

B KOHLEKRAFTWERKE

1 Einleitung

Kohlekraftwerke (KKW) sind **Wärme­kraftwerke**. Die dort produzierte elektrische Energie wird durch Umwandlung von der in der Kohle gebundenen **chemischen Energie** erzeugt, wobei zunächst durch Verbrennung **Wärmeenergie** erzeugt wird.

Aus thermodynamischen Gründen kann nur ein Teil der Wärmeenergie in **Arbeit** bzw. **elektrische Energie** umgewandelt werden. Ein großer Teil muss abgeführt werden. Er wird über **Kühltürme** (Abb.1) an die Umgebung abgegeben.



Abb.1: Kohlekraftwerk

In Deutschland wird zurzeit die meiste elektrische Energie in Kohlekraftwerken produziert. Man unterscheidet zwischen **Braunkohle** und **Steinkohle**, von denen es jeweils noch verschiedenen Sorten (Weichbraunkohle, Glanzbraunkohle u.a. oder Fettkohle, Anthrazit u.a.) gibt.

Braunkohle ist die geologisch gesehen die jüngere der beiden Kohlearten. Ihr Wassergehalt ist höher und ihr Heizwert ist dreimal geringer als der von Steinkohle. Braunkohle kann in Tagebau gefördert werden, im Gegensatz zur Steinkohle die in tieferen Erdschichten liegt und daher unter Tage gefördert werden muss.

Wegen des geringeren Heizwertes lohnt der Transport von Braunkohle nicht. Braunkohlekraftwerke befinden sich daher nahe der Kohleabbau­stätte, wogegen Steinkohlekraftwerke ihren Brennstoff teilweise von sehr weitem angeliefert bekommen.

Die betriebenen Kohlekraftwerke haben eine Leistung von etwa 200 MW bis 1000 MW. Diese Angaben beziehen sich auf die abgegebene elektrische Leistung.

2 Funktionsweise

Die Kohle im Anlieferungszustand ist ein Feststoff, der sich hauptsächlich aus Kohlenstoff mit einer gewissen Feuchtigkeit zusammensetzt. Zusätzlich besteht Kohle aus Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff und mineralischen Stoffen.

In Abb.2 ist ein Kraftwerk schematisch dargestellt.

Die angelieferte Kohle wird zunächst gemahlen und getrocknet. Dann wird sie mit vorgewärmter Luft in der **Brennkammer (Kessel)** bei ca. 1200°C verfeuert. Häufig wird dazu ein Wirbelschichtverfahren (schwebend Verbrennung) verwendet.

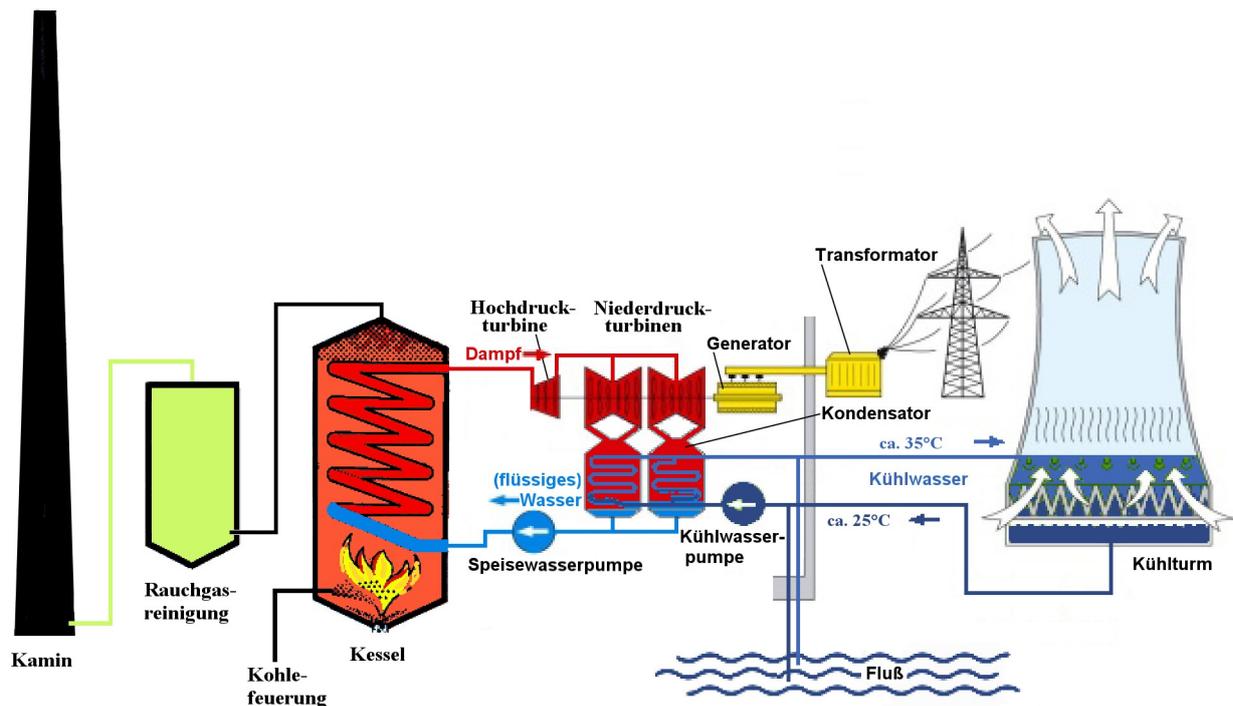


Abb.2: Schematische Darstellung eines Kohlekraftwerkes

Der Kohlenstoffanteil oxidiert dabei zu Kohlenstoff. Der Schwefel oxidiert ebenfalls, die mineralischen Einschlüsse verbrennen zu Asche. Bei den hohen Verbrennungstemperaturen reagiert der Stickstoff aus der Kohle ebenso wie ein Teil des Luftstickstoffes mit dem Sauerstoff.

Der Kessel dient als **Dampferzeuger**. Die **Wärme** der heißen Verbrennungsgase geht auf das Wasser des Dampfkreislaufes über. Hierzu verlaufen im Kessel viele Kilometer Rohrleitungen, damit das durch die Speisewasserpumpe geförderte Wasser im Kessel verdampfen kann.

Der Dampf, der den Kessel verlässt, strömt durch einen Zwischenüberhitzer und einen **Dampftrockner**. Er erreicht die Dampfturbine mit einer Temperatur von mehr als 500°C und steht unter ca. 250 bar Druck.

In der Dampfturbine werden die im Dampf enthaltene Wärme- und Druckenergie in Bewegungsenergie des **Läufers** umgewandelt ist.

Die Dampfturbine besteht aus mehreren **Leiträdern** und **Laufädern**, die abwechselnd angeordnet sind. Die **Leitschaufeln** der Leiträder sind am Gehäuse fixiert und leiten den Dampf auf die **Laufschaueln**. Diese sind an der rotierbaren Welle, dem Läufer, fixiert. Ein Teil der im Dampf enthaltenen Energie wird am Laufrad in **mechanische Energie** umgewandelt, der Läufer dreht.

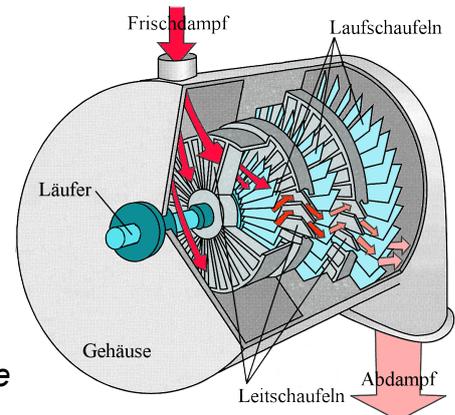


Abb.6: Aufbau einer Dampfturbine

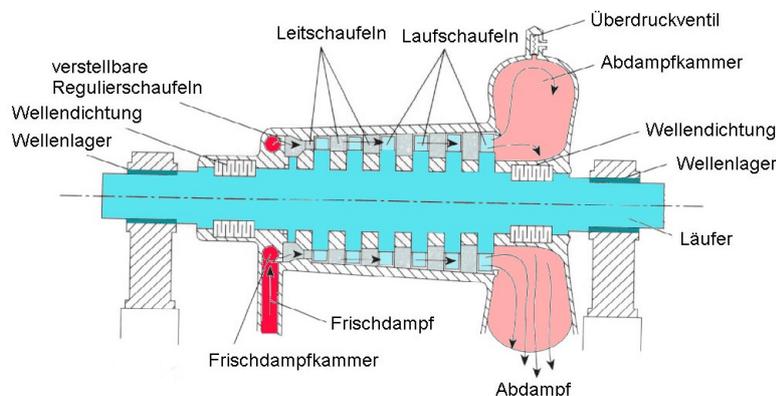


Abb.7: Schnittdarstellung einer Dampfturbine



Abb.8: Arbeiten am Läufer

Der energieärmere Dampf strömt zum nächsten Leitrad und wird dort wiederum auf das nächste Laufrad gelenkt. Dieser Vorgang wiederholt sich fortwährend.

Der Dampf entspannt sich auf dem Weg durch die Turbine immer mehr, sein Druck und seine Temperatur fallen. Der Durchmesser der Räder vergrößert sich daher kontinuierlich, damit bei geringerem Druck die größeren Schaufeln ein entsprechendes Drehmoment liefern können. Man unterscheidet dabei zwischen dem **Hochdruckteil**, dem **Mitteldruck-** und dem **Niederdruckteil** der Turbine. Je nach Größe des Kraftwerkes handelt es sich hierbei um separate Turbinen.

Der Läufer ist mit dem **Generator** verbunden, der die mechanische Energie des Läufers in **elektrische Energie** umwandelt.

Die elektrische Energie wird im **Transformator** auf eine hohe Spannung umgewandelt und dann über Hochspannungsleitungen landesweit oder grenzüberschreitend verteilt.

Der Wasserdampf steht beim Austritt aus der Niederdruckturbine unter einem Druck von 0,04 bar und hat eine Temperatur von 35°C. Er hat noch immer den gasförmigen Aggregatzustand.

Im nachfolgenden **Kondensator** wird er soweit abgekühlt, dass er verflüssigt. Mit der weiter vorne erwähnten **Speisewasserpumpe** wird er wieder in den Kessel gepumpt. Der **Dampf-Kreislauf** beginnt somit erneut.

Zur Wärmeabgabe des Dampfes im Kondensator gibt es einen **Kühlwasser-Kreislauf**. Das Kühlwasser nimmt im Kondensator die Wärme auf und gibt sie anschließend an die Umgebung ab.

Die abzuführende Wärmeenergie ist sehr groß. Thermodynamisch bedingt ist sie größer als die vom Kraftwerk produzierte elektrische Energie.

Deswegen werden meistens riesige Kühltürme verwendet, in denen das erwärmte Kühlwasser versprüht und durch entgegen strömende Luft gekühlt wird. Dabei verdunstet ein Teil des Wassers. Die dem Wasser entzogene **Verdunstungswärme** trägt zur Abkühlung des Wassers bei.

Die Verluste an Kühlwasser müssen durch frisches Wasser ersetzt werden. Daher sind Kohlekraftwerke immer in der Nähe eines Flusses errichtet. Ein Teil des erwärmten Kühlwassers kann auch direkt in den Fluss fließen. Allerdings darf aus ökologischen Gründen die Flusstemperatur nicht zu hoch werden.

3 Wirkungsgrad und Energieverluste

3.1 Wirkungsgrad

Die **Thermodynamik**¹⁾ lehrt uns, dass der größtmögliche Wirkungsgrad eines rechtsgängigen **Kreisprozesses**²⁾ der **Carnot**³⁾-Wirkungsgrad ist.

Er berechnet sich wie folgt:

Carnot-
Wirkungsgrad

$$\eta = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

η : Wirkungsgrad des Carnot-Kreisprozesses³⁾

T_{\min} : niedrigste Temperatur im Kreisprozess in K

T_{\max} : höchste Temperatur im Kreisprozess in K

Berechnung des Carnot-Wirkungsgrades mit den Temperaturen eines realen Kohlekraftwerkes:

Als niedrigste Temperatur im Kreisprozess kann die Umgebungstemperatur (beispielsweise 20°C) angenommen werden.

Aufgrund der Wärmefestigkeit der Stähle ist die höchste Temperatur beispielsweise auf 550°C begrenzt.

Daraus ergibt sich ein größtmöglicher Wirkungsgrad von 64%.

Der Carnot-Kreisprozess ist ein theoretischer Kreisprozess. **Reale Kreisprozesse** haben aufgrund von irreversiblen Vorgängen geringere Wirkungsgrade.

Ein Kohlekraftwerk arbeitet nicht nach dem Carnot-Prozess, sein Wirkungsgrad ist somit noch geringer.

Die realen Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken liegen weltweit durchschnittlich bei ca. 20%. Die deutschen Kraftwerke liegen bei ca. 38%.

¹⁾ Thermodynamik = Wärmelehre

²⁾ Kreisprozesse sind Vorgänge, bei denen kontinuierlich Wärme in Arbeit (z.B. Verbrennungsmotor) bzw. Arbeit in Wärme (z.B. Kühlschrank) umgewandelt wird.

³⁾ CARNOT, Nicolas Léonard Sadi (1796 – 1832), französischer Physiker und Militäringenieur, berechnete Wärmemaschinen, legte Grundlagen zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik, „Vater der Thermodynamik“



3.2 Energieverluste

Im Kohlekraftwerk finden mehrere Energiewandlungen statt, die jeweils mit Verlusten behaftet sind. Zudem geht Energie durch Reibung und Wärmeverluste verloren.

Im **Energiefluss (Sankey-) diagramm** (Abb.9) sind verschiedene Verluste dargestellt.

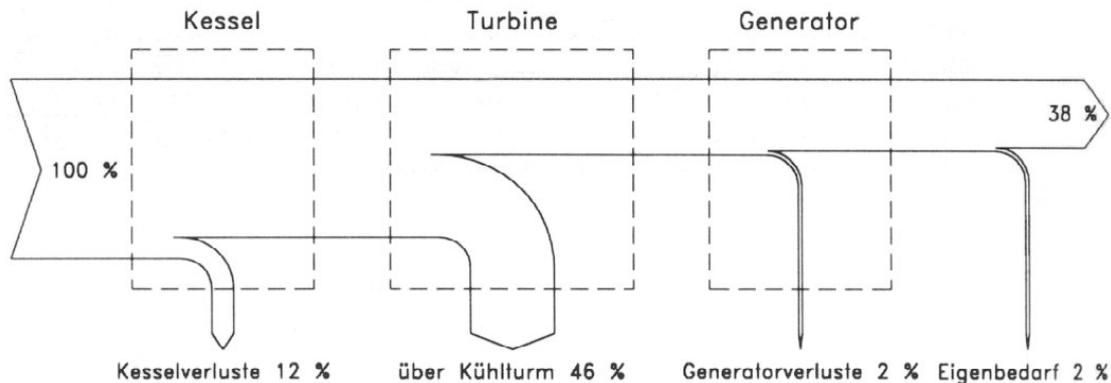


Abb.9: Energieflussdiagramm (Quelle: Schubert: Energie/ H+T)

Die Kesselverluste ergeben sich teilweise durch die hohen Temperaturen bei der Feuerung (Wärmeleitung und Strahlungswärme des Kessels), hauptsächlich jedoch durch die Wärmeenergie der heißen Abgase.

Die Verluste am Kühlturm entsprechen der **Kondensationswärme** des Speisewassers.

Der Transport der Kohle bis zum Kraftwerk und der Transport der elektrischen Energie bis zum Endverbraucher sind zusätzlich mit Verlusten behaftet.

Letztendlich kommt nur ein kleiner Teil der Energie, die in der Kohle chemisch gebunden ist, als elektrische Energie beim Verbraucher an.

4 Rauchgasreinigung

Durch die Verbrennung der Kohle entsteht sogenanntes **Rauchgas**.

Im Rauchgas sind an umweltbelastenden Schadstoffen unter anderem **Stickoxide NO_x**, **Stäube** und **Schwefeldioxid SO₂** zu finden.

Der Zweck der Rauchgasreinigung ist es, diese drei Schadstoffe zu einem großen Teil zu entfernen. Hierzu gibt es die Reinigungsstufen **Entstickung**, **Entstaubung** und **Entschwefelung** (Abb.10).

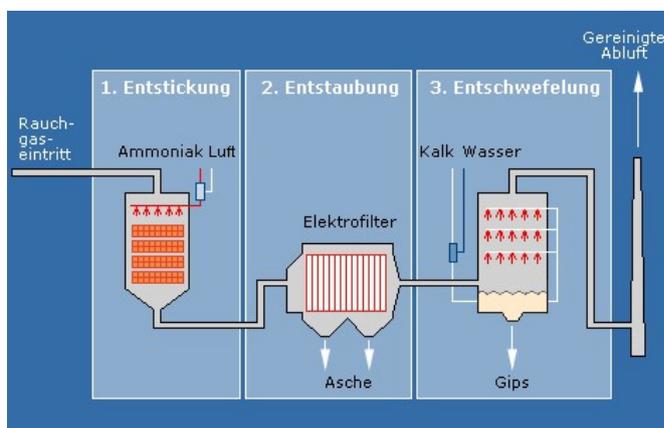


Abb.10: Entstickung, Entstaubung und Entschwefelung (Quelle: KW Mehrum)

In Abb. 11 ist ein Kohlekraftwerk mit der dazu gehörenden Rauchgasreinigungsanlage dargestellt.

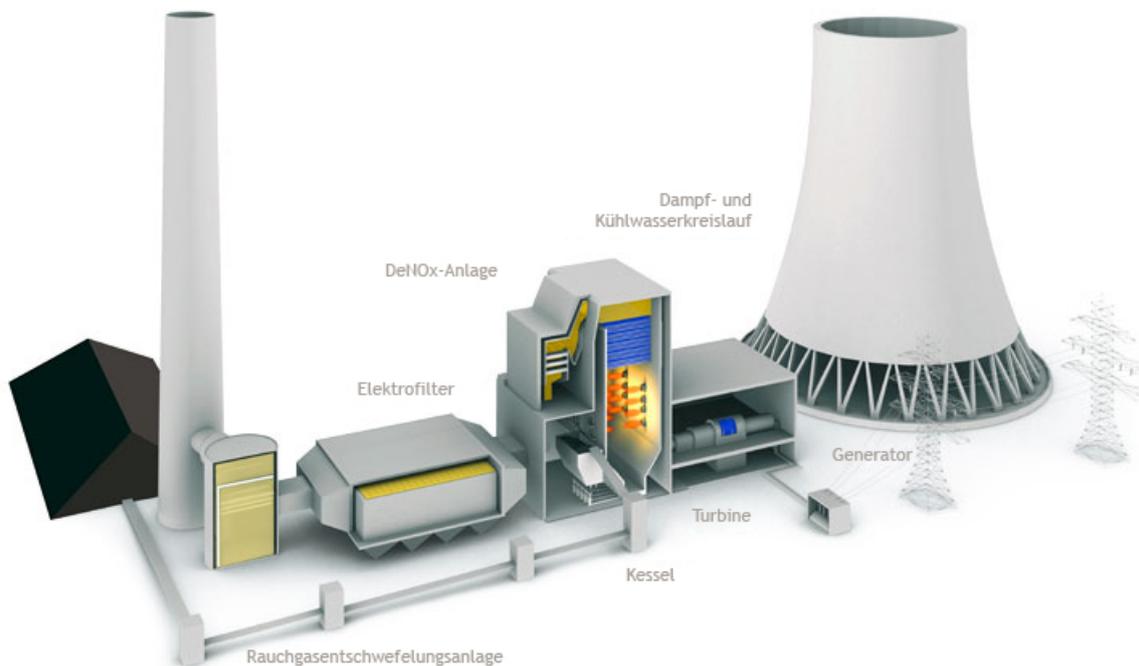


Abb.11: Kohlekraftwerk mit Rauchgasreinigung (Quelle: Evonik Industries)

4.1 Rauchgasentstickung

In einer **ersten Reinigungsstufe** werden die **Stickoxide NO_x** im Rauchgas **reduziert** („Entstickung“, „Denitrifikation“). Hierzu gibt es verschiedenen Verfahren, die teils mit („SCR“) und teils ohne (SNCR“) Katalysator funktionieren.

Beim **DeNO_x-Verfahren** beispielsweise wird eine Mischung aus **Luft** und **Ammoniak-Gas NH_3** in das Rauchgas gedüst. Das Gasgemisch strömt über einen Katalysator. Dadurch werden **Wasserstoff oxidiert** und **Stickstoff reduziert**.

Es entstehen **Stickstoff N_2** und **Wasser H_2O** , harmlose, natürliche Bestandteile der Luft.

Die Entstickungsanlagen halten bis zu 90 % der Stickoxide zurück.

4.2 Rauchgasentstaubung

Das so genannte „entstickte“ Rauchgas strömt in der **zweiten Reinigungsstufe** durch **Elektrofilter**, in denen die feinen Staubteilchen in einem Hochspannungsfeld elektrostatisch aufgeladen werden. Die negativ geladenen Teilchen werden dann von der positiven Niederschlagselektrode angezogen und somit dem Gasstrom entnommen.

Der Wirkungsgrad solcher Elektrofilter liegt über 99,9 %.

Die abgeschieden **Flugasche** wird beispielsweise im Straßenbau und als Zuschlagstoff im Beton verwendet.

4.3 Rauchgasentschwefelung

Die entstickten und entstaubten Rauchgase (Abb.12) werden in einem Wärmetauscher von ca. 140 °C auf etwa 50 °C abgekühlt.

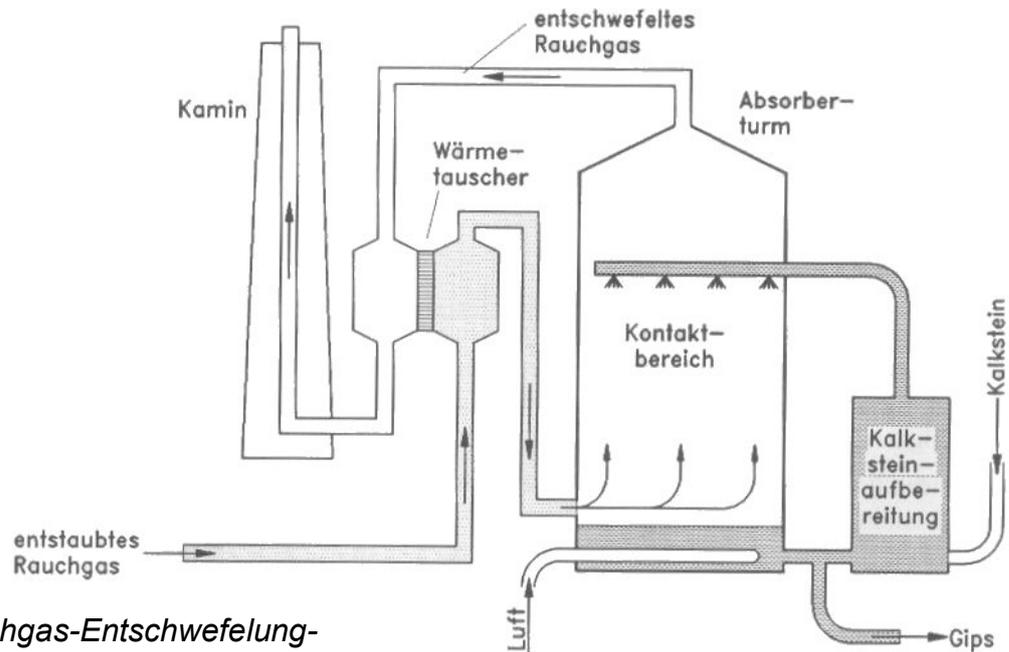
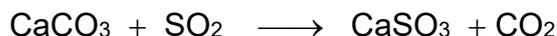


Abb.12: Rauchgas-Entschwefelungsanlage (Quelle: Schuberth: Energie / H+T)

Sie gelangen dann in der **dritten Reinigungsstufe** in einen Waschturm, den **Absorberturm**. Hier findet die **Entschwefelung** statt. Dem Absorberturm wird von oben eine **Kalkmilchsuspension** zugeführt.

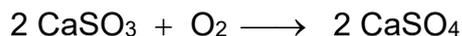
Die Kalkmilchsuspension ist eine **wässrige Lösung** von **Kalkstein CaCO_3** . Diese wird in einer **Kalksteinaufbereitungsanlage** hergestellt, indem Kalkstein zu so genanntem **Kalksteinmehl CaCO_3** fein aufgemahlen und mit **Wasser** aufgeschlämmt wird.

Das Rauchgas steigt im Absorberturm auf und strömt durch den Kalkmilch-Sprühkegel. Dabei reagiert das Gas Schwefeldioxid mit dem Kalk zu **Calciumsulfid CaSO_3** und **Kohlendioxid CO_2** .



Zwischen 90% und 95% des im Rauchgas enthaltenen Schwefeldioxids SO_2 können aus dem Rauchgas gewaschen werden.

Das dadurch anfallende Calciumsulfid wird durch Einblasen von Luft zu **Calciumsulfat CaSO_4** oxidiert.



Calciumsulfat CaSO_4 ist **Gips**. Gips ist im Wasser schwer löslich, er fällt aus der Flüssigkeit aus, wird entwässert (ca. 10 % Restfeuchte) und getrocknet. Der Gips wird größtenteils in der Baustoffindustrie verwendet.

Die entstickten, entstaubten und entschwefelten Rauchgase werden im Wärmetauscher auf höhere Temperaturen erwärmt und abschließend über den Schornstein freigesetzt. Sie steigen zu höheren Luftschichten auf.