

# **Kleine Biomassekessel – Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen**

Prof. Dr.–Ing. Stefan Beer  
HAW Hochschule für angewandte Wissenschaften Amberg-Weiden (FH)  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23, D-92224 Amberg  
Tel.: 09621-482-227  
E-Mail: s.beer@haw-aw.de  
Internet: www.haw-aw.de

## **1. Einführung**

Die Emissionen von kleinen Biomassekesseln, die in Europa millionenfach zur Beheizung von Gebäuden eingesetzt werden, tragen zusammen mit den durch Verkehr verursachten Emissionen ganz wesentlich zur Belastung der Luft mit partikelförmigen und gasförmigen Schadstoffen bei, vgl. /1/.

Das aktuelle Bestreben auch alternative Biomassetypen (z.B. Getreidekörner, pelletiertes Stroh oder auch Getreideganzpflanzen etc.) in kleinen Heizkesseln zu verbrennen, verschärft die Diskussion erheblich, da diese Brennstoffe aufgrund der im Vergleich zu Holz höheren Gehalte von Problemstoffen (z.B. Asche, Stickstoff, Chlor) ein höheres Emissionspotenzial aufweisen /2/.

Die angekündigte Novellierung der 1. BImSchV (auch Kleinf Feuerungsanlagenverordnung) wird zwar die alternativen Biomassebrennstoffe als Regelbrennstoffe zulassen allerdings werden wesentlich schärfere Emissionsgrenzwerte für alle Schadstoffklassen vorgeschrieben werden.

Diese Trends haben dazu geführt, dass die Hersteller von Biomassekesseln das Emissionsniveau insbesondere durch kostengünstige Primärmaßnahmen nochmals deutlich absenken möchten und daher bereit sind, entsprechende Entwicklungen anzugehen.

In dem vorliegenden Beitrag wird ein aktueller Überblick zu den Möglichkeiten und Grenzen von Primärmaßnahmen für CO (damit auch für Gesamt-C), NO<sub>x</sub> und auch für partikelförmige Emissionen mit Focus auf kleine Biomassekessel mit kontinuierlicher Brennstoffbeschickung und Verbrennungsregelung gegeben.

## **2. Maßnahmen zur Absenkung von CO und Gesamt-C**

Die Methoden zur Absenkung der CO-Emissionen und der Summe aller organischen Verbindungen (Gesamt-C) sind sehr gut bekannt und erforscht, z.B. /3,4/. Als Erfahrungswerte gelten hier:

- Ausreichend hohe Temperatur in der Ausbrandzone i.d.R. > 850 °C;
- Ausreichende Verweilzeit i.d.R. ca. 2 s;
- Gute Durchmischung von Brennstoff und Luft;
- Luftstufung, d.h. Primärluft zur Vergasung des Brennstoffes, Sekundärluft zur Oxidation der entstandenen Vergasungsprodukte;
- Ausreichender Luftüberschuss, in der Praxis  $\lambda$ -Werte ( $\lambda$ : Luftverhältniszahl) zwischen 1,4 und 2,2 bei kleinen Biomassekesseln;

Von den einzelnen Regeln kann ohne große Nachteile abgewichen werden: Eine kürzere Verweilzeit kann z.B. durch eine höhere Temperatur in der Ausbrandzone kompensiert werden, was sich für trockene Brennstoffe wie Holzpellets anbietet.

Interessant ist die große Bandbreite bei den  $\lambda$ -Werten in der Praxis. Hohe Werte verursachen einen niedrigen feuerungstechnischen Wirkungsgrad des Heizkessels und sind somit zu vermeiden. Senkt man jedoch den  $\lambda$ -Wert stark ab, steigt die Gefahr von CO-Emissionen. Eine Absenkung des  $\lambda$ -Wertes muss folglich begleitet werden durch eine Verbesserung der Vermischung von Brenngas mit Sekundärluft bzw. durch weitergehende Maßnahmen wie Temperaturerhöhung in der Ausbrandzone (z.B. durch keramische Auskleidung, Vorwärmung der Sekundärluft) oder Verlängerung der Verweilzeit.

In Abb. 1 ist der Effekt einer Temperaturveränderung in der Ausbrandzone während eines Anfahrvorganges dargestellt. Die restlichen Verbrennungsbedingungen wurden konstant gehalten. Deutlich ist hier der reine Temperatureffekt auf den Ausbrand zu erkennen.

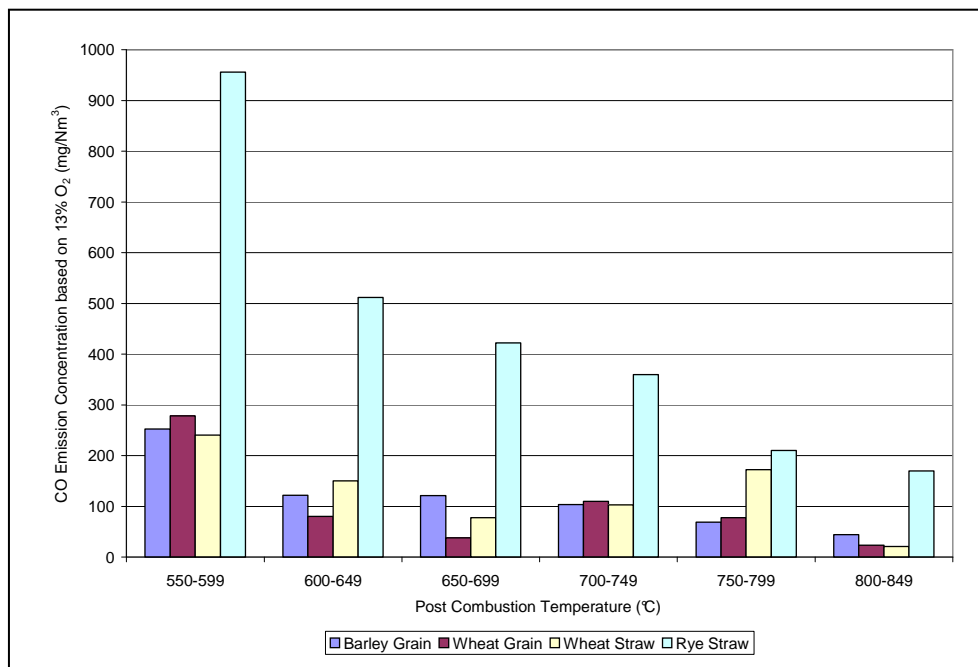


Abb. 1: Effekt der Temperatur in der Ausbrandzone eines 50 kW-Heizkessels für alternative Brennstoffe.

Die Verbesserung der Durchmischung kann durch aktive Elemente (z.B. Prallplatten, Düsen) oder durch rein strömungstechnische Maßnahmen (z.B. Anwendung von Drall, Rückströmung) erfolgen.

Der Autor hat das Prinzip des „Vortex-Break-Down“-Phänomens, vgl. Abb. 2, auf einen Pelletkessel mit 15 kW Nennwärmeleistung angewendet. Bekannt wurde dieses Prinzip durch die Entwicklung von Magerverbrennungskonzepten für Gasturbinen mit dem Hauptziel niedrige  $\text{NO}_x$ -Emissionen zu erreichen. Beim Pelletkessel steht aber die gute Vermischung von Brenngas mit Sekundärluft im Vordergrund.

Durch einen starken Drall (hier der Sekundärluft) wird im Kern des Strömungsgebiets ein Unterdruckgebiet erzeugt, in das Verbrennungsprodukte zurückströmen. Hierdurch entsteht eine Zone mit sehr guter Durchmischung und sehr gleichmäßiger Temperaturverteilung.

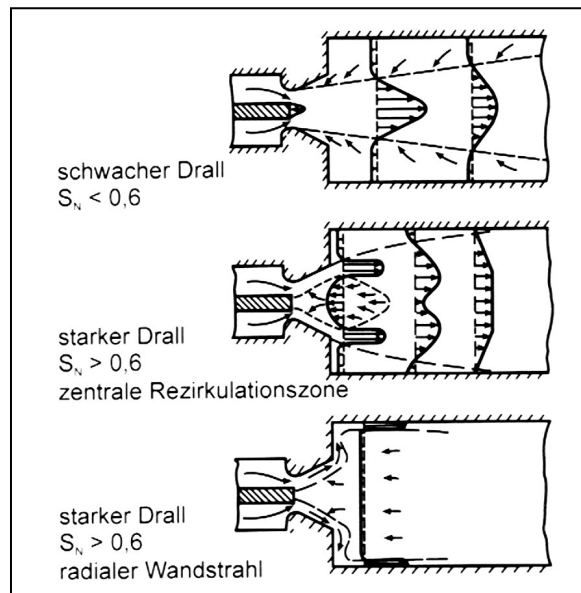


Abb. 2: Drallinduzierte Strömungsfelder bei verschiedenen Drallstärken /5/.

In Abb. 3 ist das Ergebnis der numerischen Simulation des Verbrennungsvorgangs bei starkem Drall (Swirl-Number = 0,65) dargestellt. Das Gebiet mit der Rückströmung ist als Isofläche gekennzeichnet.

Die praktische Umsetzung ergab eine Minderung der  $\text{CO}$ -Emissionen um ca. 100 % bei ansonsten exakt gleichen Verbrennungsbedingungen. Zusätzlich konnte ein leichter Rückgang der  $\text{NO}_x$ -Emissionen (um 20%) festgestellt werden, was durch die Dämpfung von Temperaturspitzen, die zu thermisch bedingtem  $\text{NO}_x$  führen, hervorgerufen wird. Da bei der Biomasseverbrennung die  $\text{NO}_x$ -Emissionen hauptsächlich auf den Stickstoffgehalt des Brennstoffs zurückzuführen sind, kann durch diese Methode hier kein größerer Effekt erzielt werden.

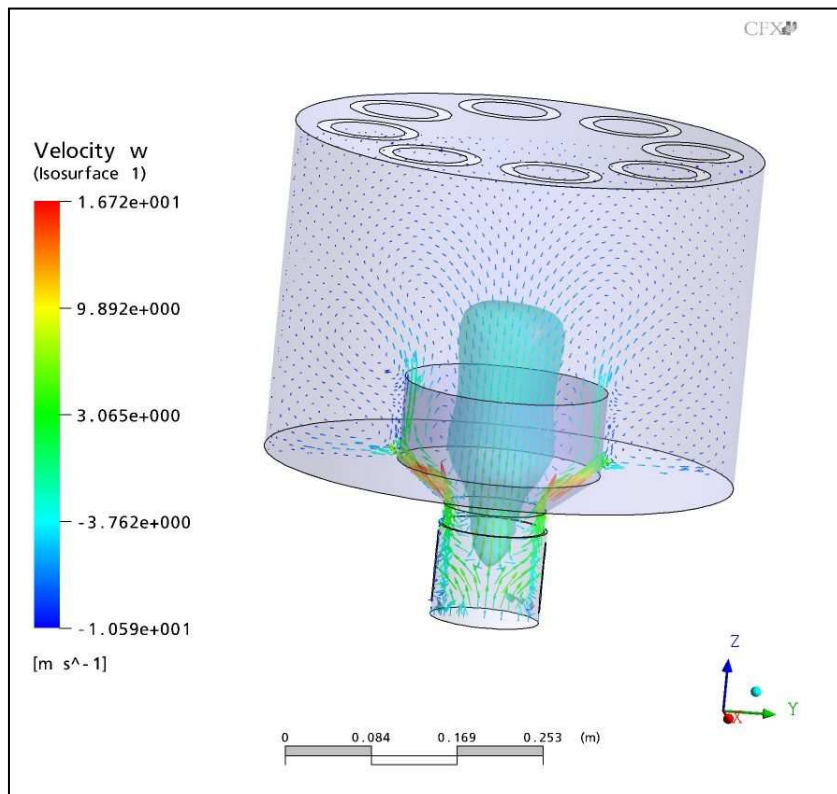


Abb. 3: Numerische Simulation der Strömung in einem Pelletkessel mit „Vortex-Break-Down“-Phänomen, die Isofläche im Kern kennzeichnet das Rückströmungsgebiet.

### 3. Maßnahmen zur Absenkung von NO<sub>x</sub>-Emissionen

Die 3 Möglichkeiten (siehe Abb. 4) zur Senkung von NO<sub>x</sub>-Emissionen durch Primärmaßnahmen wurden hinsichtlich der NO<sub>x</sub> - armen Kohlenstaubfeuerung intensiv erforscht und werden heute bei modernen Kohlekraftwerken erfolgreich angewendet, vgl. /6,7/.

Die magere Verbrennung zielt auf einen hohen Luftüberschuss ab und wird zur Absenkung der Verbrennungstemperatur z.B. in Gasturbinenbrennkammern oder Gasotomotoren zur Verminderung der thermischen NO<sub>x</sub>-Bildung eingesetzt. Diese Methode ist für Brennstoffe mit einem hohen Brennstoffstickstoffgehalt daher nicht geeignet.

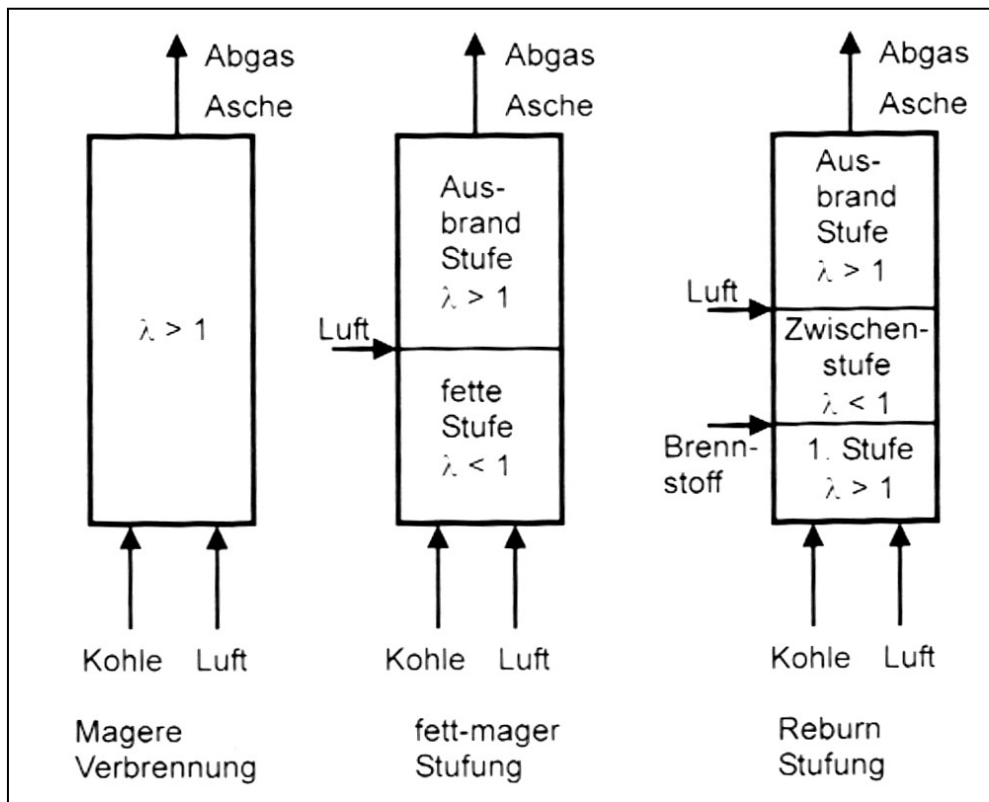


Abb. 4: Möglichkeiten der Verbrennungsführung zur Minderung von Stickoxiden/3/.

Die Methode der Luftstufung (bzw. auch fett-mager Stufung genannt) bewirkt durch Luftmangel in der Primärverbrennungszone eine geringere Konversion von Brennstoffstickstoff in NO und natürlich einen hohen Anteil an nicht oder teiloxydierten Verbindungen (z.B.  $\text{NH}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ , CO,  $\text{H}_2$  und  $\text{C}_{\text{fix}}$ ), die in der Reduktionszone als NO-Verbraucher wirken. In der anschließenden Ausbrandzone findet bei Luftüberschuss eine Oxidation statt.

Die Methode der Brennstoffstufung (bzw. auch Reburn Stufung) basiert auf den gleichen Reaktionsmechanismen wie die Luftstufung. Die Methode ist jedoch aufwändiger in der Umsetzung aber auch effizienter.

Daher kann nur die Methode der Luftstufung für kleine Biomassefeuerungen für Brennstoffe mit hohem Stickstoffgehalt eingesetzt werden.

Nussbaumer /8/ hat die Methode der Luftstufung mit Reduktionszone (siehe Abb. 5) auf Holzfeuerungen übertragen und konnte bei optimaler Verbrennungsführung Stickoxidminderungen von bis zu 75% bei Verwendung von UF-Spanplatten mit 2% Stickstoffgehalt nachweisen.

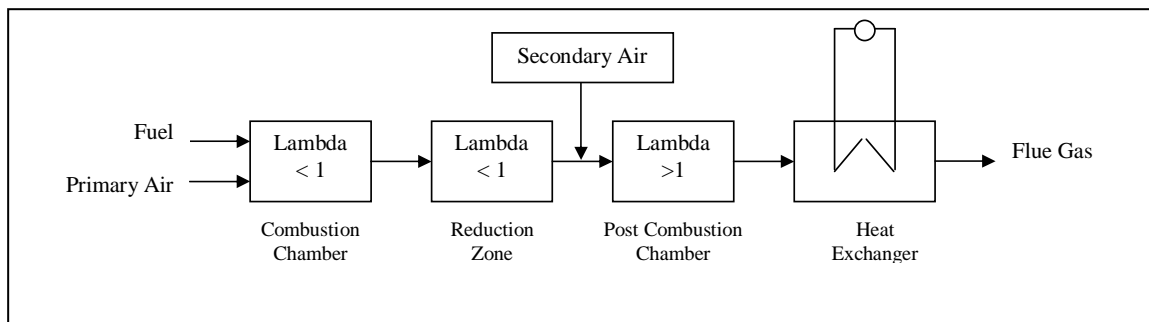


Abb. 5: NO<sub>x</sub>-Reduktion durch Luftstufung mit Reduktionszone/8/.

Durch systematische Versuche konnten folgende Kriterien für eine optimale Verbrennungsführung bei Luftstufung gefunden werden:

- $\lambda$  in der Primärzone zwischen 0,7 und 0,8;
- Temperatur in der Reduktionszone ca. 1100-1200 °C bei einer Verweilzeit von 0,3-0,5 s;
- Gute Durchmischung in der Reduktionszone.

Obernberger und Scharler/9/ untersuchten für Biomassekessel mit Rostfeuerung im mittleren Leistungsbereich die Kombination aus Luftstufung und Rauchgasrezirkulation. Mittels CFD-Analyse zeigten sie, dass durch die Rauchgasrezirkulation insbesondere die turbulente Durchmischung in der Primärzone der Feuerung deutlich verbessert wird und damit auch die Reduktion von NO in der Reduktionszone. Zusätzlich ist durch ein variables Rezirkulationsverhältnis eine Temperaturbeeinflussung in der Primärzone möglich.

Der Autor hat in Kooperation mit dem atz-Entwicklungszentrum und dem Heizkesselhersteller Grimm (Amberg) einen kleinen Heizkessel für Brennstoffe wie z.B. Getreide, pelletiertes Stroh und pelletierte Ganzpflanzen entwickelt, dessen Auslegung auf den Vorgaben von Nussbaumer/8/ basiert. Auf die Implementierung einer Rauchgasrezirkulation wurde aufgrund des zu großen Aufwands verzichtet.

In Abb. 6 wird ist der prinzipielle Aufbau des Kessels zu erkennen. Zur Verbrennung aschereicher Biomassebrennstoffe wurde ein Vorschubrost mit gleichmäßiger Primärluftzuführung von unten integriert. Die Sekundärluft wird wieder nach dem „Vortex-Breakdown“-Prinzip zugemischt.

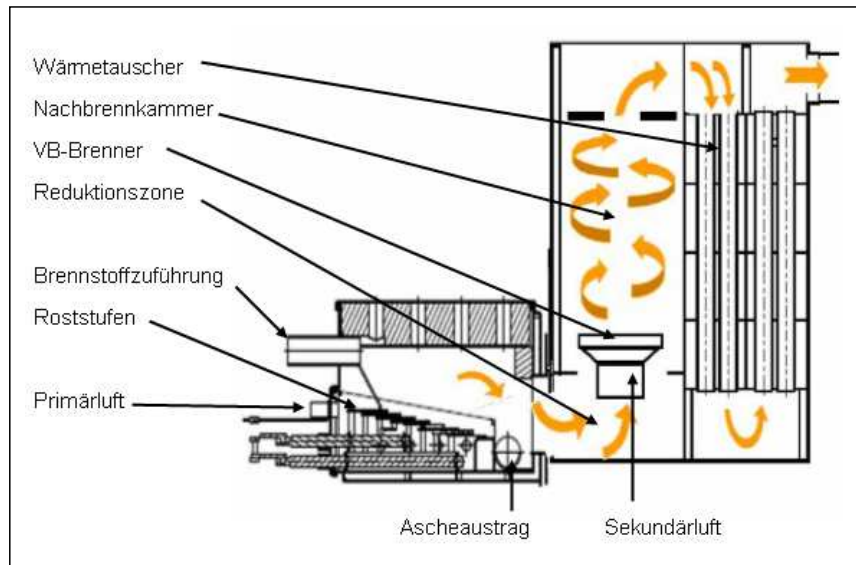


Abb. 6: Schnitt durch den Heizkessel mit einer Nennwärmeleistung von 50 kW für verschiedene alternative Biomassebrennstoffe.

Als sehr schwierig hat sich die Einhaltung des Temperaturkriteriums in der Reduktionszone erwiesen. Erst durch Umbau auf eine Gegenstromfeuerung konnte eine Eintrittstemperatur von 1100 °C in die Reduktionszone erreicht werden.

In Abb. 7 ist die Stickoxidkonzentration in Relation zur Eintrittstemperatur in die Reduktionszone aufgetragen. Die verwendeten Brennstoffe enthalten 2,51 % (Weizenkörner) bzw. 1,72 % (Gerstenkörner) Stickstoff bezogen auf den absolut trockenen Brennstoff. In der Primärzone konnte ein  $\lambda$ -Wert von 0,6-0,8 eingehalten werden, in der Ausbrandzone ein  $\lambda$ -Wert von 1,2-1,4 eingehalten werden. Zum Vergleich ist für Weizenkörner eine Referenzmessung an einem konventionellen Kessel mit Getreideeignung, aber ohne ausgeprägte Reduktionszone, eingetragen. Der Emissionswert für  $\text{NO}_x$  liegt bei der Referenzmessung um ca. 57% höher.

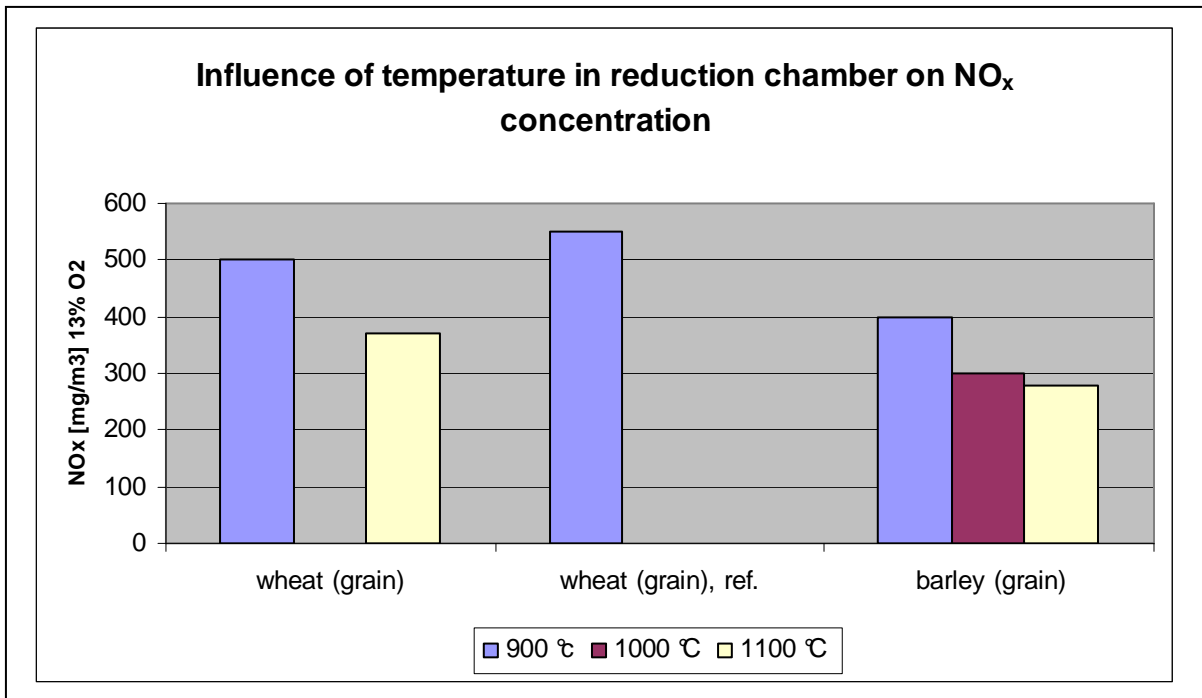


Abb. 7: Einfluss der Eintrittstemperatur in die Reduktionszone auf die Stickoxidemissionen für Weizen- und Gerstenkörner. Zusätzlich ist eine Referenzmessung (wheat (grain), ref.) an einem konventionellen Kessel mit Luftstufung aber ohne ausgeprägte Reduktionszone eingetragen.

In Abb. 8 sind die Ergebnisse für weitere Brennstoffe dargestellt. Auffällig sind die niedrigen CO-Konzentrationen, die durch optimale Ausbrandbedingungen erreicht werden konnten.

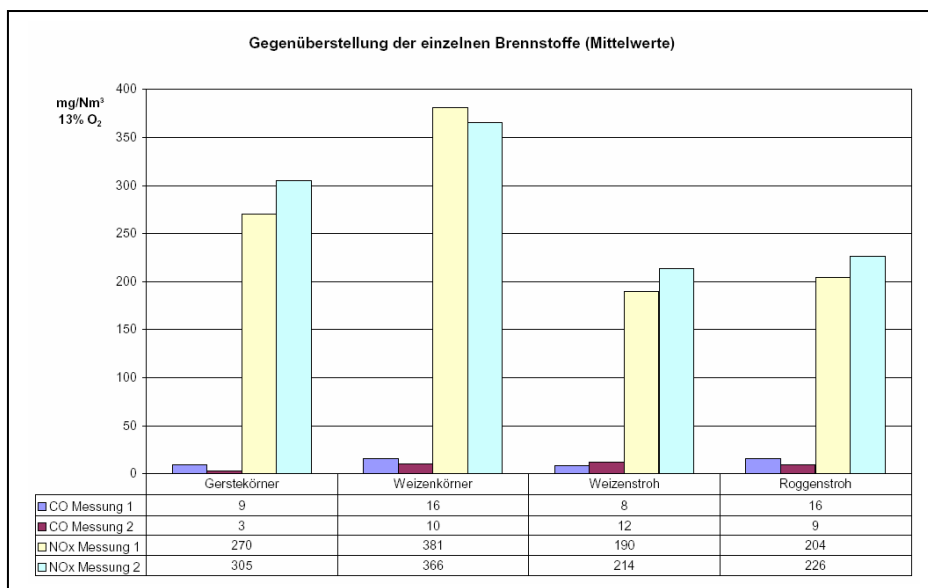


Abb. 8: Zusammenfassung der Messergebnisse für verschiedene Brennstoffe.



## 4. Primärmaßnahmen zur Minimierung von partikelförmigen Emissionen

In Abb. 9 sind die verschiedenen Pfade der Partikelbildung in Holzfeuerungen dargestellt /10/. Es werden folgende Pfade unterschieden:

- Fest-Partikel-Pfad: Anorganische Partikel mit hohem Schmelzpunkt (z.B. CaO) gelangen als feste Partikel in das Rauchgas.
- Fest-Dampf-Partikel-Pfad: Anorganische Bestandteile (z.B. Kalium) des Brennstoffs werden im Glutbett oxidiert, wodurch ihr Schmelzpunkt erniedrigt wird. Sie verdampfen und bilden auf dem Weg der Abkühlung sehr kleine Partikel. Dieser Mechanismus erklärt auch den hohen Anteil an Feinstaub bei der Verbrennung von Getreide oder Stroh, da der Kaliumanteil im Vergleich zu Holz deutlich höher ist.
- Rußbildung mit angelagerten PAK aufgrund von unvollständigem Ausbrand.
- Mitgerissene Flugascheteilchen.

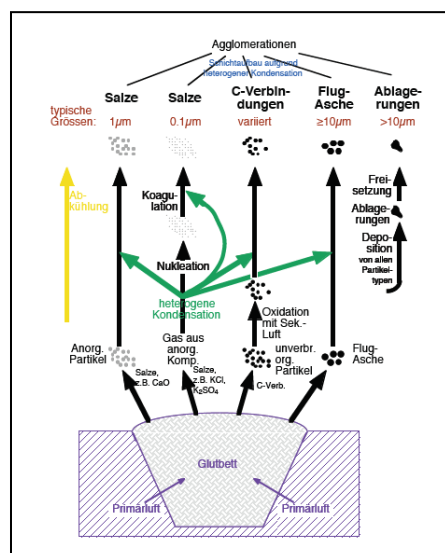


Abb. 9: Wege der Bildung von Partikeln nach /10/.

Zur Verminderung der Partikelfracht können daher folgende primäre Maßnahmen beitragen:

- Verminderung des Luftanteils in der Primärzone: Dies bewirkt eine geringere Oxidation der Kaliumanteile des Brennstoffes (siehe b)) und eine geringere Strömungsgeschwindigkeit im Rostbereich (siehe a) und d)). Oser et al. /10/ schlagen hierzu eine Luftverhältniszahl von  $\lambda$  zwischen 0,2 und 0,4 vor. Dies ist in der Praxis sehr schwer einzuhalten und läuft auch dem Prinzip der Luftstufung mit Reduktionszone entgegen, wo der optimale Bereich von  $\lambda$  zwischen 0,7 und 0,8 liegen sollte.

- Optimierung des Ausbrands: Mit den in Abschnitt 2 dargestellten Maßnahmen zur Verminderung der CO-Emissionen wird dieses Ziel erreicht. Diese Maßnahme ist umso wichtiger, als das Schädigungspotenzial der Rußpartikel als deutlich höher im Vergleich zu den anorganischen Partikeln eingestuft wird, vgl. /1/.

Da eine vollständige Umsetzung der dargestellten Maßnahmen in der Praxis nicht möglich sein wird und auch dann die sichere Einhaltung eines zukünftigen Staubgrenzwertes von z.B. 20 mg/m<sup>3</sup> nicht gegeben wäre, hält der Autor zur Minderung der partikelförmigen Emissionen sekundäre Maßnahmen mit gutem Abscheidegrad im Feinstaubbereich zukünftig für zwingend erforderlich.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Durch eine Reihe von Primärmaßnahmen (Temperaturführung, Luftstufung, Reduktionszone, Vermischung, Verbrennungsregelung) kann der Schadstoffausstoß kleiner Biomassekessel zukünftig noch deutlich vermindert werden. Bei der Minderung insbesondere des anorganischen Anteils der staubförmigen Emissionen werden in Zukunft sekundäre Maßnahmen (Staubabscheidetechnik) unumgänglich sein. Die Staubabscheider müssen insbesondere im Partikelgrößenbereich unterhalb von 1 µm einen guten Abscheidegrad aufweisen.

Die Anwendung moderner Computergestützter Entwicklungswerkzeuge (z.B. die Numerische Strömungssimulation) wird auch bei der Entwicklung neuer kleiner Biomassekessel eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

## Literaturverzeichnis

- 1) Klippel, N. Nussbaumer, T.: Health Relevance of Particles from Wood Combustion in Comparison to Diesel Soot, 15<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, 7.-11. May 2007, Berlin
- 2) Mocker, M. et al.: Heizen mit Getreide und Stroh – Ein Entwicklungsprojekt aus der Region Amberg-Sulzbach, 16. Symposium Bioenergie, Kloster Banz, 2007
- 3) Joos, F.: Technische Verbrennung, Berlin, Springer, 2006
- 4) Karl, J.: Dezentrale Energiesysteme, München, Wien, Oldenbourg, 2004
- 5) Beer M. J., Chigier N. A.: Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers, London, 1972
- 6) Kolb T., Jansohn P., Leuckel W.: Reduction of NO<sub>x</sub> emission in turbulent combustion by fuel staging/effects of mixing and stoichiometry in the reduction zone. 22<sup>nd</sup> Symp. (Int.) Comb., The Combustion Institute, Pittsburg, 1988
- 7) Spliethoff H. et al.: Basic Effects on NO<sub>x</sub> Emissions in Air Staging and Reburning at a Bench Scale Test Facility. Fuel, 75(5):560-564, 1996
- 8) Nussbaumer, T.: Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen, BWK, Bd. 49, Nr.1/2, 1997
- 9) Obernberger, I., Scharler, R.: Deriving guidelines for the design of biomass furnaces with CFD analysis-a new Multifuel-Low-NO<sub>x</sub> furnace as example, 6<sup>th</sup> International Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Estoril, Portugal, 2001
- 10) Oser, M. et al.: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen, Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Schweiz, Schlussbericht, 2003