

# Feinstaub aus Holzfeuerungen elektrostatich abscheiden

**BIOMASSE** | Holzfeuerungen verursachen unterschiedliche Arten von Aerosolen. Dazu gehören anorganische Feststoffe (Salze) sowie elementarer Kohlenstoff (Ruß) und organische Kondensate (Teere). Während Salze für elektrostatiche Partikelabscheider gut geeignet sind, besitzt Ruß eine zu hohe elektrische Leitfähigkeit und neigt zum Wiedereintrag agglomerierter Partikel. Teere sind elektrisch isolierend, verursachen lokale Überschlüge durch Rücksprühen und haften als klebrige Schicht an der Elektrode. Vor diesem Hintergrund ist der Betrieb elektrostaticher Abscheider mit Holzfeuerungen zwar drei Aerosolarten jedoch optimiert werden.

**B**iomasse trägt mit ungefähr 10 % zur Deckung der globalen Nachfrage nach Primärenergie bei und ist damit der wichtigste erneuerbare Energieträger. Ihre Bedeutung für die Energieversorgung wird angesichts der begrenzt verfügbaren Energieressourcen künftig zunehmen. Um die wachsenden Mobilitätsbedürfnisse zu decken, sind in den letzten Jahren Biokraftstoffe in den Blickpunkt gerückt. Diese haben jedoch eine geringe Flächeneffizienz und ein geringeres Potenzial zur Substitution fossiler Primärenergieträger als Wärme oder Strom aus Holz [1]. Demgegenüber kann die Wärme- und Stromerzeugung aus Holz bei nachhaltiger Nutzung der Wälder sehr effektiv zu den Klimazielen beitragen. Dabei ist jedoch auch der Luftreinhalte Rechnung zu tragen. Da lungengängiger Feinstaub mit einem Partikeldurchmesser bis  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) die relevanteste Schadstoffgruppe für Gesundheitsschäden ist und Holzfeuerungen maßgeblich zur Freisetzung dieses Feinstaubtyps beitragen, werden die entsprechenden Vorschriften zur Luftreinhalte sukzessive verschärft. Für die Einhaltung der Staubgrenzwerte werden Holzfeuerungen zunehmend mit Feinstaubabscheidern ausgerüstet. Dank ihrer Robustheit werden hierfür

meistens elektrostatiche Partikelabscheider eingesetzt. Bei der Holzverbrennung können unterschiedliche Arten primärer Aerosole gebildet werden, die hier den folgenden drei Klassen zugeordnet werden: anorganische Partikel (Salze), elementarer Kohlenstoff (Ruß) und kondensierbare organische Verbindungen (Teere). Während Salze und Ruß in fester Form vorliegen, sind Teere bei hohen Temperaturen dampfförmig und kondensieren bei Abkühlung zu Tröpfchen aus. Obwohl diese Aerosolarten als Feinstaub gelten, weisen sie sehr unterschiedliche Eigenschaften auf.

In der Kraftwerkstechnik bewährte elektrostatiche Partikelabscheider, kurz Elektroabscheider, werden seit längerem auch für automatische Holzfeuerungen im Leistungsbereich oberhalb von 1 MW eingesetzt, die dank moderner Regelungstechnik meistens eine hohe Ausbrandqualität erzielen. Die Verschärfung der Grenzwerte für Staubemissionen hat mittlerweile auch für Holzfeuerungen im Leistungsbereich von 5 kW bis 1 MW zur Entwicklung marktreifer Elektroabscheider geführt. In Kleinfeuerungen treten häufiger Phasen mit unvollständiger Verbrennung sowie hohen Ruß- und Teerkonzentrationen im Abgas auf. Der Abscheidegrad hängt von den Eigen-

schaften der gebildeten Partikel und der Abgaskomponenten ab.

Das Prinzip und die Funktionsweise der elektrostatichen Abscheidung von Partikeln aus Abgasströmen ist schon seit etwa einem Jahrhundert bekannt. Solche Systeme werden üblicherweise in Röhren- oder Plattenbauweise ausgeführt und weitgehend für konstante Betriebsbedingungen ausgelegt, wie dies in thermischen Kraftwerken der Fall ist. Das bis heute gesammelte Know-how basiert hauptsächlich auf Erkenntnissen aus der Kohleverbrennung, während für Holzfeuerungen bislang kaum Daten verfügbar sind. Bei Elektroabscheidern für Holzfeuerungen sind generell die folgenden Punkte zu beachten:

- Die im Abgas von Holzfeuerungen auftretenden Partikel bestehen in der Regel aus Salzen, Ruß und Teeren.
- Die Konzentrationen von Abgaskomponenten wie  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  können in weiten Bereichen variieren. Dadurch verändern sich die Partikelabscheidebedingungen, da zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit des Abgasstroms vom Wasserdampfgehalt abhängt.
- Holzfeuerungen werden oft in einem Ein-Aus-Betrieb mit kurzen Verbrennungsphasen betrieben. In der Startphase können erhöhte Teer- und Rußkonzentrationen im Abgas auftreten. Um Probleme zu vermeiden, werden Elektroabscheider im Falle niedriger Abgastemperaturen oft ausgeschaltet. Dies führt allerdings zu einer geringen Verfügbarkeit und somit insgesamt höheren Feinstaubemissionen.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde das Abscheideverhalten der bei unterschiedlichen Betriebszuständen einer Holzfeuerung gebildeten Partikel untersucht. Aus den Messergebnissen wurden Kenndaten zur Auslegung und

## Autoren

Prof. Dr. sc. techn. **Thomas Nussbaumer**, Jahrgang 1960, Studium des Maschinenbaus an der ETH Zürich, 1989 Promotion, seit 1990 Inhaber des Ingenieurbüros Verenum, 1997 Habilitation zum Thema Bioenergie an der ETH Zürich, seit 2007 Professor für Erneuerbare Energien an der Hochschule Luzern, Schweiz.

[thomas.nussbaumer@verenum.ch](mailto:thomas.nussbaumer@verenum.ch)

Dipl.-Ing. (FH) **Adrian Lauber**, Jahrgang 1979, Ausbildung zum Elektroniker und anschließend als Netzwerktechniker tätig, danach Studium des Maschinenbaus an der Hochschule Rapperswil in der Schweiz mit Abschluss zum Dipl.-Ing. (FH) im Jahr 2007, seitdem ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachgruppe Bioenergie an der Hochschule Luzern.



Regelung von Elektroabscheidern für Holzfeuerungen abgeleitet.

## Partikelbildungsmechanismen

Die Bildungsmechanismen für Salze, Ruß und Teere bei der Holzverbrennung lassen sich wie folgt beschreiben [2]:

- Anorganische Partikel, hauptsächlich Salze, werden aus den mineralischen Aschebestandteilen des Brennstoffes Holz in die Gasphase transferiert und bilden im Abgas Feststoffe durch chemische Reaktionen, Kondensation und Resublimation. Der Transfer mineralischer Verbindungen in das Abgas wird durch hohe Temperatur begünstigt, weshalb Salze bei optimaler Verbrennung die Staubfracht dominieren.
- Ruß wird aus organischen Vorläufer-substanzen gebildet. Flüchtige Komponenten und primäre Teere reagieren bei Temperaturen von 700 bis 850 °C zu sekundären Teeren und bilden polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, die bei hohen Temperaturen ab etwa 850 °C und bei Abwesenheit von Sauerstoff durch Freisetzung von Wasserstoff zur Synthese von Ruß führen.

- Kondensierbare organische Verbindungen stammen aus Verbindungen, die bei mittleren Temperaturen direkt durch Pyrolyse freigesetzt werden, oder werden bei höheren Temperatur aus sekundären Teeren gebildet.

Da diese Aerosolarten unterschiedliche chemisch-physikalische Eigenschaften aufweisen, ist ihre Unterscheidung für Auslegung und Betrieb von Feinstaubabscheidern entscheidend. Wegen der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit der Rußbildung treten hohe Rußgehalte nur bei hohen Temperaturen auf, und bei niedrigen Temperaturen dominieren die kondensierbaren organischen Verbindungen. Daher ist je nach Temperatur und Prozessführung meistens einer der zwei Aerosolarten vorherrschend.

## Versuchsaufbau

Für die Untersuchung der Partikeleigenschaften wurde ein rohrförmiger Elektroabscheider im Labormaßstab mit 1 m Länge und 0,1 m Durchmesser aufgebaut und an einen Pelletkessel angeschlossen (Bild 1). Durch Modifikation der Brennkammer und der Luftzufüh-

<sup>1)</sup> Im Englischen werden kondensierbare organische Verbindungen als *Condensable Organic Compounds (COC)* bezeichnet und flüchtige organische Verbindungen als *Volatile Organic Compounds (VOC)*.

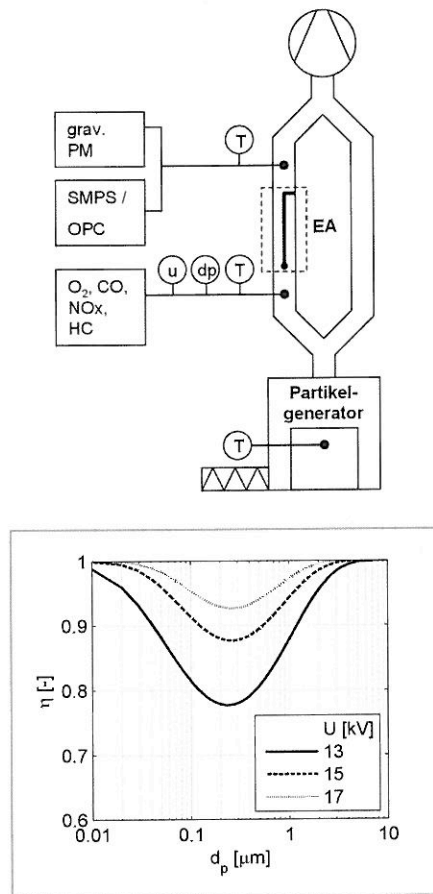


Bild 2

## Berechneter Abscheidegrad des Rohr-Elektroabscheiders als Funktion von Partikelgröße und Spannung.

Die Kurven zeigen den berechneten Abscheidegrad  $\eta$  in Abhängigkeit von der Partikelgröße  $d_p$  in  $\mu\text{m}$  für drei verschiedene Spannungen  $U$  in kV: 13 kV (durchgezogene Linie), 15 kV (gestrichelte Linie) und 17 kV (strichpunktierte Linie). Der Abscheidegrad liegt für alle Spannungen über den gesamten Bereich der Partikelgröße (0,01 bis 10  $\mu\text{m}$ ) über 90 %.

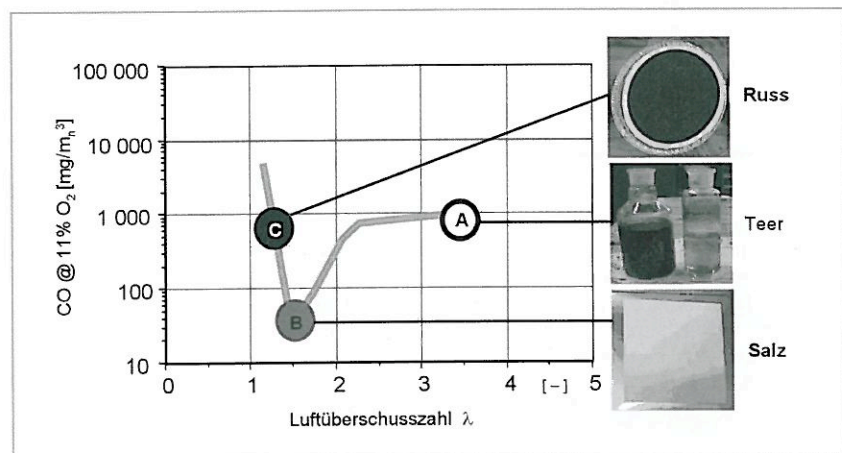


Bild 1

## Skizze des Versuchsaufbaus, der aus der Pelletfeuerung, dem Elektroabscheider und der Messtechnik besteht.

widerstand wurde gemäß dem IEEE-Standard 548-1984 gemessen [3].

## Betriebspunkte

Bei der Holzverbrennung lassen sich abhängig vom Luftüberschuss  $\lambda$  drei Betriebspunkte (Bild 3) unterscheiden [2]:

- **Betriebspunkt A:** Bei hohem Luftüberschuss ( $\lambda = 3,5$ ) resultieren geringe Verbrennungstemperaturen und hohe Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) sowie flüchtigen und kondensierbaren organischen Verbindungen<sup>1)</sup>. Daneben können hohe Anteile kondensierbarer organischer Verbindungen auch bei geringem Luftüberschuss auftreten, zum Beispiel während der Startphase oder beim Einsatz von nassem Holz. Kondensierbare organische Verbindungen werden weder vollständig oxidiert noch zu Ruß umgewandelt. Wegen ihrer organischen Bestandteile weisen sie hohe Wasserstoffgehalte und C/H-Verhältnisse von 1 bis 2 auf. Im hier betrachteten Beispiel gilt für das C/H-Verhältnis ein Wert von 1,24.
- **Betriebspunkt B:** Bei optimalem Luftüberschuss ( $\lambda = 1,55$ ) wird eine fast vollständige Verbrennung erzielt, so dass der Feinstaub vorwiegend aus anorganischen Verbindungen (Salzen) besteht.
- **Betriebspunkt C:** Bei zu geringem Luftüberschuss ( $\lambda = 1,2$ ) tritt in den Zonen hoher Temperaturen und bei einem Sauerstoffmangel in der Flamme die sukzessive Synthese von Ruß unter Freisetzung von Wasserstoff auf.

Bild 3

## Charakteristische Betriebspunkte der Holzverbrennung im CO-lambda-Diagramm.



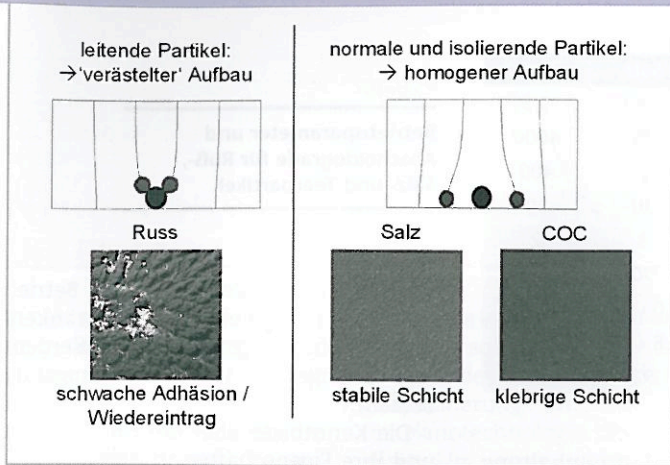


Bild 4

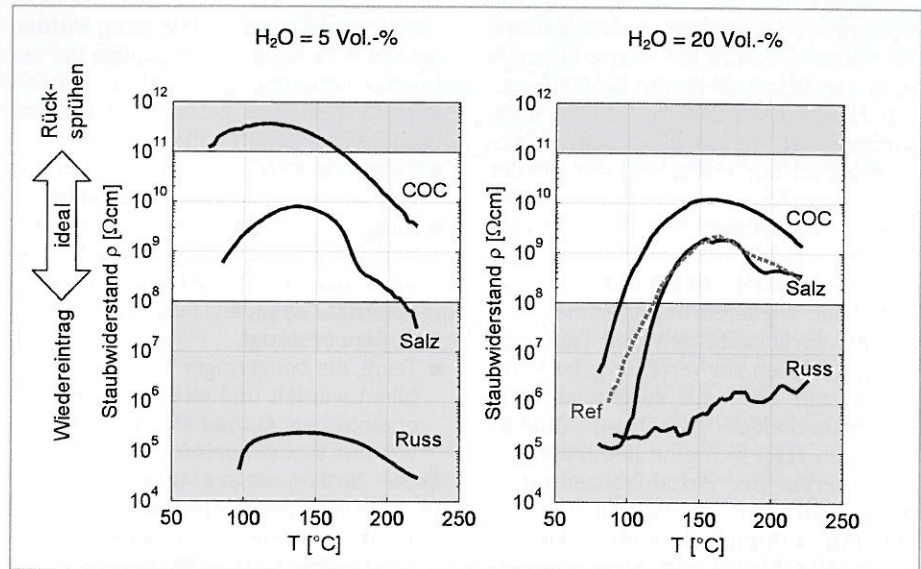
Schichtaufbau-mechanismen im elektrischen Feld für elektrisch sehr gut leitende Rußpartikel, gut leitende Salzpartikel und schlecht leitende Teerpartikel (von links nach rechts).

dampfgehalt von 13 Vol.-% analysiert. Wie die Messungen belegen, rangieren die elektrischen Widerstände für Salzpartikel aus der Versuchsanlage und aus der Referenzprobe bei Temperaturen des Abgases von 120 bis 200 °C in einem für Elektroabscheider günstigen Bereich. Da der elektrische Widerstand stark von der Temperatur und der Abgasfeuchte abhängt, muss auch die Holzfeuchte berücksichtigt werden. In feuchtem Abgas

Durch die Abgabe von Wasserstoff weist der Ruß hohe C/H-Verhältnisse von mindestens 6 bis 8 auf. In dem hier betrachteten Beispiel gilt für das C/H-Verhältnis ein Wert von 6,44.

### Elektrische Partikeleigenschaften

Für die Funktion der elektrostatischen Partikelabscheidung sind der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  in  $\Omega\text{m}$  und die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  in  $(\Omega\text{m})^{-1}$  der Staubschicht von zentraler Bedeutung. Damit der von der Sprühelektrode ausgehende Strom durch die abgelagerte Schicht abgeleitet werden kann, ist eine bestimmte Leitfähigkeit erforderlich. Bei zu hoher Leitfähigkeit wird die Ladung allerdings zu rasch abgegeben. Dies hat eine ungenügende Haftung der Partikel zur Folge. Aus diesem Grund sollte der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  der Staubpartikel in einem Bereich zwischen  $10^8$  und  $10^{11} \Omega\text{cm}$  liegen [4; 5]. Daneben werden für diesen Bereich auch nach unten erweiterte Werte von  $10^5 \Omega\text{cm}$  [6] oder  $10^4 \Omega\text{cm}$  [7] sowie verringerte obere Bereichsgrenzen von  $10^{10} \Omega\text{cm}$  [8] und darunter genannt. Für die untersuchten Stäube wurde der im Bild 4 dargestellte Schichtaufbau identifiziert. Die spezifischen elektrischen Widerstände der Staubpartikel sind im Bild 5 dargestellt. Salz weist eine ideale Leitfähigkeit auf und bildet eine homogene Staubschicht, die problemlos entfernt werden kann. Ruß verfügt über einen geringen spezifischen Staubwiderstand ( $\rho < 10^6 \Omega\text{cm}$ ) und damit eine sehr gute Leitfähigkeit, die eine schnelle Ladungsabgabe nach sich zieht, so dass Rußpartikel schlecht an der Niederschlagselektrode haften. Dabei kommt es zu einem verästelteten Schichtaufbau und zu einer Bildung von Agglomeraten, die aufgrund der unzureichenden Adhäsion an der Wand zu einem Wiedereintrag führen. Da kondensierbare organische Verbindungen eine geringe elektrische Leitfähigkeit haben, bildet sich eine elektrisch isolierende Schicht auf der Niederschlagselektrode. Diese Schicht ist klebrig, lässt sich nur sehr schwer abreinigen und verhindert die Ladungsabgabe der nachfolgenden



Partikel. Dadurch treten an der Niederschlagselektrode lokal starke Felder und örtliche Durchschläge auf – ein Effekt, der als Rücksprühen bezeichnet wird. Die angelegte Spannung muss in diesen Fällen reduziert werden, so dass auch die Partikelabscheideleistung sinkt. Da der Koronastrom ansteigt, lässt sich das Rücksprühen identifizieren, indem die Stromdichte als Funktion der Spannung aufgetragen wird. Im Bild 5 ist der spezifische elektrische Staubwiderstand in trockener und feuchter Gasatmosphäre als Funktion der Temperatur dargestellt. Das trockene Gas enthält 5 Vol.-%  $\text{H}_2\text{O}$ . Bei einer Holzfeuchtigkeit von 5 Gew.-% entspricht dies einem Luftüberschuss von  $\lambda = 3,0$  und somit Bedingungen, die in einem Holzkessel auftreten können. Das feuchte Gas enthält 20 Vol.-%  $\text{H}_2\text{O}$ . Dies entspricht einem Luftüberschuss von  $\lambda = 1,2$  bei einer Holzfeuchtigkeit von 50 Gew.-% und ist zum Beispiel für Waldhackschnitzelfeuerungen die obere Grenze. Die experimentellen Analysen decken den in der Praxis auftretenden Bereich typischer Feuchtigkeitsgehalte ab. Neben den Staubproben aus dem Elektroabscheider im Labor wurde auch eine Probe aus einem Elektroabscheider einer 1-MW-Hackschnitzelfeuerung untersucht. Diese Referenzprobe wurde bei dem im Abgas herrschenden Wasser-

Bild 5

Messwerte des spezifischen elektrischen Widerstandes für Ruß-, Salz- und Teerpartikel. Links sind Messergebnisse für trockenes Abgas mit 5 Vol.-% Wasserdampf dargestellt und rechts Messergebnisse für feuchtes Abgas mit 20 Vol.-% Wasserdampf.

wird die elektrische Leitfähigkeit von Salzen bei Temperaturen unterhalb von 120 °C kritisch. In trockenem Abgas wird die elektrische Leitfähigkeit von Salzen ab 200 °C kritisch. Bei kondensierbaren organischen Verbindungen treten erst ab 170 °C geeignete Bedingungen auf. Bei Variation von Luftüberschuss und Holzfeuchtigkeit ist der optimale Betrieb eines Elektroabscheiders nur in einem engen Temperaturbereich möglich. Die präsentierten Messergebnisse können hierfür als Indikator dienen. Dennoch sind für eine Anwendung spezifische Staubanalysen empfehlenswert.

### Abscheidegrad

In der Tabelle sind Abscheidegrade für die drei Partikeltypen gegenübergestellt. Bei Salzpartikeln wurde der auslegungseitig erwartete Abscheidegrad von 90 % erreicht. Der bei Teerpartikel erreichte



Betriebsparameter		Ruß	Salz	Teer
Luftüberschuss $\lambda$		1,2	1,55	3,5
Kohlenmonoxid <sup>1)</sup>	in mg/m <sup>3</sup> (i.N.)	1000	70	4000
Flüchtige organische Verbindungen <sup>1)</sup>		20	2	400
Partikelmasse vor Elektroabscheider	in mg/m <sup>3</sup> (i.N.)	50	30	50
Partikelmasse nach Elektroabscheider		42	3	7
<b>Abscheidegrad, massebezogen</b>	<b>in %</b>	<b>16</b>	<b>90</b>	<b>86</b>
Partikelanzahl vor Elektroabscheider	in 1/cm <sup>3</sup> (i.N.)	6,0 · 10 <sup>7</sup>	6,0 · 10 <sup>7</sup>	9,6 · 10 <sup>7</sup>
Partikelanzahl nach Elektroabscheider	in 1/cm <sup>3</sup> (i.N.)	7,5 · 10 <sup>6</sup>	4,8 · 10 <sup>6</sup>	9,0 · 10 <sup>6</sup>
<b>Abscheidegrad, anzahlbezogen</b>	<b>in %</b>	<b>88</b>	<b>92</b>	<b>90</b>

<sup>1)</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>

Abscheidegrad ist etwas geringer, da das elektrische Feld zur Verhinderung von Rücksprühen reduziert werden musste. Ein kritischer Faktor bei Teerpartikeln ist auch der Aufbau klebriger Schichten an den Niederschlags Elektroden. Bei Rußpartikeln ist der anzahlbezogene Abscheidegrad nur etwas geringer als der für Salzpartikel, während der massebezogene Abscheidegrad bei Rußpartikeln 16 Gew.-% beträgt und bei Salzpartikeln mit 90 Gew.-% signifikant höher ist. Dies ist auf den Wiedereintrag agglomerierter Partikel zurückzuführen und lässt sich durch Analysen zur Verteilung der Korngrößen mit ein- und ausgeschaltetem Elektroabscheider bestätigen (Bild 6). Demnach zeigt sich eine Reduktion des Modalwertes der Anzahlkonzentration von Rußpartikeln um etwa eine Größenordnung, während für Rußpartikel mit Korngrößen über 0,5 µm eine Zunahme um ungefähr eine Größenordnung zu beobachten ist. Der Elektroabscheider funktioniert bei dieser Betriebsweise in erster Linie als Agglomerator für Ruß und nur in einem geringen Maß als Abscheider. Dieser Effekt tritt vor allem bei Kleinanlagen auf, bei denen geringe Partikelabscheidegrade und Spannungsüberschläge nachgewiesen wurden. Dies bestätigt die geringe Effektivität von schlecht ausgelegten und betriebenen Elektroabscheidern.

## Schlussfolgerungen

Holzfeuerungen können Partikel und Tröpfchen als primäre Aerosole im Abgas enthalten, die zur Einhaltung der

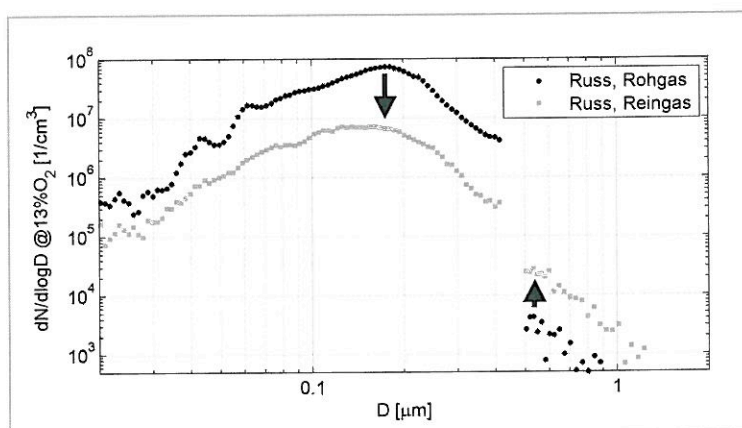
Gesetzesvorgaben zur Luftreinhaltung abgeschieden werden müssen. In einer messtechnischen Untersuchung wurden die unter variablen Bedingungen bei der Holzverbrennung generierten Partikel analysiert und auf dieser Grundlage drei primäre Partikelarten identifiziert:

- Salze, die sich bei hoher Temperatur und idealem Luftüberschuss bilden.
- Ruß, der sich bei hoher Temperatur und lokalem Sauerstoffmangel bildet und ein hohes C/H-Verhältnis von 6,44 aufweist, das den fast elementaren Aufbau bestätigt.
- Teere, die bei geringer Temperatur gebildet werden und entsprechend dem organischen Aufbau C/H-Verhältnisse von nur 1,24 aufweisen.

Diese Partikel weisen unterschiedliche physikalisch-chemische Eigenschaften auf. Für eine elektrostatische Partikelabscheidung ist vor allem die elektrische Leitfähigkeit bzw. der Staubwiderstand entscheidend. Salze weisen für Elektroabscheider ideale Eigenschaften auf. Ruß hat eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit und verursacht einen Wiedereintrag agglomerierter Partikel. Kondensierbare organische Verbindungen verfügen über eine nur geringe elektrische Leitfähigkeit und bilden elektrisch isolierende Staubschichten, die zu einem

Bild 6

Gemessene Korngrößenverteilungen von Rußpartikeln bei aus- bzw. eingeschaltetem Elektroabscheider.



Tabelle

Betriebsparameter und Abscheidegrade für Ruß-, Salz- und Teerpartikel.

Rücksprühen führen und den Betrieb des Elektroabscheiders einschränken. Diese Verbindungen bilden außerdem eine klebrige, nur schwer zu reinigende Schicht.

Die Kenntnisse über die Partikelarten und ihre Eigenschaften in Abhängigkeit vom Betriebszustand kann zur Auslegung und Betriebsoptimierung genutzt werden. Während der stationäre Betrieb einer Holzfeuerung mit überwiegend anorganischen Partikeln im Abgas für den Elektroabscheider unkritisch ist, können sein Abscheidegrad und seine Verfügbarkeit unter anderem während der Startphase der Feuerung, bei einem Betrieb unter Luftmangel oder bei einer zu geringen Verbrennungstemperatur erheblich eingeschränkt werden. Für die Reduzierung der Emissionen sind jedoch hohe Verfügbarkeiten entscheidend, was eine optimale Anlagenauslegung und Systemintegration zur Gewährleistung eines stationären Betriebs voraussetzt. Mit einer Regelung auf der Basis von Informationen über typische Partikelarten könnte der Einsatzbereich von Elektroabscheidern zum Beispiel in Bezug auf die Einsatztemperatur deutlich ausgedehnt werden. Für die Regelung sind Informationen zur Verbrennungs- und Abgastemperatur, zum Luftüberschuss und zur Holzfeuchte erforderlich. Wenn diese Größen kontinuierlich erfasst oder betrieblich vorgegeben werden, kann der Betrieb von Holzfeuerungen mit Elektroabscheidern verbessert werden, so dass auch Emissionen reduziert werden.

## Literatur

- [1] Nussbaumer, T.: Vergleich von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz, BWK 57 (2005) Nr. 12, S. 59-61.
- [2] Nussbaumer, T.: Combustion and Co-combustion of Biomass. Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy & Fuels 17 (2003) No 6, pp. 1510-1521.
- [3] Wiggers, H.; Nasri, S.: Staubwiderstandsmessungen bei elektrofiltertypischen Stromdichten. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 68 (2008) Nr. 5, S. 177-181.
- [4] Parker, K. R.: Applied Electrostatic Precipitation. London: Blackie Academic & Professional, 1997.
- [5] Parker, K. R.: Electrical operation of electrostatic precipitators. London: The Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [6] Fritz, W.; Kern, H.: Reinigung von Abgasen. Würzburg: Vogel, 1990.
- [7] Richtlinie VDI 3678, Blatt 1: Elektrofilter. Prozessgas- und Abgasreinigung. Düsseldorf: VDI, 1998.
- [8] White, H. J.: Industrial Electrostatic Precipitation. Oxford: Pergamon, 1963.