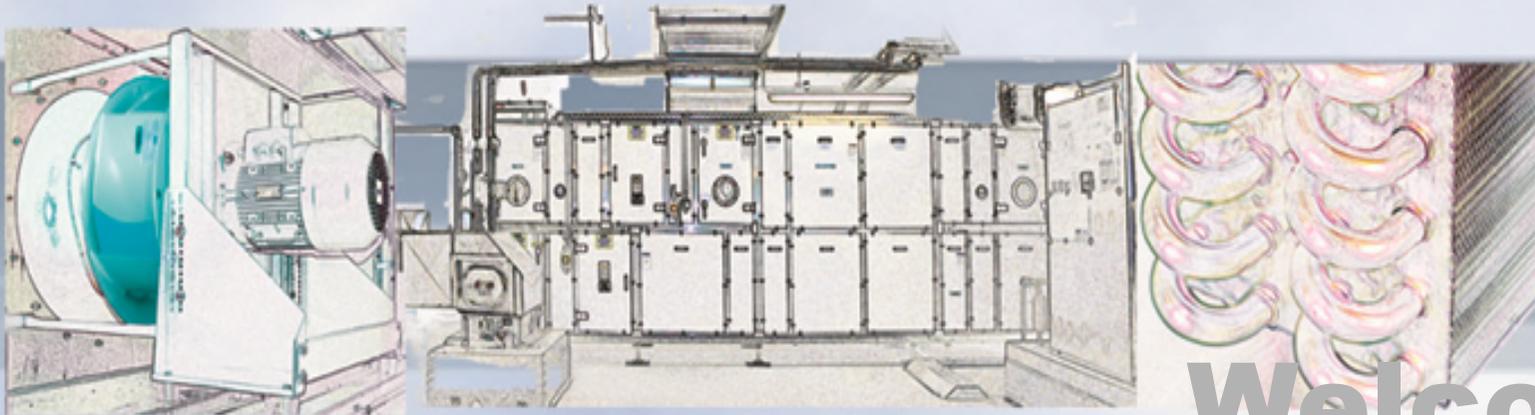


# Willkommen



# Bienvenue

# Welcome

## Raumluftechnik WRG versus Wärmepumpe

Wärmebereitstellung durch Abwärmenutzung

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

c.kaup@umwelt-campus.de



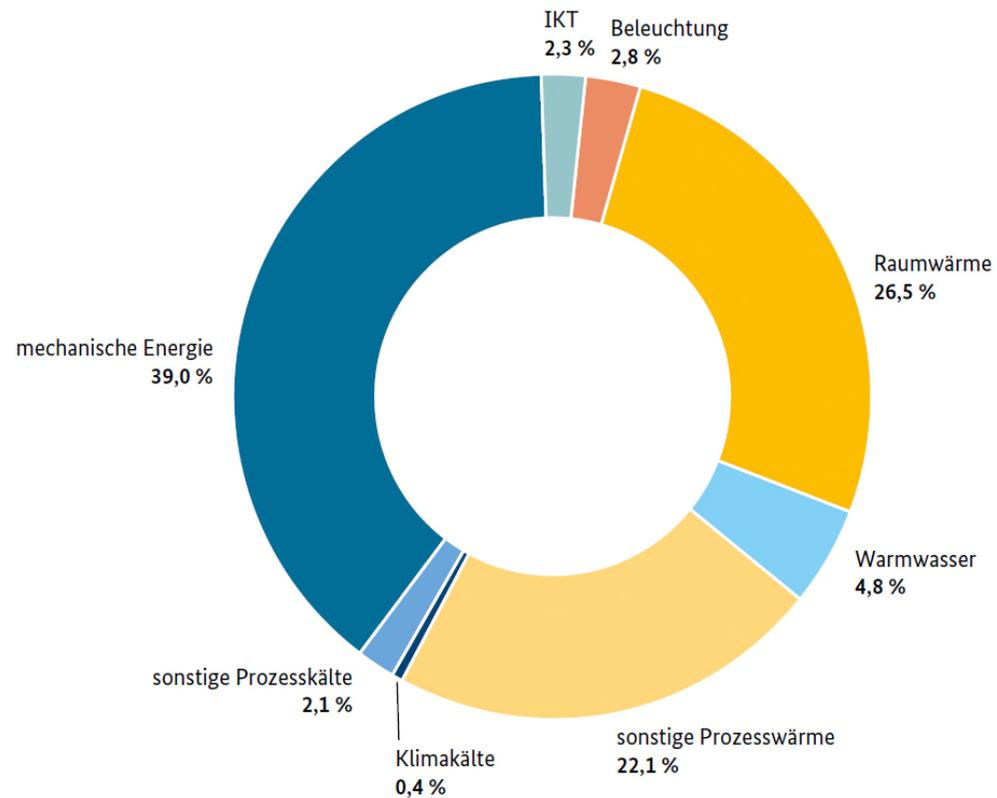
Umwelt-Campus  
Birkenfeld

H O C H  
S C H U L E  
T R I E R

Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland 2017 (insgesamt 9.329 PJ)

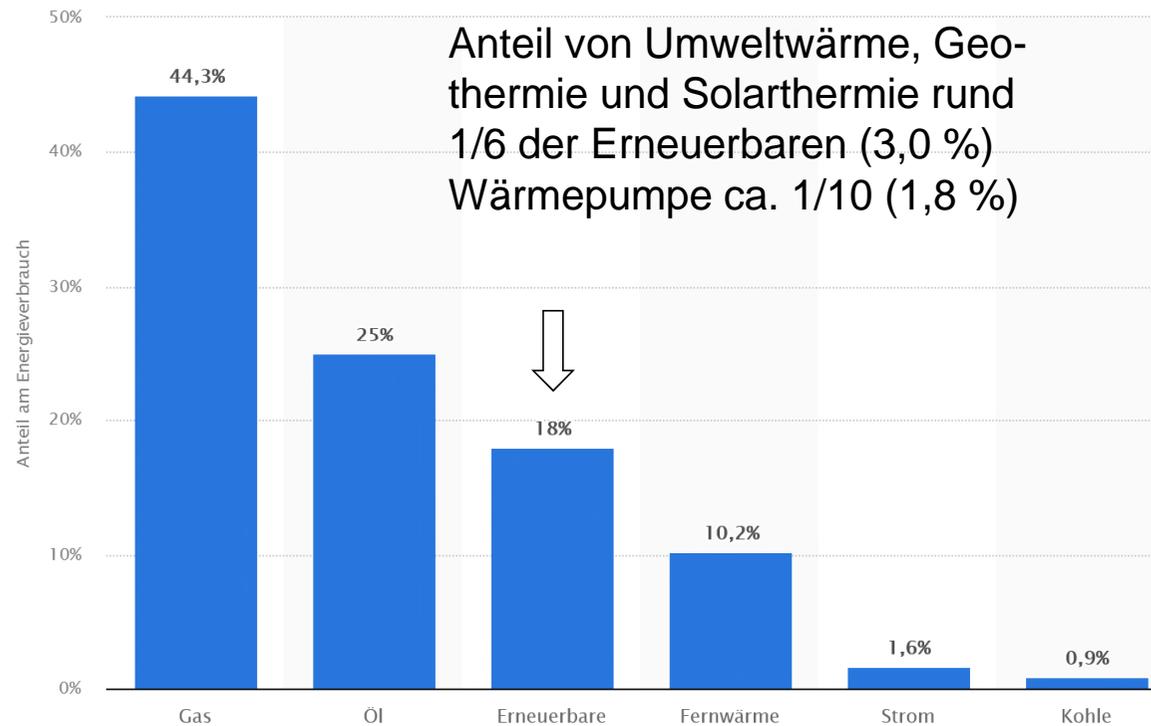
9.329 PJ = 2.591 TWh

Raumwärme **687 TWh**



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

## Energieträger im Jahr 2019



© Statista 2021

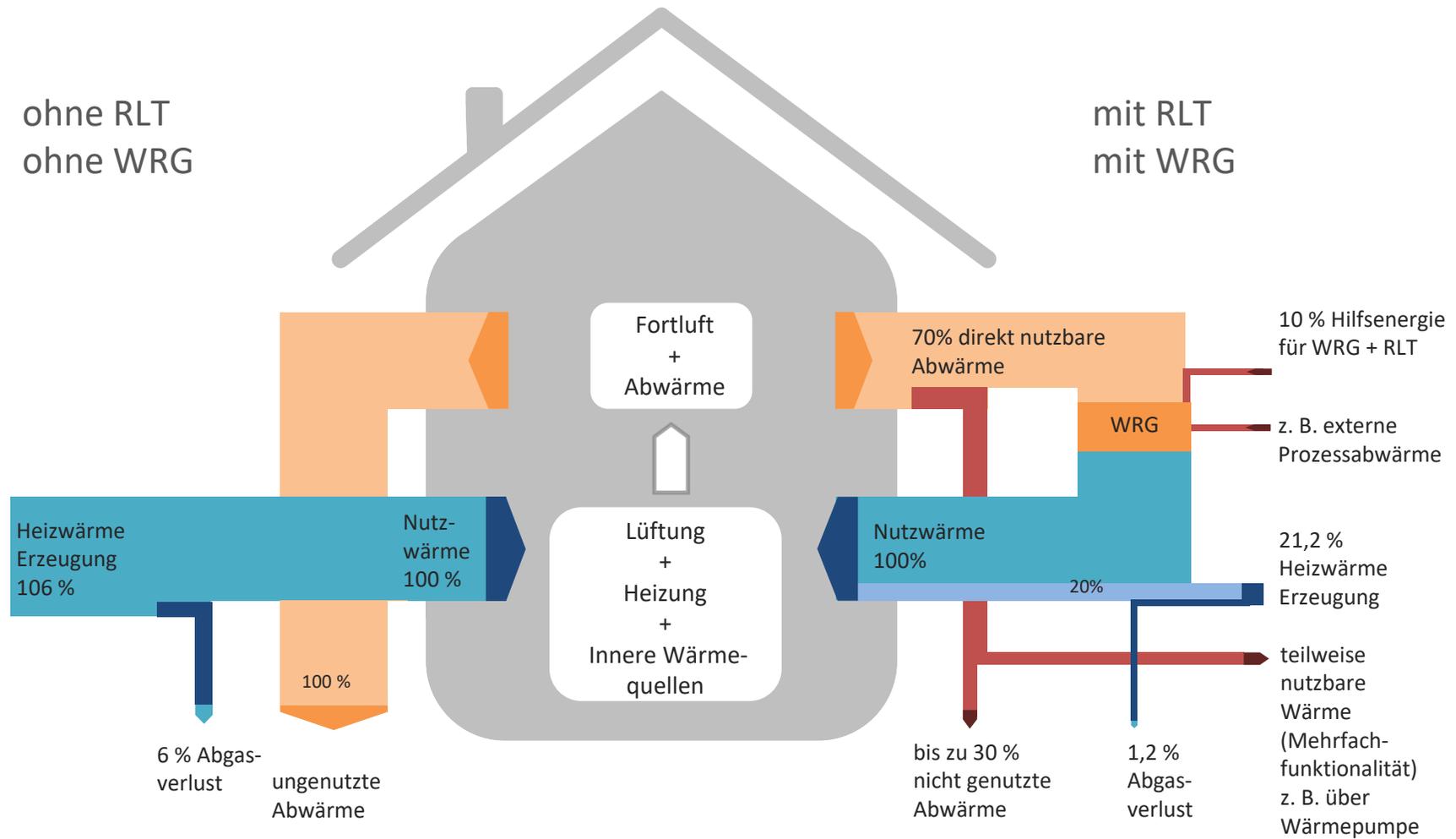
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250403/umfrage/raumwaermebereitstellung-nach-energietraeger-in-deutschen-haushalten/>

Transmissionswärme  
(Dämmen der Gebäudehülle)

Lüftungswärme (35 bis 38 %)  
(Dichten der Gebäudehülle)

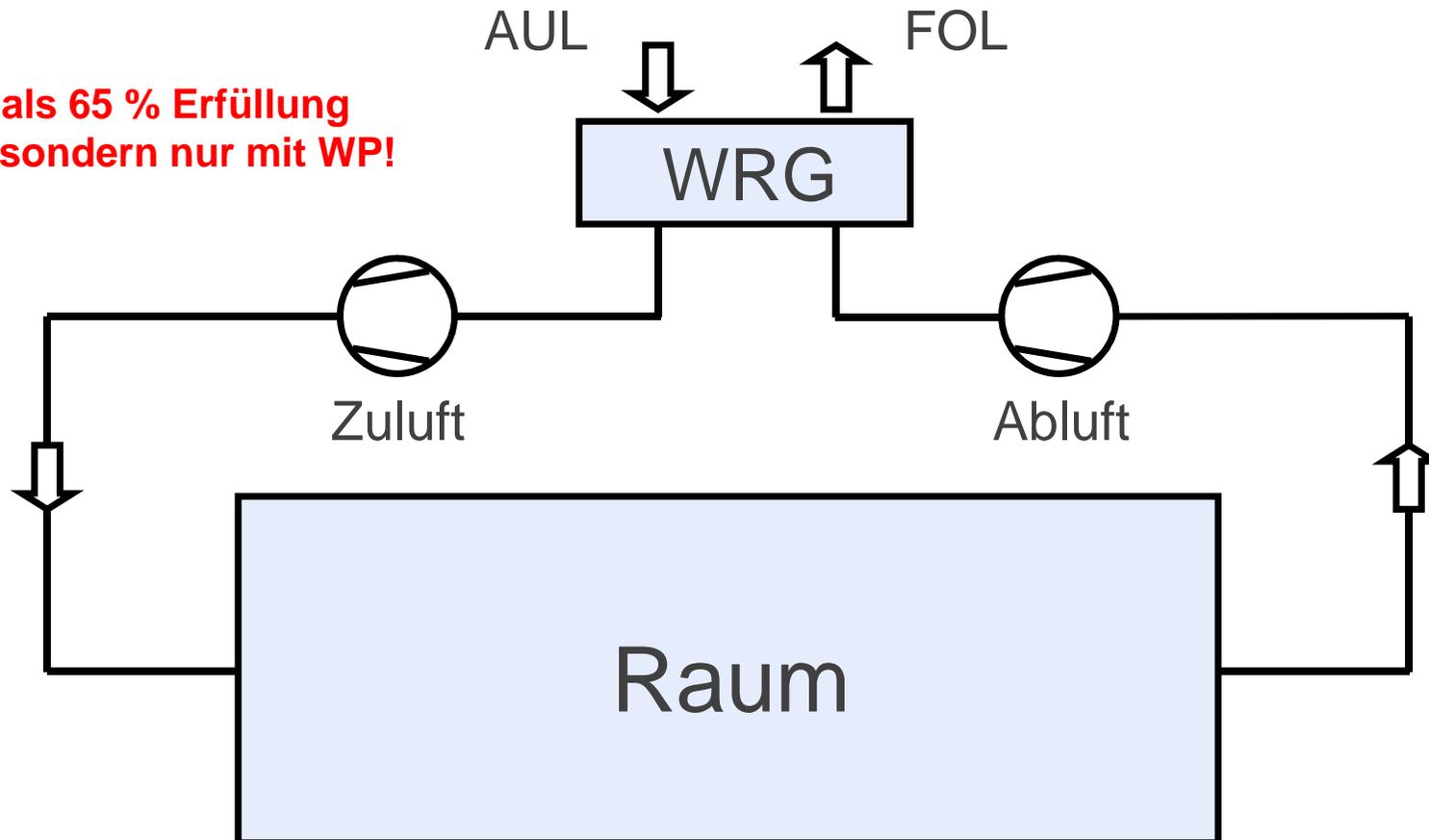


# Raumluftechnik mit WRG

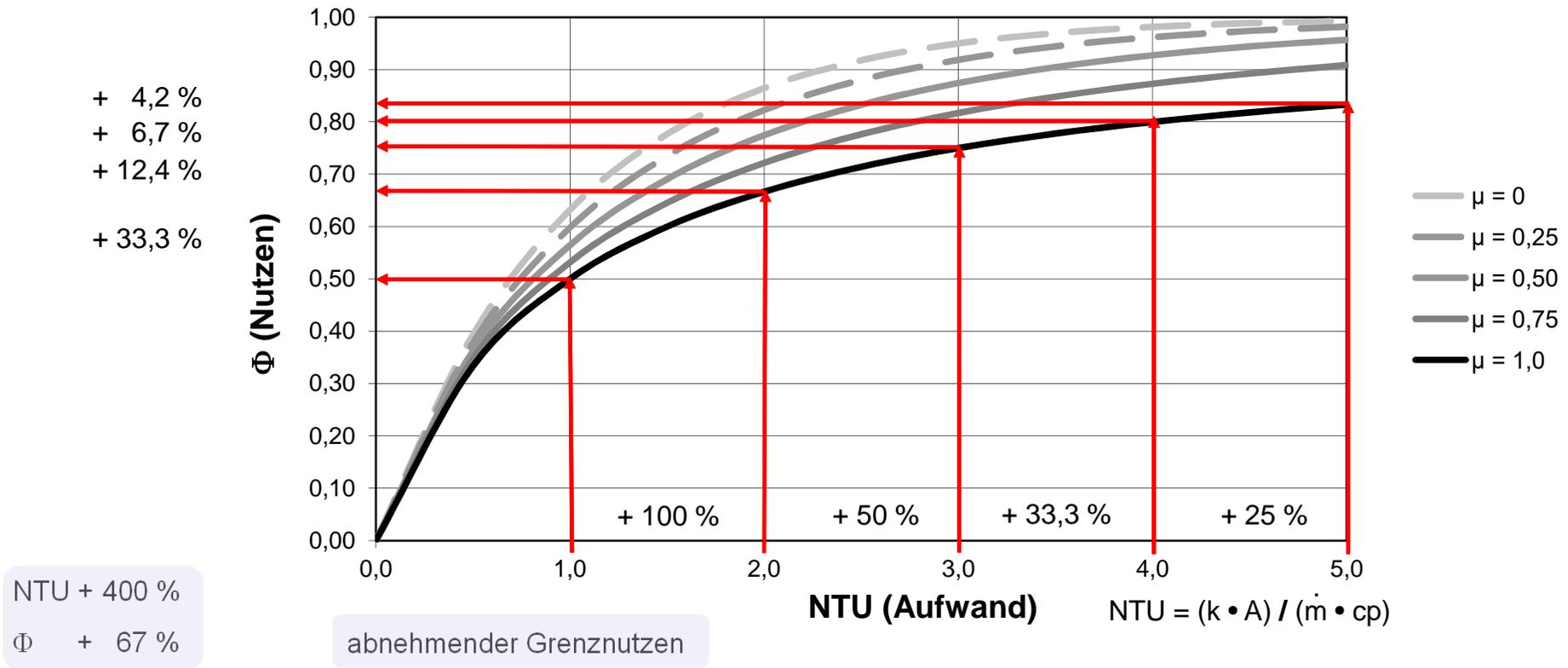


**GEG 2023**

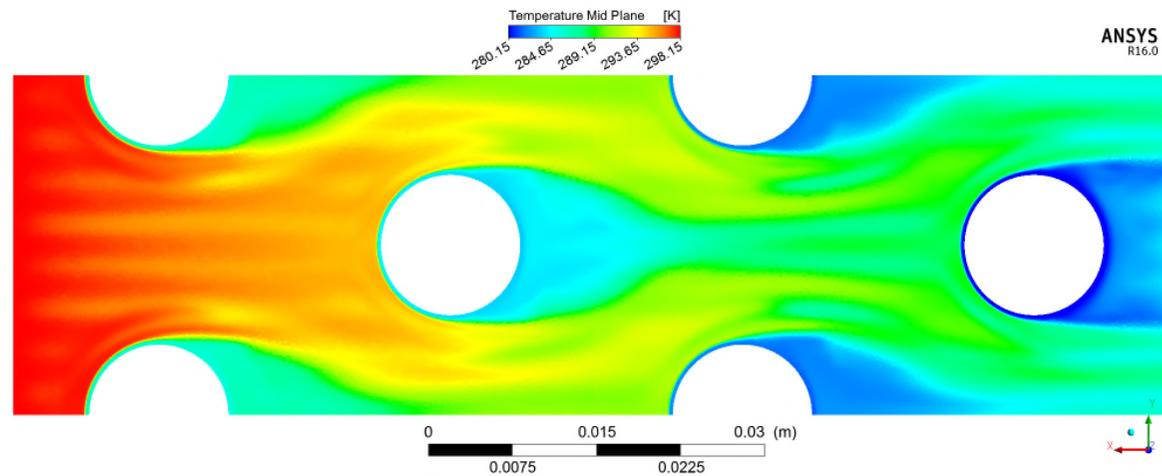
**WRG nicht als 65 % Erfüllung  
anerkannt, sondern nur mit WP!**



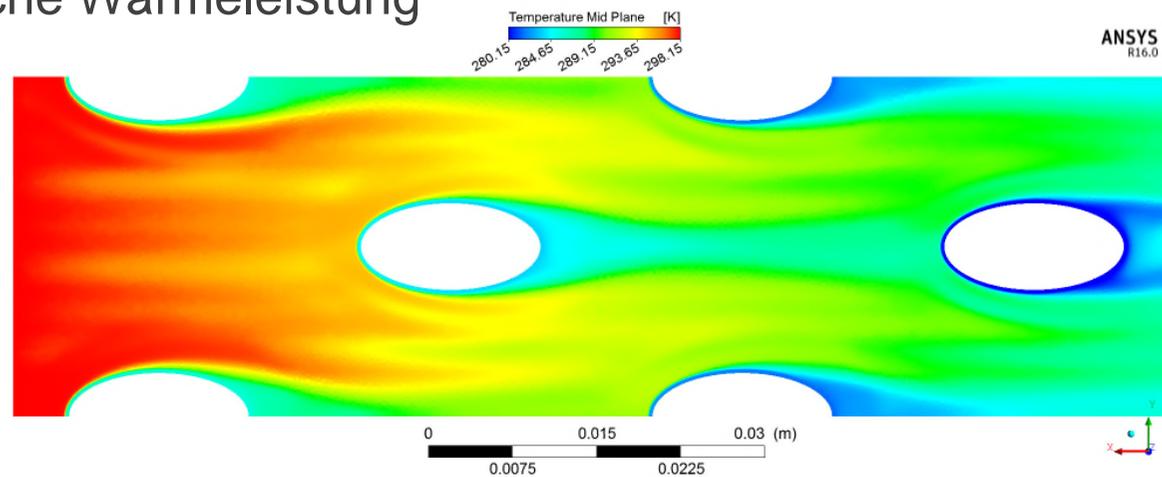
# Effizienz der Wärmeübertragung im Gegenstrom



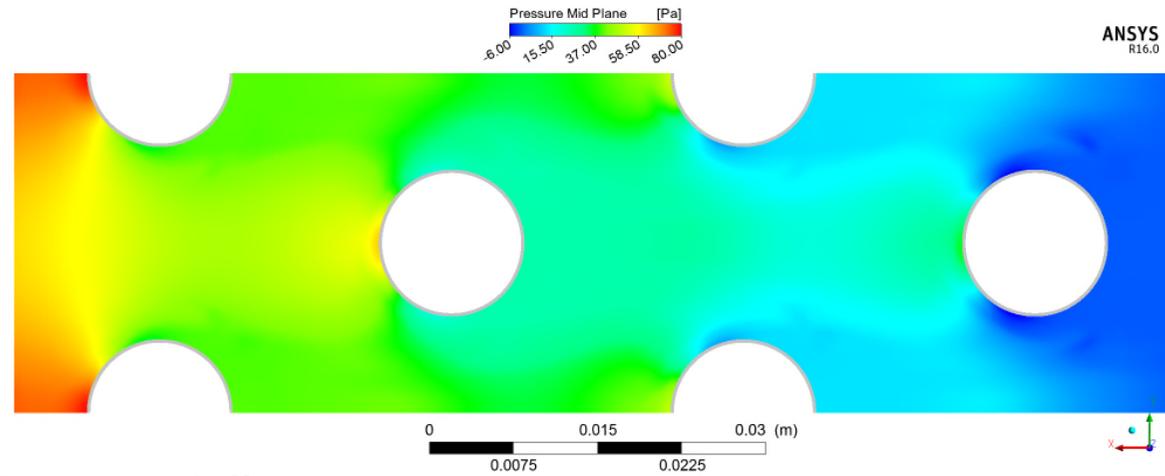
# Effizienzsteigerung der WRG



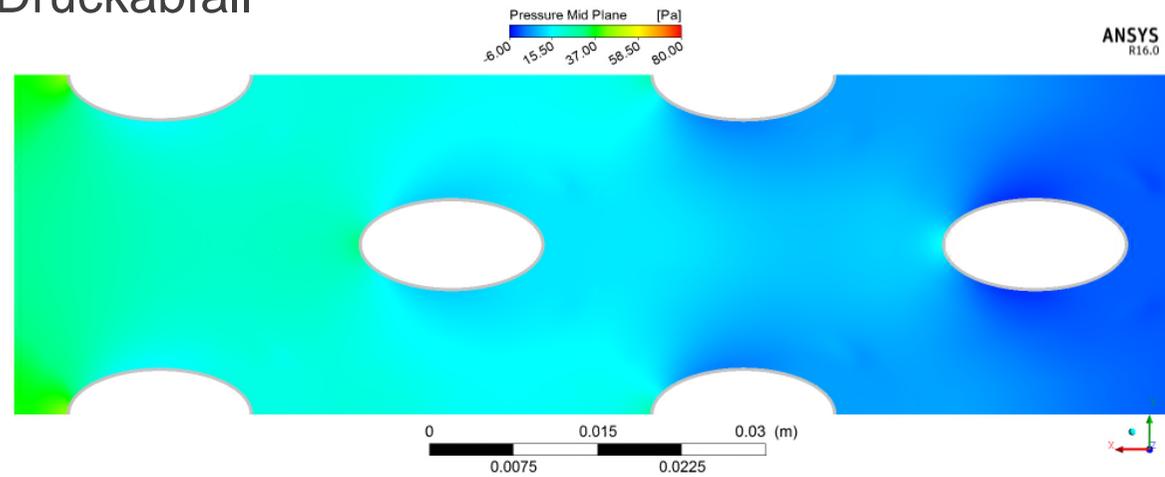
Identische Wärmeleistung



# Effizienzsteigerung der WRG



- 40 % Druckabfall



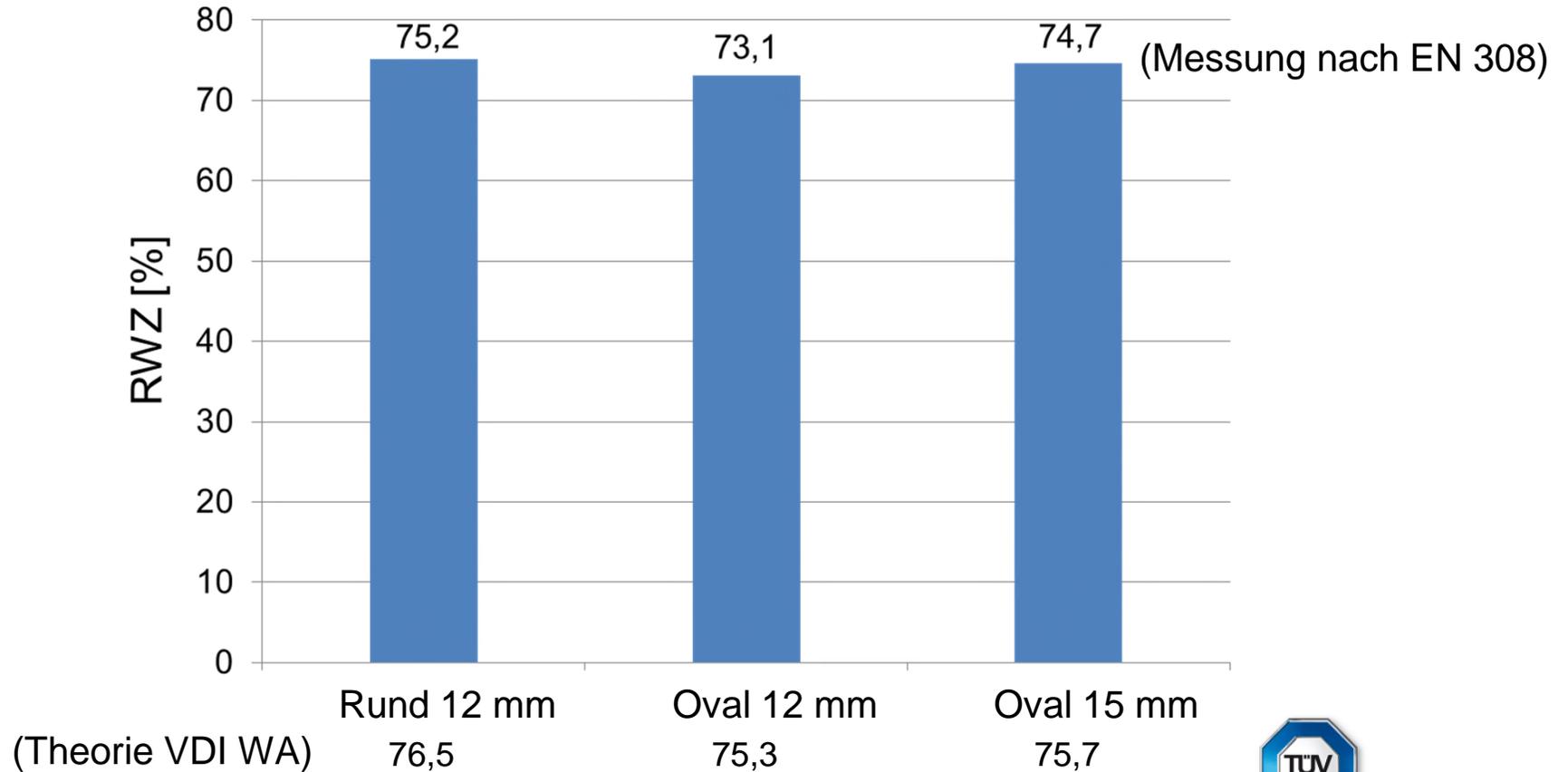


DE 10 2016 105 645 und EP 3 231 524

Flächenvergrößerung  
ohne Druckverlusterhöhung  
~ 20 %



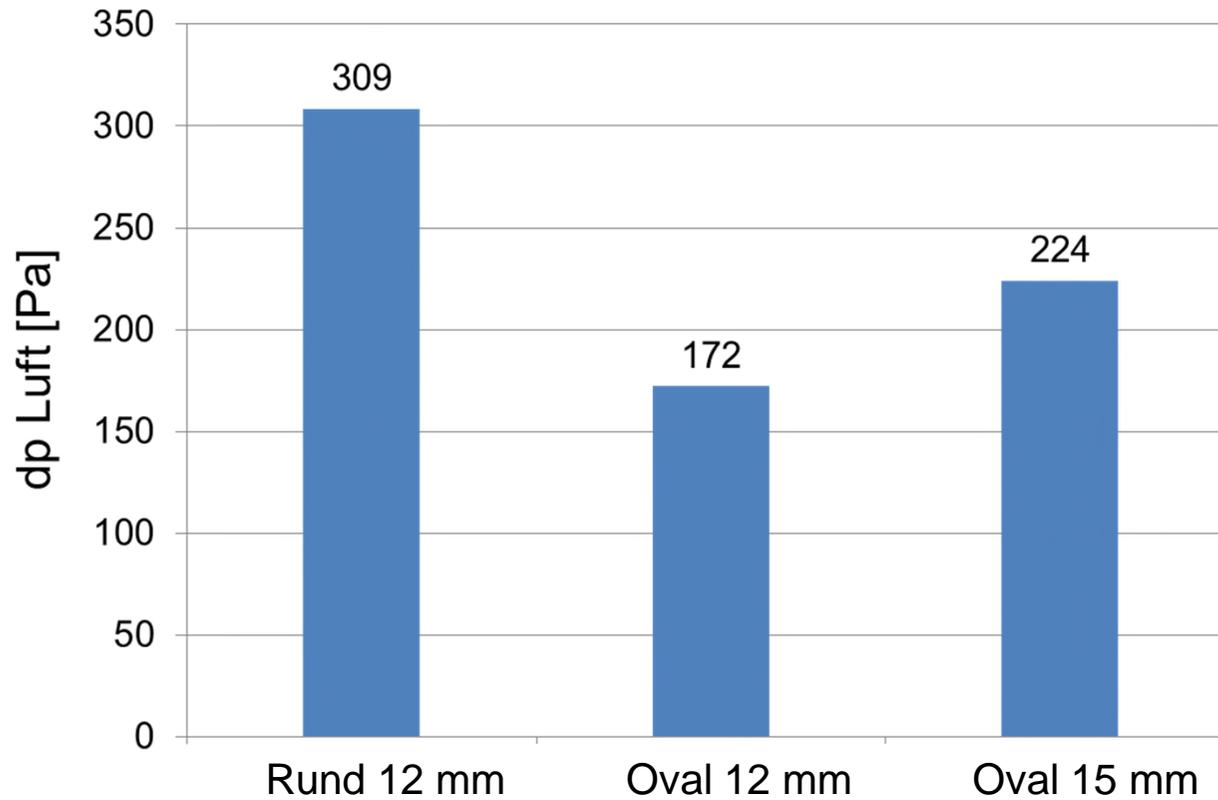
Druckverlustreduktion  
Ovalrohr gegenüber  
Rundrohr ~ 40 %



## Messung TÜV Süd an Baumustern



Industrie Service

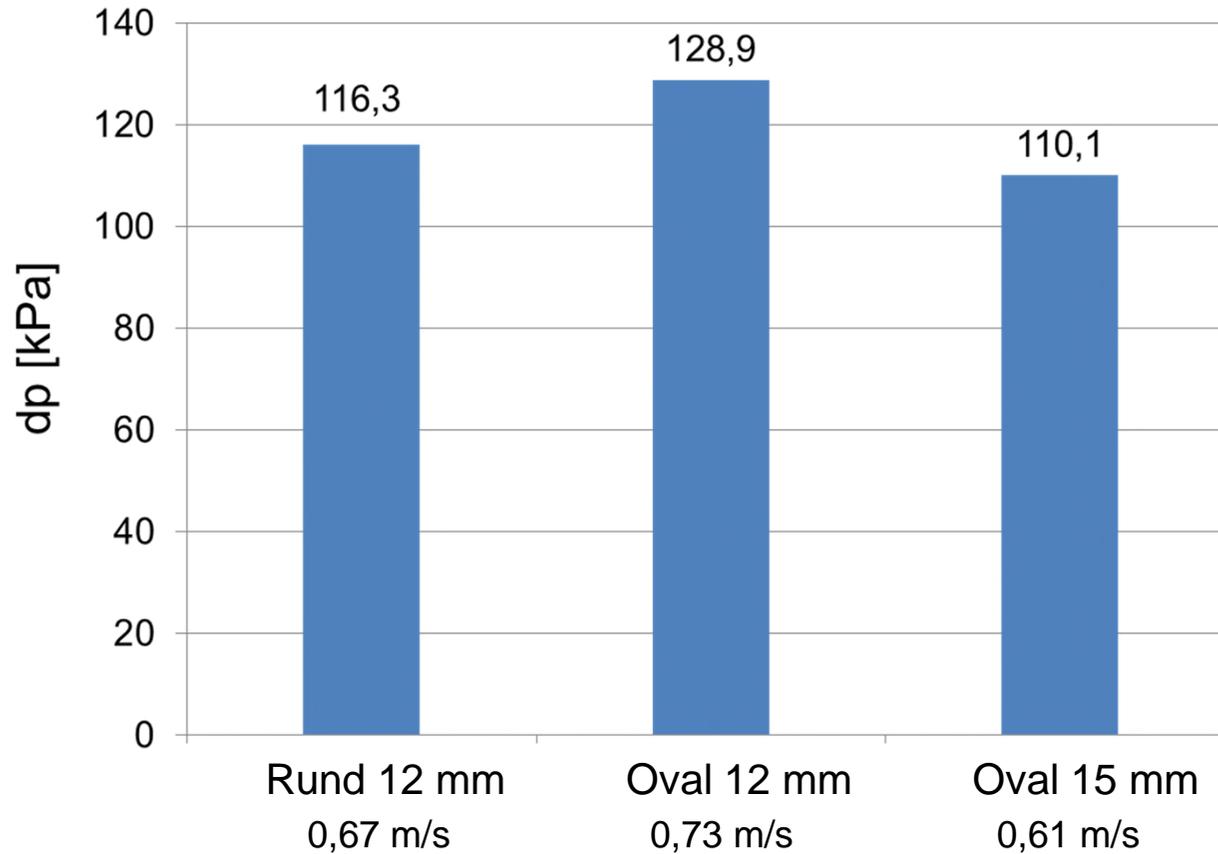


Messung TÜV Süd an Baumustern



Industrie Service

# Leistungsmessung - Medienwiderstand

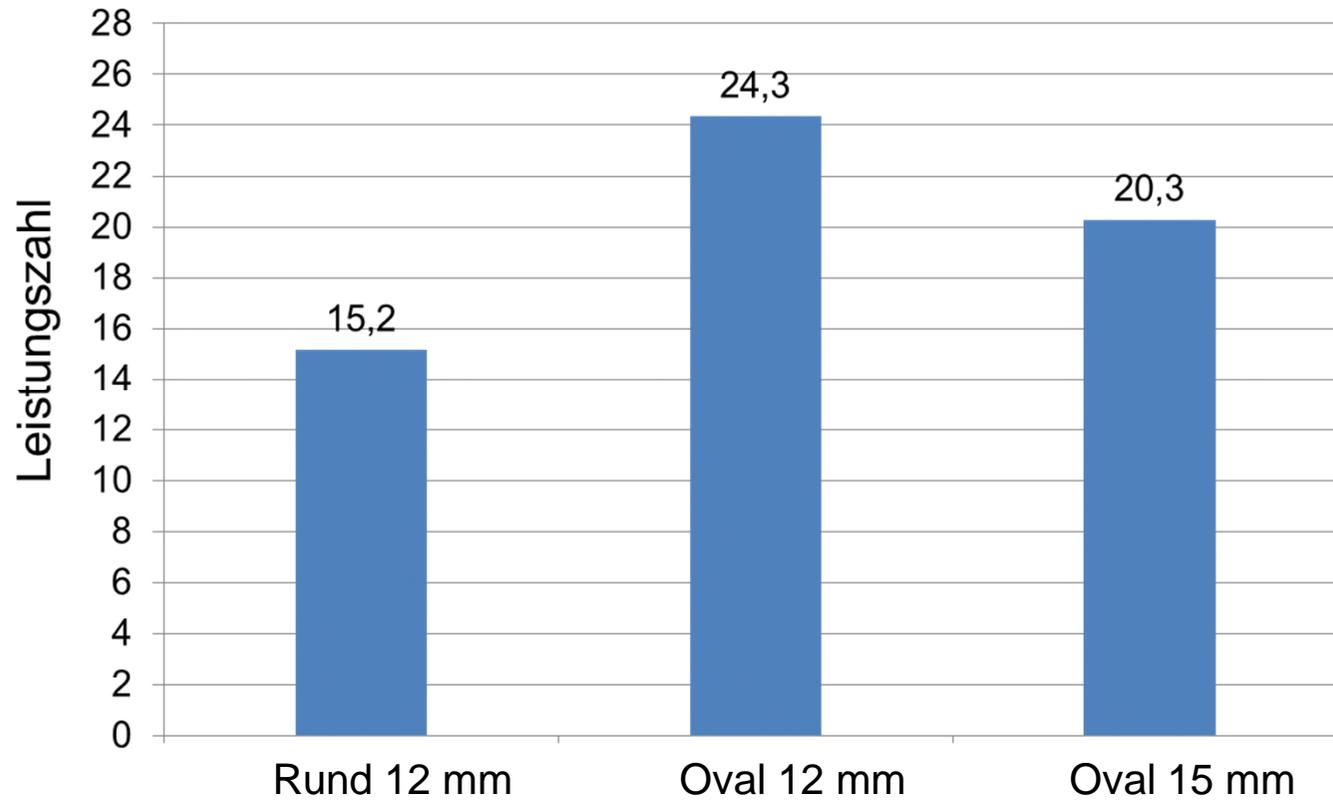


Messung TÜV Süd an Baumustern



Industrie Service

# Leistungsmessung - Leistungszahl $COP_{eq}$ KVS



Messung TÜV Süd an Baumustern



Industrie Service

## Parameter zur Effizienzsteigerung

Möglichst **hoher Übertragungsgrad** (+)

realistisch 70 bis 80 %, theoretisch maximal 100 %

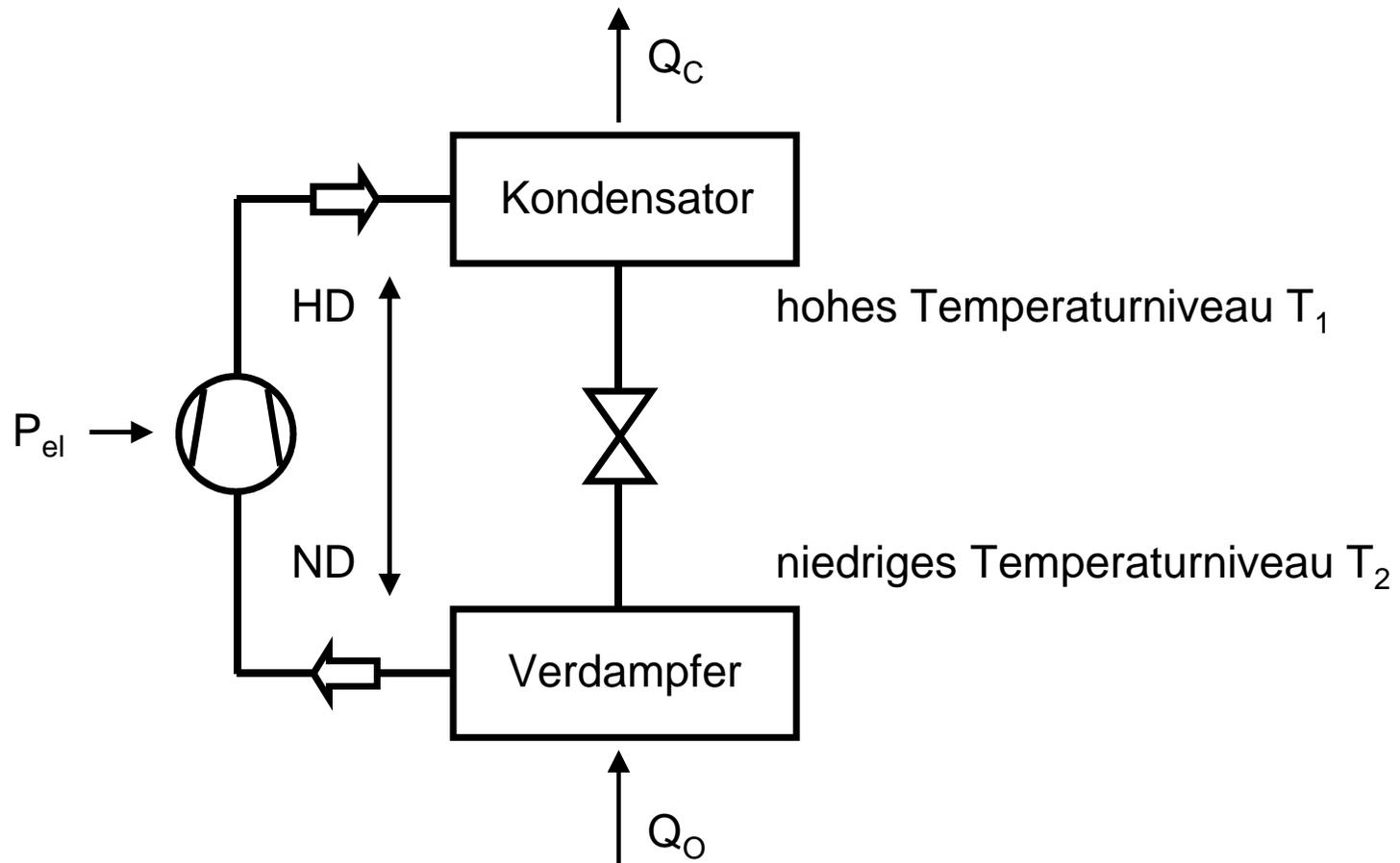
Möglichst **niedriger Druckabfall** (Hilfsenergie) (-)

Verbesserung des  $COP_{eq}$

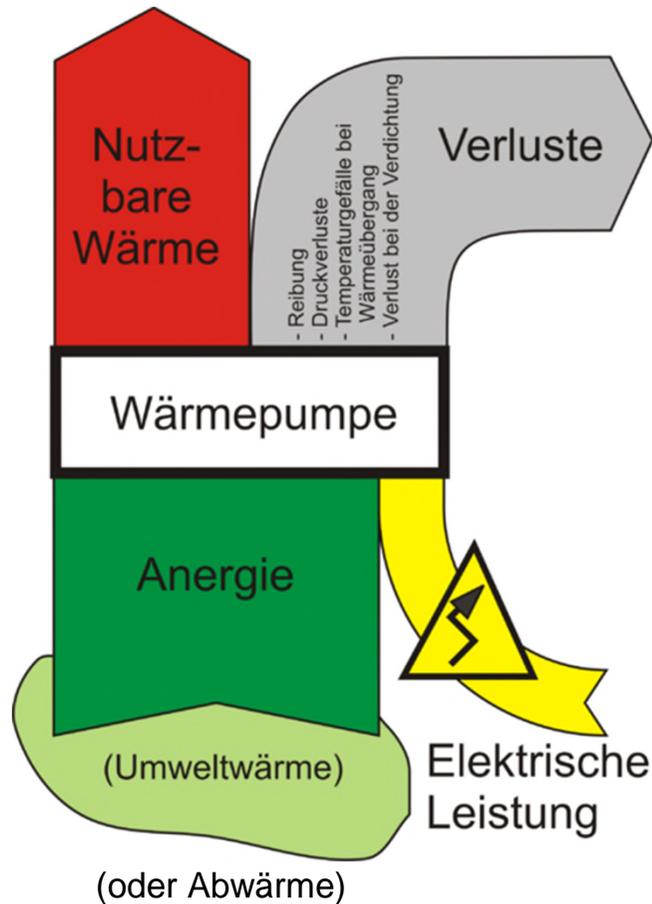
**Effiziente Komponenten** (z. B.  $\eta$  Ventilator) (+)

**Vereisung vermeiden**  $< 0^\circ\text{C}$  (-)

# Kompressionswärmepumpe



# Wärmepumpe Wirkungsgrad nach Carnot



$\phi$  = nutzbare Wärmeenergie /  
aufgenommenen Energie

$$\phi = (T_1 - T_2) / T_1$$

$$\phi = 1 - T_2 / T_1 \quad [T_1 > T_2]$$

$$\varepsilon_C = 1 / \phi = T_1 / (T_1 - T_2)$$

Wirkungsgrad des (reversiblen)  
Carnot'schen Kreisprozesses

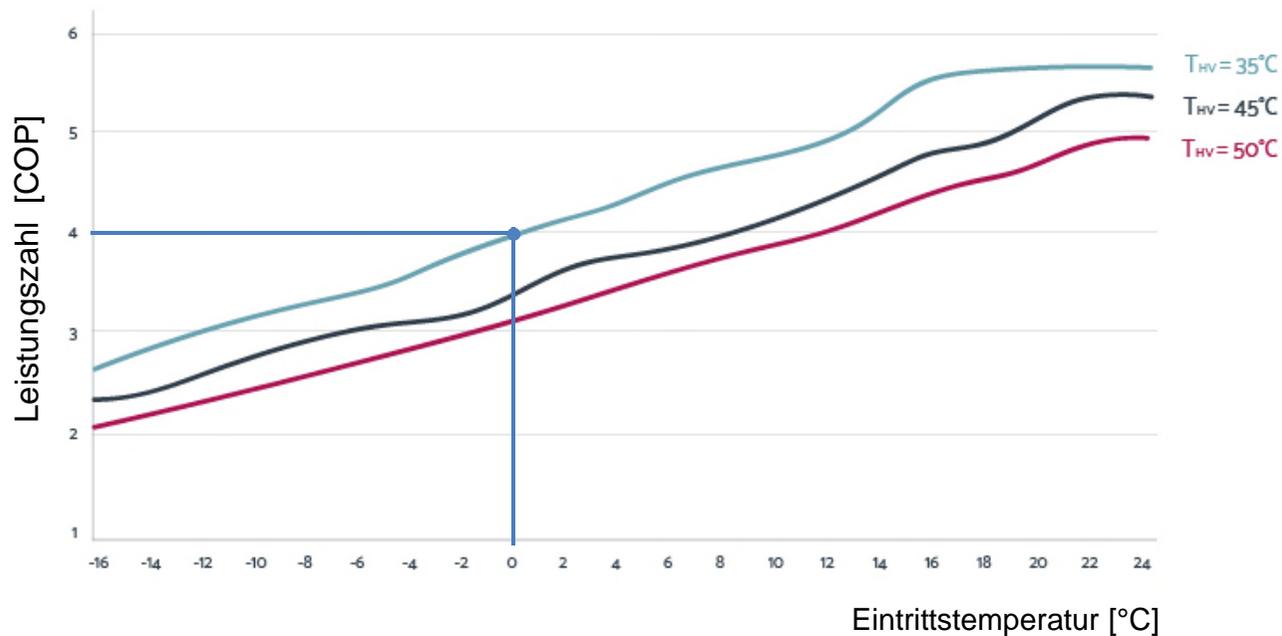
Effektive Leistungsziffer

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_C \cdot \eta$$

$\eta$  Wirkungsgrad der Komponenten

# Wärmepumpe effektive Leistungsziffer COP

Beispielhafter Verlauf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe für verschiedene Lufteintritts- und Vorlauftemperaturen



Beispiel:

Quelltemperatur  $T_2 = 0^\circ\text{C}$

Vorlauf  $T_1 = 35^\circ\text{C}$

**COP  $\epsilon_{\text{eff}} = 4$**

$$\epsilon_C = 308,15 \text{ K} / (35 - 0) \text{ K}$$

$$\epsilon_C = 8,8$$

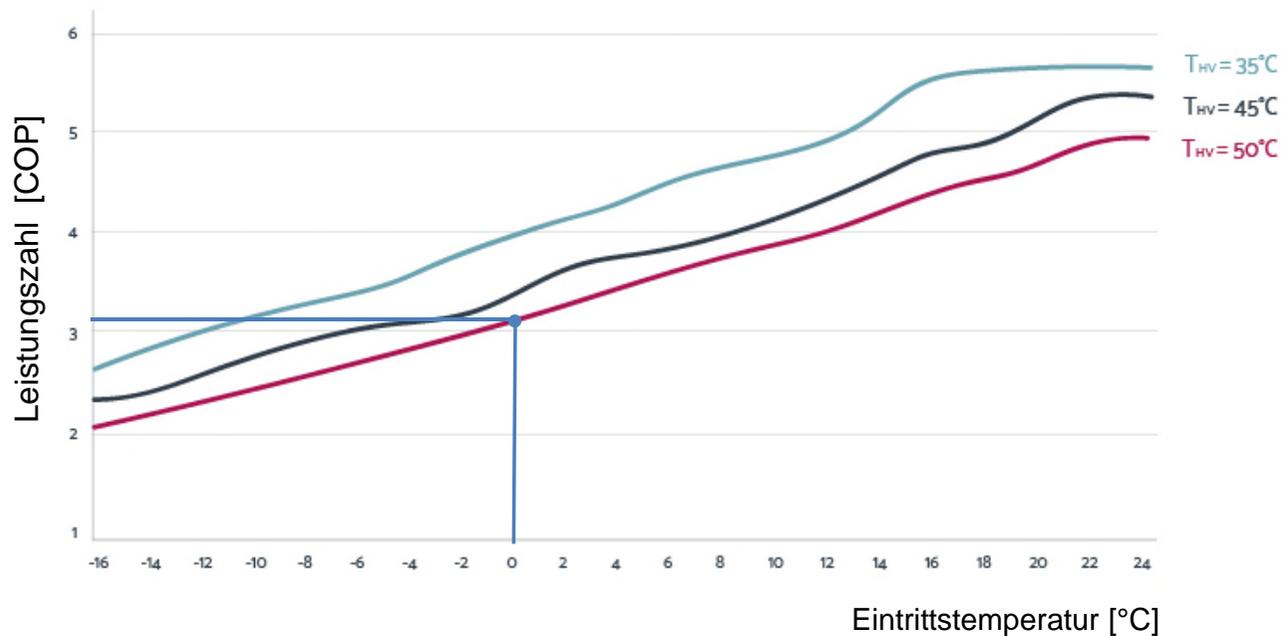
$$\eta = \epsilon_{\text{eff}} / \epsilon_C = 4 / 8,8$$

$$\eta = 45 \%$$

Quelle: <https://www.dein-heizungsbauer.de/ratgeber/energie-sparen/wirkungsgrad-waermepumpe/>

# Wärmepumpe effektive Leistungsziffer COP

Beispielhafter Verlauf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe für verschiedene Lufteintritts- und Vorlauftemperaturen



Beispiel:

Quelltemperatur  $T_2 = 0^{\circ}\text{C}$

Vorlauf  $T_1 = 50^{\circ}\text{C}$

**COP  $\epsilon_{\text{eff}} = 3,1$**

$$\epsilon_C = 323,15 \text{ K} / (50 - 0) \text{ K}$$

$$\epsilon_C = 6,5$$

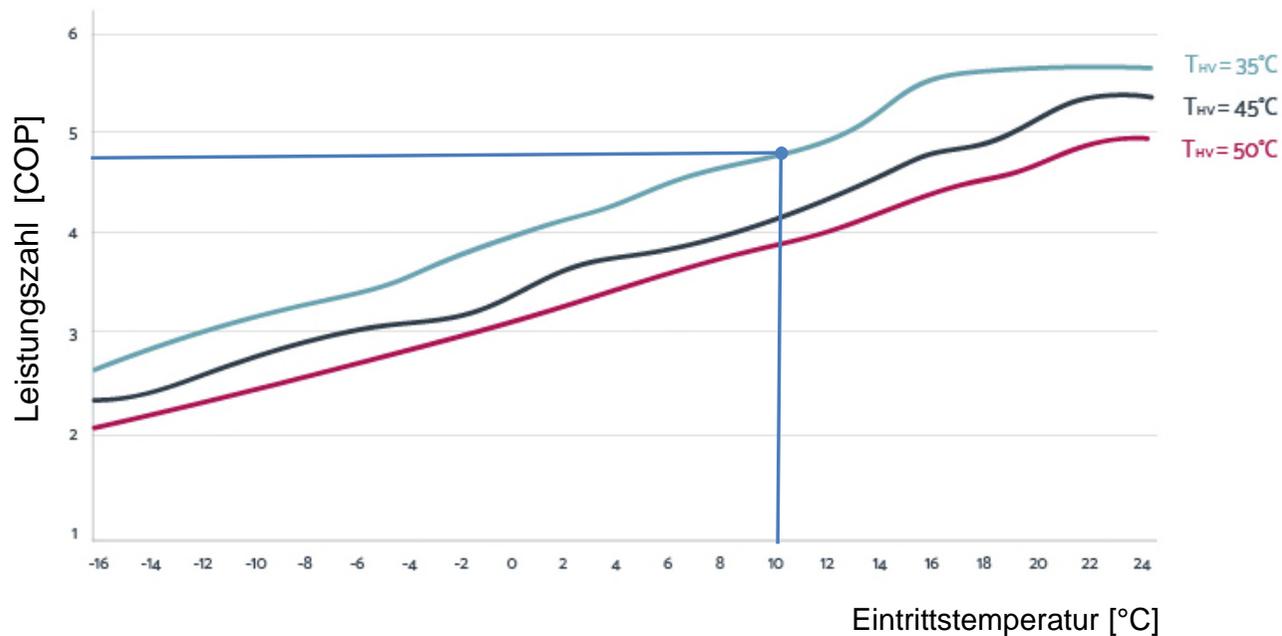
$$\eta = \epsilon_{\text{eff}} / \epsilon_C = 3,1 / 6,5$$

$$\eta = 48 \%$$

Quelle: <https://www.dein-heizungsbauer.de/ratgeber/energie-sparen/wirkungsgrad-waermepumpe/>

# Wärmepumpe effektive Leistungsziffer COP

Beispielhafter Verlauf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe für verschiedene Lufteintritts- und Vorlauftemperaturen



Beispiel:

Quelltemperatur  $T_2 = 10 \text{ °C}$

Vorlauf  $T_1 = 35 \text{ °C}$

COP  $\epsilon_{\text{eff}} = 4,8$

$\epsilon_C = 308,15 \text{ K} / (35 - 10) \text{ K}$

$\epsilon_C = 12,3$

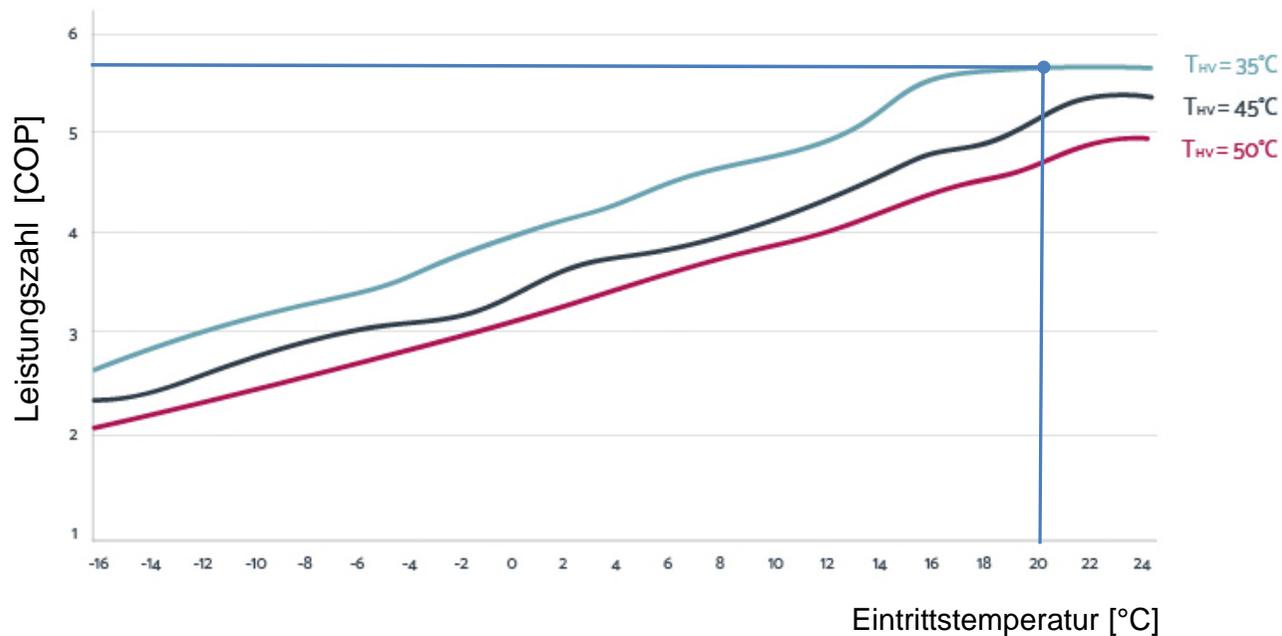
$\eta = \epsilon_{\text{eff}} / \epsilon_C = 4,8 / 12,3$

**$\eta = 39 \%$**

Quelle: <https://www.dein-heizungsbauer.de/ratgeber/energie-sparen/wirkungsgrad-waermepumpe/>

# Wärmepumpe effektive Leistungsziffer COP

Beispielhafter Verlauf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe für verschiedene Lufteintritts- und Vorlauftemperaturen



Beispiel:

Quelltemperatur  $T_2 = 20 \text{ °C}$

Vorlauf  $T_1 = 35 \text{ °C}$

COP  $\epsilon_{\text{eff}} = 5,7$

$\epsilon_C = 308,15 \text{ K} / (35 - 20) \text{ K}$

$\epsilon_C = 20,5$

$\eta = \epsilon_{\text{eff}} / \epsilon_C = 5,7 / 20,5$

**$\eta = 28 \%$**

Quelle: <https://www.dein-heizungsbauer.de/ratgeber/energie-sparen/wirkungsgrad-waermepumpe/>

## Parameter zur Effizienzsteigerung

Möglichst **hohe Temperatur  $T_2$  der Quelle (+)**

Möglichst **niedrige (Vorlauf-) Zulufttemperatur  $T_1$  (Wärmesenke) (+)**

Verbesserung des Carnot-Wirkungsgrades

**Effiziente Komponenten** (z. B.  $\eta$  Verdichter) (+)

**Druckverluste** (Hilfsenergie) im Kältekreis **reduzieren** (+)

**Vereisung vermeiden**  $< 0^\circ\text{C}$  (-)

**Taktung vermeiden** (z. B. mehrstufige KM) (-)

Economizer, Dampfeinspritzung & Drehzahlregelung im Teillastbetrieb (+)

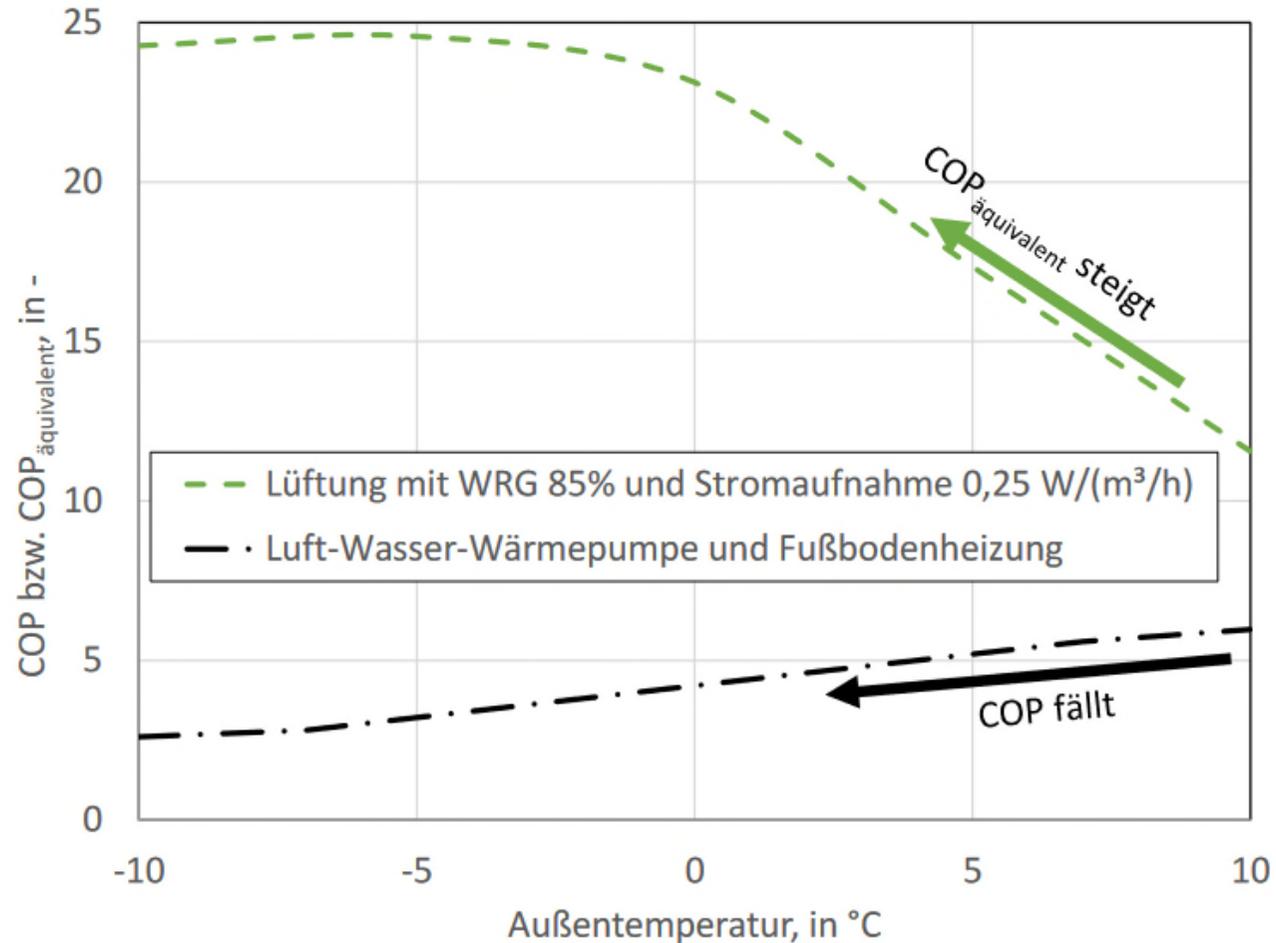
# Wärmepumpen versus WRG

COP der WRG

10 bis 25

COP der WP

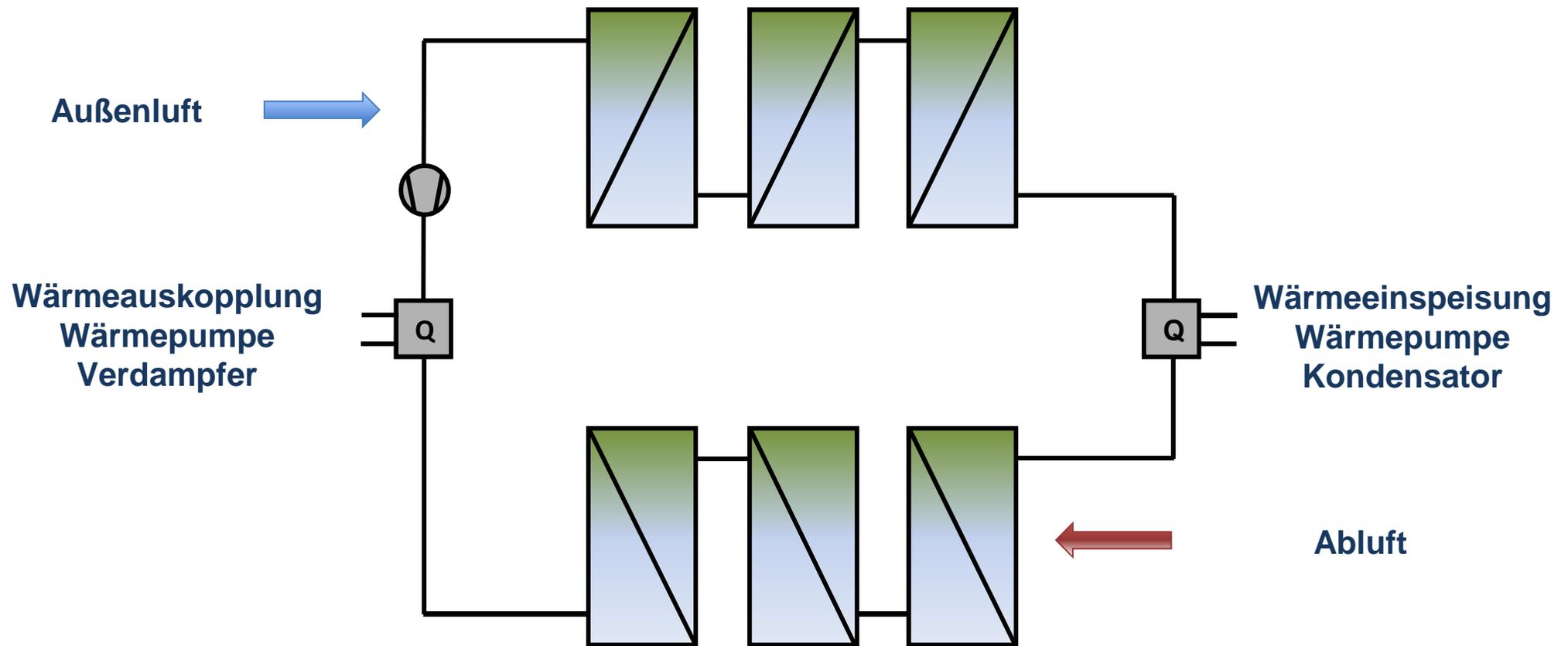
3 bis 5



Quelle: Hartmann, T., 2021 Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung als nachhaltige Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele (COP-Äquivalenzstudie) – Kurzstudie mit Validierung aus der Praxis

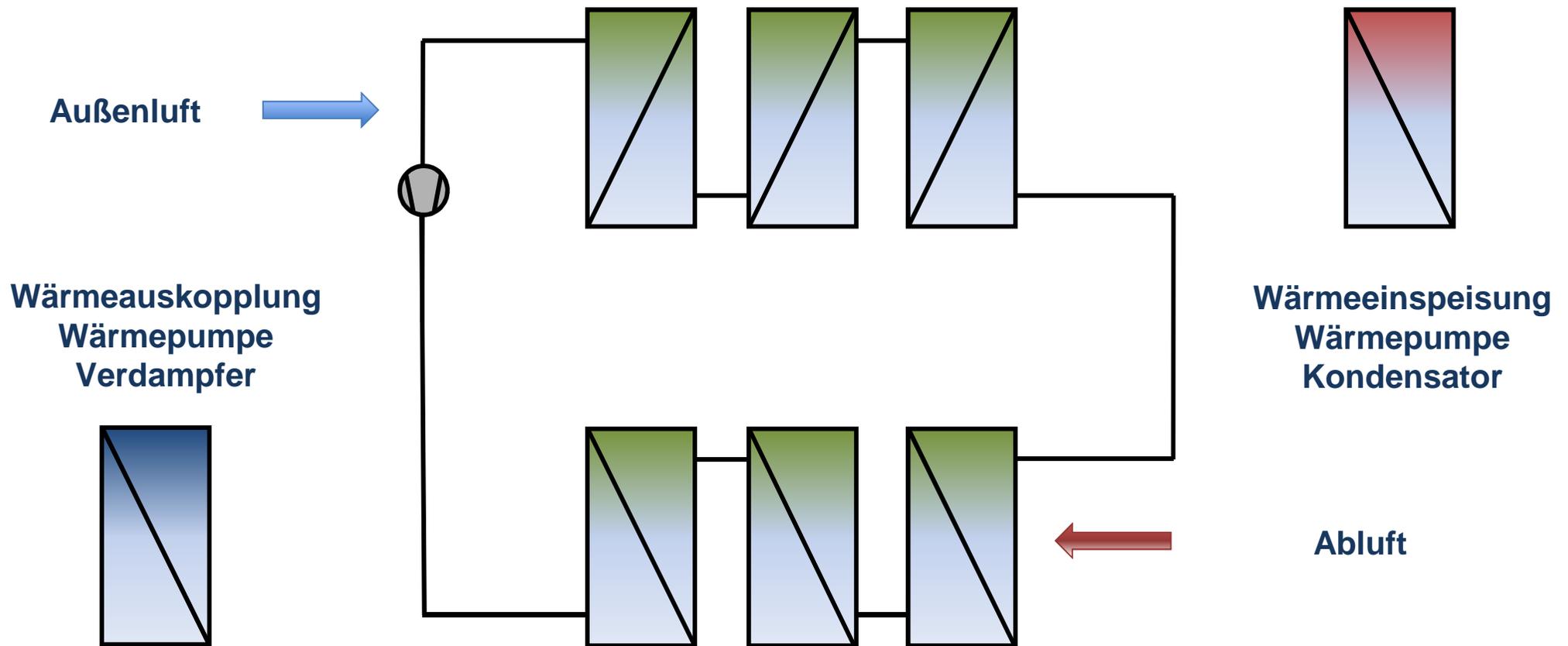
# Integrierter Wärmepumpenbetrieb in der WRG

## Wärmerückgewinnung

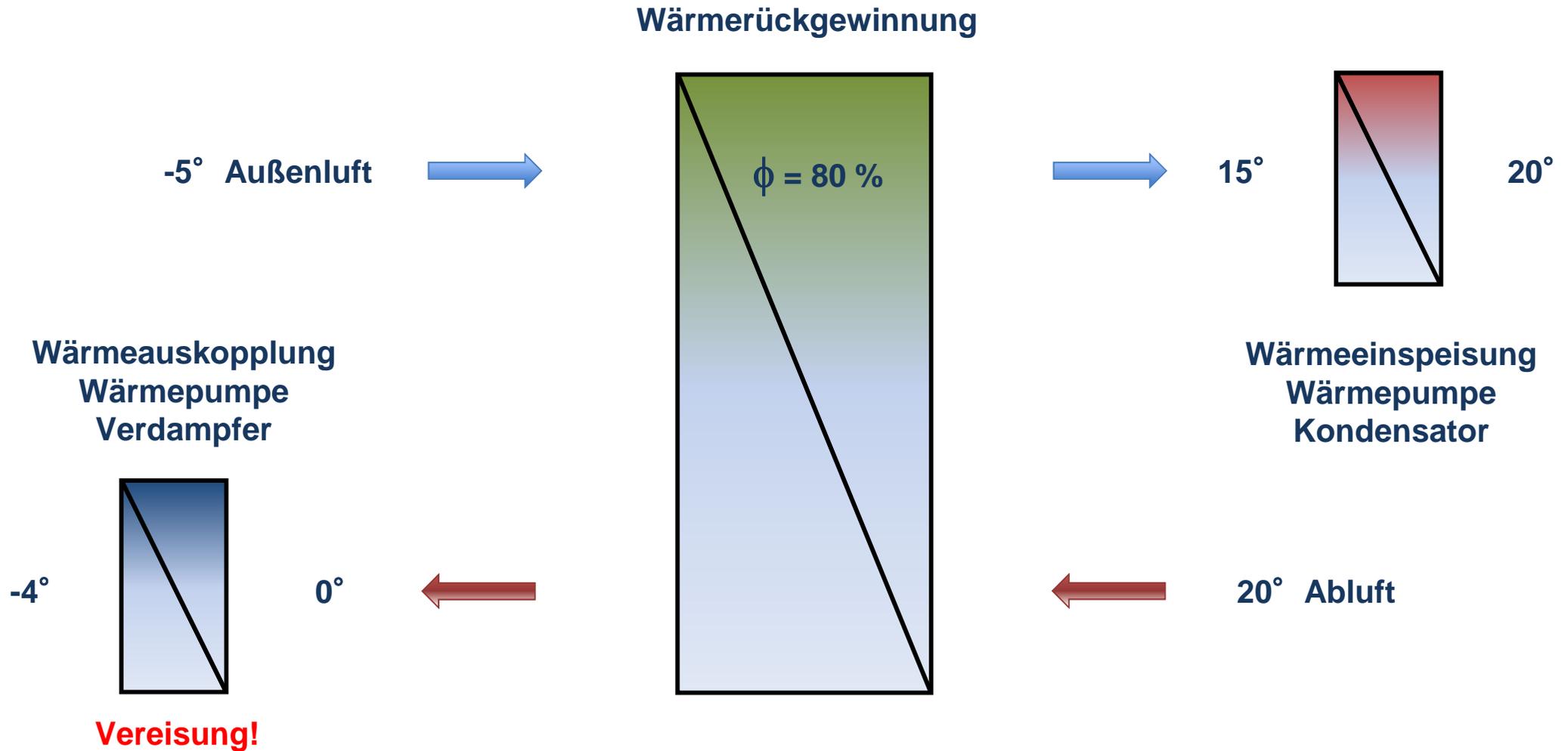


# Wärmepumpe im RLT-Gerät mit WRG

## Wärmerückgewinnung



# Wärmepumpe im RLT-Gerät mit WRG



# Wärmepumpe im RLT-Gerät ohne WRG

5 fache Leistung nötig aber höheres  
Temperaturniveau (> COP)

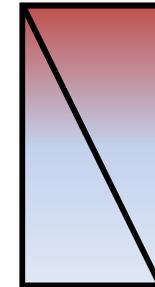
=> etwa Faktor 3 höherer  
Elektroenergiebedarf

-5° Außenluft

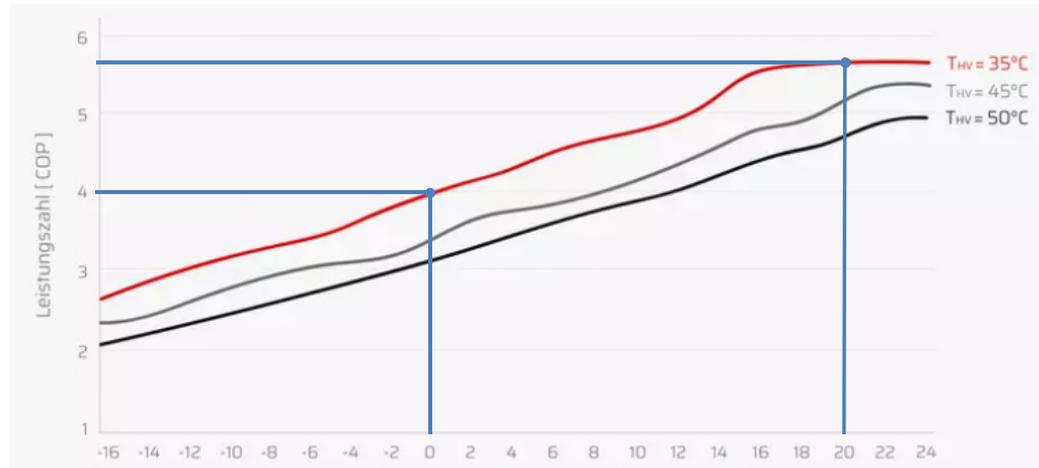


-5°

20°



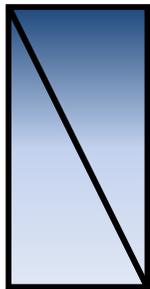
Wärmeeinspeisung  
Wärmepumpe  
Kondensator



20° Abluft



Wärmeauskopplung  
Wärmepumpe  
Verdampfer



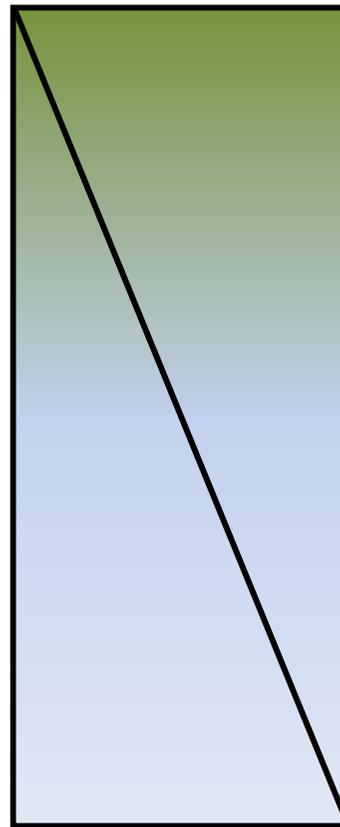
1°

20°

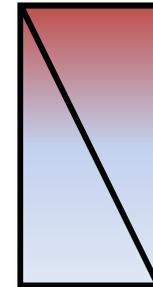
# Wärmepumpe im RLT-Gerät nach der WRG

## Wärmerückgewinnung

Wärmeauskopplung  
Wärmepumpe  
Verdampfer

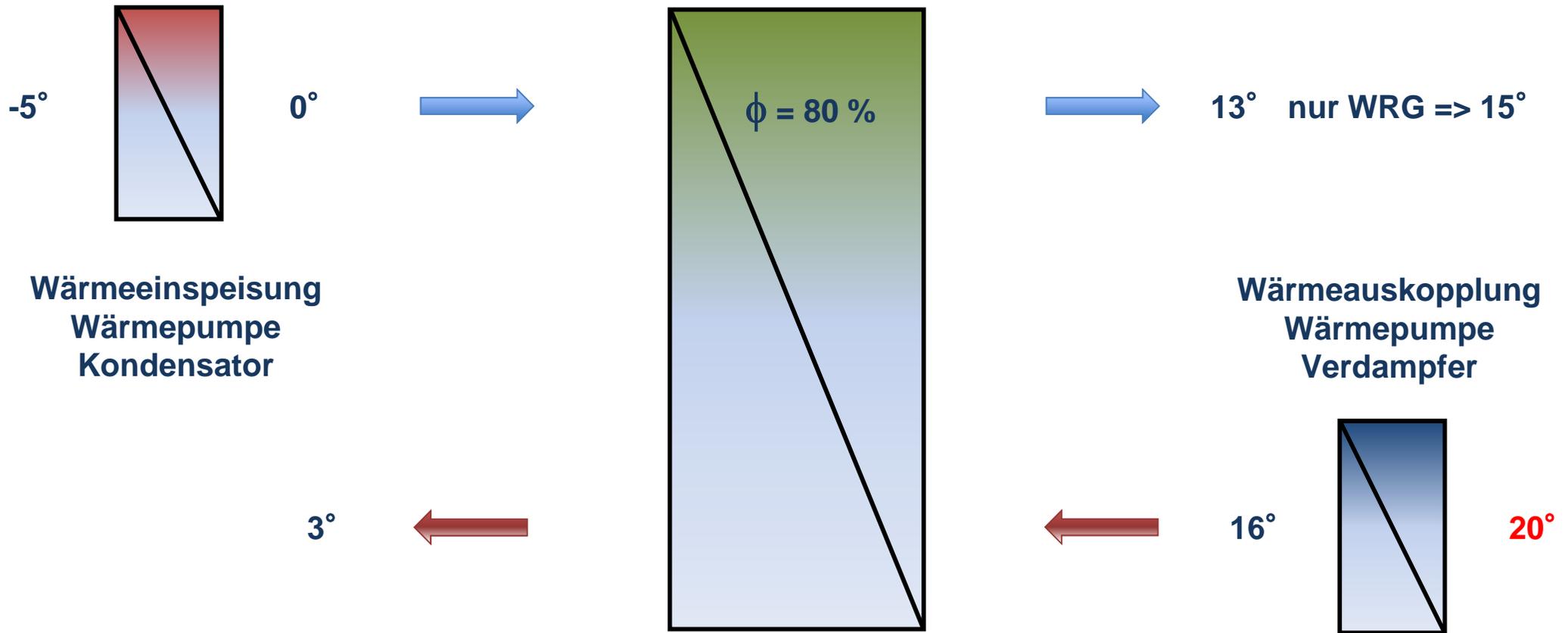


Wärmeeinspeisung  
Wärmepumpe  
Kondensator



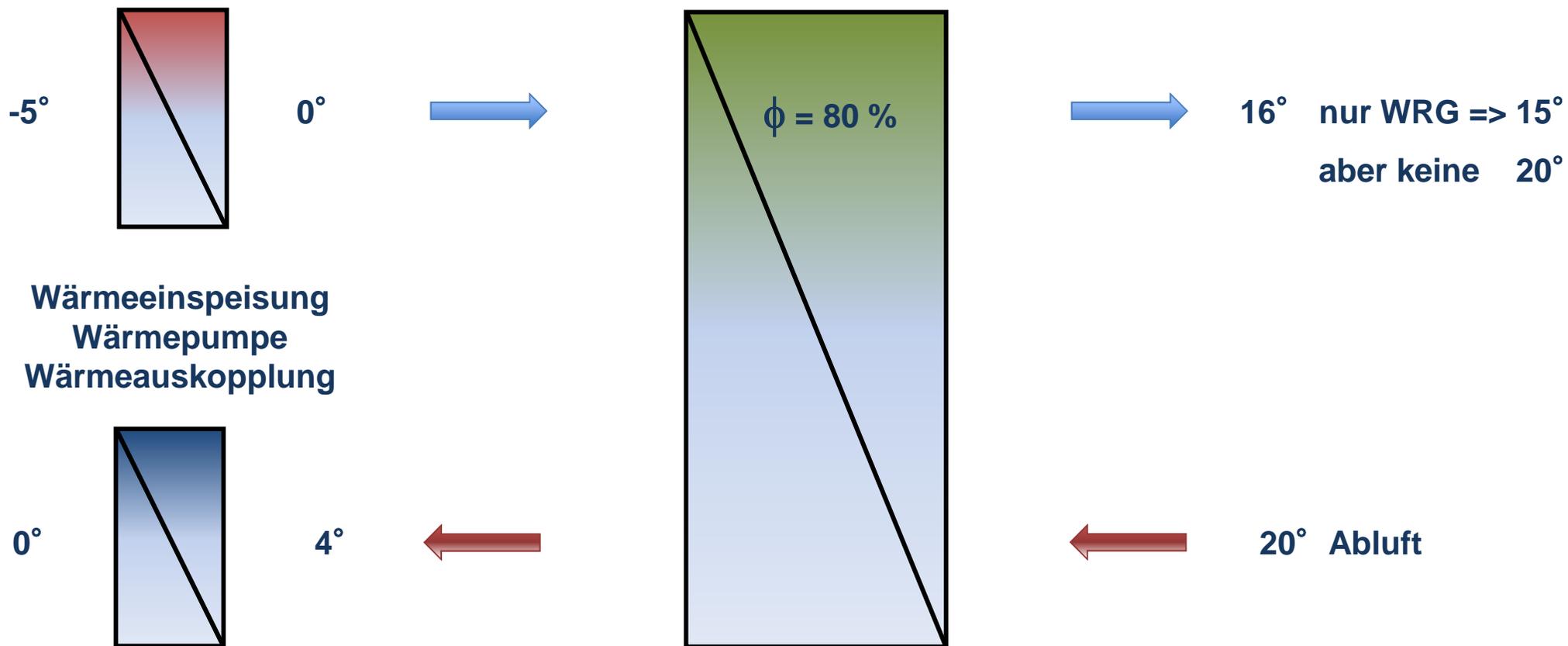
# Wärmepumpe im RLT-Gerät vor der WRG

## Wärmerückgewinnung

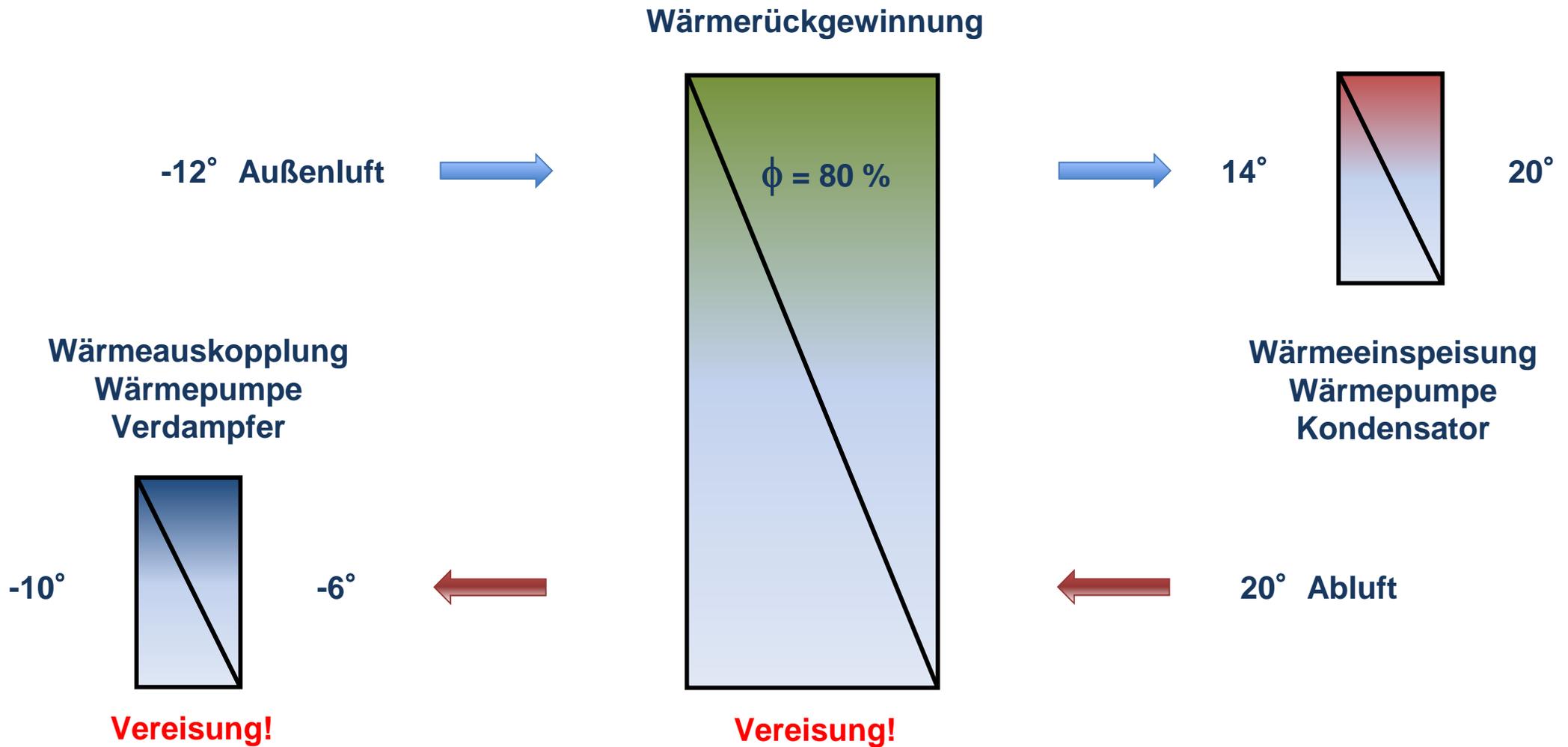


# Wärmeeinspeisung im RLT-Gerät vor der WRG

## Wärmerückgewinnung

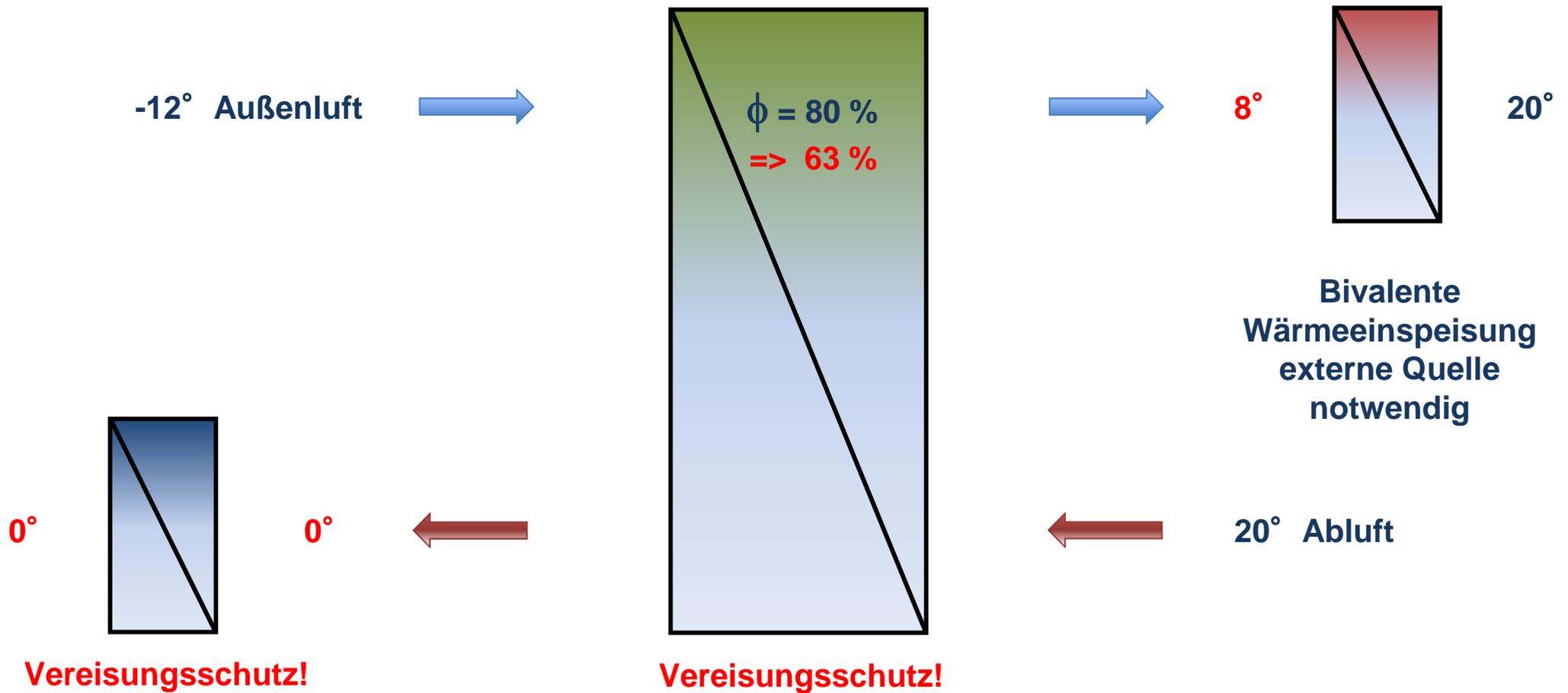


# Wärmepumpe im RLT-Gerät mit WRG - Extremfall



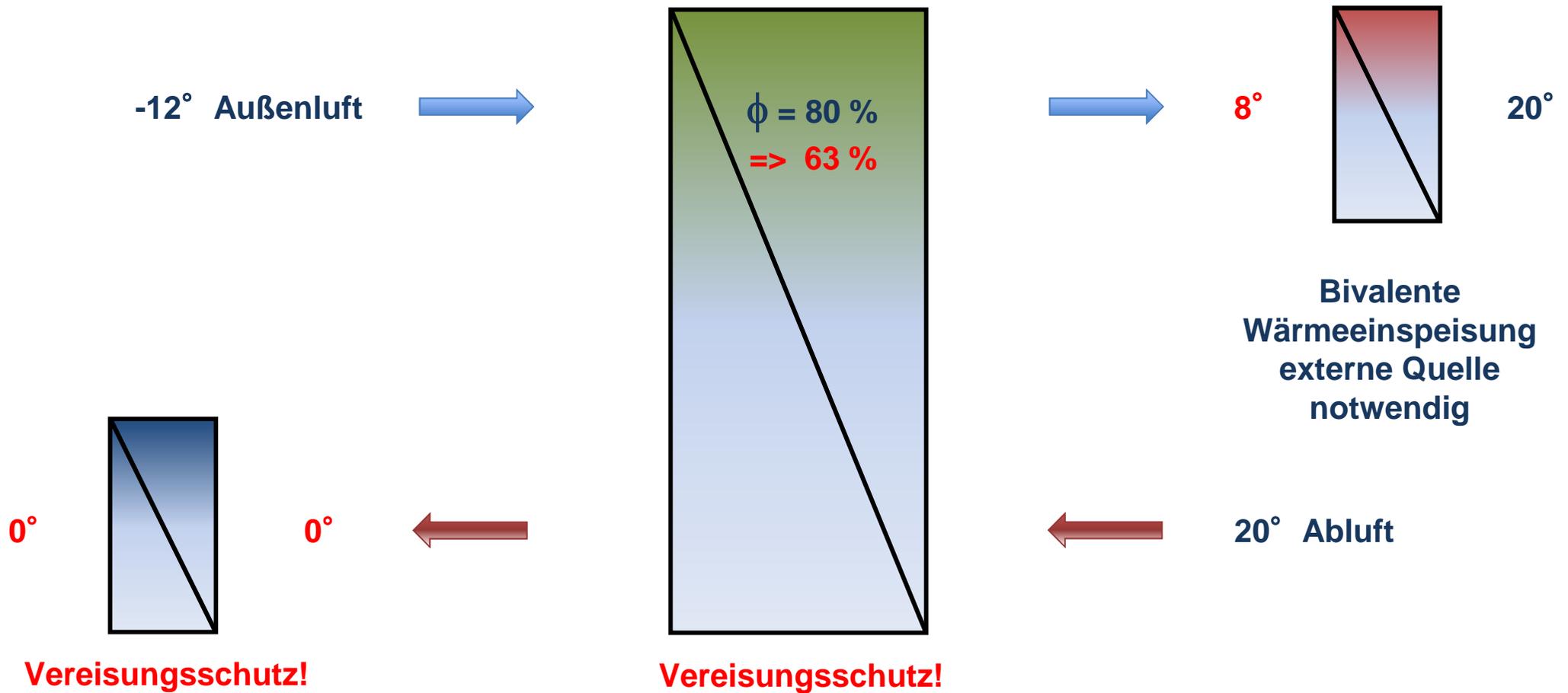
# Wärmepumpe im RLT-Gerät mit WRG - Bivalenz

## Wärmerückgewinnung



# Wärmepumpe im RLT-Gerät mit WRG - Bivalenz

## Wärmerückgewinnung



# Wärmepumpe im RLT-Gerät mit WRG - Enteisung

## Wärmerückgewinnung

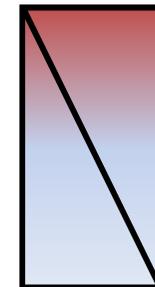
-12° Außenluft



$\phi = 80\%$   
 $\Rightarrow 63\%$



8°



20°

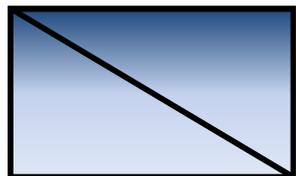
hohe Wärmeeinspeisung  
geteilter Verdampfer mit  
Abtauschaltung  
Zusatzwärme notwendig!

20° Abluft



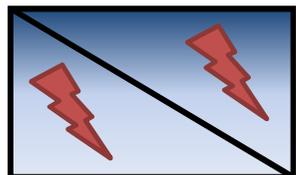
Vereisungsschutz!

Vereisung!



-10°

0°

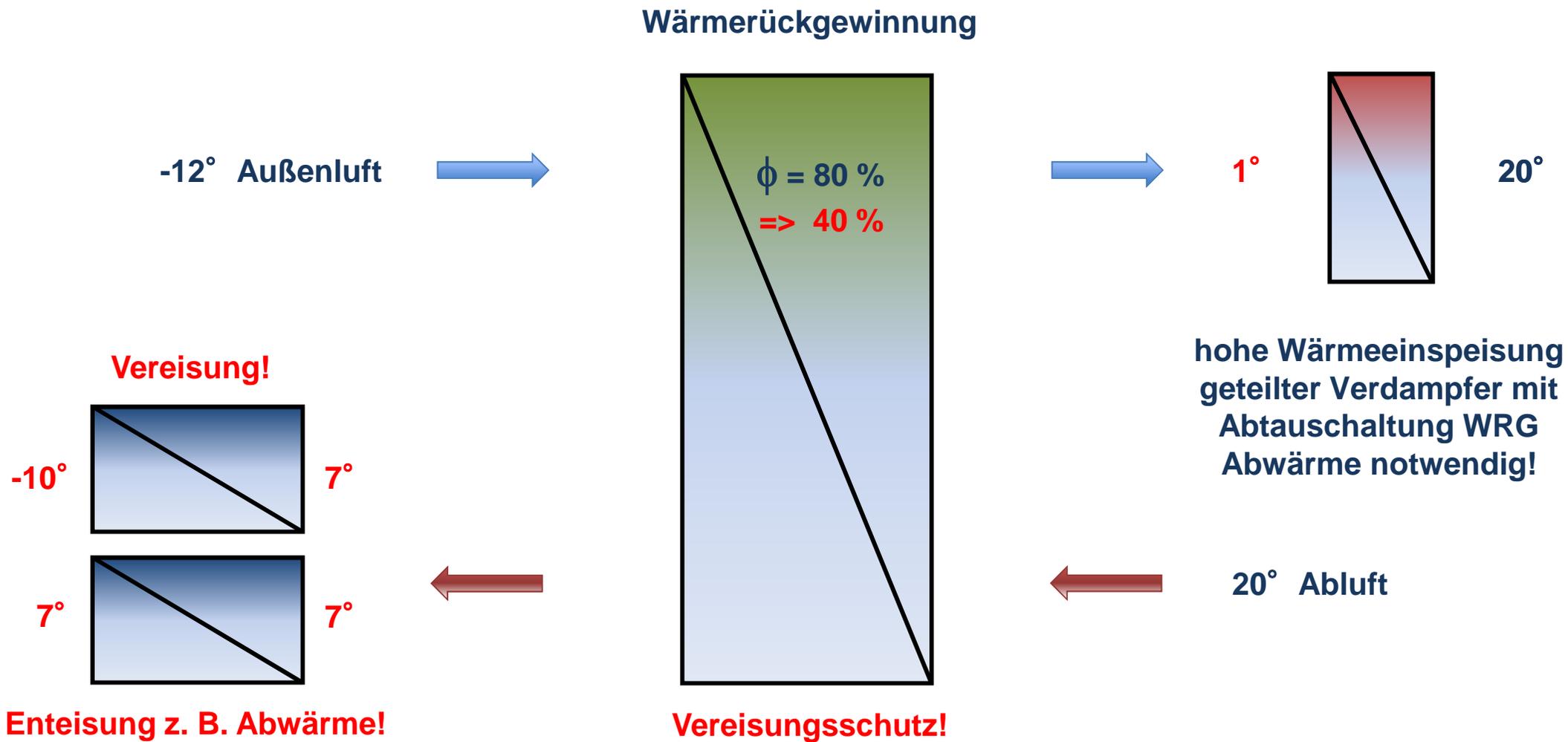


0°

0°

Enteisung!

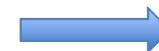
# Wärmepumpe im RLT-Gerät mit WRG - Enteisung



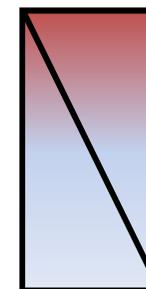
# Wärmepumpe im RLT-Gerät ohne WRG - Extremfall

Auch ohne WRG droht Vereisung

-12° Außenluft

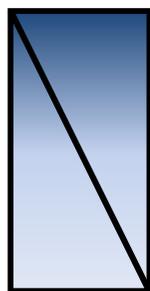


-12°



20°

Wärmeauskopplung  
Wärmepumpe  
Verdampfer



-5°

20°

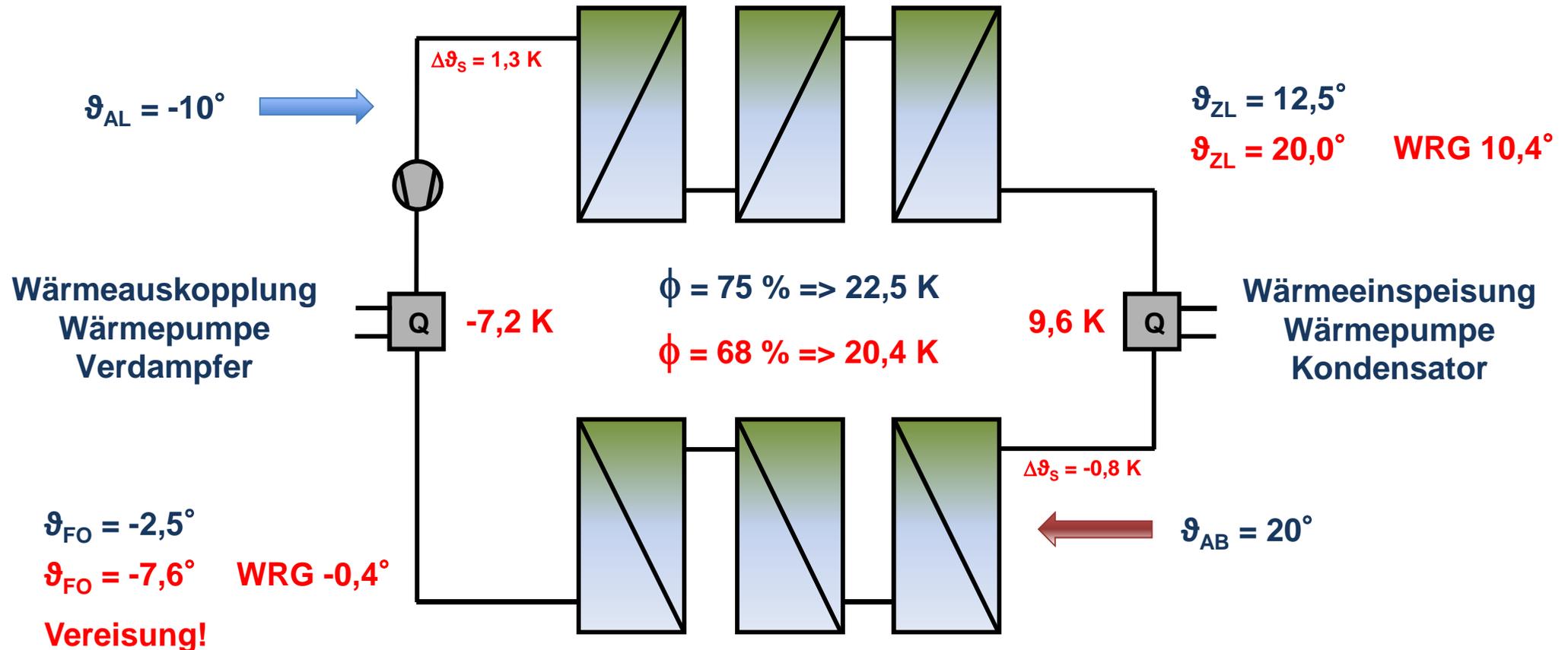


20° Abluft

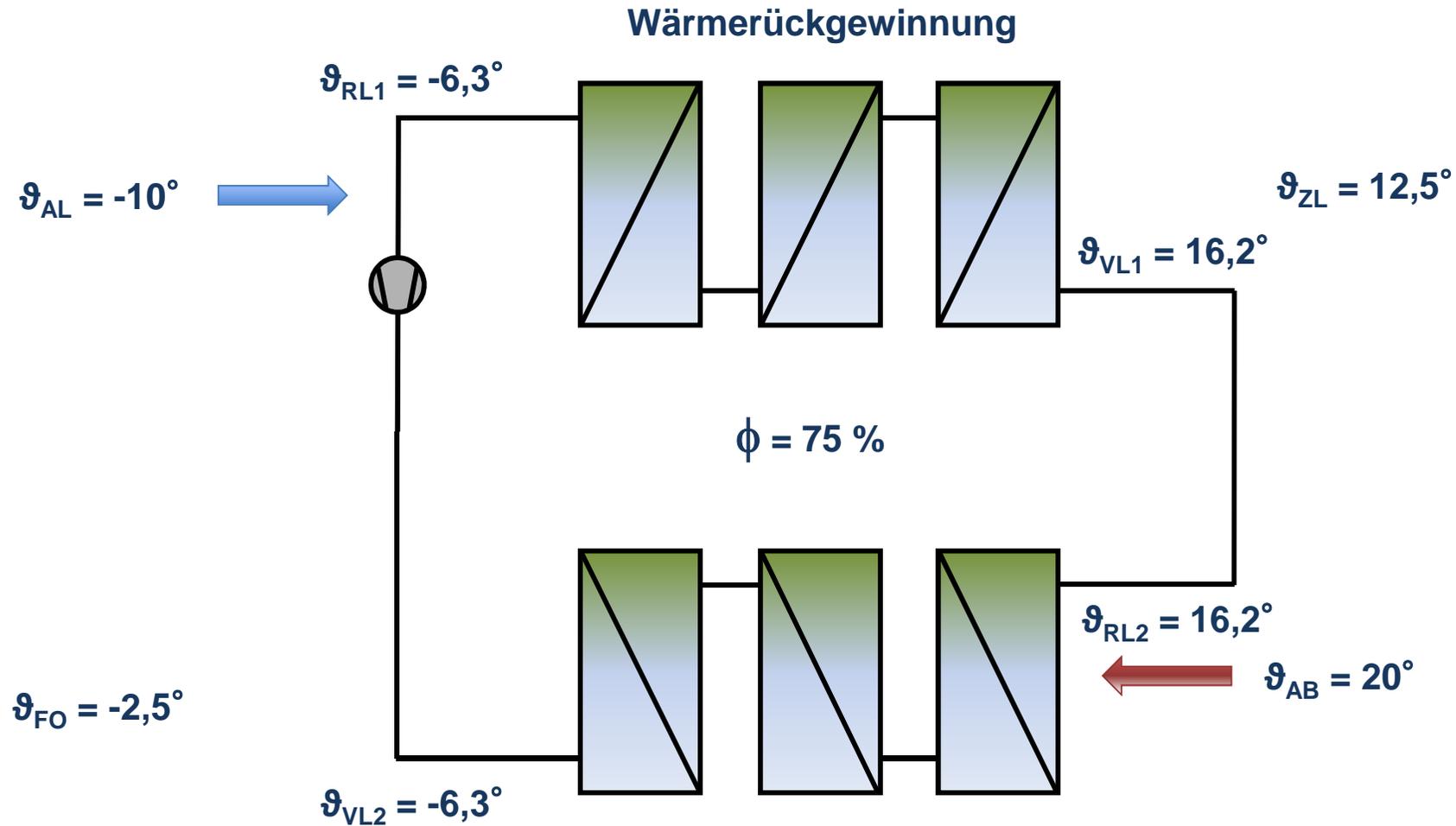
Wärmeeinspeisung  
Wärmepumpe  
Kondensator

# Integrierter Wärmepumpenbetrieb im KVS

## Wärmerückgewinnung

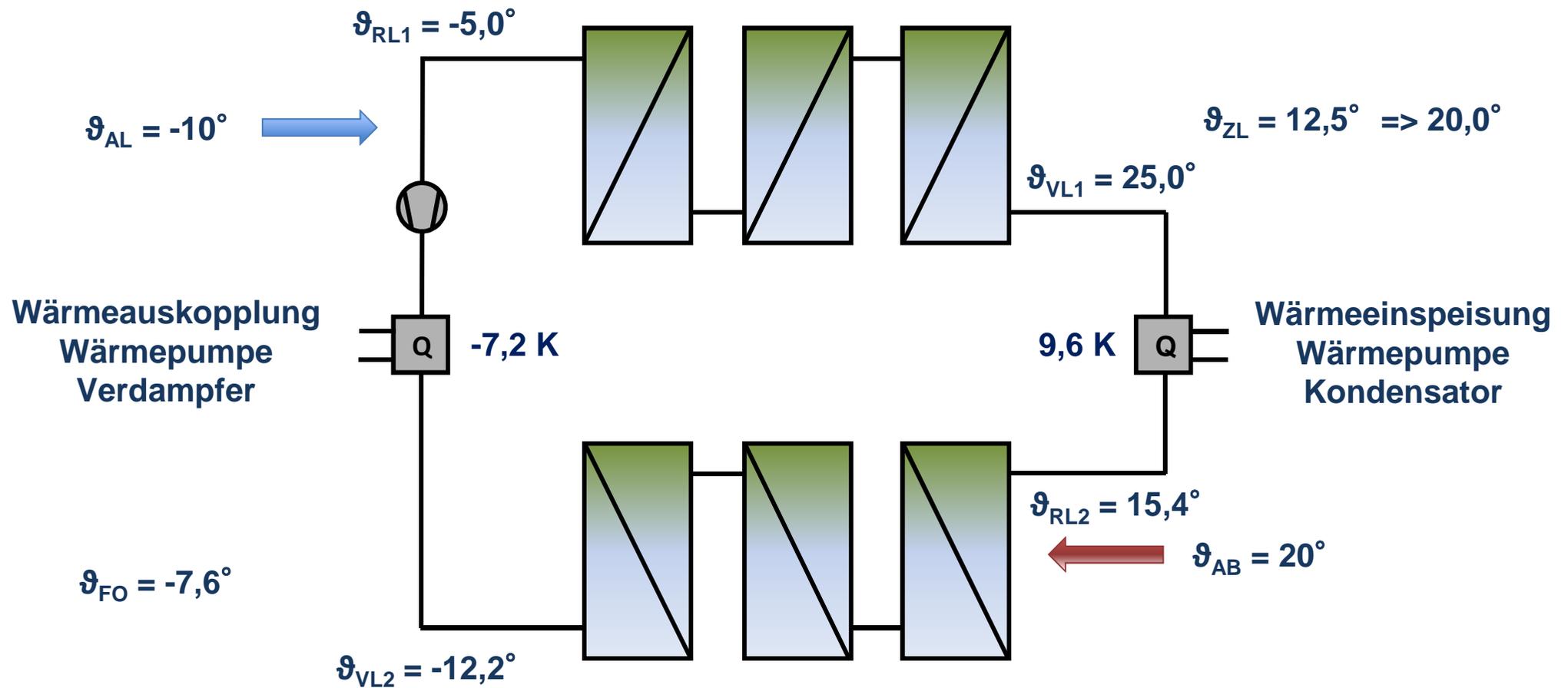


# RLT-Gerät mit WRG ohne WP

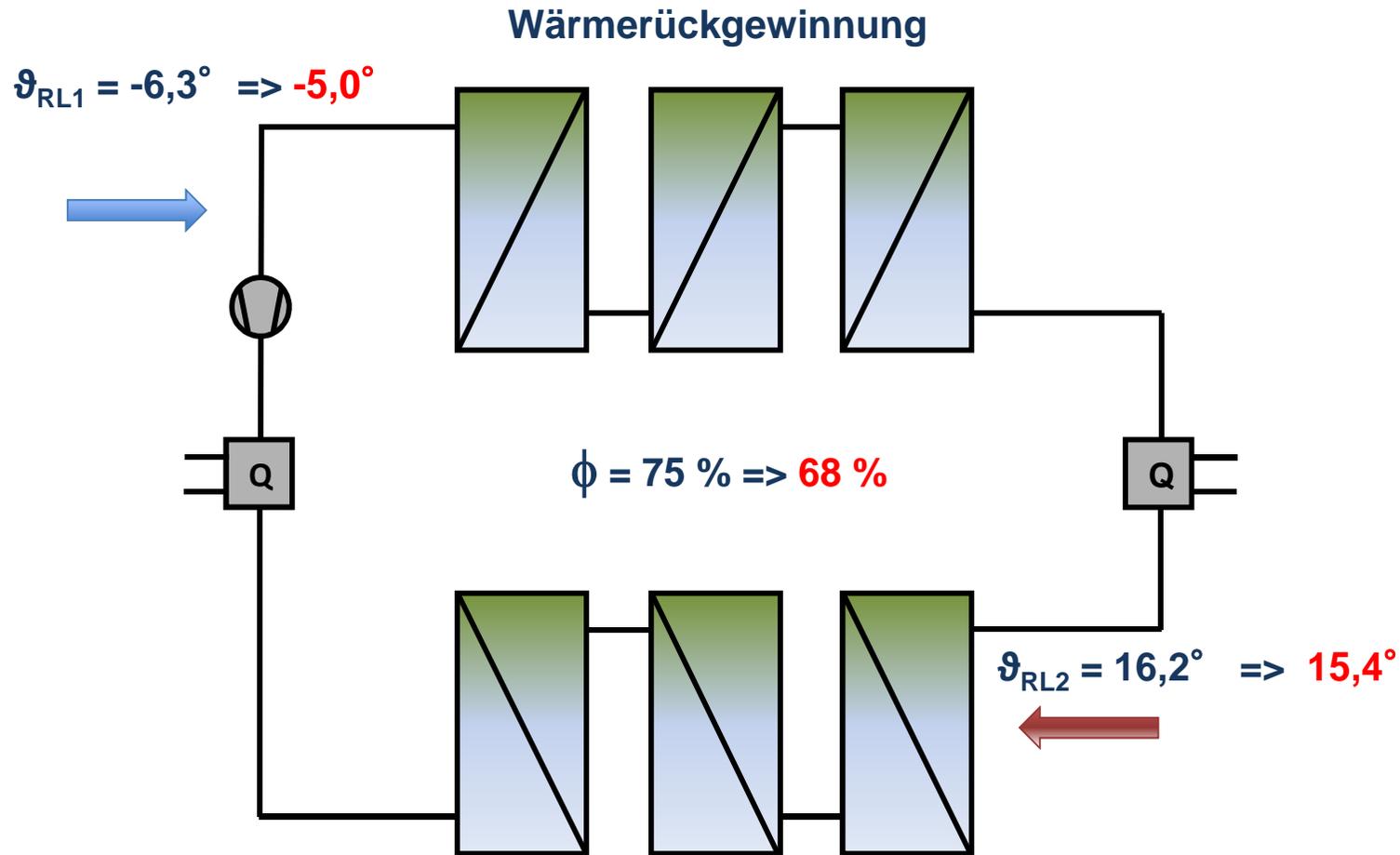


# Integrierter Wärmepumpenbetrieb im KVS

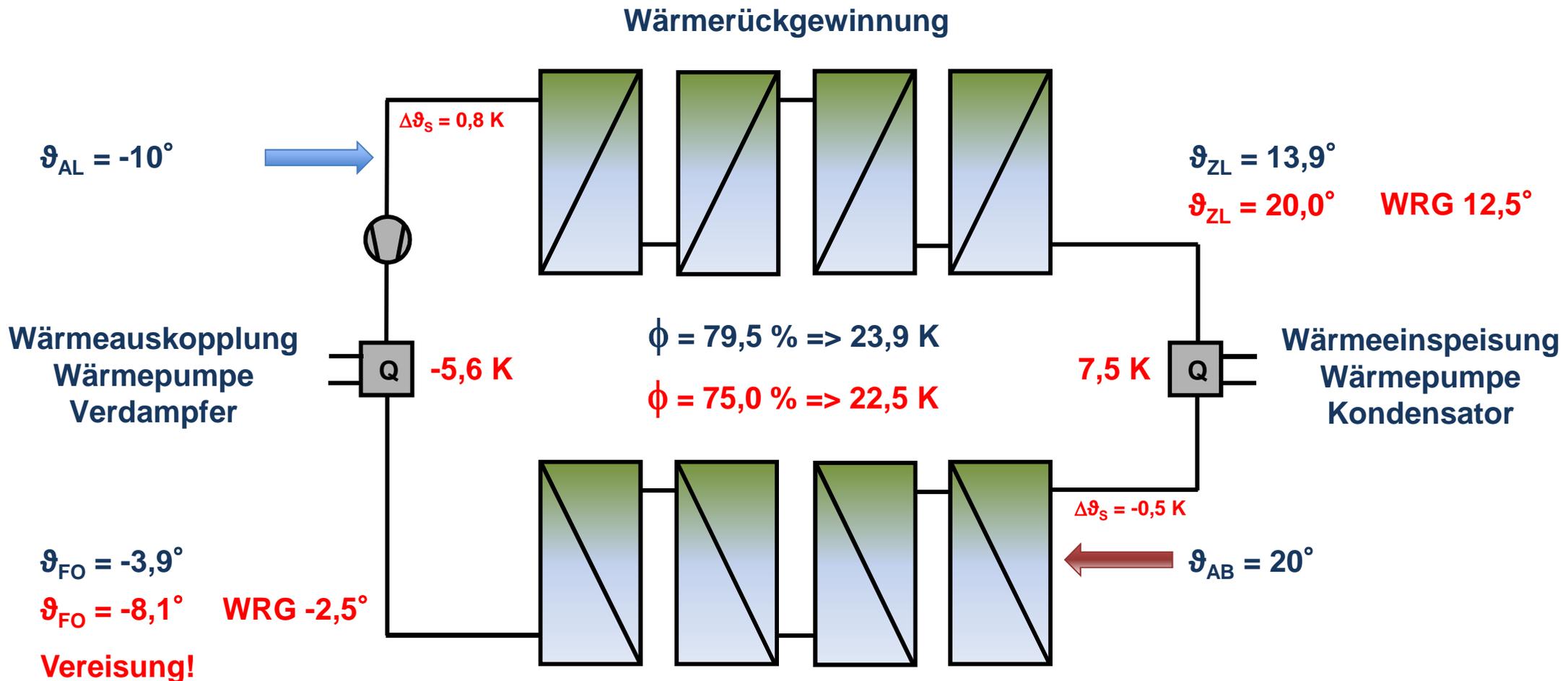
## Wärmerückgewinnung



# Kombinierte Temperaturänderung im RL



# Integrierter Wärmepumpenbetrieb im KVS



# Integrierter Wärmepumpenbetrieb im KVS



## Hydraulikmodul WRG mit integrierter Wärmepumpe



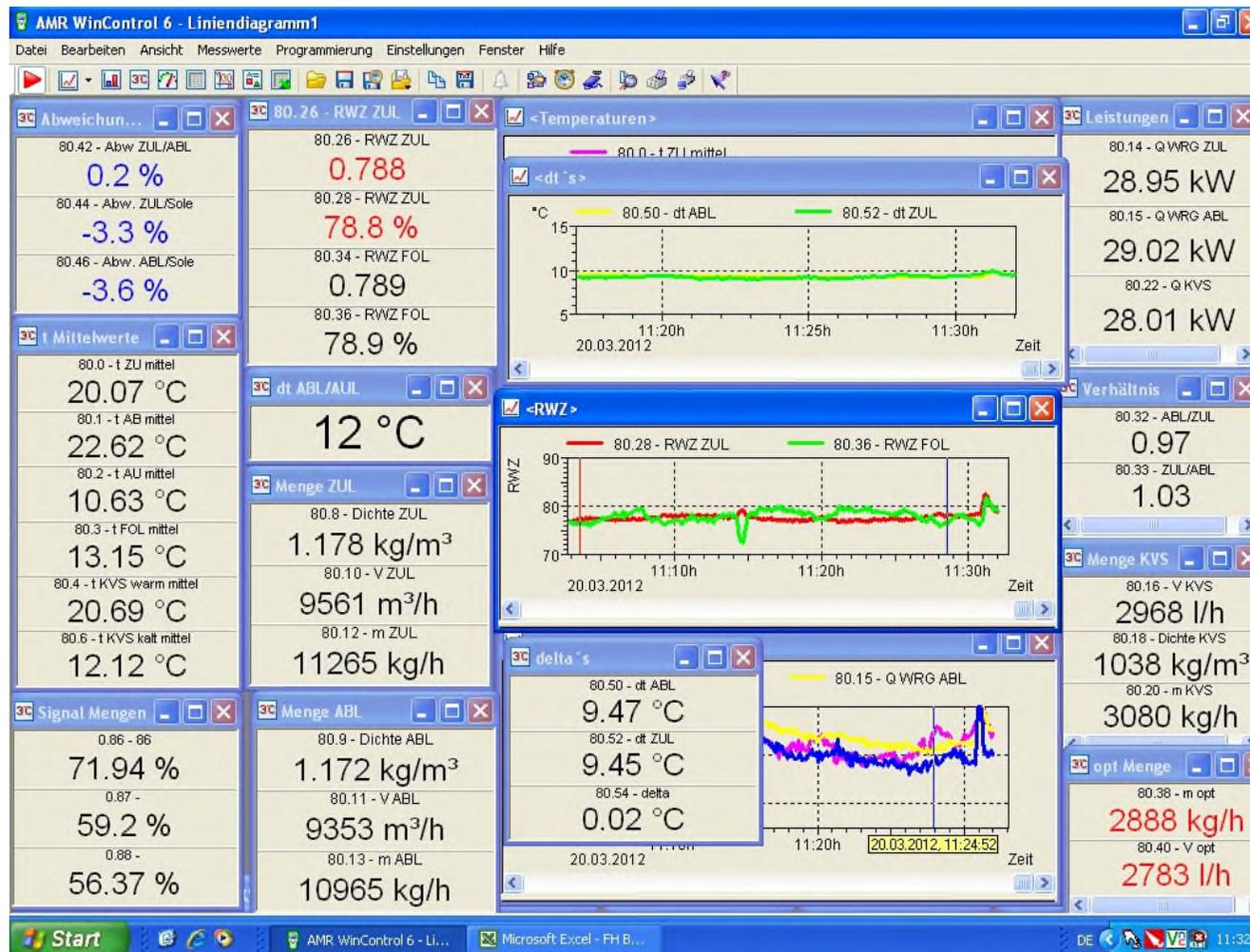


WRG &  
Wärmepumpe



Leistungsmessung

# Messung WRG



## Messungen an einem Kreislaufverbundsystem - **Volllast**

**Übertragungsgrad  $\Phi_{ges} = 0,766$**

bei **4,9°C** Außenluft- und **20,8°C** Ablufttemperatur => Zuluft **17,1°C**

jeweils **24 Rohrreihen** pro Luftseite  **$Q_{WRG} = 38,3 \text{ kW}$**  mit  **$COP_{eq.} = 18,2$**

Auskopplung  **$Q_V = 17,6 \text{ kW}$**  => Einspeisung  **$Q_K = 23,1 \text{ kW}$**  (5,5 kW Komp.)

Einfluss durch **Ein- und Auskopplung**  $\Phi_{ges} = 0,766$  =>  $\Phi_{ges} = \mathbf{0,678}$

**$Q_{WRG} = 33,5 \text{ kW}$**  mit  **$COP_{WP} = 4,2$**  =>  **$COP_{System} = 7,3$**

bei **5,1°C** Außenluft- und **20,9°C** Ablufttemperatur => Zuluft **22,8°C** (WRG **15,8°C**)

## Messungen an einem Kreislaufverbundsystem - **Teillast**

**Übertragungsgrad  $\Phi_{ges} = 0,766$**

bei **4,9°C** Außenluft- und **20,8°C** Ablufttemperatur => Zuluft **17,1°C**

jeweils **24 Rohrreihen** pro Luftseite  **$Q_{WRG} = 38,3 \text{ kW}$**  mit  **$COP_{eq.} = 18,2$**

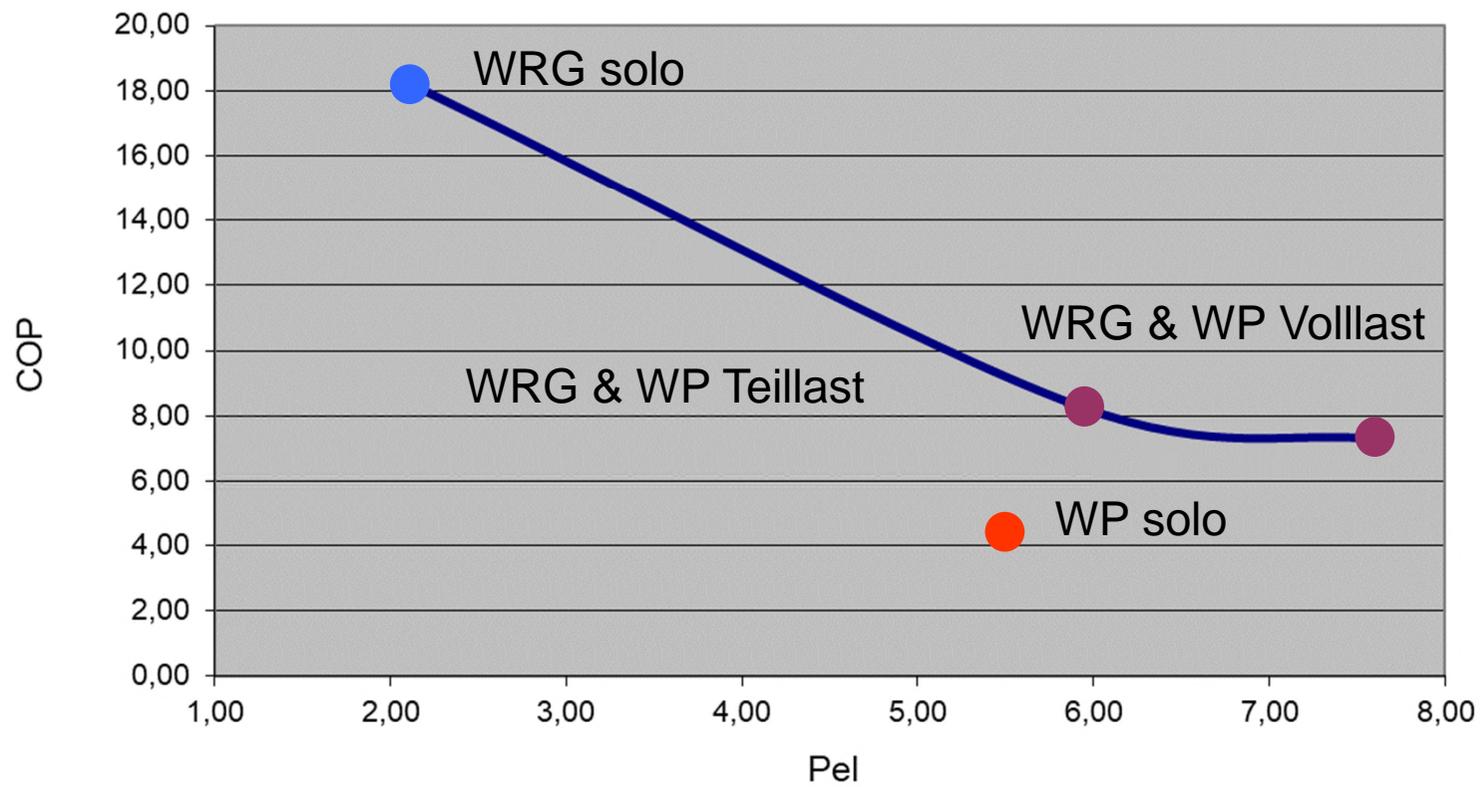
Auskopplung  **$Q_V = 13,1 \text{ kW}$**  => Einspeisung  **$Q_K = 16,9 \text{ kW}$**  (3,8 kW Komp.)

Einfluss durch **Ein- und Auskopplung**  $\Phi_{ges} = 0,766$  =>  $\Phi_{ges} = \mathbf{0,713}$

**$Q_{WRG} = 33,3 \text{ kW}$**  mit  **$COP_{WP} = 4,5$**  =>  **$COP_{System} = 8,3$**

bei **6,0°C** Außenluft- und **21,1°C** Ablufttemperatur => Zuluft **21,9°C** (WRG **16,8°C**)

# Messung WRG



## Problemfall Wechselwirkung allgemein

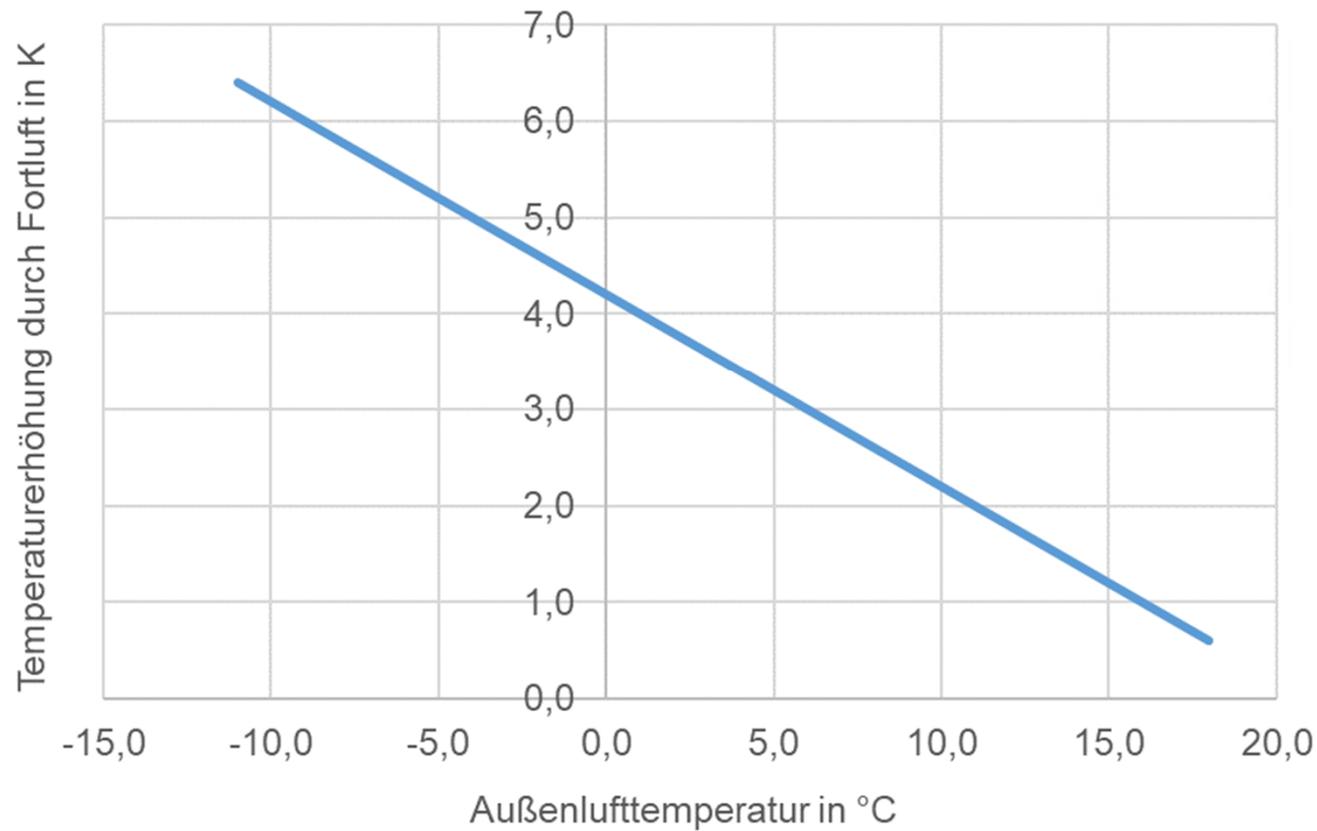
**Abwärme** kann **nur einmal genutzt** werden (WRG vs. WP)

**Geringere Effizienz** der Wärmepumpe durch WRG bezogen auf Abluft (-)

**Höhere Effizienz** der Wärmepumpe durch WRG bezogen auf Außenluft (+)

**Besserer COP** ggü. **Außenluft** im **Übergangsfall**  $> 0^{\circ}\text{C}$  (+)

## Vergleich Fortluft zur Außenluft bei $\phi_{WRG} = 0,8$



## Problemfall Wechselwirkung im KVS

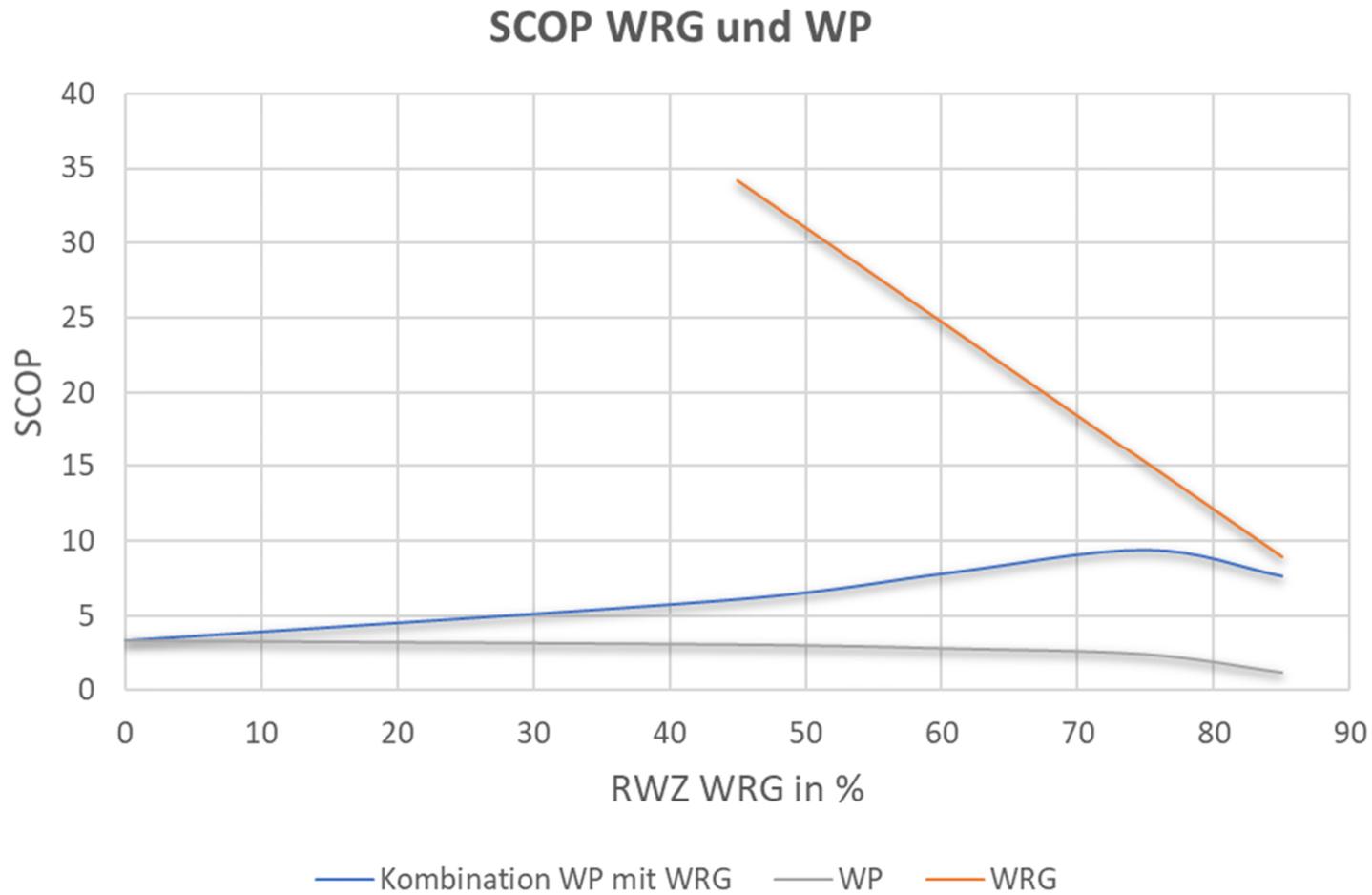
Doppelt **negative Beeinflussung KVS** durch Ein- und Auskopplung (-)

hoher **Übertragungsgrad** weniger **Einspeisung** (+)

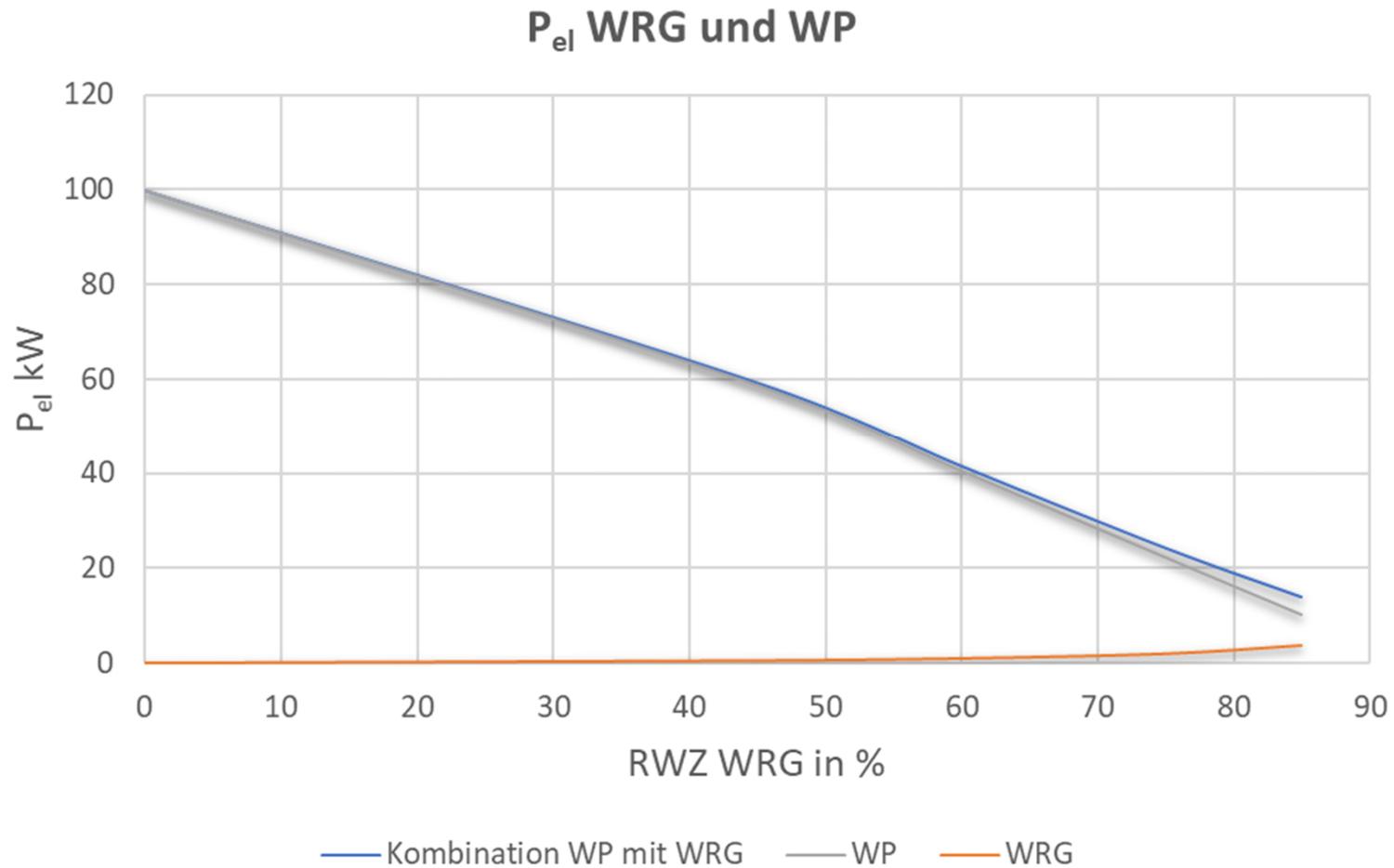
Das „**Wenige**“ wird zudem **effizienter übertragen** (+)

# Jahressimulation Wärmepumpe mit WRG

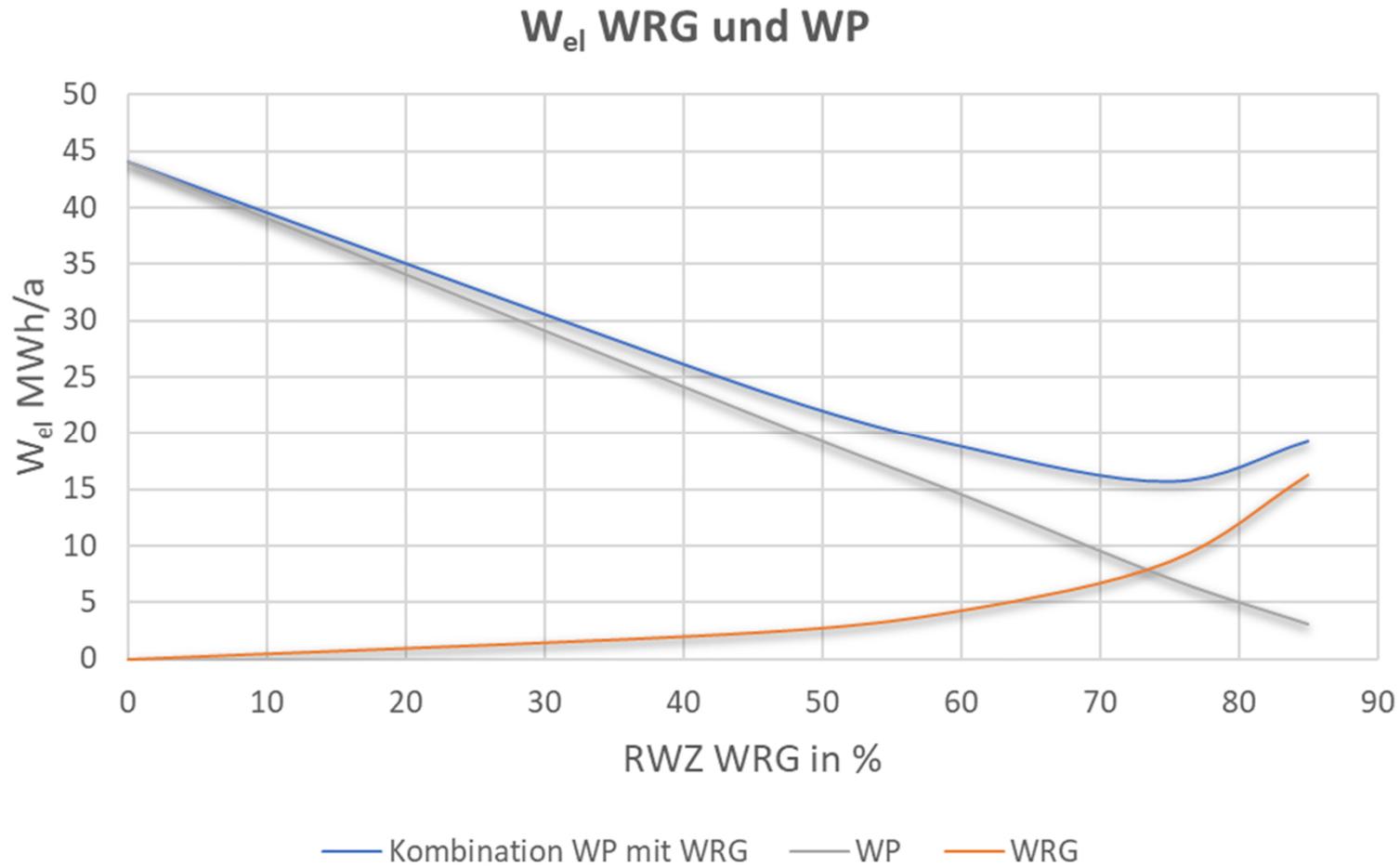
WRG Temperaturübertragungsgrad in %	0	45	60	75	85
NTU WRG	0,00	0,82	1,50	3,00	5,67
WP und WRG in der RLT für 10.000 m <sup>3</sup> /h und 4.380 h/a					
T <sub>Außenluft</sub> (Standort Potsdam) und T <sub>Zuluft</sub> in °C	22	22	22	22	22
WRG Wärme in MWh/a	0,0	80,1	106,1	130,8	144,6
Benötigte Wärmebereitstellung nach WRG in MWh/a	149,2	68,9	42,8	18,1	4,2
Beitrag der Wärmepumpe (WP) in MWh/a	149,0	67,5	41,7	17,5	3,8
Elektroenergiebedarf WP <sub>el</sub> in MWh/a	44,1	21,7	14,6	7,1	3,1
SCOP WP (JAZ)	3,38	3,11	2,87	2,46	1,24
ΔP WRG (geschätzt über NTU)	0	58	106	212	400
Leistungsbedarf P <sub>el</sub> WRG in kW	0,00	0,53	0,98	1,96	3,70
Elektroenergiebedarf W <sub>el</sub> WRG in MWh/a	0,00	2,34	4,29	8,59	16,22
Gesamtelektroenergiebedarf W <sub>el</sub> WRG + WP in MWh/a	44,1	24,0	18,9	15,7	19,3
Einsparung in %	0,0%	45,5	57,2	64,3	56,2
SCOP WRG (JAZ)		34,18	24,71	15,23	8,91
WP max. Leistung in kW	99,9	58,7	40,5	22,2	10,1
WP + WRG regenerativ in MWh/a	149,0	147,6	147,8	148,3	148,4
P <sub>el</sub> gesamt in kW	99,9	59,2	41,5	24,2	13,8
SCOP Kombination WP + WRG (JAZ Gesamtsystem)	3,38	6,14	7,84	9,44	7,69
Gesamtwärmebedarf des Systems in MWh/a	149,2	149,0	148,9	148,9	148,8
Anteil WP	99,9	45,3	28,0	11,8	2,6



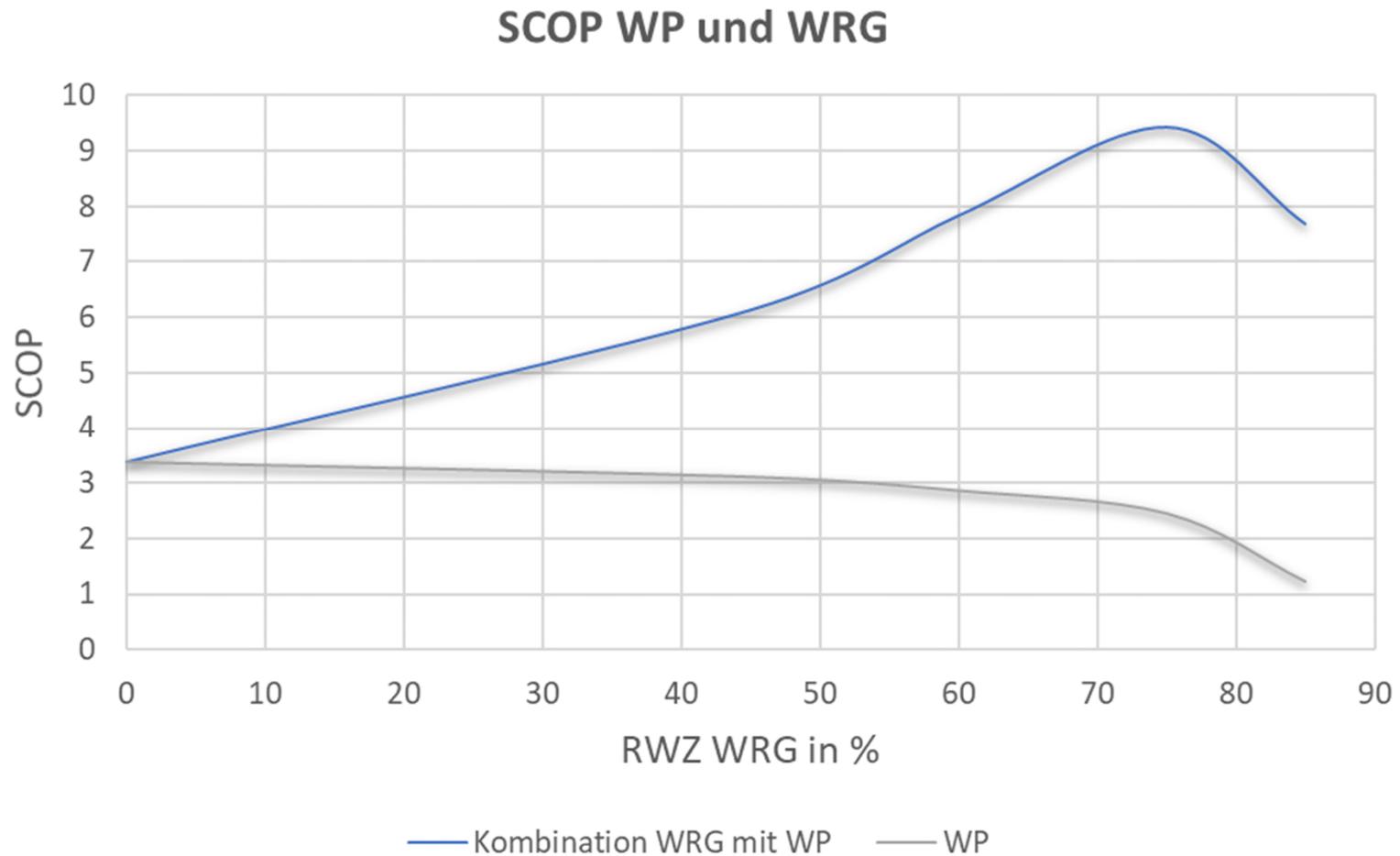
# Wärmepumpe mit WRG als Effizienzmaßnahme



# Wärmepumpe mit WRG als Effizienzmaßnahme



# Wärmepumpe mit WRG als Effizienzmaßnahme



## Problemfall Vereisung

**Abwärme** kann **nur einmal genutzt** werden (WRG vs. WP)

**Leistung** der **WRG** wird **ab ca. -5 °C begrenzt** (-)

**Kondensat friert** sonst ein! (-) & COP sinkt (-)

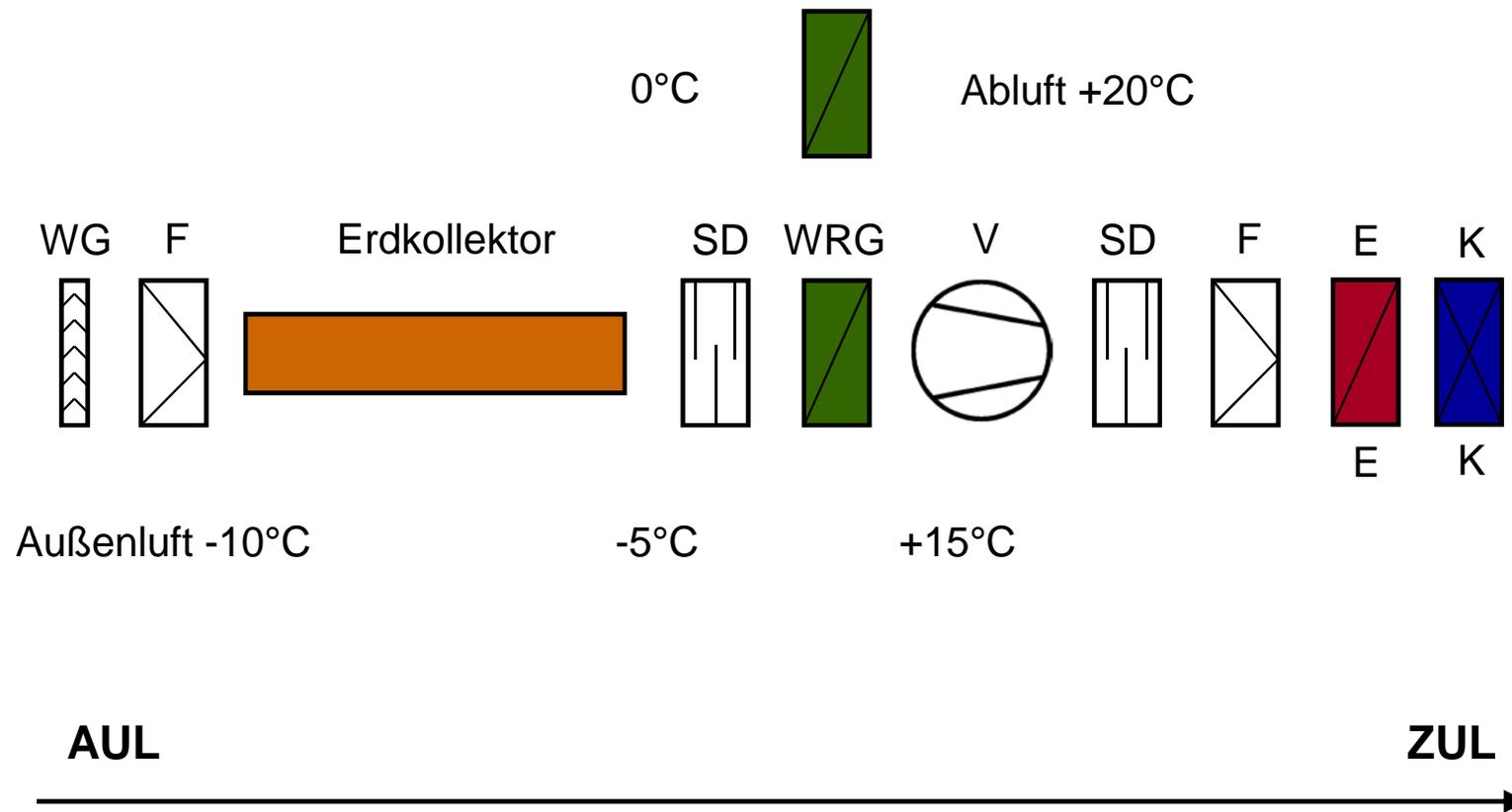
**System** kann **komplett zufrieren!**

Wärme zur **Enteisung** = Wärme für **Vereisung** (-)

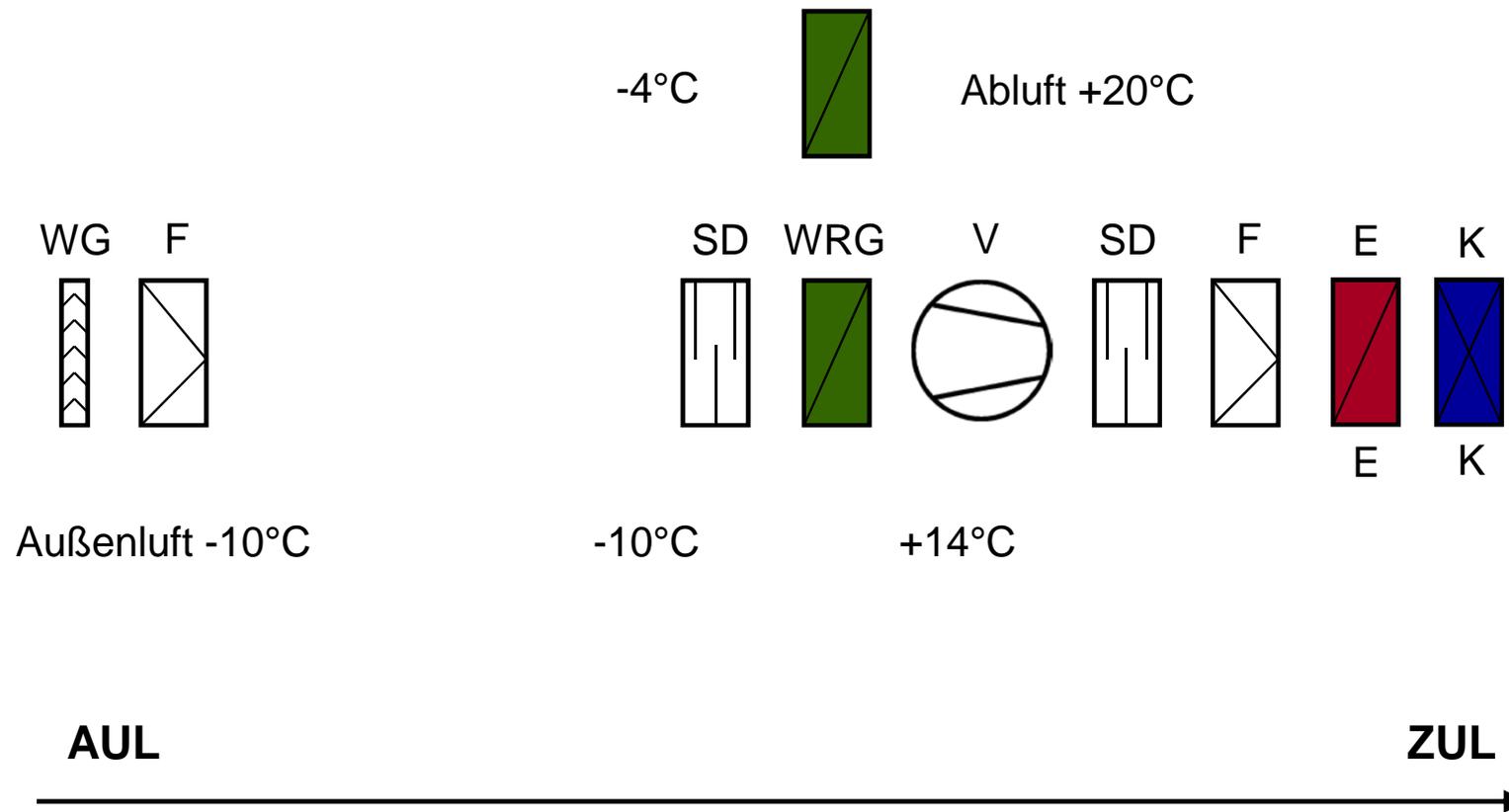
**Bivalente Wärmeerzeugung** wird zwingend **benötigt** (-)

**WRG gemäß GEG 2023 - § 68 immer noch verpflichtend!**

# Exkurs Erdwärmeübertrager im Winter

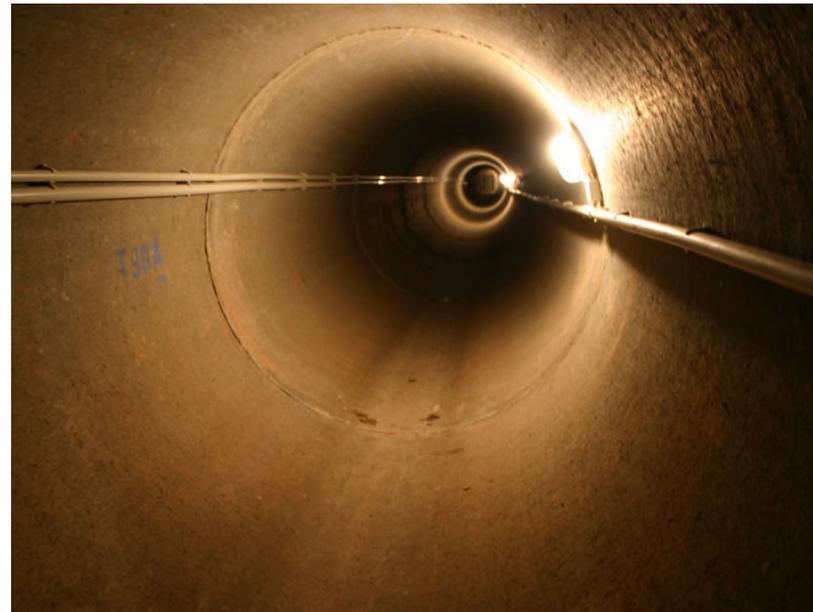


# Anlage ohne Erdwärmeübertrager im Winter

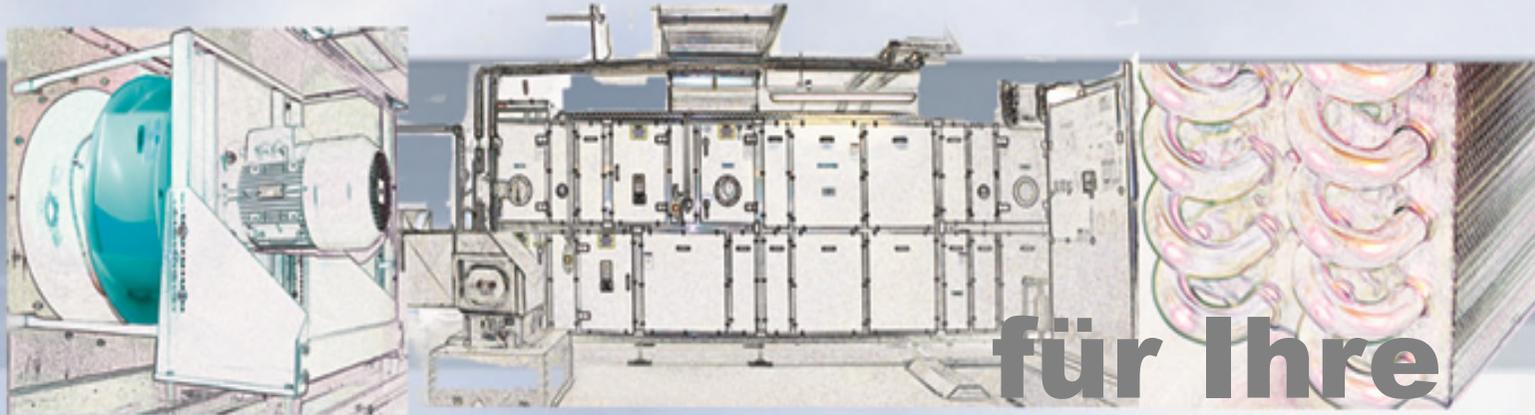


## Erdwärmeübertrager

- hohe Investitionskosten
- geringer Nettonutzen



# Herzlichen Dank



für Ihre

# Aufmerksamkeit

## Raumluftechnik WRG versus Wärmepumpe

Wärmebereitstellung durch Abwärmenutzung

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus  
Birkenfeld

H O C H  
S C H U L E  
T R I E R