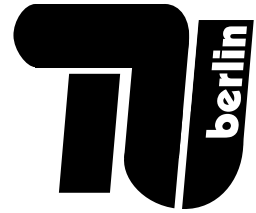


Technische Universität Berlin

INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK

Prof. Dr.-Ing. G. Tsatsaronis



Altklausurensammlung
im Fach Energietechnik I und Energietechnik II
mit Musterlösungen am Ende des Dokuments

Inhalt

Semester
H 2022
F 2022
H 2021
F 2021

H: Herbst; F: Frühjahr

H_2022

Teilgebiet	Thema	Punkte	
		ET I	ET II
		8 oder 9 LP	8 LP
Theorie, Fundamental	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	50	50
	Exergie	20	25
	Wirtschaftlichkeit	9	
	Verbrennung I	8	8
Theorie, Rest	Energieträger	6	
	Dampfkraftwerke	9	
	Gasturbinen	10	
	Fossile Brennstoffe	5	
	Kälteprozesse I	8	
	Kombikraftwerke		6
	Kälteprozesse II		7
	Erneuerbare Energien		10
	Alternative Brennstoffe		8
	Chemisches GGW		4
	Wärmeübertrager		6
Rechenteil	<i>Bearbeitungsdauer [min]</i>	80	80
	Exergie	44	44
	a	4	4
	b	7	7
	c	6	6
	d	7	7
	e	7	7
	f	3	3
	g	4	4
	h	6	-
	i	-	6
	Wirtschaftlichkeit	31	
	WÜ-Netz		30



**Bachelor-Prüfung am 27. September 2022 im Fach
Energietechnik I
Master-Prüfung am 27. September 2022 im Fach
Energietechnik II
Teil I – Theorieaufgaben**

- Tragen Sie Ihren Namen, Matrikelnummer, Sitzplatz und E-Mail-Adresse sowie Ihren Studiengang ein. Kreuzen Sie den Prüfungsversuch an.
- Beantworten Sie die Fragen in den dazu freigelassenen Zwischenräumen. Sollte der Platz nicht ausreichen, fordern Sie durch Handzeichen weitere Blätter an.
- Rechenwege müssen nachvollziehbar dargestellt werden. Nicht zu wertende Berechnungen oder Diagramme müssen durchgestrichen werden. Es ist leserlich zu schreiben.
- Bitte geben Sie alle Blätter nach der Bearbeitungszeit im gehefteten Zustand ab.

Name:	
Martikelnummer:	
E-Mail Adresse:	
Studiengang:	
Prüfungsversuch:	<input type="checkbox"/> 1. Versuch <input type="checkbox"/> 2. Versuch <input type="checkbox"/> 3. Versuch

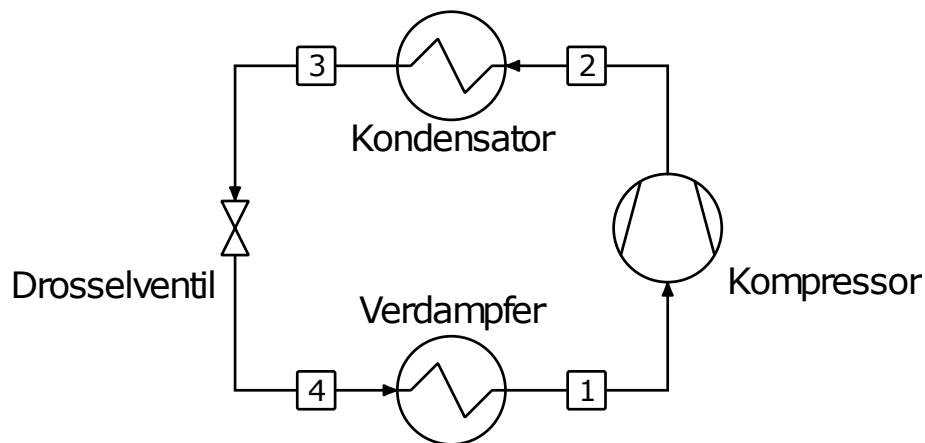
Ich erkläre, dass ich mich prüfungsfähig fühle. (§ 39 (10) AllgStuPO vom 8. Mai 2013)

Unterschrift:	
----------------------	--

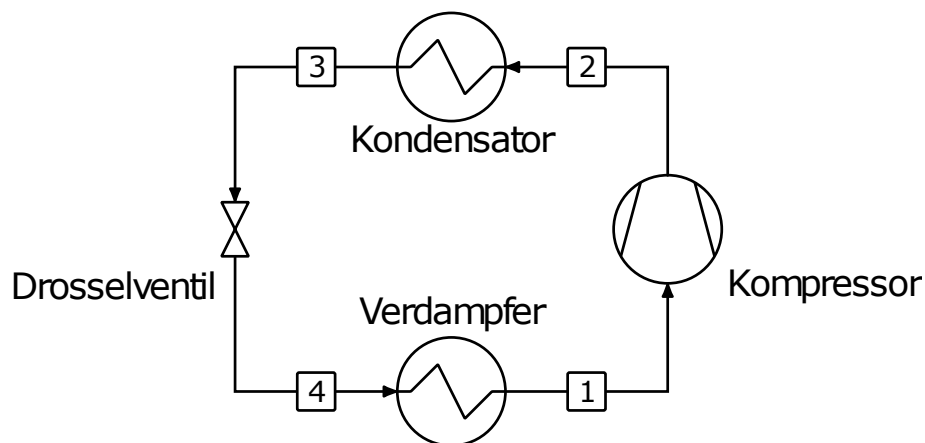
1. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse - Teil A 14 Punkte

Im Folgenden wird ein einfacher Kälteprozess betrachtet. Das Drosselventil und der Kompressor sind nach außen adiabatisch. Änderungen der kinetischen und potentiellen Energie können vernachlässigt werden.

- (a) (5 Punkte) Markieren Sie **mit Pfeilen** alle Energieströme, die dem System zu- oder abgeführt werden. Ein bei der Kühlraumtemperatur T_K zugeführter Wärmestrom soll mit \dot{Q}_K und ein bei der Umgebungstemperatur T_0 abgeführter Wärmestrom mit \dot{Q}_0 bezeichnet werden. Tragen sie außerdem **mit Pfeilen** alle auftretenden Exergieströme ein, die dem System zu- oder abgeführt werden, sofern sich diese von dem dazugehörigen Energiestrom in Größe oder Richtung unterscheiden.



RESERVE:



(b) **(2 Punkte)** Definieren Sie die Leistungszahl für den dargestellten Kälteprozess.

(c) **(2 Punkte)** Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad für den dargestellten Kälteprozess.

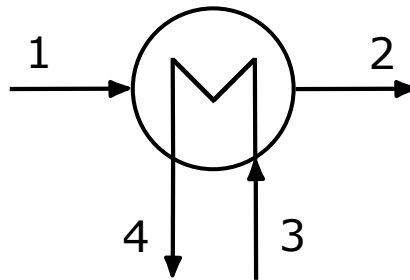
(d) **(2 Punkte)** Für den dargestellten einfachen Kälteprozess soll nun eine alternative Definition des exergetischen Nutzens auf der Basis von Sekundärstoffströmen erarbeitet werden. Welche Anpassungen würden Sie dafür im Fließbild vornehmen und wie ließe sich der exergetische Nutzen für diesen Fall definieren? Beschreiben Sie stichpunktartig. Es muss keine Formel aufgestellt werden.

- (e) **(3 Punkte)** Kann der mit einem positiven Wärmestrom \dot{Q} verbundene Exergiestrom \dot{E}_q negativ werden? Begründen Sie stichpunktartig anhand einer geeigneten Formel.

Punktzahl:	/14

2. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse - Teil B 11 Punkte

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



- (a) **(4 Punkte)** Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad für den dargestellten Wärmeübertrager.

- (b) **(2 Punkte)** Nehmen Sie an, dass die Zustände 1 und 2 festgelegt sind. Durch welche Maßnahme ließe sich der exergetische Wirkungsgrad steigern und was würde dies für die apparative Umsetzung bedeuten? Druckverluste sollen hierbei vernachlässigt werden.

- (c) **(5 Punkte)** Stellen Sie für den betrachteten Wärmeübertrager eine Kostenbilanz inklusive Hilfsbeziehung(en) auf, wie sie für eine exergoökonomische Analyse verwendet wird. Um welche Art von Kosten-Hilfsbeziehung(en) handelt es sich? Was ist die Zielgröße der Kostenbilanz?

Punktzahl:	/11
------------	-----

3. Verbrennung 8 Punkte

- (a) **(8 Punkte)** Geben Sie eine Reaktionsgleichung für die vollständige und vollkommene Verbrennung von Propan C_3H_8 mit Sauerstoff an. Wie groß ist der Molenstrom \dot{n}_{O_2} des Sauerstoffs, der zur stöchiometrischen Verbrennung von $0,025 \text{ kmol/s}$ Propan benötigt wird? Geben Sie außerdem den zugehörigen Massenstrom \dot{m}_{Luft} der Luft an. Für die Zusammensetzung der Luft wird das folgende Stoffmengenverhältnis angenommen.

$$\frac{x_{O_2}}{x_{N_2}} = \frac{0,21}{0,79}$$

Punktzahl:	/8
------------	----

4. Wirtschaftlichkeitsanalyse 9 Punkte

(a) **(6 Punkte)** Erläutern Sie kurz die folgenden Kostenkategorien und nennen Sie jeweils ein Beispiel.

- i. Fixkosten
- ii. variable Kosten
- iii. Investitionskosten

(b) **(3 Punkte)** Multiple Choice: Kreuzen Sie die richtigen Antworten zu der jeweiligen Frage / Aussage an. Es sind mehrere Antworten möglich.

Bewertung: Jeweils 1 Punkt pro Frage für die richtig angegebenen Antwortkombinationen, falsche Antworten (auch Kombinationen aus falschen mit richtigen Antworten) werden mit 0 Punkte bewertet. Es werden **keine** Punkte für falsche Antworten abgezogen.

Was berücksichtigt der <i>Zeitwert des Geldes</i> bei den Kosten?	
<input type="checkbox"/>	a) Kosten, die zum jetzigen Zeitpunkt anfallen, haben einen höheren Wert als in der Zukunft liegende
<input type="checkbox"/>	b) die Berücksichtigung der Inflation
<input type="checkbox"/>	c) Kosten, die zum jetzigen Zeitpunkt anfallen, haben einen geringeren Wert als in der Zukunft liegende
Was berücksichtigt die <i>Kostensteigerungsrate</i> ?	
<input type="checkbox"/>	a) Inflation
<input type="checkbox"/>	b) Kostenindex
<input type="checkbox"/>	c) Kostenentwicklung über die Zeit
Wie sind <i>Annuitäten</i> definiert?	
<input type="checkbox"/>	a) Kreditrückzahlungen
<input type="checkbox"/>	b) regelmäßig wiederkehrende Zahlung eines konstanten Betrages

Punktzahl:	/9

5. Energieträger 6 Punkte

(a) **(6 Punkte)** Multiple Choice: Kreuzen Sie die richtigen Antworten zu der jeweiligen Frage / Aussage an. Es sind mehrere Antworten möglich.

Bewertung: Jeweils 1 Punkt pro Frage für die richtig angegebenen Antwortkombinationen, falsche Antworten (auch Kombinationen aus falschen mit richtigen Antworten) werden mit 0 Punkte bewertet. Es werden **keine** Punkte für falsche Antworten abgezogen.

1.	Welche Aussagen treffen auf Primärenergieträger zu?	
	a)	werden von der Natur unmittelbar und unverändert zur Verfügung gestellt
	b)	werden von nicht regenerierbaren und regenerierbaren Energieträgern bereitgestellt
2.	Die folgenden Energieträger sind Endenergieträger:	
	a)	elektrische Energie
	b)	Kraft
3.	Welche genannten Energieträger werden der Nutzenergie zugeordnet?	
	a)	Wasserstoff
	b)	mechanische Energie
	c)	Kraftstoffe
4.	Welcher der Punkte wird dem nicht energetischen Verbrauch zugeordnet?	
	a)	Schmierstoffe
	b)	Kraftstoffe
	c)	Kunststoffproduktion
5.	Biomasse ist ein Primärenergieträger?	
	a)	ja
	b)	nein
6.	Die folgenden Energieträger werden den erneuerbaren Energieträgern zugeordnet	
	a)	Kernenergie
	b)	Sonnenstrahlen
	c)	Laufwasser

Punktzahl:	/6

6. Fossile Brennstoffe 5 Punkte

(a) **(3 Punkte)** Es sollen die drei folgenden Brenngase mit ihren jeweiligen ungefähren Zusammensetzungen betrachtet werden (Restgase werden vernachlässigt):

- Erdgas: CH₄ (ca. 90 %)
- Flüssiggas: C₃-Kohlenwasserstoffe (ca. 90 %), C₄-Kohlenwasserstoffe (< 10 %)
- Stadtgas: H₂ (ca. 40–50 %), CH₄ (ca. 20 %), N₂ (ca. 15 %), CO (ca. 10 %)

Ordnen Sie die Brenngase in Abhängigkeit ihres Brennwertes in die nachfolgende Tabelle ein (*Hinweis*: Die Angabe der volumetrischen Brennwerte erfolgt wie im Skript nach DIN 1340 bei $p_0 = 1,013\,25$ bar):

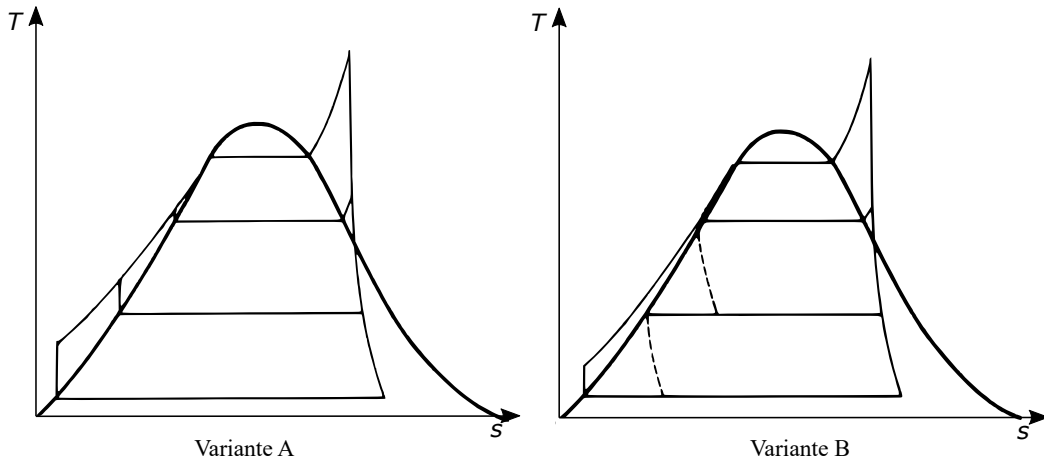
10–30 MJ/m ³	30–75 MJ/m ³	über 75 MJ/m ³

(b) **(2 Punkte)** Nennen Sie zwei Gründe, weshalb Roherdgas in vielen Fällen aufbereitet werden muss.

Punktzahl:	/5

7. Dampfkraftwerke9 Punkte

In dem dargestellten T,s -Diagramm sind zwei unterschiedliche Verschaltungsvarianten von Speisewasservorwärmern dargestellt. Die Massenströme und thermodynamischen Zustände der jeweiligen Dampfanzapfungen sind identisch.



- (a) (2 Punkte) Wie unterscheiden sich Variante A und B auf Komponentenebene?

- (b) (2 Punkte) Welche Variante ist mit höheren Investitionskosten verbunden? Begründen Sie Ihre Antwort.

- (c) **(2 Punkte)** c) Welche Variante ist mit einer höheren Exergievernichtung verbunden? Begründen Sie Ihre Antwort.

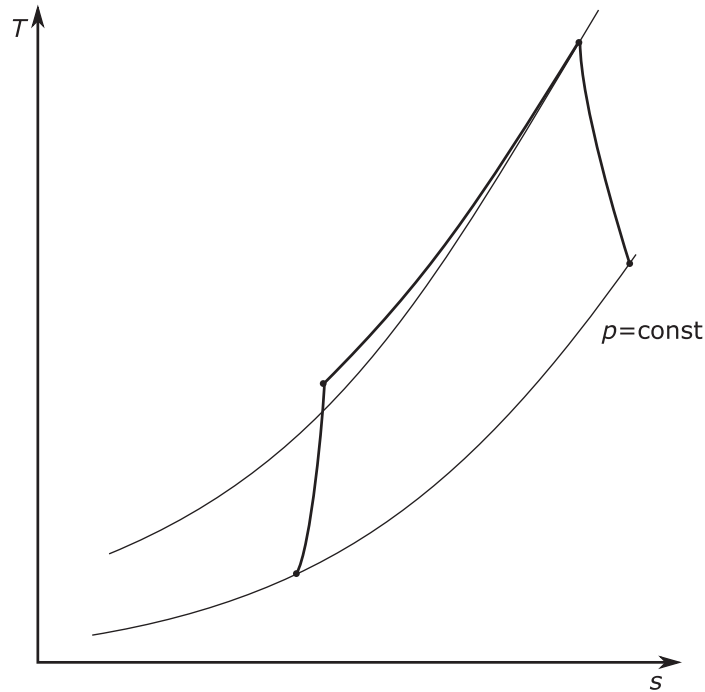
- (d) **(3 Punkte)** Mit welcher zusätzlichen Maßnahme wird die Speisewasservorwärmung kombiniert, um die mit dem Rauchgasstrom verbundenen Exergieverluste zu begrenzen? Erläutern Sie die Maßnahme kurz stichpunktartig.

Punktzahl:	/9

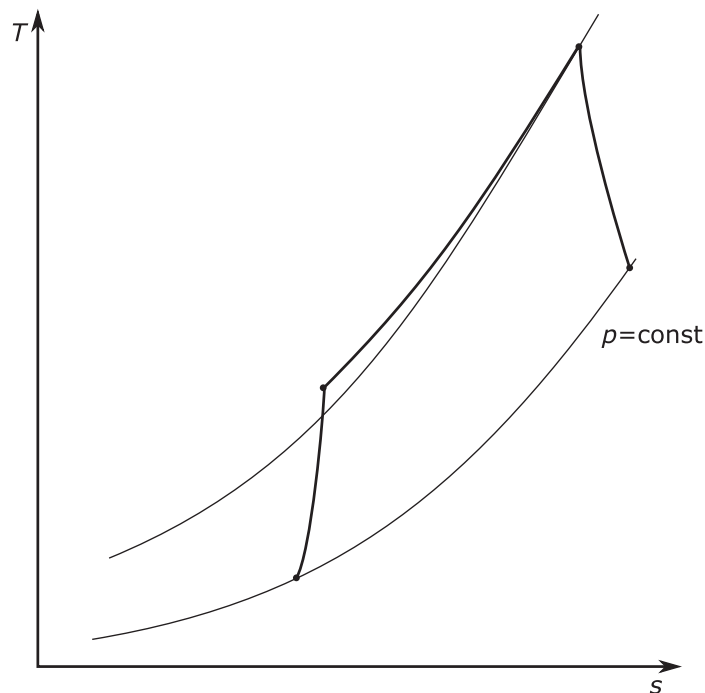
8. Gasturbinen 10 Punkte

Dargestellt ist ein einfacher offener Gasturbinenprozess, bestehend aus drei Komponenten. Der Prozess soll auf eine zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung erweitert werden. Der Massenstrom, die Temperatur und der Druck am Turbinenein- und Turbinenausstritt bleiben dabei unverändert, ebenso die polytropen Wirkungsgrade der Verdichter und der Turbine.

- (a) **(3 Punkte)** Zeichnen Sie die Änderungen, die sich durch die Integration der Zwischenkühlung ergeben, in das T,s -Diagramm.



RESERVE:



- (b) **(5 Punkte)** Welche Auswirkungen hat die Zwischenkühlung auf den Brennstoffmassenstrom und die Nettoleistung des Gasturbinensystems? Begründen Sie Ihre Antwort.

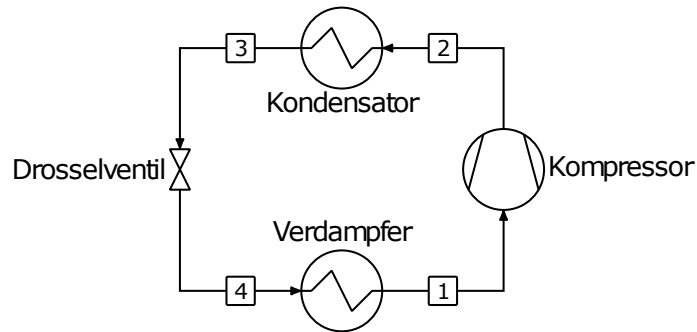
- (c) **(2 Punkte)** Nimmt der Vorteil einer mehrstufigen Verdichtung mit Zwischenkühlung mit steigendem polytropen Wirkungsgrad der Verdichter zu oder ab? Begründen Sie Ihre Antwort.

Punktzahl:	/10

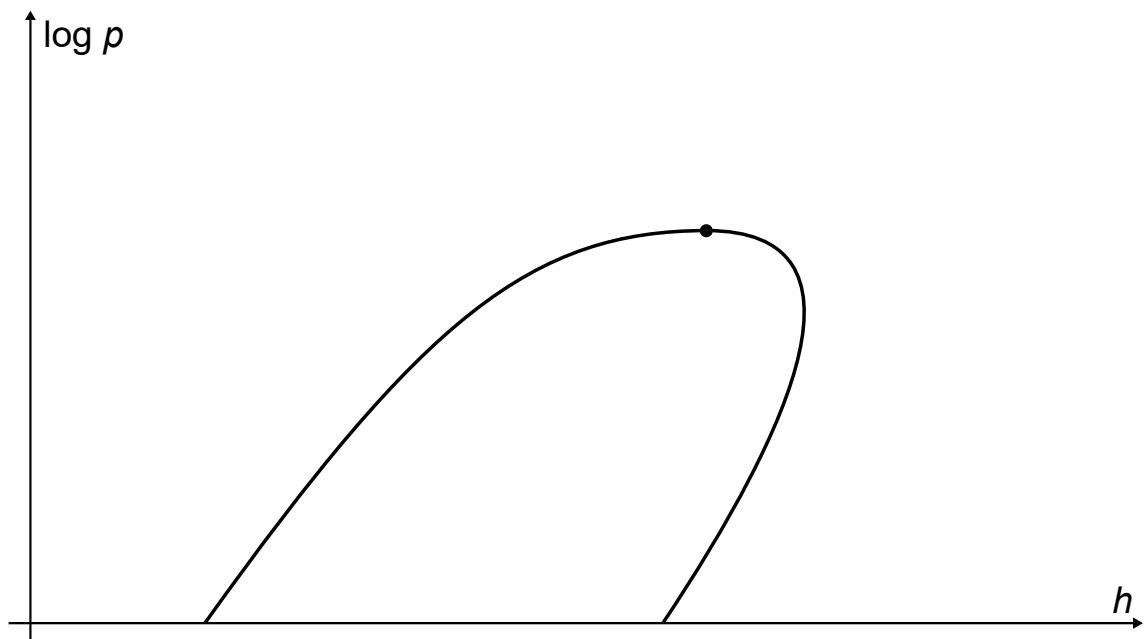
9. Kälteprozesse I 8 Punkte

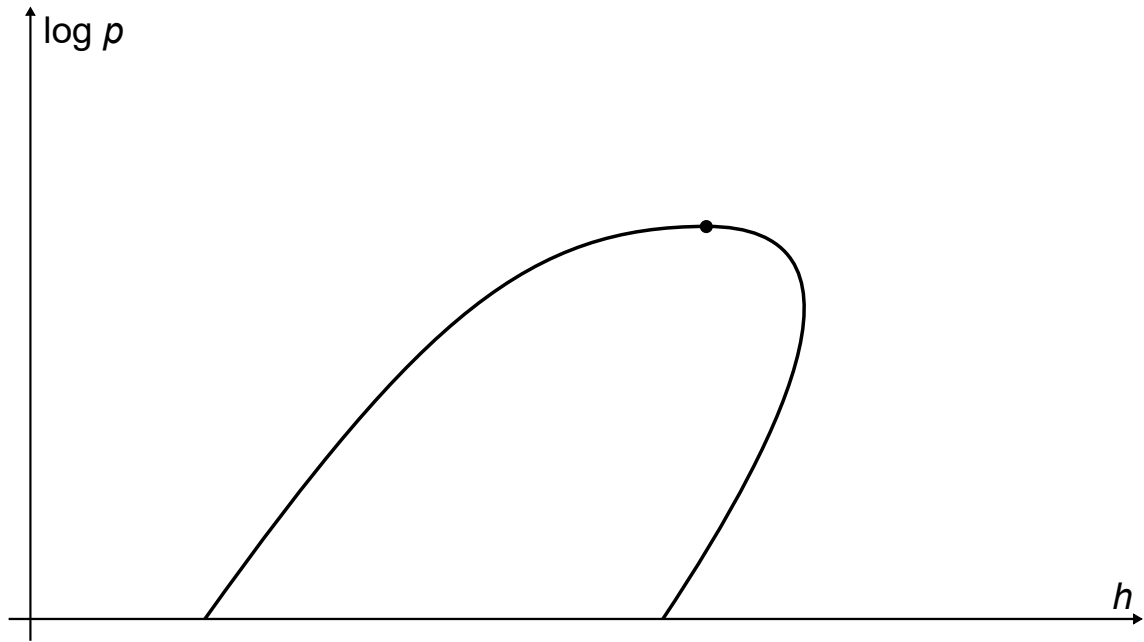
(a) (2 Punkte) Was sind die prinzipiellen Unterschiede zwischen einer Wärmepumpe und einer Kältemaschine? Gehen Sie dabei auf die Komponenten ein!

(b) (6 Punkte) Gegeben ist das Fließbild eines einfachen Kälteprozesses:



Stellen Sie den dargestellten realen Kälteprozess in einem $\log p, h$ -Diagramm dar. Gehen Sie in den Zuständen 1 und 3 von gesättigten Verhältnissen aus. Kennzeichnen Sie Isolinien für notwendige Größen (inklusive für T_0)!



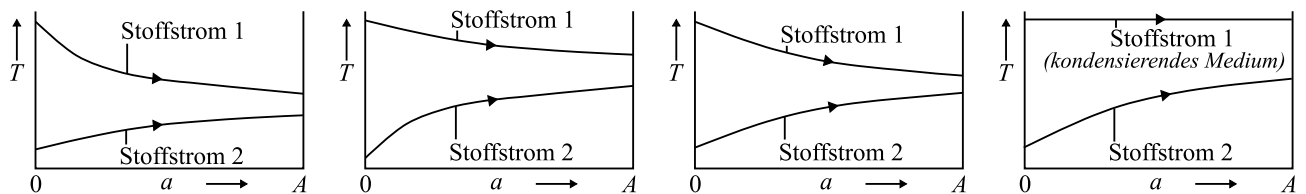
RESERVE:

Punktzahl:	/8

10. Wärmeübertrager 6 Punkte

(a) (4 Punkte) Ordnen Sie die angegebenen Gleichungen bzw. Ungleichungen den jeweiligen Bildern eines Wärmeübertragers zu. Tragen Sie dazu den jeweiligen Buchstaben (A, B oder C) unterhalb des dazugehörigen Bildes in die Box ein. Bei der Größe $\dot{C} = \dot{m} \cdot c_p$ handelt es sich um den Wärmekapazitätsstrom.

- A) $\dot{C}_1 = \dot{C}_2$
- B) $\dot{C}_1 > \dot{C}_2$
- C) $\dot{C}_1 < \dot{C}_2$

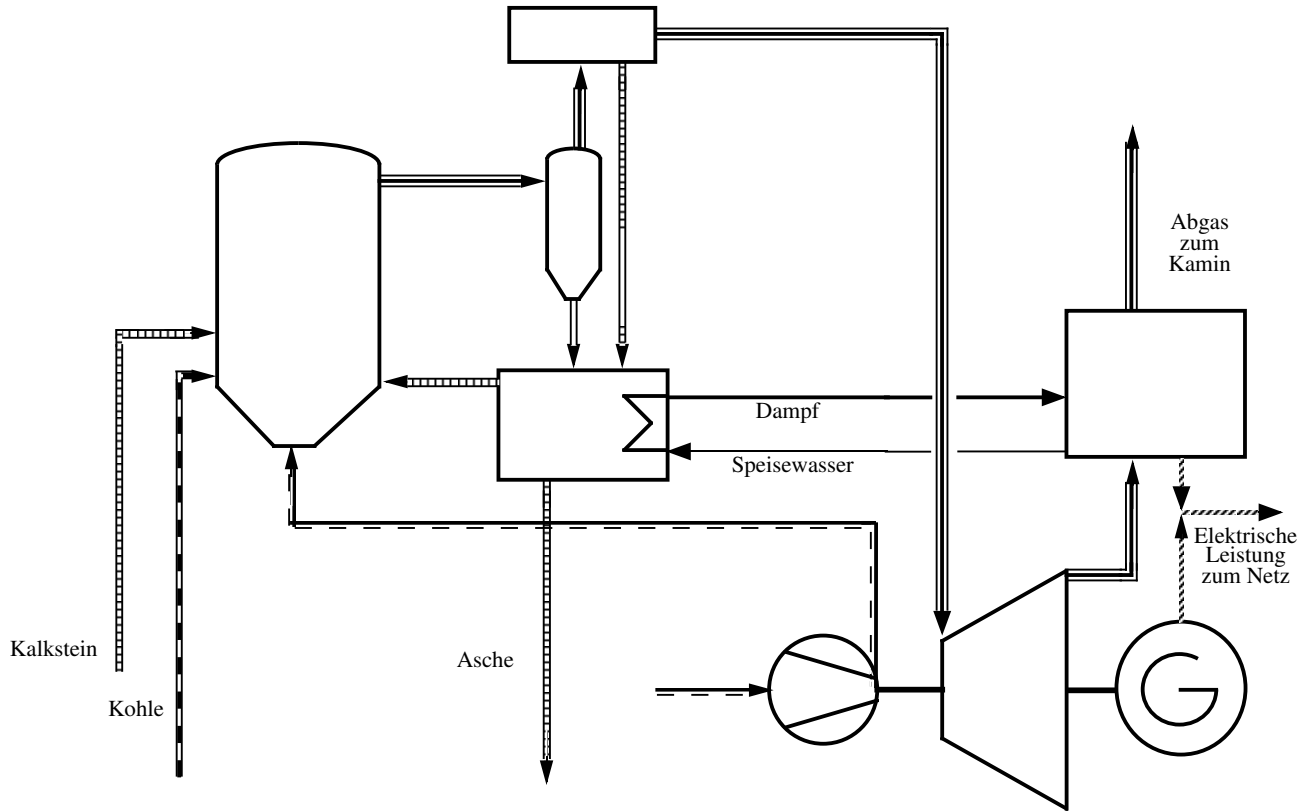


(b) (2 Punkte) Von welchen Größen bzw. Verhältnissen hängt die Exergievernichtung bei der Wärmeübertragung ab?

Punktzahl:	/6

11. Kombianlagen mit Kohleeinsatz 6 Punkte

Die untenstehende Abbildung zeigt eine Kombianlage mit Kohleeinsatz.



(a) (1 Punkt) Um was für einen Kombiprozess handelt es sich genau?

(b) (4 Punkte) Benennen Sie alle Komponenten, die im Fließbild dargestellt sind. Schreiben Sie die jeweiligen Bezeichnungen direkt ins Fließbild.

(c) (1 Punkt) Was ist aus thermodynamischer Sicht der größte Nachteil dieses Konzepts?

Punktzahl: /6

12. Alternative Brennstoffe 8 Punkte

Die nationale Wasserstoffstrategie Deutschlands sieht vor, grünen Wasserstoff verflüssigt per Schiff aus sonnenreichen Staaten nach Deutschland zu importieren. Moderne Flüssigerdgas-Transportschiffe (LNG-Tanker) haben ein Transportvolumen von etwa 250.000 m^3 .

Im gasförmigen Zustand besitzt Erdgas einen Heizwert von ca. $10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$. Durch die Verflüssigung wird eine Volumenreduktion auf $1/600$ erreicht. Der volumetrische Heizwert von Wasserstoff beträgt im gasförmigen Zustand etwa $3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$. Die Volumenreduktion durch Verflüssigung beträgt $1/800$.

- (a) **(4 Punkte)** Wie viele Tankschiffe (Angabe auf eine Nachkommastelle) des oben genannten Typs, beladen mit flüssigem Wasserstoff werden benötigt um die transportierte Energie (nur Heizwert) eines einzelnen Tankschiffs mit verflüssigtem Erdgas zu ersetzen? Die abweichenden Verdampfungsenthalpien der Gase sollen hier vereinfacht nicht mitbetrachtet werden.

- (b) **(2 Punkte)** Wasserstoff besitzt die höchste gravimetrische Energiedichte aller flüssigen und gasförmigen Brennstoffe. Warum ist die Betrachtung dieser Eigenschaft allein nicht ausreichend? Argumentieren Sie stichpunktartig.

- (c) **(2 Punkte)** Welche zusätzlichen energetischen Aufwände und technischen Herausforderungen ergeben sich noch beim Transport von verflüssigtem Wasserstoff?

Punktzahl:	/8
------------	----

13. Erneuerbare Energieträger 10 Punkte

(a) (10 Punkte) Ein bekannter Politiker braucht einen Experten bzw. eine Expertin und bittet Sie um Rat, welche der folgenden Technologien oder Energieträger kurz bis mittelfristig durch Investitionszuschüsse oder Einspeisevergütungen gefördert werden sollen. Nennen Sie zunächst je Option einen Vor- und zwei Nachteile. Zu welcher Technologie würden Sie Ihm raten?

- Atomkraftwerke
- Wasserstoff
- Onshore-Wind

Punktzahl:	/10

14. Kältetechnik II 7 Punkte

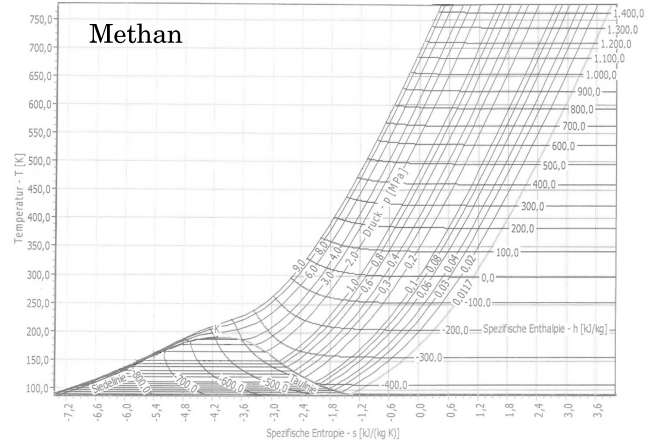
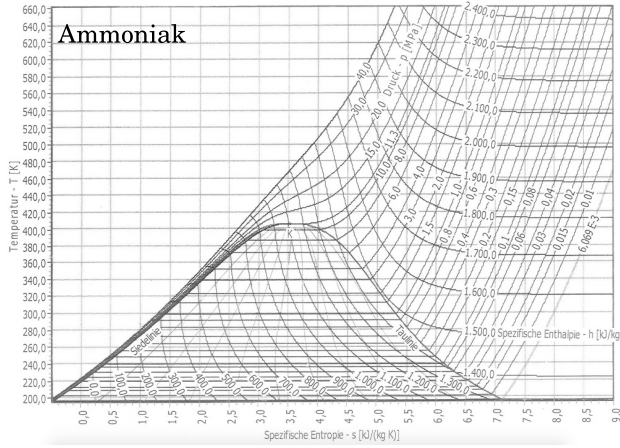
- (a) **(2 Punkte)** Nennen Sie die zwei Hauptunterschiede im Aufbau zwischen Absorptions- und Kompressionskältemaschine.

- (b) **(1 Punkt)** Der Joule-Thomson Effekt lässt sich durch den folgenden Koeffizienten mathematisch beschreiben: $\mu_{\text{Joule-Thomson}} = \left(\frac{\delta T}{\delta p}\right)_h$.

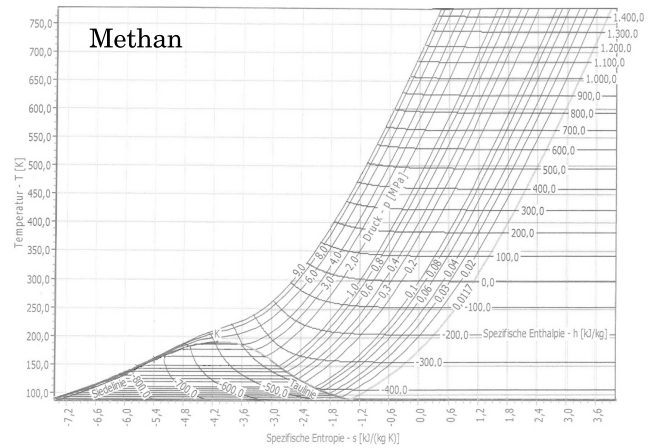
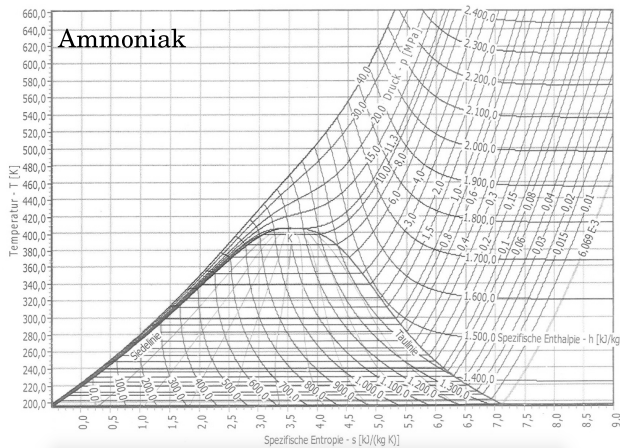
Welches Phänomen wird durch den Joule-Thomson Effekt beschrieben?

(c) (4 Punkte) Umranden und benennen Sie in den folgenden T-s-Diagrammen von Ammoniak bzw. Methan grob die Bereiche,

1. in denen das ideale Gasgesetz das Realgasverhalten in guter Näherung beschreibt $\rightarrow (\frac{\delta T}{\delta p})_h \approx 0$
2. in denen die Berücksichtigung des Joule-Thomson Effekts relevant ist $\rightarrow (\frac{\delta T}{\delta p})_h \neq 0$



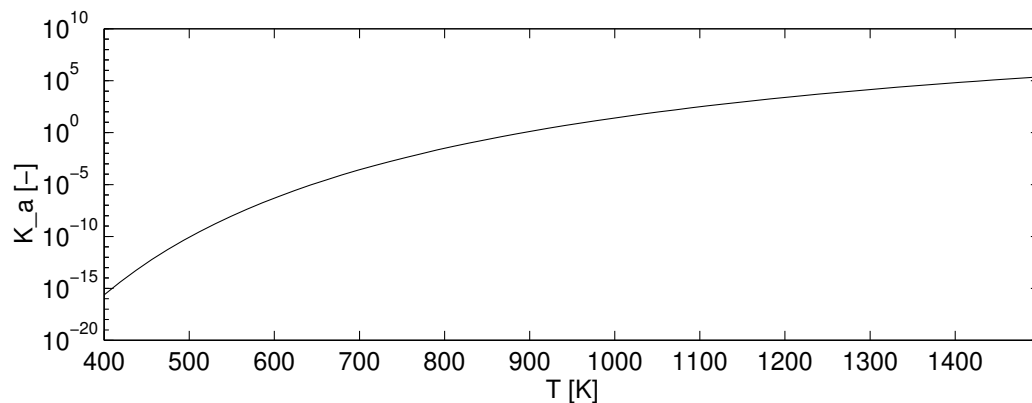
RESERVE:



Punktzahl:	/7

15. Chemisches Gleichgewicht 4 Punkte

In einem Reaktor läuft eine chemische Reaktion ab, deren Gleichgewichtskonstante die folgende Temperaturabhängigkeit aufweist:



- (a) **(1 Punkt)** Um welche Art von Reaktion handelt es sich in Bezug auf die Reaktionsenthalpie?

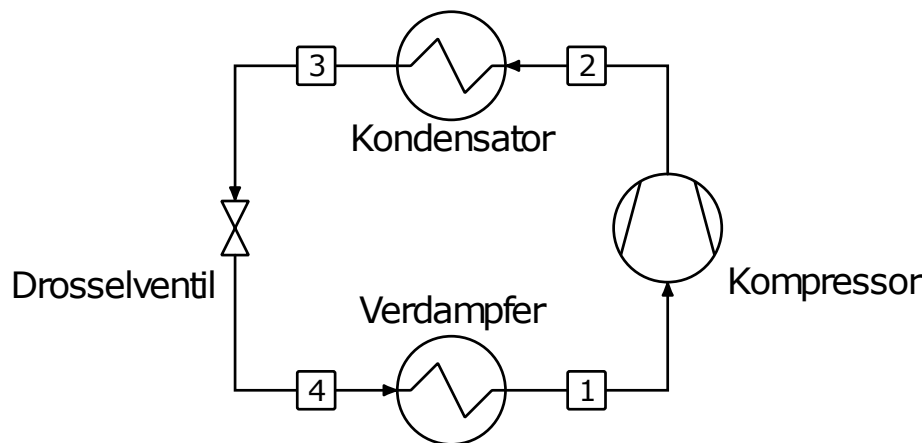
- (b) **(3 Punkte)** Die Temperatur im Reaktor lässt sich über Wärmeübertragerflächen einstellen. Eine Kollegin schlägt vor, das Temperaturniveau im Reaktor anzuheben. Die Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung soll dabei konstant gehalten werden. Lässt sich der Prozess auf diese Weise aus thermodynamischer Sicht verbessern? Nennen Sie zwei Gründe, mit denen sich Ihre Antwort rechtfertigen lässt.

Punktzahl:	/4
------------	----

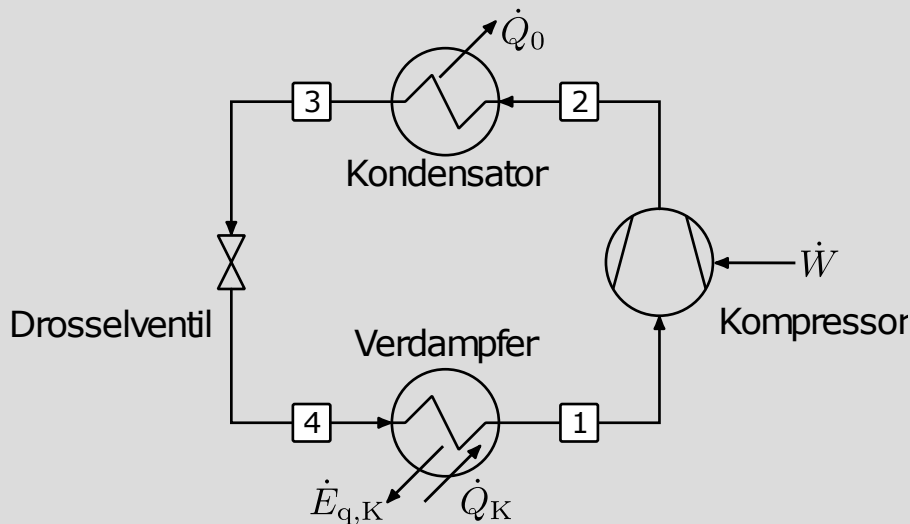
1. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse - Teil A 14 Punkte

Im Folgenden wird ein einfacher Kälteprozess betrachtet. Das Drosselventil und der Kompressor sind nach außen adiabatisch. Änderungen der kinetischen und potentiellen Energie können vernachlässigt werden.

- (a) (5 Punkte) Markieren Sie **mit Pfeilen** alle Energieströme, die dem System zu- oder abgeführt werden. Ein bei der Kühlraumtemperatur T_K zugeführter Wärmestrom soll mit \dot{Q}_K und ein bei der Umgebungstemperatur T_0 abgeführter Wärmestrom mit \dot{Q}_0 bezeichnet werden. Tragen sie außerdem **mit Pfeilen** alle auftretenden Exergieströme ein, die dem System zu- oder abgeführt werden, sofern sich diese von dem dazugehörigen Energiestrom in Größe oder Richtung unterscheiden.



1 Punkt Kompressor mit \dot{W} ; 2 Punkte Verdampfer mit \dot{Q}_K und $\dot{E}_{q,K}$ (Richtung!); 1 Punkt Kondensator mit \dot{Q}_0 u. ohne $\dot{E}_{q,0}$ oder wenn $\dot{E}_{q,0} = 0$ geschrieben wurde (sonst 0,5 Abzug); 1 Punkt Drossel ohne Ströme



- (b) **(2 Punkte)** Definieren Sie die Leistungszahl für den dargestellten Kälteprozess.

Nutzen und Aufwand jeweils 1 Punkt

$$LZ = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}}$$

- (c) **(2 Punkte)** Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad für den dargestellten Kälteprozess.

Nutzen und Aufwand jeweils 1 Punkt

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{q,K}}{\dot{W}}$$

- (d) **(2 Punkte)** Für den dargestellten einfachen Kälteprozess soll nun eine alternative Definition des exergetischen Nutzens auf der Basis von Sekundärstoffströmen erarbeitet werden. Welche Anpassungen würden Sie dafür im Fließbild vornehmen und wie ließe sich der exergetische Nutzen für diesen Fall definieren? Beschreiben Sie stichpunktartig. Es muss keine Formel aufgestellt werden.

- Verdampfer mit ein- und austretendem Stoffstrom auf der kalten Seite (1 Punkt)
- Nutzen ist Exergiezunahme des zu kühlenden Stoffstroms (Exergiedifferenz) (1 Punkt)

- (e) **(3 Punkte)** Kann der mit einem positiven Wärmestrom \dot{Q} verbundene Exergiestrom \dot{E}_q negativ werden? Begründen Sie stichpunktartig anhand einer geeigneten Formel.

Ja (1 Punkt), für

$$E_q < 0?$$

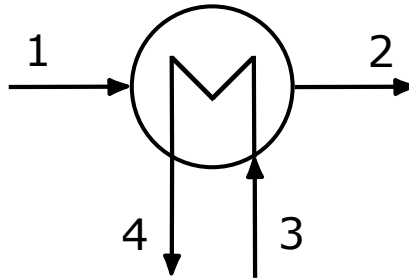
$$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} < 0 \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$1 - \frac{T_0}{T} < 0$$

$$T < T_0 \quad (1 \text{ Punkt})$$

2. Exergieanalyse/Thermodynamische Analyse - Teil B 11 Punkte

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



- (a) (4 Punkte) Definieren Sie den exergetischen Wirkungsgrad für den dargestellten Wärmeübertrager.

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

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

oder

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T}{(\dot{E}_3^T - \dot{E}_4^T) + (\dot{E}_3^M - \dot{E}_4^M) + (\dot{E}_1^M - \dot{E}_2^M)}$$

- (b) (2 Punkte) Nehmen Sie an, dass die Zustände 1 und 2 festgelegt sind. Durch welche Maßnahme ließe sich der exergetische Wirkungsgrad steigern und was würde dies für die apparative Umsetzung bedeuten? Druckverluste sollen hierbei vernachlässigt werden.

- Verringerung der Differenz der mittleren Temperaturen zwischen kalter und warmer Seite (1 Punkt) durch
- Vergrößerung der Wärmeübertragerfläche (1 Punkt)

- (c) (5 Punkte) Stellen Sie für den betrachteten Wärmeübertrager eine Kostenbilanz inklusive Hilfsbeziehung(en) auf, wie sie für eine exergoökonomische Analyse verwendet wird. Um welche Art von Kosten-Hilfsbeziehung(en) handelt es sich? Was ist die Zielgröße der Kostenbilanz?

Kostenbilanz Wärmeübertrager (2 Punkte):

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

HB (1 Punkt):

$$c_3 = c_4$$

Art (1 Punkt): F-Rule

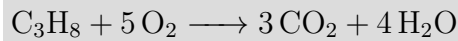
Zielgröße (1 Punkt): c_2

3. Verbrennung 8 Punkte

- (a) **(8 Punkte)** Geben Sie eine Reaktionsgleichung für die vollständige und vollkommene Verbrennung von Propan C_3H_8 mit Sauerstoff an. Wie groß ist der Molenstrom \dot{n}_{O_2} des Sauerstoffs, der zur stöchiometrischen Verbrennung von $0,025 \text{ kmol/s}$ Propan benötigt wird? Geben Sie außerdem den zugehörigen Massenstrom \dot{m}_{Luft} der Luft an. Für die Zusammensetzung der Luft wird das folgende Stoffmengenverhältnis angenommen.

$$\frac{x_{\text{O}_2}}{x_{\text{N}_2}} = \frac{0,21}{0,79}$$

(2 Punkte) Reaktionsgleichung



(2 Punkte) Stoffmengenstrom

$$\dot{n}_{\text{O}_2} = 0,025 \cdot 5 = 0,125 \text{ kmol/s}$$

(1 Punkt) Bestimmung molare Massen aus Formelsammlung

$$M_{\text{O}_2} = 32 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{\text{N}_2} = 28 \text{ kg/kmol}$$

(2 Punkte) Ansatz

(1 Punkt) Ergebnis

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{Luft}} &= \dot{n}_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2} + \frac{x_{\text{N}_2}}{x_{\text{O}_2}} \cdot \dot{n}_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{N}_2} \\ &= 0,125 \cdot 32 + \frac{0,79}{0,21} \cdot 0,125 \cdot 28 \\ &\approx 17,17 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

4. Wirtschaftlichkeitsanalyse 9 Punkte

(a) **(6 Punkte)** Erläutern Sie kurz die folgenden Kostenkategorien und nennen Sie jeweils ein Beispiel.

- i. Fixkosten
- ii. variable Kosten
- iii. Investitionskosten

- Fixkosten: wiederkehrende Kosten, die kurzfristig unabhängig von der Produktionsmenge sind, Beispiel – Jährlich stattfindende Wartung
- variable Kosten – wiederkehrende Kosten, die unmittelbar von der Produktionsmenge abhängen, Beispiel – Brennstoffkosten
- Investitionskosten: einmalig anfallende finanzielle Aufwendungen, Beispiel – Austausch einer Pumpe

Bewertung: 1 P für richtige Erklärung + 1 P für Beispiel

(b) **(3 Punkte)** Multiple Choice: Kreuzen Sie die richtigen Antworten zu der jeweiligen Frage / Aussage an. Es sind mehrere Antworten möglich.

Bewertung: Jeweils 1 Punkt pro Frage für die richtig angegebenen Antwortkombinationen, falsche Antworten (auch Kombinationen aus falschen mit richtigen Antworten) werden mit 0 Punkte bewertet. Es werden **keine** Punkte für falsche Antworten abgezogen.

Was berücksichtigt der <i>Zeitwert des Geldes</i> bei den Kosten?	
a)	Kosten, die zum jetzigen Zeitpunkt anfallen, haben einen höheren Wert als in der Zukunft liegende
b)	die Berücksichtigung der Inflation
c)	Kosten, die zum jetzigen Zeitpunkt anfallen, haben einen geringeren Wert als in der Zukunft liegende
Was berücksichtigt die <i>Kostensteigerungsrate</i> ?	
a)	Inflation
b)	Kostenindex
c)	Kostenentwicklung über die Zeit
Wie sind <i>Annuitäten</i> definiert?	
a)	Kreditrückzahlungen
b)	regelmäßig wiederkehrende Zahlung eines konstanten Betrages

- Was berücksichtigt der Zeitwert des Geldes bei den Kosten? – *Antwort: a*
- Was berücksichtigt die Kostensteigerungsrate? – *Antwort: a und c (nominelle Steigerungsrate) oder nur c (reale Steigerungsrate)*
- Wie sind *Annuitäten* definiert? – *Antwort: b*

5. Energieträger 6 Punkte

(a) **(6 Punkte)** Multiple Choice: Kreuzen Sie die richtigen Antworten zu der jeweiligen Frage / Aussage an. Es sind mehrere Antworten möglich.

Bewertung: Jeweils 1 Punkt pro Frage für die richtig angegebenen Antwortkombinationen, falsche Antworten (auch Kombinationen aus falschen mit richtigen Antworten) werden mit 0 Punkte bewertet. Es werden **keine** Punkte für falsche Antworten abgezogen.

1.	Welche Aussagen treffen auf Primärenergieträger zu?	
	a)	werden von der Natur unmittelbar und unverändert zur Verfügung gestellt
	b)	werden von nicht regenerierbaren und regenerierbaren Energieträgern bereitgestellt
2.	Die folgenden Energieträger sind Endenergieträger:	
	a)	elektrische Energie
	b)	Kraft
3.	Welche genannten Energieträger werden der Nutzenergie zugeordnet?	
	a)	Wasserstoff
	b)	mechanische Energie
	c)	Kraftstoffe
4.	Welcher der Punkte wird dem nicht energetischen Verbrauch zugeordnet?	
	a)	Schmierstoffe
	b)	Kraftstoffe
	c)	Kunststoffproduktion
5.	Biomasse ist ein Primärenergieträger?	
	a)	ja
	b)	nein
6.	Die folgenden Energieträger werden den erneuerbaren Energieträgern zugeordnet	
	a)	Kernenergie
	b)	Sonnenstrahlen
	c)	Laufwasser

1. Antwort: a und b

2. Antwort: a

3. Antwort: b

4. Antwort: a und c

5. Antwort: a

6. Antwort: b und c

6. Fossile Brennstoffe 5 Punkte

(a) **(3 Punkte)** Es sollen die drei folgenden Brenngase mit ihren jeweiligen ungefähren Zusammensetzungen betrachtet werden (Restgase werden vernachlässigt):

- Erdgas: CH_4 (ca. 90 %)
- Flüssiggas: C_3 -Kohlenwasserstoffe (ca. 90 %), C_4 -Kohlenwasserstoffe (< 10 %)
- Stadtgas: H_2 (ca. 40–50 %), CH_4 (ca. 20 %), N_2 (ca. 15 %), CO (ca. 10 %)

Ordnen Sie die Brenngase in Abhängigkeit ihres Brennwertes in die nachfolgende Tabelle ein (*Hinweis*: Die Angabe der volumetrischen Brennwerte erfolgt wie im Skript nach DIN 1340 bei $p_0 = 1,01325 \text{ bar}$):

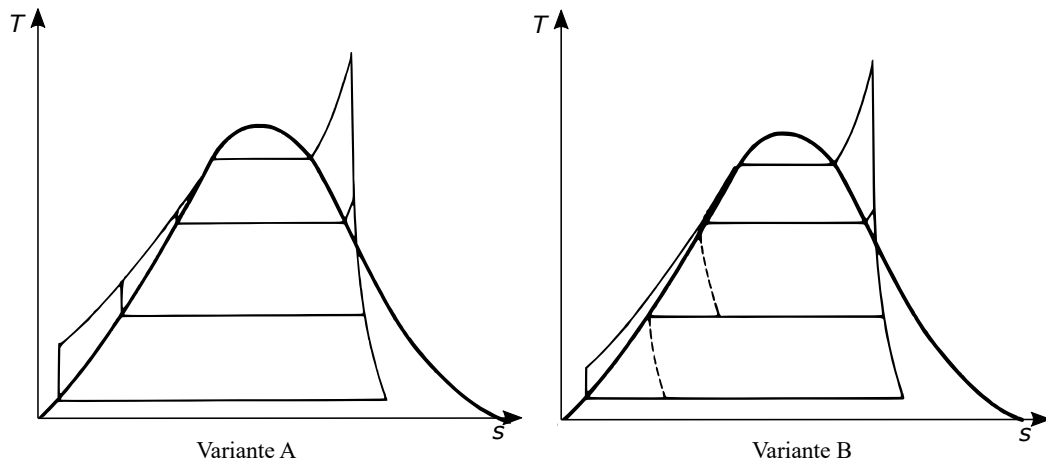
10–30 MJ/m ³	30–75 MJ/m ³	über 75 MJ/m ³
Stadtgas	Erdgas	Flüssiggas

(b) **(2 Punkte)** Nennen Sie zwei Gründe, weshalb Roherdgas in vielen Fällen aufbereitet werden muss.

- Begleitstoffe wie Wasser können in Erdgaspipelines auskondensieren und zu Korrosionsproblemen führen
- enthaltenes H_2S würde bei Verbrennung zu SO_2 oxidiert werden -> unerwünscht, da Erdgasfeuerungen in der Regel für schwefelfreien Brennstoff konzipiert werden / keine REA
- Restgase wie CO_2 erhöhen nötige Verdichterleistung

7. Dampfkraftwerke 9 Punkte

In dem dargestellten T,s -Diagramm sind zwei unterschiedliche Verschaltungsvarianten von Speisewasservorwärmern dargestellt. Die Massenströme und thermodynamischen Zustände der jeweiligen Dampfanzapfungen sind identisch.



- (a) (2 Punkte) Wie unterscheiden sich Variante A und B auf Komponentenebene?

In Variante A werden die Kondensatströme mittels **Pumpen** (1,0 Punkte) auf das Druckniveau des Speisewasserstroms gehoben und diesem beigemischt. In Variante B findet eine Druckabsenkung mittels **Drosseln** (1,0 Punkte) statt und anschließender Kondensatrückführung. (Bei beiden Varianten handelt es sich um Oberflächenvorwärmer.)

- (b) (2 Punkte) Welche Variante ist mit höheren Investitionskosten verbunden? Begründen Sie Ihre Antwort.

Variante A ist mit höheren Investitionskosten verbunden aufgrund der zusätzlichen Pumpen.

- (c) (2 Punkte) c) Welche Variante ist mit einer höheren Exergievernichtung verbunden? Begründen Sie Ihre Antwort.

Variante B aufgrund der Drosselung.

- (d) (3 Punkte) Mit welcher zusätzlichen Maßnahme wird die Speisewasservorwärmung kombiniert, um die mit dem Rauchgasstrom verbundenen Exergieverluste zu begrenzen? Erläutern Sie die Maßnahme kurz stichpunktartig.

Durch einen Luftvorwärmer (2,0 Punkte) kann Wärme vom Rauchgas an die Verbrennungsluft übertragen und so die Temperatur bzw. die Exergieverluste des Abgasstroms verringert werden (1,0 Punkte).

8. Gasturbinen 10 Punkte

Dargestellt ist ein einfacher offener Gasturbinenprozess, bestehend aus drei Komponenten. Der Prozess soll auf eine zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung erweitert werden. Der Massenstrom, die Temperatur und der Druck am Turbinenein- und Turbinenausstritt bleiben dabei unverändert, ebenso die polytropen Wirkungsgrade der Verdichter und der Turbine.

- (a) **(3 Punkte)** Zeichnen Sie die Änderungen, die sich durch die Integration der Zwischenkühlung ergeben, in das T,s -Diagramm.

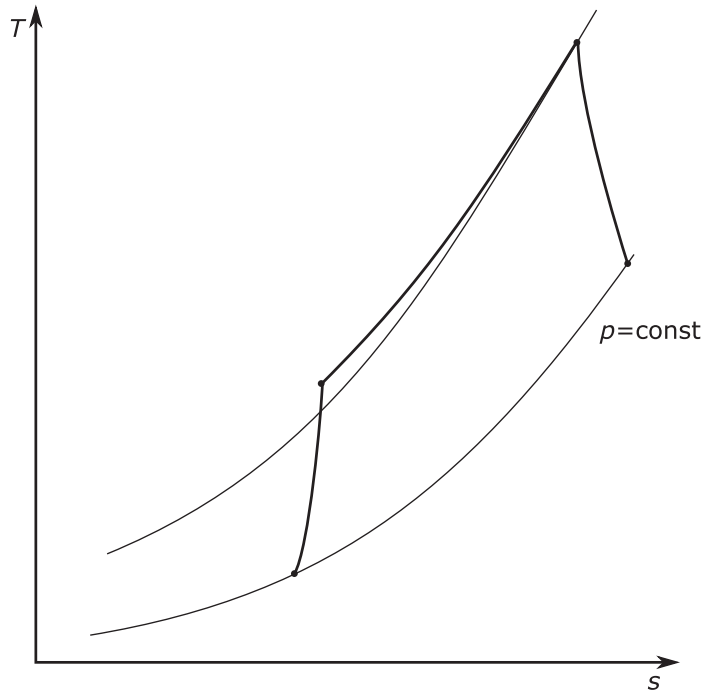
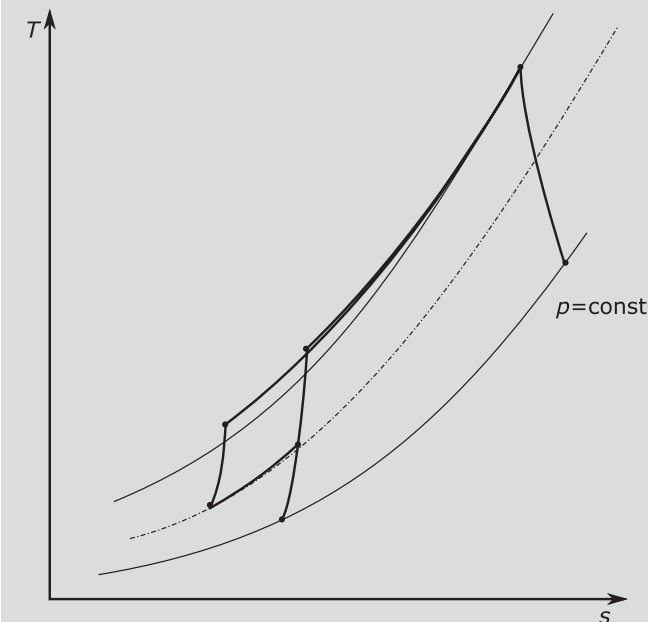


Diagramm: 3 neue Zustandsänderungen, jeweils 1 Pkt.



- (b) **(5 Punkte)** Welche Auswirkungen hat die Zwischenkühlung auf den Brennstoffmassenstrom und die Nettoleistung des Gasturbinensystems? Begründen Sie Ihre Antwort.

Aufgrund der Zwischenkühlung sinkt die Temperatur des Luftmassenstroms am Eintritt der Brennkammer (1,0 Punkte). Um die gleiche Temperatur am Austritt der Brennkammer wie zuvor zu erreichen, ist ein größerer Brennstoffmassenstrom erforderlich (1,0 Punkte).

Die Leistung der Turbine bleibt unverändert (1,0 Punkte). Die Zwischenkühlung verringert die Leistungsaufnahme des Verdichters (1,0 Punkte). Aus der Energiebilanz der Welle folgt, dass die Nettoleistung zunimmt (1,0 Punkte).

- (c) **(2 Punkte)** Nimmt der Vorteil einer mehrstufigen Verdichtung mit Zwischenkühlung mit steigendem polytropen Wirkungsgrad der Verdichter zu oder ab? Begründen Sie Ihre Antwort.

Ein steigender polytroper Wirkungsgrad des Verdichters führt zu einer geringeren Verdichteraustrittstemperatur (1,0 Punkte) und damit einhergehend zu einer geringeren Leistungsaufnahme des Verdichters. Der Vorteil der Zwischenkühlung, welche in der Verringerung der Verdichterleistung aufgrund der Verdichtung auf einem niedrigerem Temperaturniveau beruht, nimmt hierdurch ab (1,0 Punkte).

9. Kälteprozesse I 8 Punkte

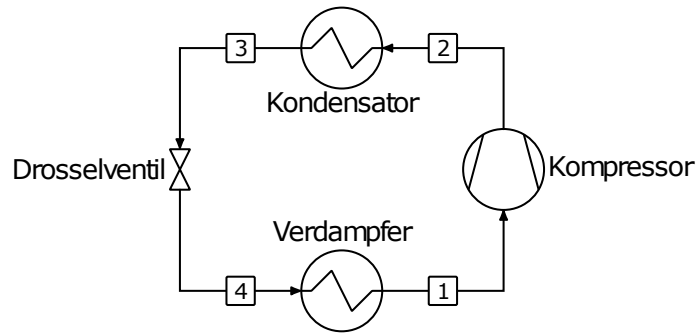
(a) **(2 Punkte)** Was sind die prinzipiellen Unterschiede zwischen einer Wärmepumpe und einer Kältemaschine? Gehen Sie dabei auf die Komponenten ein!

1 Pkt: Die Komponenten sind identisch.

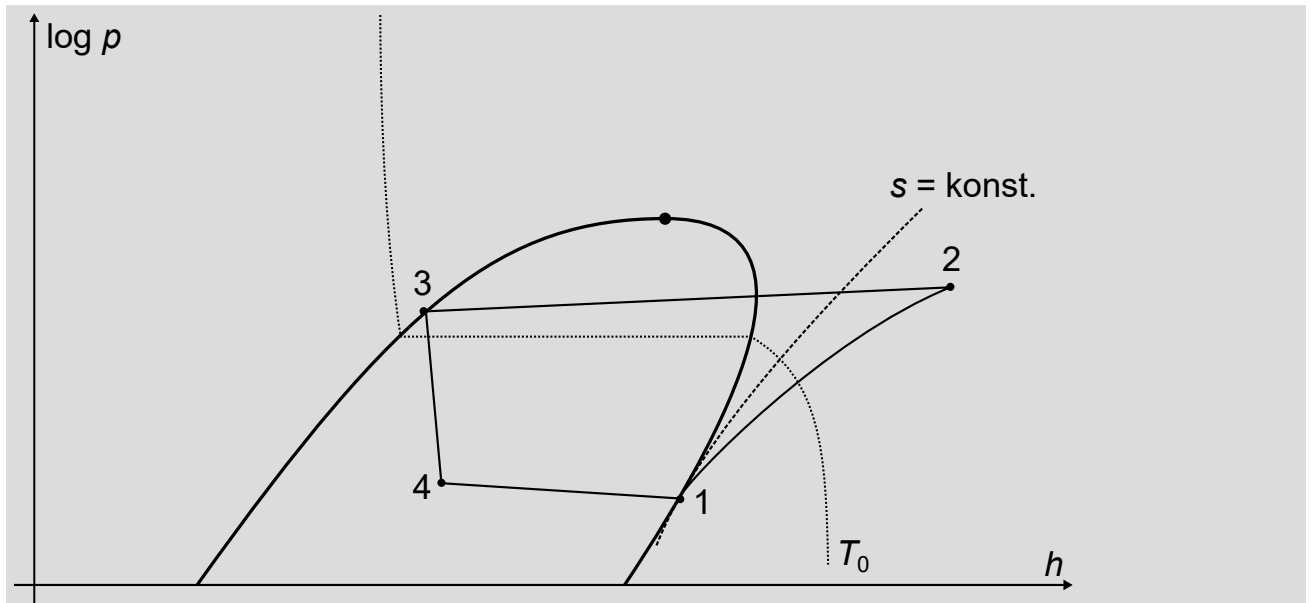
1 Pkt: Der Unterschied liegt allein in der Definition des Nutzens.

Antwort "Temperaturbereich in dem sie arbeiten" kann 0,5 Punkte geben, wenn weniger als 2 Punkte erreicht werden.

(b) **(6 Punkte)** Gegeben ist das Fließbild eines einfachen Kälteprozesses:



Stellen Sie den dargestellten realen Kälteprozess in einem $\log p, h$ -Diagramm dar. Gehen Sie in den Zuständen 1 und 3 von gesättigten Verhältnissen aus. Kennzeichnen Sie Isolinien für notwendige Größen (inklusive für T_0)!



Je 1 Pkt pro reale ZÄ (1-2 erfordert isentrope für reale)

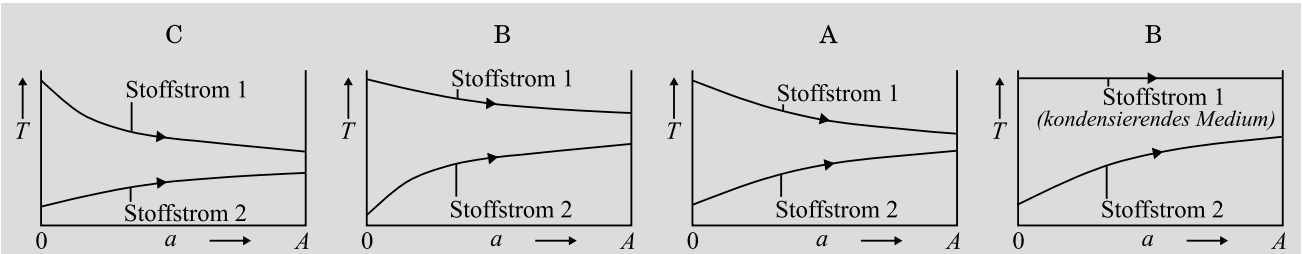
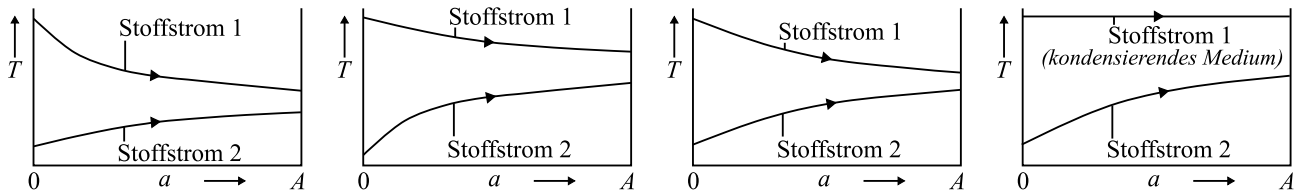
1 Pkt T_0 -Isolinie

1 Pkt: Beschriftung

10. Wärmeübertrager 6 Punkte

(a) (4 Punkte) Ordnen Sie die angegebenen Gleichungen bzw. Ungleichungen den jeweiligen Bildern eines Wärmeübertragers zu. Tragen Sie dazu den jeweiligen Buchstaben (A, B oder C) unterhalb des dazugehörigen Bildes in die Box ein. Bei der Größe $\dot{C} = \dot{m} \cdot c_p$ handelt es sich um den Wärmekapazitätsstrom.

- A) $\dot{C}_1 = \dot{C}_2$
- B) $\dot{C}_1 > \dot{C}_2$
- C) $\dot{C}_1 < \dot{C}_2$



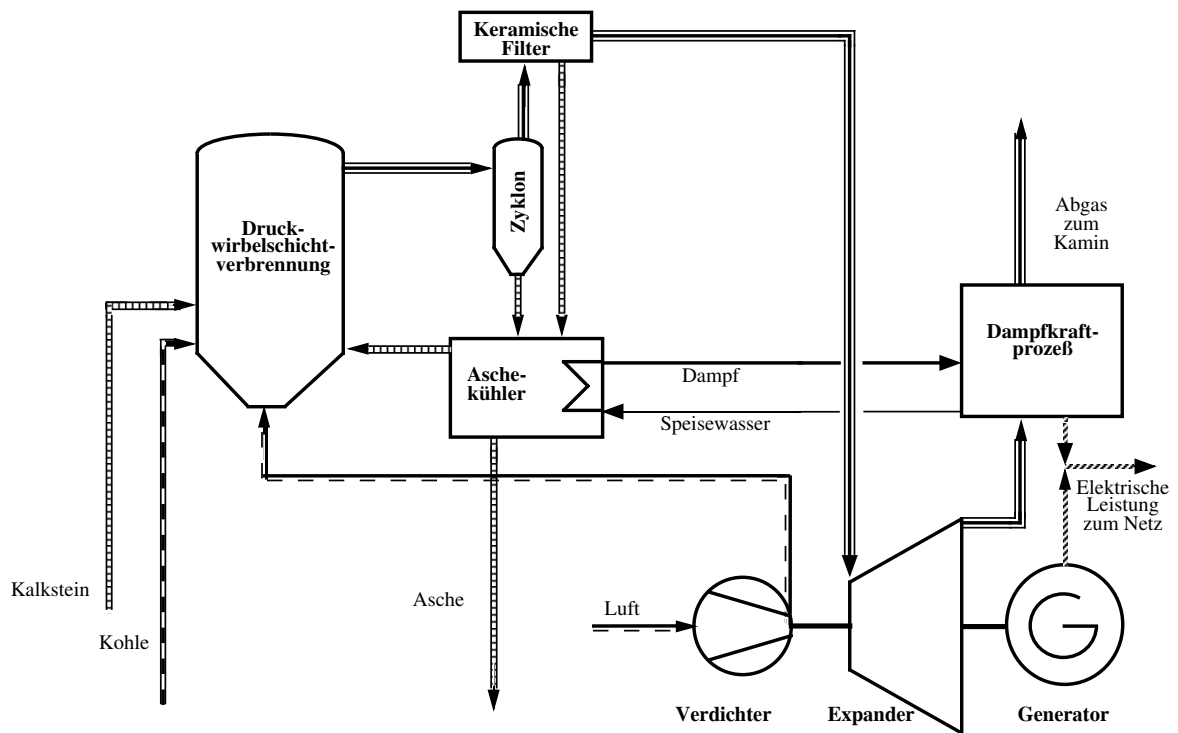
Fluid mit dem höheren Wärmekapazitätsstrom erfährt eine geringe Temperaturänderung

(b) (2 Punkte) Von welchen Größen bzw. Verhältnissen hängt die Exergievernichtung bei der Wärmeübertragung ab?

Von Temperaturdifferenz und Temperaturniveau der Wärmeübertragung

11. Kombianlagen mit Kohleeinsatz 6 Punkte

Die untenstehende Abbildung zeigt eine Kombianlage mit Kohleeinsatz.



- (a) (1 Punkt) Um was für einen Kombiprozess handelt es sich genau?

Kombiprozess mit zirkulierender Druckwirbelschichtfeuerung

- (b) (4 Punkte) Benennen Sie alle Komponenten, die im Fließbild dargestellt sind. Schreiben Sie die jeweiligen Bezeichnungen direkt ins Fließbild.

0,5 Punkte pro Komponente

- (c) (1 Punkt) Was ist aus thermodynamischer Sicht der größte Nachteil dieses Konzepts?

geringe Gasturbineneintrittstemperatur aufgrund der geringen Temperatur der Wirbelschicht (temperaturabhängige Entschwefelung)

12. Alternative Brennstoffe 8 Punkte

Die nationale Wasserstoffstrategie Deutschlands sieht vor, grünen Wasserstoff verflüssigt per Schiff aus sonnenreichen Staaten nach Deutschland zu importieren. Moderne Flüssigerdgas-Transportschiffe (LNG-Tanker) haben ein Transportvolumen von etwa 250.000 m^3 .

Im gasförmigen Zustand besitzt Erdgas einen Heizwert von ca. $10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$. Durch die Verflüssigung wird eine Volumenreduktion auf $1/600$ erreicht. Der volumetrische Heizwert von Wasserstoff beträgt im gasförmigen Zustand etwa $3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$. Die Volumenreduktion durch Verflüssigung beträgt $1/800$.

- (a) **(4 Punkte)** Wie viele Tankschiffe (Angabe auf eine Nachkommastelle) des oben genannten Typs, beladen mit flüssigem Wasserstoff werden benötigt um die transportierte Energie (nur Heizwert) eines einzelnen Tankschiffs mit verflüssigtem Erdgas zu ersetzen? Die abweichenden Verdampfungsenthalpien der Gase sollen hier vereinfacht nicht mitbetrachtet werden.

1) Gesucht ist nach dem Faktor der enthaltenen Energie zweier Stoffe bei konstantem Volumen $\frac{E_{\text{chem,LNG-Tanker}}}{E_{\text{chem,LH2-Tanker}}}$ bzw. allgemeiner nach dem Verhältnis der volumetrischen Heizwerte im flüssigen Zustand $\frac{H_{i,\text{LNG}}}{H_{i,\text{LH2}}}$

$$2) \frac{E_{\text{chem,LNG-Tanker}}}{E_{\text{chem,LH2-Tanker}}} = \frac{\frac{10}{1}}{\frac{3}{800}} = 2,5$$

- (b) **(2 Punkte)** Wasserstoff besitzt die höchste gravimetrische Energiedichte aller flüssigen und gasförmigen Brennstoffe. Warum ist die Betrachtung dieser Eigenschaft allein nicht ausreichend? Argumentieren Sie stichpunktartig.

Wasserstoff besitzt die geringste Dichte aller Gase und damit eine niedrige volumetrische Energiedichte, welche deutlich unterhalb derjenigen aller Kohlenwasserstoffe liegt. Nur unter hohem Druck oder in flüssiger Form bei tiefen Temperaturen können im Vergleich zu Kohlenwasserstoffen (gasförmig und flüssig) vertretbare volumetrische Speicherdichten erreicht werden.

- (c) **(2 Punkte)** Welche zusätzlichen energetischen Aufwände und technischen Herausforderungen ergeben sich noch beim Transport von verflüssigtem Wasserstoff?

Energieaufwand zur Wasserstoffverflüssigung beträgt ca. $0,23 \text{ kWh}_{\text{el}}$ um 1 kWh (Brennwert) Wasserstoff zu verflüssigen.

Energieaufwand zur Rückvergasung am Landeterminal.

Wasserstoffkorrosion an Metallen von Rohrleitungen etc.

Bisherige Erdgasinfrastruktur kann in den meisten Fällen nicht ohne Weiteres für Wasserstoff genutzt werden.

Boil-off-Verluste durch Wärmeeintrag in Speicher.

13. Erneuerbare Energieträger 10 Punkte

(a) (10 Punkte) Ein bekannter Politiker braucht einen Experten bzw. eine Expertin und bittet Sie um Rat, welche der folgenden Technologien oder Energieträger kurz bis mittelfristig durch Investitionszuschüsse oder Einspeisevergütungen gefördert werden sollen. Nennen Sie zunächst je Option einen Vor- und zwei Nachteile. Zu welcher Technologie würden Sie Ihm raten?

- Atomkraftwerke
- Wasserstoff
- Onshore-Wind

1 Pkt je Vor- und Nachteil

1 Pkt Fazit: Wind

	Vorteile (Auswahl)	Nachteile (Auswahl)
AKW	CO ₂ -freie gesicherte Grundlast	ungeklärte Endlagerfrage, hohes Unfallrisiko, hohe Investitionskosten, Brennstoff muss importiert werden, komplettes An- und Abschalten der Anlage sehr aufwendig
Wasserstoff	potenziell universell einsetzbar	keine natürliche Ressource, hohe Verluste entlang der Nutzungskette, Infrastruktur nicht vorhanden, Je nach Anwendungszweck meist nur die zweit-/drittbeste Lösung, ohne EE-Ausbau nicht sinnvoll
Onshore-Wind	geringe Auswirkungen auf Flora und Fauna, günstig	hoher spezifischer Flächenbedarf, stark eingeschränkte Regelbarkeit, lokale Widerstände möglich

Fazit: Kurz bis Mittelfristig ist Onshore-Windenergie die einzige Option, da erprobte und günstige Technologie. Wasserstoff ist langfristig eine Option aber nicht in dem anvisierten Zeitraum, da zu viele ungeklärte Fragen. Atomkraftwerke sind in dem Zeitraum ebenfalls nicht realisierbar

14. Kältetechnik II 7 Punkte

(a) (2 Punkte) Nennen Sie die zwei Hauptunterschiede im Aufbau zwischen Absorptions- und Kompressionskältemaschine.

Verdichter: mechanisch bei KKM, thermisch bei AKM
Arbeitsmittel: KKM nutzt Reinstoff, AKM nutzt Zweistoffgemisch

(b) (1 Punkt) Der Joule-Thomson Effekt lässt sich durch den folgenden Koeffizienten mathematisch beschreiben: $\mu_{\text{Joule-Thomson}} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h$.

Welches Phänomen wird durch den Joule-Thomson Effekt beschrieben?

Temperaturänderung bei isenthalper Drosselung

(c) (4 Punkte) Umranden und benennen Sie in den folgenden T-s-Diagrammen von Ammoniak bzw. Methan grob die Bereiche,

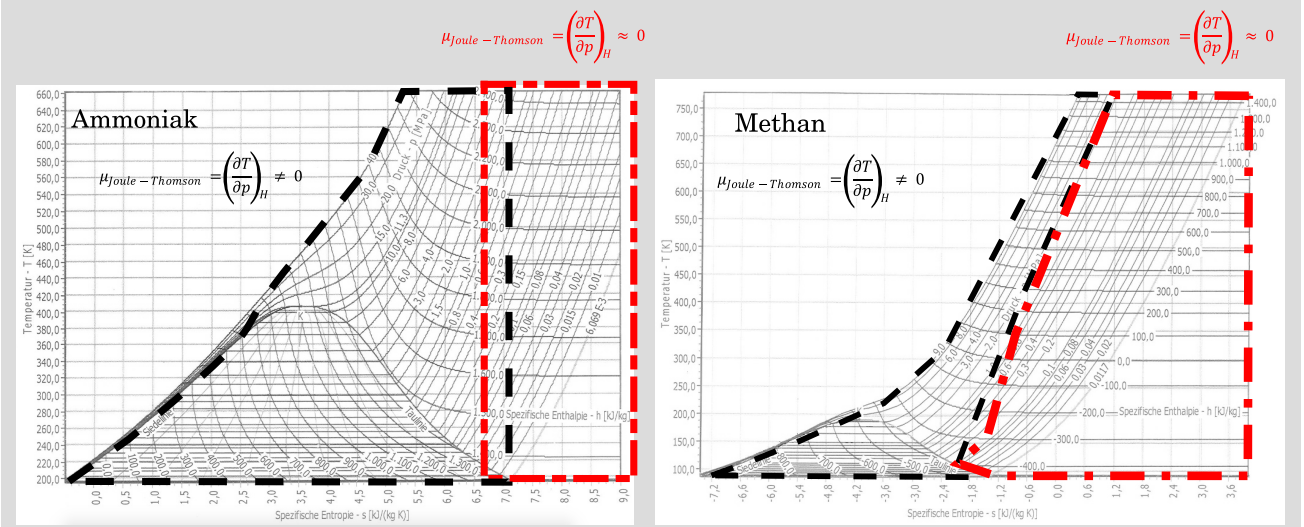
1. in denen das ideale Gasgesetz das Realgasverhalten in guter Näherung beschreibt $\rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h \approx 0$
2. in denen die Berücksichtigung des Joule-Thomson Effekts relevant ist $\rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h \neq 0$

(je 1 Punkt für korrekten umrandeten und benannten Bereich.)

A) $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h \approx 0$: Bereich im gasförmigen Zustand mit waagerechten Isenthalpen

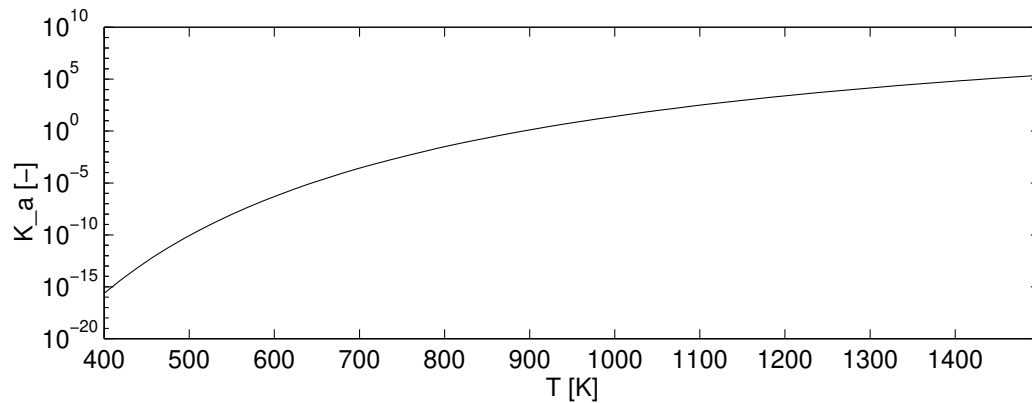
B) $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h \neq 0$: restlicher Bereich des Diagramms ohne Bereich der Flüssigkeit

C) Die Bereiche dürfen sich leicht überlappen und leicht von der Musterlösung abweichen. Wichtig ist, dass erkannt wird, dass waagerechte Isenthalpen einem JT-Koeffizienten von null entsprechen.



15. Chemisches Gleichgewicht 4 Punkte

In einem Reaktor läuft eine chemische Reaktion ab, deren Gleichgewichtskonstante die folgende Temperaturabhängigkeit aufweist:



- (a) (1 Punkt) Um welche Art von Reaktion handelt es sich in Bezug auf die Reaktionsenthalpie?

endotherme Reaktion

- (b) (3 Punkte) Die Temperatur im Reaktor lässt sich über Wärmeübertragerflächen einstellen. Eine Kollegin schlägt vor, das Temperaturniveau im Reaktor anzuheben. Die Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung soll dabei konstant gehalten werden. Lässt sich der Prozess auf diese Weise aus thermodynamischer Sicht verbessern? Nennen Sie zwei Gründe, mit denen sich Ihre Antwort rechtfertigen lässt.

Ja (1 Punkt), denn:

- Temperaturerhöhung verschiebt GGW auf Produktseite -> höherer GGW-Umsatz
- geringere Exergievernichtung bei Wärmeübertragung durch höheres Temperaturniveau

jeweils 1 Punkt



Energietechnik – 27. September 2022
– MUSTERLÖSUNG –
Teil II – Rechenaufgaben

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

Name:	
Matrikelnummer:	

Aufgabe:	16	17	18	Summe
Punktzahl:	50	31	30	111
Davon erreicht:				

16. Thermodynamische Analyse 50 Punkte

Die Abbildung zeigt das Fließbild einer Prozessdampfbereitstellung für einen Industriestandort. Im Vorlauf erfolgt eine Versorgung mit Satttdampf auf drei unterschiedlichen Druckniveaus. Das Speisewasser wird gesammelt zurückgeführt (Rücklauf). Die einzelnen Wärmeübertrager der Produktionsprozesse sind nicht dargestellt.

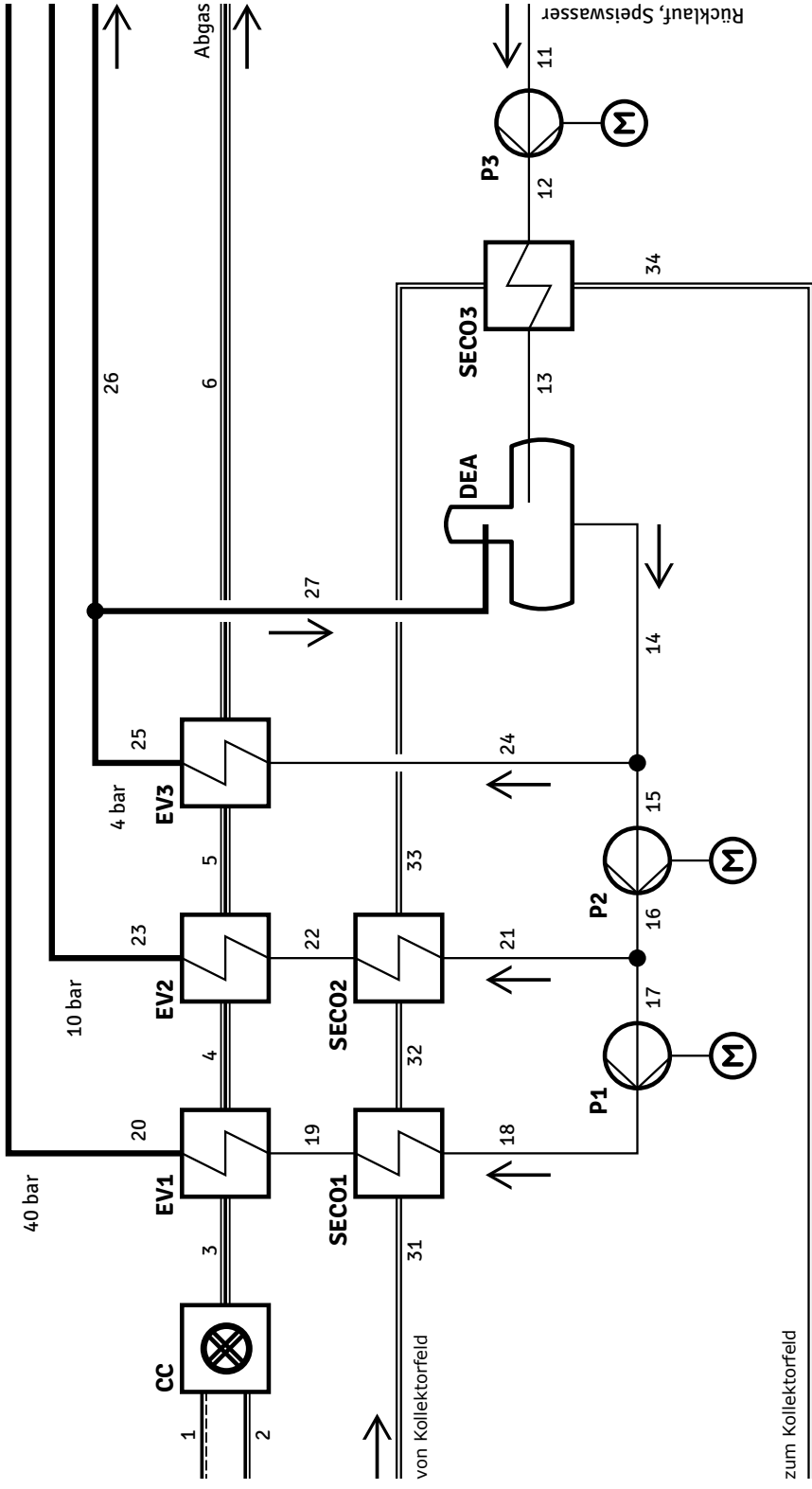
Erdgas (Strom 2) wird mit Luftüberschuss (Strom 1) verbrannt. Das Abgas (Strom 3 bis 6) dient der Bereitstellung von Satttdampf (Ströme 20, 23 und 26) mittels der Verdampfer (Komponenten EV1 bis EV3). Alle Prozessdampfströme sind vollständig gesättigt.

Mittels Solarkollektoren (nicht dargestellt) wird ein Thermoölkreislauf (Ströme 31 bis 34) erwärmt. Damit werden die Economizer (Komponenten SECO1 bis SECO3) versorgt, in denen die Vorwärmung des Speisewassers stattfindet. Das Speisewasser verlässt die Economizer SECO1 und SECO2 leicht unterkühlt.

Die Mischvorwärmung mittels Satttdampf ermöglicht die Entgasung im Speisewasserbehälter (DEA). Die Pumpen (P1 bis P3) bringen das Speisewasser auf das jeweilig erforderlichen Druckniveau.

Annahmen und gegebene Werte

- Alle Komponenten arbeiten stationär und sind nach außen adiabat.
- Änderungen der kinetischen und potentiellen Energien können vernachlässigt werden.
- Druckverluste in den dargestellten Wärmeübertragern werden vernachlässigt.
- Die Motoren haben einen elektrisch-mechanischen Wirkungsgrad von $\eta_{el,m} = 95\%$.
- Die Pumpen haben einen mechanischen Wirkungsgrad von $\eta_m = 100\%$ und einen isentropen Wirkungsgrad $\eta_s = 80\%$.
- Die Umgebungstemperatur beträgt $T_0 = 25\text{ °C}$. Der Umgebungsdruck beträgt $p_0 = 1,013\ 25\text{ bar}$.
- Die spezifische Enthalpie und die spezifische Entropie von Wasser (IAPWS-IF97 Formulierung) bei Umgebungsbedingungen betragen $h_0 = 104,929\text{ kJ/kg}$ und $s_0 = 0,367\ 23\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}$.
- Für die molaren chemischen Exergien ist Modell I aus der Formelsammlung zu benutzen.
- Erdgas wird vereinfachend als reines Methan angenommen. Die zugeführte Luft besteht vereinfachend zu 21 Mol-% aus Sauerstoff und 79 Mol-% aus Stickstoff. Die Luftzahl bei der Verbrennung beträgt $\lambda = 1,05$.



Vorläufe, Prozessdampf

Rücklauf, Speiswasser

Legende:

- Luft
- ==== Brennbare Gase
- ===== Nicht brennbare Gase
- Welle, mechanisch
- == Thermoöl
- Dampf
- Speiswasser
- CC Brennkammer
- DEA Entgaser
- EV Verdampfer
- P Speiswasserpumpe
- SECO Solar-Economizer

zum Kollektorfeld

Aufgaben

- (a) **(4 Punkte)** Wie hoch ist der elektrische Eigenbedarf der dargestellten Prozessdampfversorgung?
- (b) **(7 Punkte)** Berechnen Sie die von den Solarkollektoren der Anlage zur Verfügung gestellte Wärmeleistung \dot{Q}_{solar} .
- (c) **(6 Punkte)** Berechnen Sie die Exergievernichtung in der Komponente SECO1.
- (d) **(7 Punkte)** Stellen Sie die Wärmeübertragung in den Verdampfern EV1, EV2 und EV3 qualitativ in einem $T, \Delta \dot{H}$ -Diagramm dar. Beschriften Sie ihre Darstellung eindeutig.
- (e) **(7 Punkte)** Definieren und berechnen Sie den exergetischen Wirkungsgrad ϵ_{DEA} des Speisewasserbehälters.
- (f) **(3 Punkte)** Berechnen Sie die chemische Exergie von Strom 23, \dot{E}_{23}^{CH} [MW].
- (g) **(4 Punkte)** Geben Sie stichpunktartig mindestens zwei Optionen an, um den dargestellten Prozess zu verbessern. Ihre Vorschläge sollen zur Verbesserung des thermodynamischen Wirkungsgrad, der Wirtschaftlichkeit oder der Umweltverträglichkeit des Prozesses beitragen.
- (h) **(6 Punkte)** Notieren Sie die Reaktionsgleichung der Verbrennung in Komponente CC. Bestimmen Sie unter Verwendung der angegebenen Luftzahl die stöchiometrische Koeffizienten.
- (i) **(6 Punkte)** Stellen Sie für die Komponente EV3 eine Kostenbilanz auf, wie sie in der exergoökonomischen Analyse benötigt wird. Geben Sie alle erforderlichen Hilfsbeziehungen an. Gehen Sie davon aus, dass die eintretenden Kostenströme sowie die Kosten des Verdampfers bekannt sind. Stellen Sie die Kostenbilanz nach der gesuchten Größe um und vereinfachen Sie soweit wie möglich.

Nr.	\dot{m} [kg/s]	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	e^{PH} [kJ/kg]
1	334,323	25	1,01325	25,293	6,8888	0
2	18,590	25	1,01325	54,778	11,6148	0
3	352,914	1980,6	1,01325	2661,470	9,8042	1880,619
4	352,914	1899,0	1,01325	2539,058	9,7489	1774,702
5	352,914	1521,4	1,01325	1980,239	9,4664	1300,106
6	352,914	168,6	1,01325	188,986	7,6645	46,100
11	375	60	1	251,222	0,8312	7,968
12	375	60,0	4	251,603	0,8314	8,281
13	375	81,4	4	341,190	1,0920	20,170
14	421,324	143,6	4	604,723	1,7766	79,591
15	125	143,6	4	604,723	1,7766	79,591
16	125	143,8	14	606,078	1,7772	80,752
17	25	143,8	14	606,078	1,7772	80,752
18	25	144,2	40	609,595	1,7789	83,767
19	25	247,4	40	1072,871	2,7688	
20	25	250,4	40	2800,897	6,0697	995,774
21	100	143,8	14	606,078	1,7772	80,752
22	100	192,0	14	816,744	2,2552	148,918
23	100	195,0	14	2788,893	6,4675	865,162
24	296,324	143,6	4	604,723	1,7766	79,591
25	296,324	143,6	4	2738,056	6,8954	686,748
26	250	143,6	4	2738,056	6,8954	686,748
27		143,6	4	2738,056	6,8954	686,748
31	138,889	300	10	581,499	1,3965	166,845
32	138,889	263,814	10	498,110	1,2462	128,263
33	138,889	193,523	10	346,430	0,9436	66,795
34		65,031	10			

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \dot{w}_{el} &= \frac{1}{\eta_{el,m}} \sum_{P=1}^3 (\dot{H})_P \quad (1) \\
 &= \frac{1}{\eta_{el,m}} \left[\dot{m}_{18} (h_{18} - h_{17}) + \dot{m}_{16} (h_{16} - h_{15}) + \dot{m}_{12} (h_{12} - h_{11}) \right] \\
 &= \frac{1}{0,95} \left[\frac{25 \text{ kg}}{\text{s}} (609,595 - 606,078) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \right. \\
 &\quad (2) \quad \left. + \frac{125 \text{ kg}}{\text{s}} (606,078 - 604,723) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{375 \text{ kg}}{\text{s}} (251,603 - 251,222) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \\
 &= 421,24 \text{ kW} \hat{=} \underline{\underline{0,42 \text{ MW}}} \quad (1) \quad \Sigma 4
 \end{aligned}$$

b) h_{34} unbekannt \rightarrow MB + EB bei SECO3

$$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{31}$$

$$(1) \quad \dot{H}_{12} + \dot{H}_{33} = \dot{H}_{13} + \dot{H}_{34}$$

$$(1) \quad h_{34} = \frac{\dot{m}_{12}}{\dot{m}_{31}} (h_{12} - h_{13}) + h_{33}$$

$$h_{34} = \frac{\frac{375 \text{ kg}}{\text{s}}}{\frac{138,889 \text{ kg}}{\text{s}}} \left(251,603 - 341,190 \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 346,430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

$$= \underline{\underline{104,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}} \quad (1)$$

ETS Kollektorfeld

②

$$\dot{Q}_{\text{solar}} = \dot{m}_{31} (h_{31} - h_{34})$$

①

$$= 138,889 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (581,5 - 104,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

①

$$= \underline{\underline{66,25 \text{ MW}}}$$

①

Σ 7

c) Exergiebilanz SECO 1

$$\textcircled{1} \dot{E}_{18} + \dot{E}_{31} = \dot{E}_{19} + \dot{E}_{32} + \dot{E}_D$$

→ kein Änderung der chem. Exergien

$$\textcircled{1} \dot{E}_D = \dot{m}_{18} (e_{18}^{\text{PH}} - e_{19}^{\text{PH}}) + \dot{m}_{31} (e_{31}^{\text{PH}} - e_{32}^{\text{PH}})$$

e_{19}^{PH} unbekannt

$$e_{19}^{\text{PH}} = h_{19} - h_0 - T_0 (s_{19} - s_0)$$

$$\textcircled{1} = (1072,871 - 104,929) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$- 298,15 \text{ K} (2,7688 - 0,36723) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\textcircled{1} = 251,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

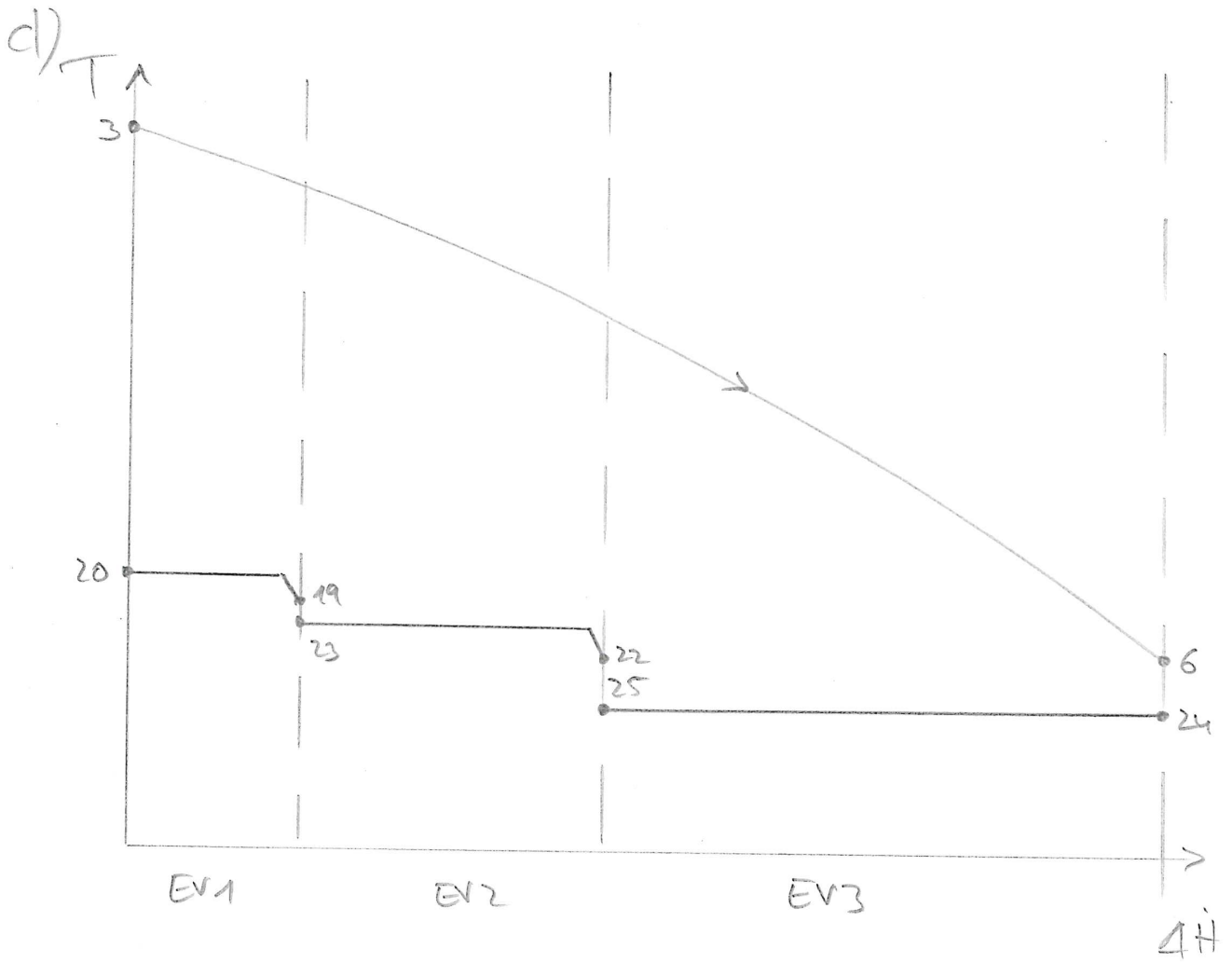
3

$$\dot{E}_D = 25 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (83,767 - 251,9) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

1

$$+ 138,889 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (166,845 - 128,263) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= \underline{\underline{1,16 \text{ MW}}} \quad 1 \quad \Sigma 6$$



ZÄ 3 → 6 1

Beschriftung 1

ZÄ je EV 1 → 3

Größenverhältnisse EV 1

Σ 7

Umlenkung EV1, EV2 1

$$\begin{aligned}
 e) \quad \varepsilon_{DEA} &= \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} \quad \text{mit } \dot{m}_{14} = \dot{m}_{27} + \dot{m}_{13} \quad (4) \\
 & \quad \quad \quad \dot{m}_{27} = 46,324 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (1) \\
 &= \frac{\dot{m}_{13} (e_{14}^{PH} - e_{13}^{PH}) \quad (1,5)}{\dot{m}_{27} (e_{27}^{PH} - e_{14}^{PH}) \quad (1,5)} \\
 &= \frac{375 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (79,591 - 20,170) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{46,324 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (686,748 - 79,591) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \\
 &= \frac{22\,282,88}{28\,311,24} = 0,792 = \underline{\underline{79,2\%}} \quad (7) \\
 & \quad \quad \quad \underline{\underline{27}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f) \quad \dot{M}_{H_2O} &= (2 \cdot 1,00791 + 15,9934) \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \\
 &= 18,0152 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

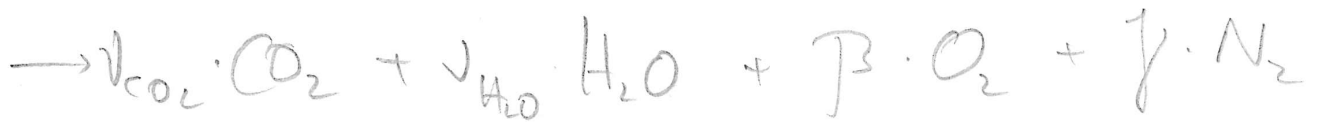
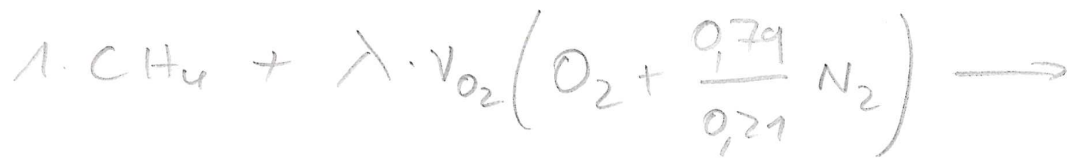
$$\begin{aligned}
 \dot{E}_{23}^{CH} &= \dot{m}_{23} \cdot \frac{e_{H_2O(e)}^{CH}}{M_{H_2O}} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{45 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{18,0152 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \\
 &= \underline{\underline{249,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}} \quad (7) \quad \underline{\underline{23}}
 \end{aligned}$$

- a)
- Nutzung von Biogas statt Erdgas (5)
 - Abgastemperatur T_6 noch sehr hoch,
Einsparung in zusätzlichen Wärmebereitstellung,
z.B. Brauchwassererwärmung oder Fernwärme
oder Nutzung im ORC Prozess (\rightarrow Strom)
 - Industrieprozesse evaluieren, sind
40 bar Prozessdruck tatsächlich
erforderlich; ggf. geringere Drücke / Temp.
möglich
 - DEA-Dampf - Bereitstellung mittels Strom, \downarrow
Statt Abzug aus 4 bar - Dampfleitung
 - Kollektorfeld vergrößern
 - chemische Speicher für Thermospeicherung
vorsehen

2 Option je (2) \rightarrow 4

4) ET1

⑥



$$\lambda = 1,05$$

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

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \quad (1)$$

$$v_{\text{O}_2} = 2 \quad (1)$$

$$\beta = v_{\text{O}_2} (\lambda - 1)$$

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

$$\gamma = v_{\text{O}_2} \cdot \lambda \cdot \frac{0,79}{0,21} = 7,9 \quad (1)$$



②



Σ6

h) ET2

(7)

Knotenbilanz EV3

$$\dot{C}_5 + \dot{C}_{24} + \dot{z}_{EV2} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{25} \quad (2)$$

Hilfsbeziehung

$$C_5 = C_6 \quad (2)$$

$$C_{25} = \frac{C_5 (\dot{E}_5 - \dot{E}_6) + C_{24} \dot{E}_{24} + \dot{z}_{EV2}}{\dot{E}_{25}} \quad (2)$$

$\Sigma 6$

17. Wirtschaftlichkeitsanalyse31 Punkte

Ein landwirtschaftlicher Betrieb plant den Bau einer Biogasanlage. Das dabei produzierte Biomethan kann durch eine Einspeisung ins lokale Gasnetz direkt zu einem Preis von $p_{\text{CH}_4} = 8 \text{ ct/kWh}_{\text{th}}$ verkauft werden (Biomethanvermarktung). Alternativ kann durch eine zusätzliche Investition in ein BHKW das Gas in elektrische Energie umgewandelt und als EEG-Strom vermarktet werden. Für den Strom würde der Betrieb einen Festpreis erhalten. Dieser beträgt in den ersten zehn Jahren $p_{\text{el},1} = 23 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ und reduziert sich dann für die restliche Laufzeit auf $p_{\text{el},2} = 20 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$. Durch Nutzung der Abwärme aus dem BHKW können zusätzlich die Betriebskosten der Biogasanlage um 2% reduziert werden. Entscheiden Sie welche Vermarktungsalternative wirtschaftlicher ist. Ermitteln Sie hierzu den jeweiligen Kapitalwert. Um die Berechnung zu vereinfachen, ist der Gegenwartswert der Wartungskosten für das BHKW bereits mit $P_{\text{W,BHKW}} = 101\,485 \text{ EUR}$ angegeben.

Alle für Ihre Berechnungen notwendigen Angaben finden Sie in der Tabelle und den Hinweisen zur Aufgabenbearbeitung.

Hinweis für alle Unteraufgaben:

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

Weitere Annahmen und Hinweise

- Vereinfachend wird angenommen, dass die jeweiligen Zahlungen für die Investitionsausgaben zum jeweiligen Baubeginn erfolgen.
- Alle weiteren Kosten und Erlöse fallen jeweils am Ende eines Jahres an.
- Bei den Investitionskosten der Biogasanlage sind nur die Kosten für eine Anlage mit einer Erzeugungskapazität von $\dot{V}_{\text{BG,A}} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ aus dem Jahr 2022 bekannt. Die hier betrachtete Anlage hat jedoch eine Erzeugungskapazität von $\dot{V}_{\text{BG}} = 75 \text{ m}^3/\text{h}$. Die dazugehörigen Investitionskosten $I_{\text{BG,A},2022}$ und der Degressionsexponent sind in der Tabelle angegeben.
- Durch die Abwärme des BHKWs können die Biogaserzeugungskosten um 2% reduziert werden.
- Die allgemeine Kostensteigerung, welche auch für Investitionsgüter gilt, beträgt $r_n = 2\%/a$ und die Kostensteigerung für die Biogasproduktion $r_{\text{FC}} = 1,2\%/a$.
- Die Steigerung für den Verkaufspreis Biomethan beträgt $r_{\text{CH}_4} = 1,8\%/a$.
- Der Verkauf des Stroms erfolgt zu einem Festpreis, welcher sich nach 10 Jahren reduziert.
- Die jeweiligen Zeitpunkte der Erhebung zu den einzelnen Preisen ist in der Tabelle angegeben, diese können sich bei den einzelnen Positionen unterscheiden.
- Bezugszeitpunkt und Investitionszeitpunkt sowie Inbetriebnahme ist der 1. Januar 2024.
- Es wird vereinfacht angenommen, dass die Anlage am Ende der Nutzungszeit vollständig abgeschrieben ist.
- Führen Sie sämtliche Rechnungen in inflationsbehafteter Währung durch.
- Der Gegenwartswert der Wartungskosten für das BHKW ist zur Vereinfachung Ihrer Rechnung bereits angegeben mit $P_{\text{W,BHKW}} = 101\,485 \text{ EUR}$.

Aufgaben

- (a) **(5 Punkte)** Erstellen Sie einen qualitativen Zeitstrahl für alle anfallenden Kosten und Erlöse. Tragen Sie auch die wesentlichen Zeitpunkte aus der unteren Tabelle ein. Nutzen Sie hierzu die Vorlage in Abbildung 1.
- (b) **(12 Punkte)** Berechnen Sie den Kapitalwert der Alternative Biomethanvermarktung (Einspeisung ins Gasnetz). Ermitteln Sie hierfür die folgenden Werte:
- (3 Punkte)** Barwert der Investition der Biogasanlage $P_{I,BG}$.
 - (4 Punkte)** Barwert der Betriebskosten für die Biogasanlage P_{FC} . [2 100 000 EUR]
 - (3 Punkte)** Barwert der Erlöse aus Biomethanol P_{CH_4} .
 - (2 Punkte)** Kapitalwert der Vermarktung von Biomethan NPV_{CH_4} . [80 000 EUR]
- (c) **(13 Punkte)** Berechnen Sie den Kapitalwert der Alternative Vermarktung von EEG-Strom. Ermitteln Sie hierfür die folgenden Werte:
- (1 Punkte)** Stromproduktion des BHKWs W_{el} . [1450 MWhel/a]
 - (1 Punkte)** Barwert der Investition des BHKWs $P_{I,BHKW}$.
 - (2 Punkte)** Barwert der Kosteneinsparung bei den Biogasproduktionskosten $P_{E,BG}$.
 - (6 Punkte)** Barwert der Erlöse aus EEG-Strom P_{Strom} .
 - (3 Punkte)** Kapitalwert der Vermarktung EEG-Strom NPV_{CH_4} . [−9000 EUR]
- (d) **(1 Punkt)** Entscheiden und begründen Sie kurz welche Vermarktungsalternative wirtschaftlicher ist.

Annahmen und Parameter des Investitionsprojekts "GuD-Anlage im Industriepark"

Planungsdaten	
Bezugszeitpunkt	1. Januar 2024
Baubeginn / Inbetriebnahme	1. Januar 2024
Wirtschaftliche Nutzungsdauer ab Inbetriebnahme, n	15 a
Daten Biogasanlage	
jährliche Biomethansproduktion, W_{th}	3191 MWh _{th} /a
Produktionskapazität der Biogasanlage Biomethan, \dot{V}_{CH_4}	75 m ³ _{CH₄} /h
Investitionskosten für eine Biogasanlage A $\dot{V}_{CH_4} = 60 \text{ m}^3_{CH_4}/\text{h}$, 1. Januar 2022, $I_{BG,A,2022}$	1 150 000 EUR
Degressionsexponent α	0,7
Biomethanproduktionskosten je kWh Biomethan 1. Januar 2022, $p_{FC,2022}$	5 ct/kWh _{th}
Verkaufspreis Biomethan 1. Januar 2024 $p_{CH_4,2024}$	8 ct/kWh _{th}
Daten BHKW	
Summe der elektrischen Nennleistung BHKW, \dot{W}_{el}	250 kW _{el}
elektrischer Wirkungsgrad BHKW, η_{el}	47%
spezifische Investitionskosten BHKW 1. Januar 2023, $I_{BHKW,2023}^{spez}$	1300 €/kW _{el}
Stromverkaufspreis ab 1. Januar 2024 bis 31. Dezember 2033, $p_{Strom,1}$	23 ct/kWh _{el}
Stromverkaufspreis zum 1. Januar 2034 bis 31. Dezember 2038, $p_{Strom,2}$	20 ct/kWh _{el}
Gegenwartswert der Wartungskosten BHKW 1. Januar 2024, $P_{W,BHKW,2024}$	101 485 EUR
Sonstige Angaben	
Jährliche nominelle allg. Kostensteigerungsrate, r_n	2%/a
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate für Biomethan, r_{CH_4}	1,8%/a
Jährliche nominelle Kostensteigerungsrate für Biogasproduktion, r_{FC}	1,2%/a
Jährlicher effektiver Zinssatz, i_{eff}	2,5%/a

Vorlage für den Zeitstrahl zu Aufgabe a)

Markieren Sie bei mehreren Alternativen die zu bewertende deutlich!

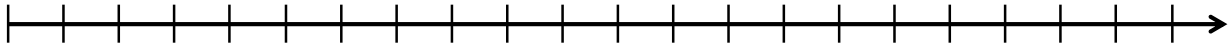


Abbildung 1: Vorlage Zeitstrahl für Aufgabe a

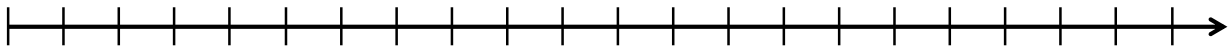
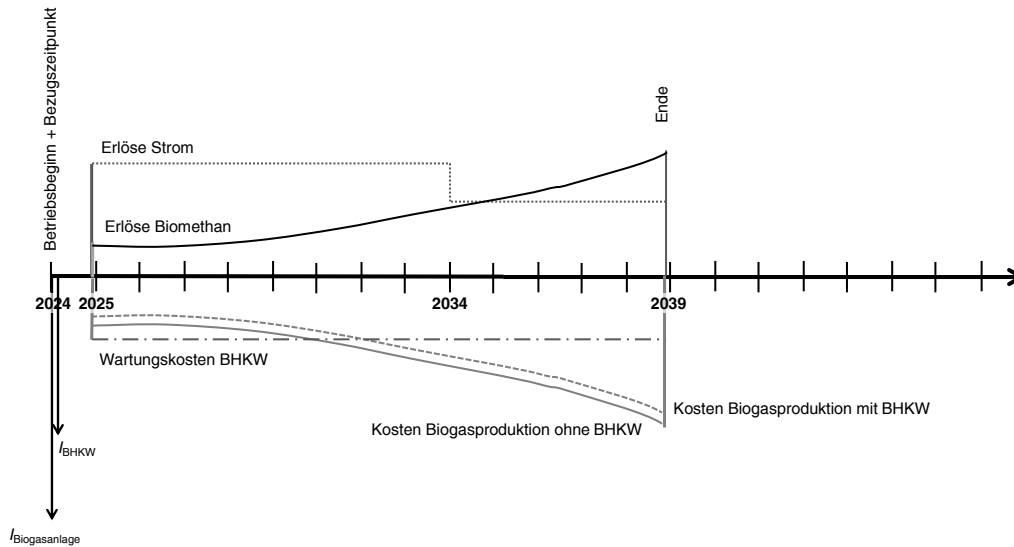


Abbildung 2: Vorlage Zeitstrahl für Aufgabe a (Reserve)

Musterlösung

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

(a) Erstellung des Zeitstrahls **5 Punkte**



(0,5 Punkte je korrekte Angabe)

(b) Kapitalwert für Alternative Biomethan **12 Punkte**

i. Barwert Investition der Biogasanlage **3 Punkte**

$$I_{BG,A,2024} = I_{BG,A,2022} \cdot (1 + r_n)^2 = 1\,196\,460 \text{ €} \quad (1 \text{ P})$$

$$I_{BG,2024} = I_{BG,A,2022} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{CH_4}}{V_{CH_4,A}} \right)^\alpha = 1\,196\,460 \text{ €} \cdot \left(\frac{75 \text{ m}^3_{CH_4}/h}{60 \text{ m}^3_{CH_4}/h} \right)^{0,7} = 1\,398\,734 \text{ €} \quad (1 \text{ P Rechenweg})$$

$$P_{I,BG} = 1\,398\,734 \text{ €} \quad (1 \text{ P})$$

ii. Barwert der Betriebskosten Biogasanlage **4 Punkte**

$$A_{FC} = P_{FC} \cdot CRF; \quad CELF = \frac{A_{FC}}{FC_{0,2024}} = \frac{k_{FC}(1-k_{FC}^n)}{1-k_{FC}} CRF$$

$$\rightarrow P_{FC} = \frac{k_{FC}(1-k_{FC}^{15})}{1-k_{FC}} \cdot FC_{0,2024}$$

$$\text{mit } k_{FC} = \frac{1 + r_{FC}}{1 + i_{\text{eff}}} = 0,9873 \quad (2 \text{ P (Ansatz)})$$

$$FC_{0,2024} = W_{th} \cdot p_{FC,2022} \cdot (1 + r_{FC})^2 = 163\,427 \text{ €} \quad (1 \text{ P})$$

$$P_{FC} = 2\,216\,514 \text{ €} \quad (1 \text{ P})$$

iii. Barwert der Erlöse aus Biomethanol **3 Punkte**

$$P_{CH_4} = \frac{k_{CH_4}(1-k_{CH_4}^{15})}{1-k_{CH_4}} \cdot E_{CH_4,2024} \quad (\text{siehe Ansatz Betriebskosten Biogasanlage})$$

$$\text{mit } k_{\text{CH}_4} = \frac{1 + r_{\text{CH}_4}}{1 + i_{\text{eff}}} = 0,9932$$

(1 P (Ansatz))

$$E_{\text{CH}_4,2024} = W_{\text{th}} \cdot p_{\text{CH}_4,2024} = 255\,319 \text{ €} \quad (1 \text{ P})$$

$$P_{\text{CH}_4} = 3\,627\,906 \text{ €} \quad (1 \text{ P})$$

iv. Kapitalwert Vermarktung von Biomethanol **2 Punkte**

$$NPV_{\text{CH}_4} = -P_{\text{I,BG}} - P_{\text{FC}} + P_{\text{CH}_4} = 12\,658 \text{ €} \quad (1 \text{ P Formel} + 1 \text{ P Ergebnis})$$

(c) Kapitalwert für Alternative EEG Strom **13 Punkte**

i. Stromproduktion BHKW **(1 Punkte)**

$$W_{\text{el}} = W_{\text{th}} \cdot \eta_{\text{el}} = 1500 \text{ MWh}_{\text{el}}/\text{a} \quad (1 \text{ P})$$

ii. Barwert Investitionskosten BHKW **(1 Punkte)**

$$P_{\text{I,BHKW}} = I_{\text{BHKW},2024} = I_{\text{BHKW},2023} \cdot (1 + r_n) = 331\,500 \text{ €} \quad (1 \text{ P})$$

iii. Barwert Einsparungen Betriebskosten Biogasanlage **(2 Punkte)**

$$P_{\text{E,FC}} = 0,02 \cdot P_{\text{FC}} = 44\,330 \text{ €} (42\,000 \text{ €}) \quad (2 \text{ P})$$

iv. Barwert Einnahmen EEG-Strom **(6 Punkte)**

Einnahmen 1: 10 a

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

mit $CRF_{10} = \frac{i(1+i_{\text{eff}})^{10}}{(1+i_{\text{eff}})^{10}-1} = 0,1143 \quad (1 \text{ P})$

$$A_{\text{Strom},1} = W_{\text{el}} \cdot p_{\text{Strom},1} = 345\,000 \text{ €/a} (333\,500 \text{ €/a}) \quad (0,5 \text{ P})$$

$$P_{\text{Strom},1,2024} = 3\,018\,373 \text{ €} (2\,917\,760 \text{ €}) \quad (1 \text{ P})$$

Einnahmen 2: 5 a

$$P_{\text{Strom},2,2034} = \frac{A_{\text{Strom},2}}{CRF_5}$$

mit $CRF_5 = \frac{i(1+i_{\text{eff}})^5}{(1+i_{\text{eff}})^5-1} = 0,2152 \quad (0,5 \text{ P})$

$$A_{\text{Strom},2} = W_{\text{el}} \cdot p_{\text{Strom},2} = 300\,000 \text{ €/a} (29\,000 \text{ €/a})$$

$$P_{\text{Strom},2,2034} = 1\,394\,052 \text{ €} (1\,347\,584 \text{ €}) \quad (1 \text{ P})$$

$$P_{\text{Strom},2,2024} = \frac{P_{\text{Strom},2,2034}}{(1+i_{\text{eff}})^{10}} = 1\,089\,031 \text{ €} (1\,052\,730 \text{ €}) \quad (1 \text{ P})$$

$$P_{\text{Strom}} = P_{\text{Strom},1,2024} + P_{\text{Strom},2,2024} = 4\,107\,404 \text{ €} (3\,970\,490 \text{ €}) \quad (1 \text{ P})$$

v. Kapitalwert Vermarktung von EEG-Strom **3 Punkte**

$$NPV_{\text{Strom}} = NPV_{\text{CH}_4} - P_{\text{CH}_4} - P_{\text{I,BHKW}} - P_{\text{W,BHKW}} + P_{\text{E,FC}} + P_{\text{Strom}} = 103\,500\,€ \text{ (-8995\,€)}$$

(2 P Formel + 1 P Ergebnis)

(d) Welche Vermarktungsalternative ist wirtschaftlicher **1 Punkte**

Die Stromvermarktung ist wirtschaftlicher aufgrund des höheren Kapitalwertes.

(Quereinstieg: Die Vermarktung von Biomethan ist wirtschaftlicher aufgrund des höheren Kapitalwertes.)

18. Wärmeübertragernetzwerke30 Punkte

Die folgenden sieben Stoffströme sollen zu einem Wärmeübertragernetzwerk verbunden werden.

Nr.	T_{ein} [°C]	T_{aus} [°C]	$\dot{m}c_p$ [kW/K]	$\dot{m}\Delta h^{\text{LV}}$ [kW]
1	100	40	3	-
2	60	150	6	-
3	130	130	-	60
4	190	190	-	80
5	250	40	3	-
6	20	170	2	-

- 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 4** soll bei der angegebenen konstanten Temperatur und der angegebenen Wärmeleistung **kondensiert** werden.
- Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten der Ströme wird vernachlässigt.
- Alle Wärmeübertrager werden im Gegenstrom betrieben.
- Druckverluste werden vernachlässigt.

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

Aufgaben

- (a) **(10 Punkte)** Bestimmen Sie den minimalen externen Heizbedarf $\dot{Q}_{\text{HU,min}}$ und den minimalen externen Kühlbedarf $\dot{Q}_{\text{CU,min}}$ mit Hilfe der Wärmekaskade sowie alle Pinchtemperaturen T_P für das Wärmeübertragernetzwerk rechnerisch. Verwenden Sie dafür die Tabelle.
- (b) **(7 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) **(3 Punkte)** Zeichnen Sie in Ihr Wärmestromprofil die Änderungen ein, die sich durch die zusätzliche Integration eines weiteren Stoffstroms ergeben, mit $T_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$, $T_{\text{aus}} = 50 \text{ °C}$ und einem Wärmekapazitätsstrom von 4 kW/K . Treffen Sie 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)
Hinweis: Kennzeichnen Sie für die Integration den Verlauf eindeutig.
- (d) **(10 Punkte)** Entwickeln Sie für das ursprüngliche Wärmeübertragernetzwerk (ohne die Integration aus Aufgabenteil (c)) 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,
 - die entsprechenden Zwischentemperaturen
 - und sofern vorhanden die externen Wärmequellen und -senken.

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]
<u>I</u>	240	-3	-180	0	-170
	180			-180	-350
<u>II</u>	180	-	-80	-260	-430
	160			-280	-450
<u>III</u>	140	5	100	-180	-350
	140			-120	-290
<u>IV</u>	90	5	250	130	-40
	70			40	170
<u>V</u>	30	-4	-160	10	-160
	30				

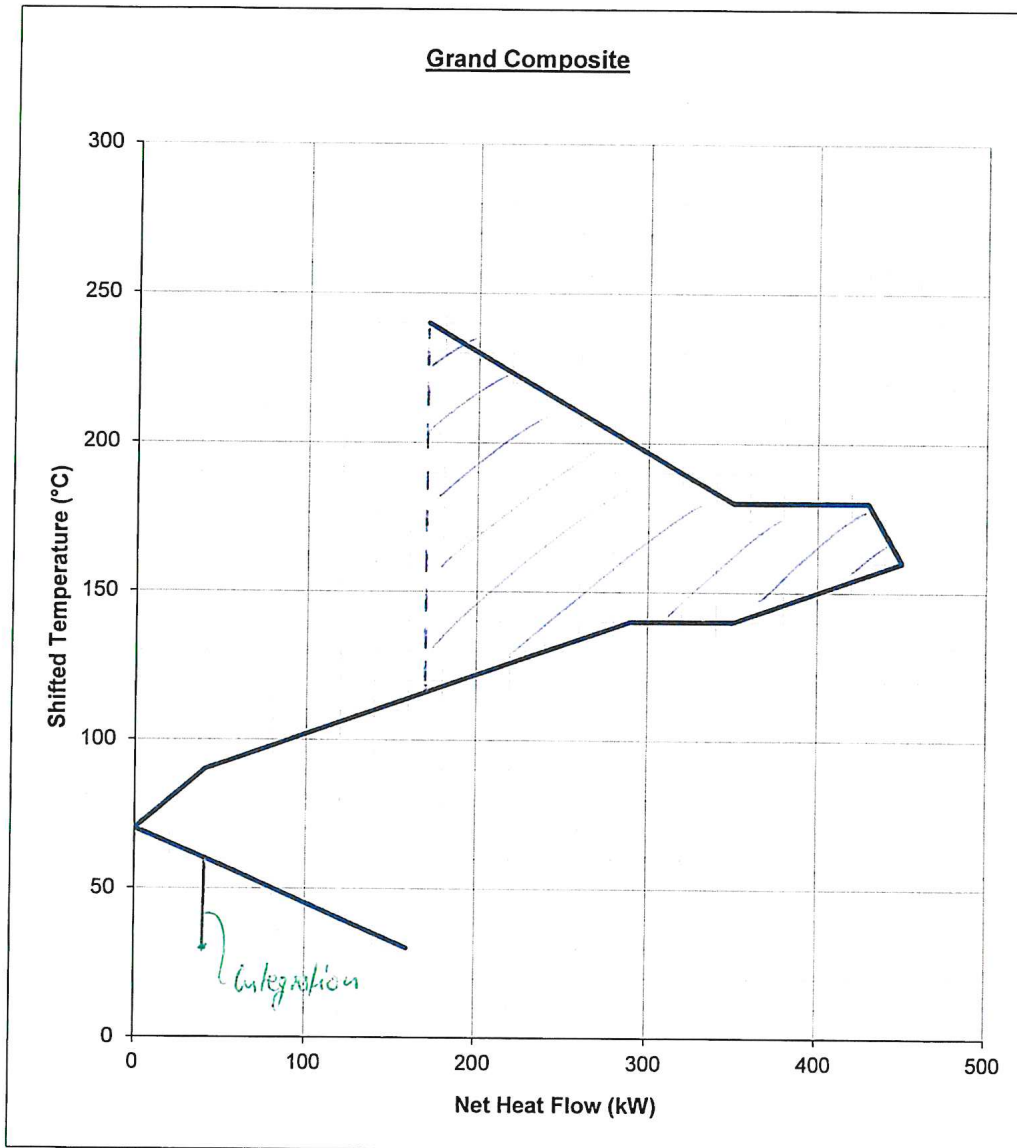
$\dot{Q}_{HU, \min} = 170 \text{ kW}$ (A)

$\dot{Q}_{CU, \min} = 160 \text{ kW}$ (A)

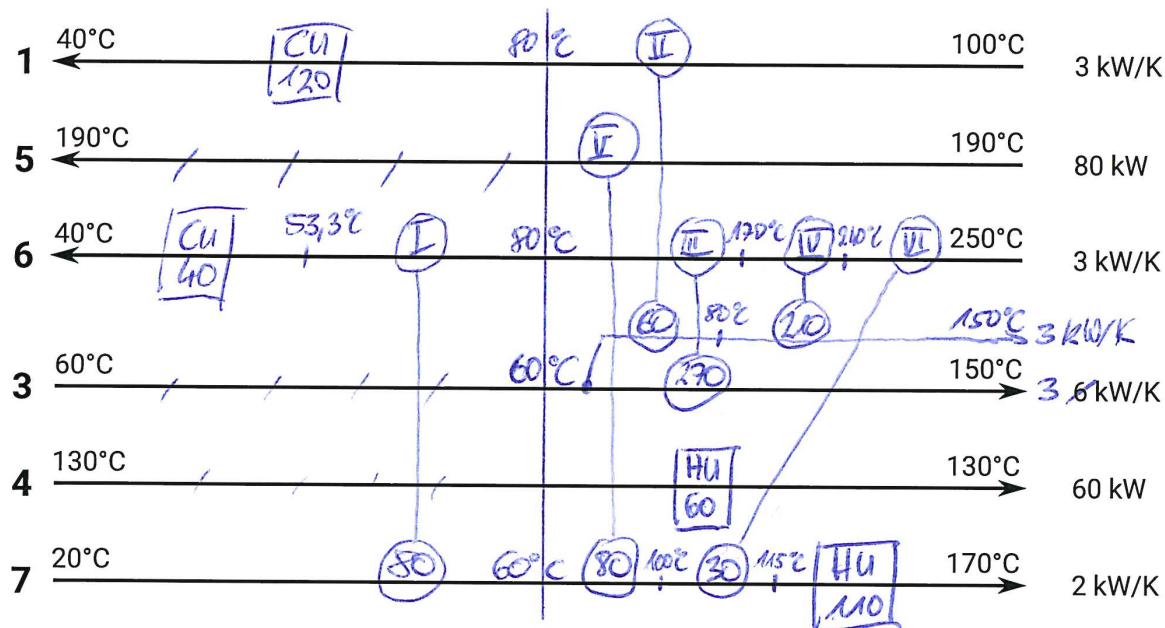
$T_p^* = 70^\circ\text{C} \rightarrow T_p = 60/90^\circ\text{C}$ (A)

$\Sigma 10$

- b) • \int int. WRG (1) • GCC: 0,5 pro Wertepaar: (4,5)
- $T_{HU, \min}^* = 15^\circ\text{C} \Rightarrow T_{HU, \min} = 15^\circ\text{C}$ (1)
- $T_{CU, \max}^* = 30^\circ\text{C} \Rightarrow T_{CU, \max} = 20^\circ\text{C}$ (26,5)



- c) • $Q_{HU, \min}$ bleibt gleich, $Q_{CU, \min}$ sinkt (1)
- $T_{HU, \min}$ bleibt gleich, $T_{CU, \max}$ steigt (1) (23)
- Einzeichnen (1)



① je Wü (2 10)

