

Einzug der Trockensorption in die Rauchgasreinigung der neuen Kraftwerksgeneration – SO₃-Abscheidung an einem Gewebefilter –

Rudi Karpf, Thomas Porsche und Daniel Kosel

1.	Anforderungen an die Rauchgasreinigung.....
2.	Konzeptstudie.....
2.1.	Beschreibung der Konzepte.....
2.2.	Bewertung der Konzepte.....
3.	Verifizierung der Konzeptentscheidung.....
4.	Merkmale von Gewebefiltern/Trockensorption.....
5.	Zusammenfassung.....
6.	Literatur.....

Vor dem Hintergrund des anthropogenen Klimawandels und der Erreichung der in diesem Zusammenhang festgelegten Klimaschutzziele hat die Diskussion über die CO₂-Abtrennung und Speicherung aus Kraftwerks- und Industrieprozessen (engl. Carbon Capture and Storage: CCS) national wie global stark an Bedeutung gewonnen. Dies wurde noch dadurch verstärkt, dass die Debatten um die Energieversorgungssicherheiten das energiewirtschaftliche Gewicht in Richtung einer stärkeren nationalen Kohlenutzung verschoben. So basieren etwa 60 Prozent der Kraftwerksleistung der bekannten Kraftwerksplanungen in Deutschland auf dem Energieträger Kohle [1].

Seit dem Jahr 2001 engagiert sich Vattenfall bei der Erforschung, Konzeptfindung und Umsetzung von CCS-Technologien. In diesem Zusammenhang fasste Vattenfall im Jahr 2005 den Beschluss, am Standort Schwarze Pumpe eine Pilotanlage für das Oxyfuel-Verfahren mit einer thermischen Leistung von 30 MW zu errichten, die am 09. September 2008 offiziell in Betrieb genommen wurde.

Basierend auf den ersten Betriebserfahrungen mit der Pilotanlage in Schwarze Pumpe und den sich hieraus ergebenden Entwicklungs- und Optimierungspotentialen wurde die ete.a Ingenieurgesellschaft mbH mit der Erstellung einer Konzeptstudie zur Rauchgasreinigung (RGR) nach einem Oxyfuel-Dampferzeuger beauftragt. Primäres Ziel dieser Studie war es, eine effektive SO₃-Minderungsstufe im Kontext der bereits konzipierten Rauchgasreinigung aufzuzeigen. Die Ergebnisse der Studie sowie den darauf basierenden weitergehenden Untersuchungen haben gezeigt, dass die Trockensorption mit Gewebefilter eine effiziente SO₃-Minderungsstufe darstellt. Der vorliegende Beitrag nimmt Bezug auf die gewonnenen Erkenntnisse sowie auf allgemeine Merkmale und Auslegungskriterien für Gewebefilter.

1. Anforderungen an die Rauchgasreinigung

Die für die Bewertung zugrunde zu legenden Daten sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst. Im Vergleich zur konventionellen Verbrennung mit Luft sind die Massenströme der einzelnen Gasbestandteile gleich, jedoch aufgrund der Verbrennung mit reinem Sauerstoff und des hieraus resultierenden kleineren Rauchgasvolumenstrom, sind die Konzentrationen beim Oxyfuelprozess höher.

Tab. 1: Rauchgaseigenschaften

Parameter	Einheit	Betrag
feuchter Rauchgasmassenstrom (aschefrei)	kg f.RG/s	323,28
trockener Rauchgasmassenstrom (aschefrei)	kg tr.RG/s	263,21
Aschemassenstrom	kg A/s	5,77
feuchter Rauchgasnormvolumenstrom	m ³ N f.RG/h	784.047
trockener Rauchgasnormvolumenstrom	m ³ N tr.RG/h	515.003
Rauchgastemperatur nach Kessel/DeNOx/Gavo	°C	381/340/188
Betriebsdruck nach Kessel (Unterdruck als pe)	mbar	-4

Tab. 2: Rauchgaszusammensetzung nach Feuerung/Kessel

Komponente	Massenstrom \dot{m}	Massenanteil w	Volumenanteil
	kg/h	Ma.-%	Vol.-%
Ar	26.682	2,29	1,91
N ₂	88.317	7,59	9,04
O ₂	31.575	2,71	2,83
H ₂ O	216.252	18,58	34,43
CO ₂	797.883	68,56	51,64
Schadstoff	Massenstrom \dot{m}	Konzentration	Volumenanteil
	kg/h	mg/m ³ tr. RG	ppm
SO _x (als SO ₂)	2.749	5.338	1.824
SO ₃	52,53	102	28
NO _x (als NO ₂)	474,32	921	441

Nach der REA wurden folgende SO_x-Reingaswerte definiert:

- SO₂ < 50 mg/m³ tr. RG
- SO₃ < 10 mg/m³ tr. RG

2. Konzeptstudie

Bei den verschiedenen Rauchgasreinigungskonzepten sind folgende Randbedingungen zu beachten gewesen.

Berücksichtigt man die in Kapitel 1 angegebenen Auslegungsdaten und den geforderten SO₂-Reingaswert von max. 50 mg SO₂/m³ tr. RG, dann müssen mindestens 2.724 kg SO₂/h bzw. mehr als 65.360 kg SO₂ pro Tag abgeschieden werden.

Um hohe Entsorgungskosten zu vermeiden, müssen die Reaktionsprodukte aus der Entschwefelung des Rauchgases verwertbar sein. Aus diesem Grund wird die in der Praxis übliche und bewährte nasse Rauchgasreinigung als Rauchgasentschwefelungsverfahren gewählt. Hierbei wird das Schwefeldioxid in einem Kalksteinwäscher in Form von Gips abgeschieden. Damit die Einhaltung der spezifizierten Gipsqualität garantiert werden kann, muss vor der Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) ein Staubabscheider installiert werden.

In wie weit bei der Konzeption der RGR-Varianten eine Entstickung berücksichtigt werden muss, ist noch durch Versuche in der Pilotanlage Schwarze Pumpe zu klären. In den folgenden betrachteten Konzepten ist zunächst eine High-Dust SCR-Anlage als Entstickungsmaßnahme vorgesehen.

Eine weitere Randbedingung ist, dass der Anlagenbetrieb auch mit normaler Verbrennungsluft möglich sein muss. Die Rauchgasableitung erfolgt in diesem Fall über einen Kamin unter Umgehung der Anlagenkomponenten für die Rauchgaskühlung und die CO_2 -Verdichtung.

2.1. Beschreibung der Konzepte

Variante 1 (Sprühabsorption)

In einer von Vattenfall mit Industriepartnern durchgeführten Machbarkeitsstudie wurde ein Basiskonzept für die RGR für das Oxyfuel-Verfahren entwickelt, das nachfolgend als Vergleichsmodell für die weiteren RGR-Konzepte dient.

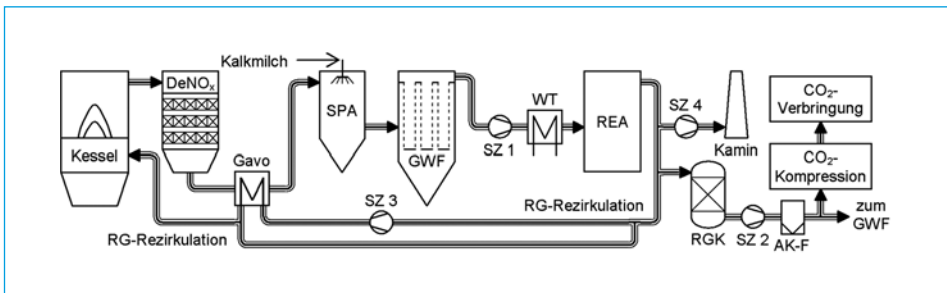


Abb. 1: Schematische Darstellung der RGR-Variante 1 für das Oxyfuel-Verfahren

Das Rauchgas verlässt den Kessel mit einer Temperatur von etwa 381 °C und tritt dann in den SCR-Katalysator (High-Dust-Schaltung) der DeNO_x-Anlage ein. Hier erfolgt die Reduzierung der Stickoxide (NO_x) mit dem zuvor eingedühten Ammoniak (NH₃).

Anschließend gibt das Rauchgas in einem Gasvorwärmer (Gavo) einen Teil seiner Wärmeenergie an das rezirkulierte Rauchgas ab, wobei es sich auf etwa 188 °C abkühlt.

Im Sprühabsorber (SPA) wird Kalkmilch für die SO₃-Abscheidung eingedüst. Hierbei kühlt sich das Rauchgas infolge der Verdampfungskühlung auf etwa 136 °C ab.

In dem nachgeschalteten Gewebefilter (GWf) erfolgt die Abscheidung von Staub und Flugasche sowie der Reaktionsprodukte aus der Sprühabsorption.

Der Wärmetauscher (WT) bewirkt eine zusätzliche Rauchgasabkühlung vor der Rauchgasentschwefelungsanlage (REA). In der REA werden die Schadstoffe Schwefeldioxid (SO₂), Chlorwasserstoff (HCl) und Fluorwasserstoff (HF) in einem Rauchgaswäscher mit einer Kalksteinsuspension (CaCO₃ mit Wasser) abgeschieden.

Variante 2 (Trockensorption ohne Vorentstaubung)

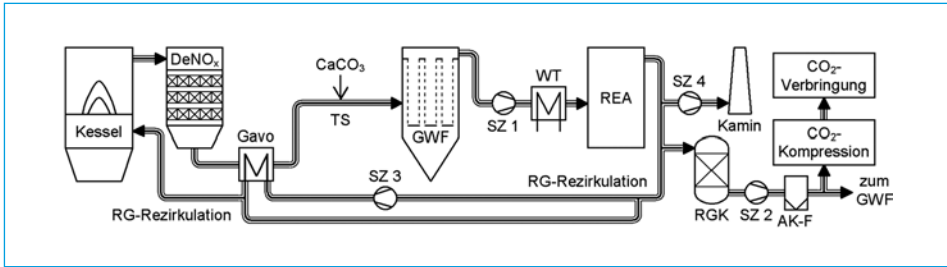
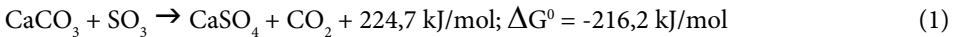


Abb. 2: Schematische Darstellung der RGR-Variante 2 für das Oxyfuel-Verfahren

Variante 2 unterscheidet sich von Variante 1 insofern, dass keine Kalkmilch als Absorbens eingesetzt sowie auf die Komponente Sprühabsorber verzichtet wird. Die SO₃-Abscheidung erfolgt durch eine Trockensorption (TS) mit Kalkstein (CaCO₃) als Reagenz, der vor dem Gewebefilter in den Rauchgasstrom dosiert wird.

In dem nachgeschalteten Gewebefilter (GWF) erfolgt die Abscheidung von Staub und Flugasche sowie der Reaktionsprodukte aus der Trockensorption.

In der Flugstromphase reagiert das SO₃ mit dem Reagenz Calciumcarbonat wie folgt:



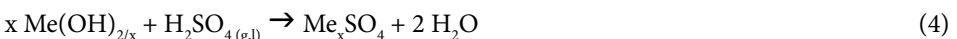
Die Reihenfolge der Reaktivität bei der Reaktion mit CaCO₃ ist abhängig von dem Betrag der Freien Enthalpie ΔG^0 :

Reaktivität	SO ₃	>	HF	>	HCl	>	SO ₂
G ⁰ in kJ/mol]	216,2	>	118,7	>	52,1	>	41,2

Anhand der Beträge für die Freie Enthalpie ΔG^0 kann man erkennen, dass bei der Reaktion mit SO₃ der größte Energiebetrag frei wird. Die Freie Enthalpie ΔG^0 beträgt bei HF nur noch die Hälfte, bei HCl nur ein Viertel und bei SO₂ sogar nur noch ein Fünftel des Wertes von SO₃ (siehe oben). Die Triebkraft der Reaktion mit Calciumcarbonat (bzw. die Reaktivität) nimmt dementsprechend in derselben Reihenfolge ab.

Sind in der Flugasche genügend alkalische Bestandteile bzw. Oxide der Alkali- und Erdalkalimetalle (mit Me = Na, K, Mg, Ca) vorhanden, dann erfolgt während der Filtrationsphase am Gewebefilterschlauch auch bei RGR-Variante 2 ohne Absorbens eine SO₃-Abscheidung.

Hierbei spielt die Rauchgasfeuchte eine bedeutende Rolle, da die o.g. Oxide mit Wasser zu basischen Hydroxiden reagieren, die wiederum mit dem SO₃ bzw. mit bereits kondensierter H₂SO₄ Sulfate bilden können (mit x = 1 für Me = Mg, Ca und x = 2 für Me = Na, K):



Die weitergehende Gasbehandlung entspricht der bereits in Variante 1 beschriebenen Weise.

Variante 3 (gestufte Verdampfungskühlung)

Die Staub- und Flugascheabscheidung erfolgt in einem der DeNO_x und Gavo nachgeschalteten Elektrofilter (EF).

Durch eine Wassereindüsung vor REA erfolgt eine Zwischenkühlung (ZK), die als Schockkühlung wirkt. Durch die gestufte Verdampfungskühlung soll die Gefahr einer Aerosolbildung des SO₃ als Folge einer plötzlichen Temperaturabsenkung unter die Säuretaupunkttemperatur (Schockkühlung) verringert bzw. unterdrückt werden. Hierbei wird durch die Eindüsung von Wasser die Rauchgastemperatur nur soweit abgekühlt, dass lediglich eine Annäherung an die Säuretaupunkttemperatur aber keine Unterschreitung erfolgt. Die SO₃-Abscheidung findet dann in dem Kalksteinwäscher statt, wo das SO₃ in Form von Schwefelsäure (H₂SO₄) kondensiert und mit dem Kalkstein (CaCO₃) zu Gips (CaSO₄ · 2 H₂O) reagiert.

Das von e.on (ehemals Preußen Elektra Engineering GmbH) patentierte Verfahren wird in Deutschland mit Erfolg in den beiden Kraftwerken Shamrock und Schkopau eingesetzt [2]. Die guten Ergebnisse aus den beiden deutschen Kraftwerken konnten allerdings bei entsprechenden Versuchen in einem nordamerikanischen Kraftwerk nicht wiederholt werden. Die Ursache für die abweichenden Ergebnisse konnten nicht gefunden bzw. geklärt werden.

E.ON ist daher bei der Übernahme von Garantien in Bezug auf die SO₃-Abscheideleistung zurückhaltend und würde entsprechende Vorversuche an der betreffenden Rauchgasreinigungsanlage voraussetzen.

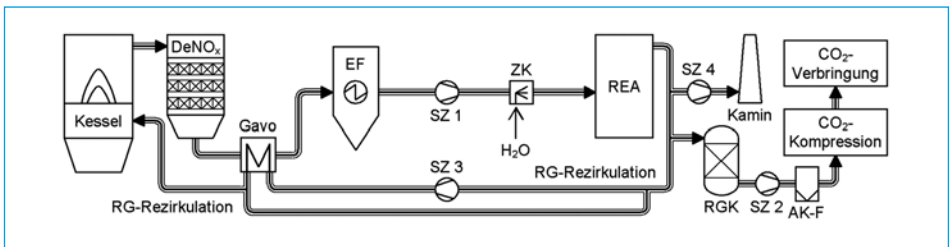


Abb. 3: Schematische Darstellung der RGR-Variante 3 für das Oxyfuel-Verfahren mit High-Dust-SCR und Elektrofilter

Die weitergehende Gasbehandlung entspricht der bereits in Variante 1 beschriebenen Weise.

Variante 4 (Schüttstofffilter)

Vergleichbar mit Variante 3 erfolgt die Staub- und Flugascheabscheidung in einem der DeNO_x und Gavo nachgeschalteten Elektrofilter (EF).

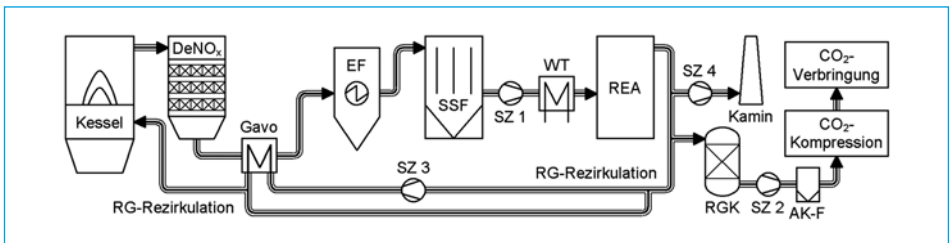


Abb. 4: Schematische Darstellung der RGR-Variante 4 für das Oxyfuel-Verfahren

werden hierbei nicht erreicht. Das erzielte Temperaturniveau ist stattdessen eher mit einer Sprühabsorption in Müllverbrennungsanlagen vergleichbar. Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass in diesem Fall der Umfang der Carbonatbildung sehr hoch ist.

Die Ursache hierfür ist der hohe Kohlendioxidanteil im Rauchgas und die geringe Verweilzeit im Sprühabsorber, sodass an dieser Stelle kinetische Einflussparameter für den Reaktionsablauf von größerer Bedeutung sind als thermodynamische Einflussgrößen.

Tab. 3: Mengenverhältnisse der Schadstoffe im Rauchgas beim Eintritt in den Sprühabsorber

Parameter	Einheit	CO ₂	SO ₂	SO ₃
Rohgaskonzentration	Vol.-% (tr. RG)	78,75	–	–
	mg/m ³ tr. RG	–	5.338	102
Molekülanzahl	mol/m ³ tr. RG	35,375	8,33 • 10 ⁻²	1,27 • 10 ⁻³
Molekülverhältnis	mol/mol SO ₃	27.768	65	1

Die Anforderung einer selektiven SO₃-Abscheidung kann mit diesem RGR-Konzept nicht erfüllt werden, da in großem Umfang CO₂ aber auch ein Teil des SO₂ abgeschieden wird. Hierdurch steigt der Reagenzbedarf auf ein deutlich überstöchiometrisches Verhältnis an. Die tatsächliche Stöchiometrie lässt sich jedoch nicht genau berechnen und müsste durch entsprechende Versuche ermittelt werden. Im Vergleich zu den anderen RGR-Varianten schneidet die Variante 1 am schlechtesten ab.

Aufgrund der unzureichenden Referenzanlagen ist das Risiko bei der RGR-Variante 3 in Bezug auf die SO₃-Abscheidung zu groß, sodass auch diese Variante ausgeschlossen wurde.

Von den verbleibenden RGR-Varianten 2, 4 und 5 erfordert die RGR-Variante 4 den größten apparativen Aufwand für die Umsetzung der spezifizierten Anforderungen an die Rauchgasreinigung. Daher scheidet auch diese Variante aus.

Die RGR-Varianten 2 und 5 unterscheiden sich im Aufbau lediglich durch einen zusätzlichen Elektrofilter für die Vorentstaubung. Die Auswirkungen auf das RGR-Konzept (Schwerpunkt der SO₃-Abscheidung, Gestaltung der Reaktionsstrecke vor Gewebefilter, Verwertungsmöglichkeiten für die anfallenden Stoffströme etc.) sind jedoch deutlich größer.

Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Auswahlkriterien und Randbedingungen ist die RGR-Variante 2 das unter den betrachteten zu favorisierende RGR-Konzept, mit dem SO₃-Emissionen zuverlässig abgeschieden werden können. Der Vorteil gegenüber der RGR-Variante 5 besteht hauptsächlich in dem geringeren apparativen Aufwand.

3. Verifizierung der Konzeptentscheidung

Da zur Abscheidung von SO₃ mit Kalkstein in Verbindung mit einem Gewebefilter keine Referenzen im Kraftwerksbereich, sondern nur hinter Müllverbrennungsanlagen und in der keramischen Industrie vorliegen, wurden Versuche an der Technikumsanlage der Technischen Universität Dresden durchgeführt.

Dieses Projekt wurde im Auftrag der Vattenfall Europe Generation AG, Abteilung Kraftwerkentwicklung von der ete.a Ingenieurgesellschaft mbH in Zusammenarbeit mit der TH Mittelhessen, Gießen (Kompetenzzentrum für Energie- und Umweltsystemtechnik) und der TU Dresden (Professur für Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung) durchgeführt.

Der Aufbau der Technikumsanlage ist in Abbildung 6 dargestellt und beschrieben.

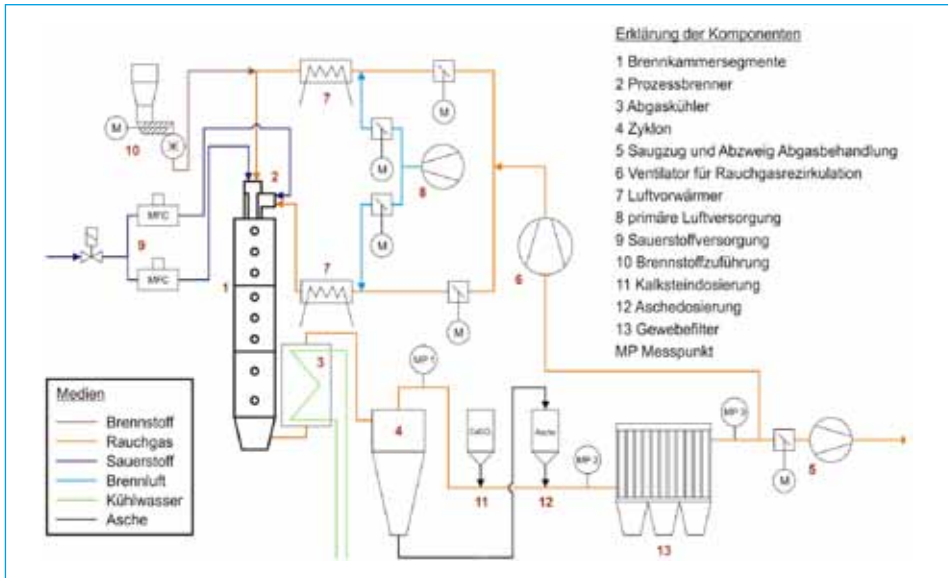


Abb. 6: Schematische Darstellung der Technikumsanlage

Die Versuche wurden mit Braunkohlenstaub (BKS) aus dem Lausitzer Revier durchgeführt. Die Zusammensetzung der Kohle ist im kraftwerkschemischen Labor der TU Dresden bestimmt worden (vgl. Tabelle 4 und 5). Der Anteil des Wassers in der Kohle kann je nach Charge und Lagerung leicht variieren, grundsätzlich ist die Kohle jedoch sehr homogen.

Parameter	Einheit	Wert	Norm
Wassergehalt*	Ma.-%	10,8	DIN konform
Aschegehalt	Ma.-%	4,8	DIN 51719
Flüchtige	Ma.-%	47,4	DIN 51720
fixer Kohlenstoff	Ma.-%	37	
Heizwert (h_u)	MJ/kg	21,3	DIN 51900

* Wassergehalt variiert leicht, zwischen 9,3 und 10,8 Ma.-%

Tab. 4:

Kurzanalyse des verwendeten Brennstoffs (TBK)

Parameter	Einheit	Wert	Norm
Elementaranalyse waf (wasser/aschefreier Zustand)			
Kohlenstoff (C)	Ma.-%	67,2	DIN konform
Wasserstoff (H)	Ma.-%	5,2	DIN konform
Sauerstoff (O)	Ma.-%	26,5	DIN konform
Stickstoff (N)	Ma.-%	0,7	DIN konform
Schwefel (S)	Ma.-%	0,4	DIN konform

Tab. 5:

Elementaranalyse des verwendeten Brennstoffs (BKS)

Weitere Eigenschaften des Brennstoffs sind in Tabelle 6 (Korngrößenverteilung) und in Tabelle 7 (Ascheschmelzverhalten) aufgeführt.

Tab. 6: Korngrößenverteilung nach DIN 66165

Siebweite	Wert
mm	Ma.-%
> 2	0,13
2,0 – 1,0	0,11
1 – 0,8	0,23
0,8 – 0,5	0,61
0,5 – 0,315	1,9
0,315 – 0,2	7,75
0,2 – 0,1	19,58
0,1 – 0,08	9,6
0,08 – 0,063	11,76
0,063 – 0,032	27,47
< 0,032	20,78

Tab. 8: Korngrößenverteilung der Flugasche, Entnahmeort Aschekasten

Korngröße	Masseanteil	Masseanteil	Masseanteil
mm	%	%	%
> 2	1,4	3,85	1,40
2,0 – 1,0	0,16	0,26	0,18
1,0 – 0,8	0,08	0,1	0,22
0,8 – 0,5	0,36	0,28	0,33
0,5 – 0,315	0,95	1	1,14
0,315 – 0,2	6,52	6,78	6,7
0,2 – 0,1	29,98	30,22	31,42
0,1 – 0,08	11,09	10,27	13,44
0,08 – 0,063	23,28	20,04	23,98
0,063 – 0,032	16,33	19,24	15,48
< 0,032	9,85	7,96	5,71

Tab. 7: Ascheschmelzverhalten nach DIN 51730

Parameter	Einheit	Wert
Erweichungstemperatur	°C	1.149
Halbkugeltemperatur	°C	> 1.357
Fließtemperatur	°C	> 1.357

In den Versuchen wurde die Flugasche aus dem Rauchgasstrom zunächst abgeschieden und im späteren Verlauf geregelt wieder zugegeben. Die Korngrößenverteilung der Flugasche geht aus Tabelle 8 hervor. Das Schüttgewicht der Flugasche liegt bei 0,56 kg/l. Tabelle 9 zeigt die Zusammensetzung der Brennstoffasche, die im Labor der TU Dresden untersucht wurde. Die Masseanalyse zeigt, dass der Großteil der Asche aus Calcium (26,0 Ma.-%), Eisen (24,5 Ma.-%) und Schwefel (24,3 Ma.-%) besteht.

Der Versuchsgewebefilter ist mit acht Polyimidfilterschläuchen (M-P84GP84/55/15) ausgerüstet. Die Flugasche sowie das zugegebene Calciumcarbonat werden auf der Außenseite (Anströmseite) der Filterschläuche abgeschieden. Die mit dem Staub belegten Filterschläuche werden im Gegensatz zu herkömmlichen Ausführungen nicht mit Druckluft sondern mit Kohlendioxid aus einer Gasflasche bei einem Abreinigungsdruck von 4 bis 5 bar mittels eines Druckimpulses abgereinigt. Die Abpulsung reinigt in einem Zyklus von fünf Minuten zwei Filterschläuche ab. Der abgereinigte Staub fällt in den unteren Bereich des Gewebefilters, wo ebenfalls die Probenahmen der abgeschiedenen Flugasche erfolgen. Das

Parameter	Einheit	Wert
Oxidanalyse der Asche nach DIN 51729		
Silicium (SiO ₂)	Ma.-%	6,6
Aluminium (Al ₂ O ₃)	Ma.-%	4,8
Eisen (Fe ₂ O ₃)	Ma.-%	24,5
Calcium (CaO)	Ma.-%	26,0
Magnesium (MgO)	Ma.-%	9,1
Sulfate (SO ₃)	Ma.-%	24,3
Natrium, Kalium, Rest (Na ₂ O + K ₂ O + Rest)	Ma.-%	4,7

Tab. 9:

Zusammensetzung der Brennstoffasche

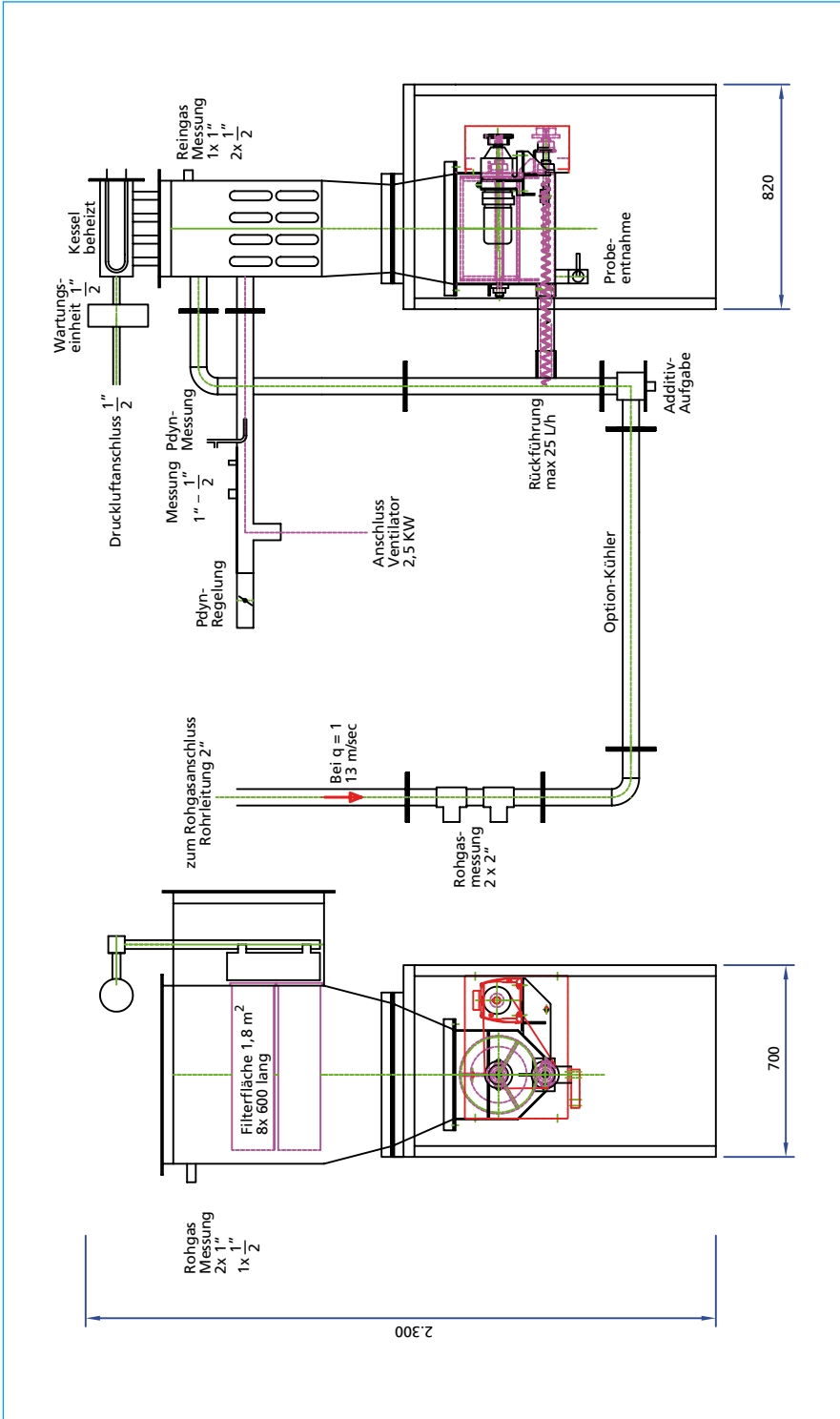


Abb. 7: Aufbau des Versuchs-Gewebefilters

Reingas wird teilweise über die Rezirkulation dem Verbrennungsprozess wieder zugeführt, das nicht rezirkulierte Reingas wird über einen Kanal abgeführt. Der gesamte Gewebefilter sowie die Zuleitungen werden mithilfe von Begleitheizungen auf einer Temperatur von min. 180 °C gehalten.

Als Additiv für die Abscheidung des SO₃ wurde, wie in der Konzeptstudie beschrieben, Calciumcarbonat verwendet. Die spezifischen Daten der verwendeten Rügener Schlämme sind in Tabelle 10 und 11 abgebildet. Die Schüttdichte der Kreide beträgt 0,59 kg/cm³.

Tab. 10: Spezifische Daten der Rügener Schlämme

Parameter	Produkteigenschaft	Maßeinheit	typischer Wert
chemische Analyse	CaCO ₃	Ma.-%	96,5
	HCl-unlöslich	Ma.-%	2
	Fe ₂ O ₃	Ma.-%	0,2
physikalische Analyse	Weißgrad R 457	%	77
	Weißgrad Ry	%	82
	H ₂ O-Gehalt (ab Werk)	Ma.-%	0,5
	pH-Wert		8 – 9,5
Kornverteilung	Siebrückstand 0,063 mm	Ma.-%	15
	Siebrückstand 0,090 mm	Ma.-%	5

Tab. 11: Sieblinie der Rügener Schlämme

Korngröße	Mittelwerte
mm	Ma.-%
> 2	0,07
2,0 – 1,0	0,01
1,0 – 0,8	0,01
0,8 – 0,5	0,01
0,5 – 0,315	0,2
0,315 – 0,2	5,97
0,2 – 0,18	8,14
0,1 – 0,08	5,38
0,08 – 0,063	0,19
0,063 – 0,032	0,01
< 0,032	0,01

Ergebnisse der Versuche

Die Versuchsergebnisse spiegeln im Wesentlichen die aus der Konzeptstudie geweckten Erwartungen wieder. So konnte das SO₃-Abscheidopotential von Calciumcarbonat sowie das der Flugasche unter den definierten Prozessbedingungen nachgewiesen werden.

Die SO₃-Reingaskonzentrationen lagen bei allen Versuchseinstellungen < 5 mg/m³ (max. 3,4 mg/m³, min. 0,2 mg/m³), bei SO₃-Rohgaskonzentrationen von maximal 115,7 mg/m³ und minimal 8 mg/m³. Der Mittelwert der SO₃-Reingaskonzentration lag bei 0,85 mg/m³, bei einer SO₃-Rohgaskonzentration von 39,81 mg/m³. Aus den Ein- und Ausgangskonzentrationen ergab sich ein gemittelter Abscheidegrad von 97,7 %.

Der vermutete Verdünnungseffekt aufgrund des Massenverhältnisses von Flugasche zu dosierten Kalkstein konnte nicht belegt werden, da die Flugasche aufgrund ihrer Alkalität eine hohe intrinsische SO₃-Abscheideleistung besitzt. Je nach reaktivem Ca-Anteil in der Flugasche sind SO₃-Abscheidegrade bis 99 % realisierbar.

Die Messergebnisse wurden so zusammengefasst, dass die Abhängigkeit von einem dem Prozess zugegebenen Calciumäquivalent zum möglichen SO₃-Abscheidegrad dargestellt wird.

Es ist darauf zu achten, dass eine entsprechende Verweilzeit und Kontaktmöglichkeit (Verwirbelung) der Flugasche mit dem Rauchgas vor der Entstaubungsstufe sichergestellt ist. Sollte über die Ca-Äquivalentbestimmung der Flugasche die zusätzliche Dosierung von Kalkstein erforderlich sein, so ist eine möglichst homogene Verteilung im Rauchgasstrom sicherzustellen. Des Weiteren ist eine entsprechende Feinheit des Kalksteins notwendig um genügend reaktive Oberfläche zur Verfügung zu stellen.

4. Merkmale von Gewebefiltern/Trockensorption

Im Gegensatz zu den Massenkraftabscheidern lassen sich mit filternden Abscheidern unabhängig von der Feinheit des Staubes sehr hohe Abscheideleistungen erreichen. Bei filternden Abscheidern wird das zu reinigende Gas durch ein poröses Medium geleitet, in dem die dispergierten Feststoffteilchen aufgrund verschiedener Mechanismen zurückgehalten werden. Man unterscheidet bei den filternden Abscheidern zwischen Faserschichtfiltern (Gewebefilter) und Schüttschichtfiltern.

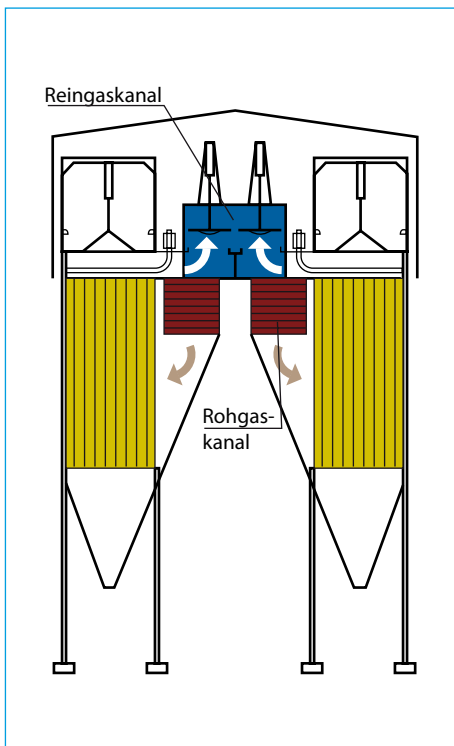


Abb. 8: Gewebefilter Typ ALSTOM, Optipuls LKPG

Quellen:

Alstom Power

Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff-Dampf-Rauchgas. Verden: Lührs & Röver Verlag, 18. Auflage, 2011; S. 271-273

Beim Gewebefilter dienen thermisch und chemisch beständige Gewebe bzw. Filze aus Kunststoffen, Glasfasern oder Keramik als Filtermedium. Bei dem dargestellten Gewebefiltertyp wird das Rohgas mittig herangeführt und auf die rechts und links angeordneten Kammern verteilt. Aufgrund von Teillastbetrieb und Verfügbarkeit werden die Gewebefilter als Mehrkammerfilter ausgeführt. In jeder Filterkammer sind mehrere Filterelemente (Schläuche oder Taschen) in Reihen (14 – 22 Stück/Reihe) angeordnet. Die Filterelemente werden mit etwa 2 – 4 cm/s von außen angeströmt, sodass sich außen ein sog. *Filterkuchen* aufbaut, der wesentlich zur Filtration beiträgt. Durch den allmählichen Aufbau des *Filterkuchens* steigt der Druckverlust im Filter nach und nach an. Häufig werden die Filter mit Erreichen eines Differenzdruck-Schwellenwertes abgereinigt. Die Abreinigung erfolgt entweder durch Abrütteln oder durch ein plötzliches Aufblähen mittels eines Druckluftimpulses wie in Abbildung 9 gezeigt. Zur Versteifung und Vermeidung eines Kollapses der Filterschläuche aufgrund des Unterdrucks auf der Abströmseite sind im Innern sog. Stützkörbe installiert. Diese werden zusammen mit den Filterschläuchen in der Kopfplatte dicht eingespannt. Der so abgereinigte Staub fällt in den trichterförmigen Boden des Gewebefilters und wird in der Regel über Schnecken ausgetragen.

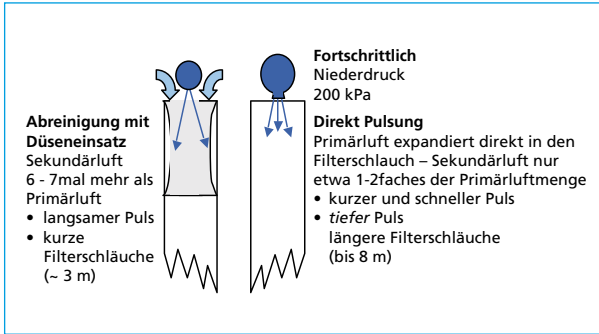


Abb. 9:

Puls-Jet Abreinigungsprinzip

Quelle: Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff-Dampf-Rauchgas. Verden: Lührs & Röver Verlag, 18. Auflage, 2011; S. 271-273

Der Filtrations- und Abreinigungsprozess am Schlauchquerschnitt ist in Abbildung 10 dargestellt. Beim Filtrationsprozess werden die Schläuche zwischen den Stützkorbdrähten durchgebogen, wogegen beim Abreinigungsprozess der Schlauch durch die injizierte Stoßwelle mittels Druckluft aufgebläht wird.

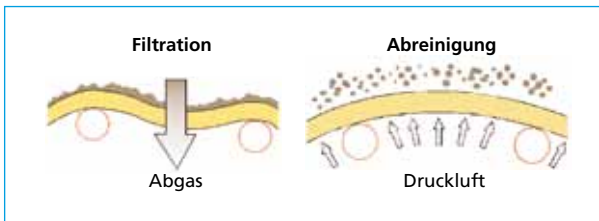


Abb. 10:

Filtrations- und Abreinigungsprozess am Schlauchquerschnitt

Quelle: Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff-Dampf-Rauchgas. Verden: Lührs & Röver Verlag, 18. Auflage, 2011; S. 271-273

Die wichtigsten Kriterien zur Gewebefilterauslegung sind:

- Filterflächenbelastung
- Druckverlust des Filters
- Filtermedium
- Druckluftverbrauch zur Filterabreinigung
- Anströmung der Filterschläuche
- Kosten
- Filterflächenbelastung V_F

$$V_F = \frac{V_{i.B.} [\text{m}^3/\text{h}]}{A_F [\text{m}^2]} = \text{Filterflächenbelastung} [\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}] \quad (5)$$

Die Filterflächenbelastung ist auch gleichbedeutend mit der Filtrationsgeschwindigkeit [m/h] und wird international häufig als Air/Cloth (A/C)-Ratio bezeichnet.

Für reine Entstauber im Kraftwerksbereich beträgt die Filterflächenbelastung etwa 120 – 130 [m³/m² h]. Für die kombinierte Entstaubung und Sorption liegt sie zwischen 50 – 70 [m³/m² h].

Druckverlust

Der Druckverlust des Filters, gemessen zwischen Ein- und Austritt, wird so gewählt, dass er

- bei reinen Entstaubern etwa 8 – 12 mbar
- bei kombinierter Entstaubung und Sorption etwa 12 – 20 mbar beträgt. Der maximale Auslegungsdruck liegt sehr häufig bei 25 – 35 mbar.

Filtermedium

Für die Auswahl des richtigen Filtermediums sind die Kriterien

- Beständigkeit (Temperatur, chemisch, mechanisch)
- Filtrationsbedingungen (Staubbeschaffenheit, Abscheideleistung, usw.)
- Kosten

zu beachten. Die heutigen Filtersysteme werden in der Regel als Oberflächenfiltration ausgelegt. Das bedeutet, dass sehr dichte Filtermaterialien (kleine Faser, hohes Filterflächengewicht) mit einer speziellen Oberflächenbehandlung wie z.B. das Aufbringen einer Membrane oder einer Kalandrierung eingesetzt werden.

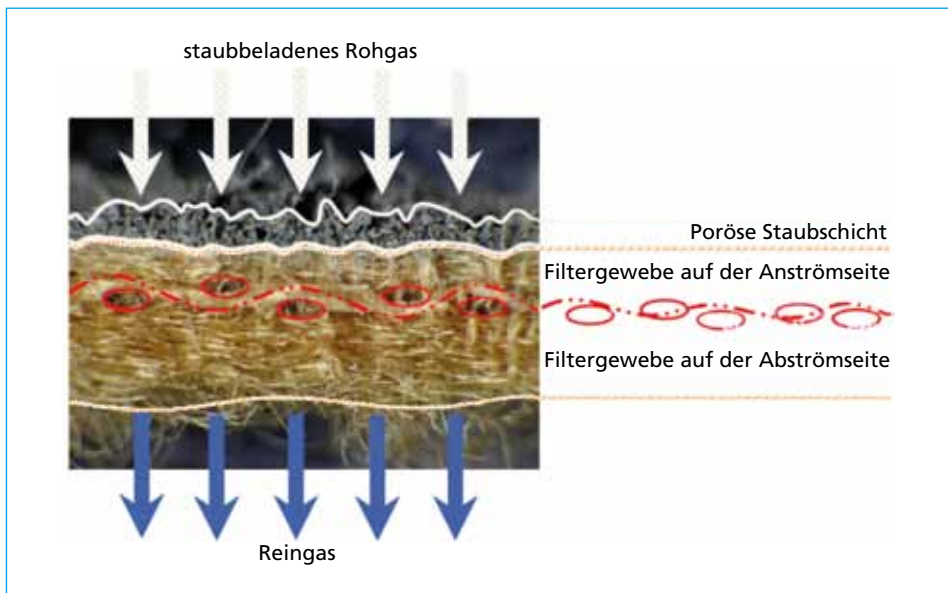


Abb. 11: Schlauchquerschnitt eines Gewebefiltermediums mit anfiltriertem Staub

Quellen:

Fa. Gutsch

Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff-Dampf-Rauchgas. Verden: Lührs & Röver Verlag, 18. Auflage, 2011; S. 271-273

Druckluftverbrauch

Der Druckluftverbrauch für die Abreinigung der Filterschläuche variiert mit der Rohgasstaubkonzentration, dem Abpulssystem und dem Verschmutzungsgrad der Filterschläuche.

Anströmung der Filterschläuche

Wenn die Stäube wie bei einem Sorptionsfilter auch eine Funktion bei der Bindung von Schadgasen übernehmen, so ist es notwendig, dass das Sorptionsmittel (z.B. Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$) bevorzugt an das obere Ende der Filterschläuche gelangt um hierdurch eine Einbindung in den Filterkuchen sicher zu stellen. Dadurch wird auch bei kurzzeitigem Abpulsen langer Filterschläuche noch nicht völlig verbrauchtes Reagenz erneut angezogen.

Betrieb von Gewebefilteranlagen

Die Gewebefilter sind so zu konzipieren, dass z.B. an den Öffnungen der Gewebefilterkammern kein bzw. nur ein minimaler Falschlufteinbruch sichergestellt wird. Insbesondere für den Oxyfuel-Prozess hat dies eine große Bedeutung. Erfahrungen zeigen, dass an den Stellen, an denen Falschluff eindringt, in Abhängigkeit der Temperatur mit Korrosion zu rechnen ist. Des Weiteren ist bei der Planung für die Einbindung in den gesamten Reinigungsprozess zu berücksichtigen, dass Wassertaupunkt-Unterschreitungen zu vermeiden sind. Dem kann mit Hilfe von z.B. einer Umfahrung (Bypass) und/oder einem Aufheizkreislauf entgegnet werden. In jedem Fall wird ein so genanntes *precoating* der Filterschläuche vor und nach jedem An- bzw. Abfahren empfohlen um das Filtermaterial zu schützen.

Bei der richtigen Auswahl des Filtermaterials und Abstimmung auf die Prozessanforderungen werden Standzeiten von mehreren Jahren problemlos erreicht. Im Bereich der Abfallverbrennung gibt es Anlagen, deren Filterschläuche mehr als 10 Jahre ohne einen Austausch in Betrieb sind.

5. Zusammenfassung

Im Auftrag der Vattenfall Europe Generation AG, Abteilung Kraftwerkentwicklung wurde im Rahmen der Entwicklungstätigkeit zur CCS Technologie und der im September 2008 in Betrieb genommene Pilotanlage in Schwarze Pumpe eine Konzeptstudie zur SO_3 -Minderung von der ete.a Ingenieurgesellschaft erstellt. Es wurden insgesamt fünf Varianten verfahrenstechnisch bewertet und gegenübergestellt. Die meisten Vorteile und effizienteste SO_3 -Abscheidung ist die Abscheidung an einem Gewebefilter nach dem Trockensorptionsverfahren. Hierfür wird in Pulverform ein basisches Neutralisationsmittel (im vorliegenden Fall Kalkstein) trocken in den Rauchgasstrom vor Gewebefilter eingeblasen und homogen verteilt. Die Abscheidung erfolgt zum Teil in der Flugstromphase aber auch in der sich auf den Filterelementen bildenden Staubschicht (Filterkuchen), der bei der Trockensorption als Reaktionsraum dient.

Da zur Abscheidung von SO_3 mit Kalkstein in Verbindung mit einem Gewebefilter keine Referenzen im Kraftwerksbereich, sondern nur hinter Müllverbrennungsanlagen und in der keramischen Industrie vorliegen, wurden Versuche von ete.a in Kooperation mit der TU Dresden und der TH Mittelhessen, Gießen an der Technikumsanlage der TU Dresden durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse spiegeln im Wesentlichen die aus der Konzeptstudie geweckten Erwartungen wieder. So konnte das SO_3 -Abscheidopotential von Calciumcarbonat unter den definierten Prozessbedingungen nachgewiesen werden.

Auch im Betrieb als reiner Staubabscheider konnte eine sehr gute SO_3 -Abscheidung an der basischen Flugasche aufgezeigt werden.

Der Gewebefilter als Staubabscheider in der Kraftwerkstechnik hat, neben der Tatsache ein Hochleistungsfilter, unabhängig des Staubwiderstandes und insbesondere für Feinstäube zu sein, die Eigenschaft der adsorptiven bzw. chemisorptiven Bindung von weiteren Gasbestandteilen wie z.B. von Quecksilber. In anderen Ländern ist der Gewebefilter längst zum Stand der Technik geworden und als wirkungsvoller Entstauber aus der Kraftwerkstechnik nicht mehr wegzudenken.

6. Literatur

- [1] BMU: RECCS Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS); Berlin, Dezember 2007
- [2] Gutberlet, H.; Dieckmann, A.: Minimierung der Bildung von Schwefelsäure-aerosolen in REA-Wäschern. VGB-Konferenz Kraftwerk und Umwelt 2000 am 4./5. April 2000 in Leipzig. Vortrag A 11, VGB-TB 316, VGB-KRAFTWERKSTECHNIK GmbH
- [3] Diepenseifen, K.; Karpf, R.: Brennstoff-Dampf-Rauchgas. Verden: Lührs & Röver Verlag, 18. Auflage, 2011; S. 271-273