

Jahresbericht 2001, 15. Dezember 2001

Grundlagen der Aerosolbildung bei Holzfeuerungen

Autor	Dr. Michael Oser
Institution	Verenum
Adresse	Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich
Telefon, E-mail,	Telefon: 01/364 14 12
Internetadresse	E-mail: verenum@smile.ch
BFE Projekt	Projekt-Nr.: 26688
	Vertrags-Nr.: 82347
Dauer des Projekts	1.1.1999 bis 31.12.2002

ZUSAMMENFASSUNG

Im Berichtsjahr wurde der Einfluss von Primärluftüberschuss, Glutbetthöhe, Abgasrückführung und Wasserkühlung des Brennstoffbetts auf die Partikelemissionen an einer 100 kW Unterschubfeuerung untersucht. Zur Realisierung der geforderten Betriebsarten wurde die Versuchsanlage so modifiziert, dass eine räumlich klar definierte Trennung der verschiedenen Zonen in der Feuerung gewährleistet werden kann, was nach Inbetriebnahme mit Messungen bestätigt werden konnte.

Die Resultate zeigen, dass der Luftüberschuss im Glutbett und die davon abhängige Glutbetthöhe in der Anlage mit getrennten Verbrennungszonen einen starken Einfluss auf die Partikelemissionen haben. Die Staubemissionen können zudem durch den Einsatz der Abgasrückführung beeinflusst werden. Die Wasserkühlung des Brennstoffbetts sowie die früher untersuchten Parameter Feinanteil des Brennstoffs, Feuerungsleistung und Gesamtluftüberschuss zeigten dagegen keine signifikanten Auswirkungen.

Durch Absenkung des Glutbettluftüberschusses und Betrieb mit hohem Glutbett konnten Partikelemissionen zwischen 20 und 45 mg/Nm³ (bei 13 Vol.-% O₂) erreicht werden. Ohne Abgasrezirkulation ist dazu ein sehr tiefer Glutbettluftüberschuss von unter 0,3 erforderlich. Mit Abgasrezirkulation können vergleichbare Staubemissionen bereits bei höherem Luftüberschuss erreicht werden. Die Bestimmung der Staubmasse sowie der Korngrössenverteilung zeigt, dass die Reduktion der Partikelmasse auf eine geringere Partikelanzahl *und* eine geringere mittlere Partikelgrösse zurückzuführen ist. Die Anzahlkonzentration wird also auch vermindert, jedoch in weniger starkem Mass als die Massenkonzentration.

Projektziele

- Analyse des Einflusses der Betriebsparameter auf die Aerosolbildung
- Analyse des Brennstoffeinflusses auf die Aerosolbildung
- Evaluation der Hauptmechanismen der Aerosolbildung in automatischen Holzfeuerungen
- Erkenntnisse für technische Entwicklungen an Holzfeuerungen zur Minderung der Partikelemissionen, insbesondere der gesundheitsrelevanten PM10-Emissionen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die gemäss Projektantrag zu variierenden Parameter sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die im Berichtsjahr untersuchten Parameter sind fett gekennzeichnet.

Bereich	Parameter	Durchgeführt	Variationsbereich
Brennstoff	Holzart	2001 / 2002*	WHS Buche, WHS Fichte, Spanplatten
	Feinanteil (Korngrössen)	2000	<1 Gew.-%, 15-20 Gew.-%, 25-30 Gew.-%
	Wassergehalt	offen	<25%, 30-35%, ca.40%, >45%
	Rindenanteil	2001*	< 5 Gew.-%, 25 Gew.-%
Verbrennung	Leistungsabgabe	2000	75%, 30%, 100% von Maximum
	Gesamtluftüberschuss	2000	1.8, 1.3, 3.0
	Primärluftüberschuss	2001	<0.1, 0.5-0.55, 0.65-0.7
	Eindüsstelle Sekundärluft (früh/spät)	2001	Reduktionszone Nachbrennkammer
	Glutbetthöhe	2001	tief, hoch
Temperatur	Wasserkühlung Brennstoffbett	2001	Ohne, Mit (5 kW)
	Abgasrückführung	2001	Ohne, Mit
Praxisanlage	Vergleich tiefes Glutbett mit PL / hohes Glutbett mit wenig PL	offen	

* Die Variation von Holzart und Rindenanteil erfolgt ab Dezember 200, die Resultate liegen noch nicht vor

Im Gegensatz zu den im Vorjahr durchgeführten Variationen von Leistung, Gesamtluftüberschuss und Holzfeinanteil zeigen die Variation des **Primärluftüberschusses** (und als Folge davon der Glutbetthöhe) sowie der **Abgasrückführung** einen deutlichen Einfluss auf die Partikelemissionen. In den Bildern 1 bis 6 ist der Einfluss des Glutbettluftüberschusses auf die Partikelemissionen mit und ohne Abgasrückführung dargestellt. Die Grafiken enthalten jeweils 3 Kurven wie folgt:

- a) ohne Abgasrückführung (AGR = 0)
- b) konstante Abgasrückführung (AGR = konstant) von 30 – 40 Nm³/h
- c) Abgasrückführung mit konstantem Primärluftvolumenstrom (PL = konstant) von 50 – 55 Nm³/h

Eine deutliche Reduktion der Partikelemissionen wird beobachtet, wenn der Glutbettluftüberschuss sehr gering ist und bei den verwendeten Buchenwaldhackschnitzeln zwischen 0,25 und 0,3 beträgt (Bild 1, AGR=0). Voraussetzung für diesen positiven Effekt ist, dass in der Feuerung eine ausgeprägte Einteilung der Zonen erzielt und somit die Luftstufung konsequent erreicht wird. Ohne diese konsequente Auftrennung kann Sekundärluft in die Glutbettzone zurückströmen und den Effekt der Luftstufung zunichte machen.

Bei Einsatz der Abgasrückführung wird der Abfall der Partikelkonzentration zu einem höheren Luftüberschuss hin verschoben (Bild 1, AGR=ϕ). Bei festem Primärluftvolumenstrom und zunehmender Abgasrückführung sinkt die Partikelkonzentration (Bild 1, PL=ϕ).

Sowohl mit als auch ohne Abgasrückführung konnten durch reine Primärmassnahmen (ohne Einsatz eines Zyklons oder anderen Abscheiders), Partikelkonzentrationen unter 50 mg/Nm³ (bei 13 Vol.-% O₂) in Einzelfällen sogar um 20 mg/Nm³ erreicht werden. Bei dieser Betriebsart stellt sich ein sehr hohes Glutbett ein. In der Versuchsanlage werden dabei die geometrischen Grenzen des zur Verfügung stehenden Feuerraums erreicht, so dass die Retorte und der darüber liegende Raum mit glühenden Schnitzeln gefüllt ist (Bild 7).

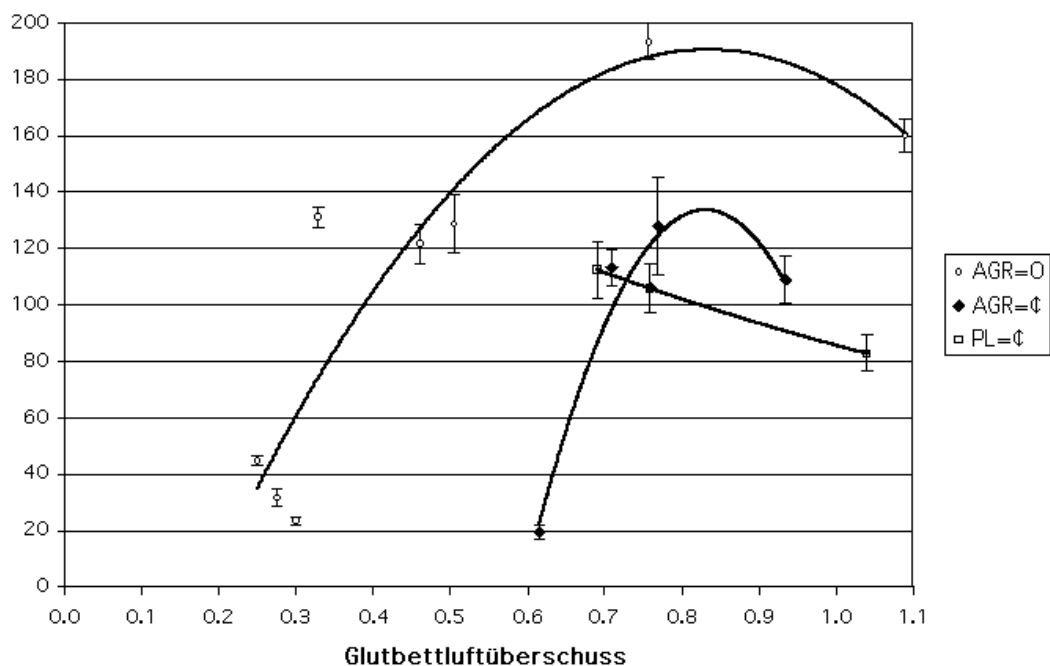


Bild 1: Partikelkonzentration im Abgas in Abhängigkeit des Luftüberschusses im Glutbett mit und ohne Abgasrückführung. Der Luftüberschuss wird entweder durch Variation des Primärluftvolumenstroms bei festem Abgasrückführungsvolumenstrom (AGR=0 Nm³/h bzw. AGR=ϕ=30–40 Nm³/h) oder durch Variation des Abgasrückführungsvolumenstroms bei festem Primärluftvolumenstrom (AGR=ϕ=50–55 Nm³/h) verändert.

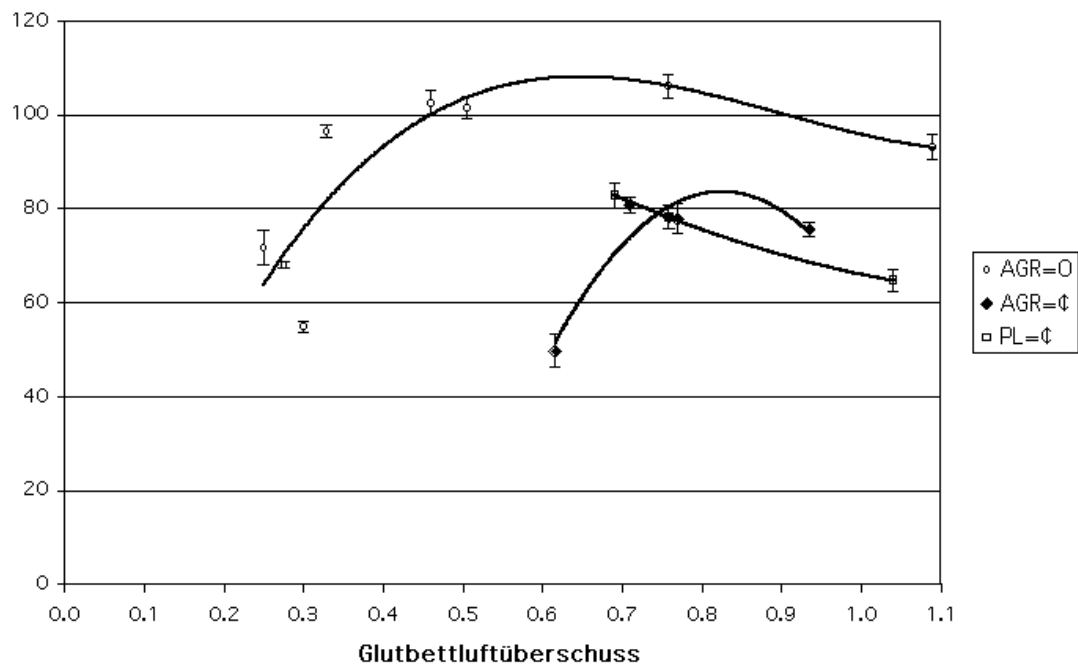


Bild 2: Häufigster Partikeldurchmesser (Mode) gemessen mit SMPS in Abhängigkeit des Luftüberschusses im Glutbett mit und ohne Abgasrückführung. Der Luftüberschuss wird entweder durch Variation des Primärluftvolumenstroms bei festem Abgasrückführungsvolumenstrom ($AGR=0 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bzw. $AGR=\phi=30\text{--}40 \text{ Nm}^3/\text{h}$) oder durch Variation des Abgasrückführungsvolumenstroms bei festem Primärluftvolumenstrom ($AGR=\phi=50\text{--}55 \text{ Nm}^3/\text{h}$) verändert.

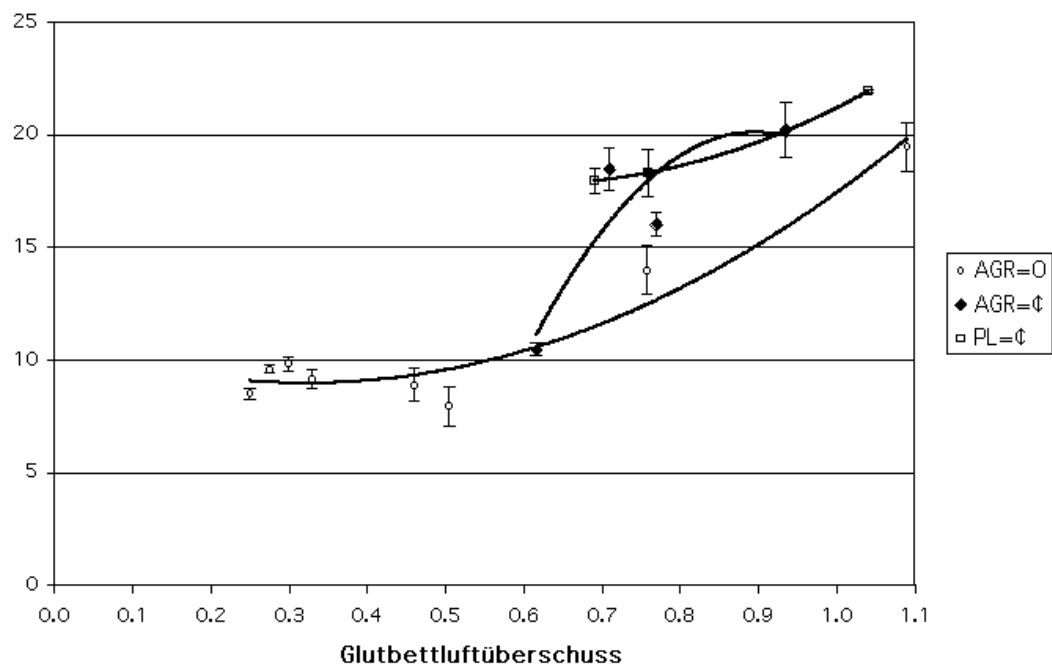


Bild 3: Anzahl submikroner Partikel im Abgas gemessen mit SMPS in Abhängigkeit des Luftüberschusses im Glutbett mit und ohne Abgasrückführung. Der Luftüberschuss wird entweder durch Variation des Primärluftvolumenstroms bei festem Abgasrückführungsvolumenstrom ($AGR=0 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $AGR=\phi=30\text{--}40 \text{ Nm}^3/\text{h}$) oder durch Variation des Abgasrückführungsvolumenstroms bei festem Primärluftvolumenstrom ($AGR=\phi=50\text{--}55 \text{ Nm}^3/\text{h}$) verändert.

Bei Absenkung des Glutbettluftüberschusses von 0,5 auf unter 0,3 sinkt nicht nur die Partikelmasse, sondern auch der Partikeldurchmesser (Bild 2). Die Partikelanzahl wird dabei gemäss SMPS nicht (Bild 3) und gemäss ELPI geringfügig vermindert (Bild 4).

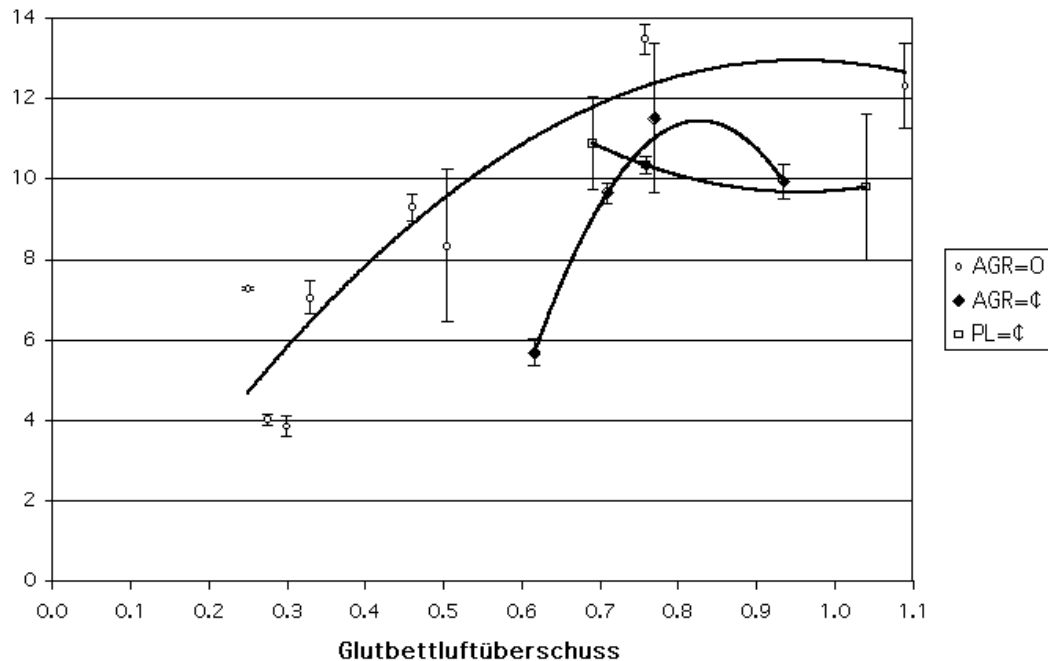


Bild 4: Anzahl submikroner Partikel im Abgas gemessen mit ELPI in Abhängigkeit des Luftüberschusses im Glutbett mit und ohne Abgasrückführung. Der Luftüberschuss wird entweder durch Variation des Primärluftvolumenstroms bei festem Abgasrückführungsvolumenstrom ($AGR=0 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $AGR=\phi=30\text{--}40 \text{ Nm}^3/\text{h}$) oder durch Variation des Abgasrückführungsvolumenstroms bei festem Primärluftvolumenstrom ($AGR=\phi=50\text{--}55 \text{ Nm}^3/\text{h}$) verändert.

Analog zur Partikelmasse ist auch die Kohlenstoff-Fracht stark abhängig vom Glutbettluftüberschuss (Bild 5). Bei tiefem Glutbettluftüberschuss liegt sie unter $10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (13 Vol.-% O_2), die Fracht an organischem Kohlenstoff (TOC) teilweise sogar unter $1 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (13 Vol.-% O_2) (Bild 5).

Die Kalium-Fracht ist ebenfalls stark abhängig vom Glutbettluftüberschuss, wogegen Schwefel unabhängig vom Glutbettluftüberschuss etwa in gleichen Massenströmen emittiert wird (Bild 6).

Ein Einfluss der **Temperaturen** im Feuerraum (gemessen wurde die Temperatur oberhalb des Glutbetts, die Oberflächentemperatur des Glutbetts mittels IR-Temperaturmessung sowie eine Temperatur im Glutbett) auf die Partikelemissionen konnte nicht nachgewiesen werden. In einem Bereich zwischen rund 700°C bis 1100°C wurde kein Einfluss gefunden. Mit der für diese Untersuchungen ausgelegten **Wasserkühlung des Brennstoffbetts** konnten rund 5 kW oder etwa 6% der Nutzleistung aus dem Glutbett entzogen werden. Die dadurch erzielte Temperaturabsenkung im Glutbett zeigte keinen relevanten Einfluss auf die Partikelemissionen.

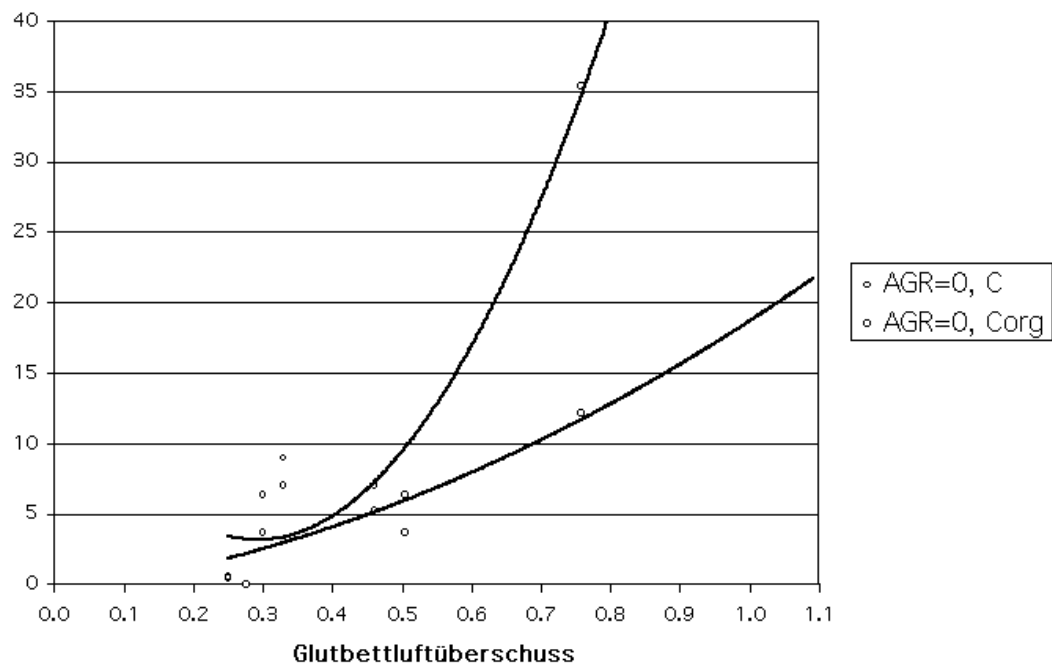


Bild 5: Fracht des partikelgebundenen totalen und organischen Kohlenstoffs im Abgas in Abhängigkeit des Luftüberschusses im Glutbett. Der Luftüberschuss wird entweder durch Variation des Primärluftvolumenstroms bei festem Abgasrückführungsvolumenstrom ($AGR=0 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $AGR=\phi=30\text{--}40 \text{ Nm}^3/\text{h}$) oder durch Variation des Abgasrückführungsvolumenstroms bei festem Primärluftvolumenstrom ($AGR=\phi=50\text{--}55 \text{ Nm}^3/\text{h}$) verändert.

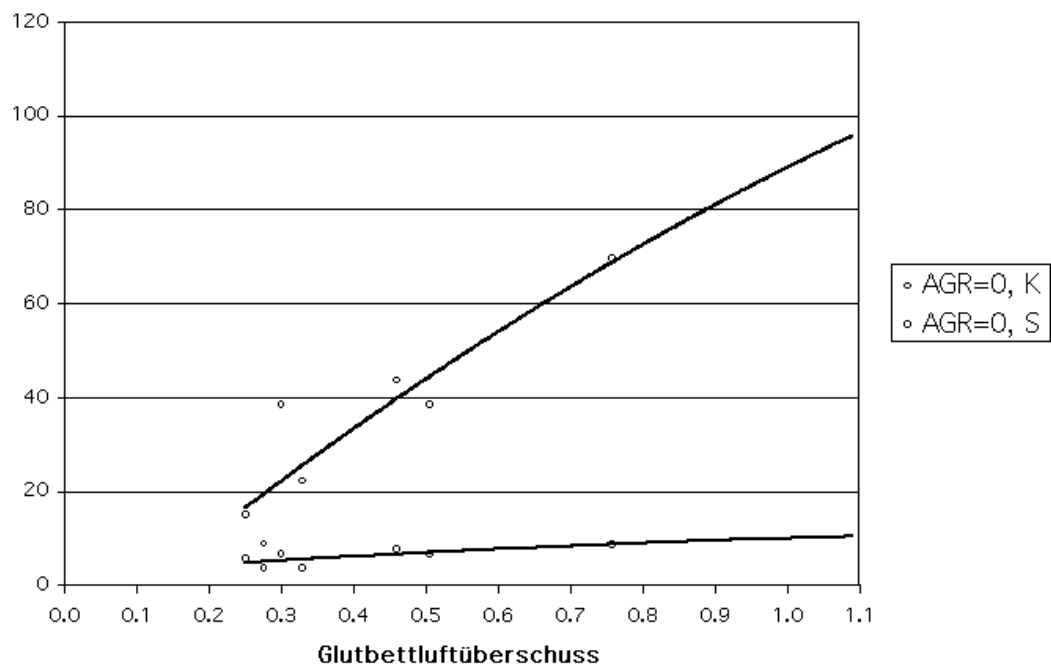


Bild 6: Fracht des partikelgebundenen Kaliums und Schwefels im Abgas in Abhängigkeit des Luftüberschusses im Glutbett. Der Luftüberschuss wird entweder durch Variation des Primärluftvolumenstroms bei festem Abgasrückführungsvolumenstrom ($AGR=0 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $AGR=\phi=30\text{--}40 \text{ Nm}^3/\text{h}$) oder durch Variation des Abgasrückführungsvolumenstroms bei festem Primärluftvolumenstrom ($AGR=\phi=50\text{--}55 \text{ Nm}^3/\text{h}$) verändert.



Bild 7: Feuerraum mit Glutbett bei einem Glutbettluftüberschuss von knapp 0,3. Fast der gesamte Feuerraum ist gefüllt mit glühenden Schnitzeln.

Nationale Zusammenarbeit

Die Arbeit erfolgt in Zusammenarbeit zwischen Verenum, EMPA Dübendorf und Tiba-Müller AG Balsthal. In der Begleitgruppe sind BFE, BUWAL und Ardens GmbH vertreten.

Internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde am internationalen Seminar „*Aerosols from Biomass Combustion*“ vom 27. Juni 2001 an der ETH Zürich präsentiert und zur Diskussion gestellt. Zum Zeitpunkt des Seminars lagen die im Jahresbericht vorgestellten Resultate jedoch noch nicht vor (siehe auch Tabelle 1).

Für das „*12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*“ vom 17. bis 21. Juni 2002 in Amsterdam ist ein Abstract mit dem Titel „*Reduction of particulate emissions by advanced staged combustion*“ eingereicht. Dabei sollen die aktuellen Resultate über den Einfluss von Glutbettluftüberschuss, Glutbetthöhe und Abgasrückführung international vorgestellt werden.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Für die Brennstoffumwandlung im Glutbett ist der effektive Luftüberschuss im Glutbett entscheidend. Dieser ergibt sich durch die kontrolliert zugeführte Primärluft, die als Falschlufte z.B. durch den Brennstoffkanal zugeführte Luft und allenfalls zum Glutbett zurückströmende Sekundärluft und er wird in dieser Arbeit als Glutbettluftüberschuss bezeichnet. Bei gegebenem Brennstoff und Feuerraumgeometrie bestimmt der Glutbettluftüberschuss seinerseits die Glutbetthöhe, die sich unter stationären Betriebsbedingungen einstellt.

In der modifizierten Versuchsanlage konnte nun gezeigt werden, dass durch Veränderung von Glutbettluftüberschuss bzw. Glutbetthöhe eine deutliche Beeinflussung der Partikelemissionen erzielt werden kann. An der Versuchsanlage wurde ein Maximum der Partikelkonzentration gefunden, das sich bei einem Luftüberschuss im Glutbett von knapp unter 1 einstellt.

Unter den gewählten Versuchsbedingungen können die Staubemissionen von über 100 mg/Nm^3 (bei 13 Vol.-% O_2) bei Glutbettluftüberschuss um 1 bis auf Werte zwischen 20 und 45 mg/Nm^3 vermindert werden. Ohne Abgasrückführung ist dazu ein Betrieb bei sehr tiefem Glutbettluftüberschuss von unter 0,3 notwendig. Mit Abgasrückführung verschiebt sich dieser Wert zu höherem Luftüberschuss.

Die Verminderung der Partikelmasse ist dabei auf eine Reduktion der Partikelanzahl und der Partikelgrösse zurückzuführen. Die Partikelanzahl wird somit ebenfalls verringert, jedoch in geringerem Ausmass als die Partikelmasse.

Die bisherigen Untersuchungen wurden mit Waldhackschnitzeln Buche durchgeführt. Die Übertragung der Resultate auf andere Brennstoffe ist noch offen (Tabelle 1). Die Versuche dazu finden ab Dezember 2001 statt.

Für die weitere Entwicklung einer emissionsarmen, automatischen Holzfeuerung ergibt sich der Zielkonflikt, dass bei den bis anhin untersuchten Betriebsbedingungen das Minimum bezüglich Partikelmasse nicht mit dem Minimum bezüglich Stickoxidemissionen zusammen fällt. Im Gegenteil treten bei Bedingungen für sehr tiefe Partikelemissionen tendenziell hohe Stickoxidemissionen auf. In der nächsten Projektphase soll die Versuchsanlage so modifiziert werden, dass eine Trennung der Effekte zur Partikelminderung und zur Stickoxidminderung erzielt wird und somit tiefe Partikelemissionen bei gleichzeitig tiefen Stickoxidemissionen erzielt werden.

Für eine allfällige Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis sind noch weitere Abklärungen und Entwicklungsschritte erforderlich. Um einen geeigneten Betrieb mit sehr tiefem Glutbettluftüberschuss zu gewährleisten ist eine Anpassung der Feuerungs-Geometrie erforderlich. Zudem ist der Einsatz einer geeigneten Regelung notwendig, welche den gewünschten Betriebszustand über längere Zeit und bei änderndem Brennstoff und variierender Last gewährleistet. Vor der allfälligen Umsetzung sollen jedoch die Auswirkungen auf kombinierte Optimierung bezüglich Partikel und Stickoxiden untersucht werden.

Referenzen

- [1] Oser, M.; Nussbaumer, Th., Schweizer, B.; Mohr, M.; Figi, R.: ***Influences on aerosol formation in an automatic wood furnace***. Aerosols from Biomass Combustion, International Seminar, 27 June 2001, ETH Zürich, June 27 2001 in Zurich, Verenum press, Zurich 2001, ISBN 3-908705-00-2, 59–64