



**Exkursion
Nossener Brücke:
25.05.05
Treffpunkt
Öderaner Str. 21, 11:30 Uhr
Eingang GuD-HKW**

Dresden, 26.04.2005



Exkursion
Thermische Nutzung
von Biomasse 11.05.05
STEAG-Holz-HKW
Am Lugaer Graben 18
07:30 Uhr
(Nähe S-Bahnhof Niedersedlitz)

Dresden, 26.04.2005

2 Konventionelle thermische Kraftwerke

2.1 Brennstoffe, Verbrennung und Vergasung, Schadstoffe

2.1.1 Brennstoffe

In den Brennstoffen Holz, Torf, Braunkohle, Steinkohle und Anthrazit (**fest**), Erdöl (**flüssig**) sowie Erdgas (**gasförmig**) ist die Sonnenenergie als chemische Energie gespeichert. Diese Energie kann durch **Oxidation** der brennbaren Bestandteile Kohlenstoff, Wasserstoff u.a. wieder in Wärme umgewandelt werden. Die in den Brennstoffen vorkommenden Elemente H, C und S werden bei vollständiger Verbrennung zu CO_2 , H_2O und SO_2 verbrannt. Die bei der Verbrennung freiwerdende Wärme, **ohne** Rückgewinnung der Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes ist der untere Heizwert H_u .

2.1.1 Brennstoffe

Wird der in den Rauchgasen enthaltene Wasserdampf kondensiert, so ist die freigesetzte Wärme der Brennwert.

Aus den **Reaktionsgleichungen** der Verbrennung sind der **Sauerstoff-(Luft-)bedarf** und die **Rauchgaszusammensetzung** zu ermitteln.

Die niedrigste Temperatur bei der die durch Reaktion entwickelte Wärme größer als die durch Strahlung abgegebene ist, ist die Zündtemperatur. Dabei erfolgt die Bildung der Verbrennungsflamme.

Die theoretisch maximale Verbrennungstemperatur ist die Temperatur der Rauchgase bei vollkommener isobar-adiabatischer Verbrennung.

Die Oxidationsreaktionen der brennbaren Bestandteile des Brennstoffes mit Sauerstoff – die Verbrennung – setzen die Wärmemengen frei, die in der Enthalpie der Rauchgase enthalten sind. Bei einer **vollkommenen** Verbrennung entstehen als Verbrennungsprodukte CO_2 , H_2O und SO_2 .

Die mineralischen Bestandteile beteiligen sich nicht an der Verbrennung. Bei einer unvollkommenen Verbrennung liegen noch brennbare gasförmige Rauchgasanteile wie H_2 , Kohlenwasserstoffe und CO vor.

2.1.1 Brennstoffe

Das Vorkommen von Primärenergieträgern, wie Kohle, Gas, Heizöl und regenerative Brennstoffe ist für die nächsten Jahrzehnte gesichert, wenn man von den globalen Reserven ausgeht. Örtlich und zeitliche Begrenzungen sind aber vorhersehbar.

Abfallbrennstoffe sind keine natürlich vorkommenden Primärenergiequellen, doch nehmen Müll aus Haushalten und Industrie sowie kommunale Klärschlämme und pflanzliche Abfälle ständig an Umfang zu. Heizwerte von 8 bis zu 20 MJ/kg Brennstoff, je nach Vorsortierung und Möglichkeit einer Abfallreduzierung, gewährleisten ihre thermische umweltfreundliche Verwertung in Müll-Heiz-Kraftwerken bzw. in Kombination mit Kohle.

2.1.1 Feste Brennstoffe

Chemische Zusammensetzung und Eigenschaften

Die natürlichen festen Brennstoffe haben durch Inkohlung den Kohlenstoffgehalt angereichert. Der Inkohlungsgrad hat sich von Torf über Braunkohle bis zur Steinkohle erhöht.

Der feste Brennstoff wird durch den Heizwert H_u , die chemische Zusammensetzung, die Ballastanteile Asche A und Wasser W sowie durch die chemische Zusammensetzung der Asche bestimmt.

Aus der Elementaranalyse des Brennstoffes und dem Verbrennungsluftanteil werden die Bestandteile des Rauchgases ermittelt.

Es bilden

$$C + H + O + N + S + A + W = 100 \%$$

2.1.1 Feste Brennstoffe

Der Aschegehalt A wird nach DIN 51719 als Verbrennungsrückstand einer Brennstoffprobe bei $825 \pm \text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt und so zur Brennstoffbeurteilung benutzt. Mann nimmt dabei vereinfacht an, dass A mit der Gesamtmasse der Minerale (Sand, Ton, Pyrit, Erdalkaliverbindungen) übereinstimmt, die vor der Veraschung im Brennstoff vorlagen.

Die chemische Zusammensetzung der Brennstoffasche wird **unabhängig** von der chemischen Bindung als Oxidanalyse angegeben. Diese Analysen vermitteln Anhaltspunkte über den ursprünglichen Mineralgehalt: Hohe SiO_2 - und Al_2O_3 -Konzentrationen lassen z.B. auf einen Quarzsand- und Tonüberschuss schließen (mineralogisch saure Asche). Aus der Oxidanalyse kann das Verschlackungsverhalten in der Dampferzeuger-Feuerung abgeschätzt werden. Die flüchtigen Bestandteile V werden als Gewichtsverlust beim Erwärmen einer 0,5 g-Brennstoffprobe auf $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ unter Luftabschluss ermittelt (7 min). Es verflüchtigen sich Wasserdampf, CO_2 , CO , H_2 und Kohlenwasserstoffe, zurück bleibt ein aschehaltiger Koks. Diese Kenngröße ist zur Abschätzung der Zündwilligkeit geeignet: Diese nimmt mit V^{daf} zu.

2.1.1 Feste Brennstoffe

Der Gesamtschwefelgehalt S_t eines Brennstoffes ist eine wichtige Ausgangsgröße zur Berechnung der SO_2 -Emission, kann aber auch zur Ermittlung der Rauchgaskorrosivität und der Verschlackung genutzt werden.

S_t kann ebenso wie der Schwefelanteil S_A , der bei der Veraschung nach DIN 51724 chemisch gebunden wird, nach Standardvorschriften sehr genau bestimmt werden. Nach

$$S_c = S_t - S_A$$

ergibt sich der verbrennliche Schwefel S_c , der sich bei der Brennstoff-Veraschung im Labor hauptsächlich als SO_2 verfügt.

Der Heizwert H_u kann nach Boie aus der chemischen Analyse bestimmt werden:

$$H_u = 34800 \cdot \gamma_C + 93800 \cdot \gamma_H + 10460 \cdot \gamma_S + 6280 \cdot \gamma_N - 10800 \cdot \gamma_O - 2450 \cdot \gamma_W$$

2.1.1 Feste Brennstoffe

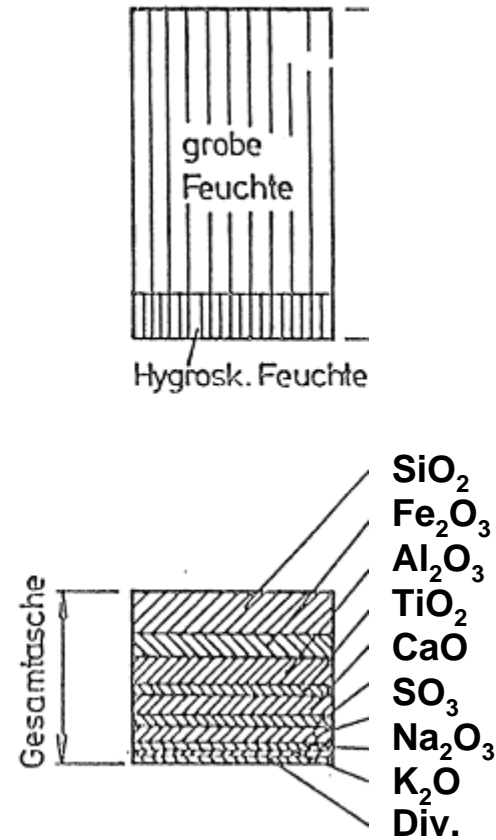
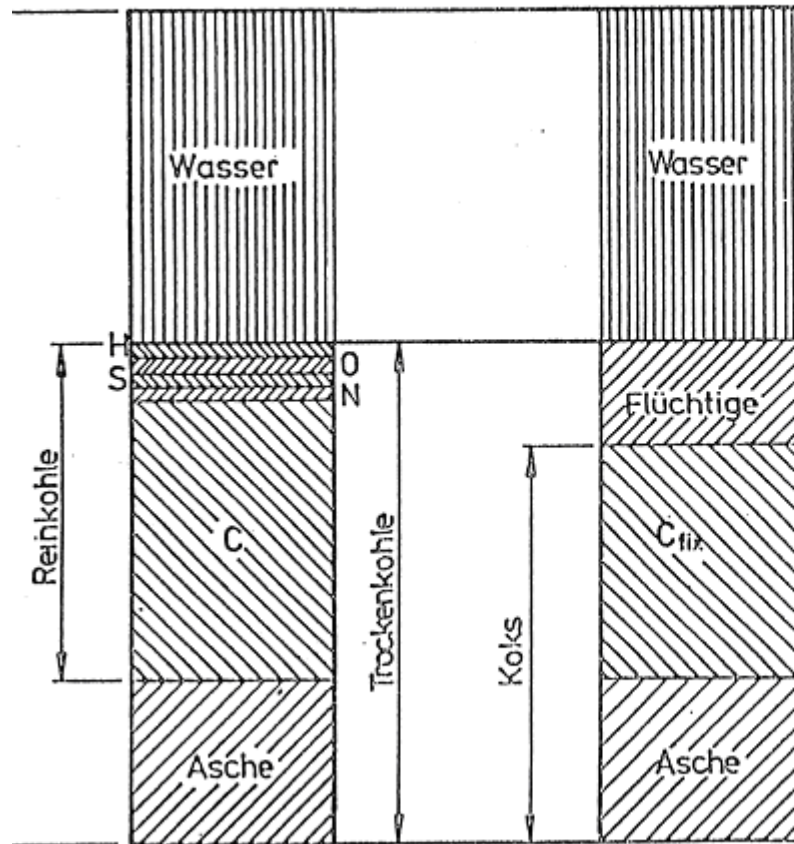
Von den festen natürlichen Brennstoffen erlangt Torf mit einer hohen Rohfeuchte von 90 %, die auf 60 bis 30 % mit technisch vertretbarem Aufwand reduziert werden kann, lokale Bedeutung für die Verbrennung (z.B. Finnland).

Braunkohle wird vor allem in Europa für die Nutzung in Dampfkraftwerken und auch für die Vergasung angewandt. Ein hoher Wasseranteil von 50 bis 60 %, niedrige bis hohe Aschegehalte (bis zu 35 %) und Schwefelgehalte $S_t = 0,3$ bis 4,5 % sind Hinweise auf die Schwierigkeiten bei der thermischen Nutzung dieses Brennstoffes. In der Bundesrepublik Deutschland werden aber bei geringen Brennstoffpreisen 15 bis 20 % der Elektroenergieerzeugung durch Rohbraunkohle – umweltfreundlich – abgedeckt. Der Schwefelanteil ist lagerstättenbezogen unterschiedlich.

Steinkohle weist einen hohen Heizwert auf, der ihre globale Bedeutung für die Energieversorgung (z.B. für brennstoffarme Länder, wie Japan) begründet. Dabei treten aber auch – lagerstätten-spezifisch – hohe Schwefelanteile (bis zu 4 %) und Aschanteile auf. Die Aufbereitung der Förderkohle führt zu einer starken Klassifizierung nach Korngröße und Aschegehalt, also zu einem differenzierten, breiten Angebot.

2.1.1 Feste Brennstoffe

Brennbare und nicht brennbare Substanzen



2.1.1 Flüssige Brennstoffe

Die aus Erdöl aufbereiteten Heizöle, Teeröle aus Braun- und Steinkohle sowie Öl-Schiefer bestehen aus Kohlenwasserstoffgruppen mit unterschiedlichen Siedetemperaturen. Die typischen Kennwerte weisen eine nahezu gleiche chemische Zusammensetzung und daher einen fast gleichen Heizwert von 40 bis 42 MJ/kg auf. Die Unterteilung der Heizöle in **leichte bis schwere Sorten** erfasst auch den unterschiedlichen **Schwefelgehalt** von 0,7 bis 3,5 %. Schwefel- und Vanadiumgehalt werden durch die verschiedenen Herkunftsländer bestimmt.

Der Stockpunkt und die Viskosität der Heizöle sind stark durch die Temperatur geprägt, sie bestimmen die Technologie des Transportes, der Lagerung und der Verbrennung (z.B. mit Vorwärmung bei niedrigen Umgebungstemperaturen).

Der Flammpunkt ist eine Größe zur brandschutztechnischen Einordnung, es ist die tiefste Temperatur, bei der der Brennstoff unter Atmosphärendruck in einem geschlossenen Tiegel mit Fremdzündung entflammt. Die Gefahrenklassen werden je nach Flammen-punkt der Heizöle unterschieden und danach die Sicherheitsvorkehrungen für den Umgang mit ihnen festgelegt.

Abfallbrennstoffe, wie Altöle und Zellstoffablauge, werden in Sondermüllverbrennungsanlagen bzw. Lauge-Dampferzeugern thermisch verwertet.

2.1.1 Feste Abfallstoffe

Abfallstoffe und nachwachsende Rohstoffe weisen eine stark unterschiedliche chemische Zusammensetzung und damit Heizwert aus. Sie sind aber stets den festen oder flüssigen Brennstoffen zuzuordnen und wie sie, z.B. im Hinblick auf die chemische Analyse und den Heizwert zu betrachten. Als Sonderfall sind dabei aber die zusätzlichen Beladungen mit den Schadstoffen Cl, F, Cd, Hg, Pb u.a. in ihrer Auswirkung auf die Umweltbelastung u.a. durch Dioxine und Asche zu behandeln.

2.1.1 Gasförmige Brennstoffe

Natürliche, künstliche und Abfall-Gase werden nach ihrem Heizwert in Schwachgase ($H_u < 8$ MJ/kg), Mittulgase ($H_u = 8$ bis 14 MJ/kg), Normalgase ($H_u = 14$ bis 21 MJ/kg) und Starkgase ($H_u > 21$ MJ/kg) sowie nach ihrem Gehalt an schweren Kohlenwasserstoffen in Arm- und Reichgase nach DIN 1340 eingeteilt. Erdgas – als natürliches Brenngas – hat einen über 80%-igen Methan-Anteil. Mit der Zusammensetzung verändert sich auch der Heizwert.

Künstliche Brenngase entstehen bei der Vergasung (Schwelgas, Stadtgas ...) bei Temperaturen über 450 °C und bei der Vergasung bei über 900 °C, wobei hier Wasserdampf oder Luft zugeführt wird.

2.1.1 Brennstoffe

Bei der Kohle-Druckvergasung wird Feinkohle bei 20 bis 40 bar mit O₂ angereicherter Luft oder reinem Sauerstoff und Wasserdampf vergast, es entsteht ein Verbrennungsgas, das auch in den Gasturbinen kombinierter Gas-Dampf-Kraftwerke nach der Reinigung verbrannt werden kann.
(Siehe auch folgenden Abschnitt Vergasung)

Biogase werden durch bakterielle Zersetzung von Faulschlamm und organischen Deponiestoffen unter Luftabschluss gebildet, Sie enthalten etwa 50 bis 70 % Methan.

2.1.1 Brennstoffe

Typische Kennwerte flüssiger und gasförmiger Brennstoffe

Flüssige Brennstoffe

Ölsorte	Dichte	Zusammensetzung %					Heizwert	
							Ho	Hu
	g/ml	C	H	O	N	S	MJ/kg	MJ/kg
extra leicht (EL)	0,840	85,9	13,0	0,4		0,7	45,6	42,7
leicht (L)	0,880	85,5	12,5	0,8		1,2	45,0	42,28
mittel (M)	0,920	85,3	11,6	0,6		2,5	43,3	40,8
schwer (S)	0,970	84,0	11,0	1,11	0,39	3,5	43,0	40,2
Steinkohlenteeröl	1,02-1,1	89,0	6,5	1,7	1,2	0,8	39,0	37,7

2.1.1 Brennstoffe

Industriegase

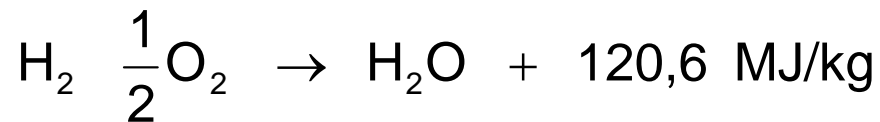
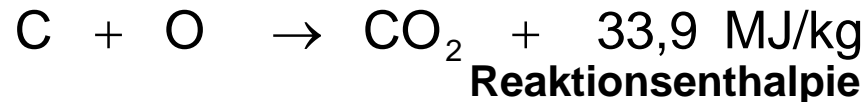
Gasgehalt	Dichte	Chemische Zusammensetzung %							Heizwert	Heizwert
		kg/m ³	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	N ₂	O ₂	Ho
									MJ/m ³	MJ/m ³
Koksgas	0,49	5,4	56,8	23,9	1,6	2,2	9,3	0,4	19,0	16,9
Gichtgas	1,29	31,0	2,3	0,3	-	9,0	57,4	-	4,35	4,21
Stadtgas	0,59	21,5	51,5	17,0	2,0	4,0	4,0	-	17,3	15,6
Generatorgas	1,16	29,0	11,0	0,3	-	5,0	54,7	-	5,2	4,94
Wassergas	0,71	40,0	50,0	0,3		5,0	4,7	-	11,6	10,6
Brennwert	Ho	12,64	12,77	39,86	70,42	MJ/m ³				
Heizwert	Hu	12,64	10,77	35,80	64,35	MJ/m ³				

Gichtgas = Hochofengas, wird am oberen Schachtende abgezogen
Wassergas = heiße Kohle (aus Verbrennung mit Luft) + Wasserdampf
Generatorgas = durch unvollständige Verbrennung (CO)

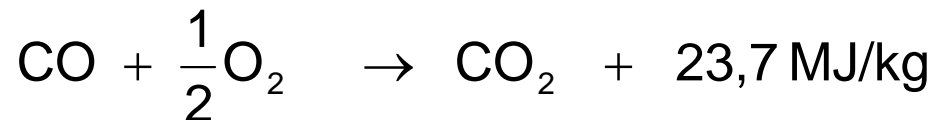
2.1.2 Verbrennung und Vergasung

Die Vorgänge der Verbrennung sind dann durch die chemischen Reaktionen bestimmt:

- einstufige Verbrennung



- zweistufige Verbrennung



**Teilschritte der Kohlenstoffverbrennung
(Zwischenreaktionen)**

2.1.2 Verbrennung und Vergasung



Aus diesen chemischen Reaktionen können der Sauerstoffbedarf, die Rauchgaszusammensetzung und der Rauchgasmassenstrom berechnet werden. Dabei wird auf die Stoffwerte der Brennstoffbestandteile der folgenden Tabelle hingewiesen.

2.1.2 Verbrennung und Vergasung

Stoff	molare Masse	molares Normvolumen	Normdichte	Gaskonstante
	m	$V_{m,n}$	ρ_n	R
	kg/kmol	$\frac{m}{n} / \text{kmol}$	kg/m^3	kJ/kgK
Kohlenstoff C	12,011	-	-	-
Schwefel S	32,060	-	-	-
Luft (trocken)	28,965	22,401	1,2930	0,28689
Luftstickstoff $\text{N}_2+\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{Ne}$	28,1609	22,403	1,2570	0,29510
Stickstoff N_2	28,0134	22,403	1,2504	0,29666
Sauerstoff O_2	31,9988	22,392	1,4290	0,25958
Argon Ar	39,948	22,392	1,7840	0,20793
Neon Ne	20,179	22,425	0,8998	0,41224
Kohlendioxid CO_2	44,0098	22,261	1,9770	0,18763
Wasserdampf H_2O	18,0152	22,41	0,80389	0,46144
Schwefeldioxid SO_2	64,059	21,856	2,9310	0,12656
Wasserstoff H_2	2,0158	22,428	0,08988	4,12723

Stoffwerte der Brennstoffbestandteile

Enthalpie

**Die Enthalpie ist ein Maß für die Energie eines Systems.
Sie wird in der Regel durch den Buchstaben H symbolisiert.
Sie setzt sich additiv aus zwei Teilen zusammen:
der Inneren Energie U und der Volumenarbeit.**

Innere Energie:

- bezeichnet die kinetische Energie der Teilchen des betrachteten Systems,
- die Energie der chemischen Bindungen der Teilchen des Systems, etc.
- Sie nimmt proportional zur Temperatur des Systems zu;
- am absoluten Nullpunkt ist sie 0.

Volumenarbeit:

- ist die Arbeit, die verrichtet werden musste, um das Volumen V und den Druck p zu erzeugen, das das System zum jetzigen Zeitpunkt hat.

Enthalpie

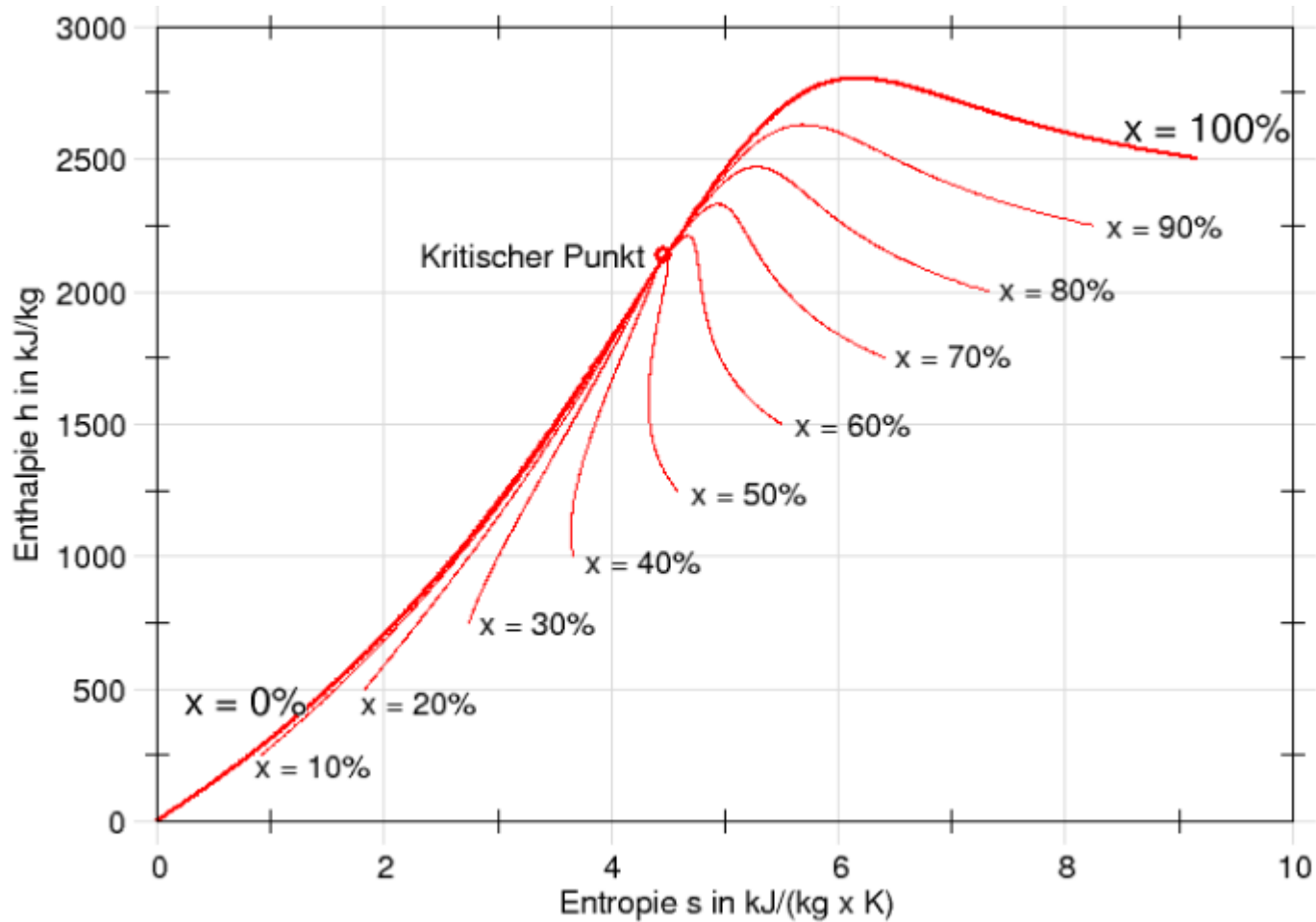
Will man die Änderung der Enthalpie eines Systems messen, so wird die Änderung der Temperatur und die des Volumens bei konstantem Druck gemessen.

$$H = U + pV$$

Differenziell ausgedrückt:

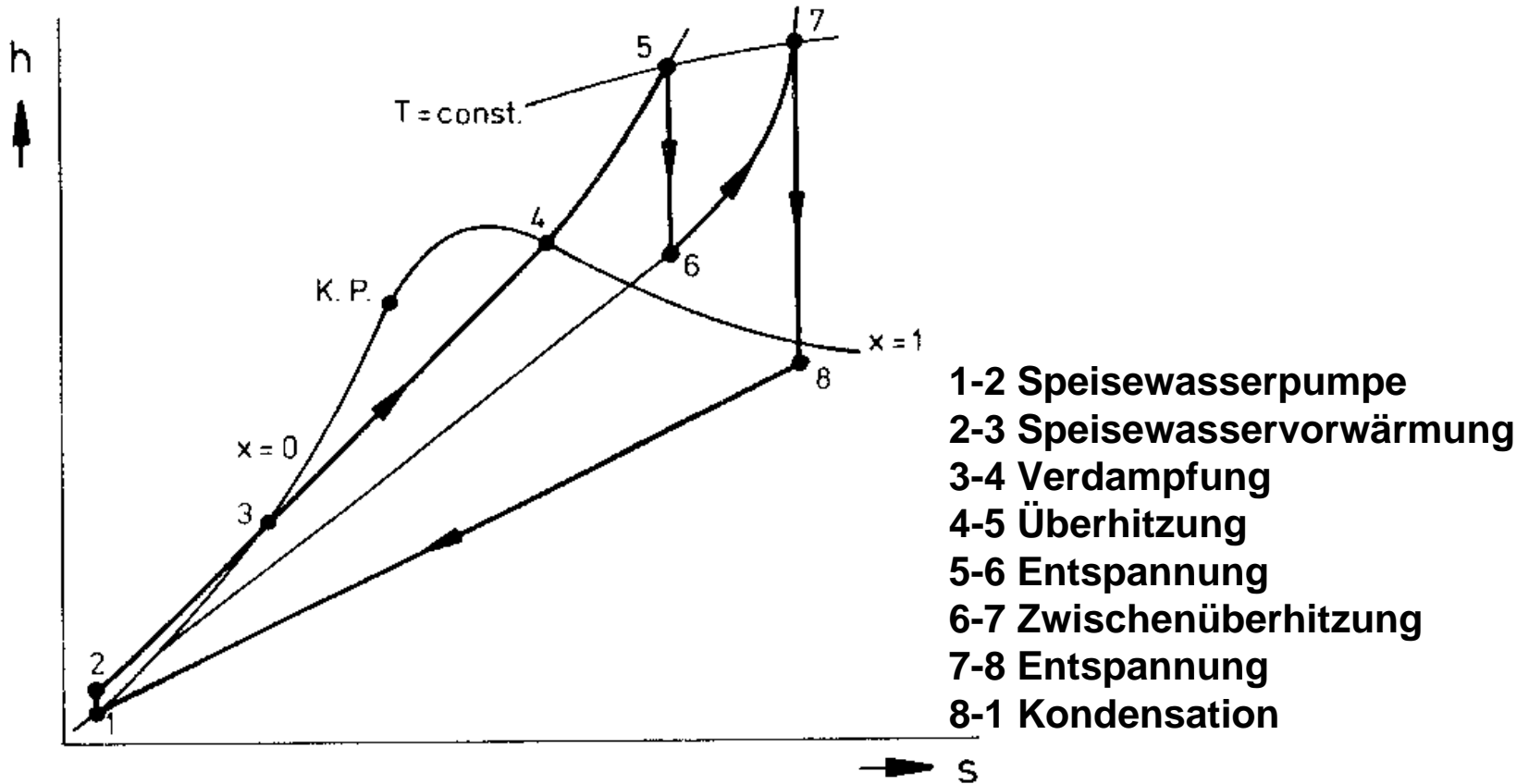
$$\begin{aligned}dH &= dU + p * dV + V * dp \\ &= T * dS + V dp\end{aligned}$$

Molier-hs-Diagramm für Wasserdampf



zu erzeugen, das das System zum jetzigen Zeitpunkt hat.

Kraftwerksprozess im hs-Diagramm



Rankine-Prozeß mit Zwischenüberhitzung im hs-Diagramm

Entropie

Der Begriff der Entropie wurde ursprünglich von Rudolf Clausius in der (phänomenologischen) Thermodynamik eingeführt, um eine quantitative Analyse der Frage zu ermöglichen, welche Prozesse in der Natur von selbst ablaufen können und welche nicht.

Später wies Ludwig Boltzmann nach, dass die Entropie einer Substanz durch ihre atomare Zusammensetzung sowie durch die unregelmäßige Bewegung ihrer Atome bestimmt wird. Die Entropie besitzt die Einheit J/K (Joule pro Kelvin).

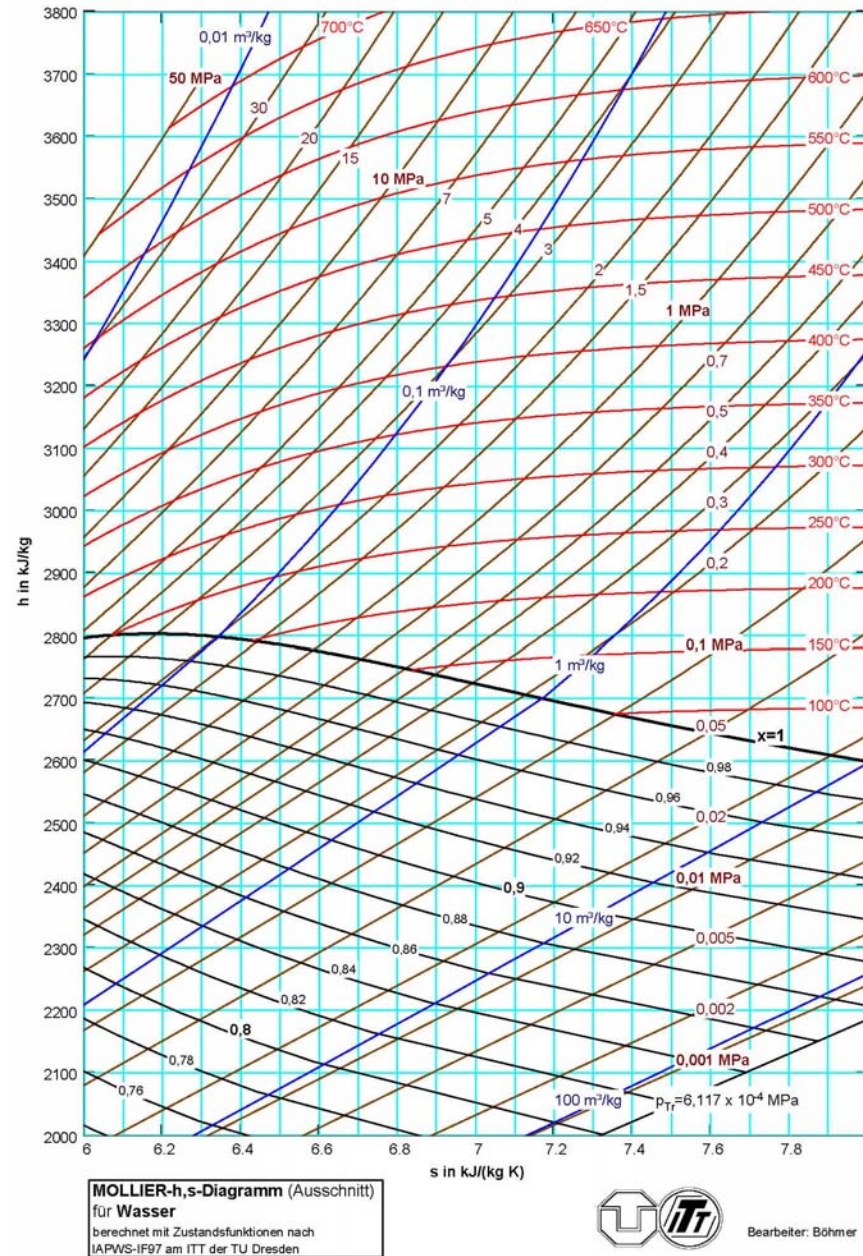
In der klassischen phänomenologischen Thermodynamik ist die Entropie über die Wärme definiert. Wärme ist immer eine sehr "unordentliche" Energieform mit hoher Entropie.

$$dS = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$




**Ein isoliertes System entwickelt sich von einem beliebigem Ausgangspunkt so lange irreversibel, bis das Gleichgewicht erreicht ist.
Beispiel: Kaffee+Kaffeesahne**

Enthalpie

**Ausschnitt aus dem
hs-Diagramm mit Linien
konstanter Temperatur
konstantem Druck
und konstantem
spezifischen Volumens**



Elementare Verbrennungsreaktionen

Brennstoff		Sauerstoff- bedarf		Reaktions- produkte
 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Kohlenstoff M_C</div>	+	 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Sauerstoff MO_2</div>	=	 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Kohlendioxid MCO_2</div>
$12.011 \frac{\text{kg C}}{\text{kmol}}$ $\frac{M_C}{M_C} \cdot \gamma_C$ $\gamma_C \frac{\text{kg C}}{\text{kg Br}}$	+	$31.998 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kmol}}$ $\frac{MO_2}{M_C} \cdot \gamma_C$ $2.664 \cdot \gamma_C \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg Br}}$	=	$44.009 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kmol}}$ $\frac{MCO_2}{M_C} \cdot \gamma_C$ $3.664 \cdot \gamma_C \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg Br}}$
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Wasserstoff M_{H_2}</div>	+	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Sauerstoff $\frac{1}{2}MO_2$</div>	=	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Wasser M_{H_2O}</div>
$2.016 \frac{\text{kg H}_2}{\text{kmol}}$ $\frac{M_{H_2}}{M_{H_2}} \cdot \gamma_H$ $\gamma_H \frac{\text{kg H}}{\text{kg Br}}$	+	$15.999 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kmol}}$ $\frac{1 \cdot MO_2}{2 \cdot M_{H_2}} \cdot \gamma_H$ $7.937 \cdot \gamma_H \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg Br}}$	=	$18.015 \frac{\text{kg H}_2O}{\text{kmol}}$ $\frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} \cdot \gamma_H$ $8.936 \cdot \gamma_H \frac{\text{kg H}_2O}{\text{kg Br}}$
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Schwefel M_S</div>	+	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Sauerstoff MO_2</div>	=	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Schwefeldioxid MSO_2</div>
$32.066 \frac{\text{kg S}}{\text{kmol}}$ $\frac{M_S}{M_S} \cdot \gamma_S$ $\gamma_S \frac{\text{kg S}}{\text{kg Br}}$	+	$31.998 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kmol}}$ $\frac{MO_2}{M_S} \cdot \gamma_S$ $0.998 \cdot \gamma_S \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg Br}}$	=	$64.064 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{kmol}}$ $\frac{MSO_2}{M_S} \cdot \gamma_S$ $1.998 \cdot \gamma_S \frac{\text{kg SO}_2}{\text{kg Br}}$

Dabei ist: $\gamma_C + \gamma_{O_2} + \gamma_H + \gamma_S + \gamma_N + \gamma_A + \gamma_W = 1$

Verbrennungsrechnung

Aus den o.a. Bilanzen und der Elementarzusammensetzung des Brennstoffes lässt sich die Menge an Sauerstoff - bzw. Oxidationsprodukten berechnen. So gilt für den theoretischen (minimalen) Sauerstoffbedarf (bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmasse).

$$2,668 \cdot \gamma_C + 7,9365 \cdot \gamma_H + 0,998 \cdot \gamma_S - \gamma_O = \mu_{O_{\min}} \left[\frac{\text{kgO}_2}{\text{kg}_{\text{Br}}} \right]$$

Der theoretische, spezifische trockene Luftbedarf wird somit:

$$\mu_{L_{\min \text{tr}}} = \frac{1}{0,2321} \cdot \mu_{O_2} \left[\frac{\text{kg Luft}}{\text{kg}_{\text{Br}}} \right]$$

Mit Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit:

$$\mu_{L_{\min \text{f}}} = \mu_{L_{\min \text{tr}}} \cdot (1 + X_{L, \text{H}_2\text{O}})$$

Verbrennungsrechnung

Bei stöchiometrischer Verbrennung ist die Luftzahl $n = 1$

$$n = \frac{\text{tatsächlich zugeführter Luftmengenstrom}}{\text{theoretisch für die Verbrennung notwendiger Luftmengenstrom}}$$

$$\mu_{L,f} = n \cdot \mu_{L,f \text{ min}}$$

Der reale Luftbedarf wird durch die Luftzahl n bestimmt. n ist dabei immer größer als 1!

Warum wird mehr Luft zugeführt?

Verbesserung der Verbrennung durch höheres O_2 -Angebot

Nicht beliebig hohes n , da sonst die Verbrennungstemperatur abgesenkt wird.

Verbrennungsrechnung

Ein zu niedriges n führt zur unvollständigen Verbrennung mit einer reduzierenden Atmosphäre in der Flamme und hohem CO-Gehalt.

Je nach Verbrennungsprozess und Brennstoffart gibt es eine optimale Luftzahl:

Feuerungsart	Brennstoff	Luftzahl n
Kohlefeuerung	fest	1,15 – 1,3
Ölfeuerung	flüssig	1,05 – 1,15
Gasfeuerung	gasförmig	1,02 – 1,10

Rauchgasberechnung

Die theoretisch minimale spezifische Rauchgasmenge, die sich aus den Bestandteilen CO_2 , H_2O , SO_2 , A, N_2 bei der vollständigen Verbrennung (chemischen Reaktion) zusammengesetzt, ermittelt man analog zum Sauerstoff – bzw. Luftbedarf:

$$\mu_{\text{RG},f} = \mu_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{SO}_2} + \mu_{\text{N}_2} + \mu_{\text{O}_2} + \mu_{\text{H}_2\text{O}} \quad \left[\frac{\text{kg}_{\text{RG},f}}{\text{kg}_{\text{Br}}} \right] \quad \text{mit}$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 3,6641 \cdot \gamma_C$$

$$\mu_{\text{SO}_2} = 1,9980 \cdot \gamma_S$$

$$\mu_{\text{N}_2} = \gamma_N + n(1 - x_{\text{O}_2\text{L}}) \cdot \mu_{\text{L},\text{min},\text{tr}}$$

$$\mu_{\text{O}_2} = (n - 1) x_{\text{O}_2\text{L}} \cdot \mu_{\text{L},\text{min},\text{tr}}$$

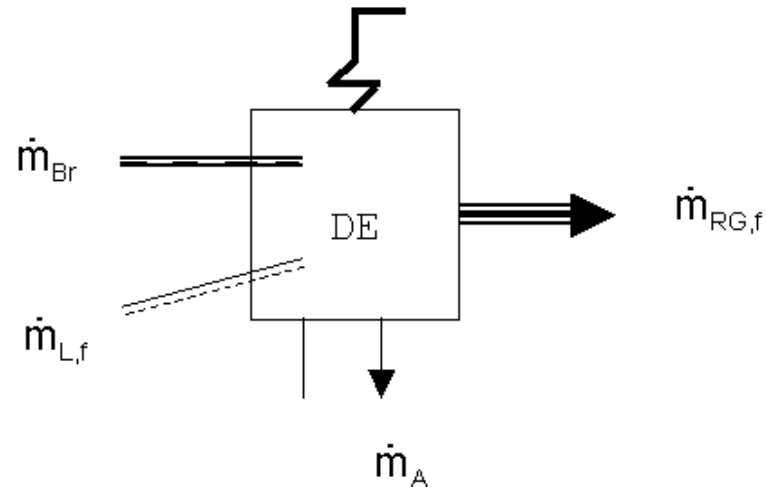
$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 8,9365 \cdot \gamma_H + \gamma_W + n \cdot x_{\text{H}_2\text{O},\text{L}} \cdot \mu_{\text{L},\text{min},\text{tr}}$$

bzw.

$$\mu_{\text{RG},\text{tr}} = \mu_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{SO}_2} + \mu_{\text{N}_2} + \mu_{\text{O}_2}$$

Rauchgasmassenbilanz

Der Rauchgasmassenstrom kann aber auch aus der Massenbilanz am Dampferzeuger ermittelt werden:



$$\dot{m}_{RG,f} = \dot{m}_{Br} + \dot{m}_{L,f} - \dot{m}_A \quad \text{bzw.}$$

$$\mu_{RG,f} = 1 + \mu_{L,f} - \gamma_A$$

Rauchgasmassenbilanz

Der Luft- bzw. Rauchgasmassenstrom ergibt sich bei bekanntem Brennstoffmassenstrom (z.B. aus der Energiebilanz des Kraftwerkes) zu:

$$\dot{m}_{L,f} = \mu_{L,f} \cdot \dot{m}_{Br} \left[\frac{\text{kg L, fl}}{\text{s}} \right]$$

bzw.

$$\dot{m}_{RG,f} = \mu_{RG,f} \cdot \dot{m}_{Br} \left[\frac{\text{kg RG, f}}{\text{s}} \right]$$

Für die statische Verbrennungsrechnung von festen Brennstoffen wurden Berechnungsblätter nach BOIE und ALTMANN vom Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der TU Dresden entwickelt, die auch als PC-Programm nutzbar sind, analoges gibt es auch für die Gasverbrennung.

Verbrennungsrechnung (siehe auch Übung)

Die Ergebnisse der Verbrennungsrechnungen für ausgewählte Brennstoffe sind in den folgenden Bildern zusammengetragen:

- **Luftbedarf**
- **Rauchgaszusammensetzung**
- **(u.a. CO₂, SO₂...)**
- **Nebenprodukte (NO_x...)**

Stoffwerte von Rauchgasen

Die Stoffwerte von Rauchgasen mit der ermittelten Zusammensetzung werden nach den Annahmen für ein Gasmisch bestimmt:

Für die Gaskonstante gilt z.B.:

$$R_{\text{RG}} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot R_i \quad \text{in kJ/kg}$$

$$y_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{\text{RG}}} \quad i: \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O} \dots$$

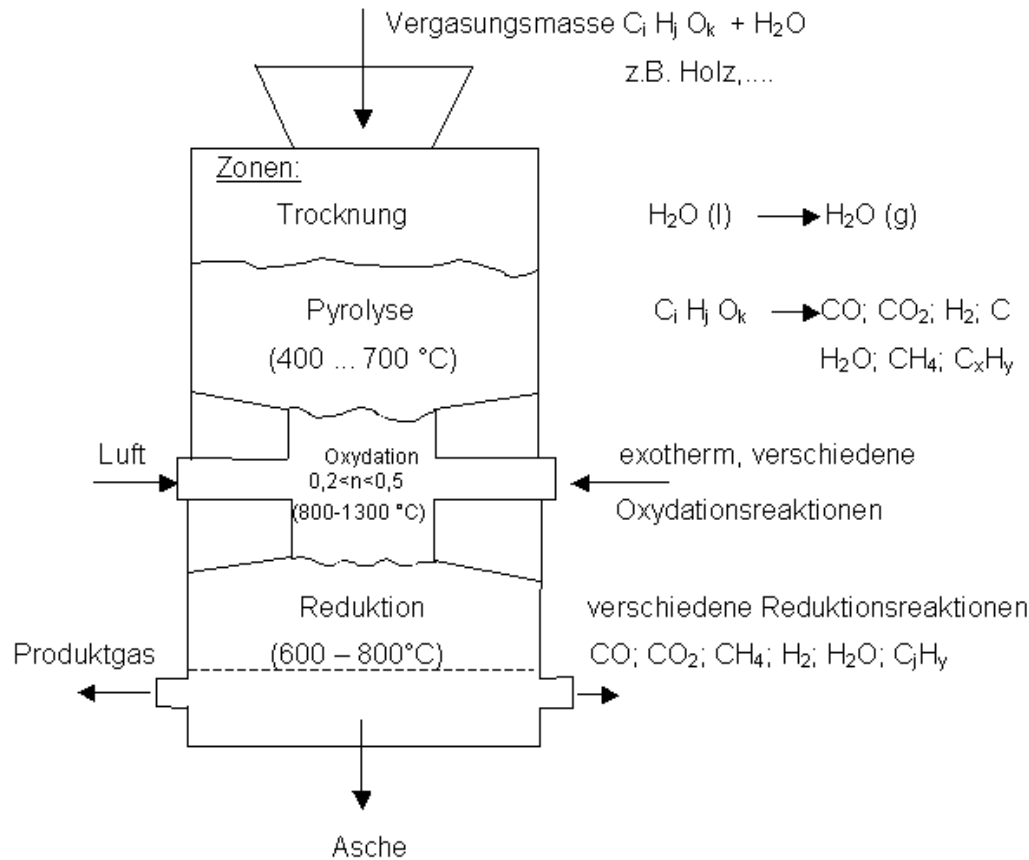
Rauchgaszusammensetzung

Bestandteile des feuchten Rauchgases in Vol.-%

Brennstoff	Luftverhältnis	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	NO _x	SO ₂
Braunkohle	1,3	11,6	18,9	4,0	65,3	0,05	0,35
Steinkohle	1,3	14,1	3,8	4,7	77,3	0,2	0,15
Heizöl	1,1	12,9	10,2	1,8	75,0	0,1	0,10
Erdgas	1,1	8,8	17,1	1,7	72,1	0,07	-

Vergasung

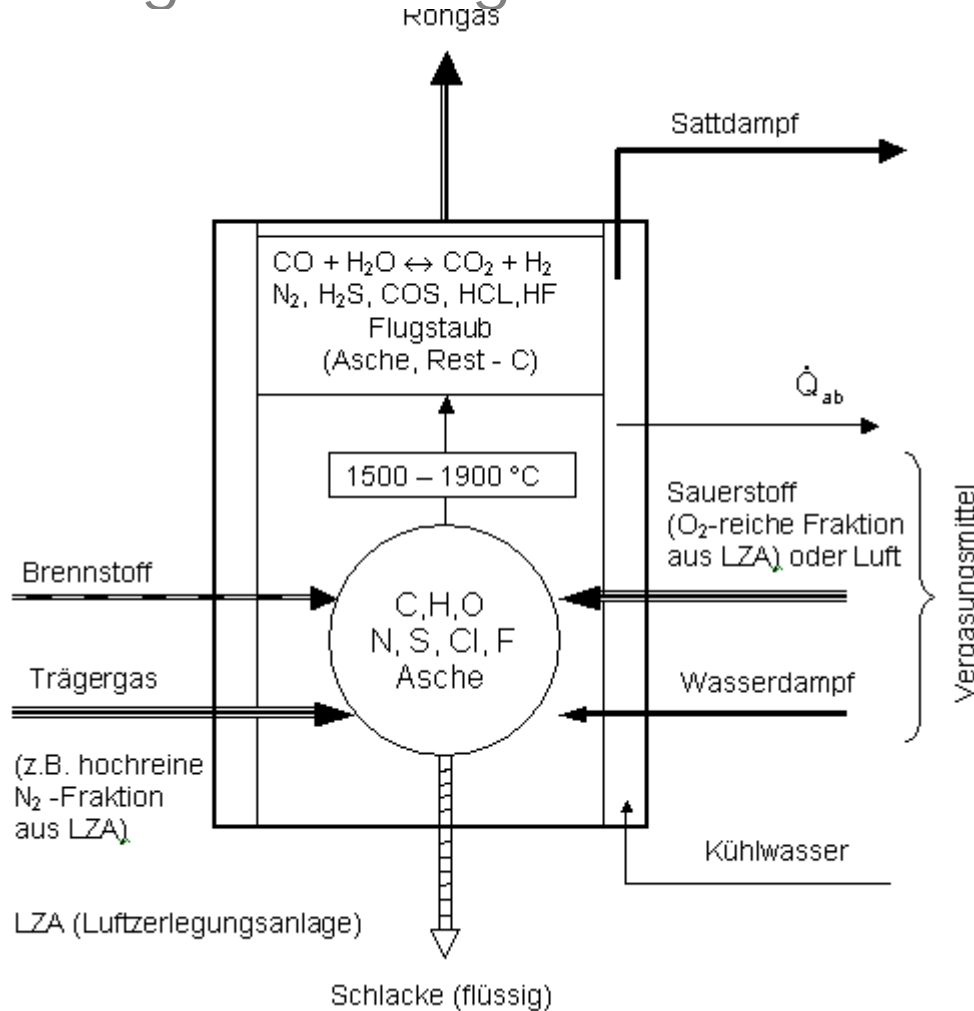
Im Gegensatz zur Verbrennung soll bei der Vergasung ein Produktgas erzeugt werden, das in nachgeschalteten Prozessen (Gasmotor, Gasturbine, Brennstoffzelle ...) eine Wirkungsgraderhöhung durch Hochtemperaturverbrennung ermöglicht.



**Gleichstrom-
vergaser**

1)	Heterogenes Wassergasgleichgewicht							
	C	+	H ₂ O	⇌	CO	+	H ₂	-131,4 kJ/mol
2)	<u>Boudouard-Gleichgewicht</u>							
	C	+	CO ₂	⇌	2CO			-172,6 kJ/mol
3)	Teilverbrennung							
	C	+	½ O ₂	⇌	CO			+110,6 kJ/mol
4)	Nachverbrennung							
	CO	+	½ O ₂	⇌	CO ₂			+ 283,2 kJ/mol
5)	Totalverbrennung							
	C	+	O ₂	⇌	CO ₂			+ 393,8 kJ/mol
6)	Direkthydrierung							
	C	+	2H ₂	⇌	CH ₄			+ 74,9 kJ/mol
7)	Homogenes Wassergasgleichgewicht							
	CO	+	H ₂ O	⇌	CO ₂	+	H ₂	+ 41,2 kJ/mol
8)	<u>Methanisierung</u>							
	CO	+	3H ₂	⇌	CH ₄	+	H ₂ O	+ 206,3 kJ/mol
9)	<u>Methanisierung</u>							
	CH ₄	+	2O ₂	⇌	CO ₂	+	2H ₂ O	+ 803,0 kJ/mol
10)	Knallgasreaktion							
	H ₂	+	½ O ₂	⇌	H ₂ O			+ 242,0 kJ/mol

Flugstromvergaser



Das Ziel der Vergasung ist es, ein **Brenngas** zu erzeugen, das u.a. nach einer Gasreinigung bei höheren Drücken und Temperaturen in Gasturbinen verbrannt werden kann (oder für andere Anwendungsfälle genutzt wird).

Anwendungsfälle sind u.a.

- Kohlevergasung zur Erzeugung von Synthesegas für die kommunale Versorgung
- Vergasung von Biomassen

Gaszusammensetzung

Vergasungssystem Merkmal	Einheit	Festbett		WS	ZWS
		Gegenstrom	Gleichstrom		
Anlagengröße	kW_{th}	1000	700	100000	800000
Brennstofffeuchte	%at	52	6	14	15
H ₂	Vol.-%	14	21	9,3	14,8
CO	Vol.-%	20	22,5	15,8	15,4
CO ₂	Vol.-%	10	11,5	16,7	15,0
CH ₄	Vol.-%	2,5	1,5	3,8	4,2
C _n H _m	Vol.-%			1,6	2,0
N ₂	Vol.-%			52,8	39,6
Heizwert h_u	MJ/Nm^3	4,9	5,6	4,4	5,0

Leere Felder: keine Angaben

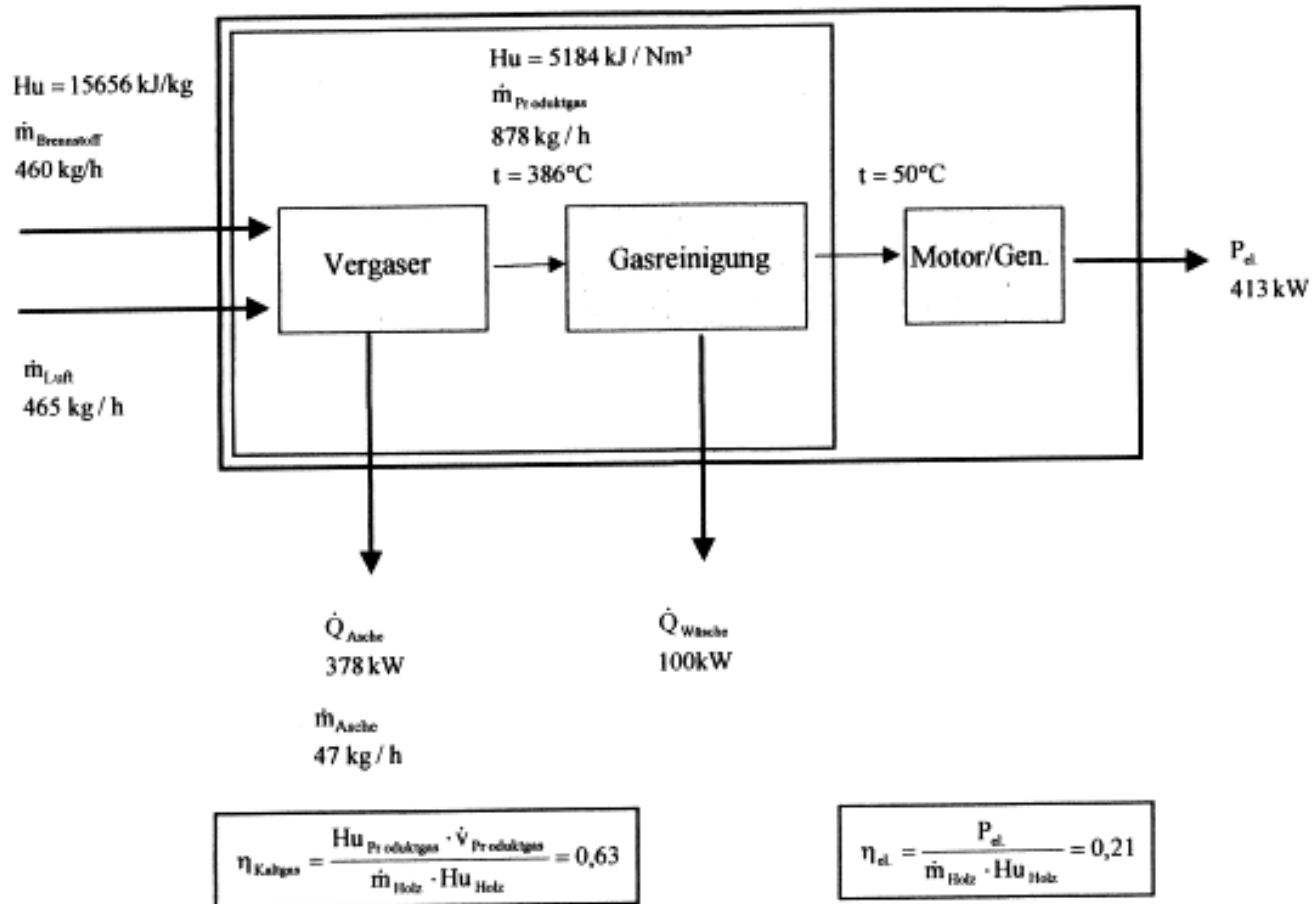
Gasreinheit

		Festbett		Festbett	
		Gegenstrom	Gleichstrom	WS	ZWS
Partikelgehalt	g/Nm ³	0,1 – 3	0,02 – 8	1 – 100	8 – 100
Bereich					
Mittelwert	g/Nm ³	1	1	4	20
Teergehalt	g/Nm ³	10 – 150	0,01 – 6	1 – 23	1 – 30
Bereich					
Mittelwert	g/Nm ³	50	0,5	12	8

erreicht

Anforderungen an das Produktgas Verwendungszweck	Partikel- gehalt mg/Nm ³	Partikel- größe µm	Teergehalt mg/Nm ³	Alkaligehalt mg/Nm ³
Verbrennungsmotor	< 50	< 10	< 100	
Gasturbine	< 30	< 5		< 0,24
Methanolsynthese	< 0,01		< 100	
Brennstoffzelle				

gefordert



Energetische Nutzung von Holz zur Elektroenergieerzeugung
 - Holzvergasung – Produktgasreinigung und Kühlung – Gasmotor/Generator

(Beispiel)