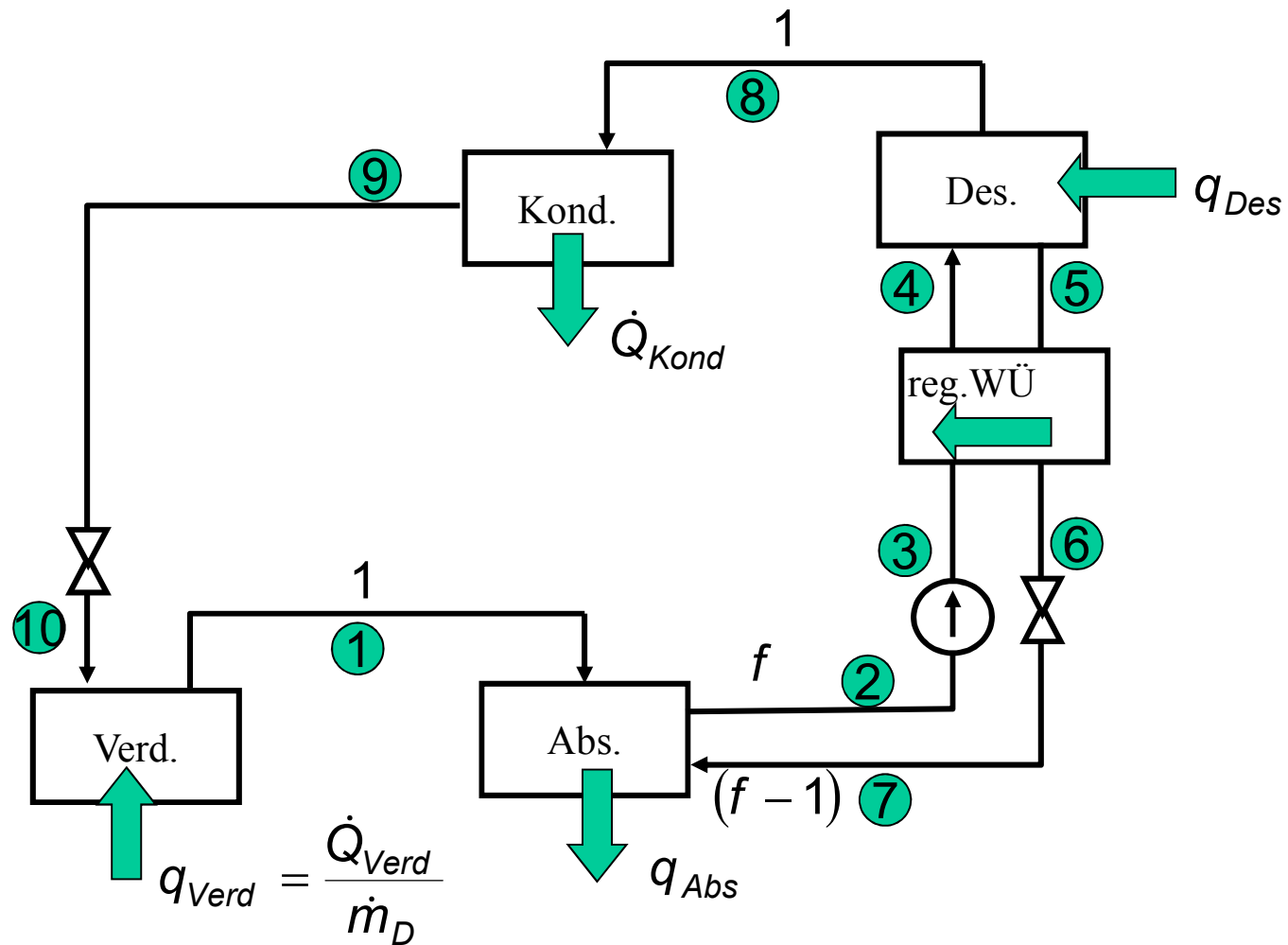
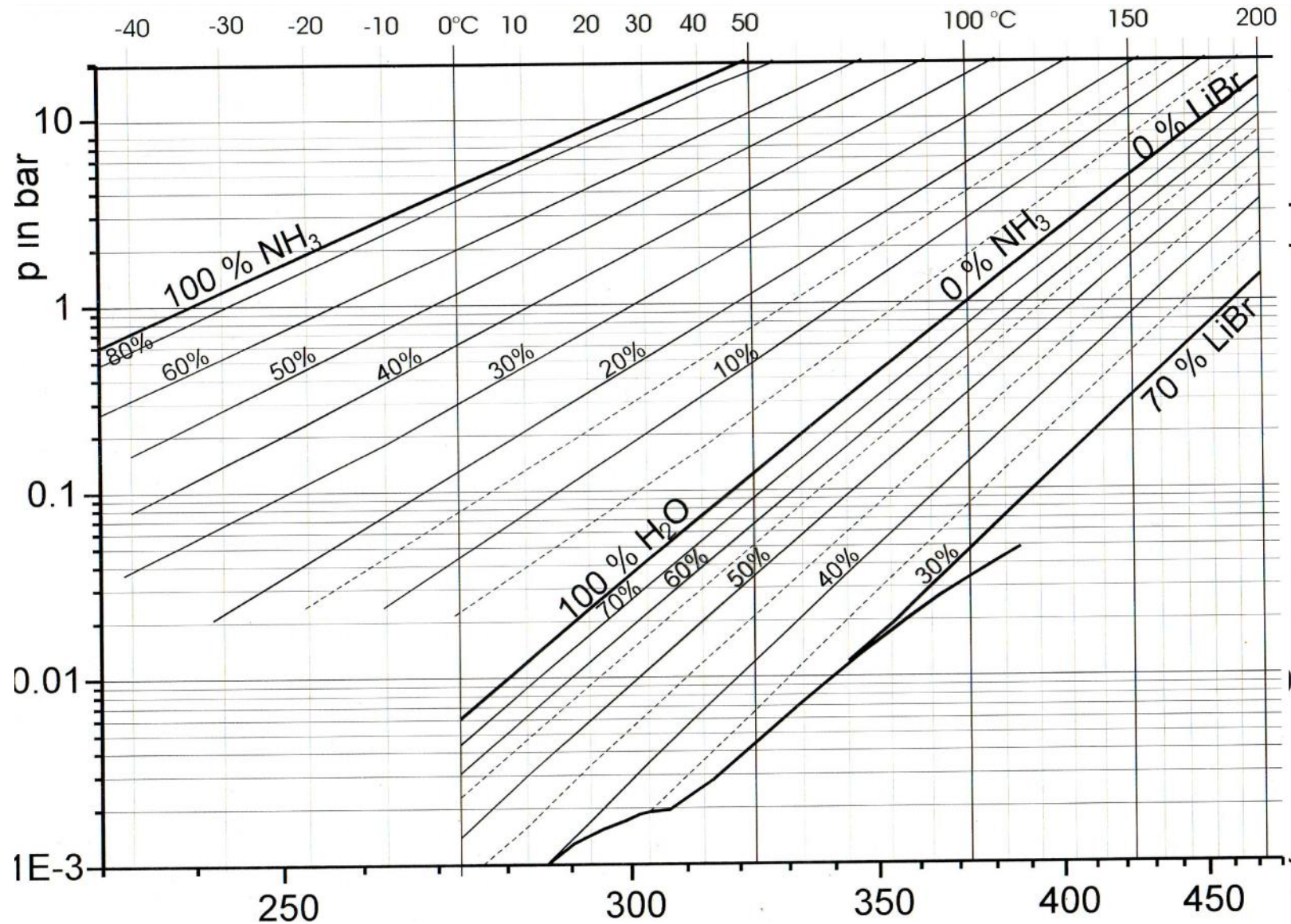


AWP mit regenerativem LM-WÜ



Dampfdruckdiagramm



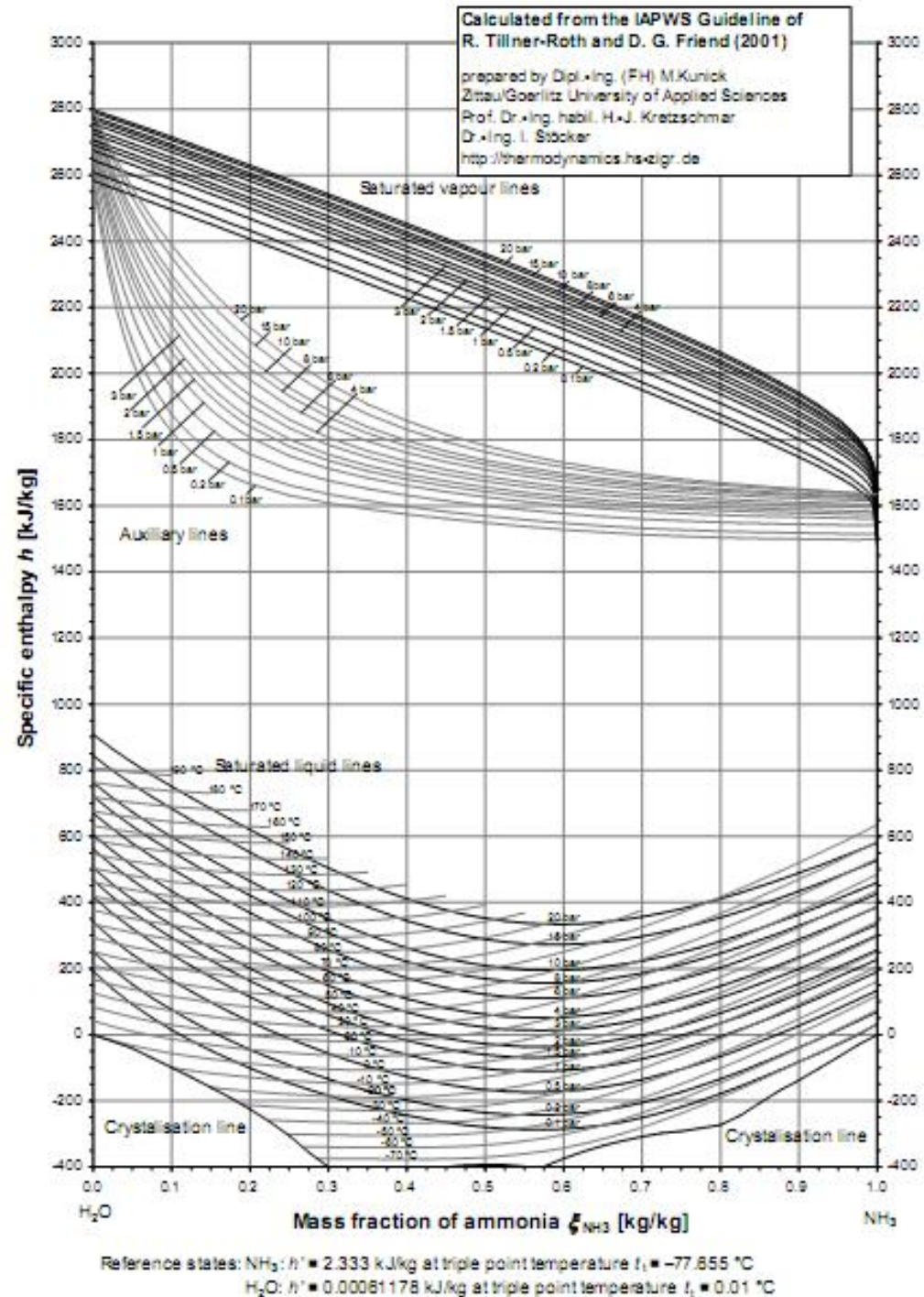
h, ξ - Diagramm für NH_3 -Wasser

$$t_{\text{NH}_3}^{LV} = -33^\circ\text{C}$$

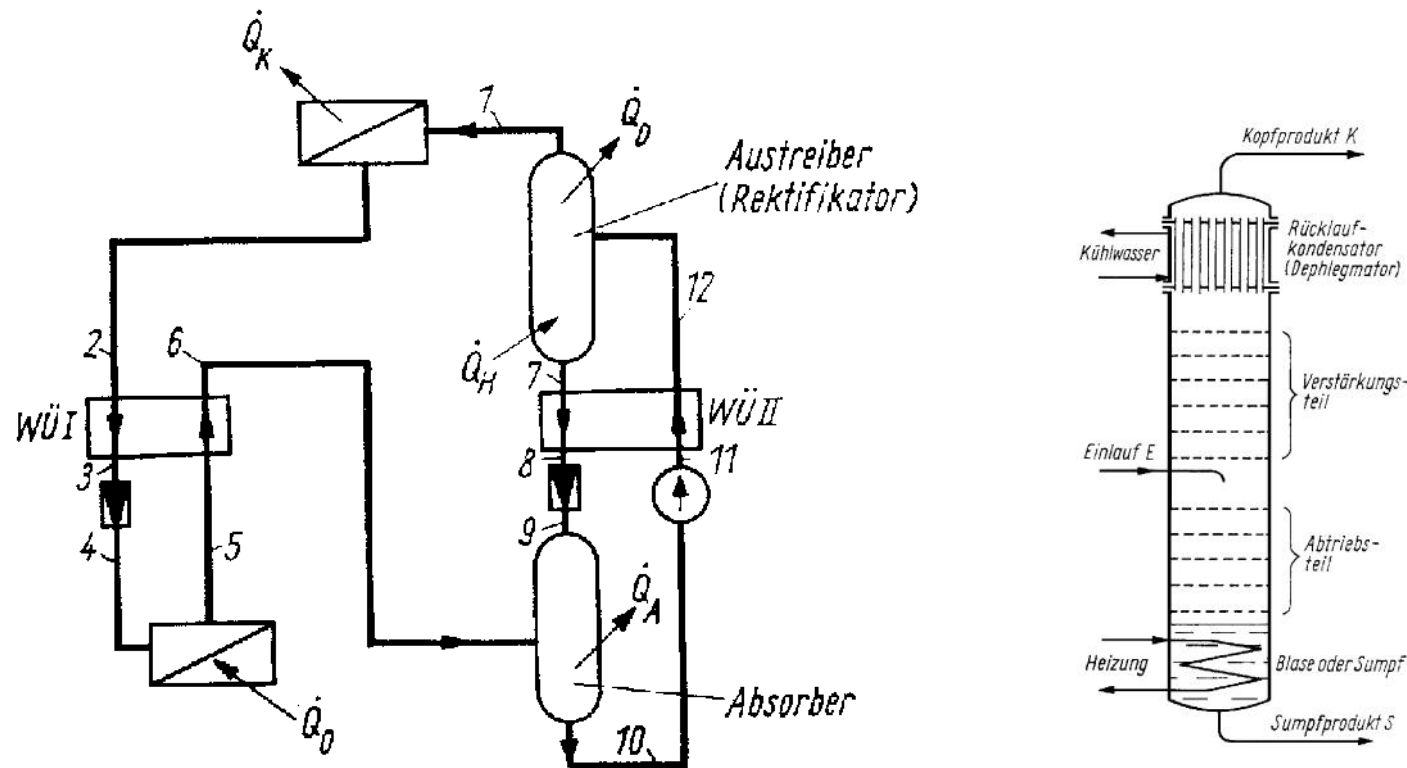
$$t_{\text{H}_2\text{O}}^{LV} = 100^\circ\text{C}$$

$$\Delta t^{LV} < 200^\circ\text{C}$$

Lösungsmittel verdampft teilweise und muss aus AM-Dampf entfernt werden, vermeiden der „Versauerung“ des Verdampfers (Anstieg der Verdampfungstemperatur)



NH₃- Wasser - AWP

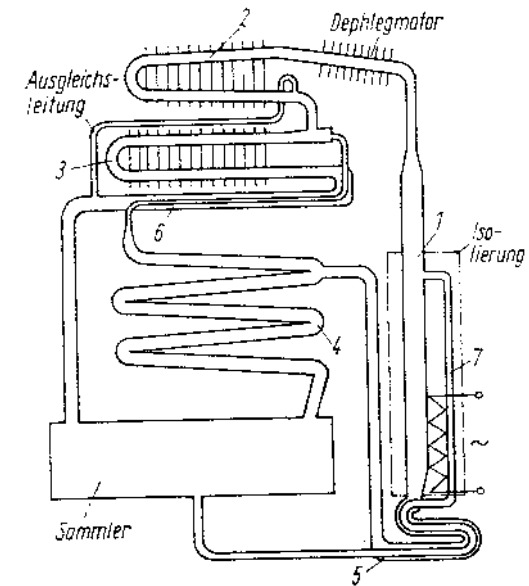
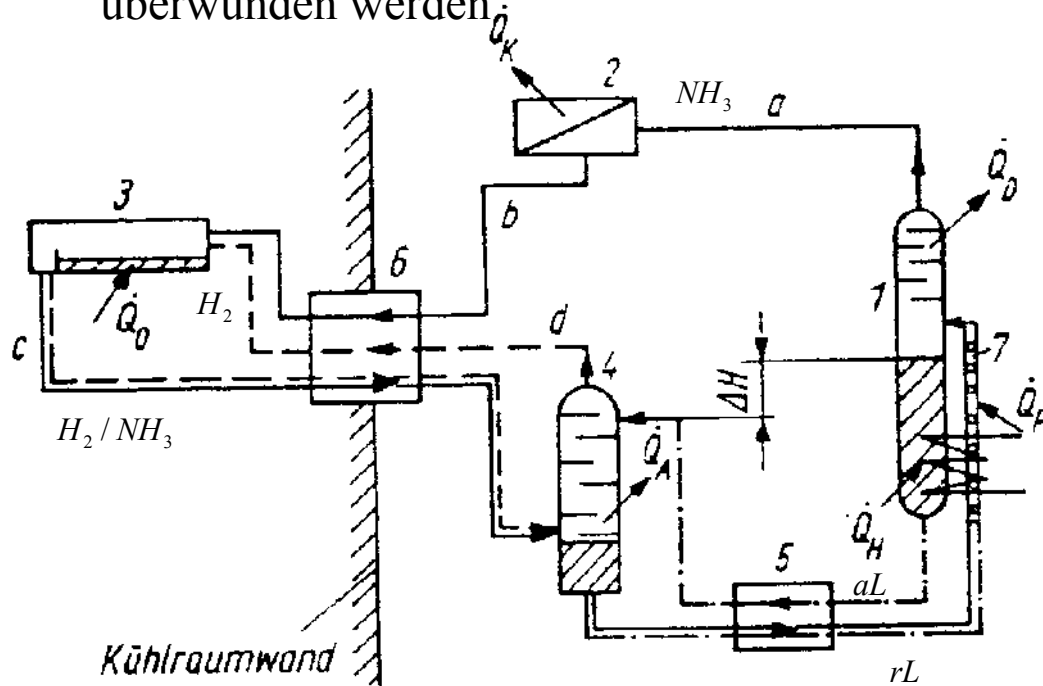


- NH₃-Dampf wird nicht in reiner Form ausgetrieben
- Rektifikation (Destillation), zur Dampfreinigung notwendig
- zusätzlicher Wärmeeaufwand → schlechteres Wärmeverhältnis

Diffusionskältemaschine

(Absorptionskälteanlage mit druckausgleichendem Gas)

Geringe Druckunterschiede können durch eine Thermosiphonpumpe (ohne bewegte Teile) überwunden werden.

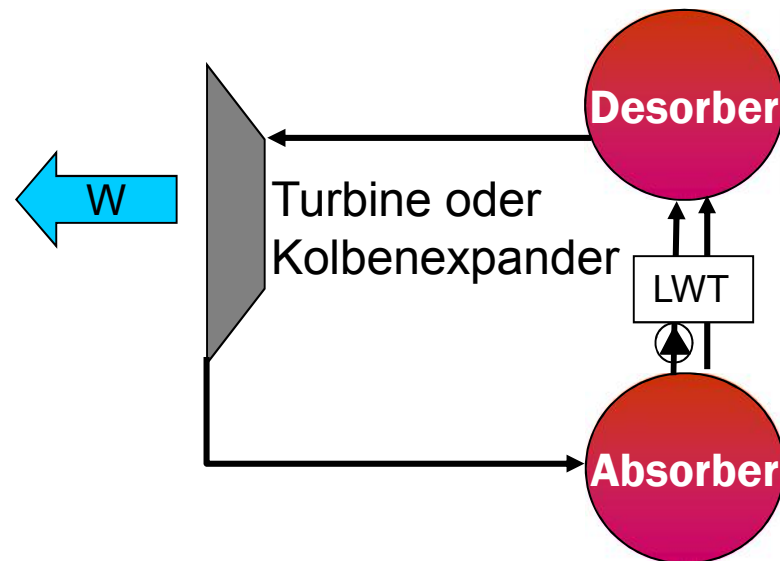


1 Austreiber (Desorber), 2 Kondensator, 3 Verdunster; 4 Absorber, 5,6 Wärmeübertrager
7 Thermosiphonpumpe

Druckausgleichendes Gas He oder H_2 (geringere Dichte gegenüber NH_3)

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{pM}{zRT} \sim M$$

Arbeitsleistender Absorptionskreisprozess KALINA-Prozess



Vorgeschlagen zur :

- Nutzung niedriger Kondensatortemperaturen bei geringer Umgebungstemperatur
- Nutzung gleitender Temperaturniveaus

Desorber: Anpassung an Wärmequelle z.B. Heißwasser aus Geothermie

Absorber: bessere Ausnutzung des Kühlwassertemperaturniveaus

Nachteil: zusätzlicher Lösungskreislauf mit Wärmeübertrager und Verlusten, optimale regenerative Wärmenutzung notwendig

Arbeitsleistender Absorptionskreisprozess KALINA-Prozess

Wärmezufuhr
aus Geothermie

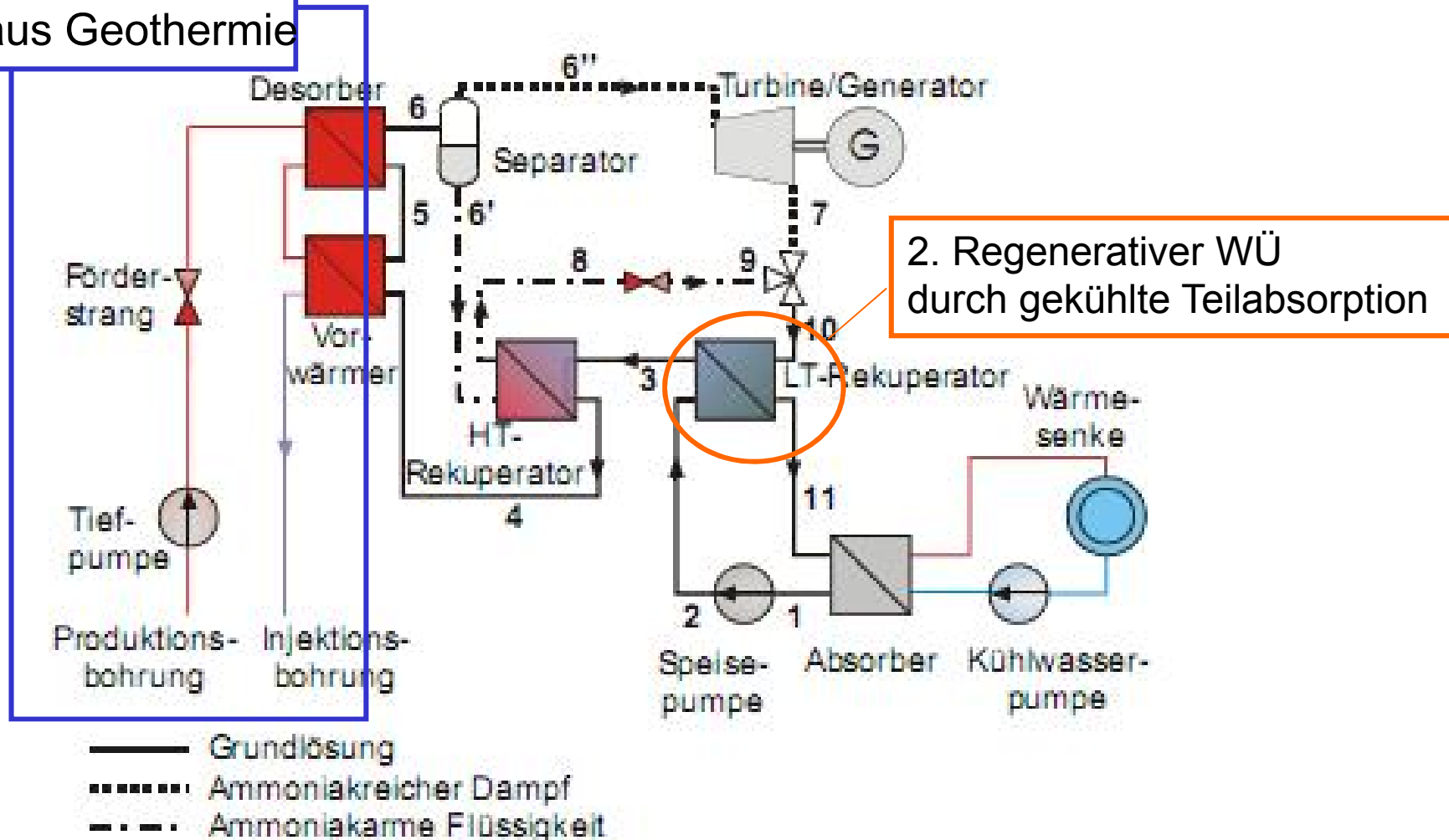


Abbildung IV-19: Kalina-Kreislauf KCS 34 nach Leibowitz und Mleak (1999) und (Mleak, 2002).

Kalina-Prozess im lg p, 1/T-Diagramm

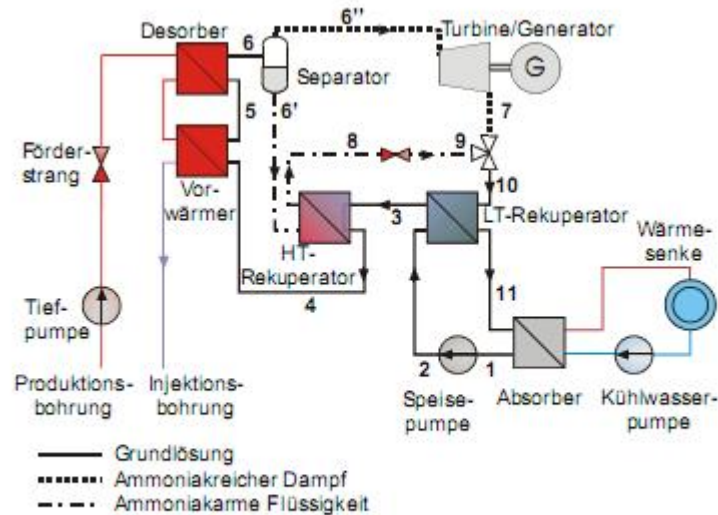
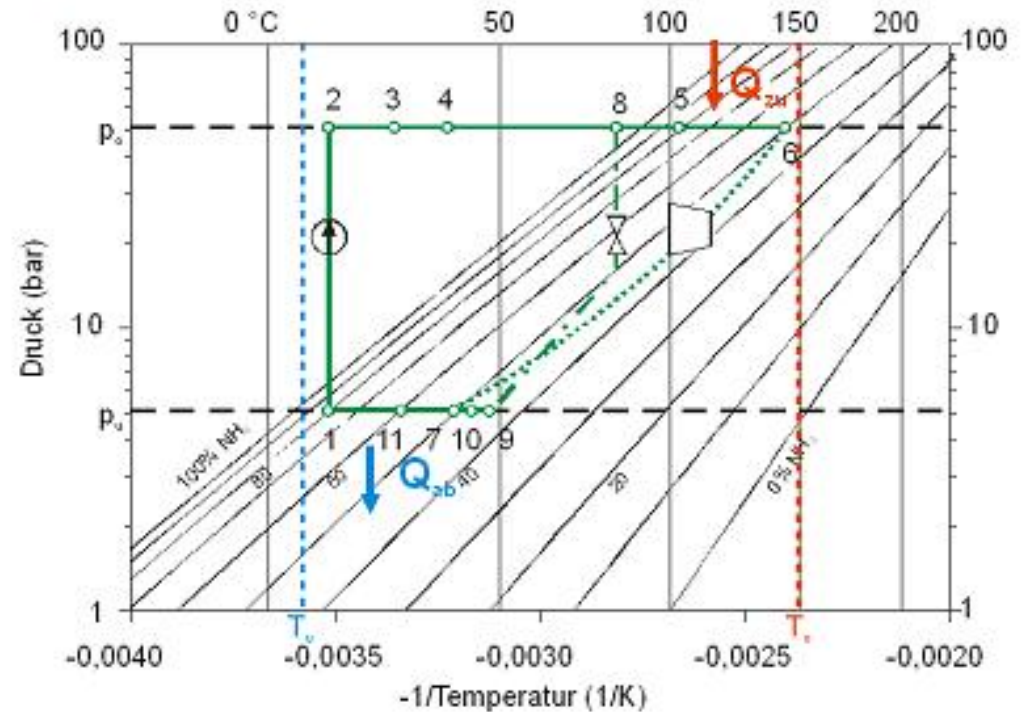


Abbildung IV-19: Kalina-Kreislauf KCS 34 nach Leibowitz und Mleak (1991) (Mleak, 2002).



Regenerativer Wärmeübertrager im ORC-Prozess

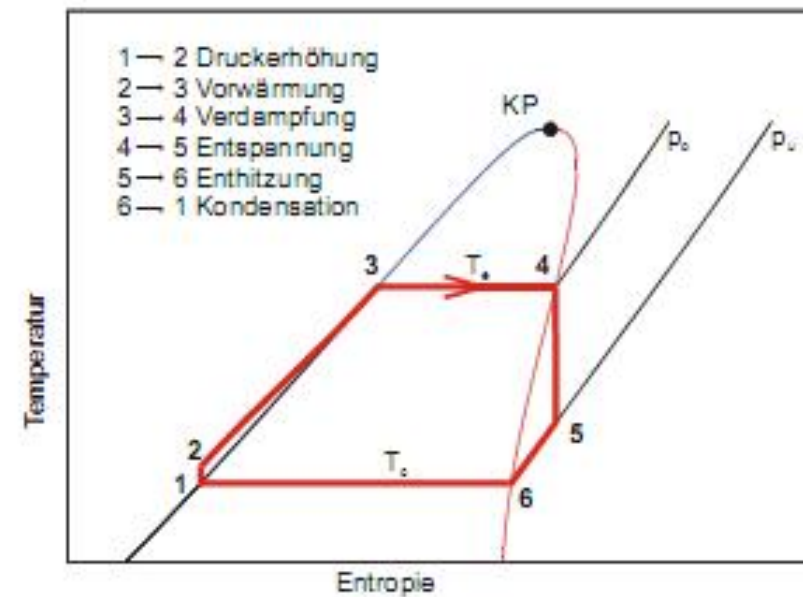
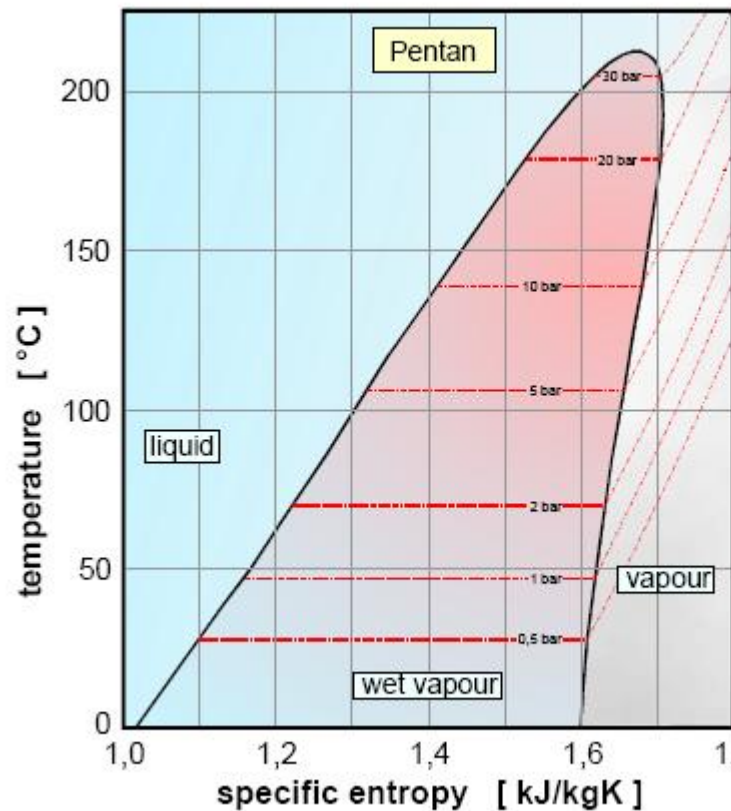


Abbildung IV-2: Typisches Temperatur-Entropie-Diagramm eines einfachen ORC mit retrogradem Arbeitsmittel.

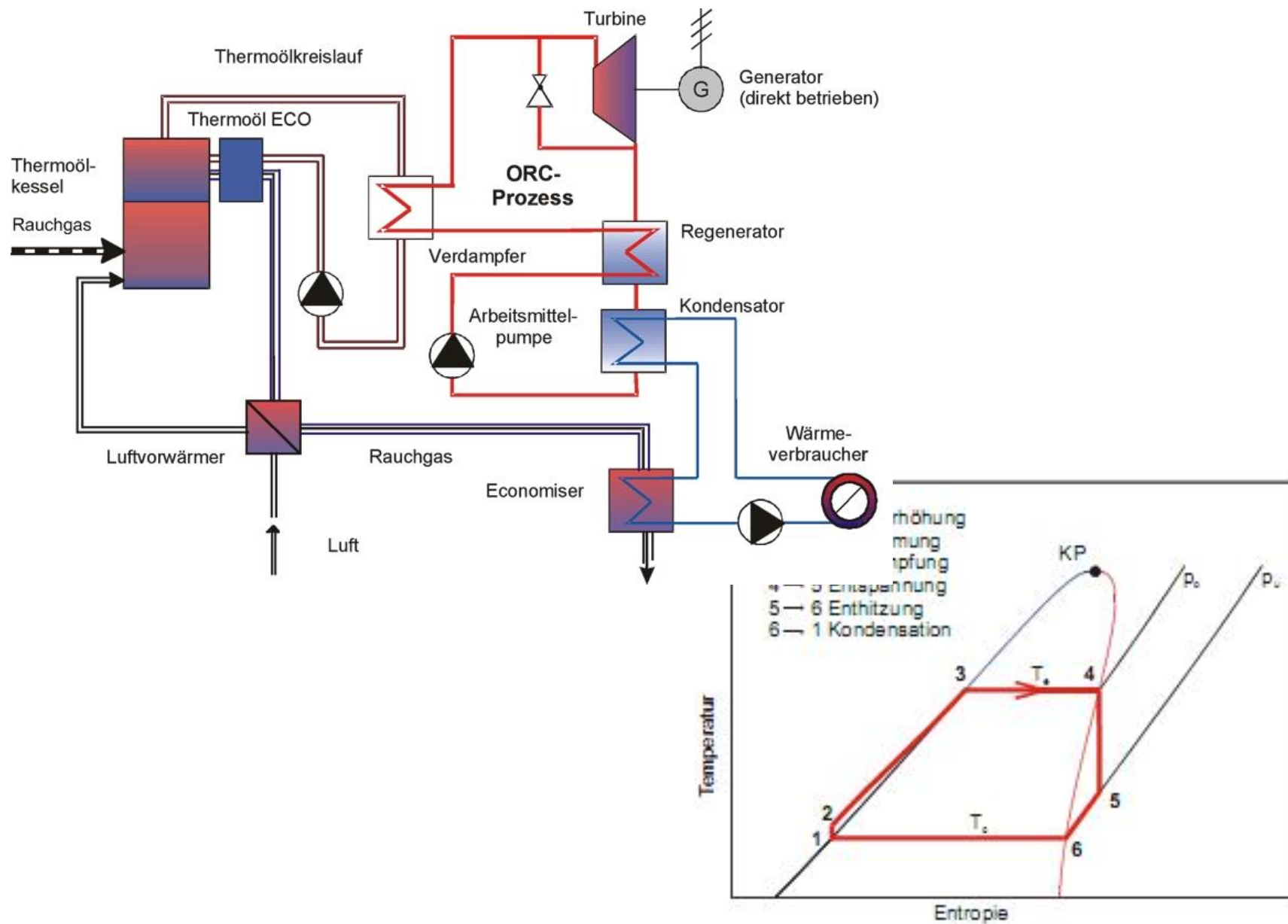
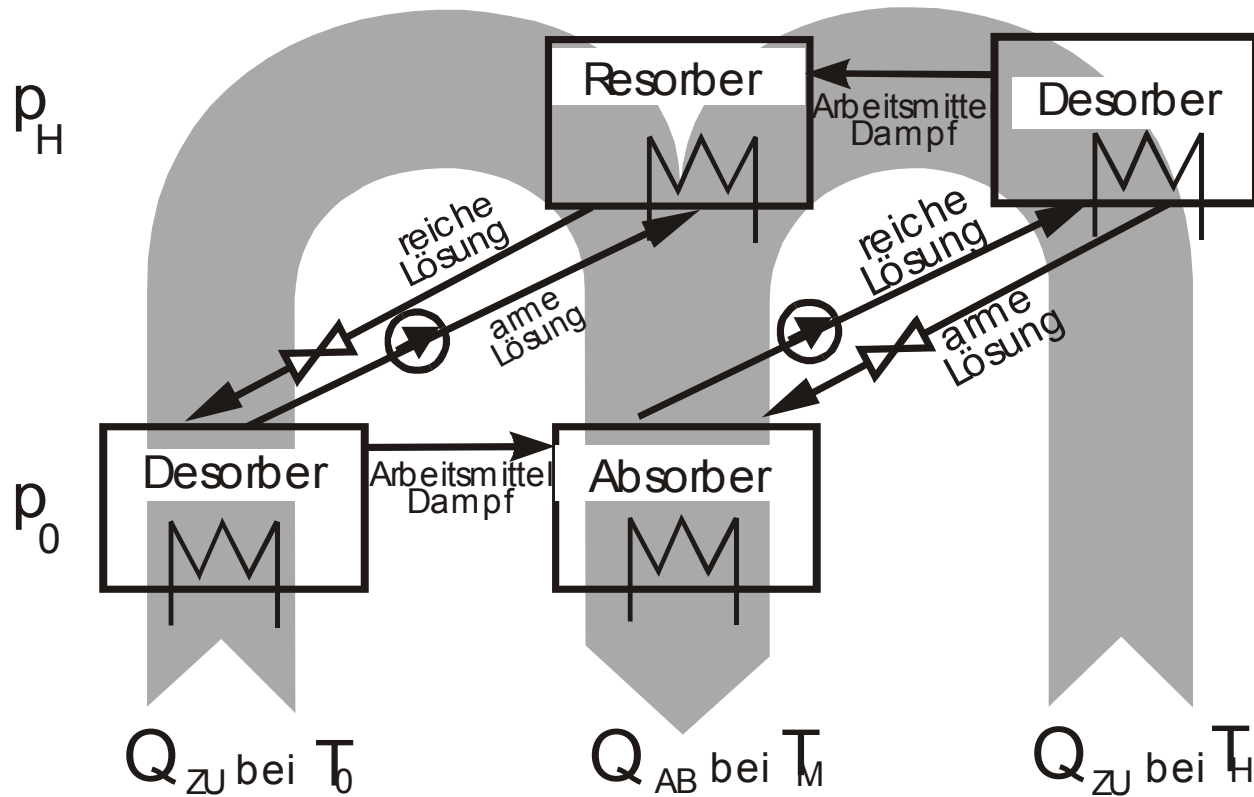


Abbildung IV-2: Typisches Temperatur-Entropie-Diagramm eines einfachen ORC mit retrogradem Arbeitsmittel.

Resorptionswärmepumpe



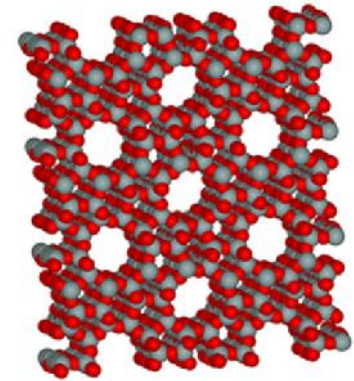
Vermeidung des Rektifikationsaufwandes

z.B. auch zur Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden
 $\text{LaNi}_{4,5}\text{Al}_{0,5}$; TiFe , wegen niedriger Kondensationstemperatur
des Wasserstoffs

Arbeitsmittel für Adsorptions-Kreisprozesse

Arbeitsmittel:

Zeolith: mikroporöse Gerüststruktur aus AlO_4^- und SiO_4^- -Tetraedern, die untereinander durch Sauerstoffatome verbunden sind. Dadurch resultiert Struktur aus gleichförmigen Poren und/oder Kanälen, in denen Stoffe adsorbiert werden können.

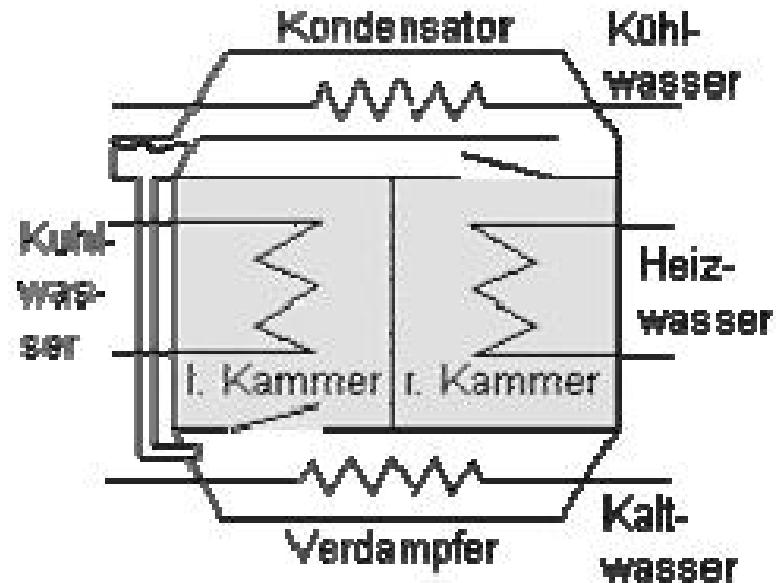


Silicagel: Kieselgel, amorphes Siliciumdioxid
 SiO_2 innere Oberfläche ca. $600 \text{ m}^2/\text{g}$

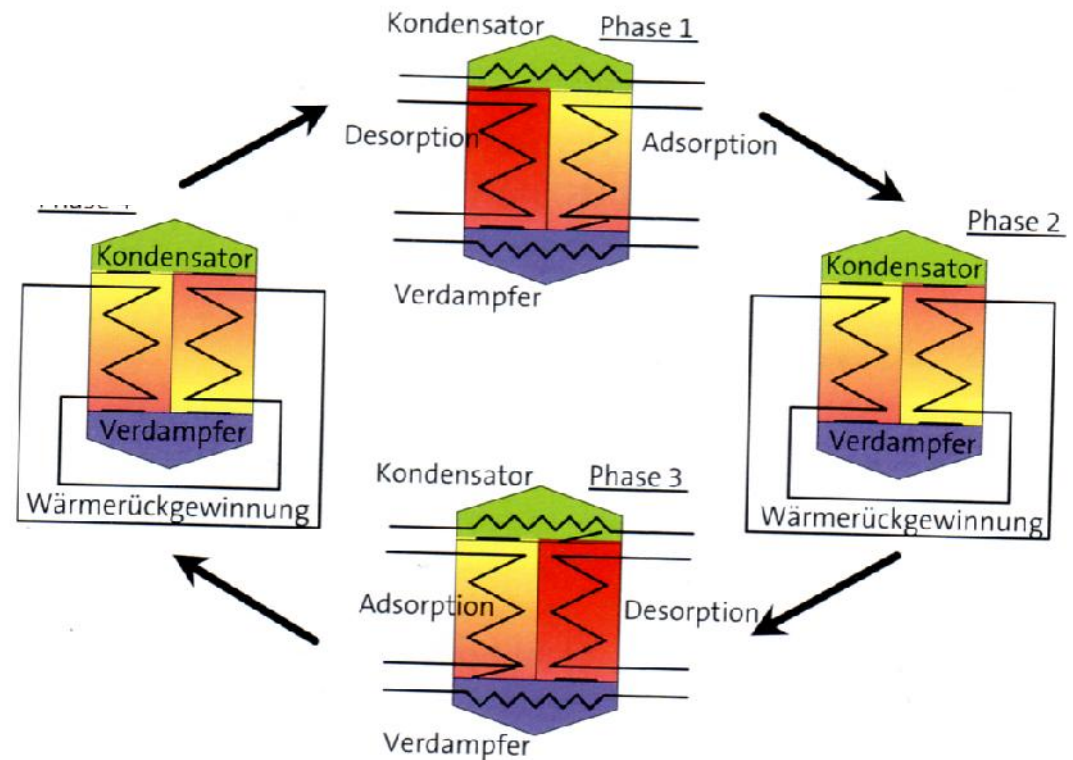


Anlagerung (Adsorption) von Wassermolekülen (Adsorbat) auf der Oberfläche des Adsorbers

Adsorptionskreisprozesse



Diskontinuierlich
oder quasikontinuierlich bei
Verwendung mehrerer Behälter



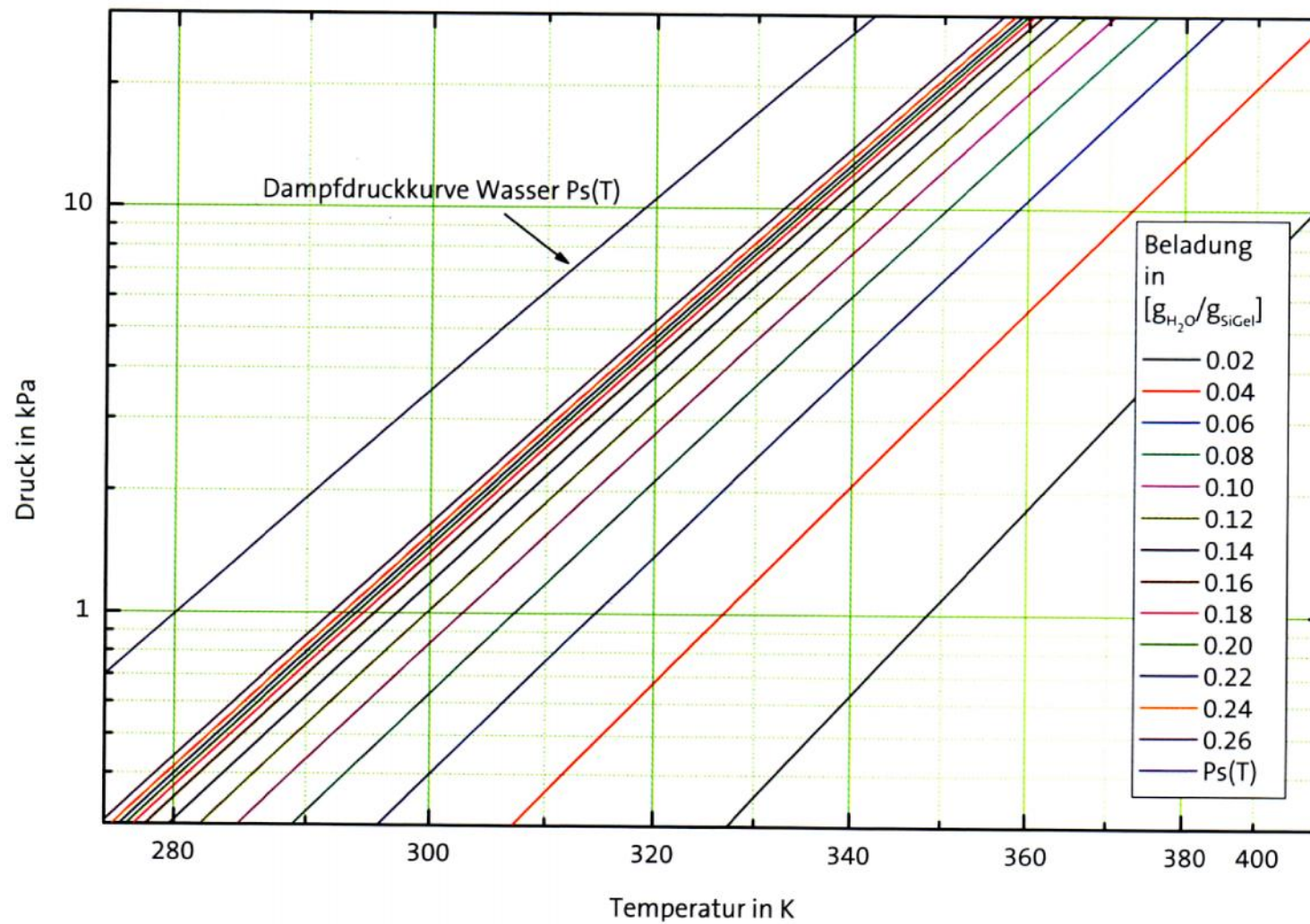


Abb. 22: Isosterenfeld des Stoffpaares Silicagel – Wasser

Vergleich Ab- Adsorptionskältemaschine

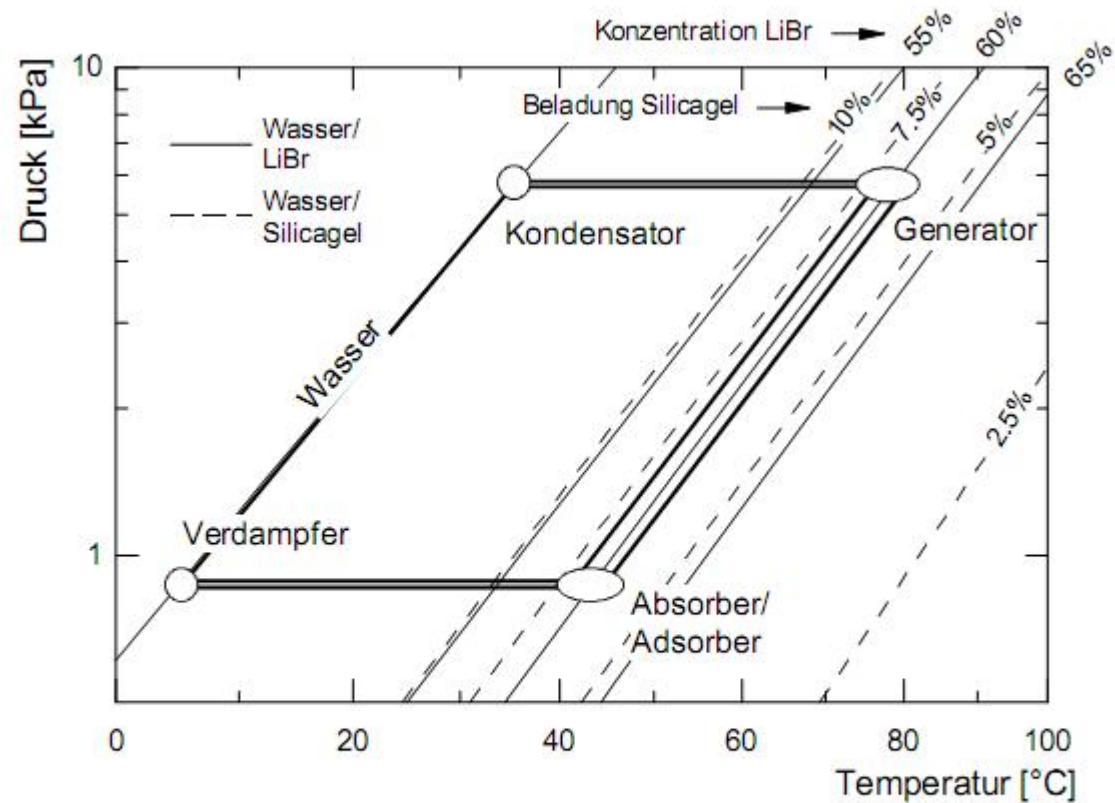
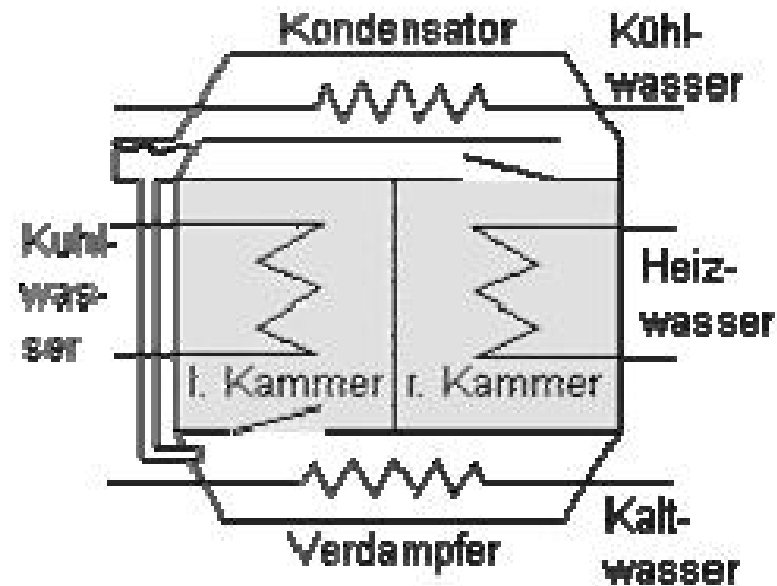


Abbildung 3.1: Einstufiger Sorptionskreislauf. Für die Absorptionskälteanlage (mit Stoffpaar Wasser/Lithiumbromid) und Adsorptionskälteanlage (mit Wasser/Silicagel) wird nahezu die gleiche interne Austreibertemperatur benötigt.

Adsorptionswärmepumpe



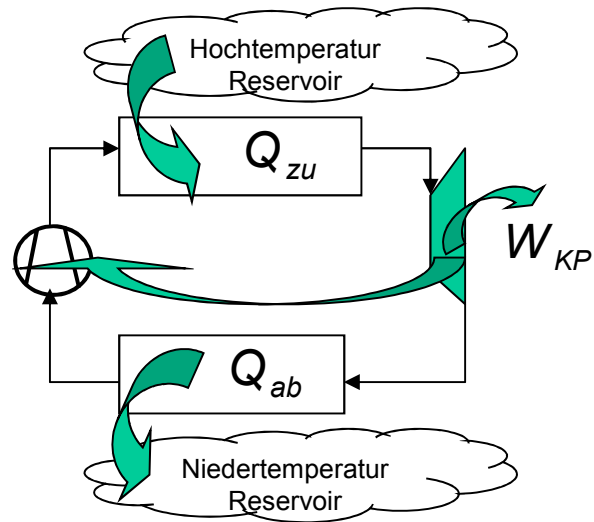
Vorteile

Kaum bewegte Teile
 evtl. niedrigere Austreibertemperaturen
 Möglichkeiten zur Speicherung und
 dezentraler Kälteerzeugung

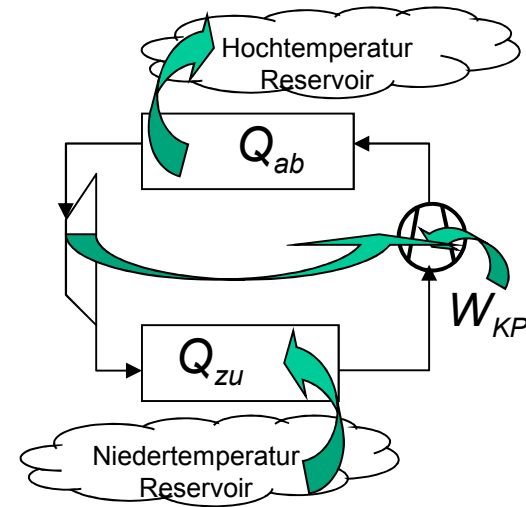
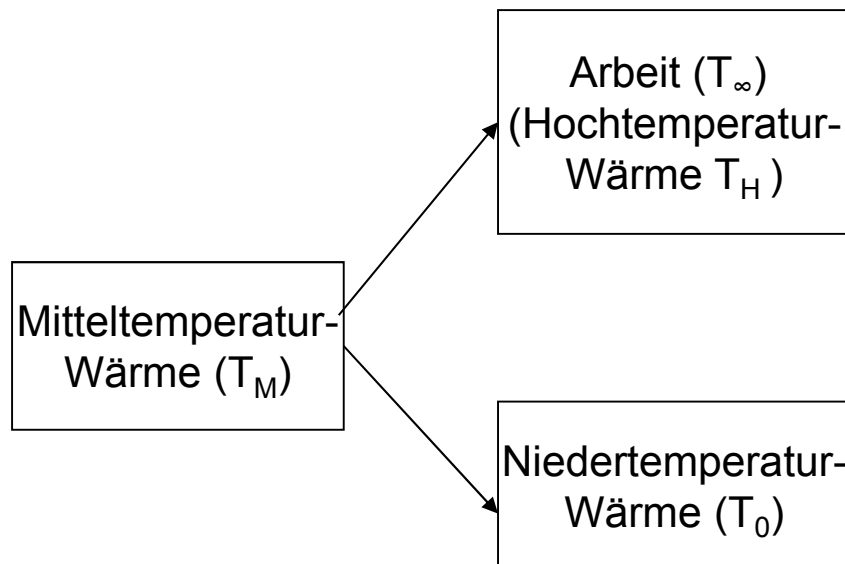
Nachteile:

Schwer
 diskontinuierlicher Betrieb
 Schwierige
 Wärmeübergangsbedingungen zum
 Feststoff
 Geringere reg. WÜ
 kleinere Kältezahlen als bei Abs.

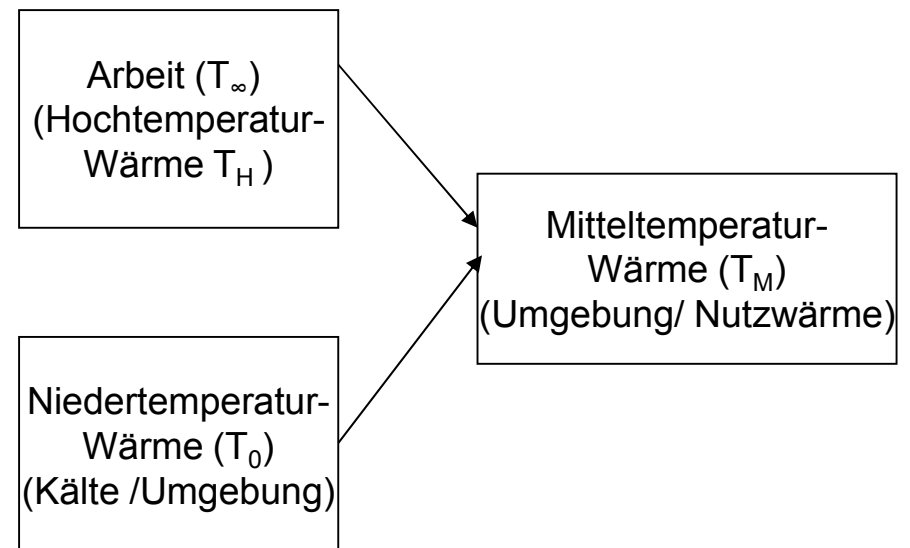
Systematik der Kreisprozesse



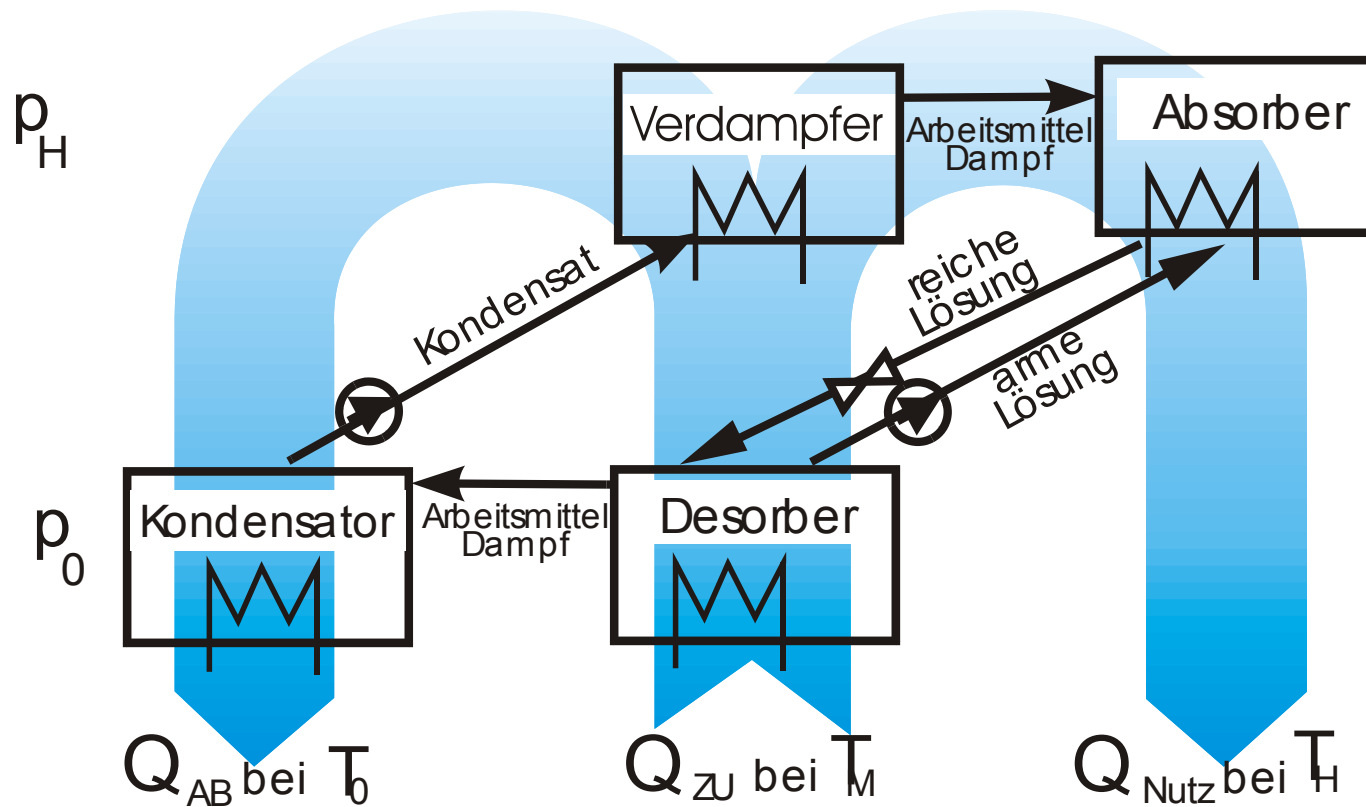
Disproportionierungsprozesse
arbeitsleistende / rechtsläufige KP



Synproportionierungsprozesse
arbeitsverbrauchende / linksläufige KP

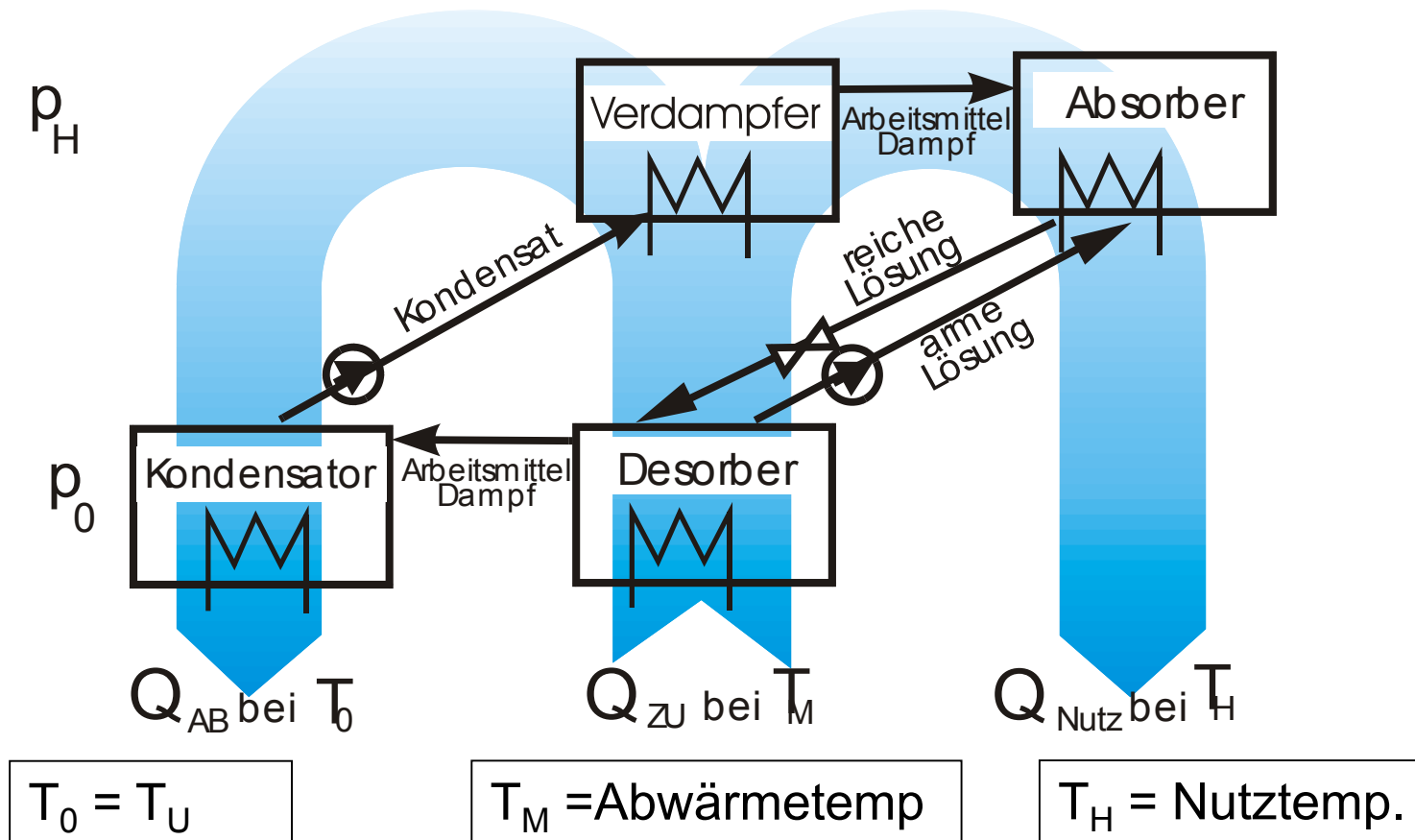


Wärmetransformator



Aufwertung des T.-Niveaus von Abwärme, die noch eine gewisse Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebung hat, aber für regenerative Wärmenutzung zu kalt ist.

Wärmetransformator



$$\varepsilon_{WT} = \frac{N}{A} = \frac{\dot{Q}_{Abs}}{\dot{Q}_{Verd} + \dot{Q}_{Des}}$$

$$\varepsilon_{AWT} \approx 0,5$$

A- Wärmepumpe - Gesamtbilanz

Gesamtenergiebilanz :

$$\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd} + (P_p) = \dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Kond}$$

vereinfachte Gesamtexergiebilanz : *reversibel* ($\Delta\dot{E}_v = 0$) :

$$\frac{T_H - T_U}{T_H} \dot{Q}_{Des} + \frac{T_0 - T_U}{T_0} \dot{Q}_{Verd} = \frac{T_M - T_U}{T_M} (\dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Kond}) + \Delta\dot{E}_v$$

Vereinfachte Schreibweise mit Carnot-Faktoren $\tau_i = \frac{T_i - T_U}{T_i}$

$$\tau_H \dot{Q}_{Des} + \tau_0 \dot{Q}_{Verd} = \tau_M (\dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Kond}) + \Delta\dot{E}_v$$

Wärmeverhältnis (Kältezah) AKM

$$\tau_M = 0 \text{ wegen } T_M = T_U \quad \varepsilon_{AWP} = \frac{\dot{Q}_{Verd}}{\dot{Q}_{Des}} = \frac{\tau_H}{\tau_0} = \frac{T_H - T_U}{T_H} \frac{T_0}{T_U - T_0} = \eta_{Carnot} \varepsilon_{KM}$$

Wärmeverhältnis AWP

$$\tau_0 = 0 \text{ wegen } T_0 = T_U \quad \varepsilon_{AWP} = \frac{\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{Kond}}{\dot{Q}_{Des}} = \frac{\tau_H}{\tau_M} = \frac{T_H - T_U}{T_H} \frac{T_M}{T_M - T_U} = \eta_{Carnot} \varepsilon_{WP}$$

AWT - Gesamtbilanz

Gesamtenergiebilanz :

$$\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd} + (P_p) = \dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Kond}$$

vereinfachte Gesamtexergiebilanz : *reversibel* ($\Delta\dot{E}_v = 0$) :

$$\frac{T_M - T_U}{T_M} (\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd}) = \frac{T_H - T_U}{T_H} \dot{Q}_{Abs} + \frac{T_0 - T_U}{T_0} \dot{Q}_{Kond} + \Delta\dot{E}_v$$

Vereinfachte Schreibweise mit Carnot-Faktoren $\tau_i = \frac{T_i - T_U}{T_i}$

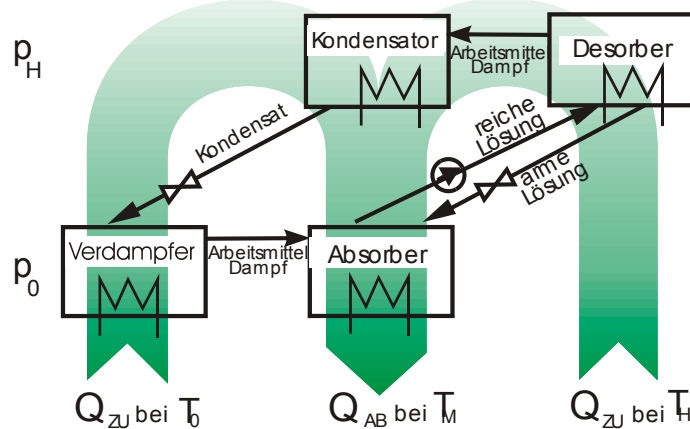
$$\tau_M (\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd}) = \tau_H \dot{Q}_{Abs} + \tau_0 \dot{Q}_{Kond} + \Delta\dot{E}_v$$

Reversibles Wärmeverhältnis

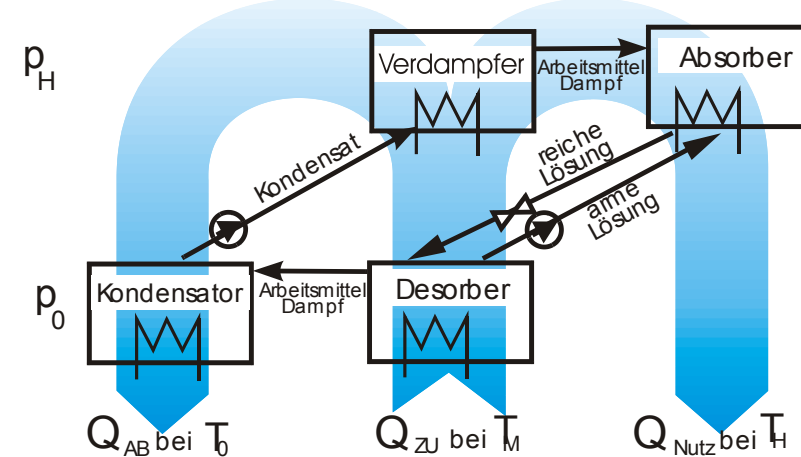
$$\tau_0 = 0 \text{ wegen } T_0 = T_U \quad \varepsilon_{AWT} = \frac{\dot{Q}_{Abs}}{\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd}} = \frac{\tau_M}{\tau_H} = \frac{T_M - T_U}{T_M} \frac{T_H}{T_H - T_U} = \eta_{Carnot} \varepsilon_{WP}$$

$$\varepsilon_{AWT, theor.} = \frac{\dot{Q}_{Abs}}{\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd}} = 0,5$$

Synproportionierung (Wärmepumpe und Kältemaschine)



Disproportionierung Wärmetrafo



technologieorientiertes (konventionelles) Wärmeverhältnis

$$\varepsilon_{AKM} = \frac{\dot{Q}_{Verd}}{\dot{Q}_{Des}} \approx 1 \quad \varepsilon_{AWP} = \frac{\dot{Q}_{Kond} + \dot{Q}_{Abs}}{\dot{Q}_{Des}} \approx 2$$

$$\varepsilon_{WT} = \frac{\dot{Q}_{Abs}}{\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd}} \approx 0,5$$

(am Wesen der Energiewandlung orientiertes) Transformationsverhältnis

$$\varepsilon_{Trans} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}} \approx 1$$

im reversiblen Vergleichsprozess ($\Delta E_V = 0$ mit $\tau_i = \frac{T_i - T_U}{T_i}$):

$$\tau_H Q_H + \tau_0 Q_0 = \tau_M (Q_0 + Q_H)$$

Wärmetransformation

Gemeinsamkeit aller Kreisprozesse:

Ein Teil der Energie wird auf höheres Qualitätsniveau angehoben

Es sind stets 3 Temperaturniveaus beteiligt

→ Transformationsprozesse

Zwischen 2 Temperaturniveaus kann nur einfache Energiewandlung
(Abwertung des Qualitätsniveaus) stattfinden

Einführung einer Kennziffer,
die sich am Wesen der Wärmetransformation orientiert

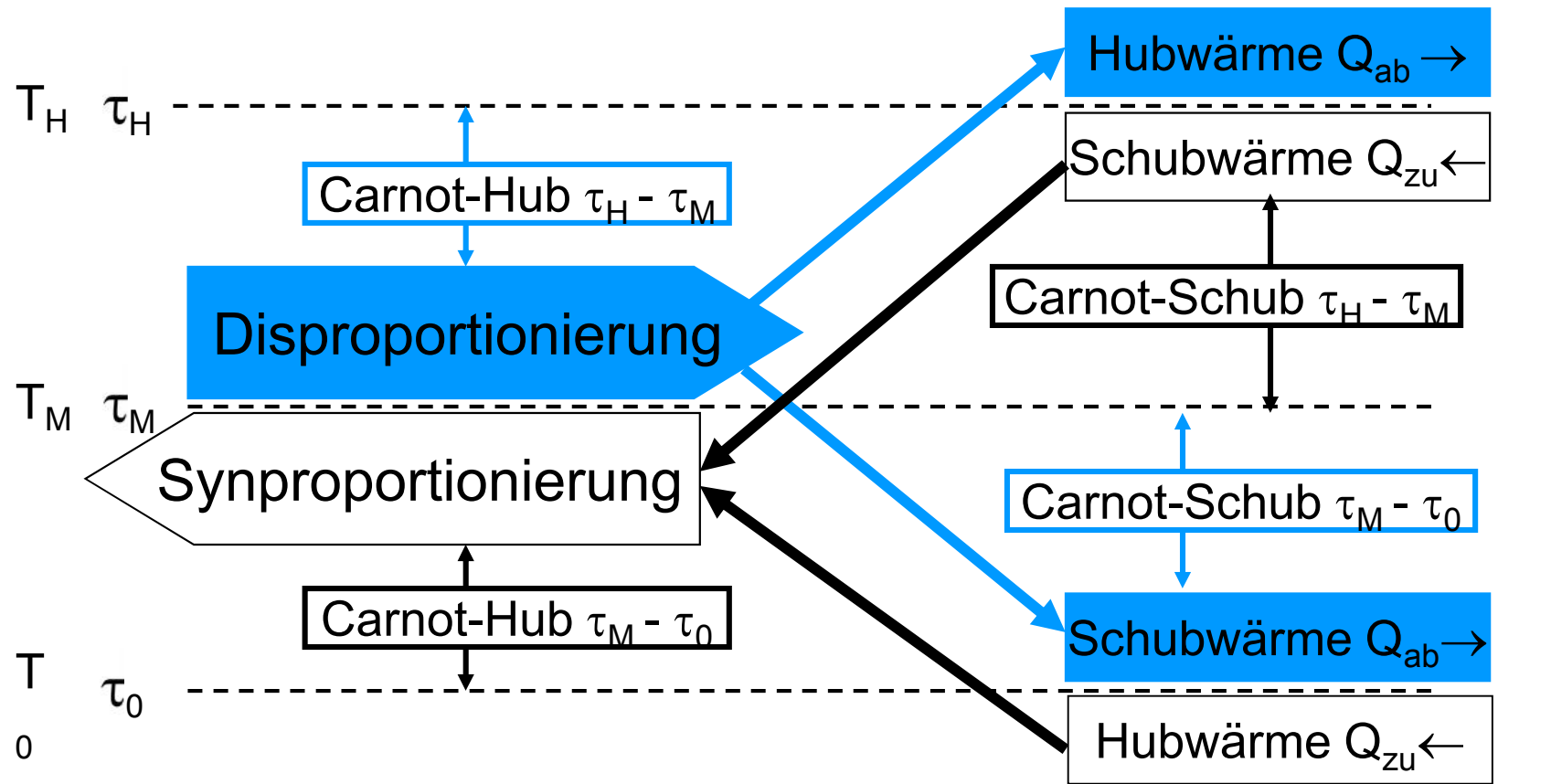
Transformationsverhältnis

$$\varepsilon_{Tr_{rev}} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}}$$

Bewertung mittels der Qualitätsunterschiede zwischen den Energieformen

$$\Delta\tau$$

Transformationsprozesse

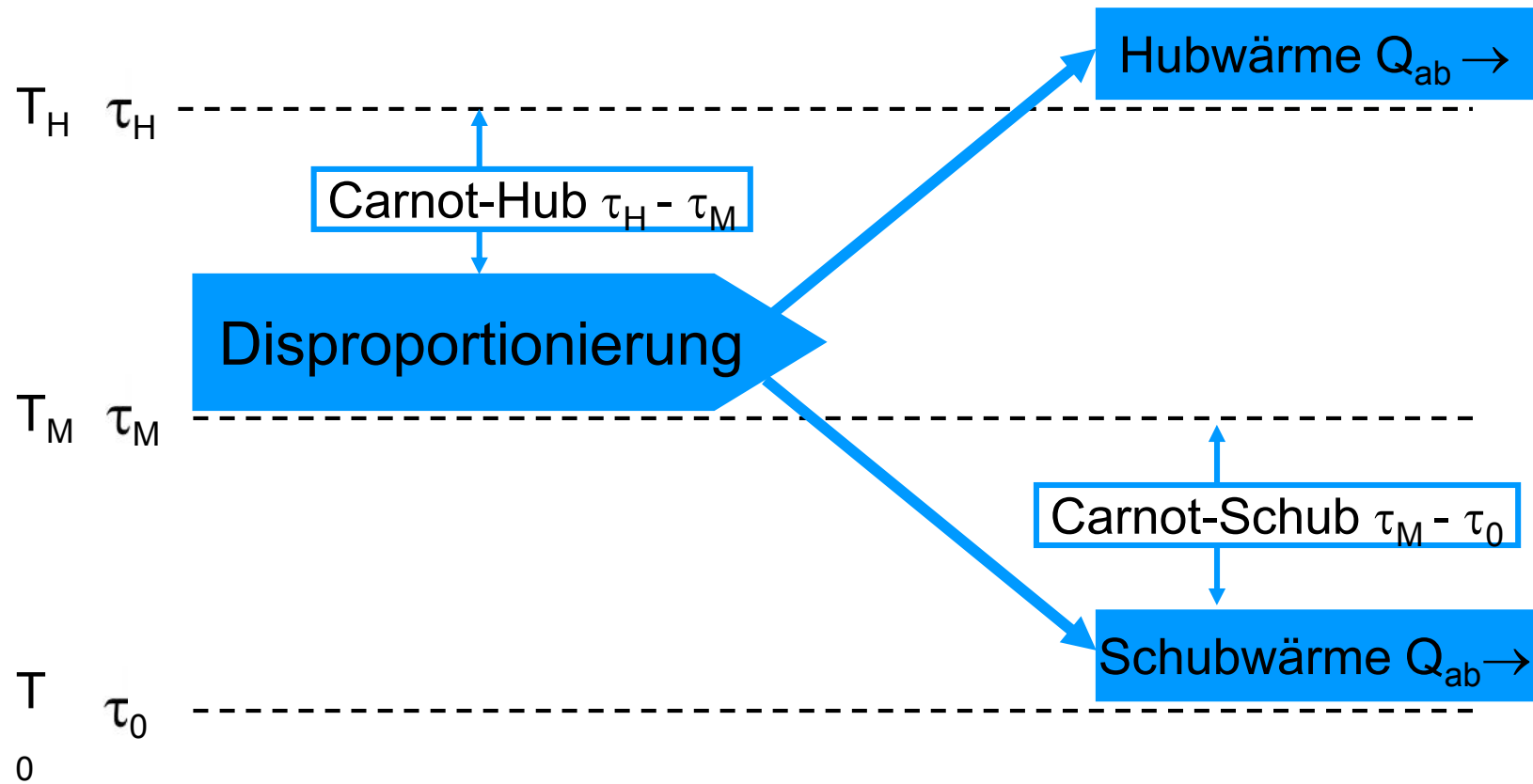


Carnot-Faktor

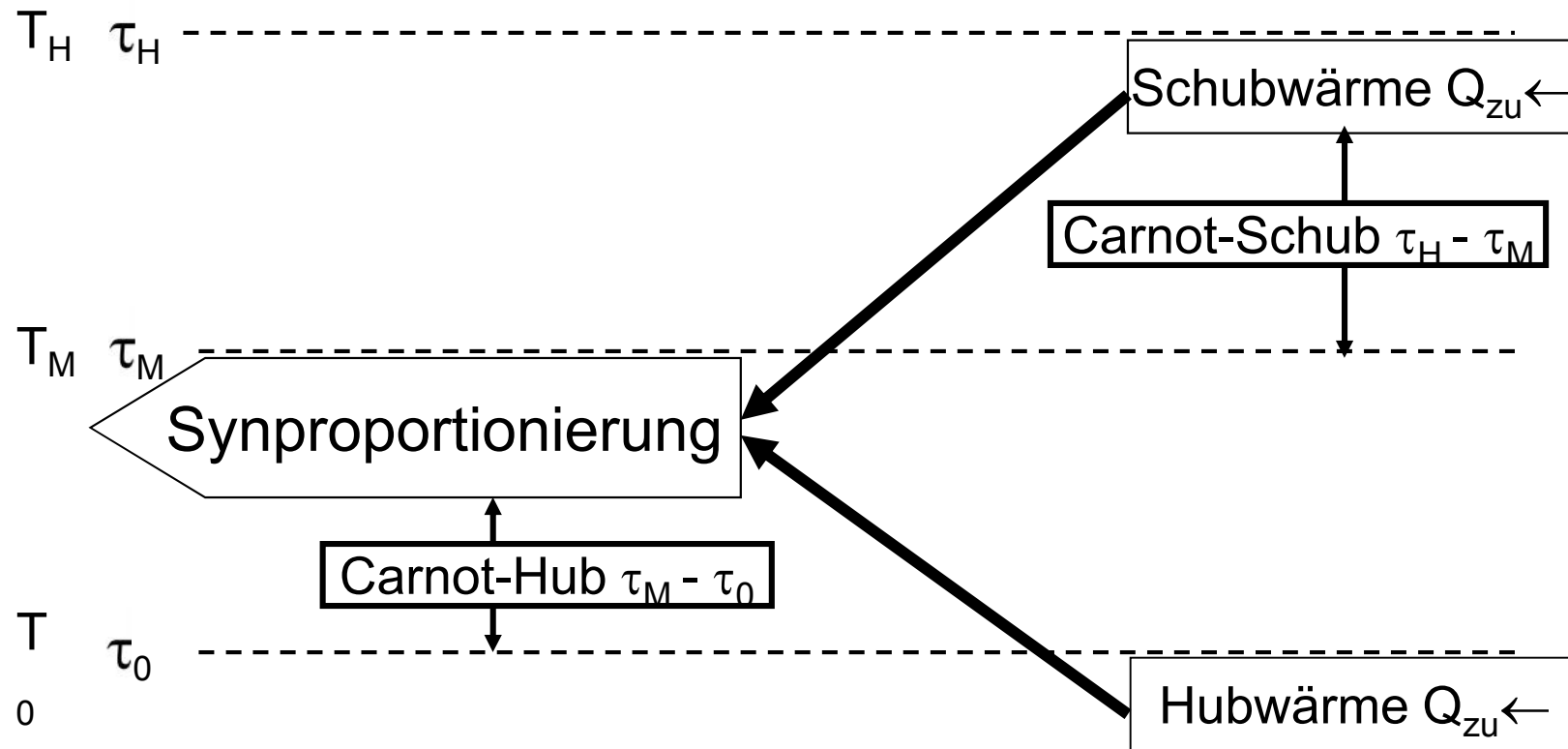
$$\frac{Q_{Hub} \tau_U}{Q_{Schub} T} = \frac{W}{Q}$$

(exergetische Temperatur)

Transformationsprozesse



Transformationsprozesse



Synproportionierung (Wärmepumpe und Kältemaschine)	Disproportionierung Wärmetrafo
(am Wesen der Energiewandlung orientiertes) Transformationsverhältnis	
$\varepsilon_{Trans} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}} \approx 1$	
Exergiebilanz:	
$\frac{T_H - T_U}{T_H} Q_H + \frac{T_0 - T_U}{T_0} Q_0 = \frac{T_M - T_U}{T_M} Q_M + \Delta E_V$	$\frac{T_M - T_U}{T_M} Q_M = \frac{T_H - T_U}{T_H} Q_H + \frac{T_0 - T_U}{T_0} Q_0 + \Delta E_V$
im reversiblen Vergleichsprozess ($\Delta E_V = 0$ mit $\tau_i = \frac{T_i - T_U}{T_i}$):	
$\tau_H Q_H + \tau_0 Q_0 = \tau_M Q_0 + \tau_M Q_H$	

$$\varepsilon_{Syn} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} = \frac{\tau_H - \tau_M}{\tau_M - \tau_0} = \frac{\Delta \tau_{Schub}}{\Delta \tau_{Hub}} \quad \varepsilon_{Dis} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_0} = \frac{1}{\varepsilon_{Syn}} = \frac{\tau_M - \tau_0}{\tau_H - \tau_M} = \frac{\Delta \tau_{Schub}}{\Delta \tau_{Hub}}$$

$$\varepsilon_{Trans} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}} = \frac{\Delta \tau_{Schub}}{\Delta \tau_{Hub}}$$

Mehrstufigkeit

Allgemeingültige Beziehung für alle Kreisprozesse

Transformationsverhältnis

$$\varepsilon_{Tr_{rev}} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}} = \frac{\Delta\tau_{Schub}}{\Delta\tau_{Hub}}$$

Transformationswirkungsgrad

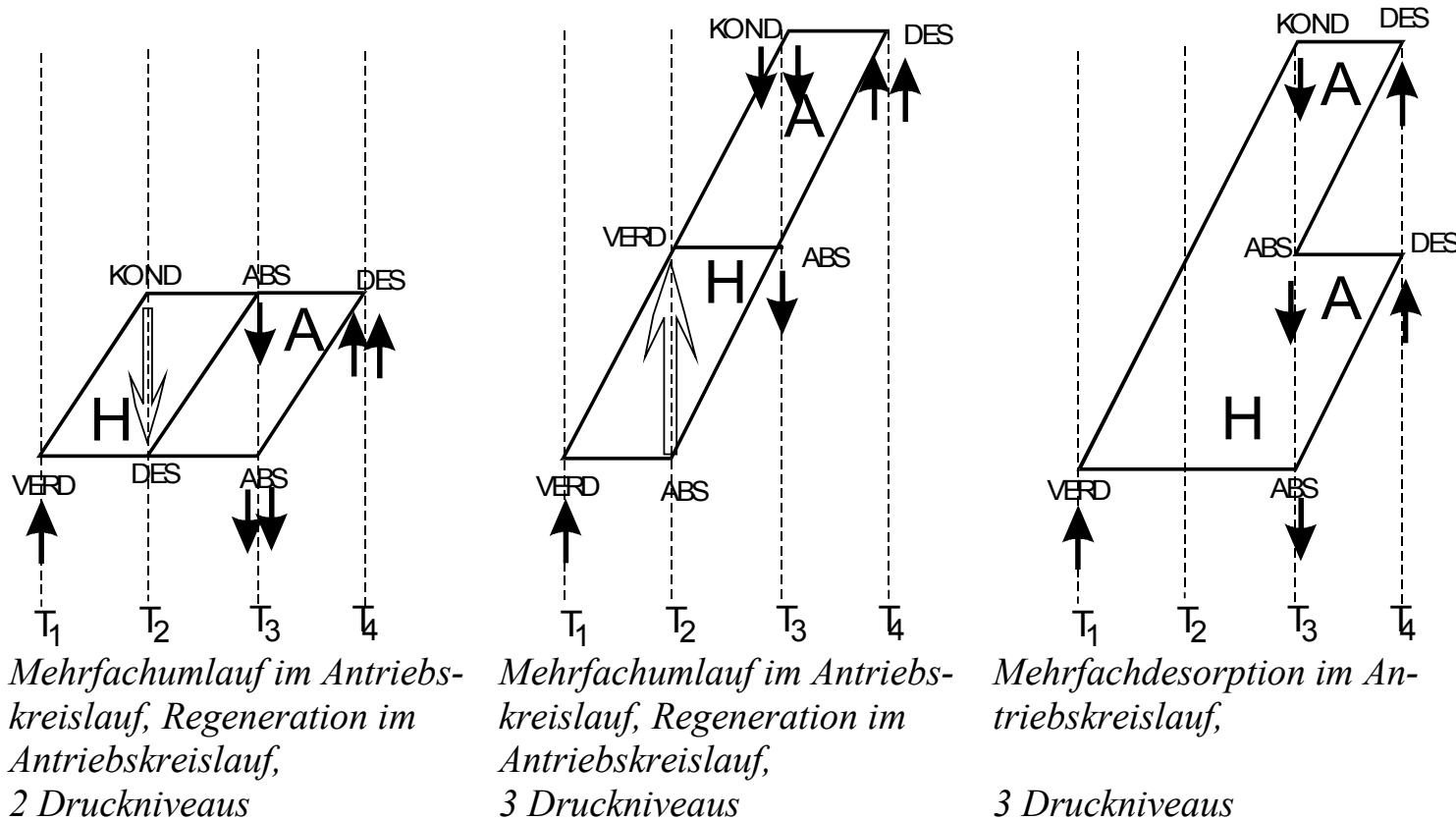
$$\eta_{Trans} = \frac{\Delta E_{Hub}}{\Delta E_{Schub}} = \frac{\Delta\tau_{Hub} \dot{Q}_{Hub}}{\Delta\tau_{Schub} \dot{Q}_{Schub}} = \frac{\varepsilon_{Trans}}{\varepsilon_{Trans,rev}}$$

Durch Mehrstufigkeit kann

Bei vergrößerter Antriebs- oder verringerter Hub- Temperaturdifferenz das Wärmeverhältnis verbessert werden (Double Effect)

Der Temperaturhub des Kreisprozesses auf Kosten einer Verringerung des Wärmeverhältnisses erhöht werden (Double Lift)

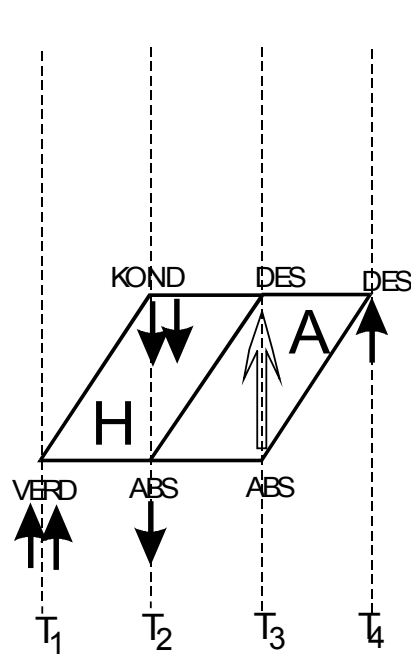
Double Lift (vergrößerter Temperaturhub)



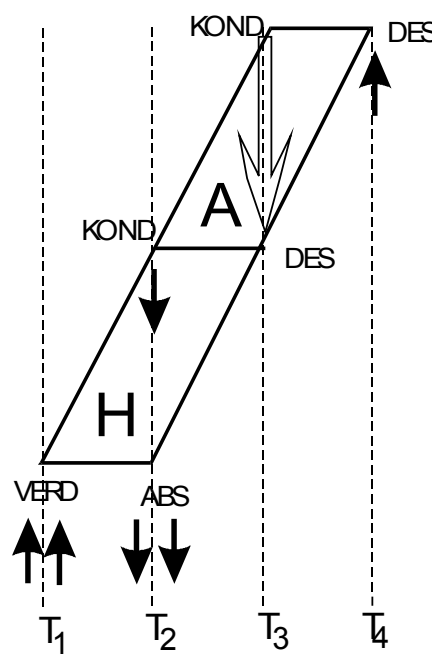
Synproportionierungsprozesse mit vergrößertem Temperaturhub (double lift)

Erhöhter Arbeitsmittelumlauf im Hochtemperaturkreislauf

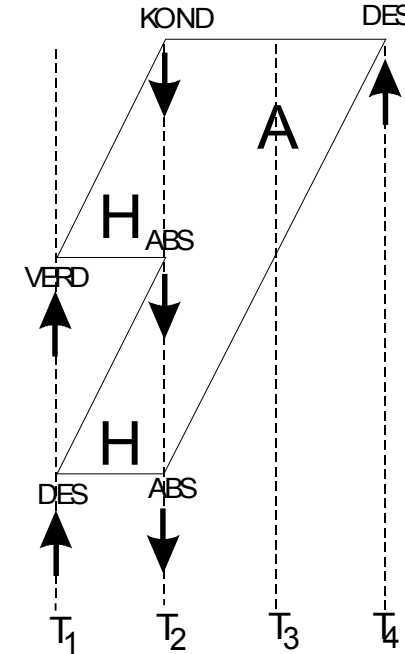
Double Effect (verbessertes Wärmeverhältnis)



*Mehrfachumlauf im
Hubkreislauf, Regeneration
im Antriebskreislauf,
2 Druckniveaus*



*Mehrfachumlauf im
Hubkreislauf, Regeneration
im Antriebskreislauf,
3 Druckniveaus*



*Mehrfachverdampfung im
Hubkreislauf,
3 Druckniveaus*

Synproportionierungsprozesse mit verbessertem Wärmeverhältnis (double-effect)

Erhöhter Arbeitsmittelumlauf im Niedertemperaturkreislauf

Zweistufige LiBr-Wasser-Maschinen sind Stand der Technik

Schaltungsvariante Double-Effect-Anlage

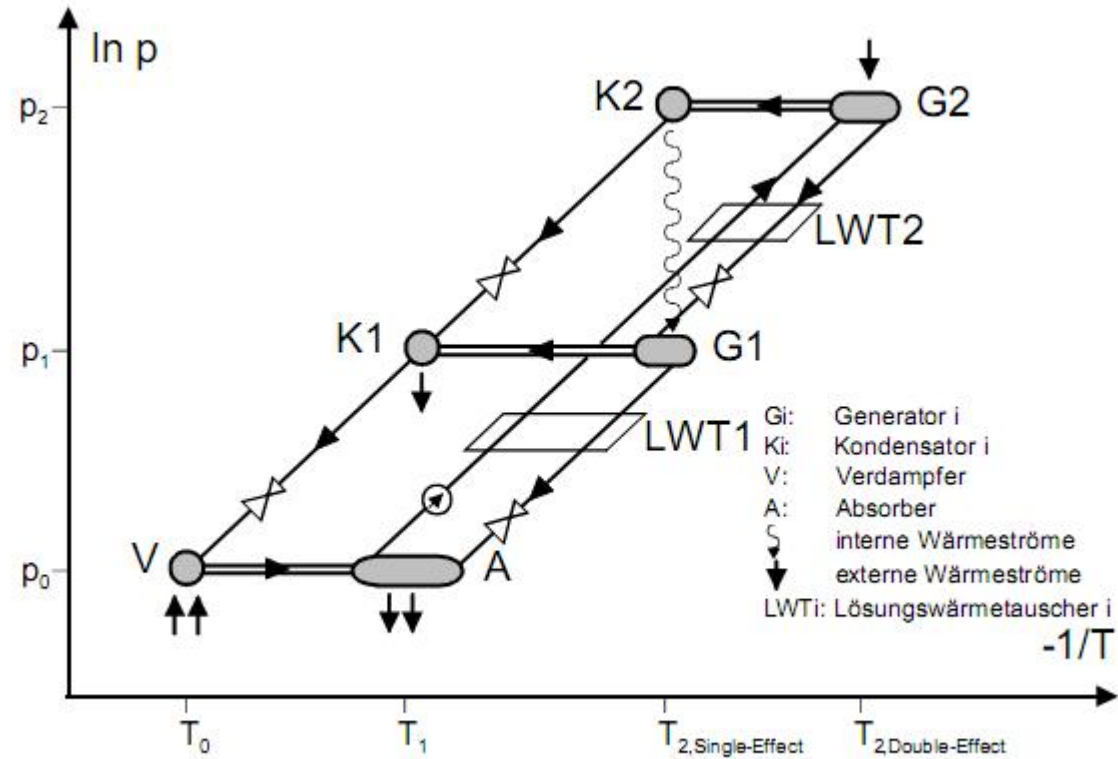
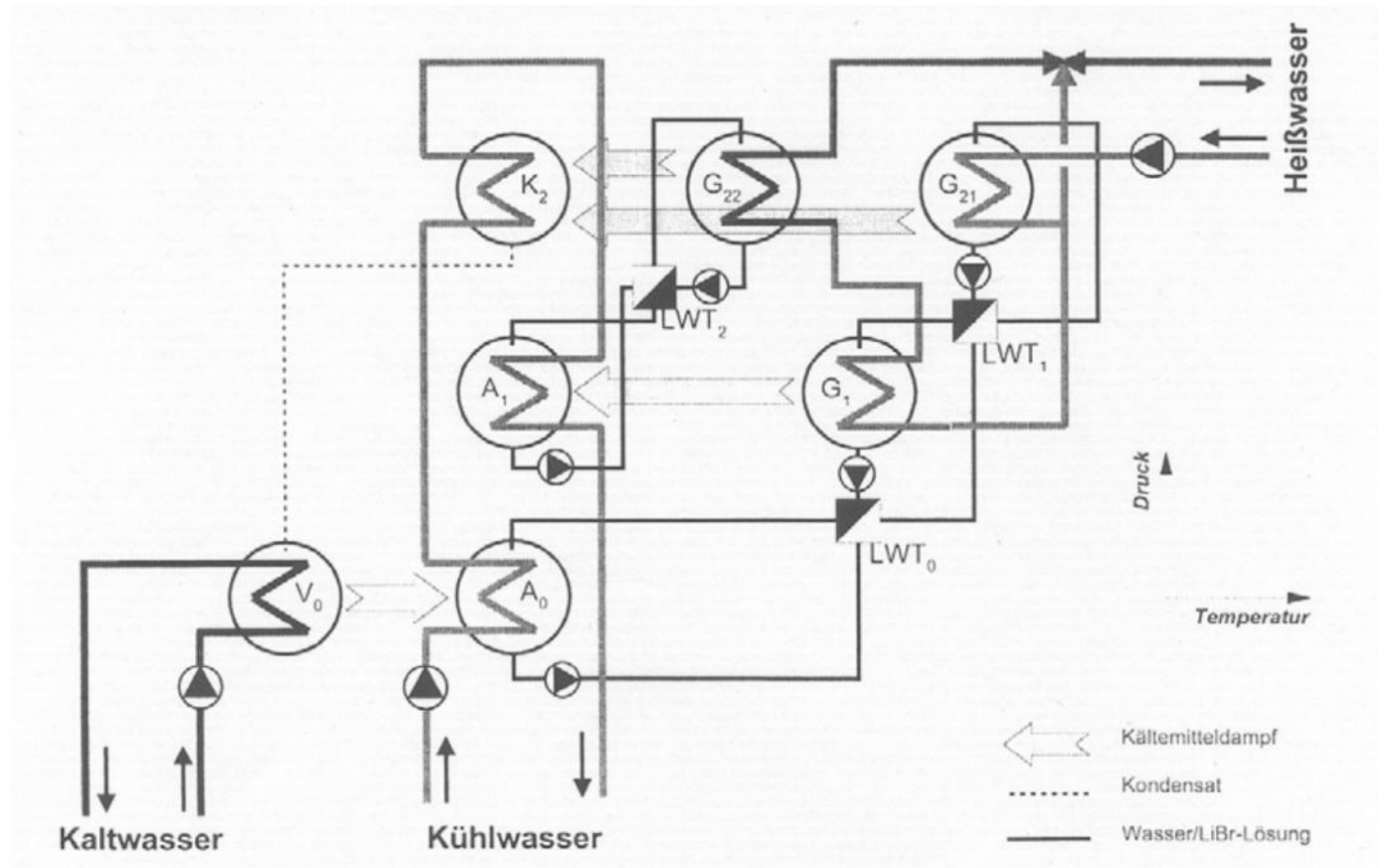


Abbildung 2.4: Vereinfachtes Schema eines Double-Effect-Absorptionskreislaufs

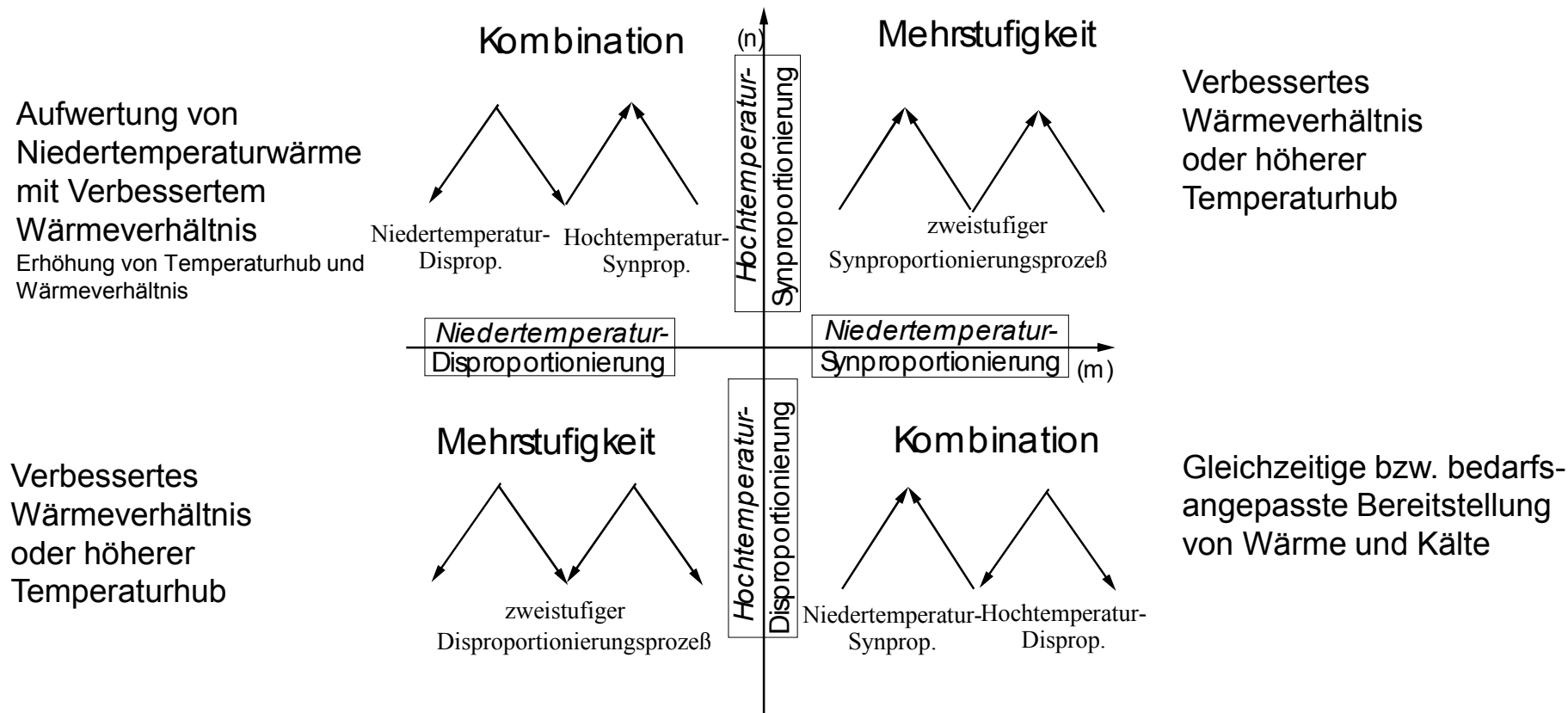
Beispiel: SE/SL-DL-LiBr/H₂O-Anlagen Kälte aus Fernwärme (Temperaturen 80 -100°C)



Auskühlung des Heizmediums von 25-70 K abhängig von der Fernwärmeverlauftemperatur und somit auch niedrige Fernwärmerücklauftemperaturen von 50 - –60°C.

Die Anlage kann auch als reiner Single Effect-Prozess, mit den Teilen V_0 , A_0 , G_{21} , K_2 oder als reiner Double Lift-Prozess, mit den Teilen G_1 , A_1 , G_{22} betrieben werden

Kombination von Syn – und Disproportionierung



Prinzipielle Möglichkeiten von Mehrstufigkeit und Kombination