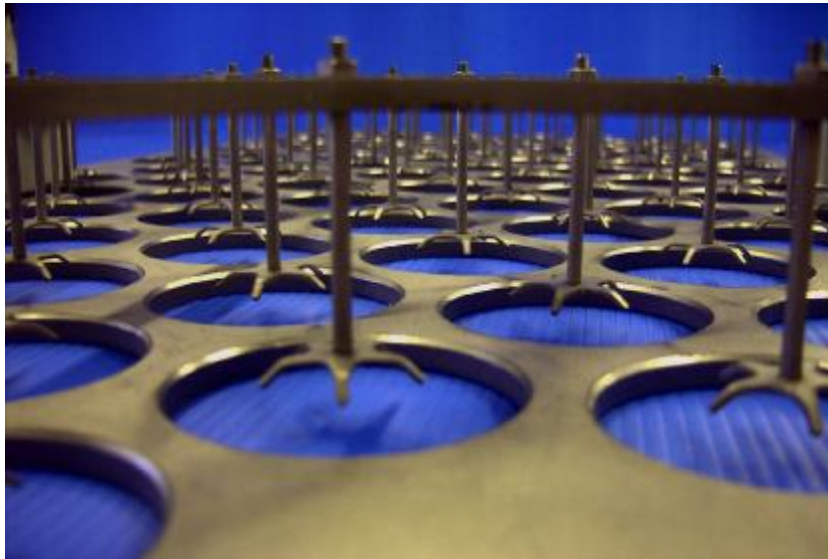


# CAROLA

## Corona Aerosolabscheider für Verbrennungsabgase



## **CAROLA**

### **Corona Aerosolabscheider für Verbrennungsabgase**

#### **Inhalt:**

1. Einführung
2. Funktionsweise und Aufbau
3. Leistungs- und Verbrauchsdaten
4. Betriebserfahrungen und Ergebnisse
5. Referenzen
6. Literatur

Informationsschrift

Stand: September 2003

Die angegebenen Daten in dieser Informationsschrift sind mit großer Sorgfalt zusammengestellt, Irrtümer können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Es können aus den Angaben in dieser Broschüre keine Ansprüche auf Haftung oder Leistungsgarantie erhoben werden.

## 1. Einführung

Der elektrostatische Abscheider „Carola“ (**Corona Aerosol Abscheider**) wurde vom Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), Institut für Technische Chemie – Thermische Abfallbehandlung, mit dem Ziel entwickelt, einen hocheffektiven Abscheider für Feinstpartikel aus Gasströmen bereitzustellen, der gegenüber konventionellen Systemen erhebliche Vorteile bezüglich Investitions- und Betriebskosten aufweist. Der „Carola“-Abscheider ist durch das FZK patentiert /1/.

Die Rauschert Verfahrenstechnik GmbH, Steinwiesen, ist der exklusive Lizenznehmer für Anwendungen dieses Systems in der chemischen, pharmazeutischen und petrochemischen Industrie.

## 2. Funktionsweise und Aufbau

Der elektrostatische Abscheider „Carola“ (Abb. 1) arbeitet mit folgenden vier Hauptprozessschritten:

1. Kühlung und Befeuchtung des zu behandelnden Abgases
2. Kondensation von Wasserdampf auf den submikronen Partikeln
3. Elektrostatische Aufladung der Partikeln in einem elektrischen Feld
4. Abscheidung der Partikeln auf einer geerdeten Oberfläche



Abb. 1: Modell einer Carola-Einheit für einen Gasdurchsatz von 700 m<sup>3</sup>/h

Das zu reinigende Abgas strömt von unten nach oben durch den Abscheider. Über Sprühdüsen wird das Abgas unter Verwendung von kaltem Wasser zuerst übersättigt. Die Übersättigung wird rasch an den im Gas vorhandenen Fremdkeimen und damit auch den Partikeln (heterogene Kondensation) abgebaut, die auf diese Weise anwachsen.

Hauptbestandteil des Aerosolabscheiders ist die kompakt aufgebaute Ionisatorstufe (Abb. 2), die speziell für den Betrieb mit hohem Wasserdampfgehalt des Verbrennungsabgases optimiert wurde. Die Partikelaufladung erfolgt konstruktionsbedingt sehr effektiv im Corona-Bereich von Sprünnadeln und entsprechend der apparativen Auslegung mit geringen Spannungen im Bereich von 10 – 18 kV.

Die Ionisatorstufe besteht aus einem geerdeten Boden mit Öffnungen und einem Array von Hochspannungselektroden, die zu den Bodenöffnungen zentral angeordnet sind. Durch Corona-Entladungen werden die eng an den Elektroden vorbeiströmenden Partikeln elektrisch geladen (Betriebshochspannung: max. 18 kV). Die Hochspannungsversorgung erfolgt über ein kompaktes Steuergerät.



*Abb. 2: Ionisatorstufe eines Carola-Abscheiders (700 m<sup>3</sup>/h Gasdurchsatz)*

Die geladenen Partikeln werden auf einen räumlich vom Ionisator getrennten, kompakten Kollektor niedergeschlagen. Der Kollektor besteht aus einem geerdeten Rohrpaket (Oberflächenabscheider).

Sowohl der Kollektor als auch der Ionisator werden intermittierend über Düsenanordnungen gespült, um ein Anbacken von Feststoffen zu vermeiden. Die Zeitabstände zwischen den Bedüsungen werden in der Regel nach dem Druckverlust gesteuert. Durch einen Flüssigkeitssammler mit Rinne zwischen Kollektor und Ionisator wird sichergestellt, daß die Waschflüssigkeit mit dem abgeschiedenen Partikelmaterial aus dem Abscheider ausgeschleust wird.

Für die einwandfreie Funktion der Isolatoren werden diese kontinuierlich mit beheizter Sperrluft beaufschlagt, die über ein Sperrluftgebläse mit elektrischem Heizregister bereitgestellt wird. Die Regelung erfolgt im Steuerschrank.

### 3. Leistungs- und Verbrauchsdaten

#### Verbrauchsdaten<sup>1</sup>

Druckverlust (gesamte Einheit):	< 5 mbar
Brauchwasser:	ca. 20 – 60 l/1000 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> (feuchtes Abgas)
Elektrische Energie:	Ionisation: ca. 0,2 kW/1000 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> (feuchtes Abgas)
	Sperrluft: < 0,5 kW/1000 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> (feuchtes Abgas)

#### Betriebsdaten

Der CAROLA-Abscheider ist für Gasvolumenströme ab etwa 500 m<sup>3</sup>/h bis etwa 50.000 m<sup>3</sup>/h geeignet. Für höhere Volumenströme sind Sonderkonstruktionen bzw. die Parallelschaltung von Einzelaggregaten möglich.

Das eintretende Abgas muß weitgehend wasserdampfgesättigt sein. Sollte dies nicht der Fall sein, wird dem Abscheider eine Füllkörperkolonne zur Sättigung des Abgases vorgeschaltet. Damit ergeben sich je nach Gaszusammensetzung Betriebstemperaturen im Bereich von Umgebungstemperatur bis ca. 90°C. In Abb. 3 ist ein typischer Aufbau einer Abgasreinigung mit einem „Carola“-Abscheider dargestellt. Das heiße Abgas wird zunächst gequenchet und in einer Füllkörperkolonne vorgereinigt, bevor es in den Partikelabscheider „Carola“ als letzte Stufe des Abgasreinigungsprozesses eintritt.

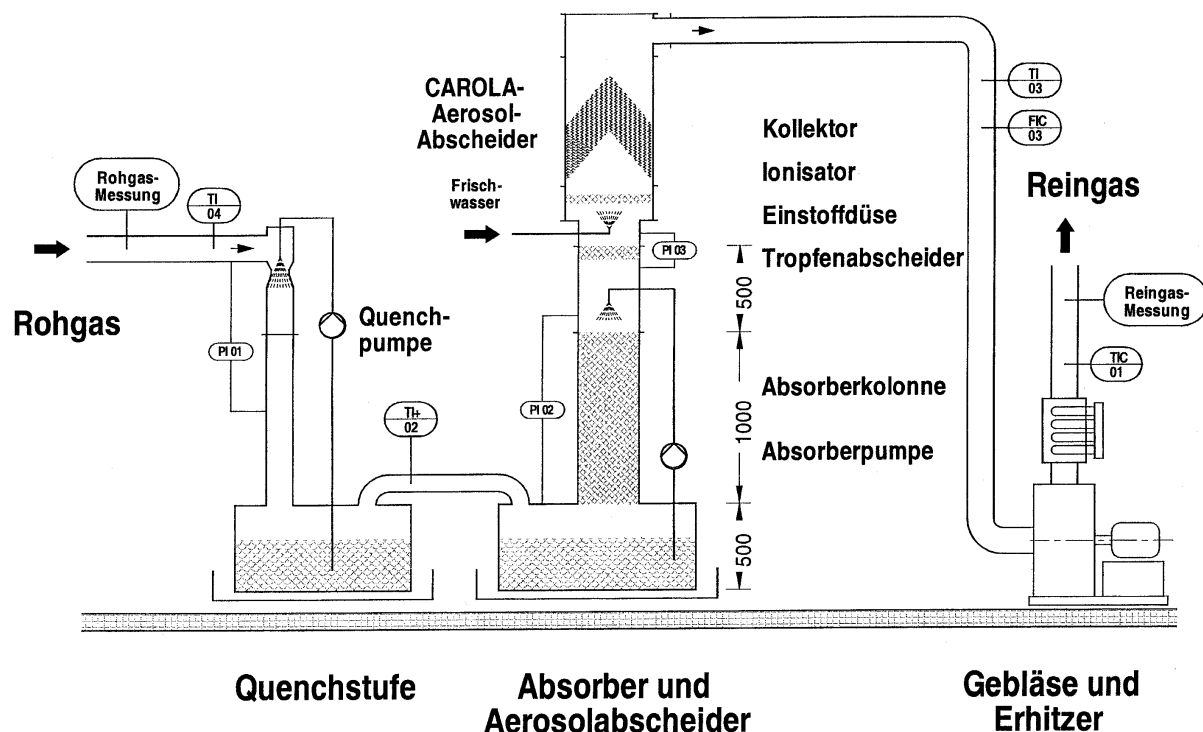


Abb. 3: Fließschema einer typischen Abgasreinigung mit einem „Carola“-Abscheider (Beispiel Carola-4 Einheit für Versuche im Technikumsmaßstab)

<sup>1</sup> Die Zahlenangaben sind ungefähre Anhaltswerte. Genaue Verbrauchszahlen werden projektbezogen ermittelt.

Die maximale Staub- bzw. Aerosolkonzentration im Rohgas zum Abscheider ist aufgrund des sogenannten „Corona-Quenchings“ limitiert. Bei zu hohen Staubkonzentrationen bricht der von den Sprühelektroden emittierte Elektronenstrom zusammen, so daß kein für eine Ionisation ausreichender elektrischer Strom erzeugt werden kann. Die maximale Staubkonzentration am Eintritt zum Abscheider liegt im Bereich von 1 bis 3 g/m<sup>3</sup>. Bei höheren Konzentrationen ist der Einsatz einer Vorabscheiderstufe, beispielsweise eines Venturi- oder Strahlwäschers, möglich.

Die erreichbaren Gesamtabscheidegrade hängen von der Art, der Fraktionierung sowie der Konzentration der Partikel ab. Es können Gesamtabscheidegrade über 99% erreicht werden. Falls notwendig, ist die Serienschaltung von zwei Carola-Abscheidern möglich. Betriebsergebnisse für verschiedene Aufgabenstellungen und Randbedingungen sind im nachfolgenden Kapitel zusammengefaßt.

### **Notwendige Hilfsenergie und –stoffe**

Für den Betrieb des Carola-Abscheiders ist ein Drehstromanschluß sowie die Bereitstellung von Brauchwasser sowie einer Entsorgungsmöglichkeit für das anfallende Abwasser mit dem abgeschiedenen Partikelmaterial notwendig.

### **Nebenaggregate**

Die gesamte Anlage wird im Regelfall zentral über einen Steuerschrank bedient. Eine Anbindung an ein bauseitiges PLT-System ist möglich. Der Steuerschrank ist mit einem kompakten Steuergerät für die Hochspannungsversorgung sowie einem Regler für die Sperrluftheizung ausgestattet. Das Hochspannungskabel zur Verbindung des Steuerschranks mit der Ionisatoreinheit ist standardmäßig im Lieferumfang enthalten. Der räumliche Abstand zwischen dem Steuerschrank und dem Abscheider sollte auf etwa 10 m begrenzt sein. Der Steuerschrank wird den Kundenanforderungen individuell angepaßt, optional sind beispielsweise Druckverlustanzeigen sowie Durchflußmessungen möglich.

Die Bereitstellung von heißer Sperrluft erfolgt im Regelfall durch ein Sperrluftgebläse, das mit einem elektrischen Heizregister verbunden ist. Diese Aggregate inklusive der notwendigen Verrohrung sind üblicherweise im Lieferumfang enthalten.

## **4. Betriebserfahrungen und Ergebnisse**

Für Vorversuche im Labor- und Technikummaßstab sowie für Bypass-Versuche an industriellen Anlagen sind bisher insgesamt drei verschiedene Carola-Einheiten errichtet worden:

- Carola-1: DN 350; Gasvolumenstrom max. 350 m<sup>3</sup><sub>B</sub>/h
- Carola-2: 800 x 800 mm (quadratische Ausführung); Gasvolumenstrom max. 2500 m<sup>3</sup><sub>B</sub>/h
- Carola-4: DN 500; Gasvolumenstrom max. 725 m<sup>3</sup><sub>B</sub>/h

Die Anlage Carola-4 ist eine mobile Versuchsanlage, die für Vor-Ort-Versuche zur Verfügung steht. Eine Informationsschrift über diese Anlage kann gesondert angefordert werden.

Mit diesen Anlagen wurden bisher folgende Versuchsreihen durchgeführt:

- Abscheidung von redispergiertem Flugstaub einer Hausmüllverbrennung (Carola-2)
- Abscheidung von Kalkstein (Carola-2)
- Abscheidung von Partikeln aus einer Holzfeuerung (Carola-1)
- Abscheidung von Aerosil ( $\text{SiO}_2$ ) (Carola-2)
- Abscheidung von Staub aus der Hausmüllverbrennung TAMARA (Carola-4)
- Abscheidung von Partikeln aus einer Chlorsilanverbrennung (Carola-4)

### Redispergierter Flugstaub (Carola 2)

Die Versuche wurden beim FZK an dem Teststand AGATE durchgeführt, an dem heißes Abgas mittels eines 900 kW Heizkessels erzeugt wird [2]. Nach einem Quench und einer Füllkörperkolonne wurde die Carola-2 Einheit mit redispergiertem Flugstaub aus einer Hausmüllverbrennung betrieben. Der Flugstaub wird mit einem Bürstendosierer vor der Quencheinheit zugegeben, wobei die Konzentrationen von 100 bis 1000  $\text{mg}/\text{m}^3$  variiert wurden. Über Quench und Füllkörperkolonne werden bezogen auf die Partikelanzahl 30 %, bezogen auf die Partikelmasse 90 % abgetrennt. Der Abscheidegrad der Carola-Einheit ist größer als 97 %, wobei der Reingaswert gravimetrisch kleiner als 0,4  $\text{mg}/\text{m}^3$  bestimmt wurde. Ein typisches Ergebnis zeigt Abb. 4.

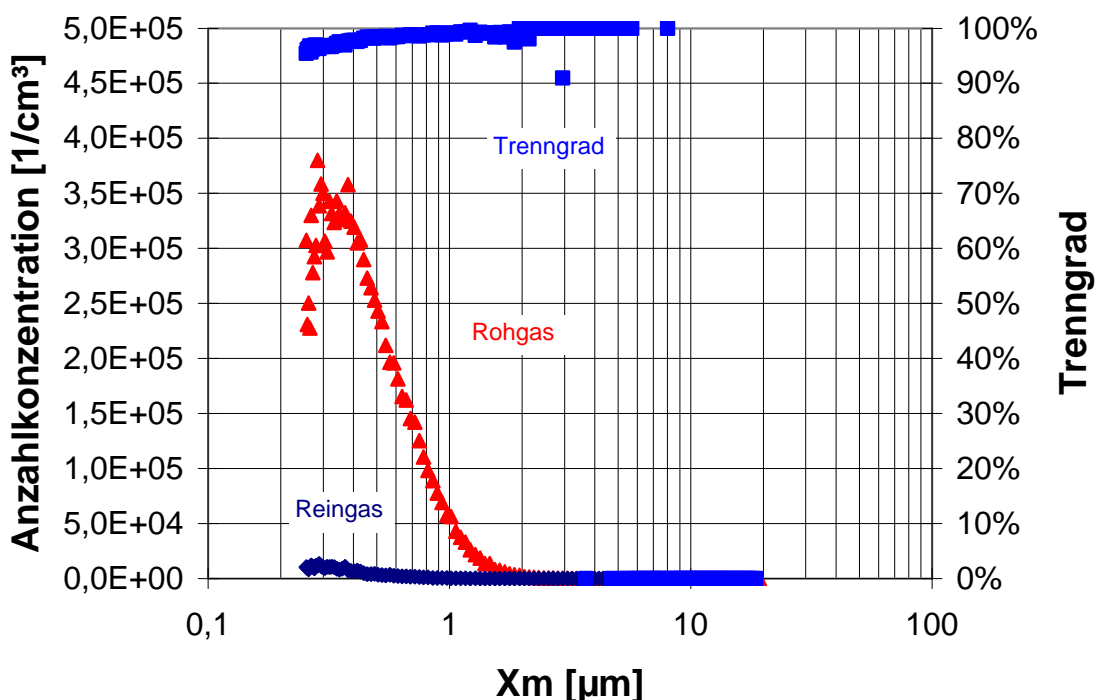


Abb. 4: Partikelkonzentration im Roh- und Reingas sowie daraus ermittelter Trenngrad für redispergierten Flugstaub

Für die Bestimmung der Partikelanzahl im Roh- und Reingas wurde je nach Größenklasse ein Mobilitätsanalysator SMPS- bzw. ein Streulichtanalysator PCS verwendet. Parallel dazu sind gravimetrische Messungen nach VDI 2066 mit Planfilterkopfsonden durchgeführt worden. Aus Abb. 4 ist zu erkennen, daß der redispergierte Flugstaub sehr fein fraktioniert ist mit einem Modalwert von 0,3 µm. Der erreichte Trenngrad liegt für Partikel im Submikronbereich über 80 % bis über 90 %.

## Kalkstein (Carola 2)

In Abb. 5 sind Ergebnisse von Roh- und Reingasmessungen sowie den daraus bestimmten Trenngrad für ins Rohgas vor dem Quench dispergierten Kalkstein wiedergegeben. Diese Versuche wurden ebenfalls am Teststand AGATE mit dem Carola-2 Modul durchgeführt. Der Kalkstein weist gegenüber dem redispergierten Flugstaub mehr Partikel im Bereich größer 2 µm auf. Die erreichten Trenngrade liegen für die submikrone Partikelfraktion zwischen 80 % und 90 %, und sind daher mit denen für redispergierten Flugstaub (Abb. 4) vergleichbar.

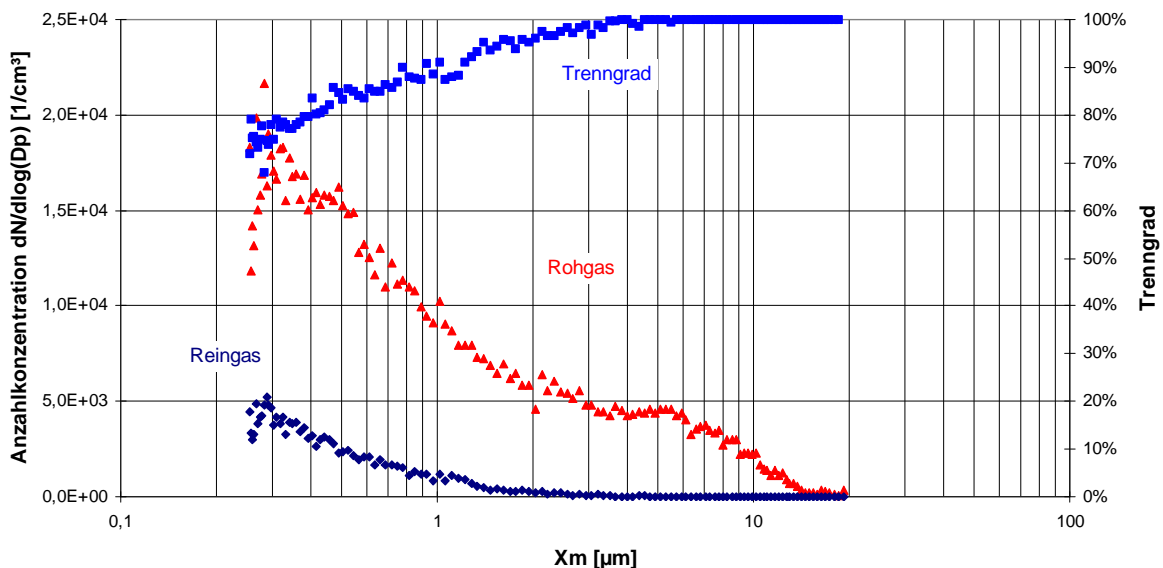


Abb. 5: Partikelkonzentration im Roh- und Reingas sowie daraus ermittelter Trenngrad für Kalkstein

## Holzverbrennung (Carola 1)

An einer Unterschubfeuerung für Holzhackschnitzel wurden verschiedene Aerosolabscheidesysteme miteinander verglichen /3/, /4/. Die Messung der Partikel im Rohgas mit Planfiltern und Impaktoren ergibt eine Massenkonzentration von 20 bis 60 mg/m<sup>3</sup>, wobei über 60% der Partikeln in der Submikronfraktion vorliegen. Die Partikelgrößenverteilung im Rohgas der Unterschubfeuerung wurde mittels Mobilitätsanalysator bestimmt. Sie zeigt eine logarithmische Normalverteilung mit einem Modalwert bei 66 nm. Nach Abb. 6 kann mit dem Carola-Abscheider eine signifikante Verminderung der Partikelkonzentration erreicht werden.

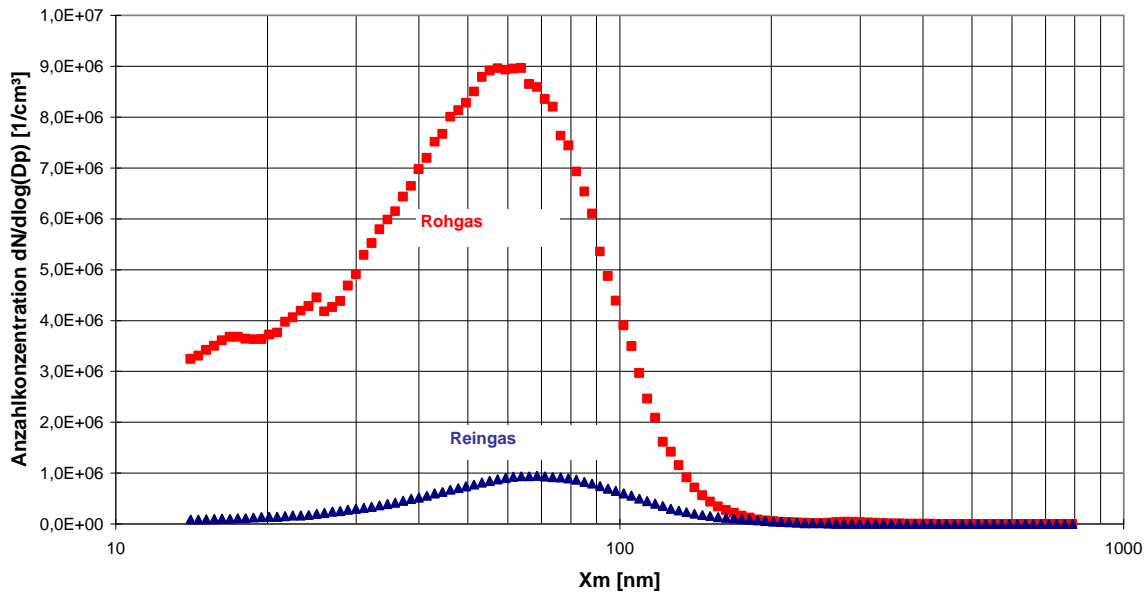


Abb. 6: Partikelanzahl im Roh- und Reingas nach einer Holzfeuerung

Die Versuchs- und Anlagenparameter für die Experimente an der Unterschubfeuerung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es wird deutlich, daß der Carola-Abscheider im Vergleich zu herkömmlichen Naßelektrofiltern einen deutlich geringeren Energieaufwand für die Partikelaufladung benötigt. Der gasseitige Druckverlust ist mit kleiner 3 mbar ebenfalls sehr niedrig.

Tabelle 1: Parameter und Ergebnisse der Abscheideversuche an einer Holzfeuerung (nach /3/)

Gas Volumenstrom	Partikelkonzentration	Modalwert der Anzahlverteilung	Hochspannung	Strom für Partikelaufladung	Abscheideleistung	Leistung für Partikelaufladung	Druckverlust
$\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$	$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$	nm	kV	mA	%	W	mbar
320	35-55	66	7-10	2,5-5,0	90-95	30-50	<3

### Aerosil (Carola 2)

Am Versuchsstand AGATE wurde mit dem Carola-2 Modul die Abscheidung von  $\text{SiO}_2$ -Partikeln getestet. Dazu wurde über einen Banddosierer Aerosil der Firma Degussa vor den Quench mit einer Zerstäuberdüse eingespeist. Mit diesem Versuchsaufbau konnte eine Rohgasbeladung von ca.  $330 \text{ mg}/\text{m}^3$  erreicht werden. Die Staubverluste bzw. -abscheidung in den einzelnen Komponenten der Versuchsanlage, wie Quench, Absorber und Carola-Einheit ohne Hochspannung wurde in den Versuchen V1 bis V3 (Abb. 7) mit Luft ( $25^\circ\text{C}$  Eintritt,  $16^\circ\text{C}$  Taupunkt) ermittelt. Danach folgte eine Versuchsreihe im Luft- ( $25^\circ\text{C}$  Eintritt,  $16^\circ\text{C}$  Taupunkt) und Abgasbe-

trieb (160°C Eintritt, 59°C Taupunkt), wobei das Abgas wieder von einem 900 kW Leichtölkessel stammt. Alle Versuche wurden mit einem Gasdurchsatz von 1500 m<sup>3</sup><sub>B</sub>/h durchgeführt. Die Partikelmassenkonzentration wurde gravimetrisch nach VDI 2066 vor Quench und nach der Carola-Einheit gemessen. Beim Versuch V1 ist sowohl Quench- und Absorberkreislauf abgeschaltet, d.h. die Anlage wurde trocken betrieben. Bei V2 wurde der Quench mit ca. 1 m<sup>3</sup>/h, bei V3 zusätzlich der Absorberkreislauf mit 9 m<sup>3</sup>/h betrieben. Die abgeschiedene Aerosilmenge nimmt von 65 % auf ca. 75 % und mit beiden Waschkreisläufen auf 90 % zu. Wird die Hochspannung von Carola zugeschaltet, so wurde sowohl im Luft- als auch im Abgasbetrieb eine Abscheideleistung über die Gesamtanlage von 97 % gemessen (Abb. 7).

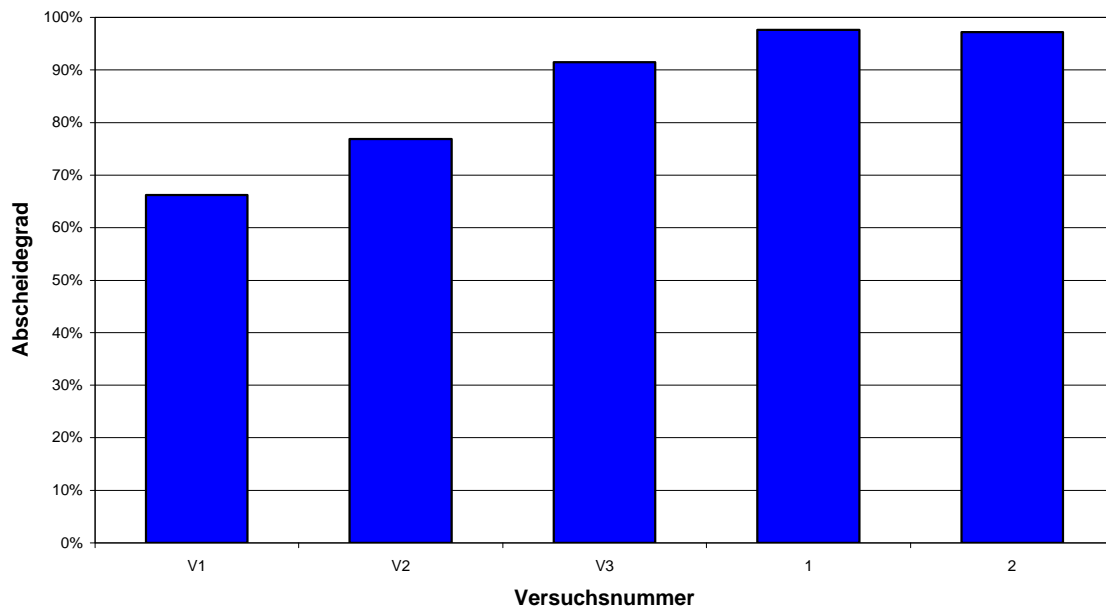


Abb. 7: Gravimetrisch bestimmte Gesamtabscheidegrade bei Aerosildosierung

In einer zusätzlichen Meßkampagne wurde die Partikelgrößenverteilung des zudosierten Aerosils mit einem Mobilitätsanalysator (SMPS) im Roh- und Reingas gemessen (Abb. 8). Der Modalwert liegt zwischen 100 und 200 nm, sowohl im Roh- als auch im Reingas. Der daraus bestimmte Trenngrad für die Partikelfraktion < 800 nm liegt im Bereich von 70 bis 80 %.

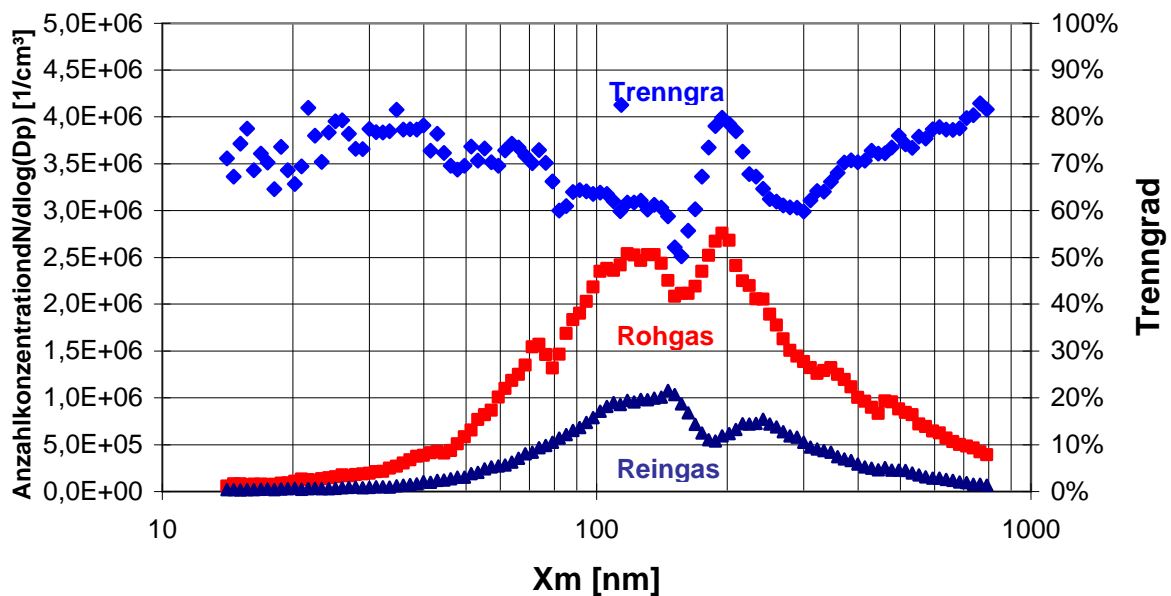


Abb. 8: Partikelkonzentration im Roh- und Reingas sowie daraus ermittelter Trenngrad bei Aerosildosierung

#### Tamara Flugstaub (Carola 4)

Im Bypass zu der Abgasreinigung an der MVA TAMARA am FZK wurde die Carola-4 Einheit, wie sie in Abb. 3 schematisch dargestellt ist, betrieben. Dabei wurde die Abscheidung von Flugstaub bei hohen Partikelkonzentrationen und Wassergehalten im Abgas untersucht. Für die Messungen des Abscheidegrades wurden gravimetrische Filterproben (VDI 2066) gezogen, die Bestimmung des Trenngrades erfolgte über die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung im Roh- und Reingas mit Hilfe des Mobilitätsanalysators SMPS.

In Abb. 9 sind die Ergebnisse der Gesamtabscheidegradmessungen bei verschiedenen Betriebs- und Anlagenparametern zusammengefasst. Die Versuchsreihe 1 gibt die Abscheideleistung der Anlage bis zur Carola-Einheit an. In den Versuchsreihen 2 bis 4 wurde die Carola-4 Einheit mit verschiedenen Elektrodenkombinationen, jedoch ohne Wassereindüsung vor dem Ionisator betrieben. Es ergeben sich so lediglich Gesamtabscheidegrade zwischen 60 % und 80 %. Die Ursache für diese niedrigen Abscheidegrade liegt im wesentlichen bei einem unzureichenden Feuchtenieberschlag auf dem Kollektorpaket. Bei den Versuchsreihen 5 bis 9 wurden unterschiedliche Hochspannungen eingestellt sowie die Isolatoren mit bzw. ohne Sperrluftheizung betrieben, jedoch immer eine Eindüsung von Wasser vor dem Ionisator vorgenommen. Die resultierenden Abscheidegrade liegen immer über 99 %.

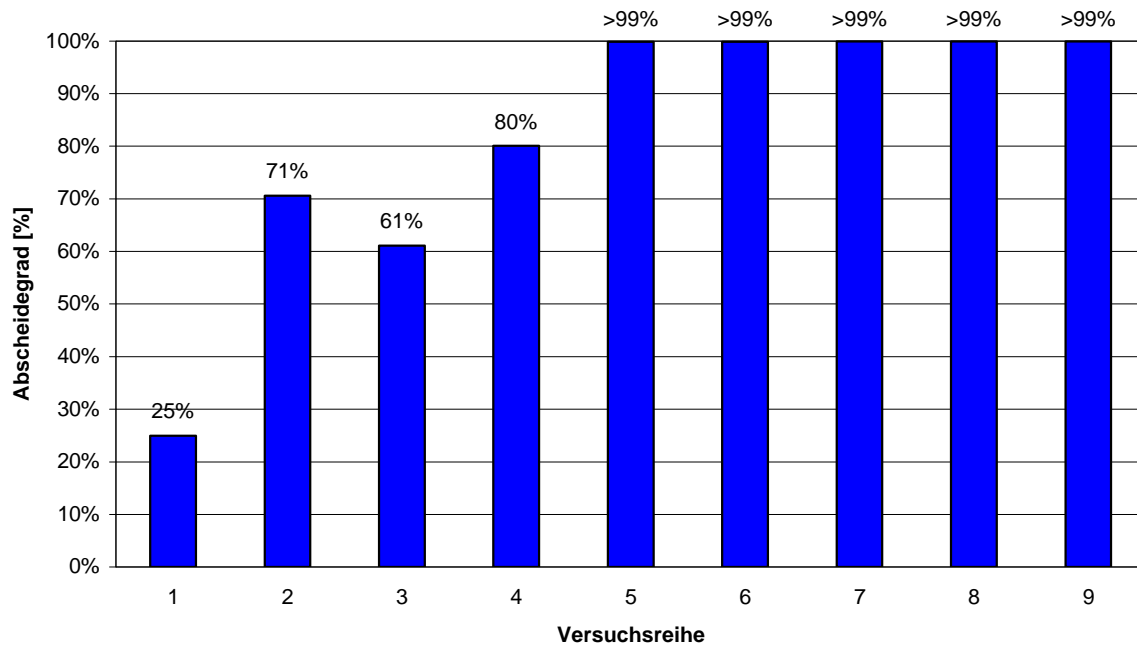


Abb. 9: Gravimetrisch bestimmte Gesamtabscheidegrade an TAMARA

Wie aus Abb. 9 deutlich wird, lassen sich die gravimetrisch gemessenen Gesamtabscheidegrade (Versuchsreihe 5-9) nicht mehr genau aufschlüsseln. Eine detailliertere Aussage über die quantitative Abscheidung der Partikel im Submikronbereich erlauben SMPS-Messungen, die in Abb. 10 dargestellt sind. Die Partikelanzahl im Reingas ist bereits ohne Anlegen von Hochspannung erheblich reduziert, mit Hochspannung ergibt sich ein über das gesamte Partikelgrößenintervall konstanter Trenngrad von ca. 80 %.

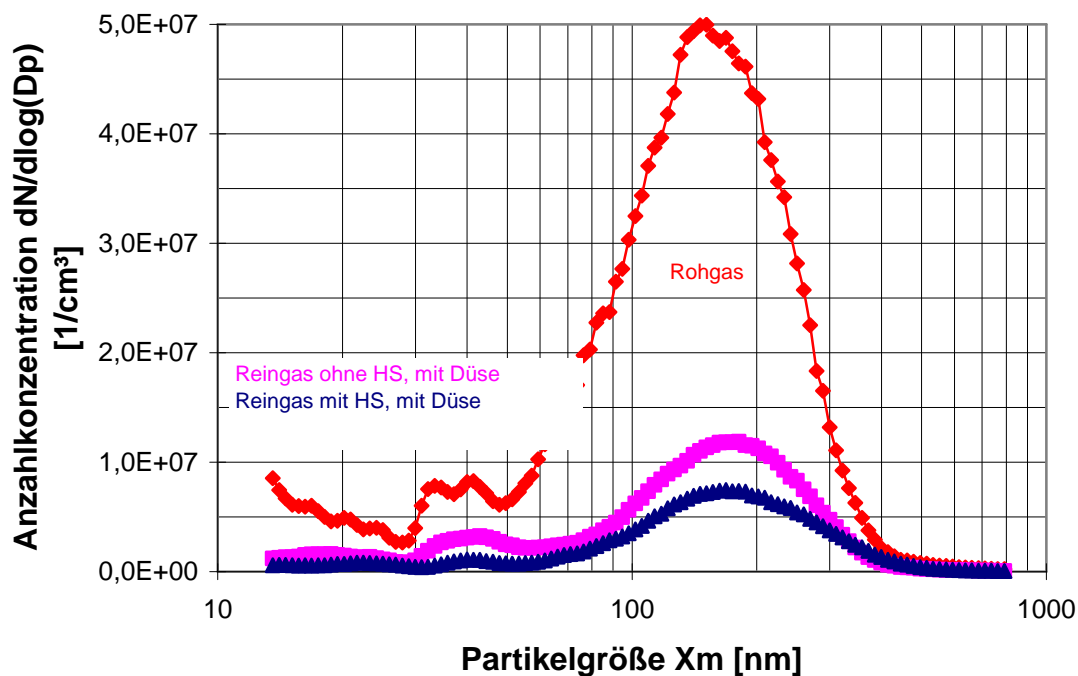


Abb. 10: Partikelanzahl im Roh- und Reingas an TAMARA

Zusätzlich wurde die Abhängigkeit der Abscheideleistung von der Gasbelastung der Carola-4 Einheit getestet (Abb. 11).

Dabei wurde der Standardbetriebspunkt mit einem Volumenstrom der Anlage von  $550 \text{ m}^3_{\text{B}}/\text{h}$  als Normallast gleich 100 % gesetzt. Daraufhin wurde der Volumenstrom auf 480, 400 und  $275 \text{ m}^3_{\text{B}}/\text{h}$  reduziert. Messungen wurden nur an der Reingasmaßstelle durchgeführt, da es hier lediglich auf einen Vergleich zum Standardbetriebspunkt ankommt. Aus Abb. 11 ist deutlich zu entnehmen, daß mit Abnahme des Volumenstroms, also bei Teillast, eine Abnahme in der Partikelanzahlkonzentration korrespondiert. Bei Teillast verbessert sich also das Abscheideverhalten der Carola-Einheit.

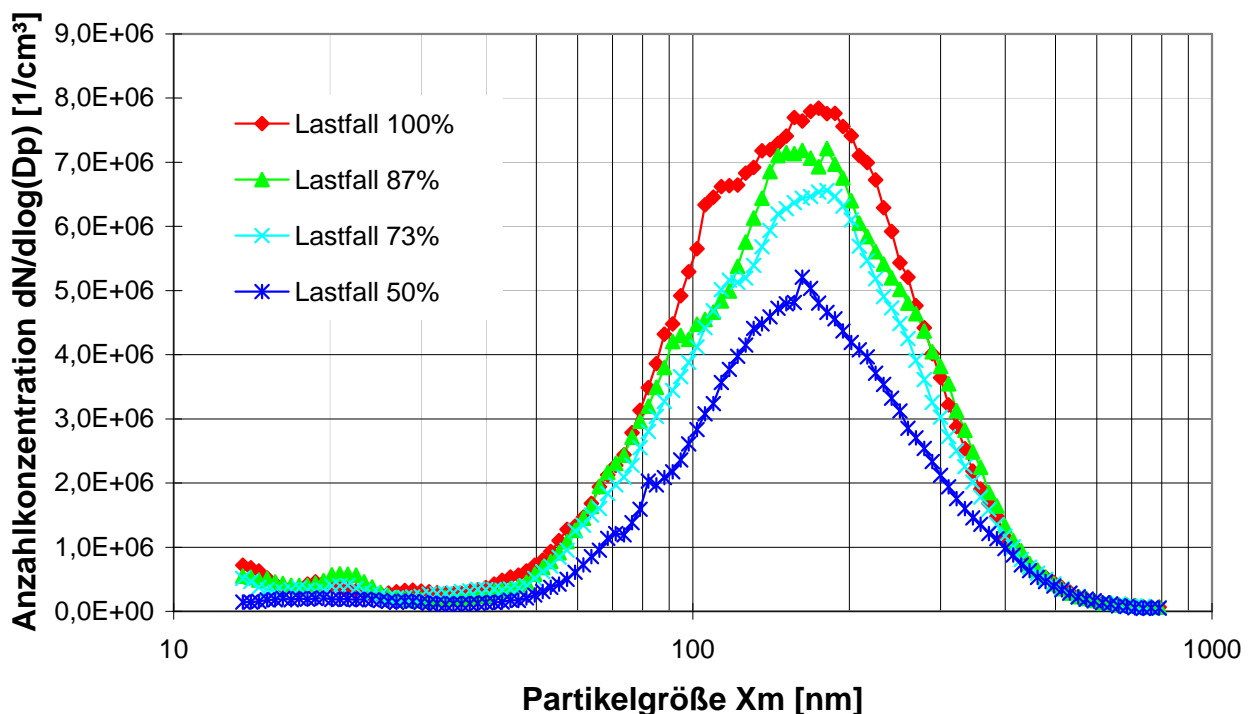


Abb. 11: Vergleich der Reingasmessungen (Anzahlkonzentration) bei Lastwechsel

## 5. Referenzen

Neben den in Kapitel 4 beschriebenen Versuchsreihen wurde bisher eine großtechnische Carola-Einheit realisiert. Es handelt sich dabei um eine Einheit zur Abscheidung von  $\text{SO}_3$ -Aerosolen aus einem Verbrennungsabgas, die nach einem  $\text{SO}_2$ -Wäscher installiert wird. Die Inbetriebnahme dieser Carola-Einheit ist für Oktober 2003 geplant. Die wesentlichen Daten dieses Abscheiders sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Carola-Abscheider zur Separierung von SO<sub>3</sub>-Aerosol

<b>Vorgabedaten:</b>		
Gasvolumenstrom	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h (feucht)	13.000
Eintrittstemperatur	°C	67
SO <sub>3</sub> -Konzentration (Rohgas)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> tr.	1.000
<b>Garantiewerte und Verbrauchszahlen:</b>		
SO <sub>3</sub> -Konzentration (Reingas)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> tr.	< 35
Ausschleusemenge Wasser	m <sup>3</sup> /h	< 1
Elektrische Anschlußleistung	kW	4
Druckverlust	mbar	< 5
<b>Abmessungen:</b>		
Durchmesser	mm	DN 2.000
Bauhöhe	mm	5.500
<b>Werkstoffe:</b>		
Gehäuse	GFK mit Chemieschutzschicht	
Internals	Titan (Ionisator); PP (Kollektor)	

## 6. Literatur

/1/ **Patentschrift DE 101 32 582:** Anlage zum elektrostatischen Reinigen von Gas und Verfahren zum Betreiben derselben, vom 10.07.2001.

/2/ **Bologa, A.; Seifert, H.; Paur, H.-R.; Baumann, W.; Dirks, F.; Wäscher, T.:** Effective cleaning of fine particles from waste incineration flue gases by a novel form of corona charging collector. In: VDI/DECHEMA (Hrsg.): *Preprints zu The Future of Waste Management in Europe*, Strasburg, 7.-8- Oktober 2002, S. 316-319.

/3/ **Bologa, A.; Paur, H.-R.; Wäscher, T.:** Electrostatic charging of aerosol as a mechanism of gas cleaning from submicron particles. *Filtration & Separation* 38 (2001) No. 10, S. 26-30.

/4/ **Paur, H.-R.; Schaber, K.-H.; Kasper, G.; Baumbach, G.; Maas, U.:** Vermeidung und Verminderung von Feinstpartikelemissionen bei Verbrennungsanlagen. Vortrag beim Dechema Workshop „Herausforderung Aerosole“, Frankfurt, 30./31.05.2001.

## **Kontakt:**

Rauschert Verfahrenstechnik GmbH  
Paul-Rauschert-Straße 6  
D – 96349 Steinwiesen

Tel.: +49 9262 77 0  
Fax: +49 9262 97151

E- Mail: [Info.vt@rauschert.de](mailto:Info.vt@rauschert.de)  
Internet: [www.rauschert.de/vt/](http://www.rauschert.de/vt/)