

CAROLA – Corona-induzierte Aerosolabscheidung zur Minderung der industriellen Feinstpartikelemission

H.-R. Paur, A. Bologna, W. Baumann, H. Seifert, ITC;

Th. Wäscher, Ingenieurbüro für Energie- und Verfahrenstechnik, Heidelberg

Einleitung

Eine große Zahl von Studien hat Assoziationen zwischen gesundheitlichen Beeinträchtigungen und der Erhöhung der Konzentration feiner Partikeln in der Umgebungsluft (Partikeln kleiner als $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) und kleiner als $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$)) nachgewiesen. Selbst bei niedrigen Immissionskonzentrationen dieser Partikelfractionen wurde unter anderem eine Zunahme der Mortalität und Morbidität festgestellt [1]. Im Jahr 1999 beschloss die EG-Kommission den 24-Stunden-Grenzwert für die Feinstpartikelimmission (PM_{10}) stufenweise bis zum Jahr 2010 auf $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ abzusenken. Im Rahmen der Novelle der 22. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung wurde die EU-Vorgabe im Jahr 2002 in nationales Recht umgesetzt [2]. Die zukünftigen Grenzwerte werden derzeit in Deutschland, insbesondere in industriellen Ballungsräumen, großflächig überschritten. Nach Erhebungen des UBA sind mobile und industrielle Quellen sowie der Hausbrand die wesentlichen Quellen der PM_{10} -Belastung. Die Feinstpartikelemission betrifft viele Industriezweige, insbesondere die chemische Industrie, die Baustoffindustrie und die Energieversorger. Die Minderung industrieller Feinstpartikelemissionen wird daher in den kommenden Jahren eine besondere technische Herausforderung darstellen. Um hohe Abscheidegrade für Feinstpartikeln bei gleichzeitig moderaten Investitions- und Betriebskosten zu erreichen, wurde der Corona-Aerosol-Abscheider (CAROLA) entwickelt.

Stand der Technik der Partikelabscheidung

Die Massenkonzentration ist bisher das Kriterium für die Beurteilung der Partikelemission aus industriellen Anlagen. Moderne Filteranlagen erreichen hohe massenbezogene Abscheidegrade für industrielle Stäube. Die große Bandbreite industrieller Staubabscheideaufgaben erfordert unterschiedliche Abscheideverfahren, Filtermaterialien und Filtergrößen. Zum Einsatz kommen vor allem filternde, elektrische, nasse Abscheidesysteme sowie Trägheitsabscheider [3].

Die Verfahren sind bezüglich der Abscheidegrade, des spezifischen Energieverbrauchs, der Verfügbarkeit sowie der Investitions- und Betriebskosten zu bewerten. Während Trägheitsabscheider, wie der Zyklon, zur Abscheidung von Feinstpartikeln ungeeignet sind, weisen filternde und elektrische Abscheider hohe Abscheideleistungen auch im Submikronbereich auf, besitzen aber ein Abscheideminimum im Übergangsbereich zur diffusiv kontrollierten Abscheidung. Um auch dort hohe Abscheidegrade zu erzielen, wird allgemein die Anströmgeschwindigkeit abgesenkt oder es werden dichtere, meist nicht regenerierbare, Filtermedien eingesetzt. Bewährt hat sich bei Elektrofiltern die mehrstufige Ausführung, die allerdings hohe Investitionskosten verursacht.

Bei klebrigen und flüssigen Feinstpartikeln bieten Nassabscheider den Vorteil hoher Betriebssicherheit. Bezüglich des Energieverbrauchs dieser Systeme

beschreiben die Untersuchungen von Holzer [4] den Stand der Technik. Zur Abscheidung submikroner Partikeln wird ein Energieverbrauch von bis zu 5 kW pro $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ gereinigtem Abgas benötigt. Um den hohen Energieverbrauch der Nassabscheider zu senken wird versucht die Feinstpartikeln durch Wasserdampfkondensation zu vergrößern [5].

Die Anforderung, hohe anzahlbezogene Abscheidegrade im Submikronbereich zu erzielen, kann im Einzelfall dazu führen, dass die Filteranlage ähnliche Investitionen erfordert wie der Produktionsprozess. Problematisch sind die Betriebskosten von Filtern, die von der Leistungsaufnahme und den Wartungskosten der Anlagen bestimmt werden. Bei industriellen Prozessen fallen häufig klebrige und flüssige Feinstpartikeln (Ruß, Ölnebel, Salz- und Säurenebel) an, die den Einsatzbereich der Filtersysteme einschränken. Der Einsatz und der periodische Austausch von nicht regenerierbaren Filtern führt zu neuen Abfällen, zusätzlichen Betriebskosten und verminderter Anlagenverfügbarkeit. Die Aufgabe besteht darin, hohe Abscheidegrade für Feinstpartikeln zu erzielen und gleichzeitig die Investitions- und Betriebskosten zu minimieren.

Beschreibung der Corona-induzierten Aerosolabscheidung

Das CAROLA-Verfahren wurde für die Abscheidung der Feinstpartikelfraktion entwickelt. Deshalb muss die Grobfraktion vor

dem Eintritt in das CAROLA-System durch einen Vorabscheider entfernt werden. Dies kann in Abhängigkeit vom Einsatzfall ein Vorabscheider, ein Füllkörperwäscher oder bei Ölnebeln eine selbstreinigende Filterpackung sein. Durch diese Vorabscheidung werden je nach Dimensionierung 20 – 90 % der Grobpartikeln zurückgehalten.

Abb. 1 zeigt das elektrostatische Abscheidesystem CAROLA [6]. Die Feinstpartikeln ($< 1 \mu\text{m}$) treten in eine Ionisationszone ein, in der die Gasströmung durch Düsen beschleunigt wird und die Partikeln nahe an der Coronaentladung¹⁾ vorbeigeführt werden, die sich an nadelförmigen Metallelektroden beim Anlegen von Hochspannung ausbildet (Abb. 2). Hierbei werden die Partikeln durch feld- bzw. diffusionskontrollierte Mechanismen aufgeladen. In der Coronaentladung, die unter Rauchgasbedingungen bei Spannungen von 10 – 15 kV an Metallspitzen zündet, liegen freie Elektronen und negative Ionen im Überfluss vor, die auf die Oberfläche der Feinstpartikeln diffundieren können (sog. Diffusions-

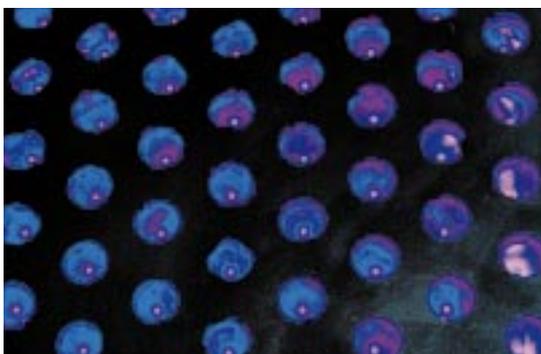


Abb. 2: Ausschnitt der Düsenplatte. In jeder Düse (hellblau) ist die auf einer Nadelspitze brennende Coronaentladung als heller Punkt zu erkennen.

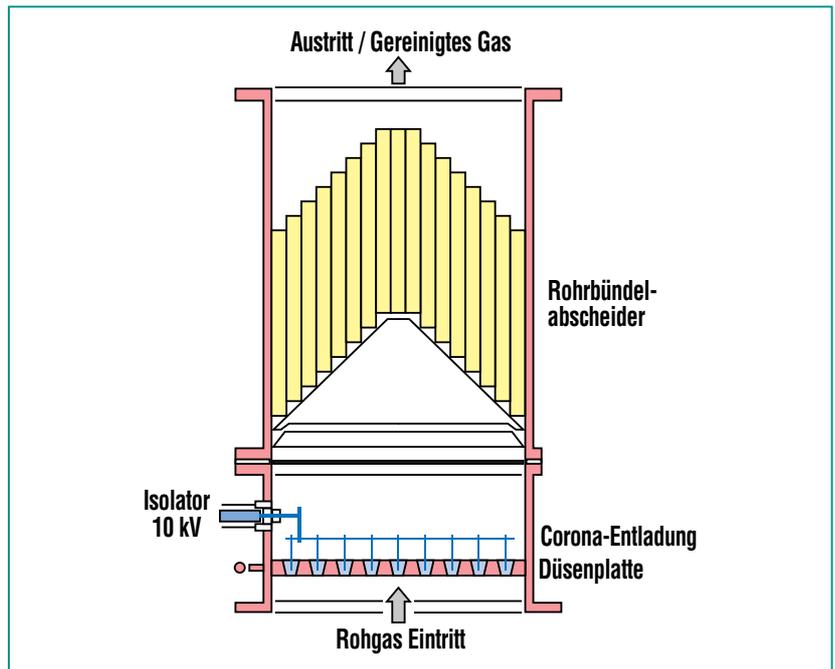


Abb. 1: Verfahrensschema des CAROLA-Abscheiders: bestehend aus einer Düsenplatte (rot) , durch die das zu reinigende Gas von unten in den Abscheider eintritt, der Coronaentladung (blau), in der durch Hochspannung das Gas ionisiert wird und dem Rohrbündelabscheider (gelb) in dem die geladenen Partikel sich ablagern und somit aus dem Gasstrom entfernt werden. Das gereinigte Abgas wird über einen Kamin abgeleitet.

aufladung). Durch die gewählte Geometrie ist bei CAROLA die Aufladung deutlich effektiver als in den verfügbaren Elektrofiltern. Während bei einem Elektrofilter eine Elektrodenlänge von einigen Metern erforderlich ist, um eine vollständige Aufladung der Partikeln zu erreichen, sind die bei CAROLA eingesetzten Sprüh-elektroden nur einige Zentimeter lang. Zudem kann bei Spannungen im Bereich von 10 – 15 kV die Hochspannungserzeugung und

-zuleitung deutlich einfacher ausgeführt werden als bei den industriell üblichen Systemen mit ca. 50 kV.

Die aufgeladenen Partikeln werden zur Abscheidung in einen geraden, etwa 25 – 60 cm hohen Rohrbündelabscheider geleitet und geben dort ihre Ladung beim Auftreffen auf die Oberfläche der Rohre ab. Da die Rohre eine hohe spezifische Oberfläche zur Verfügung stellen, kann auch dieser Teil des Abscheiders sehr kom-

¹⁾ Als Coronaentladung bezeichnet man eine Leuchterscheinung, die sich an Metallspitzen beim Anlegen hoher Spannungen bildet. In der Natur auftretende Coronaentladungen, die sich an Kirchturm-, Mastspitzen oder Hochspannungsleitungen bilden, werden auch als Elmsfeuer bezeichnet. Die Leuchterscheinung beruht auf einer Anregung der Luftmoleküle durch die hohe elektrische Feldstärke, die an spitzen Gegenständen im elektrischen Feld auftritt. Häufig ist die Leuchterscheinung von einem knisternden Geräusch begleitet.

pakt ausgeführt werden. Bei flüssigen Feinstpartikeln (Ölnebel) reinigt sich die Oberfläche durch das ablaufende Öl selbst. Sonst können Sprühdüsen eingesetzt werden, um periodisch das Rohrbündel zu reinigen. Da weder die Düsenplatte noch das Rohrbündel einen wesentlichen Strömungswiderstand darstellen, beträgt der Differenzdruck des CAROLA-Systems nur 1 – 2 hPa. Der spezifische Leistungsbedarf für die Hochspannung liegt bei etwa 0,1 kW pro 1000 m³/h gereinigtem Abgas.

CAROLA stellt somit einen sehr kompakten zweistufigen Elektroabscheider dar. Im Gegensatz zum konventionellen einstufigen Horizontal-Elektrofilter, in dem die Aufladung und der Transport

der Partikeln in einem gemeinsamen elektrischen Feld erfolgt, baut sich bei CAROLA durch die geladenen Partikeln (Raumladung) im Rohrbündel ein Feld auf, das die Triebkraft für den Partikeltransport zur Verfügung stellt. Bei den gängigen Elektrofiltern werden zur Erzeugung der Hochspannung bis 50 kV aufwendige Regelungsverfahren und Schutzmaßnahmen verwendet. Um eine weitgehende Aufladung und Abscheidung der Feinstpartikeln zu erzielen, werden mehrere Filterstufen in Reihe geschaltet. Bei klebrigen Partikeln können die Abscheideplatten verschmutzen und müssen daher periodisch gereinigt werden.

In der Tab. 1 wird das CAROLA-System mit konventionellen Elek-

trofiltern, gemäß dem Stand der Technik, verglichen. Die im Vergleich hohen Strömungsgeschwindigkeiten und hohen Feldstärken des CAROLA-Systems ermöglichen eine kompakte Bauweise der Ionisationsstufe. Der Durchsatz und die Leistungsaufnahme des CAROLA-Systems liegen im Bereich der Röhrenelektrofilter. Der wesentliche Vorteil des CAROLA-Abscheiders liegt in der kompakten Bauweise, trotz derer hohe massen- und anzahlbezogene Abscheidegrade erzielt werden. So kann, wie Planungsstudien zeigen, eine Volumenreduktion um bis zu Faktor 2 – 3 gegenüber den am Markt verfügbaren Elektrofiltern erreicht und die Investitionskosten können gegenüber dem Stand der Technik reduziert werden.

Parameter		Röhren-Elektrofilter[7]	Platten-Elektrofilter [7]	CAROLA* Corona/Abscheider
Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]	1,5 – 2,5	1,0 – 2,0	3 – 12 / 2 – 3
Abstand Elektrode / Abscheider	[mm]	100 – 250	250 – 500	n.a. / 300
Mittlere Feldstärke	[kV/cm]	2,5 – 5,0	3,5 – 4	10 / < 0,4
Spezifischer Strom	[mA/m ²]	1	0,5	n.a. / n.a.
Partikelkonzentration	[g/m ³]	10	100	0,1 – 1
Massenbezogener Abscheidegrad	[%]	99 – 99,5	99,5 – 99,9	90 – 99
Anzahlbezogener Abscheidegrad	[%]	70 – 99**	70 – 99**	60 – 99**
Durchsatz	[m ³ /s]	< 20	< 100	< 10***
Differenzdruck	[hPa]	2	1 – 1,5	1 – 2
Spez. Leistungsbedarf (Hochspannung)	[Ws/m ³]	1000 – 5000	500 – 5000	150 – 300

* Der erste Wert bezieht sich auf die Aufladungszone (Corona), der zweite Wert auf den Rohrbündelabscheider des CAROLA-Systems.

** Anzahlbezogener Abscheidegrad eines Elektrofilters im Submikronbereich

*** Planungsstudie für CAROLA-Abscheider bis zu 36.000 m³/h.

n.a. = nicht anwendbar

Tab. 1 : Vergleich des CAROLA-Abscheiders mit konventionellen Elektrofiltern.

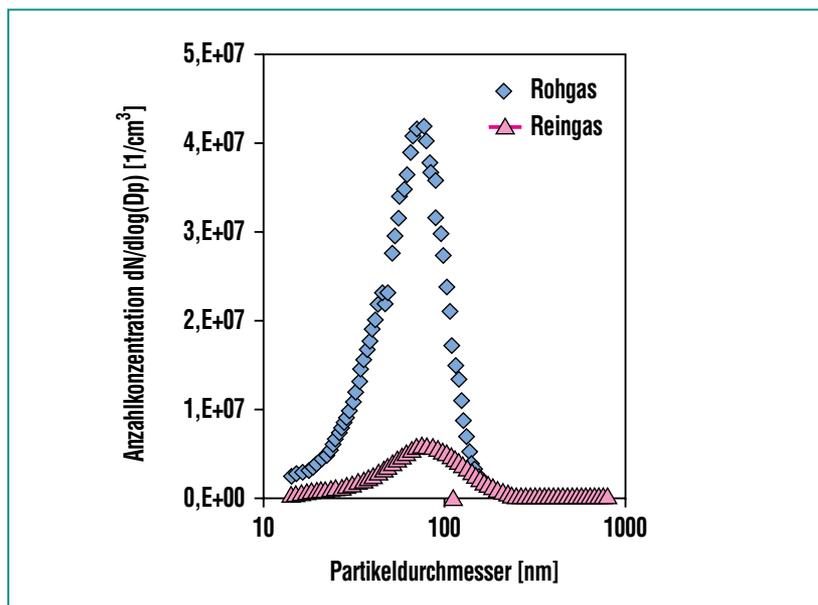


Abb. 3: Partikelgrößenverteilung einer zweistufigen Holzverbrennung. Die blauen Symbole zeigen die Partikelgrößenverteilung vor dem Eintritt in den Abscheider und die roten Symbole die Partikelgrößenverteilung im gereinigten Abgas nach der Abscheidung.

Als typisches Beispiel für derartige Aerosole ist in Abb. 3 die Partikelgrößenverteilung im Abgas einer Holzverbrennungsanlage dargestellt. Hier wurde durch die Optimierung der Verbrennungsbedingungen zwar die Massenkonzentration der Partikeln auf etwa 30 mg/m^3 und der organische Kohlenstoff auf unter 1 % gesenkt, gleichzeitig werden jedoch über 10^7 Partikeln pro Kubikzentimeter, mit einem anzahlbezogenen Modalwert von 66 nm, emittiert, die mit dem Filter abzuscheiden sind [9]. CAROLA wurde im Abgasstrom der 150 kW Holzverbrennungsanlage, nach einem Wäscher, betrieben und der anzahlbezogene Fraktionsabscheidegrad beträgt im Submikronbereich 80 bis 95 %. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde bereits die in Abb. 4 dargestellte Anlage für $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ Rauchgas aus einer Abfallverbrennungsanlage erstellt. Als nächster Schritt wird von einem Industriepartner eine Anlage zur Reinigung von $13000 \text{ m}^3/\text{h}$ geplant und aufgebaut.

Bei Metallbearbeitungsverfahren, wie sie in der Automobilindustrie eingesetzt werden, verwendet man sogenannte Kühlschmierstoffe. Dies sind komplex zusammengesetzte ölhaltige Flüssigkeiten, die während der Bohr- und Fräsprozesse auf die bearbeiteten Metalloberflächen gesprüht werden. Hierbei verdampfen sie teilweise und können bei hohen Temperaturen sogar pyrolysieren. Im Abgas der Bearbeitungszentren liegt ein dichter Ölnebel vor, in dem hohe Anzahlkonzentrationen feiner Partikeln nachgewiesen werden. Diese Partikeln ent-



Abb. 4: CAROLA Abscheider für Verbrennungsanlagen (Durchsatz $2500 \text{ m}^3/\text{h}$).

Industrielle Anwendungen

Die Problematik der Feinstpartikelabscheidung betrifft im allgemeinen thermische Prozesse, bei denen durch chemische Reaktion (Ruß) oder durch die Nukleation schwerflüchtiger Stoffe eine hohe Anzahl von Primärpartikeln gebildet werden. Die Koagulation/Agglomeration dieser Partikeln und die Kondensation schwerflüchtiger Vorläufersubstanzen führt innerhalb von Sekunden zu Partikelkonzentrationen von 10^5 bis 10^9 pro Kubikzentimeter. Da die Koagulationsrate bei dieser Anzahlkonzentration relativ niedrig ist und die Verweilzeit des Abgases in technischen Anlagen im Bereich von 10 – 30 Sekunden liegt, bleibt die Anzahlkonzentration im Abgas bis zum Verlassen der Anlage weitgehend unverändert.

halten Öl, teilweise aber auch teerige Zersetzungsprodukte und metallhaltige Komponenten. Die Grobreinigung dieser Abgase kann durch einfache Nebelabscheider (Demister) erfolgen. Hierbei werden die Partikeln über 5 µm weitgehend abgeschieden. Um die verbleibenden Partikeln zu entfernen, werden meist High-Efficiency-Particulate-Air-(HEPA)-Filter eingesetzt, die aber durch Einlagerung klebriger Feinstparti-



Abb. 5: CAROLA-System zur Abscheidung von Kühlschmierstoffnebeln (links) und Partikelmesstechnik (rechts) beim Einsatz in der Automobilindustrie. Im blauen Metallgehäuse ist ein Vorabscheider für grobe Öltröpfchen und ein Gebläse eingebaut. Dieses fördert das zureinigende Gas in die darüber installierte CAROLA-Stufe. Nach Passieren des Rohrpakets, wird das gereinigte Gas über das Metallrohr an der rechten oberen Seite des Abscheiders abgeleitet.

keln verstopfen und ausgewechselt werden müssen. Eine Alternative stellen Elektrofilter dar, deren Abscheideplatten allerdings im Dauerbetrieb durch teerige Ablagerungen bedeckt werden, wodurch der Abscheidegrad der Filter abnimmt.

Das CAROLA-System wurde zunächst in Technikumsversuchen mit synthetischen Ölaerosolen getestet. Hierbei wurden beim Einsatz von industriellen Kühlschmierstoffen Abscheidegrade von bis zu 99 % bestimmt. Der gereinigte Volumenstrom betrug etwa 700 m³/h. Bei Testserien an Schleifmaschinen in der Automobilindustrie konnten mittlerweile im Dauerbetrieb hohe Abscheidegrade des CAROLA-Systems bestätigt werden (Abb. 5). Abb. 6 zeigt einen mittleren Abscheidegrad für Ölaerosol von 96 % über einen Zeitraum von 300 h. Auch nach dieser Zeit wurden nur geringe Ablagerungen auf dem Abscheider festgestellt.

Zusammenfassung

Die aktuelle Gesetzgebung zur Feinstpartikelimmission soll in Europa zu einer deutlichen Absenkung der Emissionen aus Industrie und Verkehr führen. Der Corona-Aerosol-Abscheider CAROLA erzielt hohe Abscheidegrade für Feinstpartikeln, die aus Verbrennungsanlagen und aus Metallbearbeitungsanlagen emittiert werden. Durch seine kompakte Bauform und geringe Leistungsaufnahme können die Investitions- und Betriebskosten für die Feinstpartikelabscheidung gesenkt werden. Erste Tests an industriellen Anlagen zeigen im Dauerbetrieb die hohe Leistungsfähigkeit und die gute Verfügbarkeit des CAROLA-Abscheiders.

Danksagung

Für die engagierte technische Mitarbeit danken wir den Herren K. Woletz und R. Arheidt.

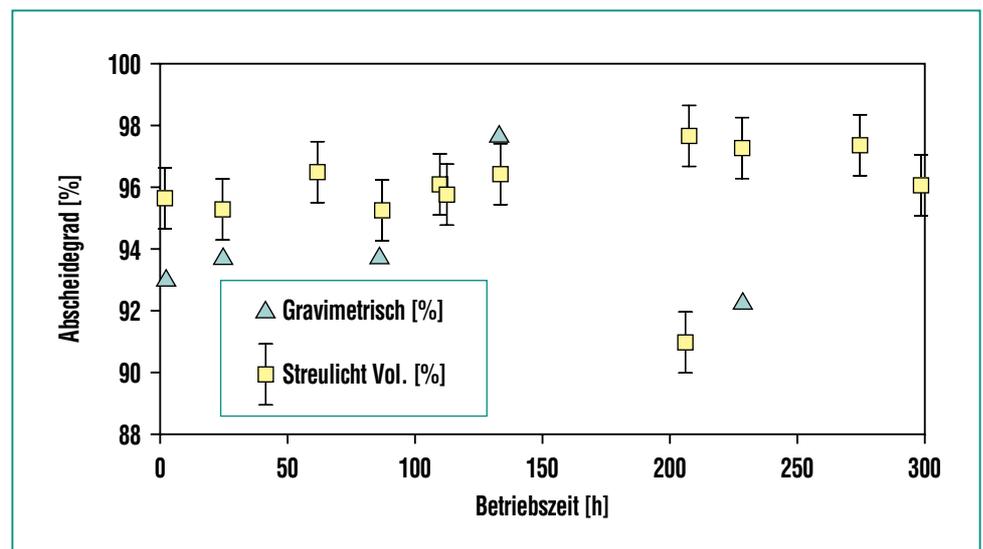


Abb. 6: Abscheidegrade für Ölaerosol beim Dauerbetrieb des CAROLA-Abscheiders an einer industriellen Schleifmaschine (gravimetrische Messung nach VDI2066 (△) und mit Streulichtmessgerät (□)).

Literatur

- [1] H. F. Krug, S. Diabaté, S. Strack, *NACHRICHTEN – Forschungszentrum Karlsruhe Jahrg. 33*, S. 305 – 315, Karlsruhe, 4/2001
- [2] *Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über Immissionswerte – 22. BImSchV vom 26. Oktober 1993.* (BGBl. I S. 1819; 1994 S. 1095) (BGBl. III 2129-8-22)
- [3] F. Löffler, *Staubabscheiden, Lehrbuchreihe Chemieingenieurwesen/Verfahrenstechnik*, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York, Stuttgart, 1988
- [4] K. Holzer, *Staub-Reinhaltung der Luft: Jahrg. 48. S. 203 – 206. 1988*
- [5] B. A. Sachweh, *Habilitationsschrift, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Kaiserslautern, 1996*
- [6] A. Bologna, Th. Wäscher, H.-R. Paur, W. Baumann, *Dt. Patent Nr. 101 32 5. 2001.*
- [7] C. Riehle, *In: Applied Electrostatic Precipitation, Ed. by K. R. Parker, Blackie Academic and Professional, ISBN 0751402664, London, 1999*
- [8] H.-R. Paur, K.-H. Schaber, G. Kasper, G. Baumbach, U. Maas, *In: Zellner, Wiesner (eds) „Workshop „Herausforderung Aerosole vor dem Hintergrund der europäischen Umweltgesetzgebung“ 30./31. Mai 2001 DECHEMA-Haus, Frankfurt am Main, (ISBN 3-89746-032-7) S. 167 – 181*