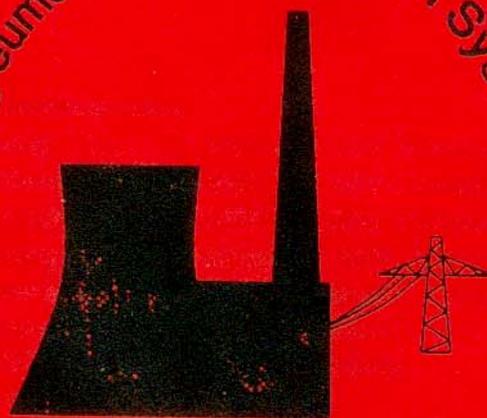


TECHNIK

Energieumsatz in technischen Systemen



740 MW Block F
VEBA-Kraftwerke-Ruhr
Gelsenkirchen Scholven
Eine Unterrichtseinheit zur Behandlung des
thermischen Kraftwerksprozesses

Klaus Trimborn
Heinrich-von-Kleist-Gymnasium, Bochum

1/90

Herausgeber:

Technik-Unterricht: Forum e.V. (TUF)
Memelstraße 75 4100 Duisburg 1

Inhalt

1. Grundsätzliche didaktische und methodische Überlegungen
2. Feuerung und Dampferzeuger
 - 2.1 Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes
 - 2.2 Massenstrom an Kohle
 - 2.3 Entschwefelungsanlage
3. Wasser/Dampf-Kreislauf
 - 3.1 Einstufiger Prozeß
 - 3.2 Prozeß mit Zwischenüberhitzung
4. Literatur

Anhang

Schülerarbeitsblätter

Kraftwerk 01	Kraftwerksprozess
Kraftwerk 02	Grundriß <i>VKR 740 MW Steinkohleblock F Scholven</i>
Kraftwerk 02a	Kurzbeschreibung <i>VKR 740 MW Steinkohleblock F Scholven</i>
Kraftwerk 03	Technische Daten <i>VKR 740 MW Steinkohleblock F Scholven</i>
Kraftwerk 04	Feuerung und Dampferzeuger <i>VKR 740 MW Steinkohleblock F</i>
Kraftwerk 05	Brenneranordnung / Feuerungsraum Block F
Kraftwerk 06	Maschinenanlagen - Elektrotechnik - Rückkühlung und Wasserversorgung
Kraftwerk 07	Umweltschutzmaßnahmen
Kraftwerk 08	Entschwefelung
Kraftwerk 09	Siedetemperaturen und Wärmeinhalte für Wasser und Dampf
Kraftwerk 10	Wasserdampf tafeln für gesättigten Wasserdampf
Kraftwerk 11	Arbeitsblatt: Enthalpiezuwachs beim Erwärmen von Wasser
Kraftwerk 12	Enthalpie / Temperaturdiagramm für Wasser und Wasserdampf
Kraftwerk 13	Enthalpie/Druck-Diagramm für Wasser und Wasserdampf
Kraftwerk 14	Schalt-schema des Kraftwerkes - Zuordnung der Energiezustände
Kraftwerk 15	Kraftwerksprozeß mit Zwischenüberhitzung
Kraftwerk 16	Turbinenanlage - Schnittzeichnung
Kraftwerk 17	Turbinenanlage - Montagephoto

Klausuraufgabe

Abituraufgabe 4. Fach

1. Grundsätzliche didaktische und methodische Überlegungen

Die vorliegende Materialsammlung bietet die Möglichkeit, im Kurs *Energieumsatz in technischen Systemen* Berechnungsbeispiele anhand der konkret vorliegenden technischen Daten eines realen Kraftwerkes durchzuführen.

Sie ist nicht als geschlossene Einheit zu verstehen, sondern sollte bei dem schrittweisen Durchgang durch den thermischen Kraftwerksprozeß entweder zum Einstieg in die Behandlung eines Teilsystemes (z.B. Feuerung/Dampferzeuger, Kondensator/Wärmeaustausch) oder zur Vertiefung und zum Transfer der entwickelten technikkwissenschaftlichen Zusammenhänge auf ein Realsystem (z.B. Wasser/Dampf-Kreislauf) ermöglichen. Die entsprechenden einführenden und vertiefenden Experimente zu den einzelnen Teilsystemen (z.B. Feuerung, Wärmeaustausch, Turbine, Generator) werden in gesonderten TUF-Workshop-Heften vorgestellt.

Dieses Workshop-Heft zum thermischen Kraftwerk gibt eine Materialsammlung zum konkreten Kraftwerksaufbau und den technischen Daten des 740 MW Steinkohleblockes F der VKR in Gelsenkirchen Scholven.

Von den Arbeitsblättern (*Kraftwerk 01...16*) bieten die Blätter *01 ... 08* technische Daten und Beschreibungen der einzelnen Teilsysteme des Kraftwerkes. Sie sind einer Informationsbroschüre der Veba-Kraftwerke-Ruhr, Gelsenkirchen, entnommen.

Die Arbeitsblätter *Kraftwerk 04* und *08* sind mit Aufgaben versehen, die sich auf die technischen Daten und den Begleittext auf dem Arbeitsblatt beziehen.

Die Arbeitsblätter *Kraftwerk 09 ... 12* dienen zur Einführung in die Thermodynamik des Wasser/Dampf-Prozesses. Dabei wurde bewußt auf die Behandlung der Entropie verzichtet, die energetische Betrachtung beschränkt sich auf eine Ableitung und Benutzung des *Enthalpie/Temperatur-Diagrammes*.

Auch mit dieser Betrachtungsweise ist es möglich und der Zielgruppe angemessen, die Wirkungsgradbestimmung und Optimierungsmaßnahmen wie Druckerhöhung, Temperaturerhöhung, Zwischenüberhitzung auf thermodynamische Fakten zu stützen und den Schülern verständlich zu machen.

Die Arbeitsblätter *Kraftwerk 14..15* dienen zum Transfer dieser Erkenntnisse auf den realen Prozeß im Kraftwerk Scholven.

Kraftwerk 16 .. 17 bieten Schnittzeichnung bzw. ein Foto aus der Endmontage einer Turbinenanlage an.

Auf den nun folgenden Seiten werden die Berechnungen zu den einzelnen mit Aufgaben versehenen Arbeitsblättern vorgestellt, sowie eine kurze Beschreibung der unterrichtlichen Einführung in den Wasser/Dampf-Kreislauf gegeben.

Die Formelstellung und Benutzung von Indizes richtet sich nach dem Lehrbuch Haage, Hans-Dieter, *Maschinenkunde - Kraft- und Arbeitsmaschinen*, Hanser Verlag, München 1988. Dieses Buch ist als Unterrichtswerk für den Kurs *Energieumsatz* auch als Schülerbuch sehr geeignet, da es neben einer Behandlung der thermodynamischen, technikkwissenschaftlichen Grundlagen und mathematischen Ableitungen auf einem den Schülern im Jahrgang 12 angemessenen Niveau über zahlreiche Abbildungen und Schnittzeichnungen von Maschinen und Anlagen verfügt.

Es ist geplant, weitere quantitative Berechnungsbeispiele zu anderen Teilsystemen des Kraftwerkes auszuarbeiten, die dann als Ergänzung zu diesem Heft erscheinen werden.

2. Feuerung und Dampferzeuger

Nach einer Einführung in die Problematik der Versorgung mit elektrischer Energie an geeigneten Medien (Bedarfsanalyse, grundsätzliche Versorgungsmöglichkeiten) kann mit dem Arbeitsblatt *Kraftwerk 01* eine Strukturierung der thermischen Kraftwerke in die beteiligten Subsysteme erfolgen. Mit den Blätter *Kraftwerk 02 ... 03* wird eine Übersicht des konkret betrachteten Kraftwerkes gegeben.

Der Einstieg in die Behandlung der stoff- und energieumsetzenden Funktion der Teilsysteme Feuerung und Dampferzeuger erfolgt mit dem Arbeitsblatt *Kraftwerk 04*.

2.1 Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes

Über eine Analyse und Berechnung der Daten für den Vollastbetrieb ist es möglich, den Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerksblockes zu bestimmen. Ausgegangen wird dabei von der elektrischen Nennleistung $P_{el} = 740 \text{ MW}$ (Generatorleistung ohne Berücksichtigung des Eigenbedarfes des Kraftwerkes).

Für die Feuerungsanlagen werden dabei die im Text angegebenen Auslegungsdaten für Vollast eingesetzt.

Leistung der Feuerung

$$P_{\text{Feuerung}} = n_{\text{Brenner}} \cdot P_{\text{Brenner}}$$

Brenneranzahl $n_{\text{Brenner}} = 32$

Leistung eines Brenners $P_{\text{Brenner}} = 210 \text{ GJ/h} = 58,33 \text{ MJ/s}$

$$P_{\text{Feuerung}} = 32 \cdot 58,33 \text{ MJ/s}$$

$$P_{\text{Feuerung}} = 1866,6 \text{ MW}$$

Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \frac{P_{el}}{P_{\text{Feuerung}}}$$

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \frac{740 \text{ MW}}{1866,6 \text{ MW}} = 0,396$$

$$\eta_{\text{Gesamt}} = 39,6 \%$$

2.2 Massenstrom an Kohle

Die Aufgabenstellung und die zur Bearbeitung notwendigen Daten befinden sich auf dem Arbeitsblatt **Kraftwerk 04**.

Es werden die Massenströme an Kohle bei Vollast für die beiden Kohlensorten mit dem maximal und dem minimal möglichen Heizwert berechnet.

Grundlage bildet die Beziehung

$$P_{\text{Feuerung}} = \dot{m}_{\text{Kohle}} \cdot H_u$$

$$\dot{m}_{\text{Kohle}} = \frac{P_{\text{Feuerung}}}{H_u}$$

Kohlensorte 1

$$H_u = 25000 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{\text{Kohle1}} = \frac{1866,6 \cdot 10^3 \text{ kJ/s}}{25000 \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{m}_{\text{Kohle1}} = 74,6 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{Kohle1}} = 268,78 \text{ t/h}$$

Kohlensorte 2

$$H_u = 30000 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{\text{Kohle2}} = \frac{1866,6 \cdot 10^3 \text{ kJ/s}}{30000 \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{m}_{\text{Kohle2}} = 62,22 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{Kohle2}} = 224 \text{ t/h}$$

Vergleich mit installierter Mühlenleistung

$$\dot{m}_{\text{Mühlen}} = 4 \cdot 68 \text{ t/h} = 272 \text{ t/h}$$

Die Mühlenanlagen verfügen also bei Vollastbetrieb mit der Kohlensorte 1 noch über eine Reserveleistung von ca. 3 t/h.

2.3 Entschwefelungsanlage

Bei der Berechnung der Aufgaben auf dem Arbeitsblatt *Kraftwerk 08* wird der maximal mögliche Schwefelanteil $w_S = 1\%$ zugrunde gelegt (s. *Kraftwerk 03* - Allgemeine Angaben).

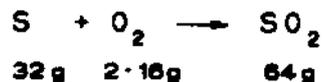
Massenstrom an Schwefel und Schwefeldioxid

$$\dot{m}_S = w_S \cdot \dot{m}_{\text{Kohle}}$$

$$\dot{m}_S = 0,01 \cdot 269 \text{ t/h}$$

$$\dot{m}_S = 2,69 \text{ t/h} = 64,56 \text{ t/d}$$

Nach der chemischen Formel der Umsetzung von Schwefel und Sauerstoff zu SO_2



folgt für das Massenverhältnis $m_S / m_{\text{SO}_2} = 1/2$

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 2 \cdot \dot{m}_S$$

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 129,12 \text{ t/d}$$

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 5,38 \text{ t/h}$$

Schwefelanteil im Rauchgas

Die Rauchgasmenge wird in den technischen Daten mit $V_R = 1875000 \text{ m}^3/\text{h}$ angegeben. Der Massenanteil an Schwefeldioxid berechnet sich zu

$$w_{\text{SO}_2} = \frac{\dot{m}_{\text{SO}_2}}{V_R} = \frac{5,38 \cdot 10^9 \text{ mg/h}}{1875000 \text{ m}^3/\text{h}} = 2867 \text{ mg/m}^3$$

vor der Entschwefelung.

Bei einem Abscheidegrad von $a = 85\%$ ergibt sich nach der Entschwefelung noch ein Anteil von

$$w_{\text{SO}_2}^* = 0,85 \cdot 2867 \text{ mg/m}^3 = 430,4 \text{ mg/m}^3$$

Der Grenzwert der TA-Luft liegt für Großfeuerungsanlage dieses Leistungsbereiches bei $w_{\text{SO}_2} = 2500 \text{ mg/m}^3$ für Altanlagen mit Genehmigungserteilung vor 1983.

Für neue Kraftwerke gilt ein Wert von $w_{\text{SO}_2} = 400 \text{ mg/m}^3$ bei einem Abscheidegrad von mindestens 85 %.

3. Wasser / Dampf - Kreislauf

Die Bereitstellung der notwendigen thermodynamischen Grundkenntnisse sollte die Begriffe Zustandsgrößen (p, V, T), Wärmeenergie q und Enthalpie h umfassen.

Mit Hilfe der Arbeitsblätter *Kraftwerk 09 .. 11* lassen sich die Zustandsänderungen und der Enthalpiezuwachs bei Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung als spezifische Größen (also bezogen auf ein Kilogramm Wasser) diskutieren sowie Aufbau und Aussage des Enthalpie/Temperaturdiagrammes (*Kraftwerk 12*) erarbeiten.

Vor Einsatz der Berechnungsbeispiele am Wasser/Dampf-Prozeß des KW Scholven sollte ein einfacher Prozeß mit glatten Druck- und Temperaturwerten zusammen mit den Schülern erarbeitet werden (z.B. 200 bar, 500°C, Gegendruck 1 bar). Die Zustandsänderungen im Verlaufe des Dampferzeugers, der Turbine und des Kondensators können an geeigneten Folien oder Tafelbildern dargestellt werden. Das Berechnungsbeispiel dient dann zur Vertiefung und Einübung der Wirkungsgradberechnung und zur Diskussion der Optimierung des Prozesses durch Druck-, Temperaturerhöhung, bzw. Kondensatordrucksenkung.

Es führt auch zu einer Diskussion über weitere mögliche Optimierungsmaßnahmen, da der zu $\eta = 25\%$ berechnete Wirkungsgrad ja wesentlich unter dem mit *Kraftwerk 04* berechneten Wirkungsgrad liegt.

Das nächste Berechnungsbeispiel zum Prozeß mit Zwischenüberhitzung (*Kraftwerk 14*) liefert dann einen Wirkungsgrad von $\eta = 41\%$, der in der gleichen Größenordnung wie der anfänglich berechnete Wirkungsgrad liegt.

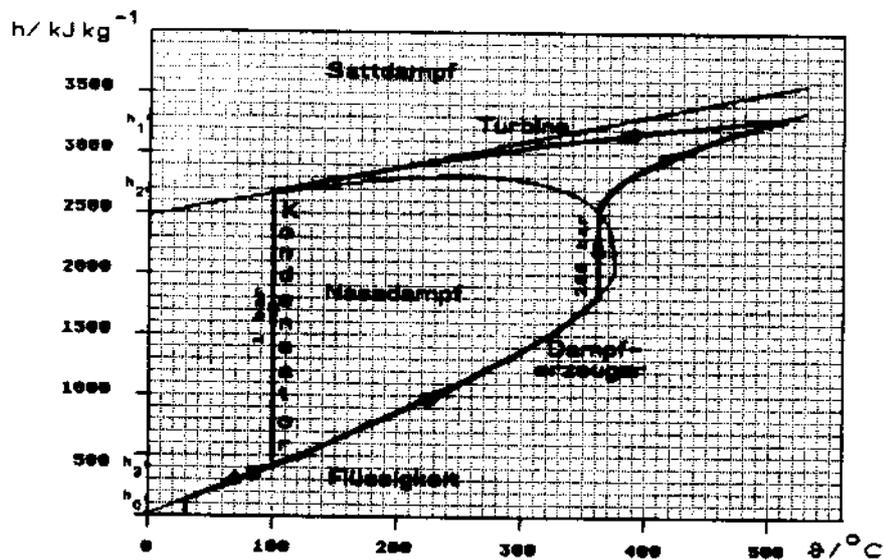


Abb. 1 : Kraftwerksprozeß für 200/1bar, 500°C

3.1 Einstufiger Prozeß

Bei der Bearbeitung dieses Arbeitsblattes werden die Daten für einen fiktiven einstufigen Prozeß eingesetzt. Dabei werden nur die Angaben aus dem Datenblatt zum HD - Dampf und zur Kondensatordruck eingesetzt.

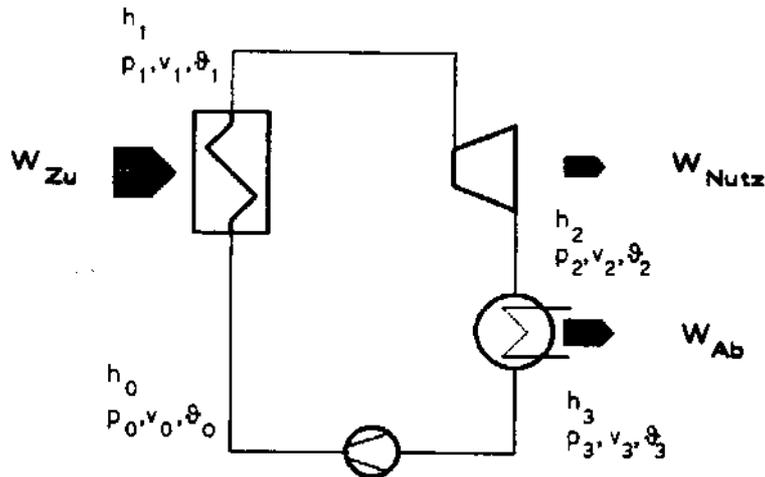


Abb. 2 : Kraftwerkschalterschema - Zuordnung der Zustands- und Energiegrößen

Die Bearbeitung des Arbeitsblattes *Kraftwerk 13* führt zu der folgenden Tabelle. Dabei sind die Volumenwerte angenäherte Werte aus den Wasserdampf-Tabellen.

	0	1	2	3
p / bar	186	186	0,078	0,078
v / m ³ kg ⁻¹ *	0,001	0,01655	10	0,001
θ / °C	30	530	32	30
h / kJkg ⁻¹	140	3380	2560	140

*Die Volumenwerte sind angenäherte Werte aus den Dampftafeln

Tabelle 1: Energie- und Zustandsgrößen

Berechnung der zugeführten Energie

$$\Delta h_{01} = (3380 - 140) \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{01} = 3240 \text{ kJ/kg}$$

Berechnung der theoretischen Nutzarbeit

$$w = \Delta h_{th} = \Delta h_{12}$$

$$\Delta h_{12} = (3380 - 2560) \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{12} = 820 \text{ kJ/kg}$$

Berechnung des theoretischen thermischen Wirkungsgrades

$$\eta_{th} = \frac{w_{Nutz}}{w_{zu}}$$
$$\eta_{th} = \frac{820 \text{ kJ/kg}}{3240 \text{ kJ/kg}} = 0,25$$
$$\eta_{th} = 25 \%$$

Berechnung des Dampfverbrauches

Voraussetzung : verlustlose Turbine

$$\dot{m}_{D,th} = \frac{P_{th}}{\Delta h_{th}}$$
$$P_{el} = \eta_{Gen} \cdot P_{th}$$
$$\dot{m}_{D,th} = \frac{P_{el}}{\eta_{Gen} \cdot \Delta h_{th}}$$
$$\dot{m}_{D,th} = \frac{740 \cdot 10^3 \text{ kJ/s}}{0,93 \cdot 820 \text{ kJ/s}}$$
$$\dot{m}_{D,th} = 970,36 \text{ kg/s} = 3493,3 \text{ t/h}$$

Der Vergleich mit dem in den technischen Daten angegebenen, erheblich geringeren Dampfverbrauch führt zu der Diskussion über Möglichkeiten der Wirkungsgradverbesserung. Ausgehend von diesen Ergebnissen kann dann der Prozeß mit Zwischenüberhitzung analysiert und diskutiert werden.

3.2 Prozeß mit Zwischenüberhitzung

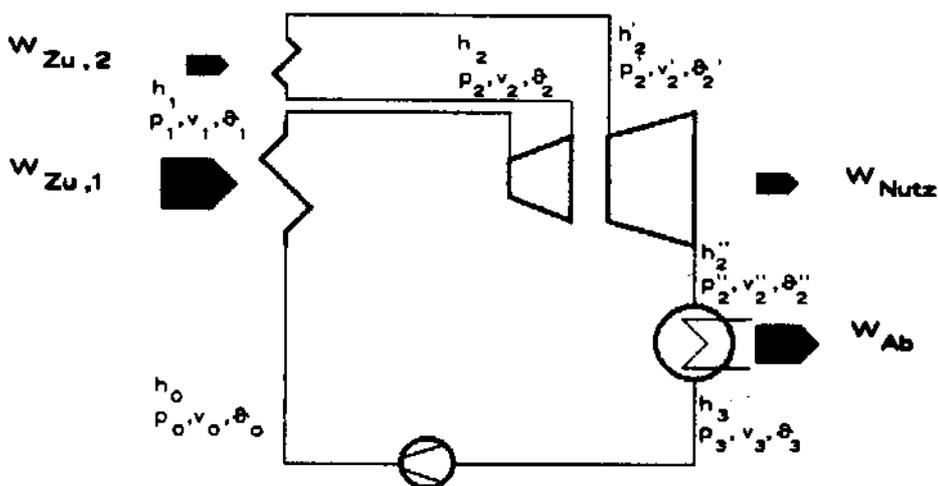


Abb. 3 : Prozeß mit Zwischenüberhitzung

Die Ermittlung der Zustands- und Energiegrößen des Prozesses führt zu folgender Tabelle:

	0	1	2	2'	2''	3
p / bar	186	186	37	37	0,078	0,078
v / m ³ kg ⁻¹ *	0,001	0,01655	0,05	0,09	10	0,001
ϑ / °C	30	530	240	530	32	30
h / kJkg ⁻¹	140	3380	2700	3540	2540	140

*Die Volumenwerte sind angenäherte Werte aus den Dampftafeln

Tabelle 2 : Zustands- und Energiegrößen Prozeß mit Zwischenüberhitzung

Berechnung des Wirkungsgrades

$$\eta_{th} = \frac{w_{Nutz}}{w_{zu}} = \frac{w_{Nutz 1} + w_{Nutz 2}}{w_{zu 1} + w_{zu 2}}$$

Nutzarbeit

$$w_{Nutz} = \Delta h_{12} + \Delta h_{2'2''}$$

$$w_{Nutz} = [(3380 - 2700) + (3540 - 2540)] \text{ kJ/kg}$$

$$w_{Nutz} = 1680 \text{ kJ/kg}$$

Zugeführte Energie

$$w_{zu} = \Delta h_{01} + \Delta h_{22'}$$

$$w_{zu} = [(3380 - 140) + (3540 - 2700)] \text{ kJ/kg}$$

$$w_{zu} = 4080 \text{ kJ/kg}$$

Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{1680 \text{ kJ/kg}}{4080 \text{ kJ/kg}} = 0,41$$

$$\eta_{th} = 41 \%$$

Berechnung der theoretischen Dampfmenge

$$\dot{m}_{D,th} = \frac{P_{el}}{\eta_{Gen} \cdot \Delta h_{th}}$$

$$\dot{m}_{D,th} = \frac{740 \cdot 10^3 \text{ kJ/s}}{0,98 \cdot 1680 \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{m}_{D,th} = 473,6 \text{ kg/s} = 1705 \text{ t/h}$$

$$\eta_{tur} = \frac{\dot{m}_{D,th} \cdot \Delta h_{th}}{\dot{m}_{D,e} \cdot \Delta h_{th}}$$

Als effektive Dampfmenge wird $\dot{m}_{D,e} = 2200 \text{ t/h}$ aus dem Datenblatt Kraftwerk 03 eingesetzt.

$$\eta_{tur} = \frac{1705 \text{ t/h}}{2200 \text{ t/h}} = 0,78$$

$$\eta_{tur} = 78 \%$$

Ein Vergleich der Wirkungsgradberechnungen für das Gesamtsystem (s. 2.1) mit $\eta = 39,6\%$, des Wasser/Dampfkreislaufes mit $\eta = 41\%$ und des Turbinenwirkungsgrades führt zur Diskussion über weitere Optimierungsmaßnahmen im konkreten Kraftwerksprozeß (Anzapfungen, Vorwärmung, ...).

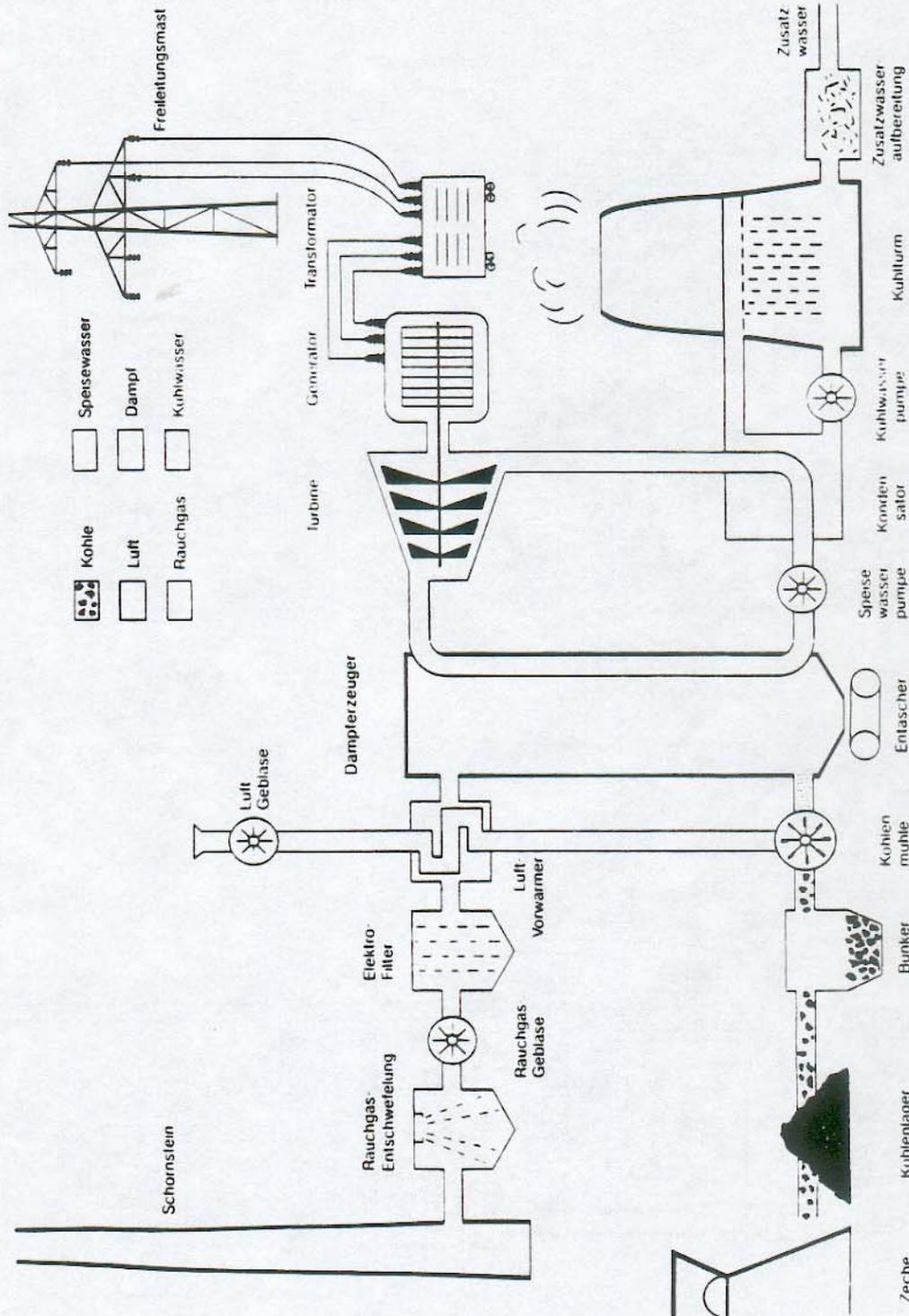
4. Literatur

- [1] *Der 740-MW-Steinkohleblock Scholven F.* VKR (Hrsg.)
Veba-Kraftwerke-Ruhr, Gelsenkirchen

- [2] *Maschinenkunde - Kraft- und Arbeitsmaschinen*, Haage, Hans-Dieter
Hanser-Verlag, München, 6. Auflage, 1988

Kraftwerksprozeß

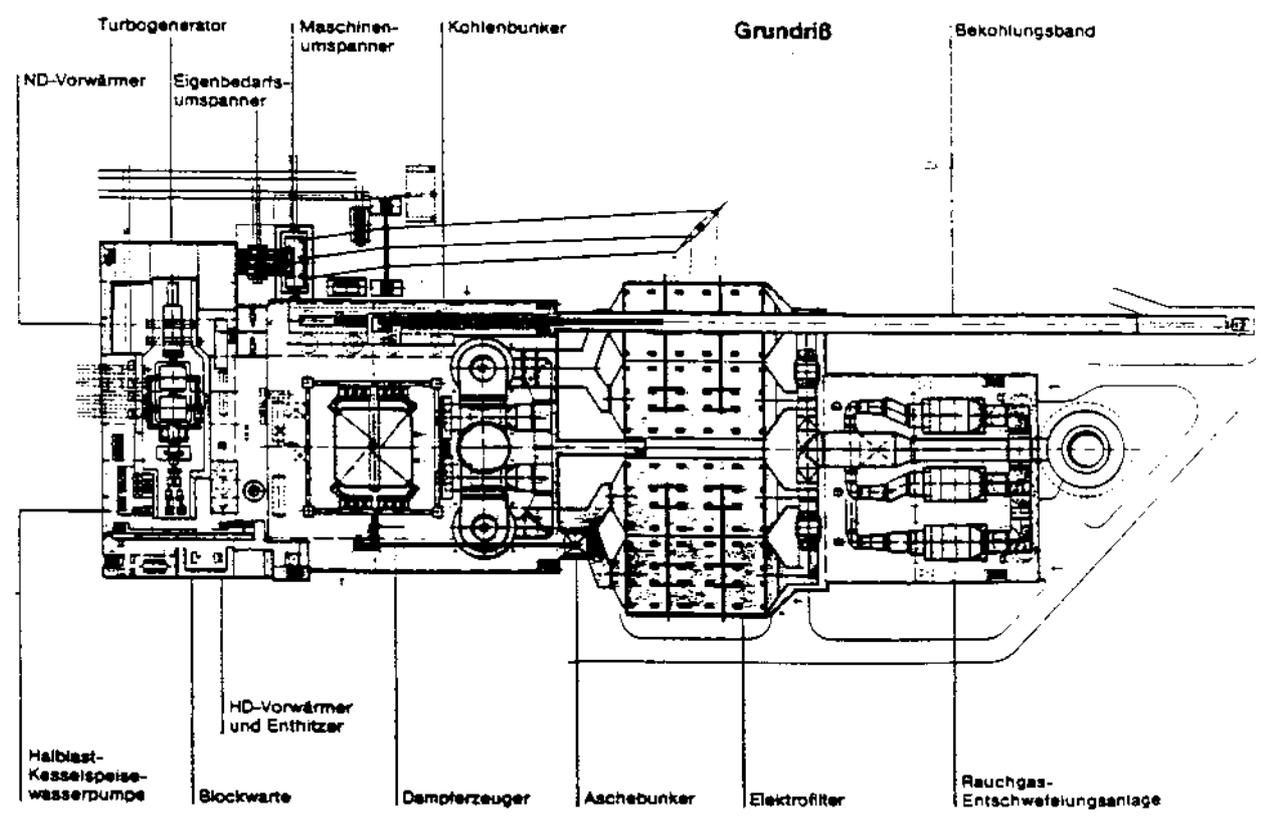
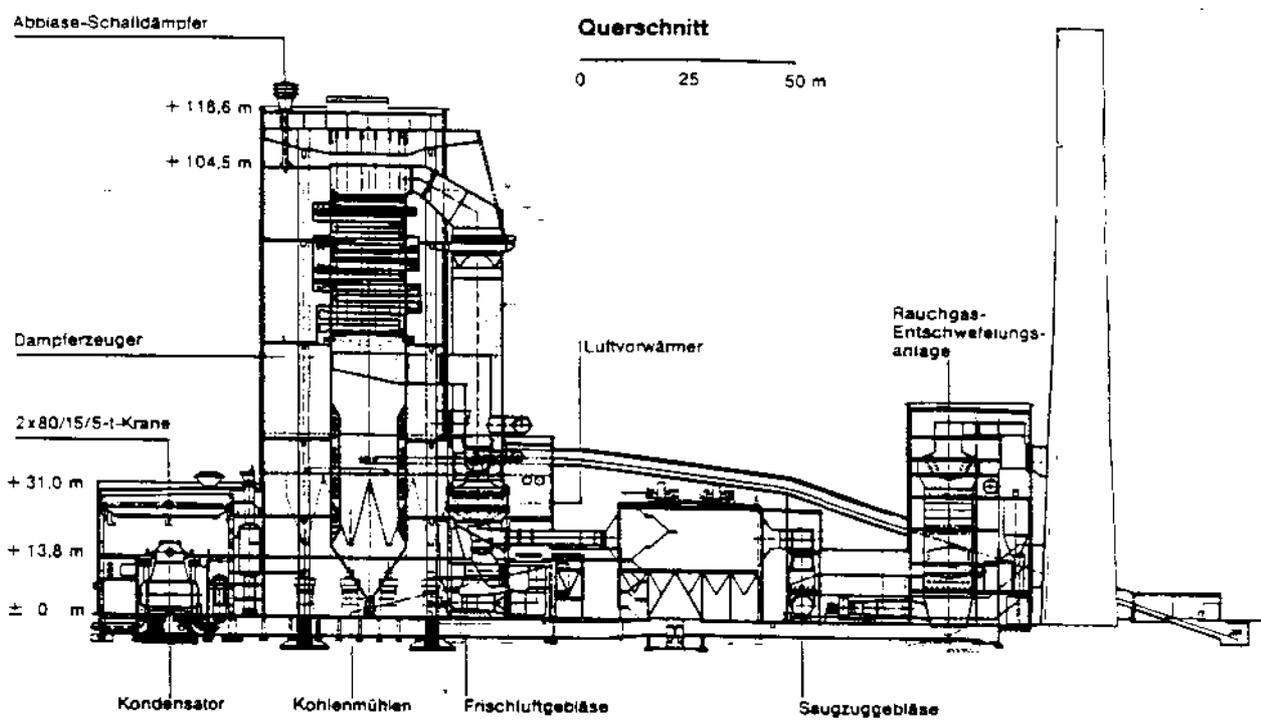
Kraftwerk 01



VKR 740 MW
Steinkohleblock F Scholven

Kraftwerk 82

Grundriß



VKR 740 MW Steinkohleblock F Scholven

Kurzbeschreibung

Kraftwerk 02a

besteht aus zwei Säulen die mit einer Höhe von 22 m eine Höhe von 28 m und eine Tiefe von 12 m haben. Sie wiegen 3.900 t

erhält seine Hochspannung von 57.000 bis 75.000 Volt aus Umspannern, die ihren Strom aus dem Eigenbetriebsnetz des Blockes beziehen

Scheitel 99 ft., der Staubleichen aus den Rauchgasen ab Der Feinstaub wird aufbereitet als Füllstoff im Straßenbau und in der Betonindustrie (Inhib-Füller) oder pelletiert und gemischt, als Zuschlag für Beton (Pluastin) eingesetzt.

ist mit ihren drei Maschstraßen in einem Gebäude untergebracht, das mit einer Höhe von 52 m und 90.500 m³ umbaulichen Raum etwa die Ausmaße des Kesselhauses eines 370-MW-Blockes aufweist

ringt die Rauchgase mit Hilfe von Kalkmilch, die in den Rauchgasstrom eingespritzt wird. Das Endprodukt ist Calciumsulfat (Gips), das in der Baubranche verwendet wird. Bei Vollast betragen 10,5 t Gips in der Stunde an

übernimmt die im Generator erzeugte elektrische Energie mit einer Spannung von 21.000 Volt, transformiert sie auf 380.000 Volt hoch und speist sie mit dieser Spannung in das Netz der öffentlichen Versorgung ein. Das Hochspannung ist notwendig, weil sich Elektrizität nur in dieser Form über weite Strecken wirtschaftlich übertragen läßt

wiegt insgesamt 557 t, davon allein die Ofenführung 104 t. Er wurde mit einem 63 m langen 32achsigen Spezial-Traffler der Deutschen Bundesbahn vom Hieslerwerk nach Scholven überführt. Wegen des hohen Gewichtes und der Überbreite und Länge konnte der Transport nur mit der geringen Geschwindigkeit von 20 km/h teilweise nur im Schrittempo und über Nebenstraßen erfolgen. Die Reise nach Scholven dauerte 8 Tage.

steht in einem Gebäude, das ausschließlich für den Schallschutz errichtet wurde

enthält als zentrales Element ein 2 m breites Schaltpult, von dem aus ein Kraftwerksmeister mit Hilfe der Elektronik sämtliche Fahrfunktionen des Kraftwerks steuert und überwacht. Für das Anfahren ist zusätzlich eine sogenannte Anfahrtafel installiert, registriert und überträgt laufend rd. 850 Meßwerte die auf Anzeigen oder Schrieblättern dargestellt werden

bedient und überwacht rd. 850 Motoren, Schieber und Magneteventile, die eingebunden sind in 80 Funktionsgruppenautomaten und 120 Regelkreise

wurde in den Jahren 1975-1979 errichtet ist mit Umweltschutzmaßnahmen wie Elektrofilter, Rauchgasentschwefelung u. a. ausgestattet für die VKE über 20% der gesamten Investitionssumme ausgegeben hat

sichert durch seinen Kohlenverbrauch langfristig die Arbeitsplätze von rd. 3.000 Bergbau-Mitarbeitern leistet 740 Millionen Watt. Das reicht aus, um 740.000 Bügel-erren oder 240.000 Haushalts-Waschmaschinen gleichzeitig zu betreiben oder um 5 Beirlebe von der Größe des Welkes Scholven der VEBa OEL AG zu versorgen

Das Elektro-Staubfilter

Die Rauchgasentschwefelung

Der Maschinennumspanner

Die Waage

Der Kraftwerksblock

ist 10,5 m hoch, 18 m breit hängt an den vier 110 m hohen Stahl-Stützpfählen des Kesselhauses, sie haben einen Querschnitt von 2,5 x 2,5 m und sind innen begehbare. Jede Stütze nimmt 6.000 t Belastung auf

enthält mehr als 500 km Rohre mit einer Gesamtlänge von 72.000 m, die Höhe sind durch 30.000 m Hitzelelemente und 40.000 während der Montage ausgeformte Schweißnähte verbunden

kann in seinem Rohrsystem 2.200 t Dampf in der Stunde erzeugen

wird über 32 Eckenbrenner mit einem Kohlenstaub-Heißluft-Gemisch beheizt, das mit ca. 1400°C verbrannt kann jährlich bis zu 1,5 Mio. t Steinkohle verbrennen

heißt seine 450°C heißen Gase zu den beiden Luftvorwärmern. Sie wiegen je 750 t und verfügen über eine Wärmetauscherfläche von 120.000 m². In den Luftvorwärmern geht der größte Teil der in den Gasen enthaltenen Abwärme auf die Frischluft über, die dem Dampferzeuger zugeführt wird

ist an des zentrale Behältersystem des Kraftwerks Scholven angeschlossen, das z. Z. eine Aufnahme- und Transportkapazität von ca. 20.000 t je Tag besitzt

verfügt über zwei Tageelager von je 10.000 t Füllungsvermögen

besteht aus dem Hochdruckteil mit den angestuppten Kessel-speisepumpen, dem Mittel- und Niederdruckteil, dem Generator und der Erregermaschine, er ist ca. 55 m lang

wiegt insgesamt ca. 3.000 t, davon allein die Turbine rd. 1.000 t

enthält in seinen beiden Niederdruckteilen Endschrauben mit einer Länge von 825 mm; bei einer Drehzahl von 3.000 Umdrehungen in der Minute erreichen die Enden der Schrauben Überschalgeschwindigkeit. An den Füßen jeder Endschraube und damit an der Turbinenwelle tritt eine Fliehkraft von ca. 200 t

enthält 32.200 m² Kupfäche, das sind 44.500 Edelstahl-Rohre von je 10 m Länge in denen das Wasser aus dem Kühlkreislauf zirkuliert und an deren Außenwänden sich der entspannte Dampf aus der Turbine niederschlägt

ist an Oberkante Tassenrand 115 m hoch und hat mit einem Zanderdurchmesser von 96 m die Ausmaße eines Fußballfeldes. Die Scheibe steht auf 36 Y-förmig angeordneten Stützen mit einem Querschnitt von 60 x 60 cm

hat an seiner Unterkante eine Schalen-Wendstärke von 70 cm, die sich bis zur Oberkante auf 18 cm verjüngt

enthält rd. 10.500 m³ Beton, der unter Verwendung von aufbereiteter Flugasche (Inhib-Füller) aus dem Blocken Schrauben B-E hergestellt wurde

Der Dampferzeuger

Die Bekotlung des Blockes

Der Turbosatz

Der Kondensator

Der Kühlturm

VKR 740 MW Steinkohleblock F Scholven

Technische Daten

Kraftwerk 83

Allgemeine Angaben

Der steinkohlegefeuerte 740-MW-Block Scholven F wurde in den Jahren 1975 bis 1979 errichtet. Sein Standort liegt zwischen den vier 370-MW-Steinkohleblöcken B-E und den beiden ölgefeuerten 714-MW-Blöcken G und H. Der Block ist mit den Bekohlungs- und Entschungseinrichtungen der Blöcke B-E verbunden.

Bei der Planung des Blockes wurden die bewährten Konzepte und Einrichtungen der vorhandenen Blöcke soweit wie möglich übernommen. So entsprechen die gesamten Anlagen im Maschinenhaus und die Schaltung des Wasserdampfkreislaufes den Blöcken G und H. Die Bekohlungsanlage ist nach dem gleichen Prinzip wie für die Blöcke Scholven B-E aufgebaut.

Die Bruttoleistung beträgt 740 MW, nach Abzug des Eigenbedarfs werden in das 380-kV-Netz des RWE 687 MW eingespeist.

Brennstoffbasis ist Ruhrkohle, die im Rahmen des 3. Verstromungsgesetzes eingesetzt wird. Der Block ist in der Lage - je nach Ausnutzungsdauer - bis zu 1500 000 t Kohle im Jahr in elektrische Energie umzuwandeln. Es kommt ausschließlich gewaschene Feinkohle mit einem Schwefelgehalt von maximal 1% zum Einsatz.

Mit der Inbetriebnahme des Blockes Scholven F erhöht sich die gesamte installierte Leistung im Kraftwerk Scholven auf rd. 3700 MW.

Leistung	MW	740
Kesselanlagen		
Bauart		kohlenstaubgefeuert mit trockener Entschung, einfacher ZU, 2 Umwälzpumpen
Dampfleistung	t/h	2200
Dampfzustände HD	bar/°C	230/535
(Konzessionsdaten)		
KZU	bar/°C	50/400
HZU	bar/°C	50/535
Bauart und Feuerung		Ecken
Anzahl der Brenner		32
Anzahl der Brennebenen		4 x 2
Luftvorwärmer		2
Abgastemperatur	°C	140
Mühlen (Schusseimühlen)		4
Saugzuggebläse		2
Frischlufugebläse		2
Elektrofilter		2 Rauchgasfilter, Abscheidegrad 99,4%
Schornstein		Höhe 300 m
Wasser-Dampf-Kreislauf		
Halbiastspeisepumpen		2 x 50%
Fördermenge	t/h	1100
Enddruck	max. bar	305
Leistungsbedarf	kW	11300
Viertellastpumpen		2 x 25%
Fördermenge	t/h	550
Enddruck	max. bar	305
Leistungsbedarf	kW	6300
Motorleistung	kW	7500
Kondensatpumpen		2 x 50%
Fördermenge	t/h	1000
Förderhöhe	mWS	255
Leistungsbedarf	kW	875
Motorleistung	kW	1000
Kondensatkühler		1
ND-Vorwärmer		3
HD-Vorwärmer		2
Enthitzer		1
Turbinenanlage		
Bauart		viergehäusig mit Zwischenüberhitzung, 2 ND-Gehäuse je zweiflutig
Nennleistung	MW	740
HD-Dampf	bar/°C	186/530
ZU-Dampf	bar/°C	37/530
Anzapfungen		6
Endschaufellänge	mm	825
Kondensatoren		2
Kühlfläche	m ²	32200
Kondensatordruck	bar	0,078

Elektrische Anlagen

Generator		1
Nennleistung	MVA	880
Nennspannung	kV	21 ± 5%
Nennstrom	kA	24,2
Kühlmittel		H ₂
Kühlmitteldruck	bar	5,0
Drehstrom-Haupterregungs-Maschine		1
Drehstrom-Hilferregungs-Maschine		1
Maschinenumspanner		1
Nennleistung	MVA	856
Nennspannung	kV	21/420
Kühlung		Wasser
Eigenbedarfsumspanner		1 Dreiphasenumspanner
Nennleistung	MVA	55
Nennspannung	kV	21/10,5
Kühlung		Luft

Rückkühlanlagen

Kühlturm		1
Bauart		Gegenstrom-Naturzugkühlturm mit AZ-Rieseleinbauten, Betonachtel 115 m hoch
Leistung	m ³ /h	58 000
Kühlwasserpumpen		2
Fördermenge	m ³ /h	29 000
Förderhöhe	mWS	23

Brennstoffe und Brennstofflager

Brennstoff		Steinkohle
Zentrale Bekohlung		1 Bandstraße ab Eckturm 2, 1400 t/h automatisch arbeitender Absetzer
Blockbekohlung		Je 2 Block- und Zwischenlager für 10 000 t, automatisch arbeitender Kratzlader 600 t/h, Bandstraße/Kohlenbunker 4 x 310 t (vollautomatischer Betrieb)
Zentrale Rückbekohlung		Kratzlader/Bandstraße 900 t/h zum Eckturm 2
Heizöltank		35 000 t

Entschwefelungsanlage (Auslegungsdaten)

Rauchgasmenge (feucht, Normzustand)	m ³ /h	1 875 000
SO ₂ -Konzentration (Normzustand)	g/m ³	0,43
Abscheidegrad		≥ 90%
Rauchgasaustrittstemperatur	°C	ca. 50
Gipsmenge	t/h	10,5

Herausgeber:

VEBA Kraftwerke Ruhr AG
Bergmannsglückstraße 41-43, Gelsenkirchen-Buer

Dampferzeugeranlage

Der Dampferzeuger und die Feuerungsanlage sind ausgelegt für eine Dampferleistung von 2 200 t/h bei einem höchstzulässigen Genehmigungsdruk von 230 bar. Die Mahl- und Feuerungsanlage kann Steinkohle mit einem unteren Heizwert zwischen 25 000 und 30 000 kJ/kg und mit einem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen zwischen 26 und 38 % (w) verbrennen.

Bei der Auslegung und Konstruktion dieses Dampferzeugers, der die doppelte Leistung der zum Zeitpunkt der Planung in der Bundesrepublik betriebenen Dampferzeuger haben sollte, war vor allem der Gesichtspunkt einer hohen Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit bestimmend. Es wurde eine Konstruktion in Einzugsbauweise mit abwärtsgehendem Leerzug und einer Eckenfeuerung gewählt.

Ausgehend von den Betriebserfahrungen vorhandener Anlagen wurde besonders bei der Auslegung der Brennkammer und der Feuerungs- und Mahlanlage versucht, durch Modell- und Ähnlichkeitsbetrachtungen sowie durch ausführliche EDV-Rechnungen eine größtmögliche Sicherheit zu erzielen. Bei allen Berührungsoberflächen wurde großer Wert auf geringe Verschmutzungseignung und gute Reinigungsmöglichkeit gelegt. Als Mahlanlage werden 4 Schüsselmöhlen mit einer Durchsatzleistung von je 68 t/h eingesetzt, die mit Überdruck betrieben werden. Die Mahlpindel sind mit einer hydro-pneumatischen Mahlpendelfederung ausgestattet. Die 4 Mühlen versorgen 32 Strahlbrenner mit einer Leistung von je 210 GJ/h mit Kohlenstaub.

Zum Zünden des Dampferzeugers und zum Stützen der Feuerung bei Schwachlast ist eine Schwerölfeuerung installiert, die für 30 % der maximalen Feuerungsleistung ausgelegt ist.

Luft- und Rauchgaswege sind aus Gründen der besseren Verfügbarkeit, aber auch als Ergebnis konstruktiver Überlegungen und Kostenoptimierungen zweisträngig ausgeführt.

Kohletransport und -lagerung erfolgen nach den in den Blöcken B-E bewährten Prinzipien. Die Kohle wird über die Eisenbahn antransportiert und über einen Tiefbunker entladen. Über eine ebenfalls bestehende Bandbrücke wird sie den Längsfreilagern des Blockes F über einen Absetzer und von dort mit einem Kratzrader über ein Schrägband den Kesselbunkern zugeführt.

Blick in den Feuerraum des Dampferzeugers während der Bauzeit



Aufgaben :

1. Aus welchen Teilanlagen besteht die Feuerungs- und Dampferzeugeranlage ? Welche davon dienen zur Energieumwandlung, welche zu anderen Zwecken ?
2. Berechnen Sie den Gesamtwirkungsgrad η des Kraftwerkes bei Vollast. Dabei beträgt die elektrische Ausgangsleistung $P_{el} = 740 \text{ MW}$. Die übrigen Anlagen werden mit ihrer Nennleistung betrieben.
3. Berechnen Sie den Massenstrom an Kohle \dot{m}_{Kohle} bei Vollast für die beiden Kohlsorten mit den unteren Heizwerten $H_U(\text{Kohle 1}) = 25\,000 \text{ kJ/kg}$ und $H_U(\text{Kohle 2}) = 30\,000 \text{ kJ/kg}$ in kg/s und t/h. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der installierten Mühlenleistung.

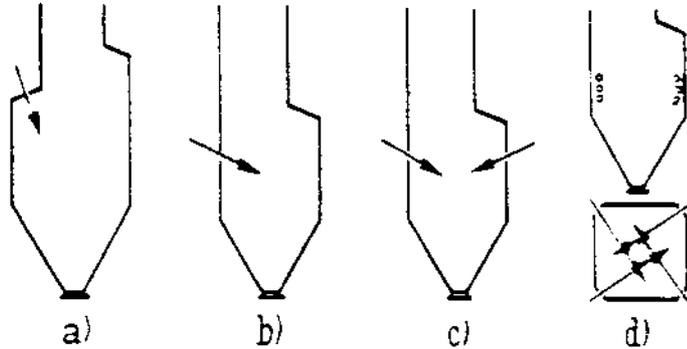
VKR 740 MW
Steinkohleblock F Scholven

Brenneranordnung / Feuerungsraum

Kraftwerk 05

Brenneranordnung bei Kohlenstaub-
feuerungen

- a) Deckenbrenner
- b) Frontbrenner
- c) Gegenbrenner
- d) Eckenbrenner



Blick in den Feuerraum des Dampferzeugers während der Bauzeit



VKR 740 MW
Steinkohleblock F Scholven

Maschinenanlagen - Elektrotechnik
Rückkühlung - Wasserversorgung

Kraftwerk 86

Maschinenanlagen

Die maschinellen Einrichtungen sind im wesentlichen identisch mit denen der Blöcke G und H. Der Turbosatz ist eine viergenäusige axiale Kondensationsmaschine in Überdruckbauweise ohne Regelstufe für Gleitdruckbetrieb. Zwei 50%-Kesselspeisewasserpumpen sind über ein Verzweigungsgetriebe direkt an den HD-Teil der Turbine angekuppelt. MD- und die beiden ND-Teile sind doppelflutig ausgeführt. Die beiden Kastenkondensatoren sind kühlwasserseitig hintereinandergeschaltet.

Der Wärmekreislauf wurde nach zahlreichen Optimierungsrechnungen festgelegt. Die HD-Vorwärmer sind einsträngig und bestehen aus zwei stehenden Vorwärmern in Sammlerkonstruktion und einem vorgeschalteten Enthitzer. Die ebenfalls einsträngige ND-Vorwärmanlage besteht aus drei liegenden, unterhalb des Generators angeordneten Vorwärmern in Plattenkonstruktion sowie einem Kondensatkühler. Die 4. Vorwärmstufe ist als Entgäsmischvorwärmer mit Speisewasserbenähter ausgeführt.

Für Anfahr- und Reservewecke sind zwei 25%-Speisewasserpumpen mit Asynchronmotor-Antrieb über Regelgetriebe installiert.

Elektrotechnik

Der im Ständer und Läufer wasserstoffgekühlte Generator hat eine Nennleistung von 880 MVA. Er wird mittels eines Wellengenerators über rotierende Dioden erregt und hat eine Nennspannung von 21 kV. Über den 856-MVA-Maschinentransformator, der eine Übersetzung von 21 kV/420 kV mit Stufenschalter hat, speist er in die 380-kV-Schaltanlage Polsum des RWE. Im Zuge der einphasig gekapselten Ableitung zwischen Generator und Maschinenumspanner liegt vor dem Anschluß des Eigenbedarfstransformators der Generatorschalter mit einer Abschaltleistung von 3 600 MVA, mit dem der Generator synchronisiert wird. Dieses Konzept gestattet die Eigenbedarfsversorgung des Blockes zum An- und Abfahren über den Maschinentrafo aus dem 380-kV-Netz. Da der Kessel für gelegentliches Schwarzabfahren geeignet ist, wurde für Fehler im Bereich der Generatorableitung auf einen zweiten Netzanschluß zur Besicherung verzichtet.

Der Eigenbedarfstransformator mit einer Nennleistung von 55 MVA speist die beiden Schienen der 10-kV-Eigenbedarfsschaltanlage. Diese Schienen versorgen die Motoren mit Leistungen von mehr als 500 kW und die 2,5-MVA-Niederspannungstrafos der 500-V-Hauptschaltanlagen, die im Warten- und Kauengebäude bzw. im Elektro-Filter-Unterbau untergebracht sind. Die Versorgung der Entschwefelung erfolgt getrennt über einen 15-MVA-Trafo aus dem 35-kV-Ringnetz der VKR. Die gesamte Eigenbedarfs- und Notstromschaltung ist zur Erhöhung der Versorgungssicherheit, soweit wirtschaftlich sinnvoll, zweisträngig aufgebaut.

Für den Notbetrieb sind zwei 250-kW/500-kVA-Dieselelektroaggregate vorhanden; weiterhin stehen für Verbraucher, die keine Unterbrechung der Spannungsversorgung vertragen, zwei Umformersätze mit je 35 kW/70 kVA Leistung zur Verfügung, die aus den beiden 220-V-Batterien gespeist werden.

Rückkühlanlagen und Wasserversorgung

Der Block F hat einen 115 m hohen Naturzugekühlturm in Gegenstrombauweise mit Asbesteinbauten. Der Tassendurchmesser beträgt 96 m. Es sind zwei 50%-Kühlwasserpumpen mit einer Förderleistung von je 29 000 m³/h vorhanden. Aus Lärmschutzgründen sind die Pumpen mit einem Gebäude umgeben. Das Zusatzwasser für den Kühlkreislauf wird aus dem öffentlichen Netz beschafft. Da der Salzgehalt relativ gering ist, läßt sich das Kühlwasser bis zu etwa 10facher Eindickung anreichern.

Aufbereitet wird das Wasser in der zentralen Schnellentkarbonisierungsanlage des Kraftwerkes Scholven mit Kalkhydrat. Diese Anlage besteht aus 3 Bahnen mit einer Gesamtkapazität von 4 500 m³/h (1 x 1 000 m³/h, 1 x 1 500 m³/h, 1 x 2 000 m³/h).

Die Versorgung mit Zusatzwasser für den Wasserdampfkreislauf erfolgt aus der bestehenden zentralen Vollentsalzungsanlage, die im Verbund nicht nur das gesamte Kraftwerk Scholven, sondern auch benachbarte Chemiebetriebe und weitere VKR-Kraftwerke versorgt. Die Vollentsalzungsanlage hat bei 5 Bahnen eine Brutto-Gesamtkapazität von 800 m³/h (3 x 100 m³/h, 1 x 200 m³/h, 1 x 300 m³/h).

Die Kreislaufreinigung aller Kraftwerksblöcke in Scholven wird im Teilstrom in einer zentralen Kondensatentsalzungsanlage durchgeführt.

Leittechnik

Die leittechnischen Systeme der Blockanlage und die Warte sind in enger Anlehnung an das Konzept der übrigen Blöcke aufgebaut. Die Warte ist in ihrem Aufbau in zwei Bereiche unterteilt, den Fahrbereich, der aus einem zwei Meter breiten, gut überschaubaren Pult und aus zwei in unmittelbarer Nähe angeordneten Tafelteilen besteht, und die sogenannte Anfahrtafel. Im ersten Teil sind alle zum Überwachen, Regeln und Steuern des laufenden Blockes benötigten Elemente untergebracht und im zweiten diejenigen Bedienungs- und Rückmeldeorgane, die vor oder während des An- und Abfahrens des Blockes benötigt werden.

Zur nachträglichen Störungsaufklärung werden in einer zentralen Datenerfassungsanlage mit einer Auflösung von 5 msec ca. 1 000 Signale erfaßt und auf einem Drucker in Klartext ausgegeben.

Als elektronische Regel- und Steuerungssysteme kamen bewährte Fabrikate zum Einsatz, die in mehr als 100 Schränken im Elektromraum unter der Warte untergebracht sind.

Die Entschwefelungsanlage mit ihren zum Teil aggressiven und zu Anbackungen neigenden Stoffen brachte neuartige Probleme auf dem Gebiet der Meßtechnik. Die gefundenen Lösungen wie

- chemische Reinigung analytischer Sonden,
- Druck-Meßumformer mit beschichteten Membranen,
- induktive Durchflußmesser,
- Ultraschall-Dichtemesser,
- SO₂-Emissionsmeßgeräte für den mg-Bereich

haben ihre erste Bewährungsprobe erfolgreich bestanden.

Entschwefelungsanlage und zentrale Gipszerzeugung haben ihre eigenen Leitstände und Elektroniksysteme. Aufgrund einer anderen Technologie und der Erweiterungsmöglichkeit kam bei der elektronischen Steuerung der Gipszentrifugen erstmalig in Scholven ein neuartiges, freiprogrammierbares und preisgünstiges System zur Anwendung.

Umweltschutzmaßnahmen

Für den Bau des Blockes Scholven F wurden umfangreiche Maßnahmen und Einrichtungen zum Schutz der Umwelt eingeplant und verwirklicht, die z. T. weit über das von Gesetzgeber und Aufsichtsbehörde vorgeschriebene Maß hinausgehen.

Zur Staubabcheidung aus den Rauchgasen erhielt der Block eines der größten bisher gebauten Elektrofilter. Es ist so sicher ausgelegt, daß auch bei Störungen der maximal zulässige Feststoffauswurf von 150 mg/m³ Rauchgas nicht überschritten wird. Im Normalbetrieb, und das gilt auch für Vollast, liegt die Staubemission erheblich unter diesem Wert. Der abgeschiedene Staub wird fast vollständig weiterverarbeitet und in der Bauindustrie oder im Straßenbau volkwirtschaftlich sinnvoll eingesetzt.

Zur Verringerung der Schwefeldioxid-Emission wird schwefelarme Vollwertkohle eingesetzt. Darüber hinaus ist dem Elektrofilter eine Rauchgas-Entschwefelungsanlage nachgeschaltet, die im folgenden Abschnitt beschrieben ist.

Die intensive Rauchgasreinigung bewirkt in Verbindung mit anderen Maßnahmen, daß die durch den Block verursachten Immissionen außerordentlich gering sind. Im Einzugsbereich von 16 x 16 km² liegt die zusätzliche Immission von z. B. Staub und Schwefeldioxid bei deutlich weniger als 1% der in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft festgelegten Maximalwerte. Hierbei ist eine für Steinkohlenblöcke realistische Ausnutzung im Mittelastbereich der Stromversorgung vorausgesetzt.

Staub- und Schwefeldioxid-Emissionen des Blockes werden durch schreibende Meßgeräte laufend registriert. Die Aufzeichnungen stehen der Aufsichtsbehörde zur Verfügung.

Eine weite Skala von Einzelmaßnahmen dient dem Schallschutz. Hierzu gehören u. a.

- die Aufstellung lärmintensiver Aggregate in Gebäuden, die mit schalldämmender Außenverkleidung versehen sind,
- die schalldämmende Isolierung aller außenliegenden Rohrleitungen und Kanäle,
- der Einbau von Schalldämpfern an allen Belüftungs- und Entlüftungsöffnungen und den Dampfaustrittstellen.

Darüber hinaus sind die Schallschutzmaßnahmen für den Block in das Gesamtkonzept des Kraftwerks Scholven eingebunden; hierzu gehören u. a. ein dichter Grüngürtel um die Anlage, der z. Z. 275 000 Gehölze umfaßt, und Lärmschutzwälle.

Die Umweltschutzmaßnahmen erforderten einen finanziellen Aufwand von über 20% der Investitionskosten des Blockes. Die jährlichen Kosten der Umweltschutzmaßnahmen für den Block belaufen sich auf rd. 50 Mio DM.

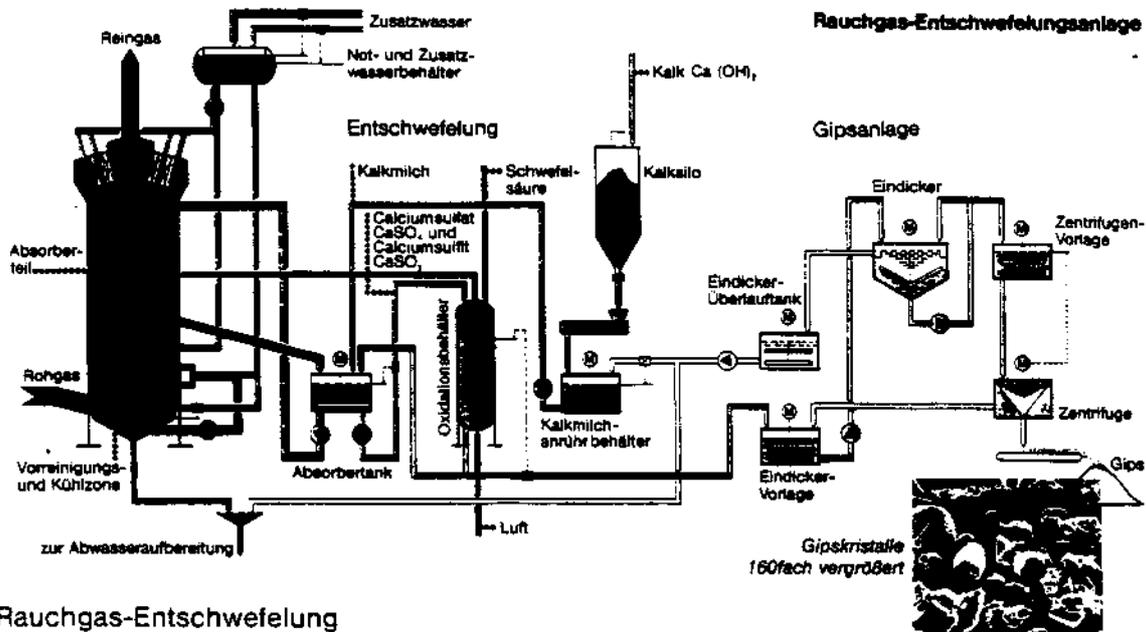
VEBA Kraftwerke Ruhr AG

Für viele ältere Kraftwerke ist der Aufwand im Vergleich zum erwarteten Nutzen zu hoch, so daß ein erheblicher Teil stillgelegt wird. In Tabelle 9 sind die Betriebskosten eines 700-MW-Steinkohlekraftwerks (Stand 1984) aufgelistet. Die Umweltschutzkosten umfassen Leistungen für Investitionen, Unterhalt, Personal, Chemikalien und die Gipsbeseitigung, daneben fallen Kosten für die umfangreiche Überwachung an. In diesem Musterkraftwerk machen die Umweltschutzmaßnahmen etwa 23 Prozent der gesamten spezifischen Stromerzeugungskosten aus. Da abgesämere Energieerzeugung (Wasserkraft, Kernenergie) nur einen Teil (1985 etwa 1/3) des Strombedarfs deckt, ist im Vollzug der Großfeuerungsanlagen-Verordnung mit einem Anstieg des Strompreises zu rechnen.

Tabelle 9: Stromerzeugungskosten eines 700-MW-Steinkohlekraftwerks

Frischwasseraufbereitung (Kühlkreislauf)	0,07 Pf/kWh
Kühiturm	0,5 Pf/kWh
Rauchgasentstaubung	0,2 Pf/kWh
Rauchgasentschwefelung	1,5 Pf/kWh
Rauchgasentstickung	1,0 Pf/kWh
Chemikalienlager (Entschwefelung, Entstickung)	0,07 Pf/kWh
Rauchgasaufwärmung	0,17 Pf/kWh
Dünger- und Gipsverwertung	0,1 Pf/kWh
Flugstaubverwertung	0,05 Pf/kWh
NaBascheverwertung	0,02 Pf/kWh
Abwasseraufbereitung (Entschwefelung, Entstickung, Kühlkreislauf)	0,08 Pf/kWh
Lärmschutz	0,19 Pf/kWh
Landschaftsgestaltung in Kraftwerksnähe	0,19 Pf/kWh
Betriebskosten für Umweltschutzmaßnahmen insgesamt	4,14 Pf/kWh
Spezifische Kosten für den reinen Elektrizitätserzeugungsprozeß	13,6 Pf/kWh
Gesamte spezifische Stromerzeugungskosten	17,74 Pf/kWh

QUELLE:
FOND DER COAL. INDUSTRY
UMWELT BEREICH LUFT



Rauchgas-Entschwefelung

Dem Elektro-Staubfilter ist eine Rauchgas-Entschwefelungsanlage nachgeschaltet, die aus drei parallel arbeitenden Bahnen besteht. Das Arbeitsprinzip zeigt die schematische Darstellung: In der Vorreinigungszone werden die Rauchgase zunächst mit Wasser besprüht und abgekühlt; hierbei werden wasserlösliche Gase und Reststaub aus den Rauchgasen ausgewaschen. Anschließend gelangen die Rauchgase zur Entschwefelung in den Absorberteil. Mit Hilfe einer Absorptionsflüssigkeit, die Kalkmilch und Gips enthält, sowie des Restsauerstoffes der Rauchgase wird hier im Systemkreislauf von Absorber und Absorbentank das Schwefeldioxid an den Kalk gebunden; es entstehen Calciumsulfat (Gips) und geringe Mengen von Calciumsulfid. Die gereinigten Rauchgase werden in den Schornstein geleitet. In einem nachgeschalteten Oxidationstank wird aus dem Calciumsulfid durch Zugabe von Luft und Schwefelsäure ebenfalls Calciumsulfat. Der Gips-Suspension wird danach in einer weiteren Verarbeitungsstufe das Wasser entzogen. Bei Vollastbetrieb des Kraftwerks fallen stündlich 10,5 t Gips an. Dieser Gips kann gut in der Bauindustrie verwendet werden. Die Abwässer aus dem Entschwefelungsprozess werden in der werkeigenen Wasserreinigung neutralisiert und gereinigt.

1. Berechnen Sie die Masse an Schwefel, die bei Vollast mit der Kohle in die Feuerung geführt werden, und die Masse an Schwefeldioxid (SO_2), die durch die Verbrennung freigesetzt wird ($\dot{m}_S, \dot{m}_{\text{SO}_2}$ in t/h und t/d) bei einem Schwefelanteil von $w_S = 1\%$ ($H_u = 25000 \text{ kJ/kg}$).
2. Berechnen sie den Massenanteil w_{SO_2} (in mg/m^3) im Rauchgas unter Berücksichtigung eines Abscheidungsgrades der Entschwefelungsanlage von $a = 85\%$. Vergleichen Sie mit dem Grenzwert der TA Luft:

$$w_{\text{SO}_2} = 2300 \text{ mg/m}^3 \quad \text{bei Genehmigung vor 1983}$$

$$w_{\text{SO}_2} = 400 \text{ mg/m}^3 \quad \text{bei } a = 85\% \quad \text{bei Genehmigung nach 1983}$$

Siedetemperaturen und Wärmeinhalte für Wasser und Wasserdampf

Kraftwerk 89

p bar	t °C	Sattdampf				Heißdampf (h_h in kJ/kg)									
		h' J/kg	r J/kg	h'' J/kg	v'' m ³ /kg	250 °C	290 °C	330 °C	370 °C	400 °C	420 °C	440 °C	460 °C	480 °C	500 °C
1	99,1	415	2257	2675	1,725	2973	3052	3132	3211	3274	3316	3358	4000	3442	3483
2	120	502	2202	2705	0,902	2968	3048	3128	3211	3274	3312	3354	4000	3442	3483
3	133	557	2165	2721	0,617	2964	3048	3128	3207	3270	3312	3354	3396	3437	3483
4	143	599	2135	2734	0,471	2964	3044	3123	3207	3270	3312	3354	3396	3437	3479
5	151	636	2110	2747	0,382	2960	3040	3123	3207	3266	3308	3349	3396	3437	3479
6	158	666	2089	2755	0,321	2956	3040	3119	3203	3266	3308	3349	3391	3437	3479
7	164	691	2068	2759	0,278	2952	3035	3119	3203	3266	3308	3349	3391	3433	3479
8	170	716	2051	2768	0,245	2948	3031	3115	3199	3262	3303	3349	3391	3433	3475
9	175	737	2035	2772	0,219	2948	3031	3115	3199	3262	3303	3345	3387	3433	3475
10	179	759	2018	2776	0,198	2943	3027	3111	3195	3257	3303	3345	3387	3429	3475
11	183	779	2001	2780	0,181	2939	3023	3111	3195	3257	3299	3345	3387	3429	3475
14	194	825	1964	2788	0,144	2927	3014	3102	3190	3253	3295	3341	3383	3425	3471
21	214	917	1884	2801	0,0968	2901	2998	3086	3178	3241	3287	3329	3375	3416	3463
26	225	963	1838	2801	0,0785	2885	2981	3077	3165	3232	3278	3324	3366	3412	3458
30	233	1005	1800	2805	0,0680	2860	2968	3065	3161	3228	3274	3316	3362	3408	3454
35	241	1043	1758	2801	0,0582	2834	2952	3056	3149	3220	3266	3312	3358	3404	3446
40	249	1080	1721	2801	0,0508		2931	3040	3156	3211	3257	3303	3349	3395	3442
50	263	1147	1645	2793	0,0402		2897	3015	3119	3195	3241	3291	3337	3383	3433
60	274	1206	1578	2784	0,0331		2847	2985	3098	3174	3228	3278	3324	3370	3421
70	284	1260	1511	2772	0,0279		2800	2956	3077	3157	3211	3262	3312	3362	3408
80	294	1311	1449	2759	0,0240			2918	3052	3140	3195	3245	3295	3349	3396
90	302	1357	1390	2747	0,0210			2885	3027	3119	3178	3232	3283	3337	3387
100	310	1398	1327	2726	0,0185			2839	3002	3098	3161	3216	3270	3324	3375
150	341	1599	1017	2617	0,0107				2839	2981	3061	3132	3195	3257	3316
200	364	1809	632	2441	0,0062				2554	2835	2939	3031	3111	3182	3253



Wasserdampf-Tabellen für gesättigten Wasserdampf

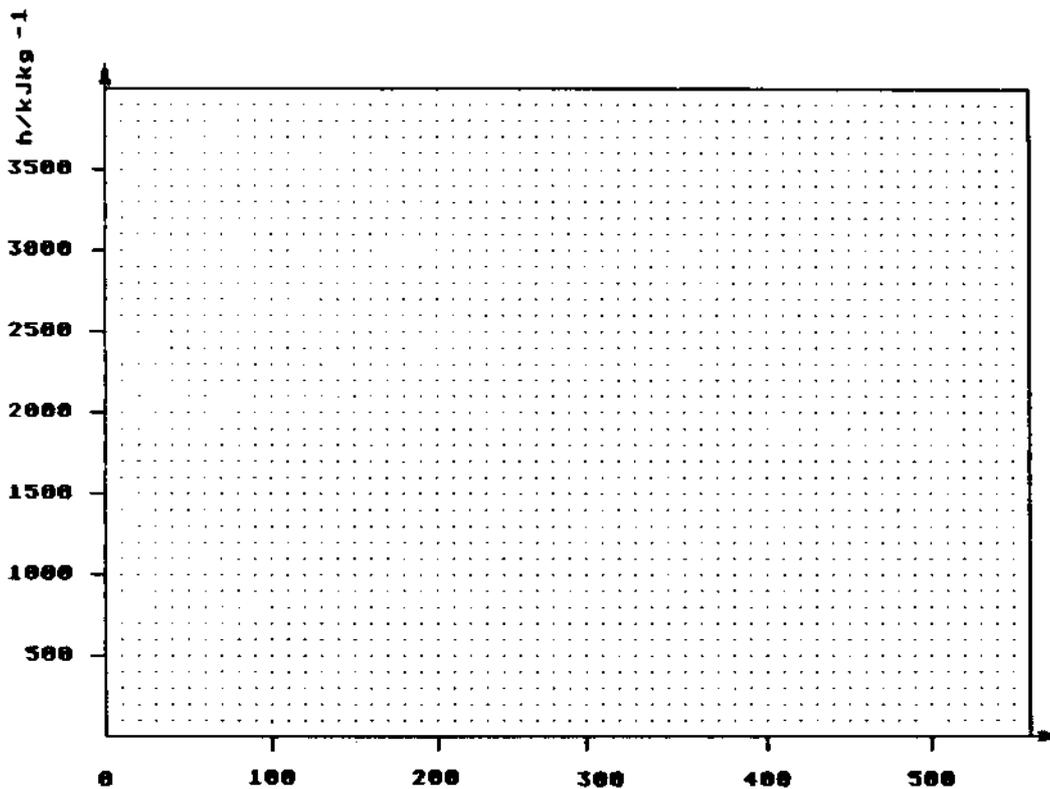
Kraftwerk 18

P bar	t C	v' m³/kg	h' kJ/kg	s' kJ/(kg K)	t C	v'' m³/kg	h'' kJ/kg	s'' kJ/(kg K)	P bar	t C	v' m³/kg	h' kJ/kg	s' kJ/(kg K)	t C	v'' m³/kg	h'' kJ/kg	s'' kJ/(kg K)
0.2	100	8.588	2686.0	8.1245	350	14.37	3176.3	9.1275	10	200	0.2062	2830.8	6.6995	450	0.3302	3369.4	7.6156
	150	9.748	2781.7	8.3651	400	15.53	3278.6	9.2854		250	0.2326	2943.2	6.9256	500	0.3539	3477.2	7.7597
	200	10.91	2878.4	8.5811	450	16.68	3382.5	9.4343		300	0.2578	3060.4	7.1212	550	0.3775	3586.3	7.8964
	250	12.06	2976.3	8.7778	500	17.84	3488.1	9.5755		350	0.2823	3156.4	7.2987	600	0.4009	3696.7	8.0266
	300	13.22	3075.6	8.9590	600	20.15	3704.5	9.8386		400	0.3064	3262.6	7.4626	650	0.4243	3808.5	8.1512
0.4	100	4.282	2684.0	7.8006	350	7.184	3175.9	8.8072	15	200	0.1325	2797.9	6.4561	450	0.2190	3362.7	7.4216
	150	4.866	2780.5	8.0432	400	7.762	3278.1	8.9652		250	0.1520	2925.1	6.7123	500	0.2350	3471.7	7.5673
	200	5.447	2877.5	8.2590	450	8.340	3382.0	9.1142		300	0.1696	3037.2	7.0170	550	0.2508	3581.6	7.7050
	250	6.027	2975.6	8.4570	500	8.917	3487.9	9.2554		350	0.1864	3146.2	7.0994	600	0.2666	3692.7	7.8360
	300	6.606	3075.0	8.6385	600	10.07	3704.3	9.5186		400	0.2028	3254.4	7.2664	650	0.2823	3805.1	7.9613
0.6	100	2.846	2681.6	7.6084	350	4.788	3175.5	8.5196	20	250	0.1115	2905.5	6.5508	500	0.1755	3466.1	7.4292
	150	3.219	2779.3	7.8539	400	5.173	3277.9	8.7777		300	0.1254	3023.6	6.7665	550	0.1875	3576.9	7.5680
	200	3.628	2876.6	8.0714	450	5.559	3382.0	8.9268		350	0.1385	3135.9	6.9543	600	0.1994	3688.7	7.6999
	250	4.015	2975.0	8.2689	500	5.944	3487.7	9.0681		400	0.1511	3246.2	7.1246	650	0.2113	3801.7	7.8257
	300	4.402	3074.5	8.4507	600	6.714	3704.2	9.3133		450	0.1634	3356.0	7.2820	700	0.2231	3916.0	7.9463
1.0	100	1.695	2674.7	7.3567	350	2.870	3174.7	8.3929	30	250	0.07067	2859.4	6.2936	500	0.1161	3455.0	7.2314
	150	1.937	2776.8	7.6138	400	3.102	3277.3	8.5413		300	0.08116	2994.8	6.5412	550	0.1242	3567.5	7.3725
	200	2.172	2874.9	7.8329	450	3.334	3381.4	8.6905		350	0.09047	3114.7	6.7418	600	0.1323	3680.7	7.5059
	250	2.406	2973.6	8.0313	500	3.565	3487.2	8.8319		400	0.09926	3229.6	6.9192	650	0.1403	3794.8	7.6330
	300	2.638	3073.5	8.2137	600	4.027	3703.8	9.0953		450	0.1078	3342.6	7.0811	700	0.1482	3910.0	7.7545
1.2	150	1.611	2775.5	7.5275	400	2.584	3277.0	8.4568	40	300	0.05889	2962.9	6.3652	550	0.09257	3558.2	7.2312
	200	1.808	2874.0	7.7474	450	2.778	3381.2	8.6061		350	0.06644	3092.5	6.5822	600	0.09872	3672.7	7.3664
	250	2.003	2973.0	7.9463	500	2.970	3487.0	8.7476		400	0.07335	3212.7	6.7677	650	0.1048	3787.9	7.4946
	300	2.197	3073.0	8.1289	550	3.163	3594.5	8.8823		450	0.07994	3329.0	6.9344	700	0.1108	3904.0	7.6171
	350	2.391	3174.3	8.2983	600	3.356	3703.7	9.0110		500	0.08632	3443.8	7.0879	750	0.1168	4021.2	7.7345
1.5	150	1.286	2773.6	7.4210	400	2.067	3276.5	8.3533	60	300	0.03617	2885.7	6.0698	550	0.06091	3539.3	7.0271
	200	1.444	2872.7	7.6423	450	2.221	3380.8	8.5027		350	0.04227	3044.2	6.3353	600	0.06514	3656.7	7.1656
	250	1.601	2972.0	7.8419	500	2.376	3486.7	8.6443		400	0.04740	3177.4	6.5410	650	0.06930	3774.2	7.2963
	300	1.757	3072.2	8.0249	550	2.530	3594.2	8.7790		450	0.05211	3301.3	6.7187	700	0.07340	3892.1	7.4207
	350	1.912	3173.7	8.1946	600	2.684	3703.4	8.9079		500	0.05658	3421.2	6.8790	750	0.07746	4010.7	7.5396
2.0	150	0.9603	2770.2	7.2821	400	1.549	3275.7	8.2196	80	300	0.02420	2783.9	5.7886	550	0.04509	3520.3	6.8771
	200	1.080	2870.4	7.5061	450	1.665	3380.1	8.3693		350	0.02999	2988.2	6.1314	600	0.04836	3640.7	7.0190
	250	1.198	2970.3	7.7068	500	1.781	3486.1	8.5110		400	0.03436	3139.5	6.3652	650	0.05155	3760.4	7.1524
	300	1.316	3071.0	7.9005	550	1.897	3593.7	8.6459		450	0.03817	3272.7	6.5561	700	0.05469	3880.1	7.2786
	350	1.433	3172.7	8.0806	600	2.013	3703.0	8.7748		500	0.04171	3398.3	6.7241	750	0.05779	4000.2	7.3990
4.0	150	0.4709	2753.1	6.9297	400	0.7724	3272.4	7.9961	100	350	0.02243	2922.3	5.9423	600	0.03829	3624.6	6.9022
	200	0.5343	2861.4	7.1721	450	0.8308	3377.4	8.1467		400	0.02647	3098.2	6.2143	650	0.04091	3746.7	7.0382
	250	0.5949	2963.7	7.3776	500	0.8891	3483.9	8.2980		450	0.02978	3242.8	6.4216	700	0.04347	3868.2	7.1664
	300	0.6545	3065.8	7.5640	550	0.9473	3591.9	8.4243		500	0.03278	3374.8	6.5983	750	0.04599	3989.8	7.2882
	350	0.7136	3168.6	7.7360	600	1.005	3701.4	8.5435		550	0.03559	3501.2	6.7566	800	0.04848	4111.7	7.4046
6.0	200	0.3522	2852.0	6.9699	450	0.5527	3374.8	7.8568	150	350	0.01159	2690.4	5.4396	600	0.02486	3583.8	6.6799
	250	0.3937	2957.0	7.1809	500	0.5918	3481.7	7.9997		400	0.01568	2974.8	5.8795	650	0.02671	3712.1	6.8227
	300	0.4341	3060.7	7.3703	550	0.6307	3590.0	8.1355		450	0.01850	3160.4	6.1459	700	0.02851	3838.4	6.9580
	350	0.4740	3164.6	7.5440	600	0.6696	3699.8	8.2650		500	0.02083	3313.2	6.3504	750	0.03026	3963.7	7.0816
	400	0.5135	3269.1	7.7055	650	0.7083	3811.3	8.3892		550	0.02291	3451.9	6.5243	800	0.03198	4088.7	7.2009
8.0	200	0.2610	2841.8	6.8207	450	0.4137	3372.1	7.7213	200	400	0.00995	2815.0	5.5488	650	0.01982	3677.1	6.6612
	250	0.2930	2940.2	7.0385	500	0.4431	3479.5	7.8648		450	0.01273	3064.0	5.9064	700	0.02103	3808.5	6.7998
	300	0.3239	3055.5	7.2309	550	0.4724	3586.1	8.0010		500	0.01480	3245.8	6.1498	750	0.02240	3937.8	6.9294
	350	0.3542	3160.5	7.4065	600	0.5017	3698.3	8.1309		550	0.01655	3400.3	6.3435	800	0.02373	4065.9	7.0517
	400	0.3840	3265.9	7.5691	650	0.5308	3809.9	8.2553									

Enthalpiezuwachs beim Erwärmen und Überhitzen von Wasser

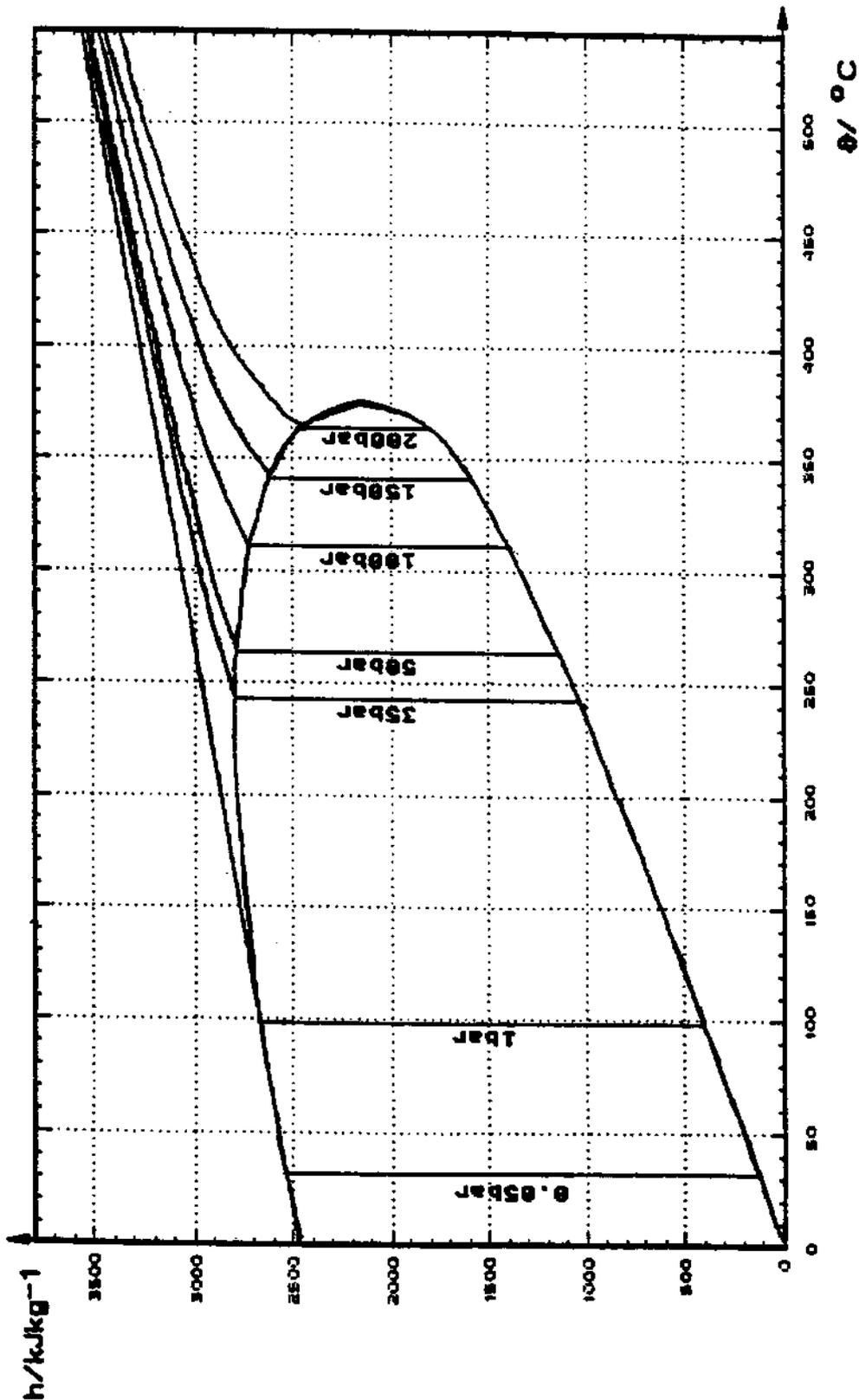
Kraftwerk 11

Zeichnen Sie mit Hilfe der Wasserdampf tafeln für die Drücke $p_1 = 1 \text{ bar}$, $p_2 = 10 \text{ bar}$, $p_3 = 100 \text{ bar}$, $p_4 = 200 \text{ bar}$ den Enthalpiezuwachs beim Erwärmen, Verdampfen und Überhitzen von 0°C auf 500°C in das untenstehende Diagramm ein.



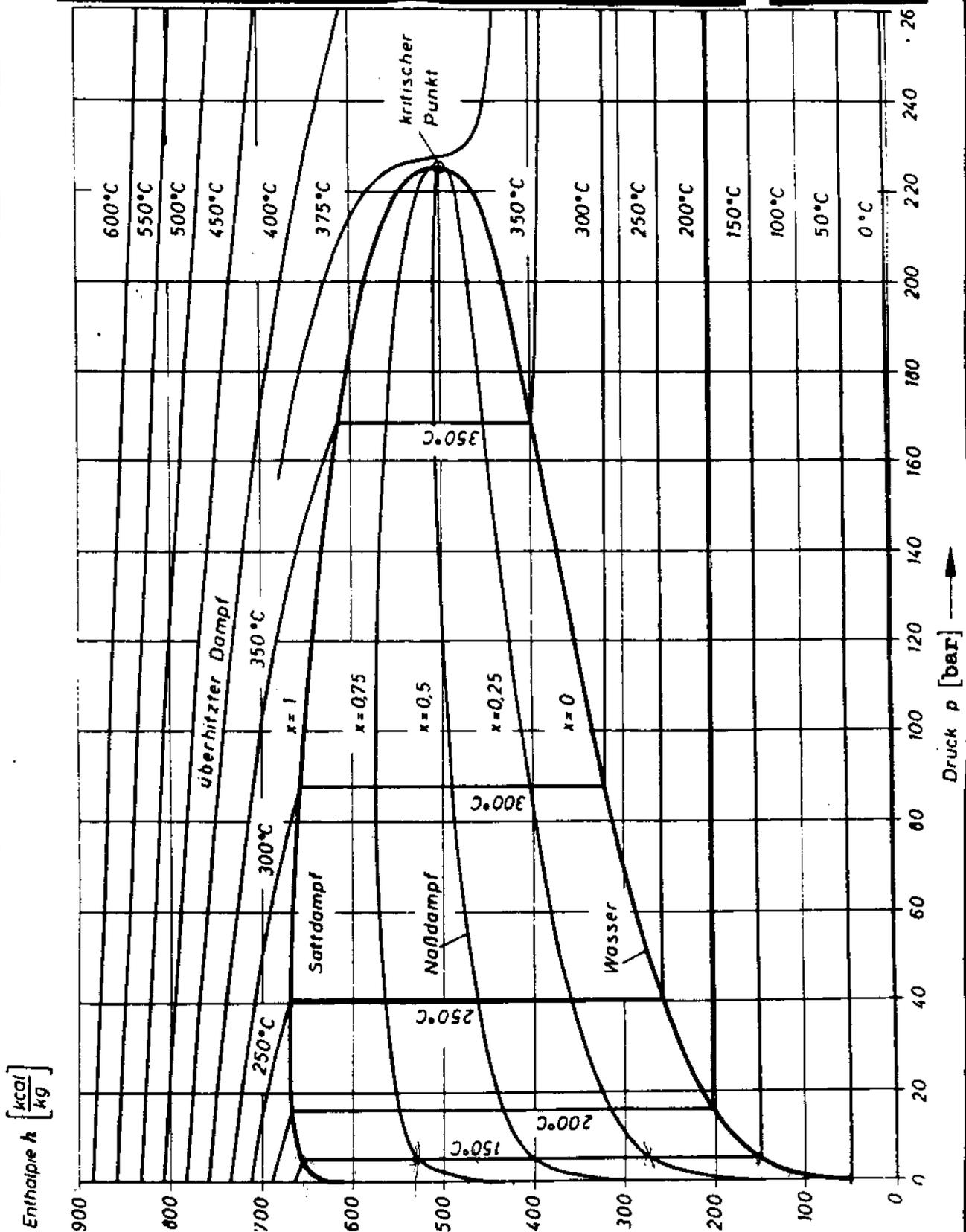
Enthalpie/Temperaturdiagramm für Wasser und Wasserdampf

Kraftwerk 12



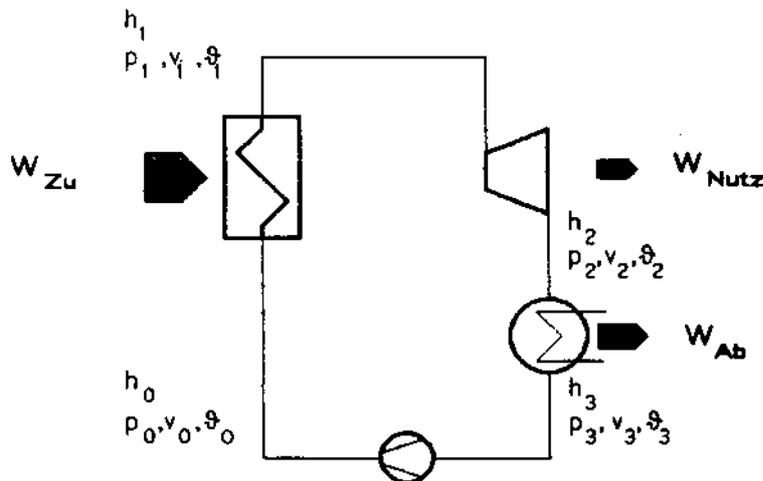
Enthalpie/Druck-Diagramm für Wasser und Wasserdampf

Kraftwerk 13



Schaltschema des Kraftwerkes - Zuordnung der Energiezustände

Kraftwerk 14



Aufgaben:

1. Ordnen Sie mit Hilfe der Wasserdampftabellen, des Enthalpie-Temperatur-Diagrammes und der technischen Daten die für das Kraftwerk Scholven Block F zutreffenden Zustandsgrößen v , s sowie die jeweilige Enthalpie h zu. Die Rückkühltemperatur soll $s = 30^\circ\text{C}$ betragen.

	0	1	2	3
p / bar	186	186	0,078	0,078
$v / \text{m}^3\text{kg}^{-1}$				
$s / ^\circ\text{C}$				
h / kJkg^{-1}				

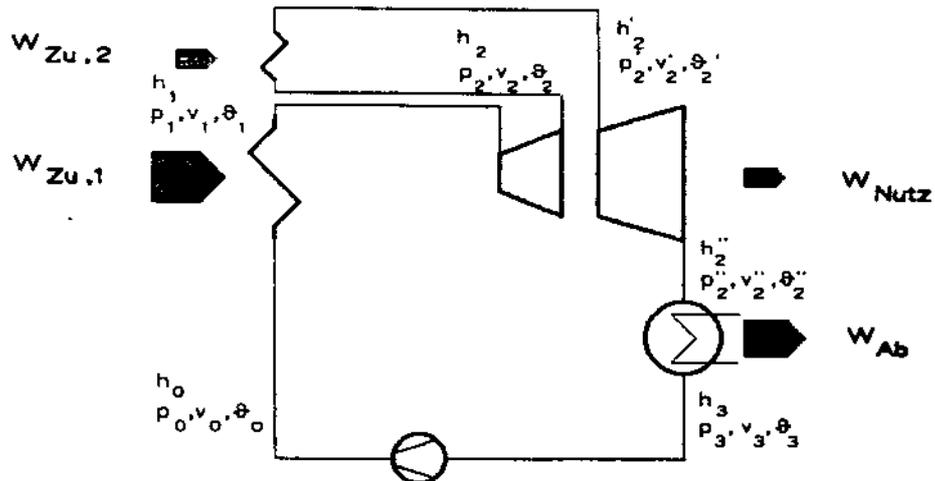
2. Berechnen Sie die im Dampferzeuger zugeführte Enthalpie Δh_{01} , das in der Turbine nutzbare thermische Enthalpiegefälle (die theoretische Nutzarbeit) $w = \Delta h_{th} = \Delta h_{12}$, sowie die im Kondensator abgeführte Enthalpie Δh_{23} .

3. Ermitteln sie den theoretischen thermischen Wirkungsgrad η_{th} .

4. Berechnen Sie, ausgehend von einer Leistung von $P_{el} = 740 \text{ MW}$ und einem Generatorwirkungsgrad $\eta_{Gen} = 0,93$, den theoretischen Dampfverbrauch $\dot{m}_{D,th}$. Vergleichen Sie dieses Ergebnis mit dem in den technischen Daten angegebenen effektiven Dampfverbrauch von $\dot{m}_{D,e} = 2200 \text{ t/h}$.

Kraftwerksprozeß mit Zwischentüberhitzung

Kraftwerk 15



Aufgaben:

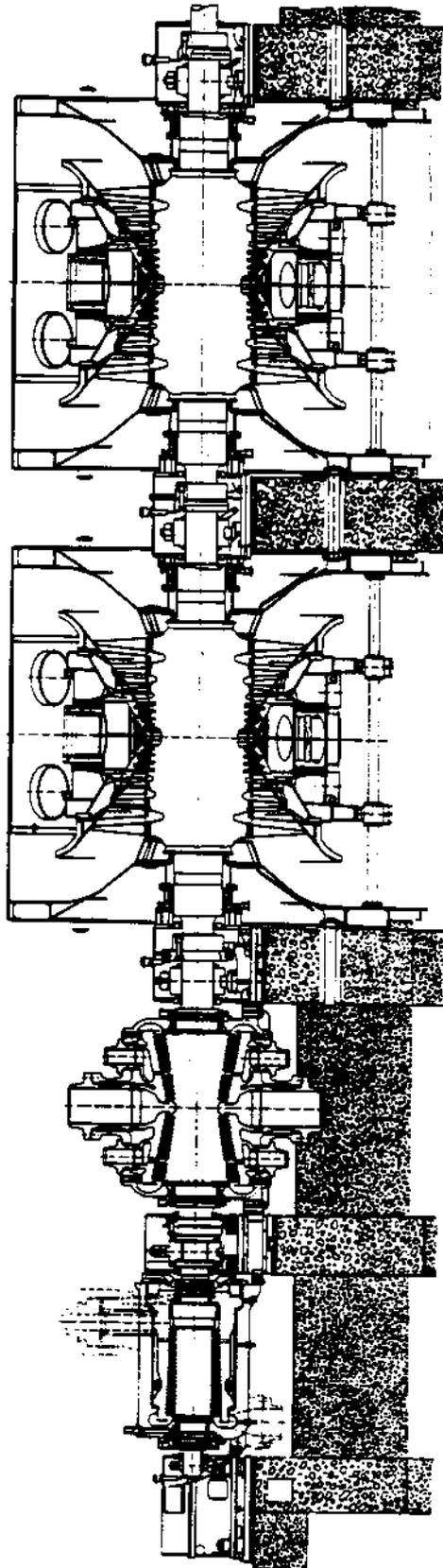
1. Ordnen Sie mit Hilfe der Wasserdampftabellen, des Enthalpie-Temperatur-Diagrammes und der technischen Daten die für das Kraftwerk Scholven Block F zutreffenden Zustandsgrößen p , v , φ sowie die jeweilige Enthalpie h zu.

	0	1	2	2'	2''	3
p / bar						
v / $m^3 kg^{-1}$						
φ / $^{\circ}C$						
h / $kJ kg^{-1}$						

2. Ermitteln sie den theoretischen thermischen Wirkungsgrad η_{th}
3. Berechnen Sie, ausgehend von einer Leistung von $P_{el} = 740$ MW und einem Generatorwirkungsgrad $\eta_{Gen} = 0,93$ den theoretischen Dampfverbrauch $\dot{m}_{D,th}$. Wie groß ist der Turbinenwirkungsgrad bei einem effektiven Dampfverbrauch von $\dot{m}_{D,e} = 2200$ t/h (s. Technische Daten)?
4. Berechnen Sie den Kesselwirkungsgrad η_{Kessel} .

Turbinenanlage - Schnittzeichnung

Kraftwerk 16



Viergehäuseige Zwischenüberhitzungsturbinen (KWU)

Leistung: bis 780 MW, Frischdampfdruck: 160 bis 250 bar, Frischdampftemperatur: bis 545°C, ZÜ-Dampfdruck: 30 bis 60 bar, ZÜ-Dampftemperatur: bis 545°C, Drehzahl: 3000 min⁻¹

Klausur

Kraftwerk

In einem Steinkohlekraftwerk wird Steinkohle mit dem unteren Heizwert $H_U = 29000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ verfeuert. Bei Vollast beträgt der stündliche Massenstrom $\dot{m}_{\text{Kohle}} = 234 \text{ t/h}$. Der Wirkungsgrad im Bereich **Feuerung/Dampferzeuger** beträgt $\eta = 0.9$.

Die Wärmeenergie wird im **Dampferzeuger** auf den **Wasser/Dampf-Kreislauf** eines einstufigen Turbinenprozesses übertragen, der folgende Kenndaten aufweist:

$$p_{\text{HD}} = 200 \text{ bar} \quad \theta_U = 520^\circ\text{C} \quad \theta_K = 20^\circ\text{C}$$

Die weiteren Teilsysteme Turbine und Generator weisen folgende Wirkungsgrade auf:

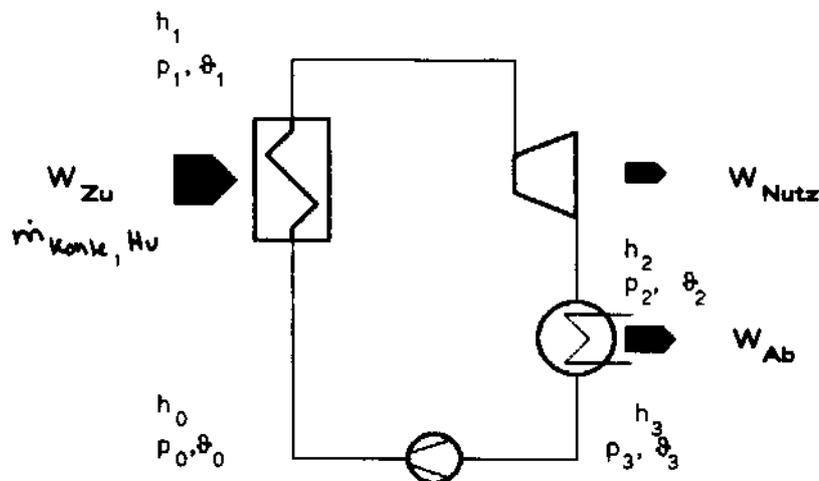
$$\eta_{\text{Turbine}} = 0.75 \quad \eta_{\text{Generator}} = 0.95$$

AUFGABENSTELLUNG

1. Berechnen Sie die Leistung der Brenneranlage P_{Br} in MW.
Berechnen Sie die auf den Wasser/Dampf-Kreislauf übertragene Wärmeleistung P_{Dampf} in MW.
Wo treten im Bereich **Dampferzeuger/Feuerung** Verluste auf?
2. Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad des Wasser/Dampf-Kreislaufes η_{th} .
Beschreiben Sie dabei den Aufbau und die Benutzung des h/θ - Diagrammes.
Welche Leistung P_{Turbine} wird an die Turbine abgegeben?
Welche Dampfmenge \dot{m}_D wird pro Sekunde im Dampferzeuger erzeugt?
3. Welche elektrische Leistung P_{El} steht am Generatorausgang zur Verfügung?
Welche Nutzleistung liefert das Kraftwerk bei einem Eigenbedarf an elektrischer Leistung von $P_{\text{Eigen}} = 35 \text{ MW}$?
4. Welchen Gesamtwirkungsgrad η_{Gesamt} weist das Kraftwerk auf?
Erläutern Sie einen Weg zur entscheidenden Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades.
Führen Sie dazu an einem selbstgewählten Beispiel eine entsprechende Berechnung durch.

Abituraufgabe 4. Fach

Kraftwerk



Für das im o.a. Schaltschema angeführte Kraftwerk gelten folgende Daten:

Ausgangsleistung	$P_e = 600 \text{ MW}$
Dampfdruck vor Turbine	$p_F = 200 \text{ bar}$
Überhitzungstemperatur	$\vartheta_F = 500 \text{ }^\circ\text{C}$
Kondensatordruck	$p_K = 0,05 \text{ bar}$
Rückkühltemperatur	$\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
Heizwert der Kohle	$H_U = 28000 \text{ kJ/kg}$
Gesamtwirkungsgrad	$\eta = 0,18$

Abituraufgabe 4. Fach

Kraftwerk

AUFGABENSTELLUNG:

1. Berechnen Sie den Massenstrom an Kohle \dot{m}_{Kohle} , der bei Vollastbetrieb in der Feuerung eingesetzt wird.
2. Ordnen Sie mit Hilfe der Wasserdampftabellen und des Enthalpie-Temperatur-Diagrammes sowie der o.a. technischen Daten die für das Kraftwerk zutreffenden Zustandsgrößen p , ϑ sowie den jeweiligen Enthalpiegehalt h zu.

	0	1	2	3
p / bar				
$\vartheta / ^\circ\text{C}$				
$h / \text{kJ/kg}$				

3. Berechnen Sie die im Dampferzeuger zugeführte Enthalpie Δh_{01} , das in der Turbine nutzbare thermische Enthalpiegefälle (die theoretische Nutzarbeit) $w = \Delta h_{\text{th}} = \Delta h_{12}$, sowie die im Kondensator abgeführte Enthalpie Δh_{23} .
4. Ermitteln sie den theoretischen thermischen Wirkungsgrad η_{th} .