

Bewertung verschiedener Rauchgasreinigungsverfahren im Kontext zu gesteigerten Emissionsanforderungen

Dipl.-Ing. Rudi Karpf

Dipl.-Ing. Michael Krüger

ete.a Ingenieurgesellschaft mbH, Lich

Dipl.-Ing. Jürgen Hüscher

E.ON Energy from Waste AG, Helmstedt

 **Wissensforum**

VDI Fachkonferenz
Thermische Abfallbehandlung 2009
München, 8. u. 9. Oktober 2009

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
2	BESCHREIBUNG DER KONZEPTE	4
2.1	Zweistufige Nasswäsche mit NH ₃ -Stripper	6
2.2	Zweistufige RGR-System (Hybrid-Verfahren) mit NH ₃ -Stripper	8
2.3	Konditionierte Trockensorption mit nachgeschalteten Festbettadsorber	10
3	GEGENÜBERSTELLUNG UND BEWERTUNG	11
3.1	Ermittlung der Investitions- und Betriebsmittelkosten	11
3.2	Bewertung der Konzepte	14
3.2.1	Variante V7	15
3.2.2	Variante V8	16
3.2.3	Variante V9	17
3.3	Referenzen für ausgeführte Anlagen	18
	Variante V7	18
	Variante V8	18
	Variante V8-1	18
	Variante V9	18
4	ZUSAMMENFASSUNG	19

1 Einleitung

Mit einer Verbrennungskapazität von derzeit 3,0 Millionen Tonnen Abfall pro Jahr ist E.ON Energy from Waste (EEW) im Bereich Abfallverbrennung bundesdeutscher Marktführer.

Bereits in den vergangenen Jahren wurden von EEW immer wieder konzeptionelle Überlegungen zu Rauchgasreinigungsverfahren angestellt, um auf die geänderten Anforderungen zu reagieren.

Sei es die Forderung von NO_x -Emissionswerten von $\leq 70 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$ oder gestiegene Schadgasfrachten bei der Behandlung von Ersatzbrennstoffen (EBS).

Vor diesem Hintergrund wurden im Auftrag der EEW durch ete.a GmbH unterschiedliche Rauchgasreinigungsverfahren betrachtet, um unter verschiedenen emissionsseitigen Rahmenbedingungen das wirtschaftlich günstigste Verfahren zu validieren. In einer ersten Konzeptstudie sind acht verschiedene Rauchgasreinigungsverfahren technisch bilanziert und wirtschaftlich bewertet worden.

Die jüngsten Überlegungen wurden zum einen durch die Diskussion über verschärfte Emissionsgrenzwerte in Form von Kontrollwerten und zum anderen durch geänderte Kostenstrukturen im Bereich der Additiv- und Energiebeschaffung geleitet.

Aus diesem Grund ist die Konzeptstudie um drei weitere Rauchgasreinigungsverfahren ergänzt worden. Die hierfür zugrunde zu legenden anlagentechnischen Rahmendaten wurden durch EEW im Bereich der Stickoxidemissionen auf $\text{NO}_x < 100 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$ bei Einsatz der SNCR-Technologie mit einem Ammoniak(NH_3)-Schlupf $< 10 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$. Die ausgewählten Verfahren bieten gleichzeitig die Möglichkeit deutlich kleinere Grenzwerte als die der 17. BImSchV zu erreichen.

Im Ziel der Ausarbeitung stand die Herausstellung des verfahrenstechnisch sichersten und wirtschaftlich günstigsten Rauchgasreinigungsverfahrens, mit welchem die E.ON Energy from Waste AG die geforderten Emissionswerte hinter zukünftigen thermischen Abfallverwertungs- und Ersatzbrennstoffanlagen gesichert einhält.

2 Beschreibung der Konzepte

Auslegungsdaten

Für die Auslegung der Rauchgasreinigungskonzepte wurden folgende Prozessdaten (für eine Linie) vorgegeben:

Rauchgasvolumenstrom in Norm trocken.: 131.472 mg/m³_{i.N.tr.} bzw. 11 Vol.-% O₂
 Rauchgastemperatur 200 (260) °C

Tab. 1 Rauchgaszusammensetzung nach Kessel (bzw. 11 Vol.-% O₂)

Parameter	Einheit	TMW (min.)	TMW (norm.)	HMW	Spitze (0,5 - 5h)
Heizwert	[MJ/kg]	10	11,5	14	18
H ₂ O	Vol.-%	12	15	19	24
Staub	mg/m ³ i.N.tr.	1.500	2.500	3.500	10.000 (Rußblasen)
NO _x	mg/m ³ i.N.tr.	300	400	500	700
HCl	mg/m ³ i.N.tr.	600	1.500	4.000	5.000
SO ₂	mg/m ³ i.N.tr.	300	650	1.500	3.000
Hg	mg/m ³ i.N.tr.	0,3	0,5	1	1,2
Cd + Tl	mg/m ³ i.N.tr.	1	2,5	7	10
NH ₃ (nach Kessel)	mg/m ³ i.N.tr.	-	15	-	35

Tab. 2 Darstellung der Emissionskonzentrationen (bzgl. 11 Vol.-% O₂)

Komponente	Einheit	17. BImSchV	½ 17. BImSchV
TOC	mg/m ³ i.N.tr.	10	5
CO	mg/m ³ i.N.tr.	50	25
HCL	mg/m ³ i.N.tr.	10	5
HF	mg/m ³ i.N.tr.	1	0,5
SO ₂	mg/m ³ i.N.tr.	50	25
Staub	mg/m ³ i.N.tr.	10	5
NO _x	mg/m ³ i.N.tr.	200	100
Hg	mg/m ³ i.N.tr.	0,03	0,025
Cd, TI	mg/m ³ i.N.tr.	0,05	0,025
Sb - Sn	mg/m ³ i.N.tr.	0,5	0,25
As - Cr	mg/m ³ i.N.tr.	0,05	0,025
Dioxine/Furane	ng/m ³ i.N.tr.	0,1	0,05
NH ₃ ¹⁾	mg/m ³ i.N.tr.	-	< 10 (Ziel < 5)

¹⁾ Ist kein in der 17. BImSchV geforderter Grenzwert, sondern eine Vorgabe von EEW

Bisher bewertete Rauchgasreinigungskonzepte

Die in der ersten Konzeptstudie betrachteten Rauchgasreinigungsverfahren wurden mit unterschiedlichen Emissionsanforderungen erstellt. Es galt zunächst zwischen der Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV und der ½ 17. BImSchV sowie einem NO_x-Emissionsgrenzwert von ≤ 100 mg/m³_{i.N.tr.} und ≤ 70 mg/m³_{i.N.tr.} zu unterscheiden (vgl. Abb.1). Die im Anhang dargestellte Übersicht vermittelt einen Eindruck der bisher betrachteten Varianten.

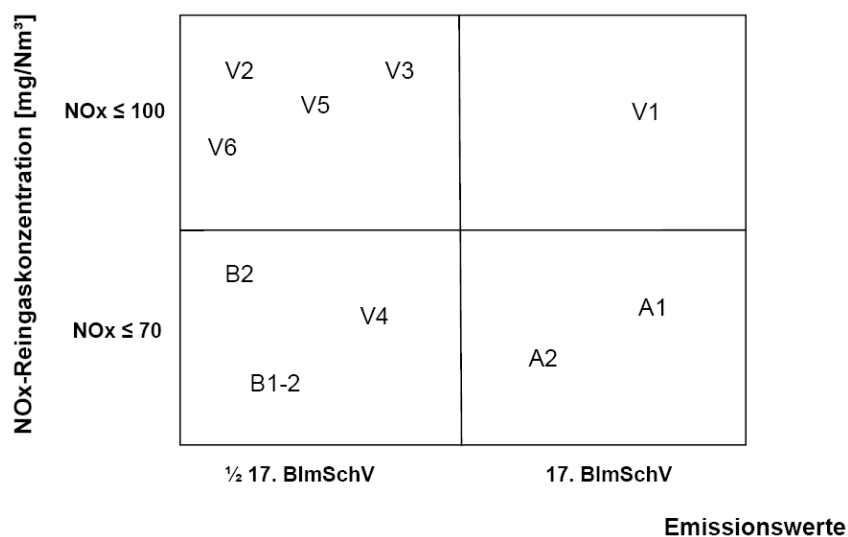


Abb.1 Auswahl-Matrix der bisher betrachteten Rauchgasreinigungskonzepte

Das Konzept V1 erfüllt im oberen rechten Quadranten die kleinsten Anforderungen der Emissionsbegrenzung und stellt auch somit die kostengünstigste Variante dar. Innerhalb des rechten unteren Quadranten ergeben sich für das Konzept A2 die größeren Vorteile. Für die erhöhten NO_x -Emissionsanforderungen ($\leq 70 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$) bei gleichzeitiger Erfüllung der $\frac{1}{2}$ 17. BImSchV besitzt die Variante B1-2 die größten Vorzüge. Bei den verschärften Emissionsanforderungen mit Ausnahme von NO_x ($\leq 100 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$) verzeichnet das Verfahren V3 innerhalb des linken oberen Quadranten den größten Nutzen, wobei die Varianten V5 und V6 nicht im Detail bewertet sondern lediglich als alternative Konzepte aufgezeigt wurden.

Wie bereits o.g. haben geänderte Kostenstrukturen im Bereich der Additiv- und Energiebeschaffung zwischenzeitlich zu einer Wandlung der wirtschaftlichen Rahmenparameter geführt, so dass die ursprünglich kostengünstigsten Verfahren aus o.g. Konzeptstudie (insbesondere Verfahren auf Basis von Natriumhydrogencarbonat) zum heutigen Zeitpunkt kommerziell in Frage gestellt sind.

Die durch EEW formulierten zukünftigen Anforderungen an Rauchgasreinigungsverfahren werden durch den linken oberen Quadranten, ergänzt durch eine Emissionsbegrenzung für Ammoniak von $< 10 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$ (wenn möglich $< 5 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$), wiedergespiegelt.

Im Folgenden werden die hierfür in Frage kommenden Varianten beschrieben, diskutiert und bewertet. Es sei an dieser Stelle bemerkt, dass die betrachteten Verfahren kein Alleinstellungsmerkmal beanspruchen und es sicherlich weitere Alternativen hierzu gibt.

2.1 Zweistufige Nasswäsche mit NH_3 -Stripper

Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte wird bei dieser Verfahrensvariante im Wesentlichen über einen zweistufigen Rauchgaswäscher sichergestellt. Die Reduktion der Stickoxide erfolgt bereits vor Eintritt in die eigentliche Rauchgasreinigungsanlage, über eine mehrstufige Ammoniakwassereindüsung in den ersten Kesselzug (SNCR).

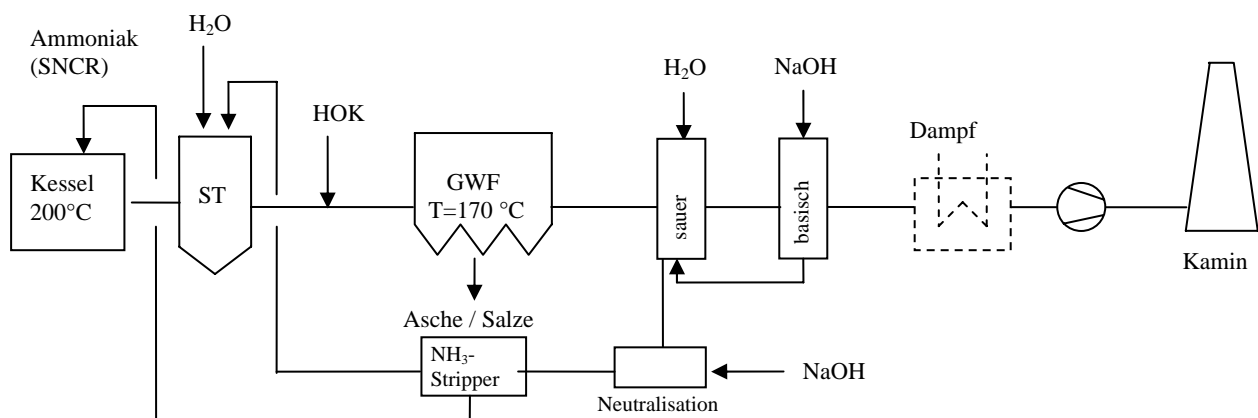


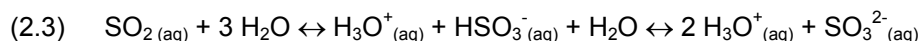
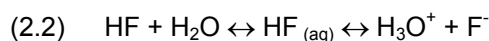
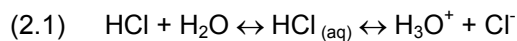
Abb. 2 Darstellung der Variante V7 zur Einhaltung < 17 . BImSchV-Werte sowie einem NO_x -Reingaswert $< 100 \text{ mg/m}^3$ und einem NH_3 -Schlupf $< 5 \text{ mg/m}^3$

Die in Abb.2 dargestellte Variante V7 bietet die Grenzwerteinhaltung < 17.BImSchV und einen NO_x-Emissionswert von <100 mg/m³_{i.N.tr.} bei einem Ammoniak (NH₃)-Schlupf von ≤ 5 mg/m³_{i.N.tr.}.

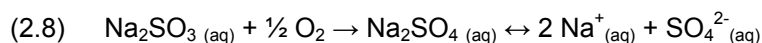
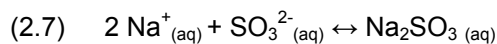
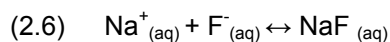
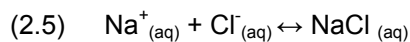
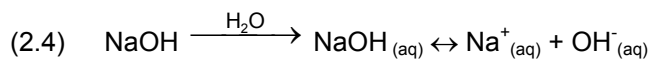
Dieses Verfahrenskonzept wird im Wesentlichen durch die zweistufige Waschstufe, bestehend aus einer sauren und basischen Gaswäsche (NaOH-Wäscher), charakterisiert. In der sauren Wäscherstufe werden primär HCl und HF und in der basischen Stufe SO₂ abgeschieden. Da die Anlagen abwasserfrei betrieben werden müssen, besteht die Notwendigkeit der Abwasserentsorgung. Das erfolgt durch die Eindampfung der Abwässer in den Rauchgasstrom nach Kessel unter Nutzung der Rauchgasenthalpie. Die so getrockneten Reaktionssalze werden neben der Flugasche an einem nachgeschalteten Gewebefilter trocken abgeschieden. Der Gewebefilter dient gleichzeitig, durch Zugabe von Aktivkoks, zur Abscheidung von Schwermetallen, insbesondere Quecksilber sowie Dioxinen/Furanen (PCDD/PCDF).

Je nach Anforderungen kann ein DaGaVo zur Rauchgaswiederaufheizung nachgeschaltet werden, um Dampffahnen am Kamin zu vermeiden.

Reaktionen in der sauren Rauchgaswäscherstufe



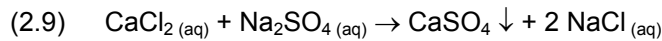
Reaktionen in der basischen Rauchgaswäscherstufe



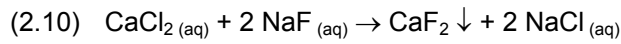
Durch die Anforderung einer sicheren Unterschreitung von <100 mg/m³_{i.N.tr.} für den NO_x-Grenzwert muss mit einem höheren Schlupf an NH₃ gerechnet werden, der in der sauren Wäscherstufe auf einen Wert unter 5 mg/m³_{i.N.tr.} abgesenkt werden soll. Das dabei gelöste NH₃ wird hierbei vor der Rückführung des Abschlammwassers aus dem sauren Wäscher in den Sprühtrockner, nach der Neutralisationsstufe (Zugabe von NaOH) in einem NH₃-Stripper ausgeschleust und wieder in die Ammoniakwasservorlage der SNCR zurückgeführt. Der hier gewählte Einsatz des vergleichsweise kostenintensiven Betriebsmittels Natronlauge (NaOH) für die Neutralisation der Wäscherabwässer, begründet sich aus der nachgeschalteten NH₃-Strippung, in dessen Kolonnen die bei der Neutralisation mit Kalkhydrat entstehenden unlöslichen Reaktionssalze zu Verkrustungen führen würden.

Bei der Neutralisation der Abwässer aus der sauren und alkalischen Waschstufe mit Kalkhydrat bzw. Kalkmilch findet eine Umkristallisation der Reaktionsprodukte Calciumchlorid, Natriumsulfat und

Natriumfluorid statt. Die Sulfat-Ionen des Natriumsulfats reagieren mit den Calcium-Ionen des Calciumchlorids zu schwerlöslichem Calciumsulfat und löslichem Natriumchlorid:



Analog bildet sich aus den Fluorid-Ionen des Natriumfluorids und den Calcium-Ionen des Calciumchlorids schwerlösliches Calciumfluorid:



Durch die Umkristallisation erhöhen sich die Menge von schwerlöslichem Calciumsulfat bzw. -fluorid und damit der Feststoffgehalt in den Abwässern.

2.2 Zweistufige RGR-System (Hybrid-Verfahren) mit NH₃-Stripper

Als weitere Variante (V8) wird ein Hybridverfahren bestehend aus konditionierter Trockensorption mittels Kalkhydrat und einem nachgeschalteten zweistufigen Wäschersystem (vgl. Abb.3) beschrieben.

Variante V8 bietet ebenfalls die Grenzwerteinhaltung < 17.BlmSchV und einen NO_x-Emissionswert von <100 mg/m³_{i.N.tr.} bei einem Ammoniak (NH₃)-Schlupf von ≤ 5 mg/m³_{i.N.tr.}. Auch in dieser Variante erfolgt die Entstickung über das SNCR-Verfahren durch die Eindüsung von Ammoniakwasser in den ersten Kesselzug.

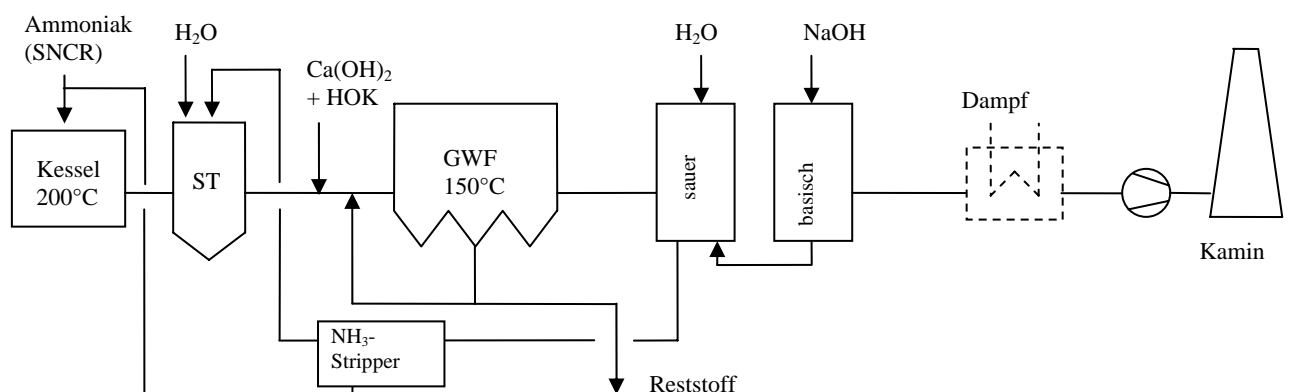
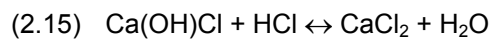
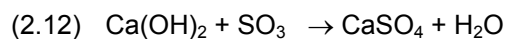
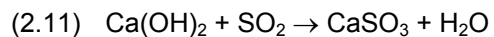
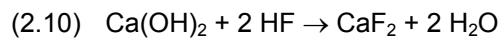
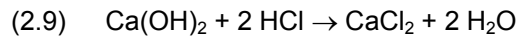


Abb. 3 Darstellung der Variante V8 zur Einhaltung < 17. BlmSchV sowie einem NO_x-Reingaswert <100 mg/m³_{i.N.tr.} und einem NH₃-Schlupf <5 mg/m³_{i.N.tr.}.

In der dem Kessel nachgeschalteten Rauchgasreinigungsanlage werden die Rauchgase in einem Sprühtrockner zunächst abgekühlt und befeuchtet. Dann erfolgt in einer Trockensorptionsstufe eine erste simultane Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile sowie der Schwermetalle und Dioxine/Furane. Als Additiv wird Normalkalkhydrat und Herdofen-Aktivkoks trocken zugegeben und ferner das am Gewebefilter angefallene Restprodukt - mit nicht unerheblichen Anteilen an noch

unverbrauchten Frischsorbens - teilweise rezirkuliert. Das im Rezirkulat enthaltene Calciumchlorid verstärkt dabei die SO₂-Abscheidung an den Filterschläuchen. Die Rezirkulatmenge wird hierbei fest eingestellt. Das Ausschleusen eines Teilstroms an Restprodukte aus dem Prozess findet kontinuierlich statt.

Reaktionen in der konditionierten Trockensorption mit Kalkhydrat



Dem Gewebefilter nachgeschaltet erfolgt die Nachreinigung der Rauchgase in einem zweistufigen Wäschersystem mit saurer und basischer Stufe analog zu V7. Durch das hier bereits deutlich niedrige Niveau an sauren Schadgasen ist lediglich eine geringfügige pH-Wert Korrektur der Wäscherabwässer mittels Natronlauge erforderlich. Zur Sicherstellung der NH₃-Abscheidung ist in der sauren Wäscherstufe eine zusätzliche HCl-Dosierung vorgesehen. Das vom Sumpf des sauren Wäschers abgezogene Abschlämmwasser wird über einen NH₃-Stripper geführt, um das darin gelöste NH₃ auszuschleusen (Rückführung zur SNCR) und anschließend im Sprühtrockner verdampft. Die dabei anfallenden Mengen an Salzen werden anschließend am Gewebefilter abgeschieden. Neben den Abwässern aus der Wäscherstufe, wird über die zusätzliche Zugabe von Prozesswasser, die benötigte Abkühlung und Befeuchtung des Rauchgases am Sprühtrockner ermöglicht.

In der weitergehenden Betrachtung wird die Betriebsweise der Variante 8 auch ohne eine NH₃-Strippung betrachtet. Ist diesem Fall wird das Abwasser aus dem Wäscher direkt als Treibwasser für die Ammoniakwasserverdüsung im ersten Kesselzug verwendet. Eine vorherige Aufbereitung des Abwassers ist nach Herstellerangaben nicht notwendig. Diese Variante wird im Folgenden mit der Bezeichnung V8-1 geführt.

2.3 Konditionierte Trockensorption mit nachgeschalteten Festbettadsorber

Das als Variante 9 beschriebene Verfahren besteht aus einem konditionierten Trockensorptionsverfahren mittels Kalkhydrat und nachgeschaltetem Aktivkoks-Festbettadsorber (vgl. Abb. 4). Diese Verfahrensvariante V9 bietet ebenfalls die Einhaltung < 17. BImSchV-Werte und einen NO_x-Emissionswert von < 100 mg/m³_{i.N.tr.} bei einem Ammoniak (NH₃)-Schlupf von ≤ 5 mg/m³_{i.N.tr.}. Wie bei den Varianten V7 und V8 erfolgt auch hier die Entstickung über das SNCR-Verfahren durch die Eindüsung von Ammoniakwasser in den ersten Kesselzug.

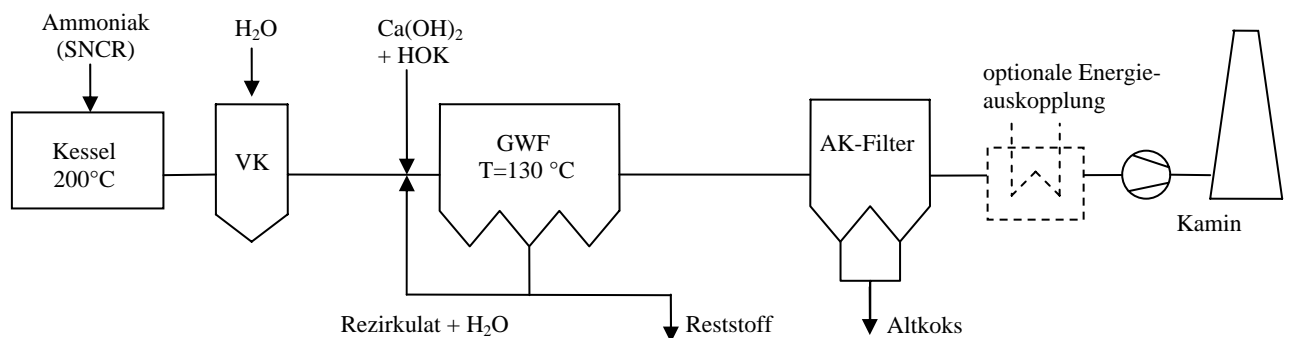


Abb. 4: Darstellung der Variante V8 zur Einhaltung der < 17. BImSchV sowie einem NO_x-Reingaswert < 100 mg/m³ und einem NH₃-Schlupf < 5 mg/m³

Das aus dem Kessel austretende Rauchgas wird zunächst über einen Verdampfungskühler auf ca. 140 °C abgekühlt und befeuchtet. Dann erfolgt die Abscheidung der sauren Schadgasanteile in einer Trockensorptionsstufe. Als Additiv dient - neben der Zugabe von Normalkalkhydrat - das am Gewebefilter angefallene Restprodukt mit nicht unerheblichen Anteilen an noch unverbrauchten Frischsorbens. Das darin enthaltene Calciumchlorid verstärkt dabei die SO₂-Abscheidung an den Filterschläuchen. Die Rezirkulatmenge wird fest eingestellt. Hierbei besteht die Möglichkeit das Rezirkulat über einen Befeuchtungsmischer zusätzlich anzufeuchten, um die Reaktivität und insbesondere die Abscheidung von SO₂ nochmals zu erhöhen sowie die Kalkausnutzung zu verbessern. Über die Befeuchtung des Rezirkulats wird das Rauchgas vor Gewebefilter nochmals von ca. 140 °C auf ca. 130 °C abgekühlt.

Das Ausschleusen eines Teilstroms des Restproduktes findet kontinuierlich statt.

Für die Abscheidung der Schwermetalle, insbesondere Quecksilber sowie Dioxine/Furane (PCDD/PCDF) sowie zur Reduzierung des NH₃-Schlupfes auf 5 mg/m³_{i.N.tr.} ist dem Gewebefilter ein Festbettadsorber mit Aktivkoks nachgeschaltet.

3 Gegenüberstellung und Bewertung

3.1 Ermittlung der Investitions- und Betriebsmittelkosten

Zur Ermittlung der Investitionskosten für die Varianten V7 bis V9 wurden von namhaften Anlagenlieferanten Richtpreisangebote eingeholt. Die entsprechenden Angebotspreise sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tab. 3: Darstellung der Investitionskosten (für eine Linie) für die Varianten 7-9 sowie der daraus berechnete Mittelwert

Variante	Einheit	Investitionskosten (Richtpreis)					
		Lieferant A	Lieferant B	Mittelwert	NH ₃ -Stripper	Festbett-adsorber	Gesamtkosten
V7	€	nicht angeboten	11.500.000	11.500.000	1.500.000		13.000.000
V8	€	10.500.000	11.700.000	11.100.000	1.500.000		12.600.000
V8-1	€	10.500.000	11.700.000	11.100.000			11.100.000
V9	€	7.900.000	9.300.000	8.600.000		3.000.000	11.600.000

Die Kosten für den in Variante V9 benötigten Aktivkohle-Filter wurden bei der Firma CSC angefragt. Als Schätzwert wurde hier ein Miet-Preis von 200.000 €/a angegeben, welcher mittels einer Nutzungsdauer von 15 Jahren auf ca. 3.000.000 € Investitionskosten umgerechnet wurde.

Für die Ermittlung der Betriebsmittelkosten wurden von E.ON Energy from Waste AG die in Tabelle 4 aufgeführten Einheitspreise vorgegeben.

Tab. 4: spezifische Betriebsmittelkosten

Stoff	Einheit	Preis
Strom	€/kWh	0,04
Normalkalkhydrat	€/t	95
Branntkalk	€/t	90
Aktivkoks mahlaktiviert	€/t	420
Aktivkoks Granulat (MgO-dotiert; inkl. Entsorgung)*	€/t	800
Natronlauge (50%ig)	€/t	240
Ammoniakwasser (25%ig)	€/t	100
Druckluft	€/m ³	0,03
Prozesswasser	€/t	0,5
ausgekoppelte Energie	€/kWh	0,017
Dampf NH ₃ -Stripper	€/kWh	0,017
Abwasserentsorgung	€/t	12,6
Reststoffentsorgung	€/t	160
VE-Wasser**	€/m ³	0,11

*Angabe von Fa. CSC

** Wert abgeschätzt

Über eine Stoff- und Energiebilanzierung wurden für jedes Verfahren die einzelnen Betriebsmittelverbräuche, wie in Tabelle 5 dargestellt, ermittelt.

Tab. 5: Darstellung der Betriebsmittelverbräuche der einzelnen Varianten, für eine Linie

Stoffstrom	Einheit	V7	V8	V8-1	V9
Strom	[kWh/h]	614	645	639	563
Branntkalk	[kg/h]	-	-	-	-
Normalkalkhydrat	[kg/h]	261	527	527	527
Natriumcarbonat	[kg/h]	-	-	-	-
Aktivkoks, mahlaktiviert	[kg/h]	7	7	7	7
Aktivkoks, Granulat MgO-dotiert	[kg/h]	-	-	-	35
Natronlauge (50%ig)	[kg/h]	208	9	8	-
Ammoniakwasser (25%ig)	[kg/h]	97	97	97	97
Ammoniak-Rückgewinnung durch Strippung	[kg/h]	18	18	18	-
Druckluft	[m³/h]	850	1.181	1.171	1.136
Prozesswasser	[kg/h]	13.495	11.726	11.726	5.425
Abwasser	[kg/h]	-	-	-	-
ausgekoppelte Energie	[kW]	-	-	-	-
Dampf NH ₃ -Stripper	[kW]	450	450	-	-
Reststoffentsorgung	[kg/h feucht]	940	1.230	1.230	1.230
VE-Wasser	[m³/h]	0,1	0,1	-	-

Ausgehend von einer jährlichen Betriebsdauer von 7.800 Stunden wurden mit Hilfe der spezifischen Betriebskosten sowie den bilanzierten Betriebsmittelverbräuchen die in Tab. 6 enthaltenen Betriebsmittelkosten berechnet.

Tab. 6: Darstellung der stündlichen sowie jährlichen Betriebsmittelkosten (für eine Linie)

Stoffstrom	Einheit	V7	V8	V8-1	V9
Strom	[€/h]	25	26	26	23
Branntkalk	[€/h]	-	-	-	-
Normalkalkhydrat (95%)	[€/h]	25	50	50	50
Natriumbicarbonat	[€/h]	-	-	-	-
Aktivkoks mahlaktiviert	[€/h]	3	3	3	3
Aktivkoks Granulat (MgO-dotiert)	[€/h]	-	-	-	28
Natronlauge (50%ig)	[€/h]	50	2	2	-
Ammoniakwasser (25%ig)	[€/h]	10	10	10	10
Ammoniak-Rückgewinnung durch Strippung	[€/h]	-1,8	-1,8	-1,8	-
Druckluft	[€/h]	26	35	35	34
Prozesswasser	[€/h]	6,7	5,9	5,9	2,7
ausgekoppelte Energie	[€/h]	-	-	-	-
Dampf NH ₃ -Stripper	[€/h]	7,65	7,65	-	-
Reststoffentsorgung	[€/h]	150	197	197	197
Energiegewinn durch kleinere Kesselaustrittstemperatur	[€/h]	-	-	-	-
VE-Wasser	[€/h]	0,011	0,011	-	-
Summe Betriebsmittelkosten	[€/h]	300,42	334,71	326,27	346,80
jährl. Kosten bei 7.800 h/a	€/a	2.343.241	2.610.729	2.544.889	2.705.069

Anmerkung: die in den Varianten V7 und V8 mittels NH₃-Strippung zurückgewonnene Menge an Ammoniak wird in den Betriebsmittelverbräuchen mit einem negativen Vorzeichen versehen und als „Gewinn“ definiert. Ebenso bei Variante V8-1, bei der die im Abwasser enthaltene Menge an Ammoniak ohne Strippung als Treibwasser für die NH₃-Eindüsung verwendet wird.

Wie in Tabelle 6 dargestellt, bewegen sich die Betriebsmittelkosten bei allen drei Varianten in etwa auf gleichem Preisniveau zwischen 300 und 350 €/h. Ermittelt man die jährlichen Betriebsmittelkosten bei 7.800 Betriebsstunden, ergeben sich für Variante V7 mit 2.343.241 €/a die geringsten Betriebsmittelkosten was ein Minderbetrag von 361.828 €/a gegenüber der teuersten Variante V9 darstellt.

Ausgehend von den in Tab. 3 genannten Investitionskosten und den entsprechenden Betriebsmittelkosten wurde die Wirtschaftlichkeit nach der Annuitätenmethode gemäß VDI 2067 berechnet.

Hierfür wurde eine Nutzungsdauer von 15 Jahren und ein Zinssatz von 10,6 % zugrunde gelegt. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten wurden nach Vorgabe von EEW mit 3%, bezogen auf die Investitionskosten, berechnet und berücksichtigt.

Tab. 7: Darstellung der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Variante gemäß VDI 2067

Kosten	Einheit	V7	V8	V8-1	V9
Investitionskosten	[€]	13.000.000	12.600.000	11.100.000	11.600.000
Nutzungsdauer (Jahre)	[a]	15	15	15	15
Wartung-/Instandhaltungskosten	[€]	390.000	378.000	333.000	348.000
Betriebskosten p.a.	[€]	2.343.241	2.610.729	2.544.889	2.705.069
Abschreibung p.a.	[€]	866.667	840.000	740.000	773.333
Kapitaldienstkosten p.a.	[€]	1.757.600	1.703.520	1.500.720	1.568.320
Kosten p. a. inkl. Kapitaldienst	[€]	4.490.841	4.692.249	4.378.609	4.621.389

Gemäß der in Tabelle 7 getroffenen Gegenüberstellung stellt Variante 8-1 mit jährlichen Kosten von 4.378.609 € die günstigste Variante dar.

Die Kostendifferenzen zwischen den einzelnen Varianten sind nicht so signifikant, sodass unter Berücksichtigung einer Unschärfe von ca. 15 % bei den Investitionskosten der eingeholten Richtpreisangebote kein eindeutiger Kostenvorteil für eine der vier betrachteten Verfahrensvarianten gegeben ist.

3.2 Bewertung der Konzepte

Alle vorgestellten Varianten sind so konzipiert, dass sie die Emissionswerte < 17. BImSchV sicher eingehalten werden. Durch entsprechende Auslegung des SNCR-Verfahrens wird ein NO_x-Emissionswert von ≤ 100 mg/m³_{i,N.tr.} bei < NH₃ 10 mg/m³_{i,N.tr.} erreicht. Die Abscheidung der sauren Schadgasanteile sowie von Schwermetallen und organischen Verbindungen erfolgt mit bewährten Verfahren wie der zweistufigen Rauchgaswäsche, der konditionierten Trockensorption und der Festbettadsorption - einzeln oder in Kombination. Zusätzliche Maßnahmen, wie eine integrierte NH₃-Strippung bzw. ein Aktivkoks-Festbettfilter, ermöglichen die Einhaltung eines NH₃-Schlupfes von ≤ 5 mg/m³_{i,N.tr.}.

Im Folgenden werden die verfahrenstechnischen Vor- und Nachteile der jeweiligen Variante eingehender erläutert.

3.2.1 Variante V7

Variante V7 besteht aus einem SNCR-Verfahren, einem Sprühtrockner, einem Gewebefilter inkl. Dosierung von mahlaktiviertem Aktivkoks und einem zweistufigen Rauchgaswäscher incl. NH_3 -Strippung zur Abscheidung der sauren Schadgase sowie zur Einhaltung des NH_3 -Schlupfes von $\leq 5 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$.

Die Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten über die Wäscherstufen mit Natronlauge erfolgt mit einer Stöchiometrie von ca. 1,0 besonders effektiv, was gleichzeitig für einen geringeren Reststoffanfall gegenüber einem kalkbasierenden Trockensorptionsverfahren steht. Desweiteren bieten die Waschstufen ein hohes Potential und Sicherheit zur Unterschreitung der Emissionsgrenzwerte für die sauren Schadgasbestandteile, selbst bei schwankenden hohen Rohgaskonzentrationen. Nachteilig ist das Risiko, dass bei SO_2 -Spitzen in der zweiten Wäscherstufe(basischen Stufe) eine reduzierende Atmosphäre entsteht und zur Reduktion von ionischem Quecksilberchlorid zu metallischem Quecksilber(Hg^0) führen kann.

Nach dem Sprühtrockner liegt die Rauchgastemperatur im Gewebefilter mit einer Temperatur von $160 \text{ }^\circ\text{C}$ oberhalb des Taupunktes, wodurch Korrosionsschäden theoretisch vermieden werden. Da keine neutralisierenden Additive wie $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oder NaHCO_3 vor Gewebefilter dosiert werden, ist jedoch ein hohes korrosives Potential bei ungünstigen Betriebsbedingungen (partielle Taupunktunterschreitung) gegeben. Aus diesem Grund muss ein Tropfenmitriss aus dem Sprühtrockner unbedingt vermieden werden (ausreichend große Verweilzeit des Rauchgases im Sprühtrockner) und der Gewebefilterbunker begleitbeheizt werden.

Über die zu verdampfende Menge an anfallendem Abwasser aus der Wäscherstufe ist die maximale Rauchgastemperatur im Gewebefilter begrenzt. Die Bilanzierung bei vollständiger Verdampfung der Abwassermengen ergibt, dass bei einer Rauchgasaustrittstemperatur nach Kessel von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ im Gewebefilter eine maximale Temperatur von $163 \text{ }^\circ\text{C}$ erreichbar ist.

Aufgrund des wasserdampfgesättigten Rauchgases und der Fahrweise bei Kühlgrenztemperatur kommt es zu Wasserdampfkondensation in den rauchgasberührte Komponenten nach Wäscher (Rauchgaskanäle, Saugzug und Kamin). Diese Komponenten sind daher korrosionsgeschützt auszuführen. Neben einer entsprechenden Beschichtung der Kanäle besteht auch die Möglichkeit, dass Rauchgas nach Wäscher mittels eines DAGAVO aufzuheizen.

Durch den z.T. unvermeidbaren Tropfenmitriss aus dem Wäscher (z.B. bei verschmutzten Tropfenabscheidern) besteht das Risiko einer Erhöhung der Staubemission. Um dies zu verhindern ist in den Varianten V8 und V8-1 von einem der Anbieter ein Nass-Elektrofilter hinter Wäscher vorgesehen.

Zur Vermeidung einer Wasserdampffahne am Kamin besteht die Möglichkeit, über einen Rauchgaskondensator einen Teil der Rauchgasfeuchte abzuscheiden. Die dabei freiwerdende Kondensationswärme kann u.U. noch für die Aufheizung von Fernwärme oder Kondensat verwendet werden.

3.2.2 Variante V8

Variante V8 besteht aus einem SNCR-Verfahren, einem Sprühtrockner, einer konditionierten Trockensorptionsstufe und Gewebefilter sowie einer nachgeschalteten zweistufigen Rauchgaswäsche inkl. NH_3 -Strippung zur Einhaltung des NH_3 -Schlupfes von $\leq 5 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$. Die Hauptabscheidung der sauren Schadgaskomponenten erfolgt in der konditionierten Trockensorption über das günstigere Additiv $\text{Ca}(\text{OH})_2$. In den Wäscherstufen wird lediglich eine Restabscheidung der sauren Schadgasbestandteile und vornehmlich die Reduzierung des NH_3 -Schlupfes vorgenommen.

Aufgrund der Zweistufigkeit unter Verwendung der Additive Kalkhydrat und Natronlauge kann bei dieser Verfahrensvariante auf mögliche Schwankungen in den Betriebsmittel- und Reststoffentsorgungskosten reagiert werden, da die Hauptabscheidung der sauren Schadgase von der konditionierten Trockensorption in die Wäscherstufe durch veränderte Prozessbedingungen in der Trockensorption verlagert werden kann.

Wie auch in Variante V7 entsteht eine Dampffahne am Kamin, welche wie oben beschrieben durch den optionalen Einsatz einer Rauchgaswiederaufheizung oder einer Kondensationsstufe vor Kamin zumindest teilweise vermieden werden kann (in den Investitions- und Betriebsmittelkosten nicht berücksichtigt).

Im Vergleich zu den Varianten V7 und V9 ist bei Variante V8 die aufwendigste Anlagentechnik erforderlich (konditionierte Trockensorption inkl. Rezirkulation, zweistufiger Wäscher und NH_3 -Strippung).

Bestandteil der Verfahrenskonzepte V7 und V8 ist eine NH_3 -Strippung für die separate Abscheidung des NH_3 aus den Wäscherabwässern. Da bei Variante V8 die sauren Schadgasanteile HCl , HF und SO_2 bereits weitestgehend in der vorgeschalteten Trockensorptionsstufe entfernt werden, ist eine zusätzliche Ansäuerung der ersten Wäscherstufe für die NH_3 -Abscheidung (pH-Wert-Korrektur) notwendig.

Da auch in dieser Variante die Rauchgaswäscher als letzte Reinigungsstufe vorgesehen sind, gelten die gleichen Bedingungen und Aussagen, die bereits unter 3.3.1 getroffen worden sind.

Variante V8-1

Die Variante V8-1 ist identisch mit der Variante V8, nur dass hier das Abwasser aus den Wäschern direkt, ohne Strippung, als Treibwasser für die NH_3 -Eindüsung in der SNCR eingesetzt wird. Die NH_3 -Senke liegt bei Variante V8-1 demnach im Kessel bzw. im SNCR-Verfahren.

Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die Investitionskosten sowie auch die Betriebskosten für den NH_3 -Stripper entfallen. Weiterhin ist der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand für diese Variante geringer.

3.2.3 Variante V9

Variante V9 besteht aus einem Verdampfungskühler, einer konditionierten Trockensorptionsstufe mit Dosierung von Kalkhydrat und Aktivkoks, einer Reststoffrezirkulation inkl. Befeuchtung, einem Gewebefilter und einem nachgeschaltetem Aktivkoks-Festbettfilter zur adsorptiven Abscheidung restlicher saurer Schadgasanteile, Schwermetallen und organischen Verbindungen sowie zur Reduzierung der NH_3 -Konzentration.

Im Vergleich zu den Varianten V7, V8 und V8-1 ergibt sich bei Variant V9 ein deutlich geringerer Druckverlust über den Gesamtanlagenumfang mit entsprechender Einsparung von elektrischer Energie am Saugzuggebläse.

Durch Einsatz des Aktivkoks-Festbettfilters wird neben der NH_3 -Abscheidung ein zusätzliches Potential zur Reduzierung von Schwermetallen (insbesondere Hg), Dioxinen/Furanen und C_{org} geschaffen. Ferner ist am Aktivkoks mit einer katalytischen Nachreaktion von NO_x mit dem NH_3 -Schlupf zu rechnen (vgl. BF/Uhde-Verfahren), so dass bei dieser Variante die geringsten NO_x -Reingaswerte zu erwarten sind.

Anders als bei den Varianten V7, V8 und V8-1 beträgt die Rauchgastemperatur über den gesamten Prozess mind. 130 °C bei moderaten Wasserdampfgehalten im Rauchgas. Hierdurch ist keine korrosionsgeschützte Ausführung der Anlagenteile erforderlich und die Entstehung einer Dampffahne am Kamin wird vermieden. Optional ist vor Kamin eine Wärmeauskopplung mit Fernwärme- oder Kondensataufheizung möglich.

Variante V9 hat vergleichsweise wenige Komponenten und bedarf somit eines geringen Wartungs- und Instandhaltungsaufwandes.

Aufgrund der eingeschränkten Adsorptionsfähigkeit von HCl an undotiertem Aktivkoks ist im Festbettfilter der Einsatz von kostenintensivem MgO-dotierten Aktivkoks erforderlich, sofern eine Reduzierung der HCl-Schadgasfracht von $10 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$ (nach Trockensorption) auf $5 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$ (am Kamin) erreicht werden soll. In Form des MgO wird dem HCl ein basischer Reaktionspartner angeboten, der durch Chemiesorption zu einer dauerhaften Bindung des HCl im Festbettfilter führt. Die Auswahl an möglichen Lieferanten ist für diese speziellen Aktivkokse eingeschränkt.

Aufgrund der Glimmbrandgefahr im Aktivkoks-Filter ist ein hoher sicherheitstechnischer Aufwand erforderlich (Stickstoffinertisierung).

Im Betriebsverlauf ist mit einem ansteigenden Druckverlust über den Aktivkoks-Filter aufgrund von Staubeinlagerungen, den Reaktionssalzen aus der HCl-Umsetzung am Magnesiumoxid sowie durch Ammoniumsulfatbildung zu rechnen.

Der Einsatz von Aktivkoks festbettfiltern zur Senkung der NH_3 -Reingaskonzentration ist in dieser Form noch nicht über Erfahrungen aus Referenzanlagen abgesichert.

Voraussetzung für V9 ist der Einsatz eines Festbettfilters, dessen Aktivkoks Bett lediglich zweimal pro Jahr im Rahmen der planmäßigen Revisionen getauscht wird. Der Altkoks wird vom Lieferanten übernommen und wieder aufbereitet (Kosten in Betriebsmittelkosten enthalten). Der Einsatz eines Wanderbettfilters würde aufgrund der aufwendigen Sicherheitstechnik für die Frischkoks Lagerung und beschickung sowie den Aktivkoksabzug und die Altkokslagerung bzw. Rückführung in die Feuerung zu kostenintensiv.

3.3 Referenzen für ausgeführte Anlagen

Variante V7

Die Variante V7 ist z. B. in der Biomasse-Verbrennungsanlage AVR Rotterdam realisiert. Diese besteht aus einem Kessel mit SNCR-Anlage, einem Zyklon, einem Gewebefilter mit HOK-Dosierung und einem nachgeschalteten zweistufigen Wäscher. Über einen NH_3 -Stripper wird das im Wäscherabwasser enthaltene Ammoniak wieder zurückgewonnen.

Variante V8

Für Variante V8 kann z.B. die Biomasse-Verbrennungsanlage HVC Alkmaar / Niederlande als Referenz aufgeführt werden. Die Anlage besteht aus einer SNCR mit nachgeschalteter Trockensorption inkl. Rezirkulation und Befeuchtung, einem Wärmetauscher und einem Nasselektrofilter mit integrierter saurer und basischer Stufe vor Kamin. Eine NH_3 -Strippanlage ist in dieser Anlage nicht realisiert.

Variante V8-1

Für die Variante V8-1 liegen noch keine Referenzen vor. Von Seiten des SNCR-Anlagenbauers liegt die Aussage vor, dass diese Variante durchführbar sei. Eine schriftliche Bestätigung hierzu steht noch aus.

Variante V9

Als Referenz für Variante V9 kann näherungsweise das MHKW Wuppertal aufgeführt werden. Die Anlage besteht aus einem Kessel mit nachgeschaltetem E-Filter, einer Trockensorptionsstufe mit Gewebefilter und Rezirkulation (inkl. Befeuchtung), einem Aktivkoks-Filter und einer nachgeschalteten SCR-Anlage.

4 Zusammenfassung

In der Vergangenheit wurde die ete.a GmbH bereits mit umfangreichen Konzeptbetrachtungen für Rauchgasreinigungsverfahren hinter Müllverbrennungsanlagen durch die heutige E.ON Energy from waste (EEW) beauftragt. Der vorliegende Beitrag basiert auf einer weitergehenden Konzeptbetrachtung durch die von EEW neu definierten Randbedingungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Emissionsgrenzwerte. Es werden drei weitere Verfahrensvarianten vorgestellt und bewertet wobei folgende Emissionswerte gelten:

- < 17. BImSchV
- $\text{NO}_x < 100 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$
- $\text{NH}_3\text{-Schlupf} < 10 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$, Ziel: $< 5 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$

In allen drei Varianten erfolgt die Entstickung über eine SNCR-Anlage. Die Abscheidung der sauren Schadgaskomponenten erfolgt über eine konditionierte Trockensorption bzw. einen zweistufigen Wäscher. Da ein $\text{NH}_3\text{-Schlupf}$ von $< 10 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.tr.}}$ (Ziel: $< 5 \text{ mg/m}^3$) mit einer SNCR-Anlage bei der geforderten NO_x -Reingaskonzentration nicht immer gesichert erreicht werden kann, ist eine nachfolgende Reinigungsstufe zur Reduzierung der NH_3 -Fracht unerlässlich. Diese besteht in den vorgestellten Varianten aus einer Wäscherstufe (V7, V8, V8-1) bzw. einem Aktivkohlsorbentfilter (V9). Bei den Variante V7 und V8 wird durch einen NH_3 -Stripper das im Abwasser enthaltene Ammoniak abgeschieden und erneut im SNCR-Verfahren verwendet. Variante V8-1 ist gegenüber Variante V8 mit Ausnahme des Verzichtes auf die NH_3 -Strippung identisch aufgebaut. Hier wird das im Abwasser gelöste Ammoniak direkt im SNCR-Verfahren als Treibwasser verwendet. Die NH_3 -Senke liegt bei Variante V8-1 folglich im Kessel bzw. im SNCR-Verfahren.

Tabelle 8 zeigt zusammenfassend die verfahrenstechnischen Vor- und Nachteile der vorgestellten Varianten sowie die entsprechenden Kosten. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergibt, dass alle drei vorgestellten Varianten kostenseitig auf einem nahezu gleichen Niveau von ca. 4.200.000 €/a (inkl. Kapitaldienst) liegen.

Aus verfahrenstechnischer Sicht bietet die Variante V8-1 die meisten Vorteile, da vergleichsweise wenige Komponenten erforderlich sind. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Hauptabscheidung der sauren Schadgase von der Trockensorption auf die Wäscherstufen zu verlagern. Dadurch kann auf mögliche Schwankungen in den Betriebsmittelpreisen oder Reststoffentsorgungskosten reagiert werden. Außerdem weist diese Variante das größte Abscheidepotential auf. Dies bedeutet, dass noch geringere Reingaswerte als die in dieser Bewertung festgeschriebenen Werte für die sauren Schadgase, jedoch bei entsprechend höheren Betriebsmittelverbräuchen erreicht werden können.

Tab. 8: Zusammenfassung der verfahrenstechnischen Bewertung sowie der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Kriterium	Variante V7	Variante V8	Variante V8-1	Variante V9
garantierte Emissionswerte	< 17. BImSchV; NOx<100 mg/m ³ , NH ₃ -Schlupf < 5 mg/m ³	< 17. BImSchV; NOx<100 mg/m ³ , NH ₃ -Schlupf < 5 mg/m ³	< 17. BImSchV; NOx<100 mg/m ³ , NH ₃ -Schlupf < 5 mg/m ³	< 17. BImSchV; NOx<100 mg/m ³ , NH ₃ -Schlupf < 5 mg/m ³
verfahrenstechnische Vorteile	- geringer Reststoffanfall	- Verlagerung der Hauptabscheidung von der Trockensorption auf die Wäscherstufe möglich (auf preisl. Schwankungen der Betriebsmittel- und Reststoffentsorgungskosten kann flexibel reagiert werden)	- Verlagerung der Hauptabscheidung von der Trockensorption auf die Wäscherstufe möglich (auf preisl. Schwankungen der Betriebsmittel- und Reststoffentsorgungskosten kann flexibel reagiert werden) - wenig Komponenten durch Wegfall des NH ₃ -Strippers - keine zusätzlichen Betriebs-, Invest- und Wartungskosten durch Wegfall des NH ₃ -Strippers	- geringer Druckverlust - keine Dampfahne am Kamin sichtbar - niedrige Wartungs- und Instandhaltungskosten - katalytische Nachentstickung am Aktivkohle-Filter (geringste NOx-Werte) - zusätzliches Potential zur Reduzierung von Hg, Dioxine/Furane und C _{org.} - vergleichsweise wenig Komponenten
verfahrenstechnische Nachteile	- Dampfahne am Kamin Lösung: zusätzlicher DaGaVo - viele Komponenten - zusätzlicher Dampfverbrauch durch NH ₃ -Stripper - hohe Wartungs- und Instandhaltungskosten - evtl. Überschreitung der Staubreingaskonzentration durch Tropfenmitriss - rauchgasberührte Komponenten nach Wäscher sind korrosionsgeschützt auszuführen	- aufwendige Anlagentechnik - hoher Druckverlust - Dampfahne am Kamin; Lösung: zusätzlicher DaGaVo o. RG-Kondensation - viele Komponenten - zusätzlicher Dampfverbrauch durch NH ₃ -Stripper - Ansäuerung der ersten Wäscherstufe zur NH ₃ -Abscheidung notwendig - evtl. Überschreitung der Staubreingaskonzentration durch Tropfenmitriss - rauchgasberührte Komponenten nach Wäscher sind korrosionsgeschützt auszuführen	- hoher Druckverlust - Dampfahne am Kamin Lösung: zusätzlicher DaGaVo o. RG-Kondensation - Ansäuerung der ersten Wäscherstufe zur NH ₃ -Abscheidung notwendig - evtl. Überschreitung der Staubreingaskonzentration durch Tropfenmitriss - rauchgasberührte Komponenten nach Wäscher sind korrosionsgeschützt auszuführen - keine Referenzanlagen für Nutzung des Abwassers aus Wäscher als Treibwasser für NH ₃ -Eindsüung in SNCR	- zusätzlich kostenintensive MgO-dotierte Aktivkohle notwendig → geringe Auswahl an Lieferanten - hoher sicherheitstechnischer Aufwand (Ex-Schutz) - keine Referenzanlage für NH ₃ -Abscheidung mit Festbettfilter
Betriebskosten [€a]	2.343.241	2.610.729	2.544.889	2.705.069
Wartungs- und Instandhaltung [€a]	390.000	378.000	333.000	348.000
Investitionskosten [€]	13.000.000	12.600.000	11.100.000	11.600.000
Gesamtkosten inkl. Kapitaldienst [€a]	4.490.841	4.692.249	4.378.609	4.621.389

Mit Bezug auf die eingangs vorgestellte Auswahl-Matrix der betrachteten Verfahrenskonzepte sind die neu hinzugekommenen Varianten in den oberen linken Quadranten einzuordnen, der die derzeitigen Anforderungen der EEW widerspiegelt. Variante V3 und V8-1 sind im Grunde identisch, da in der zurückliegenden Betrachtung der NH3-Stripper monetär nicht betrachtet wurde. Bei einem direkten Vergleich ist innerhalb dieses Quadranten die Variante V3 die günstigste Variante, wobei in V8-1 die aktuellen Preise berücksichtigt sind und im Vergleich somit die derzeitig günstigste Variante darstellt.

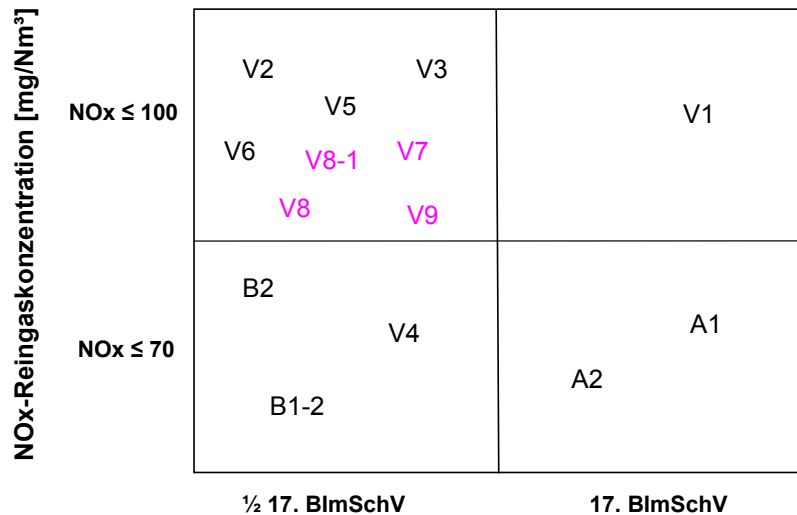


Abb. 5: Darstellung möglicher Verfahrensvarianten für unterschiedliche Emissionswerte. Die in der vorliegenden Studie vorgestellten Varianten sind farblich markiert

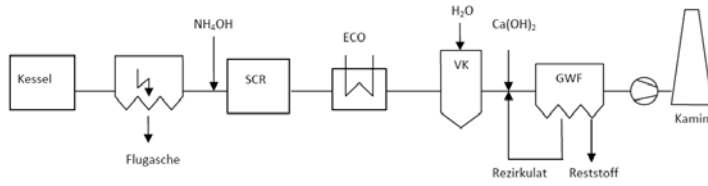


Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH
 Heinrich-Neeb-Straße 17
 35423 Lich
 ☎ 06404-658164
 📠 06404-658165
 ✉ info@ete-a.de
www.ete-a.de

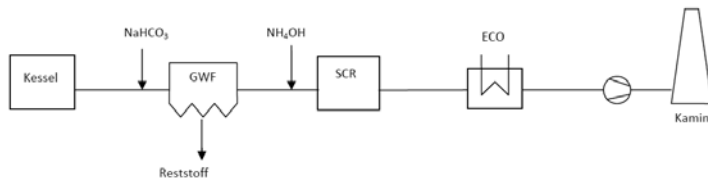


E.ON Energy from Waste AG
 Dipl.-Ing. Jürgen Hüsch
 Schöninger Straße 2-3
 38350 Helmstedt
 ☎ 05251-18 46 83
 📠 05251-18 23 79
 ✉ juergen.huesch@eon-energie.com
www.eon-energie.com

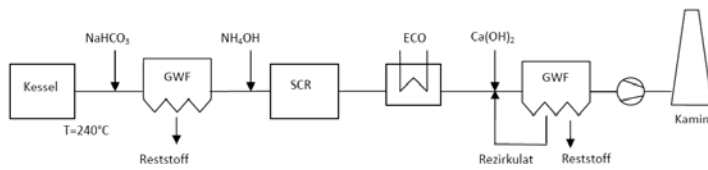
Anhang



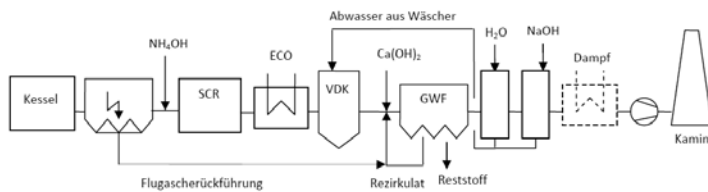
Variante A1



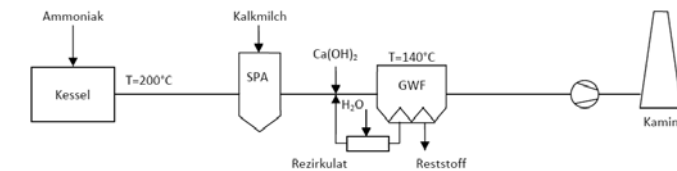
Variante A2



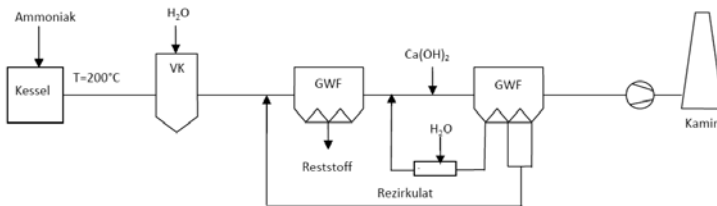
Variante B2



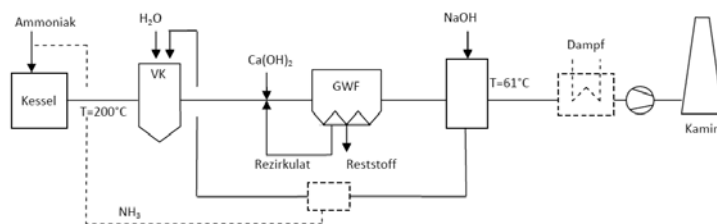
Variante B2-1



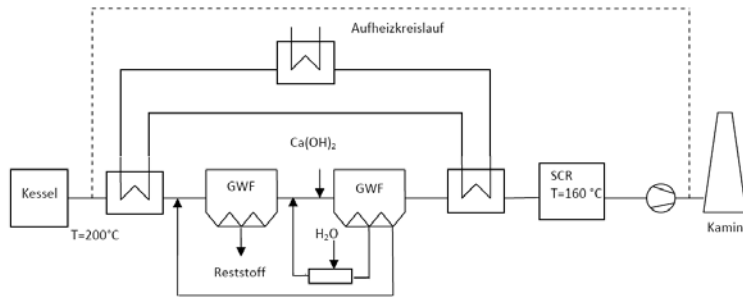
Variante V1



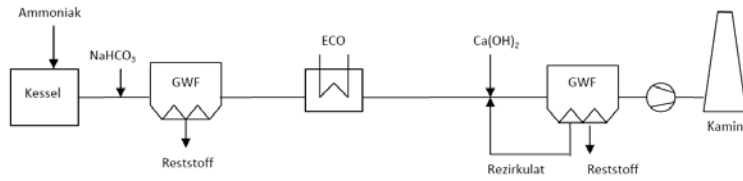
Variante V2



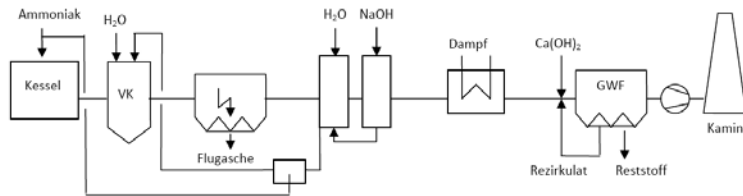
Variante V3



Variante V4



Variante V5



Variante V6