

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des
Statusseminars des BWPLUS am 9. und 10. März 1999 im
Forschungszentrum Karlsruhe

**Entwicklung eines Feuerungskonzeptes zur Verbesserung des
Ausbrandes bei gleichzeitiger NO_x- Minderung bei der
Holzverbrennung im gewerblichen Bereich - Feuerungsanlagen von
100 bis 1000 kW Leistung**

U. Zuberbühler, G. Baumbach
Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen
Universität Stuttgart

Förderkennzeichen: PEF 396007

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Entwicklung eines Feuerungskonzeptes zur Verbesserung des Ausbrandes bei gleichzeitiger NO_x- Minderung bei der Holzverbrennung im gewerblichen Bereich - Feuerungsanlagen von 100 bis 1000 kW Leistung

U. Zuberbühler, G. Baumbach, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen,
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

Zusammenfassung

Gegenwärtig werden in gewerblichen Holzfeuerungsanlagen beim Verbrennen von naturbelassenem Holz NO_x-Werte < 200 mg/m³ und Partikelkonzentrationen < 50 mg/m³ erreicht. Beim Verbrennen von Spanplattenresten, wie sie insbesondere im Schreinerhandwerk oder der Möbelindustrie anfallen, können die NO_x-Konzentrationen bis zu 1000 mg/m³ und die Partikelkonzentrationen bis zu 500 mg/m³ erreichen. Für die verstärkte thermische Nutzung von Abfallhölzern sind diese Emissionen nicht vertretbar hoch. Deshalb erfolgt in diesem Projekt basierend auf Erfahrungen der bisherigen Untersuchungen die Weiterentwicklung automatischer Holzfeuerungen in Form eines neuen Feuerungskonzeptes. Zur weiteren Emissionsminderung ist ein vollständiger Ausbrand der Partikel und eine weitgehende Partikelabscheidung erforderlich, bevor die Gase den Wärmetauscher (Kessel) durchströmen. Dort tragen kohlenstoffhaltige Partikel maßgeblich zur Neubildung von polychlorierten Dioxinen und Furanen bei. Bisher wurde im Projekt zur Verbesserung des Partikel ausbrandes bei gleichzeitiger primärer NO_x-Minderung die Ausbrandzone einer zweistufigen Feuerung neu gestaltet und optimiert. Bezüglich des Partikel ausbrandes wurden dabei sehr gute Ergebnisse erzielt. Bei den Untersuchungen zur primären NO_x-Minderung stellte sich heraus, dass der dabei erzielbare Erfolg maßgeblich von den Bedingungen im Primärbereich der Feuerung abhängt, wo der Brennstoff zugeführt wird. Dort muß der Brennstoff unter Luftmangel verbrannt bzw. vergast werden. Mit lufttrockenen stückigen Brennstoffen konnten diese Bedingungen realisiert werden. Mit feinkörnigen sehr trockenen Brennstoffen, wie sie gerade bei der Spanplattenbearbeitung anfallen, war dies nicht möglich. Um für eine breite Brennstoffpalette im Primärbereich eine definierte unterstöchiometrische Verbrennung zu realisieren, wird dieser Bereich neu konstruiert. Im Weiteren wird eine neue Primärbrennkammer angefertigt und mit der Ausbrandzone der bestehenden Feuerung kombiniert. Das Verbrennungsverhalten der Brennkammer wird auf dem Versuchsstand am IVD untersucht, optimiert und dokumentiert.

Development of a furnace construction to realize both burnout improvement and simultaneous NO_x-reduction in industrial wood firings in the range of 100 to 1000 kW

U. Zuberbühler, G. Baumbach

Summary

The emissions during the combustion of natural wood chips in current automatic firings are NO_x < 200 mg/m³ and particle < 50 mg/m³. During the combustion of chipboard residues NO_x emissions can reach 1000 mg/m³ and particle 500 mg/m³, as they accrue particularly at furniture industry and carpenters. This high emissions are not acceptable with regard to a further thermal

utilization of wood residues. Therefore in this project is a further development in realizing a new construction of the firing system is done, based on the experiences made at industrial wood firings in previous investigations. A further emission reduction requires the complete burnout of particles and the separation of the remained particles before they are transported through the heat exchanger. There carbonic particles are a key factor in forming Polychlorinated Dioxin and Furan anew. In the current PEF project the burnout zone of a staged furnace was optimized to achieve primary NO_x reduction with simultaneous improvement of particle burnout. Concerning the particle burnout there were achieved good results with the new burnout zone. The investigations traeting NO_x reduction showed, that the recoverable success depends mainly on the conditions in the primary zone where the fuel is fed. Here the fuel must be burned or gasified with lack of air, wich was possible with air dry wood chips of a homogen piece size of about 3 cm. Burning with lack of air was not possible with very fine dry fuels such as residuals of chip board processing. To achieve defined conditions independent of the fuel properties in this part of the furnace it is necessary to construct it anew. Therefore a patentable idea was developed to solve this problem for a wide range of fuels. Furthermore a new primary combustion chamber will be manufactured and combined with the burnout zone of the present firing. The combustion behavior of this combined furnace will be investigated with different kinds of fuels.

1 Einleitung

Die schwierige Entsorgungssituation von Abfallhölzern aus der holzbe- und holzverarbeitenden Industrie sowie aus dem Recycling Bereich, die bestehende Unsicherheit bei der Einteilung und Kontrolle der eingesetzten Brennstoffe und nicht zuletzt die zahlreichen Beschwerden über Emissionsbelästigungen an bestehenden Anlagen, waren Anlaß für die bislang im Bereich der gewerblichen und industriellen Holzfeuerungen durchgeführten Forschungsarbeiten. Zunächst wurde dabei der Anlagenbestand in Baden-Württemberg erfaßt und die davon ausgehenden Emissionen untersucht. In einem weiteren Projekt wurde untersucht, unter welchen Randbedingungen eine emissionsarme Verbrennung in Feuerungen im gewerblichen Bereich realisiert werden kann, wobei möglichst die Grenzwerte der 17. BImSchV (Abfallverbrennungsanlagen) eingehalten werden sollen, ohne dabei eine kostspielige Abgasnachbehandlung vorsehen zu müssen (ZUBERBÜHLER & BAUMBACH 1997).

Diese Untersuchungen zeigten, dass zur weiteren Emissionsminderung mit dem neuen Feuerungskonzept vor allem zwei Punkte realisiert werden müssen: Das sind im wesentlichen eine Verbesserung des Partikelausbrandes und die Anwendung primärer Entstickungsmaßnahmen.

In der ersten Stufe des Projekts wurde zur Verbesserung des Partikelausbrandes die Ausbrandzone der Feuerung neu gestaltet. Durch diese Maßnahme konnte folgendes erreicht werden:

Unvollständig verbrannte Partikel verbleiben im Feuerraum und werden nicht mit der Strömung durch den Wärmetauscher transportiert, wo sie eine Schlüsselrolle bei der Neubildung toxischer polychlorierter Kohlenwasserstoffe spielen.

Auf einen Trägheitsabscheider nach dem Wärmetauscher (z.B. Zyklon) kann verzichtet werden. Die sehr feinen, lungengängigen Partikel $< 1 \mu\text{m}$ werden im Zyklon ohnehin nicht abgeschieden.

Die erforderliche Verbrennungsluftmenge konnte durch die gute Durchmischung erheblich verringert werden, so dass der Restsauerstoffgehalt im Abgas von ca. 13 % auf 6 -7 % vermindert werden konnte. Durch den somit geringeren Abgasverlust wurde der Wirkungsgrad verbessert.

Die gute Durchmischung der Gase im Feuerraum kann auch mit stark verminderter Luftzufuhr aufrecht erhalten werden, was bei der Versuchsfeuerung einen kontinuierlichen Teillastbetrieb bis herunter auf 30 % der Nennleistung ermöglicht.

Die NO_x-Entstehung und die Möglichkeiten zu deren Minderung bei der Biomasseverbrennung waren bereits Gegenstand mehrerer wissenschaftlicher Untersuchungen (KELLER 1994, NUSSBAUMER 1997). Am IVD wurden die Vorgänge bei der Vergasung von verschiedenen Biomassen an einer Pyrolyseanlage (RÜDIGER 1996) und bei der Mitverbrennung von Biomasse in einem Kohle-Flugstromreaktor (KICHERER 1996) untersucht. In **Abbildung 1** sind die Bedingungen zur primären NO_x-Minderung dargestellt. Von zentraler Bedeutung sind dabei unterstöchiometrische Bedingungen in der Primär-Brennkammer.

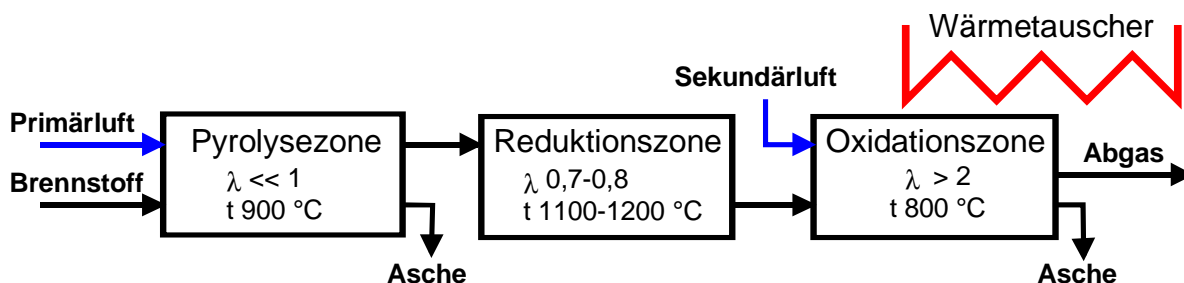


Abb. 1: Bedingungen in den verschiedenen Feuerraumzonen zur primären NO_x-Minderung nach dem Prinzip der Luftstufung

2 Feuerungskonzepte und Betriebserfahrungen

In **Abbildung 2** sind die verschiedenen Feuerungskonzepte skizziert, die für diese Untersuchungen herangezogen werden. Bei allen vier skizzierten Feuerraumtypen wird der Brennstoff über eine Schnecke in den Feuerraum gefördert. Beim **Typ A** handelt es sich um eine regelbare 175 kW Unterschubfeuerung der üblichen Bauart wie sie häufig im gewerblichen Bereich eingesetzt wird. Die Feuerung verfügte über eine λ - und Temperaturregelung, wobei Primär und Sekundärluft über getrennte Gebläse zugeführt wurden. Brennstoff und Primärluft wurden in einer Feuermulde zugeführt. Die Sekundärluft wurde mit einem separaten Gebläse oberhalb der Feuermulde und entlang des Feuerraumes zugeführt, wodurch ansatzweise eine gestufte Verbrennung realisiert war. Grobe, unverbrannte Partikel wurden nach dem Kessel in

einem Zyklon abgeschieden. Zur vollständigen Verbrennung war bei diesem Feuerungstyp ein hoher Luftüberschuß erforderlich (Restsauerstoffgehalt im Abgas von 8 -13 %). Bei stickstoffreichen Brennstoffen traten hohe NO_x-Werte im Abgas auf. Die Feuerung konnte bis ca. 50 % der Nennleistung kontinuierlich betrieben werden. In dieser Betriebsweise wurde ein guter Ausbrand der Gase erzielt (CO < 50 mg/m³). Grobe Brennstoffverunreinigungen waren beim Betrieb unkritisch.

Bei der Feuerung vom **Typ B** ist der Feuerraum räumlich in einen Primär- und Sekundärteil getrennt. Der Brennstoff wird auf einem schräg angeordneten, zyklisch gerüttelten Rost gefördert, der von der Primärluft von unten durchströmt wird. Der Sekundärteil des Feuerraums, die Ausbrandzone ist in zylindrischer Form im liegenden Kessel integriert. Durch den Einbau der ausschamottierten Ausbrandzone in den Kessel werden Schäden durch Überhitzung der Schamottierung vermieden. Die Sekundärluftzugabe erfolgt mit einem speziellen Drallgebläse, wodurch eine turbulente spiralförmige Drallströmung erzeugt wird. Unvollständig verbrannte grobe Partikel werden an der Wand der zylindrischen Ausbrandzone abgeschieden und verbleiben dort, bis sie ausgebrannt sind. Die Grobentstaubung erfolgt hier vor dem Kessel, so dass der Zyklonabscheider nach dem Kessel wie bei Typ A nicht mehr erforderlich ist. Durch die guten Mischungseigenschaften des Drallgebläses konnte der zur vollständigen Verbrennung benötigte Luftüberschuß verringert werden. Die gute Durchmischung blieb auch bei verminderter Luftzufuhr (Teillast bis 30 %) erhalten. Durch die Reduzierung des Luftüberschusses und die Vermeidung von Temperaturspitzen in der Ausbrandzone war bei stickstoffreichen Brennstoffen eine NO_x-Minderung erkennbar. Da die Primärluft die Brennstoffschüttung auf dem Rost durchströmen muß, ist die zugeführte Luftmenge von der Stückgröße des Brennstoffs abhängig, was sich bei der Dosierung als nachteilig erwies. Grobe Brennstoffverunreinigungen führten im Rostbereich zu Betriebsstörungen.

Bei der Feuerung vom **Typ C** wurde der Primärteil umgestaltet und die Ausbrandzone vom Typ B übernommen. Zwischen dem Bereich der Brennstoffaufgabe und der Ausbrandzone ist eine Reduktionszone zur NO_x-Minderung vorgesehen. Der Brennstoff wird beim Typ C ohne Rost direkt im rechteckigen ausschamottierten Primärteil des Feuerraumes zugeführt. Die Primärluft wird im Bereich der Brennstoffschüttung über einen 3 cm hohen Spalt zugeführt der sich über die ganze Brennraumbreite erstreckt. Mit diesem Konzept der Primärluftzuführung konnte kein stabiler Verbrennungsprozeß realisiert werden. Im Spaltbereich kam es zu intensiver Verbrennung, wogegen in anderen Bereichen der Primärbrennkammer der Brennstoff unverbrannt liegen bleibt. Angestrebt werden aber homogene unterstöchiometrische Bedingungen im Bereich der Brennstoffzuführung, weshalb dieses Konzept nicht weiterverfolgt wurde.

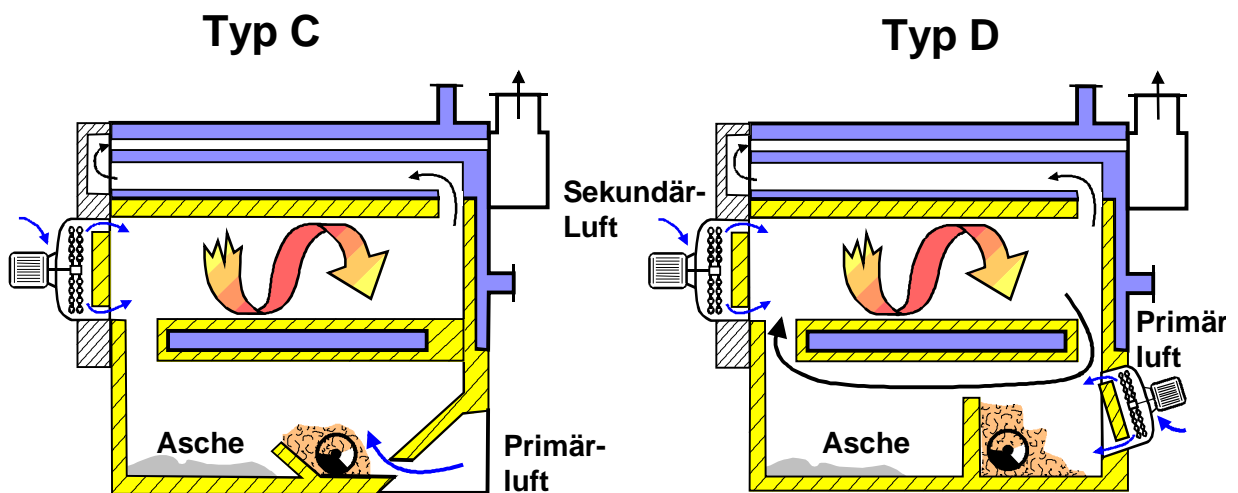
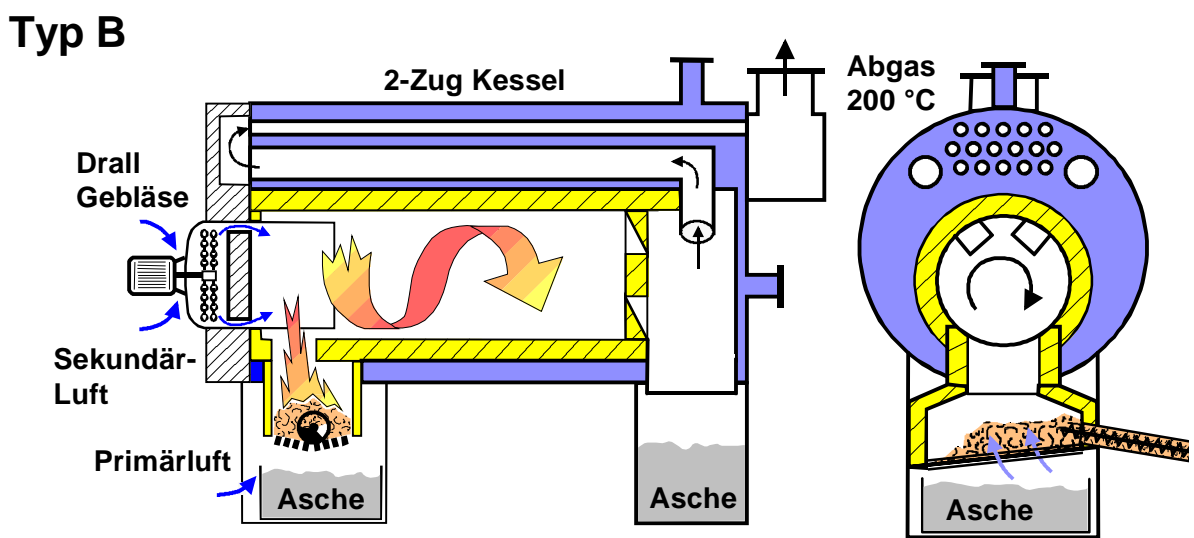
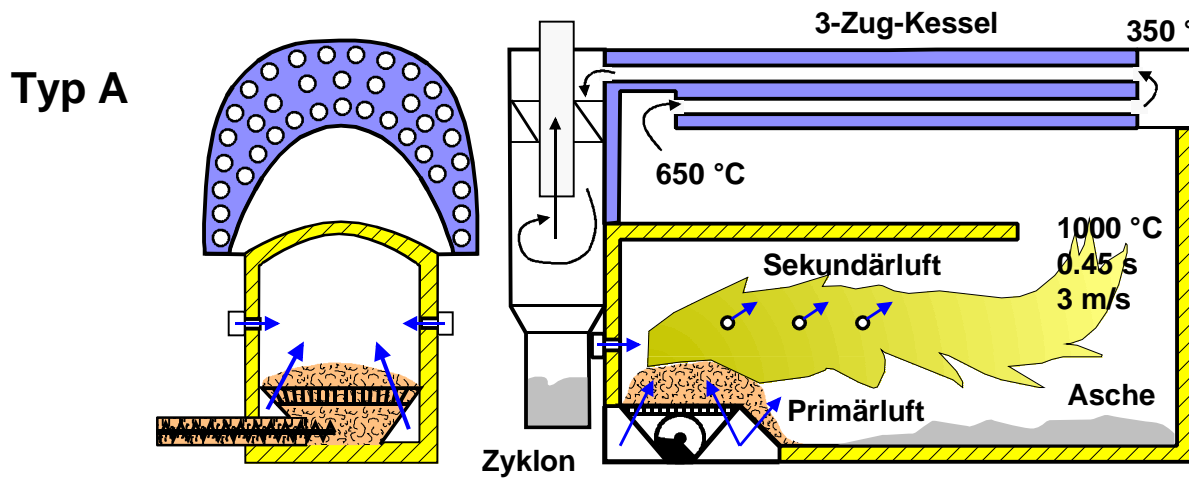


Abb. 2: Verschiedene Feuerungskonzepte zur Verbesserung des Partikelausbrandes und zur primären NO_x-Minderung

Im Unterschied zum Typ C wird beim **Typ D** die Primärluft mit einem Drallgebläse zugeführt wodurch die Brennstoffschüttung von oben abgebrant wird. Dadurch wird im Gegensatz zum Typ C erreicht, dass die Primärluft besser dosiert werden kann, was zur primären NO_x-Minderung eine entscheidende Voraussetzung darstellt. Bei den Varianten B und C ist die Primärluftmenge vom anliegenden Unterdruck im Feuerraum und von der Beschaffenheit der Brennstoffschüttung abhängig. Weiter besteht beim Typ D die Möglichkeit, heißes Gas aus der Ausbrandzone in den Primärbereich zurückzuführen und so die Primärluft weiter zu vermindern. Außerdem kann so bei Teillast dem Auskühlen des relativ großen Feuerraums entgegengewirkt werden.

3 Emissions- und Betriebsverhalten

Das Betriebsverhalten der λ - und temperaturgeregelten Feuerung **Typ A** wurde bereits im vorhergehenden Projekt (ZUBERBÜHLER & BAUMBACH 1997) ausführlich beschrieben. Die Feuerung konnte bis ca. 50 % ihrer Nennlast kontinuierlich betrieben werden. Kleinere Wärmeabnahmen sowie Schwachlast wurden durch den Wechsel von Gluthalte- (Stand-by) und Lastbetrieb realisiert, was hier höhere CO-Emissionen bedingte. In **Abbildung 3** ist das Betriebsverhalten von **Typ B** in verschiedenen Lastzuständen anhand der CO-, O₂-Konzentrationsverläufe und der abgegebenen Leistung dargestellt.

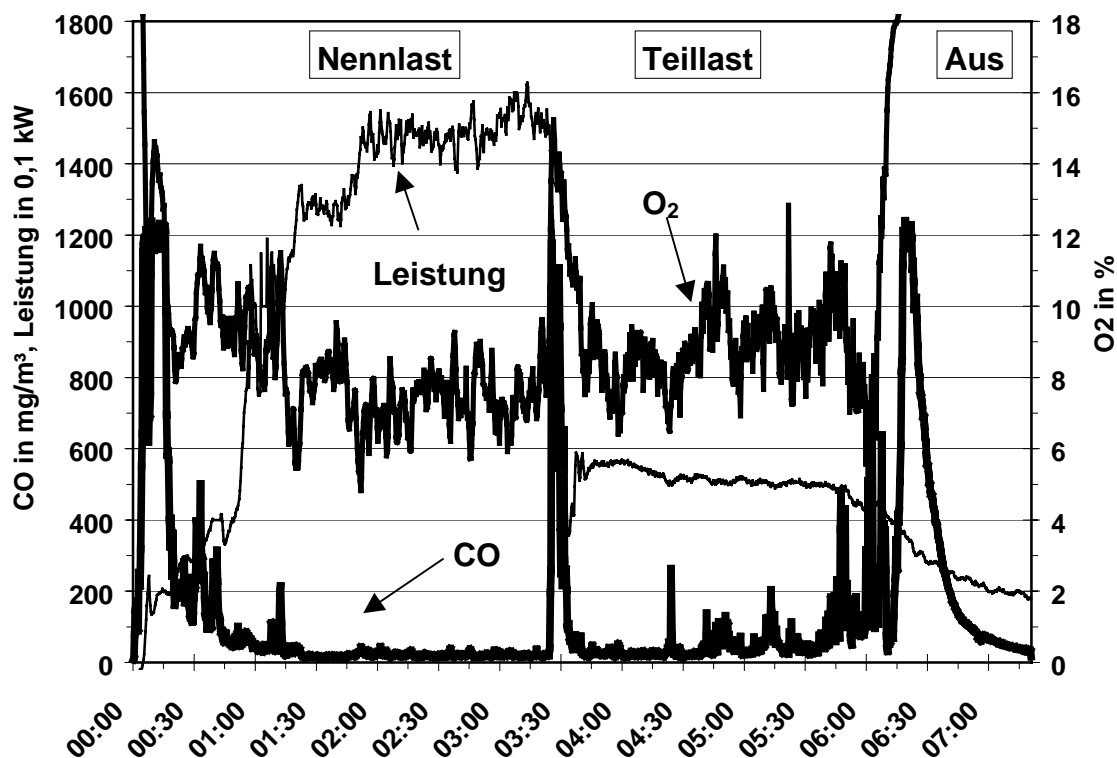


Abb. 3: Charakteristisches Betriebsverhalten der Feuerung Typ B (getrennte Primär- und Sekundärbrennkammer mit Drallgebläse in der Ausbrandzone) bei Nenn- und Teillast mit naturbelassenen Hackschnitzeln

Bei diesem Versuch wurde die Feuerung aus dem kalten Zustand heraus mit einem Heißluftgebläse automatisch gezündet. Zu Beginn reicht die Temperatur im kalten Feuerraum nicht aus, um CO vollständig zu oxidieren. Nach ca. 20 min brennt die Feuerung kontinuierlich

mit ihrer Nennleistung von 150 kW und CO-Konzentrationen kleiner 50 mg/m³, bis nach 3,5 h durch eine Reduzierung der abgenommenen Leistung ein abrupter Lastwechsel erzwungen wird. Dies bedingt einen kurzzeitigen CO-Peak. Danach brennt die Feuerung mit ca. 33 % der Nennleistung weiter, bis nach 6 Stunden ausgeschaltet wird. Nach dem Ausschalten der Feuerung kommt es zu einem erneuten Ansteigen der CO-Konzentration, was durch das Auskühlen der Feuerraums beim Holzkohlenabbrand auch bei Stückholzfeuerungen zu beobachten ist (BAUMBACH et al. 1997). Bei Schwachlast wird dieser Feuerungstyp ganz abgeschaltet und bei erneutem Wärmebedarf neu gezündet, wodurch der meist emissionsreiche Stand-by-Betrieb vermieden wird.

Die CO-Konzentrationen können als Kriterium für die Ausbrandqualität der gasförmigen Verbindungen herangezogen werden. In **Abbildung 4** sind die CO-Konzentrationen der Feuerungskonzepte A - C beim Verbrennen von verschiedenen Brennstoffen dargestellt. Dabei handelt es sich um Mittelwerte über mehrere Stunden bei kontinuierlicher Betriebsweise. Mit den Feuerungskonzepten A und B wurden unabhängig vom eingesetzten Brennstoff für Holzfeuerungen sehr gute Ausbrandbedingungen erzielt. Beim Typ B konnte durch die bessere Durchmischung durch das Drallgebläse der Restsauerstoffgehalt im Abgas gegenüber dem Typ A verringert werden, ohne dass sich die Ausbrandbedingungen verschlechterten. Auch bei 30 % Teillast wurde mit dem Typ B ein guter Ausbrand erzielt.

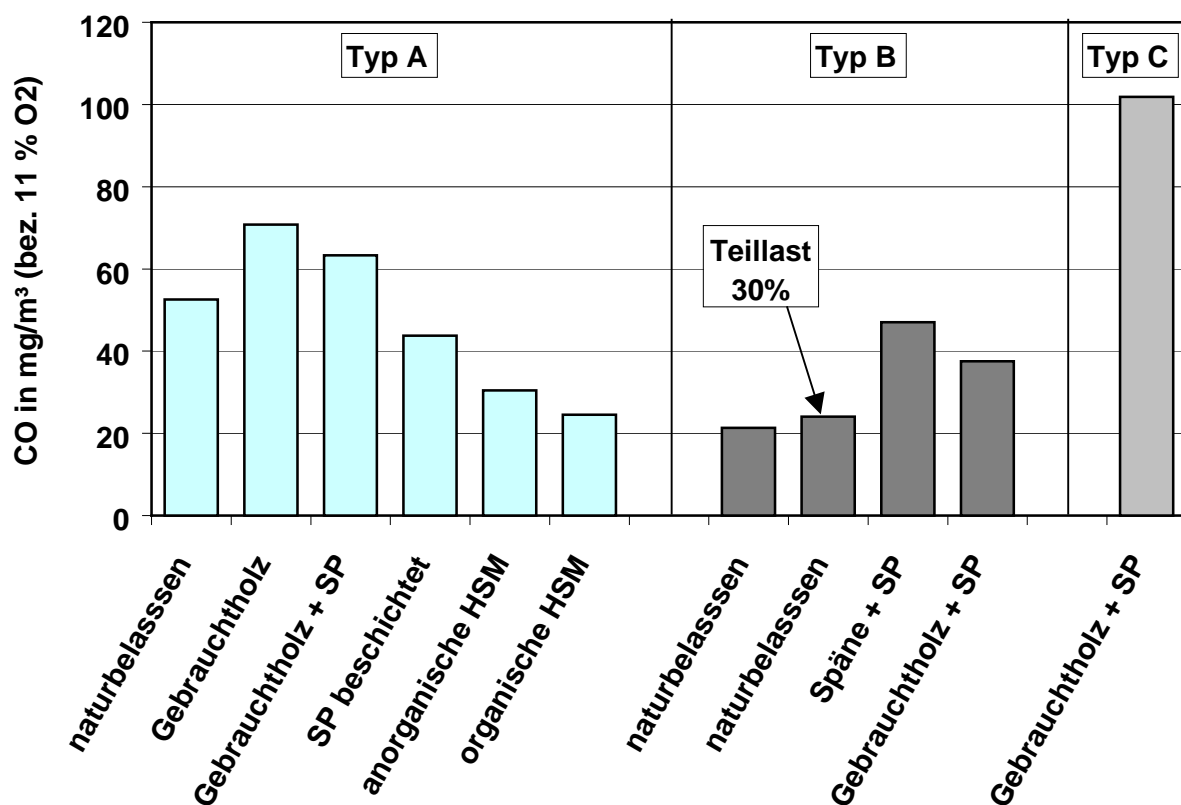


Abb. 4: CO-Mittelwerte der Feuerraumkonzepte A-C mit verschiedenen Brennstoffen (SP = Spanplatten, HSM = Holzschutzmittel)

Mit dem Typ C konnten keine stabilen kontinuierlichen Verbrennungsbedingungen erzielt werden, weil Brennstoff und Primärluft nicht gleichmäßig dosiert werden konnten, was am höheren CO-Mittelwert deutlich wird. Vom Typ D liegen bislang noch keine Ergebnisse vor. Da hier die bewährte Ausbrandzone vom Typ B verwendet wird, sind hier vergleichbare Resultate zu erwarten.

In **Abbildung 5** sind die mittleren Partikelkonzentrationen der Feuerungskonzepte A und B für verschiedene Brennstoffe dargestellt. Die Partikelkonzentrationen wurden gravimetrisch mittels Planfilter bestimmt. Die dargestellten Werte repräsentieren 2 - 4 Planfilter die je 15 min beladen wurden.

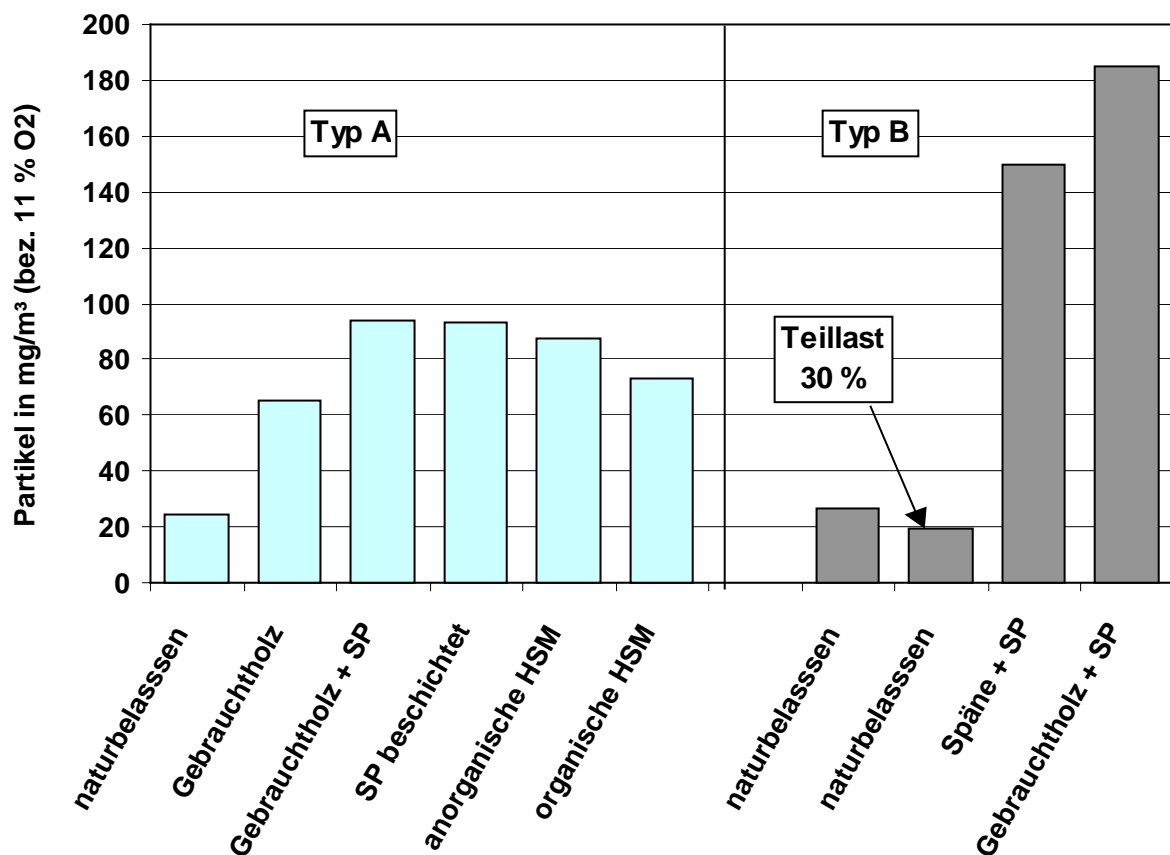


Abb. 5: Mittlere Partikelkonzentrationen der Feuerungskonzepte Typ A (mit Zyklon nach dem Kessel) und Typ B (mit „heißer“ Grobentstaubung in der Ausbrandzone vor dem Kessel)

Die Partikelemissionen im Abgas von Holzfeuerungen unterliegen vielfältigen Einflußfaktoren. Mit vergleichbarem Brennstoff, z.B. naturbelassenem Hackschnitzel wurden mit den unterschiedlichen Feuerungskonzepten A und B vergleichbare Partikelkonzentrationen im Abgas erreicht, obwohl sich die beiden Konzepte bezüglich der Grobentstaubung erheblich unterscheiden. Beim Typ A werden grobe unverbrannte Partikel nach dem Kessel im Zyklon abgeschieden; beim Typ B verbleiben diese in der Ausbrandzone bis sie vollständig verbrannt sind. Mit anderen Brennstoffen wurden bei beiden Feuerungstypen wesentlich höhere Partikelkonzentrationen im Abgas gemessen als bei naturbelassenem Holz. Da bei beiden Feuerungskonzepten die Partikelabscheidung auf Trägheitskräften beruht, können im wesentlichen nur die groben Partikel (> 5 µm) in der Feuerung zurückgehalten werden. Feine

Partikel ($< 1 \mu\text{m}$) werden bei beiden Feuerungskonzepten mit dem Abgas emittiert. Brennstoffe

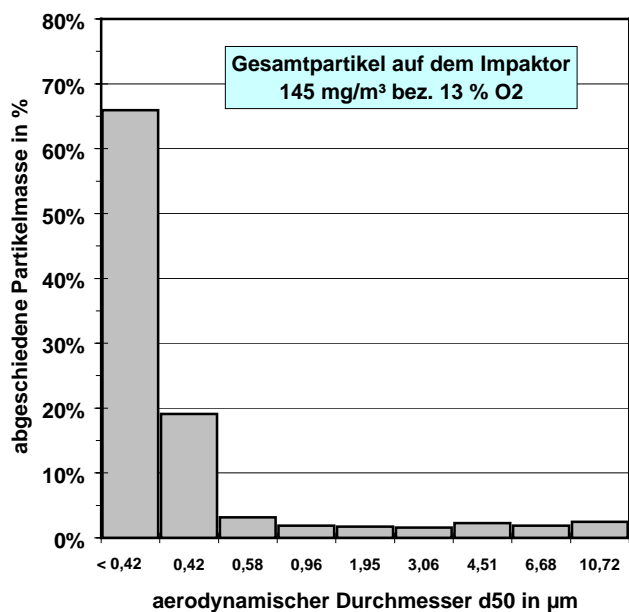


Abb. 6: Korngrößenverteilung der Partikel im Abgas der Feuerung B (Gebrauchtholz + SP)

mit einem hohen Feinanteil (z.B. Schleifstäube) und einem hohen Spanplattenanteil tendieren zu hohen Feinstaubemissionen.

In **Abbildung 6** ist die Korngrößenverteilung der Partikel im Abgas für die Feuerung Typ B für den Brennstoff "Gebrauchtholz + Spanplatten" dargestellt. Die Korngrößenverteilung wurde mit einem 8-stufigen Kaskadenimpaktor bestimmt. Die mittels Planfilter bestimmte Gesamtpartikelkonzentration betrug 148 mg/m^3 bezogen auf 13 % O_2 (entsprechend 185 mg/m^3 bei 11 % O_2 in Abb 4). Die Feuerung hätte in diesem Fall den Grenzwert der 1. BImSchV (150 mg/m^3 , bei 13 % O_2) gerade noch eingehalten.

Abbildung 6 zeigt, dass ca. 90 % der emittierten Partikelmasse einen aerodynamischen Partikeldurchmesser kleiner $1 \mu\text{m}$ aufweist. Diese sehr feinen Partikel könnten mit einem Zyklon nicht mehr aus dem Abgas entfernt werden. Folglich kann mit dem Feuerungskonzept B auf ein nachgeschaltetes Zyklon verzichtet werden. Grobe, unverbrannte Partikel sind im Spektrum nicht mehr vorhanden, werden also in der Ausbrandzone wirkungsvoll zurückgehalten und ausgebrannt, was eine erhebliche Verbesserung gegenüber dem Konzept A dargestellt.

Da bei Holzfeuerungen bislang kaum Maßnahmen zur primären NO_x -Minderung verwirklicht sind, hängen die NO_x -Konzentrationen im Abgas direkt vom Stickstoffgehalt des eingesetzten Brennstoffes ab. Da im Holzbe- und -verarbeitenden Gewerbe immer mehr Spanplatten eingesetzt werden, nimmt auch der N-Gehalt im Brennstoff wegen der in Spanplatten enthaltenen Stickstoffverbindungen weiter zu. Der Zusammenhang zwischen N-Gehalt im Brennstoff und den NO_x -Konzentrationen im Abgas ist für die Feuerungskonzepte A - C in **Abbildung 7** dargestellt. Dabei wurden für mehrere Verbrennungsversuche mit Nennlast die mittleren NO_x -Konzentrationen über dem N-Gehalt des jeweiligen Brennstoffs aufgetragen. Bei 100-prozentiger Umwandlung des Brennstoffstickstoffs in NO_x hätte man schon bei naturbelassenen Hölzern mit einem N-Gehalt $< 0,3 \%$ sehr hohe NO_x -Werte im Abgas. Ein Teil des Brennstoffstickstoffs verbleibt in der Asche oder wird als N_2 emittiert. Wieviel Brennstoffstickstoff letztlich als NO_x emittiert wird, hängt von den Bedingungen während des Verbrennungsprozesses ab. In Abb. 7 sind die Trendlinien für die Feuerungen Typ A und B eingezeichnet. Tendenziell liegen die NO_x -Werte beim Typ B um 20 % niedriger als beim Typ A, was auch der Theorie entspricht, die besagt, dass durch die Maßnahme der Luftstufung eine NO_x -Minderung von 20-30 % erzielt werden kann (NUSSBAUMER 1997). Durch den Einbau einer heißen Reduktionszone zwischen

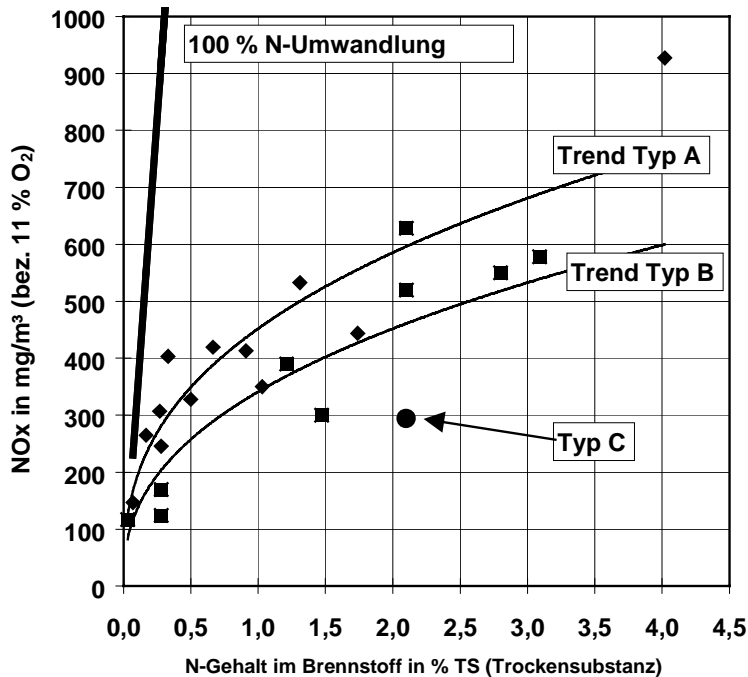


Abb. 7: Mittlere NO_x-Konzentrationen im Abgas in Abhängigkeit vom N-Gehalt im Brennstoff für verschiedene Feuerungskonzepte

Schüttung von oben abgebrannt wird. Im weiter Verlauf des Projekts wird dieser Typ bis zur Marktreife weiterentwickelt.

7 Literatur

- BAUMBACH G., ZUBERBÜHLER U., SIEGLE V., HEIN K.R.G. (1997): Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen. Ecomed Verlag, Landsberg
- KELLER R. (1994): Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 129, VDI-Verlag
- KICHERER A. (1996): Biomasseverbrennung in Staubfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Schadstoffemissionen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 6: Energietechnik, Nr.344, VDI-Verlag
- NUSSBAUMER T. (1997): Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen. In: MARUTZKY R. (1997): Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen. Sonderpublikation Umwelt, Springer-Verlag
- RÜDIGER H. (1996): Pyrolyse von festen biogenen und fossilen Brennstoffen zur Erzeugung eines Zusatzbrennstoffes für Feuerungsanlagen. Dissertation, Universität Stuttgart
- ZUBERBÜHLER U., BAUMBACH G. (1997): Emissionsarme Verbrennung von problematischen gewerblichen und industriellen Rest und Abfallhölzern in Pilotanlagen unter 1MW Feuerungsleistung. IVD-Bericht Nr.38, Stuttgart

Primär- und Sekundärteil der Feuerung lassen sich die NO_x-Konzentrationen noch weiter reduzieren, wie aus einem Versuch mit der Feuerung C deutlich wird. Die Realisierung und Einhaltung der in Abbildung 1 skizzierten Bedingungen in den einzelnen Teilen des Feuerraumes ist entscheidend für die NO_x-Reduzierung. Die Versuche mit dem Typ C zeigten, dass unterstöchiometrische Bedingungen ($\lambda \ll 1$) im Primärteil der Feuerung sehr schwer zu realisieren sind. Um hier definierte Bedingungen zu schaffen, wurde der Primärteil des Feuerraumes wie in Abbildung 2, Typ D skizziert umgebaut. Die Primärluftzuführung erfolgt hier unabhängig von der Brennstoffschüttung, wobei die