

# Wärmepumpe

Wärme pumpen?

Themen

Heizungs-Varianten

Kostenvergleich

Umweltwärme nutzen

Wärme pumpen

Wärmepumpe

Phasenübergänge

Folgerungen

Kältemittel

Wärmepumpenprozess

Prozessschritte

Zustandsänderungen

Schritt I - IV

1. Hauptsatz

Enthalpie & Wärmepumpe

Wärmepumpenprozess

Carnot

Carnot-Wirkungsgrad  $\eta$

Carnot-Wärmepumpe  $\eta_C$

$COP_{real}$

COP Erfahrungswerte

Vorlauftemperaturen

Ig 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

# Wärme pumpen?



- Wärme pumpen?
- Mit „gefühlte“ kalter Außenluft heizen?
- Wie kann aus einer kalten ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) Außentemperatur eine hohe Innentemperatur werden?
- Was geschieht, wenn die Außentemperatur unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt?

# Themen

## Technik & Physik

Es soll um **physikalische, technische Inhalte** gehen, also kein Exkurs über das Für und Wider von Wärmepumpen.

## Einführung

Der Unterschied zwischen einem Kühlschrank und einer Wärmepumpe.

## Idee der Wärmepumpe

Elektroheizung versus Wärmepumpe.

## Physik

Wasser und Wasserdampf.

Isotherme, Isobare, Isochore, Isovapore, Isentrope

Enthalpie

Ig p,h Diagramm feuchte Luft

Ig p,h-Diagramm Kältemittel

Carnot-Prozeß

# Heizungs-Varianten

	Brennwertgerät	Elektroheizung	Wärmepumpe
Elektr. Energie	Kein Beitrag zur Erzeugung von Wärme. Pumpen, Regelung 50 – 100 W	Wärme aus Strom: Infrarotheizung ca. 100 %	Aus 1 kWh elektr. Energie werden 3 kWh Heizenergie. <b>COP = 3</b>
Fossile Brennstoffe	Erdgas	(Erdgas 60 % E-Werk)	(Erdgas 60 % E-Werk)
Regenerierbare Energie			Umwelt (Luft, Erde, ...)
Kosten	7.000 – 10.000 €	max. 1.500 € je Raum (Raumgröße)	Je nach Leistung, ab 20.000 €
Fazit	Analog zum Verbrauch entsteht CO <sub>2</sub> .	Ideal, wenn elektr. Energie autark erzeugt wird.	Energie aus der Umwelt. CO <sub>2</sub> neutral?
Graue Energie	Mittel (Herstellung)	Gering	Hoch (Herstellung)

# Kostenvergleich

	Gas	Strom
Verbrauch	8000 kWh/Jahr	2800 kWh/Jahr
Kosten	20 ct/Jahr (Januar 2022)	45 ct/Jahr (Januar 2022)
Kosten	1600 €	1260 €

## Wärmepumpe und elektr. Energie

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      1600 € (20 ct/Jahr)  
960 € (12 ct/Jahr)

$Kosten_3 = 2666 \times 45 = 1199 \text{ €}$   
 $Kosten_4 = 2000 \times 45 = 900 \text{ €}$

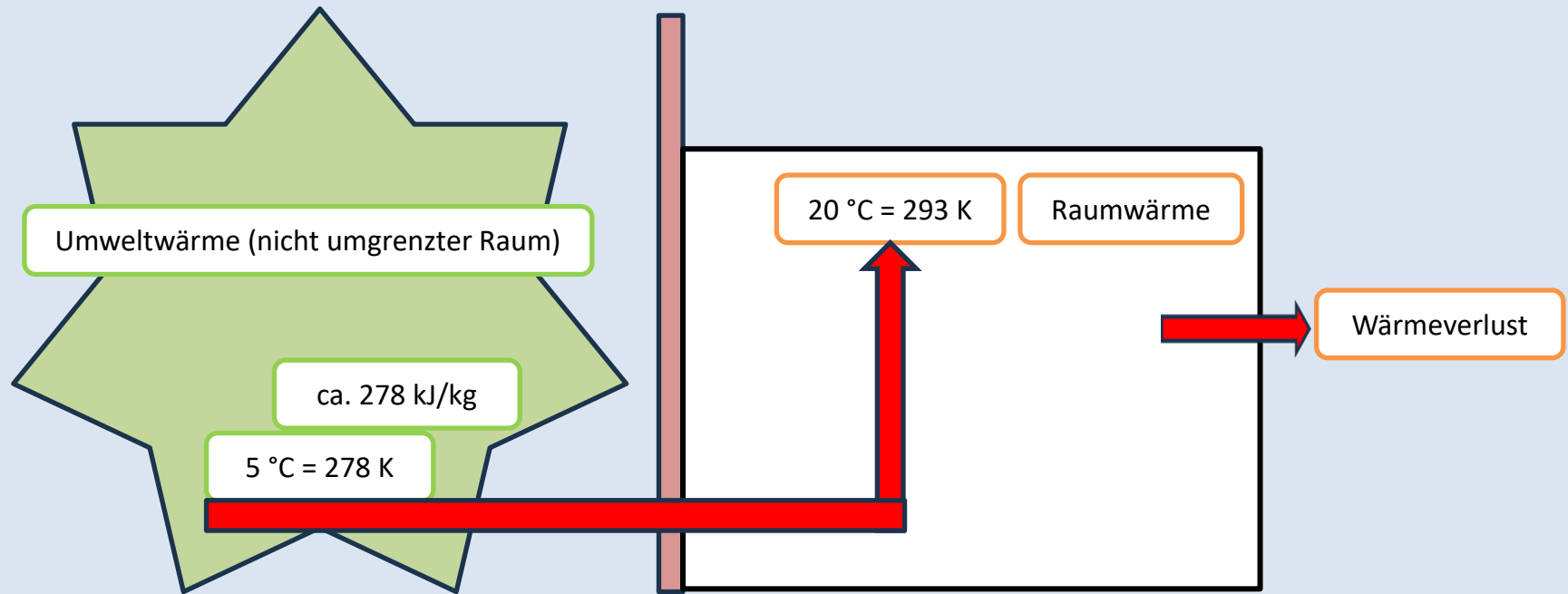
Quelle: [Strompreisentwicklung 2024: So entwickelt sich der Strompreis | VERIVOX](#)

[Gaspreis aktuell: So viel kostet die Kilowattstunde | NDR.de - Nachrichten - NDR Info](#)

# Umweltwärme nutzen

Absolute Temperaturskala in **Kelvin**!

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

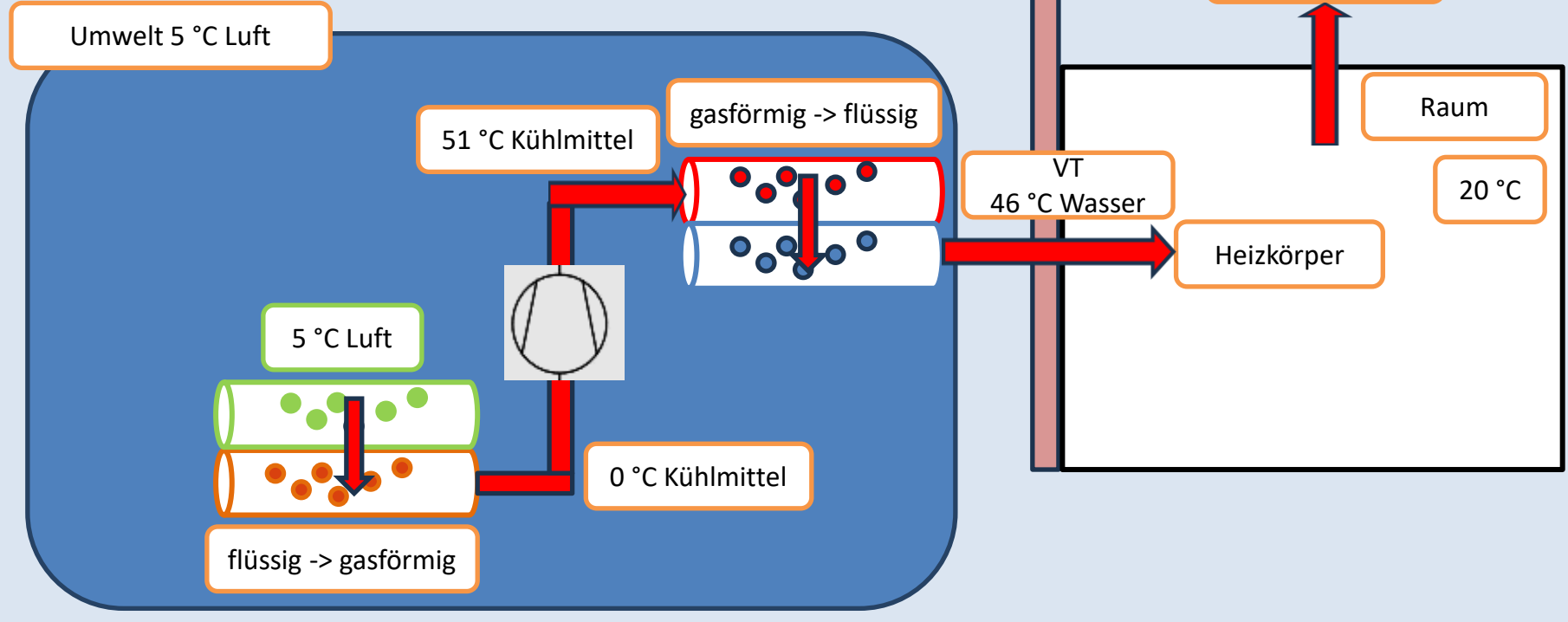


**Aufgabe: Aus Umweltwärme Raumwärme ernten.**

# Wärme pumpen

Wärmefluss von der warmen Luft an das kühle Kältemittel.

Wärmefluss vom warmen Kältemittel an den kühlen Heizkreislauf.

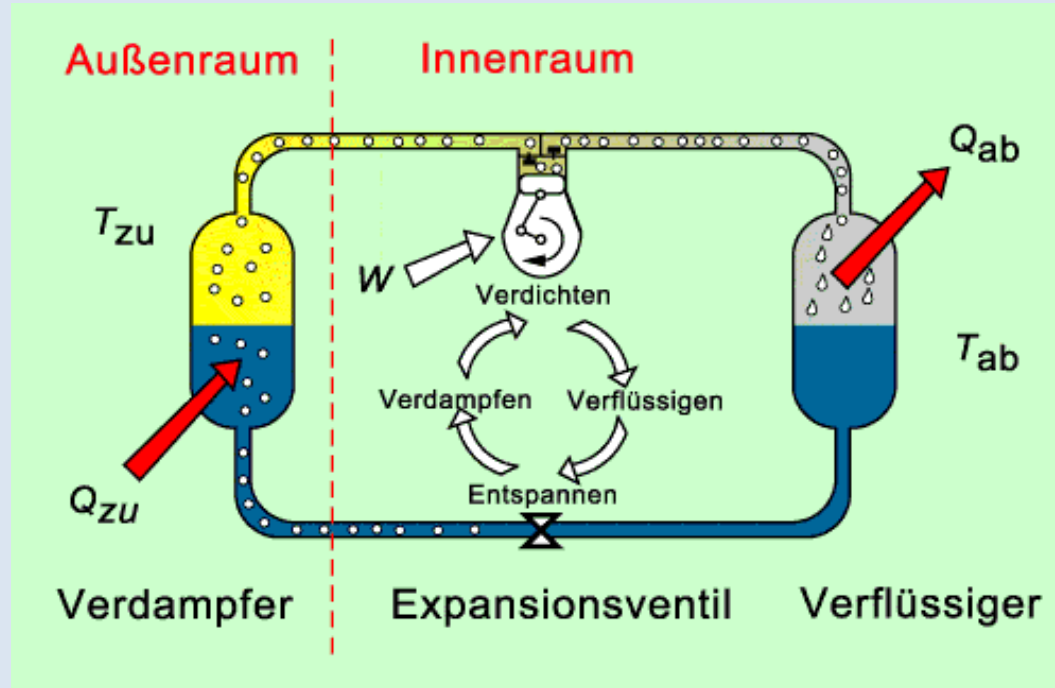


Aufgabe: Kältemittel von „5 °C“ auf „51 °C“ pumpen.

# Wärmepumpe

Kühlschrank:

links Innenraum  
rechts Außenraum



Wärmepumpe:

rechts Innenraum  
links Außenraum

Link: [Kühlschrank in Physik](#) | [Schülerlexikon](#) | [Lernhelfer](#)



# Phasenübergänge

Temperatur in °C

Energie in kJ (für 1 kg)

Phasen:

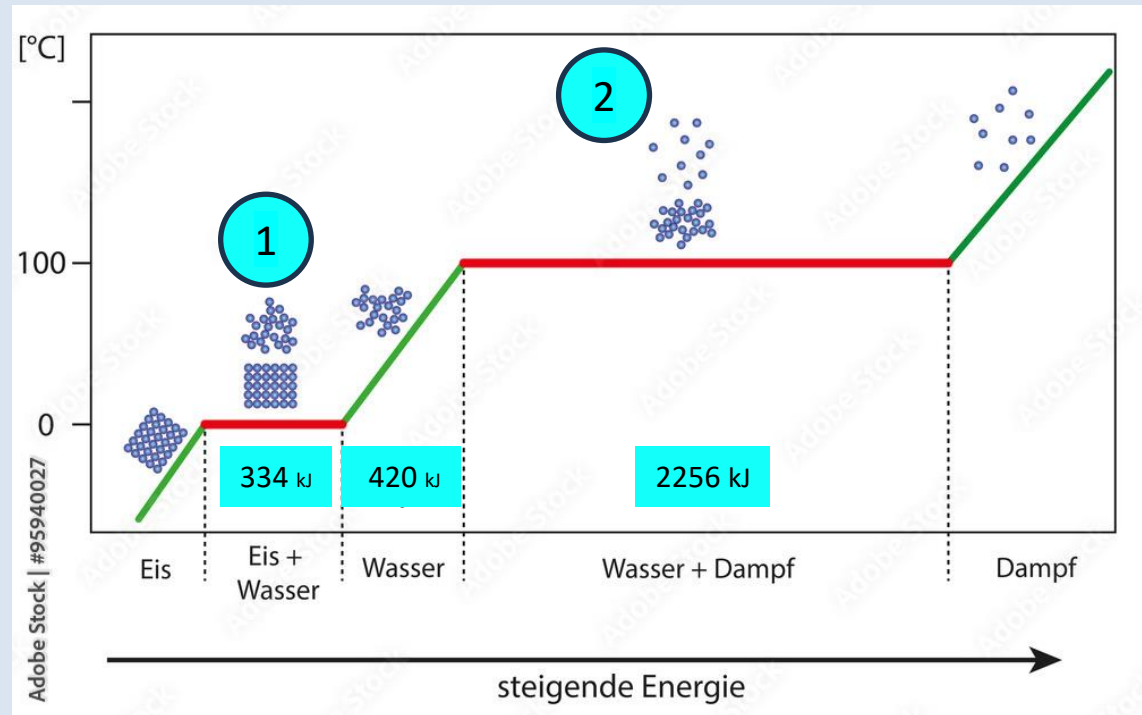
- Festkörper: Eis
- Eis + Wasser
- Flüssigkeit: Wasser
- Nassdampf: Wasser und Dampf
- Heißdampf: Dampf

**Isotherme:**  $t = \text{konst}$

$p = \text{konst}$

Phasenübergänge:

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



Bei 1 bar Luftdruck.

# Folgerungen

## Wasser verdampfen

Um Wasser bei  $p=1$  bar zu verdampfen:

spez. Enthalpie Wasser:  $h_1 = 417 \text{ J/kg}$

spez. Enthalpie Wasserdampf  $h_2 = 2673 \text{ J/kg}$

spez. zugeführte Energie:  $\Delta h = h_2 - h_1$   
 $\Delta h = 2673 - 417$   
 $\Delta h = 2256 \text{ kJ/kg}$

## 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!

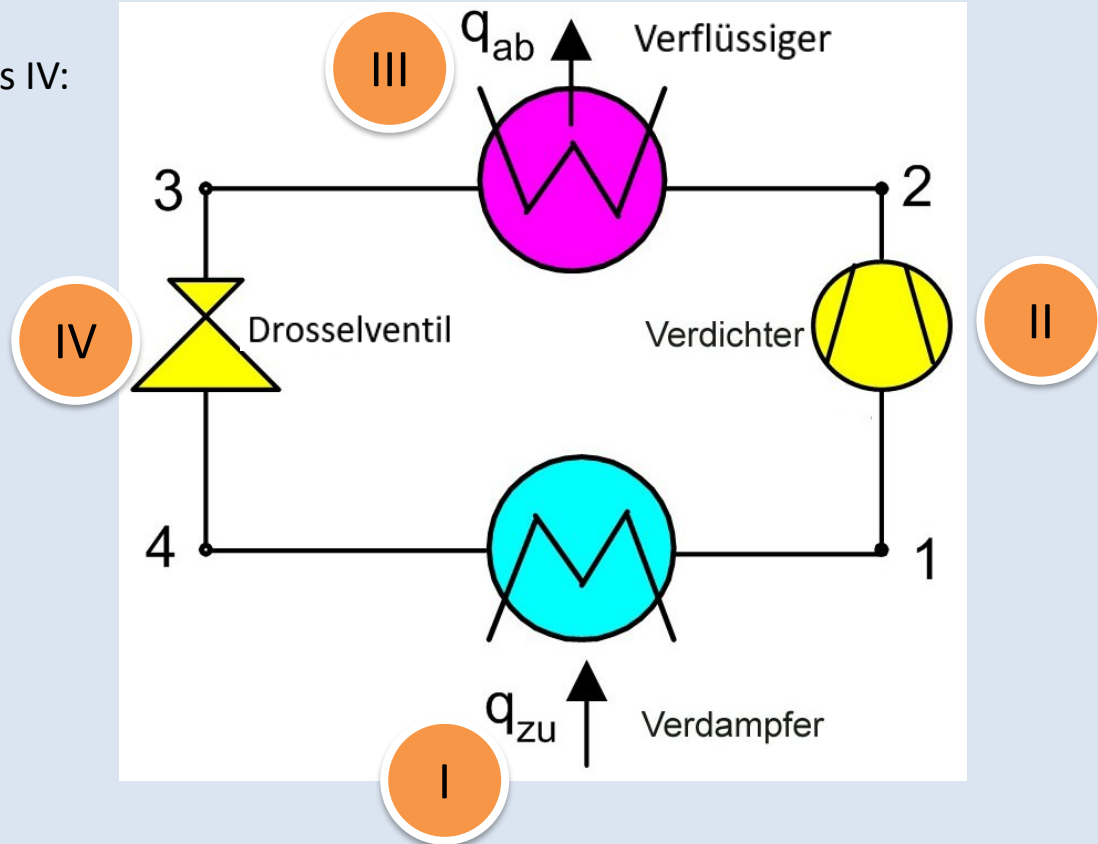
Wasser siedet bei Umgebungsdruck erst bei 100 °C.  
Bei ca. 1/100 bar würde Wasser erst bei 0°C sieden.

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)

# 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.

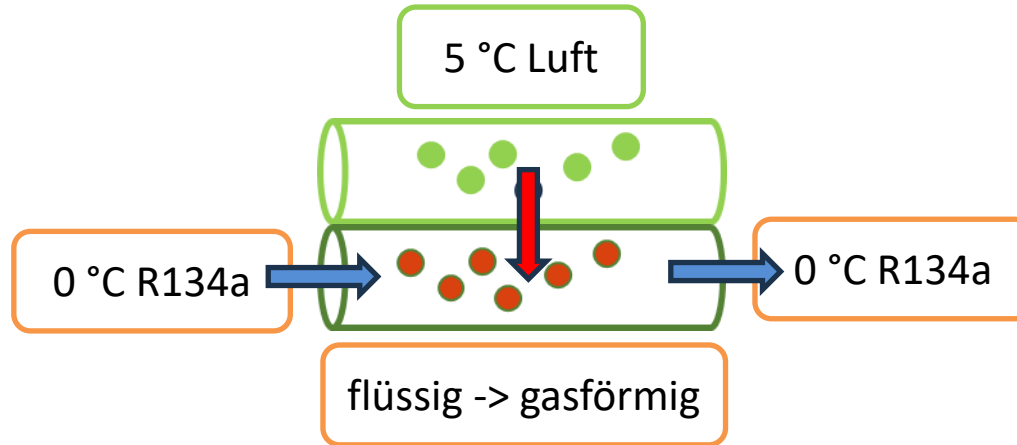
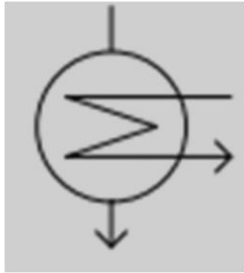
# Zustandsänderungen

		(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>

# Schritt I

Schritt I: verdampfen

(isothermer Prozess)



Vorgang

Zufuhr von Wärme an Kältemittel.

Thermodynamik

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

---

# 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

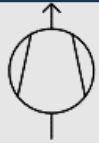
---



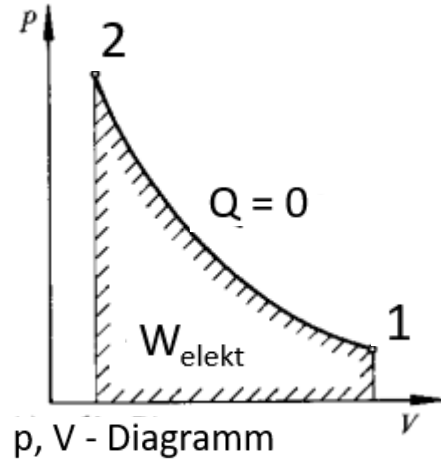
## Schritt II

### Schritt II: verdichten

$$\begin{aligned}T_2 &= 51\text{ °C} \\p_1 &= 13,51\text{ bar} \\v_2 &< v_1\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}T_1 &= 0\text{ °C} \\p_1 &= 2,93\text{ bar} \\v_1 &\end{aligned}$$



### (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.

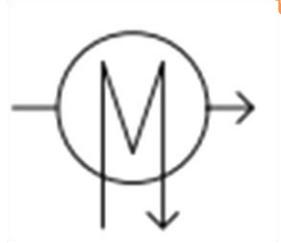
Volumen verkleinert sich.

Quelle: FS\_Thermodynamik\_und\_Kaeltechnik.pdf

## Schritt III

Schritt III: verflüssigen

(isothermer Prozess)



$46 + 5 = 51\text{ °C R134a}$

Gas -> flüssig

VT  
46 °C Wasser

Rücklauf  
35 °C Wasser

Vorgang

Abgabe von Wärme.

Thermodynamik

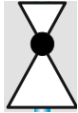
Phasenübergang von „gasförmig → flüssig.  
Temperatur bleibt konstant.  
Druck bleibt konstant.

## Schritt IV

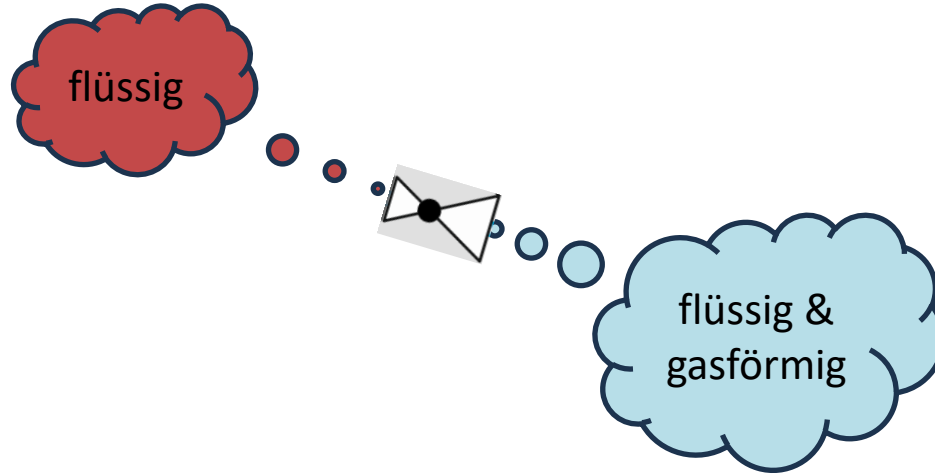
Schritt IV: entspannen

(isentropischer Prozess)

$T_3 = 51\text{ °C}$   
 $p_3 = 13,51\text{ bar}$   
 $v_3$



$T_4 = 0\text{ °C}$   
 $p_4 = 2,93\text{ bar}$   
 $v_4 > v_3$



Vorgang

Kältemitteltemperatur auf Umlufttemperatur (-Grädigkeit) senken.

Thermodynamik

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

# Enthalpie & Wärmepumpe

Enthalpie<sup>[2]</sup>

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

Die Enthalpie  $H$  ist eine Zustandsgröße, wie  $U$ ,  $p$  und  $V$ .

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

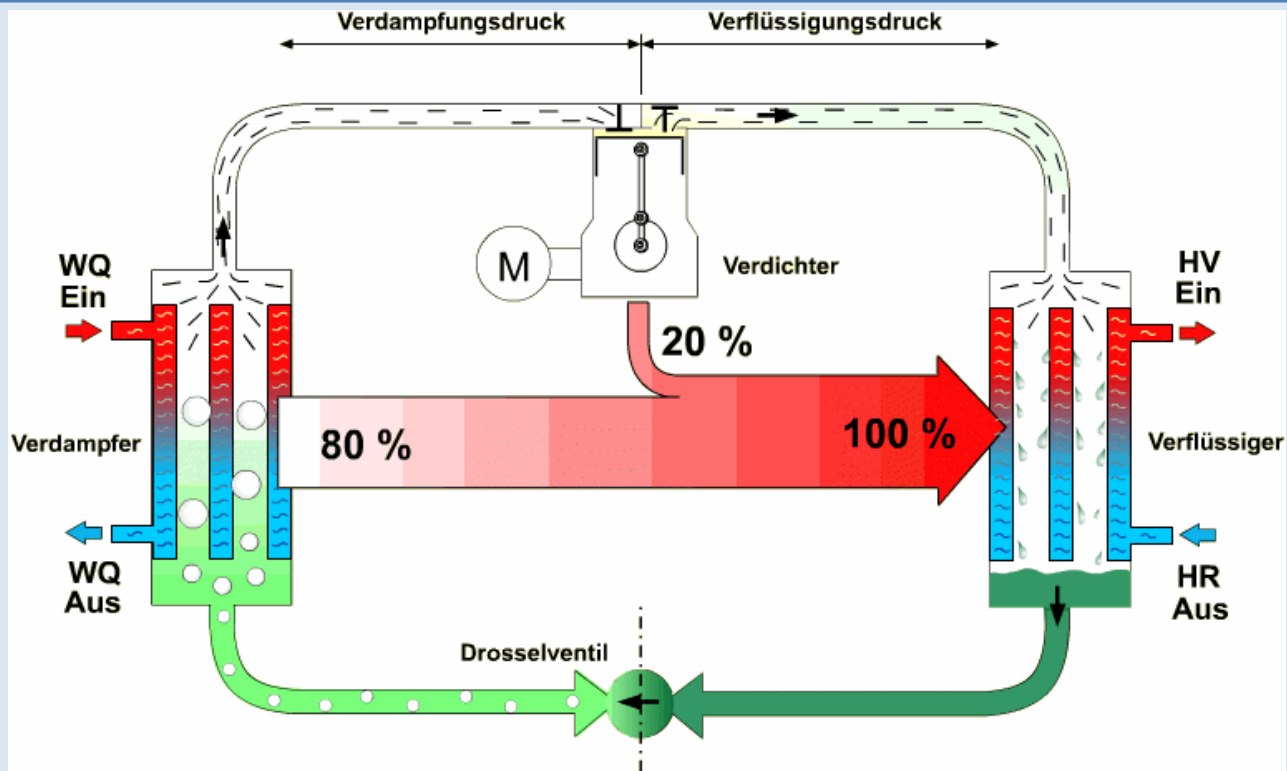
Der Phasenübergang von „gasförmig -> flüssig“, Abgabe von Wärme, führt zu einer abnehmenden spez. Enthalpie  $h$ .

Expansionsventil

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

# Wärmepumpenprozess

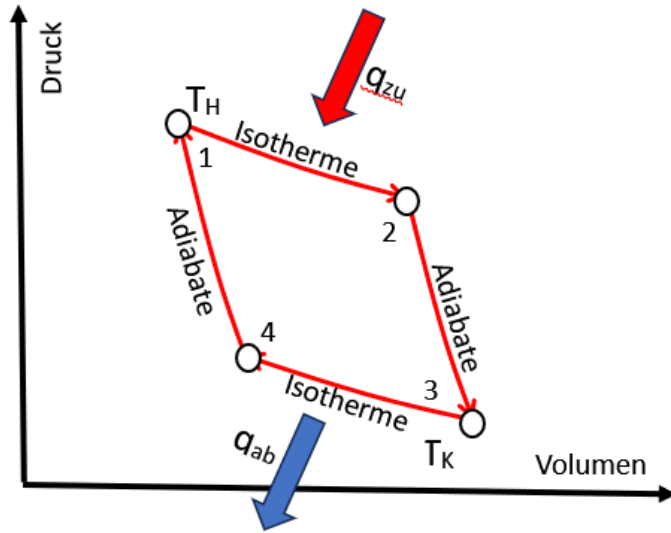
Hier COP = 5.  
Realistisch?



Link: <https://waerme-mit-system.de/waermepumpe/>

# Carnot

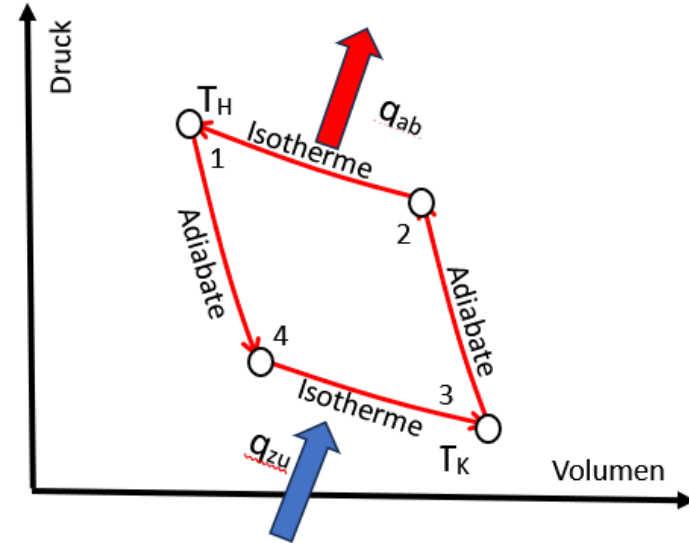
rechtslaufend



Wärmekraftmaschine

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

linkslaufend



Wärmepumpe

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

# Carnot-Wirkungsgrad $\eta$

Rechtslaufender Carnot-Prozess.

allgemein

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Wärmekraftmaschine

$$\eta = \frac{W}{q_{zu}}$$

gewonnene Arbeit / aufgewandte Energie

Carnot

$$\eta = \frac{q_{Nutz}}{q_{zu}}$$

$$\eta = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}}$$

Carnot-Wirkungsgrad

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

$\eta$  ist kleiner als 1

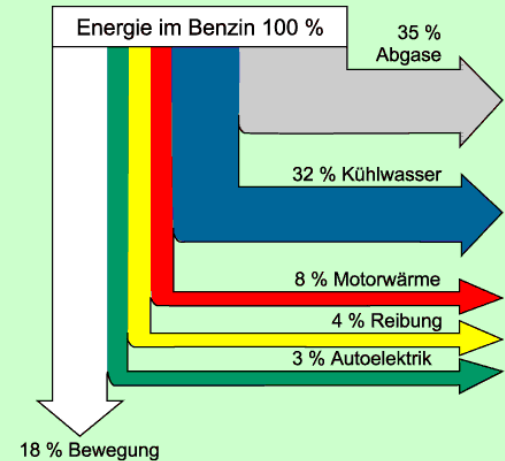
Ottomotor

$$T_H = 2500 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_K = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\eta = \frac{2500 - 900}{2500} = 0,64$$

(35 % Abgase)



## 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



$COP_{real}$

COP

Coefficient of Performance

$COP_{real}$

COP bewertet mit Gütegrad der Wärmepumpe.

Carnot-Wirkungsgrad

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

Gütegrad

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

Erfahrungswerte:

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

$COP_{real}$

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

$$COP_{real} = \eta_{C,WP} \times \frac{T_H}{T_H - T_K}$$

# 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: [COP Wärmepumpe: Werte, Bedeutung, Berechnung | Bosch \(bosch-homecomfort.com\)](https://www.bosch-homecomfort.com/de/produkte/waermpumpen/cop-waermpumpe-werte-bedeutung-berechnung)

# Vorlauftemperaturen

## Altbau mit Heizkörpern



90/70 °C, auch mit  
75/65 °C möglich

## Brennwertsystem



60/45 °C

-5 °C

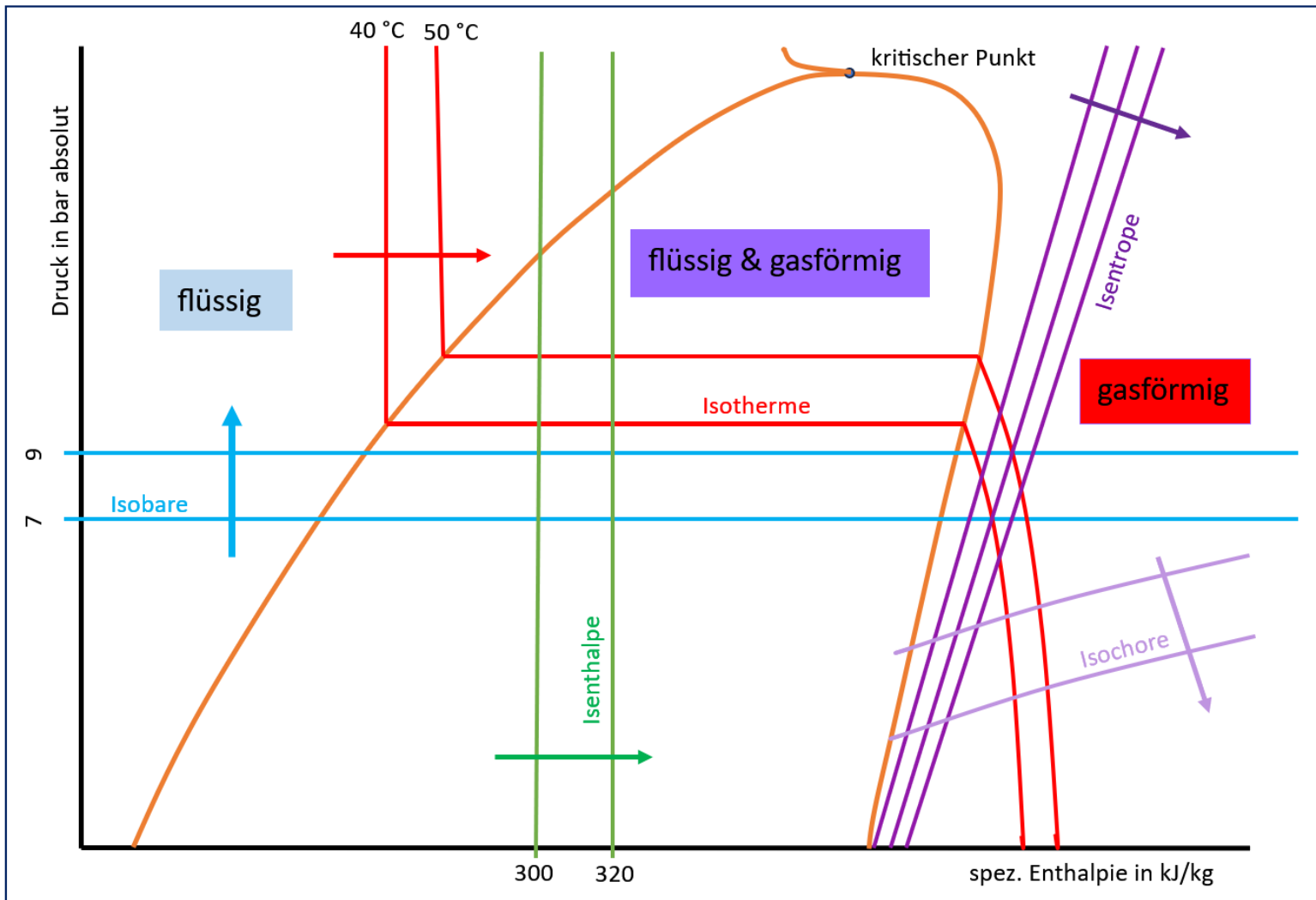
## Fußbodenheizung



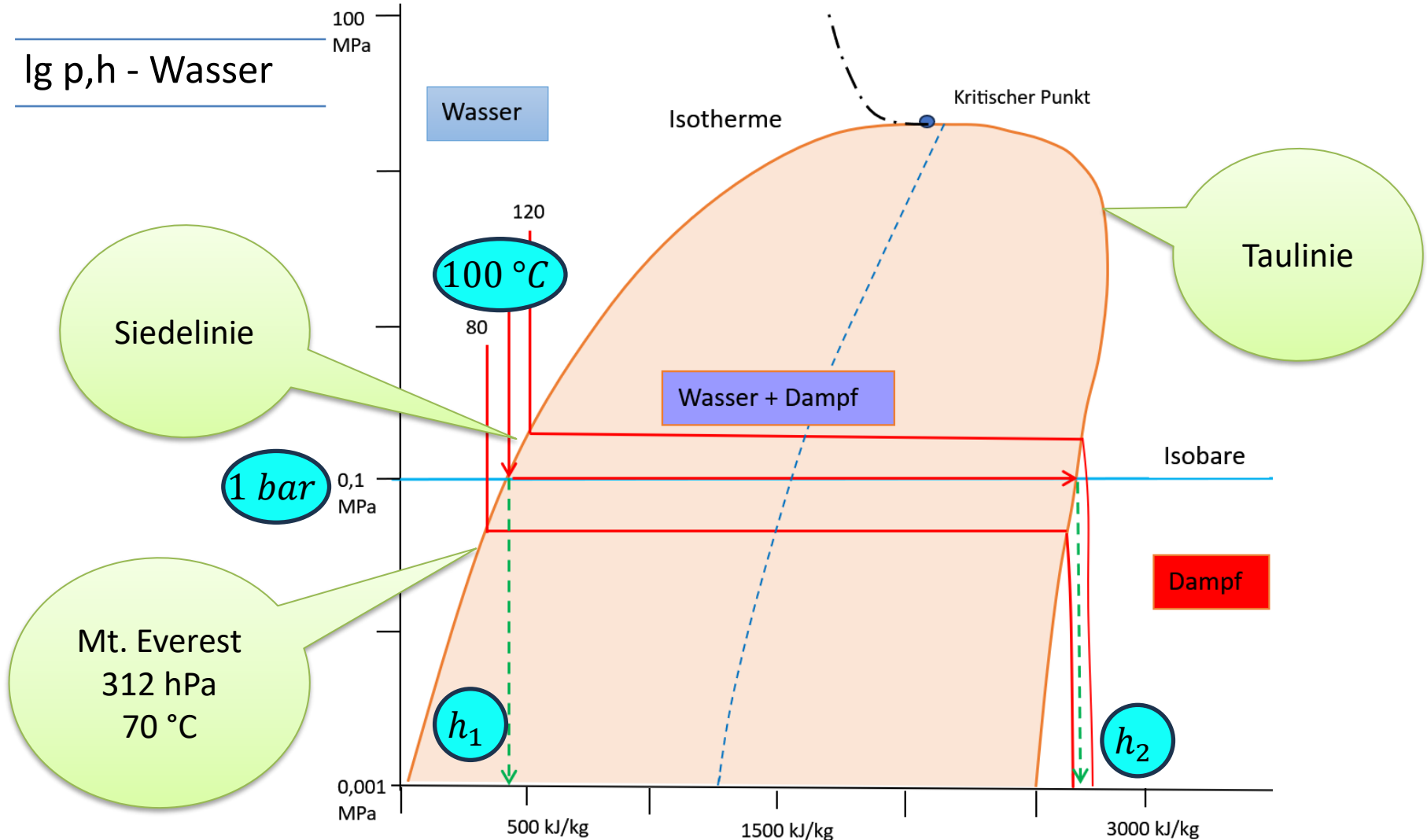
40/30 °C

Quelle: [Vorlauftemperatur: Die Heizung optimal einstellen | Vaillant](#)

# lg p,h Aufbau



# lg p,h - Wasser

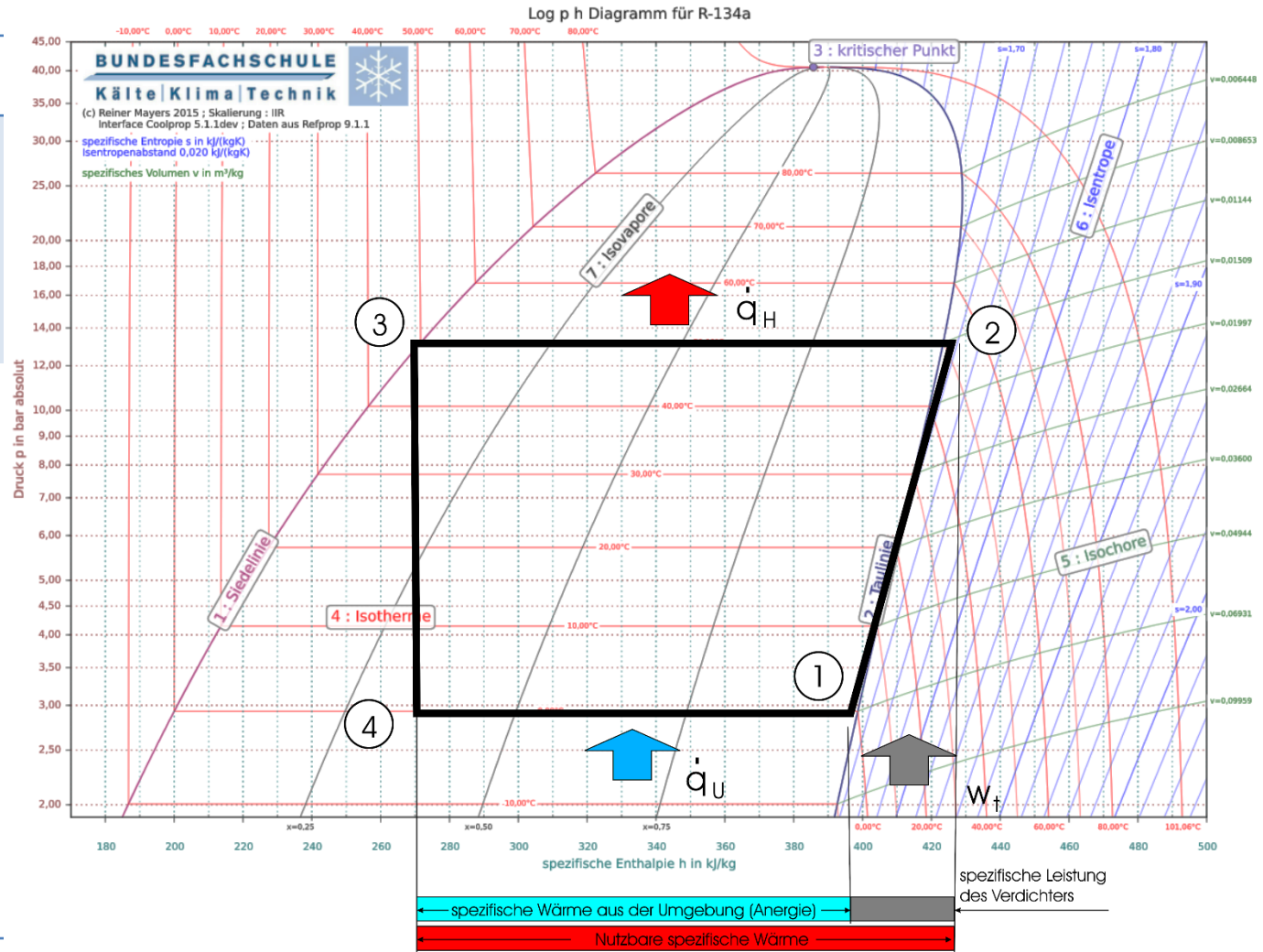


# lg p,h R-134a Carnot

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

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

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

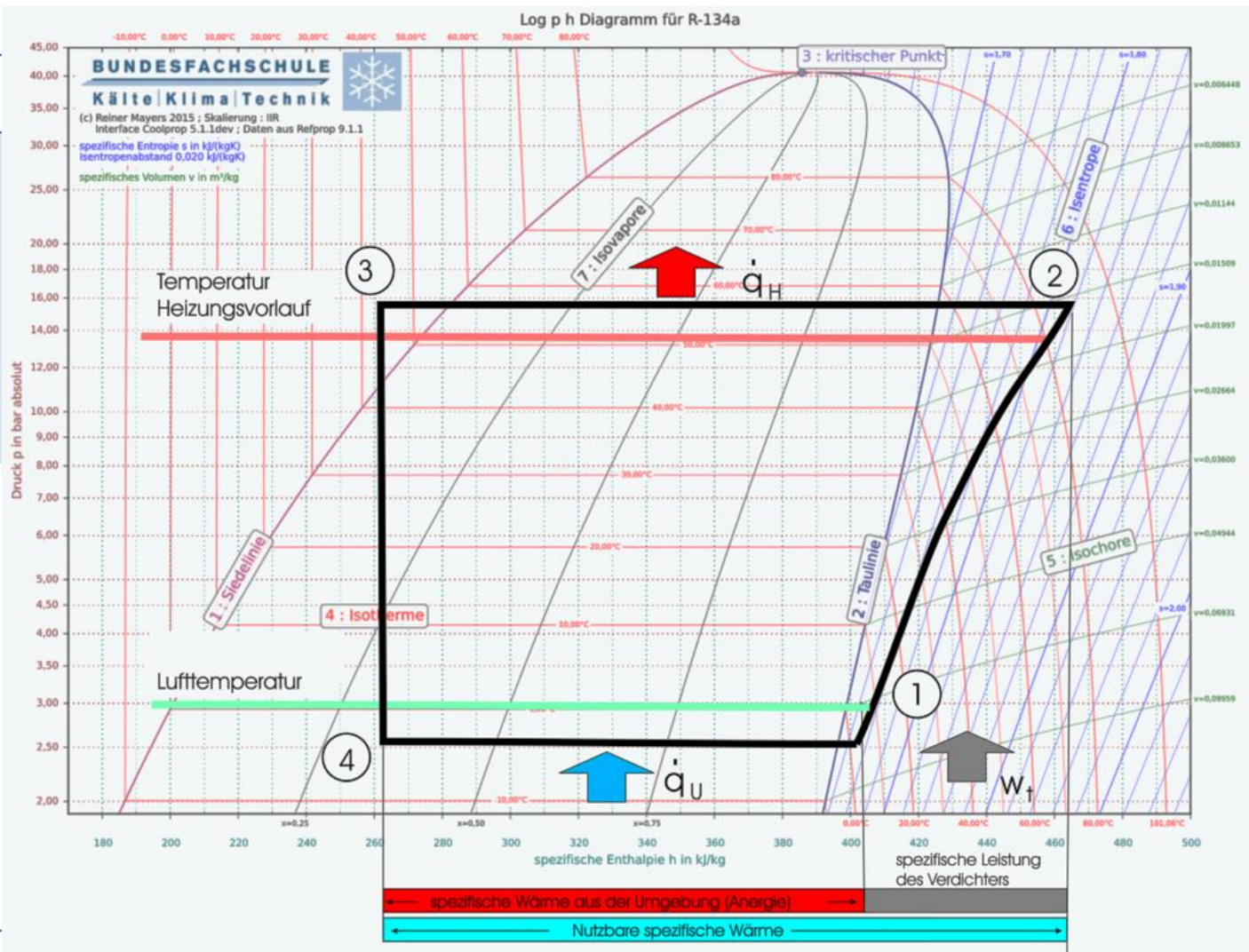


## lg p,h R-134a real

- Wärmepumpe
- Realer Prozess
- Kältemittel R-134a

Einfluss von:

- Grädigkeit
- Verdichter-  
Wirkungsgrad



Quelle 4

# Heizkennlinie

Brennwertgerät

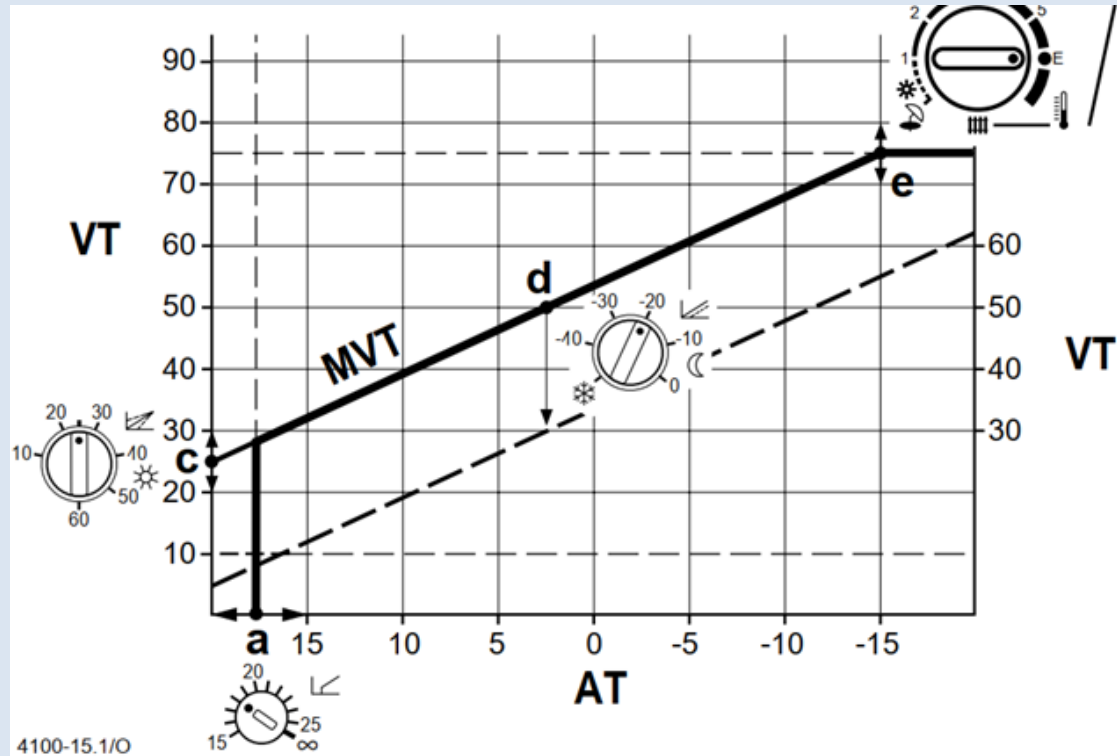
$a = 17,5\text{ °C}$

$c = 25\text{ °C}$

$d$  (Nachtabsenkung)

$e = 75\text{ °C}$

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



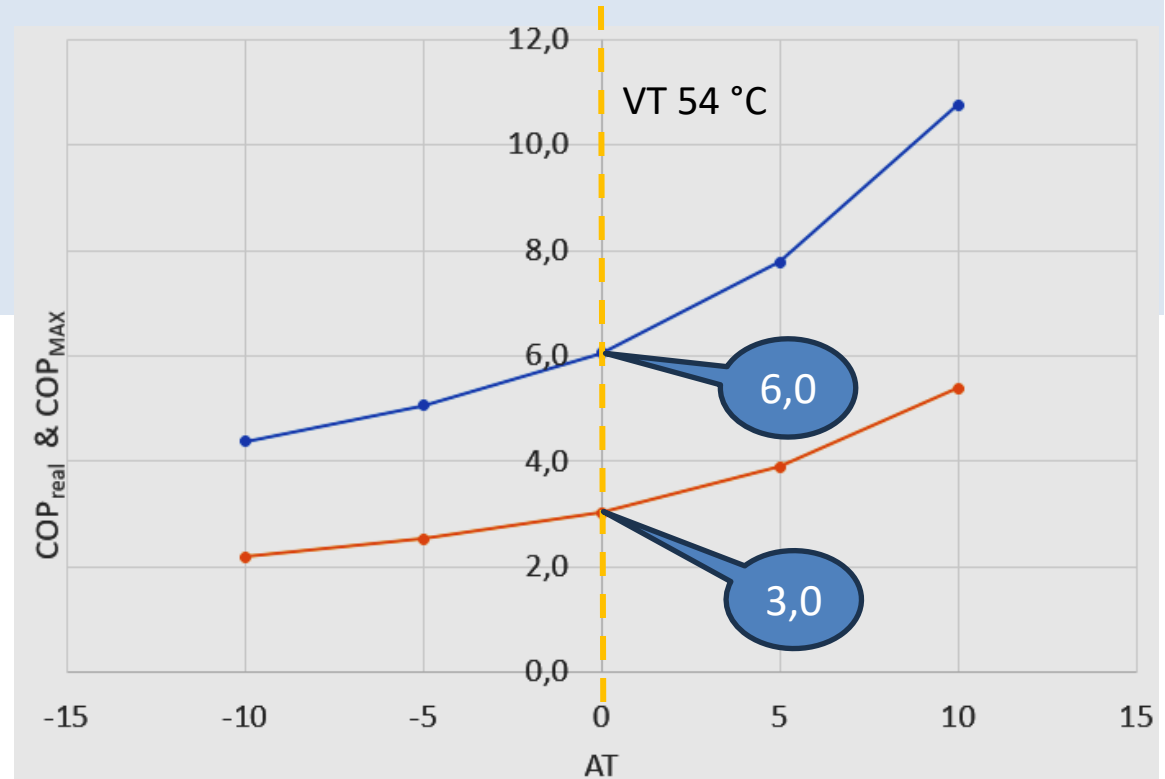


## Carnot: $COP_{MAX}$ & $COP_{real}$ von AT

$\eta_{C;WP}$  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

—  $COP_{MAX}$   
—  $COP_{real}$

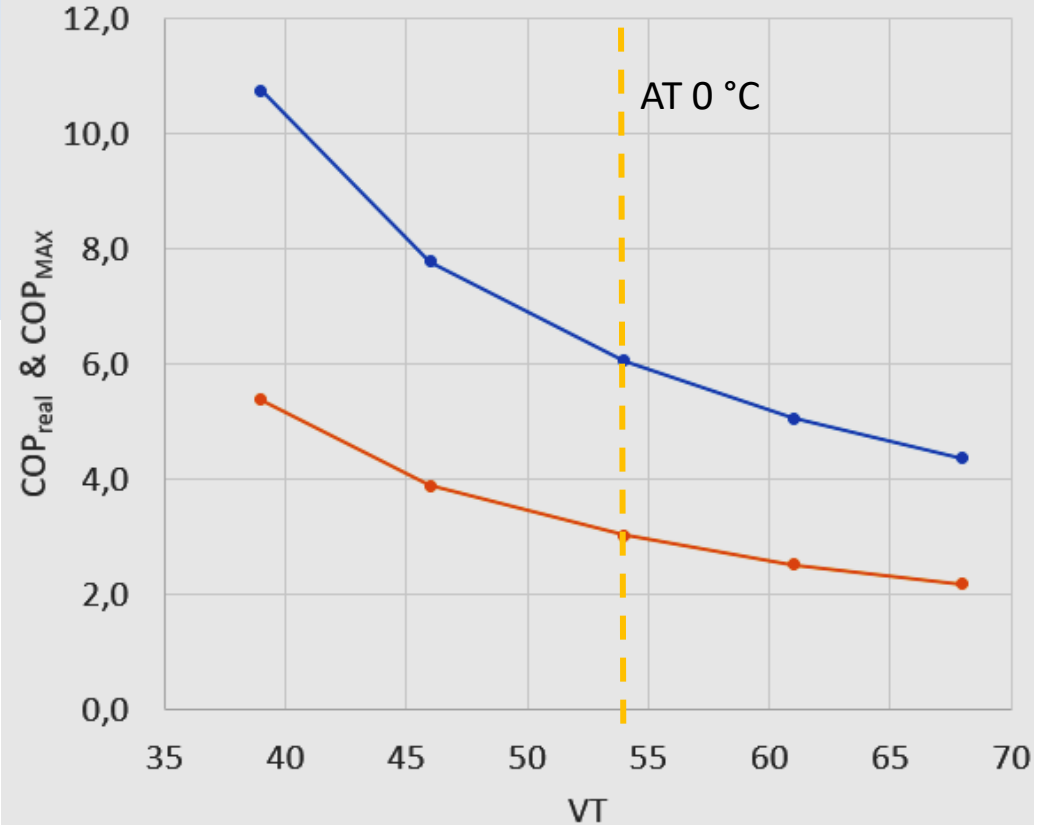


## Carnot: $COP_{MAX}$ & $COP_{real}$ von VT

$\eta_{C;WP}$  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

—  $COP_{MAX}$   
—  $COP_{real}$



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

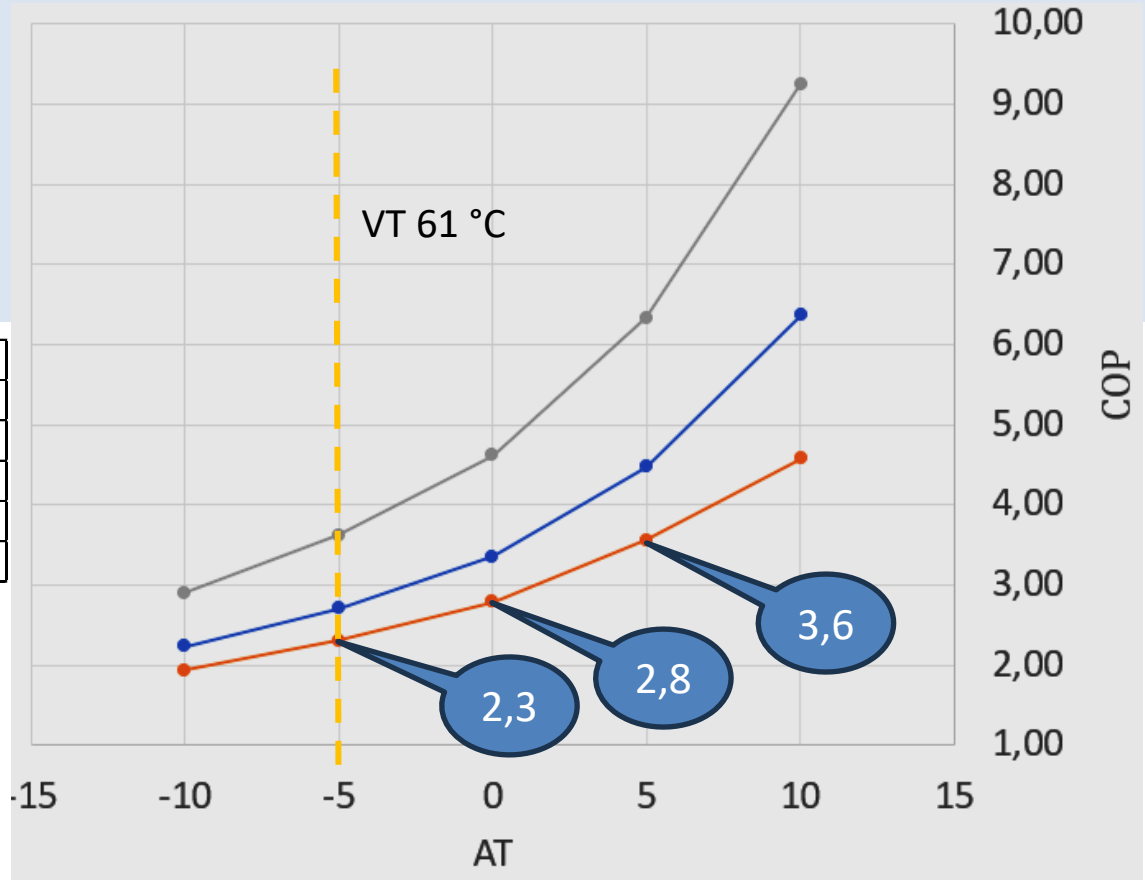
Außentemperatur

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

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



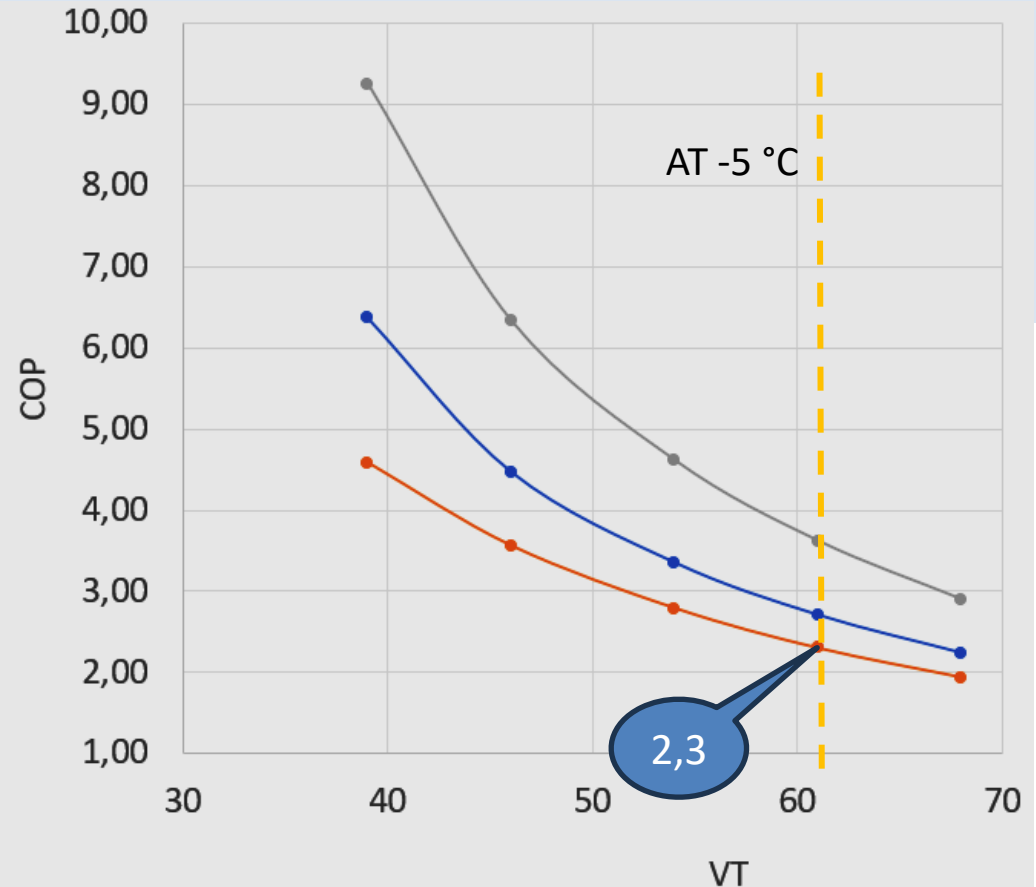
# $COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von VT

**R134a** COP über Enthalpie  
 $COP_{h;1,0}$  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

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



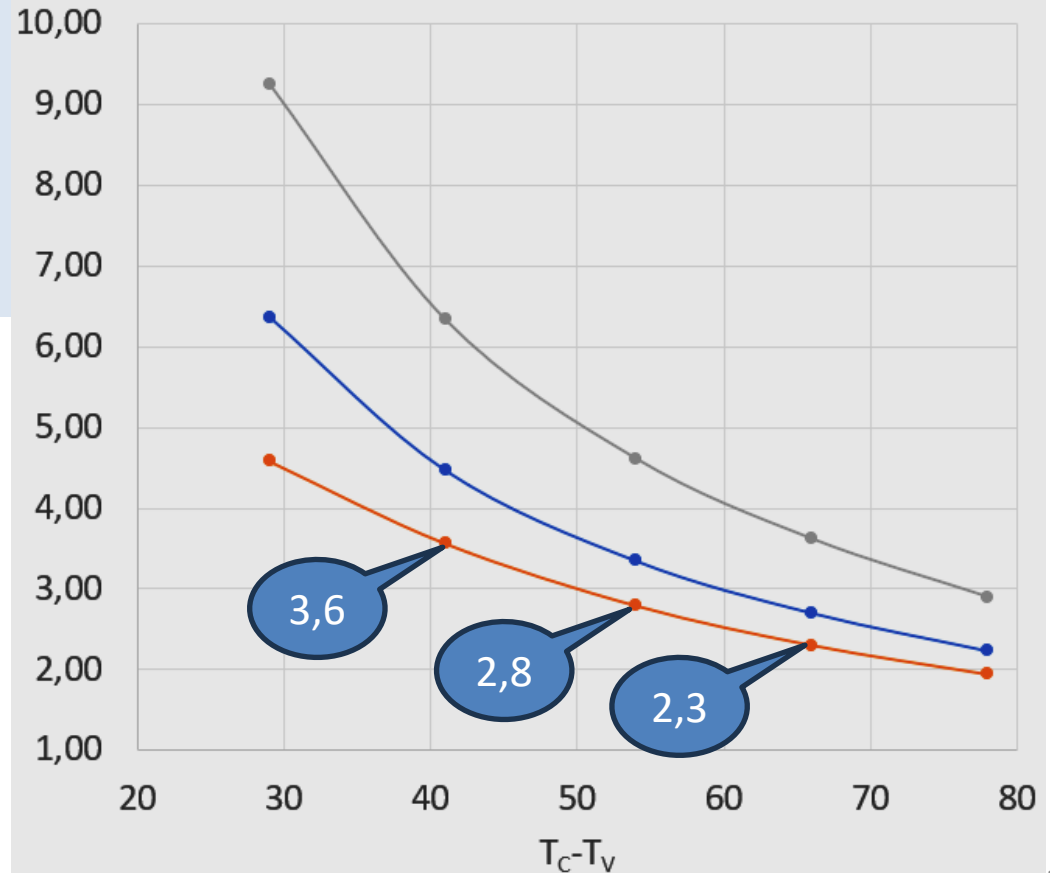
# $COP_{h;1,0}$ & $COP_{h;0,65}$ & Grädigkeit von TC-TV

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 Internet

$COP_h$

über spez. Enthalpie.

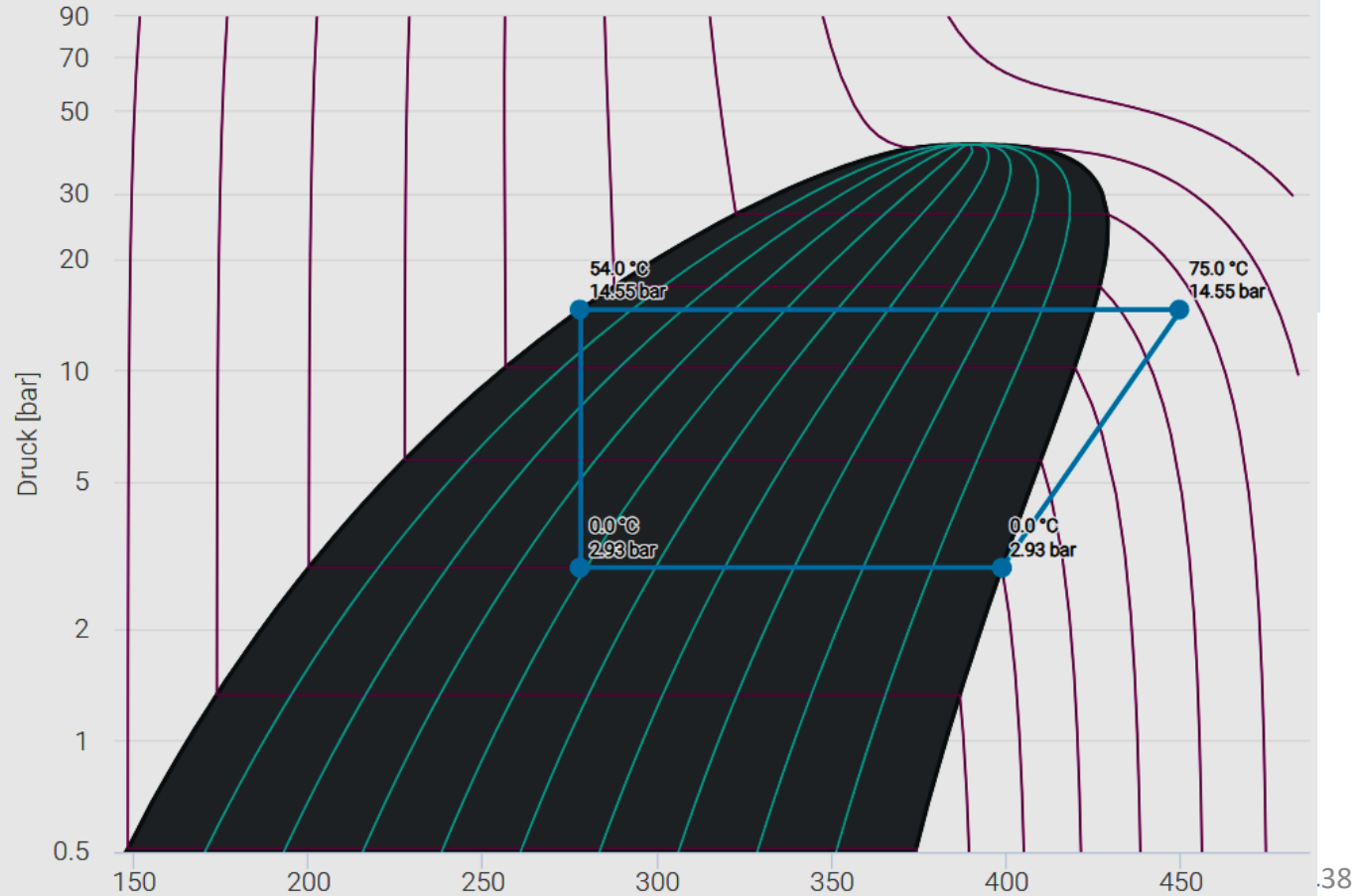
$\eta_{\text{Verdichter}} = 0,65$

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

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

log(p)-h Diagramm R134A

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



Quelle [5]

## COP Werte

COP	Coefficient of Performance
COP < 1	Die Wärmepumpe verbraucht mehr elektrische Energie als sie zum Heizen liefert. Jede andere Heizung wäre besser.
COP = 1	Wärmepumpe wirkt wie Widerstandsheizung. Schlecht für das Klima und teuer.
COP = 1-2	Unwirtschaftlich, da Strom meist mit einem Wirkungsgrad von unter 50 % aus Wärme erzeugt wird.
COP > 3	Normaler Arbeitsbereich. Öl- und Gasheizungen überlegen

Prof. Dr. G. Ganteför

Link: [WÄRMEPUMPE: Wie geht das eigentlich? | #58 Energie und Klima - YouTube](#)

## Quellen

1	Dietzel, Fritz: Technische Wärmelehre, Kamprath-Reihe
2	<a href="#"><u>Enthalpie – Wikipedia</u></a>
3	<a href="#"><u>W10 Wärmepumpe (tu-darmstadt.de)</u></a>
4	<a href="#"><u>https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmepumpe</u></a>
5	<a href="#"><u>Log ph Diagramm online I TLK Energy (tlk-energy.de)</u></a>
6	<a href="#"><u>www.schuelerlexikon.de</u></a>
7	<a href="#"><u>Online - Berechnung - Tetrafluorethan - R134a (peacesoftware.de)</u></a>
8	<a href="#"><u>Thermodynamische Funktionen: Zustandsgrößen für R134a (Tetrafluorethan) (enthalpos.blogspot.com)</u></a>