

Hans-Günter Heitmann

Chemie und Korrosion in Kraftwerken



VULKAN

Chemie und Korrosion in Kraftwerken

Hans-Günter Heitmann

**Chemie und Korrosion
in Kraftwerken**

VULKAN-VERLAG ESSEN

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Heitmann, Hans-Günther:

Chemie und Korrosion in Kraftwerken / Hans-Günther Heitmann. - Essen :
Vulkan-Verl., 2000

ISBN 978-3-8027-2921-8 (Print)

ISBN 978-3-8027-3064-1 (eBook)

© 2000 Vulkan-Verlag GmbH
Ein Unternehmen der Oldenbourg-Gruppe
Hollestraße 1g, D-45127 Essen
Telefon: (02 01) 8 20 02-0, Internet: <http://www.oldenbourg.de>

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Satz: DOUBLE-U UP, Georgensgmünd
Umschlagkonzeption: Kraxenberger Kommunikationshaus, München
Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier
Druck und Bindung: Brinck-Druck GmbH, Essen

Vorwort

Auf dem Gebiet der Kraftwerk-Chemie sind zahlreiche Bücher und Veröffentlichungen erschienen, die es dem Interessenten durch die Fülle von Informationen oft schwer machen, das für ihn Wesentliche zu finden. Zu erwähnen sind dabei die Werke von Hömig „Metall und Wasser“, von Held / Schnell „Kühlwasser“ und von Heitmann „Praxis der Kraftwerk-Chemie“. In diesem Buch sollen die wichtigsten Grundlagen der in den oben genannten Werken ausführlich beschriebenen Erkenntnisse anschaulich in verkürzter Form, auch für Nichtfachleute verständlich dargestellt werden. Das Buch bietet aber auch dem Ingenieur die Möglichkeit sich schnell über die wesentlichen Probleme beim Kraftwerksbau und seines Betriebes zu informieren.

Hans-Günter Heitmann

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Kraftwerkstechnik	5
1.1 Kraftwerke mit Naturumlaufdampferzeuger	9
1.2 Kraftwerke mit Zwangsumlaufdampferzeuger	11
1.3 Kraftwerke mit Durchlaufdampferzeuger	12
1.4 Gasturbinenkraftwerke	14
1.5 Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren	16
1.6 Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktoren	22
1.7 Kernkraftwerke mit Schwerwasserreaktoren	25
1.8 Kernkraftwerke mit gasgekühlten Reaktoren	25
1.9 Kernkraftwerke mit natriumgekühlten Reaktoren	26
2 Betriebsbeeinflussung durch chemische Faktoren	27
2.1 Standort	28
2.2 Inhaltsstoffe des Wassers	28
2.3 Reaktivitätsregelung von Druckwasserreaktoren	32
3 Allgemeine Grundlagen der Wasserchemie	35
3.1 Korrosion	37
3.1.1 Säurekorrosion	39
3.1.2 Korrosionsstrom und Polarisation	42
3.1.3 Sauerstoffkorrosion	43
3.1.4 Passivität	45
3.1.5 Pourbaix-Diagramme	46
3.1.6 Rißkorrosion	48
3.1.7 Erosionskorrosion	49
3.1.8 Heißdampfoxidation	51
3.1.9 Heißwasseroxidation	52
3.2 Chemische Erläuterungen zur Wasserchemie	53
4 Wasserchemie der Kreisläufe	59
4.1 Fossil befeuerte Kraftwerksanlagen	60
4.2 Wasserchemie in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren ...	63
4.3 Wasserchemie in Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren ...	67
4.4 Chemie in Kernkraftwerke mit gasgekühlten Reaktoren	68
4.5 Chemie in Kernkraftwerken mit schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren	68

Wir beherrschen korrosive Medien.



®DIABON Rohrbündelwärmeaustauscher haben sich seit Jahrzehnten für die Wärmeübertragung von aggressiven Medien bewährt.

Unser umfassendes Leistungsangebot für die Chemische Technik und den Umweltschutz:

Apparate und Anlagenkomponenten aus ®DIABON, ®UCUFLOX und SPEZIALMETALLEN für hochkorrosive Anwendungen. Korrosionsschutzauskleidungen mit ®VULCOFERRAN, ®GENAKOR und ®UCUFLOX.

Business Unit
Process Equipment and Linings

SGL TECHNIK GmbH

Werner-von-Siemens-Straße 18
D-86405 Meitingen/Germany
Telefon +49 (8271) 83-1564
Telefax +49 (8271) 83-2101
Telex 53823 sgl mtg

BEISPIEL:

®DIABON Wärmeaustauscher

Der hochkorrosionsbeständige, kunstharzimpregnierte Graphit ®DIABON wurde von SGL TECHNIK gezielt für den Einsatz in sehr aggressiven Medien entwickelt. Beständig gegen nahezu alle organischen und anorganischen Säuren ist ®DIABON ideal für die Behandlung korrosiver Stoffgemische.

Für den sicheren Wärmeaustausch von korrosiven Medien fertigen wir:

- DIABON Rohrbündelwärmeaustauscher, auch mit Carbonfaserarmierung
- DIABON Blockwärmeaustauscher (kubische und zylindrische Bauformen)
- DIABON Plattenwärmeaustauscher (besonders kompakte Bauweise)
- DIABON Modulwärmeaustauscher zur Kühlung/Wiederaufheizung korrosiver Rauchgase
- DIABON Wärmeaustauscher bieten ein Höchstmaß an Betriebssicherheit.

® auf Unternehmungen der SGL CARBON GROUP eingetragene Marke



SGL CARBON GROUP

5	Chemische Verfahrenstechnik	71
5.1	Wasseraufbereitung	72
5.1.1	Zusatzspeisewasser	72
5.1.2	Kondensataufbereitung	78
5.1.3	Abflutwasser	82
5.1.4	Reaktorwasser	83
5.1.5	Brennelementbeckenwasser	84
5.2	Allgemeiner Abwässer	84
5.3	Radioaktive Abgaben	87
5.4	Verbrennungsabgase	88
5.5	Gesetze zur Emissionsbegrenzung	90
6	Kühlwasser	93
6.1	Hauptkühlwasser	94
6.2	Luftkühlung	100
6.3	Nebenkühlstellen	101
6.4	Generatorkühlkreisläufe	102
7	Trinkwasser	105
7.1	Meerwasser	106
7.1.1	Destillation	106
7.1.2	Umkehrosmose	108
7.1.3	Sonstige Verfahren	109
8	Abwasser	111
8.1	Radioaktive Abwässer	112
8.2	Abwasser aus Entschwefelungsverfahren	116
9	Chemische Maßnahmen während der Bau- und Montagezeit .	117
9.1	Chemische Reinigung	118
10	Wasseranalytik	121
11	Rauchgaschemie	125
11.1	Rauchgasentschwefelung	129
11.2	Rauchgasentstickung	137
12	Wasserchemie fossil befeuerter Kraftwerke	139
12.1	Chemische Maßnahmen während der Bau- und Montagezeit	140
12.2	Chemische Maßnahmen während der Inbetriebnahmephase	143
12.3	Chemie während des Betriebes	144
12.3.1	Schutzschichtbildung und -zerstörung	144
15	Chemie in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren	161
16	Chemie in Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren	169

17	Chemie in Kernkraftwerken mit gasgekühlten Reaktoren	173
18	Chemie in Kernkraftwerken mit natriumgekühlten Brutreaktoren SNR	175
19	Chemische Einflüsse auf Komponenten und Systeme während des Betriebes	177
19.1	Dampfturbinen	178
19.2	Gasturbinen	180
19.3	Turbinenkondensatoren	186
19.4	Wärmeaustauscher, Behälter und Rohrleitungen	191
19.5	Wasseraufbereitungsanlagen	192
20	Korrosionsschutz durch Beschichtungen	195
21	Konservierung	201
22	Brennstoffe	207
22.1	Feste Brennstoffe	208
22.2	Flüssige Brennstoffe	209
22.3	Gasförmige Brennstoffe	210
22.4	Nukleare Brennstoffe	211
23	Betriebsmittel	213
24	Dekontamination	217
	Schrifttum	221

Einleitung

Im Jahre 1884 hatten sich Werner von Siemens, Hermann und Wilhelm Foerster in Gutachten an die Reichsregierung für die Gründung eines „Instituts zur experimentellen Förderung der exakten Naturwissenschaft und Präzisionstechnik“ ausgesprochen. In seinem Schreiben vom April 1883 sprach Siemens davon, daß „die wissenschaftliche Form selbst nirgends Lebensberuf in der staatlichen Organisation“ ist, sie ist nur eine geduldete Privattätigkeit der Gelehrten neben ihrem Beruf, der Lehrtätigkeit. Daher würden, ergänzte er seine Ausführungen im April des nächsten Jahres, hochbegabte Männer... „im Unterrichtsdienste verbraucht werden“. Die Absicht aller dieser Gutachten war, neben den Universitäten und Technischen Hochschulen Laboratorien einzurichten, in denen unter Leitung begabter Forscherpersönlichkeiten diejenigen Experimentaluntersuchungen durchgeführt werden sollten, für die an den Hochschulen weder die Zeit noch die entsprechenden Einrichtungen oder Geldmittel vorhanden waren. Auf der 27. Hauptversammlung im Jahre 1886 griff der Verein Deutscher Ingenieure diese Pläne auf und befürwortete sie, so daß schließlich die staatliche Zustimmung erreicht und im Jahre 1887 in Berlin die Physikalisch-Technische Reichsanstalt gegründet wurde [1].

Es war naheliegend, auch für die Chemie ein ähnliches Institut in Vorschlag zu bringen. Eine im Oktober 1905 von Emil Fischer, Walther Nernst und Wilhelm Ostwald verfaßte und den in Frage kommenden Gesellschaften übermittelte Denkschrift legte darin nahe, sich für die Gründung einer derartigen Einrichtung einzusetzen. Die Obliegenheiten dieser kurz als Chemische Reichsanstalt bezeichneten Gründung sollte vornehmlich zur Bewältigung feinerer und nur mit großem Aufwand bestreitbarer wissenschaftlichen Aufgaben dienen. Am 7. März 1908 erfolgte daraufhin die Gründung des Vereins „Chemische Reichsanstalt“, der gerichtlich in Berlin-Mitte eingetragen wurde, mit dem Zweck, die wissenschaftliche und technische Chemie zu fördern.

Auch in der Kraftwerkstechnik hatte man erkannt, daß der sichere Betrieb von Kraftwerken in erheblichem Maße von der Kraftwerk-Chemie abhängig ist. Doch trotz aller Fortschritte auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik waren die Zusammenhänge auf dem Gebiet der Werkstoffkunde und der Wasserchemie nach dem ersten Weltkrieg noch weitgehend unklar. Die Schwierigkeiten bei der Dampferzeugung hatten 1920, ausgelöst durch eine schwerwiegende Dampferzeugerexplosion in einem Kraftwerk, dazu geführt, daß die Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) auf Grund von Rundfragen Anforderungen an das Dampferzeugerwasser stellte. Nachdem im gleichen Jahr die Vereinigung der Großkesselbesitzer, VGB, gegründet wurde, führte diese die Arbeiten fort. Von ihr wurde 1924 in Zusammenarbeit mit dem Wasserrohr-Kesselverband „Regeln für die Betriebsführung mit besonderer Berücksichtigung der Frage des Verhaltens des Wassers im Kessel“ aufgestellt. Zur weiteren Bearbeitung der chemischen Fragen wurde im Jahre 1925 der VGB-Speisewasserausschuß ins Leben gerufen, der zum ersten Mal am 18./19. September in Darmstadt tagte [2].

Dieser Ausschuß hat in den folgenden Jahrzehnten die Fragen der Kraftwerk-Chemie und die damit zusammenhängenden Korrosionsprobleme weitgehend

geklärt, so daß die Chemie im Kraftwerk heute nahezu restlos beherrscht werden kann. Daran haben außer der VGB viele Fachleute aus Hochschulinstituten, aus der Industrie und von den Kraftwerken selbst ihren Anteil beigetragen.

Die Bedeutung der Kraftwerk-Chemie für die Verfügbarkeit und Anlagensicherheit wurde im Laufe der Jahre weltweit erkannt und durch geeignete Maßnahmen in die Praxis umgesetzt [413]. Von der ESKIMO wurden Elemente eines Programms zum Management der Leistungen der Kraftwerk-Chemie zusammengestellt, die auf eigene Erfahrungen beruhen und den Ergebnissen internationaler Forschung entsprechen.

1 Kraftwerkstechnik

Die Entwicklung der Kraftwerk-Chemie war natürlich mit dem technischen Fortschritt der Kraftwerkstechnik eng verbunden. Letztere begann mit der Erfindung der Dampfmaschine durch James Watt im Jahre 1765. In der Anfangsphase der Dampftechnik dienten diese Maschinen überwiegend zur Durchführung chemischer Fabrikationsprozesse, in zunehmendem Maße aber auch zur Vereinfachung und Unterstützung mechanischer Prozesse. Erst mit der Entwicklung des Generators durch Werner von Siemens konnte die Dampferzeugung in Kombination mit einer Dampfturbine auch zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Damit waren die Voraussetzungen für eine rasante Entwicklung der Energieerzeugung gegeben.

Auch die Zusammenhänge zwischen Werkstoff, Korrosion und der Wasserzusammensetzung wurden langsam erkannt. Die bei der damaligen Dampferzeugung auftretenden Schwierigkeiten waren in erster Linie auf Härteablagerungen, dem sogenannten Kesselstein, zurückzuführen. Es wurde deshalb empfohlen, einen Dampferzeuger zum Zweck der gründlichen Reinigung von Kesselstein etwa jeden Monat außer Betrieb zu nehmen und intensiv zu reinigen. Um die dadurch bedingten Ausfälle zu vermeiden, bediente man sich bei den in den 20er Jahren bevorzugten Steilrohr- und Schrägrohrdampferzeugern mit Drücken bis zu 34 bar in zunehmendem Maße zur Aufbereitung des Zusatzspeisewassers durch Fällungsverfahren mit Kalk und Soda. Aufbauend auf die Beobachtungen von Way [3] und Thompson [4] im Jahre 1850, daß im Boden vorkommende natürliche Zeolithe, das heißt stark wasserhaltige Alkalitonerdesilikate, Calcium und Magnesium gegen Natrium auszutauschen vermögen, stellte Gans [5] Na-Al-Silikate durch Zusammenschmelzen von Feldspat, Wasserglas und Soda künstlich her. Durch diese synthetischen Austauschermittel mit dem Namen Permutite konnte das Speisewasser weitgehend enthärtet werden [6].

Ende des 19. Jahrhunderts wurde das erste Dampfkraftwerk in Berlin in Betrieb genommen. Der Betriebsdruck der Dampferzeuger wurde im Laufe der nächsten Jahre ständig erhöht. Ende der 20er Jahre wurde erstmals im Großkraftwerk Mannheim auf einen Betriebsdruck von 110 bar übergegangen. Die Dampferzeugeraustrittstemperatur lag bei 475 °C [7, 8].

Das Zusatzspeisewasser wurde in einer dreistufigen Verdampferanlage hergestellt, so daß dieses nahezu Destillatqualität hatte. Im gleichen Zeitraum wurde die Konditionierung des Dampferzeugerwassers mit Phosphat eingeführt, um dadurch einerseits eine bestimmte Alkalität einzustellen und andererseits Härteeinbrüche in Schlammform zu überführen und als solches über einen Teilstrom aus dem Dampferzeuger auszutragen [9 bis 14].

Um die gleiche Zeit begann die Entwicklung des BENSON-Dampferzeugers, in dem das Wasser bei überkritischem Druck verdampft wurde. Die erste überkritisch betriebene Anlage mit einem Betriebsdruck von 225 bar ging 1929 als Versuchsanlage im Siemens-Werk, Berlin-Siemensstadt in Betrieb. Diese Anlage war bis zum Ende des zweiten Weltkrieges in Funktion und wurde 1945 von den Russen demontiert und in Moskau wieder aufgebaut und zu Forschungszwecken betrieben.

Der erste kommerziell betriebene BENSON-Dampferzeuger mit einer Dampfleistung von 100 t/h nahm 1933 im Kraftwerk Langerbrügge in Belgien seinen Betrieb auf. Der überkritische Druck mußte allerdings hinter dem Dampferzeuger reduziert werden, da für diesen Druck noch keine Dampfturbinen zur Verfügung standen. Erst später wurde von Hans Gleichmann [30, 31] erkannt, daß der BENSON-Dampferzeuger auch unterkritisch betrieben werden kann, so daß sich eine Druckreduzierung erübrigte.

Die generelle Schaltung eines Blockkraftwerkes mit einer Leistung von 600 MW geht aus dem Wärmeschaltbild eines fossilbefeuerten Kraftwerkes, Bild 1, hervor. Das Schema kann als Beispiel für viele andere Kraftwerksschaltungen gelten, die mit ähnlichen Auslegungsdaten und Vorwärmschaltungen ausgeführt wurden. Zur Gewinnung der 600 MW Generatorleistung erzeugt der Dampferzeuger einen Dampfstrom von 520 kg/s bzw. 1870 t/h bei 180 bar und 535 °C. Nach der Entspannung im Hochdruckteil der Turbine wird der Dampf bei einem Trenndruck von 41 bar dem Dampferzeuger wieder zugeführt und von 319 auf 535 °C überhitzt. Die Zwischenüberhitzung bringt eine erhebliche Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades der Anlage, verringert die Nässe in den letzten Turbinenstufen und ermöglicht die Ausnutzung eines größeren Gefälles.

Das Speisewasser wird in einer 7-stufigen Regenerativvorwärmanlage durch Anzapfdampf aus der Turbine auf eine Temperatur von 250 °C erwärmt, bevor es in den Dampferzeuger eintritt. In diesem wird das Wasser durch die bei der Verbrennung frei werdende Wärme weiter aufgeheizt, verdampft und überhitzt.

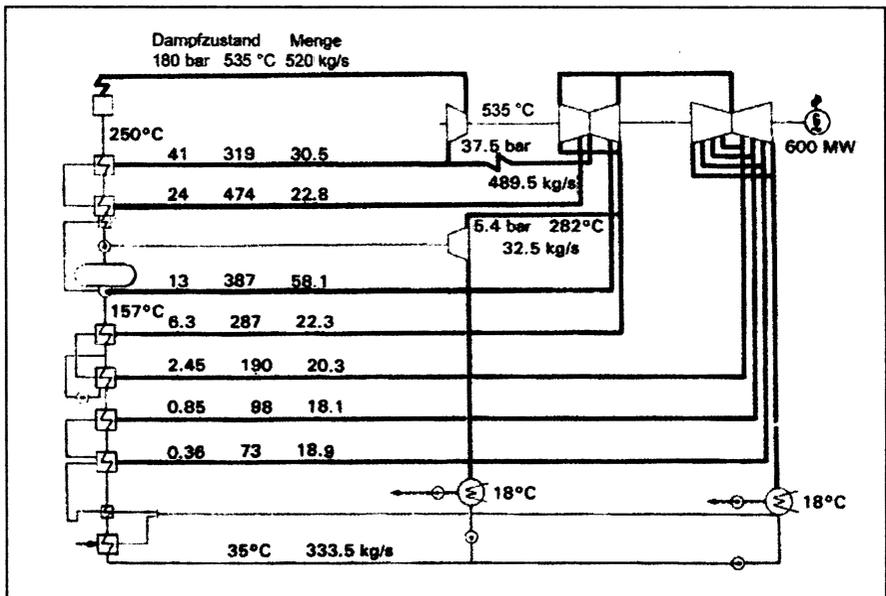


Bild 1: Wärmeschaltbild für ein fossil beheiztes Blockkraftwerk 600 MW

Im Niederdruckbereich wird das Kondensat in vier Vorwärmerstufen und einem Mischvorwärmer, der mit dem Speisewasserbehälter kombiniert ist, auf 186 °C erwärmt. Speisepumpen fördern das Kondensat aus dem Speisewasserbehälter durch zwei HD-Vorwärmerstufen in den Dampferzeuger. Das Nebenkondensat der Vakuumvorwärmer der Anzapfungen 1 und 2 strömt über einen Kondensatkühler in den Turbinenkondensator. Die Nebenkondensate aus den Wärmeaustauschern der Anzapfungen 3 und 4 werden mit Pumpen in die Hauptkondensatleitung eingespeist. Der Dampf für die Vollastpumpenturbine wird den Überströmleitungen vom MD- zum ND-Teil der Turbine entnommen.

Die bevorzugten Frischdampfdrücke bei Blockkraftwerken [29] liegen zwischen 165 und 250 bar, die Temperatur für Frischdampf und Zwischenüberhitzerdampf zwischen 525 und 540 °C. In den 50er Jahren wurden in der chemischen Industrie auch Kraftwerke mit Frischdampftemperaturen bis zu 650 °C errichtet. Dabei mußte der Endüberhitzer der Dampferzeuger infolge der begrenzten Temperaturbeständigkeit ferritischer Werkstoffe bis 560 °C aus austenitischem Material gefertigt werden.

Die Aufgabe von Industriekraftwerken besteht in der gesicherten Abgabe von Wärme in Form von Dampf und Heißwasser mit vorgegebenem Druck und vorgegebener Temperatur. Industrieanlagen benötigen die Wärme ohne Unterbrechung, da Betriebsstörungen schwerwiegende Folgen nach sich ziehen können. Sie sind daher häufig als Sammelschienenkraftwerke ausgeführt, um die Wärmeenergieerzeugung sicherzustellen.

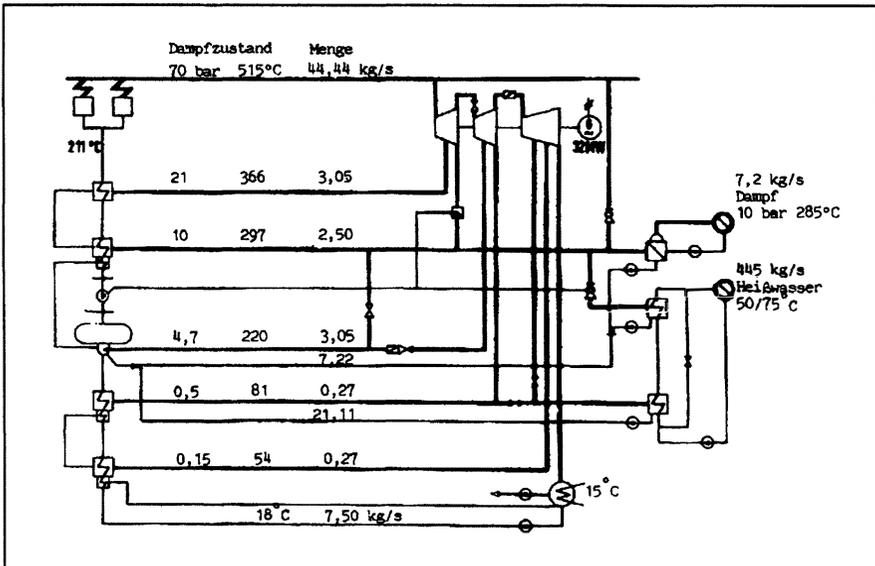


Bild 2: Wärmeschaltbild für ein Industriekraftwerk

Als Beispiel ist in Bild 2 das Wärmeschaltbild eines Industriekraftwerkes wiedergegeben. Für dieses werden 7,2 kg/s Dampf von 10 bar/225 °C und 445 kg/s Heißwasser von 75 °C benötigt. Zwei Dampfkessel erzeugen stündlich 160 t Dampf von 70 bar/550 °C und leiten ihn über Sammelschienen zur Turbine. Die Turbinenstufen und das Gefälle in der Turbine werden so gewählt, daß für die Abgabe der Wärme zur Industrierversorgung ein geeigneter Trenndruck entsteht. Vorzugsweise entnimmt man die großen Dampfmengen am Austritt einer Turbinenstufe, am Beispiel den Anzapfdampf von 10 bar für die Versorgung des Fabrikationsdampfes aus dem Abdampfteil der Hochdruckstufe. Das 10 bar-Netz stellt im Teillastbereich der Turbine die Erwärmung des Heißwassers sicher, wobei der Wärmeaustauscher Dampf über die Reduzier- und Kühlstation erhält. Normalerweise übernimmt der untere Wärmeaustauscher die volle Aufwärmspanne. Der hierfür notwendige Anzapfstrom von 21,11 kg/s wird aus dem Abdampfraum des Mitteldruckgehäuses der Turbine herausgeführt. Zur Sicherstellung der ungehinderten Versorgung sind die verschiedenen Drucknetze über Reduzierstationen miteinander verbunden. Die Vorwärmanlage wird von den fünf Turbinenanzapfungen mit Dampf versorgt oder bei abgeschalteter Turbine zweistufig über die Reduzierventile.

Die konstruktive Gestaltung eines Dampferzeugers ist weitgehend abhängig von der Art des benutzten Feuerungssystems und dem zur Verfügung stehenden Brennstoff. Die früher fast ausschließlich angewandte Rostfeuerung ist weitgehend durch die Staubfeuerung ersetzt worden. Lediglich in Müllkraftwerken ist die Rostfeuerung auch heute noch von Bedeutung. Bei Kohlenstaubfeuerungen wird die Trockenfeuerung mit trockenem Ascheabzug angewendet.

Bauart, Form und spezifische Größe eines Dampferzeugers werden wesentlich von der Art des verwendeten Brennstoffes beeinflußt. Der Grund liegt in dem teilweise recht unterschiedlichen Heizwert der Brennstoffe, der hauptsächlich durch verschiedene Asche- und Wassergehalte verursacht wird. Das Verhältnis der mittleren Heizwerte von Braunkohle zu Steinkohle und Öl liegt bei etwa 1:3:5. Demzufolge sind Braunkohle-Dampferzeuger wesentlich größer und aufwendiger als Steinkohle- oder Öldampferzeuger mit gleicher Dampfleistung. Die am häufigsten verwendeten Brennstoffe sind Erdgas, Heizöl, Braunkohle und Steinkohle. Mitunter kommen auch noch Gichtgas, Reichgas und Torf als Brennstoff zur Anwendung. Manche Dampferzeuger werden auch für Zweistoff-Gemischfeuerungen wie z.B. Öl-Gas oder Steinkohle-Gas ausgelegt. Darüber hinaus sind noch Abhitzeessel gebräuchlich, die zur Wärmeausnutzung, zur Gaskühlung und zur Kühlung heißer Bauteile dienen.

Bezüglich der Wasser-Dampfseite kommen heute im wesentlichen drei verschiedene Dampferzeugerarten [16, 17] zur Anwendung:

1.1 Kraftwerke mit Naturumlauddampferzeuger

Diese Bauart ist im unteren Druckbereich am meisten verbreitet und wird bis zu Drücken von 185 bar Trommeldruck angewendet. Der Wasserumlauf wird durch den Unterschied der spezifischen Gewichte von Wasser und dem Sattedampf-

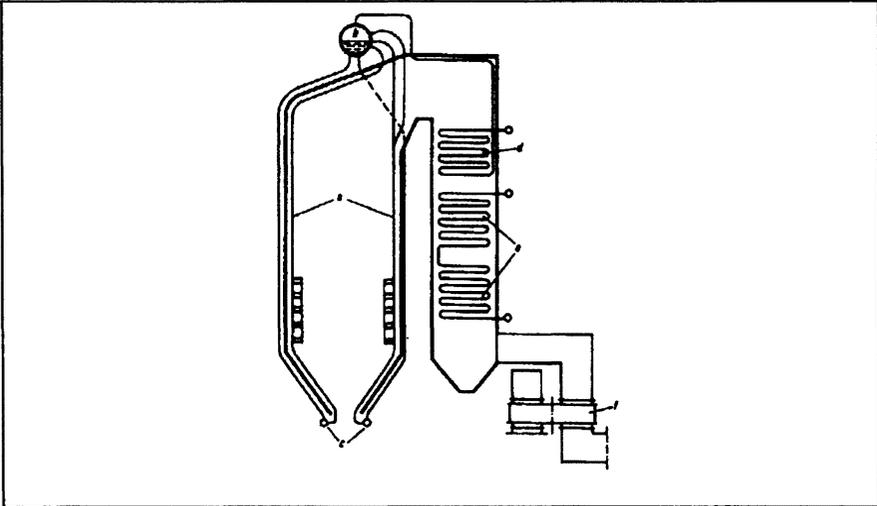


Bild 3: Naturumlaufdampferzeuger
 a = Feuerraum mit Strahlungsverdampfer, b = Obertrommel, c = Umkehrsammler, d = Überhitzer, e = Speisewasser-Vorwärmer, f = Lufterhitzer

Wassergemisch hervorgerufen. Der Verdampfungsteil eines solchen Dampferzeugers besteht aus einer Obertrommel, einem möglichst senkrecht geführten Steigrohrsystem und unbeheizt verlegten Fallrohren. Den schematischen Aufbau eines Naturumlaufdampferzeugers zeigt Bild 3. Die Einführung der Steigrohre in die Obertrommel kann unter- oder oberhalb des Wasserspiegels vorgenommen werden. Das Wasser fließt über die nicht beheizten Fallrohre in die unteren Umkehrsammler über den Feuerraum mit dem Strahlungsverdampfer zurück in die Obertrommel. In dieser findet eine Trennung des Wasser-Dampfgemisches statt, wobei der Dampf zu den Überhitzern weitergeleitet wird.

Ein ausreichender Wasserumlauf ist bei einem Naturumlaufdampferzeuger die Voraussetzung für eine betriebssichere Arbeitsweise. Darüber hinaus ist eine einwandfreie Trennung von Wasser und Dampf in der Obertrommel sicherzustellen, um ein Mitreißen von salzangereichertem Kesselwasser in die Überhitzer zu vermeiden. Zur Erreichung dieser Forderung sind eine Reihe von Trommeleinbauten entwickelt worden. Um eine ausreichende Dampfreinheit zu gewährleisten, wird darüber hinaus die Dampfraumbelastung, d.h. das Verhältnis des stündlich im Verdampfer erzeugten Sattdampfvolumens zum Dampfrauminhalt der Trommel, begrenzt. Die Beziehungen zwischen Dampfraumbelastung, Salz und Kieselsäuregehalt im Dampf ist in Abhängigkeit vom Druck in Bild 4 wiedergegeben. Die Anforderungen an die Qualität des Speisewassers werden dabei in erster Linie vom Betriebsdruck des Dampferzeugers und seiner Heizflächenbelastung in der Brennkammer bestimmt.

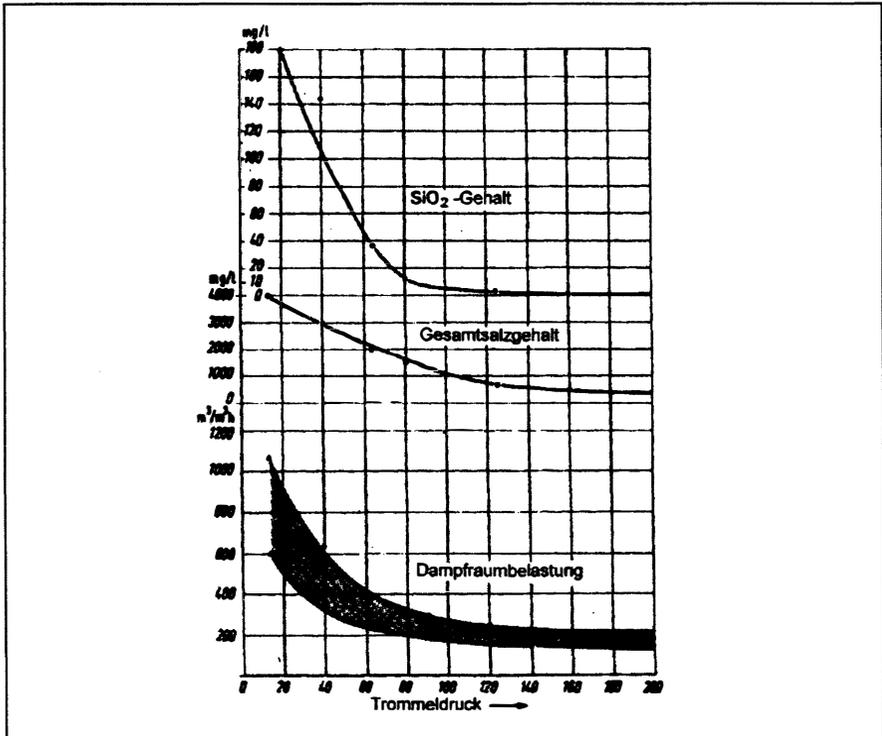


Bild 4: Zulässige Dampfraumbelastung, Gesamtsalzgehalt- und SiO₂-Gehalt

1.2 Kraftwerke mit Zwangsumlaufdampferzeuger

Diese Bauart ist dem Naturumlaufdampferzeuger mit weniger großen, außen liegenden Fallrohren sehr ähnlich, da die Verdampferrohre auf allen Wänden der Brennkammer ebenfalls senkrecht angeordnet und parallel geschaltet sind. Der Unterschied besteht besonders darin, daß zur Unterstützung des Wasserumlaufes zwischen Trommel und Verdampfer eine Umwälzpumpe angeordnet ist. Dadurch können die Rohrdurchmesser verkleinert und die Wasser-Dampf-Trennung in der Trommel durch wirkungsvollere Abscheider mit größerem Druckverlust verbessert werden. Zur Erzielung einer guten Trennung von Wasser und Dampf werden in der Trommel stets Zentrifugalabscheider eingebaut. Die Umlaufzahl liegt zwischen 4 und 6. Diese Bauart wurde unter dem Namen „La Mont“, dem Erfinder dieses Verdampfersystems, bekannt.

Gemäß Bild 5 läuft das Wasser von einer Trommel der Umwälzpumpe zu und wird von dieser in die einzelnen Verteiler des Verdampfersystems gefördert. Das in den Verdampferrohren erzeugte Wasser-Dampf-Gemisch wird entweder direkt oder über Zwischensammler in die Trommel des Dampferzeugers eingeleitet. Hier

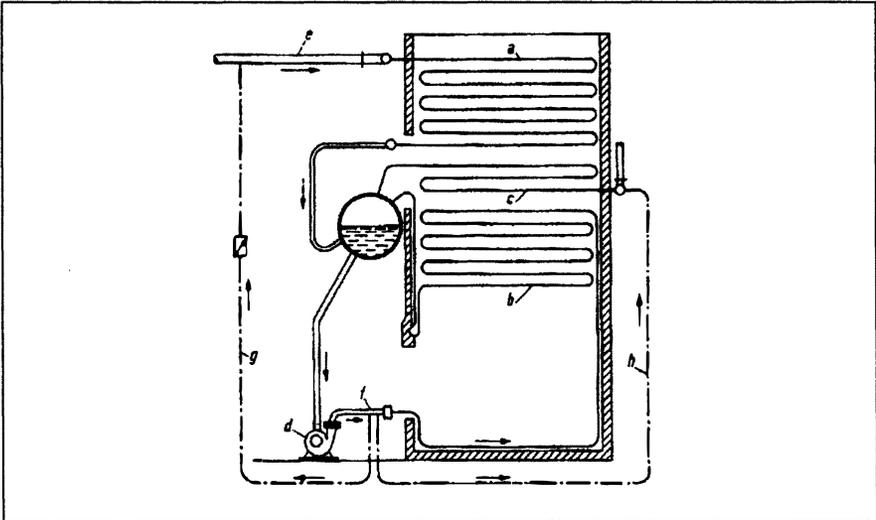


Bild 5: Schaltschema des La Mont-Dampferzeugers
 a = Speisewasservorwärmer, b = Verdampfer, c = Überhitzer, d = Umwälzpumpe,
 e = Speiseleitung, f = Druckleitung, g = Umwälzleitung zur Kühlung von a beim
 Anfahren und beim Teillastbetrieb, h = Umwälzleitung zur Kühlung von c beim
 Anfahren

scheiden sich Dampf und Wasser. Das abgeschiedene Wasser nimmt erneut am Umlauf teil, während der Dampf zum Überhitzer strömt. Die Trommeldrücke dieser Dampferzeuger liegen zwischen 130 und 200 bar, die Frischdampf- und Zwischenüberhitzertemperaturen betragen bis zu 570 °C.

1.3 Kraftwerke mit Durchlaufdampferzeuger

Bei dieser Bauart wird das Wasser in direktem Durchlauf verdampft, eine Trommel zur Trennung von Dampf und Wasser ist daher nicht erforderlich. Die direkte Durchlaufverdampfung verlangt allerdings ein von Salzen und Korrosionsprodukten freies Speisewasser, da sich diese Stoffe bei Überschreitung der Dampflichkeit im letzten Teil der Verdampfungszone abscheiden können. Durchlaufdampferzeuger werden sowohl nach dem BENSON- als auch nach dem SULZER-Prinzip (Bild 6) gebaut. Beim BENSON Dampferzeuger wird das eintretende Speisewasser vorgewärmt, verdampft und der Dampf anschließend überhitzt. Ein charakteristisches Merkmal dieses Dampferzeugers war lange Zeit hindurch die Restverdampfungszone, die zwecks gefahrloser Ablagerung der Restsalze in einem mäßigen Temperaturbereich angeordnet wurde. Die abgelagerten Salze wurden dann gelegentlich während eines Abstell- und Abfahrvorganges herausgespült. Mit der Anwendung von Vollentsalzungsanlagen zur Zusatzspeisewasseraufbereitung und von Kondensatentsalzungsanlagen konnte diese Heizflächenanordnung entfallen.

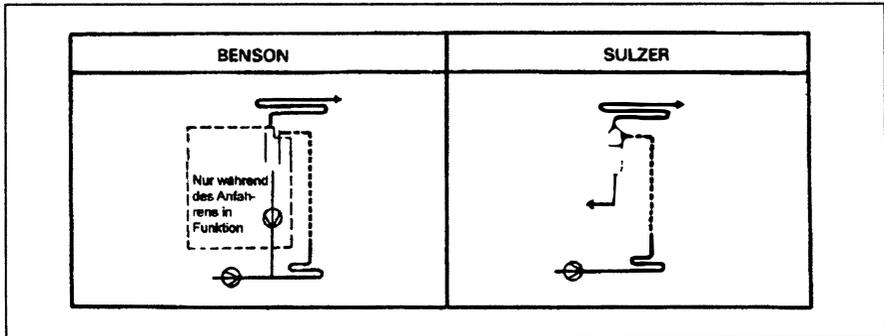


Bild 6: Prinzip Durchlaufdamperzeuger

Während sich beim BENSON-Dampferzeuger der Verdampfungsendpunkt in Abhängigkeit von Last, Brennstoff und Verschmutzung örtlich verändern kann, wird beim SULZER-Prinzip der Verdampfungsendpunkt in einem Abscheidegefäß dadurch festgehalten, daß der Durchfluß durch den Verdampfer um einige Procente gegenüber der Dampfleistung erhöht wird. Das abgeschiedene Wasser wird über Entspanner wieder dem Speisewasserbehälter zugeführt.

Durchlaufdamperzeuger werden sowohl bei unterkritischen als auch bei überkritischen Dampfdrücken verwendet. Im überkritischen Bereich geht das SULZER-

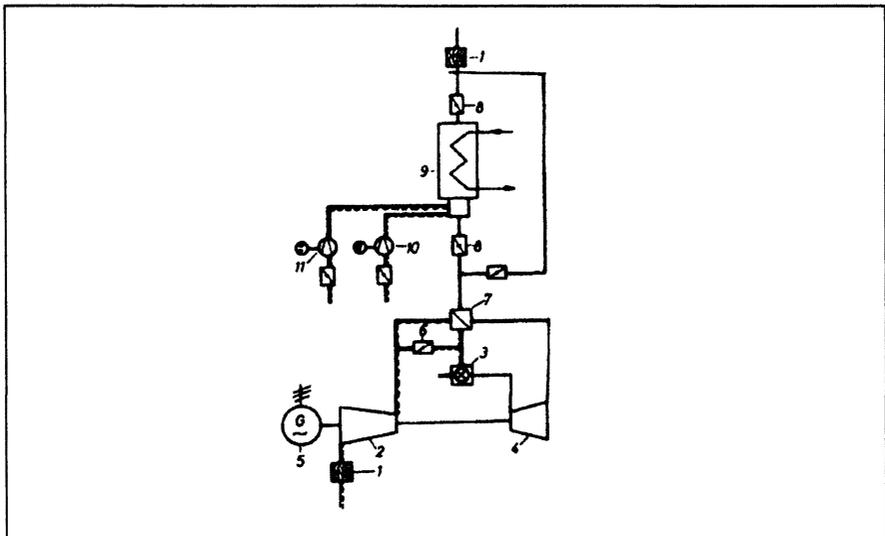


Bild 7: Wärmeschaltplan für ein Gasturbinenkraftwerk
 1 = Schalldämpfer, 2 = Verdichter, 3 = Brennkammer, 4 = Turbine, 5 = Generator,
 6 = Bypassklappe, 7 = Luftvorwärmer, 8 = Stoßklappe, 9 = Wasserwärmtauscher mit Zusatzheizung, 10 = Frischluftgebläse, 11 = Kühlluftgebläse

Prinzip in das BENSON-Prinzip über. Bei manchen überkritischen Anlagen wird dem Durchlauf ein Zwangsumlauf überlagert, wobei ein Teil des Mediums am Austritt der Brennkammer mit Speisewasser in einer Trommel gemischt und durch eine Pumpe dem Verdampfer wieder zugeführt wird. Durch diesen zusätzlichen Zwangsumlauf ist eine senkrechte Rohranordnung in der Brennkammer möglich. Zur Regelung der Heißdampf­temperatur wird in den Überhitzer Wasser eingespritzt. Dieses Wasser muß die gleiche Qualität wie das Speisewasser haben, so daß vorwiegend Speisewasser zur Einspritzung verwendet wird.

1.4 Gasturbinenkraftwerke

Gasturbinenkraftwerke [18, 19] werden in erster Linie zur Spitzenstromerzeugung verwendet. Je nach Bedarf können sie mit Einrichtungen zur Warmwasserversorgung oder mit einem Dampfturbinenprozess kombiniert werden. Einige Beispiele mögen den Aufbau eines Gasturbinenkraftwerkes näher erläutern.

Bild 7 zeigt den Wärmeschaltplan eines Gasturbinenkraftwerkes, in dem die Abgase der Gasturbine zur Luftvorwärmung und zur Warmwasserversorgung die-

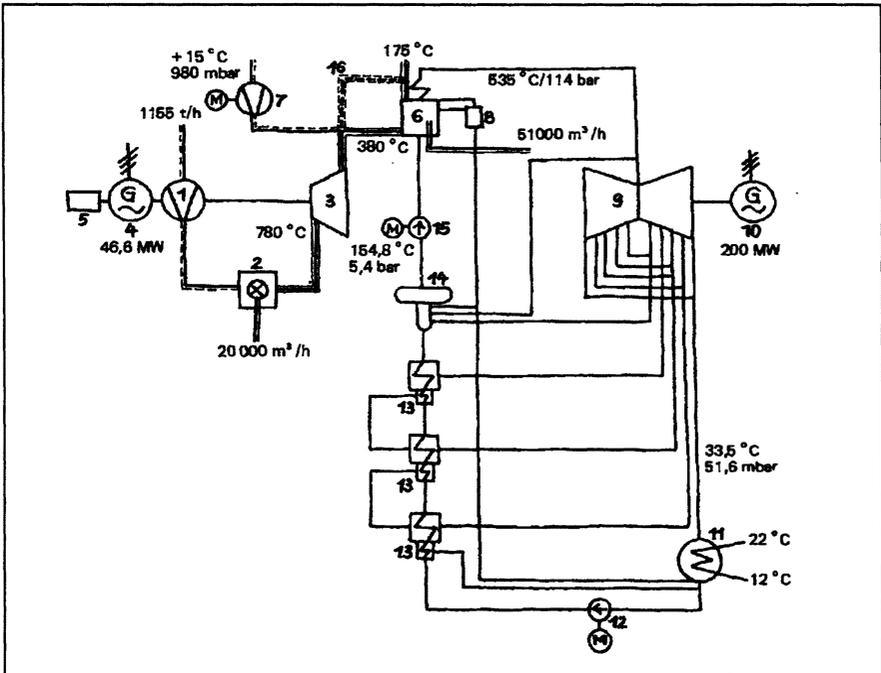


Bild 8: Vereinfachter Wärmeschaltplan für einen kombinierten Gas-Dampfprozeß
 1 = Verdichter, 2 = Turbinenbrennkammer, 3 = Gasturbine, 4 = Generator, 5 = Anfahr­satz, 6 = Dampf­zeu­ger, 7 = Frischluft­ge­bläse, 8 = Anfahr­fla­sche, 9 = ein­ge­häu­sig­e Dampf­tur­bine, 10 = Generator, 11 = Dampf­tur­binen­kon­den­sa­tor, 12 = Kon­den­sa­tor­pum­pe, 13 = ND-Dampf­re­ge­ra­tiv-Vor­wär­mer, 14 = Speisewasser­be­häl­ter mit Ent­ga­ser, 15 = Speisewasser­pum­pe, 16 = By­pass-Lei­tung

nen. Die erforderliche Verbrennungsluft wird im Verdichter komprimiert, im Luftvorwärmer erwärmt und in der Brennkammer mit dem Brennstoff - Erdgas oder Leichtöl - vermischt. Die Verbrennungsgase treten mit etwa 850 °C in die Gasturbine ein und verlassen diese mit etwa 350 °C. Im nachgeschalteten Wärmeaustauscher, der auch mit Zusatzfeuerung betrieben werden kann, findet die Warmwassererzeugung statt.

Den Wärmeschaltplan eines kombinierten Gas-Dampfturbinenprozesses zeigt Bild 8 [20]. Die Anlage besteht aus einem 50 MW-Gasturbosatz und einem 220 MW-Dampfturbinenblock ohne Zwischenüberhitzung und ohne Hochdruckvorwärmung. Die Anlage ist so ausgeführt, daß Dampf- und Gasturbosatz sowohl getrennt als auch kombiniert betrieben werden können.

Bei Vollast verläßt das Rauchgas mit 780 °C die Brennkammer der Gasturbine. Da die Verbrennung in der Brennkammer mit erheblichem Luftüberschuß abläuft, enthält das Rauchgas noch etwas mehr als 18 Gewichts-% Sauerstoff. Es wird deshalb, nachdem es sich in der Gasturbine entspannt und auf etwa 380 °C abgekühlt hat, als Verbrennungsluft in den Dampferzeuger eingeleitet. Dieser

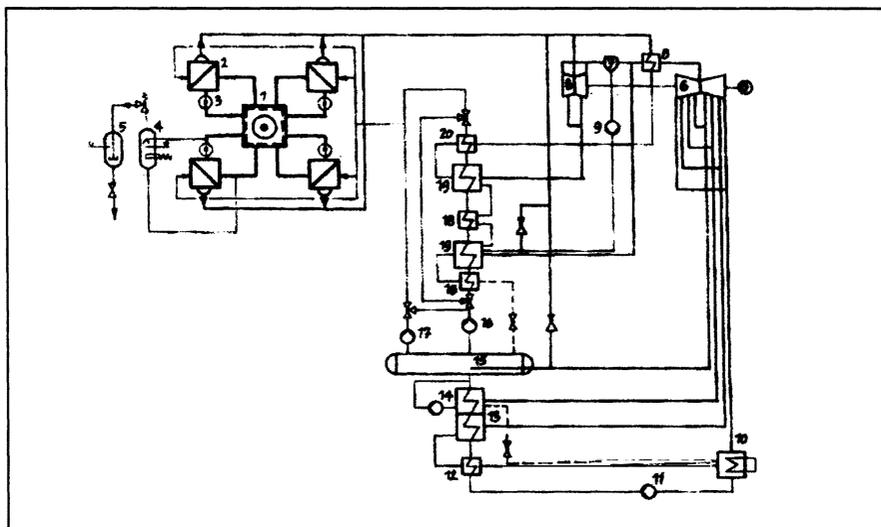


Bild 9: Vereinfachter Wärmeschaltplan des 1300-MW-Standardkernkraftwerks mit Druckwasserreaktor

— Primärkreislauf
 — Wasser-Dampf-Kreislauf

1 = Reaktor, 2 = Dampferzeuger, 3 = Hauptkühlmittelpumpe, 4 = Druckhalter, 5 = Abblasebehälter, 6 = Turbosatz, 7 = Wasserabscheider, 8 = Zwischenüberhitzer, 9 = Wasserabscheider, Kondensatpumpe, 10 = Kondensator, 11 = Hauptkondensatpumpenanlage, 12 = ND-Vorwärmer-Kondensatkühler, 13 = ND-Vorwärmer, 14 = ND-Vorwärmer-Kondensatpumpe, 15 = Speisewasserbehälter, 16 = Speisewasserpumpenanlage, 17 = An- und Abfahrpumpenanlage, 18 = HD-Vorwärmer-Kondensatkühler, 19 = HD-Vorwärmer, 20 = ZÜ-Kondensatkühler