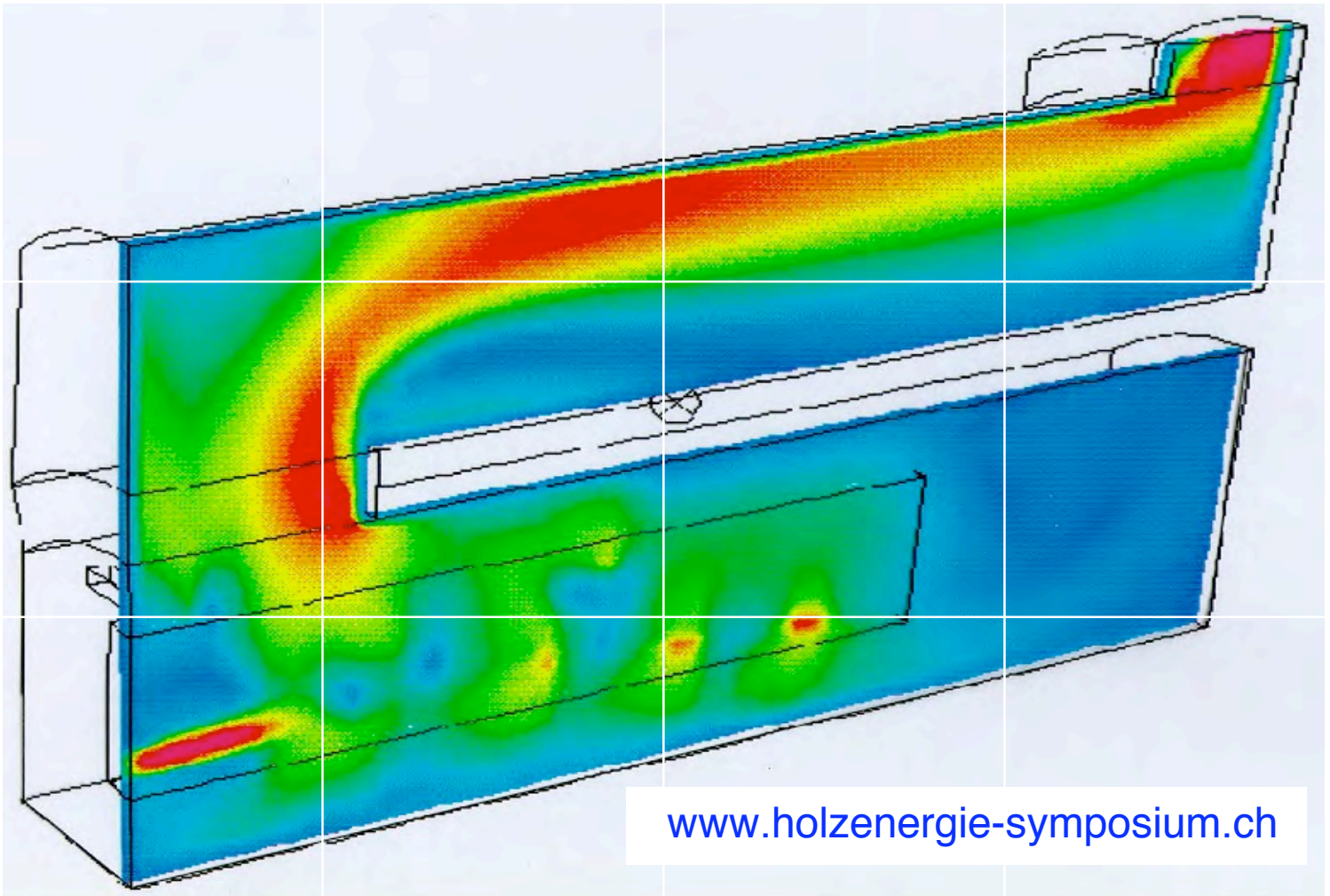


Thomas Nussbaumer (Hrsg.)

# 11. Holzenergie-Symposium

Potenzial und Technik zur Holzenergie-Nutzung

17. September 2010, ETH Zürich



Thomas Nussbaumer (Hrsg.):

11. Holzenergie-Symposium: Potenzial und Technik zur Holzenergie-Nutzung.

Tagung an der ETH Zürich am 17. September 2010, Verenum Zürich 2010

ISBN 3-908705-21-5

Bezugsquellen:

Holzenergie-Symposium, c/o TEMAS AG, Egnacherstrasse 69, CH – 9320 Arbon  
Telefon 071 446 50 30, Fax 071 446 50 82, Email [info@holzenergie-symposium.ch](mailto:info@holzenergie-symposium.ch)

Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – 8006 Zürich, [www.verenum.ch](http://www.verenum.ch)

Weitere Informationen: [www.holzenergie-symposium.ch](http://www.holzenergie-symposium.ch)

# Inhaltsverzeichnis

	Vorwort		5
<b>1</b>	K. Prins	Wood potential and future demand and supply for wood in Europe	7
<b>2</b>	R. Manser	Holzpotenzial der Schweiz und Entwicklungsstrategien aus Sicht des Bundes	23
<b>3</b>	H.-R. Streiff	Bedarf, Quellen und Bedarfsentwicklung für Säge- und Industrieholz	37
<b>4</b>	U. Elber	Bedarf an Energieholz zur Stromerzeugung	45
<b>5</b>	H.-J. Schmid	Strategie zur Energieholznutzung von SFIH Holzfeuerungen Schweiz	55
<b>6</b>	U. Baltensperger	Verhalten der Schadstoffe aus Holzfeuerungen in der Atmosphäre und Beitrag zum Feinstaub	59
<b>7</b>	Th. Nussbaumer	Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen und Klimaeffekt von Aerosolen aus der Biomasse-Verbrennung	67
<b>8</b>	W. Schultess	Vermeidung von Fehlauslegungen und Mängeln bei der Planung von Abgasreinigungsanlagen	91
<b>9</b>	A. Lauber	Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern	113
<b>10</b>	R. Haberl	Systembewertung von Jahresnutzungsgrad und Jahresemissionen für Kombianlagen Pellet und Solar	131
<b>11</b>	J. Good	Einfluss von Kaltstart und Teillast auf die Schadstoffemissionen von Stückholz- und Pelletheizungen	145
<b>12</b>	J. Dall Bentzen	Biomass furnace with updraft fixed bed gasification for 2 – 12 MW	173
<b>13</b>	S. Barsali	Externally Fired Micro Gas Turbine (75 kWe) for combined heat and power generation from solid biomass	179
	Autorenverzeichnis		195



# Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern

---

Adrian Lauber und Thomas Nussbaumer  
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw

## Zusammenfassung

In einem elektrostatischen Staubabscheider im Labormassstab wurden typische Partikel aus unterschiedlichen Verbrennungszuständen von Holz gesammelt und untersucht. Dazu wurde ein Pelletkessel konstruktiv modifiziert und bei unterschiedlichen Einstellungen betrieben, die entsprechend dem Verbrennungszustand zu folgenden drei Partikelarten führten:

1. Salze aus guter Verbrennung bei hoher Temperatur und idealem Luftüberschuss,
2. Russ aus der Verbrennung bei hoher Temperatur mit lokalem Luftmangel und
3. kondensierbare organische Verbindungen (Condensable Organic Compounds, COC) aus der Verbrennung bei tiefer Temperatur mit hohem Luftüberschuss.

Anhand der chemischen Reaktionen der Holzverbrennung wird die Bildung der drei Partikelarten beschrieben und den unterschiedlichen Verbrennungszuständen zugeordnet. Mittels Analyse der chemischen und physikalischen Eigenschaften konnten die Partikel identifiziert und die Klassierung validiert werden. So wurde für Salze ein geringer, für Russ und COC dagegen ein hoher Kohlenstoffgehalt nachgewiesen. Russ und COC unterscheiden sich durch signifikant unterschiedliche Anteile an Kohlenstoff und Wasserstoff. So beträgt das molare C/H-Verhältnis von Russ rund 6,44, was das beinahe elementare Vorliegen des Kohlenstoffs bestätigt. COC weist mit einem C/H-Verhältnis von 1,24 dagegen einen organischen Aufbau auf. Für das Verhalten der Partikel im Elektroabscheider ist jedoch vor allem deren elektrische Leitfähigkeit entscheidend, weshalb der Staubwiderstand bei verschiedenen Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalten bestimmt und gezeigt wurde, dass die Leitfähigkeit eine signifikante Abhängigkeit von Partikeltyp und Abgasfeuchte aufweist. Salze weisen eine ideale Leitfähigkeit auf, so dass die Partikel auf der Niederschlagselektrode abgeschieden werden und zu einer homogenen und einfach abzureinigenden Staubschicht führen. Russ führt dagegen wegen der sehr hohen Leitfähigkeit zum Aufbau von Agglomeraten und in der Folge zu Wiedereintrag in die Gasströmung. COC sind dagegen nur schlecht leitfähig, was zum Aufbau einer elektrisch isolierenden Staubschicht führt, die bei tiefer Abgasfeuchte Rücksprühen verursacht und den Betrieb und Abscheidegrad des Elektroabscheiders limitiert. Für die Auslegung und den Betrieb von Elektroabscheidern bei Holzfeuerungen müssen diese spezifischen Eigenschaften der Partikel demnach unbedingt beachtet werden. Die Kenntnis dieser Eigenschaften und deren Abhängigkeit vom Betriebszustand kann zur Optimierung von Auslegung und Betrieb der Elektroabscheider genutzt werden.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Elektrostatische Partikelabscheider oder kurz Elektroabscheider kommen seit längerem für automatische Holzfeuerungen im Leistungsbereich über 1 MW zum Einsatz. Daneben führt die Verschärfung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) auch für Holzfeuerungen unter 1 MW zu einem Bedarf an Feinstaubabscheidern. Für Elektroabscheider ergeben sich damit folgende Einsatzgebiete bei Holzfeuerungen:

- Klein-Elektroabscheider für Holzfeuerungen von 5 kW – 70 kW (neu)
- Elektroabscheider für automatische Holzfeuerungen von 70 kW – 1 MW (neu)
- Elektroabscheider für automatische Holzfeuerungen ab 1 MW (bekannt).

In Ländern mit verschärften Emissionsgrenzwerten wurden in den letzten Jahren auch für die zwei neuen Kategorien bis 1 MW Elektroabscheider entwickelt und auf den Markt gebracht. Dabei ist zu beachten, dass grössere automatische Holzfeuerungen in der Regel eine hohe Ausbrandqualität erzielen können und dies dank Regelungstechnik und Kontrolle der Anlagen meist auch im Praxisbetrieb sicher stellen. Kleinf Feuerungen weisen dagegen oft Phasen mit unvollständiger Verbrennung auf, was zu hohen Anteilen an Russ und/oder kondensierbaren organischen Verbindungen (Condensable Organic Compounds, COC) führt.

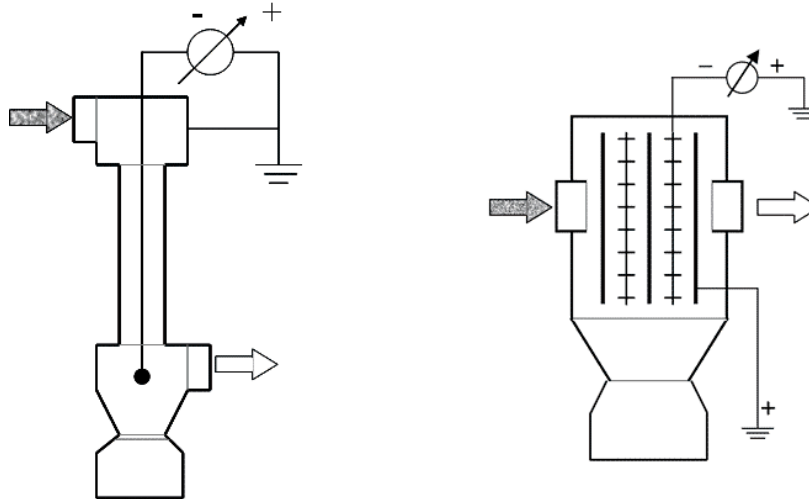


Bild 1 Aufbau von Elektroabscheidern.  
Links: Röhren-Elektroabscheider, rechts: Platten-Elektroabscheider.

Der Abscheidegrad von Elektroabscheidern ist abhängig von den Eigenschaften der Partikel und der Abgase. Elektrisch sehr gut leitfähige Partikel wie Russ können Agglomerate bilden, die durch Wiedereintrag von der Niederschlagselektrode zurück in den Abgasstrom gelangen und damit den Abscheidegrad verringern können. Elektrisch schlecht leitfähige Partikel können zu einer isolierenden Staubschicht auf der Niederschlagselektrode und in der Folge zu unerwünschtem Rücksprühen führen, was die Leistung des Abscheiders begrenzt und zum Beispiel für COC erwartet wird. Für den Einsatz von Feinstaubabscheidern ist deshalb ent-

scheidend, dass die Eigenschaften der bei verschiedenen Verbrennungszuständen auftretenden Partikel bekannt sind und bei Auslegung und Betrieb der Abscheider berücksichtigt werden. Bei Fehlen entsprechender Kenntnisse besteht die Gefahr, dass die Abscheider ungeeignet betrieben werden oder im Praxisbetrieb nur stark reduzierte Abscheidegrade erzielen.

Das Prinzip der elektrostatischen Abscheidung ist seit rund einem Jahrhundert bekannt, Bild 1 zeigt die Ausführung von Elektroabscheidern in Röhren- und Plattenbauweise. In der Literatur sind Auslegungsparameter für verschiedene Gaszusammensetzungen und Partikeleigenschaften zu finden [1–3]. Diese basieren jedoch weitgehend auf konstanten Betriebsbedingungen, wie dies in thermischen Kraftwerken der Fall ist. Zusätzlich sind die Partikeleigenschaften hauptsächlich aus der Kohleverbrennung bekannt. Für Holzfeuerungen sind dagegen kaum Daten verfügbar [4]. Für die Anwendung von Elektroabscheidern an Holzfeuerungen sind deshalb folgende Punkte zu beachten:

1. Partikel von kleinen Holzfeuerungen bestehen aus verschiedenen Komponenten. Diese können vereinfacht in drei Kategorien eingeteilt werden:
  1. Anorganische Partikel (Salze)
  2. Russ (Feststoffpartikel aus nahezu elementarem Kohlenstoff)
  3. Kondensierbare organische Komponenten (COC)
2. Die Konzentrationen an  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  im Abgas können in weiten Bereichen variieren. Dadurch verändern sich auch die Abscheidebedingungen im Elektroabscheider, da zum Beispiel der Wasserdampfgehalt die elektrische Leitfähigkeit beeinflusst.
3. Holzfeuerungen werden meistens für Heizzwecke eingesetzt, was oft mit häufigem Ein-/Aus-Betrieb und nur kurzen stationären Verbrennungsphasen verbunden ist [5]. In der Startphase können tiefe Abgastemperaturen und erhöhte Konzentrationen an organischen Kondensaten auftreten. Als Folge davon können Wasserdampf und wenn vorhanden auch kondensierbare organische Verbindungen im Elektroabscheider kondensieren. Um dies zu verhindern, werden Elektroabscheider üblicherweise bei tiefen Abgastemperaturen ausgeschaltet. Dies kann zu einer tiefen Verfügbarkeit des Abscheiders und damit zu hohen Emissionen im realen Betrieb führen.

## 1.2 Ziel

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Bestimmung der Abscheideeigenschaften der bei verschiedenen Betriebszuständen auftretenden Partikeln aus Holzfeuerungen als Basis für die Auslegung und die Regelung von Elektroabscheidern. Zusätzlich sollen Betriebsprobleme wie Rücksprühen und Wiedereintrag spezifischen Betriebsbedingungen und Staubeigenschaften zugeordnet werden, um damit den Betrieb von Feuerung und Elektroabscheider aufeinander abzustimmen und zu verbessern.

## 2 Theorie

Bei der Holzverbrennung sind drei Verbindungsarten zu unterscheiden, die im Abgas als Feststoff vorliegen oder nach Abkühlung in der Atmosphäre zum Feinstaub beitragen können und vereinfachend als Salz, Russ und kondensierbare organische Verbindungen (COC) bezeichnet werden. Die Bildungsmechanismen sind in Bild 2 dargestellt. Diese drei Kategorien haben komplett unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften:

1. Anorganische Partikel, hauptsächlich Salze, werden aus den mineralischen Aschebestandteilen des Brennstoffs gebildet und dominieren bei optimaler Verbrennung.
2. Russ wird aus organischen Vorläufersubstanzen in Zonen mit hoher Temperatur und lokalem Luftmangel gebildet. Flüchtige Komponenten und primäre Teere reagieren zu sekundären Teeren und bilden polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die bei hoher Temperatur *und* Abwesenheit von Sauerstoff durch Freisetzung von Wasserstoff zu Russ reagieren können. Die Bildung von sekundären Teeren findet ab 700°C bis 850°C in relevantem Mass statt und die anschließende Synthese zu Russ ebenfalls erst in ausgeprägtem Mass bei Temperaturen ab rund 850°C.
3. COC werden in mehreren Prozessen gebildet:
  - Bei tiefer Temperatur werden flüchtige oder kondensierte organische Komponenten aus der Pyrolyse gebildet. Die Charakteristik ist unter anderem abhängig von der Verweilzeit, Aufwärmrate und Temperatur.
  - Bei mittlerer Temperatur und lokalem Luftmangel können flüchtige organische Komponenten zu sekundären Teeren in Form von COC konvertieren.

Automatische Holzfeuerungen können eine annähernd vollständige Verbrennung erzielen, sie weisen jedoch wegen der hohen Temperaturen eine hohe Freisetzung von Salzen auf, weshalb die Partikelfracht überwiegend aus Salzen besteht. In der Startphase und bei unsachgemäßem Betrieb können aber auch COC und Russ emittiert werden.

Unvollständige Verbrennung tritt oft bei handbeschickten Feuerungen auf, wobei COC und Russ die Partikelfracht dominieren. Wegen der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit der Bildung sekundärer Teere und insbesondere der Synthese von Russ treten nur bei hoher Temperatur entsprechend hohe Russgehalte auf. Bei tiefer Temperatur findet dagegen keine Russbildung statt, so dass bei unvollständiger Verbrennung COC dominieren. Je nach Temperatur und Prozessführung ist deshalb oft eine der beiden Partikeltypen vorherrschend.



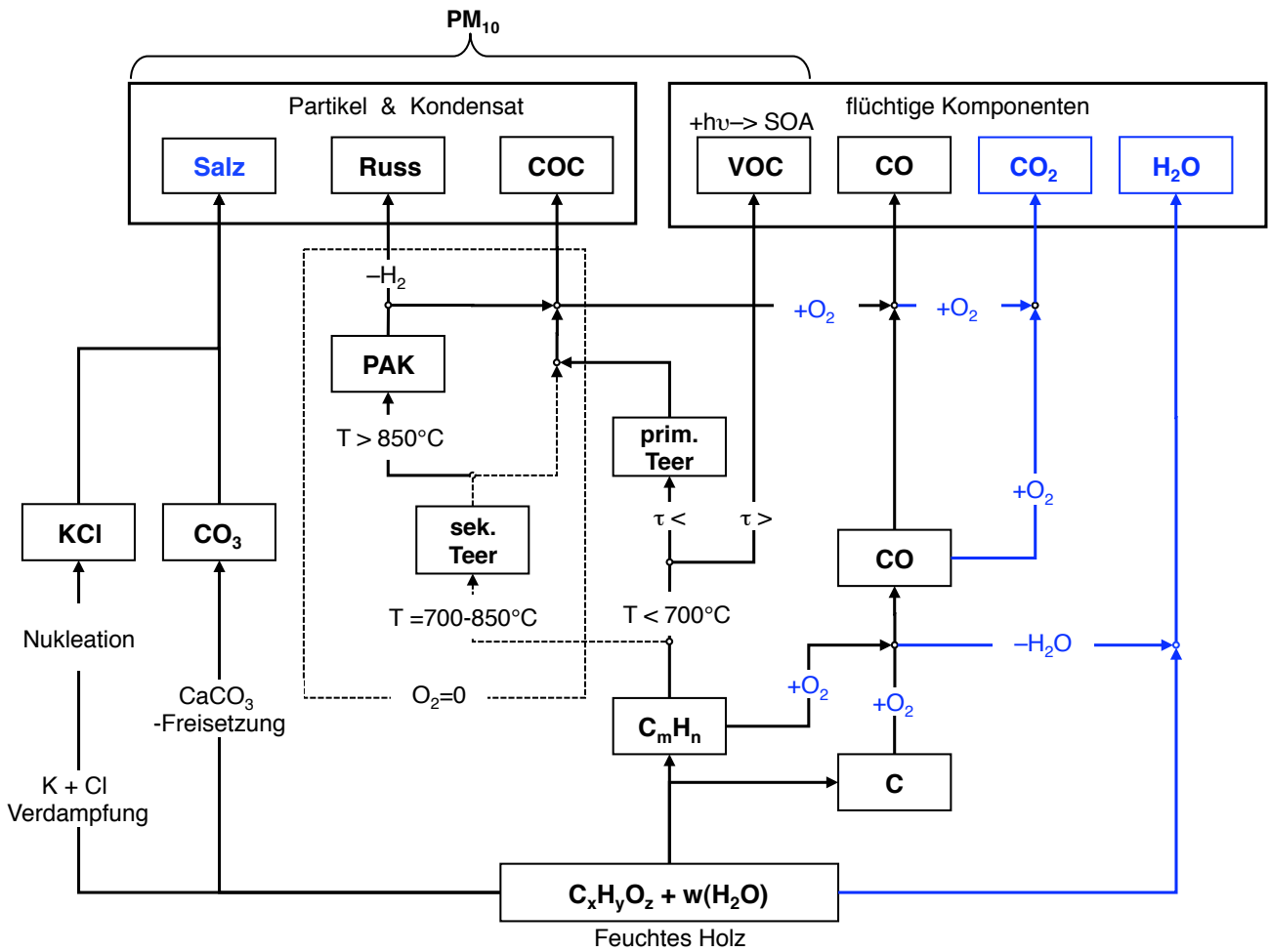


Bild 2 Mechanismen der Aerosolbildung bei der Holzverbrennung. (Temperaturangaben: [6],  $H_2$ -Abspaltung: [7]).

### 3 Methode

Für die Experimente wurde ein Rohr-Elektroabscheider im Labormassstab aufgebaut und an einen Pelletkessel mit modifizierter Brennkammer angeschlossen (Bild 3). Durch die Modifikation konnten Betriebspunkte kontinuierlich betrieben werden, die üblicherweise nur in transienten Phasen, wie zum Beispiel während des Startvorgangs, auftreten.

Der Elektroabscheider wurde auf einen für Kleinanlagen typischen Abscheidegrad ausgelegt, der für den gesamten Bereich der Partikelgrößen knapp über 90% beträgt. Der Abscheidegrad für das typische Korngrössenspektrum von Holzfeuerungen liegt bei über 95% (Bild 3).

Die elektrische Leitfähigkeit der Partikel wurde entsprechend IEEE Standard 548-1984 gemessen. Aufgrund eines fehlenden gültigen Standards wurde der alte Standard verwendet. Die Relevanz der Widerstandsmessung für Elektroabscheider wird in [10] beschrieben.

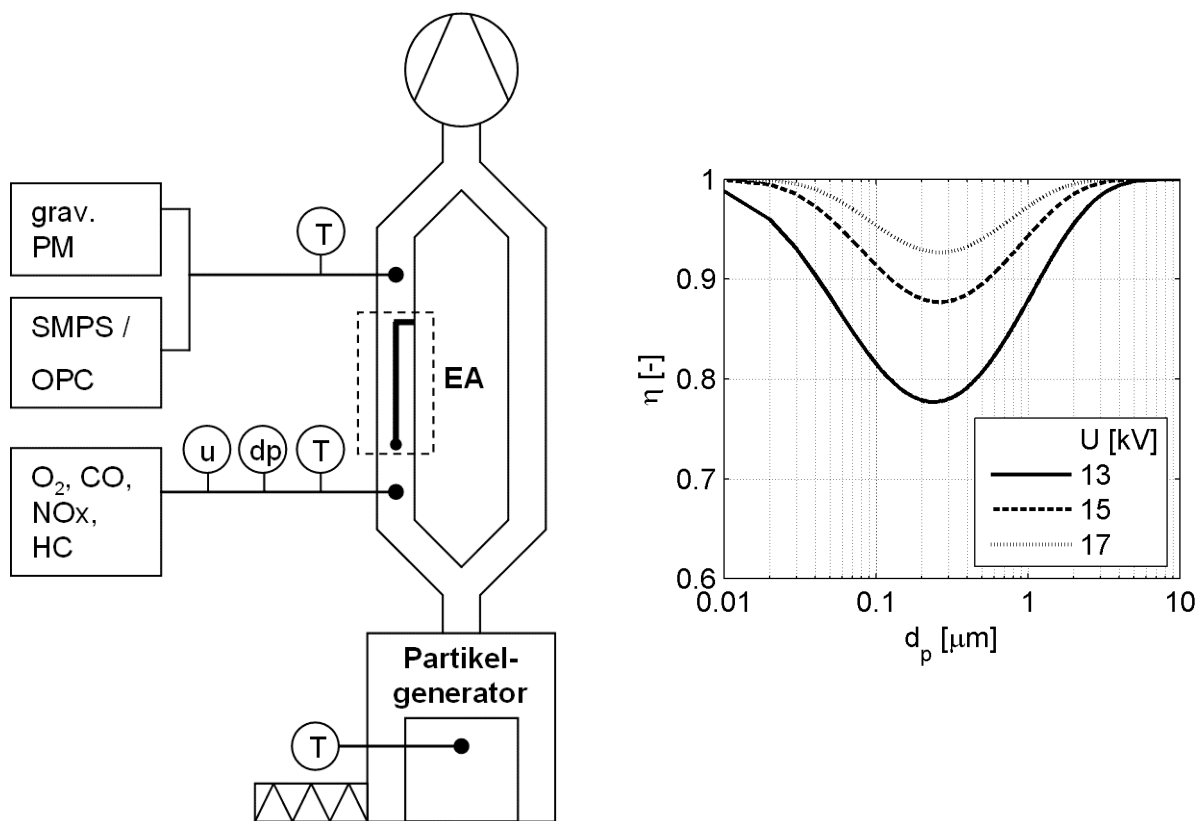


Bild 3 Links: Messaufbau. Rechts: Berechneter Abscheidegrad für den Labor-Elektroabscheider in Funktion der Partikelgröße und der Spannung. Kenngrößen des Elektroabscheider: L 1000 mm, D 100 mm,  $u$  1 m/s, SCA 45 s/m,  $U_{\text{max}}$  -65kV.

## 4 Resultate

### 4.1 Partikelarten

Bei der Holzverbrennung können drei Zustände unterschieden werden, die unter anderem vom Luftüberschuss in der Brennkammer abhängig sind [11]. Bild 4 zeigt die im Labor-Elektroabscheider gefundenen Partikel für die drei Betriebspunkte mit unterschiedlichen Luftüberschusszahlen:

- Betriebspunkt A Bei hohem Luftüberschuss wird nur eine tiefe Verbrennungstemperatur erzielt, was zu einer unvollständigen Verbrennung führt. Bei tiefer Temperatur findet jedoch keine Bildung von Russ statt, weshalb primäre und sekundäre Teere aus der Pyrolyse die Partikelfracht dominieren. Diese liegen im Abgas als COC vor, welche aufgrund der organischen Zusammensetzung einen hohen Wasserstoffgehalt und damit ein kleines C/H-Verhältnis aufweisen, was durch die chemische Analyse bestätigt wird (Tabelle 1 und 2).
- Betriebspunkt B Bei optimalem Luftüberschuss wird eine annähernd vollständige Verbrennung erzielt. Dazu müssen die Verbrennungsgase und die Luft gut gemischt und ein Quenchen der Flamme verhindert werden. Unverbrannter Kohlenstoff wird dann nur in geringen Mengen emittiert, weshalb der Feinstaub im Abgas vorwiegend aus anorganischen Asche-Bestandteilen in Form von Salzen besteht.
- Betriebspunkt C Bei tiefem Luftüberschuss wird in sauerstofffreien Zonen in der heissen Flamme Russ gebildet, indem primäre Teere aus der Pyrolyse vorab zu sekundären Teeren führen, die im Weiteren zu PAK und schlussendlich bei weiterem Partikelwachstum unter der Freisetzung von Wasserstoff zu Russ führen. Infolge der Freisetzung von Wasserstoff weist der verbleibende Russ ein hohes C/H-Verhältnis auf, was gemäss Analyse bestätigt wird (Tabelle 1 und 2).

Bei der Zuordnung der Partikelarten zu den Betriebspunkten ist zu beachten, dass hohe Teergehalte nicht nur bei hohem Luftüberschuss auftreten. Vielmehr kann Teer vor allem in handbeschickten Holzfeuerungen auch bei Luftmangel auftreten, wenn im Feuerraum tiefe Temperaturen herrschen, was zum Beispiel beim Start eines Holzofens oder bei Verwendung von zu feuchtem Holz der Fall ist. Sofern wie hier Luftmangel bei hoher Flammtemperatur herrscht, kann jedoch Russbildung auftreten.

Aus der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften gemäss Tabelle 1 ist zu erwarten, dass Salze für den Betrieb von Elektroabscheidern optimal sind, während Russ zu Wiedereintrag und COC zu Rücksprühen führt. Da beim Start oder bei nicht-idealem Betrieb hohe Konzentrationen an Russ oder COC auftreten können, werden Elektroabscheider ausserhalb des optimalen Betriebspunkts der Feuerung oft ausgeschaltet, was zu unerwünschten Emissionen führt.

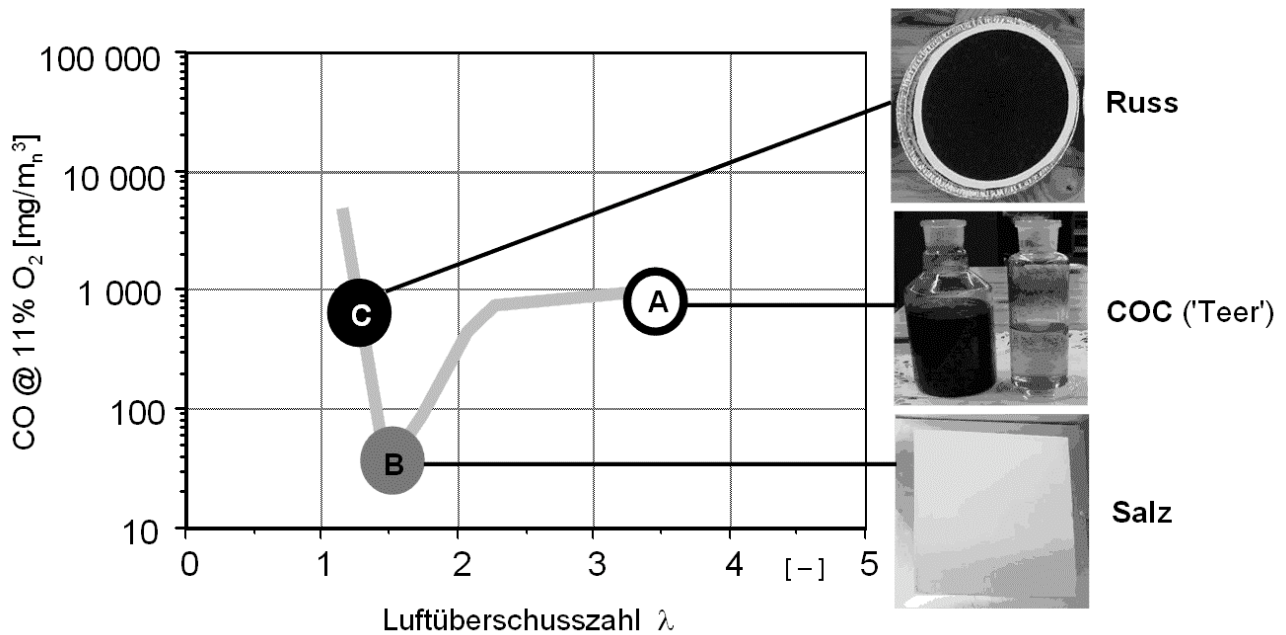


Bild 4 Betriebspunkte der Holzverbrennung dargestellt im CO/Lambda-Diagramm nach [11]. Die drei Zustände entsprechend den drei Partikeltypen Russ, Salze und COC, abhängig von der Luftüberschusszahl und anderen Parametern.

Tabelle 1 Chemische und elektrische Eigenschaften der drei Partikelarten und deren Eignung für Elektroabscheider gemäss Theorie [1,8,9].

\*primäre Teere: isolierend, sekundäre Teere und PAK: halbleitend.

Partikel-Typ	Salze	Russ	COC
<b>Eigenschaft</b>			
Molares Verhältnis C/H	–	> 6 – 8	≈1 (< 2)
Elektrische Leitfähigkeit	mittel	hoch	gering, teilweise isolierend*
Eignung für Elektroabscheider	ideal	nicht ideal wegen Gefahr von Wiedereintrag	nicht ideal wegen Rücksprühen und Gefahr von Verklebungen

## 4.2 Zusammensetzung der Partikel

Infolge der Freisetzung von Wasserstoff bei der Russbildung weisen Russ und COC ein signifikant unterschiedliches C/H-Verhältnis auf und lassen sich damit eindeutig identifizieren, wie aus der Elementaranalyse hervorgeht (Tabelle 2). Bild 5 zeigt die Zustände der Verbrennung anhand von Emissionen, Temperatur und Luftüberschuss und Partikel-Zusammensetzung. Zusammen mit der chemischen Analyse bestätigen die Resultate die Abhängigkeit der Partikeleigenschaften von der Luftüberschusszahl ( $\lambda$ ), was die Klassierung in drei Verbrennungs-Zustände zulässt.

- Bei  $\lambda = 1.2$  wird durch lokalen Sauerstoffmangel **Russ** gebildet (bei moderaten CO- und HC-Konzentration). Dies führt zu Wiedereintrag von agglomerierten Partikeln.
- Bei  $\lambda = 1.55$  wird eine annähernd vollständige Verbrennung erzielt und erzeugt hauptsächlich anorganische Partikel in Form von **Salzen**.
- Durch Erhöhung des Luftüberschusses auf  $\lambda = 3.5$  wurde ein stabiler Betriebspunkt mit hohen Konzentrationen an CO und HC erreicht. Die in diesem Betriebspunkt gebildeten **COC** verursachten Rücksprühen, wodurch der Abscheidegrad geringfügig reduziert wurde.

Tabelle 2 Kohlenstoffgehalt und Elementar-Zusammensetzung der Partikel.  
1) thermische Kohlenstoffanalyse, 2) Elementaranalyse.

Analyse	Element	Einheit	Russ	Salz	COC
1	C (Gesamt-C)	Gew.-%	51.4	15.2	45.2
2	C	Gew.-%	41.0	14.5	36.0
	H	Gew.-%	0.53	0.45	2.41
	N	Gew.-%	0.28	0.53	0.73
	S	Gew.-%	3.12	5.12	1.53
	C/H	Mol/Mol	6.44		1.24

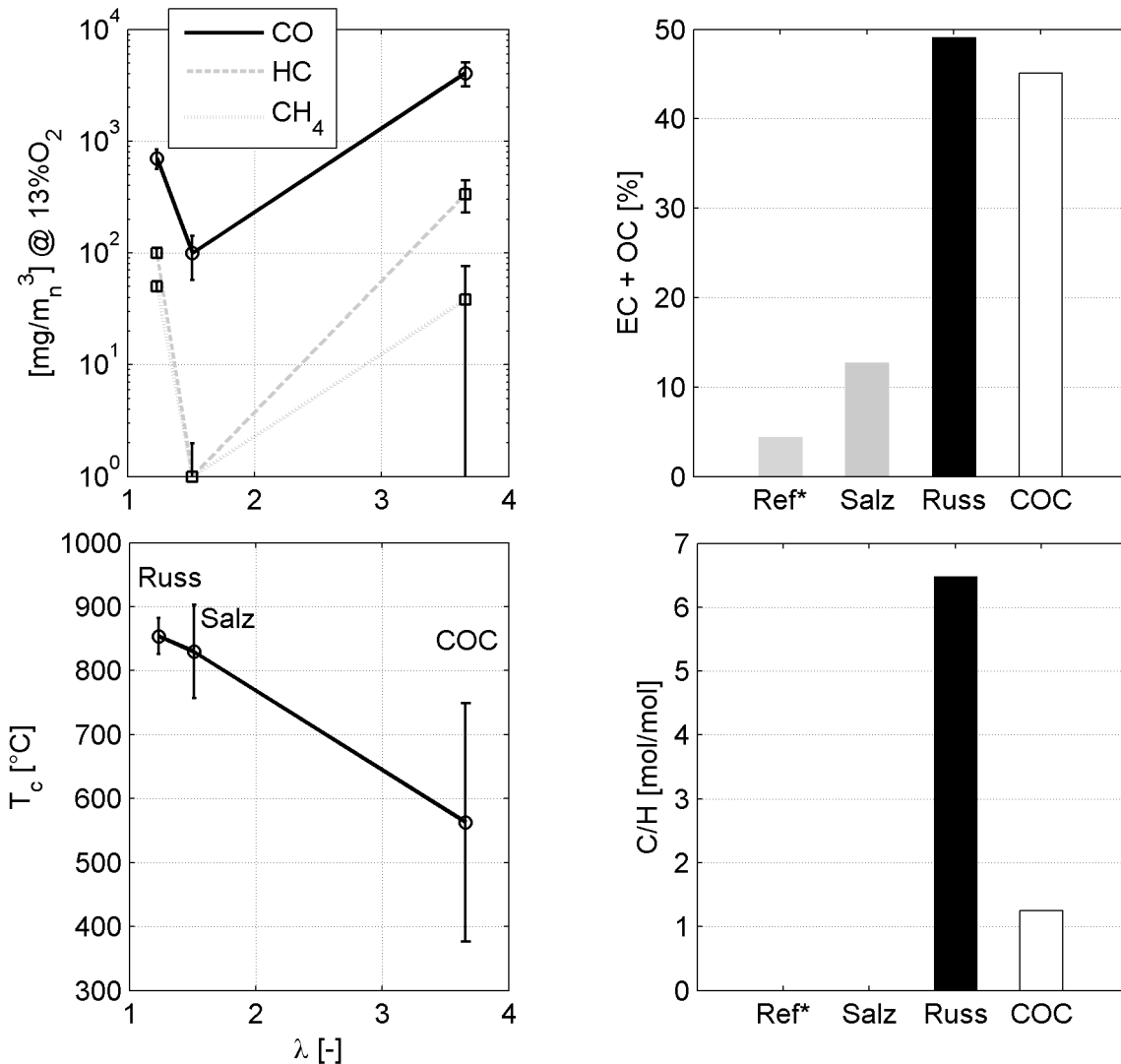


Bild 5 Links: Charakteristik der drei Betriebspunkte am modifizierten Pelletkessel. Rechts: Chemische Analyse der drei Partikeltypen. Zusätzlich sind die Resultate einer Staubprobe aus einem kommerziellen Elektroabscheider an einer automatischen Hackschnitzelfeuerung als „Ref“ eingezeichnet.

Bild 6 zeigt die Resultate der Analysen zur elektrischen Leitfähigkeit der Partikel. Dargestellt ist der Staubwiderstand (also die Leitfähigkeit<sup>-1</sup>) als Funktion der Temperatur in trockener und in feuchter Umgebung. Ein Gehalt von 5 Vol.-% Wasserdampf entspricht etwa der unteren Grenze von Abgasen aus Holzfeuerungen und kann in einem Holzofen bei hohem Luftüberschuss auftreten. 20% Wasserdampfgehalt entspricht etwa der oberen Grenze, die bei tiefem Luftüberschuss und nassem Holz in einer Waldhackschnitzelfeuerung möglich ist. Analysiert wurden die drei Staubproben aus dem Labor-Elektroabscheider sowie eine Probe aus einem kommerziellen Elektroabscheider an einer automatischen 1 MW Hackschnitzelfeuerung. Die Analyse für diese als „Referenz“ bezeichnete Probe erfolgte bei dem in Realität auftretenden Wasserdampfgehalt von 13 Vol.-%.

Der Staubwiderstand von Salz aus der Versuchsanlage und von Partikeln aus der Referenzprobe liegen zumindest zwischen 120°C und 200°C in dem für Elektroabscheider idealen

Bereich. Da der Staubwiderstand jedoch stark von der Temperatur und der Abgasfeuchte abhängig ist, muss auch für diese Stäube der Wassergehalt bei Auslegung und Betrieb der Anlage berücksichtigt werden. Im feuchten Abgas wird die Leitfähigkeit für Salz bei Temperaturen unterhalb von 120 °C kritisch. Trockenes Abgas wird für Salz ab 200 °C kritisch, während für COC erst ab 170 °C geeignete Bedingungen auftreten. Durch den variierenden Luftüberschuss und Holzfeuchte ist deshalb für Partikel aus der Holzfeuerung der optimale Betrieb nur in einem engen Temperaturbereich möglich. Obwohl Analysen für spezifische Anwendungen empfohlen werden, können die Resultate in Bild 6 als qualitativer Indikator für die Anlagenoptimierung bei verschiedenen Partikeltypen genutzt werden.

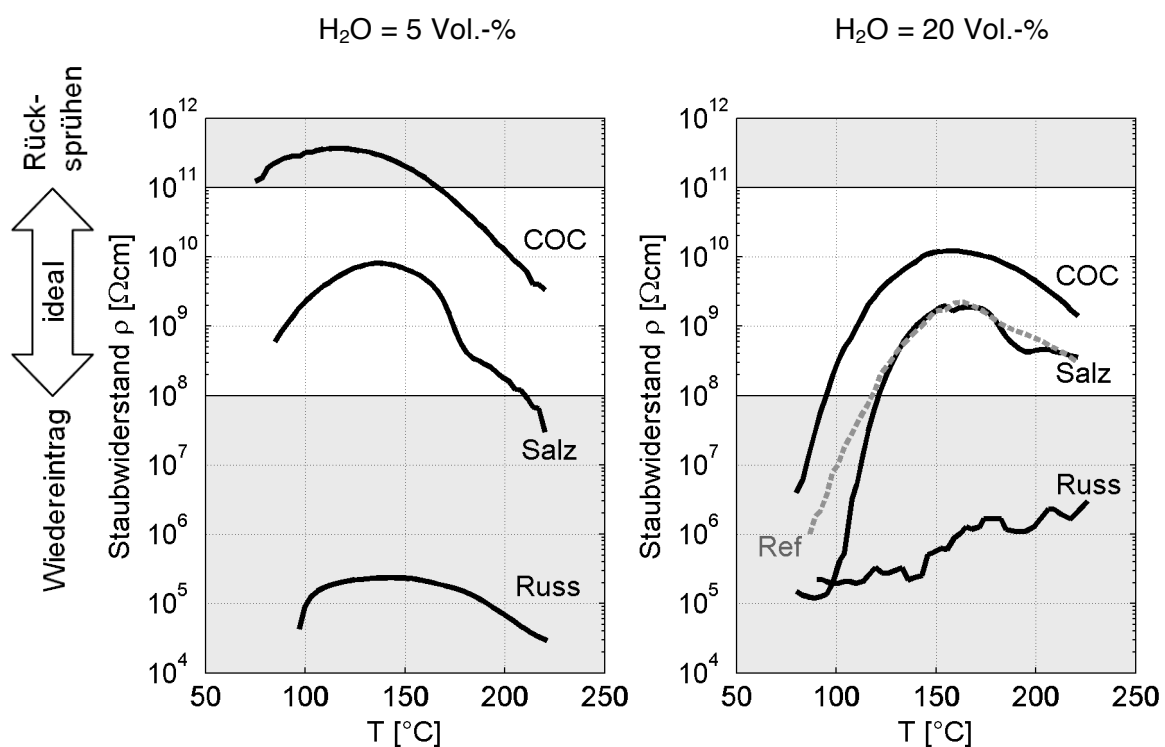


Bild 6 Staubwiderstand (Leitfähigkeit<sup>-1</sup>) von Russ, Salz und COC aus dem Labor-Elektroabscheider in den oben beschriebenen Betriebspunkten für trockene (links) und feuchte Abgase (rechts). 5 Vol.-% H<sub>2</sub>O entspricht z.B. einem Luftüberschuss von 3,0 bei einer Holzfeuchtigkeit von 5 Gew.-%. 20 Vol.-% H<sub>2</sub>O entspricht z.B. einem Luftüberschuss von 1,2 bei einer Holzfeuchtigkeit von 50 Gew.-%. Die Referenzprobe "Ref" stammt aus einem kommerziellen Elektroabscheider einer automatischen Waldhackschnitzelfeuerung und wurde bei einem 13 Vol.-% H<sub>2</sub>O analysiert entsprechend einem Luftüberschuss von 1,5 und einer Holzfeuchtigkeit von 30 Gew.-%. Der ideale Bereich der Leitfähigkeit zur Staubabscheidung in Elektroabscheidern ist gemäss Parker als "ideal" eingezeichnet [2]. Höhere Staubwiderstände führen zu Rücksprühen, höhere Leitfähigkeit dagegen zu Wiedereintrag.

### 4.3 Schichtaufbau

Die elektrische Leitfähigkeit bestimmt den Schichtaufbau im elektrischen Feld, weshalb die Staubschicht an der Niederschlagsselektrode von der Partikelart abhängig ist. Russ bildet eine verästelte Schicht, die dabei entstehenden Agglomerate haben nur eine schwache adhäsive Bindung zur Wand (Bild 7). Dies kann zu Wiedereintrag von agglomerierten Partikeln führen. Salz bildet eine homogene Schicht, welche problemlos mit den gängigen Abreinigungseinrichtungen entfernt werden kann. Bei COC ist die Schicht zwar ebenfalls homogen, jedoch klebrig, was die Abreinigung erschwert und zu Problemen führen kann.

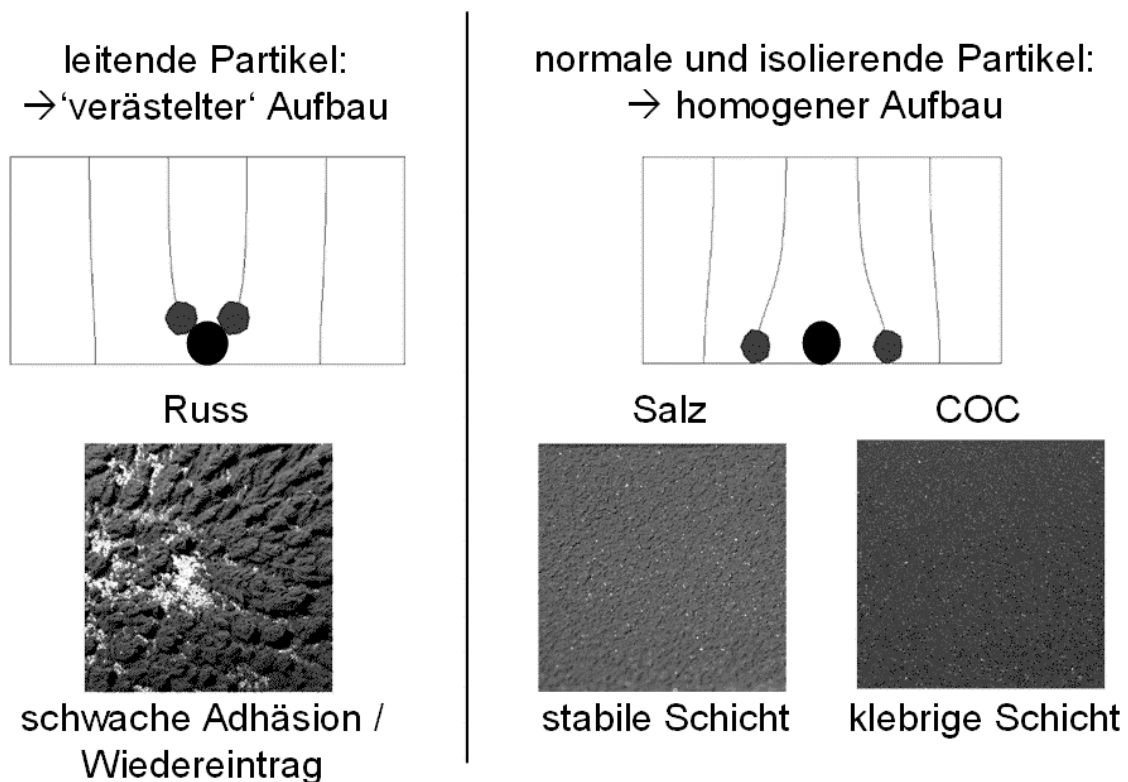


Bild 7 Mechanismen des Schichtaufbaus verschiedener Stäube im elektrischen Feld nach [12], links für elektrisch sehr gut leitende Partikel und rechts für elektrisch isolierende und normal leitende Partikel. Die Bilder zeigen die Staubschichten aus dem Labor-Elektroabscheider von links nach rechts wie folgt:

1. Verästelte grobe Russ-Agglomerate aus der Verbrennung von Holz unter Luftmangel (Black Carbon, vorwiegend elementarer Kohlenstoff),
2. Homogene graue Staubschicht aus dem optimalen Betrieb, und
3. Klebrige braune Staubschicht aus dem Betrieb mit hohem Luftüberschuss (Brown Carbon, hauptsächlich organischer Kohlenstoff).



## 4.4 Abscheidegrad

Tabelle 3 und Bild 8 zeigen den Abscheidegrad, welcher für die drei Partikeltypen erzielt wurde. Für Salz wurde der berechnete Abscheidegrad von 90% problemlos erreicht. Für COC ist der Abscheidegrad geringfügig tiefer, da das elektrische Feld zur Verhinderung von Rücksprühen reduziert werden musste. Für Russ ist die Abscheideleistung in Bezug auf die Anzahlkonzentration geringfügig tiefer, die Abscheidung der Massenkonzentration beträgt jedoch nur noch 16% und ist somit drastisch reduziert, was auf den Wiedereintrag von agglomerierten Partikeln zurückzuführen ist, wie dies auch aus der Korngrößenverteilung in Bild 9 hervorgeht. Diese zeigt eine Reduktion des Modalwerts der Anzahlkonzentration von Russ um rund eine Größenordnung, während gleichzeitig die Partikel mit Korngrößen von mehr als 0,5 Mikrometern um rund eine Größenordnung zunehmen. Der Elektroabscheider funktioniert bei dieser Betriebsweise für Russ somit in erster Linie als Agglomerator und nur in geringem Mass als Abscheider. Dieser Effekt kann zum Beispiel für kleine Elektroabscheider an Holzöfen entscheidend sein, wo oft Abscheidegrade in Bezug auf die Masse von unter 80% erreicht werden. Der Effekt muss bei der Auslegung und Berechnung der Abscheidegrade berücksichtigt werden. In Bezug auf die Gesundheitseffekte des Feinstaubes kann die Agglomeration zu grösseren Partikeln zwar als Verbesserung bewertet werden, die Emission von agglomeriertem Russ ist jedoch ebenfalls unerwünscht und sie kann zumindest lokal negative Auswirkungen haben.

Tabelle 3 Abscheidegrad bezogen auf Masse- und Anzahlkonzentration von Russ, Salz und COC.

Partikel Typ		Russ	Salz	COC
<b>Betriebsgrösse</b>				
Luftüberschuss $\lambda$	[-]	1.2	1.55	3.5
CO	[mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ] bei	1000	70	4000
VOC	13 Vol.-% O <sub>2</sub>	20	2	400
PM Masse vor Elektroabscheider	[mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ] bei	50	30	50
PM nach Elektroabscheider	13 Vol.-% O <sub>2</sub>	42	3	7
<b>Abscheidegrad Masse</b>	<b>[%]</b>	<b>16</b>	<b>90</b>	<b>86</b>
PM Anzahl vor Elektroabscheider	[cm <sub>n</sub> <sup>-3</sup> ]	6.0 10 <sup>7</sup>	6.0 10 <sup>7</sup>	9.6 10 <sup>7</sup>
PM Anzahl nach Elektroabscheider	[cm <sub>n</sub> <sup>-3</sup> ]	7.5 10 <sup>6</sup>	4.8 10 <sup>6</sup>	9.0 10 <sup>6</sup>
<b>Abscheidegrad Anzahl</b>	<b>[%]</b>	<b>88</b>	<b>92</b>	<b>90</b>

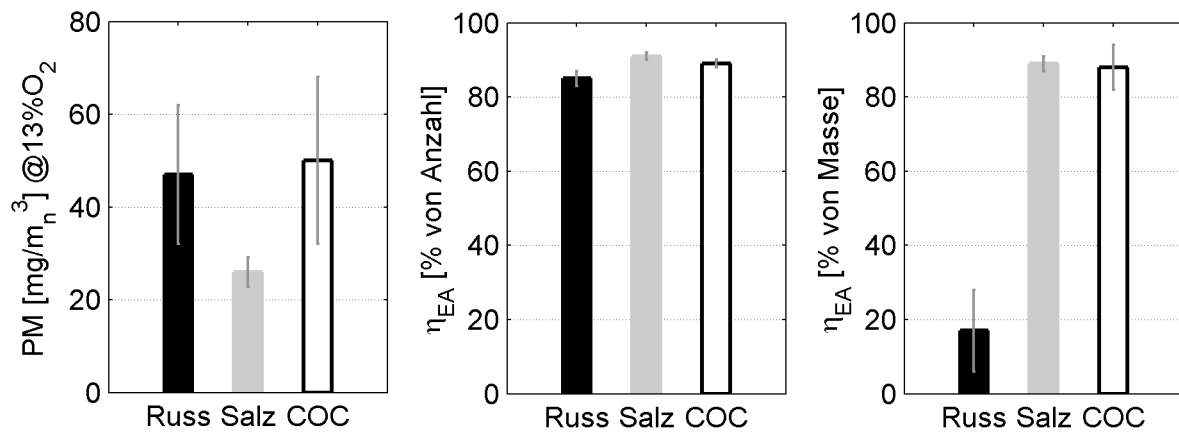


Bild 8 Von links nach rechts:  
 1. Gravimetrische Staub-Massenkonzentrationen im Rohgas für Russ, Salz und COC,  
 2. Abscheidegrad bezogen auf Anzahlkonzentration und  
 3. Abscheidegrad bezogen auf Massenkonzentration.

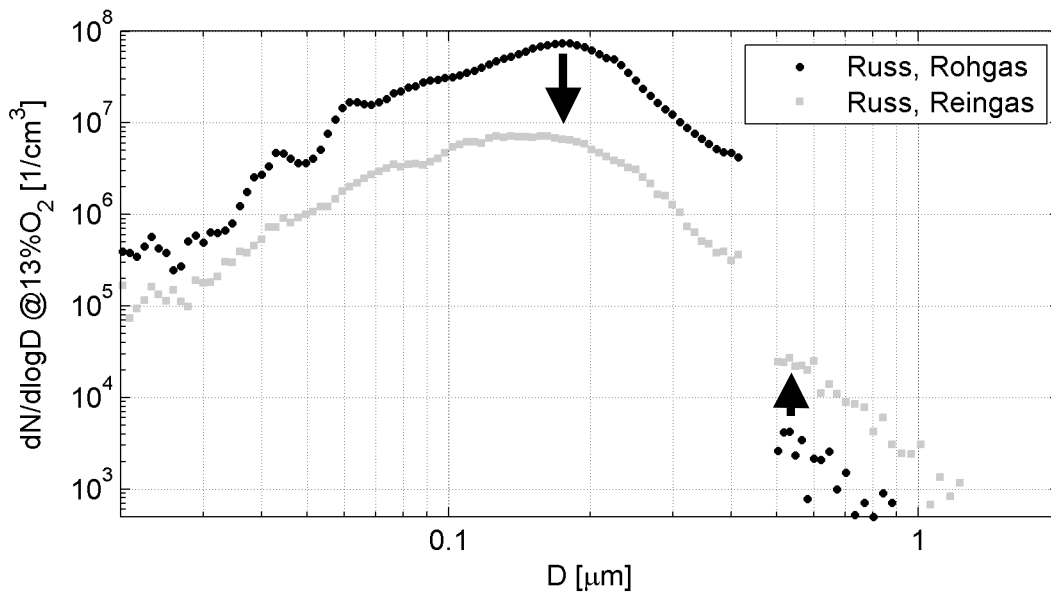


Bild 9 Kongrößenverteilung von Russ gemessen mit SMPS und OPC bei ausgeschaltetem und eingeschaltetem Elektroabscheider.

## 4.5 Elektrisches Verhalten des Elektroabscheiders

Im Praxisbetrieb von Holzfeuerungen liegen in der Regel keine Informationen zur elektrischen Leitfähigkeit der Stäube vor. Bei der Darstellung der Stromdichte in Funktion der Spannung kann jedoch Rücksprühen aufgrund einer elektrisch isolierenden Staubschicht erkannt werden. Bild 10 zeigt das Auftreten von Rücksprühen im Labor-Elektroabscheider beim Betrieb mit COC durch ansteigen der Stromdichte bei konstanter oder gar sinkender Spannung. Zu hohe Leitfähigkeit wie im Fall von Russ kann mit dieser Methode aber nicht detektiert werden.

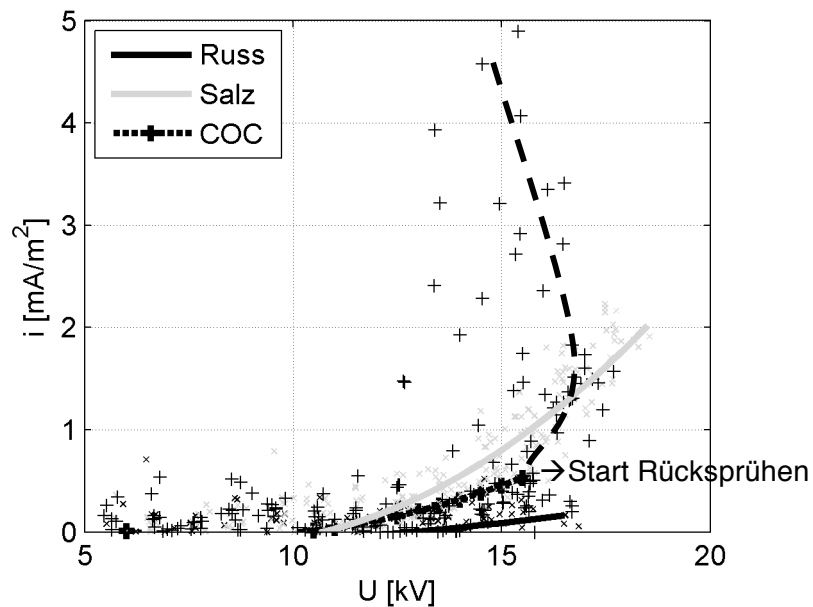


Bild 10 Stromdichte als Funktion der Spannung und abhängig vom Partikeltyp.

## 5 Schlussfolgerungen

In einem Labor Elektroabscheider wurden Partikel aus verschiedenen Verbrennungsbedingungen gesammelt und in Bezug auf chemische und elektrische Eigenschaften analysiert. Daraus können folgende drei Partikeltypen identifiziert und den unterschiedlichen Verbrennungs-Zuständen zugeordnet werden:

- Russ aus der Verbrennung bei hoher Temperatur und mit lokalem Luftmangel,
- mineralische Partikel wie Salze, die bei hoher Verbrennungstemperatur und lokal genügend Sauerstoff gebildet werden,
- kondensierbare organische Verbindungen (COC), die bei tiefer Verbrennungstemperatur emittiert werden.

Die drei Partikelarten weisen komplett unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften auf, wobei für das Verhalten im Elektroabscheider vor allem die elektrische Leitfähigkeit bzw. der Staubwiderstand entscheidend ist. Salze aus der vollständigen Verbrennung weisen ideale Eigenschaften für die Abscheidung in Elektroabscheidern auf. Russ hat eine sehr hohe Leitfähigkeit. Dies ermöglicht eine hohe Abscheideleistung, führt aber zu Wiedereintrag von agglomerierten Partikeln. Kondensierbare organische Verbindungen weisen eine geringe Leitfähigkeit auf. Dies kann Rücksprühen verursachen, wodurch der Betrieb des Elektroabscheiders eingeschränkt und die Abscheideleistung reduziert wird. Im Weiteren führen Kondensate zu einer klebrigen Staubschicht, was die Abreinigung der Niederschlags-elektrode erschwert oder verunmöglicht.

Während der Betrieb von Elektroabscheidern für Holzfeuerungen bei optimalen und stationären Bedingungen mit vorwiegend anorganischen Partikeln im Abgas unkritisch ist, können unter anderem bei folgenden Bedingungen Betriebsprobleme auftreten:

- Während der Startphase oder bei Verwendung von zu feuchtem Holz infolge von bei tiefer Temperatur gebildeten COC.
- Bei Drosselung der Luftzufuhr infolge von bei hoher Temperatur in Zonen mit lokalem Luftmangel gebildetem Russ.

Die Resultate zeigen, dass ein Elektroabscheider nur tiefe Emissionen garantieren kann, wenn die Feuerung optimal betrieben wird. In transienten Phasen können die Emissionen im Reingas nicht nur durch die erhöhten Rohgas-Emissionen, sondern zusätzlich durch die gleichzeitig reduzierte Abscheideleistung des Elektroabscheiders ansteigen. Detaillierte Informationen zum Einfluss des Betriebspunkts der Feuerung auf die Charakteristik der Partikel ermöglichen eine verbesserte Auslegung des Elektroabscheider und eine Anpassung des Betriebs an die Anforderungen von kleinen und mittleren Holzfeuerungen.

## 6 Empfehlungen und Ausblick

Um die Gesamtemissionen von mit Elektroabscheidern ausgerüsteten Holzfeuerungen im Praxisbetrieb zu reduzieren, ist die Erzielung einer hohen Verfügbarkeit und einer hohen Abscheideleistung der Elektroabscheider entscheidend, wozu folgende Faktoren beitragen:

1. Eine optimale Anlagenauslegung und System-Integration ermöglichen eine stationäre Betriebsführung, z.B. mit zwei Kesseln und zwei Elektroabscheidern für variierende Lastfälle.
2. Mittels Prozessintegration mit einer Regelung des Elektroabscheiders aufgrund von spezifischen Informationen als Indikator für den momentanen Partikeltyp kann der Betriebsbereich des Elektroabscheiders vergrössert werden. Als Informationen stehen insbesondere folgende Grössen zur Verfügung:
  - Abgastemperatur,
  - Luftüberschuss,
  - Verbrennungstemperatur,
  - Holzfeuchte.
3. Massnahmen um Wiedereintrag zu verhindern:
  - Limitierung der Gasgeschwindigkeit im Elektroabscheider auf unter 1,5 m/s,
  - Optimierung der Niederschlagselektroden,
  - Verkürzung der Abreinigungsintervalle während Betriebsphasen mit Wiedereintrag.

## 7 Literatur

- [1] White, H. J. (1969), Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern. Leipzig, VEB.
- [2] Parker, K.R (1997), Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, London
- [3] Parker, K.R (2003), Electrical operation of electrostatic precipitators, The Institution of Electrical Engineers
- [4] R. Frey, 9. Holzenergie-Symposium, Verenum Press, Zürich 2006, ISBN 3-908705-14-2
- [5] J. Good, T. Nussbaumer, 10. Holzenergie-Symposium, Verenum Press, Zürich 2008, ISBN 3-908705-19-3
- [6] Evans, R. J.& T. A. Milne (1987). Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. 1. Fundamentals. Energy & Fuels 1(2): 123-137.
- [7] Jess, A. (1996). Mechanisms and kinetics of thermal reactions of aromatic hydrocarbons from pyrolysis of solid fuels. Fuel 75(12): 1441-1448.
- [8] Leuckel, W.& R. Römer (1979). Schadstoffe aus Verbrennungsprozessen. Ludwigshafen, VDI 346.
- [9] Römpp (1989). Chemie-Lexikon. Stuttgart.
- [10] Wiggers, H., Nasri, S. (2008). Staubwiderstandsmessungen bei Elektrofilter-typischen Stromdichten. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 68 (2008) Nr. 5, 177–181.
- [11] T. Nussbaumer, Energy & Fuels, Vol. 17, No 6, 2003, 1510–1521
- [12] Blanchard, D. et al.: Correlation Between Current Density and Layer Structure for Fine Particle Deposition in a Laboratory Electrostatic Precipitator. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No 3, 2002, 832–839

## Verdankung

Die vorliegenden Arbeiten wurden unterstützt von:

- Bundesamt für Energie (BfE)
- Kommission für Innovation und Technologie (KTI).