

Kolloquium 1: Energiebedarf

Der heutige Vorrat an wirtschaftlich gewinnbaren fossilen Brennstoffen betrage

$$E_{\text{tot}} = 5,5 \cdot 10^7 \text{ PJ (P = Peta = } 10^{15}\text{)}$$

der Weltverbrauch beträgt

$$\dot{E}_0 = 4,6 \cdot 10^5 \text{ PJ/a}$$

bei einer Bevölkerung von

$$B_0 = 7.1 \text{ Mia Menschen.}$$

- a) Leiten Sie eine allgemeingültige Beziehung ab für die Vorratsdauer der Energieressourcen beim heutigen Vorrat E_{tot} , dem heutigen Verbrauch $\dot{E}_0$, einem Bevölkerungswachstum von a [%/a] und einem Zuwachs des Pro-Kopf-Verbrauchs von b [%/a], wobei der Verbrauch vereinfachend während eines Kalenderjahres konstant sei.
- b) Wie lange reichen die Vorräte bei einem Bevölkerungswachstum von $a = 2\%/a$ und einem Zuwachs des Pro-Kopf-Verbrauchs von $b = 1\%/a$ im Vergleich zu $a = b = 0$?
- c) Wieviel beträgt der Pro-Kopf-Verbrauch heute und beim Versiegen der Ressourcen im Vergleich zum Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft für die Schweiz ?
- d) Schätzen Sie Ihren persönlichen Energieverbrauch (z.B. als Mittel der letzten drei Jahre) unterteilt nach geeigneten Kategorien. Diskutieren Sie die einzelnen Anteile.
Wo sehen Sie Unsicherheiten bei der Datenlage ?

Kolloquium 2: Energiebegriffe

1) Was bedeuten die Begriffe Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie ? Beispiele ? Wo ist diese Unterscheidung wichtig? Wo bestehen Schwierigkeiten der Anwendung?

2) Wie beurteilen Sie die Aussage 'Wasserstoff ist die Energiequelle der Zukunft' ?

3) Vergleich verschiedener Energiesysteme

a) Wie beurteilen Sie folgenden Vergleich: Kohlekraftwerk mit Erntefaktor = 10, Meereswellenkraftwerk mit Erntefaktor = 0.8, Solarkraftwerk mit Erntefaktor = 3 ?

b) Was ist zu beachten, wenn eine Ölheizung mit einer Solarheizung verglichen wird und wie kann ein solcher Vergleich geeignet vorgenommen werden?

4) Wie beurteilen Sie folgende Richtlinien der EU auf sachliche Korrektheit ?

Donnerstag, 8. November 2001 · Nr. 260

59

Neue Zürcher Zeitung

EU-Förderplan für «grüne» Treibstoffe

Ehrgeizige Vorgaben Brüssels

lts. Brüssel, 7. November

Die EU-Kommission will gemäss einem am Mittwoch verabschiedeten Aktionsplan bis zum Jahr 2020 20 Prozent des fossilen Treibstoffs durch alternative Treibstoffe ersetzen. Diese Substitution gehört zur Umweltstrategie der Europäischen Union, die Treibhausgasemissionen zu senken. Kurzfristig sieht der Aktionsplan die vermehrte Verwendung von Biokraftstoffen vor. Deren Anteil soll im Jahr 2005 2 Prozent am gesamten Treibstoffverbrauch in der EU betragen und schrittweise bis 2010 auf 5,75 Prozent erhöht werden. Zurzeit liegt er bei durchschnittlich 0,2 Prozent. Weil das ehrgeizige Ziel allein mit Biotreibstoff nicht erreicht werden kann, beantragt die Kommission auch den mittel- und längerfristigen Wechsel auf Erdgas, Wasserstoff und Brennstoffzellen. In der Kombination mit den Biotreibstoffen könne der bis 2020 angestrebte Ersatz von einem Fünftel der im Verkehr verbrannten Erdölprodukte erreicht werden.

Zwei Richtlinienentwürfe ergänzen den Aktionsplan der Kommission. Der eine verpflichtet die Mitgliedstaaten, dafür zu sorgen, dass bis Ende 2005 mindestens 2 Prozent der in ihrem Hoheitsgebiet verkauften Treibstoffe aus Biomasse stammen. Der andere enthält Bestimmungen, wie der Umstieg steuerlich gefördert werden soll. Beide Erlasse müssen vom Europäischen

Parlament und den im Ministerrat vertretenen Staaten gutgeheissen werden. Der Fiskalvorschlag räumt den Mitgliedstaaten die Möglichkeit ein, mit Steuererleichterungen die höheren Produktionskosten für Biokraftstoffe auszugleichen.

Das EU-Recht schreibt den Mitgliedern für die Erhebung von Abgaben auf Mineralölen Mindestverbrauchssteuersätze vor. Dies gilt auch dann, wenn Benzin oder Diesel Biokraftstoffe beigemischt werden. Eine zeitlich befristete steuerliche Begünstigung ist bloss für die Entwicklung umweltverträglicherer Produkte möglich. Deshalb beantragt die Kommission eine gezielte Lockerung der Rahmenvorschriften, um die in der Produktion markant teureren alternativen Treibmittel mit zeitlich unbefristeten Steuererleichterungen gegenüber den herkömmlichen Kraftstoffen Benzin und Diesel konkurrenzfähig zu machen. Der Vorschlag sieht eine um maximal 50 Prozent reduzierte Verbrauchssteuer vor.

In Deutschland und Österreich gilt allerdings bereits jetzt eine vollständige Steuerbefreiung für Treibstoffe aus Pflanzenölen. Die Kommission trägt dieser Situation Rechnung mit einer Übergangslösung, nach der sich für diese Länder bis Ende 2003 nichts ändert und die eine anschließende Verlängerung des Regimes nicht ausschliesst. Der Vorschlag sieht ohnehin schon die Möglichkeit einer gänzlichen Steuerbefreiung für die in öffentlichen Verkehrsmitteln und Taxis verwendeten Biotreibstoffe vor.

Kolloquium 3: Vergleich zweier Energiesysteme

Vergleichen Sie den Gesamtenergieaufwand der folgenden zwei Konzepte zur Beheizung eines Gebäudes während der Lebensdauer t :

Variante A: Ölheizung (Index H für Heizung) mit Wirkungsgrad η_H und energetischer Rückzahldauer ERZ_H

Variante B: Wärmepumpe (Index WP) mit Jahresarbeitszahl JAZ* und energetischer Rückzahldauer ERZ_{WP} , wobei die Stromversorgung mit einem Ölkraftwerk mit η_{KW} und einer Rückzahldauer ERZ_{KW} erfolge.

Leiten Sie dazu eine **Formel** her und diskutieren Sie den Vergleich mit folgendem Beispiel:

		Heizung mit Öl	WP**	Kraftwerk KW
Grösse	Einheit			
η	–	0.80	–	0.40
JAZ	–	–	3.0	–
ERZ	Jahre [a]	0.50	2.0	1.0

a) Visualisieren Sie den Vergleich in einer **Grafik** und bestimmen Sie folgende Werte:

b) Ab welcher Lebensdauer ist die Wärmepumpe besser als die Ölheizung?

Zusatzfragen (optional, nicht notwendig für Testat):

c) Heizung, Wärmepumpe und Kraftwerk haben eine Lebensdauer von 20 Jahren.
Wieviel ist die Einsparung der besseren Lösung nach Ablauf der Lebensdauer?
Wie gross sind die energetischen Erntefaktoren nach Ablauf der Lebensdauer?

d) Welche JAZ muss die WP mindestens aufweisen, damit sie besser ist als die Ölheizung (zuerst Formel herleiten, dann Werte einsetzen)?

* Die Jahresarbeitszahl wird im Kapitel „Wärmepumpe“ behandelt. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der während eines Jahres von der Wärmepumpe erzeugten Nutzwärme bezogen auf die während eines Jahres zugeführten elektrischen Energie für die Wärmepumpe inklusive Hilfsaggregate (zum Beispiel der Ventilator zum Ansaugen von Umgebungsluft oder die Flüssigkeitspumpe zur Umwälzung der Flüssigkeit einer Erdwärmesonde). Für die Bilanzierung im Rahmen dieser Übung ist diese Definition ausreichend und die detaillierte Funktion der Wärmepumpe unerheblich.

** Für das aufgeführte Beispiel ist die ERZ der Wärmepumpe gross und die JAZ hoch, was zum Beispiel für eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonde typisch ist (gute JAZ aber grosse Vorleistung für die Sonde). Bei einer (einfachen) Luft-Wasser-WP kann die ERZ wesentlich kürzer sein, aber es wird oft auch eine wesentlich tiefere JAZ erreicht.

Kolloquium 4: Grundlagen, Bilanzierung, Gebäude

- 1) a) Mischen von zwei Flüssigkeiten A und B ohne chemische Reaktion und ohne Phasenänderungen, mit $\dot{m}_A = 5 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_B = 8 \text{ kg/s}$, $T_A = 80^\circ\text{C}$, $T_B = 20^\circ\text{C}$. Annahme: $c_{pA} = c_{pB} = \text{konst.}$
Formulieren Sie die Bilanzierung (Schema, Stoffströme, Bilanzgrenze, Stoff- und Energiebilanz) gemäss Checkliste im Skript. Leiten Sie eine Formel her
a1) für die adiabate Mischtemperatur und
a2) für die Wärmezufuhr, um den Reaktor auf T zu halten.

b) Zusatzaufgabe: Die Flüssigkeiten A und B werden kontinuierlich gemischt (wieder mit $\dot{m}_A = 5 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_B = 8 \text{ kg/s}$), wobei keine chemische Reaktion und keine Phasenänderung auftritt.
A und B seien Zweistoffgemische aus den Komponenten X und Y zu folgenden Anteilen:
 $x_A = 30\%$, $y_A = 70\%$, $x_B = 10\%$, $y_B = 90\%$.
Bestimmen Sie die Zusammensetzung der Mischung C.
- 2) a) Vor der Abreise in die Sommerferien vergessen Sie zu Hause, den Kühlschrank zu schliessen.
Wie beeinflusst dies die Raumtemperatur in der Küche? Zeitliches Verhalten? Begründung?

b) Familie A wohnt in einem Haus, dessen Heizung über einen Aussenthermostat geregelt wird (das Haus verfüge über Fussbodenheizung und Zusatzradiatoren). Familie B wohnt in einem Haus mit Radiatoren, welche mit Raumthermostaten geregelt werden.
b1) Im Winter bemerken sie, dass die Raumluft sehr trocken ist. Wieso?
b2) Sie kaufen Wasserverdunster, welche an die Radiatoren gehängt werden, sonst ändern sie nichts an der Heizung. Wie beeinflusst dies die Raumtemperatur und den Energieverbrauch von Familie A und B?

c) Beurteilen Sie folgende Massnahmen, die von zwei Energieexperten zur Verminderung des Heizenergieverbrauchs vorgeschlagen werden: Vorschlag 1: Die Abwärme des Gebäudes wird zur Beheizung genutzt, indem die Verluste durch die Wände über einen Wärmeübertrager dem Gebäude zugeführt werden. Vorschlag 2: Das Gebäude wird mit einer Zwangslüftung versehen, bei der die Abluft über einen Wärmeübertrager abgeführt wird und die Zuluft erwärmt.

- 3) a) Wie beurteilen Sie den nachfolgenden Artikel aus dem TA auf sachliche Korrektheit ?
b) Wie beurteilen Sie Mikroturbinen und Brennstoffzellen ?

Für die Zukunft: Energie ohne Ende

Von **Sandra Willmeroth**

Tages-Anzeiger · Freitag, 9. November 2001

69

Erneuerbar, effizienter und dezentral

Für die Energieversorgung von Morgen wird an vielen Enden geforscht.

Drei Trends dominieren den Energiemarkt: die Weiterentwicklung der erneuerbaren Energien, neue Möglichkeiten zum sparsameren Verbrauch und einer dezentralen Verteilung. Welcher Subsektor die grössten Zukunftschancen hat, ist heute noch stark umstritten. Insbesondere die Frage, wie gross der Anteil der erneuerbaren Energien an der gesamten Elektrizitätserzeugung sein wird, erhitzt die Gemüter.

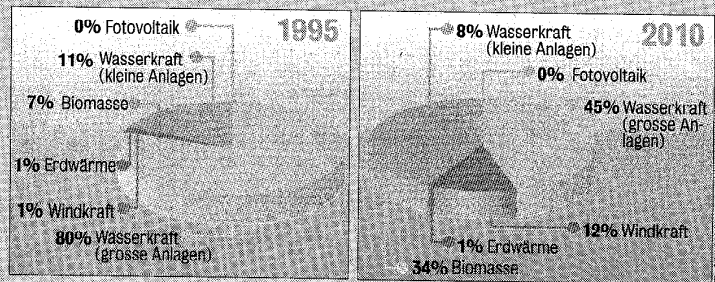
Am oberen Ende der Prognosen setzt eine Studie des Öriesen Shell an, die davon ausgeht, dass sich der Gesamtenergiebedarf in den nächsten Jahrzehnten fast verdreifachen wird und dass rund die Hälfte durch erneuerbare Energien gedeckt werden könnte. Und das, obwohl einige Energiegewinnungsverfahren dann noch immer keine Marktreife erlangt haben werden, wie beispielsweise die Fotovoltaik oder die Erdwärme (siehe Grafik).

Hoffnungsträger Biomasse

Das grösste Wachstum als Energie-spender versprechen sich Experten von der Biomasse, dem ältesten Verfahren zur Energiegewinnung. Durch das Verfeuern von Holzabfällen aus der Forstwirtschaft und der Möbel- und Holzindustrie sowie der Vergärung landwirtschaftlicher Abfälle können heute schon ganze Wohn- und Gewerbegebiete mit Warmwasser versorgt wer-

Potenzial der erneuerbaren Energien

Anteil erneuerbare Energie in Europa



den. Biogas könnte theoretisch, mit besseren Aufbereitungsverfahren, die Qualität von Erdgas erreichen und in dessen Leitungsnetz eingespeist werden, als Brennstoff an Tankstellen verfügbar sein oder als Energielieferant für Brennstoffzellen dienen.

Im Gegensatz zu Solaranlagen oder der Erdwärme (Geothermie) als erneuerbare Energiequellen sind die Mikroturbinen als umweltschonende und effiziente, dezentrale Energiespender bereits wettbewerbsfähig. Die Kleinstkraftwerke basieren auf der Funktionsweise von Flugzeugturbinen und werden zur Stromproduktion eingesetzt, wobei sie einen weiten Einsatzbereich bieten. Das amerikanische Gas-Forschungsinstitut schätzt, dass der Markt für Mikroturbinen bis 2010 auf bis zu acht Milliarden Dollar anwachsen könnte.

Ein weiterer Hoffnungsträger im alternativen Energiemarkt ist die Brennstoffzelle. Durch die kontrollierte che-

mische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff werden Strom, Wasser und Wärme produziert, aber keine klimaschädigenden Schadstoffe. Prinzipiell wäre die Brennstoffzelle überall einsetzbar, im Weltraum ebenso wie im Auto oder als stationäres Kraftwerk für Wohnhäuser oder Fabriken. Das grösste Problem ist jedoch, dass Wasserstoff nur in gebundener Form zur Verfügung steht und erst durch den Einsatz von Energie gewonnen werden muss.

Langwierige und teure Forschung

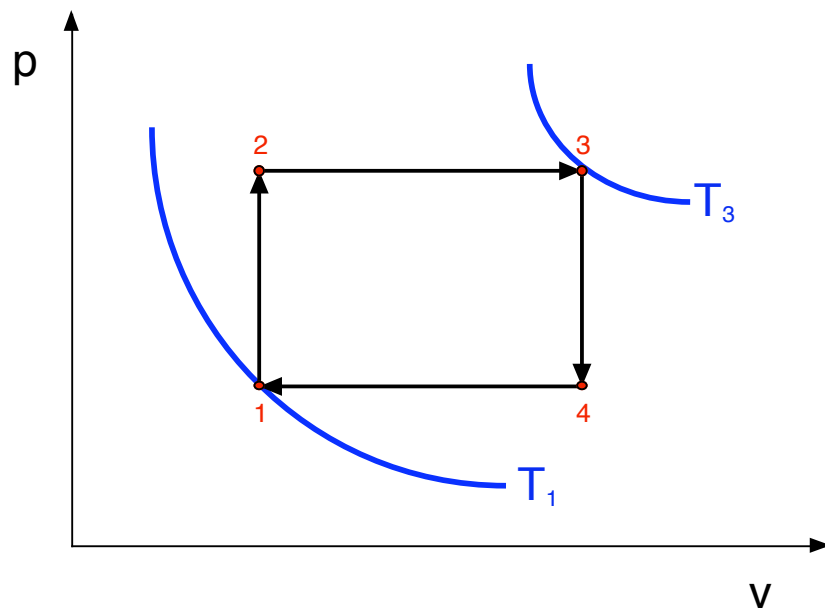
Die meisten Verfahren zur Energiegewinnung aus alternativen Quellen sind allerdings noch weit von der Wettbewerbsfähigkeit entfernt. Ohne politische Subventionen wäre die umweltschonende Energiegewinnung so teuer, dass sie im freien Markt – gegen das in Relation viel billigere Öl und Erdgas – keine Chance hätte. (wis)

Kolloquium 5: Wärmeübertragung

- 1)
 - a) Was versteht man unter *Wärmeübergang* (α -Wert) und *Wärmedurchgang* (U-Wert) ?
Welche Einheiten haben diese Grössen ?
 - b) Wie setzt sich der Wärmedurchgang durch eine Wand zusammen ? Erläutern Sie dies mit einer Skizze unter Angabe des Temperaturverlaufs wenn $T_{\text{innen}} > T_{\text{aussern}}$.
 - c) Wieso empfinden Sie 18-gradiges Wasser als kalt und 18-gradige Luft als (relativ) warm ?
Wieso ist die Angabe der Temperatur nicht ausreichend zur Beschreibung des Wärmeempfindens ?
Wieso gibt es einen Hitzeschwall, wenn Sie in der Sauna Wasser auf die heissen Steine giessen ? Steigt die Temperatur an Ihrer Körperoberfläche an oder nicht ?
 - d) Wie beurteilen Sie die Angabe eines U-Wertes für ein Bauteil (Wand, Fenster) ?
Ist der U-Wert eine „Stoffkonstante“ für ein Bauteil und können Sie somit aus zwei gemessenen U-Werten von zwei Gebäuden mit Sicherheit beurteilen, welches Gebäude energetisch besser ist ?
 - e) Im Brennraum eines Motors mit Flüssigkeitskühlung (Beispiel Automotor) herrsche eine *mittlere* Gastemperatur von 500°C (während der Verbrennung ist sie höher, während des Ansaugs tiefer). Die Aussentemperatur betrage 20°C, die Kühlwassertemperatur (die am Armaturenbrett überwacht werden kann) 80°C.
Wie hoch ist die Zylinderwandtemperatur:
20°C, 22°C, 78°C, 82°C, 290°C, 498°C oder 500°C.
Wieso ?
- 2)
 - a) Nennen Sie einige wichtige Anwendungen von Wärmeübergängen.
 - b) Nennen Sie einige Anwendungen von Wärmeübertragern (früher: Wärmetauscher).
 - c) Erläutern Sie das Funktionsprinzip eines Wärmeübertragers und stellen sie die Temperaturverhältnisse für einen Gleich- und Gegenstrom-Wärmeübertrager dar.

Kolloquium 6: Kreisprozess

Mit einem idealen Gas wird ein rechtsläufiger Kreisprozess durchgeführt, der sich aus Isobaren ($p=\text{konstant}$) und Isochoren ($v=\text{konstant}$) gemäss nachfolgender Grafik zusammensetzt.



Die Zustandsgrössen der Eckpunkte im p,V-Diagramm sind:

- $p_1 = 7,5 \text{ bar}$, $p_2 = 10 \text{ bar}$, $V_2 = 1 \text{ l}$, $V_3 = 1,5 \text{ l}$
- Die Gasmenge beträgt $\nu = 0,3 \text{ mol}$
- Das Gas bestehe aus zweiatomigen, starren Molekülen mit folgenden molaren Wärmekapazitäten: isobar: $c_p = 29,10 \text{ J/mol K}$, isochor: $c_v = 20,79 \text{ J/mol K}$
- Für die molare Gaskonstante (in $[\text{J/mol K}]$) idealer Gase gilt die Beziehung $R_m = c_p - c_v$

Aufgaben:

- Charakterisieren Sie den Prozess bezüglich Energieumwandlung in einem Satz
- Bestimmen Sie die Temperaturen T_1 , T_2 und T_3
- Welche Nutzarbeit A wird je Umlauf abgegeben ?
- Welche Wärme Q_{zu} muss je Zyklus zugeführt werden?
- Wie gross ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} des Kreisprozesses ?

Kolloquium 7: Energieformen, Exergie und Anergie

- 1)
 - a) Was bedeuten die Begriffe Exergie und Anergie ?
 - b) Beurteilen Sie die Energiespeicherarten und die Wertigkeit folgender Energieformen:
 - Potentielle Energie eines Stausees
 - Wärmehalt des Stausees bei Umgebungstemperatur
 - Wärmehalt eines Abwasserstroms bei 80°C
 - Energieinhalt von CO ($H_u = 12,6 \text{ MJ/m}^3$), Energieinhalt von H_2 ($H_u = 10,8 \text{ MJ/m}^3$).
 - c) Wie gross ist die Exergieerhöhung beim Spannen einer Feder, die von der Länge $L_0 = 300 \text{ mm}$ auf die Länge $L = 100 \text{ mm}$ gespannt wird ?
Die Federkonstante betrage $k = 15 \text{ N/mm}$.
- 2) Welchen Wirkungsgrad hätte eine Carnot-Maschine, die zwischen denselben Maximal- und Minimaltemperaturen T_3 und T_1 wie im vorhergehenden Kolloquium arbeiten würde ?
- 3) Die direkte Umwandlung von chemisch gebundener Energie in mechanische Arbeit ist eine Herausforderung für die Energieversorgung. Ein Erfinder präsentiert Ihnen dazu folgenden Lösungsansatz:

Verbrennung von Biomasse (hier ein Zündholz) oberhalb von einem mit Wasser gefüllten Gefäss (hier ein Teller), wobei die Biomasse nach dem Anzünden mit einem zweiten Gefäss umschlossen wird (hier ein Glas). Sofort nach dem Verschliessen der brennenden Biomasse beginnt der Wasserpegel im Glas zu steigen.

Der Erfinder behauptet, dass eine direkte Umwandlung von chemisch gebundener Energie in potenzielle Energie stattgefunden hat.

 - a) Wie erklären Sie die Beobachtung?
 - b) Welche Phänomene können für den Anstieg des Wasserpegels verantwortlich sein?
 - c) Welche können ausgeschlossen werden?
 - d) Stimmt die Behauptung des Erfinders? Falls nein, wieso nicht?

Kolloquium 8: Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe mit der Leistungszahl $\varepsilon = 3.0$ soll ein Haus heizen.

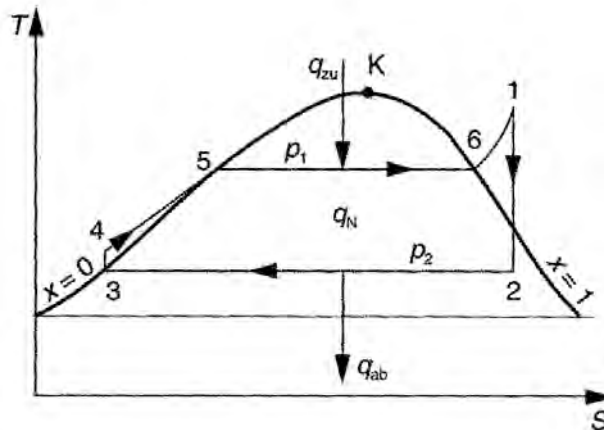
Die erforderliche Heizleistung betrage

$\dot{Q}_{ab} = 15 \text{ kW}$ bei $T_{nutz} = 45 \text{ °C}$. Die Aussentemperatur beträgt $T = -5 \text{ °C}$.

- a) Welche elektrische Leistung P nimmt der Motor auf ?
- b) Wie gross wäre die Leistungsziffer einer idealen Luft-Wasser-Wärmepumpe ?
- c) Wie gross wäre die Leistung P_C des Antriebsmotors, wenn ein Carnot-Prozess ablaufen würde ?
- d) Woher kommt der Unterschied zwischen idealem und realem Prozess ?
- e) Welche Konsequenzen ergeben sich aus dem Funktionsprinzip der Wärmepumpe für die Wärmequelle ?
- f) Welche (bautechnischen) Konsequenzen bezüglich der Heizkörper und der Wärmeverteilung hat der Einsatz einer Wärmepumpe zur Gebäudeheizung ?

Kolloquium 9: Dampfturbine

Die einfache Dampfkraftanlage arbeitet nach dem *Clausius-Rankine Prozess* im T,s-Diagramm:



Die Dampfparameter am Turbineneintritt betragen $p_1 = 13,5 \text{ MPa}$ und $T_1 = 535 \text{ °C}$.
Der Kondensatordruck betrage $p_2 = 0,006 \text{ MPa}$.

- 1) Ermitteln Sie mit Hilfe der beiliegenden Tabellen und des h,s-Diagrammes die fehlenden Werte a) bis g) der Zustandsgrößen von Wasser und Dampf in der folgenden Tabelle:

Zustand	p [MPa]	T [°C]	v [m³/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
1	13,5	535	0,02429	a)	6,54
2	0,006	b)	c)	2015	d)
3	e)	f)	$1,0064 \cdot 10^{-3}$	151,5	0,5209
4	13,5	36,551	$1,0064 \cdot 10^{-3}$	g)	0,5209

Hinweis: Das spezifische Volumen v einer Flüssigkeit-Dampfmischung kann mit Hilfe der Tabellen der Zustandsgrößen für Wasser und Wasserdampf im Sättigungszustand und des Dampfgehaltes x gemäß der Beziehung

$$v = (1-x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v')$$

ermittelt werden, wobei

v' = spezifisches Volumen der gesättigten Flüssigkeit,

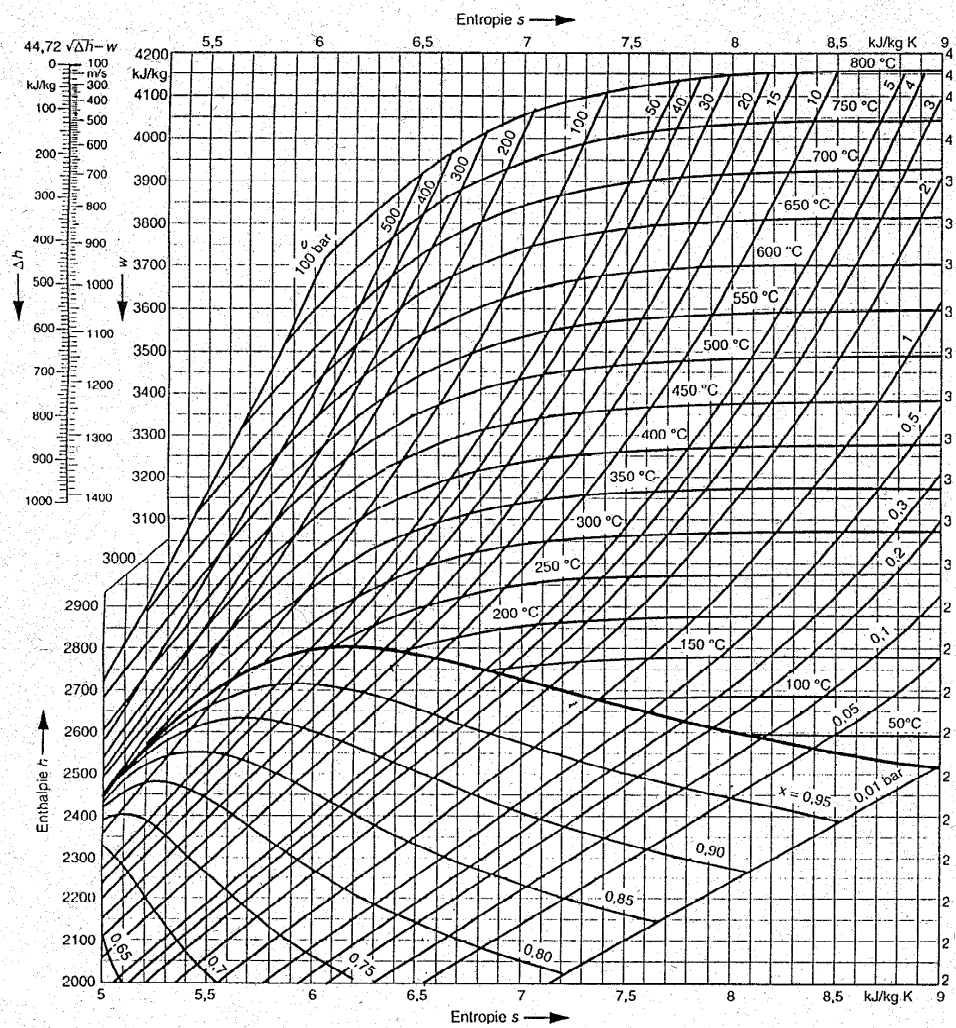
v'' = spezifisches Volumen des gesättigten Dampfes.

- 2) Bestimmen Sie die spezifische Arbeit der Turbine sowie die spezifische zu- und abgeführte Wärme unter Vernachlässigung des Speisepumpen-Arbeitsaufwandes und ermitteln Sie damit den thermischen Wirkungsgrad des Kreisprozesses.
- 3) Wie ändern sich die spezifischen Energiemengen und der thermische Wirkungsgrad, wenn der Arbeitsaufwand in der Speisepumpe für eine isentrope Verdichtung berücksichtigt wird?
Wie gross sind das Verhältnis zwischen Pumpleistung und Turbinenleistung sowie der durch die Vereinfachung unter 2) gemachte Fehler?

Tabelle 1: Thermodynamische Zustandsgrößen des Wassers und Wasserdampfes im Sättigungszustand

p	T	v'	v''	h'	h''	Δh_v	s'	s''
bar	°C	dm ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	kJ/(kg·K)
0.010	6,9808	1,0001	129,20	29,34	251,44	2485,0	0,1060	8,9767
0.015	13,036	1,0006	87,98	54,71	252,55	2470,7	0,1957	8,8288
0.020	17,513	1,0012	67,01	73,46	253,36	2460,2	0,2607	8,7246
0.025	21,096	1,0020	54,26	88,45	254,02	2451,7	0,3119	8,6440
0.030	24,100	1,0027	45,67	101,00	254,56	2444,6	0,3544	8,5785
0.035	26,694	1,0033	39,48	111,85	255,04	2438,5	0,3907	8,5232
0.040	28,983	1,0040	34,80	121,41	255,45	2433,1	0,4225	8,4755
0.045	31,035	1,0046	31,14	129,99	255,82	2428,2	0,4507	8,4335
0.050	32,898	1,0052	28,19	137,77	256,16	2423,8	0,4763	8,3960
0.055	34,605	1,0058	25,77	144,91	256,47	2419,8	0,4995	8,3621
0.060	36,183	1,0064	23,74	151,50	256,75	2416,0	0,5209	8,3312
0.065	37,651	1,0069	22,02	157,64	257,02	2412,5	0,5407	8,3029
0.070	39,025	1,0074	20,53	163,38	257,26	2409,2	0,5591	8,2767
0.075	40,316	1,0079	19,24	168,77	257,49	2406,2	0,5763	8,2523
0.080	41,534	1,0084	18,10	173,86	257,71	2403,2	0,5925	8,2296
0.085	42,689	1,0089	17,10	178,69	257,92	2400,5	0,6079	8,2087
0.090	43,787	1,0094	16,20	183,28	258,11	2397,9	0,6224	8,1881
0.095	44,833	1,0098	15,40	187,65	258,30	2395,3	0,6361	8,1691
0.10	45,833	1,0102	14,67	191,83	258,48	2392,9	0,6493	8,1511
0.12	49,446	1,0119	12,36	206,94	259,12	2384,3	0,6963	8,0872
0.14	52,574	1,0133	10,69	220,02	259,67	2376,7	0,7367	8,0334
0.16	55,341	1,0147	9,433	231,59	260,16	2370,0	0,7721	7,9869
0.18	57,826	1,0160	8,445	241,99	260,59	2363,9	0,8036	7,9460
0.20	60,086	1,0172	7,650	251,45	260,99	2358,4	0,8321	7,9094
0.25	64,992	1,0199	6,204	271,99	261,83	2346,4	0,8932	7,8323
0.30	69,124	1,0223	5,229	289,30	262,54	2336,1	0,9441	7,7695
0.40	75,886	1,0265	3,993	317,65	263,69	2319,2	1,0261	7,6709
0.45	78,743	1,0284	3,576	329,64	264,17	2312,0	1,0603	7,6307
0.50	81,345	1,0301	3,240	340,56	264,60	2305,4	1,0912	7,5947
0.55	83,737	1,0317	2,964	350,61	264,99	2299,3	1,1194	7,5623
0.60	85,954	1,0333	2,732	359,93	265,36	2293,6	1,1454	7,5327
0.65	88,021	1,0347	2,535	368,62	265,69	2288,3	1,1696	7,5055
0.70	89,959	1,0361	2,365	376,77	266,01	2283,3	1,1921	7,4804
0.75	91,785	1,0375	2,217	384,45	266,30	2278,6	1,2131	7,4570
0.80	93,512	1,0387	2,087	391,72	266,58	2274,0	1,2330	7,4352
0.85	95,152	1,0400	1,972	398,63	266,84	2269,8	1,2518	7,4147
0.90	96,713	1,0412	1,869	405,21	267,09	2265,6	1,2696	7,3954
1,0	99,632	1,0434	1,694	417,51	267,44	2257,9	1,3027	7,3598
1,5	111,37	1,0530	1,159	467,13	269,34	2226,2	1,4336	7,2234
2,0	120,23	1,0608	0,8854	504,70	270,63	2201,6	1,5301	7,1268
2,5	127,43	1,0675	0,7184	535,34	271,64	2181,0	1,6071	7,0520
3,0	133,54	1,0735	0,6056	561,43	272,47	2163,2	1,6716	6,9909
3,5	138,87	1,0789	0,5240	584,27	273,16	2147,4	1,7273	6,9392
4,0	143,62	1,0839	0,4622	604,67	273,76	2133,0	1,7764	6,8943
4,5	147,92	1,0885	0,4138	623,16	274,29	2119,7	1,8204	6,8547
5,0	151,84	1,0928	0,3747	640,12	274,75	2107,4	1,8604	6,8192
6,0	158,84	1,1009	0,3155	670,42	275,55	2085,0	1,9308	6,7575
7,0	164,96	1,1082	0,2727	697,06	276,20	2064,9	1,9918	6,7052
8,0	170,41	1,1150	0,2403	720,94	276,75	2046,5	2,0457	6,6596
9,0	175,36	1,1213	0,2148	742,64	277,21	2029,5	2,0941	6,6192
10,0	179,88	1,1274	0,1943	762,61	277,62	2013,6	2,1382	6,5828

p	T	v'	v''	h'	h''	Δh_v	s'	s''
bar	°C	dm ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	kJ/(kg·K)
11	184,07	1,1331	0,1774	781,13	2779,7	1998,5	2,1786	6,5497
12	187,96	1,1386	0,1632	798,43	2782,7	1984,3	2,2161	6,5194
13	191,61	1,1438	0,1511	814,70	2785,4	1970,7	2,2510	6,4913
14	195,04	1,1489	0,1407	830,08	2787,8	1957,7	2,2837	6,4651
15	198,29	1,1539	0,1317	844,67	2789,9	1945,2	2,3145	6,4406
16	201,37	1,1586	0,1237	858,56	2791,7	1933,2	2,3436	6,4175
17	204,31	1,1633	0,1166	871,84	2793,4	1921,5	2,3713	6,3957
18	207,11	1,1678	0,1103	884,58	2794,8	1910,3	2,3976	6,3751
19	209,80	1,1723	0,1047	896,81	2796,1	1899,3	2,4228	6,3554
20	212,37	1,1766	0,09954	908,59	2797,2	1888,6	2,4469	6,3367
21	214,85	1,1809	0,09489	919,96	2798,2	1878,2	2,4700	6,3187
22	217,24	1,1850	0,09065	930,95	2799,1	1868,1	2,4922	6,3015
23	219,55	1,1892	0,08677	941,60	2799,8	1858,2	2,5136	6,2849
24	221,78	1,1932	0,08320	951,93	2800,4	1848,5	2,5343	6,2690
25	223,94	1,1972	0,07991	961,96	2800,9	1839,0	2,5543	6,2536
26	226,04	1,2011	0,07686	971,72	2801,4	1829,6	2,5736	6,2387
28	230,05	1,2088	0,07139	990,48	2802,0	1811,5	2,6106	6,2104
30	233,84	1,2163	0,06663	1008,4	2802,3	1793,9	2,6455	6,1837
32	237,45	1,2237	0,06244	1025,4	2802,3	1776,9	2,6786	6,1585
34	240,88	1,2310	0,05873	1041,8	2802,1	1760,3	2,7101	6,1344
36	244,16	1,2381	0,05541	1057,6	2801,7	1744,2	2,7401	6,1115
38	247,31	1,2451	0,05244	1072,7	2801,1	1728,4	2,7689	6,0896
40	250,33	1,2521	0,04975	1087,4	2800,3	1712,9	2,7965	6,0685
45	257,41	1,2691	0,04404	1122,1	2797,7	1675,6	2,8612	6,0191
50	263,91	1,2858	0,03943	1154,5	2794,2	1639,7	2,9206	5,9735
55	269,93	1,3023	0,03563	1184,9	2789,9	1605,0	2,9757	5,9309
60	275,55	1,3187	0,03244	1213,7	2785,0	1571,3	3,0273	5,8908
65	280,82	1,3350	0,02972	1241,1	2779,5	1538,4	3,0759	5,8527
70	285,79	1,3513	0,02737	1267,4	2773,5	1506,0	3,1219	5,8162
75	290,50	1,3677	0,02533	1292,7	2766,9	1474,2	3,1657	5,7811
80	294,97	1,3842	0,02353	1317,1	2759,9	1442,8	3,2076	5,7471
85	299,23	1,4009	0,02193	1340,7	2752,5	1411,7	3,2479	5,7141
90	303,31	1,4179	0,02050	1363,7	2744,6	1380,9	3,2867	5,6820
95	307,21	1,4351	0,01921	1386,1	2736,4	1350,2	3,3242	5,6506
100	310,96	1,4526	0,01804	1408,0	2727,7	1319,7	3,3605	5,6198
110	318,05	1,4887	0,01601	1450,6	2709,3	1258,7	3,4304	5,5595
120	324,65	1,5268	0,01428	1491,8	2689,2	1197,4	3,4972	5,5002
130	330,83	1,5672	0,01280	1532,0	2667,0	1135,0	3,5616	5,4408
140	336,64	1,6106	0,01150	1571,6	2642,4	1070,7	3,6242	5,3803
150	342,13	1,6579	0,01034	1611,0	2615,0	1004,0	3,6859	5,3178
160	347,33	1,7103	0,009308	1650,5	2584,9	934,3	3,7471	5,2531
170	352,26	1,7696	0,008371	1691,7	2551,6	859,9	3,8107	5,1855
180	356,96	1,8399	0,007498	1734,8	2513,9	779,1	3,8765	5,1128
190	361,43	1,9260	0,006678	1778,7	2470,6	692,0	3,9429	5,0332
200	365,70	2,0370	0,005877	1826,5	2418,4	591,9	4,0149	4,9412
210	369,78	2,2015	0,005023	1886,3	2347,6	461,3	4,1048	4,8223
220	373,69	2,6714	0,003728	2011,1	2195,6	184,5	4,2947	4,5799
221,2	374,15	3,17	0,00317	2107,4	0	0	4,4429	



h,s-Diagramm für Wasserdampf

Tabelle 2: Spezifische Enthalpie [kJ/kg] von Wasser und Heißdampf

Druck [bar]	200	250	300	350	400	450	500	550	600	700	800
1	2875,4	2974,5	3074,5	3175,6	3278,2	3382,4	3488,1	3595,8	3704,8	3928,2	4158,3
5	2855,1	2961,1	3064,8	3168,1	3272,1	3377,2	3483,8	3591,8	3701,5	3925,8	4156,4
10	2826,8	2943,0	3052,1	3158,5	3264,4	3370,8	3478,3	3587,1	3697,4	3922,7	4154,1
15	2791,3	2921,5	3037,6	3147,7	3255,8	3363,7	3472,2	3582,4	3693,3	3919,6	4151,7
20	852,6	2902,1	3025,0	3138,6	3248,7	3357,8	3467,3	3577,6	3689,2	3916,5	4149,4
25	852,8	2879,5	3010,4	3128,2	3240,7	3349,7	3461,7	3572,9	3685,1	3913,4	4147,0
30	853,0	2854,8	2995,1	3117,5	3232,5	3344,6	3456,2	3568,1	3681,0	3910,3	4144,7
35	853,2	2828,1	2979,0	3106,5	3224,2	3338,0	3450,6	3563,4	3676,9	3907,2	4142,4
40	853,4	1085,8	2962,0	3095,1	3215,7	3331,2	3445,0	3558,6	3672,8	3904,1	4140,0
45	853,6	1085,8	2944,2	3083,3	3207,1	3324,4	3439,3	3553,8	3668,6	3901,0	4137,7
50	853,8	1085,8	2925,5	3071,2	3198,3	3317,5	3433,7	3549,0	3664,5	3897,9	4135,3
60	854,2	1085,8	2885,0	3045,8	3180,1	3305,5	3422,2	3539,3	3656,2	3891,7	4130,7
70	854,6	1085,8	2839,4	3018,7	3161,2	3289,1	3410,6	3529,6	3647,9	3885,4	4126,0
80	855,1	1085,8	2786,8	2989,9	3141,6	3274,3	3398,8	3519,7	3639,5	3879,2	4121,3
90	855,5	1085,8	1344,5	2959,0	3121,2	3259,2	3386,8	3509,8	3631,1	3873,0	4116,7
100	855,9	1085,8	1343,4	2925,8	3099,9	3243,6	3374,6	3499,8	3622,7	3866,8	4112,0
120	856,8	1085,9	1341,2	2849,7	3051,8	3211,4	3349,6	3479,6	3605,7	3854,3	4102,7
140	857,7	1086,1	1339,2	2754,2	3005,6	3177,4	3323,8	3458,8	3588,5	3841,7	4093,3
160	858,6	1086,3	1337,4	2620,8	2951,3	3141,6	3297,1	3437,7	3571,0	3829,1	4084,0
180	859,5	1086,5	1335,7	1659,8	2890,3	3104,0	3269,6	3416,1	3553,4	3816,5	4074,6
200	860,4	1086,7	1334,3	1647,2	2820,5	3064,3	3241,1	3394,1	3535,5	3803,8	4065,3
250	862,8	1087,5	1331,1	1625,1	2582,0	2954,3	3165,9	3337,0	3489,9	3771,9	4041,9
300	865,2	1088,4	1328,7	1610,0	2161,8	2825,6	3085,0	3277,4	3443,0	3739,7	4018,5
350	867,7	1089,5	1326,8	1598,7	1993,1	2676,4	2998,3	3215,4	3395,1	3707,3	3995,1
400	870,2	1090,8	1325,4	1589,7	1934,1	2515,6	2906,8	3151,6	3346,4	3674,8	3971,7
500	875,4	1093,6	1323,7	1576,4	1877,7	2293,2	2723,0	3021,1	3248,3	3610,2	3925,3
600	880,8	1096,9	1323,2	1567,1	1847,3	2187,1	2570,6	2896,2	3151,6	3547,0	3879,6
800	891,9	1104,4	1324,7	1555,9	1814,2	2094,1	2397,4	2708,0	2980,3	3428,7	3792,8

Kolloquium 10: Brennstoff-Trocknung

1. Hintergrund

Der Energieinhalt von Brennstoffen wird mit dem Heizwert oder dem Brennwert beschrieben. Im deutschsprachigen Raum wird für Wirkungsgradangaben der Heizwert als Bezugsgrösse verwendet (Wirkungsgrad = Nutzenergie/Heizwert). Dies ist physikalisch unsinnig, da so Wirkungsgrade von über 100% möglich sind und es kann zu Fehlinterpretationen beim Vergleich von trockenen und nassen Brennstoffen führen. Für nachfolgende Aufgabe werden folgende Definitionen benötigt:

Brennwert H_o (früher oberer Heizwert): Energiemenge, die bei der Verbrennung von einem Kilogramm Brennstoff durch fühlbare Wärme und Verdampfungswärme genutzt werden kann, also durch Abkühlung der Abgase auf die Ausgangstemperatur, wobei das Wasser im Abgas flüssig vorliegt.

Heizwert H_u (früher unterer Heizwert): Energiemenge, die bei der Verbrennung von einem Kilogramm Brennstoff als fühlbare Wärme genutzt werden kann, also durch Abkühlung der Abgase auf die Ausgangstemperatur wobei das Wasser im Abgas dampfförmig vorliegt.

Der Brennwert oder der Heizwert kann durch Messung bestimmt werden. Zwischen Brennwert und Heizwert gilt folgende Umrechnung durch Berücksichtigung der Verdampfungswärme des Wassers:

$$H_u = H_o - x_w \Delta h_v \text{ [MJ/kg]}$$

x_w bezeichnet das Verhältnis des bei der Elementaranalyse anfallenden Wassers (das sich aus Brennstoffwasser und Brennstofffeuchtigkeit zusammensetzt) zur Masse des Brennstoffs:

$x_w = \underbrace{\left(0.5 n_H \frac{M_W}{M_B}\right)}_{\substack{= \\ \text{„Brennstoffwasser“} \\ \text{(Wasser aus H in der Biomasse)}}} + \underbrace{w}_{\substack{= \\ \text{Brennstoff-} \\ \text{feuchtigkeit}}}$

n_H = molarer H-Anteil im Brennstoff

M_W = Molmasse von Wasser, M_B = Molmasse von Biomasse

Der erste Term berücksichtigt das Wasser aus H im Brennstoff, der zweite das Wasser eines feuchten Brennstoffs. Bei H-haltigen Brennstoffen ist auch für wasserfreie Brennstoffe der Heizwert geringer als der Brennwert.

Heizwert feuchter Brennstoffe (aschefrei). Für feuchte Brennstoffe gilt:

$H_u(w) = H_{u \text{ atro}} (1 - w) - \Delta h_v w$	und	$H_u(u) = \frac{H_{u \text{ atro}} - \Delta h_v u}{1 + u}$
--	-----	--

Δh_v = Verdampfungsenthalpie von Wasser

= 2.442 MJ/kg bei 25°C (Standardtemperatur für thermochemische Messungen)

$H_{u \text{ atro}}$ = Heizwert des wasserfreien Brennstoffs

für Holz gilt als typischer Wert bei 25°C: $H_{u \text{ atro}} = 18,3 \text{ MJ/kg}$, $H_{o \text{ atro}} = 19,6 \text{ MJ/kg}$

2. Aufgabenstellung.

In einem holzgefeuerten Dampfkraftwerk mit einer Leistung von $P_e = 25 \text{ MW}_e$ wird frisches Holz mit einem Wassergehalt von $w = 50 \%$ verbrannt. Der elektrische Wirkungsgrad (Stromerzeugung / zugeführte Energie als Brennstoff-Heizwert) der Anlage beträgt $\eta_e = 30 \%$. Das Kraftwerk weist eine jährliche Betriebszeit von $t_b = 8000 \text{ h/a}$ bei Nennlast auf.

- Wie hoch ist der Heizwert H_u des verwendeten Holzes?
- Wie gross ist der jährliche Brennstoffbedarf?
- Um den Wirkungsgrad zu verbessern, plant der Betriebsleiter den Bau einer Trocknungshalle. Eine natürliche Trocknung ohne Fremdenergiezufuhr führt zu einem Wassergehalt von $w = 20\%$. Wie gross ist der Brennstoffbedarf jetzt und wieviel beträgt die Brennstoffeinsparung? Wie hoch ist nun der Wirkungsgrad des Kraftwerks ab Brennstoffanlieferung?
- Welche Grösse ist besonders geeignet, um die Veränderung durch die Trocknung zu berechnen und zu veranschaulichen: Der Heizwert oder der Brennwert? Beschreiben Sie die Veränderung durch die Trocknung in einem Diagramm $H_u(w)$ und $H_o(w)$.
- Welche zusätzlichen Effekte kann die Trocknung auf den Anlagenbetrieb und das Anlagenkonzept haben?
- Die Trocknungshalle erreicht die geplante Leistung leider nicht, sondern ermöglicht lediglich eine Trocknung auf $w = 30 \%$. Welche weiteren Möglichkeiten sehen Sie zur Trocknung und Wirkungsgradsteigerung? Der Planer der Anlage unterbreitet nachfolgenden Vorschlag zur Erzielung des gewünschten Wassergehalts. Wie gross ist der Wirkungsgradgewinn dieser Massnahme?

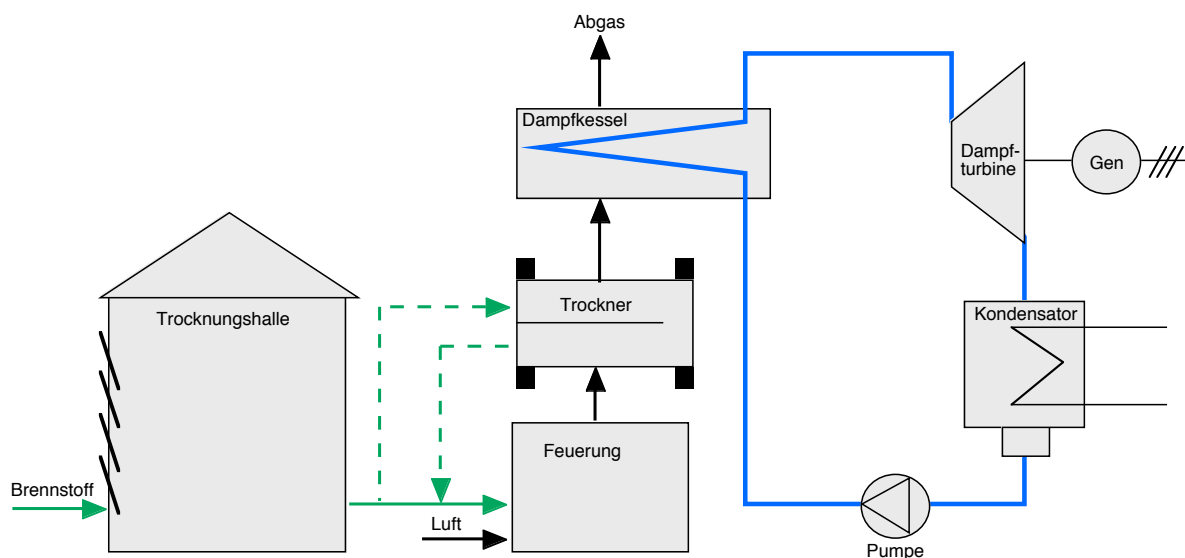


Bild 1 Aufbau des Dampfkraftwerks. Basisvariante: Ohne Trocknungshalle und ohne Trockner.
 Option 1: Bau einer Trocknungshalle,
 Option 2: Trockner mit Wärmeentzug aus Feuerungsabgas.

Kolloquium 11: LRV und Normierung

- 1) Wegen Klagen von Anwohnern muss die kantonale Behörde eine Holzfeuerungsanlage beurteilen und kontrollieren, ob die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) eingehalten wird. Sie werden beauftragt, die Abnahmemessung vorzubereiten und auszuwerten.

a) Welche Grössen messen oder bestimmen Sie ? Begründung ? Ort und Art der Messung ?

b) Sie ermitteln folgende Werte:

- Massendurchsatz des Brennstoffs $\dot{m} = 500 \text{ kg/h}$
- Holzfeuchtigkeit $u = 80\%$ (bezogen auf Trockenmasse).

Welches sind die gültigen Grenzwerte gemäss Einteilung der LRV (Feuerungsleistung gemäss LRV = Energie-Input).

Annahme: Heizwert: $H_u = \frac{18'500 - 25 u}{1 + \frac{u}{100}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ (wobei u in % einzusetzen ist)

- c) Sie ermitteln folgende Werte im trockenen Abgas bei 180°C (die meisten Emissionsmessgeräte messen trockene Abgase um das Messgerät vor Kondensat zu schützen):

$$\text{O}_2 = 8 \text{ Vol.-%}$$

$$\text{CO}_2 = 13 \text{ Vol.-%}$$

$$\text{CO} = 100 \text{ Vol.-ppm}$$

$$\text{NO} = 150 \text{ Vol.-ppm}$$

$$\text{NO}_2 = 10 \text{ Vol.-ppm}$$

Sind die LRV-Grenzwerte eingehalten ?

Zur Beantwortung dieser Frage sollen die Messwerte auf die Einheiten und Bedingungen der LRV umgerechnet werden. Dazu müssen die gemessenen Werte auf eine Bezugsgrösse normiert werden. Diese beträgt im vorliegenden Fall 11 Vol.-% O_2 .

Leiten Sie dazu eine **Formel zur Berechnung der Luftüberschusszahl** her aus der Abgaszusammensetzung bei der Verbrennung von Holz mit dem Feuchtigkeitsgehalt u und geben Sie an, wie die Emissionsmessdaten auf die Bezugsgrösse der LRV normiert werden können. Für die Zusammensetzung des Brennstoffs (Holz) gelte dabei:

C: 50 Gew.-%, H: 6 Gew.-%, O: 44 Gew.-% bzw. vereinfacht: $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.7}$.

Begründen Sie, wieso in der LRV eine Sauerstoff-Bezugsgrösse angegeben und die Normierung auf diese Bezugsgrösse vorgeschrieben ist.

Beilage:

Emissionsgrenzwerte für Holzfeuerungen gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV Anhang 3 Ziffer 522, Stand am 3. Feb. 1998)

	Feuerungswärmeleistung					
	über 20 kW bis 70 kW	über 70 kW bis 200 kW	über 200 kW bis 500 kW	über 500 kW bis 1 MW	über 10 MW bis 5 MW	über 5 MW
<i>Holzbrennstoffe</i>						
– Bezugsgrösse: Die Grenzwerte beziehen sich auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von %vol	13	13	13	13	11	11
– Feststoffe insgesamt mg/m ³	–	150	150	150	150	50
– Kohlenmonoxid (CO): für Holzbrennstoffe nach Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. a und b mg/m ³	4000 ¹⁾	2000	1000	500	250	250
– für Holzbrennstoffe nach Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c mg/m ³	1000	1000	800	500	250	250
– Stickoxide (NOx), angegeben als Stickstoffdioxid (NO ₂) mg/m ³	2)	2)	2)	2)	2)	2)
– gasförmige organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlen- stoff (C) mg/m ³	–	–	–	–	50	50
– Ammoniak und Ammonium- verbindungen, angegeben als Ammoniak ³⁾ mg/m ³	–	–	–	–	30	30
<i>Hinweise:</i>						
– Die Angabe eines Strichs in der Tabelle bedeutet, dass weder nach Anhang 3 noch nach Anhang 1 eine Begrenzung vorgeschrieben ist.						
1) Gilt nicht für Zentralheizungsherde.						
2) bei einem Massenstrom von 2500 g/h oder mehr 250 mg/m ³ .						
3) Diese Emissionsbegrenzung ist nur für Feuerungsanlagen mit Entstickungseinrich- tung von Bedeutung.						

Auszug aus der Einleitung zur Luftreinhalte-Verordnung, Anhang 1:

23 Bezugsgrösse bei Emissionskonzentrationen

¹ Die als Konzentrationen angegebenen Grenzwerte und die als Bezugsgrössen angegebenen Sauerstoffgehalte beziehen sich auf das Volumen des Abgases im Normzustand (=°C, 1013 mbar) nach Abzug des Feuchtegehaltes (trocken).

² Die als Emissionskonzentrationen angegebenen Grenzwerte beziehe sich auf die Abgasmenge, die nicht stärker verdünnt ist, als dies technisch und betrieblich unvermeidlich ist.

³ Wird für eine Anlage in den Anhängen 2 – 4 als Bezugsgrösse ein Volumengehalt an Sauerstoff angegeben, so sind die gemessenen Emissionskonzentrationen jeweils auf diese Bezugsgrösse umzurechnen.

24 Feuerungswärmeleistung

Die Feuerungswärmeleistung bezeichnet die einer Anlage zugeführte Wärmeenergie pro Zeiteinheit. Sie wird errechnet, indem der Brennstoffverbrauch der Anlage mit dem unteren Heizwert des Brennstoffs multipliziert wird.

Kolloquium 12: Verbrennung

- 1) a) Bestimmen Sie die maximal möglichen Stickoxidemissionen aus dem Brennstoffstickstoff bei der Verbrennung von Buchenholz mit einem Stickstoffgehalt von $N = 0,2 \text{ Gew.}\%$.
Die Zusammensetzung des Holzes betrage: $48,8 \text{ Gew.}\% \text{ C}$, $5,7 \text{ Gew.}\% \text{ H}$, $45,5 \text{ Gew.}\% \text{ O}$

b) Eine Emissionsmessung im Abgas einer realen Feuerung ergibt Stickoxidemissionen von $300 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}$ bei $11 \text{ Vol.}\% \text{ O}_2$. Wie erklären Sie die Abweichung ?

- 2) Wie beeinflussen **a) Abgasrezirkulation** und **b) Verbrennungsluftvorwärmung** bei der Verbrennung eines Brennstoffs in einer Feuerung folgende Größen:

- Wirkungsgrad
- Gesamtluftüberschusszahl (O_2 - und CO_2 -Gehalt der Abgase)
- NO_x -Gehalt der Abgase
- SO_2 -Gehalt der Abgase
- Abgastemperatur
- Verbrennungstemperatur.

Bei welchen Brennstoffen sind die vorgeschlagenen Massnahmen sinnvoll?

Begründen Sie Ihre Aussage und wenden Sie dazu die Grundsätze der Bilanzierung an.