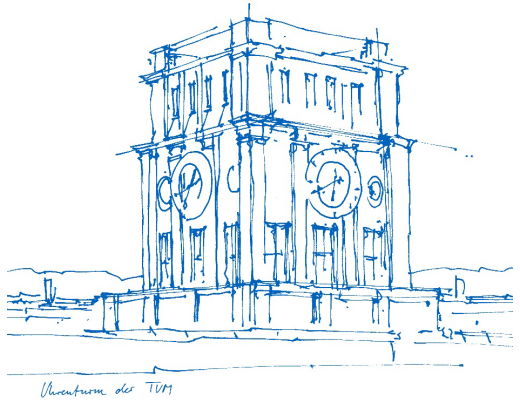
Optimierte Verschaltung und Betriebsweise von Großwärmepumpen in Fernwärmesystemen mit Fokus auf tiefengeothermische Anlagen

Zwischenstand der Masterarbeit

Samuel Müller
Energie- und Prozesstechnik (M. Sc.)
mueller.samuel1@swm.de

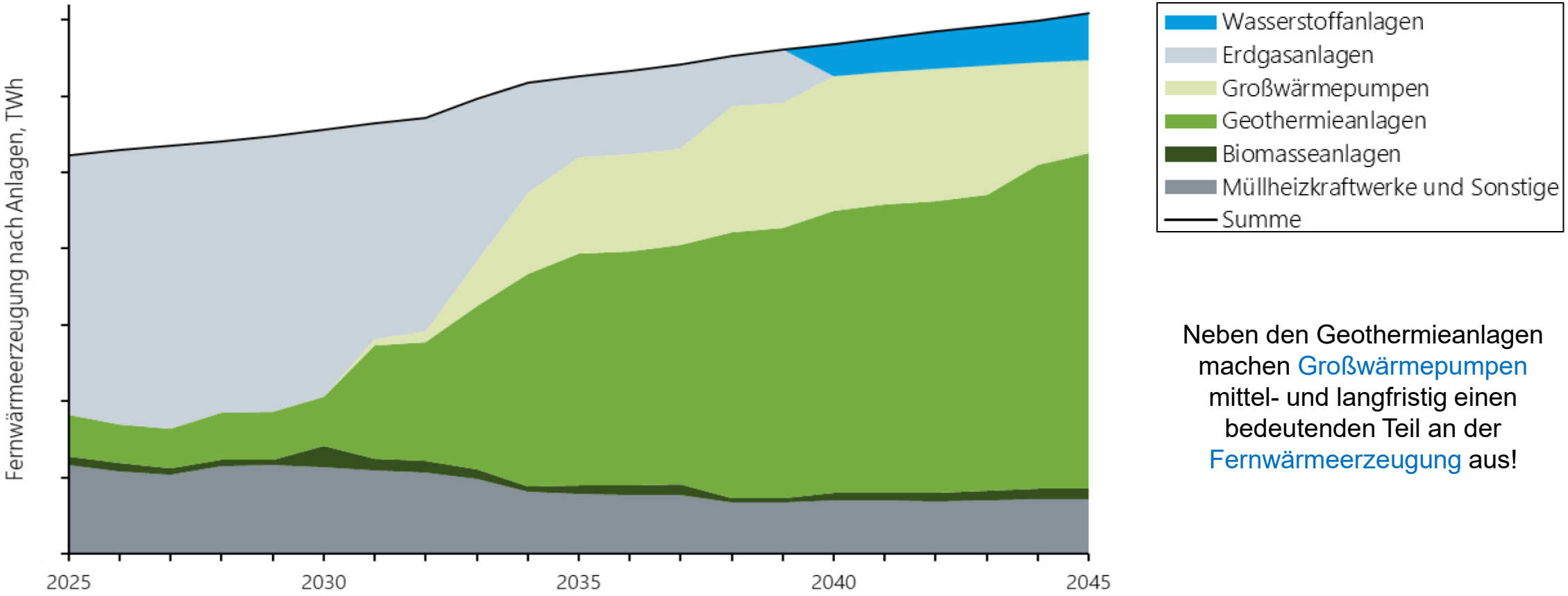
Technische Universität München – Fakultät für Maschinenwesen – Lehrstuhl für Energiesysteme
Stadtwerke München – Erneuerbare Energien in der Region – Konzepte und Standardisierung Tiefe Geothermie

7. Oktober 2026



Der Puls unserer Stadt

Wärmeplanung der Stadtwerke München



Neben den Geothermieanlagen machen Großwärmepumpen mittel- und langfristig einen bedeutenden Teil an der Fernwärmeerzeugung aus!

Abbildung 1.1 – Qualitative Entwicklung der Fernwärmeerzeugung der Stadtwerke München nach Anlagen (Quelle: SWM)

Tiefengeothermie im Großraum München

- Großwärmepumpen (Wärmepumpen ab einer Leistung von 100 kW_{th}) sollen in zukünftigen Geothermieprojekten mehrfach eingesetzt werden.
- An einzelnen Standorten sollen Wärmepumpen (WP)-Leistungen bis ca. 80 MW realisiert werden.
- Was fällt bei Betrachtung des Großraums München bezüglich der natürlichen Gegebenheiten auf?

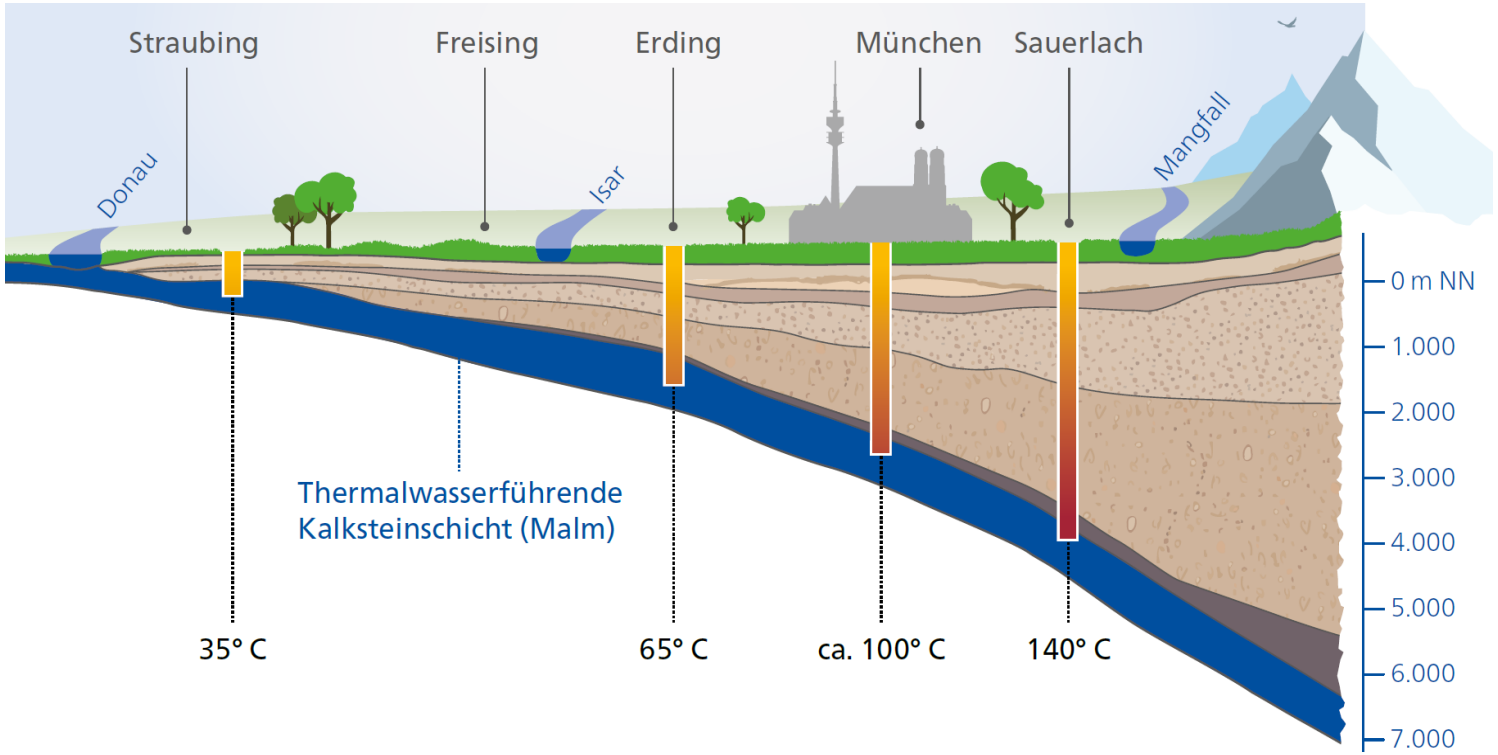


Abbildung 1.2 – Nord-Süd-Schnitt durch das Voralpenland (Quelle: SWM)

Tiefengeothermie im Großraum München

- Großwärmepumpen (Wärmepumpen ab einer Leistung von 100 kW_{th}) sollen in zukünftigen Geothermieprojekten mehrfach eingesetzt werden.
- An einzelnen Standorten sollen Wärmepumpen (WP)-Leistungen bis ca. 80 MW realisiert werden.
- Was fällt bei Betrachtung des Großraums München bezüglich der natürlichen Gegebenheiten auf?

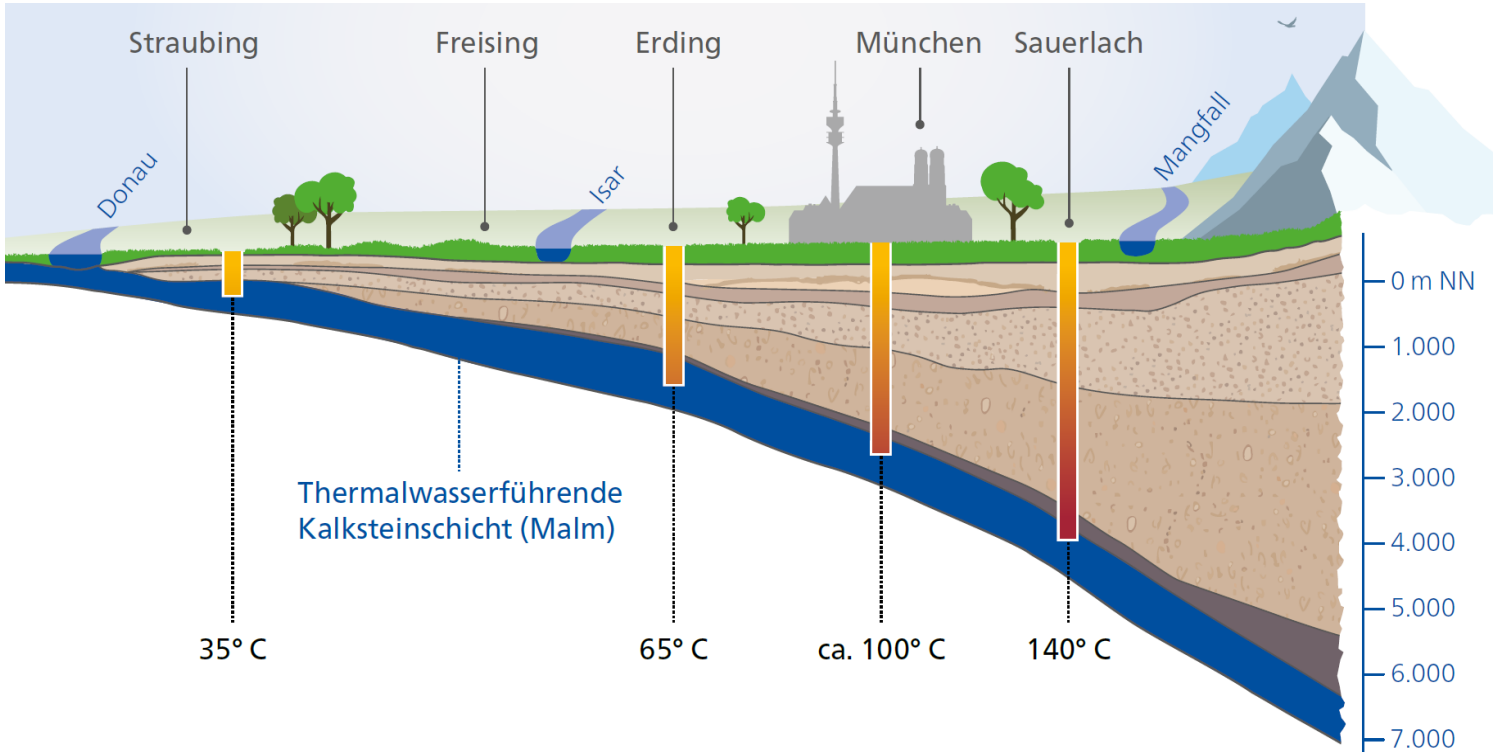
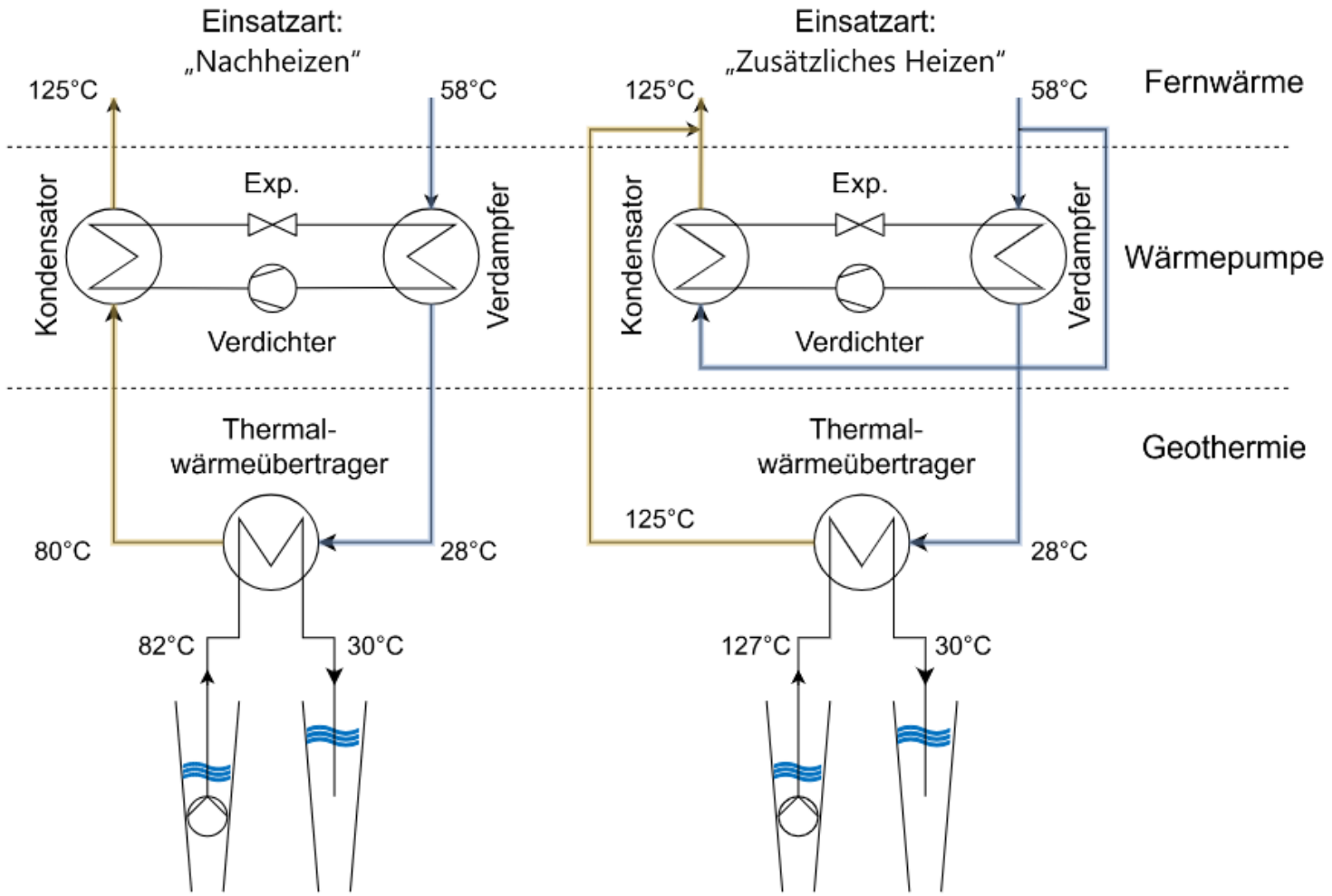


Abbildung 1.2 – Nord-Süd-Schnitt durch das Voralpenland (Quelle: SWM)

- Nördlich liegen geringere Thermalwassertemperaturen vor als im Süden von München
- Standortabhängig unterschiedliche Austrittstemperaturen des Thermalwassers

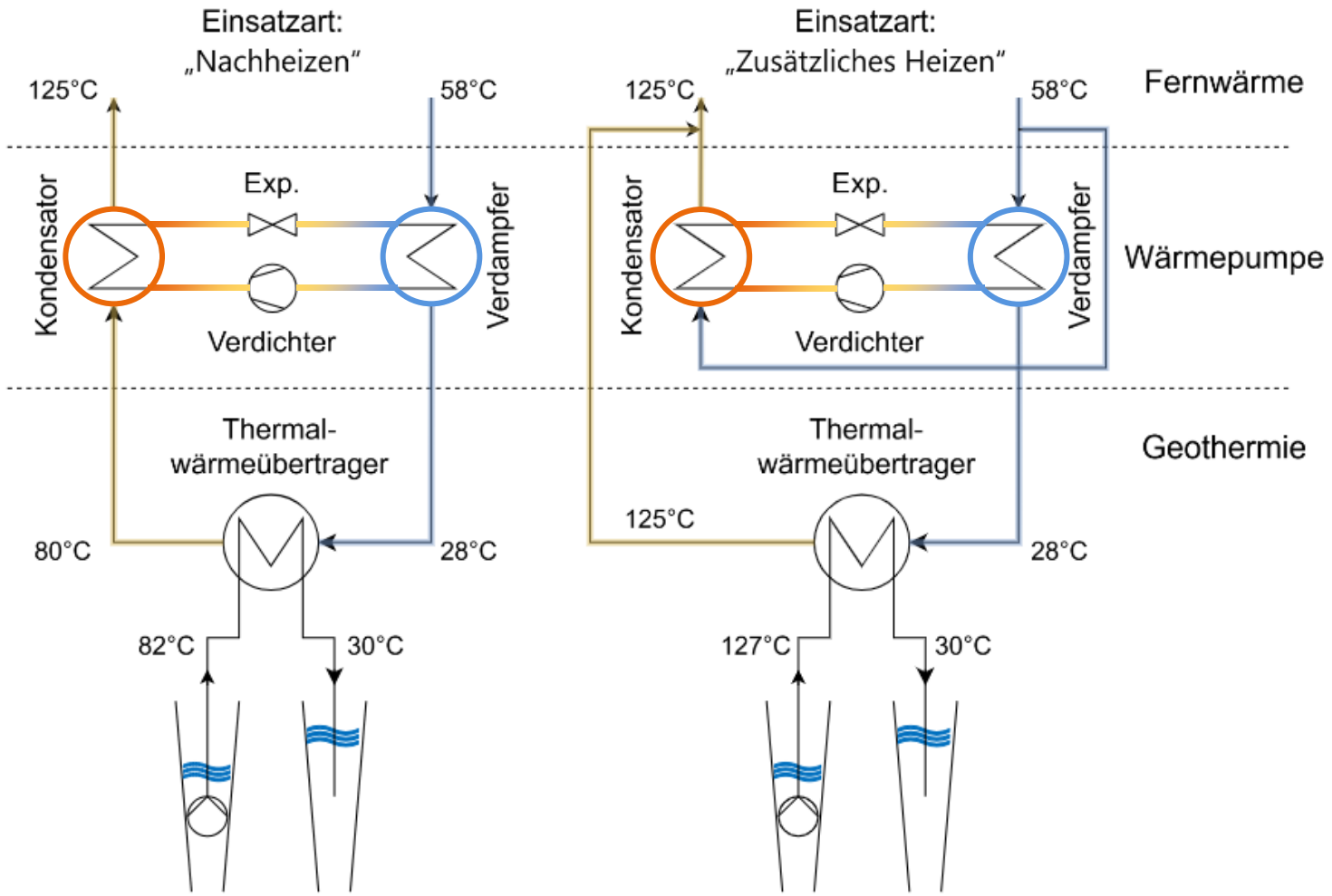
Grundlegende Betriebsweisen von Großwärmepumpen



- Nicht alle Geothermiestandorte können ganzjährig die erforderlichen Fernwärmetemperaturen bereitstellen.
  - **Nachheizen der Temperatur** mittels einer WP erforderlich
- Begrenztes Fördervolumen der Geothermie
  - Durch parallel zur Geothermie betriebene Wärmepumpen kann **zusätzliche Wärme** bereitgestellt werden. Andere Wärmeerzeuger im Wärmenetz können zurückgefahren werden.
- Bessere Auskühlung der Geothermie
  - **Höhere Effizienz und bessere Potenzialnutzung**

Abbildung 2.1 – Einsatzarten der Großwärmepumpe - „Nachheizen“ (links) und „Zusätzliches Heizen“ (rechts) (Quelle: SWM – Felix Loistl)

Grundlegende Betriebsweisen von Großwärmepumpen

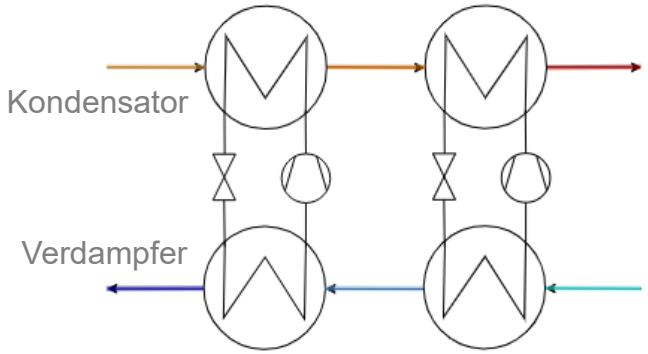


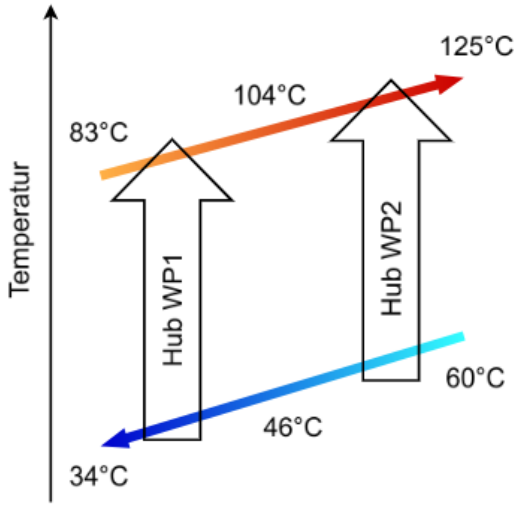
- Nicht alle Geothermiestandorte können ganzjährig die erforderlichen Fernwärmetemperaturen bereitstellen.
  - **Nachheizen der Temperatur** mittels einer WP erforderlich
- Begrenztes Fördervolumen der Geothermie
  - Durch parallel zur Geothermie betriebene Wärmepumpen kann **zusätzliche Wärme** bereitgestellt werden. Andere Wärmeerzeuger im Wärmenetz können zurückgefahren werden.
- Bessere Auskühlung der Geothermie
  - **Höhere Effizienz und bessere Potenzialnutzung**

Abbildung 2.1 – Einsatzarten der Großwärmepumpe - „Nachheizen“ (links) und „Zusätzliches Heizen“ (rechts) (Quelle: SWM – Felix Loistl)

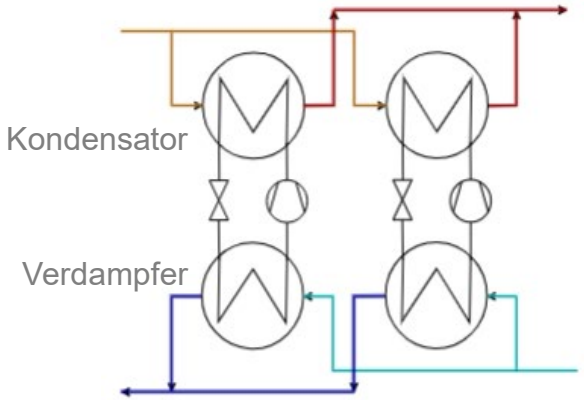
Verschaltungsarten mehrerer Wärmepumpen

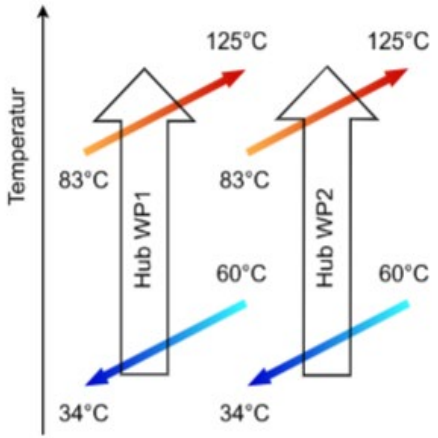
Reihenschaltung





Parallelschaltung





Externe Kaskadierung

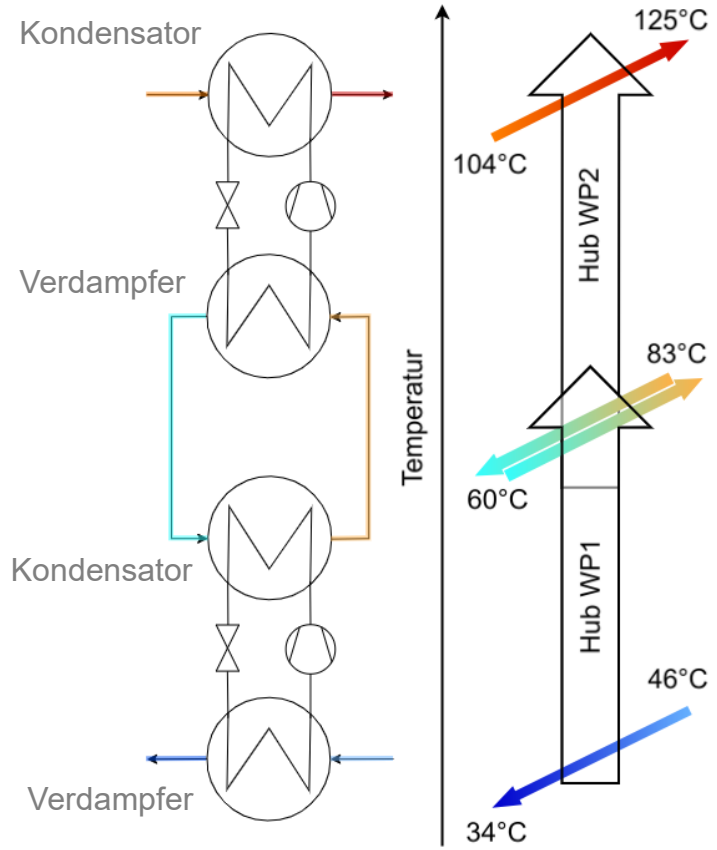


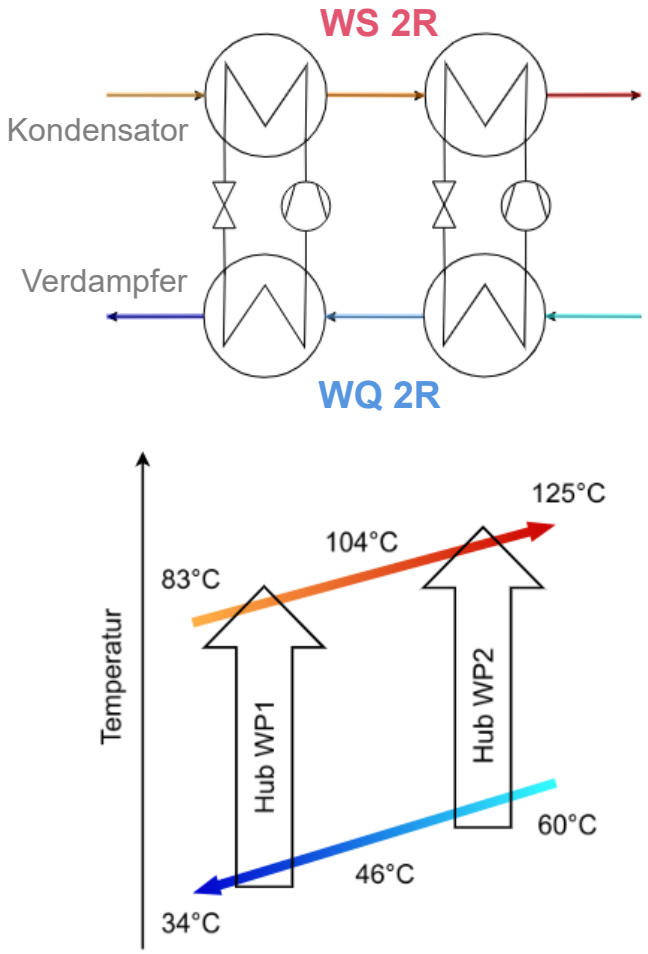
Abbildung 2.2 – verschiedene Verschaltungsarten von Wärmepumpen, vereinfacht dargestellt für jeweils zwei Exemplare (eigene Darstellung)

WS = Wärmesenke
WQ = Wärmequelle

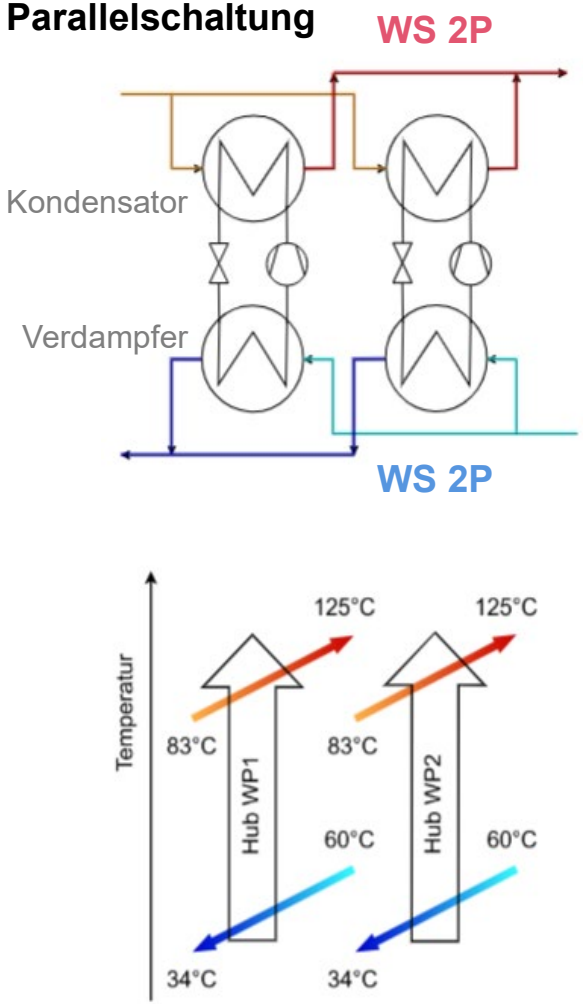
R = Reihenschaltung
P = Parallelschaltung
K = Kaskadierung

Verschaltungsarten mehrerer Wärmepumpen

Reihenschaltung



Parallelschaltung



Externe Kaskadierung

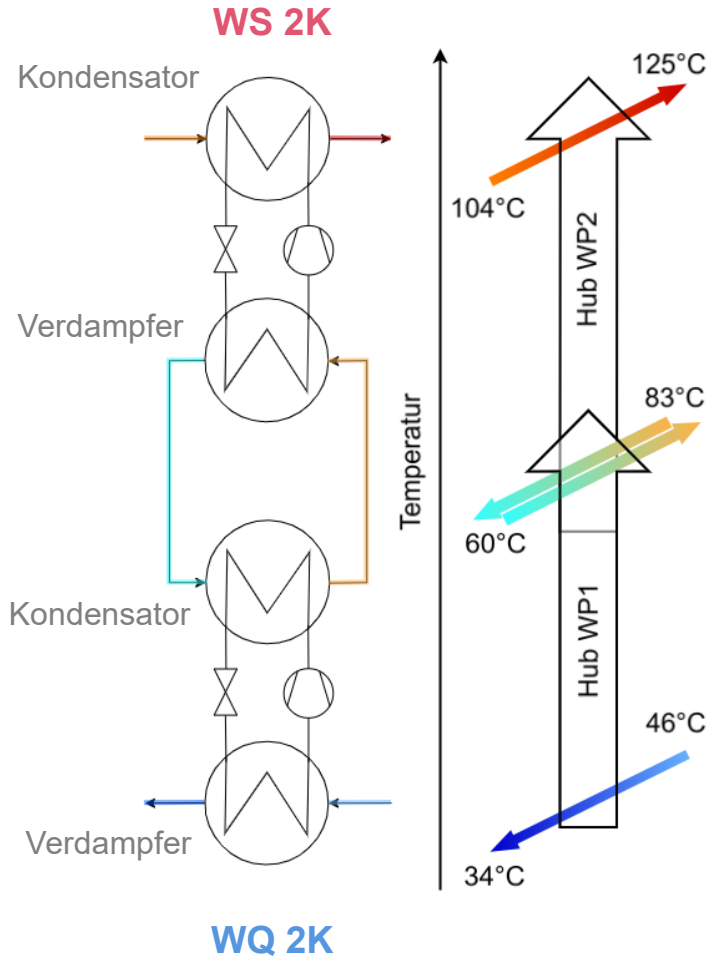


Abbildung 2.2 – verschiedene Verschaltungsarten von Wärmepumpen, vereinfacht dargestellt für jeweils zwei Exemplare (eigene Darstellung)

Klassifikation hydraulischer Verschaltungskonfigurationen

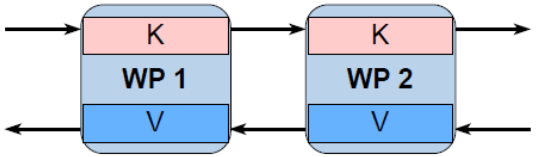
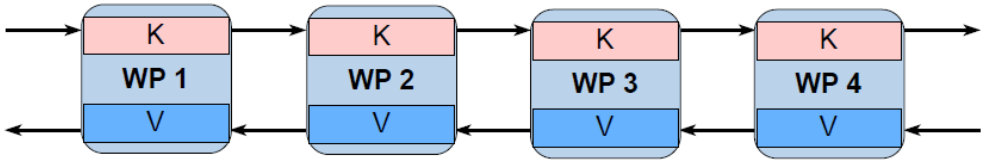
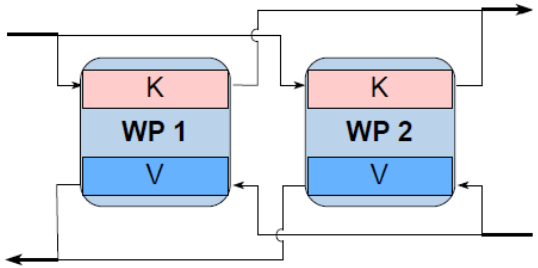
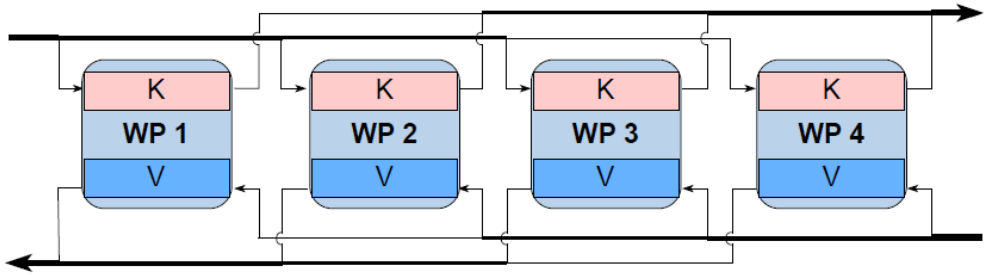
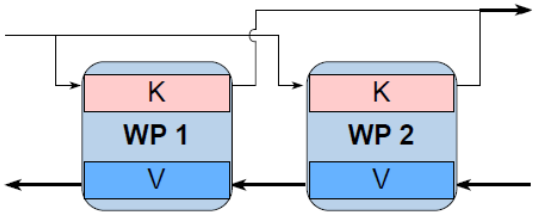
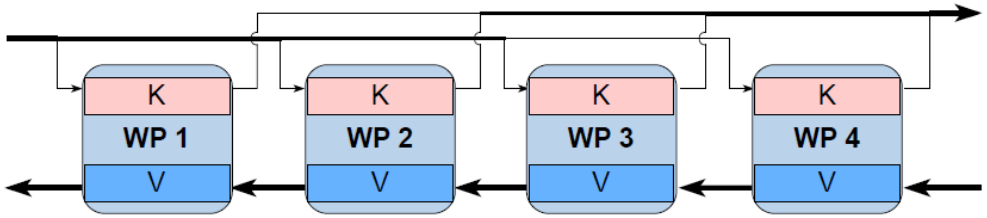
Verschaltungskonfiguration	Zwei Wärmepumpen	Vier Wärmepumpen
Bezeichnung	WS 2R / WQ 2R	WS 4R / WQ 4R
Reihenschaltung --- --- Reihenschaltung		
Bezeichnung	WS 2P / WQ 2P	WS 4P / WQ 4P
Parallelschaltung --- --- Parallelschaltung		
Bezeichnung	WS 2P / WQ 2R	WS 4P / WQ 4R
Parallelschaltung --- --- Reihenschaltung		

Abbildung 3.1 – Nomenklatur für Verschaltungskonfigurationen mehrerer WP (eigene Darstellung), ***K = Kondensator, V = Verdampfer***

Klassifikation hydraulischer Verschaltungskonfigurationen

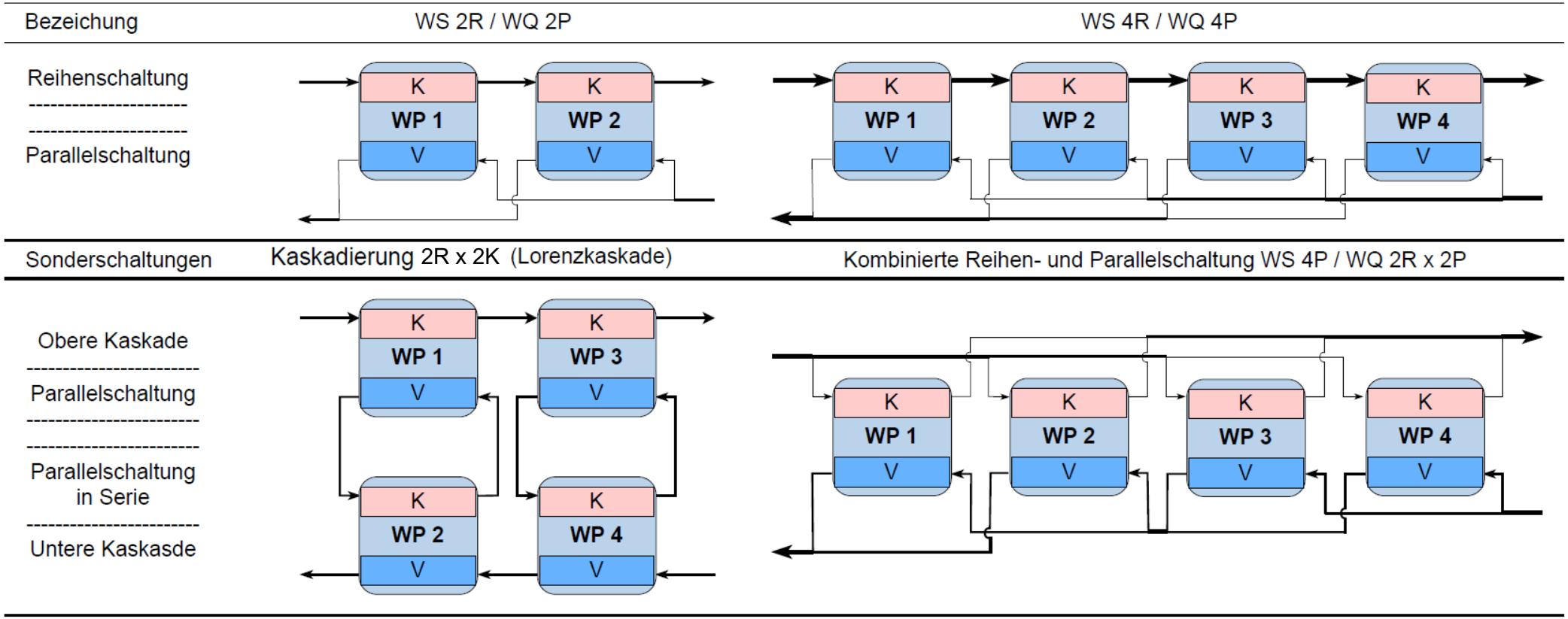


Abbildung 3.2 – Nomenklatur für Verschaltungskonfigurationen mehrerer WP (eigene Darstellung, Lorenzkaskade angelehnt an Studie des Fraunhofer IEG, 2025, Auswahl Wärmepumpenportfolio), ***K = Kondensator, V = Verdampfer***

Klassifikation hydraulischer Verschaltungskonfigurationen

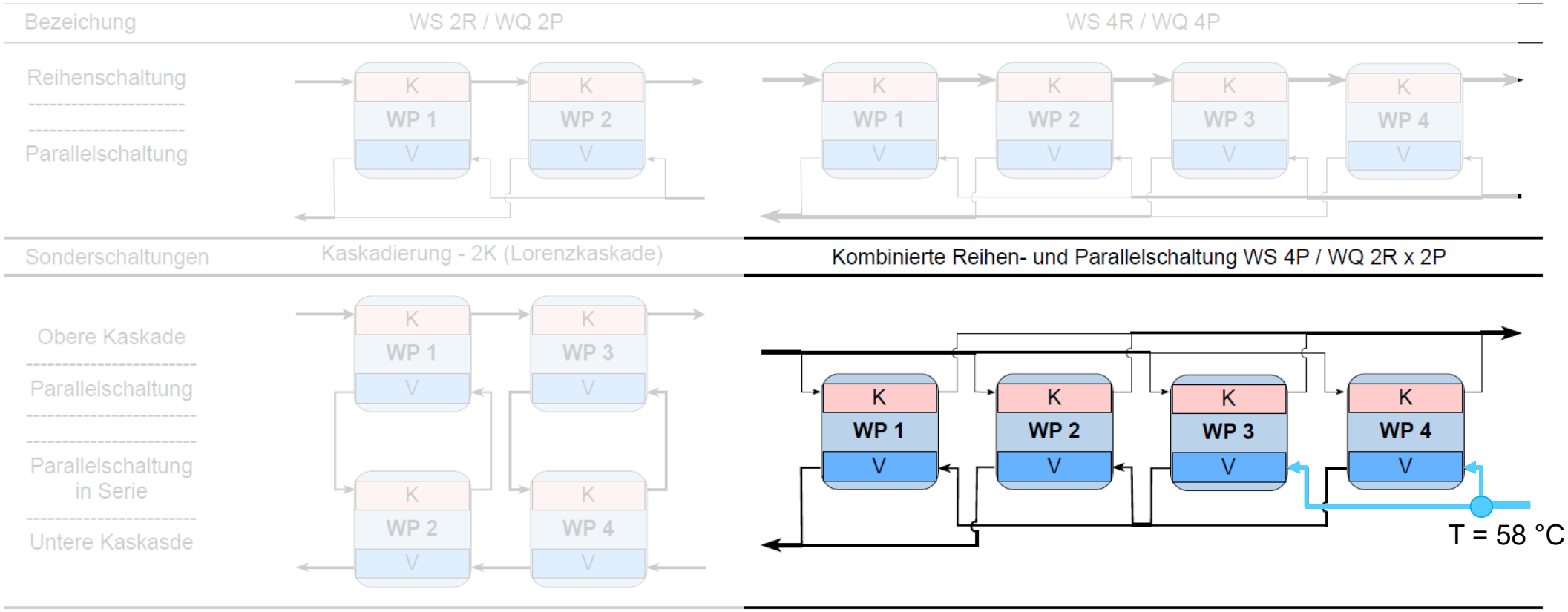


Abbildung 3.2 – Nomenklatur für Verschaltungskonfigurationen mehrerer WP (eigene Darstellung, Lorenzkaskade angelehnt an Studie des Fraunhofer IEG, 2025, Auswahl Wärmepumpenportfolio), ***K = Kondensator, V = Verdampfer***

Klassifikation hydraulischer Verschaltungskonfigurationen

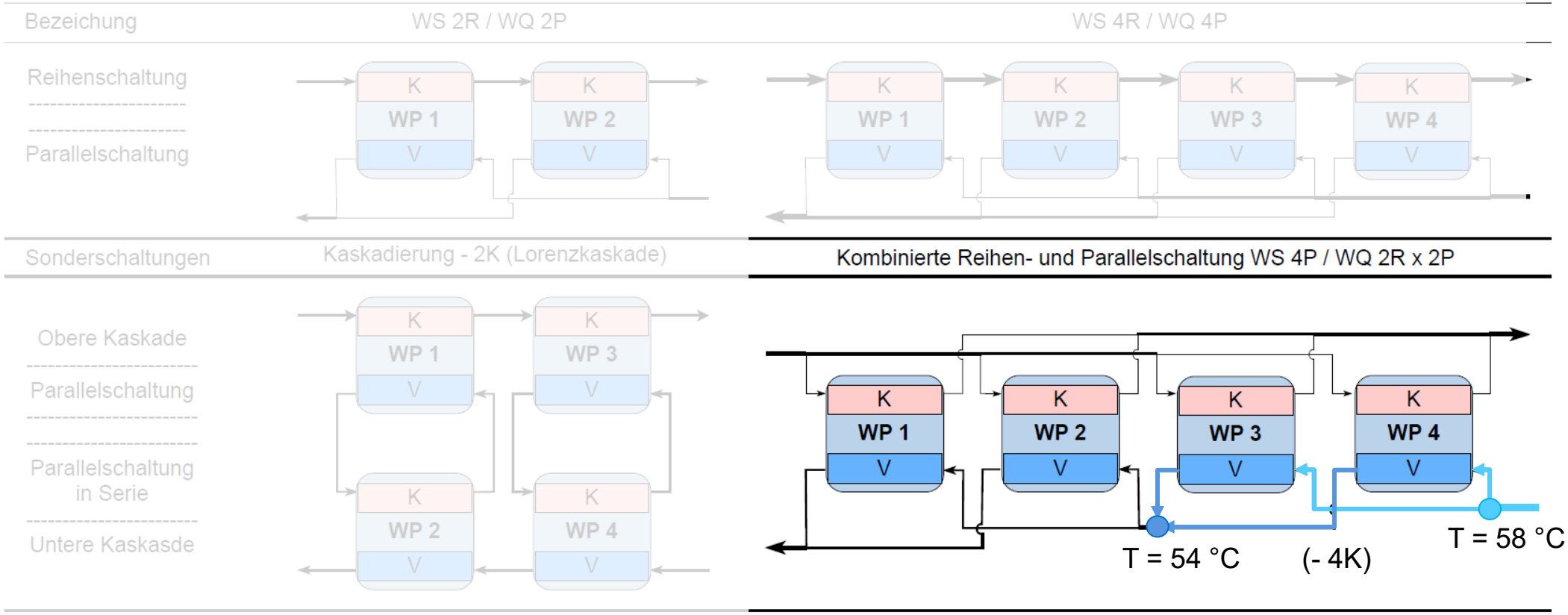


Abbildung 3.2 – Nomenklatur für Verschaltungskonfigurationen mehrerer WP (eigene Darstellung, Lorenzkaskade angelehnt an Studie des Fraunhofer IEG, 2025, Auswahl Wärmepumpenportfolio), ***K = Kondensator, V = Verdampfer***

Klassifikation hydraulischer Verschaltungskonfigurationen

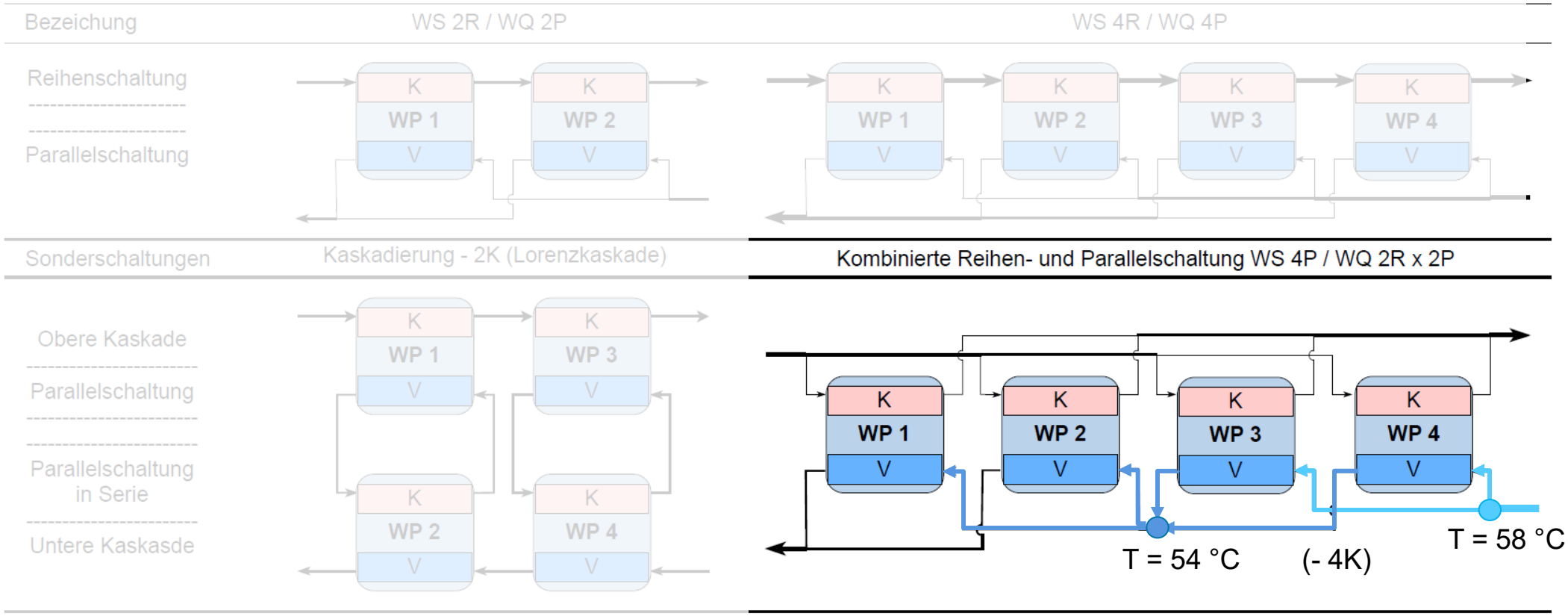


Abbildung 3.2 – Nomenklatur für Verschaltungskonfigurationen mehrerer WP (eigene Darstellung, Lorenzkaskade angelehnt an Studie des Fraunhofer IEG, 2025, Auswahl Wärmepumpenportfolio), ***K = Kondensator, V = Verdampfer***

Klassifikation hydraulischer Verschaltungskonfigurationen

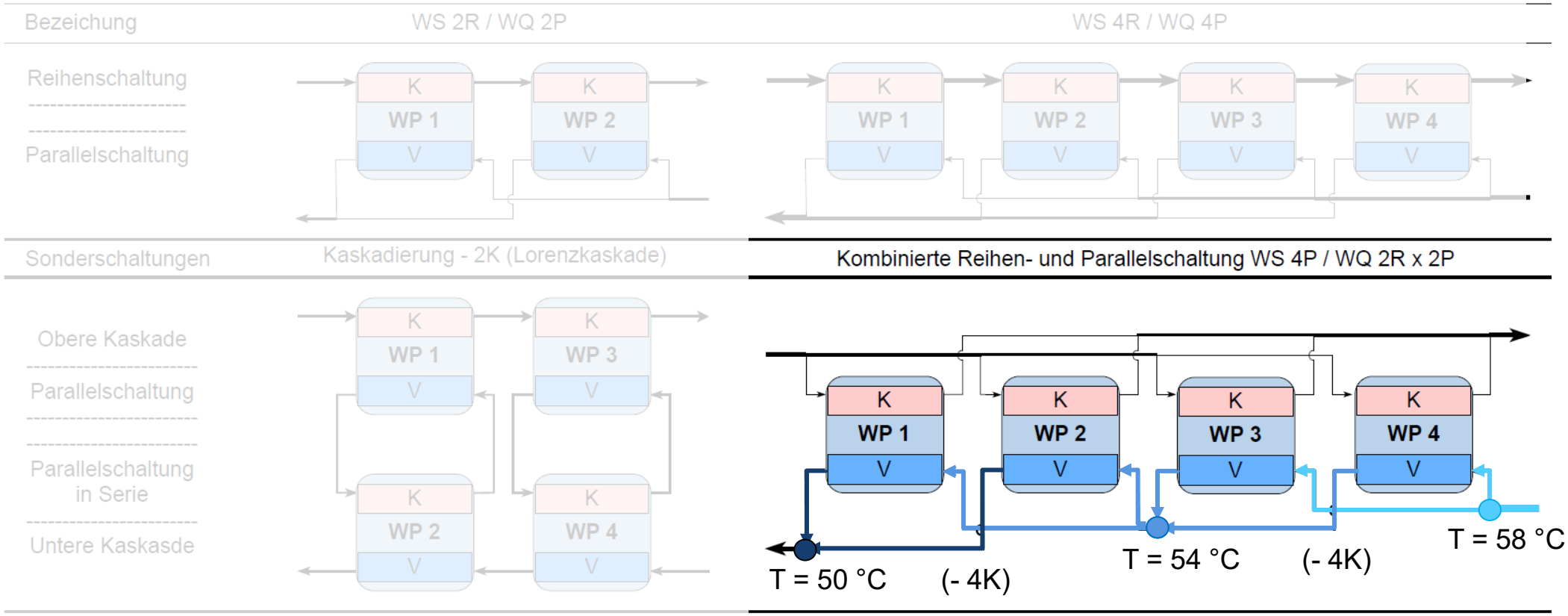
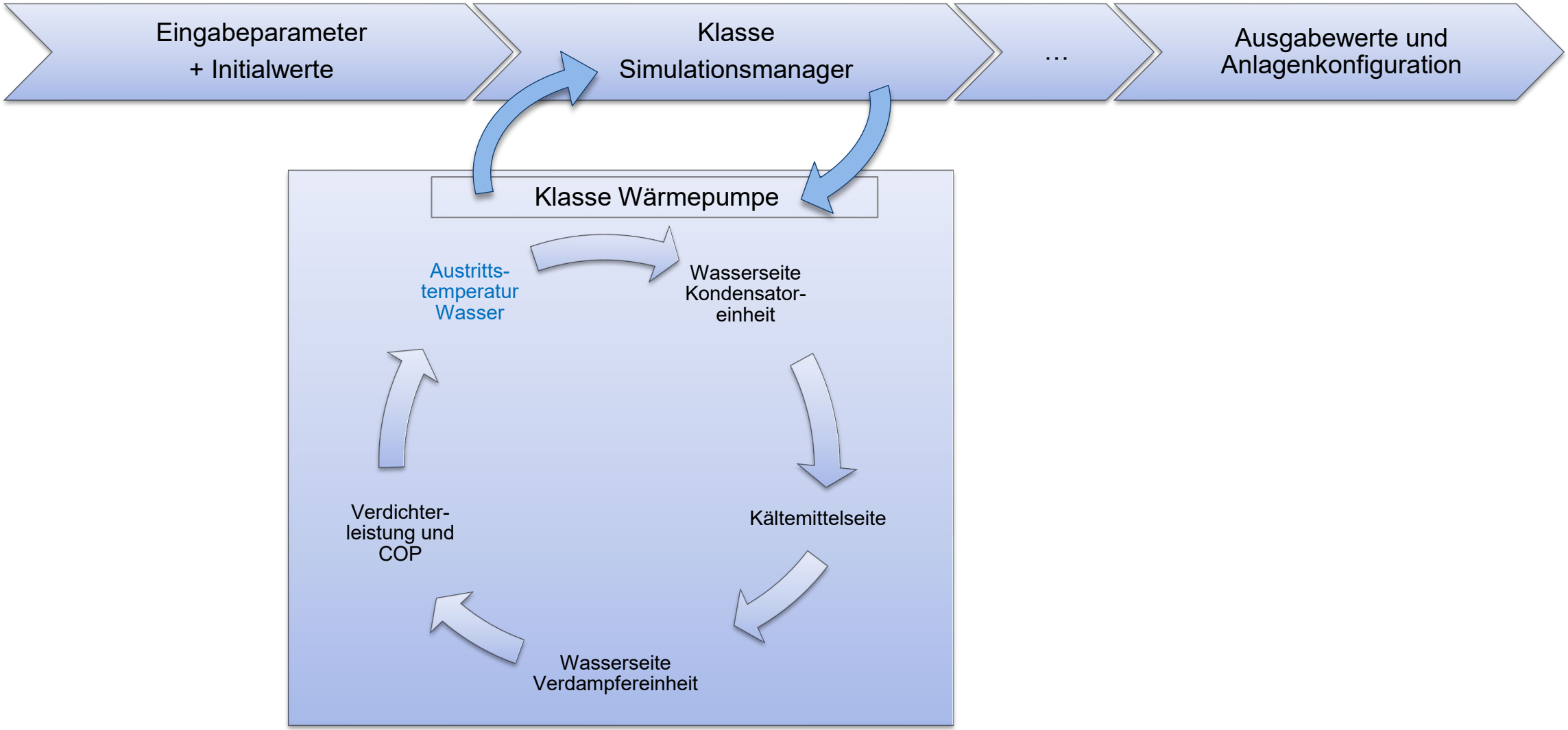


Abbildung 3.2 – Nomenklatur für Verschaltungskonfigurationen mehrerer WP (eigene Darstellung, Lorenzkaskade angelehnt an Studie des Fraunhofer IEG, 2025, Auswahl Wärmepumpenportfolio), ***K = Kondensator, V = Verdampfer***

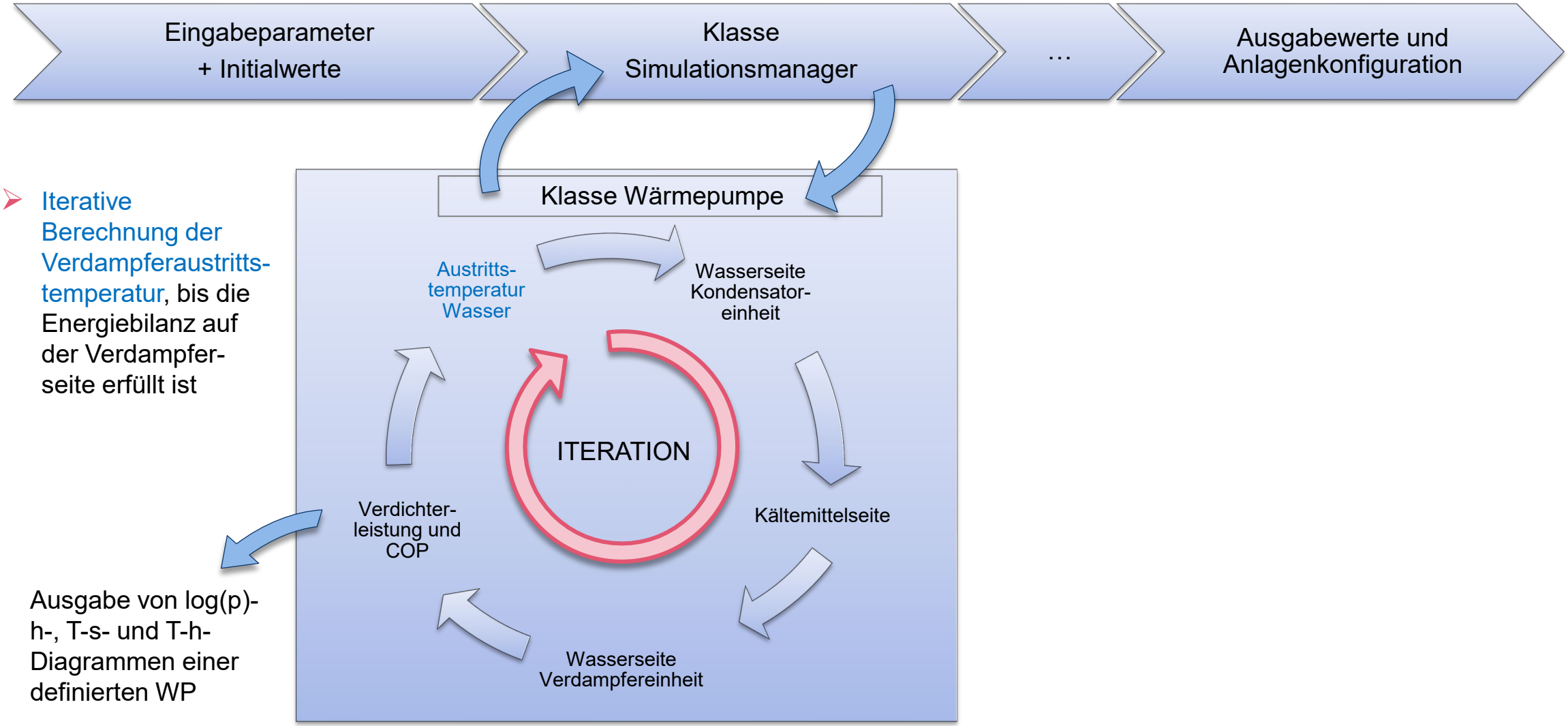
Python-Architektur für die Simulation einer WP-Konfiguration



Python-Architektur für die Simulation einer WP-Konfiguration



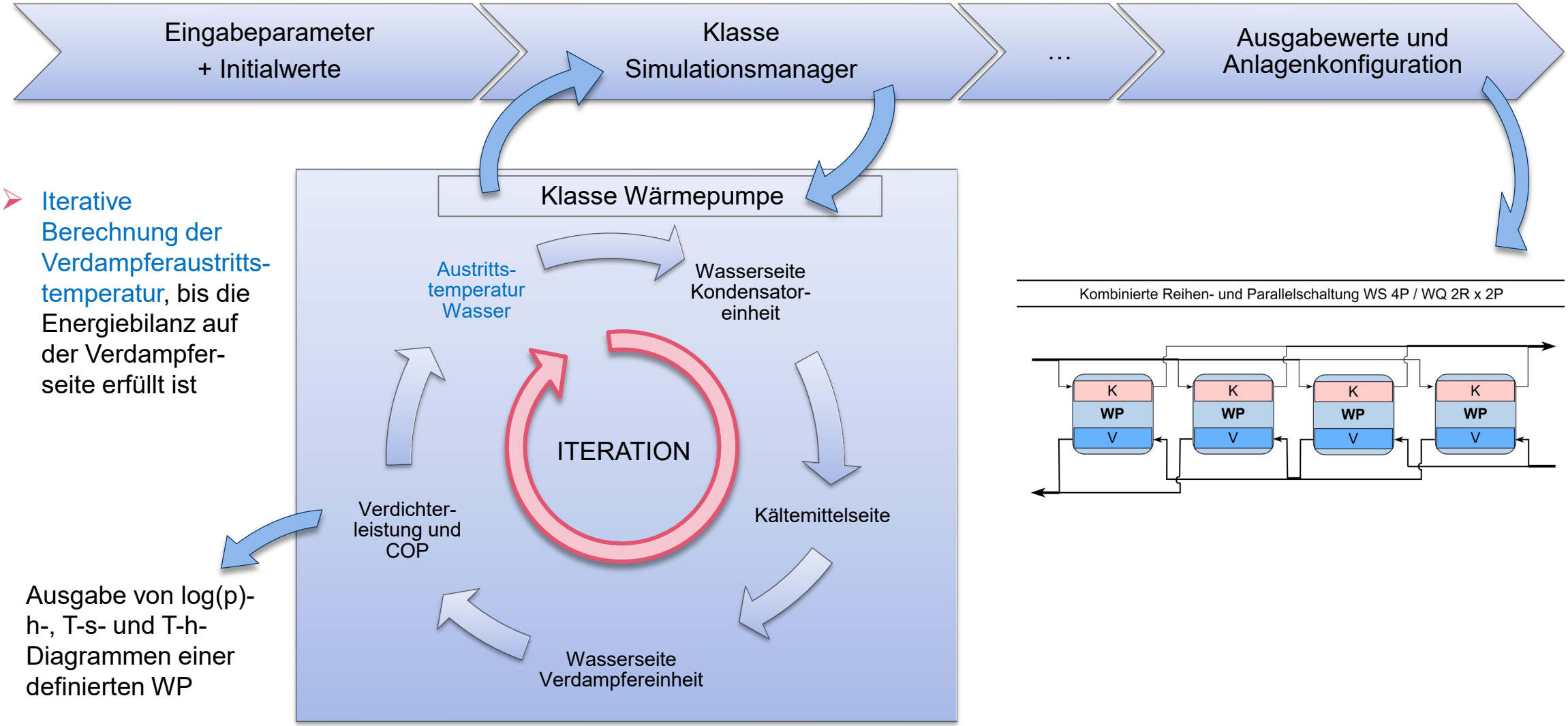
Python-Architektur für die Simulation einer WP-Konfiguration



- Iterative Berechnung der Verdampferaustritts-temperatur, bis die Energiebilanz auf der Verdampfer-seite erfüllt ist

Ausgabe von log(p)-h-, T-s- und T-h-Diagrammen einer definierten WP

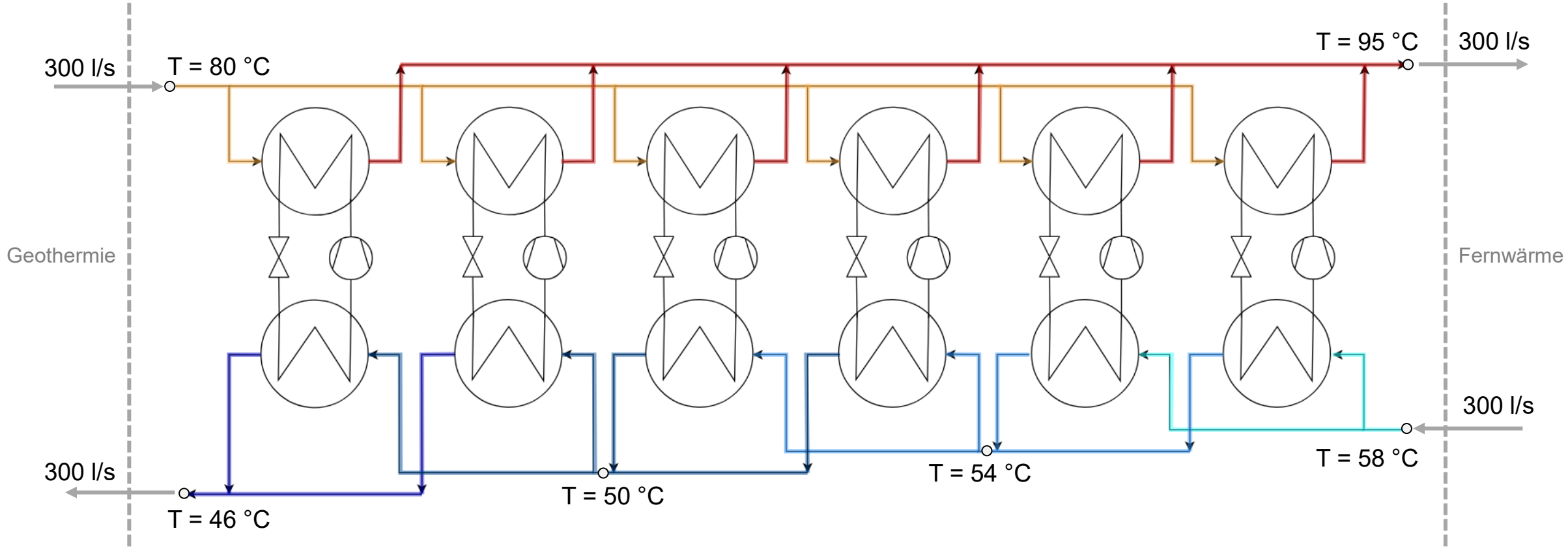
Python-Architektur für die Simulation einer WP-Konfiguration



- Iterative Berechnung der Verdampferaustritts-temperatur, bis die Energiebilanz auf der Verdampfer-seite erfüllt ist

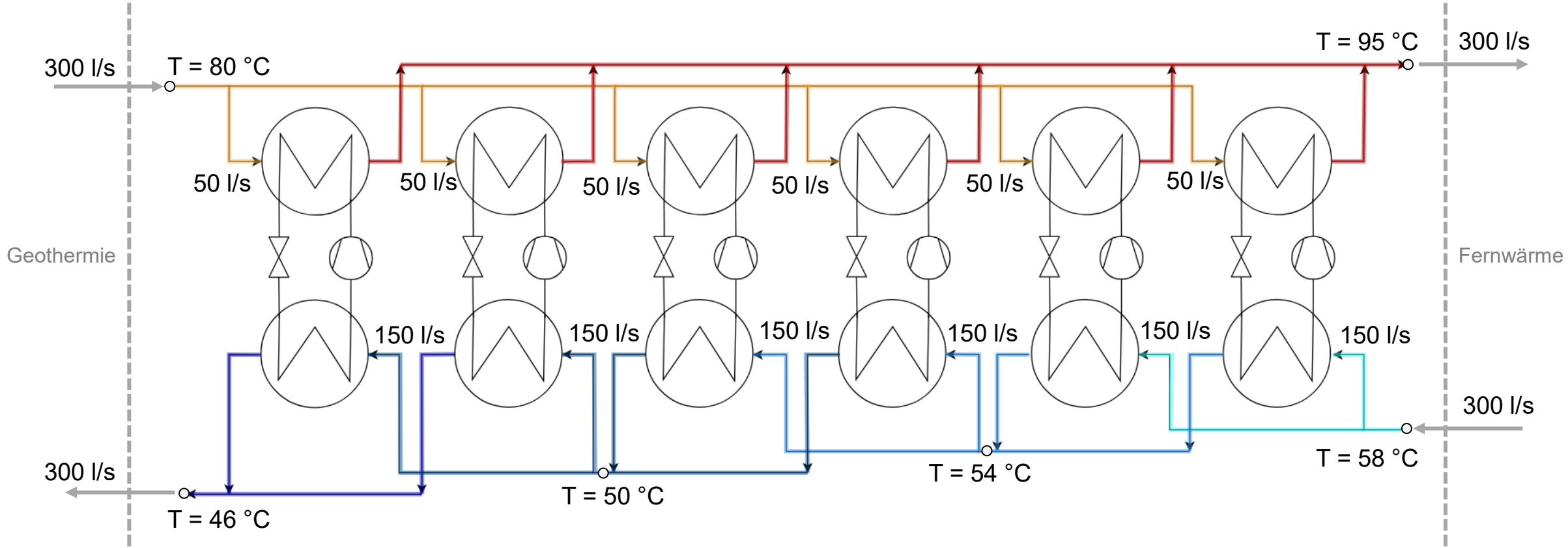
Ausgabe von log(p)-h-, T-s- und T-h-Diagrammen einer definierten WP

Verschaltungskonfiguration für beispielhaftes Szenario



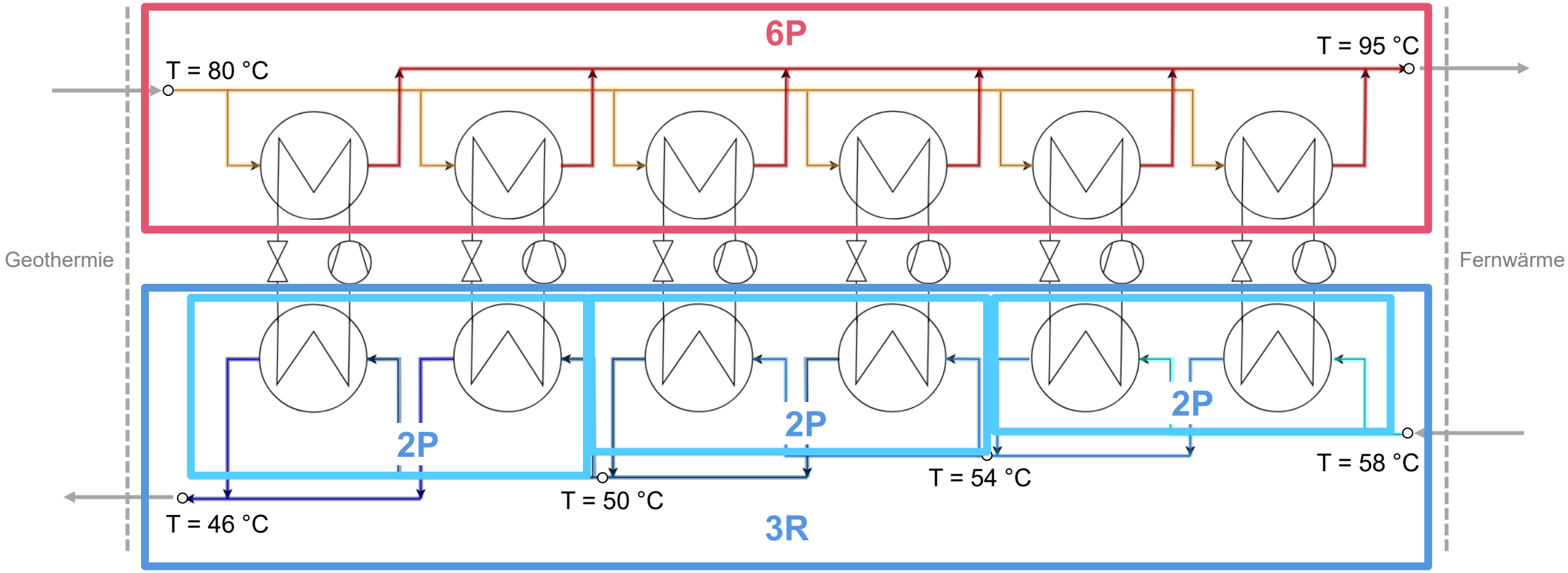
- Gewählte **Konfiguration – WS 6P / WQ 3R x 2P – gegenläufig**
- Einhaltung der nötigen Kondensator-Temperaturspreizungen laut Herstellervorgaben für die Wärmesenke
- COP-Optimierung durch Reihenschaltung von jeweils zwei parallel betriebenen Verdampfern an der Wärmequelle

Verschaltungskonfiguration für beispielhaftes Szenario



- Gewählte **Konfiguration – WS 6P / WQ 3R x 2P – gegenläufig**
- Einhaltung der nötigen Kondensator-Temperaturspreizungen laut Herstellervorgaben für die Wärmesenke
- COP-Optimierung durch Reihenschaltung von jeweils zwei parallel betriebenen Verdampfern an der Wärmequelle

Verschaltungskonfiguration für beispielhaftes Szenario



- Gewählte **Konfiguration – WS 6P / WQ 3R x 2P – gegenläufig**
- Einhaltung der nötigen Kondensator-Temperaturspreizungen laut Herstellervorgaben für die Wärmesenke
- COP-Optimierung durch Reihenschaltung von jeweils zwei parallel betriebenen Verdampfern an der Wärmequelle

T-Q̇-Diagramm für Verschaltungskonfiguration mit R717 (Ammoniak)

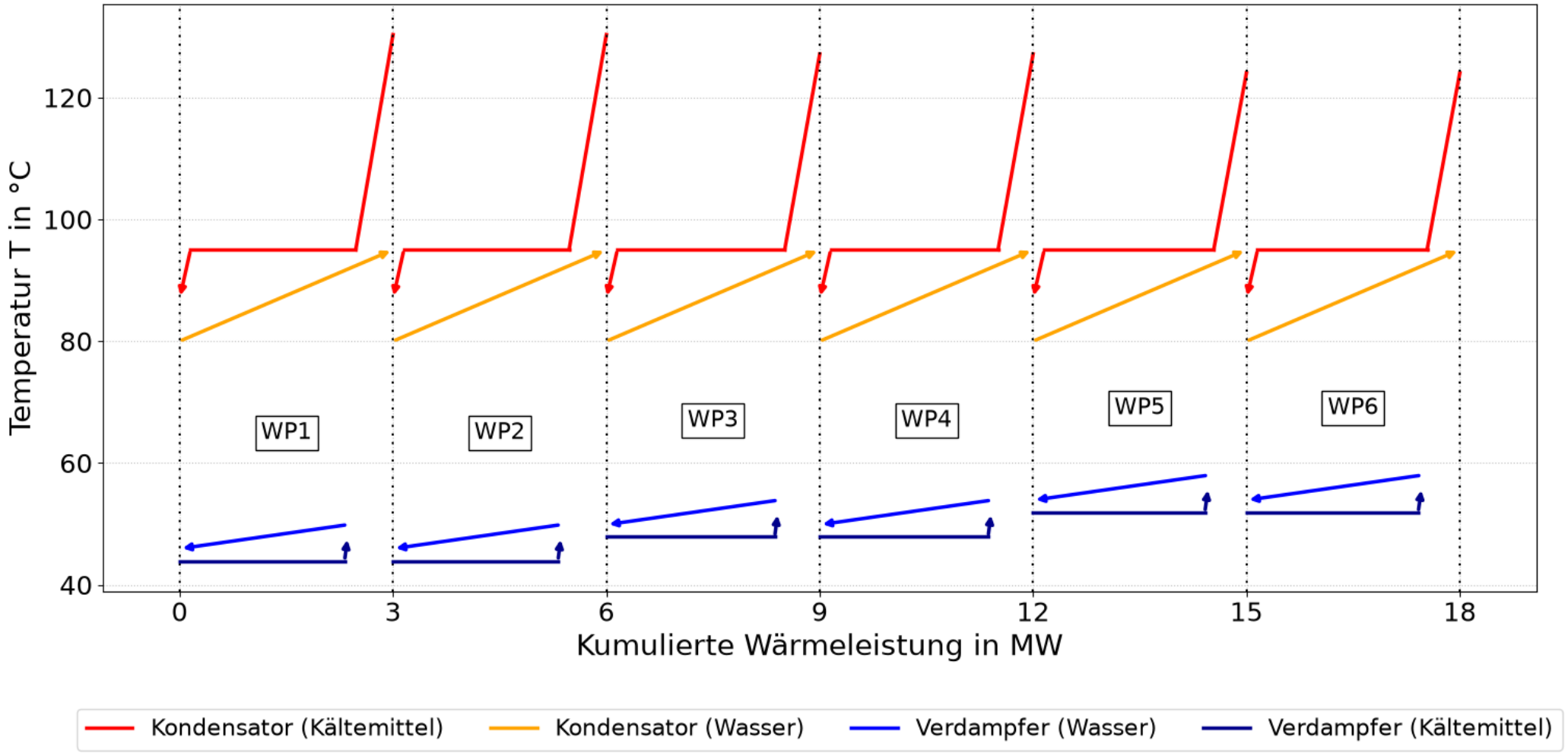


Abbildung 4.1 – T-Q̇-Diagramm der Verschaltungskonfiguration am Beispiel des Kältemittels R717 (eigene Darstellung)

T-Q̇-Diagramm für Verschaltungskonfiguration mit R717 (Ammoniak)

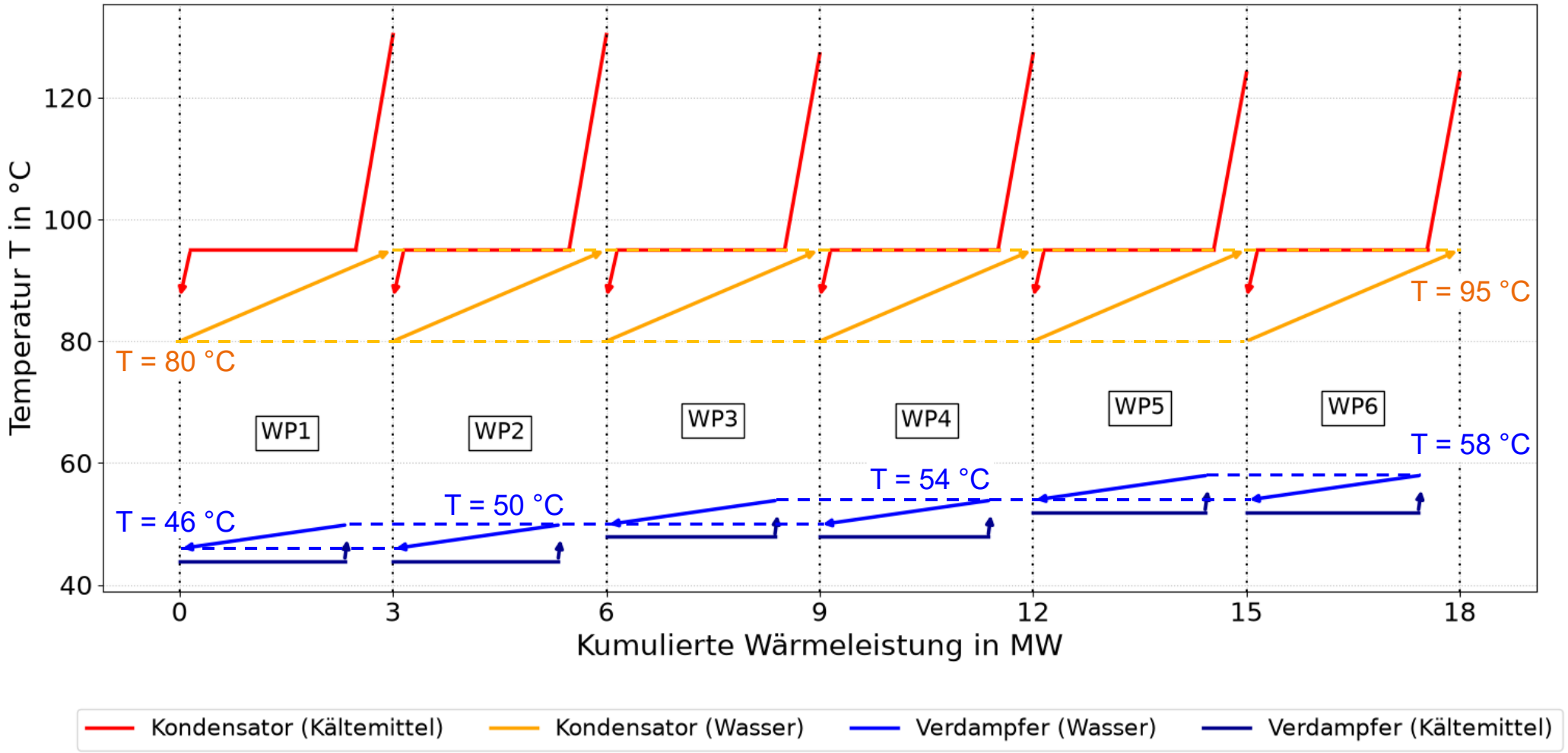


Abbildung 4.1 – T-Q̇-Diagramm der Verschaltungskonfiguration am Beispiel des Kältemittels R717 (eigene Darstellung)

Die Analyse der optimierten Verschaltung und Betriebsweise von Großwärmepumpen dient dazu, …

… ein unterstützendes Tool in der Konzeptionsphase von Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen bereitzustellen

… Erkenntnisse bzgl. Leistungsgrößen (COP, Prozessgüte) zu gewinnen

… durch Variation der Inputparameter die Eignung verschiedener Verschaltungskonfigurationen zu bewerten

… einen Beitrag zur Effizienzsteigerung im geothermischen Wärmenetzbetrieb zu leisten

Weiter Ziele und Anwendungsmöglichkeiten des Codes sind …

… die Simulation verschiedener Lastszenarien zur Analyse des Teillastverhaltens

… die Erweiterung der Python-Architektur durch die Integration physikalisch ausgereifterer Komponenten

… die Verknüpfung mit anderen Simulationsmodellen in Python (z.B. Reservoir-Simulation)

… die Erstellung einer graphischen Oberfläche für benutzerfreundlichere Anwendungen (z.B. mit Pythonpaket – Streamlit)

Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

Fragen oder Anmerkungen?

Funktionsweise einer Wärmepumpe

Wie funktioniert eine Wärmepumpe?

- Leistungsbilanz um die WP: $$\dot{Q}_{\mathrm{WP}} = \dot{Q}_{\mathrm{ab}} = \dot{Q}_{\mathrm{zu}} + P_{\mathrm{el}}$$

Unter welchen Bedingungen spricht man von Großwärmepumpen?

- „Großwärmepumpe ab 100 kW_{th} definiert" (VDI-Richtlinie 4646)
- Andere Quellen setzen eine Heizleistung von 500 kW_{th} oder mehr voraus.

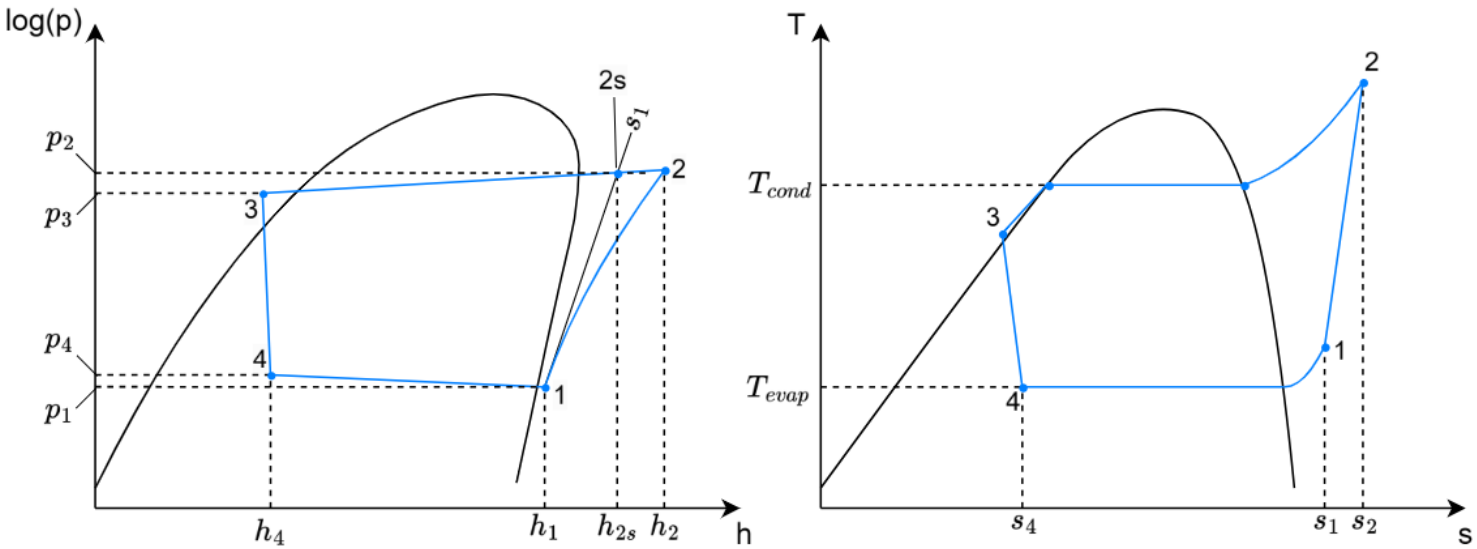


Abbildung 2.2 – log(p)-h-Diagramm (links) und T-s-Diagramm (rechts) einer WP (eigene Darstellung)

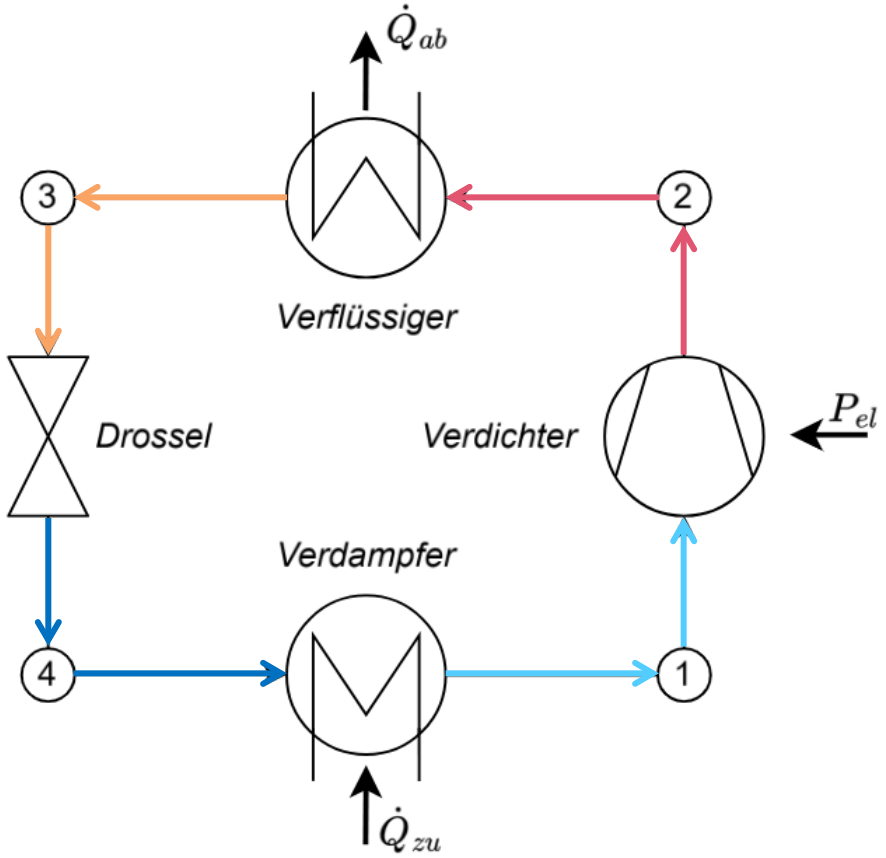


Abbildung 2.1 – Schematischer Kreislauf einer WP mit den vier zentralen Grundkomponenten (eigene Darstellung)

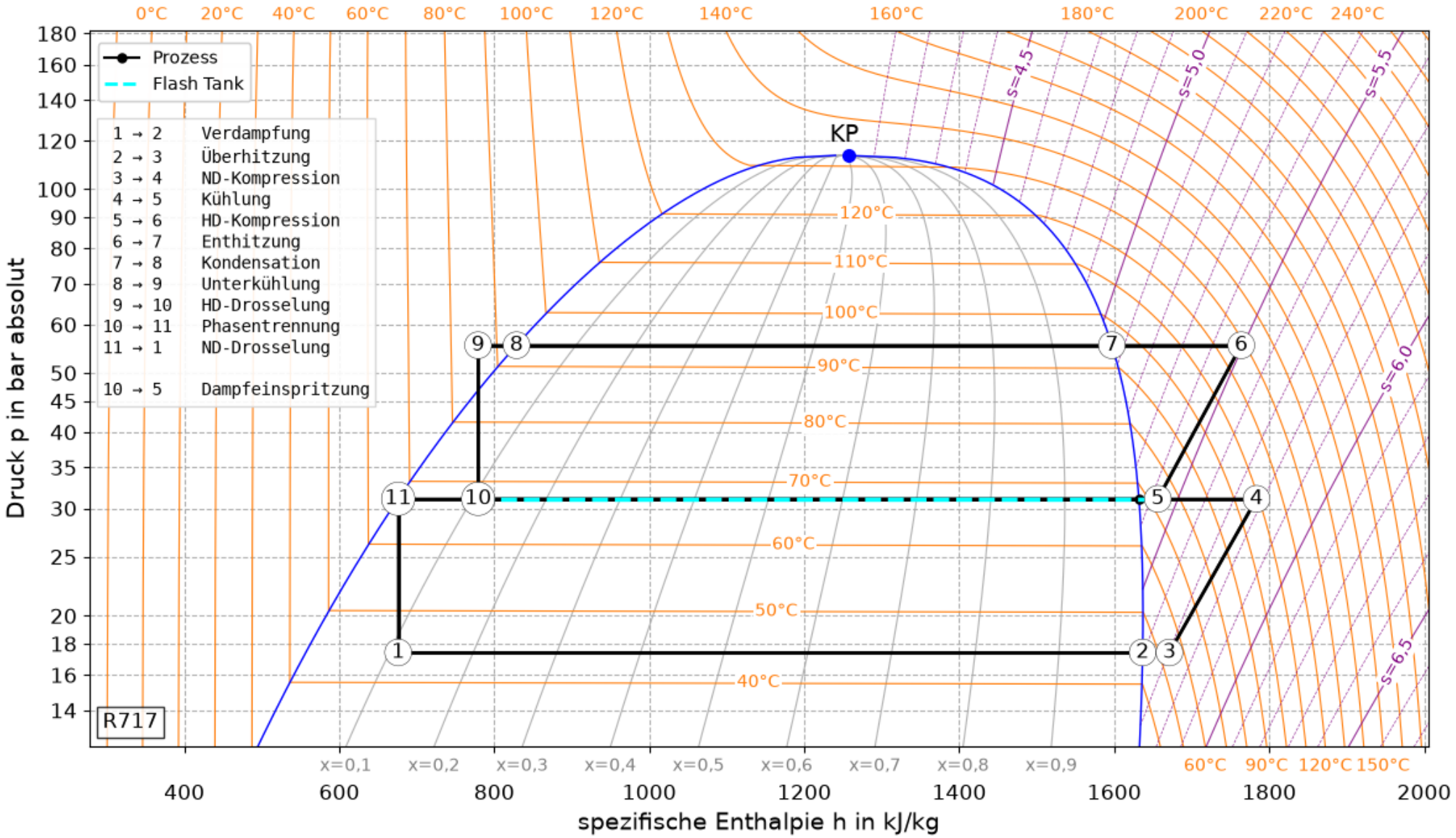


Abbildung 5.2 – log(p)-h-Diagramm am Beispiel des Kältemittels R717, Integration eines Flash-Tanks (eigene Darstellung)

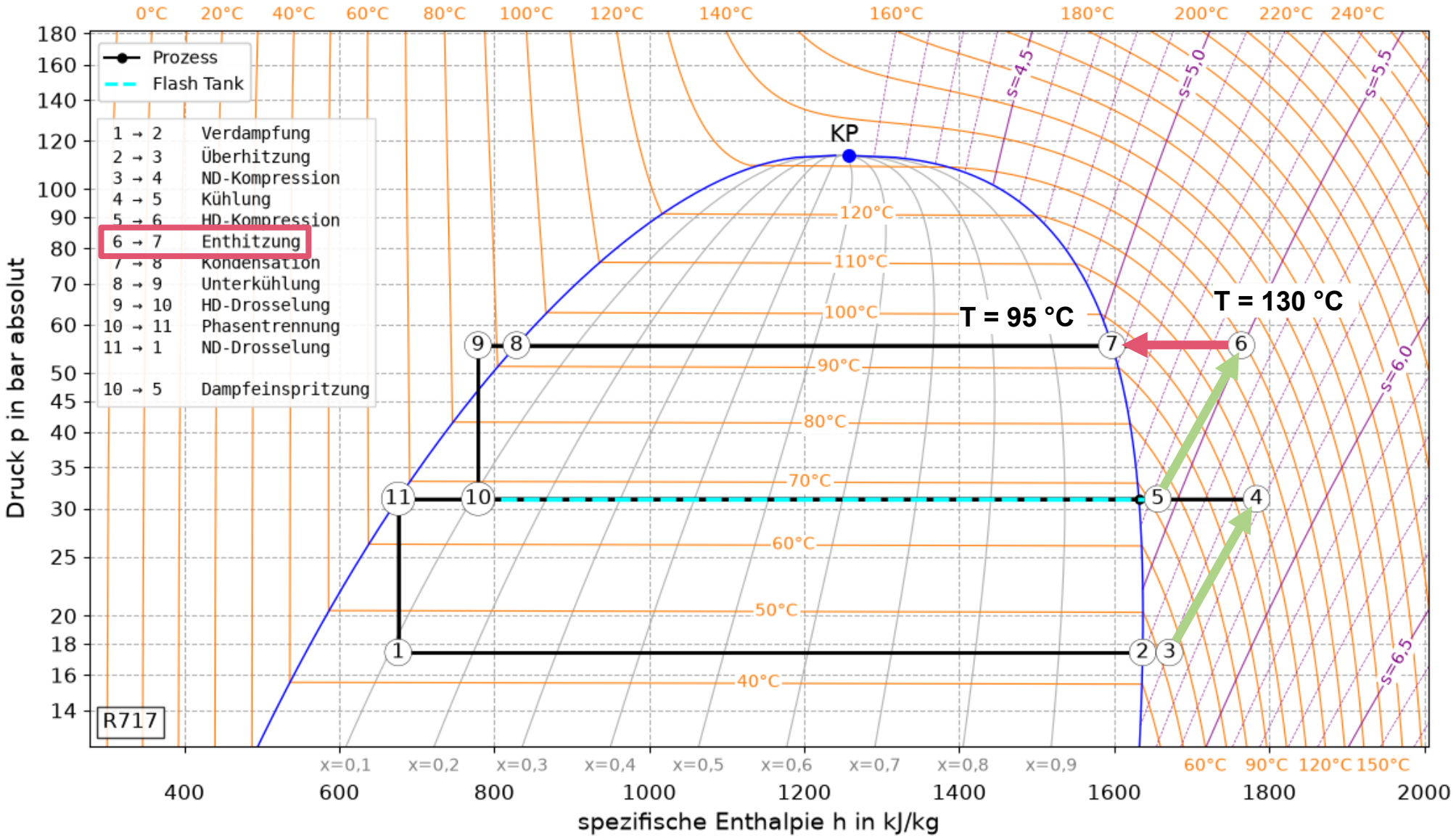


Abbildung 5.2 – log(p)-h-Diagramm am Beispiel des Kältemittels R717, Integration eines Flash-Tanks (eigene Darstellung)