



Tino Martin Marling (Autor)

## **Strom aus fossilen und regenerativen Energien**

Eine Zusammenfassung aus Praxiserfahrungen und Literaturstudien



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8027>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



## Vorwort

Nach dem Atomausstiegsbeschluss im Jahr 2011 wurden bis Ende 2017 bereits mehr als die Hälfte der Atomkraftwerke in Deutschland vom Netz genommen.

Parallel dazu wurden die Windkraft-, Solar- und Biogasanlagen massiv gefördert, sodass Deutschland heute über einen 2. Kraftwerkspark auf der Basis der Erneuerbaren verfügt.

Man verband damit die Hoffnung, die CO<sub>2</sub> Emissionen der Energiewirtschaft signifikant reduzieren zu können. Nachdem sich diese Hoffnung nicht erfüllt hat, wurde Mitte 2018 eine Kommission ins Leben gerufen, die die Aufgabe bekam, den Ausstieg aus der Kohleverstromung unter umweltpolitischen, wirtschaftlichen und sozialverträglichen Aspekten zu untersuchen. Im Abschlussbericht der Kommission wird empfohlen, dass Deutschland bis zum Jahr 2038 aus der Kohle aussteigt und die notwendigen Strommengen auf der Basis von Erneuerbaren und Gaskraftwerken erzeugt werden und darüber hinaus eine sogenannte Kaltreserve für Notfälle auf der Basis von kohlegefeuerten Dampfkraftwerken erhalten bleibt.

Um die politischen Ziele der Energiewende in Deutschland zu erreichen, werden enorme technische und kommerzielle Anstrengungen notwendig.

Zur Umsetzung tragfähiger Lösungen werden auch zukünftig gut ausgebildete Ingenieure benötigt, die einerseits in der konventionellen Strom- und Wärmeerzeugung tätig sein können, als auch in zukunftsweisenden Technologien, die zum Gelingen einer nachhaltigen umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Energieversorgung beitragen.

Das vorliegende Buch bietet sowohl Studenten als auch Berufseinsteigern in der Energietechnik eine gute Möglichkeit sich einen Überblick über die gängigsten Technologien zur Stromerzeugung (Gaskraftwerke, Dampfkraftwerke, Biomasse, Abfallverbrennungsanlagen, Solar- und Windkraftanlagen) und den damit verbundenen Herausforderungen zu verschaffen.

Über praxisnahe Beispiele wird der Einstieg in diese komplexe Materie erleichtert.

Für diejenigen, die sich vertieft einarbeiten möchten, gibt es gezielte und hilfreiche Hinweise auf die einschlägige Literatur.

---

Prof. Dr.-Ing. Bernd EPPLE

Leiter des Fachgebietes für Energiesysteme und Energietechnik (EST)

Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2

64287 Darmstadt



# 1 Einleitung

In der Natur stehen der Menschheit unterschiedliche Formen der Energie für den alltäglichen Gebrauch zur Verfügung.

Im Rahmen der großtechnischen Nutzung zur Strom- und Wärmeerzeugung sind dies im Wesentlichen die Sonnenenergie, die Windenergie, die Energie des laufenden oder auch aufgestauten Wassers und die in fossilen Brennstoffen (Kohle, Gas, Öl) gebundene Energie.

Für die Wärmeerzeugung hat der Mensch schon in Urzeiten die in fossilen Brennstoffen gebundene Energie genutzt. Im Zuge der Industrialisierung erhielten diese Energieträger immer größer werdende Bedeutung für die Erzeugung elektrischen Stroms. Dies war und ist jedoch mit direkten Schadstoffemissionen verbunden und wird in der Zwischenzeit als umweltgefährdend eingestuft.

Mit der Entwicklung von Werkstoffen und elektrischen Apparaten zur Herstellung von Solarpanelen und Windrädern, sowie den dazugehörigen Generatoren, wurden etwa seit dem Jahr 2000 Wind- und Solaranlagen großflächig zur kommerziellen Stromerzeugung in den Verkehr gebracht. Zur effektiven Nutzung dieser Technologien wurden sogenannte Wind- und Sonnenkataster erstellt. Die als selbstverständlich vorhersehbaren Regionen für Windkraftanlagen in Küstennähe als auch für Solaranlagen in den Ländern der Sahelzone haben sich bis heute jedoch nicht als die Regionen mit der höchsten Ausbeute herauskristallisiert.

Dies ist dadurch begründet, dass es für Windkraftanlagen in Küstennähe beschränkende Faktoren wie die Wassertiefe, die Untergrundbeschaffenheit und die Schifffahrtsrechte gibt. Darüber hinaus ist der Bau neuer Stromtrassen für den Transport ins Landesinnere sehr schleppend, so dass das Potenzial der Off-Shore Windenergie nicht ausgeschöpft werden kann und die On-Shore Windkraftanlagen in Deutschland derzeit ca. 90 % des Stroms aus Windrädern liefern.

Für Solarkraftanlagen ist die Dauer der Sonnenstunden und der Sonneneinstrahlungswinkel essentiell und demzufolge in den Ländern der Sahelzone am vorteilhaftesten. Dazu wurde im Jahr 2009 das Großprojekt DessertTec ausgerufen, an dem sich viele namhafte Anlagenbauer und Planer beteiligt haben. Aufgrund der politischen Instabilität in der Region Nordafrika, sowie den Transportschwierigkeiten zum Überbrücken sehr großer Reichweiten, wurden die Aktivitäten zu diesem Projekt im Jahr 2015 wieder eingestellt.

Bis dato zählen die privaten PV Anlagen in der Summe zu den größten Stromlieferanten aus Solaranlagen. Dieser Strom kann jedoch nicht direkt zur Stützung der Hochspannungsübertragungsnetze benutzt werden. Daher muss die gleiche Menge auf konventionelle Weise vorgehalten werden, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Aufgrund der zuvor genannten Einschränkungen für Wind- und Solarkraftwerke, sowie den technischen Schwierigkeiten elektrischen Strom in größeren Mengen zu speichern, bleibt die Nutzung der fossilen Energieträger zur Abdeckung des Strombedarfs in den industrialisierten Ländern bis auf Weiteres unverzichtbar.

Allen voran kommt der Kohle (Braun- und Steinkohle) dabei die größte Bedeutung zu, weil deren Verfügbarkeit am höchsten und deren Preise pro Energieeinheit am wirtschaftlichsten sind. Die gesamten Kohlevorkommen auf unserer Erde wurden im Jahr 2010 mit einer Restspeicherkapazität von ca. 3000 Jahren geschätzt, wobei die derzeit wirtschaftlich schürfbaren Vorkommen eine Restspeicherkapazität von ca. 450 Jahren aufweisen, vorausgesetzt, dass die Kohleverstromung auch zukünftig bei ansteigendem Strombedarf einen weltweiten Anteil von ca. 30 % behalten wird.

[IEA World Energy Outlook 2017].



Inwieweit diese Prognosen zutreffend sind, kann zum heutigen Zeitpunkt nicht mit völliger Gewissheit bestätigt werden. Daher ist davon auszugehen, dass Kohle auch in Zukunft zumindest global einen wesentlichen Anteil an der Stromerzeugung haben wird. Die Kohleverstromung findet jedoch aufgrund des CO<sub>2</sub> Ausstoßes und der damit prognostizierten Erderwärmung bei der Bevölkerung der hochindustrialisierten Länder immer weniger Akzeptanz.

Zur Abscheidung des CO<sub>2</sub> im Rauchgas von kohlegefeuerten Kraftwerken stehen heute verschiedene Techniken bereit (Carbon Capture), die jedoch nicht zum Einsatz kommen, weil die Endlagerung des verflüssigten CO<sub>2</sub> nicht vollständig geklärt und damit nicht verbindlich geregelt ist. Darüber hinaus gibt es auch hierfür in der Bevölkerung nur wenig bis keine Akzeptanz.

Öl wird wegen seiner voranschreitenden Knappheit nur noch sehr selten in aufbereiteter Form verstromt. Das Rohöl wird an den Quellen verstromt, wo der erzeugte Strom größtenteils zur Förderung des Öls benötigt wird.

Gas wird im Rahmen der Umweltdiskussionen wieder attraktiver, allerdings ist die Versorgungssicherheit nach wie vor ein kritischer Punkt bei der Nutzung dieses Energieträgers. Durch den Bau weiterer Gaspipelines, die diesen Energieträger von den großen unterirdischen Feldern Asiens nach Europa bringen, ist mit einer Entspannung hinsichtlich des Risikos der Versorgungssicherheit zu rechnen.

Wasserkraft ist in Ländern mit Bergen und Flüssen eine attraktive und umweltfreundliche Art der Stromerzeugung. Man kann davon ausgehen, dass dieser Technik im Zuge des Ausbaus der Erneuerbaren eine stärkere Rolle zukommen wird. Hinsichtlich des Ausbaus von Pumpspeicherkraftwerken gibt es allerdings auch dazu Einsprüche aus den Umweltschutzorganisationen.

In den letzten Jahren haben Müllverbrennungsanlagen als dezentrale Stromversorger immer stärker an Bedeutung gewonnen. Der biogene Anteil in Siedlungsabfällen ermöglicht es, das die Rauchgase dieser Anlagen innerhalb der EU weit gültigen Richtlinien bis zu 50 % als CO<sub>2</sub> neutral eingestuft werden können.

Weiterhin wird seitens der EU Kommission darauf gedrängt, den Wirkungsgrad dieser Anlagen stetig zu erhöhen, was bereits seit 2009 in dem sogenannten R1 Faktor festgeschrieben wurde.

Sollte es gelingen, den Abfallwirtschaftskreislauf, so wie er innerhalb der EU Staaten praktiziert wird, auf andere Länder zu übertragen, könnte diese Technologie vor dem Hintergrund des weltweit steigenden Müllaufkommens zu einem festen Standbein in der dezentralen Strom- und Wärmeversorgung werden.

Weitere Technologien auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub> reduzierten Energieversorgung werden unter dem Stichwort „Power to X“ zusammengefasst. Dabei steht das X für die unterschiedlichen Möglichkeiten mit Strom aus Erneuerbaren Energien entweder nutzbare chemische Energieträger wie z.B. Wasserstoff, Methan oder Synthesegase herzustellen oder Wärme zu erzeugen, die z.B. für die Produktion von Dampf genutzt werden kann.

Diese Technologien befinden sich noch im Entwicklungsstadium und sind derzeit nicht wirtschaftlich einsetzbar.

Die Faktoren für den erfolgreichen Einsatz alternativer Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen werden die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit und die Bezahlbarkeit sein. Moderne Kohle und Gas gefeuerte Kraftwerke haben hierfür die Messlatte sehr hoch gelegt, denn der Strom wurde bis zum Beginn der Energiewende in Deutschland so selbstverständlich wie die Luft zum atmen hingegenommen.



In der Zwischenzeit haben sich mit einem knapp 40 %igen Anteil an Erneuerbaren die Strompreise für den privaten Endverbraucher mehr als verdoppelt, weshalb die in Deutschland gestartete Energiewende, sowohl im Inland als auch im Ausland, eher kritisch verfolgt wird.



## 2 Fossile Energieträger

Unter fossilen Energieträgern versteht man Stoffe, die im Wesentlichen aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen und nach Aufwendung einer Anfangsenergie unter Sauerstoffverbrauch exotherm, d.h. unter Wärmefreisetzung, reagieren.

Grundsätzlich werden die fossilen Energieträger in feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe unterteilt.

### 2.1 Brennstoffe

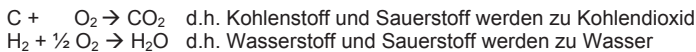
Der in fossilen Brennstoffen gespeicherte Energieinhalt wird bei der Verbrennung freigesetzt. Die freigesetzte Wärmemenge pro Massen- oder Volumeneinheit hängt von den im Brennstoff vorhandenen Elementen ab und wird als Heizwert bezeichnet.

Mit dem Heizwert kann die Energiedichte pro Masseneinheit beschrieben werden. Je höher der Heizwert, desto geringer die zu transportierenden Mengen bzw. Volumina. Davon profitiert bis heute in erster Linie die Flugzeug- und Automobilindustrie.

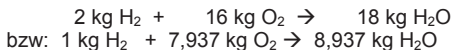
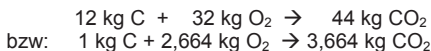
Um den Heizwert eines Brennstoffs (Br) bestimmen zu können, benötigt man seine Elementaranalyse bzw. den Anteil der jeweiligen Elemente, wie z. Bsp.: Kohlenstoff c, Wasserstoff h, Sauerstoff o, Schwefel s, etc.

Für die Verbrennung bzw. den chemischen Oxidationsprozess wird Sauerstoff benötigt. Als Sauerstoffträger dient i.d.R. frische Luft mit näherungsweise 21 % Sauerstoffanteil und ca. 79% Stickstoffanteil.

Die elementaren Reaktionsgleichungen für die Hauptreaktanden lauten:



Unter Berücksichtigung der molaren Massen, d.h. spezifischen molekularen Gewichte der Reaktanden, ergeben sich damit die folgenden Massenbilanzen:



Den Mindestluftbedarf um den Sauerstoffbedarf für die idealisierte vollständige Verbrennung zu decken, ermittelt man aus der Elementaranalyse des Brennstoffs.

Für den einfachen Fall des Methangases (CH<sub>4</sub>) wird im Folgenden die Vorgehensweise dargestellt.

Pro molare Masseneinheit (Mol) Brennstoff, gibt es 1 Mol Kohlenstoff (C) und 4 Mol Wasserstoff (H<sub>4</sub>)

Die molare Masse ist der Quotient aus Masse und Stoffmenge eines Elementes.

Durch Einsetzen der Molmassen lässt sich somit die Stoffmenge bestimmen; d.h.:

$$1 * \frac{12 \frac{\text{kgC}}{\text{molBr}}}{16 \frac{\text{kgBr}}{\text{mol Br}}} = \frac{12 \text{ kgC}}{16 \text{ kg Br}} = 75 \% \text{ Gewichtsanteil c (Kohlenstoff)}$$

entsprechend gilt



$$4 * \frac{1 \frac{\text{kgH}}{\text{molBr}}}{16 \frac{\text{kgBr}}{\text{mol Br}}} = \frac{4 \text{ kgC}}{16 \text{ kg Br}} = 25 \% \text{ Gewichtsanteil h (Wasserstoff)}$$

Wie oben aufgeführt benötigt man für die vollständige Verbrennung von 1 kg C mindestens 2,664 kg O<sub>2</sub> und für die vollständige Verbrennung von 1 kg H benötigt man entsprechend 7,937 kg O<sub>2</sub>.

Der Mindestsauerstoffbedarf pro kg Brennstoff (CH<sub>4</sub>) errechnet sich damit zu:

$$\text{O}_2 \text{ min.} = 0,75 \times 2,664 + 0,25 \times 7,937 = 3,982 \text{ kg O}_2 / \text{kg CH}_4$$

Mit einem Massenanteil von 23,2 % Sauerstoff in der Luft ergibt sich damit ein Mindestluftbedarf von 17,16 kg Luft / kg CH<sub>4</sub>.

Dies wird üblicherweise als stöchiometrische Mindestluftmenge L<sub>min</sub> bezeichnet und ist identisch mit der Aussage Lambda (λ) = 1.

D.h., wenn der Feuerung z.B. 20 % mehr Luft zugeführt wird als theoretisch notwendig, spricht man von einem Luftverhältnis λ=1,2. Die Gründe für ein Überangebot von Luft in realen Verbrennungsanlagen sind vielfältig, resultieren jedoch aus der praktischen Erkenntnis, mit dieser Maßnahme die vollständige Oxidation der Verbrennungsprodukte zu gewährleisten.

Die Abgasmenge pro kg Brennstoff berechnet sich unter Berücksichtigung der o.g. Herleitung zu m<sub>Abg.</sub> = λ \* m<sub>Lmin</sub> + 1 [ kgAbgas / kg Brst. ].

Für die technische Auslegung der Aggregate, die mit dem Abgas in Berührung kommen, verwendet man die sog. feuchte Abgasmenge, d.h. inklusive des Wasseranteils. Zu Vergleichszwecken oder für Behördenkataster verwendet man das sog. trockene Abgas als Bezugsgröße für die Schadstoffanteile.

Vertiefende Erklärungen und weitergehende Beispiele findet man u.a. in [1] und [2]

### 2.1.1 Flüssige und gasförmige Brennstoffe

Für flüssige Brennstoffe, wie z.B. Erdöl oder dessen Veredelungsprodukte Benzin, Dieselloil oder Kerosin, gelten die gleichen Basisreaktionen wie in 2.1 beschrieben. Allerdings handelt es sich bei diesen Brennstoffen i.d.R. um langkettige Kohlenwasserstoffe, deren Summenformeln sehr unterschiedlich sein können.

So hat z.B. der für Verbrennungsmotorenantriebe gültige Referenzkraftstoff die Summenformel C<sub>7,34</sub> H<sub>13,45</sub> O<sub>0,01</sub>. [3]

In flüssigen Brennstoffen sind u.U. Staubpartikel, Schwermetalle und eventuell auch Schwefel enthalten. Die Elementaranalyse erweitert sich demzufolge um diese Elemente.

Die Luft- und Rauchgasmengen werden nach dem gleichen Schema wie in 2.1 beschrieben ermittelt. Aufgrund des höheren Anteils an brennstoffgebundenem Sauerstoff in Flüssigbrennstoffen reduziert sich die erforderliche Mindestluftmenge gegenüber reinem Gas deutlich. Dementsprechend verringert sich auch die Abgasmenge eines Brennstoffs mit inhärentem Sauerstoff und anderen Anteilen (z.B. Schwefel) spürbar.

In der technischen Nutzung werden flüssige Brennstoffe vor der Verbrennung hauptsächlich zerstäubt. Der Abbrand erfolgt dabei durch das Ausgasen der flüchtigen Bestandteile an der Tropfenoberfläche. D.h. je feiner die Zerstäubung und je mehr kleine Tropfen, desto schneller und effizienter die Verbrennung.



Das ist z.B. der Grund, warum in Verbrennungsmotoren heutzutage Drücke von mehr als 1500 bar vor der Zerstäubung eingesetzt werden.

Der Regelbereich pro Düse ist naturgemäß soweit eingeschränkt, dass die Volllastmenge um lediglich ca. ein Drittel reduziert werden kann, damit eine noch akzeptable Tropfengröße erreicht wird.

Um den Regelbereich zu vergrößern, wurden Zerstäubersysteme entwickelt, die mit einem Trägermedium arbeiten. Dieses Medium kann je nach Anwendungsfall z.B. Luft oder Dampf sein.

Bei niederkalorischen flüssigen Brennstoffen wird vorzugsweise Dampf als Trägermedium eingesetzt, womit eine bessere Substitution des Brennstoffs im Teillastbereich ermöglicht wird. Bei hochkalorischen Brennstoffen, wie z.B. Dieselöl oder Benzin, werden entweder reine Druckzerstäuber oder auch Druckluftzerstäuber eingesetzt.

Je nach Konsistenz kann es notwendig werden, dass der Brennstoff vorgewärmt werden muss, um eine zufriedenstellende Zerstäubung zu erreichen. Rohöl oder Ölrückstände sind i.d.R. sehr zähflüssig und müssen bereits aufgrund dieser Eigenschaft erhitzt werden, um die Pumpfähigkeit zu gewährleisten. [4]

Gasförmige Brennstoffe bestehen in der Regel aus kurzen Kohlenwasserstoff- Molekülen. Die Reaktivität ist aufgrund des natürlichen Aggregatzustandes sehr hoch. Die Brennstoffe werden nach folgender Nomenklatur gekennzeichnet: C1, C2, C3, C4 usw., wobei die fortlaufenden Nummern die Anzahl der Kohlenstoffatome pro Brennstoffmolekül angeben.

Der Heizwert naturgasförmiger Brennstoffe liegt im Bereich zwischen ca. 33 MJ/kg – 45 MJ/kg. Synthetische Gase können Heizwerte bis ca. 90MJ/kg erreichen, wobei Wasserstoff mit ca. 100 MJ/kg die Ausnahme bildet.

Zu niederkalorischen Brenngasen zählen u.a. Kokereigase mit relativ hohen CO Anteilen. Für die energetische Nutzung dieser Gase benötigt man Brennersysteme mit großen Zuführquerschnitten und Flammenstabilisierungseinrichtungen, weil die Flammenausbreitung nur in relativ engen Grenzen erfolgt.

Als Unterscheidungsmerkmal für die Qualität von Gasen, die in Verbrennungsanlagen zur Anwendung kommen, wird hauptsächlich der sog. Wobbe-Index verwendet. Dieser wird aus dem Quotienten zwischen Heizwert und der Quadratwurzel des relativen Dichteverhältnisses berechnet. Das relative Dichteverhältnis ist darin definiert als der Quotient zwischen Brennstoff und Luft bei gleichen barometrischen Bedingungen.

$$\text{Wobbe Index} = \frac{\text{Heizwert}}{\sqrt{\rho/\rho_0}}$$

In den technischen Verbrennungseinrichtungen wird über die Beimischung von Luft angestrebt die Verbrennungsendtemperaturen unterhalb von 1300 °C zu halten, um über diese Primärmaßnahme den NOx Bildungsprozess so gering wie möglich zu halten. [5] Darüber hinaus wird bei gasgefeuerten Anlagen darauf geachtet, die Abgasverluste so gering wie möglich zu halten. D.h., sowohl die Abgastemperatur, als auch der Abgasvolumenstrom sollten nicht unnötig hoch sein, wenn es um Anlagen geht, bei denen die Abwärme im Rauchgas nicht genutzt werden kann.





## 2.1.2 Feste Brennstoffe

Die sog. festen Brennstoffe lassen sich nach Heizwert, Wasser und Aschegehalt klassifizieren.

Der Heizwert steigt mit dem Inkohlungsgrad, d.h. mit steigendem Kohlenstoffanteil. Daher hat Kohle i.d.R. einen höheren Heizwert als z.B. Torf.

Die Kohle wird aufgrund des stark unterschiedlichen Heizwertes jedoch grob in 3 Gruppen eingeteilt; das sind mit aufsteigendem Heizwert die Braunkohle, die Steinkohle und Anthrazit (siehe nachfolgende Tabelle).

	Kurzanalyse (Immediate)				Elementaranalyse				
	Wasser [%], roh	Asche [%], roh	fl. Anteile waf [%]	u. Heizwert	C-Gehalt waf [%]	H-Gehalt waf [%]	O-Gehalt waf [%]	N-Gehalt waf [%]	S-Gehalt waf [%]
Braunkohle	45 - 60	3 - 10	45 - 55	5 - 11	65 - 75	4.5 - 6	17 - 27	0.5 - 1.0	0.5 - 2.5
Steinkohle	5 - 12	6 - 15	25 - 40	20 - 29	75 - 85	5 - 6	7 - 10	1 - 2	0.5 - 3.5
Anthrazit	4 - 9	6 - 10	10 - 25	29 - 32	85 - 92	3 - 5	2 - 6	1 - 2	0.5 - 1.0

Die Elementaranalyse bezieht sich auf den wasser- und aschefreien Brennstoff und gibt folgende Anteile der Elemente an:

- Kohlenstoff c
- Wasserstoff h
- Sauerstoff o
- Stickstoff n
- Schwefel s.

Zur weiteren Beurteilung der zu verfeuernden Kohle, wie z.B. das Verschlackungsverhalten, werden die Anteile des Eisens (Fe), der Alkalien (Ca, K, Na) und der Metalle (Mg, Al) herangezogen.

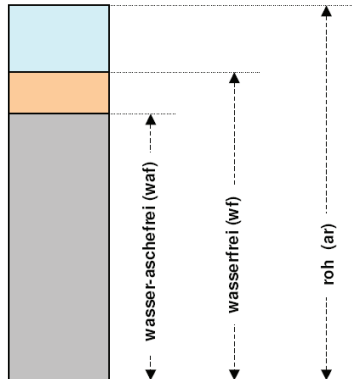
Für eine erste grobe Einstufung wird in der Praxis die sog. Kurzanalyse erstellt, bei der, bezogen auf den Rohzustand, der Wassergehalt, der Aschegehalt sowie der Anteil der flüchtigen Bestandteile (d.h. Ausgasung von H<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) und der Heizwert ermittelt werden. [6]

Durch die heterogene Struktur fester Brennstoffe, können partielle Temperaturspitzen beim Oxidieren der brennbaren Substanzen nicht ausgeschlossen werden.

In der Flamme können dabei auch Diffusionsreaktionen auftreten, die nicht exakt vorausberechenbare Abgasbestandteile erzeugen.

Um die effizienteste Umsetzung abschätzen zu können, gibt man für die festen Brennstoffe zusätzlich die maximal mögliche CO<sub>2</sub> Konzentration im Abgas an.

Die Hauptbezugszustände der Kohle sind im folgenden Schaubild zusammengefasst:



Gemäß DIN / EN 51700 gibt es feinere Unterteilungen, bei denen die Rohsubstanz wie angeliefert (as received = ar) noch untergliedert wird in „lufttrocken“, „analysefeucht“ sowie „wasser- und mineralstofffrei“. Nach Abzug aller nicht brennbaren Anteile bleibt die organische Brennstoffsubstanz zurück. Diese organische Brennstoffsubstanz besteht dabei aus Kohlenstoff, Wasserstoff sowie eventuellen Schwefelanteilen und bildet im europäischen Raum die Basis für die Bestimmung des sog. unteren Heizwertes (Hu), der auch hier zur Wirkungsgradbestimmung von fossil befeuerten Anlagen herangezogen wird.

Im angelsächsischen Raum benutzt man zur Wirkungsgradbestimmung vorwiegend den sog. oberen Heizwert (Ho), der sich um den Wasser- und Mineralanteil unterscheidet, d.h. um den Anteil der Verdampfungswärme des Wassers.

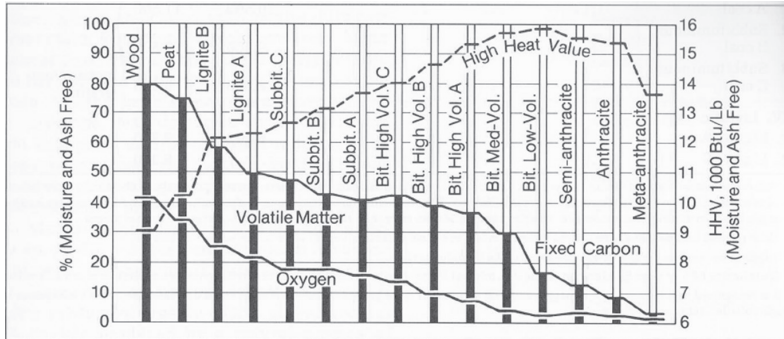
Hinsichtlich des Schwefelanteils in der Kohle, findet man neben dem organischen Anteil auch die anorganischen Anteile, die im Eisen gebunden sind und als Pyrit (oder in Fachkreisen aufgrund des goldähnlichen Aussehens als Katzensgold) bezeichnet werden.

Im Zuge der emissionsmindernden Maßnahmen wurde für die Steinkohlen das sog. Mazerilverhalten zu einem wichtigen Auslegungskriterium. Die Mazerale sind die Gefügebestandteile, die sich zusammensetzen aus Vitrinit (Holzbasis), Exinit (Bitumenbasis), Resinit (Harzbasis) und Inertinit, welches sich wiederum aus Mikrinit, Semifusinit, Sklerotinit und Fusinit zusammensetzt und hauptsächlich die inaktiven und spröden Anteile repräsentiert.

Besonders hervorzuheben ist, dass die Steinkohlen der nördlichen Halbkugel vorwiegend über Vitrinit und Exinit verfügen und die der südlichen Halbkugel mehr Inertinit enthalten. Darüber hinaus kann man beobachten, dass für die Kohlen der südlichen Hemisphäre bei gleichem Stickstoffgehalt höhere NO<sub>x</sub> Emissionen entstehen als bei den Steinkohlen der nördlichen Hemisphäre mit vergleichbarem Stickstoffgehalt. Der Lufthaushalt der Feuerung muss dementsprechend angepasst werden. [7]

Die weltweit schürfbaren Kohlen sind in der Zwischenzeit relativ gut analysiert und dokumentiert. Die Einteilung erfolgt üblicherweise nach dem Heizwert und dem Gehalt der flüchtigen Anteile, bezogen auf die Wasser-Asche freie brennbare Substanz.

Die Einteilung der weltweiten Kohlen nach dem amerikanischen Standard ASTM D388-12 ist in der nachfolgenden Graphik zusammengefasst.



Die flüchtigen Bestandteile zünden innerhalb des stöchiometrischen Bereichs am schnellsten und üben damit den entscheidenden Einfluss auf den Abbrand des Kohlekorns aus. Die Auslegung einer Kohlestaubfeuerung wird durch den Anteil der flüchtigen Bestandteile sehr stark beeinflusst, da die dem Brenner zugeführte Mindeststaubbelastung zur Erhaltung der Flamme im Wesentlichen davon abhängt. [8]

Nach dem Abbrand der Kohlepartikel bleiben die vorwiegend mineralischen Ascheanteile zurück. Etwa 90 % dieser Anteile fliegen als kleine Partikel mit dem Rauchgasstrom als Flugasche durch den Kessel und die nachgeschalteten Rauchgasreinigungseinrichtungen. Die restlichen 10 % fallen als Schlacke, sogenannte Trichteräsche, in den Kesseltrichter und von dort in den Entschlacker (siehe 2.2.3).

Die heißen Flugaschepartikel haben die Eigenschaft, dass sie je nach Temperatur deformiert und klebrig werden. D.h. die Partikel haften an den Heizflächenrohren und bauen sich dort mit der Zeit zu einem Belag auf, der den Wärmeübergang massiv behindern würde, falls dieser nicht turnusmäßig abgereinigt würde. Man spricht von der Verschmutzung/Verschlackung des Kessels, die mittels Wasser und/oder Dampfzügen (Rußbläser) soweit reduziert wird, dass die technischen Eigenschaften der Anlage eingehalten werden können.

Die Reinigung der Kesselrohre erfordert jedoch sehr viel Erfahrung, da eine gewisse Grundverschmutzung erhalten bleiben sollte, um die Oberfläche vor korrosiven Angriffen zu schützen.

Vorbeugende Maßnahmen werden ergriffen, indem man die Aschen der zum Einsatz kommenden Kohlen untersucht und deren Schmelzverhalten dokumentiert. In Abhängigkeit davon wird die Brennkammeraustrittstemperatur des Kessels bzw. die Größe der Brennkammer festgelegt.

Das Ascheschmelzverhalten wird gemäß DIN/EN 51730 ermittelt. Man unterscheidet dort nach 3 Temperaturen, die für die Verschmutzung des Dampferzeugers relevant sind:

- A: die Erweichungstemperatur
- B: die Halbkugeltemperatur
- C: die Fließtemperatur

Falls die Temperaturdifferenz zwischen B und C kleiner 50 K beträgt, spricht man von einer sog. „kurzen Schlacke“, d.h. kurz nachdem die Asche sich verformt, wird sie auch bald flüssig. Es ist leicht nachvollziehbar, dass diese Art der Schlacke bei Aggregate Lieferanten und Anlagenbetreibern nicht sehr beliebt ist.