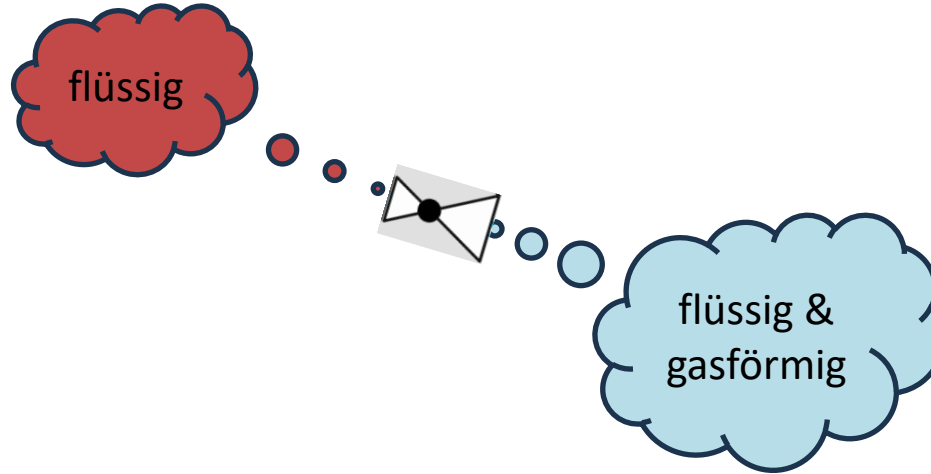
Schritt IV: entspannen

(isentropischer Prozess)

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



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

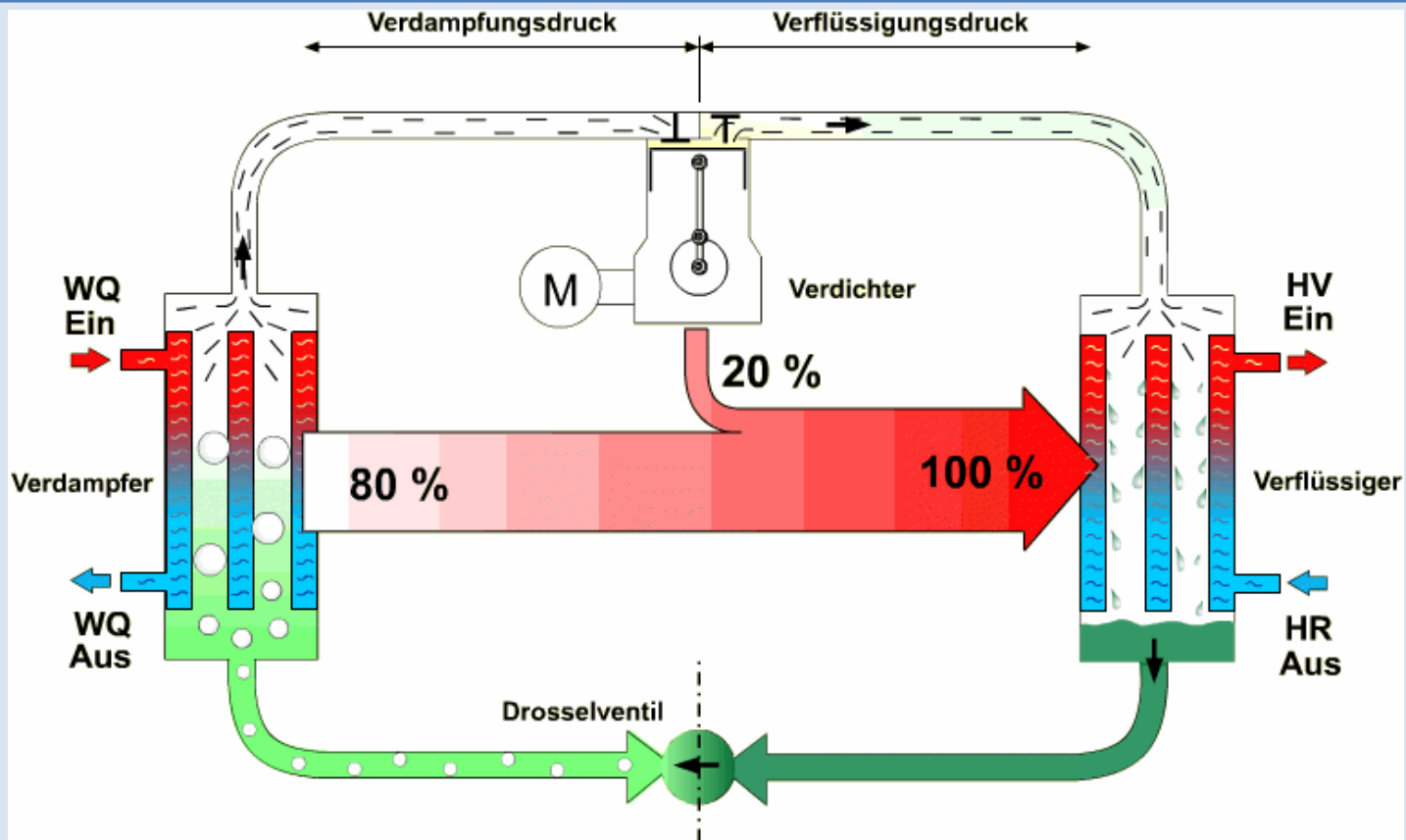


Vorgang Kältemitteltemperatur auf Umlufttemperatur (-Grädigkeit) senken.

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:

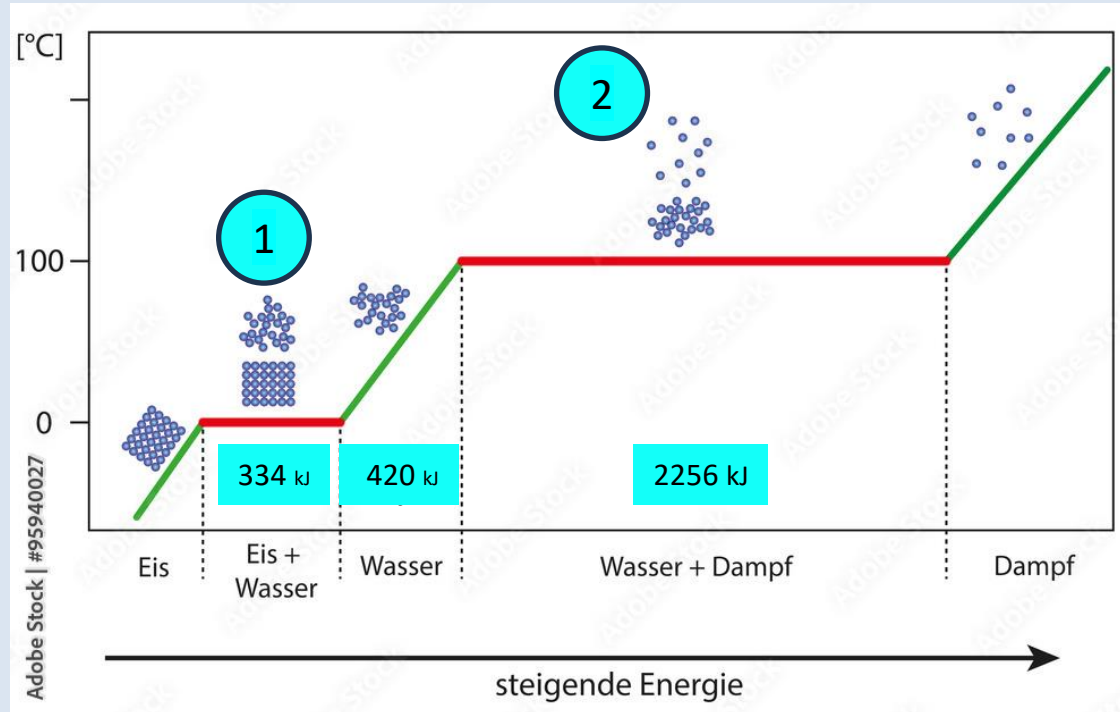
- Festkörper: Eis
- Flüssigkeit: Wasser
- Nassdampf: Wasser und Dampf
- Heißdampf: Dampf

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 ( $W_{\text{elekt}}$ ) führt zu einer **anwachsenden** spez. Enthalpie  $h$ .

## Kondensator

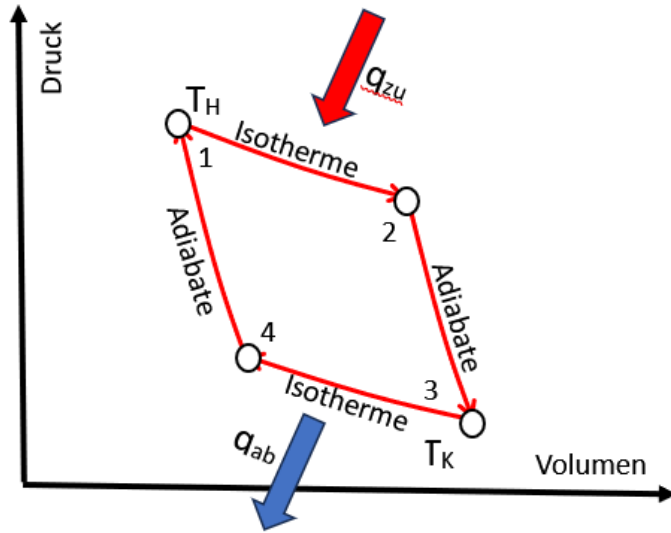
Der Phasenübergang von „gasförmig -> flüssig“, Abgabe von Wärme, führt zu einer **abnehmenden** spez. Enthalpie  $h$ .

## Expansionsventil

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

# Carnot

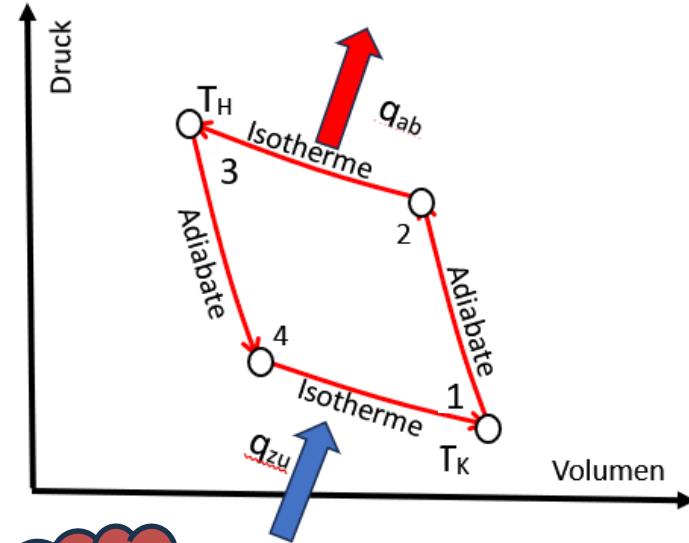
rechtslaufend



Wärmekraftmaschine

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

linkslaufend



Wärmepumpe

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

T in K



## Carnot-Wärmepumpe $\eta_C$

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

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

$\eta$  ist größer als 1  
T in Kelvin

COP<sub>real</sub>

COP

Coefficient of Performance

COP<sub>real</sub>

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

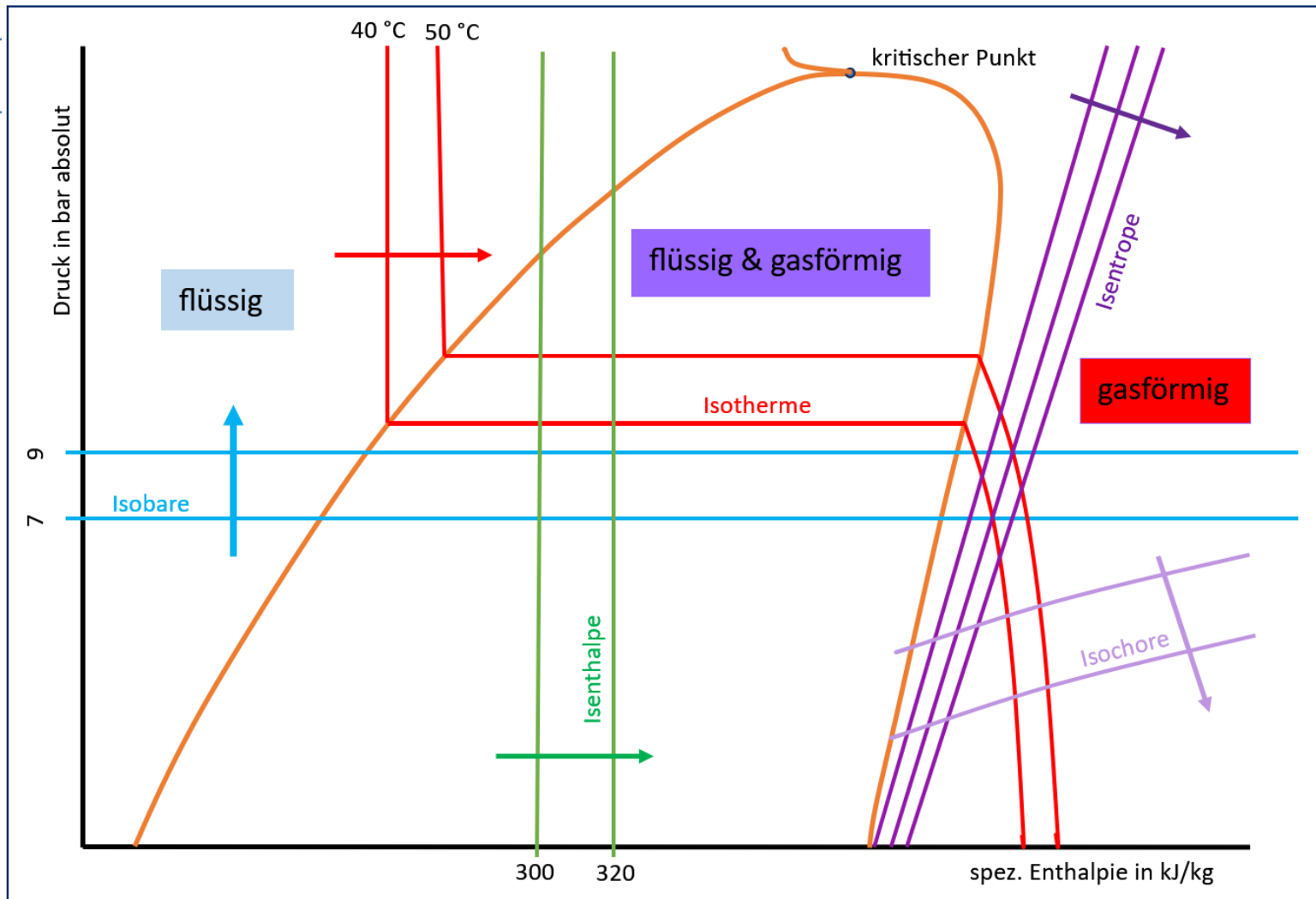
$$\eta_{C,WP} = \mathbf{0,45 \text{ bis } 0,55}$$

COP<sub>real</sub>

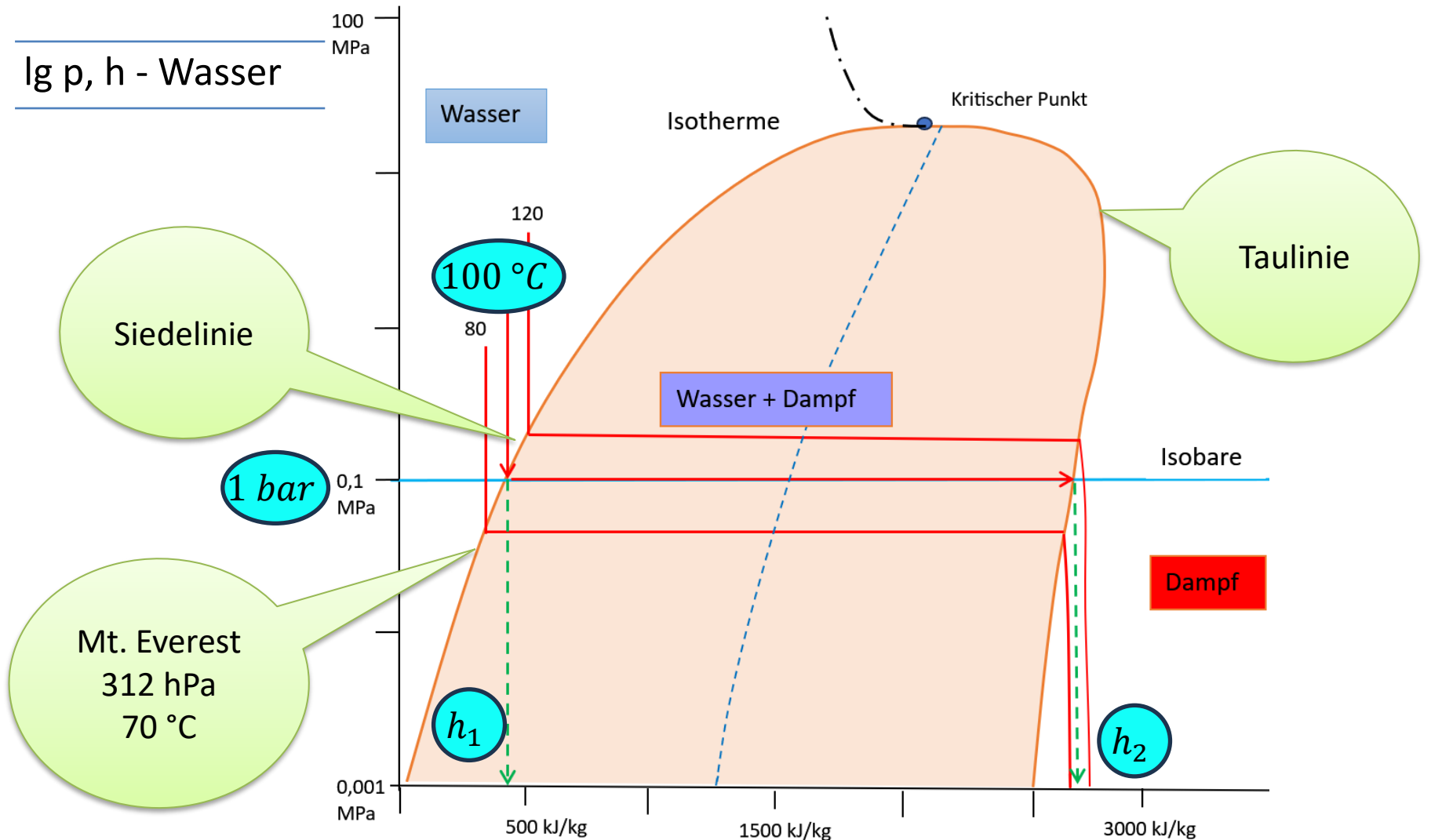
$$COP_{real} = \eta_{C,WP} \times \eta_C$$

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

Zustands-  
diagramm



# lg p, h - Wasser

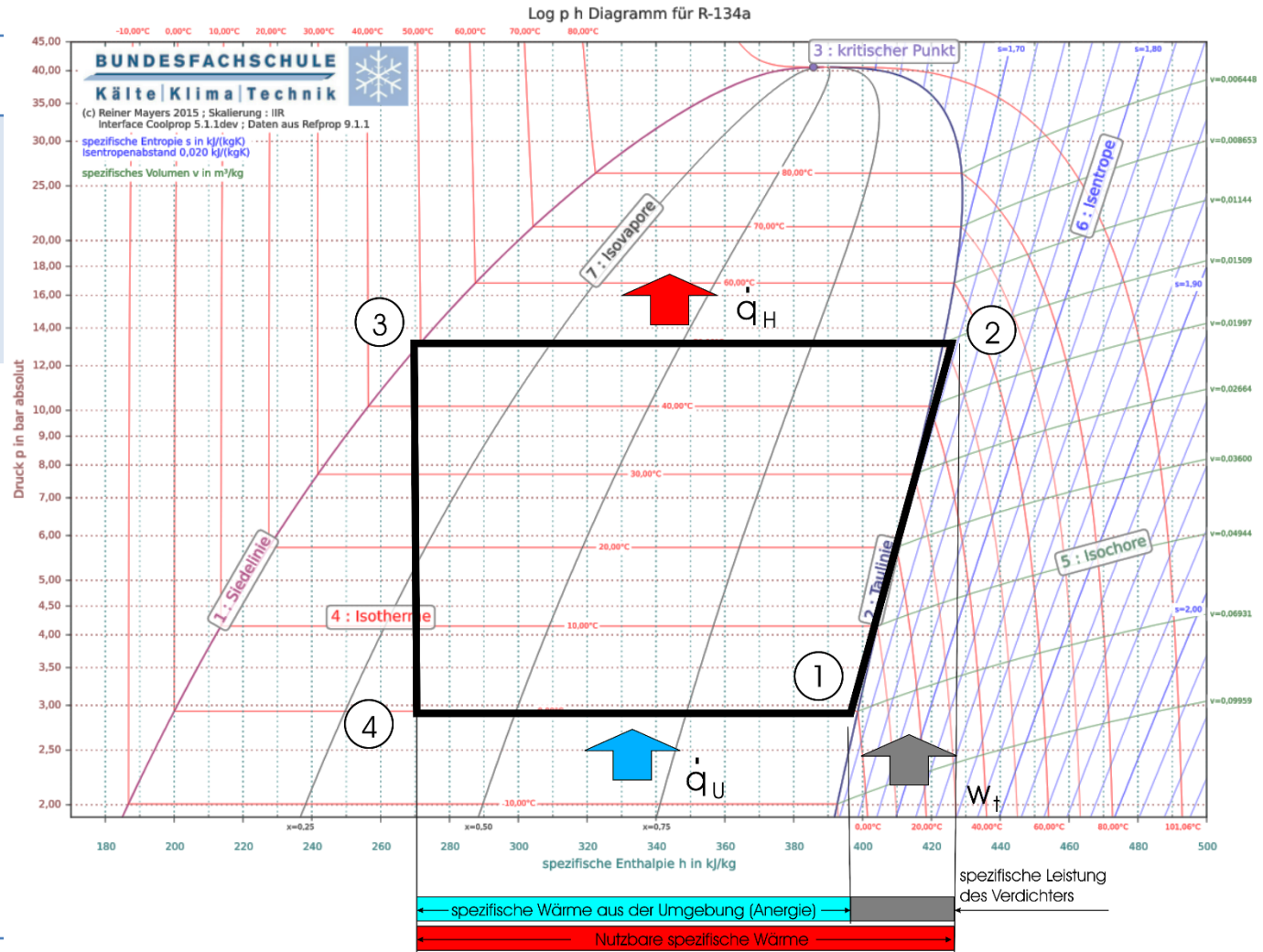


# lg p,h R-134a Carnot

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

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

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



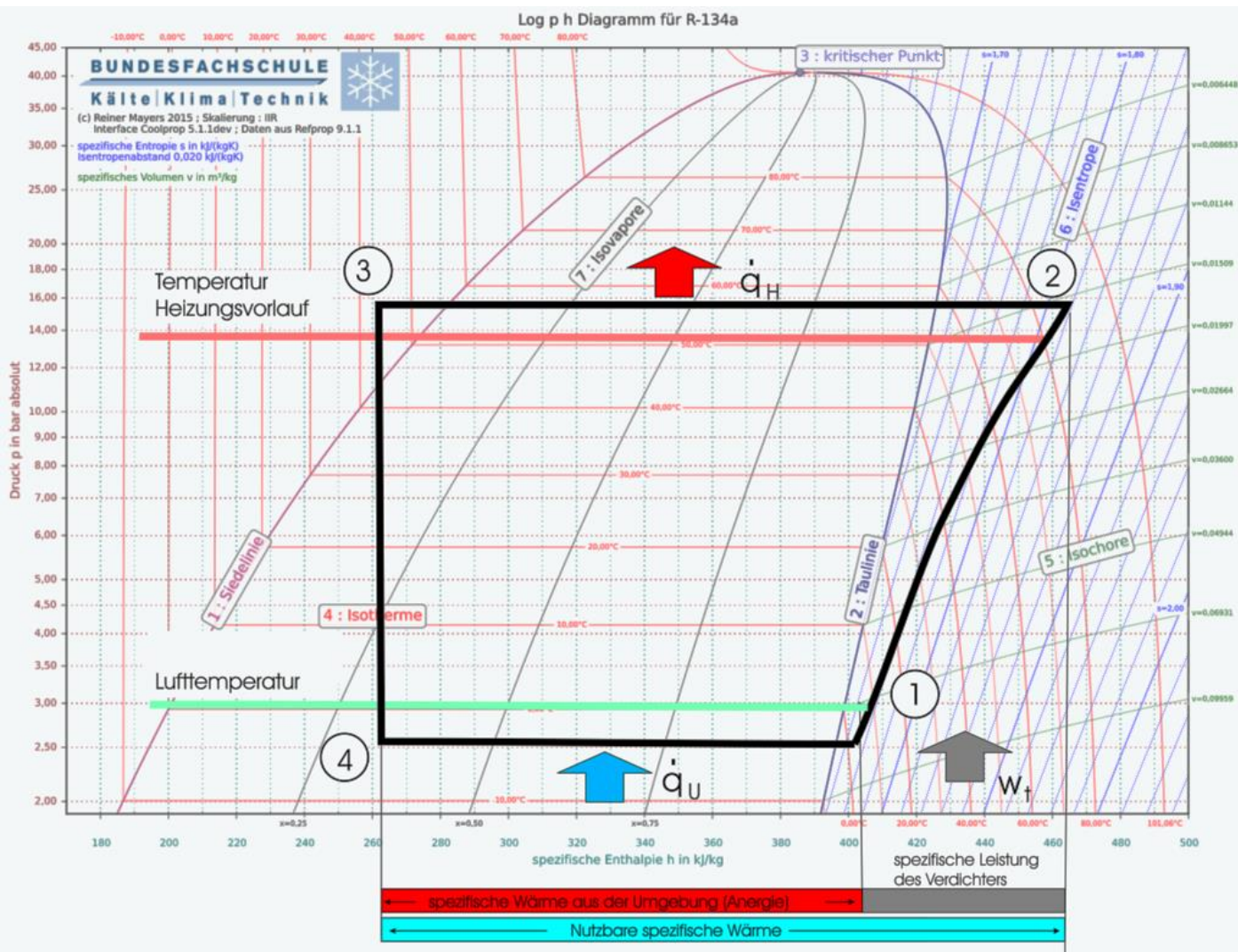
Quelle [9]

## 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

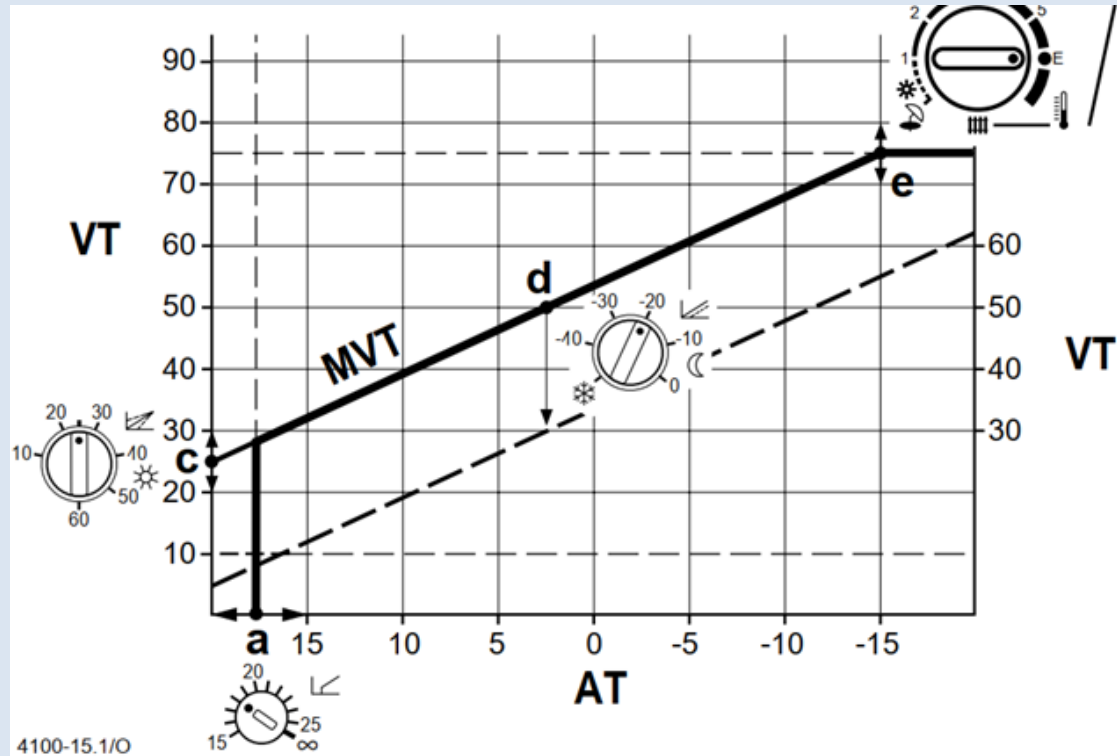
$a = 17,5\text{ °C}$

$c = 25\text{ °C}$

$d$  (Nachtabsenkung)

$e = 75\text{ °C}$

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





## Rechnung $\eta_C$

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!

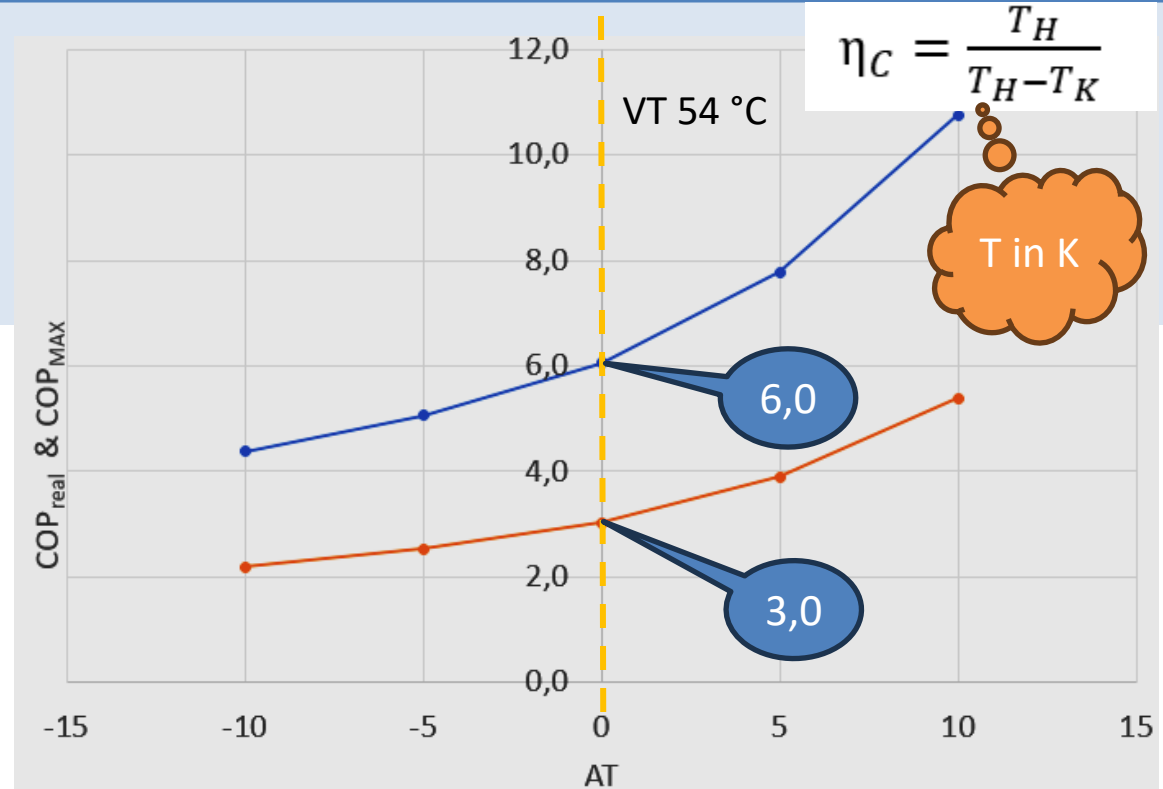
# Carnot: $COP_{MAX}$ & $COP_{real}$ von AT

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

AT °C	VT °C	$\Delta T$
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

$COP_{MAX}$  —————  
 $COP_{real}$  —————

(vom Kältemittel unabhängig)



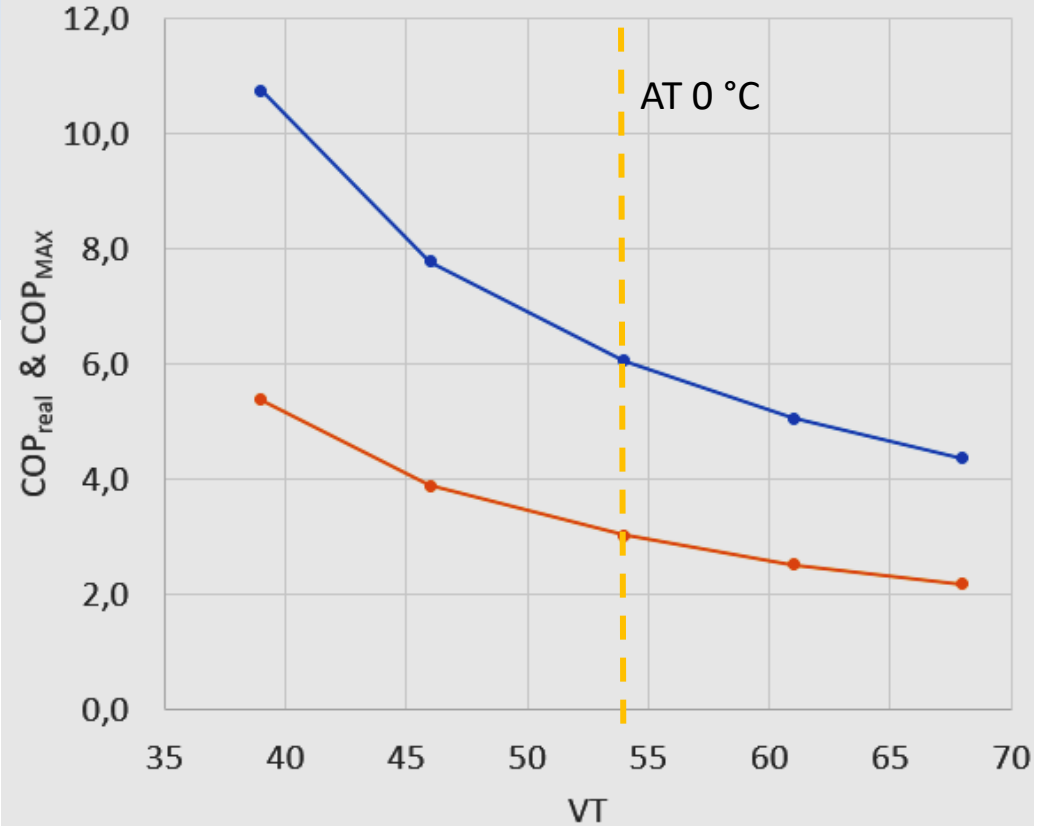
# Carnot: $COP_{MAX}$ & $COP_{real}$ von VT

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

AT °C	VT °C	$\Delta T$
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

$COP_{MAX}$  —————  
 $COP_{real}$  —————

(vom Kältemittel unabhängig)





# COP Internet

$COP_h$

über spez. Enthalpie.

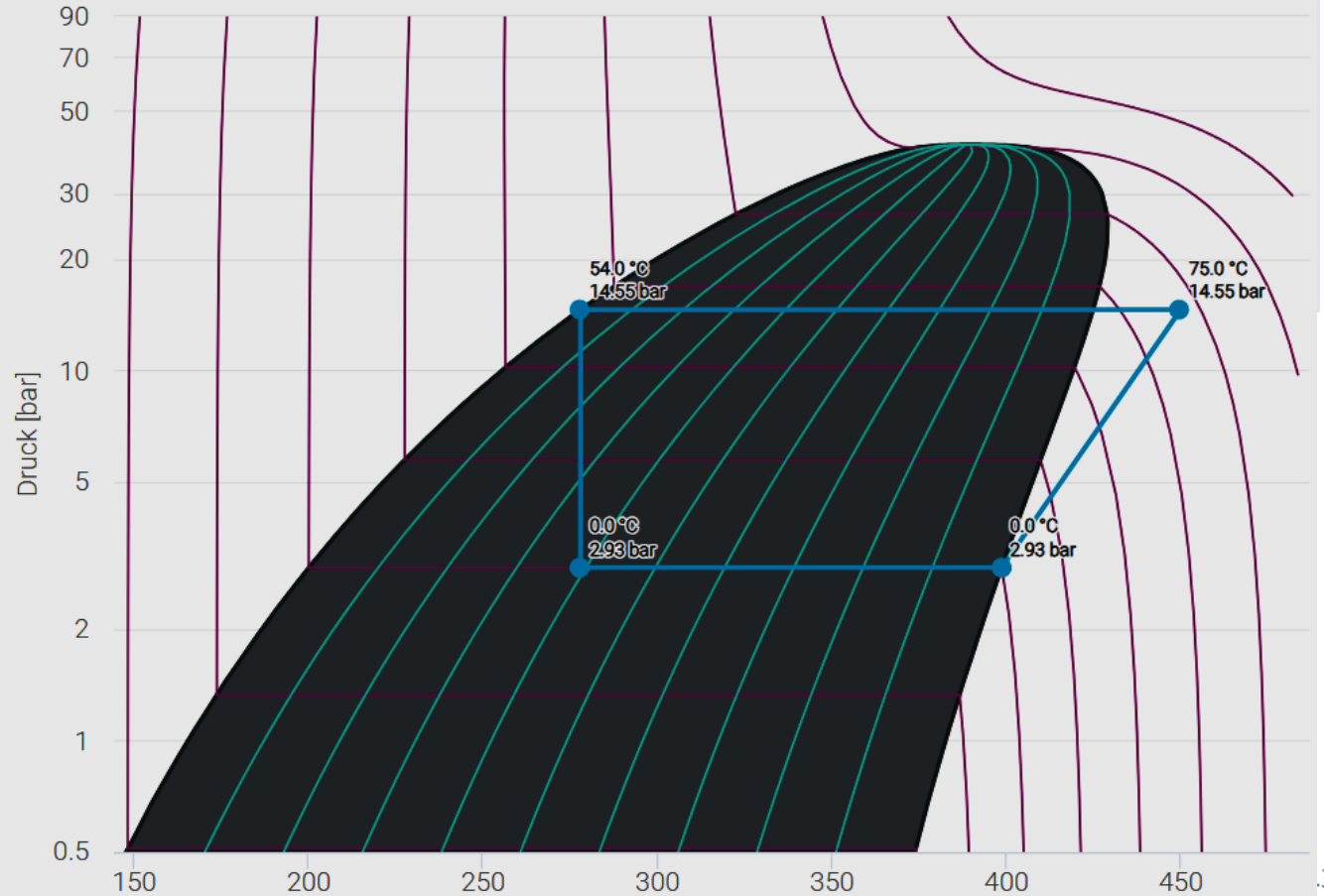
$\eta_{\text{Verdichter}} = 0,65$

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

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

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	$\Delta T$
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

Grädigkeit	
bei TC	5
bei TV	5

—

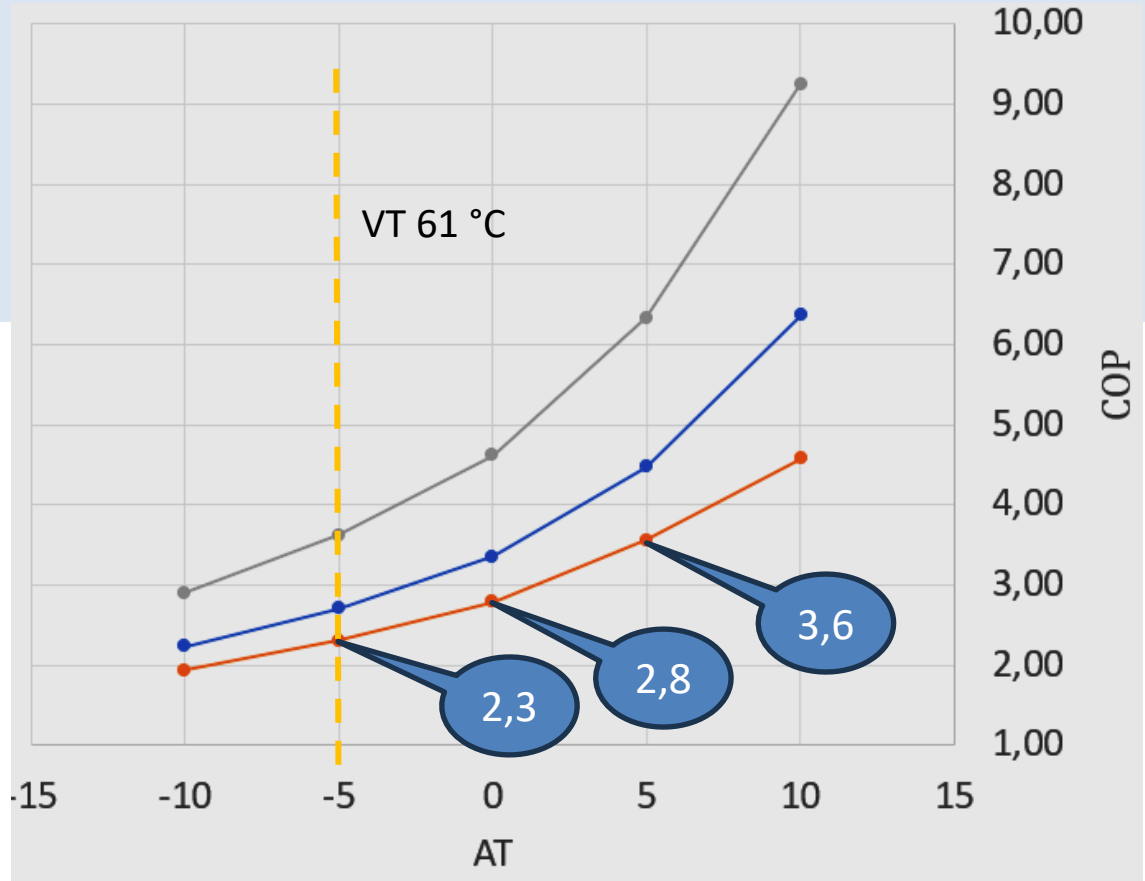
$COP_{h;1,0}$

—

$COP_{h;0,65}$

—

$COP_{h;0,65;Grädigkeit}$



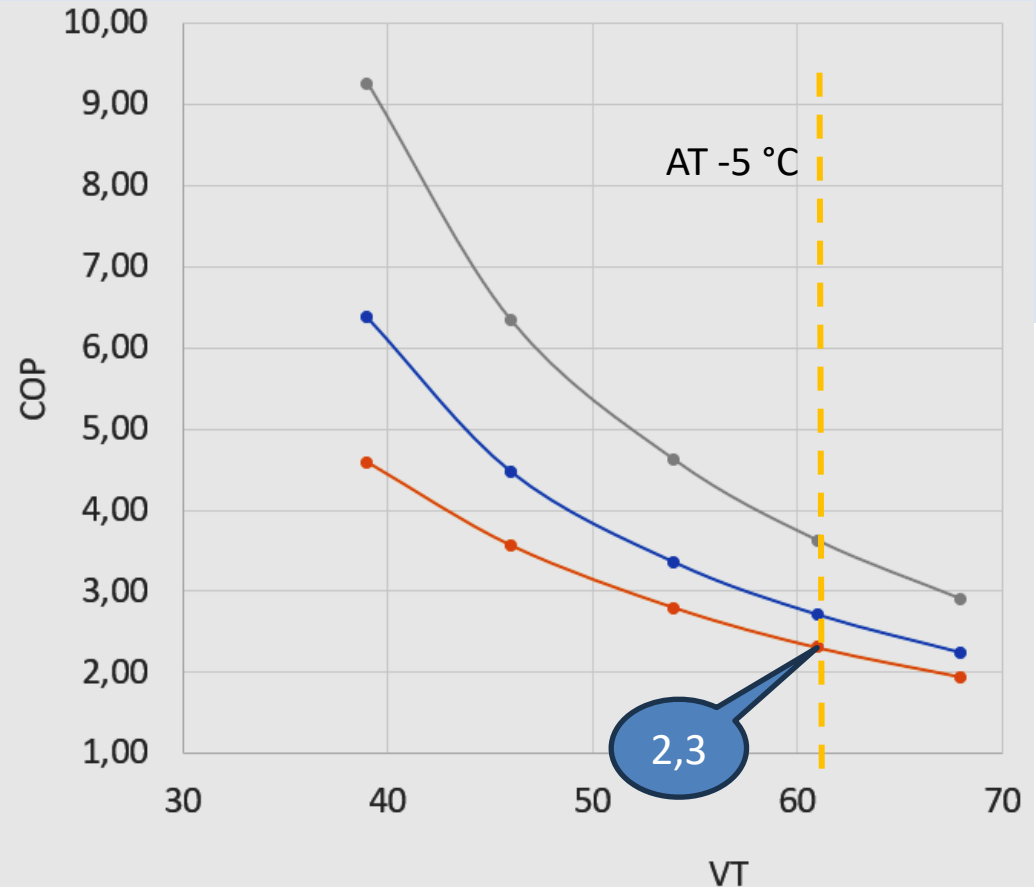
# $COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von VT

**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	$\Delta T$
10	39	29
5	46	41
0	54	54
-5	61	66
-10	68	78

Grädigkeit	
bei TC	5
bei TV	5

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



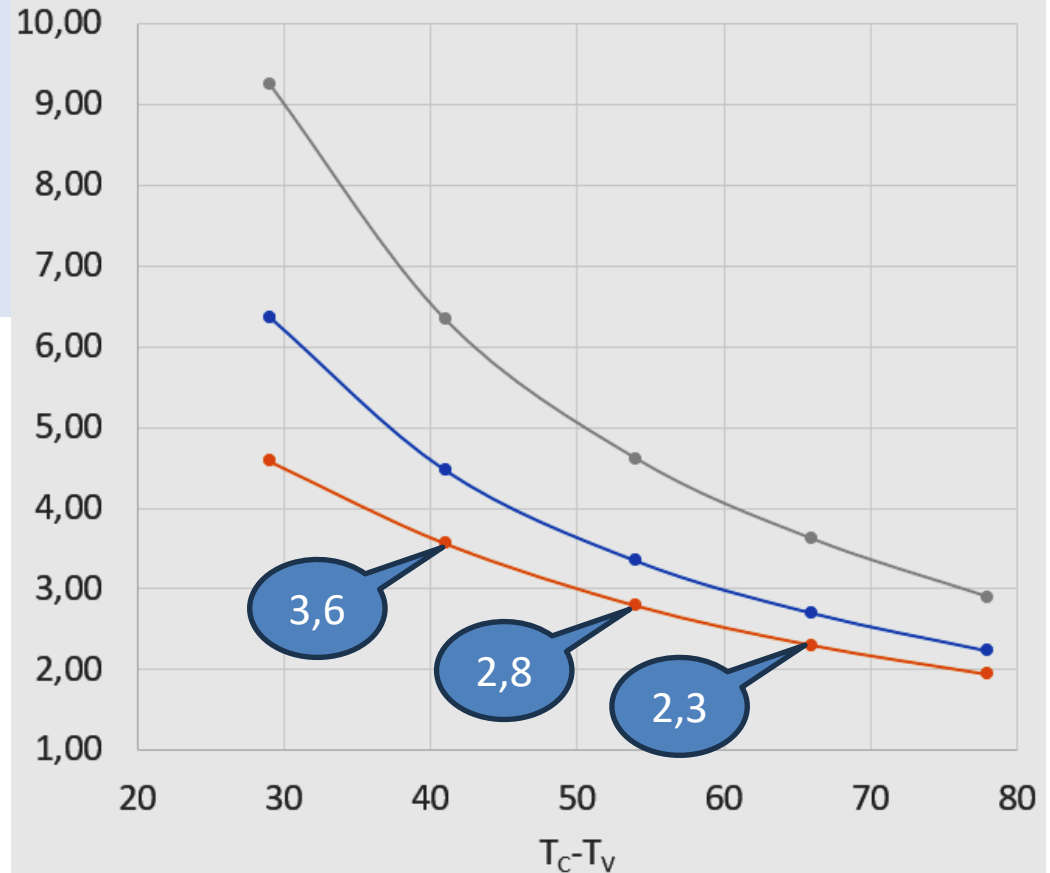
# $COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von TC-TV

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