

1 Energie

1.) Energieträger und -verbraucher

a) Nennen Sie 5 Primärenergieträger!

- *Kohle*
- *Erdöl*
- *Erdgas*
- *Uran*
- *Wasserkraft*

b) Nennen Sie 5 Sekundärenergieträger!

- *Kohle*
- *Benzin*
- *Heizöl*
- *Gas*
- *Strom*

c) Nennen Sie die 4 Hauptgruppen der Verbraucher!

- *Industrie*
- *Verkehr*
- *Haushalte*
- *Kleinverbraucher*

d) Nennen Sie die 3 hauptsächlichen Arten der Endenergie!

- *Raumwärme*
- *Prozesswärme*
- *Kraft*

2.) Energiequellen

a) Erklären Sie den Begriff (Energie-) RESERVEN!

Eindeutig identifizierbare Vorräte, unter heutigen oder in naher Zukunft zu erwartenden Bedingungen technisch UND wirtschaftlich abbaubar

b) Was sind (Energie-) RESSOURCEN? Stellen Sie den Unterschied gegenüber a) heraus!

Nachgewiesene oder nicht nachgewiesene, jedoch geologisch mögliche UND wahrscheinliche Vorräte; Unterschiede: gehen über Reserven hinaus, z.Z. aber technisch und/oder wirtschaftlich NICHT gewinnbar

c) Wie groß ist die Reichweite der 4 wichtigsten Energievorräte?

- *Erdöl, Erdgas:* *viele Jahrzehnte (> 50 Jahre)*
- *Kohle:* *viele Jahrhunderte (400... 1200 Jahre)*
- *Uran, Thorium:* *viele Jahrtausende (nutzungsabhängig!)*

3.) Energiedefinitionen

a) Was ist Energie?

Eine Zustandsgröße, nämlich die FÄHIGKEIT:

- *Arbeit zu verrichten*
- *Wärme zu übertragen*
- *Strahlung zu entsenden*

b) Wie wird Energie gemessen?

In dem man durch die Energie (eines Körpers) einen Prozess verrichten (, z.B. die Quecksilbersäule eines Thermometers zum Steigen bringen) lässt und aus der Zustandsänderung (z.B. Wärmeübertragung → Temperaturanstieg → Ausdehnung) auf den Ausgangszustand schließt.

c) Was versteht man unter Exergie und Anergie?

Energie = Exergie + Anergie

- *Exergie: in ALLE anderen Energieformen umwandelbar*
- *Anergie: NICHT umwandelbar, meistens Wärmeenergie*

4.) Wirkungsgrad

d) Durch welche Kenngröße ist der Wirkungsgrad eines energetischen Prozesses (nach oben) begrenzt?

Durch so genannten Carnot-Faktor (= Carnot'scher Wirkungsgrad):

$$\eta_C = 1 - \frac{T_u}{T_o}$$

e) Welche physikalischen (Grund-) Bedingungen müssten für einen Wirkungsgrad von 100 % erfüllt sein?

$$\eta_{\text{Prozess}} = \eta_C = 100 \%$$

$$\Rightarrow T_u = 0 \quad \vee \quad T_o = \infty$$

2 Fossile Energieträger

1.) Verbrennungsbegriffe

a) Welcher Vorgang wird als „Verbrennung“ bezeichnet?

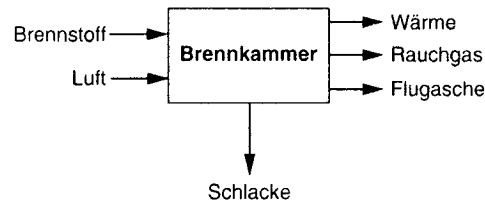
Chemische Reaktion mit Sauerstoff, bei der BINDUNGSENTHALPIE frei wird (= „exotherme Oxidation“)

b) Was besagen der Heizwert und der Brennwert eines Brennstoffes?

- *Heizwert H_u : bezogen auf Brennstoffmenge bilanzierte Verbrennungsenergie nach Rückkühlung aller Verbrennungsprodukte mit AUSNAHME des WASSERDAMPFES (→ „klassische“ Verbrennungsanlagen)*
- *Brennwert H_o : bezogen auf Brennstoffmenge bilanzierte Verbrennungsenergie nach Rückkühlung aller Verbrennungsprodukte EINSCHLIESSLICH des WASSERDAMPFES (→ „Brennwert“-Anlagen)*

$$\Rightarrow H_o \geq H_u$$

- c) Womit werden Heiz- bzw. Brennwert ermittelt?
Mittels Elementar-(Stoff-)Analyse
- d) Stellen Sie schematisch dar, welche Produkte bei der Verbrennung zu- oder abgeführt werden müssen?



2.) Verbrennungsrechnung

- a) Geben Sie einen jeweils typischen Heizwert der 4 wichtigsten fossilen Brennstoffe an!

- *Steinkohle (Ruhr):* $H_{u,Steinkohle} \approx 32 \text{ MJ/kg}$
- *Heizöl EL:* $H_{u,Heizöl} \approx 43 \text{ MJ/kg}$
- *Erdgas H:* $H_{u,Erdgas} \approx 49 \text{ MJ/kg} \approx 36 \text{ MJ/m}^3$
- *Benzin:* $H_{u,Benzin} \approx 43 \text{ MJ/kg}$

- b) Was ist der Mindestluftbedarf, wovon hängt er ab und in welcher Einheit wird er angegeben?

Auf Brennstoffmenge bezogener (Mindest-)Bedarf an (trockener) Luft mit 21%_{Vol} Sauerstoff; ist abhängig vom C-, H-, S-, O-Gehalt im Brennstoff; Einheit:

- *Feste und flüssige Brennstoffe:* $[L_{min}] = \frac{m_{trL}^3}{kg_{BS}}$
- *Brenngase:* $[L_{min}] = \frac{m_{trL}^3}{m_{BG}^3} = 1$

- c) Wie ist die Luftzahl definiert?

$$= \text{Luft - Überschuss - Zahl} = \frac{\text{tatsächliche Luftmenge}}{(\text{stöchiometrisch notwendiger}) \text{ Mindestluftbedarf}}$$

3.) Verbrennungstemperatur

- a) Wie wird die Verbrennungstemperatur prinzipiell und rechnerisch ermittelt?
Energie- bzw. Leistungsbilanz im Feuerraum:

$$t_{th} = \frac{H_u}{V_G r_G c_{pG}} = \frac{h_G}{c_{pG}} \text{ mit } r_G = \text{Raumanteil des Verbrennungsgases}$$

- b) Geben Sie die typischen realen Feuerraumtemperaturen der 4 wichtigsten Brennstoffe an!

- *Steinkohle (Staubfeuerung):* $t_{FR,Steinkohle} \approx 1300...1400 \text{ }^\circ\text{C}$
- *Braunkohle:* $t_{FR,Braunkohle} \approx 1100 \text{ }^\circ\text{C}$
- *Heizöl:* $t_{FR,Heizöl} \approx 1400 \text{ }^\circ\text{C}$
- *Erdgas:* $t_{FR,Erdgas} \approx 1400 \text{ }^\circ\text{C}$

3 Kraftwerke

1.) Kraftwerksarten

- a) Welche jährliche Nutzungsdauer eines Kraftwerkes wird üblicherweise als Grundlast, Mittellast, Spitzenlast bezeichnet?
- *Grundlast* $\geq 5000 \text{ h/a}$
 - *Mittellast* $\approx 2000 \dots 5000 \text{ h/a}$
 - *Spitzenlast* $\leq 1000 \text{ h/a}$
- b) Nennen Sie jeweils eine zu den Nutzungsarten aus a) und zur Erzeugung industrieller Prozessenergie verwendete, typische Kraftwerksart und begründen Sie, warum sie dort zum Einsatz kommt!
- *Grundlast: KERNKRAFTWERK; Dauerbetrieb wegen langen An- und Abfahrzeiten, engem Leistungsbereich sowie hohen Stillstandskosten*
 - *Mittellast: STEINKOHLE-DAMPFKRAFTWERK; flexibler Betrieb auf Grund kurzer An- und Abfahrzeiten, sowie weitem Leistungsbereich möglich bzw. bei Kraft-Wärme-Kopplung notwendig*
 - *Spitzenlast: PUMP-SPEICHER-KRAFTWERK; Speicherung während Niedriglast-Phase \rightarrow Energieabgabe während Spitzenlast-Phase*
 - *Prozessenergie: GASTURBINEN-KRAFTWERK; kompakte Bauweise und flexibler Betrieb bei möglicher Abwärme-Nutzung als Prozesswärme oder in kombinierter Gas-und-Dampf-Anlage*
- c) Erläutern Sie kurz die Betriebsarten eines Kraftwerks!
- *Bestimmungsgemäßer NORMAL-BETRIEB*
 - *STÖRUNG: Warnungen; KW kann i.d.R. weiterbetrieben werden und Fehlfunktion wird während des Betriebes bzw. bei der nächsten Revision behoben; NUR Störungen HÖHERER Ordnung führen zum Abschalten*
 - *STÖRFALL: KW MUSS je nach Ordnung mehr oder minder schnell ABGEFAHREN werden*
 - *UNFALL: Fehlfunktion mit FOLGEN für Mensch ODER Umwelt*

4 Dampfkraftwerk

1.) Thermodynamische Grundlagen

- a) Welche Zustandsgröße bleibt während dem Verdampfen unverändert, wenn gleichzeitig der Druck konstant gehalten wird?

Die Temperatur.

- b) Was versteht man unter Enthalpie, was unter Entropie?

– *Enthalpie: Wärmemenge bei konstantem Druck*

– *Entropie: Von der Temperatur unabhängige Zustandsgröße, welche die Wärmemenge in Bezug auf einen Nullpunkt kennzeichnet*

- c) Erklären Sie folgende Begriffe:

– Kritischer Punkt

Punkt, an dem die Dichte von flüssiger und gasförmiger Phase gleich ist und ein Übergang in den jeweils anderen Aggregatzustand ohne Wärme-Zu- oder Abfuhr erfolgen kann.

– Tripelpunkt

Punkt, an dem alle drei Phasen nebeneinander bestehen können, also z.B. ein direkter Übergang vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand möglich ist.

– Verdampfungsenthalpie

Wärmemenge, die (bei konstantem Druck und konstanter Temperatur) zur Überführung vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand zugeführt werden muss.

– Schmelzenthalpie

Wärmemenge, die (bei konstantem Druck und konstanter Temperatur) zur Überführung vom festen in den flüssigen Aggregatzustand zugeführt werden muss.

- d) Auf welchen Nullpunkt beziehen sich die Werte für Enthalpie und Entropie des Wasserdampfes in den üblichen Tabellen und daraus abgeleiteten Berechnungen?

Auf den Tripelpunkt von reinem Wasser (0,01 °C; 611,657 Pa ± 0,010 Pa).

- e) Was verbirgt sich hinter folgenden Angaben:

– Absolute Feuchte

Massenbezogener, absoluter Wassergehalt in Luft in $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{fL}}$

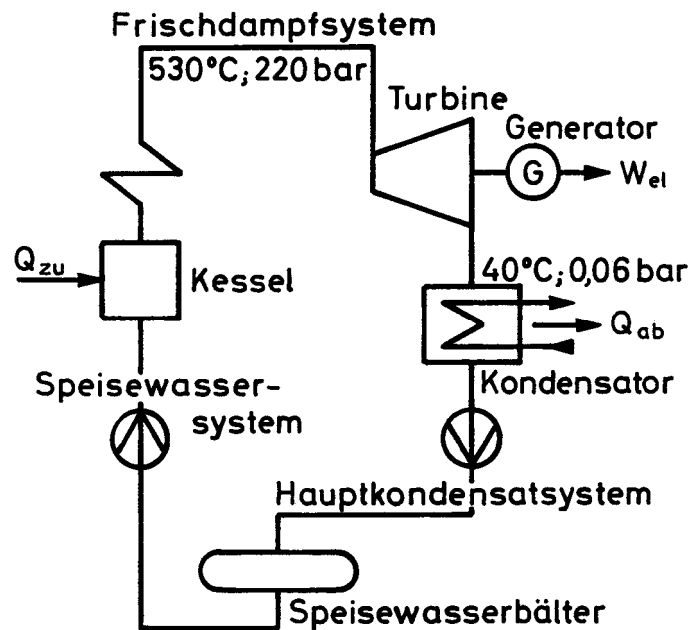
– Relative Feuchte

Verhältnis von absoluter Feuchte zur (im Sättigungszustand) maximal möglichen Feuchte in % oder dimensionslos; temperaturabhängig!

– Taupunkt

Temperatur, bei der sich Luft mit einer bestimmten absoluten Feuchte gerade im Sättigungszustand befindet, die relative Feuchte also genau 100 % beträgt

f) Skizzieren Sie das (Prinzip-) Schaltbild einer Dampfkraftanlage!



g) Nennen Sie die Grundelemente folgender Systeme eines Dampfkraftwerks:
Dampferzeuger

- *Dampfkessel*
- *Überhitzerkessel*

Frischdampfsystem

- *Haupt-Dampfleitung*

Turbosatz

- *Turbine(n)*
- *Generator*

Kühl-(Wasser-)System ohne (ausschließliche) Flusswassernutzung

- *Kondensator*
- *Kühlturm*
- *Kühlwasserpumpe(n)*

Kondensatsystem

- *Kondensatpumpe(n)*
- *Niederdruckvorwärmer*

Speisewassersystem

- *Speisewasserbehälter*
- *Speisewasserpumpe(n)*
- *Hochdruckvorwärmer*

h) Geben Sie die thermodynamischen Phasen eines Dampfkreislaufs nach dem Clausius-Rankine-Prozess an und nennen sie jeweils das Grundelement aus g), in welchem diese abläuft!

(1)→(2): *Isentrope Expansion des Dampfes unter Verrichtung von mechanischer Arbeit in der TURBINE*

(2)→(3): *Isobare Kondensation des Dampfes unter Wärmeabgabe im KONDENSATOR*

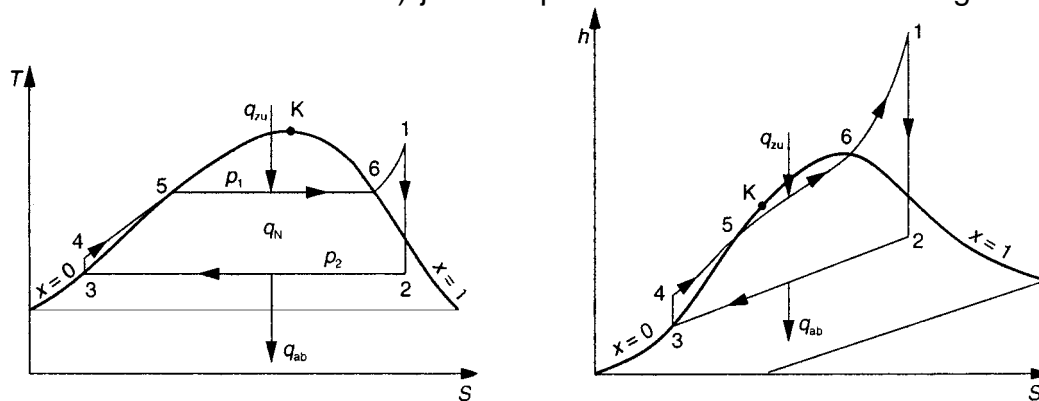
(3)→(4): *Isentrope Verdichtung des Kondensats und Speisewassers unter mechanischem Arbeitsaufwand in den PUMPEN*

(4)→(5): *Isobare Erwärmung des Speisewassers unter Wärmezufuhr im KESSEL*

(5)→(6): *Isobare Verdampfung des Speisewassers unter Wärmezufuhr im KESSEL (VERDAMPFER)*

(6)→(1): *Isobare Überhitzung des Frischdampfes unter Wärmezufuhr im ÜBERHITZER*

i) Stellen Sie Phasen nach h) jeweils qualitativ im T-s- und h-s-Diagramm dar!



j) Wie sind folgende thermodynamische Größen formelmäßig definiert:

– Spezifische technische Arbeit

= (spezifische) technische Arbeit, die bei der Expansion in der Turbine gewonnen wird:

= Enthalpie am Turbineneintritt – Enthalpie am Turbinenausritt

$$w_T = h_1 - h_2$$

– Spezifische zugeführte Energie

= (spezifische) Energie, die VON AUSSEN durch Verbrennung zugeführt wird (Speisewasserpumpen werden dagegen vom Generatorstrom und NICHT von außen angetrieben → Eigenbedarf!):

= Enthalpie am Turbineneintritt – Enthalpie am Kesseleinlauf

$$q_{zu} = h_1 - h_4$$

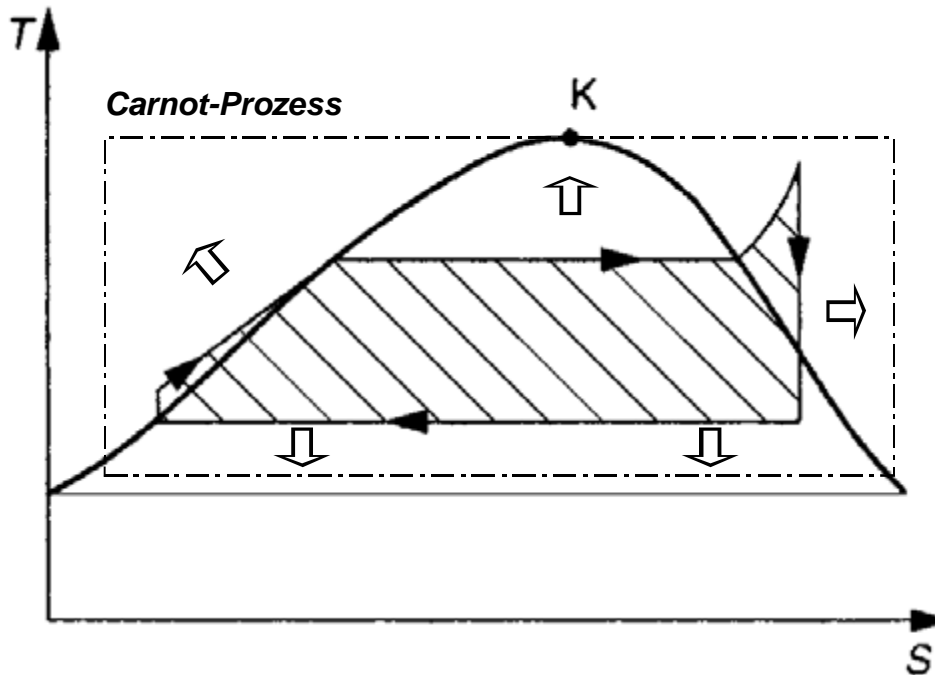
– Wirkungsgrad

= Verhältnis von technischer Arbeit zur zugeführten Energie:

$$= \frac{\text{(spezifische) technische Arbeit}}{\text{(spezifische) zugeführte Energie}}$$

$$\eta = \frac{w_T}{q_{zu}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4}$$

- k) Stellen Sie in einem geeigneten Diagramm qualitativ dar, wie der Wirkungsgrad eines Dampfkraftprozesses prinzipiell verbessert werden kann! Wie müsste der Idealprozess aussehen?



Idealprozess: Carnot-Prozess → Rechteck (im T-s-Diagramm) zwischen zwei Isothermen und zwei Isentropen

- l) Beschreiben Sie 4 Möglichkeiten der Wirkungsgradverbesserung!
- (I): *Erhöhung der Frischdampfparameter; höhere Zustände aber durch Werkstoffgegebenheiten begrenzt!*
 - (II): *Senkung der Kondensatorparameter; Wärmeabgabe aber an Flüsse (behördlich) und/oder Umgebungsluft (physikalisch) begrenzt!*
 - (III): *Doppelte Zwischenüberhitzung; Stand der Technik!*
 - (IV): *Regenerative Speisewasservorwärmung; heute bis zu 7-fache Speisewasservorwärmung realisiert!*

2.) Aufbau eines Kohlekraftwerks

- a) Geben Sie die Komponenten an, die zu folgender Gesamtanordnung gehören:
Brennstoffaufbereitung
- *Kohle-(Graben-)Bunker*
 - *Brecheranlagen*
 - *Förderbänder*
 - *Kesselbunker (i.d.R. maximal 1 Tagesration)*
 - *Kohlemühlen (zur Herstellung von Kohlestaub)*
 - *Nass-Asche-Bunker (für Schlacke usw.)*
 - *Trocken-Asche-Bunker (für Asche aus Rauchgasen)*
 - *Verladeeinrichtung(en) (Kohle-An- und Asche-Abtransport)*

Dampferzeugung und Feuerung

- *Kessel* } (I)
- *Saugzug* }
- *Feuerungseinrichtungen (Gebläse, Öl-Anfeuerung usw.)* |
- *Schornstein* }

Turbogruppe und Wasser-Dampf-Kreislauf

- *Turbine* }
- *Kondensator* |
- *Hochdruck-Vorwärmer* |
- *Niederdruck-Vorwärmer* } (II)
- *Speisewasserbehälter* |
- *Pumpen* |
- *Rohrleitungen* |
- *Sicherheitseinrichtungen* }

Kühlsystem und Wasseraufbereitung

- *Kühlturm*
- *Wassereinlaufbauwerke (Flusswasser)*
- *Wasseraufbereitungsanlagen für Konditionierung des Speisewassers*
- *Rohrleitungen*

Umweltschutzanlagen

- *Entstaubungsanlagen*
- *Entschwefelungsanlagen (REA)*
- *Entstickungsanlagen (DENOX)*

Elektrotechnik

- *Generator* }
- *Transformator* } (III)
- *Energieableitung* |
- *Eigenbedarfsanlagen* }

Leittechnik

- *Warte* }
- *Schaltanlagen* } (IV)
- *Messen – Steuern – Regeln (MSR)* }

Außerdem: Werkstätten, Lager, Verwaltung, Sozialgebäude usw.

b) In welchen Gebäude-Komplexen befinden sich die wichtigsten Komponenten aus a)?

- (I): *Kesselhaus*
- (II): *Maschinenhaus*
- (III): *Allgemein: Starkstromanlagen*
- (IV): *Schaltanlagegebäude*

3.) Dampferzeuger

a) Beschreiben Sie die Aufgabe des Dampferzeugers!

Aus chemischer Energie des Brennstoffs, die in der Feuerung in Wärmeenergie umgewandelt wurde, Enthalpie eines hochgespannten Dampfes generieren

b) Aus welchen Aggregaten besteht der Dampferzeuger?

- *Economizer*
- *Feuerraum*
- *Verdampfer*
- *Überhitzer*
- *Luft-Vorwärmer*
- *Hilfsaggregate*

c) Welche maximalen Dampfparameter sind derzeit praktisch erreichbar?

*$p_1 \approx 270 \text{ bar}$; $\vartheta_1 \approx 600 \text{ °C}$; \rightarrow *Werkstoffbelastung!**

d) Nennen Sie die wichtigsten Anforderungen an Dampferzeuger!

- *Erwärmung, Verdampfung, Überhitzung großer Massenströme ($\dot{m} \leq 3500 \text{ t}_{\text{Dampf}} / \text{h}$)*
- *Kurze Anfahrzeiten, schnelle Laständerungen ($\pm 10 \text{ \%} / \text{min}$)*
- *Geringe Temperatur- ($\pm 3 \text{ K}$) und Druckschwankungen ($\pm 1 \text{ \%}$)*
- *Hoher Wirkungsgrad*
- *Lange Lebensdauer, hohe Verfügbarkeit (2000...2500 h/8760 h im Jahr)*

e) Charakterisieren Sie den Wasserlauf der 3 gebräuchlichsten Verdampfersysteme und nennen Sie jeweils Vor- und Nachteile!

- *Naturumlauf-Dampferzeuger \rightarrow interne Zirkulation durch Schwerkraft*

Vorteile: Einfachheit

Geringe Kosten

Nachteil: maximal 100 MW elektrische Leistung

- *Zwangumlauf-Dampferzeuger \rightarrow interne Zirkulation durch Pumpe*

Vorteile: Höhere Leistung (bis 1000 MW elektrische Leistung)

Flexibilität in Geometrie und Kessel-Typ

Nachteile: Umwälzpumpe (Temperaturen!)

Höhere Kosten

- (Zwang-)Durchlauf-Dampferzeuger → keine interne Zirkulation (in Deutschland üblich)

*Vorteile: Keine Trommel, nur Nassabscheider
Keine Leistungsbegrenzung nach oben
Flexibilität in Geometrie des Kessels*

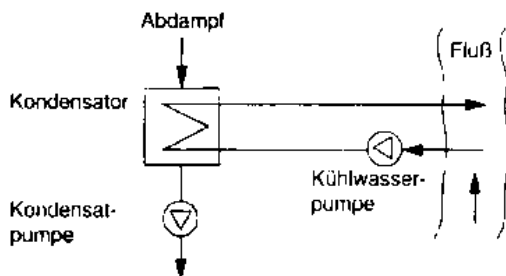
*Nachteile: Hohe untere Leistungsgrenze ($\geq 30\%$)
Hohe Kosten*

4.) Dampfturbine

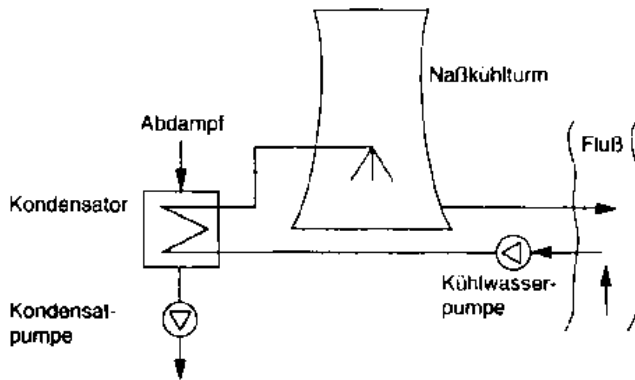
- Welche Aufgabe hat die Dampfturbine aus thermodynamischer Sicht?
→ *Wärme­kraft­ma­schine zur Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie durch Expansion des hochgespannten Dampfes*
- Durch welche Turbinenteile und jeweils wie wird die Aufgabe aus a) erfüllt?
 - *Leiteinrichtung, stehend und fest mit Gehäuse verbunden:
Führung des Dampfes auf die Schaufeln des Laufrades und Erhöhung der Dampfgeschwindigkeit mittels (Laval-)Düse*
 - *Laufrad mit Schaufeln, auf der Turbinenwelle verankert
Impuls des Dampfes in Rotationsenergie umwandeln, damit Drehung der Turbinenwelle, die Generator antreibt*
- Erklären Sie den Unterschied zwischen einer Kondensations- und einer Gegendruckturbine an einem Beispiel!
Beispiel Heizkraftwerk:
 - *Gegendruckturbine: (Hochdruckturbine) entspannt Dampf von Frischdampf-Zustand bis auf Druck des Heizdampfnetzes (= „Gegendruck“)*
 - *Kondensationsturbine: (Niederdruckturbine) entspannt Dampf (je nach Bedarf) von Heizdampf-Zustand bis auf Kondensations-(unter-)druck*

5.) Kühlwassersysteme

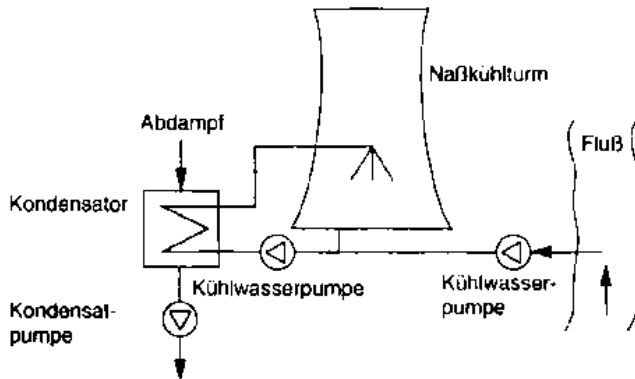
- Beschreiben Sie kurz die 4 gebräuchlichsten Kühlungsprinzipien!
 - *Frischwasserkühlung:*



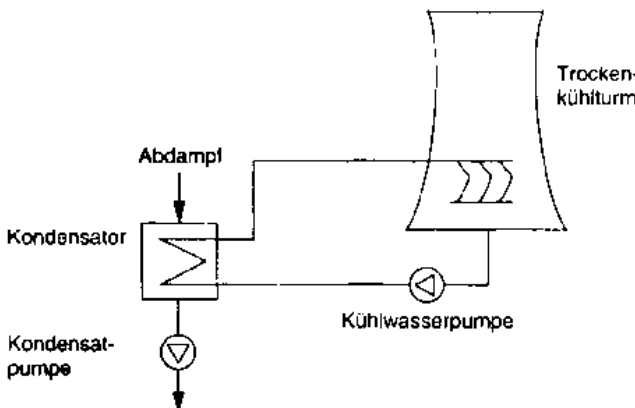
– *Ablaufkühlung:*



– *Kreislaufkühlung als Nasskühlung:*



– *Kreislaufkühlung als Trockenkühlung:*



- b) Welches Problem kann sich bei einem Kühlsystem ohne Kühlturm ergeben?
 = *Frischwasserkühlung* → *Im Sommer kann die Flusswassertemperatur soweit ansteigen, dass auf Grund behördlich begrenzter thermischer Gewässerbelastung die notwendige Temperaturdifferenz nicht mehr gegeben ist und der Betrieb des Kraftwerkes teilweise oder ganz eingestellt werden muss (z.B. Großkraftwerk Mannheim)*
- c) Was versteht man unter Grädigkeit?
Temperaturdifferenz zwischen Dampf und Kühlluft (= Umgebungsluft)

6.) Umweltschutztechnik

a) Geben Sie an, welche an der Verbrennung beteiligten Stoffe zu welchen Emissionen führen!

- $S \rightarrow SO_2$
- *N-Verbindungen, Luft-N₂ → NO, NO₂*
- *Cl-, F-Verbindungen → HCl, HF + Dioxine*
- *Inerte Bestandteile → Asche, Flugstaub*
- $C \rightarrow CO_2$ (= Treibhausgas)

b) Welche Maßnahmen zur Emissionsminderung bei fossil befeuerten Dampfkraftanlagen sind grundsätzlich denkbar?

- *Primärenergie: Aufbereitung des Brennstoffs*
- *Endenergie: Energieeinsparung*
- *Kessel: Feuerungstechnische Maßnahmen*
- *Rauchgase: Gasreinigungsverfahren*
- *Wärme: Abwärmenutzung*
- *Gesamtanlage: Wirkungsgradverbesserung*

c) Nennen Sie Verfahren zur Entstaubung der Abgase!

- *Fliehkraft-Abscheidung mittels Zyklon (Grobstaub)*
- *Elektrofilter (Mittel- und Feinstaub)*
- *Gewebefilter (Feinstaub)*

d) Geben Sie Verfahren zur Entschwefelung und die wichtigsten, dabei entstehenden Endprodukte an und beschreiben Sie eines der Verfahren genauer!

- *Gipsnass- / Kalkwaschverfahren: $SO_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (Gips)*

Beschreibung: entstaubtes und abgekühltes Rauchgas wird durch Sprühturm-Wäscher geführt und mit $Ca(OH)_2$ (Kalkmilch = Kalk + Wasser) besprüht → Austragung des Gips' über Förderbänder → Trocknung, Abtransport

- *Wellmann-Lord-Verfahren: $SO_2 \rightarrow H_2SO_4$ (Schwefelsäure)*
- *Walther-Verfahren: $SO_2 \rightarrow (NH_4)SO_4$ (Amoniumsulfat = Dünger)*

e) Wie wird eine wirksame Entstickung durchgeführt?

- *Walther-Verfahren: $NO_x \rightarrow (NH_4)NO_3$ (Amoniumnitrat = Dünger)*
- *Mit Hilfe von Katalysatoren bei 320...400 °C:*
 $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$

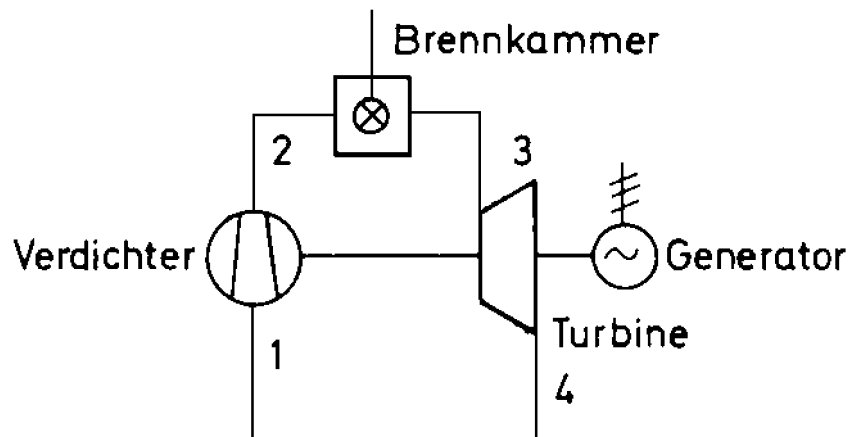
f) Bei welchen Schadstoffen sind die üblichen Emissionsmengen kritisch in Bezug auf den derzeit gültigen Grenzwert in der Bundesrepublik?

- SO_2 : *Emissionsmenge $\leq 100 \text{ mg/m}^3 \leftrightarrow$ Grenzwert = 200 mg/m^3*
- NO_x : *Emissionsmenge $\leq 200 \text{ mg/m}^3 \leftrightarrow$ Grenzwert = 200 mg/m^3*

5 Gasturbinen-Kraftwerk

1.) Thermodynamische Grundlagen

a) Skizzieren Sie das Prinzipschaltbild einer Gasturbinenanlage!



b) Beschreiben Sie vereinfacht die Zustandsänderungen innerhalb des Gasturbinen-Kreisprozesses und geben Sie an, in welchem Aggregat diese stattfindet! Wie heißt der thermodynamische Kreisprozess?

JOULE-PROZESS:

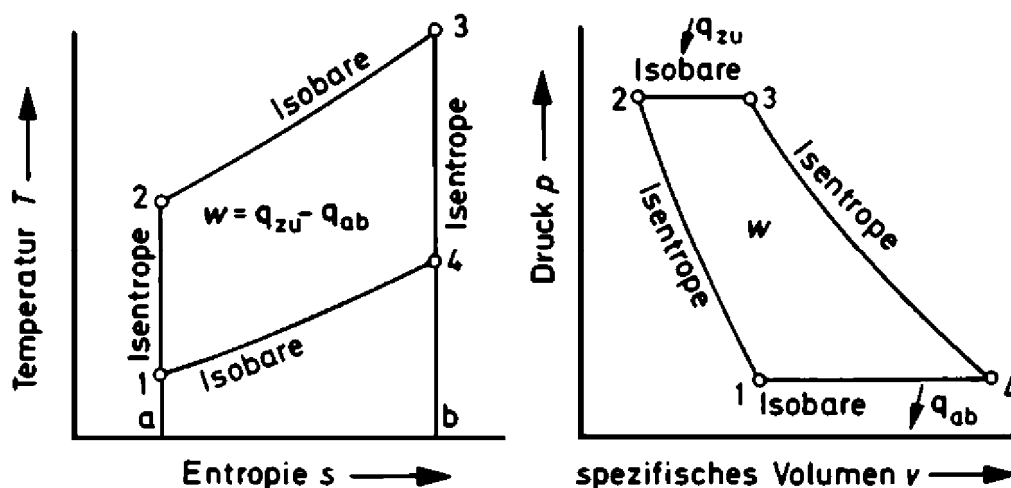
(1)→(2): *Isentrope Verdichtung der Luft im VERDICHTER*

(2)→(3): *Isobare Wärmezufuhr durch Entzündung in der BRENNKAMMER*

(3)→(4): *Isentrope Entspannung des Heißgases in der TURBINE unter Verrichtung von mechanischer (Rotations-)Arbeit zur Stromerzeugung*

(4)→(1): *Ausstoßen der heißen Abgase in die UMGEBUNG bzw. Ansaugen von Umgebungsluft unter isobaren Bedingungen*

c) Stellen Sie die Zustandsänderungen aus b) jeweils im p-v- und T-s-Diagramm dar!



d) Durch welche Parameter wird der Wirkungsgrad einer Gasturbine maßgeblich bestimmt und wie lautet jeweils die Formel?

– *Temperaturdifferenz über dem Verdichter:*

$$\eta_{GT} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

– *Druckdifferenz über dem Verdichter (+ Isentropen-Exponent):*

$$\eta_{GT} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

e) Mit Hilfe welcher Maßnahmen kann der thermische Wirkungsgrad eines Gasturbinen-Kreisprozesses gesteigert werden?

– *Erhöhung des (Verdichter-)Druckverhältnisses $\beta = p_1/p_2$*

– *Anheben der Turbinen-Eintrittstemperatur (derzeit $\vartheta_3 \leq 1300 \text{ °C}$)*

→ *Werkstoff-Frage!*

– *Regenerative Luftvorwärmung zwischen Verdichter und Brennkammer*

→ *Anhebung von T_2*

– *Mehrstufige Verdichtung mit Zwischenkühlung bzw. mehrstufige Expansion mit Zwischenüberhitzung → Vergrößerung der Fläche im T-s-Diagramm*

2.) Einsatzbereich der Gasturbine

a) Welche Vorteile bietet die Gasturbine gegenüber der Dampfturbine?

– *Kurze Bauzeiten infolge kompakter Bauweise: Verdichter, Brenngas-Einführung und Turbine bilden transportierbare Einheit + Brennkammer + Generator*

– *Geringer Platzbedarf*

– *Geringe Massen*

– *Niedrige Anlagenkosten*

– *Kurze Anfahrzeiten: 3...20 min*

– *Kein Kühlwasserbedarf*

– *Geringer Eigenbedarf (ca. 1%)*

– *Großes Potential zur Erhöhung des Wirkungsgrades*

b) Welche Nachteile gegenüber Dampfturbinen müssen beim Einsatz der Gasturbine in Kauf genommen werden?

– *Niedriger Wirkungsgrad*

– *Hohe NO_x-Emissionen (durch Einspritzen von Wasserdampf reduzierbar)*

– *Schalldämmung erforderlich*

– *Lebensdauer begrenzt*

– *Hohe Erdgaspreise*

c) Wo liegen die Haupteinsatzgebiete der Gasturbine und welche Eigenschaften lassen sie jeweils für den Einsatz prädestiniert erscheinen?

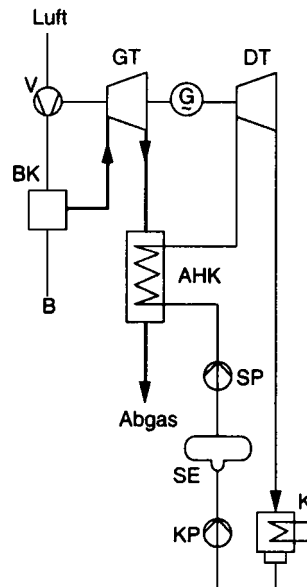
– *Spitzenlast-Kraftwerke: kurze Anfahrzeiten, aber hohe Betriebskosten*

– *Industrieturbinen: kompakte Bauweise, Abwärme in Prozessen nutzbar*

6 Kombinierte Gas- und Dampfturbinen-Anlage (GuD)

1.) Thermodynamische Grundlagen

a) Skizzieren Sie das Prinzipschaltbild einer GuD-Anlage!



b) Worauf beruht die prinzipielle Wirkungsgradverbesserung einer GuD-Anlage gegenüber einzelner Gas- oder Dampfturbinen?

*Flächen im T-s- bzw. p-v-Diagramm beider Prozesse werden addiert
→ dadurch beide Wirkungsgrade zusammengerechnet*

c) Wie wird der Wirkungsgrad formelmäßig berechnet?

Summe – Produkt:
$$\eta_{GuD} = \eta_{GT} + \eta_{DT} - \eta_{GT} \cdot \eta_{DT}$$

2.) Einsatzbereiche

a) Wo und in welcher Nutzungsart wird die GuD-Anlage eingesetzt?

- *Energieversorgungsunternehmen (EVU):* *Mittellast*
- *Industrie:* *Grundlast*

b) Welche Vorteile bietet eine GuD-Anlage mit Zusatzfeuerung?

- *Höhere Leistungen (über 500 MW)*
- *Größere Flexibilität*

7 Kolbenmotoren

1.) Grundlagen

a) Welches sind die wichtigsten Arbeitsprinzipien von Kolbenmotoren für den stationären Einsatz?

- *Otto-Motor (Benzin oder Gas)*
- *Diesel-Motor (Diesel oder Gas)*
- *Sterling-Motor **

(im Experimentierstadium)*

- b) Auf welchen thermodynamischen Prozess gründet sich jeweils die Leistungsabgabe der Arbeitsprinzipien aus a)?
- *Otto*: Gleich-RAUM-Prozess
 - *Diesel*: Gleich-DRUCK-Prozess
 - *Sterling*: CARNOT-Prozess
- c) Wie wird der theoretische Wirkungsgrad der einzelnen Arbeitsprinzipien aus a) formelmäßig berechnet?
- *Otto*: $\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$
 - *Diesel*: $\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa(\varphi - 1)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa(\varphi - 1)}$
 - *Sterling*: $\eta_{\text{Sterling}} = \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$

8 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

1.) Grundlagen

- a) Was versteht man unter Kraft-Wärme-Kopplung?
GLEICHZEITIGE Erzeugung von Strom UND Wärme.
- b) Wie nennt man den Gesamtwirkungsgrad einer KWK-Anlage und wie wird er formelmäßig berechnet?

„Energienutzungsgrad“ = $\frac{\text{elektrische Leistung} + \text{Heizwärmeleistung}}{\text{Brennstoff-Wärmestrom}}$

$$\eta_E = \frac{P_{el} + \dot{Q}_H}{\dot{Q}_{BS}}$$

- c) Wie ist die Stromkennzahl definiert?

Stromkennzahl = $\frac{\text{elektrische Leistung}}{\text{Heizwärmeleistung}}$

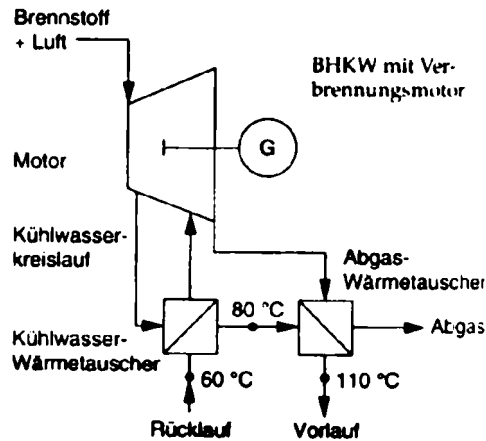
$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_H}$$

- d) Wie lautet die Formel für den Brennstoff-Aufwands-Faktor?

BS-Aufw.-Faktor = $\frac{\text{BS-Wärmestr. HKW} - \text{BS-Wärmestr. Kond.-KW}}{\text{Heizwärmeleistung}}$

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{BS, HKW} - \dot{Q}_{BS, Kond}}{\dot{Q}_H}$$

- e) Skizzieren Sie das typische Prinzipschaltbild eines Blockheizkraftwerks mit Verbrennungskolbenmotor!



2.) Einsatzbereiche

- a) Erklären Sie die Begriffe Kraftwerk, Heizwerk und Heizkraftwerk!
- *Kraftwerk* → *NUR Stromerzeugung*
 - *Heizwerk* → *NUR Wärmeerzeugung*
 - *Heizkraftwerk* → *Kraft-Wärme-Kopplung*
- b) Worin liegt der grundsätzliche Unterschied zwischen einem Heizkraftwerk (HKW) und einem Blockheizkraftwerk (BHKW)?
- *HKW* → *FERN-Wärme*
 - *BHKW* → *NAH-Wärme*
- c) Stellen Sie die Vor- und Nachteile folgender Arbeitsprinzipien von HKW heraus und geben Sie an, welche Einsatzgebiete daraus resultieren:
- HKW mit Gegendruckturbine
 - Vorteile:* *Hoher Wirkungsgrad*
Geringe Herstellungskosten
 - Nachteil:* *Starre Kopplung zwischen Strom- und Wärmeerzeugung*
 - Einsatzgebiet:* *Überwiegend Industrie – Ausnahme: Großkraftwerk Mannheim*
 - HKW mit Kondensationsturbine
 - Vorteil:* *Flexibilität zwischen Strom- und Wärmeerzeugung*
 - Nachteile:* *Geringerer Wirkungsgrad*
Höhere Komplexität der Anlage
Höhere Herstellungskosten
 - Einsatzgebiet:* *Öffentliche Strom- und Wärmeerzeugung (Stadtwerke)*
- d) Was versteht man unter dem Begriff „wärmegeführt“?
- WÄRME-Bedarf bestimmt Kraftwerksleistung*

- e) Warum werden beide HKW-Typen aus c) letztlich „wärmegeführt“?
- *Gegendruck: Starre Kopplung → Heizedampf-Massenstrom bestimmt Turbinenleistung*
 - *Kondensation: flexible Dampfkopplung über Entnahmestufen, ABER: Wirkungsgrad → Stromerzeugung anpassen!*
- f) Beschreiben Sie die prinzipielle Arbeitsweise des HKW Großkraftwerk Mannheim und den entscheidenden Vorteil, der sich aus ihr ergibt!
- *Steinkohle-Heizkraftwerk mit Frischwasserkühlung:*
- *Vorschaltanlagen (Hochdruckseite): mehrere Kraftwerksblöcke mit Gegendruckturbinen, z.T. zweistufig 250 / 90 bar*
 - *20-bar-Dampf-Sammelschiene: Zusammenführung aller Blöcke, die in Betrieb sind und Verteilung auf Nachschaltanlagen*
 - *Nachschaltanlagen (Niederdruckseite): viele Kondensationsturbinen zur Dreh- und Bahnstromerzeugung, Ferndampfnetz (20 bar)*
 - *Kondensatoren: z.T. Erwärmung von Fernheizwasser (130 °C)*
 - *Außerdem: Erdgas- / Heizöl-Block
Direkte 20-bar-Dampf-Erzeugung
Direkte Erw. von Fernheizwasser aus Sammelschiene*
- *Vorteil: MAXIMALE Flexibilität der Kraft-Wärme-Kopplung bei hoher Versorgungssicherheit*

9 Kernkraftwerke

1.) Grundlagen

- a) Welches sind die Bestandteile des Atomkerns, welche Ladung besitzen sie und in welchem Zahlenverhältnis stehen sie zueinander bzw. zu den übrigen Atombestandteilen?
- *Protonen: positiv geladen*
 - *Neutronen: neutral*
- Anzahl ist gleich und gleich der Anzahl der Elektronen in der Hülle*
- b) In welcher Weise werden die Eigenschaften eines Atoms von seinen (Kern-) Bestandteilen bestimmt und welche herausragenden Eigenschaften sind dies?
- Anzahl Protonen bestimmt Stellung im Periodensystem und damit chemische Eigenschaften: Massenzahl $A = \text{Ordnungszahl (Protonen)} Z + \text{Neutronen } N$*
- c) Woraus setzt sich die Masse eines Atomkerns zusammen und wie kann die in ihm enthaltene Bindungsenergie berechnet werden?
- $m_K = Z \times \text{Protonenmasse} + N \times \text{Neutronenmasse} - \text{Massendefekt } \Delta m$
- Nach Einstein: Bindungsenergie = $E_B = -\Delta mc^2$*
- d) Worin besteht der Unterschied zwischen einer „Atom-(aren)“ und einer „Kern-“ Reaktion?
- *„Atomare“ = chemische Reaktion*
 - *„Kern-“ = nukleare Reaktion*

e) Charakterisieren Sie die folgenden Prozesse:

- (radioaktiver) Zerfall

Die spontane Umwandlung eines Nuklides in ein anderes Nuklid oder in einen anderen Energiezustand desselben Nuklides.

- Kernspaltung

Spaltung eines Atomkernes in zwei (oder mehr) Teile etwa derselben Größe durch den Stoß eines Teilchens mit der Folge, das Bindungsenergie freigesetzt wird.

- Kernfusion

Bildung eines schwereren Kernes aus leichteren Kernen unter Freisetzung von Bindungsenergie.

f) Was versteht man unter „schnellen“ und unter „thermischen“ Neutronen?

„Schnelle“ Neutronen werden bei der Kernspaltung mit sehr hoher Energie (ca. 1 MeV) und Geschwindigkeit freigesetzt und die Wahrscheinlichkeit, dass sie eine weitere Kernspaltung (→ Kettenreaktion) auslösen, ist sehr gering.

„Thermische“ Neutronen besitzen etwa dieselbe Energiemenge wie bei normaler Umgebungstemperatur (ca. 0,03 eV) und lösen mit hoher Wahrscheinlichkeit eine weitere Kernspaltung aus.

Durch einen „Moderator“ können „schnelle“ Neutronen auf „thermisches“ Energieniveau abgebremst werden.

g) Erläutern Sie den Begriff „Kritische Masse“!

Kleinste Spaltstoffmasse, die unter festgelegten Bedingungen eine Kettenreaktion auslöst, d.h. bei der die Wahrscheinlichkeit „thermischer“ Neutronen gleich eins ist.

h) Was geschieht bei der „Anreicherung“ von spaltbarem Material und welches Ziel in Bezug auf die friedliche Nutzung der Kernenergie wird dabei verfolgt?

Vorgang zur Herstellung von Kernbrennstoffen, bei dem der Anteil des bestimmten Isotops in einer Element-Menge vergrößert wird mit dem Ziel, dass die „Kritikalität“ etwa 3...4 % größer als eins wird.

i) Wodurch werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlen hervorgerufen und was sind die Ergebnisse der jeweiligen Prozesse?

- *Alpha-Strahlen: Zerfall unter Aussenden von Heliumkernen ($2 p + 2 n$) → „Alpha-Zerfall“*

- *Beta-Strahlen: Zerfall eines Neutrons (n) unter Aussenden eines Protons (p) und eines Elektrons (e^-) ODER Zerfall eines Protons (p) unter Aussenden eines Neutrons (n) und eines Positrons (e^+) → „Beta-Zerfall“*

- *Gamma-Strahlen: Spaltung; Alpha- oder Beta-Zerfall werden i. Allg. immer vom Aussenden elektromagnetischer Wellen hoher Energie (γ -Strahlen) begleitet*

j) Beschreiben Sie kurz den Spalt- und den Brutprozess!

- *Spaltprozess: Angeregt durch den Stoß eines Neutrons kommt es zur Kernspaltung. Es werden Nuklide und weitere Neutronen, sowie große Energiemengen (Bindungsenergie) emittiert.*
- *Brutprozess: Mehrstufiger Umwandlungsprozess, bei dem ein nicht spaltbarer Stoff durch Anlagerung eines „schnellen“ Neutrons und anschließendem (zweifachen) Beta-Zerfall in einen spaltbaren Stoff umgewandelt wird.*

2.) Radioaktivität und Strahlenschutz

a) Welchen Vorgang bezeichnet man als „Radioaktivität“ und durch welches Naturgesetz wird sie hervorgerufen?

Spontaner Zerfall eines Atomkerns unter Emission von Strahlung; gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik: Streben nach niedrigerem Energieniveau.

b) Welche chemischen Elemente sind (immer) radioaktiv?

Alle Elemente mit Protonenzahl $Z > 84$ und einige darunter.

c) Worauf beruht die so genannte biologische, einen Organismus schädigende Wirkung radioaktiver Strahlung und warum ist diese gerade für Geschlechtszellen so verheerend?

Durch Schädigung des Erbgutes infolge ionisierender Strahlung kann es zur Bildung von Krebszellen kommen. Da Chromosomen in „normalen“ Körperzellen immer paarweise, spiegelbildlich angeordnet sind, können zerstörte Erbinformationen aber meistens „repariert“ werden. In Geschlechtszellen (Keimzellen) sind Chromosomen nicht paarweise vorhanden – Missbildungen bei nachfolgenden Generationen sind möglich!

d) Was versteht man unter (Strahlen-) Dosis?

Maß für eine näher anzugebende Strahlenwirkung, meist in Bezug auf Organismen.

e) Erklären Sie, was man unter „Äquivalentdosis“ versteht und wie diese berechnet wird! Geben Sie die übliche Einheit an!

Die Äquivalentdosis H ist das Produkt aus der Energiedosis (Ionendosis) D im Weichteilgewebe, dem Qualitätsfaktor Q und evtl. einem zeitlichen Verteilungsfaktor N .

$$H = D \cdot Q \cdot N \quad [H] = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ Sievert}$$

f) Wie kann die Äquivalentdosis auch ermittelt werden und nach welchen Gesichtspunkten wird dabei vorgegangen?

Produkt eines Dosisfaktors F aus Tabellen und der Aktivität der Strahlenquelle:

$$H = F \cdot A$$

Tabelle differenziert:

- *Radionuklid*
- *Alter der bestrahlten Person*
- *Bestrahlte Körperteile bzw. -fläche*

g) Welche Äquivalentdosis empfängt ein Bundesbürger durchschnittlich im Jahr?
2...5 mSv pro Jahr

3.) Zerfallsgesetz

- a) Geben Sie die Formel für das Radioaktive Zerfallsgesetz an!

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{mit } N_0 = \text{Anzahl der Zerfallsprozesse am Anfang}$$

- b) Welche Größe aus a) wird als Zerfallskonstante bezeichnet?

Faktor λ im Exponent (positiv!)

- c) Wie ist die Halbwertszeit formelmäßig definiert?

$$\text{Zeit } t \text{ für } N = \frac{N_0}{2} \quad \Rightarrow T_H = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

- d) Wie lautet die Definition der „Aktivität“ in Worten und wie wird diese berechnet?

$$\text{Zerfallsprozesse je Zeiteinheit: } A = -\dot{N} = -\frac{dN}{dt} = -(-\lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}) = \underline{\underline{\lambda \cdot N}}$$

- e) In welcher Einheit wird die Aktivität gemessen bzw. angegeben?

$$[A] = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ Becquerel} = 1/\text{s}$$

4.) Kernreaktor und -kraftwerke

- a) Nennen Sie die 4 notwendigen Grundelemente einer kontrollierten Kernreaktion, beschreiben Sie ihre jeweilige Aufgabe und geben Sie jeweils 2 Stoffe an, die zum Einsatz kommen!

– *Spaltmaterial: Liefert durch Spaltung Energie;*

U 235, Pu 239

– *Moderator: Bremsst „schnelle“ Neutronen auf „thermische“ Geschwindigkeit ab;*

Wasser, Graphit

– *Kühlmittel: Transportiert erzeugte Wärmeenergie aus dem Reaktor zur Sekundärseite;*

Wasser, Helium

– *Absorber: „Einfangen“ von Neutronen zum Abschalten oder Regeln des Reaktors;*

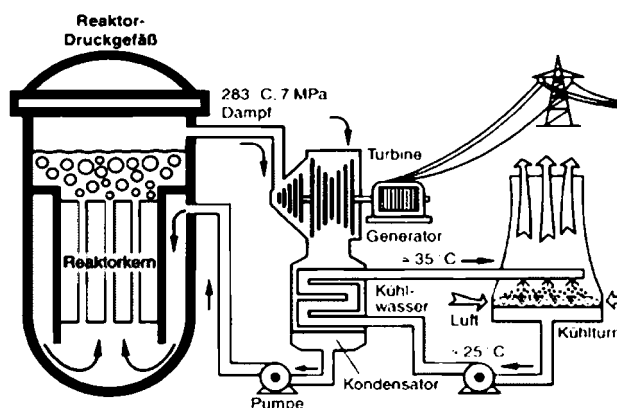
Bor, Cadmium

b) Charakterisieren sie 4 Reaktorkonzepte, die derzeit in der Bundesrepublik technisch realisierbar bzw. im Einsatz sind!

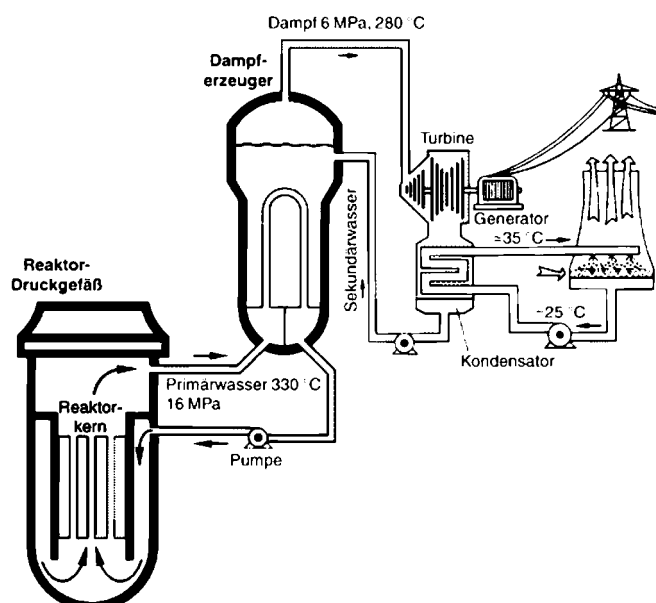
- *Siedewasserreaktor:* Frischdampf-Erzeugung direkt im Reaktordruckbehälter → Turbosatz ist Teil des Primärkreislaufs, welcher mit Brennelementen in Berührung kommt
- *Druckwasserreaktor:* Primärkreislauf aus Reaktordruckbehälter und Wärmetauscher → Frischdampf-Erzeugung im Sekundärkreislauf, Turbinen kommen nicht mit Reaktor-Kühlwasser in Berührung
- *Hochtemperaturreaktor:* Primärkreislauf, in dem kugelförmige Brennelemente mittels Helium bei bis zu 950 °C gekühlt werden → Frischdampf-Erzeugung im Wärmetauscher ähnlich DWR
- *Schneller Brutreaktor:* Permanente Erzeugung von Spaltmaterial im Reaktor durch Ausnutzung des Brutprozesses → wg. Moderatorwirkung von H₂O Kühlung mittels Natrium, zweifacher Wärmetausch bis zur Frischdampf-Erzeugung

c) Skizzieren Sie das Prinzip-Schaltbild eines Siedewasser- (SWR) und eines Druckwasserreaktors (DWR)!

SWR:



DWR:



- d) Welche Dampfparameter liegen üblicherweise am Turbineneintritt eines DWR-Blocks an?
- *Druck:* 60...70 bar
 - *Temperatur:* 280...320 °C
- e) Beschreiben Sie die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen!
- *Auflösen des Brennstoffs in Salpetersäure*
 - *Chemische Trennung des unverbrannten Materials von den Spaltprodukten*
 - *Herstellung neuer Brennelemente aus gewonnenem Brennstoff (ca. 97 %)*
 - *Endlagerung des radioaktiven Abfalls (ca. 3%)*
- f) Welche Klassifizierungen radioaktiven Abfalls werden vorgenommen und wie sind diese definiert?
- *Schwach radioaktiv:* $A \leq 3,7 \cdot 10^9 \text{ Bq/m}^3$
 - *Mittel radioaktiv:* $3,7 \cdot 10^9 \leq A \leq 3,7 \cdot 10^{14} \text{ Bq/m}^3$
 - *Hoch radioaktiv:* $A \geq 3,7 \cdot 10^{14} \text{ Bq/m}^3$

5.) Reaktorsicherheit

- a) Wie lautet das oberste Ziel der Sicherheitskonzeption und durch welche Maßnahmen auf der ersten Ebene soll es im Störfall erreicht werden?
- *Sicherer Einschluss der radioaktiven Spaltprodukte durch:*
- *Sichere Abschaltung des Reaktors*
 - *Sichere Nachwärme-Abfuhr*
- b) Beschreiben Sie die 4 Grundprinzipien zur Realisation der Reaktorsicherheit jeweils an einem Beispiel!
- *Fail-safe-Prinzip („folgeschadensicher“):* z.B. fallen Absorberstäbe im Störfall in Folge von Schwerkraft selbsttätig zwischen die Brennstäbe.
 - *Inhärente Sicherheit („in sich“):* z.B. nimmt Aktivität der Brennelemente bei der Bildung von Wasserdampf-Blasen auf Grund der verringerten Moderatorwirkung automatisch ab.
 - *Aktive Sicherheit:* z.B. wird KKW während der ersten 30 min nach einem Störfall ausschließlich rechnergesteuert (ohne manuellen Eingriff)
 - *Barrieren-Prinzip:* z.B. Einschluss der Brennelemente im Reaktor-Druckbehälter → gasdichter Mantel um Reaktor-Druckbehälter → während des Betriebs nicht begehbare Gebäudebereich um Druckbehälter → Stahl-Beton-Mantel um Reaktorgebäude usf.
- c) Was versteht man unter „Redundanz“ im Zusammenhang mit Sicherheitstechnik und zu welchem Grundprinzip aus b) gehört sie?
- Mehrfachauslegung wichtiger technischer Systeme → aktive Sicherheit*

6.) Kernfusion

- a) Nennen Sie die Stoffe, die an der gegenwärtig favorisierten Fusionsreaktion beteiligt sind bzw. wären!

Deuterium (schwerer Wasserst.) + Tritium \rightarrow Helium + 1 n + Bindungsenergie

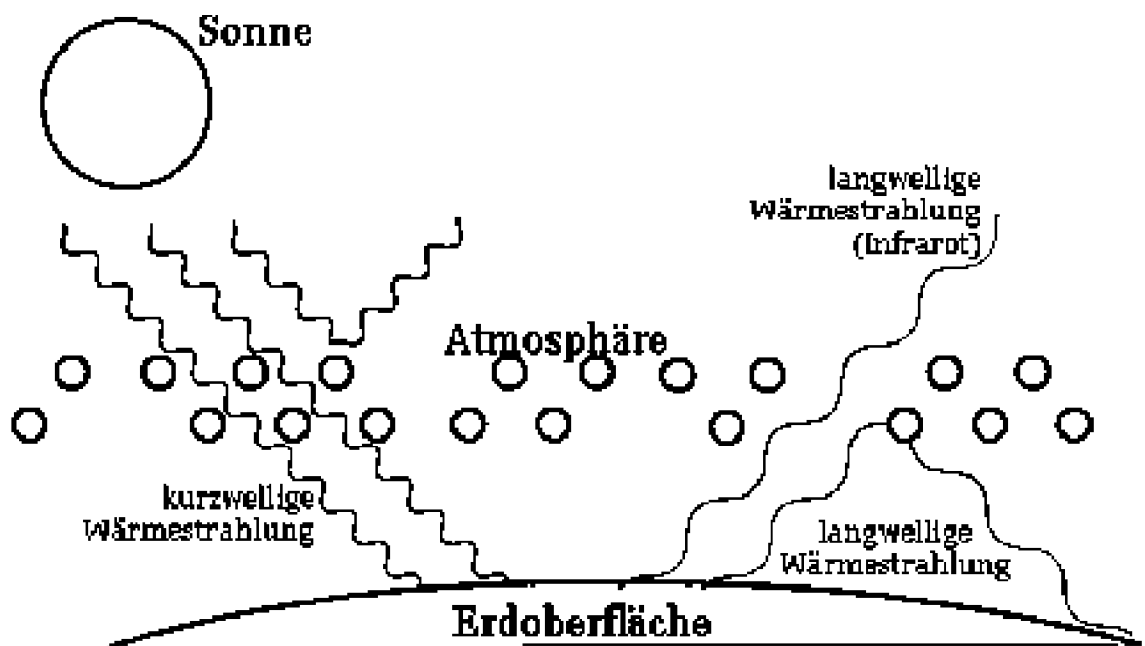
- b) Welche entscheidenden Vorteile böte eine technische Realisation der Kernfusion gegenüber der Kernspaltung?

- *Keine radioaktiven Spaltprodukte*
- *Praktisch unbegrenzte Ressourcen an fusionierbarem Material*

10 Treibhauseffekt

1.) Naturwissenschaftliche Grundlagen

- a) Beschreiben Sie das Prinzip des Treibhauseffekts anhand einer Skizze!



- b) Was ist die Folge des natürlichen Treibhauseffekts?

Das Strahlungsgleichgewicht zwischen Sonnen-EIN- und Erd-AB-Strahlung und damit das Temperaturniveau auf der Erde werden von $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, also um $\Delta T = 33\text{ K}$ angehoben.

- c) Wie hoch ist die durchschnittliche Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre nach bisherigen Erkenntnissen während einer Eiszeit, wie hoch während einer Warmphase und wie hoch ist die Konzentration gegenwärtig? Welche Tendenz zeichnet sich anhand von Messungen und Modellrechnungen ab?

- *Eiszeit:* *ca. 200 ppm = 0,02 %*
- *Warmphase (wie jetzt):* *ca. 300 ppm = 0,03 %*
- *Gegenwart:* *ca. 370 ppm = 0,037 %*
- *Tendenz:* *(steiler) Anstieg!*

d) Was versteht man unter dem anthropogenen Treibhauseffekt?

Treibhauseffekt, der ausschließlich durch die menschliche Zivilisation hervorgerufen wird.

2.) Zusammenhänge mit der Zivilisation

a) Nennen Sie die wichtigsten, den Treibhauseffekt fördernden Gase bzw. Stoffgruppen!

– CO_2

– CH_4 (Methan)

– N_2O (Lachgas)

– O_3 (Ozon)

– FCKW

– H_2O * (* wird jedoch nicht zu den „Treibhausgasen“ gerechnet!)

b) Wie werden die Emissionsmengen der Treibhausgase üblicherweise angegeben?

$[\text{CO}_2] = \text{Mio t}$; alle anderen Gase werden in CO_2 -Äquivalent umgerechnet

c) Wie hoch etwa ist die jährliche Emission des Haupttreibhausgases in der Bundesrepublik aktuell und wie verteilt sie sich prozentual auf die 5 wichtigsten Emittentengruppen?

– Insgesamt: ca. 850 Mio t

– Energieerzeugung: 43 %

– Verkehr: 20 %

– Industrie: 16 %

– Haushalte: 14 %

– Gewerbe: 7 %

d) Geben Sie in stark gerundeten Zahlenwerten an, wie sich der Primärenergieverbrauch (PEV) in der Bundesrepublik von 1990 bis heute entwickelt hat!

– 1990: ca. 15 EJ

– 2005: ca. 14 EJ

e) Welchen Schluss kann man aus einem Vergleich der Entwicklung des PEV mit den übrigen Rahmendaten wie Bevölkerungszahl, Bruttoinlandsprodukt (BIP) und Verkehrsaufkommen ziehen?

Trotz Wachstum hat sich der Primärenergieverbrauch verringert → Anstieg des PEV ist NICHT Voraussetzung für Wachstum und steigenden Wohlstand.

3.) Handel mit Treibhausgas-Emissionen

- a) Geben Sie sinngemäß wieder, was das Ziel des Kyoto-Protokolls ist, welche Ziele sich daraus jeweils für die EU und für die Bundesrepublik ergeben!
- *Kyoto: Emissionen von Treibhausgasen im Zeitraum von 2008 bis 2012 um 5,2 %, bezogen auf die Basis von 1990 zu verringern.*
 - *EU: Reduzierung im selben Zeitraum um 8 %*
 - *Bundesrepublik: wie oben, jedoch um 21 %*

- b) Durch welche beiden Vorgaben soll das Erreichen des Ziels aus a) in der Bundesrepublik sichergestellt werden?
- *Jährliche Reduktion (z.Z. 3 %) der Gesamtemissionsmenge mittels „Erfüllungsfaktor“*
 - *Emissionsrechte-Vergabe und -Handel mit Strafen für Überschreitung der Zuteilungsmenge*

- c) Beschreiben Sie kurz, was man unter Emissionshandel versteht und welchen Zweck er verfolgt!
- Übertragung (Verkauf) von zugeteilten Emissionsberechtigungen auf andere Emittenten, die auch am Emissionshandel teilnehmen mit dem Ziel, Einsparungs- und Entwicklungspotentiale für eine Gesamtreduktion zu nutzen.*

- d) Welche 3 Mechanismen des Emissionshandels sind im Kyoto-Protokoll geregelt, wie und zwischen welchen Partnern soll dieser im Einzelnen ablaufen?

Projektbezogen:

- *Joint Implementation → zwischen Industrieländern (genehmigungspflichtig) → Industriestaaten führen gemeinsame Projekte durch und einigen sich darüber, wie viel der erzielten Emissionsminderung den einzelnen Partnern in ihrer Klimabilanz gutgeschrieben wird.*
- *Clean Development Mechanism → zwischen Industrie- und Entwicklungsländern → Industriestaaten führen Projekte gemeinsam mit Entwicklungsländern durch und einigen sich darüber, wie viel der erzielten Emissionsminderung den einzelnen Partnern in ihrer Klimabilanz gutgeschrieben wird.*

Emissionsbezogen:

- *Emission Trading → (Emissionshandel) innerhalb von und zwischen Industrieländern → Staaten kaufen und verkaufen untereinander Emissionsrechte. Industriestaaten mit wachsenden Emissionen können ihre Verpflichtung zur Klimagasbegrenzung einhalten, indem sie Rechte von anderen Ländern kaufen, in denen die Emissionen gemindert wurden oder aus anderen Gründen gesunken sind.*

- e) Charakterisieren Sie, welche Emittenten am Emissionshandel teilnehmen dürfen!

Herausragende Treibhausgas-Emittenten: z.B. Energieversorger, metallurgische Betriebe, Ziegelbrennereien usw.

- f) Nach welchem Verfahren erfolgt gegenwärtig die Zuteilung der Emissionsberechtigungen laut deutschem Recht?

Berechnung der Menge mittels Emissionsfaktoren:

- *Energiebedingt* → $C\text{-Gehalt} / \text{Heizwert} \cdot 44 / 12$
- *Prozessbedingt* → *stöchiometrisch*

- g) Warum darf die Zuteilungsmenge für den Emissionshandel nicht ausschließlich auf Messungen beruhen?

Derzeit verfügbare Messmethoden sind zu ungenau, um jährliche Reduzierung von 3 % nachzuweisen.

- h) Welche Kritikpunkte ergeben sich am gemäß Kyoto beschrittenen Weg der Emissionsminderung durch Emissionshandel zumindest innerhalb der Bundesrepublik?

- *Reduktionsmenge liegt weit im Streubereich gängiger Erfassungsmethoden, d.h. bei gleichzeitig hohem organisatorischen Aufwand ist Erfolg nicht sichergestellt.*
- *Einbeziehung (in den Emissionshandel) von Emittenten mit z.T. relativ kleinen Emissionsmengen verursacht Bürokratie und Kosten ohne wirksame Emissionsminderung.*