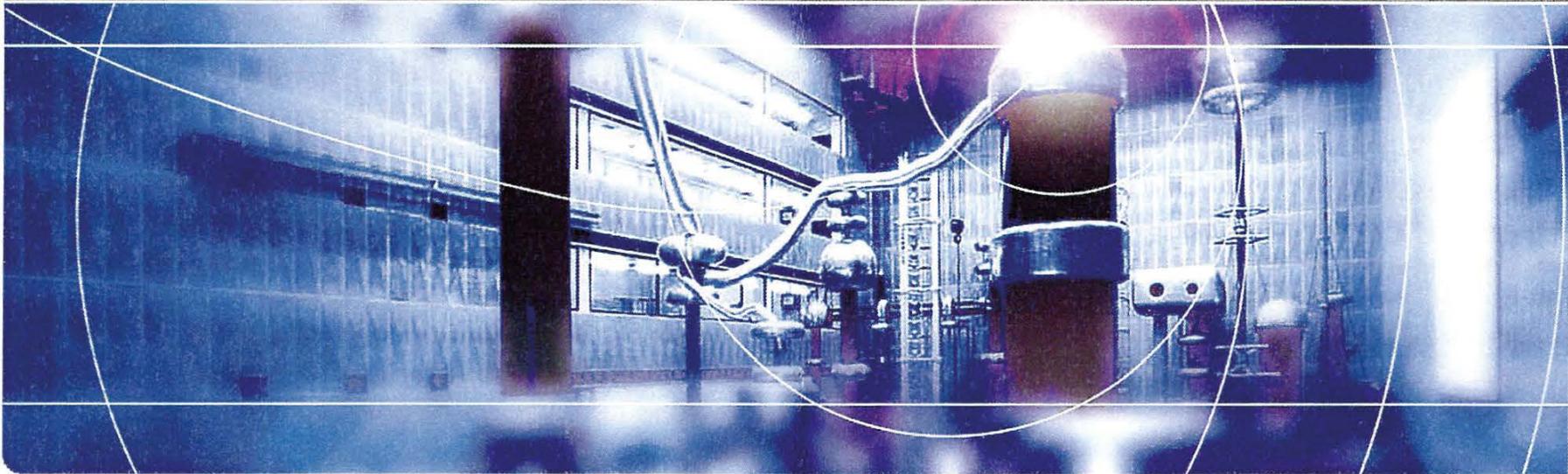


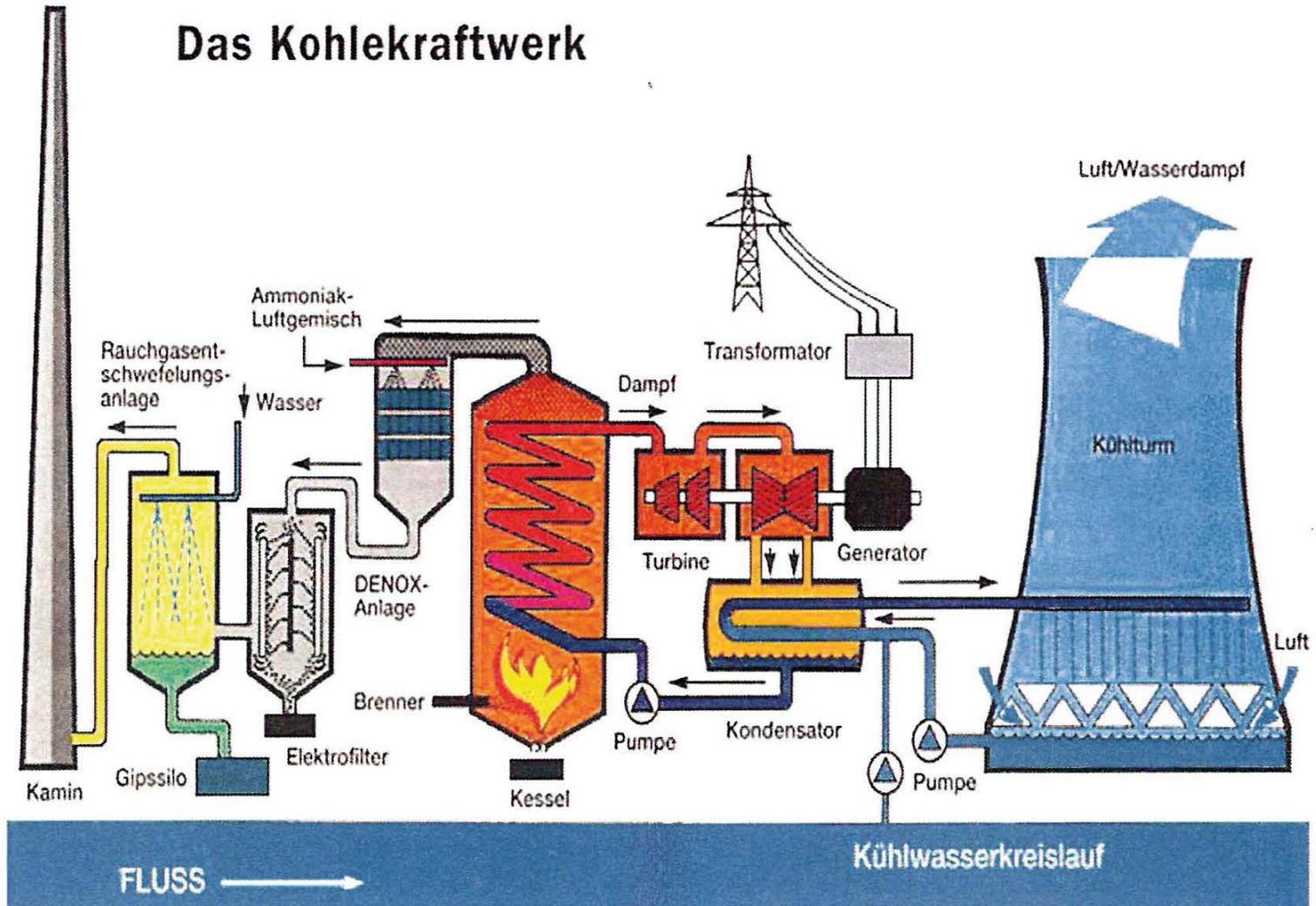
Erzeugung elektrischer Energie

Dr.-Ing. Bernd Hoferer

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)



Das Kohlekraftwerk



Komponenten von Dampfkraftwerken: Dampferzeuger (I)

Dampferzeuger haben die Aufgabe, die bei der Verbrennung bzw. Kernspaltung freiwerdende Wärmeenergie in Dampf bestimmter Temperatur und bestimmten Drucks umzuwandeln. Es handelt sich also um spezielle für hohe Drücke ausgelegte Wärmetauscher, die in den Anfängen dampfbetriebener Wärmekraftmaschinen tatsächlich die Form eines Wasserkessels hatten, später aber zu komplizierten Reihen- und Parallelschaltungen von Rohrsystemen mutierten und seither den Namen Dampferzeuger tragen.

Komponenten von Dampfkraftwerken: Dampferzeuger (II)

- Großraumwasserkessel: hohe Dampfreserve aber lange Anfahrzeiten
- Wasserrohrkessel: niedrige Dampfreserve, hohe Dampfdrücke (bis 350 bar) möglich,
kurze Anfahrzeiten,
wird stets angewandt bei großen Dampfleistungen
Grenzleistung liegt bei 1000 MW_{el}

wichtigster Wasserrohrkessel: Benson-Kessel

- Durchlaufkessel, dessen Restverdampfungspunkt (Übergang in Sattedampf) belastungs- bzw. feuerungsabhängig im Rohr gleitet.
- hoher Wirkungsgrad durch T, p ↑

Beispiel Lippendorf Dampfleistung 672 kg/s

Druck: 285 bar

Temperatur: 554 °C

Abmessungen: 24×24×160 m

Sulzer-Kessel

- Ähnlich Benson-Kessel
- Durchlaufkessel, dessen Restverdampfungspunkt (Übergang in Sattedampf) durch die Sulzerflasche festgehalten wird.
- Sulzerflasche dient als Abscheider und wird daher in Industriekraftwerken ohne Kondensatrückführung eingesetzt, die wegen etwaiger Verschmutzungsgefahr des Prozeßdampfs durch den chemischen Prozeß mit ständig frisch aufbereitetem Kesselspeisewasser arbeiten.

Schließlich unterscheidet man Einzug- und Zweizugdampferzeuger. Bei ersteren befinden sich alle Heizflächen übereinander in einem Zug, sogenannte Turmbauweise, bei letzteren sind die Heizflächen auf zwei Züge aufgeteilt. Diese Bauweise führt damit zu einer geringeren Bauhöhe.

Komponenten von Dampfkraftwerken: Feuerung (I)

- Kohlestaubfeuerung: Kohle wird in Kohlemühlen fein gemahlen und als Kohlestaub in den Feuerraum geblasen und unter weiterer Zufuhr von Verbrennungsluft verbrannt.
Unterscheidung in Feuerungen mit trockenem und flüssigen Ascheabzug
Bei trockenem Ascheabzug ist die Brennkammer so groß auszulegen, daß die geschmolzenen Asche- und Schlacketröpfchen zu festen Partikeln erstarrt sind, bevor die Rauchgase auf die Heizflächen auftreffen.
Bei Schmelzkammerfeuerung bestehen Probleme mit Korrosionserscheinungen im Kessel und der Rauchgasreinigung.
Temperaturen: 1400...1600 °C
Einsatz in großen Kohleblöcken

Komponenten von Dampfkraftwerken: Feuerung (II)

-Wirbelschichtfeuerung: Kohlengranulat wird durch einige 100...1000 Düsen in den Feuerraum geblasen, Flamme bildet eine Wirbelschicht. Auf einem von unten mit Verbrennungsluft versorgtes Wirbelbett wird aufgewirbeltes, fluidisiertes Kohlegranulat in der Wirbelschicht von zwei bis drei Metern Dicke verbrannt.

Temperaturen: ca. 850 °C, daher weniger NO_x im Rauchgas

Besonders für die Verbrennung ballaststoff- und schwefelreicher Kohle

Einbindung von SO₂ durch Zugabe von Kalk

Einsatz in kleinen Kohleblöcken bis etwa 200 MW_{th}

Beispiel Kraftwerk Stuttgart-Gaisburg der EnBW

Komponenten von Dampfkraftwerken: Dampfturbinen

- Aufgabe und Aufbau:

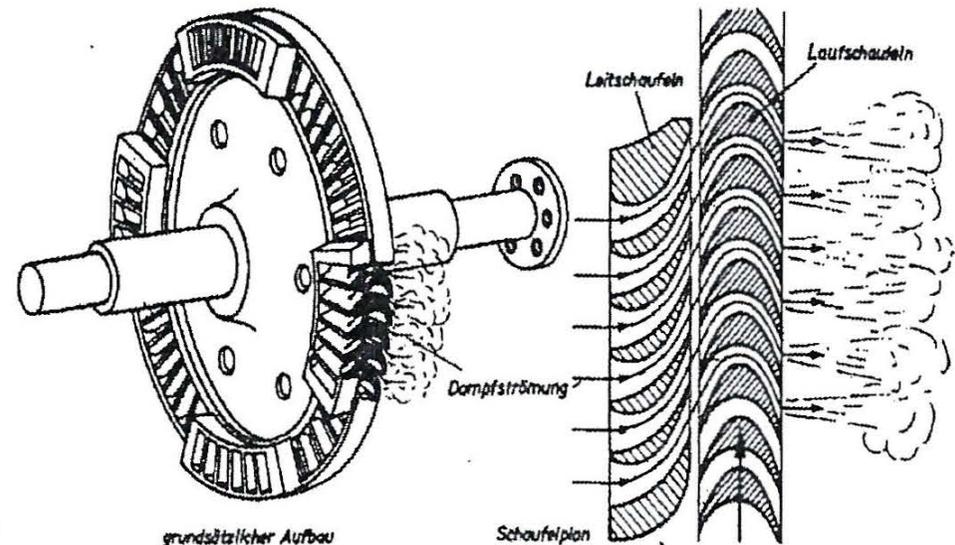
Expansion des Dampfes, Umsetzung der Druckminderung in eine Strömungsgeschwindigkeit, damit Kraft auf die Turbinenschaufeln und Drehmoment an der Welle

Leitrad: Umlenkung des Dampfes

Lauftrad: Umsetzung der Strömungsgeschwindigkeit in eine Drehbewegung

- technische Grenzen:

- Umfangsgeschwindigkeit der Turbine
- Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes
 - Abbau des Dampfdrucks in mehreren Stufen
 - Hochdruck-Turbine (HD)
 - Mitteldruck-Turbine (MD)
 - Niederdruckturbine (ND)



Komponenten von Dampfkraftwerken: Kondensator

- Aufgabe:

Kondensieren des Dampfes nach dem Austritt aus der ND-Turbine

Grund: Wirkungsgradsteigerung

ohne Kondensator: - Turbine müßte gegen den Atmosphärendruck (ca. 1 bar) arbeiten

- Abdampftemperatur wäre bei ca. 100 °C

mit Kondensator: - Turbine arbeitet auf einen Druck von ca. 0,04...0,05 bar

- Abdampftemperatur ist einige 10 °C

- Funktionsweise:

Vakuum stellt sich durch die Volumenverringerng bei Änderung des Aggregatzustandes

Dampf → Wasser von selbst ein, Kühlung durch Kühlwasser aus einem Fluß oder großem See

Abwärme: grob 2000 MW für 1000 MW elektrische Leistung (= Wirkungsgrad 33%)

Abwärmennutzung prinzipiell möglich, aber wirtschaftlich nicht sinnvoll

Komponenten von Dampfkraftwerken: Kühleinrichtung (I)

Die vollständige Kondensation des aus der Turbine austretenden Wasserdampfs erfordert einen großen Kühlwasserbedarf, beispielsweise benötigt ein 1000MW-Block grob 2000 MW Kühlleistung, weswegen Dampfkraftwerke immer an Flüssen oder großen Seen gebaut werden. Man unterscheidet zwischen Frischwasserkühlung und Rückkühlung.

Am einfachsten und kostengünstigsten ist die Frischwasser- oder Durchlaufkühlung. Das Kühlwasser wird einem Fluß, Kanal, See oder dem Meer, dem sogenannten Vorfluter, entnommen, mechanisch gereinigt und durch den Kondensator geleitet. Anschließend fließt es auf direktem Weg in den Vorfluter zurück. Dieses Verfahren setzt allerdings voraus, daß der Vorfluter stets genügend Wasser mit sich führt und sich an heißen Sommertagen nicht über 28°C erwärmt. Um die Umweltvorschriften einzuhalten ist es möglich, daß Kraftwerke mit Durchlaufkühlung zeitweise ihre Leistung erheblich reduzieren müssen.

Beispiel Kraftwerk Karlsruhe-Rheinhafen der EnBW

Komponenten von Dampfkraftwerken: Kühleinrichtung (II)

Im Fall begrenzter Frischwasserkühlung geht man auf Rückkühlung über, d.h. das aus dem Kondensator austretende Kühlwasser wird in einem Kühlturm rückgekühlt. Hierbei unterscheidet man Naßkühltürme und Trockenkühltürme.

Naßkühlung: Hierbei wird ein Teil der Abwärme in Form von Verdunstungswärme an die Umwelt abgegeben. Das erwärmte Wasser des Kühlkreislaufs wird im Kühlturm entweder zerstäubt oder über große Oberflächen geleitet, so daß es verdunstet. Naturzug oder Ventilatoren sorgen für den nötigen Luftdurchsatz im Kühlturm. Die heute gebräuchlichste Art ist der Naturzugnaßkühlturm. Er besteht aus einer Betonschale, die in der Mitte verjüngt ist und bis zu 150m hoch ist. Die Betonschale ist auf einer gitterähnlichen Konstruktion angeordnet, so daß unten von allen Seiten Luft anströmen kann. Das im Kondensator erwärmte Kühlwasser wird im Kühlturm in etwa 12m Höhe gegen den aufsteigenden Luftstrom verrieselt, wobei das Wasser abkühlt bevor es dem Kondensatorkreislauf wieder eingespeist wird.

Beispiel Kraftwerk Heilbronn der EnBW

Komponenten von Dampfkraftwerken: Kühleinrichtung (III)

Ventilator- oder Zellenkühltürme kommen mit geringeren Bauhöhen aus. Dafür benötigen sie jedoch zusätzliche elektrische Energie für die Ventilatoren, die dem natürlichen Luftzug nachhelfen.

Beispiel Kraftwerk Marbach der EnBW

Bei der Trockenkühlung strömt das Kühlwasser durch luftgekühlte Rippenrohre. Das Wasser kommt hier also nicht in den direkten Kontakt mit der Luft, wodurch ein Verdampfen verhindert wird. Ein Nachteil gegenüber der Naßkühlung ist jedoch, daß bei gleicher Kühlleistung ungefähr die vierfache Luftmenge benötigt wird und die Ventilatoren Strom verbrauchen.

Hybridkühltürme kombinieren die beiden genannten Verfahren, dadurch kann die Schwadenbildung, wie sie bei der Naßkühlung auftritt erheblich reduziert werden.

Beispiel Kraftwerk Altbach/Deizisau der EnBW

Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (I)

- Emissionen:

- CO₂ (Treibhauseffekt) und Staub
- SO₂ (Schwefeloxide)
- NO_x (Stickoxide)

hängen ab vom Brennstoff und der Art der Verbrennung

- Beispiel: 550 MW Steinkohlekraftwerk

- 10 t Staub / h
- 4,0 t SO₂ / h
- 1,5 t NO_x / h

- notwendige Maßnahmen

Entstaubung, Entschwefelung und Entstickung der Rauchgase

Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (II)

- Entstaubung:

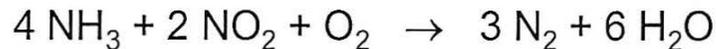
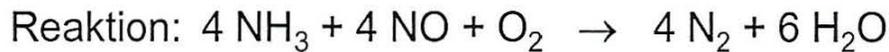
mechanische Staubabscheider (nutzen Schwerkraft oder Fliehkraft aus)

Gewebefilter

Elektrofilter (Wirkungsgrad > 99,7 %)

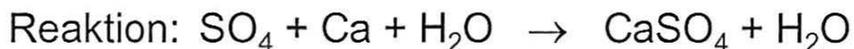
- Entstickung:

Bei Abgastemperaturen von 200...400 °C wird dem Abgas Ammoniak (NH₃) mit Luft vermischt eingesprüht:



- Entschwefelung:

Bei Abgastemperaturen von ca. 100 °C wird das Rauchgas durch wässrige CaCO₃-Lösung geführt (mit dieser Lösung besprüht):



Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (III)

Rauchgasentstaubung

Aus der Verbrennung resultieren stündlich etwa 10 t Aschen als Rückstand, davon 1t als sogenannte Kessel- oder Grobasche (Naßasche). Die restliche Aschenmenge verbleibt im Rauchgas mit einer Konzentration von etwa 6g Staub je m³ Rauchgas vor der Filterung. Diese ca. 9t Asche müssen pro Stunde in den Staubabscheidern aus einem Rauchgasvolumenstrom von $1,7 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{h}$ bei ca. 150°C zurückgehalten werden.

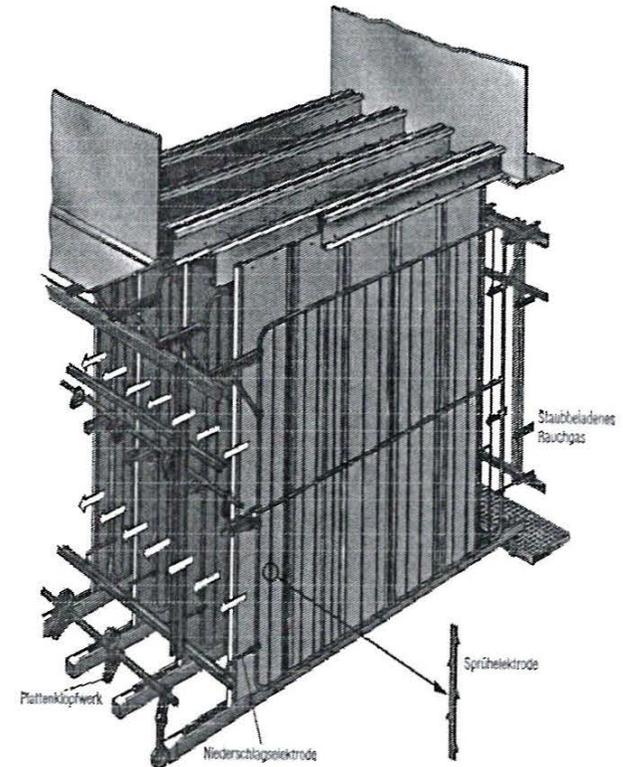
Die Staubabscheidung auf einen Reststaubgehalt im Rauchgas von 10mg/m³ entspricht einem Wirkungsgrad von ca. 99,7%.

Bei 4500 Block-Vollaststunden je Jahr werden ca. 42500 t Flugasche abgeschieden und mit ca. 1400 Silofahrzeugen (30t-Lkw) abtransportiert.

Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (IV)

Funktionsweise Elektrofilter

- Erzeugung von Ladungsträgern durch Koronaentladungen
- Aufladung der Partikel durch Ladungsträger
- Transport der Partikel zur Abscheideelektrode
- Anlagerung der Partikel an den Abscheideelektroden
- Abreinigung des angelagerten Staubes
- Reentrainment von abgeschiedenen Partikeln

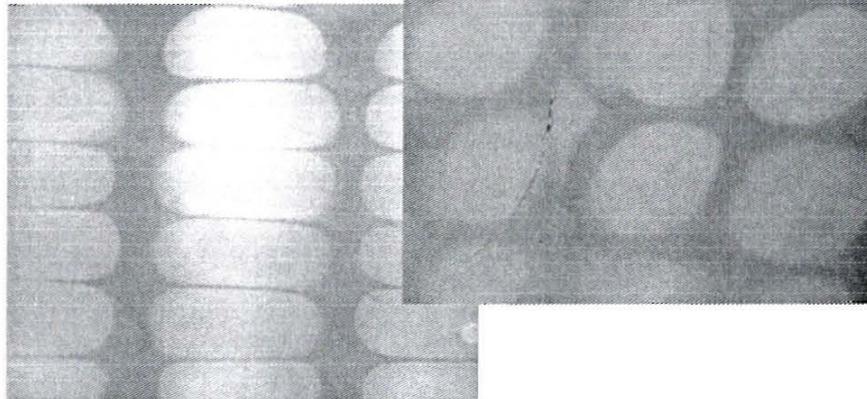
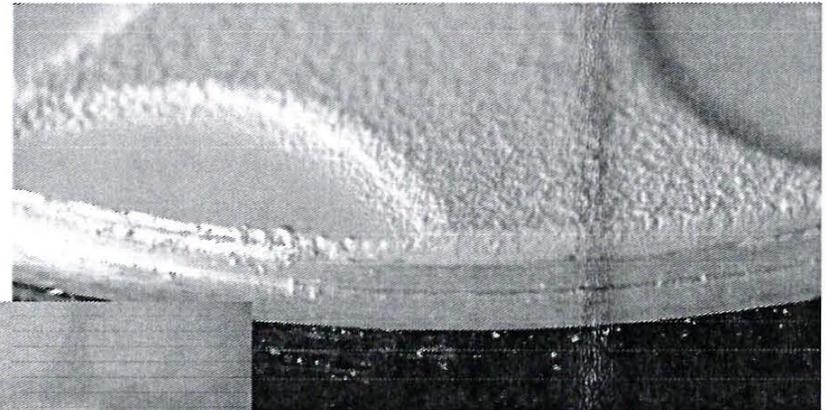


Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (V)

Auslegungskriterien eines Elektrofilters

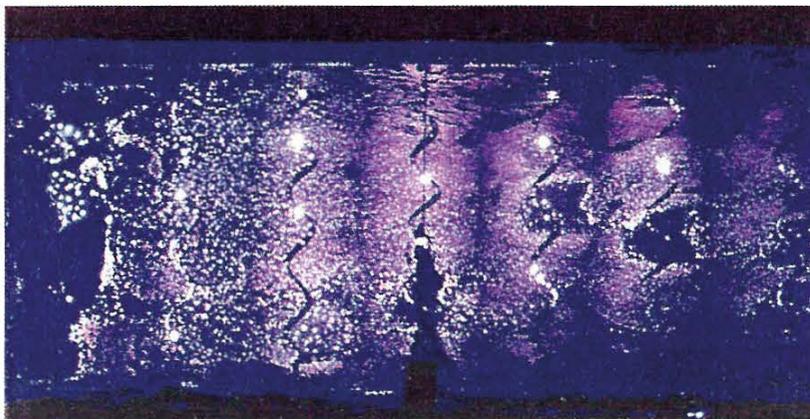
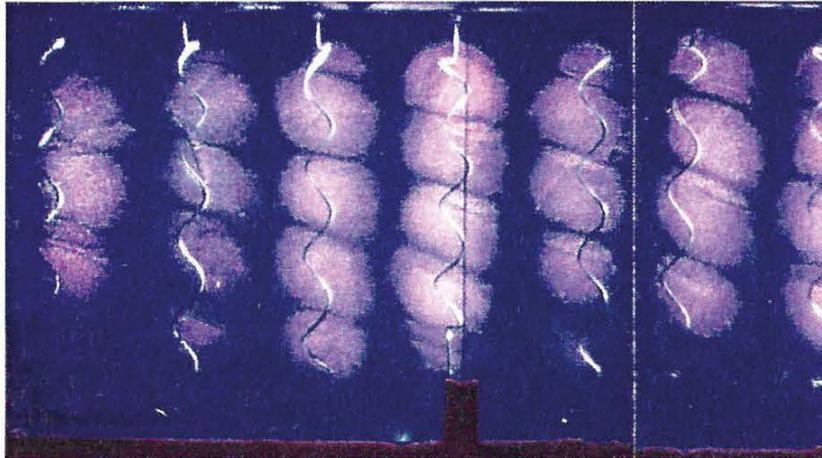
unter anderem

- Rauchgasvolumenstrom
- Staubwiderstand
- Feuchtigkeit
- Temperatur
- Haftfähigkeit
- Staubgehalt und Körnung

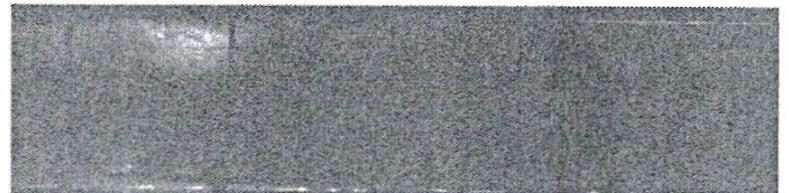
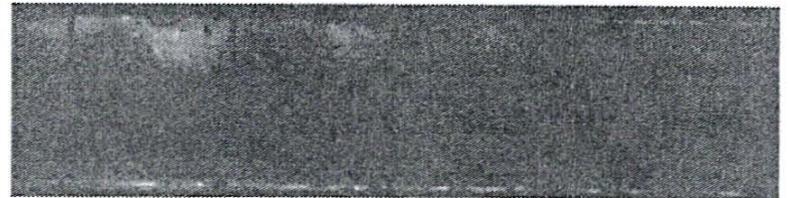
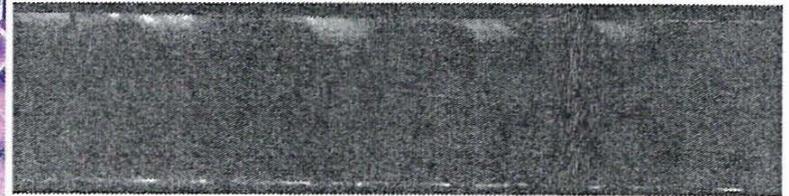


Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (VI)

Problematik bei großen
Staubwiderständen: Rücksprühen



Problematik bei kleinen
Staubwiderständen: Reentrainment



Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (VII)

Rauchgasentstickung

Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen Abgase, die je nach Brennstoffart, Feuerungsart und Feuerungsbedingungen auch Stickstoffoxide (NO_x), insbesondere (NO), enthalten. Der Anteil an Stickstoff im festen Brennstoff ist verhältnismäßig gering, er beträgt ca. 1,5% bei Steinkohle.

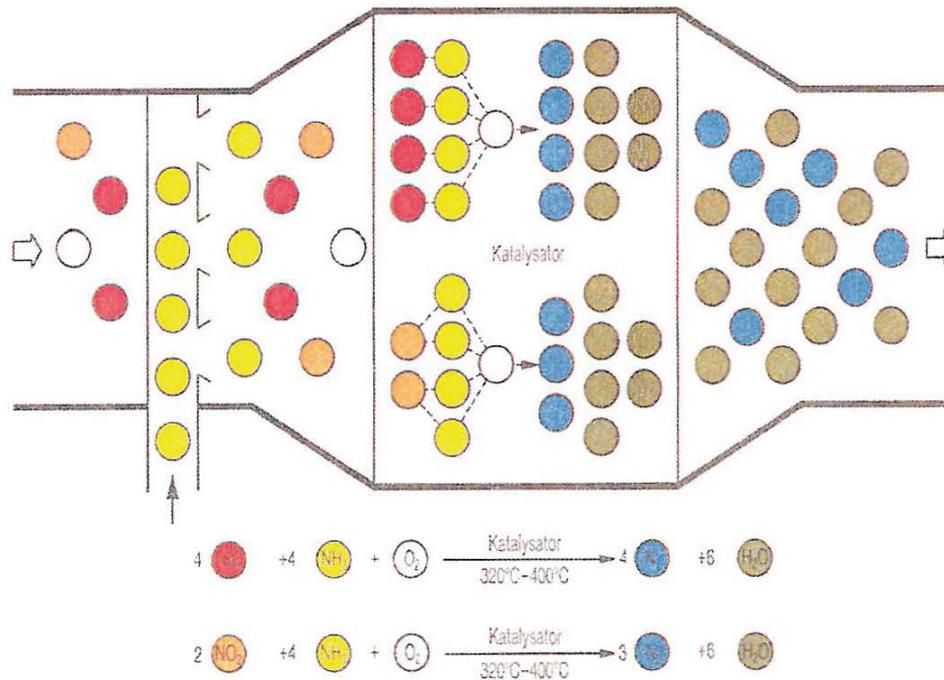
Stickstoffoxide im Abgas, zu rd. 95% als Stickstoffmonoxid, entstehen thermisch in der Flamme aus Luftstickstoff und atomarem Sauerstoff und aus Brennstoffstickstoff.

Behördliche Forderungen schreiben für große Anlagen einen Stickstoffoxid (NO_x)-Grenzwert im Abgas der Dampferzeugungsanlagen von max. 100mg/m³ vor.

Um diesen Grenzwert einzuhalten, wird das selektive katalytische Reduktionsverfahren (SCR) eingesetzt.

Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (VIII)

Rauchgasentstickung, Verfahrensprinzip

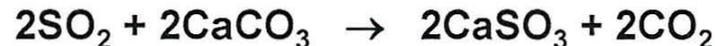


Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (IX)

Rauchgasentschwefelung

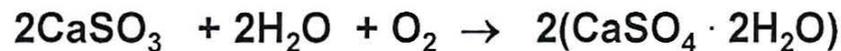
Ebenso wie die zuvor behandelte Asche ist auch Schwefel ein natürlicher Bestandteil der Kohle und wird bei Verbrennung unvermeidbar zu Schwefeldioxid (SO₂) oxidiert. Der Gehalt an SO₂ im Rauchgas ist damit direkt abhängig vom Schwefelgehalt der eingesetzten Kohle. Für die Rauchgasentschwefelung wurden großtechnische Verfahren auf der Basis mit Kalk (CaO) als Absorbens entwickelt und eingesetzt, daneben hat sich ein Verfahren mit billigerem Kalkstein (CaCO₃) durchgesetzt:

Die chemischen Vorgänge bei der Entschwefelung mit Kalkstein lassen sich vereinfacht mit der Formel



beschreiben.

Um einen verwertbaren Gips zu erzeugen, wird Kalziumsulfid durch Einblasen von Luftsauerstoff zu Kalziumsulfat oxidiert



Komponenten von Dampfkraftwerken: Rauchgasreinigung (X)

Rauchgasentschwefelung, Verfahrensprinzip

- Abkühlen der Rauchgase und Vorreinigung
- Absorption des gasförmigen SO_2 in der Waschflüssigkeit
- chemische Bindung des gelösten SO_2
- Umwandlung des Zwischenproduktes Sulfit zu Sulfat
- Kristallisation des Sulfats zu Gips
- Filtrieren der Gipskristalle aus der Suspension und Aufbereitung des Gipses

