



HTBLuVA St. Pölten
Höhere Abteilung Elektrotechnik

3100 St. Pölten, Waldstrasse 3 Tel: 02742-75051-300
Homepage: <http://et.htlstp.ac.at> E-Mail: et@htlstp.ac.at



Titel:

ES1-SKRIPTUM THERMISCHE KRAFTWERKE HTL

Autor:

LABENBACHER MICHAEL

Ort: HTBL u. VA in St. Pölten

Zeitraum: 2015 - 2016

Fach: Energiesysteme

Lehrer: Dipl.-Ing. Dr. Manfred Berger

Vorlage-Skriptum: Dipl.-Ing. Dr. Manfred Berger

Inhaltsverzeichnis

1. Dampfkraftwerk	1
1.1. Einführung & Definitionen	1
1.2. Grundlagen der Thermodynamik	4
1.2.1. Thermodynamische Systeme	4
1.2.2. Thermische Zustandsgrößen	5
1.2.3. Erster Hauptsatz der Thermodynamik	7
1.2.4. Zustandsänderungen	8
1.2.5. Kreisprozesse	10
1.2.6. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	14
1.3. Wirkungsweise von Dampfkraftwerken	15
1.3.1. Zustandsänderungen des Wasserdampfes	17
1.3.2. Grundschaltung	21
1.3.3. Maßnahmen zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrades .	22
1.4. Aufbau des Kessels	28
1.5. Dampfturbine	30
1.6. Kondensation und Kühlung	31
1.7. Rauchgasreinigung	33
2. Gasturbinenkraftwerk	35
3. Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (GuD)	39
A. Diagramme und Tabellen	41
Abbildungsverzeichnis	45
Tabellenverzeichnis	47
Abkürzungsverzeichnis	48

1. Dampfkraftwerk

1.1. Einführung & Definitionen



Abbildung 1.1.: Dampfkraftwerk

Zu den Dampfkraftwerken zählen Kohle-, Öl-, Sonnenwärme- und Kernkraftwerke (und Gas- und Dampf-Kombikraftwerke), wobei die thermische Energie von Wasserdampf in einer Dampfturbine ausgenützt wird.

Es wird bei Dampfkraftwerken¹ die chemische Energie von fossilen Brennstoffen (Steinkohle, Braunkohle, Öl und Erdgas) zur Erzeugung von Wasserdampf benutzt und die vom Kessel (= Brenner, Reaktor) kommende Wärmeenergie wird über eine Turbine in mechanische Energie und über den Generator dann in elektrische Energie umgeformt.

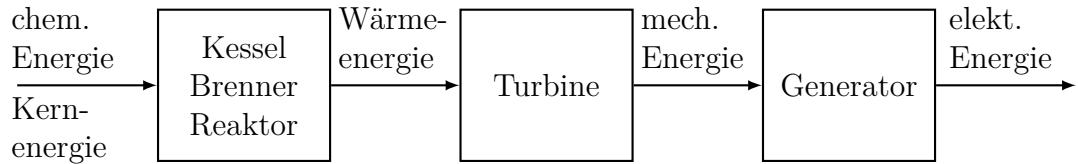


Abbildung 1.2.: Energiefloss eines Dampfkraftwerkes

Def.: Arbeit W ist die Energiedifferenz beim Übergang von einem energetischen Zustand zu einem anderen. („Ein Körper MUSS Energie besitzen, um Arbeit zu verrichten“ bzw. „Energie beschreibt die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu verrichten“)

Def.: Wärmeenergie W (eigentlich Q) ist die Energiedifferenz, die KEINE Arbeit verrichtet.

$$W = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (1.1)$$

c spezifische Wärmekapazität

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,19 \frac{\text{Ws}}{\text{gK}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \quad (1.2)$$

Solange kein besonderer Grund zur Trennung besteht, werden nun Arbeit, Wärme- menge und Energie identisch betrachtet.

Der Gesamtwirkungsgrad einer Energiewandlungskette lässt sich mit

$$\eta_{\text{ges}} = \prod_{i=1}^n \eta_i = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \quad (1.3)$$

berechnen.

¹Bei Kernkraftwerken wird die bei der Spaltung von Atomkernen freiwerdende Wärmeenergie genutzt.

Primärenergie wird aus der Natur bereitgestellt. (z. B. Kohle, Öl, Gas, Wind, Wasser, Solarenergie)

Sekundärenergie wird durch die Umwandlung von Primärenergie erreicht. (z. B. Strom, Dampf, Fernwärme, Diesel, Braunkohlebriketts)

Endenergie ist die vom Verbraucher eingesetzte Energie. (=Mischung aus Primär- und Sekundärenergie)

Nutzenergie ist die vom Verbraucher endgültig genutzte Energie.

1.2. Grundlagen der Thermodynamik

1.2.1. Thermodynamische Systeme

Def.: Thermodynamik ist die Lehre von der Wärme und der Umwandlung in eine andere Energieform.

Es wird zwischen 5 thermodynamischen Systemen unterschieden, wobei die festgelegten „Systemgrenzen“ die Art des thermodynamischen Systems festlegt.

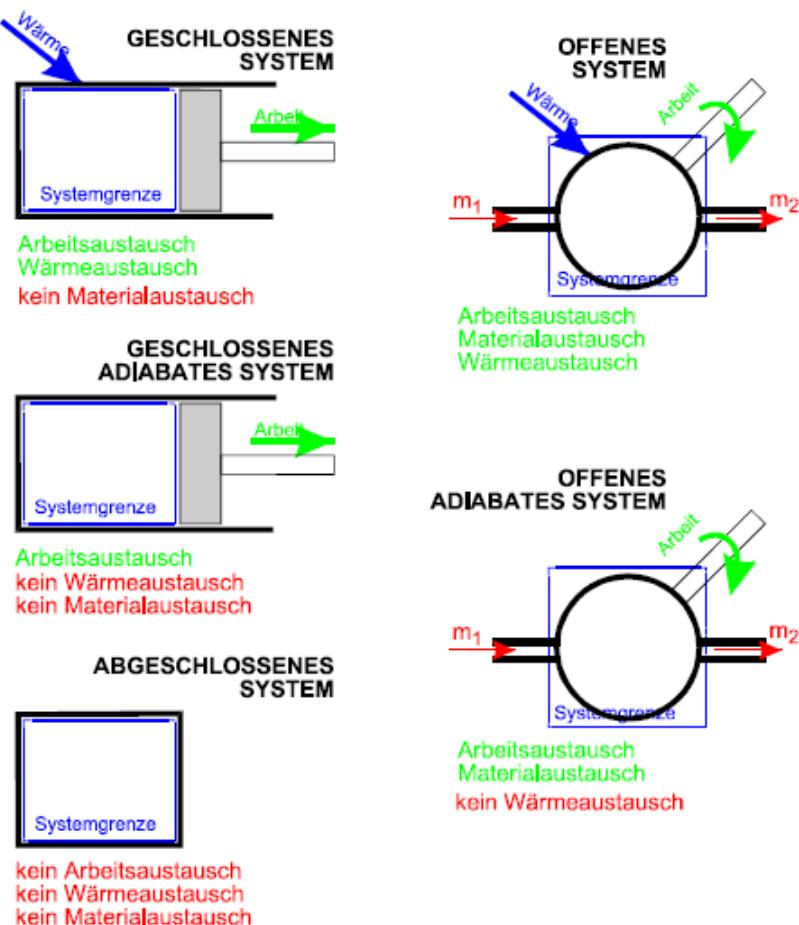


Abbildung 1.3.: Thermodynamische Systeme

Bei einem adiabaten System wird keine Wärmeenergie abgegeben.

1.2.2. Thermische Zustandsgrößen

Def.: Zustandsgrößen sind messbare physikalische Größen, die den stationären Zustand eines Mediums in einem System kennzeichnen.

Der Zusammenhang der Zustandsgrößen wird über die „Zustandsgleichung“ angegeben. Die Gaskonstante R hängt von der Masse und der Art des Gases ab.
(z. B. $R_{\text{LUFT}} = 287 \text{ J/kgK}$)

Entropie S :

Die Entropie [J/K] ist eine extensive Zustandsgröße eines physikalischen Systems und verhält sich bei Vereinigung von Systemen additiv, wie auch das Volumen, sprich die Entropien addieren sich.

Man unterscheidet allgemein zwischen reversiblen und irreversiblen Prozessen. Bei einem reversiblen, also umkehrbaren, Prozess ist die Entropieänderung:

$$dS_{\text{rev}} = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} \quad (1.4)$$

dQ_{rev} umgesetzte Wärmeenergie, sprich die Wärmemenge, welche bei einem reversiblen Prozess mit der Umgebung ausgetauscht wird.
 T absolute Temperatur, bei der der Prozess abläuft

Diese Entropieänderung ist bei Wärmezufuhr ($dQ = \text{pos.}$) positiv und bei Wärmeabfuhr ($dQ = \text{neg.}$) negativ. Bei reversiblen Kreisprozessen (z. B. dem idealen Carnot-Prozess) gilt:

$$\Delta S = 0 \quad (1.5)$$

(Hinweis: Kein Wärmeumsatz tritt z. B. bei Pumpen und Turbinenprozesse auf.)
Hingegen gilt für die Entropieänderung von irreversiblen, also nicht umkehrbaren, Kreisprozessen:

$$\Delta S > 0 \quad (1.6)$$

Wird nun die Entropie S durch die Masse m durchdividiert, so erhält man die spezifische Entropie s [J/kgK] als eine intensive Zustandsgröße. (intensive Zustandsgrößen sind von der Größe des betrachteten Systemes unabhängig)

Enthalpie H :

Die Enthalpie H [J], auch Wärmeinhalt genannt, ist ein Maß für die Energie eines thermodynamischen Systems. Oft wird dabei die spezifische Enthalpie h [J/kg] verwendet.

Die Enthalpie setzt sich dabei aus der inneren Energie U und der Volumenarbeit $p \cdot V$ zusammen:

$$H = U + p \cdot V \quad (1.7)$$

Die innere, mechanisch nicht nutzbare, Energie besteht aus der:

1. thermischen Energie (beruhend auf der ungerichteten Bewegung der Moleküle)
2. chemischen Bindungsenergie
3. potentiellen Energie der Atomkerne

, und nimmt ungefähr proportional der Temperatur des Systems zu und ist am absoluten Nullpunkt gleich der Nullpunktenergie.

1.2.3. Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz beinhaltet den Satz der Erhaltung der Energie unter der Einbeziehung der Wärme und der inneren Energie eines Mediums.

Def.: Die einem geschlossenen System zugeführte Energie entspricht dem Zuwachs an innerer Energie U und der vom System verrichteten Arbeit $p \cdot V$

Kurz gesagt ist die Energie eines abgeschlossenen System konstant und es gilt:

$$\text{Druck} \quad p = \frac{F}{A} \quad [p] = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa} \quad 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar} \quad (1.8)$$

$$\text{absolute Temp. } T = \vartheta + 273, 15 \text{ K} \quad [T] = 1 \text{ K} \quad (1.9)$$

$$\text{spezifisches V.} \quad v = \frac{V}{m} \quad [v] = 1 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1.10)$$

$$\text{Dichte} \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad [\rho] = 1 \text{ kg/m}^3 \quad (1.11)$$

Die Zustandsgleichung beschreibt nun folgenden Zusammenhang zwischen Druck, Volumen, Masse und Temperatur:

$$\begin{aligned} p \cdot V &= m \cdot R \cdot T \\ p \cdot v &= R \cdot T \end{aligned} \quad (1.12)$$

1.2.4. Zustandsänderungen

Eine Zustandsänderung beschreibt die Änderung des Zustandes von einem Zustand in einen anderen.

1. Isochore Zustandsänderung (Volumen $V = \text{konst.}$) keine Volumenänderung bedeutet auch, dass keine Arbeit verrichtet wird!
2. Isobare Zustandsänderung (Druck $p = \text{konst.}$)
3. Isotherme Zustandsänderung (Temperatur $T = \text{konst.}$) Die Temperatur vor und nach der Zustandsänderung ist somit konstant, sprich bei einer Verdichtung muss also die Kompressionswärme abgeführt werden.
4. Adiabatische Zustandsänderung (kein Wärmeaustausch) Es wird also keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. $Q = 0$
5. Polytropische Zustandsänderung Sind gekennzeichnet durch Hyperbeln zwischen isothermen und adiabaten Zustandsänderungen im pV -Diagramm.
6. Isentrope Zustandsänderung (Entropie S des Gesamtsystems konst.) Ein adiabatischer reversibler Prozess ist immer auch isentrop. (die Umkehrung gilt nicht)
7. Isenthalpe Zustandsänderung (Enthalpie H des Gesamtsystems konst.) Ein isothermer reversibler Prozess ist immer auch isenthalp. (die Umkehrung gilt nicht)

Dabei sind isotherme und adiabatische Zustandsänderungen technisch nicht realisierbar!, und alle solche realisierbaren Zustandsänderungen laufen polytrop ab.

Das pV -Diagramm wird häufig für Veranschaulichungen von Prozessabläufen verwendet:

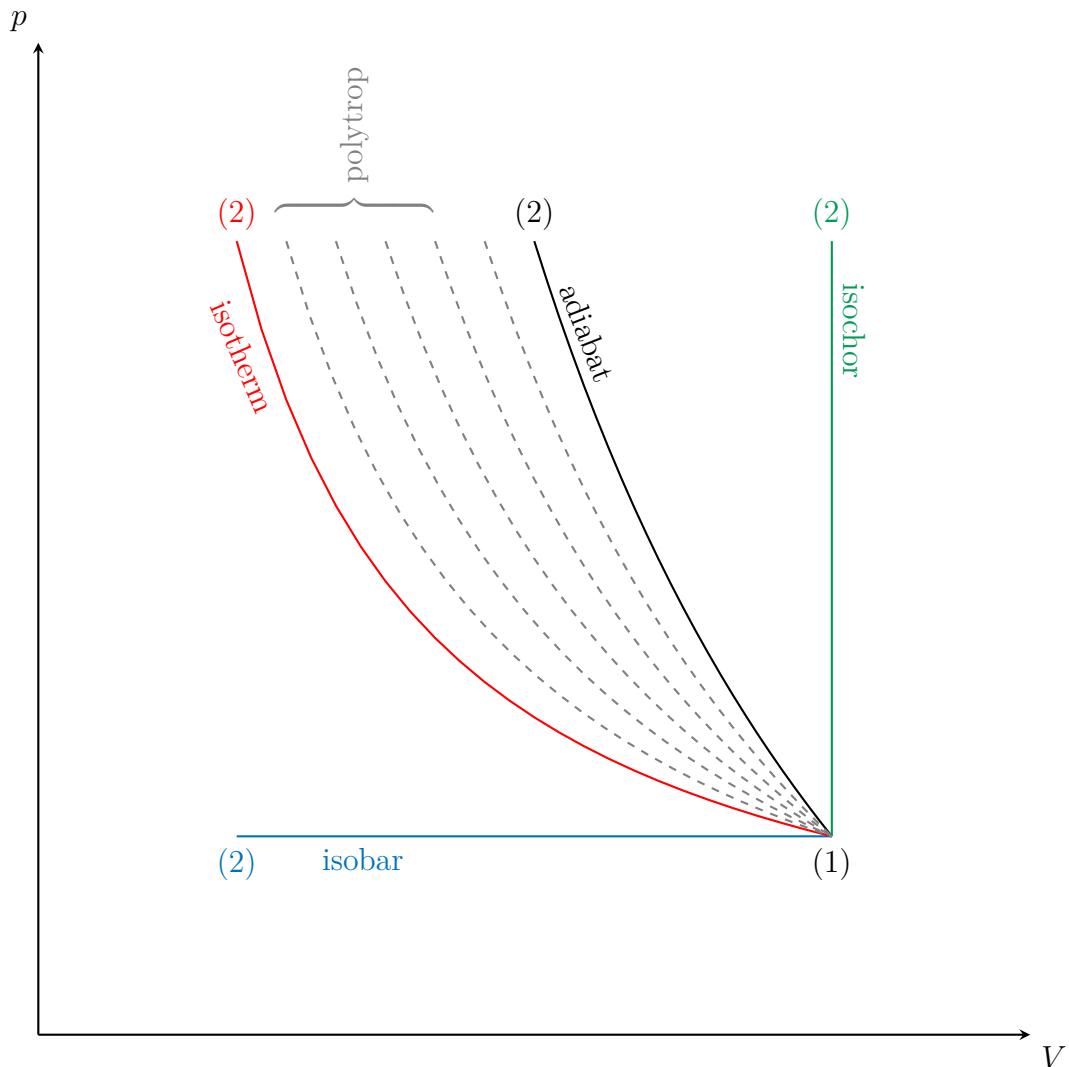


Abbildung 1.4.: Zustandsgleichungen im pV -Diagramm

1.2.5. Kreisprozesse

Ein Kreisprozess ist ein Prozess, an dessen Ende wieder der Anfangszustand erreicht wird, damit ein gasförmiges Medium kontinuierlich Raumänderungsarbeit verrichtet, sprich in einer Wärmekraftmaschine ständig Wärme in mechanische Energie (Turbine) umgewandelt werden kann. Es ist sozusagen eine Folge von Zustandsänderungen eines Arbeitsmediums, welche periodisch ablaufen.

Man unterscheidet hier zwischen Links- und Rechtsprozessen. Beim rechtslaufenden Prozess wird ein Teil der bei hoher Temperatur zugeführten Wärme in Arbeit umgewandelt und der andere Teil wird bei niedriger Temperatur wieder abgeführt. \Rightarrow Die Differenz ist die Kreisprozessarbeit.

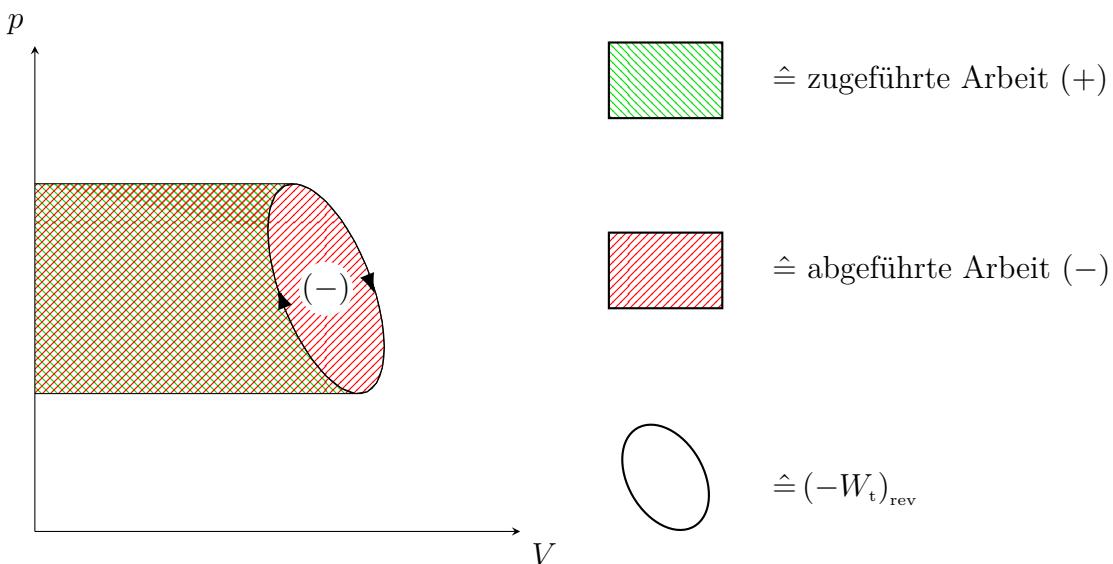


Abbildung 1.5.: Kreisprozess im pV -Diagramm

Die Gewinnung von Arbeit im rechtslaufenden Prozess kommt zustande, da bei niedriger Temperatur, sprich bei niedrigem Druck, komprimiert wird (Arbeitsaufwand) und bei hohem Druck, sprich bei hoher Temperatur, expandiert das Fluid (unter Arbeitsabgabe). \Rightarrow Der Betrag der Volumenarbeit der Expansion ist größer der der Kompression.

Die Flächen in diesem Diagramm entsprechen im Prinzip mechanischen Arbeiten und die von den Zustandslinien eingeschlossene Fläche im pV -Diagramm gibt beim rechtslaufenden Kreisprozess die reversible, vom kontinuierlich ablaufenden Prozess, abgegebene Arbeit an. Die Wärme ist im pV -Diagramm nicht ersichtlich!

Um die Wärmebilanz anzuzeigen wird das Ts -Diagramm verwendet, welches bei einem reversiblen Kreisprozess (ohne Dissipation) die übertragenen Wärmen anzeigt. Bei irreversiblen (realen) Kreisprozessen stellt die eingeschlossene Fläche im Ts -Diagramm die Summe aus reversibler übertragener Wärme und Dissipationsarbeit dar.

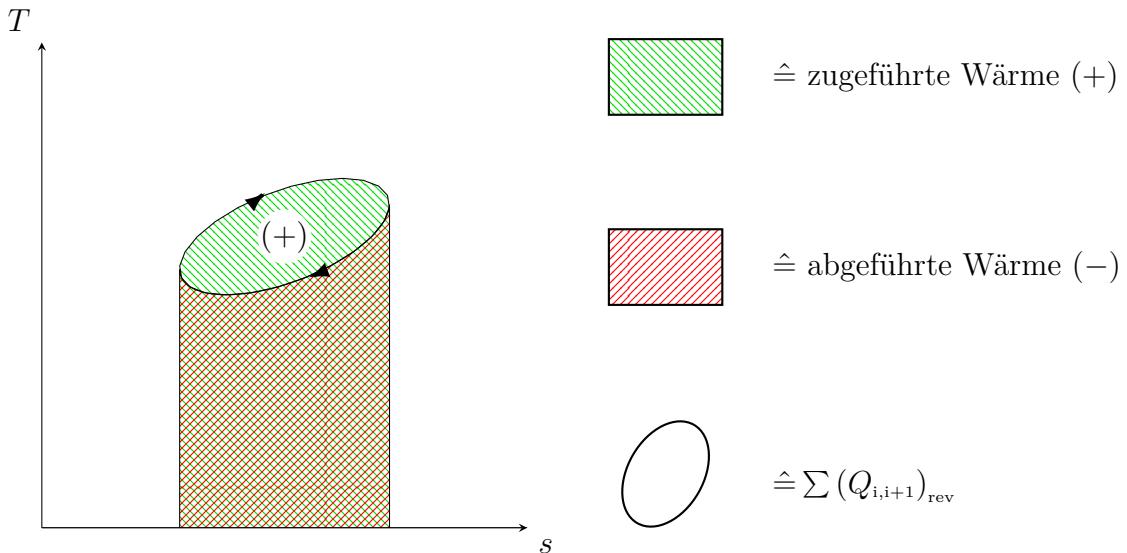


Abbildung 1.6.: Wärmebilanz im Ts -Diagramm

Die zugeführte Wärme entspricht im Prinzip der dem Arbeitsmedium im Brennkessel zugeführten Wärme und die Differenz entspricht dann der mechanischen Volumenarbeit, welche man vom Prozess erhält.

Man unterscheidet allgemein zwischen einem „offenen Kreisprozess“, wo das Medium nach dem Arbeitsprozess austritt und einem „geschlossenen Kreisprozess“, wo immer dasselbe Medium den Arbeitsprozess durchläuft!

Ein idealer, technisch nicht realisierbarer Kreisprozess ist der „Carnot-Kreisprozess“, welcher als Vergleich für die Bewertung von Kreisprozessen dient und den höchsten thermischen Wirkungsgrad ergibt, da in realen Anordnungen immer etwas Energie abgegeben wird, z. B. durch Reibung.

$$\eta_{\text{Th}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1.13)$$

T_2 „Umgebungstemperatur“ ($T_2 < T_1$)
 T_1 Arbeitstemperatur

Man erkennt, dass der thermische Wirkungsgrad von der höchsten und tiefsten Temperatur in einem Kreisprozess bestimmt wird!

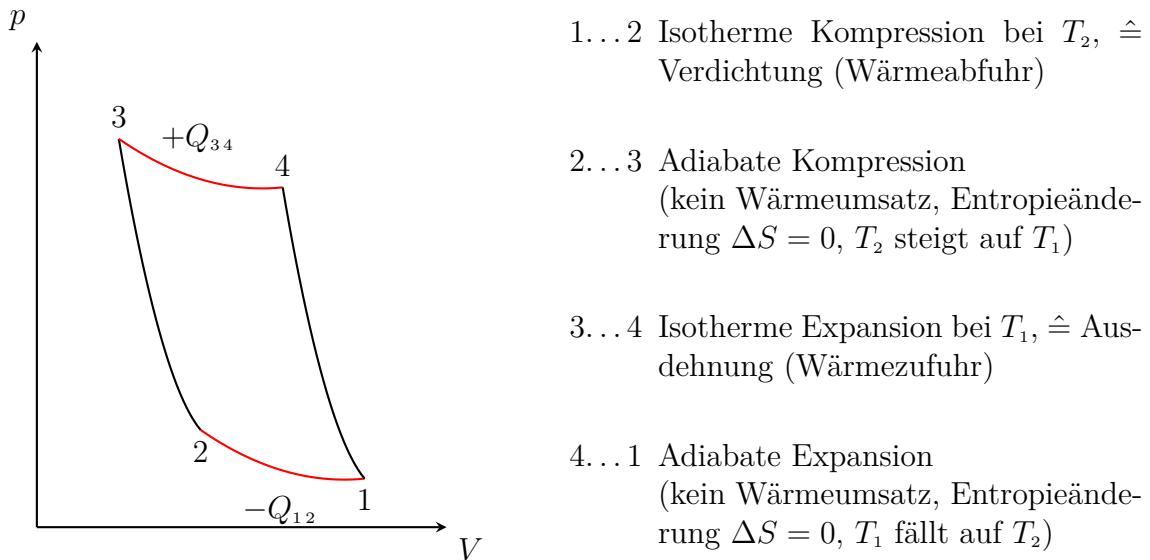


Abbildung 1.7.: Carnot-Prozess

Die umschlossene Fläche im pV -Diagramm ist ein Maß für die abgegebene Arbeit in einem Kreisprozess und sollte somit ein Maximum haben.

Vergleich von verschiedenen Kraftwerkstypen:

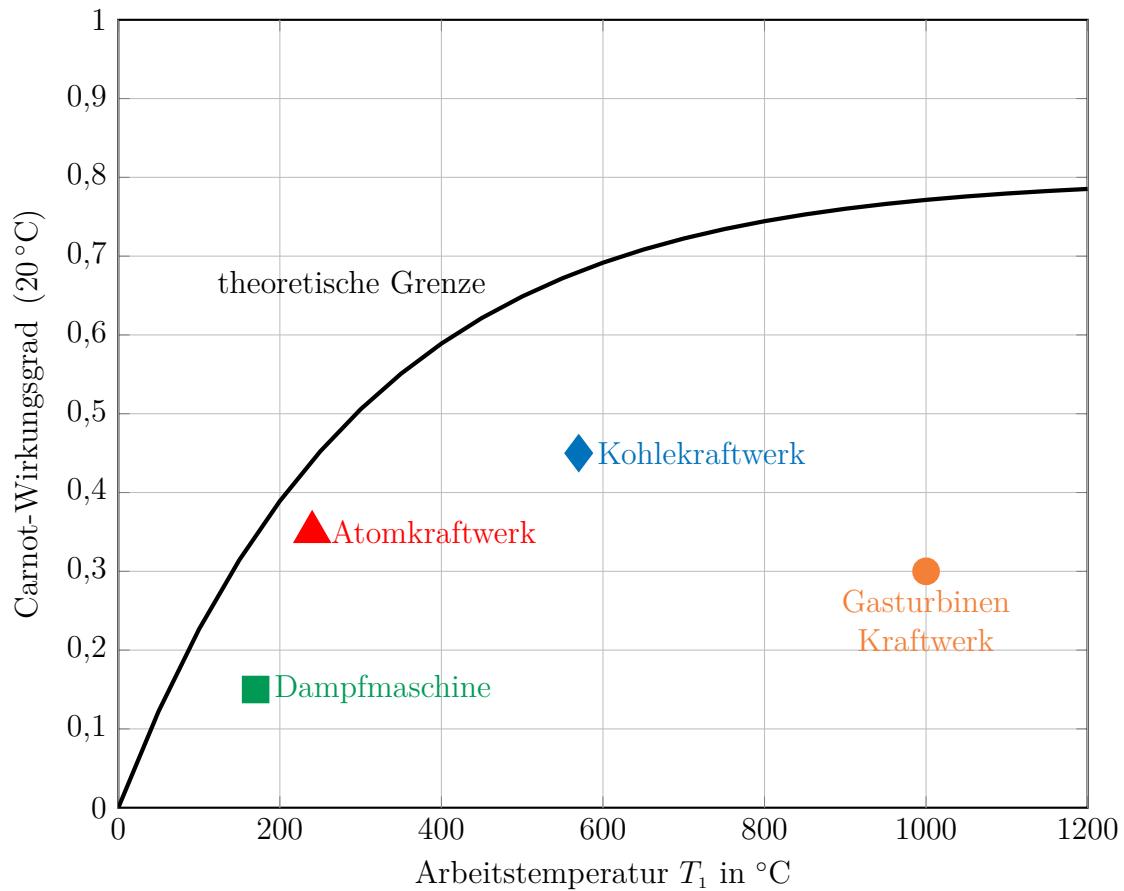


Abbildung 1.8.: Wirkungsgrade η_{Th} bei der Umwandlung von Wärmeenergie ($T_2 = 20^\circ\text{C} = 293,15\text{ K}$)

Thermische Energie ist natürlich nicht vollständig nutzbar und sie wird somit in Exergie (nutzbare Energie) und Anergie (nicht nutzbare Energie) unterteilt.

Bsp.: Ein Liter Wasser hat eine Temperatur von 100 °C und gesucht sind die absolute thermische Energie, Anergie, Exergie und der thermische Wirkungsgrad.

$$\Delta W = m \cdot c \cdot \Delta v \approx 1 \text{ kg} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \underbrace{(100 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C})}_{\hat{=} 80 \text{ K}} = 335,2 \text{ kJ}$$

$$\eta_{\text{Th}} = 1 - \frac{293,15 \text{ } ^\circ\text{K}}{373,15 \text{ } ^\circ\text{K}} \hat{=} 21,44 \%$$

$$\text{Exergie} = \Delta W \cdot \eta_{\text{Th}} = 335,2 \text{ kJ} \cdot 0,2144 = 71,86 \text{ kJ}$$

$$\text{Anergie} = \Delta W \cdot (1 - \eta_{\text{Th}}) = 335,2 \text{ kJ} \cdot 0,7856 = 263,34 \text{ kJ}$$

1.2.6. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Die Vorgänge in der Thermodynamik sind wegen der immer vorhandenen Reibung nicht umkehrbare, sprich irreversible Prozesse.

Def.: **Wärme kann NIE von selbst von einem Körper tieferer Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen.**

Das bedeutet, dass zugeführte Wärme bei irreversiblen (realen) Prozessen NICHT vollständig in Arbeit umgewandelt werden kann und zur Arbeitsabgabe muss ein Temperaturgefälle vorhanden sein.

1.3. Wirkungsweise von Dampfkraftwerken

Als idealisierter Kreisprozess eines Wärmekraftwerkes dient der „Clausius-Rankine-Prozess“, welcher die technischen Abläufe beschreibt. Dieser Kreisprozess enthält natürlich noch wesentliche Vereinfachungen bzw. Vernachlässigungen.

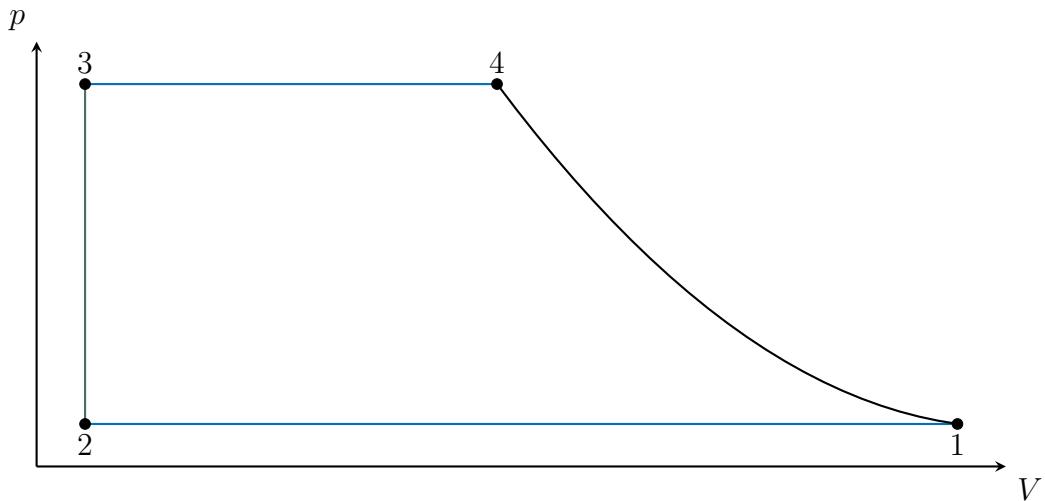


Abbildung 1.9.: pV -Diagramm des Clausius-Rankine-Prozesses

- 1...2 Isobare Kondensation des Dampfes im Kondensator, durch Kühlung mittels einem Kühlwasserkreislauf. ($p = \text{konst.}$ & V sinkt)
- 2...3 Adiabate Verdichtungsphase, durch isentrope Druckerhöhung durch die Speisepumpe, welches das Kondensat vom Speisewasserbehälter in den Kessel befördert. ($V = \text{konst.}$ & $\Delta S = 0$)
- 3...4 Isobare Wärmezufuhr im Kessel, wobei das Wasser bis zum Verdampfungspunkt erwärmt wird, dann verdampft und schließlich überhitzt. ($p = \text{konst.}$ & V steigt)
- 4...1 Adiabate Expansion des Dampfes in der Turbine. \Rightarrow Druck und Temperatur sinken, Volumen steigt. ($\Delta S = 0$)

Die umschlossene Fläche des pV -Diagramms stellt natürlich ein Maß für die abgegebene Arbeit dar.

Die Wärmebilanz beim Clausius-Rankine-Prozess ist im Ts -Diagramm ersichtlich:

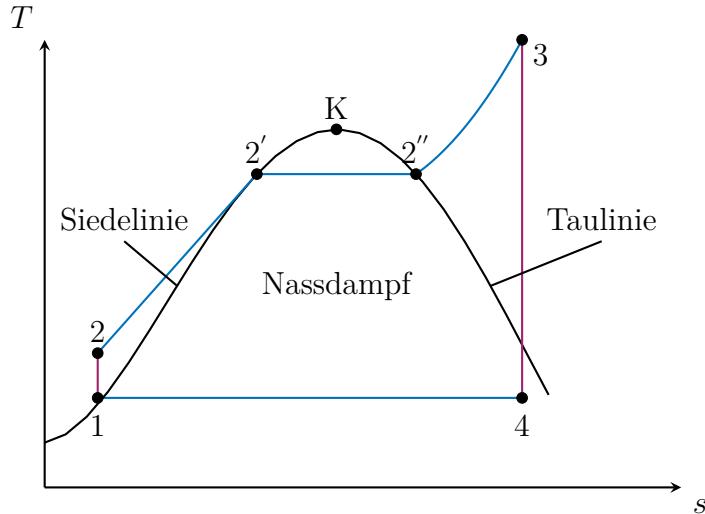


Abbildung 1.10.: Ts -Diagramm des unterkritischen Clausius-Rankine-Prozesses

, hingegen erfolgt der Übergang beim überkritischen Clausius-Rankine-Prozesses über dem Kritischen Punkt K und beim Satt dampfprozess geht direkt von 2'' über eine isentrope Expansion auf 4.

1...2 Isentrope Druckerhöhung durch die Speisepumpe.

2...2' Isobare Speisewasservorwärmung.

2'...2'' Isobare Verdampfung.

2''...3 Isobare Überhitzung.

3...4 Isentrope Expansion des Dampfes in der Turbine.

4...1 Isobare Kondensation des Dampfes im Kondensator, durch Kühlung wird der Dampf niedergeschlagen.

Das große Druckgefälle, welches die Dampfturbine zu verarbeiten hat, erfordert so viele Stufen, dass diese in einem einzigen Gehäuse nicht untergebracht werden könnten. Es werden deshalb mehrere Turbinen (Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckturbine) mit dem Generator zu einem Wellenstrang zusammengekuppelt.

1.3.1. Zustandsänderungen des Wasserdampfes

In vielen Maschinen treten Arbeitsmedien (meist Wasser) in flüssigen und gasförmigen Aggregatzuständen auf. Dabei versteht man unter „Verdampfen“ den Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand und unter „Kondensieren“ den Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand.

Verdampfen von Wasser bei konstantem Druck p :

„Kaltem“ Wasser wird Wärme zugeführt. Erreicht die Temperatur die „Siede“-Temperatur T_s , so beginnt das Wasser zu verdampfen und erst, wenn das gesamte Wasser verdampft ist kann die Temperatur weiter ansteigen. Das Gemisch aus siedendem Wasser und Dampf wird als „Nassdampf“ bezeichnet und ist das gesamte Wasser verdampft und liegt die Siedetemperatur vor, so spricht man vom „Sattdampf“. Steigt die Temperatur dann weiter an, so spricht man von „Heißdampf“.

Die zum Verdampfen erforderliche Energie wird als Verdampfungswärme bezeichnet und ist stoff- und druckabhängig.

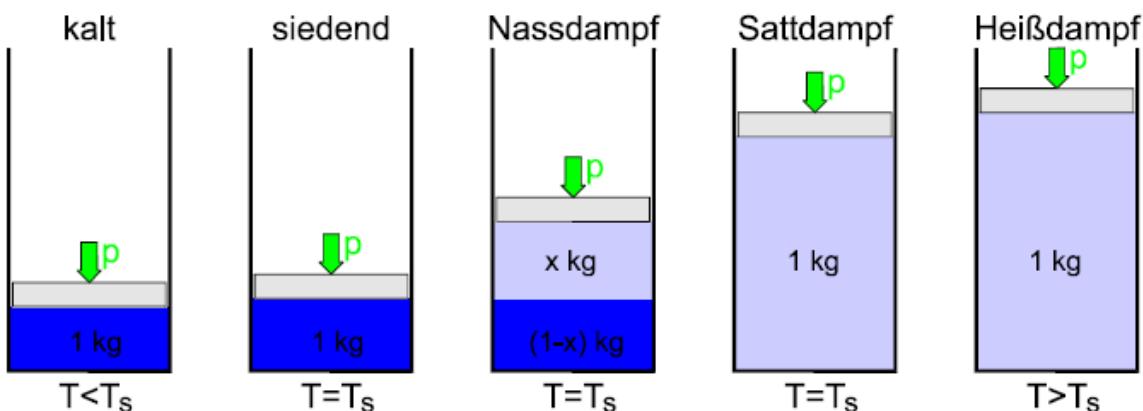


Abbildung 1.11.: Verdampfen von 1 kg Wasser bei konstantem Druck

Der kritische Punkt K von Wasser liegt bei einer Temperatur von $374,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem Druck von mindestens $221,2\text{ bar}$. Darüber kann es keine Nassdampfphasen mehr geben und Wasser (der Dampf) im sogenannten überkritischen Zustand hat die Dichte von flüssigem Wasser, also relativ gesehen groß, und die Viskosität von Wasserdampf, also es kann gleich schnell fließen wie Wasserdampf.

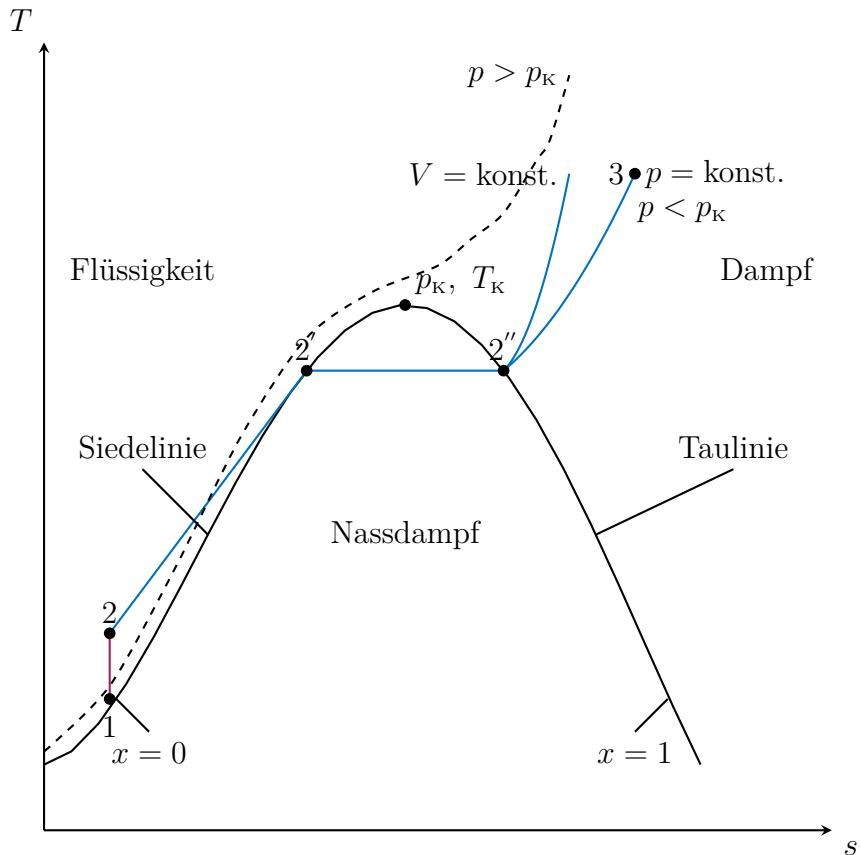


Abbildung 1.12.: Verdampfen von Wasser im Ts -Diagramm

Im Kreisprozess einer Dampfkraftanlage wird Arbeit gewonnen durch Entspannung von Wasserdampf in einer Expansionsmaschine (Dampfturbine). Neben der Turbine und Speisewassererpumpe benötigt man aber noch Wärmeübertrager zur Zu- & Abfuhr von Wärme. Dies sind hier einerseits die Verdampfer und Überhitzer und werden zusammengefasst als Dampferzeuger bezeichnet und andererseits der Kondensator für die Wärmeabfuhr.

Als idealer (reversibler) Vergleichsprozess dient hier der Clausius-Rankine-Prozess und die nachfolgenden Angaben sind auf das nachfolgende Ts -Diagramm bezogen. Der Kondensationsdruck $p_1 = p_4$ wird durch die Temperatur des Kühlmittels bestimmt, welches den Wärmestrom $\dot{Q}_{1,4}$ aufnimmt. Heutzutage liegt die hier die Temperatur bei $T_1 = T_4 = 30$ bis 50°C und $p_1 = p_4$ bei 0,05 bar bis 0,1 bar \Rightarrow „Abdampfzustand“

Der „Frischdampfzustand“ liegt bei maximal $p_3 \approx 285$ bar und $T_3 = 600^\circ\text{C}$ (es herschen sogenannte überkritische Bedingungen vor).

Für einen idealen Clausius-Rankine-Prozess muss also gelten: $p_2 = p_2' = p_2'' = p_3$ & $T_1 = T_4$ & $p_1 = p_4$ und es muss noch T_3 existieren. Weitere Enthalpien, Volumina und andere Zustandsgrößen für die Punkte 1 bis 4 werden aus Dampftafeln für den Sättigungszustand bzw. für den überhitzten Dampf und aus dem Mollier hs -Diagramm entnommen.

Die übertragenen Energieströme lassen sich aus dem umlaufenden Arbeitsmittelstrom \dot{m}_s , welcher auch noch als Dampfdurchsatz oder Speisewassermassenstrom bezeichnet wird, und den jeweiligen Enthalpiedifferenzen berechnen. Vernachlässigt wird die Leistungsaufnahme der Speisepumpe, da sie wesentlich geringer als die Leistungsabgabe der Turbine ist. (ca. 2 bis 3 %)

Für den zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{2,3}$ gilt:

$$\dot{Q}_{2,3} = \dot{m}_s \cdot Q_{2,3} = \dot{m}_s \cdot (h_3 - h_2) \quad (1.14)$$

Die gesamte Wärmezufuhr setzt sich aus drei Abschnitten zusammen, welche in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich und erklärt werden.

Für die Wärmeabgabe am Kondensator gilt:

$$Q_{4,1} = h_4 - h_1 \quad (1.15)$$

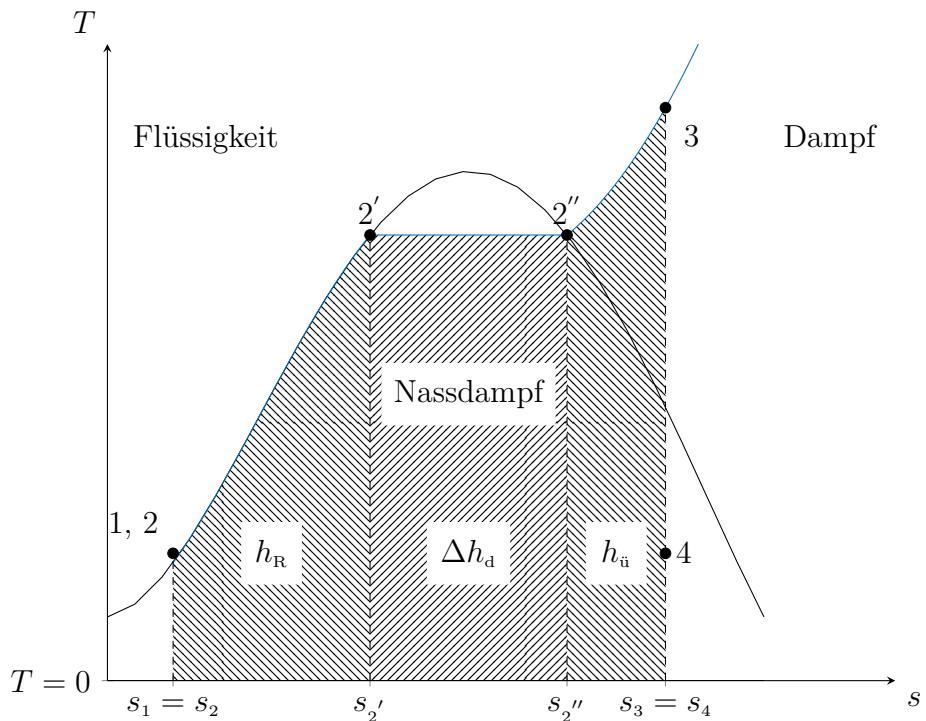


Abbildung 1.13.: Zugeführter Wärmestrom

Die drei Abschnitte der Wärmezufuhr:

$1, 2 \dots 2'$ Flüssigkeitswärme $h_R = Q_R = h_{2'} - h_2$

$2' \dots 2''$ Verdampfungswärme, Verdampfungsenthalpie $Q_d = \Delta h_d = h_{2''} - h_{2'}$

$2'' \dots 3$ Überhitzungswärme, Überhitzungsenthalpie $Q_{\ddot{u}} = h_{\ddot{u}} = h_3 - h_{2''}$

1.3.2. Grundschaltung

Das Kesselspeisewasser über die Speisepumpe in den Kessel befördert, dort verdampft und anschließend im Überhitzer auf 550 °C bei 250 bar überhitzt. Über die Frischdampfleitung gelangt nun der Dampf in die Turbine, welche meist aus drei Stufen (Hoch-, Mittel- & Niederdruckturbine) besteht.

Je kleiner der Druck wird, desto größer wird das Volumen des Dampfes und damit der Turbine. Nach der Turbine strömt der Abdampf (fast ein Vakuum (0,03 bar)) in den Kondensator und wird als Wasser niedergeschlagen. Über die Kondensatpumpe wird das Wasser in den Sammelbehälter gepumpt und von dort drückt die Speisewasserpumpe wieder das Wasser in den Kessel zurück.

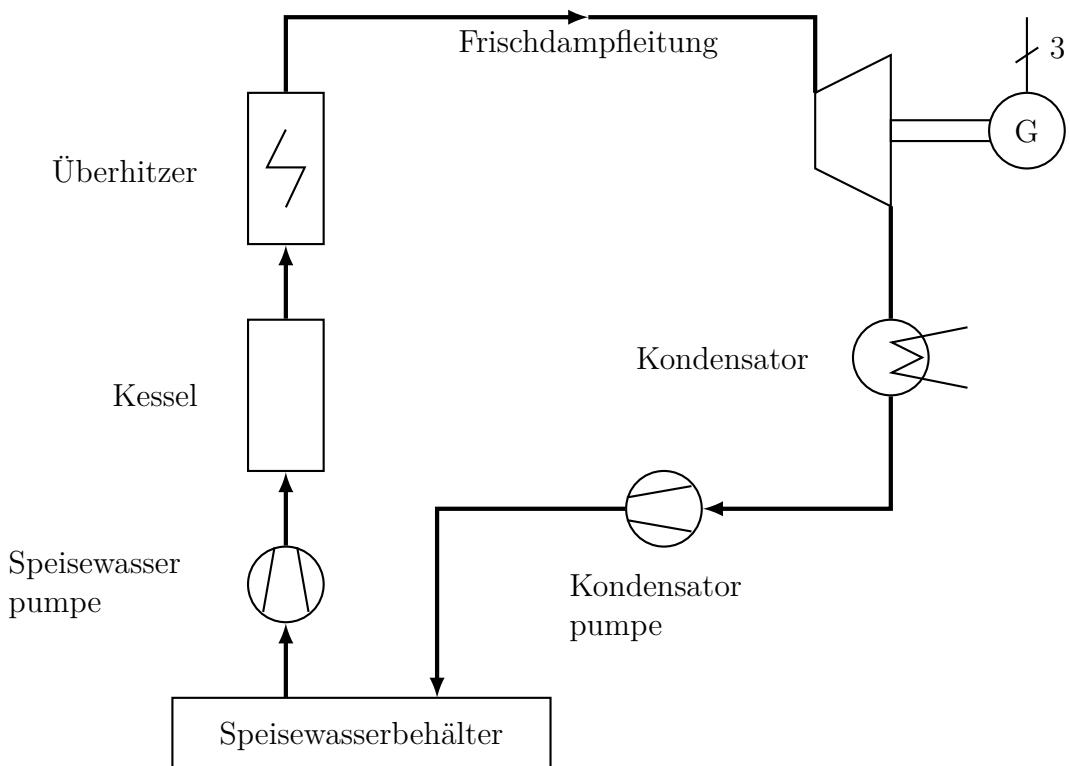


Abbildung 1.14.: Schaltschema einer Kondensationsdampfkraftanlage

Der Wirkungsgrad liegt heute bei etwa 43 %. Bei einer Kraft-Wärme-Kopplung wird die Abwärme des Kondensators als Fernwärme genutzt und dadurch steigt der Wirkungsgrad auf etwa 85 % an.

1.3.3. Maßnahmen zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrades

Zur Verbesserung des Wirkungsgrades gibt es folgende Möglichkeiten, welche an Hand des Ts -Diagrammes verdeutlicht werden.

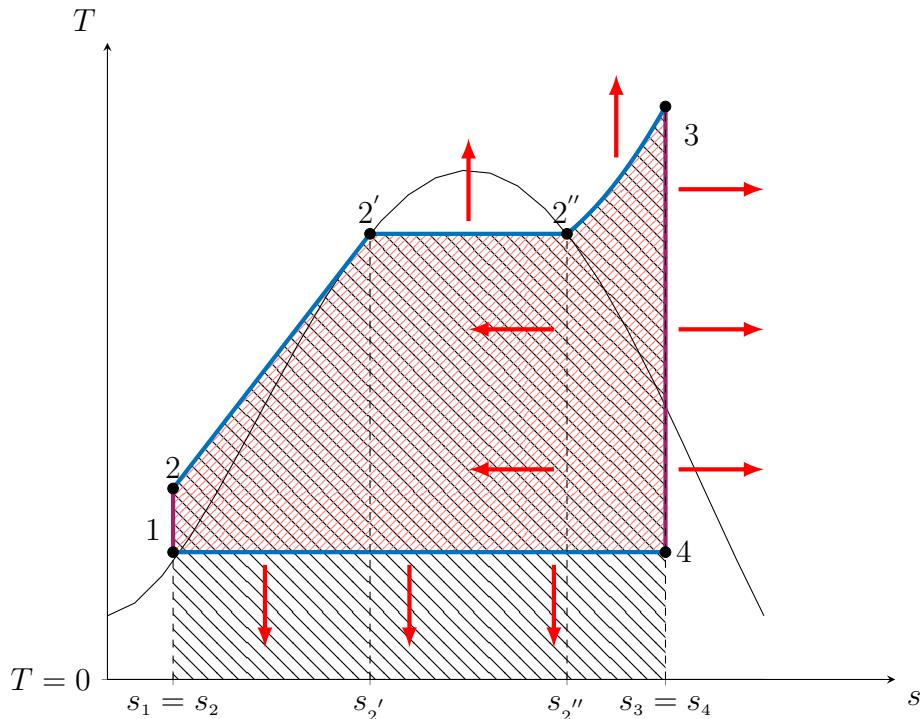


Abbildung 1.15.: Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung

Der Clausius-Rankine-Prozess hat im Vergleich zu anderen Wärmekraftanlagen einen kleinen η_{Th} , jedoch lässt sich dieser Nachteil durch Maßnahmen kompensieren, so dass der thermische Wirkungsgrad moderner Kondensationskraftwerke den von Gas- und Verbrennungskraftanlagen erreicht und sogar übersteigt ($\eta = 43 - 49 \%$).

- Zwischenüberhitzung (Erhöhung der Zustandsänderungen mit hohem Wirkungsgrad)
- ← Vermeiden von Zustandsänderungen mit niedrigem Wirkungsgrad durch inneren Wärmeaustausch (regenerative Speisewasservorwärmung)
- ↓ Absenkung des Turbinengegendrucks (Senkung des Kondensationsdrucks)
- ↑ Steigerung der Turbineneintrittstemperatur und des Eintrittsdrucks (sprich Erhöhung des Frischdampfzustandes)

Absenken des Abdampfdrucks:

Der thermische Wirkungsgrad η_{Th} hängt stark vom Austrittsdruck des Dampfes aus der Niederdruckturbine ab. Der Druck am Turbinenaustritt ist in guter Näherung gleich dem Kondensatordruck und legt damit die Temperatur fest, bei der die Abwärme des Dampfkraftprozesses an die Umgebung abgegeben wird.

Beim Erreichen der Temperatur des Kühlmittels im Kondensator findet diese Verbesserungsmaßnahme ihre Grenze. Letztendlich begrenzt die Umgebungstemperatur die mögliche Absenkung.

Bei Großkraftwerken liegt der Kondensationsdruck heute bei etwa 40 mbar, was einer Temperatur von 29 °C entspricht.

Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur und des Eintrittsdrucks:

Hierdurch wird die Nutzarbeitsfläche im Ts -Diagramm, d. h. die von den Zustandsänderungslinien eingeschlossene Fläche, vor allem in den Bereichen vergrößert, die den größten Anteil für den Wirkungsgrad liefern.

Im angeführten Beispiel ist die Zustandsänderung über $2'_{\text{x}} - 2''_{\text{x}} - 3_{\text{x}}$ so gewählt, dass die abzuführende Wärme genauso groß ist wie im Referenzprozess $2' - 2'' - 3$. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die gesamte zusätzlich zugeführte Wärme (Fläche $2'_{\text{x}} - 2''_{\text{x}} - 3_{\text{x}} - 3 - 2'' - 2' - 2'_{\text{x}}$) vollständig in Turbinenleistung umgesetzt wird!

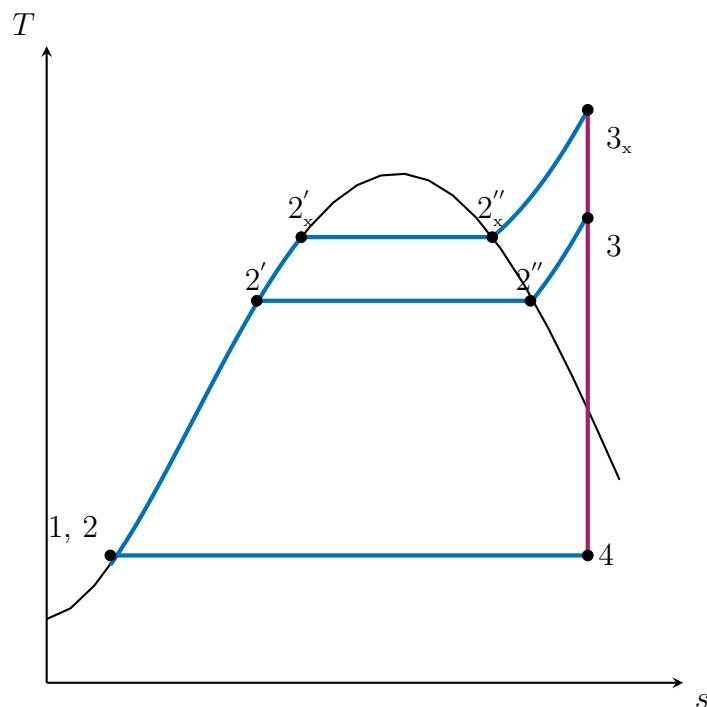


Abbildung 1.16.: Erhöhung des Frischdampfzustandes

Die Arbeitsausbeute beider Prozesse unterscheidet sich mit:

$$\Delta W = h_{3x} - h_3$$

Zwischenüberhitzung:

Die Zwischenüberhitzung ist ein an den Hochdruckprozess angeschlossener Teilprozess bei dem der austretende Dampf nach einer Teilentspannung in der Hochdruck (HD)-Turbine zum Dampferzeuger rückgeführt und dann im Zwischenüberhitzer (ZÜ) wieder etwa auf die gleiche Temperatur, wie der Hochdruckdampf, erhitzt wird. Liegt die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr $\bar{T}_{\text{ZÜ}}$ des Teilprozesses über der Temperatur des Hochdruckprozesses, so steigt der Wirkungsgrad.

Des Weiteren wird durch die Zwischenüberhitzung das hohe Druckgefälle im Nassdampfgebiet vermieden. (Durch eine Expansion von sehr hohen Drücken p_3 auf sehr niedrige Drücke p_4 kann im Nassdampfgebiet ein Zustand mit hoher Endnässe, niedrigem Dampfgehalt, erreicht werden, was zu vermeiden ist, da die Kondensattröpfchen mit hoher Geschwindigkeit auf die Turbinenschaufeln auftreffen (sogenannte Kavitation) und diese beschädigen würden. Außerdem würde ein hoher Wassergehalt die Korrosion fördern.)

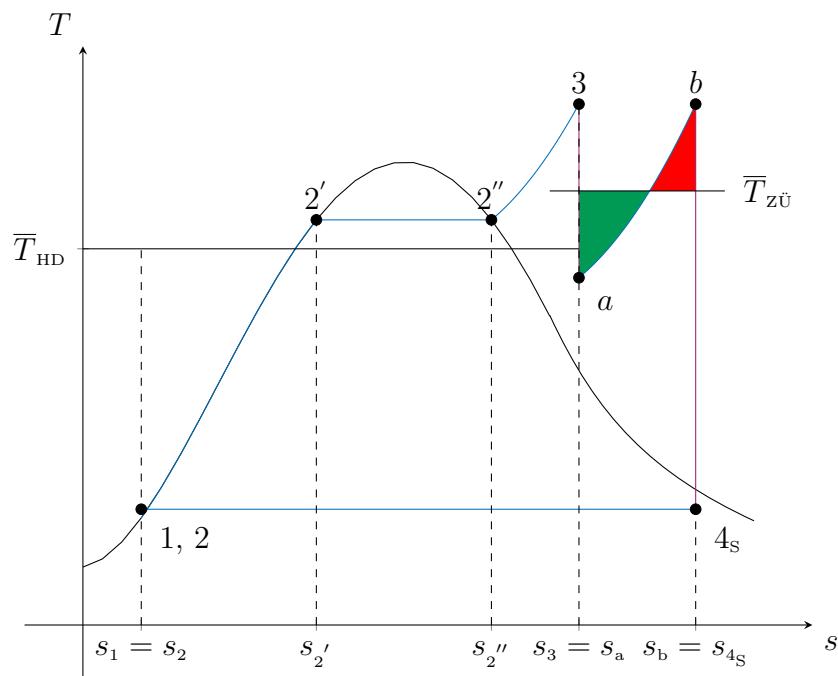


Abbildung 1.17.: Zwischenüberhitzung im Ts -Diagramm

3... a Expansion in der HD-Turbine

a... b Zwischenüberhitzung

b... 4 Expansion in der ND-Turbine (bzw. und Mitteldruckturbine)

Das notwendigerweise große Expansionsvolumen kann bei zweiflutigen Niederdruckturbinen dazu führen, dass die Schaufeln am Austritt so lang werden würden, dass sich ihre Spitzen mit Überschallgeschwindigkeiten bewegen müssten. Um die Materialbelastung zu begrenzen, ersetzt man daher große Niederdruckturbinen durch zwei, dampfmäßig parallel geschaltete Einheiten, um so das erforderliche Expansionsvolumen auf vier, anstatt auf zwei, Austritte zu verteilen (vierflutig).

Eine zweite Zwischenüberhitzung kann zwar den Wirkungsgrad noch etwas steigern, jedoch steht dies mit einem hohen verbundenen Bauaufwand in Verbindung und findet nur in Sonderfällen Anwendung.

Regenerative Speisewasservorwärmung:

Dabei werden aus den Turbinen an verschiedenen Stellen (bei verschiedenen Drücken bzw. Temperaturen) jeweils geringe Dampfströme entnommen. Es wird sozusagen die Kondensationswärme der Dampfströme genutzt, um das Speisewasser aufzuwärmen. Dabei wird das Speisewasser durch einen prozessinternen Wärmeaustausch auf eine wesentlich über der Kondensationstemperatur des im Kondensator niedergeschlagenen Dampfes liegende Temperatur aufgeheizt.

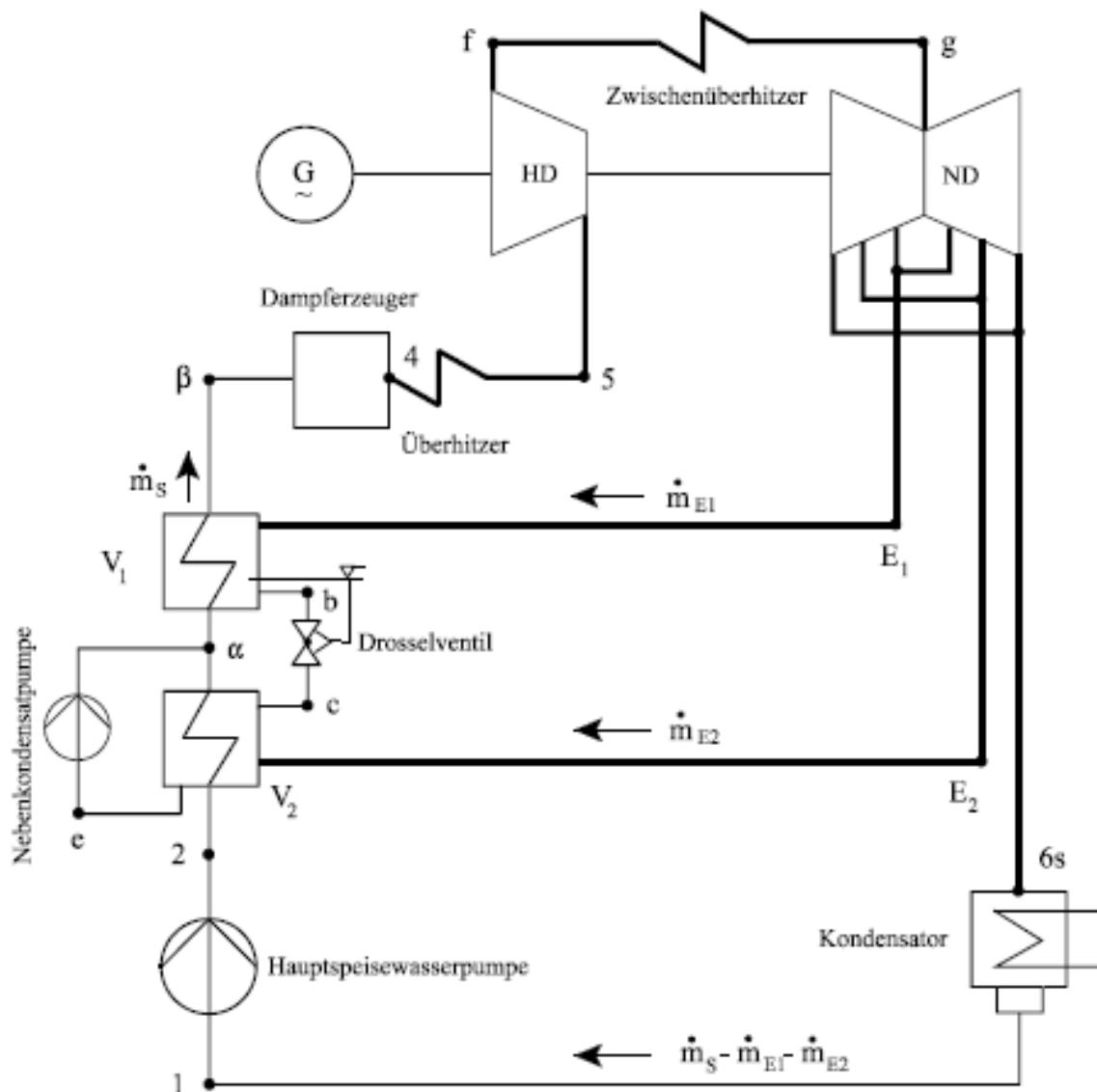


Abbildung 1.18.: Wärmeschaltbild mit Wirkungsgradmethoden

1.4. Aufbau des Kessels

Beim „Flammrohrkessel“ ist das Flammrohr vom Wasser umgeben und die Verbrennungsgase werden über, im Wasser liegende, Rauchrohre mit kleinem Durchmesser geführt.

Der Vorteil dieser Variante ist die Robustheit, welche den langen Anfahrzeiten gegenübersteht.

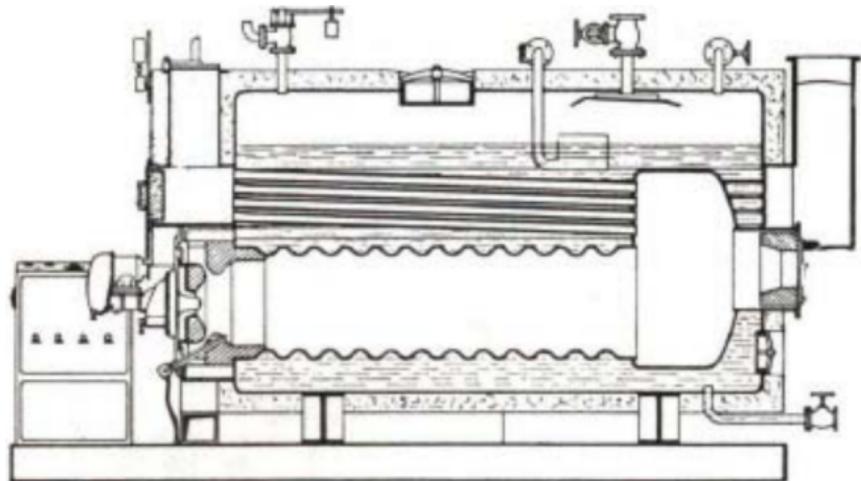


Abbildung 1.19.: Flammrohrkessel

Im Gegensatz dazu wird beim „Wasserrohrkessel“ das Wasser durch schräge Rohre, wegen den Dampfblasen, geleitet.

Der Wasserkreislauf ergibt sich über die Fallrohre und Einsatz finden sie bei großen Leistungen und Drücken.

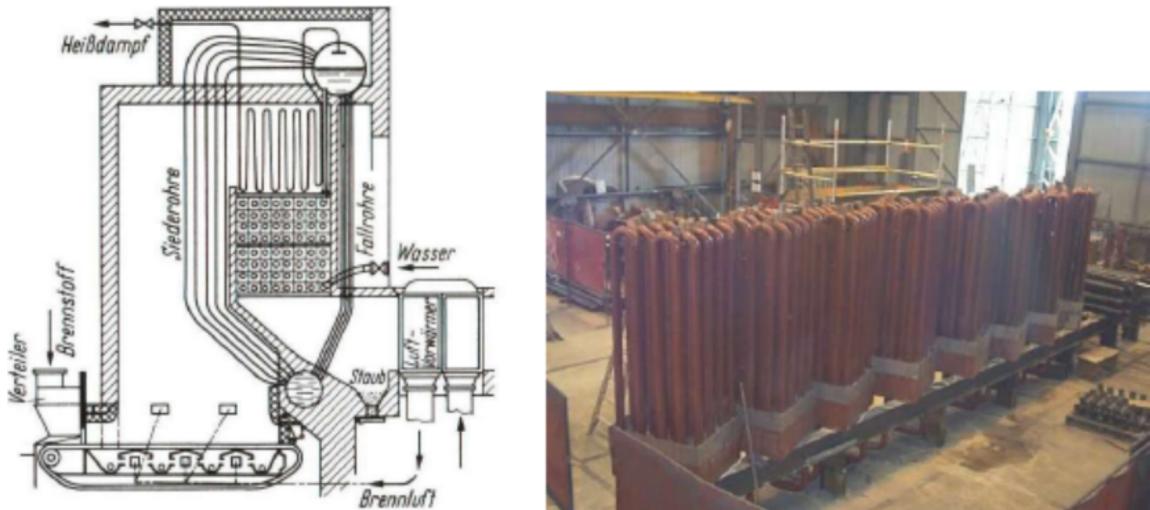


Abbildung 1.20.: Wasserrohrkessel

Damit sich die Feuertemperatur erhöht, wird die Verbrennungsluft für den Brenner im Luftvorwärmer erwärmt. Der Überhitzer liegt dabei im oberen Teil der Brennkammer.

Die Kesseln sind meist für Mischfeuerung (Kohle-Öl-Gas) ausgelegt.

1.5. Dampfturbine

Die Dampfturbine besteht in der Regel, wegen des großen Druckgefälles, aus mehreren hintereinander geschalteten Stufen, wobei sich bei einer „Gleichdruckturbine“ der Dampf das Laufrad mit dem gleichen Druck wie bei Eintritt verlässt und bei einer „Überdruckstufe“ verringert sich der Druck in der Laufschaufel.

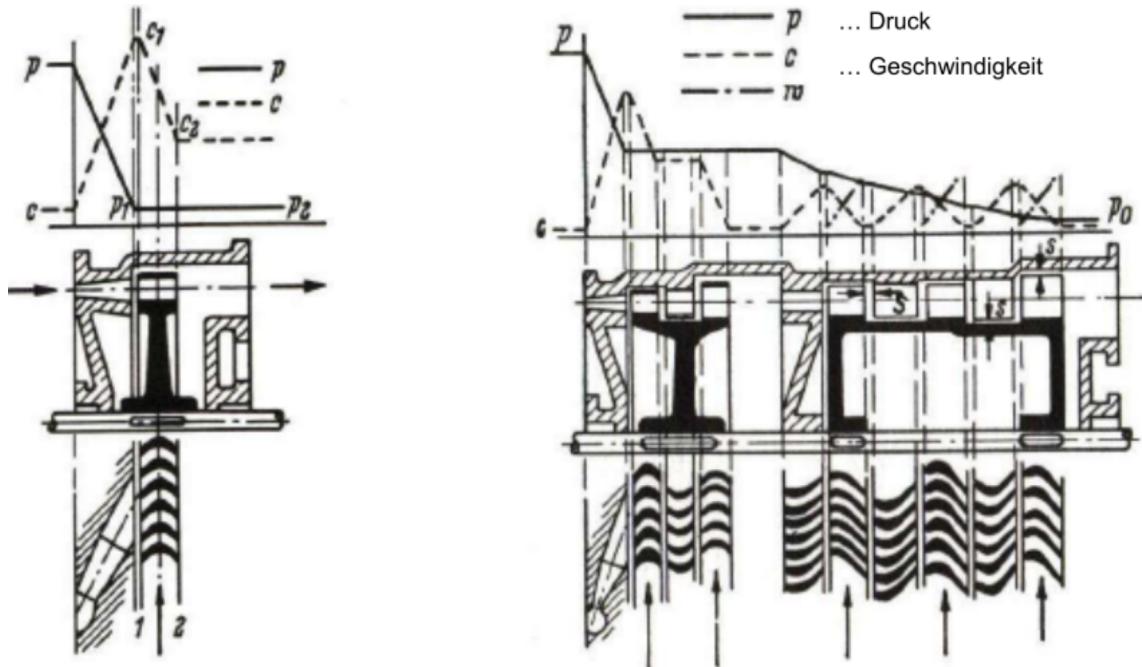


Abbildung 1.21.: Vergleich: Gleichdruck- & Überdruckturbine

Eine Stufe besteht aus einer Düse und einem Laufrad. Dabei wird der Dampf über die feststehende Düse oder in Leitschaufeln beschleunigt und danach wird er auf die Schaufeln des Laufrades gelenkt, das er somit in Drehbewegung versetzt.

1.6. Kondensation und Kühlung

Man differenziert hier zwischen einer Frischwasserkühlung, Nasskühltürmen und Trockenkühltürmen.

Frischwasserkühlung:

Die Aufwärmspanne beträgt 10 K (groß) und die Aufheizung des Flusswasser kann 3 ... 6 K betragen, was das biologische Gleichgewicht stören kann.

Des Weiteren muss bei Niedrigwasser die Kraftwerksleistung reduziert werden , jedoch erfordern diese Kühlungen die niedrigsten Investitionskosten.

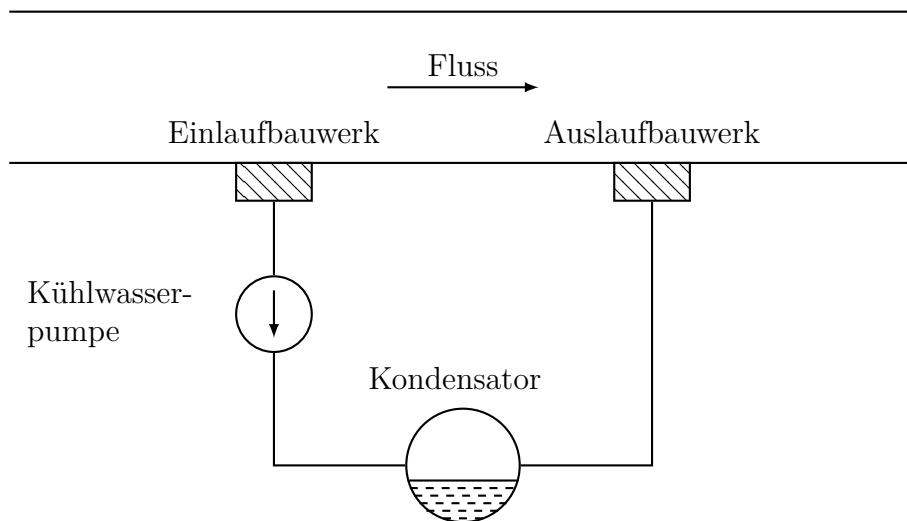


Abbildung 1.22.: Frischwasserkühlung am Flusslauf

Nasskühltürme:

Hier ist die doppelte Durchflussmenge, wegen halber Aufwärmspanne von 5 K gegenüber der Frischwasserkühlung notwendig. Die Aufwärmspanne kann gesteigert werden mit Hilfe von Ventilatoren.

1 ... 3 % des Kühlwasser verdampfen pro Umlauf, was weithin sichtbare Dampffäden hervorrufen kann und es kann dabei zur Störung des Kleinklimas kommen. Die Investitionskosten sind gegenüber Frischwasserkühlung hoch.

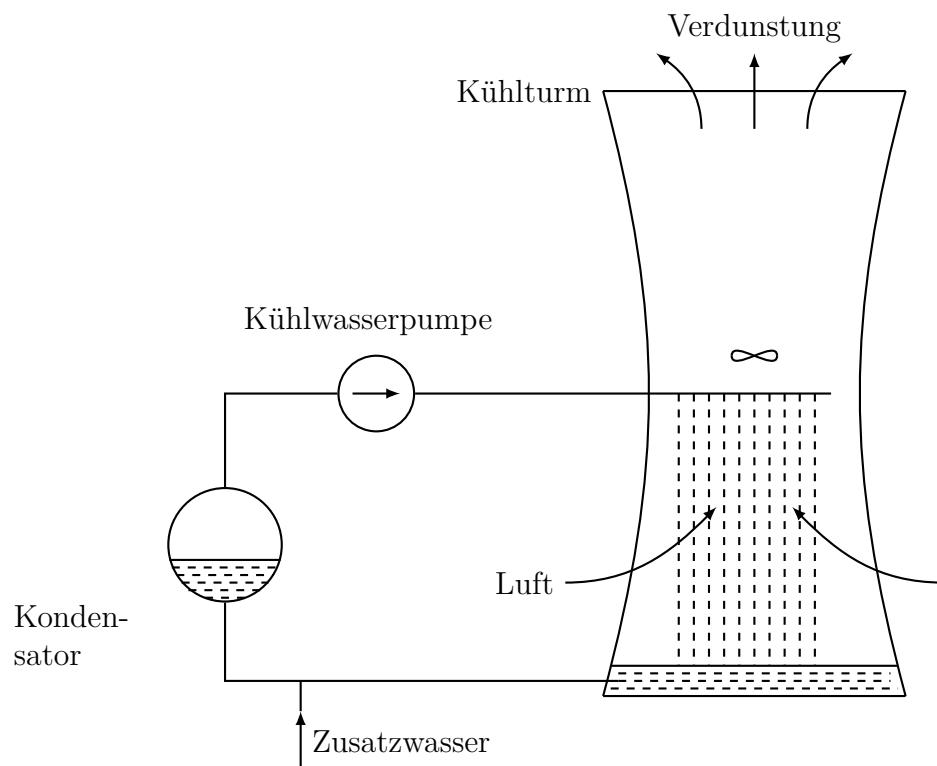


Abbildung 1.23.: Nasskühlturm

Trockenkühltürme:

Bei dieser Variante gibt es ein geschlossenes Kühlwassersystem, sprich Kühlwasser fließt durch luftgekühlte Radiatoren. Somit sind hohe Pumpenleistungen und zusätzliche Lüfter zur Zwangskühlung erforderlich und die Kühltürme werden größer.

Sie sind die umweltfreundlichste (keine Verdunstung), aber auch teuerste Lösung und benötigen damit die höchsten Investitionskosten.

Kombinationskühlung ist eine Kombination aus Frischwasserkühlung und Nass- bzw. Trockenkühltürmen.

1.7. Rauchgasreinigung

Rauchgasreinigungsanlagen

1. **entstauben**, (Elektrofilter, bringt Feststoffe raus)
2. **entschwefeln** (Umwandlung des SO_2 in Gips $CaSO_4$, bringt Schwefel raus) und
3. **entsticken** (Reduktion der Stickoxide NO_x mit Ammoniak zu N_2 und H_2O , bringt Stickoxide raus)

die Verbrennungsgase bevor sie durch den Kamin abziehen. Durch diese Maßnahme werden die Emissionen erheblich reduziert.

1. Flugasche:

Hierbei handelt es sich um die Abscheidung von festen Stoffen, wobei der anfallende Staub großteils in Zementwerken eingesetzt wird. Die Partikelabscheidung im Elektrofilter beruht auf dem Prinzip der elektrostatischen Abscheidung.

Von einer negativ geladenen, auf Hochspannung (z. B. 20 kV) befindlichen, Sprüh-elektrode werden Elektronen emittiert und zur positiven geladenen Niederschlags-elektrode hin beschleunigt. Die durch den Filter strömenden festen Partikeln werden durch diese beschleunigten Elektronen bzw. sich anlagernden Ionen negativ geladen und bewegen sich ebenfalls in Richtung der positiven Niederschlagselektrode.

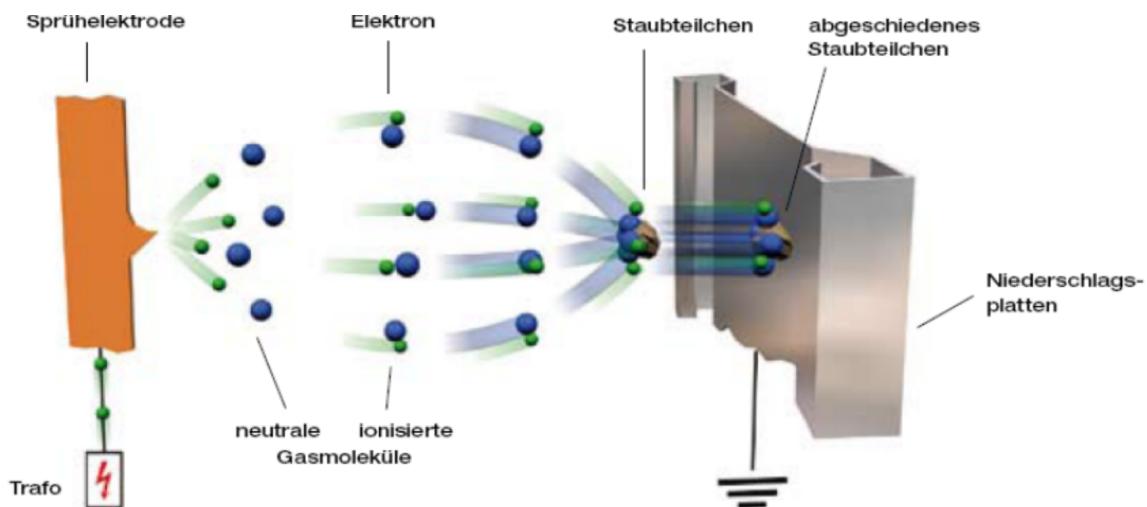
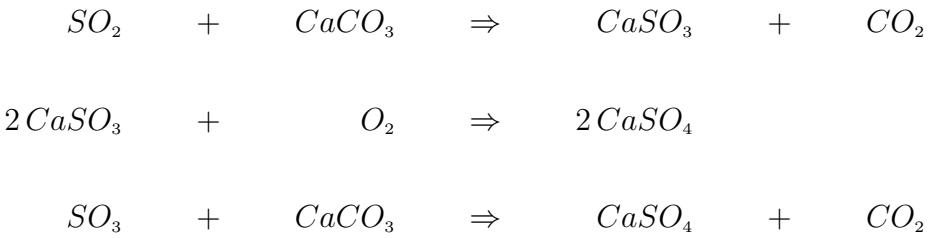


Abbildung 1.24.: Prinzip des Elektrofilters zur Staubabscheidung

2. SO_x-Abscheidung:

In Verbrennungsanlagen, bei denen nur geringe Anteile von Chlorwasserstoff HCl und Flusssäure HF im Abgas sind erfolgt die Reaktion mit Kalkstein $CaCO_3$, wobei in der Regel immer Gips $CaSO_4$ mit Zwischenschritten erzeugt wird:



Der Ausgangsstoff Gips $CaSO_4$ wird dann zu einem verkaufsfähigen Produkt aufbereitet, jedoch sind die Erlöse sehr gering, allerdings werden somit die ansonst anfallenden Entsorgungskosten eingespart.

3. NO_x-Abscheidung:

Die Stickoxid-Abscheidung erfolgt fast ausschließlich mit Verfahren, wo ein Produkt von N_2 und H_2O übrig bleibt. Als Reaktionsmittel finden Harnstoff und Ammoniak Anwendung, wobei molekularer Stickstoff, Wasser und Kohlendioxid übrig bleiben. Die optimale Temperatur für eine NO_x -Reduktion liegt dabei, je nach Zusammensetzung, zwischen 900 – 1100 °C.

2. Gasturbinenkraftwerk

Im Gegensatz zu einem Dampfkraftwerk gibt es bei Gasturbinenkraftwerken keinen Kessel und der Brennstoff kann flüssig oder gasförmig sein. Kurz gesagt werden diese mit Erdgas oder anderen Erdölprodukten (Brennstoff) betrieben und das Zentrum stellt die Gasturbine dar.

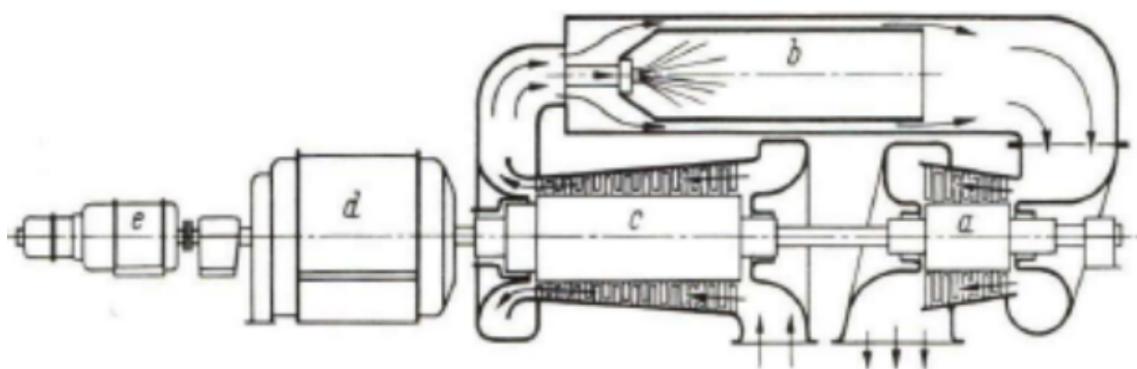


Abbildung 2.1.: Gasturbine mit offenem Kreislauf

Hauptbestandteile:

- a Gasturbine
- b Brennkammer
- c Verdichter
- d Generator
- e Anwurfmotor bei herkömmlichen Kraftwerken, da sich die Verdichtung erst mit der Drehzahl aufbaut.

Bei einem offenen Kreislauf (Mehrheit) werden die Verbrennungsgase direkt auf die Turbine geführt (Temperaturen bis über 1000 °C, was höher ist als bei einem Dampfkraftwerk).

Bei einem geschlossenen Kreislauf nimmt die als Arbeitsmittel umlaufende Luft nicht an der Verbrennung teil, sondern wird von einem Luftheritzer von außen erwärmt, womit ein Wärmetauscher notwendig ist!

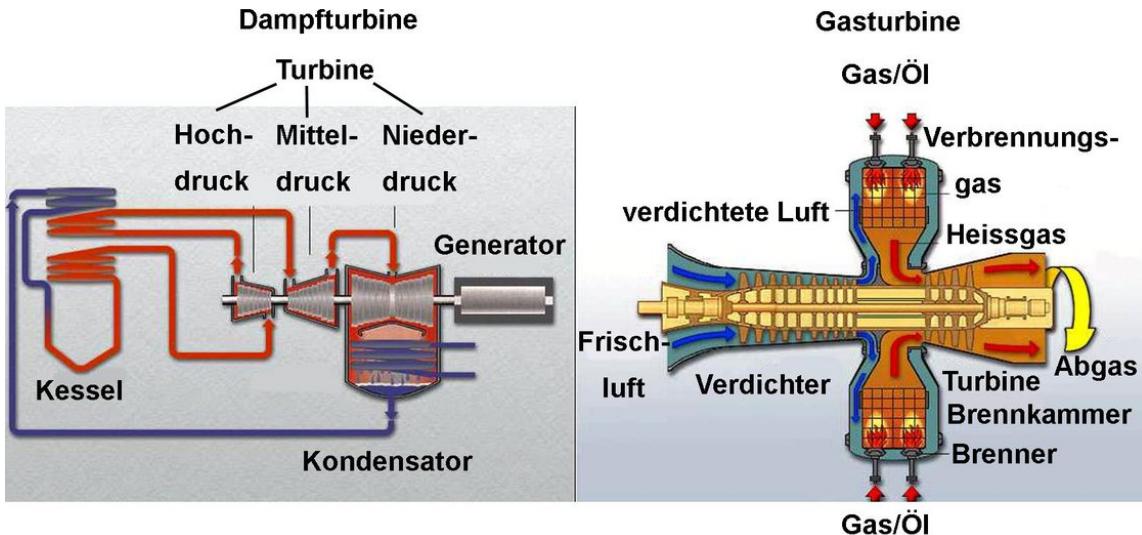


Abbildung 2.2.: Vergleich: Gasturbine & Dampfturbine

Funktionsbeschreibung:

Der Verdichter verdichtet die Luft vom Umgebungsztand (Kompression). Der Sauerstoff gelangt in die Brennkammer, wo er als Oxidator für beispielsweise Erdgas dient und die heißen Abgase expandieren in der Turbine unter Abgabe von technischer Arbeit.

Häufig erwärmen die Abgase über einen Rekuperator (Wärmeübertrager, welcher thermische Energie von einem Stoffstrom auf einen anderen überträgt.) die verdichtete Luft zusätzlich ($\hat{=}$ innerer Wärmeaustausch). Hierdurch erreicht man einen höheren Wirkungsgrad.

Als Vergleichsprozess für offene (und geschlossene) Gasturbinenanalgen mit gasförmigen Arbeitsmittel dient der rechtslaufende Joule-Prozess. Die auftretende innere Verbrennung in der Brennkammer wird dabei als äußere Wärmezufuhr behandelt und das Ausstoßen der Abgase als isobare Wärmeabfuhr.

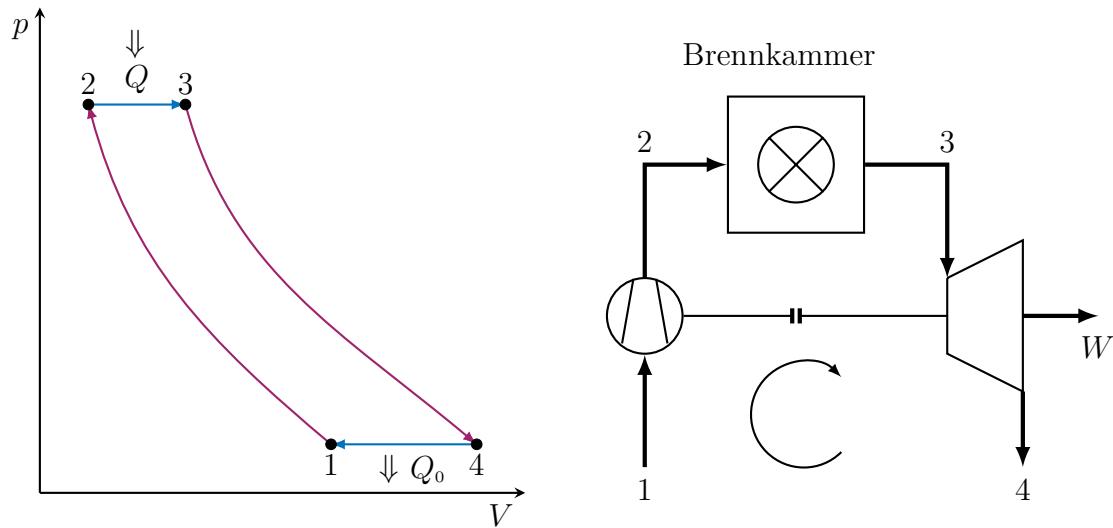


Abbildung 2.3.: rechtslaufender Joule-Prozess

Vier Zustandsänderungen treten dabei auf:

- 1...2 Isentrope Kompression (Verdichtung der Luft)
- 2...3 Isobare Wärmezufuhr (Verbrennung des Erdgases mit dem verdichteten Sauerstoff als Oxidator in der Brennkammer)
- 3...4 Isentrope Expansion (In der Turbine expandieren die heißen Gase unter Abgabe von Arbeit)
- 4...1 Isobare Wärmeabfuhr (Ausstoßung der Abgase)

Vorteile von Gasturbinen, neben dem Nachteil der höheren Kosten und einer so nicht möglichen Fernwärmekopplung:

- einfache und kompakte Bauweise
- kurze Bauzeiten
- niedrige Anlagekosten (als Kennwerte gilt: Anlagenkosten pro kW-installierter Leistung ($\text{€}/\text{kW}$))
- geringer Platzbedarf
- kein Kühlwasserbedarf
- kurze Anfahrzeiten
- großes Potenzial zur besseren Brennstoffausnutzung in Kombination mit nachgeschaltetem Dampfprozess
- Aufwand der Rauchgasreinigung ist geringer



Abbildung 2.4.: Kompaktes Gasturbinenkraftwerk

3. Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (GuD)

Hierbei werden eine Gasturbine und eine Dampfturbine kombiniert und die Abgase der Gasturbine (ca. 500 °C) werden für die Dampferzeugung verwendet.

Durch das hohe Temperaturgefälle des Rauchgases steigt der Wirkungsgrad auf etwa 58 % und eine Fermwärmeauskopplung aus dem Dampfkraftwerk ist wieder möglich.

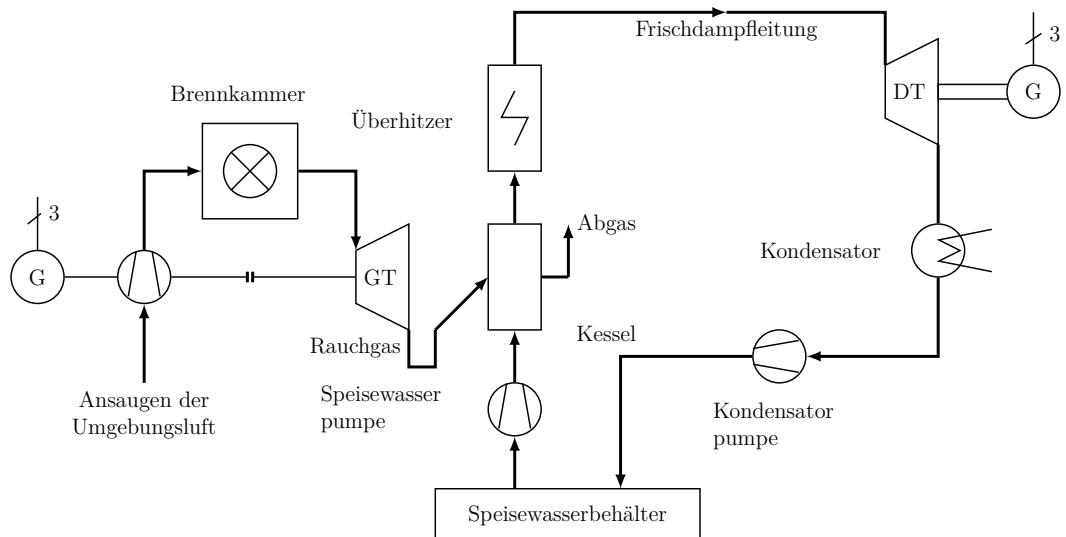


Abbildung 3.1.: Schaltschema einer GuD-Anlage

Das Rauchgas reicht nicht, sondern dient nur zur Vorerwärmung und es kann somit Brennstoff eingespart werden.

Allgemein ist es üblich den Kessel für mehrere verschiedene Brennstoffe auszulegen. (Öl, Biomasse, Erdgas, ...)

Nun das ganze noch einmal anders dargestellt:

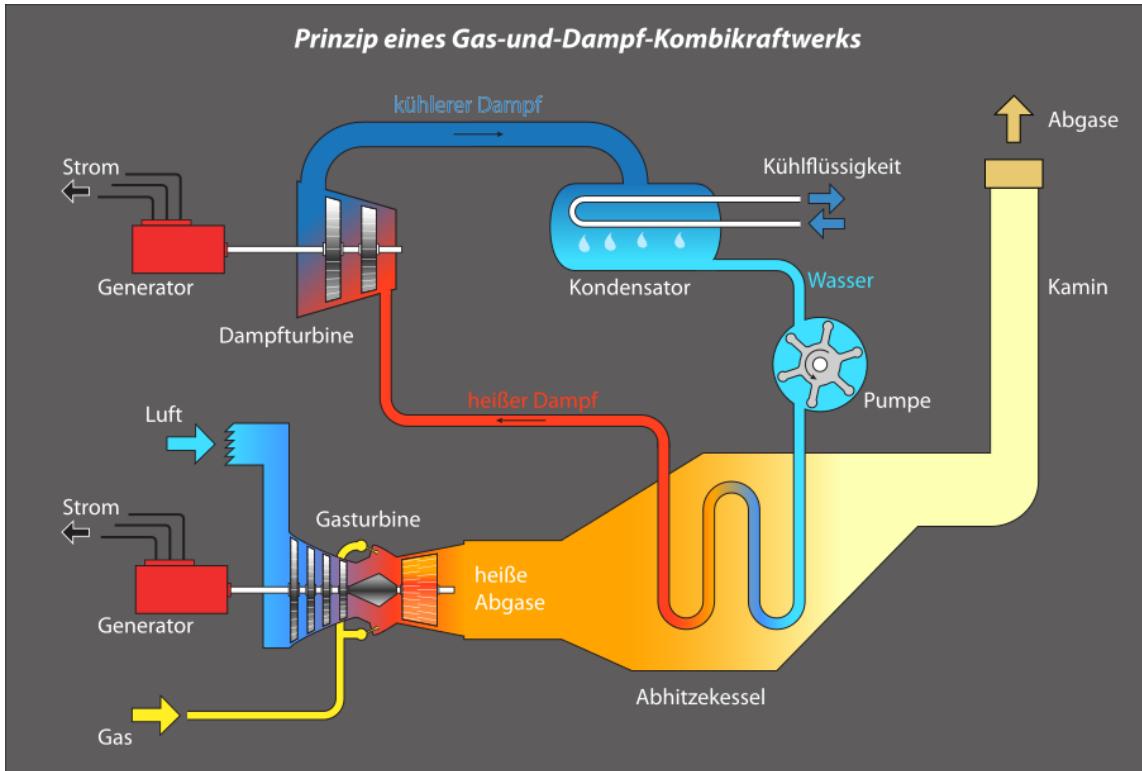


Abbildung 3.2.: Prinzipschaltbild einer GuD-Anlage

A. Diagramme und Tabellen

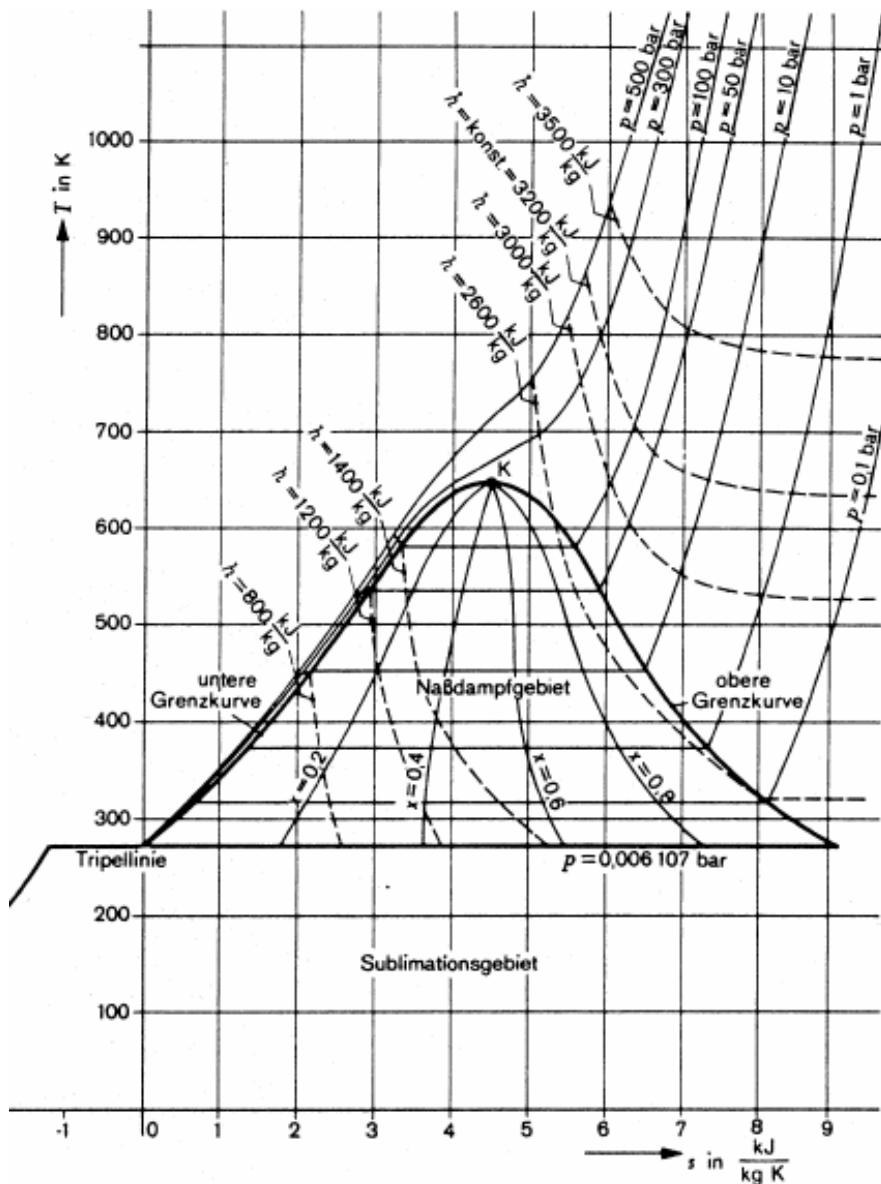


Abbildung A.1.: Ts -Diagramm von Wasserdampf

Wasserdampftafel, Sättigungszustand (Drucktafel)

ρ bar	t °C	v' m^3/kg	v'' m^3/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,0061	0	0,0010002	206,3	-0,04	2501,6	2501,6	-0,0002	9,1577
0,01	6,98	0,0010001	129,20	29,34	2514,4	2485,0	0,1060	8,9767
0,02	17,51	0,0010012	67,01	73,46	2533,6	2460,3	0,2607	8,7246
0,03	24,10	0,0010027	45,67	101,00	2545,6	2444,6	0,3544	8,5785
0,04	28,98	0,0010040	34,80	121,41	2554,5	2433,1	0,4225	8,4755
0,05	32,90	0,0010052	28,19	137,77	2561,6	2423,8	0,4763	8,3960
0,06	36,18	0,0010064	23,74	151,50	2567,5	2416,0	0,5209	8,3312
0,07	39,03	0,0010074	20,53	163,38	2572,6	2409,2	0,5591	8,2767
0,08	41,53	0,0010084	18,10	173,86	2577,1	2403,2	0,5925	8,2296
0,09	43,79	0,0010094	16,20	183,28	2581,1	2397,9	0,6224	8,1881
0,1	45,83	0,0010101	14,67	191,83	2584,8	2392,9	0,6493	8,1511
0,2	60,09	0,0010172	7,650	251,45	2609,9	2358,4	0,8321	7,9094
0,3	69,12	0,0010223	5,229	289,30	2625,4	2336,1	0,9441	7,7695
0,4	75,89	0,0010265	3,993	317,65	2636,9	2319,2	1,0261	7,6709
0,5	81,35	0,0010301	3,240	340,56	2646,0	2305,4	1,0912	7,5947
0,6	85,95	0,0010333	2,732	359,93	2653,6	2293,6	1,1454	7,5327
0,7	89,96	0,0010361	2,365	376,77	2660,1	2283,3	1,1921	7,4804
0,8	93,51	0,0010387	2,087	391,72	2665,8	2274,0	1,2330	7,4352
0,9	96,71	0,0010412	1,869	405,21	2670,9	2265,6	1,2696	7,3954
1,0	99,63	0,0010434	1,694	417,51	2675,4	2257,9	1,3027	7,3598
1,1	102,32	0,0010455	1,549	428,84	2679,6	2250,8	1,3330	7,3277
1,2	104,81	0,0010476	1,428	439,36	2683,4	2244,1	1,3609	7,2984
1,3	107,13	0,0010495	1,325	449,19	2687,0	2237,8	1,3868	7,2715
1,4	109,32	0,0010513	1,236	458,42	2690,3	2231,9	1,4109	7,2465
1,5	111,37	0,0010530	1,159	467,13	2693,4	2226,2	1,4336	7,2234
2,0	120,23	0,0010608	0,8854	504,70	2706,3	2201,6	1,5301	7,1268
3,0	133,54	0,0010735	0,6056	561,43	2724,7	2163,2	1,6716	6,9909
4,0	143,62	0,0010839	0,4622	604,67	2737,6	2133,0	1,7764	6,8943
6,0	158,84	0,0011009	0,3155	670,42	2755,5	2085,0	1,9308	6,7575
8,0	170,41	0,0011150	0,2403	720,94	2767,5	2046,5	2,0457	6,6594
10	179,88	0,0011274	0,1943	762,6	2776,2	2013,6	2,1382	6,5828
15	198,29	0,0011539	0,1317	844,7	2789,9	1945,2	2,3145	6,4406
20	212,37	0,0011766	0,0995	908,6	2797,2	1888,6	2,4469	6,3367
30	233,84	0,0012163	0,0666	1007,4	2802,3	1793,9	2,6455	6,1837
40	250,33	0,0012521	0,0498	1087,4	2800,3	1712,9	2,7965	6,0685
50	263,91	0,0012858	0,0394	1154,5	2794,2	1639,7	2,9206	5,9735
60	275,55	0,0013187	0,0324	1213,7	2785,0	1517,3	3,0273	5,8908
70	285,79	0,0013513	0,0274	1267,4	2773,5	1506,0	3,1219	5,8162
80	294,97	0,0013842	0,0235	1317,1	2759,9	1442,8	3,2076	5,7471
90	303,31	0,0014148	0,0205	1363,7	2744,6	1380,9	3,2867	5,6820
100	310,96	0,001453	0,0180	1408,0	2727,7	1319,7	3,3605	5,6198
110	318,05	0,001489	0,0160	1450,6	2709,3	1258,7	3,4304	5,5595
120	324,65	0,001527	0,0143	1491,8	2689,2	1197,4	3,4972	5,5002
130	330,83	0,001567	0,0128	1532,0	2667,0	1135,0	3,5616	5,4408
140	336,64	0,001611	0,0115	1571,6	2642,4	1070,7	3,6242	5,3803
150	342,13	0,001658	0,0103	1611,0	2615,0	1004,0	3,6859	5,3178
160	347,34	0,001710	0,0093	1650,5	2584,9	934,3	3,7471	5,2531
180	356,96	0,001840	0,0075	1734,8	2513,9	779,1	3,8765	5,1128
200	365,70	0,002037	0,0059	1826,5	2418,4	591,9	4,0149	4,9412
210	369,78	0,002202	0,0050	1886,3	2347,6	461,3	4,1048	4,8223
220	373,69	0,002671	0,0037	2011,1	2195,6	184,5	4,2947	4,5799
221,2	374,15		0,00317		2107,4	0	4,429	

Tabelle A.1.: Wasserdampftafel, überheizter Dampf

Wasserdampftafel, überheizter Dampf (Fortschreibung)

ρ bar	t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	t^s °C	t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	t^s °C	t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	t^s °C	t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	t^s °C	
0,2	100	8,585	2686,3	8,1261	350	14,374	3177,1	9,1303	10	200	0,02059	2826,8	6,6922	450	0,3903	3370,8	7,6190
	150	9,748	2872,3	8,3676	400	15,529	3279,4	9,3259		250	0,02327	2943,0	6,9209	500	0,3540	3478,3	7,7627
	200	10,907	2879,2	8,5819	440	16,684	3383,4	9,4372		300	0,02580	3052,1	7,1251	550	0,3775	3587,1	7,8991
	250	12,064	2977,1	8,7806	500	17,838	3489,0	9,5784		350	0,02824	3138,5	7,3031	600	0,4010	3697,4	8,0292
	300	13,219	3076,4	8,9618	600	20,346	3705,4	9,8416		400	0,03665	3284,4	7,4665	650	0,4244	3809,3	8,1537
0,4	100	4,279	2683,8	7,6085	350	7,185	3176,8	8,1000	15	200	0,1524	2794,7	6,4508	450	0,2191	3364,3	7,4253
	150	4,886	2780,9	8,0450	400	7,763	3279,1	8,9680		250	0,1520	2923,5	6,7099	500	0,2350	3472,8	7,5703
	200	5,448	2818,2	8,2625	440	8,340	3383,1	9,1170		300	0,1697	3038,9	6,9207	550	0,2509	3582,4	7,7077
	250	6,028	2976,5	8,4598	500	8,918	3488,8	9,2583		400	0,1865	3148,7	7,1044	600	0,2667	3693,3	7,8385
	300	6,607	3075,9	8,6413	600	10,07	3705,3	9,5316		400	0,2029	3256,6	7,2709	650	0,2824	3805,7	7,9836
0,6	100	2,844	2681,2	7,6085	350	4,788	3176,4	8,6224	20	250	0,1114	2902,4	6,5454	500	0,1756	3462,1	7,4333
	150	3,238	2779,4	7,8551	400	5,174	3278,8	8,7806		200	0,1255	3023,0	6,7696	550	0,1876	3577,6	7,5706
	200	3,638	2873,3	8,0738	440	5,559	3382,9	8,9296		300	0,1386	3138,6	6,9596	600	0,1995	3689,2	7,7072
	250	4,016	2975,8	8,2718	500	5,944	3488,6	9,0701		400	0,1511	3248,7	7,1296	650	0,2114	3802,1	7,8279
	300	4,402	3075,4	8,4536	600	6,714	3703,1	9,3343		450	0,1634	3357,8	7,2859	700	0,2232	3916,5	7,9485
1,0	100	1,696	2676,2	7,3618	350	2,871	3175,6	8,3858	30	250	0,07055	2854,8	6,2847	500	0,11668	3456,2	7,3435
	150	1,936	2776,3	7,6137	400	3,102	3278,2	8,5442		200	0,08116	2995,1	6,5422	550	0,12426	3567,2	7,3438
	200	2,172	2875,4	7,8349	440	3,334	3382,4	8,6939		300	0,09553	3117,5	6,7471	600	0,13234	3681,0	7,5079
	250	2,406	2974,5	8,0342	500	3,565	3488,1	8,8348		400	0,09931	3232,5	6,9246	650	0,14036	3795,0	7,6349
	300	2,639	3074,5	8,2166	600	4,028	3704,8	9,0682		450	0,10779	3344,6	7,0854	700	0,14832	3910,3	7,7564
1,2	100	1,611	2774,8	7,5267	400	2,585	3277,9	8,4597	40	300	0,05683	2962,0	6,3642	550	0,09260	3358,6	7,2333
	150	2,000	1,8088	2874,4	7,8492	440	2,778	3382,9		200	0,06645	3095,1	6,5870	600	0,09876	3672,8	7,4880
	250	2,406	2993,9	7,9491	500	2,971	3487,9	8,6990		400	0,07338	3215,7	6,7733	650	0,10486	3787,9	7,6480
	300	2,791	3074,0	8,1319	550	3,163	3595,4	8,8852		450	0,07996	3331,2	6,9388	700	0,11690	3894,1	7,8187
	350	3,175	3175,3	8,3012	600	3,356	3704,6	9,0140		500	0,08634	3445,0	7,0049	750	0,11689	4021,4	7,7361
1,5	100	1,285	2772,5	7,4194	400	2,067	3277,5	8,3562	60	300	0,03614	2885,0	6,0892	550	0,06604	3339,3	7,0285
	200	1,444	2872,9	7,6439	440	2,222	3381,7	8,5056		350	0,04222	3045,3	6,3586	600	0,06533	3656,2	7,1664
	250	1,601	2972,9	7,8447	500	2,472	3487,6	8,6472		400	0,04738	3164,6	6,55462	650	0,07346	3773,5	7,2971
	300	1,757	3073,3	8,0280	550	2,530	3595,3	8,7819		450	0,05210	3303,5	6,7230	700	0,07348	3891,7	7,4217
	350	1,912	3174,7	8,1916	600	2,684	3704,4	8,9106		500	0,05659	3422,2	6,8818	750	0,07755	4010,7	7,5409
2,0	100	0,9895	2768,5	7,2794	400	1,549	3276,7	8,2226	80	300	0,02426	2786,8	5,7942	550	0,04510	3519,7	6,8778
	150	1,080	2870,5	7,5702	440	1,865	3381,1	8,3722		350	0,02995	2899,9	6,1349	600	0,04839	3639,5	7,0191
	250	1,199	2971,2	7,7096	500	1,781	3487,0	8,5139		400	0,03431	3141,6	6,3694	650	0,05161	3759,2	7,1523
	300	1,316	3072,1	7,8937	550	1,897	3594,7	8,6487		450	0,04184	3243,4	6,5597	700	0,05597	3879,2	7,2986
	350	1,433	3173,8	8,0730	600	2,013	3704,0	8,7776		500	0,04710	3386,8	6,7262	750	0,05788	3999,9	7,4999
4,0	100	0,4707	2752,0	6,9285	400	0,7725	3273,6	7,3894	100	350	0,02424	2925,8	5,9489	600	0,03832	3623,7	6,9013
	200	0,5344	2860,4	7,1038	440	0,8309	3378,5	8,0497		400	0,02641	3099,9	6,2182	650	0,04026	3744,7	7,0173
	250	0,5952	2964,5	8,3890	500	7,5479	3484,9	8,1919		450	0,02974	3243,6	6,4243	700	0,04353	3866,8	7,1466
	300	0,6549	3067,2	7,5675	550	0,9474	3592,8	8,3271		500	0,03276	3374,6	6,5994	750	0,04608	3989,1	7,2886
	350	0,7139	3170,0	7,7395	600	1,0054	3702,3	8,4563		550	0,03560	3499,8	6,7564	800	0,04858	4112,0	7,4058
6,0	100	0,3520	2849,7	6,9562	450	0,5528	3176,0	7,5600	150	350	0,01146	2694,8	5,4467	600	0,03488	3579,8	6,6764
	250	0,3939	2957,6	7,1829	500	0,5918	3482,7	8,0027		400	0,01566	2979,1	5,8876	650	0,03677	3708,3	6,8195
	300	0,4344	3062,3	7,3740	550	0,6308	3590,9	8,1383		450	0,01845	3159,7	6,1468	700	0,03859	3835,4	6,9336
	350	0,4742	3166,2	7,5166	600	0,6696	3600,7	8,2678		500	0,02080	3310,4	6,3487	750	0,04036	3962,4	7,0806
	400	0,5136	3270,6	7,7090	650	0,7084	3812,1	8,4199		550	0,02291	3448,3	6,5213	800	0,03209	4088,6	7,2013
8,0	100	0,2698	2838,6	6,8148	450	0,4137	3173,4	7,7246	200	400	0,00995	2820,5	5,5485	650	0,01967	3671,1	6,6554
	250	0,2932	2930,4	7,0397	500	0,4432	3480,5	8,4678		450	0,01271	3064,3	5,9089	700	0,02111	3803,8	6,7053
	300	0,3341	3057,3	7,2348	550	0,4725	3589,9	8,6038		500	0,01477	3241,1	6,3487	750	0,02250	3935,0	6,9267
	350	0,3543	3162,4	7,4107	600	0,5017	3699,1	8,8136		550	0,01655	3394,1	6,3374	800	0,02385	4065,3	6,9311
	400	0,3842	3267,5	7,5729	650	0,5309	3810,7	8,2579		600	0,01816	3335,5	6,5043				

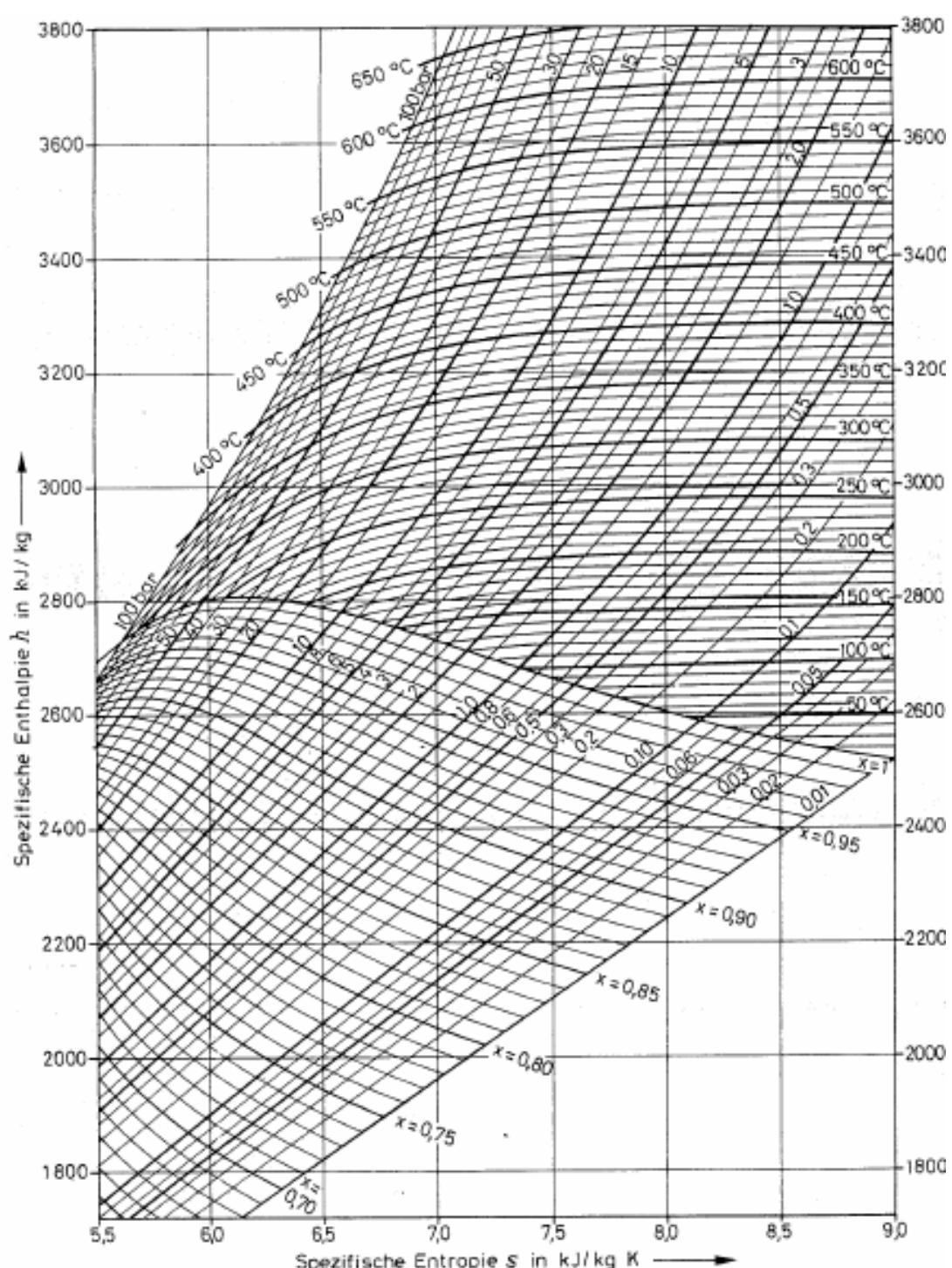
Mollier h, s -Diagramm für Wasserdampf (Ausschnitt)

Abbildung A.2.: Moiller-Diagramm

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Dampfkraftwerk	1
1.2.	Energiefluss eines Dampfkraftwerkes	2
1.3.	Thermodynamische Systeme	4
1.4.	Zustandsgleichungen im pV -Diagramm	9
1.5.	Kreisprozess im pV -Diagramm	10
1.6.	Wärmebilanz im Ts -Diagramm	11
1.7.	Carnot-Prozess	12
1.8.	Wirkungsgrade η_{Th} bei der Umwandlung von Wärmeenergie ($T_2 = 20^\circ\text{C} = 293,15\text{ K}$)	13
1.9.	pV -Diagramm des Clausius-Rankine-Prozesses	15
1.10.	Ts -Diagramm des unterkritischen Clausius-Rankine-Prozesses	16
1.11.	Verdampfen von 1 kg Wasser bei konstantem Druck	17
1.12.	Verdampfen von Wasser im Ts -Diagramm	18
1.13.	Zugeführter Wärmestrom	20
1.14.	Schaltschema einer Kondensationsdampfkraftanlage	21
1.15.	Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung	22
1.16.	Erhöhung des Frischdampfzustandes	24
1.17.	Zwischenüberhitzung im Ts -Diagramm	25
1.18.	Wärmeschaltbild mit Wirkungsgradmethoden	27
1.19.	Flammrohrkessel	28
1.20.	Wasserrohrkessel	29
1.21.	Vergleich: Gleichdruck- & Überdruckturbine	30
1.22.	Frischwasserkühlung am Flusslauf	31
1.23.	Nasskühlturm	32
1.24.	Prinzip des Elektrofilters zur Staubabscheidung	33
2.1.	Gasturbine mit offenem Kreislauf	35
2.2.	Vergleich: Gasturbine & Dampfturbine	36
2.3.	rechtslaufender Joule-Prozess	37
2.4.	Kompaktes Gasturbinenkraftwerk	38
3.1.	Schaltschema einer GuD-Anlage	39
3.2.	Prinzipschaltbild einer GuD-Anlage	40

A.1. <i>Ts</i> -Diagramm von Wasserdampf	41
A.2. Moiller-Diagramm	44

Tabellenverzeichnis

A.1. Wasserdampftafel, überhitzer Dampf	42
---	----

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d. h.	das heißt
Dipl.-Ing.	Diplom-Ingenieur
Dr.	Doktor
GuD	Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
HTBL u. VA	höhere technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt
z. B.	zum Beispiel