

## 5 - B Untersuchungen des CUTEC-Instituts zur NO<sub>x</sub>-Minderung in Pilot- und Großanlagen

Dr.-Ing. R. Warnecke, Dipl.-Ing. M. Davidovic: CUTEC-Institut GmbH

Dipl.-Ing. W. Schmidt, Dipl.-Ing. R. Schreiner: MARTIN GmbH

Dr.-Ing. U. Priesmeier: FISIA Babcock Environment GmbH

### Zusammenfassung

Bei Parametervariationen in der CUTEC-Rückschubrost-Pilotanlage und in den Müllverbrennungsanlagen Kempten und Schweinfurt wurden Ansätze für NO<sub>x</sub>-Minderungsstrategien erkannt. Die Bandbreite der dabei gemessenen NO<sub>x</sub>-Rohgasemissionen reichte von ca. 180 bis 550 mg/m<sup>3</sup> in der Pilotanlage und von ca. 200 bis 400 mg/m<sup>3</sup> (jeweils i.N., tr., 11% O<sub>2</sub>) in den Großanlagen. Insbesondere die Vertrimmung der Sekundärluft zur Rückseite des Feuer-raums und Rezi- bzw. Inertgaseindüsung unterhalb der Sekundärluft zur Vermischung der Brennbett-Gase zeigten deutliche Auswirkungen auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen. Eine qualitative Erklärung der beobachteten Phänomene erfolgte anhand von Mischungs- und Stöchiometrieansätzen, wobei entscheidende Bedeutung für eine wirksame NO<sub>x</sub>-Minderung den Mechanismen in der Gasphase zukommen.

### Zielstellung und Grundlagen

Die hier dargestellten Untersuchungen hatten zum Ziel, NO<sub>x</sub>-relevante Parameter in Müllverbrennungsanlagen durch systematische Versuche in Pilot- und Großanlagen zu ermitteln und daraus Minderungsstrategien für Stickoxide in Rostsystemen zu erarbeiten. Dabei sollten primär die Randbedingungen möglichst realitätsnah gewählt, sekundär aber auch unkonventionelle Anlageneinstellungen erprobt werden.

Ausgehend von den bekannten primären NO<sub>x</sub>-Minderungsmaßnahmen aus der Gas- bzw. Ölverbrennung von stickstoffreichen Brennstoffen [z.B. 1, 2, 3] sollten Möglichkeiten der Übertragung auf die Verhältnisse in Rostsystemen geprüft werden. Im Wesentlichen resultiert daraus die Durchführung einer Stufenverbrennung (Luft- oder

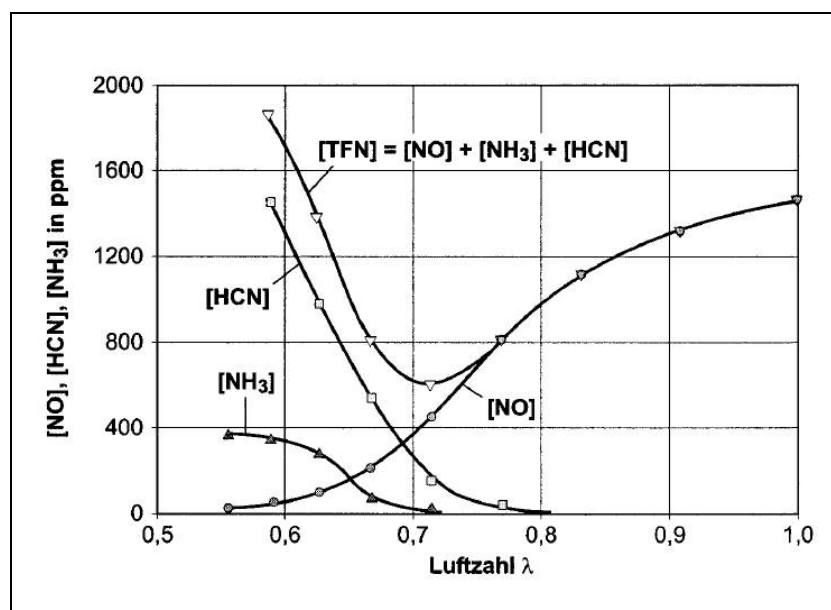
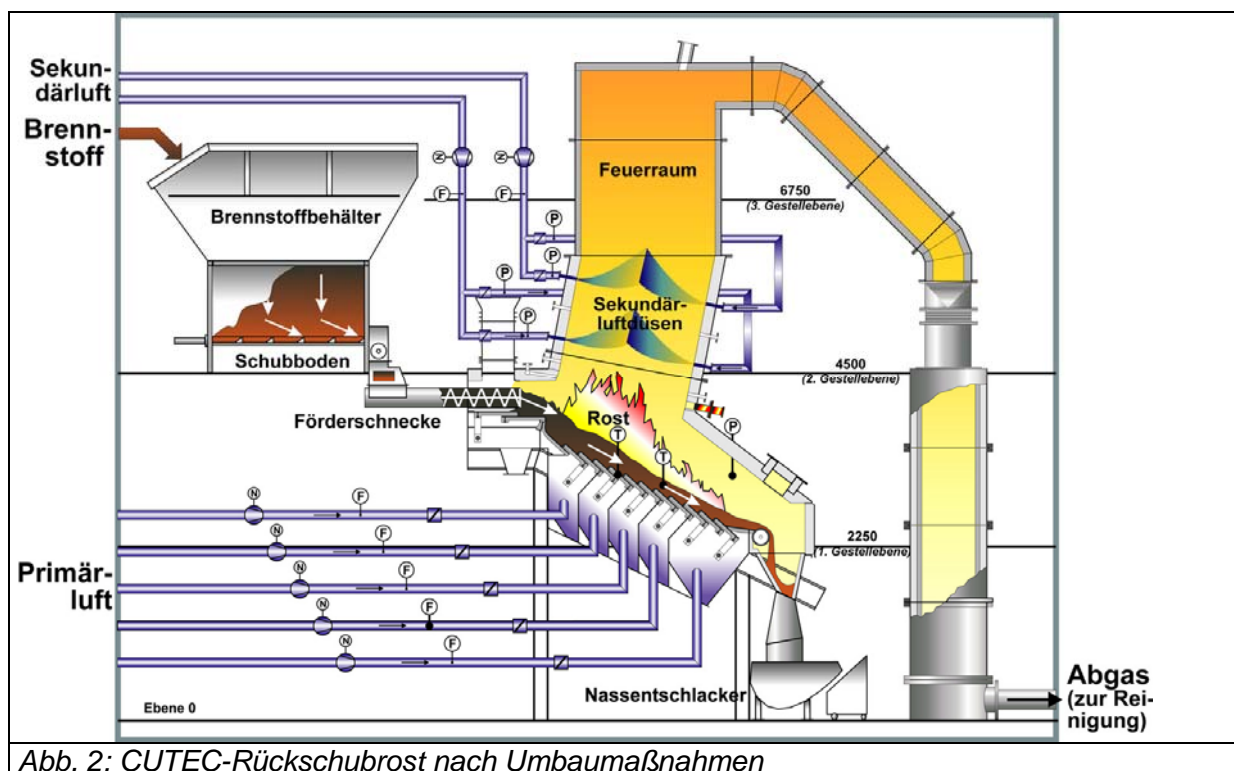


Abb. 1: Bildung stickstoffhaltiger Verbindungen in Flammen verschiedener Stöchiometrie [nach 4]

Brennstoffstufung) mit einer Reduktionszone, in der eine Luftzahl von  $\lambda_{\text{Red}} \approx 0,6 \dots 0,8$  (TFN-Minimum, s. **Abb. 1**) und eine hinreichende Verweilzeit von ca. 0,5 s eingehalten werden. Insbesondere bei flüchtigenreichen Brennstoffen, wie z.B. Hausmüll, bei denen während der Entgasung bedeutende Mengen an NO-Reduktionsmitteln ( $\text{NH}_3$ ) freigesetzt werden (siehe auch TP 1), erscheint eine Übertragung solcher Minderungsstrategien möglich. Im Pilotmaßstab wurden mit getrennter Prozessführung, d.h. bei Vergasung auf dem Rost und Nachverbrennung der Vergasungsgase in einer separaten Brennkammer, bereits deutliche Erfolge erzielt [5].

#### Untersuchungen zur $\text{NO}_x$ -Minderung in Pilotanlagen: CUTEC-Rückschubrost

Für die Versuche an der Rückschubrost-Pilotanlage des CUTEC-Instituts wurden Umbaumaßnahmen in den Bereichen Beschickung, Feuerung und 1. Zug sowie Anpassungen der Abgasreinigung und Luftversorgung durchgeführt. Der Aufbau und die Geometrie der neuen Anlage sind aus **Abb. 2** ersichtlich. Als Anhaltswerte für die Größenverhältnisse sollen hier nur die Abmessungen des Feuerraumquerschnitts genannt sein: Tiefe 1,8 m; Breite 0,6 m.



*Abb. 2: CUTEC-Rückschubrost nach Umbaumaßnahmen*

Dem unterschiedlichen Luftbedarf der Teilprozesse Trocknung, Entgasung, Vergasung und Restausbrand des Festbrennstoffes entsprechend wird die Primärluft in 5 Zonen mit getrennt regelbarem Volumenstrom zugeführt. Mit der Menge und Verteilung der Primärluft werden die Luftzahl des Rostes und die Lage der Hauptreaktionszone beeinflusst. Der Transport des Brennstoffbettes wird von den sich bewegenden Roststäben ausgelöst. Charakteristisch für Rückschubroste ist die Schubbewegung der Roststäbe entgegen der Hauptflussrichtung des

Bettes, wodurch eine intensive Mischung im Brennbett stattfindet. Die Nachverbrennung der aus dem Brennbett entweichenden Gase erfolgt im Feuerraum durch Eindüsung von Sekundärluft. Diese kann in mehreren Ebenen und durch Einsatz verschiedener Düsenkombinationen (Anzahl, Durchmesser) mit unterschiedlichen Verteilungsmustern und Impulsen eingedüst werden. Im sich anschließenden 1. Zug finden Nachreaktionen zum Ausbrand des Abgases und Schadstoffabbau statt. Über Messstutzen können die Gase in allen relevanten Reaktionsbereichen beprobt und analysiert werden.

An der Rückschubrost-Pilotanlage können im Vergleich zu kommerziellen Großanlagen verhältnismäßig große Variationsbreiten der Prozessparameter gefahren werden. Deshalb lag der Schwerpunkt der Untersuchungen zunächst auf einer systematischen Variation aller beeinflussbaren NO<sub>x</sub>-relevanten Versuchsparameter, siehe **Abb. 3**. In der Tabelle sind auch die Versuche in den Großanlagen sowie eine qualitative Bewertung der beobachteten Effekte der Parametervariationen auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen verzeichnet.

Anlagenausstattung (Auszug)	Variation und Ergebnis in der Anlage			Schweinfurt
	CUTEK	Kempton		
Versuchsparameter A...D				
Ausstattung Nachverbrennung	2 x SL	2 x SL		KL, Rezi, SL
Strömungsführung der Abgase	Mittelstrom	Mittelstrom		Gegenstrom
<b>A: Brennstoff</b>				
1. Art	?			
2. Stickstoffgehalt	++			+
3. Wassergehalt	0			
4. Heizwert	0			
5. Körnung				
<b>B: Luftsystem</b>				
1. Luftzahl Rost	0	+		
2. Luftverteilung Rost	+	0		+
3. Sauerstoffkonzentration PL				
4. Temperatur PL				0
5. Luftzahl Nachverbrennung	+	+		+
6a. Luftverteilung SL (horizontal)	++	++		++
6b. Luftverteilung SL (vertikal)	+	+		
7. Sauerstoffkonzentration SL	++			
8. Temperatur SL				
9. Lage der SL-Ebenen	0 / ++			
10. Abgasrezirkulation				0
11. andere Nachverbrennungsluft				?
12. Düsengeometrie				
<b>C: Rostsystem</b>				
1. Geometrie				
2. Bewegung				
3. Thermische Leistung	+			0
<b>D: Feuerraum / 1. Zug</b>				
1. Geometrie				
2. Feuerung (Gg-/Mi-/Gl-strom)				

**Legende**

Abkürzungen:  
SL Sekundärluft  
KL Kühlluft (Platten)  
Rezi Abgasrezirkulation

Variationsbreite:  
 groß  
 mittel  
 klein

NO<sub>x</sub>-Effekte:  
++ deutlicher Effekt  
+ wenig Effekt  
0 kaum Effekt  
? unklar

**Abb. 3: Parametervariationen bei Versuchen in Pilot- und Großanlagen**

Als Brennstoffe wurden Holz und Hausmüll-Fluff-Mischungen eingesetzt, denen zum Teil Additive (Harnstoff, BRAM) zugeschlagen wurden. Der Hausmüll stammte aus einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage, um eine weitgehend gleichbleibende Qualität mit definierter Stückigkeit zu erhalten. Die in der Aufbereitungsanlage aussortierten Stoffe wurden durch die Mischung mit Fluff (flugfähige Fraktion, d.h. hauptsächlich geshredderte

Kunststoffe und Papier) ausgeglichen. Die Variationen für die Primärluft umfassten die Gesamtmenge, d.h. Luftzahl auf dem Rost (Verbrennung, Vergasung), und die Verteilung über der Rostlänge (Hauptluft vorn, mittig). Im Bereich der Sekundärluft wurden die Parameter Gesamt-Luftzahl ( $O_2$ -Gehalt des Abgases), horizontale Verteilung der Sekundärluft zwischen Vorder- und Rückseite des Feuerraums, vertikale Verteilung auf die beiden Sekundärluft-Ebenen, Sauerstoffkonzentration in der unteren Sekundärluft und die Lage bzw. der Abstand der Sekundärluftebenen untersucht. Die thermische Leistung wurde nur exemplarisch variiert und lag normalerweise bei ca. 620 kW bzw. bei ca. 730 kW bei weiterführenden Untersuchungen außerhalb des HGF-Vorhabens.

Durch eine systematische Kombination der Parametervariationen wurden 30 Einstellungen der Pilotanlage ausgewählt. Die hier diskutierten Ergebnisse stammen sowohl aus Versuchen des HGF-Strategiefondsvorhaben als auch aus einem anderen  $NO_x$ -Minderungsprojekt, das gemeinsam mit der MARTIN-GmbH in den Jahren 1999 bis 2002 durchgeführt wurde. Dadurch steht das Datenmaterial aus insgesamt ca. 100 Versuchen zur Verfügung, von dem hier aber nur die wesentlichen Erkenntnisse dargestellt werden sollen. Insbesondere die in Abb. 3 mit ++ und + markierten Parametervariationen mit deutlich erkennbaren Effekten auf die  $NO_x$ -Emissionen sollen im Folgenden näher diskutiert werden.

Während der Versuche wurden Netzmessungen im Bereich der Hauptreaktionszonen durchgeführt, hier vor allem die Ermittlung von Temperaturen und Gaskonzentrationen ( $O_2$ ,  $CO_2$ , CO,  $H_2$ ,  $CH_4$ , NO, zeitweise  $NH_3$  und HCN) über dem Brennbett, zwischen den beiden Sekundärluftebenen und oberhalb der oberen Sekundärlufteindüsung. Die Konzentrationen des ausgebrannten Rohgases ( $O_2$ ,  $CO_2$ , CO,  $NO_x$  u.a.) wurden am Eintritt zum 2. Zug bestimmt. Eine typische Konzentrationsverteilung im Feuerraum zeigt **Abb. 4**. Im Bereich der Haupt-Entgasungszone über den ersten beiden Rostzonen sind deutlich die hohen Konzentrationen brennbarer Gase (reduzierende Bedingungen) zu erkennen. Hier finden sich relativ geringe  $NO$ -Konzentrationen, da der Brennstoff-Stickstoff überwiegend als  $NH_3$  und HCN vorliegt, was auch aus Labor- und Chargenrostversuchen bereits hinreichend bekannt

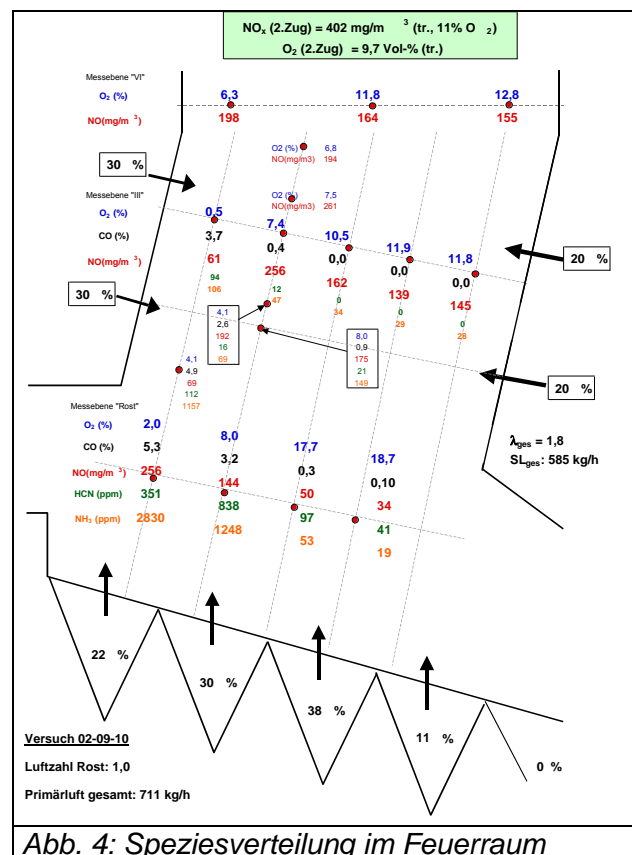


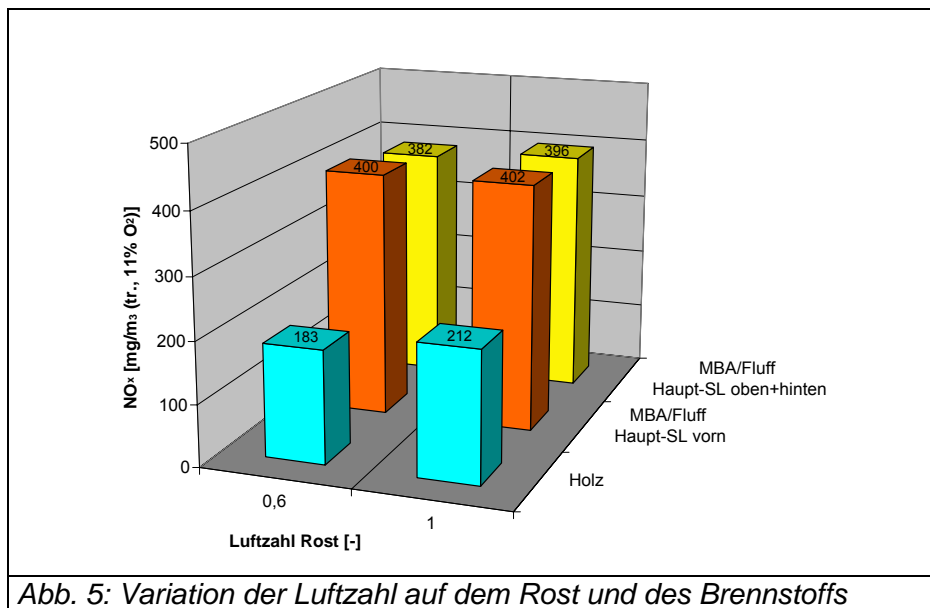
Abb. 4: Speziesverteilung im Feuerraum

Abb. 4: Speziesverteilung im Feuerraum

ist (s. TP 1). Die Bildung von NO aus diesen Vorläuferverbindungen findet vorwiegend erst in der Nachverbrennung statt, wenn oxidierende Bedingungen auftreten. Der überwiegende Teil des Rohgas-NO<sub>x</sub> scheint aus den flüchtigen Stickstoffverbindungen zu stammen, da die NO-Frachten aus dem hinteren Teil des Rostes (Koksausbrand) gering sind.

Im Folgenden werden anhand der Rohgaskonzentrationen des ausgebrannten Abgases (Messstelle 2. Zug) Aussagen zum Einfluss der betrachteten Anlagen-Parameter auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen abgeleitet. Die Absenkung der Luftzahl auf dem Rost von 1 auf 0,6, d.h. vom Verbrennungs- auf den Vergasungsbetrieb hatte keine nennenswerten Auswirkungen auf die NO<sub>x</sub>-

Konzentration, siehe **Abb. 5**. Offenbar konnten mit der verwendeten Anlagenkonfiguration nicht die Vorteile einer gestuften Verbrennung genutzt werden, wie sie üblicherweise zur NO<sub>x</sub>-Minderung eingesetzt wird (s.o.). Dies



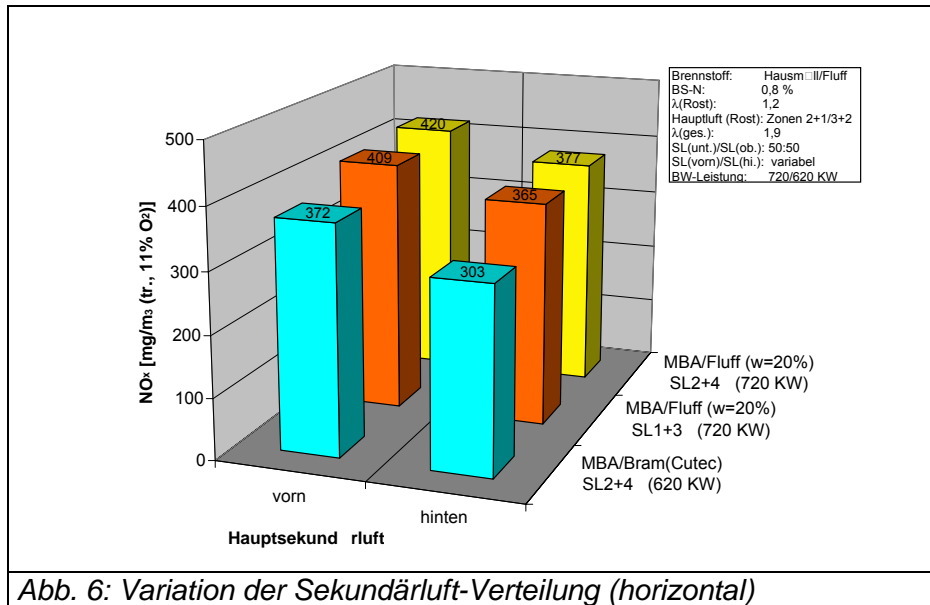
**Abb. 5:** Variation der Luftzahl auf dem Rost und des Brennstoffs

wird darauf zurückgeführt, dass eine ausreichende Vermischung der Gase unterhalb der Sekundärluftebenen nicht gegeben ist. Deshalb gibt es trotz der von der Gesamtbilanz her gegebenen Vergasungsbedingungen in der Primärstufe lokal große Unterschiede mit Luftzahlen von  $\lambda \ll 1$  (vorn) bis  $\lambda \gg 1$  (hinten). Ohne Vermischung dieser Gase liegen nur relativ enge Bereiche mit optimaler Stöchiometrie (TFN-Minimum, s. Abb. 1) vor. Bereits gebildetes NO und Reduktionsmittel befinden sich in verschiedenen Zonen und können nicht miteinander reagieren. Der Brennstoff-Stickstoff liegt noch vorwiegend in Form von HCN und NH<sub>3</sub> in der Flüchtigenwolke vor. Die Mischung der Rostgase mit der ersten Sekundärluft ist mit einem zusätzlichen Sauerstoffeintrag verbunden, wobei plötzlich oxidierende Bedingungen auftreten. Die Stickstoffverbindungen in der Flüchtigenwolke werden dabei überwiegend zu NO oxidiert, da der Bereich des TFN-Minimums bereits überschritten ist.

Signifikante Unterschiede der NO<sub>x</sub>-Werte ergeben sich erwartungsgemäß bei Einsatz von Brennstoffen mit verschiedenen Stickstoffgehalten (**Abb. 5**). Der Stickstoff-Umwandlungs-

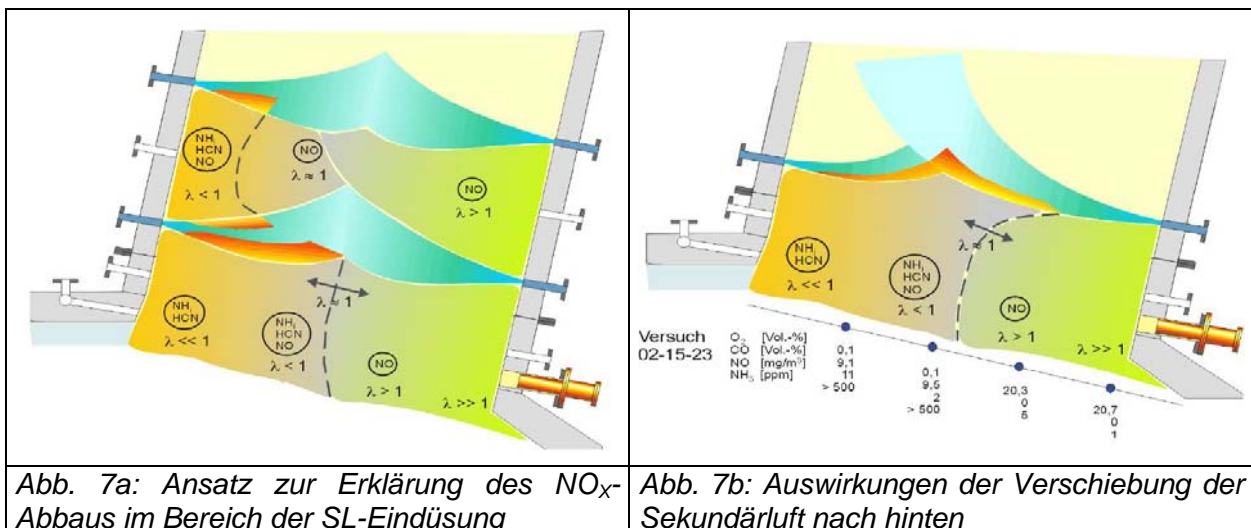
grad – d.h. der zum  $\text{NO}_x$  umgewandelte Anteil des Brennstoff-N – sinkt wie bekannt mit steigendem N-Gehalt des Brennstoffs.

Die deutlichsten Hinweise auf mögliche  $\text{NO}_x$ -Minderungsstrategien ergaben sich bei den Variationen im Bereich der Sekundärlufteindüsung. In **Abb. 6** sind die Auswirkungen einer Vertrimmung der Hauptsekundärluft



von den Vorderwanddüsen zu den Rückwanddüsen zu sehen. Von der Verteilung vorn:hinten = 60%:40% wurde für verschiedene Brennstoffe und Sekundärluftebenen die Sekundärluft umgestellt auf die Verteilung 40%:60%. In allen Fällen ergab sich eine reproduzierbare und signifikante Senkung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen zwischen 10 und 20%.

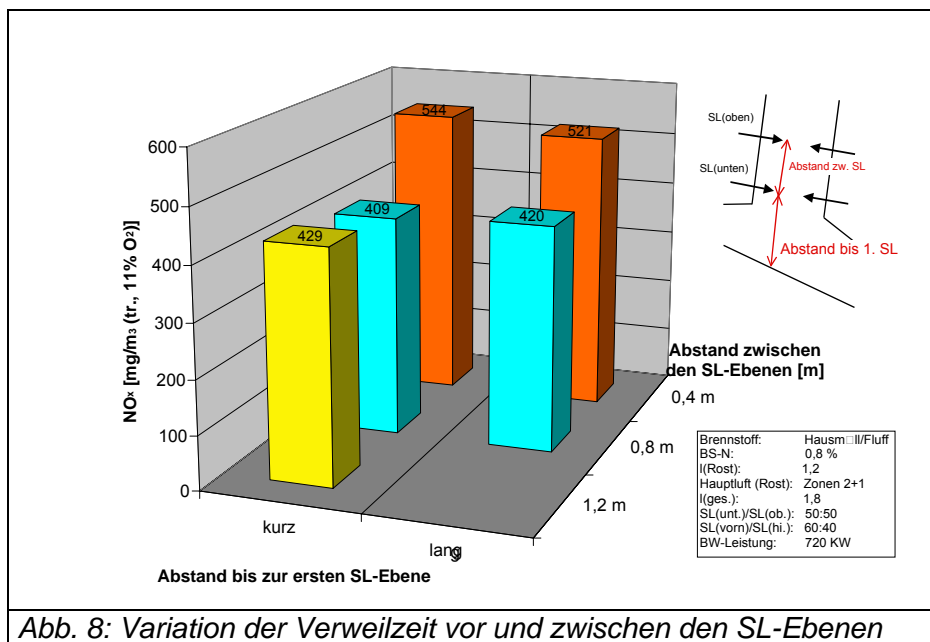
Eine ansatzweise Erklärung dieses Phänomens ist mit den Strömungen und der Speziesverteilung im Bereich der Sekundärluft-Freistrahlen möglich. Die Ausgangslage mit gleichverteilter Sekundärluft ist schematisch in **Abb. 7a** gezeigt: Über dem Brennbett befinden sich Gaswolken mit unterschiedlicher Stöchiometrie von  $\lambda << 1$  bis  $\lambda >> 1$  und entsprechenden Stickstoffspeziesanteilen. Eine wirksame Reduktion der Stickoxidemissionen kann nur in leicht unterstöchiometrischen Zonen stattfinden, im Bild mit  $\lambda < 1$  bezeichnet. Außer in relativ engen Bereichen oberhalb des Brennbetts bilden sich diese Zonen in den Rändern der unteren vor-



deren Sekundärluftstrahlen, die in die stark unterstöchiometrische Flüchtigenwolke blasen. Oberhalb der unteren Sekundärluftebene existieren nur noch kleine Gebiete mit  $\lambda < 1$  an der Vorderwand des Feuerraums. Wird nun bei sonst gleichen Randbedingungen die untere Sekundärluft hauptsächlich über die Rückwanddüsen zugegeben (**Abb. 7b**), verstärkt sich die Sogwirkung dieser Freistrahlen und die Flüchtigenwolke wird in Richtung Rückwand gezogen. Dadurch vergrößern sich die Zonen mit  $\lambda < 1$  an den Rändern der Sekundärluftstrahlen, was die  $\text{NO}_x$ -Reduktion begünstigt.

Die Verwendung unterschiedlicher Sekundärluftebenen hatte zum Ziel, die Verweilzeit der Gase vom Brennbett bis zum Eintritt in die erste Sekundäreindüsung sowie die Verweilzeit der Gase zwischen den beiden SL-Ebenen zu variieren. **Abb. 8** ist zu entnehmen, dass der Abstand vom Bett bis zur ersten SL-Ebene offensichtlich wenig Bedeutung für die  $\text{NO}_x$ -Emissionen hat. Ein  $\text{NO}$ -Abbau kann dort nur begrenzt stattfinden, da keine ausreichende Mischung stattfindet.

Für den Abstand der beiden SL-Ebenen voneinander scheint es einen kritischen Wert zu geben, unterhalb dessen die  $\text{NO}_x$ -Werte stark ansteigen, während sie oberhalb konstant bleiben. Dies deutet darauf hin, dass für die  $\text{NO}$ -Reduktion zwischen den beiden



SL-Ebenen eine genügend lange Verweilzeit benötigt wird. Liegen die SL-Ebenen zu dicht beieinander, so gleichen die Reaktionsbedingungen eher denen der einstufigen Nachverbrennung, die sich in anderen Versuchen des CUTEC-Instituts gegenüber der gestuften Nachverbrennung im Hinblick auf  $\text{NO}_x$ -Minderung als eindeutig schlechtere Variante erwiesen hat.

Durch die Eindüsung von Reaktionsgasen mit geringeren Sauerstoffgehalten in die vordere, untere Sekundärluftreihe sollte geprüft werden, ob sich bei gleicher Mischwirkung (Eintrittsimpuls) aber weniger intensiven Verbrennungsreaktionen im Bereich der Entgasungsprodukte eine  $\text{NO}_x$ -Minderung erzielen lässt. **Abb. 9** zeigt die Ergebnisse von Versuchen mit Eindü-

sung von Luft (21 Vol.-% O<sub>2</sub>), sauerstoffangereicherter Luft („Rezi“ mit 8 Vol.-% O<sub>2</sub>) und Stickstoff (0 Vol.-% O<sub>2</sub>) bei sonst gleichen Randbedingungen. Es zeigt sich eine reproduzierbare und signifikante Abhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Emissionen, die umso niedriger ausfallen, je weniger Sauerstoff in den Bereich der Hauptentgasungsprodukte eingetragen wird. Dies ist ein Indiz dafür, dass ein inerter Mischer oberhalb des Brennbettes aber unterhalb der Sekundärluft positive Auswirkungen auf die NO-Reduktion hat. Die sich einstellende Luftzahl der gemischten Gase ist dann wahrscheinlich in weiten Gebieten in einem für die NO-Reduktion günstigen Bereich von  $\lambda \approx 0,7$ .

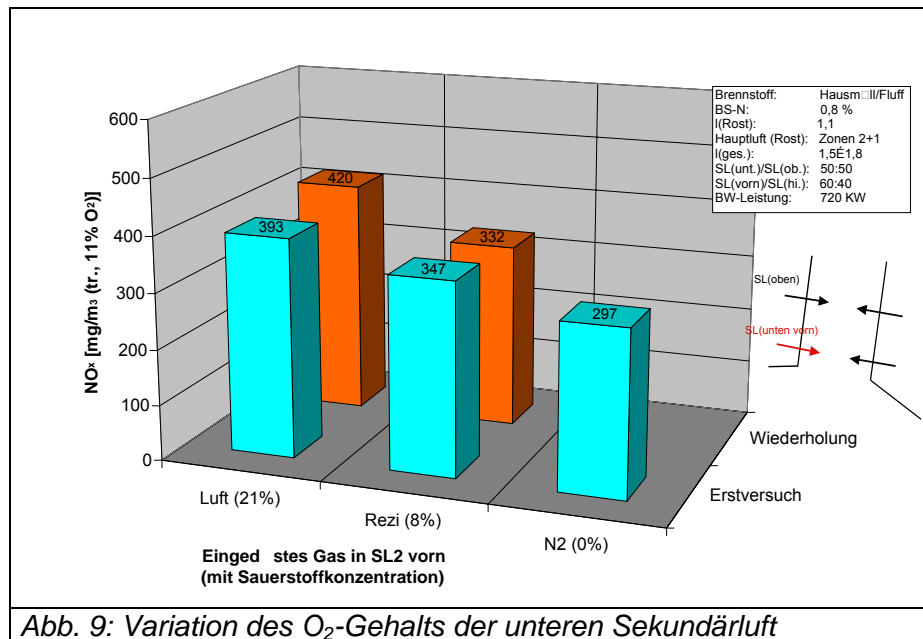


Abb. 9: Variation des O<sub>2</sub>-Gehalts der unteren Sekundärluft

### Untersuchungen zur NO<sub>x</sub>-Minderung in Großanlagen

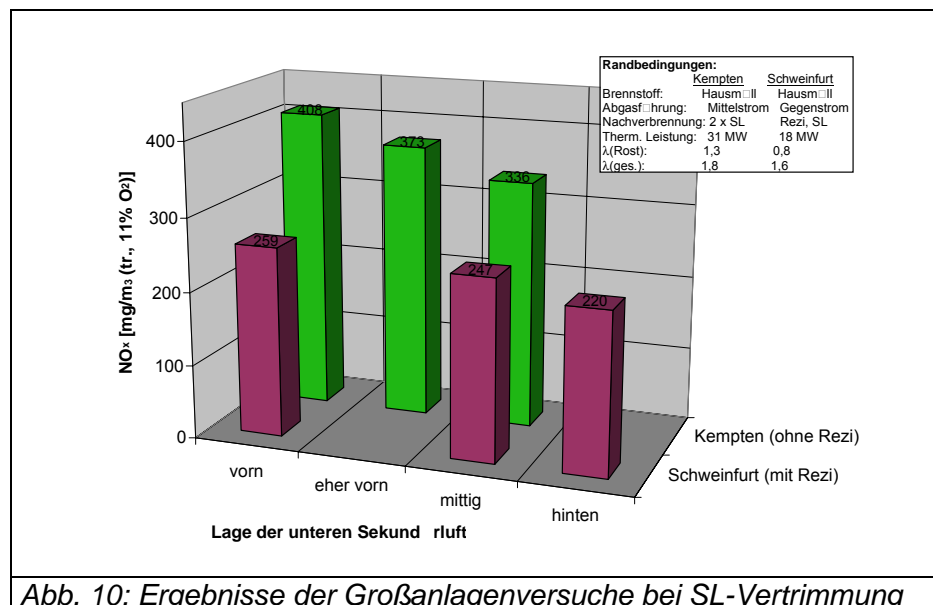
Von CUTEC wurden unter Mitwirkung der Industriepartner MARTIN und BBP Validierungsversuche in 2 kommerziellen Müllverbrennungsanlagen mit unterschiedlichen Rostsystemen gefahren. Es handelte sich um das MHKW Kempten mit Rückschubrost und um die MVA Schweinfurt mit Noell-Vorschubrost. Die beiden Anlagen hatten grundsätzlich unterschiedliche Ausstattungen des Nachverbrennungssystems.

Der Feuerraum des MHKW Kempten war ähnlich aufgebaut, wie der der CUTEC-Pilotanlage. Abgesehen von den unterschiedlichen Längen-/Breitenverhältnissen und der Düsenausstattung der Sekundärluftreihen verfügte er ebenfalls über 2 übereinanderliegende Sekundärluftebenen mit einer kämmenden Anordnung der Düsen jeweils auf der Vorder- und Rückseite des Feuerraums. Feuerraum und 1. Zug waren oberhalb der Hauptverbrennungszone auf dem Rost angeordnet, so dass die Abgase im Mittelstrom geführt wurden. Die Abmessungen des Feuerraumquerschnitts betragen ca. 4m x 4m. Die Luftzahlen lagen für die Roststufe bei  $\lambda_{\text{Prim}} = 1,3$  und am Kesselaustritt bei  $\lambda_{\text{ges}} = 1,8$ . Die thermische Leistung der

Anlage betrug während der Versuche konstant ca. 31 MW (93% der Nennlast). Die Rohgas-NO<sub>x</sub>-Werte wurden am Kesselende vor der Abgasreinigung gemessen.

Einen völlig anderen Aufbau wies die MVA Schweinfurt auf, die neben dem anderen Rostsystem (Vorschubrost) als Gegenströmer ausgebildet ist und im Luftsystem markante Unterschiede aufwies. Zum Schutz der Seitenwände unmittelbar oberhalb des Rostes wurde in erheblichem Maße „Plattenluft“ eingeblasen, darüber lagen als erste Mischstufe zwei gegenüberliegende Düsenreihen in den Seitenwänden für Abgasrezirkulation und wiederum darüber am Eintritt zum 1. Zug zwei gegenüberliegende Düsenreihen in Vorder- und Rückwand für Sekundärluft. Die Versorgung mit Primärluft erfolgte unterstöchiometrisch ( $\lambda_{\text{Prim}} = 0,8$ ), die Luftzahl nach SL-Zugabe lag bei  $\lambda_{\text{ges}} = 1,6$ . Die Messstelle für die Erfassung der Rohgaswerte befand sich ca. 5 m oberhalb der Sekundärluftebene im 1. Zug und ungefähr 3 m unterhalb der Ammoniakwassereindüsung für die SNCR. Eine ständige Netzmessung war nicht möglich, weshalb die Beprobung des Abgases auf einen Punkt im vorderen Drittel des Feuerraums (lichte Weite 3,3m x 3,4m) beschränkt blieb. Die Feuerungswärmeleistung während der Versuche betrug ca. 18 MW, was 95% der Nennlast entspricht.

Die variierten Parameter für beide Anlagen wurden bereits in **Abb. 3** genannt. Da die übliche Anlagenfahrweise beider Anlagen nahe am Auslegungszustand lag und Betriebsstörungen nicht in Kauf genommen werden konnten, waren die Variationsmöglichkeiten im Vergleich zur CUTEC-Pilotanlage eingeschränkt. Die Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind qualitativ ebenfalls in Abb. 3 eingetragen. Deutliche Effekte mit NO<sub>x</sub>-Minderungen von bis zu 20% sind insbesondere bei der Vertrimmung der Sekundärluft in horizontaler Richtung, also von der Vorderwand zur Rückwand, zu beobachten, siehe auch Pilotanlagenversuche. **Abb. 10** zeigt die Messwerte für beide Großanlagen, wobei gleiche Tendenzen zu sehen sind, aber deutlich unterschiedliche NO<sub>x</sub>-Niveaus zwischen den beiden Anlagen. Letzteres wird u.a. auf die Ausstattung der MVA Schweinfurt mit einer Abgasrezirkulation unterhalb der Sekundärluftebene zurückgeführt,



beobachten, siehe auch Pilotanlagenversuche. **Abb. 10** zeigt die Messwerte für beide Großanlagen, wobei gleiche Tendenzen zu sehen sind, aber deutlich unterschiedliche NO<sub>x</sub>-Niveaus zwischen den beiden Anlagen. Letzteres wird u.a. auf die Ausstattung der MVA Schweinfurt mit einer Abgasrezirkulation unterhalb der Sekundärluftebene zurückgeführt,

was sich bereits bei den Versuchen in der Pilotanlage positiv hinsichtlich der NO-Minderung bemerkbar gemacht hatte. Darüber hinaus ergeben sich größere NO<sub>x</sub>-Werte bei dem MHKW Kempton durch die höhere Luftzahl in dieser Anlage.

Geringere Effekte wurden durch die Senkung der Gesamtluftzahl (verminderte O<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas) und die Umverteilung der Primärluft erzielt. In der Anlage Kempton konnte durch eine Verlagerung der Sekundärluft in die obere SL-Ebene eine NO-Minderung von über 10% verzeichnet werden.

### Resümee und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass NO<sub>x</sub>-Minderungsmöglichkeiten in Müllverbrennungsanlagen vor allem im Bereich des Nachverbrennungssystems zu suchen sind, insbesondere im Zusammenhang mit der Sekundärlufteindüsung. Um die Potenziale einer optimierten NO<sub>x</sub>-Reduktion durch Primärmaßnahmen unter Berücksichtigung der Anlagengröße voll ausschöpfen zu können, sind weiterführende Versuche in Pilot- und Großanlagen erforderlich. Dabei sind vorrangig die Auswirkungen von Abgasrezirkulation und Mischeffekten im Feuerraum detailliert zu untersuchen.

### Literatur

- [1] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. Tecflam-Seminar, Heidelberg, 1990.
- [2] Schopf, N.; Sternberg, J.; Sterner, D.: Thermische Nutzung hochstickstoffhaltiger Reststoffe in der betrieblichen Wärmeerzeugung. VDI-Berichte 1313, 1997, S. 299-302
- [3] Keller, R.: Primärseitige NO<sub>x</sub>-Minderung mittels Luftstufung bei der Holzverbrennung. BWK 46 (1994), S. 483-488.
- [4] Eberius, H.; Just, T.; Kelm, S.; Warnatz, J.; Nowak, U.: Konversion von brennstoffgebundenem Stickstoff am Beispiel von dotierten Propan-Luft-Flammen. VDI-Berichte 645, S. 626 ff, 1987.
- [5] Beckmann, M.; Scholz, R.; Davidovic, M.; Weichert, C.: Vergasung und Verbrennung von Abfallholz in Rostsystemen. VDI-Berichte 1387, S. 395-405, 1998.