

Verminderung der Feinstaubemissionen um 60 bis 80%:

Low-Particle-Konzept für automatische Holzfeuerungen

PD Dr.

Thomas Nussbaumer*

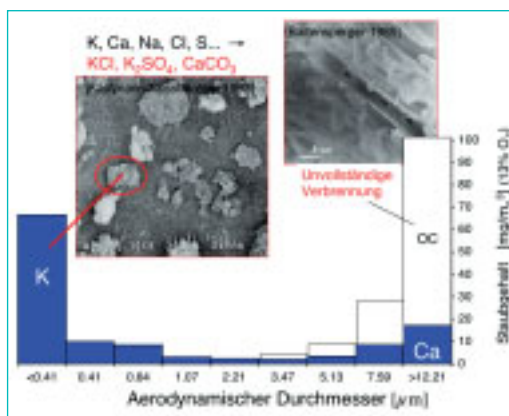
Da Holz als erneuerbarer Energieträger zur Substitution fossiler Brennstoffe beiträgt, wird die Holzenergie in der Schweiz von Bund und Kantonen gefördert. Ziel ist eine Verdopplung der Energieerzeugung aus Holz und eine entsprechende Erhöhung des Anteils am Gesamtenergieverbrauch, welcher heute rund 2,5% beträgt. Dazu kommen vor allem automatische Holzheizungen für grössere Einzelverbraucher sowie zur Versorgung von Wärmenetzen zum Einsatz. Eine vermehrte Energieholznutzung ist allerdings teilweise im Widerspruch zu den Zielen der Luftreinhaltung, da Holzfeuerungen vergleichsweise hohe Stickoxid- und Staubemissionen aufweisen.

Abbildung 1: Korngrössenverteilung angegeben als aerodynamischer Durchmesser des Staubs einer automatischen Holzfeuerung nach [2]. REM-Aufnahmen nach [3] und [4]. Die Partikel kleiner 1 Mikrometer bestehen grossteils aus Kaliumverbindungen, während vor allem in der Grobfraction über 5 Mikrometer auch Calciumverbindungen aus der Rinde wichtig sind. Bei unvollständiger Verbrennung werden zusätzliche kohlenstoffhaltige Partikel freigesetzt, welche vor allem zu grösseren Partikeln über 1 Mikrometer führen, wobei der im Bild eingezeichnete Anteil Staub aus unvollständiger Verbrennung nur qualitativen Charakter aufweist.

Massnahmen zur Reduktion dieser zwei Schadstoffe haben deshalb hohe Priorität. Dies gilt besonders für Feinstäube kleiner 10 Mikrometer (Particulate Matter PM 10), weil diese lungengängigen Stäube verschiedene Gesundheitsschädigungen verursachen und die Immissionsgrenzwerte an PM 10 in grossen Teilen der Schweiz überschritten werden.

Im Beitrag wird ein neues Verbrennungskonzept vorgestellt, mit welchem die Staubemissionen bei auto-

matischen Holzfeuerungen um voraussichtlich rund 60% bis 80% reduziert werden können. Mögliche Einsatzgebiete sind einerseits Anlagen ohne Feinstaubabscheider bis zu rund 0,5 MW oder 1 MW zum Einsatz von qualitativ hochwertigen Energieholzsorimenten wie zum Beispiel Holzpellets. Für grössere Anlagen sowie schwierigere Holzbrennstoffe sollten in Zukunft Feinstaubabscheider eingesetzt werden. Das Low-Particle-Konzept ermöglicht dann eine Reduktion der Filterbelastung und der anfallenden Flugasche.



Quellen von Feinstaub in Holzfeuerungen

Bei annähernd vollständiger Verbrennung von Holz stammt der Feinstaub im Abgas vorwiegend aus im Brennstoff enthaltenen Aschebestandteilen wie Kalium, Calcium, Magnesium, Chlor und weiteren Mineralstoffen [1]. Bei der Verbrennung wird ein Teil dieser Verbindungen in die Gasphase transferiert und führt anschliessend zur Bildung von salzartigen Feinstäuben. Der überwiegende Teil der Masse dieser Stäube weist Korngrössen unter 10 Mikrometer auf mit einem relevanten Anteil an Partikeln im submikronen Be-

Abbildungen

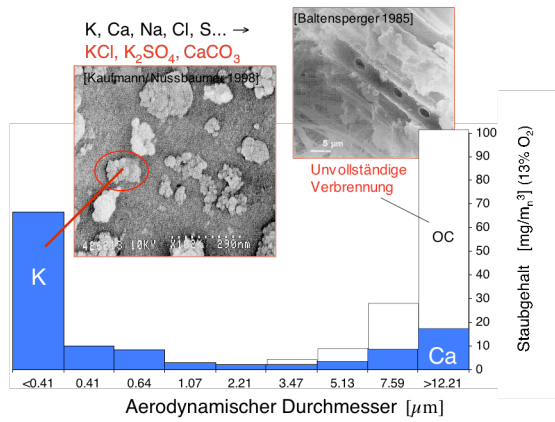


Abbildung 1

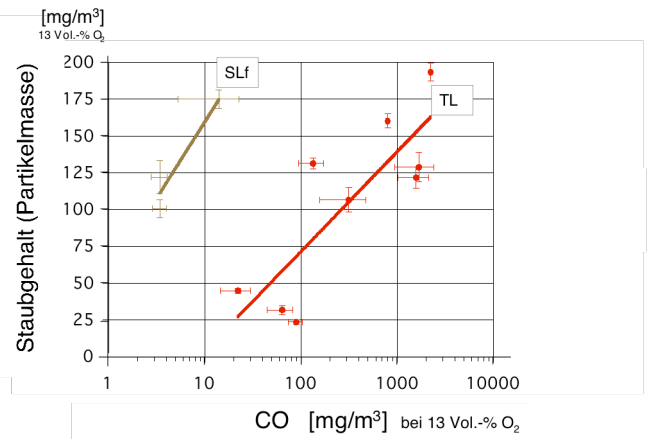


Abbildung 3

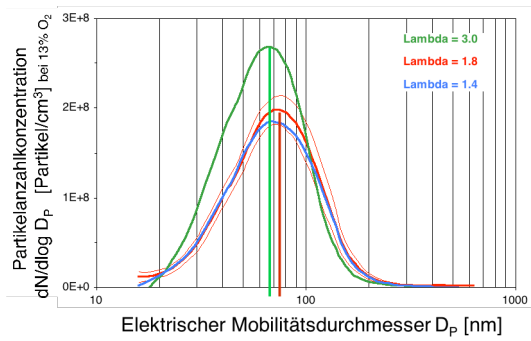


Abbildung 2

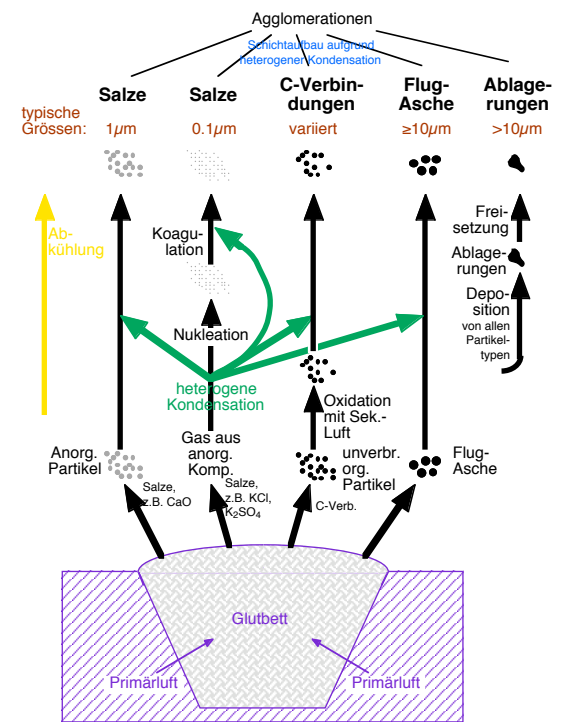


Abbildung 4

reich kleiner 1 Mikrometer (Abbildung 1). Die Partikelzahl weist meist sogar ein Maximum für Korngrößen unter 0,1 Mikrometern, oft zwischen 60 und 80 Nanometern, auf (Abbildung 2). Stäube dieser Größe gelangen nicht nur in die Lunge, sondern sie können über das Blut auch im ganzen Körper verteilt werden, weshalb sie als besonders gesundheitsschädlich gelten. Wenn Holz unter schlechten Bedingungen verbrannt wird, entstehen zusätzliche Feinstäube aus Kohlenstoff, Kohlenwasserstoffen und Russ. Vor allem bei unsachgemäßem Betrieb oder unzulässigem Brennstoff können ausserdem zusätzliche Schadstoffe wie polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Furane (PCDD/F) emittiert werden, welche besonders gesundheitsschädigend sind.

Sekundärmassnahmen durch Staubabscheidung

Zur Staubabscheidung für Holzfeuerungen kommen Abscheidesysteme wie Gewebe- oder Elektrofilter in Frage. Für Anlagen von einigen MW Leistung sind solche Abscheidesysteme seit langem Stand der Technik und in Zukunft werden sie auch bei kleineren Leistungen Eingang finden. Während Gewebefilter eine fast vollständige Abscheidung auf Staubgehalte im Abgas von bis zu unter 5 mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂ erzielen, weisen die in der Praxis heute noch meist bevorzugten Elektrofilter typische Reingaswerte zwischen 10 mg/m³ und 20 mg/m³ auf.

Motivation für Primärmassnahmen zur Staubminderung

Trotz Möglichkeiten zur Staubabscheidung besteht aus zwei Gründen ein Interesse an Massnahmen zur primärseitigen Verminderung der Staubemissionen im Verbrennungsprozess:

- Für Holzbrennstoffe mit geringem Aschegehalt und tendenziell tiefen Staubemissionen wie Holzpellets und allenfalls auch hochwertigen Sortimenten von Waldhackschnitzeln ist anzustreben, dass Anlagen bis zu rund 0,5 MW oder 1 MW Leistung ohne Einsatz aufwändiger Filter betrieben werden können.
- Für bezüglich Staubemissionen kritischere Sortimente sowie für Anlagen grösserer Leistung ist dagegen der Einsatz von Staubabscheidern in Zukunft grundsätzlich vorzusehen. Allerdings ist ein tiefer Staubgehalt im Rohgas auch für solche Anlagen vorteilhaft, da dadurch die Belastung des Filters sowie der Anfall an Flugasche reduziert werden.

Organische Stäube

Wichtigste Massnahme für tiefe Staubemissionen aus der Verbrennung ist die Erzielung einer hohen Ausbrandqualität der Gase und der Feststoffe. Der Gasausbrand wird meist beschrieben durch den Gehalt an Kohlenmonoxid (CO) als Indikator der Verbren-

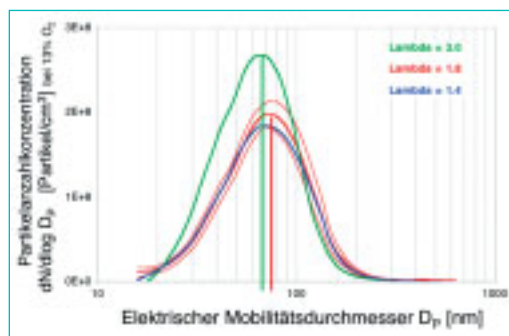


Abbildung 2: Korngrößenverteilung submikroner Partikel bei Verbrennung von Waldhackschnitzeln in einer Unterschubfeuerung bei unterschiedlichem Luftüberschuss Lambda [2]. Für Lambda = 1,8 sind die Kurven für den Mittelwert und die Standardabweichung eingetragen. Die Daten beschreiben die Anzahlverteilung gemessen mit Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS).

nungsqualität. Bei unveränderten Randbedingungen ist oft eine Korrelation zwischen dem Staubgehalt und dem CO-Gehalt im Abgas erkennbar. Dies zeigen zum Beispiel Messungen an einer automatischen Holzfeuerung nach Abbildung 3 für zwei unterschiedliche Betriebsweisen der Anlage. Die Abhängigkeit zwischen CO und Staub wird allerdings häufig überschätzt, weil die Staubemissionen noch von zahlreichen anderen, vom CO-Gehalt unabhängigen Faktoren beeinflusst werden. So geht aus dem Vergleich nach Abbildung 3 ebenfalls hervor, dass bei Änderung eines Betriebsparameters, im gezeigten Fall der Ort der Luftzuführung, die Staubemissionen zwar immer noch mit CO korrelieren, sich das Niveau der Staubemissionen jedoch signifikant verschiebt. Ein ähnlicher Effekt kann zum Beispiel auch durch Änderung des Brennstoffs verursacht werden. Von einem bestimmten CO-Gehalt kann somit selbst bei Verwendung des gleichen Brennstoffs nicht eindeutig auf den Staubgehalt geschlossen werden. Im Beispiel kann ein CO-Gehalt von 20 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ einem Staubgehalt von rund 175 mg/m³ oder aber von rund 25 mg/m³ entsprechen. Der hohe Wert entspricht dabei einer konventionellen Luftführung in der Feuerung, während der tiefe Wert einer Luftführung entspricht, die dem in diesem Beitrag beschriebenen Low-Particle-Konzept entspricht. Zusammenfassend kann daraus abgeleitet werden, dass eine gute Ausbrandqualität der Gase zwar eine notwendige, jedoch keine hinreichende Bedingung für tiefe Staubemissionen ist. Das gleiche gilt im Grundsatz auch für den Ausbrand der Feststoffe im Abgas und auf dem Rost. Da der Feststoffausbrand allerdings aufwändiger

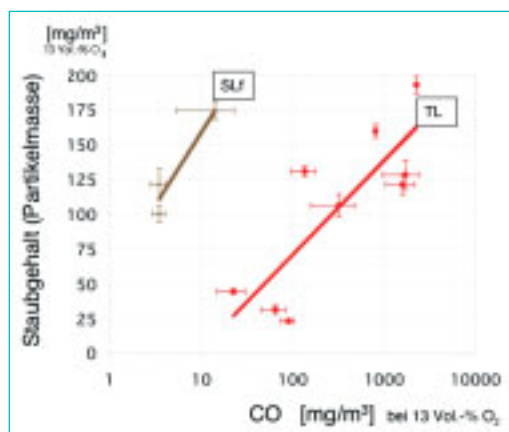
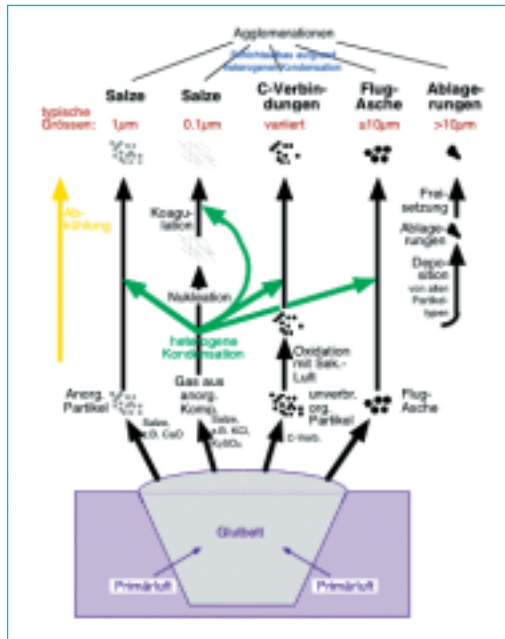


Abbildung 3: Korrelation zwischen dem CO-Gehalt im Abgas als Indikator für die Ausbrandqualität und dem Staubgehalt bei unterschiedlicher Luftzuführung in einer Unterschubfeuerung bei Betrieb mit Waldhackschnitzeln Buche [5]. SLf = Sekundärluftzufuhr früh (konventioneller Betrieb), TL = Tertiärluft (Low-Particle-Betrieb).

Abbildung 4: Mechanismen der Partikelbildung bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in automatischen Feuerungen [5].



dingungen oft zu schlechten Verbrennungsbedingungen führt, was als indirekte Auswirkung höhere Staubemissionen verursachen kann. Eine indirekte Erhöhung der Feinstäube ist allerdings auch über die nachfolgend beschriebenen Mechanismen der Partikelbildung möglich. So kann ein verstärktes Mitreißen von Feinmaterial aus dem Glutbett dazu führen, dass ein Teil des Brennstoffs statt in der Brennkammer erst im Flugstrom umgesetzt wird. Die dabei freigesetzten Vorläufersubstanzen stehen dabei direkt im Gasstrom als Keime für die anschließende Partikelbildung zur Verfügung. Ohne Transfer der Vorläufersubstanzen in die Gasphase verbleiben diese Verbindungen dagegen in der Rostasche, weshalb der Staubgehalt durch den zusätzlichen Transfer von Partikel bildenden Stoffen in die Gasphase erhöht wird.

Anorganische Stäube

Hohe Gehalte an organischen Staubfrachten sind in modernen Holzfeuerungen meist die Folge von falscher Lufteinstellung oder ungeeignetem Brennstoff, zum Beispiel mit zu hohem Wassergehalt oder zu hohem Feinanteil. Bei korrekter Betriebsweise kann dagegen eine hohe Ausbrandqualität erzielt werden, was im Folgenden vorausgesetzt wird. Die Abgase enthalten dann nur noch geringe Mengen an unverbrannten Schadstoffen und der Hauptteil der Staubemissionen stammt aus anorganischen Komponenten im Holz wie Kalium, Calcium, Magnesium, Phosphor, Chlor, Schwefel und weiteren Elementen. Da diese anorganischen Feinstäube durch eine Verbesserung des Ausbrands nicht verhindert werden können, wurden die Bildungsmechanismen und die Möglichkeiten zur Verminderung der Staubemissionen in einem Forschungsprojekt in Zusammenarbeit von Verenum, Empa Dübendorf und Müller AG Balsthal untersucht [5]. Die Erfahrungen wurden in einer ersten Prototypanlage für Holzpellets in die Praxis umgesetzt [6]. Eine Weiterentwicklung zur Anwendung für Waldhackschnitzel und Restholz ist derzeit im Gang.

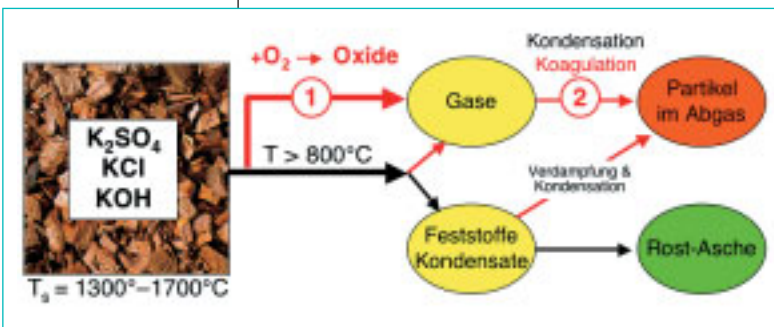


Abbildung 5: Mechanismen der Bildung anorganischer Feinstäube (Salze) bei der Holzverbrennung. Erläuterung der Umwandlungsmechanismen und mit Schritt 1 und 2 bezeichneten Pfeile im Text.

zu bestimmen ist und zudem nicht direkt kontinuierlich erfasst werden kann, liegen dazu weniger Erfahrungen vor. Zudem wird die Kontrolle des Feststoffausbrands auch nicht als Standardmessung für Emissionsüberwachungen eingesetzt.

Einfluss des Feinanteils im Brennstoff

In der Praxis wird oft auch eine Korrelation zwischen dem Feinanteil im Brennstoff und den Staubemissionen beobachtet oder behauptet. Um diesen Einfluss zu prüfen, wurde in einer Versuchsanlage der Feinanteil kleiner 3 mm im Brennstoff bei sonst identischen Verbrennungsbedingungen zwischen 1,3 Gew.-% (gesiebter Brennstoff) und 27,6 Gew.-% (Brennstoff mit Zugabe des ausgesiebten Feinanteils) variiert [2]. Die Staubemissionen betragen dabei zwischen 100 mg/m³ und 110 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂. Innerhalb der untersuchten Bandbreite war somit praktisch keine direkte Erhöhung durch den Feinanteil nachweisbar. Der Feinanteil selbst führt demnach nicht zu einer direkten Erhöhung der Feinstäube, da diese mit rund 0,1 Mikrometern Korngröße vier Zehnerpotenzen kleiner sind als der Feinanteil im Brennstoff. Es wird deshalb vermutet, dass ein erhöhter Feinanteil unter Praxisbe-

Bildung anorganischer Stäube

Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Mechanismen zur Bildung von Partikeln bei der Holzverbrennung. Bei nahezu vollständiger Verbrennung von Holz besteht der überwiegende Teil der Partikel aus Salzen. Kaliumverbindungen machen dabei bei naturbelassenem Holz meist den Hauptanteil aus (beim untersuchten Holzbrennstoff rund 30 Gew.-%), während bei der Verbrennung von Rinde eine zusätzliche Fraktion an Calciumverbindungen entsteht, welche grösser ist als der Anteil an Kaliumverbindungen.

Die Bildung der Salze beruht darauf, dass ein Teil der im Brennstoff enthaltenen anorganischen Verbindungen durch Verdampfung und chemische Reaktionen in die Gasphase transferiert wird, welcher bei der anschließenden Abkühlung des heissen Gases durch

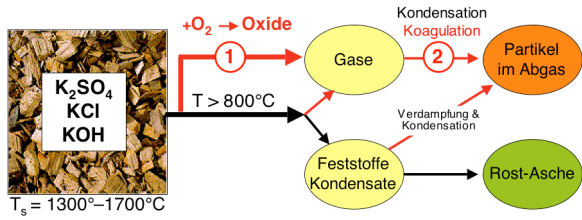


Abbildung 5

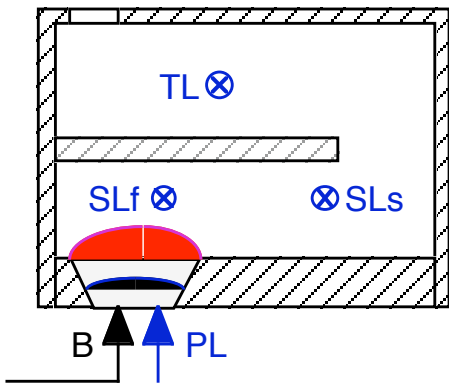


Abbildung 6

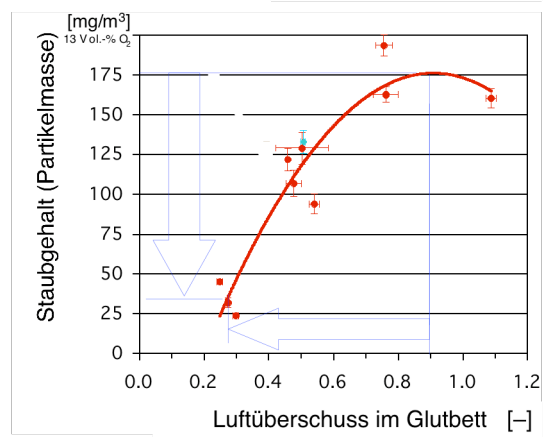


Abbildung 8

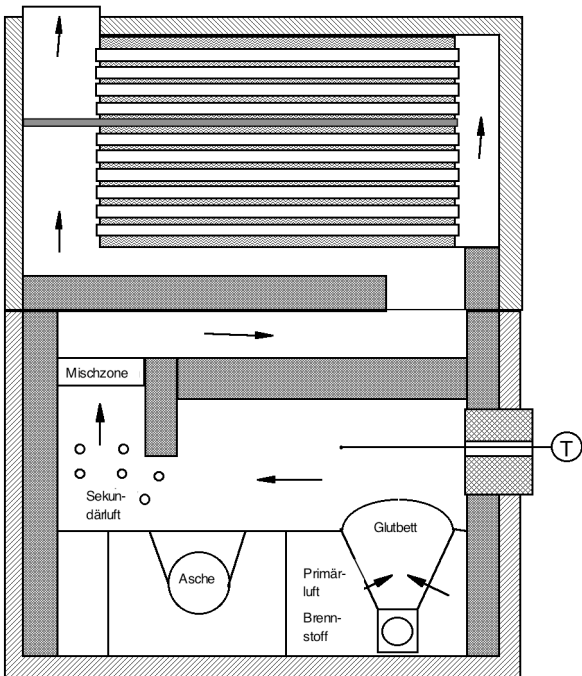


Abbildung 7

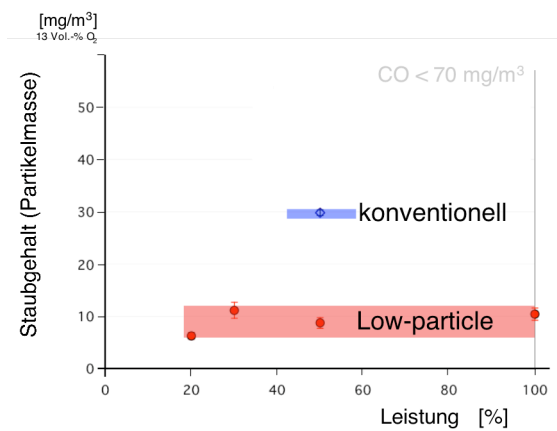


Abbildung 9

Nukleation, Koagulation und Kondensation zur Bildung von Partikeln und Tröpfchen führt. Der Transfer in die Gasphase wird vor allem durch Einwirkung der lokalen Temperatur und durch die lokalen Reaktionsbedingungen, insbesondere die Anwesenheit von Oxidationsmittel, beeinflusst.

Da Kalium im Brennstoff vorwiegend in schwer flüchtigen Verbindungen wie Kaliumsulfat (Siedetemperatur $T_S = 1689\text{ °C}$; Schmelztemperatur $T_m = 1070\text{ °C}$) und Kaliumchlorid ($T_S = 1413\text{ °C}$, $T_m = 773\text{ °C}$) vorliegt, verbleibt ein Teil dieser Verbindungen als Feststoff in der Rostasche. Allerdings können die Kaliumverbindungen bei Anwesenheit von Sauerstoff zu leichter flüchtigen Oxiden wie Kaliumoxid ($T_m = 350\text{ °C}$) und Kaliumhydroxid ($T_m = 360\text{ °C}$) oxidiert werden. Auf Grund der höheren Flüchtigkeit werden diese verstärkt in die Gasphase transferiert, weshalb durch Sauerstoffarmut im Glutbett der Transfer von Kalium ins Abgas reduziert werden kann. Gleichzeitig erhöht die Zugabe von Sauerstoff im Glutbett die lokale Temperatur, was die Verdampfung und den Transfer in die Gasphase ebenfalls begünstigt. Auf Grund dieser Mechanismen zur Bildung von anorganischem Feinstaub in Form von Salzen werden daraus folgende Hypothesen und Massnahmen zur Reduktion der Partikelemissionen bei der Holzverbrennung nach Abbildung 5 abgeleitet:

Massnahme 1 (Schritt 1 in Abbildung 5):

Durch Absenkung des Luftüberschusses im Glutbett kann die Partikelmasse im Abgas reduziert werden, weil die Zufuhr von Luft (bzw. Sauerstoff) im Glutbett die Bildung von anorganischen Staubkomponenten im Abgas durch folgende Mechanismen unterstützt:

1. Sauerstoff fördert die Oxidation von schwer flüchtigen Kaliumverbindungen zu leichter flüchtigen Kaliumoxiden,
2. Sauerstoff erhöht die lokale Temperatur,
3. Die Zufuhr von Verbrennungsluft im Glutbett erhöht die Gasgeschwindigkeit und damit das Mitreißen von Brennstoffteilen. Obwohl diese Brennstoffstücke wie oben beschrieben nicht direkt als (submikrone) Partikel auftreten, können bei deren Verbrennung im Flugstrom freigesetzte Verbindungen in der Gasphase zur Partikelbildung führen.

Alle drei Effekte erhöhen den Transfer von Mineralstoffen in die Gasphase, welche anschliessend durch Kondensation zur Bildung von Partikeln führen. Durch Reduktion des Sauerstoffgehalts respektive des Luftüberschusses im Glutbett wird deshalb die Masse an Feinstaub reduziert.

Massnahme 2 (Schritt 2 in Abbildung 5):

Die für die Verbrennung nicht notwendige Luftmenge in der Gasphase führt zu einer Verdünnung des Abgases und damit zu einer Verringerung der Koagulation kleiner Partikel zu grösseren, weshalb die Partikelanzahl durch Absenkung des Gesamtluftüberschusses reduziert wird.

Experimentelle Umsetzung zur Staubminderung

In einem ersten Schritt wurde eine Versuchsanlage mit einer 100-kW-Unterschubfeuerung realisiert, welche die unabhängige Variation von Betriebsparametern erlaubt, die im Praxisbetrieb miteinander gekoppelt sind. Damit konnte unter anderem der Einfluss von Primärluftüberschuss, Glutbetthöhe, Abgasrückführung, Staubanteil im Brennstoff und Temperatur des mit variabler Wasserkühlung ausgerüsteten Brennstoffbetts untersucht werden. Zur Realisierung der geforderten Betriebsarten wurde die Anlage so modifiziert, dass eine räumlich klar definierte Trennung der verschiedenen Verbrennungszonen in der Feuerung erzielt wird. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Luftführung sind in Abbildung 6 dargestellt. In der Folge wurde die erste Prototypanlage nach Abbildung 7 realisiert, welche zur Praxiseinführung als Low-Particle-Feuerung für Holzpellets ausgelegt wurde.

Resultate

Die Untersuchungen an der Versuchsanlage für Waldhackschnitzel und an der Prototypfeuerung für Holzpellets bestätigen die Hypothesen zur Beeinflussung der Partikelemissionen und erlauben eine quantitative Abschätzung der Wirksamkeit zur Staubminderung. Die erste Hypothese, dass die Partikel-Massenkonzentration durch Absenkung des Luftüberschusses im Glutbett reduziert werden kann, wurde vorab auf der Versuchsanlage bestätigt. Die Staubemissionen bei Betrieb mit Waldhackschnitzeln aus Buchenholz konnten durch Betrieb bei sehr tiefem Luftüberschuss um etwa 80% vermindert werden, nämlich ausgehend von rund 175 mg/m^3 bei 13 Vol.-% O_2 im Standardbetrieb auf Werte zwischen 20 mg/m^3 und 45 mg/m^3 bei einem Glutbett-Luftüberschuss von rund 0,3 (Abbildung 8).

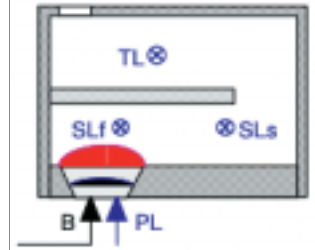


Abbildung 6: Luftführungsvarianten der Versuchsanlage einer automatischen Holzfeuerung nach dem Low-Particle-Konzept [5]. Die Luft kann maximal dreistufig zugeführt werden (PL: Primärluft, SL: Sekundärluft, TL: Tertiärluft), wobei zusätzlich zwischen früher (SLf) und später (SLs) Sekundärluft gewählt werden kann.

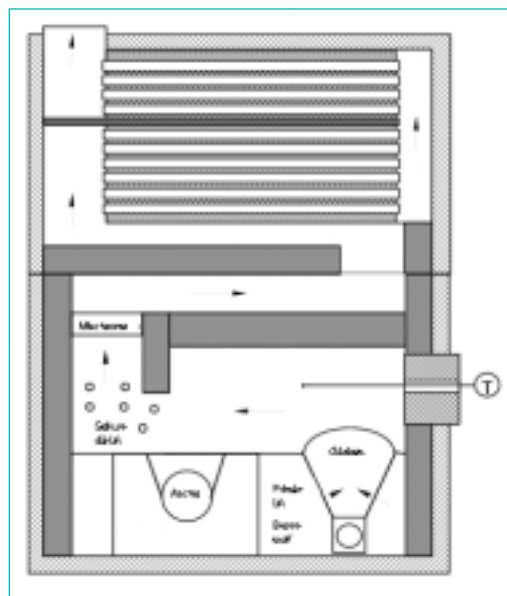
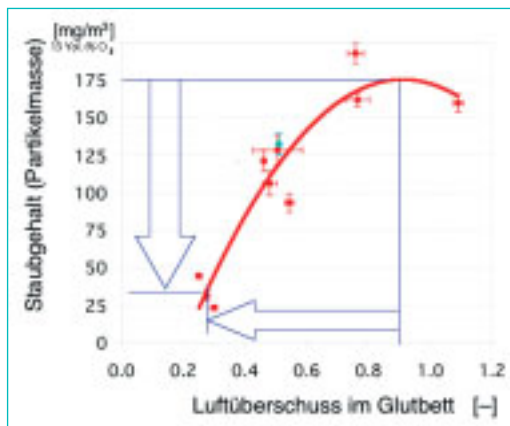


Abbildung 7: Aufbau der Prototypanlage nach dem Low-Particle-Konzept für Holzpellets [6]. T = Temperaturmessung.

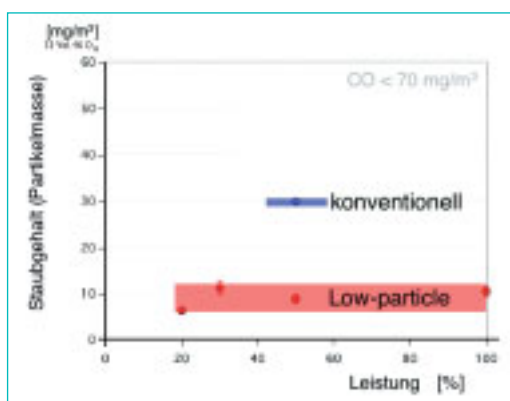
Abbildung 8: Staubgehalt im Abgas der Versuchsanlage nach Abbildung 6 in Abhängigkeit des Luftüberschusses im Glutbett bei der Verbrennung von Waldhackschnitzeln Buche [5]. Durch Absenkung des Luftüberschusses von 0,9 auf 0,3 wird der Staubgehalt um rund 80% reduziert.



Aufgrund des tiefen Glutbett-Luftüberschusses bildet sich dabei ein hohes Glutbett aus, was bei der Konstruktion zu berücksichtigen ist. Zudem konnten auf der Prototypanlage für Holzpellets unter Low-Particle-Bedingungen Partikelemissionen zwischen 6 mg/m³ und 11 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ erreicht werden und dies im Lastbereich von 20% bis 100% Leistung (Abbildung 9). Dabei lagen der Glutbett-Luftüberschuss zwischen 0,33 und 0,37 und die CO-Emissionen unter 70 mg/m³. Im Vergleich dazu führte der Betrieb mit einem Glutbett-Luftüberschuss von 0,68 zu Partikelkonzentrationen von 30 mg/m³. Nebst der Verminderung der Staubemissionen ist die Möglichkeit eines kontinuierlichen Teillastbetriebs ab 20% Nennleistung ein Vorteil, welcher dank einer neu entwickelten Brennungsregelung ermöglicht wird. Auch im Fall der Pelletverbrennung mit Staubemissionen auf tieferem Niveau wird somit ein Reduktionspotenzial von rund 80% erzielt.

Die zweite Hypothese, dass die Partikel-Anzahlkonzentration durch Verminderung des Gasvolumenstroms bzw. des Gesamtluftüberschusses reduziert werden kann, wurde durch Messung der Partikelanzahl und der Korngrößenverteilung auf der Versuchsanlage bestätigt. Durch Reduktion der Abgasmenge und des Gesamtluftüberschusses um einen Faktor 2,4 konnte die Anzahlkonzentration von 19 · 10⁷ auf 8 · 10⁷ Partikel pro cm³ bei 13 Vol.-% O₂ oder um rund 60% vermindert werden [5].

Abbildung 9: Staubgehalt im Abgas der Prototypanlage für Holzpellets nach Abbildung 7 in Abhängigkeit der Leistung [6]. Durch Low-Particle-Betrieb kann der Staubgehalt auf unter 15 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ reduziert werden, wobei im Lastbereich von 20% bis 100% Leistung weder die Staub- noch die CO-Emissionen ansteigen.



Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass mit dem Low-Particle-Konzept im Vergleich zu einer konventionellen Verbrennung eine signifikante Reduktion der Staubemissionen erzielt werden kann. Dazu müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Betrieb bei sehr tiefem Glutbett-Luftüberschuss von 0,2 bis 0,4, um Partikelmasse zu verringern.
- Hohe Gasdichtheit der Feuerung und Brennstoffzuführung z.B. durch Einsatz einer Zellradschleuse, da Falschluff sonst einen tiefen Glutbett-Luftüberschuss verunmöglicht
- Betrieb bei tiefem Gesamt-Luftüberschuss von 1,3 bis 1,6, um Partikel-Anzahl zu verringern.
- Späte Sekundärluftzuführung mit ausgeprägter Luftstufung und geometrische Ausführung des Feuerraums zur sicheren Verhinderung der Rückströmung von Sekundärluft zum Glutbett.
- Ausreichend gross dimensionierter Feuerraum für erhöhtes Glutbett.
- Nahezu vollständiger Ausbrand von Gasen und Feststoffen mit CO-Werten unter 100 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ und geringem organischen Kohlenstoffanteil der Partikel. Dies erfordert genügend hohe Temperaturen im Bereich des Glutbetts (über 650 °C), um die Umsetzung der organischen Feststoffkomponenten zu gasförmigen Komponenten zu gewährleisten. Im Weiteren müssen eine gute Vermischung der Sekundärluft mit den brennbaren Gasen sowie eine ausreichend lange Verweilzeit bei hoher Temperatur gewährleistet werden (mindestens 0,3 Sekunden bei 850 °C).

Praxiseinsatz

Die Umsetzung des Low-Particle-Konzepts setzt eine angepasste Feuerungstechnik und den Einsatz einer leistungsfähigen Regelung voraus. Da selbst bei Ausschöpfung des Reduktionspotenzials noch relevante Staubemissionen zu erwarten sind, ist das Konzept für folgende Anwendungen von Interesse:

- Für Holzpellets mit begrenztem Aschegehalt verspricht das Low-Particle-Konzept die Erreichung von Staubemissionen unter 15 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂, was rund ein Faktor 10 tiefer ist als mit üblichen Holzbrennstoffen in konventionellen Feuerungen ohne Filter. Für Holzpellets bietet das Low-Particle-Konzept deshalb vor allem für kleine und mittlere Leistungen bis zu rund 1 MW interessante Anwendungsmöglichkeiten für Anlagen ohne Filter. Für andere qualitativ hochwertige Energieholzsortimente wie Waldhackschnitzel mit begrenztem Asche- und Fremdstoffanteil kommen ebenfalls Einsatzmöglichkeiten ohne Filter in Frage, wobei die erzielbaren Staubgehalte und sinnvolle Leistungsgrößen noch bestimmt werden müssen.
- Anlagen grösserer Leistung (ab 1 MW bis 2 MW) sowie Anlagen zur Nutzung von kritischeren Brenn-

stoffsportimenten sollten in Zukunft ausschliesslich mit weitergehender Entstaubung wie Gewebefiltern oder allenfalls Elektrofiltern ausgerüstet werden. Für solche Anwendungen reduziert eine bezüglich Partikelbildung optimierte Feuerungstechnik die Menge an als Sondermüll zu behandelnder Filterasche. Gleichzeitig ermöglicht der reduzierte Staubgehalt im Rohgas auch eine kleinere Dimensionierung der Abscheideanlage und eine Reduktion des Hilfsenergieverbrauchs.

Nebst anlagentechnischen Massnahmen zur Emissionsminderung ist in Zukunft darauf zu achten, dass die unterschiedlichen Energieholzsortimente möglichst klar definiert und gezielt genutzt werden. Minderwertige Brennstoffe erfordern eine aufwändige Anlage, welche eine gewisse Mindestgrösse aufweisen und über eine effiziente Staubabscheidung verfügen müssen. Demgegenüber weisen qualitativ hochwertige Sortimente wie Holzpellets einen erhöhten Herstellungsaufwand und entsprechend hohe Brennstoffkosten auf, sie können dafür in einfacheren Anlagen kleiner und mittlerer Grösse genutzt werden. Obwohl dies heute bereits zur Anwendung kommt, ermöglicht eine weitere Spezialisierung der Brennstoffversorgung und der Anlagentechnik in Zukunft eine zunehmende Optimierung der Energieholznutzung.

Literatur

- [1] Nussbaumer, Th., Hasler, Ph.: Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen. Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999) 13–22
- [2] Oser, M., Nussbaumer, Th., Schweizer, B., Mohr, M., Figi, R.: Untersuchung der Einflüsse auf die Partikelemissionen in einer Unterschubfeuerung. Tagungsband 6. Holzenergie-Symposium, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 51–68
- [3] Kaufmann, H., Nussbaumer, Th.: Bildung und Eigenschaften von Chlorverbindungen bei der Verbrennung biogener Brennstoffe, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 59 (1999) 7/8 267 – 272
- [4] Baltensperger, U.: Chemische und morphologische Charakterisierung von partikelförmigen Luftfremdstoffen, Dissertation, Universität Zürich, 1985
- [5] Oser, M., Nussbaumer, Th., Müller, P., Mohr, M., Figi, R.: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Bundesamt für Energie, Bern 2003, ISBN 3-908705-02-9
- [6] Oser, M., Nussbaumer, Th.: Low-Particle-Pelletfeuerung im Leistungsbereich von 100 bis 500 kW. Bundesamt für Energie, Bern 2004, ISBN 3-908705-09-6

Verdankung

Die vorliegende Untersuchung wurde vom Bundesamt für Energie (BFE) und vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) unterstützt und in Zusammenarbeit mit der Firma Müller AG Balsthal und der Abteilung Verbrennungsmotoren und Feuerungen der EMPA Dübendorf durchgeführt. ■

(*PD Dr. Thomas Nussbaumer
Verenum, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich
thomas.nussbaumer@verenum.ch, www.verenum.ch)