Vortrag im Haus der Technik / Essen:

„Minderungspotenzial einer vorhandenen SNCR im MHKW Frankfurt/Main“

Dipl.-Ing. Rainer Keune
MHKW Frankfurt am Main GmbH

Heddernheimer Landstr. 157
60439 Frankfurt am Main

069 / 212 232 92
rainer.keune@mhkw-frankfurt.de
www.mhkw-frankfurt.de

Dipl.-Ingenieur Andreas Wiedl
ete.a Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umwelttechnik & Beratung mbH

Hofgut Kolnhausen 12
35423 Lich

06404 / 668 0826
andreas.wiedl@ete-a.de
www.ete-a.de

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG 3

2 DAS SNCR-SYSTEM IM MHKW FRANKFURT 5

2.1 NO_x-ROHGASNIVEAU 7
2.2 ENTWICKLUNG NO_x-EMISSIONEN (2007 – 2013) 7

3 DURCHGEFÜHRTE MAßNAHMEN 8

3.1 LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER SNCR BEI ERHÖHTER ANFORDERUNG AN DIE NO_x-MINDERUNG 10

4 DISKUSSION UND AUSBLICK 13

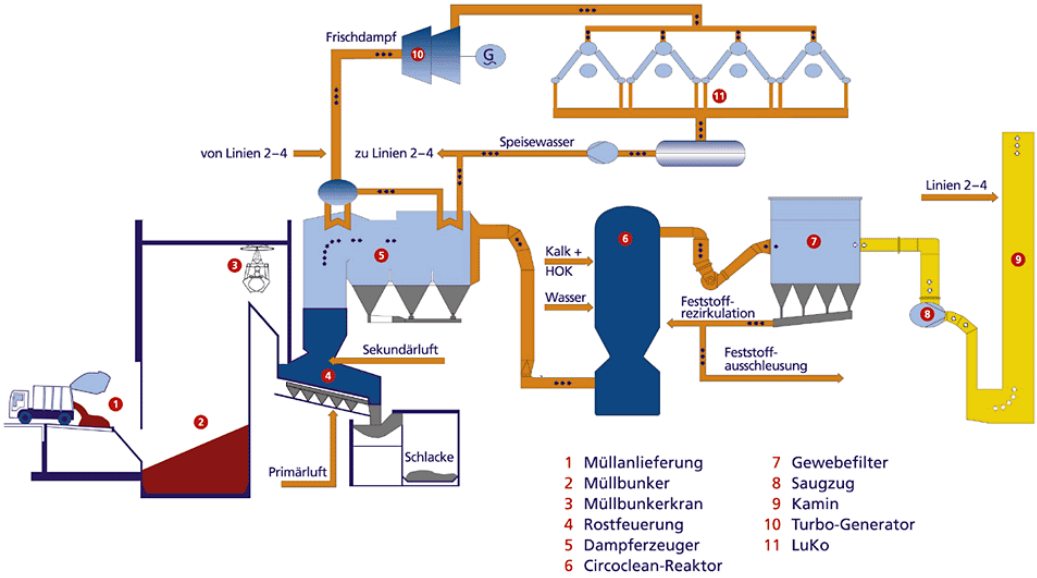
4.1 AUSWIRKUNG DER VERSCHÄRFTEN NO_x-GRENZWERTE AUF DIE BETRIEBSMITTELKOSTEN 14

5 ANHANG 16

1 Einleitung

Die Abfallverbrennungsanlage (AVA) in der Nordweststadt Frankfurt wurde in den 60iger Jahren errichtet. Seit jeher liefert sie Dampf in das benachbarte Heizkraftwerk zur Erzeugung von Strom und Fernwärme für den Stadtteil Nordweststadt. Im Zeitraum 2003 bis 2009 wurden alle vier Verbrennungslinien saniert und zu einem zeitgemäßen Müllheizkraftwerk (MHKW) ausgebaut. Das MHKW Frankfurt versorgt nunmehr nicht nur den Stadtteil Nordweststadt, sondern auch den neuen Stadtteil „Am Riedberg“ mit Fernwärme. Nach Abschluss aller Modernisierungs- und Umbaumaßnahmen im Jahr 2009 können im MHKW 525.600 Tonnen Hausmüll jährlich thermisch verwertet werden.

Abbildung 1: Schema einer Verbrennungslinie mit Rauchgasreinigung im MHKW Frankfurt



Die Minderung der Stickoxide (NO_x) erfolgt über das SNCR-Verfahren, indem zur NO_x-Reduzierung Harnstofflösung ($(NH_2)_2CO$) in den ersten Kesselzug eingedüst wird. Es sind zwei Eindüsebenen vorhanden, die bei Bedarf umgeschaltet werden können. Das Rauchgas strömt aus den Kesseln ohne vorherige Staubabscheidung direkt in den CIRCOCLEAN®-Reaktor, in dem die Schadstoffabscheidung durch die Zugabe von Kalkhydrat als Reagenz und Herdofenkoks (HOK) als Adsorbens erfolgt. Die mit den Schadstoffen beladenen Feststoffe werden im Gewebefilter abgeschieden und anschließend ausgeschleust bzw. als Rezirkulat dem CIRCOCLEAN®-Reaktor zugeführt. Das Reingas wird über den Saugzug in den Kamin gefördert.

Der aktuelle Stand der Novellierung der 17. BImSchV geht aus ***Tabelle 1*** hervor. Hintergrund hierfür ist die nationale Umsetzung der europäischen Industrie-Emissions-Richtlinie (IED-Richtlinie). Die Emissionsgrenzwertverschärfungen betreffen Staub, Quecksilber, Stickoxide und Ammoniak.

Der ab 01.01.2019 für Bestandsanlagen einzuhaltende TMW für NO_x von 150 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$, bei einem gleichzeitig einzuhaltendem NH_3-Schlupf von 10 (TMW) bzw. 15 (HMW) mg/m$^3_{i.N.tr.}$, stellt damit erhöhte Anforderungen an die NO_x-Minderungseinrichtung dar.

Tabelle 1: ***Änderungen der Emissionsgrenzwerte 17.BImSchV durch Umsetzung der IED-Richtlinie (* neue Emissionsgrenzwerte fett gedruckt)***

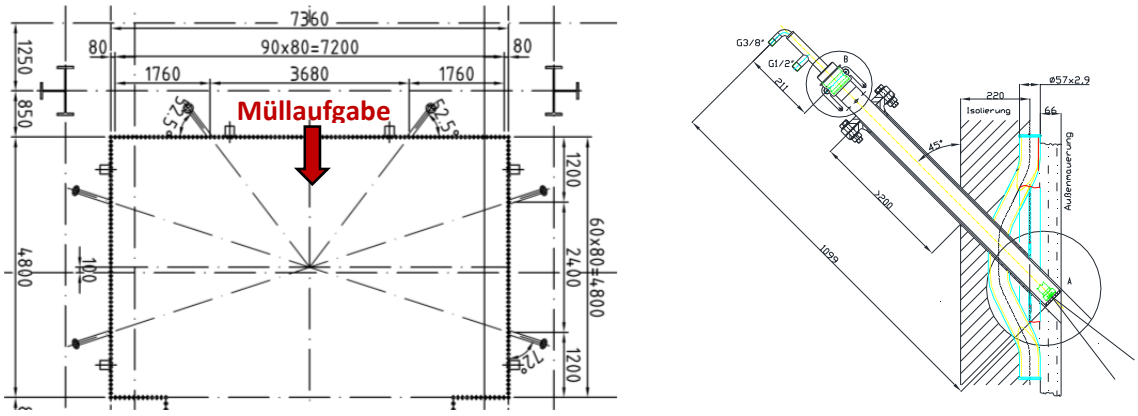
Aktuelle 17. BImSchV		**Nationale Umsetzung der EU-Industrieemissions-Richtlinie (IED) / Novellierung 17. BImSchV**				**Bemerkungen**
TMW [mg/m^3 $_{i.N.tr.}$]	HMW [mg/m^3 $_{i.N.tr.}$]	**Emissions-werte**: *	TMW (§8) [mg/m^3 $_{i.N.tr.}$]	HMW (§8) [mg/m^3 $_{i.N.tr.}$]	JMW (§10) [mg/m^3 $_{i.N.tr.}$]	**Neu:** Einführung eines Jahresmittelwertes (JMW, §10)
200	400	NO_x	***150***	400	***100***	
-	-	NH_3	***10***	***15***	-	
10	30	Staub	***5***	***20***	-	
0,03	0,05	Hg	0,03	0,05	***0,01***	
-	-	**Termine**:	Übergangsregelungen für bestehende Anlagen (§28): • Anforderungen der neuen Verordnung gelten ab dem 01. Januar 2016, jedoch ohne JMW nach §10 und ohne TMW für NO_x • Neuer NOx-TMW und JMW nach §10 gelten ab dem 1. Januar 2019, jedoch ohne JMW für NO_x			d.h. für MHKW Frankfurt: • ab ***01.01.2016*** Einhaltung neue TMW/HMW für Staub & NH_3 • ab ***01.01.2019*** Einhaltung TMW für NO_x und JMW für Hg • kein JMW für NO_x!

2 Das SNCR-System im MHKW Frankfurt

Zur Minderung der Stickoxide nach dem Prinzip der selektiven nichtkatalytischen Reduktion (SNCR) ist im MHKW Frankfurt eine Anlage von ERC vorhanden. Die SNCR-Anlage besteht im Wesentlichen aus den beiden Harnstofftanks, den Dosier- und Verteilereinrichtungen sowie dem Eindüssystem zur Verteilung des verdünnten Verfahrenshilfsstoffes in der Ausbrandzone der Feuerung. Der Verfahrenshilfsstoff wird in wässriger Lösung vor dem Reaktionsraum im Rauchgas verteilt. Zu diesem Zweck wird das Verfahrenshilfsstoff / Wasser-Gemisch und Druckluft zu dem Eindüssystem geleitet und mit Zweistoff-Düsenlanzen im Rauchgasstrom verteilt. Nach Verdampfung des Wassers zersetzt sich das Reduktionsmittel im Rauchgas und reagiert mit den Stickoxiden.
Das Eindüssystem besteht aus 2 Ebenen mit jeweils 6 Eindüslanzen. Es wird immer nur eine der beiden Ebenen mit Flüssigkeit beaufschlagt. Die Umschaltung erfolgt manuell in Abhängigkeit von der Feuerraumtemperatur (z.B. mit fortschreitender Reisezeit).

Die Eindüslanzen sind auf +17 m (Ebene 1) und auf +20,9 m (Ebene 2), jeweils um 45° nach unten geneigt, an der Kesselwand angebracht und zwar verteilt an den Seitenwänden links/rechts und der Vorderwand der Kesselwand. Auf der Rückseite befinden sich keine Düsenlanzen. Der Sprühstrahl tritt aus der Düse mit einem Winkel von 15° als Vollkegel aus.
Zwischen den SNCR-Ebenen befinden sich auf +18,0m die Sender-/Empfängereinheiten der akustischen Temperaturmessung „agam“. Die agam-Messung dient zur Anzeige der Temperaturverteilung in der Feuerraumebene und ist regelungstechnisch bisher ausschließlich mit der Sekundärluftvertrimmung (Vorder-/Rückwand) verknüpft.

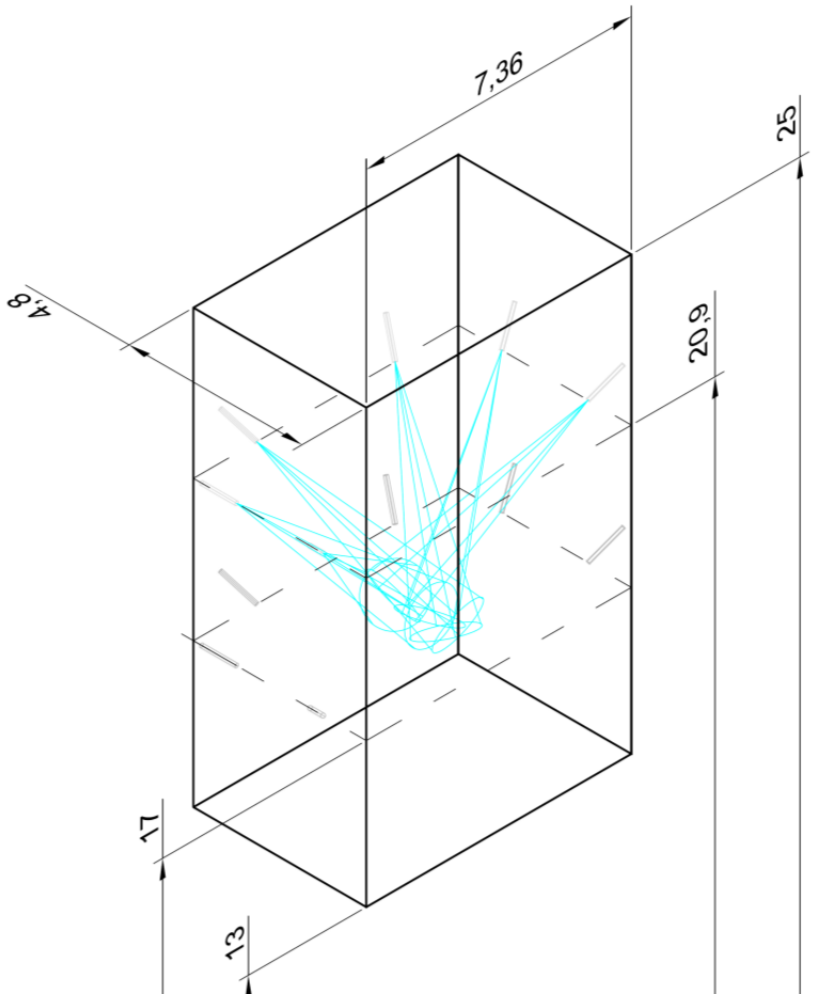
Abbildung 2: Anordnung SNCR-Düsenlanzen



Die räumliche Eindüsgeometrie, insbesondere mit der relativ starken Neigung der Düsenlanzen um 45° nach unten, ist der ***Abbildung 3*** zu entnehmen (Gesamtübersicht Feuerraum / Kessel, siehe ***Abbildung 8*** im Anhang).

Durch die Neigung der Düsenlanzen um 45° nach unten wurde ursprünglich beabsichtigt mit dem Reduktionsmittel in Bereiche höherer Temperatur vorzudringen, als in der eigentlichen Düsenebene tatsächlich vorliegt. Die ***Abbildung 3*** zeigt die Ausrichtung der Sprühkegel anhand der Düsenlanzenneigung, beispielhaft für die Düsenebene +20,9m.

Abbildung 3: 3D-Ansicht SNCR-Eindüsung (Zahlenwerte: Angaben in m)



2.1 NO_x-Rohgasniveau

Die Ermittlung des NO_x-Rohgasniveaus am 26.09.12 an den Linien 11 und 12 wurde durch temporäre Abschaltung der Harnstoffeindüsung über einen Zeitraum von etwa 1,5 h durch Erfassung der Messwerte mit der Emissionsmessung am Kamin bestimmt:

Tabelle 2: Bestimmung NO_x-Rohgasniveau bei Nennlast & Mittelwerte SNCR restlicher Tag

	c_{NOx} **Linie 11** [mg/m³ i.N.tr.]	c_{NOx} **Linie 12** [mg/m³ i.N.tr.]	**Hu Mittel** L11, L12 [kJ/kg]	**Harnstoff** [l / t Abfall]	**NO_x** [mg/m³ i.N.tr.]	**NH_3** [mg/m³ i.N.tr.]
Min:	259	295	-	-	-	-
Max:	445	387	-	-	-	-
Mittelwert:	**355**	**343**	10.310	L11: 5,55 L12: 3,64	L11: 159,9 L12: 153,4	L11: 2,56 L12: 1,80
Spannweite:	*186*	*92*				

Die Ermittlung des NO_x-Rohgasniveaus im Teillastbetrieb einer Verbrennungslinie konnte jedoch nicht in der gleichen Art und Weise ermittelt werden, da bereits kurz nach Abschalten der Harnstoffeindüsung NO_x-Werte von ca. 450 – 500 mg/m³ i.N.tr. am Kamin registriert wurden und die Harnstoffeindüsung aufgrund drohender Grenzwertverletzungen kurzfristig wieder in Betrieb genommen werden musste.

2.2 Entwicklung NO_x-Emissionen (2007 – 2013)

Die Regelung der NO_x-Reingaswerte erfolgt im Mittel auf einen Sollwert von ca. 180 mg/m³ i.N.tr.. Die zeitliche Entwicklung der NO_x-Reingaswerte über die Betriebsjahre ist in ***Tabelle 3***, beispielhaft für die Linie 11, dargestellt (nur die Linie 11 besitzt alle Optimierungsschritte).

Hervorzuheben ist der höchste spezifische Harnstoffverbrauch im Jahre 2009, gleichbedeutend mit der Umstellung der Verbrennung von reinem Haus- auf Haus- und Gewerbemüll. Unter Bezugnahme auf das Jahr 2009 („100%“) konnte der spezifische Harnstoffverbrauch, bei gleichzeitiger Erhöhung der thermischen Auslastung der Feuerung (von ca. 92% auf 100%) gesenkt werden und liegt heute (1. Quartal 2013) bei ca. 75% des Wertes aus 2009.

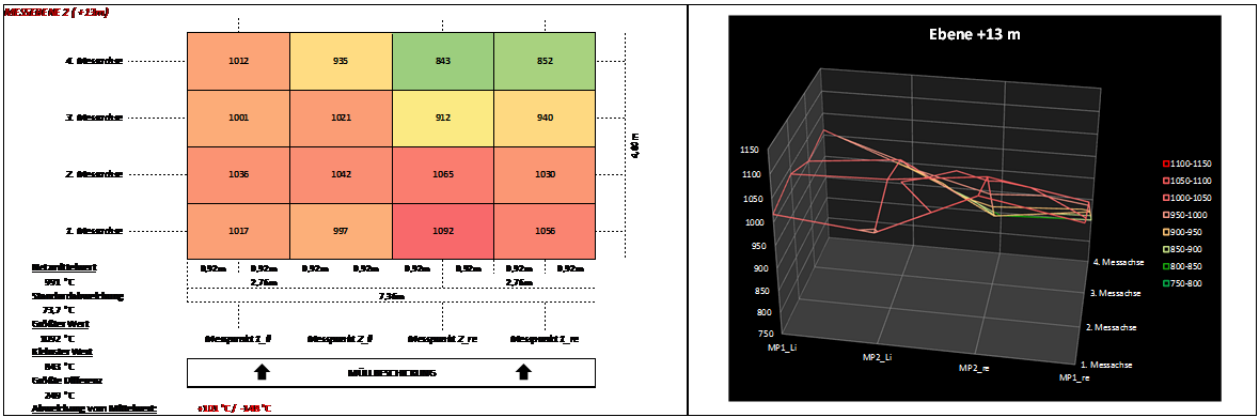
Tabelle 3: Zeitlicher Verlauf SNCR Parameter und Abhängigkeiten, Bsp. L11

Jahr	Spez. Harnstoff-verbrauch [l / t Abfall]	NO_x Jahres mittel werte [mg/m³ i.N.tr.]	Linien MHKW in Be-trieb [-]	Orientierung thermische Auslastung [%]	Abfallart
	Linie 11				
2007	3,77	178,25	2/2	~92%	Hausmüll
2008	4,76	168,34	2/2	~92%	Hausmüll
2009	***5,04 = 100%***	175,39	3/4	~92%	Haus- & Gewerbemüll
2010	4,74	166,32	3/4	~92 - 100%	Haus- & Gewerbemüll
2011	3,89	163,76	3/4	~100%	Haus- & Gewerbemüll
2012	4,39	173,22	3/4	~100%	Haus- & Gewerbemüll
2013 Q1	***3,76 = 74,6%***	172,53	3/4	~100%	Haus- & Gewerbemüll

3 Durchgeführte Maßnahmen

Von den im MHKW Frankfurt vorhandenen vier Verbrennungslinien (11 / 12 / 13 / 14) wurden bisher an den Linien 11 und 12 Modifikationen an der Feuerung bzw. der Feuerungsleistungsregelung (FLR) vorgenommen, ausgehend von einer nach Übernahme der Anlagen vorherrschenden „frontlastigen“ Feuerlage (keine Mittelstromfeuerung), die eine deutliche Schieflage der Temperaturverteilung mit sich brachte, siehe hierzu beispielhaft eine Auswertung einer Messebene der TÜV-Kalibrierungsmessungen vom 04.01.2011 an Linie 1.

Abbildung 4: Beispiel Temperaturverteilung Linie 11 vom 04.01.2011



Durch Anpassung der Primärluftverteilung entlang des Rostes sowie der Rostgeschwindigkeiten konnte die Mittelstromfeuerung „ausgerichtet“ und dadurch die Temperaturverteilung an den Linien 11 und 12 verbessert werden.
Weiterhin wurde ebenfalls an den Linien 11 und 12 die Treibwassermenge für die Harnstoff-Eindüsung mit dem Ziel vergrößert, die wirksame Eindringtiefe des Reduktionsmittels in den Feuerraum zu erhöhen. In ***Tabelle 4*** sind einige einschlägige Betriebsparameter der bereits optimierten Linien 11 und 12 und der bisher nicht veränderten Linien 13 und 14 gegenüber gestellt.
Erkennbar ist, dass sich die Temperaturdifferenzen zwischen Vorder- und Rückwandtemperatur (Temperatur VW, RW) an den optimierten Linien 11 und 12 geringer darstellen und auch die eingesetzten Harnstoffmengen im Vergleich zu den „alten“ Linien 13 und 14 geringer sind. Linie 12 weist sowohl die geringsten Temperaturunterschiede zwischen Vorder- und Rückwandtemperatur, als auch den geringsten Harnstoffverbrauch auf (77 l/h im Jahresmittel).

Tabelle 4: ***Gegenüberstellung Betriebswerte 2012 für optimierte Linien 11 & 12 sowie „alte“ Linien 13 & 14***

		Betriebsweise						Betriebsmittel		Emissionen	
		Frisch-Dampf [t/h]	Mittelwert Temperatur Vorderwand (VW) [°C]	Mittelwert Temperatur Rückwand (RW) [°C]	Delta Temperatur VW - RW [°C]	Temperatur Decke Feuerraum [°C]	Mittelwert SNCR-Temperatur [°C]	Harnstoff [l/h]	Treibwasser Harnstoff-Eindüsung [kg/h]	NH_3-Schlupf Kamin [mg/m³ i.N.tr.]	NOx Kamin [mg/m³ i.N.tr.]
"Optimiert"	Linie 11	60,1	941	922	19,9	748	932	85	372	7,1	167
	Linie 12	60,0	926	924	3,2	752	925	77	384	4,6	157
"Alt"	Linie 13	60,6	975	933	42,3	779	954	101	249	4,6	168
	Linie 14	60,3	959	939	36,5	767	949	91	263	4,2	177

Regelgüte der Feuerung

Die Standardabweichung der Dampfmenge vom Sollwert ist kleiner 3 %, somit kann die Regelgüte der Feuerung, als Voraussetzung für einen effektiven SNCR-Betrieb, als „sehr gut“ eingestuft werden (siehe ***Tabelle 5***).

Tabelle 5: ***Standardabweichung der Dampfmenge für den Zeitraum 05.05.-11.05.2013***

10min Mittelwerte			
Zeitraum:	05.05.2013 00:00	bis	11.05.2013 23:55
	mD	abs. Standardabweichung (1σ)	
Linien	t/h	t/h	%
L11	58,2	1,25	2,22%
L12	57,2	1,28	2,24%
L13	53,6	1,36	2,56%

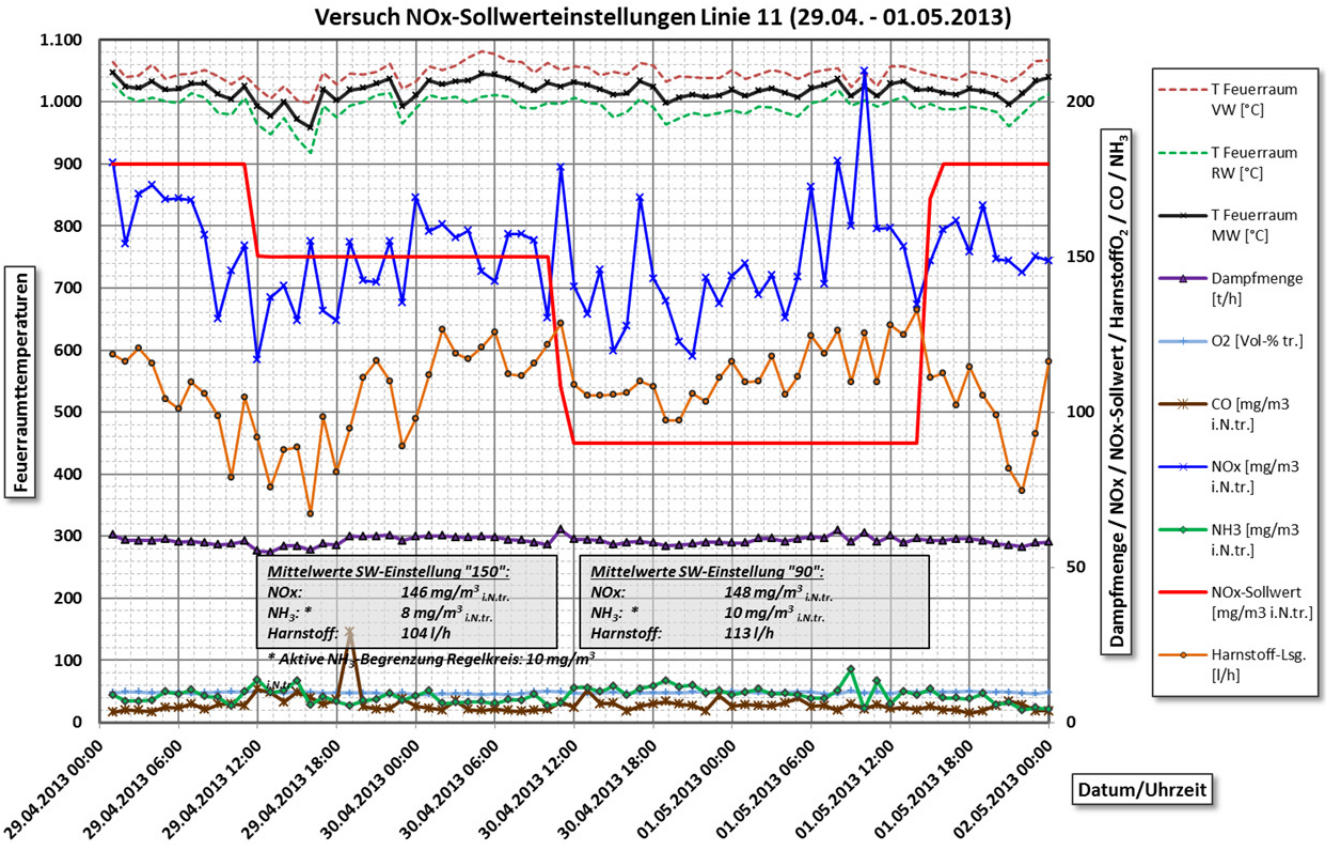
3.1 Leistungsfähigkeit der SNCR bei erhöhter Anforderung an die NO_x-Minderung

Aufbauend auf den an Linien 11 und 12 durchgeführten Optimierungsschritten wurde die SNCR versuchsweise mit verringertem Sollwert betrieben, um sich an der zukünftig erforderlichen Fahrweise zu orientieren und aus den gewonnenen Erfahrungen Rückschlüsse auf gegebenenfalls erforderliche weitere Maßnahmen ziehen zu können.

Im laufenden Betrieb sind solchen Versuchsfahrten jedoch Grenzen gesetzt, so z.B. die in der NO_x-Regelung implementierte Begrenzung des NH_3-Schlupfes, die aufgrund der negativen Einflüsse eines zu hohen NH_3-Schlupfes auf die Reststoffqualität und auch den Betrieb der Rauchgasreinigungsanlage eingeführt wurde.

Wie aus ***Abbildung 5*** hervorgeht, konnte eine Sollwertvorgabe von 150 $mg/m^3_{i.N.tr.}$ (= zukünftiger Tagesmittelwert) bei einem NH_3-Schlupf am Kamin von ca. 8 $mg/m^3_{i.N.tr.}$ eingehalten werden, der darauffolgenden Sollwertvorgabe von 90 $mg/m^3_{i.N.tr.}$ konnte der NO_x-Regler aufgrund der aktiven Schlupfbegrenzung (Vorgabe 10 $mg/m^3_{i.N.tr.}$) nicht mehr folgen – das NO_x-Niveau von 140 - 150 $mg/m^3_{i.N.tr.}$ veränderte sich praktisch nicht mehr. Der Harnstoffverbrauch betrug im Mittel zwischen 104 l/h bzw. 113 l/h (vgl. hierzu Angabe Jahres-∅ der Linie 11 von 85 l/h in ***Tabelle 4***).

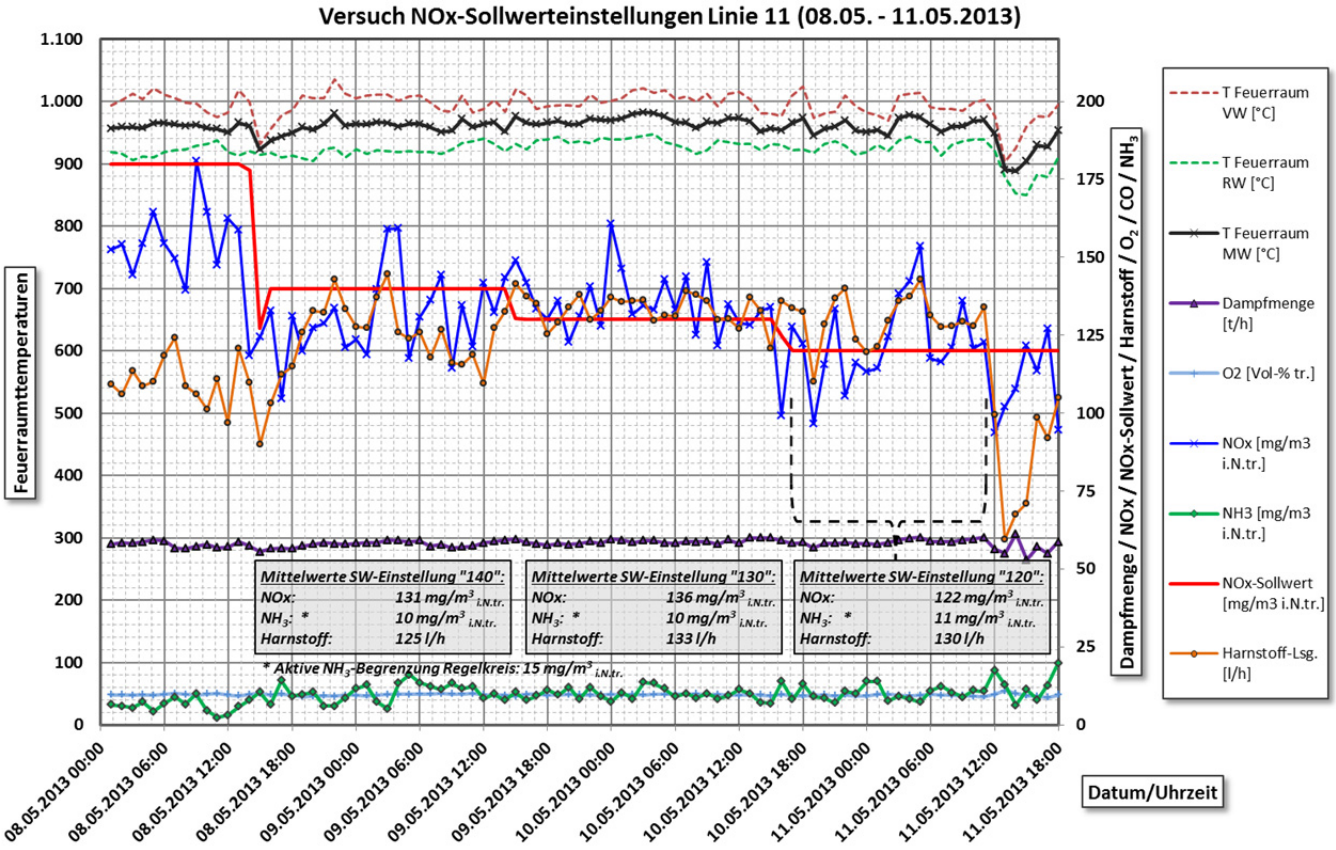
Abbildung 5: Betrieb mit temporär verringerten NO_x-Sollwerten an Linie 11 (29.04.-13.05.2013)



In einem daran anknüpfenden Versuch wurde die NH_3-Schlupfbegrenzung in der Regelung temporär verändert (Vorgabe 15 mg/m$^3_{i.N.tr.}$), so dass tiefere NO_x-Sollwerte von 140 / 130 / 120 mg/m$^3_{i.N.tr.}$ eingestellt werden konnten, mit der Absicht, den zukünftigen NO_x-Tagesmittelwert von 150 mg/m$^3_{i.N.tr.}$ sicher zu unterschreiten, siehe ***Abbildung 6***.

Unter diesen Bedingungen stellte sich während des Versuchszeitraumes ein mittlerer NH_3-Schlupf von >10 - 11 mg/m$^3_{i.N.tr.}$ am Kamin ein, bei entsprechend höherem Harnstoffverbrauch von 125 l/h bis 133 l/h (vgl. hierzu Angabe Jahres-∅ Linie der 11 von 85 l/h in ***Tabelle 4***).

Abbildung 6: Betrieb mit temporär verringerten NO_x-Sollwerten an Linie 11 (08.05.-11.05.2013)



Die oben gezeigten SNCR-Versuche dienten aufgrund der jeweiligen Laufzeit im Rahmen der betrieblichen Möglichkeiten neben dem laufendem Verbrennungsbetrieb zur Indikation und einer ersten Einschätzung einer zukünftigen Fahrweise mit tieferen NO_x-Sollwerten. Eventuelle Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb, z.B. durch den erhöhten NH_3-Schlupf, wurden im Rahmen der Versuchszeiträume nicht beobachtet und bedürfen für den Dauerbetrieb einer weitergehenden Untersuchung.

4 Diskussion und Ausblick

Die Novellierung der 17. BImSchV gibt für bestehende Anlagen ab dem 01. Januar 2016 neue Grenzwerte für Ammoniak in Höhe von 10 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$ (TMW) bzw. 15 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$ (HMW) und ab dem 01. Januar 2019 für NO_x von 150 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$ (TMW) vor.

Für das Erreichen des aktuell geltenden Grenzwertes von 200 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$ (TMW) ist die vorhandene SNCR-Installation ausreichend, für einen sicheren Betrieb der Anlage zur Erfüllung der zukünftigen Grenzwerte werden jedoch Optimierungsschritte der SNCR-Anlage erforderlich sein. Unter einem „sicheren“ Betrieb der SNCR ist die Fahrweise der Entstickungsanlage mit Betriebswerten von $NO_x \approx$ 130 - 140 mg/m^3 $_{i.N.tr}$ .und $NH_3 \leq$ 8 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$ erforderlich. Insbesondere der NH_3-Schlupf <u>hinter Kessel</u> sollte aber auch im Hinblick auf eine sichere Betriebsweise der Trockensorption minimiert sein und <10 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$ betragen.

Versuchsfahrten an den feuerungsseitig optimierten Linien haben gezeigt, dass der künftige NO_x-Grenzwert von 150 mg/m^3 $_{i.N.tr.}$ mit der bestehenden Installation unterschritten werden kann, jedoch befindet sich der zugehörige NH_3-Schlupf auf dem Niveau des Grenzwertes, so dass diesbezüglich keine ausreichende Betriebssicherheit vorhanden ist.
Anknüpfend an die nach Durchführung der Feuerungsoptimierungsschritte an den Linien 11 und 12 sowie der durchgeführten SNCR-Versuche vorliegenden Erkenntnisse, sind folgende Punkte für das MHKW Frankfurt von Relevanz und werden weiter im Hinblick auf die Anforderungen der neuen 17.BImSchV weiter verfolgt:

- Einbringen einer dritten SNCR-Ebene im Feuerraum zur besseren Anpassung der Harnstoffeindüsung an die Feuerraumtemperatur (siehe ***Tabelle 6***)
- Weitere Optimierung der Feuerleistungsregelung (FLR) durch zusätzliche Einbindung der vorhandenen akustischen Temperaturmessung (Zeitvorteil gegenüber dem Dampfmengensignal)
- Ggfs. Nutzung der akustischen Temperaturmessung für den SNCR-Betrieb für eine automatische Ebenenumschaltung
- Verhalten der SNCR im Teillastbetrieb
- Auswirkungen eines erhöhten NH_3-Schlupfes auf den Betrieb der Rauchgasreinigung, insbesondere auf den Gewebefilter und die Reststoffqualität
- Austausch der vorhandenen Düsen durch Fächerdüsen zur Optimierung der Flächenabdeckung mit Harnstoff.

Tabelle 6: SNCR-Konzepte für verschiedene Anwendungen [Quelle: Mehldau & Steinfath]

Anwendung	Lastbereich	NOx-Reingas [mg/Nm³]	NH_3-Schlupf [mg/Nm³]	Eindüs-ebenen	Sonstiges
Kleine Feuerungsanlagen	80-100%	< 200	< 20	1	Vorratsbehälter im Modul
Moderater NOx Abscheidegrad	90-100%	< 200	< 15	1	
Moderater NOx Abscheidegrad	60-100%	< 150-200	< 15	2	
Hoher NOx Abscheidegrad	50-100%	< 100-150	< 15	3	
Hoher NOx Abscheidegrad, geringer NH_3Schlupf	50-100%	< 100	< 5-10	3	Akustische Temperatur-messung (agam)

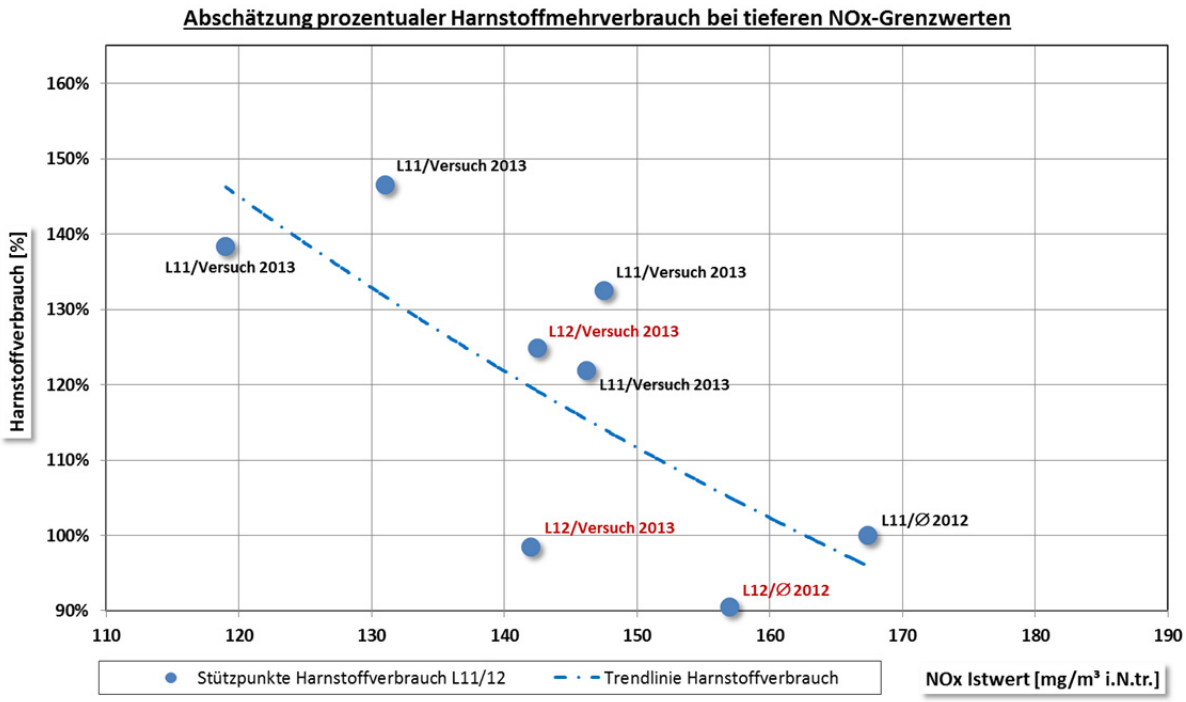
Rote Markierung = zukünftige Randbedingungen und resultierende Anforderungen bez. MHKW Frankfurt

4.1 Auswirkung der verschärften NO_x-Grenzwerte auf die Betriebsmittelkosten

Auf Basis der im MHKW Frankfurt vorliegenden Betriebsdaten aus 2012, sowie während der Versuchsfahrten in 2013 an den Linien 11 und 12 ermittelten Betriebsdaten, wurde eine erste Abschätzung der zu erwartenden relativen Betriebsmittelkostensteigerung vorgenommen.

Demnach ist eine Steigerung der Betriebsmittelkosten, bezogen auf den heutigen Zustand der Anlage (100%), im Bereich von ca. +30 bis +40% zu erwarten (Bezugswert $NO_x \approx 130$ mg/m^3 $_{i.N.tr.}$), siehe ***Abbildung 7*** (für die Darstellung wurden nur die Daten der feuerungsseitig bereits optimierten Linien 11 und 12 verwendet).

Abbildung 7: Abschätzung Erhöhung relative Betriebsmittelkosten bei verringerten NO_x-Sollwerten



5 Anhang

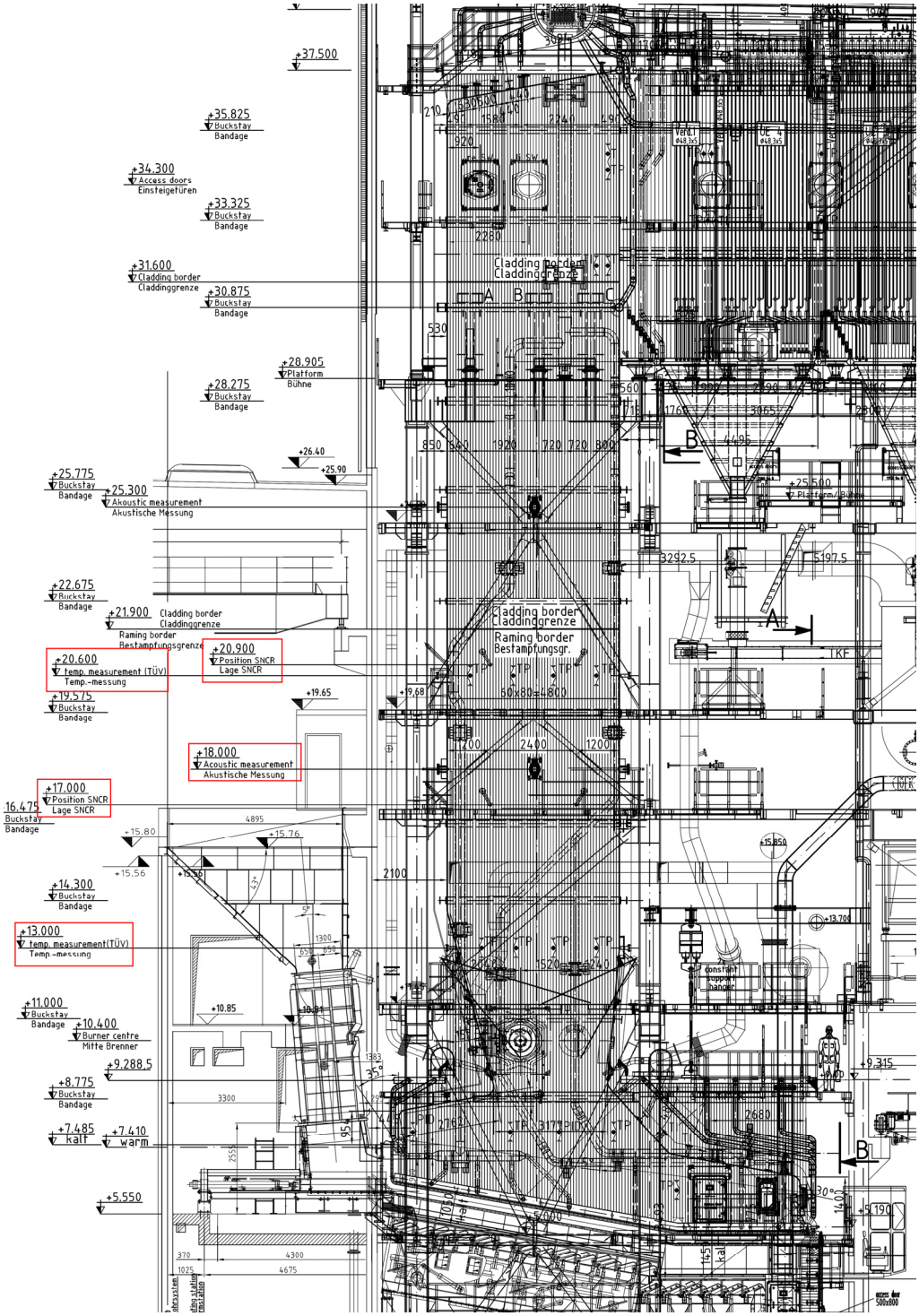



Abbildung 8: Seitenansicht Feuerung/Kessel