

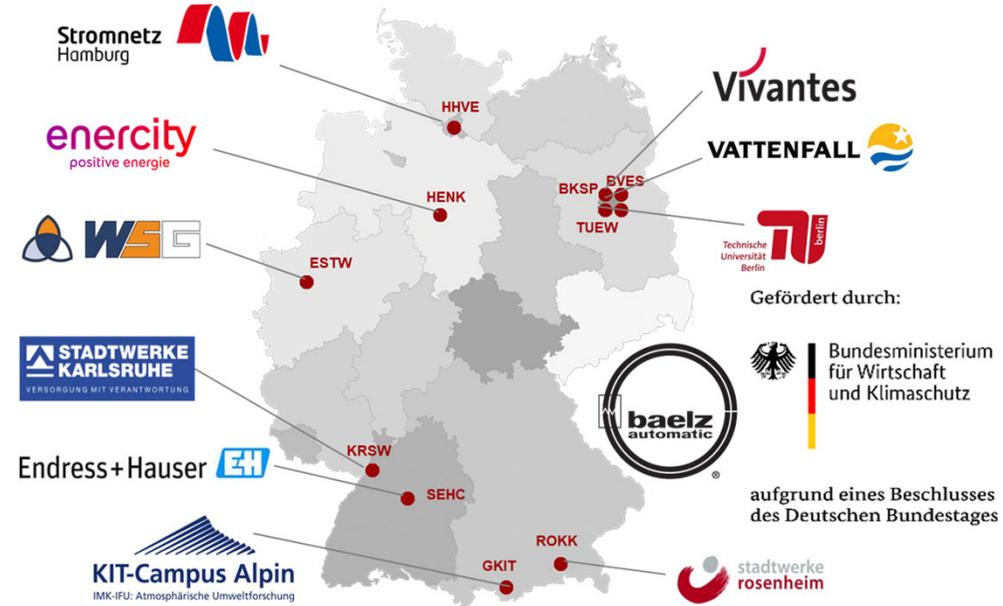
Energieeffiziente Regelung von Absorptionskälteanlagen und -wärmepumpen in Abwärmenetzen

1. Projekthintergrund zur Anlagenentwicklung und -regelung
2. Konzeption der modellbasierten Regelstrategien
3. Messdaten und Ergebnisse

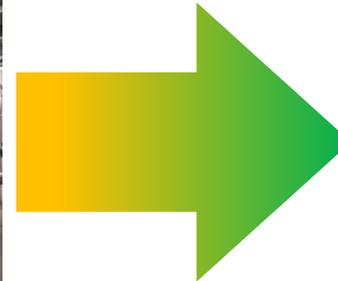
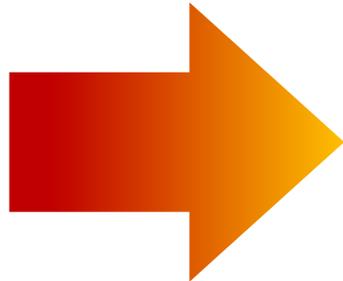
Projekthintergrund

BMW / PTJ Projekte:

1. EnEff-AKA: Anlagenentwicklung Biene & Hummel
2008 – 2013
5 Partner, 3 Funktionsmuster
2. EnEff-FAKS: Feldtest 16 Installationen,
2013 – 2018
21 Partner, 25 Anlagen
3. EnEff-ReKs: Effiziente Anlagen- und Systemregelung
2018 – 2022
10 Liegenschaften mit 14 AKA



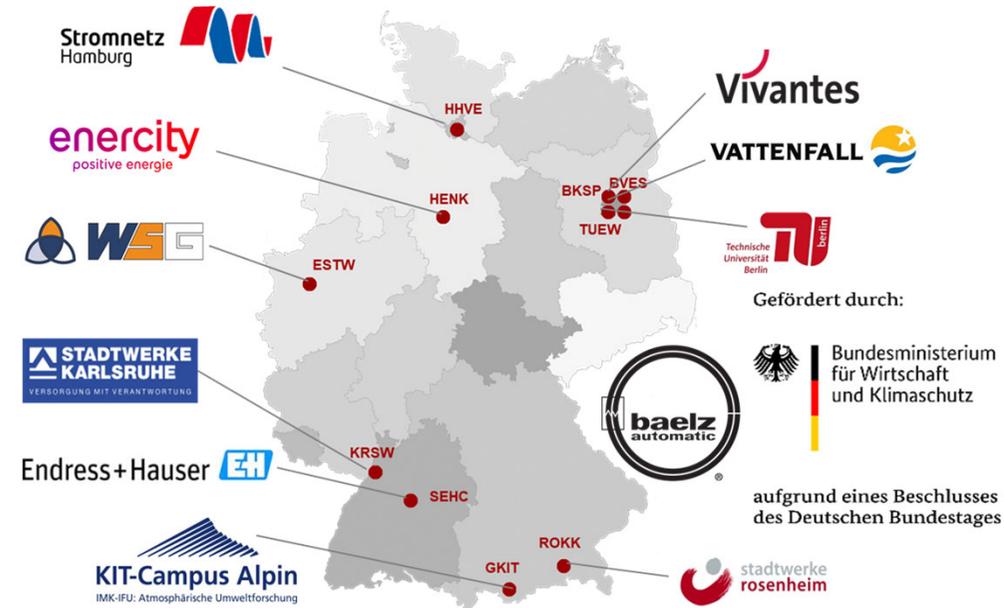
Regelung energieaufwandsoptimierter Kälteerzeugungssysteme



Projekthintergrund

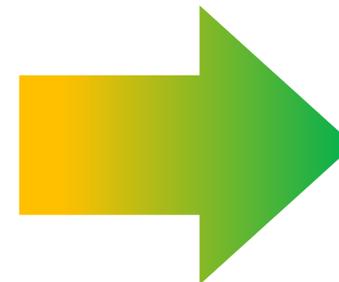
BMW / PTJ Projekte:

1. EnEff-AKA: Anlagenentwicklung Biene & Hummel
2008 – 2013
5 Partner, 3 Funktionsmuster
2. EnEff-FAKS: Feldtest 16 Installationen,
2013 – 2018
21 Partner, 25 Anlagen
3. EnEff-ReKs: Effiziente Anlagen- und Systemregelung
2018 – 2022
10 Liegenschaften mit 14 AKA



Zielstellungen in ReKs = Regelung energieaufwandsoptimierter Kälteerzeugungssysteme

- Entwicklung energieaufwandsoptimierter Regelungsstrategien zur Effizienzsteigerung in Kälteerzeugungssystemen
- Umsetzung der Regelstrategien auf industriellen SPS-Controllern mit Evaluation durch Monitoring



Regelungsebenen in ReKs

Komponenten-Regelung

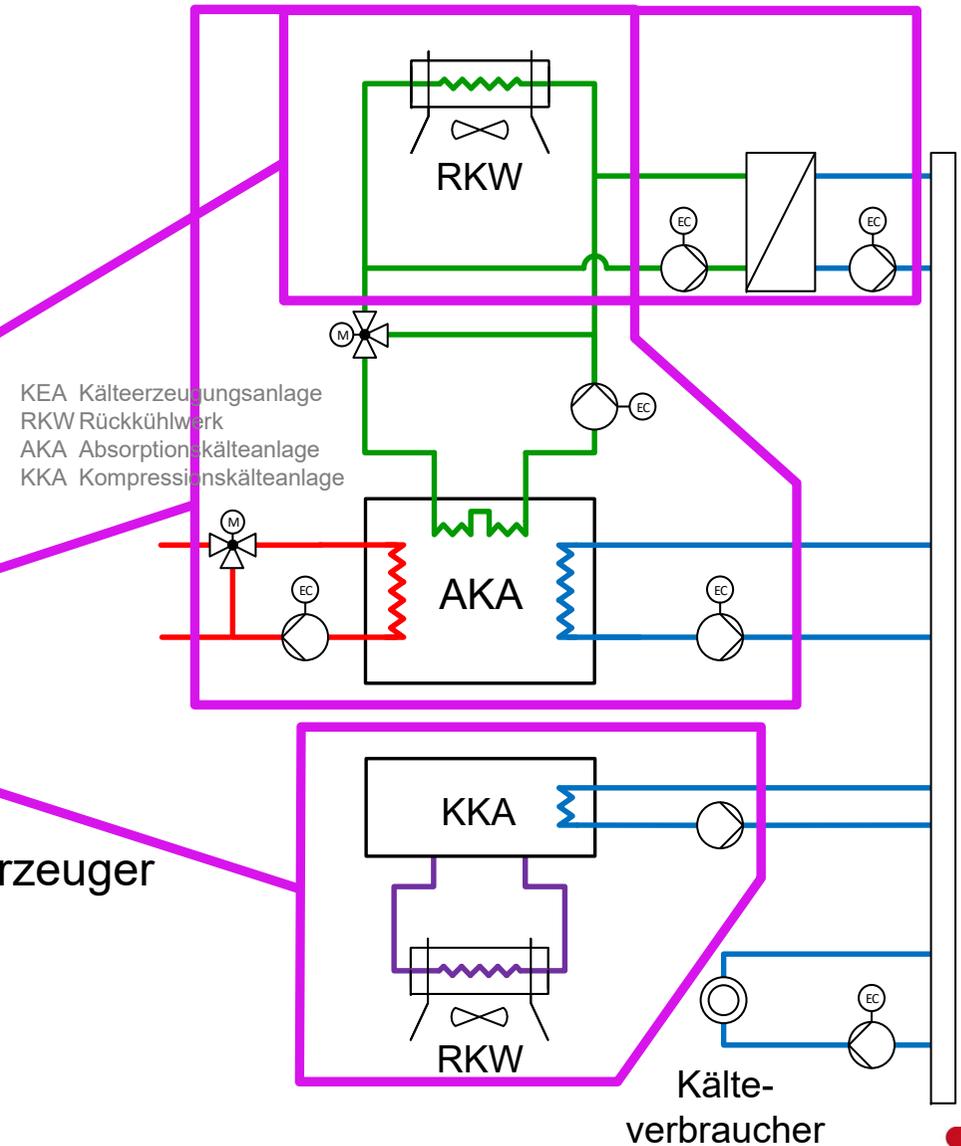
- Pumpen-Regelung
- Regelung Rückkühlwerk (RKW)
- Regelung Absorptionskälteanlage (AKA)

Anlagen-Regelung

- KEA_{FC} im Freikühlbetrieb
- KEA_{th} im Absorptionskältebetrieb
- KEA_{el} im Kompressionskältebetrieb

System-Regelung

- Anforderung / Freigabe der verfügbaren Kälteerzeuger
- Folgeschaltungen für Kälteerzeuger
- Priorisierung von Kälteerzeugern



Regelung Absorptionskälte (AKA)

Primäre Zielstellungen:

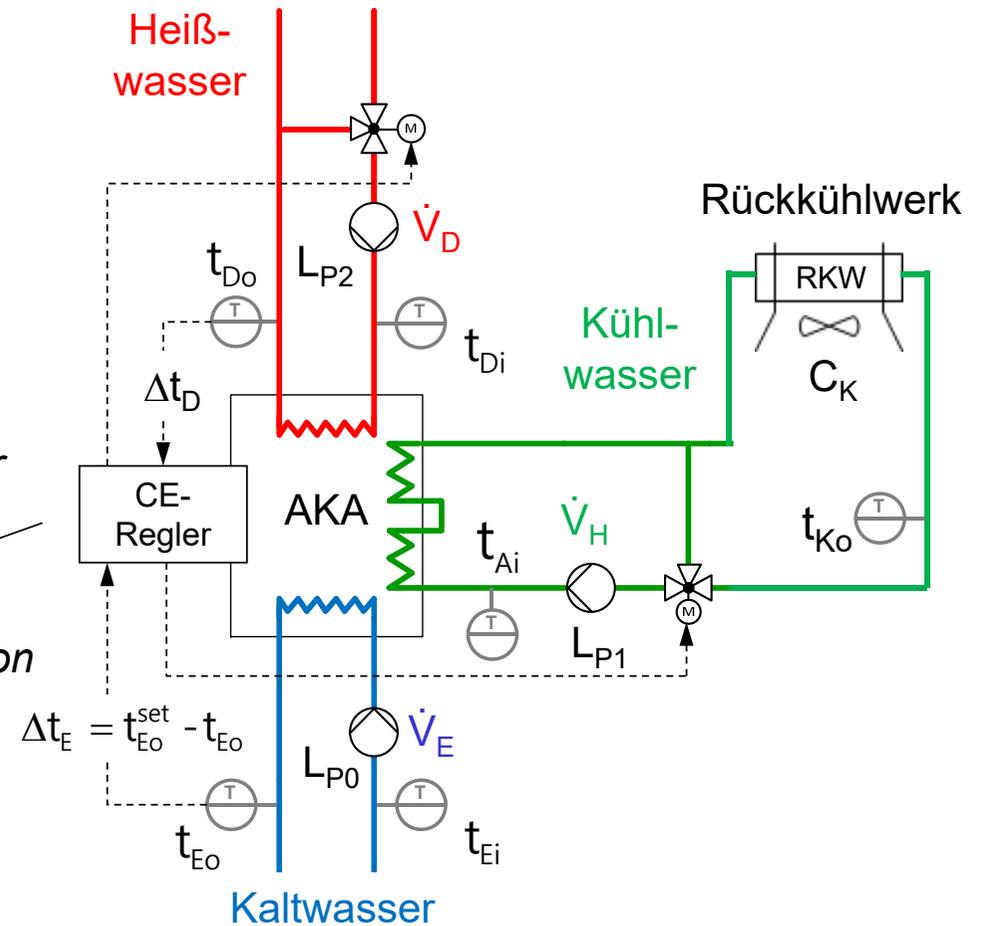
\dot{Q}_E^{set} Bereitstellung der geforderten Kälteleistung

t_{Eo}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Kaltwasser

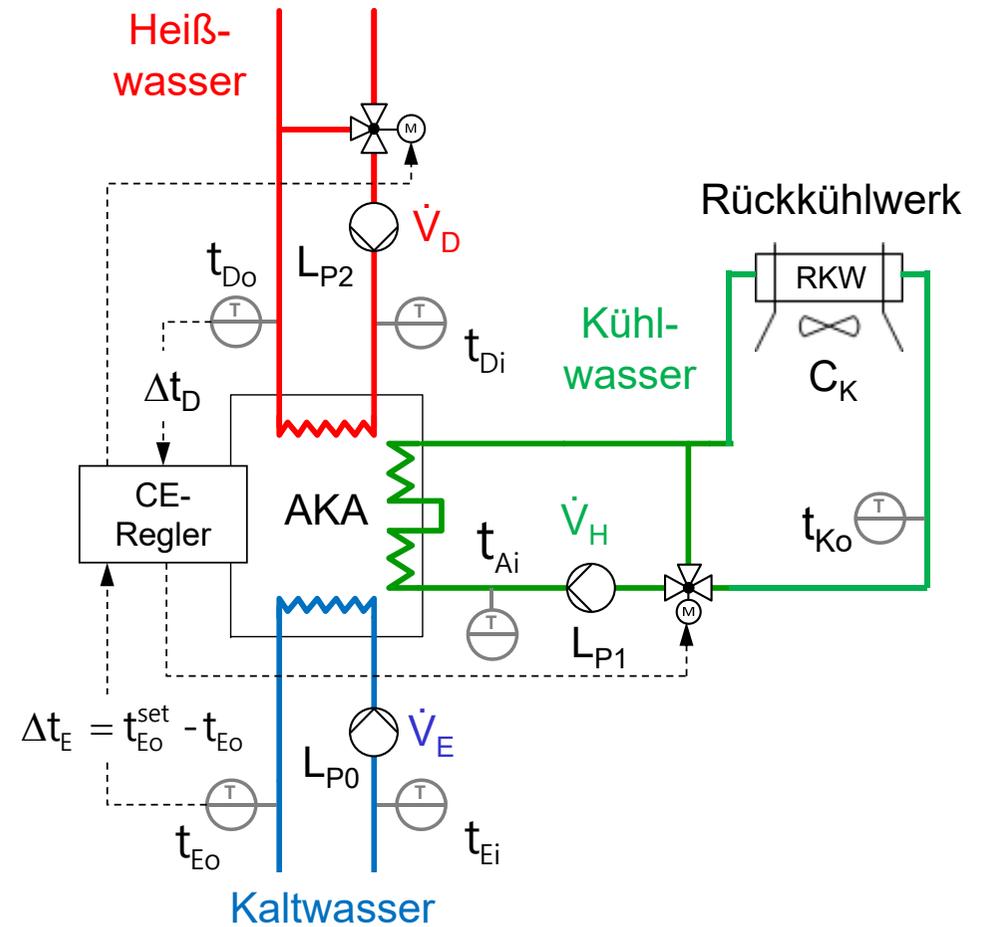
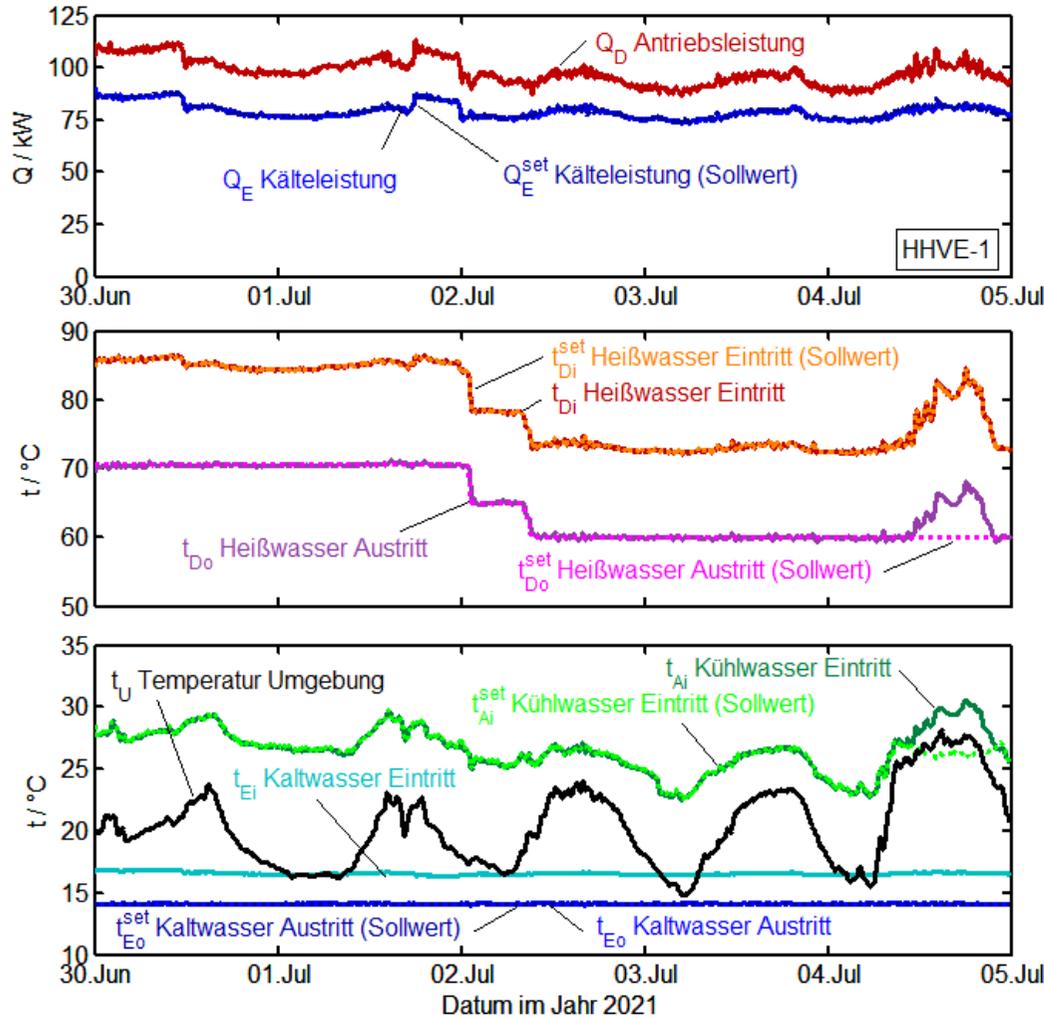
Sekundäre Zielstellungen:

t_{Do}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Heißwasser

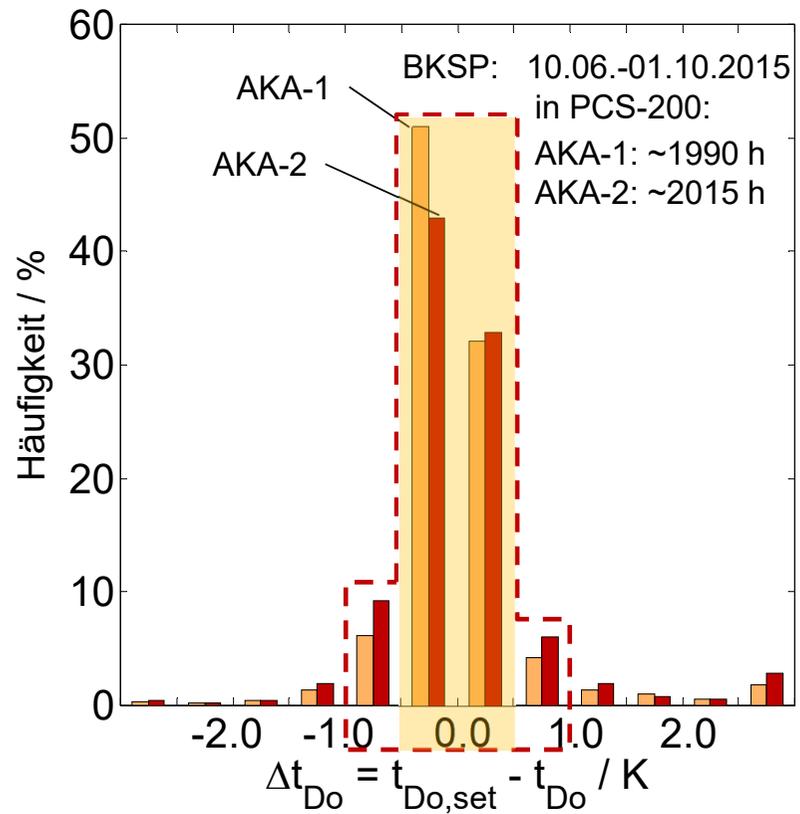
CE = *Characteristic Equation*



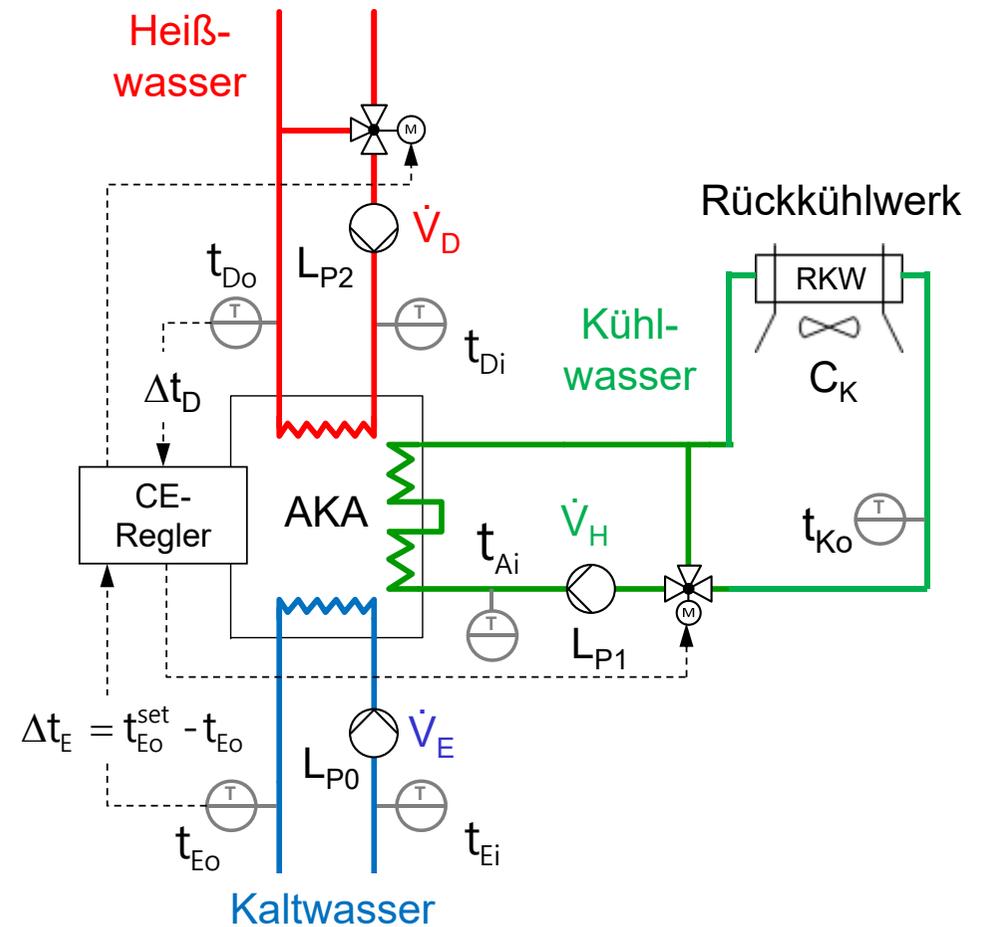
Regelung Absorptionskälte (AKA)



Regelung Absorptionskälte (AKA)



70 - 80% Regelabweichung $< \pm 0,5 K$
85 - 90% Regelabweichung $< \pm 1,0 K$



Regelung Absorptionskälte (AKA)

Primäre Zielstellungen:

\dot{Q}_E^{set} Bereitstellung der geforderten Kälteleistung

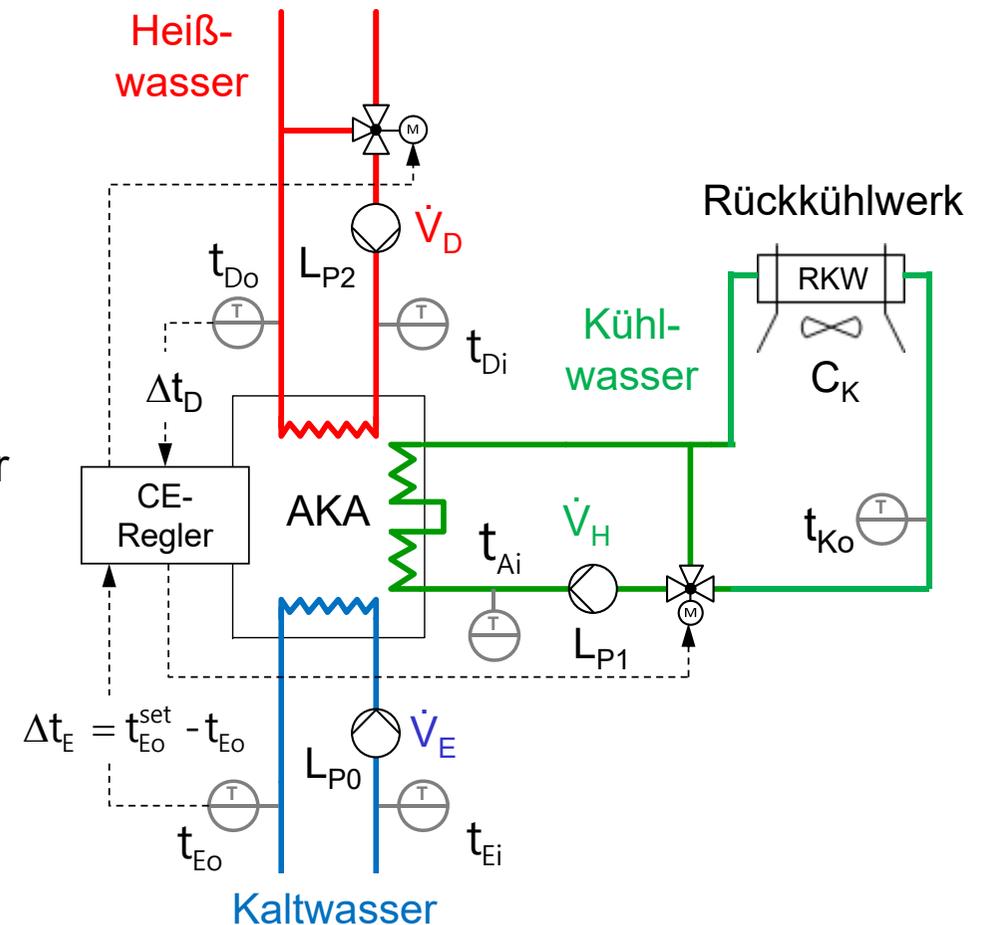
t_{Eo}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Kaltwasser

Sekundäre Zielstellungen:

t_{Do}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Heißwasser

Ergebnis aus Feldtest (FAkS-Projekt):

- ca. 10 – 50% des PE-Bedarfs resultieren aus dem Strombedarf für Pumpen + RKW
- Bedeutung des Strombedarf nimmt zu wenn PE-Faktor Wärme abnimmt



Anlagenregelung Absorptionskältebetrieb (KEA_{th})

Primäre Zielstellungen:

\dot{Q}_E^{set} Bereitstellung der geforderten Kälteleistung

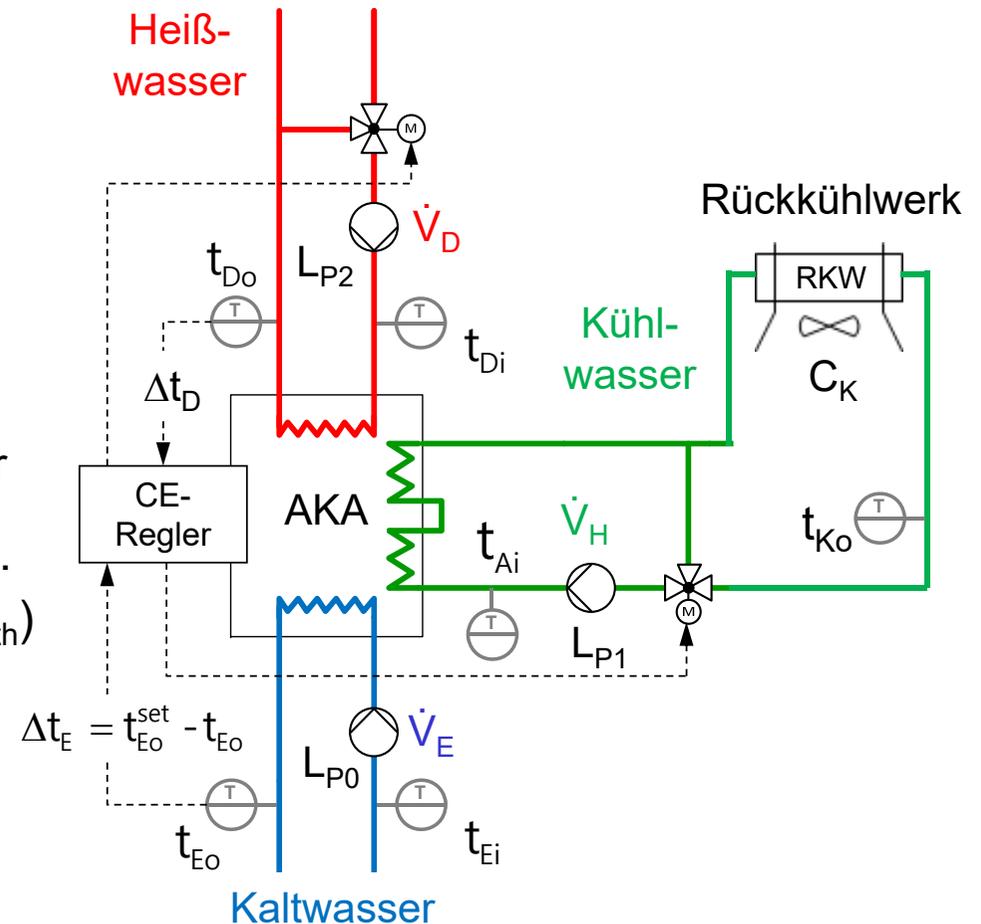
t_{E0}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Kaltwasser

Sekundäre Zielstellungen:

t_{D0}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Heißwasser

$\dot{w}_{KEA_{th}}^{min}$ minimaler spezifischer Strombedarf für therm. angetriebene Kälteerzeugungsanlagen (KEA_{th})

$$\dot{w}_{KEA_{th}} = \frac{L_{KEA}}{\dot{Q}_E} = \frac{\text{elektrische Leistung}}{\text{Kälteleistung}}$$



Anlagenregelung Absorptionskältebetrieb (KEA_{th})

Primäre Zielstellungen:

\dot{Q}_E^{set} Bereitstellung der geforderten Kälteleistung

t_{E0}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Kaltwasser

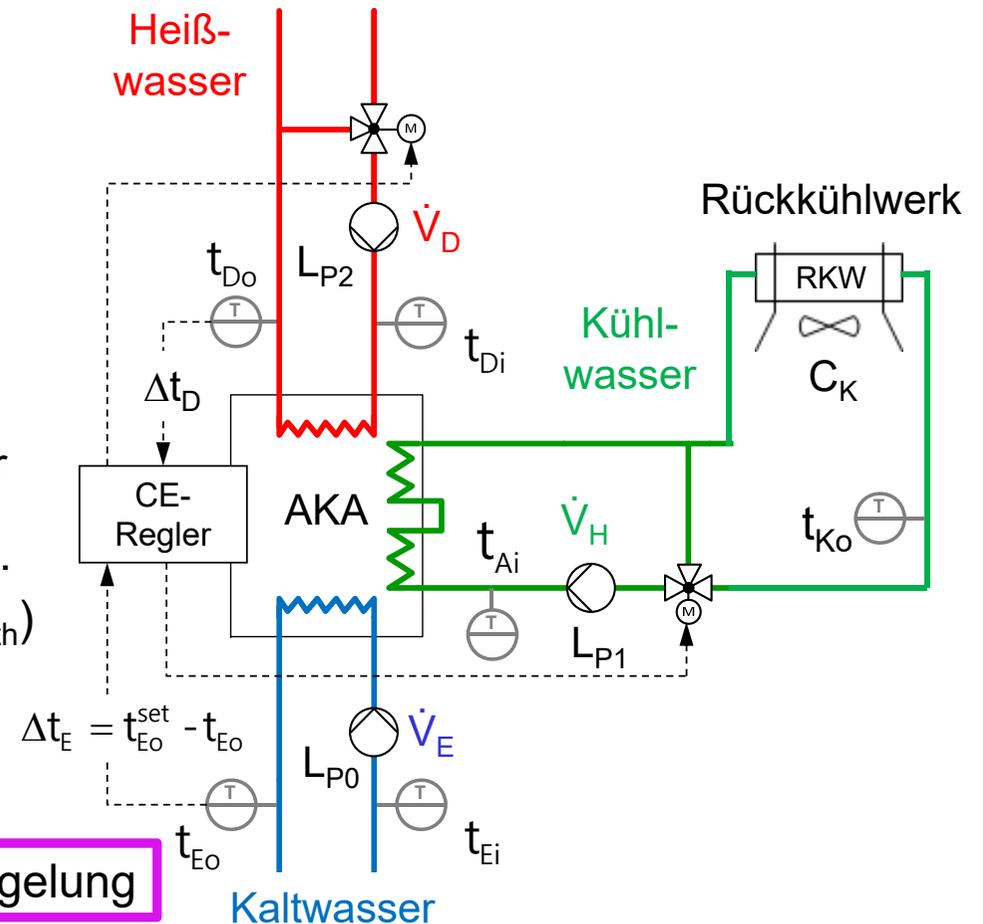
Sekundäre Zielstellungen:

t_{D0}^{set} Einhaltung der Solltemperatur im Heißwasser

$\dot{w}_{KEA_{th}}^{min}$ minimaler spezifischer Strombedarf für therm. angetriebene Kälteerzeugungsanlagen (KEA_{th})

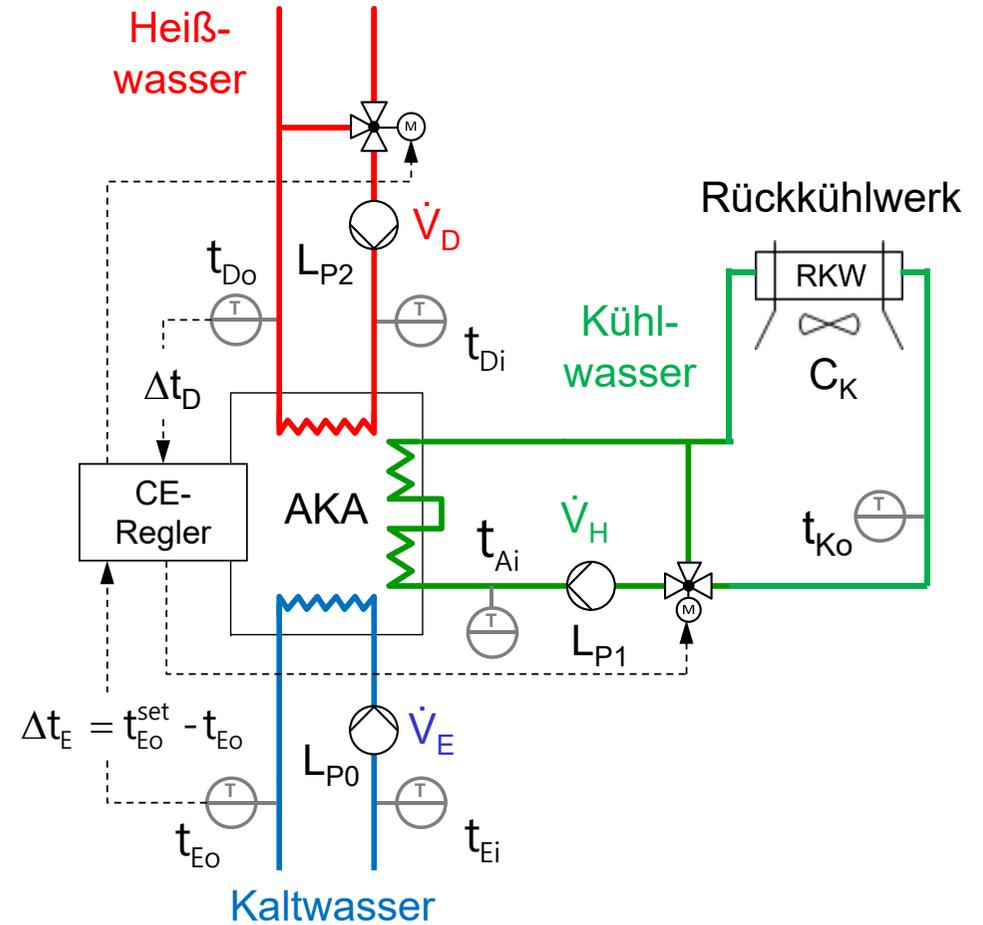
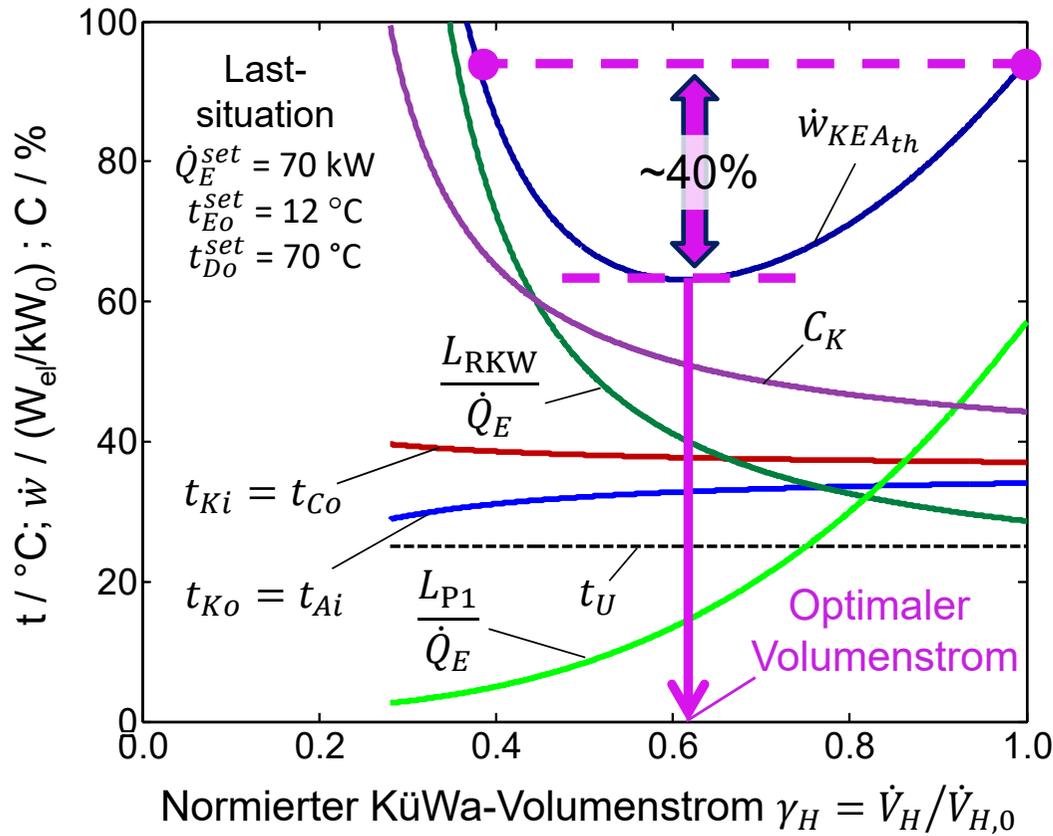
$$\dot{w}_{KEA_{th}} = \frac{L_{KEA}}{\dot{Q}_E} = \frac{L_{AKA} + L_{P0} + L_{P1} + L_{P2} + L_{RKW}}{\dot{Q}_E}$$

Aktive Volumenstromregelung



Motivation zur optimalen Volumenstromregelung für KEA_{th}

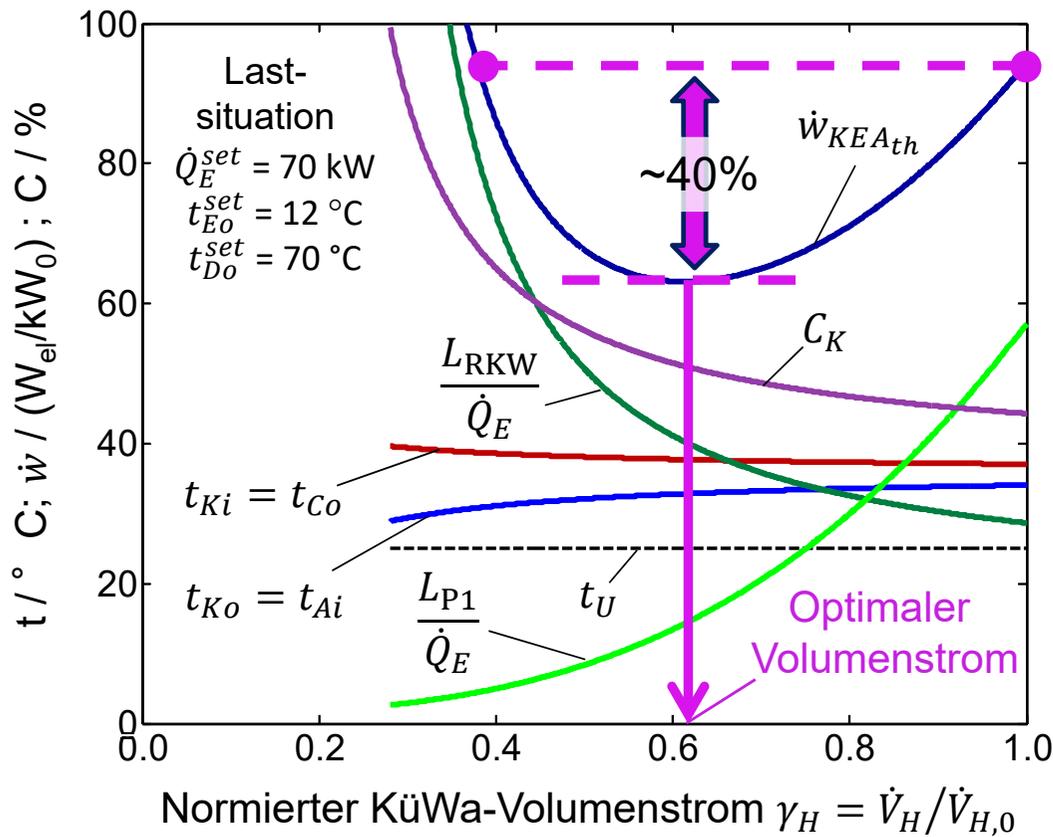
$$\dot{w}_{KEA_{th}} = \frac{L_{KEA}}{\dot{Q}_E} = \frac{L_{AKA} + L_{P0} + L_{P1} + L_{P2} + L_{RKW}}{\dot{Q}_E}$$



Entwicklung modellprädiktive Mehrgrößenregelung (CEKEA-Regelung)

$$\dot{w}_{KEA_{th}} = \frac{L_{KEA}}{\dot{Q}_E} = \frac{L_{AKA} + L_{P0} + L_{P1} + L_{P2} + L_{RKW}}{\dot{Q}_E}$$

AKA-Modell + Pump-Modell + RKW-Modell

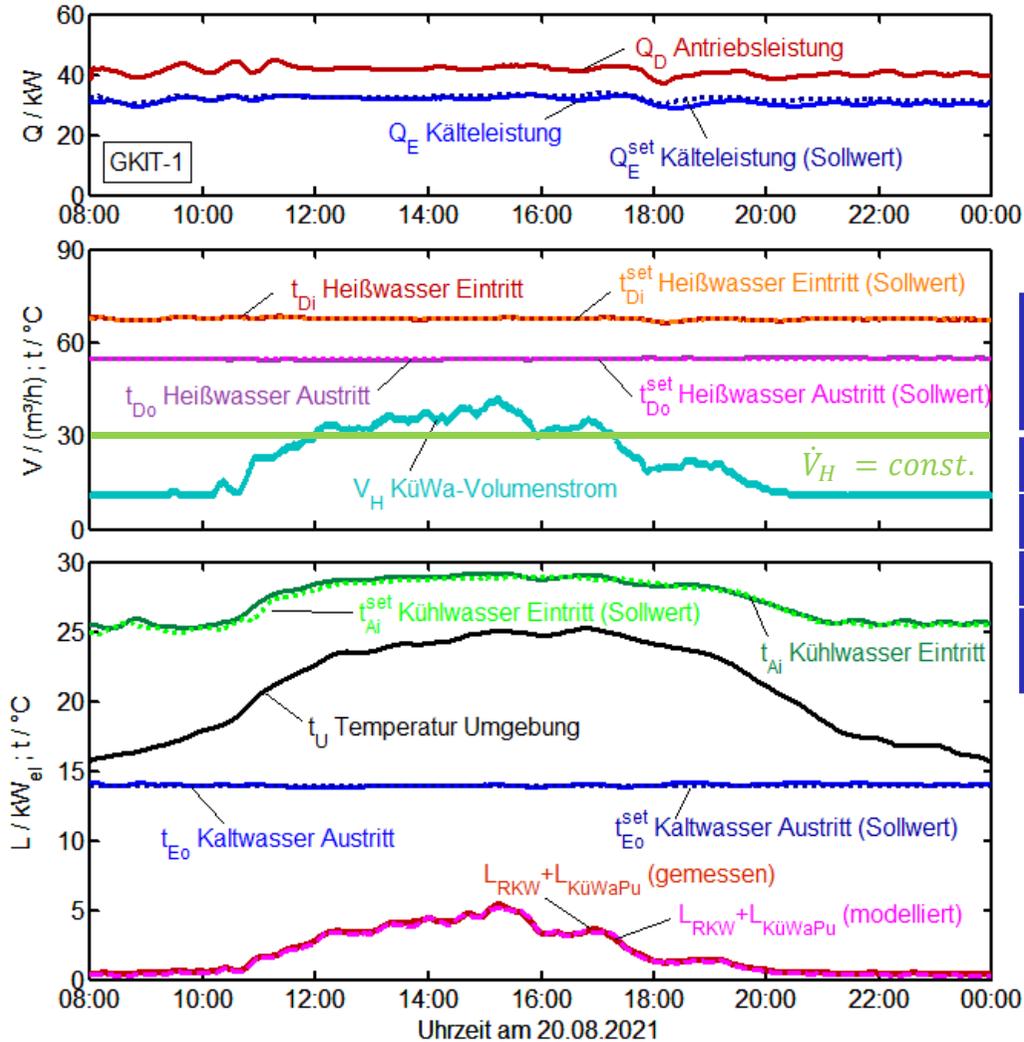


Industrieller SPS-Controller



Foto: Stadtwerke Karlsruhe

Ergebnisse CEKEA-Regelung



Rechnerischer Vergleich von:

- CEKEA-Regelung (mit $\dot{V}_H = var.$) und
- CE-Regelung (mit $\dot{V}_H = const.$)

		Messung mit $\dot{V}_H = var.$	Rechnung mit $\dot{V}_H = var.$	Diff. in %	Rechnung mit $\dot{V}_H = const.$	Einsparung in %
\dot{Q}_E	kW_0	31,5	31,3	- 1	31,5	-
L_{P1}	kW_{el}	0,77	0,80	5	1,26	36
L_{RKW}	kW_{el}	1,13	1,09	- 4	1,22	11
\dot{W}_{KEA}	$\frac{W_{el}}{kW_0}$	57,8	60,6	5	81,2	25

Durch aktive Volumenstromregelung mit modellbasierter Mehrgrößenregelung (CEKEA):

- ca. 25% geringerer Strombedarf
- entsprechend geringere Betriebskosten

Regelung für KälteErzeugungsSysteme (KES)

Effizienzorientierte Folgeschaltung für mehrere KälteErzeugungsAnlagen (KEA):

- KEA_{FC} im Freikühlbetrieb
- KEA_{th} im Absorptionskältebetrieb
- KEA_{el} im Kompressionskältebetrieb

Primärenergie-Effizienz

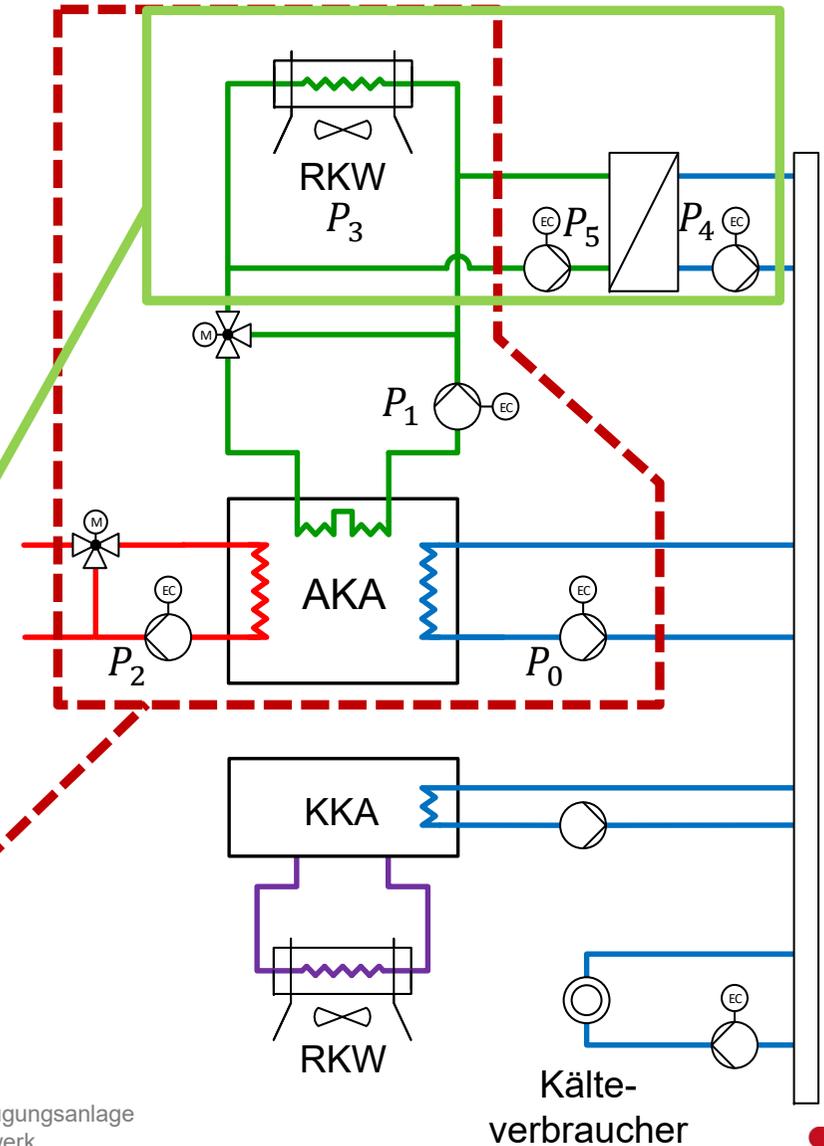
$$\text{PE Effizienz} = \frac{\text{Kälte}}{\text{PE für Strom} + \text{PE für Wärme}}$$

PE-Effizienz im Freikühlbetrieb mit KEA_{FC}

$$\zeta_{KEA_{FC}}^{PE} = \frac{\dot{Q}_E^{set}}{\sum_{y=3}^5 (P_y \cdot f_{el})}$$

PE-Effizienz im Absorptionskältebetrieb mit KEA_{th}

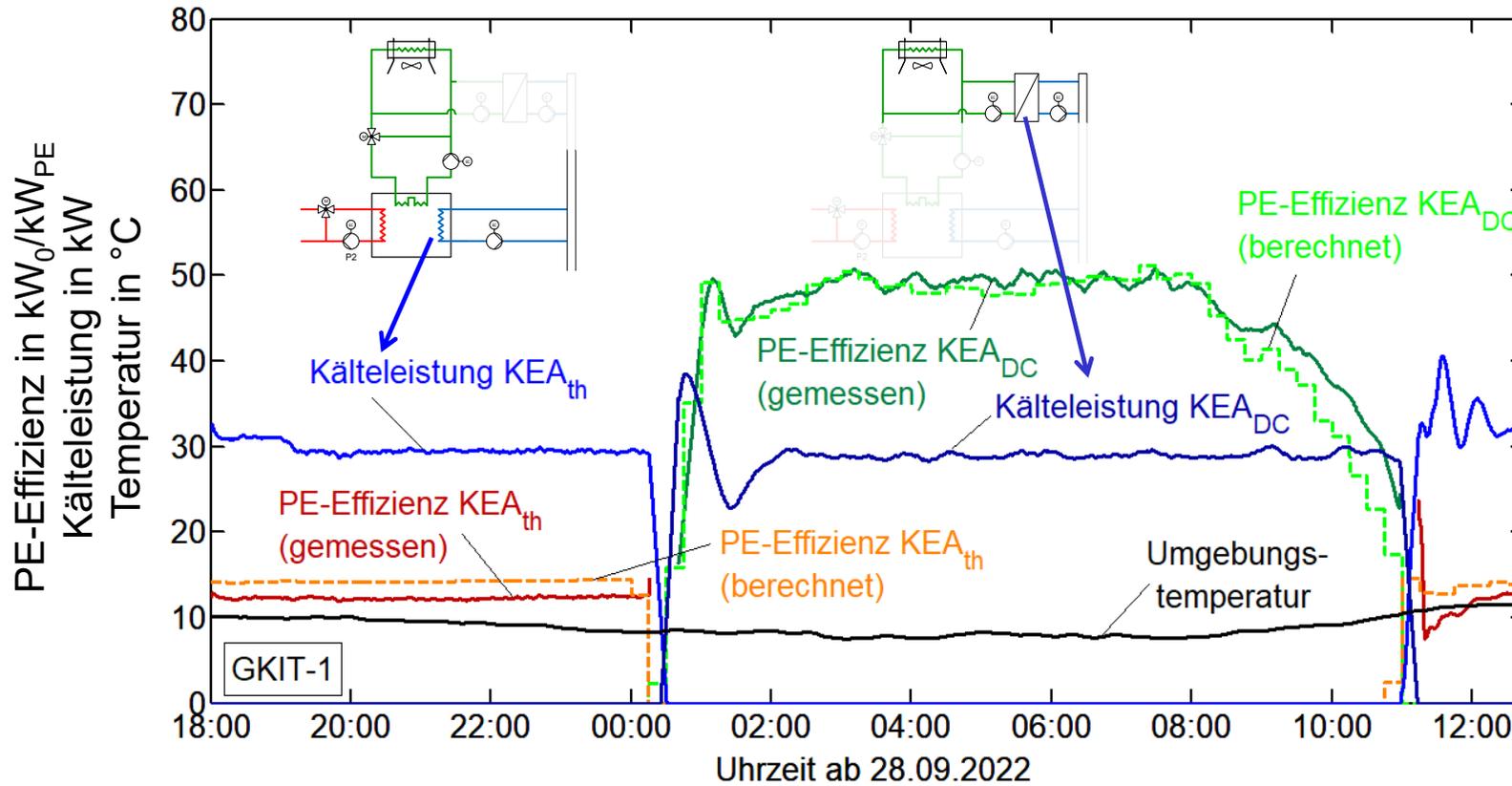
$$\zeta_{KEA_{th}}^{PE} = \frac{\dot{Q}_E^{set}}{\sum_{y=0}^3 (P_y \cdot f_{el}) + \dot{Q}_D \cdot f_W}$$



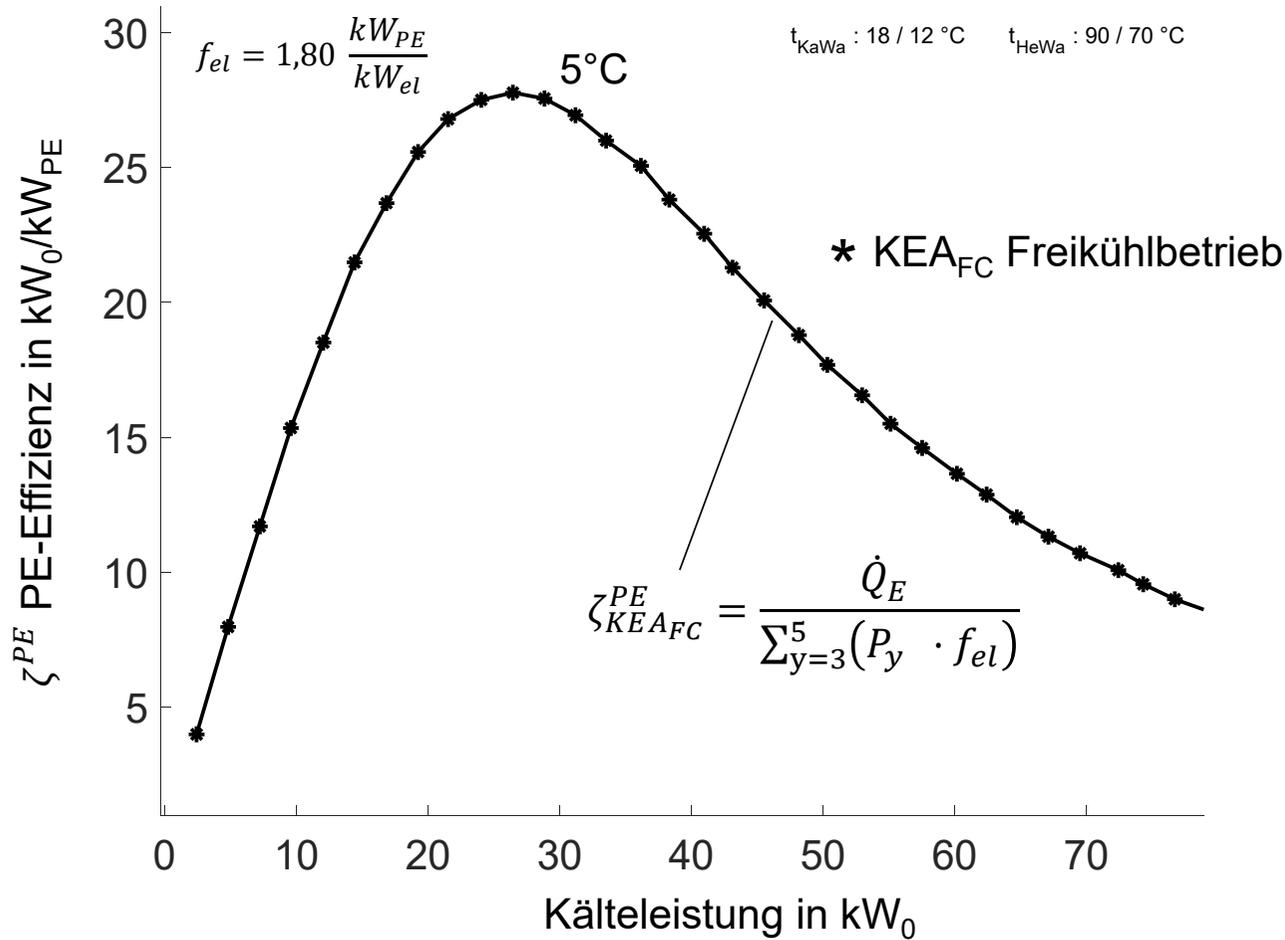
KEA Kälteerzeugungsanlage
 RKW Rückkühlwerk
 AKA Absorptionskälteanlage
 KKA Kompressionskälteanlage

Slide 14

Systemregelung mit effizienzorientierter Folgeschaltung



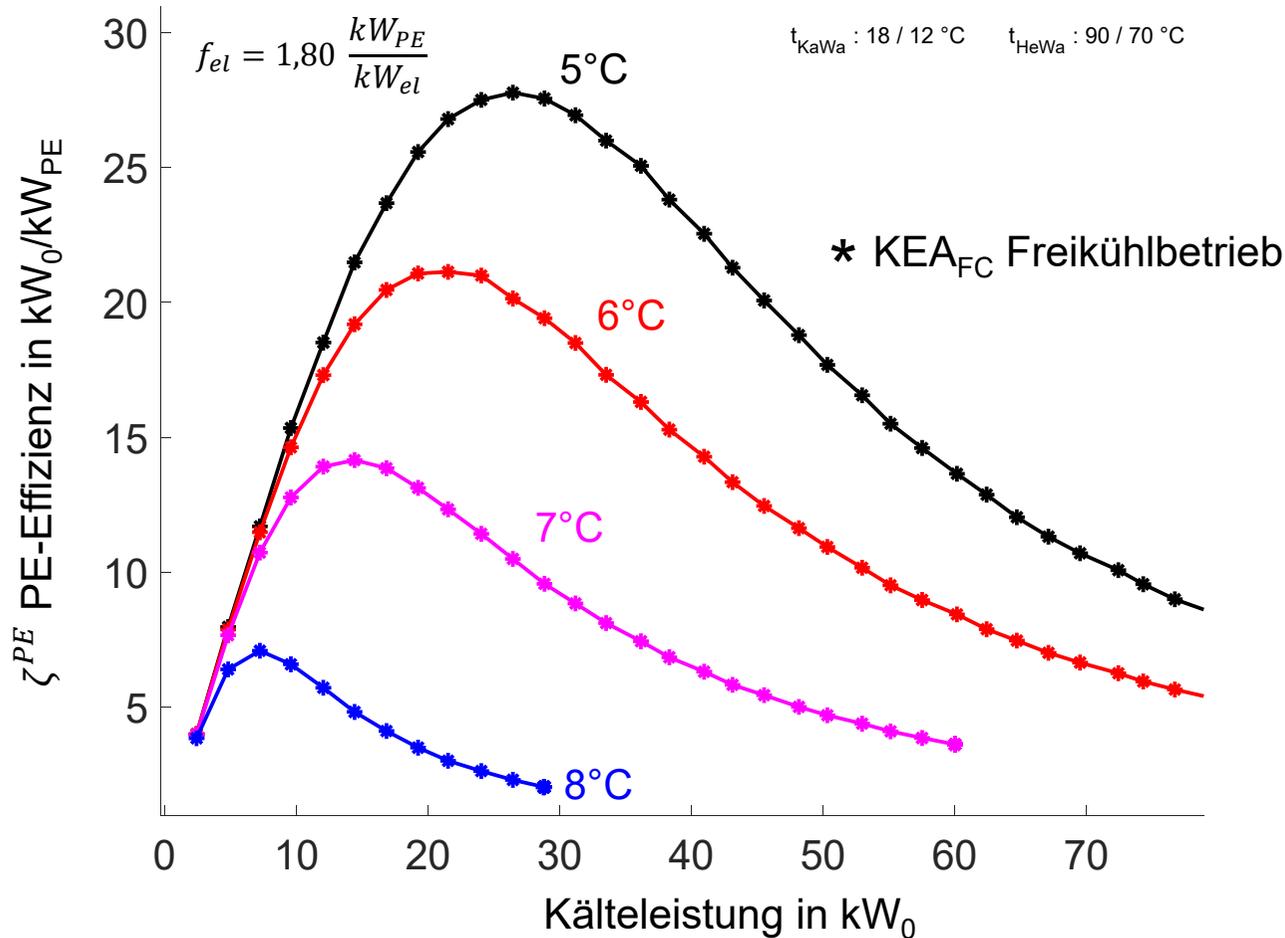
Effizienzverhalten von KEA_{FC} und KEA_{th}



Bei niedriger Last und großem ΔT_{RKW} steigt \dot{Q}_E stärker als $\sum P_y$
 $\rightarrow \zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ steigt.

Bei hoher Last steigt $\sum P_y$ stärker als \dot{Q}_E
 $\rightarrow \zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ fällt.

Effizienzverhalten von KEA_{FC} und KEA_{th}

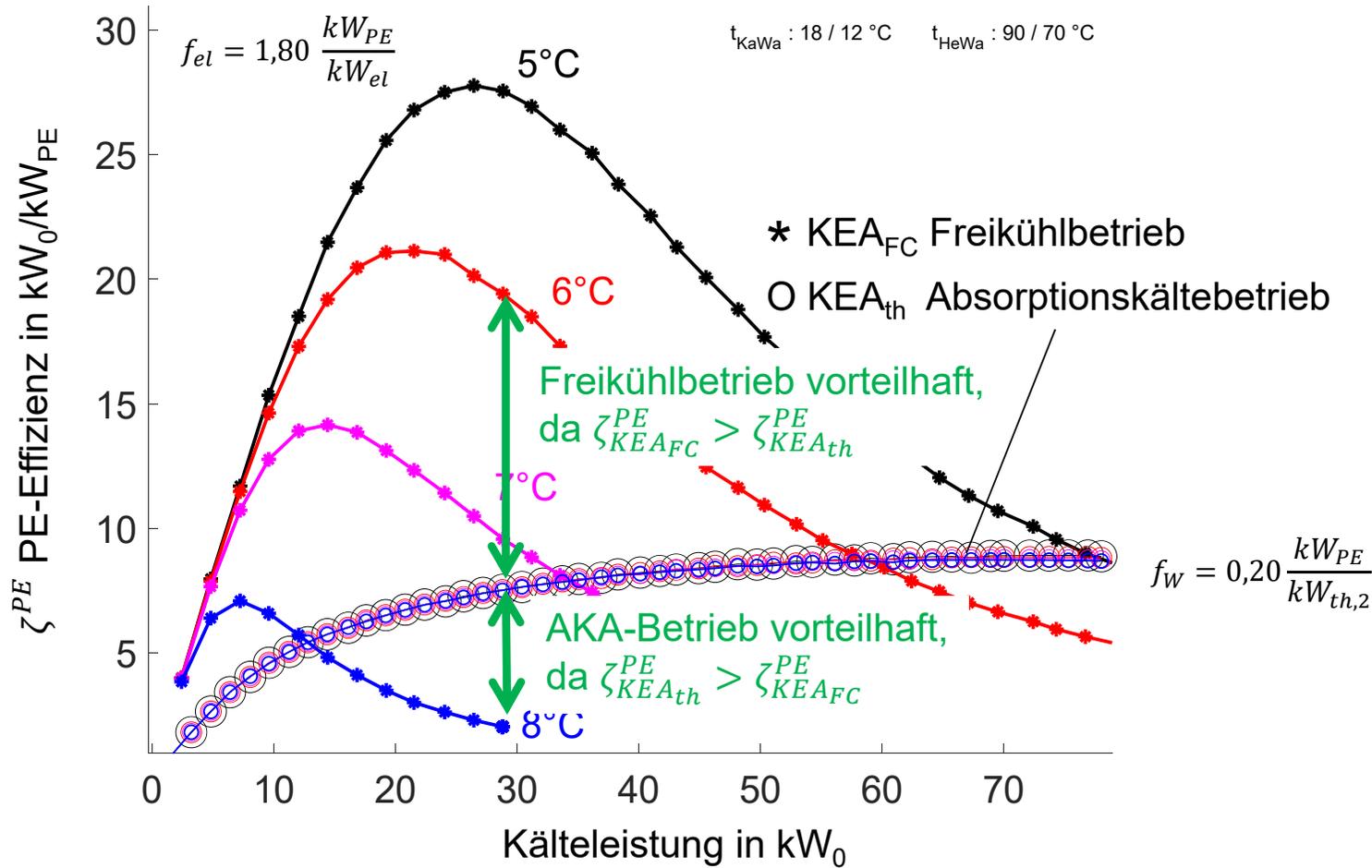


Bei niedriger Last und großem ΔT_{RKW} steigt \dot{Q}_E stärker als $\sum P_y$
 $\rightarrow \zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ steigt.

Bei hoher Last steigt $\sum P_y$ stärker als \dot{Q}_E
 $\rightarrow \zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ fällt.

Maximum in $\zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ von untergeordneter Bedeutung, da Last und t_U vorgegeben.

Effizienzverhalten von KEA_{FC} und KEA_{th}



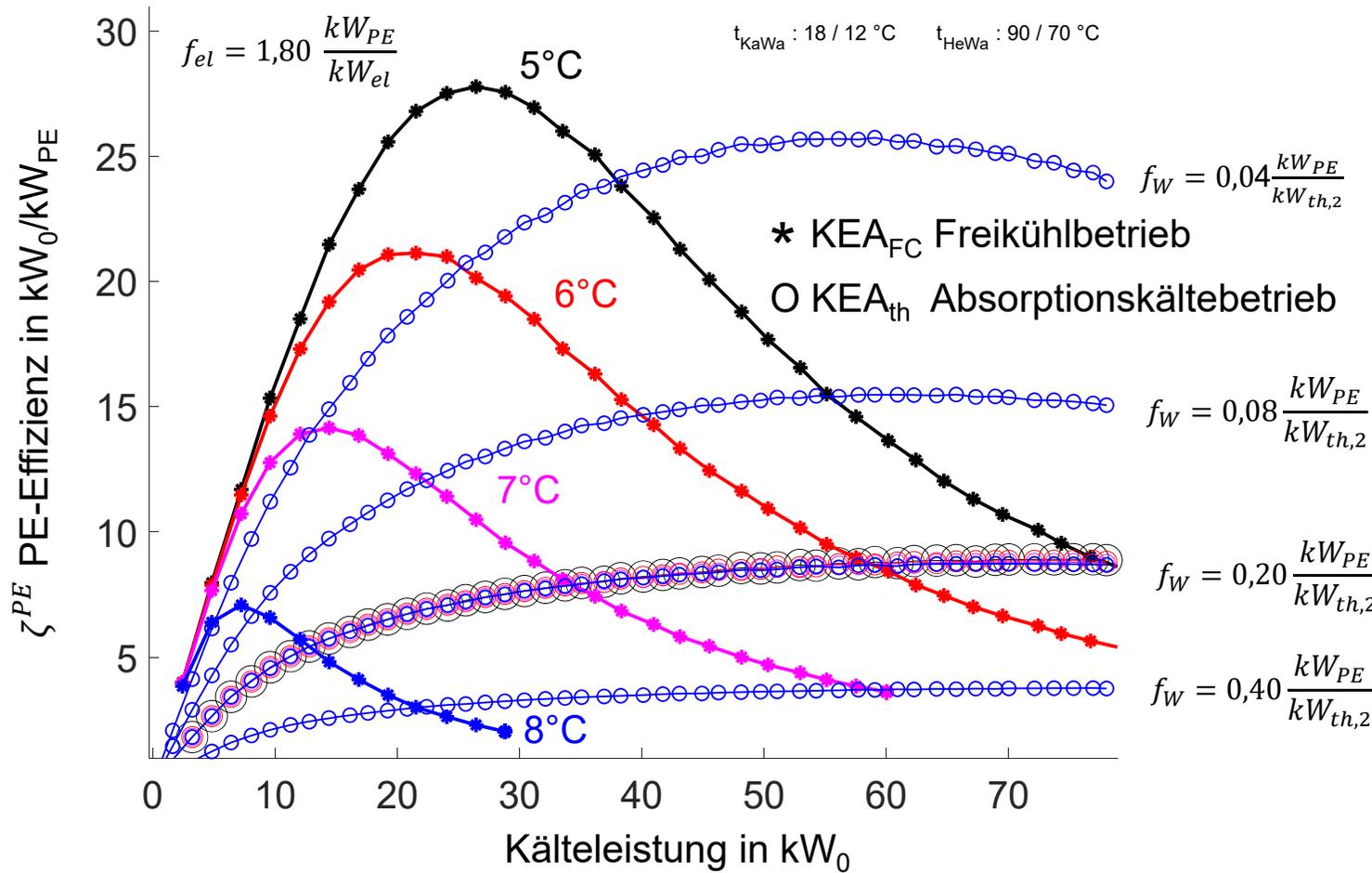
Bei niedriger Last und großem ΔT_{RKW} steigt \dot{Q}_E stärker als $\sum P_y$
 $\rightarrow \zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ steigt.

Bei hoher Last steigt $\sum P_y$ stärker als \dot{Q}_E
 $\rightarrow \zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ fällt.

Maximum in $\zeta_{KEA_{FC}}^{PE}$ von untergeordneter Bedeutung, da Last und t_U vorgegeben.

Für Systemeffizienz ist Vergl. mit anderen KEA entscheidend.

Effizienzverhalten von KEA_{FC} und KEA_{th}



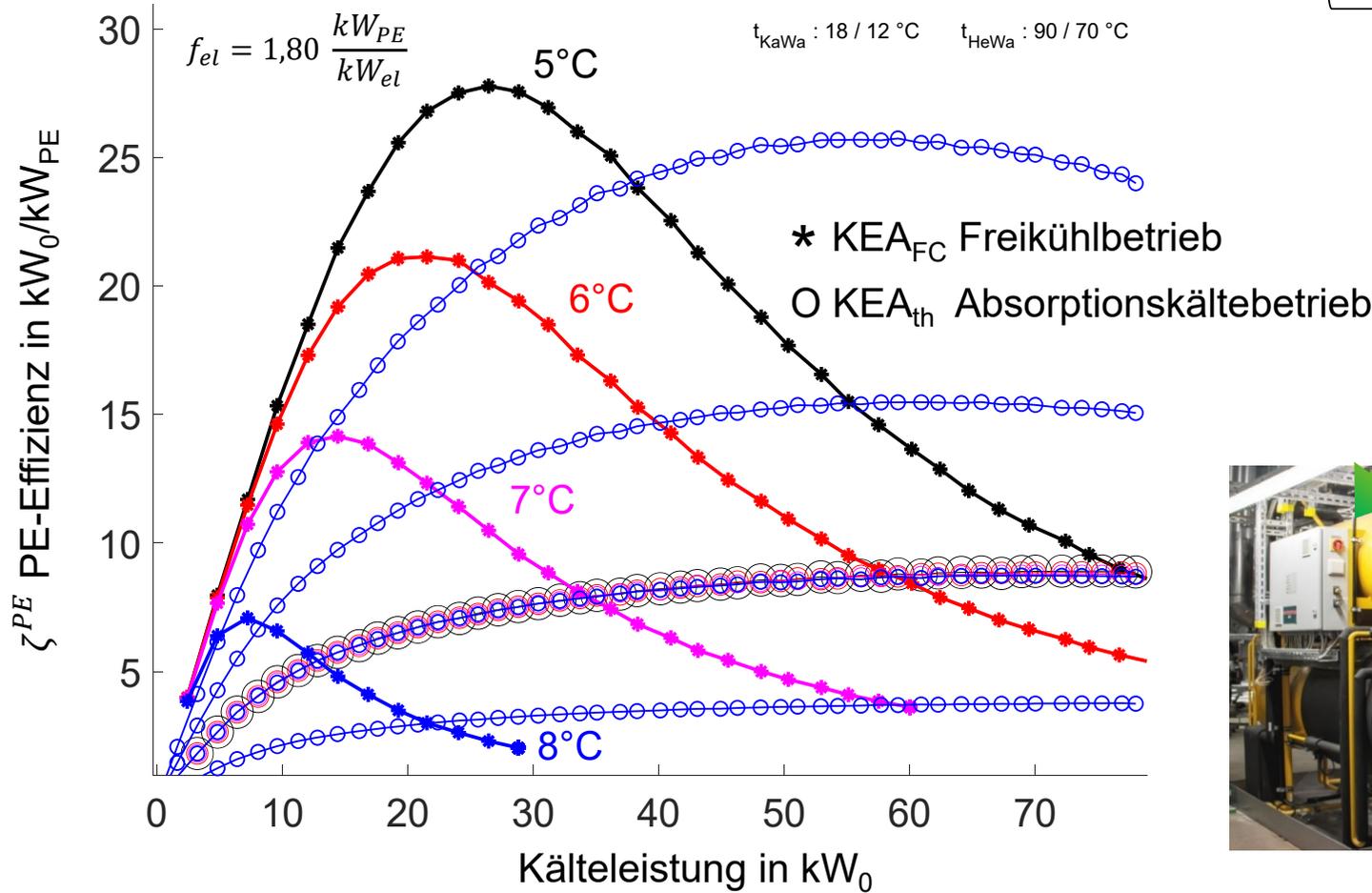
Bei niedriger Last und großem ΔT_{RKW} steigt \dot{Q}_E stärker als $\sum P_y$
 $\rightarrow \zeta_{KEAFC}^{PE}$ steigt.

Bei hoher Last steigt $\sum P_y$ stärker als \dot{Q}_E
 $\rightarrow \zeta_{KEAFC}^{PE}$ fällt.

Maximum in ζ_{KEAFC}^{PE} von untergeordneter Bedeutung, da Last und t_U vorgegeben.

Für Systemeffizienz ist Vergl. mit anderen KEA entscheidend.

Entwicklung modellprädiktive Systemregelung



AKA-Model Pump-Model
 KKA-Model RKW-Model



Industrieller SPS-Controller



Foto: Stadtwerke Karlsruhe

Zusammenfassung

- Modelprädiktive Mehrgrößenregelung für Absorptionskälteanlagen (AKA-Regelung) wurde erweitert zur KEA_{th} -Regelung für KälteErzeugungsAnlagen
- Gleichzeitige Regelung der Eintrittstemperaturen und Volumenströme im Heiß- und Kühlwasser ermöglicht die Einhaltung von vier Zielgrößen:

t_{EO}^{set} Austrittstemperatur Kaltwasser t_{DO}^{set} Austrittstemperatur Heißwasser

\dot{Q}_E^{set} Kälteleistung \dot{w}_{KEA}^{min} Minimaler spez. Strombedarf

- KEA_{th} -Regelung läuft auf industriellen SPS-Controllern.
- Reduktion des spezifischen Strombedarfs durch Anlagenregelung mit variablen Volumenströmen um mehr als 25%.
- Systemregelung mit effizienzorientierter Folgeschaltung verschiedener KälteErzeugungsAnlagen (KEA_{th} , KEA_{el} , KEA_{FC}) ermöglicht PE- bzw. Betriebskosten-Einsparungen > 50%.

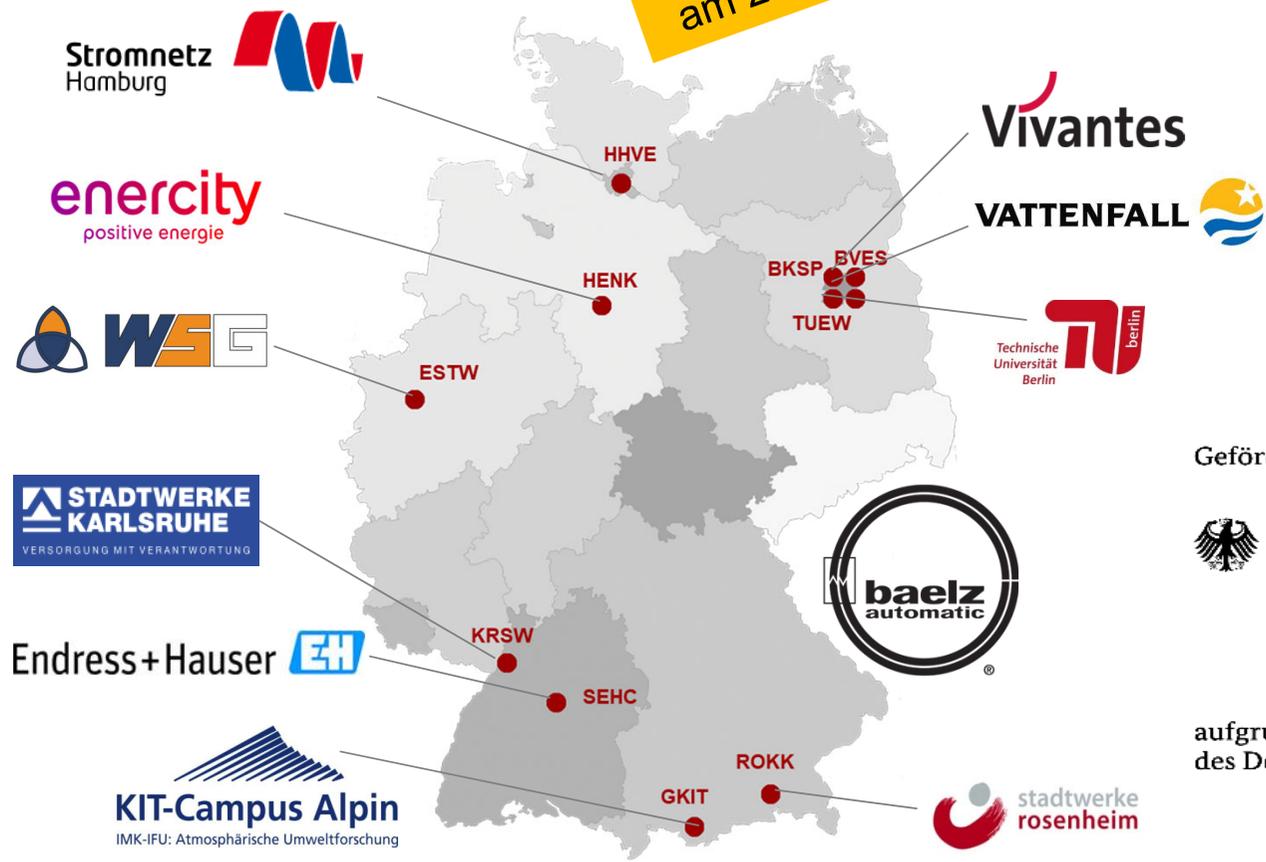


Gefördert durch: FM160v2.1 (Typ Hummel)



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ReKs-Projekt-Abschlussmeeting
am 28./29. Nov. 2022 in Berlin



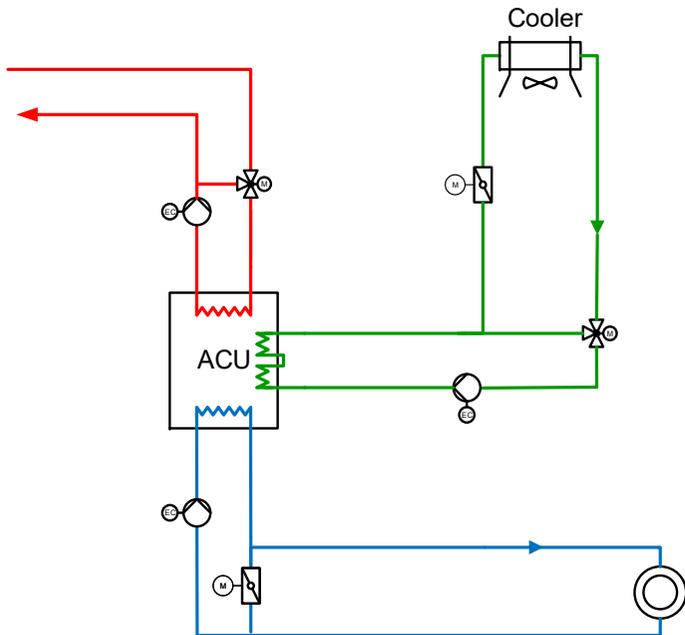
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Absorptionswärmepumpe = effiziente Hausanschlussstation

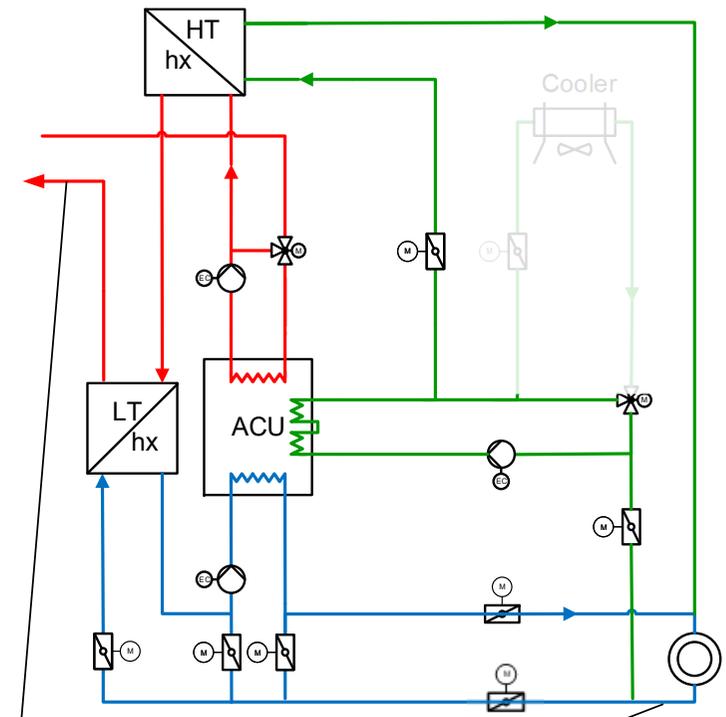
Cooling



Cooling load:
35 kW @ 20/16°C

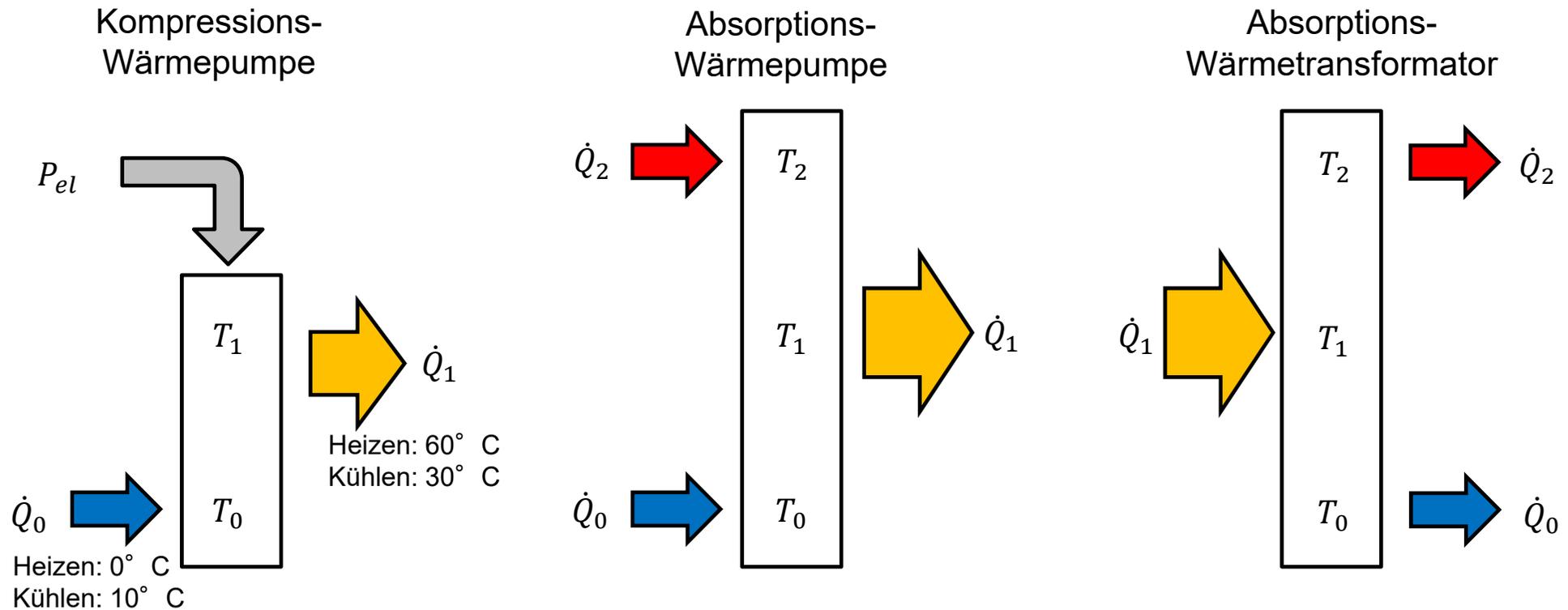
Heating load:
80 kW @ 65/45°C

Heating



Temperatur
Netzrücklauf < Temperatur
Gebäuderücklauf
möglich

Einordnung Absorptions-Wärmetransformator (AWT)



P_{el} elektrische Leistung

\dot{Q}_N Wärmestrom

T_N Temperatur

N Temperaturniveau