

# Aktuelle Erkenntnisse im Bereich der Feinstaubemissionen bei Pelletsfeuerungen

Prof. Dr. Ingwald Obernberger<sup>1,2,3</sup>, Dipl.-Ing. Thomas Brunner<sup>1,2,3</sup>, Dr. Georg Bärnthaler<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Inffeldgasse 21b, 8010 Graz, Österreich

<sup>2)</sup> Austrian Bioenergy Centre GmbH, Inffeldgasse 21b, 8010 Graz, Österreich

<sup>3)</sup> Institut für Ressourcenschonende und Nachhaltige Systeme, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 21b, 8010 Graz, Österreich

Da der technische Standard von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen in den vergangenen Jahren ständig verbessert wurde, stehen dem Kunden zur Zeit ausgereifte Konzepte zur Auswahl, die sich durch hohe Bedienungsfreundlichkeit, hohe feuerungstechnische Wirkungsgrade sowie vergleichsweise niedrige gasförmige Emissionen auszeichnen. Dies gilt vor allem für moderne Pelletsfeuerungen. Der aktuelle dramatische Anstieg der Öl- und Gaspreise hat zusätzlich dazu geführt, dass die Nachfrage nach Pelletsheizungen sich deutlich verstärkt. Unter anderem durch dieses gesteigerte Interesse wurden jedoch von Seiten der Erzeuger und Vertrieber fossil befeuerter Zentralheizungskessel immer wieder erhöhte Feinstaubemissionen von Pelletsfeuerungen als Argument gegen den Einsatz dieser Technologie angeführt. Tatsache ist, dass Festbrennstoffe einen wesentlich höheren Aschengehalt aufweisen als Heizöl oder Erdgas und somit auch gezwungenermaßen höhere Staubemissionen entstehen. Tatsache ist aber auch, dass bislang nur wenige abgesicherte Daten über Feinstaubemissionen aus modernen Pelletsfeuerungen zur Verfügung standen, und somit eine Gegenargumentation erschwert war, da zum Teil auf Basis schlecht abgesicherter oder nicht aktueller Emissionsmessdaten argumentiert wurde. Ergebnisse neuester Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Feinstaubemissionen von modernen Pelletsfeuerungen am unteren Ende des oft in den Medien kolportierten Emissionsspektrums liegen. In dieser Veröffentlichung soll der aktuelle Stand des Wissens bezüglich Feinstaubbildung und Feinstaubemissionen aus Pelletsfeuerungen sowie deren Relevanz bezüglich der Auswirkungen auf den menschlichen Organismus zusammengefasst und ein Ausblick auf laufende Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet gegeben werden.

## Allgemeines zu Feinstaubemissionen und Feinstaubimmissionen

### Definitionen

Die Gesamtheit aller Partikel in der Umgebungsluft wird üblicherweise als Gesamtstaub oder TSP (Total Suspended Particulate Matter) bezeichnet und wird prinzipiell in zwei Bereiche (Modes) unterteilt. Diese sind der Coarse Mode (grobe Partikel mit einem Durchmesser von ca. 1 µm bis zu ca. 40 µm) sowie der Fine Mode (Feinstaub <1µm) [1]. Weil die luftgetragenen Partikel weder eine einheitliche Form noch Dichte haben, wird für sie ein aerodynamischer Durchmesser (ae.d.) angegeben. Man nimmt dazu ein kugelförmiges Teilchen mit einer Dichte von 1 g/cm<sup>3</sup> an und berechnet, welchen Durchmesser dieses Teilchen haben müsste, um gleich schnell wie das betrachtete Teilchen in Luft zu sinken.

Zur besseren Erfassung und Beschreibung der einzelnen Partikelfractionen werden zusätzlich die Begriffe PM<sub>10</sub> (Particulate Matter = Schwebstaub mit einem Durchmesser von <10 µm), PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>1,0</sub> verwendet.

### Emissionsquellen der Immissionen

Partikel die dem Coarse Mode zuzuordnen sind entstehen beispielsweise durch Abrieb (Reifenabrieb, Abrieb von Bremsbelägen) und Aufwirbelungen (Rollsplitt etc.) des Straßenverkehrs auf befestigten und unbefestigten Wegen, durch Aufwirbelungen beim Umschlag von Schüttgütern sowie durch landwirtschaftliche Tätigkeiten und im Rahmen industrieller Prozesse. Der Fine Mode hingegen resultiert in der Regel aus Partikelemissionen aus der Industrie, dem Straßenverkehr (Dieselruß), der Energieproduktion sowie des Hausbrands.

Die Emissionsquellen sind somit vielfältig und eine direkte Zuordnung der Verursacher einer lokalen Immissionssituation ist in vielen Fällen nur schwer möglich. Die Zuordnung unterschied-

licher Emissionsquellen wird zusätzlich dadurch erschwert, dass Feinstäube sehr lange in der Luft dispergiert bleiben, und je nach Wetterlage auch vom Ort ihrer Entstehung in benachbarte und weiter entfernte Regionen mit den Luftmassen verfrachtet werden.

### **Grenzwerte**

Grenzwerte für Partikelkonzentrationen in der Umgebungsluft sind durch die EU Richtlinie 1999/30/EG festgelegt und regeln die PM10 Immissionen. Der Grenzwert für den Tagesmittelwert an PM10 liegt laut dieser EU-Richtlinie bei 50 µg/m<sup>3</sup> und darf an einer Messstelle ab 2005 nicht öfter als 35 mal im Jahr überschritten werden. In vielen europäischen Regionen werden derzeit deutlich mehr als 35 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 50 µg/m<sup>3</sup> pro Jahr festgestellt, was dazu geführt hat, dass die lokale Luftgütesituation sowie Maßnahmen zur Reduktion von Feinstaubimmissionen in den vergangenen Jahren immer häufiger öffentlich diskutiert wurden.

### **Gesundheitsrelevanz von Feinstaub**

Es ist allgemein bekannt und durch zahlreiche medizinische Studien nachgewiesen, dass erhöhte Staubkonzentrationen in der Umgebungsluft langfristig zu gesundheitlichen Schäden führen, wobei fast ausschließlich die Inhalation von partikelbelasteter Luft von Relevanz ist. Je kleiner Partikel sind, umso tiefer können sie in die Lungen eindringen, dort abgelagert werden und somit in den menschlichen Organismus gelangen. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass Partikel <10 µm bis in die Bronchien gelangen und Partikel <5 µm noch tiefer in die Lungen eindringen [2]. Aktuelle Untersuchungen konzentrieren sich vor allem darauf Parameter zu definieren, die eine Klassifizierung der Toxizität von Feinstäuben zulassen. Es ist nach wie vor nicht eindeutig geklärt, in wie fern spezielle chemischen Elemente bzw. Verbindungen die Toxizität beeinflussen. Dabei muss zusätzlich beachtet werden, dass stark hygroskopische und wasserlösliche Partikel ein deutlich anderes Verhalten bezüglich deren Aufnahme in sowie deren Auswirkungen auf den menschlichen Organismus haben können als wasserunlösliche Partikel. Konsens herrscht lediglich darin, dass die Gesundheitsgefährdung mit abnehmender Korngröße steigt, was in erster Linie auf die höhere spezifische Oberfläche kleinerer Partikel zurückzuführen ist. Des Weiteren besteht die klare Tendenz, dass zur Bewertung von PM die Anzahl der Partikel von größerer Relevanz ist als die Masse, da eine große Anzahl kleiner Partikel zwar in Summe gesehen über weniger Masse verfügt als weniger aber dafür größere Partikel, die Oberfläche dieses Partikelkollektivs aber deutlich höher ist.

## **Flugaschenemissionen aus Biomassefeuerungsanlagen**

### **Allgemeines**

Die im vorangegangenen Abschnitt erwähnten häufigen Grenzwertüberschreitungen für PM10 haben dazu geführt, dass die Diskussionen zu diesem Thema stark emotionalisiert wurden. Zum Teil wurde und wird speziell von den Erzeugern und Vertreibern von fossilen Heizungssystemen auf Basis schlecht recherchierter oder nicht repräsentativer Emissionsdaten von Biomassefeuerungen (es werden meist Emissionswerte schlecht geregelter Altanlagen herangezogen) argumentiert, was zu einer Verunsicherung von Betreibern von Biomasseheizanlagen sowie potentieller Neukunden führt. Es ist dabei sehr wichtig zu berücksichtigen, dass die technologische Weiterentwicklung von Biomassefeuerungen in den letzten Jahren auch zu einer deutlichen Reduktion der Feinstaubemissionen geführt hat. Wie die in den folgenden Abschnitten ausgeführten Argumente noch deutlich zeigen werden, kann auf Basis des bereits vorhandenen Wissens belegt werden, dass Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen zwar ein ernst zu nehmendes Thema darstellen, jedoch keinesfalls, wie es in der Öffentlichkeit des öfteren versucht wird, überbewertet werden dürfen.

Allgemein muss festgestellt werden, dass Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Thema Staub- bzw. Flugaschenbildung in Biomassefeuerungen seit längerer Zeit vorrangig für mittelgroße und große Feuerungsanlagen betrieben wurde [3]. Erst vor wenigen Jahren sind auch Untersuchungen bezüglich der Staubbildung in Biomasse-Kleinfeuerungen angelaufen. Aus diesem Grund werden hier auch einige relevante Partikelbildungsmechanismen auf Basis der Erkenntnisse an Großanlagen erläutert und dann durch die aktuellen Erkenntnisse von Messungen an Biomasse-Kleinfeuerungen, im speziellen an Pelletskesseln, ergänzt.

## Flugaschenbildung in Biomassefeuerungen

Im Gegensatz zu flüssigen und gasförmigen fossilen Brennstoffen enthalten feste Brennstoffe erhebliche Anteile an anorganischen Elementen, die so genannten Aschenbildner. Aus diesem Grund treten bei der Biomasseverbrennung (wie auch bei der Kohlenverbrennung) generell höhere Staubemissionen auf als bei der Verbrennung gasförmiger oder flüssiger Brennstoffe. Prinzipiell lassen sich Flugaschenemissionen aus Biomassefeuerungen in zwei Kategorien, nämlich grobe Flugaschen und Aerosole (Feinstäube) unterteilen (siehe Abbildung 1).

Grobe Flugaschen entstehen durch Aufwirbelung von Aschen- und Holzkohlenpartikeln vom Brennstoffbett, die dann in weiterer Folge mit dem Rauchgas aus dem Feuerraum ausgetragen werden. Ein Teil dieser Partikel wird bereits im Feuerraum und im Kessel wieder aus der Strömung abgeschieden (durch Schwerkraft und/oder Zentrifugalkräfte in Wendekammern), der verbleibende Anteil verlässt die Feuerung als Partikelemission. Typische Partikelgrößen von groben Flugaschen liegen in Großfeuerungsanlagen bei ca. 10 bis 250  $\mu\text{m}$ . Das Verteilungsmaximum liegt im Bereich zwischen 30 und 70  $\mu\text{m}$  [3, 4]. Grobe Flugaschenpartikel bestehen, sofern ein annähernd vollständiger Holzkohlenausbrand vorausgesetzt wird, aus den Hauptaschenbildnern wie Si, Ca, Mg und K, die in der Regel als Oxide und Sulfate gebunden sind. Die Konzentration der groben Flugaschen im Rauchgas hängt in erster Linie vom Aschegehalt des Brennstoffes, von der Feuerungstechnologie (Rostfeuerer, Wirbelschicht etc.), von Störungen im Brennstoffbett, welche das Aufwirbeln von Aschenpartikeln fördern, sowie den Rauchgasgeschwindigkeiten im Feuerraum und im Kessel ab. Bei Großanlagen liegen die Emissionen am Kesselaustritt in Größenordnungen von bis zu einigen  $\text{g}/\text{m}^3$ .

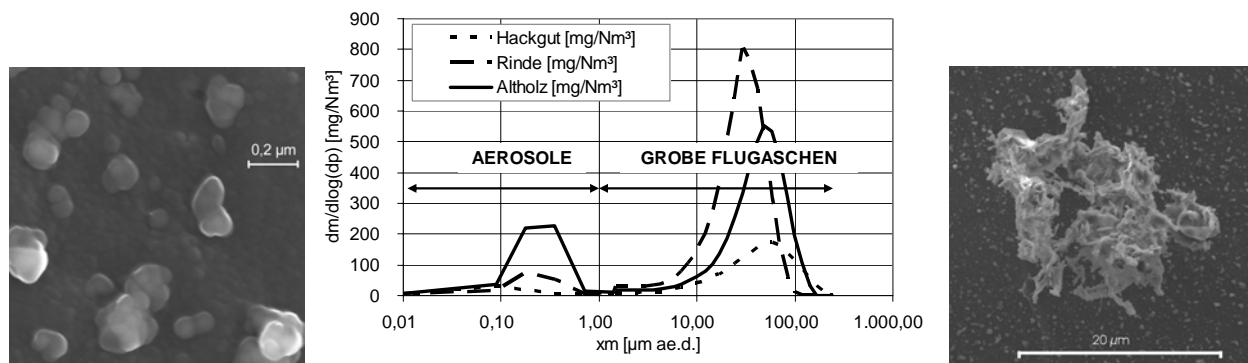


Abbildung 1: Korngrößenverteilung und elektronenmikroskopische Aufnahmen von Flugaschenemissionen aus einer Biomassefeuerungsanlage

Erläuterung: Messergebnisse von Testläufen an einer  $400 \text{ kW}_{\text{th}}$  Vorschubrostfeuerer bei Vollastbetrieb; ae.d. ... aerodynamischer Durchmesser; linkes Photo: Aerosole; rechtes Photo: grobes Flugaschenpartikel

Die zweite Partikelfraktion stellen die so genannten Aerosole dar. Die Bildungsmechanismen, die zur Aerosolbildung führen, sind bei weitem komplexer und ihre Erklärung erfordert das Verständnis des gesamten Verbrennungsprozesses. Aerosole sind Partikel mit einem Durchmesser deutlich unter  $1 \mu\text{m}$ , die sich durch Kondensation von Dämpfen aus der Gasphase heraus bilden. Betrachtet man die in Abbildung 1 dargestellte typische Korngrößenverteilung von Flugaschen aus einer Biomassefeuerungsanlage, so kann man sofort erkennen, dass für die Bildung von Feinstaubemissionen (PM<sub>10</sub>) annähernd nur Aerosole, und kaum grobe Flugaschen verantwortlich sind. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt im Detail auf die komplexen Vorgänge, die die Aerosolbildung (Feinstaubbildung) beeinflussen, eingegangen.

## Aerosolbildung in Biomassefeuerungen

Der Biomasseverbrennungsprozess läuft prinzipiell in mehreren Stufen ab. Wird ein Brennstoffpartikel in den Feuerraum eingebracht, so durchläuft es zuerst eine Trocknungsphase, während der sich das Partikel hauptsächlich durch Strahlungsenergie aus dem umgebenden Feuerraum erwärmt. Anschließend folgt die Pyrolyse bzw. Vergasungsphase, während der flüchtige Bestandteile des Brennstoffes in die Gasphase freigesetzt werden. Dabei muss prinzipiell zwischen brennbaren flüchtigen Bestandteilen wie zum Beispiel Wasserstoff, Kohlenwasserstoffen

und Kohlenmonoxid sowie nicht brennbaren anorganischen flüchtigen Komponenten, die hauptsächlich aus K, Na, S, Cl sowie leicht flüchtigen Schwermetallen wie Zn, Pb und Cd bestehen, unterschieden werden. Nach Abschluss dieser Phase erfolgt der Ausbrand der im Brennstoffbett verbliebenen Holzkohle in Form heterogener Gas-Fest-Phasenreaktionen. Auch während dieser Phase werden anorganische Komponenten in die Gasphase freigesetzt. Bezüglich der Aerosolbildung kann prinzipiell zwischen zwei Bildungspfaden unterschieden werden:

### **Bildung von anorganischen Aerosolen**

Wie bereits erwähnt wurde, wird ein Teil der leicht flüchtigen Aschebildner, wie zum Beispiel K, Na, S, Cl, Zn und Pb, während der Pyrolyse-/Vergasungsphase und dem Holzkohleausbrand vom Brennstoffbett in die Gasphase freigesetzt. In weiterer Folge gehen diese Komponenten chemische Reaktionen ein. K und Na bilden dabei in erster Linie Sulfate und Chloride sowie Karbonate. Leicht flüchtige Schwermetalle reagieren in der Regel zu Oxiden oder Chloriden. Welche Komponenten in welchem Massenanteil im Detail gebildet werden, hängt in erster Linie von den Konzentrationen der einzelnen Elemente in der Gasphase und den damit zusammenhängenden Gleichgewichtszusammensetzungen ab. Es ist somit auch ein direkter Zusammenhang der Aerosolbildung mit der Brennstoffzusammensetzung gegeben. Überschreitet nun der Dampfdruck einer dieser Komponenten den Sättigungsdampfdruck, so werden durch Nukleation Partikel gebildet, die Korngrößen von wenigen Nanometern (nm) aufweisen. Diese Übersättigung kann einerseits durch die Bildung einer Komponente mit sehr niedrigem Sättigungsdampfdruck (z.B.: ZnO) oder durch das Absenken des Sättigungsdampfdruckes auf Grund der Abkühlung des Rauchgases im Kessel erfolgen. Die so gebildeten Partikel beginnen auf ihrem weiteren Weg mit dem Rauchgas durch die Feuerung und den Kessel durch Kollisionen zu agglomerieren und wachsen somit an. Sobald eine ausreichende Anzahl an Partikeln im Rauchgas gebildet wurde, kommt es zusätzlich zur Kondensation von aschebildenden Dämpfen auf den Partikeloberflächen und somit zu weiterem Partikelwachstum. Agglomeration und Kondensation führen in weiterer Folge zur Ausbildung der typischen Korngrößenverteilung der Aerosole im Rauchgas am Kesselaustritt (Abbildung 1). Diese Korngrößenverteilung ist unimodal und zeichnet sich durch ein Verteilungsmaximum aus, das bei Einsatz chemisch unbehandelter holzartiger Brennstoffe bei ca. 0,1 bis 0,2  $\mu\text{m}$  (ae.d.) liegt.

### **Bildung organischer Aerosole (Produkte unvollständiger Verbrennung)**

Während der Pyrolyse-/Vergasungsphase werden, wie bereits erwähnt wurde, flüchtige brennbare Komponenten aus dem Brennstoff in die Gasphase freigesetzt. Dort reagieren diese Komponenten in Form homogener Gasphasenreaktionen idealerweise mit der Verbrennungsluft zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Ein möglichst vollständiger Gasphasenausbrand und somit eine möglichst vollständige Umsetzung der brennbaren flüchtigen Biomassebestandteile ist zwar das Ziel jeder modernen Biomassefeuerungsanlage, die Bildung von Produkten des unvollständigen Gasphasenausbrands, wie CO und organische Kohlenstoffverbindungen, kann jedoch nicht gänzlich vermieden werden. Während der Abkühlung des Rauchgases können sich bei unzureichendem Gasphasenausbrand durch Kondensation von gasförmigen Kohlenstoffverbindungen ebenfalls Aerosole bilden. Wie die anorganischen Aerosole wachsen auch diese dann im weiteren Verlauf ihres Weges durch Feuerung und Kessel auf Grund von Kondensationseffekten und Agglomeration.

## **Einflussfaktoren auf die Flugaschenbildung in Pelletskesseln**

### **Einflussfaktoren auf die Bildung grober Flugaschen**

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt wurde, werden in mittelgroßen und großen Biomassefeuerungen Emissionen an groben Flugaschepartikeln am Kesselaustritt von bis zu einigen  $\text{g}/\text{m}^3$  gemessen. Dies stellt kein emissionstechnisches Problem dar, da die Entstaubung für diese groben Flugaschen problemlos über Zyklone und Multizyklone realisiert werden kann. Ergebnisse von Messungen an Pelletskesseln haben im Gegensatz dazu gezeigt, dass in diesen Feuerungen nur geringe Emissionen an groben Flugaschen auftreten. Gründe dafür sind der extrem niedrige Aschengehalt von Holzpellets, die vergleichsweise geringen Rauchgasgeschwindigkeiten im Feuerraum und im Kessel sowie, verglichen mit Vorschubrosten in Großanlagen, deutlich ruhigere Verbrennung der Pellets in den eingesetzten Brennersystemen.

Daraus resultiert, dass der rechte Teil der bimodalen Korngrößenverteilung der Flugaschenemissionen in Abbildung 1 bei Pelletsfeuerungen nur schwach ausgeprägt ist und somit die Gesamtstaubemission zum Großteil dem Bereich PM<sub>10</sub>, oder genauer gesagt dem Bereich PM<sub>1</sub> zugeordnet werden kann.

### Einflussfaktoren auf die Bildung anorganischer Aerosole

Die Bildung anorganischer Aerosole kann in Biomassefeuerungsanlagen, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen, durch anlagentechnische und regelungstechnische Maßnahmen nicht wesentlich beeinflusst werden. Da Aerosole, wie beschrieben, aus leicht flüchtigen anorganischen Komponenten, die während der Verbrennung aus dem Brennstoff in die Gasphase übergehen, gebildet werden, ist die chemische Zusammensetzung des Brennstoffes bzw. das Freisetzungsverhalten der Aerosolbildner der bestimmende Faktor für die Feinstaubbildung. In Abbildung 2 sind Messergebnisse der Aerosolemissionen von mittelgroßen und großen Biomassefeuerungsanlagen mit den Gehalten dieser leicht flüchtigen anorganischen Komponenten (K, Na, S, Cl, Zn, Pb) im eingesetzten Brennstoff korreliert. Dazu muss prinzipiell angemerkt werden, dass der Gehalt an Aerosolbildnern im Brennstoff von Weichholz über Hartholz zu Rinde und Altholz, wie die Graphik verdeutlicht, stark ansteigt. Stroh und Ganzpflanzen enthalten noch deutlich höhere Konzentrationen an Aerosolbildnern als Altholz. Bei den naturbelassenen, chemisch unbehandelten Biomassebrennstoffen sind vor allem die Gehalte an K, S und Cl für die Aerosolbildung ausschlaggebend, während bei chemisch behandelten Brennstoffen (Altholz) Schwermetalle wie Zn und Pb an Bedeutung gewinnen.

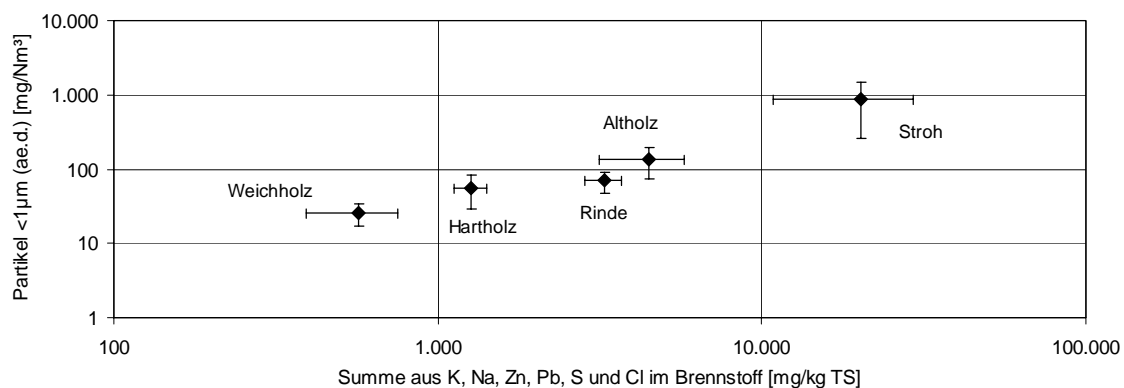


Abbildung 2: Aerosolemissionen mittelgroßer und großer Biomassefeuerungsanlagen im Vergleich zu den im Brennstoff enthaltenen Aerosolbildnern

Erläuterungen: Emissionen bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol.% O<sub>2</sub>; TS ... Trockensubstanz; Ergebnisse von Messungen an Rostfeuerungen im Leistungsbereich zwischen 400 kW<sub>th</sub> und 50 MW<sub>th</sub>; Quellen: [3, 4, 5]

Generell kann angemerkt werden, dass Weichholzpellets verhältnismäßig niedrige Gehalte an K, Na, S, Cl und leicht flüchtigen Schwermetallen (Zn, Pb, Cd) aufweisen, und somit auch vergleichsweise geringe Mengen an Aerosolen während der Verbrennung gebildet werden (siehe nächster Abschnitt). Abbildung 2 verdeutlicht aber auch, dass bei Einsatz von Pellets mit Anteilen an Hartholz, Rinde oder Stroh, der Anteil an diesen Komponenten deutlich steigt, und somit die Aerosolemissionen auch anwachsen. Auf Grund der vergleichsweise hohen K-, S- und Cl-Gehalte von Ganzpflanzen sind bei Einsatz dieser Brennstoffe sehr hohe Aerosolemissionen zu erwarten.

### Einflussfaktoren auf die Bildung organischer Aerosole

Im Gegensatz zur Bildung anorganischer Aerosole kann die Bildung kohlenstoffhaltiger Aerosole durch die Anlagentechnologie und Regelungstechnik deutlich beeinflusst werden. Je vollständiger die Verbrennung (der Gasphasenausbrand) ist, umso weniger organische Kohlenstoffverbindungen, die während der Abkühlung des Rauchgases im Wärmetauscher kondensieren können, stehen zur Verfügung. In modernen mittelgroßen und großen Biomassefeuerungen zum Beispiel, die bei CO-Konzentrationen im Rauchgas von <math><100\text{ mg/Nm}^3</math> und org. C-Emissionen von weniger als 10 mg/Nm<sup>3</sup> betrieben werden, konnten bei Analysen von Aerosolproben keine bzw. nur sehr geringe Konzentrationen an organischem Kohlenstoff festgestellt werden. Es kann somit gesagt werden, dass alle Maßnahmen, die zur Reduktion von CO- und org.C-Emissionen führen,

auch dazu beitragen, die Aerosolbildung zu minimieren. Beispiele für solche Maßnahmen sind eine gute Verwirbelung der Verbrennungsluft mit den Rauchgasen im Feuerraum sowie ausreichend hohe Verweilzeiten der Rauchgase bei entsprechend hohen Feuerraumtemperaturen.

## Feinstaubemissionen von Pelletsfeuerungen

Im Rahmen von Kesselzulassungen und Kesselprüfungen von Biomasse-Kleinfeuerungen wird generell immer der Gesamtstaubgehalt als Parameter für die Partikelemissionen von Feuerungen bestimmt. Somit sind aus diesen Messungen keine Daten bezüglich der PM10-Emissionen verfügbar. Erst seit wenigen Jahren beschäftigen sich einige Forschungsprojekte mit der Frage der Korngrößenverteilung von Staubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen, und somit auch von Pelletskesseln [6, 7, 8].

Ein Ergebnis, das alle diese Studien zeigen ist, dass, wie bereits erwähnt wurde, grobe Flugaschen nur einen kleinen Beitrag zu den Staubemissionen von modernen Pelletskesseln leisten. Mehr als 90% der emittierten Gesamtstaubmenge kann diesen Messungen zufolge [6] dem PM1-Bereich ( $<1 \mu\text{m ae.d.}$ ) zugeordnet werden.

Größere Unterschiede treten bei den gemessenen Aerosolkonzentrationen auf. Hier zeigt sich deutlich der Zusammenhang zwischen der Gasphasenausbrandqualität und der Aerosolbildung. Wird eine Pelletsfeuerung bei niedrigen gasförmigen CO und org.-C Emissionen betrieben, so werden fast ausschließlich anorganische Aerosole gebildet. Bei Einsatz von Weichholzpellets, die vergleichsweise geringe K-, S- und Cl-Gehalte aufweisen, liegen die Aerosolemissionen somit in einem Bereich  $<20 \text{ mg/Nm}^3$  (bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol.%  $\text{O}_2$ ). Dies wird durch Messergebnisse aus [6] sowie durch erste Ergebnisse eines laufenden Forschungsprojektes am Austrian Bioenergy Centre, das sich im Rahmen umfassender Messserien mit Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen beschäftigt, bestätigt. Die Partikel bestehen in diesem Fall fast ausschließlich aus K und S sowie geringen Anteilen an Cl und Spuren von Na und Zn. Der Kohlenstoffanteil an den Partikeln resultiert hauptsächlich aus Karbonaten (K, das nicht als Sulfat oder Chlorid gebunden ist, bildet Karbonate) und nicht aus organischen Kohlenstoffverbindungen. Es zeigt sich jedoch auch deutlich, dass mit abnehmender Gasphasenausbrandqualität auch die Aerosolemissionen deutlich (um mehr als das zehnfache) ansteigen [8]. In diesen Fällen tragen elementarer Kohlenstoff sowie kondensierte Kohlenwasserstoffe weit mehr zur gebildeten Aerosolmenge bei als anorganische Aschenbildner.

Bezüglich der Korngrößenverteilung der emittierten Partikel ist anzumerken, dass das Massenverteilungsmaximum im Falle eines guten Gasphasenausbrands (überwiegend anorganische Aerosole) im Bereich zwischen  $0,1$  und  $0,2 \mu\text{m ae.d.}$  liegt (siehe Abbildung 3). Bei steigender Aerosolkonzentration durch Kondensation von kohlenstoffhaltigen Verbindungen (bei schlechter Ausbrandqualität) steigt der mittlere Partikeldurchmesser auf  $0,3$  bis  $0,4 \mu\text{m ae.d.}$ .

Die Anzahldichte der Aerosole liegt im Falle eines guten Gasphasenausbrands in der Größenordnung von  $10^7$  Partikel/ $\text{cm}^3$  Rauchgas und steigt bei unzureichendem Gasphasenausbrand auf Werte in der Größenordnung von  $10^8$  Partikel/ $\text{cm}^3$  Rauchgas an.

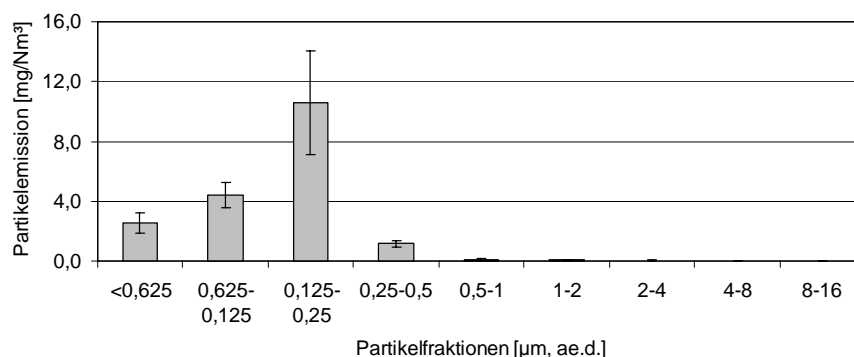


Abbildung 3: Korngrößenverteilung von Aerosolemissionen am Kesselaustritt  
 Erläuterungen: Mittelwerte und Standardabweichungen von 5 Messungen an einer modernen Pelletsfeuerung ( $20 \text{ kW}_{th}$ ) bei Nennlastbetrieb; ae.d. ... aerodynamischer Durchmesser; Daten bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol%  $\text{O}_2$

## Umweltrelevanz von Feinstaubemissionen aus Biomassefeuerungen

Wie bereits einleitend erwähnt wurde, gibt es derzeit noch keine eindeutige Festlegung, welche Parameter die Toxizität von Feinstäuben bestimmen. Aerosole aus modernen Pelletsfeuerungsanlagen, die Pellets laut der deutschen oder österreichischen Pelletnorm aus Weichholz einsetzen, bestehen, wenn guter Ausbrand gegeben ist, zum überwiegenden Teil aus Kaliumsulfat und enthalten nur geringe Schwermetallanteile. Derzeit sind umfassende Arbeiten zur Untersuchung der Toxizität von Aerosolen aus Biomassefeuerungen im Gange, es sind jedoch noch keine abgesicherten Ergebnisse verfügbar. Erste und vorläufige Resultate deuten darauf hin, dass die Toxizität von gut ausgebrannten Feinstäuben aus Holzfeuerungen deutlich geringer zu sein scheint als die von Dieselruß [9]. Diese Ergebnisse müssen aber noch geprüft und durch mehrere unabhängige Untersuchungen bestätigt werden.

Für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen erscheint es in diesem Zusammenhang als sehr wichtig, dass durch eine entsprechende vollautomatische Regelung der Anlage sichergestellt wird, dass ein möglichst vollständiger Ausbrand in allen Betriebsphasen erreicht werden kann, um die Bildung von organischen Aerosolen weitgehend zu vermeiden.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Veröffentlichung wird aufgezeigt, wie Feinstaubemissionen in Biomassefeuerungen gebildet werden und welche prinzipiellen Möglichkeiten zur Reduktion dieser Emissionen durch Primärmaßnahmen bestehen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass anorganische Feinstaubemissionen insbesondere durch die Wahl des Brennstoffes beeinflussbar sind. Der Ausstoß an organischen Aerosolen kann grundsätzlich durch einen entsprechend guten Gasphasenausbrand auf ein Minimum reduziert werden.

Bei Einsatz von Weichholzpellets in Kleinfeuerungsanlagen, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen, ist mit Aerosolemissionen von  $<20 \text{ mg/Nm}^3$  (bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol.%  $\text{O}_2$ ) zu rechnen. Entsprechend den höheren Gehalten an Aerosolbildnern im Brennstoff ist bei Verfeuerung von Hartholz, Rinde, Stroh oder Ganzpflanzen eine deutlich höhere Aerosolemission gegeben.

Die gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaubemissionen aus Biomassefeuerungen sind derzeit noch unzureichend erforscht. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Ergebnisse derzeit laufender Forschungsprojekte, die in den kommenden Jahren vorliegen werden, von besonderer Relevanz.

Ein in diesem Zusammenhang sehr wichtiges Forschungsvorhaben, das Projekt „Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen“, das am Austrian Bioenergy Centre in Graz durchgeführt wird, konzentriert sich darauf die relevanten Einflussgrößen auf die Feinstaubbildung genau zu ergründen und die Feinstaubemissionen für unterschiedliche holzartige Biomasse-Brennstoffe (Pellets, Hackgut, Stückholz) und Feuerungstechnologien zu untersuchen. Ziel der Arbeiten ist es, die Feinstaubemissionen aus den genannten Feuerungsanlagen genau zu charakterisieren und durch entsprechende Primärmaßnahmen zu minimieren. In naher Zukunft ist am Austrian Bioenergy Centre auch ein Projekt bezüglich der Erforschung der gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen geplant, das auf dem genannten Projekt aufbauen wird.

## Literatur

1. WILSON W.E., SUH H. H., 1997: Fine particles and coarse particles: concentration relationship relevant to epidemiological studies, J. Air & Waste Management Association, Vol. 47, pp 1238-1249
2. HAUCK H, 2005: Health effects of ambient aerosols, in: Proc. of the Internat. Seminar "Aerosols in Biomass Combustion", March 2005, Graz, Austria, book series "Thermal Biomass Utilization", Volume 6, ISBN 3-9501980-2-4, pp.1-11, published from BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz, Austria
3. OBERNBERGER I., BRUNNER T., FRANDSEN F., SKIFVARS B.-J., BROUWERS J.J.H., MÜLLER M., STEURER C., BECHER U., 2003: Aerosols in fixed-bed biomass combustion – formation, growth, chemical composition, deposition, precipitation and separation from flue gas, final report, EU project No. NNE5-1999-00114, European Commission DG Research (ed), Brussels, Belgium
4. BRUNNER T., JÖLLER M., OBERNBERGER I., 2004: Aerosol formation in fixed-bed biomass furnaces - results from measurements and modelling. To be published in: Proc. of the Internat. Conf. Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, Sept 2004, Victoria, Canada

5. CHRISTENSEN K. A., 1995: The Formation of Submicron Particles from the Combustion of Straw, Ph.D. Thesis, ISBN 87-90142-04-7, Department of Chemical Engineering (ed), Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark
6. HARTMANN H., SCHMID V., LINK H., 2005: Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung, Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), ISSN 1614-1008, Straubing, 2005
7. BOMAN C., NORDIN A., BOSTRÖM D., ÖHMAN M., 2004: Characterization of inorganic particulate matter from residential combustion of pelletized biomass fuels, Energy and Fuels 2004, 18:338-348
8. JOHANSSON L., LECKNER B., GUSTAVSSON L., COOPER D., POTTER A., TULLIN C., NERNTSEN M., 2005: Particle emissions from residential biofuel boilers and stoves – old and modern techniques, in: Proc. of the Internat. Seminar "Aerosols in Biomass Combustion", March 2005, Graz, Austria, book series "Thermal Biomass Utilization", Volume 6, ISBN 3-9501980-2-4, pp.1-11, published from BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz, Austria
9. NUSSBAUMER T., KLIPPEL N., OSER M., 2005: Health relevance of aerosols from biomass combustion in comparison to diesel soot indicated by cytotoxicity tests, in: Proc. of the Internat. Seminar "Aerosols in Biomass Combustion", March 2005, Graz, Austria, book series "Thermal Biomass Utilization", Volume 6, ISBN 3-9501980-2-4, pp.1-11, published from BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz, Austria