

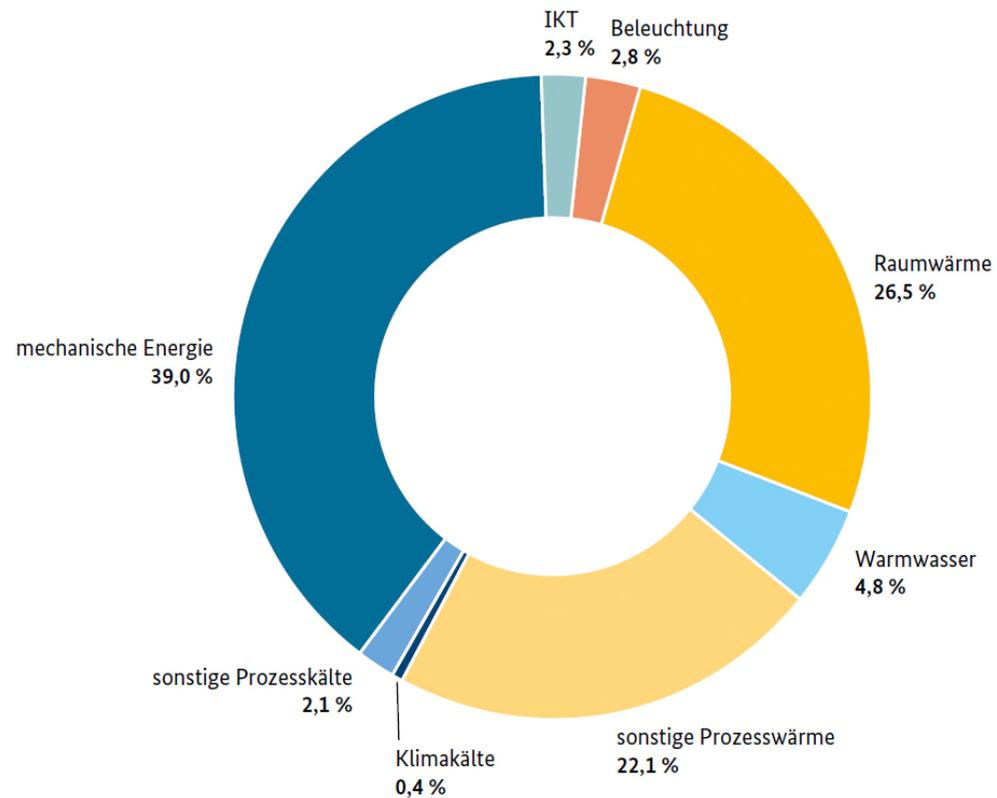
Nutzen und Grenzen der Wärmerückgewinnung im Vergleich zur Wärmepumpe im Kontext der Energiewende Abwärmenutzung nur noch mit Wärmepumpen?

Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. Christoph Kaup

Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland 2017 (insgesamt 9.329 PJ)

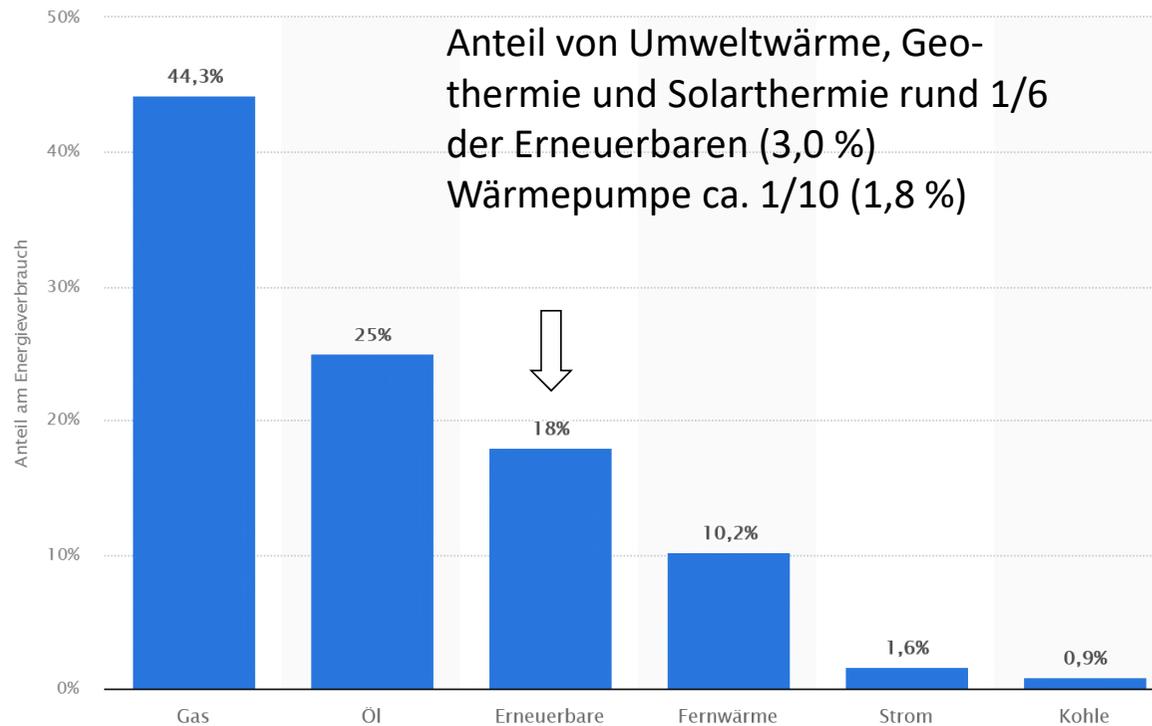
9.329 PJ = 2.591 TWh

Raumwärme **687 TWh**



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

Energieträger im Jahr 2019



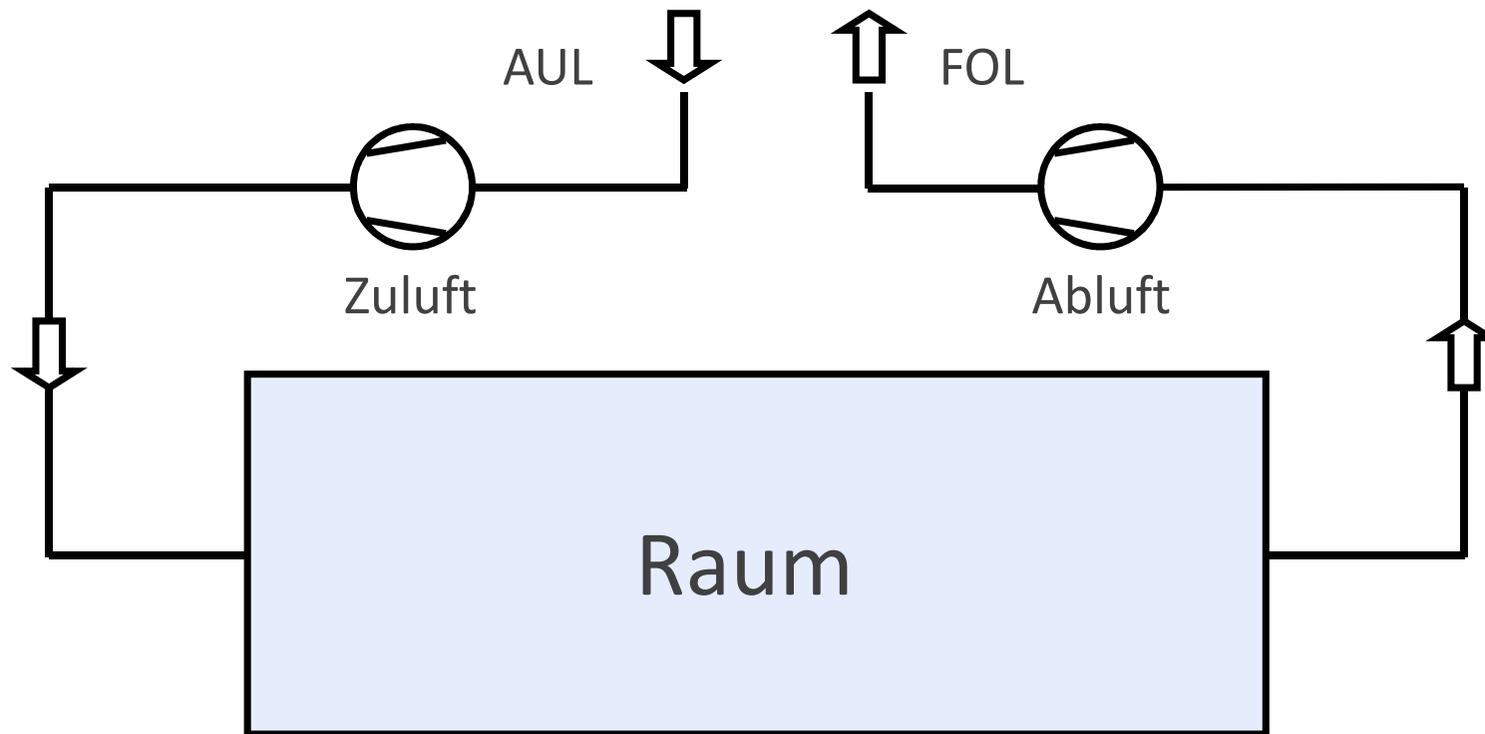
© Statista 2021 

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

Transmissionswärme
(Dämmen der Gebäudehülle)

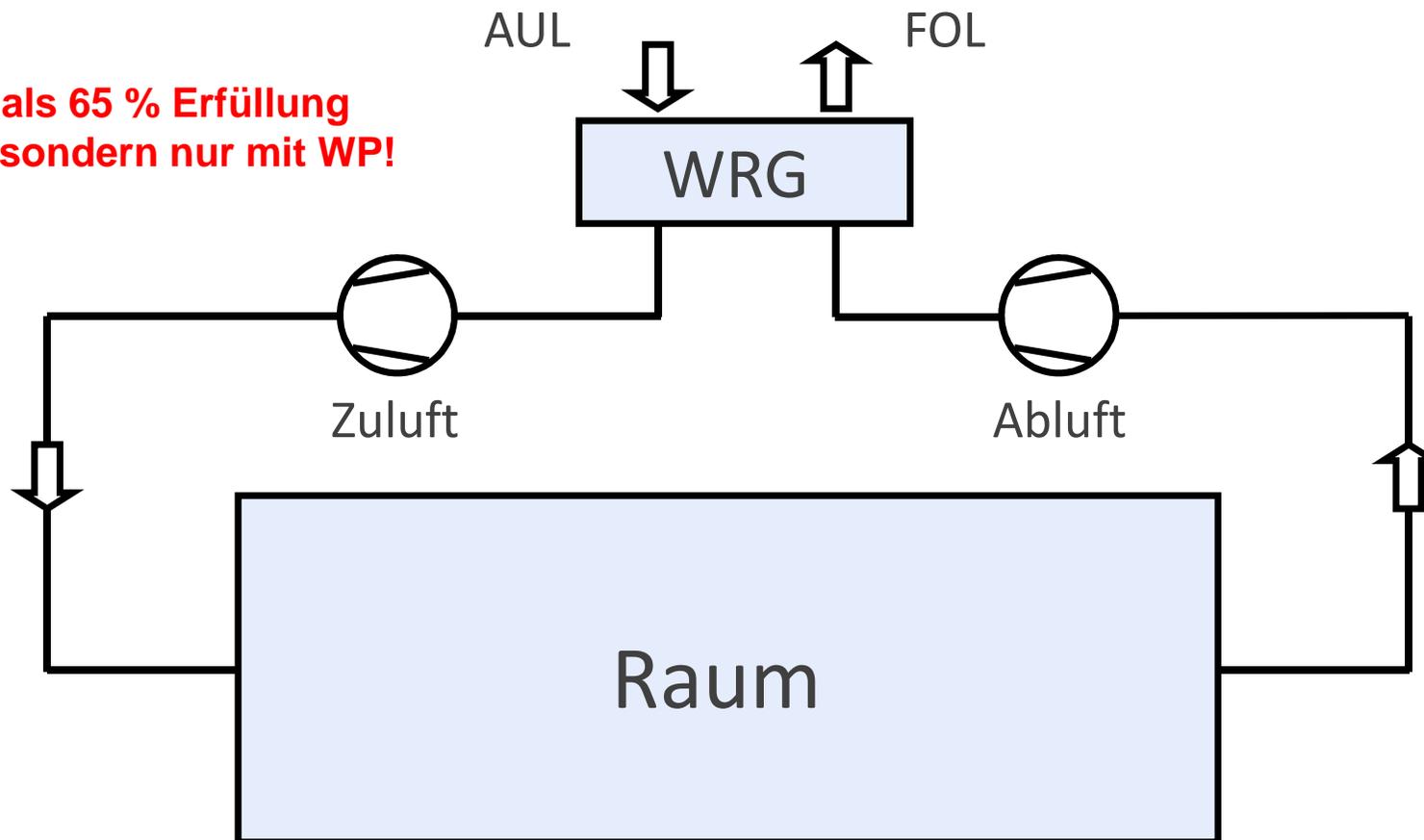
Lüftungswärme (35 bis 38 %)
(Dichten der Gebäudehülle)





GEG 2023

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



UCB-Gutachten 2012 für

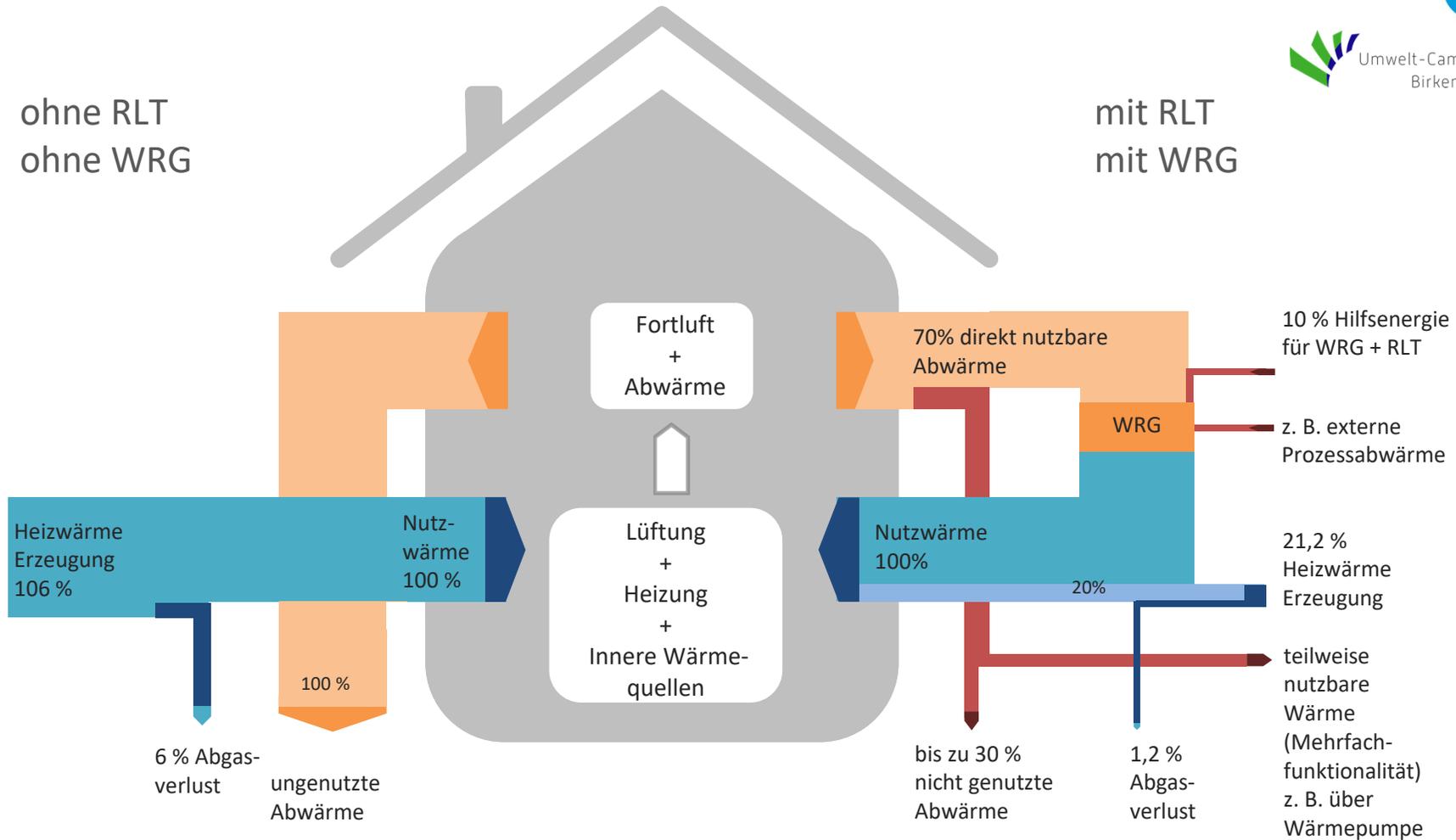


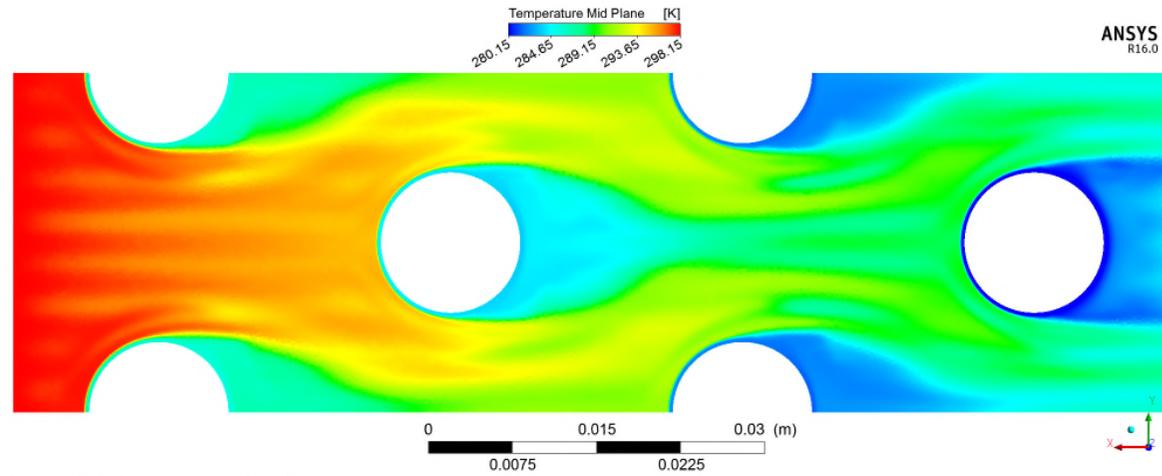
Umwelt-Campus
Birkenfeld

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

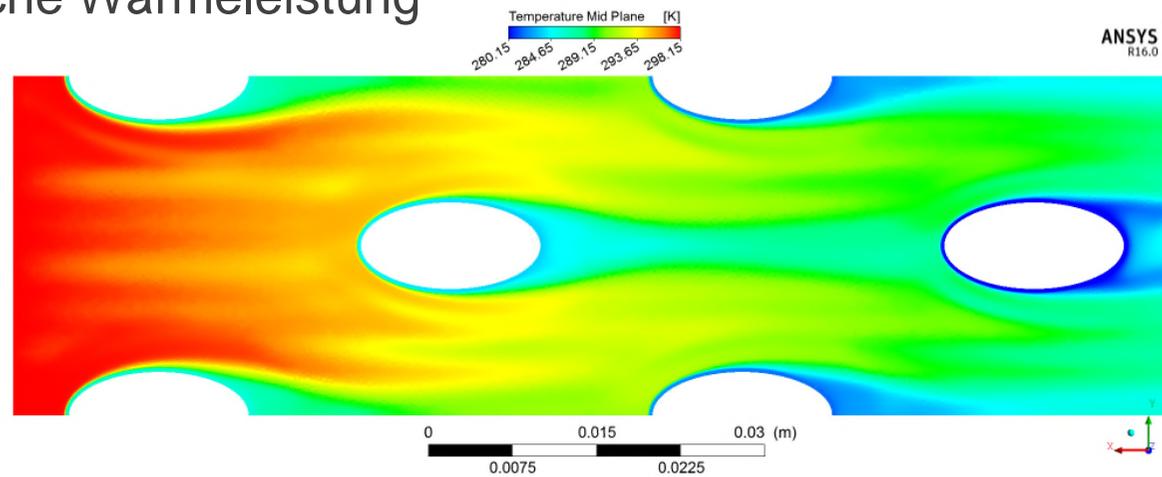
ohne RLT
ohne WRG

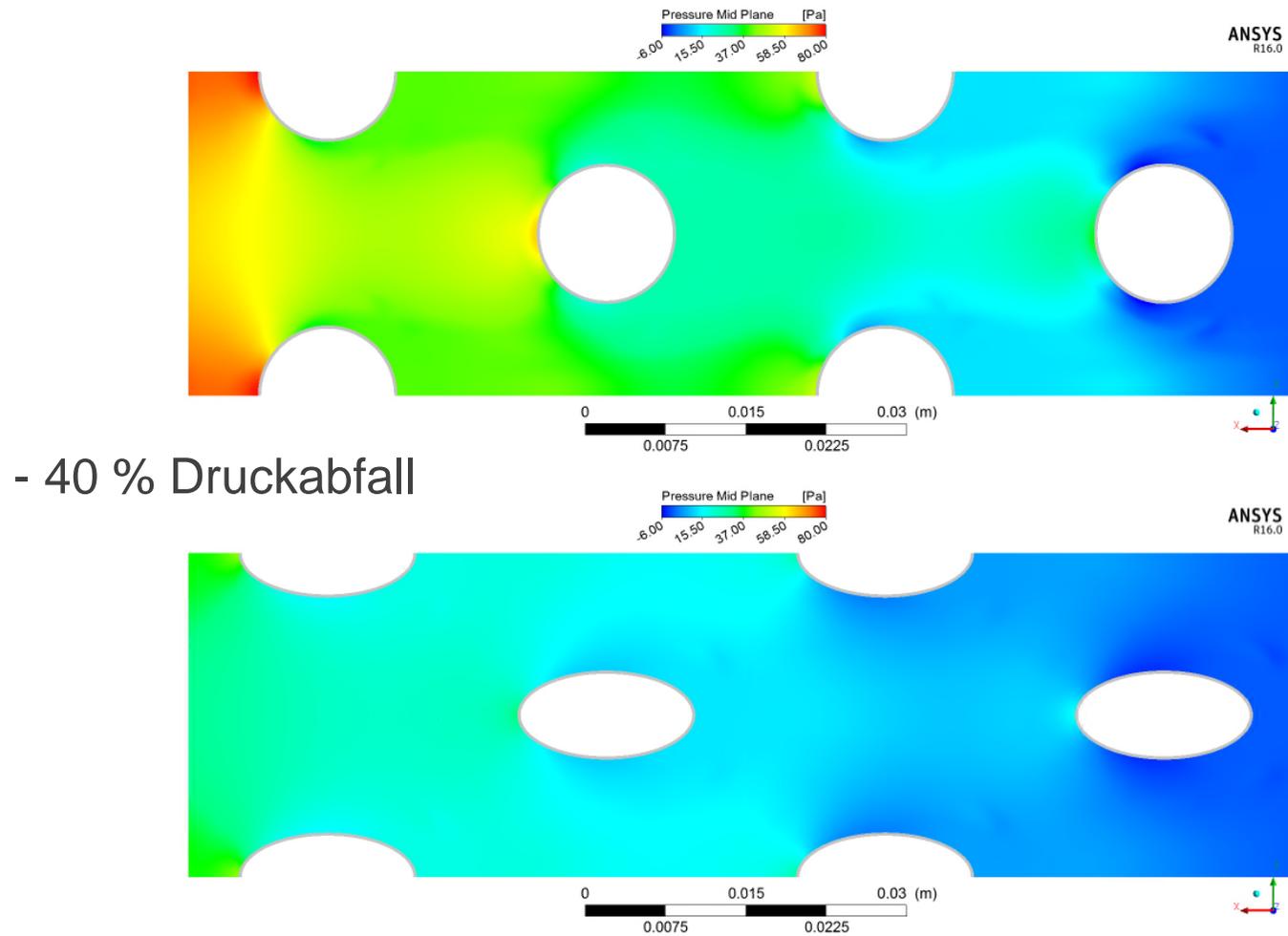
mit RLT
mit WRG





Identische Wärmeleistung



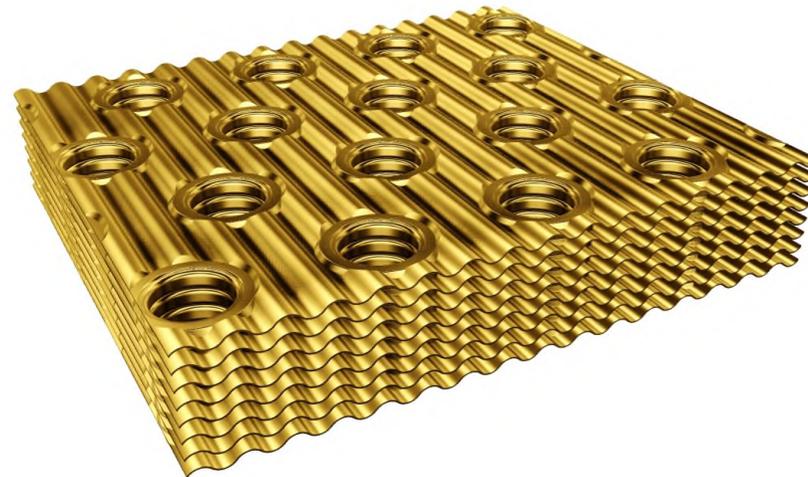


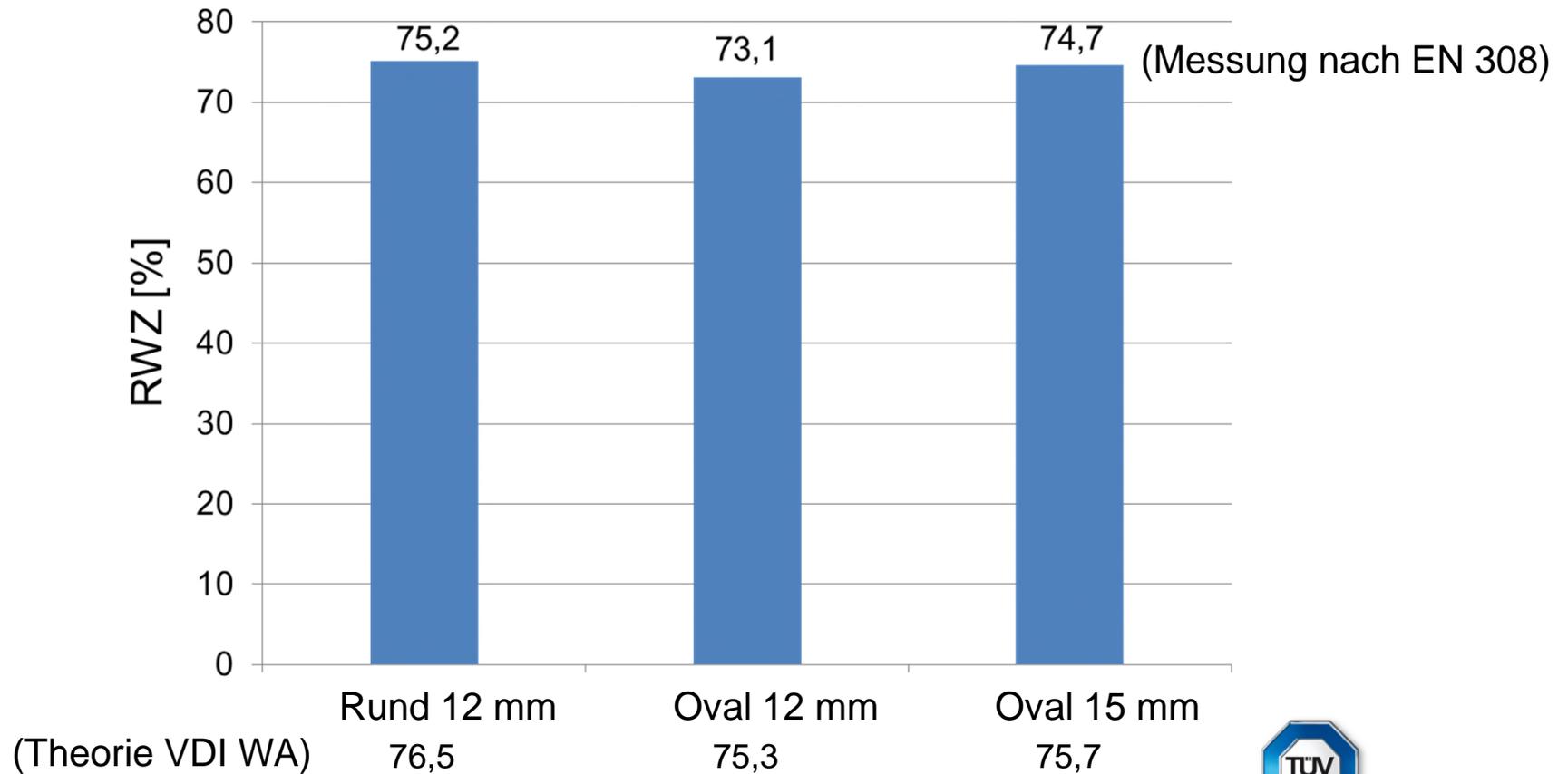


DE 10 2016 105 645 und EP 3 231 524

Flächenvergrößerung
ohne Druckverlusterhöhung
~ 20 %

Druckverlustreduktion
Ovalrohr gegenüber
Rundrohr ~ 40 %

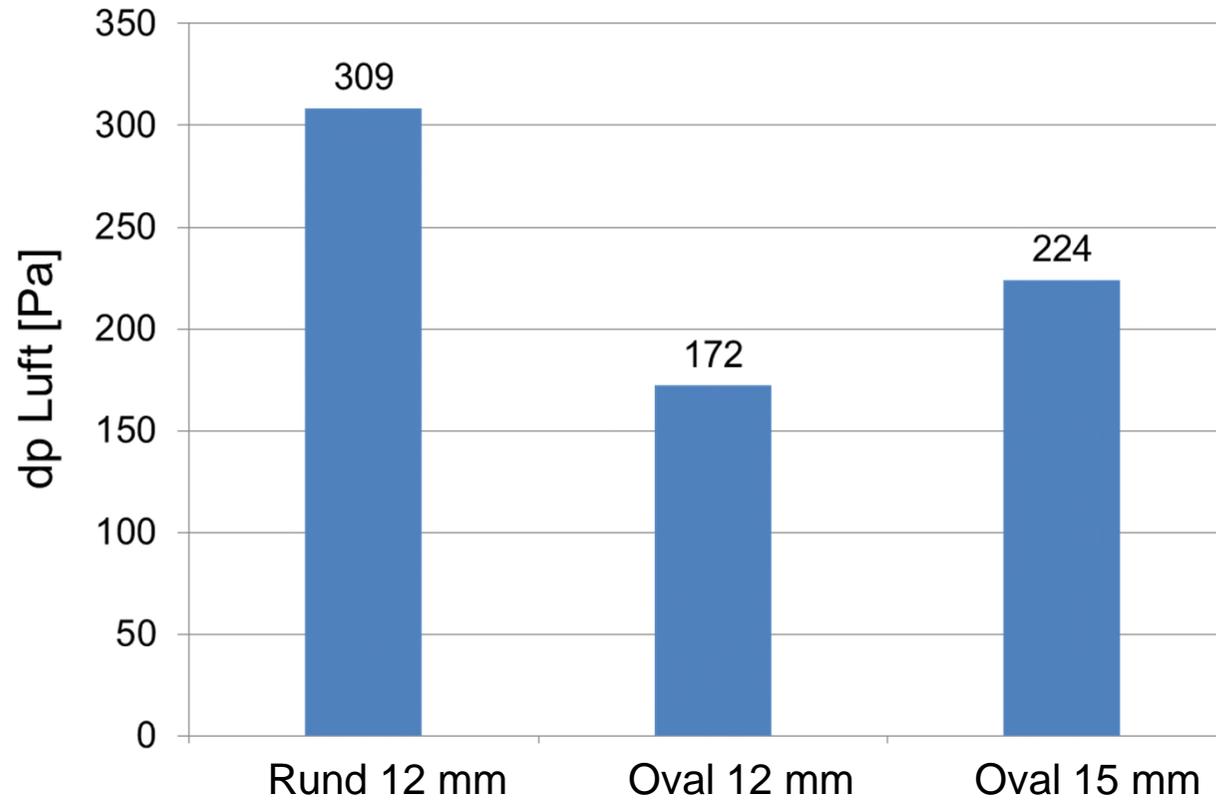




Messung TÜV Süd an Baumustern



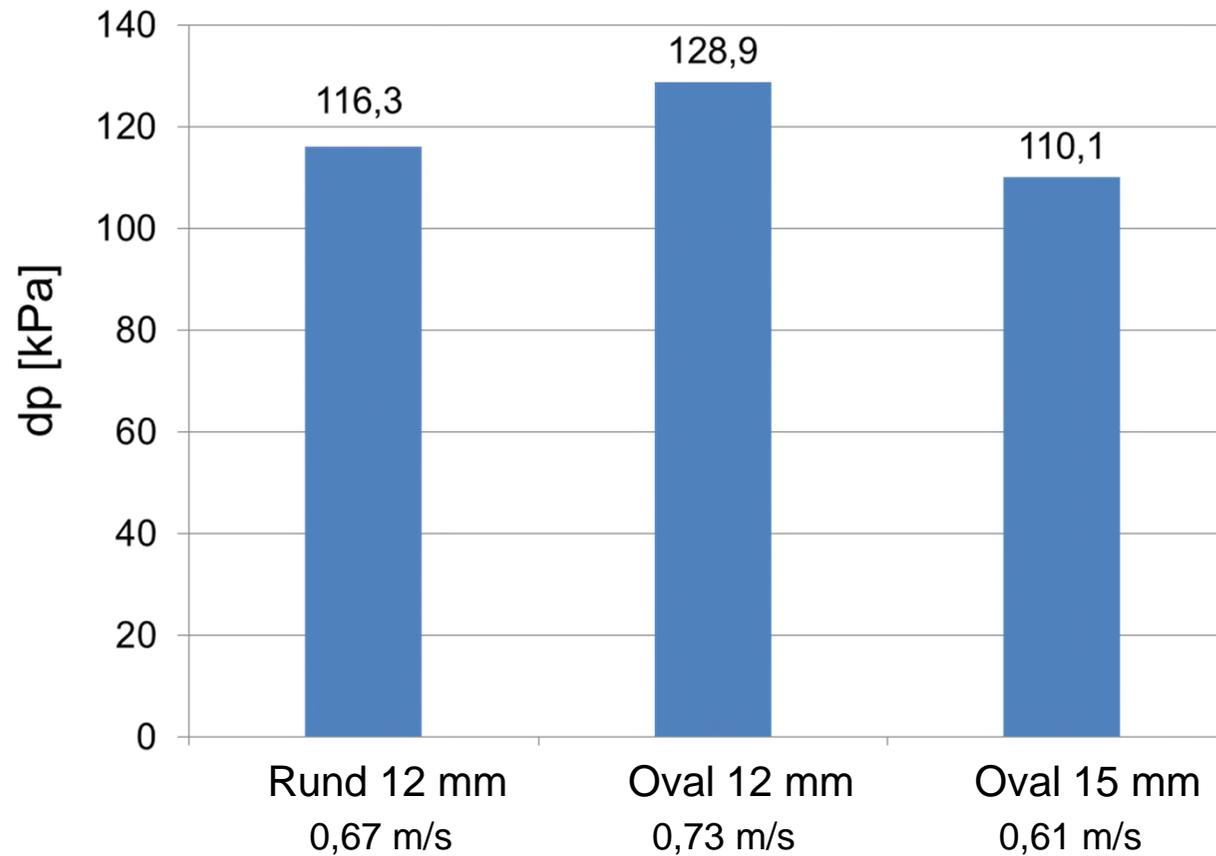
Industrie Service



Messung TÜV Süd an Baumustern



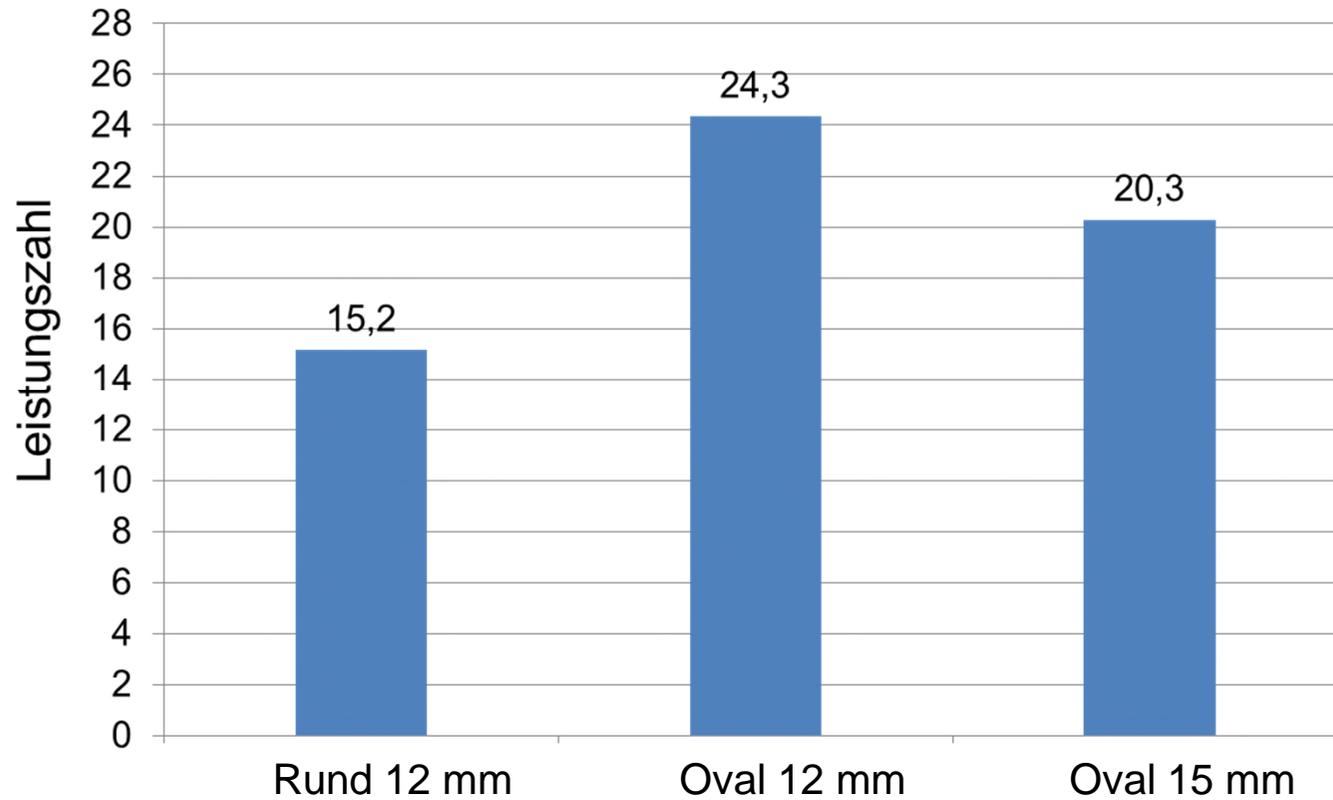
Industrie Service



Messung TÜV Süd an Baumustern



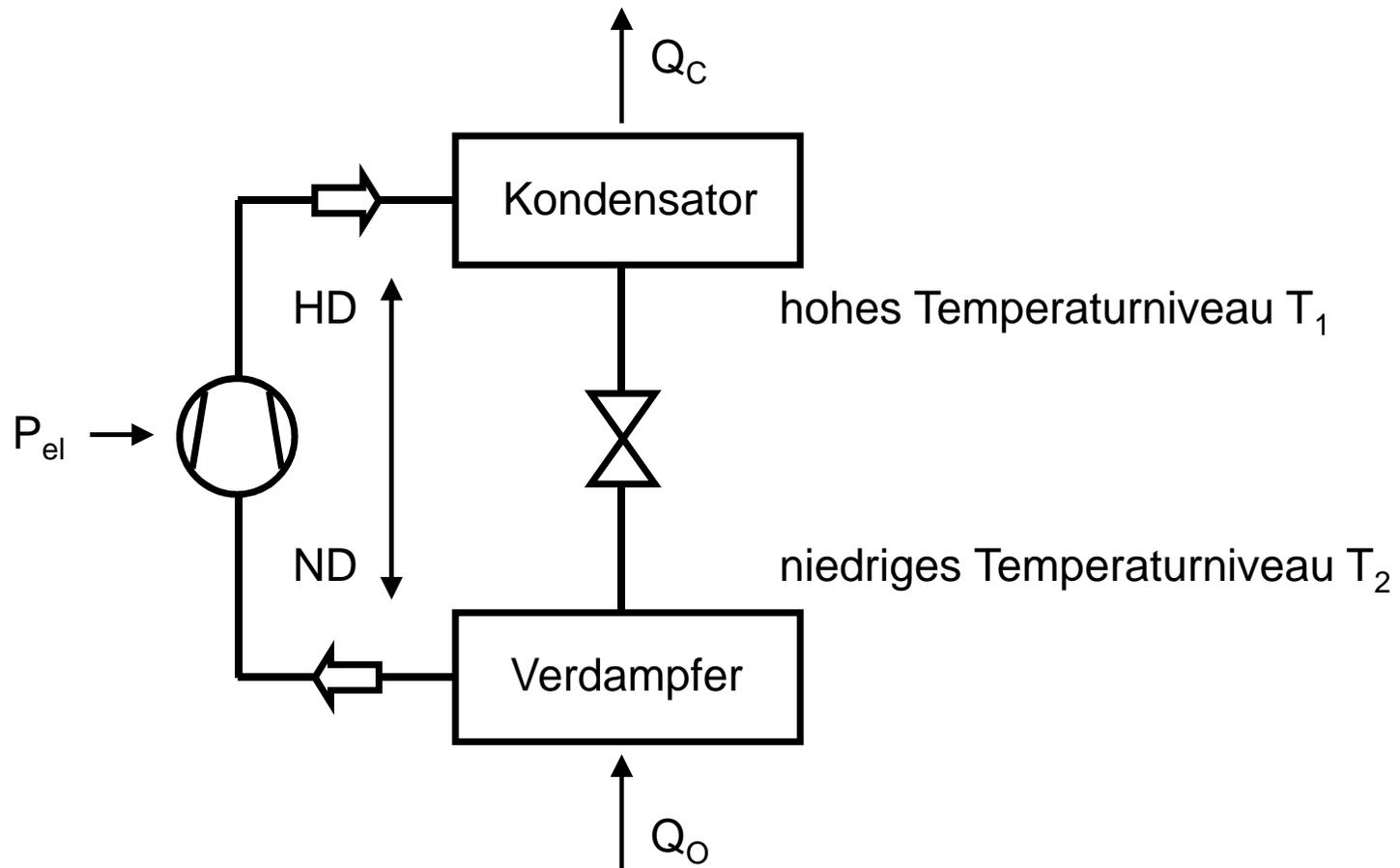
Industrie Service

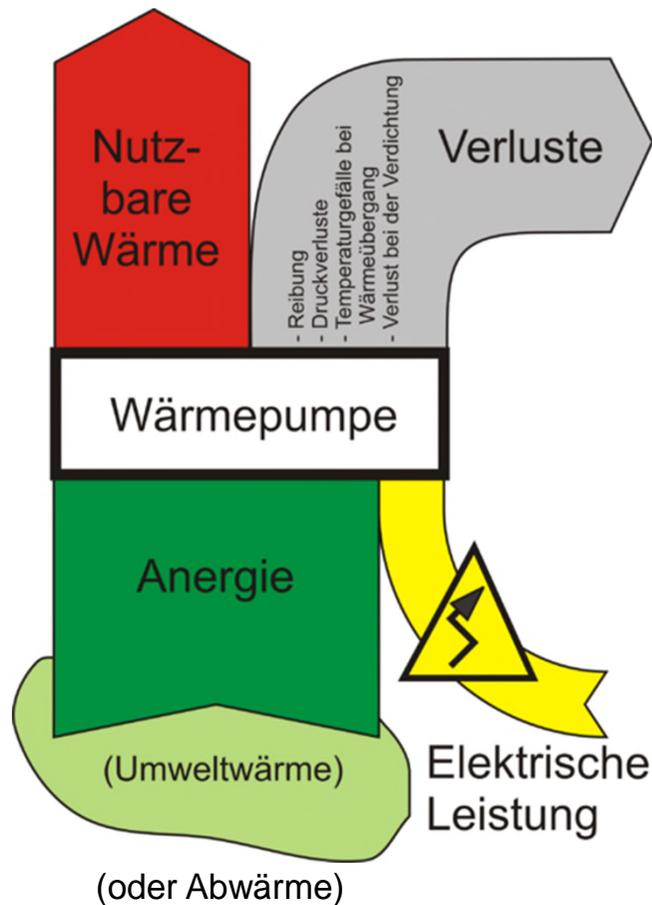


Messung TÜV Süd an Baumustern



Industrie Service





ϕ = nutzbare Wärmeenergie /
aufgenommenen Energie

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

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

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

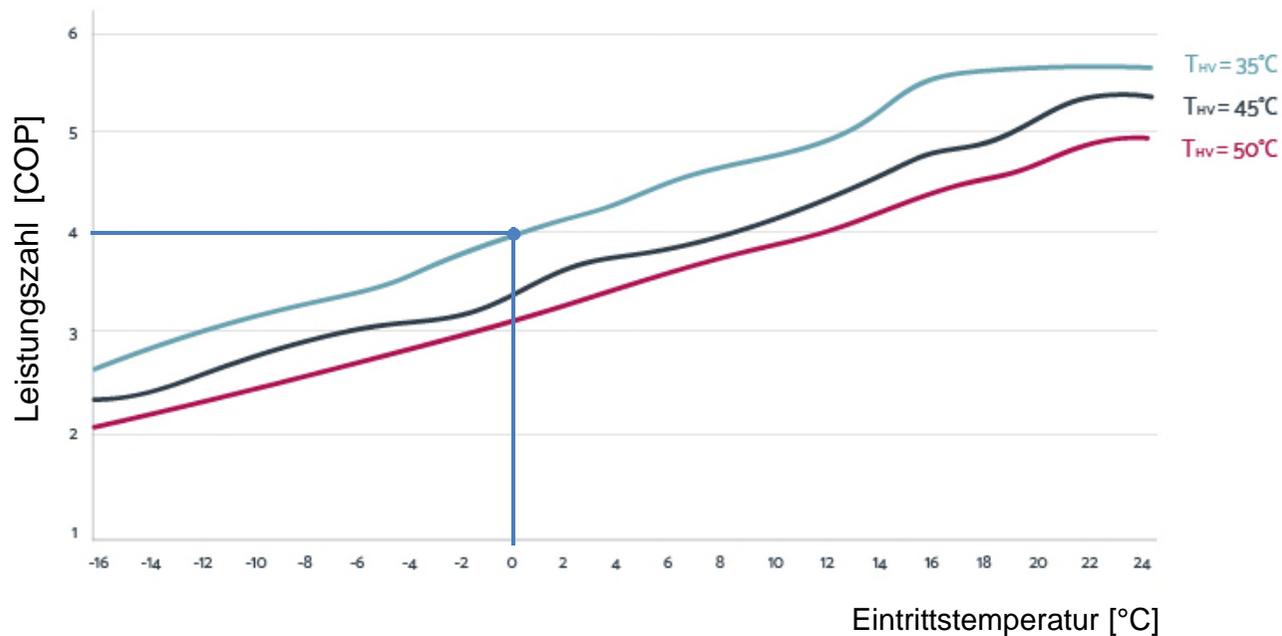
Wirkungsgrad des (reversiblen)
Carnot'schen Kreisprozesses

Effektive Leistungsziffer

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

η Wirkungsgrad der Komponenten

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



Beispiel:

Quelltemperatur $T_2 = 0 \text{ °C}$

Vorlauf $T_1 = 35 \text{ °C}$

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

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

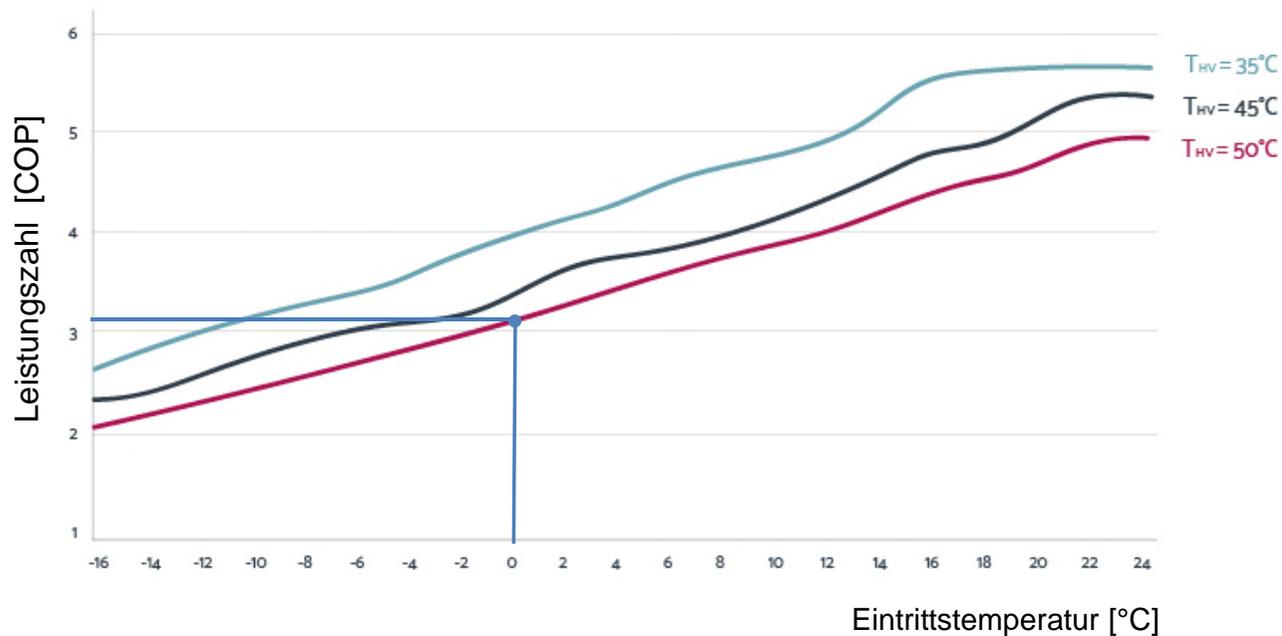
$\epsilon_C = 8,8$

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

$\eta = 45 \%$

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

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



Beispiel:

Quelltemperatur $T_2 = 0 \text{ °C}$

Vorlauf $T_1 = 50 \text{ °C}$

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

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

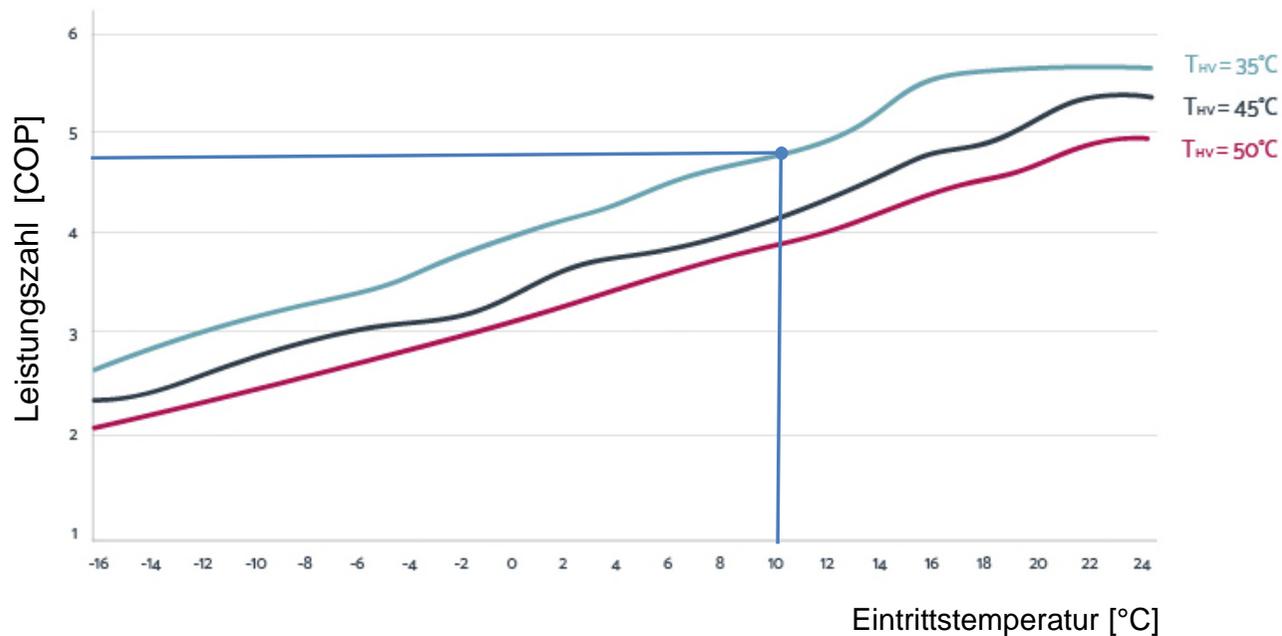
$\epsilon_C = 6,5$

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

$\eta = 48 \%$

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

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

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

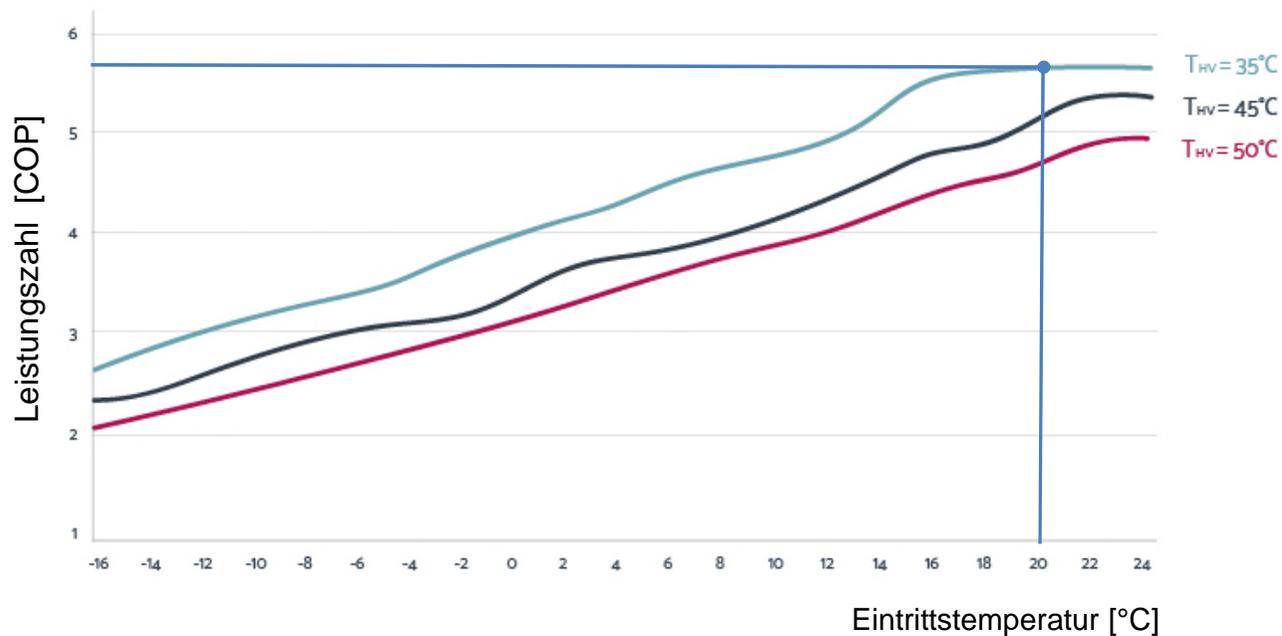
$\epsilon_C = 12,3$

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

$\eta = 39 \%$

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

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. η Verdichter) (+)

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

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

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

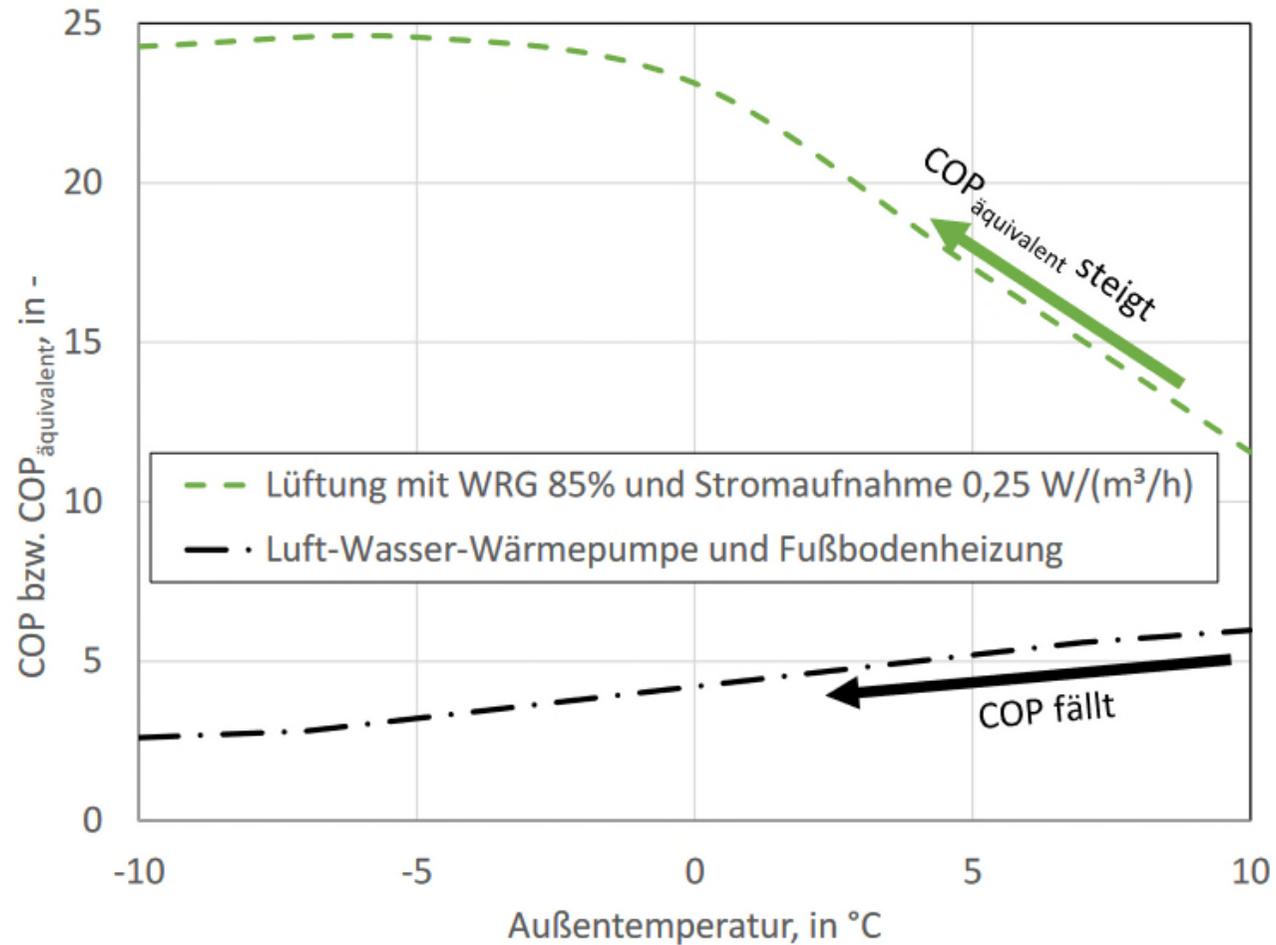
Economizer, Dampfeinspritzung & Drehzahlregelung im Teillastbetrieb (+)

COP der WRG

10 bis 25

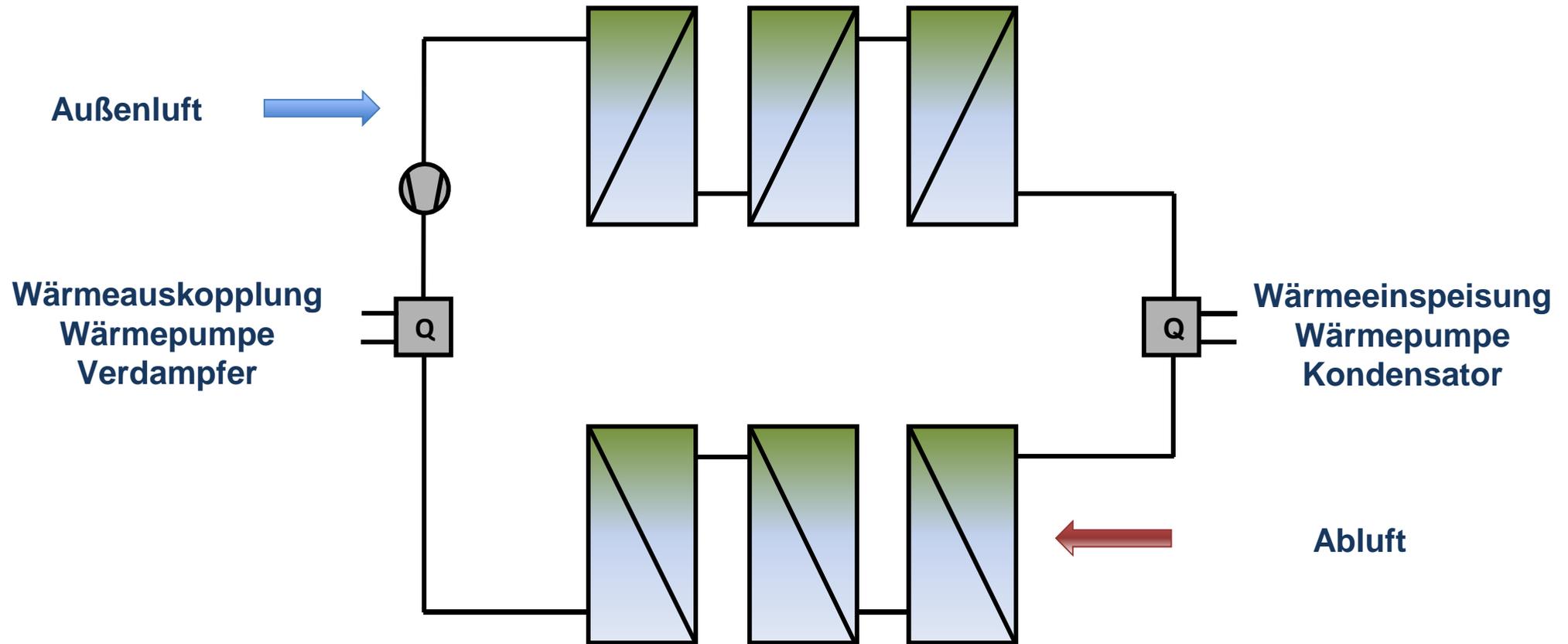
COP der WP

3 bis 5

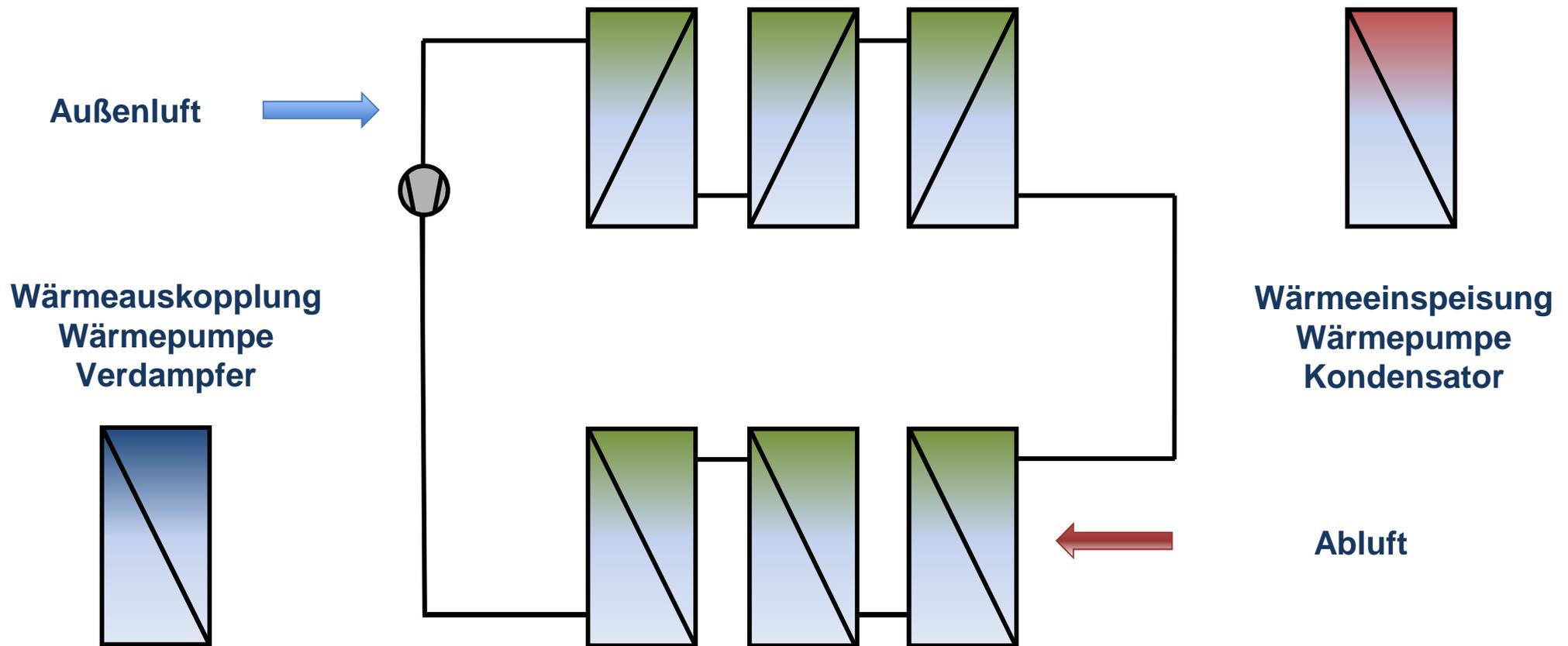


Quelle: Hartmann, T., 2021 Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung als nachhaltige Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele (COP-Äquivalenzstudie) – Kurzstudie mit Validierung aus der Praxis

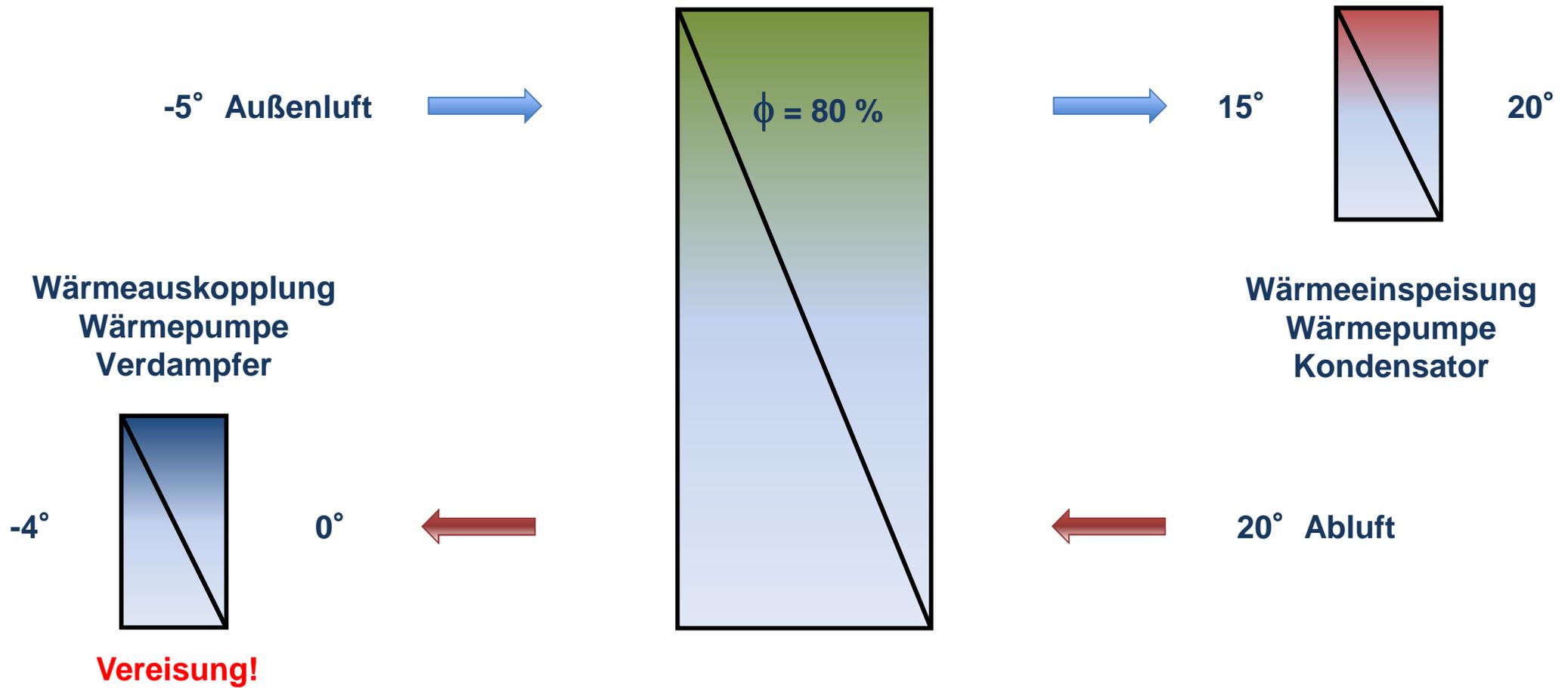
Wärmerückgewinnung



Wärmerückgewinnung



Wärmerückgewinnung



Wärmepumpe im RLT-Gerät ohne WRG

5 fache Leistung nötig aber höheres
Temperaturniveau (> COP)

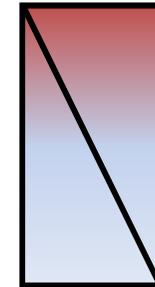
=> etwa Faktor 3 höherer
Elektroenergiebedarf

-5° Außenluft

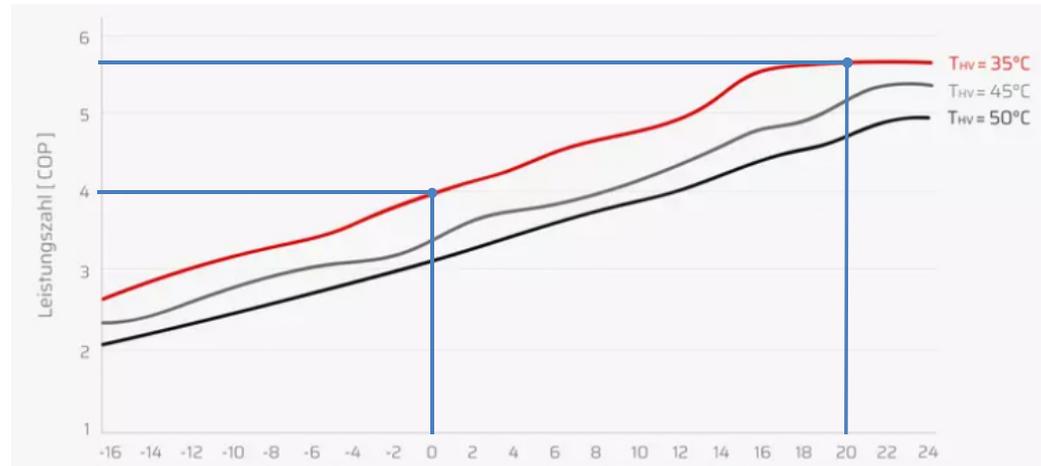


-5°

20°



Wärmeeinspeisung
Wärmepumpe
Kondensator



Wärmeauskopplung
Wärmepumpe
Verdampfer



1°

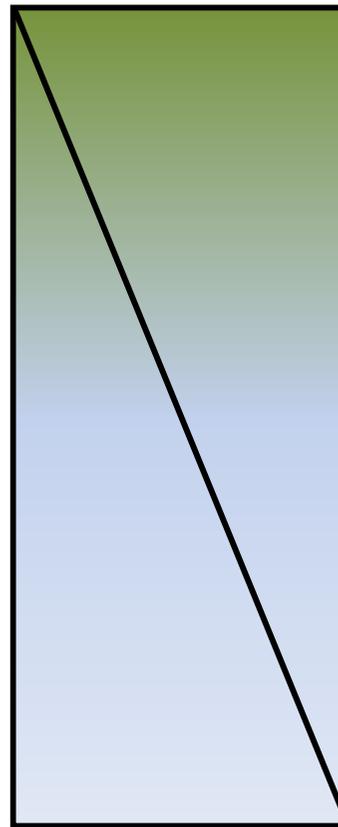
20°



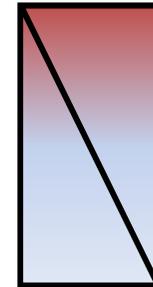
20° Abluft

Wärmerückgewinnung

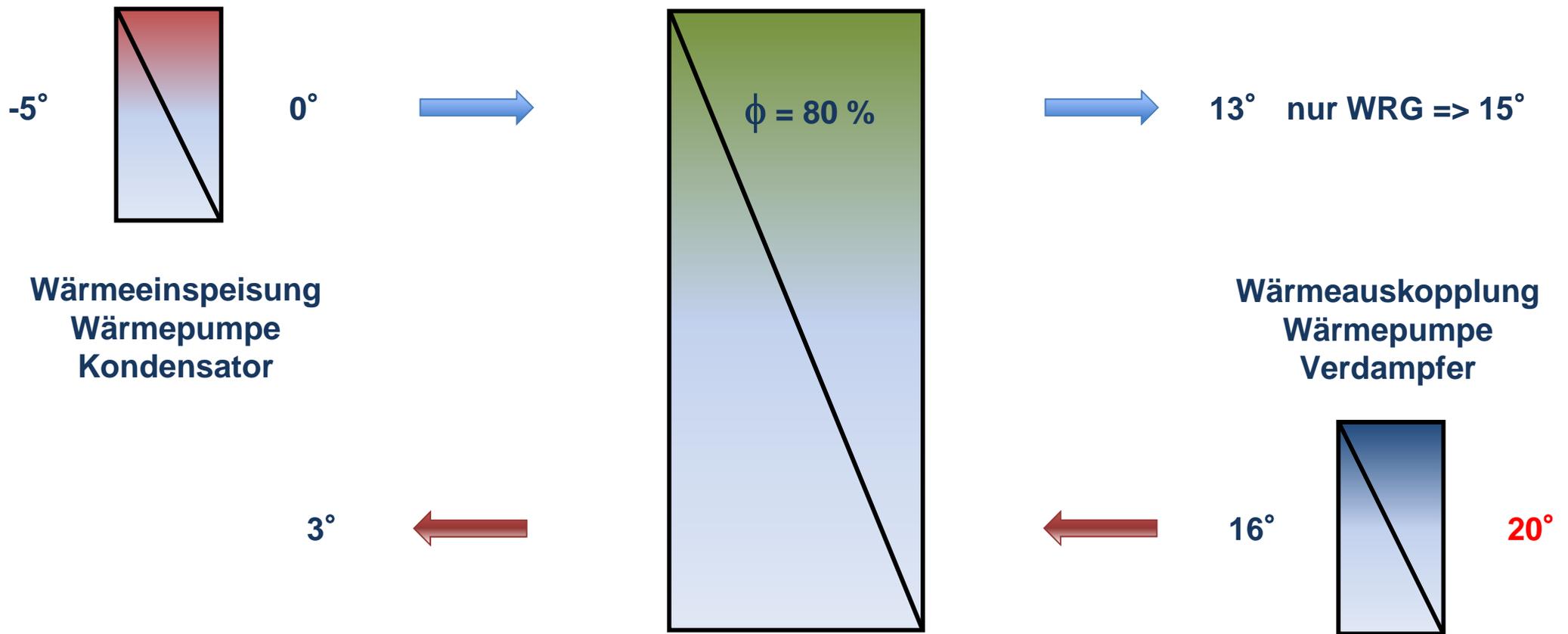
Wärmeauskopplung
Wärmepumpe
Verdampfer



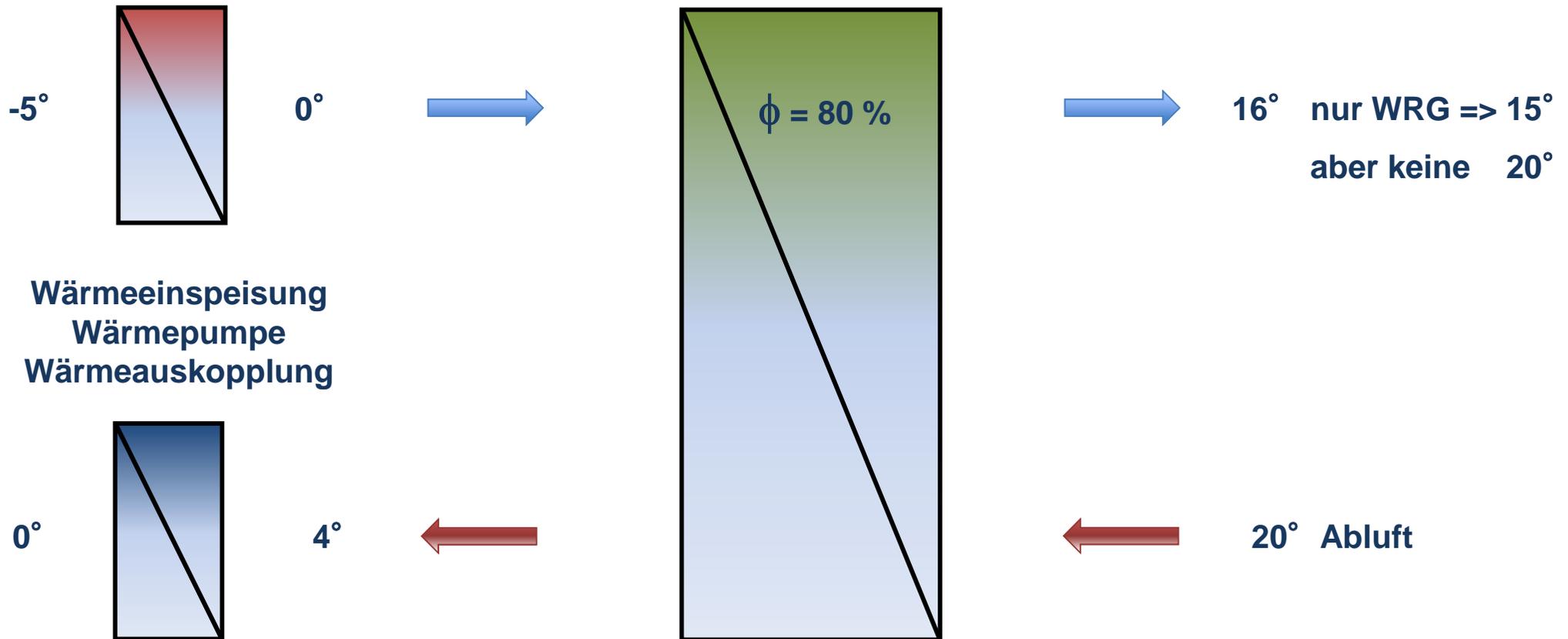
Wärmeeinspeisung
Wärmepumpe
Kondensator

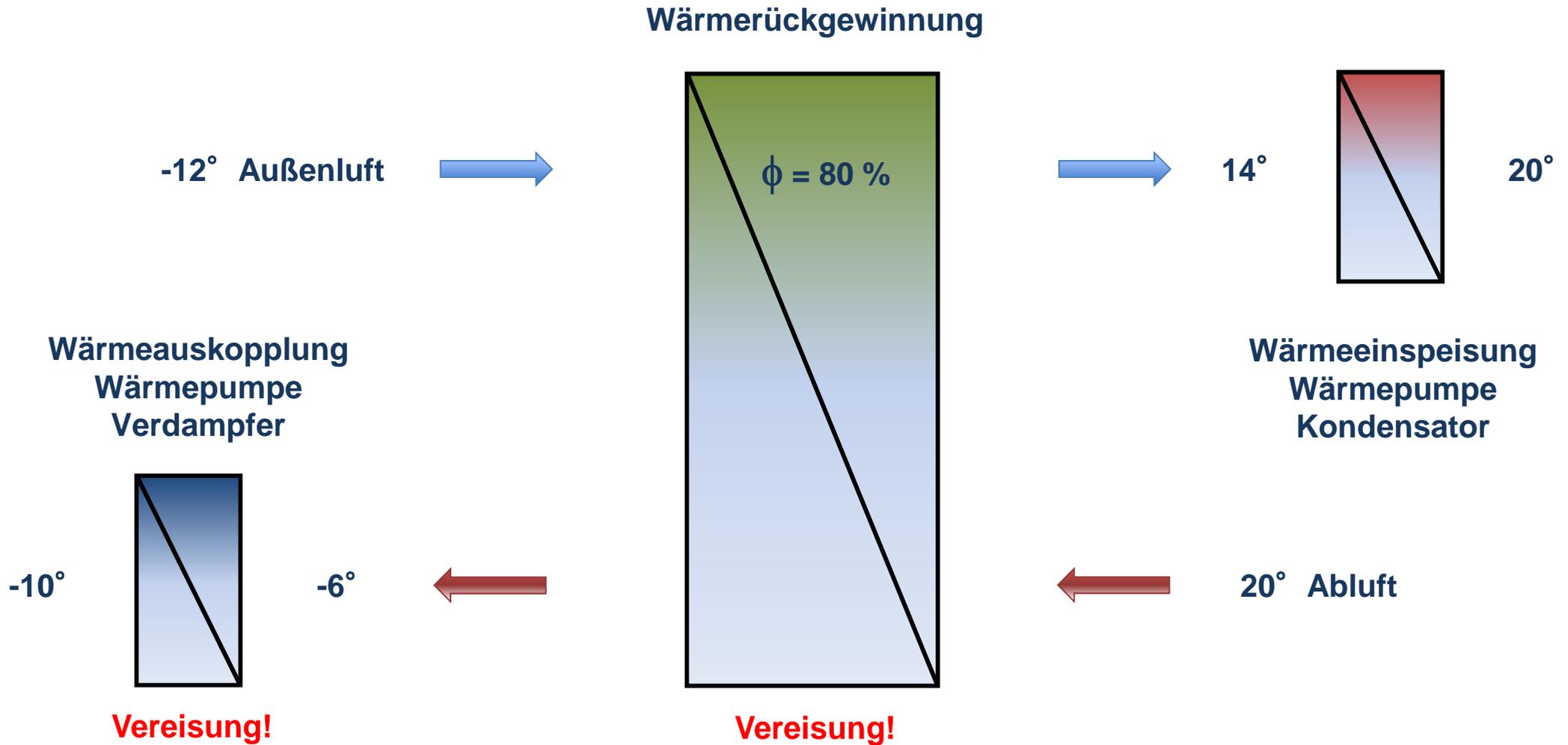


Wärmerückgewinnung

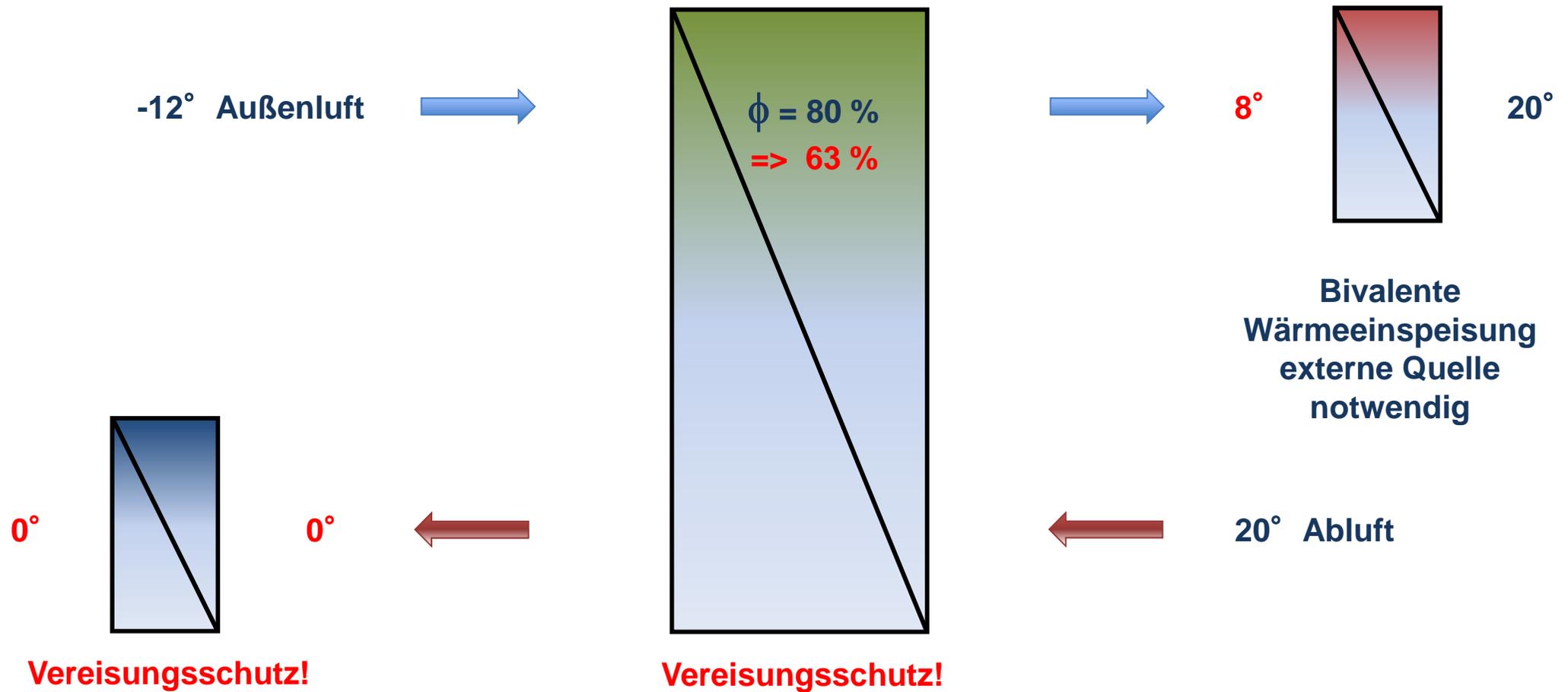


Wärmerückgewinnung





Wärmerückgewinnung



Wärmerückgewinnung

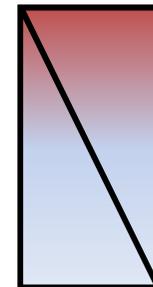
-12° Außenluft



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



8°



20°

hohe Wärmeeinspeisung
geteilter Verdampfer mit
Abtauschaltung
Zusatzwärme notwendig!

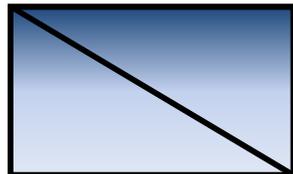
20° Abluft



Vereisungsschutz!

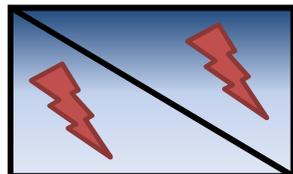


Vereisung!



-10°

0°



0°

0°

Enteisung!

Wärmerückgewinnung

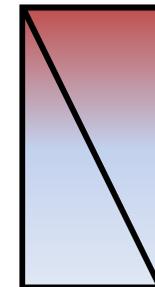
-12° Außenluft



$\phi = 80\%$
 $\Rightarrow 40\%$



1°



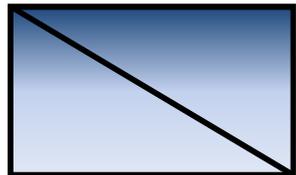
20°

hohe Wärmeeinspeisung
geteilter Verdampfer mit
Abtastung WRG
Abwärme notwendig!

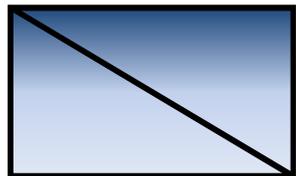
20° Abluft



Vereisung!



7°



7°

7°

Enteisung z. B. Abwärme!

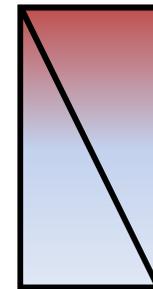
Vereisungsschutz!

Auch ohne WRG droht Vereisung

-12° Außenluft



-12°

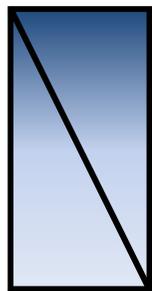


20°

Wärmeauskopplung
Wärmepumpe
Verdampfer

Wärmeeinspeisung
Wärmepumpe
Kondensator

-5°



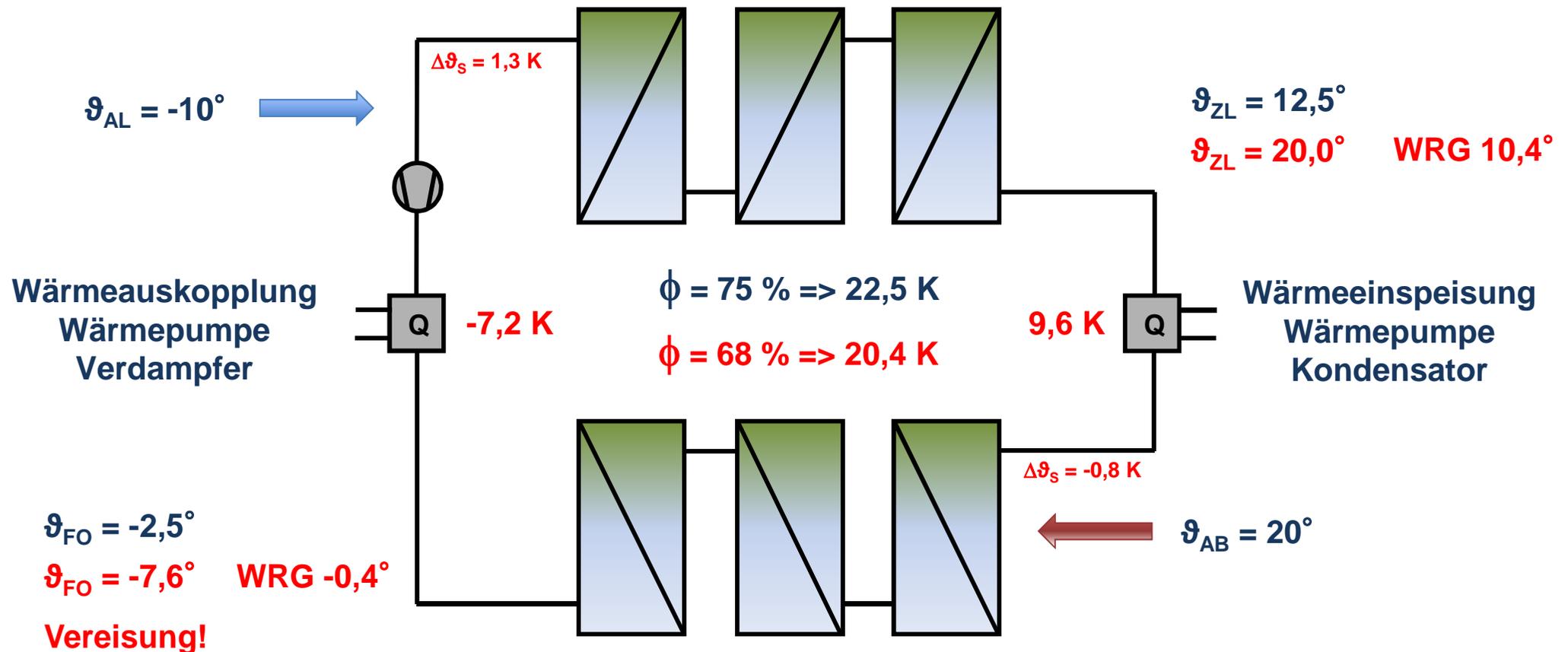
20°

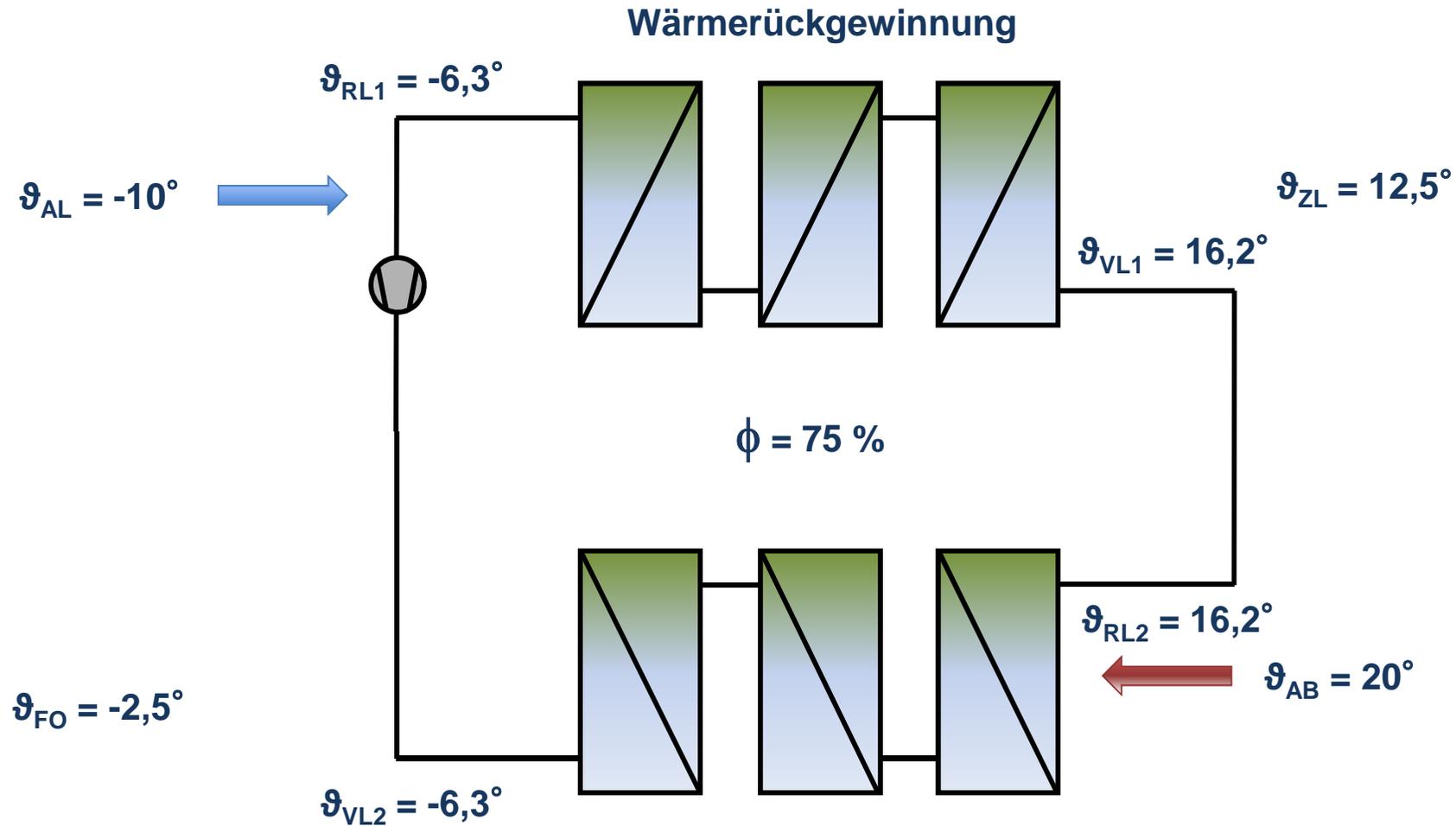


20° Abluft

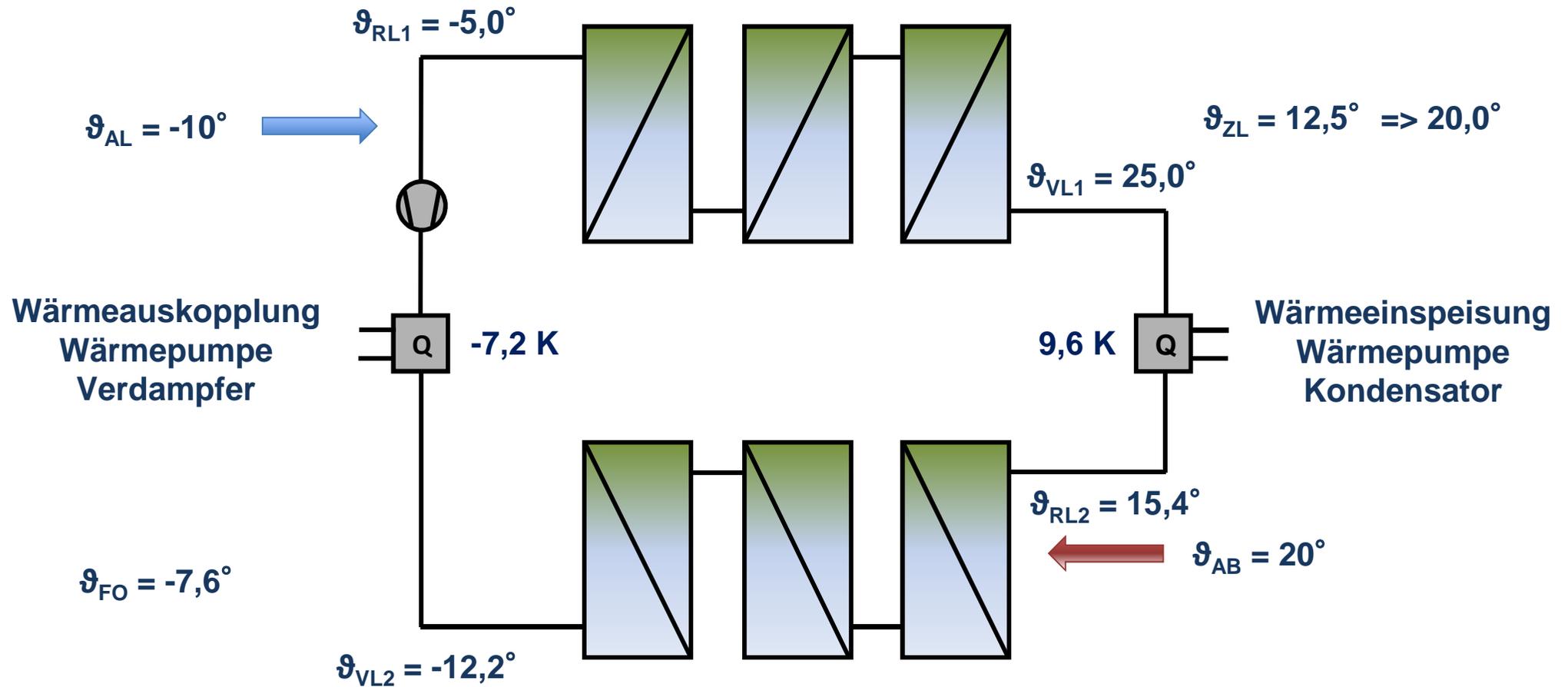
Vereisung!

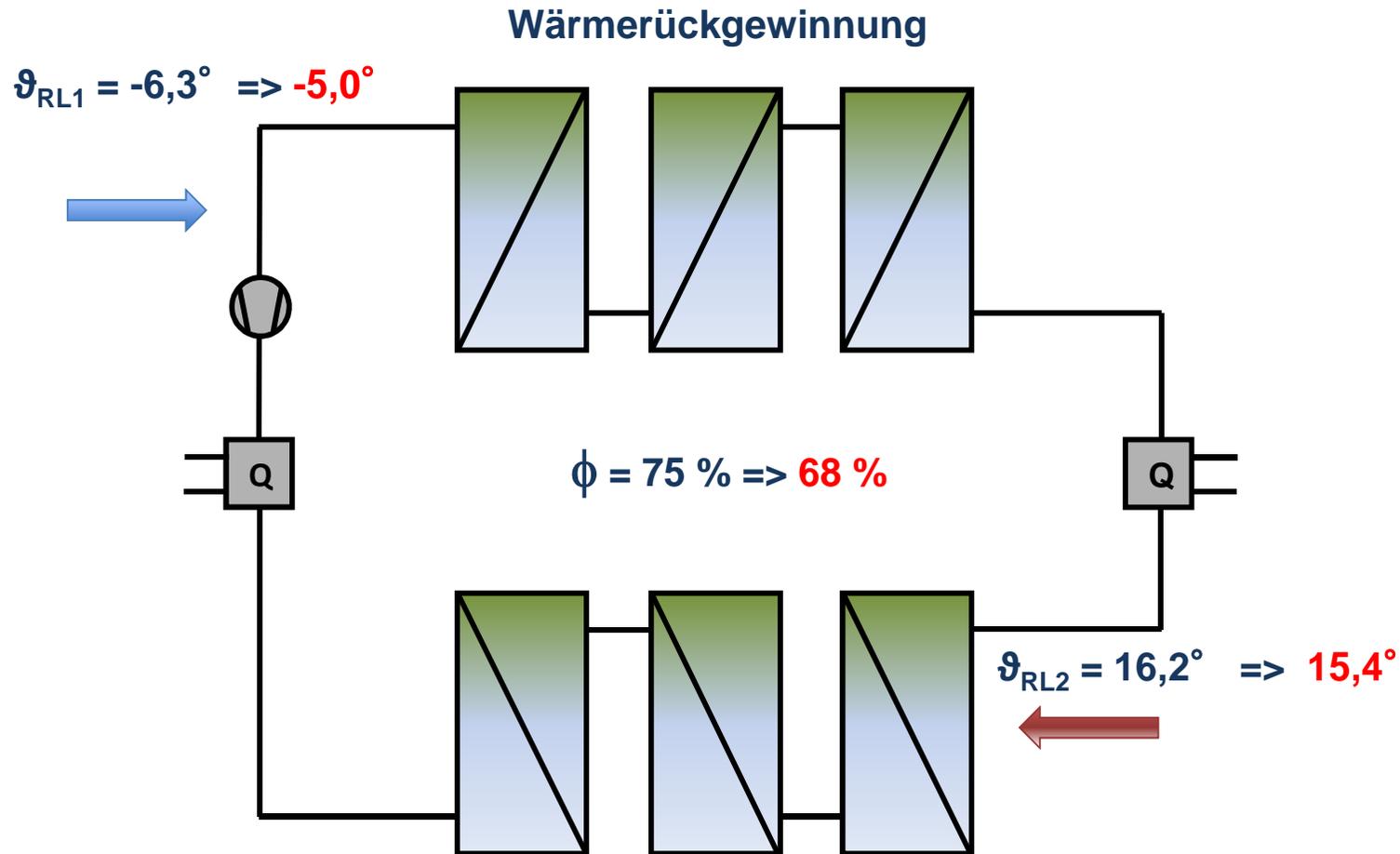
Wärmerückgewinnung

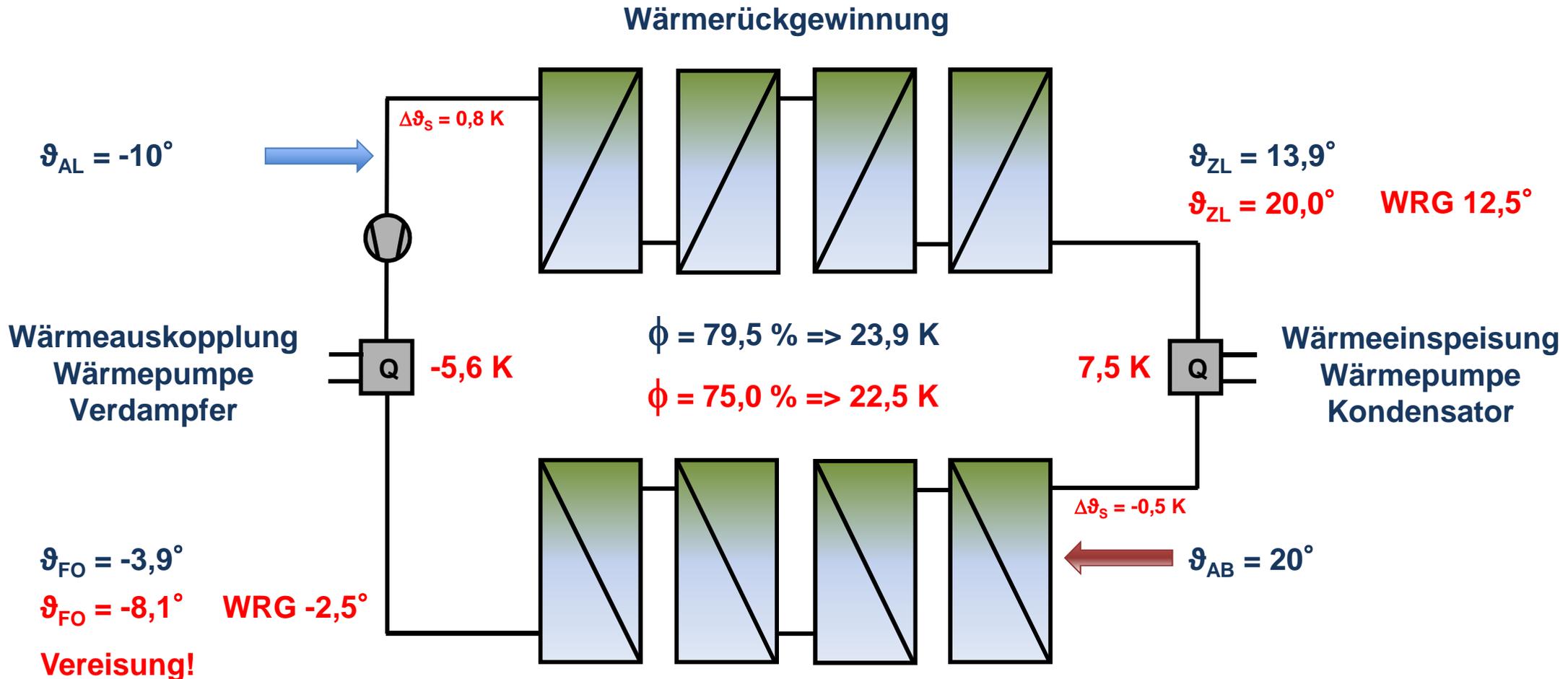




Wärmerückgewinnung









Hydraulikmodul WRG mit integrierter Wärmepumpe

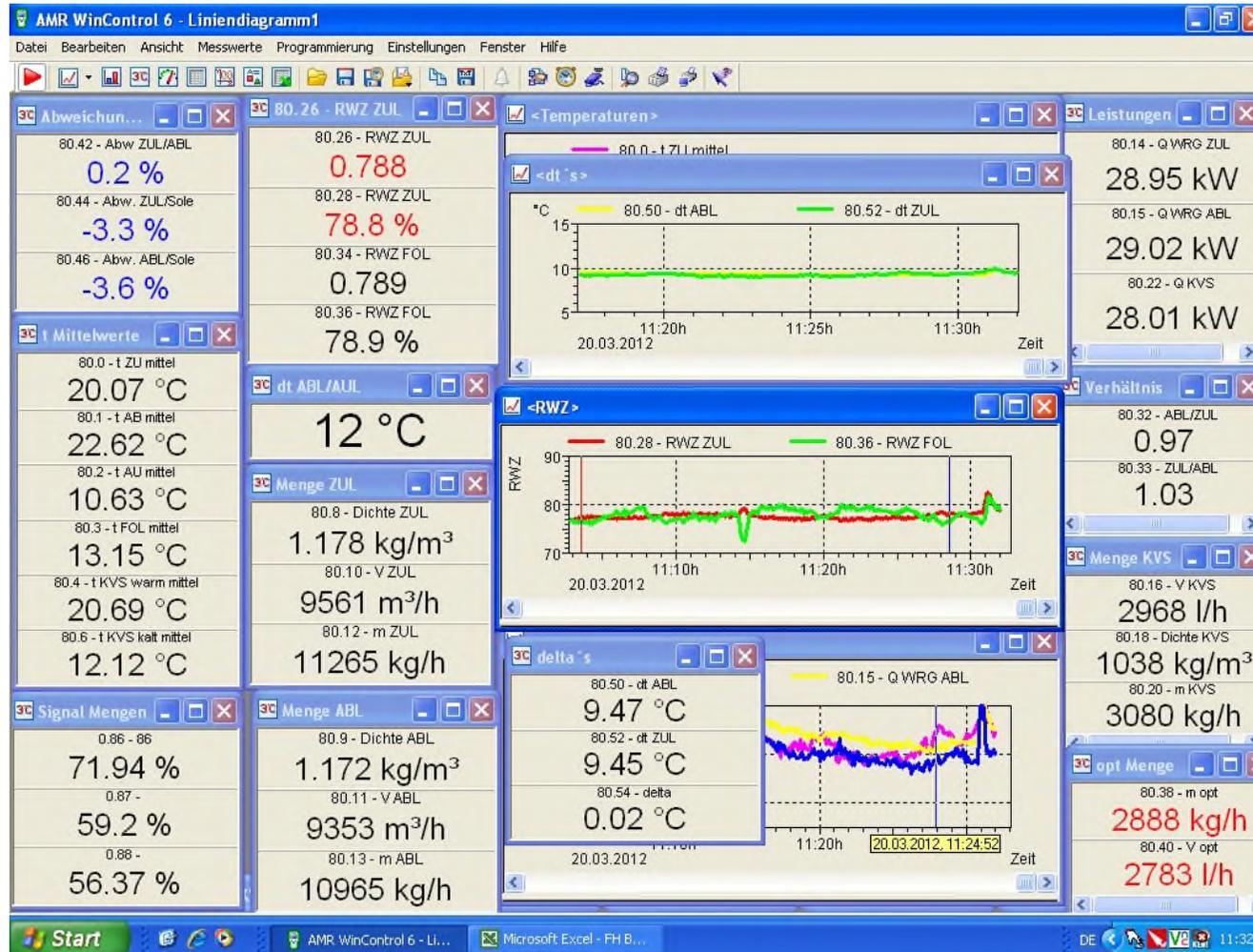




WRG &
Wärmepumpe



Leistungsmessung



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**

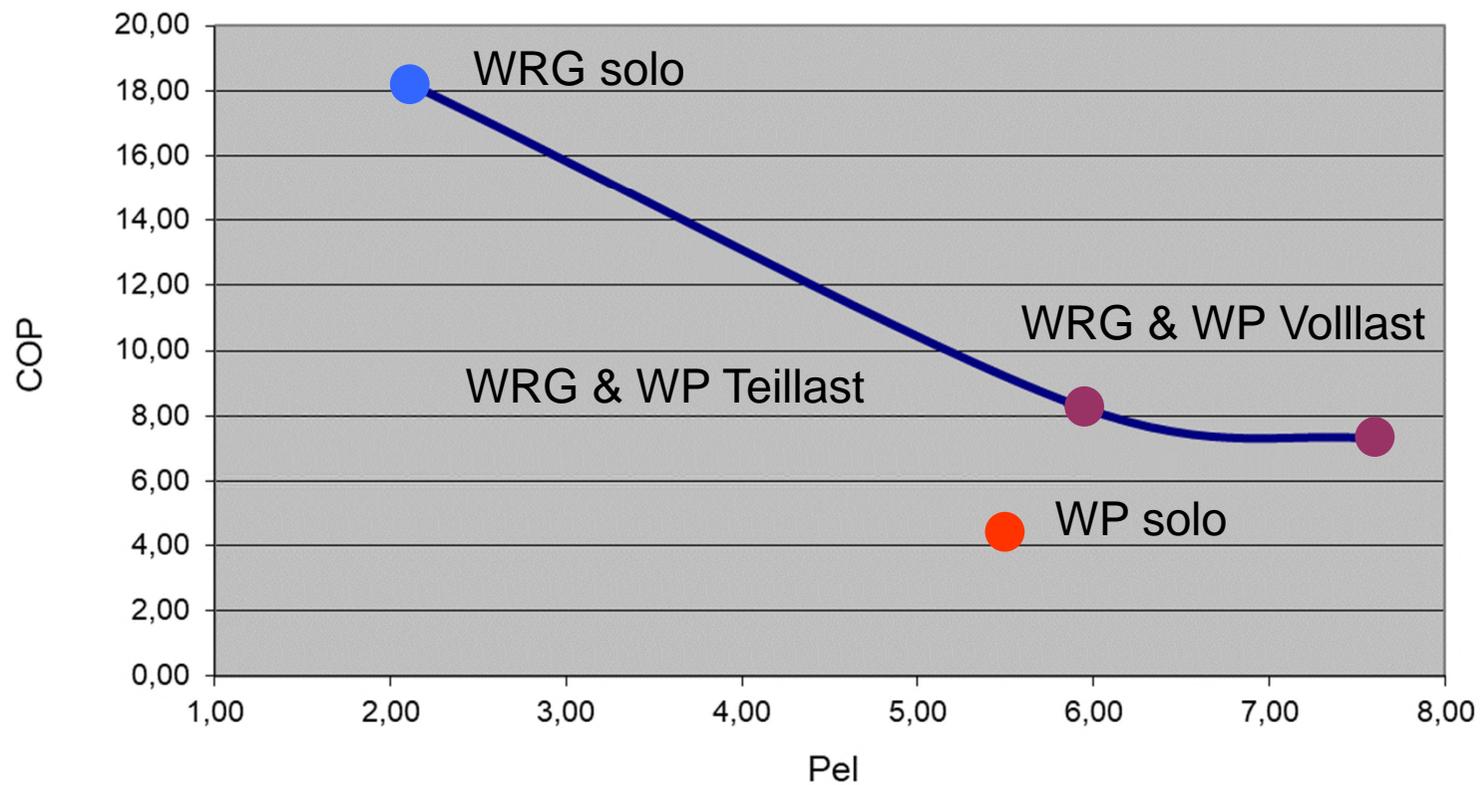
jeweils **24 Rohrreihen** pro Luftseite **$Q_{WRG} = 38,3 \text{ kW}$** mit **$COP_{eq.} = 18,2$**

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**)



Problemfall Wechselwirkung allgemein

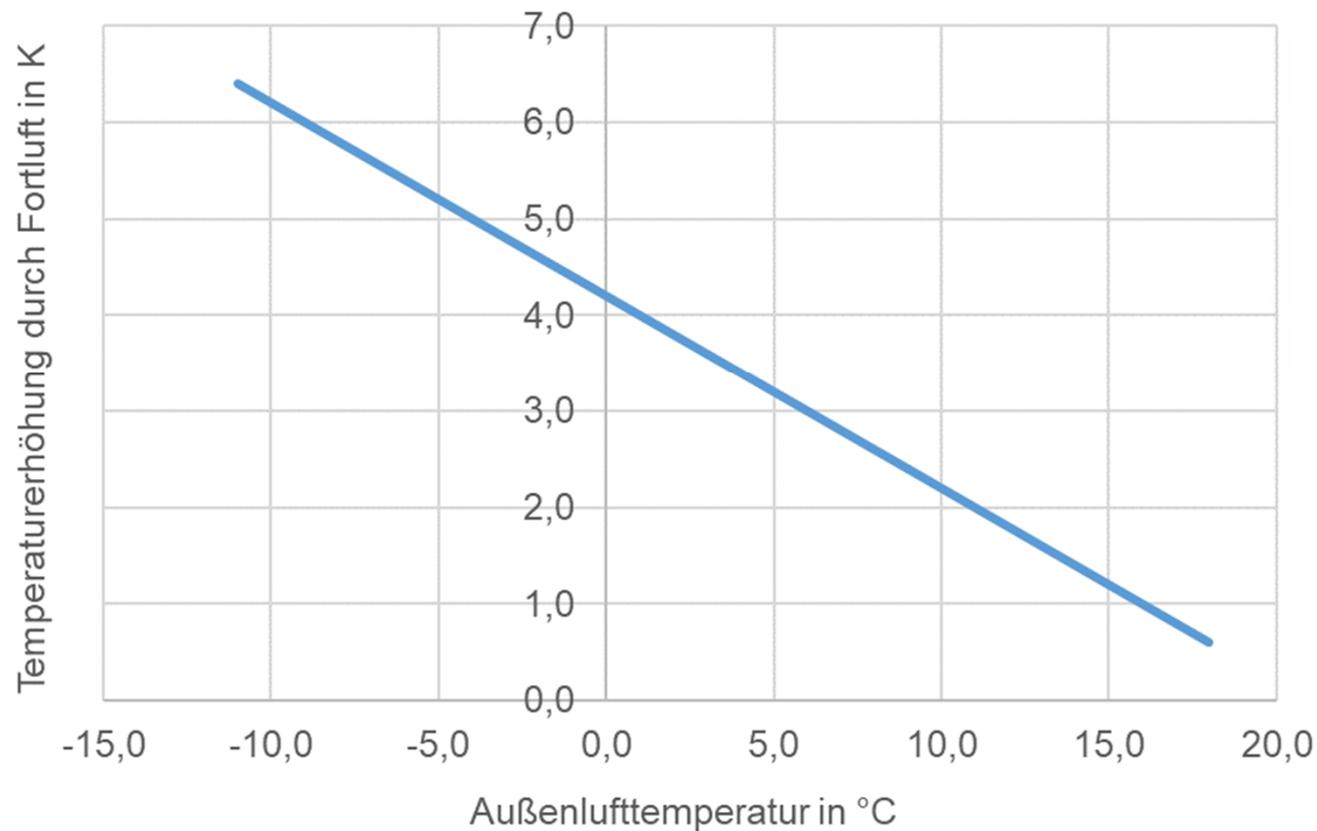
Abwärme kann **nur einmal genutzt** werden (WRG vs. WP)

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 $\phi_{WRG} = 0,8$

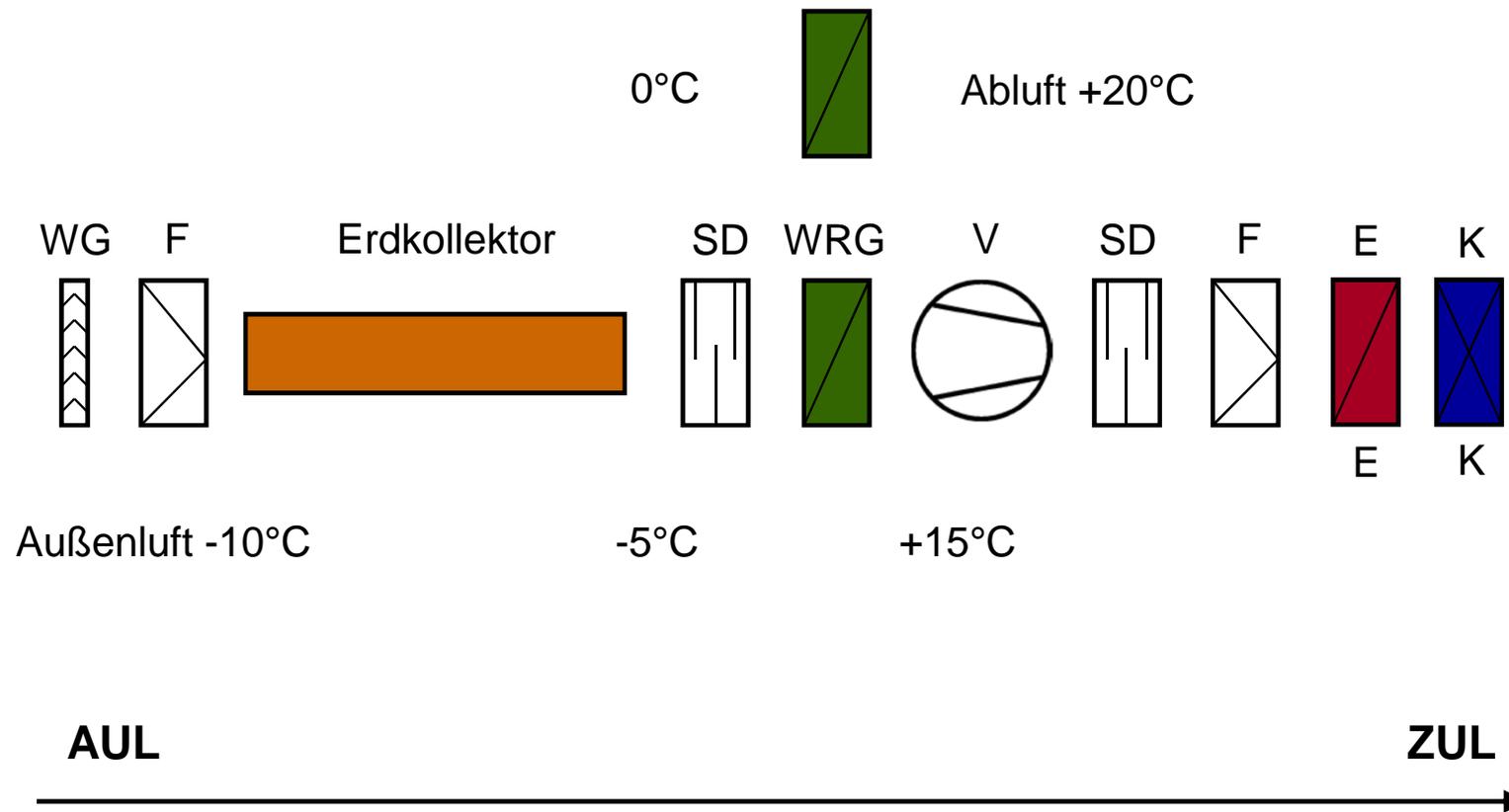


Problemfall Wechselwirkung im KVS

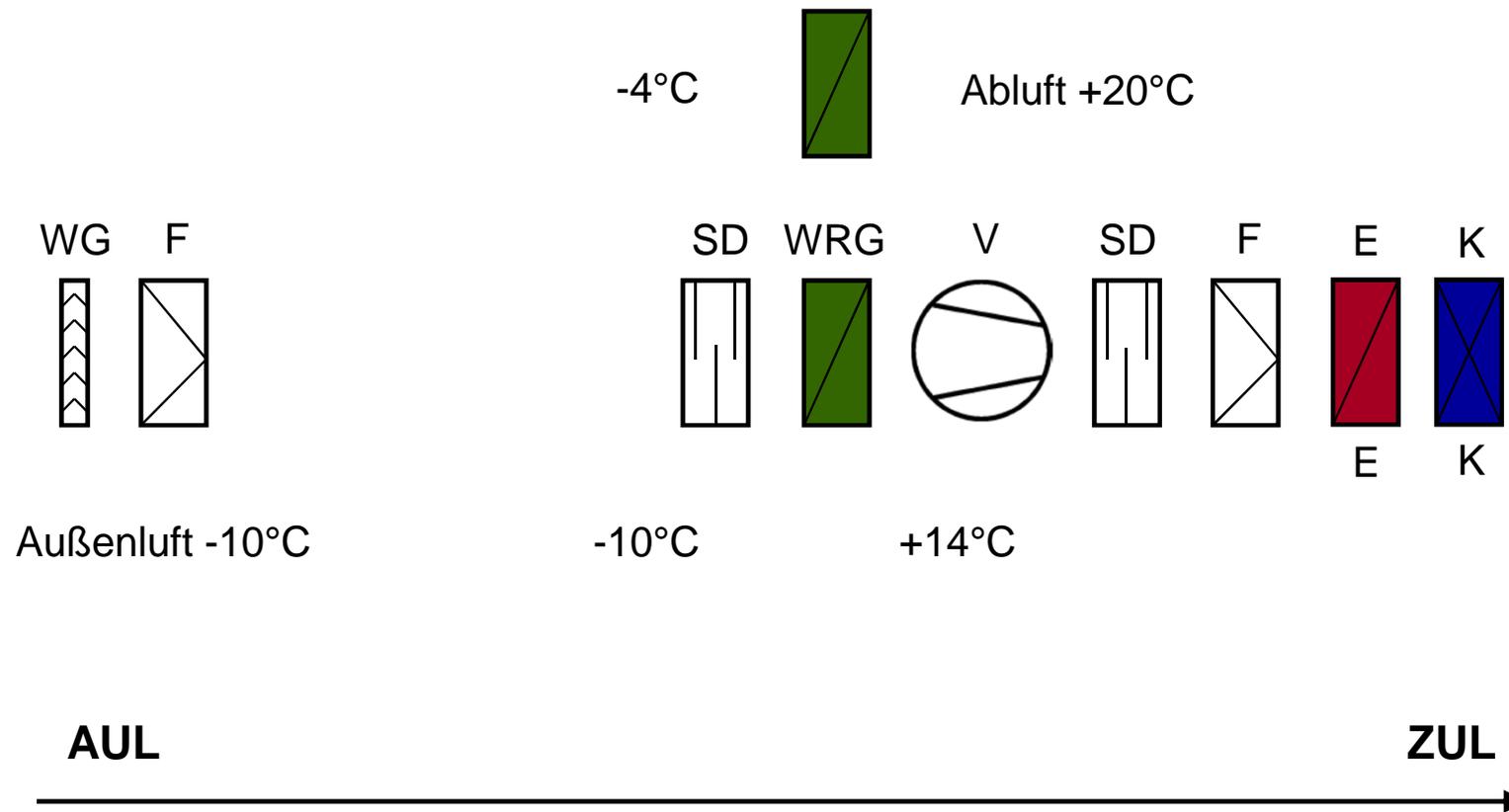
Doppelt **negative Beeinflussung KVS** durch Ein- und Auskopplung (-)

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

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

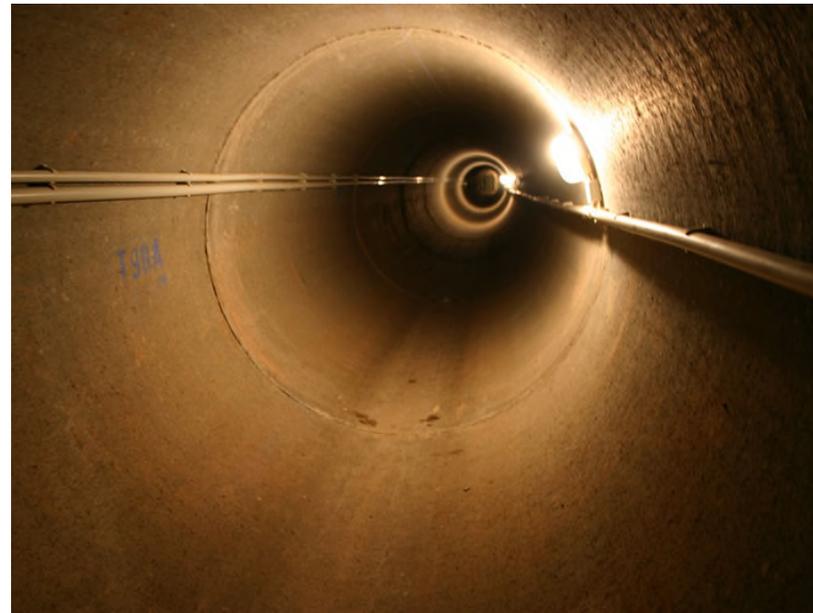


Anlage ohne Erdwärmeübertrager im Winter



Erdwärmeübertrager

- hohe Investitionskosten
- geringer Nettonutzen



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!

HERZLICHEN DANK

technikwissen@howatherm.de

ZEIT für Ihre FRAGEN und ANREGUNGEN

Prof. Dr.-Ing. Dr. **Christoph Kaup**