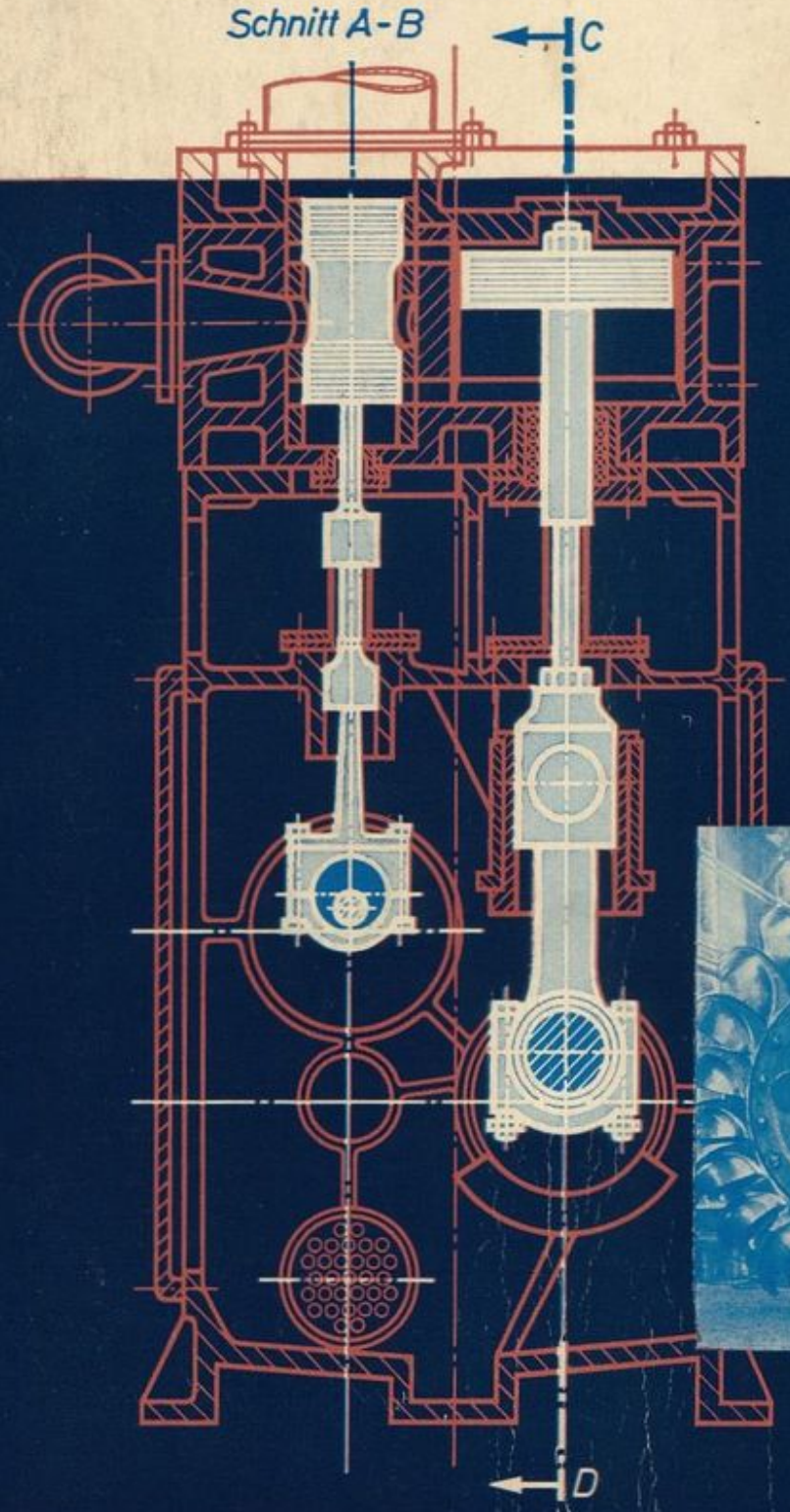
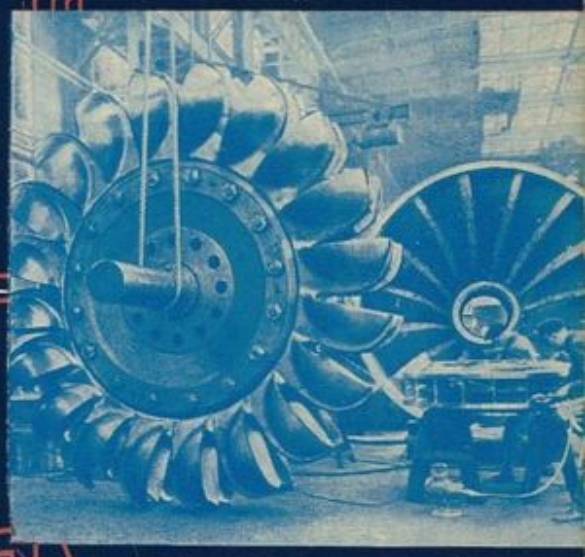
Fachkunde für Maschinenschlosser

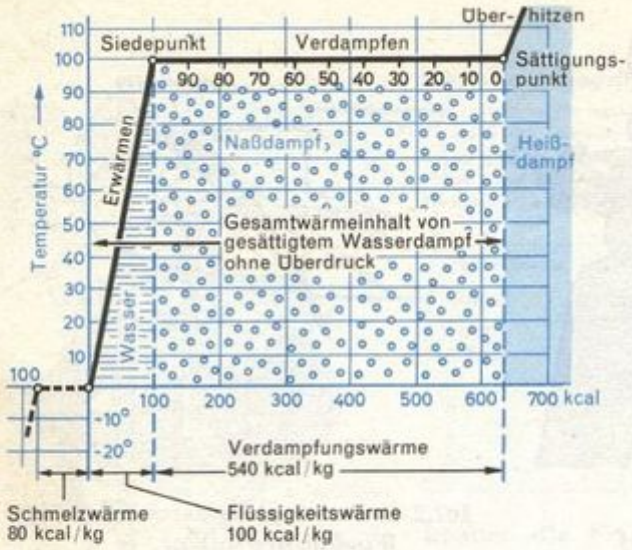
2: Maschinenteile und Zusammenbau – Aufstellen und Einbau von Maschinen – Kraftmaschinen – Elektrotechnik

Erwin Wackermann

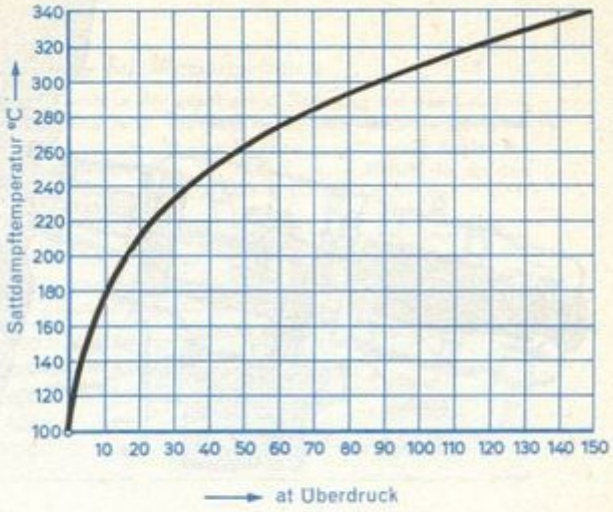




8432



108,1 *Verdampfen von Wasser*



108,2 *Die Siedetemperatur steigt mit dem Druck an*

IV. Dampfkraftanlagen

1. Die Dampferzeugung

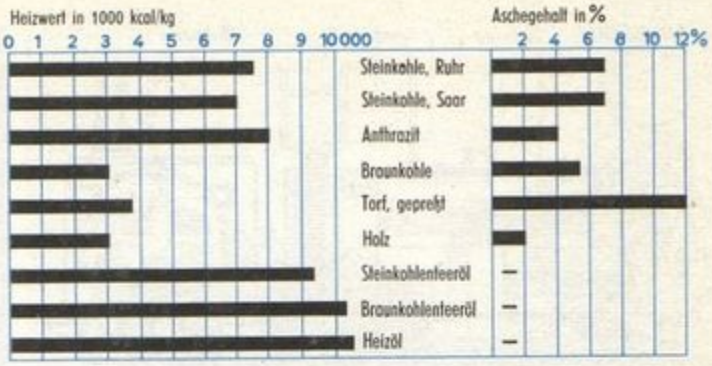
Für die Erwärmung von 1 kg Wasser um 1° C ist 1 kcal (Kilokalorie) nötig.

Die zugeführte Wärme heißt Flüssigkeitswärme. Bei normalem Luftdruck siedet das Wasser bei 100° C. Es müssen also 100 kcal/kg zugeführt werden, bis Wasser von 0° C siedet. Ist der Siedepunkt erreicht, bilden sich Dampfblasen, die im Wasser nach oben steigen. Weitere zugeführte Wärme, die Verdampfungswärme, läßt das Wasser verdampfen. Bei ständiger Wärmezufuhr werden solange Dampfblasen abgeschieden, bis alles Wasser verdampft ist. Die Siedetemperatur des Wassers ändert sich dabei nicht! Die zugeführte Verdampfungswärme beträgt 540 kcal/kg (**108,1**).
Umschließt ein Gefäß (Kessel) Wasser, steigt der Druck im Gefäß an, sobald Dampf erzeugt wird. Zugleich steigt aber auch die Siedetemperatur des Wassers (Tabelle).

Wärmeinhalt und Siedetemperatur bei verschiedenen Dampfdrücken								
Dampfdruck	atü	0	1	10	20	30	50	100
Siedetemperatur	° Cels	100	120	183	214	234	264	310
Gesamtwärmeinhalt	kcal/kg	639	646	664	669	669,5	667	664

Bei höheren Drücken ist also der Gesamtwärmeinhalt nur wenig höher als bei niedrigen. Mit nur wenig zusätzlicher Wärme entsteht hochgespannter Dampf, der dann in Maschinen ein Mehrfaches an Arbeit leistet. Darum erzeugt man zunehmend Hochdruckdampf.

Der erzeugte Dampf heißt Naßdampf, weil er noch mitgerissene Wasserteilchen trägt. Erst in einem hochgelegenen Sammler bleiben die schweren Wasserteilchen unten zurück. Oben sammelt sich trockener Dampf, der Sattdampf. Schon bei geringster Abkühlung scheidet er im Dampfrohr Wasser ab; er kondensiert und verliert so einen Teil seines Arbeitsvermögens. Um dies zu vermeiden, wird der Sattdampf in einem besonderen nachgeschalteten Rohrsystem, dem Überhitzer, zusätzlich erhitzt und in Heißdampf verwandelt. Auch das Kesselspeisewasser wird möglichst hoch vorgewärmt.



109,1 *Brennstoffe bewertet man nach Heizwert und Aschegehalt*

Hoher Heizwert verringert die Transportkosten, Bunkereinrichtungen und Mahlanlagen; geringer Aschegehalt ist im Kesselbetrieb günstig.

2. Die Verbrennung

Feste, flüssige oder gasförmige Brennstoffe liefern die nötige Wärmeenergie. Vorwiegend werden Stein- oder Braunkohle verwendet; für Schiffskessel fast nur Öl. Holz und Torf sind nur am Erzeugungsort wirtschaftlich. Der Maßstab für die Güte eines Brennstoffs ist sein Heizwert. Er wird in kcal/kg, bei Brenngasen in kcal/m³ gemessen.
Heizwert ist die Wärmemenge, die bei Verbrennung von 1 kg (1 m³) Brennstoff frei wird.

Kohlen bewertet man ferner nach ihrem unterschiedlichen Aschegehalt. Gasreiche (fette) Kohlen zünden gut, brennen leicht und mit langer Flamme, neigen zum Rußen. Gasarme (magere) Kohlen zünden schwerer und verbrennen mit kurzer Flamme. Für niedrig beanspruchte Kessel genügt Förderkohle.

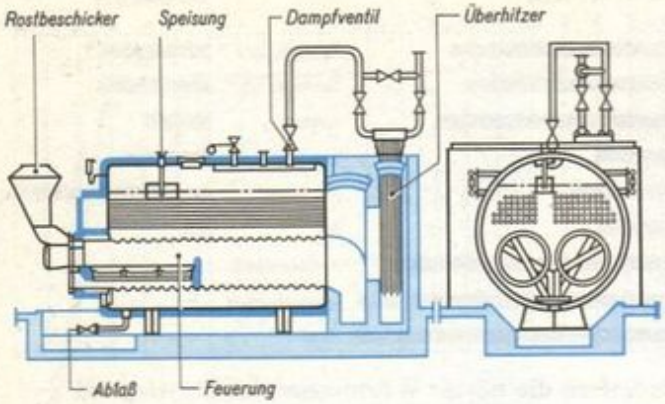
Sorten:	Förderkohle: unsortiert, wie die Förderung sie bringt,	Nußkohle I bis V:	80 · · · 10 mm groß,
		Kohlengrus (Grieß):	Korngröße 3 · · · 10 mm,
	Stückkohle: über 80 mm groß,	Kohlenstaub (gemahlen):	Korngröße 3 · · · 0 mm.

Flüssige Brennstoffe (Heizöl) haben einen hohen Heizwert. Große Energiemengen lassen sich daher auf kleinstem Raum (Schiffe) bunkern. Kohlenstaub gefeuerte Kessel haben meist eine Ölfeuerung zum Anheizen.
Gasförmige Brennstoffe sind in der Wirtschaft selten. Bei Großdieseln gibt es Abhitzekessel, die mit den Motorabgasen (600 · · · 700° C) geheizt werden.

Der Verbrennungsvorgang. Brennstoffe bestehen aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Wasser und Asche. Neu zugeführter Brennstoff nimmt zunächst Wärme auf. Nacheinander werden Wasser und die flüchtigen gasförmigen Bestandteile ausgetrieben und letztere im Rauchgasstrom verbrannt. Sobald der Brennstoff seine Zündtemperatur erreicht, verbrennt er und entwickelt Rauchgase, die sich bei der hohen Feuerraumtemperatur stark ausdehnen und durch den Kamin nach oben steigen. Manchmal künstlicher Zug nötig. Auf diese Weise erhält die Feuerung immer frische Verbrennungsluft. Eine vollständige Verbrennung setzt voraus: 1. genügend hohe Temperatur im Feuerraum; 2. genügend Luft; 3. Brennstoff und Luft gut durchmischt (Verwirbelung der Rauchgase).
Die Menge der nötigen Verbrennungsluft hängt von Brennstoffart und -sorte ab. Luftmangel führt zu unvollständiger Verbrennung. Luftüberschuß mindert die Feuerraumtemperatur und den Kesselwirkungsgrad. Eine gute Verbrennung erfolgt rauchfrei. Sie wird durch die Analyse der Rauchgase nachgewiesen; je höher der Gehalt an Kohlendioxyd (CO_2), und je weniger Kohlenoxyd (CO), desto besser die Verbrennung.

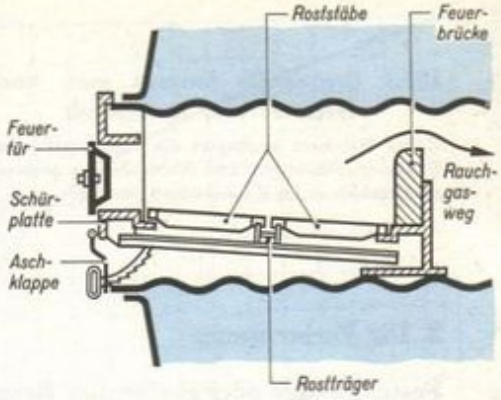
3. Dampfkessel

Dampfkessel nehmen die Wärmeenergie der Verbrennungsgase auf und verdampfen damit Wasser. Die Wärme wird übertragen durch die direkte Berührung der Verbrennungsgase mit den Kesselwandungen, Rohren usw. und durch die Strahlung auf die Kesselteile. Bei älteren Kesseln spielt die Berührungswärme die Hauptrolle, bei neueren die Strahlungswärme. Die Dampfleistung des Kessels hängt ab von der Größe der wärmeaufnehmenden Kessel- (Heiz-) und der Rostfläche, auf der der Brennstoff verbrennt. Beide Flächen müssen in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen.



110,1 *Flammrohrkessel mit Planrostfeuerung*

Dreizugkessel mit Planrostfeuerung und Überhitzer, vollständig wärmeisoliert. Die Rauchgase durchziehen zuerst das Flammrohr, kehren dann im zweiten Zug (die Hälfte der Rauchrohre) um. Im dritten Zug (andere Hälfte der Rauchrohre) werden sie wieder zurückgeführt, gehen durch den Überhitzer und verlassen den Kessel durch den Kamin.



110,2 *Planrostfeuerung in einem Flammrohrkessel*

Für kleinere Kessel, bei denen ein Heizer noch den Kohlebedarf durch Aufschaufeln decken kann. Der Rost muß alle 4 oder 6 Stunden abgeschlackt werden.

Rauchrohrkessel

Für kleine bis mittlere Leistungen werden Rauchrohrkessel gebaut. Als ortsfeste Kessel, als Schiffs- und Lokomotivkessel bestehen sie aus mehreren zusammengenieteten Schüssen. An den Enden sind Böden. Durch den Kessel hindurch geht ein gewelltes Flammrohr (oder mehrere), um eine möglichst große Heizfläche zu bekommen. In dem Flammrohr sitzt die Feuerung, meist eine Planrostfeuerung (**110,2**). Die Heizgase streichen zuerst durch das Flammrohr, dann im weiteren Verlauf durch enge Rauchrohre. Dabei wird die Richtung ein- oder mehrmal gewechselt.

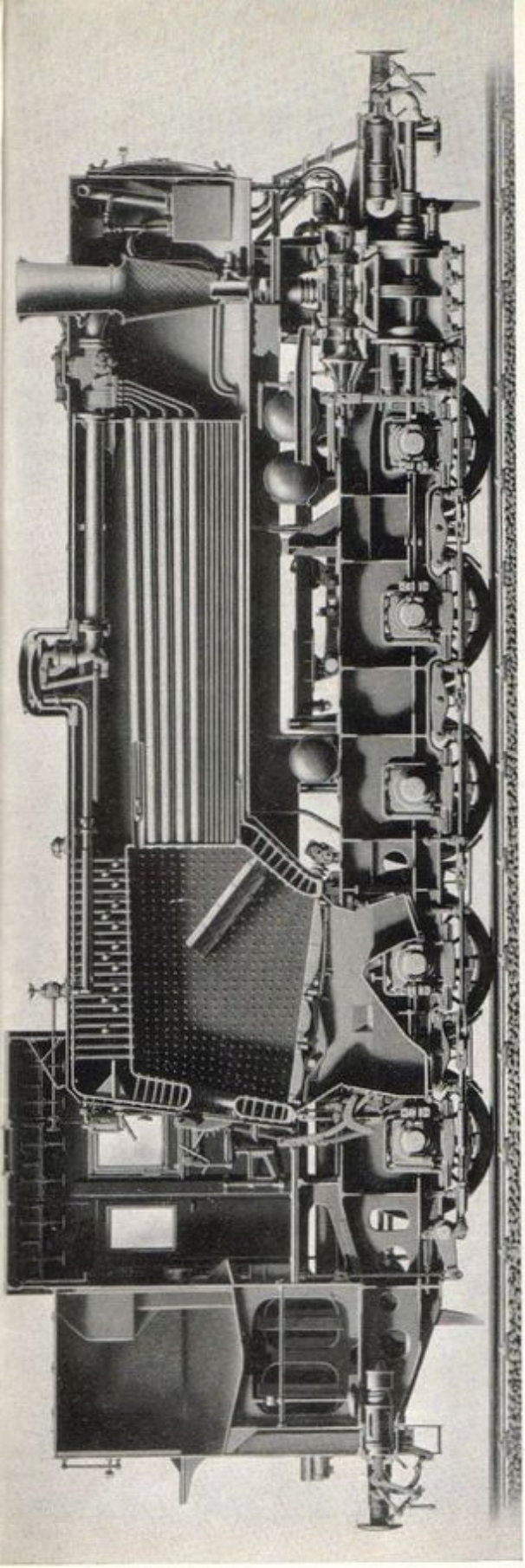
Der Überhitzer liegt im Rauchgaszug an einer Stelle hoher Rauchgastemperatur und besteht aus einzelnen Rohrelementen, die durch Rauchrohre mit größerem Durchmesser führen (Tafel bei S. 110), oder aus einem Rohrbündel, das geschlossen im Rauchgasstrom liegt (**110,1**). Der Naßdampf wird dem Dampfsammler entnommen und strömt durch den Überhitzer. Dort wird er überhitzt und verläßt den Kessel als Heißdampf.

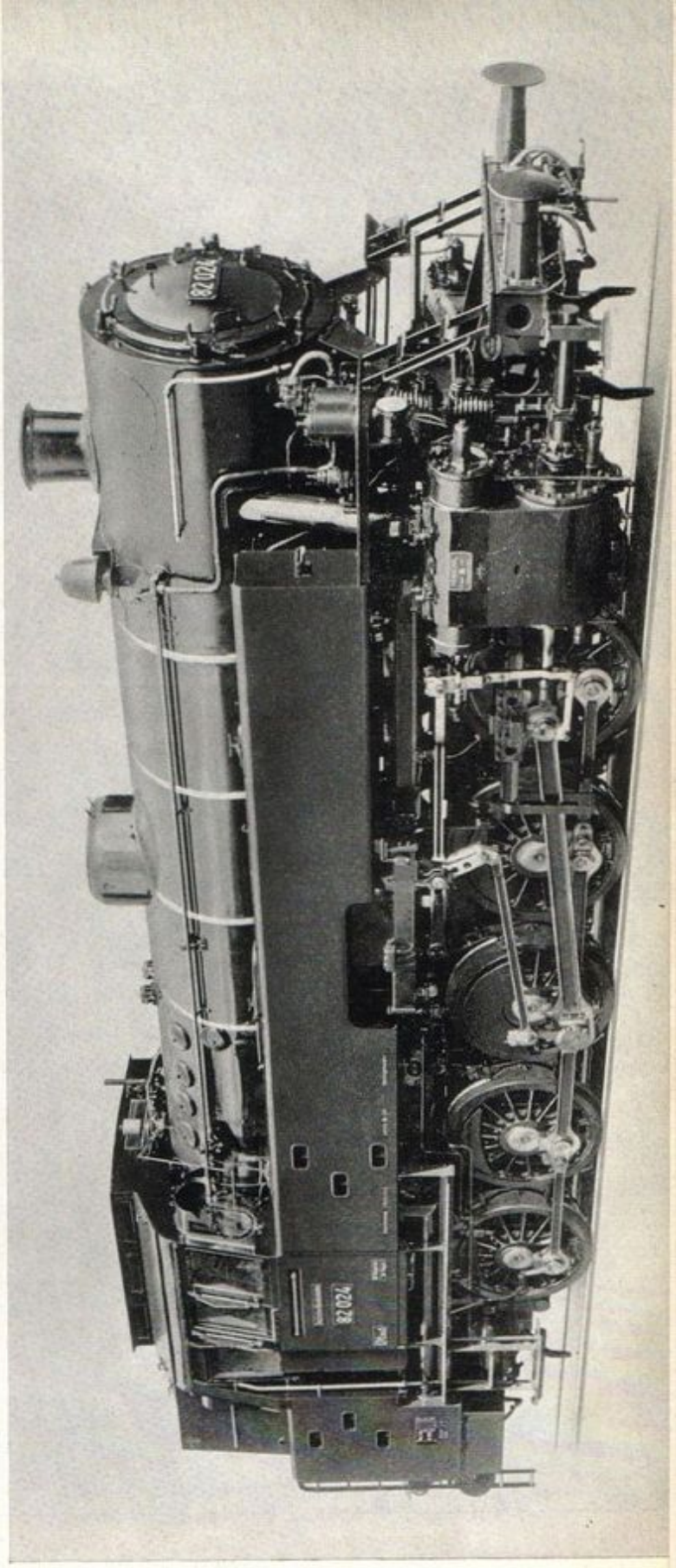
Sicherheitsvorrichtungen. Der große Wasserinhalt, der Explosionen gefährlich macht, verlangt viele Sicherheitsvorrichtungen. Nötige Armaturen zur Kesselausrüstung:

1. doppelte Speisevorrichtung
2. Dampfabsperrventil
3. Sicherheitsventil
4. Speiseventil (Rückschlag-)
5. zwei Wasserstandszeiger
6. Ablaßvorrichtung
7. Manometer mit Kontrollflansch
8. Thermometer

Vor- und Nachteile der Rauchrohrkessel

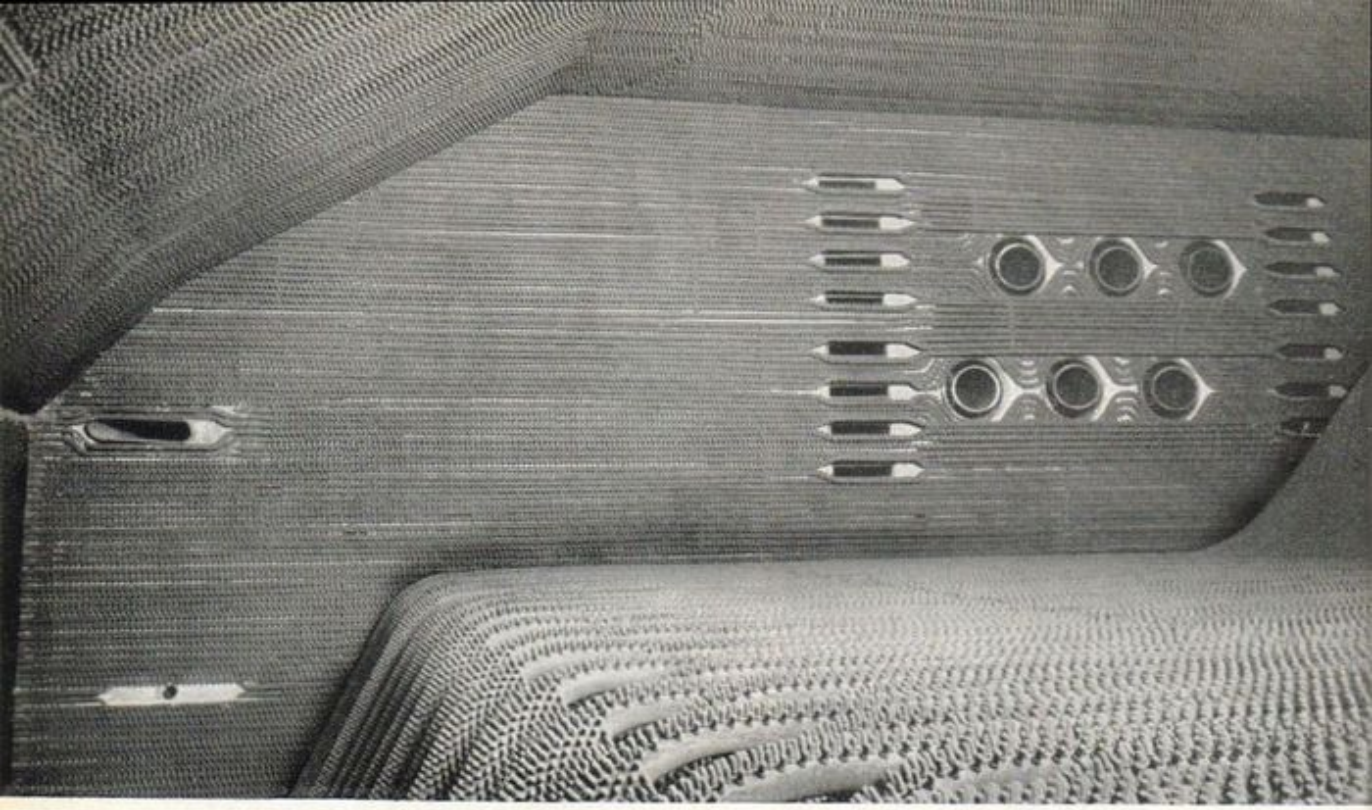
1. Der große Wasserinhalt ermöglicht eine starke Speicherung. Belastungsschwankungen werden leicht aufgenommen.
2. Kessel ist leicht zu reinigen, da durch Mannlöcher zugänglich. Deshalb werden an die Güte des Speisewassers keine hohen Anforderungen gestellt.
3. Anheizzeiten vom kalten Kessel bis zur vollen Dampfleistung sind lang; 4···12 Stunden, je nach Kesselgröße.
4. Bauart ist nur für kleine bis mittlere Einheiten (Dampfleistung bis ca. 10 t/h) wirtschaftlich.

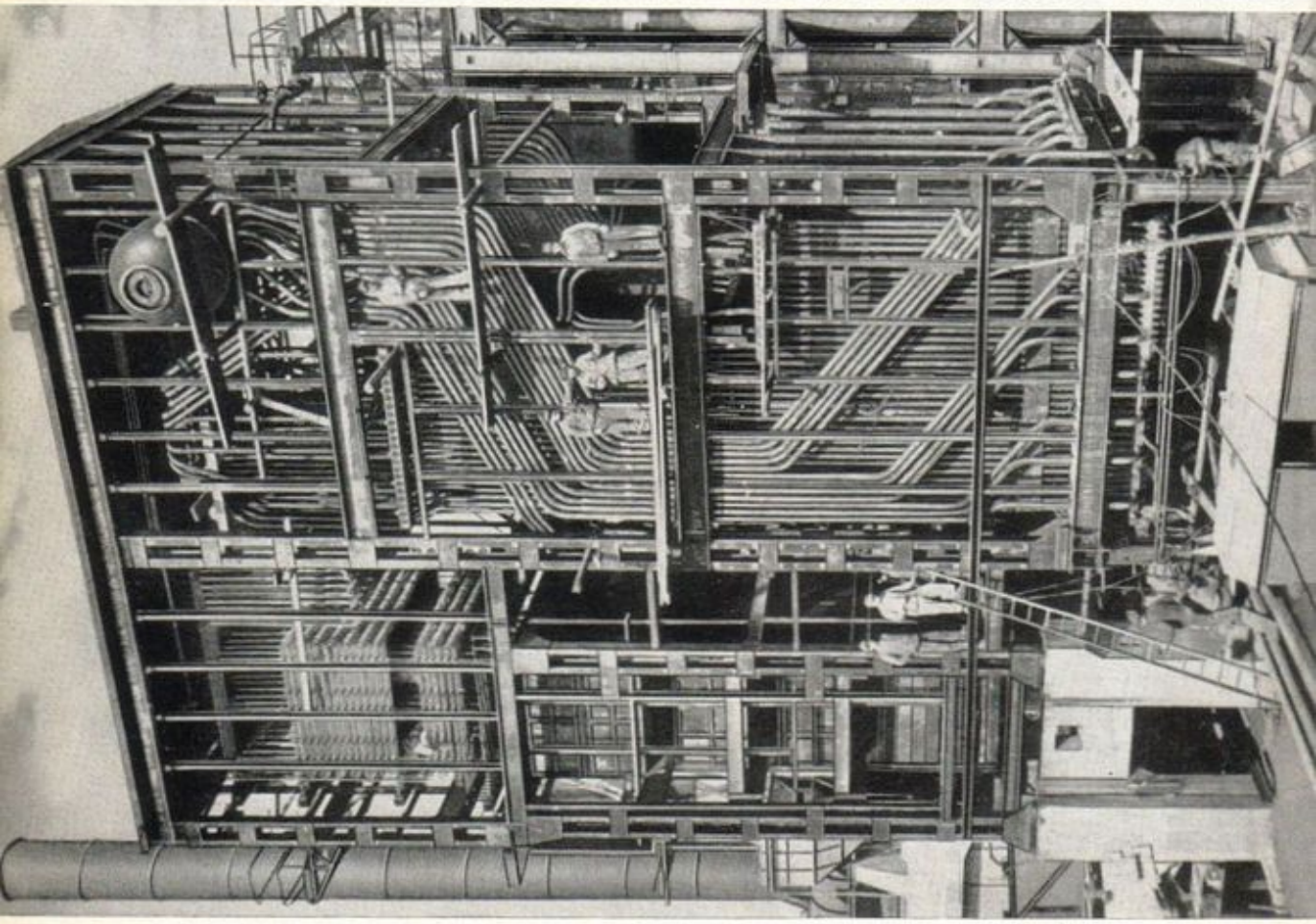




Tenderlokomotive Reihe 82 der Deutschen Bundesbahn

Neuentwicklung mit völlig geschweißtem Kessel und Rahmen. Die Lok läuft vor- und rückwärts gleich gut (70 km/h) und dient schwerem Verschiebe- und leichtem Nahgüterzugdienst. Dampfdruck 14 atü. Dampferzeugung bei Höchstbelastung 8 t/h. Zwei Zylinder. Einstufige Dampfdehnung. Zylinderdurchmesser 600 mm. Kolbenhub 660 mm. Raddurchmesser 1400 mm. Leergewicht 69 200 kg. Dienstgewicht 91 600 kg.



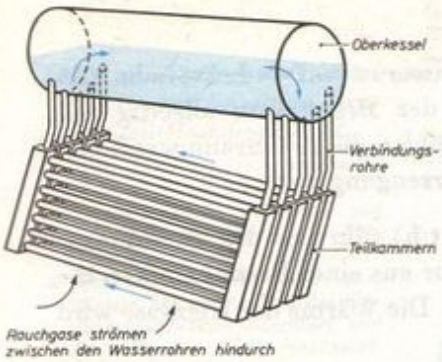


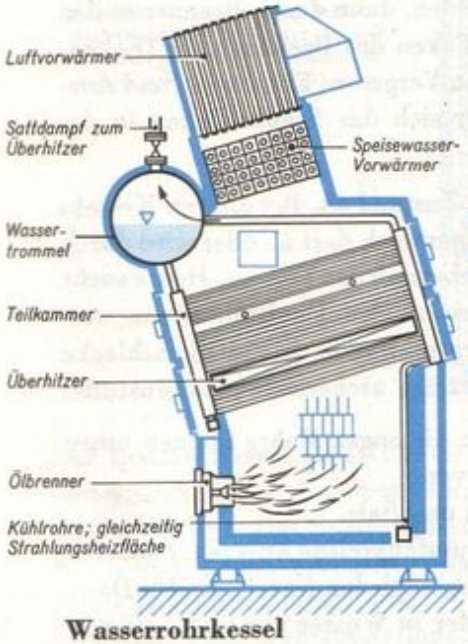
Montage eines modernen Strahlungskessels (Bild links)

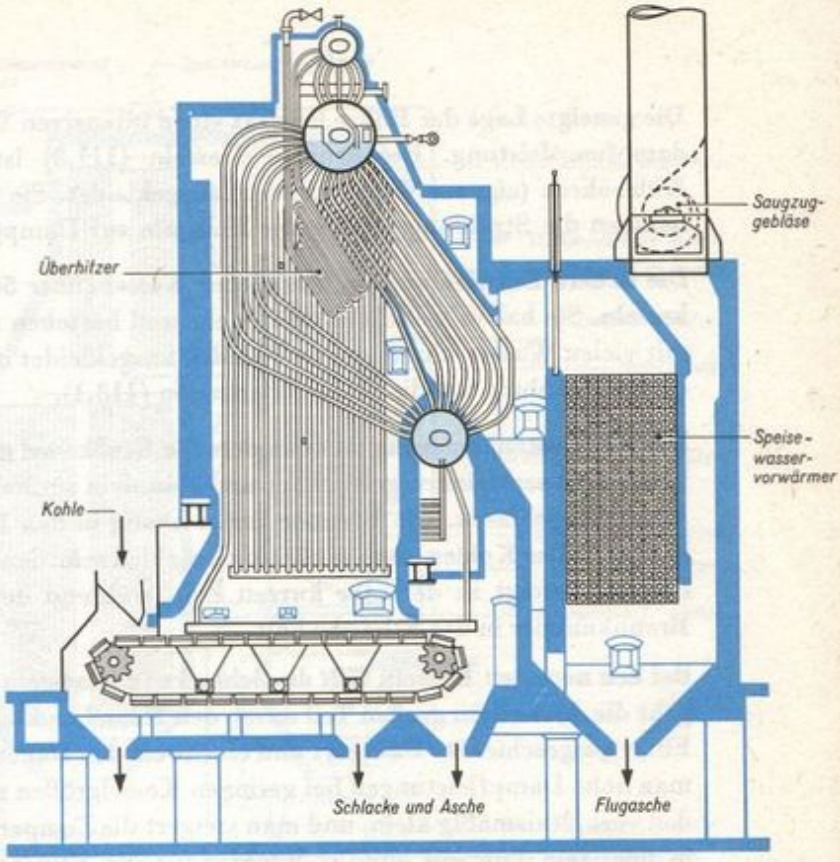
Schmelzkammerkessel mit 30 t/h Dampfleistung, 44 atü und 475° Überhitzung, mit Steinkohlen-Staubfeuerung.

Brennkammer eines Höchstdruck-Kessels (Bild rechts)

Der Kessel enthält keine Trommeln mehr. Dicht nebeneinander liegende, bestachelte Rohre bilden die Brennkammer. An der Brennraumwand im Hintergrund die Einblaseöffnungen für Kohlenstaub und Luft.







111,1 *Anordnung von Teilkammern (links oben)*
Teilkammern verwendet man bei kleinen bis mittelgroßen Kesseln. Hier ist der Wasserumlauf auf mehrere voneinander unabhängige Kammern verteilt.

111,2 *Teilkammer-Schiffskessel mit Ölfeuerung (links unten)*

111,3 *Zweitrommel-Steilrohrkessel mit Wanderrostfeuerung für 25 t/h und 20 atü (rechts)*

Wasserrohrkessel

Die Leistung der Rauchrohrkessel ist begrenzt, denn bei ihnen kommt nur ein kleiner Teil des Wasserinhalts gleichzeitig mit den Heizgasen in Berührung. Für die Erzeugung großer Dampfmengen brauchte man früher sehr viele Kessel! Für große Dampfleistungen baut man heute Kessel, bei denen sich das Wasser in Bündeln dünner, von Rauchgasen umströmter Wasserrohre befindet. Die Wasserrohre münden in Kesseltrommeln oder Wasserkammern, so daß alle Rohre miteinander verbunden sind. Durch zweckmäßige und günstige Anordnung der Rohre wird eine kräftige Umlaufbewegung erzielt. Entsprechend den Betriebsanforderungen bei ortsfesten und beweglichen (Schiffs-)Kesseln sind viele Bauarten entstanden.

Für kleine bis mittlere Dampfleistungen werden vor allem Teilkammerkessel gebaut. Sie zeigen Bündel schräg im Brennraum liegender gerader Rohre, die in schmale Wasserkammern (=Teilkammern) eingewalzt sind (**111,1**). Jede Kammer ist durch ein Rohr mit dem Oberkessel verbunden und kann sich daher einzeln mit den Rohren ausdehnen.

Für größere Dampfleistungen eignen sich Steilrohrkessel. Sie haben meist zwei querliegende Trommeln, die durch Bündel von Wasserrohren miteinander verbunden sind.

Die geneigte Lage der Rohre bewirkt einen intensiven Wasserumlauf und eine hohe Verdampfungsleistung. Bei neueren Kesseln (**111,3**) ist der Brennraum allseitig mit Kühlrohren (eigener Wasserumlauf) ausgekleidet. Sie kühlen die Brennraumwand und nehmen die Strahlungswärme der Heizgase zur Dampferzeugung auf.

Die neuere Entwicklung im Bau großer Kessel (über 50 t/h) führt zu den Strahlungskesseln. Sie haben keine Trommel mehr und bestehen nur aus einer Brennkammer, die mit vielen Wasserrohren an den Wänden ausgekleidet ist. Die Wärme der Heizgase wird durch Strahlung auf die Rohre übertragen (**113,1**).

Die Kohlenstaubfeuerung ist besonders für Großkessel geeignet. Die angelieferte Förderkohle wird zerkleinert, getrocknet und staubfein zermahlen, dann durch Brenner in den Kessel eingeblasen. Die Brenner liegen häufig in den Ecken des Brennraumes (Eckenbrenner). Der Kohlenstaub muß fein zermahlen sein, denn Vergasen, Entzünden und Ausbrennen erfolgt in der sehr kurzen Zeit, während der sich das Staubteilchen in der Brennkammer in der Schwebe hält.

Bei den neuesten Kesseln fällt die Schlacke in flüssigem Zustand an. Bei älteren Kesseln geht die Asche zum großen Teil durch den Kessel und lagert sich dort ab oder wird durch Filter ausgeschieden. Das stört und erschwert den Dauerbetrieb des Kessels. Heute sucht man hohe Dampfleistungen bei geringen Kesselgrößen zu erzielen. Die Brennräume werden verhältnismäßig klein, und man steigert die Temperaturen so hoch, daß die Schlacke in flüssigem Zustand anfällt. Wichtig für die Verfeuerung aschereicher Brennstoffe.

Wasserrohrkessel benötigen reinstes Speisewasser, denn die engen Rohre können innen nicht gereinigt werden. Das Speisewasser muß frei sein von:
1. Härte (Kesselstein), 2. Gasen und Säuren, 3. Öl, Fett und Salz.
Das Aufbereiten, Entfernen aller Unreinigkeiten fordert umfangreiche Anlagen. Zunächst werden die Schwebestoffe in Klärtanks und Filtern ausgeschieden (mechanisch). Dann fällt die chemische Reinigung die Härtebildner entweder in Wasser aus (d. h., sie verwandelt sie in schwerlösliche Stoffe), oder das Wasser wird durch einen Filter aus geeigneten Füllmitteln geleitet, der die Härtebildner zurückhält (Basenaustauschverfahren). Der in der Dampfkraftanlage verarbeitete Dampf schlägt sich in einem Kondensator nieder und wandert als Speisewasser zurück. Dampfmaschinenabdampf entölen!

Vorteile und Nachteile der Wasserrohrkessel

1. Sehr große Dampfleistungen.
   Der größte Dampfkessel steht in den USA, Delaware-Tal. Er arbeitet mit 350 atü und 650° und speist eine Turbogruppe von 275 000 kW.
2. Sehr kurze Anheizzeiten (manchmal nur wenige Minuten).
3. Wegen des geringen Wasserinhaltes Speicherfähigkeit nur gering; Kessel empfindlich gegen Belastungsschwankungen; bei großen Kesseln automatische Regelung. Wenn nötig, wird ein Dampfspeicher zwischen Kessel und Verbraucher geschaltet.

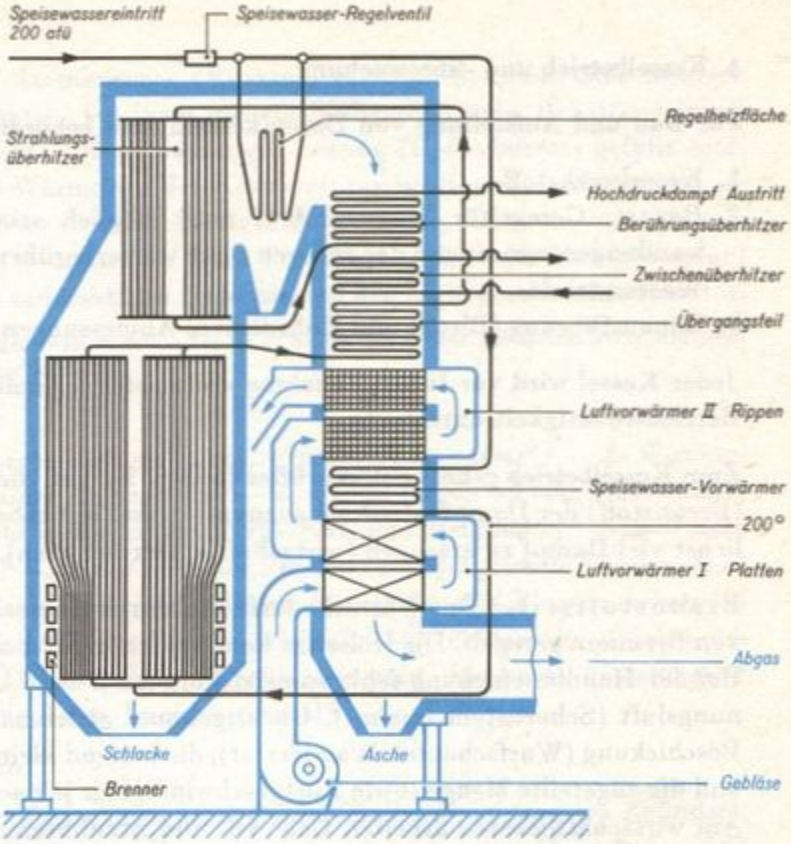
Hochdruckdampferzeuger

Die wirtschaftlichen Vorteile geben diesem die Zukunft. Von den Erzeugungsverfahren (Löffler, Benson, La Mont) wird hier der Bensonkessel als Beispiel gezeigt.

113,1 *Anordnung der Heizflächen bei einem Benson-Hochdruckkessel*

Wasser bzw. Dampf durchlaufen die folgenden Stationen:

1. Pumpe drückt Wasser mit 200 atü in den Vorwärmer. Vorwärmung auf 180 ··· 200° C.
2. Im Strahlungsteil wird dem Wasser der größte Teil der Verdampfungswärme zugeführt und das Wasser auf Sattdampftemperatur erwärmt.
3. Im Übergangsteil findet die restliche Verdampfung und die beginnende Überhitzung statt.
4. Im Überhitzer wird der Dampf auf die gewünschte Heißdampftemperatur (ca. 500° C) gebracht.



Der Benson-Kessel (113,1) besteht aus einem Röhrensystem mit mehreren hintereinandergeschalteten Rohrbündeln, in denen wieder eine Anzahl von Rohren parallel geschaltet sind. Das Speisewasser wird mit einer Pumpe in die Eingangsseite hinein und durch den Kessel gedrückt (Zwangsdurchlauf). Auf der Ausgangsseite tritt der überhitzte Hochdruckdampf aus.
Die einzelnen Durchlaufstationen nennt die Erklärung zu Bild 113,1.

Hochdruckkessel haben künstlichen Wasserumlauf. Der natürliche Wasserumlauf (hervorgerufen durch den Unterschied der Wichte) genügt nicht mehr. Künstlichen Umlauf bewirkt man durch eine Umwälzpumpe. Hierdurch wird die Wasserbewegung von der Lage der Trommeln und Rohre völlig unabhängig, und man kann alle Heizflächen so legen, daß der Brennraum wirtschaftlich ausgenutzt wird. Schneller Wasserumlauf bewirkt höhere Verdampfungsleistungen.

Kraftwerkskessel haben häufig noch einen Zwischenüberhitzer, der den während der Arbeit in der Turbine angestiegenen Wassergehalt des Dampfes (schädlich!) wieder absenkt. Außerdem besitzen sie noch Vorwärmer für die Verbrennungsluft.

Benson-Kessel regeln automatisch Wasserdurchlauf, Frischdampftemperatur und Dampfdruck. Durch den geringen Wasserinhalt sind sie völlig explosionssicher. Das Speichervermögen ist aber gering.

In einen Benson-Kessel mit 125 t/h Dampfleistung, 150 atü und 510° C Dampftemperatur wurden 25 km Rohre, z. T. aus legiertem Stahl, eingebaut. Beheizte Rohre hatten Außendurchmesser von 35 und 38 mm mit Wanddicken von 4 mm.

4. Kesselbetrieb und -überwachung

Für Bau und Aufstellung von Dampfkesseln sind behördlich vorgeschrieben:

1. Kesselwerkstoffe.
2. Bauart. Geregelter Wasserumlauf muß möglich sein; rauchgasberührte Kesselwandungen müssen auf der anderen Seite wasserberührt sein. Höhe des niedrigsten Wasserstandes.
3. Bauausführung (Blech- und Rohrdicken, Abmessungen der Nietung).

Jeder Kessel wird vor Inbetriebnahme und später regelmäßig wiederkehrend auf seine Betriebstüchtigkeit untersucht.

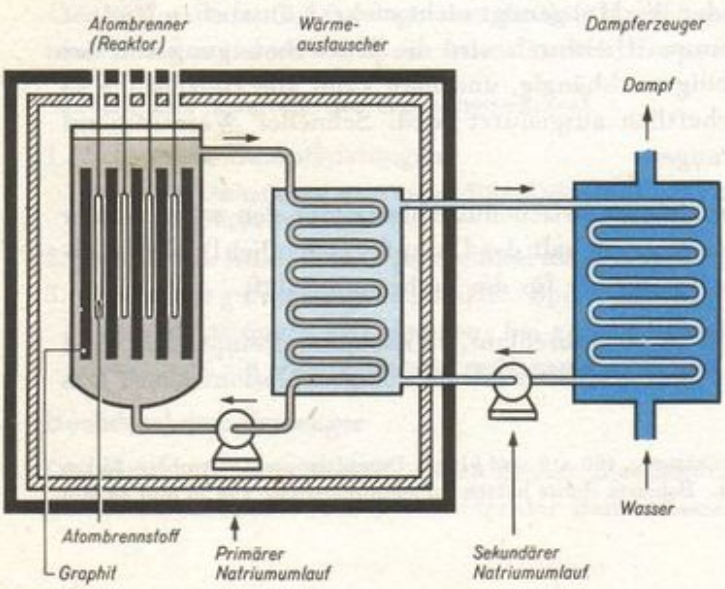
Zum Kesselbetrieb gehört ein geprüfter Heizer. Er hat die Aufgabe, den Wärmebedarf (Brennstoff) der Dampfentnahme anzupassen und mit möglichst wenig Brennstoff möglichst viel Dampf zu erzeugen (wirtschaftlich zu arbeiten).

Brennstoffseite: Der Wärmebedarf wird durch Kohlenmenge oder durch Regulieren von Brennern geregelt. Die Höhe der Feuerschicht richtet sich nach der Kesselbelastung. Bei der Handbeschickung fehlt zumeist kurz nach dem Aufwerfen genügend Verbrennungsluft (Schornstein qualmt). Günstiger und gleichmäßiger wirkt die mechanische Beschickung (Wurfschaufel, Wanderrost), die laufend kleine Mengen Brennstoff zuführt und die zugeteilte Menge sowie Rostgeschwindigkeit je nach Kesselbelastung einrichtet. Am wirtschaftlichsten arbeiten Gas-, Öl- und Staubbrenner. Hier sind Brennstoff und Luft am einfachsten aufeinander abzustimmen.

Dampfseite: Ständig muß die Dampfentnahme (Wasserstand) beobachtet werden. Da ein Absinken des Wasserstandes unter den niedrigsten Stand Kesselschäden und -explosionen hervorrufen kann, muß rechtzeitig zugespeist werden.

5. Atomkraftanlagen

Während bei üblichen Brennstoffen sich der chemische Verbrennungsvorgang zwischen den äußeren Atomschalen der Elemente abspielt, dringt er bei der Kernspaltung in die Tiefe des Atoms und befreit sehr große Energiemengen.



114,1 *Dampferzeugung mit Hilfe von Atombrennstoff*

Der Atombrenner ist mit einem dreifachen Schutzmantel umgeben.
Innen: Berylliumoxyd mit Graphit
Mitte: Blei und Cadmium
Außen: Spezialbeton

Der Dampf wird mit einem Atombrenner (Reaktor) erzeugt. Bekannt sind mehrere Bauarten; **114,1** zeigt das Prinzip. In einem mehrfach abgeschirmten Behälter hängen gesicherte Röhren, die mit Uran 235 in wässeriger Lösung (Uranylnitrat) gefüllt sind. Flüssiges Natrium nimmt die Wärme aus der Kernspaltung im Reaktor auf und gibt sie in einem Wärmeaustauscher an anderes flüssiges Natrium ab. Dies erzeugt dann in einem Dampferzeuger Dampf zum Antrieb einer Turbine. Der doppelte Natriumumlauf beschränkt den Kreislauf des radioaktiven Natriums auf den betongeschützten Reaktor.

Natrium eignet sich als Wärmeträger, weil es schon bei 97,5° flüssig wird, aber bei Betriebstemperaturen von 500 · · · 600° noch keinen Dampf bildet.

Aufgaben

1. Erkläre die Begriffe „Flüssigkeitswärme" und „Verdampfungswärme"! — 2. Was versteht man unter dem Heizwert eines Brennstoffes? — 3. Welche Folgen hat eine Verbrennung mit Luftmangel? — 4. Wie unterscheiden sich Naß-, Satt- und Heißdampf? — 5. Welche Vorteile bringt der Heißdampf? — 6. Warum haben Flammrohrkessel gewellte Flammrohre? — 7. Erkläre den grundlegenden Unterschied zwischen Rauchrohr- und Wasserrohrkesseln! — 8. Nenne die Vor- und Nachteile der Rauchrohrkessel! — 9. Erkläre die Arbeitsweise eines Wanderrostes! — 10. Warum haben Großkessel meist Kohlenstaubfeuerungen? — 11. Was versteht man unter einem Strahlungskessel?

6. Die Kolbendampfmaschinen

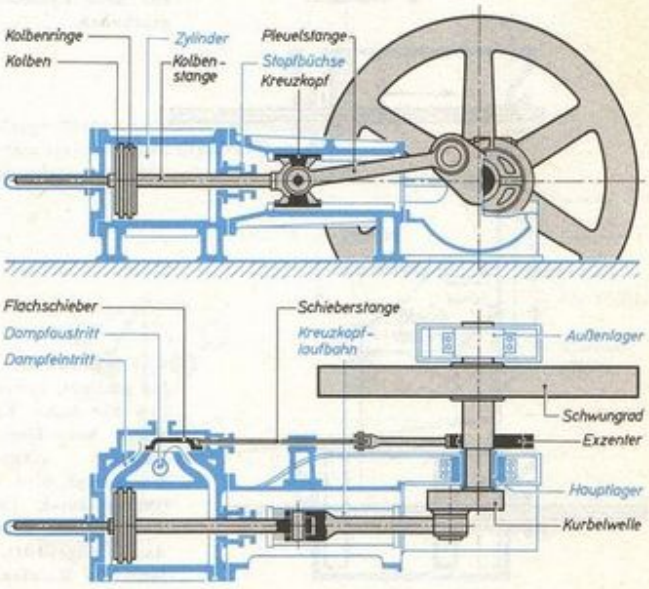
Mit der Erfindung der Dampfmaschine, 1690 Papin (Kolbenbewegung im Zylinder), 1703 Newcomen (Wirkung durch den Unterdruck kondensierenden Dampfes), 1782 James Watt (Wirkung durch den Dampfdruck), begann das Zeitalter der Technik. In 150 Jahren wurde die Dampfmaschine eine vielseitig verwendbare Kraftmaschine.

In der Dampfmaschine bewegt der Druck des Dampfes den Kolben im Zylinder. Der Kurbeltrieb wandelt die geradlinige Kolbenbewegung in Drehbewegung um. Kleine Dampfmaschinen sind Volldruckmaschinen mit Dampfeinströmung während des ganzen Hubes; große Maschinen sind Expansionsmaschinen.

Das Arbeitsspiel im Dampfzylinder umfaßt folgende Vorgänge:

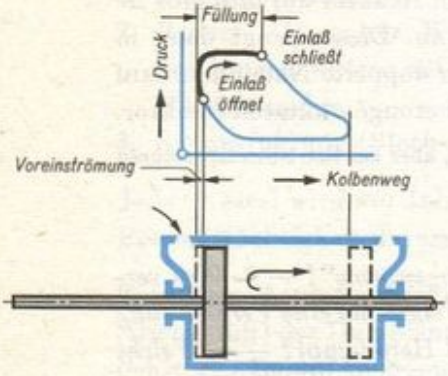
1. teilweise Füllung des Zylinders mit Frischdampf;
2. Ausdehnen (Expansion) nach beendeter Einströmung;
3. entspannter Dampf strömt aus;
4. Restdampf wird verdichtet.

Wenn die Vorgänge innerhalb eines Zylinders aufeinanderfolgen, der Dampf also nur in einem Zylinder Arbeit leistet, spricht man von einstufiger Dampfdehnung. Da der Dampf auf beiden Kolbenseiten wirkt, sind die Dampfmaschinen doppelwirkend.



115,1 *Einzylinder-Dampfmaschine mit Steuerung durch Flachschieber*

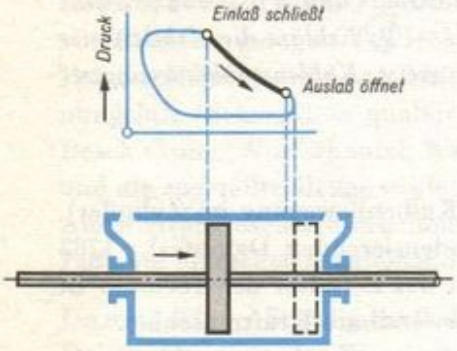
Schieber oder Ventile steuern Dampfeinlaß und -auslaß. An den Dampfzylinder ist ein Schieberkasten angebaut. Dorthin führt von jedem Zylinderende ein Kanal (gemeinsam für Ein- und Auslaß). Bei älteren Maschinen besorgte ein durch Exzenter angetriebener Flachschieber (115,1) die Dampfverteilung. Er arbeitete mit Außenkanteneinströmung. Heute stehen an seiner Stelle Rundschieber mit Innenkanteneinströmung. Die inneren Schieberkanten steuern die Einströmung (Frischdampf mit hohem Druck), die äußeren die Ausströmung (118,1). So werden die Schieberstopfbüchsen von Druck entlastet und lassen sich leichter dichten. Ventile finden wir bei sehr großen Dampfmaschinen.



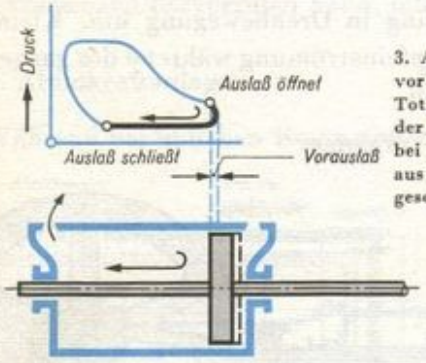
116,1 *Arbeitsspiel einer Dampfmaschine*

(für linke Kolbenseite dargestellt)

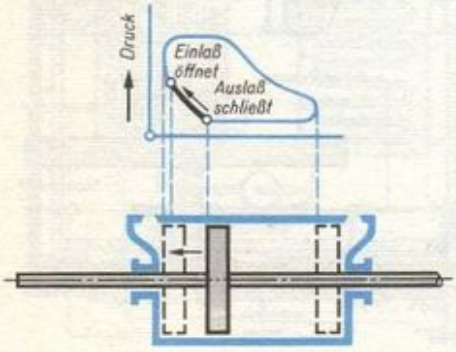
1. Füllen. Steht der Kolben in der linken Totlage, soll schon voller Dampfdruck wirken. Dampfeinlaß deshalb schon vor Totlage geöffnet (Voreinströmung). Der Druck steigt im Zyl. schnell an. Während des Einströmens Bewegung zur rechten Totlage hin.



2. Ausdehnen. Nach beendeter Füllung wird der Einlaß geschlossen. Der Dampf dehnt sich im Zylinder aus und bewegt den Kolben; dabei wird Arbeit geleistet. Der Dampfdruck fällt ab.



3. Ausströmen. Kurz bevor der Kolben die rechte Totlage erreicht hat, öffnet der Auslaß. Der Dampf wird bei Umkehr der Bewegung aus dem Zylinder hinausgeschoben.



4. Verdichten. Der Auslaß schließt, bevor der Kolben die linke Totlage erreicht hat. Der noch im Zylinder eingeschlossene Restdampf wird verdichtet und dadurch Druck und Temperatur dem Frischdampf angepaßt; außerdem läuft die Maschine ruhiger.

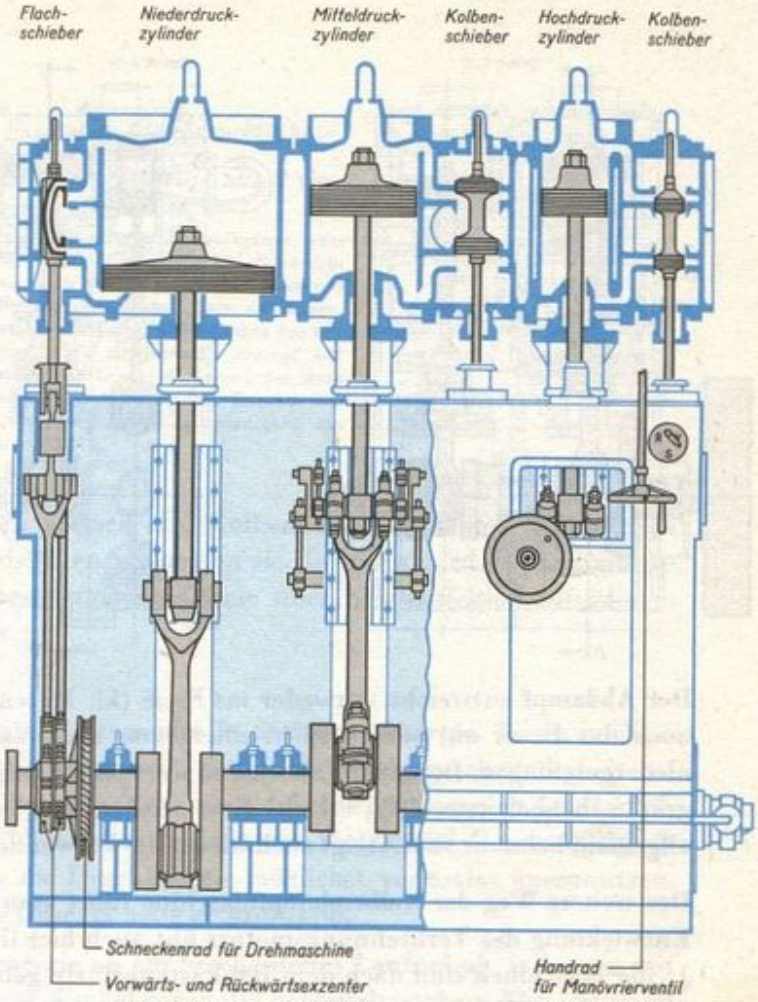
Größere Dampfmaschinen besitzen mehrstufige Dampfdehnung, die sich vorteilhaft und wirtschaftlich auswirkt. Man führt den Dampf nacheinander in einen Hochdruck- und einen Niederdruckzylinder. In jedem erfährt er eine Teilausdehnung und leistet eine Teilarbeit. Die Zylinder werden in ihren Durchmessern so abgestimmt, daß sie gleiche Leistungen vollbringen. Maschinen mit zweistufiger Dampfdehnung heißen Verbundmaschinen, dabei können die Zylinder nebeneinander (117,1) oder hintereinander (Tandemmaschinen) liegen. Auch dreistufige Dampfdehnung kommt vor (117,1).

Der Leistungsablauf größerer Dampfmaschinen. Wenn man den Druckverlauf im Zylinder längs des Kolbens mit einem Indikator aufzeichnet (116,1),

entsteht eine in sich geschlossene Linie. Sie stellt das Produkt Kraft × Weg und damit die im Zylinder geleistete Arbeit dar. Kann nur wenig Dampf einströmen (Einlaß früh geschlossen), beginnt die Ausdehnung sehr früh; der Druck fällt schnell ab, die geleistete Arbeit ist gering. Strömt der Dampf längere Zeit (mehr Dampf), wirkt der volle Druck länger, die Expansion beginnt später. Die Expansionslinie verschiebt sich also weiter nach rechts; der Inhalt des Diagramms wird größer; es wird mehr Arbeit geleistet.

Die Einströmzeit (Füllung) wird in Prozenten des Kolbenweges angegeben; sie beträgt bei Einzylindermaschinen bis 40%, bei Verbundmaschinen bis 60% des Hubes.

Viele Dampfmaschinen müssen umsteuerbar sein. Bei Schiffen, Lokomotiven, Rudermaschinen, Winden und Rammen ist der Drehsinn häufig zu ändern. Das ist bei Volldruckmaschinen einfach, bei Expansionsmaschinen komplizierter, denn die Schieberbewegung muß umgekehrt werden.

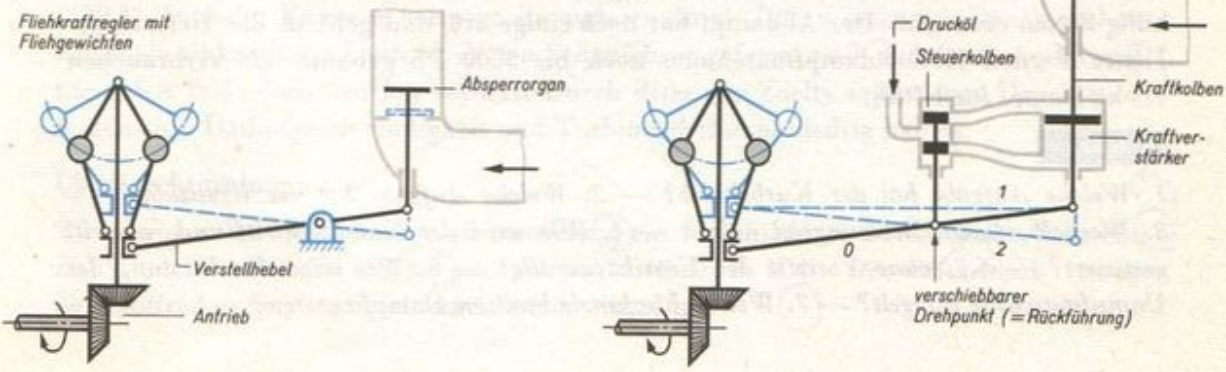


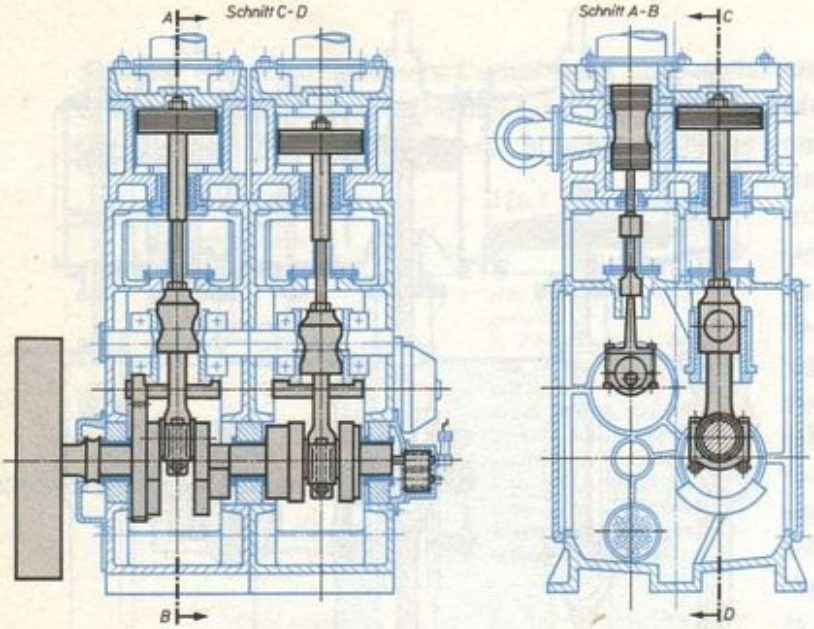
117,1 *Schiffsdampfmaschine mit dreistufiger Dampfdehnung*

Dreifach-Expansions-Maschine. Hoch- und Mitteldruckzylinder werden durch Kolbenschieber gesteuert, Niederdruckzylinder durch Flachschieber. Verkleidung zum Teil entfernt.

117,2 *Drehzahlregelung durch Drosselung*

Bei kleinen Maschinen verstellt der Fliehkraftregler die Drosselklappe direkt über einen Verstellhebel. Größere Maschinen nehmen Drucköl zu Hilfe. Der Fliehkraftregler verstellt einen Steuerkolben, der Drucköl unter oder über den Verstellkolben leitet. 0 = Ausgangslage, 1 = Steuerlage, 2 = rückgeführte Endlage (neue Gleichgewichtslage).





118,1 *Zweizylinder-Dampfmotor. Spillingwerk, Hamburg*

Wird in zwei Motorblocktypen gebaut, die zu verschiedenen Leistungen zusammengebaut werden. Kleine Einheit 70 mm Hub, 35 PS bei 1500 U/min.

Große Einheit	oder
140	126 mm Hub
140	165 PS
750	1000 U/min.

Kolbengeschwindigkeit nur 3,5 m/s.
Rundschiebersteuerung durch gemeinsame Steuerwelle. Druckumlaufschmierung sämtlicher Lager.

Der Abdampf entweicht entweder ins Freie (kl. Maschinen; bei Lokomotiven facht er noch das Feuer an) oder wird in einem von Kaltwasser durchflossenen Kondensator niedergeschlagen. In jedem Fall wird so wertvolle Energie vernichtet und ein Wirkungsgrad von höchstens 20% erzielt. Erst seitdem die Vorteile des Gegendruckbetriebes allgemein bekannt sind, steigt auch wieder die Verwendung von Kolbendampfmaschinen.

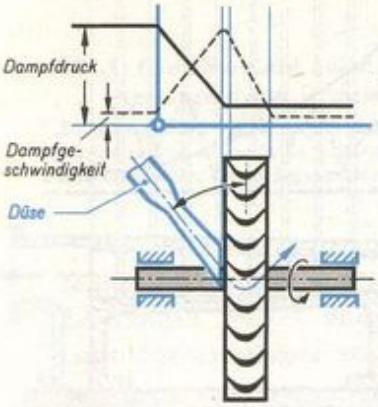
Der weitere Weg der Kolbendampfmaschine führt zum Dampfmotor (118,1). Die rasche Entwicklung des Verbrennungsmotors übt auch hier ihren Einfluß aus:

1. die Maschinen sind nach dem Baukastenprinzip gebaut; sie bestehen aus Leistungseinheiten, die je nach Anforderung zusammengesetzt werden (bis zu 6 Einheiten);
2. kurzhubige Bauart macht sehr hohe Drehzahlen möglich;
3. sämtliche Verschleißteile sind auszutauschen;
4. die stehende Bauart fordert nur wenig Platz;
5. die Maschinen sind vollständig gekapselt.

Die schnellaufende Kolbendampfmaschine ist heute noch wettbewerbsfähig. Wegen ihrer Nachteile wurde die Kolbendampfmaschine vielerorts von anderen Maschinen verdrängt. Nur noch Lokomotiven, kleine Schiffe, Bagger und Rammen benutzen sie. Durch Dampfmotoren ist wieder ein neues Anwendungsgebiet, der Antrieb von Stromerzeugern, erschlossen worden. Kleine Fabriken mit laufendem Bedarf an Heizdampf können mit Kolbendampfmaschinen im Gegendruckbetrieb wirtschaftlich arbeiten und billig Strom erzeugen. Der Abdampf hat noch einige atü und geht in die Heizanlage. Heute werden Kolbendampfmaschinen noch bis 3000 PS gebaut; sie verbrauchen 4,5 kg Dampf für 1 PSh.

Aufgaben

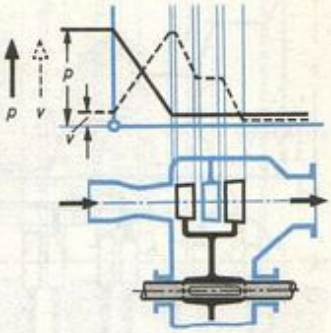
1. Welche Aufgabe hat der Kurbeltrieb? — 2. Welche Aufgabe hat der Kreuzkopf? — 3. Weshalb ist ein Schwungrad nötig? — 4. Wie wird der Dampfeintritt und -austritt gesteuert? — 5. Nenne Vorteile der Ventilsteuerung! — 6. Wie wird die Leistung der Dampfmaschine geregelt? — 7. Welche Merkmale besitzen Dampfmotoren?



◀ **119,1** *Einstufige Gleichdruckturbine*

119,2 *Gleichdruckturbine mit 2 Geschwindigkeitsstufen* ▶

Das Curtisrad hat mehrere Laufkränze, entsprechend seiner Stufenzahl. Die Schaufeln der ersten Stufe sind so gestaltet, daß sie nur die Hälfte der Geschwindigkeit ausnutzen. Die feststehenden Leitschaufeln leiten den aus der ersten Stufe austretenden Dampf auf den zweiten Laufkranz; dort wird der Rest der Geschwindigkeit ausgenutzt. Beachte den Verlauf von Druck und Geschwindigkeit des Dampfes im Bild!



7. Dampfturbinen

Die großen hin- und herbewegten Massen der Kolbendampfmaschinen verursachen starke Reibung. Dampfturbinen dagegen vermeiden sie. In ihnen wird die Energie zunächst durch Düsen in Strömungsenergie und diese über beschaufelte Laufräder in mechanische Arbeit umgewandelt.

Gleichdruckturbinen

Düsen verwandeln die Druckenergie des Dampfes in Strömungsenergie. Wenn hochgespannter Dampf aus einer Öffnung ausströmt, steigt die Dampfgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Druckabnahme stark an (bis 1 200 m/s); dabei vergrößert sich das Dampfvolumen. Nach den Gasgesetzen bleibt das Produkt aus Druck und Geschwindigkeit immer gleich: $p \cdot v = \text{const}$. Um die Druckenergie möglichst verlustlos auszunutzen, muß der Austrittsquerschnitt, die Düse, günstig geformt sein.

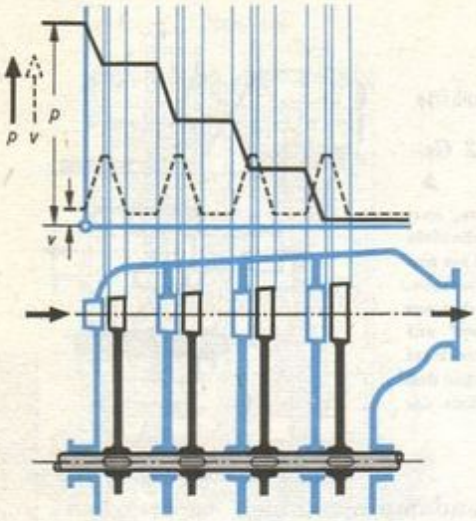
Der Dampf gibt seine Strömungsenergie an ein beschaufeltes Laufrad ab, indem er mit hoher Geschwindigkeit in günstigem Winkel gegen die Schaufeln strömt. Der Druck ist vor und hinter dem Laufrad gleich; deshalb: Gleichdruckturbinen. Das Laufrad wird in schnelle Drehung versetzt. Die hohen Drehzahlen können aber nicht ausgenutzt werden. Daher hat die einstufige Gleichdruckturbine keine praktische Bedeutung.

Um brauchbare Drehzahlen zu erhalten, wird die Energieabgabe an das Laufrad auf mehrere Laufschaufelreihen verteilt. Diese Anordnung (**119,2**) heißt nach ihrem Erfinder Curtisrad; man nennt sie auch Geschwindigkeitsstufen, weil die Dampfgeschwindigkeit stufenweise ausgenutzt wird. Curtisräder können große Druckgefälle verarbeiten und werden häufig im Hochdruckteil von Turbinen verwendet.

Die Turbinendrehzahl läßt sich auch durch unterteiltes Druckgefälle in mäßigen Grenzen halten. Hierzu scheiden Wände die Turbine in mehrere druckdichte Kammern (**120,1**). In jeder Kammer herrscht ein anderer durch Düsen erzeugter Druck und arbeitet ein einkränziges Laufrad, dessen Schaufeln so geformt sind, daß der Dampf jeweils nur einen Teil seines Druckes verliert. Durch diese von Zoelly erfundenen Druckstufen lassen sich Dampfgeschwindigkeit und Turbinendrehzahl niedrig halten.

Überdruckturbinen

Wenn vor und hinter einer Austrittsöffnung ein verschiedener Druck wirkt, tritt eine Reaktion (Rückdruck) auf (s. auch Wasserturbinen S. 104). Der Rückdruck bewegt das Laufrad entgegengesetzt zur Ausströmrichtung.

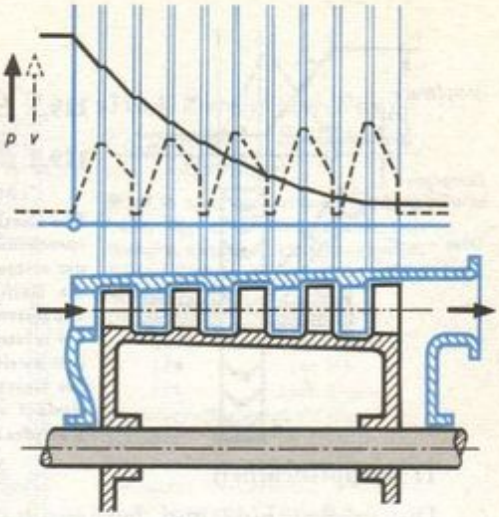


120,1 *Gleichdruckturbine mit 4 Druckstufen*

Das Druckgefälle des Dampfes ist in mehrere Stufen unterteilt. Als Durchströmquerschnitte zwischen den einzelnen Kammern wirken Düsen, die gleichzeitig die Strömungsrichtung umkehren.

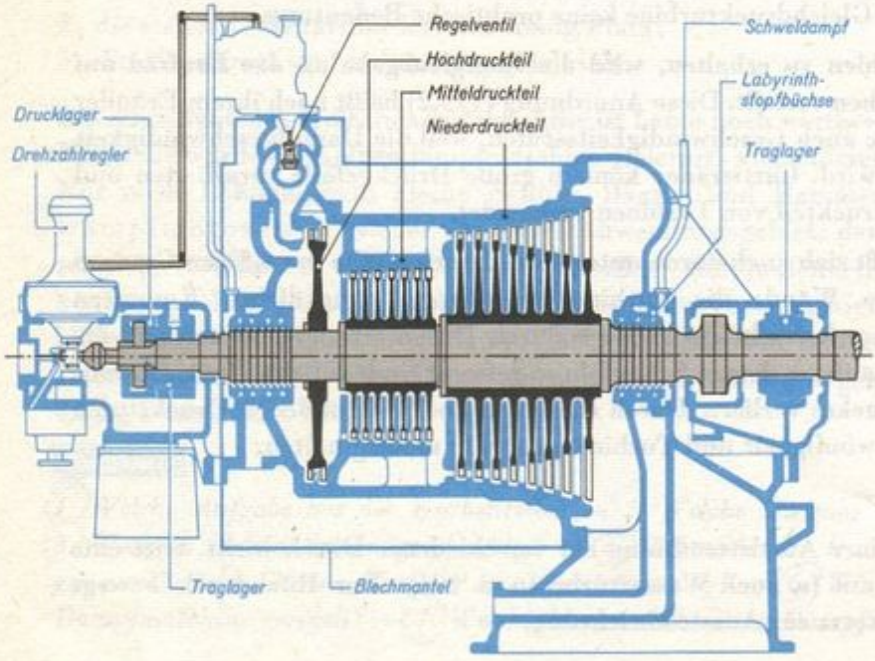
120,2 *Überdruckturbine*

Leit- und Laufschaufeln setzen Druckgefälle in Geschwindigkeit um.



In Überdruckturbinen herrscht vor jeder Schaufel ein höherer Druck als hinter ihr. Leit- und Laufschaufeln wirken als Düsen, in denen der Druck in Geschwindigkeit umgesetzt wird. Hierzu erhält die gesamte Beschaufelung eine geeignete Form mit Düsenquerschnitt (**120,4**). Druck- und Geschwindigkeitsverlauf zeigt **120,2**. Im niedrig gespannten Dampf genügen schon geringe Druckänderungen, um hohe Dampfgeschwindigkeiten zu erzeugen. Daher werden Überdruckturbinen für geringe Drücke (NDr-Teil der Turbine) gebaut. Die bisher besprochenen Bauarten sind Axialturbinen, bei denen der Dampf in Richtung der Achse durch die einzelnen Laufkränze strömt.

In Radialturbinen, nach ihrem Erfinder auch Ljungström-Turbine genannt, ist die Beschaufelung radial angeordnet. Sie haben zwei entgegengesetzt drehende Läufer, jeder auf eigener Welle, jeder an der Stirnseite mit Überdruckbeschaufelung (**121,1**). Der Dampf wird nahe der Wellenmitte zugeführt (**121,1**) und verläßt die Beschaufelung am äußeren Umfang. Beide Läufer drehen sich entgegengesetzt; feststehende Leitschaufeln

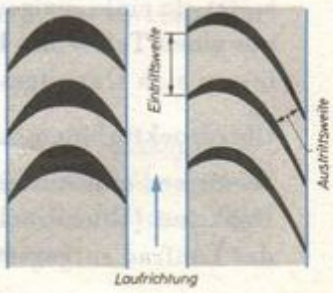


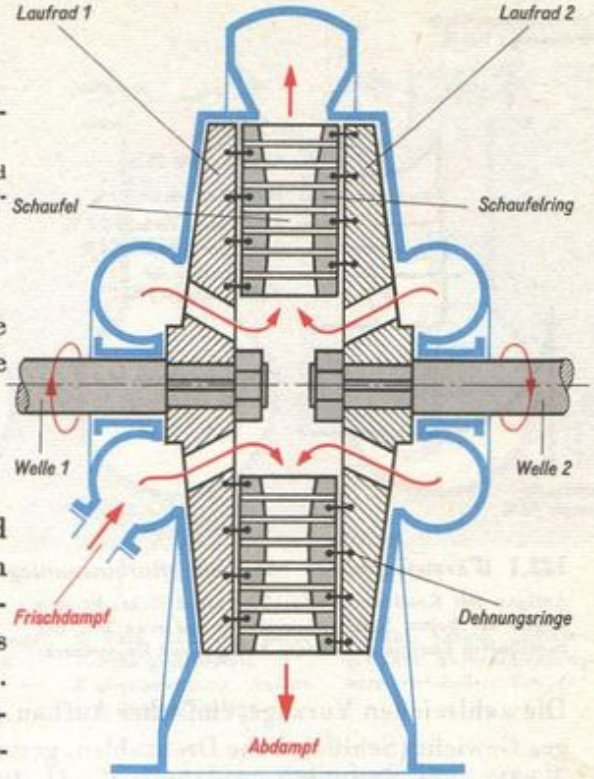
120,3 *Eingehäusige Gleichdruck-Kondensationsturbine. 6000 kW, 3000 U/min.*

HDr-Teil: zweikränziges Curtisrad. MDr-Teil: 7 Druckstufen. NDr-Teil: 8 Druckstufen.

120,4 *Schaufelformen*

Gleichdruckschaufeln haben stark gekrümmte Profile. Überdruckschaufeln haben einen flacheren Profilverlauf.





121,1 *Radialturbinen haben zwei Läufer mit entgegengesetztem Drehsinn*

Die Stirnflächen beider Läufer sind einander zugekehrt und tragen ineinandergreifende konzentrische Ringe von Überdruckschaufeln, die entgegengesetzt gekrümmt sind.

fehlen. Radialturbinen werden für größere Leistungen gebaut und treiben je Welle einen Stromerzeuger an.

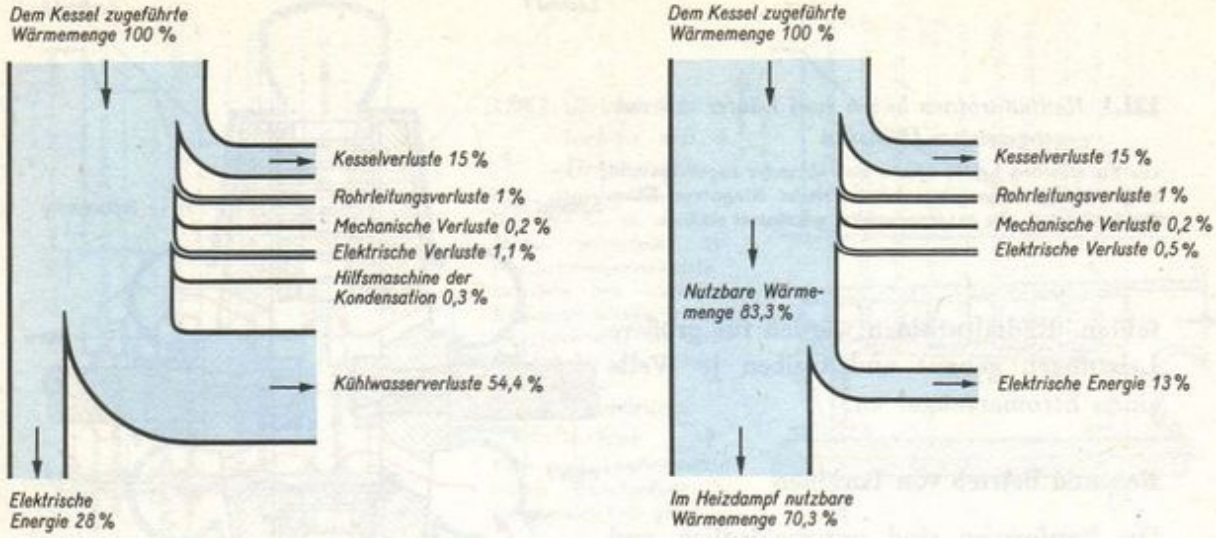
Bau und Betrieb von Turbinen

Die Bauformen sind unterschiedlich und richten sich vor allem nach der verlangten Leistung. Die Hochdruckstufe hat Gleichdruckbeschaufelung, sowohl Curtisräder als auch Druck- oder Geschwindigkeitsstufen. In der Niederdruckstufe wird Überdruckbeschaufelung verwendet. Axial- und Radialturbinen können auch kombiniert werden. Baustoffe für den Läufer sind Stahl oder Stahlguß, auch Ni-Stahl. Schaufeln werden aus warmfesten und rostfreien legierten Stählen gezogen oder gefräst und sorgfältig im Läufer befestigt, da Umfangsgeschwindigkeiten bis 400 m/s möglich sind.

Dampfturbinen werden hauptsächlich für größere Leistungen (über 400 PS) gebaut. Sie dienen zur Stromerzeugung und werden direkt mit einem Generator gekuppelt; Regeldrehzahl 3000 U/min. Für Schiffsantriebe baut man mittelgroße Turbinen; sie enthalten, da nicht umsteuerbar, immer eine Rückwärtsturbine. Zur Drehzahlherabsetzung dient ein Zahnradgetriebe zwischen Turbine und Schraube. Häufig werden Turbopumpen, -gebläse und -kompressoren durch Dampfturbinen angetrieben.

Turbinen laufen meist mit gleichbleibender Drehzahl, die ein Regler konstant hält. Die Leistung wird entweder durch Drosselung des Dampfventils (Drosselregelung) oder durch Zu- oder Abschalten von Düsensätzen geregelt (Düsenregelung).

Viele Turbinenanlagen dienen in Industriebetrieben, die laufend Dampf für Heizzwecke brauchen, besonderen Zwecken. Man wählt eine Gegendruckturbine, die gegen einen Druck von z. B. 5 atü arbeitet. Der Abdampf verläßt die Turbine mit diesem Druck und strömt dann in die Heizleitung. So wird die gesamte Wärmeenergie des Dampfes ausgenutzt. Zwar ist die Stromausbeute der Turbine geringer, als wenn die gleiche Dampfmenge in einer Kondensationsturbine verarbeitet werden würde, dafür steht aber Heizdampf zur Verfügung. **122,1** zeigt als Vergleich den Wärmefluß in einer Kondensations- und in einer Gegendruckturbine. Aus Anzapfturbinen wird Dampf bestimmten Drucks abgezogen. Vorschaltturbinen mindern hohen Druck aus wirtschaftlichen Hochdruckkesseln auf einen niedrigeren, vielseitig verwendbaren Druck.



122,1 *Wärmeflußbilder von Dampfturbinenanlagen*

Anlagen mit Kondensationsturbinen (Bild links) können wegen der hohen Kühlwasserverluste nur etwa 30% der zugeführten Energie ausnutzen. Anlagen mit Gegendruckturbinen (Bild rechts) und einer Energieausnutzung von 80% sind dann wirtschaftlich, wenn laufend Bedarf an Heizdampf vorliegt.

Die zahlreichen Vorzüge, einfacher Aufbau, große Leistung auf kleinstem Raum, geringes Gewicht (Schiffe), hohe Drehzahlen, geringe Reibung und ölfreies Kondensat, haben der Dampfturbine zu weiter Verbreitung verholfen.

Aufgaben

1. Erkläre das Arbeitsprinzip der Dampfturbine! — 2. Nenne Aufgabe der Dampfdüsen! — 3. Welche Merkmale hat eine Gleichdruck-, welche eine Überdruckturbine? — 4. Worauf ist beim Anfahren von Turbinen besonders zu achten? — 5. Wo werden Gegendruckturbinen gebraucht und welche Vorteile bieten sie?

V. Brennkraftmaschinen

Verbrennt ein flüssiger oder gasförmiger Brennstoff zusammen mit Luft, bilden sich große Mengen Verbrennungsgase. Geht diese Verbrennung in einem geschlossenen Raum vor sich, entsteht ein Überdruck, der zur Arbeitsleistung benutzt wird. In den Kolbenmaschinen wirkt der Druck direkt auf den Kolben. Bei den Gasturbinen setzt er sich in Geschwindigkeit um und wirkt über Düsen auf ein beschaufeltes Laufrad ein.

Kolbenmaschinen

Die ersten Brennkraftmaschinen waren Kolbenmaschinen.
Kolbenmaschinen unterscheidet man nach der Arbeitsweise (Viertakt und Zweitakt) und nach dem Arbeitsverfahren (Otto-, Diesel- und Glühkopfmotor).
Als wesentliche Bestandteile einer Kolbenmaschine gelten:
1. Zylinder mit Gaseinlaß- und Auslaßöffnungen (Ventile oder Schlitze);
2. Kurbeltrieb (Kolben, Pleuelstange und Kurbelwelle).

1. Beim Viertaktmotor läuft ein Arbeitsspiel in 4 Takten (2 Kurbelwellenumdrehungen) ab

Die vier Takte sind Ansaugen, Verdichten, Arbeit und Auspuffen (123,1).
Im Ansaugtakt kommt Frischladung in den Zylinder, beim Ottomotor ein Kraftstoff-