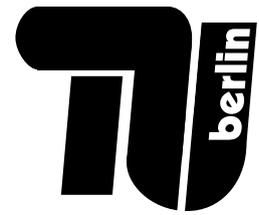


**Technische Universität Berlin**

**INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK**

**Prof. Dr.-Ing. G. Tsatsaronis**



**Altklausurensammlung**  
**im Fach Energietechnik I und Energietechnik II**

Inhalt

Semester
F 2020
H 2019
F 2019
H 2018

H: Herbst; F: Frühjahr

**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	
	WÜ-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.

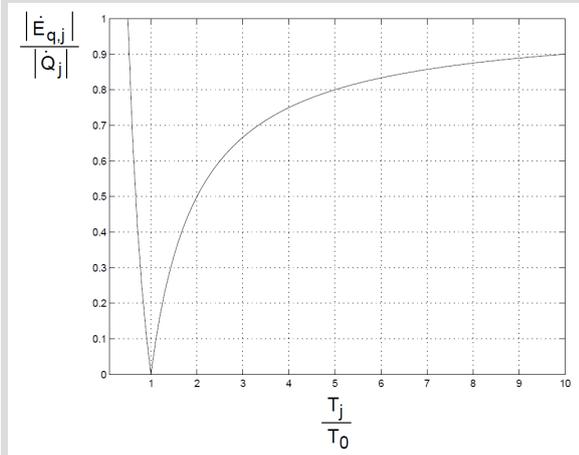
- (d) **(6 Punkte)** In einem Prozess treten zwei Verlustwärmeströme auf. Die Temperatur des Stroms A liegt 20 K oberhalb und die des Stroms B 20 K unterhalb der Umgebungstemperatur. Welchen

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

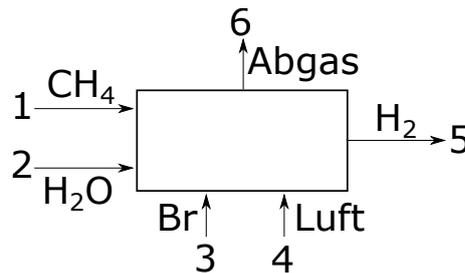
Strom B (1 Punkt), da der Exergiegehalt des Verlustwärmestromes bei  $T_B = T_0 - \Delta T$  größer ist als bei Strom A  $T_A = T_0 + \Delta T$  (1 Punkt).

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

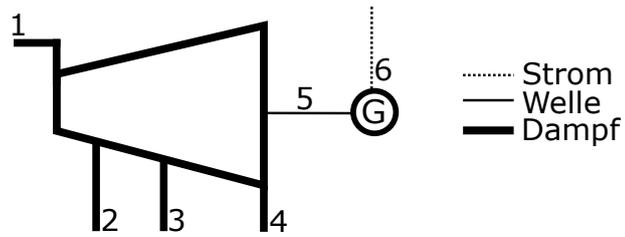
- (1 Punkt)  $\dot{E}_P = \dot{E}_5 - \dot{E}_2 - \dot{E}_1$
- (1 Punkt)  $\dot{E}_F = \dot{E}_3 + \dot{E}_4 - \dot{E}_6$
- (1 Punkt)  $\dot{E}_L = 0$

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:

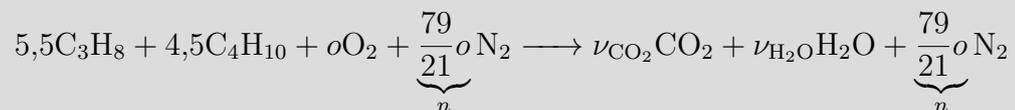
- Propan  $C_3H_8$  55 mol-%
- i-Butan  $C_4H_{10}$  15 mol-%
- n-Butan  $C_4H_{10}$  30 mol-%

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

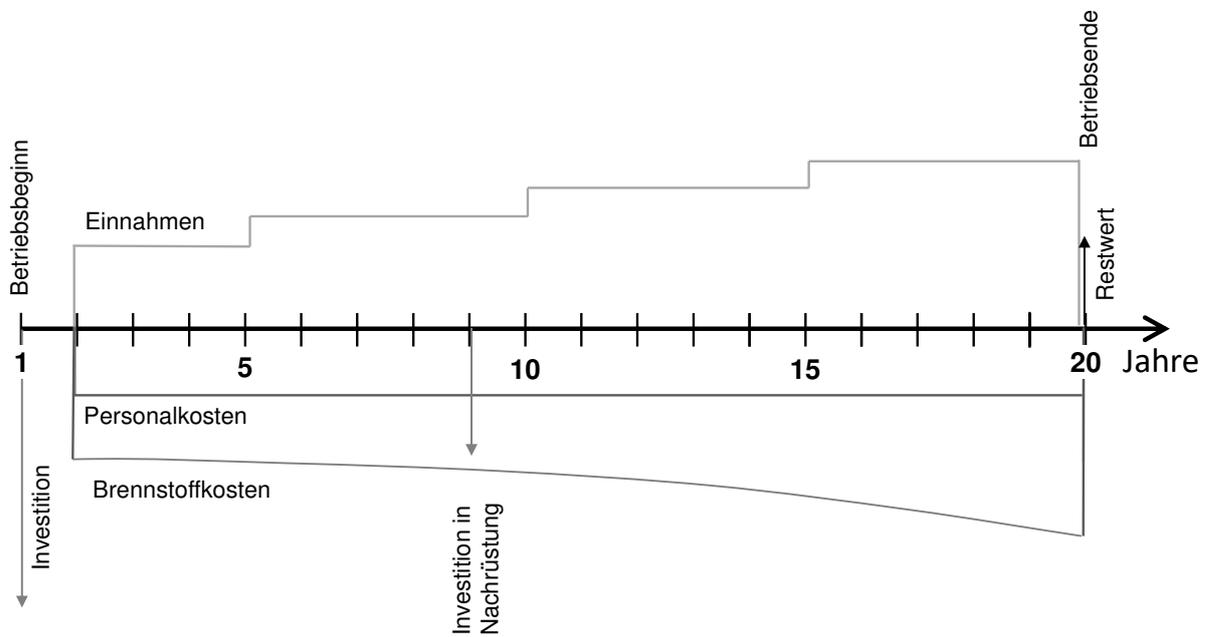
Ein Unternehmen kalkuliert eine stromproduzierende Anlage mit einer Betriebszeit von 20 Jahren. Folgende relevante Parameter sollen berücksichtigt werden:

- 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

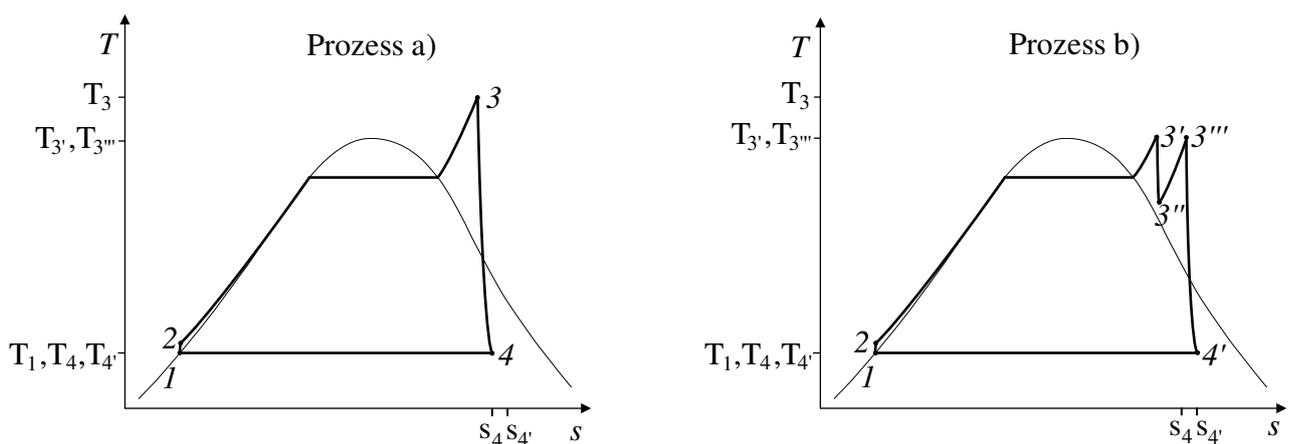
(c) **(2 Punkte)** Geben Sie einen ungefähren Wert für den gerade noch zulässigen Dampfgehalt in der Dampfturbine an. Welches Problem tritt bei einem zu niedrigen Dampfgehalt in der Dampfturbine auf?

- (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 Frischdampf Temperatur 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.

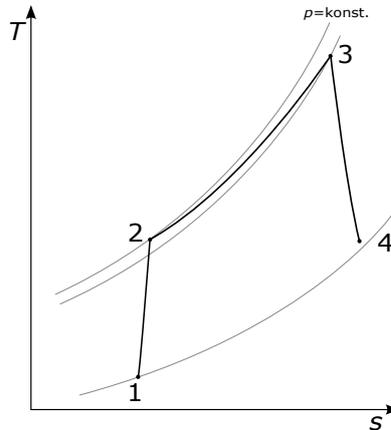
Alternative Begründung: Aufgrund des konstantes Druckes gilt für die thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmezufuhr

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

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. Turbinenaustrittstemperatur unterhalb der Verdichteraustrittstemperatur.

- (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)

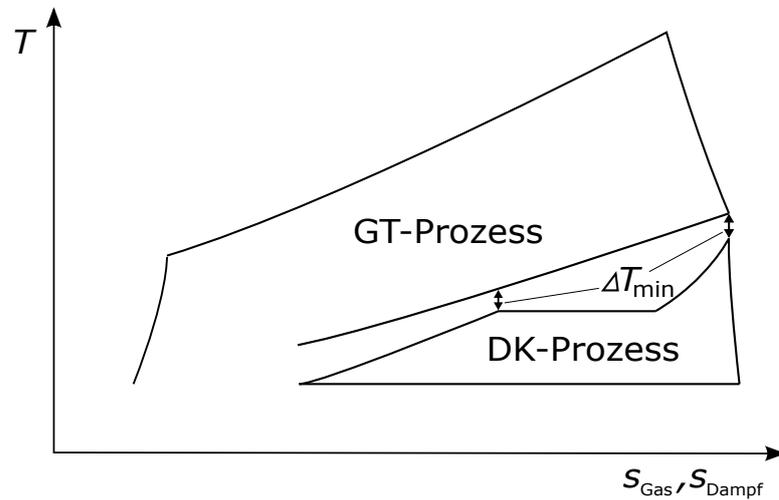
Höhere Exergieverluste, aufgrund deutlich höherer Abgastemperaturen.

- (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)

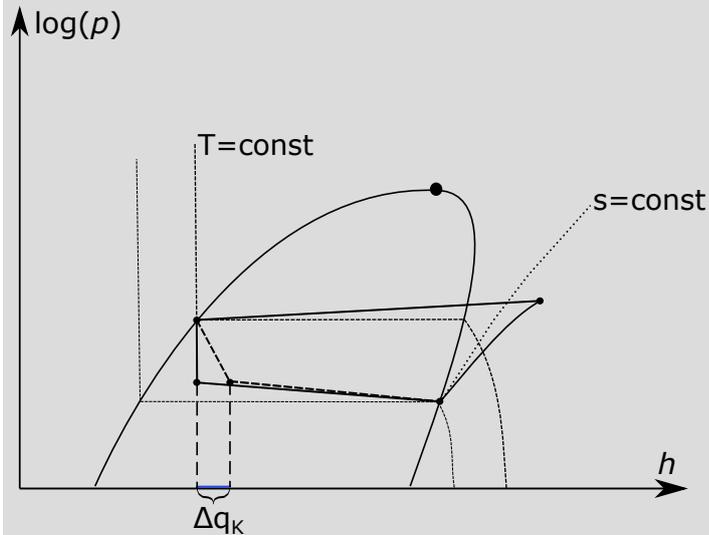
1 Pkt für Isentrope

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 1Punkt)

(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)

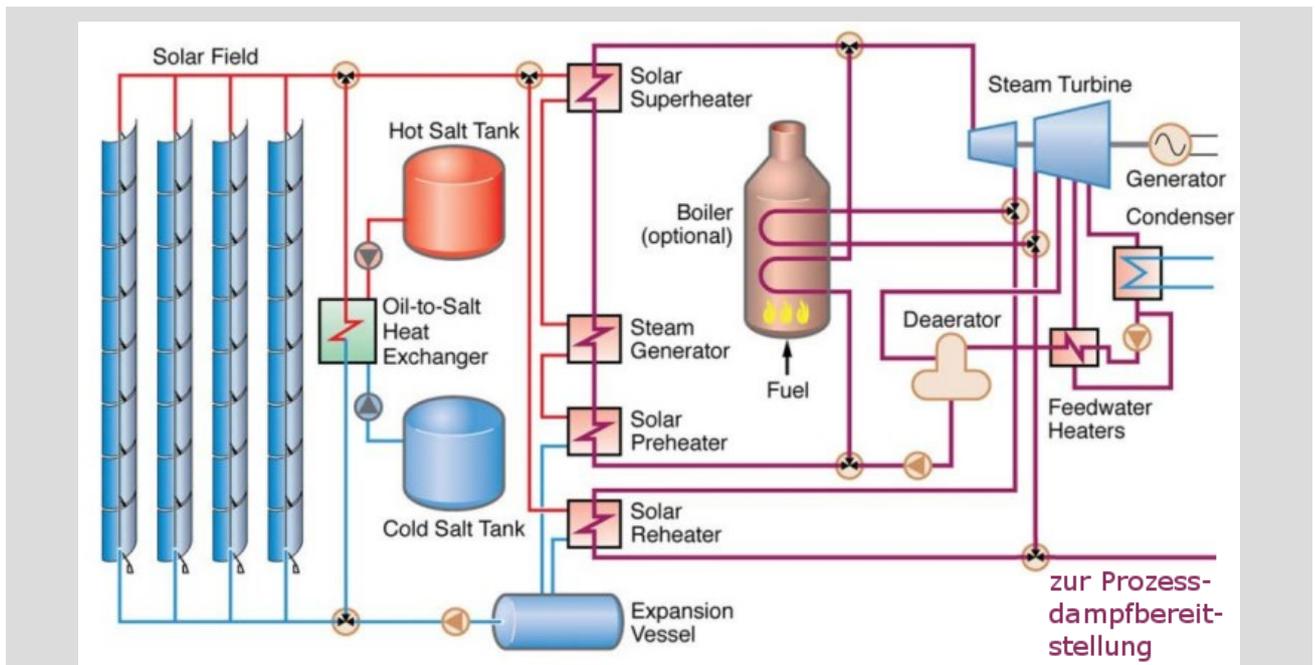
(halber Punkt, wenn geschrieben wurde, dass sich hohe Vergaseraustrittstemperaturen nachteilig auf den Wirkungsgrad auswirken)

## 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!

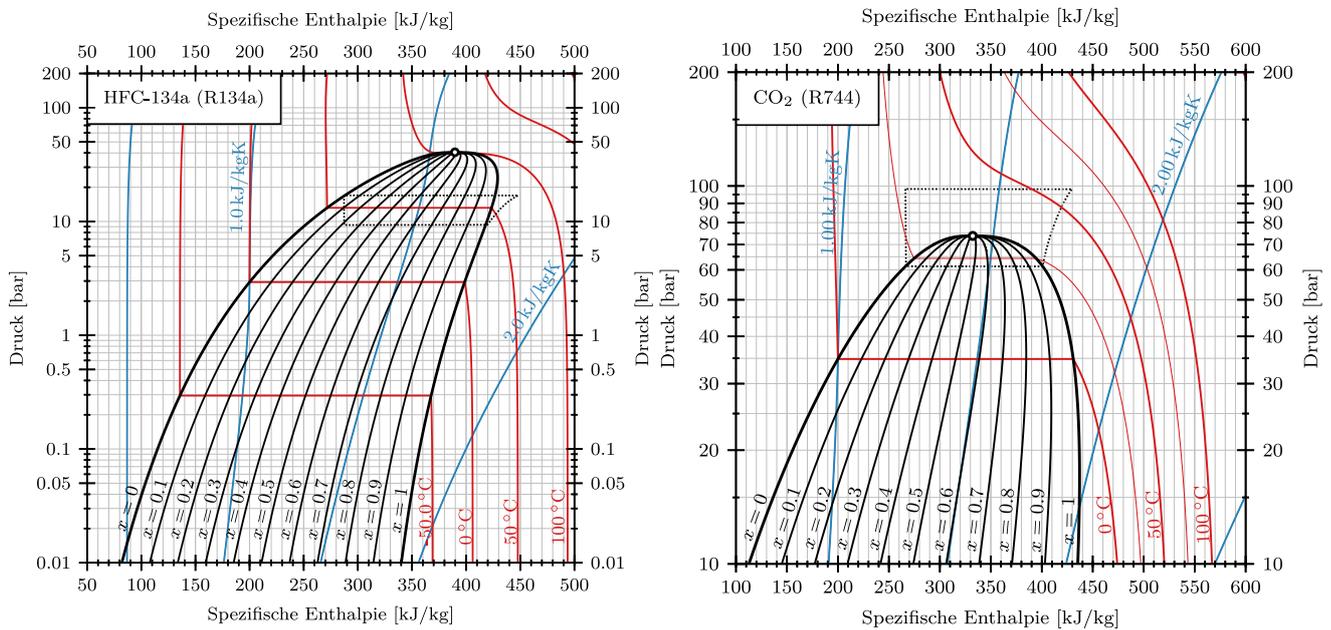
- Arbeitsmittel ist ein Zweistoffgemisch.
- Druckerhöhung erfolgt im flüssigen statt im gasförmigen Zustand.

(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  $\text{CO}_2$ .

1. Welcher Unterschied ergibt sich im Wärmepumpenbetrieb bei Verwendung von  $\text{CO}_2$  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  $\dot{C}_F$ .

$$\begin{aligned} \dot{C}_P &= \dot{C}_4 - \dot{C}_3 \\ \dot{C}_F &= \dot{C}_1 - \dot{C}_2 \end{aligned}$$

- (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  $\tau$  der Gesamtanlage. Formulieren Sie geeignete Gleichungen.

$$\begin{aligned} (1P) \quad \dot{Z}_k &= \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \\ (2P) \quad \dot{Z}_k^{CI} &= \frac{CI}{\tau} \frac{PEC_k}{\sum PEC_k} \\ (2P) \quad \dot{Z}_k^{OM} &= \frac{OM}{\tau} \frac{PEC_k}{\sum PEC_k} \end{aligned}$$

**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.

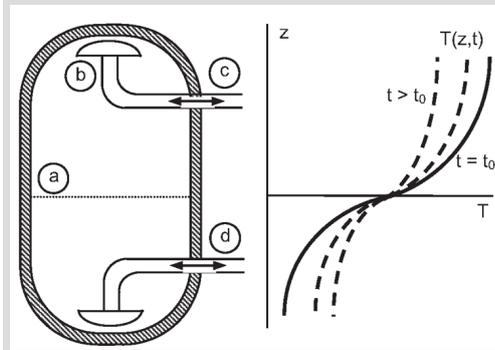
1. Pumpspeicherkraftwerk
2. Druckluftspeicherkraftwerk
3. Lithium-Ionen-Batterie

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

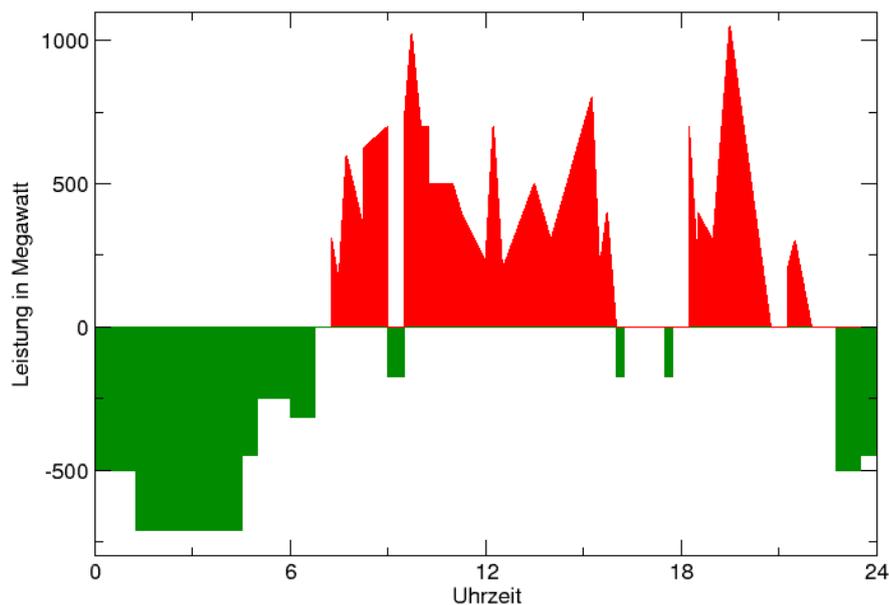
2,1,3

(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)



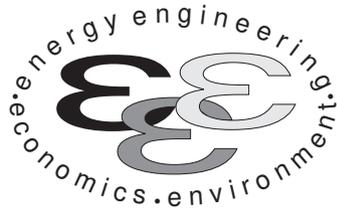
(c) **(3 Punkte)** Das Diagramm zeigt den typischen Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerkes im Laufe eines Tages (Pumpbetrieb: Leistung negativ; Generatorbetrieb: Leistung positiv). Charakterisieren Sie Pumpspeicherkraftwerke und erläutern Sie stichpunktartig die Unterschiede beim Profil (Verlauf, Zeit)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

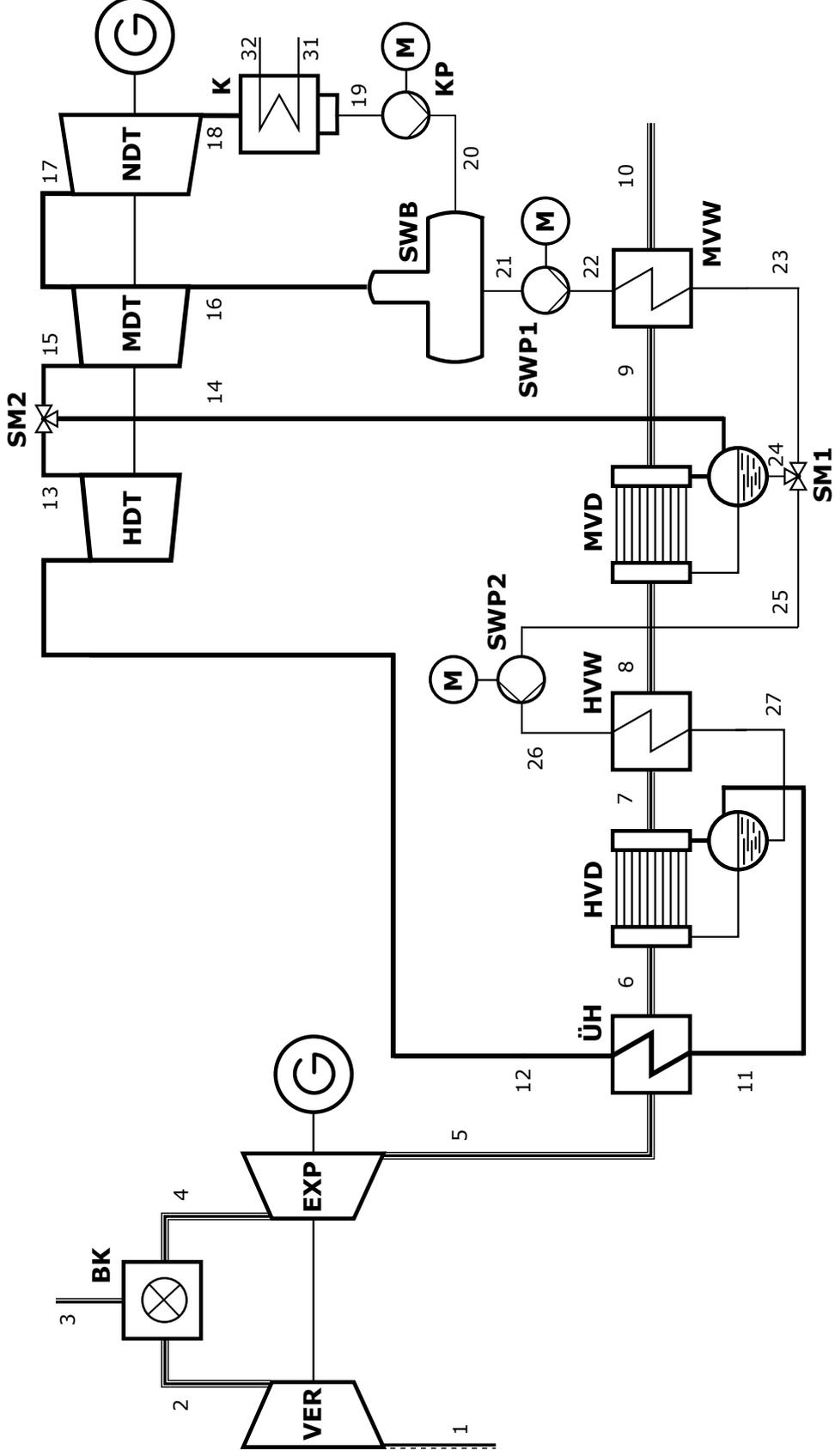
### Annahmen und gegebene Werte

- 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** Speisewasserbehälter
- SWP** Speisewasserpumpe

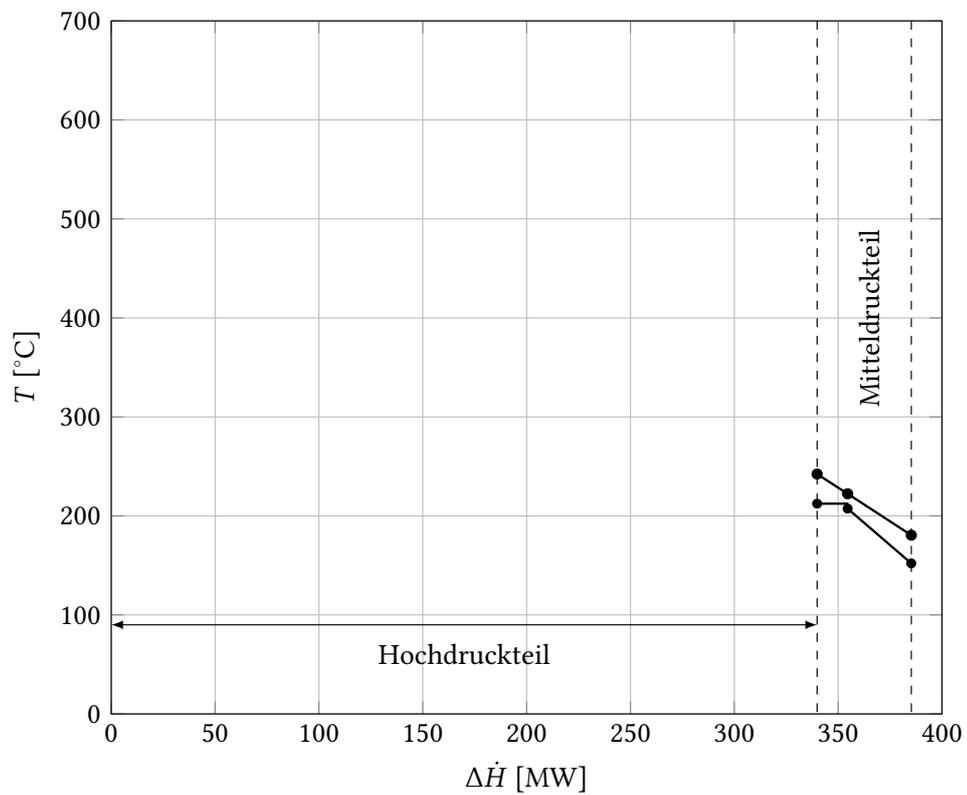
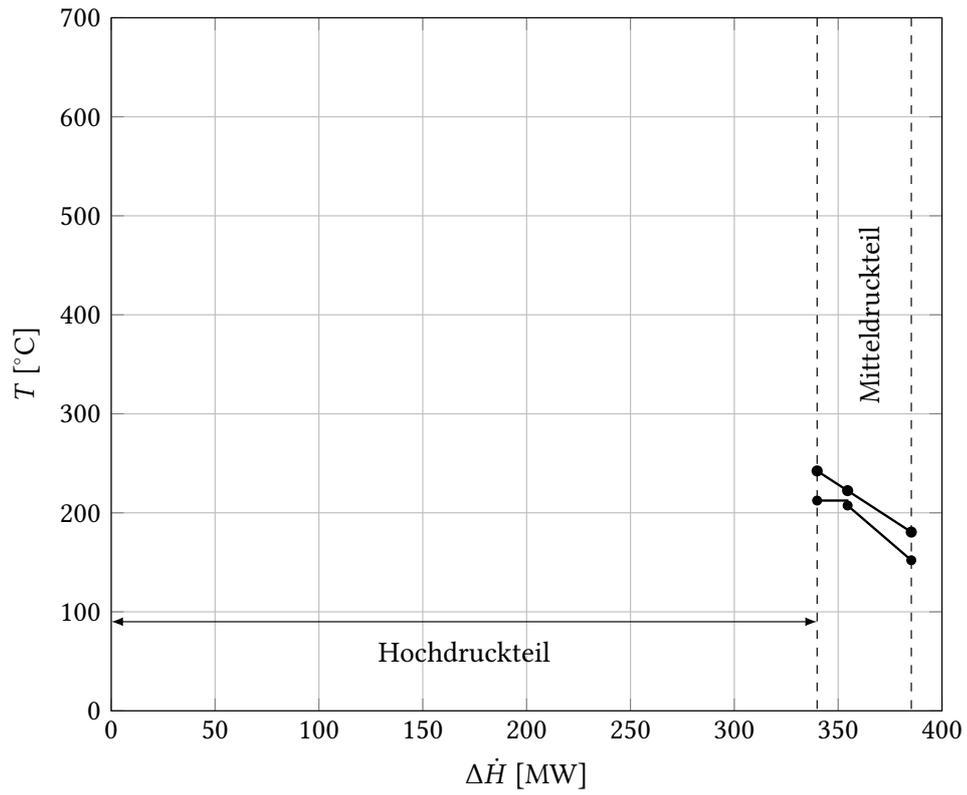


## Aufgaben

- (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  $\varepsilon_{SWB}$ .
- (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]	$e^{\text{PH}}$ [kJ/kg]	$\dot{H}$ [MW]	$\dot{S}$ [MW/K]	$\dot{E}^{\text{PH}}$ [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



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

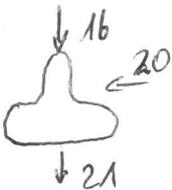
$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{el,DT} &= (\dot{H}_{12} + \dot{H}_{14} - \dot{H}_{16} - \dot{H}_{18}) \cdot \eta_{um} \cdot \eta_{Gr} \quad (1) \\
 &= (445,49 + 21,5 - 66,24 - 236,71) \cdot 0,99 \cdot 0,985 \text{ MW} \\
 &= 159,96 \text{ MW} \quad (1)
 \end{aligned}$$

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

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

~~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  $\Delta e^{ph}$

(1)

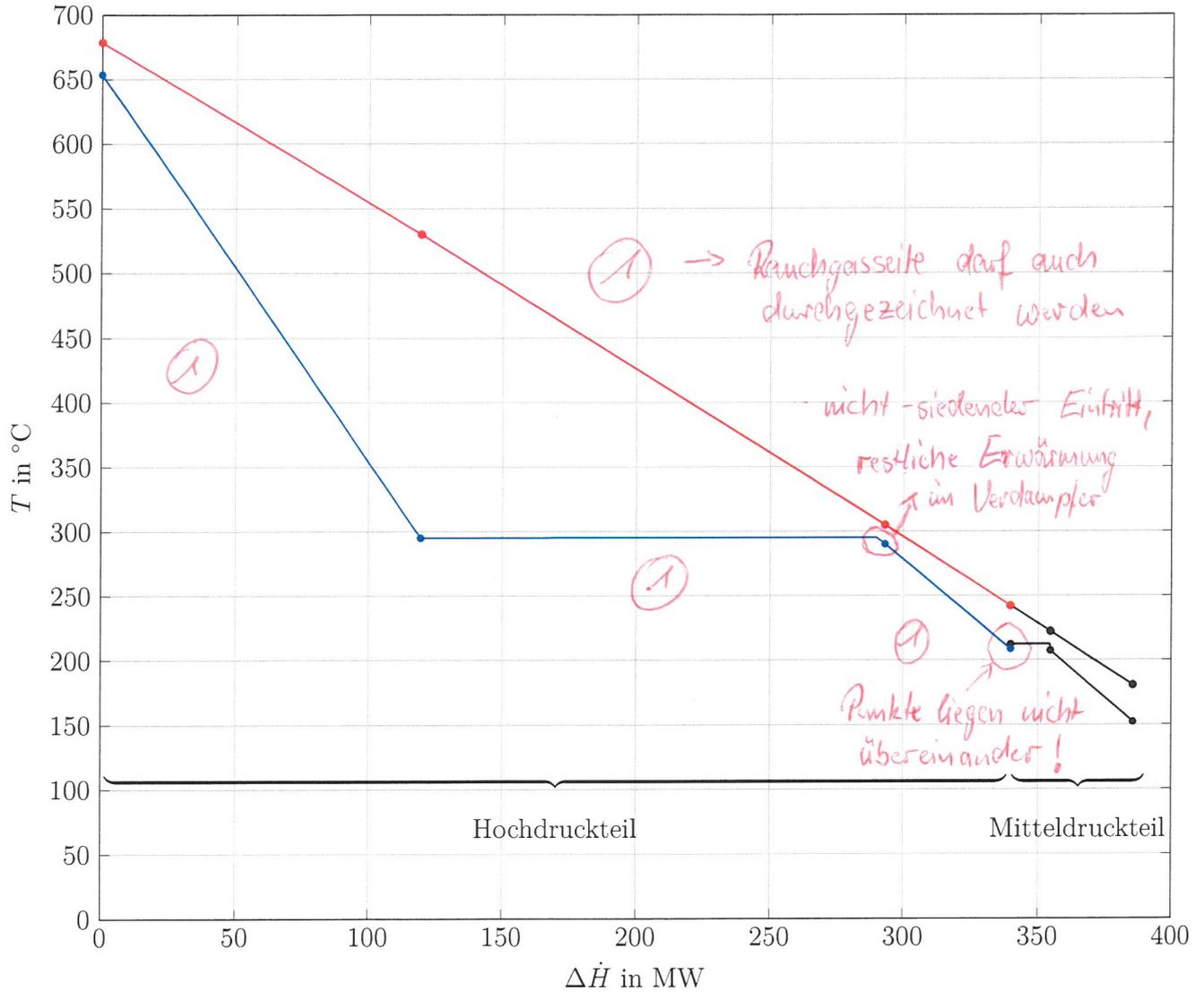
~~5~~

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  $\Delta T$  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  
 →  $\Delta T$  v. Strom 16 u. 20 ↓,  $\dot{E}_{SWB}$  ↑

...

(4)

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

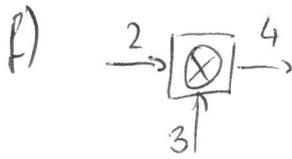
1)  $\dot{E}_P = \dot{W}_{el,GT} + (\dot{E}_5 - \dot{E}_1)$  (1)

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

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

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

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

$$= 23,3 \text{ MW} + 125,82 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 84,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} / 1000 + 293,15 \text{K} (0,302 \frac{\text{MW}}{\text{K}} - 125,82 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,2965 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} / 1000)$$

$$= 111,47 \text{ MW} \quad (1)$$

2. Alternative

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

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

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

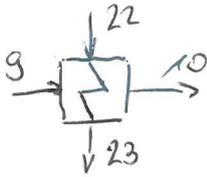
$$\dot{H}_{23} = \dot{H}_{24} + \dot{H}_{25} = 111,46 \text{ MW} \quad (1)$$

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

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

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

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

$$PV_{I,2022} = I_{2020} \cdot (1 + r_i)^2 = 1545 \text{ T€} \quad (1 \text{ Punkt})$$

**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

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

$$A_{\text{W\u00e4rme},2022} = p_{\text{W\u00e4rme}} \cdot Q = 1206 \text{ T\u20ac/a (1 Punkt) (1170T\u20ac/a)}$$

$$PV_{\text{W\u00e4rme},2022} = 12\,523 \text{ T\u20ac (1 Punkt) (12\,150T\u20ac)}$$

**Aufgabe g:** (3 Punkte) Barwert der Revision

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

$$I_{2030} = I_{2032} \cdot (1 + r_I)^8 = 1883 \text{ T\u20ac (1 Punkt) (1827T\u20ac)}$$

$$PV_{\text{Rev},2022} = 637 \text{ T\u20ac (1 Punkt) (618T\u20ac)}$$

**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)

$$NPV_{2020} = -8\,404\,999 \text{ \u20ac (-8\,113\,295 \u20ac) (1 Punkt)}$$

*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.	$T_{\text{ein}}$ [°C]	$T_{\text{aus}}$ [°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  $100 \text{ °C}$  und einer Wärmeleistung von  $50 \text{ kW}$  kondensiert wird,
  - Strom B, welcher bei einer konstanten Temperatur von  $100 \text{ °C}$  und einer Wärmeleistung von  $25 \text{ kW}$  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

1

4

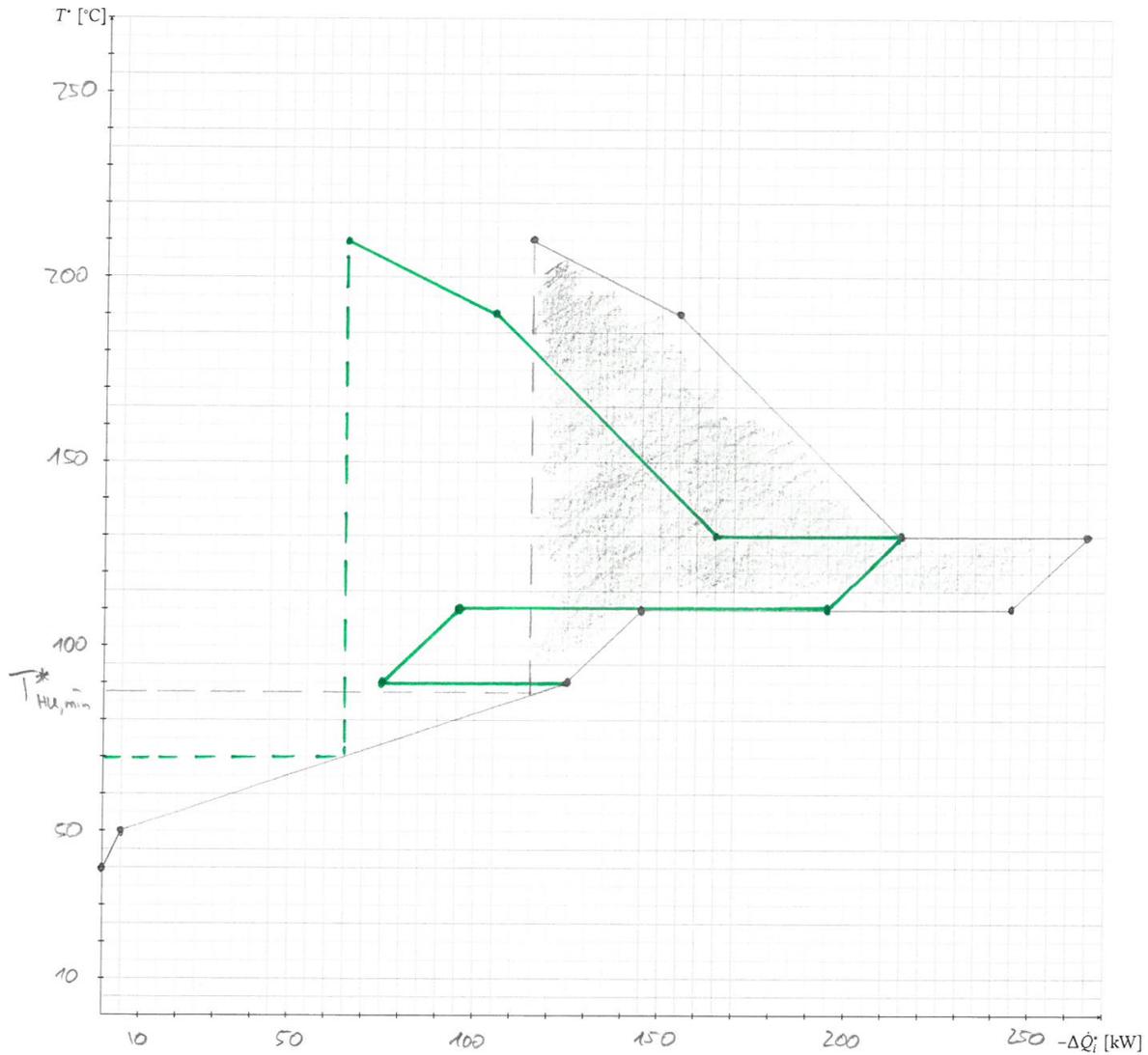
1

1

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

0,5 pro ZA (4)

Int. Wärmerückgewinnung (1)



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

Integration: oberhalb Rück → warmer Strom → Kondensation

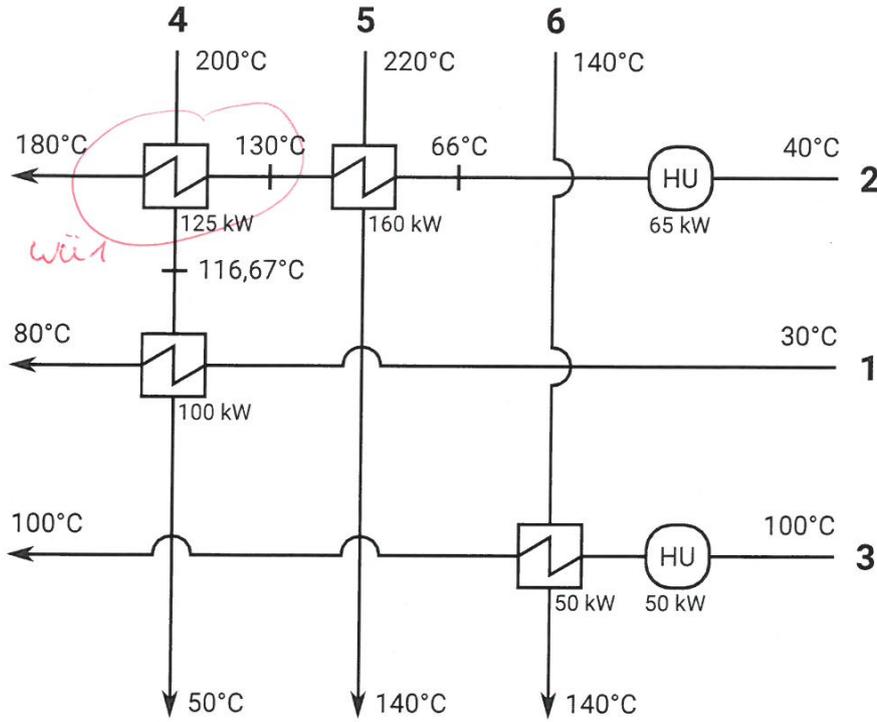
⇒  $\dot{Q}_{HU}$  sinkt (1)

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

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

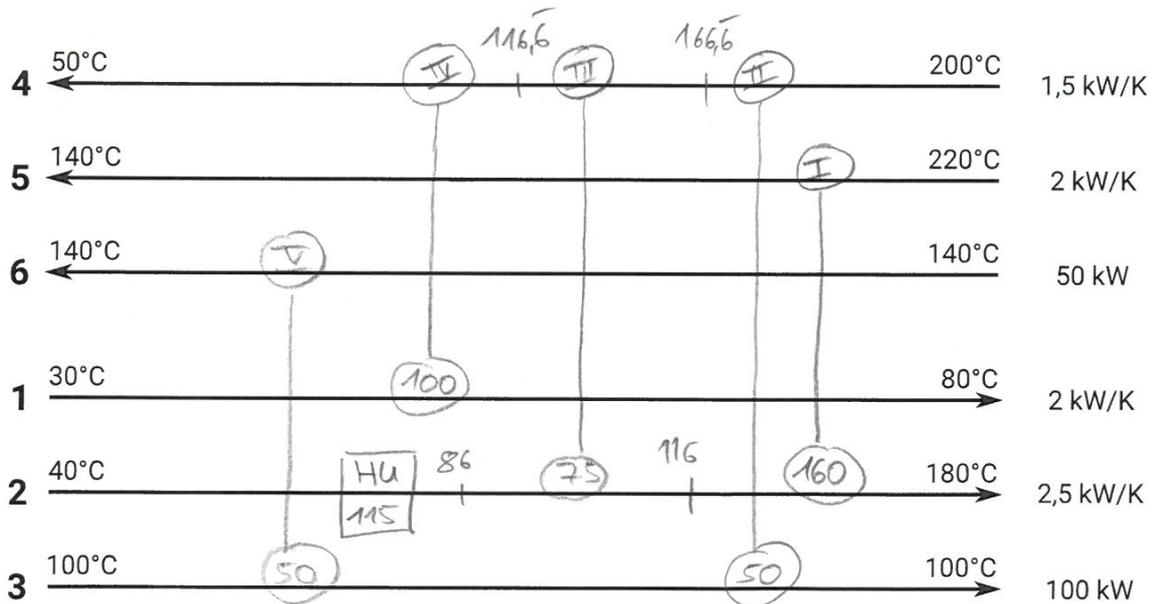
Einzeichnen (1)  
Parallelverschiebung (1)

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  $\Sigma 6$



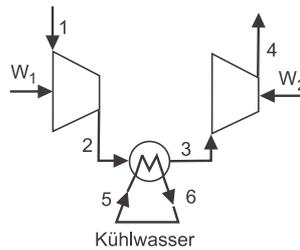
H\_2019

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 <sub>2</sub> -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**

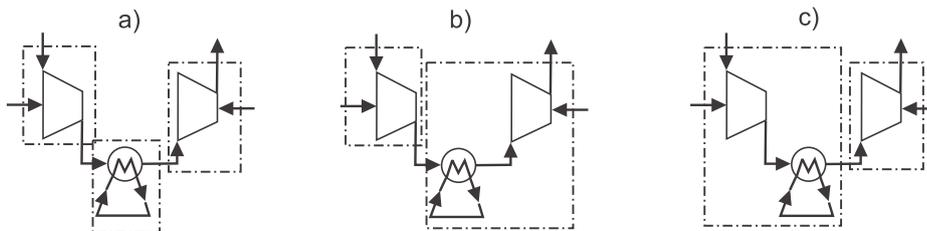
- (a) (2 Punkte) Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad des dargestellten Gesamtsystems, wenn das erwärmte Kühlwasser nicht weiter genutzt wird.



(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<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umgesetzt, Alle Substanzen überschreiten die Systemgrenze ungemischt bei T<sub>0</sub> und p<sub>0</sub>.

(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  $1 \text{ kmol/s}$  Stickstoff und  $1 \text{ kmol/s}$  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:

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

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

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

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

- (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.

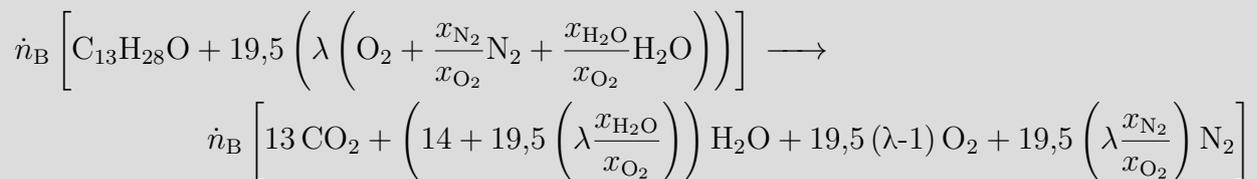
- (a) **(6 Punkte)** Formulieren Sie die Reaktionsgleichung und geben Sie alle Koeffizienten an.  
 (b) **(2 Punkte)** Bestimmen Sie den Molenanteil des gesamten Wassers  $x_{H_2O}$  im Abgas.

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

Reaktion mit reinem Sauerstoff



Allgemeine Reaktionsgleichung mit  $\dot{n}_B$  und  $\lambda$



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).

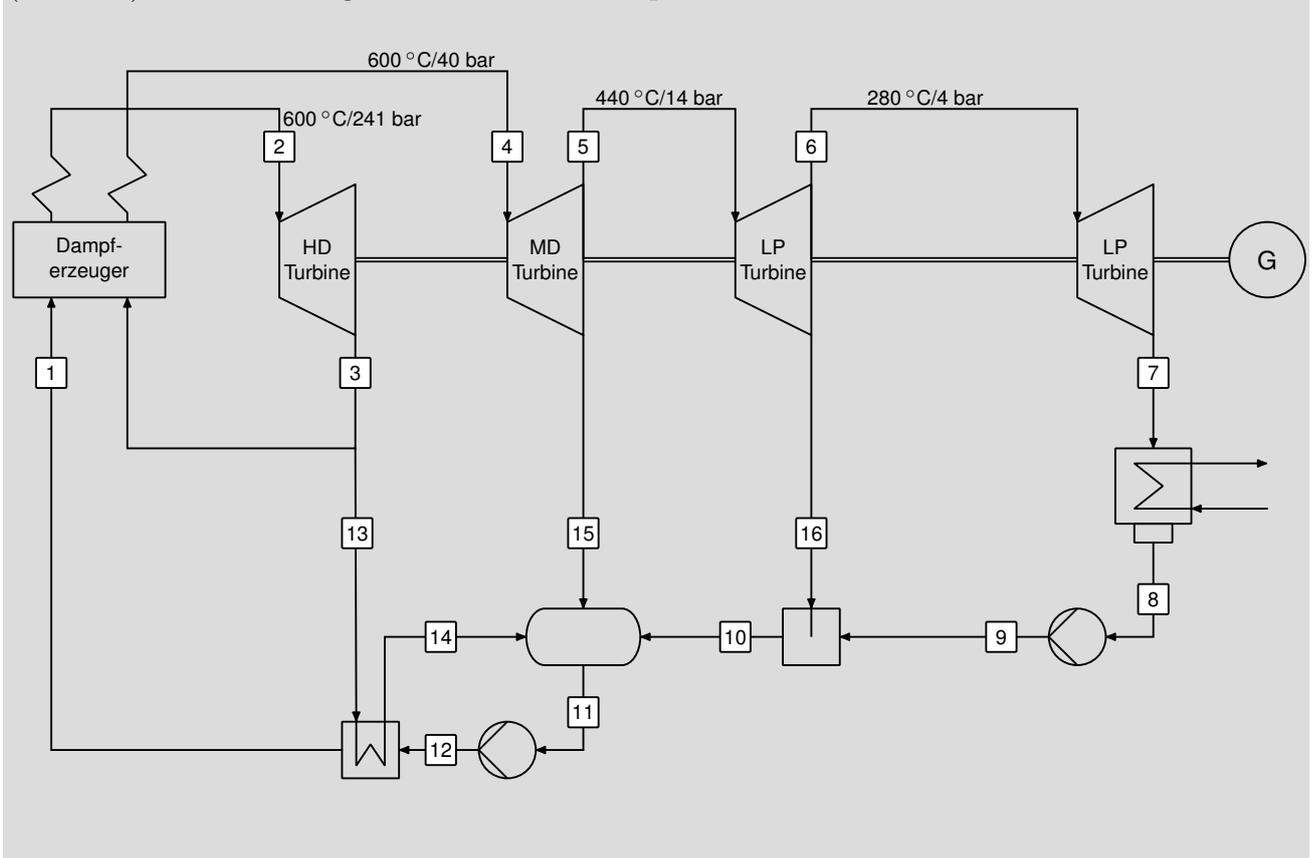
## 5. Dampfkraftwerke ..... 10 Punkte

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.

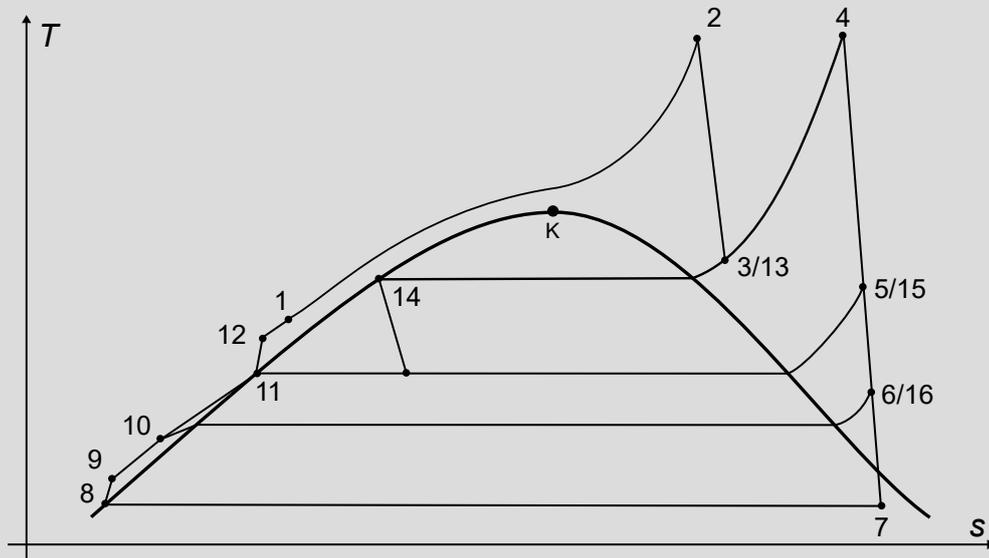


- (b) **(5 Punkte)** Im qualitativen  $T,s$ -Diagramm ist **eine beispielhafte** Vorwärmestrecke für das obige Fließbild dargestellt. Ergänzen Sie die Zustandsänderungen im Dampferzeuger und Turbinenteil mit den Anzapfungen unter der Annahme, dass die Wärmezufuhr im Dampferzeuger isobar und die Entspannung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

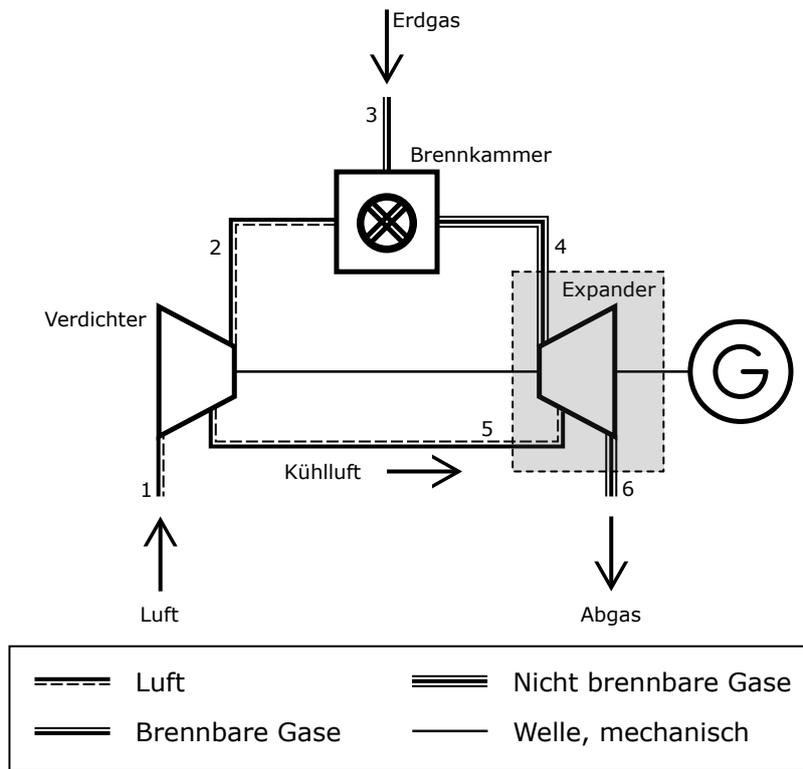
- (1 Punkt) Isobare Wärmezufuhr bei überkritischem Fluid (1-2)
- (1 Punkt) Adiabate, irreversible Entspannung in der Hochdruckturbinen (2-3)

- (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 adiabat 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 -> Massenstrom zur Brennkammer steigt -> bei identischem Brennstoffmassenstrom sinkt die Temperatur der Verbrennung -> 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 adiabaten Brennkammer enthält keine weiteren Verluste; Energieerhaltung -> 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 Abhitzekessel, 1P Wirkungsgrad, 1P Flexibilität]

-Reduktion  $\text{NO}_x$ -Emissionen

-erweitert um Abhitzekessel zur Dampfbereitstellung

-Dampf kann in Brennkammer eingespritzt werden -> erhöhter Wirkungsgrad

-darüber hinaus Bereitstellung von Prozessdampf

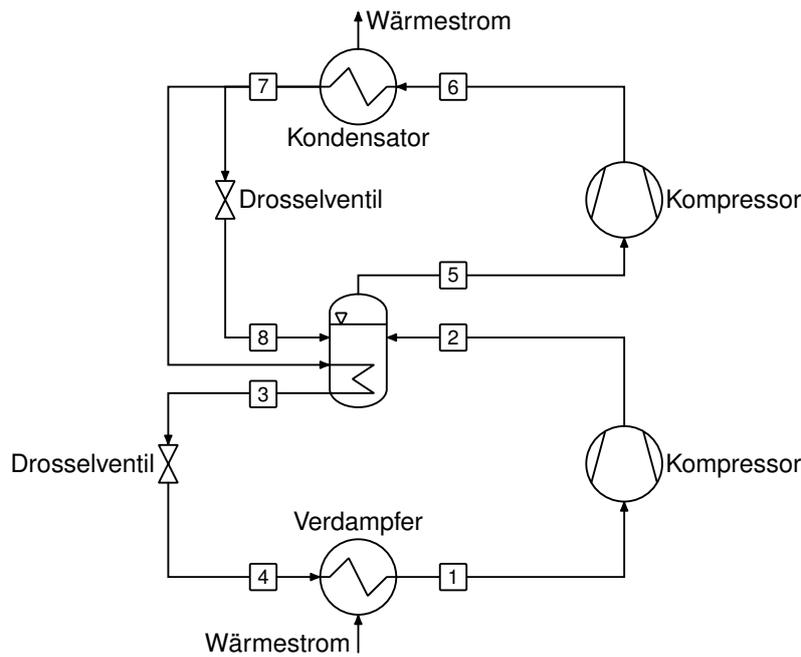
-Prozess sehr flexibel: zurück geleiteter Dampfes und damit Erhöhung des Wirkungsgrades, kann an den vorliegenden Bedarf angepasst werden

**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:

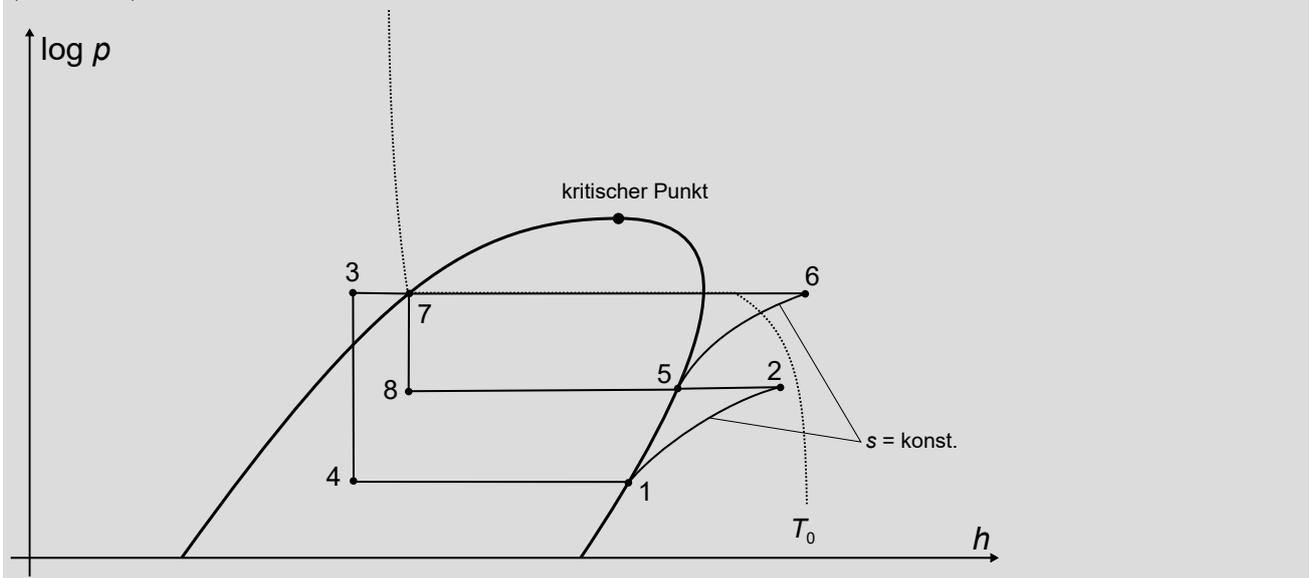
- die Wärmeübertragung jeweils isobar,
- die Verdichtung jeweils isentrop, und
- die Drosselung jeweils isenthalp erfolgt.

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.



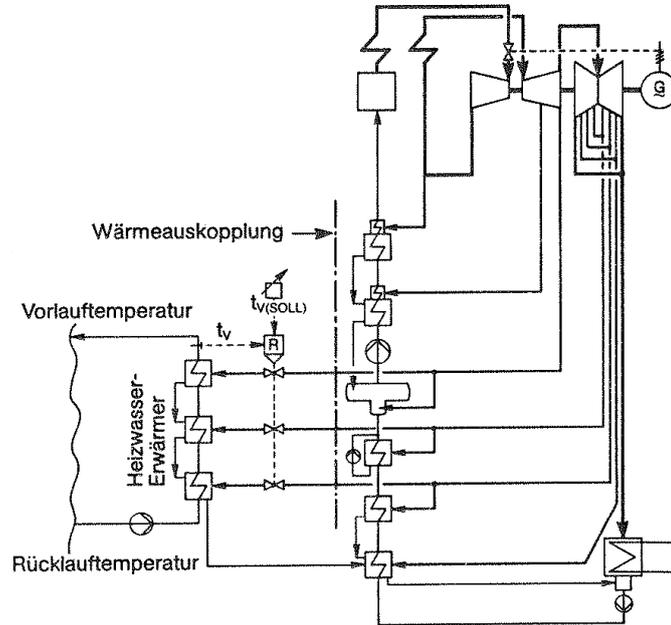
(b) **(2 Punkte)** Welche Konzepte für die Verbesserung kältetechnischer Prozesse wurden im hier betrachteten Prozess angewendet?

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.

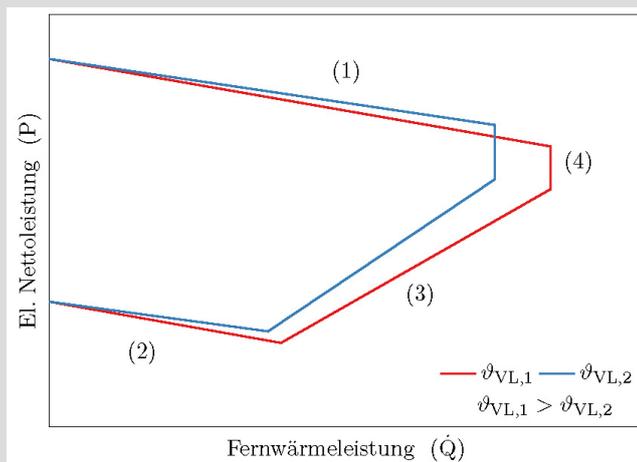
**8. Kraft-Wärme-Kopplung ..... 5 Punkte**

(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 ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), Schwefeloxide ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), Kohlenwasserstoffe, Partikel (unverbrannter Brennstoff, Ruß, Asche, Spurenelemente), Schwermetalle, Staub, Feinstaub, Dioxine, Furane

- (b) **(3 Punkte)** Beschreiben Sie stichpunktartig die thermische  $\text{NO}_x$ -Bildung bei der Verbrennung.

Luftstickstoff wird in  $\text{NO}_x$  umgewandelt (1P)  
läuft bei hohen Temperaturen (0,5P) nach dem Zeldovic-Mechanismus (0,5P) ab  
NO-Bildungsrate abhängig von Konzentration O und  $\text{N}_2$  (0,5P)  
Geschwindigkeitskonstante, Arrhenius-Ansatz (0,5P)

- (c) **(4 Punkte)** Mit Hilfe welcher Maßnahmen kann die Bildung von thermischen  $\text{NO}_x$  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  $\text{N}_2$ ,

technisch: Luftstufung (Sauerstoffkonzentration unterstöchiometrisch)

Maßnahme 2:

physikalisch: Verminderung der lokalen Temperatur; Temperaturspitzen im Brennraum vermeiden

technisch: Rauchgasrezirkulation, Vormischflammen bei Gasturbinen

## 10. Dampferzeuger ..... 10 Punkte

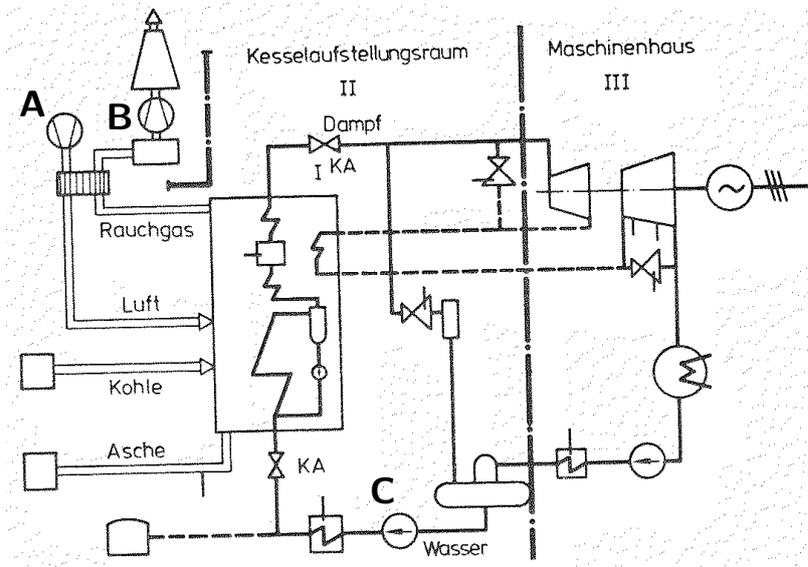
- (a) (5 Punkte) Zeigen Sie die unterschiedliche Anordnung der Wärmeübertrager (Economizer, Verdampfer, Überhitzer) im Dampferzeuger eines Dampfkraftprozesses und im Abhitzeessel eines Gas- und Dampfturbinenkraftwerkes mit Hilfe von  $T, \Delta H$ -Diagrammen. Erläutern Sie die Ursache stichpunktartig.

(2P je Diagramm, 1P Ursache)

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

Aufteilung in verschiedene Druckstufen, Zwei-Druck- oder Drei-Druck-Abhitzeessel  
Vergrößerung der WÜ-Flächen  $\rightarrow$  Verringerung  $\Delta T_{\min}$

- (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  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ -reiches Gas zur Gasturbine

## 12. Rauchgasreinigung ..... 5 Punkte

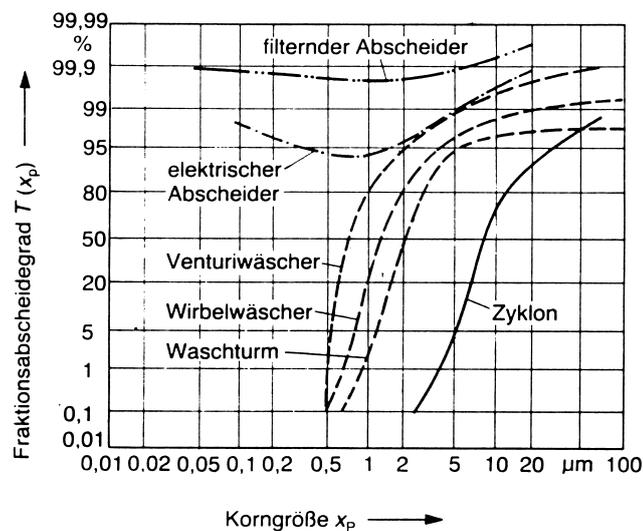
- (a) (3 Punkte) Beschreiben Sie stichpunktartig die Transportmechanismen bei filternden Abscheidern. Sie können diese auch in geeigneter Form schematisch darstellen.

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  $2 \mu\text{m}$  zu einer Zone verminderter Abscheidung.

**13. Kohlendioxid-Abscheidung ..... 6 Punkte**

- (a) **(6 Punkte)** Stellen Sie das Prinzip *Pre-Combustion* zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung an einem Synthesegas schematisch dar. Ausgangspunkt ist der fossile Brennstoff. Das Schema sollte mit dem eigentlichen Kraftwerk und der CO<sub>2</sub>-Speicherung enden. Benennen Sie alle Verfahrenseinheiten und Ströme eindeutig.

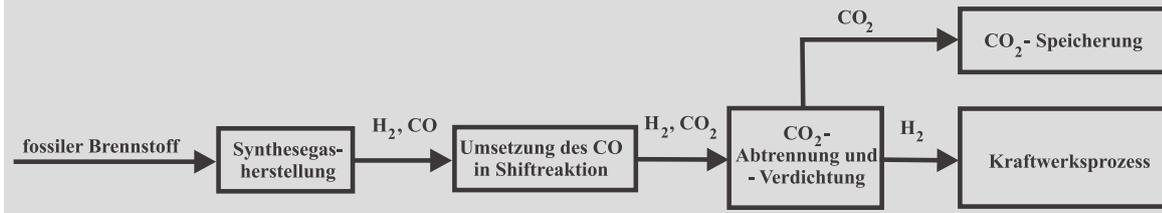
(1 Punkt) Synthesegasherstellung

(1 Punkt) Shiftreaktion

(1 Punkt) CO<sub>2</sub>-Abtrennung

(2 Punkte) Stoffströme (jeweils 0,5)

(1 Punkt) Beschriftung



**14. Erneuerbare Energieträger ..... 9 Punkte**

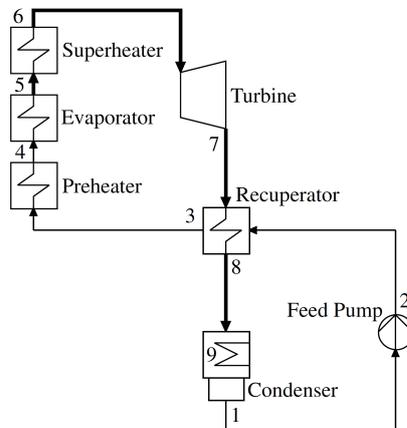
(a) (2 Punkte) Ordnen Sie folgende solarthermische Kollektor-Technologien nach aufsteigendem Konzentrationsfaktor. Geben Sie die richtige Reihenfolge mit Hilfe der angegebenen Zahlen an.

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

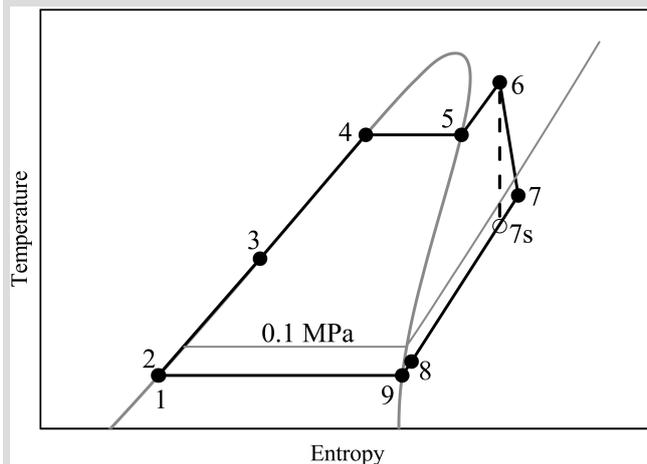
(je richtiger Beziehung 0,5 P, max. 2P)

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.



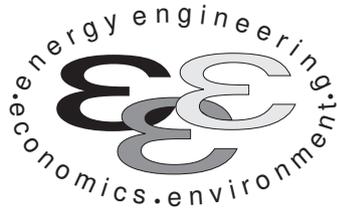
(je richtiger ZÄ 0,5 P, Beschriftung 1P)



(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.

---

<b>Name:</b>	
<b>Martikelnummer:</b>	

---

Aufgabe:	15	16	17	<b>Summe</b>
Punktzahl:	49	32	32	113
Davon erreicht:				

**15. Thermodynamische Analyse ..... 49 Punkte**

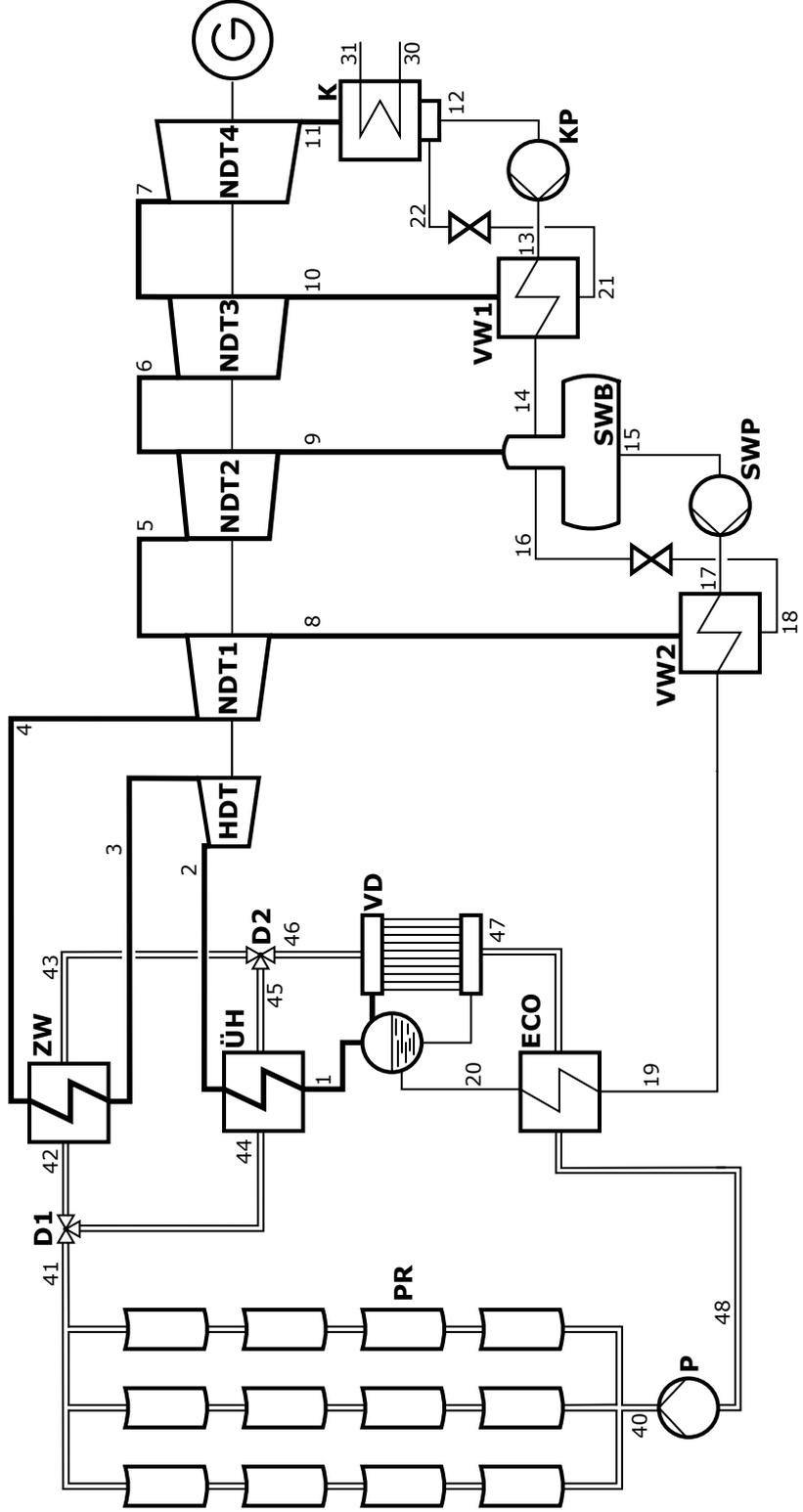
Die Abbildung zeigt das Fließbild eines solarbetriebenen Dampfkraftwerkes. Das Thermoöl wird mittels der Pumpe (P) durch die Parabolkollektoren (PR) gepumpt. Der Massenstrom des Thermoöls wird anschließend geteilt und zur Überhitzung (ÜH), beziehungsweise zur Zwischenüberhitzung (ZW) des Wasserdampfes 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 tabel aus der Formelsammlung kann folglich nicht für die Lösung der Aufgaben verwendet werden.

**Legende:**

-  Thermoöl
-  Welle, mechanisch
-  Dampf
-  Kreislaufwasser
- PR** Parabolrinnen-Kollektorfeld
- P** Pumpe
- D** Splitter / Mischer
- ECO** Economizer
- VD** Verdampfer mit Trommel
- ÜH** Überhitzer
- ZW** Zwischenüberhitzer
- HDT** Hochdruck-Dampfturbine
- NDT** Niederdruck-Dampfturbine
- K** Kondensator
- KP** Kondensatpumpe
- VW** Niederdruck-Vorwärmer
- SWB** Speisewasserbehälter
- SWP** Speisewasserpumpe



## 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  $\dot{E}_P^{\text{TOT}}$ , den exergetischen Aufwand  $\dot{E}_F^{\text{TOT}}$  und den Exergieverlust  $\dot{E}_L^{\text{TOT}}$  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  $\varepsilon_{\text{SWB}}$ .
- (e) **(5 Punkte)** Der isentrope Wirkungsgrad der vierten Stufe der Niederdruck-Dampfturbine beträgt  $\eta_{\text{s,NDT4}} = 0,88$ . 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  $100 \text{ €/h}$ . 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  $\text{€/h}$  sowie ihre spezifischen Kosten in  $\text{€/MWh}_{\text{ex}}$ .

### 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)

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

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

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

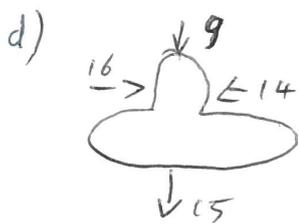
~~③~~

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

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

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

~~(5)~~



$e_{16}$  &  $e_9$  sind <sup>größer</sup> ~~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)~~

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

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

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

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

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

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

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

~~(5)~~

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

$$\dot{E}_{D,VD} = \dot{E}_{20} - \dot{E}_1 + \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{20}}{\epsilon_{VD}} = 3,946 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{S}_{gen,VD} = \frac{\dot{E}_{D,VD}}{T_0} = 0,0137 \frac{\text{MW}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$\dot{S}_{46} = \dot{S}_1 - \dot{S}_{20} + \dot{S}_{47} - \dot{S}_{gen} = 1,372 \frac{\text{MW}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$\dot{H}_{46} = \dot{H}_{43} + \dot{H}_{45} = 611,03 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{46} = \dot{E}_{43} + \dot{E}_{45} = 105,35 \text{ MW} + 107,84 \text{ MW} = 213,19 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{46} &= \dot{m}_{46} \left[ (h_{46} - h_{0,14}) - T_0 (s_{46} - s_{0,14}) \right] \\ &= \dot{H}_{46} - \dot{m}_{46} h_{0,14} - T_0 \dot{S}_{46} + \dot{m}_{46} T_0 s_{0,14} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{46} - \dot{H}_{46} + T_0 \dot{S}_{46} = \dot{m}_{46} (T_0 s_{0,14} - h_{0,14})$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{46} = \frac{\dot{E}_{46} - \dot{H}_{46} + T_0 \dot{S}_{46}}{T_0 s_{0,14} - h_{0,14}} = 810,71 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

//  
(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)~~

$$h) \quad t_{31} = t_{11} - \Delta t_{\text{min}} = 40,81 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{H}_{\text{WÜ}} = \dot{H}_{11} + \dot{H}_{22} - \dot{H}_{12} \quad (1) \\ = 151,69 \text{ MW} + 2,21 \text{ MW} - 14,59 \text{ MW} \\ = 139,31 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} = \frac{\Delta \dot{H}_{\text{WÜ}}}{c_p \Delta T} \quad (1)$$

$$= \frac{139,31 \text{ MW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} [40,81 - 15] \text{ K}} =$$

$$= 1291,27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

~~(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. Wirtschaftlichkeitsanalyse .....32 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 <sub>el</sub>
Nettostromerzeugung, $W_{el,netto}$	620 GWh <sub>el</sub> /a
Eigenverbrauch Strom $W_{el,eigen}$	6,5 GWh <sub>el</sub> /a
Elektrischer Wirkungsgrad, $\eta_{el}$	55 %
Thermischer Wirkungsgrad, $\eta_{th}$	30 %
Spezifische Investitionskosten 01.01.2018, $i_0$	900 € <sub>2018</sub> /kW <sub>el</sub>
Jährliche fixe Betriebskosten, $k_{fix}$	2 % der Investitionskosten
<i>Sonstige Angaben</i>	
Stromverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, $p_{Strom}$	50 €/MWh <sub>el</sub>
Wärmeverkaufspreis zum Inbetriebnahmezeitpunkt, $p_{Wärme,1}$	30 €/MWh <sub>th</sub>
Wärmeverkaufspreis ab 01.01.2032, $p_{Wärme,2}$	40 €/MWh <sub>th</sub>
Erdgaspreis zum Planungszeitpunkt, $p_{FC}$	21 €/MWh <sub>LHV</sub>
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.	$T_{\text{ein}}$ [°C]	$T_{\text{aus}}$ [°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)

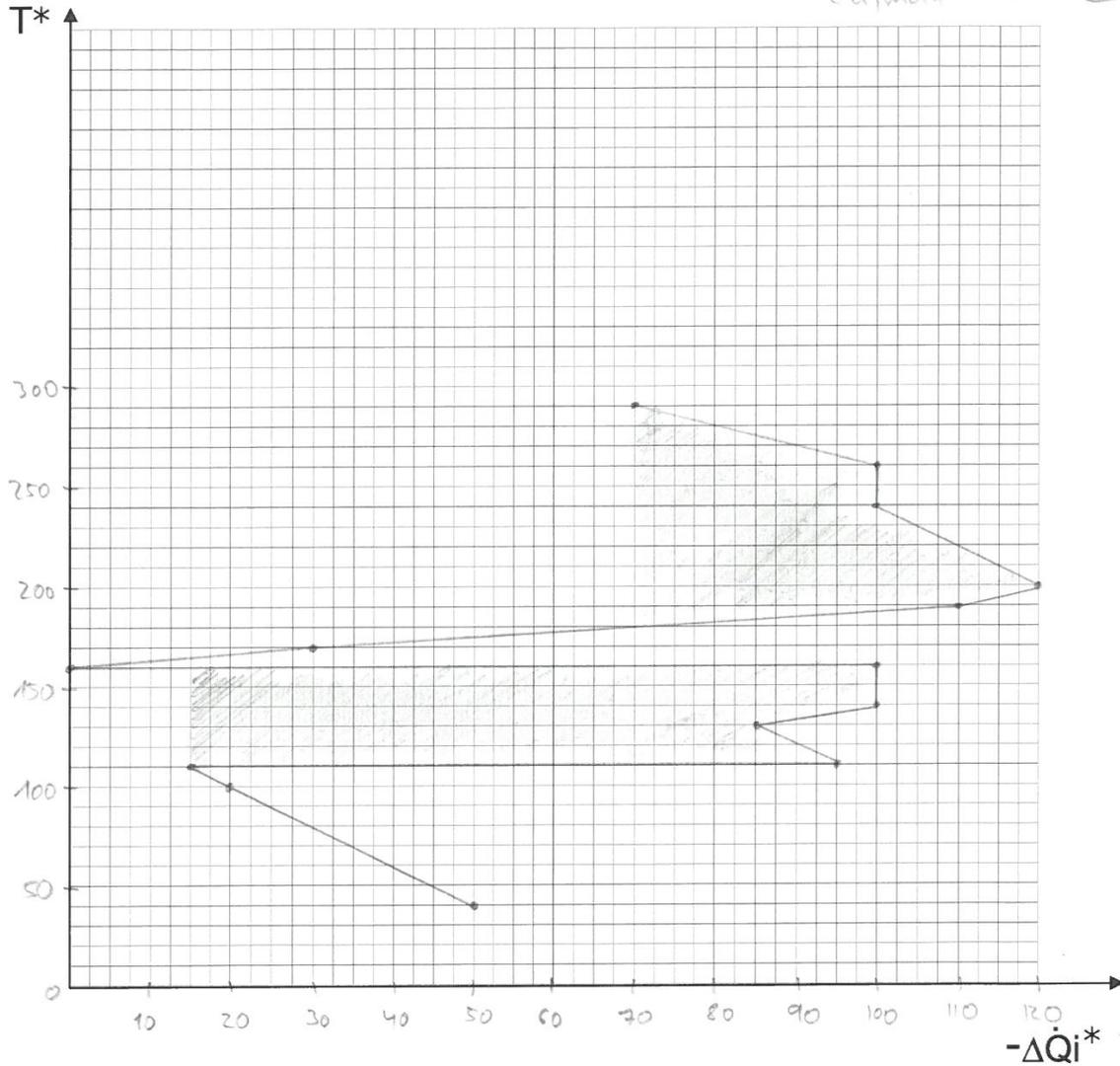
$T_{HU,min}^* = 180^\circ\text{C}$  (1)

$\rightarrow T_{HU,min} = 140^\circ\text{C}$

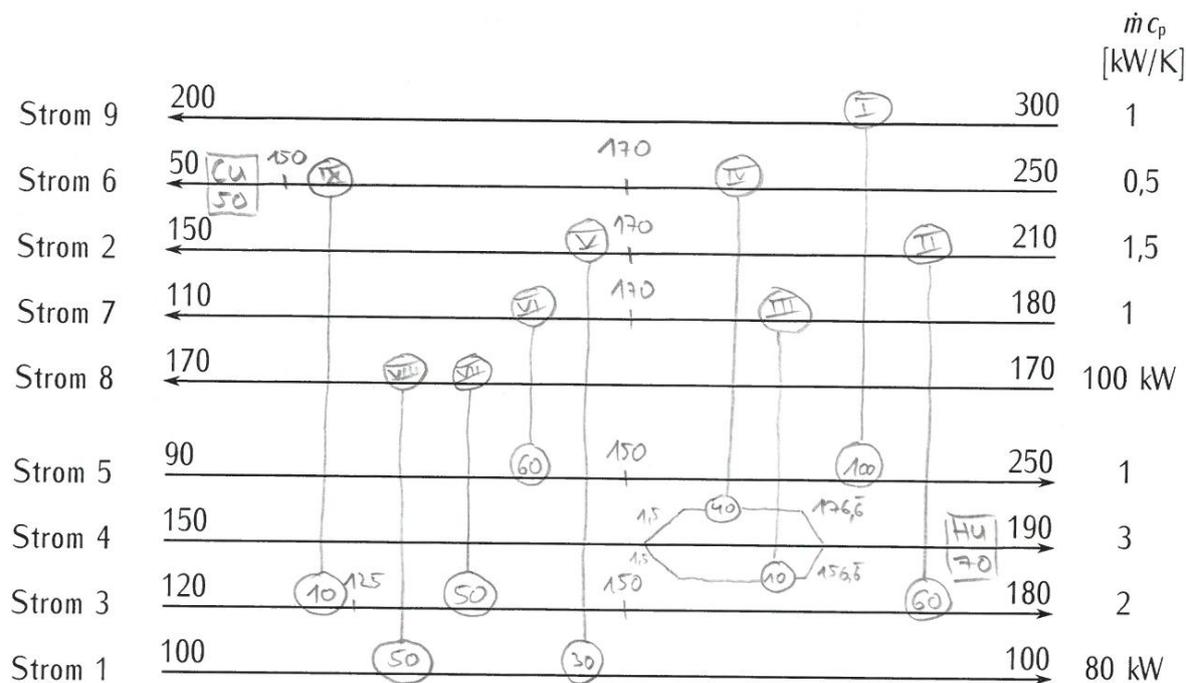
Wärmerückgewinnung (1,5)

$T_{CU,max}^* = 40^\circ\text{C}$  (1)

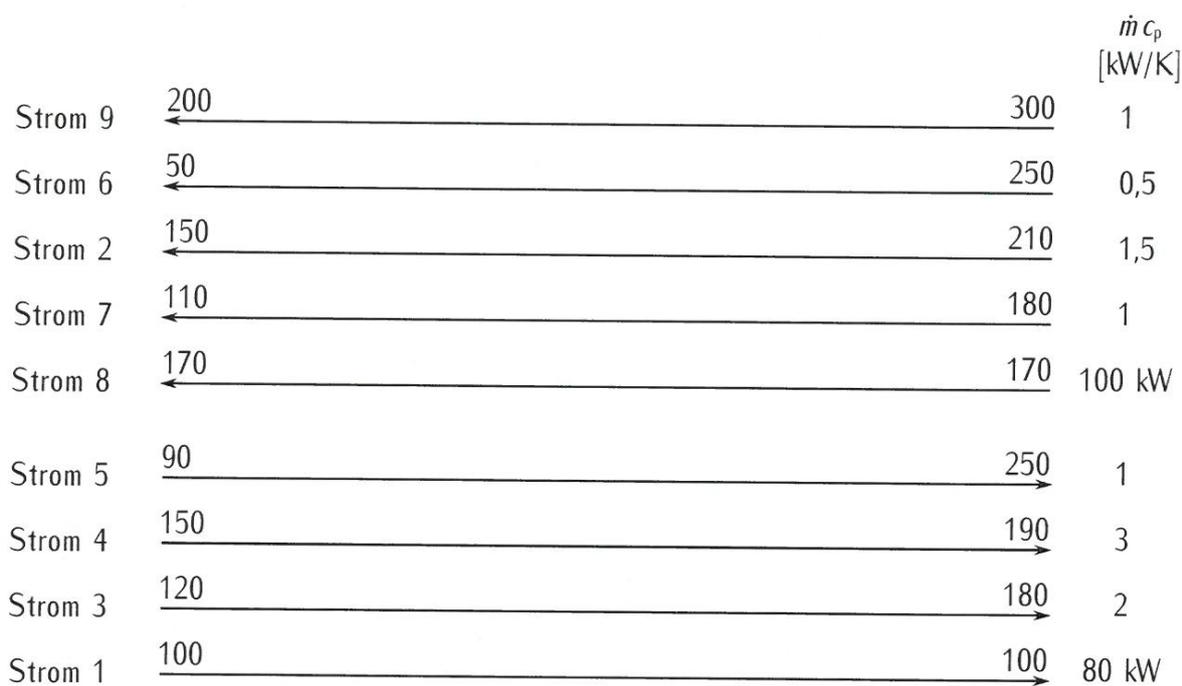
$\rightarrow T_{CU,max} = 30^\circ\text{C}$



Σ 10



je Wü (1)  $\Sigma q$



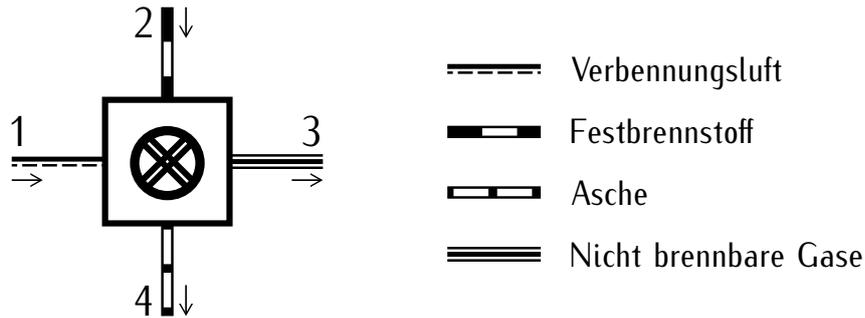


**F\_2019**

Teilgebiet	Thema	Punkte	
		ET I	ET II
		8 oder 9 LP	8 LP
Theorie, Fundamental	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	50	50
	Exergie (ET 1 ohne d)	18	24
	Wirtschaftlichkeit	8	
	Verbrennung I	8	8
Theorie, Rest	Energieträger	5	
	Dampfkraftwerke	14	
	Gasturbinen	13	
	Kälteprozesse I	10	
	Dampferzeuger		13
	Kälteprozesse II		10
	Erneuerbare Energien		9
	Energiespeicher		6
	CO <sub>2</sub> -Abtrennung		6
Rechenteil	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	80	80
	Exergie	46	46
	a	5	5
	b	3	3
	c	3	3
	d	5	5
	e	5	5
	f	6	6
	g	7	7
	h	4	4
	i	4	4
	j	4	
	k		4
	Wirtschaftlichkeit	30	
WÜ-Netz		30	



## 1. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse – Teil A ..... 18 Punkte



- (a) (4 Punkte) Formulieren Sie für die dargestellte Komponente (Brennkammer) die Energiebilanz und die Exergiebilanz. Die Komponente arbeitet stationär und ist nach außen adiabat. Änderungen der kinetische und potentiellen Energie können vernachlässigt werden.

$$0 = \dot{H}_1 + \dot{H}_2 - \dot{H}_3 - \dot{H}_4$$

$$0 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 - \dot{E}_3 - \dot{E}_4 - \dot{E}_D$$

- (b) (4 Punkte) Welche Prozesse verursachen die Exergievernichtung in der betrachteten Komponente?

Mischung  
Chemische Reaktion  
Wärmeübertragung  
Reibung

- (c) (4 Punkte) Erläutern Sie stichpunktartig anhand der dargestellten Komponente die Vorteile der Exergieanalyse gegenüber einer reinen energetischen Betrachtung. Gehen Sie für diese Teilaufgabe davon aus, dass die Brennkammer nicht nach außen adiabat ist.

-Mit Hilfe der Energiebilanz lassen sich die Verluste durch Irreversibilitäten nicht erfassen.  
-Nur Exergiebilanz berücksichtigt die Exergievernichtung (Entropieerzeugung)  
-Im Falle einer nicht adiabaten Brennkammer, sind die tatsächlichen Verluste abhängig von der Temperatur (nur durch exergetischen Betrachtung berücksichtigt)  
-In energetischer Betrachtung wird die Temperatur des Verlustterms nicht berücksichtigt  
-beim energetischen Wirkungsgrade ergeben sich i.d.R. Werte von knapp 100%, die Angabe des Wirkungsgrades ist irreführend  
-dagegen beim exergetischen Wirkungsgrad rund 75%; tatsächlichen Verluste werden berücksichtigt

- (d) (6 Punkte) Erstellen Sie eine Kostenbilanz für die dargestellte Komponente, wie sie für exergoökonomische Analysen benötigt wird. Gehen Sie davon aus, dass die Kosten aller eingehenden Ströme und die der Komponente bekannt sind. Geben Sie alle notwendigen Hilfsbeziehungen mit an und stellen Sie nach der relevanten Größe um.

(6 Punkte)

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

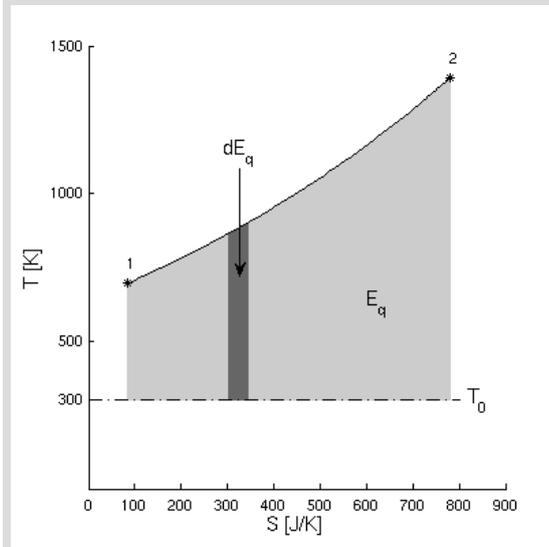
$$c_2 = c_4$$

$$c_3 = \frac{\dot{C}_1 + c_2 (\dot{E}_2 - \dot{E}_4) + \dot{Z}}{\dot{E}_3}$$

**2. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse – Teil B ..... 6 Punkte**

- (a) **(6 Punkte)** Markieren Sie qualitativ in einem  $T, s$ -Diagramm für eine isobare Zustandsänderung mit einer Wärmezufuhr  $\dot{Q}$  die zugeführte Exergie  $\dot{E}_q$ . Beschriften Sie Ihre Darstellung eindeutig.

(1P) Zustandsänderung, (2P) Umgebungstemperatur, (2P) richtige Fläche, (1P) Beschriftung



**3. Wirtschaftlichkeitsanalyse ..... 8 Punkte**

Die Interne-Zinssatz-Methode ist ein dynamisches Verfahren zum Vergleich von Investitionsalternativen.

- (a) **(1 Punkt)** Wie ist der interne Zinssatz definiert?

(1 Punkt)

Der interne Zinssatz ist definiert als Diskontierungszinssatz, der sich bei einem Kapitalwert von Null ergibt.

- (b) **(3 Punkte)** Wie lautet die allgemeine Gleichung zur Berechnung des internen Zinssatzes  $i^*$  und erläutern Sie kurz die einzelnen Variablen.

(1 Punkt)  $\sum_{z=0}^{BL} Y_z \cdot (1 + i^*)^{-z} = 0$

mit

(2 Punkte)

$Y_z$  – Nettoszahungen am Ende der  $z$ -ten Zeitperiode

$BL$  – wirtschaftliche Nutzungsdauer

- (c) **(2 Punkte)** Ein Fernwärmeunternehmen hat für eine Effizienzmaßnahme an einem Heizkraftwerk zwei Angebote. Das Angebot A hat nach internen Kalkulationen einen internen Zinssatz von  $i_A^* = 8\%$  und das Angebot B von  $i_B^* = 9\%$ . Welches Angebot soll das Unternehmen annehmen? Begründen Sie Ihre Antwort vor dem Hintergrund der Definition dieser Methode.

(1 Punkt) Angebot A wählen

(1 Punkt) Begründung: Bei Angebot A wird das für die Effizienzmaßnahme eingesetzte Kapital intern höher verzinst.

- (d) **(2 Punkte)** Aus welchem Grund sollten die Ergebnisse der Internen-Zinssatz-Methode mit Vorsicht interpretiert werden? Erläutern Sie Ihre Antwort stichpunktartig. (2 Punkte)

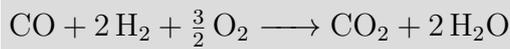
(2 Punkte) Die Methode nimmt eine Wiederanlage der Zahlungen zu dem berechneten internen Zinssatz an. Es sollte geprüft werden, ob diese Annahme für das zu bewertende Projekt akzeptabel ist und nicht unrealistisch Zinssätze voraussetzt.

**4. Verbrennung ..... 8 Punkte**(a) **(8 Punkte)** Gegeben ist ein Synthesegas.

$$\frac{x_{\text{CO}}}{x_{\text{H}_2}} = 0,5$$

Formulieren Sie eine Reaktionsgleichung für die stöchiometrische Verbrennung mit reinem Sauerstoff. Bestimmen Sie den massenspezifischen Heizwert  $H_i$  des Synthesegases unter zu Hilfenahme der Stoffwerte aus der Formelsammlung.

(2 Punkte Reaktionsgleichung)



(2 Punkte Ansatz und Werte aus Formelsammlung)

$$-\bar{H}_i = \Delta \bar{h}_R = \sum \nu_i \bar{h}_i$$

$$\nu_{\text{CO}} = -1$$

$$\nu_{\text{H}_2} = -2$$

$$\nu_{\text{O}_2} = -\frac{3}{2}$$

$$\nu_{\text{CO}_2} = 1$$

$$\nu_{\text{H}_2\text{O}} = 2$$

$$\bar{h}_{\text{CO}} = -110528$$

$$\bar{h}_{\text{H}_2} = 0$$

$$\bar{h}_{\text{O}_2} = 0$$

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = -393521$$

$$\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}(\text{g})} = -241856$$

(1 Punkt molenspezifischer Heizwert)

$$\bar{H}_{i,\text{Syngas}} = -[-1 \cdot (-110528) + (-393521) + 2 \cdot (-241856)] = 766705 \text{ kJ/kmol}$$

(1 Punkt molare Masse Syngas)

$$M_{\text{Syngas}} = \frac{2}{3} M_{\text{H}_2} + \frac{1}{3} M_{\text{CO}} = \frac{2}{3} (2 \cdot 1,0079) + \frac{1}{3} (12,011 + 15,9994) = 10,681 \text{ kg/kmol}$$

(2 Punkte Endergebnis)

$$H_{i,\text{Syngas}} = 71,782 \text{ MJ/kg}$$

**5. Energieträger ..... 5 Punkte**

- (a) **(4 Punkte)** Geben Sie für die aufgeführten Primärenergieträger Tendenzen\* zur mittelfristigen Entwicklung in Deutschland (nächsten 10 Jahre) bezüglich deren installierter Leistung an. Begründen Sie Ihre Angabe jeweils kurz und nachvollziehbar.

\*Anteil steigt (↑), Anteil fällt (↓), Anteil bleibt etwa gleich (=)

Primärenergieträger	Tendenz* (↑, ↓, =)	Begründung
Wasserkraft	=	Kein weiterer Zubau von Anlagen zu erwarten / möglich
Erdgas	↑ =	Leicht erhöht um Bedarf an Flexibilität durch Ausbau Erneuerbarer Energien zu decken.
Windenergie	↑	Zubau aufgrund der Subventionen
Braunkohle	↓	Kohle-Ausstieg

- (b) **(1 Punkt)** Ein Teil der Primärenergieträger wird für den *nichtenergetischen Verbrauch* eingesetzt? Erläutern Sie kurz anhand eines Beispiels was dieser Begriff umfasst.

(1 Punkt) Der Primärenergieträger wird nicht für Nutzenergie eingesetzt, z.B. Erdöl wird in chemische Erzeugnisse umgewandelt.

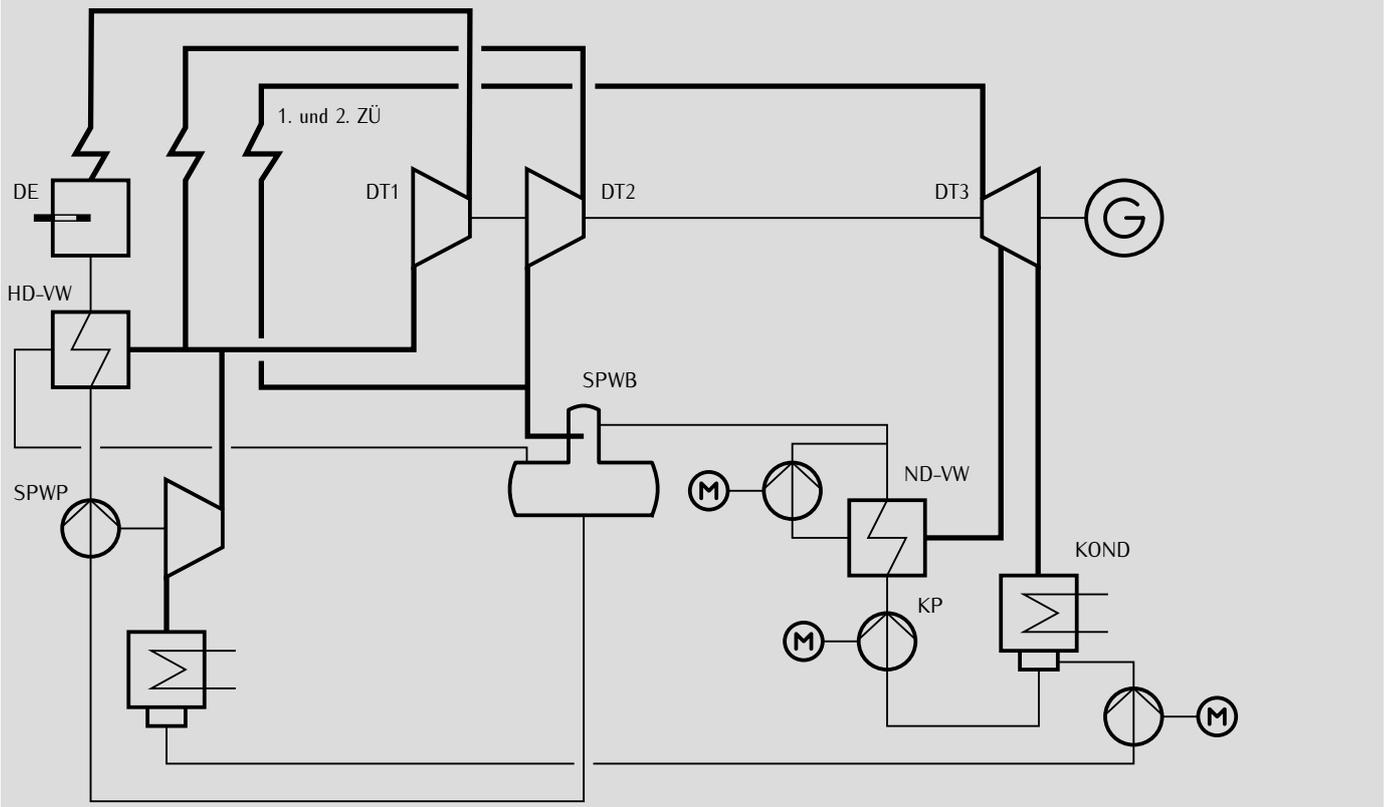
**6. Dampfkraftwerke ..... 14 Punkte**

(a) **(11 Punkte)** Stellen Sie das Fließbild eines Dampfkraftprozesses dar. Der Prozess soll neben den unten aufgeführten Eigenschaften und Komponenten alle weiteren notwendigen Komponenten beinhalten.

- Doppelte Zwischenüberhitzung.
- Einen Hochdruck- und einen Niederdruckvorwärmer jeweils ausgeführt als Oberflächenvorwärmer.
- Einen Speisewasserbehälter.
- Eine Speisewasserpumpe, mechanisch angetrieben mit Anzapfdampf.

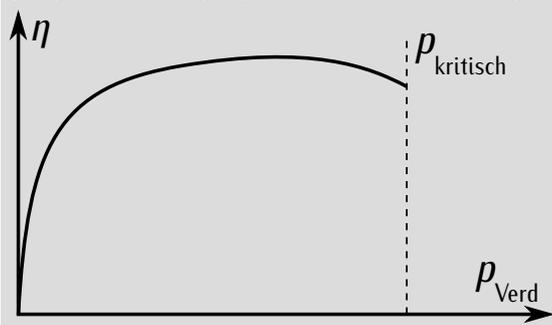
Beschriften Sie Ihre Darstellung eindeutig.

(1P) DE: Dampferzeuger, (1P) SPWP: Speisewasserpumpe, (1P) SPWB: Speisewasserbehälter, (2P) HD-VW, ND-VW: Hochdruck- und Niederdruckvorwärmer, (1P) KP: Kondensatpumpe, (1P) KOND: Kondensator, (2P) ZÜ: 1. und 2. Zwischenüberhitzung, (1P) DT: Dampfturbine, (1P) Beschriftung



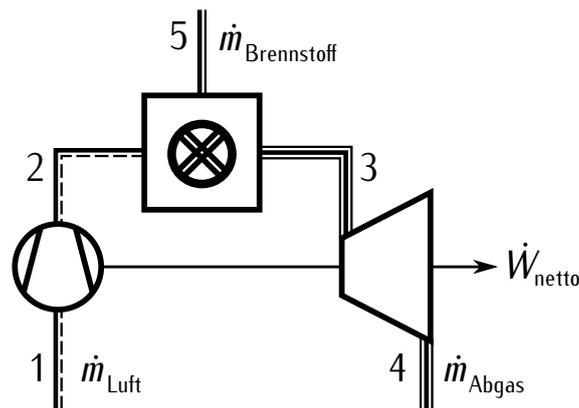
(b) **(3 Punkte)** In einem unterkritischen Dampfkraftprozess findet keine Überhitzung statt. Der Eintrittszustand in die Dampfturbine ist vollständig gesättigter Dampf. Der Druck im Kondensator ist konstant. Stellen Sie qualitativ den Wirkungsgrad des Prozesses in Abhängigkeit des Druckes bei der Verdampfung dar. Beschriften Sie Ihre Darstellung eindeutig.

(1P) Verlauf, (1P) kritischer Druck, (1P) Beschriftung



## 7. Gasturbinen ..... 13 Punkte

(a) (7 Punkte) Gegeben ist der folgende einfache offene Gasturbinenprozess.

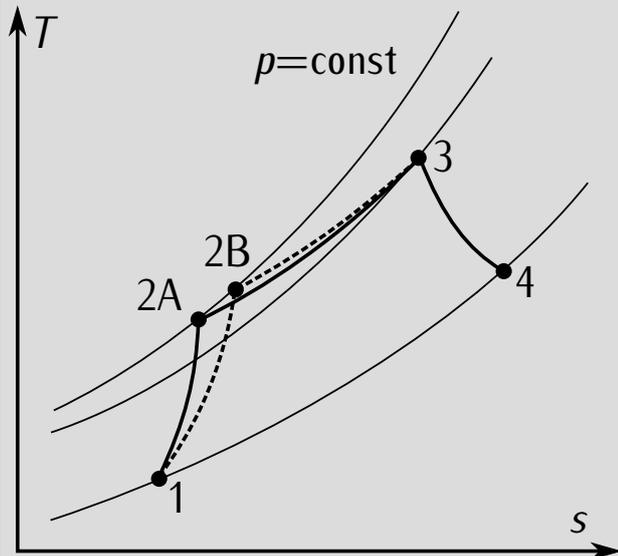


Treffen Sie die Annahme, dass sich die molare Zusammensetzung des Luftstromes von 2 nach 3 durch die Brennstoffzugabe nicht ändert. Zeichnen Sie die Zustandsänderungen des dargestellten Prozesses in ein  $T, s$ -Diagramm für die geforderten Fälle A und B. Achten Sie dabei auf eine nachvollziehbare Beschriftung.

A) Für den realen Betriebsfall.

B) Für den realen Betriebsfall, wenn der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters, im Vergleich zu Fall A, sinkt. Die Eintrittsparameter in den Expander sowie der Eintrittsdruck in die Brennkammer ändern sich nicht.

(2P) Fall A gezeichnet (inkl. Druckverluste und nicht isentrop), (2P) Fall B, (1P) Beschriftung, (2P) für alle drei Isobaren (1P wenn nur zwei Isobaren gezeichnet sind)



(b) (3 Punkte) Welche Änderungen ergeben sich für den Prozess von Fall A zu Fall B, wenn der Luftmassenstrom konstant bleibt? Nennen Sie drei Änderungen.

(je 1P pro Änderung)

- Erhöhte Verdichteraustrittstemperatur
- höhere Leistungsaufnahme des Verdichters oder Nettoleistung des Prozesses sinkt
- geringere Wärmezufuhr in der Brennkammer

- (c) **(3 Punkte)** Welche Änderung zum oben dargestellten offenen Gasturbinenprozess würden Sie vorschlagen, wenn die Anlage in Berlin zusätzlich zum Anschluss an das Fernwärmenetz genutzt werden soll? Definieren Sie für diesen Fall den exergetischen Wirkungsgrad und den Exergievernichtungsquotienten des oben dargestellten Gasturbinenprozesses! Die Definitionen sollen nur die im Fließbild dargestellten Ströme oder Komponenten enthalten.

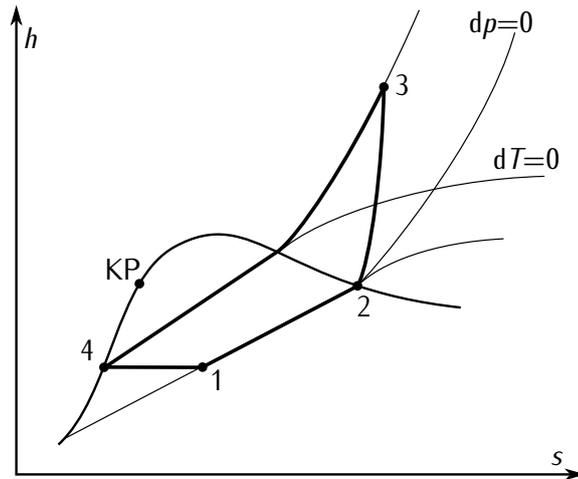
(1P) Abhitzekessel hinzufügen oder Umbau zu einem GuD-Prozess

$$(1P) \epsilon_{GT} = \frac{|\dot{W}_{\text{Netto}}|}{\dot{E}_5 - \dot{E}_4}$$

$$(1P) y_D = 1 - \epsilon_{GT} = 1 - \frac{|\dot{W}_{\text{Netto}}|}{\dot{E}_5 - \dot{E}_4}, \text{ da } y_L = 0$$

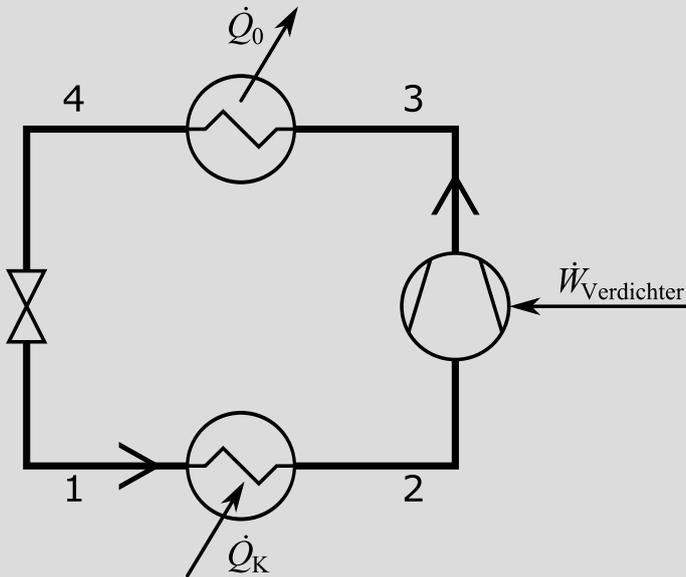
**8. Kälteprozesse I ..... 10 Punkte**

(a) **(9 Punkte)** Gegeben ist ein  $h, s$ -Diagramm eines Kälteprozesses. Notieren Sie alle Zustandsänderungen eindeutig. Entwerfen Sie ein dazugehöriges Fließbild und beschriften Sie Ihre Zeichnung eindeutig.



(9 Punkte); 1P je Zustandsänderung; 1P je Komponente im Fließbild, 1P Beschriftung

- 1-2 isobare Verdampfung
- 2-3 nicht isentrope Verdichtung
- 3-4 isobare Kondensation
- 4-1 isenthalpe Drosselung

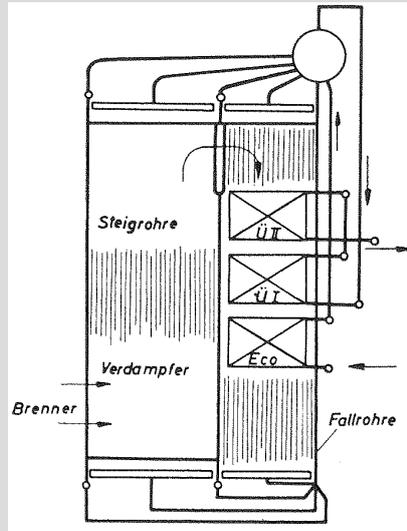
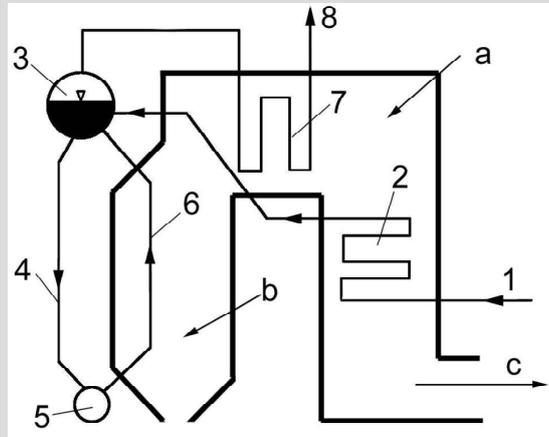


(b) **(1 Punkt)** Welche Veränderung erwarten Sie in einem realen Prozess gegenüber der Darstellung im  $h, s$ -Diagramm?

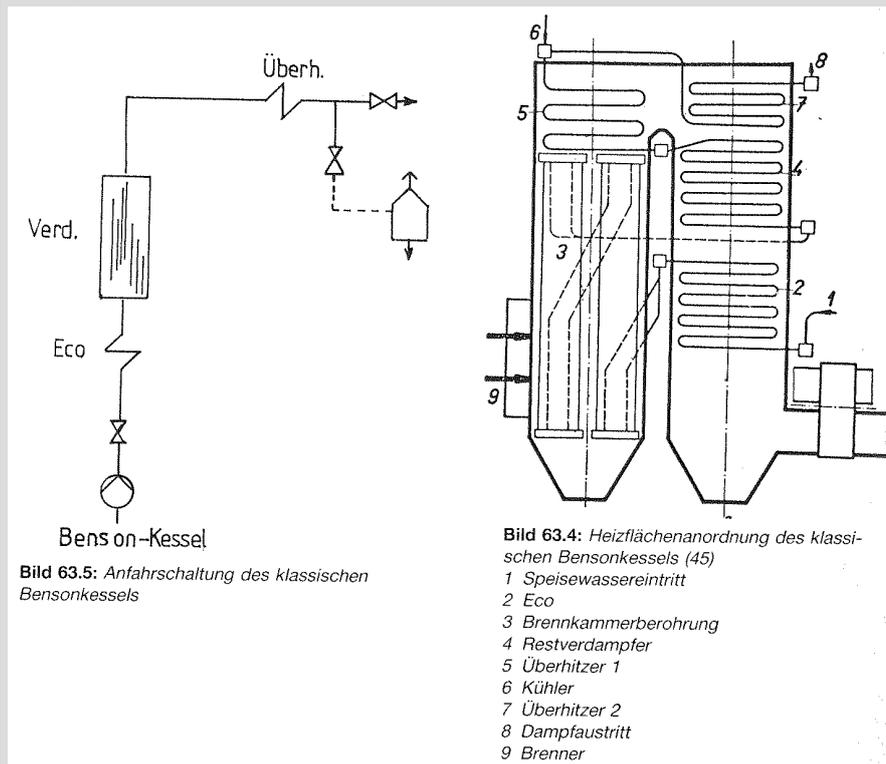
Druckverluste bei der Wärmeübertragung

9. Dampferzeuger ..... 13 Punkte

(a) (11 Punkte) Skizzieren Sie einen Naturumlauf- und einen Zwangsdurchlauf-Dampferzeuger. Beschriften Sie alle Bestandteile eindeutig.



(6 Punkte) Naturumlauf-Dampferzeuger: a: Rauchgaskanal, b: Brennraum, c: zur Rauchgasreinigung, 1: von Speisewasserbehälter, 2: **Economizer**, 3: **Trommel**, 4: **Fallrohre**, 5: **Verteilersammler**, 6: **Steigrohre**, 7: **Überhitzer**, 8: zur Turbine



**Bild 63.4:** Heizflächenanordnung des klassischen Bensonkessels (45)  
 1 Speisewassereintritt  
 2 Eco  
 3 Brennkammerberohrung  
 4 Restverdampfer  
 5 Überhitzer 1  
 6 Kühler  
 7 Überhitzer 2  
 8 Dampfaustritt  
 9 Brenner

(4 Punkte) Zwangsdurchlaufkessel: Pumpe, Eco, Verdampfer, Überhitzer  
 (1 Punkt) Beschriftung

(b) (2 Punkte) Warum sind die zulässigen Abgastemperaturen im Kamin eines Gas- und Dampfturbinenkraftwerks in der Regel deutlich geringer als bei einem kohlegefeuerten Dampfkraftwerk?

Die minimale Abgastemperatur resultiert aus der Säuretaupunkttemperatur, welche vom Schwefelgehalt des Brennstoffs abhängt. Da Erdgas im Vergleich zu Kohle einen wesentlich geringeren Schwefelgehalt hat, kann die Abgastemperatur entsprechend gesenkt werden.

**10. Kohlendioxid-Abscheidung ..... 6 Punkte**

- (a) **(6 Punkte)** Stellen Sie das Prinzip *Pre-Combustion* zur  $\text{CO}_2$ -Abtrennung an einem Synthesegas schematisch dar. Ausgangspunkt ist der fossile Brennstoff. Das Schema sollte mit dem eigentlichen Kraftwerk und der  $\text{CO}_2$ -Speicherung enden. Benennen Sie alle Verfahrenseinheiten und Ströme eindeutig.

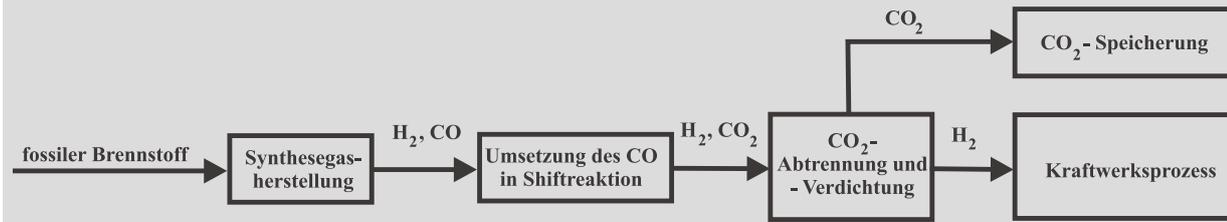
(1 Punkt) Synthesegasherstellung

(1 Punkt) Shiftreaktion

(1 Punkt)  $\text{CO}_2$ -Abtrennung

(2 Punkte) Stoffströme (jeweils 0,5)

(1 Punkt) Beschriftung



**11. Erneuerbare Energieträger ..... 9 Punkte**

Die thermischen Verluste  $\dot{Q}_V$  von Solarkollektoren lassen sich durch zwei Gleichungen beschreiben.

$$\dot{Q}_{V,1} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_A \cdot (T_A^4 - T_0^4) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{V,2} = U \cdot A_A \cdot (T_A - T_0) \quad (2)$$

- (a) **(2 Punkte)** Welche Effekte werden mit den beiden Gleichungen berücksichtigt? Ordnen Sie die Effekte eindeutig zu.

Gleichung (1): Verluste aufgrund von Strahlung

Gleichung (2): Verluste aufgrund von Konvektion

- (b) **(3 Punkte)** Welcher der beiden Anteile überwiegt bei zur Brauchwassererwärmung eingesetzten Flachkollektoren? Zeigen Sie die Korrektheit Ihrer Aussage anhand einer kurzen Rechnung.

Gehen Sie dabei von folgenden bekannten Werten aus:

$$\varepsilon = 0,1 \text{ und } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ sowie } U = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

(1 Punkt) Verluste aufgrund von Konvektion überwiegen.

(je Rechnung 1 Punkt) Nachweis für  $T_A \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\frac{\dot{Q}_{V,1}}{A_A} = 0,1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \cdot (373,15^4 - 298,15^4) \text{ K}^4 = 65,1 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

$$\frac{\dot{Q}_{V,2}}{A_A} = 2 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (373,15 - 298,15) \text{ K} = 150 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

- (c) **(2 Punkte)** Welche Verluste treten neben den thermischen Verlusten an Solarkollektoren noch auf? Welcher Zusammenhang ergibt sich für den Reflexionsgrad  $\rho$ , den Absorptionsgrad  $\alpha$  und den Transmissionsgrad  $\tau$ , wenn die Energieflüsse am Solarkollektor beschrieben werden.

(1 Punkt) optische Verluste

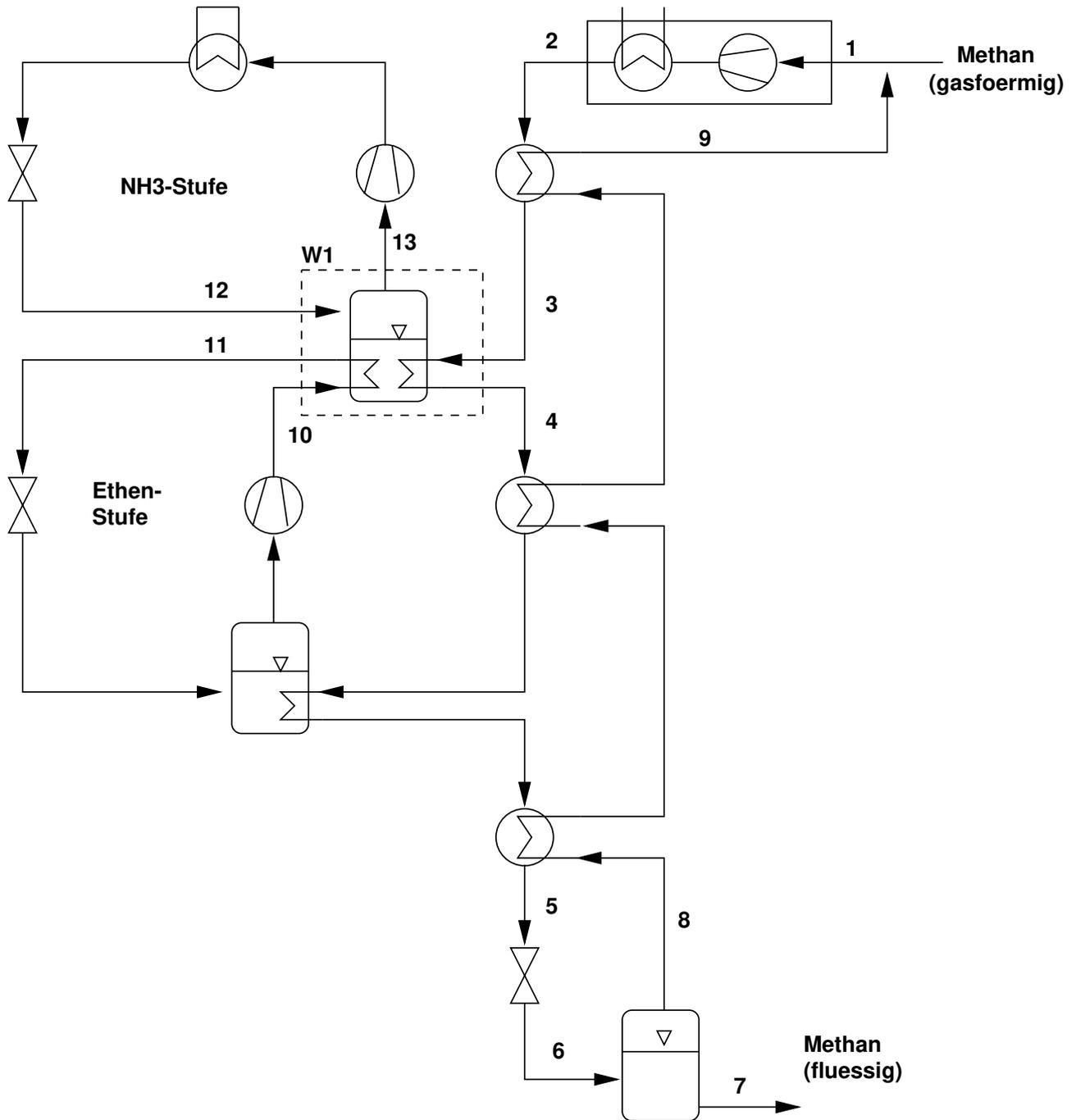
(1 Punkt)  $\rho + \alpha + \tau = 1$

- (d) **(2 Punkte)** Auf welche Größe nehmen selektive Beschichtungen des Absorbers Einfluss und wozu dienen diese? Erläutern Sie stichpunktartig

(2 Punkte) Einfluss auf Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$ . Selektive Beschichtungen nehmen möglichst viel Strahlung auf, wandeln sie in Wärme um und strahlen möglichst wenig ab („Strahlungsfalle“). Ziel:  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

**12. Kälteprozesse II ..... 10 Punkte**

(a) (1 Punkt) Die Abbildung zeigt, dass Methan mit Hilfe einer Kältekaskade aus Ethen und Ammoniak verflüssigt werden kann.



Auf welchem physikalischen Wirkungsprinzip beruht die Methanverflüssigung im Wesentlichen?

Joule-Thomson-Effekt

(b) (9 Punkte) Skizzieren Sie die Methanverflüssigung in ein  $h, s$ -Diagramm, wobei Druckverluste bei der Wärmeübertragung vernachlässigt werden können. Kennzeichnen Sie die Zustandspunkte 1 bis 9, markieren Sie Isobaren und Isothermen sowie das Nassdampfgebiet und beschriften Sie eindeutig.

siehe Diagramm

- je 1 Punkt für folgende Zustandsänderungen: 1-2; 2-5; 5-6; 8-9
- je 0,5 Punkte für folgende Zustandsänderungen: 6-7; 6-8;
- Isobaren einen Punkt

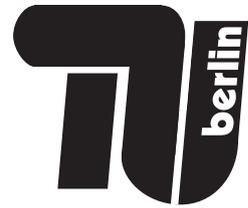
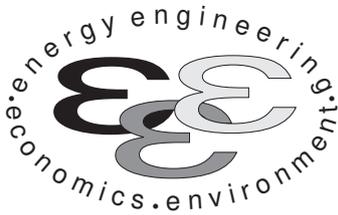


**13. Energiespeicher ..... 6 Punkte**

- (a) **(6 Punkte)** Welche Aufgaben übernehmen Energiespeicher in einem elektrischen Energieversorgungsnetz? Nennen Sie mindestens drei. Ordnen Sie der genannten Aufgabe jeweils einen geeigneten Energiespeicher zu.

Abdeckung von Lastspitzen (Druckluftspeicherkraftwerk, Pumpspeicherkraftwerk)  
Zeitliche Verschiebung (Erzeugung, Verbrauch), Bevorratung (chemische Speicher, Power to gas)  
Ausgleich von Lastschwankungen (Schwungradspeicher)  
Energieversorgung von mobilen Verbrauchern (Batterie)





**Energietechnik – 6. März 2019  
– MUSTERLÖSUNG –  
Teil II – Rechenaufgaben**

<b>Name</b>	
<b>Matrikel-Nr.</b>	

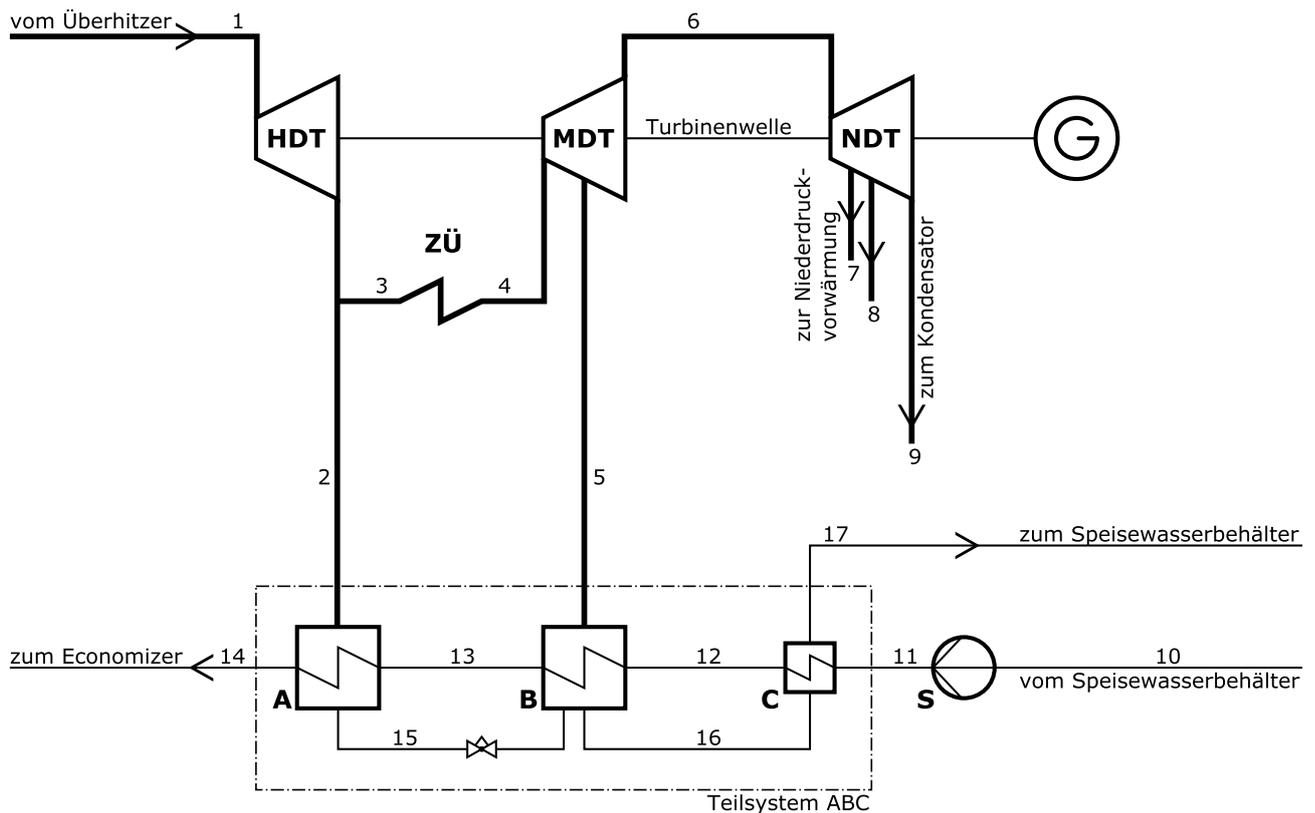
- Tragen Sie Ihren Namen und die Matrikelnummer ein.
- Rechenwege müssen nachvollziehbar dargestellt werden. Nicht zu wertende Berechnungen oder Diagramme müssen durchgestrichen werden. Es ist leserlich zu schreiben.
- Beschriften Sie die von Ihnen verwendeten Rechenblätter mit Namen und Matrikelnummer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

Aufgabe:	14	15	16	<b>Summe</b>
Punktzahl:	50	30	30	110
Davon erreicht:				

**14. Thermodynamische Analyse ..... 50 Punkte**

Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Fließbild eines Dampfkraftwerkes. Mit Hilfe eines Economizers, eines Verdampfers und eines Überhitzers wird Frischdampf (Strom 1) bereitgestellt, welcher in der Hochdruckturbine (Komponente HDT) entspannt wird. Nach der Hochdruckturbine wird ein Teil des Dampfes (Strom 2) einem Hochdruckvorwärmer (Komponente A) zugeführt. Der restliche Dampfstrom (Strom 3) wird zwischenüberhitzt und anschließend der Mitteldruckturbine (Komponente MDT) zugeleitet (Strom 4). Eine Anzapfung (Strom 5) aus der Mitteldruckturbine gelangt zu einem weiteren Hochdruckvorwärmer (Komponente B). Beide Anzapfungen (Strom 2 und 5) werden in den Vorwärmern vollständig kondensiert und anschließend im Hochdruckkondensatkühler (Komponente C) unterkühlt, bevor das Kondensat dem Speisewasserbehälter zugeführt wird. Zwei Anzapfungen (Strom 7 und 8) an der Niederdruckturbine (Komponente NDT) liefern die Wärme für die Niederdruckvorwärmung. Der Abdampfstrom (Strom 9) aus der Niederdruckturbine wird dem Kondensator zugeführt. Die Speisewasserpumpe (Komponente S) erhöht den Druck des Speisewassers auf das Hochdruckniveau. Am Ende der Hochdruckvorwärmung sind die Economizereintrittsparemeter erreicht.

Die Wasserdampfptafel aus der Formelsammlung kann nicht für die Lösung der Aufgaben verwendet werden. Entnehmen Sie ggf. Angaben aus den nachfolgend umgedruckten Tabellen basierend auf der IAPWS-IF97 Formulierung.



<b>Legende:</b>	<b>A</b> Hochdruckvorwärmer	<b>MDT</b> Mitteldruckturbine
Dampf	<b>B</b> Hochdruckvorwärmer	<b>NDT</b> Niederdruckturbine
Kreislaufwasser	<b>C</b> Hochdruckkondensatkühler	<b>S</b> Speisewasserpumpe
Bilanzgrenze	<b>G</b> Generator	<b>ZÜ</b> Zwischenüberhitzung
	<b>HDT</b> Hochdruckturbine	

## Aufgaben

- (a) **(5 Punkte)** Legen Sie die mechanische Leistung der Hochdruckturbine so aus, dass am Generator eine elektrische Leistung resultierend aus der Hochdruckturbine von  $\dot{W}_{\text{el,HDT}} = 70 \text{ MW}$  zur Verfügung steht. Berechnen Sie die unbekanntenen Größen.
- (b) **(3 Punkte)** Stellen Sie eine Gleichung zur Berechnung der elektrischen Leistung der gesamten Dampfturbine  $\dot{W}_{\text{el,DT}}$  in Abhängigkeit der Enthalpieströme auf. *Hinweis:* Es soll **kein** Zahlenwert angegeben werden.
- (c) **(3 Punkte)** Erwarten Sie, dass die mechanische Leistung der Niederdruckturbine deutlich größer, deutlich kleiner oder ungefähr gleich der mechanischen Leistung der Hochdruckturbine ist? Begründen Sie Ihre Antwort in geeigneter Form.
- (d) **(5 Punkte)** Berechnen Sie den isentropen Wirkungsgrad  $\eta_s$  für die Entspannung in der Hochdruckturbine.
- (e) **(5 Punkte)** Berechnen Sie den gesamten Exergiestrom des Frischdampfstromes  $\dot{E}_1$ .
- (f) **(6 Punkte)** Berechnen Sie den Massenstrom der ersten Dampfanzapfung  $\dot{m}_2$ .
- (g) **(7 Punkte)** Berechnen Sie den gesamten Wärmestrom, der dem Speisewasser im Dampferzeuger zugeführt wird. Geben Sie dazu an welche Komponenten Sie dem Dampferzeuger zugeordnet haben.
- (h) **(4 Punkte)** Definieren Sie die Exergievernichtung, den Exergieverlust sowie den exergetischen Wirkungsgrad der Hochdruck-Speisewasservorwärmung (Teilsystem aus den Komponenten A, B und C).
- (i) **(4 Punkte)** Zeichnen Sie qualitativ für die Hochdruck-Speisewasservorwärmung (Teilsystem aus den Komponenten A, B und C) die warmen und kalten Ströme in ein  $T, \Delta\dot{H}$ -Diagramm. Kennzeichnen Sie alle Ströme eindeutig.
- (j) **(4 Punkte)** Gegeben ist die Zusammensetzung eines Rauchgasstroms im Dampferzeuger. Prüfen Sie den Strom auf Kondensation bei Umgebungsbedingungen. Geben Sie ggf. den Molenanteil des dampfförmig und flüssig vorliegenden Wassers an. Nutzen Sie bei Bedarf die angegebene Formel.
- (k) **(4 Punkte)** Stellen Sie für die Hochdruck-Speisewasservorwärmung (Teilsystem aus den Komponenten A, B und C) eine Kostenbilanz auf, wie sie für die exergoökonomische Analyse benötigt wird. Geben Sie alle notwendigen Hilfsbeziehungen an und stellen Sie die Bilanz nach dem Zielwert um. Gehen Sie davon aus, dass die eintretenden Kostenströme aus den vorgeschalteten Komponenten und die Kosten des Teilsystems  $\dot{Z}_{\text{ABC}}$  bekannt sind.

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.

$$\dot{m}_2 = 20 \text{ kg/s}$$

## Annahmen und gegebene Werte

- Alle Komponenten arbeiten stationär und sind nach außen adiabat.
- Kinetische und potentielle Energien 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 Generatorwirkungsgrad beträgt 95,89%.
- Druckverluste bei den dargestellten Wärmeübertragern können vernachlässigt werden.
- Die Anzapfungen werden in den Vorwärmern (Komponente A und B) vollständig kondensiert.
- Für die molaren chemischen Exergien ist Modell I zu benutzen.

Tabelle 1: Thermodynamische Daten der Stoffströme

$j$	$\dot{m}_j$ [kg/s]	$T_j$ [°C]	$p_j$ [bar]
1		530	190
2		320	45
3		320	45
4		530	45
5			20
6			2
9			0,07
11			250
12		150	250
13		200	
14		250	250
15			
16			20
17			20

Tabelle 2: Zusammensetzung des Rauchgasstromes

$i$	$x_i$
N <sub>2</sub>	0,750
O <sub>2</sub>	0,100
H <sub>2</sub> O	0,095
CO <sub>2</sub>	0,030
SO <sub>2</sub>	0,025

$$p_{s,\text{H}_2\text{O}} = \left( \frac{x_{\text{H}_2\text{O},g}}{x_{\text{trocken}} + x_{\text{H}_2\text{O},g}} \right) \cdot p_0$$

**Table 4 Single-Phase Region (Regions 1 to 3 of IAPWS-IF97) – Continuation**  
**Homogenes Zustandsgebiet (Bereiche 1 bis 3 der IAPWS-IF97) – Fortsetzung**

$t$ [°C]	$v$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$s$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$p = 4.5 \text{ MPa}$			$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\lambda \times 10^3$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
				$c_p$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$w$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\kappa$		
0	0.000998	4.53	0.0001	4.1979	1409.37	442.32	1780.71	563.51
5	0.000998	25.49	0.0761	4.1864	1433.16	457.40	1510.98	572.83
10	0.000998	46.40	0.1507	4.1791	1454.53	470.99	1301.19	582.18
15	0.000999	67.28	0.2238	4.1744	1473.56	483.08	1134.55	591.44
20	0.001000	88.14	0.2956	4.1713	1490.39	493.72	999.78	600.48
25	0.001001	109.00	0.3661	4.1694	1505.16	502.95	889.10	609.19
30	0.001002	129.84	0.4354	4.1683	1518.00	510.84	796.96	617.49
35	0.001004	150.68	0.5036	4.1678	1529.05	517.46	719.36	625.32
40	0.001006	171.52	0.5707	4.1679	1538.43	522.87	653.35	632.63
45	0.001008	192.36	0.6367	4.1684	1546.26	527.13	596.67	639.41
50	0.001010	213.20	0.7017	4.1695	1552.63	530.32	547.62	645.64
60	0.001015	254.91	0.8288	4.1731	1561.40	533.71	467.39	656.49
70	0.001021	296.67	0.9523	4.1786	1565.42	533.51	405.00	665.30
80	0.001027	338.49	1.0725	4.1860	1565.23	530.15	355.51	672.26
90	0.001034	380.40	1.1895	4.1953	1561.32	524.01	315.59	677.59
100	0.001041	422.41	1.3036	4.2066	1554.06	515.44	282.92	681.50
110	0.001049	464.54	1.4150	4.2200	1543.78	504.74	255.86	684.17
120	0.001058	506.81	1.5239	4.2355	1530.73	492.18	233.18	685.73
130	0.001067	549.26	1.6305	4.2534	1515.12	478.00	213.99	686.31
140	0.001077	591.89	1.7350	4.2740	1497.11	462.39	197.60	685.97
150	0.001088	634.74	1.8375	4.2974	1476.80	445.53	183.48	684.76
160	0.001099	677.85	1.9382	4.3242	1454.28	427.57	171.21	682.70
170	0.001111	721.24	2.0372	4.3549	1429.58	408.64	160.47	679.80
180	0.001124	764.96	2.1348	4.3901	1402.72	388.86	151.01	676.06
190	0.001138	809.06	2.2310	4.4305	1373.69	368.34	142.59	671.44
200	0.001154	853.59	2.3261	4.4771	1342.48	347.19	135.06	665.90
210	0.001170	898.63	2.4203	4.5310	1309.04	325.52	128.26	659.38
220	0.001187	944.24	2.5138	4.5937	1273.32	303.42	122.08	651.83
230	0.001207	990.54	2.6067	4.6672	1235.21	280.00	116.41	643.14
240	0.001228	1037.63	2.6994	4.7540	1194.59	258.32	111.16	633.20
250	0.001251	1085.67	2.7921	4.8578	1151.21	235.46	106.26	621.86
<b>Saturation</b>								
$t_s = 257.44$								
Liquid	0.001270	1122.14	2.8613	4.9492	1111.693	218.35	102.79	612.42
Vapour	0.0441	2798.00	6.0198	4.2279	500.02	1.2610	17.78	53.30
260	0.0446	2808.60	6.0397	4.0583	503.69	1.2649	17.91	53.08
270	0.0465	2846.71	6.1106	3.6066	516.08	1.2741	18.40	52.52
280	0.0482	2881.29	6.1737	3.3285	526.57	1.2787	18.89	52.29
290	0.0498	2913.55	6.2315	3.1328	535.99	1.2814	19.37	52.29
300	0.0514	2944.10	6.2852	2.9844	544.69	1.2833	19.84	52.47
310	0.0529	2973.34	6.3358	2.8671	552.84	1.2846	20.31	52.80
320	0.0543	3001.52	6.3837	2.7723	560.55	1.2855	20.77	53.25
330	0.0557	3028.84	6.4294	2.6944	567.88	1.2861	21.23	53.79
340	0.0571	3055.45	6.4732	2.6298	574.89	1.2865	21.69	54.43

**Table 4 Single-Phase Region (Regions 1 to 3 of IAPWS-IF97) – Continuation**  
**Homogenes Zustandsgebiet (Bereiche 1 bis 3 der IAPWS-IF97) – Fortsetzung**

$t$ [°C]	$v$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$s$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$p = 4.5 \text{ MPa}$			$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\lambda \times 10^3$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
				$c_p$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$w$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\kappa$		
350	0.0584	3081.47	6.5153	2.5759	581.62	1.2867	22.14	55.13
360	0.0597	3107.00	6.5559	2.5308	588.10	1.2866	22.59	55.90
370	0.0610	3132.11	6.5953	2.4927	594.36	1.2864	23.04	56.72
380	0.0623	3156.88	6.6355	2.4606	600.42	1.2861	23.49	57.58
390	0.0635	3181.34	6.6706	2.4335	606.31	1.2857	23.93	58.49
400	0.0648	3205.56	6.7069	2.4105	612.04	1.2852	24.37	59.44
410	0.0660	3229.56	6.7423	2.3910	617.63	1.2846	24.81	60.42
420	0.0672	3253.39	6.7769	2.3746	623.09	1.2839	25.24	61.43
430	0.0684	3277.06	6.8108	2.3607	628.43	1.2832	25.68	62.46
440	0.0696	3300.61	6.8441	2.3490	633.66	1.2824	26.11	63.52
450	0.0708	3324.05	6.8767	2.3392	638.79	1.2816	26.54	64.61
460	0.0719	3347.40	6.9088	2.3310	643.83	1.2807	26.97	65.71
470	0.0731	3370.67	6.9403	2.3242	648.77	1.2798	27.40	66.84
480	0.0742	3393.89	6.9713	2.3187	653.64	1.2789	27.82	67.98
490	0.0754	3417.05	7.0019	2.3143	658.43	1.2780	28.24	69.14
500	0.0765	3440.18	7.0320	2.3109	663.14	1.2771	28.66	70.32
510	0.0777	3463.27	7.0617	2.3083	667.79	1.2762	29.08	71.51
520	0.0788	3486.34	7.0910	2.3064	672.38	1.2752	29.50	72.72
530	0.0799	3509.40	7.1199	2.3052	676.90	1.2742	29.92	73.93
540	0.0810	3532.45	7.1484	2.3047	681.37	1.2733	30.33	75.17
550	0.0821	3555.50	7.1765	2.3046	685.78	1.2723	30.75	76.41
560	0.0833	3578.55	7.2044	2.3051	690.14	1.2713	31.16	77.66
570	0.0844	3601.60	7.2319	2.3060	694.45	1.2704	31.57	78.93
580	0.0855	3624.67	7.2591	2.3073	698.71	1.2694	31.97	80.20
590	0.0866	3647.75	7.2860	2.3090	702.92	1.2684	32.38	81.48
600	0.0877	3670.85	7.3126	2.3110	707.09	1.2675	32.79	82.77
610	0.0888	3693.97	7.3389	2.3133	711.22	1.2665	33.19	84.07
620	0.0898	3717.11	7.3650	2.3158	715.31	1.2655	33.59	85.38
630	0.0909	3740.29	7.3908	2.3187	719.36	1.2646	33.99	86.69
640	0.0920	3763.49	7.4163	2.3217	723.38	1.2636	34.39	88.01
650	0.0931	3786.72	7.4416	2.3250	727.35	1.2627	34.79	89.33
660	0.0942	3809.99	7.4667	2.3285	731.29	1.2618	35.18	90.66
670	0.0953	3833.29	7.4915	2.3322	735.20	1.2608	35.58	91.99
680	0.0963	3856.63	7.5162	2.3361	739.07	1.2599	35.97	93.33
690	0.0974	3880.01	7.5406	2.3401	742.92	1.2590	36.36	94.67
700	0.0985	3903.44	7.5647	2.3442	746.73	1.2580	36.75	96.02
720	0.1006	3950.41	7.6125	2.3529	754.26	1.2562	37.53	98.72
740	0.1028	3997.56	7.6595	2.3621	761.69	1.2544	38.30	101.44
760	0.1049	4044.89	7.7058	2.3718	769.00	1.2527	39.07	104.17
780	0.1070	4092.43	7.7514	2.3818	776.21	1.2509	39.82	106.91
800	0.1092	4140.17	7.7963	2.3921	783.33	1.2492	40.58	109.66

**Table 4 Single-Phase Region (Regions 1 to 3 of IAPWS-IF97) – Continuation**  
**Homogenes Zustandsgebiet (Bereiche 1 bis 3 der IAPWS-IF97) – Fortsetzung**

$t$ [°C]	$v$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$s$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$p = 19 \text{ MPa}$				$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\kappa$	$\lambda \times 10^3$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
				$c_p$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$w$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\kappa$			
0	0.000991	19.04	0.0005	4.1332	1432.86	109.06	1748.59	571.51		
5	0.000991	39.70	0.0754	4.1304	1456.65	112.69	1489.88	580.27		
10	0.000992	60.35	0.1490	4.1294	1477.95	115.95	1287.49	589.25		
15	0.000992	81.00	0.2213	4.1295	1496.91	118.85	1125.93	598.26		
20	0.000993	101.65	0.2923	4.1301	1513.69	121.40	994.72	607.15		
25	0.000995	122.30	0.3622	4.1310	1528.46	123.62	886.55	615.78		
30	0.000996	142.96	0.4309	4.1320	1541.35	125.53	796.22	624.06		
35	0.000998	163.62	0.4985	4.1333	1552.52	127.14	719.94	631.89		
40	0.001000	184.29	0.5650	4.1347	1562.07	128.47	654.88	639.24		
45	0.001002	204.97	0.6305	4.1363	1570.12	129.53	598.90	646.08		
50	0.001004	225.65	0.6951	4.1382	1576.77	130.34	550.36	652.38		
60	0.001009	267.06	0.8212	4.1429	1586.23	131.27	470.77	663.40		
70	0.001014	308.51	0.9439	4.1488	1591.09	131.36	408.70	672.41		
80	0.001020	350.04	1.0631	4.1562	1591.89	130.72	359.35	679.60		
90	0.001027	391.64	1.1793	4.1650	1589.08	129.41	319.47	685.19		
100	0.001034	433.34	1.2926	4.1754	1583.05	127.54	286.80	689.39		
110	0.001042	475.16	1.4032	4.1874	1574.12	125.17	259.69	692.36		
120	0.001050	517.10	1.5112	4.2012	1562.55	122.37	236.96	694.26		
130	0.001059	559.19	1.6169	4.2168	1548.57	119.18	217.71	695.19		
140	0.001068	601.44	1.7205	4.2345	1532.34	115.66	201.26	695.23		
150	0.001079	643.89	1.8220	4.2546	1513.99	111.85	187.09	694.43		
160	0.001089	686.54	1.9216	4.2773	1493.62	107.79	174.78	692.82		
170	0.001101	729.44	2.0195	4.3029	1471.29	103.50	164.01	690.40		
180	0.001113	772.61	2.1159	4.3321	1447.06	99.02	154.52	687.17		
190	0.001126	816.09	2.2108	4.3652	1420.92	94.38	146.10	683.11		
200	0.001140	859.93	2.3044	4.4028	1392.90	89.58	138.57	678.21		
210	0.001155	904.17	2.3969	4.4458	1362.96	84.67	131.80	672.43		
220	0.001171	948.87	2.4885	4.4950	1331.10	79.65	125.66	665.72		
230	0.001188	994.09	2.5793	4.5514	1297.27	74.56	120.06	658.03		
240	0.001207	1039.92	2.6695	4.6165	1261.44	69.41	114.91	649.29		
250	0.001227	1086.46	2.7593	4.6920	1223.55	64.22	110.14	639.41		
260	0.001249	1133.81	2.8489	4.7802	1183.50	59.03	105.67	628.29		
270	0.001273	1182.11	2.9387	4.8841	1141.13	53.83	101.45	615.83		
280	0.001300	1231.55	3.0289	5.0081	1096.18	48.64	97.42	601.91		
290	0.001330	1282.36	3.1199	5.1587	1048.30	43.48	93.53	586.44		
300	0.001364	1334.85	3.2123	5.3458	996.96	38.34	89.72	569.36		
310	0.001404	1389.45	3.3067	5.5856	941.38	33.23	85.92	550.64		
320	0.001450	1446.83	3.4043	5.9066	880.37	28.13	82.05	530.34		
330	0.001507	1508.03	3.5066	6.3642	812.62	23.07	78.01	508.49		
340	0.001580	1574.97	3.6167	7.0846	737.04	18.10	73.60	485.00		
350	0.001683	1651.88	3.7410	8.4936	643.78	12.96	68.46	459.03		
360	0.001873	1755.11	3.9053	13.6384	501.01	7.05	61.08	427.75		

**Table 4 Single-Phase Region (Regions 1 to 3 of IAPWS-IF97) – Continuation**  
**Homogenes Zustandsgebiet (Bereiche 1 bis 3 der IAPWS-IF97) – Fortsetzung**

$t$ [°C]	$v$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$s$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$p = 19 \text{ MPa}$				$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\lambda \times 10^3$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	
				$c_p$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$w$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\kappa$	$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]			
Liquid	0.001925	1776.94	3.9397	16.2346	468.76	6.0065	59.40	423.20		
Vapour	0.0067	2465.52	5.0247	30.5865	398.68	1.2536	26.11	192.39		
370	0.0082	2616.04	5.2606	12.1689	446.59	1.2773	25.26	133.52		
380	0.0093	2715.73	5.4145	8.4188	476.36	1.2822	25.23	114.51		
390	0.0102	2790.66	5.5283	6.7384	498.48	1.2862	25.43	104.78		
400	0.0109	2852.77	5.6213	5.7605	516.53	1.2893	25.73	98.85		
410	0.0115	2906.98	5.7013	5.1209	531.88	1.2911	26.07	94.94		
420	0.0121	2955.79	5.7722	4.6649	545.37	1.2921	26.45	92.25		
430	0.0127	3000.65	5.8365	4.3211	557.49	1.2926	26.84	90.39		
440	0.0132	3042.47	5.8955	4.0525	568.56	1.2928	27.24	89.11		
450	0.0136	3081.88	5.9504	3.8372	578.79	1.2928	27.65	88.27		
460	0.0141	3119.34	6.0019	3.6613	588.34	1.2926	28.06	87.77		
470	0.0145	3155.20	6.0504	3.5153	597.31	1.2924	28.47	87.55		
480	0.0149	3189.72	6.0966	3.3928	605.79	1.2920	28.89	87.55		
490	0.0154	3223.12	6.1406	3.2889	613.85	1.2915	29.30	87.73		
500	0.0157	3255.55	6.1829	3.2000	621.54	1.2910	29.72	88.07		
510	0.0161	3287.16	6.2235	3.1233	628.91	1.2904	30.14	88.54		
520	0.0165	3318.05	6.2627	3.0569	635.99	1.2898	30.55	89.13		
530	0.0169	3348.32	6.3006	3.0000	642.81	1.2891	30.97	89.81		
540	0.0172	3378.06	6.3374	2.9482	649.39	1.2883	31.38	90.57		
550	0.0176	3407.31	6.3732	2.9035	655.77	1.2876	31.79	91.40		
560	0.0179	3436.14	6.4080	2.8641	661.96	1.2868	32.20	92.30		
570	0.0183	3464.61	6.4419	2.8292	667.97	1.2859	32.61	93.25		
580	0.0186	3492.74	6.4751	2.7982	673.82	1.2851	33.01	94.25		
590	0.0189	3520.58	6.5076	2.7706	679.53	1.2843	33.42	95.28		
600	0.0192	3548.16	6.5393	2.7460	685.10	1.2834	33.82	96.35		
610	0.0196	3575.51	6.5705	2.7240	690.55	1.2825	34.22	97.45		
620	0.0199	3602.65	6.6010	2.7043	695.88	1.2817	34.62	98.58		
630	0.0202	3629.60	6.6310	2.6866	701.10	1.2808	35.02	99.72		
640	0.0205	3656.39	6.6605	2.6708	706.23	1.2799	35.42	100.88		
650	0.0208	3683.03	6.6895	2.6567	711.26	1.2790	35.81	102.06		
660	0.0211	3709.53	6.7181	2.6440	716.20	1.2782	36.20	103.25		
670	0.0214	3735.91	6.7462	2.6327	721.05	1.2773	36.59	104.45		
680	0.0217	3762.18	6.7739	2.6225	725.83	1.2765	36.98	105.65		
690	0.0220	3788.36	6.8013	2.6135	730.53	1.2756	37.37	106.87		
700	0.0223	3814.46	6.8282	2.6054	735.16	1.2748	37.75	108.08		
720	0.0229	3866.43	6.8811	2.5920	744.23	1.2731	38.52	110.53		
740	0.0235	3918.16	6.9326	2.5816	753.05	1.2714	39.28	112.98		
760	0.0240	3969.71	6.9830	2.5739	761.65	1.2697	40.03	115.43		
780	0.0246	4021.13	7.0323	2.5684	770.04	1.2681	40.77	117.89		
800	0.0252	4072.46	7.0806	2.5650	778.24	1.2664	41.51	120.33		

**Table 4 Single-Phase Region (Regions 1 to 3 of IAPWS-IF97) – Continuation**  
**Homogenes Zustandsgebiet (Bereiche 1 bis 3 der IAPWS-IF97) – Fortsetzung**

$t$ [°C]	$v$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$s$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$p = 25 \text{ MPa}$		$w$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\kappa$	$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\lambda \times 10^3$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
				$c_p$	$\alpha$				
0	0.000988	24.96	0.0004	4.1090	1442.86	84.29	1736.82	574.80	
5	0.000988	45.51	0.0749	4.1093	1466.60	87.06	1482.20	583.34	
10	0.000989	66.06	0.1482	4.1107	1487.83	89.55	1282.57	592.17	
15	0.000990	86.62	0.2201	4.1125	1506.73	91.76	1122.91	601.90	
20	0.000991	107.18	0.2909	4.1144	1523.47	93.70	993.02	609.92	
25	0.000992	127.76	0.3605	4.1162	1538.21	95.40	885.80	618.52	
30	0.000994	148.35	0.4290	4.1181	1551.11	96.86	796.15	626.78	
35	0.000995	168.94	0.4964	4.1199	1562.30	98.09	720.36	634.62	
40	0.000997	189.54	0.5627	4.1218	1571.91	99.12	655.65	641.98	
45	0.000999	210.16	0.6280	4.1238	1580.03	99.94	599.93	648.84	
50	0.001001	230.78	0.6923	4.1260	1586.78	100.57	551.58	655.17	
60	0.001006	272.07	0.8181	4.1311	1596.50	101.32	472.22	666.26	
70	0.001012	313.41	0.9404	4.1372	1601.67	101.43	410.26	675.35	
80	0.001018	354.82	1.0593	4.1445	1602.84	100.98	360.96	682.63	
90	0.001024	396.30	1.1752	4.1532	1600.44	100.03	321.09	688.33	
100	0.001031	437.88	1.2881	4.1633	1594.86	98.65	288.40	692.63	
110	0.001039	479.57	1.3984	4.1748	1586.42	96.90	261.27	695.73	
120	0.001047	521.38	1.5061	4.1879	1575.38	94.81	238.51	697.76	
130	0.001056	563.34	1.6115	4.2027	1561.98	92.44	219.23	698.84	
140	0.001065	605.45	1.7147	4.2194	1546.37	89.81	202.75	699.03	
150	0.001075	647.73	1.8158	4.2383	1528.71	86.96	188.56	698.39	
160	0.001085	690.22	1.9150	4.2595	1509.09	83.92	176.23	696.95	
170	0.001097	732.93	2.0125	4.2834	1487.59	80.72	165.44	694.71	
180	0.001108	775.90	2.1084	4.3105	1464.25	77.37	155.94	691.67	
190	0.001121	819.15	2.2028	4.3411	1439.12	73.89	147.51	687.83	
200	0.001135	862.73	2.2959	4.3758	1412.19	70.31	139.98	683.17	
210	0.001149	906.69	2.3878	4.4152	1383.47	66.63	133.21	677.65	
220	0.001164	951.06	2.4787	4.4601	1352.95	62.88	127.09	671.23	
230	0.001181	995.91	2.5688	4.5113	1320.60	59.07	121.50	663.89	
240	0.001199	1041.31	2.6581	4.5698	1286.42	55.21	116.38	655.54	
250	0.001218	1087.33	2.7469	4.6371	1250.36	51.34	111.64	646.14	
260	0.001239	1134.08	2.8355	4.7149	1212.39	47.45	107.22	635.60	
270	0.001262	1181.67	2.9239	4.8052	1172.43	43.57	103.06	623.82	
280	0.001287	1230.24	3.0125	4.9112	1130.34	39.71	99.11	610.74	
290	0.001315	1279.96	3.1016	5.0369	1085.91	35.87	95.32	596.26	
300	0.001346	1331.06	3.1915	5.1883	1038.86	32.08	91.65	580.34	
310	0.001381	1383.84	3.2828	5.3745	988.82	28.32	88.03	563.00	
320	0.001421	1438.72	3.3761	5.6099	935.42	24.62	84.42	544.30	
330	0.001469	1496.28	3.4723	5.9188	878.00	20.99	80.74	524.38	
340	0.001526	1557.48	3.5729	6.3448	815.21	17.42	76.90	503.35	

**Table 4 Single-Phase Region (Regions 1 to 3 of IAPWS-IF97) – Continuation**  
**Homogenes Zustandsgebiet (Bereiche 1 bis 3 der IAPWS-IF97) – Fortsetzung**

$t$ [°C]	$v$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$s$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$p = 25 \text{ MPa}$		$w$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\kappa$	$\eta \times 10^6$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\lambda \times 10^3$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
				$c_p$	$\alpha$				
350	0.001599	1623.86	3.6803	6.9800	745.33	13.8983	72.76	481.07	
360	0.001697	1698.64	3.7993	8.0944	667.09	10.4897	68.08	457.01	
370	0.001850	1789.93	3.9424	10.5651	568.12	6.9776	62.21	428.37	
380	0.002218	1935.67	4.1670	23.1840	426.79	3.2844	52.39	392.66	
390	0.004647	2395.53	4.8656	28.4614	403.34	1.4003	31.70	239.85	
400	0.006005	2578.59	5.1399	13.0025	450.94	1.3546	29.17	168.15	
410	0.006884	2687.10	5.2999	9.2401	480.01	1.3389	28.56	142.43	
420	0.007579	2769.45	5.4196	7.4062	502.36	1.3319	28.43	128.20	
430	0.008172	2837.67	5.5174	6.3206	520.68	1.3270	28.51	119.23	
440	0.008697	2897.06	5.6013	5.6026	536.34	1.3230	28.70	113.16	
450	0.009175	2950.38	5.6755	5.0860	550.18	1.3196	28.95	108.88	
460	0.009617	2999.20	5.7426	4.6938	562.68	1.3169	29.25	105.79	
470	0.010029	3044.53	5.8040	4.3856	574.13	1.3147	29.57	103.57	
480	0.010418	3087.11	5.8609	4.1377	584.74	1.3127	29.92	101.99	
490	0.010788	3127.44	5.9141	3.9347	594.64	1.3110	30.27	100.91	
500	0.011142	3165.92	5.9642	3.7661	603.96	1.3095	30.64	100.23	
510	0.011482	3202.85	6.0117	3.6245	612.76	1.3081	31.01	99.85	
520	0.011810	3238.48	6.0569	3.5044	621.13	1.3067	31.39	99.74	
530	0.012127	3272.99	6.1001	3.4014	629.10	1.3054	31.77	99.83	
540	0.012435	3306.55	6.1416	3.3126	636.72	1.3041	32.16	100.10	
550	0.012735	3339.28	6.1816	3.2354	644.04	1.3028	32.55	100.52	
560	0.013028	3371.29	6.2203	3.1679	651.09	1.3015	32.94	101.06	
570	0.013314	3402.67	6.2577	3.1085	657.88	1.3003	33.32	101.70	
580	0.013595	3433.49	6.2941	3.0560	664.45	1.2990	33.71	102.44	
590	0.013870	3463.81	6.3294	3.0094	670.82	1.2978	34.10	103.24	
600	0.014140	3493.69	6.3638	2.9679	677.01	1.2966	34.49	104.11	
610	0.014405	3523.18	6.3974	2.9308	683.02	1.2954	34.88	105.04	
620	0.014667	3552.32	6.4302	2.8976	688.88	1.2942	35.27	106.00	
630	0.014925	3581.14	6.4623	2.8678	694.59	1.2931	35.65	107.00	
640	0.015179	3609.69	6.4937	2.8410	700.17	1.2919	36.04	108.04	
650	0.015430	3637.97	6.5246	2.8168	705.63	1.2908	36.42	109.09	
660	0.015678	3666.03	6.5548	2.7949	710.98	1.2897	36.80	110.17	
670	0.015923	3693.88	6.5845	2.7752	716.21	1.2886	37.18	111.27	
680	0.016165	3721.54	6.6136	2.7574	721.35	1.2876	37.56	112.37	
690	0.016406	3749.03	6.6423	2.7413	726.39	1.2865	37.94	113.49	
700	0.016643	3776.37	6.6706	2.7267	731.35	1.2855	38.32	114.62	
720	0.017113	3830.64	6.7258	2.7016	741.01	1.2835	39.07	116.89	
740	0.017575	3884.47	6.7794	2.6812	750.37	1.2815	39.81	119.17	
760	0.018030	3937.92	6.8317	2.6647	759.45	1.2796	40.55	121.46	
780	0.018479	3991.08	6.8826	2.6517	768.29	1.2777	41.28	123.75	
800	0.018922	4044.00	6.9324	2.6415	776.89	1.2759	42.01	126.04	

**Table 1 Saturation State (Temperature Table)**  
**Sättigungszustand (Temperaturtafel)**

$t$ [°C]	$T$ [K]	$p_s$ [MPa]	$v'$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$v''$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h'$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$h''$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta h_v$	$s'$	$s''$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\Delta s_v$
0	273.15	0.000611	0.001000	206.140	-0.042	2500.89	2500.93	-0.0002	9.1558	9.1559
0.01	273.16	0.000612	0.001000	205.997	0.001	2500.91	2500.91	0.0000	9.1555	9.1555
1	274.15	0.000657	0.001000	192.445	4.177	2502.73	2498.55	0.0153	9.1291	9.1138
2	275.15	0.000706	0.001000	179.764	8.392	2504.57	2496.17	0.0306	9.1027	9.0721
3	276.15	0.000758	0.001000	168.014	12.604	2506.40	2493.80	0.0459	9.0765	9.0306
4	277.15	0.000814	0.001000	157.121	16.813	2508.24	2491.42	0.0611	9.0506	8.9895
5	278.15	0.000873	0.001000	147.017	21.019	2510.07	2489.05	0.0763	9.0249	8.9486
6	279.15	0.000935	0.001000	137.638	25.224	2511.91	2486.68	0.0913	8.9994	8.9081
7	280.15	0.001002	0.001000	128.928	29.426	2513.74	2484.31	0.1064	8.9742	8.8678
8	281.15	0.001073	0.001000	120.834	33.626	2515.57	2481.94	0.1213	8.9492	8.8278
9	282.15	0.001148	0.001000	113.309	37.824	2517.40	2479.58	0.1362	8.9244	8.7882
10	283.15	0.001228	0.001000	106.309	42.021	2519.23	2477.21	0.1511	8.8998	8.7488
11	284.15	0.001313	0.001000	99.793	46.216	2521.06	2474.84	0.1659	8.8755	8.7096
12	285.15	0.001403	0.001001	93.724	50.410	2522.89	2472.48	0.1806	8.8514	8.6708
13	286.15	0.001498	0.001001	88.070	54.602	2524.71	2470.11	0.1953	8.8275	8.6322
14	287.15	0.001599	0.001001	82.798	58.794	2526.54	2467.75	0.2099	8.8038	8.5939
15	288.15	0.001706	0.001001	77.881	62.984	2528.36	2465.38	0.2245	8.7804	8.5559
16	289.15	0.001819	0.001001	73.291	67.173	2530.19	2463.01	0.2390	8.7571	8.5181
17	290.15	0.001938	0.001001	69.006	71.361	2532.01	2460.65	0.2534	8.7341	8.4806
18	291.15	0.002065	0.001001	65.003	75.548	2533.83	2458.28	0.2678	8.7112	8.4434
19	292.15	0.002198	0.001002	61.261	79.734	2535.65	2455.92	0.2822	8.6886	8.4064
20	293.15	0.002339	0.001002	57.761	83.920	2537.47	2453.55	0.2965	8.6661	8.3696
21	294.15	0.002488	0.001002	54.487	88.105	2539.29	2451.18	0.3108	8.6439	8.3331
22	295.15	0.002645	0.001002	51.422	92.289	2541.10	2448.81	0.3250	8.6218	8.2969
23	296.15	0.002811	0.001003	48.552	96.473	2542.92	2446.45	0.3391	8.6000	8.2609
24	297.15	0.002986	0.001003	45.863	100.656	2544.73	2444.08	0.3532	8.5783	8.2251
25	298.15	0.003170	0.001003	43.341	104.838	2546.54	2441.71	0.3673	8.5568	8.1895
26	299.15	0.003364	0.001003	40.977	109.021	2548.35	2439.33	0.3813	8.5355	8.1542
27	300.15	0.003568	0.001004	38.758	113.202	2550.16	2436.96	0.3952	8.5144	8.1192
28	301.15	0.003783	0.001004	36.675	117.384	2551.97	2434.59	0.4091	8.4934	8.0843
29	302.15	0.004009	0.001004	34.719	121.565	2553.78	2432.21	0.4230	8.4727	8.0497
30	303.15	0.004247	0.001004	32.882	125.745	2555.58	2429.84	0.4368	8.4521	8.0153
31	304.15	0.004497	0.001005	31.154	129.926	2557.39	2427.46	0.4506	8.4317	7.9812
32	305.15	0.004759	0.001005	29.529	134.106	2559.19	2425.08	0.4643	8.4115	7.9472
33	306.15	0.005035	0.001005	28.001	138.286	2560.99	2422.70	0.4780	8.3914	7.9135
34	307.15	0.005325	0.001006	26.562	142.465	2562.79	2420.32	0.4916	8.3715	7.8800
35	308.15	0.005629	0.001006	25.208	146.645	2564.58	2417.94	0.5052	8.3518	7.8467
36	309.15	0.005947	0.001006	23.932	150.824	2566.38	2415.56	0.5187	8.3323	7.8136
37	310.15	0.006282	0.001007	22.729	155.004	2568.17	2413.17	0.5322	8.3129	7.7807
38	311.15	0.006632	0.001007	21.595	159.183	2569.96	2410.78	0.5457	8.2936	7.7480
39	312.15	0.007000	0.001007	20.526	163.362	2571.75	2408.39	0.5591	8.2746	7.7155
40	313.15	0.007384	0.001008	19.517	167.541	2573.54	2406.00	0.5724	8.2557	7.6832
41	314.15	0.007787	0.001008	18.565	171.720	2575.33	2403.61	0.5858	8.2369	7.6512
42	315.15	0.008209	0.001009	17.665	175.899	2577.11	2401.21	0.5990	8.2183	7.6193
43	316.15	0.008650	0.001009	16.816	180.079	2578.89	2398.82	0.6123	8.1999	7.5876
44	317.15	0.009112	0.001009	16.013	184.258	2580.67	2396.42	0.6255	8.1816	7.5561

**Table 1 Saturation State (Temperature Table) – Continuation**  
**Sättigungszustand (Temperaturtafel) – Fortsetzung**

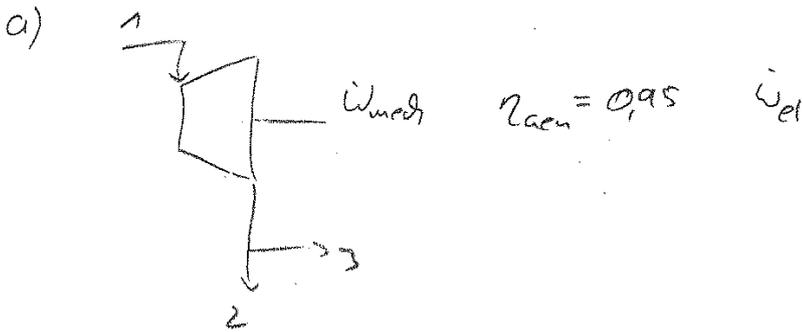
$t$ [°C]	$c_p'$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$c_p''$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$w'$ [m s <sup>-1</sup> ]	$w''$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\kappa'$	$\kappa''$	$\eta'$ [10 <sup>-6</sup> kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	$\eta''$ [10 <sup>-3</sup> W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\lambda'$ [10 <sup>-3</sup> W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\lambda''$ [10 <sup>-3</sup> W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
0	4.2199	1.8882	1402.28	408.88	3216537	1.3269	1791.78	9.22	561.02	17.07
0.01	4.2199	1.8882	1402.33	408.89	3214432	1.3269	1791.16	9.22	561.04	17.07
1	4.2165	1.8889	1407.23	409.61	3013280	1.3268	1731.09	9.24	562.92	17.12
2	4.2134	1.8895	1412.07	410.34	2824038	1.3268	1673.61	9.26	564.82	17.18
3	4.2105	1.8902	1416.82	411.07	2647765	1.3267	1619.12	9.29	566.72	17.23
4	4.2078	1.8909	1421.48	411.80	2483499	1.3266	1567.41	9.31	568.62	17.28
5	4.2054	1.8917	1426.04	412.53	2330358	1.3266	1518.29	9.34	570.52	17.34
6	4.2031	1.8924	1430.50	413.25	2187526	1.3265	1471.59	9.36	572.42	17.39
7	4.2011	1.8932	1434.87	413.97	2054253	1.3264	1427.15	9.39	574.32	17.45
8	4.1992	1.8940	1439.14	414.69	1929848	1.3264	1384.83	9.41	576.22	17.51
9	4.1974	1.8949	1443.31	415.41	1813675	1.3263	1344.48	9.44	578.11	17.56
10	4.1958	1.8957	1447.40	416.13	1705144	1.3262	1305.98	9.46	580.00	17.62
11	4.1943	1.8966	1451.39	416.84	1603713	1.3262	1269.23	9.49	581.88	17.68
12	4.1930	1.8975	1455.28	417.55	1508880	1.3261	1234.11	9.51	583.75	17.74
13	4.1917	1.8985	1459.09	418.26	1420182	1.3260	1200.53	9.54	585.62	17.80
14	4.1905	1.8994	1462.81	418.97	1337189	1.3259	1168.39	9.57	587.48	17.86
15	4.1894	1.9004	1466.43	419.68	1259505	1.3258	1137.62	9.59	589.33	17.92
16	4.1884	1.9014	1469.97	420.38	1186763	1.3257	1108.13	9.62	591.17	17.98
17	4.1875	1.9025	1473.42	421.08	1118624	1.3257	1079.85	9.65	593.00	18.04
18	4.1866	1.9035	1476.79	421.79	1054772	1.3256	1052.72	9.67	594.82	18.10
19	4.1858	1.9046	1480.07	422.48	994916	1.3255	1026.67	9.70	596.62	18.16
20	4.1851	1.9057	1483.26	423.18	938785	1.3254	1001.65	9.73	598.42	18.23
21	4.1844	1.9069	1486.37	423.88	886129	1.3253	977.59	9.75	600.19	18.29
22	4.1838	1.9080	1489.41	424.57	836714	1.3252	954.46	9.78	601.96	18.35
23	4.1832	1.9092	1492.35	425.26	790326	1.3251	932.19	9.81	603.70	18.42
24	4.1827	1.9104	1495.22	425.95	746762	1.3250	910.76	9.84	605.44	18.48
25	4.1822	1.9116	1498.02	426.63	705837	1.3249	890.11	9.87	607.15	18.55
26	4.1817	1.9129	1500.73	427.32	667378	1.3248	870.20	9.90	608.85	18.62
27	4.1813	1.9141	1503.37	428.00	631223	1.3247	851.01	9.92	610.53	18.68
28	4.1809	1.9154	1505.93	428.68	597223	1.3246	832.49	9.95	612.19	18.75
29	4.1806	1.9167	1508.41	429.36	565239	1.3245	814.62	9.98	613.84	18.82
30	4.1803	1.9180	1510.83	430.04	535140	1.3244	797.35	10.01	615.46	18.89
31	4.1800	1.9194	1513.17	430.72	506807	1.3243	780.68	10.04	617.07	18.96
32	4.1798	1.9207	1515.44	431.39	480127	1.3242	764.56	10.07	618.65	19.02
33	4.1795	1.9221	1517.64	432.06	454995	1.3241	748.98	10.10	620.22	19.09
34	4.1794	1.9235	1519.77	432.73	431314	1.3240	733.90	10.13	621.76	19.16
35	4.1792	1.9249	1521.83	433.40	408992	1.3239	719.31	10.16	623.29	19.24
36	4.1791	1.9263	1523.83	434.07	387945	1.3238	705.19	10.19	624.79	19.31
37	4.1790	1.9278	1525.75	434.73	368094	1.3237	691.52	10.22	626.27	19.38
38	4.1789	1.9292	1527.62	435.40	349364	1.3235	678.26	10.25	627.74	19.45
39	4.1788	1.9307	1529.41	436.06	331687	1.3234	665.42	10.28	629.17	19.52
40	4.1788	1.9322	1531.15	436.72	314999	1.3233	652.97	10.31	630.59	19.60
41	4.1788	1.9337	1532.82	437.37	299238	1.3232	640.90	10.34	631.99	19.67
42	4.1788	1.9353	1534.43	438.03	284350	1.3231	629.18	10.37	633.36	19.75
43	4.1788	1.9368	1535.98	438.68	270281	1.3230	617.81	10.40	634.72	19.82
44	4.1789	1.9384	1537.47	439.33	256982	1.3229				

**Table 1 Saturation State (Temperature Table)**  
**Sättigungszustand (Temperaturtafel)**

$t$ [°C]	$T$ [K]	$p_s$ [MPa]	$v'$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$v''$ [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	$h'$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$h''$ [kJ kg <sup>-1</sup> ]	$\Delta h_v$	$s'$	$s''$ [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\Delta s_v$
0	273.15	0.000611	0.001000	206.140	-0.042	2500.89	2500.93	-0.0002	9.1558	9.1559
0.01	273.16	0.000612	0.001000	205.997	0.001	2500.91	2500.91	0.0000	9.1555	9.1555
1	274.15	0.000657	0.001000	192.445	4.177	2502.73	2498.55	0.0153	9.1291	9.1138
2	275.15	0.000706	0.001000	179.764	8.392	2504.57	2496.17	0.0306	9.1027	9.0721
3	276.15	0.000758	0.001000	168.014	12.604	2506.40	2493.80	0.0459	9.0765	9.0306
4	277.15	0.000814	0.001000	157.121	16.813	2508.24	2491.42	0.0611	9.0506	8.9895
5	278.15	0.000873	0.001000	147.017	21.019	2510.07	2489.05	0.0763	9.0249	8.9486
6	279.15	0.000935	0.001000	137.638	25.224	2511.91	2486.68	0.0913	8.9994	8.9081
7	280.15	0.001002	0.001000	128.928	29.426	2513.74	2484.31	0.1064	8.9742	8.8678
8	281.15	0.001073	0.001000	120.834	33.626	2515.57	2481.94	0.1213	8.9492	8.8278
9	282.15	0.001148	0.001000	113.309	37.824	2517.40	2479.58	0.1362	8.9244	8.7882
10	283.15	0.001228	0.001000	106.309	42.021	2519.23	2477.21	0.1511	8.8998	8.7488
11	284.15	0.001313	0.001000	99.793	46.216	2521.06	2474.84	0.1659	8.8755	8.7096
12	285.15	0.001403	0.001001	93.724	50.410	2522.89	2472.48	0.1806	8.8514	8.6708
13	286.15	0.001498	0.001001	88.070	54.602	2524.71	2470.11	0.1953	8.8275	8.6322
14	287.15	0.001599	0.001001	82.798	58.794	2526.54	2467.75	0.2099	8.8038	8.5939
15	288.15	0.001706	0.001001	77.881	62.984	2528.36	2465.38	0.2245	8.7804	8.5559
16	289.15	0.001819	0.001001	73.291	67.173	2530.19	2463.01	0.2390	8.7571	8.5181
17	290.15	0.001938	0.001001	69.006	71.361	2532.01	2460.65	0.2534	8.7341	8.4806
18	291.15	0.002065	0.001001	65.003	75.548	2533.83	2458.28	0.2678	8.7112	8.4434
19	292.15	0.002198	0.001002	61.261	79.734	2535.65	2455.92	0.2822	8.6886	8.4064
20	293.15	0.002339	0.001002	57.761	83.920	2537.47	2453.55	0.2965	8.6661	8.3696
21	294.15	0.002488	0.001002	54.487	88.105	2539.29	2451.18	0.3108	8.6439	8.3331
22	295.15	0.002645	0.001002	51.422	92.289	2541.10	2448.81	0.3250	8.6218	8.2969
23	296.15	0.002811	0.001003	48.552	96.473	2542.92	2446.45	0.3391	8.6000	8.2609
24	297.15	0.002986	0.001003	45.863	100.656	2544.73	2444.08	0.3532	8.5783	8.2251
25	298.15	0.003170	0.001003	43.341	104.838	2546.54	2441.71	0.3673	8.5568	8.1895
26	299.15	0.003364	0.001003	40.977	109.021	2548.35	2439.33	0.3813	8.5355	8.1542
27	300.15	0.003568	0.001004	38.758	113.202	2550.16	2436.96	0.3952	8.5144	8.1192
28	301.15	0.003783	0.001004	36.675	117.384	2551.97	2434.59	0.4091	8.4934	8.0843
29	302.15	0.004009	0.001004	34.719	121.565	2553.78	2432.21	0.4230	8.4727	8.0497
30	303.15	0.004247	0.001004	32.882	125.745	2555.58	2429.84	0.4368	8.4521	8.0153
31	304.15	0.004497	0.001005	31.154	129.926	2557.39	2427.46	0.4506	8.4317	7.9812
32	305.15	0.004759	0.001005	29.529	134.106	2559.19	2425.08	0.4643	8.4115	7.9472
33	306.15	0.005035	0.001005	28.001	138.286	2560.99	2422.70	0.4780	8.3914	7.9135
34	307.15	0.005325	0.001006	26.562	142.465	2562.79	2420.32	0.4916	8.3715	7.8800
35	308.15	0.005629	0.001006	25.208	146.645	2564.58	2417.94	0.5052	8.3518	7.8467
36	309.15	0.005947	0.001006	23.932	150.824	2566.38	2415.56	0.5187	8.3323	7.8136
37	310.15	0.006282	0.001007	22.729	155.004	2568.17	2413.17	0.5322	8.3129	7.7807
38	311.15	0.006632	0.001007	21.595	159.183	2569.96	2410.78	0.5457	8.2936	7.7480
39	312.15	0.007000	0.001007	20.526	163.362	2571.75	2408.39	0.5591	8.2746	7.7155
40	313.15	0.007384	0.001008	19.517	167.541	2573.54	2406.00	0.5724	8.2557	7.6832
41	314.15	0.007787	0.001008	18.565	171.720	2575.33	2403.61	0.5858	8.2369	7.6512
42	315.15	0.008209	0.001009	17.665	175.899	2577.11	2401.21	0.5990	8.2183	7.6193
43	316.15	0.008650	0.001009	16.816	180.079	2578.89	2398.82	0.6123	8.1999	7.5876
44	317.15	0.009112	0.001009	16.013	184.258	2580.67	2396.42	0.6255	8.1816	7.5561

# Thermodynamische Analyse

(1)



aus Tabelle

$$h_1 = h(190 \text{ bar}, 530^\circ\text{C}) = 3348,32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$h_2 = h(45 \text{ bar}, 320^\circ\text{C}) = 3001,52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{el, HDT} = -70 \text{ MW}$$

$$\dot{W}_{mech, HDT} = \frac{-70 \text{ MW}}{0,9589} = -73 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{W}_{mech, HDT}}{(h_2 - h_1)} = \frac{-73.000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{(3001,52 - 3348,32) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 210,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

b)

$$\dot{W}_{el, DT} = \eta_{gen} \left[ (\dot{H}_2 + \dot{H}_3 - \dot{H}_1) + (\dot{H}_5 + \dot{H}_6 - \dot{H}_4) + (\dot{H}_7 + \dot{H}_8 + \dot{H}_9 - \dot{H}_c) \right]$$

**(3P)**

c)

$$\Delta h_{ND} \gg \Delta h_{HD}$$

$$\dot{m}_{ND} < \dot{m}_{HD}$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{ND} > \dot{W}_{HD}$$

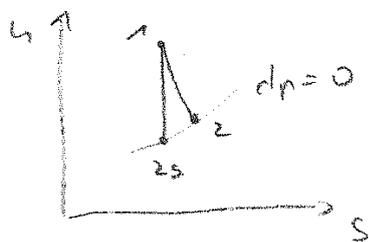
**(3P)**

→ Enthalpiedifferenz in ND-Turbine deutlich größer als in HDT  
↳ siehe  $h,s$ -Diagramm

→ Massenstrom in ND zwar kleiner, wegen Anzapfungen

⇒ In Summe aber Leistung ND deutlich größer

$$d) \eta_{s, \text{HDT}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} \quad (2)$$



Punkt 2<sub>s</sub>:

$$p_{2s} = p_2 \quad \text{und} \quad s_{2s} = s_1$$

$$h_{2,s} = h(45 \text{ bar}; 6,3006 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}) \quad (1)$$

aus Tabelle:  $h_a = 2944,10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_a = 6,2852 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

$$h_b = 2973,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_b = 6,3358 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \quad (2P)$$

Interpolieren (FS 4.14)

$$h_{2,s} = (6,3006 - 6,2852) \cdot \frac{(2973,34 - 2944,10)}{(6,3358 - 6,2852)} + 2944,10$$

$$\approx 2953 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$\eta_{s, \text{HDT}} = \frac{3348,32 - 3001,52}{3348,32 - 2953,00} = 87,73\% \quad (1)$$

$$e) \dot{E}_1^{\text{TOT}} = \dot{E}_1^{\text{PH}} + \dot{E}_1^{\text{CH}}$$

$$\dot{E}_1^{\text{PH}} = \dot{m}_1 [(h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)] \quad (1)$$

$$= 210,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[ (3348,32 - 84,01) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 293,154 (6,3006 - 0,2865) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$$

$$\approx 316,64 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{E}_1^{\text{CH}} = \dot{m}_1 e_1^{\text{CH}} \quad \text{mit} \quad \dot{m}_1 = \frac{\dot{m}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{210,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{18,0152 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 11,6846 \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$$

$$\dot{E}_1^{CH} = \frac{210,5 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{18,0152 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

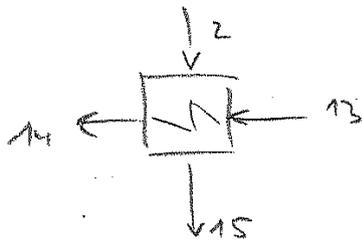
$$45 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \quad (1)$$

(3)

$$= 0,526 \text{ MW} \quad (1)$$

$$\dot{E}_1^{\text{TOT}} = (316,64 + 0,526) \text{ MW} = 317,17 \text{ MW} \quad (1)$$

f) Energiebilanz Komponente A



$$\dot{H}_{13} + \dot{H}_2 = \dot{H}_{14} + \dot{H}_{15} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14}) = \dot{m}_2(h_{15} - h_2)$$

Massenbilanz global:  $\dot{m}_{13} = \dot{m}_1 \quad (1)$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \frac{(h_{13} - h_{14})}{(h_{15} - h_2)}$$

$h_2$  aus Aufgabenteil a)  
 $h_2 = 3001,52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

aus Tabelle:  $h_{13} = h(250 \text{ bar}, 200^\circ\text{C}) = 862,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$

↳ keine Druckverluste:  $p_{13} = p_{14} = 250 \text{ bar}$

$$h_{14} = h(250 \text{ bar}, 250^\circ\text{C}) = 1087,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$h_{15} = h'(45 \text{ bar}) = 1122,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

↳ vollständig kondensiert und

$p_2 = p_{15}$ ; keine Druckverluste

$$\dot{m}_2 = 210,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( \frac{862,73 - 1087,33}{1122,14 - 3001,52} \right) = 25,156 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

3) DE = Economizer } und Zwischenüberhitzer } (4)  
 Verdampfer } (14 → 1)  
 Überhitzer } (3 → 4) (1)

$$\dot{Q}_{DE} = \dot{m}_1 (h_1 - h_{14}) + \dot{m}_3 (h_4 - h_3) \quad (1)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (1P)$$

$$= 210,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 25,156 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

mit Quereinström:

$$190,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= 185,344 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1P)$$

$h_{14}$  aus f)

$$h_3 = h_2 \quad (1P)$$

$$h_4 = h(45 \text{ bar}; 530^\circ\text{C}) = 3509,40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1P)$$

$$\dot{Q}_{DE} = 210,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( 3348,32 - 1087,33 \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} +$$

$$+ 185,344 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( 3509,40 - 3001,52 \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 475,938 \text{ MW} + 94,133 \text{ MW}$$

$$\approx 570,07 \text{ MW} \quad (1)$$

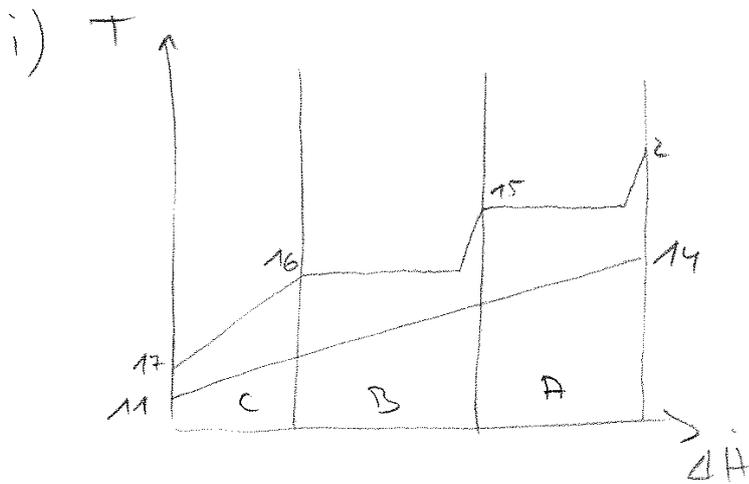
mit Quereinström  $\dot{m}_2 = 20 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

$$\dot{Q}_{DE} \approx 572,69 \text{ MW}$$

$$h) \epsilon_{ABC} = \frac{\dot{E}_{14} - \dot{E}_{11}}{(\dot{E}_2 + \dot{E}_5) - \dot{E}_{17}} \quad (2) \quad (5)$$

$$\dot{E}_L = 0 \quad (4)$$

$$\dot{E}_0 = \dot{E}_2 + \dot{E}_5 + \dot{E}_{11} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{17} \quad (1)$$



Bedrillig (1)

Te wü (1)

(24)

j) nur ET 1:

$$T_0 = 20^\circ\text{C} \quad p_0 = 1 \text{ bar}$$

aus VDT (IAPWS97)

$$p_s(20^\circ\text{C}) = 0,002339 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$x_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_0 \stackrel{?}{\geq} p_{s,\text{H}_2\text{O}}(T_0)$$

$$0,095 \cdot 0,1 \text{ MPa} = 0,0095 \text{ MPa} > 0,002339 \text{ MPa} \quad (1)$$

→ Kondensation!

$$p_{s, H_2O} = \frac{x_{H_2O, g}}{x_{\text{trojan}} + x_{H_2O, g}} p_0$$

6

$$\text{mit } x_{\text{trojan}} = x_{O_2} + x_{N_2} + x_{CO_2} + x_{SO_2}$$

$$x_{H_2O, g} = \frac{x_{\text{trojan}}}{\frac{p_0}{p_{s, H_2O}} - 1}$$

$$= \frac{0,75 + 0,1 + 0,03 + 0,025}{\frac{0,1 \text{ MPa}}{0,002339 \text{ MPa}} - 1}$$

$$= \frac{0,905}{42,35 - 1}$$

$$= 0,021675 \quad (1)$$

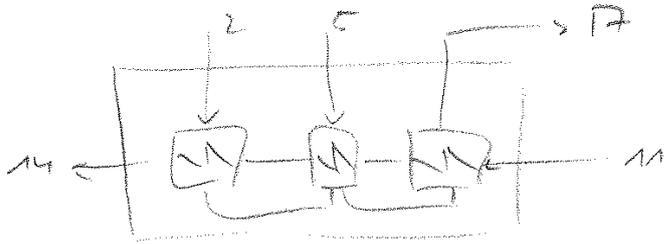
$$x_{H_2O, l} = x_{H_2O} - x_{H_2O, g}$$

$$= 0,095 - 0,021675$$

$$= 0,073325 \quad (1)$$

j) bzw k) nur ET2:

(7)



(2)

$$\dot{C}_2 + \dot{C}_5 + \dot{C}_{11} + \dot{I}_{ABC} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{17}$$

$$C_{17} = \frac{\dot{C}_2 + \dot{C}_5}{\dot{E}_2 + \dot{E}_5} \quad (1)$$

$$\dot{C}_{14} = \dot{C}_2 + \dot{C}_5 + \dot{C}_{11} - C_{17} + \dot{I}_{ABC}$$

$$C_{14} = \dot{C}_2 + \dot{C}_5 + C_{11} - \left( \frac{\dot{C}_2 + \dot{C}_5}{\dot{E}_2 + \dot{E}_5} \right) \dot{E}_{17} + \dot{I}_{ABC}$$

(1)

$\dot{E}_{14}$

**15. Wirtschaftlichkeitsanalyse ..... 30 Punkte**

Ein Heizkraftwerk für die Fernwärmeversorgung eines Stadtquartiers wird bisher mit Öl gefeuert. Der Betreiber möchte auf Holzpellets als Brennstoff umsteigen. Hierzu sind Umbauten am Dampferzeuger notwendig. Das Kraftwerk steht während der Umrüstung vom 1. Oktober 2020 bis zum 31. Dezember 2020 still. In diesem Zeitraum fallen keine Erträge und Kosten an. Durch den Stillstand werden im Jahr der Umrüstung nur  $3/4$  der sonst benötigten Heizölmenge verbraucht und auch nur  $3/4$  der sonst üblichen Energiemenge (elektrisch und thermisch) verkauft. Für den Einkauf der Holzpellets stehen dem Betreiber zwei Möglichkeiten zu Verfügung:

- 1. Monatliche Beschaffung am freien Markt:** Bei dieser Alternative werden Holzpellets zu den jeweils gültigen Preisen mit einem Vorlauf von zwei Monaten am freien Markt beschafft. Es wird eine jährliche Kostensteigerung von  $r_{H,var} = 2,5\%/a$  und ein durchschnittlicher Jahrespreis von  $230\text{ €/t}$  erwartet. Bei dieser Beschaffungsform rechnet der Betreiber zusätzlich mit konstanten monatlichen Kosten von  $1100\text{ €/Monat}$  für den erhöhten Personalaufwand.
- 2. Fester Liefervertrag:** Es wird ein fester Rahmenvertrag mit einem Lieferanten über ein Jahr mit einem Festpreis von  $245\text{ €/t}$  vereinbart. Hier wird eine jährliche Kostensteigerung auf den neuen Festpreis von  $r_{H,fix} = 3\%/a$  erwartet.

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 gegebene Werte**

- Die Erlöse werden jeweils am Ende eines Jahres gezahlt und wachsen jährlich mit der Kostensteigerungsrate  $r_{n,allg} = 1,2\%$ .
- Die Betriebs- und Wartungskosten werden jeweils zum Ende eines Jahres fällig und steigen jährlich mit der Kostensteigerungsrate  $r_{n,allg} = 1,2\%$ . Die Betriebs- und Wartungskosten sind unabhängig von der eingesetzten Brennstoffart.
- Alle Brennstoffkosten sind jeweils zum Ende eines Jahres fällig.
- Die Zahlung der Investitions- und Umrüstkosten erfolgt erst zum 1. Januar 2021.
- Die Brennstoffkosten der Zahlungsreihe  $FC_{\text{Öl}}$  unterliegen der Kostensteigerungsrate  $r_{\text{Öl}} = 2,8\%/a$ .
- Die Heizölkosten sowie die Erlöse reduzieren sich im Jahr der Umrüstung um  $1/4$  des jeweiligen Wertes ohne Umrüstung. Die Zahlungen finden zu den gleichen Zeitpunkten statt.
- Die monatlichen Kosten für den erhöhten Personalaufwand der Beschaffung am freien Markt unterliegen keiner Kostensteigerung.

**Aufgaben**

- (3 Punkte)** Bestimmen Sie den notwendigen Bedarf an Holzpellets in t/a [ $3500\text{ t/a}$ ] und Heizöl in MWh/a [ $15\,500\text{ MWh/a}$ ].
- (11 Punkte)** Welche Beschaffungsvariante der Holzpellets ist nach der Umrüstung günstiger? Berechnen Sie hierzu die jährliche Annuität der jeweiligen Beschaffungsstrategie für die Nutzungsdauer von 10 Jahren. Begründen Sie kurz Ihre Antwort.
- (16 Punkte)** Berechnen Sie, wie hoch die Umrüstungskosten auf Holzpellets als Brennstoff maximal sein können, damit sich diese gegenüber Heizöl lohnt. Gehen Sie dabei davon aus, dass nach Umrüstung der Festvertrag für die Holzpellet-Beschaffung gewählt wird. Bezugszeitpunkt ist der 1. Januar 2021.  
Hinweis: Berücksichtigen Sie auch die hierfür relevanten Kostenpositionen im Jahr der Umrüstung.  
Beantworten Sie dabei folgende Fragen: Welche Kostenposition ist in der Berechnung nicht zu berücksichtigen? Begründen Sie kurz. Welche Schlussfolgerungen lassen sich für die Investition aus dem Ergebnis ableiten?

**Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich alle Kostenangaben  
auf den *Planungszeitpunkt*.**

<b>Projektdaten</b>	
Bezugszeitpunkt	1. Januar 2021
Inbetriebnahme nach Umrüstung	1. Januar 2021
Bauzeit des Kraftwerks	1. Okt. – 31. Dez. 2020
Zahlungszeitpunkt der Investitions- und Umrüstkosten	1. Januar 2021
Wirtschaftliche Nutzungsdauer ab Inbetriebnahme nach Umrüstung, $n$	10 a
Elektrische Nettoleistung des Heizkraftwerks, $\dot{W}_{el}$	1 MW <sub>el</sub>
Äquivalente Jahresvollbenutzungsstunden, $t_v$	3500 h/a
Elektrischer Wirkungsgrad, $\eta_{el}$	24 %
Restwert am Ende der Nutzungsdauer, $R$	0 €
Jährliche Betriebs- und Wartungskosten für 2020, $OMC_{2020}$	90.000 €/a
Preis Heizöl für 2019, $fc_{Öl,2019}$	75,33 €/MWh
Jährliche Kostensteigerungsrate der Brennstoffkosten Heizöl, $r_{Öl}$	2,8 %/a
Preis Holzpellets am freien Markt für 2020, $fc_{H,var,2020}$	230 €/t
Jährliche Kostensteigerungsrate Brennstoffkosten Holzpellets bei Marktpreisen $r_{H,var}$ .	2,5 %/a
Konstante monatliche Zusatzkosten bei Beschaffung zu Marktpreisen, $Z_{FC,H,var}$	1100 €/Monat
Preis Holzpellets zum Festpreis für 2020, $fc_{H,fix,2020}$	245 €/t
Jährliche Kostensteigerungsrate Brennstoffkosten Holzpellets bei Festpreis, $r_{H,fix}$	3 %/a
Durchschnittlicher Heizwert für Holzpellets, $H_{i,H}$	4,90 kWh/kg
Jährliche allgemeine Kostensteigerungsrate, $r_{n,allg}$	1,2 %/a
Jährlicher effektiver Zinssatz, $i_{eff}$	4,5 %/a
Erträge für das Jahr 2019, $E_{2019}$	2 900 000 €/a <sub>2019</sub>

**Musterlösung**

Werte in Klammern sind die Ergebnisse bei Quereinstieg

**Aufgabe a (3 Punkte)**

*Jährlicher Bedarf an Holzpellets (2 Punkte)*

$$m_H = Q_{ges}/H_{i,H} \text{ mit } Q_{ges} = \tau \cdot \frac{W'_{el}}{\eta_{el}} = 14.583 \text{ MWh/a} \quad 2 \text{ Punkt}$$

$$m_H = 2.976 \text{ t/a} \quad 1 \text{ Punkt}$$

*Jährlicher Bedarf an Heizöl in MWh/a (1 Punkt)*

$$Q_{\dot{o}l} = Q_{ges} = 14.583 \text{ MWh/a}$$

**Aufgabe b (11 Punkte)**

geg.: Zeitraum 10a

*Jährliche Annuität Brennstoffkosten Holzpellets bei Marktpreisen (6 Punkte)*

$$\text{Annuität der Zusatzkosten: } A_{Zusatz,H,var} = 12 \cdot Z_{FC,H,var} = 13.200 \text{ €/a} \quad 1 \text{ Punkt}$$

Annuität der Brennstoffkosten:

$$A_{FC,H,var} = FC_{H,var,2020} \cdot CELF_{H,var}^{10}$$

$$FC_{H,var,2020} = m_H \cdot f_{c_{H,var,2020}} = 684.524 \text{ € (805.000 €)} \quad 1 \text{ Punkt}$$

$$CELF_{H,var}^{10} = \frac{k(1-k^6)}{(1-k)} \cdot CRF_{10} = 1,1384 \quad 1 \text{ Punkt}$$

$$\text{mit } k = \frac{(1+r_{H,var})}{(1+i_{eff})} = 0,9809 \text{ und } CRF_{10} = \frac{i_{eff}(1+i_{eff})^6}{(1+i_{eff})^6 - 1} = 0,12638 \frac{1}{a} \quad 1 \text{ Punkt}$$

$$A_{FC,H,var} = 2.976 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 230 \frac{\text{€}}{\text{t}} \cdot 1,1384 = 779.262 \frac{\text{€}}{\text{a}} \text{ (916.412 } \frac{\text{€}}{\text{a}}) \quad 1 \text{ Punkt}$$

$$A_{FC,H,var,ges} = A_{FC,H,var} + A_{Zusatz,H,var} = \mathbf{792.462} \frac{\text{€}}{\text{a}} \text{ (929.612 } \frac{\text{€}}{\text{a}}) \quad 1 \text{ Punkt}$$

*Jährliche Annuität Brennstoffkosten Holzpellets bei Festpreis (3 Punkte)*

(2 Punkte)

$$FC_{H,gix,2020} = m_H \cdot f_{c_{H,fix}} = 729.166,67 \text{ € (857.500 €)}$$

$$A_{FC,H,fix} = FC_{H,fix,2020} \cdot CELF_{H,fix}^{10} = \mathbf{851.594} \frac{\text{€}}{\text{a}} \text{ (1.001.474 } \frac{\text{€}}{\text{a}}) \quad 2 \text{ Punkte (Formel + Ergebnis)}$$

$$\text{Mit } k = \frac{(1+r_{H,fix})}{(1+i_{eff})} = 0,9856 \text{ und } CELF_{H,fix}^{10} = 1,1679 \quad 1 \text{ Punkt}$$

**Die Beschaffung am freien Markt ist kostengünstiger da, hier die geringeren jährlichen Kosten anfallen.**

(1 Punkt für Antwort + 1 Punkt für richtiges Gesamtergebnis)

**Aufgabe c (16 Punkte)**

Betriebs- und Wartungskosten sind mit und ohne Umrüstung identisch und haben somit keinen Einfluss auf die Kalkulation. 1 Punkt

*Kostenersparnis durch Brennstoff Holzpellets (8 Punkte)*

Berechnung des Gegenwartswerts Brennstoffkosten für Heizöl zum 01.12.2021

$$A_{FC} = CRF_{10} \cdot P_{FC} \text{ und } CELF^{10} = \frac{A_{FC}}{FC_{2020}} = \frac{k(1-k^{10})}{1-k} \cdot CRF_{10}$$

$$P_{FC,2021} = \frac{CEL F^{10} \cdot FC_{\dot{O}l,2020}}{CRF_{10}} = \frac{\frac{k(1-k^n)}{1-k} \cdot CRF_{10} \cdot FC_{\dot{O}l,2020}}{CRF_{10}} = \frac{k(1-k^n)}{1-k} \cdot FC_{\dot{O}l,2020}$$

$$P_{FC,\dot{O}l,2021} = \frac{k_{\dot{O}l}(1-k_{\dot{O}l}^{10})}{1-k_{\dot{O}l}} \cdot FC_{\dot{O}l,2020} \quad 1 \text{ Punkt für Formel} + 2 \text{ Punkte richtige Herleitung}$$

$$FC_{\dot{O}l,2020} = Q_{\dot{O}l} \cdot fc_{\dot{O}l,2019} \cdot (1 + r_{\dot{O}l}) = 1.129.316 \text{ €} \quad 1 \text{ Punkt}$$

$$P_{FC,\dot{O}l,2021} = \frac{0,9837 \cdot (1-0,9837^{10})}{1-0,9837} \cdot 1.129.316 \text{ €} = 10.328.656 \text{ €} (10.977.886 \text{ €}) \quad 1 \text{ Punkt}$$

Berechnung des Gegenwartswerts Brennstoffkosten für Holzpellets zum 31.12.2021 für den Festpreis

$$P_{FC,H,fix,2021} = \frac{k_{\dot{O}H,fix}(1-k_{\dot{O}H,fix}^{10})}{1-k_{\dot{O}H,fix}} \cdot FC_{H,fix,2020} = \frac{0,9856 \cdot (1-0,9856^{10})}{1-0,9856} \cdot 729.167 \text{ €} = 6.738.414 \text{ €} (7.924.371 \text{ €})$$

2 Punkte (Formel + Ergebnis)

Berechnung des Gegenwartswertes der Kostenersparnis für 01.01.2021

$$P_{FC,Ersparnis,2021} = P_{FC,\dot{O}l,2021} - P_{FC,H,fix,2021} = 3.590.243 \text{ €} (3.053.515 \text{ €}) \quad (1 \text{ Punkt})$$

Berechnung des Gegenwartswertes des entgangenen Ertrags während der Umbauphase (4 Punkte)

$$E_{2020} = E_{2019} \cdot (1 + r_{n,allg}) = 2.900.00 \text{ €} \cdot (1 + 0,012) = 2.934.800 \text{ €}$$

$$E_{ent.,2020} = E_{2020} \cdot \frac{1}{4} = 733.700 \text{ €} \quad 1 \text{ Punkt}$$

Kostenersparnis durch nicht eingesetzten Brennstoff während der Umbauphase

$$FC_{\dot{O}l,Einsparung,2020} = Q_{\dot{O}l} \cdot fc_{\dot{O}l,2020} \cdot \frac{1}{4} = 282.329 \text{ €} (300.075 \text{ €}) \quad 1 \text{ Punkt}$$

Bereinigte entgangene Gewinne

$$E_{ent.,b,2020} = E_{ent.,2020} - FC_{\dot{O}l,Einsparung,2020} = 451.371 \text{ €} (433.625 \text{ €}) \quad 1 \text{ Punkt}$$

Gegenwartswert entgangene Gewinne für 2021

$$P_{E,ent.,b,2021} = E_{ent.,b,2020} (1 + i_{eff}) = 471.683 \text{ €} (453.138 \text{ €}) \quad 1 \text{ Punkt}$$

Maximal zulässige Umrüstkosten

$$C_{I,max} = P_{FC,Ersparnis,2021} - P_{E,ent.,2021} = 3.118.560 \text{ €} (2.600.378 \text{ €}) \quad 1 \text{ Punkt}$$

**Eine Umrüstung ist dann wirtschaftlich, solange deren Kosten unter den maximalen Umrüstkosten von = 3.118.560 € liegen.** 1 Punkt

+ 1 Punkt für richtiges Gesamtergebnis

**16. Wärmeübertragernetzwerke ..... 30 Punkte**

Die folgenden sieben Stoffströme sollen zu einem Wärmeübertragernetzwerk verbunden werden.

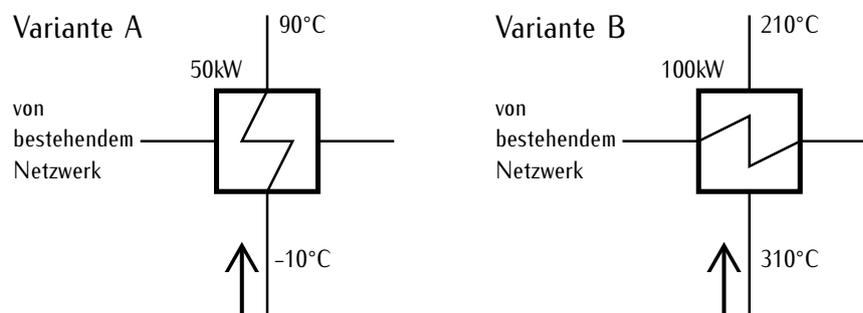
Nr.	$T_{\text{ein}}$ [°C]	$T_{\text{aus}}$ [°C]	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	$\dot{m}\Delta h^{LV}$ [kW]
1	240	340	2	-
2	310	60	1	-
3	310	260	2	-
4	90	90	-	200
5	160	160	-	100
6	190	190	-	150
7	240	240	-	50

- Die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung liegt bei  $\Delta T_{\text{min}} = 20 \text{ K}$ .
- Die Ströme 4, 6 und 7 sollen bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung verdampft werden.
- Strom 5 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 Pinchttemperaturen für das Wärmeübertragernetzwerk rechnerisch. Verwenden Sie dafür die Tabelle.
- (b) **(8 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)** Zur Integration in das Wärmeübertragernetzwerk stehen zwei verschiedene Prozesse zur Auswahl. Charakterisiert durch die angegebenen Wärmeübertrager.



Treffen Sie Aussagen zum Verhalten des minimalen externen Kühlbedarfs  $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$  und des minimalen externen Heizbedarfs  $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$ . Welche Variante sollte bevorzugt werden? Zeichnen Sie in Ihr Wärmestromprofil die Änderungen ein, die sich durch die zusätzliche Integration der von Ihnen bevorzugten Variante ergeben.

Hinweis: Kennzeichnen Sie für die Integration den Verlauf eindeutig.

- (d) **(6 Punkte)** Ergänzen Sie den Entwurf für ein System mit maximaler Energierückgewinnung (MER-System), welches keine Pinch-Regel verletzt, unter der Annahme, dass beide in Aufgabenteil c) angebotenen Varianten integriert werden. 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]
	350			0	-200
I		2	100		
	300			100	-100
II		-1	-50		
	250			50	-150
III		/	50		
	250			100	-100
IV		-1	-50		
	200			50	-150
V		/	150		
	200			200	0
VI		-1	-50		
	150			150	-50
VII		/	-100		
	150			50	-150
VIII		-1	-50		
	100			0	-200
IX		/	200		
	100			200	0
X		-1	-50		
	50			150	-50
	(1)		(5)	(1)	(1)

(1)  $\dot{Q}_{HU, \min} = 200 \text{ kW}$

(1)  $\dot{Q}_{CU, \min} = 50 \text{ kW}$

$T_{P,1}^* = 200^\circ\text{C}$   $T_{P,1} = 190/210^\circ\text{C}$

$T_{P,2}^* = 100^\circ\text{C}$   $T_{P,2} = 90/110^\circ\text{C}$

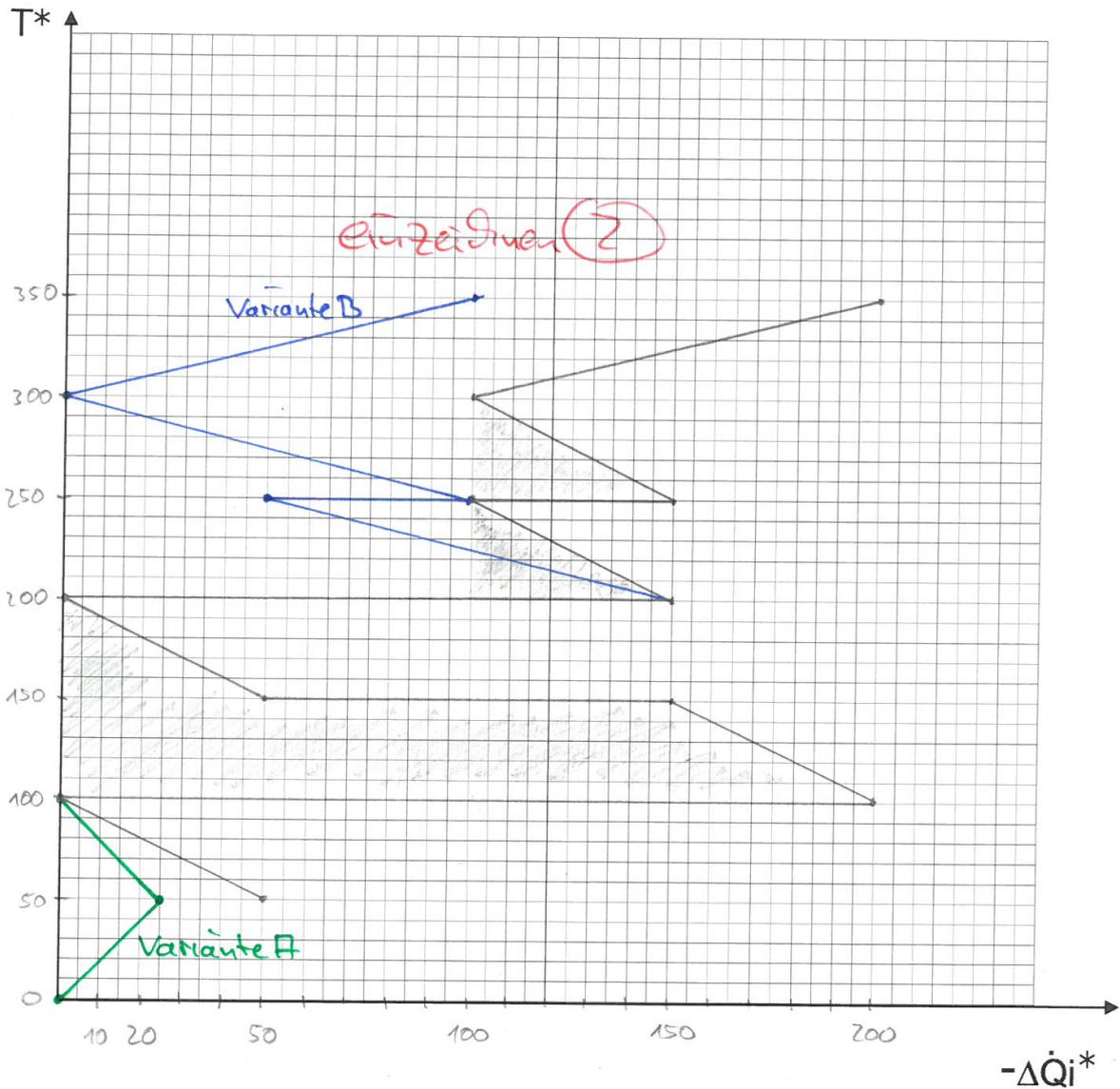
(1)  $\Sigma II$

0,5 pro ZÄ (5)

Lösnerückgewinn (1)

$T_{HU, \min}^* = 350^\circ\text{C} \rightarrow T_{HU, \min} = 360^\circ\text{C}$  (1)

$T_{CU, \max}^* = 50^\circ\text{C} \rightarrow T_{CU, \max} = 40^\circ\text{C}$  (1)

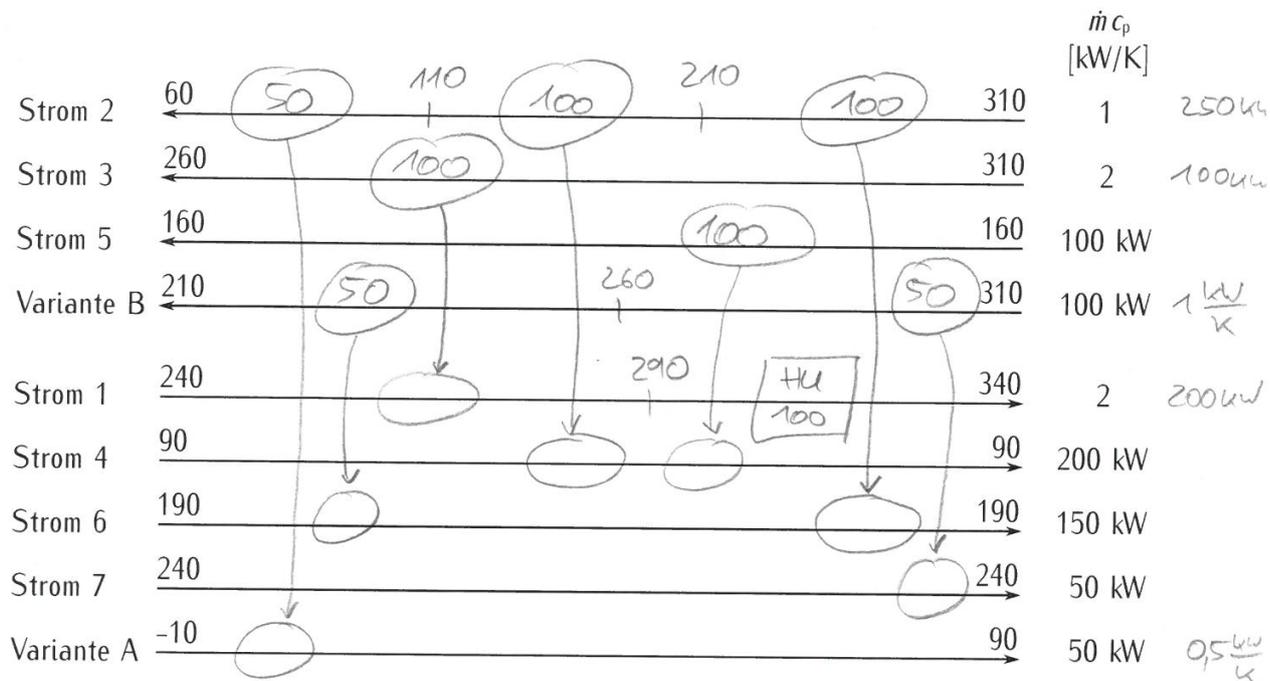


Variante B (100kW / 310 → 210°C)

$\dot{Q}_{HU, \min}$  sinkt von 200 auf 100kW (1)

(1) Variante A (50kW / -10 → 90°C)  
 $\dot{Q}_{CU, \min}$  sinkt von 50 auf 0kW

⇒ Variante B, da CU in Ausgangsfall bei Umgebungstemperatur und HU um 100kW sinkt, CU bei Variante A nur um 50kW



$7 \times W_{\dot{u}}$   
 $4 \times \text{Temperaturen}$   
 $1 \times HU$

$\left. \begin{array}{l} 7 \times W_{\dot{u}} \\ 4 \times \text{Temperaturen} \\ 1 \times HU \end{array} \right\} \text{ je } 0,5$

Σ 6

Stream	Temperature (K)	$\dot{m} c_p$ [kW/K]	Power [kW]
Strom 2	60 → 310	1	
Strom 3	260 → 310	2	
Strom 5	160 → 160	100	100 kW
Variante B	210 → 310	100	100 kW
Strom 1	240 → 340	2	
Strom 4	90 → 90	200	200 kW
Strom 6	190 → 190	150	150 kW
Strom 7	240 → 240	50	50 kW
Variante A	-10 → 90	50	50 kW



**H\_2018**

Teilgebiet	Thema	Punkte	
		ET I	ET II
		8 oder 9 LP	8 LP
Theorie, Fundamental	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	50	50
	Exergie (ET 1 ohne d)	18	24
	Wirtschaftlichkeit	9	
	Verbrennung I	8	8
Theorie, Rest	Energieträger	5	
	Dampfkraftwerke	12	
	Gasturbinen	13	
	KWK	6	
	Fossile Brennstoffe	4	
	Dampferzeuger		9
	Kombikraftwerke		9
	Gasreinigung		9
	Erneuerbare Energien		7
	Kernenergie		9
	Rechenteil	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	80
Exergie		45	45
a		7	7
b		5	5
c		4	4
d		10	10
e		5	5
f		4	4
g		4	4
h		6	
i			6
Wirtschaftlichkeit		30	
WÜ-Netz			30



1. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse ..... 24 Punkte

(a) (6 Punkte) Beantworten Sie die Multiple-Choice Fragen.

Der Wert der spezifischen physikalischen Exergie eines Systems ändert sich ...

- bei einer Änderung der Masse des Systems.
- bei einer Änderung der Temperatur der thermodynamischen Umgebung.
- bei einer Änderung der Zusammensetzung der thermodynamischen Umgebung.

Stellen Sie sich eine Zustandsänderung vor für die gilt  $\dot{S}_{gen} = 0$ . Was ist richtig?

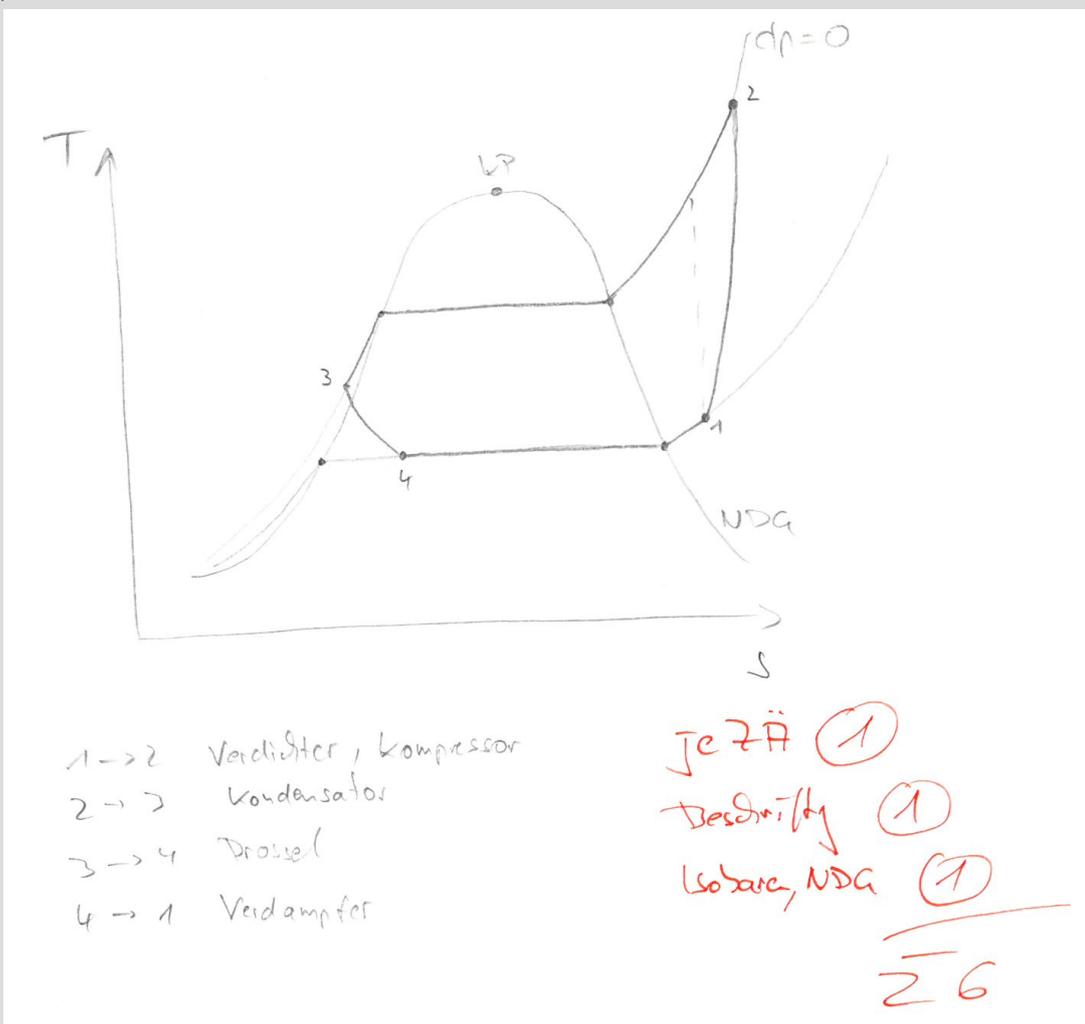
- $\dot{E}_D \geq 0$
- $\dot{E}_D = 0$
- Abhängig von der Umgebungstemperatur kann der Wert der Exergievernichtung von null abweichen.

Bei jeder Zustandsänderung in einer realen Komponente, die vereinfachend als nach außen adiabat angenommen wird, ...

- tritt immer Exergievernichtung auf.
- ist Exergievernichtung in Folge von Wärmeübertragung immer ausgeschlossen.
- tritt immer Exergievernichtung in Folge von Mischung auf.

(b) (6 Punkte) Es wird eine reale Kompressionskälteanlage in ihrer einfachsten Ausführung betrachtet. Das Kältemittel wird im Verdampfer zusätzlich überhitzt. Zudem findet im Kondensator eine Unterkühlung des Kältemittels statt. Zeichnen Sie den Prozess in ein  $T, s$ -Diagramm. Markieren Sie die Isobaren und das Nassdampfgebiet. Beschriften Sie ihre Darstellung vollständig und eindeutig.

(6 Punkte)



- (c) **(6 Punkte)** Eine Drossel wird üblicherweise als dissipative Komponente betrachtet. Arbeitet die Drossel mit einem Kältemittel als Arbeitsmedium vollständig unterhalb der Umgebungstemperatur gilt diese Aussage nicht mehr. Erläutern Sie den Zusammenhang und führen Sie, eine Formel für den exergetischen Wirkungsgrad einer Drossel in einer Kälteanlage ein. Dokumentieren Sie ihre Antwort nachvollziehbar.

(6 Punkte); 2P Aussage zur Temperatur, 2P Aussage zum Druck jeweils in Verbindung mit thermischer und mechanischer Exergie; 2P Definition Wirkungsgrad

Drossel unterhalb der Umgebungstemperatur, Zustandsänderung  $1 \rightarrow 2$ ,  $T_2 < T_1$ ,  $p_2 < p_1$ :

Temperatur sinkt in Folge der Drosselung (Joule-Thomson-Effekt); thermische Exergie steigt, Entfernung von  $T_0$  nimmt zu; gewünschter Effekt bei Einsatz in Kältemaschinen

Druck nimmt ab; mechanische Exergie sinkt

Wird die Exergie in den thermischen und mechanischen Anteil aufgeteilt, kann unterhalb der Umgebungstemperatur auch für die Drossel ein Wirkungsgrad definiert werden.

$$\eta_{\text{Drossel}} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T}{\dot{E}_1^M - \dot{E}_2^M}$$

- (d) **(6 Punkte)** Ist die Exergievernichtung des Gesamtsystems minimal, wenn mit Hilfe der exergoökonomischen Analyse die Kosten für ein Gesamtsystem minimiert werden? Begründen Sie Ihre Antwort. Unterscheiden Sie in neue (Neubau oder Nachrüstung) und bestehende Systeme (nur Änderung der Brennstoffkosten).

(6 Punkte)

(1P) Minimierung der Exergiezufuhr bei konstantem Exergieproduktstrom  $\Rightarrow$  thermodynamisch optimale Lösung

(1P) Minimierung der exergiespezifischen Produktkosten bei konstantem Exergieproduktstrom (exergoökonomischen Analyse)  $\Rightarrow$  wirtschaftlich optimale Lösung

(2P) Bei einem bestehenden System, sind die beiden Optima gleich, wenn man davon ausgeht, dass die Betriebs- und Wartungskosten konstant bleiben. Nur Änderung der Brennstoffkosten. Die Exergievernichtung ist folglich minimal.

(2P) Bei neuen Systemen (Neubau oder Nachrüstung) unterscheiden sich die beiden Optima, weil die thermodynamisch optimale Lösung in der Regel mit extrem hohen Investitionskosten verbunden ist. In diesen Fällen ist das wirtschaftliche Optimum von Bedeutung. Die Exergievernichtung ist folglich nicht minimal.

## 2. Wirtschaftlichkeitsanalyse ..... 9 Punkte

Fremdkapital wird vorwiegend über einen definierten Zeitraum zurückgezahlt. Dabei wird zwischen den Arten konstanter Tilgung und konstanter Rückzahlung unterschieden.

- (a) (2 Punkte) Definieren Sie hierzu stichpunktartig die Begriffe Tilgung und Zinszahlung.

(2 Punkte)

Tilgung: Ab- bzw. Rückzahlung einer Schuld.

Zinszahlung: Geldbetrag für die vorübergehende Überlassung von Kapital in Prozent auf den Nennwert (Schuld).

- (b) (2 Punkte) Erläutern Sie stichpunktartig den Unterschied zwischen einem effektiven Zinssatz und einem nominellen Zinssatz.

(2 Punkte)

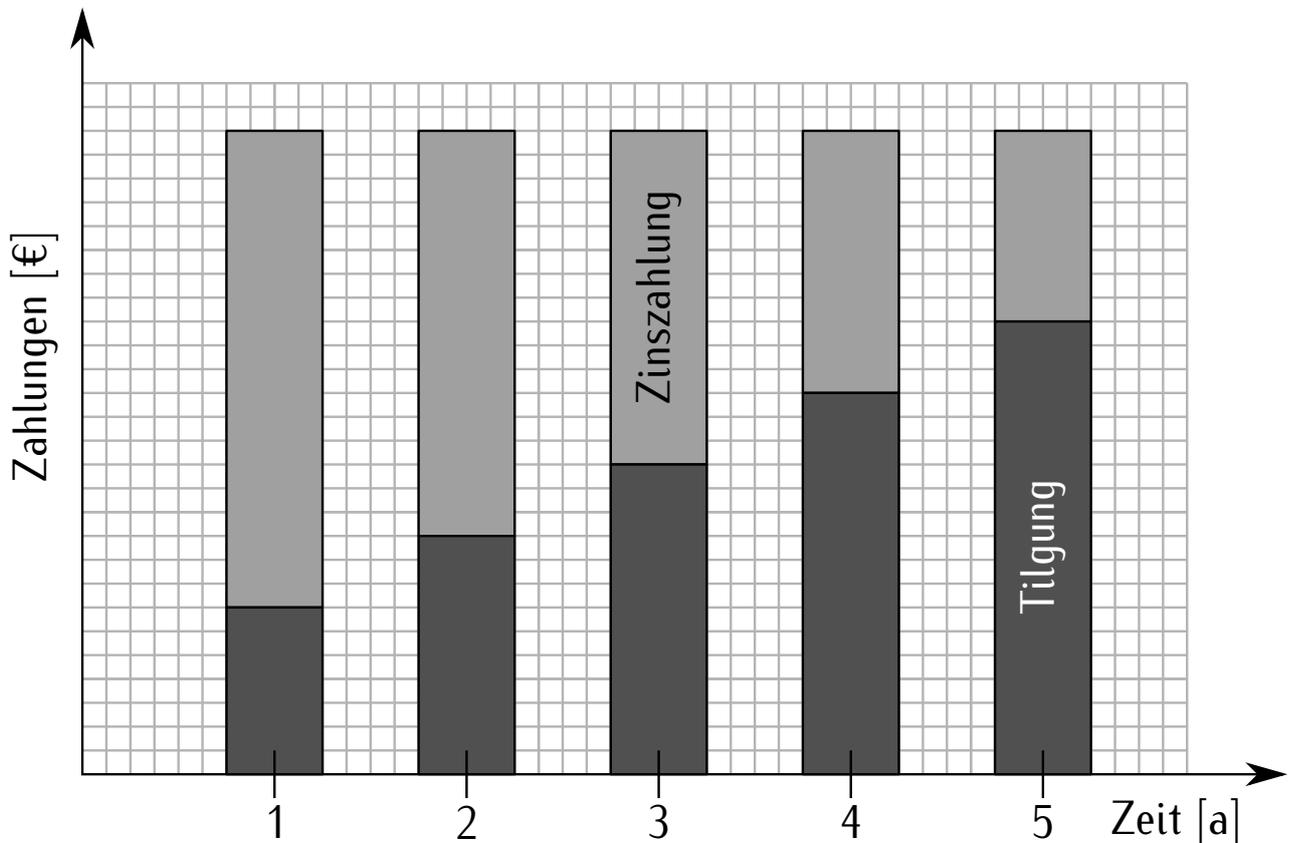
Effektiver Zinssatz entspricht einer jährlich einmaligen Verzinsung des Kapitals.

Nomineller Zinssatz: die Verzinsung erfolgt  $p$ -mal pro Jahr, wobei  $p \geq 1$  gilt.

- (c) (5 Punkte) Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf der konstanten Rückzahlung als Balkendiagramm (in ungefährender Größenordnung, keine Berechnungen) für das folgende Beispiel. Kennzeichnen Sie qualitativ das Verhältnis zwischen Tilgung und Zinszahlung.

Kredithöhe 10 000 €, Rückzahlungszeitraum 5 Jahre, Zinssatz 1,5 %/a

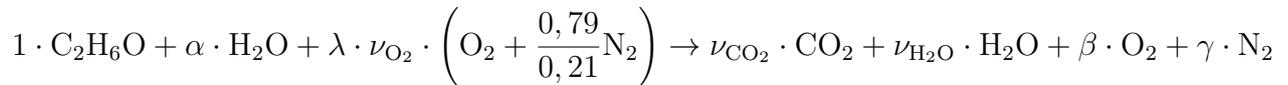
Nutzen Sie hierzu die Vorlagen. Sollten Sie die Reserve nutzen, kennzeichnen Sie jeweils die endgültige Variante eindeutig.



Gesamtrückzahlungsbetrag ist konstant über die 5 Jahre (2 Punkte), Zum Anfang hohe Zinszahlungen, diese sinken über die Rückzahlungszeit (2 Punkte), Beschriftung (1 Punkt)

**3. Verbrennung ..... 8 Punkte**

- (a) **(8 Punkte)** Ein Brennstoff aus 70 Mol-% Ethanol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) und 30 Mol-% Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) wird stöchiometrisch mit Luft verbrannt, die zu 21 Mol-% aus Sauerstoff und 79 Mol-% aus Stickstoff besteht. Bestimmen Sie  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ , sowie  $\nu_{\text{CO}_2}$ ,  $\nu_{\text{H}_2\text{O}}$  und  $\nu_{\text{O}_2}$  in der folgenden Gleichung.



Hinweis: Als Lösung können Zahlenwerte oder Abhängigkeiten von anderen Größen angegeben werden.

(1 Punkt)  $\lambda = 1$ , da stöchiometrisch.

(1 Punkt)  $\alpha = \frac{0,3}{0,7}$ , in Analogie zum Stickstoff der Luft mit dem Vorfaktor von  $\frac{0,79}{0,21}$

(1 Punkt)  $\beta = \nu_{\text{O}_2} \cdot (\lambda - 1)$ , alternativ:  $\beta = 0$ , da stöchiometrisch

(1 Punkt)  $\gamma = \nu_{\text{O}_2} \cdot \lambda \cdot \frac{0,79}{0,21}$ , alternativ:  $\gamma = \nu_{\text{O}_2} \cdot \frac{0,79}{0,21}$ , da stöchiometrisch

(1 Punkt)  $\nu_{\text{CO}_2} = 2$  (C-Bilanz d. Edukte)

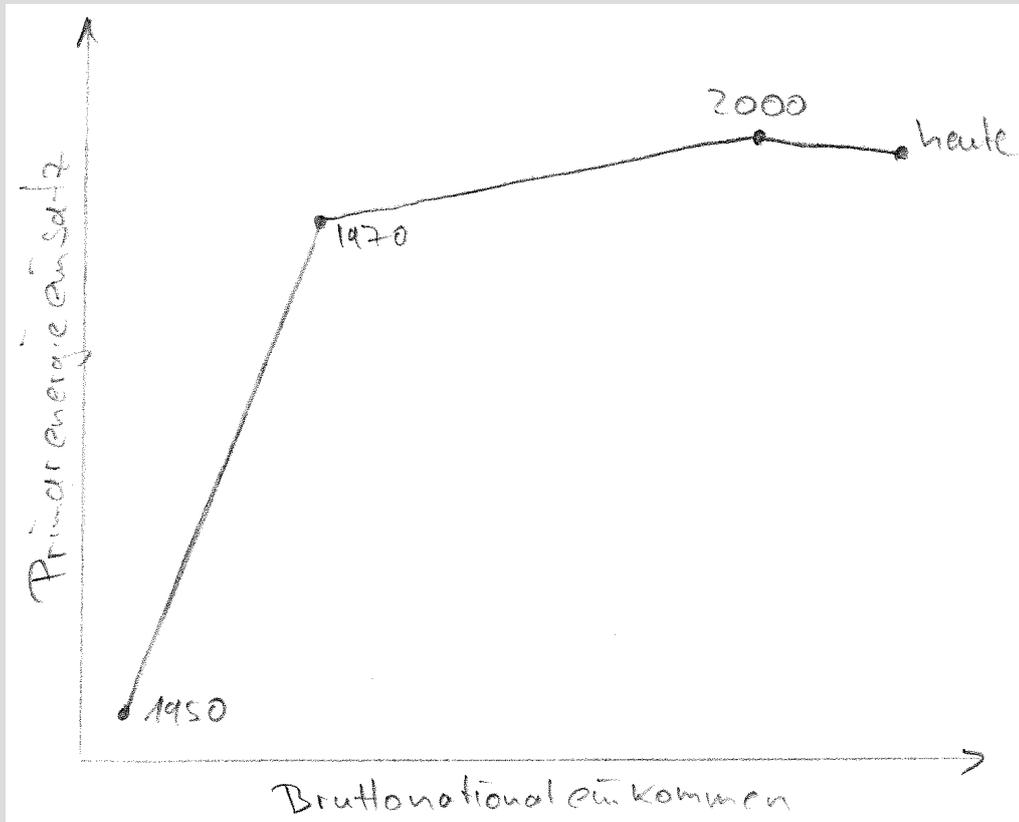
(1 Punkt)  $\nu_{\text{H}_2\text{O}} = \alpha + 3 = 3\frac{3}{7}$  (H-Bilanz d. Produkte)

(2 Punkte) Die Sauerstoffatombilanz ergibt aus  $\nu_{\text{CO}_2}$  und  $\nu_{\text{H}_2\text{O}}$  für die Produkte:  $4 + 3\frac{3}{7} = 7\frac{3}{7}$  und für die Edukte ohne  $\nu_{\text{O}_2}$ :  $1 + \frac{3}{7} = 1\frac{3}{7}$ , daher ist  $\nu_{\text{O}_2} = \frac{7\frac{3}{7} - 1\frac{3}{7}}{2} = 3$  oder  $\nu_{\text{O}_2} = \frac{2\nu_{\text{CO}_2} + \nu_{\text{H}_2\text{O}} - \nu_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}} - \alpha}{2}$

#### 4. Energieträger ..... 5 Punkte

- (a) (5 Punkte) Stellen Sie qualitativ den Verlauf des Bruttonationaleinkommens (x-Achse) und des Primärenergieeinsatzes (y-Achse) für die Jahre ab 1950 bis heute für die Bundesrepublik Deutschland dar. Beschriften Sie relevante Punkte eindeutig. Benennen Sie die Ursachen für den Verlauf stichpunktartig.

(2 Punkte) 2 für Verlauf, 1 Beschriftung, 2 Erläuterung



Für vollständige Punktzahl müssen mindestens die ersten beiden Tendenzen korrekt gezeichnet und diskutiert werden.

1950 bis 1973 (1970-1975 akzeptabel): linearer Anstieg; Größen voneinander abhängig; starke Industrialisierung der Bundesrepublik, energieintensive Industrie als wesentliches Bestandteil des Bruttonationaleinkommens, geringe Energiekosten

ab 1973 bis ca. 2000: starker Anstieg der Energiebezugskosten; zunehmende Verlagerung der Produktion energieintensiver Produkte ins Ausland; kaum Änderung des Primärenergieeinsatzes erkennbar; GHD-Sektor gewinnt zunehmend an Bedeutung, Industrie geht gleichzeitig zurück; Entkopplung von Primärenergieeinsatz und Bruttonationaleinkommen

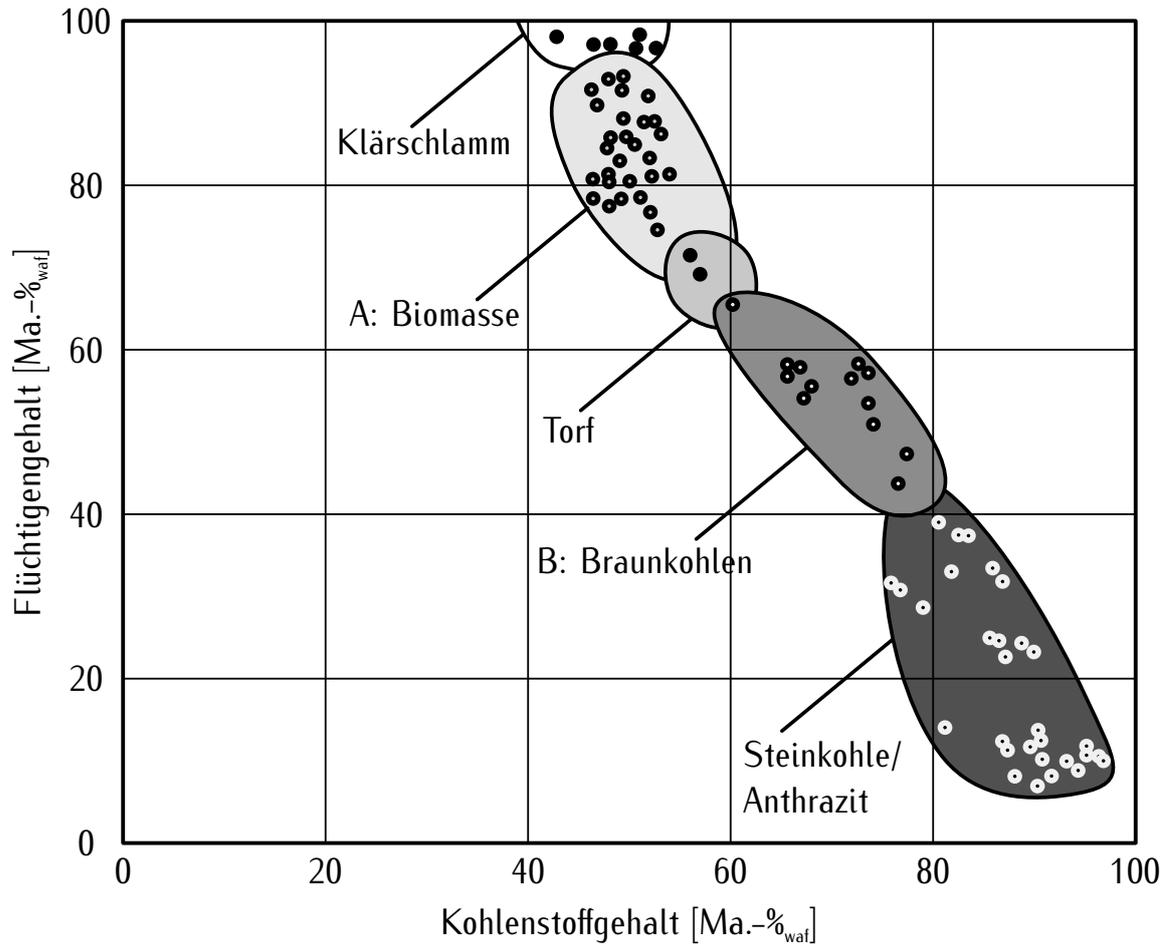
ab 2000er: zuletzt ist ein leichter Rückgang des Primärenergieeinsatzes bei gleichzeitigem weiteren Anstieg des Bruttonationaleinkommens erkennbar; erkennbare Energieeffizienzmaßnahmen in den Sektoren aufgrund weiter gestiegener Energiebeschaffungspreise und Anstrengungen zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen

## 5. Fossile Brennstoffe ..... 4 Punkte

- (a) (2 Punkte) Flüchtige Bestandteile sind Zersetzungsprodukte der organischen Brennstoffsubstanz, die entweichen, wenn feste Brennstoffe unter festgelegten Bedingungen erhitzt werden. Welche flüchtigen Bestandteile kennen Sie? Nennen Sie mindestens zwei.

(2 Punkte) Wasserstoff, Kohlenwasserstoffverbindungen ( $C_aH_b$ ), Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid

- (b) (2 Punkte) Das Diagramm zeigt den Kohlenstoff- und Flüchtigengehalt verschiedener fester Brennstoffe. Ergänzen Sie die fehlenden Bezeichnungen der Brennstoffe A und B.



**6. Dampfkraftwerke ..... 12 Punkte**

(a) **(2 Punkte)** Aus welchen vier Anlagenkomponenten besteht ein Dampfkraftprozess mindestens?

(je 0,5 Punkte) Speisewasserpumpe, Dampferzeuger, Dampfturbine, Kondensator.

(b) **(2 Punkte)** Mit jeder Zwischenüberhitzung lässt sich der Wirkungsgrad immer erhöhen. Richtig oder falsch? Begründen Sie Ihre Antwort.

(1 Punkt) Falsch.

(1 Punkt) Nur wenn durch die Zwischenüberhitzung das mittlere Temperaturniveau der Wärmezufuhr erhöht wird, steigt der Wirkungsgrad.

(Im  $T, s$ -Diagramm Verschiebung nach rechts: möglicherweise Austritt im überhitzten Gebiet.)

(c) **(2 Punkte)** Aus welchen Parametern ergibt sich der Dampfturbinaustrittsdruck? Nennen Sie mindestens zwei.

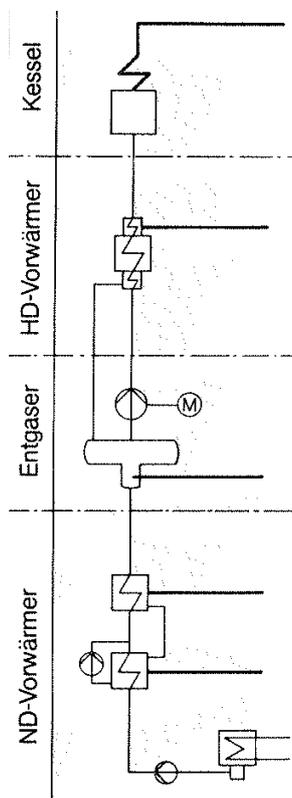
(1 Punkt) Kühlwassertemperatur

(1 Punkt) Auslegung des Kondensators (Wärmeübertragungsfläche, Kühlwassermassenstrom, Geometrie des Kondensators, minimale Temperaturdifferenz)

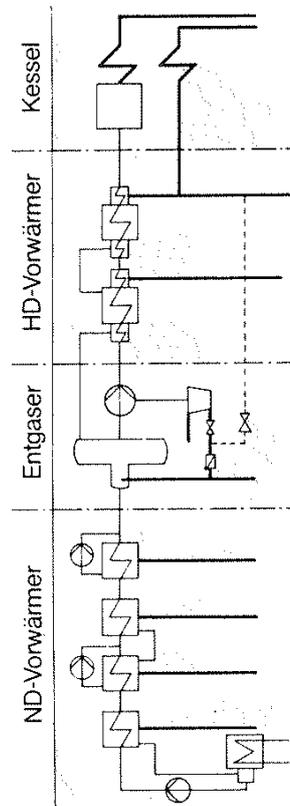
(d) **(2 Punkte)** Welche zwei Typen von Speisewasservorwärmern existieren?

(je 1 Punkt) Oberflächenvorwärmer und Mischvorwärmer

(e) **(4 Punkte)** Dargestellt sind zwei mögliche Verschaltungen für eine Speisewasservorwärmung. Das Dampfkraftwerk der Variante A hat folglich geringere spezifische Investitionskosten, in Variante B ergibt sich ein höherer Wirkungsgrad. Welche Unterschiede können Sie noch benennen. Nennen Sie mindestens zwei. Welche Verschaltung würden Sie üblicherweise für ein Kraftwerk mit einer Generatorleistung von bis zu 50 MW wählen? Begründen Sie Ihre Antwort stichpunktartig.



(a) Variante A



(b) Variante B

(2 Punkte) Unterschiede:

Speisewasserpumpe kann in Variante A unabhängig von der Dampfturbine betrieben werden.

Variante A hat einen geringeren spezifischer Eigenbedarf für Pumpen.

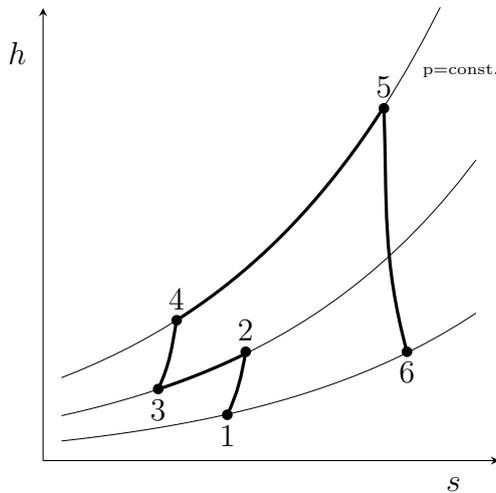
Variante B hat eine geringere spezifische Exergievernichtung bei der Wärmeübertragung durch Anpassung der Profile (mehr Oberflächenvorwärmer).

In Variante A ist keine Rückführung in die Kondensatablage erforderlich.

(2 Punkte) Variante A ist zu wählen; bei kleineren Anlagen (z.B. Industriekraftwerk) werden üblicherweise auch geringere Frischdampftemperaturen gewählt, zudem keine Zwischenüberhitzung, weil nur ein Dampfturbinengehäuse; kosten- und regelungsintensive Vorwärmstrecke dann nicht wirtschaftlich

**7. Gasturbinen ..... 13 Punkte**

- (a) **(6 Punkte)** Betrachten Sie den Gasturbinenprozess im  $h, s$ -Diagramm. Charakterisieren Sie ihn bezüglich der folgenden Eigenschaften:



- idealisierte oder reale Verdichtung und Expansion
- idealisierte oder realer Strömungsprozess bei der Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr
- offen oder geschlossen
- mit oder ohne Zwischenkühlung
- mit oder ohne sequenzielle Feuerung
- mit oder ohne Rekuperation

(je 1 Punkt:) offen; reale ( $\rightarrow$  nicht isentrope) Verdichtung und Expansion; ideale Wärmezufuhr und -abfuhr ( $\rightarrow$  ohne Druckverluste); mit Zwischenkühlung ( $2 \rightarrow 3$ ), ohne sequenzielle Feuerung ( $\rightarrow$  nur eine Expansion  $5 \rightarrow 6$ ) und ohne Rekuperation, da  $T_6 < T_4$ .

- (b) **(2 Punkte)** Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad des oben dargestellten Gasturbinenprozesses einmal unter der Annahme, dass das Gasturbinen-System im Solobetrieb betrieben wird, und einmal unter der Annahme, dass es Bestandteil eines Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerks (GUD-Prozess) ist.

$$(1 \text{ Punkt}) \varepsilon_{\text{GT,Solo}} = \frac{|\dot{W}_{12} + \dot{W}_{34} + \dot{W}_{56}|}{\dot{E}_F}$$

$$(1 \text{ Punkt}) \varepsilon_{\text{GT,GUD}} = \frac{|\dot{W}_{12} + \dot{W}_{34} + \dot{W}_{56}|}{\dot{E}_F - \dot{E}_6}$$

- (c) **(1 Punkt)** Welche anlagentechnische Erweiterung würden Sie vorschlagen, um die spezifische Arbeit bei dem dargestellten Gasturbinenprozess zu erhöhen?

(1 Punkt) sequenzielle Feuerung *oder* stärkere bzw. mehrstufige Zwischenkühlung

- (d) **(2 Punkte)** Aus welchen zwei Schaufeltypen ist eine Stufe eines Verdichters oder Expanders aufgebaut?

(2 Punkte) Leitschaufel (Leitrad, Stator) und Laufschaufel (Laufgrad, Rotor)

- (e) **(2 Punkte)** Wie wird die Turbineneintrittstemperatur  $T_{\text{ISO}}$  nach ISO 2314 bestimmt? Vergleichen Sie die Feuerungstemperatur mit der  $T_{\text{ISO}}$  (größer, kleiner, gleich)?

(2 Punkte) Die  $T_{\text{ISO}}$  ergibt sich durch bilanzielle Mischung der Turbinenkühlluftströme mit dem heißen Abgas am Eintritt des Expanders, somit ist die Feuerungstemperatur höher als die  $T_{\text{ISO}}$ .

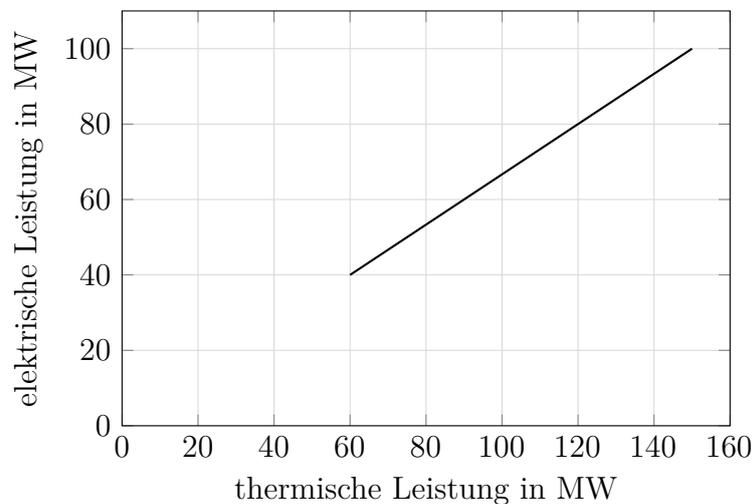
**8. Kraft-Wärme-Kopplung ..... 6 Punkte**

- (a) (1 Punkt) Wodurch ergibt sich die Brennstoff- bzw. Primärenergieeinsparung von KWK-Anlagen gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme?

(1 Punkt) Die anfallende Abwärme aus der Stromerzeugung wird bei KWK-Anlagen z. T. als Nutzwärme ausgekoppelt, womit KWK-Anlagen einen höheren Brennstoffausnutzungsgrad (auch energetischer Wirkungsgrad) besitzen, als Kraftwerke.

- (b) (5 Punkte) In der folgenden Abbildung ist die Betriebscharakteristik einer KWK-Anlage mit Dampfturbine für eine Vorlauftemperatur  $T_1$  dargestellt.

- Wie hoch ist die Stromkennzahl  $S$  der KWK-Anlage?
- Die thermische Ausbeute  $\beta_{th}$  beträgt 50%. Wie hoch ist der Volllast-Brennstoffenergiebedarf  $\dot{E}n_{Br}$  und die elektrische Ausbeute  $\beta_{el}$ ?
- Zeichnen Sie qualitativ die Betriebscharakteristik für eine Vorlauftemperatur  $T_2$  mit  $T_2 > T_1$  in die Grafik ein und begründen Sie die Lage der zwei Linien zueinander.



(1 Punkt) i)  $S = \frac{100 \text{ MW}_{el}}{150 \text{ MW}_{th}} = 66,66\%$  oder  $S = \frac{40 \text{ MW}_{el}}{60 \text{ MW}_{th}} = 66,66\%$

(1 Punkt) ii)  $\beta_{th} = \frac{\dot{Q}}{\dot{E}n_{Br}}$ , für  $\dot{Q} = 150 \text{ MW}_{th} \rightarrow \dot{E}n_{Br} = 300 \text{ MW}$

(1 Punkt) ii)  $\beta_{el} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_f \cdot H_u}$ , für  $\dot{W} = 100 \text{ MW}_{el} \rightarrow \beta_{el} = 33\%$

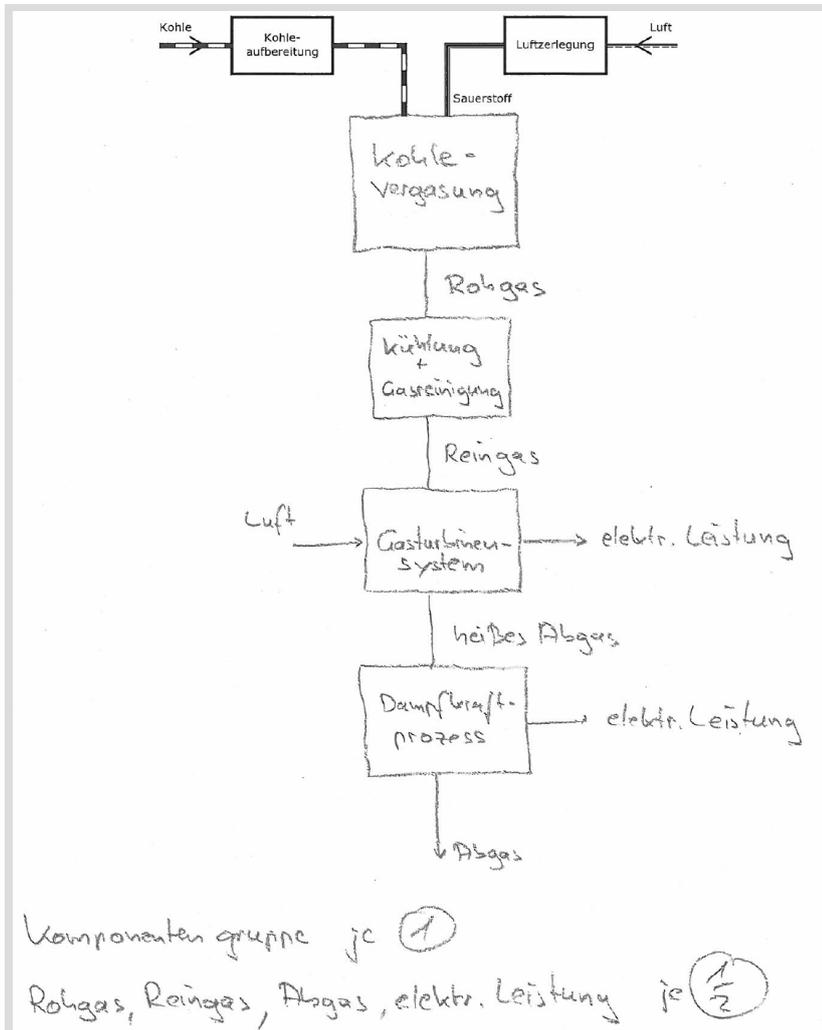
(1 Punkt) iii) Die Linie liegt unterhalb der eingezeichneten,

(1 Punkt) iii) da bei höherer Vorlauftemperatur Heizdampf bei höherem Druck benötigt wird, der bei gleicher Wärmeauskopplung eine geringere Stromerzeugung zur Folge hat.



## 10. Kombikraftwerke .....9 Punkte

- (a) (6 Punkte) Stellen Sie ein Kombikraftwerk mit integrierter Kohlevergasung (IGCC) in Form eines Blockschaltbildes dar. Zeichnen Sie die wichtigsten Komponentengruppen sowie relevante Stoff- und Energieströme. Ihr Schaltbild sollte mit den Komponentengruppen *Kohleaufbereitung* und *Luftzerlegung* beginnen.



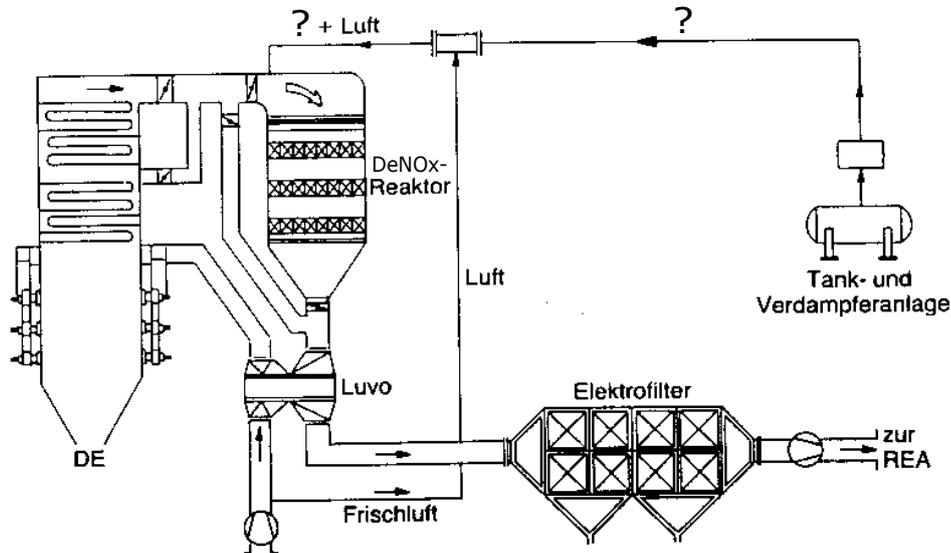
- (b) (3 Punkte) Welche Vorteile ergeben sich beim Einsatz von Kombikraftwerken mit integrierter Kohlevergasung (IGCC) gegenüber anderen konventionellen Anlagen mit fossilen Brennstoffen, z.B. kohlegefeuerten Dampfkraftwerken oder Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerken (GUD-Prozess). Erläutern Sie die Zusammenhänge stichpunktartig.

(3 Punkte)

- höherer Wirkungsgrad als bei anderen kohlegefeuerten Kraftwerken
- Einsatz des günstigen Brennstoffs Kohle in GT möglich, im Vergleich zum GUD-Prozess
- vereinfachte Einbindung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung

## 11. Rauchgasreinigung ..... 9 Punkte

- (a) (4 Punkte) Benennen Sie die in der Abbildung dargestellte Sekundärmaßnahme zur Entstickung sowie die Schaltungsart. Welcher Stoff ist für das Verfahren erforderlich? Welcher Nachteil ergibt sich durch die Schaltungsart?



(4 Punkte) je einen Punkt

Selektive katalytische Reduktion (SCR-Verfahren)

Rohgasschaltung (High-Dust)

Ammoniak,  $\text{NH}_3$

Ablagerung von Staub und  $\text{SO}_2$ -Reaktionsprodukten im Katalysator; verringerte Standzeit des Katalysators

- (b) (5 Punkte) Welche Abscheidemechanismen sind bei filternden Abscheidern ursächlich? Warum kommt es im Partikelgrößenbereich zwischen  $0,1$  und  $2\mu\text{m}$  zu einer Zone verminderter Abscheidung?

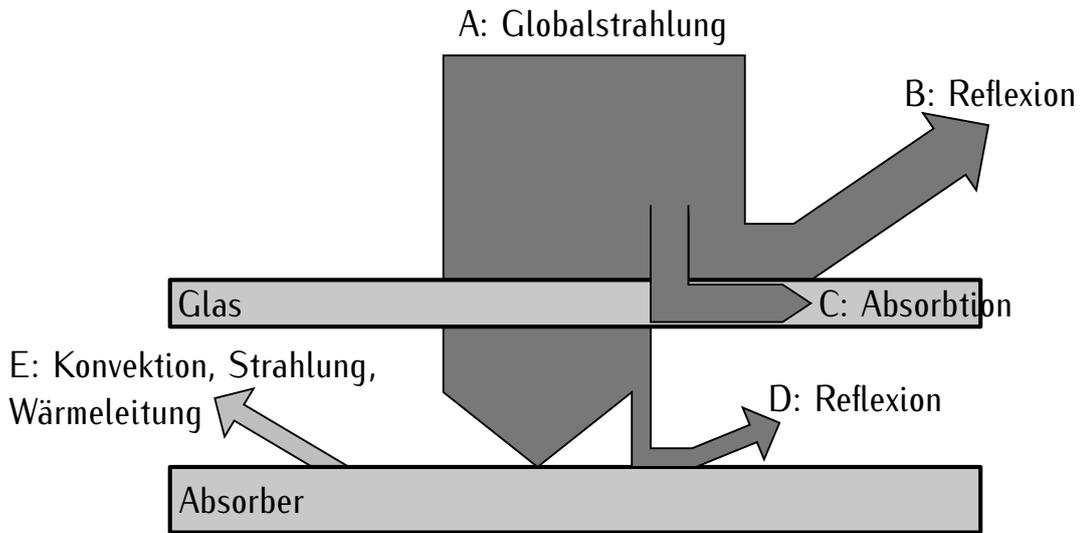
(5 Punkte) 3 Mechanismen, 2 Begründung

Trägheit, Diffusion und Elektrostatik

Diffusion und Elektrostatik verlieren ihre Wirkung mit zunehmender Teilchengröße; Trägheitseinfluss nimmt mit Partikelgröße zu; überlagernde Abscheidemechanismen mit verminderter Wirkung zwischen  $0,1$  und  $2\mu\text{m}$

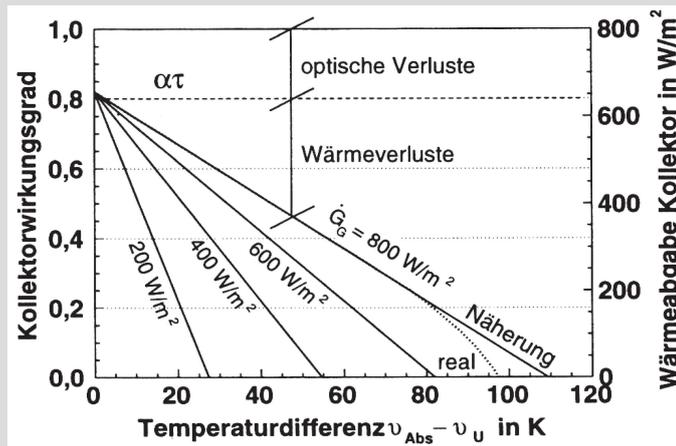
**12. Erneuerbare Energieträger ..... 7 Punkte**

(a) (5 Punkte) Benennen Sie die Energieströme A bis E an der schematischen Darstellung des einfach verglasten Flachkollektors einer Solarthermieanlage.



(b) (2 Punkte) Beschreiben Sie die Abhängigkeiten aller auftretenden Verluste am Flachkollektor von der Absorbtemperatur.

(2 Punkte)



-optische Verluste (Reflexion, Absorption im Glas) unabhängig von der Absorbtemperatur

-Wärmeverluste steigen mit der Absorbtemperatur

(-Strahlungsverluste erst bei höheren Temperaturen relevant, welche üblicherweise am Flachkollektor nicht erreicht werden)

**13. Kernenergie .....9 Punkte**

- (a) **(2 Punkte)** Eine Bauklasse der Kernreaktoren sind Leichtwasserreaktoren. Welche zwei Reaktortypen dieser Bauklasse kennen Sie?

(2 Punkte) Siedewasserreaktor, Druckwasserreaktor

- (b) **(2 Punkte)** Warum ist der Wirkungsgrad von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren in der Regel deutlich kleiner als der von kohlegefeuerten Dampfkraftwerken?

bei Siedewasserreaktor nur Satttdampf bei rund 70 bar an die Turbine, bei Druckwasserreaktor Temperaturen bis 330 °C möglich (eine der Antworten genügt); insgesamt geringere mittlere thermodynamische Temperatur bei der Wärmezufuhr  $\Rightarrow$  geringerer Wirkungsgrad

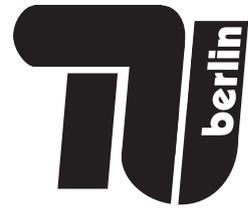
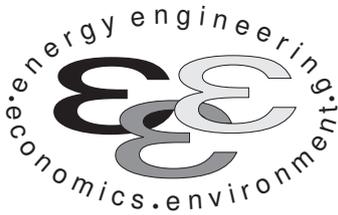
- (c) **(2 Punkte)** Mit welchen Kernreaktoren sind höhere Wirkungsgrade möglich? Nennen Sie zwei.

(2 Punkte) Brutreaktoren (schneller Brüter), Hochtemperaturreaktor (Kugelhaufenreaktor)

- (d) **(3 Punkte)** Welche Eigenschaften zeichnen einen geeigneten Moderator in einem Kernreaktor aus?

(2 Punkte) Moderator soll ...

- Neutronen abbremsen
- möglichst keine Neutronen absorbieren
- kostengünstig verfügbar sein



**Energietechnik – 25. September 2018  
– MUSTERLÖSUNG –  
Teil II – Rechenaufgaben**

<b>Name</b>	
<b>Matrikel-Nr.</b>	

- 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.

Aufgabe:	14	15	16	<b>Summe</b>
Punktzahl:	51	30	30	111
Davon erreicht:				

**14. Thermodynamische Analyse . . . . . 51 Punkte**

In der Abbildung ist das Fließbild eines sogenannten STIG-Prozesses (steam injected gas turbine) zu sehen. Die Anlage kann als Kombinationskraftwerk zur gekoppelten Erzeugung elektrischer Energie und Prozesswärme angesehen werden. Das heiße Abgas eines Gasturbinenprozesses, aufgeteilt in Verdichter (Komponente A), Brennkammer (Komponente B) und Expander (Komponente C), erzeugt im Abhitzekegel (Komponente D) Wasserdampf. Dieser kann sowohl zur Auskopplung von Prozesswärme (Komponente E) genutzt als auch wiederum in die Gasturbinenanlage zurück eingespeist werden. Bei der Rückeinspeisung des Dampfes in den Gasturbinenprozess handelt sich um eine prozessintegrierte Abwärmennutzung, mit der eine elektrische Leistungs- und Wirkungsgraderhöhung erreicht wird.

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.

$$[h_2 = 558 \text{ kJ/kg}]$$

$$[h_5 = 1742 \text{ kJ/kg}]$$

$$[\dot{W}_{r,A} = 36,24 \text{ MW}]$$

**Aufgaben**

- (a) **(7 Punkte)** Bestimmen Sie die isentrope  $\dot{W}_{s,A}$  und die reale Leistung  $\dot{W}_{r,A}$  des Verdichters (Komponente A).
- (b) **(5 Punkte)** Berechnen Sie die elektrische Nettoleistung  $\dot{W}_{\text{netto}}$  des Systems.
- (c) **(4 Punkte)** Ermitteln Sie die spezifische Enthalpie des Stroms 5.
- (d) **(10 Punkte)** Berechnen Sie den isentropen Wirkungsgrad des Expanders (Komponente C).
- (e) **(5 Punkte)** Berechnen Sie die Exergievernichtung durch die Mischung der Ströme 2 und 16.
- (f) **(4 Punkte)** Berechnen Sie den in der Komponente E abgegebenen Prozesswärmestrom sowie den über die gesamte Prozesswärmekette abgegebenen Exergiestrom.
- (g) **(4 Punkte)** Ordnen Sie für die Ströme 2, 4 und 5 die Werte der massenspezifischen physikalischen und chemischen Exergie je in abnehmender Reihenfolge.
- (h) **(6 Punkte)** Definieren Sie die elektrische Ausbeute sowie den energetischen und den exergetischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Es sollen keine Werte berechnet werden.
- (i) **(6 Punkte)** Erstellen Sie je eine Kostenbilanz für den Verdichter (Komponente A) und die Brennkammer (Komponente B), wie sie für exergoökonomische Analysen benötigt wird. Gehen Sie davon aus, dass die Kosten aller eingehenden Ströme und die der Komponenten bekannt sind. Geben Sie alle notwendigen Hilfsbeziehungen mit an und stellen Sie nach der relevanten Größe um.

## Annahmen und gegebene Werte

- Alle Komponenten arbeiten stationär und sind nach außen adiabat.
- Kinetische und potentielle Energien können vernachlässigt werden.
- Die Umgebungsbedingungen sind gegeben durch  $T_0 = 25\text{ °C}$  und  $p_0 = 1,01325\text{ bar}$ .

	$h_0$ [kJ/kg]	$s_0$ [kJ/kgK]
Luft	25,293	6,889
Wasser	104,929	0,367

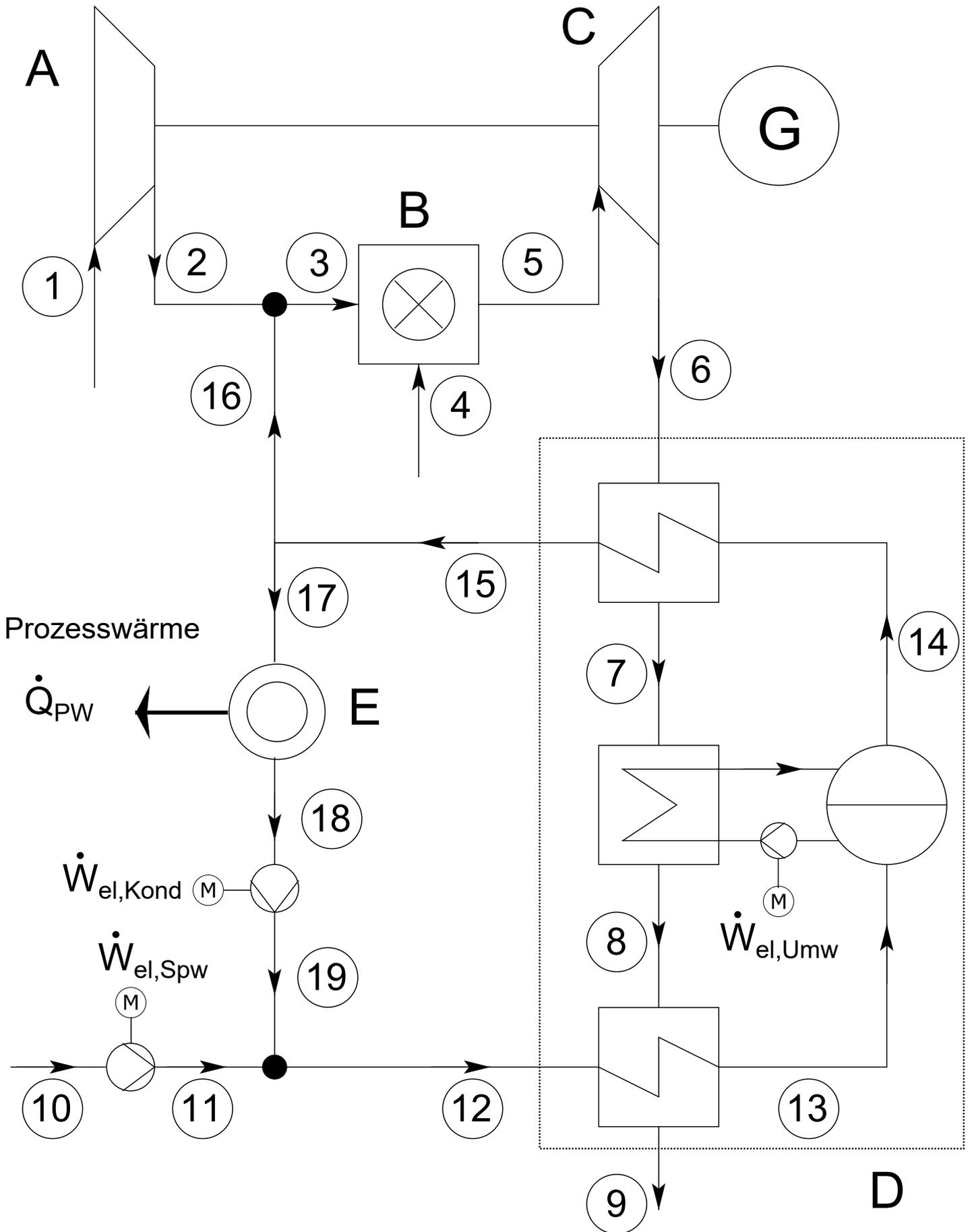
- Brennwert des Brennstoffs:  $HHV_{\text{Br}} = 55,685\text{ MJ/kg}$
- Isentrope Wirkungsgrade und Wirkungsgrade für die Umwandlung von mechanischer in elektrische Leistung und umgekehrt sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

	$\eta_s$ [-]	$\eta_{\text{mech}\leftrightarrow\text{el}}$ [-]
Expander	?	-
Verdichter	0,87	-
Pumpen	0,8	0,9
Generator	-	0,95

- Bei isentroper Verdichtung beträgt die Enthalpie am Zustandspunkt hinter dem Verdichter (Komponente A)  $h_{2s} = 492,98\text{ kJ/kg}$ .
- Bei isentroper Entspannung beträgt die Enthalpie am Zustandspunkt hinter der Turbine (Komponente C)  $h_{6s} = 732,456\text{ kJ/kg}$ .
- Die elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe im Verdampfer des Abhitzeessels (Komponente D) beträgt  $\dot{W}_{\text{el,Umwälz}} = 22\text{ kW}$ .
- Die mechanische Wellenleistung zum Generator beträgt  $31,370\text{ MW}$ .

Tabelle 1: Thermodynamische Daten des STIG-Prozesses

$j$	$\dot{m}_j$ [kg/s]	$T_j$ [°C]	$p_j$ [bar]	$h_j$ [kJ/kg]	$s_j$ [kJ/kgK]	$\dot{E}_j^{\text{PH}}$ [MW]	$\dot{E}_j^{\text{CH}}$ [MW]	$\dot{E}_j^{\text{TOT}}$ [MW]
1	68	25	1,013	25,293	6,889	0	0,309	0,309
2	68	535,84	27,6		6,979	34,731	0,309	35,040
3	73,6	523,65	27,6			39,507	0,308	39,815
4	1,323	25	27,6					69,273
5		1173,21	27,6				1,729	90,057
6		480,34	1,08				1,729	18,967
7		426,24	1,07				1,729	16,011
8		239,38	1,06	555,043			1,729	7,645
9		154,27	1,05	458,144		3,209	1,729	4,938
10	5,6	20	3	84,2				
11	5,6	20,18	27,7	87,291				
12	8,99	39,02	27,7	165,918				
13	8,99	226,38	27,65	973,289				
14	8,99	229,38	27,65	2802,941				
15	8,99	450,34	27,6	3348,652				
16	5,6	450,34	27,6	3348,652	7,128		0,28	
17	3,39	450,34	27,6	3348,652	7,128			
18	3,39	70	17,6	294,432	0,954			
19	3,39	70,11	27,7	295,722				



a) ges.:  $\dot{W}_{s,A}$ ,  $\dot{W}_{r,A}$

$$\dot{W}_{s,A} = \dot{m}_1 (h_{2,s} - h_1) = 68 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( 492,98 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 25,293 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 31803 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{r,A} = \dot{m}_1 (h_2^x - h_1) = 68 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( 562,864 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 25,293 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 36555 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \text{ges.: } h_2 &\rightarrow \eta_s = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1} \Leftrightarrow h_2 = \frac{h_{2,s} - h_1}{\eta_s} + h_1 \\ &= \frac{492,98 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 25,293 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,87} + 25,293 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 562,864 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

b) ges.:  $\dot{W}_{el,netto}$

$$\dot{W}_{el,netto} = \dot{W}_{el,brutto} - \dot{W}_{el,pumpe} = -29801,5 \text{ kW} + 46,126 \text{ kW} = -29755,374 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{el,brutto} = \dot{W}_{mech,gen} \cdot \eta_{gen} = -29801,5 \text{ kW}$$

① Bilanz

$$\begin{aligned} \dot{W}_{el,pumpe} &= 22 \text{ kW} + \frac{\dot{m}_{20} (h_{21} - h_{20})}{\eta_{mech,pumpe}} + \frac{\dot{m}_{22} (h_{23} - h_{22})}{\eta_{mech,pumpe}} \\ &= 22 \text{ kW} + \frac{5,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (87,291 - 84,2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,9} + \frac{3,39 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (295,722 - 294,432) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,9} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 22 \text{ kW} + 19,233 \text{ kW} + 4,8929 \text{ kW} \\ &= 46,126 \text{ kW} \end{aligned}$$

c) ges:  $h_5$

Energiebilanz um 8

$$0 = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} + \dot{m}_4 \cdot \text{HHV}_4 - \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (1)$$

Massenstrombilanz

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 = 74,923 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1)$$

$$h_5 = \frac{\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} + \dot{m}_4 \cdot \text{HHV}_4}{\dot{m}_5}$$

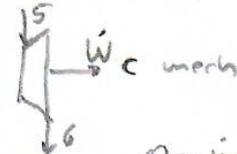
$$= \frac{68 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 562,864 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3348,652 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1,323 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 55685 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{74,923 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \quad (1)$$

$$= 1744,437 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

d) ges:  $\eta_{s,ex}$

$$\eta_{s,c} = \frac{h_5^v - h_6^x}{h_5^v - h_{6,s}^v} \quad (1)$$

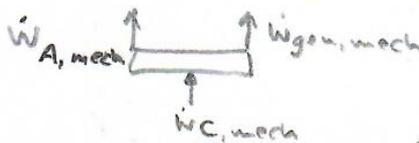
E-Bilanz



$$0 = \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{W}_{c, mech} - \dot{m}_6 \cdot h_6$$

$$\dot{W}_{c, mech} = \dot{m}_5 (h_5 - h_6) \quad (2)$$

E-Bilanz Welle  $\dot{W}_{c, mech}$



$$0 = \dot{W}_{c, mech} - \dot{W}_{A, mech} - \dot{W}_{gen, mech} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{c, mech} &= \dot{W}_{A, mech} + \dot{W}_{gen, mech} \quad (1) \\ &= 36555 \text{ kW} + 31390 \text{ kW} \\ &= 67925 \text{ kW} \quad (1) \end{aligned}$$

$$h_6 = h_5 - \frac{\dot{W}_{c, mech}}{\dot{m}_5}$$

$$h_6 = 1744,437 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \frac{67925 \text{ kW}}{74,923 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \quad (1)$$

$$h_6 = 837,839 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$\eta_{s,ex} = \frac{1744,437 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 837,839 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1744,437 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 732,456 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,8958 \quad (1)$$

e) ges:  $\dot{E}_D$ , mischer



$$0 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{16} - \dot{E}_3 - \dot{E}_D \quad \textcircled{1}$$

$$\dot{E}_D = \dot{E}_2^{TOT} + \dot{E}_{16}^{CH} + \dot{E}_{16}^{PH} - \dot{E}_3^{TOT}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{16}^{PH} &= \dot{m}_{16} [(h_{16} - h_0) - T_0 (s_{16} - s_0)] \quad \textcircled{1} \\ &= 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[ \left( 3348,652 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 104,929 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right. \\ &\quad \left. - 298,15 \text{K} \left( 7,128 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 0,267 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \right] \\ &= 6876,413 \text{ kW} \quad \textcircled{1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{E}_D &= (35,04 \text{ MW} + 0,28 \text{ MW} + 6,876 \text{ MW} - 39,815) \\ &= 2,38 \text{ MW} \quad \textcircled{1} \end{aligned}$$

f) ges.:  $\dot{Q}_{PW}$ ,  $\dot{E}_{PW}$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{PW} &= \dot{m}_{17} (h_{18} - h_{17}) = 3,39 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( 294,432 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3348,652 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \\ &= -10353,8 \text{ kW} \quad \textcircled{1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{PW} &= \dot{m}_{17} [(h_{18} - h_{17}) - T_0 (s_{18} - s_{17})] \quad \textcircled{1} \\ &= 3,39 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[ \left( 294,432 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3348,652 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right. \\ &\quad \left. - 298,15 \text{K} \cdot \left( 0,954 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 7,128 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \right] \\ &= -4113,568 \text{ kW} \quad \textcircled{1} \end{aligned}$$

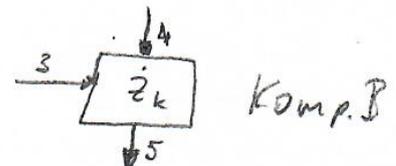
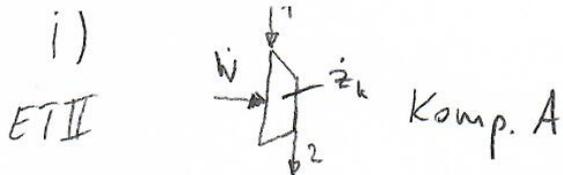
$$g) \quad e_5^{PH} > e_2^{PH} > e_4^{PH}$$

$$e_4^{CH} > e_5^{CH} > e_2^{CH}$$

h) ges.:  $\eta, \varepsilon, \beta$   
ETI

$$\eta_{\text{en}} = \frac{|\dot{W}_{\text{el, netto}} + \dot{Q}_{\text{PW}}|}{\dot{m}_4 \cdot \text{HHV}_4}, \quad \varepsilon = \frac{|\dot{W}_{\text{el, netto}} + \dot{E}_{\text{PW}}|}{\dot{E}_7 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{10}}$$

$$\beta_{\text{el}} = \frac{|\dot{W}_{\text{el, netto}}|}{\dot{m}_4 \cdot \text{HHV}_4}$$



$$\textcircled{2} \quad c_1 \dot{E}_1 + c_w \cdot \dot{W} + \dot{z}_k = c_2 \cdot \dot{E}_2$$

$$\textcircled{1} \quad c_2 = \frac{c_1 \dot{E}_1 + c_w \cdot \dot{W} + \dot{z}_k}{\dot{E}_2}$$

keine Hilfsbez.

$$\textcircled{2} \quad c_3 \dot{E}_3 + c_4 \dot{E}_4 + \dot{z}_k = c_5 \dot{E}_5$$

$$\textcircled{1} \quad c_5 = \frac{c_3 \dot{E}_3 + c_4 \dot{E}_4 + \dot{z}_k}{\dot{E}_5}$$

keine Hilfsbez.

**15. Wirtschaftlichkeitsanalyse ..... 30 Punkte**

In einem chemischen Prozess wird Dampf benötigt, der durch einen Dampferzeuger (Anschaffungszeitpunkt 1. Januar 2009) bereitgestellt wird. Im Laufe des Betriebs hat sich herausgestellt, dass der Dampferzeuger überdimensioniert ist. Da die Brennstoffkosten in letzter Zeit stark gestiegen sind, überlegt die Unternehmensführung, zum 1. Januar 2020 einen neuen, kleineren und effizienteren Dampferzeuger in Betrieb zu nehmen. Die Anschaffung soll bereits zum 1. Juli 2019 erfolgen. Der neue Dampferzeuger würde, gegenüber dem bisherigen, 2 % Brennstoff einsparen.

*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**

- Führen Sie alle Berechnungen in inflationsbehafteter Währung durch.
- Die Neuanlage wird über Nacht am 1. Juli 2019 betriebsfertig geliefert. Betriebsbeginn ist der 1. Januar 2020.
- Mit Ausnahme der Investitionskosten fallen alle Zahlungen zum Ende eines Jahres an.
- Anschaffungszeitpunkt und Betriebsbeginn des alten Dampferzeugers war der 1. Januar 2009. Zu diesem Zeitpunkt fielen auch die Investitionskosten an.
- Bedenken Sie bei der Restwertberechnung, dass die Altanlage eine Nutzungszeit von 20 Jahren hat und zum Bezugszeitpunkt erst 10 Jahre genutzt wurde. Gehen Sie von einer linearen Abschreibung aus.

**Aufgaben**

- (a) **(5 Punkte)** Erstellen Sie einen Zeitstrahl, in den Sie alle für die Berechnung relevanten Ausgaben, Einnahmen und Zeitpunkte qualitativ eintragen. Berücksichtigen Sie auch relevante Positionen der Altanlage.
- (b) **(6 Punkte)** Dem Unternehmen sind bisher nur die Investitionskosten des in Betrieb befindlichen (alten) Dampferzeugers zum Zeitpunkt seines Kaufs bekannt. Berechnen Sie die Investitionskosten des neuen Dampferzeugers zum Zeitpunkt seines Kaufs (Anschaffungszeitpunkt). Nutzen Sie hierzu den Degressionsexponenten sowie die geschätzte Kostensteigerung ab 2017 und den Kostenindex aus den Tabellen. [ $C_{DE,neu,2019} = 95\,000\text{ €}$ ]
- (c) **(2 Punkte)** Berechnen Sie den Gegenwartswert zum Bezugszeitpunkt (1. Januar 2019). Berechnen Sie hierzu die einzelnen Gegenwartswerte für
- i. **(3 Punkte)** den Restwert der Altanlage,
  - ii. **(1 Punkt)** die Investitionskosten des neuen Dampferzeugers,
  - iii. **(8 Punkte)** die Kosteneinsparung durch geringeren Brennstoffverbrauch und
  - iv. **(3 Punkte)** die Kreditrückzahlung des alten Dampferzeugers.
- (d) **(2 Punkte)** Geben Sie der Unternehmensführung aufgrund Ihrer Ergebnisse eine Handlungsempfehlung für oder gegen die Anschaffung des neuen Dampferzeugers.

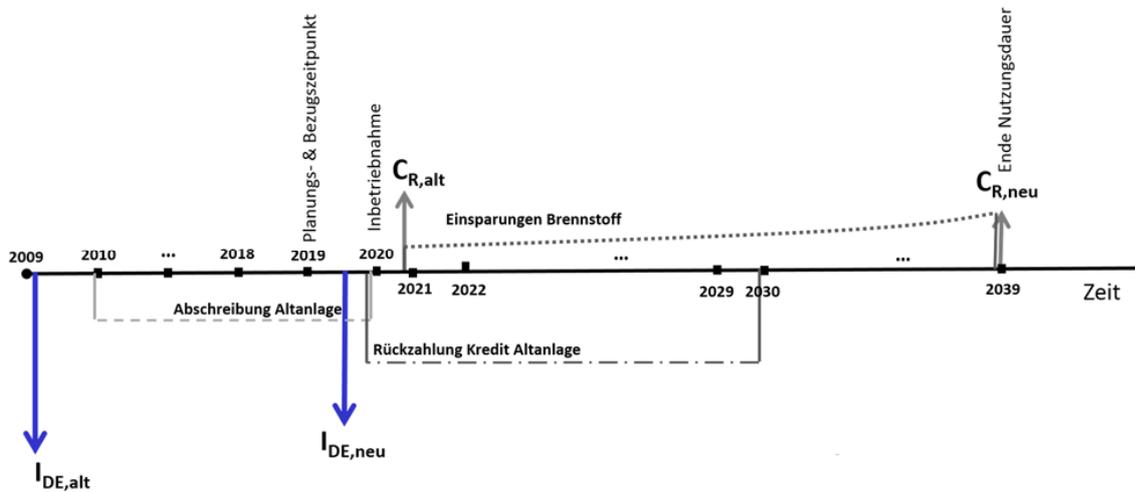
*Hinweis:* Sollten Sie die vorhergehenden Aufgabenteile nicht bearbeitet haben, so können Sie von einem fiktiven Gegenwartswert von 500 000 € ausgehen.

**Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich alle Kostenangaben auf den *Planungszeitpunkt*.**

<b>Projektdaten</b>	
Anschaffungszeitpunkt / Bau der Altanlage / Inbetriebnahme der Altanlage	1. Januar 2009
Planungszeitpunkt / Bezugszeitpunkt	1. Januar 2019
Anschaffungszeitpunkt / Bau der Neuanlage	1. Juli 2019
Inbetriebnahme der Neuanlage	1. Januar 2020
Wirtschaftliche Nutzungsdauer der Neu- und Altanlage, $n$	20 a
Äquivalente Jahresvollbenutzungsstunden, $t_v$	8000 h/a
Investitionskosten des <b>alten</b> Dampferzeigers am 1. Januar 2009, $C_{DE,alt,2009}$	87 000 €
Wirkungsgrad des <b>alten</b> Dampferzeigers, $\eta_{DE,alt}$	90 %
Maximal bereitgestellter Wärmestrom des <b>alten</b> Dampferzeigers (maximale Wärmeleistung), $\dot{Q}_{DE,alt}$	100 MW <sub>th</sub>
Maximal bereitgestellter Wärmestrom des <b>neuen</b> Dampferzeigers (maximale Wärmeleistung), $\dot{Q}_{DE,neu}$	80 MW <sub>th</sub>
Spezifische Brennstoffkosten zum Planungszeitpunkt, $c_{FC,2019}$	2,73 cent/kWh
Jährlicher effektiver Zinssatz, $i_{eff}$	4,5 %/a
Jährliche Kostensteigerung für Brennstoff, $r_{FC}$	2,6 %/a
Brennstoffkosteneinsparungen durch die Neuanlage, $e_{FC}$	2 %
Mittlere Kostensteigerungsrate für Dampferzeuger ab 2017, $r_{DE}$	2 %/a
Kostendegressionsexponent für Dampferzeuger, $\alpha_{DE}$	0,8
Restwert des Dampferzeigers nach je 20 Jahren Laufzeit, $C_R$	2000 €

Jahr	<b>Kostenindex Dampferzeuger</b>
2000	100,0
2001	102,3
2002	106,1
2003	108,5
2004	112,4
2005	120,5
2006	123,4
2007	126,2
2008	134,0
2009	139,7
2010	142,5
2011	145,7
2012	150,0
2013	154,7
2014	157,8
2015	161,0
2016	163,1
2017	166,2

Musterlösung



a) Zeitreihe (5 Punkte)

- je richtigen Zeitpunkt: 0,5 P → 1,5 P
- je richtiger Einmalzahlung: 0,5 P → 2 P
- je Kosten- / Einnahmenverlauf 0,5 P → 1,5 P

b) Investitionskosten (6 Punkte)

**Berücksichtigung der Kostensteigerung von 2009 auf 2017 (2 Punkte)**

Kauf erfolgte am 01.01.2009 daher zu Preise aus 2008

$$C_{DE,alt,2017} = C_{DE,alt,2009} \cdot \frac{Index_{2017}}{Index_{2008}} = 87.000 \text{ €} \cdot \frac{166,2}{134,0} = 107.895 \text{ €}$$

(1 Punkt Formel, 1 Punkt Berechnung)

**Kostensteigerung von 2017 auf 2019 (2 Punkte)**

$$P = \frac{F}{(1+r)^n}$$

$$C_{DE,alt,2019} = C_{DE,alt,2017} \cdot (1+0,02)^2 = 112.253,74 \text{ €}$$

**Berücksichtigung der Degression (2 Punkte)**

$$C_{PE,Y} = C_{PE,W} \cdot \left(\frac{X_y}{X_w}\right)^\alpha$$

$$C_{DE,neu,2019} = C_{DE,alt,2019} \cdot \left(\frac{Q_{DE,neu}}{Q_{DE,alt}}\right)^\alpha = 112.253,74 \text{ €} \cdot \left(\frac{80 \text{ MW}_{th.}}{100 \text{ MW}_{th.}}\right)^{0,8} = 93.901,56 \text{ €}$$

c) Gegenwartswert zum Bezugszeitpunkt (17 Punkte)

**i. Bestimmung des Gegenwartwertes vom Restwert der Altanlage (3 Punkte)**

$$C_{R,alt,2020} = C_{DE,alt,2008} - A_{Abschr.} \cdot n_{nutz} + C_R$$

Jährlicher Abschreibungsbetrag:

$$A_{Abschr.} = \frac{(C_{DE,alt,2017} - C_R)}{n} = \frac{87.000 \text{ €} - 2.000 \text{ €}}{20} = 4.250 \text{ €/a} \quad (1 \text{ Punkt})$$

Bisherige Nutzungszeit des Dampferzeugers:  $n_{nutz} = 11 \text{ a}$

$$C_{R,alt,2020} = 87.000 \text{ €} - 4.250 \frac{\text{€}}{\text{a}} \cdot 11 \text{ a} + 2.000 \text{ €} = 42.250 \text{ €} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$Y_{R,2019} = \frac{C_{R,alt,2020}}{(1+i_{eff})} = 40.430,62 \text{ €} \quad (1 \text{ Punkt})$$

**ii. Bestimmung des Gegenwartwertes der Investition (1 Punkt)**

$$Y_{DE,neu,2019} = \frac{C_{DE,neu,2019}}{(1+i_{eff})^{0,5}} = 91.857,51 \text{ €} \quad [92.932,04 \text{ €}]$$

**iii. Bestimmung des Gegenwartwertes der Kostenersparnis (8 Punkte)**

Brennstoffkosten Altanlage (2,5 Punkte)

$$FC_{alt,2019} = \frac{Q_{DE,alt}}{\eta_{DE,alt}} \cdot t_{v,alt} \cdot c_{FC,2019} = \frac{100 \text{ MW}_{th}}{0,9} \cdot 8.000 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 27,3 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 24.266.666,67 \text{ €/a}$$

$$FC_{alt,2020} = FC_{alt,2019} \cdot (1+r_{FC}) = 24.994.666,67 \text{ €/a}$$

Kostenersparnis durch Neuanlage (1 Punkt)

$$FC_{E,2020} = FC_{alt,2020} \cdot e_{FC} = 499.893,33 \text{ €/a}$$

Bestimmung des Gegenwartwertes der Kosteneinsparung

$$PV_{FC,E} = \frac{A_{FC,E}}{CRF} \text{ und } CELF = \frac{A_{FC,E}}{FC_{E,2020}} = \frac{k(1-k^n)}{1-k} \cdot CRF$$

$$PV_{FC,E,2020} = \frac{CELF \cdot FC_{E,2020}}{CRF} = \frac{\frac{k(1-k^n)}{1-k} \cdot CRF \cdot FC_{E,2020}}{CRF} = \frac{k(1-k^n)}{1-k} \cdot FC_{E,2020} = 8.619.921,78 \text{ €}$$

(2 Punkte Rechenweg + 1 Punkt Ergebnis)

$$\text{mit } k = \frac{(1+r_{FC})}{(1+i_{eff})} = 0,98565 \quad (0,5 \text{ Punkte})$$

$$Y_{FC,E,2019} = \frac{PV_{FC,E,2020}}{(1+i_{eff})} = 8.248.728,97 \text{ €}$$

(0,5 Punkte für Umrechnung auf Bezugszeitpunkt + 0,5 Punkte für Gesamtergebnis richtig)

**iv. Bestimmung des Gegenwartwertes der Kreditrückzahlungen Altanlage (3 Punkte)**

Bestimmung der Annuität Kreditzahlungen (1 Punkt)

$$A_{Kredit} = C_{DE,alt} \cdot CRF_{20} \text{ mit } CRF_{20} = \frac{i_{eff}(1+i_{eff})^{20}}{(1+i_{eff})^{20}-1} = 0,07688 \frac{1}{a}$$

$$A_{Kredit} = 6.689 \text{ €/a}$$

Bestimmung des Gegenwartwertes der noch zu leistenden Restzahlungen bei einer verbleibenden Laufzeit von 9 Jahren. (2 Punkte)

$$Y_{Kredit,2019} = \frac{A_{FC,E}}{CRF_9} = 48.619 \text{ € mit } CRF_9 = 0,13757$$

**Gegenwartswert der Investition (2 Punkte)**

$$NP_{2019} = -Y_{DE,neu,2019} - Y_{Kredit,2019} + Y_{E,2019} + Y_{R,2019} = 8.148.682,76 \text{ €} \quad [8.147.608,24 \text{ €}]$$

(1 Punkt für Formel, 1 Punkt für richtiges Ergebnis)

**d) Handlungsempfehlung (2 Punkte)**

Der Gegenwartswert ist positiv, daher sollte in den neuen Dampferzeuger investiert werden.

(1 Punkt richtige Antwort, 1 Punkt Begründung)

**16. Wärmeübertragernetzwerke ..... 30 Punkte**

Die folgenden sechs Stoffströme sollen zu einem Wärmeübertragernetzwerk verbunden werden.

Nr.	$T_{\text{ein}}$ [°C]	$T_{\text{aus}}$ [°C]	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	$\dot{m}\Delta h^{LV}$ [kW]
1	-20	20	1	-
2	50	10	1,5	-
3	-5	15	1	-
4	30	30	-	10
5	20	20	-	20
6	40	40	-	10

- Die minimale Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung liegt bei  $\Delta T_{\text{min}} = 10 \text{ K}$ .
- Strom 4 soll bei einer konstanten Temperatur von  $30 \text{ °C}$  mit einer Wärmeleistung von  $10 \text{ kW}$  verdampft werden.
- Strom 5 soll bei einer konstanten Temperatur von  $20 \text{ °C}$  mit einer Wärmeleistung von  $20 \text{ kW}$  kondensiert werden.
- Strom 6 soll bei einer konstanten Temperatur von  $40 \text{ °C}$  mit einer Wärmeleistung von  $10 \text{ kW}$  verdampft 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) **(8 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)** Zeichnen Sie in Ihr Wärmestromprofil die Änderungen ein, die sich durch die zusätzliche Integration eines einzelnen Stroms ergeben;  $T_{\text{ein}} = 5 \text{ °C}$  und  $T_{\text{aus}} = -10 \text{ °C}$  mit einem Wärmekapazitätsstrom von  $1 \text{ kW/K}$ . Treffen Sie eine Aussage zum Verhalten des minimalen externen Kühlbedarf  $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$  und der maximalen Temperatur der externen Wärmesenke  $T_{\text{CU,max}}$  (steigt / sinkt / bleibt gleich) und nennen Sie bei einer Änderung die aktualisierten Werte.
- Hinweis: Kennzeichnen Sie für die Integration den Verlauf eindeutig.
- (d) **(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	45	-	10	0	-10
	45	-	10	10	0
II	35	-1,5	-15	-5	-15
	35	-	10	5	-5
IV	25	-1,5	-15	-10	-20
	25	-	10	0	-10
V	20	-0,5	-2,5	-12,5	-22,5
	20	0,5	2,5	-10	-20
VII	15	-	-20	-30	-40
	15	0,5	5	-25	-35
IX	0	2	10	-15	-25
	0	1	15	0	-10
X	-15	-	-	-	-
	-15	-	-	-	-

$\Sigma 11$

$\dot{Q}_{Hu,min} = 10 \text{ kW}$  (1)

$\dot{Q}_{Cu,min} = 10 \text{ kW}$  (1)

$T_p^* = 45^\circ\text{C} \Rightarrow T_p = 40/50^\circ\text{C}$  (1)

~~WRG~~

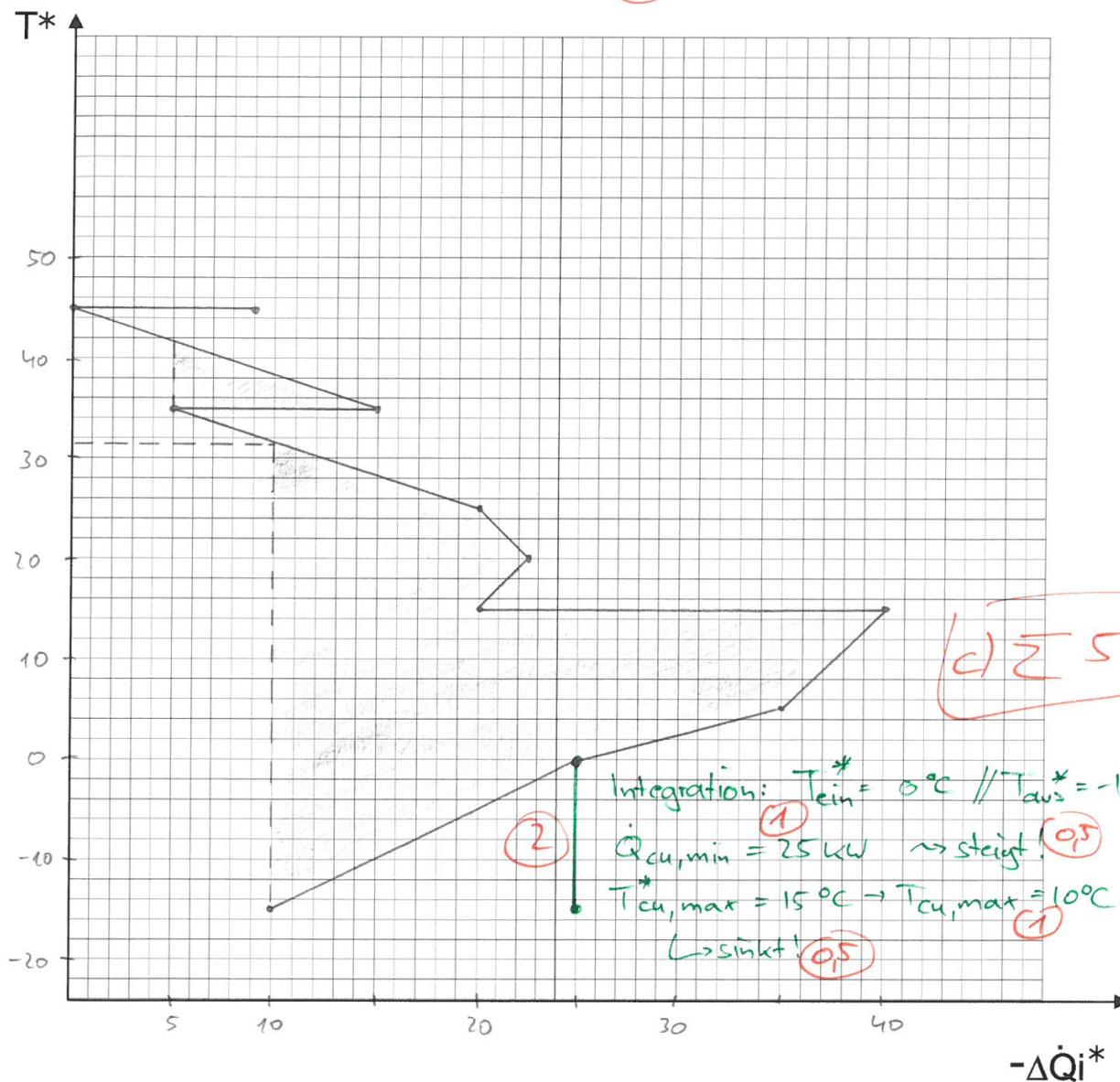
0,5 / ZÄ

(5)

b) 28

0,5 / WRG

(1)



$T_{Hu,min}^* = 45^\circ\text{C} \rightarrow T_{Hu,min} = 50^\circ\text{C}$  (1)

$T_{Cu,max}^* = 31,5^\circ\text{C} \rightarrow T_{Cu,max} = 26,5^\circ\text{C}$  (1)

