

BWPLUS

“Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“

Forschungszentrum Karlsruhe

**Entwicklung eines Feuerungskonzeptes zur Verbesserung
des Ausbrandes bei gleichzeitiger NO_x-Minderung bei
der Holzverbrennung im gewerblichen Bereich**

von

Ulrich Zuberbühler und Günter Baumbach

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen IVD

Abteilung Reinhaltung der Luft

Universität Stuttgart

Förderkennzeichen: 3 96 007

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

59 Seiten
30 Abbildungen
6 Tabellen
28 Literaturstellen

März 2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Feuerungskonzepte und Betriebsverhalten der verschiedenen Anlagen.....	3
2.1	Ausgangslage und Problemstellung	3
2.2	Unterschubfeuerung (Typ A).....	4
2.3	Feuerungskonzept (Typ B) mit Partikelabscheidung im Feuerraum	4
2.4	Feuerungskonzept (Typ C & D) mit primärer NO _x -Reduktionszone	5
2.5	Feuerungskonzept (Typ E) Primärluftzuführung mittels Injektor und Gasrückführung ...	7
2.6	Leistungsregelung.....	8
2.7	Teillastbetrieb einer älteren Praxisanlage	8
2.8	Betriebsverhalten der Unterschubfeuerung (Typ A).....	9
2.9	Betriebsverhalten der Feuerungen (Typ B bis E) mit gestufter Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum.....	10
3	Versuchsprogramm und Messtechnik.....	12
3.1	Versuchsprogramm.....	12
3.1.1	Teil I: Feuerung Typ B mit Luftstufung und Partikelabscheidung im Feuerraum ...	12
3.1.2	Teil II: Feuerung Typ C, D und E mit Luftstufung, Partikelabscheidung im Feuerraum, Reduktionszone und Gasrückführung.....	12
3.2	Messtechnik	12
3.2.1	Kontinuierlich gemessene Größen	13
3.2.2	Diskontinuierlich gemessenen Größen	15
3.2.2.1	Messung der polychlorierten Dioxine und Furane.....	16
3.2.2.2	Partikelkonzentration und Korngrößenverteilung.....	17

4	Untersuchungsergebnisse.....	22
4.1	CO-Konzentrationen.....	22
4.2	Partikel.....	23
4.2.1	Entstehung und Zusammensetzung.....	23
4.2.2	Gesamtpartikel-Emission.....	25
4.2.3	Partikel-Größenverteilung.....	26
4.2.4	Möglichkeiten zur primären Minderung der Partikelemissionen	28
4.3	Primäre NO _x -Minderung.....	31
4.3.1	Grundlagen.....	31
4.3.2	Vergleich der NO _x -Minderung bei den verschiedenen Feuerungskonzepten	34
4.4	Polychlorierte Dibenzodioxine und –furane PCDD/F.....	36
4.4.1	Grundlagen.....	36
4.4.1.1	Emission unzerstörter PCDD/F.....	38
4.4.1.2	Bildung aus Precursoren	38
4.4.1.3	De-Novo-Synthese.....	39
4.4.1.4	Einfluss der Ausbrandqualität.....	40
4.4.2	PCDD/F-Emissionen.....	41
4.4.3	Minderung von PCDD/F-Emissionen.....	44
5	Beurteilung der verschiedenen Feuerungskonzepte und Schlussfolgerungen	46
6	Literatur.....	50
7	Anhang: Patentschrift.....	53

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 (IVD), Abt. Reinhaltung der Luft, 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 unverträglich hoch. Zur Emissionsminderung ist ein vollständiger Ausbrand der Partikel und eine weitgehende Partikelabscheidung im Feuerraum anzustreben, bevor die Gase den Wärmetauscher (Kessel) durchströmen. Dort einmal hingelangt, würden kohlenstoffhaltige Partikel maßgeblich zur Neubildung von polychlorierten Dioxinen und Furanen beitragen. In diesem Projekt wurde zur Verbesserung des Partikelbrandes und gleichzeitigen primären NO_x-Minderung die Ausbrandzone einer zweistufigen Feuerung neu gestaltet und optimiert. Bezüglich des Partikelbrandes wurden dabei sehr gute Ergebnisse erzielt. Bei den Untersuchungen zur primären NO_x-Minderung stellte sich heraus, dass der 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 bei der Spanplattenbearbeitung anfallen, war dies aber nicht möglich. Um für eine breite Brennstoffpalette im Primärbereich eine definierte unterstöchiometrische Verbrennung zu realisieren, wurde dieser Bereich neu konstruiert. Im weiteren wurde eine neue Primärbrennkammer angefertigt und mit der Ausbrandzone der bestehenden Feuerung kombiniert. Um einen Brennstoffumsatz unter Luftmangel zu ermöglichen, wird bei dieser Brennkammer ein Teil der Primärluft durch heißes Gas vom Ende der Ausbrandzone oder durch Abgas ersetzt. Das Verbrennungsverhalten der Brennkammer wurde auf dem Versuchstand am IVD untersucht, optimiert und dokumentiert. Im kontinuierlichen Lastbetrieb wurde mit beschichteten Spanplatten (N-Gehalt 4,3 % TS) eine mittlere NO_x-Konzentration von 437 mg/m³ (13 % O₂) gemessen, was gegenüber einer konventionellen Unterschubfeuerung eine Minderung um ca. 40 % darstellt. Die mittlere CO-Konzentration betrug 30 mg/m³ (13 % O₂) und die Partikelkonzentration 47 mg/m³ (13 % O₂) ohne nachgeschalteten Staubabscheider. Diese Messergebnisse zeigen deutlich, dass durch die konsequente Umsetzung von Primärmaßnahmen eine brauchbare Feuerung für schwierige Brennstoffe von holzbe- und holzverarbeitenden Betrieben entwickelt werden konnte.

Development of a furnace construction to realise 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 utilisation of wood residues. Therefore in this project 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 could be a key factor in forming Polychlorinated Dioxin and Furan anew. In the first project step the burnout zone of a staged furnace was optimised to improve particle burnout with simultaneous particle separation. Concerning the particle burnout there were achieved good results with the new burnout zone. The investigations treating 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, which was possible with air dry wood chips of a homogenous 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 was necessary to construct it anew. At the new manufactured combustion chamber hot gas from the end of combustion chamber or exhaust gas is taken to reduce primary air. This part was combined with the well working burnout zone of the existing firing. The combustion behaviour of this combined furnace was investigated and optimised on the IVD test stand. During continuously combustion of coated chipboards (fuel N-content 4,3 % dry matter) NO_x concentrations of 437 mg/m³ (13 % O₂) were measured, which corresponds to a 40 % reduction in comparison with an common underfed boiler. CO concentrations with 30 mg/m³ (13 % O₂) were on a very low level as well as particle concentration of 47 mg/m³ (13 % O₂) without additional precipitation. The results show, that a significant emission reduction could be achieved by primary measures. Now, a low emission firing for the combustion of difficult fuels from wood manufacturing industry is available.

1 Einleitung

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

Der Ersatz der fossilen Brennstoffe Erdgas, Erdöl und Kohle durch regenerative, CO₂-neutrale Holzbrennstoffe leistet einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Minderung mit noch erheblichen Potentialen in Deutschland und Europa. Sollen die vorhandenen Substitutionspotentiale voll ausgeschöpft werden, müssen neben den naturbelassenen Hölzern aus der Forstwirtschaft und der Landschaftspflege auch die Resthölzer aus der Holzbe- und -verarbeitung sowie Altholz verstärkt zur Energieerzeugung genutzt werden. Um dabei die Emissionsbelastung möglichst gering zu halten, müssen bei der Verbrennung die durchaus sehr unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Brennstoffe aus den verschiedenen Branchen berücksichtigt werden (MARUTZKY & STRECKER 1998). Während es sich bei "naturbelassenen Hackschnitzeln" aus der Forstwirtschaft und Landschaftspflege meist um sehr feuchte Brennstoffe handelt, sind die Brennstoffe aus der Holzbe- und -verarbeitung in der Regel trocken. Je nach den verarbeiteten Holzwerkstoffen, z.B. Span- und Faserplatten und den eingesetzten Bearbeitungsverfahren enthält der Brennstoff einen hohen Feinanteil (z.B. Schleifstaub) und einen hohen Stickstoffgehalt, woraus sich spezielle Anforderungen an die Verbrennungstechnik ergeben. Beim Verbrennen von naturbelassenem Holz werden NO_x-Werte < 200 mg/m³ und Partikelkonzentrationen < 50 mg/m³ erreicht. Beim Verbrennen von Spanplattenresten können die NO_x-Konzentrationen bis zu 1000 mg/m³ und die Partikelkonzentrationen bis zu 500 mg/m³ betragen. Hier können durch die Realisierung primärer Emissionsminderungsmaßnahmen bei der Feuerraumgestaltung die Emissionen wesentlich vermindert werden.

In diesem Forschungsprojekt sollten die Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung der primären NO_x-Minderung bei gleichzeitiger Verbesserung des Partikelausbrandes untersucht und erprobt werden. Die Entwicklung erfolgte in zwei Stufen. Eine erste Maßnahme zur primären Emissionsminderung stellt die gestufte Verbrennung dar. Bei den meisten gebräuchlichen Feuerungen ist dieses Prinzip nur ansatzweise verwirklicht. Dort wird die Verbrennungsluft zwar „gestuft“ an

1 Einleitung

verschiedenen Stellen im Feuerraum zugegeben, aber es bilden sich keine räumlich getrennten Zonen mit unterschiedlichen Bedingungen aus. Um dies zu realisieren, sollte in der ersten Entwicklungsstufe der Feuerraum in eine Primär- und Sekundärbrennkammer (Ausbrandzone) aufgeteilt werden. Die Ausbrandzone sollte so gestaltet werden, dass unvollständig verbrannte Partikel dort verbleiben, so dass auf einen Trägheitsabscheider am Ende der Feuerung verzichtet werden kann.

In der zweiten Entwicklungsstufe sollte der Primärteil der Brennkammer so gestaltet werden, dass dort die zur primären NO_x-Minderung notwendigen Randbedingungen vorliegen (reduzierende Atmosphäre, hohe Temperatur). Aus der Kombination von Primär- und Sekundärkammer sollte eine praxistaugliche Feuerung entstehen, bei der die Möglichkeiten zur primären Emissionsminderung voll ausgenutzt werden und die es ermöglicht, auch schwierige Brennstoffe aus der Holzbe- und Holzverarbeitenden Industrie emissionsarm zu verbrennen.

2 Feuerungskonzepte und Betriebsverhalten der verschiedenen Anlagen

2.1 Ausgangslage und Problemstellung

Ausgehend von dem bekannten Emissionsverhalten einer modernen λ - und temperaturgeregelten Unterschubfeuerung, wurde in diesem Projekt versucht, Primärmaßnahmen zur Verbesserung des Partikelausbrandes bei gleichzeitiger NO_x-Minderung, in einem praxistauglichen Feuerungskonzept umzusetzen. Dies erschien vor allem deshalb notwendig, weil sich die in der holzbe- und holzverarbeitenden Industrie zur Verfügung stehenden Brennstoffe aufgrund der verarbeiteten Werkstoffe (zunehmend Spanplatten) und Bearbeitungsmethoden mit schnelllaufenden Maschinen dahingehend geändert haben, dass vermehrt trockene Brennstoffe mit hohem Feinanteil und hohem N-Gehalt zur Verfügung stehen. Werden solche Brennstoffe mit herkömmlicher Feuerungstechnik verbrannt, können im Abgas, trotz guter Ausbrandbedingungen der gasförmigen Bestandteile (z.B. CO), hohe NO_x- und Partikelkonzentrationen im Abgas auftreten. Dies konnte an früheren Emissionsuntersuchungen an der in **Abbildung 2.1** skizzierten Feuerung bereits gezeigt werden (ZUBERBÜHLER & BAUMBACH 1997). Dieses gut dokumentierte Emissionsverhalten der Unterschubfeuerung diente für diese Untersuchungen als Referenz zur Beurteilung der erzielten Emissionsminderung.

Bei der Umsetzung primärer Emissionsminderungsmaßnahmen, wie sie aus der Kraftwerkstechnik zur Kohleverbrennung oder bei Öl- und Gasfeuerungen bereits bekannt sind, wurde schrittweise vorgegangen. Ausgehend vom Emissionsverhalten der Unterschubfeuerung Typ A, wurde im ersten Schritt versucht den Partikelausbrand zu verbessern. In einem weiteren Schritt wurde versucht, durch eine Umgestaltung des Feuerraumes den Verbrennungsprozess so zu führen, dass dort die zur primären NO_x-Minderung notwendigen Bedingungen (KELLER 1994) vorliegen. Im weiteren sind die verschiedenen Feuerungskonzepte skizziert. Bei allen dargestellten Konzepten wird der Brennstoff über eine Schnecke in den Feuerraum gefördert. Die Verbrennungsluft und das Abgas werden über Gebläse zu- bzw. abgeführt, die mit Frequenzumrichtern betrieben werden, was eine stufenlose Einstellung der Volumenströme ermöglicht. Die Überwachung und Steuerung der Feuerungen erfolgte bei allen Konzepten durch eine Speicherprogrammierbare Steuerung SPS, mit der auch die λ - und Temperaturregelung realisiert wurde.

2.2 Unterschubfeuerung (Typ A)

In **Abbildung 2.1** ist eine regelbare 175 kW Unterschubfeuerung der üblichen Bauart, wie sie häufig im gewerblichen Bereich eingesetzt wird, dargestellt. 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.

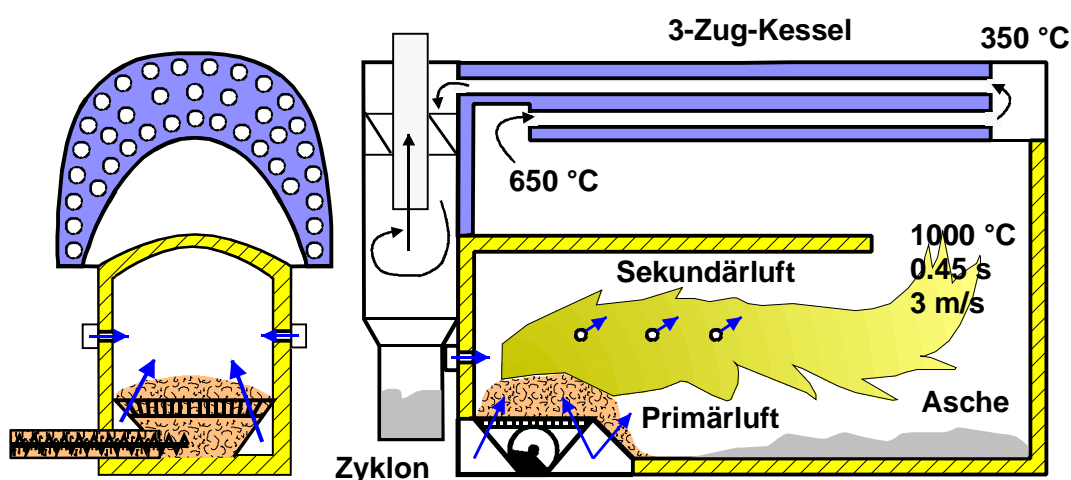


Abbildung 2.1: Unterschubfeuerung üblicher Bauart (Typ A) mit Zyklonabscheider, 175 kW, Baujahr 1995, λ - und Temperaturregelung

2.3 Feuerungskonzept (Typ B) mit Partikelabscheidung im Feuerraum

Das Feuerungskonzept (Typ B) ist in **Abbildung 2.2** skizziert. Dort wurde eine räumliche Trennung des Feuerraumes in einen Primär- und Sekundärteil realisiert. 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 Drall-

2 Feuerungskonzepte und Betriebsverhalten der verschiedenen Anlagen

strömung 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.

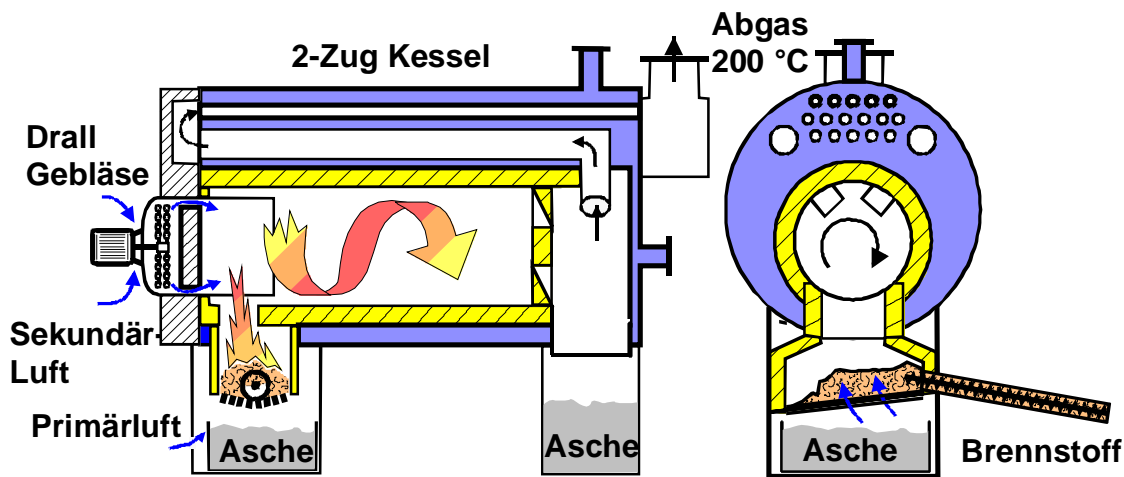


Abbildung 2.2: Feuerungskonzept Typ B mit gestufter Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum, 150 kW, Baujahr 1998, λ - und Temperaturregelung

2.4 Feuerungskonzept (Typ C & D) mit primärer NO_x-Reduktionszone

Zur primären NO_x-Minderung muss der Verbrennungsprozess in definierter Weise, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben ist, geführt werden. Der Erfolg einer primären NO_x-Minderung hängt dabei im wesentlichen davon ab, wie gut es gelingt die dort geforderten Bedingungen in der Praxis umzusetzen.

Bei den Feuerungskonzepten vom Typ C + D wurde der Primärteil des Feuerraumes umgestaltet und die Ausbrandzone vom Typ B übernommen, da mit dieser gute Erfahrungen bezüglich der Ausbrandbedingungen, insbesondere der Partikel, erzielt wurden. Zwischen dem Bereich der Brennstoffaufgabe und der Ausbrandzone ist eine Reduktionszone zur NO_x-Minderung vorgesehen. Der Brennstoff wurde beim Typ C ohne Rost direkt im rechteckigen ausschamottierten Pri-

2 Feuerungskonzepte und Betriebsverhalten der verschiedenen Anlagen

märteil des Feuerraumes zugeführt. Die Primärluft wurde im Bereich der Brennstoffschüttung über einen 3 cm hohen Spalt zugeführt der sich über die ganze Brennraumbreite erstreckte. Ziel dabei war, die Brennstoffzuführung möglichst einfach ohne Rost und beweglichen Teilen zu gestalten. Außerdem sollte die zugeführte Primärluft nicht die Brennstoffschüttung durchströmen, so dass die Luftmenge nicht von der Beschaffenheit der Brennstoffschüttung abhängt.

Mit dem Konzept C konnte kein stabiler Verbrennungsprozess realisiert werden. Im Spaltbereich kam es zu intensiver Verbrennung, wogegen in anderen Bereichen der Primärbrennkammer der Brennstoff unverbrannt liegen blieb. Angestrebt wurden aber homogene unterstöchiometrische Bedingungen im Bereich der Brennstoffzuführung, weshalb dieses Konzept nicht weiterverfolgt wurde.

Die Probleme wie sie beim Type C im Primärbereich auftraten sollten mit dem Typ D gelöst werden. Dort wurde die Primärluftzuführung über ein zweites Drallgebläse realisiert. Ziel dabei war, die Brennstoffschüttung von oben abzubrennen. Auch mit diesem Konzept konnte in der Praxis kein stabiler Betrieb über einen längeren Zeitraum erreicht werden. Im Betrieb bildete sich auf der Oberfläche der Brennstoffschüttung eine Schicht aus Glut und Holzkohle die einen Umsatz des darunter liegenden Brennstoffs verhinderte.

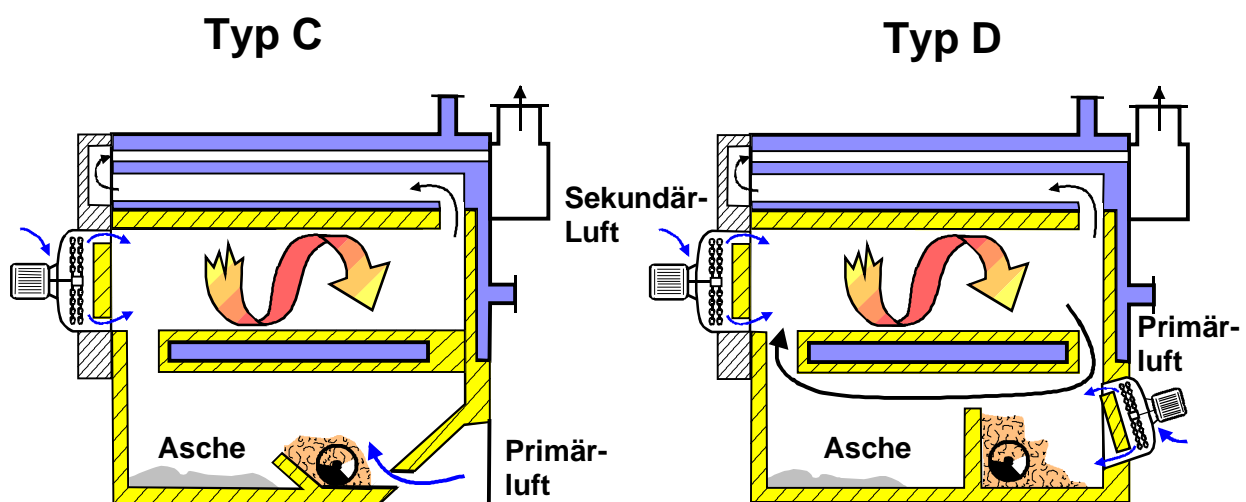


Abbildung 2.3: Feuerungskonzepte (Typ C & D) mit gestufter Verbrennung mit oberem Abbrand und Reduktionszone, Brennstoffzufuhr ohne Rost direkt in den schamottierten Feuerraum

Im Unterschied zum Typ C wurde beim Typ D die Primärluft mit einem Drallgebläse zugeführt wodurch die Brennstoffschüttung von oben abgebrannt werden sollte. Dadurch wurde 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 war die Primärluftmenge vom anliegenden Unterdruck im Feuerraum und von der Beschaffenheit der Brennstoffschüttung abhängig. Weiter bestand beim Typ D die Möglichkeit, heißes Gas aus der Ausbrandzone in den Primärbereich zurückzuführen und so die Primärluft weiter zu vermindern.

Außerdem konnte so bei Teillast dem Auskühlen des relativ großen Feuerraums entgegengewirkt werden.

2.5 Feuerungskonzept (Typ E) Primärluftzuführung mittels Injektor und Gasrückführung

In **Abbildung 2.4** ist das Feuerungskonzept (Typ E) dargestellt. Basierend auf den Erfahrungen bei den Verbrennungsversuchen mit den anderen Feuerungskonzepten erfolgte bei diesem Konzept die Primärluftzugabe über Bohrungen in den Rostelementen. Damit sollte eine möglichst homogene Verteilung der zugeführten Luft über den gesamten Rostbereich erzielt werden. Zur Überwindung des Druckverlustes der Rostelemente und der Brennstoffschüttung wurde ein Seitenkanalgebläse verwendet. Die Luftzuführung wurde als Injektor ausgeführt, was es erlaubt, zusammen mit der Primärluft heißes Gas vom Ende der Brennkammer oder bereits abgekühltes Abgas der Primärluft zuzumischen. Bei diesem Konzept wurde versucht die Brennstoffschüttung auf dem Rost so klein wie möglich zu halten, so dass der Druckverlust der Brennstoffschüttung gegenüber der Luftzuführung durch die Rostelemente gering ist und somit die zugeführte Luftmenge nicht durch die Eigenschaften der Brennstoffschüttung beeinflusst wird.

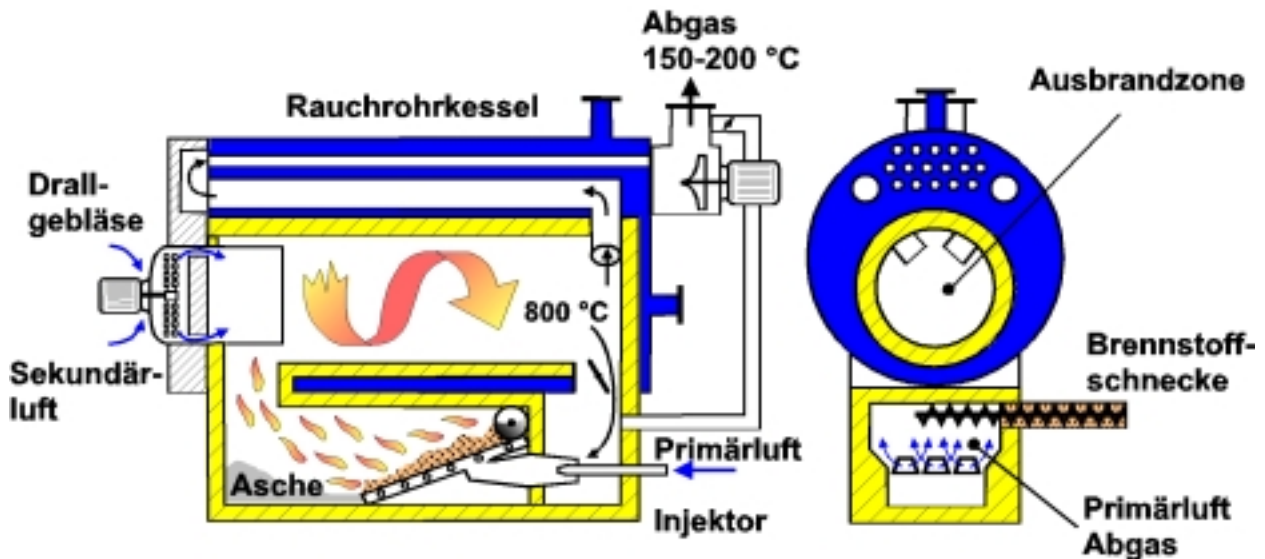


Abbildung 2.4: Feuerungskonzept (Typ E) gestufte Verbrennung, NO_x-Reduktionszone und Gasrückführung

2 Feuerungskonzepte und Betriebsverhalten der verschiedenen Anlagen

2.6 Leistungsregelung

In der Regel werden Feuerungen in holzbe- und holzverarbeitenden Betrieben zur Erzeugung von Heiz- und Prozesswärme eingesetzt. In beiden Anwendungsfällen ist der Wärmeverbrauch nicht konstant. Voraussetzung für einen emissionsarmen Praxisbetrieb auch unter Teillastbedingungen ist aber eine möglichst kontinuierliche Betriebsweise der Feuerung.

Bei modernen Feuerungsanlagen wird dies durch eine λ - und Temperaturregelung erzielt, wie sie beispielhaft in **Abbildung 2.5** dargestellt ist. Brennstoff- und Luftmenge werden über einen breiten Leistungsbereich dem jeweiligen Wärmebedarf angepasst. Die eigentliche Leistungsregelung erfolgt anhand der Kesseltemperatur über die zugeführte Verbrennungsluftmenge. Die Brennstoffzufuhr wird in Abhängigkeit des gemessenen Restsauerstoffgehaltes des Abgases (λ -Regelung) dem jeweiligen Lastzustand angepasst. Diese Regelstrategie wurde in den Grundzügen bei allen untersuchten Feuerungskonzepten beibehalten. Generell gilt, je trockener der eingesetzte Brennstoff, desto breiter ist der Leistungsbereich in dem ein kontinuierlicher Betrieb möglich ist.

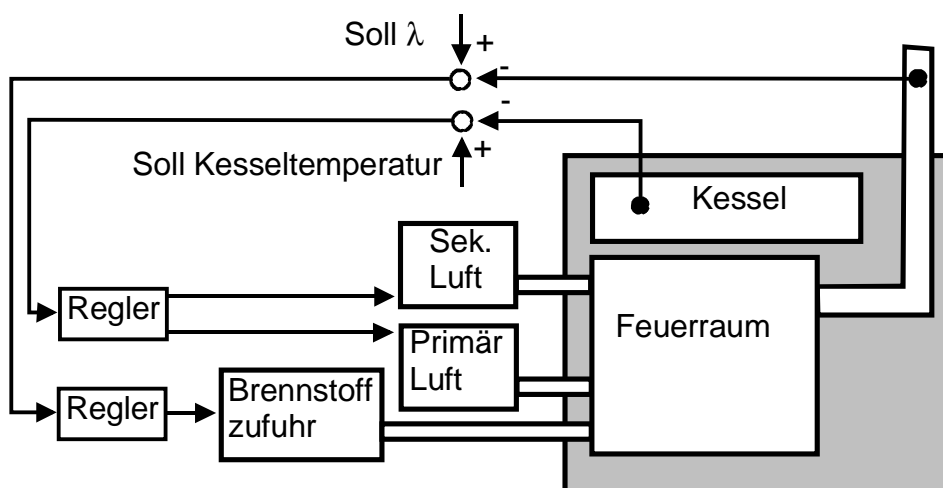


Abbildung 2.5: Grundprinzip der λ - und Temperaturregelung bei den untersuchten Feuerungskonzepten

2.7 Teillastbetrieb einer älteren Praxisanlage

Zahlreiche Feuerungen im derzeitigen Anlagenbestand verfügen nicht über eine kontinuierliche Leistungsregelung. Dort wird der Teillastbetrieb durch einen periodischen Wechsel der Betriebszustände „Brennen“ und „Gluthalten“ (Stand-by) realisiert, wie es in **Abbildung 2.6** am Beispiel einer älteren Unterschubfeuerung mit (430 kW Feuerungs-Wärme-Leistung FWL) dargestellt ist.

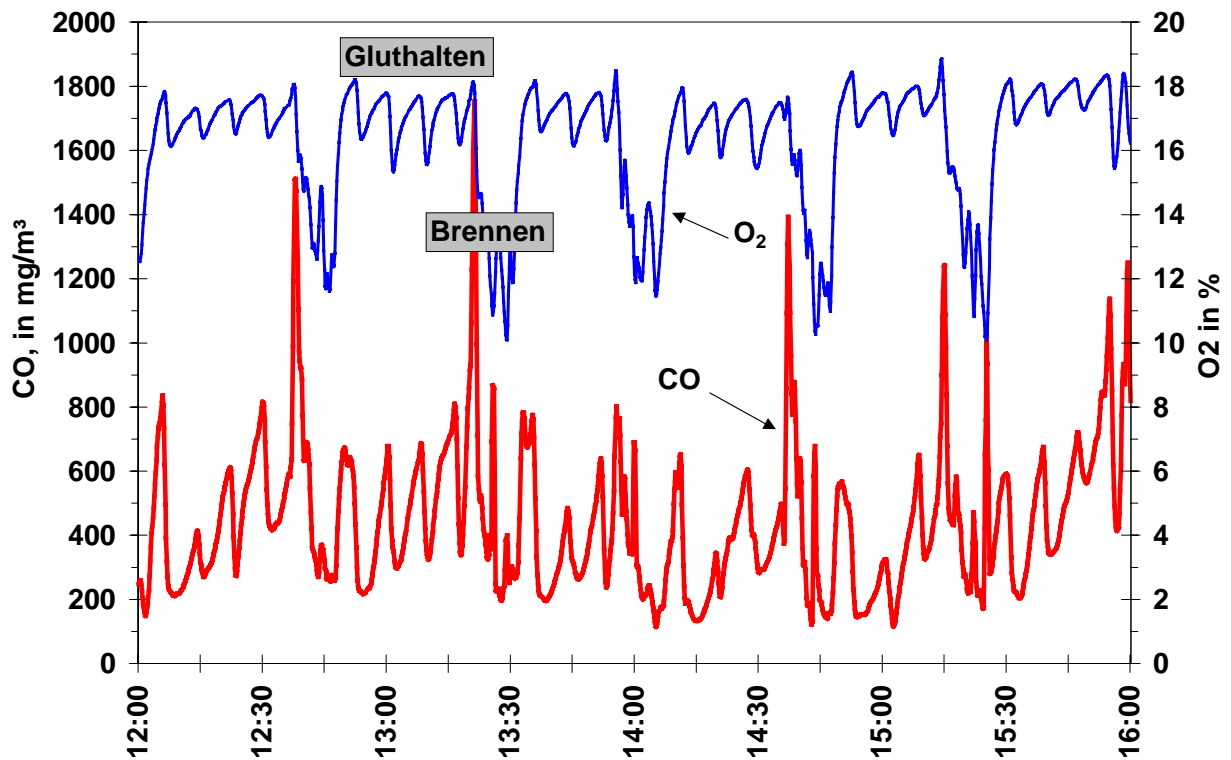


Abbildung 2.6: Typisches Betriebsverhalten einer Unterschubfeuerung ohne kontinuierliche Leistungsregelung (430 kW, Baujahr 1989) im Teillastbetrieb

Der in **Abbildung 2.6** dargestellte Teillastbetrieb ohne kontinuierliche Leistungsregelung wurde dadurch realisiert, dass beim Überschreiten einer voreingestellten Solltemperatur des Kesselwassers die Verbrennungsluft- und Abgasgebläse abgeschaltet wurden. Diese Betriebszustände sind im Diagramm an dem hohen Restsauerstoffgehalt im Abgas zu erkennen. Dort wird durch fest eingestellte Taktzeiten der Brennstoffschnecke gerade so viel Brennstoff zugeführt, dass im Feuerraum eine zündfähige Glut erhalten bleibt. In diesem Betriebszustand ist die Feuerraumtemperatur für eine vollständige CO-Oxidation nicht ausreichend. Durch den hohen Luftüberschuss kühlt der Feuerraum schnell aus und der Abgasverlust ist entsprechend hoch. Fällt die Kesseltemperatur unter den Sollwert, werden die Gebläse wieder eingeschaltet und die Brennstoffzufuhr erhöht. Die Luftzufuhr ist dabei durch Klappen fest eingestellt und die Brennstoffzufuhr ist durch eine feste Takt- und Pausenzeit der Einschubschnecke vorgegeben.

2.8 Betriebsverhalten der Unterschubfeuerung (Typ A)

In **Abbildung 2.7** ist das Betriebsverhalten der Unterschubfeuerung (Typ A) mit kontinuierlicher Leistungsregelung, wie sie unter Kapitel 2.2 beschrieben wurde, in verschiedenen Lastzuständen dargestellt. Anhand des CO-Konzentrationsverlaufes sind hier deutlich die Auswirkungen der kontinuierlichen Leistungsregelung auf das Emissionsverhalten zu sehen. Das Emissionsverhalten

2 Feuerungskonzepte und Betriebsverhalten der verschiedenen Anlagen

ten im Nenn- und Teillastbetrieb ist nahezu identisch. Die CO-Konzentrationen sind hier auf sehr niedrigem Niveau. Bei Wärmeabnahmen deutlich unter 50 % der Nennleistung ist kein kontinuierlicher Betrieb mehr möglich. Dort kommt es zu einem periodischen Wechsel der Zustände „Brennen“ und „Gluthalten“ wie es bereits bei der Feuerung ohne Leistungsregelung beschrieben wurde. Aus einem Vergleich der CO-Konzentrationsverläufe (**Abbildung 2.6** und **Abbildung 2.7**) wird deutlich, dass mit einer kontinuierlichen Leistungsregelung das Emissionsverhalten wesentlich verbessert werden kann.

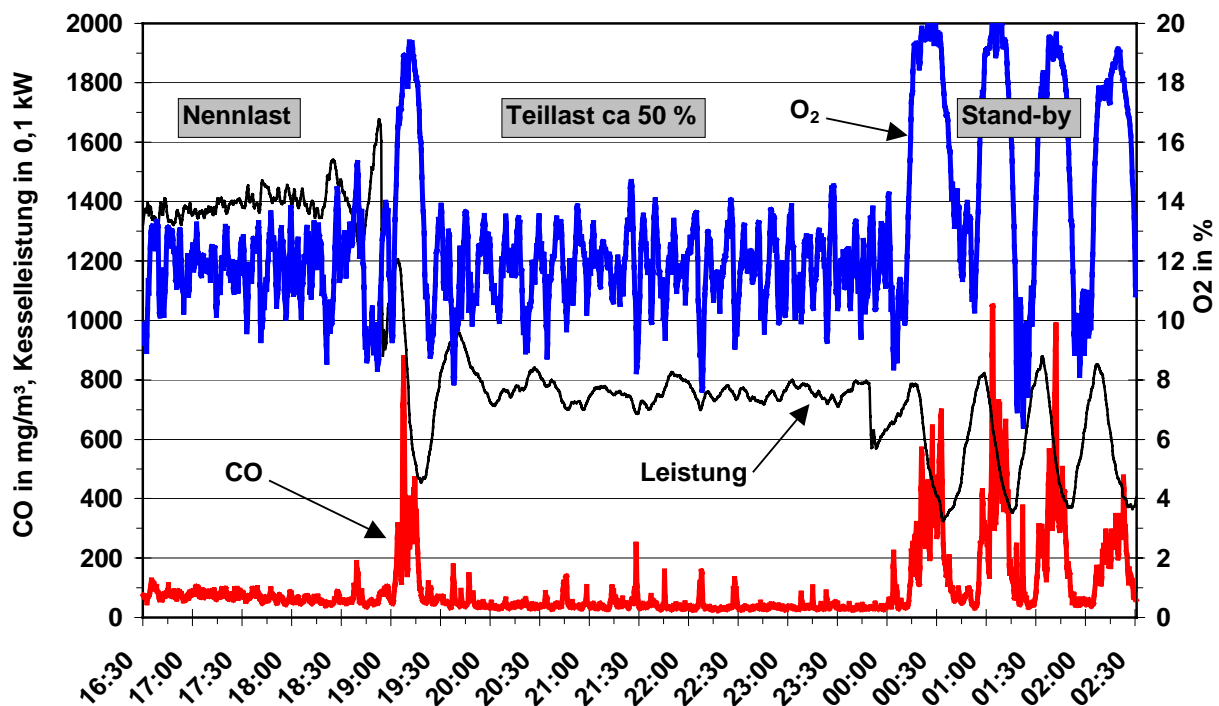


Abbildung 2.7: Charakteristisches Betriebsverhalten der Unterschubfeuerung Typ A (Baujahr 1995, λ - und Temperaturregelung) bei Nenn- und Teillast sowie im Stand-by Betrieb

2.9 Betriebsverhalten der Feuerungen (Typ B bis E) mit gestufter Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum

Da die Steuerung der Feuerung (Typ B) auch für die anderen Konzepte beibehalten wurde, ist das Betriebsverhalten der Feuerungskonzepte (Typ B bis E) in verschiedenen Lastzuständen beispielhaft anhand eines Versuches mit Typ B beschrieben. In **Abbildung 2.8** sind die CO-, O₂-Konzentrationsverläufe und die abgegebene Leistung in verschiedenen Lastzuständen dargestellt.

2 Feuerungskonzepte und Betriebsverhalten der verschiedenen Anlagen

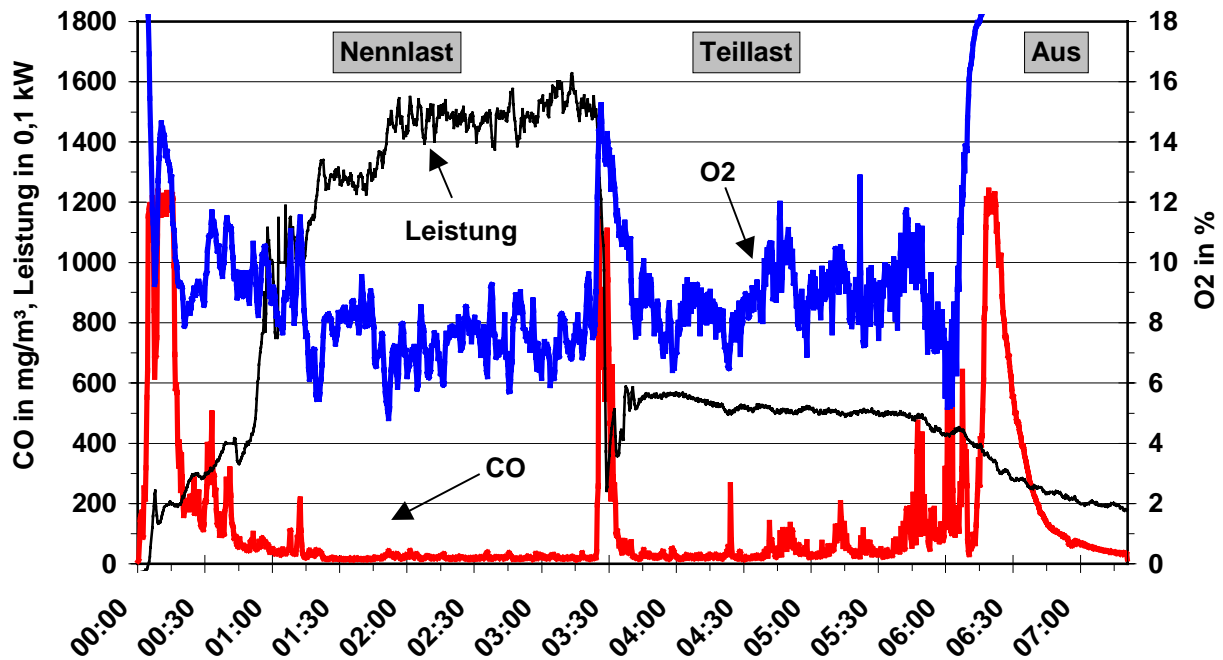


Abbildung 2.8: Charakteristisches Betriebsverhalten der Feuerung Typ B (gestufte Verbrennung und Partikelabscheidung im Feuerraum) bei Nenn- und Teillast mit naturbelassenen Hackschnitzeln

Beim abgebildeten 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 mit CO-Konzentrationen auf sehr niedrigem Niveau, 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 (zum Vergleich **Abbildung 2.7** rechts).

3 Versuchsprogramm und Messtechnik

3.1 Versuchsprogramm

3.1.1 Teil I: Feuerung Typ B mit Luftstufung und Partikelabscheidung im Feuerraum

Im ersten Teil des Versuchsprogramms wurde das charakteristische Betriebsverhalten der Feuerung vom Typ B auf den IVD-Versuchsstand untersucht. Die Versuchsergebnisse dienten zunächst der Optimierung des Betriebsverhaltens. Dazu musste sowohl die Regelung angepasst, als auch bauliche Veränderungen vorgenommen werden. Nachdem ein stabiler, kontinuierlicher Betrieb möglich war, wurde das Emissionsverhalten mit verschiedenen Brennstoffen in unterschiedlichen Lastzuständen untersucht. Die dabei eingesetzten Messtechniken sind nachfolgend beschrieben.

3.1.2 Teil II: Feuerung Typ C, D und E mit Luftstufung, Partikelabscheidung im Feuerraum, Reduktionszone und Gasrückführung

Die Untersuchungsergebnisse aus Teil I zeigten, dass zur weiteren Emissionsminderung der Primärteil der Feuerung neu gestaltet werden musste. Der Sekundärteil (die Ausbrandzone) vom Typ B wurde dabei beibehalten. Mit den neuen Feuerungen wurde zunächst das Betriebsverhalten untersucht. Mit Typ C & D war, trotz erheblicher Anstrengungen, kein stabiler kontinuierlicher Betrieb zu realisieren. Diese Konzepte wurden daraufhin verworfen. Erst mit dem Typ E gelang ein stabiler Betrieb über längere Zeiträume. Daraufhin wurde das Betriebsverhalten dieses Typs optimiert und das Emissionsverhalten untersucht. Diese Versuche wurden mit zerkleinerten, beschichteten Spanplatten, einem in der Holz- und Holzverarbeitenden Industrie durchaus üblichen, aber bezüglich der Emissionen sehr schwierigem Brennstoff, durchgeführt.

3.2 Messtechnik

Zur Beurteilung und Interpretation von Messergebnissen ist eine isoliert betrachtete Messgröße in der Regel nicht ausreichend. Die Aufgabe der Messtechnik besteht einerseits darin die Emissionen und andererseits die zur Charakterisierung der Randbedingungen notwendigen Betriebsgrößen zu erfassen. Grundsätzlich wird zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Messverfahren unterschieden. Die kontinuierlichen Verfahren ermöglichen eine zeitliche Auflösung der Messgröße, was zur Beschreibung von instationären Vorgängen wie z.B. zur Charakterisierung

risierung des Betriebsverhaltens einer Feuerungsanlage benötigt wird. Da nicht für alle Messgrößen kontinuierliche Messverfahren oder die entsprechenden Messgeräte zur Verfügung standen, musste bei den Untersuchungen auf diskontinuierliche Verfahren zurückgegriffen werden. Die diskontinuierlichen Verfahren liefern einen Durchschnittswert der Messgröße über den Probenahmezeitraum. Um eine klare Zuordnung der Messwerte zu den Randbedingungen zu ermöglichen, müssen diese im Probenahmezeitraum möglichst konstant gehalten werden.

3.2.1 Kontinuierlich gemessene Größen

Kontinuierlich gemessen wurden die Konzentrationen der gasförmigen Abgaskomponenten O_2 , CO_2 , CO , NO_x und C_nH_m . Zur Charakterisierung des Betriebsverhaltens wurden an verschiedenen Stellen der Feuerungsanlage Temperaturen mit Thermoelementen bestimmt und zusammen mit den gasförmigen Komponenten aufgezeichnet. Zur Ermittlung des Luftüberschusses ist es notwendig die zugeführten Luft- und Brennstoffmengen zu kennen. Die zugeführte Primär- und Sekundärluftmenge wurde mit Messblenden ermittelt. Dabei wurde der Druckabfall an einer Messblende mit einem Drucksensor in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die momentan umgesetzte Brennstoffmenge konnte nicht direkt bestimmt werden. Um dennoch Informationen über den Brennstoffumsatz zu erhalten, wurde die Kesselleistung mit einem Wärmezähler gemessen und aufgezeichnet. In stationären Betriebszuständen kann über die abgegebene Kesselleistung der Brennstoffumsatz berechnet werden. Laständerungen wirken sich mit zeitlicher Verzögerung auf die abgegebene Kesselleistung aus, da die Materialien in der Feuerung, z.B. die Schamottierung, Wärme einspeichern bzw. abgeben können. In **Tabelle 3.1** sind die Messverfahren, die verwendeten Messgeräte und der jeweilige Messbereich angegeben.

Tabelle 3.1: Messverfahren und Messgeräte zur Bestimmung der kontinuierlich gemessenen Größen an der Versuchsanlage

Größe	Messgerät/Messbereich	Messprinzip
CO_2/CO	Binos, Leybold Heraeus Messbereich: CO_2 : 0 – 20 Vol. % CO : 0 - 1000 ppm	Nichtdispersive Infrarot-Absorption
O_2	Oxynos, Leybold Heraeus Messbereich: 0 - 25 Vol. %	Paramagnetismus des Sauerstoffes
C_nH_m	FID Testa Messbereich: 0 - 100 ppm	Flammenionisation
NO, NO_2	Thermo Elektron, Modell 10B Messbereich: 0 - 500 ppm	Chemilumineszenz
Temperatur	Thermoelemente Widerstandsthermometer	Kontaktspannung Widerstandsänderung
Luftmenge	Blendenrohr \varnothing 100 mm	Druckabfall an der Messblende

3 Versuchsprogramm und Messtechnik

Der Messaufbau der kontinuierlichen Messgeräte ist in **Abbildung 3.1** skizziert. Mit Ausnahme der Messung der Gesamtkohlenwasserstoffe wurde mit einer Sonde, über den Querschnitt des Rauchgaskanals ein Teilstrom des Rauchgases entnommen und dieses über einen Messgaskühler den Messgeräten zugeführt. Zur Bestimmung der C_nH_m -Konzentrationen wurde das Probengas direkt über eine beheizte Messgasleitung dem Messgerät zugeführt, um eine Auskondensation von Kohlenwasserstoffen zu vermeiden. Außerdem wurden noch Anlagenkenngrößen wie die abgegebene Kesselleistung und diverse Temperaturen aufgezeichnet. Die Anordnung zur Bestimmung der zugeführten Luftmengen ist in **Abbildung 3.2** dargestellt.

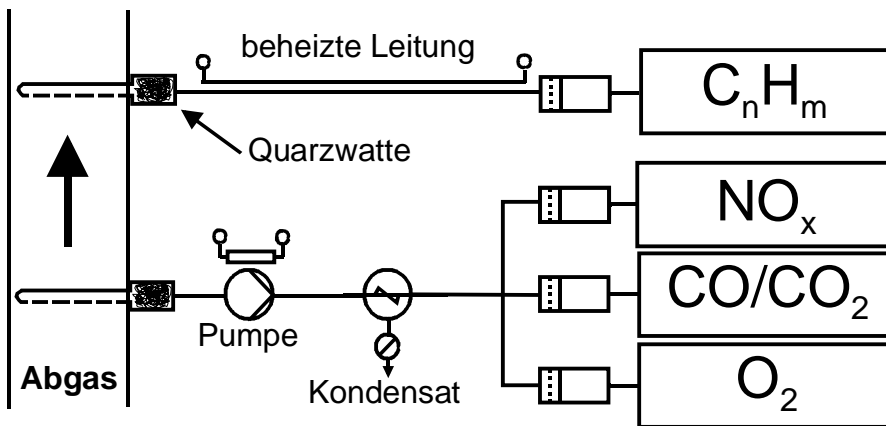


Abbildung 3.1: Probenahme und Messaufbau der kontinuierlichen Messgeräte im Abgas der Versuchsanlage

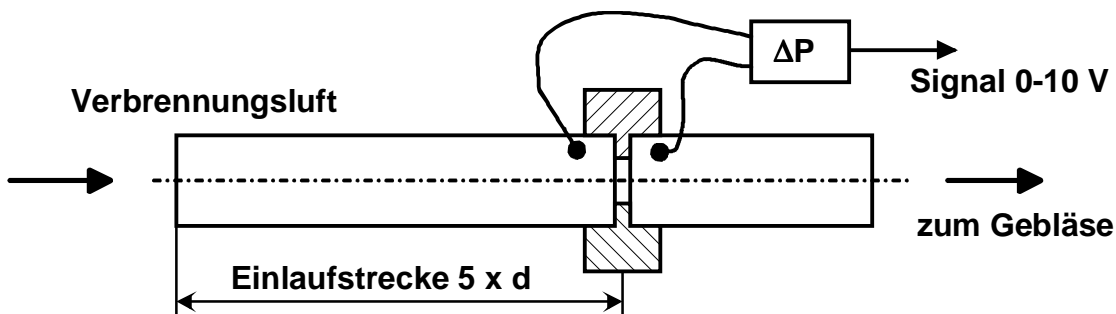


Abbildung 3.2: Blendenrohr zur Messung von Primär- und Sekundärluftmenge

Die verwendeten Blendenrohre hatten einen Innendurchmesser von 100 mm und konnten je nach zu messendem Volumenstrom mit unterschiedlichen Messblenden 50 oder 75 mm Innendurchmesser bestückt werden. Der Drucksensor hatte einen Messbereich von 0-250 Pa. Der Zusammenhang zwischen Druckabfall an der Blende und dem entsprechenden Volumenstrom wurde nach EN ISO 5167-1 berechnet. In **Abbildung 3.3** ist der Zusammenhang zwischen dem Ausgangssignal am Drucksensor und dem geförderten Volumenstrom dargestellt.

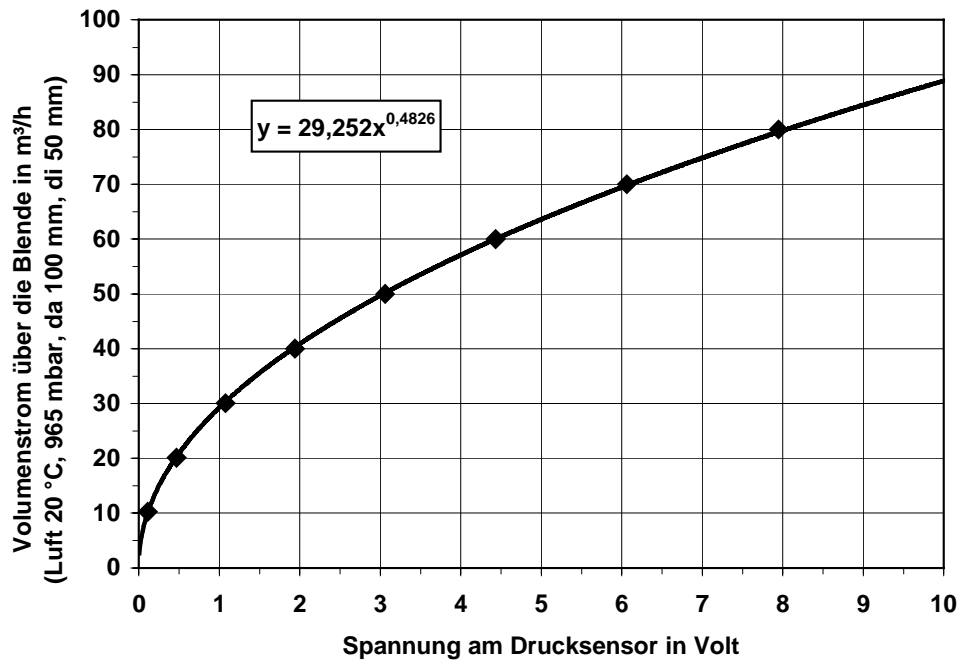


Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen dem Spannungssignal am Drucksensor und dem geförderten Volumenstrom

3.2.2 Diskontinuierlich gemessenen Größen

Bei den diskontinuierlich gemessenen Größen wurde analog den kontinuierlich gemessenen Größen mittels Sonde ein Teilstrom des Abgases entnommen und dieser über einen bestimmten Zeitraum durch die Probenahmeapparatur geleitet. In **Tabelle 3.2** sind die diskontinuierlich gemessenen Größen, die Probenahmeapparaturen und die verwendeten Messverfahren zusammengestellt.

Tabelle 3.2: Messverfahren zur Bestimmung der diskontinuierlich gemessenen Größen an der Versuchsanlage

Partikel	Gothe, Planfilterkopfgerät,	gravimetrische Bestimmung auf Quarzfaserfiltern nach VDI 2066
Korngrößen-Verteilung	Kaskadenimpaktor, Andersen Mark III Messbereich: 0,41 - 18,7 µm	Größenklassifizierung durch Trägheitskräfte, Glasfasersammelplatten, gravimetrische Bestimmung nach VDI 2066, Bl. 5
PCDD/F Bestimmung	Eigenbau – Probenahmeapparatur, gekühlte Sonde und Absorptionseinheit	Aufbereitung mit GC/MS-Analyse (Prof. Hagenmaier), nach VDI-Richtlinie 3499
Brennstofffeuchte u	Trockenofen (103 °C)	gravimetrisch nach Trocknung

3 Versuchsprogramm und Messtechnik

3.2.2.1 Messung der polychlorierten Dioxine und Furane

Die Apparatur zur Probenahme polychlorierter Dioxine und Furane (PCDD/F) ist in **Abbildung 3.4** skizziert und bestand entsprechend der VDI Richtlinie 3499 Blatt 3 aus einer wassergekühlten Sonde, Kondensationsgefäß und Impingerflaschen mit Absorptionslösung. Als Wasserkühlung diente ein Doppelrohr aus Edelstahl. Das eigentliche Sondenrohr (aus Quarzglas) ist in diesem Doppelrohr koaxial angeordnet und an beiden Enden durch O-Ringe geführt. Die Möglichkeit zur raschen Abkühlung des vorderen Sondenbereiches ist durch diese direkte Kühlung des Sondenrohres gegeben. Ein Kondensatabscheider und zwei in Reihe geschaltete Impingerflaschen, die 130 - 150 ml Ethylenglycolmonoethylether enthalten, sind der Sonde nachgeschaltet. Eine weitere Impingerflasche dient als Tropfenabscheider, anschließend folgt ein Trockenturm und der Gasvolumenzähler mit einer regelbaren Pumpe. Die bei den Messungen eingestellten Probenahmeparameter sind in **Tabelle 3.3** dargestellt. Die Probenahmeparameter und der Düsendurchmesser der Sonde wurden so gewählt, dass einerseits der für die Probenahmeapparatur optimale Durchfluß eingestellt werden konnte und andererseits die Teilstromentnahme weitgehend isokinetisch erfolgte.

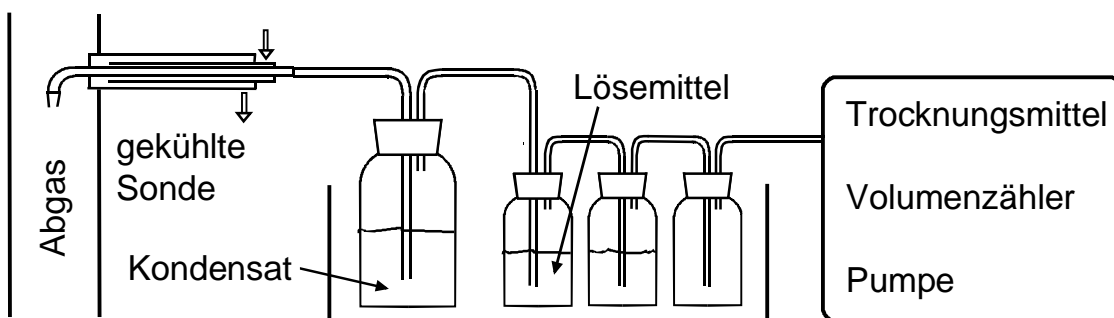


Abbildung 3.4: Probenahmeeinrichtung zur Bestimmung der PCDD/F-Konzentrationen im Abgas

Tabelle 3.3: Probenahmeparameter bei der PCDD/F-Probenahme

Absorptionsmittel	Ethylenglycolmonoethylether
Menge pro Flasche	4 x 130-150 ml
Gasvolumen	15 - 20 m ³ _{Norm}
Gasfluss	3,5 m ³ /h
Dauer	4 - 6 h

Um eine sichere Analyse der in sehr kleinen Konzentrationen vorliegenden PCDD/F im Abgas von Holzfeuerungen zu erzielen, mussten diese in der Absorptionslösung angereichert werden. Dazu wurden 15-20 m³ Abgas über die Probenahmeeinrichtung gesaugt, was eine lange Probe-

nahmezeit von 4-6 h bedingte. Zur Qualitätskontrolle der Probenahme wurden in der Kondensatflasche jeweils 2,5 ng an halbseitig mit C¹³ markiertem Tetra- und Hexachlordibenzodioxin zugegeben, anhand deren Wiederfindungsrate die Probe beurteilt werden konnte. Der Aufschluss und die Analyse der Proben wurde von Prof. Hagenmaier an der Universität Tübingen vorgenommen.

3.2.2.2 Partikelkonzentration und Korngrößenverteilung

Die Partikelkonzentrationen im Abgas wurden gravimetrisch mittels Partikelsammlung auf Planfiltern nach der VDI-Richtlinie 2066, Bl. 2 bestimmt. Dabei wurden Quarzfaserfilter (Munktell MK360, ϕ 50 mm) verwendet, die temperaturbeständig sind und keine Bindemittel enthalten. Die Partikelmessungen fanden direkt im Abgas im Temperaturbereich von 100 bis 150 °C statt. Sämtliche Filter wurden vor der Messung bei 120 °C ca. zwei Stunden ausgeheizt und vor der Wägung 24 Stunden im Exikkator äquilibriert.

In **Abbildung 3.5** ist der Messaufbau skizziert, wie er zur Bestimmung der Partikelkonzentration mittels Planfilter und der Partikel-Größenverteilung mittels Kaskadenimpaktor benutzt wurde.

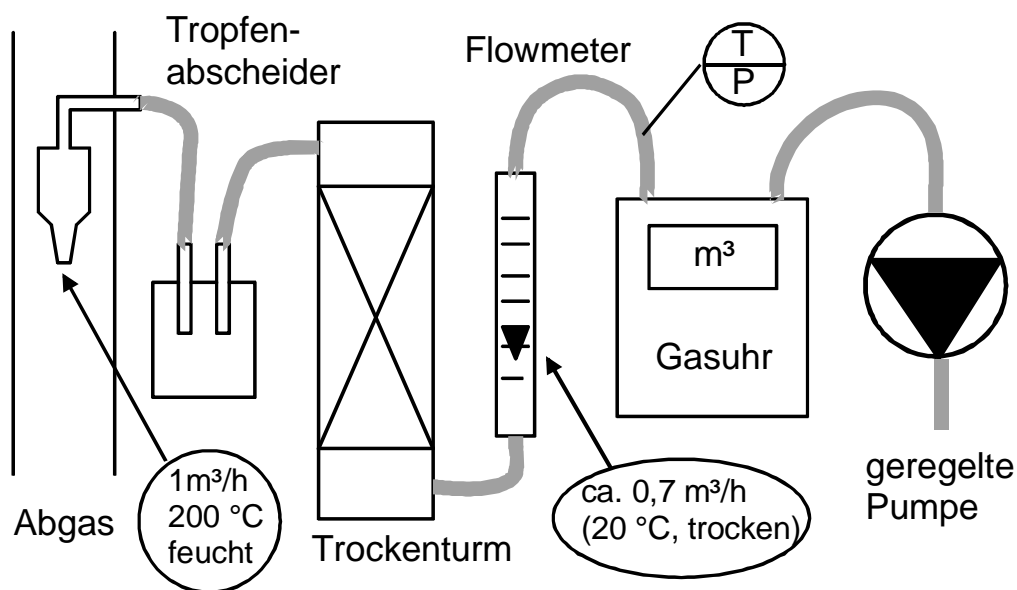


Abbildung 3.5: Probenahmeeinrichtung zur Bestimmung der Partikelkonzentration mittels Planfilter und zur Ermittlung der Partikel-Größenverteilung mittels Kaskadenimpaktor

Die Korngrößenverteilung der Partikel wurde nach VDI-Richtlinie 2206, Bl. 5 mittels Kaskadenimpaktor bestimmt. Dabei wurde die Korngrößenverteilung durch die Abscheidung und gravimetrische Bestimmung von Partikeln einer bestimmten Größe auf der entsprechenden Impak-

3 Versuchsprogramm und Messtechnik

torstufe ermittelt. Die Abscheidung der separierten Partikel im Impaktor erfolgte auf Glasfasergewebe das wie die Planfilter zur Bestimmung der Partikelkonzentration mit 120 °C ausgeheizt und äquilibriert wurde.

Das Prinzip der Kaskadenimpaktormessung lässt sich am Beispiel einer Impaktorstufe, die schematisch in **Abbildung 3.6** dargestellt ist, erläutern. Das partikelbeladene Gas aus der Teilstromentnahme wird durch eine Düse bzw. Düsenplatte (Hauptabmessungen: Düsenweite D , Düsenlänge L) geleitet. Im Abstand S zu der Düsenplatte befindet sich eine mit einer Sammelfolie belegte Prallplatte, die von dem Gasstrom angeströmt wird (Staupunktströmung) und eine Umlenkung bewirkt. Die Partikel besitzen eine größere Trägheit als das Gas und können aufgrund dessen der umgelenkten Gasstromlinie nicht in gleichem Maße folgen. Bei zu hoher Trägheit des Partikels wird dieses aus dem Gasstrom ausgetragen und auf der Sammelplatte abgeschieden. Durch eine Verringerung der Düsenweite je Impaktorstufe ergibt sich für jede nächste Impaktorstufe eine höhere Geschwindigkeit des durchgesaugten Gas-Partikelstromes. Mit zunehmender Gasgeschwindigkeit werden kleinere Partikel abgeschieden. Die in Reihe geschalteten Impaktionsstufen bewirken somit die Partikelklassierung. Zunächst erfolgt die Abscheidung der Partikel mit höheren Trägheitskräften in den Impaktorstufen mit großer Düsenweite und einer geringeren Geschwindigkeit. Feinere Partikel mit geringeren Trägheitskräften werden in den nachfolgenden Stufen des Kaskadenimpaktors abgeschieden, die durch eine geringere Düsenweite und eine höhere Gasgeschwindigkeit gekennzeichnet sind. Die nicht in den Impaktorstufen abgeschiedenen Partikel werden auf einem nachgeschalteten Endfilter gesammelt.

Das Partikel-Abscheideverhalten ist in Form von Trennlinien für die einzelnen Impaktorstufen in **Abbildung 3.7** dargestellt. Die ideale Trennlinie für den Abscheidegrad einer Kornfraktion würde durch eine Sprungfunktion abgebildet. Real wird diese Sprungfunktion nicht erreicht, stellt jedoch nach Berechnungen von MARPLE & LUI (1974) unter bestimmten Voraussetzungen näherungsweise eine Sprungfunktion dar. Die Korngröße, die zu 50 % auf einer Impaktorstufe abgeschieden wird, entspricht hierbei per Definition dem Trenndurchmesser (cut off). Durch Wägung der Sammelplatten und des Endfilters lässt sich schließlich die Partikel-Größenverteilung ermitteln. Für die in **Abbildung 3.7** beispielhaft gezeigten Trennlinien kann auf diese Weise für jede Impaktorstufe ein aerodynamischer Grenzkorndurchmesser d_{50} angegeben werden, der gerade dem Abscheidegrad von 50 % entspricht. Dieser aerodynamische Grenzkorndurchmesser der einzelnen Impaktorstufen muss für jede einzelne Impaktormessung neu berechnet werden, da der d_{50} -Durchmesser von der Strömungsgeschwindigkeit und den Stoffdaten des Gases abhängt. Da die Partikelabscheidung auf den einzelnen Impaktorstufen auf dem aerodynamischen Prinzip beruht, sollte der Volumenstrom, der über den Impaktor gesaugt wird, möglichst konstant bei 1 m³/h (impaktorabhängig) liegen. Außerdem sollte die Absauggeschwindigkeit des Teilstromes gleich (isokinetisch) oder etwas höher als die Abgasgeschwindigkeit sein.

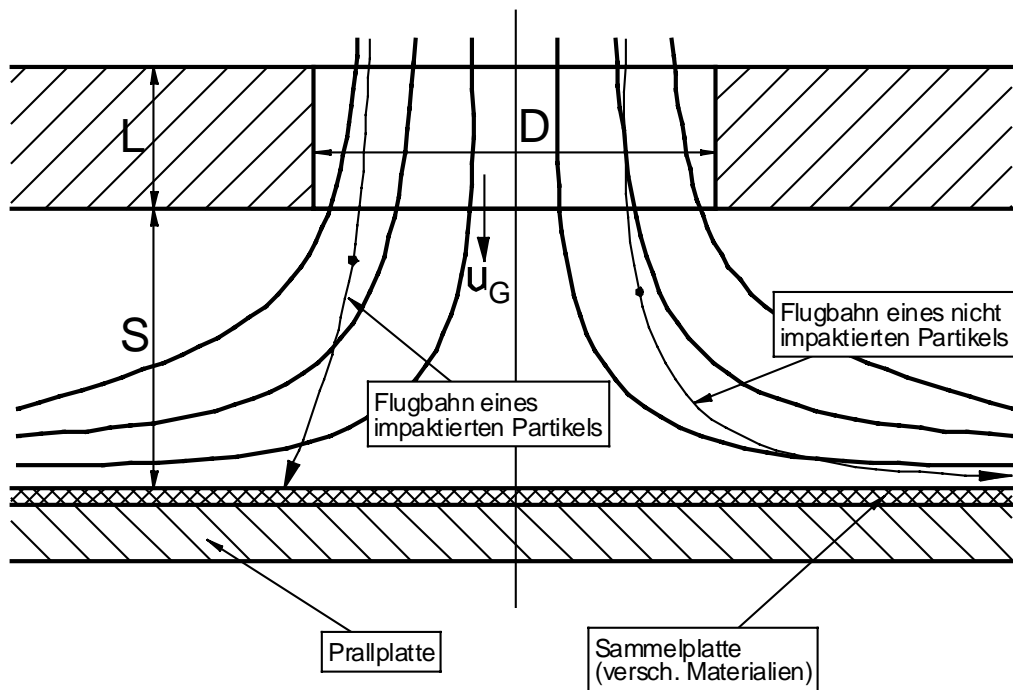


Abbildung 3.6: Prinzip der Impaktion nach LÜTZKE & MUHR (1981)

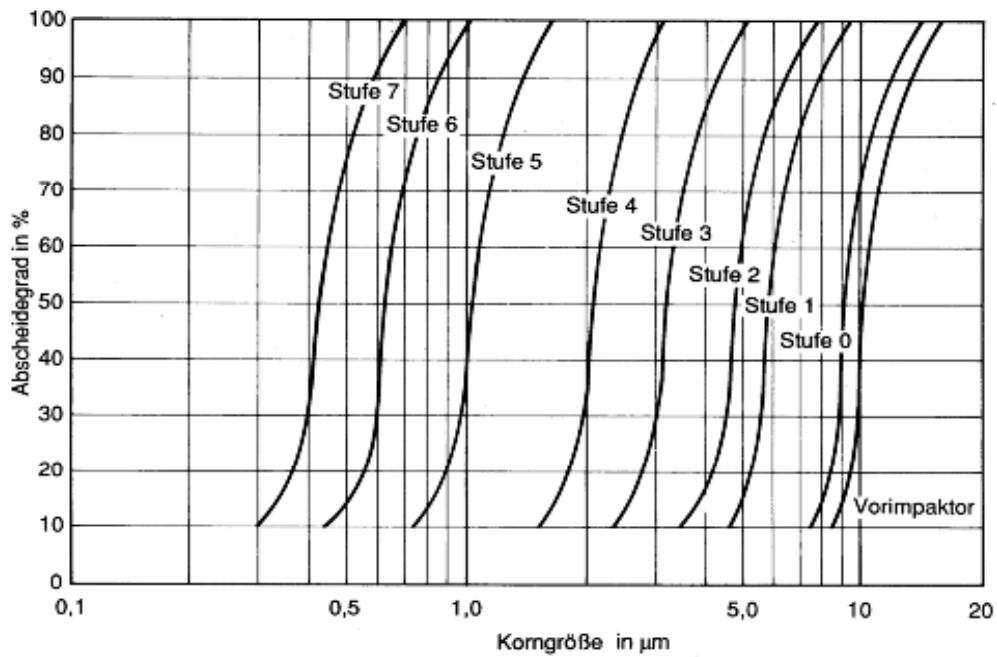


Abbildung 3.7: Trennlinien der einzelnen Impaktorstufen (SCHÄFER 1979)

3 Versuchsprogramm und Messtechnik

Das Ergebnis einer Impaktormessung einschließlich der Berechnung der aerodynamischen Grenzkorndurchmesser d_{50} der einzelnen Impaktorstufen ist in **Tabelle 3.4** beispielhaft für eine Messung im Abgas einer 175 kW Unterschubfeuerung dargestellt. Die Feuerung wurde mit naturbelassenen Holzhackschnitzeln bei Volllast betrieben.

Zur graphischen Darstellung des Ergebnisses einer Impaktormessung können die in **Tabelle 3.4** aufgeführten Größen herangezogen werden. Am anschaulichsten ist die Darstellung der auf den einzelnen Impaktorstufen abgeschiedenen relativen Partikelmassen in % der Gesamtmasse, wie in **Abbildung 3.8** dargestellt. Auf der x-Achse ist der Bereich der aerodynamischen Durchmesser der auf den einzelnen Impaktorstufen impaktierten Partikel angegeben. Diese Bereiche werden von aerodynamischen Trenndurchmessern der einzelnen Impaktorstufen begrenzt, und müssen für jede Messung neu berechnet werden. Wenn bei der Impaktormessung der tatsächliche Volumenstrom über den Impaktor näherungsweise den Vorgaben von 1 m³/h entspricht, weichen die berechneten aerodynamischen Trenndurchmesser nur unwesentlich von den im **Abbildung 3.8** dargestellten Korngrößenbereichen ab. Dies ermöglicht eine zusammenfassende Darstellung mehrerer Impaktormessungen in einem Diagramm.

Tabelle 3.4: Ergebnisse einer Impaktormessung, 175 kW Unterschubfeuerung mit Zyklonabscheider (Berechnung der aerodynamischen Trenndurchmesser d_{50} der einzelnen Impaktorstufen nach VDI 2066 Blatt 5)

Stufe	ϕd_{50}	Partikelgrößen Bereich		impaktierte Masse	Massenanteil	Durchgangssumme	Rückstandssumme
	μm	μm	μm	mg	%	%	%
1	11,29	> 11,29		1,99	6,2	6	100
2	7,03	7,03	11,29	0,66	2,1	8	94
3	4,75	4,75	7,03	0,96	3,0	11	92
4	3,23	3,23	4,75	1,02	3,2	14	89
5	2,06	2,06	3,23	0,97	3,0	17	86
6	1,01	1,01	2,06	0,88	2,7	20	83
7	0,61	0,61	1,01	0,71	2,2	22	80
8	0,44	0,44	0,61	1,81	5,6	28	78
EF		< 0,44		23,11	72,0	100	72

EF = Endfilter

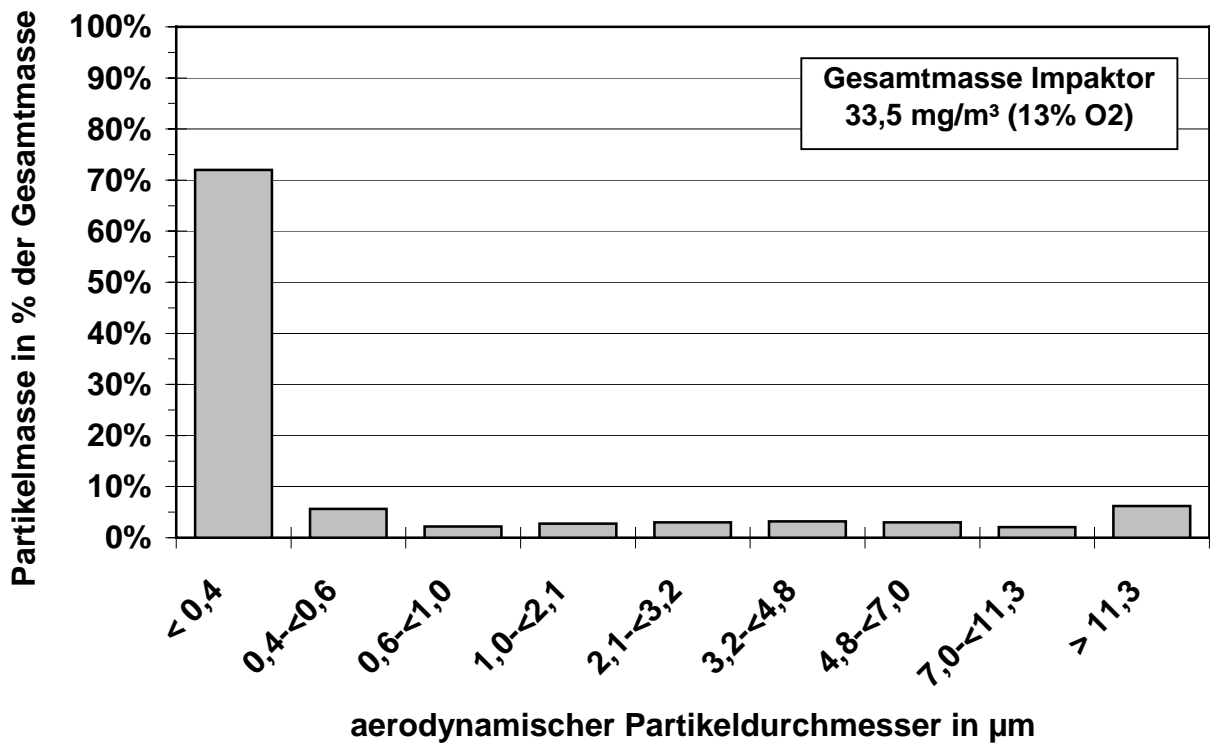


Abbildung 3.8: Partikel-Größenverteilung am Beispiel einer 175 kW Unterschubfeuerung mit Zyklonabscheider im Vollastbetrieb mit naturbelassenen Hackschnitzeln

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 CO-Konzentrationen

Die CO-Konzentrationen können als Kriterium für die Ausbrandqualität der gasförmigen Verbindungen herangezogen werden. In **Abbildung 2.1** sind die CO-Konzentrationen der Feuerungskonzepte A - E 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.

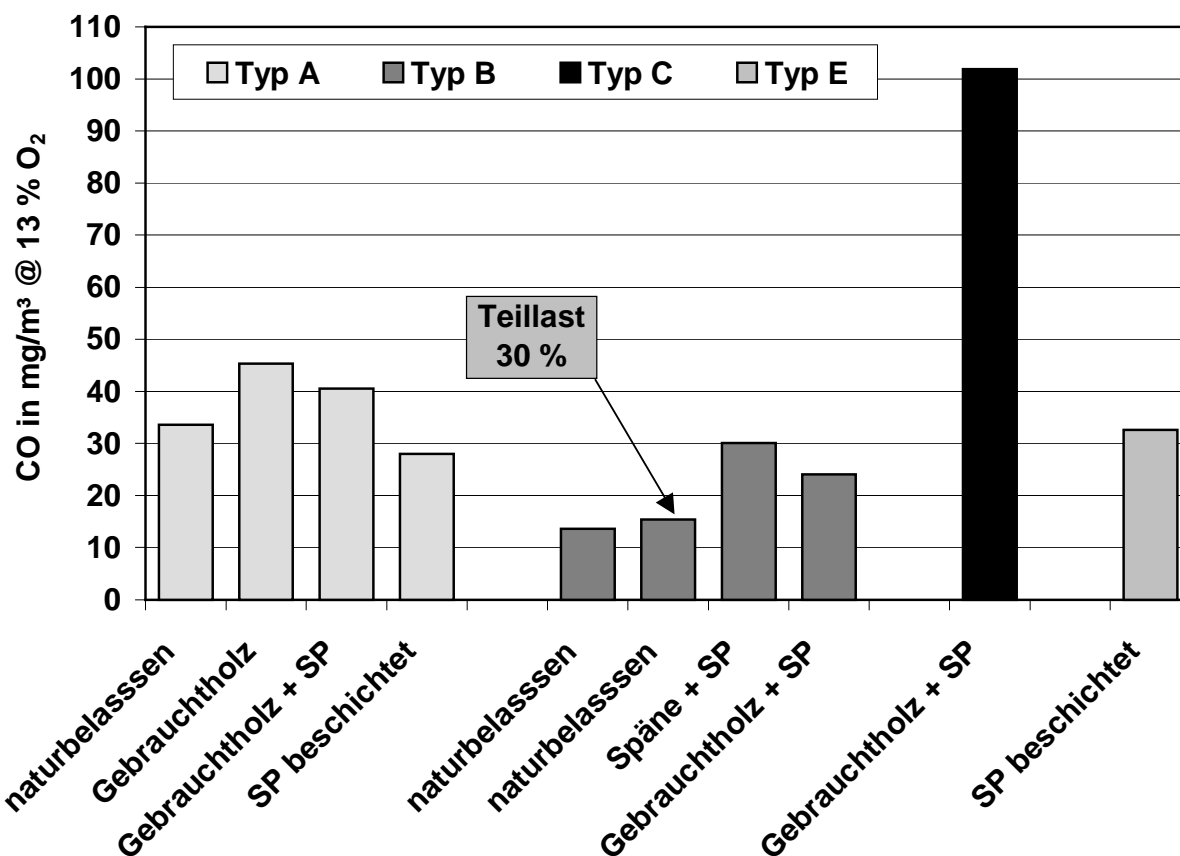


Abbildung 4.1: Mittlere CO-Konzentrationen im kontinuierlichen Lastbetrieb der verschiedenen Feuerungskonzepte (SP = Spanplatten)

Mit den Feuerungskonzepten Typ C + D konnte kein stabiler kontinuierlicher Lastbetrieb realisiert werden. Bei beiden Varianten war der Brennstoffumsatz unzureichend. Der zugeführte Brennstoff brannte nicht gleichmäßig ab und die Durchmischung von brennbaren Gasen und Verbrennungsluft war unzureichend. Während des Betriebs kam es zu trotz eines hohen mittleren Luftüberschusses zu kurzzeitigen Luftmangelsituationen mit CO-Emissionen, was sich in dem vergleichsweise hohen CO-Mittelwert in **Abbildung 4.1** widerspiegelt.

Beim Feuerungskonzept (Typ E) konnten diese Probleme durch eine Neugestaltung der Brennstoff- und Luftzufuhr beseitigt werden. Bezüglich des Betriebsverhaltens und der Verbrennung der gasförmigen Bestandteile konnten mit dem Typ E vergleichbare gute Eigenschaften wie mit Typ B erzielt werden.

4.2 Partikel

4.2.1 Entstehung und Zusammensetzung

Die Gesamtpartikelemissionen im Abgas von Holzfeuerungen können im wesentlichen aus folgenden Hauptbestandteilen bestehen:

Partikel aus unvollständiger Verbrennung:

- kohlenstoffhaltige Zersetzungsprodukte aus dem Brennstoff (Ruß)
- kohlenstoffhaltige kondensierte Syntheseprodukte (Teertröpfchen)
- unvollständig verbrannte Brennstoffteilchen (grob)

Partikel aus Brennstoffinhaltsstoffen:

- mit der Strömung ausgetragene Ascheteilchen (grob - fein)
- kondensierte Salzverbindungen (sehr fein)
- Metallverbindungen (Salze, Oxide)

Die Partikel im Abgas von Holzfeuerungen liegen in der Regel nicht in Form homogener Teilchen einer einzelnen Substanz vor, sondern sind aus den obigen Stoffen zusammengesetzt. Bei der Abkühlung der Rauchgase kann es z.B. zur Kondensation von Kohlenwasserstoffen und Salzen auf bereits bestehenden Asche- oder Rußpartikeln kommen. In **Abbildung 4.2** ist eine typische Brennstoff- und Abgaszusammensetzung beim Verbrennen von relativ trockenen, stick-

4 Untersuchungsergebnisse

stoffreichen Brennstoffen (bis ca. 4 %) abgebildet. Die im Abgas enthaltenen Partikel können dabei aus unterschiedlichen Austrags- und Bildungsmechanismen herrühren, wie es in **Abbildung 4.2** angedeutet ist.

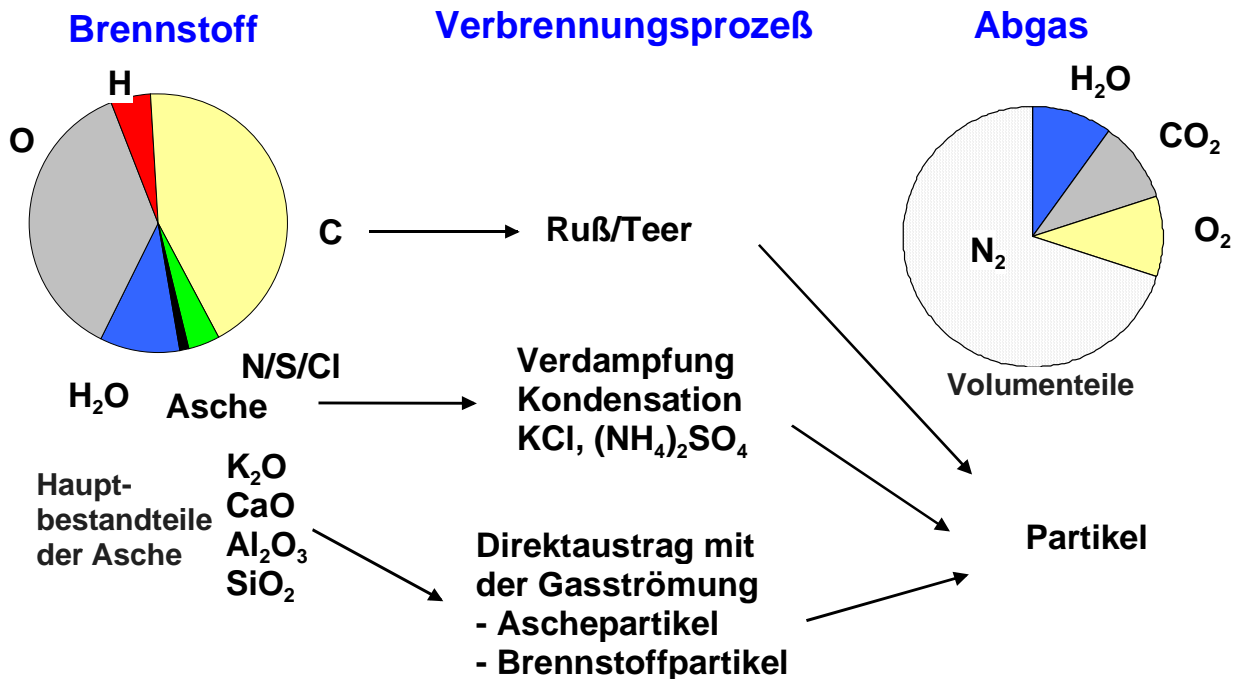


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Partikelemission bei der Holzverbrennung mit Brennstoff- und Aschezusammensetzung

Bei Feuerungen, die gute Ausbrandbedingungen aufweisen ($\text{CO} < 100 \text{ mg/m}^3$), sind Ruß und Teer von untergeordneter Bedeutung. Dort spielen vor allem der Direktaustrag von Asche- und Brennstoffpartikeln sowie Verdampfungs- und Kondensationsvorgänge die dominierende Rolle.

Auf der lichtmikroskopischen Aufnahme **Abbildung 4.3** eines Planfilters sind z.B. unvollständig verbrannte Brennstoffteilchen an ihrer noch erkennbaren Holzstruktur sowie aufgeschmolzene Kügelchen mit einem Durchmesser von ca. $50 \mu\text{m}$ zu erkennen. Außerdem sind dort noch größere Agglomerate aus teils unförmigen, teils runden Partikeln vorhanden. Die abgebildeten groben Partikel werden üblicherweise mit Trägheitsabscheidern nach der Feuerung zurückgehalten. Die feinen Partikel, die den gesamten Planfilter als graue Grundschicht bedecken, werden als "Feinstaub" emittiert.

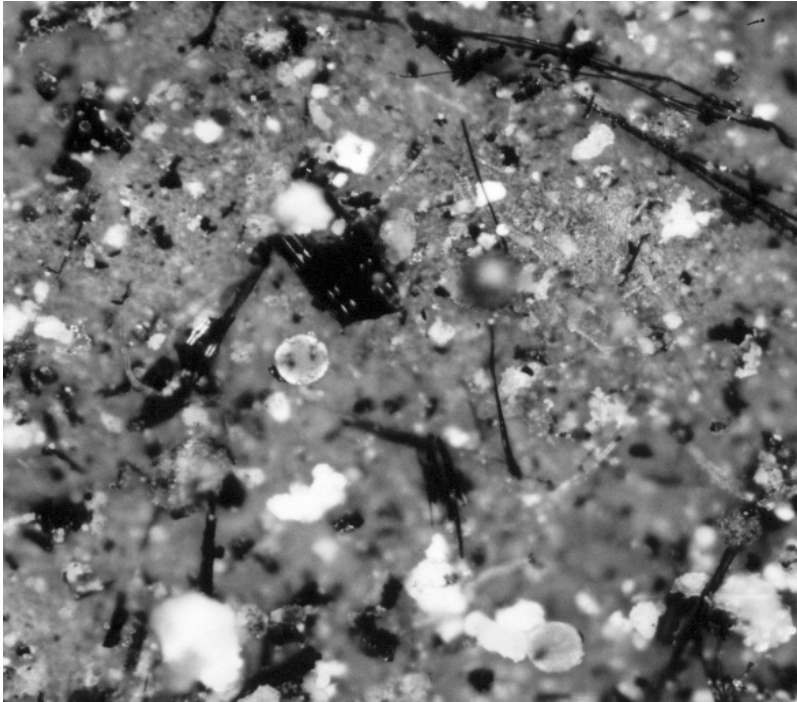


Abbildung 4.3: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Planfilters, beladen im Abgas einer Unterschubfeuerung (800 kW) beim Verbrennen von Gebrauchtholz

4.2.2 Gesamtpartikel-Emission

Die in **Abbildung 4.4** dargestellten Gesamt-Partikelkonzentrationen im Abgas wurden nach VDI 2066 mittels Planfilter gravimetrisch bestimmt. Dargestellt sind Mittelwerte, die jeweils 2 - 4 Planfilter repräsentieren, welche 15 min mit einem Teilstrom des Abgases beladen wurden. Die Messungen fanden unter vergleichbaren Randbedingungen statt. Die CO-Konzentrationen lagen dabei im Bereich $< 100 \text{ mg/m}^3$, so dass keine Kohlenwasserstoffe im Abgas vorhanden waren, die z.B. als Teer auskondensieren können.

Mit naturbelassenem Holz lagen die Partikelkonzentrationen bei beiden Feuerungstypen A & B mit ca. 20 mg/m^3 auf sehr niedrigem Niveau. Hier ist anzumerken, dass sich naturbelassene Brennstoffsortimente bezüglich der Partikelemissionen erheblich unterscheiden können. Je nach Feinanteil und Änderung der Brennstoffzusammensetzung, wie z.B. durch einen höheren Rinden- oder Nadelanteil, können die Partikelemissionen auch bei naturbelassenem Brennstoff wesentlich höher ausfallen. Dieser Effekt wird besonders bei den dargestellten Partikelkonzentrationen der anderen Brennstoffsortimente deutlich, die bei beiden Feuerungstypen deutlich höher liegen.

4 Untersuchungsergebnisse

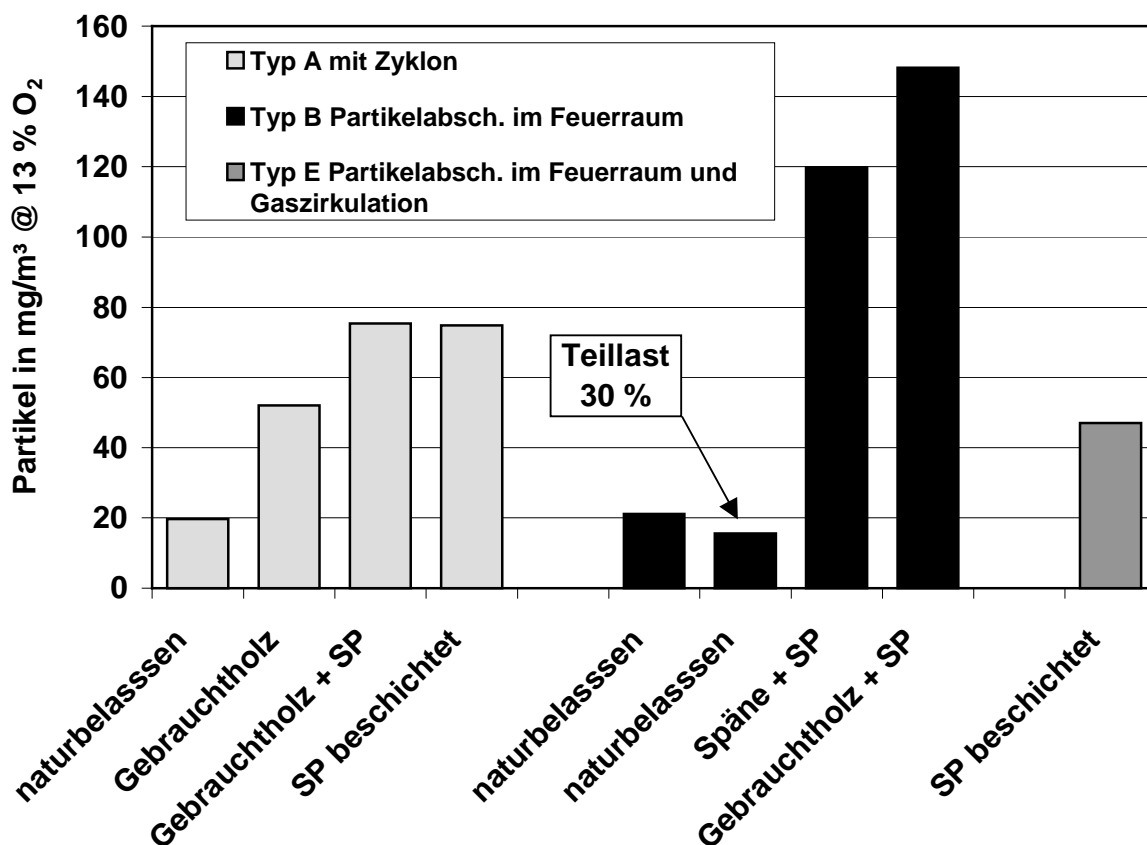


Abbildung 4.4: Mittlere Gesamt-Partikelkonzentrationen der untersuchten Feuerungskonzepte mit verschiedenen Brennstoffen (SP = Spanplatten)

4.2.3 Partikel-Größenverteilung

Die Partikelemissionen im Abgas von Holzfeuerungen unterliegen vielfältigen Einflussfaktoren. Mit naturbelassenen Hackschnitzeln (homogene Stückgröße, geringer Feinanteil) wurden mit den unterschiedlichen Feuerungskonzepten (Typ A und B) vergleichbare Gesamt-Partikelkonzentrationen im Abgas erreicht, obwohl sich beide Konzepte bezüglich der Art der Partikelabscheidung grundlegend unterscheiden. Beim Typ A werden grobe, unvollständig verbrannte Partikel nach dem Kessel in einem Zyklon abgeschieden. Die Analyse mehrerer Zyklonaschen ergab sehr hohe Restkohlenstoffgehalte von 10-30 %. Diese kohlenstoffhaltigen Partikel sollen beim Typ B in der heißen Ausbrandzone des Feuerraums verbleiben bis sie vollständig verbrannt sind.

In **Abbildung 4.5** sind Partikel-Größenverteilungen der unterschiedlichen Feuerungskonzepte (Typ A und B) mit vergleichbarem Brennstoff im Nennlastbetrieb abgebildet. Die beiden Verteilungen unterscheiden sich nur geringfügig bei den Korngrößen im Bereich aerodynamischer

Durchmesser um 5 μm . Dort ist das Abscheideverhalten des Zyklons besser als die Abscheidung im Feuerraum, was aber nicht sonderlich ins Gewicht fällt, da der Hauptteil der emittierten Partikelmasse, mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser $< 1\mu\text{m}$, in den Bereich PM_1 fällt. Diese Feinstpartikel können beide Abscheidesysteme relativ ungehindert passieren, was an dem hohen Massenanteil in den Partikel-Größenverteilungen deutlich wird.

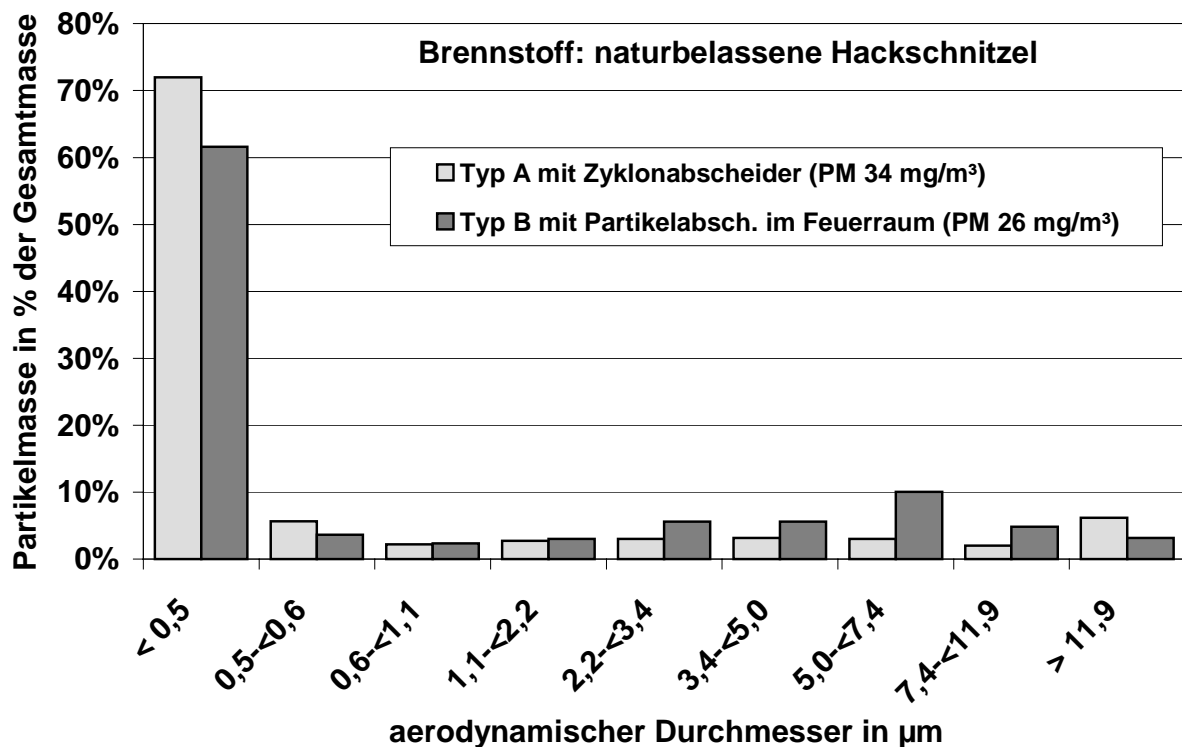


Abbildung 4.5: Vergleich der Partikel-Größenverteilung der Feuerungskonzepte Typ A mit Zyklonabscheider und Typ B mit Partikelabscheidung im zylindrischen Feuerraum. Die Gesamt-Partikelkonzentration auf den Impaktoren ist als PM bezüglich 13 % O_2 angegeben.

Mit anderen Brennstoffen wurden bei beiden Feuerungstypen wesentlich höhere Partikelkonzentrationen im Abgas gemessen als bei naturbelassenem Holz. Sowohl aus der Vergleichbarkeit der Partikel-Größenverteilung als auch an den Gesamtpartikel-Konzentrationen wird deutlich, dass das angestrebte Ziel, die groben unverbrannten Partikel bereits im Feuerraum abzuscheiden, mit dem Feuerungskonzept Typ B erreicht wurde. Auf einen nachgeschalteten Zyklonabscheider kann hier verzichtet werden, was eine erhebliche Platz- und Kostenersparnis bewirkt.

Beim Einsatz anderer Brennstoffe wie z.B. beim Verbrennen von beschichteten Spanplatten veränderten sich die Partikel-Größenverteilungen im Vergleich zu naturbelassenem Holz nur geringfügig. In **Abbildung 4.6** sind die Partikel-Größenverteilungen der Feuerungskonzepte (Typ A und E) gegenübergestellt. Deutliche Unterschiede zwischen den beiden Verteilungen sind nur im Bereich aerodynamischer Partikeldurchmesser $< 1\mu\text{m}$ zu erkennen. Partikel in diesem Bereich können in beiden Konzepten nicht abgeschieden werden, weshalb die Unterschiede entwe-

4 Untersuchungsergebnisse

der in den Brennstoffeigenschaften (die Brennstoffe waren vergleichbar, aber aus unterschiedlichen Chargen) oder den Verbrennungsbedingungen zu suchen sind. Bemerkenswert ist hier die Gesamt-Partikelkonzentration von 30 mg/m^3 mit dem Feuerungskonzept E, wie sie eigentlich nur beim Verbrennen von naturbelassenem Brennstoff mit homogener Stückgröße zu erwarten wäre.

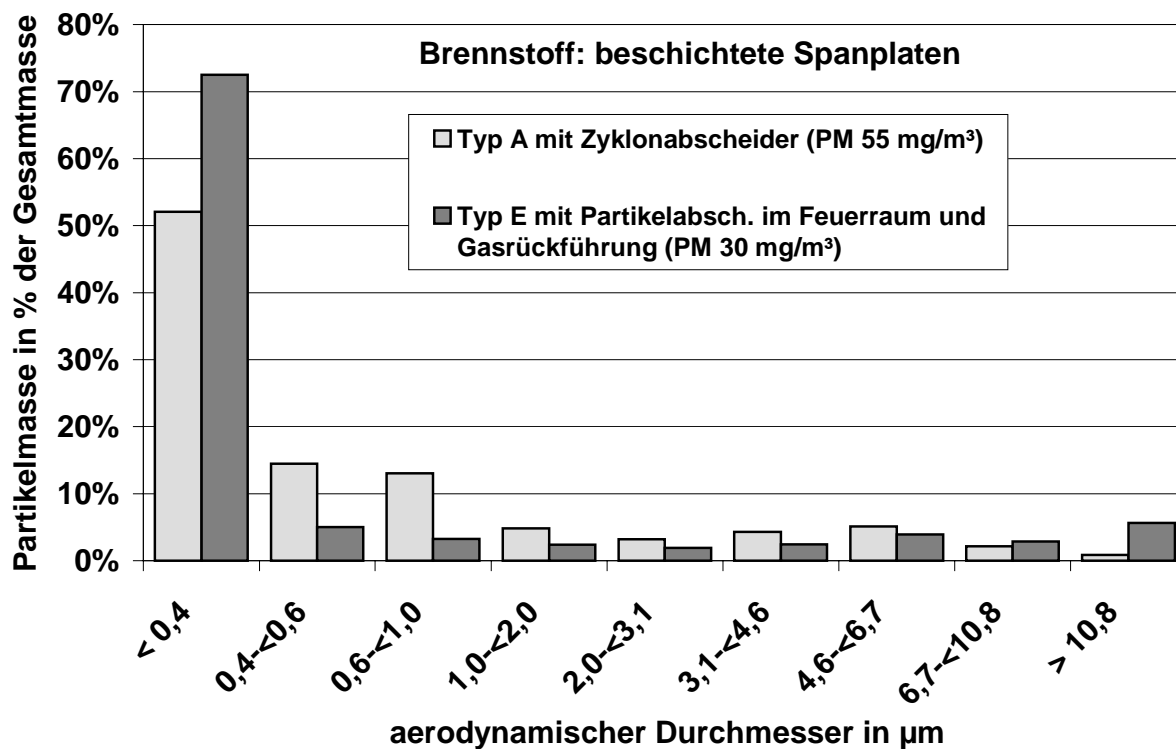


Abbildung 4.6: Vergleich der Partikel-Größenverteilung der Feuerungskonzepte Typ A mit Zyklonabscheider und Typ E mit Partikelabscheidung im zylindrischen Feuerraum und Gasrückführung. Die Gesamt-Partikelkonzentration auf den Impaktoren ist als PM bezüglich 13 % O_2 angegeben.

Die in den Abbildungen 4.5 und 4.6 angegebenen Gesamt-Partikelkonzentrationen beziehen sich auf die jeweiligen Impaktoren und können daher von den Werten in Abbildung 4.4 abweichen, da dort die Mittelwerte aus Planfiltermessungen dargestellt sind.

4.2.4 Möglichkeiten zur primären Minderung der Partikelemissionen

Die drei wichtigsten Bildungswege von Partikeln im Abgas wurden bereits in **Abbildung 4.2** skizziert. Entsprechend besteht die Gesamtpartikelmasse aus den drei folgenden Hauptkomponenten:

- Produkte unvollständiger Verbrennung (Ruß, Teer, unvollständig verbrannte Brennstoffteilchen).

- Asche und Brennstoffpartikel, die mit der Gasströmung aus dem Brennstoffbett ausgetragen wurden.
- Produkte aus Verdampfung und Kondensation von Brennstoffinhaltsstoffen und ihren Verbindungen (Salze, Metalloxide).

Nicht alle Komponenten lassen sich durch Primärmaßnahmen gleichermaßen beeinflussen. Der Anteil von Produkten aus unvollständiger Verbrennung kann durch eine optimierte Verbrennung fast vollständig vermieden werden. Mit einer entsprechenden Feuerraumgestaltung und einer Verbrennungsregelung muss dafür gesorgt werden, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichende Temperatur, Verweilzeit und Durchmischung im Feuerraum vorhanden sind. Wie auch aus den Darstellungen des Betriebsverhaltens (Kapitel 2) deutlich wird, ist immer eine kontinuierliche Betriebsweise anzustreben. Im Stand-by-Betrieb sind die Voraussetzungen für eine vollständige Verbrennung meist nicht mehr gegeben. Beim Einsatz von trockenen Brennstoffen kann in diesem Fall die Feuerung ganz abgeschaltet werden, da hier der Zündvorgang nur wenig Zeit in Anspruch nimmt.

Auch der Anteil der Gesamtpartikelmasse der aus dem Austrag von Asche- und Brennstoffteilchen aus der Brennstoffschüttung resultiert, lässt sich durch Primärmaßnahmen erheblich verringern. Dazu muss im Bereich der Brennstoffschüttung die Strömungsgeschwindigkeit verringert werden. Durch die Maßnahme der gestuften Verbrennung wird im Bereich der Brennstoffschüttung nur ein Teil der Verbrennungsluft zugeführt, was dort eine erhebliche Verminderung der Strömungsgeschwindigkeiten mit sich bringt. Außerdem muss die Verbrennungsluft in diesem Bereich gleichmäßig, flächig verteilt zugeführt werden.

Der Anteil der Partikelmasse aus Verdampfung und Kondensation von Brennstoffinhaltsstoffen lässt sich durch Primärmaßnahmen nur unwesentlich beeinflussen. Dieser Anteil wird hauptsächlich von der Brennstoffzusammensetzung und den Brennstoffinhaltsstoffen bestimmt. Besonders bei chlor- und kaliumreichen Brennstoffen kommt es zu solchen Verdampfungs- und Kondensationserscheinungen. Dem kann mit möglichst niedrigen Temperaturen im Bereich der Brennstoffschüttung und evtl. durch die Zugabe von Brennstoffadditiven entgegengewirkt werden (MÜLLER 1999). Letzteres erfordert allerdings eine genaue und homogen verteilte Dosierung der Additive, was für Feuerungsanlagen kleiner 1 MW einen erheblichen Zusatzaufwand bezüglich Anschaffungs- und Betriebskosten darstellt.

HASLER & NUSSBAUMER (1997) beschreiben einen näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen dem geschätzten Aschegehalt verschiedener Brennstoffe und den Staubgehalten im Abgas einer Vorschubrostfeuerung. Die Versuche wurden unter vergleichbar guten Verbrennungsbedingungen, mit CO-Konzentrationen $< 5 \text{ mg/m}^3$ durchgeführt, so dass die Anteile an Produkten aus unvollständiger Verbrennung an der Partikelmasse als relativ gering angenommen

4 Untersuchungsergebnisse

werden können. Dieser Zusammenhang ist in **Abbildung 4.7** dargestellt. Auffallend daran ist der mit 1 % sehr niedrig geschätzte Aschegehalt des Brennstoffgemisches aus Rinde und Holz, da der Aschegehalt von Rinde üblicherweise 5 – 10 % beträgt.

Zum Vergleich wurden in **Abbildung 4.7** die Ergebnisse aus eigenen Messungen an einer Vorschubrostfeuerung (240 kW) mit verschiedenen Brennstoffen im Diagramm eingetragen. Die Aschegehalte der Brennstoffe wurden nicht geschätzt, sondern mittels Brennstoffanalyse bestimmt. Auch dort tendieren die Gesamt-Partikelkonzentrationen mit zunehmendem Aschegehalt zu höheren Werten, jedoch nicht so ausgeprägt wie bei den Untersuchungen von HASLER & NUSSBAUMER (1997). Daraus lässt sich schließen, dass zwar grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Gesamtpartikel-Konzentration besteht, dieser aber sehr stark von den jeweiligen Randbedingungen der Feuerungsanlage abhängt. Da sich die Gesamtpartikelmasse im wesentlichen aus drei Quellen unterschiedlichen Ursprungs zusammensetzt, wird der Einfluss des Aschegehalts evtl. überdeckt. Eine isolierte Betrachtung des Partikelanteils der aus Verdampfungs- und Kondensationsvorgängen aus Brennstoffinhaltsstoffen resultiert, würde hier einen bessern Zusammenhang liefern. Mit derzeit verfügbarer Partikel Messtechnik ist es nicht möglich diesen Anteil isoliert zu betrachten.

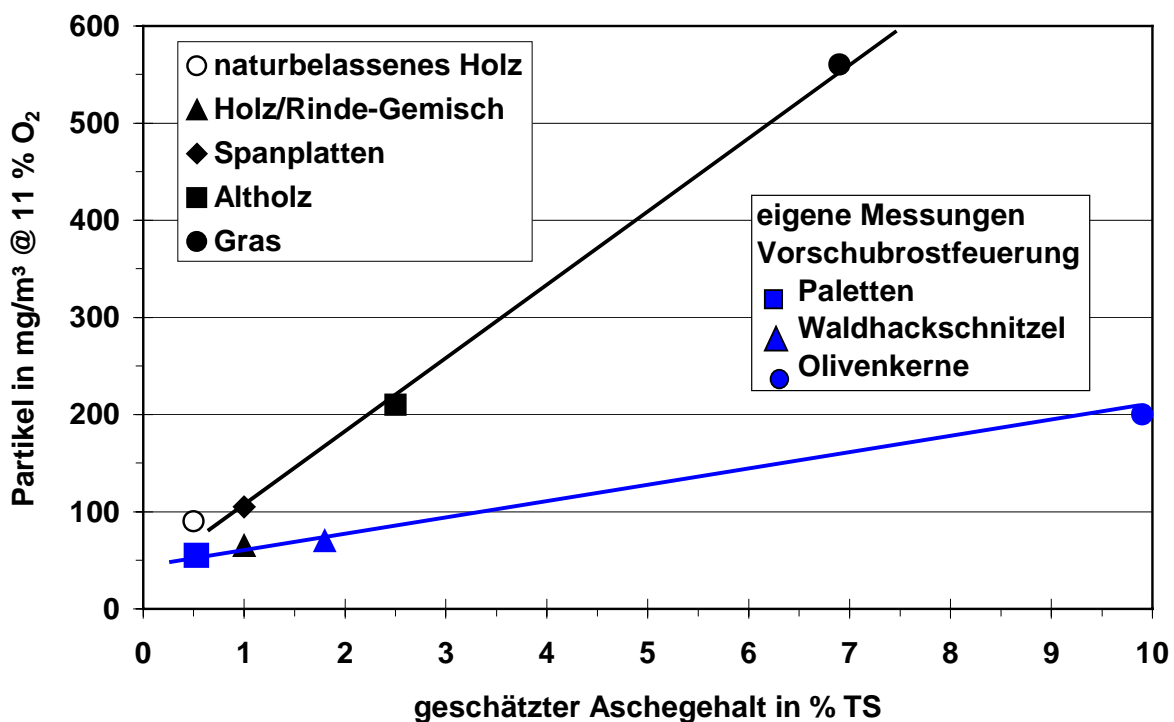


Abbildung 4.7: Zusammenhang zwischen Gesamtpartikel-Konzentration im Abgas von Vorschubrostfeuerungen und den Aschegehalten der eingesetzten Brennstoffe. Vergleich der Darstellung von HASLER & NUSSBAUMER (1997) mit eigenen Messungen.

4.3 Primäre NO_x-Minderung

Im Feuerungsanlagenbestand der holzbe- und verarbeitenden Industrie sind bislang kaum Maßnahmen zur primären NO_x-Minderung verwirklicht, obwohl die Grundlagen hierzu weitgehend bekannt sind. Gleichzeitig werden hier immer mehr Spanplatten eingesetzt was einen höheren N-Gehalt im Brennstoff und somit auch höhere NO_x-Konzentrationen im Abgas mit sich bringt. Dieser nachteiligen Entwicklung kann mit Maßnahmen zur primären NO_x-Minderung entgegen gewirkt werden.

4.3.1 Grundlagen

Die Stickstoffoxide (NO_x) angegeben als Summe aus NO und NO₂, stammen bei Verbrennungsprozessen entweder aus der Oxidation des Luftstickstoffs oder aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff. Bei der Entstehung der Stickstoffoxide wird unterschieden in:

- Thermisches NO, Bildung durch Oxidation des Luftstickstoffes erst ab Temperaturen um 1300 °C.
- Promptes NO, Bildung nur bei sehr hohen Temperaturen (1500 °C) in Anwesenheit von Kohlenwasserstoffradikalen (z.B. bei Gasturbinen).
- Brennstoff NO, Bildung hauptsächlich aus Stickstoffverbindungen des Brennstoffs.

In **Abbildung 4.8** ist der Zusammenhang zwischen den zu erwartenden Stickstoffkonzentrationen im Abgas, der Feuerraumtemperatur und verschiedenen Holzbrennstoffen mit unterschiedlichen Stickstoffgehalten dargestellt (NUSSBAUMER 1997). Das "Prompte NO" spielt wegen der relativ geringen Flammtemperaturen bei Holzfeuerungen praktisch keine Rolle. Auch das "Thermische NO" trägt nur zu einem kleinen Teil zu den NO_x-Konzentrationen im Abgas bei.

4 Untersuchungsergebnisse

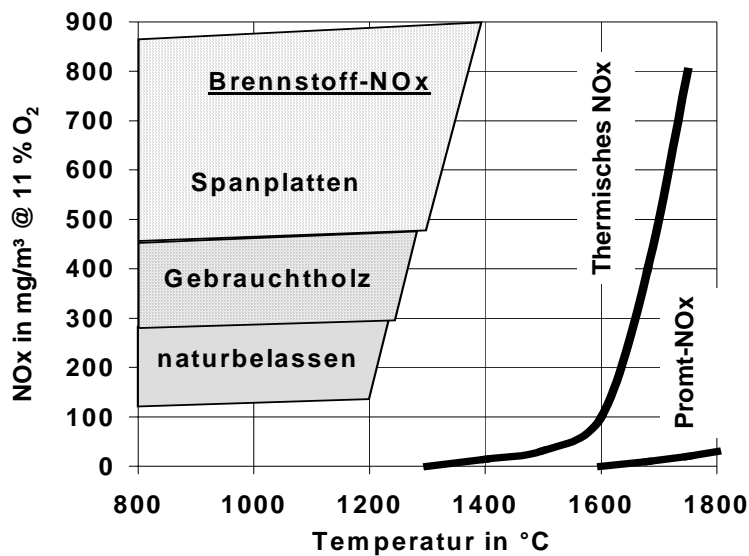


Abbildung 4.8: Bildungsmöglichkeiten von Stickstoffoxiden und zu erwartende Konzentrationen in Abhängigkeit von Verbrennungstemperatur und der Art des Brennstoffs (NUSSBAUMER 1997)

Bei Öl- und Gasfeuerungen liegen gegenüber Holzfeuerungen wesentlich höhere Flammtemperaturen vor, weshalb dort bevorzugt thermisches NO_x gebildet wird. Zur NO_x -Minderung wird deshalb bei Öl und Gasfeuerungen abgekühltes Abgas in den Brennraum zurückgeführt oder durch Drallerzeugung eine interne Rezirkulation in der Flamme erzwungen, beides mit dem Ziel, die Flammtemperatur und den Luftüberschuss zu senken und so die thermische NO_x -Bildung zu vermindern.

Da bei Holzfeuerungen jedoch die Stickstoffoxide im Abgas hauptsächlich aus dem Brennstoffstickstoff stammen, müssen hier andere Maßnahmen angewendet werden. In **Abbildung 4.9** sind die Hauptreaktionswege der NO-Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff vereinfacht dargestellt. Aus den NH_i -Zwischenprodukten, die bei der Vergasung des Brennstoffs entstehen, bildet sich unter oxidierenden Bedingungen bevorzugt NO und unter reduzierenden Bedingungen N_2 . Zur NO_x -Minderung muss der Verbrennungsprozess deshalb so geführt werden, dass aus den NH_i -Verbindungen bevorzugt N_2 entsteht.

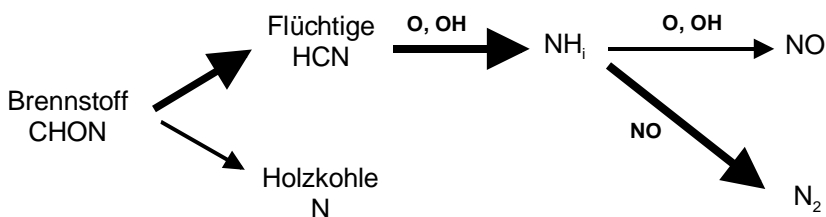


Abbildung 4.9: Vereinfachtes Reaktionsschema der NO-Bildung bei der Biomasseverbrennung aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff

Die NO_x-Entstehung und die Möglichkeiten zur 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. Dabei wird grundsätzlich zwischen den folgenden Verfahren zur NO_x-Minderung unterschieden:

- Luftstufung
- Luftstufung mit Reduktionszone
- Brennstoffstufung

Unter Luftstufung versteht man die Aufteilung und Zuführung der Verbrennungsluft in unterschiedliche Zonen des Feuerraums. Wichtig ist hier besonders die Trennung der Zonen, da in diesen unterschiedliche Bedingungen eingestellt werden müssen.

Bei der Luftstufung mit Reduktionszone befindet sich zwischen der unterstöchiometrischen Zone, wo der Brennstoff entgast und abgebaut wird, und der überstöchiometrischen Ausbrandzone eine Reduktionszone. Diese dient der räumlichen Trennung von unter- und überstöchiometrischem Bereich und als Reaktionszone zur Reduktion von NO an NH-Radikalen, wie z.B. beim SNCR-Verfahren durch Ammoniak- oder Harnstoffeindüsung. Dabei dienen die bei der sauerstoffarmen Verbrennung entstehenden NH-Zwischenprodukte als Reduktionsmittel. Außerdem muss in der Reduktionszone bei sauerstoffarmer Atmosphäre und Temperaturen > 900 °C eine Verweilzeit von 0,1 – 0,5 s erreicht werden.

Bei der Brennstoffstufung wird ein Reduktionsbrennstoff zwischen Primär- und Sekundärzone zugegeben. Als Reduktionsbrennstoffe eignen sich Gas oder feinkörnige Biomassen. Kriterium ist hier, dass die Brennstoffe leicht entgasen und einen hohen Flüchtiganteil aufweisen. Als Reduktionsmittel dienen je nach Reduktionsbrennstoff CH₄ bzw. NH₃-Verbindungen. Diese Art der NO_x-Minderung bietet sich vor allem in größeren holzverarbeitenden Industriebetrieben an, wo stückige Holzreste und Schleifstaub getrennt anfallen, wobei der Schleifstaub als Reduktionsbrennstoff verwendet werden kann (KELLER 1994).

Bei Holzfeuerungen im Leistungsbereich < 1 MW muss zur NO_x-Minderung aus wirtschaftlichen Gründen die Methode der Luftstufung mit Reduktionszone herangezogen werden, denn die Brennstoffstufung erfordert zwei getrennte Brennstofflager und -aufgabesysteme. Außerdem ist damit auch ein erhöhter Überwachungs- und Regelaufwand verbunden. In **Abbildung 4.10** sind die Bedingungen zur optimalen primären NO_x-Minderung ohne Brennstoffstufung dargestellt. Von zentraler Bedeutung sind dabei unterstöchiometrische Bedingungen in der Primär-Brennkammer.

4 Untersuchungsergebnisse

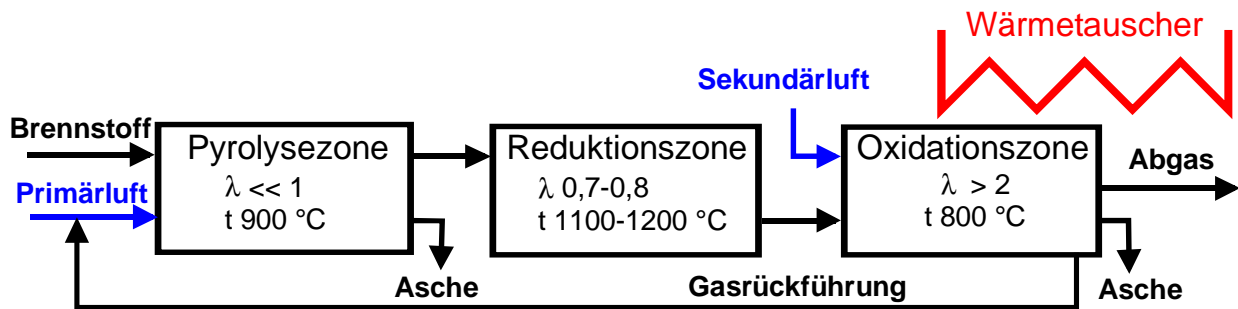


Abbildung 4.10: Bedingungen im Feuerraum zur optimalen NO_x -Reduktion (ohne Brennstoffstufung) bei der Biomasseverbrennung

Maßgebend für eine erreichbare NO_x -Minderung ist die Realisierbarkeit der notwendigen Bedingungen im Feuerraum. Bei der Methode der gestuften Verbrennung hängt die erzielbare NO_x -Minderung vor allem von den Bedingungen im Primärbereich des Feuerraumes ab, wo der Brennstoff unterstöchiometrisch unter Luftmangel umgesetzt werden muss.

4.3.2 Vergleich der NO_x -Minderung bei den verschiedenen Feuerungskonzepten

Der Zusammenhang zwischen N-Gehalt im Brennstoff und den NO_x -Konzentrationen im Abgas ist für die verschiedenen Feuerungskonzepte in **Abbildung 4.11** dargestellt. Dabei wurden für mehrere Verbrennungsversuche mit Nennlast unter vergleichbaren Randbedingungen die mittleren NO_x -Konzentrationen über dem N-Gehalt des jeweiligen Brennstoffs aufgetragen.

Eine vollständige Umwandlung des Brennstoffstickstoffs in NO_x ergebe schon bei naturbelassenen Hölzern mit einem N-Gehalt $< 0,5 \%$ sehr hohe NO_x -Werte im Abgas, wie es auf der linken Seite im Diagramm angedeutet ist. Unter realen Bedingungen wird nur ein Teil des Brennstoffstickstoffs durch die Verbrennung in NO_x umgewandelt. Dabei verbleiben ca. 20 % des Brennstoffstickstoffs in der Asche (NUSSBAUMER & SALZMANN 1996) der Rest wird als N_2 oder NO_x emittiert. Wieviel Brennstoffstickstoff letztlich als NO_x emittiert wird, hängt von den Bedingungen während des Verbrennungsprozesses ab.

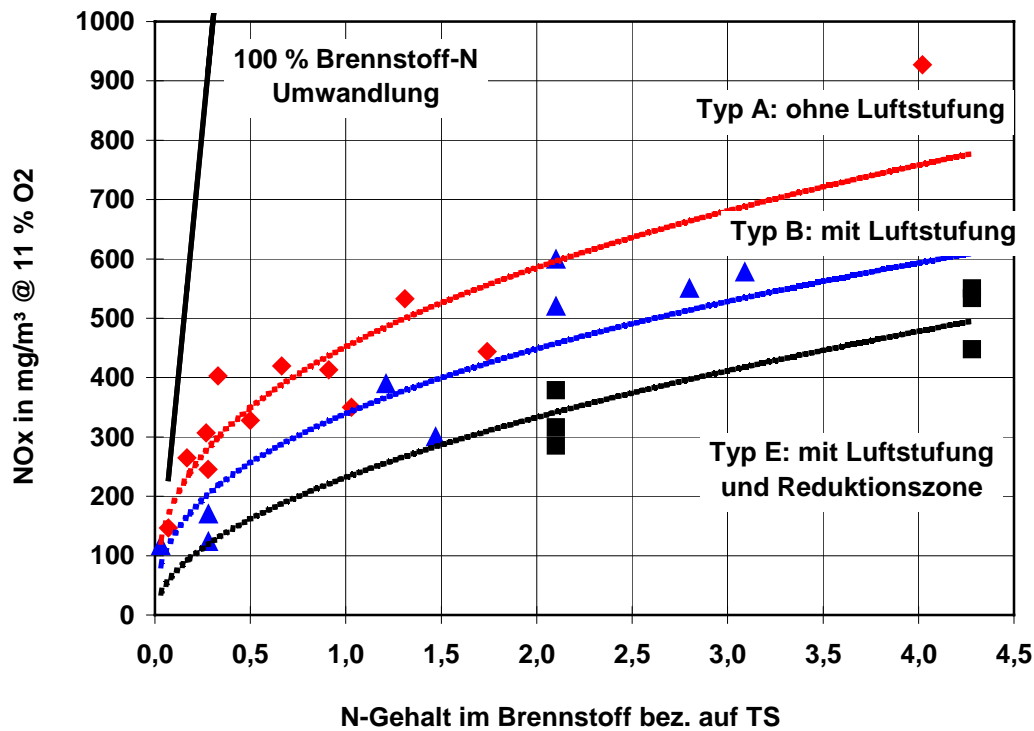


Abbildung 4.11: Mittlere NO_x -Konzentrationen unterschiedlicher Feuerungskonzepte in Abhängigkeit von N-Gehalt im Brennstoff unter vergleichbaren Randbedingungen (Nennlast)

In **Abbildung 4.11** ist das Verhalten der untersuchten Feuerungskonzepte anhand der mittleren NO_x -Konzentrationen in Abhängigkeit des N-Gehalts im Brennstoff dargestellt. Das Verhalten der Feuerungskonzepte A, B, und E ist durch die entsprechenden Mittelwerte und deren Trendlinie wiedergegeben.

Die eingezeichneten Trendlinien erlauben ein realistisches NO_x -Minderungspotential der Feuerungskonzepte B und E gegenüber dem Typ A abzuschätzen. Zur Abschätzung der erzielten NO_x -Minderung einer Maßnahme wurde hier das Verhalten der Feuerung Typ A als Referenz gewählt. Da offensichtlich kein linearer Zusammenhang zwischen N-Gehalt im Brennstoff und NO_x -Konzentration im Abgas besteht, ist das Minderungspotential einer Maßnahme nicht nur vom Bezugszustand, sondern auch vom N-Gehalt des eingesetzten Brennstoffs abhängig. Die Angaben des Minderungspotentials einer Maßnahme sind deshalb hier als Näherungswerte anhand der Trendlinien zu verstehen.

Die NO_x -Werte liegen beim Typ B um 20 % niedriger als beim Typ A, was auch der Theorie entspricht, die besagt, dass durch die Maßnahme der Luftstufung ein NO_x -Minderung von 20-30 % erzielt werden kann. Auffällig bei den Werten für Typ B ist die relativ große Streuung der Mittelwerte um die Trendlinie. Dies lag daran, dass es mit dem Typ B nicht bei allen Brennstoffen gelang den Brennstoff unterstöchiometrisch zu verbrennen, was natürlich die Fähigkeit zur NO_x -Minderung entscheidend beeinflusst.

4 Untersuchungsergebnisse

Durch die Umgestaltung der Brennstoff- und Primärluftzuführung sowie das Einrichten einer heißen Reduktionszone zwischen Primär- und Sekundärteil der Feuerung (Typ E) ließen sich die NO_x -Konzentrationen noch weiter reduzieren. Bei diesem Konzept erfolgt die Primärluftzugabe weitgehend unabhängig von der Beschaffenheit der Brennstoffschüttung. Durch die Möglichkeit der Gasrückführung kann der zugeführte Primärluftanteil sehr stark reduziert werden, ohne den Brennstoffumsatz zu verringern. Bei den Konzepten A und B bewirkte ein Senken des Primärluftanteils meist auch eine Verminderung des Brennstoffumsatzes und in Folge eine unzulässige Anhäufung von unverbranntem Brennstoff im Feuerraum. Wie aus der Trendlinie des Typ E deutlich wird, konnten durch die Maßnahme der gestuften Verbrennung mit Reduktionszone die NO_x -Konzentrationen gegenüber der „ungestuften Verbrennung“ um ca. 40 % gemindert werden. NUSSBAUMER & SALZMANN (1996) geben für diese Maßnahme ein höheres Potential von 40 –75 % an, was aber außer vom Bezugszustand wesentlich von den unterstöchiometrischen Bedingungen im Primärbereich abhängt, die mit einer Feuerung im Praxisbetrieb erzielbar sind.

Der direkte Einfluss der Gasrückführung, entweder von heißem Gas vom Brennkammerende wie beim Typ E oder von Abgas, auf die NO_x -Konzentrationen ist von untergeordneter Bedeutung. Entscheidend für die NO_x -Minderung sind unterstöchiometrische Bedingungen im Bereich der Brennstoffschüttung im Feuerraum. Um dort diese Bedingungen zu realisieren ist jedoch eine Gasrückführung notwendig.

4.4 Polychlorierte Dibenzodioxine und –furane PCDD/F

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von PCDD und PCDF sind weitgehend ähnlich. Sie sind chemisch sehr stabil, fettlöslich und biologisch schwer abbaubar. Eigenschaften, die eine Anreicherung in der Umwelt und dabei besonders in der Nahrungskette begünstigen. PCDD/F sind gegenüber Säuren und Basen weitgehend inert und bis zu Temperaturen von 600 – 800°C unter oxidativen sowie reduktiven Reaktionsbedingungen thermisch stabil.

4.4.1 Grundlagen

PCDD/F-Verbindungen treten oft in Verbindung mit thermischen Prozessen auf (LAI 1994) und wurden somit auch bei Holzfeuerungen im Abgas und in den Ablagerungen nachgewiesen. Im Abgas können PCDD/F sowohl gasförmig als auch partikelgebunden vorliegen. Die Grundlagen zu PCDD/F-Verbindungen bei der Holzverbrennung sind in BAUMBACH et al. (1997) ausführlich beschrieben und im folgenden zusammengefasst.

PCDD/F-Verbindungen von Holzfeuerungen im Abgas und in den Verbrennungsrückständen können im wesentlichen auf drei Ursachen zurückgeführt werden:

1. Emission unzerstörter im Brennstoff enthaltener PCDD/F. Diese können z.B. aus Holzschutzmittelresten stammen. Ältere Holzschutzmittel bestanden u.a. aus polychlorierten Phenolen (PCP) und deren Folgeprodukten. Bei der Herstellung dieser Holzschutzmittel entstanden die PCDD/F als Nebenprodukte und waren somit auch im Holzschutzmittel enthalten.
2. Bildung der PCDD/F aus chlororganischen Vorgängerverbindungen (sog. Precursoren) wie Chlorphenole, Chlorbenzole, PVC, PCB u.ä. (BRUNNER 1990).
3. Neubildung (De-Novo-Synthese) der PCDD/F in den Wärmetauschern und Rauchgaswegen der Feuerungen aus im Flugstaub vorhandenem Kohlenstoff und Metallchloriden beim Vorhandensein eines Katalysators (z.B. Cu, Fe). Eine Startreaktion ist dabei der Deacon-Prozeß, wobei elementares Chlorgas katalytisch in Gegenwart von Sauerstoff gebildet wird (HAGENMAIER 1989).

Die genannten PCDD/F-Bildungswege können nicht strikt voneinander getrennt werden. Die Voraussetzungen zu Bildung von PCDD/F (C, Cl, Cu, Fe im Temperaturbereich von 300-500 °C) sind bei der Biomasseverbrennung immer an irgend einer Stelle der Feuerung gegeben. Eine Minimierung der PCDD/F-Emissionen kann einerseits durch eine Minimierung der Vorläufer- bzw. Ausgangssubstanzen erfolgen und andererseits durch eine Verkürzung der Aufenthaltszeiten unter günstigen Bildungsbedingungen erreicht werden. In **Tabelle 4.1** sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die PCDD/F-Bildungswege in Biomassefeuerungsanlagen zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Einflussfaktoren auf die PCDD/F-Entstehung bei Verbrennungsprozessen

Einflussfaktoren	Bildungswege	
	Precursoren	<i>De-Novo</i> -Synthese
Reaktanden	(Chlor-)Aromaten	makromolekulare Kohlenstoffstrukturen
Reaktion	Gasphasenreaktion	Gasphase/Feststoff-Reaktion an abgelagertem Flugstaub
Reaktionszeit	ca. 0-20 min	ca. 2-4 h (Langzeitprozeß)
Ort	Nachverbrennungszone, Wärmetauscher	Wärmetauscher, Abgasreinigung, Rauchgaswege
Temperatur	300-700 °C	200-400 °C
Katalysator		CuCl, CuCl ₂ , CuSO ₄ , FeCl ₃
Chlorquelle	HCl, Cl ₂ , KCl, NaCl	HCl, Cl ₂ , KCl, NaCl, CuCl, CuCl ₂ , FeCl ₃
Atmosphäre	O ₂ nicht notwendig	sauerstoffhaltig ($\lambda > 1$), H ₂ O fördert PCDD/PCDF- Bildung

4 Untersuchungsergebnisse

4.4.1.1 Emission unzerstörter PCDD/F

Eine relevante Quelle für direkten Dioxininput in Holzverbrennungsanlagen sind Holzschutzmittel auf Basis von Pentachlorphenolen (PCP). Ähnlich wie bei der Produktion von 2,4,5-Trichlorphenol (eine Produktionsanlage für diesen Stoff verursachte den "Seveso"-Unfall) entstehen bei der Herstellung von Chlorphenolen immer auch PCDD/F als unerwünschte Nebenprodukte und liegen als Verunreinigungen auch im Produkt vor. Werden mit PCP-haltigen Holzschutzmitteln behandelte Hölzer verbrannt, so werden PCDD/F in die Feuerung eingetragen. Wäre dieser Bildungsweg relevant für die Emission von PCDD/F aus Holzfeuerungsanlagen, so müsste sich das Kongenerenprofil von PCP auch im Abgas wiederfinden. Dies ist aber nicht der Fall (HAGENMAIER 1989). Die Tatsache, dass nur noch geringe Mengen von mit PCP behandelten Hölzern im Umlauf sind, und dass auch bei der Verbrennung von naturbelassenen Hölzern in z.T. nicht unerheblichen Mengen PCDD/F emittiert werden zeigt, dass dieser Weg, ähnlich wie bei MVAs, keinen quantitativen Einfluss auf die PCDD/F-Gesamtemissionen aus Holzfeuerungen hat.

Auch in Polychlorierten Biphenylen (PCB) treten PCDD/PCDF als Verunreinigungen auf. PCBs wurden vor allem in Transformatoren und als Hydrauliköl verwendet. Während für Holzeinbauten in Alttransformatoren eine geordnete Entsorgung als Sonderabfall als sicher gelten kann, ist bei Althölzern, vor allem aus dem Baustellenbereich, eine geringfügige Verschmutzung mit PCB aus der Hydraulik älterer Baustellenfahrzeuge möglich. Aber auch hier sind die denkbaren Mengen so gering, dass es sich um keine quantitativ relevante Quelle für den PCDD/F-Input in Holzfeuerungsanlagen handeln kann.

4.4.1.2 Bildung aus Precursoren

Grundsätzlich ist es, gerade auch dann, wenn viele Precursoren in die Feuerung eingetragen werden, sehr schwer zu unterscheiden, ob emittierte PCDD/F durch den Umbau von Precursoren gebildet werden oder ob chlororganische Verbindungen lediglich als Chlorquelle für die De-Novo-Synthese dienen. In **Tabelle 4.1** wurden die beiden Bildungswege hinsichtlich der notwendigen und hinreichenden Reaktionsbedingungen verglichen. Wichtig für die Beurteilung ist in diesem Zusammenhang die Reaktionszeit. Die Bildung aus Precursoren kann als Gasphasenreaktion vergleichsweise schnell in den strömenden Abgasen erfolgen. Für die De-Novo-Synthese, die an der Grenzfläche zwischen Flugstaub und Gasphase stattfindet und auf dem oxidativen Abbau von abgelagertem und katalytisch chloriertem Kohlenstoff basiert, ist ein wesentlich längerer Zeitraum notwendig.

Als Precursoren sind hier wieder PCP und PCB zu nennen, die beim Abbau, genauso wie bei der Produktion, in PCDD/F umgewandelt werden können. Aber auch andere chlororganische Bei-

mengungen in Holzschutzmitteln (z.B. Endosulfan, Chlorthalonil, Dichlofluanid) können als Precursoren dienen. In Technikumsversuchen wurde die Verbrennung derartig vorbehandelter Hölzer untersucht. Bei guten Ausbrandbedingungen ergaben sich PCDD/F-Emissionen, die um den Faktor 5-20 über denen von unbehandelten Hölzern lagen. War zusätzlich der Ausbrand schlecht, so ergab sich eine weitere Erhöhung der PCDD/F-Emissionen um den Faktor 5-20 (STRECKER & MARUTZKY 1994).

PVC wird zwar ebenfalls oft als Precursor genannt, ist aber wegen des Fehlens von aromatischen Strukturen nur indirekt hier einzuordnen. Plausibler ist die Funktion als Chlorlieferant für andere aromatische Substanzen, wie z.B. das Lignin des Holzes, oder für die De-Novo-Synthese.

In **Abbildung 4.12** ist die Grundstruktur von Lignin, das zu 25 % im Holz enthalten ist, skizziert. Da die Chlorsubstituenten fehlen, also zuerst eine Chlorierung notwendig ist, fällt dieses Molekül in einen Grenzbereich zwischen Precursor und Ausgangssubstanz für die De-Novo-Synthese.

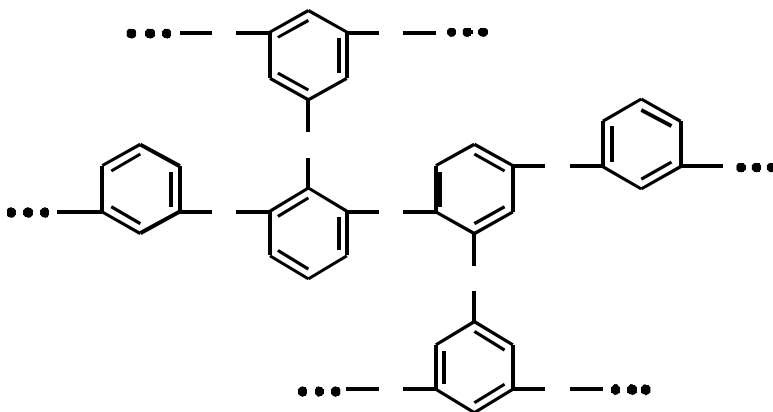


Abbildung 4.12: Grundstruktur des Lignins

4.4.1.3 De-Novo-Synthese

Mit dem Brennstoff und seinen Inhaltsstoffen werden der Feuerung

- die Grundbausteine der PCDD/F (C-Aromaten, Cl und O₂),
- die zur Chlorierung bei niedrigen Temperaturen notwendigen Katalysatoren (besonders Cu und Fe),
- und den der Chlorbildung durch den Deacon-Prozeß entgegenwirkenden Inhibitor (SO₂)

zugeführt. Als zusätzliche Chlorlieferanten kommen PCP, PCB und PVC in Frage. Auch das früher zur Spanplattenhärtung verwendete Ammoniumchlorid und das als Streckmittel für Leimharze verwendete Natriumchlorid können dabei eine Rolle spielen (MARUTZKY 1991).

4 Untersuchungsergebnisse

Hinsichtlich der Neubildung von PCDD/F über die De-Novo-Synthese können chlorhaltige Härter und PVC-Beschichtungen einen größeren Einfluss auf das Dioxinbildungspotential haben als die Behandlung mit Holzschutzmitteln. Während Ammoniumchlorid und Natriumchlorid heute bei der Spanplattenherstellung kaum noch verwendet werden (in alten Spanplatten aber enthalten sein können), stellt das PVC, durch seine Verwendung als Umleimer und Beschichtungswerkstoff, eine quantitativ relevante Chlorquelle dar.

Als Lieferanten für die notwendigen Katalysatoren kommen Holzschutzmittel in Frage. CK-, CKA-, CKB- und CKF-Salze, die als wasserlösliche Salzkonzentrate vor allem bei der Druckimprägnierung eingesetzt werden, enthalten Kupfersalze und Kupferoxid. Auch im metallorganischen Holzschutzmittel Cu-HDO (Komplexsalz) ist Kupfer enthalten (STRECKER & MARUTZKY 1994), (DIBT 1995). Vermutlich sind auch beim Verbrennen von naturbelassenem Holz die vorhandenen Mengen an Eisen- und Kupferverbindungen bereits ausreichend, um elementares Chlor für die De-Novo-Synthese zu produzieren.

Der als Inhibitor wirkende Schwefel kann vor allem über das als Spanplattenhärter verwendete Ammoniumsulfat in die Feuerung eingetragen werden. Sogar bei schlechten Ausbrandbedingungen wurden beim Einsatz dieses Brennstoffs relativ niedrige PCDD/F-Emissionen gemessen (STRECKER & MARUTZKY 1994). Die inhibierende Wirkung von SO₂ bei der PCDD/F-Bildung konnte experimentell (RAGHUANTHAN & GULLET 1996) nachgewiesen werden. In den dort durchgeführten Versuchen lagen die Konzentrationen an Reaktanden aber um ein Vielfaches höher als sie in Holzfeuerungsabgasen anzutreffen sind.

Hohe Sauerstoffgehalte in der Abkühlzone fördern nach dem LeChatelier-Prinzip über eine Verschiebung des Gleichgewichts beim Deacon-Prozeß, die Bildung von elementarem Chlor und damit die De-Novo-Synthese von PCDD/F. Der in Holzfeuerungen übliche hohe Luftüberschuss (der Bezugssauerstoffgehalt von Feuerungen nach 1. BImSchV beträgt 13 %) fördert also die Bildung von PCDD/F über den Bildungsweg der De-Novo-Synthese.

4.4.1.4 Einfluss der Ausbrandqualität

Die Qualität des Ausbrands bezieht sich auf die gasförmigen Abgasbestandteile und die Partikel. Während der Ausbrand der Verbrennungsgase entscheidend ist, um die Emissionen unverbrannter PCDD/F und die Bildung aus Precursoren zu minimieren, vermindert ein guter Ausbrand der Partikel (im Bereich der Wärmetauscher und im weiteren Abgasweg) vor allem das Bildungspotential über die De-Novo-Synthese.

Bei ausreichend hohen Temperaturen im Feuerraum (>800°C), ausreichender Verweilzeit und genügend hohem Luftüberschuss bei guter Durchmischung kann davon ausgegangen werden,

dass sämtliche Precursoren zerstört werden. Diese Bedingungen liegen bei Holzfeuerungsanlagen aber nicht immer vor. Besonders im Stand-by-Betrieb, aber auch in Luftmangelsituationen bei Nennlast, kann es zu Bedingungen kommen, die die direkte Emission und die Bildung von PCDD/F über Precursoren erlauben.

Diese Betriebsbedingungen verschlechtern natürlich auch den Ausbrand der Partikel. Der Partikelausbrand und die Ablagerungen in den für die De-Novo-Synthese in Frage kommenden Anlagenbereichen (Wärmetauscher und Abgaswege) wird aber zusätzlich über Faktoren wie Strömungsführung, Strömungsgeschwindigkeiten und Brennstoffstruktur (Stückgröße, Dichte u.ä.) bestimmt. Eine starke Beeinflussung der PCDD/F-Emissionen durch die Ausbrandbedingungen sowohl bei behandelten als auch bei unbehandelten Hölzern wurde auch STRECKER & MARUTZKY (1994) angegeben. Bei schlechteren Ausbrandbedingungen wurden dort höhere PCDD/F-Konzentrationen im Abgas gemessen, als unter guten Ausbrandbedingungen.

4.4.2 PCDD/F-Emissionen

An unserem Institut wurden bereits umfangreiche PCDD/F-Messungen im Abgas und in den Aschen gewerblicher und industrieller Holzfeuerungen durchgeführt (BAUMBACH et al. 1997). Zur Einschätzung und Beurteilung der PCDD/F-Abgaskonzentrationen wurden diese mit Literaturwerten verglichen. Die recherchierten Werte wurden weitgehendst drei Brennstoffgruppen zugeordnet, die in **Tabelle 4.2** aufgeführt sind.

Tabelle 4.2: Vergleich der PCDD/F-Abgaskonzentrationen verschiedener Holzfeuerungen IVD-Feldmessungen mit Werten aus der Literatur

Brennstoff	Autoren	PCDD/PCDF ng I-TEQ/m ³ (bez. 13% O ₂)
Naturbelassenes Holz	Feldmessung IVD	0,02 - 2,73
	WILKEN (1993)	0,01 - 0,70
	STRECKER & MARUTZKY (1994)	0,01 - 0,15
	HASLER et al.(1993)	0,02 - 0,21
Naturbelassenes Holz und Spanplatten	Feldmessung IVD	0,09 - 0,81
	WILKEN (1993)	0,02 - 3,30
	STRECKER & MARUTZKY (1994)	0,05 - 0,19
	HASLER et al.(1993)	0,02 - 0,08
Betriebsüblicher Brennstoff *	Feldmessung IVD	0,37 - 16,0
	WILKEN (1993)	0,01 - 1,39
	STRECKER & MARUTZKY (1994)	0,03 - 4,11
	NUSSBAUMER (1994)	2,70 - 14,4

*Gemisch aus naturbelassenem, behandeltem und beschichtetem Holz sowie diversen Spanplatten

4 Untersuchungsergebnisse

Zur besseren Übersicht sind die in **Tabelle 4.2** angegebenen Konzentrationsbereiche in **Abbildung 4.13** graphisch dargestellt. Die PCDD/F-Konzentrationen der bei Feldmessungen untersuchten Anlagen bewegten sich dabei in üblichen Konzentrationsbereichen vergleichbarer Feuerungen. Bei den Literaturwerten lag der Kleinstwert bei allen drei Brennstoffgruppen unter demjenigen der Feldmessungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den Literaturwerten auch Ergebnisse aus Versuchsanlagen enthalten sind, die meist unter optimierten Bedingungen betrieben wurden.

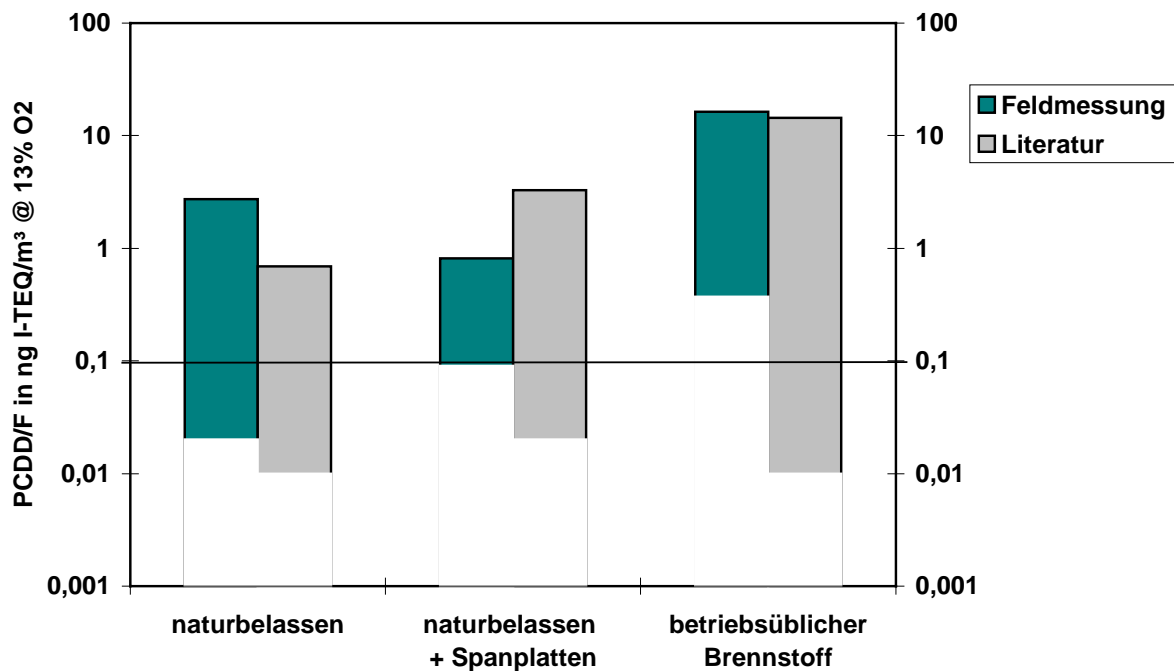


Abbildung 4.13: PCDD/F-Konzentrationsbereiche im Abgas gewerblicher Holzfeuerungen im Vergleich mit Literaturwerten

Aus den Ergebnissen der Feldmessungen konnten keine systematischen Rückschlüsse über die wesentlichen Einflussfaktoren auf die PCDD/F-Abgaskonzentrationen abgeleitet werden, da an jeder untersuchten Anlage andere Randbedingungen (z.B. Feuerungstyp, Brennstoff, Betriebsweise etc.) vorlagen. In einem weiteren Projekt wurden daher die PCDD/F-Konzentrationen beim Verbrennen unterschiedlicher Brennstoffsportimente, darunter auch mit Holzschutzmitteln behandelte Hölzer, unter weitgehend konstanten Randbedingungen an einer Versuchsanlage untersucht (ZUBERBÜHLER & BAUMBACH 1997). Diese Untersuchungen wurden mit der Unterschubfeuerung (Typ A) durchgeführt. Ein Teil dieser Ergebnisse ist in **Abbildung 4.14** dargestellt. Bei der Versuchsreihe mit (Typ A) wurden mit Gebrauchtholz und mit naturbelassenem Brennstoff relativ hohe PCDD/F-Konzentrationen gemessen. Dies ist nicht konform zu anderen Untersuchungen, wie z.B. bei NUSSBAUMER (1994) wo gerade umgekehrte Verhältnisse gefunden wurden. Dort wurden mit naturbelassenen Brennstoffen die kleinsten und mit Altholz die höchsten PCDD/F-Konzentrationen gemessen. Allerdings stammten die dort dargestellten Er-

gebnisse aus unterschiedlichen Feuerungsanlagen. Bei der Versuchsreihe mit dem Typ A hingegen lagen sehr unterschiedliche Brennstofffeuchten vor. Dabei wiesen die beiden Sortimente Gebrauchtholz und naturbelassener Brennstoff mit der höchsten Brennstofffeuchte auch die höchsten PCDD/F-Konzentrationen auf. Bei dieser Versuchsreihe schien die Brennstofffeuchte größeren Einfluss auf die PCDD/F-Konzentrationen im Abgas zu nehmen, als die Menge der Verunreinigungen die mit dem Brennstoff der Feuerung zugeführt wurden. Eindeutige Zusammenhänge zwischen den PCDD/F-Abgaskonzentrationen und der Art des eingesetzten Brennstoff konnten trotz vergleichbar guten Verbrennungsbedingungen nicht abgeleitet werden.

Die Tatsache, dass sich hohe Brennstofffeuchten und Sauerstoffgehalte in Verbrennungsanlagen nachteilig auf PCDD/F Konzentrationen im Abgas auswirken können, wurde auch bei Untersuchungen an Müllverbrennungsanlagen beobachtet (VOGG et al. 1990).

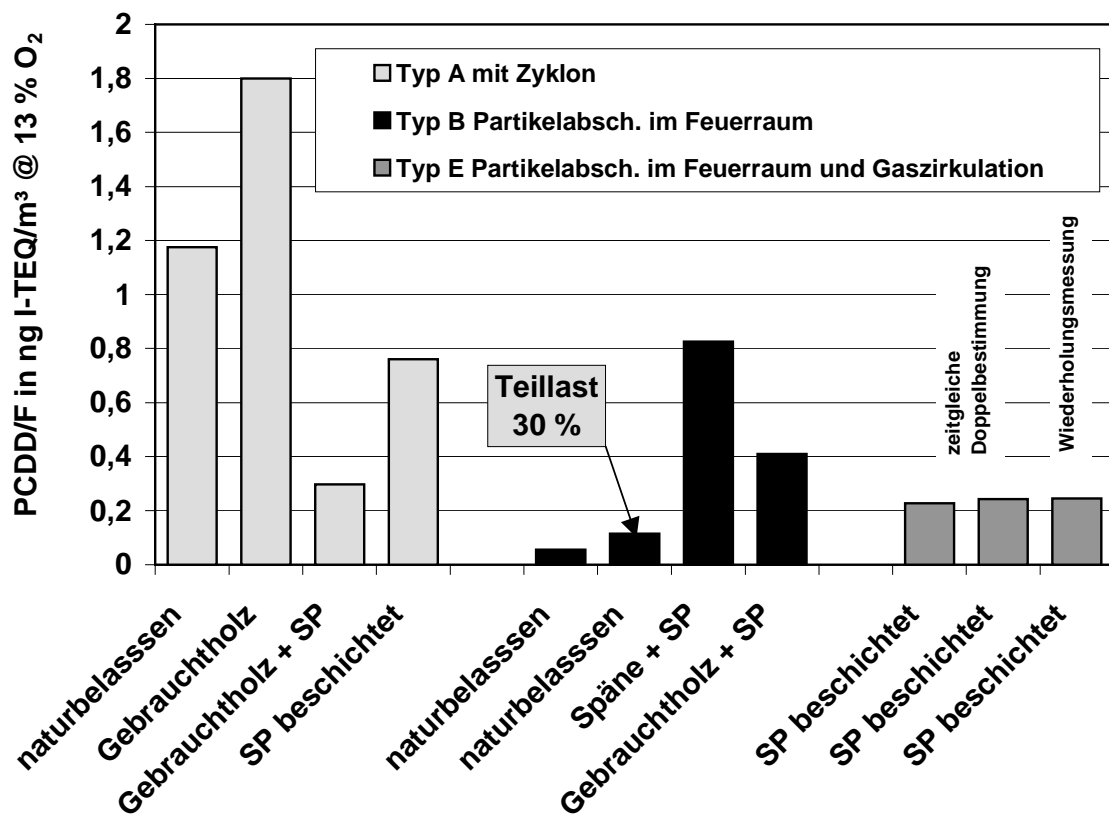


Abbildung 4.14: PCDD/F-Abgaskonzentrationen verschiedener Feuerungskonzepte mit unterschiedlichen Brennstoffen, (SP = Spanplatten, Mittelwerte 3 –5h)

Beim Feuerungskonzept B und folgend wurde angestrebt, die PCDD/F-Abgaskonzentrationen dadurch zu vermindern, dass die kohlenstoffhaltigen groben Partikel im Feuerraum verbleiben und somit nicht in Bereiche der Feuerung gelangen, wo für die Neubildung von PCDD/F über die De-Novo-Synthese günstige Bedingungen vorliegen. Außerdem konnte bei den neuen Kon-

4 Untersuchungsergebnisse

zepten durch die verbesserte Durchmischung der Restsauerstoffgehalt weiter vermindert und der Ausbrand verbessert werden.

Für naturbelassenes Holz lagen die PCDD/F-Konzentrationen beim Feuerungskonzept B im Nenn- und Teillastbetrieb bei 0,11 ng I-TEQ/m³ und darunter, was gut mit Literaturangaben übereinstimmt. Gegenüber den Werten für naturbelassenes Holz beim Typ A bedeutet das eine erhebliche Verminderung, wobei anzumerken ist, dass der Brennstoff nicht aus einer Charge stammte und beim Typ A eine wesentlich höhere Feuchte besaß.

Aus einem Vergleich der PCDD/F-Werte für beschichtete Spanplatten in **Abbildung 4.14** der Feuerungskonzepte A und E ist eine deutliche Verminderung auf 1/3 der Ausgangskonzentration erkennbar. Zwar stammten diese beiden Brennstoffe nicht aus der gleichen Charge, waren aber in der chemischen und physikalischen Zusammensetzung vergleichbar.

Die PCDD/F-Werte in **Abbildung 4.14** für Gebrauchtholz und Mischungen daraus sind für einen Vergleich der Feuerungskonzepte nicht geeignet, da die Brennstoffchargen zu unterschiedlich waren.

Zur Überprüfung der Streuung und der Reproduzierbarkeit der verwendeten PCDD/F-Proben- und Analysetechnik wurde beim Typ E mit beschichteten Spanplatten eine Doppelbestimmung durchgeführt. Dabei wiesen die beiden Proben eine Abweichung von 4 % auf. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde die Feuerung gereinigt und neu angeheizt. Auch hier war die Abweichung kleiner 4 % zu den Werten der Doppelbestimmung, was für PCDD/F-Analysen ein sehr gutes Ergebnis darstellt.

4.4.3 Minderung von PCDD/F-Emissionen

Die PCDD/F-Emissionen aus gewerblichen Holzfeuerungen können zwar nicht vollständig vermieden, aber durch die Einhaltung bestimmter Randbedingungen und die Anwendung von primären Minderungsmaßnahmen, begrenzt werden.

Folgend sind die Einflüsse von Brennstoff und Feuerungstechnik auf die PCDD/F-Emissionen qualitativ dargestellt.

Positive Brennstoffeigenschaften:

möglichst homogener Brennstoff, lufttrocken mit einheitlicher Stückgröße

Negative Brennstoffeigenschaften:

hoher Feinanteil im Brennstoff (Austrag kohlenstoffhaltiger Partikel in den Wärmetauscher)
organisch gebundenes Chlor z.B. PVC
Precursoren und katalytisch wirkende Verbindungen

Positive Feuerungsmerkmale:

vollständiger Ausbrand ($\text{CO} < 250 \text{ mg/m}^3$, $\text{THC} < 10 \text{ mg/m}^3$) von Gasen und Partikeln
Temperaturen $> 750 \text{ }^\circ\text{C}$ im Feuerraum
möglichst geringer Luftüberschuss
schnelle Abkühlung der Verbrennungsgase unter $200 \text{ }^\circ\text{C}$
Partikelabscheidung im heißen Feuerraum

Negative Feuerungsmerkmale:

große (staubbeladene) Oberflächen und lange Verweilzeiten im Temperaturbereich $250 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$
kohlenstoffhaltige Partikel, Sauerstoff, Chlor im Abgas

Primärmaßnahmen:

gestufte Verbrennung evtl. mit Abgasrückführung (Verminderung des Luftüberschusses und der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Brennstoffaufgabe wodurch weniger Partikel ausgetragen werden)
gute Durchmischung von Brenngasen und Verbrennungsluft (Ausbrand Gase/Partikel, Luftüberschuss)
Partikelabscheidung im Feuerraum
schnelle Abkühlung der Verbrennungsgase unter $200 \text{ }^\circ\text{C}$

Sekundärmaßnahmen:

Einrichtungen zur Abgasnachbehandlung im Temperaturbereich $< 200 \text{ }^\circ\text{C}$
Feinstaubabscheidung z.B. mittels Gewebefilter (ca. 50 % Minderung)
Additivzugabe vor Staubabscheidung
katalytische PCDD/F-Minderung

5 Beurteilung der verschiedenen Feuerungskonzepte und Schlussfolgerungen

Typ A: moderne λ - und temperaturgeregelte Unterschubfeuerung

Die Unterschubfeuerung ist in der holzbe- und holzverarbeitenden Industrie die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Bauart, da sie den Einsatz eines breiten Brennstoffsortiments bezüglich Feuchte und Stückgröße zulässt. Unterschubfeuerungen werden von zahlreichen Herstellern angeboten; sie unterscheiden sich im wesentlichen nur in der technischen Ausführung, funktionieren aber alle nach dem gleichen Prinzip. Der zerkleinerte Brennstoff wird in einer Feuermulde zusammen mit der Primärluft zugeführt, so dass sich dort ein stabiles Glutbett bildet. Meist direkt oberhalb der Feuermulde erfolgt die Sekundärluftzugabe, was oftmals schon als „gestufte Verbrennung“ bezeichnet wird. Die gestufte Verbrennung erfordert jedoch eine klare Trennung der Verbrennungsstufen, was bei dieser Bauart in der Regel nicht der Fall ist.

Unterschubfeuerungen können bei entsprechender Regelung bis hinab auf ca. 50 % der Nennleistung kontinuierlich betrieben werden. In diesem Betriebszustand wird mit diesen Feuerungen noch ein guter Ausbrand bezüglich der gasförmigen Abgasbestandteile erzielt ($\text{CO} < 100 \text{ mg/m}^3$).

Grobe Partikel im Abgas werden bei dieser Bauart mit Trägheitsabscheidern, meist Zyklonen am Ende der Feuerung nach dem Wärmetauscher entfernt. Diese Partikel können noch bis zu 30 % unverbrannten Kohlenstoff enthalten und lagern sich teilweise in den Anlagenteilen nach dem Brennraum ab, wo sie eine Schlüsselrolle bei der Neubildung von PCDD/F in diesen Bereichen spielen können. Die bei der Verbrennung entstehenden Feinstaubpartikel (z.B. PM_{10}) können mit dem Zyklon nicht abgeschieden werden und werden emittiert.

Schwierige Brennstoffe, wie z.B. aus der Spanplattenbearbeitung mit hohem Feinanteil und Stickstoffgehalt, führen bei diesen Anlagen zu hohen Staub- und NO_x -Konzentrationen im Abgas.

Typ B: Rostfeuerung mit gestufter Verbrennung und integrierter Partikelabscheidung im Feuerraum

Bei diesem Feuerungskonzept wurde durch die räumliche Trennung des Feuerraums eine gestufte Verbrennung realisiert. Im Primärbereich des Feuerraums wird der zerkleinerte Brennstoff auf einem Rost zugegeben. Die Primärluftzugabe erfolgt unterhalb des Rostes durch Unterdruck, der durch ein Abgasgebläse erzeugt wird. Der Hauptteil der Verbrennungsluft wird im zylindri-

5 Beurteilung der verschiedenen Feuerungskonzepte und Schlussfolgerungen

schen Teil der Brennkammer mit einem speziellen Drallgebläse zugeführt. Mit dieser Anordnung wurde folgendes erreicht:

- In der Primärbrennkammer wird nur noch ein Teil der Verbrennungsluft zugegeben, dadurch wird der Austrag von Asche- und Brennstoffpartikeln aus der Brennstoffschüttung vermindert.
- Durch die erzeugte Drallströmung im zylindrischen Teil der Sekundärbrennkammer werden grobe, teils unvollständig verbrannte Partikel ähnlich wie im Zyklon abgeschieden und verbleiben dort. Bei Temperaturen von 800 °C und einem Sauerstoffgehalt von 6-8 % haben unvollständig verbrannte Partikel gute Bedingungen und genügend Zeit für einen vollständigen Ausbrand. Durch diese Maßnahme kann auf einen Trägheitsabscheider nach dem Wärmetauscher verzichtet werden. Messungen der Partikel-Konzentration und der Partikel-Größenverteilung ergaben, dass diese Anordnung mit dem Abscheideverhalten eines Zyklons gleichzusetzen ist.
- Das Drallgebläse bewirkt in der Sekundärbrennkammer eine intensive Mischung von Verbrennungsgasen aus der Primärbrennkammer und der Sekundärluft. Dadurch kann die Feuerung mit 6-8 % anstelle mit den sonst üblichen 10-14 % Restsauerstoffgehalt im Abgas betrieben werden. Dies bewirkt eine Verringerung des Abgasvolumenstroms, der Abgaswärmeverlust sinkt und der Wirkungsgrad steigt. Durch die Mischungsverbesserung konnte der beim Typ A bereits sehr ordentliche Ausbrand der gasförmigen Bestandteile noch gesteigert werden, so dass im Versuchsbetrieb die mittleren CO-Konzentrationen unter 50 mg/m³ (13 % O₂) lagen.
- Durch die gestufte Verbrennung und die Vermeidung von Temperaturspitzen in der Ausbrandzone durch die intensive Mischung der Gase mit dem Drallgebläse konnten die NO_x-Emissionen gegenüber dem Typ A um ca. 20 % reduziert werden.
- Dieser Feuerungstyp wurde von einem Feuerungshersteller zur Marktreife gebracht und bereits am Markt erfolgreich eingeführt.

Typ C & D: Typ B mit veränderter Primärbrennkammer

Bei den Feuerungskonzepten C & D wurde die Sekundärbrennkammer vom Typ B beibehalten und die Primärbrennkammer neugestaltet mit dem Ziel, eine Reduktionszone zur NO_x-Minderung zwischen Brennstoffaufnahme und Ausbrandzone zu schaffen. Beide Konzepte scheiterten daran, dass kein kontrollierter Brennstoffumsatz unter definierten unterstöchiometrischen Bedingungen möglich war. Diese Konzepte wurden nicht weiterverfolgt.

5 Beurteilung der verschiedenen Feuerungskonzepte und Schlussfolgerungen

Typ E: Rostfeuerung mit gestufter Verbrennung, Partikelabscheidung im Feuerraum, Reduktionszone und Gasrückführung

Die NO_x-Emissionen bei der Holzverbrennung stammen hauptsächlich aus der Oxidation des im Brennstoff gebundenen Stickstoffs. Bei stickstoffreichen Brennstoffen, wie sie häufig in der Holzbe- und Holzverarbeitenden Industrie anzutreffen sind, muss das bei der Verbrennung entstehende Stickstoffdioxid zu molekularem Stickstoff reduziert werden. Dazu müssen im Feuerraum Zonen mit reduzierenden Bedingungen geschaffen werden. Dies kann durch die Einrichtung einer Reduktionszone und Luftstufung erreicht werden. Oftmals scheitert die Umsetzung dieser Anforderungen in der Praxis daran, dass es nicht gelingt, den Brennstoff unter Luftmangel umzusetzen bzw. zu vergasen. Beim Typ E wurde das dadurch realisiert, dass ein Teil der Primärluft durch heißes Gas vom Brennkammerende oder durch Abgas ersetzt wird. Die NO_x-Emissionen konnten durch diese Maßnahme um ca. 40 % gegenüber dem Typ A gesenkt werden. Auch auf die Minderung der Partikelkonzentrationen wirken sich diese Maßnahmen positiv aus. Mit beschichteten Spanplatten, einem Brennstoff, der außer hohem N-Gehalt in der Regel auch einen hohen Feinanteil aufweist und somit zur Emission hoher Partikelkonzentrationen neigt, wurden mit den Typ E Partikelkonzentrationen < 50 mg/m³ (13 % O₂) gemessen.

Umsetzung der Forschungsergebnisse bei der Konstruktion und Planung von Feuerungsanlagen

Entscheidend für den emissionsarmen Betrieb, besonders aber bei der Realisierung primären Emissions-Minderungsmaßnahmen, ist die Regelung der Anlage und die Anpassung jeder einzelnen Anlage an die örtlichen Randbedingungen (MARUTZKY & SEEGER 1999). Bei Messungen an Praxisanlagen zeigt sich immer wieder, dass die Anlagen insgesamt mit einem viel zu hohen Luftüberschuss betrieben werden. Brennstoff- und Luftmengen sind oft nicht aufeinander abgestimmt und die Anlagen können nicht kontinuierlich betrieben werden, da sie meistens zu groß ausgelegt sind.

Zur primären Emissionsminderung muss die Verteilung der Verbrennungsluft (Primär-, Sekundärluft), das zurückgeführte Gas und die geförderte Brennstoffmenge dem eingesetzten Brennstoff angepasst werden. Zum Teil können diese Aufgaben von der Anlagenregelung übernommen werden. Diese kann jedoch nicht erkennen, ob es sich z.B. um einen trockenen losen Brennstoff geringer Dichte oder z.B. um sehr feuchtes waldfrisches Holz handelt. Für einen emissionsarmen Betrieb kann diese Information aber entscheidend sein, da unterschiedliche Brennstoffe völlig andere Einstellungen erfordern.

Wenn das beschriebene Potential zur primären Emissionsminderung bei Praxisanlagen angewendet und ausgeschöpft werden soll, dann muss auch auf der Brennstoffseite eine Einteilung bzw.

5 Beurteilung der verschiedenen Feuerungskonzepte und Schlussfolgerungen

Klassifizierung des Brennstoffes erfolgen um eine bessere Abstimmung von Brennstoff und Verbrennungsluft zu ermöglichen.

6 Literatur

BAUMBACH G., ZUBERBÜHLER U., SIEGLE V., HEIN K.R.G. (1997): Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen. Ecomed-Verlag, Landsberg

BRUNNER H. (1990): Untersuchungen zu Herkunft und Vorkommen polychlorierter Dibenzodioxine und Dibenzofurane in der Umwelt. Dissertation Universität Tübingen

DIBT (1995): Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt: Holzschutzmittelverzeichnis. Erich Schmidt Verlag, Berlin

HAGENMAIER H. (1989): Polychlorierte Dibenzodioxine und polychlorierte Dibenzofurane - Bestandsaufnahme und Handlungsbedarf -, VDI-Berichte Nr. 745

HASLER P., NUSSBAUMER T., BÜHLER R. (1993): Dioxinmissionen von Holzfeuerungen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern

HASLER P., NUSSBAUMER T. (1997): Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern

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 Nr.344, Reihe 6: Energietechnik, VDI-Verlag

LAI (1994): Länderausschuß für Immissionsschutz (LAI): Erarbeitung von Anforderungen zur Emissionsbegrenzung von Dioxinen und Furanen, LAI-Schriftenreihe Bd. 9, Erich Schmidt Verlag, Berlin

LÜTZKE K., MUHR W. (1981): Erprobung von Emissionsmeßverfahren zur Feststellung von Korngrößenfraktionen – Band 1 -, UBA Forschungsbericht 81-104-02 121, RW TÜV, Essen

MARPLE V.A., LUI B.Y.H. (1974): Characteristics of laminar jet impactors. Environmental Science and Technology 8, p. 648

MARUTZKY R. (1991): Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten. WKI-Bericht Nr.26, Wilhelm-Klauditz-Institut, Braunschweig

MARUTZKY R., STRECKER M. (1998): Anforderungen an Holzbrennstoffe und Aschen. In: Emissionsarme Holzverbrennung in häuslichen und gewerblichen Feuerungsanlagen. Kolloquium am 29. September in Stuttgart, IVD-Bericht Nr.41, S. 39-52

MARUTZKY R., SEEGER K. (1999): Energie aus Holz und anderer Biomasse. Grundlagen-Technik-Emissionen-Wirtschaftlichkeit-Entsorgung-Recht. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen

MÜLLER M. (1999): Optimaler Betrieb von Rostfeuerungen. Verbrennungsverbesserung und Belagsminderung durch den Einsatz von Additiven. BWK Bd. 51 Nr.9, S. 46-48

NUSSBAUMER T. (1994): Dioxinmissionen von Holzfeuerungen; Entwarnung für naturbelassenes Holz und Forderung zur Durchsetzung des Abfallverbrennungsverbots in Kleinfeuerungsanlagen. Heizung Klima Nr. 3, 83-87

NUSSBAUMER T., SALZMANN R. (1996): Primary Measures for NO_x Reduction in Wood Combustion by Air Staging and Fuel Staging. First European Conference on Small Burner Technology and Heating Equipment, Zürich, September 1996

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

RAGHUANTHAN K., GULLET B. K. (1996): Role of Sulfur in Reducing PCDD and PCDF Formation. Environmental Science & Technology, Vol.30, 1827-1834

RÜDIGER H. (1996): Pyrolyse von festen biogenen und fossilen Brennstoffen zur Erzeugung eines Zusatzbrennstoffes für Feuerungsanlagen. Dissertation, Universität Stuttgart

SCHÄFER (1979): Kaskaden-Impaktor Andersen Mark III. Gebrauchsanleitung

STRECKER M., MARUTZKY R. (1994): Untersuchungen von Holz und Holzwerkstoffen auf Holzschutzmittel und deren Emissionen bei der Verbrennung. Forschungsbericht 76-104 03518, Umweltbundesamt, Berlin

VOGG H., HUNSINGER H., STIEGLITZ L. (1990): Contribution to solving the problem of dioxins generated during waste incineration. Chemical Engineering and Technology 13, 221

WILKEN M. (1993): Ermittlung und Verminderung der Emissionen von halogenierten Dioxinen und Furanen aus thermischen Prozessen - Holzfeuerungen. Umweltbundesamt, Forschungsbericht Nr. 10403365/06, Berlin

6 Literatur

ZUBERBÜHLER U., BAUMBACH G. (1997): Emissionsarme Verbrennung von problematischen gewerblichen und industriellen Rest- und Abfallhölzern in Pilotanlagen unter 1 MW Feuerungsleistung. IVD-Bericht Nr. 38, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen Uni-Stuttgart, Selbstverlag

7 Anhang: Patentschrift

Bei der Bearbeitung des dargestellten Forschungsprojekts und dabei besonders bei den konstruktiven und experimentellen Aufgaben bei der Gestaltung des Primärteils der Feuerung ergab sich die Möglichkeit, die verwendete Anordnung zu patentieren, da diese bislang noch nicht angewendet wurde. Die Anmeldung erfolgte gemeinschaftlich durch die Universität Stuttgart, den Projektleiter und der Firma AVC Umwelttechnik.

Die Anmeldung erfolgte unter der Nr. 19850376 im Nov. 1998, die Offenlegung ist folglich im Mai 2000. Der Erteilungsbeschluss erging im Jan. 2000.

BESCHREIBUNG

Vorrichtung zum Verbrennen von Bio- und Feststoffmassen mit primärer Schadstoffminderung - CO, NO_x und Staub

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Verbrennen von Bio- und Feststoffmassen. Biomassen, die zur thermischen Nutzung zur Verfügung stehen, sind z.B. Restholz aus der Durchforstung, Grünschnitt, Abfälle bei der Holzbe- und -verarbeitung und Gebrauchtholz aus dem Recycling- und Abbruchbereich. Biogene Brennstoffe liegen in unterschiedlicher Form, wie z.B. als Stückholz, Späne, Sägemehl und Schleifstaub sowie als Gemisch vor.

Die fortschreitende Entwicklung im Bereich Werkstoffe und Fertigungstechnologien in der holzverarbeitenden Industrie, hat einen erheblich feineren staubartigen Produktionsabfall zur Folge. Diese biogenen Produktionsabfälle weisen je nach Art und Menge der verarbeiteten Werkstoffe (z.B. Spanplatten) einen Stickstoffgehalt von bis zu 4 % auf, was bei der Verbrennung in derzeit üblichen Feuerungen zu sehr hohen NO_x- und Staubkonzentrationen im Abgas führen kann.

In holzbe- und -verarbeitenden Betrieben werden Biomassefeuerungen hauptsächlich zur Beheizung der Betriebsgebäude und zur Prozesswärmeerzeugung eingesetzt. Die momentan installierten Feuerungen, weisen im Vergleich zu Öl- und Gasfeuerungen sehr hohe Emissionen an Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxiden (NO_x) und Staub auf. Die beschriebene Erfindung ermöglicht es, die Schadstoffemissionen bei der Biomasseverbrennung durch Primärmaßnahmen wesentlich zu vermindern.

Zur Wärmeengewinnung aus Biomassen sind mehrere Verbrennungssysteme wie Schubrost- und Schrägrostfeuerungen, Unterschub-Schneckenfeuerungen und die Fließbettentgasung (EP 0 076 353A2) bekannt. Die CO-Emissionen im Abgas von Holzfeuerungen hängen im wesentlichen von den Ausbrandbedingungen (Temperatur, Verweilzeit, Sauerstoffangebot, Vermischung) in

7 Anhang: Patentschrift

der Brennkammer ab. Staubartige Brennstoffe, die sehr trocken sind und deren Struktur in den meisten Fällen als "einblaspflichtig" im Sinne der Vorschrift TRD 414 "Holzfeuerungen an Dampfkesseln" einzustufen ist, oder die zumindest im Grenzbereich dieser Vorschrift angesiedelt sind, erreichen mit der bekannten Einblasfeuerung unter Verwendung eines speziellen Gebläses zur Erzeugung einer rotierenden Gasströmung (Gliederkopfgebläse EP 0 473 618 B1) auf Grund des Prinzips der "Verbrennung in einer rotierenden Gaswalze" sehr gute Emissionswerte. Der Leistungsbereich solcher Feuerungsanlagen liegt zur Zeit zwischen 0,5 und 10 MW.

Bei Holzfeuerungen für den gewerblichen Bereich (100-1000 kW) konnten, durch die Brennkammergestaltung (z.B. vollständige Schamottierung, gestufte Brennkammer mit getrennter Primär- und Sekundärluftzuführung) und durch den Einsatz elektronischer Regelungen, die CO-Emissionen im Vergleich zu älteren Feuerungsanlagen wesentlich reduziert werden. Aus der Patentschrift US 5 178 076 ist eine Vorrichtung zur Biomasseverbrennung bekannt, die über eine zweigeteilte Brennkammer mit getrennten Luftzuführungen verfügt. Der Übergang von Primär- zur Sekundärbrennkammer erfolgt über eine Verengung des Strömungsquerschnitts (Düse) wo die Sekundärluftzugabe erfolgt. Die Sekundärluft wird dabei innerhalb der Schamottierung der Primärbrennkammer entlang geführt und somit vorgewärmt. Die Sekundärluft dient dabei gleichzeitig zur Kühlung der Primärbrennkammer.

Die NO_x-Emissionen hängen bei der Holzverbrennung direkt vom Stickstoffgehalt des eingesetzten Brennstoffes ab. Spanplatten enthalten aufgrund von stickstoffhaltigen Bindemitteln und Beschichtungen (z.B. Melamin) gegenüber naturbelassenem Holz wesentlich mehr Stickstoff, was zu sehr hohen NO_x-Konzentrationen im Abgas führt (ZUBERBÜHLER U., BAUMBACH G. 1998: Feuerungen in der holzbe- und -verarbeitenden Industrie - Techniken, Emissionen, Neuentwicklungen. In Tagungsband: Emissionsarme Holzverbrennung in häuslichen und gewerblichen Feuerungsanlagen, Kolloquium am 29. September 1998 in Stuttgart, S. 53 - 66). Die Partikelemissionen unterliegen vielfältigen Einflüssen. Je feinkörniger die Brennstoffe sind, desto eher besteht die Möglichkeit, dass unverbrannte Brennstoff- und Aschepartikel von der Strömung im Feuerraum mitgerissen werden und so der Gasströmung durch den Wärmetauscher folgen, wo sie eine Schlüsselrolle bei der Neubildung von Dioxinen und Furanen spielen. Durch Sekundärmaßnahmen können diese relativ groben Partikel zwischen Wärmetauscher und Kamin mit einem Zyklon abgeschieden werden. Auch die NO_x-Konzentrationen lassen sich durch sekundäre Maßnahmen mindern, was einen erheblichen apparativen und regelungstechnischen Aufwand darstellt, der für Feuerungen < 1MW wirtschaftlich nicht vertretbar ist.

Die Prinzipien zur primären NO_x-Minderung sind hinreichend bekannt, aber an bestehenden Holzfeuerungen erst ansatzweise umgesetzt (NUSSBAUMER T. 1997: Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen. In: Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen, VDI Sonderpublikation, S. 279-308). Um die notwendigen Bedingungen zur primären NO_x-Minderung im Feuerraum einzustellen, wird

dieser räumlich in Primär- und Sekundärzone getrennt (Luftstufung). Dazwischen wird bei hoher Temperatur und Luftmangel eine Reduktionszone eingerichtet (KELLER R. 1994: Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 15: Umwelttechnik Nr. 129). Im Praxisbetrieb ist es jedoch sehr schwer, die zur NO_x-Minderung notwendigen Bedingungen einzustellen, da die Feuerungen - je nach momentanem Wärmebedarf mit unterschiedlicher Last betrieben werden. In Feuerungsanlagen > 1 MW bei denen Holzwerkstoffe und Spanplatten eingesetzt werden wird zur NO_x-Minderung die Rauchgasrezirkulation eingesetzt. Dadurch soll erreicht werden, die Feuerung im Primärbereich möglichst unterstöchiometrisch (mit Luftmangel) zu betreiben, um dort reduzierende Bedingungen zu schaffen. Dazu wird im Primärbereich der Feuerung ein Teilstrom der abgekühlten Rauchgase über separate Gebläse wieder zugegeben. Dies erfordert einen zusätzlichen Steuer- und Regelaufwand.

Partikel im Abgas werden bei Anlagen < 1MW in der Regel mit Trägheitsabscheidern (meist Zyklon) aus dem Abgas entfernt. Bei Feuerungsanlagen >1MW werden zur Entstaubung aufgrund des einzuhaltenden TA-Luft Grenzwertes Elektrofilter eingesetzt. Bei Feuerungen mit einem hohen Anteil an sehr feinen Partikeln (< 1µm) im Abgas werden vereinzelt Gewebefilter eingesetzt, da die sehr feinen Partikel mit einem Zyklon oder Elektrofilter nicht effektiv abgeschieden werden können.

Die nachträgliche Partikelabscheidung stellt immer einen apparativen Aufwand dar. Außerdem entstehen hier Reststoffe, die u.U. teuer entsorgt werden müssen. Bei der beschriebenen Erfindung verbleiben die von der Strömung mitgerissenen unverbrannten Partikel im heißen Feuerraum, bis diese vollständig ausgebrannt sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ausgehend von dem vorstehend beschriebenen Stand der Technik, eine Vorrichtung zum Verbrennen von Bio- und Feststoffmassen aufzuzeigen, mit der derartige Massen so verbrannt werden können, dass möglichst wenig Schadstoffe entstehen und emittiert werden. Die Erfindung dient dazu, die teilweise sehr hohen CO-, NO_x-, und Staubemissionen bei der Verbrennung von Bio- und Feststoffmassen durch primäre Maßnahmen erheblich zu senken. Diese Erfindung ist durch die Merkmale des Hauptanspruchs gegeben.

Bei der entsprechenden Vorrichtung mit einer Vergasungskammer (10) und einer Brennkammer (30), die über die Kanäle (25 u. 35) miteinander verbunden sind und eine Einheit bilden, kann Heißgas (33) aus der Brennkammer (30) in die Vergasungskammer (10) zurückgeführt werden. Dadurch können in den beiden Kammern die zur primären NO_x-Minderung notwendigen Bedingungen eingestellt werden. Durch die Heißgaszirkulation können diese Bedingungen auch bei Teillastbetrieb realisiert werden. Bei herkömmlichen Feuerungsanlagen kühlt der Feuerraum bei Teillast schnell aus, was zu erhöhten Emissionen führt. Dieser Effekt wird durch die Heißgaszir-

7 Anhang: Patentschrift

kulation erheblich vermindert. Es handelt sich hierbei nicht um die bereits vielfach angewendete Rauchgasrückführung.

Die Verbrennungsluft wird über getrennte Gebläse in der Vergasungskammer (10) und in der Brennkammer (30) zugeführt. Durch den Einsatz eines speziellen Gebläses (Gliederkopfgebläse 40.1) wird in der Brennkammer eine Drallströmung erzeugt, die für eine gute Durchmischung von Vergasungsprodukten (11) und Sekundärluft (32) sorgt. Dadurch kann der zur vollständigen Verbrennung notwendige Luftüberschuss erheblich reduziert werden, was sich positiv auf den Wirkungsgrad (weniger Abgasverluste) auswirkt. Außerdem wird die Drallströmung (31) in der Brennkammer (30) dazu benutzt, durch Flieh- und Trägheitskräfte Partikel abzuscheiden, die über den Heißgas-Rückführkanal (35) mit dem zirkulierenden Heißgas (33) wieder in die Vergasungskammer (10) gelangen. Dadurch kann der sonst hinter solchen Anlagen übliche Zyklonabscheider entfallen.

Das wesentlich Neue bzw. der Kern der Erfindung besteht darin, dass nicht bereits durch den Wärmetauscher abgekühltes Rauchgas (60) zurückgeführt wird, sondern Heißgas (33) aus der Brennkammer (30) in die Vergasungskammer (10) zurückgeführt wird. Ebenfalls neu ist die Rückführung der abgeschiedenen Partikel von der Brennkammer (30) in die Vergasungskammer (10).

Im Wandbereich der Brennkammer (30) wo der Flammkanal (25) in die Brennkammer mündet, entsteht durch die hohe Einströmgeschwindigkeit der Sekundärluft (32) ein relativer Unterdruck. Auf der gegenüberliegenden Wandseite herrscht relativer Überdruck. Diese Druckdifferenz dient zur Heißgaszirkulation (33). Je nach Gestaltung der Brennstoffaufgabe in der Vergasungskammer (10) kann es erforderlich sein die Druckdifferenz zur Heißgaszirkulation zu erhöhen. Dies kann z.B. durch eine Ausbildung der Primärluftzuführung (14) als Injektor erfolgen.

Die Erfindung wird im folgenden anhand des in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels näher beschrieben und erläutert. Es zeigt

Fig. 1 Längs- und Querschnitt der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einer feuerfest ausgekleideten Vergasungs- und Brennkammer mit je einem Gebläse.

In der feuerfest ausgekleideten Vergasungskammer (10) wird der Brennstoff (12) über einen Schneckenförder (13) zugeführt. Mit dem Gebläse (40.2) wird die zur Vergasung notwendige Primärluft (14) zugegeben. Die Primärluftzuführung ist in Fig. 1 als Injektor ausgebildet, so dass über die Öffnung (21) Heißgas (33) vom Ende der Brennkammer (30) zusammen mit der Primärluft (14) der Vergasungskammer (10) zugeführt wird. Die Vergasungsprodukte (11) gelangen über den Flammkanal (25) in die feuerfest ausgekleidete Brennkammer (30). Das Gliederkopfgebläse (40.1) setzt das Heißgas (31) in der Brennkammer (30) in Rotation. Außerdem wird mit dem Gliederkopfgebläse (40.1) die zur vollständigen Verbrennung nötige Sekundärluft (32) zu-

geführt. Anschließend durchströmt das vollständig verbrannte Heißgas (31) den Kessel (50), wo es seine Wärme an das Kesselwasser abgibt. Das abgekühlte Rauchgas (60) gelangt direkt oder über einen Entstauber in den Schornstein. Die ausgebrannte Asche (23) bleibt am Ende der Vergasungskammer (10) liegen, wo sie entweder mit einer Schnecke abgezogen werden kann oder in periodischen Abständen manuell entfernt werden muss.

BEZUGSZIFFERNLISTE

- 10 Vergasungskammer (feuerfest ausgekleidet)
- 11 Vergasungsprodukte
- 12 Brennstoff
- 13 Schneckenförderer (Brennstoff)
- 14 Primärluft (Frischluftezufuhr Vergasungskammer)
- 20 Wand (feuerfest)
- 21 Öffnung
- 23 Asche
- 25 Flammkanal (feuerfest ausgekleidet)
- 30 Brennkammer (feuerfest ausgekleidet)
- 31 Heißgas (Drallströmung)
- 32 Sekundärluft (Frischluftezufuhr Brennkammer)
- 33 zirkulierendes Heißgas
- 35 Heißgas-Rückführkanal (feuerfest ausgekleidet)
- 40.1 Gebläse Brennkammer
- 40.2 Gebläse Vergasungskammer
- 50 Kessel (Rauchrohrkessel)
- 60 Rauchgas

PATENTANSPRÜCHE

1. Vorrichtung zur primären Schadstoffminderung, mit einer Vergasungskammer und einer Brennkammer vor einem Wärmetauscher, dadurch gekennzeichnet,

dass die Vergasungskammer (10) und die Brennkammer (30) über je ein Gebläse (40.1 und 40.2) zur Verbrennungsluftzuführung verfügen und über einen Heißgas-Rückführkanal (35) und einen Flammkanal (25) direkt miteinander verbunden sind und eine Einheit bilden, wobei der Heißgas-Rückführkanal (35) am Ende der Brennkammer (30) platziert ist und der Flammkanal (25) am Ende der Vergasungskammer (10) unter dem Gebläse (40.1) in die Brennkammer (30) mündet.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

dass die Vergasungskammer (10) über eine eingebaute Wand (20) mit einer Öffnung (21) verfügt, über die die Primärluft (14) und das Heißgas (33) in die Vergasungskammer (10) gelangen.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

dass die Längsachsen der Vergasungskammer (10) und der Brennkammer (30) stehend angeordnet sind.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird eine Vorrichtung beschrieben, die es ermöglicht, den Verbrennungsprozess von Bio- und Feststoffmassen so zu führen, dass im Feuerraum die zur primären Schadstoffminderung notwendigen Bedingungen erfüllt werden. Der Feuerraum besteht aus einer feuerfest ausgekleideten Vergasungs- und einer Brennkammer, die so miteinander verbunden sind, dass heißes Gas aus der Brennkammer in die Vergasungskammer geleitet werden kann. Dieses Gas dient in der Vergasungskammer zum Transport der Entgasungsprodukte aus dem Brennstoffbett in die Brennkammer und zur Erzielung der notwendigen Temperatur in der Vergasungskammer. Diese Anordnung ermöglicht eine Brennstoffvergasung unter minimaler Primärluftzugabe. Bei Teillast kann so ein schnelles Auskühlen von Vergasungs- und Brennkammer verhindert werden. Die Luftzuführung für Primär- und Sekundärluft erfolgt über getrennte, geregelte Gebläse, womit die Menge des zirkulierten Heißgases eingestellt werden kann und eine optimale Durchmischung von Brenngasen und Verbrennungsluft erzielt wird.

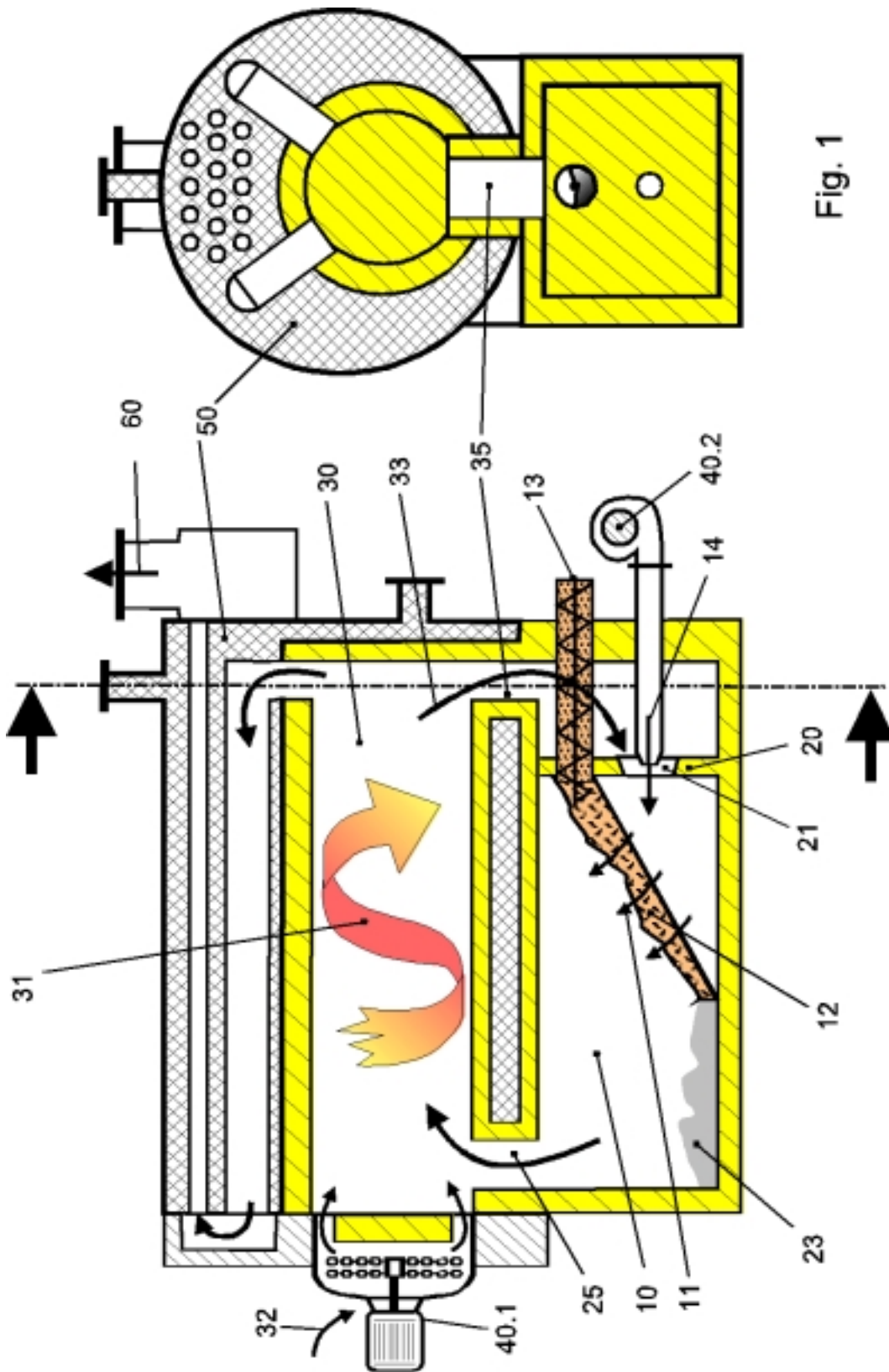


Fig. 1