

Primärmaßnahmen zur Verminderung von Brennstoffstickoxiden in Holzfeuerungen haben zum Ziel, den Brennstoffstickstoff durch eine gestufte Verbrennungsführung zu molekularem Stickstoff

zu reduzieren. In diesem Zusammenhang beschreibt der erste Teil des Beitrages, der in der Ausgabe 1/2-97 erschienen ist, die Wege zur Bildung von Stickoxiden. Der vorliegende zweite Teil stellt mit der Luft- und Brennstoffstufung zwei technische Maßnahmen zur Stickoxidminde-

rung vor. Es werden Untersuchungen zur Luftstufung an einer 25-kW-Versuchsanlage und an einer 250-kW-Prototypanlage vorgestellt und die Potentiale der Brennstoffstufung geschildert.

## Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen

Teil 2: Luft- und Brennstoffstufung

Thomas Nussbaumer, Zürich

Die Möglichkeiten der gestuften Verbrennung von Holz werden an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Firma Müller AG Balsthal im Rahmen eines Forschungsprojekts untersucht. Die Arbeiten werden vom Bundesamt für Energiewirtschaft und vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft unterstützt und sind Teil des EU-Projekts JOR3-CT96-0059 „Reduction of Nitrogen Oxide Emissions from Wood Chip Grate Furnaces“.

### Möglichkeiten der Luftstufung

In einer ersten Arbeit wurde die Luftstufung mit Variation von Verweilzeit, Temperatur und Stöchiometrie in der Reduktionszone an einer 25-kW-Laboranlage (Bild 5, [11, 12]) untersucht. Gleichzeitig wurde der Einfluß der gestuften Luftzufuhr in der Vergasungszone aufgezeigt und verschiedene Varianten der Abgasrezirkulation geprüft.

Die Untersuchungen zeigen, daß bei niedrigem Stickstoffgehalt (naturbelassenes Holz) eine  $\text{NO}_x$ -Minderung von rund 50 bis 60 % erzielt werden kann, während bei erhöhtem Stickstoffgehalt (zum Beispiel UF-Spanplatten) eine Minderung um rund 75 % möglich ist. Daneben zeigen die Messungen, daß ohne Reduktionskammer durch Einhalten einer unterstöchiometrischen Primärluftzahl immerhin eine  $\text{NO}_x$ -Minderung um rund die Hälfte der angegebenen Werte erreicht werden kann.

Die Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der in der Laboranlage erzielten Werte für verschiedene

Versuchsanordnungen. Zur Erreichung minimaler  $\text{NO}_x$ -Werte durch Luftstufung mit Reduktionskammer in der Versuchsanlage ist die Einhaltung folgender Bedingungen bezüglich Temperatur, Verweilzeit und Primärluftzahl in der Reduktionszone erforderlich:

- Verweilzeit  $\approx 0,5$  s ( $> 0,3$  s) und gute Vermischung der Gase (Turbulenz),
- Temperatur in der Reduktionszone  $\approx 1\ 100$  bis  $1\ 200$  °C,
- Primärluftzahl  $\approx 0,7$  bis  $0,8$ .

Insbesondere die Primärluftzahl hat einen wesentlichen Einfluß auf die Effizienz der  $\text{NO}_x$ -Reduktion (Bild 6). Bei einer Primärluftzahl  $< 0,7$  ist in der Reduktionszone kaum  $\text{NO}$  verfügbar. Die  $\text{NH}$ -Verbindungen werden deshalb in der Nachbrennkammer zu  $\text{NO}$  oxidiert. Bei einer Primärluftzahl  $> 1$  werden die stickstoffhaltigen Zwischenprodukte bereits in der Vergasungszone weitgehend zu  $\text{NO}$  oxidiert, so daß in der Reduktionszone keine  $\text{NH}$ -Verbindungen für den  $\text{NO}$ -Abbau zur Verfügung stehen.

Die Einhaltung enger Bereiche für die Temperatur und die Primärluftzahl hat zur Folge, daß für eine effiziente  $\text{NO}_x$ -Minderung in der Praxis eine leistungsfähige Prozeß-

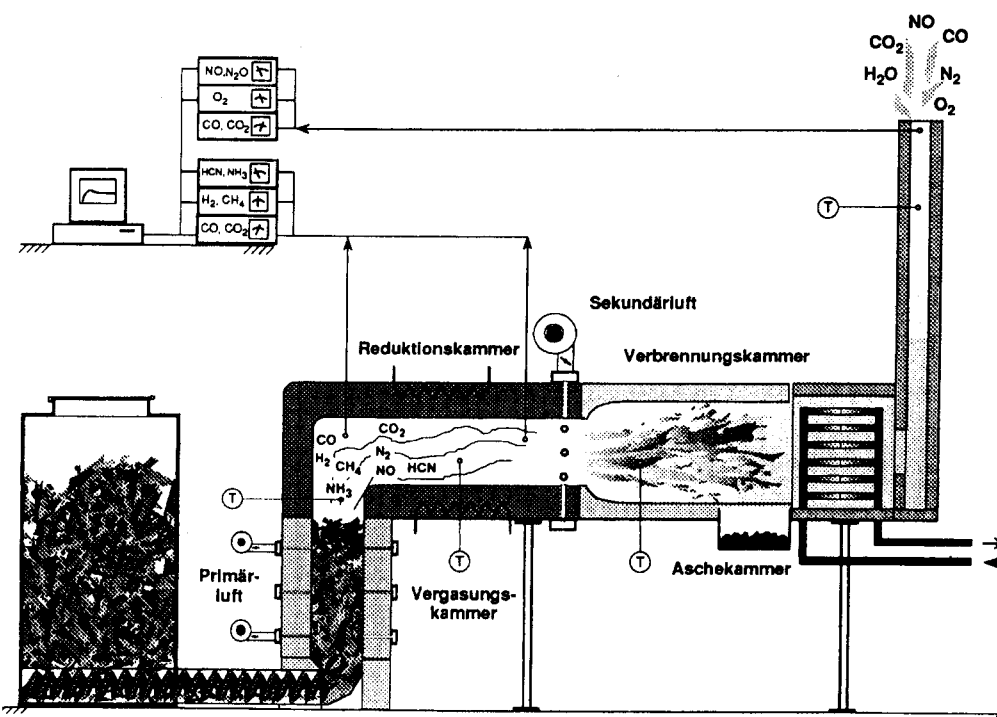


Bild 5 | 25-kW-Laborversuchsanlage zur Holzverbrennung mit Luftstufung in einer separaten Reduktionskammer [11; 12].

Dr.-Ing. Thomas Nussbaumer, Jahrgang 1960, Studium des Maschinenbaus an der ETH Zürich mit Ausbildung in Verfahrenstechnik. Von 1985 bis 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der ETH Zürich, seit 1990 Leiter der Forschungsgruppe Holzenergie & Energiegras an der ETH Zürich, Dozent an der ETH Zürich und an der HTL Burgdorf, Inhaber und Geschäftsführer des Ingenieurbüros Verenum, Zürich.

**Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen**

**NO<sub>x</sub>-Emissionen und Umwandlungsrate von Brennstoffstickstoff N zu NO<sub>x</sub> bei der Verbrennung von Holz und UF-Spanplatten für verschiedene Verbrennungstechniken und Primärluftzahlen in der Versuchsanlage nach Bild 5 [12]. Temperatur in der Reduktionszone: 1 160 °C, Verweilzeit: 0,3 bis 0,6 s. Die 2-stufige Verbrennung mit Reduktionskammer entspricht der vorgestellten Luftstufung. Bei der 3-stufigen Verbrennung erfolgt zusätzlich eine gestufte Zugabe der Primärluft auf zwei Ebenen.**

Brennstoff	Verbrennungstechnik	Primärluftzahl	NO <sub>x</sub>	Umwandlungsrate von N zu NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub> -Reduktion
			als NO <sub>2</sub> bei 13 Vol.-% O <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	%	%
Holz N = 0,15 Gew.-%	2stufige Verbrennung ohne Reduktionskammer (Referenz)	1...1,3	200	39,8	0
	2stufige Verbrennung mit unterstöchiometrischer Primärluft	0,6...0,8	140	28,0	30
	2stufige Verbrennung mit Reduktionskammer	0,7	76	15,1	62
	3stufige Verbrennung mit Reduktionskammer	0,8	60	12,0	70
UF-Spanplatten N = 2,0 Gew.-%	2stufige Verbrennung ohne Reduktionskammer (Referenz)	1...1,3	848	15,3	0
	2stufige Verbrennung mit unterstöchiometrischer Primärluft	0,6...0,8	440	8,1	48
	2stufige Verbrennung mit Reduktionskammer	0,7	216	4,0	75
	3stufige Verbrennung mit Reduktionskammer	0,8	176	3,2	79

regelung erforderlich ist, die bei verschiedenen Leistungen den NO-Abbau optimiert und gleichzeitig gute Ausbrandbedingungen gewährleistet.

Aufgrund der Erfahrungen in der Versuchsanlage wurde eine 250-kW-Prototypanlage mit Luftstufung gemäß Bild 7 realisiert [13]. Bei der Konstruktion wurden die Wärmeverluste der Reduktionskammer minimiert, um die für eine effiziente NO<sub>x</sub>-Minderung erforderliche Temperatur sicher zu erreichen. In der Prototypanlage wurden ver-

gleichbare Resultate wie mit der Laboranlage erreicht, allerdings bei geringfügig höheren Primärluftzahlen.

**Erfahrungen aus der Praxis**

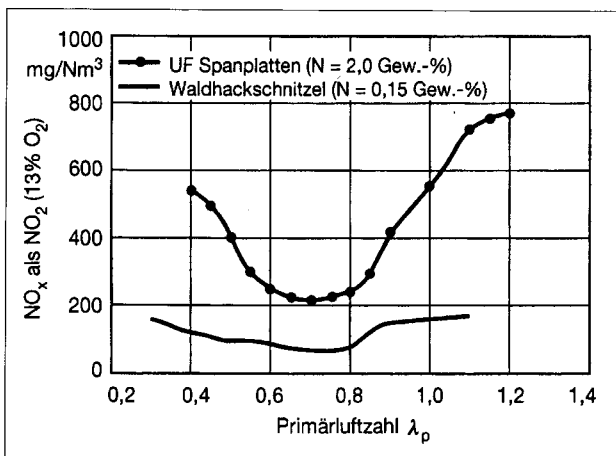
Erste Betriebserfahrungen mit Praxisanlagen haben gezeigt, daß als Folge der hohen Temperatur in der Reduktionszone zum Teil Verschlackung von Flugasche auftreten kann. Dadurch werden Ablagerungen an den Wänden begünstigt, die zu Materialproblemen führen können. Dieses folgt aus der Tatsache, daß bei der ersten Prototypanlage wegen der konsequenten Vermeidung von Wärmeverlusten in der Reduktionszone annähernd die adiabate Verbrennungstemperatur erreicht wird.

Da die Primärluftzahl nahe bei 1, also nahe beim Temperaturmaximum ist, werden zum Teil Gastemperaturen von bis zu 1 400 °C erreicht (Bild 8). Dies ist über dem für die NO<sub>x</sub>-Minderung optimalen Temperaturniveau von 1 100 bis 1 200 °C und somit auch höher als

für die Luftstufung vorgesehen. Für den Einsatz der Luftstufung in der Praxis sind deshalb Maßnahmen erforderlich, die eine Überschreitung der zulässigen Temperaturen verhindern. Die konstruktiven Ansätze zur Temperaturabsenkung umfassen eine Verminderung der Feuerbelastung sowie eine partielle Wärmeabfuhr vor Eintritt in die Reduktionszone. Entsprechende Maßnahmen wurden in Prototyp-Anlagen bereits realisiert. Die ersten Erfahrungen der Inbetriebnahmephase sind positiv, längere Praxiserfahrungen liegen jedoch noch nicht vor.

Eine Temperaturabsenkung in der Reduktionszone kann auch durch Absenkung der Primärluftzahl von ≈ 1 auf 0,7 bis 0,8 (Bild 8) oder durch Rückführung von gekühlten Abgasen in die Vergasungszone erzielt werden. Durch Variation der rezirkulierten Abgasmenge besteht die Möglichkeit, die Temperatur in der Reduktionskammer zu regeln. Dieses ermöglicht zum Beispiel bei stark variierendem Heizwert oder Wassergehalt der eingesetzten Brennstoffe einen zu-

**Bild 6** NO<sub>x</sub>-Emissionen als Funktion der Primärluftzahl für die Verbrennung von UF-Spanplatten und naturbelassenem Holz in der Laboranlage mit Luftstufung gemäß Bild 5. Temperatur in der Reduktionszone: 1 160 °C, Verweilzeit: 0,3 bis 0,6 s [12].



sätzlichen Freiheitsgrad für die Prozeßoptimierung.

Die verschiedenen Maßnahmen zur Temperaturkontrolle werden derzeit im Rahmen der laufenden Forschungsarbeiten untersucht. Gleichzeitig werden Konzepte zur Prozeßregelung erarbeitet, welche die Einhaltung der optimalen Betriebsbedingungen gewährleisten.

Da für eine effiziente  $\text{NO}_x$ -Minderung durch Luftstufung hohe Reduktionstemperaturen erforderlich sind, ist davon auszugehen, daß die Einsatzmöglichkeiten für stark zur Verschlackung neigende Brennstoffe beschränkt sind. Dies betrifft Brennstoffe mit hohem Aschegehalt und niedriger Ascheerweichungstemperatur – insbesondere Restholzsortimente – sowie Stroh, Gras, Chinaschilf und weitere Halmgüter [14].

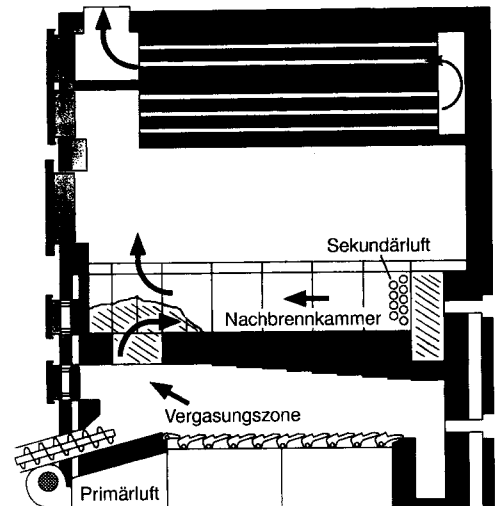
### Einsatz der Brennstoffstufung

Zur Gewährleistung reduzierender Bedingungen in einer definier-

ten Zone der Feuerung kann nebst der Luftstufung auch die Brennstoffstufung eingesetzt werden [15]. Dabei wird der Hauptbrennstoff in einer ersten Stufe mit einem Luftüberschuß  $> 1$  verbrannt und anschließend ein Zweitbrennstoff (auch Stufen- oder Reduktionsbrennstoff genannt) in das Abgas eingemischt (Bild 4). Durch Zuführung des Zweitbrennstoffs wird in der Reduktionszone ein Luftüberschuß  $< 1$  erreicht, so daß zuvor gebildete Stickoxide durch CH- und NH-Verbindungen aus dem Zweitbrennstoff reduziert werden.

Durch Brennstoffstufung können sowohl Brennstoffstickoxide als auch thermische Stickoxide aus der Hauptbrennzone reduziert werden. Als Stufenbrennstoff sind grundsätzlich alle kohlenstoffhaltigen Brennstoffe geeignet, also beispielsweise Erdgas, Erdöl, Kohle oder Holz. Bei stickstoffhaltigen Brennstoffen wird der Stickoxidabbau durch die freigesetzten NH-Verbindungen verstärkt. Bei Festbrennstoffen ist zudem ein hoher

Flüchtigengehalt vorteilhaft. Biogene Brennstoffe sind deshalb gut als Stufenbrennstoff geeignet [16]. So weist zum Beispiel Stroh ein besseres Reduktionspotential auf als Kohle (Bild 9). Aber auch Holz und andere biogene Brennstoffe haben ein hohes Reduktionspotential. Um eine effiziente Stickoxidminderung zu erzielen, muß der Stufenbrennstoff eine hohe spezifi-



**Bild 7** 250-kW-Prototypanlage einer Rostfeuerung mit Luftstufung und Reduktionskammer [13]. Die Reduktionskammer ist im mittleren Teil der Feuerung angeordnet (schraffiert eingezeichnet) und umgeben von der Nachbrennkammer.

# psst! ist die Luft rein?

Was Sie hier sehen, ist eigentlich kein Geheimnis. Im Gegenteil, unsere Produkte sind weltweit bekannt für ihre außergewöhnliche Präzision und Zuverlässigkeit im Messen von Stickstoffen, Etcetera, Etcetera, Undsoweniger.

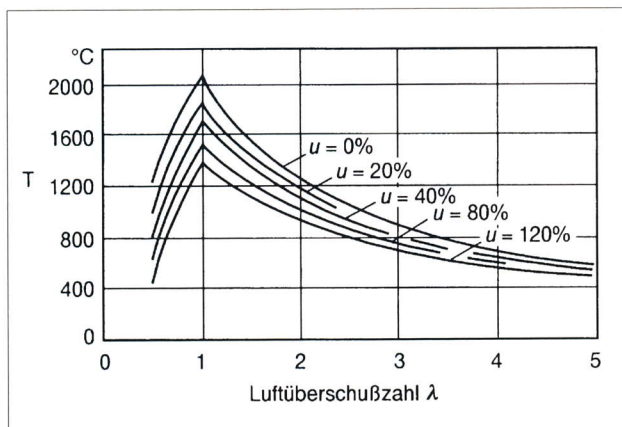


Sollten Sie wirklich noch nichts von uns gehört haben, möchten wir Ihnen gerne detailliertere Informationen über unser Produktspektrum zukommen lassen.



ECO-PHYSICS

Telefon: (089) 791 92 34  
Telefax: (089) 791 92 35



**Bild 8** Adiabate Verbrennungstemperatur von Holz als Funktion der Luftüberschußzahl für verschiedene Holzfeuchtigkeiten  $u$  (bezogen auf trockene Holzmasse) [5].

sche Oberfläche aufweisen, so daß eine Aufmahlung zu feiner Korngröße erforderlich ist [16]. Für biogene Brennstoffe kommt nebst der direkten Eindüsung als Stufenbrennstoff die Möglichkeit der Pyrolyse oder Vergasung zu einem heizwertreichen Produktgas in Frage [15, 17]. Dies bietet insbesondere den Vorteil, daß die Aschen des Hauptbrennstoffs und des Zweitbrennstoffs nicht vermischt werden.

In einem Vorversuch für Holz-brennstoffe wurden in einer Unterschubfeuerung Holz-schnitzel in einer Retorte mit Luftüberschuß  $> 1$  verbrannt und weitere Holz-schnitzel als Zweitbrennstoff oberhalb der Retorte auf einem Rost umgesetzt [13]. Mit einem Anteil von rund 30 % Zweitbrennstoff am gesamten umgesetzten Brennstoff wurde eine 52 bis 73%ige  $\text{NO}_x$ -Minderung erzielt. Obwohl bezüglich Temperatur und Korngröße keine optimalen Bedingungen erreicht wurden, zeigen die Resultate, daß die Brennstoffstufung bereits bei tiefen Temperaturen (700 bis

**Fazit** Im Vergleich zu konventionellen Feuerungen kann durch Luftstufung mit zusätzlicher Reduktionszone für Brennstoffe mit niedrigem Stickstoffgehalt ( $< 0,5$  Gew.-%, zum Beispiel naturbelassenes Holz) eine  $\text{NO}_x$ -Minderung um rund 50 %, für Brennstoffe mit erhöhtem Stickstoffgehalt ( $> 1$  Gew.-%, zum Beispiel UF-Spanplatten) um rund 75 % erreicht werden. Die Wirksamkeit der Luftstufung ist in erster Linie abhängig von der Primärluftzahl, der Temperatur, der Verweilzeit und der Vermischungsqualität. Eine maximale  $\text{NO}_x$ -Minderung wird erzielt für eine Primär-

luftzahl von 0,7 bis 0,8, für eine Verweilzeit von 0,3 bis 0,5 s und für eine Temperatur von 1 100 bis 1 200 °C. Um diese Bedingungen in der Praxis einzuhalten, ist der Einsatz einer Prozeßregelung erforderlich. Die Brennstoffstufung verspricht bei optimierten Prozeßbedingungen ein vergleichbares oder höheres  $\text{NO}_x$ -Minderungspotential als die Luftstufung und ist bereits bei niedrigeren Temperaturen wirksam. Die Realisierung von zwei unabhängigen Brennstoffdosierungen kommt jedoch erst bei Anlagen ab einigen MW thermischer Leistung in Frage.

800 °C) ein zur Luftstufung vergleichbares Potential zur Stickoxidminderung aufweist. Verschiedene Untersuchungen zur Brennstoffstufung mit Kohle als Hauptbrennstoff zeigen ebenfalls, daß die Brennstoffstufung bereits bei niedrigeren Temperaturen wirksamer ist als die Luftstufung [16 bis 20].

Die bei der Luftstufung beobachteten Temperaturprobleme in der Reduktionszone können bei der Brennstoffstufung somit zumindest teilweise vermieden werden. Zudem kann bei tieferer Reduktionstemperatur das Bauvolumen der Reduktionskammer verringert werden.

### Anwendungen in der Praxis

Für die Anwendung der Brennstoffstufung kommen einerseits Feuerungen in Frage, bei denen Holz sowohl als Haupt- als auch als Stufenbrennstoff eingesetzt wird. Allerdings liegen keine Erfahrungen

mit einfach realisierbaren und praxistauglichen Konzepten der Brennstoffstufung für Kleinanlagen vor.

Mögliche Anwendungsgebiete ergeben sich hingegen bei Holzverarbeitenden Betrieben, in denen größere Mengen an stückigem Restholz und an Holzstaub anfallen. Das stückige Material kann mit Luftüberschuß  $> 1$  auf einem Rost verbrannt werden, während der Holzstaub als Stufenbrennstoff in das Abgas vom Rost eingedüst wird. Entsprechende Anwendungen kommen in erster Linie für Anlagen ab einigen MW thermischer Leistung in Frage, da für die Realisierung von zwei unabhängigen Brennstoffzuführungen und der entsprechenden Prozeßregelung mit einem relativ großen Aufwand zu rechnen ist.

Daneben können biogene Brennstoffe als Stufenbrennstoff zur Zufuehrung in Kohlekraftwerken oder industriellen Verbrennungsanlagen eingesetzt werden. Dabei kann ein Teil der fossilen Brennstoffe durch nachwachsende Brennstoffe substituiert und gleichzeitig das stickoxidmindernde Potential der biogenen Brennstoffe ausgenutzt werden. Allerdings ist zu beachten, daß die Qualität der Asche durch den Zweitbrennstoff nicht verschlechtert werden darf und daß der betriebliche Aufwand je nach verwendetem Zweitbrennstoff durch Verschlackungs- oder Ablagerungsprobleme erhöht werden kann.

**Bild 9**  $\text{NO}_x$ -Emissionen als Funktion der Primärluftzahl bei der Brennstoffstufung mit verschiedenen Stufenbrennstoffen [16].

