

Abschlussbericht

Stofflicher Verbleib des NH_3 bei SNCR-Verfahren auf dem Rauchgas- und Reststoffweg in deutschen Müllverbrennungsanlagen -Ammonia Masking in SNCR Plants-

Projektträger:

VGB-Forschungstiftung (Essen)

VGB-Nr. 380

erstellt durch:

CUTEC – Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum

-Forschungszentrum für Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz der TU Clausthal-

Leibnizstr. 21 + 23

38678 Clausthal-Zellerfeld

Unter Mitwirkung von:

Dr.-Ing. Sabine Weineck

Dr.-Ing. Stefan Vodegel

Clausthal-Zellerfeld, den 11. September 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Ausgangssituation und Aufgabenstellung	5
2.1	Problemdarstellung	5
2.2	Zielsetzung	7
2.3	Lösungsweg und Bearbeitungsschritte	7
3	Vorgehen und Durchführung	9
3.1	Betrachtete Linien	9
3.2	Grundsätzliche Vorgehensweise	9
3.3	Kontinuierliche Gasanalyse	11
3.4	Feststoff- und Flüssigkeitsproben	11
3.5	Bilanzierung	11
4	Betrachtung der einzelnen Linien	13
4.1	Linie 4	13
4.2	Linie 5	21
4.3	Linie 3	27
4.4	Linie 1	33
4.5	Linie 2	39
4.6	Linie 6	47
5	Anlagenübergreifende Darstellung der Ergebnisse	53
5.1	Verbleib des NH ₃ auf dem Rauchgasweg	53
5.2	Effizienz der Reduktionsmittelnutzung	58
5.3	Verzögerte Ammoniakfreisetzung (Memory-Effekte)	58
5.4	Entsorgung der Reststoffe	59
5.5	Umweltauswirkungen einer NO _x -Grenzwertabsenkung	59
5.6	Fazit	62
6	Danksagung	63
7	Anhang	64
7.1	Abkürzungsverzeichnis	64
7.2	Abbildungsverzeichnis	65
7.3	Tabellenverzeichnis	68
7.4	Literaturverzeichnis	69

1 Zusammenfassung

Zum 2. Mai 2013 trat eine Änderung der 17. BImSchV in Kraft. Eingeführt wurde u.a. eine Absenkung der Emissionsgrenzwerte für Stickoxide und die Einführung von Grenzwerten für den Ammoniak-Schlupf am Kamin für bestehende und neue Abfallverbrennungsanlagen. Die Verordnung stellt besonders für Ausführungen mit der weit verbreiteten SNCR-Technologie eine Herausforderung dar. Im Forschungsvorhaben *Stofflicher Verbleib des Ammoniak bei SNCR-Verfahren auf dem Rauchgas- und Reststoffweg in deutschen Müllverbrennungsanlagen* ließ die VGB-Forschungsstiftung (Essen) Auswirkungen der weiteren Absenkung der NO_x -Grenzwerte ermitteln. Durch Messungen an sechs bestehenden Müllverbrennungsanlagen (Abk.: MVA) und EBS-Kraftwerken und deren wissenschaftlicher Auswertung sollten ferner Prognosen zur Möglichkeit weiterer Grenzwertabsenkungen ermittelt werden. Es waren nach Möglichkeit drei Zustände zu beproben: 1. Betrieb mit anlagenspezifischem NO_x -Sollwert, 2. Betrieb mit abgesenktem Sollwert, 3. kurzzeitiger Betrieb ohne SNCR.

Ein Einfluss der eingesetzten Entstickungstechnik war im Gegensatz zur verwendeten Rauchgasreinigung nicht zu erkennen, zumal sich die Anlage mit harnstoffbetriebener SNCR noch in der Optimierungsphase befand. Wie zu erwarten, konnten die Anlagen mit Gaswäschern im Abgasweg eine Grenzwertabsenkung sehr gut verkraften. Der Ammoniak schlupf stieg anlagenspezifisch von ca. 0,8 auf ca. 1,5 mg/Nm^3 . Zulässig ist ein Grenzwert von 10 mg/Nm^3 als Tagesmittelwert. Bei den Anlagen mit trockener oder quasi-trockener Abgasreinigungstechnologie aber war ein deutlicher Anstieg des Ammoniak schlupfes auf den Bereich von 6 bis 9 mg/Nm^3 zu verzeichnen, wenn der NO_x -Sollwert in Regionen von 100 bis 120 mg/Nm^3 abgesenkt wurde. Ursache ist, dass eine Grenzwertabsenkung zu einer deutlichen Steigerung des Reduktionsmitteleinsatzes, d.h. Ammoniakwassers oder Harnstofflösung, als Betriebsmittel der SNCR führte. Dabei sank der Wirkungsgrad des Reduktionsmittels hinsichtlich der gewünschten Reduktionsreaktionen signifikant; der Anteil der Nebenreaktionen nahm zu. Eine Erhöhung des Einsatzes an Reduktionsmittel kann also zu verminderten NO_x -Emissionen führen. Neben einer Erhöhung des Schlupfes sind allerdings deutlich höhere Ammoniumgehalte u.a. in den Kesselaschen und Filterstäuben sowie im HCl-Wäscher der Abgasreinigung die Folge. Die bisher genutzten Wege der Reststoffentsorgung wären damit noch nicht gefährdet, aber individuell zu prüfen. Während der Untersuchungen an den Anlagen im bestimmungsgemäßen Betrieb konnte keine verzögerten Ammoniakfreisetzungen festgestellt werden.

Es ist zu beachten, dass das Reduktionsmittel hergestellt und transportiert werden muss. Dabei werden CO_2 -Emissionen freigesetzt. Bei einer Absenkung des Grenzwertes um 50 mg/Nm^3 NO_x liegen diese für die Ammoniakherstellung und einen angesetzten Transport über 100 km bei 1 bis 2 kg CO_2 pro t Müll zusätzlich. Gegenüber dem durchschnittlichen CO_2 -Äquivalent von 383 kg pro t Müll ist dies zwar gering, aber erwähnenswert. Mit der Reduzierung des NO_x -Grenzwertes der 17. BImSchV um 50 mg/Nm^3 würde der Anteil der Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerke an den deutschen Gesamt- NO_x -Emissionen nur von ca. 1,0 auf 0,6 % sinken.

Insgesamt waren neben den Erkenntnisgewinnen in Details vergleichende Auswertungen an verschiedenen Anlagen mit unterschiedlichen Abgasreinigungskonfigurationen möglich. Es wurde eine gute Datenbasis geschaffen, um auf künftige Fragen zu NO_x - und NH_3 -Grenzwertabsenkungen Antworten geben zu können. Bisher für Einzelanlagen vorliegende Kenntnisse wurden auf eine breitere Basis gestellt.

Abstract

An amendment to the 17th Federal Immission Control Regulation (“Bundes-Immissions-Schutz-Verordnung”, BImSchV) came into force on May 2, 2013. New provisions include a reduction of the emission limits for nitrogen oxides and the introduction of limits for ammonia slip from the chimneys of existing and new waste incineration plants. The Regulation poses a particular challenge to plants running the widely employed SNCR technology. In its research project on *the material location of ammonia in SNCR processes in flue gas and residual material channels at German waste incineration plants*, the VGB research foundation (Essen) investigated the effects of the further reduction of NO_x limits. Measurements at six existing waste incineration and RDF power plants, with subsequent scientific evaluation of the results, additionally sought to obtain predictions for the possibility of further reductions in limit values. The aim was for the experiments to test three states as far as possible: 1. Operation at the plant-specific NO_x limits; 2. Operation at reduced limits; 3. Short-time operation without SNCR.

As opposed to the flue gas cleaning process, no influence of the employed denox technique was detectable, especially in view of the fact that the plant featuring urea-based SNCR was still in its optimisation phase. As expected, the plants with gas scrubbers in their flue systems were very well able to withstand a reduction in limits. The ammonia slip rose on a plant-specific basis from approximately 0.8 to approximately 1.5 mg/Nm³. The permissible daily average limit value is 10 mg/Nm³. However, the plants featuring quasi-dry flue gas cleaning technology recorded significant increases in ammonia slip to a range from 6 to 9 mg/Nm³ when the nominal NO_x was reduced to 100 to 120 mg/Nm³. The reason is that lowering limit values results in a significant increase in reducing agent, i.e. ammonia water or urea solution, as the SNCR agent. The efficiency of the reducing agent was significantly impaired in terms of the desired reduction reactions; the number of secondary reactions increased. So increasing the reducing agent input can lower NO_x emissions. Other consequences, alongside increased slip, included much higher ammonium content in the boiler ash and filter dust and in the HCl scrubber of the flue gas cleaning system. Thus, the residual material disposal channels previously used would not yet be at risk of elimination, but would need to be reviewed on a case-by-case basis. In the course of plant testing in regular operation, no delayed ammonia release could be detected.

It should further be noted that the reducing agent has to be produced and transported. CO₂ emissions are produced in the production process. With a 50 mg/Nm³ reduction of the NO_x limit, the emissions for ammonia production and an estimated transport distance of 100 km are an additional 1 to 2 kg of CO₂ per tonne of waste. This is low compared to the average CO₂ equivalent of 383 kg/t_w. It is worthy to note that with a reduction of the NO_x-limit in the 17. BImSchV of 50 mg/Nm³ the percentage of Germany's total NO_x emissions attributable to waste incineration and RDF power plants decreases only from approximately 1.0 to 0.6 %.

All in all, in addition to the detailed findings evaluations were possible on various plants featuring different flue gas cleaning system configurations. A good data base was established in order to provide answers to future questions relating to reductions in NO_x and NH₃ limits. Existing knowledge in relation to single plants has been placed on a broader foundation.

2 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

2.1 Problemdarstellung

Die Entstickung der Abgase von Abfallverbrennungsanlagen ist ein wesentlicher Schritt der Abgasreinigung. Durch die im Mai 2013 in Kraft getretene novellierte 17. BImSchV [1] werden gegenüber der Fassung von 2009 einige Vorgaben geändert, die zwar zunächst nur für Neuanlagen gelten, mit bestimmten Übergangsfristen aber auch auf bestehende Anlagen Anwendung finden werden. Einen Überblick über die für Entstickungssysteme relevanten Änderungen gibt Tabelle 2.1–1.

Demnach wird der zulässige Tagesmittelwert der Stickoxid¹-Konzentration für bestehende Abfallverbrennungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mindestens 50 MW ab dem 01. Januar 2019 von 200 mg/m_N³ auf 150 mg/m_N³ gesenkt. Bereits ab dem 01. Januar 2016 wird für bestehende Anlagen, bei denen eine SCR oder SNCR² eingesetzt wird, außerdem eine Begrenzung der Ammoniak-Emissionen auf 10 mg/m_N³ neu eingeführt. Demgegenüber findet der zulässige Jahresmittelwert der Stickoxid-Emissionen von 100 mg/m_N³ auf bestehende Anlagen keine Anwendung.

Tabelle 2.1–1: NO_x- und NH₃-Grenzwerte in mg/m_N³ für Abfallverbrennungsanlagen nach 17. BImSchV

		Neuanlagen		bestehende Anlagen						
Halbstundenmittelwert ¹⁾	NO _x	400	[§8-(1)-2.-f)]	400	ab 01.01.2019	[§28-(4)]	bis dahin	400		
	NH ₃ ²⁾	15	[§8-(1)-2.-i)]	15	ab 01.01.2016	[§28-(1)-1.]	bis dahin	-		
Tagesmittelwert ¹⁾	NO _x	≥ 50 MW ³⁾	150	[§8-(1)-1.-f)]	≥ 50 MW ³⁾	150	ab 01.01.2019	[§28-(4)]	bis dahin	200
		< 50 MW ³⁾	200	[§8-(2)-2.]	< 50 MW ³⁾	200	ab 01.01.2016	[§28-(1)-1.]	bis dahin	
	NH ₃ ²⁾	10	[§8-(1)-1.-i)]	10	ab 01.01.2016	[§28-(1)-1.]	bis dahin	-		
Jahresmittelwert ⁴⁾	NO _x	100		[§10-(1)-1.]	> 50 MW ³⁾	-	seit 02.05.2013	[§28-(6)]	bis dahin	(100) ⁵⁾
					≤ 50 MW ³⁾	-	-	[§10-(3)]	-	-
	NH ₃	-								

1) Im Normzustand nach Abzug der Feuchte [§2-(6)], bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 11% [§8-(3)]. Bei Stoffen, die durch eine Abgasreinigungseinrichtung gemindert und begrenzt werden, darf die O₂-Umrechnung der Messwerte jedoch nur für die Zeiten erfolgen, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt [§17-(1)].

2) Sofern SNCR oder SCR eingesetzt wird.

3) Feuerungswärmeleistung.

4) Arithmetischer Mittelwert der nach Anlage 4 der BImSchV validierten Tagesmittelwerte [§17-(4)].

5) Ausgenommen waren Anlagen, die den Betrieb vor dem 31.12.2013 aufgenommen haben [17. BImSchV 2009 §17a-(3)-2.], für die bis zum 31. Dezember 2010 ein vollständiger Genehmigungsantrag gestellt worden war oder mit deren Errichtung vor dem 31. Dezember 2011 begonnen worden war [17. BImSchV 2009 §17a-(3)-1.].

Die Angaben beziehen sich auf die 17. BImSchV vom 02.05.2013 in der Fassung der Juris GmbH (www.juris.de) Werte für Abfallverbrennungsanlagen. Für Abfallmitverbrennungsanlagen gelten abweichende Grenzwerte.

Bei Anlagen mit SCR-Entstickung [2] ist anzunehmen, dass die neuen Grenzwerte ohne besonderen Aufwand eingehalten werden können. Die SCR-Stufe arbeitet bei Temperaturen von 200°C bis 300°C und ist meistens am Ende der Abgasreinigung (AGR) angeordnet. Aufgrund der Anordnung kann die NO_x-Rohgaskonzentration, nach der die Entstickungsmittelmenge primär geregelt wird, am Eintritt bzw. in der Nähe des Katalysators gemessen werden und ist somit nur mit einer geringen Totzeit behaftet. Außerdem ist dort das Rohgas besser durchmischt als im 1. Zug (Eindüsung bei SNCR-Anlagen), sodass über dem

¹ Summe aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid

² SCR = selective catalytic reduction; SNCR = selective non-catalytic reduction

Querschnitt kaum Konzentrationsunterschiede vorliegen. Darüber hinaus wird die Eintrittstemperatur am Katalysator geregelt und ist somit relativ konstant. Des Weiteren ist anzunehmen, dass die katalytischen Reduktionsmechanismen die Oxidation von NH_3 zu NO_x minimieren bzw. den Abbau von NH_3 begünstigen.

Dadurch entspricht das NO_x -Rohgassignal recht genau dem tatsächlichen, momentanen Istwert, der NH_3 -Überschuss vor der Entstickungsstufe ist entsprechend gering, die Betriebsbedingungen sind optimal, das Reduktionsziel kann gut erreicht werden und ein Ammoniak-Schlupf ist kaum vorhanden.

Bei SNCR-Anlagen [3,4,5,6,7,8,9] muss hingegen die Zufuhr des Reduktionsmittels verfahrensbedingt im heißen Bereich (ca. 950 - 1.050°C) erfolgen. Dies wird meist mit Lanzensystemen (mehrere Lanzen in verschiedenen Ebenen bzw. bewegliche Lanzen, an mehreren Seitenwänden) im ersten Kesselzug zwischen Sekundärluftzugabe und Überhitzer realisiert. An dieser Position ist die Messung der NO_x -Rohgaskonzentration vor allem wegen der Staubbelastung kaum möglich. Auch ist das Rohgas wenig durchmischt, weshalb ungleichmäßige Konzentrationsverteilungen vorliegen, die zudem durch Feuerlage, Sekundärluftmenge und -verteilung usw. beeinflusst sind. Eine einzelne Messposition wäre daher ohnehin wenig repräsentativ. Als primäre Regelgröße für die Entstickungsmittelmenge wird daher entweder der NO_x -Gehalt am Kesselende, am Kamin oder Kombinationen daraus herangezogen [4], die gegenüber der SCR mit einer größeren Totzeit behaftet sind. Eine zusätzliche Anforderung besteht darin, dass die Entstickungsmittelzufuhr nur in einem bestimmten Temperaturfenster den gewünschten Effekt hat. Da an den Lanzenpositionen nicht nur die Konzentrationen, sondern auch die Temperaturen inhomogen sind, muss neben der Gesamtmenge auch die Verteilung des Entstickungsmittels (zwischen den Ebenen und Seitenwänden) entsprechend angepasst werden. Hierzu werden als sekundäre Regelgrößen verschiedene weitere Größen herangezogen (Feuerlage, lokale Temperaturen, akustische Temperaturfeldmessung, u. Ä.) [5, 8].

Durch all diese Randbedingungen ist beim SNCR-Verfahren ein deutlich größerer Mess- und Regelungsaufwand erforderlich, um die Entstickung optimal zu betreiben. Zwar scheint ein NO_x -Grenzwert von 150 mg/m_N^3 durch erhöhte Zufuhr von Entstickungsmittel grundsätzlich erreichbar [4, 5, 7, 9], jedoch ist davon auszugehen, dass sich dabei der Ammoniak-Schlupf stark vergrößert [6, 3].

Betreiber bestehender Abfallverbrennungsanlagen mit SNCR-System werden somit durch die neue 17. BImSchV in eine Schere zwischen NO_x - und NH_3 -Grenzwert gezwungen.

Das Einhalten des NH_3 -Grenzwertes wird noch durch einen weiteren Aspekt erschwert. Es ist bekannt, dass Ammoniak mit anderen Abgaskomponenten (z. B. HCl , SO_2) Salze bilden kann (Ammoniumsulfat, Ammoniumhydrogensulfat, Ammoniumchlorid u. ä.), die bei Temperaturen zwischen 150 und 300°C als Feststoffe ausfallen. Diese Salze sammeln sich innerhalb der Anlagen an und werden diskontinuierlich mit den anderen zurückgehaltenen bzw. abgeschiedenen Feststoffen (Asche, Filterstäube) ausgetragen. Der zu betrachtende NH_3 -Schlupf setzt sich also aus dem gasförmigen Ammoniak im Abgas („gasförmiger Schlupf“), den gelösten Ammoniumverbindungen in den flüssigen Reststoffen der Wäscher („flüssiger Schlupf“) und den eben genannten festen Salzen („fester Schlupf“) zusammen.

Bei Erhöhung der Abgastemperatur oder Veränderung der Abgaszusammensetzung können

sich diese Salze zersetzen, wobei der gespeicherte Ammoniak wieder entweicht. Auf ähnliche Weise kann innerhalb von Wäschern Ammoniak gespeichert und freigesetzt werden, z. B. bei Änderungen des pH-Wertes. Eine zeitweise hohe NH_3 -Konzentration am Kamin muss demnach nicht unbedingt durch eine ungenügende Wirkung des Entstickungssystems zu diesem Zeitpunkt begründet sein, sondern kann auch durch Freisetzung von „gespeichertem“ Ammoniak verursacht werden [10].

Hieraus ergeben sich für die Betreiber von MVA einige wesentliche Fragen, die bisher nicht oder nur ansatzweise geklärt sind:

2.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, folgende Fragen zu untersuchen:

1. *Wo verbleibt das NH_3 auf dem Abgasweg vom 1. Zug bis zum Kamin?*
2. *Wie ändert sich die Effizienz der Reduktionsmittelnutzung bei abgesenktem NO_x -Regelwert?*
3. *Gibt es Memory-Effekte?*
4. *Wie hoch sind negative ökologische Folgen einer weiteren NO_x -Grenzwert-Absenkung?*

Antworten auf diese Fragen – oder zumindest Beiträge dazu – sollten durch umfangreiche Messungen und Probenahmen an verschiedenen Anlagen sowie begleitende Betriebsdatenanalysen gefunden werden.

2.3 Lösungsweg und Bearbeitungsschritte

Idee des Vorhabens war es, Messungen an verschiedenen Müllverbrennungsanlagen mit unterschiedlichen Abgasreinigungskonfigurationen an mehreren Stellen durchführen zu lassen. Dabei erklärten sich sechs Betreiber mit jeweils einer Anlage zur Kooperation bereit.

Die Abgasreinigungswege deutscher Müllverbrennungsanlagen bestehen zwar aus einer begrenzten Anzahl an Baugruppen, die aber in unterschiedlichster Weise verschaltet sein können. Als einfaches illustrierendes Beispiel wird deshalb zunächst eine Abgasreinigung betrachtet, die nur aus einem Filter und einem Wäscher besteht.

Abbildung 2.3-1 zeigt schematisch einen einfachen Aufbau einer solchen Rauchgasreinigungsstrecke.

Es war davon auszugehen, dass von der Ammoniak-Schlupf-Problematik vor allem Anlagen mit trockener oder quasi-trockener Abgasreinigung betroffen sind, da es bei Anlagen mit Wäschern wahrscheinlich ist, dass der Ammoniak dort weitestgehend vollständig gelöst wird. Insofern ist es sinnvoll, Anlagen mit nasser Abgasreinigung vergleichsweise zu betrachten.

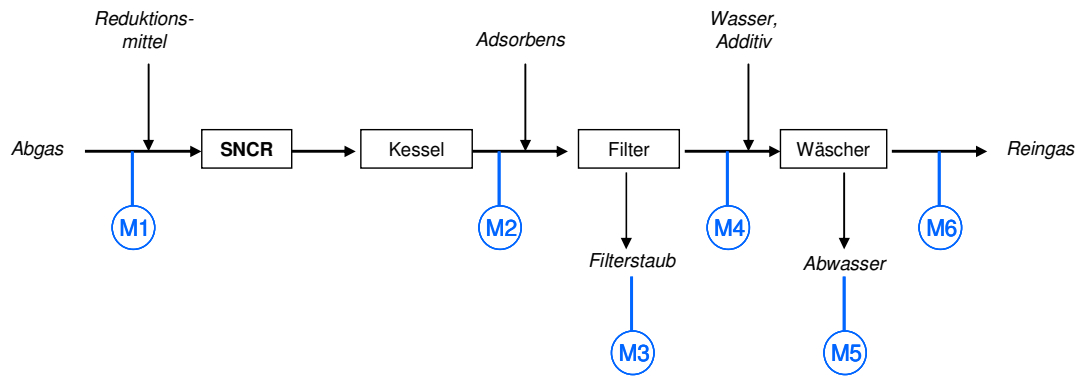


Abbildung 2.3-1: Schematische Darstellung einer Rauchgasreinigung mit SNCR, Filter und Wäscher.

Um den Verbleib des eingesetzten Reduktionsmittels zu bestimmen, sollten entlang der Rauchgasreinigungsstrecke alle in Frage kommenden Medien untersucht werden. In Abbildung 2.3-1 sind dazu die möglichen Messstellen blau eingezeichnet.

3 Vorgehen und Durchführung

3.1 Betrachtete Linien

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss, in dem die VGB-Forschungsstiftung, sieben Betreiber von MVA-Anlagen, zwei MVA-Anlagenbauer sowie zwei Hersteller von Entstickungssystemen vertreten waren, wurden sechs Linien ausgewählt, an denen jeweils das beschriebene Messprogramm durchgeführt wurde.

Es wurde bei der Auswahl der Linien darauf geachtet, bezüglich Reduktionsmittel, SNCR-Systeme, Rauchgasreinigungssysteme und der Kesselgeometrie eine möglichst große Vielfalt abzubilden. Dennoch gibt es Apparatekombinationen, die nicht berücksichtigt werden konnten.

Einige charakteristische Eigenschaften der ausgewählten Linien sind in der Betrachtung der einzelnen Linien in Kapitel 4 zusammengestellt.

Im Folgenden werden die zu untersuchenden Linien zur Anonymisierung mit Linie 1 bis Linie 6 bezeichnet.

3.2 Grundsätzliche Vorgehensweise

Jedes Anlagenteil (z. B. Kessel, Sprühabsorber oder Gewebefilter) wurde einzeln untersucht. So wurden z. B. beim Kessel in der Gasphase gleichzeitig unterhalb der SNCR-Ebene und am Kesselaustritt die Komponenten NO_x , NH_3 , CO , CO_2 , O_2 , Feuchte sowie HCl und SO_2 gemessen. Während dieser Messungen wurden Feststoffproben des Kesselstaubes (z. B. 2./3. Zug und 4. Zug) entnommen. Die Feststoffe wurden im Labor, falls erforderlich, gemahlen, geteilt und eluiert. Vom Eluat wurde der pH-Wert gemessen und die NH_4^+ -Konzentration mittels Ionenchromatographie bestimmt. Die oben beschriebene Vorgehensweise stellt so eine systematische Untersuchung jedes Anlagenteils sicher. Darüber hinaus wurde das Messprogramm planmäßig für den anlagenspezifischen Normalbetrieb (im Folgenden auch als Ist-Zustand bezeichnet) sowie darauffolgend mit abgesenktem NO_x -Regelwert durchgeführt. Sowohl Ist-Zustand als auch der Zustand mit abgesenktem Regelwert sind anlagenspezifisch und bilden einen großen Konzentrationsbereich ab. Zur Bestimmung der Rohgas- NO_x -Konzentration wurden Netzmessungen unterhalb der SNCR-Ebene durchgeführt. Dafür wurden speziell angefertigte Probenahmesonden verwendet, deren Außenmantel zur thermischen Stabilität gekühlt und deren Innenrohr beheizt ist, um eine Kondensation der Abgase auszuschließen. Bei sehr großen Kesselgeometrien ergab sich allerdings neben den üblichen Konzentrationsschwankungen - verursacht durch örtliche und vor allem zeitliche Schwankungen bedingt durch die Inhomogenität des Brennstoffes - noch zusätzlich die Problematik, dass der Querschnitt messtechnisch nicht überall vollständig abgedeckt werden konnte. Dort sind die Grenzen vor allem durch den vorhandenen Platz an den Messstellen gesetzt. Im Laufe des Vorhabens konnte zusätzlich während der Messungen am Kessel ein mehrstündiger Betrieb ohne SNCR in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, die Rohgaskonzentrationen nach dem Kessel und damit an einem kleineren Querschnitt bei niedrigeren Temperaturen und guter Durchmischung zu messen.

Die Messungen konnten an den verschiedenen Messstellen nicht gleichzeitig durchgeführt werden. Stattdessen wurden die einzelnen Stufen nacheinander beprobt, wobei jeweils

gleichzeitig am Ein- und Austritt die notwendige Analysentechnik installiert war. Teilweise mussten hierfür betreiberseitig zunächst Messstutzen nachgerüstet bzw. wieder nutzbar gemacht werden.

Damit die Messergebnisse der einzelnen Stufen untereinander verglichen werden können, müsste über die gesamte Dauer der Messkampagne ein möglichst gleichmäßiger Anlagenbetrieb gegeben sein. Bei einem Zeitraum von etwa zwei Wochen ist es aber nicht möglich, den dafür benötigten Vorrat an homogenisiertem Brennstoff vorzuhalten. Daher wurden die Messungen im üblichen Betrieb durchgeführt, wobei die Linien vom Kranfahrer mit gut durchmischten Abfallchargen beschickt wurden. Dies geht zwar in geringem Maße zu Lasten der Vergleichbarkeit der einzelnen Stufen, aber um dies auszugleichen, wurde bei der Auswertung anhand einiger Leitparameter der Feuerung (Dampfproduktion, Gehalte von O_2 und CO) überprüft, ob der jeweilige Betriebszustand ausreichend repräsentativ gewesen ist.

Die Gaskonzentrationen am Ein- und Austritt der einzelnen Stufen der Rauchgasreinigung wurden mit kontinuierlichen Gasanalysatoren über einen Zeitraum von mehreren Stunden gemessen. Dabei wurde an der letzten Stufe begonnen und dann jeweils nach Ablauf der Messzeit das hintere Analysensystem umgebaut und am Eintritt der davorliegenden Stufe installiert. Von den an der jeweiligen Stufe anfallenden Reststoffen (Filterstaub, Waschlösung, Kesselasche) wurden im selben Zeitraum diskontinuierlich Proben gezogen.

So wurde schrittweise, Stufe für Stufe, von hinten nach vorne, die gesamte Rauchgasreinigung vermessen.

Für die Bestimmung des NO_x -Gehaltes direkt nach der Verbrennung, also noch ohne Entstickung (Roh- NO_x), wurden unterhalb der SNCR auf Grund der großen Querschnitte Netzmessungen durchgeführt. Bei diesen Messungen wurden die einzelnen Messpunkte an den verschiedenen Messstutzen nacheinander angefahren. Hierfür konnten die Messstutzen zur Überprüfung der Verbrennungsbedingungen nach 17. BImSchV im ersten Zug genutzt werden. Allerdings ist häufig die maximale Eintauchtiefe der Gasentnahmesonden durch die äußeren Platzverhältnisse beschränkt. Um den größtmöglichen Bereich abdecken zu können, wurden Sonden in drei verschiedenen Längen gefertigt.

Das gesamte Messprogramm wurde zweimal durchgeführt: Im ersten Durchlauf mit dem anlagenüblichen NO_x -Sollwert der SNCR, im zweiten mit einem niedrigeren Sollwert und nun am Kessel beginnend entlang der Abgasreinigungsstrecke (Abk.: AGR). Da im zweiten Fall mehr Reduktionsmittel zugeführt werden muss, um diesen Sollwert zu erreichen, ist mit einem Anstieg von NH_3 im Rauchgas zu rechnen.

An mehreren Linien war es außerdem möglich, Messungen bei vollständig abgeschalteter SNCR durchzuführen. Die Abschaltung erfolgte nach Absprache mit der zuständigen Aufsichtsbehörde unter der Auflage, dass der Tagesmittelwert für NO_x nicht überschritten wird. Somit konnten NO_x -Rohgaswerte sowohl unterhalb der SNCR als auch am Kesselende ermittelt werden.

3.3 Kontinuierliche Gasanalyse

Für die kontinuierliche Analyse der Rauchgaskomponenten vor der SNCR wurde eine Gasentnahmelanze in den Kessel eingebracht, die außen mit Wasser gekühlt und innen elektrisch beheizt ist. Die Kühlung dient dazu, die Sondenstabilität auch bei hohen Rauchgastemperaturen (bis ca. 1.000°C) aufrecht zu erhalten. Es muss aber gleichzeitig verhindert werden, dass das Messgas kondensiert, weil sonst wasserlösliche Komponenten wie Ammoniak im Kondensat abgeschieden und die Messungen dadurch verfälscht würden. Deshalb ist das eigentliche Entnahmerohr im Sondeninneren beheizt, sodass der Taupunkt des Rauchgases nicht unterschritten wird. Zwischen dem gekühlten Außenmantel und dem beheizten Innenrohr der Sonde liegt eine Dämmschicht, welche die beiden Bereiche thermisch voneinander trennt. Für alle weiteren Messstellen liegt die Rauchgastemperatur unterhalb von 250°C. Deshalb sind die dort eingesetzten Sonden lediglich innen beheizt und gegen das Außenrohr gedämmt.

Vom Austritt der beiden Sonden wird jeweils das Messgas über beheizte Leitungen und eine beheizte Messgasaufbereitung (MGA) einem portablen Multikomponenten Fourier-Transformations-Infrarot-Gasanalysator (FTIR - Gasmet DX 4000) mit beheizter Messzelle zugeführt. Somit wird der gesamte Weg des Messgases bis zum Messzellenaustritt auf einer Temperatur von 180°C gehalten. Mit den FTIR-Geräten werden die Komponenten NH₃, HCl, SO₂, NO, NO₂, H₂O, CO und CO₂ analysiert. Anschließend wird das Messgas jeweils über eine gekühlte MGA weiteren Gasanalysatoren zugeführt. Mit diesen Standardgeräten wurden vor allem O₂, aber auch CO und CO₂ gemessen, sowie NO, NO₂ und SO₂ im UV-Wellenlängenbereich zur Absicherung der mit dem FTIR gemessenen Konzentrationen. Um die Messungen bei den hohen Staubgehalten im Rohgas durchführen zu können, sind auf dem Gasweg mehrere Filter installiert.

3.4 Feststoff- und Flüssigkeitsproben

Die Feststoffproben (Kesselasche 2./3. und 4. Zug, evtl. Querzug und Eco, Reststoff von Zyklon und Sprühabsorber, Filterstäube) wurden nah am Entstehungsort (z.B. am Sendegefäß) entnommen. Die Reststoffmassenströme werden nicht immer getrennt erfasst, sondern teilweise in gemeinsamen Silos zusammengeführt. Daher sind die Analyseergebnisse in diesen Fällen schwierig zu bewerten. Die Proben wurden in gasdicht verschließbare Gläser gefüllt und im Labor falls notwendig zerkleinert und mit verdünnter Schwefelsäure eluiert. Anschließend wurde der Ammoniumgehalt der Eluate durch Ionenchromatografie bestimmt.

Die Proben aus den Wäschern bzw. den einzelnen Wäscherstufen wurden filtriert und wie das Eluat der Feststoffe untersucht.

3.5 Bilanzierung

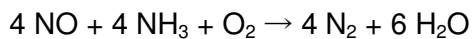
Im Folgenden werden drei Anteile des Ammoniak-Schlupfes näher betrachtet:

- gasförmig, durch die Gasmessungen vor und hinter jedem Anlagenteil bestimmt
- fest, durch die Probenahmen der Kesselaschen und der Reaktionsprodukte - hier Filterstäube und Sprühabsorberreststoffe - ermittelt und
- flüssig, durch Probenahmen aus den Wäschern bestimmt.

Ammoniak wird hauptsächlich über das in der SNCR eingesetzte Reduktionsmittel in das

Rauchgas eingebracht oder es entsteht aus diesem durch chemische Reaktionen. Demgegenüber ist das aus der Feuerung stammende Rohgas-NH₃ vernachlässigbar. Das zugeführte Ammoniak wird einerseits bei der Reduktion der Stickoxide verbraucht, andererseits wird es selbst oxidiert. Der verbleibende NH₃-Strom wird im weiteren Verlauf teilweise in die Reststoffe eingebunden und mit diesen in Form von Ammoniumverbindungen aus dem Prozess abgeführt. Nur was danach noch im Rauchgas verblieben ist, wird als NH₃-Schlupf über den Kamin in die Umgebung geleitet.

Die für die Reduktion der Stickoxide verbrauchte Ammoniak-Menge lässt sich aus dem Rauchgasvolumenstrom und der Differenz der NO_x-Konzentrationen vor SNCR (Roh-NO_x) und nach Kessel abschätzen. Dabei wird von der Brutto-Reaktionsgleichung



ausgegangen.

Hiermit lässt sich außerdem berechnen, welche NH₃-Konzentration theoretisch vorliegen müsste, wenn das Reduktionsmittel überhaupt nicht oxidiert würde. Der dazu benötigte Anteil des Reduktionsmittels wird im Folgenden mit „Reduktion“ oder „Reduktionsmittelgrad“ bezeichnet. Für die Berechnung dieses Anteils ist der Roh-NO_x-Gehalt die entscheidende Größe. Diese Konzentration wurde über die Netzmessungen unterhalb der SNCR bestimmt. Da je nach Anlagengröße keine vollständige Abdeckung über der Kesselbreite erreicht werden konnte, wurden im Verlauf des Vorhabens zusätzliche Messungen beim Betrieb der Anlage ohne SNCR hinzugezogen. Sowohl der Massenstrom des Reduktionsmittels als auch die Roh-NO_x-Konzentrationen unterliegen im Prozess sehr starken Schwankungen, was dazu führt, dass es sich bei der „Reduktion“ um eine sehr sensible Größe handelt.

Aus dem gemessenen NH₃-Gehalt am Kesselende und den über die Reststoffe abgeführten Ammoniakströmen kann die Konzentration nach der SNCR berechnet werden. Im Vergleich mit der theoretischen Konzentration nach der Reduktion folgt daraus der Anteil des Reduktionsmittels, der hier als „sonstige Reaktionen“ bezeichnet wird. Dieser Anteil setzt sich zusammen aus dem Anteil des Reduktionsmittels, der nicht an der Entstickung teilnimmt und oxidiert wird sowie dem der festen und flüssigen Reststoffe - je nach Anlagenkonfiguration - die nicht in das System zurückgeführt werden. Die auf dem Rauchgasweg mit den Feststoffen abgeführten NH₃-Anteile sind mit großen Unsicherheiten behaftet, weil die für die Bilanz benötigten Massenströme nicht genau ermittelt werden können. Rauchgasseitige Messungen als Staubkonzentration, z. B. im 2./3. Zug, sind wegen der hohen Temperaturen und großen Querschnitte kaum möglich. Vor dem Gewebefilter sind sie nicht ausreichend repräsentativ, da wegen der hohen Partikelbelastung des Rauchgases nur sehr kurze Probenahmezeiten möglich sind. Aus diesen Gründen wurden diese Anteile auf der Feststoffseite bilanziert. Die dazu notwendigen Feststoffmassenströme wurden aus den Betreiberdaten für die Silofüllstände ermittelt. Hier wiederum treten andere Widrigkeiten auf. Beispielsweise werden Sprühabsorber- und Filterreststoffe oft zusammen in ein Silo gefördert, wobei die Anteile vom Betreiber nur geschätzt werden können. Die Silofüllstände werden nur ungenau erfasst, außerdem werden sie in unregelmäßigen Abständen teilweise entleert. Daher wurden bei der Bilanzierung Tagesmittelwerte der Feststoffmassenströme zugrunde gelegt. Für die Bestimmung dieser Massenströme mussten diverse Annahmen getroffen werden, die in enger Abstimmung mit den Anlagenbetreibern erfolgten.

4 Betrachtung der einzelnen Linien

Tabelle 3.5–1 zeigt eine Übersicht über die Messzeiträume an den verschiedenen Linien. Zusätzlich sind die Zeiten für den Ist-Zustand und den abgesenkten Zustand mit den entsprechenden NO_x-Regelwerten (RW), sowie die des Betriebes ohne SNCR – falls durchgeführt- eingetragen.

Tabelle 3.5–1: Übersichtstabelle zu den Messungen an den einzelnen Linien

Linie	Messzeitraum	Anlagenzustand	NO _x -Regelwert [mg/m ³]
1	16.02.-25.02.2016	Ist-Zustand Betrieb ohne SNCR abgesenkter NO _x -RW	150
	16.02.-19.02.2016		
	19.02.2016		-
	22.02.-25.02.2016		100
2	12.04.-21.04.2016	Ist-Zustand Betrieb ohne SNCR abgesenkter NO _x -RW	180
	12.04.-15.04.2016		
	15.04.2016		-
	18.04.-21.04.2016		120
3	01.12.-09.12.2015	Ist-Zustand Betrieb ohne SNCR abgesenkter NO _x -RW	185
	01.12.-04.12.2015		
	04.12.2015		-
	07.12.-09.12.2015		100
4	11.03.-18.03.2015	Ist-Zustand abgesenkter NO _x -RW	95
	11.03.-14.03.2015		
	16.03.-18.03.2015		70
5	11.08.-20.08.2015	Ist-Zustand abgesenkter NO _x -RW	175
	11.08.-14.08.2015		
	17.08.-20.08.2015		120
6	16.08.-24.08.2016	Ist-Zustand Betrieb ohne SNCR abgesenkter NO _x -RW	185
	22.08.-24.08.2015		
	18.08.2016		-
	16.08.-18.08.2016		100

Die Ergebnisse an den einzelnen Linien werden nachfolgend in der Chronologie der Messkampagnen dargestellt.

4.1 Linie 4

Zunächst werden die wichtigsten Daten der untersuchten Linie in einer Kurzbeschreibung zusammengefasst.

4.1.1 Kurzbeschreibung der projektrelevanten Anlagentechnik

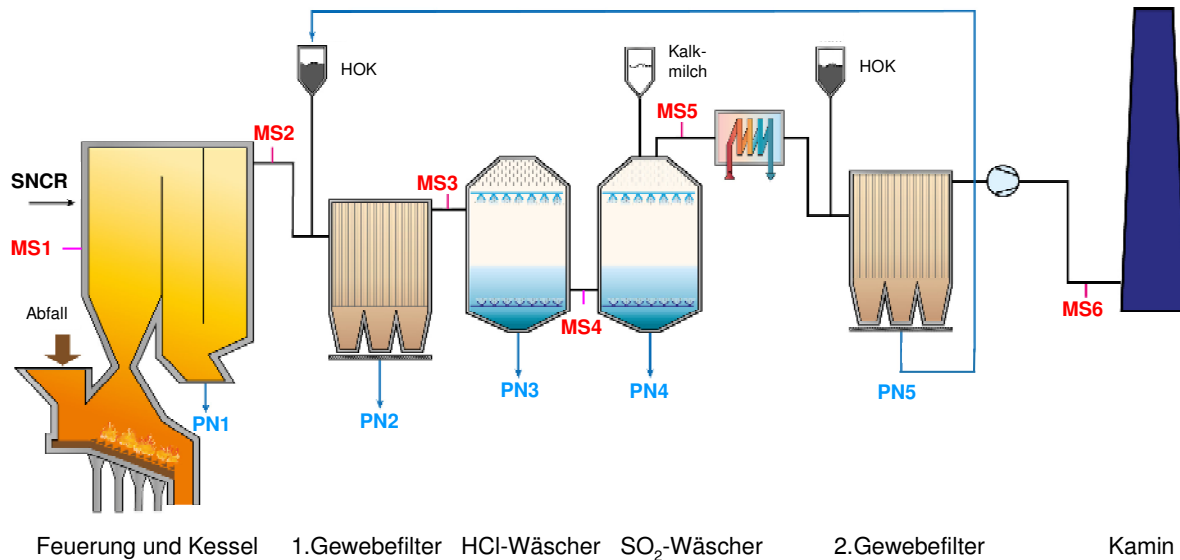


Abbildung 4.1-1: Anlagenfließbild der Linie 4.

Rostfeuerung

Feuerung:	Stufen-Vorschubrost, Mittelstromfeuerung
Durchsatz, max:	23 t/h
Heizwert:	6.500-14.000 kJ/kg
Müllmenge (Auslegungspkt.)	21,5 t/h bei 9650 (kJ/kg)
Feuerungswärmeleistung:	60 MW
Dampferzeugerleistung:	72 t/h

Kessel

- 4-Zug Vertikal-Kessel
- 1./2. Zug: Strahlungszüge
- 3. Zug: Überhitzer
- 4. Zug: Economiser

SNCR

Hersteller:	Steinmüller
Reduktionsmittel:	Ammoniakwasser, 25%
Eindüseebenen:	3 (Ebene 1: 29,7 m, Ebene 2: 33,3 m, Ebene 3: 37,6 m)
Düsengruppen je Ebene:	2 (rechte und linke Seitenwand)
Anzahl Düsen je Gruppe:	6
Treibmedium:	Dampf
Reduktionsmittelmenge	= $f(\text{NO}_x \text{ max}(\text{NO}_x \text{ Rohgas}, \text{NO}_x \text{ Reingas}))$, NO _x -Regelwert = 95 mg/Nm ³
Schaltung der Düsengruppen	= $f(T_{\text{Feuerraum}} \text{ (AGAM auf 30 m)}, \text{NH}_3\text{-Schlupf})$, Regelwert = 10 mg/Nm ³ NH ₃ es können auch Düsengruppen unterschiedlicher Ebenen gleichzeitig angesteuert werden

4.1.2 Versuchsprogramm an Linie 4

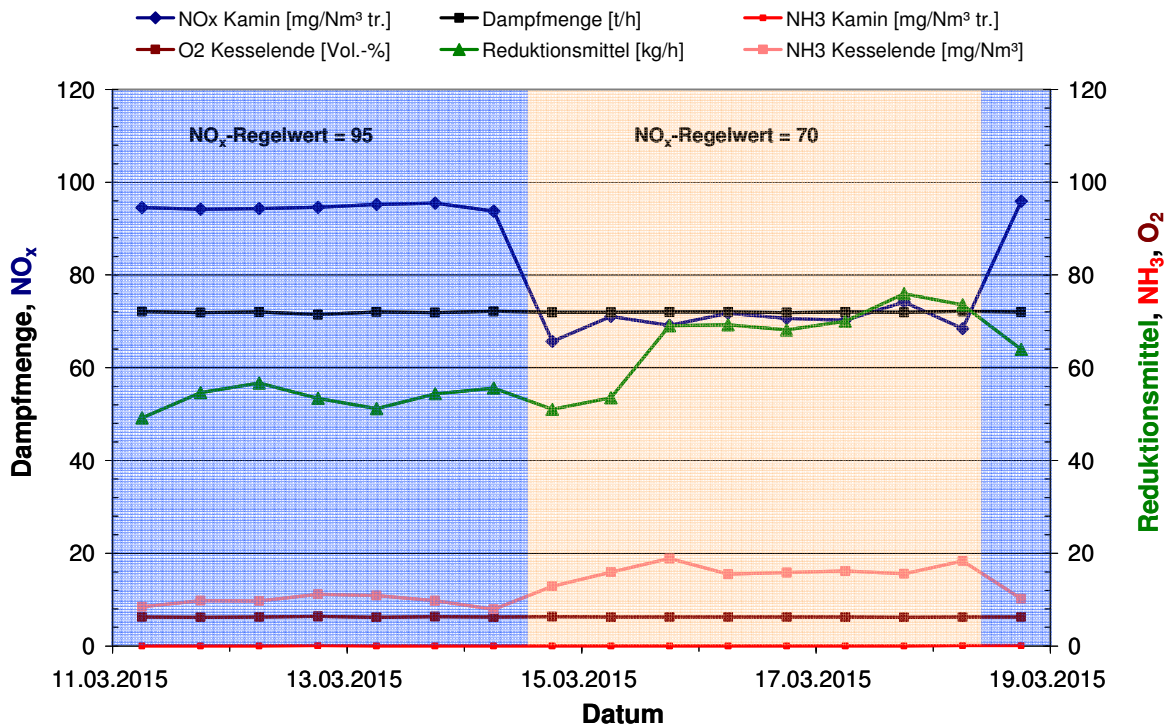


Abbildung 4.1-2: Versuchsprogramm an Linie 4.

In Abbildung 4.1-2 sind für den Zeitraum der Versuchsdurchführung neben den Konzentrationsverläufen für NO_x am Kamin, NH_3 nach Kessel und am Kamin, sowie von O_2 hinter dem Kessel auch die entsprechenden Massenströme von Reduktionsmittel und Dampf als 12-Stunden-Mittelwerte aufgetragen. Die beiden Versuchseinstellungen sind gut zu erkennen:

1. NO_x -RW = 95 mg/m^3 ; Ist-Zustand der Anlage – blau hinterlegt
2. NO_x -RW = 70 mg/m^3 ; abgesenkter NO_x -Regelwert

Anhand der Verläufe von Sauerstoffkonzentration und Dampfmenge ist ersichtlich, dass die Anlage während des gesamten Messzeitraumes in einem repräsentativen Zustand betrieben wurde. Allerdings fällt auf, dass der Reduktionsmittelverbrauch nach der Umstellung der Anlage auf einen NO_x -Regelwert (Abk.: RW) von 70 mg/m^3 erst einmal konstant bleibt bzw. sogar leicht fällt, obwohl die NO_x -Konzentration um bis zu 30% gesunken ist. Eine Erklärung hierfür wird später noch gegeben.

4.1.3 Messungen an Linie 4

Im Ist-Zustand der Anlage, also bei einem NO_x -Regelwert von 95 mg/m^3 , wurden die Messungen am zweiten Gewebefilter beginnend entgegen der Rauchgasströmung von einer Anlagenkomponente zur nächsten durchgeführt. Beim abgesenkten Zustand, mit einem NO_x -RW von 70 mg/m^3 , wurde entgegengesetzt verfahren, also vom Kessel ausgehend in Strömungsrichtung. Die Umstellung aller Anlagen wurde freitags nach den letzten

Messungen durchgeführt. Am Montag ist mit den Messungen fortgefahren worden, so dass sich in der Rauchgasreinigung ein stationärer Zustand einstellen konnte.

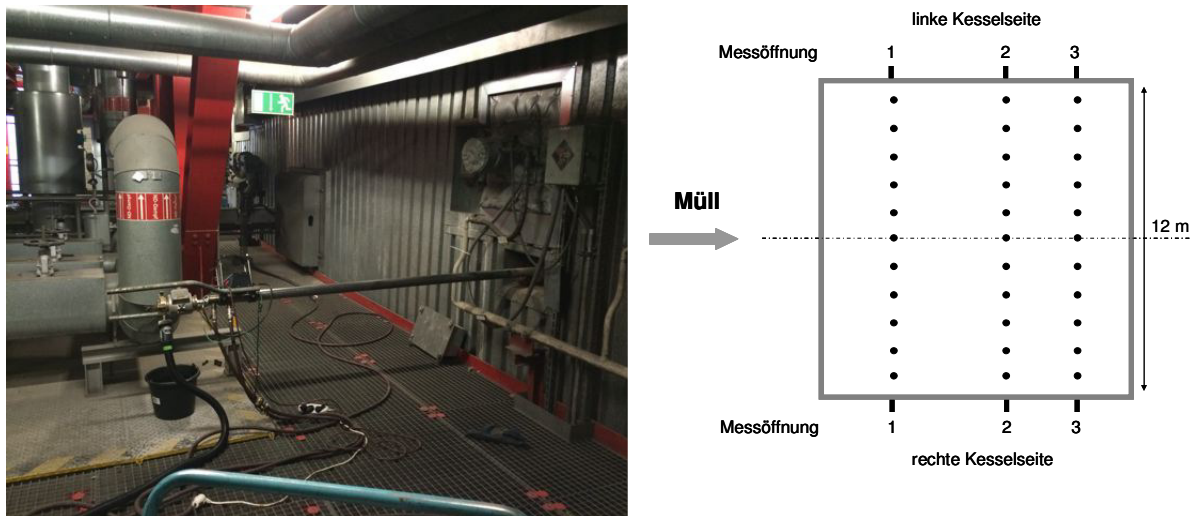


Abbildung 4.1-3: Foto der der wassergekühlten und elektrisch beheizten Messsonde beim Betrieb an der linken Kesselseite (Messöffnung 3) sowie eine schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie4.

Für die Bestimmung des Roh-NO_x wurden kontinuierliche Messungen unterhalb der SNCR (MS1 in Abbildung 4.1-1) mit einer wassergekühlt und elektrisch beheizten Sonde durchgeführt. Dafür standen auf der rechten und linken Kesselseite jeweils drei Messstutzen zur Verfügung, die oberhalb der letzten Sekundärluftzugabe und unterhalb der Ebene zur Ammoniakwassereindüsung liegen. Wie aus Abbildung 4.1-3 zu erkennen ist, konnte an dieser Anlage eine gute Querschnittsabdeckung erreicht werden.

In Abbildung 4.1-4 ist der Konzentrationsverlauf für die NO_x-Konzentrationen über der linken Hälfte des Kesselquerschnittes unterhalb der SNCR dargestellt. Die NO_x-Messwerte schwanken in einem weiten Bereich von ca. 200 bis 500 mg/m³. Lediglich am dritten Messstutzen in Kesselwandnähe sind noch höhere Konzentrationen erkennbar. Ansonsten kann bei den verschiedenen Messpositionen kein direkter Zusammenhang zwischen Eintauchtiefe und NO_x-Wert hergestellt werden. Die Inhomogenität des Brennstoffes lässt sich an Messstutzen 3 bei einer Eintauchtiefe der Sonde von 2 m sehr schön erkennen, da dort Schwankungen über den genannten Bereich hinaus auftreten. Für die weiteren Berechnungen wurde aus diesen Werten für beide Anlagenzustände der jeweilige Mittelwert gebildet. Hierbei ergaben sich folgende Werte:

- NO_x-RW = 95 mg/m³ → Roh-NO_x = 380 mg/m³
- NO_x-RW = 70 mg/m³ → Roh-NO_x = 302 mg/m³

Die Tatsache, dass beim abgesenkten NO_x-RW der Roh-NO_x-Gehalt am Tag der Messung ca. 20% unterhalb dem bei Ist-Zustand der Anlage liegt, erklärt auch, warum der Reduktionsmittelverbrauch am 15.03.2015 trotz herabgesetztem RW noch auf dem Level des „normalen“ Betriebes lag (siehe auch Abbildung 4.1-2).

Die kontinuierlich bestimmten NH₃-Konzentrationen in der Gasphase der jeweiligen

Anlagenteile sind später als Mittelwerte bezogen auf die eingesetzte Reduktionsmittelmenge in den Bilanzen dargestellt.

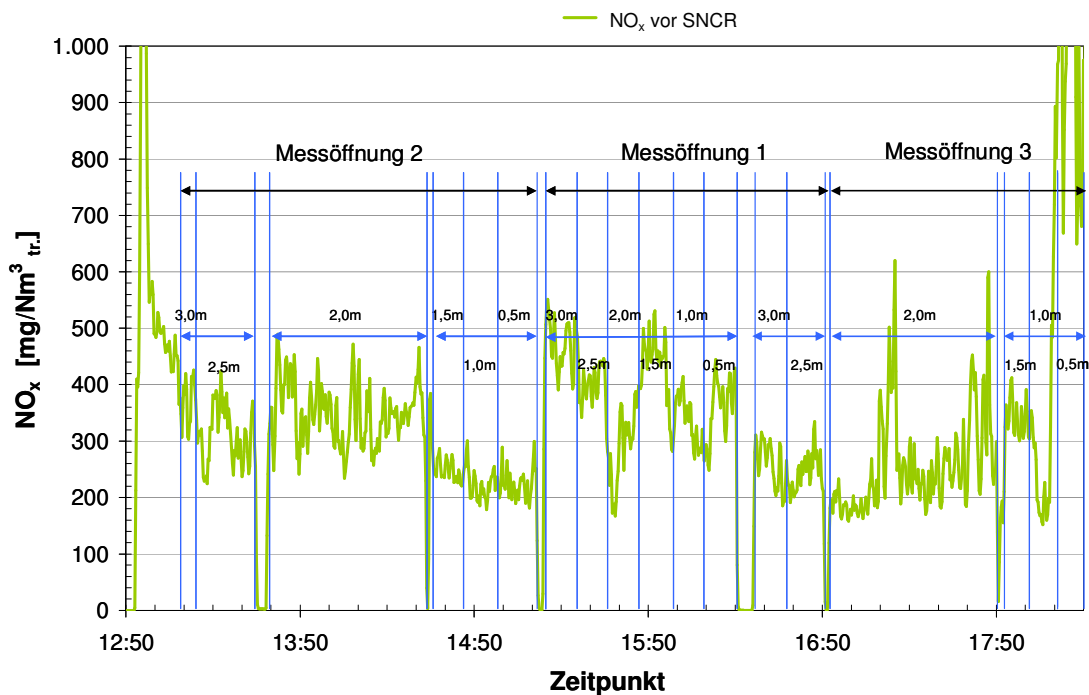


Abbildung 4.1-4: Netzmessung der NO_x -Konzentrationen unterhalb der SNCR an der linken Kesselseite aufgenommen.

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, werden für den festen Anteil des NH_3 -Schlupfes Proben von Kesselasche und Filterstäube benötigt. Diese diskontinuierlichen Proben wurden an den Tagen der Durchführung der Gasanalyse gezogen. Abbildung 4.1-5 zeigt die ermittelten Ammoniumgehalte der Feststoffe sowohl für den Ist-Zustand als auch bei abgesenktem NO_x -RW. Zusätzlich ist die Menge des eingesetzten Reduktionsmittels angegeben. Während die Ammoniumgehalte für die Kesselasche aus dem 2./3.-Zug (41 und 45 mg/kg) und aus dem zweiten Gewebefilter (227 und 229 mg/kg) für beide Anlagenzustände etwa in der gleichen Größenordnung liegen, ist für den Reststoff aus dem Gewebefilter fast eine Verdreifachung der Ammoniumkonzentration festzustellen.

Bei den Ammoniumkonzentrationen in den Wäschern (Abbildung 4.1-6) ist feststellbar, dass die Werte im SO_2 -Wäscher etwa gleich bleiben, während sie sich im HCl-Wäscher nahezu verdoppeln. Die Ausschleusungen aus dem SO_2 -Wäscher (Gipsausschleusung) und die aus dem HCl-Wäscher (Rohsäure) verlassen die hier betrachtete Bilanzgrenze zur Gips- bzw. Salzsäureproduktion.

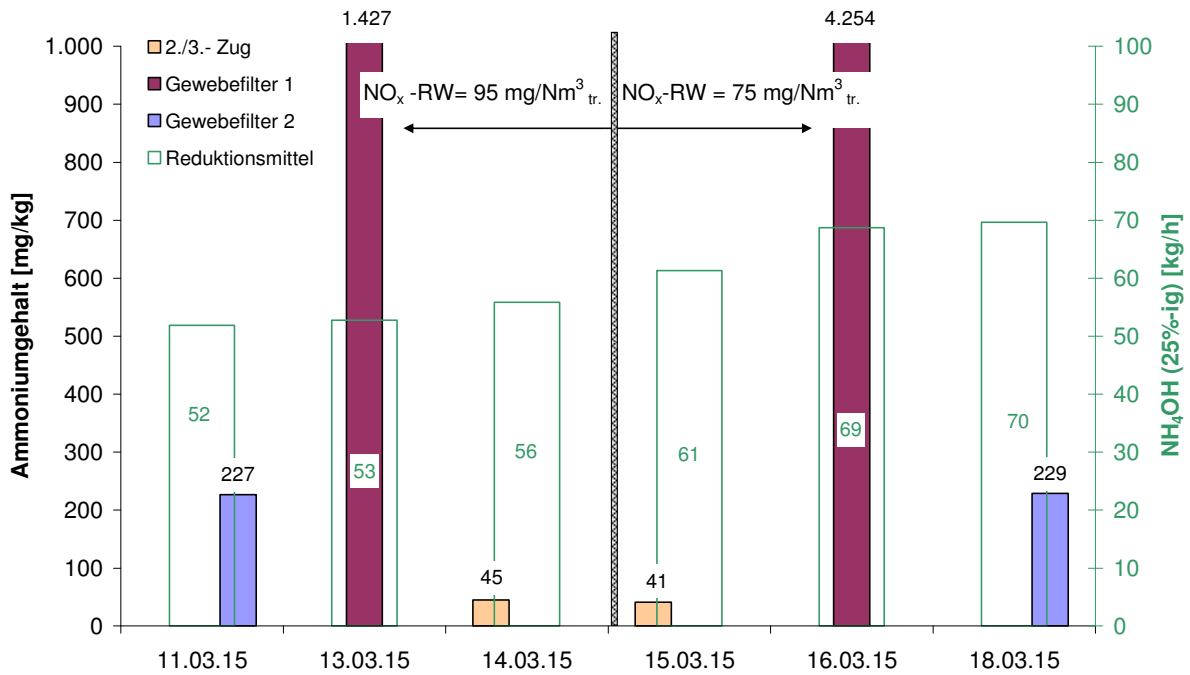


Abbildung 4.1-5: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x-Regelwert für Linie 4.

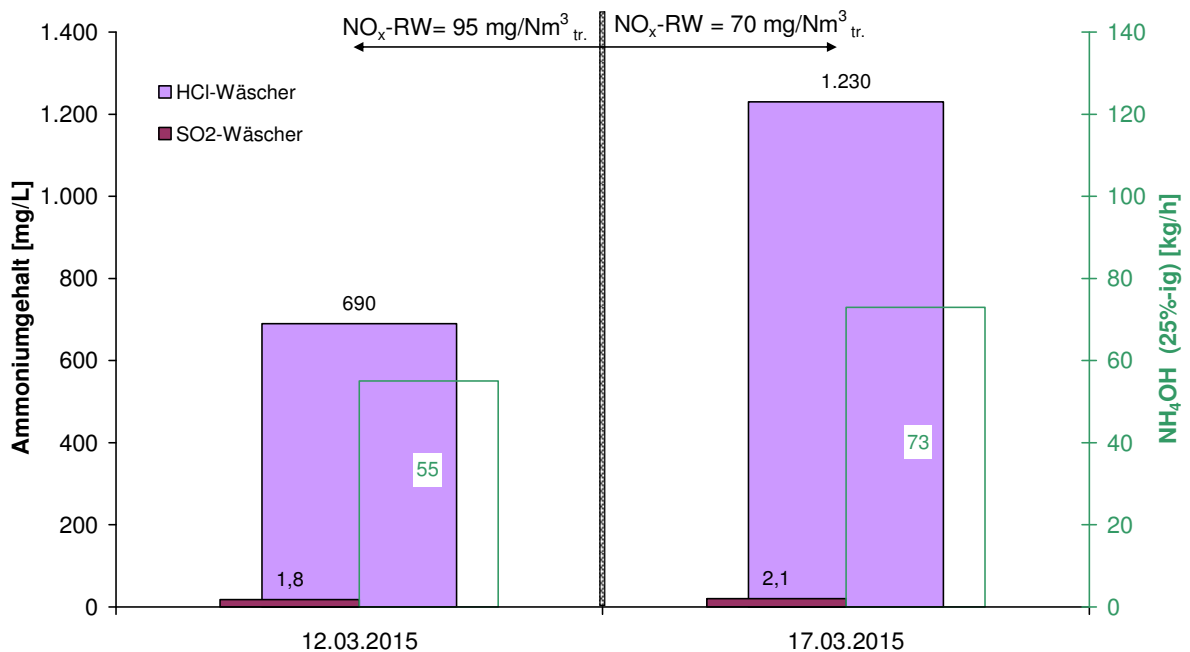


Abbildung 4.1-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den Wäschern sowie eingesetzte Reduktionsmittelmenge für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x-Regelwert für Linie 4.

4.1.4 Bilanzen Linie 4

Ca. 185 m³/h Abluft aus der (hier nicht betrachteten) Ammoniak-Strippung werden der Verbrennung an der Kesselrückwand kurz unterhalb der Sekundärlufteindüsung zugegeben. Die NH₃-Konzentration in diesem Strom ist allerdings nicht bekannt. Inwiefern dieser Ammoniakstrom eventuell eine NO_x-Vorreduktion bewirkt, oder ob er vollständig oxidiert wird, kann hier nicht beurteilt werden.

Für den NH₃-Anteil aus dem SO₂-Wäscher kann keine Aussage gemacht werden, da keine Mengenangaben für die Gipsauschleusung vorliegen. Allerdings ist die Ammoniumkonzentration im SO₂-Wäscher mit 1,8 mg/L im Ist-Zustand bzw. 2,1 mg/L beim abgesenkten NO_x-RW (siehe Abbildung 4.1-6) vernachlässigbar gering gegenüber derjenigen in der 1. Stufe des HCl-Wäschers (690 mg/l beim Ist-Zustand bzw. 1230 mg/L bei abgesenktem NO_x-RW).

Der Term der „sonstigen Reaktionen“ berechnet sich hier mit den Anteilen (Ammoniumkonzentrationen und Massenströmen) der Kesselasche aus 2./3.-Zug, dem des Reststoffes des 1. Gewebefilters, dem des HCl-Wäschers und dem Teil aus der Gasphase hinter dem Kessel.

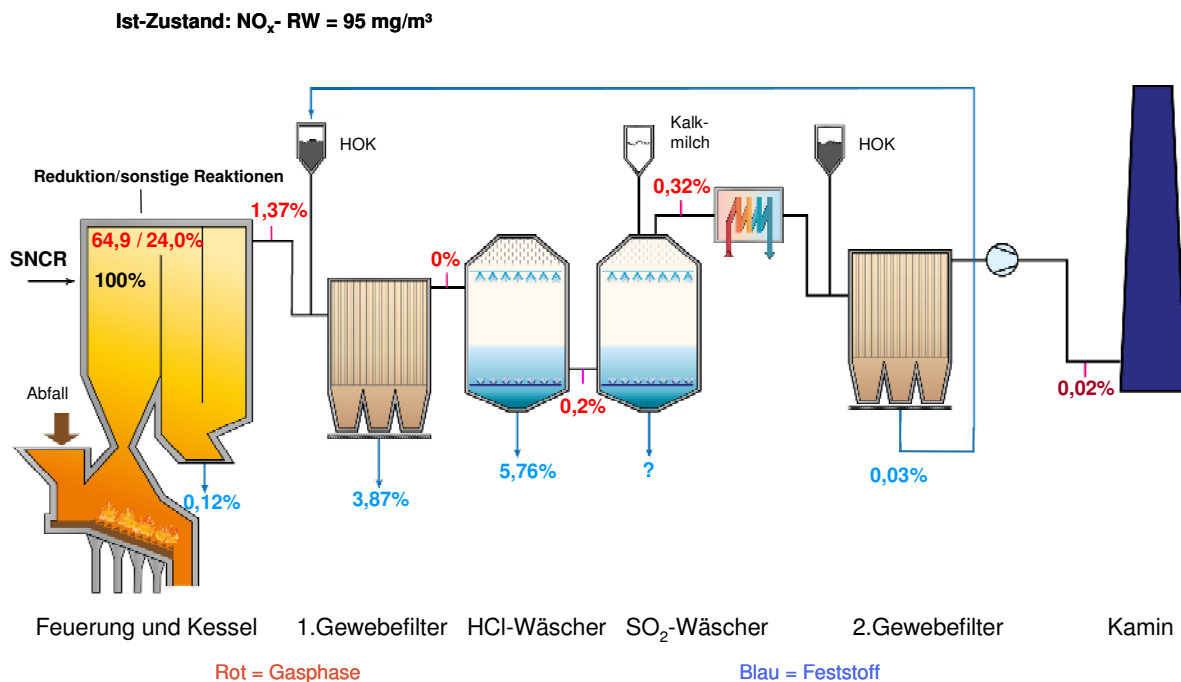


Abbildung 4.1-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 4 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

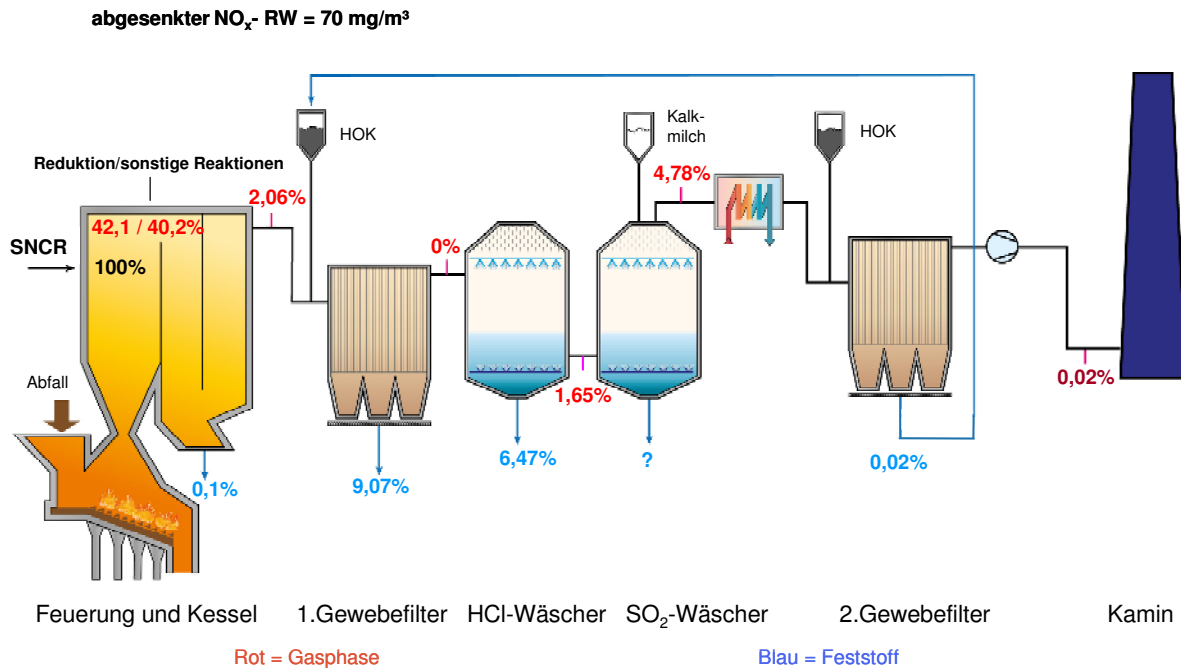


Abbildung 4.1-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 4 für den Zustand mit abgesenktem NO_x -Regelwert.
Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

Die NH_3 -Anteile in der Gasphase bezogen auf das eingesetzte Reduktionsmittel sind Mittelwerte, die im Zeitraum der Messungen des jeweiligen Anlagenteiles – an verschiedenen Tagen – ermittelt wurden. Aus diesem Grund ergibt sich entlang des Rauchgasweges keine schlüssige Wertefolge.

Prinzipiell kann aber festgestellt werden, dass der theoretisch für die Reduktion aufgebrauchte Anteil des Ammoniaks abfällt (von ca. 65 auf ungefähr 42%), während der mit den Reststoffen ausgebrachte Anteil des Ammoniak erkennbar ansteigt. Dies macht sich vor allem beim Filterstaub des 1. Gewebefilters deutlich bemerkbar.

Der gasförmige Schlupf am Kamin ist mit der Absenkung des NO_x -RW nicht angestiegen, was aber mit der vorliegenden Anlagenanordnung in der Rauchgasreinigung auch nicht zu erwarten war.

4.2 Linie 5

4.2.1 Kurzbeschreibung der projektrelevanten Anlagentechnik

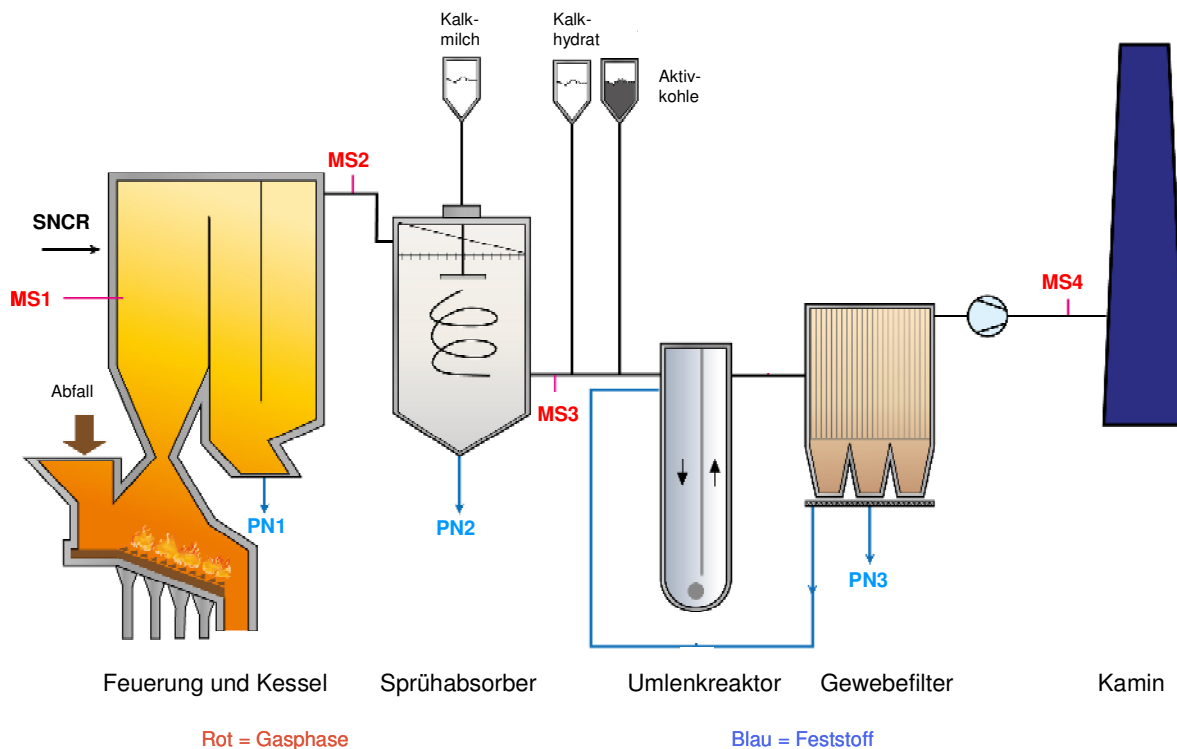


Abbildung 4.2-1: Anlagenfließbild der Linie 5.

Rostfeuerung

Feuerung:	Stufen-Vorschubrost, Mittelstromfeuerung
Mülldurchsatz:	29,2 t/h bei 13,5 MJ/kg (Auslegungspunkt)
Heizwert:	8 – 17,5 MJ/kg
Feuerungswärmeleistung:	52,5 MW _{th}
Dampferzeugerleistung:	58,8 t/h

Kessel

- 4-Zug-Vertikal-Kessel
- 1./2. Zug: Strahlungszüge
- 3. Zug: 5 Überhitzer, 1 Economiser
- 4. Zug :7 Economiser

SNCR

Hersteller:	ERC
Reduktionsmittel:	Ammoniakwasser (25%-ig)
Eindüseebenen:	3; Ebene 1: 20 m, Ebene 2: 25, Ebene 3: 29 m
Düsengruppen je Ebene:	3 (Vorderwand, rechte und linke Seitenwand)
Anzahl Düsen je Gruppe:	2

Treibmittel: Druckluft
 Reduktionsmittelmenge = $f(\text{NO}_x \text{ hinter Kessel, NH}_3\text{-Schlupf})$
 $\text{NO}_x\text{-Regelwert} = 180 \text{ mg/Nm}^3$
 Schaltung der Ebenen = $f(T_{\text{RG}})$, 2 Pyrometer im Feuerraum bei 25 m

4.2.2 Versuchsprogramm an Linie 5

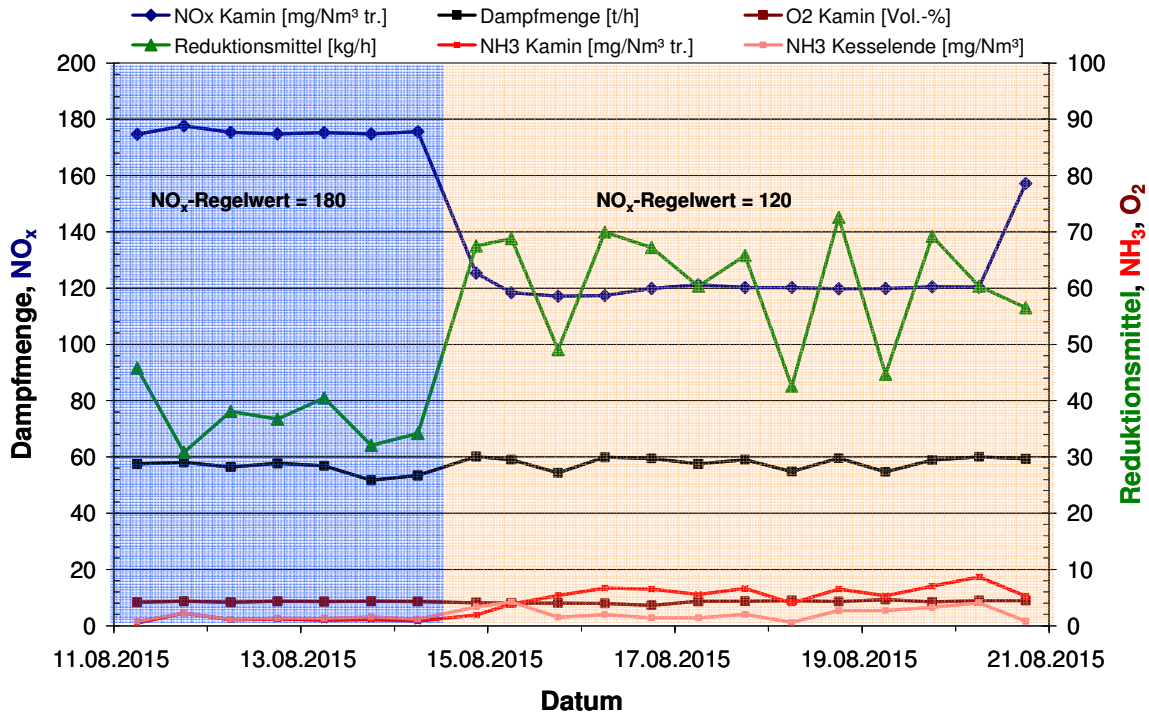


Abbildung 4.2-2: Versuchsprogramm an Linie 5

Abbildung 4.2-2 zeigt das Versuchsprogramm an Linie 5. Man sieht die Konzentrationsverläufe für NO_x am Kamin, NH_3 nach Kessel und am Kamin, sowie von O_2 am Kamin und die entsprechenden Massenströme für das Reduktionsmittel und des Dampfes als 12-Stunden-Mittelwerte über den Versuchszeitraum. Es werden zwei unterschiedliche Versuchseinstellungen deutlich:

1. $\text{NO}_x\text{-RW} = 180 \text{ mg/m}^3$; Ist-Zustand der Anlage – blau hinterlegt
2. $\text{NO}_x\text{-RW} = 120 \text{ mg/m}^3$; abgesenkter NO_x -Regelwert

Anhand der Verläufe von Sauerstoffkonzentration und Dampfmenge ist ersichtlich, dass die Anlage während des untersuchten Zeitraumes in einem repräsentativen Zustand betrieben wurde.

Auffällig ist die Schwankungsbreite für den Reduktionsmitteleinsatz bei abgesenktem NO_x -RW.

4.2.3 Messungen an Line 5

Auch hier wurden die Messungen beim Ist-Zustand der Anlage (hier $180 \text{ mgNO}_x/\text{m}^3$) am Ende der Rauchgasreinigung begonnen und im abgesenkten Zustand entgegengesetzt verfahren.

Abbildung 4.2-3 stellt dar, dass auch bei dieser Anlage die Platzverhältnisse und der Kesselquerschnitt eine gute Abdeckung der Messpunkte ermöglicht haben. Die Netzmessung unterhalb der SNCR in

Abbildung 4.2-4 zeigt, dass die gemessenen NO_x -Konzentrationen vor allem an der rechten Kesselwand sehr großen Schwankungen unterliegen. Diese bewegen sich in einem Bereich zwischen 200 und über 500 mg/m^3 selbst wenn die Sonde an einem festen Punkt sitzt. Ansonsten sind die höchsten Konzentrationen in der Nähe der rechten Kesselwand festgestellt worden.

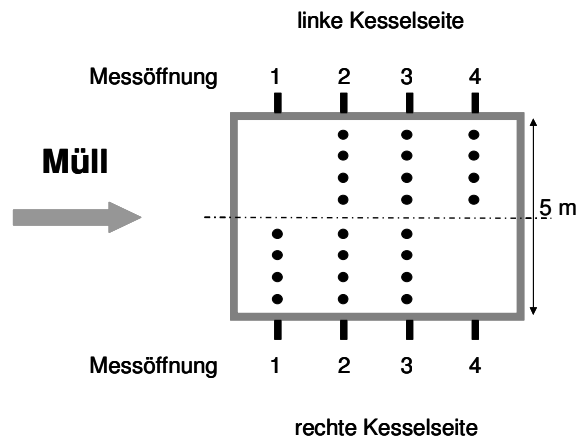


Abbildung 4.2-3: Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 5

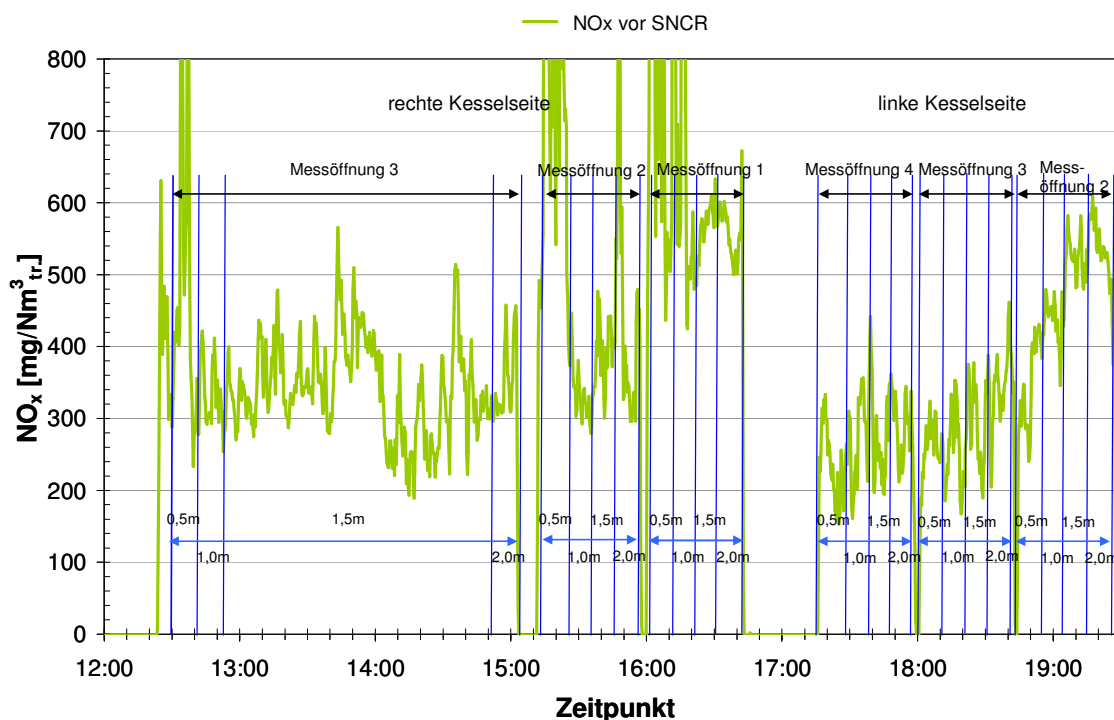


Abbildung 4.2-4: Netzmessung der NO_x -Konzentrationen unterhalb der SNCR aufgenommen.

Aus den Netzmessungen unterhalb der SNCR wurden folgende Mittelwerte bestimmt:

- $\text{NO}_x\text{-RW} = 180 \text{ mg/m}^3$ → Roh- $\text{NO}_x = 393 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_x\text{-RW} = 120 \text{ mg/m}^3$ → Roh- $\text{NO}_x = 359 \text{ mg/m}^3$

Auf Grund dieser enormen Schwankungsbreite der NO_x -Konzentrationen als Grundlage zur Bestimmung des Roh- NO_x -Wertes wurde bei späteren Messungen der nachfolgenden Anlagen ein zusätzlicher Betriebspunkt eingestellt. Dabei wurde, nach Rücksprache mit den Genehmigungsbehörden, die SNCR für zwei bis drei Stunden (je nach Linie) ausgeschaltet. Somit konnte der Roh- NO_x -Gehalt hinter dem Kessel bei einem sehr viel kleineren Kanalquerschnitt und vor allem auch bei guter Durchmischung der Strömung bestimmt werden. Diese Vorgehensweise wurde unter der Voraussetzung gestattet, dass der genehmigte Tagesmittelwert für die NO_x -Konzentration nicht überschritten wird. Dies konnte dadurch ohne Probleme erreicht werden, dass die Abschaltung des Reduktionsmittels immer gegen Mittag durchgeführt wurde und danach sofort auf den abgesenkten Zustand der Anlage umgeschaltet wurde.

Die Ammoniumkonzentrationen der Reststoffe aus dem 2./3.-Zug, dem Sprühabsorber und dem Gewebefilter sind in Abbildung 4.2-5 zusammen mit dem eingesetzten Reduktionsmittel aufgetragen. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Anlagen wurden hier zusätzliche Proben entnommen, um Schwankungsbereiche zu erkennen. Man sieht, dass bei den Ammoniumgehalten der Filterasche in beiden Anlagenzuständen Konzentrationsschwankungen im Bereich des Faktors 2,6 und größer auftreten. Der Ammoniumgehalt der Filterasche des 2./3.-Zuges ist für beide Zustände etwa gleich. Hier muss angemerkt werden, dass Ammoniumkonzentrationen $< 10 \text{ mg/kg}$ im Bereich der Bestimmungsgrenze des Verfahrens liegen und deshalb mit Vorsicht bewertet werden müssen.

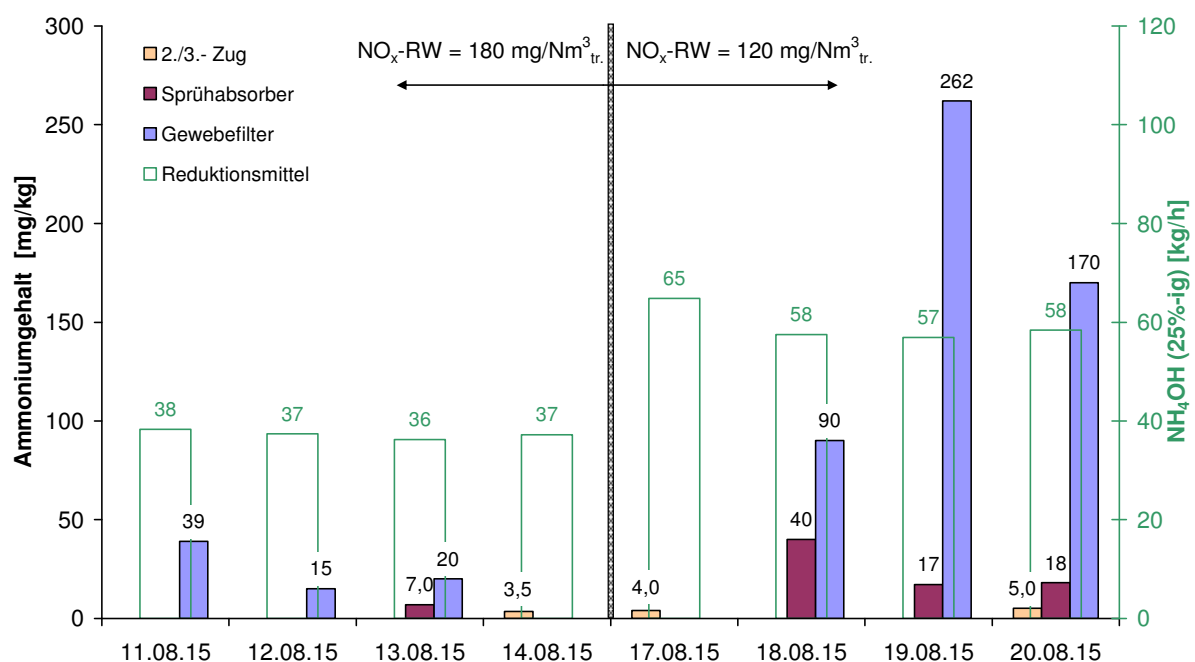


Abbildung 4.2-5: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x -Regelwert für Linie 5.

4.2.4 Bilanzen Linie 5

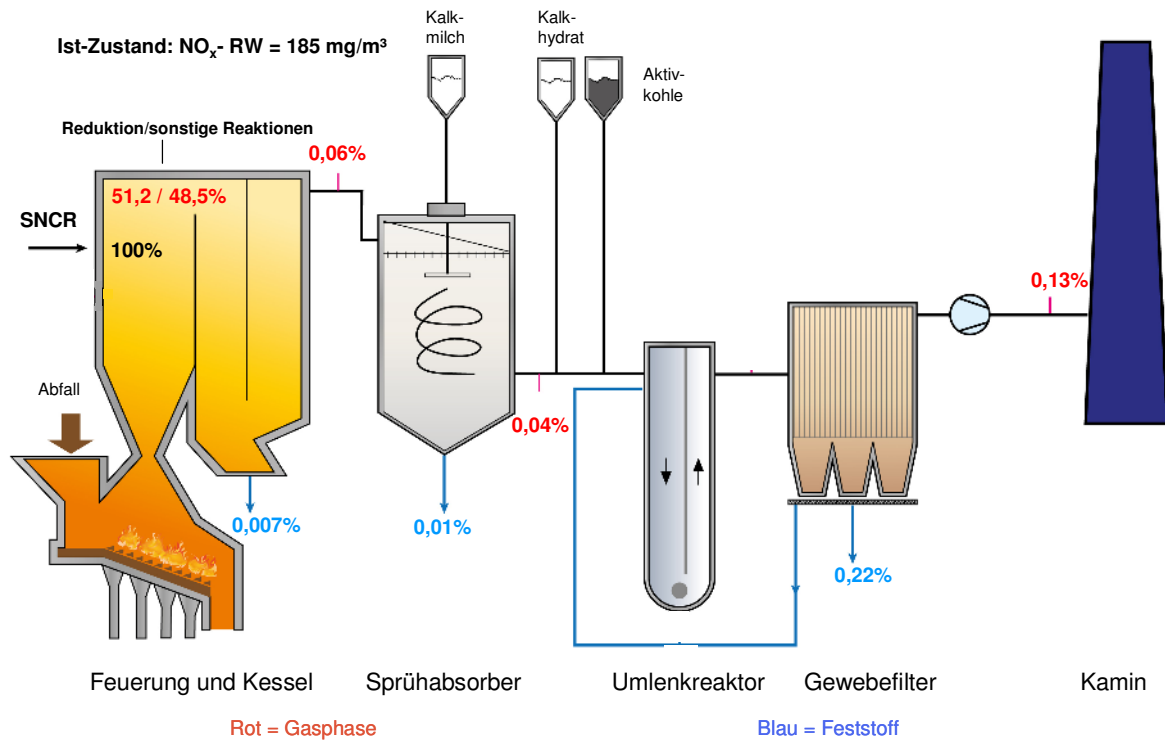


Abbildung 4.2-6: Ammoniak-Bilanz für Linie 5 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

Der Term der „sonstigen Reaktionen“ berechnet sich hier mit den Anteilen der Kesselasche aus 3. und 4. Zug, dem des Reststoffes des Sprühabsorbers, dem des Gewebefilters und dem Teil aus der Gasphase hinter dem Kessel.

Der Anteil des Reduktionsmittels, der für die Reduktion gebraucht wird, liegt im Ist-Zustand bei ca. 51% und fällt im abgesenkten Zustand auf ungefähr 39 % ab (Abbildung 4.2-6 und Abbildung 4.2-7). Der Anteil, der als „fester Schlupf“ über die Asche aus dem 2./3.-Zug abgeführt wird, ist vernachlässigbar (gestiegen von 0,004 auf 0,006 %). Die Anteile in den Reststoffen des Sprühabsorbers liegen bereits eine Größenordnung höher (Zunahme von 0,01 auf 0,05 %) und beim Gewebefilter eine weitere Größenordnung (von 0,22 auf 0,63 %). Der Anteil des Reduktionsmittels, der als „gasförmiger Schlupf“ den Kamin verlässt, steigt auf das Dreifache von 0,13 auf 0,40 % an.

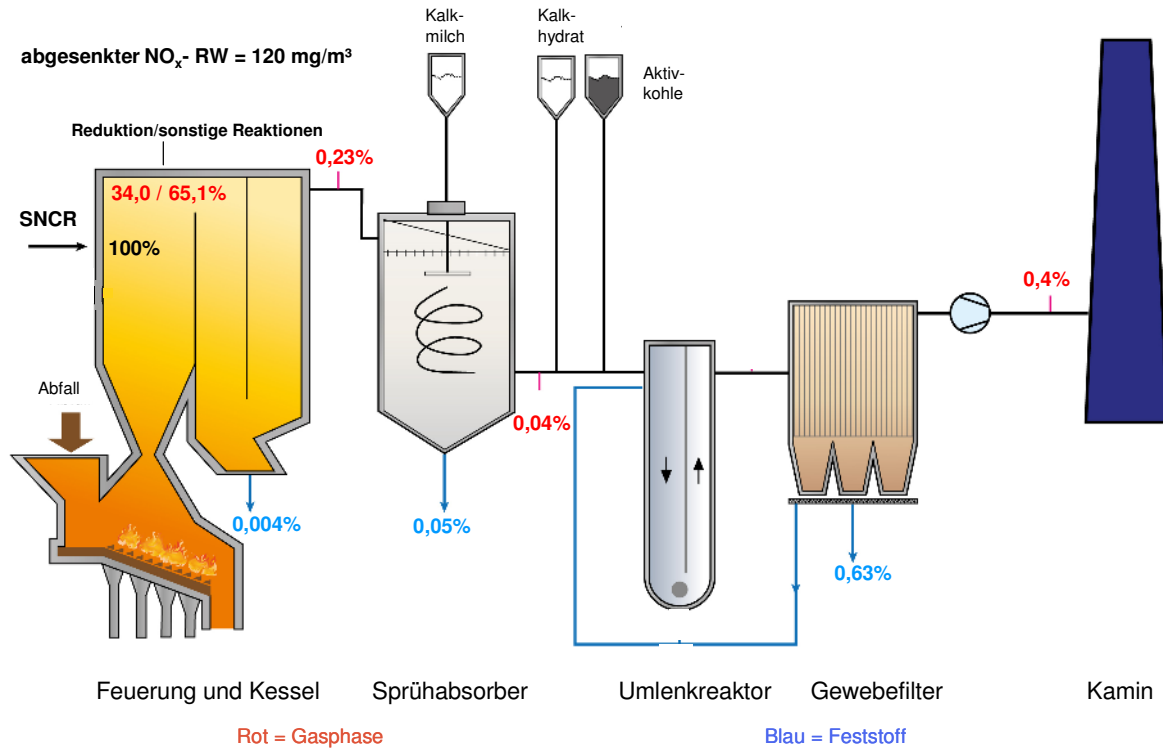


Abbildung 4.2-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 5 für den Zustand mit abgesenktem NO_x -Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

4.3 Linie 3

4.3.1 Kurzbeschreibung der projektrelevanten Anlagentechnik

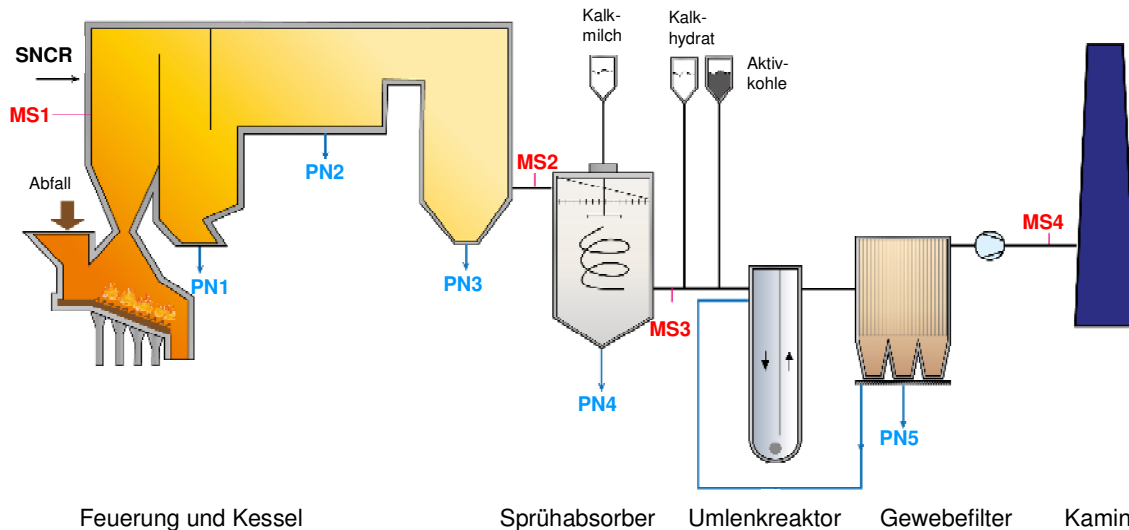


Abbildung 4.3-1: Anlagenfließbild der Linie 3.

Rostfeuerung

Feuerung:	wassergekühlter Vorschubrost, Mittelstromfeuerung
Brennstoff:	Stofflich nicht verwertbare Siedlungsabfälle und heizwertreiche Fraktionen aus der Abfallaufbereitung von Haus-, Sperr- und Gewerbemüll
Durchsatz:	31,1 t/h
Heizwert:	14 MJ/kg
Feuerungswärmeleistung:	121 MW _{th}
Dampferzeugerleistung:	140 t/h

Kessel

5-Zug-Dampferzeuger (Horizontalkessel mit 4 Vertikalzügen)

- 1.- 3. Zug: vertikale Leerzüge
4. Zug: Horizontalzug → 1 Verdampfer und 3 Überhitzer
5. Zug: Vertikalzug → 7 Economisern

SNCR

Hersteller:	Mehldau und Steinfath Umwelttechnik GmbH
Reduktionsmittel:	Ammoniakwasser, 25 %
Eindüseebenen:	3; Ebene 1: 20,0 m, Ebene 2: 25,0 m, Ebene 3: 30,0 m
Düsengruppen je Ebene:	3; Vorderwand, rechte und linke Seitenwand
Anzahl Düsen je Gruppe:	Vorderwand 6 rechte und linke Seitenwand je 1
Treibmittel:	Druckluft
Reduktionsmittelmenge	= f(Last und NO _x hinter Kessel), NO _x -Regelwert = 180 mg/Nm ³
Schaltung der Ebenen	= f(T _{RG}), Pyrometer zwischen Ebene 2 und Ebene 3, t > 960 °C erfolgt manuelle Umschaltung auf Ebene 2

4.3.2 Versuchsprogramm an Linie 3

Abbildung 4.3-2 zeigt die Verläufe für NO_x am Kamin, NH_3 nach Kessel und am Kamin, O_2 hinter dem Kessel sowie die entsprechenden Massenströme für Reduktionsmittel und Dampf als 12-Stunden-Mittelwerte. Die drei Versuchseinstellungen sind durch verschiedene farbliche Hintergründe gekennzeichnet.

1. NO_x -RW = 180 mg/m^3 ; Ist-Zustand der Anlage (blau)
2. Anlagenbetrieb ohne SNCR (hellgrau)
3. NO_x -RW = 100 mg/m^3 ; abgesenkter NO_x -Regelwert (gelb-braun)

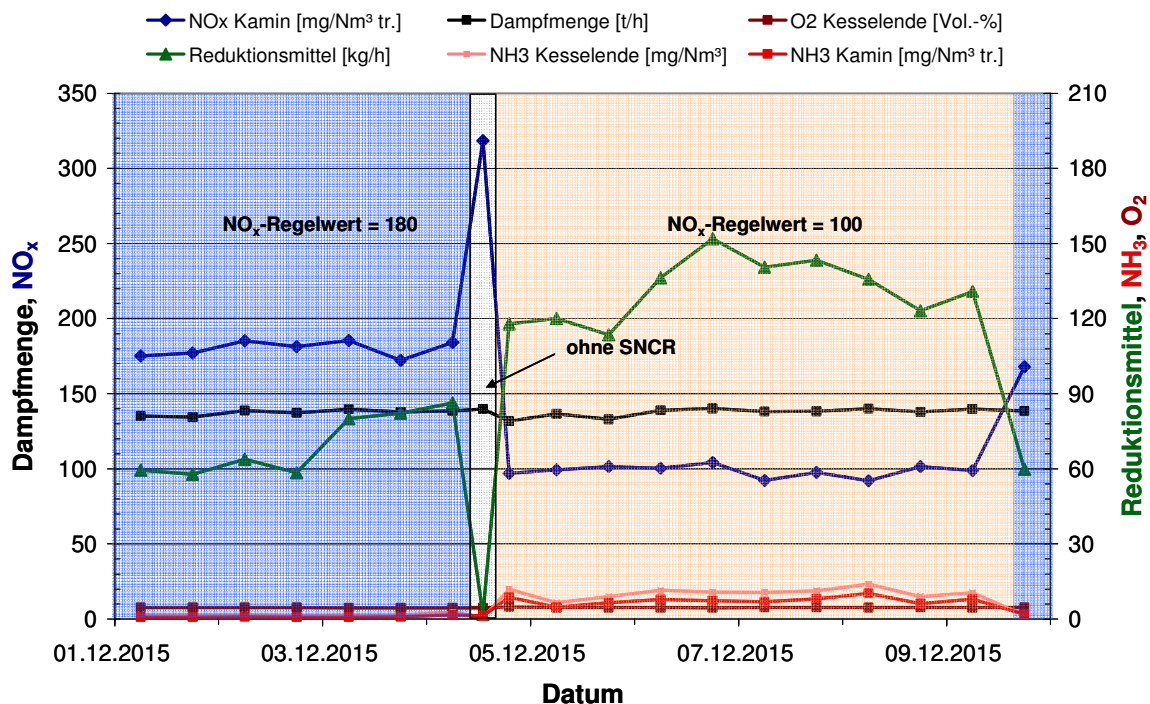


Abbildung 4.3-2: Versuchsprogramm an Linie 3

Anhand der Verläufe von Sauerstoffkonzentration und Dampfmenge wird wiederum deutlich, dass die Anlage während des untersuchten Zeitraumes in einem repräsentativen Zustand betrieben wurde. Hier fällt auf, dass sowohl bei Zustand 1, dem Ist-Zustand der Anlage, als auch bei Zustand 3 – hier NO_x -RW = 100 mg/m^3 – die Reduktionsmittelverbräuche für die Einhaltung des jeweiligen Regelwertes auf zwei verschiedenen Niveaus liegen.

4.3.3 Messungen an Linie 3

Die schematische Darstellung der Messpunkte in Abbildung 4.3-3 zeigt, dass hier keine gute Querschnittsabdeckung erreicht werden konnte. Dies liegt vor allem daran, dass der Kessel zu breit ist und dadurch die, durch den Transport bedingte, maximale Sondenlänge von 4m nicht ausreichend ist. Allerdings würde eine längere Sonde auch größere Wassermengen erfordern, da durch die größere Oberfläche entsprechend mehr Wärme an das Kühlwasser übertragen wird. Um mehr Kühlwasser durch die Sonde zu transportieren, müsste der Ringspalt für das Kühlwasser entsprechend vergrößert werden, was aber bei den vorhandenen Messstutzen nicht möglich ist, da der vorhandene Stutzendurchmesser schon vollständig genutzt wurde. Der mittlere Messstutzen konnte leider nicht verwendet werden, da ein Träger das Einbringen der Sonde verhindert hat.

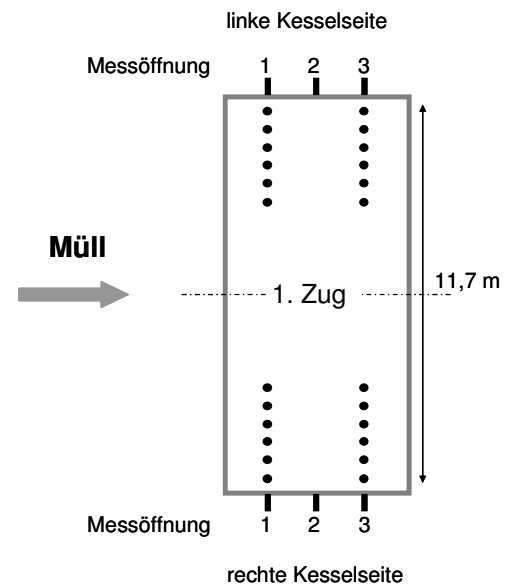


Abbildung 4.3-3: Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 3

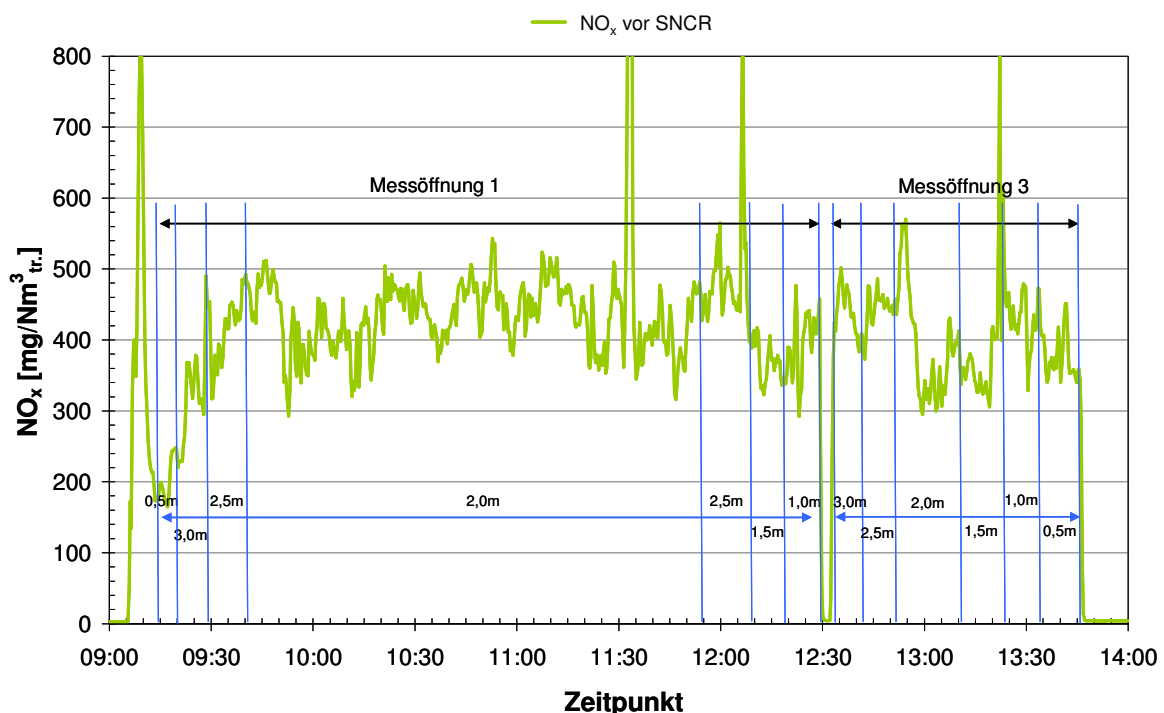


Abbildung 4.3-4: Netzmessung der NO_x -Konzentrationen unterhalb der SNCR aufgenommen.

Die NO_x -Konzentrationsverläufe der Netzmessung (Abbildung 4.3-4), gemessen an der linken Kesselseite, bewegen sich relativ konstant hauptsächlich im Bereich zwischen 300 und 500 $\text{mg NO}_x/\text{m}^3$. Es wurden folgende Mittelwerte bestimmt:

- $\text{NO}_x\text{-RW} = 180 \text{ mg/m}^3$ → Roh- $\text{NO}_x = 396 \text{ mg/m}^3$
- Betrieb ohne SNCR → Roh- $\text{NO}_x = 355 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_x\text{-RW} = 120 \text{ mg/m}^3$ → Roh- $\text{NO}_x = 359 \text{ mg/m}^3$

Der Betrieb der Anlage ohne SNCR wurde über einen Zeitraum 2,5 Stunden aufrecht erhalten.

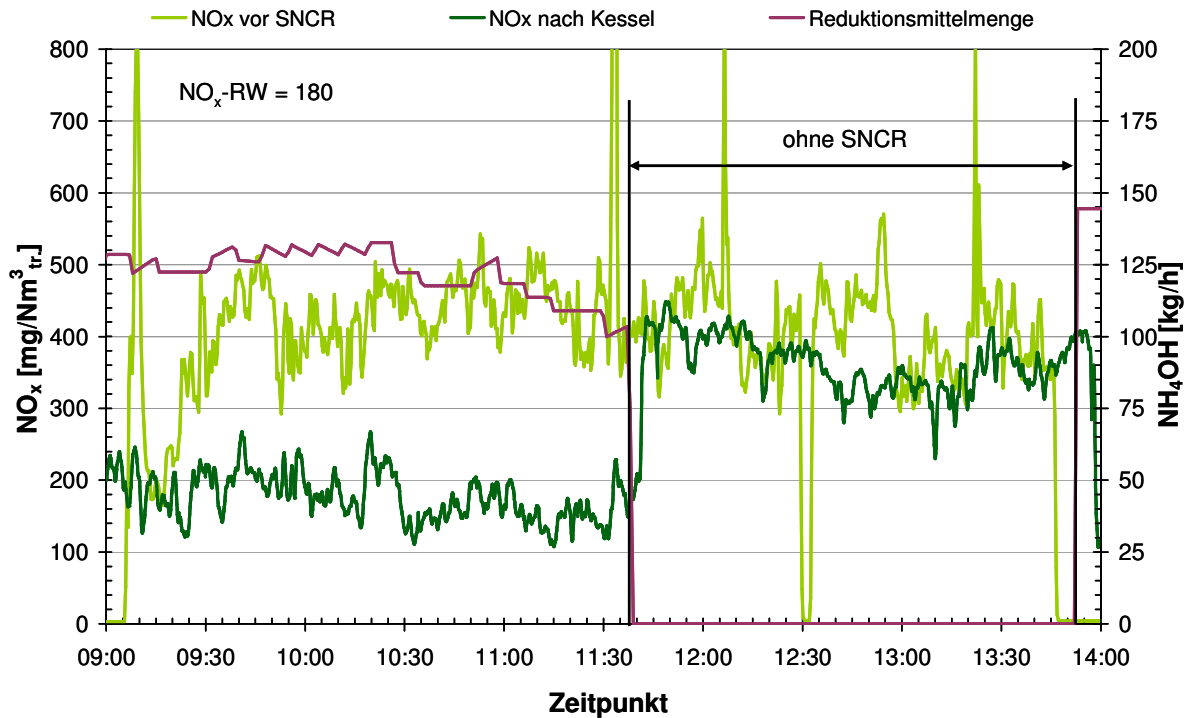


Abbildung 4.3-5: Betrieb der Anlage ohne SNCR.

Zusätzlich zu den Reststoffen aus dem 2./3.-Zug, dem Sprühabsorber und dem Filter wurden an dieser Anlage noch Proben aus Querzug + Eco (als Sammelprobe) entnommen. Die zugehörigen Ammoniumgehalte sind in Abbildung 4.3-6 zusammen mit dem Reduktionsmittelleinsatz graphisch aufgetragen. Die Konzentrationen der Asche aus dem 2./3. Zug und dem Querzug liegen alle für die Anlagenzustände 2 und 3 etwa gleich, während die Konzentrationen des Reststoffes aus dem Sprühabsorber von 17 auf 73 mg/m^3 etwa auf das Vierfache wachsen und sich die des Filters von ungefähr 40 auf 263 mg/m^3 um mehr als das 5-fache erhöhen.

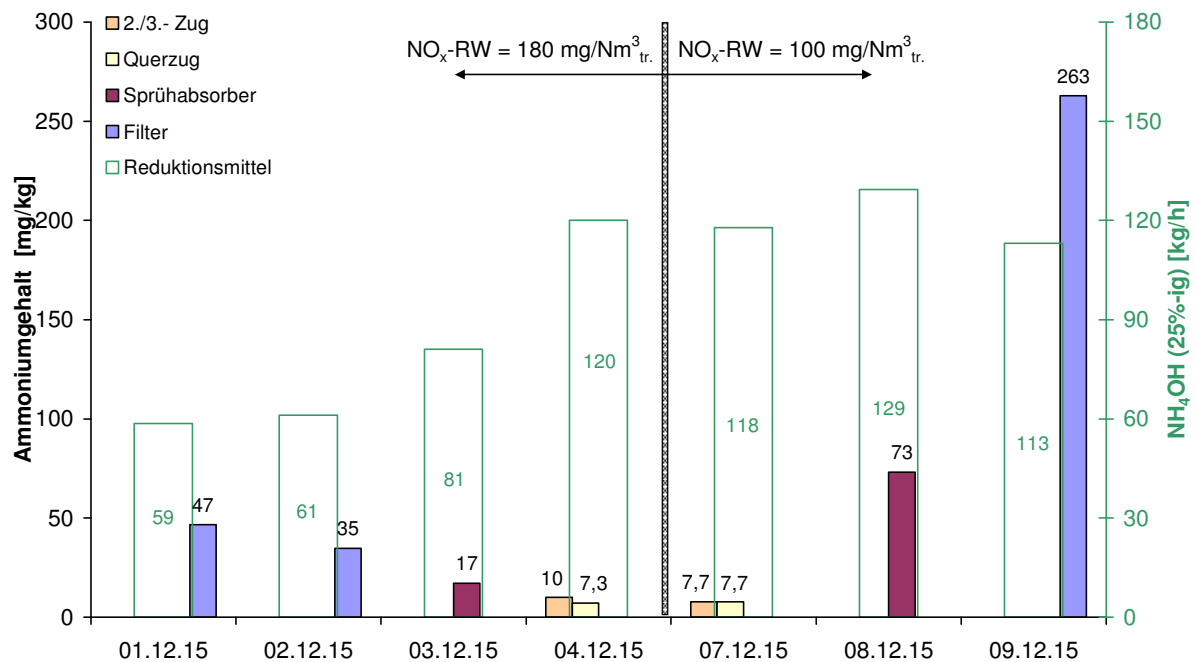


Abbildung 4.3-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x -Regelwert für Linie 3.

4.3.4 Bilanzen Linie 3

Im Ist-Zustand der Anlage ($\text{NO}_x = 180 \text{ mg/m}^3$) ergibt sich ein Anteil von 55 % des Reduktionsmittels, der für die Oxidation des NO_x benötigt wird. Bei $\text{NO}_x = 100 \text{ mg/m}^3$ sinkt dieser um ca. 5 % auf 49 % ab. Auf Grund der großen Abweichung des Roh- NO_x -Wertes beim Betrieb der Anlage ohne SNCR würde sich ein Reduktionsgrad von 44 % ergeben.

Der Anteil, der als „fester Schlupf“ mit der Flugasche aus dem 2./3. Zug sowie dem Querzug + Eco ausgeschleust wird, ist wiederum als vernachlässigbar anzusehen. Die Anteile für den Sprühabsorber sowie den Filter verdreifachen sich knapp, wobei der des Filters um eine Größenordnung über dem des Sprühabsorbers liegt. Der Beitrag des „gasförmigen Schlupfes“ am Kamin liegt im Ist-Zustand bei 0,12 % und vervierfacht sich im abgesenkten Zustand auf 0,48 % des eingesetzten Reduktionsmittels.

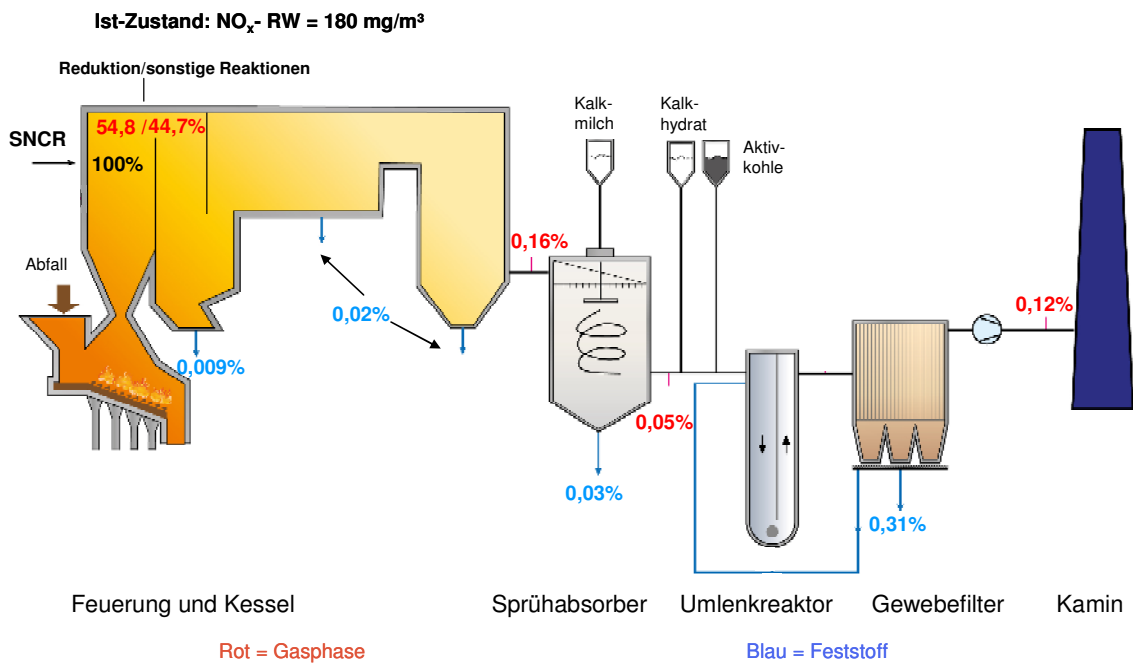


Abbildung 4.3-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 3 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

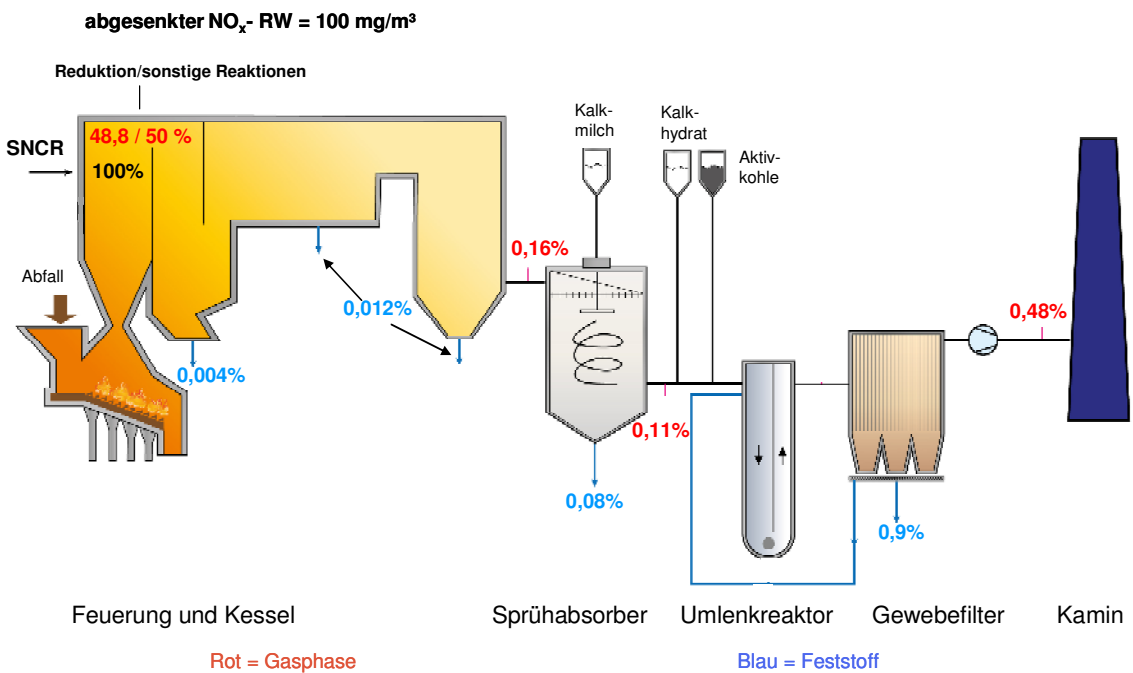


Abbildung 4.3-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 3 für den Zustand mit abgesenktem NO_x-Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

4.4 Linie 1

4.4.1 Kurzbeschreibung der projektrelevanten Anlagentechnik

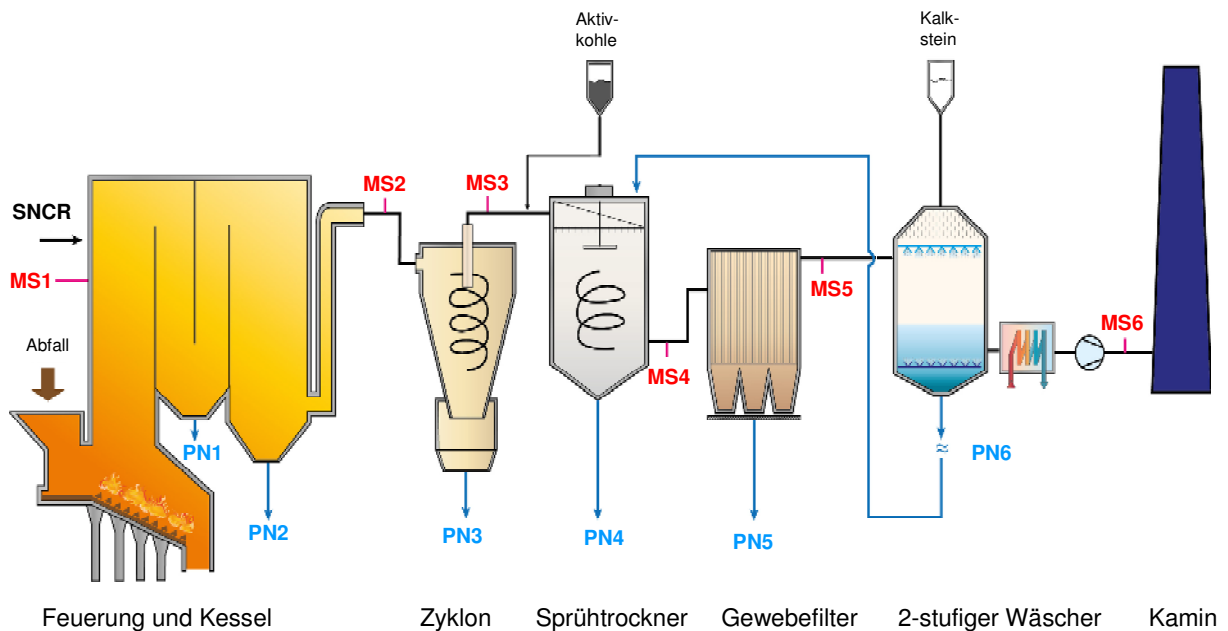


Abbildung 4.4-1: Anlagenfließbild der Linie 5.

Rostfeuerung

Feuerung:	luftgekühlter Vorschubrost, Mittelstromfeuerung
Brennstoff:	Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbemüll, getrockneter Klärschlamm
Durchsatz:	8,8 t/h
Heizwert:	8,5 – 11,9 MJ/kg
Feuerungswärmeleistung:	20,8 MW
Dampferzeugerleistung:	25 t/h

Kessel

4-Zug-Vertikalkessel

1./2. Zug: Strahlungszüge, 2. Zug Schotten (2 als Verdampfer, 1 als Überhitzer)

Übergang 2./3. Zug: Schutzverdampfer

3. Zug: 5 Überhitzer

4. Zug: 1 Überhitzer, 6 ECOS

SNCR

Hersteller:	Noell
Reduktionsmittel:	Ammoniakwasser, 25%-ig
Eindüseebenen:	1 bei 20,5 m
Düsengruppen je Ebene:	2 (rechte und linke Seitenwand)
Anzahl Düsen je Gruppe:	je 2 schwenkbare Düsen (+30° bis -30°)

Treibmittel: Dampf
 Reduktionsmittelmenge = $f(\text{NO}_x \text{ Kamin})$, NO_x -Regelwert = 150 mg/Nm^3
 Düsenneigung = $f(T_{\text{RG}})$ 4 Strahlungs-pyrometer im Feuerraum bei 15,2 m
 Die an der Umkehr 3./4. Zug installierte NH_3 -Schlupfmessung wird bislang nur als registrierende Messung betrieben.
 Eine Schlupf-Regelung / -Begrenzung ist bislang nicht erforderlich.

4.4.2 Versuchsprogramm an Linie 1

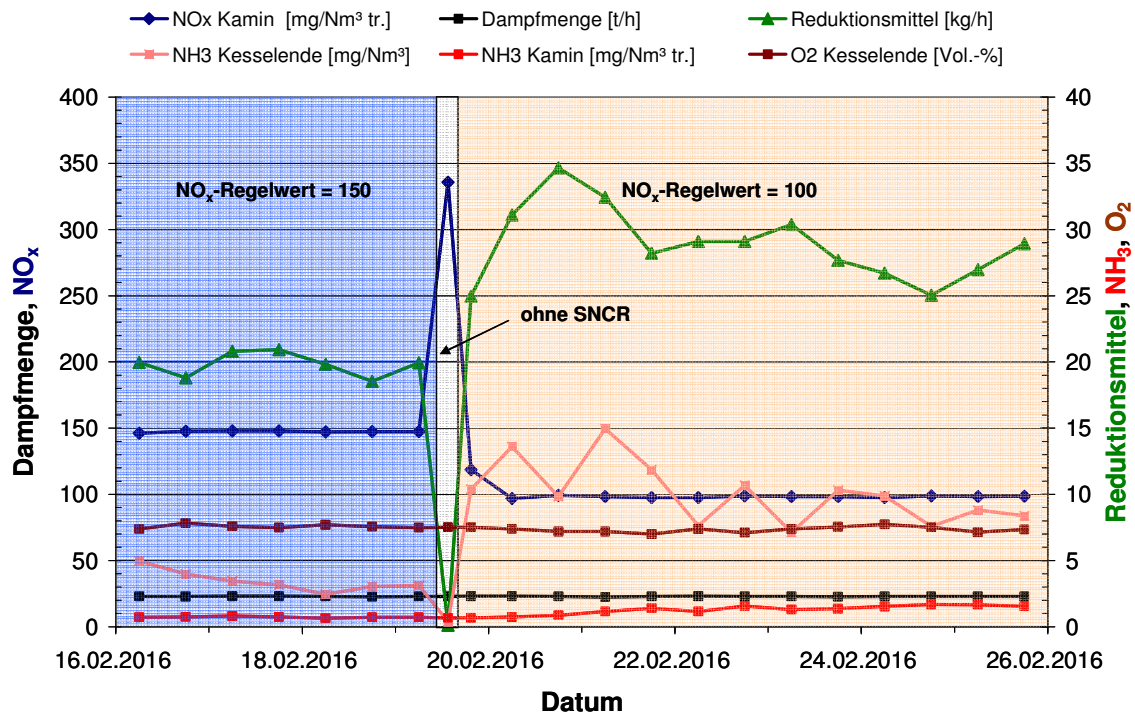


Abbildung 4.4-2: Versuchsprogramm an Linie 1.

Das Versuchsprogramm für Linie 1 (Abbildung 4.4-2) zeigt die Verläufe für NO_x am Kamin, NH_3 nach Kessel und am Kamin, O_2 hinter dem Kessel sowie die entsprechenden Massenströme für Reduktionsmittel und Dampf als 12-Stunden-Mittelwerte. Die drei Versuchseinstellungen sind unterschiedlich farbig hinterlegt.

1. NO_x -RW = 150 mg/m^3 ; Ist-Zustand der Anlage (blau)
2. Anlagenbetrieb ohne SNCR (hellgrau)
3. NO_x -RW = 100 mg/m^3 ; abgesenkter NO_x -Regelwert (gelb-braun)

Am Verlauf des eingesetzten Ammoniakwassers ist erkennbar, dass für den abgesenkten Zustand das Reduktionsmittel nach anfänglichem Mehrverbrauch reduziert werden konnte. Die Anlage wurde ansonsten in einem repräsentativen Zustand betrieben.

4.4.3 Messungen an Linie 1

Es konnte eine gute Abdeckung der Messpunkte über dem Querschnitt (Abbildung 4.4-3) erreicht werden, da es sich hier um die kleinste untersuchte Anlage handelt und die Platzverhältnisse es erlaubten, von der rechten Kesselseite aus die gesamte Fläche zu erreichen. Die NO_x -Verläufe der Netzmessungen für den abgesenkten Zustand sind in der Abbildung 4.4-4 über der Zeit aufgetragen. Die Konzentrationen schwanken zwischen 300 und 500 mg/m^3 und ergeben einen Mittelwert von 380 mgNO_x/m^3 .

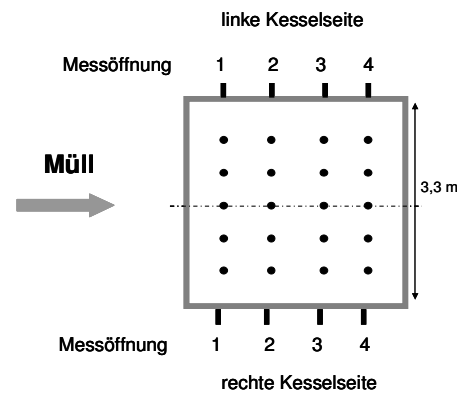


Abbildung 4.4-3: Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 1.

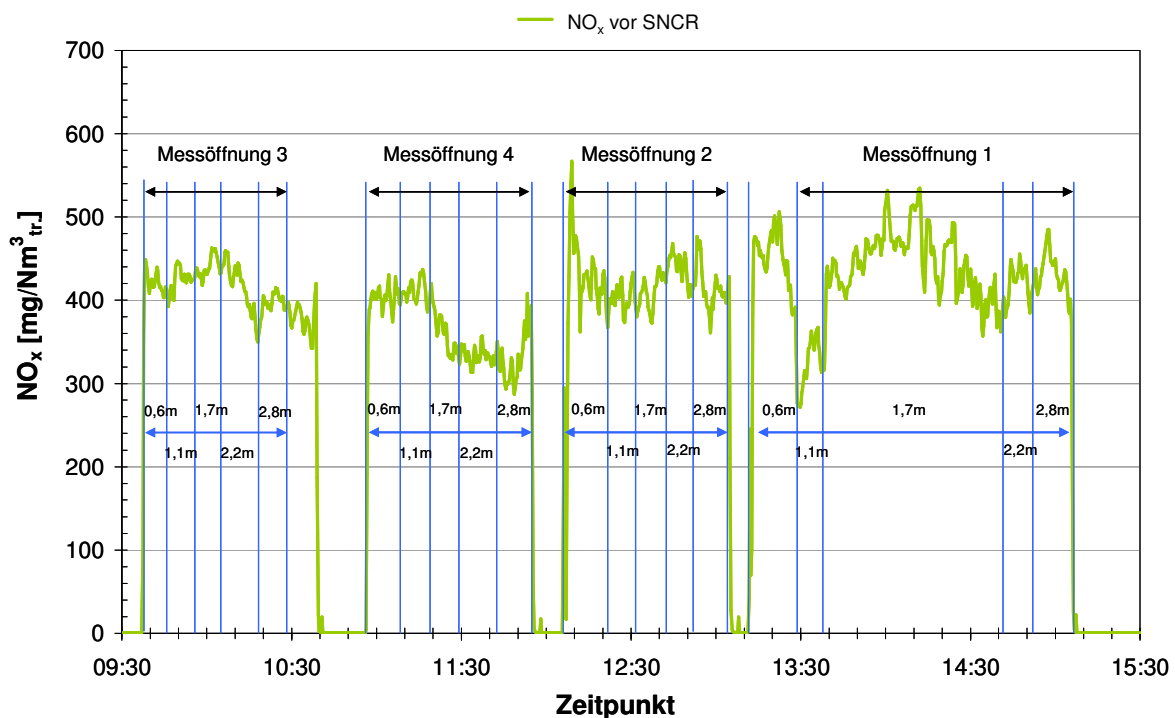


Abbildung 4.4-4: Netzmessung der NO_x -Konzentrationen unterhalb der SNCR an Linie 1 aufgenommen.

Es ergaben sich folgende Mittelwerte:

- $\text{NO}_x\text{-RW} = 150 \text{ mg}/\text{m}^3$ → Roh- $\text{NO}_x = 354 \text{ mg}/\text{m}^3$
- Betrieb ohne SNCR → Roh- $\text{NO}_x = 369 \text{ mg}/\text{m}^3$
- $\text{NO}_x\text{-RW} = 100 \text{ mg}/\text{m}^3$ → Roh- $\text{NO}_x = 380 \text{ mg}/\text{m}^3$

Der Betrieb der Anlage ohne SNCR (Abbildung 4.4-5) wurde im Anschluss der Messungen

im Ist-Zustand über einen Zeitraum von drei Stunden durchgeführt.

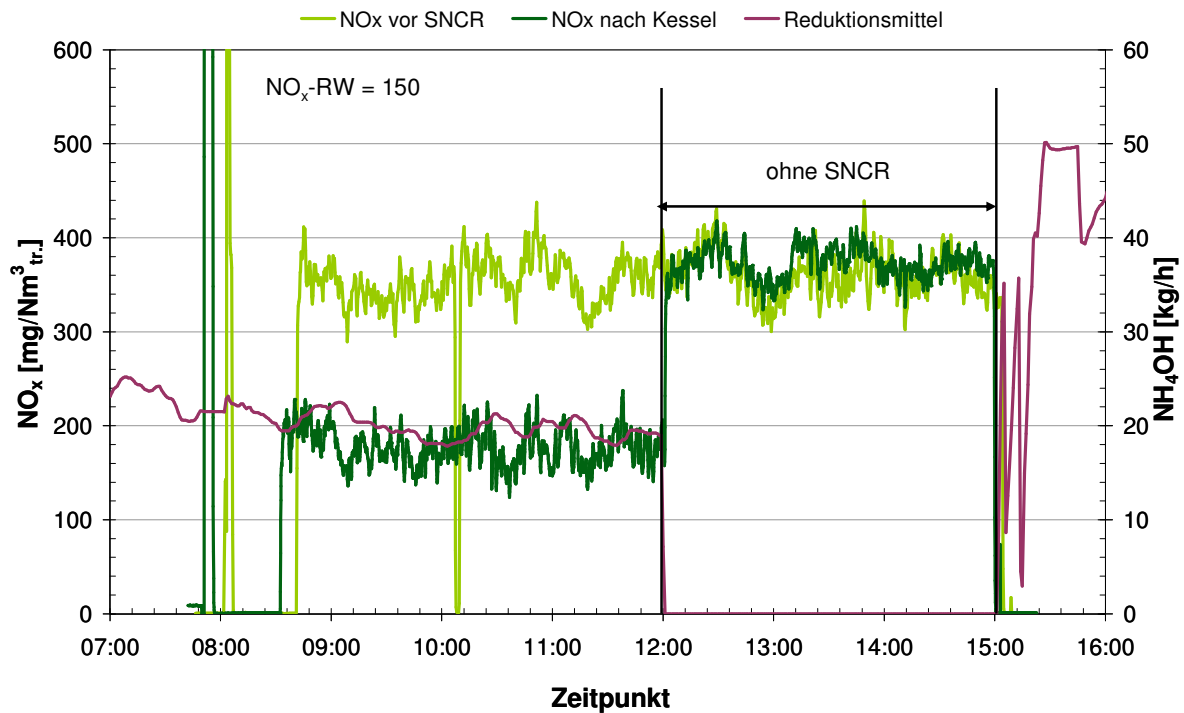


Abbildung 4.4-5: Betrieb der Anlage ohne SNCR.

Als feste Reststoffe fallen hier die folgenden Fraktionen an:

- Flugasche aus dem 2./3. Zug,
- Flugasche aus dem 4. Zug,
- Flugasche aus dem Zyklon,
- Restadsorbens aus dem Sprühtrockner, sowie der
- Staub aus dem Gewebefilter

Die Ammoniumgehalte dieser Reststoffe sind in Abbildung 4.4-6 gezeigt. Die Werte für Flugasche aus dem 2./3.-Zug unterliegen Schwankungen zwischen ca. 8 und ca. 20 mg/kg und zwar sowohl für den Ist- als auch im abgesenkten Zustand. Die Asche aus dem 4. Zug hat ihren maximalen Wert im Ist-Zustand mit 163 mg/kg und erreicht am darauf folgenden Tag den minimalen Wert von 12 mg/m³. Die Ausschleusung aus dem Zyklon liegt während des Messzeitraumes zwischen 9 und 27 mg/kg. Die Reststoffe aus dem Sprühtrockner liegen im 1. Zustand zwischen 321 und 410 mg/kg und steigen dann für den abgesenkten Zustand auf 760 bis 764 mg/kg an, was in etwa einer Verdopplung entspricht. Ähnlich verhält sich auch der Filterstaub, bei dem sich die Konzentrationen etwa verdreifachen (von 0,8 bis 1,1 auf 3,2 bis 3,4 g/kg).

Die Ammoniumkonzentrationen im zweistufigen Wäscher sind in Abbildung 4.4-7 aufgetragen. Der Ammoniumgehalt der 1. Stufe liegt im Ist-Zustand bei ca. 140 mg/L und steigt um fast das 2,5-fache auf etwa 340 mg/L an. In der 2. Wäscherstufe steigt die Konzentration von 22 auf 74 bis 82 mg/L. Die Abschlammung aus dem Wäscher verlässt allerdings die Bilanzgrenze nicht, da diese in den Vorlagebehälter des Sprühtrockners geleitet wird.

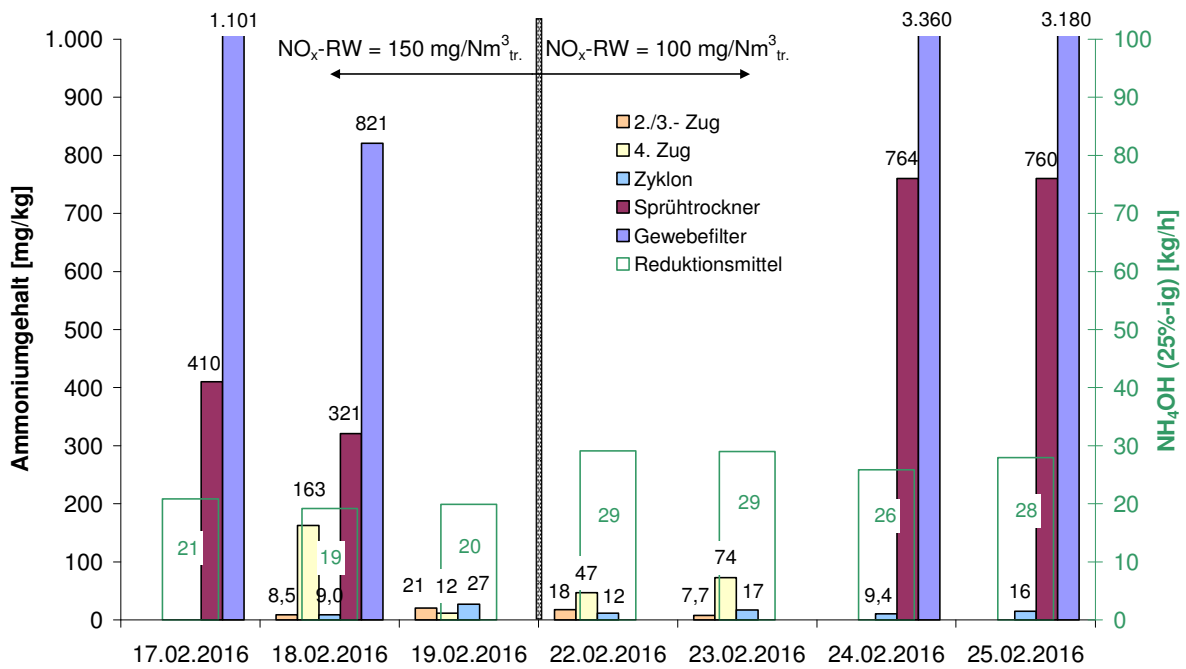


Abbildung 4.4-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x-Regelwert für Linie 1.

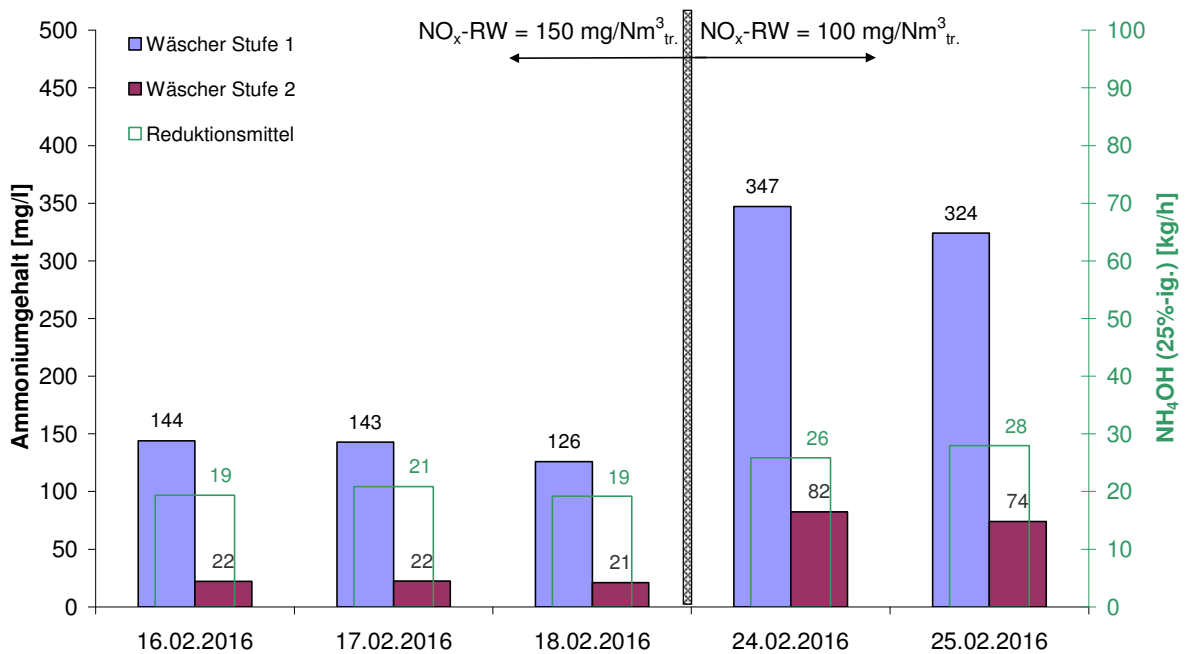


Abbildung 4.4-7: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge im Wäscher sowie eingesetzte Reduktionsmittelmenge für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x-Regelwert für Linie 1.

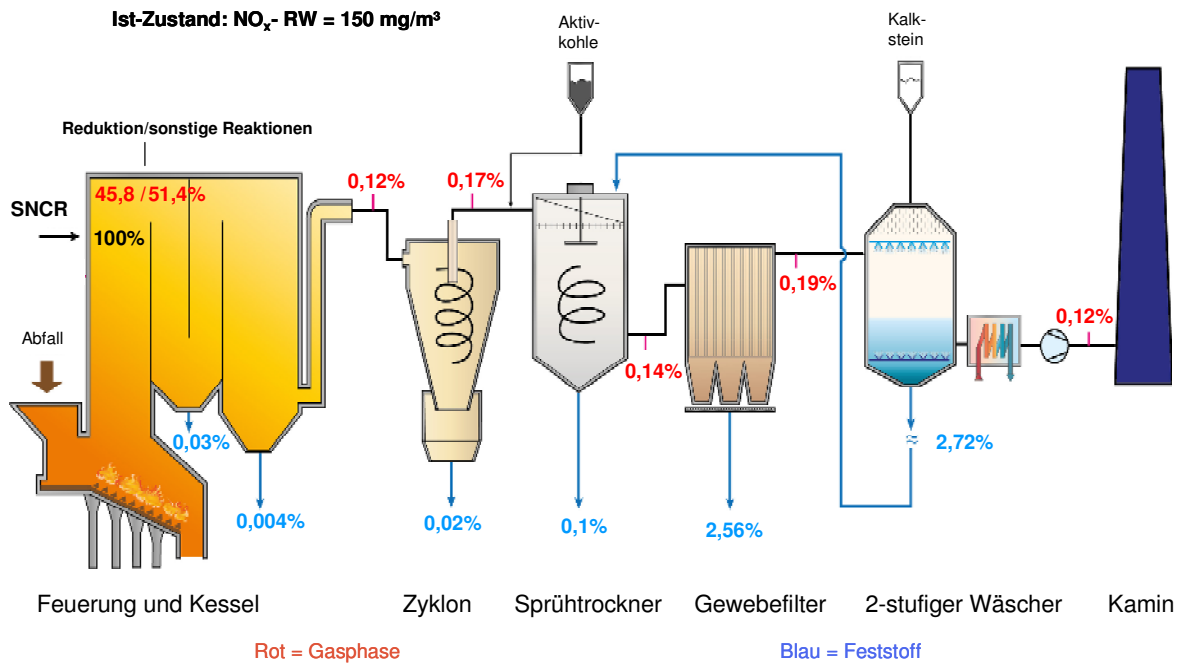


Abbildung 4.4-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 1 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

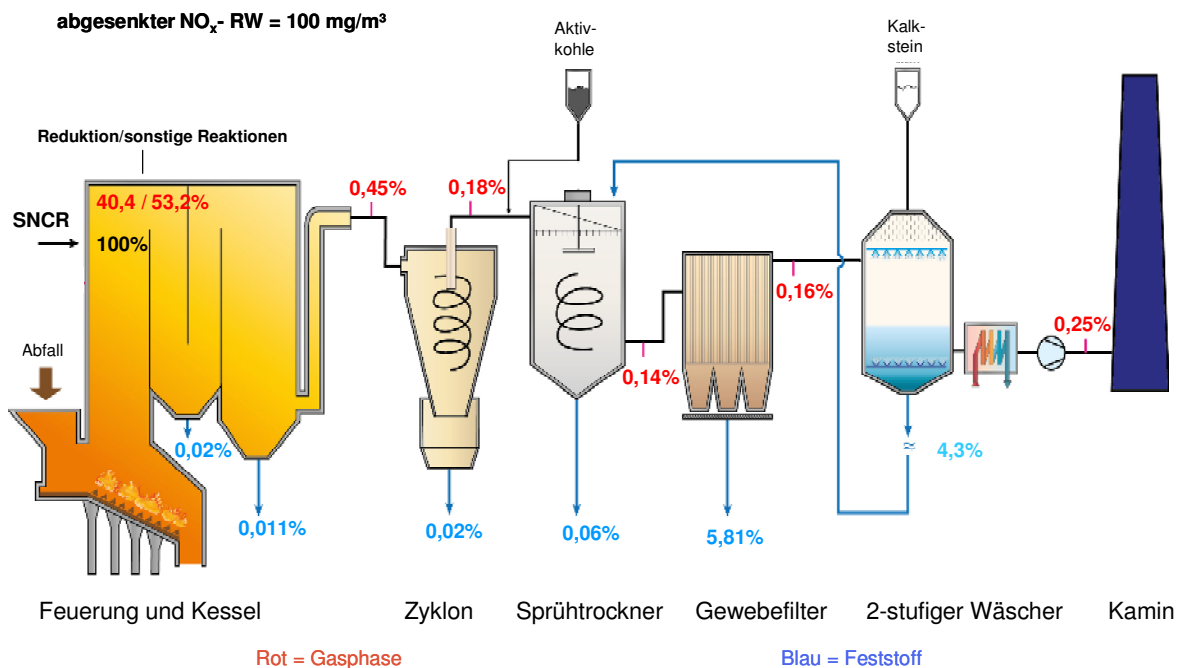


Abbildung 4.4-9: Ammoniak-Bilanz für Linie 1 für den Zustand mit abgesenktem NO_x-Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

Der Anteil für die Reduktion liegt hier im Ist-Zustand bei ca. 46 % (bzw. 49 % bei Berechnung mit dem Roh-NO_x aus dem Betrieb ohne SNCR) und beim abgesenkten NO_x-Regelwert bei

ca. 41 %. Dies sind für beide Anlagenzustände ähnliche Größenordnungen. Große Änderungen bezüglich des Anteiles des Reduktionsmittels ergeben sich nur für den Gewebefilter, bei dem mehr als eine Verdopplung zu erkennen ist und bei der Ausschleusung aus dem Wäscher, welche aber nicht die Bilanzgrenze verlässt, da dieser Strom zurück in den Sprühtrockner geführt wird. Außerdem verdoppelt sich der Anteil des „gasförmigen Schlupfes“ am Kamin.

4.5 Linie 2

4.5.1 Kurzbeschreibung der projektrelevanten Anlagentechnik

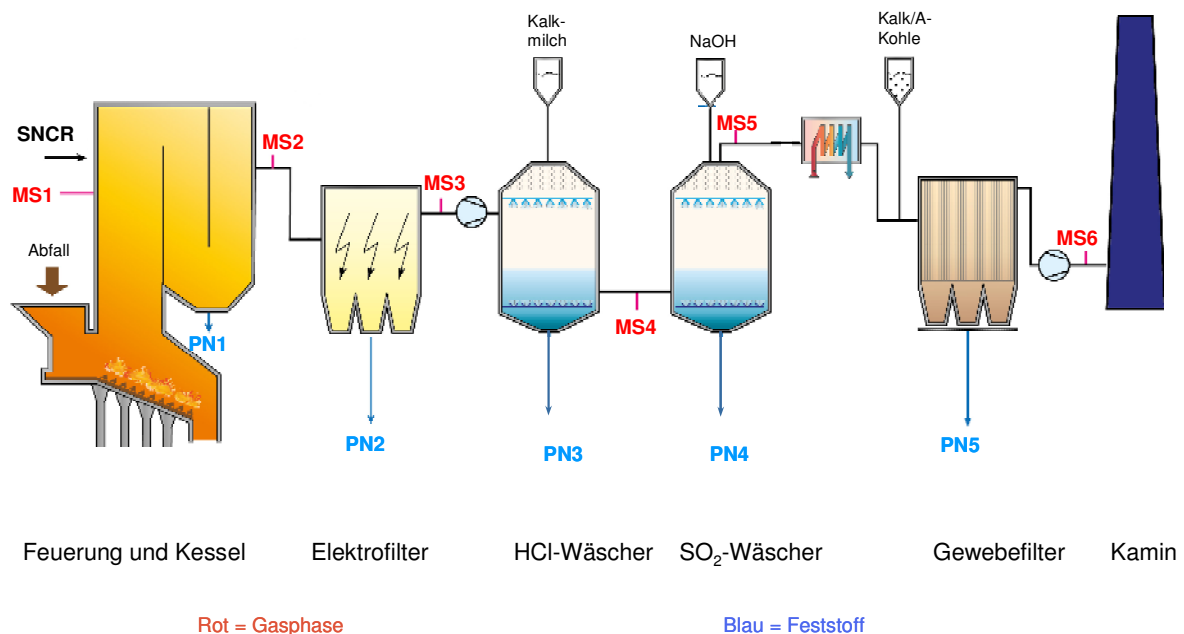


Abbildung 4.5-1: Anlagenfließbild der Linie 2.

Rostfeuerung

Feuerung:	Walzenrost, Gleichstromfeuerung
Mülldurchsatz:	24,5 t/h
Heizwert (Auslegung):	9,6 MJ/kg
Feuerungswärmeleistung:	65,2 MW
Dampferzeugerleistung:	78 t/h

Kessel

- 3-Zug Vertikal-Kessel
1. Zug: Strahlungszug
 2. Zug: Strahlungszug und 1 Überhitzer
 3. Zug: 2 Überhitzer und 2 Economiser

SNCR

Hersteller:	ERC
Reduktionsmittel:	Ammoniakwasser, 25 %-ig
Eindüseebenen:	3; Ebene 1: 19,2 m, Ebene 2: 21,0 m, Ebene 3: 24,5 m
Düsengruppen je Ebene:	3 an Rückwand sowie rechter und linker Seitenwand
Anzahl Düsen je Gruppe:	2
Treibmedium:	Druckluft
Reduktionsmittelmenge	= f(NO _x hinter Kessel, NO _x Kamin, Schlupf, Lastfaktor), NO _x -Regelwert = 180 mg/Nm ³
Schaltung der Düsen	= f(T _{RG}) → AGAM auf 23,3 m. Düsen unterschiedlicher Ebenen sollen in Abhängigkeit der mittels AGAM berechneten Temperatur im jeweiligen Sektor geschaltet werden.

4.5.2 Versuchsprogramm Linie 2

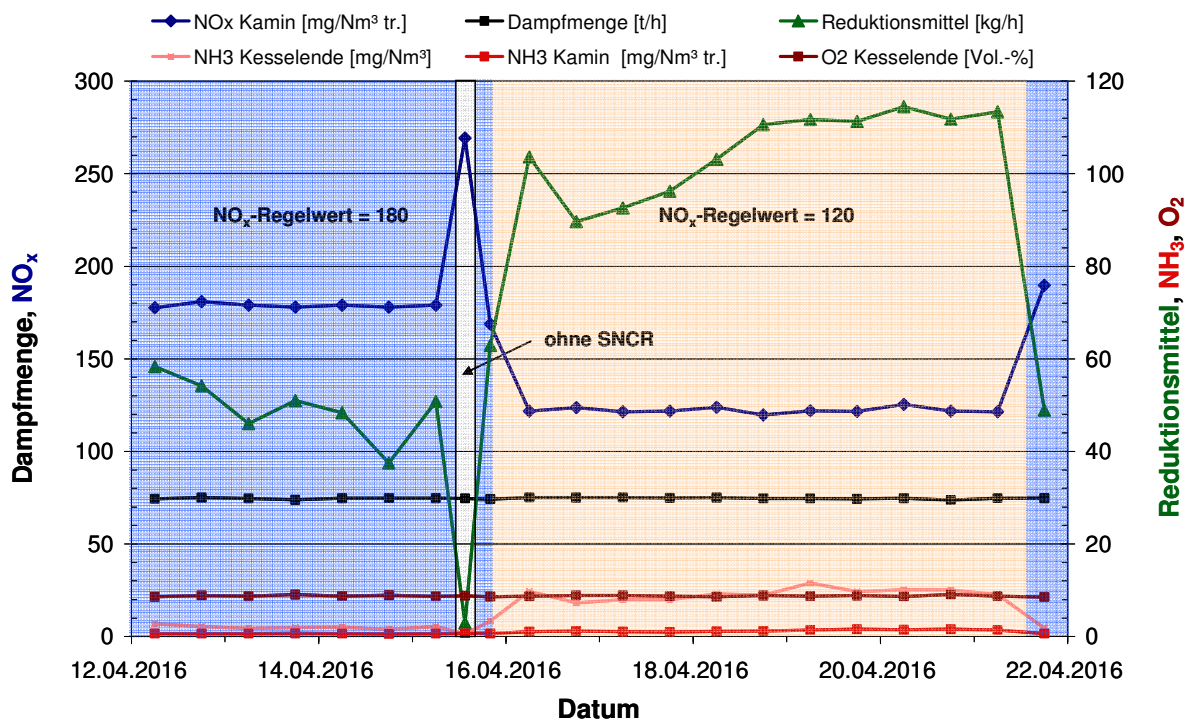


Abbildung 4.5-2: Versuchsprogramm an Linie 2.

Die Abbildung 4.5-2 zeigt das Versuchsprogramm für Linie 2. Die drei verschiedenen Anlageneinstellungen sind hier:

1. NO_x-RW = 180 mg/m³; Ist-Zustand der Anlage (blau)
2. Anlagenbetrieb ohne SNCR (hellgrau)
3. NO_x-RW = 120 mg/m³; abgesenkter NO_x-Regelwert (gelb-braun)

Die konstanten Werte der Dampfmenge und der Sauerstoffkonzentration zeigen, dass die Anlage in einem repräsentativen Zustand betrieben wurde.

Im 3. Zustand bei einem NO_x -RW von 120 mg/m^3 ist nach einem kurzen Überspringen der Reduktionsmittelmenge eine stetige Erhöhung des Verbrauches ersichtlich.

4.5.3 Messungen an Linie 2

Die Abdeckung der Messpunkte über dem Querschnitt ist hier aus zwei verschiedenen Gründen nicht optimal gewesen. Zum einen konnte wegen der vorhandenen Platzverhältnisse keine längere Sonde eingesetzt und zum anderen die Messstutzen an der rechten Kesselseite wegen mangelnder Zugänglichkeit nicht verwendet werden. Die Netzmessung in Abbildung 4.5-4 wurde bei abgesenktem NO_x -Regelwert durchgeführt. Es zeigt sich, dass Konzentrationsschwankungen in einem Bereich zwischen ca. 150 und $500 \text{ mg NO}_x/\text{m}^3$ auftraten.

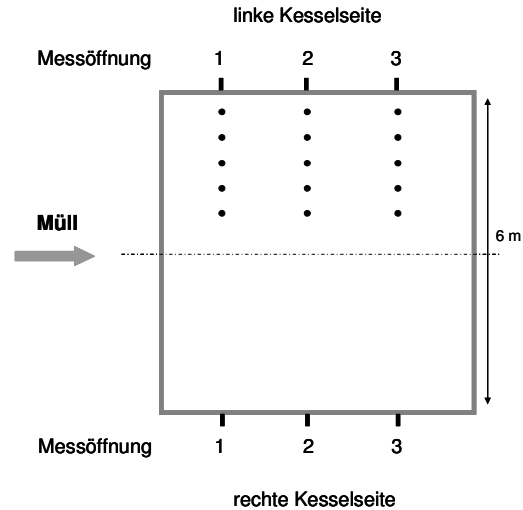


Abbildung 4.5-3:
 Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 2.

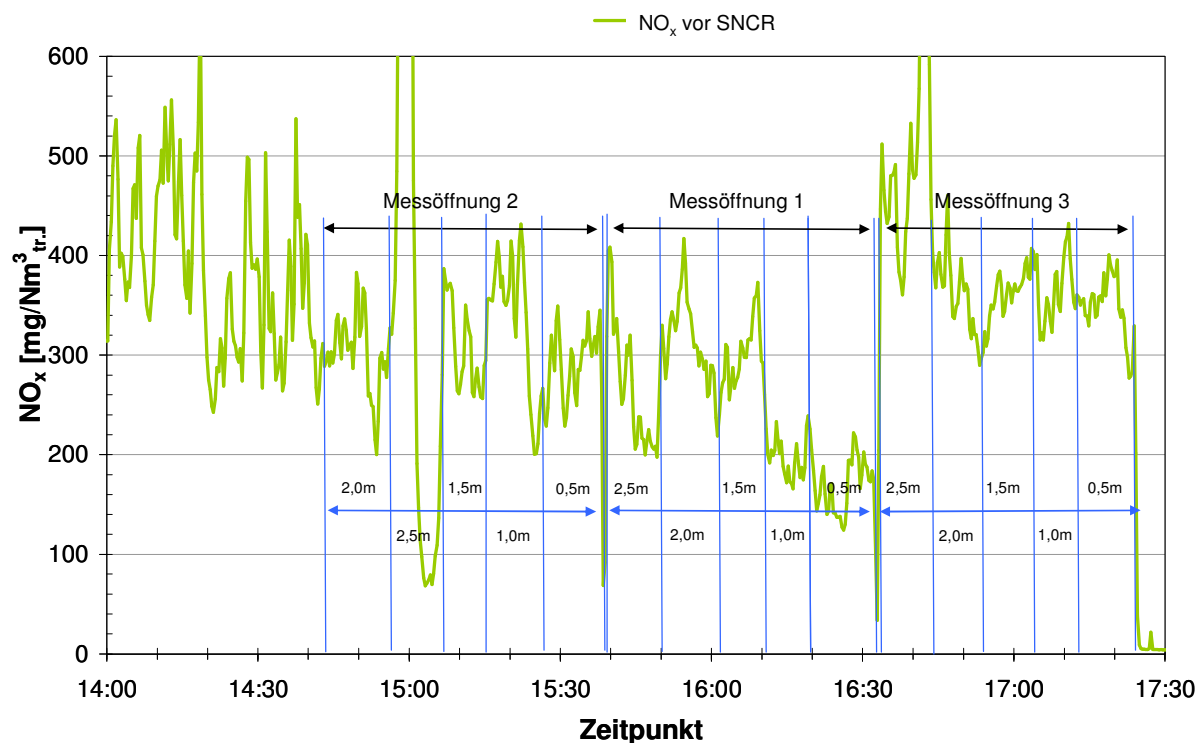


Abbildung 4.5-4: Netzmessung der NO_x -Konzentrationen für den abgesenkten Zustand unterhalb der SNCR an Linie 2 aufgenommen.

Im Folgenden sind die durch die Netzmessungen und den Betrieb ohne SNCR bestimmten Mittelwerte aufgelistet.

- $\text{NO}_x\text{-RW} = 180 \text{ mg/m}^3 \rightarrow \text{Roh-NO}_x = 360 \text{ mg/m}^3$

- Betrieb ohne SNCR → Roh-NO_x = 331 mg/m³
- NO_x-RW = 120 mg/m³ → Roh-NO_x = 325 mg/m³

Abbildung 4.5-5 zeigt die NO_x-Verläufe vor SNCR und nach Kessel für den Ist-Zustand und den Betrieb ohne SNCR.

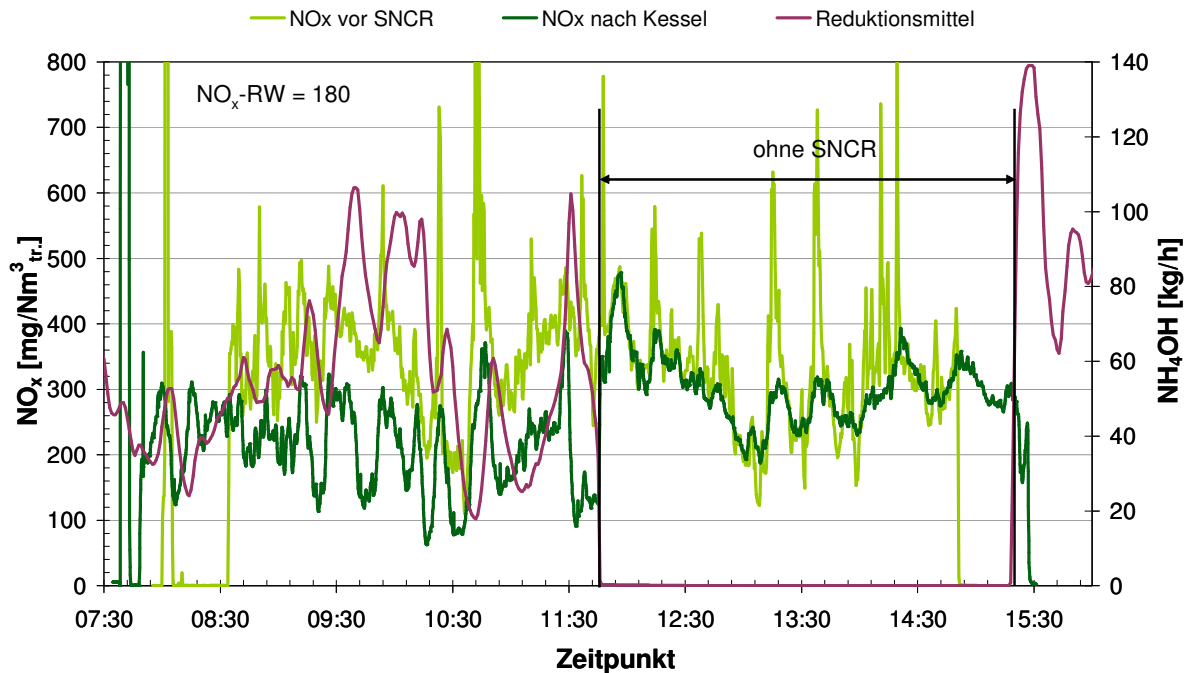


Abbildung 4.5-5: Betrieb der Anlage ohne SNCR, Linie 2.

Um einen besseren Überblick über die Schwankungsbreiten der Ammoniumkonzentrationen in den Reststoffen zu erhalten, wurde im projektbegleitenden Ausschuss des Vorhabens vereinbart, eine größere Anzahl von Stichproben zu untersuchen. Daraufhin wurden an jedem Messtag Proben aller Reststoffe entnommen und nach Beendigung der Messungen im Labor untersucht. In Abbildung 4.5-6 sind die ermittelten Ammoniumkonzentrationen in den festen Reststoffen und in Abbildung 4.5-6 die der flüssigen Reststoffe zusammen mit der Reduktionsmittelmenge für die Tage der Messungen aufgetragen. Prinzipiell sind die NH₄⁺-Gehalte im 2./3. Zug und im E-Filter eher niedriger, während sie im Reststoff des Gewebefilters um etwa eine Größenordnung größer liegen. Die Schwankungen der Ammoniumkonzentration des Kesselstaubes sind anscheinend unabhängig von der Reduktionsmittelmenge. Demgegenüber ist bei den Reststoffen aus dem Gewebefilter und insbesondere denen des Elektrofilters ein starker Anstieg der Ammoniumkonzentrationen bei erhöhter Reduktionsmittelzugabe zu verzeichnen. Für den abgesenkten Zustand ist allerdings die größte Steigerung der Konzentrationen im Elektrofilter festzustellen. Die Ammoniumkonzentrationen der aus den Wäschern ausgeschleusten Mengen (Abbildung 4.5-6) zeigen, dass der HCl-Wäscher die größte Ammoniak-Senke in der hier betrachteten Abgasreinigung darstellt. Die Absenkung der NO_x-Konzentration von 180 auf 120 mg/m³ (Δ NO_x = 60 mg/m³) hat hier etwa eine Verdoppelung der Reduktionsmittelmenge zur Folge, wodurch die Ammoniumkonzentration im HCl-Wäscher ungefähr auf das Dreifache ansteigt.

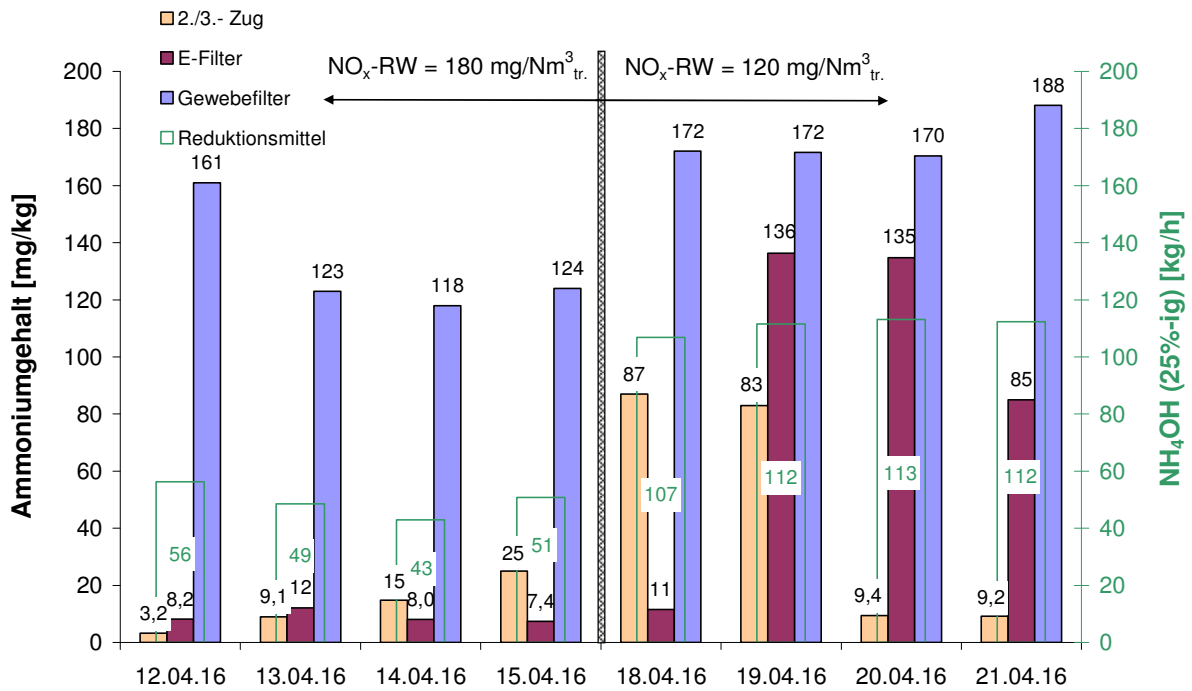


Abbildung 4.5-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x-Regelwert für Linie 2.

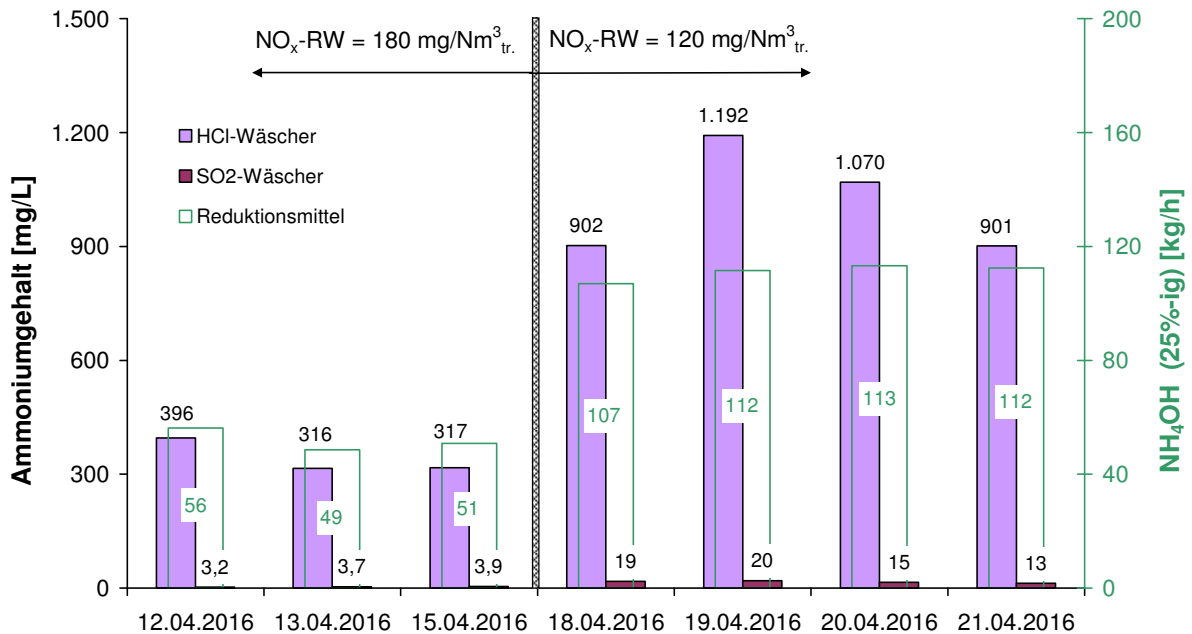


Abbildung 4.5-7: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den Wäschern sowie eingesetzte Reduktionsmittelmenge für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x-Regelwert für Linie 2.

Die Ammoniumfrachten aus den beiden Wäschern werden über die angeschlossene

Abwasserreinigungsanlage, d.h. über die Sole der Eindickung, den Hydroxidschlamm der Filterpresse und über den Gips aus dem System ausgeschleust.

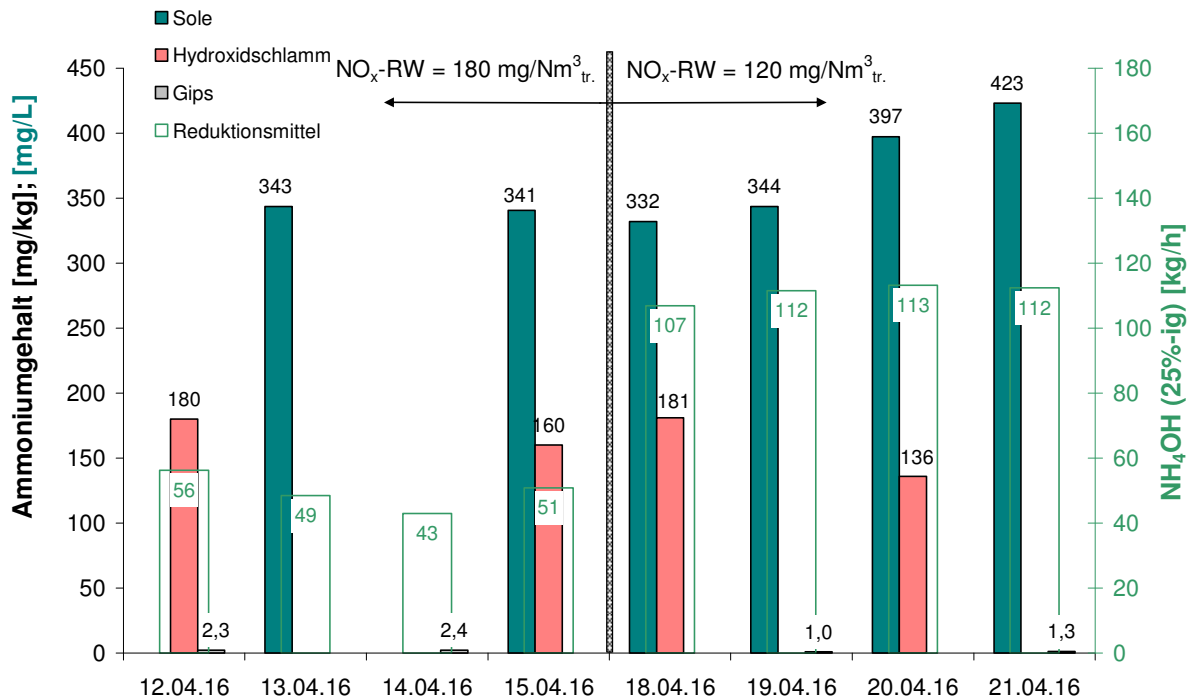


Abbildung 4.5-8: Mittelwerte der Ammoniumgehalte in den Reststoffen der Abwasseraufbereitung.

Die Abwasseraufbereitung wird von vier Linien bedient. Beim Ist-Zustand sind alle vier Linien mit einem NO-Regelwert von 180 mg/m³ betrieben worden. Im abgesenkten Zustand jedoch wurde nur die untersuchte Linie auf NO_x-RW = 120 herabgesetzt. Während für den Gips und den Hydroxidschlamm kein Einfluss auf die Ammoniumkonzentrationen festgestellt werden konnte, ist bei der Sole mit einer Verzögerung von vier Tagen eine sukzessive Erhöhung zu erkennen.

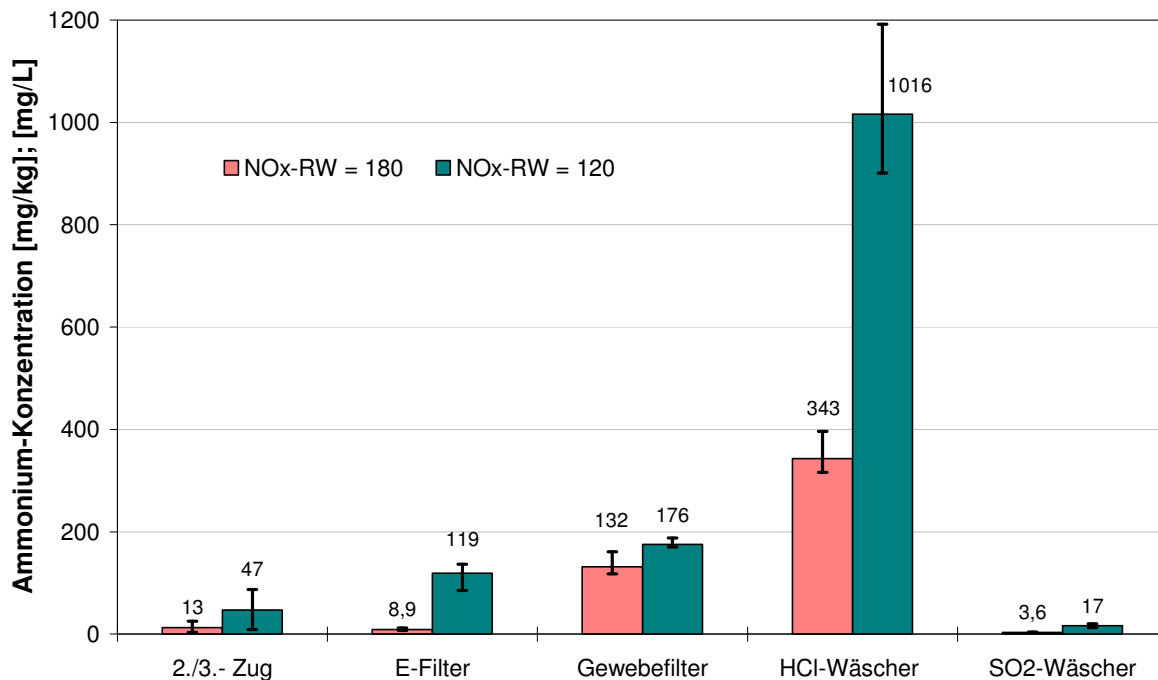


Abbildung 4.5-9: Mittelwerte der Ammoniumgehalte in den Reststoffen, Linie 2.

Um einen Überblick über die Streuung der NH_4^+ -Konzentrationen in den Reststoffen zu erhalten, wurden die Mittelwerte sowohl der festen als auch der flüssigen Phasen in Abbildung 4.5-9 für beide Anlagenzustände aufgetragen. Zur Berechnung des Mittelwerte für den $\text{NO}_x\text{-RW} = 120$ am E-Filter wurde allerdings der Wert vom 18.04. nicht mit einbezogen, da dieser nicht plausibel erscheint. Um die Streubreite der gemessenen Werte zu erfassen, sind die maximalen und minimalen Konzentrationen zusätzlich dargestellt. Die relativen Abweichungen liegen bei den festen Reststoffen mit 75 % nach unten und 92 % nach oben für den 2./3. Zug ($\text{NO}_x\text{-RW}=180$) am höchsten und die des Gewebefilters mit 22 und 10 % ($\text{NO}_x\text{-RW}=180$) am niedrigsten. Für die flüssigen Reststoffe liegen sie prinzipiell niedriger. Dies ist vor allem mit dem Ort der Probenahmen zu erklären.

Aus dem 2./3. Zug und dem E-Filter wurden Stichproben über einen Zeitraum von etwa 15 Minuten gesammelt. Hier befinden sich vor allem größere Partikel. Diese Proben korrelieren zeitnah mit den Vorgängen. Die Proben aus dem Gewebefilter bilden eher eine Sammelprobe mit feinen Partikeln aus einem längeren Zeitraum ab, bis der Filterkuchen vom Gewebes Schlauch entweder abfällt oder durch einen Druckstoß abgereinigt wird. In den Wäschern hingegen findet eine ständige Umwälzung statt, wodurch eine Homogenisierung gewährleistet wird.

4.5.4 Bilanzen Linie 2

Der in Abbildung 4.5-10 ermittelte Anteil zur Reduzierung liegt bei dieser Linie im Ist-Zustand bei 48 % und im abgesenkten Zustand bei 33 % (Abbildung 4.5-11). Ausgehend vom Roh- NO_x -Wert aus dem Betrieb der Anlage ohne SNCR würde sich ein Reduktionsgrad von 39 % ergeben. Die höchsten Anteile in den Reststoffen sind hier im Wasser des HCl-Wäschers

anzutreffen. Diese verdoppeln sich etwa bei Absenkung des NO_x-RW.

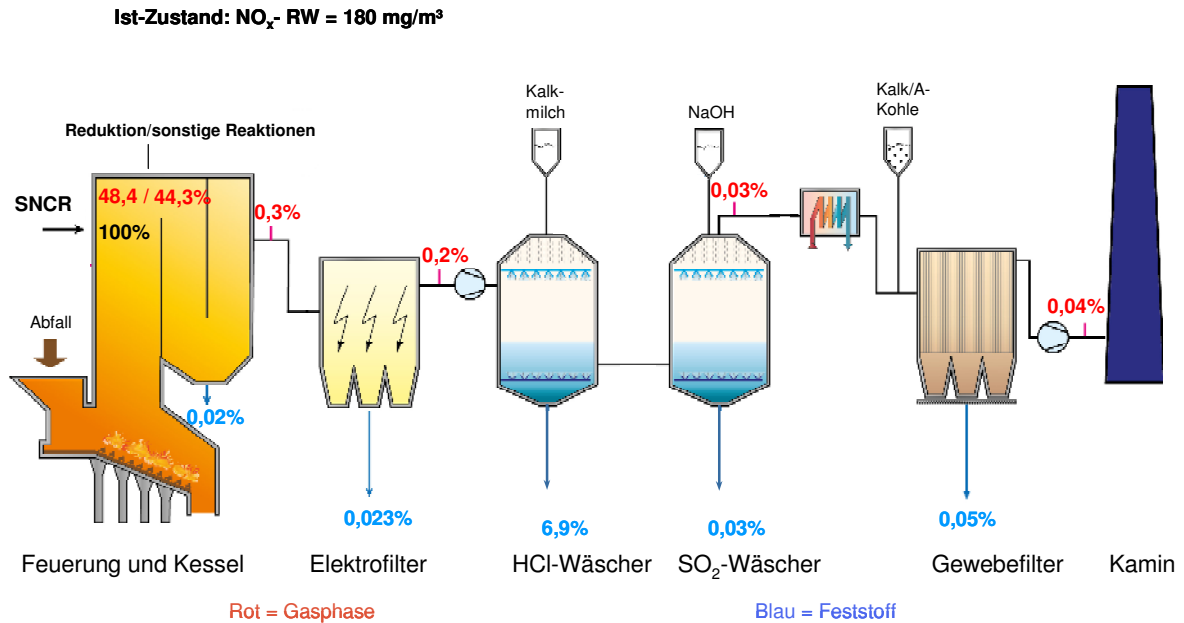


Abbildung 4.5-10: Ammoniak-Bilanz für Linie 2 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

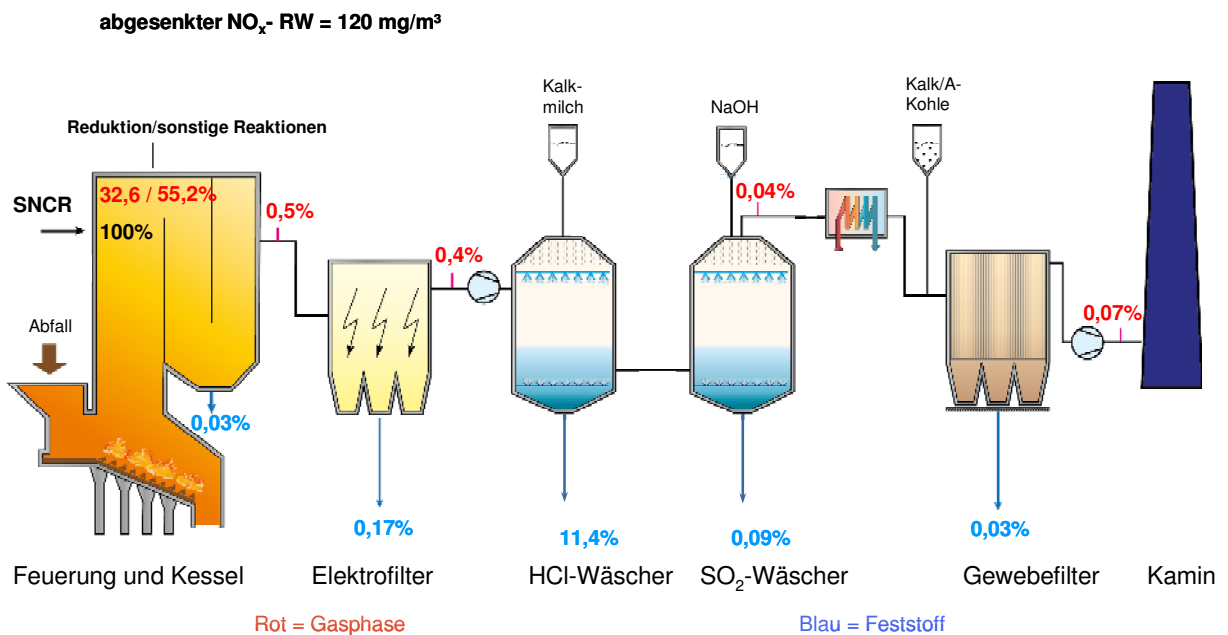


Abbildung 4.5-11: Ammoniak-Bilanz für Linie 2 für den Zustand mit abgesenktem NO_x-Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

4.6 Linie 6

4.6.1 Kurzbeschreibung der projektrelevanten Anlagentechnik

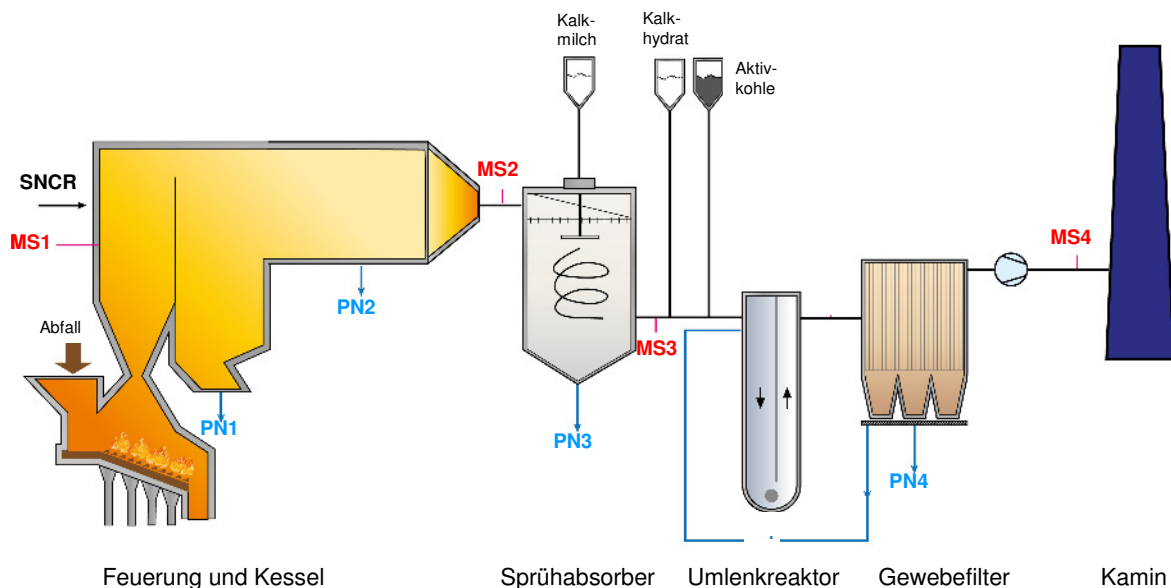


Abbildung 4.6-1: Anlagenfließbild der Linie 6.

Rostfeuerung

Feuerung:	wassergekühlter Platten-Vorschubrost, Mittelstromfeuerung
Brennstoff:	aufbereiteter Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall
Durchsatz, max:	21,6 t/h bei einem mittleren Heizwert von 14,5 MJ/kg
Heizwert:	14,5 MJ/kg (11 – 18 MJ/kg)
Feuerungswärmeleistung:	87 MW _{th} (52,2 – 95,7 MW _{th})
Dampferzeugerleistung:	100 t/h Nennleistung

Kessel

4-Zug Dampferzeuger (Horizontalkessel mit 3 Vertikalzügen)

1.- 3. Zug: vertikale Leerzüge

4. Zug: Horizontalzug → Schutzverdampfer, 3 Überhitzerstufen, Verdampfer, 4 ECO-Stufen

SNCR

Hersteller:	Firma Mehdau & Steinfath
Reduktionsmittel:	Harnstofflösung
Eindüseebenen:	3; Ebene 1: 23,00 m, Ebene 2: 26,20 m, Ebene 3: 27,5 m
Düsengruppen je Ebene:	1 an der Vorderwand
Anzahl Düsen je Gruppe:	5
Treibmittel:	Druckluft
Reduktionsmittelmenge	= f(NO _x hinter Kessel), zurzeit NO _x -Regelwert = 185 mg/Nm ³
Schaltung der Ebenen	= f(T _{RG})

4.6.2 Versuchsprogramm Linie 6

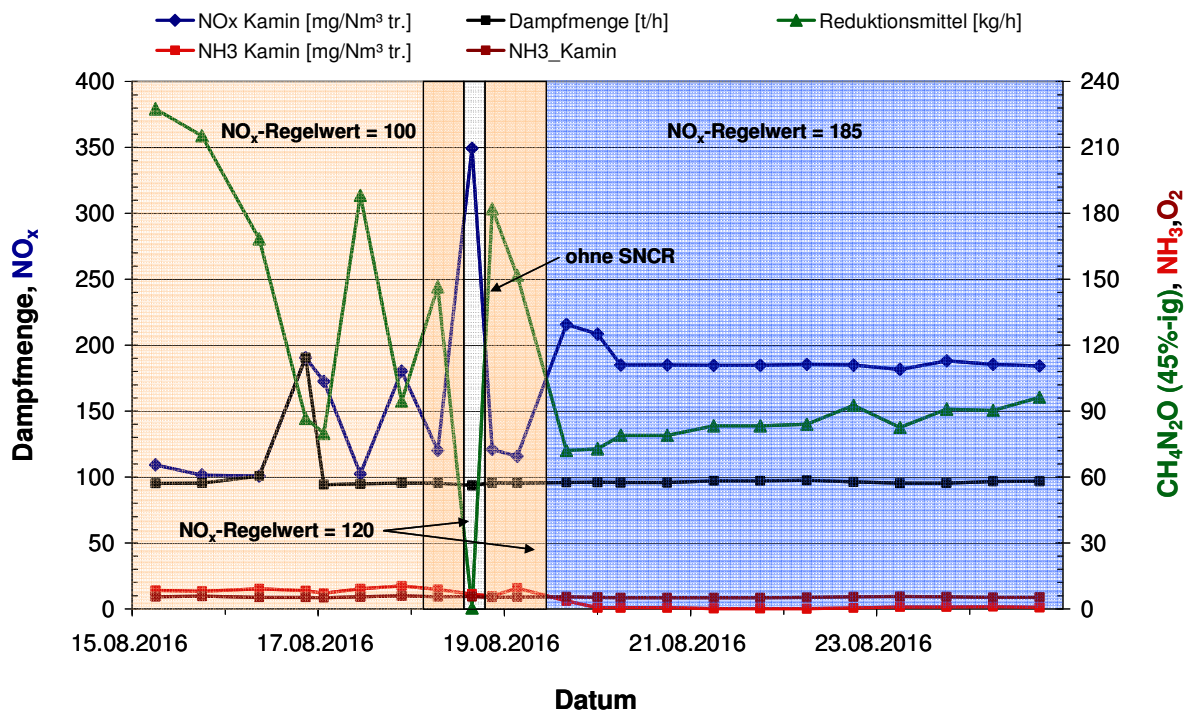


Abbildung 4.6-2: Versuchsprogramm an Linie 6.

Die Anlage wurde bezüglich der Parameter Sauerstoff und Dampfmenge in einem repräsentativen Zustand betrieben (Abbildung 4.6-2). Es wurden vier verschiedene Anlagenzustände gefahren:

1. NO_x -RW = 100 mg/m^3 ; abgesenkter NO_x -Regelwert I der Anlage (helles gelb-braun)
2. NO_x -RW = 120 mg/m^3 , abgesenkter NO_x -Regelwert II der Anlage (gelb-braun)
3. Anlagenbetrieb ohne SNCR (hellgrau)
4. NO_x -RW = 185 mg/m^3 ; Ist-Zustand der Anlage (blau)

Abweichend von der üblichen Vorgehensweise wurde hier zuerst der Anlagenzustand mit abgesenktem NO_x -RW betrachtet. Dafür wurde die Anlage drei Tage vor Beginn der Untersuchungen mit einem NO_x -Regelwert von 100 mg/m^3 betrieben.

Wie anhand des Reduktionsmittelverlaufes und dementsprechend an den NO_x -Konzentrationen am Kamin zu erkennen ist, konnten die Zustände mit abgesenktem NO_x -RW nicht über einen längeren Zeitraum konstant gehalten werden. Dies liegt begründet in der stark schwankenden Brennstoffqualität mit sehr niedrigen Heizwerten und hohen Wassergehalten.

4.6.3 Messungen an Linie 6

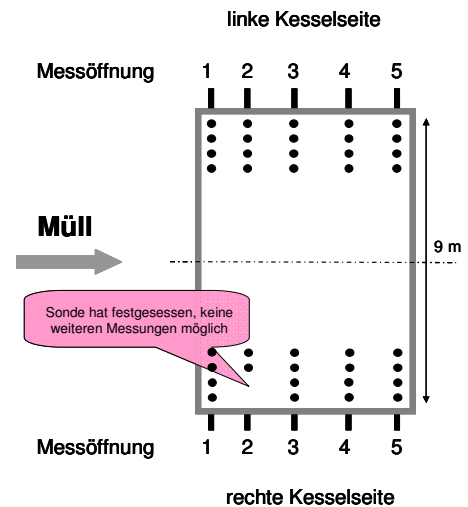


Abbildung 4.6-3: Foto der Messsonde beim Betrieb an der linken Kesselseite (Messöffnung 4) sowie eine schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 4.

Bei dieser Anlage konnte keine gute Querschnittsabdeckung für die Messungen unterhalb der SNCR-Ebene erreicht werden. Dies ist hauptsächlich durch die Kesselgeometrie begründet, aber auch durch die Platzverhältnisse neben der rechten und linken Kesselwand. Es konnte nur eine Sonde mit einer maximalen Länge von 3,25 m eingesetzt werden, wie das Foto in Abbildung 4.6-3 auf der linken Seite zeigt. Zusätzlich wurden nicht alle Punkte im Netz angefahren, weil Ablagerungen in einem der Messstutzen dazu führten, dass sich die Sonde festsetzte.

Die Netzmessungen in Abbildung 4.6-4 wurden im Zeitraum während des Ist-Zustandes durchgeführt. Die Konzentrationsschwankungen lagen in einem Bereich zwischen 250 und 500 mg/m³. Für den abgesenkten RW sind die NO_x-Konzentrationsverläufe vor SNCR und nach Kessel in Abbildung 4.6-5 aufgetragen. Daraus ergeben sich die folgenden Roh-NO_x-Werte:

- NO_x-RW = 120 mg/m³ → Roh-NO_x = 411 mg/m³
- Betrieb ohne SNCR → Roh-NO_x = 379 mg/m³
- NO_x-RW = 185 mg/m³ → Roh-NO_x = 416 mg/m³

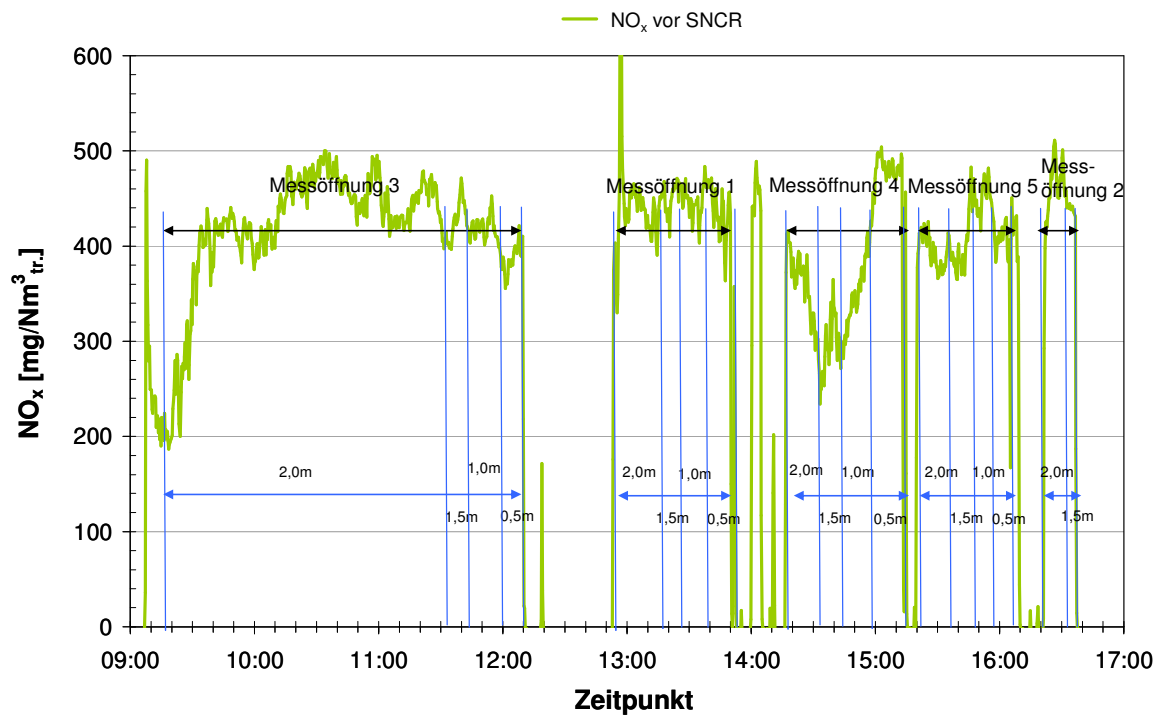


Abbildung 4.6-4: Netzmessung der NO_x-Konzentrationen für den Ist-Zustand unterhalb der SNCR an Linie 6 aufgenommen.

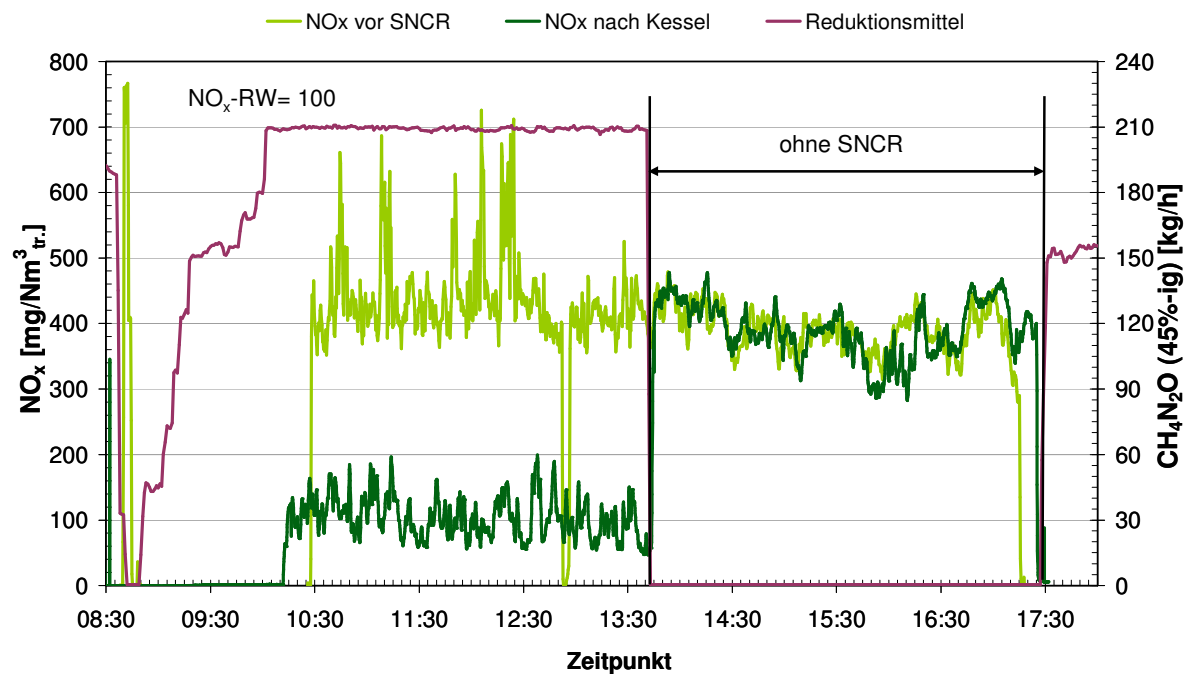


Abbildung 4.6-5: NO_x-Konzentrationen vor SNCR und nach Kessel, sowie Betrieb der Anlage ohne SNCR.

Die Ammoniumkonzentrationen der Kesselaschen (Abbildung 4.6-6) fallen im Ist-Zustand gegenüber dem abgesenkten Zustand wie erwartet ab. Die der Reststoffe aus dem

Sprühabsorber allerdings steigen im Ist-Zustand eher an. Die Filterasche hat im Zustand mit $\text{NO}_x\text{-RW}=100(120)$ eine fast 6-fache Konzentration im Vergleich zum Ist-Zustand (ohne die Konzentration vom 23.08.2016). Auf Grund der ständig schwankenden Reduktionsmittel-massenströme wird hier auf eine weitergehende statistische Auswertung der Reststoffkonzentrationen verzichtet.

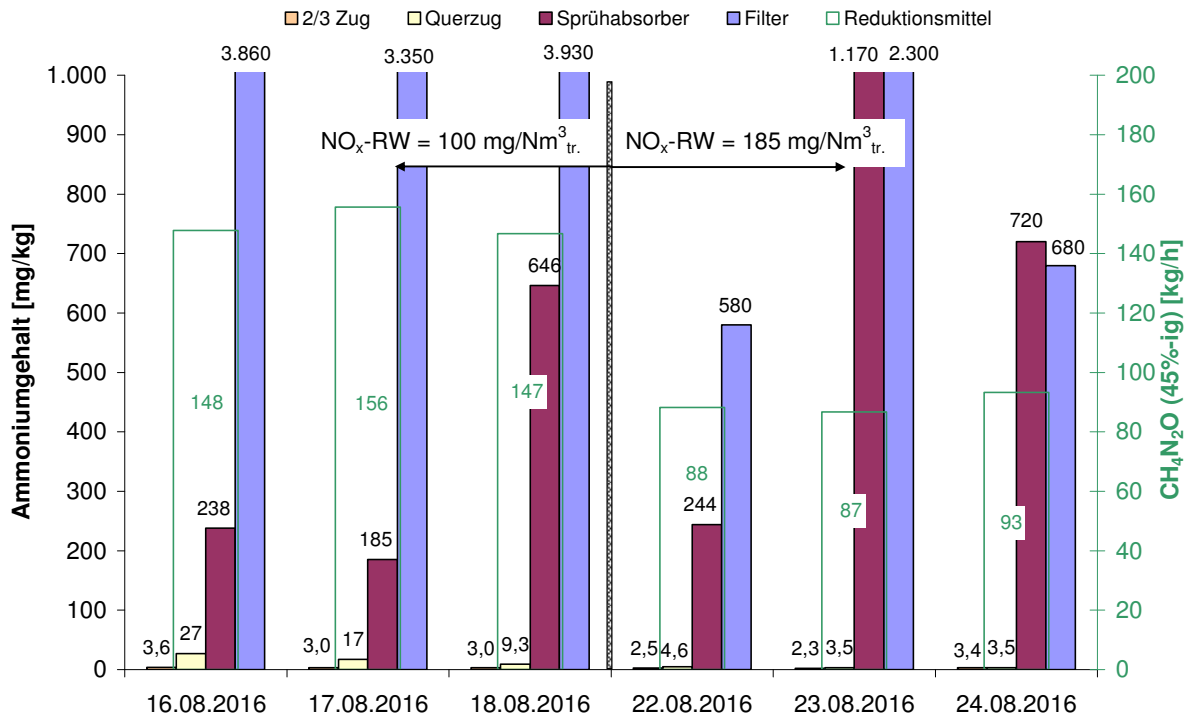


Abbildung 4.6-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO_x -Regelwert für Linie 6.

4.6.4 Bilanzen Linie 6

Der Reduktionsmittelgrad liegt bei 33 % (bzw. 27 % bei Berechnung aus dem Roh- NO_x -Wert des Betriebes ohne SNCR) für den Ist-Zustand und fällt auf 23 % für den abgesenkten Zustand beim $\text{NO}_x\text{-RW}=120$. Die in den Ammoniak-Bilanzen (Abbildung 4.6-7 und Abbildung 4.6-8) berechneten Anteile für den Kesselstaub sind gering, da nur sehr kleine Staubmassen anfallen. Die Anteile für den Filterstaub steigen knapp um den Faktor 4, die im Reingas vor dem Kamin um den Faktor 1,4. Hier sei noch einmal ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht, dass die Konzentrationen an den einzelnen Anlagenteilen an verschiedenen Tagen ermittelt wurden und somit nur in der Größenordnung und nicht absolut zu vergleichen sind.

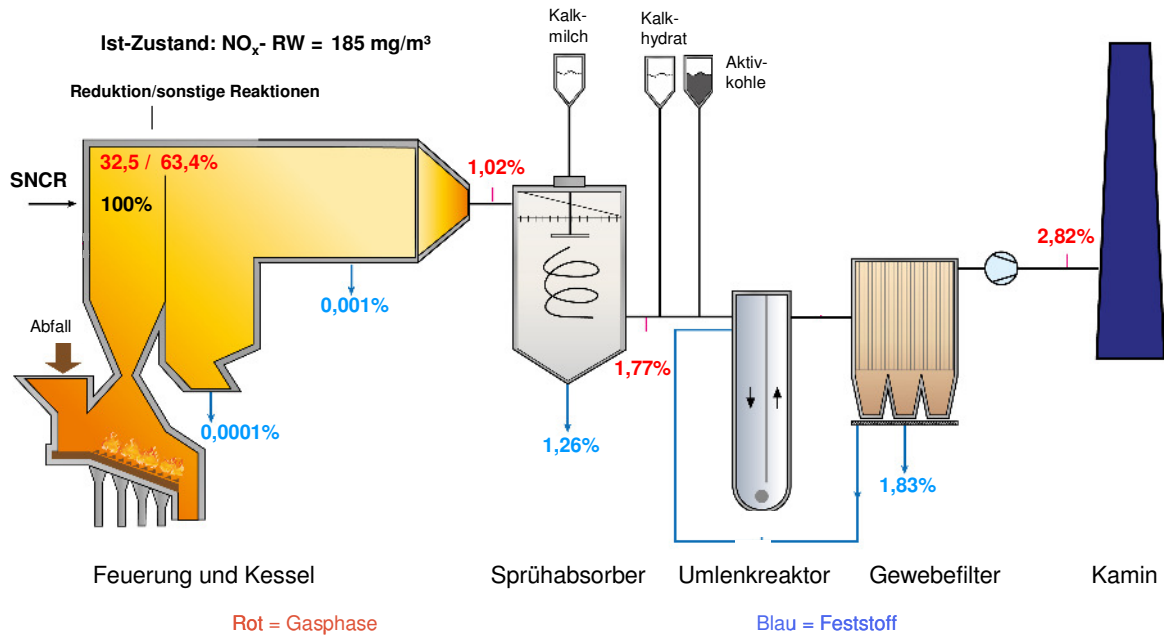


Abbildung 4.6-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 6 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

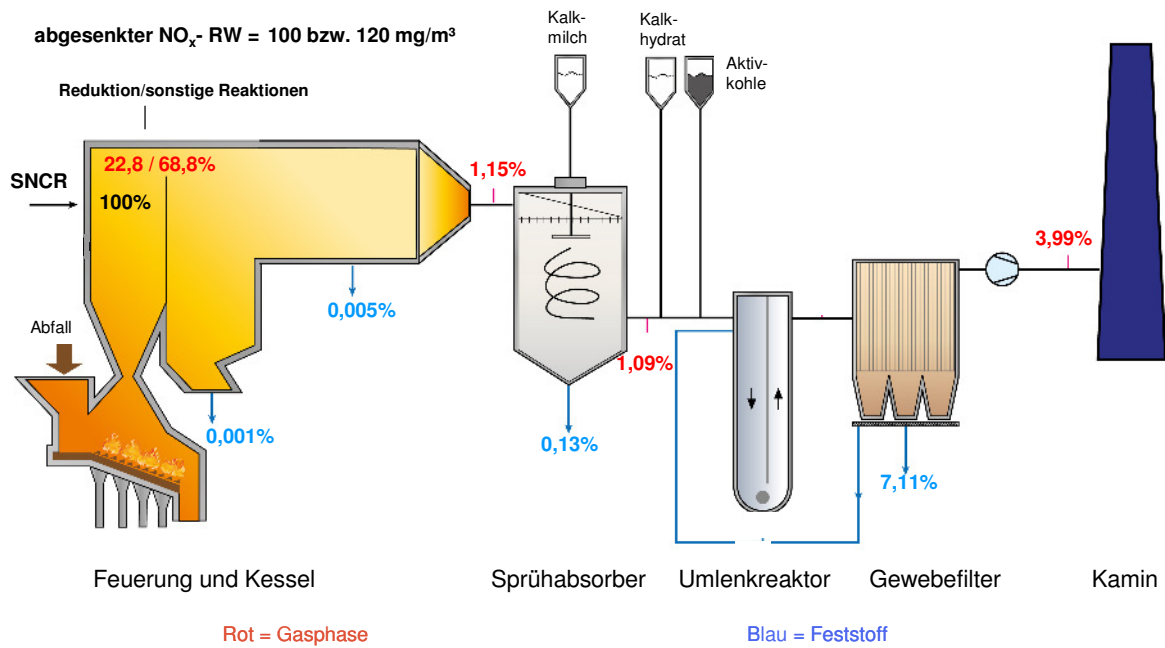


Abbildung 4.6-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 6 für den Zustand mit abgesenktem NO_x-Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.

5 Anlagenübergreifende Darstellung der Ergebnisse

Ausgehend von den Fragestellungen in Kapitel 2.2 werden nun die gewonnenen Ergebnisse im Zusammenhang diskutiert.

5.1 Verbleib des NH_3 auf dem Rauchgasweg

Im Folgenden werden die drei Anteile des Ammoniak-Schlupfes näher betrachtet:

- „gasförmig“, durch die Gasmessungen vor und hinter jedem Anlagenteil bestimmt,
- „fest“, durch die Probenahmen der Kesselaschen und der Reaktionsprodukte - hier besonders Filterstäube und Sprühabsorberreststoffe - ermittelt und
- „flüssig“, mit Hilfe von Probenahmen aus den Wäschern bestimmt.

Die offensichtlichste Änderung bei gesteigertem Reduktionsmitteleinsatz ist neben der Absenkung der NO_x -Emissionen der Anstieg des NH_3 -Schlupfes am Kamin. In Abbildung 5.1-1 ist der NH_3 -Schlupf, der aus Mittelwerten der Betreiberdaten im jeweiligen Messzeitraum für die untersuchten Anlagen bestimmt wurde, als Balkendiagramm aufgetragen. Zusätzlich ist an jedem Balken der jeweilige NO_x -Regelwert angegeben.

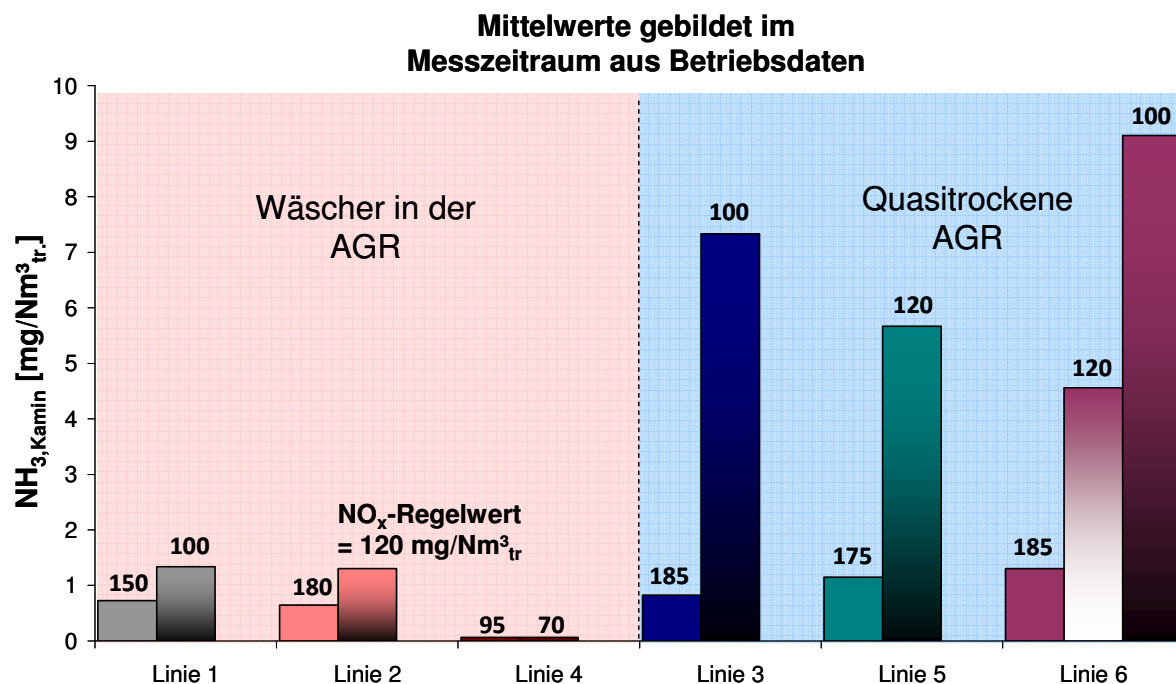


Abbildung 5.1-1: Gegenüberstellung des „gasförmigen“ NH_3 -Schlupfes am Kamin für die untersuchten Anlagen.

Im linken Teil ist der Schlupf für die Linien mit Wäschern in der Abgasreinigung und im rechten Teil der Wert der Linien mit quasitrockener AGR dargestellt. Wie erwartet, steigt der Schlupf am Kamin bei Anlagen mit Wäschern nur unerheblich von ca. 0,7 auf etwa 1,3 mg/m^3 an. Linie 4 zeigt mit $< 0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ für beide Anlagenzustände keinerlei Veränderung im Messwert.

Die Anlagen mit quasitrockener AGR zeigen jedoch einen deutlichen Sprung bei der Ammoniakkonzentration am Kamin, wenn zur Erreichung des eingestellten NO_x -Wertes die Reduktionsmittelmenge erhöht werden muss. Dennoch wird auch hier der geforderte NH_3 -Grenzwert von 10 mg/m^3 eingehalten. Im Zusammenhang mit der Diskussion um die „besten verfügbaren Techniken“ im sog. Sevilla-Prozess ist zu bemerken, dass die NH_3 -Konzentrationen beim gemessenen Sauerstoffgehalt angegeben sind und nicht wie z. B. in den Niederlanden auf einen Sauerstoffbezugswert von 11 %, was einer „Verdünnung“ entspricht und für die eben gezeigten NH_3 -Mittelwerte zum Vergleich noch einmal in Abbildung 5.1-2 dargestellt wird.

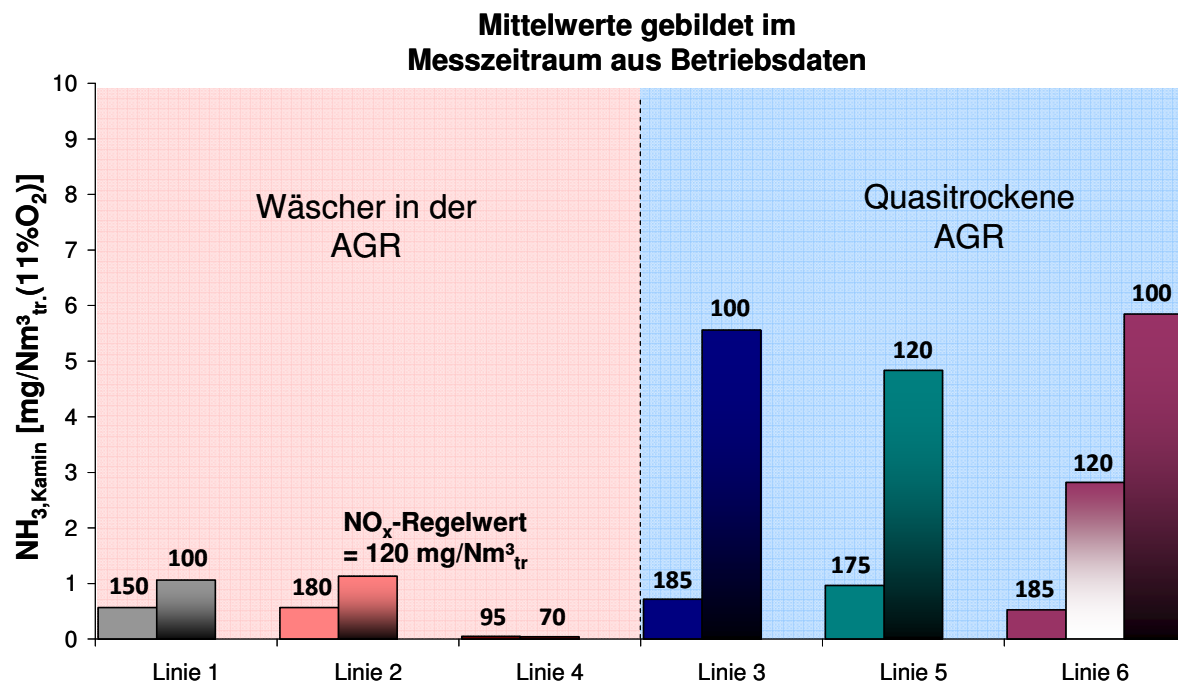


Abbildung 5.1-2: Gegenüberstellung des „gasförmigen“ NH_3 -Schlupfes am Kamin für die untersuchten Anlagen (Konzentrationen bezogen auf 11% O_2 im Abgas).

Die Konzentrationen der einzelnen Fraktionen sind nicht nur vom Reduktionsmitteleinsatz abhängig, sondern insbesondere auch vom Aufbau der Abgasreinigungsanlage. So wird bei quasitrockenen AGRs der Kombination

SNCR → Sprühabsorber → Umlenkreuz → Gewebefilter

die größte Menge der Ammoniumverbindungen im Gewebefilter abgeschieden, wie dies aus Abbildung 5.1-3 deutlich wird, in welcher der spezifische Ammoniumgehalt bezogen auf die eingesetzte Müllmenge für die verschiedenen Reststoffe der quasitrockenen Abgasreinigung im Ist-Zustand aufgetragen ist. Hierbei ist zu beachten, dass die Achse für den spezifischen Ammoniumgehalt eine logarithmische Unterteilung aufweist, da ansonsten – aufgrund der Konzentrationsunterschiede sowohl der einzelnen Fraktionen als auch bei den unterschiedlichen Linien – keine übersichtliche Gegenüberstellung des gesamten Spektrums möglich ist.

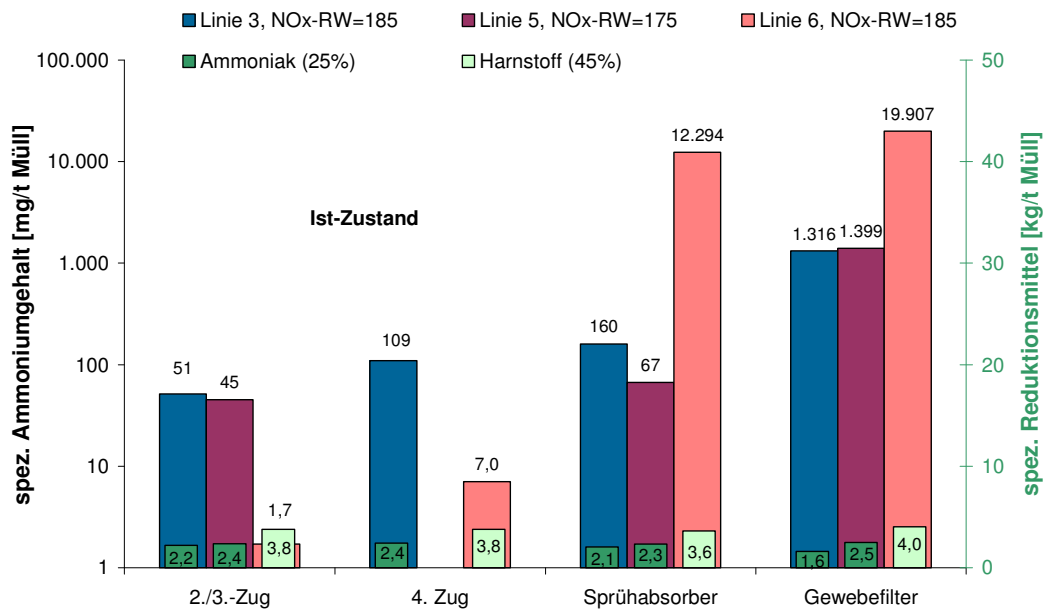


Abbildung 5.1-3: Gegenüberstellung des „festen“ Schlupfes beim Ist-Zustand der untersuchten Anlagen mit quasi-trockener Abgasreinigung.

Während die Steigerung der Reduktionsmittelmenge erwartungsgemäß kaum Einfluss auf die Ammoniumkonzentration der Kesselaschen hat, ist bei den Reststoffen aus dem Sprühabsorber und dem Gewebefilter mit einer Erhöhung auf das 4 – 5 fache zu rechnen, wie Abbildung 5.1-4 für den Zustand mit abgesenktem NO_x-Regelwert zeigt.

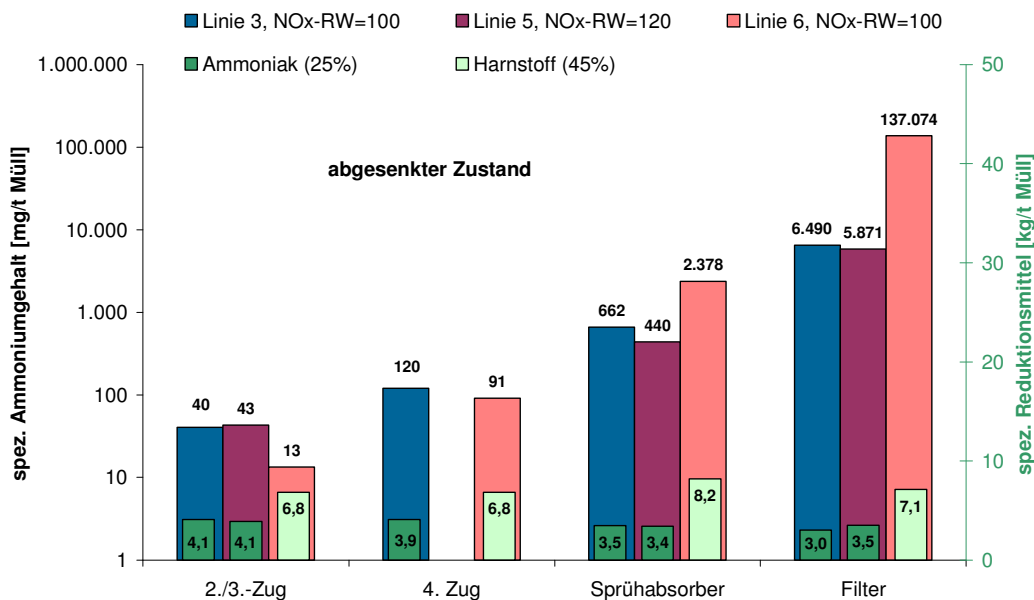


Abbildung 5.1-4: Gegenüberstellung des „festen Schlupfes“ beim abgesenkten Zustand der untersuchten Anlagen mit quasi-trockener Abgasreinigung.

Die überproportionale Steigerung der Ammoniumkonzentrationen in den Reststoffen von

Sprühabsorber und Gewebefilter bei der mit Harnstoff betriebenen Linie liegt vermutlich am noch nicht optimierten Betrieb der Linie und den damit verbundenen hohen Reduktionsmittelverbräuchen (siehe auch Kapitel 4.6.2).

Da die höchsten NH_4^+ -Konzentrationen am Gewebefilter auftreten, liegt die Vermutung nah, dass sich die Ammoniumverbindungen insbesondere an sehr feinen Partikeln an- oder in diese einlagern, da die Oberfläche der kleinen Partikel sehr viel größer als die der Groben ist.

In den Abbildung 5.1-5 und Abbildung 5.1-6 sind die spezifischen Ammoniumgehalte der verschiedenen festen Reststoffe für die Abgasreinigungen mit Wäschern in der AGR gegenübergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Filteranordnungen scheint sich die spez. Ammoniumkonzentration nicht so homogen auf die einzelnen Rauchgasreinigungsstufen aufzuteilen, wie dies bei Anlagen mit quasi-trockener AGR der Fall ist.

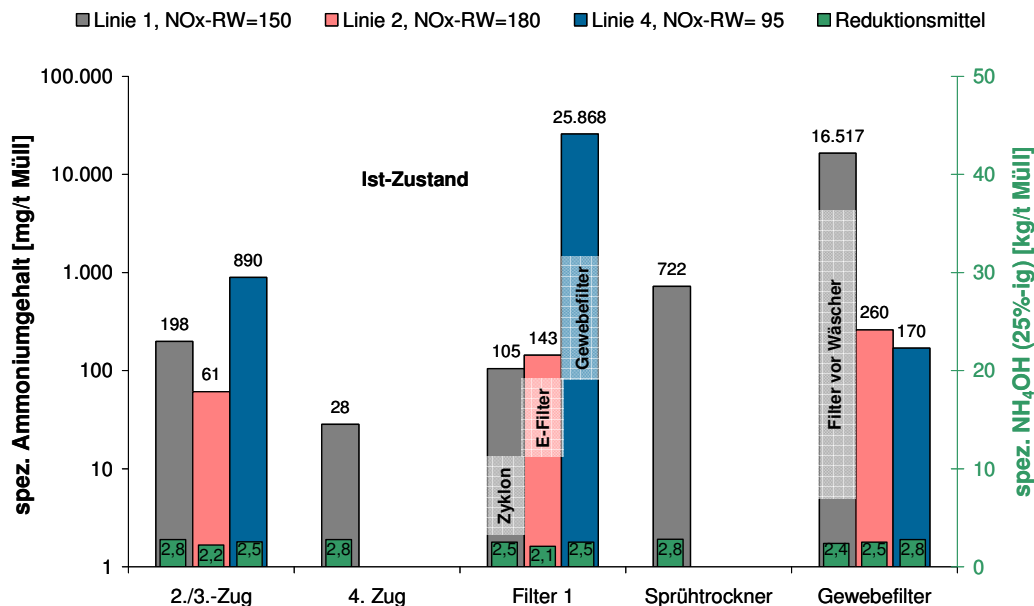


Abbildung 5.1-5: Gegenüberstellung des „festen“ Schlupfes beim Ist-Zustand der untersuchten Anlagen mit Wäschern in der Abgasreinigung.

Allerdings sind die höchsten spez. Ammoniumgehalte der festen Reststoffe an allen Anlagen im Gewebefilter wiederzufinden. Für Linie 4 ist ein Gewebefilter direkt nach dem Kessel angeordnet. Der große Konzentrationsunterschied am Gewebefilter (am Ende der AGR) zwischen Linie 1 und den Linien 2 bzw. 4 liegt darin begründet, dass an Linie 1 vor dem Wäscher entstaubt wird und dementsprechend das Gas bei den beiden anderen Linien schon „gewaschen“ wurde. Die Annahme, dass sich Ammoniumgehalte mit sehr feinen Partikeln korrelieren, wird durch die Konzentrationsverteilung an „Filter 1“ bestärkt. Je „besser“ der Abscheider auch kleinste Partikel entfernt, umso höher ist die Ammoniumkonzentration im Reststoff.

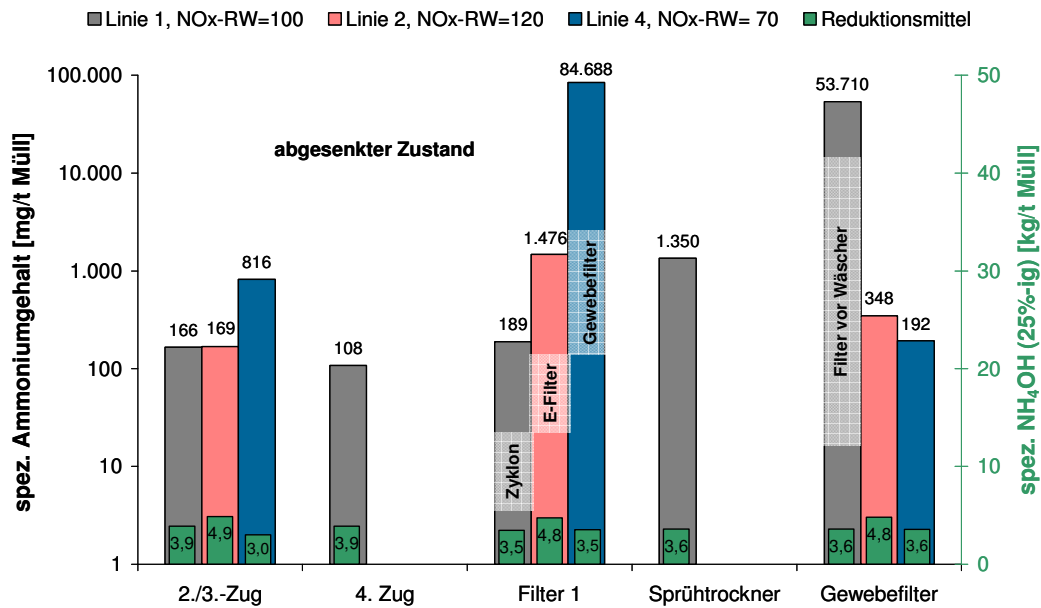


Abbildung 5.1-6: Gegenüberstellung des „festen“ Schlupfes beim abgesenkten Zustand der untersuchten Anlagen mit Wäschern in der Abgasreinigung.

Die Gegenüberstellung der spez. Ammoniumkonzentrationen im Wasser der Wäscher für den Ist- und den abgesenkten Zustand zeigt Abbildung 5.1-7. Im HCl-Wäscher bzw. der ersten Stufe des 2-stufigen Wäschers steigen die Konzentrationen um das 2 bis ca. 3,5-fache im abgesenkten Zustand an. Jene im SO₂-Wäscher (2. Stufe) nehmen stärker zu, liegen aber prinzipiell weit unterhalb denen im 1. Wäscher.

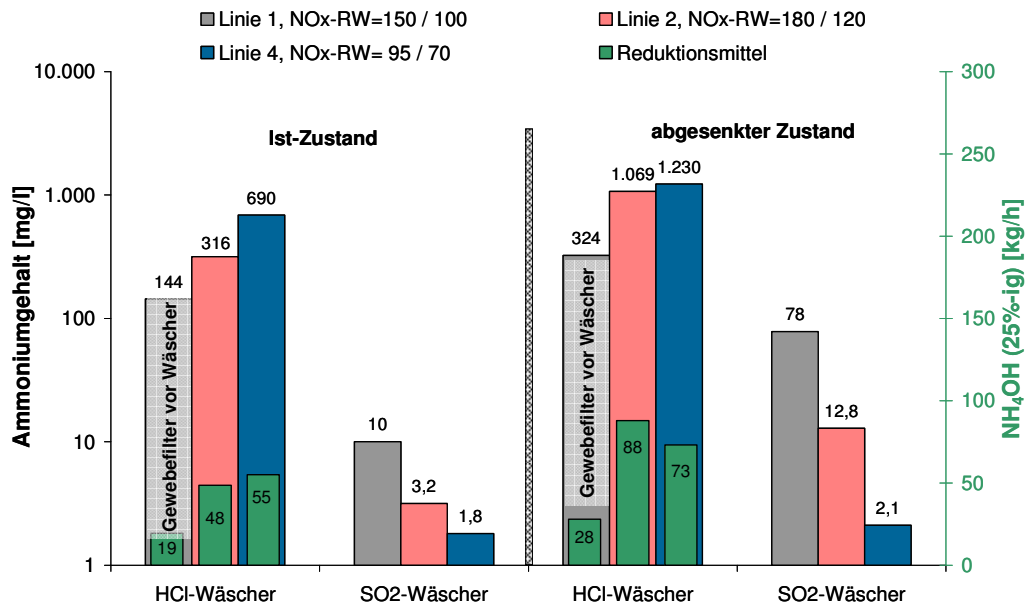


Abbildung 5.1-7: Gegenüberstellung des „flüssigen“ Schlupfes beim Ist- und abgesenkten Zustand der untersuchten Anlagen mit Wäschern in der Abgasreinigung.

5.2 Effizienz der Reduktionsmittelnutzung

Mit den ermittelten Ammoniumgehalten in den Reststoffen sowie den für die Reduktion benötigten stöchiometrischen Mengen an Reduktionsmittel und den gemessenen Ammoniak-Konzentrationen in der Gasphase können die Wirkungsgrade des eingesetzten Reduktionsmittels über den gesamten Abgasweg bestimmt werden. Zum Erreichen eines abgesenkten NO_x -Grenzwertes müssen überproportional hohe Reduktionsmittelmengen eingesetzt werden, da sich der für die Reduktion nutzbare Anteil je nach Anlage und damit verbundenen NO_x -Niveaus sowie der anlagenspezifischen Absenkung des NO_x -Regelwertes (ΔNO_x) um 5 bis über 20 % reduziert. Gründe hierfür sind, dass das Reduktionsmittel vermehrt oxidiert wird, die Reststoffe wie oben beschrieben mit Ammoniumverbindungen angereichert werden (Abbildung 5.1-3 bis Abbildung 5.1-7) und der gasförmige Schlupf am Kamin ansteigt (Abbildung 5.1-1).

5.3 Verzögerte Ammoniakfreisetzung (Memory-Effekte)

Die Ammoniumverbindungen sammeln sich innerhalb der Anlagen an und werden diskontinuierlich mit den anderen zurückgehaltenen bzw. abgeschiedenen Feststoffen (Schlacke, Asche, Filterstäube) ausgetragen. Bei Erhöhung der Abgastemperatur oder Veränderung der Abgaszusammensetzung können sich diese Salze zersetzen, wobei das gebundene Ammoniak wieder entweicht. Auf ähnliche Weise kann innerhalb von Wäschern Ammoniak gespeichert und freigesetzt werden, z. B. bei Änderungen des pH-Wertes. Dieses Phänomen wurde beim Betrieb der Linie 2 ohne SNCR (Abbildung 5.3-1) beobachtet. In der Graphik sind die Konzentrationen von HCl , SO_2 gemessen vor dem Wäscher, die NH_3 -Konzentration am Kesselende und am Kamin, sowie die Reduktionsmittelmenge aufgetragen.

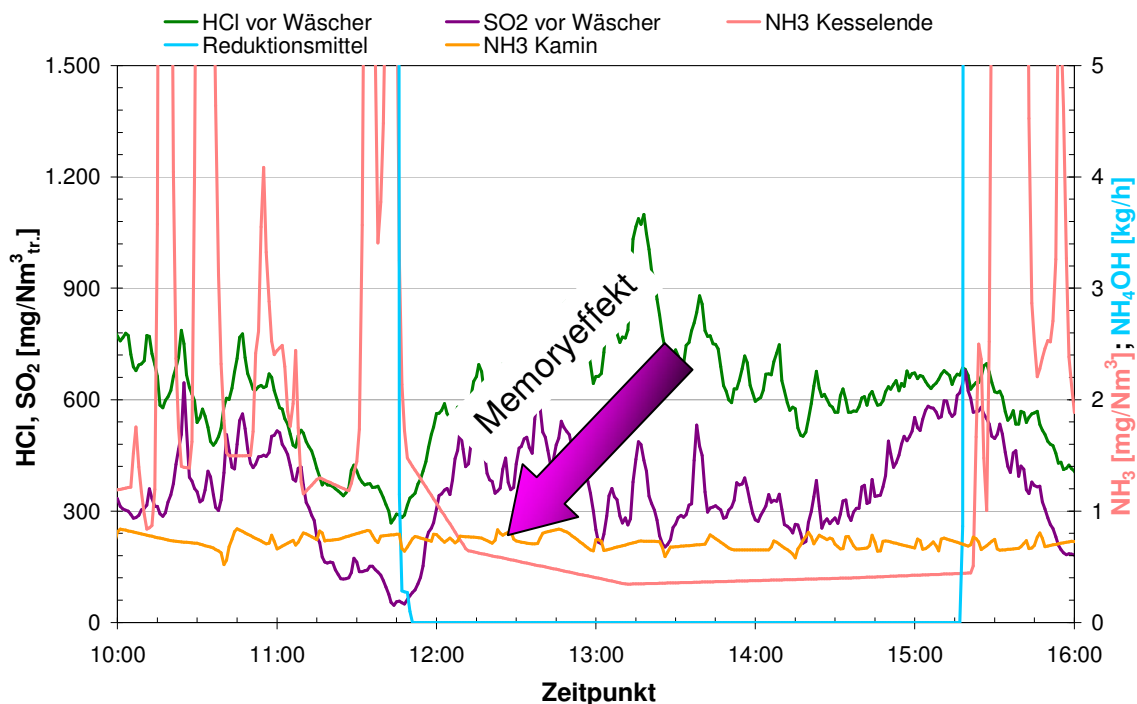


Abbildung 5.3-1: Verzögerte NH_3 -Freisetzung beim Betrieb ohne Reduktionsmittel am Beispiel Linie 2.

Sowohl die Zeitachse als auch die sekundäre Ordinate wurden gespreizt, um den Effekt besser darzustellen. Die Reduktionsmittelzugabe wurde gegen 11:45 Uhr gestoppt. Der Reduktionsmitteldurchsatz fällt daraufhin abrupt auf Null (blauer Graph, sekundäre y-Achse), aber die NH_3 -Konzentration am Kesselende (ebenfalls sekundäre y-Achse) folgt diesem Ereignis nur bedingt. Sie sinkt schnell bis auf $1,5 \text{ mg/m}^3$, um dann langsam über einen Zeitraum von ca. 10 Minuten auf einen Wert von $0,4 \text{ mg/m}^3$ abzufallen. Die am Ende des Kessels abgelagerten Ammoniumsalze befinden sich beim Betrieb ohne SNCR durch den fehlenden Ammoniak-Schlupf nicht mehr im Gleichgewicht mit der Gasphase. Vermutlich löst sich das Ammoniak dem Gleichgewicht folgend aus den Salzen. Dies wird auch als „Memory-Effekt“ bezeichnet. In diesem Zeitraum müsste auch ein Anstieg der HCl- und SO_2 -Konzentrationen messbar sein, der jedoch aufgrund der im Vergleich zu NH_3 hundertfach höheren Konzentration beider Komponenten im Rohgas nicht nachgewiesen werden kann, da die „normalen Schwankungen“ im System viel zu groß sind.

5.4 Entsorgung der Reststoffe

Die bergrechtliche Versatzpflicht besagt, dass Bergwerksbereiche nach der Nutzung zu verfüllen sind. Rückstände aus der Rauchgasreinigung von MVA sind typische Abfälle für die Untertage-Verwertung. Laut Studien handelt es sich um die „Beste verfügbare Technik“, um dem Gefahrenpotenzial dieser Abfälle hinreichend genug Rechnung tragen zu können [11].

Bei den unterschiedlichen zur Anwendung kommenden Verfahren wie z. B. Stapelversatz, Dickstoffversatz oder Sturzversatz werden bestimmte bauphysikalische Eigenschaften benötigt. Bringen die Abfälle diese nicht mit, so müssen sie mit geeigneten Komponenten kombiniert werden (Konditionierung).

Im Allgemeinen sind dort keine Grenzwerte für Ammoniumverbindungen vorhanden. Eine Ausgasung von NH_3 muss bei der Verarbeitung der Versatzstoffe vermieden werden, da eine Annahme der Reststoffe sonst verweigert wird. Beim Status Quo gibt es diesbezüglich in der Regel keine Probleme. Vorsicht ist allerdings bei einer Absenkung des NO_x -Grenzwertes geboten, da es durch erhöhte Ammoniumkonzentrationen in den Reststoffen bei der Konditionierung zur Freisetzung von Ammoniak kommen könnte.

5.5 Umweltauswirkungen einer NO_x -Grenzwertabsenkung

Für weitere Berechnungen wurden Ausgleichskurven für die spezifische Reduktionsmittelmenge als Funktion der NO_x -Konzentration am Kamin ermittelt.

Dazu wurden für jede Anlage für den Ist-Zustand und den Zustand mit abgesenktem NO_x -Regelwert jeweils 12-Stunden-Mittelwerte für die eingesetzte Reduktionsmittelmenge bezogen auf eine Tonne Brennstoff aus den Betreiberdaten berechnet. Diese sind in Abbildung 5.5-1 aufgetragen und für die jeweiligen Anlagen mit einer Trendlinie korreliert worden. Zum Vergleich wurde exemplarisch für eine SCR die spezifische Reduktionsmittelmenge für NO_x -Gehalte am Kamin zwischen 50 und 200 mg/m^3 unter Zugrundelegung der folgenden Annahmen berechnet:

- Reduktionsmittel Ammoniakwasser
- mittlerer Roh- $\text{NO}_x = 350 \text{ mg/m}^3$
- Abgasvolumenstrom = $4500 \text{ m}^3/\text{tMüll}$

Für SCR-Anlagen liegt der Stöchiometriefaktor (SF) für die Umsetzung von NO_x sehr nahe an eins, weshalb die spez. Reduktionsmittelmenge im stöchiometrischen Verhältnis (= ideal) errechnet wurde.

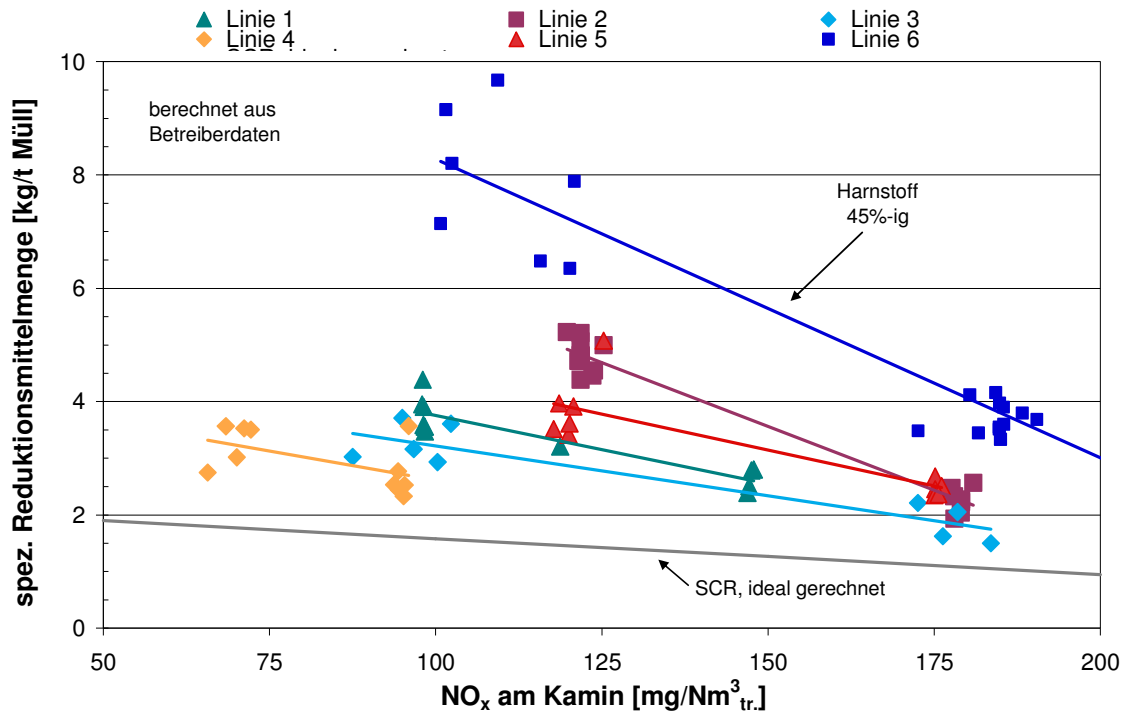


Abbildung 5.5-1: Bestimmung der spezifischen Reduktionsmittelmenge als Funktion der NO_x -Konzentration am Kamin für die betrachteten Linien.

Zur Beurteilung der Klimarelevanz wird im Allgemeinen das CO_2 -Äquivalent herangezogen. Für die Berechnung der CO_2 -Äquivalente wurden die Ammoniak- bzw. Harnstoffherstellung sowie der Transport der Reduktionsmittellösung in einem Radius von 100 km zugrunde gelegt. In der Graphik in Abbildung 5.5-2 ist ersichtlich, dass ausgehend von einer NO_x -Konzentration am Kamin von $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($\Delta\text{NO}_x=0$) sich bei einer Reduzierung um $\Delta\text{NO}_x=50 \text{ mg}/\text{m}^3$ je nach Anlage eine Erhöhung der spezifischen Menge des CO_2 -Äquivalentes zwischen ca. 42 % und 95 % ergibt. Hierzu sei erwähnt, dass die Werte teilweise weit im nicht experimentell ermittelten Bereich liegen und somit extrapoliert wurden. Relativiert werden diese Zahlen allerdings dadurch, dass sich durch die thermische Abfallbehandlung ein spez. CO_2 -Äquivalent von $383 \text{ kg}/\text{t}_{\text{Müll}}$ errechnet [12].

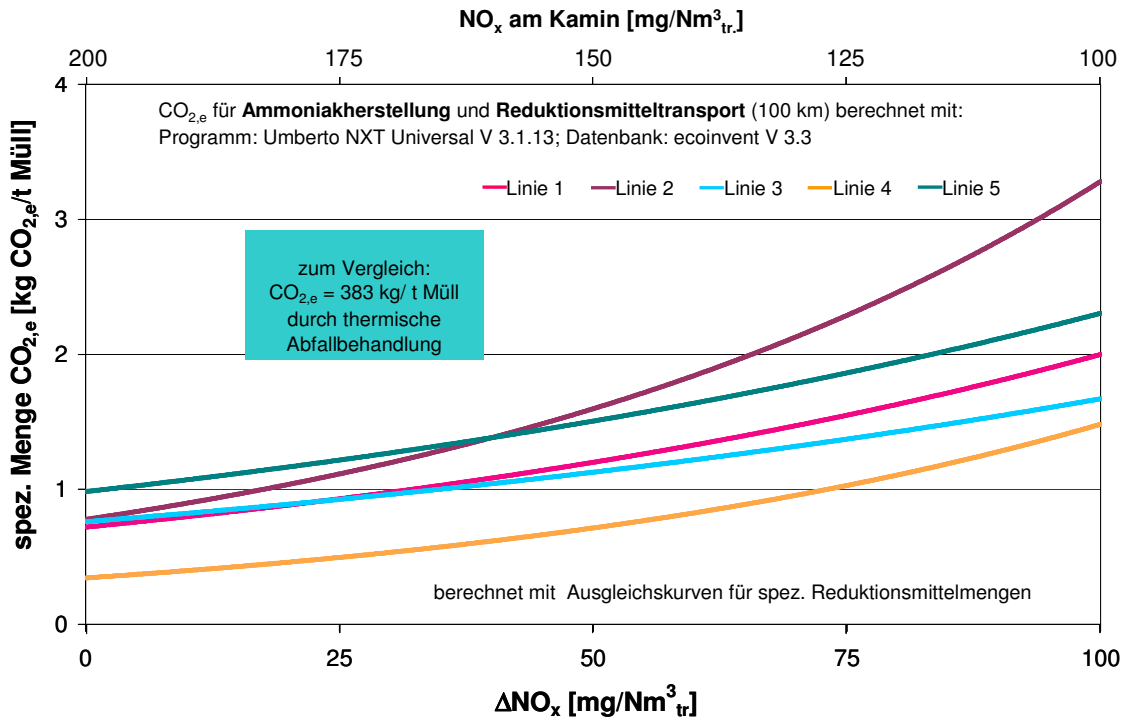


Abbildung 5.5-2: Berechnete CO₂-Äquivalente für die Herstellung und den Transport des Reduktionsmittels [12].

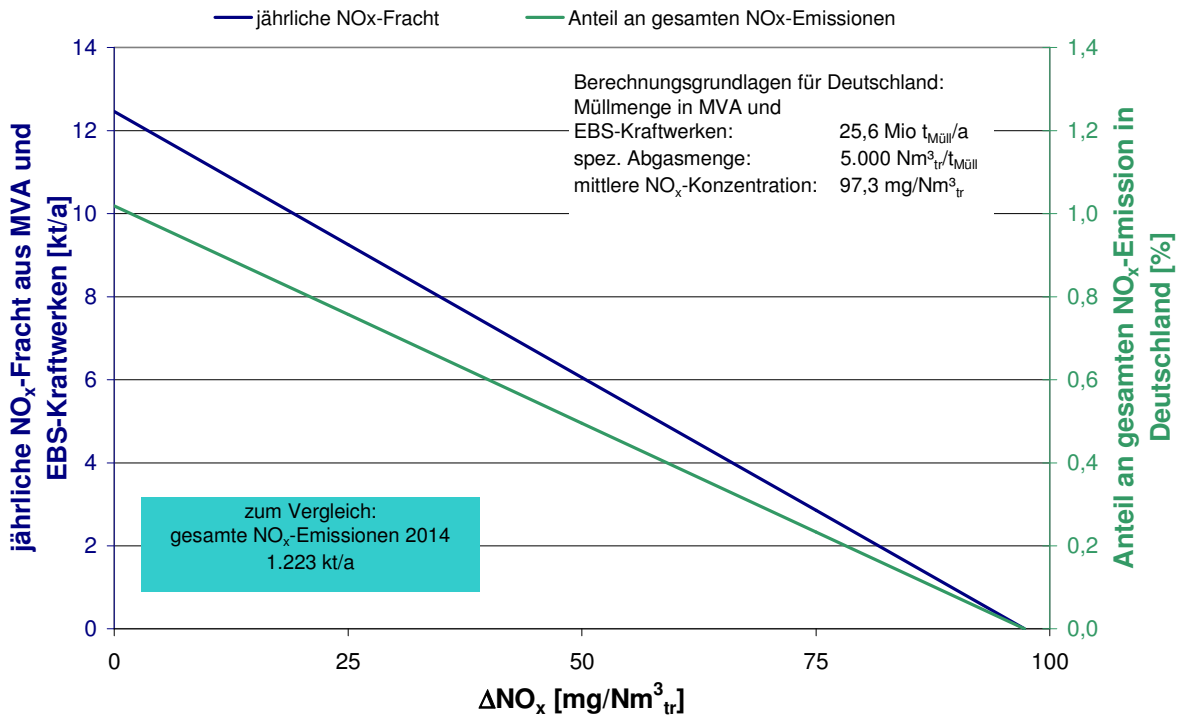


Abbildung 5.5-3: NO_x-Frachten aus MVA und EBS-Kraftwerken in Deutschland, sowie deren Anteil an der gesamten NO_x-Emission [13].

In Deutschland wurden laut Umweltbundesamt im Jahr 2014 1.223 kt Stickstoffoxide emittiert

[13]. Die durch Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerke verursachte jährliche NO_x -Fracht liegt bei 12,2 kt/a, was etwa nur 1 % der gesamten NO_x -Emissionen in Deutschland entspricht (siehe auch Abbildung 5.5-3). Wenn die NO_x -Emissionen der MVA und EBS-Kraftwerke in Deutschland um 50 mg/m^3 gesenkt würden, so entspräche dies nur einem Anteil an den gesamten deutschlandweiten Stickoxid-Emissionen von 0,4 %.

5.6 Fazit

Im vorgestellten Vorhaben wurden systematische Messungen an Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken verschiedener Technologien, beginnend am Feuerraum entlang der Abgasreinigung bis hin zum Kamin, durchgeführt. Dadurch wurden vergleichende Auswertungen an Anlagen mit verschiedenen technischen Ausführungen ermöglicht. Somit konnte eine gute Datenlage geschaffen werden, um auf künftige Fragestellungen zu NO_x - und NH_3 -Grenzwertabsenkungen zu reagieren. Die bisher für Einzelanlagen vorliegenden Kenntnisse wurden damit auf eine breitere Basis gestellt.

Eine weitere Absenkung des gesetzlich vorgegebenen NO_x -Grenzwertes am Kamin ist unter Beibehaltung der installierten SNCR-Technologie technisch begrenzt möglich. Das Vorhaben hat gezeigt, dass kein Einfluss von Rostbauart, Art der Gasführung, der Kesselbauweise und der SNCR-Technologie erkennbar ist. Allerdings können Alter und Qualität der Ausführungen die Möglichkeit der Grenzwertabsenkung beeinflussen.

Die Wirksamkeit des Reduktionsmittels sinkt signifikant, sodass deutlich mehr eingesetzt werden muss als es der stöchiometrisch erforderlichen Menge entspricht.

Die Ammoniumgehalte in den Reststoffen steigen dabei stark an. Dies könnte z. B. bei Sommertemperaturen zu einer Ammoniakfreisetzung führen mit folgender Annahmeverweigerung bei der Verwertung.

6 Danksagung

Dieser Bericht basiert auf einem durch die VGB-Forschungstiftung und durch Eigenanteile des projektbegleitenden Ausschusses finanzierten Forschungsvorhaben. Die Autoren bedanken sich bei allen Beteiligten für die finanzielle und personelle Unterstützung.

Besonderer Dank gilt auch

- der freundlichen Unterstützung aller Anlagenbetreiber bei der Durchführung der Messungen und Bereitstellung der Daten,
- den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die zahlreiche Teilnahme an den halbjährlichen Treffen und der immer regen und vor allem konstruktiven Diskussion der Ergebnisse,
- Prof. Dr.-Ing. Reindorf für seinen Einsatz als wissenschaftlicher Mitarbeiter der CUTEC-Institut GmbH zum Projektstart und für seine qualifizierte Beratung nach seinem Wechsel an die Universität Trier.

Clausthal-Zellerfeld, 11. September 2017



Dr.-Ing. Stefan Vodegel
Abteilungsleiter Thermische Prozesstechnik



Dr.-Ing. Sabine Weineck
Projektleiterin

7 Anhang

7.1 Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasreinigung
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
EBS	Ersatzbrennstoff
E-Filter	Elektrofilter
Ist-Zustand	Anlagenzustand mit üblichem NO _x -Regelwert
MVA	Müllverbrennungsanlage
Nm ³	Normkubikmeter
RedMi	Reduktionsmittel
RGR	Rauchgasreinigung
Roh-NO _x	NO _x -Konzentration im Rohgas, vor SNCR
RW	Regelwert
SCR	selektive katalytische Reaktion
SNCR	selektive nicht katalytische Reduktion
SF	Stöchiometriefaktor
TM	Tagesmittelwert

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.3-1: Schematische Darstellung einer Rauchgasreinigung mit SNCR, Filter und Wäscher.....	8
Abbildung 3.1-1: Anlagenfließbild der Linie 4.....	14
Abbildung 3.1-2: Versuchsprogramm an Linie 4.	15
Abbildung 3.1-3: Foto der der wassergekühlten und elektrisch beheizten Messsonde beim Betrieb an der linken Kesselseite (Messöffnung 3) sowie eine schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie4.	16
Abbildung 3.1-4: Netzmessung der NO _x -Konzentrationen unterhalb der SNCR an der linken Kesselseite aufgenommen.....	17
Abbildung 3.1-5: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 4.	18
Abbildung 3.1-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den Wäschern sowie eingesetzte Reduktionsmittelmenge für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 4.	18
Abbildung 3.1-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 4 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.....	19
Abbildung 3.1-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 4 für den Zustand mit abgesenktem NO _x -Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.....	20
Abbildung 3.2-1: Anlagenfließbild der Linie 5.....	21
Abbildung 3.2-2: Versuchsprogramm an Linie 5.....	22
Abbildung 3.2-3: Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 5.....	23
Abbildung 3.2-4: Netzmessung der NO _x -Konzentrationen unterhalb der SNCR aufgenommen.....	23
Abbildung 3.2-5: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 5.	24
Abbildung 3.2-6: Ammoniak-Bilanz für Linie 5 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.....	25
Abbildung 3.2-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 5 für den Zustand mit abgesenktem NO _x -Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.....	26
Abbildung 3.3-1:Anlagenfließbild der Linie 3.....	27
Abbildung 3.3-2: Versuchsprogramm an Linie 3.....	28
Abbildung 3.3-3: Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 3.....	29

Abbildung 3.3-4: Netzmessung der NO _x -Konzentrationen unterhalb der SNCR aufgenommen.	29
Abbildung 3.3-5: Betrieb der Anlage ohne SNCR	30
Abbildung 3.3-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 3	31
Abbildung 3.3-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 3 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	32
Abbildung 3.3-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 3 für den Zustand mit abgesenktem NO _x -Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	32
Abbildung 3.4-1: Anlagenfließbild der Linie 5.	33
Abbildung 3.4-2: Versuchsprogramm an Linie 1.	34
Abbildung 3.4-3: Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 1.	35
Abbildung 3.4-4: Netzmessung der NO _x -Konzentrationen unterhalb der SNCR an Linie 1 aufgenommen.	35
Abbildung 3.4-5: Betrieb der Anlage ohne SNCR	36
Abbildung 3.4-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 1.	37
Abbildung 3.4-7: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge im Wäscher sowie eingesetzte Reduktionsmittelmenge für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 1.	37
Abbildung 3.4-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 1 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	38
Abbildung 3.4-9: Ammoniak-Bilanz für Linie 1 für den Zustand mit abgesenktem NO _x -Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	38
Abbildung 3.5-1: Anlagenfließbild der Linie 2.	39
Abbildung 3.5-2: Versuchsprogramm an Linie 2.	40
Abbildung 3.5-3: Schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 2.	41
Abbildung 3.5-4: Netzmessung der NO _x -Konzentrationen für den abgesenkten Zustand unterhalb der SNCR an Linie 2 aufgenommen.	41
Abbildung 3.5-5: Betrieb der Anlage ohne SNCR, Linie 2.	42
Abbildung 3.5-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 2.	43
Abbildung 3.5-7: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den Wäschern sowie eingesetzte Reduktionsmittelmenge für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 2.	43

Abbildung 3.5-8: Mittelwerte der Ammoniumgehalte in den Reststoffen der Abwasseraufbereitung.	44
Abbildung 3.5-9: Mittelwerte der Ammoniumgehalte in den Reststoffen, Linie 2.	45
Abbildung 3.5-10: Ammoniak-Bilanz für Linie 2 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	46
Abbildung 3.5-11: Ammoniak-Bilanz für Linie 2 für den Zustand mit abgesenktem NO _x -Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	46
Abbildung 3.6-1: Anlagenfließbild der Linie 6.	47
Abbildung 3.6-2: Versuchsprogramm an Linie 6.	48
Abbildung 3.6-3: Foto der Messsonde beim Betrieb an der linken Kesselseite (Messöffnung 4) sowie eine schematische Darstellung der Messpunkte über dem Querschnitt unterhalb der SNCR, Linie 4.	49
Abbildung 3.6-4: Netzmessung der NO _x -Konzentrationen für den Ist-Zustand unterhalb der SNCR an Linie 6 aufgenommen.	50
Abbildung 3.6-5: NO _x -Konzentrationen vor SNCR und nach Kessel, sowie Betrieb der Anlage ohne SNCR.	50
Abbildung 3.6-6: Ammonium-Konzentrationen und Reduktionsmittelmenge in den festen Reststoffen für den Ist-Zustand und mit abgesenktem NO _x -Regelwert für Linie 6.	51
Abbildung 3.6-7: Ammoniak-Bilanz für Linie 6 für den Ist-Zustand. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	52
Abbildung 3.6-8: Ammoniak-Bilanz für Linie 6 für den Zustand mit abgesenktem NO _x -Regelwert. Zahlenwerte sind bezogen auf Gesamt-Ammoniak-Fracht im Rohgas.	52
Abbildung 4.1-1: Gegenüberstellung des „gasförmigen“ NH ₃ -Schlupfes am Kamin für die untersuchten Anlagen.	53
Abbildung 4.1-2: Gegenüberstellung des „gasförmigen“ NH ₃ -Schlupfes am Kamin für die untersuchten Anlagen (Konzentrationen bezogen auf 11% O ₂ im Abgas).	54
Abbildung 4.1-3: Gegenüberstellung des „festen“ Schlupfes beim Ist-Zustand der untersuchten Anlagen mit quasi-trockener Abgasreinigung.	55
Abbildung 4.1-4: Gegenüberstellung des „festen Schlupfes“ beim abgesenkten Zustand der untersuchten Anlagen mit quasi-trockener Abgasreinigung.	55
Abbildung 4.1-5: Gegenüberstellung des „festen“ Schlupfes beim Ist-Zustand der untersuchten Anlagen mit Wäschern in der Abgasreinigung.	56
Abbildung 4.1-6: Gegenüberstellung des „festen“ Schlupfes beim abgesenkten Zustand der untersuchten Anlagen mit Wäschern in der Abgasreinigung.	57
Abbildung 4.1-7: Gegenüberstellung des „flüssigen“ Schlupfes beim Ist- und abgesenkten Zustand der untersuchten Anlagen mit Wäschern in der Abgasreinigung.	57

Abbildung 4.3-1: Verzögerte NH ₃ -Freisetzung beim Betrieb ohne Reduktionsmittel am Beispiel Linie 2.....	58
Abbildung 4.5-1: Bestimmung der spezifischen Reduktionsmittelmenge als Funktion der NO _x -Konzentration am Kamin für die betrachteten Linien.....	60
Abbildung 4.5-2: Berechnete CO ₂ -Äquivalente für die Herstellung und den Transport des Reduktionsmittels [12]	61
Abbildung 4.5-3: NO _x -Frachten aus MVA und EBS-Kraftwerken in Deutschland, sowie deren Anteil an der gesamten NO _x -Emission [13].....	61

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1–1: NO _x - und NH ₃ -Grenzwerte in mg/m _N ³ für Abfallverbrennungsanlagen nach 17. BImSchV	5
Tabelle 3.5–1: Übersichtstabelle zu den Messungen an den einzelnen Linien	13

7.4 Literaturverzeichnis

- [1] 17. BImSchV: Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV) vom 02. Mai 2013 (BGBl. I S. 1021, 1044, 3754).
- [2] Schallert, B.: NO_x-Minderung mit Katalysatoren - Grundlagen, Betriebserfahrungen und Optimierungspotentiale. Energie aus Abfall - Band 4, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2008), S. 295-308, ISBN 978-3-935317-32-0.
- [3] von der Heide, B.; Langer, P.: Effizienz und Wartungsfreundlichkeit des SNCR-Verfahrens – Ein Erfahrungsbericht - In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 7 (2010), S. 729-753, ISBN 978-3-935317-46-7.
- [4] Mineur, M.; Schmidt, W.: Betriebliche Versuche zur Optimierung der SNCR-Anlage in Müllverbrennungsanlagen. VGB PowerTech 1-2 (2011), S. 94-99.
- [5] Müller, V.; Warnecke, R.: Grenzen der SNCR „ohne“ Zusatzmaßnahmen in MVA - Versuche zur Anpassung einer „200 mg/m³-SNCR“ an niedrigere NO_x-Reingaswerte -, VDI-Wissensforum Kassel, 2011.
- [6] Dittrich, R.: Technische Umsetzung von SNCR-Verfahren mit dem Ziel der maximalen NO_x-Reduzierung – Möglichkeiten und Grenzen – In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2012), S. 629-640, ISBN 978-3-935317-78-8.
- [7] Hukriede, J.; Pachaly, R.; Reynolds, Ph.: Neue 17. BImSchV – Auswirkungen auf bestehende Abfallverbrennungsanlagen mit SNCR-Technik sowie Lösungskonzepte. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11 (2014), S. 559-574, ISBN 978-3-944310-06-0.
- [8] von der Heide, B.: Die nächste Generation der SNCR-Technik – Letzte Entwicklungen, Verbesserungen, Betriebsergebnisse -. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11 (2014), S. 577-598, ISBN 978-3-944310-06-0.
- [9] Halter, R.; Gablinger, H.: Das DynOR-SNCR-Verfahren-Betriebserfahrungen in Vaasa. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11 (2014), S. 601-608, ISBN 978-3-944310-06-0.
- [10] Krüger, S.; Krüger, J.; Karau, F.: Grundlagen zur Ammoniak-Schlupfmessung am Kesselende. VGB PowerTech 7 (2013), S. 78-82.
- [11] Alwast, H.; Birnstengel, B.; Riemann, K.-A.; Schulte, J.: Perspektiven der Untertage-Entsorgung in Deutschland. Prognos Studie 2012.
- [12] www.itad.de, abgerufen am 01.11.2016
- [13] Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990 bis 2014 (Stand 03/2016).