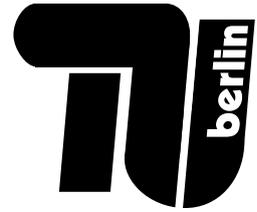


Technische Universität Berlin

INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK

Prof. Dr.-Ing. G. Tsatsaronis



Altklausurensammlung
im Fach Energietechnik I und Energietechnik II

Inhalt

Semester
F 2021
H 2020
F 2020
H 2019

H: Herbst; F: Frühjahr

F_2021

Teilgebiet	Thema	Punkte	
		ET I	ET II
		8 oder 9 LP	8 LP
Theorie, Fundamental	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	50	50
	Exergie	18	24
	Wirtschaftlichkeit	8	
	Verbrennung I	8	8
Theorie, Rest	Energieträger	8	
	Dampfkraftwerke	12	
	Gasturbinen	11	
	KWK	7	
	Fossile Brennstoffe	6	
	Dampferzeuger		7
	Kombikraftwerke		5
	Erneuerbare Energien		6
	Alternative Prozesse		10
	Alternative Brennstoffe		3
	Energiespeicher		6
	Exergoökonomie		6
Rechenteil	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	80	80
	Exergie	44	44
	a	7	7
	b	5	5
	c	6	6
	d	6	6
	e	5	5
	f	6	6
	g	3	3
	h	6	
	i		6
	Wirtschaftlichkeit	30	
	WÜ-Netz		30

1. Exergie 24 Punkte

Gegeben sei der folgende Wärmeübertrager mit $T_1 > T_4 > T_2 > T_3$. Die Komponente arbeitet stationär und ist nach außen adiat. Änderungen der kinetischen und potentiellen Energie können vernachlässigt werden.

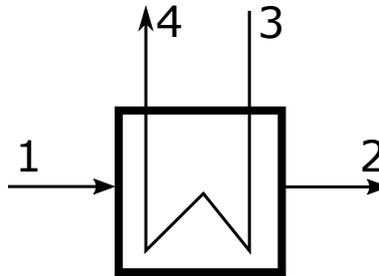


Abbildung 1: Wärmeübertrager

- (a) (2 Punkte) Ist für eine exergetische Betrachtung des vorliegenden Wärmeübertragers eine Aufteilung in chemische und physikalische Exergie notwendig? Begründen Sie!

Nein, da die chemische Zusammensetzung für jeden Stoffstrom konstant bleibt.

- (b) (2 Punkte) Formulieren Sie die Berechnungsgleichungen für die Exergievernichtung und den Exergieverlust für den Wärmeübertrager!

Jeweils 1 Punkt

$$\begin{aligned}\dot{E}_D &= \dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{E}_3 - \dot{E}_4 \\ \dot{E}_L &= 0\end{aligned}$$

- (c) (3 Punkte) Welche Ursachen für die Exergievernichtung in einem Wärmeübertrager kennen Sie? Ordnen Sie den Ursachen Größen zu, welche die Exergievernichtung beeinflussen.

(1 Punkt Ursache und je 1 Punkt je Grund) Wärmeübertragung

- übertragener Wärmestrom
- ΔT des Wärmeübertragers (Fläche)
- Temperaturniveau der WÜ

Druckverluste (Reibungsarbeit, Temperaturniveau (thermodynamische Mitteltemperatur) jedes Stoffstroms)

- (d) (4 Punkte) Definieren sie den exergetischen Wirkungsgrad, für den Fall, dass der Wärmeübertrager vollständig oberhalb der Umgebungstemperatur arbeitet!

Nutzen und Aufwand jeweils 2 Punkte

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_4 - \dot{E}_3}{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}$$

- (e) (4 Punkte) Definieren sie den exergetischen Wirkungsgrad, für den Fall, dass der Wärmeübertrager vollständig unterhalb der Umgebungstemperatur arbeitet!

Nutzen und Aufwand jeweils 2 Punkte (Es gibt 2 Pluspunkte, wenn eine Aufteilung in thermische und mechanische Exergie vorgenommen wurde)

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{\dot{E}_3 - \dot{E}_4}$$

- (f) **(3 Punkte)** Würden Sie aus thermodynamischer Sicht den Wärmeübertrager betreiben, wenn die Zustände 1 und 2 oberhalb und die Zustände 3 und 4 unterhalb der Umgebungstemperatur wären? Begründen Sie stichpunktartig!

Nein (1 Pkt), da der Wärmeübertrager keinen thermodynamischen Nutzen erbringt (\dot{E}_P ist nicht definiert (1 Pkt)) und lediglich Exergie vernichtet. Bei beiden Strömen ist die Exergie am Austritt geringer, als am Eintritt (1 Pkt).

- (g) **(6 Punkte)** Nehmen Sie an, der Wärmeübertrager arbeitet vollständig oberhalb der Umgebungstemperatur. Geben Sie für den Wärmeübertrager eine Gleichung zur Berechnung der Kosten der Exergievernichtung $\dot{C}_{D,Wü}$ an. Vereinfachen Sie so weit wie möglich. Verwenden Sie in der endgültigen Formel zur Berechnung der Kosten der Exergievernichtung $\dot{C}_{D,Wü}$ nur noch die Exergieströme \dot{E}_j und die Kostenströme \dot{C}_j mit $j = 1 \dots 4$.

(6 Punkte)

$$\dot{C}_{D,Wü} = (c_F \cdot \dot{E}_D)_{Wü} \quad \text{mit} \quad c_F = c_1 = c_2 = \frac{\dot{C}_1}{\dot{E}_1}$$

$$\dot{C}_{D,Wü} = \frac{\dot{C}_1}{\dot{E}_1} (\dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{E}_3 - \dot{E}_4)$$

2. Verbrennung 8 Punkte

Beantworten Sie die Teilaufgaben stichpunktartig und ggf. unter Angabe des Lösungsweges.

- (a) **(4 Punkte)** Propen (C_3H_6) verbrennt in Luft mit einem Luftverhältnis von 2. Welche spezifischen CO_2 -Emissionen [kg_{CO_2}/kg_{Propen}] ergeben sich für diese Verbrennung?

$$M_{C_3H_6} = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 = 42 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{CO_2} = 1 \cdot 12 + 2 \cdot 16 = 44 \text{ kg/kmol}$$



$$k_{CO_2} = \frac{132}{42} \approx 3,14 \text{ kg}_{CO_2}/\text{kg}_{Propen}$$

- (b) **(2 Punkte)** Unter welchen Voraussetzungen wird die maximale Verbrennungstemperatur eines Brennstoffs bei einer Verbrennung mit Luft erreicht?

Brennkammer nach außen adiabatisch und $\lambda = 1$.

- (c) **(2 Punkte)** Vergleichen Sie den Heizwert und Brennwert von Kohlenmonoxid (CO) qualitativ miteinander. Erläutern Sie die Zusammenhänge.

Unterschied Brennwert und Heizwert ist Kondensationsenergie im Abgas. Bei der Verbrennung von CO entsteht jedoch kein H_2O . Daher Heizwert gleich Brennwert.

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse 8 Punkte

- (a) **(6 Punkte)** Nennen Sie drei Methoden mit denen Sie für Projekte mit unterschiedlichen Nutzungszeiten eine wirtschaftliche Vergleichsrechnung durchführen können. Erläutern Sie kurz deren Ansatz.

Pro genannte Methode 0,5 Punkte, pro vollständiger Erläuterung 1,5 Punkte

Repeatability Approach:

Planungshorizont kleinstes gemeinsames Vielfaches der wirtschaftlichen Nutzungsdauer, Investitionen werden mit den gleichen Annahmen entsprechend wiederholt

Cotermination Approach:

Planungshorizont jeder beliebige sinnvolle Zeitabschnitt, einige oder alle Investitionen werden mit den gleichen Annahmen wiederholt, für eine nicht abgeschlossene Nutzungsdauer wird der Restwert der Investition ermittelt und in den Vergleich mit einbezogen

Capitalized-Cost Approach

unendlich lange Wiederholung jeder Investition, Bestimmung der gesamten kapitalisierten Kosten pro Projektalternative

- (b) **(2 Punkte)** Es stehen zwei Investitionsalternativen zu Verfügung:

- **Alternative A:** Nutzungszeit 9 Jahre; Investitionskosten $3,75 \times 10^6 \text{ €}$
- **Alternative B:** Nutzungszeit 6 Jahre; Investitionskosten $1,9 \times 10^6 \text{ €}$

Geben Sie für eine der oben von Ihnen genannten Methoden einen angenommenen Planungshorizont an. Nennen Sie für jede Alternative die dazugehörige Häufigkeit der Realisierung der Investition.

1 Punkt für Planungshorizont, 1 Punkt Investitionshäufigkeit

- Repeatability Approach: Planungshorizont 18 Jahre, A - 2 Investitionen, B - 3 Investitionen
- Cotermination Approach:
 - Alternative 1: Planungshorizont 9 Jahre, A - 1 Investition, B - 2 Investitionen + Restwertermittlung für 3 Jahre
 - Alternative 2: Planungshorizont 12 Jahre, A und B - 2 Investitionen; Restwertermittlung A für 6 Jahre
 - Alternative 3: Planungshorizont 18 Jahre, A - 2 Investitionen, B - 3 Investitionen

4. Energieträger 8 Punkte

(a) **(8 Punkte)** Erläutern Sie die unten stehenden Begriffe und ordnen Sie diesen jeweils am Beispiel eines Kühlschranks eine Energieform / einen Energieträger zu. Die elektrische Energie für den Kühlschrank wird von einem Biogaskraftwerk zur Verfügung gestellt.

- Endenergie
- Nutzenergie
- Primärenergie
- Sekundärenergie

Jeweils 1 Punkt pro richtiger Zuordnung und pro richtiger Erläuterung

- Endenergie
Energieträger, der dem Endverbraucher zur Verfügung gestellt wird (elektrische Energie)
- Nutzenergie
Energieform, die das endgültige Bedürfnis des Anwenders deckt (Wärme, Licht)
- Primärenergie
von der Natur zur Verfügung gestellte Energieform ohne menschliche Umwandlungsschritte (Biomasse)
- Sekundärenergie
umgewandelte Primärenergie (Biogas hergestellt durch Vergärung von Biomasse)
auch möglich: umgewandelte Sekundärenergie (elektrische Energie aus Biogaskraftwerk; elektrische Energie ist gleichzeitig Sekundär- und Endenergie)

5. Fossile Brennstoffe 6 Punkte

- (a) **(3 Punkte)** Durch welche Merkmale werden Festbrennstoffe (z.B. Braunkohle) aus energietechnischer Sicht vereinfachend charakterisiert? Nennen Sie mindestens eins. Wie beeinflussen diese Charakteristika die Verbrennung und die Verbrennungsprodukte?

(1 Punkt) Merkmal, (2 Punkte) Verbrennung und Verbrennungsprodukte

Merkmale: Heizwert, Brennwert, Asche- und Wassergehalt, fixer Kohlenstoff, elementare Zusammensetzung

Verbrennung: hoher Wassergehalt: mehr Vortrocknung notwendig

Verbrennungsprodukte: hoher Aschegehalt: viele unverwertbare Rückstände

- (b) **(3 Punkte)** In einer Feststoffverbrennung (z.B. Steinkohle) ist die Mitverbrennung von Biomasse geplant. Diskutieren Sie dieses Vorhaben stichpunktartig. Nennen Sie mögliche Vor- und Nachteile und gehen Sie auf die Merkmale der Brennstoffe aus energietechnischer Sicht ein.

für (3 Punkte) mind. ein Vorteil und zwei Nachteile

-grundsätzlich positiv, da nachhaltig / ressourcenschonend

Vorteil:

-Verringerung CO₂-Emissionen

Nachteile:

-Biomasse Wasseranteil größer als Steinkohle, u.U. Vortrocknung notwendig

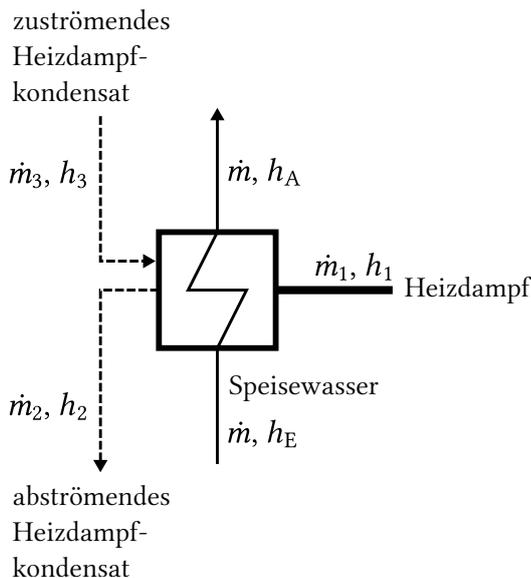
-Anteil der Biomasse begrenzt, Verunreinigung Kohlekessel, ggfs. zu niedriger Ascheanteil für Wirbelschichtfeuerung (Zufuhr von Asche notwendig)

-Biomasse Heizwert geringer, längerer Transport zum Kraftwerk u.U. nicht wirtschaftlich

6. Dampfkraftwerke 12 Punkte

Beantworten Sie die Teilaufgaben stichpunktartig und ggf. unter Angabe des Lösungsweges.

(a) (5 Punkte) Dargestellt ist ein Oberflächenvorwärmer eines Dampfkraftwerkes.



Leiten Sie eine Gleichung zur Berechnung des Heizdampfbedarfs \dot{m}_1 her. Treffen Sie dazu geeignete Annahmen, nennen Sie diese und vereinfachen Sie soweit wie möglich.

1 Punkt Annahmen, 1 Punkt MB, 2 Punkte EB, 1 Punkt Gleichung richtig umgestellt
 Annahmen: Komponente nach außen adiabatisch, stationärer Betrieb, kinetische und potentielle Energien können vernachlässigt werden.
 Massenstrombilanz:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_3$$
 Energiebilanz, Massenbilanz bereits eingesetzt:

$$\dot{m}_1 (h_1 - h_2) + \dot{m}_3 (h_3 - h_2) = \dot{m} (h_A - h_E)$$
 nach \dot{m}_1 umstellen:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m} (h_A - h_E) - \dot{m}_3 (h_3 - h_2)}{h_1 - h_2}$$

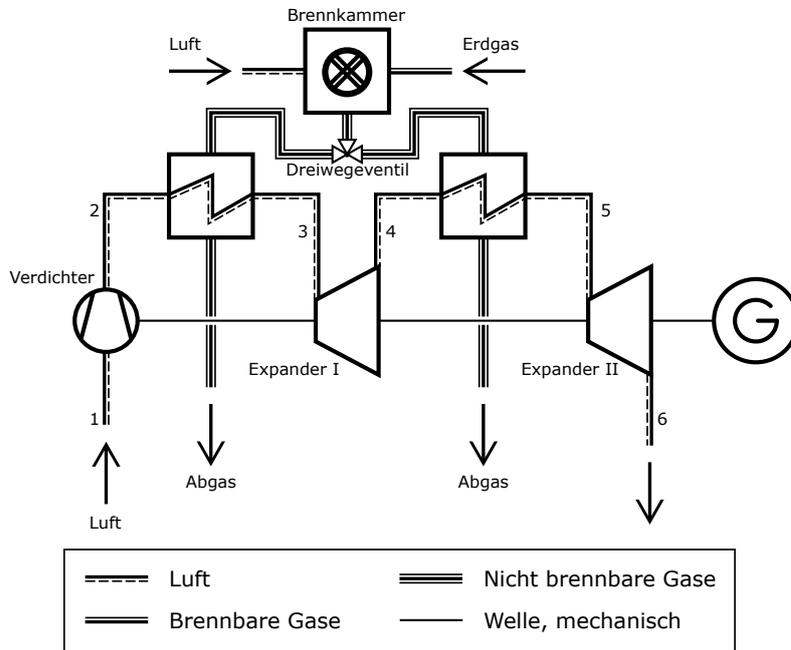
(b) (7 Punkte) Integrieren Sie die dargestellte Speisewasservorwärmung in den Niederdruckbereich eines Dampfkraftwerkes. Ihre Schaltung sollte neben den Standardkomponenten mindestens noch einen Speisewasserbehälter enthalten. Wählen Sie dabei eine geeignete Zahl von Vorwärmern aus. Beschriften Sie ihre Zeichnung.

1 Punkt beide Pumpen, 1 Punkt DE, 1 Punkt DT, 1 Punkt Kondensator, 1 Punkt Vorwärmer, 1 Punkt Speisewasserbehälter, 1 Punkt Beschriftung

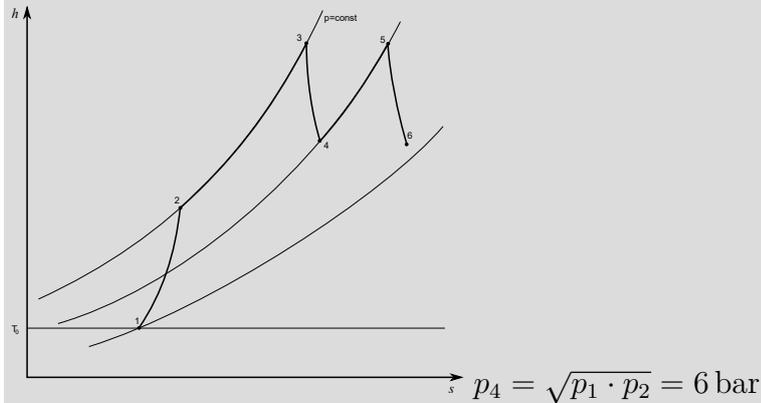
7. Gasturbinen 11 Punkte

(a) (7 Punkte) Zeichnen Sie den gezeigten Gasturbinenprozess (nur Ströme 1 bis 6) in ein h,s -Diagramm. Gehen Sie dabei von folgenden Vereinfachungen aus: Alle Komponenten sind nach außen adiabat. In den Wärmeübertragern treten keine Druckverluste auf. Zeichnen Sie notwendige Isobaren ein und achten Sie auf eine vollständige Beschriftung.

Welchen Druck sollte der Zustand 4 haben, wenn $p_1 = 1$ bar und $p_2 = 36$ bar ist?



(7 Punkte: Diagramm 5 Punkte(je ZP: 0,5, Beschriftung: 1, Isobaren: 1,5), Druck 2 Punkte)



(b) (2 Punkte) Definieren Sie den energetischen Gesamtwirkungsgrad des abgebildeten Gasturbinenprozesses. Die Luft wird bei Umgebungsbedingungen zugeführt.

(2 Punkte)

$$\eta = \frac{|\dot{W}_{12} + \dot{W}_{34} + \dot{W}_{56}|}{\dot{m}_{\text{Erdgas}} \cdot LHV_{\text{Erdgas}}} = \frac{W_{\text{el,netto}}}{\dot{m}_{\text{Erdgas}} \cdot LHV_{\text{Erdgas}}}$$

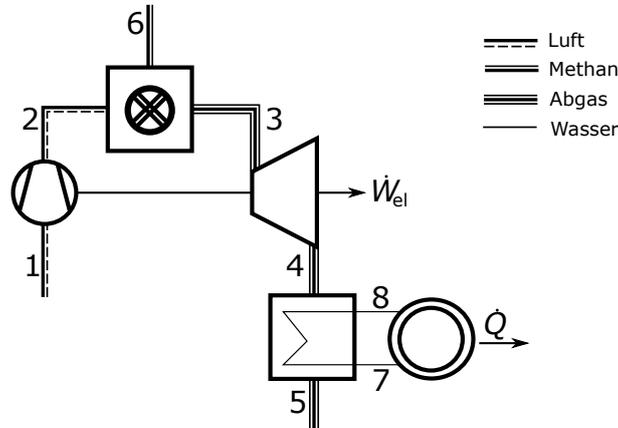
(c) (2 Punkte) Welche anlagentechnische Erweiterung würden Sie vorschlagen, um den Prozesswirkungsgrad zu erhöhen?

(2 Punkte)

Rekuperator mit Abgasstrom und Strom 2 (nach dem Verdichter)

8. Kraftwärme-Kopplungsanlagen 7 Punkte

Die nachfolgende Gasturbine mit Abhitzekessel wird in einem Fernwärmenetz eingesetzt und stellt die elektrische Leistung \dot{W}_{el} und die thermische Leistung \dot{Q} bereit. Bei dem Verbrennungsprozess entstehen die Treibhausgasemissionen \dot{m}_{CO_2} .



- (a) (2 Punkte) Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad des Gesamtprozesses:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{el} + (\dot{E}_8 - \dot{E}_7)}{\dot{E}_6 + \dot{E}_1}$$

- (b) (5 Punkte) Wie würden Sie die Treibhausgasemissionen auf die beiden Produkte elektrischer Strom und Wärme aufteilen? Geben Sie die Berechnungsformeln an!

Aufteilung über den Exergiegehalt (1 Pkt) der beiden Produkte: (2 Pkte je Gleichung)

$$\dot{m}_{CO_2, \text{el. Strom}} = \frac{\dot{W}_{el}}{\dot{W}_{el} + (\dot{E}_8 - \dot{E}_7)} \cdot \dot{m}_{CO_2}$$

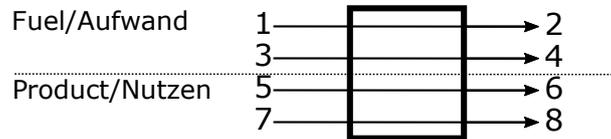
$$\dot{m}_{CO_2, \text{Wärme}} = \frac{(\dot{E}_8 - \dot{E}_7)}{\dot{W}_{el} + (\dot{E}_8 - \dot{E}_7)} \cdot \dot{m}_{CO_2}$$

Wenn die Definitionen mit für die thermische Leistung mit $(\dot{E}_4 - \dot{E}_5)$ angegeben werden (die Exergievernichtung bei der WÜ wird damit vollständig der thermischen Leistung zugeschlagen) gibt es einen Pluspunkt!

Bei Verwendung des Energiegehalts der beiden Produkte gibt es bei richtigen Gleichungen 4 Punkte. Aufteilung in halb-halb gibt keine Punkte

9. Exergoökonomie 6 Punkte

- (a) **(6 Punkte)** Erklären Sie stichpunktartig die Regeln zum Aufstellen der Hilfsbeziehungen für die exergoökonomische Analyse (F-Rule, P-Rule) und stellen sie die Hilfsbeziehungen für die folgende Komponente auf!



(1 Pkt je Gleichung, 1 Pkt je Erklärung)

- Die Fuel-rule: Die exergiespezifischen Kosten der Exergieabgebenden Ströme bleiben zwischen Ein- und Austritt konstant.
- Die Product-rule: Treten bei einer Komponente mehrere Produktströme auf, sind die exergiespezifischen Kosten aller Produktströme identisch.

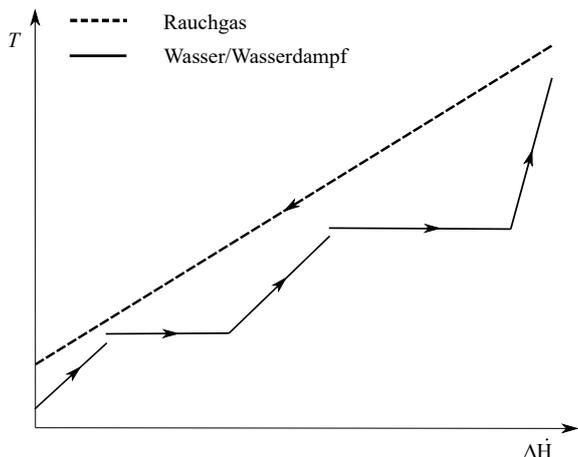
$$c_2 = c_1$$

$$c_4 = c_3$$

$$\frac{\dot{C}_6 - \dot{C}_5}{\dot{E}_6 - \dot{E}_5} = \frac{\dot{C}_8 - \dot{C}_7}{\dot{E}_8 - \dot{E}_7} \quad (2 \text{ Pkte})$$

10. Dampferzeuger7 Punkte

Dargestellt ist der Temperaturverlauf der Wasser- bzw. Dampfströme mehrerer Wärmeübertrager eines Dampfkraftprozesses entlang des Rauchgasweges.



(a) **(2 Punkte)** In welchem Kraftwerksprozess findet sich eine entsprechende Anordnungen von Wärmeübertragern? Welche Besonderheit weist der abgebildete Dampfkraftprozess gegenüber dem einfachen 4-Komponenten-Dampfkraftprozess auf (nur bezogen auf die Wasser-Dampf-Seite des abgebildeten Prozesses)

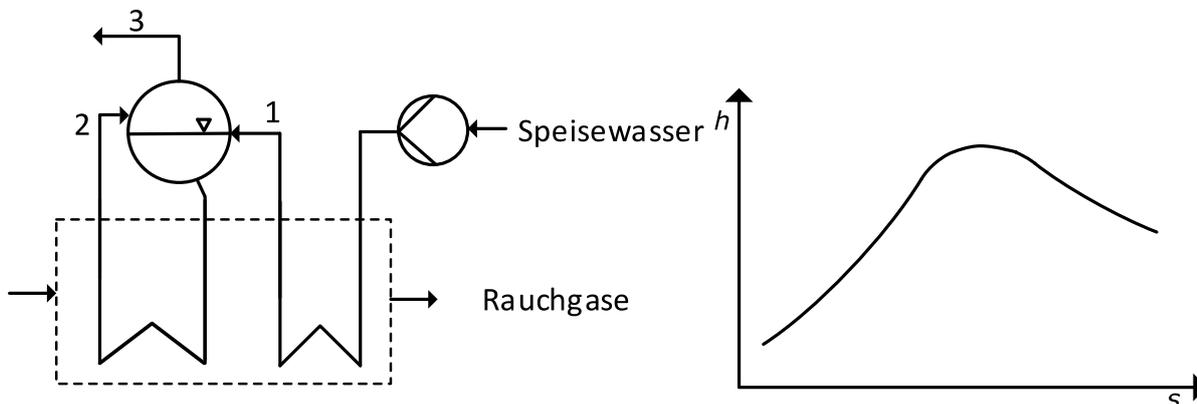
- Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
- Mehr- bzw. Zweidruckabhitzeessel/Verdampfung auf zwei verschiedenen Druckniveaus

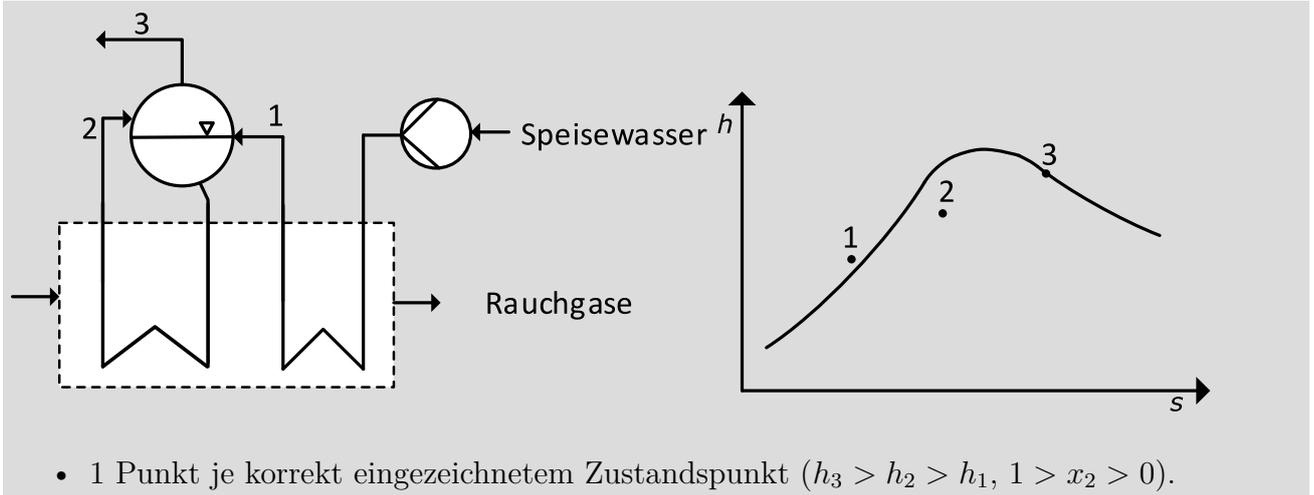
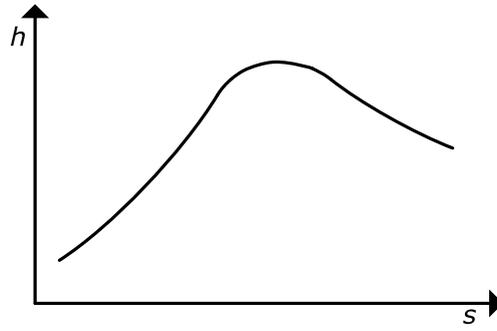
(b) **(2 Punkte)** Wird in dem dargestellten Prozess ein Benson-Dampferzeuger eingesetzt? Begründen Sie ihre Antwort.

- Nein
- Zwischen Economizer und Verdampfer ist ein Temperatursprung zu beobachten. In einem Benson-Dampferzeuger steigt die Temperatur kontinuierlich bis die Verdampfungstemperatur erreicht wird. (Der Temperatursprung ist ein Hinweis auf die Mischung von Stoffströmen mit unterschiedlichen Temperaturen und damit auf den Einsatz einer Dampftrommel.)

(c) **(3 Punkte)** Zeichnen Sie die Zustandspunkte 1-3 des dargestellten Naturumlaufverdampfers in das beigefügte h,s -Diagramm.

Hinweis: Sollten Sie die Reserve nutzen, kennzeichnen Sie die endgültige Variante eindeutig





11. Kombianlagen mit Kohleeinsatz 5 Punkte

Während mit gasgefeuerten Gas- und Dampfturbinenprozessen Wirkungsgrade von über 61 % erreicht werden, liegen die theoretisch erreichbaren Wirkungsgrade der Kombiprozesse mit Kohleeinsatz Wirkungsgrade bei 49 % und darunter.

Nennen Sie für die folgenden Kombiprozesse die maßgebliche Ursache bzw. die maßgeblichen Ursachen für die gegenüber dem gasgefeuerten Gas- und Dampfturbinenprozessen geringeren Wirkungsgrade:

- (a) **(1 Punkt)** Kombikraftwerke mit Druckwirbelschichtfeuerung (Nennen Sie eine Ursache)

Geringe Gasturbineneintrittstemperatur aufgrund der geringen Temperatur der Wirbelschicht

- (b) **(2 Punkte)** Kombikraftwerke mit integrierter Kohlevergasung (Nennen Sie zwei Ursachen)

1 Punkt je Ursache, maximal 2 Punkte

- Exergievernichtung durch die Vergasung
- Exergievernichtung durch die Brenngasreinigung/Kühlung des Brenngases
- Exergievernichtung durch die Luftzerlegungsanlage

- (c) **(2 Punkte)** Kombiprozess mit indirekt kohlebefuenerter Gasturbine (Nennen Sie zwei Ursachen)

- Exergievernichtung durch die Hochtemperaturwärmeübertragung
- Exergievernichtung durch die Rauchgasreinigung

12. Alternative Brennstoffe 3 Punkte

Derzeitig liegen in Europa die Gestehungskosten von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff deutlich über denen der Wasserstoffproduktion aus Erdgas oder Kohle.

- (a) **(1 Punkt)** Welche Kostenposition stellt aktuell den größten Anteil an den Gestehungskosten für Wasserstoff aus Elektrolyse dar?

Elektrizitätskosten

- (b) **(2 Punkte)** Nennen Sie zwei Maßnahmen, die dazu führen könnten, dass Wasserstoff aus Elektrolyse konkurrenzfähig gegenüber Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen sein kann.

pro Maßnahme 1 Pkt.

Beispiele:

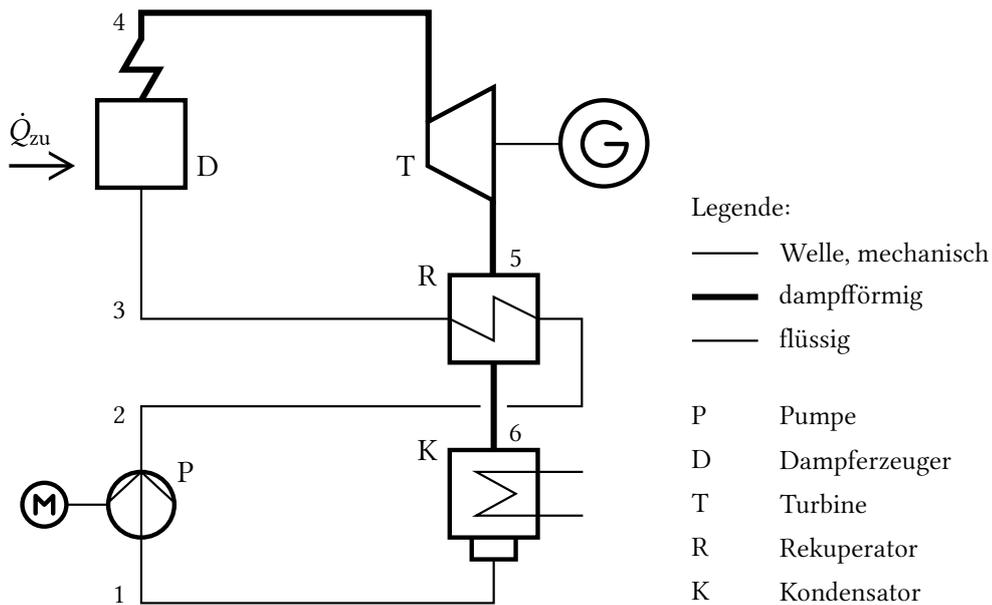
- Verringerung der Strombezugskosten, bspw. durch massiven Ausbau erneuerbarer Energien bei gleichzeitiger Befreiung von Umlagen
- signifikante CO₂-Bepreisung und damit Verteuerung von H₂ aus fossilen Rohstoffen
- Absenkung der Investitionskosten durch Skalierung und Markthochlauf

13. Alternative Prozesse 10 Punkte

(a) (6 Punkte) Die nachfolgende Abbildung zeigt einen exemplarischen ORC-Prozess. Stellen Sie den Prozess in einem T,s -Diagramm für das organische Arbeitsmittel dar und nummerieren Sie die Zustandspunkte wie im Prozessfließbild. Beachten Sie dabei, dass gemäß Fließbild der Dampferzeuger einen Überhitzer beinhaltet.

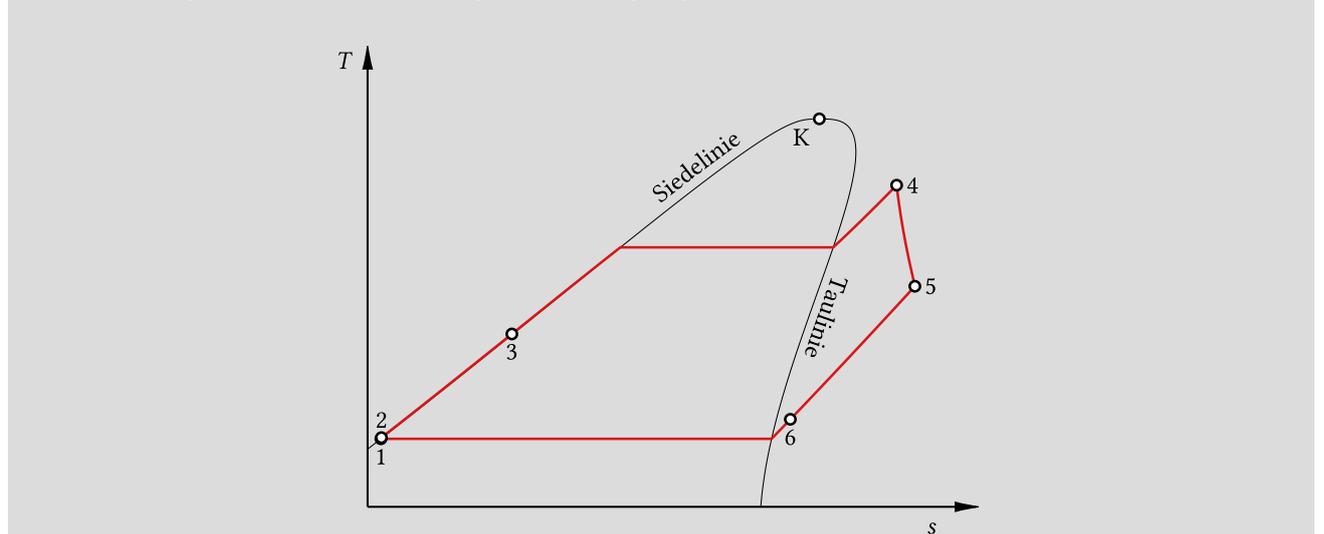
Es gelten folgende Annahmen:

- Alle Komponenten sind nach außen adiabatisch.
- Die Wärmeübertragung erfolgt isobar.
- Der Prozess weist unterkritische Frischdampfparameter auf.
- Die Entspannung des Arbeitsmittels in der Turbine erfolgt irreversibel.
- Das Arbeitsmedium verlässt den Kondensator als siedende Flüssigkeit.



Hinweis: Sollten Sie die Reserve nutzen, kennzeichnen Sie die endgültige Variante eindeutig.

- je 1 Pkt. pro Zustandsänderung, 1 u. 2 sollten übereinander oder sehr dicht beieinander liegen (6 Pkt.)
- Punktabzug bei Taulinie mit negativer Steigung



(b) (4 Punkte) Welche Unterschiede weisen organische Arbeitsmittel im Vergleich zu Wasser in Bezug auf das Nassdampfgebiet im T,s -Diagramm auf? Welche Auswirkungen haben diese Unterschiede auf den Prozess?

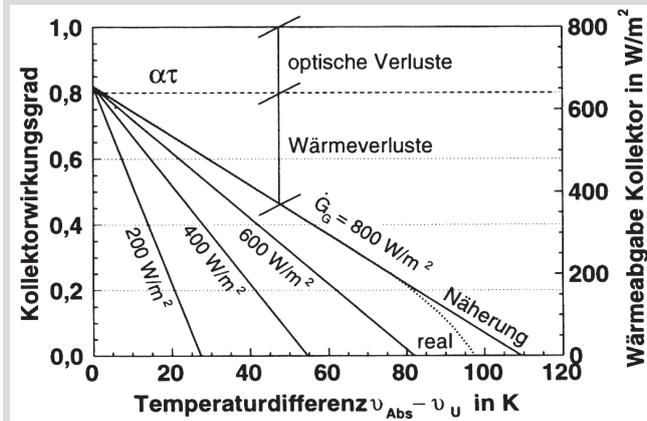
- vertikale („isentropic fluid“) oder positive Steigung („dry fluid“) der Taulinie (1 Pkt.)
→ keine Überhitzung vor Turbineneintritt notwendig, da nicht in das Nassdampfgebiet entspannt wird u. somit keine Gefahr der Erosion an Turbinenschaufeln durch zu hohe Dampfnaße besteht (1 Pkt.)
- kleinere Entropiedifferenz zwischen gesättigter Flüssigkeit und gesättigtem Dampf, analog kleine Verdampfungsenthalpie (1 Pkt.)
→ für identische thermische Leistung ist ein größerer Massenstrom erforderlich u. damit höhere Pumpenleistung notwendig (1 Pkt.)

14. Erneuerbare Energieträger 6 Punkte

Nicht konzentrierende solarthermische Anlagen wie zum Beispiel Flachkollektoren werden häufig zur Brauchwassererwärmung eingesetzt.

- (a) (4 Punkte) Stellen Sie den Kollektorwirkungsgrad η_K in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $T_K - T_0$ für den Fall einer hohen und einer niedrigen Globalstrahlung qualitativ in einem Diagramm dar. Markieren Sie die Bereiche der optischen und thermischen Verluste.

2 Punkte Verläufe, 1 Punkt Verluste, 1 Punkt alles beschriftet



- (b) (2 Punkte) Diskutieren Sie die Verläufe im Hinblick auf die o.g. Anwendung.

(mind. 2 Punkte nennen)

Bei geringer Einstrahlung sehr große Kollektorflächen notwendig bzw. Nacheizung erforderlich.

Tägliche Aufheizung auf mind. 60°C nicht dauerhaft gewährleistet.

Nahezu linearer Verlauf, kaum Strahlungseinfluss bei den Verlusten.

15. Energiespeicher 6 Punkte

Wärmespeicher in Fernwärmesystemen werden häufig als mit flüssigem Wasser gefüllte Verdrängungsspeicher bei Umgebungsdruck betrieben. Die maximale Temperatur ist daher technisch limitiert auf 98°C. Die Stoffeigenschaften von Wasser bei dieser Temperatur sind $\rho \approx 960 \text{ kg/m}^3$ und $c_p \approx 4,2 \text{ kJ/kgK}$

- (a) **(4 Punkte)** Ein zylinderförmiger Behälter dient als Speicher in einem Energiesystem zur Fernwärmeversorgung. Der Durchmesser des Wärmespeichers beträgt $d = 25 \text{ m}$ und die Höhe $z = 20 \text{ m}$. Die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur soll 50 K betragen. Wie groß ist die maximal mögliche speicherbare Wärmemenge? Das Ergebnis soll in der Einheit MWh angegeben werden.

1 Punkt Ansatz, 1 Punkt Geometrie Zylinder, 1 Punkt Ummrechnung MWh, 1 Punkt Formel Ergebnis

$$Q_{\max} = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$m = \rho \cdot V_{\text{Zylinder}}$$

$$V_{\text{Zylinder}} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot h$$

$$Q_{\max} = d^2 \cdot h \cdot \left(960 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 4,2 \cdot 50 \right) \text{ kJ/m}^3$$

$$\text{mit } 1 \text{ kJ} = 1/3600 \text{ kWh}$$

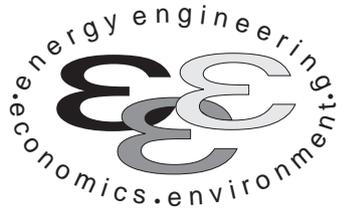
$$Q_{\max} = (25 \text{ m})^2 \cdot 20 \text{ m} \cdot 0,044 \text{ MWh/m}^3 = 550 \text{ MWh}$$

- (b) **(2 Punkte)** Wie können Verdrängungsspeicher mit flüssigem Wasser bei Temperaturen größer 98 °C realisiert werden? Erläutern Sie stichpunktartig die Unterschiede.

(1 Punkt für Druck/Temperatur, 1 Punkt für einen technischen Aspekt)

Verdampfungstemperatur druckabhängig; höhere Temperaturen erfordern daher höheren Druck i.d.R. aber kleinere Volumina der Speicher, da druckfester Behälter deutlich anspruchsvoller und teurer

zusätzliches Inventar (Pumpen, druckfeste Zuleitung, Einlauf) für Druckhaltung



**Energietechnik – 10. Mai 2021
– MUSTERLÖSUNG –
Teil II – Rechenaufgaben**

-
- Tragen Sie Ihren Namen und die Matrikelnummer ein.
 - Rechenwege müssen nachvollziehbar dargestellt werden. Nicht zu wertende Berechnungen oder Diagramme müssen durchgestrichen werden. Es ist leserlich zu schreiben.
 - Beschriften Sie die von Ihnen verwendeten Rechenblätter mit Namen und Matrikelnummer und nummerieren Sie die Seiten.
 - Bitte geben Sie alle Blätter nach der Bearbeitungszeit im gehefteten Zustand ab.
-

Name:	
Martikelnummer:	

Aufgabe:	16	17	18	Summe
Punktzahl:	50	30	30	110
Davon erreicht:				

16. Thermodynamische Analyse 50 Punkte

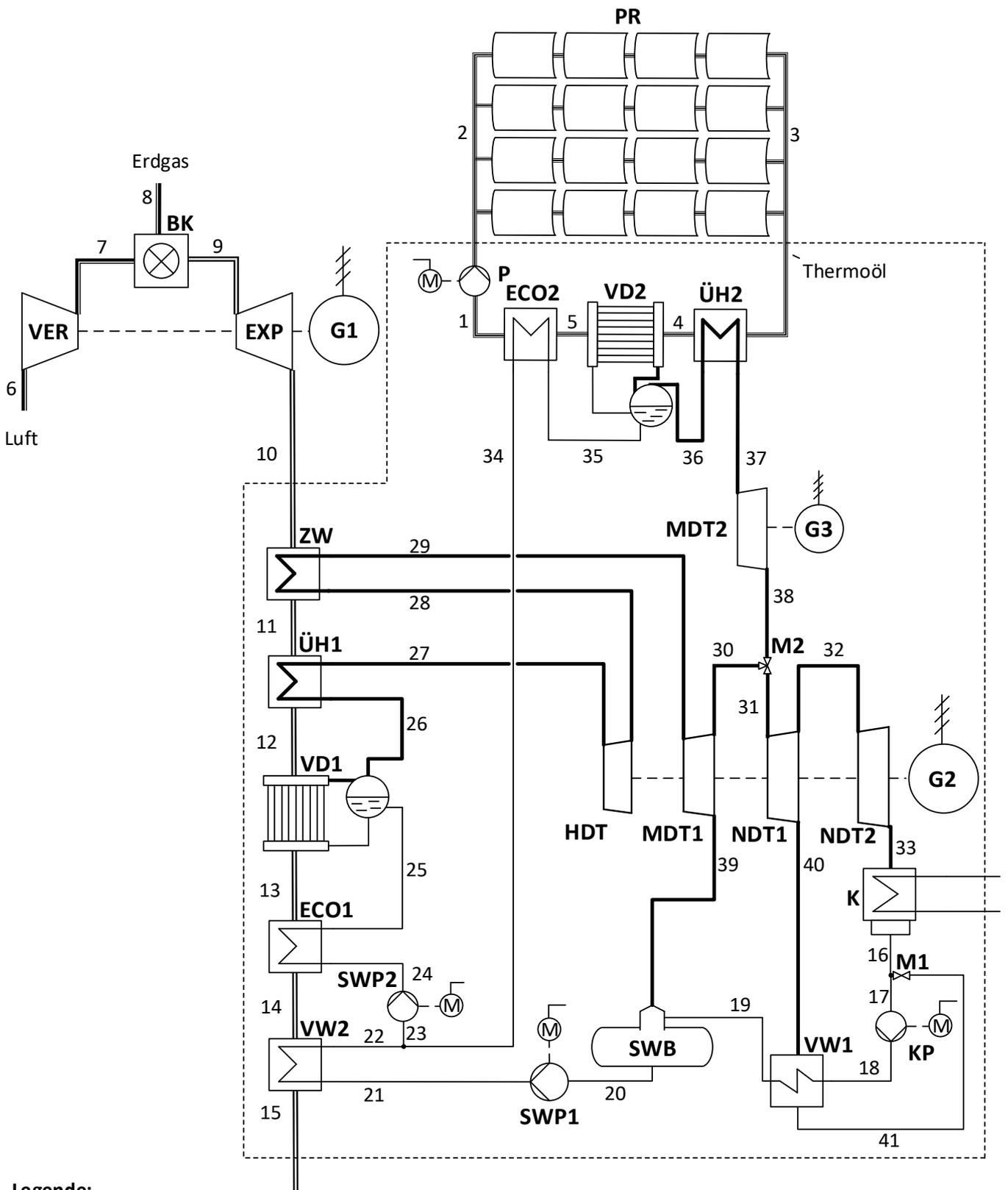
In der Abbildung ist das Fließbild eines Gas- und Dampfturbinen-Kombikraftwerks mit integriertem solarthermischem Kollektorfeld dargestellt. Der Wasserdampfkreislauf nimmt dabei sowohl im Abhitzekeessel Wärme von den Abgasen des Gasturbinenprozesses als auch aus dem Thermoölkreislauf des Kollektorfelds auf .

Im Gasturbinenprozess wird Umgebungsluft vom Gasturbinen-Verdichter (**VER**) verdichtet und in die Brennkammer (**BK**) geleitet, in welchem es mit Methan verbrannt wird. Die Rauchgase werden anschließend im Gasturbinen-Expander (**EXP**) entspannt und dem Abhitzekeessel zugeführt. Im Abhitzekeessel wird entlang des Rauchgasweges im Zwischenüberhitzer (**ZW**), Überhitzer (**ÜH1**), Verdampfer (**VD1**), Economizer (**ECO1**) und dem Mitteldruckvorwärmer (**VW2**) Wärme von den Abgasen an den Wasser-Dampfkreislauf übertragen. Die abgekühlten Rauchgase werden anschließend an die Umgebung abgeführt.

Der Thermoölmassenstrom wird mittels der Pumpe (**P**) angetrieben und absorbiert im Parabolrinnen-Kollektorfeld (**PR**) solare Strahlung. Die aufgenommene Wärme wird anschließend im Überhitzer (**ÜH2**), einem Verdampfer (**VD2**) und einem Economizer (**ECO2**) an den Wasser-Dampf-Kreislauf abgeführt.

Im Wasser-Dampfkreislauf wird der Hauptkondensatstrom (16) mit dem Kondensatstrom (41) des Niederdruckvorwärmers (**VW1**) im Mischer 1 (**M1**) gemischt und mittels der Kondensatpumpe durch den Niederdruckvorwärmer in den Speisewasserbehälter (**SWB**) gefördert, in welchem dieser wiederum mit dem Anzapfstrom (39) vermengt wird. Der Anzapfstrom (39) wird zwischen der Mitteldruckturbine (**MDT1**) und der ersten Niederdruckturbine (**NDT1**) entnommen, der Anzapfstrom (40), welcher dem Niederdruckvorwärmer zugeführt wird, zwischen der ersten (**NDT1**) und zweiten Niederdruckturbine (**NDT2**). Nach der Druckerhöhung durch die Speisewasserpumpe 1 (**SWP1**) und der weiteren Erwärmung im Mitteldruckvorwärmer (**VW2**) wird das Kreislaufwasser geteilt (Ströme 23 und 34). Strom 23 wird anschließend, nach einer weiteren Druckerhöhung in der Speisewasserpumpe 2 (**SPW2**), im Abhitzekeessel verdampft (Wärmeaufnahme in den Komponenten **ECO1**, **VD1** und **ÜH1**), in der Hochdruckdampfturbine entspannt und nach einer weiteren Wärmezufuhr im Zwischenüberhitzer der Mitteldruckturbine 1 (**MDT1**) zugeführt. Der Strom 34 wird in der Vorwärmerstrecke des Thermoölkreislaufs (**ECO2**, **VD2** und **ÜH2**) verdampft und anschließend in der Mitteldruckturbine 2 (**MDT2**) entspannt. Die Abdampfströme der Mitteldruckturbinen (Strom 30 und 38) werden im zweiten Mischer (**M2**) zusammengeführt und in der ersten Niederdruckturbine (**NDT1**) entspannt. Der Abdampfstrom der ersten Niederdruckturbine wird in die Ströme 32 und 40 aufgeteilt. Strom 32 wird in der Niederdruckturbine bis auf das Kondensatorniveau entspannt und anschließend dem Kondensator (**K**) zugeführt.

Die Stoffwerte für Wasser werden mittels der IAPWS-IF97 berechnet. Die Wasserdampftafel aus der Formelsammlung kann folglich nicht für die Lösung der Aufgaben verwendet werden.



Legende:

	Luft	VER	Gasturbinen-Verdichter	MDT	Mitteldruck-Dampfturbine
	Erdgas	BK	Brennkammer	NDT	Niederdruck-Dampfturbine
	Abgas	EXP	Gasturbinen-Expander	M	Mischer
	Thermoöl	ZW	Zwischenüberhitzer	SWB	Speiswasserbehälter
	Kreislaufwasser	ÜH	Überhitzer	KP	Kondensatpumpe
	Wasserdampf	VD	Verdampfer	SWP	Speiswasserpumpe
	Bilanzgrenze	ECO	Economizer	P	Pumpe, Thermoölkreislauf
		VW	Vorwärmer	PR	Parabolrinnen-Kollektorfeld
		HDT	Hochdruck-Dampfturbine	G	Generator

Annahmen und gegebene Werte

- Alle Komponenten arbeiten stationär und sind nach außen adiabat.
- Änderungen der kinetischen und potentiellen Energien können vernachlässigt werden.
- Druckverluste in den dargestellten Wärmeübertragern, der Brennkammer und den Rohrleitungen können vernachlässigt werden.
- Die mechanischen Verluste der Turbinen und des Verdichters werden vernachlässigt.
- Die Generatoren weisen einen mechanischen Wirkungsgrad von $\eta_{m,G} = 99\%$ und einen elektrischen Wirkungsgrade von $\eta_{el,G} = 98\%$ auf.
- Die Motoren weisen einen mechanischen Wirkungsgrad von $\eta_{m,M} = 99\%$ und einen elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_{el,M} = 95\%$ auf.
- Die Leistung des Generators 2 (**G2**) beträgt $P_{el,G2} = 71,51$ MW.
- Die Verdampfungsenthalpie bei $p = 1$ bar beträgt $\Delta h^{LV} = 2257,51$ kJ/kg.
- Die Umgebungstemperatur beträgt $T_0 = 300$ K.

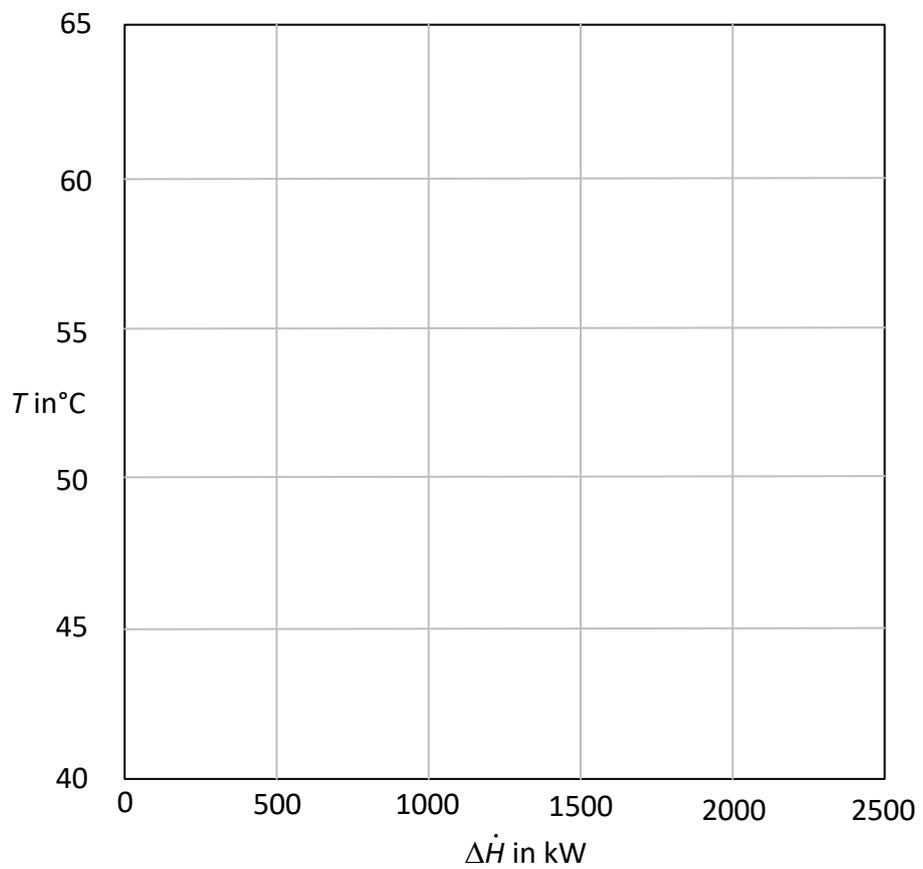
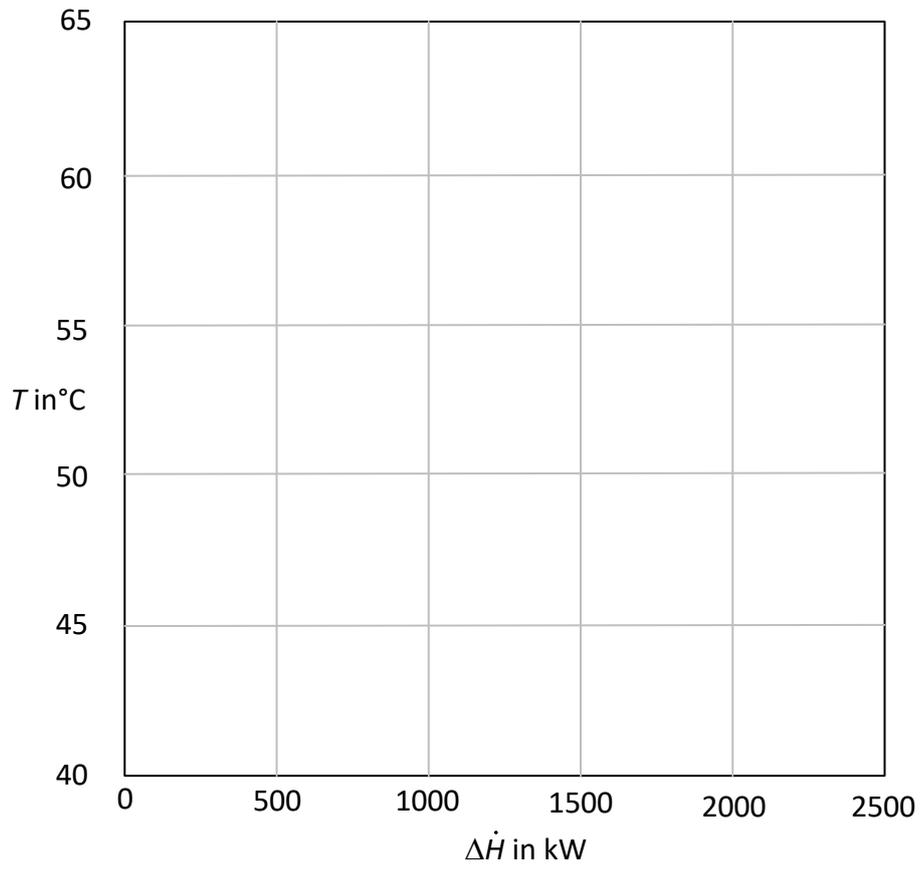
Hinweis für alle Teile dieser Aufgabe: Sofern Sie für den Quereinstieg Ergebnisse aus vorhergehenden, unbeantworteten Aufgabenteilen benötigen, benutzen Sie bitte folgende Angaben:

$$\dot{E}_{15}^{TOT} = 7 \text{ MW}; \dot{Q}_{zu,WDK} = 300 \text{ MW}, \dot{P}_{el,netto,WDK} = 115 \text{ MW}$$

Aufgaben

- (7 Punkte)** Berechnen Sie die abgegebene elektrische Leistung des Gasturbinengenerators sowie die elektrische Nettoleistung des Wasserdampfkreislaufs entsprechend der gestrichelt dargestellten Bilanzgrenze.
- (5 Punkte)** Berechnen Sie durch Verwendung einer geeigneten Exergiebilanz die gesamten mit dem Abgasstrom (Strom 15) verbundenen Exergieverluste.
- (6 Punkte)** Berechnen Sie die Summe der von den Rauchgasen an den Wasserdampfkreislauf abgegebene Wärme und der im Kollektorfeld vom Thermoöl aufgenommenen Wärme. Berechnen Sie zudem den energetischen und exergetischen Nettowirkungsgrad des Wasserdampfkreislaufs (entsprechend der dargestellten Bilanzgrenze).
- (6 Punkte)** Berechnen Sie die im Kondensator an das Kühlwasser abgeführte Wärme. *Hinweis:* Es liegen keine Daten zum Kühlwasser vor.
- (5 Punkte)** Am Austritt der Mitteldruckturbine 2 (**MDT2**) herrscht ein Dampfgehalt von $x = 0,872$. Bei einer isentropen Entspannung würde dieser auf $x = 0,829$ sinken. Wie hoch ist der isentrope Wirkungsgrad $\eta_{s,MDT2}$?
- (6 Punkte)** Definieren und berechnen Sie den exergetischen Wirkungsgrad des Mischers 2 (**M2**).
- (3 Punkte)** Berechnen Sie die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr des kalten Stroms des Economizers des Thermoölkreislaufs (**ECO2**).
- (6 Punkte)** Zeichnen Sie in das beigefügte $T, \Delta \dot{H}$ -Diagramm die Wärmeübertragung des Niederdruckvorwärmers ein und kennzeichnen Sie die zur Exergievernichtung proportionale Fläche. Zeichnen Sie in das zweite $T, \Delta \dot{H}$ -Diagramm die Wärmeübertragung ein für den Fall, dass nun zwei anstatt ein Niederdruckvorwärmer installiert sind. Das Druckniveau der ersten Dampfanzapfung (Strom 40) sowie die kalte Seite (Strom 18 und 19) bleiben unverändert. Das Druckniveau der zusätzlichen Dampfanzapfung ist nicht vorgegeben.
- (6 Punkte)** Formulieren Sie für die exergoökonomische Analyse die Kostenbilanz der Niederdruckturbine 1 (**NDT1**) sowie alle notwendigen Hilfsbeziehungen. Auf welcher Annahme bzw. Definition beruhen die Hilfsbeziehungen?

Nr.	\dot{m} [kg/s]	T [°C]	p [bar]	x	\dot{E}^{TOT} [MW]	\dot{H} [MW]	\dot{S} [MW/K]
1	515,17	283,01	35,000	-		274,98	0,6703
2	515,17	283,95	50,000	-	75,89	276,06	0,6706
3	515,17	390,00	35,000	-		408,26	0,8891
4	515,17	374,60	35,000	-	131,49	387,90	0,8580
5	515,17	300,54	35,000	-	84,56	295,62	
6	277,56	26,85	1,000	-	0,25	7,49	1,9082
7	277,56	470,41	20,000	-	121,67	135,33	1,9296
8	7,00	25,00	20,000	-	362,95	350,49	0,0705
9	284,56	1423,21	20,000	-	384,33	485,81	2,3360
10	284,56	644,45	1,010	-	94,51	204,33	2,3638
11	284,56	563,96	1,010	-	76,63	177,15	2,3328
12	284,56	429,18	1,010	-	49,56	132,73	2,2750
13	284,56	383,71	1,010	-	41,37	118,07	2,2534
14	284,56	285,86	1,010	-	25,70	87,07	2,2023
15	284,56	115,00	1,010	-		34,52	2,0902
16							
17	92,78					18,57	
18	92,78	47,81	1,000	0,000	0,50	18,58	0,0627
19	92,78	53,38	1,000	0,000		20,74	
20	100,44	99,61	1,000	0,000	3,46	41,93	0,1308
21	100,44	100,44	75,000	0,000	4,26	42,84	0,1312
22	100,44		75,000	0,000	20,31	95,39	0,2529
23	38,27		75,000	0,000	7,74	36,34	0,0963
24	38,27	224,42	220,000	0,000	8,44	37,11	0,0966
25	38,27	365,71	220,000	0,000	23,23	68,12	0,1506
26	38,27	373,71	220,000	1,000	31,08	82,78	0,1733
27	38,27	533,96	220,000	1,000	56,17	127,19	0,2377
28	38,27	330,01	56,000	1,000	42,81	114,69	0,2406
29	38,27	619,45	56,000	1,000	58,88	141,87	0,2776
30	30,60	144,15	1,000	1,000	15,20	84,62	0,2322
31	92,78	99,61	1,000	0,927	41,08	232,92	0,6418
32		58,38	0,185				
33							
34	62,18		75,000	0,000	12,57	59,05	
35	62,18		75,000	0,000	21,49	79,69	
36	62,18	290,54	75,000	1,000	64,65	171,97	0,3593
37	62,18	380,00	75,000	1,000	74,88	192,33	0,3931
38	62,18	99,61	1,000	0,872	26,00	148,30	0,4092
39	7,66	144,15	1,000	1,000	3,81	21,19	0,0581
40		58,38	0,185	0,870			
41		58,38	0,185	0,000			



a) 7 Punkte

$$P_{\text{Gen,GT}} = \eta_{el} \cdot \eta_m \cdot (\dot{H}_{10} - \dot{H}_9 + \dot{H}_7 - \dot{H}_6) \text{ (1 Punkt)}$$

$$P_{\text{Gen,GT}} = 0,98 \cdot 0,99 \cdot (204,33 - 485,81 + 135,33 - 7,49) \text{ MW} = -149,06 \text{ MW (1 Punkt)}$$

$$P_{\text{Gen3}} = \eta_{el} \cdot \eta_m \cdot (\dot{H}_{38} - \dot{H}_{37}) \text{ (1 Punkt)}$$

$$P_{\text{Gen3}} = 0,98 \cdot 0,99 \cdot (192,33 - 148,30) = -42,72 \text{ MW (1 Punkt)}$$

$$P_{\text{Pumpe}} = \frac{(\dot{H}_{18} - \dot{H}_{17} + \dot{H}_{21} - \dot{H}_{20} + \dot{H}_{24} - \dot{H}_{23} + \dot{H}_2 - \dot{H}_1) \text{ MW}}{\eta_{el} \cdot \eta_m} \text{ (1 Punkt)}$$

$$P_{\text{Pumpen}} = \frac{(18,58 - 18,57 + 42,84 - 41,93 + 37,11 - 36,34 + 276,06 - 274,98) \text{ MW}}{0,95 \cdot 0,99} = 2,95 \text{ MW (1 Punkt)}$$

$$P_{\text{WD,netto}} = P_{\text{Gen2}} + P_{\text{Gen3}} + P_{\text{Pumpen}} = -111,28 \text{ MW (1 Punkt)}$$

b) 5 Punkte

$$\dot{E}_D^{\text{TOT}} = \dot{E}_{14}^{\text{TOT}} + \dot{E}_{21}^{\text{TOT}} - \dot{E}_{15}^{\text{TOT}} - \dot{E}_{22}^{\text{TOT}} \text{ (1 Punkt)}$$

$$\dot{E}_D = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{Gen}} \text{ (1 Punkt)}$$

$$\dot{S}_{\text{Gen}} = \dot{S}_{15} + \dot{S}_{22} - \dot{S}_{14} - \dot{S}_{21} \text{ (1 Punkt)}$$

$$\dot{E}_D = 300 \text{ K} \cdot \left((2,0902 + 0,2529 - 2,2023 - 0,1312) \frac{\text{MW}}{\text{K}} \right) = 2,88 \text{ MW (1 Punkt)}$$

$$\dot{E}_{15}^{\text{TOT}} = \dot{E}_{14}^{\text{TOT}} + \dot{E}_{21}^{\text{TOT}} - \dot{E}_D - \dot{E}_{22}^{\text{TOT}} = 25,70 + 4,26 - 2,88 - 20,31 = 6,77 \text{ MW (1 Punkt)}$$

c) 6 Punkte

$$\dot{Q}_{\text{zu}} = \dot{H}_{10} - \dot{H}_{15} + \dot{H}_3 - \dot{H}_2 \text{ (1 Punkt)}$$

$$\dot{Q}_{\text{zu}} = (204,33 - 34,52 + 408,26 - 276,06) \text{ MW} = 302,01 \text{ MW (1 Punkt)}$$

$$\eta_{\text{WD,th} \rightarrow \text{el}} = \frac{|P_{\text{WD,netto}}|}{\dot{Q}_{\text{zu}}} = 0,368 \text{ (1 Punkt)}$$

$$\varepsilon_{\text{WD,th} \rightarrow \text{el}} = \frac{|P_{\text{WD,netto}}|}{\dot{E}_{10}^{\text{TOT}} - \dot{E}_{15}^{\text{TOT}} + \dot{E}_3^{\text{PH}} - \dot{E}_2^{\text{PH}}} \text{ (1 Punkt)}$$

$$\dot{E}_3^{\text{PH}} - \dot{E}_2^{\text{PH}} = \dot{H}_3 - \dot{H}_2 - T_0 \cdot (\dot{S}_3 - \dot{S}_2) \text{ (1 Punkt)}$$

$$\varepsilon_{\text{WD,th} \rightarrow \text{el}} = \frac{111,29}{94,51 - 6,77 + 408,26 - 276,06 - 300 \cdot (0,8891 - 0,6706) \text{ MW}} = 0,721 \text{ (1 Punkt)}$$

d) 6 Punkte

$$0 = \dot{Q}_{zu} + \dot{W}_{(\text{hydro})m,ab} + \dot{W}_{(\text{hydro})m,zu} + \dot{Q}_{ab} \quad (1 \text{ Punkte})$$

$$\dot{W}_{(\text{hydro})m,ab} = \frac{(-)P_{\text{Gen},2}}{\eta_{\text{Gen,el}} \cdot \eta_m} + \dot{H}_{38} - \dot{H}_{37} \quad (1 \text{ Punkte})$$

$$\dot{W}_{(\text{hydro})m,ab} = \left(\frac{-71,51}{0,98 \cdot 0,99} + 148,30 - 192,33 \right) \text{ MW} = -117,74 \text{ MW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{W}_{(\text{hydro})m,zu} = \dot{H}_{21} - \dot{H}_{20} + \dot{H}_{18} - \dot{H}_{17} + \dot{H}_{24} - \dot{H}_{23} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{W}_{(\text{hydro})m,zu} = (18,58 - 18,57 + 42,84 - 41,93 + 37,11 - 36,34) \text{ MW} = 1,69 \text{ MW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{Q}_{ab} = -\dot{Q}_{zu} - \dot{W}_{(\text{hydro})m,ab} - \dot{W}_{(\text{hydro})m,zu} = (-302,01 + 117,74 - 1,69) \text{ MW} \\ = -185,96 \text{ MW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

e) 5 Punkte

$$\dot{H}_{38} = x \cdot \Delta h^{\text{LV}}(p_{38}) \cdot m_{38} + \dot{H}'_{38} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{H}'_{38} = 148,30 - 0,872 \cdot \frac{2257,51}{1000} \cdot 62,18 = 25,90 \text{ MW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{H}_{38s} = x_s \cdot \Delta h^{\text{LV}} \cdot m_{38} + \dot{H}'_{38} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{H}_{38s} = 0,829 \cdot \frac{2257,51}{1000} \cdot 62,18 + 25,9 = 142,27 \text{ MW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\eta_{s,T} = \frac{\dot{H}_{37} - \dot{H}_{38}}{\dot{H}_{37} - \dot{H}_{38s}} = \frac{192,33 - 148,30}{192,33 - 142,27} = 0,88 \quad (1 \text{ Punkt})$$

f) 6 Punkte

$$e_{30} > e_{38} \rightarrow e_{30} \text{ Aufwand} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{E}_P = m_{38} \cdot \left(\frac{\dot{E}_{31}}{m_{31}} - \frac{\dot{E}_{38}}{m_{38}} \right) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{E}_P = 62,18 \cdot \left(\frac{41,08}{92,78} - \frac{26,00}{62,18} \right) = 1,53 \text{ MW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{E}_F = m_{30} \cdot \left(\frac{E_{30}}{m_{30}} - \frac{E_{31}}{m_{31}} \right) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{E}_F = 30,60 \cdot \left(\frac{15,20}{30,60} - \frac{41,08}{92,78} \right) = 1,65 \text{ MW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\varepsilon_{M1} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 0,927 \quad (1 \text{ Punkt})$$

g) 3 Punkte

$$\dot{E}_{q,\text{ECO2,kalt}} = \dot{Q}_{\text{ECO2}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{m,\text{kalt}}}\right) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$T_{m,\text{kalt}} = \frac{T_0}{\left(1 - \frac{\dot{E}_{35} - \dot{E}_{34}}{\dot{H}_{35} - \dot{H}_{34}}\right)} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$T_{m,\text{kalt}} = \frac{300 \text{ K}}{\left(1 - \frac{21,49 - 12,57}{79,69 - 59,05}\right)} = 528,38 \text{ K} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Alternativer Lösungsweg:

$$T_{m,\text{kalt}} = \frac{\dot{H}_{35} - \dot{H}_{34}}{\dot{S}_{35} - \dot{S}_{34}} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\dot{E}_{35}^{\text{PH}} - \dot{E}_{34}^{\text{PH}} = \dot{E}_{35}^{\text{TOT}} - \dot{E}_{34}^{\text{TOT}} = \dot{H}_{35} - \dot{H}_{34} - T_0 \cdot (\dot{S}_{35} - \dot{S}_{34}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$T_{m,\text{kalt}} = T_0 \cdot \frac{\dot{H}_{35} - \dot{H}_{34}}{-(\dot{E}_{35}^{\text{TOT}} - \dot{E}_{34}^{\text{TOT}}) + \dot{H}_{35} - \dot{H}_{34}}$$

$$T_{m,\text{kalt}} = 300 \text{ K} \cdot \frac{79,69 - 59,05}{-(21,49 - 12,57) + 79,69 - 59,05} = 528,33 \text{ K} \quad (1 \text{ Punkt})$$

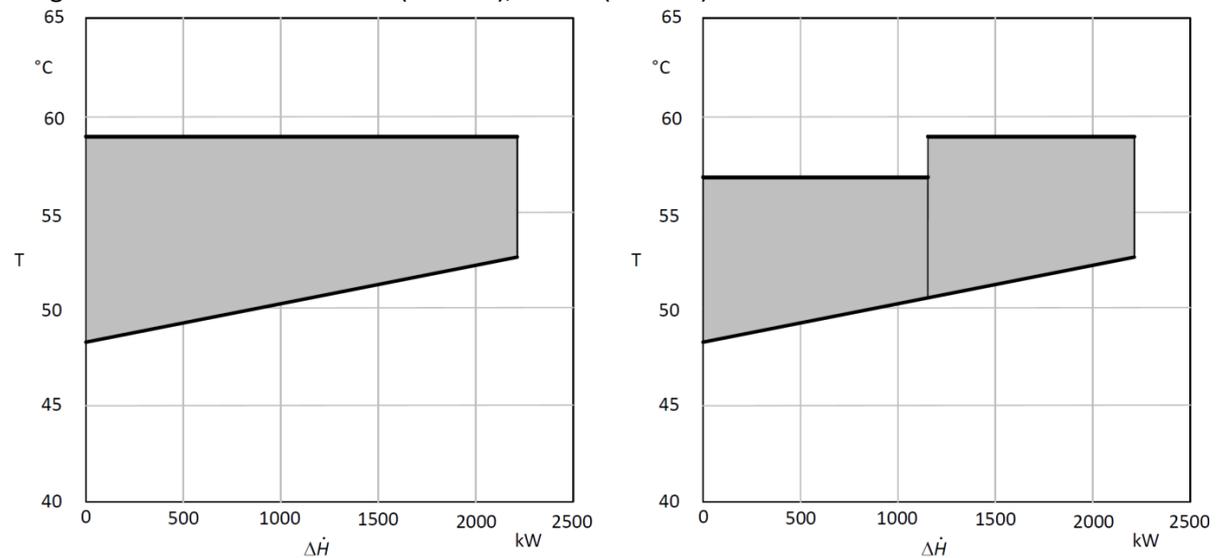
Anmerkung: Die Entropien \dot{S}_{35} und \dot{S}_{34} können auch über die Bilanzierung der benachbarten Komponenten bestimmt werden bzw. \dot{S}_{34} kann direkt mittels \dot{S}_{22} , \dot{m}_{22} und \dot{m}_{34} berechnet werden.

h) 6 Punkte

Energietechnik I

Diagramm 1: Verlauf kalte Seite und heiße Seite (je 1 Punkt), Fläche (1 Punkt)

Diagramm 2: Verlauf heiße Seite (1 Punkt), Fläche (1 Punkt)



Energietechnik II

$$\dot{C}_{31} + \dot{C}_{\text{Welle,ein}} - \dot{C}_{32} - \dot{C}_{40} - \dot{C}_{\text{Welle,aus}} + Z_{\text{NDT1}} = 0 \quad (2 \text{ Punkte})$$

$$c_{31} = c_{40} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$c_{31} = c_{32} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Die Ströme 31, 32 und 40 sind als Aufwand zu verstehen, die Kosten werden jedoch alleine dem Produkt zugeschlagen. Daher erhöhen sich die Kosten der Austrittsströme 41 und 32 nicht gegenüber dem Eintrittsstrom 31. (2 Punkte)

17. Wirtschaftlichkeitsanalyse 30 Punkte

In Südsanien wird der Bau eines Parabolrinnenkraftwerks mit einer Dampfturbine zur Stromerzeugung geplant. Baubeginn ist der 01.01.2023. Die Inbetriebnahme erfolgt ein Jahr später am 01.01.2024. Mit dem 01.01.2023 beginnt zunächst der Bau der Parabolrinnenkollektoren. Der Bau des dazugehörigen Kraftwerks einschließlich der Dampfturbinen folgt ab dem 01.06.2023. Für die Investitionskosten der Parabolrinnenkollektoren stehen Ihnen Daten aus dem Jahr 2019 zur Verfügung, für das zugehörige Dampfkraftwerk aus dem Jahr 2021. Die feste jährliche Einspeisevergütung beträgt für die ersten 10 Jahre $p_{\text{Strom},1} = 76,00 \text{ €/MWh}_{\text{el}}$. Diese reduziert sich für die restliche Nutzungsdauer auf $p_{\text{Strom},2} = 72,00 \text{ €/MWh}_{\text{el}}$.

Prüfen Sie die Wirtschaftlichkeit des Projekts.

Hinweis für alle Unteraufgaben:

Sofern Sie für den Quereinstieg Ergebnisse aus vorhergehenden, unbeantworteten Aufgabenteilen benötigen, benutzen Sie bitte die in eckigen Klammern angegebenen Werte. Diese stimmen nicht notwendigerweise mit den exakten Werten überein.

Weitere Annahmen und Hinweise

- Vereinfachend wird angenommen, dass die jeweiligen Zahlungen zu den Investitionsausgaben zum jeweiligen Baubeginn erfolgen.
- Alle weiteren Kosten und Erlöse fallen jeweils am Ende eines Jahres an.
- Die Kostensteigerung für Investitionsgüter beträgt $r_I = 2,7\%/a$, die Kostensteigerung der Betriebs- und Wartungskosten $r_{\text{OMC}} = 2,5\%/a$.
- Die Preise für Parabolrinnenkollektoren beziehen sich auf den 01. Januar 2019, die der restlichen Investitionsgüter auf den 01.01.2021.
- Bezugszeitpunkt ist hier der Investitionszeitpunkt 1. Januar 2023.
- Planungszeitpunkt ist der 1. Januar 2021
- Es wird vereinfacht angenommen, dass die Anlage am Ende der Nutzungszeit vollständig abgeschrieben ist.
- Führen Sie sämtliche Rechnungen in inflationsbehafteter Währung durch.

Aufgaben

- (6 Punkte) Erstellen Sie einen Zeitstrahl in dem alle relevanten Kosten, Einnahmen und Zeitpunkte eingetragen sowie eindeutig beschriftet sind.
- (1 Punkt) Berechnen Sie für die Anlage die benötigte Kollektorfläche A_{Koll} [75 500 m²].
- Ermitteln Sie den Kapitalwert NPV_{Solar} für das Investitionsprojekt Parabolrinnenkraftwerk. Berechnen Sie hierzu die folgenden Werte:
 - (4 Punkte) Barwert der Investition der Anlage P_I .
 - (6 Punkte) Barwert Stromeinnahmen P_{Strom} .
 - (5 Punkte) Barwert der Wartungskosten P_{OMC} .
 - (3 Punkte) Kapitalwert NPV_{Solar} . Treffen Sie eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit der Investition.
- (5 Punkte) Eine weitere Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer Investitionsalternative ist der *interne Zinssatz*. Stellen Sie für das hier beschriebene Investitionsvorhaben die Formel zur Berechnung des internen Zinssatzes i^* auf. Es sollen keine Berechnungen durchgeführt werden!

Annahmen und Parameter des Investitionsprojektes „Parabolrinnenkraftwerk“

<i>Planungsdaten</i>	
Planungszeitpunkt	1. Januar 2021
Bezugszeitpunkt	1. Januar 2023
Baubeginn Parabolrinnenkollektoren	1. Januar 2023
Baubeginn Dampfkraftwerk	1. Juni 2023
Inbetriebnahme	1. Januar 2024
wirtschaftliche Nutzungsdauer ab Inbetriebnahme, n	20 a
<i>Anlagendaten</i>	
Summe der elektrischen Nennleistung Dampfturbine 1 & 2, \dot{W}_{el}	150 MW _{el}
jährliche elektrische Netto-Stromerzeugung, W_{el}	890 GWh/a
spezifische Kollektorfläche pro kW elektrischer Nennleistung, a_P	0,2 kW/m ²
spezifische Investitionskosten Parabolrinnenkollektoren 1. Januar 2019, $i_{P,2019}$	250 €/m ²
Investitionskosten Dampfkraftwerk 1. Januar 2021, $I_{K, 2021}$	370 Mio €
<i>Sonstige Angaben</i>	
Stromverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, $p_{Strom,1}$	76,00 €/MWh _{el}
Stromverkaufspreis ab dem 11. Betriebsjahr, $p_{Strom,2}$	72,00 €/MWh _{el}
jährliche Betriebs- und Wartungskosten (2021), OMC_{2021}	15 Mio €/a
jährliche nominelle Kostensteigerungsrate Betriebs- und Wartungskosten, r_{OMC}	2,5 %/a
jährliche nominelle Kostensteigerungsrate für Investitionsgüter, r_I	2,7 %/a
jährlicher effektiver Zinssatz, i_{eff}	5 %/a
jährliche Inflationsrate, r_i	2 %/a

Vorlage Zeitstrahl



Vorlage Zeitstrahl - Reserve

Hinweis: Sollten Sie die Reserve nutzen, kennzeichnen Sie die endgültige Variante eindeutig.



Vorlage Zeitstrahl - Reserve

Hinweis: Sollten Sie die Reserve nutzen, kennzeichnen Sie die endgültige Variante eindeutig.



Vorlage Zeitstrahl - Reserve

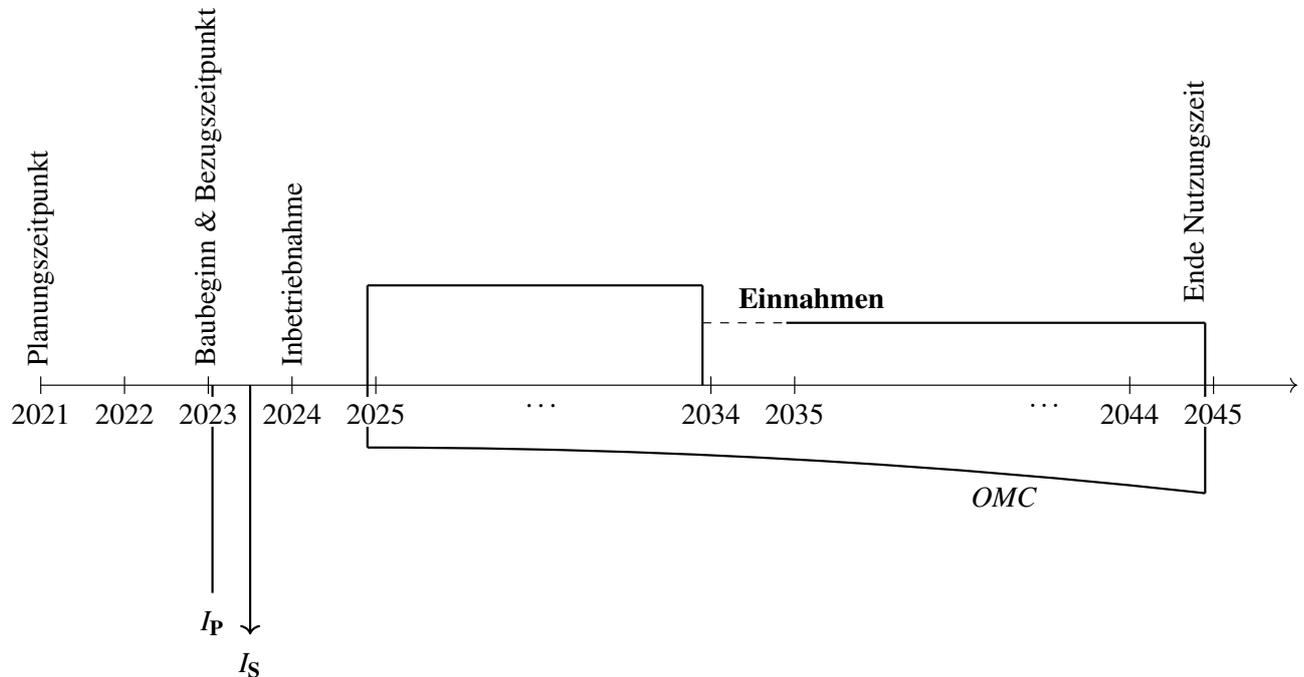
Hinweis: Sollten Sie die Reserve nutzen, kennzeichnen Sie die endgültige Variante eindeutig.



Hinweis: Die Ergebnisse bei Quereinstieg sind in grauer Farbe angegeben.

Aufgabe 1 (6 Punkte)

je 0,5 P für jede richtige Beschriftung, 1 P für richtigen Eintrag der Kosten bzw. Einnahmen
Lösung:



Aufgabe 2 (1 Punkte)

Kollektorfläche: $F_P = \frac{\dot{W}_{el}}{a_P} = 750\,000 \text{ m}^2$ (1 Punkt)

Aufgabe 3 (18 Punkte)

a. Barwert der Investition (4 Punkte)

Parabolrinnenkollektoren (1 Punkt)

$$I_{P,2023} = i_P \cdot F_P \cdot (1 + r_i)^4 = 208\,585 \text{ T€} \quad (209\,976 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

Dampfkraftwerk

$$I_{S,\text{Juni } 2023} = I_{S,2021} \cdot (1 + r_I)^{2,5} = 395\,483 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$I_{0,S,2023} = I_{S,\text{Juni } 2023} \cdot (1 + i_{eff})^{-0,5} = 337\,817 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Gegenwartswert Investitionen (1 Punkt für richtiges Gesamtergebnis)

$$PI_{2023} = I_{P,2023} + I_{0,S,2023} = 546\,402 \text{ T€} \quad (594\,537 \text{ T€})$$

b. Barwert der Stromeinnahmen (6 Punkte)

Einnahmen bis 2034

$$P_{\text{Strom},1,2024} = \frac{A_{\text{Strom},2024}}{CRF_{10}}$$

$$\text{mit } CRF_{10} = \frac{i(1+i_{eff})^{10}}{(1+i_{eff})^{10}-1} = 0,1295 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$A_{\text{Strom},2024} = p_{\text{Strom},1} \cdot W_{el} = 67\,640 \text{ T€/a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$P_{\text{Strom},1,2024} = 522\,317 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Einnahmen ab 2034

$$P_{\text{Strom},2,2034} = \frac{A_{\text{Strom},2034}}{CRF_{10}} = 494\,826 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\text{mit } A_{\text{Strom},2034} = p_{\text{Strom},2} \cdot W_{\text{el}} = 64\,080 \text{ T€/a}$$

$$P_{\text{Strom},2,2024} = P_{\text{Strom},2,2034} (1 + i_{\text{eff}})^{-10} = 303\,780 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$P_{\text{Strom},2023} = (P_{\text{Strom},1,2024} + P_{\text{Strom},2,2024}) (1 + i_{\text{eff}})^{-1} = 786\,759 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

c. Barwert Wartungskosten (5 Punkte)

$$A_{\text{OMV}} = P_{\text{OMC}} \cdot CRF; \quad CELF = \frac{A_{\text{OMV}}}{FC_{\text{OMC}}} = \frac{k(1-k^n)}{1-k} CRF$$

$$P_{\text{OMC},2024} = \frac{k(1-k^n)}{1-k} FC_{\text{OMC},202} \quad \text{mit } k = \frac{1 + r_{\text{OMC}}}{1 + i_{\text{eff}}} = 0,9762 \quad (2 \text{ Punkte für Lösungsweg})$$

$$FC_{\text{OMC},2024} = FC_{\text{OMC},2021} \cdot (1 + r_{\text{OMC}})^3 = 16\,153 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$P_{\text{OMC},2024} = 253\,298 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$P_{\text{OMC},2023} = P_{\text{OMC},2024} \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-1} = 241\,236 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

d. Kapitalwert (3 Punkte)

$$NPV_{\text{Solar},2023} = P_{\text{Strom},2023} - P_{\text{OMC},2023} - PI_{2023} = -49\,014 \text{ T€} \quad (-50\,404 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt Formel} + 1 \text{ Punkt Ergebnis})$$

→ Die Investition in das Parabolrinnenkraft ist nicht wirtschaftlich. (1 Punkt)

Aufgabe 4 (5 Punkte)

Ableiten der Formel zur Berechnung des internen Zinssatzes

$$\text{Beim internen Zinssatz gilt: } NPV_{2023}^* = 0 \quad (1 \text{ Punkt})$$

Für das hier betrachtete Investitionsbeispiel gilt (4 Punkte (je richtigen Term 1 Punkt)):

$$NPV_{2023}^* = -PI_{P,2023} - \frac{PI_{S,\text{Juni } 2023}}{(1+i^*)^{0,5}} + \frac{\frac{A_{\text{Strom},2024}}{CRF_{10}^*} + \frac{A_{\text{Strom},2034}}{CRF_{10}^* \cdot (1+i^*)^{10}}}{1+i^*} - \frac{\frac{k^*(1-k^*20)}{1-k^*} FC_{\text{OMC},2024}}{1+i^*} = 0$$

18. Wärmeübertragernetzwerke 30 Punkte

Die folgenden sechs Stoffströme sollen zu einem Wärmeübertragernetzwerk verbunden werden.

Nr.	T_{ein} [°C]	T_{aus} [°C]	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	$\dot{m}\Delta h^{\text{LV}}$ [kW]
1	40	80	1	-
2	130	40	3	-
3	250	60	3	-
4	160	160	-	60
5	40	220	4	-
6	110	180	2	-

- Die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung liegt bei $\Delta T_{\text{min}} = 20 \text{ K}$.
- Strom 4 soll bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung kondensiert werden.
- Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten der Ströme wird vernachlässigt.
- Alle Wärmeübertrager werden im Gegenstrom betrieben.
- Druckverluste werden vernachlässigt.

Hinweis für alle Unteraufgaben: Sollten Sie die Reserven nutzen, kennzeichnen Sie jeweils die endgültige Variante eindeutig.

Aufgaben

- (a) **(10 Punkte)** Bestimmen Sie den minimalen externen Heizbedarf $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$ und den minimalen externen Kühlbedarf $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$ mit Hilfe der Wärmekaskade sowie alle Pinchtemperaturen für das Wärmeübertragernetzwerk rechnerisch. Verwenden Sie dafür die Tabelle.
- (b) **(6 Punkte)** Zeichnen Sie das Wärmestromprofil (Grand Composite Curve) in das Koordinatensystem der Abbildung. Bestimmen Sie die benötigte Mindesttemperatur der externen Wärmequelle $T_{\text{HU,min}}$ sowie die zulässige Maximaltemperatur der externen Wärmesenke $T_{\text{CU,max}}$ mit Hilfe der Grafik, sofern externe Quellen oder Senken auftreten. Markieren Sie weiterhin Bereiche mit interner Wärmerückgewinnung, sofern diese auftreten.
- (c) **(5 Punkte)** Ein zusätzlicher Strom soll integriert werden. Es stehen zwei Ströme zur Auswahl:
- Strom A, welcher bei einer konstanten Temperatur von 80 °C und einer Wärmeleistung von 40 kW verdampft wird.
 - Strom B, welcher bei einer konstanten Temperatur von 70 °C und einer Wärmeleistung von 30 kW kondensiert wird.

Entscheiden Sie sich für einen Strom und begründen Sie ihre Entscheidung stichpunktartig. Zeichnen Sie in Ihr Wärmestromprofil die Änderungen ein, die sich durch die zusätzliche Integration des Stroms ergeben. Treffen Sie ggf. [WORT STREICHEN] Aussagen zum Verhalten der Größen $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$, $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$, $T_{\text{HU,min}}$ und $T_{\text{CU,max}}$ (steigt / sinkt / bleibt gleich).

- (d) **(9 Punkte)** Ergänzen Sie den Entwurf für ein System mit maximaler Energierückgewinnung (MER-System), welches keine Pinch-Regel verletzt. Nutzen Sie dafür die vorgegebene Darstellung der Ströme. Markieren Sie alle notwendigen Wärmeübertrager mit dem jeweils übertragenen Wärmestrom und den entsprechenden Zwischentemperaturen und sofern vorhanden die externe Wärmequelle und -senke.

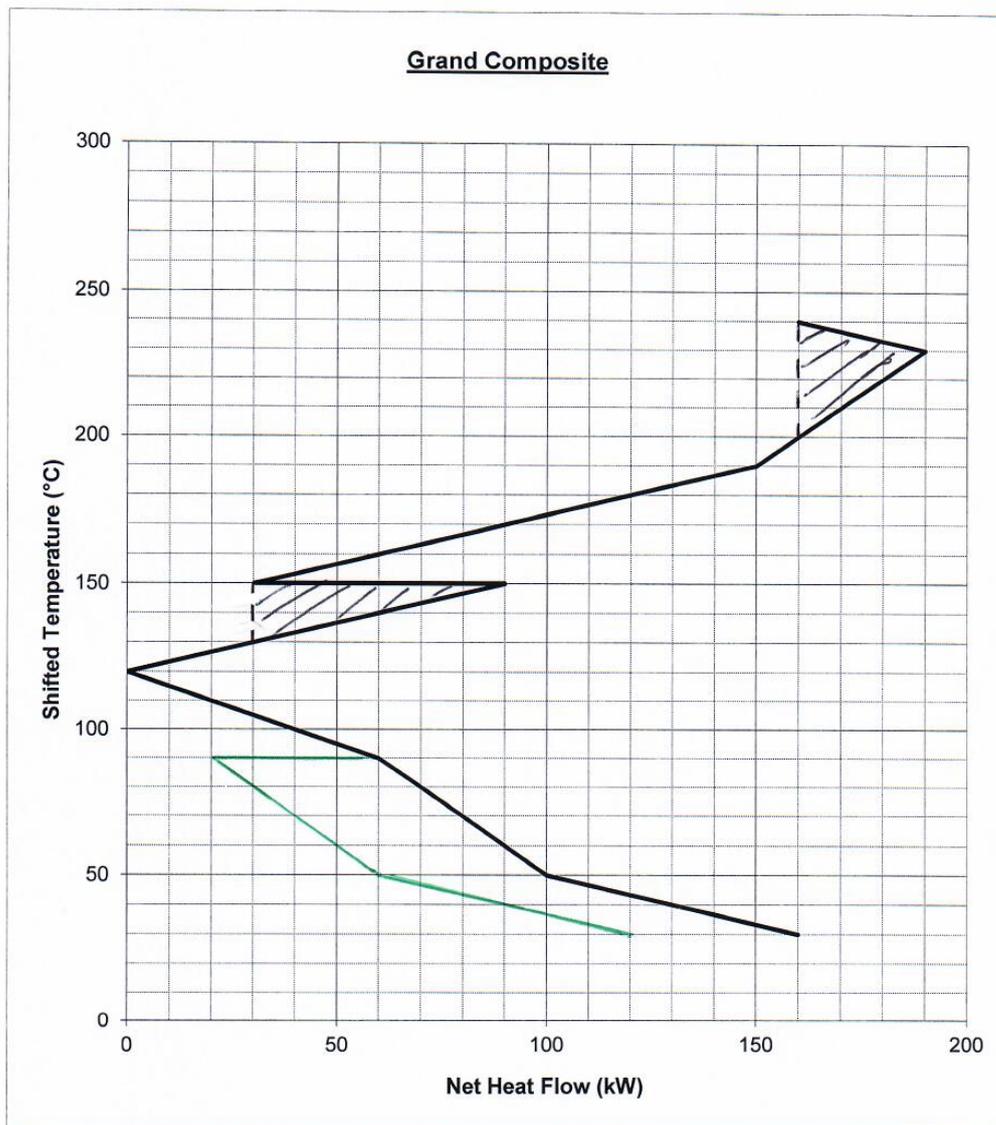
Intervall Nr.	angepasste Temperaturen [°C]	$\sum \dot{m}_i c_{p,i}$ [kW/K]	\dot{Q}_i [kW]	$\Delta \dot{Q}_i$ [kW]	$\Delta \dot{Q}_i^*$ [kW]
I	240	-3	-30	0	-160
II	230	1	40	-30	-190
III	190	3	120	10	-150
IV	150	-	-60	130	-30
V	150	3	90	70	-90
VI	120	-2	-60	<u>160</u>	0
VII	90	-1	-40	100	-60
VIII	50	-3	-60	60	-100
IX	30	-3	-60	0	-160
	(1)		(4)	(1)	(1)

$\dot{Q}_{H, \min} = 160 \text{ kW}$ (1)

$\dot{Q}_{C, \min} = 160 \text{ kW}$ (1)

$T_p^* = 120^\circ\text{C} \Rightarrow T_p = 110/130^\circ\text{C}$ (1)

$\Sigma 10$



0.5 pro ZÄ (4)

/// inst WRG (1) (26)

$$T_{H, \min}^* = 200^\circ\text{C} \Rightarrow T_{H, \min} = 210^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$T_{C, \max}^* = 30^\circ\text{C} \Rightarrow T_{C, \max} = 20^\circ\text{C}$$

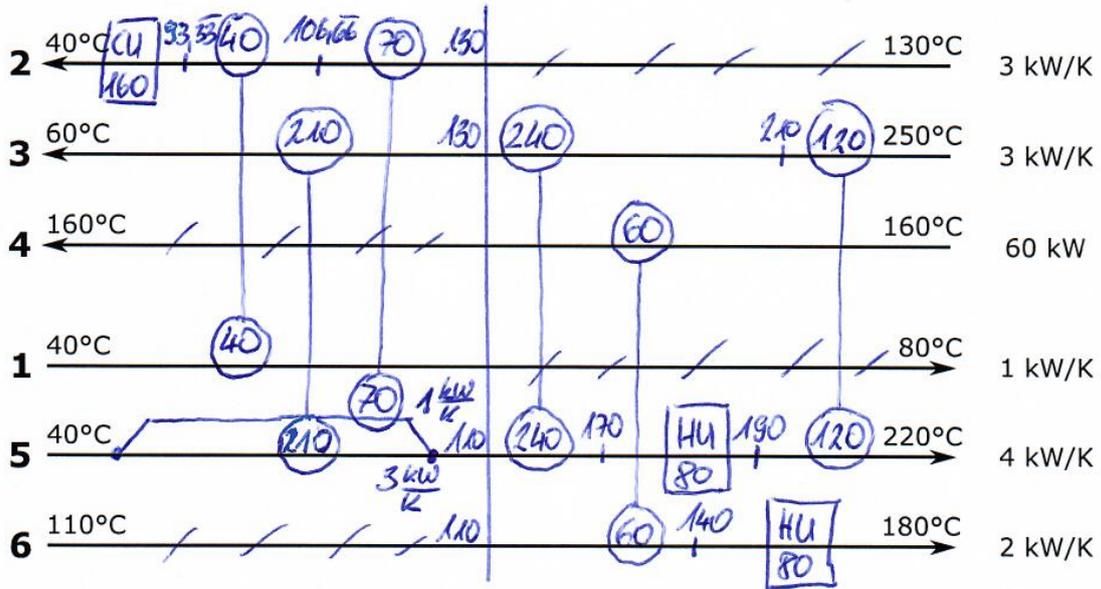
Integration: • Entscheidung für A, da unterhalb auch mit Wärmeabfuhr integriert werden sollte (B wäre Wärmezufuhr) (1)

• Q_{cu} sinkt, Q_{cu} bleibt gleich (1)

• $T_{H, \min}$ u. $T_{C, \max}$ bleibt gleich (1)

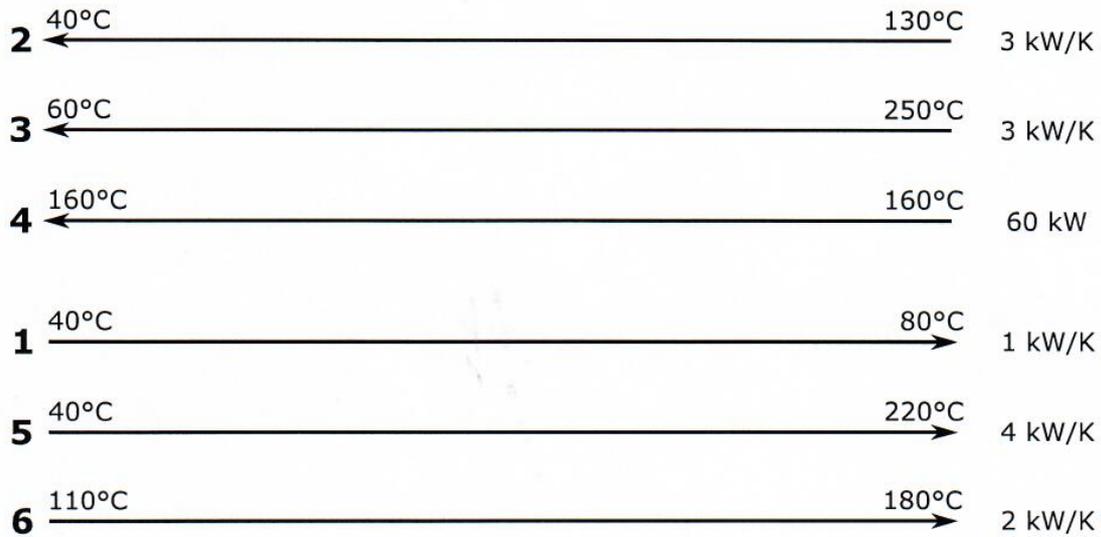
• Einzeichnen (2)

(25)



je Wü: 1P

$\Sigma 9$

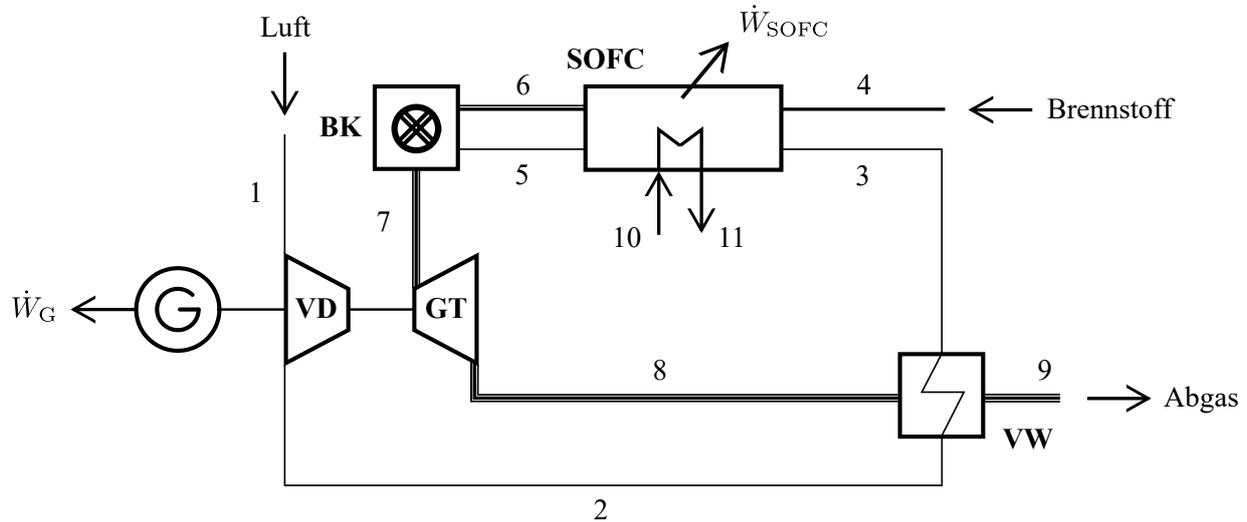


H_2020

Teilgebiet	Thema	Punkte	
		ET I	ET II
		8 oder 9 LP	8 LP
Theorie, Fundamental	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	50	50
	Exergie	18	24
	Wirtschaftlichkeit	8	
	Verbrennung I	8	8
Theorie, Rest	Energieträger	6	
	Dampfkraftwerke	12	
	Gasturbinen	12	
	KWK	6	
	Fossile Brennstoffe	6	
	Dampferzeuger		7
	Kombikraftwerke		8
	Erneuerbare Energien		5
	Alternative Brennstoffe		10
	Chemisches GGW		6
Wärmeübertrager		8	
Rechenteil	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	80	80
	Exergie	44	44
	a	5	5
	b	7	7
	c	5	5
	d	3	3
	e	4	4
	f	8	8
	g	2	2
	h	5	5
	i	5	
	j		5
	Wirtschaftlichkeit	30	
	WÜ-Netz		30

1. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse - Teil A 18 Punkte

Das Fließbild zeigt das vereinfachte Schema eines Brennstoffzellen-Hybridkraftwerks. Der gasförmige Brennstoff wird mit verdichteter und vorgewärmter Luft in einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC) unvollständig umgesetzt. Das wasserstoffhaltige Anodengas (Strom 6) wird anschließend mit dem sauerstoffhaltigen Kathodengas (Strom 5) in einer Brennkammer (BK) verbrannt und der Rauchgasstrom (Strom 7) in einer Gasturbine entspannt. Ströme 5 und 6 liegen bei einer hohen Temperatur vor. Alle Komponenten sind nach außen adiabat. Die thermische Energie aus der Kühlung der SOFC (Ströme 10, 11) wird weiter genutzt.



- (a) (4 Punkte) Nennen Sie die Ursachen für Exergievernichtung in der Brennkammer.

- (b) (3 Punkte) Stellen Sie die Exergiebilanz für den stationären Betrieb des Gesamtsystems auf.

- (c) (2 Punkte) Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad ε_{tot} des Gesamtsystems.

- (d) (2 Punkte) Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad $\varepsilon_{\text{SOFC}}$ der Komponente Brennstoffzelle (SOFC). Eine Aufteilung der Exergieströme in physikalische und chemische Exergie ist

möglich, aber nicht zwingend notwendig.



- (e) **(1 Punkt)** Der Vorwärmer (VW) ist als Rekuperator ausgeführt. Nennen Sie den Unterschied in der Betriebsweise von Rekuperatoren und Regeneratoren.

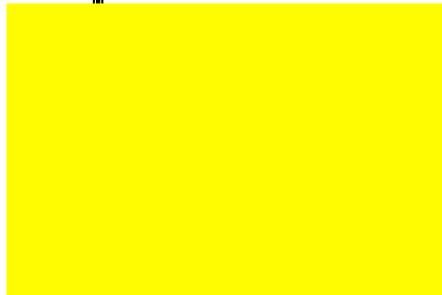


- (f) **(2 Punkte)** Im Rahmen einer erweiterten Exergieanalyse kann die Exergievernichtung in einzelnen Komponenten weiter unterteilt werden. Nennen Sie eine Möglichkeit zur Aufteilung der Exergievernichtung in einer einzelnen Anlagenkomponente.



- (g) **(4 Punkte)** Formulieren Sie für die exergoökonomische Analyse die Kostenbilanz für die Gasturbine (GT) und geben Sie alle notwendigen Hilfsbeziehungen sowie die Zielgröße an.

|||

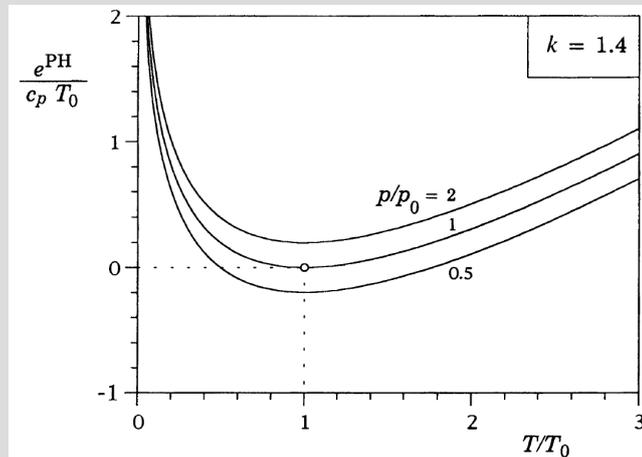


2. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse - Teil B6 Punkte

- (a) (6 Punkte) Kann die spezifische physikalische Exergie eines Stoffstroms negativ werden? Erläutern Sie den Zusammenhang stichpunktartig anhand eines Beispiels, Diagramms oder einer anderen geeigneten Darstellung.

Begründung: Ja (1 Pkt.), e^{PH} kann für $p/p_0 < 1$ (1 Pkt.) negativ werden, da dann Arbeit aufgewendet werden muss, um den Stoffstrom auf p_0 zu bringen (1 Pkt.).

Mögliches Beispieldiagramm:



3 Pkt. Diagramm (Achsen korrekt, Isobare $p/p_0 < 1$ richtig mit $e^{\text{PH}} < 0$, Isobare durch $e^{\text{PH}} = 0$ mit $p/p_0 = T/T_0 = 1$ oder vergleichbare Darstellung)

Weitere Darstellungsmöglichkeiten siehe bspw. Übung 4 „Vertiefung zur physikalischen Exergie“.

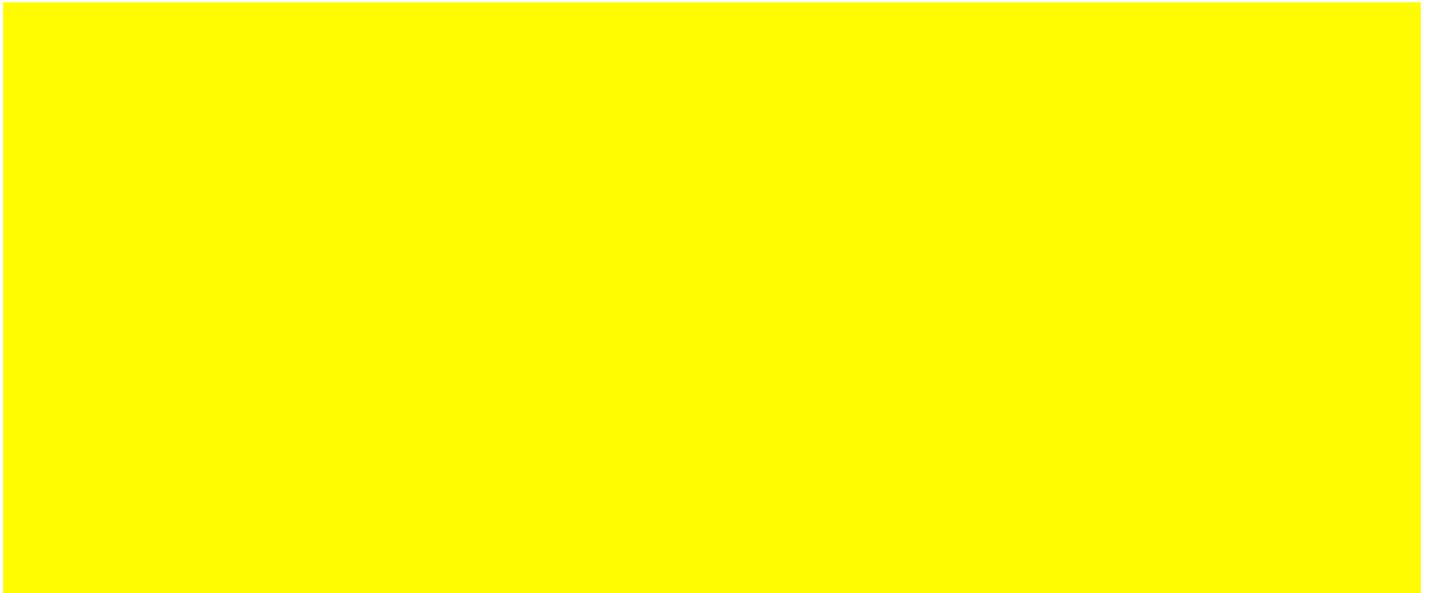
3. Verbrennung 8 Punkte

Die Reaktion von Ammoniak mit Sauerstoff zu Stickstoff und Wasser kann ein zentraler Bestandteil in einem auf Wasserstoff basierenden Energiesystem sein.

- (a) **(2 Punkte)** Formulieren Sie die Reaktionsgleichung und bestimmen Sie die stöchiometrischen Koeffizienten für die Reaktion von 1 mol Ammoniak.



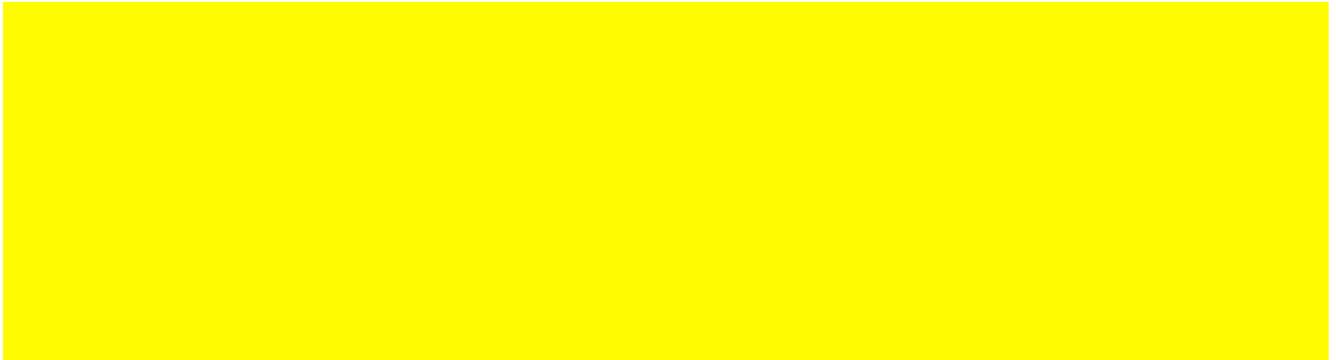
- (b) **(6 Punkte)** Berechnen Sie den massenspezifischen Heizwert für die Verbrennung von Ammoniak.



4. Wirtschaftlichkeitsanalyse 8 Punkte

(a) **(6 Punkte)** Erläutern Sie stichpunktartig die folgenden Begriffe:

- Gegenwartswert
- Annuität
- Kostensteigerung

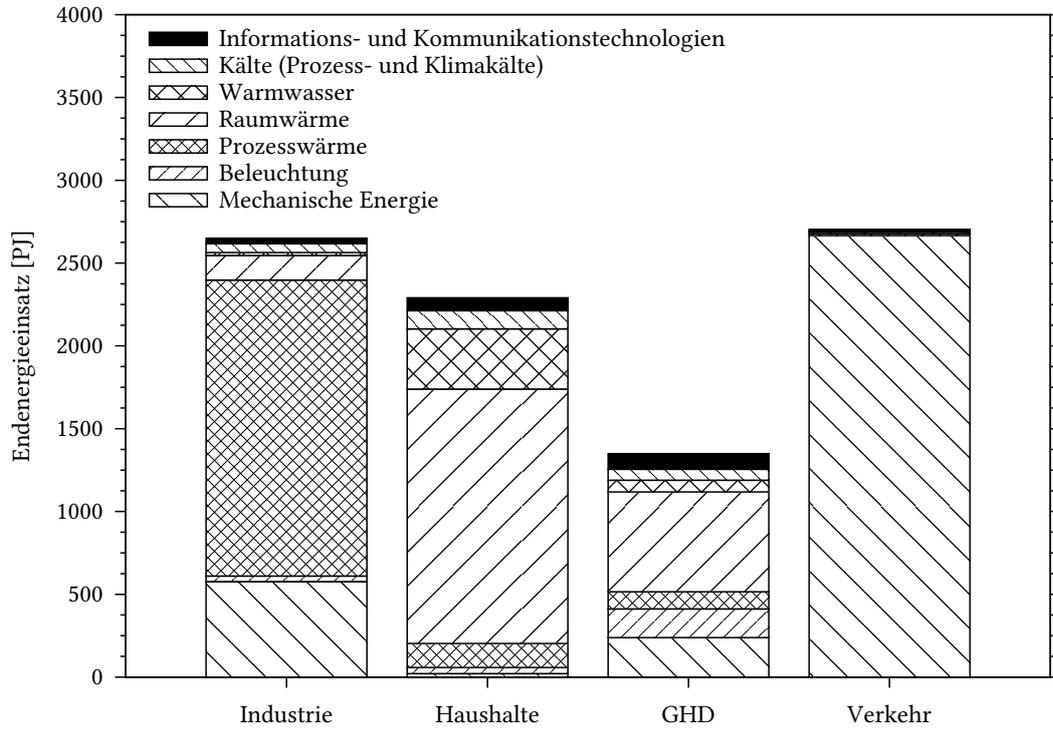


(b) **(2 Punkte)** Formulieren Sie den Zusammenhang zwischen dem Zeitwert des Geldes, dem Gegenwartswert und der Annuität einer Zahlung.



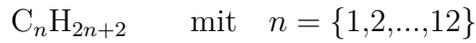
5. Energieträger 6 Punkte

(a) **(6 Punkte)** Dargestellt ist der Endenergieeinsatz in Deutschland. Treffen Sie für quantitativ relevante Bereiche eine Aussage hinsichtlich der in diesen Bereichen verwendeten Primärenergieträger und diskutieren Sie damit die Herausforderungen bei der Transformation der Energieversorgung.

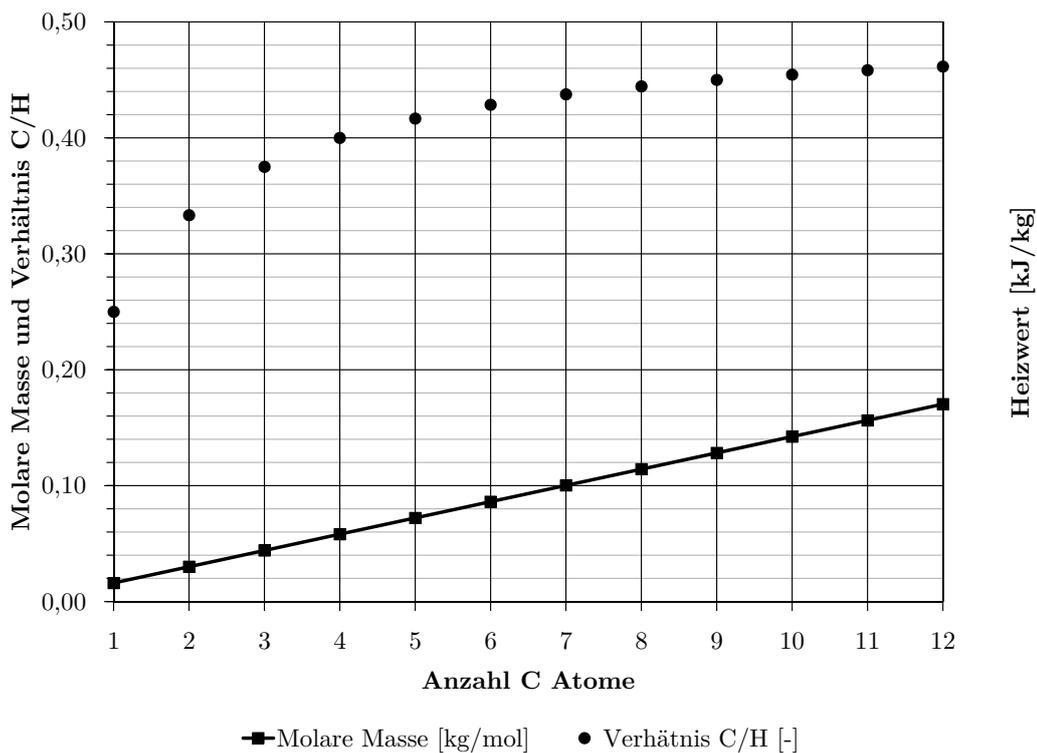
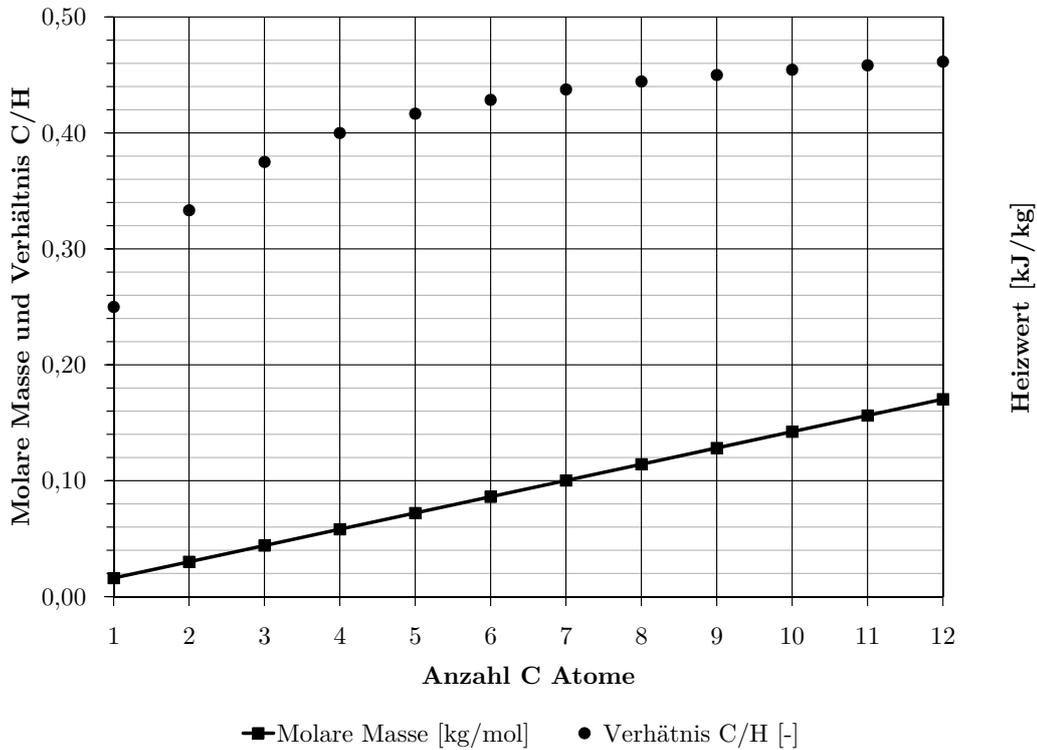


6. Fossile Brennstoffe 6 Punkte

(a) (4 Punkte) Betrachtet wird die Reihe der n-Alkane (Methan, Ethan, Propan usw.) mit aufsteigender Anzahl an C-Atomen mit der folgenden allgemeinen Summenformel.



Zeichnen Sie in das vorgegebene Diagramm den qualitativen Verlauf des massenspezifischen Heizwertes ein. Erläutern Sie stichpunktartig die Gründe für diesen Verlauf. Sollten Sie die Reserve nutzen, markieren Sie Ihre endgültige Lösung eindeutig.



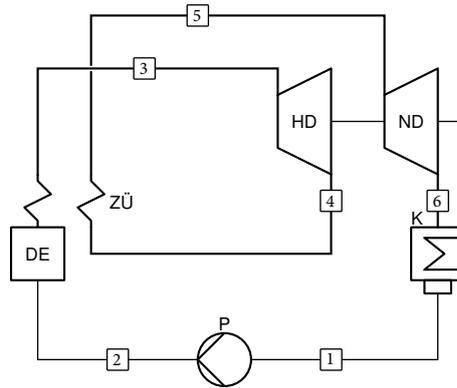


- (b) **(2 Punkte)** Welche Größe kann zur Klassifizierung von Heizölen genutzt werden? Begründen Sie stichpunktartig.



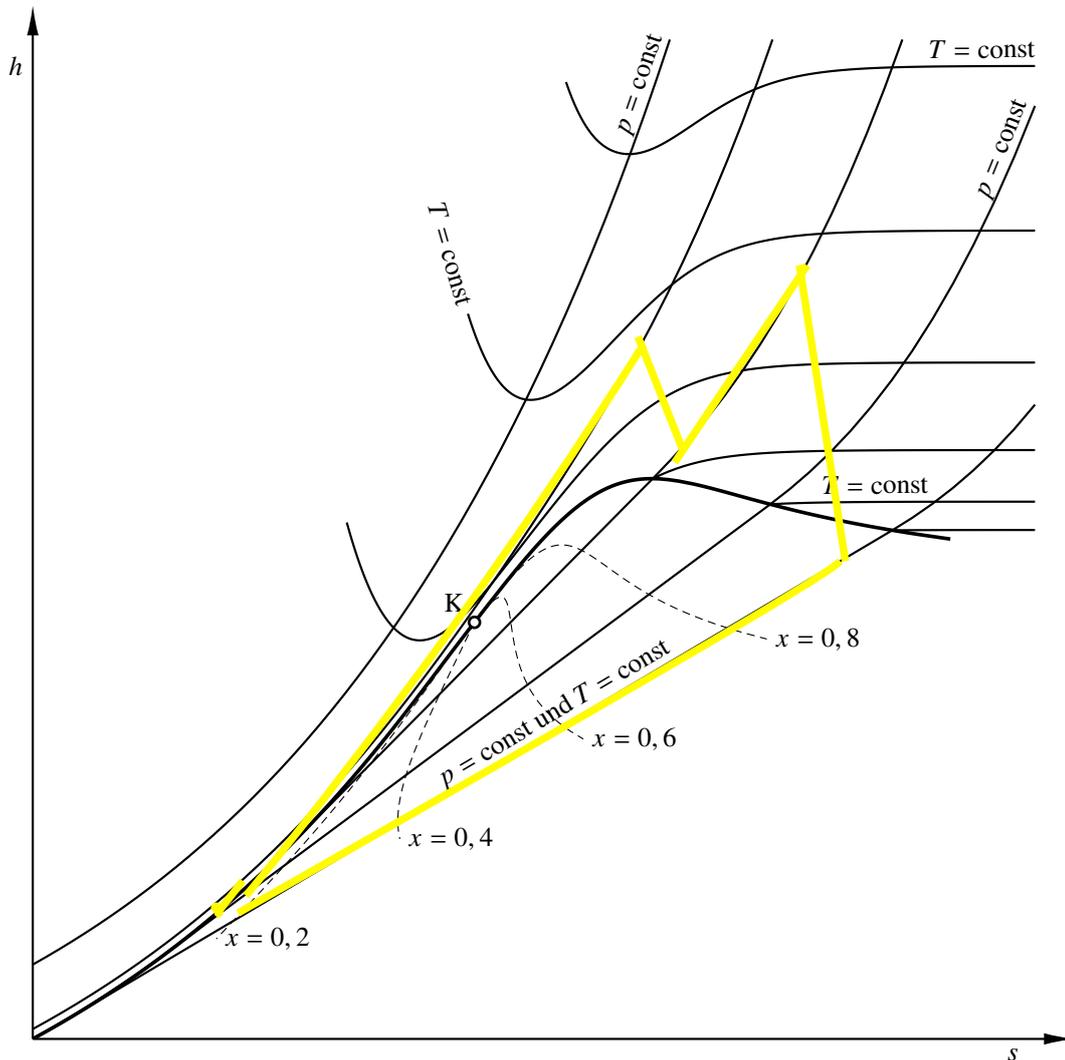
7. Dampfkraftwerke 12 Punkte

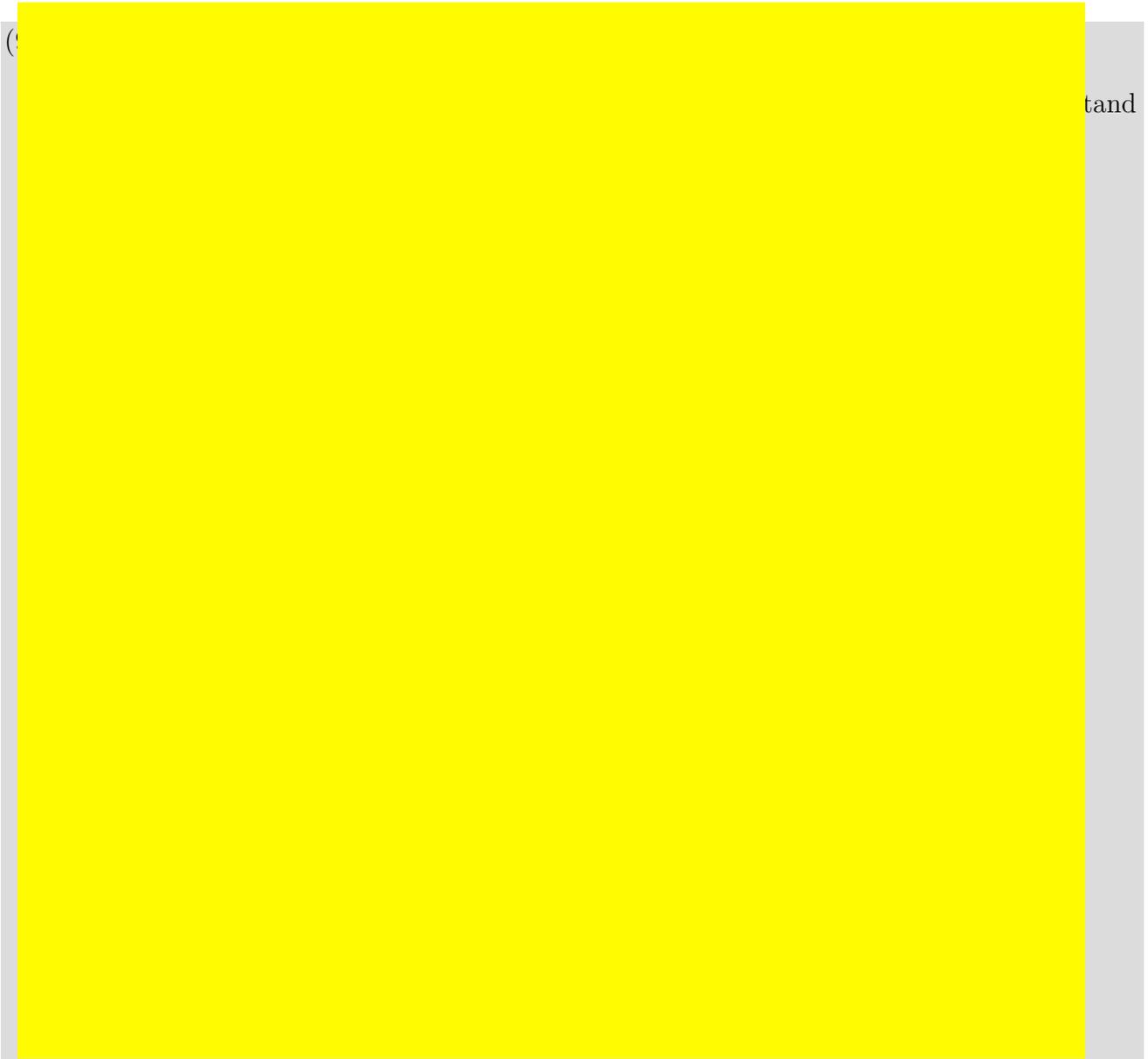
(a) (9 Punkte) Dargestellt ist ein Dampfkraftprozess mit einfacher Zwischenüberhitzung. Zeichnen Sie die Zustandsänderungen in das h,s -Diagramm ein und kennzeichnen Sie die Beträge der spezifischen Prozessgrößen Wärme und Arbeit aller Komponenten.



Es gelten folgende Annahmen:

- Alle Komponenten sind nach außen adiabatisch.
- Die Wärmeübertragung erfolgt isobar.
- Der Prozess weist überkritische Frischdampfparameter auf.
- Die Entspannung des Arbeitsmittels in den Turbinenstufen erfolgt irreversibel.
- Die Entspannung in der Niederdruckturbinen erfolgt bis in das Nassdampfgebiet.
- Das Arbeitsmedium verlässt den Kondensator als siedende Flüssigkeit.

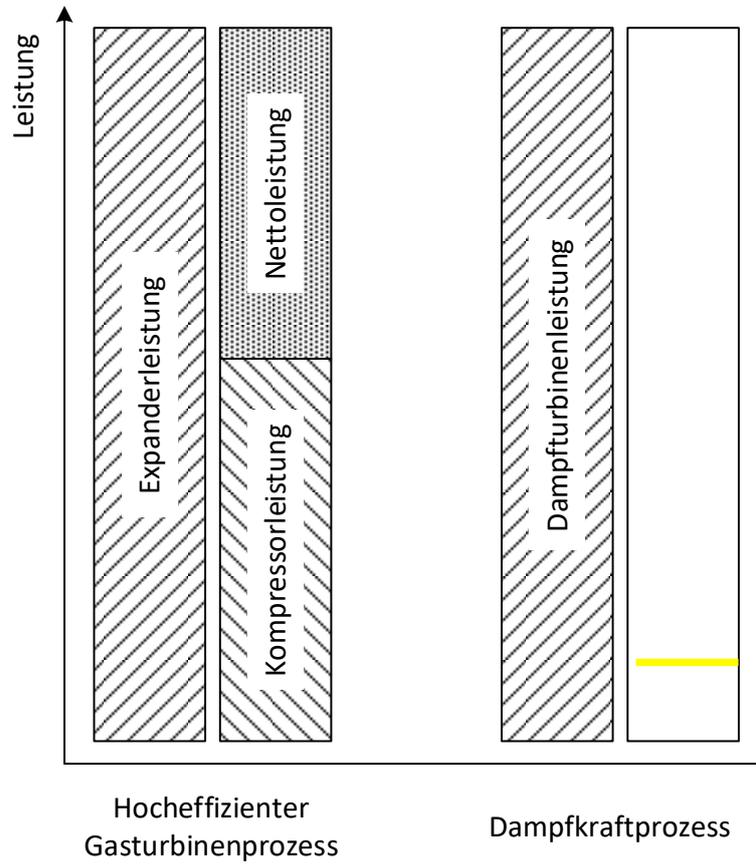




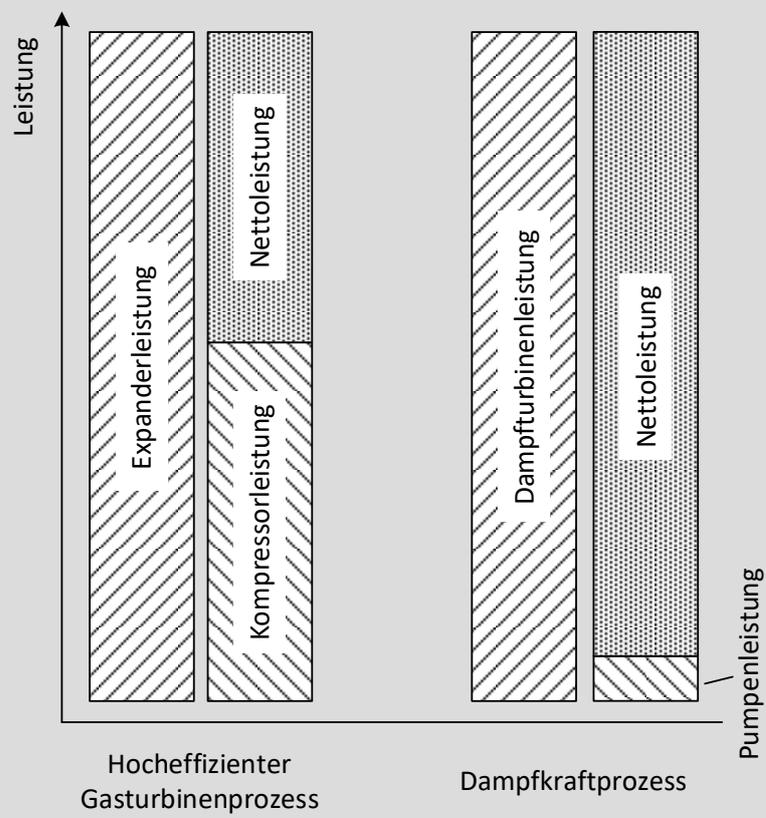
- (b) **(2 Punkte)** Führt eine Zwischenüberhitzung **stets** zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades? Begründen Sie Ihre Antwort.



- (c) **(1 Punkt)** Auf der linken Seite der folgenden Abbildung ist die Expanderleistung eines Gasturbinenprozesses dargestellt sowie die Kompressor- und Nettoleistung des Prozesses. Auf der rechten Seite ist die Leistung der Dampfturbine eines Dampfkraftprozesses dargestellt. Zeichnen Sie analog zum Gasturbinenprozess qualitativ das Verhältnis aus Netto- und Pumpenleistung des Dampfkraftprozesses ein.

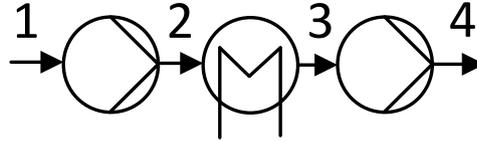


(1 Punkt)



8. Gasturbinen 12 Punkte

- (a) **(5 Punkte)** Der Verdichter eines einfachen offenen Gasturbinenprozesses (Verdichter, Brennkammer, Expander) wird durch einen zweistufigen Verdichter mit Zwischenkühlung ersetzt, siehe Abbildung. Der Prozess wird so geführt, dass der thermodynamische Zustand am Expandereintritt sich durch diese Maßnahme nicht verändert. Welche gegenläufigen Effekte resultieren hieraus, bezogen auf den Wirkungsgrad des Gesamtprozesses?



- (b) **(2 Punkte)** Der Luftmassenstrom in der obigen Abbildung soll von $p_1 = 1$ bar auf $p_4 = 16$ bar verdichtet werden. Dabei gilt $T_1 = T_3$. Die spezifische Verdichterleistung soll minimiert werden. Wie groß ist dann das Druckverhältnis des ersten Verdichters?

- (c) **(1 Punkt)** Nun soll der Wirkungsgrad des Gasturbinenprozesses maximiert werden. Bei gleichbleibenden Expandereintrittszustand ...

- erhöht sich das Druckverhältnis des ersten Verdichters.
 verringert sich das Druckverhältnis des ersten Verdichters.
 bleibt das Druckverhältnis des ersten Verdichters gleich.

Kreuzen Sie die richtige Aussage an. Erläutern Sie wenn notwendig ihre Auswahl.

- (d) **(2 Punkte)** Wird der einfache offene Gasturbinenprozess in der Regel zur Deckung der Grund-, Mittel- oder Spitzenlast eingesetzt? Begründen Sie Ihre Antwort.

- (e) **(2 Punkte)** Nennen Sie zwei Maßnahmen, mit denen sich der Wirkungsgrad eines einfachen offenen Gasturbinenprozesses deutlich steigern lässt?



9. Kraftwärme-Kopplungsanlagen 6 Punkte

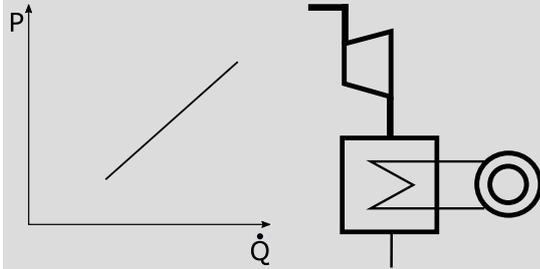
- (a) **(6 Punkte)** Zeichnen Sie den relevanten Fließbildausschnitt einer Kraftwärme-Kopplungsanlage mit Gegendruckturbine sowie den Verlauf im P, \dot{Q} -Diagramm.

2 Pkt. Gegendrucklinie im P, \dot{Q} -Diagramm.

2 für Abfolge Turbine und Kondensator

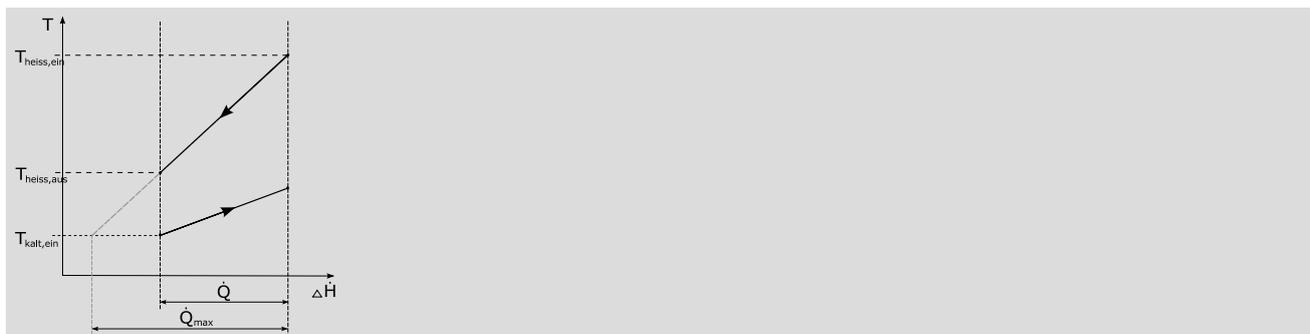
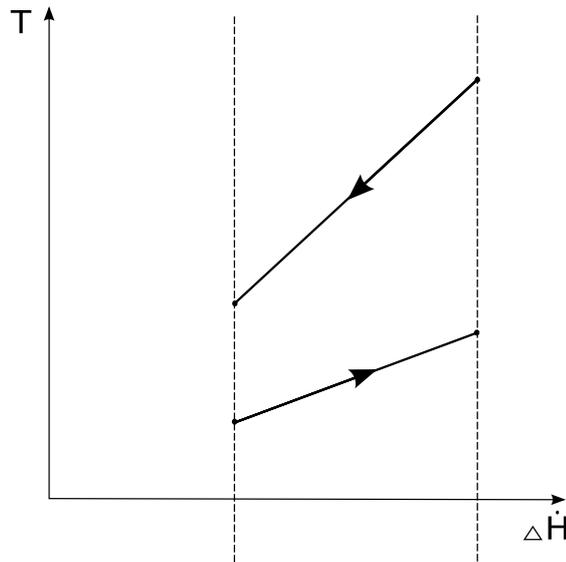
1 für Wärmeauskopplung im Kondensator

1 für Beschriftung



10. Wärmeübertrager 8 Punkte

(a) **(3 Punkte)** Die Abbildung zeigt das Temperaturprofil eines Gegenstrom-Wärmeübertragers. Kennzeichnen Sie im Diagramm die Größen, die für die Berechnung der Effektivität benötigt werden. Beschriften Sie eindeutig.



(1 Punkt) \dot{Q}_{\max}

je (0,5 Punkte) \dot{Q} , $T_{\text{kalt,ein}}$, $T_{\text{heiß,ein}}$, $T_{\text{heiß,aus}}$ (oder $T_{\text{kalt,aus}}$)

(b) **(2 Punkte)** Definieren Sie die Effektivität des dargestellten Wärmeübertragers

(1 Punkt) wenn nur mit \dot{Q} ; (2 Punkte) wenn ausführlich; im Zähler kann auch die kalte Seite genutzt werden

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{\text{heiß}}(T_{\text{heiß,ein}} - T_{\text{heiß,aus}})}{(\dot{m}c_p)_{\text{heiß}}(T_{\text{heiß,ein}} - T_{\text{kalt,ein}})}$$

(c) **(3 Punkte)** Bei sonst unveränderten Werten von $\dot{m}_{\text{heiß}}$, $c_{p,\text{kalt}} = \text{const}$, $c_{p,\text{heiß}} = \text{const}$, $\dot{H}_{\text{heiß,ein}}$, $\dot{H}_{\text{heiß,aus}}$ und $T_{\text{kalt,ein}}$ wird der Massenstrom der kalten Seite erhöht. Wird die Effektivität des Wärmeübertragers dadurch größer, kleiner oder bleibt sie konstant. Begründen Sie ihre Aussage stichpunktartig.

da $\Delta\dot{H}_{\text{heiß}} = \text{const} \Rightarrow \dot{Q} = \text{const}$

gleichzeitig $c_{p,\text{kalt}}$ und $T_{\text{kalt,ein}}$ unverändert

somit sinkt $T_{\text{kalt,aus}}$ bei steigendem Massenstrom \dot{m}_{kalt}

minimaler Wärmekapazitätsstrom weiterhin $\dot{C}_{\text{heiß}}$

$$\Rightarrow \epsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \text{const}$$

11. Dampferzeuger7 Punkte

- (a) **(2 Punkte)** Worauf ist die notwendige Mindestlast bei Zwangsdurchlauf-Dampferzeugern zurückzuführen?

Der Massenstrom des Dampferzeugers ändert sich bei Zwangsdurchlauf-Dampferzeugern linear mit der Last. Um die Kühlung der Rohre sicherzustellen, muss der Mindestmassenstrom und folglich die Mindestlast eingehalten werden.

- (b) **(2 Punkte)** Naturumlaufdampferzeuger haben in der Regel längere Anfahrzeiten im Vergleich zu Zwangsdurchlauf-Dampferzeugern. Erläutern Sie die primäre Ursache für diesen Unterschied.

Die zulässige Temperaturtransienten der dickwandigen Trommel limitieren die Laständerungsgeschwindigkeit von Naturumlaufverdampfern. (1 Punkt für Bezug auf Temperaturänderung, 1 Punkt für Nennung der Bauteils Trommel)

- (c) **(1 Punkt)** Moderne Dampfkraftwerke weisen Frischdampfdrücke von ca. 300 bar auf. Welche Dampferzeuger eignen sich für diesen Einsatz?

Zwangsdurchlauf-Dampferzeuger

- (d) **(1 Punkt)** In welchem der drei Wärmeübertrager Economizer, Verdampfer und Überhitzer können die höchsten Wärmestromdichten realisiert werden?

Verdampfer

- (e) **(1 Punkt)** Verdampferrohre können aufgrund der zweiphasigen Strömung eine instabile Durchflusskennlinie aufweisen. Durch welche Maßnahme kann dies verhindert werden?

Einbau von Strömungswiderständen (Blenden)

12. Kombianlagen mit Kohleeinsatz 8 Punkte

- (a) **(1 Punkt)** Weshalb können unter Druck stehende Verbrennungsgase der Kohlefeuerung nicht direkt in einer Gasturbine bei den heute üblichen Gasturbinentemperaturen entspannt werden?

Geschmolzene Asche und weitere korrosive Rauchgasbestandteile würden Gasturbine beschädigen.

- (b) **(1 Punkt)** Welcher weitere Grund besteht bei der Druckwirbelschichtfeuerung zur Reduzierung der Verbrennungstemperatur auf unter 900 °C?

Sicherstellung des notwendigen (temperaturabhängigen) Umsatzes des im Brennstoff enthaltenen Schwefels mit dem zugegebenen Calciumcarbonat CaCO_3 zu Calciumsulfat CaSO_4

- (c) **(2 Punkte)** Nennen Sie für die Druckwirbelschichtfeuerung zwei Möglichkeiten zur Reduzierung der Temperaturen im Brennraum.

- Verbrennung mit hohem Luftüberschuss
- Wärmeabfuhr an Dampfkraftprozess

- (d) **(2 Punkte)** Nennen Sie neben der Druckwirbelschichtfeuerung zwei prinzipiell weitere Möglichkeiten, wie mittels des Energieträgers Kohle thermische Energie für ein Gasturbinensystem bereitgestellt werden könnte (es ist keine vollständige Prozessbeschreibung gefordert).

- Kohlevergasung (und anschließende Gaswäsche)
- Kohlefeuerung und Abgabe thermischer Energie an weiteren Gasstrom mittels Heißgaswärmeübertrager

- (e) **(2 Punkte)** Welcher Kombiprozess eignet sich besonders, wenn eine CO_2 -Abscheidung vorgesehen ist? Begründen Sie Ihre Antwort.

Kohledruckvergasung (Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC) (1 Punkt)
Im IGCC mit vorheriger Luftzerlegung fällt ein Produktgas mit vergleichsweise hohem CO_2 -Konzentration an, was eine effiziente Abscheidung ermöglicht. (1 Punkt)

13. Alternative Brennstoffe 10 Punkte

(a) (6 Punkte) Die energetischen Umwandlungstechniken für Biomasse können in vier verschiedene Verfahrensarten unterteilt werden. Nennen Sie hiervon drei Verfahrensarten mit jeweils einem Beispiel.

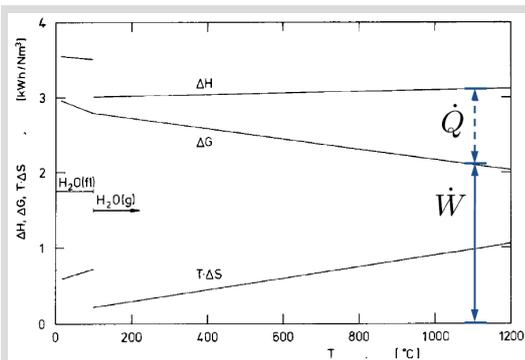
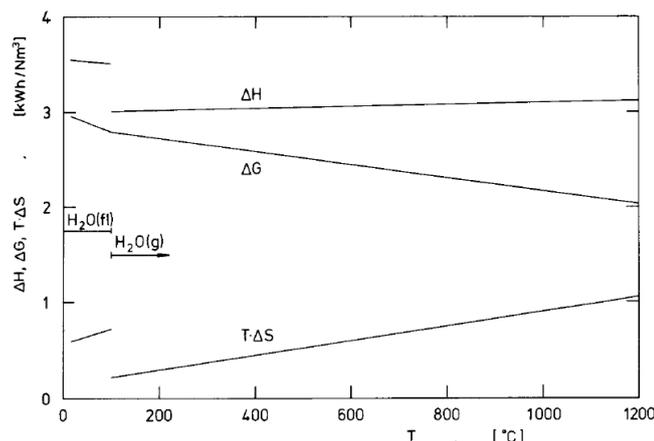
je 1 Pkt. pro Verfahrensart und 1 Pkt. pro Beispiel; max. 3 Verfahren und zugehörig je max. 1 Beispiel

- physikalische Verfahren (z.B. Brikettierung, Pressen von Ölsaaten, Pellets),
- chemische Verfahren (z. B. lösemittelweise Extraktion von Pflanzenöl),
- thermochemische Verfahren (z.B. Verbrennung, Vergasung) und
- biologische Verfahren (Biogasanlagen, Ethanolherstellung).

(b) (4 Punkte) Das Diagramm zeigt die Temperaturabhängigkeit von ΔH , ΔG und $T\Delta S$ bei der Wasserelektrolyse. Es gilt

$$T\Delta S = \Delta H - \Delta G \tag{6}$$

Die freie Reaktionsenthalpie ΔG muss dabei in Form von elektrischer Energie zugeführt werden. Erläutern Sie anhand dessen kurz den Vorteil der Hochtemperatur-Elektrolyse und nennen Sie die Art der genutzten Elektrolyte sowie den Temperaturbereich.



$$\dot{Q} = T\Delta S = \Delta H - \Delta G$$

Vorteil: Es muss weniger Energie in Form von (teurer) elektrischer Energie in den Prozess eingekoppelt werden (ΔG). Stattdessen kann ein größerer Teil durch Wärme gedeckt werden ($T\Delta S$). (2 Pkt.)

Elektrolyt: feste keramische Elektrolyte (1 Pkt.)

Temperaturbereich: 700 °C to 1000 °C (1 Pkt.)

14. Erneuerbare Energieträger 5 Punkte

- (a) **(2 Punkte)** Welche grundlegenden Anlagenkomponenten werden für ein solarthermisches Kraftwerk benötigt?

Solarkollektor mit möglichst hohem Konzentrationsfaktor

Wärmekraftmaschine (Rankine- oder Brayton-Prozess) alternativ: Dampferzeuger, Dampfturbine, Kondensator, Pumpe bzw: Verdichter, Wärmeübertrager, Expander

- (b) **(3 Punkte)** Nennen Sie drei thermische Verlustarten, die in einem solarthermischen Kraftwerk auftreten. Kennzeichnen Sie jede Verlustart (ja/nein), ob diese proportional zur Umgebungstemperatur ist.

pro Kombination 1 Punkt

Konvektion (ja), Wärmeleitung (ja), Strahlung (nein)

15. Chemisches Gleichgewicht6 Punkte

- (a) **(3 Punkte)** Charakterisieren Sie chemische Reaktionen hinsichtlich der Reaktionsenthalpie $\Delta \bar{h}_R$ und treffen Sie eine Aussagen darüber, welche dieser Reaktionen durch eine Temperaturverringereung thermodynamisch begünstigt wird.

(2 Punkte)

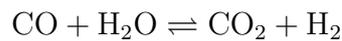
- $\Delta \bar{h}_R > 0$: endotherm

- $\Delta \bar{h}_R < 0$: exotherm

(1 Punkte)

Durch Temperaturverringereung werden exotherme Reaktionen begünstigt.

- (b) **(3 Punkte)** Trägt man die Gleichgewichtskonstante K_a der Konvertierungsreaktion

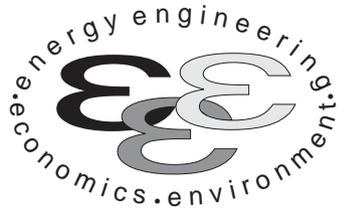


über die Temperatur in einem Diagramm auf, wird deutlich, dass diese bei niedrigen Temperaturen am größten ist. Warum wird in der Regel jedoch keine niedrigere Reaktionstemperatur gewählt, obwohl sich dies positiv auf die H_2 -Ausbeute auswirkt? Erläutern Sie die Zusammenhänge stichpunktartig.

-Reaktionsgeschwindigkeit ebenfalls temperaturabhängig, steigt mit der Temperatur

-starke Absenkung führt zu unwirtschaftlichen Verweilzeiten

-dadurch unwirtschaftlich große Reaktoren



Energietechnik – 30. September 2020
– MUSTERLÖSUNG –
Teil II – Rechenaufgaben

-
- Tragen Sie Ihren Namen und die Matrikelnummer ein.
 - Rechenwege müssen nachvollziehbar dargestellt werden. Nicht zu wertende Berechnungen oder Diagramme müssen durchgestrichen werden. Es ist leserlich zu schreiben.
 - Beschriften Sie die von Ihnen verwendeten Rechenblätter mit Namen und Matrikelnummer und nummerieren Sie die Seiten.
 - Bitte geben Sie alle Blätter nach der Bearbeitungszeit im gehefteten Zustand ab.
-

Name:	
Martikelnummer:	

Aufgabe:	16	17	18	Summe
Punktzahl:	49	30	30	109
Davon erreicht:				

16. Thermodynamische Analyse 49 Punkte

Die Abbildung zeigt das vereinfachte Fließbild einer Konzeptstudie zur Kombination von SOFC-Brennstoffzellen und Gasturbinen. Das zum Betrieb der Brennstoffzelle erforderliche wasserstoffreiche Synthesegas wird durch eine Dampfreformierung von Erdgas erzeugt.

Die Bruttoreaktionsgleichung lautet



Die Reaktion erfolgt partiell im Vorreformer, Komponente E, und findet außerdem in der Brennstoffzelle, Komponente F, statt (interne Reformierung). Der zur Dampfreformierung erforderliche Wasserdampf wird aus dem Brennstoffzellen- und Verbrennungsabgas zurückgewonnen.

Die Fließreihenfolge hierbei lautet:

13 → 14 → 15 → 16 → 17 → 18 → Kondensation von H₂O und Abtrennung aus den Rauchgasen → 20 → 21 → Verdampfung → Mischung mit CH₄ → 10 → 11 → partielle Reformierung im Vorreformer → 12 → interne Reformierung in der Brennstoffzelle.

Ein Teil der Kathodenabluft wird zum Heizen des Vorreformers herangezogen, Strom 6, und anschließend zum Brennstoffzelleneingang zurückgeführt. Die nicht oxidierten Bestandteile des Anodenabgases, Strom 13, werden in der nachgeschalteten Brennkammer, Komponente J, vollständig umgesetzt. Die dazu notwendige Verbrennungsluft wird dem Luftstrom 4 entnommen. Aufgrund der hohen Abgastemperatur nach der Brennkammer ist eine Schaufelkühlung des nachfolgend angeordneten Expanders, Komponente GT, erforderlich. Diese wird mittels Zugabe von Wasserdampf, Leitung 23, realisiert und ist zur Vereinfachung als Mischprozess, Komponente K, im Fließbild dargestellt.

Hinweis: Beachten Sie, dass an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Anlage chemische Reaktionen ablaufen, welche die Stoffmengenströme verändern. Daher stimmt die Summe der Stoffmengenströme der Edukte nicht immer mit der Summe der Stoffmengenströme der Produkte überein. Die in Tabelle 1 enthaltenen Enthalpiewerte sind bereits aufeinander abgestimmt.

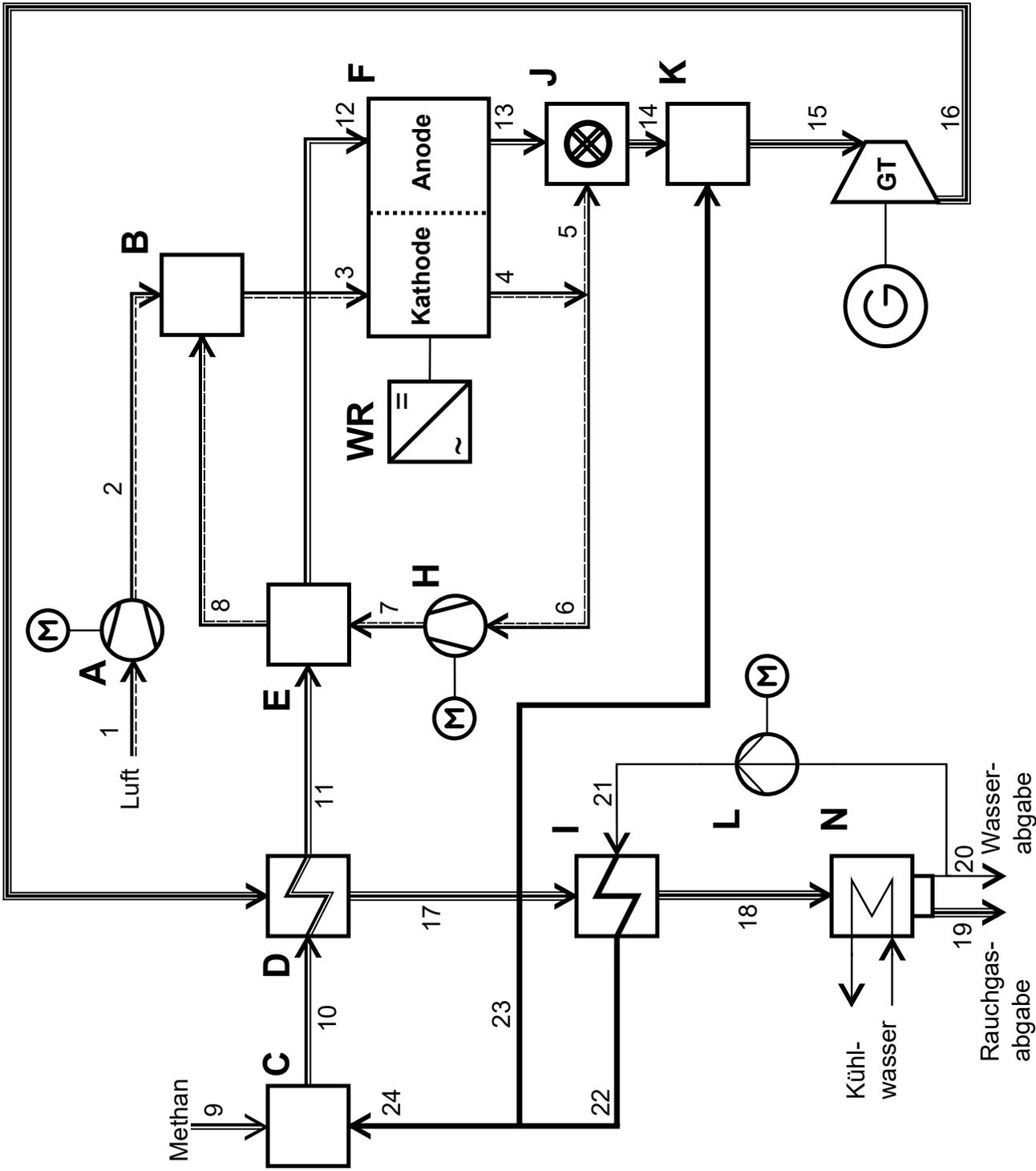
Annahmen und gegebene Werte

- Alle Komponenten arbeiten stationär.
- Kinetische und potentielle Energien können vernachlässigt werden.
- Die Wärmeverluste des Vorwärmers, Komponente D, betragen 2 % der bereitgestellten Energie und die des Expanders, Komponente GT, 1 %. Alle anderen Komponenten sind nach außen adiabatisch.
- Im Fließbild eingezeichnete Generatoren und Motoren weisen Wirkungsgrade von 98 % auf.
- Nach dem Wechselrichter werden $\dot{W}_{AC} = 366,1 \text{ MW}$ als Wechselstrom abgegeben.
- Der Elektromotor der Speisewasserpumpe, Komponente L benötigt $\dot{W}_L = 0,1 \text{ MW}$.
- Für eine ideale Expansion im Expander, Komponente GT, ergibt sich eine spezifische, molare Austrittsenthalpie von $\bar{h}_{16,s} = -104,42 \text{ MJ/kmol}$.
- Die Umgebungstemperatur beträgt $T_0 = 15 \text{ °C}$.

Legende:

- Luft
- == Brennbare Gase
- === Nicht brennbare Gase
- Dampf
- Wasser

- A** Kompressor
- B** Mischer
- C** Mischer
- D** Vorwärmer
- E** Vorreformer
- F** SOFC
- G** Generator
- H** Heißluftgebläse
- I** Verdampfer
- J** Brennkammer
- K** Mischer
- L** Speisewasserpumpe
- M** Motor
- N** Kondensator
- GT** Gasturbinen-Expander
- WR** Wechselrichter



- (a) **(5 Punkte)** Berechnen Sie den isentropen Wirkungsgrad $\eta_{s,T}$ des Expanders, Komponente GT. Gehen Sie davon aus, dass im Vorwärmer noch keine chemischen Umwandlungen stattfinden.
- (b) **(7 Punkte)** Bestimmen Sie die elektrische Leistung $\dot{W}_{el,G}$ des an den Expander angeschlossenen Generators sowie die elektrische Nettoleistung $\dot{W}_{el,netto}$ der Gesamtanlage.
- (c) **(5 Punkte)** Berechnen Sie den Heizwert des Methans mithilfe Ihrer Formelsammlung und ermitteln Sie den elektrischen Wirkungsgrad der Gesamtanlage.
Hinweis: Nutzen Sie $\overline{LHV}_{CH_4} = 800 \text{ MJ/kmol}$, falls Sie den Heizwert nicht berechnen können.
- (d) **(3 Punkte)** Formulieren Sie die Energiebilanz für den Vorreformer, Komponente E. Berechnen Sie den Stoffmengenstrom \dot{n}_{12} , der anodenseitig der Brennstoffzelle zugeführt wird.
- (e) **(4 Punkte)** Ermitteln Sie die Gleichstromabgabe \dot{W}_{DC} der Brennstoffzelle (Komponente F) und den Wirkungsgrad η_{WR} des Wechselrichters.
- (f) **(8 Punkte)** Berechnen Sie die Entropieerzeugung der Brennstoffzelle (Komponente F) und ermitteln Sie den exergetischen Wirkungsgrad ohne Berücksichtigung der Verluste des Wechselrichters.
- (g) **(2 Punkte)** Was ist im Hinblick auf die thermodynamische Güte der entscheidende Unterschied zwischen einer Brennstoffzelle und einer Wärmekraftmaschine?
- (h) **(5 Punkte)** Berechnen Sie den exergetischen Wirkungsgrad für den Kompressor, Komponente A inklusive Elektromotor zur Verdichtung der Umgebungsluft.
- (i) **(5 Punkte)** Ermitteln Sie die Exergievernichtung im Expander, Komponente GT. Betrachten Sie nur die Zustandsänderung 15→16 (ohne Schaufelkühlung, Mischer, Komponente K). Der Wärmeverluststrom des Expanders überschreitet die Systemgrenze bei der Temperatur T_0 .
- (j) **(5 Punkte)** Stellen Sie für die Brennstoffzelle eine Kostenbilanz auf, wie sie in der exergoökonomischen Analyse benötigt wird. Geben Sie alle erforderlichen Hilfsbeziehungen an und stellen Sie die Bilanz nach dem Zielwert um. Gehen Sie davon aus, dass die kathoden- und anodenseitig eintretenden Kostenströme sowie die Kosten der Brennstoffzelle \dot{Z}_F bekannt sind.

Hinweis für alle Aufgaben: Sofern Sie für den Quereinstieg Ergebnisse aus vorhergehenden, unbeantworteten Aufgabenteilen benötigen, benutzen Sie bitte folgende Angaben:

$$\bar{h}_{16} = -102 \text{ MJ/kmol}; \dot{W}_{el,G} = 312 \text{ MW}; \dot{W}_{el,A} = 120 \text{ MW}; \dot{n}_{12} = 4 \text{ kmol/s}; \dot{W}_{DC} = 400 \text{ MW}$$

Tabelle 1: Thermodynamische Daten der Stoffströme

j	\dot{n}_j [kmol/s]	T_j [°C]	p_j [bar]	\bar{h}_j [MJ/kmol]	\bar{s}_j [kJ/(kmol·K)]
1	10,47	15,00	0,98	-0,29	3,56
2	10,47	386,45	14,55	10,80	5,75
3	116,12	899,85	14,55	27,31	21,98
4	114,42	979,77	14,45	29,99	23,93
5		979,77	14,45	29,99	23,93
6	105,64	979,77	14,45	29,99	23,93
7	105,64	985,79	14,65	30,20	23,93
8	105,64	948,89	14,55	28,95	23,03
9	1,00	25,00	15,00	-74,52	-102,91
10	3,32	182,21	15,00	-185,86	-57,47
11	3,32	486,53	14,87	-173,24	-36,44
12		899,85	14,55	-113,79	8,26
13	5,32	960,35	14,45	-205,16	9,51
14		1252,39	14,16	-60,10	28,70
15	15,78	1126,20	14,16	-81,86	22,17
16	15,78	594,22	1,10		25,01
17	15,78	518,68	1,03	-105,10	22,28
18	15,78	105,97	1,00	-118,98	-2,07
19		39,85	1,00	-55,73	4,18
20		39,85	1,00	-284,71	-159,49
21					
22		280,50	15,00	-233,78	-46,55
23		280,50	15,00	-233,78	-46,55
24		280,50	15,00	-233,78	-46,55

Thermodynamische Analyse

$$a) \text{ aus FS: } \eta_{s,T} = \frac{\bar{h}_{15} - \bar{h}_{16}}{\bar{h}_{15} - \bar{h}_{16,s}}$$

EB Vorwärmer D:

$$0 = \sum \dot{H}_{ein} - \sum \dot{H}_{aus} - \dot{Q}_{\text{Verlust}}$$

$$0 = \dot{H}_{16} - \dot{H}_{17} + \dot{H}_{10} - \dot{H}_{11} - \dot{Q}_{\text{Verlust}} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{\text{Verlust}} = 0,02 \cdot \dot{Q}_{\text{Über}} = 0,02 \cdot (\dot{H}_{16} - \dot{H}_{17})$$

$$\Rightarrow 0 = \dot{H}_{16} - \dot{H}_{17} - [0,02(\dot{H}_{16} - \dot{H}_{17})] + \dot{H}_{10} - \dot{H}_{11}$$

$$0,98(\dot{H}_{16} - \dot{H}_{17}) = \dot{H}_{11} - \dot{H}_{10} \quad (1)$$

$$0,98 \dot{n}_{16} (\bar{h}_{16} - \bar{h}_{17}) = \dot{n}_{10} (\bar{h}_{11} - \bar{h}_{10})$$

$$\Rightarrow \bar{h}_{16} = \frac{\dot{n}_{10}}{\dot{n}_{16}} \frac{(\bar{h}_{11} - \bar{h}_{10})}{0,98} + \bar{h}_{17} = -102,39 \text{ MJ} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \eta_{s,T} = 0,91 \quad (1)$$

~~(5)~~

$$b) \dot{w}_{el,ST} = \dot{n}_{15} (\bar{h}_{15} - \bar{h}_{16}) \cdot \eta_T \cdot \eta_g = 314,31 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{w}_{A,el} = \frac{\dot{n}_2 (\bar{h}_2 - \bar{h}_1)}{\eta_H} = 118,48 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{w}_{H,el} = \frac{\dot{n}_6 (\bar{h}_7 - \bar{h}_6)}{\eta_H} = 22,64 \text{ MW} \quad (1)$$

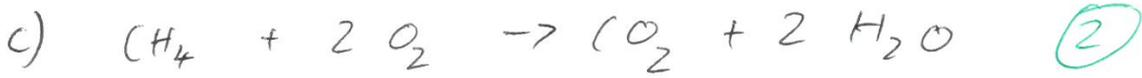
$$\dot{w}_{el,netto} = \dot{w}_{el,ST} + \dot{w}_{el,AC} - \dot{w}_{A,el} - \dot{w}_{H,el} - \dot{w}_{L,el} = 539,19 \text{ MW} \quad (1)$$

~~(7)~~

mit Quereintrieb $\dot{w}_{el,ST} = 312 \text{ MW}$

folgt: $\dot{w}_{el,netto} = 536,88 \text{ MW}$

Wurde $\dot{w}_{el,ST}$ mit $\bar{h}_{16} = -102 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ berechnet: $\dot{w}_{el,netto} = 533,22 \text{ MW}$



$$\overline{\text{LHV}} = -\Delta \bar{h}_R = -\sum_i \nu_i \bar{h}_i = \text{mit FS 1.4} = 802,361 \frac{\text{MJ}}{\text{kmol}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{el,ges}} = \frac{\dot{w}_{\text{el,netto}}}{\dot{q}_0 \cdot \overline{\text{LHV}}} = 67,2\% \quad (1)$$

mit Queereinstieg: 67,4%

/// (5)

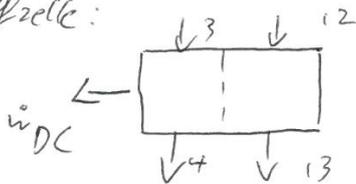
d) $0 = \dot{H}_7 - \dot{H}_8 + \dot{H}_{11} - \dot{H}_{12}$ (1)

$$0 = \dot{n}_7 \bar{h}_7 - \dot{n}_8 \bar{h}_8 + \dot{n}_{11} \bar{h}_{11} - \dot{n}_{12} \bar{h}_{12}$$

$$\Rightarrow \dot{n}_{12} = \frac{\dot{n}_7 (\bar{h}_7 - \bar{h}_8) + \dot{n}_{11} \bar{h}_{11}}{\bar{h}_{12}} = 3,89 \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \quad (1)$$

/// (3)

e) Brennstoffzelle:



$$\dot{w}_{DC} = \dot{H}_3 - \dot{H}_4 + \dot{H}_{12} - \dot{H}_{13} \quad (1)$$

$$= 388,59 \text{ MW}$$

(1) (mit Queereinstieg \dot{n}_{12})

$$\dot{w}_{DC} = 376,07 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{WR}} = \frac{\dot{w}_{AC}}{\dot{w}_{DC}} = 0,942 \quad (1)$$

$$\text{oder } 0,973 \quad (1)$$

/// (4)

$$f) \dot{S}_{ges, FC} = \dot{S}_4 + \dot{S}_{13} - \dot{S}_3 - \dot{S}_{12} = 204,21 \frac{4 \text{ W}}{\text{K}} \quad (1)$$

mit Queerinstig \dot{v}_{12} $\dot{S}_{ges, FC} = 203,31 \frac{4 \text{ W}}{\text{K}}$

$$\dot{E}_{D, FC} = T_0 \cdot \dot{S}_{ges, FC} = 58,84 \text{ MW} \quad (1) \quad (\hookrightarrow 58,58 \text{ MW})$$

$$\dot{E}_P = \dot{W}_{DC} \quad (1)$$

$$0 = \dot{E}_F - \dot{E}_P - \dot{E}_D - \dot{E}_L \quad (1)$$

$$\Rightarrow \dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D$$

$$\epsilon_{FC} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{W}_{DC}}{\dot{W}_{DC} + \dot{E}_{D, FC}} \quad (1) = 86,8\% \quad (1)$$

mit Queerinstig $\dot{W}_{DC} = 400 \text{ MW}$ $\epsilon_{FC} = 87,2\%$ ~~(8)~~

g) WKM $\eta \leq \eta_{\text{Carnot}}$ ~~(1)~~

BZ $\eta \leq 1 \rightarrow$ direkte Umwandlung von chem. in el. Energie ~~(1)~~ ~~(2)~~

h) $\dot{E}_{F,A} = \dot{W}_{A,el}$ (acs b) ~~(1)~~

$$\dot{E}_{P,A} = \dot{E}_2 - \dot{E}_1 = \dot{v}_1 \left[(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) - T_0 (\bar{s}_2 - \bar{s}_1) \right] = 109,51 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\epsilon_A = \frac{\dot{E}_{P,A}}{\dot{E}_{F,A}} = 92,4\% \quad (1) \quad (5)$$

$$i) \dot{E}_{D,GT} = \dot{S}_{gen,GT} \cdot T_0$$

(ET1)

$$\dot{S}_{gen,GT} = \frac{\dot{Q}_{verl,GT}}{T_0} + (\dot{S}_{aer} - \dot{S}_{ein}) \quad (1)$$

$$= \underbrace{\frac{\dot{m}_{15}(\bar{h}_{15} - \bar{h}_{16}) \cdot 0,01}{T_0}}_{\text{Formel (1)}} + \underbrace{\dot{m}_{15}(\bar{s}_{16} - \bar{s}_{15})}_{\text{Formel (1)}} = 56,06 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{D,GT} = 16,15 \text{ MW} \quad (1)$$

~~(5)~~

$$i) \text{ ET2) } \dot{C}_{12} + \dot{C}_3 - \dot{C}_4 - \dot{C}_{13} - \dot{C}_{AC/DC} + \dot{Z}_{FC} = 0 \quad (2)$$

Regel ob AC oder DC

$$C_3 = C_4 \quad (1)$$

$$C_{12} = C_{13} \quad (1)$$

$$C_{AC/DC} = \frac{\dot{Z}_{FC} + C_3(\dot{E}_3 - \dot{E}_4) + C_{12}(\dot{E}_{12} - \dot{E}_{13})}{\dot{w}_{AC/DC}} \quad (1)$$

~~(5)~~

17. Wirtschaftlichkeitsanalyse30 Punkte

Für die Wärmeversorgung eines Quartiers sucht die Stadt nach einer effizienteren Lösung. Ein Ansatz ist den Bedarf mittels eines Blockheizkraftwerks (BHKW) zu sichern. Dabei wird der bisherige Heißwassererzeuger (HWE) zur Sicherung der Wärmenachfrage in Spitzenzeiten genutzt. Nach fünf Jahren besteht die Option einen Wärmespeicher zu integrieren. Damit kann der Einsatz des HWE bei Lastspitzen reduziert werden. Dies spart 10% des Erdgases ein.

Prüfen Sie zunächst die Wirtschaftlichkeit des BHKWs anhand des Kapitalwertes. Wird durch die zweite Investition in einen Wärmespeicher die Wirtschaftlichkeit verbessert?

Hinweis für alle Unteraufgaben:

Sofern Sie für den Quereinstieg Ergebnisse aus vorhergehenden, unbeantworteten Aufgabenteilen benötigen, benutzen Sie bitte die in eckigen Klammern angegebenen Werte. Diese stimmen nicht notwendigerweise mit den exakten Werten überein.

Weitere Annahmen und Hinweise

- Vereinfachend wird angenommen, dass die Errichtung der Anlage über Nacht erfolgt. Inbetriebnahmezeitpunkt ist der 1. Januar 2022.
- Die Zahlung der Investitionskosten erfolgt zum 1. Januar 2022. Alle weiteren Kosten und Erlöse fallen jeweils am Ende eines Jahres an.
- Die Brennstoffkosten unterliegen einer Kostensteigerung von $r_{FC} = 3\%/a$ und die Stromkosten von $r_{Strom} = 1,5\%/a$.
- Die Kostensteigerung für Investitionsgüter beträgt $r_I = 2\%/a$.
- Über den gesamten Betrachtungszeitraum sind die Wärmeverkaufspreise konstant.
- Die Preise für die Investitionsgüter wurden am 1. Januar 2020 ermittelt.
- Die Preise für Wärme, Strom und Erdgas beziehen sich auf den Inbetriebnahmezeitpunkt.
- Bezugszeitpunkt ist der Inbetriebnahmezeitpunkt 1. Januar 2022.
- Die Ersparnisse im Erdgasverbrauch durch Installation des Wärmespeichers e_S betragen 10%.
- Führen Sie sämtliche Rechnungen in inflationsbehafteter Währung durch.

Aufgaben

- (a) **(2 Punkte)** Berechnen Sie für das BHKW den jährlichen Erdgasbedarf BR_{BHKW} [70 000 MWh_{FC}] und die jährliche Wärmeauskopplung Q_{BHKW} [37 000 MWh_{th}].
- (b) Ermitteln Sie den Kapitalwert NPV_{BHKW} für das Investitionsprojekt BHKW. Berechnen Sie hierzu die folgenden Werte:
- i. **(2 Punkte)** Barwert der Investition der BHKW-Anlage $PV_{I,BHKW}$.
 - ii. **(5 Punkte)** Barwert Brennstoffkosten PV_{FC} [18 500 T€].
 - iii. **(3 Punkte)** Barwert der Erlöse vom Stromverkauf PV_{Strom} .
 - iv. **(4 Punkte)** Barwert der Erlöse vom Wärmeverkauf $PV_{Wärme}$.
 - v. **(3 Punkte)** Kapitalwert NPV_{BHKW} . Treffen Sie eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit der Investition.
- (c) Erhöht die Installation eines Wärmespeichers im fünften Jahr der Investition die Wirtschaftlichkeit des Projektes? Berechnen Sie hierzu die folgenden Werte bezogen auf das Jahr 2022:
- i. **(2 Punkte)** Barwert der Investition des Wärmespeichers $PV_{I,S}$.
 - ii. **(6 Punkte)** Neuen Barwert der Brennstoffkosten mit Berücksichtigung der Ersparnisse beim Erdgasverbrauch durch den Wärmespeicher PV_{FC}^S .
 - iii. **(3 Punkte)** Kapitalwert NPV_S . Treffen Sie eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit dieser Investition.

Annahmen und Parameter des Investitionsprojektes „Quatiers BHKW“

Planungsdaten	
Inbetriebnahme- und Bezugszeitpunkt	1. Januar 2022
Wirtschaftliche Nutzungsdauer ab Inbetriebnahme, n	15 a
<i>Anlagendaten</i>	
elektrische Nennleistung, \dot{W}_{el}	6 MW _{el}
Jährliche Volllaststundenzahl, t_v	5000 h/a
Elektrischer Wirkungsgrad, η_{el}	40 %
Thermischer Wirkungsgrad, $\eta_{th,BHKW}$	50 %
Erdgasverbrauch HWE (Spitzendeckung), FC_{HWE}	8300 MWh _{FC}
Wärmeaukopplung HWE zur Spitzenzeiten, Q_{HWE}	7500 MWh _{th}
Spezifische Investitionskosten 1. Januar 2020, $i_{BHKW,2020}$	400 € ₂₀₂₀ /kW _{el}
Investitionskosten Wärmespeicher 1. Januar 2020, $I_{S,2020}$	550 000 €
<i>Sonstige Angaben</i>	
Stromverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, $p_{Strom,2022}$	23 €/MWh _{el}
Wärmeverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, $p_{Wärme,2022}$	42 €/MWh _{th}
Erdgaspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, $p_{FC,2022}$	17 €/MWh _{LHV}
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate der Brennstoffkosten, r_{FC}	3 %/a
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate für Strom, r_{Strom}	1,5 %/a
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate für Investitionsgüter, r_I	2 %/a
Jährlicher effektiver Zinssatz, i_{eff}	5 %/a
Jährliche Inflationsrate, r_i	2 %/a
Einsparungen Erdgas durch Wärmespeicher, e_S	10 %

Hinweis: Die Ergebnisse bei Quereinstieg sind in grauer Farbe angegeben.

Aufgabe 1 (2 Punkte)

$$\text{Erdgasverbrauch BHKW: } BR_{\text{BHKW}} = \frac{P_{\text{el}}}{\eta_{\text{el}}} \cdot t_{\text{v}} = 75\,000 \text{ MWh}_{\text{FC}}/\text{a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$\text{Wärmerzeugung BHKW: } Q = BR_{\text{BHKW}} \cdot \eta_{\text{th,BHKW}} = 37\,500 \text{ MWh}_{\text{th}}/\text{a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Aufgabe a) (16 Punkte)

i. Barwert der Investition der BHKW-Anlage (3 Punkte)

$$I_{\text{BHKW},2020} = i_{\text{BHKW}} \cdot \dot{W}_{\text{el}} = 400 \text{ €/kW}_{\text{el}} \cdot 1000 \text{ kW/MW} \cdot 6 \text{ MW}_{\text{el}} = 2400 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{I,BHKW},2022} = I_{\text{BHKW},2020} \cdot (1 + r_{\text{I}})^2 = 2497 \text{ T€}$$

ii. Barwert Brennstoffkosten (5 Punkte)

$$FC_{2022} = (BR_{\text{BHKW}} + BR_{\text{HWE}}) \cdot p_{\text{FC}} = 1416 \text{ T€} \quad 1331 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$A_{\text{FC}} = FC_{2022} \cdot CELF = FC_{2022} \cdot \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} \cdot CRF$$

$$\text{mit } PV_{\text{FC},2022} = \frac{A_{\text{FC}}}{CRF} = FC_{2022} \cdot \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} \quad (2 \text{ Punkte für Rechenweg})$$

$$k = \frac{1 + r_{\text{FC}}}{1 + i_{\text{eff}}} = \frac{1,03}{1,05} = 0,981 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{FC},2022} = 1416 \text{ T€} \cdot \frac{0,981(1 - 0,981^{15})}{1 - 0,981} = 18\,282 \text{ T€} \quad 17\,185 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

iii. Barwert der Erlöse Stromverkauf (3 Punkte)

$$A_{\text{FC}} = P_{\text{Strom},2022} \cdot CELF = P_{\text{Strom},2022} \cdot \frac{k(1 - k^{15})}{1 - k} \cdot CRF$$

$$\text{mit } PV_{\text{Strom},2022} = \frac{A_{\text{Strom}}}{CRF} = P_{\text{Strom},2022} \cdot \frac{k(1 - k^{15})}{1 - k} \quad (1 \text{ Punkte für korrekte Formel / Ansatz})$$

wenn Rechenweg bei Barwert der Brennstoffkosten fehlt dann 2 Punkte)

$$P_{\text{Strom},2022} = W_{\text{el,netto}} \cdot p_{\text{Strom},2022} = 690 \text{ T€}$$

$$k = \frac{1 + r_{\text{Strom}}}{1 + i_{\text{eff}}} = 0,9667 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Strom},2022} = 690 \text{ T€} \cdot 11,5628 = 7978 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

iv. Barwert der Erlöse Wärmeverkauf (4 Punkte)

$$PV_{\text{Wärme},2022} = \frac{A_{\text{Wärme},2022}}{CRF_{15}} \quad (1 \text{ Punkt für Ansatz})$$

$$A_{\text{Wärme},2022} = (Q_{\text{BHKW}} + Q_{\text{HWE}}) \cdot p_{\text{Wärme},2022} = (37\,500 \text{ MWh}_{\text{th}} + 7500 \text{ MWh}_{\text{th}}) \cdot 42 \text{ €/MWh}_{\text{th}} = 1890 \text{ T€}/\text{a} \quad 1869 \text{ T€}/\text{a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$CRF_{15} = \frac{i(1 + i_{\text{eff}})^{15}}{(1 + i_{\text{eff}})^{15} - 1} = 0,0963 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Wärme},2022} = 19\,626 \text{ T€} \quad 19\,408 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

v. Kapitalwert (3 Punkte)

$$NPV_{\text{BHKW}} = PV_{\text{Strom},2022} + PV_{\text{Wärme},2022} - PV_{\text{FC},2022} - PV_{\text{I,BHKW},2022} = 6825 \text{ T€} \quad 7705 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt Formel} + 1 \text{ Punkt Ergebnis})$$

→ Die Investition ins BHKW ist wirtschaftlich. (1 Punkt)

Aufgabe c) (11 Punkte)

i. Barwert der Investition des Wärmespeichers (2 Punkte)

$$I_{S,2027} = I_{S,2020} \cdot (1 + r_I)^7 = 550 \text{ T€} \cdot (1,02)^7 = 632 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{I,S,2020} = I_{S,2027} \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-5} = 495 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

ii. Neuer Barwert der Brennstoffkosten mit Berücksichtigung der Ersparnisse durch Wärmespeicher (7 Punkte)

$$PV_{FC,2022-2026} = FC_{2022} \cdot \frac{k(1-k^5)}{1-k} = 1416 \text{ T€} \cdot \frac{0,981(1-0,981^5)}{1-0,981} = 6687 \text{ T€} \quad 6286 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt} + 1 \text{ Punkt Ansatz})$$

$$PV_{FC,2027-2037}^S = FC_{2027}^S \cdot \frac{k(1-k^{10})}{1-k} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$FC_{2027}^S = (BR_{BHKW} + BR_{HWE}) \cdot (1 - e_S) \cdot p_{FC} \cdot (1 + r_{FC})^5 = 1477 \text{ T€} \quad 1389 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{FC,2027-2037}^S = 13316 \text{ T€} \quad 11190 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{FC,2022}^S = PV_{FC,2022-2026} + PV_{FC,2027-2037}^S \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-5} = 17120 \text{ T€} \quad 16093 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

iii. Kapitalwert des Speichers (3 Punkte)

$$\text{Ersparnis Erdgas durch Speicher: } PV_{FC, \text{Ersparnis}, 2022} = PV_{FC,2022} - PV_{FC,2022}^S = 1162 \text{ T€} \quad 1092 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$NPV_{S,2022} = PV_{FC, \text{Ersparnis}, 2022} - PV_{I,S,2020} = 667 \text{ T€} \quad 597 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

→ Die Investition in einen Wärmespeicher ist wirtschaftlich. (1 Punkt)

18. Wärmeübertragernetzwerke 30 Punkte

Die folgenden sechs Stoffströme sollen zu einem Wärmeübertragernetzwerk verbunden werden.

Nr.	T_{ein} [°C]	T_{aus} [°C]	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	$\dot{m}\Delta h^{LV}$ [kW]
1	50	120	2	-
2	110	60	3	-
3	40	170	4	-
4	70	90	5	-
5	150	60	6	-
6	100	100	-	50

- Die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung liegt bei $\Delta T_{\text{min}} = 20 \text{ K}$.
- Strom 6 soll bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung kondensiert werden.
- Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten der Ströme wird vernachlässigt.
- Alle Wärmeübertrager werden im Gegenstrom betrieben.
- Druckverluste werden vernachlässigt.

Hinweis für alle Unteraufgaben: Sollten Sie die Reserven nutzen, kennzeichnen Sie jeweils die endgültige Variante eindeutig.

Aufgaben

- (a) **(11 Punkte)** Bestimmen Sie den minimalen externen Heizbedarf $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$ und den minimalen externen Kühlbedarf $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$ mit Hilfe der Wärmekaskade sowie alle Pinchtemperaturen für das Wärmeübertragernetzwerk rechnerisch. Verwenden Sie dafür die Tabelle.
- (b) **(6 Punkte)** Zeichnen Sie das Wärmestromprofil (Grand Composite Curve) in das Koordinatensystem der Abbildung. Bestimmen Sie die benötigte Mindesttemperatur der externen Wärmequelle $T_{\text{HU,min}}$ sowie die zulässige Maximaltemperatur der externen Wärmesenke $T_{\text{CU,max}}$ mit Hilfe der Grafik, sofern externe Quellen oder Senken auftreten. Markieren Sie weiterhin Bereiche mit interner Wärmerückgewinnung, sofern diese auftreten.
- (c) **(4 Punkte)** Es kann ein zusätzlicher Strom integriert werden:
- Strom 7 welcher bei einer konstanten Temperatur von 170 °C und einer Wärmeleistung von 60 kW kondensiert wird.

Zeichnen Sie in Ihr Wärmestromprofil die Änderungen ein, die sich durch die zusätzliche Integration des Stroms ergeben. Treffen Sie ggf. Aussagen zum Verhalten der Größen $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$, $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$, $T_{\text{HU,min}}$ und $T_{\text{CU,max}}$ (steigt / sinkt / bleibt gleich).

- (d) **(9 Punkte)** Ergänzen Sie den Entwurf für ein System mit maximaler Energierückgewinnung (MER-System), welches keine Pinch-Regel verletzt. Nutzen Sie dafür die vorgegebene Darstellung der Ströme. Markieren Sie alle notwendigen Wärmeübertrager mit dem jeweils übertragenen Wärmestrom und den entsprechenden Zwischentemperaturen und sofern vorhanden die externe Wärmequelle und -senke.

Intervall Nr.	angepasste Temperaturen [°C]	$\sum \dot{m}_i c_{p,i}$ [kW/K]	\dot{Q}_i [kW]	$\Delta \dot{Q}_i$ [kW]	$\Delta \dot{Q}_i^*$ [kW]
I	180	4	160	0	-160
II	140	-2	-20	160	0
III	130	0	0	140	-20
IV	100	2	20	140	-20
V	90	/	-50	160	0
VI	90	2	20	110	-50
VII	80	2	20	130	-30
VIII	60	-3	-60	70	-90
	50	-5	-50	20	-140
	(1)		(4)	(1)	(1)

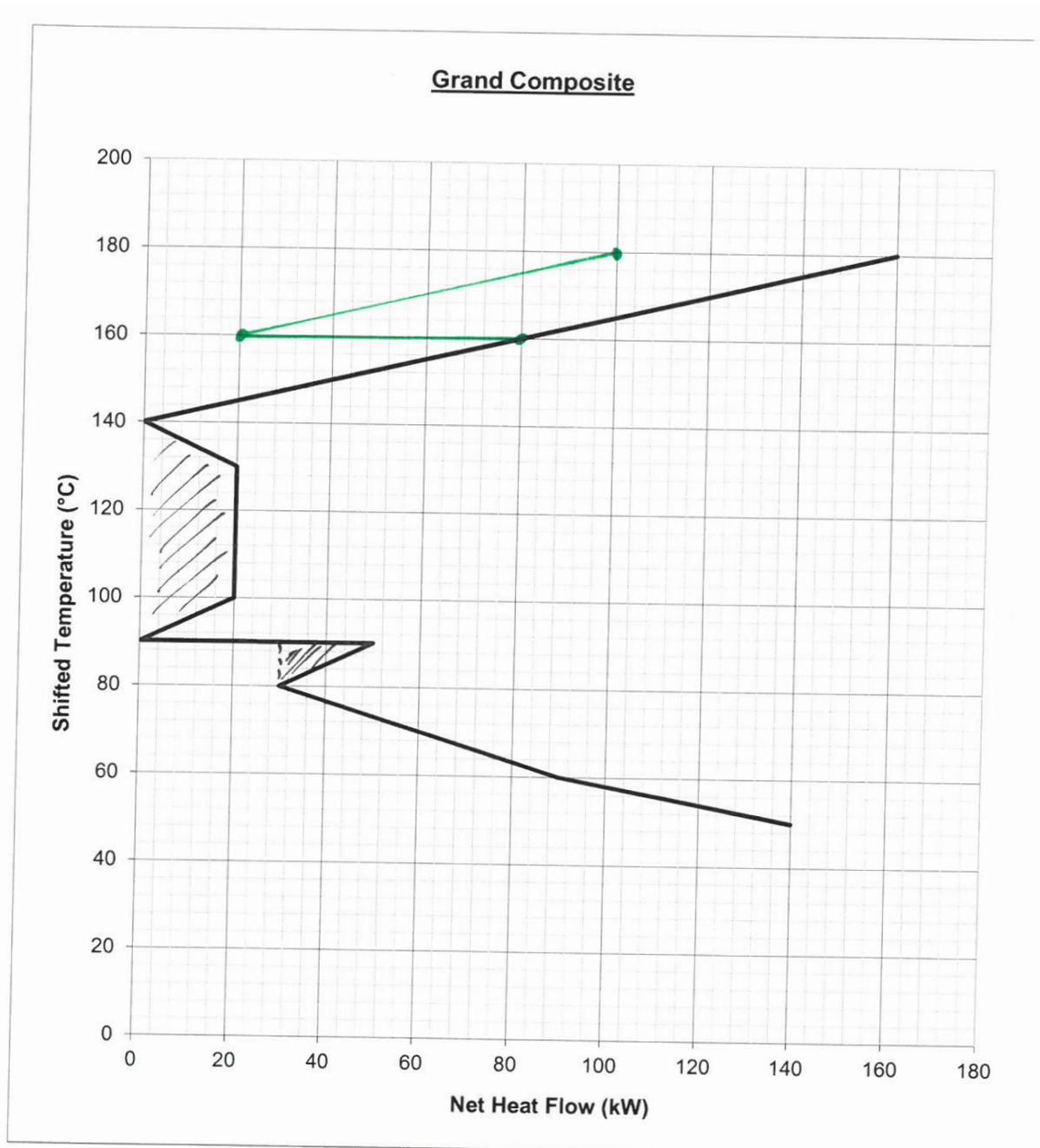
(1) $\dot{Q}_{HU, \min} = 160 \text{ kW}$

(1) $\dot{Q}_{CU, \min} = 140 \text{ kW}$

$\sum II$

(1) $T_{P,I}^* = 140^\circ\text{C} \Rightarrow T_{P,I} = 130/150^\circ\text{C}$

(1) $T_{P,II}^* = 90^\circ\text{C} \Rightarrow T_{P,II} = 80/100^\circ\text{C}$



0,5 pro ZÄ

(4)

Ind. WRG

(1)

$$T_{HU, \min}^* = 180^\circ\text{C} \rightarrow T_{HU, \min} = 190^\circ\text{C}$$

$$T_{CU, \max}^* = 50^\circ\text{C} \rightarrow T_{CU, \max} = 40^\circ\text{C}$$

(1)

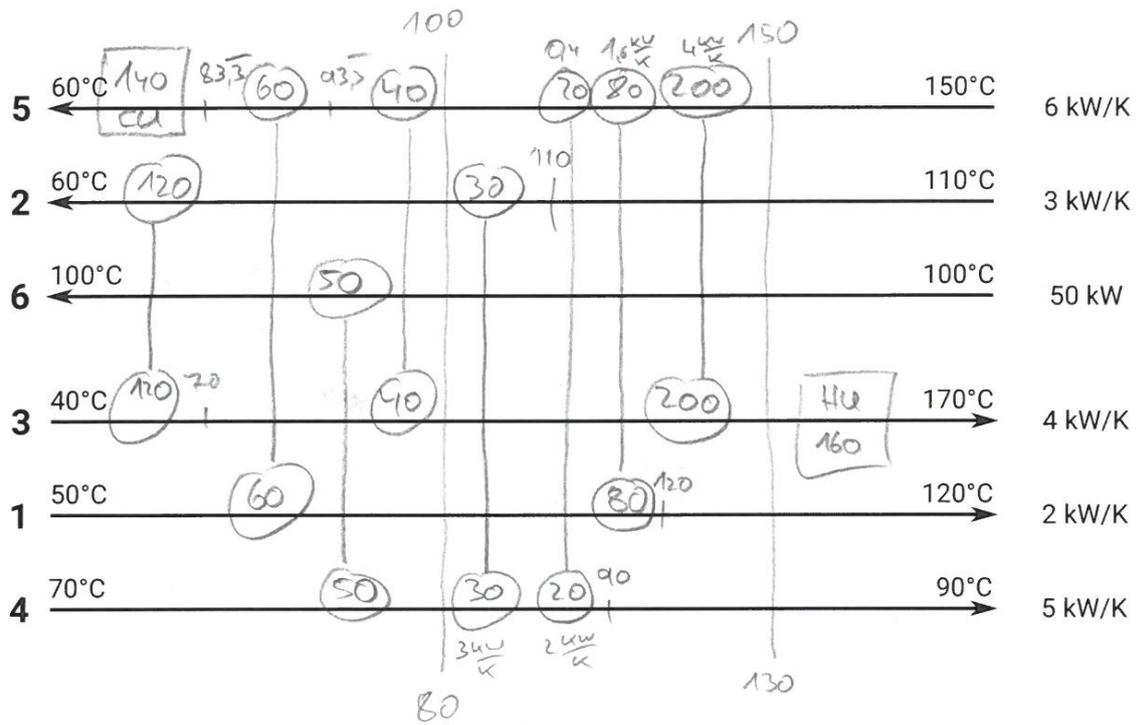
Integration: Einziges

(2)

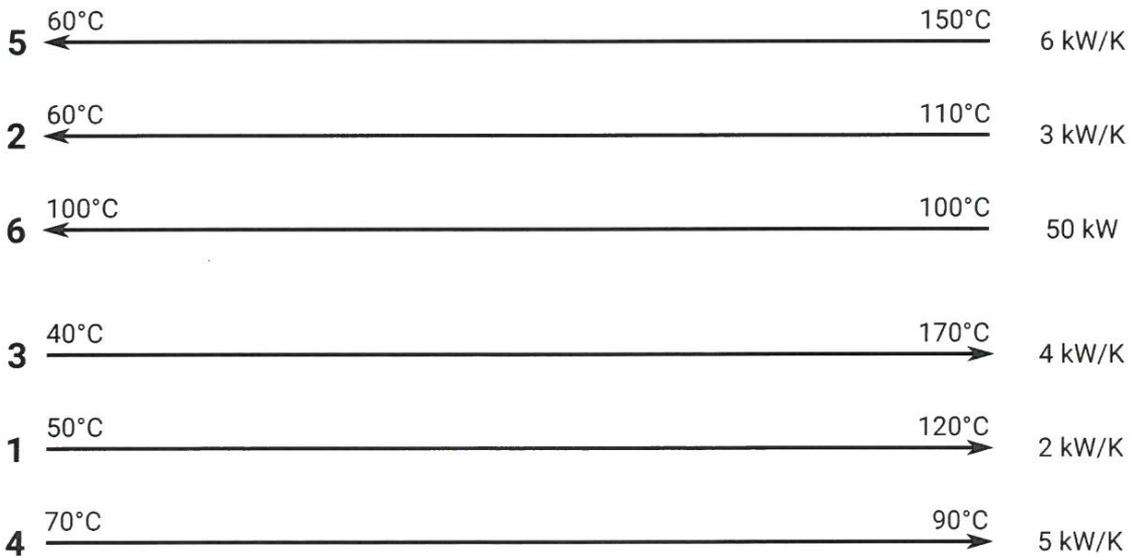
$Q_{HU} = Q_{CU}$
bleibt gleich

(2)

$T_{HU, \min}$ & $T_{CU, \max}$ bleibt gleich



$\sum Q_{\text{H}} = 1P$
 $\sum Q_{\text{C}} = 1P$
 $\Sigma 9$



F_2020

Teilgebiet	Thema	Punkte	
		ET I	ET II
		8 oder 9 LP	8 LP
Theorie, Fundamental	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	50	50
	Exergie	23	29
	Wirtschaftlichkeit	7	
	Verbrennung I	5	5
Theorie, Rest	Energieträger	6	
	Dampfkraftwerke	10	
	Gasturbinen	10	
	Fossile Brennstoffe	6	
	Kälteprozesse I	9	
	Kälteprozesse II		8
	Erneuerbare Energien		10
	Vergasung		6
	Energiespeicher		8
	Exergie / Exergoöko.		10
Rechenteil	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	80	80
	Exergie	44	44
	a	7	7
	b	5	5
	c	7	7
	d	4	4
	e	4	4
	f	3	3
	g	8	8
	h	6	
	i		6
	Wirtschaftlichkeit	30	
	WU-Netz		30

1. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse 29 Punkte

- (a) **(2 Punkte)** Diskutieren Sie stichpunktartig Zielsetzung und Erkenntnisse der exergetischen Methoden bei der Analyse von Energieumwandlungsanlagen.

- Identifikation und Berechnung der auftretenden thermodynamischen Irreversibilitäten.
- Erarbeitung von Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades
- Erarbeitung von Maßnahmen zur kostengünstigen Bereitstellung des Anlagenprodukts.

- (b) **(5 Punkte)** Gegeben Sei ein Abgas aus einer Kohlenwasserstoffverbrennung als Gemisch idealer Gase. Druck, Temperatur und Zusammensetzung des Stoffstromes und der thermodynamischen Umgebung sind bekannt. Erläutern Sie stichpunktartig die Vorgehensweise zur Berechnung der spezifischen physikalischen Exergie des Stoffstroms. Verweisen Sie auf zu verwendende Hilfsmittel.

bereits bekannt aus Formelsammlung: $\dot{E}^{\text{PH}} = \dot{m} [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)]$

- Die Enthalpie und Entropiewerte der Reinstoffe kann über die Stoffwertpolynome der FS berechnet werden. (1 Punkt)
- Kondensationsprüfung. Die Prüfung muss für die Bedingungen des Stoffstroms und bei Umgebungsbedingungen getrennt erfolgen. (2 Punkte)
- Enthalpie und Entropie des Gemisches können als molanteil-gewichtete Summe der Reinstoffenthalpien und -entropien berechnet werden. (1 Punkt)
- Bei der Entropie ist trotz idealer Mischung eine Mischungsentropie zu berücksichtigen. (1 Punkt)

- (c) **(4 Punkte)** Die Exergie eines Stoffstroms kann in verschiedene Bestandteile unterteilt werden. Nennen Sie zwei Fälle in denen eine Aufteilung der Exergie vorteilhaft ist und welche Bestandteile gesondert betrachtet werden müssen.

(1 Pkt pro Fall und 1 Pkt für die richtige Aufteilung - max 4 Pkt.)

- Zur Definition des exergetischen Wirkungsgrades für eine Brennkammer ist eine getrennte Betrachtung von chemischer und physikalischer Exergie sinnvoll (Änderung der chemischen Zusammensetzung des Stoffstromes).
- Exergiebilanz für einen Wärmeübertragung zur Vorwärmung eines Brennstoffs (chem. Exergie des Brennstoffs bleibt unverändert). Nur Änderung der physikalischen Exergie.
- Aufteilung in thermisch und mechanischen Anteil der physikalischen Exergie bei der Betrachtung des Wärmeübertragers. Bestimmung der getrennten Kostenströme der Exergievernichtung aus Wärmeübertragung und Reibung (Druckverlust). Und Definition Wirkungsgrad: Nutzen ist nur die Temperaturänderung; Druckverlust als Aufwand.
- Arbeitet eine Drossel (teilweise) unterhalb der Umgebungstemperatur muss die physikalische Exergie in mechanische und thermische Exergie aufgeteilt werden. Der Nutzen der Komponente besteht in der Umwandlung der mechanischen in thermische Exergie.
- (Zusatzpunkte, da nicht in VL diskutiert!) Die chemische Exergie kann für exergoökonomische Betrachtungen in reaktive und nicht-reaktive Anteile aufgeteilt werden.

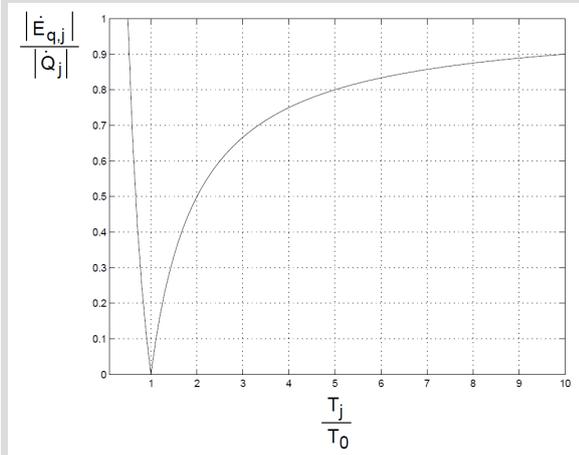
- (d) **(6 Punkte)** In einem Prozess treten zwei Verlustwärmeströme auf. Die Temperatur des Stroms A liegt 20 K oberhalb und die des Stroms B 20 K unterhalb der Umgebungstemperatur. Welchen

Verlustwärmestrom würden Sie minimieren, wenn der Energiegehalt beider Verlustwärmeströme identisch ist? Begründen Sie anhand eines geeigneten Diagramms.

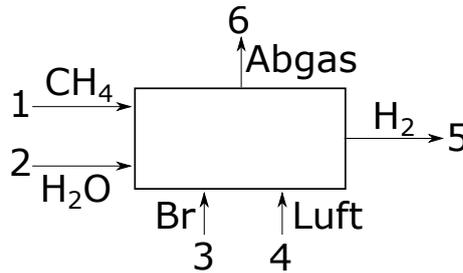
Strom B (1 Punkt), da der Exergiegehalt des Verlustwärmestromes bei $T_B = T_0 - \Delta T$ größer ist als bei Strom A $T_A = T_0 + \Delta T$ (1 Punkt).

Diagramm (3 Punkte): Im Diagramm je 1 Punkt für Verlauf kleiner und größer T_0 und 1 Punkt für $\dot{E}_q = 0$ bei T_0

Achsenbeschriftung (1 Punkt)



- (e) (6 Punkte) Abgebildet ist die Herstellung von Wasserstoff durch den Methan-Dampf-Reformierungsprozess. Die für den Prozess notwendige Wärme wird durch Verbrennung des gesondert zugeführten Brennstoffes (Br) bereitgestellt. Der Abgasstrom 6 geht ungenutzt an die Umgebung.



- Definieren sie den exergetischen Nutzen, Aufwand und Verlust, wenn die Wasserstoffherstellung
1. als Teil eines Gesamtprozesses betrachtet wird.
 2. das Ziel des Gesamtprozesses ist.

Teil des Gesamtprozesses

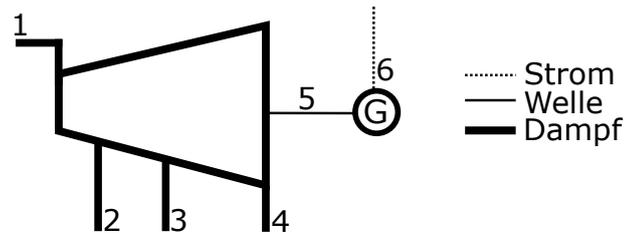
- (1 Punkt) $\dot{E}_P = \dot{E}_5 - \dot{E}_2 - \dot{E}_1$
- (1 Punkt) $\dot{E}_F = \dot{E}_3 + \dot{E}_4 - \dot{E}_6$
- (1 Punkt) $\dot{E}_L = 0$

Ziel des Gesamtprozesses

- (1 Punkt) $\dot{E}_P = \dot{E}_5$
- (1 Punkt) $\dot{E}_F = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3 + \dot{E}_4$
- (1 Punkt) $\dot{E}_L = \dot{E}_6$

- (f) (6 Punkte) Formulieren Sie für die exergoökonomische Analyse die Kostenbilanz für die abgebildete Dampfturbine und geben Sie alle notwendigen Hilfsbeziehungen an. Stellen Sie zusätzlich

für den Generator die Gleichung zur Berechnung der Kosten der Exergievernichtung auf!



2 Pkt für KB, 1 Pkt je HB, 1 Pkt für $\dot{C}_{D,G}$

$$\dot{C}_1 + \dot{Z}_T = \dot{C}_2 + \dot{C}_3 + \dot{C}_4 + \dot{C}_5$$

$$c_1 = c_2$$

$$c_1 = c_3$$

$$c_1 = c_4$$

$$\dot{C}_{D,G} = c_5 \cdot \dot{E}_{D,G}$$

2. Verbrennung 5 Punkte

Die Analyse eines Feuerzeuggases ergibt folgende Zusammensetzung:

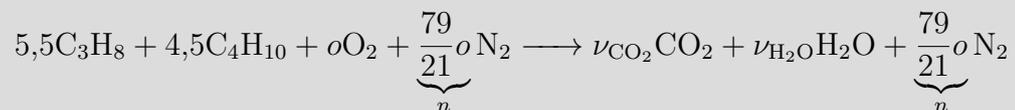
- Propan C_3H_8 55 mol-%
- i-Butan C_4H_{10} 15 mol-%
- n-Butan C_4H_{10} 30 mol-%

Der Brennstoff wird ohne Luftüberschuss verbrannt. Die Verbrennung ist vollständig und vollkommen. Zur Verbrennung wird Luft mit der molaren Zusammensetzung 79 % N_2 und 21 % O_2 verwendet.

- (a) **(2 Punkte)** Formulieren Sie die Reaktionsgleichung.
 (b) **(3 Punkte)** Geben Sie alle Koeffizienten an.

(2P Reaktionsgleichung; 1P je richtigen Koeffizienten bei O_2 , N_2 ; 0,5P je richtigen Koeffizienten bei CO_2 und H_2O)

Reaktionsgleichung:



Koeffizienten:

$$\nu_{CO_2} = 3 \cdot 5,5 + 4 \cdot 4,5 = 34,5$$

$$\nu_{H_2O} = 5,5 \cdot \frac{8}{2} + 4,5 \cdot \frac{10}{2} = 44,5$$

$$o = \nu_{CO_2} + \frac{\nu_{H_2O}}{2} = 56,75$$

$$n = \frac{79}{21}o \approx 213,49$$

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse 7 Punkte

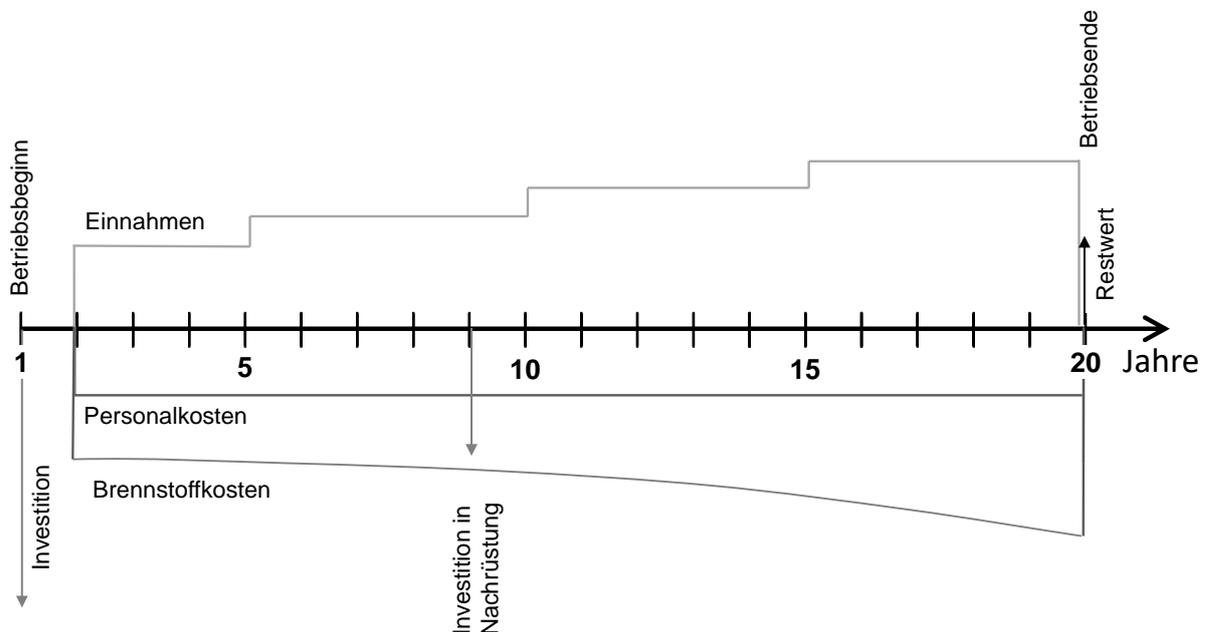
Ein Unternehmen kalkuliert eine stromproduzierende Anlage mit einer Betriebszeit von 20 Jahren. Folgende relevante Parameter sollen berücksichtigt werden:

- Investition
- Brennstoffkosten: unterliegen einer konstanten Kostensteigerung
- Personalkosten: konstant über die Laufzeit
- Nachrüstung in Umwelttechnik: einmalig zu Beginn des 9. Betriebsjahrs
- Einnahmen aus Stromverkauf: konstante Preiserhöhung jeweils alle 5 Jahre
- Restwert der Anlage zum Ende der Laufzeit

Sofern nicht anders angegeben fallen Kosten und Einnahmen zum Ende des Jahres an. Die Errichtung der Anlage erfolgt über Nacht zu Beginn des ersten Jahres. Die Anlage ist sofort betriebsbereit.

- (a) **(7 Punkte)** Erstellen Sie einen qualitativen Zeitstrahl für alle anfallenden Kosten und Einnahmen. Tragen Sie für alle Kosten bzw. Einnahmen das Jahr sowie die Kostenart ein. Kennzeichnen Sie auch alle sonstigen für das Projekt und die Wirtschaftlichkeitsrechnung relevanten Zeitpunkte.

(je Parameter 1 Punkt und 1 Punkt für Beschriftung der Zeitpunkte)



4. Energieträger 6 Punkte

- (a) **(1 Punkt)** Teil der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung ist der Primärenergieeinsatz. Ist in Deutschland die Primärenergiegewinnung größer oder kleiner als der Primärenergieeinsatz?

kleiner, Deutschland ist Nettoimporteur

- (b) **(2 Punkte)** Welche Primärenergieträger werden in Deutschland hauptsächlich exportiert oder importiert? Nennen Sie mindestens zwei.

Erdöl, Erdgas, Kohle

- (c) **(3 Punkte)** Der Endenergieeinsatz erfolgt in Deutschland für drei wesentliche Anwendungsbereiche. Welche?

Mechanische Energie, Raumheizwärme, Prozesswärme

5. Fossile Brennstoffe 6 Punkte

- (a) **(3 Punkte)** Vergleichen Sie die festen Brennstoffe hinsichtlich der angegebenen Eigenschaften. Nutzen Sie die Relationszeichen kleiner ($<$), gleich ($=$) und größer ($>$).

Heizwert Steinkohle $>$ Heizwert Braunkohle

Kohlenstoffanteil Koks $>$ Kohlestoffanteil Anthrazit

Sauerstoffanteil Holz $>$ Sauerstoffanteil Rohbraunkohle

- (b) **(3 Punkte)** Die Klassifizierung von Festbrennstoffen ist nicht nur über die elementare Zusammensetzung möglich. Welche anderen Eigenschaften sind zur Charakterisierung heran zu ziehen? Nennen Sie drei.

(1 Punkt pro Eigenschaft)

Feuchtegehalt, Aschegehalt, Heizwert/Brennwert, Zusammensetzung der Asche, fixed carbon, flüchtige Bestandteile

6. Dampfkraftwerke 10 Punkte

(a) (1 Punkt) Ein Dampfkraftprozess besteht aus mindestens vier Komponenten. In welcher der vier Komponenten tritt der größte Teil der Exergievernichtung auf?

(1 Punkt) Dampferzeuger

(b) (3 Punkte) Von welchen Einflussgrößen hängt der Dampfgehalt am Dampfturbinaustritt bei gegebenem Frischdampfzustand ab? Nennen Sie mindestens drei.

(3P maximal, 1P je möglichen Stichpunkt)

- Temperatur des Kühlmittels im Kondensator
- Minimale Temperaturdifferenz oder Fläche des Kondensators
- Isentroper Wirkungsgrad der Dampfturbine
- Druck der Zwischenüberhitzung
- Einsatz von Zwischenüberhitzer/n

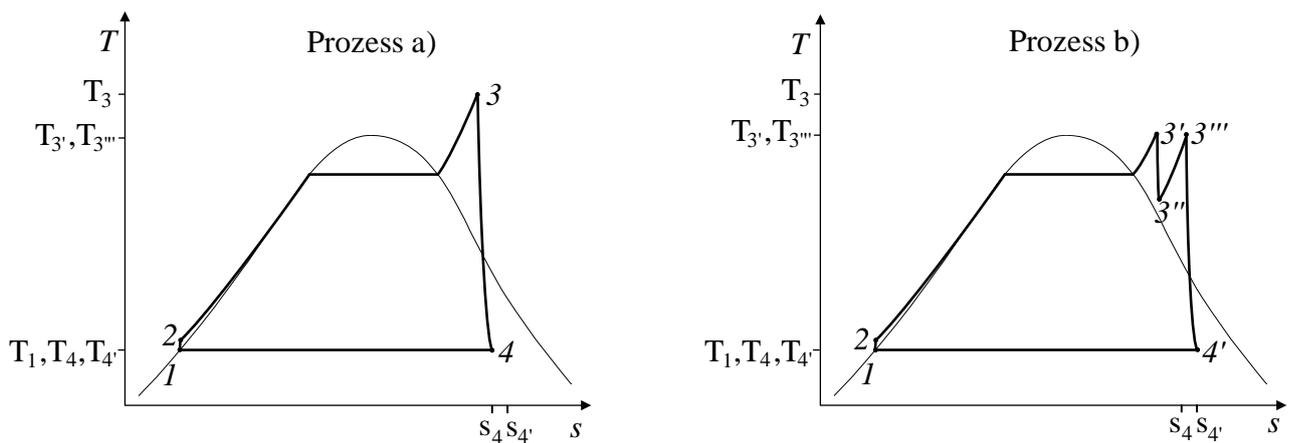
(c) (2 Punkte) Geben Sie einen ungefähren Wert für den gerade noch zulässigen Dampfgehalt in der Dampfturbine an. Welches Problem tritt bei einem zu niedrigen Dampfgehalt in der Dampfturbine auf?

- (1 Punkt) $0,85 < x < 0,95$
- (1 Punkt) Tröpfchenbildung und dadurch verursachte Erosion an Turbinenschaufeln

(d) (4 Punkte) In den qualitativen T,s -Diagrammen sind zwei unterkritische Dampfkraftprozesse dargestellt. Beide Prozesse nehmen isobar gleich viel Wärme auf.

- **Prozess a)** weist eine höhere Frischdampftemperatur auf.
- **Prozess b)** enthält eine Zwischenüberhitzung.

Welcher Prozess hat den höheren Wirkungsgrad? Begründen Sie Ihre Antwort.



$q_{23} = q_{23'} + q_{3''3''''}$	$s_{4'} > s_4$	$T_1 = T_4 = T_{4'}$	$p_2 = p_3 = p_{3'}$	$p_{3''} = p_{3''''}$	$T_3 > T_{3'}$	$T_{3''} = T_{3''''}$
-----------------------------------	----------------	----------------------	----------------------	-----------------------	----------------	-----------------------

(1 Punkt Auswahl, 3 Punkte Begründung)
 Aus den Diagrammen geht hervor, dass in Prozess b) aufgrund des höheren Entropiegehalts am Turbinenaustritt mehr Wärme abgeführt werden muss als in Prozess a). Die zugeführte Wärme

ist in beiden Fällen gleich, ebenso die Pumpenleistung. Es folgt mit

$$\eta = 1 - \frac{q_{ab}}{q_{zu}},$$

dass der Wirkungsgrad von *Prozess a)* höher ist.

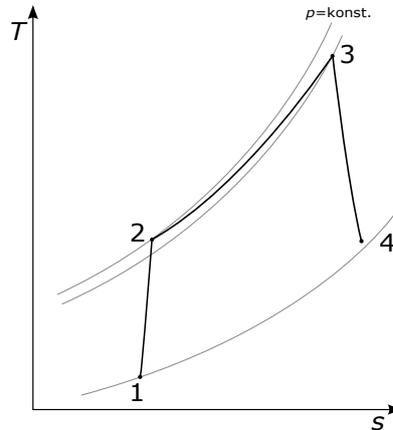
Alternative Begründung: Aufgrund des konstantes Druckes gilt für die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr

$$T_{m,23} = \frac{q_{23}}{s_3 - s_2} \quad \text{bzw.} \quad T_{m,23',3''3'''} = \frac{q_{23'} + q_{3''3'''}}{s_{3'} - s_2 + s_{3'''} - s_{3''}}.$$

Da die Wärme in beiden Prozessen auf dem gleichen konstanten Temperaturniveau abgeführt wird, weist derjenige Prozess mit der höheren thermodynamischen Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme den höheren Wirkungsgrad auf. Aus den Diagrammen geht hervor, dass der mit dem Wärmetransport verbundene Entropietransport in Prozess **a)** geringer ist, die zugeführte Wärme stimmt in beiden Fällen überein, ebenso die Pumpenleistung. Daraus folgt, dass Prozess **a)** den höheren Wirkungsgrad aufweist.

7. Gasturbinen 10 Punkte

- (a) **(2 Punkte)** Dargestellt ist das T,s -Diagramm eines einfachen offenen Gasturbinenprozesses. Kann bei gleichbleibendem Turbineneintrittszustand der Wirkungsgrad dieses Prozesses durch den Einsatz eines Rekuperators erhöht werden? Begründen Sie Ihre Antwort.



(2 Punkte)

Nein. Turbinenausrittstemperatur unterhalb der Verdichterausrittstemperatur.

- (b) **(2 Punkte)** Treten in einem einfachen offenen Gasturbinenprozess gegenüber einem Dampfkraftprozess höhere oder geringere Exergieverluste auf? Worauf ist dies vornehmlich zurückzuführen?

(2 Punkte)

Exergieverluste: GT (Abgas), DKW (Rauchgase, Asche)

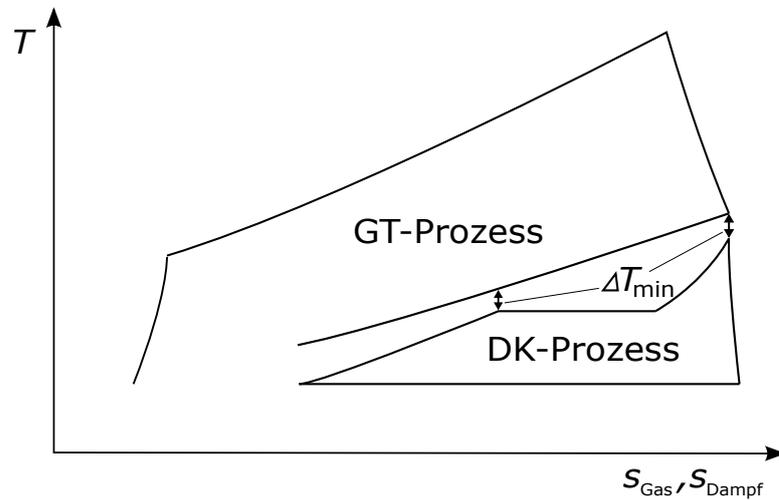
Höhere Exergieverluste, aufgrund deutlich höherer Abgastemperaturen.

- (c) **(3 Punkte)** Erläutern Sie, weshalb einwellige Gasturbinen der höchsten Leistungsklassen, welche für ein 50-Hertz-Netz ausgelegt sind, nicht in einem 60-Hertz-Netz betrieben werden können. Wie unterscheiden sich in diesem Fall die Leistungen der Modelle für 50-Hertz- und 60-Hertz-Netze?

(2 Punkte) Die (Generator-)Drehzahl beträgt im 50-Hertz-Netz 3000 U/min im 60-Hertz-Netz 3600 U/min. Um die drehzahlbedingten höheren Fliehkräfte bei einer Frequenz von 60 Hz auszugleichen, werden die Schaufelradien verringert.

(1 Punkt) Dies führt zu geringeren Massenströmen und damit einhergehend geringeren Leistungen.

- (d) **(3 Punkte)** In dem qualitativen T,s -Diagramm ist ein einfacher kombinierter Gas- und Dampfprozess dargestellt. Wie kann durch Modifikation des Wasser-Dampf-Kreislaufs dessen aufgenommene Exergie im Abhitzeessel erhöht werden? Die minimale Temperaturdifferenz der Wärmeübertrager soll unverändert bleiben. Begründen Sie Ihre Antwort.



(1 Punkt) Mehrdruckabhitzeessel

(2 Punkte) Durch Aufteilung des Stoffstroms auf unterschiedliche Druckniveaus lässt sich das Temperaturprofil der kalten Seite im Abhitzeessel so beeinflussen, dass sich die Fläche im T,s -Diagramm zwischen der warmen und kalten Seite verkleinert. Dabei steigt die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme bzw. die Exergievernichtung durch die Wärmeübertragung sinkt.

Alternativ: überkritischer Dampfkraftprozess; Argumentation analog.

8. Kältetechnik I 9 Punkte

- (a) (9 Punkte) Stellen Sie einen einfachen realen Kompressionskälteprozess mit adiabater Drosselung in einem $\log(p), h$ -Diagramm dar. Kennzeichnen Sie die Änderung im Prozess und in der spezifischen Kühlleistung, wenn die Drosselung nicht adiabat erfolgt. Zeichnen Sie notwendige Isolinien zur Verdeutlichung der realen Prozessführung.

1 Pkt für (Isotherme oder isobare)

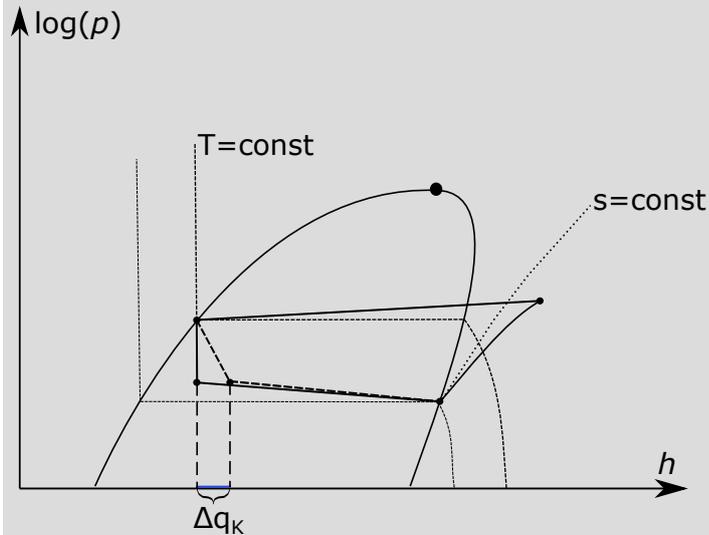
1 Pkt für Isentrope

1 Pkt je realer ZÄ

1 Punkt nicht adiabate Drossel und für neue Verdampfungsgrade

1 Pkt Änderung spez. Kühlleistung

1 Pkt für Nassdampfgebiet und Beschriftung



9. Vergasung 6 Punkte

- (a) **(3 Punkte)** Nennen Sie die drei grundlegenden Vergasertypen.

Festbett-, Wirbelschicht-, Flugstromvergaser (je 1 Punkt)

- (b) **(1 Punkt)** Bei welchem Vergasertypen werden die höchsten Austrittstemperaturen erreicht?

beim Flugstromvergaser (1 Punkt)

- (c) **(2 Punkte)** Geben Sie die übliche Definition des Vergasungswirkungsgrads (cold gas efficiency) an. Welchen Nachteil hat diese Betrachtungsweise?

$$\eta_{\text{Vergasung}} = \frac{(\dot{m} \cdot H_u)_{\text{Produktgas}}}{(\dot{m} \cdot H_u)_{\text{Brennstoff}}} \quad (1 \text{ Punkt})$$

die thermische Energie des Produktgases bleibt unberücksichtigt (1 Punkt)

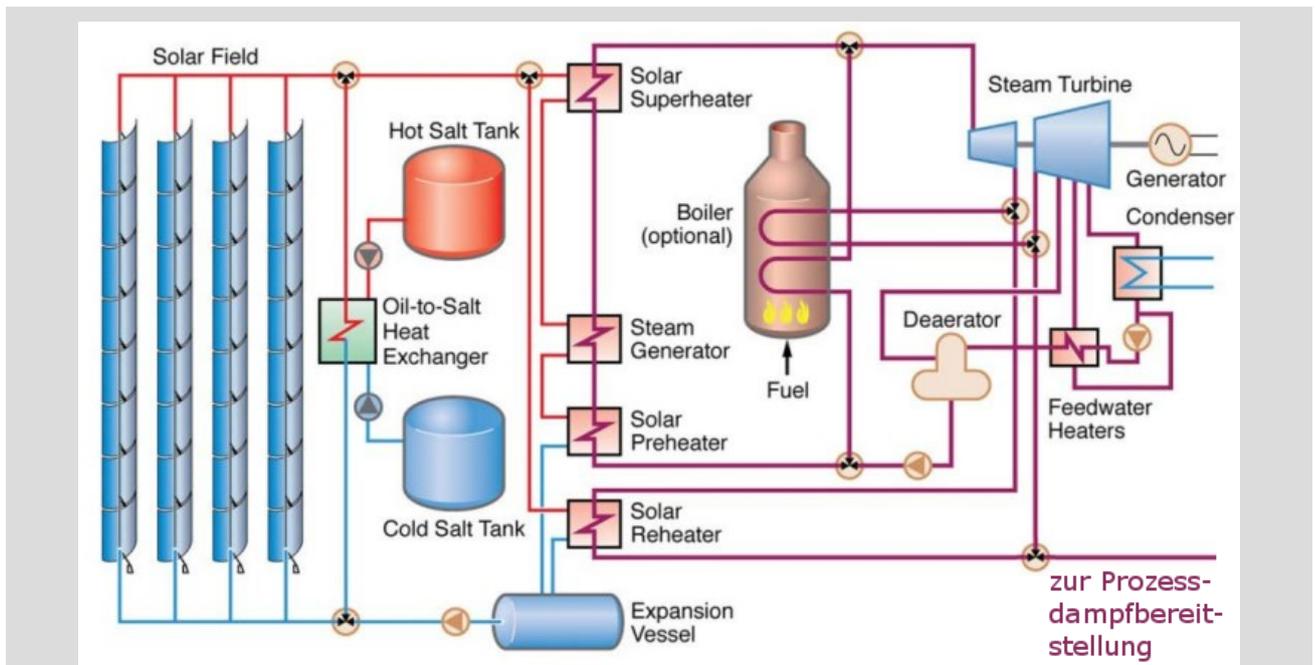
(halber Punkt, wenn geschrieben wurde, dass sich hohe Vergaseraustrittstemperaturen nachteilig auf den Wirkungsgrad auswirken)

10. Erneuerbare Energieträger 10 Punkte

- (a) (2 Punkte) Was verstehen Sie unter solarthermischer Stromerzeugung mit einem Konzentrationsfaktor größer 1? Beschreiben Sie stichpunktartig.

- Bereitstellung elektrischer Energie aus Solarstrahlung
- Sekundärkreislauf i.d.R. Clausius-Rankine- oder Brayton-Kreislauf
- Konzentration der Strahlung durch eine dem Absorber vorgeschalteten optischen Vorrichtung (reflektierende Flächen)
- Ziel der Strahlungskonzentration: Erhöhung der möglichen Absorberrtemperatur, Maximierung der Exergie der gesammelten Wärme, Erhöhung des Wirkungsgrades
- weiterer Vorteil der Strahlungskonzentration: kleinere Absorberflächen, thermische Verluste durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung im Vergleich zu größeren Absorberflächen reduziert

- (b) (8 Punkte) Eine Solarthermieanlage soll zum Betrieb einer Meerwasserentsalzungsanlage eingesetzt werden. Der Betrieb soll durchgängig (24h/7d) gewährleistet sein. Die Anlage soll Prozessdampf und elektrische Leistung zur Verfügung stellen. Zeichnen Sie ein qualitatives Blockschaltbild mit allen notwendigen Komponentengruppen sowie Stoff- und Energieströmen. Beschriften Sie eindeutig.



je (1 Punkt)

- Solarfeld inkl. Pumpe
- Thermischer Speicher und/oder Zusatzfeuerung
- Dampferzeuger
- Dampfturbine mit Generator
- Prozessdampfanzapfung
- Kondensator
- Speisewasserpumpen, ggf. -vorwärmer
- Beschriftung

11. Kältetechnik II 8 Punkte

(a) (2 Punkte) Nennen Sie zwei wesentliche Unterschiede zwischen einer Absorptions- und einer Kompressionskältemaschine!

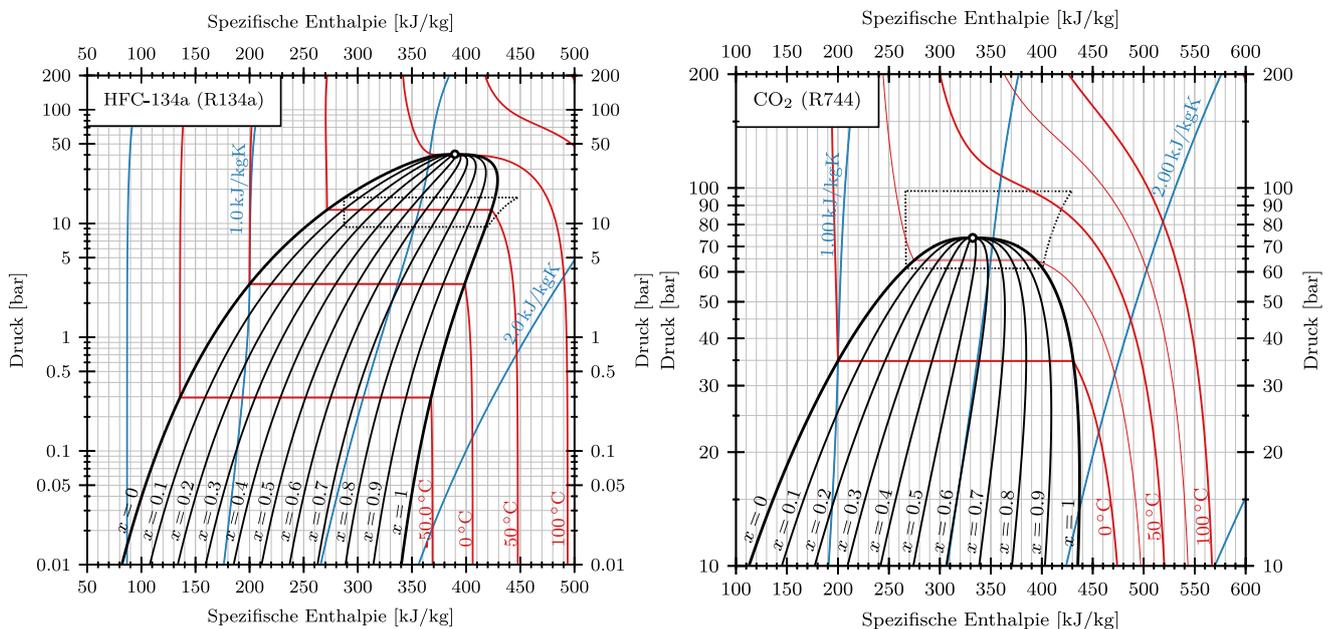
- Arbeitsmittel ist ein Zweistoffgemisch.
- Druckerhöhung erfolgt im flüssigen statt im gasförmigen Zustand.

(b) (3 Punkte) Was ist die sogenannte Inversionstemperatur T_I ? Was muss bei Abkühlung eines Stoffes mit Temperatur T beachtet werden, für den gilt $T > T_I$?

- Die Inversionstemperatur gibt die Temperatur an, bei der der Joule-Thomson-Effekt sein Vorzeichen ändert (1 Punkt).
- Liegt die aktuelle Temperatur oberhalb der Inversionstemperatur geht mit einer Druckminderung eine Temperaturerhöhung einher (1 Punkt).
- Stoffe für die gilt $T > T_I$ müssen mit einem extern Kühlmedium abgekühlt werden bis die Inversionstemperatur unterschritten ist. Erst danach kann der JT für eine weitere Kühlung verwendet werden (1 Punkt).

(c) (3 Punkte) Gegeben ist der Ausschnitt des $\log(p),h$ -Diagramms für R134a und CO_2 .

1. Welcher Unterschied ergibt sich im Wärmepumpenbetrieb bei Verwendung von CO_2 zur Versorgung eines Heizungssystems, wenn ein Strom von 25 auf 50 °C erwärmt werden soll?
2. Zeigen Sie einen Vor- und einen Nachteil auf.



- transkritische Prozessführung.
- höhere Drücke führen zu höheren Investitionskosten.
- gleitende Temperatur bei Wärmeabgabe vorteilhaft bei Erwärmung von Wasser (geringere Temperaturdifferenz), weil keine Kondensation.

12. Exergoökonomische Analyse 10 Punkte

- (a) **(1 Punkt)** Warum kann nur die Exergie als Bezugsgröße für die Kosten in Energieumwandlungsanlagen eingesetzt werden?

Nur die Exergie bewertet unterschiedliche Produkte einer Anlage (Dampf, Elektrische Energie, Produktstoffe) qualitativ gleichwertig.

- (b) **(2 Punkte)** Was sind die Ursachen für die Zunahme der Kosten pro Exergieeinheit bei einer Dampfturbine?

$$c_{\text{ein}} \ll c_W$$

Exergievernichtung, Beitrag der Investitions- sowie Betriebs- und Wartungskosten

- (c) **(2 Punkte)** Notieren Sie für die Kostenbilanz in der Form

$$\dot{C}_P = \dot{C}_F + \dot{Z}_k$$

für einen Wärmeübertrager mit

- Zustand 1: Eintritt kalter Strom
- Zustand 2: Austritt kalter Strom
- Zustand 3: Eintritt warmer Strom
- Zustand 4: Austritt warmer Strom

und $T_3 < T_0$ die Beziehungen für \dot{C}_P und \dot{C}_F .

$$\dot{C}_P = \dot{C}_4 - \dot{C}_3$$

$$\dot{C}_F = \dot{C}_1 - \dot{C}_2$$

- (d) **(5 Punkte)** Wie wird der Kostenstrom \dot{Z}_k einer Komponente, welchen Sie für die exergoökonomische Analyse benötigen, ermittelt? Gehen Sie davon aus, dass für den Gesamtprozess die nivellierten investitionsbezogenen Kosten CI und die nivellierten Betriebs- und Wartungskosten OM und für alle Komponenten k die Purchased Equipment Cost PEC_k bekannt sind. Ebenso vorgegeben werden die äquivalenten Jahresvollbenutzungsstunden τ der Gesamtanlage. Formulieren Sie geeignete Gleichungen.

$$(1P) \quad \dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}$$

$$(2P) \quad \dot{Z}_k^{CI} = \frac{CI}{\tau} \frac{PEC_k}{\sum PEC_k}$$

$$(2P) \quad \dot{Z}_k^{OM} = \frac{OM}{\tau} \frac{PEC_k}{\sum PEC_k}$$

13. Energiespeicher 8 Punkte

(a) **(2 Punkte)** Ordnen Sie folgende Energiespeichertechnologien nach aufsteigendem Zykluswirkungsgrad (round-trip-efficiency). Geben Sie die richtige Reihenfolge mit Hilfe der angegebenen Zahlen an.

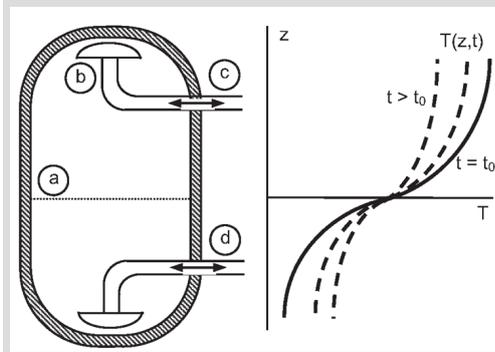
1. Pumpspeicherkraftwerk
2. Druckluftspeicherkraftwerk
3. Lithium-Ionen-Batterie

(je richtiger Beziehung 1 P, max. 2P)

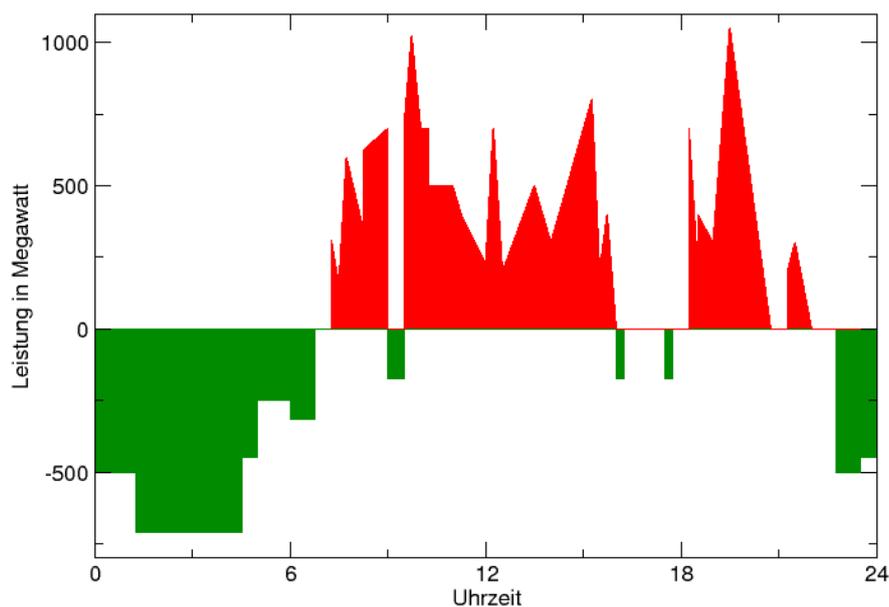
2,1,3

(b) **(3 Punkte)** Bei Kurzzeit-Wärmespeichern handelt es sich in der Regel um Verdrängungsspeicher, welche unter anderem zur Fernwärmeversorgung genutzt werden. Die Temperaturverteilung im Wärmespeicher ergibt sich durch Dichteunterschiede. Stellen Sie für zwei Zeitpunkte t_0 und $t > t_0$ die Temperaturverteilung über die gesamte Höhe des Wärmespeichers dar. Gehen Sie davon aus, dass zwischen t_0 und t keine Be- oder Entladung erfolgt.

(je richtigen Verlauf 1P, Beschriftung 1P)

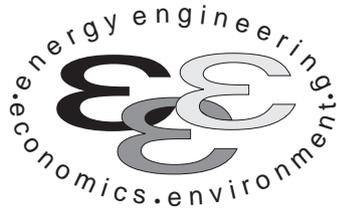


(c) **(3 Punkte)** Das Diagramm zeigt den typischen Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerkes im Laufe eines Tages (Pumpbetrieb: Leistung negativ; Generatorbetrieb: Leistung positiv). Charakterisieren Sie Pumpspeicherkraftwerke und erläutern Sie stichpunktartig die Unterschiede beim Profil (Verlauf, Zeit) des Pump- und Generatorbetriebes.



Pumpspeicherkraftwerke sind sehr flexibel (große Lastgradienten in kurzer Zeit möglich) und können daher zur Frequenzregelung eingesetzt werden; insbesondere zur Spitzenlastabdeckung. Pumpbetrieb, Beladen: v.a. nachts, also zu Zeiten niedrigen Stromverbrauchs; Leistung über längeren Zeitraum konstant; i.d.R. Überschuss aus konventionellen Anlagen, um ein Abschalten der Blöcke (Braunkohle, Kernenergie) zu vermeiden.

Generatorbetrieb, Entladen: v.a. tagsüber, also zu Zeiten hohen Stromverbrauchs (Spitzenlast); kurzfristige Änderungen der Leistung, da Bereitstellung von Regelenergie; Ausgleich der Residuallast (stark schwankend, insb. zu Zeiten hoher Spitzenlast)



**Energietechnik – 3. März 2020
– MUSTERLÖSUNG –
Teil II – Rechenaufgaben**

-
- Tragen Sie Ihren Namen und die Matrikelnummer ein.
 - Rechenwege müssen nachvollziehbar dargestellt werden. Nicht zu wertende Berechnungen oder Diagramme müssen durchgestrichen werden. Es ist leserlich zu schreiben.
 - Beschriften Sie die von Ihnen verwendeten Rechenblätter mit Namen und Matrikelnummer und nummerieren Sie die Seiten.
 - Bitte geben Sie alle Blätter nach der Bearbeitungszeit im gehefteten Zustand ab.
-

Name:	
Martikelnummer:	

Aufgabe:	14	15	16	Summe
Punktzahl:	50	30	30	110
Davon erreicht:				

14. Thermodynamische Analyse 50 Punkte

In der Abbildung ist das Fließbild eines Gas- und Dampfturbinen-Kombikraftwerks (GuD-Kraftwerk) zu sehen. Der Wasser-Dampf-Kreislauf ist als Zweidruckprozess ausgeführt. In einem Gasturbinen-Verdichter (VER) wird zunächst Umgebungsluft (Strom 1) verdichtet und anschließend der Brennkammer (BK) zugeführt. In der Brennkammer wird reines Methan (Strom 3) mit der verdichteten Luft verbrannt und das Rauchgas nachfolgend im Expander (EXP) entspannt.

Das heiße Abgas wird anschließend genutzt, um im Hochdruckteil des Abhitzekessels (Komponenten ÜH, HVD und HVW) überhitzten Dampf (Strom 12) bereitzustellen. Dieser wird anschließend in der Hochdruck-Dampfturbine (HDT) entspannt, mit Dampf (Strom 14) aus dem Mitteldruckteil des Abhitzekessels (Komponenten MVD und MVW) gemischt und in der Mitteldruck-Turbine (MDT) entspannt. Ein Teil des Niederdruckdampfes (Strom 16) wird dem Speisewasserbehälter (SWB) zugeführt, der Rest (Strom 17) wird in der Niederdruck-Turbine (NDT) entspannt. Der entspannte Dampf wird im Kondensator (K) mit Hilfe von Flusswasser (Strom 31), kondensiert.

Das Kondensat wird mittels der Kondensatpumpe (KP) dem Speisewasserbehälter zugeführt und mit dem Dampf aus der Mitteldruck-Turbine gemischt. Nach der Druckerhöhung durch die Speisewasserpumpe 1 (SWP1) und der weiteren Erwärmung im Mitteldruck-Vorwärmer (MVW) wird das Kreislaufwasser geteilt (Ströme 24 und 25). Strom 24 wird zur Erzeugung des Mitteldruckdampfes dem Mitteldruck-Vorwärmer (MVD) zugeführt. Strom 25 wird mittels der Speisewasserpumpe 2 (SWP2) auf Hochdruckniveau gebracht und zur Bereitstellung des Hochdruckdampfes nacheinander dem Hochdruck-Vorwärmer (HVW), dem Hochdruck-Verdampfer (HVD) und dem Überhitzer (ÜH) zugeführt. Das abgekühlte Rauchgas (Strom 10) wird an die Umgebung abgegeben.

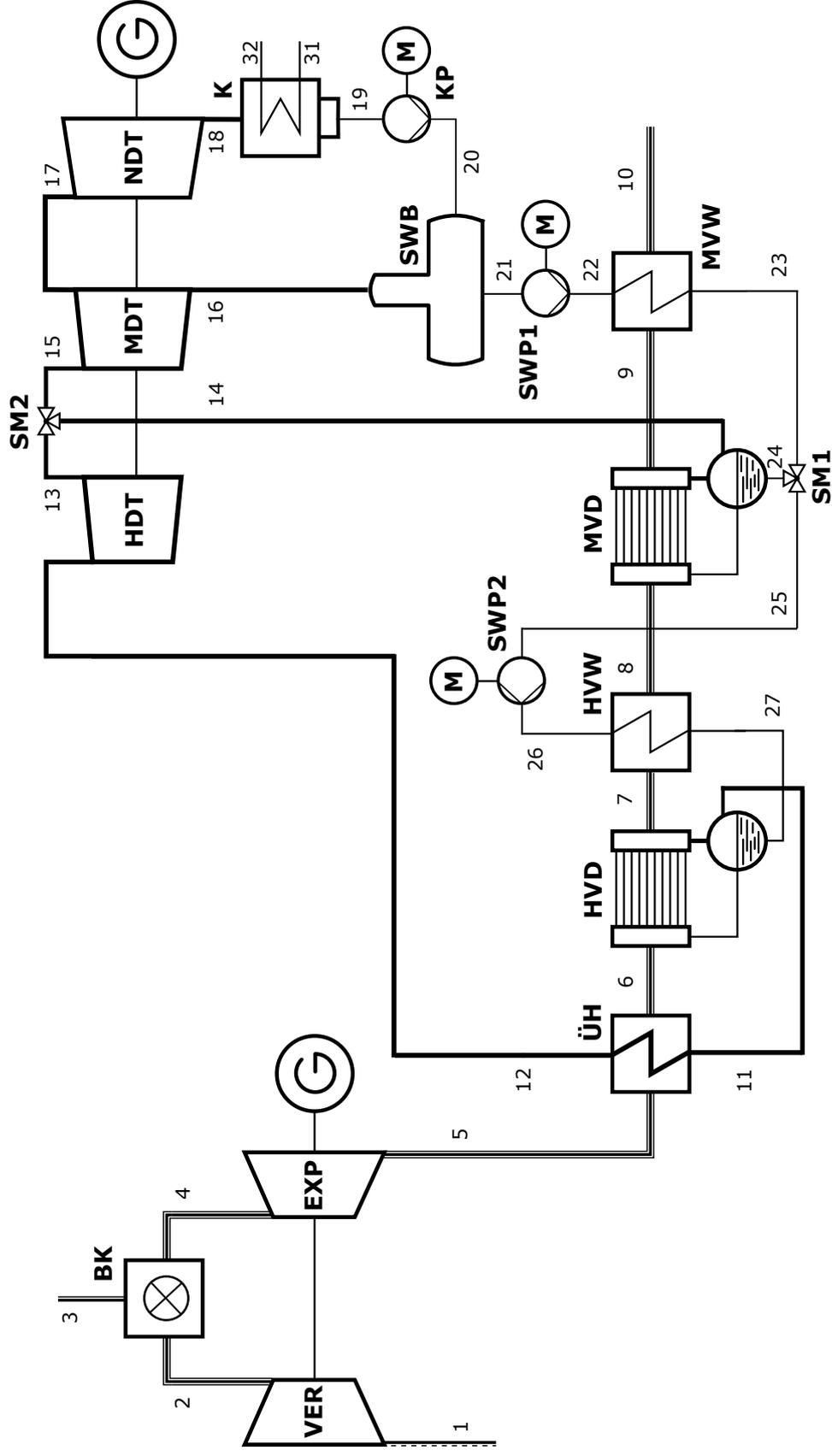
Die Stoffwerte für Wasser werden entsprechend IAPWS-IF97 berechnet. Die Wasserdampf tabel aus der Formelsammlung kann folglich nicht für die Lösung der Aufgaben verwendet werden.

Annahmen und gegebene Werte

- Alle Komponenten arbeiten stationär und sind nach außen adiabat.
- Kinetische und potentielle Energien können vernachlässigt werden.
- Druckverluste in den dargestellten Wärmeübertragern, der Brennkammer und den Rohrleitungen können vernachlässigt werden.
- Die Umgebungsbedingungen sind gegeben durch $T_0 = 20\text{ °C}$ und $p_0 = 1\text{ bar}$.
- Die spezifische Enthalpie und die spezifische Entropie von Wasser (IAPWS-IF97 Formulierung) bei Umgebungsbedingungen betragen $h_0 = 84,01\text{ kJ/kg}$ und $s_0 = 0,2965\text{ kJ/kgK}$.
- Der isentrope Wirkungsgrad **aller** Pumpen beträgt $\eta_{s,P} = 85\%$.
- Der mechanische Wirkungsgrad der Turbinen und des Verdichters beträgt $\eta_m = 99\%$. Der Wirkungsgrad der Generatoren wird mit $\eta_G = 98,5\%$ angegeben.
- Die Speisewasserpumpe 2 (SWP2) und die Kondensatpumpe (KP) arbeiten mit einem elektrisch-mechanischem Wirkungsgrad von $\eta_P = 96\%$.
- Der elektrisch-mechanische Wirkungsgrad der Speisewasserpumpe 1 (SWP1) ist **unbekannt** und kleiner als 100% .
- Die elektrische Leistung der Speisewasserpumpe 1 (SWP1) beträgt $\dot{W}_{el,SWP1} = 0,25\text{ MW}$.

Legende:

-  Luft
-  Brennstoff
-  Rauchgas
-  Welle, mechanisch
-  Dampf
-  Kreislaufwasser
- BK** Brennkammer
- VER** Gasturbinen-Verdichter
- EXP** Gasturbinen-Expander
- HVW** Hochdruck-Vorwärmer
- HVD** Hochdruck-Verdampfer
- ÜH** Überhitzer
- MVW** Mitteldruck-Vorwärmer
- MVD** Mitteldruck-Verdampfer
- HDT** Hochdruck-Dampfturbine
- MDT** Mitteldruck-Dampfturbine
- NDT** Niederdruck-Dampfturbine
- K** Kondensator
- KP** Kondensatpumpe
- SM** Splitter / Mischer
- SWB** Speiswasserbehälter
- SWP** Speisewasserpumpe

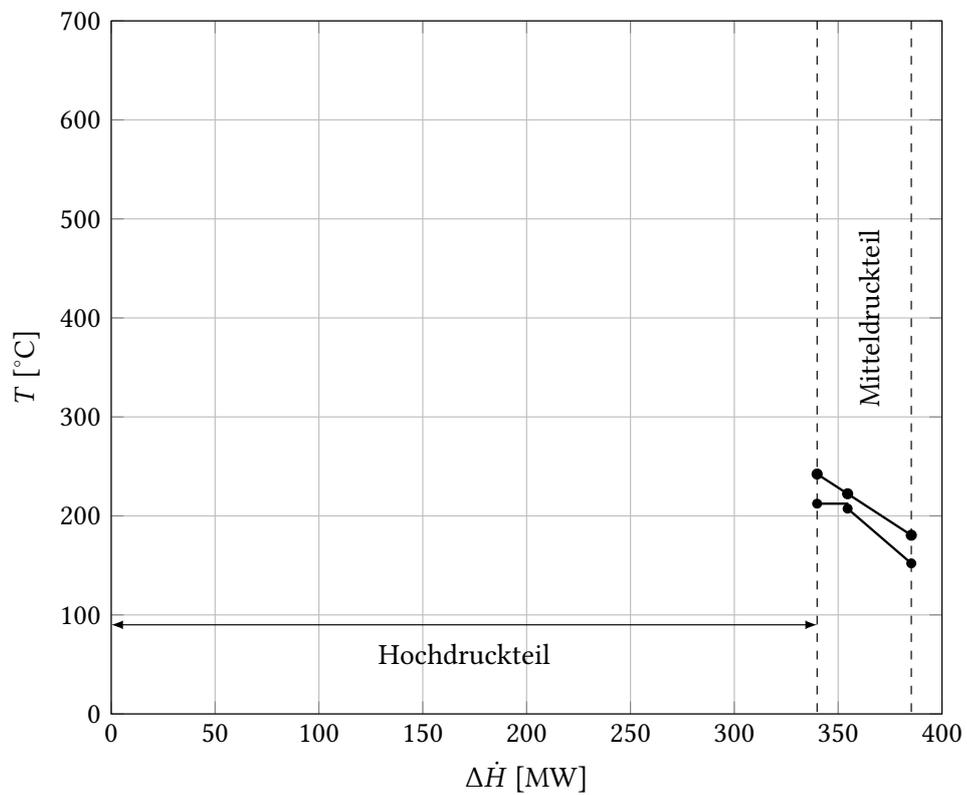
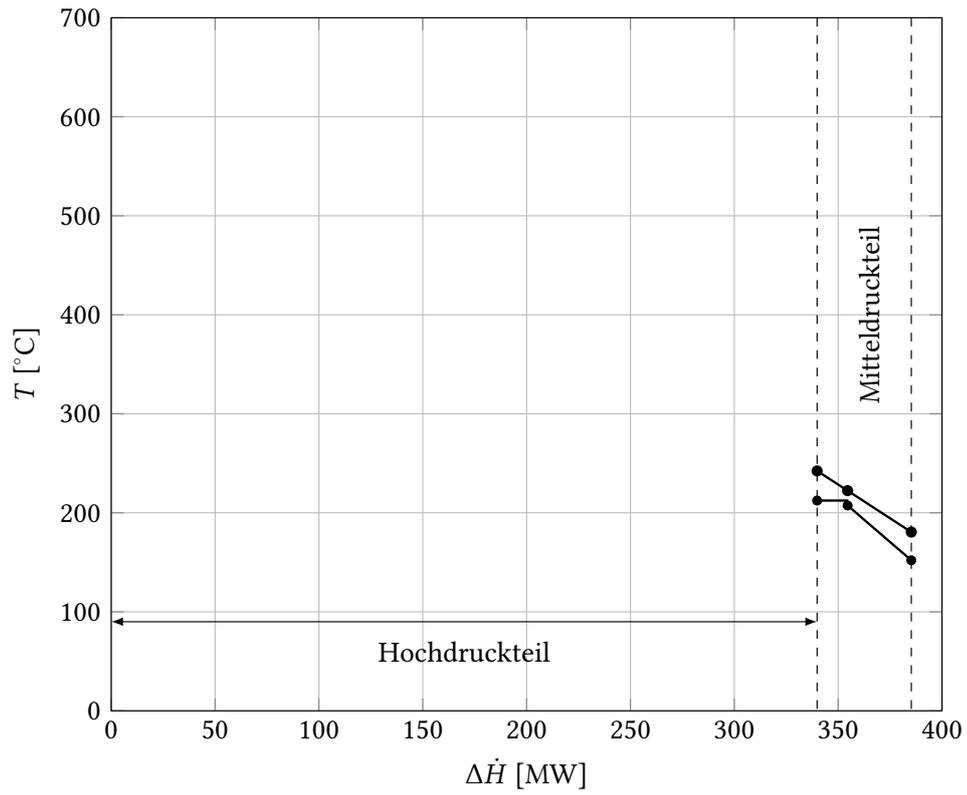


Aufgaben

- (a) **(7 Punkte)** Berechnen Sie die abgegebene elektrische Leistung der Generatoren der Gasturbine $\dot{W}_{el,GT}$ und der Dampfturbinengruppe $\dot{W}_{el,DT}$ sowie die gesamte aufgenommene elektrische Leistung der Pumpen $\dot{W}_{el,P}$. Bestimmen Sie weiterhin die ins Netz eingespeiste elektrische Leistung des Kraftwerks $\dot{W}_{el,netto}$.
- (b) **(5 Punkte)** Berechnen Sie den exergetischen Wirkungsgrad des Mischvorwärmers/ Speisewasserbehälters ε_{SWB} .
- (c) **(7 Punkte)** Ergänzen Sie das vorliegende $T, \Delta \dot{H}$ -Diagramm um die Wärmeübertrager des Hochdruckteils des Abhitzeessels (Komponenten $\dot{U}H$, HVD, HVW). Berücksichtigen Sie dabei die Stromführung entsprechend der Abbildung. Nehmen Sie an, dass die spezifischen Wärmekapazitäten konstant sind.
- (d) **(4 Punkte)** Schlagen Sie zwei konkrete Maßnahmen vor, mit der das Prozessdesign (Auswahl und Anordnung der Komponenten) aus thermodynamischer Sicht verbessert werden könnte und begründen Sie Ihre Aussage.
- (e) **(4 Punkte)** Geben Sie zwei mögliche Definitionen für den exergetischen Wirkungsgrad des Gasturbinensystems (Komponenten VER, BK, EXP) inklusive Generator als Teilsystem der Gesamtanlage an. Eine Definition soll nur Gesamtexergieströme berücksichtigen, die andere Definition soll physikalische und chemische Exergien getrennt betrachten. Es sollen keine Werte berechnet werden.
- (f) **(3 Punkte)** Berechnen Sie den in die Brennkammer eintretenden Methanmassenstrom \dot{m}_3 .
- (g) **(8 Punkte)** Bestimmen Sie die spezifische Enthalpie bei isentroper Verdichtung h_{22s} am Zustandspunkt 22 hinter der ersten Speisewasserpumpe (SWP1).
Hinweis: Der Speisewasserstrom wird nach dem Mitteldruckvorwärmer im Splitter (SM1) geteilt.
- (h) **(6 Punkte)** Bestimmen Sie die Exergievernichtung im Überhitzer ($\dot{U}H$). Nennen Sie zwei allgemeine Maßnahmen, mit denen sich die Exergievernichtung bei der Wärmeübertragung reduzieren lässt.
- (i) **(6 Punkte)** Für die Mitteldruck-Turbine (MDT) sollen im Rahmen einer exergoökonomischen Analyse die exergiebezogenen Kostenströme in der vorliegenden Anlage betrachtet werden. Stellen Sie dazu eine Kostenbilanz für die Mitteldruck-Turbine (MDT) sowie alle notwendigen Kosten-Hilfsbeziehungen auf. Definieren Sie für diese Anlagenkomponente den Kostenstrom \dot{C}_P , der mit dem exergetischen Nutzen verbunden ist und den Kostenstrom \dot{C}_F , der mit dem exergetischen Aufwand verbunden ist. Es sollen keine Werte berechnet werden.

Tabelle 1: Thermodynamische Daten der Stoffströme

Nr.	\dot{m} [kg/s]	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	e^{PH} [kJ/kg]	\dot{H} [MW]	\dot{S} [MW/K]	\dot{E}^{PH} [MW]
1		20,00	1,00	20,25	6,9048	0,00	13,27	4,5232	0,00
2		396,43	15,00	411,09	6,9773	369,60	269,3	4,5707	242,12
3		20,00	15,00	50058,70				0,1743	7,04
4	672,20	1386,26	15,00	1675,53	8,3247	1301,16	1126,29	5,5959	874,64
5	672,20	678,53	1,00	766,13	8,4108		514,99	5,6537	
6	672,20	530,11	1,00	588,22	8,2076		395,40		
7	672,20	305,01	1,00	330,01	7,831	100,37	221,83	5,264	67,47
8	672,20	242,30	1,00	260,54	7,7038	68,18	175,13	5,1785	45,83
9	672,20	222,38	1,00	238,68	7,6606	59,00	160,44	5,1494	39,66
10	672,20	180,53	1,00	193,05	7,5644	41,57	129,77	5,0848	27,94
11	118,14	295,01	80,00	2758,61	5,7448		325,90	0,6787	
12	118,14	653,53	80,00	3770,89	7,1649		445,49	0,8465	
13	118,14	433,78	20,00	3322,45	7,2365	1203,96	392,51	0,8549	142,24
14	7,68	212,38	20,00	2798,38	6,3392	942,96	21,50	0,0487	7,24
15	125,82	419,21	20,00	3290,45	7,1908	1185,37	414,01	0,9048	149,15
16	22,41	247,68	5,00	2956,32	7,2633	829,97	66,24	0,1627	18,6
17	103,42	247,68	5,00	2956,32	7,2633	829,97	305,73	0,7511	85,83
18	103,42	32,88	0,05	2288,93	7,5056	91,55	236,71	0,7762	9,47
19	103,42	32,88	0,05	137,77	0,4763	1,05	14,25	0,0493	0,11
20	103,42	32,91	5,00	138,35	0,4765	1,55	14,31	0,0493	0,16
21	125,82	151,84	5,00	640,19	1,8606	97,65	80,55	0,2341	12,29
22	125,82	152,07	20,00						
23	125,82	207,38	20,00					0,3020	
24	7,68	207,38	20,00					0,0184	1,42
25		207,38	20,00				104,66	0,2835	21,88
26		208,72	80,00	894,12	2,4025	192,72	105,63	0,2838	22,77
27		290,01	80,00	1289,38	3,1587	366,31	152,33	0,3732	43,28
31	4129,37	15,00	1,00	63,08	0,2245	0,18	260,47	0,9269	0,75
32	4129,37	27,88	1,00	116,95	0,4074	0,43	482,93	1,6822	1,79



$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{el,GT} &= [(\dot{H}_1 - \dot{H}_2)/\eta_{um} + (\dot{H}_4 - \dot{H}_5) \cdot \eta_{um}] \cdot \eta_{GT} \quad (1) \\
 &= [(13,27 - 269,3)/0,99 + (1126,29 - 514,99) \cdot 0,99] \cdot 0,985 \text{ MW} \\
 &= 341,37 \text{ MW} \quad (1)
 \end{aligned}$$

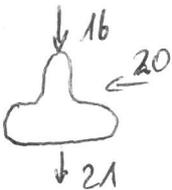
$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{el,DT} &= (\dot{H}_{12} + \dot{H}_{14} - \dot{H}_{16} - \dot{H}_{18}) \cdot \eta_{um} \cdot \eta_{GT} \quad (1) \\
 &= (445,49 + 21,5 - 66,24 - 236,71) \cdot 0,99 \cdot 0,985 \text{ MW} \\
 &= 159,96 \text{ MW} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{el,P} &= (\dot{H}_{20} - \dot{H}_{18})/\eta_P + (\dot{H}_{26} - \dot{H}_{25})/\eta_P + \dot{W}_{el,SWP1} \quad (1) \\
 &= (14,31 - 14,25)/0,96 \text{ MW} + (105,63 - 104,66)/0,96 \text{ MW} + 0,25 \text{ MW} \\
 &= 1,32 \text{ MW} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{el,netto} = \dot{W}_{el,GT} + \dot{W}_{el,DT} - \dot{W}_{el,P} = 500,01 \text{ MW} \quad (1)$$

~~7~~

b)



$$\dot{E}_F = \dot{w}_{16} (e_{16}^{ph} - e_{21}^{ph}) \quad (1)$$

$$\dot{E}_P = \dot{w}_{20} (e_{21}^{ph} - e_{20}^{ph}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{SWB} = \frac{\dot{w}_{20} (e_{21}^{ph} - e_{20}^{ph})}{\dot{w}_{16} (e_{16}^{ph} - e_{21}^{ph})} = \frac{103,42 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (97,65 - 1,55) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{22,41 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (829,97 - 97,65) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,606$$

→ je (1) Pkt. Auswahl richtiges in u. richtiges Δe^{ph}

(1)

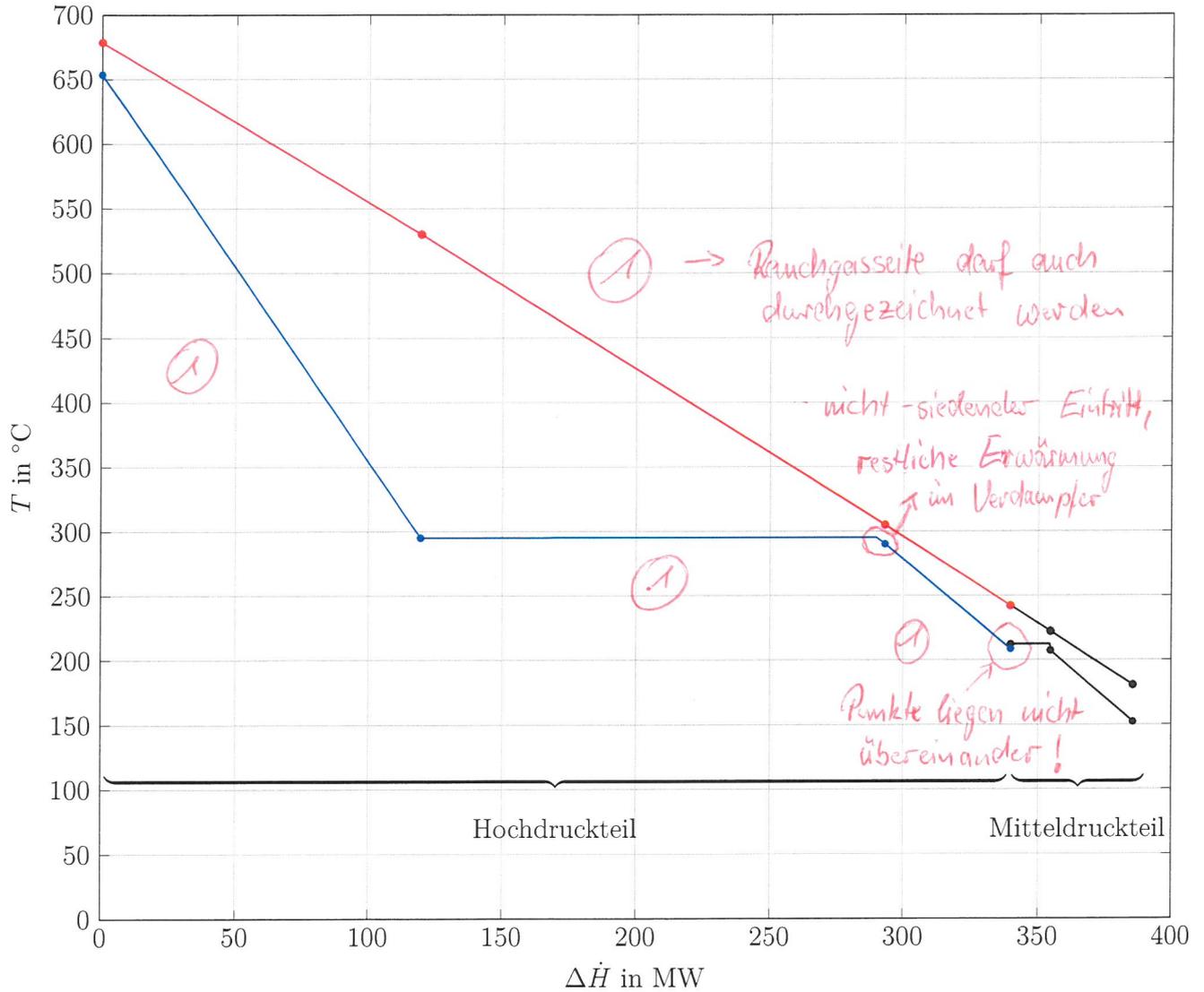
~~5~~

c) $\dot{Q}_{\text{ÜH}} = \dot{H}_5 - \dot{H}_6 = 119,59 \text{ MW}$ (1)

$\dot{Q}_{\text{HVD}} = \dot{H}_6 - \dot{H}_7 = 173,57 \text{ MW}$ (1)

$\dot{Q}_{\text{HVV}} = \dot{H}_7 - \dot{H}_8 = 46,7 \text{ MW}$ (1)

→ auch grafische Lösung ohne Berechnung der \dot{Q} 's möglich, da c_p 's konstant
 → aus konstanter Steigung d. Rauchgassseite u. Bekannten T 's ergeben sich \dot{W} -Abschnitte



(7)

d) Beispiele: - weitere Verdampfer-Druckstufen einbauen (1)
 → kleineres \dot{E}_D bei \dot{W}_D (geringere Fläche zw. warmer u. kalter Seite in $T, \Delta H$ -Diagramm) (1)

- Verhältnis $\frac{\dot{w}_{24}}{\dot{w}_{25}}$ vergrößern (1)
 → gleicher Grund wie oben (1)

weitere: - MD-Überhitzer hinzufügen
 → kleineres ΔT bei SM2

- Strom 10 ($T=180,53^\circ\text{C}$) weiter für Vorwärmer nutzen
 → \dot{E}_L verringern

- weitere Turbinenanzapfung u. Vorwärmung u. Strom 20
 → ΔT v. Strom 16 u. 20 ↓, \dot{E}_{SWB} ↑

...

(4)

e) $\epsilon_{GT} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F}$

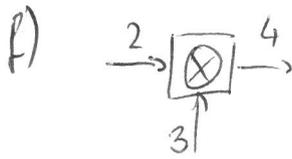
1) $\dot{E}_P = \dot{W}_{el,GT} + (\dot{E}_5 - \dot{E}_1)$ (1)

$\dot{E}_F = \dot{E}_3$ (1)

2) $\dot{E}_P = \dot{W}_{el,GT} + (\dot{E}_5^{PH} - \dot{E}_3^{PH} - \dot{E}_1^{PH})$ (1)

$\dot{E}_F = (\dot{E}_3^{CH} + \dot{E}_1^{CH}) - \dot{E}_5^{CH}$ (1)

(4)



$$0 = \dot{H}_2 + \dot{H}_3 - \dot{H}_4 \quad (1)$$

$$\dot{H}_3 = \dot{H}_4 - \dot{H}_2 = 856,99 \text{ MW} \quad (1)$$

$1126,79 \text{ MW} - 269,8 \text{ MW}$

$$\dot{m}_3 = \frac{\dot{H}_3}{h_3} = \frac{856,99 \text{ MW}}{50058,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 17,12 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

(3)

g)
$$\eta_{s,p} = \frac{h_{22s} - h_{21}}{h_{22x} - h_{21}}$$

→ 1. Schritt: \dot{H}_{23} bestimmen → 3. Alternativen (Splitter SM2 bilanzieren)

1. Alternative (1)

$$\dot{E}_{23}^{PH} = \dot{E}_{24}^{PH} + \dot{E}_{25}^{PH} = 1,42 \text{ MW} + 21,88 \text{ MW} = 23,3 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{23}^{PH} = (\dot{H}_{23} - \dot{m}_{23} \cdot h_0) - T_0 (\dot{S}_{23} - \dot{m}_{23} \cdot s_0) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_{23} &= \dot{E}_{23}^{PH} + \dot{m}_{23} \cdot h_0 + T_0 (\dot{S}_{23} - \dot{m}_{23} \cdot s_0) \\ &= 23,3 \text{ MW} + 125,82 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 84,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} / 1000 + 293,15 \text{K} (0,302 \frac{\text{MW}}{\text{K}} - 125,82 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,2965 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} / 1000) \\ &= 111,47 \text{ MW} \quad (1) \end{aligned}$$

2. Alternative

$$\dot{E}_{24} = (\dot{H}_{24} - \dot{m}_{24} \cdot h_0) - T_0 (\dot{S}_{24} - \dot{m}_{24} \cdot s_0) \quad (1)$$

$$\dot{H}_{24} = \dot{E}_{24} + \dot{m}_{24} \cdot h_0 + T_0 (\dot{S}_{24} - \dot{m}_{24} \cdot s_0)$$

$$= 6,8 \text{ MW} \quad (1)$$

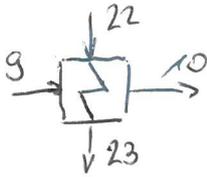
$$\dot{H}_{23} = \dot{H}_{24} + \dot{H}_{25} = 111,46 \text{ MW} \quad (1)$$

3. Alternative

$$h_{23} = h_{25} \quad (1) \quad \dot{m}_{25} = \dot{m}_{23} - \dot{m}_{24} = 18,14 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

$$h_{25} = \frac{\dot{H}_{25}}{\dot{m}_{25}} = 885,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$\dot{H}_{23} = \dot{m}_{23} \cdot h_{25} = 111,46 \text{ MW} \quad (1)$$



$$0 = \dot{H}_9 - \dot{H}_{10} + \dot{H}_{22} - \dot{H}_{23} \quad (1)$$

$$\dot{H}_{22} = \dot{H}_{23} + \dot{H}_{10} - \dot{H}_9$$

$$= 111,46 \text{ MW} + 129,77 \text{ MW} - 160,44 \text{ MW}$$

$$= 80,79 \text{ MW} \quad (1)$$

$$h_{22} = \frac{\dot{H}_{22}}{\dot{m}_{22}} = \frac{80,79 \text{ MW}}{125,82 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 642,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$h_{22s} = h_{21} + \eta_{s,p} (h_{22} - h_{21})$$

$$= 640,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,85 \cdot (642,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 640,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$= 641,82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

8

h) Variante 1

$$0 = \dot{S}_5 - \dot{S}_6 + \dot{S}_{11} - \dot{S}_{12} + \dot{S}_{\text{gen,ÜH}}; \dot{S}_6 = \dot{m}_6 \cdot s_6 = 5,5171 \frac{\text{MW}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{gen,ÜH}} &= \dot{S}_6 - \dot{S}_5 + \dot{S}_{12} - \dot{S}_{11} \\ &= 5,5171 \frac{\text{MW}}{\text{K}} - 5,6537 \frac{\text{MW}}{\text{K}} + 0,8465 \frac{\text{MW}}{\text{K}} - 0,6787 \frac{\text{MW}}{\text{K}} \\ &= 0,0312 \frac{\text{MW}}{\text{K}} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{\text{ÜH}} = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{gen,ÜH}} = 293,15 \text{ K} \cdot 0,0312 \frac{\text{MW}}{\text{K}} = 9,146 \text{ MW} \quad (1)$$

Variante 2

$$0 = \dot{E}_5^{\text{PH}} - \dot{E}_6^{\text{PH}} + \dot{E}_{11}^{\text{PH}} - \dot{E}_{12}^{\text{PH}} - \dot{E}_D \quad (1)$$

$$\dot{E}_D = \dot{E}_5^{\text{PH}} - \dot{E}_6^{\text{PH}} + \dot{E}_{11}^{\text{PH}} - \dot{E}_{12}^{\text{PH}} \quad \dot{E}^{\text{PH}} = \dot{m} [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)]$$

$$= \dot{m}_5 [(h_5 - h_6) - T_0 (s_5 - s_6)] + \dot{m}_{11} [(h_{11} - h_{12}) - T_0 (s_{11} - s_{12})]$$

$$= 79549 \text{ kW} \quad (1) + (-70409 \text{ kW}) \quad (1)$$

$$= 9,14 \text{ MW} \quad (1)$$

Variante 3

$$\text{mit } \Delta p = 0 : \quad \dot{E}_D = T_0 \frac{T_{h,m} - T_{c,m}}{T_{h,m} \cdot T_{c,m}} \dot{Q}$$

$$T_{h,m} = \frac{h_6 - h_5}{s_6 - s_5} = 875,54 \text{ K} \quad (1)$$

$$T_{c,m} = \frac{h_{12} - h_{11}}{s_{12} - s_{11}} = 712,82 \text{ K} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{ÜH}} = \dot{H}_5 - \dot{H}_6 = 119,59 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{\text{ÜH}} = 914 \text{ MW} \quad (1)$$

- Maßnahmen:
- $\Delta T_{\text{wü}} \downarrow$ (1)
 - $T_{\text{wü}}\text{-Niveau} \uparrow$ (1)

6

i)

$$0 = \dot{Z}_{\text{MDT}} + \dot{C}_{15} - \dot{C}_{16} - \dot{C}_{17} + \dot{C}_{w,\text{ein}} - \dot{C}_{w,\text{aus}} \quad (2)$$

$$\dot{C}_{15} = \dot{C}_{16} \quad (1)$$

$$\dot{C}_{15} = \dot{C}_{17} \quad (1)$$

$$\dot{C}_P = \dot{C}_{w,\text{aus}} - \dot{C}_{w,\text{ein}} \quad (1)$$

$$\dot{C}_F = \dot{C}_{15} - \dot{C}_{16} - \dot{C}_{17} \quad (1)$$

6

15. Wirtschaftlichkeitsanalyse 30 Punkte

Die Wärmeversorgung einer Manufaktur wird bisher über einen Contractor (Dienstleister) realisiert. Hierfür wird ein Wärmefestpreis bezahlt. Die Leitung der Manufaktur überlegt den Wärmebedarf zukünftig selbst mittels eines Blockheizkraftwerks (BHKW) zu sichern. Die Auslegung des BHKWs erfolgte auf Grundlage des vorher kalkulierten Wärmebedarfs der Manufaktur. Durch das Projekt werden Einnahmen aus dem Stromverkauf erzielt. Neben den jährlichen Wartungskosten, muss das BHKW zusätzlich innerhalb der Nutzungsdauer einmal überholt werden (Revision).

Prüfen Sie ob das Projekt unter den gegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlich ist, indem Sie den Kapitalwert NPV des Investitionsprojektes bestimmen. Berücksichtigen Sie hierfür sämtliche Kosten, Einsparungen und Einnahmen.

Hinweis für alle Unteraufgaben:

Sofern Sie für den Quereinstieg Ergebnisse aus vorhergehenden, unbeantworteten Aufgabenteilen benötigen, benutzen Sie bitte die in eckigen Klammern angegebenen Werte. Diese stimmen nicht notwendigerweise mit den exakten Werten überein.

Weitere Annahmen und Hinweise

- Vereinfachend wird angenommen, dass die Errichtung der Anlage über Nacht erfolgt. Inbetriebnahmezeitpunkt ist der 01.01.2022.
- Die Zahlung der Investitionskosten erfolgt zum 01.01.2022. Alle weiteren Kosten fallen jeweils am Ende eines Jahres an.
- Die Erlöse fallen jeweils am Ende eines Jahres an.
- Der Bezugszeitpunkt für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der Inbetriebnahmezeitpunkt des BHKWs.
- Führen Sie sämtliche Rechnungen in inflationsbehafteter Währung durch.
- Die Kostensteigerung für Investitionsgüter einschließlich der Revision beträgt $r_{I,n} = 2,5\%/a$.
- Die Erdgaskosten unterliegen einer Kostensteigerung von $r_{FC,n} = 3\%/a$.
- Die jährlichen Wartungskosten unterliegen keiner Kostensteigerung.
- Der an den Contractor zu zahlende Wärmepreis hat keine Kostensteigerung.
- Der Stromverkaufspreis unterliegt einer Kostensteigerung von $r_{Strom,n} = 2,5\%/a$.
- Der erzeugte Strom wird komplett verkauft (kein Eigenbedarf).

Aufgaben

- (a) **(3 Punkte)** Berechnen Sie den jährlichen Bedarf an Brennstoff BR [65 GWh/a], die jährliche Stromerzeugung W_{el} [20 GWh/a] und die jährliche Wärmeauskopplung Q [39 GWh/a] für das geplante BHKW.
- (b) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie den Barwert der Investition PV_I [1 500 €] zum Bezugszeitpunkt.
- (c) **(6 Punkte)** Berechnen Sie den Barwert der Erdgaskosten PV_{FC} zum Bezugszeitpunkt.
- (d) **(4 Punkte)** Ermitteln Sie den Barwert der Wartungskosten PV_{OMC} zum Bezugszeitpunkt.
- (e) **(4 Punkte)** Berechnen Sie den Barwert für die erwarteten Stromerlöse PV_{Strom} .
- (f) **(3 Punkte)** Berechnen Sie den Barwert für die erwarteten Einsparungen PV_E zum Bezugszeitpunkt.
- (g) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie den Barwert der Revision PV_{Rev} zum Bezugszeitpunkt.
- (h) **(4 Punkte)** Errechnen Sie den Kapitalwert NPV des Projekts zum Bezugszeitpunkt. Geben Sie hierfür auch die Formel an, die alle für dieses Projekt relevanten Faktoren berücksichtigt. Treffen Sie mittels dieser durchgeführten Analyse eine abschließende wirtschaftliche Einschätzung zur Investitionsentscheidung des BHKWs. Begründen Sie!

Annahmen und Parameter des Investitionsprojekts zum BHKW

Planungsdaten	
Planungszeitpunkt	01.01.2020
Bezugszeitpunkt	01.01.2022
Inbetriebnahmezeitpunkt	01.01.2022
Wirtschaftliche Nutzungsdauer ab Inbetriebnahme, n	15 a
BHKW-Anlagendaten	
Volllaststunden, t_v	6700 h/a
Wärmeleistung, \dot{Q}	6 MW _{therm}
Thermische Ausbeute, η_{th}	60 %
Gesamtwirkungsgrad, η_{nutz}	90 %
Spezifische Investitionskosten 01.01.2020, i_0	500 € ₂₀₂₀ /kW _{el}
Jährliche Wartungskosten bezogen auf Wärmeauskopplung, omc	0,5 ct/kWh _{therm}
Wirtschaftliche Nutzungsdauer bis zur Revision, n_{Rev}	8 a
Kosten der Revision als Anteil der Investitionskosten, c_{Rev}	50 %
Sonstige Angaben	
Stromverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, p_{Strom}	40 €/MWh _{el}
Wärmepreis des Contractors, $p_{Wärme}$	60 €/MWh _{therm}
Erdgaspreis zum Planungszeitpunkt (01.01.2020), p_{FC}	29 € ₂₀₂₀ /MWh _{LHV}
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate Erdgases, $r_{FC,n}$	3 %/a
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate Strom, $r_{Strom,n}$	2,5 %/a
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate Investitionsgüter, $r_{I,n}$	2,5 %/a
Jährlicher effektiver Zinssatz, i_{eff}	5 %/a
Jährliche Inflationsrate, r_i	2 %/a

Hinweis: Die Ergebnisse bei Quereinstieg sind in grauer Farbe angegeben.

Aufgabe a: (3 Punkte)

Wärmeauskopplung:

$$Q = \dot{Q} \cdot t_V = 40,2 \text{ GWh}_{\text{therm}}/\text{a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Brennstoffbedarf:

$$BR = \frac{Q}{\eta_{\text{th}}} = 67 \text{ GWh}_{\text{LHV}}/\text{a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Stromerzeugung:

$$W_{\text{el}} = BR \cdot (\eta_{\text{nutz}} - \eta_{\text{therm}}) = 20,10 \text{ GWh}_{\text{el}}/\text{a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Aufgabe b: (3 Punkte) Barwert der Investition

$$P_{\text{el}} = \frac{W_{\text{el}}}{t_V} \text{ bzw. } P_{\text{el}} = \frac{\dot{Q}}{\eta_{\text{therm}}} \cdot (\eta_{\text{nutz}} - \eta_{\text{therm}}) = 3 \text{ MW}_{\text{el}} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$I_{2020} = P_{\text{el}} \cdot i_0 = 1500 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{I,2022} = I_{2020} \cdot (1 + r_i)^2 = 1576 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Aufgabe c: (6 Punkte) Barwert der Erdgaskosten

$$p_{\text{FC},2022} = p_{\text{FC},2020} \cdot (1 + r_{\text{FC}})^2 = 30,77 \text{ €/MWh}_{\text{LHV}} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$A_{\text{FC}} = FC_{2022} \cdot \text{CELF} = FC_{2022} \cdot \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} \text{CRF}$$

$$PV_{\text{FC},2022} = \frac{A_{\text{FC}}}{\text{CRF}} = FC_{2022} \cdot \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} \quad (2 \text{ Punkte für Rechenweg})$$

$$k = \frac{1 + r_{\text{FC}}}{1 + i_{\text{eff}}} = \frac{1,03}{1,05} = 0,981 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$FC_{2022} = BR \cdot p_{\text{FC},2022} = 2062 \text{ T€} \quad (2000 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{FC},2022} = 2062 \text{ T€} \cdot \frac{0,981(1 - 0,981^{15})}{1 - 0,91} = 26616 \text{ T€} \quad (25821 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

Aufgabe d: (4 Punkte) Barwert der Wartungskosten

$$PV_{\text{OMC},2022} = \frac{A_{\text{OMC},2022}}{\text{CRF}_{15}} \quad (1 \text{ Punkt für Anwendung des CRF-Faktors})$$

$$A_{\text{OMC},2022} = \text{omc} \cdot Q = 1000 \cdot 40,2 \text{ MWh}_{\text{therm}}/\text{a} \cdot 5 \text{ €/MWh}_{\text{therm}} = 201 \text{ T€/a} \quad (1 \text{ Punkt}) \quad (195 \text{ T€/a})$$

$$\text{CRF}_{15} = \frac{i(1 + i)^{15}}{(1 + i)^{15} - 1} = 0,0963 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{OMC},2022} = 2087 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt}) \quad (2025 \text{ T€})$$

Aufgabe e: (4 Punkte) Barwert für die Stromerlöse

$$PV_{\text{Strom},2022} = C_{\text{Strom},2022} \cdot \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} \quad (1 \text{ Punkt für richtigen Ansatz})$$

$$C_{\text{Strom},2022} = p_{\text{Strom},2022} \cdot W_{\text{el}} = 804 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt}) \quad 780 \text{ T€}$$

$$k = \frac{1 + r_{\text{Strom}}}{1 + i_{\text{eff}}} = 0,9762 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Strom},2022} = 10000 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt}) \quad 9702 \text{ T€}$$

Aufgabe f: (3 Punkte) Barwert für die Einsparungen

$$PV_{\text{W\u00e4rme},2022} = \frac{A_{\text{W\u00e4rme},2022}}{CRF_{15}} \text{ mit } CRF_{15} = 0,0963 \text{ (1 Punkt f\u00fcr Anwendung des CRF-Faktors)}$$

$$A_{\text{W\u00e4rme},2022} = p_{\text{W\u00e4rme}} \cdot Q = 2412 \text{ T\u20ac/a (1 Punkt) (2340T\u20ac/a)}$$

$$PV_{\text{W\u00e4rme},2022} = 25\,047 \text{ T\u20ac (1 Punkt) (24\,299T\u20ac)}$$

Aufgabe g: (3 Punkte) Barwert der Revision

$$PV_{\text{Rev},2022} = I_{2030} \cdot c_{\text{Rev}} \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-8} \text{ (1 Punkt f\u00fcr Ansatz)}$$

$$I_{2030} = I_{2022} \cdot (1 + r_I)^8 = 1920 \text{ T\u20ac (1 Punkt) (1827T\u20ac)}$$

$$PV_{\text{Rev},2022} = 650 \text{ T\u20ac (1 Punkt) (618T\u20ac)}$$

Aufgabe h: (4 Punkte) Kapitalwert des Projekts

$$NPV_{2022} = PV_{\text{W\u00e4rme},2022} + PV_{\text{Strom},2022} - PV_{\text{OMV},2022} - PV_{\text{FC},2022} - PV_{\text{I},2022} - PV_{\text{Rev},2022}$$

(1 Punkte f\u00fcr Formel mit korrekten Vorzeichen und Vollst\u00e4ndigkeit)

$$NPV_{2020} = 4\,118\,366 \text{ \u20ac (4\,036\,238 \u20ac) (1 Punkt)}$$

Antwort: (2 Punkte)

Nach der Kapitalwertmethode ist die Investition in ein BHKW unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich. Es sollten alternative Investitionen gepr\u00fcft werden und eine Risikoabw\u00e4gung (z.B. Sensitivit\u00e4tsanalyse) erfolgen.

16. Wärmeübertragernetzwerke 30 Punkte

Die folgenden sechs Stoffströme sollen zu einem Wärmeübertragernetzwerk verbunden werden.

Nr.	T_{ein} [°C]	T_{aus} [°C]	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	$\dot{m}\Delta h^{\text{LV}}$ [kW]
1	30	80	2	-
2	40	180	2,5	-
3	100	100	-	100
4	200	50	1,5	-
5	220	140	2	-
6	140	140	-	50

- Die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung liegt bei $\Delta T_{\text{min}} = 20 \text{ K}$.
- Strom 3 soll bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung verdampft werden.
- Strom 6 soll bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung kondensiert werden.
- Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten der Ströme wird vernachlässigt.
- Alle Wärmeübertrager werden im Gegenstrom betrieben.
- Druckverluste werden vernachlässigt.

Hinweis für alle Unteraufgaben: Sollten Sie die Reserven nutzen, kennzeichnen Sie jeweils die endgültige Variante eindeutig.

Aufgaben

- (a) **(10 Punkte)** Bestimmen Sie den minimalen externen Heizbedarf $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$ und den minimalen externen Kühlbedarf $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$ mit Hilfe der Wärmekaskade sowie alle Pinchtemperaturen für das Wärmeübertragernetzwerk rechnerisch. Verwenden Sie dafür die Tabelle.
- (b) **(6 Punkte)** Zeichnen Sie das Wärmestromprofil (Grand Composite Curve) in das Koordinatensystem der Abbildung. Bestimmen Sie die benötigte Mindesttemperatur der externen Wärmequelle $T_{\text{HU,min}}$ sowie die zulässige Maximaltemperatur der externen Wärmesenke $T_{\text{CU,max}}$ mit Hilfe der Grafik, sofern externe Quellen oder Senken auftreten. Markieren Sie weiterhin Bereiche mit interner Wärmerückgewinnung, sofern diese auftreten.
- (c) **(5 Punkte)** Es können zusätzlich einzelne Ströme integriert werden:
- Strom A, welcher bei einer konstanten Temperatur von 100 °C und einer Wärmeleistung von 50 kW kondensiert wird,
 - Strom B, welcher bei einer konstanten Temperatur von 100 °C und einer Wärmeleistung von 25 kW verdampft wird.

Welcher Strom sollte in das bestehende Wärmeübertragernetzwerk integriert werden? Begründen Sie Ihre Auswahl. Zeichnen Sie in Ihr Wärmestromprofil die Änderungen ein, die sich durch die zusätzliche Integration eines Stroms (A oder B) ergeben. Treffen Sie ggf. Aussagen zum Verhalten der Größen $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$, $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$, $T_{\text{HU,min}}$ und $T_{\text{CU,max}}$ (steigt / sinkt / bleibt gleich).

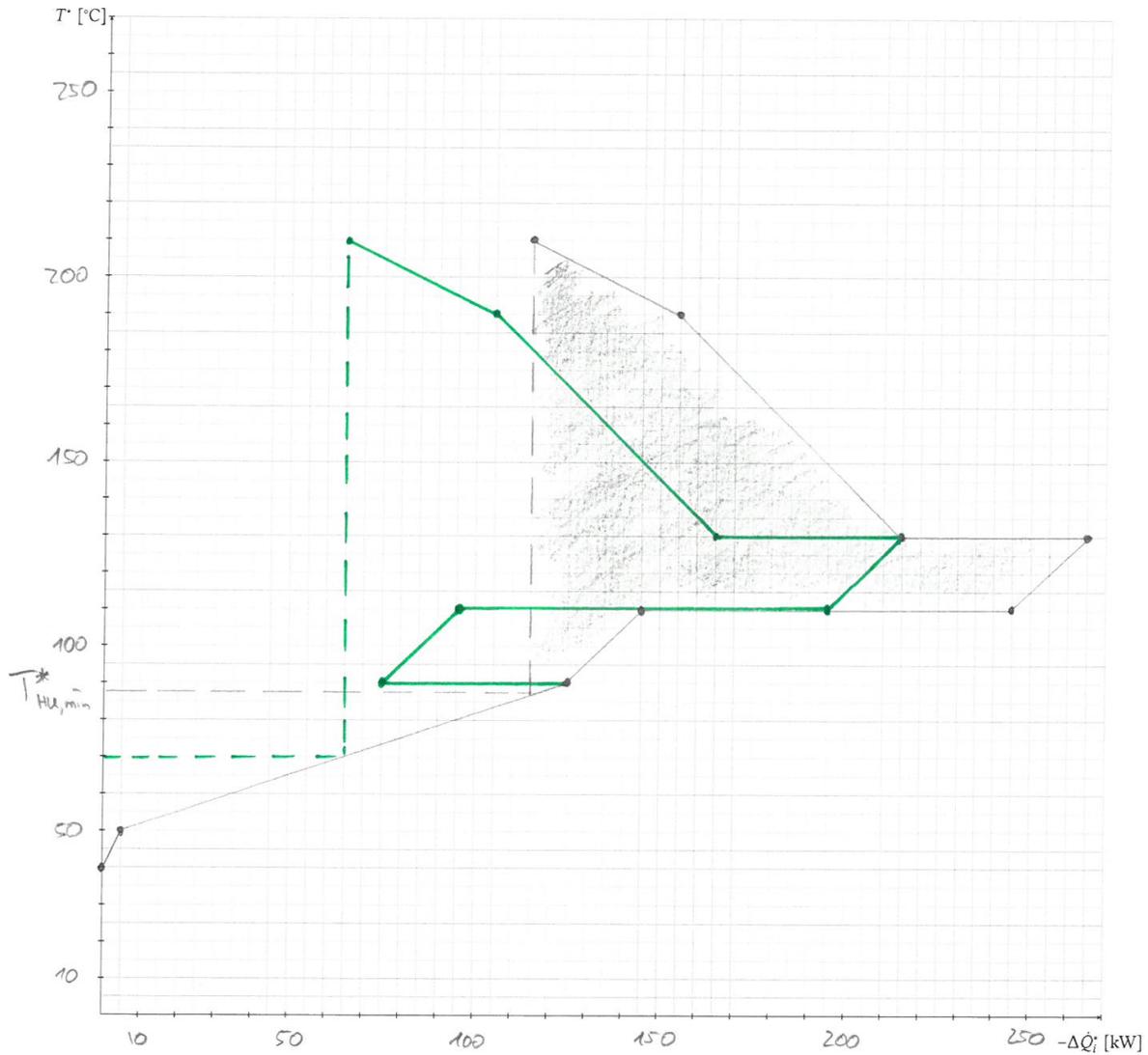
- (d) **(3 Punkte)** Es ist eine mögliche Verschaltung der Stoffströme vorgegeben. Prüfen Sie den Entwurf auf Richtigkeit und kommentieren Sie – sofern vorhanden – stichpunktartig die Fehler.
- (e) **(6 Punkte)** Ergänzen Sie den Entwurf für ein System mit maximaler Energierückgewinnung (MER-System), welches keine Pinch-Regel verletzt. Nutzen Sie dafür die vorgegebene Darstellung der Ströme. Markieren Sie alle notwendigen Wärmeübertrager mit dem jeweils übertragenen Wärmestrom und den entsprechenden Zwischentemperaturen und sofern vorhanden die externe Wärmequelle und -senke.

Intervall Nr.	angepasste Temperaturen [°C]	$\sum \dot{m}_i c_{p,i}$ [kW/K]	\dot{Q}_i [kW]	$\Delta \dot{Q}_i$ [kW]	$\Delta \dot{Q}_i^*$ [kW]
I	210	-2	-40	0	-115
II	190	-1	-60	-40	-155
III	130	/	-50	-100	-215
IV	130	/	-50	-150	-265
V	110	1	20	-130	-245
VI	110	/	100	-30	-145
VII	90	1	20	-10	-125
VIII	50	3	120	110	-5
IX	40	0,5	5	115	0

$\dot{Q}_{HU, \min} = 115 \text{ kW}$ $T_p^* = 40^\circ\text{C} \Rightarrow T_p = 30/50^\circ\text{C}$
 $\dot{Q}_{CU, \min} = 0$ $\sum 10$

0,5 pro ZA (4)

Int. Wärmerückgewinnung (1)



$T_{HU,min}^* = 87^\circ\text{C} \rightarrow T_{HU,min} = 97^\circ\text{C}$ (1) Σ6

Integration: oberhalb Rück → warmer Strom → Kondensation

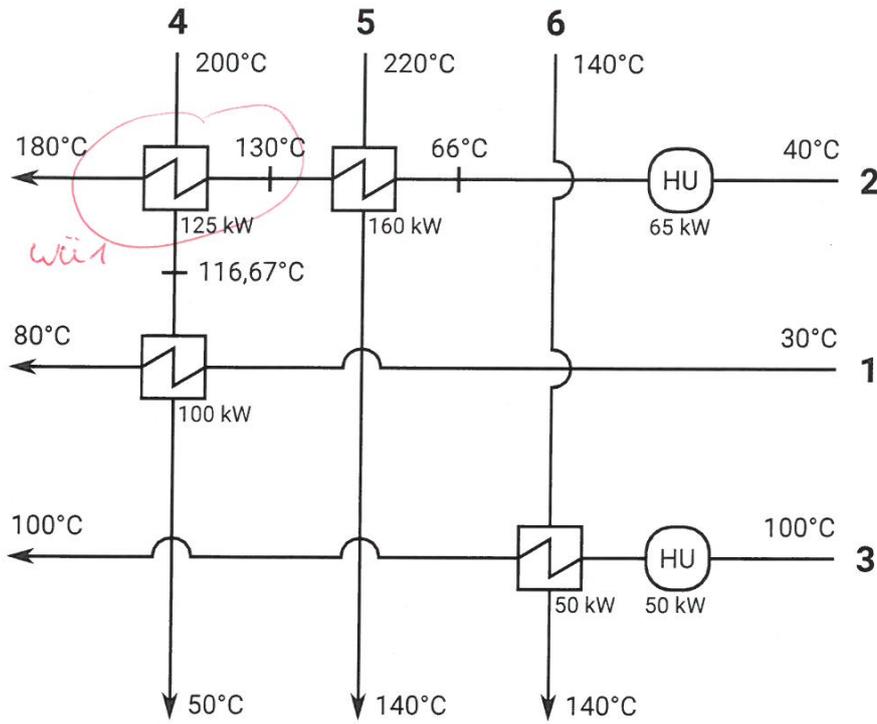
⇒ \dot{Q}_{HU} sinkt (1)

$\dot{Q}_{HU,min} = 65 \text{ kW}$ (1)

$T_{HU,min}^* = 70^\circ\text{C} \rightarrow T_{HU,min} = 80^\circ\text{C}$ (1)

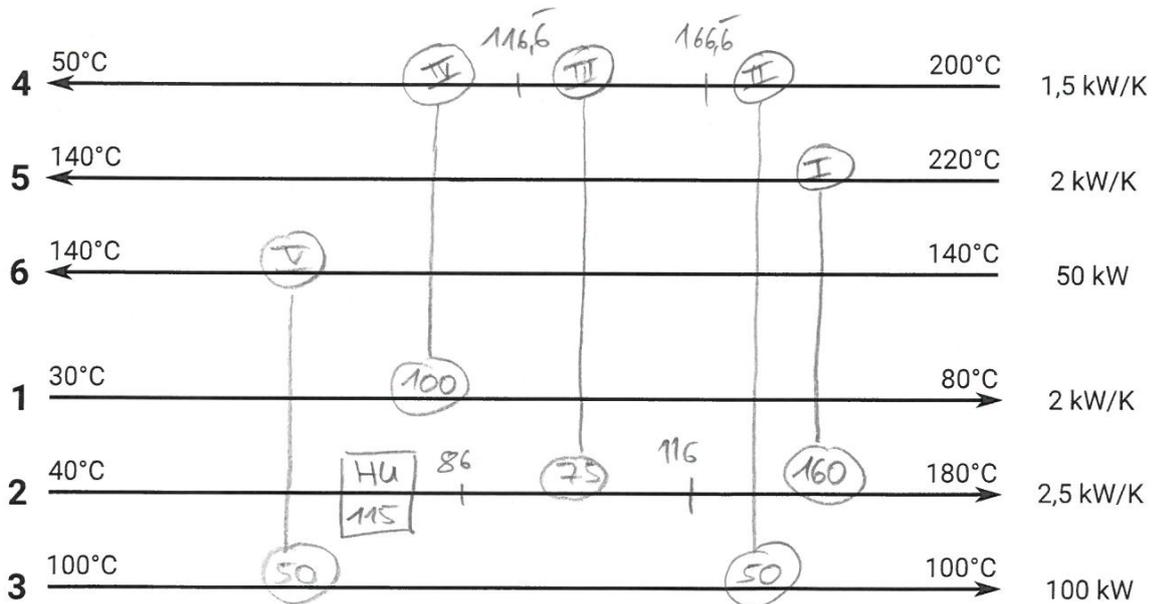
Einzeichnen (1)
Parallelverschiebung (1)

Σ5



- ① $\dot{Q}_{HU} = 115 \text{ kW} \rightarrow$ Entwurf mit max. Energieeffizienz
- ① aber Wü1 fehlerhaft \rightarrow Kreuzung der Ströme
- ① \Rightarrow Entwurf falsch!

$\Sigma 3$



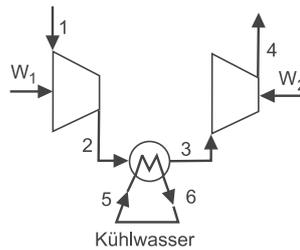
- ① je Wü
- ① HU $\Sigma 6$

H_2019

Teilgebiet	Thema	Punkte	
		ET I	ET II
		8 bzw. 9 LP	8 LP
Theorie, Fundamental	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	50	50
	Exergie	18	24
	Wirtschaftlichkeit	8	
	Verbrennung I	8	8
Theorie, Rest	Energieträger	5	
	Dampfkraftwerke	10	
	Gasturbinen	12	
	KWK	5	
	Kälteprozesse I	10	
	Dampferzeuger		10
	Kombikraftwerke		5
	Gasreinigung		5
	Erneuerbare Energien		9
	Schadstoffbildung		9
	CO ₂ -Abtrennung		6
Rechenteil	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	80	80
	Exergie ET1: a-h, ET2: a-f, i	41	41
	Wirtschaftlichkeit	32	
	WÜ-Netz		32

1. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse 24 Punkte

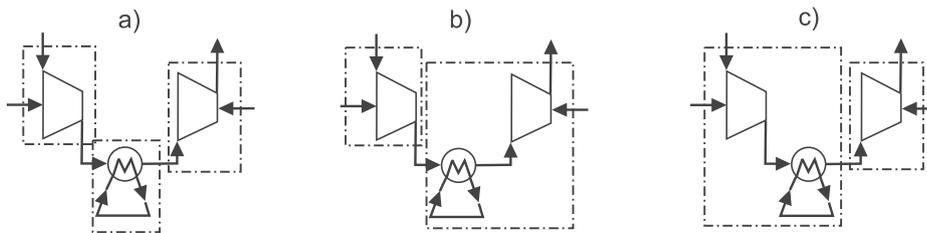
- (a) (2 Punkte) Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad des dargestellten Gesamtsystems, wenn das erwärmte Kühlwasser nicht weiter genutzt wird.



(1P Zähler, 1P Nenner)

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_4 - \dot{E}_1}{\dot{W}_1 + \dot{W}_2}$$

- (b) (4 Punkte) Das Gesamtsystem soll nun zur näheren Untersuchung in mehrere Teilsysteme untergliedert werden. Welche Unterteilung des Gesamtsystems würden Sie zur Definition exergetischer Wirkungsgrade wählen, wenn das erwärmte Kühlwasser nicht weiter genutzt wird (Antwortmöglichkeiten: a; b; c; a und b; a und c; b und c; a, b und c)? Markieren Sie und begründen Sie Ihre Auswahl stichpunktartig.



(2P Entscheidung, 2P Begründung)

zulässige Antworten: a) und b); nur a) oder nur b) in Verbindung mit der entsprechenden Begründung

a) hier kann für den Kühler zwar kein exergetischer Wirkungsgrad definiert werden, jedoch sind die Definitionen der exergetischen Wirkungsgrade der Verdichter aussagekräftig, somit zulässig

b) Für Kühler kann im Fall des nicht weiter genutzten Kühlwasser kein Nutzen definiert werden; dissipative Komponente. Die Definition exergetischer Wirkungsgrade ist auch hier aussagekräftig, da der Kühler dem nachfolgenden Verdichter zugeordnet wird.

c) wie b) jedoch ist die Zurechnung des Kühlers zum ersten Verdichter nicht sinnvoll, da der Verdichter dadurch falsch bewertet wird; Verschlechterung durch Kühlung, \dot{E}_P sinkt.

- (c) (4 Punkte) Erläutern Sie stichpunktartig wie der Wert für die Standard chemische Exergie von Methanol nach einem der beiden in der Formelsammlung vorgestellten Modellen zu Stande kommt. Gehen Sie davon aus, dass die Werte der Standard chemischen Exergien für die Komponenten der thermodynamischen Umgebung bekannt sind.

(2P) Standard chemische Exergie einer Substanz die nicht Bestandteil der thermodynamischen Umgebung ist, kann durch Bilanzierung einer reversiblen Reaktion der Substanz mit Umgebungssubstanzen deren Standard chemische Exergien bekannt sind, bestimmt werden.

(1P) Modell: Methanol wird vollständig und vollkommen unter Zufuhr von Sauerstoff in CO_2 und H_2O umgesetzt, Alle Substanzen überschreiten die Systemgrenze ungemischt bei T_0 und p_0 .

(1P) Aus Energie-, Entropie und Exergiebilanz erhält man die Gleichung zur Berechnung, siehe FS. (2.5).

- (d) **(8 Punkte)** Zeigen Sie, dass bei einer isotherm-isobaren Mischung ($T = T_0 = 298,15 \text{ K}$ und $p = p_0 = 1,01325 \text{ bar}$) von 1 kmol/s Stickstoff und 1 kmol/s Sauerstoff Exergie vernichtet wird in dem Sie den Exergievernichtungsstrom berechnen.

Gehen Sie von einer adiabaten Mischung idealer Gase aus und vernachlässigen Sie Änderungen bei der kinetischen und potentiellen Energie. Der Prozess verläuft stationär.

(2P Exergiebilanz, 2P nur ch. Exergie relevant, 2P Exergievernichtung mit chem. Exergie der Mischung, 2P Endergebnis)

Exergiebilanz, FS (2.9) vereinfacht sich zu $\dot{E}_D = \dot{E}_{N_2} + \dot{E}_{O_2} - \dot{E}_M$

physikalische Exergie: $\bar{e}_1^{\text{PH}} = \bar{e}_2^{\text{PH}} = \bar{e}_3^{\text{PH}} = 0$, da T_0 und p_0

FS (2.16) für die chemische Exergie der Mischung \dot{E}_M

$$\dot{n}_M = \dot{n}_{N_2} + \dot{n}_{O_2}$$

$$\dot{E}_D = \dot{n}_{N_2} \bar{e}_{N_2}^{\text{CH}} + \dot{n}_{O_2} \bar{e}_{O_2}^{\text{CH}} - \dot{n}_M \left(0,5 \cdot \bar{e}_{N_2}^{\text{CH}} + 0,5 \cdot \bar{e}_{O_2}^{\text{CH}} + \bar{R} T_0 \ln 0,5 \right)$$

$$\dot{E}_D = -2 \text{ kmol/s} \cdot 8,3143 \text{ kJ/kmolK} \cdot 298,15 \text{ K} \cdot \ln 0,5 = 3,426 \text{ MW}$$

Alternativ über Entropiebilanz:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{S}_3 - (\dot{S}_1 + \dot{S}_2)$$

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{n}_M \left[0,5 \left(\bar{s}_{N_2}^\circ(T_0) - \bar{R} \ln \frac{x_{N_2} p}{p_{\text{ref}}} \right) + 0,5 \left(\bar{s}_{O_2}^\circ(T_0) - \bar{R} \ln \frac{x_{O_2} p}{p_{\text{ref}}} \right) \right] - \left(\dot{n}_{N_2} \bar{s}_{N_2}^\circ(T_0) + \dot{n}_{O_2} \bar{s}_{O_2}^\circ(T_0) \right)$$

$$\dot{S}_{\text{gen}} = -2 \text{ kmol/s} \cdot 8,3143 \text{ kJ/kmolK} \cdot \ln 0,5 = 11,526 \text{ kW}$$

$$\dot{E}_D = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{gen}} = 3,426 \text{ MW}$$

- (e) **(6 Punkte)** Erstellen Sie eine Kostenbilanz, wie sie für exergoökonomische Analysen benötigt wird, für einen der im Aufgabenteil a) dargestellten Verdichter. Erläutern Sie an diesem Beispiel die Vorgehensweise zur Bestimmung der Kosten der Exergievernichtung $\dot{C}_{D,k}$ dieser Komponente. Notieren Sie die notwendigen Gleichungen. Gehen Sie davon aus, dass die Kosten aller eingehenden Ströme und die der Komponente bekannt sind.

(2P Kostenbilanz, 1P Exergiebilanz, 1P Zuordnung ex. Aufwand, 1P Formel für $\dot{C}_{D,k}$ und 1P Erläuterung hierzu)

$$\text{Kostenbilanz: } \dot{C}_1 + \dot{C}_{W_1} - \dot{C}_2 + \dot{Z}_k = 0$$

$$\text{Exergiebilanz: } \dot{E}_{D,k} = \dot{E}_1 + \dot{W}_1 - \dot{E}_2$$

Zuordnung \dot{E}_F und \dot{E}_P ; exergetischer Aufwand ist zugeführte el./mech. Leistung.

$$c_F = c_{W_1} = \frac{\dot{C}_{W_1}}{\dot{W}_1}$$

Kosten der Exergievernichtung können mit Hilfe der bereits bekannten exergiespezifischen Kosten für den exergetischen Aufwand bestimmt werden. Exergievernichtung aus Exergiebilanz.

$$\dot{C}_{D,k} = c_F \cdot \dot{E}_{D,k}$$

2. Verbrennung 8 Punkte

Der Brennstoff 1-Tridecanol $C_{13}H_{28}O$ wird mit einem Stoffmengenstrom $\dot{n}_B = 5 \text{ kmol/s}$ bei einem Luftüberschuss von $\lambda = 4/3$ verbrannt. Die Verbrennung ist vollständig und vollkommen. Zur Verbrennung wird feuchte Luft mit der molaren Zusammensetzung 78 % N_2 ; 20 % O_2 und 2 % H_2O verwendet.

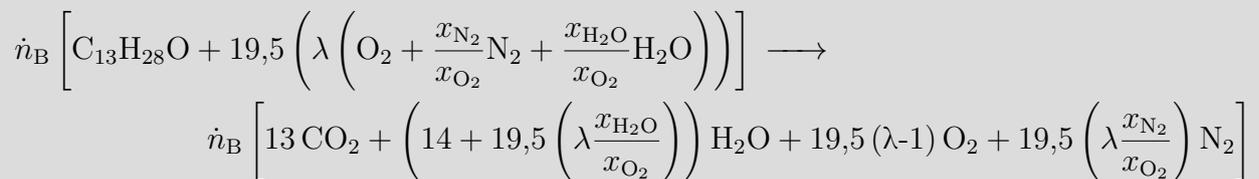
- (a) **(6 Punkte)** Formulieren Sie die Reaktionsgleichung und geben Sie alle Koeffizienten an.
 (b) **(2 Punkte)** Bestimmen Sie den Molenanteil des gesamten Wassers x_{H_2O} im Abgas.

(1P alle Stoffe in Reaktionsgleichung; 1P für richtigen O_2 -Faktor 19,5; 2P für richtige Verwendung von λ ; 2P für richtiges Endergebnis)

Reaktion mit reinem Sauerstoff



Allgemeine Reaktionsgleichung mit \dot{n}_B und λ



Endergebnis



(1P Ansatz, 1P Ergebnis)

$$x_{H_2O} = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{Abgas}} = \frac{83}{65 + 83 + 507 + 32,5} = \frac{83}{687,5} \approx 0,1207$$

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse 8 Punkte

- (a) **(2 Punkte)** Die fixen Kapital-Investitionsausgaben setzen sich unter anderem aus den direkten und den indirekten Kosten zusammen. Definieren Sie diese beiden Kostenarten kurz.

(Je Definition 1 Punkt)

Direkte Kosten - werden für die Herstellung, Montage und Installation der Investitionsausgabe benötigt und sind somit der Investitionsausgabe direkt zurechenbar.

Indirekte Kosten - werden nicht zu einem dauerhaften Bestandteil der Anlage, sind jedoch für eine ordnungsgemäße Fertigstellung des Projekts erforderlich. Sie lassen sich der Investitionsausgabe nicht exakt zurechnen.

- (b) **(2 Punkte)** Ordnen Sie die folgenden Kostenpositionen korrekt zu. Kreuzen Sie pro Kostenposition nur eine Zuordnung an.

(Pro richtiger Zuordnung 0,5 Punkte. Bei zwei Kreuzen 0 Punkte)

Kostenposition	direkte Kosten	indirekte Kosten
Rohrleitungen	X	
Baueinrichtung		X
Personalkosten für Management		X
Personalkosten für Installation	X	

- (c) **(2 Punkte)** Für Kosten, die durch den Betrieb einer Anlage anfallen, wird zwischen fixen und variablen Kosten unterschieden. Definieren Sie kurz die beiden Kostenarten.

(1 Punkt je Definition)

Variable Kosten hängen von der Nutzung der Anlage ab und damit von der Laufzeit.

Fixe Kosten sind unabhängig von der Nutzung der Anlage und fallen auch in Stillstandzeiten an.

- (d) **(2 Punkte)** Ordnen Sie die folgenden Kostenpositionen korrekt zu. Kreuzen Sie pro Kostenposition nur eine Zuordnung an. (Je richtiger Zuordnung 0,5 Punkte. Bei zwei Kreuzen 0 Punkte)

Kostenposition	variable Kosten	fixe Kosten
Verwaltung und Vertrieb		X
Hilfs- und Betriebsmittel (z.B. Chemikalien)	X	
Entsorgung von Abwasserströmen	X	
Brennstoffkosten	X	

4. Energieträger 5 Punkte

(a) **(5 Punkte)** Gegeben sind verschiedene Energieträger/-formen. Handelt es sich um Primär- oder Sekundärenergieträger oder Nutzenergie? Ordnen Sie zu. Sofern Sie Mehrfachzuordnungen vornehmen, erläutern Sie diese stichpunktartig mit Hilfe von geeigneten Beispielen.

- Erdgas
- Wärme
- Ölsand
- Licht
- Wind
- Wasserstoff

(0,5 P je richtiger Zurordnung; 0,5 P je Erläuterung)

Primär: Erdgas, Wind, Ölsand

Sekundär: Erdgas, Wärme, Wasserstoff

Nutz: Wärme, Licht

Erdgas wird vor dem Einspeisen ins Netz behandelt. Wärme kann z.B. als Fernwärme vorliegen (Sekundärenergie) oder z.B. als Raumheizwärme genutzt werden (Nutzenergie).

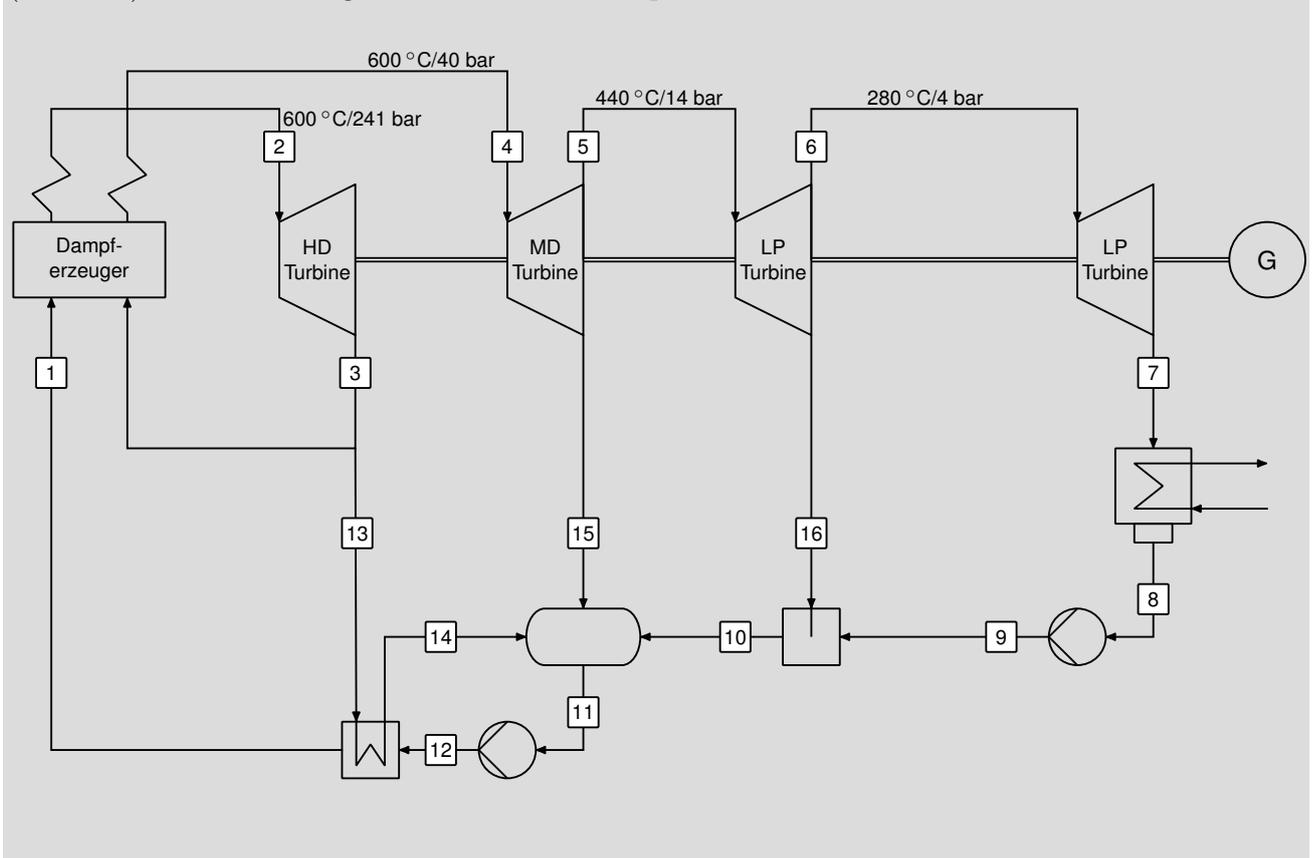
5. Dampfkraftwerke 10 Punkte

Im Folgenden soll ein überkritischer Dampfkraftprozess um eine Vorwärmestrecke bestehend aus einem Hochdruck-Oberflächenvorwärmer, dem Entgaser und einem Niederdruck-Mischvorwärmer ergänzt werden. Es sind der Dampferzeuger, der Kondensator und die Kondensatpumpe sowie die verschiedenen Turbinen mit den entsprechenden Druckstufen und Temperaturen gegeben.

- (a) **(5 Punkte)** Vervollständigen Sie das dargestellte Fließbild mit den benötigten Komponenten und Strömen. Tragen Sie dazu auch entsprechende Stromnummern ein. Die Dampfströme zur Vorwärmung können durch Anzapfungen an den Dampfturbinen entnommen werden. Der Entgaser soll bei einem Druck von 14 bar betrieben werden. Machen Sie gegebenenfalls erläuternde Anmerkungen.

(4 Punkte) Jeweils 1 Punkt pro Komponente. ND-Mischvorwärmer, Entgaser, Speisewasserpumpe und HD-Oberflächenmvorwärmer. Es ist auch möglich, den Kondensatstrom am Oberflächenvorwärmer anders einzubinden. Die Wahl der Anzapfungen ist freigestellt, die Druckstufung ist zu beachten.

(1 Punkt) Für das richtige Verbinden der Komponenten.

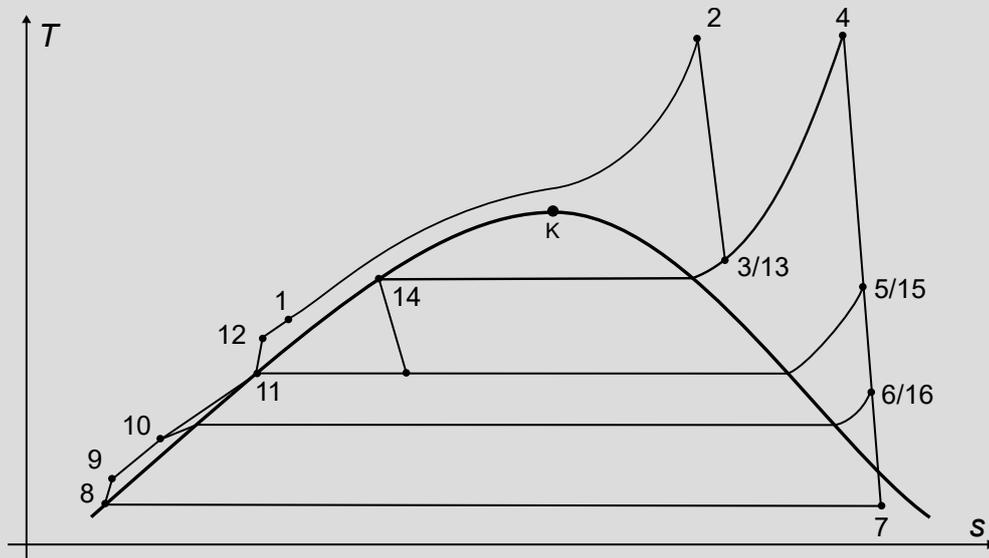


- (b) **(5 Punkte)** Im qualitativen T,s -Diagramm ist **eine beispielhafte** Vorwärmestrecke für das obige Fließbild dargestellt. Ergänzen Sie die Zustandsänderungen im Dampferzeuger und Turbinenteil mit den Anzapfungen unter der Annahme, dass die Wärmezufuhr im Dampferzeuger isobar und die Entspannung in den Turbinen adiabat, irreversibel stattfindet.

(5 Punkte) Jeweils 1 Punkt pro Zustandsänderung. Dampferzeugung erfolgt überkritisch, sodass das Nassdampfgebiet nicht geschnitten wird. Die Anzapfungen sollten deutlich erkennbar sein und in die entsprechenden Punkte laufen. Folgende Zustandsänderungen werden bewertet:

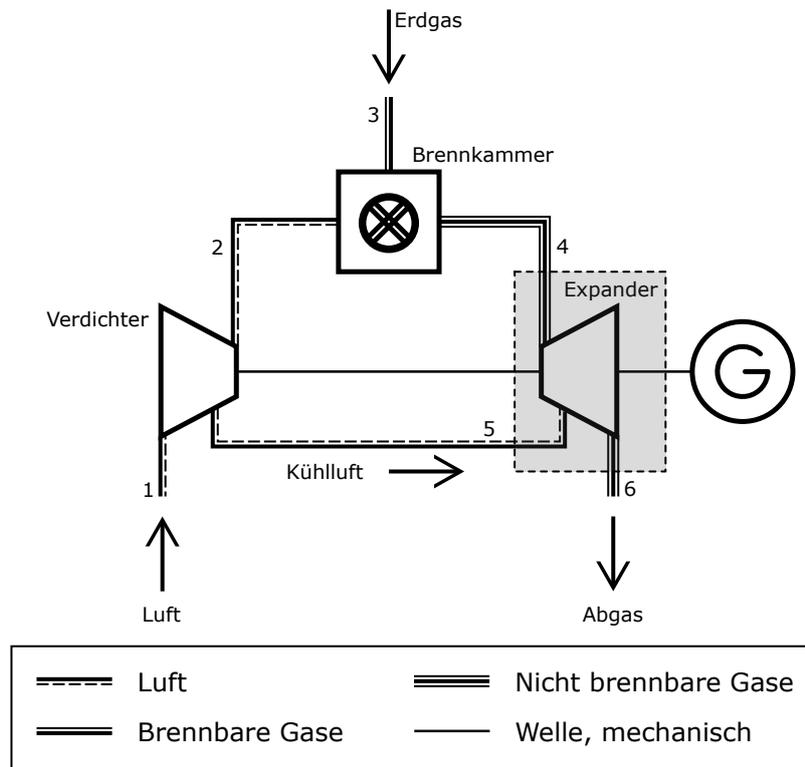
- (1 Punkt) Isobare Wärmezufuhr bei überkritischem Fluid (1-2)
- (1 Punkt) Adiabate, irreversible Entspannung in der Hochdruckturbinen (2-3)

- (1 Punkt) Isobare Zwischenüberhitzung (3,4),
- (1 Punkt) Adiabate, irreversible Entspannung in der Mittel- und Niederdruckturbine (4-5-6-7)
- (1 Punkt) Isobare Wärmeabfuhr und Kondensation mit Einbindung in die Vorwärmstrecke (3-14, 5-11, 6-10)



6. Gasturbinen 12 Punkte

Gegeben ist der folgende einfache offene Gasturbinenprozess mit Kühlluftmassenstrom. Alle Komponenten werden als nach außen adiabatt angenommen.



- (a) **(3 Punkte)** Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad des Expanders entsprechend der im Fließbild markierten Bilanzgrenze (gestrichelte Linie).

(1P Zähler, 2P Nenner)

$$\varepsilon_{\text{EXP}} = \frac{\dot{W}_{\text{EXP}}}{\dot{E}_4 + \dot{E}_5 - \dot{E}_6}$$

- (b) **(2 Punkte)** Der Massenstrom der Kühlluft \dot{m}_5 wird verringert. Wie ändert sich bei sonst unveränderten Massenströmen \dot{m}_1 und \dot{m}_3 die Expandereintrittstemperatur T_4 (steigt, fällt, bleibt gleich)? Begründen Sie stichpunktartig.

(1P Entscheidung, 1P Begründung)

Expandereintrittstemperatur sinkt.

Massenstrom Kühlluft sinkt \rightarrow Massenstrom zur Brennkammer steigt \rightarrow bei identischem Brennstoffmassenstrom sinkt die Temperatur der Verbrennung \rightarrow geringere Expandereintrittstemperatur

- (c) **(4 Punkte)** Wie groß ist der energetische Wirkungsgrad der Brennkammer? Warum ergibt sich dieser Wert? Setzen Sie den exergetischen Wirkungsgrad in Relation dazu (größer, kleiner oder gleich). Begründen Sie stichpunktartig.

(1P Zahlenwert energetischer Wirkungsgrad, 1P Erläuterung, 1P Relation, 1P Begründung)

Der energetische Wirkungsgrad ist 1.

Energiebilanz einer nach außen adiabatten Brennkammer enthält keine weiteren Verluste; Energieerhaltung \rightarrow Wirkungsgrad 1

Der exergetische Wirkungsgrad ist kleiner 1.

Exergetischer Wirkungsgrad berücksichtigt Irreversibilitäten der Komponenten; Exergievernichtung durch Mischung, chemische Reaktion, Reibung, Wärmeübertragung

- (d) **(3 Punkte)** Beschreiben Sie stichpunktartig die Funktionsweise und die Vorteile des STIG-Prozesses (Steam Injected Gasturbine). Gehen Sie zum Vergleich vom einfachen offenen Gasturbinenprozess aus.

[1P Abhitzeessel, 1P Wirkungsgrad, 1P Flexibilität]

-Reduktion NO_x -Emissionen

-erweitert um Abhitzeessel zur Dampfbereitstellung

-Dampf kann in Brennkammer eingespritzt werden -> erhöhter Wirkungsgrad

-darüber hinaus Bereitstellung von Prozessdampf

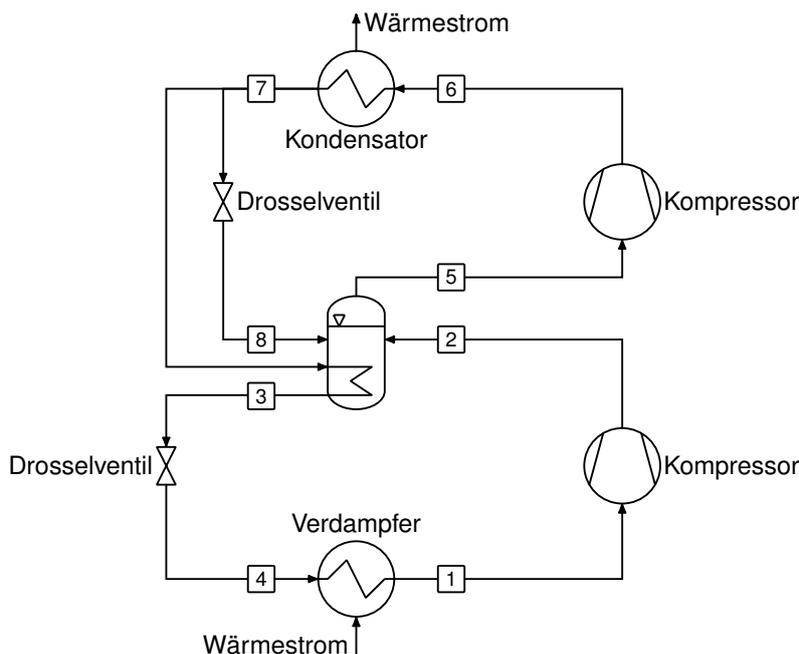
-Prozess sehr flexibel: zurück geleiteter Dampfes und damit Erhöhung des Wirkungsgrades, kann an den vorliegenden Bedarf angepasst werden

7. Kälteprozesse 10 Punkte

In der folgenden Abbildung ist ein verbesserter Kältemaschinenprozess dargestellt, der gegenüber dem einfachen Kältemaschinenprozess eine höhere Leistungszahl aufweist. Dabei handelt es sich um einen idealisierten unterkritisch betriebenen Prozess, wobei:

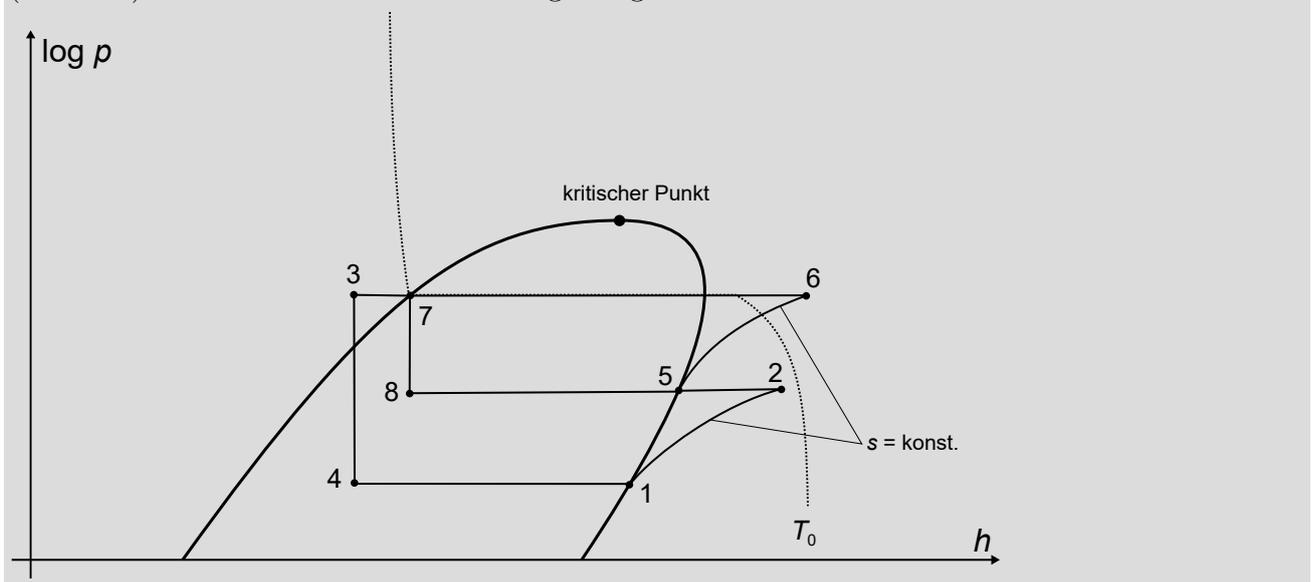
- die Wärmeübertragung jeweils isobar,
- die Verdichtung jeweils isentrop, und
- die Drosselung jeweils isenthalp erfolgt.

Das Fluid wird im Verdampfer vollständig verdampft und Kondensator vollständig kondensiert. Der Wärmestrom des Kondensators wird an die Umgebung abgegeben.



(a) (8 Punkte) Stellen Sie den Prozess in einem $\log p, h$ -Diagramm mit Nassdampfgebiet dar. Tragen Sie die Zustandspunkte 1-8 und den Verlauf der Umgebungsisothermen T_0 in das Diagramm ein.

(7 Punkte) Jeweils 1 Punkt pro Zustandsänderung
 (1 Punkt) Für das Einzeichnen der Umgebungsisothermen.



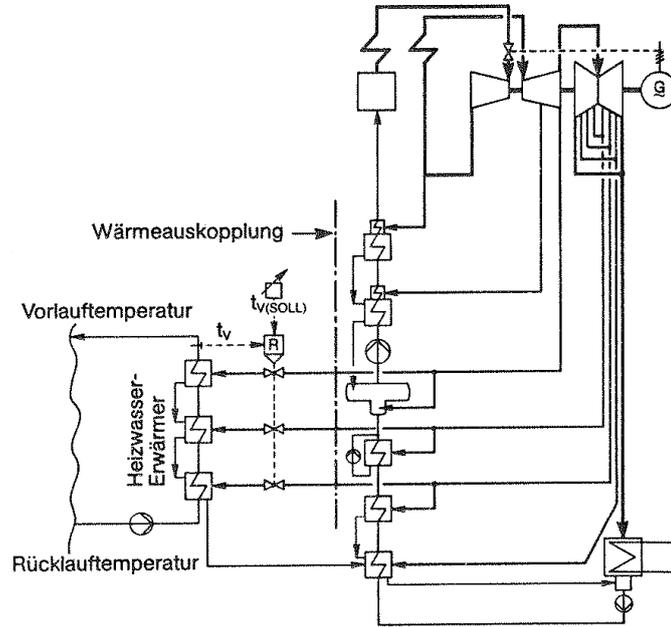
(b) **(2 Punkte)** Welche Konzepte für die Verbesserung kältetechnischer Prozesse wurden im hier betrachteten Prozess angewendet?

Basierend auf dem Fließbild kann man erkennen:

- (1 Punkt) Zwischenkühlung bei der gestuften Kompression.
- (1 Punkt) Unterkühlung eines Teils des Fluids nach dem Kondensator durch Rekuperation mit dem Fluid innerhalb der Mitteldruckflasche.

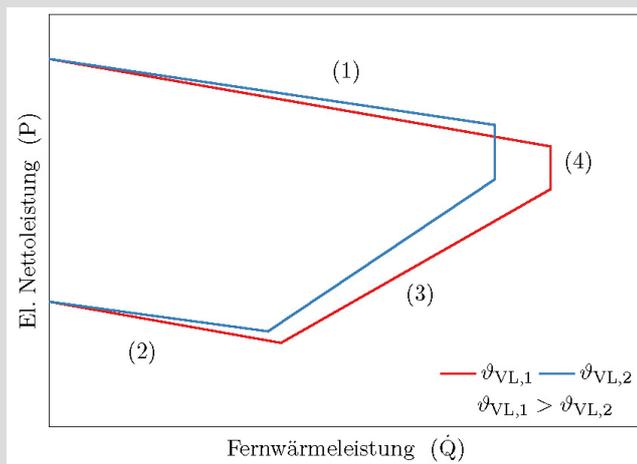
8. Kraft-Wärme-Kopplung 5 Punkte

(a) (5 Punkte) Gezeigt ist ein vereinfachtes Wärmeschaltbild eines Kraftwerkes mit einer Entnahme-Kondensations-Dampfturbine. Die Anlage arbeitet nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. Markieren Sie in einem Diagramm den möglichen Betriebsbereich der Anlage, in dem Sie auf der Ordinate die bereitgestellte elektrische Nettogleistung und auf der Abszisse die ausgekoppelte thermische Leistung für die Fernwärme auftragen.



(5 Punkte); 1P richtige Achsenzuordnung und -beschriftung; 1P je Grenze (4P auch wenn nur (1), (2) und (3))

- Grenzen der maximalen (1) und minimalen (2) Brennstoffleistung
- Gegendrucklinie (3)
- (4) hydraulische Begrenzungen fernwärmeseitig



9. Schadstoffbildung 9 Punkte

- (a) **(2 Punkte)** Neben den häufig auftretenden Stickoxiden gibt es bei gefeuerten Energieumwandlungsanlagen noch andere Schadstoffemissionen. Nennen Sie mindestens vier.

Kohlenstoffoxide (CO , CO_2), Schwefeloxide (SO_2 , SO_3), Kohlenwasserstoffe, Partikel (unverbrannter Brennstoff, Ruß, Asche, Spurenelemente), Schwermetalle, Staub, Feinstaub, Dioxine, Furane

- (b) **(3 Punkte)** Beschreiben Sie stichpunktartig die thermische NO_x -Bildung bei der Verbrennung.

Luftstickstoff wird in NO_x umgewandelt (1P)
läuft bei hohen Temperaturen (0,5P) nach dem Zeldovic-Mechanismus (0,5P) ab
NO-Bildungsrate abhängig von Konzentration O und N_2 (0,5P)
Geschwindigkeitskonstante, Arrhenius-Ansatz (0,5P)

- (c) **(4 Punkte)** Mit Hilfe welcher Maßnahmen kann die Bildung von thermischen NO_x bei der Verbrennung verringert werden? Beschreiben Sie die Maßnahmen stichpunktartig jeweils aus physikalischer und technischer Sicht.

(jeweils 1P)

Maßnahme 1:

physikalisch: Verminderung der lokalen Konzentrationen von O und N_2 ,

technisch: Luftstufung (Sauerstoffkonzentration unterstöchiometrisch)

Maßnahme 2:

physikalisch: Verminderung der lokalen Temperatur; Temperaturspitzen im Brennraum vermeiden

technisch: Rauchgasrezirkulation, Vormischflammen bei Gasturbinen

10. Dampferzeuger 10 Punkte

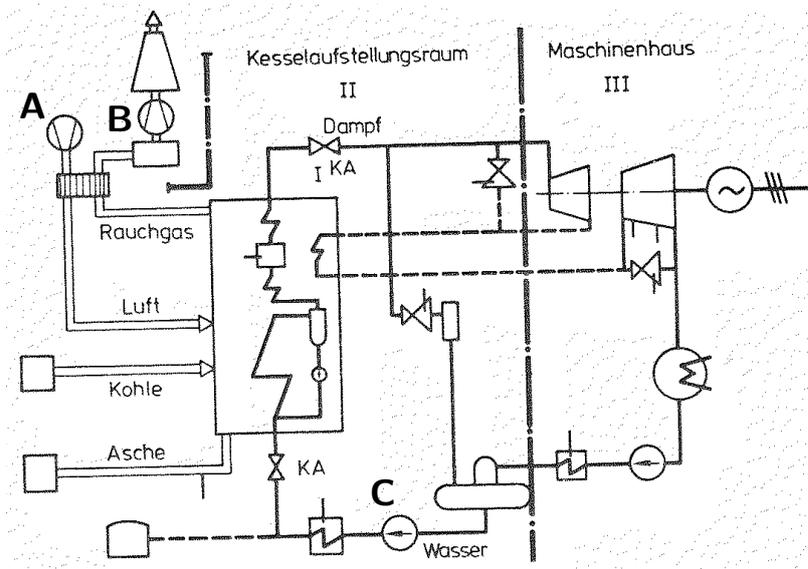
- (a) (5 Punkte) Zeigen Sie die unterschiedliche Anordnung der Wärmeübertrager (Economizer, Verdampfer, Überhitzer) im Dampferzeuger eines Dampfkraftprozesses und im Abhitzekessel eines Gas- und Dampfturbinenkraftwerkes mit Hilfe von $T, \Delta H$ -Diagrammen. Erläutern Sie die Ursache stichpunktartig.

(2P je Diagramm, 1P Ursache)

- (b) (2 Punkte) Gehen Sie von einem einfachen Abhitzekessel bestehend aus Economizer, Überhitzer und Verdampfer aus. Unterbreiten Sie Vorschläge zur Verringerung der Exergievernichtung.

Aufteilung in verschiedene Druckstufen, Zwei-Druck- oder Drei-Druck-Abhitzekessel
Vergrößerung der WÜ-Flächen \rightarrow Verringerung ΔT_{\min}

- (c) (3 Punkte) Das Schema zeigt einen Dampfkraftprozess. Die Druckverluste der Luft-/Rauchgasseite im Dampferzeuger werden durch Frischlüfter (Komponente A) und Saugzug (Komponente B) ausgeglichen. Auf der Wasser-/Dampfseite übernimmt dies gleichermaßen die Speisewasserpumpe (Komponente C). Auf welcher Seite des Dampferzeugers erwarten Sie absolut den höchsten Druckverlust? Welche Auswirkungen erwarten Sie für die Leistungsaufnahme der Komponenten A bis C? Vergleichen, begründen und diskutieren Sie stichpunktartig.



Absolut ist der *Druckverlust auf der Wasser-/Dampfseite deutlich größer* (20 bis 50 bar, je nach Größe des DE) als auf der Rauchgasseite (einige hundert Millibar).

Auf der Wasser-/Dampfseite kann jedoch von einem nahezu *inkompressiblen Fluid* ausgegangen werden. Der Ausgleich der Druckverluste ist mit einem *vergleichsweise geringen Aufwand* verbunden. Im Gegensatz zum Eigenbedarf für Frischlüfter und Saugzug.

11. Kombianlagen mit Kohleinsatz 5 Punkte

- (a) **(2 Punkte)** Kombikraftwerke mit integrierter Kohlevergasung (IGCC) bieten einige interessante Vorteile. Worin besteht bei diesen Anlagen nach wie vor die größte Herausforderung? Welche technische Verbesserung würde zu einer erheblichen Wirkungsgradsteigerung führen?

Herausforderung:

Spezifische Investitionskosten sind größer als die überkritischer Dampfkraftprozesse, welche einen ähnlichen Wirkungsgrad bieten

Verfügbarkeit der Vergaser vergleichsweise gering (rund 60%)

Wirkungsgradsteigerung:

bisher: kalte, nasse Brenngasreinigung; Wirkungsgradeinbuße; zukünftig: Heißgasreinigung angestrebt, jedoch bisher nicht realisiert

Luftzerlegung bei höherem Druck; bzw. Aufbau höherer Druck direkt nach Luftzerlegung; notwendige Verdichtung im GT-Bereich sinkt

- (b) **(1 Punkt)** Ordnen Sie für den Vollastbetrieb die folgenden Energieumwandlungsanlagen aufsteigend nach direkten Kohlendioxid-Emissionen in $\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$. Geben Sie die richtige Reihenfolge mit Hilfe der angegebenen Zahlen an.

1. Offene Gasturbine
2. Steinkohlekraftwerk mit überkritischen Dampfkraftprozess
3. Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk

(je richtiger Beziehung 0,5 P, max. 1P)

3,1,2

- (c) **(2 Punkte)** Welcher mögliche Vorteil ergibt sich im Zusammenhang mit CO_2 -Emissionen für ein IGCC? Erläutern Sie stichpunktartig die wesentlichen Verfahrensschritte.

Kohlendioxid kann abgeschieden werden (Pre-Combustion); auch dann vergleichsweise hohe Wirkungsgrade, rund 40%

Nach Gasreinigung gelangt $\text{CO} + \text{H}_2$ zur CO-Konvertierung ($\text{CO} + \text{Dampf} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$); danach Abscheidung CO_2 , H_2 -reiches Gas zur Gasturbine

12. Rauchgasreinigung 5 Punkte

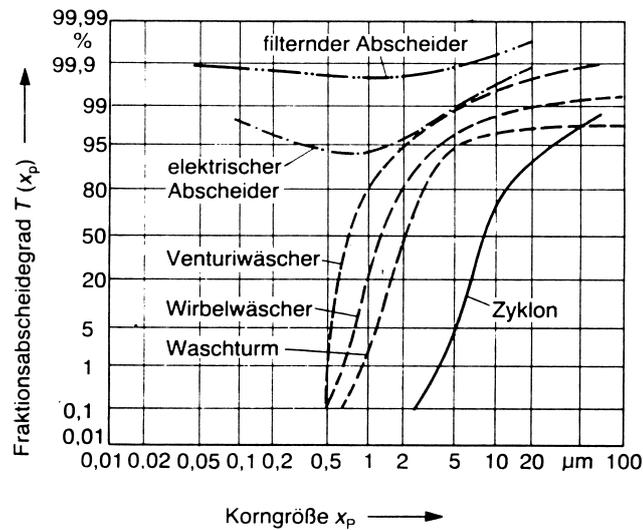
- (a) (3 Punkte) Beschreiben Sie stichpunktartig die Transportmechanismen bei filternden Abscheidern. Sie können diese auch in geeigneter Form schematisch darstellen.

hauptsächlich drei verschiedene Abscheidemechanismen bei filternden Abscheidern verantwortlich
 Trägheit: während die Gasmoleküle die Filterfasern umströmen, können die dichteren und deswegen *trägeren Partikel dieser Richtungsänderung nicht folgen*

Diffusion: Berührung mit der Faseroberfläche durch die *stochastischen Bewegungen der Partikel* aufgrund der Brownschen Molekularbewegung um ihre mittlere Bahnkurve

Elektrostatik: unterschiedliche Aufladung Partikel und Filterfaser, Anziehung

- (b) (2 Punkte) Bringen Sie die Transportmechanismen bei filternden Abscheidern in einen Zusammenhang mit dem in der Abbildung dargestellten Verlauf des Fraktionsabscheidegrades in Abhängigkeit von der Korngröße.



Diffusion und Elektrostatik verlieren ihre Wirkung mit zunehmender Teilchengröße, Trägheits Einfluss nimmt zu; jedoch nicht im gleichen Maße. Daher kommt es im Größenbereich zwischen 0,1 und 2 μm zu einer Zone verminderter Abscheidung.

13. Kohlendioxid-Abscheidung 6 Punkte

- (a) **(6 Punkte)** Stellen Sie das Prinzip *Pre-Combustion* zur CO₂-Abtrennung an einem Synthesegas schematisch dar. Ausgangspunkt ist der fossile Brennstoff. Das Schema sollte mit dem eigentlichen Kraftwerk und der CO₂-Speicherung enden. Benennen Sie alle Verfahrenseinheiten und Ströme eindeutig.

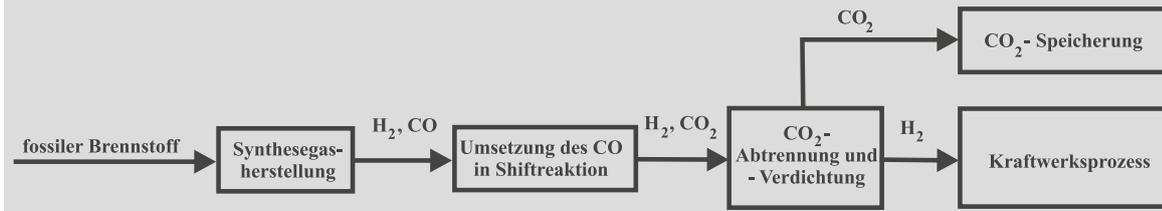
(1 Punkt) Synthesegasherstellung

(1 Punkt) Shiftreaktion

(1 Punkt) CO₂-Abtrennung

(2 Punkte) Stoffströme (jeweils 0,5)

(1 Punkt) Beschriftung



14. Erneuerbare Energieträger 9 Punkte

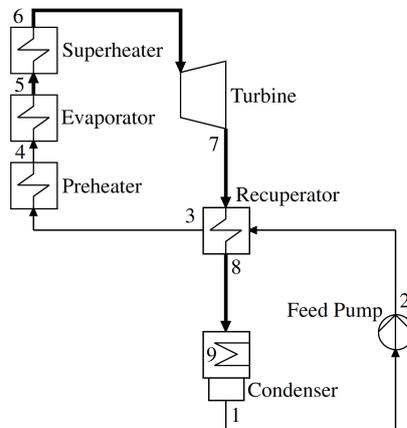
(a) (2 Punkte) Ordnen Sie folgende solarthermische Kollektor-Technologien nach aufsteigendem Konzentrationsfaktor. Geben Sie die richtige Reihenfolge mit Hilfe der angegebenen Zahlen an.

1. Linear-Fresnel Kollektor
2. Paraboloid-Spiegel
3. Vakuum-Röhrenkollektor
4. Heliostatenfeld
5. Flachkollektor

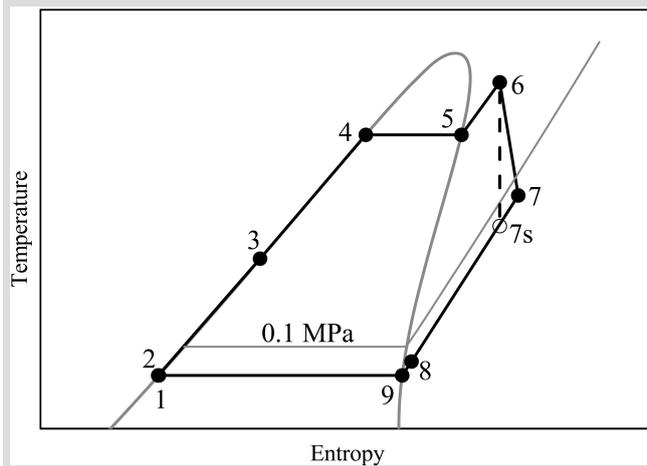
(je richtiger Beziehung 0,5 P, max. 2P)

5,3,1,4,2

(b) (5 Punkte) Die Abbildung zeigt ein exemplarisches Fließbild eines ORC-Prozesses. Zeichnen Sie ein T,s -Diagramm des realen Prozesses. Beschriften Sie Ihre Darstellung eindeutig. Druckverluste in den Wärmeübertragern können vernachlässigt werden. Die Taulinie des organischen Arbeitsmediums hat eine positive Steigung.

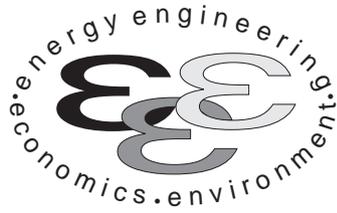


(je richtiger ZÄ 0,5 P, Beschriftung 1P)



(c) (2 Punkte) Nennen Sie mindestens vier geeignete Energieträger für ORC-Prozesse.

Biomasse, Geothermie, Solarthermie, industrielle Abwärme



Energietechnik – 24. September 2019
– MUSTERLÖSUNG –
Teil II – Rechenaufgaben

-
- Tragen Sie Ihren Namen und die Matrikelnummer ein.
 - Rechenwege müssen nachvollziehbar dargestellt werden. Nicht zu wertende Berechnungen oder Diagramme müssen durchgestrichen werden. Es ist leserlich zu schreiben.
 - Beschriften Sie die von Ihnen verwendeten Rechenblätter mit Namen und Matrikelnummer und nummerieren Sie die Seiten.
 - Bitte geben Sie alle Blätter nach der Bearbeitungszeit im gehefteten Zustand ab.

Name:	
Matrikelnummer:	

Aufgabe:	15	16	17	Summe
Punktzahl:	49	32	32	113
Davon erreicht:				

15. Thermodynamische Analyse 49 Punkte

Die Abbildung zeigt das Fließbild eines solarbetriebenen Dampfkraftwerkes. Das Thermoöl wird mittels der Pumpe (P) durch die Parabolkollektoren (PR) gepumpt. Der Massenstrom des Thermoöls wird anschließend geteilt und zur Überhitzung (ÜH), beziehungsweise zur Zwischenüberhitzung (ZW) des Wasserdampfes verwendet. Das heiße Thermoöl wird vor Eintritt in den Verdampfer (VD) wieder gemischt. Anschließend durchfließt es den Economizer (ECO), bevor es wieder in die Pumpe eintritt.

Der überhitzte Wasserdampf wird in der Hochdruck-Dampfturbine (HDT) entspannt, anschließend zwischenüberhitzt und tritt dann in die erste Stufe der Niederdruck-Dampfturbine (NDT1) ein. In der Niederdruck-Dampfturbine (NDT1-4) wird der Dampf bis ins Nassdampfgebiet entspannt. Die Anzapfungen der NDT (Ströme 8 bis 10) werden zur Vorwärmung des Speisewassers verwendet. Der Strom aus der letzten Niederdruckstufe (NDT4) wird im Kondensator (K) mit Wasser, welches bei Umgebungsbedingungen vorliegt, vollständig kondensiert. Das Kondensat wird über die Kondensatpumpe (KP) abgezogen, durchströmt den ersten Vorwärmer (VW1) und wird anschließend im Speisewasserbehälter (SWB) mit zwei Anzapfströmen (Ströme 9 und 16) gemischt. Die Speisewasserpumpe (SWP) befördert das Wasser weiter in den zweiten Vorwärmer (VW2) und den Economizer (ECO).

Die Stoffwerte für Wasser werden entsprechend IAPWS-IF97 berechnet. Die Wasserdampf Tafel aus der Formelsammlung kann folglich nicht für die Lösung der Aufgaben verwendet werden.

Aufgaben

- (a) **(2 Punkte)** Ist für das vorliegende System eine Aufteilung in chemische und physikalische Exergie sinnvoll? Begründen Sie!
- (b) **(3 Punkte)** Definieren Sie den exergetischen Nutzen \dot{E}_P^{TOT} , den exergetischen Aufwand \dot{E}_F^{TOT} und den Exergieverlust \dot{E}_L^{TOT} für das Gesamtsystem. Es sollen keine Werte berechnet werden.
- (c) **(5 Punkte)** Berechnen Sie die ins Netz eingespeiste elektrische Leistung des Kraftwerks $W_{\text{el,netto}}$.
- (d) **(8 Punkte)** Definieren und berechnen Sie den exergetischen Wirkungsgrad des Speisewasserbehälters ε_{SWB} .
- (e) **(5 Punkte)** Der isentrope Wirkungsgrad der vierten Stufe der Niederdruck-Dampfturbine beträgt $\eta_{s,\text{NDT4}} = 0,88$. Um welchen Betrag $\Delta\dot{W}_{\text{el,netto}}$ ändert sich die elektrische Nettoleistung, wenn der isentrope Wirkungsgrad um drei Prozentpunkte sinkt?
- (f) **(10 Punkte)** Berechnen Sie den Massenstrom \dot{m}_{40} des Thermoöls im Parabolrinnen-Kollektorfeld, wenn der exergetische Wirkungsgrad des Verdampfers $\varepsilon_{\text{VD}} = 0,941$ beträgt. Die Exergievernichtung im Mischer D2 kann vernachlässigt werden.
- (g) **(3 Punkte)** Berechnen Sie den elektr. Nettowirkungsgrad des Wasserdampfkreislaufes $\eta_{\text{el,WDK}}$.
- (h) **(5 Punkte)** Berechnen Sie den Kühlwassermassenstrom \dot{m}_{30} . Die einzuhaltende minimale Temperaturdifferenz im Kondensator soll $\Delta T_{\text{min}} = 5 \text{ K}$ betragen.
- (i) **(8 Punkte)** Die nivellierten Investitionskosten der Hochdruckturbine betragen 100 €/h . Der überhitzte Dampf hat spezifische Kosten in Höhe von $8 \text{ €/MWh}_{\text{ex}}$. Berechnen Sie im Rahmen der exergoökonomischen Analyse die Kosten der austretenden Ströme in €/h sowie ihre spezifischen Kosten in €/MWh_{ex} .

Hinweis für alle Unteraufgaben:

Sofern Sie für den Quereinstieg Ergebnisse aus vorhergehenden, unbeantworteten Aufgabenteilen benötigen, benutzen Sie bitte folgende Angaben. Diese stimmen nicht notwendigerweise mit den exakten Werten überein.

$$\dot{W}_{\text{el,netto}} = 100 \text{ MW}$$

Annahmen und gegebene Werte

- Alle Komponenten arbeiten stationär und sind nach außen adiabat.
- Änderungen der kinetischen und potentiellen Energien können vernachlässigt werden.
- Die Umgebungsbedingungen sind gegeben durch $T_0 = 15 \text{ °C}$ und $p_0 = 1 \text{ bar}$.
- Die spezifische Enthalpie und die spezifische Entropie von Wasser (IAPWS-IF97 Formulierung) bei Umgebungsbedingungen betragen $h_0 = 63,08 \text{ kJ/kg}$ und $s_0 = 0,2245 \text{ kJ/kgK}$.
- Die spezifische Enthalpie und die spezifische Entropie des Thermoöls bei Umgebungsbedingungen betragen $h_0 = 22,75 \text{ kJ/kg}$ und $s_0 = 0,0811 \text{ kJ/kgK}$.
- Die direkte Sonneneinstrahlung beträgt $\dot{q}_{\text{Solar}} = 800 \text{ W/m}^2$.
- Die Pumpen arbeiten mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 95 \text{ \%}$.
- Der mechanische Wirkungsgrad der Turbinen beträgt $\eta_{\text{mech}} = 99,8 \text{ \%}$. Der Wirkungsgrad des Generators wird mit $\eta_{\text{G}} = 97 \text{ \%}$ angegeben.
- Druckverluste bei den dargestellten Wärmeübertragern können vernachlässigt werden.
- Kühlwasser im Kondensator kann mit einer mittleren spezifischen Wärmekapazität von $4,18 \text{ kJ/kgK}$ angenommen werden.

Tabelle 1: Thermodynamische Daten der Stoffströme

Nr.	\dot{m} [kg/s]	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	e [kJ/kg]	\dot{H} [MW]	\dot{S} [MW/K]	\dot{E} [MW]
1	84,06	295,01	80,00					0,4829	92,87
2	84,06	385,00	80,00	3096,47	6,3013	1282,34	260,29	0,5297	107,79
3	84,06	241,73	25,00	2857,34	6,3653	1024,77	240,19	0,5351	86,14
4	84,06	385,00	25,00	3206,32	6,9662	1200,60	269,52	0,5856	100,92
5	79,46	293,45	12,00	3032,13	7,0086	1014,22	240,94	0,5569	80,59
6	76,09	199,79	5,00	2855,45	7,0601	822,67	217,26	0,5372	62,59
7	65,72	151,99	3,00		7,0892	724,33	181,74	0,4659	47,60
8		293,45	12,00	3032,13	7,0086	1014,22	13,94	0,0322	4,66
9	3,37	199,79	5,00	2855,45	7,0601	822,67	9,64	0,0238	2,78
10	10,37	151,99	3,00	2765,47	7,0892	724,33	28,68	0,0735	7,51
11	65,72	45,81	0,10	2308,23	7,2847	210,76	151,69	0,4787	13,85
12	76,09	45,81	0,10	191,81	0,6492	6,34	14,59	0,0494	0,48
13	76,09	45,85	5,00	192,43	0,6496	6,85	14,64	0,0494	0,52
14	76,09	128,53	5,00	540,26	1,6188	75,40	41,11	0,1232	5,74
15	84,06	151,84	5,00	640,19	1,8606	105,65	53,81	0,1564	8,88
16		151,84	5,00	667,86	1,9257	114,56	3,07	0,0089	0,53
17	84,06	153,14	80,00	650,41	1,8654	114,49	54,67	0,1568	9,62
18		158,14	12,00	667,86	1,9235	115,22	3,07	0,0088	0,53
19		182,97	80,00						
20		280,48	80,00					0,2578	29,93
21	10,37	50,85	3,00	213,15	0,7147	8,81	2,21	0,0074	0,09
22	10,37	45,81	0,10	213,15	0,7161	8,40	2,21	0,0074	0,09
30		15,00	1,00						
31			1,00						
40		280,99	25,00				446,57		
41		390,00	10,00				668,77		
42		390,00	10,00						
43		363,56	10,00				305,98		108,35
44		390,00	10,00						
45		362,67	10,00				305,05		107,84
46		363,12	10,00						
47		300,01	10,00					1,1606	
48		280,00	10,00				444,69		

d) Nein, da sich die chemische Zusammensetzung nicht ändert

①

①

~~②~~

b)

$$\dot{E}_F^{\circ} = \dot{E}_{\text{solar}} \quad \text{oder} \quad \dot{E}_F^{\circ} = \dot{E}_{41}^{\circ} - \dot{E}_{40}^{\circ} \quad \text{①}$$

$$\dot{E}_p^{\circ} = \dot{w}_{\text{el, netto}} \quad \text{①}$$

$$\dot{E}_L^{\circ} = \dot{E}_{31}^{\circ} - \dot{E}_{30}^{\circ} \quad \text{①}$$

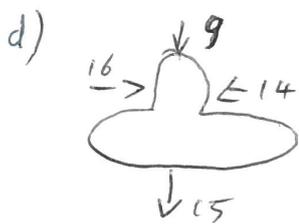
~~③~~

$$\begin{aligned}
 \dot{w}_{\text{brutto}} &= [\dot{H}_2 - \dot{H}_3 + \dot{H}_4 - \dot{H}_8 - \dot{H}_9 - \dot{H}_{10} - \dot{H}_{11}] \eta_T \cdot \eta_g = \\
 &= [260,29 - 240,19 + 269,52 - 13,94 - 28,69 - 9,64 - 151,69] \cdot 0,998 \cdot 0,97 \text{ MW} = \\
 &= 85,67 \text{ MW} \cdot 0,96806 = \\
 &= 82,93 \text{ MW} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{w}_{\text{pumpen}} &= [\dot{H}_{40} - \dot{H}_{48} + \dot{H}_{17} - \dot{H}_{15} + \dot{H}_{13} - \dot{H}_{12}] / \eta_P = \\
 &= [446,57 - 444,69 + 54,67 - 53,81 + 14,64 - 14,59] \text{ MW} / 0,95 = \\
 &= 2,79 \text{ MW} / 0,95 \quad (2) \\
 &= 2,94 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \dot{w}_{\text{netto}} = 80 \text{ MW} \quad (1)$$

~~(5)~~



e_{16} & e_9 sind ^{größer} ~~kleiner~~ e_{15} (2)
 \Rightarrow Aufwand

$e_{14} < e_{15} \Rightarrow$ Nutzen (1)

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{16} &= \dot{m}_{15} - \dot{m}_9 - \dot{m}_{14} = (84,06 - 3,37 - 76,09) \text{ kg/s} \\
 &= 4,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_F &= \dot{m}_{16} (e_{16} - e_{15}) + \dot{m}_9 (e_9 - e_{15}) \\
 &= 40,986 \text{ kW} + 2416,36 \text{ kW} \\
 &= 2,457 \text{ MW} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\dot{E}_P = \dot{m}_{14} (e_{15} - e_{14}) = 2,302 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 0,9369 \quad (1)$$

~~(8)~~

$$e) \quad \eta_{s,T} = \frac{h_7 - h_{11}}{h_7 - h_{11,s}}$$

$$h_7 = \dot{H}_7 / \dot{m}_7 = 181,74 \text{ MW} / \frac{65,72 \text{ kg}}{s} = 2765,37 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$h_{11,s} = h_7 - \frac{h_7 - h_{11}}{\eta_{s,NDT4}} = 2245,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$\eta_{s,NDT4,neu} = \eta_{s,NDT4,alt} - 0,03 = 0,85$$

$$h_{11,neu} = h_7 - \eta_{s,NDT4,neu} (h_7 - h_{11,s}) = 2323,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{w}_{el,netto} = (h_{11,neu} - h_{11,alt}) \cdot \dot{m}_{11} \cdot \eta_T \cdot \eta_g \quad (1)$$

$$= -0,99 \text{ MW} \quad (1)$$

~~(5)~~

$$f) \quad \varepsilon_{VD} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{20}}{\dot{E}_{46} - \dot{E}_{47}} \quad (2) \Rightarrow \dot{E}_{46} - \dot{E}_{47} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{20}}{\varepsilon_{VD}}$$

$$\dot{E}_{D,VD} = \dot{E}_{20} - \dot{E}_1 + \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{20}}{\varepsilon_{VD}} = 3,946 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{S}_{gen,VD} = \frac{\dot{E}_{D,VD}}{T_0} = 0,0137 \frac{\text{MW}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$\dot{S}_{46} = \dot{S}_1 - \dot{S}_{20} + \dot{S}_{47} - \dot{S}_{gen} = 1,372 \frac{\text{MW}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$\dot{H}_{46} = \dot{H}_{43} + \dot{H}_{45} = 611,03 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{46} = \dot{E}_{43} + \dot{E}_{45} = 105,35 \text{ MW} + 107,84 \text{ MW} = 213,19 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{46} &= \dot{m}_{46} \left[(h_{46} - h_{0,14}) - T_0 (s_{46} - s_{0,14}) \right] \\ &= \dot{H}_{46} - \dot{m}_{46} h_{0,14} - T_0 \dot{S}_{46} + \dot{m}_{46} T_0 s_{0,14} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{46} - \dot{H}_{46} + T_0 \dot{S}_{46} = \dot{m}_{46} (T_0 s_{0,14} - h_{0,14})$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{46} = \frac{\dot{E}_{46} - \dot{H}_{46} + T_0 \dot{S}_{46}}{T_0 s_{0,14} - h_{0,14}} = 810,71 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

10

$$g) \quad \dot{Q}_{20, \text{WDK}} = \dot{H}_{41} - \dot{H}_{48} = 668,77 \text{ MW} - 444,69 \text{ MW} \\ = 224,08 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{el}} = \frac{\dot{w}_{\text{netto}}}{\dot{Q}_{20, \text{WDK}}} = 35,7 \% \quad (1)$$

mit Queereinstieg: 44,63 %

~~(3)~~

$$h) \quad t_{31} = t_{11} - \Delta t_{\text{min}} = 40,81 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{H}_{\text{WÜ}} = \dot{H}_{11} + \dot{H}_{22} - \dot{H}_{12} \quad (1) \\ = 151,69 \text{ MW} + 2,21 \text{ MW} - 14,59 \text{ MW} \\ = 139,31 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} = \frac{\Delta \dot{H}_{\text{WÜ}}}{c_p \Delta T} \quad (1)$$

$$= \frac{139,31 \text{ MW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} [40,81 - 15] \text{ K}} =$$

$$= 1291,27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

~~(5)~~

$$i) \quad \dot{C}_2 - \dot{C}_3 - \dot{C}_{w,HD} + \dot{Z}_{HD} = 0 \quad (2)$$

$$C_3 = C_2 \quad (1)$$

$$\Rightarrow C_3 = 8 \text{ €/MWh} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \dot{C}_3 = C_3 \cdot \dot{E}_3 = 8 \cdot 86,14 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 689,14 \frac{\text{€}}{\text{h}} \quad (1)$$

$$\dot{C}_{w,HD} = \dot{C}_2 - \dot{C}_3 + \dot{Z}_{HD} = 273,2 \frac{\text{€}}{\text{h}} \quad (1)$$

$$C_{w,HD} = \frac{\dot{C}_{w,HD}}{\dot{w}_{\text{mec},HD}} = \frac{\dot{C}_{w,HD}}{\underbrace{(\dot{H}_2 - \dot{H}_3) \eta_T}_{20,06 \text{ MW}}}} = 13,62 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \quad (1)$$

~~8~~

16. Wirtschaftlichkeitsanalyse32 Punkte

Zur Sicherstellung der zukünftigen Strom- und Wärmeversorgung sucht ein Industriepark zum 01.01.2022 eine neue Lösung. Als mögliche Investition wird ein Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung (GuD-KWK) vorgeschlagen. Die Einnahmen des Projektes werden aus dem Strom- und Wärmeverkauf am Standort erzielt. Um die Kostensteigerung des Gaseinkaufes zu berücksichtigen erfolgt nach 10 Jahren eine Erhöhung des Wärmeverkaufspreises. Zur Kalkulation der Investitionskosten liegt Ihnen ein Angebot vom 01.01.2018 vor.

Prüfen Sie die Wirtschaftlichkeit des Investitionsprojektes GuD-KWK. Alle dazu notwendigen Annahmen und Parameter können der beigelegten Tabelle entnommen werden. Prüfen Sie ob das Projekt unter den gegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlich ist, indem Sie den Kapitalwert NPV des Investitionsprojektes bestimmen.

Hinweis für alle Unteraufgaben:

Sofern Sie für den Quereinstieg Ergebnisse aus vorhergehenden, unbeantworteten Aufgabenteilen benötigen, benutzen Sie bitte die in eckigen Klammern angegebenen Werte. Diese stimmen nicht notwendigerweise mit den exakten Werten überein.

Weitere Annahmen und Hinweise

- Vereinfachend wird angenommen, dass die Errichtung der Anlage über Nacht erfolgt. Inbetriebnahmezeitpunkt ist der 01.01.2022.
- Die Zahlung der Investitionskosten erfolgt erst zum 01.01.2022. Alle weiteren Kosten fallen jeweils am Ende eines Jahres an.
- Die Erlöse fallen jeweils am Ende eines Jahres an.
- Die jährlichen Fixkosten unterliegen keiner Kostensteigerung.
- Die Brennstoffkosten unterliegen einer Kostensteigerung von $r_{FC,n} = 2,5\%/a$.
- Die Kostensteigerung für Investitionsgüter beträgt $r_{I,n} = 4\%/a$.
- Führen Sie sämtliche Rechnungen in inflationsbehafteter Währung durch.
- Es wird von konstanten Strompreisen über den gesamten Betrachtungszeitraum ausgegangen.
- Der Bezugszeitpunkt für die wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der Planungszeitpunkt der Energieversorgungsanlage.

Aufgaben

- (a) **(4 Punkte)** Berechnen Sie die jährlichen Vollaststunden t_{VL} [7 750 h/a], den jährlichen Bedarf an Brennstoff BR [1 100 GWh] und die jährliche Wärmeauskopplung Q [330 GWh/a] für die geplante GuD-Anlage.
- (b) **(5 Punkte)** Bestimmen Sie den Barwert der Investition PV_I zum Bezugszeitpunkt.
- (c) **(7 Punkte)** Berechnen Sie den Barwert der Brennstoffkosten PV_{FC} zum Bezugszeitpunkt.
- (d) **(4 Punkte)** Ermitteln Sie den Barwert der Fixkosten PV_{fix} zum Bezugszeitpunkt.
- (e) **(8 Punkte)** Berechnen Sie jeweils den Barwert für die erwarteten Erlöse von Strom PV_{Strom} und Wärme $PV_{Wärme}$ zum Bezugszeitpunkt.
- (f) **(4 Punkte)** Ermitteln Sie den Kapitalwert NPV des Projektes zum Bezugszeitpunkt. Kann mittels dieser durchgeführten Analyse eine abschließende Einschätzung für oder gegen eine Investitionsentscheidung für eine GuD-KWK getroffen werden? Begründen Sie!

Annahmen und Parameter des Investitionsprojektes GuD-KWK

<i>Planungsdaten</i>	
Planungszeitpunkt	01.01.2020
Bezugszeitpunkt	01.01.2020
Inbetriebnahmezeitpunkt	01.01.2022
Wirtschaftliche Nutzungsdauer ab Inbetriebnahme, n	20 a
<i>GuD-Anlagendaten</i>	
Elektrische Nennleistung, \dot{W}_{el}	80 MW _{el}
Nettostromerzeugung, $W_{el,netto}$	620 GWh _{el} /a
Eigenverbrauch Strom $W_{el,eigen}$	6,5 GWh _{el} /a
Elektrischer Wirkungsgrad, η_{el}	55 %
Thermischer Wirkungsgrad, η_{th}	30 %
Spezifische Investitionskosten 01.01.2018, i_0	900 € ₂₀₁₈ /kW _{el}
Jährliche fixe Betriebskosten, k_{fix}	2 % der Investitionskosten
<i>Sonstige Angaben</i>	
Stromverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, p_{Strom}	50 €/MWh _{el}
Wärmeverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, $p_{Wärme,1}$	30 €/MWh _{th}
Wärmeverkaufspreis ab 01.01.2032, $p_{Wärme,2}$	40 €/MWh _{th}
Erdgaspreis zum Planungszeitpunkt, p_{FC}	21 €/MWh _{LHV}
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate der Brennstoffkosten, r_{FC}	2,5 %/a
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate für Investitionsgüter, r_I	4 %/a
Jährlicher effektiver Zinssatz, i_{eff}	5 %/a
Jährliche Inflationsrate, r_i	2 %/a

Hinweis: Die Ergebnisse bei Quereinstieg sind in grauer Farbe angegeben.

Aufgabe a (4 Punkte)

Vollaststunden:

$$t_{VL} = \frac{W_{el,netto}}{\dot{W}_{el}} = \frac{626,5 \cdot 1000 \text{ MWh/a}}{80 \text{ MW}} = 7750 \text{ h/a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Brennstoffbedarf:

$$BR = \frac{W_{el,netto}}{\eta_{el}} = 1127 \text{ GWh/a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Wärmebedarf:

$$Q = BR \cdot \eta_{th} = 338 \text{ GWh}_{therm}/a \quad (1 \text{ Punkt})$$

(plus 1 Punkt für Ansatz mit Wirkungsgrad)

Aufgabe b (5 Punkte)

Barwert der Investition

$$PV_{I,2020} = I_{2022} \cdot (1 + i_{eff})^{-2} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$I_{2022} = I_{2018} \cdot (1 + r_I)^4 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$I_{2018} = i_0 \cdot \dot{W}_{el} = 900 \text{ €/kW}_{el} \cdot 80 \cdot 1000 \text{ kWh} = 72000 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$I_{2022} = 84230 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{I,2020} = 76399 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt für Ergebnis und korrektem Gesamtrechnenweg})$$

Aufgabe c (7 Punkte) Barwert der Brennstoffkosten

$$A_{FC} = FC_{2022} \cdot CELF = FC_{2022} \cdot \frac{k(1-k^n)}{1-k} CRF$$

$$PV_{FC,2022} = \frac{A_{FC}}{CRF} = FC_{2022} \cdot \frac{k(1-k^n)}{1-k} \quad (2 \text{ Punkte für Rechenweg})$$

$$k = \frac{1 + r_{FC}}{1 + i_{eff}} = \frac{1,025}{1,05} = 0,9762 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$FC_{2022} = BR \cdot p_{FC} \cdot (1 + r_{FC})^2 = 1127 \cdot 1000 \text{ MWh} \cdot 21 \text{ €/MWh}_{LHV} \cdot (1 + 0,025)^2 = 24868 \text{ t€} \quad (24266 \text{ T€}) \quad (2 \text{ Punkt})$$

$$PV_{FC,2022} = 25128 \text{ T€} \cdot \frac{0,9809(1 - 0,9809^{20})}{1 - 0,9809} = 389944 \text{ T€} \quad (380510 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{FC,2020} = PC_{FC,2022} \cdot (1 + i_{eff})^{-2} = 353691 \text{ T€} \quad (345134 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt für Ergebnis und korrektem Gesamtrechnenweg})$$

Aufgabe d (4 Punkte) Barwert der jährlichen Fixkosten

$$PV_{fix,2022} = \frac{A_{fix,2022}}{CRF_{20}}$$

$$A_{fix,2022} = k_{fix} \cdot I_{2022} = 0,02 \cdot 84230 \text{ T€} = 1685 \text{ T€/a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$CRF_{20} = \frac{i(1+i)^{20}}{(1+i)^{20}-1} = 0,0802 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{fix,2022} = 21005 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{fix,2020} = PC_{fix,2022} \cdot (1 + i_{eff})^{-2} = 19052 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt für Ergebnis und korrektem Gesamtrechnenweg})$$

Aufgabe c (4 Punkte) Barwert der jährlichen Erträge

Stromerlöse (3 Punkte)

$$PV_{Strom,2022} = \frac{A_{Strom,2022}}{CRF_{20}}$$

$$A_{\text{Strom},2022} = (W_{\text{el,netto}} - W_{\text{el,eigen}}) \cdot p_{\text{Strom}} = 626,5 \cdot 1000 \text{ MWh/a} \cdot 50 \text{ €/MWh}_{\text{el}} = 30\,675 \text{ T€/a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Strom},2022} = \frac{31\,000 \text{ T€/a}}{0,0802} = 382\,481 \text{ T€/a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Strom},2020} = PC_{\text{Strom},2022} \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-2} = 346\,922 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt für Ergebnis und korrektem Gesamtrechenweg})$$

Wärmeerlöse (5 Punkte)

$$PV_{\text{Wärme},2022} = PV_{\text{Wärme},1,2022} + PV_{\text{Wärme},2,2022}$$

$$PV_{\text{Wärme},1,2022} = \frac{A_{\text{Wärme},2022}}{CRF_{10}} = \frac{Q \cdot p_{\text{Wärme},1}}{CRF_{10}}$$

$$CRF_{10} = 0,1295 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Wärme},1,2022} = \frac{338 \cdot 1000 \text{ MWh}_{\text{th}}/\text{a} \cdot 30 \text{ €/MWh}_{\text{th}}}{0,1264} = 78\,343 \text{ T€/a} \quad (78\,764 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Wärme},2,2022} = PV_{\text{Wärme},2,2032} \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-10}$$

$$PV_{\text{Wärme},2,2032} = \frac{A_{\text{Wärme},2032}}{CRF_{10}} = \frac{Q \cdot p_{\text{Wärme},2}}{CRF_{10}}$$

$$PV_{\text{Wärme},2,2032} = \frac{338 \cdot 1000 \text{ MWh}_{\text{th}}/\text{a} \cdot 40 \text{ €/MWh}_{\text{th}}}{0,1295} = 104\,457 \text{ T€/a} \quad (105\,019 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Wärme},2,2022} = 64\,128 \text{ T€/a} \quad (64\,473 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$PV_{\text{Wärme},2020} = PV_{\text{Wärme},2022} \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-2} = (PV_{\text{Wärme},1,2022} + PV_{\text{Wärme},2,2022}) \cdot (1 + i_{\text{eff}})^{-2} = 129\,225 \text{ T€} \quad (129\,920 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt für Ergebnis und korrektem Gesamtrechenweg})$$

Aufgabe e (4 Punkte) Kapitalwert der Investition

$$NPV_{2020} = PV_{\text{Wärme},2020} + PV_{\text{Strom},2020} - PV_{\text{fix},2020} - PV_{\text{FC},2020} - PV_{\text{I},2020} \quad (1 \text{ Punkte Formel mit korrekten Vorzeichen})$$

$$NPV_{2020} = 27\,005 \text{ T€} \quad (36\,257 \text{ T€}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

Antwort: (2 Punkte)

Nach der Kapitalwertmethode ist das GuD-KWK-Projekt wirtschaftlich. Eine Investitionsentscheidung ist jedoch nicht möglich ohne Betrachtung der Alternativen.

17. Wärmeübertragernetzwerke 32 Punkte

Die folgenden neun Stoffströme sollen zu einem Wärmeübertragernetzwerk verbunden werden.

Nr.	T_{ein} [°C]	T_{aus} [°C]	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	$\dot{m}\Delta h^{\text{LV}}$ [kW]
1	100	100	-	80
2	210	150	1,5	-
3	120	180	2	-
4	150	190	3	-
5	90	250	1	-
6	250	50	0,5	-
7	180	110	1	-
8	170	170	-	100
9	300	200	1	-

- Die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung liegt bei $\Delta T_{\text{min}} = 20 \text{ K}$.
- Strom 1 soll bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung verdampft werden.
- Strom 8 soll bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung kondensiert werden.
- Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten der Ströme wird vernachlässigt.
- Alle Wärmeübertrager werden im Gegenstrom betrieben.
- Druckverluste werden vernachlässigt.

Hinweis für alle Unteraufgaben: Sollten Sie die Reserven nutzen, kennzeichnen Sie jeweils die endgültige Variante eindeutig.

Aufgaben

- (a) **(13 Punkte)** Bestimmen Sie den minimalen externen Heizbedarf $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$ und den minimalen externen Kühlbedarf $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$ mit Hilfe der Wärmekaskade sowie alle Pinchtemperaturen für das Wärmeübertragernetzwerk rechnerisch. Verwenden Sie dafür die Tabelle.
- (b) **(10 Punkte)** Zeichnen Sie das Wärmestromprofil (Grand Composite Curve) in das Koordinatensystem der Abbildung. Bestimmen Sie die benötigte Mindesttemperatur der externen Wärmequelle $T_{\text{HU,min}}$ sowie die zulässige Maximaltemperatur der externen Wärmesenke $T_{\text{CU,max}}$ mit Hilfe der Grafik, sofern externe Quellen oder Senken auftreten. Markieren Sie weiterhin Bereiche mit interner Wärmerückgewinnung, sofern diese auftreten.
- (c) **(9 Punkte)** Ergänzen Sie den Entwurf für ein System mit maximaler Energierückgewinnung (MER-System), welches keine Pinch-Regel verletzt. Nutzen Sie dafür die vorgegebene Darstellung der Ströme. Markieren Sie alle notwendigen Wärmeübertrager mit dem jeweils übertragenen Wärmestrom und den entsprechenden Zwischentemperaturen und sofern vorhanden die externe Wärmequelle und -senke.

Intervall Nr.	angepasste Temperaturen [°C]	$\sum \dot{m}_i c_{p,i}$ [kW/K]	\dot{Q}_i [kW]	$\Delta \dot{Q}_i$ [kW]	$\Delta \dot{Q}_i^*$ [kW]
	290			0	-70
I		-1	-30		
	260			-30	-100
II		0	0		
	240			-30	-100
III		-0,5	-20		
	200			-50	-120
IV		1	10		
	190			-40	-110
V		4	80		
	170			40	-30
VI		3	30		
	160			70	0
VII		/	-100		
	160			-30	-100
VIII		0	0		
	140			-30	-100
IX		1,5	15		
	130			-15	-85
X		-0,5	-10		
	110			-25	-95
XI		/	80		
	110			55	-15
XII		-0,5	-5		
	100			50	-20
XIII		-0,5	-30		
	40	1,5	65	20	-50

1 $\dot{Q}_{Hu,min} = 70 \text{ kW}$ $T_P^* = 160^\circ\text{C}$ $T_P = 150/170^\circ\text{C}$

1 $\dot{Q}_{Cu,min} = 50 \text{ kW}$

1 2/13

0,5 pro ZÄ (6,5)

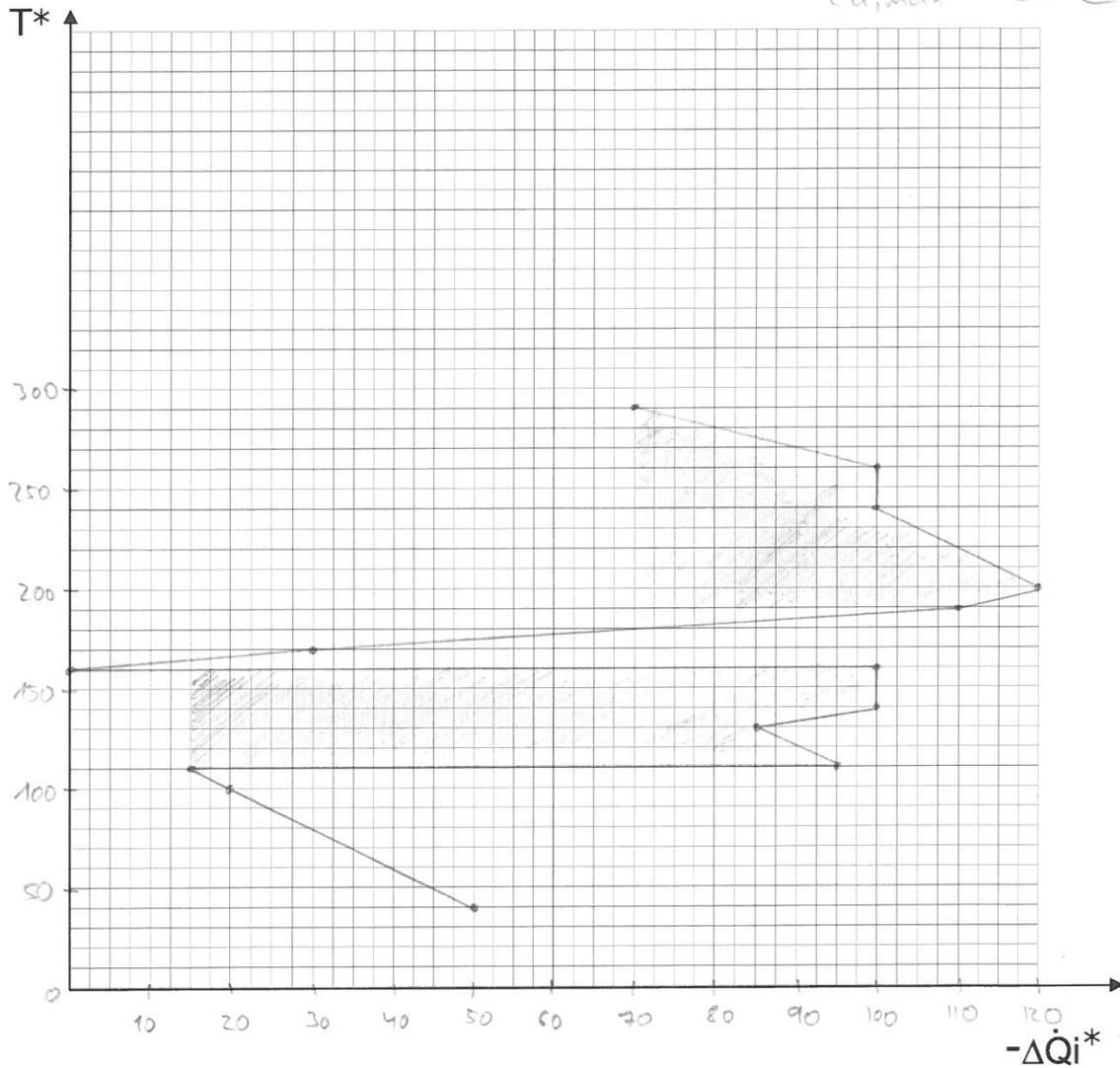
$T_{HU,min}^* = 180^\circ\text{C}$ (1)

$\rightarrow T_{HU,min} = 140^\circ\text{C}$

Wärmerückgewinnung (1,5)

$T_{cu,max}^* = 40^\circ\text{C}$ (1)

$\rightarrow T_{cu,max} = 30^\circ\text{C}$



Σ 10

