

LEHMANN - UMT GmbH

„Entwicklung eines Abscheiders neuer Bauart auf
elektrostatischer Basis für Kleinf Feuerungsanlagen im
häuslichen Bereich zur Senkung
der Gesamtstaubemissionen“

Kurzbezeichnung: „Ionen – Elektrofilter“

Abschlussbericht

gefördert durch:
die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Az: 31615

von

Dipl.-Ing. S. Gläser (Lehmann UMT)
Dipl.-Ing. (BA) J. Gehmlich (Lehmann UMT)
Dipl.-Ing. (FH) T. Birnbaum (ILK)
Dipl.-Ing. Ralf Heidenreich (ILK)

Pöhl, Januar 2018

© 2018
Lehmann UMT-GmbH,
Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH

Bezugsmöglichkeit des Abschlussberichtes:
<http://www.ilkdresden.de>, <http://www.lehmann-umt.de>

LEHMANN - UMT GmbH

„Entwicklung eines Abscheiders neuer Bauart auf
elektrostatischer Basis für Kleinf Feuerungsanlagen im
häuslichen Bereich zur Senkung
der Gesamtstaubemissionen“

Kurzbezeichnung: „Ionen – Elektrofilter“

Abschlussbericht

gefördert durch:
die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Az: 31615

von

Dipl.-Ing. S. Gläser (Lehmann UMT)
Dipl.-Ing. (BA) J. Gehmlich (Lehmann UMT)
Dipl.-Ing. (FH) T. Birnbaum (ILK)
Dipl.-Ing. Ralf Heidenreich (ILK)

Pöhl, Januar 2018

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	31615/01-24/0	Referat	24/0	Fördersumme	200.000,- €
Antragstitel		Entwicklung und Untersuchung eines elektrostatischen Staubabscheiders neuer Bauart für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen			
Stichworte		Elektrostatischer Staubabscheider, Ionenelektrofilter			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
25 Monate	01.06.15	30.04.17	I		
Zwischenberichte	aller 3 Monate				
Bewilligungsempfänger	LEHMANN UMT GmbH Jocketa-Kurze Straße 3 08543 Pöhl			Tel	037439 744 70
				Fax	037439 744 25
				Projektleitung	Dipl. Ing. Stefan Gläser
			Bearbeiter	Dipl. Ing. Stefan Gläser	
Kooperationspartner	Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die neuen Grenzwerte für Staubemissionen von Kleinfeuerungsanlagen nach Einführung der 2. Stufe der 1. BImSchV führen dazu, dass Feuerstätten, welche diese Vorgaben nicht erfüllen, mit Sekundärmaßnahmen wie elektrostatischen Abscheidern ausgerüstet werden müssen. Die bisherig auf diesem Sektor verfügbare Technik zeigt allerdings noch Zuverlässigkeitsprobleme, insbesondere bei den elektrostatischen Abscheideverfahren. Im nun abgeschlossenen FuE – Projekt sollte daher ein Abscheider neuer Bauart für Kleinfeuerungsanlagen im Nennwärmeleistungsbereich < 15 kW entwickelt werden, um die Emissionen dieser Feuerstätten zu senken und deren ökologisch wertvollen Einsatz und Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele weiterhin zu ermöglichen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Es kommt ein neues Abscheideprinzip zum Einsatz, welches die Vorteile elektrostatischer Effekte nutzt, jedoch in neuer Weise die Ladung und spätere Abscheidung der Staubpartikel erreicht. Die Ladungserzeugung in geeigneter Weise ist daher ein Kernpunkt der technischen Lösung. In dieser 1. Projektphase war das Funktionsprinzip und die technische Umsetzung des neuen Abscheidesystems unter Beweis zu stellen. Wichtige Arbeitsschritte waren dabei die Auslegung, Konstruktion und Fertigung des Ionisators, des Abscheideapparates und speziell die verfahrenstechnische Gestaltung der Abreinigungseinheit und des Staubaustrages. Der Ionisator wurde zunächst im Laborversuch hinsichtlich der erreichten Ionendichte untersucht und optimiert. Anschließend erfolgten die Versuche zur Implementierung in den Abscheidergrundkörper, vor allem hinsichtlich der Mischung und Ladung der Staubpartikel. Nach Abschluss dieser Arbeitspakete zum Aufbau des Abscheiders wurde ein Versuchsmuster gefertigt und in Versuchen mit Prüf- und Realerosol untersucht. Für das Projekt arbeiten die Kooperationspartner Lehmann-UMT GmbH und ILK Dresden zusammen. Dabei übernahm Lehmann UMT die Hauptaufgaben der Konstruktion, materialtechnischen Auslegung und Fertigung der Einzeleinheiten und das ILK Dresden die verfahrenstechnische Auslegung, den Aufbau eines Versuchsstandes sowie die Untersuchungen der Ionisatoreinheit und des abschließenden Versuchsmusters.

Nach erfolgreichem Abschluss der ersten Projektphase soll in einer 2. Projektphase an der Umsetzung des Versuchsmusters in einen einsatzfähigen Prototyp gearbeitet werden. Mit Erprobung dieser neuen Abscheiderbauart erfolgt ein erster Schritt für die Verfügbarkeit einer praktikablen Technik und für die Reduzierung des Feinstaubausstoßes von Neuanlagen, aber auch von Bestandsanlagen.

Ergebnisse und Diskussion

Aus technologischer Sicht sind die Vorhabensergebnisse so zu werten, dass das entwickelte und untersuchte, neue Prinzip zur elektrostatischen Abscheidung von Partikeln nach wie vor seine Innovationskraft nicht verloren hat. Es sind derzeit keine vergleichbaren Techniken für Abscheider bekannt. Eine aktuelle Recherche zeigt kaum Änderungen am Stand der marktverfügbaren Abscheidetechnik für Kleinfeuerungsanlagen. Die aktuell deutlich gesunkene Nachfrage, sowohl den Kamin-, als auch den Heizkesselmarkt betreffend wirken auch auf diesbezügliche Entwicklungen eher hemmend.

Aus ökologischer Sicht sind die Vorhabensergebnisse als positiv zu bewerten. Bei Fortführung des Projektes könnte die Entwicklungsaufgabe in einer 2. Projektphase mit einem Abscheider-Prototyp beendet werden, welcher die staubförmigen Emissionen, vor allem von Kaminen und kleinen Kesseln deutlich mindern würde und somit direkt als Beitrag der Luftreinhaltung zu einer Entlastung der Umwelt führt.

Die gewonnenen Erkenntnisse können aber auch bereits jetzt für weitere Entwicklungsaufgaben auf dem Gebiet der Emissionsminderung genutzt werden. Realistisch sind hier vor allem:

- Unterstützung von anderen Abscheidetechniken durch Ionisierungen (Agglomerations- und Abscheideeffekt)
- Entwicklung eines Abscheiders auf Basis des gleichen Grundkörpers und Abscheideeinheit jedoch mit Felddaufladung.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Es ist geplant, die Ergebnisse voraussichtlich auf der „22. Fachtagung - nachwachsende Rohstoffe – Bioökonomie 3.0“ am 16./17. März 2018 in Dresden vorzustellen. Es ist ein Posterbeitrag auf der „7. Statuskonferenz | Bioenergie. Flexibel und integriert in die nächste Epoche“ am 22.11.2017 in Leipzig in Vorbereitung.

Fazit

Auf Grundlage der durchgeführten FuE – Arbeiten zum neuen Abscheidekonzept wird eingeschätzt, dass damit ein Effekt zwar nachweisbar, jedoch mit einer Wirksamkeit von maximal 56 % Gesamt-Abscheidegrad insgesamt bisher als noch zu gering zu bewerten ist. Nach VDI 3670 sind für elektrostatische Abscheider mindestens 60 % Abscheidegrad erforderlich. Mit der vorliegenden Effektivität lässt sich derzeit noch kein Ansatz für ein marktfähiges Kosten-Nutzen-Verhältnis darstellen. Es gelang die Erzeugung und Applikation von Ionen in den Partikelstrom, jedoch ist die darauf zurückzuführende Abscheidung unzureichend. Dennoch erbrachte das FuE – Projekt wesentliche, positive Ergebnisse hinsichtlich der Abscheider - Konstruktion und der thermischen Abreinigung für Abscheider. Diese Ergebnisse lassen sich in weiteren Entwicklungsarbeiten nutzen.

Für eine Weiterführung der Entwicklungsarbeit unter Beibehalt des Vorhabenszieles wären folgende Schritte notwendig:

- Versuche mit noch höheren Ionendichten
- Direkter Nachweis der tatsächlich vom Partikel aufgenommenen Ladungen
- Dazu wären Untersuchungen in einem elektrischen Feld notwendig (ähnlich eines DMA oder Elektrometers)
- Erprobung zusätzlicher Feldeffekte

Daraus abgeleitet wären anschließend Arbeiten zur technischen Umsetzung

- Eines geänderten Ladeprinzips
- Zweistufige Partikelladung (abwechselnd agglomerieren, Ionisieren)

vorzunehmen.

Auf Grundlage des dargestellten Ergebnisses dieser 1. Projektphase evaluieren beide Projektpartner derzeit noch, inwiefern eine 2. Projektphase angeschlossen werden kann. Zum einen besteht die Möglichkeit durch den o.g. Untersuchungsumfang neue Erkenntnisse zur Verbesserung des Wirkungsmechanismus zu finden, zum anderen kann die Zielstellung zur Entwicklung eines Abscheiders für Kleinfeuerungsanlagen durch die Ergebnisse verändert werden, so dass es mit abgeändertem oder optimiertem Prinzip gelingt, höhere Abscheidegrade zu erzielen.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	3
2 Einleitung	4
3 Durchführung des Projektes, Einzelzielkriterien	6
3.1 Verfahrenstechnische Auslegung, konstruktive Gestaltung	6
3.2 Konstruktion und Fertigung Ionisatoreinheit	7
3.2.1 Aufbau, Konstruktion Ionistator	8
3.2.2 Fertigung Ionisator	10
3.2.3 Einbringung Ionisator	11
3.2.4 Labormuster	11
3.2.5 Versuche Laboranlage	13
3.2.6 Erhöhung der Ionendichte	16
3.3 Versuche Ionisierungswirkung	17
3.4 Auslegung, Konstruktion Abscheider	19
3.5 Komponentenlisten	22
3.6 Gestaltung der Abscheideeinheit, Abreinigung und des Staubaustrags	22
3.7 Fertigung Abscheider-Versuchsmuster	25
3.8 Versuchsstand Abscheider, Untersuchungsmethodik	25
3.9 Untersuchungen zum Verhalten des Versuchsmusters	27
3.9.1 Abscheidegrad	27
3.9.2 Agglomerationsverhalten	28
3.10 Notwendige technische Änderungen	29
3.11 Abscheideversuche mit optimiertem Ionisator	30
3.12 Versuche Abreinigung	31
3.13 Schallemissionen, Stromaufnahme	33
3.14 Druckverlust, Ozon – Entstehung	34
3.15 Ökonomie	34
4 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse, Vergleich zu ursprünglicher Zielsetzung	34
5 Bewertung der Vorhabensergebnisse	36
6 Fazit	36
Literaturverzeichnis	38
Anlagenverzeichnis	39

1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser ersten Projektphase wurde ein neues Abscheideprinzip für Biomassekleinfeuerungsanlagen auf seine Anwendbarkeit hin untersucht. Das neue Prinzip beruht auf einer elektrostatischen Abscheidung mit externer Erzeugung von Ladungsträgern, Einkopplung der Ladungsträger in den Rauchgasstrom und Ladung der darin enthaltenen Staubpartikel, welche dann an Niederschlagsflächen abgeschieden werden. Die Senkung der Partikelemissionen von Biomassefeuerungen ist sowohl für die Reinhaltung der Luft, aber für das Erreichen der Klimaschutzziele eine der großen Herausforderungen dieses Jahrzehnts. Folgende Aspekte waren Gegenstand der Untersuchungen: Zunächst musste eine entsprechend der vermuteten Rohgasbeladung ausreichenden Ladungsträgerdichte erzeugt und nachgewiesen werden. Dies gelang erstmalig mit Hilfe sog. bipolarer Ionisationsröhren, wie sie beispielsweise zur Luftreinigung in Zentralklimaanlagen eingesetzt werden. Die Ionenausbeute wurde mittels eines weiterentwickelten unipolaren Typs ohne Gegenelektrode nochmals deutlich erhöht und auf die negative Polarität beschränkt. Der Nachweis der Ionenproduktion erfolgte über ein Ionometer (Nano-Amperemeter). Ebenfalls gelang es, diese Ladungsträger über eine Strecke von ca. 0,5 m in einer metallischen Rohleitung zu transportieren, was für die spätere Abscheidung essentiell ist. Nachfolgend wurden an einem Labormuster Versuche zur Abscheidewirkung vorgenommen. Unter Einsatz spezieller Aerosolgeneratoren, darunter für Flammruß (Realaerosol), konnte für den bipolaren Röhrenionisator ein Agglomerationseffekt der Partikel hin zu größeren Korndurchmessern, aber auch ein geringer Abscheideeffekt (Fraktionsabscheidegrade) im Bereich von ca. 10-20 % nachgewiesen werden. Daraufhin wurde ein Versuchsmuster eines Abscheiders entwickelt und gefertigt und untersucht. Dabei konnte zwar wiederum der Agglomerationseffekt, allerdings nur ein Abscheidegrad von 8–22 % (ähnlich dem ersten Versuchsmuster) für DEHS – Aerosol nachgewiesen werden. Die dabei aufgereinigten Volumenströme betragen ca. 10 – 20 m³/h. Es muss daher eingeschätzt werden, dass der Effekt dieses neuen Abscheideprinzips gering ist. Allerdings konnte gezeigt werden, dass mit dem gefertigten Versuchsmuster sowie der Abreinigung mittels Glühzündung und Rußabbrand positive Ansätze für Einzellösungen vorliegen. Diese können für andere FuE-Vorhaben genutzt und weiterverfolgt werden. Zudem ist es möglich an dem Versuchsmuster geänderte Varianten elektrostatischer Abscheidelösungen zu erproben und diese weiter zu verfolgen. Im Hinblick auf die Innovationshöhe ist es jedoch durchaus empfehlenswert die Ursachen für die geringen Effekte zur Abscheidewirkung zu erforschen.

Das FuE – Projekt wurde von den Kooperationspartnern Lehmann UMT (Abscheider, Konstruktion, Fertigung) und dem Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden (ILK Dresden) gemeinsam bearbeitet. Der Deutschen Bundestiftung Umwelt wird für die Förderung des Vorhabens unter dem Az: 316105/01 gedankt.

2 Einleitung

Seit 01.01.2015 müssen Kleinfeuerungsanlagen für Holz oder Holzpellets (ausgenommen Einzelfeuerungsanlagen) der 1. BImSchV [1] (2. Stufe in Kraft) den Grenzwert von 20 mg/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) Staubgehalt im Abgas einhalten. Einzelraumfeuerungen müssen bei der Typprüfung den Wert von 40 mg/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) Staubgehalt im Abgas erreichen. Diese Vorgabe ist ein Ziel, welches bisher nur ein Teil der auf dem Markt befindlichen Feuerungen einhalten können. Auch wenn diese Konzentrationswerte bei der Typprüfung erreicht werden, ist davon auszugehen, dass beim praktischen Betrieb durch den Anwendereinfluss höhere Staubfrachten im Abgas der Fall sein werden. Auch ältere Feuerstätten sind in Betracht zu ziehen. Bei ihnen ist generell von erhöhten Emissionen auszugehen. Der Einsatz von Kleinfeuerungsanlagen wird allgemein zwiespältig gesehen, da Sie einerseits einen sehr wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele liefern, andererseits aber ihr Emissionspotential höher ist als bei zentralen Großanlagen mit Abgasreinigung.

Das durchgeführte FuE Projekt soll einen Beitrag dazu leisten, die staubförmigen Emissionen von Kleinfeuerungsanlagen zu senken und so wiederum deren Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele zu sichern.

Für eine möglichst emissionsarme Verbrennung stehen im größeren Leistungsbereich von 100 kW bis <1 MW bereits effektive und wirtschaftliche Technologien zur Staub- und Feinstaubabtrennung zur Verfügung. Jedoch besteht, nicht zuletzt auf Grund der Investitionskosten, insbesondere für Staubabscheider an Verbrennungsanlagen kleiner Leistung (< 15 kW), wie Holzkaminen im häuslichen Bereich, noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf zur Schaffung wirtschaftlicher und technologisch zuverlässiger Produkte.

Recherchen zeigen, dass am Markt derzeit nur vereinzelte Kesselanlagen mit einer entsprechenden Entstaubungstechnik ausgestattet sind [2],[4]. Dabei kommen begründet durch die geringe Wärmeleistung vorrangig folgende Verfahren zum Einsatz [5]:

- Kondensationswärmetauscher und Wäscher,
- Gewebefilter / Keramikfilter und
- elektrostatische Abscheider (in Verbindungsstücken und auf Schornsteinmündungen).

Ein kritischer Punkt bei Elektrofiltern stellt die Hochspannungseinführung dar. Auf Grund anhaftender Stäube in Verbindung mit der Feuchtigkeit der Rauchgase können Durchschläge hier nur durch konstruktiv aufwendige Detaillösungen wie Bespülungen gelöst werden. Wie eigene Versuche im praktischen Einsatz zeigen, führt dieser Bereich am Abscheider jedoch trotzdem zu Problemen [6].



Bild 1: typische Belegung von Sprühelektroden (li.: [7], re.: [80])

Diese Untersuchungen, wie auch die des TFZ Straubing, zeigen ein

weiteres Problem bisher verfügbarer oder erprobter Abscheidetechnik für Holzfeuerungen auf: die starke Verschmutzung der Sprühelektrode. Verfügbare Abscheiderlösungen führen die Ladungserzeugung mit einer Sprühelektrode im partikelbeladenen Rauchgasstrom durch. Das Bild 1 zeigt stellvertretend nur 2 Ausführungsvarianten mit Verschmutzungen nach vergleichsweise kurzen Betriebszeiten (ca. 60 h). Die Belegung führt zu einer deutlichen Reduktion der Feldstärken und damit Abnahme der Abscheidewirkung und ebenfalls zu Durchschlägen.

Ziel des FuE-Vorhabens war es, in einer ersten Projektphase ein Konzept für einen Abscheider neuer Bauart für Kleinfeuerungsanlagen zu entwickeln und die grundsätzliche Machbarkeit eines neuen Abscheideprinzips zu erproben. Grundlage des neuen Verfahrens ist eine externe Ladungserzeugung im sauberen Luftbereich außerhalb des Abscheiders. Die so erzeugten Ladungsträger (Ionen) werden in den Rauchgasstrom eingekoppelt. Somit sollen die im Rohgas befindlichen Staubpartikel geladen und an einer Niederschlagsfläche abgeschieden werden.

Es werden keine Sprühelektroden im Abscheider - Inneren, wie bei bisherigen Lösungen benötigt, welche in der Praxis häufig zu den aufgezeigten Problemen führen.

Nach Abschluss der Entwicklung sollte mit den erzielten Ergebnissen eine Einschätzung zur Umsetzbarkeit dieser technischen Entwicklung vorgenommen werden, um darüber zu entscheiden, ob in einer 2. Projektphase ein vorserienreifer Prototyp entwickelt wird.

Die dabei zu lösenden Aufgaben bestanden in den folgenden Hauptpunkten, welche zugleich Meilensteine in der FuE-Arbeit wurden:

- Meilenstein 1: Entwicklung des Ionisators,
- Meilenstein 2: Konstruktion des Abscheiders, Agglomeration,
- Meilenstein 3: Ladung und Abscheidung der Partikel in einer Abscheiderbaugruppe mit metallischer Schüttschicht,
- Meilenstein 4: Abreinigung und Staubaustrag,
- Projektabschluss: Wirksamkeit Abscheider.

3 Durchführung des Projektes, Einzelzielkriterien

3.1 Verfahrenstechnische Auslegung, konstruktive Gestaltung

Es ist bekannt, dass Stäube aus Kleinf Feuerungsanlagen im Partikelgrößenbereich von ca. 0,1 - 1 μm liegen. Ein Maxima ergibt sich für Partikel der Größe 0,2 - 0,3 μm . In einem herkömmlichen Elektroabscheider werden mittels einer Koronaentladung Gasionen erzeugt. Meist wird dabei negatives Hochspannungspotential an der Sprühelektrode verwendet. Partikel im Abgasstrom werden durch das Auftreffen der Gasionen aufgeladen. Hier unterscheidet man die sog. Feld- bzw. Diffusionsaufladung. Bei ersterer treffen die Ladungsträger durch eine gerichtete Bewegung in einem angelegten elektrischen Feld zwischen Sprüh- und Niederschlagslektrode auf die Partikel. Bei der Diffusionsaufladung treffen die Gasionen durch die (zufällige) Eigenbewegung der Partikel auf diese. Im Partikelgrößenbereich von 0,1 - 1 μm wirken beide Ladeeffekte, wobei durch das vorherrschende Partikelgrößenmaximum von etwa 0,2 - 0,3 μm der Vorgang der Diffusionsladung sich als wahrscheinlicher darstellt. Um eine Diffusionsladung von Partikeln zu erreichen, sind Ladungsträger und eine Kollision dieser mit Partikeln notwendig. In einem direkten elektrischen Feld, z.B. eines Elektrofilters mit klassischer Sprüh-Niederschlagslektroden-Anordnung werden freie Elektronen durch die Plasmaentladung der Korona stark beschleunigt und lösen durch Stoßionisation weitere Elektronen aus Gaspartikeln heraus. Diese stoßen auch auf Partikel, laden diese und die Partikel werden im elektrischen Feld abgelenkt. Ohne direkte Korona im Gasstrom, wie im Vorhaben angestrebt, müssen die Ionen aus anderen Quellen in den Gasstrom geleitet werden.

Aus der Literatur und bisherigen Entwicklungsarbeiten heraus, können dies folgende Quellen sein:

1. abgewehrte Ionen aus einem elektrischen Feld (zwischen Sprüh- und Niederschlagslektrode)
2. Ionen aus einer sog. bipolaren Ionisierungsrohre (häufig eingesetzt zur Luftreinigung, da sowohl positive N_2 – Ionen, als auch negative O_2 – Ionen gebildet werden, welche VOC – Verbindungen oxidieren können)
3. Radioaktive Strahlenquellen oder UV-Strahler ionisieren Gase
4. Einpolige Hochspannungselektroden, welche unipolare Ionen erzeugen

Bei Punkt 1 und 4 werden nur Ladungsträger einer Polarität erzeugt, wodurch nur eine unipolare Diffusionsladung erfolgen kann. Bei Punkt 2 und 3 werden Ladungsträger beider Polaritäten frei, wodurch eine bipolare Diffusionsladung die Folge ist. Auf Grund dieser Bipolarität kommen beide Möglichkeiten häufig in Reinraumanwendungen zum Einsatz, da es möglich ist, statisch geladene Bauteile und Flächen zu neutralisieren, was für den ESD-Schutz wich-

tig ist. Wird bei der Möglichkeit 2 mit Wechselspannung 230 V gearbeitet, entstehen aber etwa im Verhältnis der Volumenanteile von N_2 und O_2 in der Luft unterschiedliche Anzahlen sowohl positiver, aber auch negativer Ionen. Werden diese Ladungsträger in einen Partikelgasstrom appliziert, sollte es möglich sein, diesen zu laden.

Ungeachtet dessen, ist es möglich, dass Partikel nach dem Verbrennungsprozess noch eine Ladung tragen. Direkt in der Flamme werden Gasmoleküle thermisch ionisiert und es entsteht gemäß [9] durch die große Anzahl an bipolaren Ladungsträgern ($>10^9$ Ionen/cm³) sehr schnell eine Ladungsverteilung nach Boltzmann. Verlassen die Partikel die heiße Zone, so wird nicht sofort eine Boltzmann Ladungsverteilung erreicht, da die Ionenkonzentration schnell stark abnimmt. Die Partikel können so noch geladen bleiben und erst nach ca. 100 Minuten tritt bei einer Ionenkonzentration von ca. 1000 Ionen/cm³ (Raumluft) wiederum eine Boltzmann Ladungsverteilung ein.

In jedem Fall ist es notwendig, eine Ladungsträgerdichte von ca. $1 \cdot 10^{12}$ Ionen/m³ zu erreichen, um bei typischen Rohgaskonzentrationen an Kaminfeuerungen zwischen $1 \cdot 10^6$ /cm³ bis $6 \cdot 10^7$ /cm³ ($1 \cdot 10^{12}$ /m³ bis $6 \cdot 10^{13}$ /m³) Partikel des Durchmessers 0,2 µm (Nussbaumer, Kaltschmitt [10], [11]) eine ausreichend große Ladungsträgerdichte zu erreichen.

3.2 Konstruktion und Fertigung Ionisatoreinheit

Die Aufgabe des Ionisators besteht darin, für die Ladung der Staubteilchen eine ausreichend hohe Anzahl an Ionen bereitzustellen. Gelingt dies in einer Größenordnung von ca. 10^7 Ionen/cm³, wird davon ausgegangen, dass die Staubteilchen für den Zweck eines Abscheiders an Kleinfeuerungsanlagen, ausreichend geladen werden und sich anschließend an der Wandung eines Strömungs-Labyrinthes abscheiden können. Diese Abscheidung beruht zum einen auf einem zufälligen Impaktionseffekt, zum anderen herrscht zwischen den geladenen Partikeln und den neutralen Schüttkörpern (auch durch elektrische Influenz) eine geringe Anziehungskraft.

Ionisatoren gibt es in der Ausführung, dass sie bipolare (positive und negative) oder unipolare Ionen (positiv oder negativ) freisetzen. Dies wird durch ein wechselndes Hochspannungspotential, oder ein unipolares Hochspannungspotential realisiert. Erstere sind dabei vor allem aus der Reinraumtechnik oder Folienherstellung bekannt. Statisch aufgeladene Werkstücke sollen neutralisiert werden. Dazu werden Ladungsträger aus bipolaren Ionisatoren auf die Bauteile gelenkt. Die Ionen sorgen für einen Ladungsausgleich auf dem Bauteil, welcher zusätzlich sich selbst regelt. Unipolare Ionisatoren können z.B. eingesetzt werden, um Halb-

zeuge gezielt statisch aufzuladen, beispielsweise wenn eine Folienbahn auf einer anderen Folie aufhaften soll, um diese anschließend gemeinsam zu verschweißen.

Allgemein kann die Wirkungsweise von Ionisatoren wie folgt beschrieben werden: In den Ionisator tritt Umgebungsluft mit Sauerstoffmolekülen ein. Im Inneren des Ionisators wird zwischen Sprüh- und Gegenelektrode ein elektrisches Feld aufgebaut. Dabei wird an die Sprühelektrode z.B. negatives Spannungspotential angelegt. Bei entsprechend hoher Spannung entsteht an den Spitzen der Sprühelektrode eine Corona. Es treten Elektronen aus, welche Atome ionisieren und zur Bildung einer nicht-thermischen, instabilen Plasmawolke führen. In diesem ionisierten Gas befinden sich auch Sauerstoff-Ionen, welche negativ geladen sind. Diese sind hochreaktiv und können organische Verbindungen oxidieren, aber auch Partikel laden. Weiterhin sind freie Elektronen enthalten, welche wiederum Gasmoleküle ionisieren können. In der Natur kommt dieser Effekt bei einem Gewitter vor. Durch Blitze werden in der Luft Sauerstoff-Ionen gebildet, welche entsprechend mit Luftschadstoffen reagieren. Bei diesem Vorgang kann sich allerdings auch Ozon (O_3) bilden, welches selbst als starkes Oxidationsmittel wirkt und gesundheitsschädlich wäre. Ziel ist es demnach eine hohe Ionenkonzentration bei geringer Ozonbildung zu erreichen. Um die Ozonbildung gering zu halten, arbeiten Hersteller für Ionisierungsröhren nur mit möglichst niedrigen Hochspannungen bis zu ca. 2,5 kV.

Bei der Bearbeitung wurde zunächst versucht, mit einer typischen Sprüh- und Gegenelektroden-Konstruktion eine Ionisator aufzubauen. Es erfolgte ein Entwurf durch das ILK Dresden sowie die Konstruktion und Fertigung durch die Lehmann UMT. In den folgenden Abschnitten wird näher auf diese erste Variante eingegangen. Diese war für die Untersuchung der stattfindenden Prozesse unerlässlich.

3.2.1 Aufbau, Konstruktion Ionisator

Im Bild 2 ist der innere Aufbau des entwickelten Typs 1 des Ionisators dargestellt. Dieser kann später auf dem Gehäuse des Abscheiders oben aufsitzen. Er besteht aus den Hauptbaugruppen:

- Hüllrohr (Isolation)
- Sprühelektrode (sternförmig)
- Gegenelektrode (ringförmig)

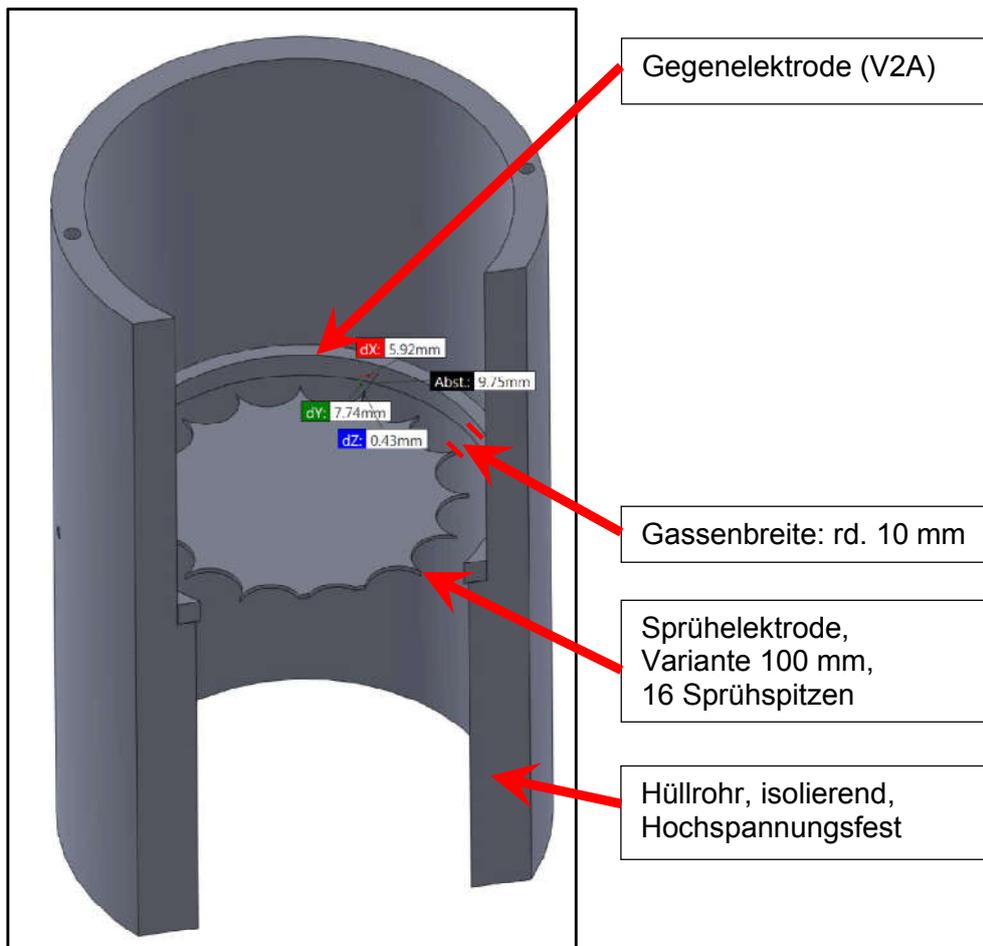


Bild 2: Innerer Aufbau Ionisator - 3D Modell

Die Anbindung der Sprühelektrode an die Hochspannungsversorgung ist im Abschnitt 3.2.4 dargestellt.

Um die Ionisationswirkung näher untersuchen zu können, wurden Sprühelektroden verschiedener Durchmesser gefertigt. Unter Anpassung der ringförmigen Niederschlagselektrode konnten verschiedene Elektroden - Konfigurationen untersucht werden (vgl. Bild 3).



Bild 3: Größenvarianten der Sprühelektrode

3.2.2 Fertigung Ionisator

Um den physikalisch elektrischen Anforderungen gerecht zu werden, wurden durch Lehmann UMT umfangreiche Schneid-Versuche durchgeführt und die Laserparameter sowie Schnittmuster so optimiert, dass besonders scharfe Spitzen entstanden. Es hat sich gezeigt, dass die Programmierung einer Schleife an der Spitze des Sterns für eine möglichst hohe Qualität maßgeblich ist. Im Bild 4 sind die ermittelten, optimalen Laserparameter dargestellt.

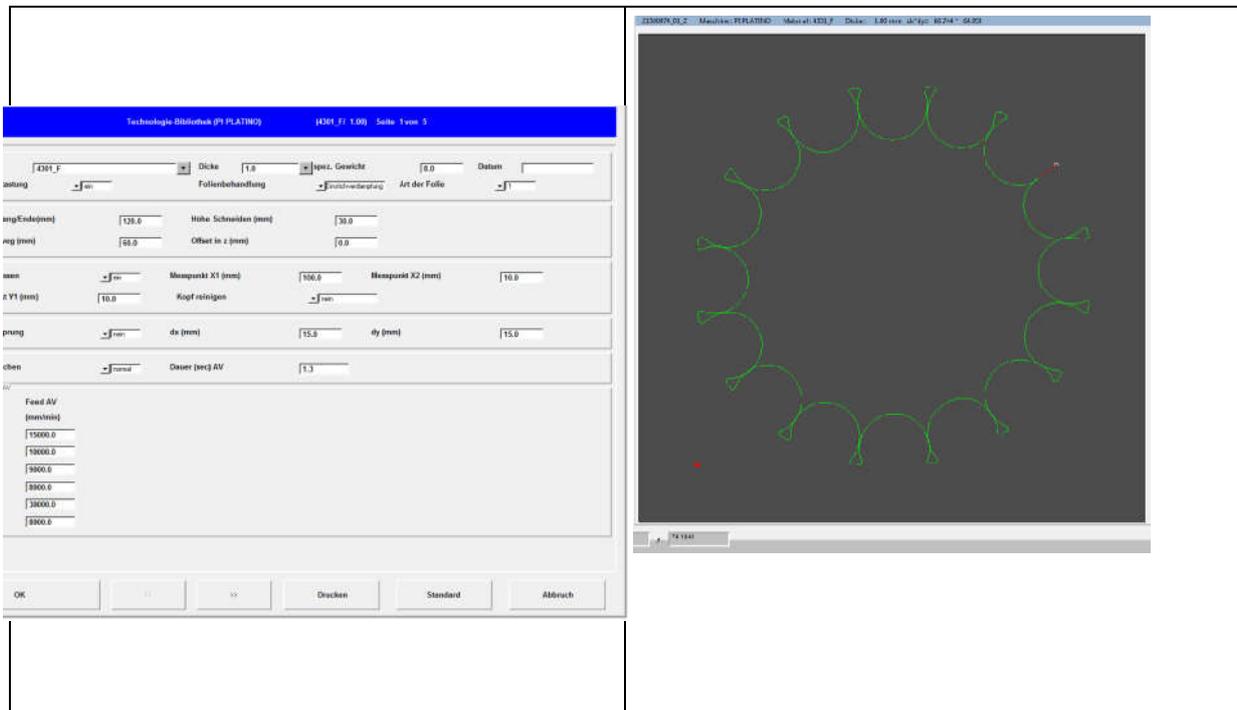


Bild 4: Versuche Optimierung Laser-Parameter, Schnittmuster

Nur durch diese Schleifen ist es möglich Spitzen zu erzeugen, die im Schneidvorgang nicht "wegbrennen".

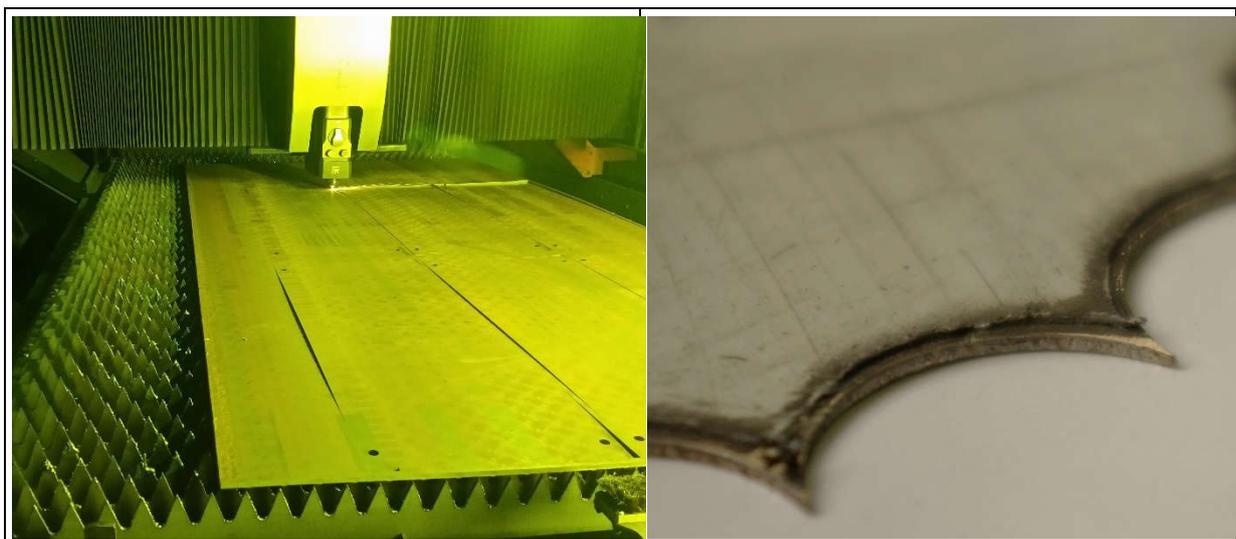


Bild 5: li.: Laser bei der Bearbeitung des Schnittmusters
re.: Schnittstellen der Radien – ausgebildet als scharfe Spitze

Das Ergebnis der Fertigung bei Lehmann UMT ist im Bild 5 dokumentiert. Auf Grund der geringsten Austrittsflächen werden hohe Feldstärken im Bereich der Sprühspitzen erreicht und der Aufbau der Corona unterstützt. Die Elektroden emittieren damit mehr Ladungsträger, was sich positiv auf die Ionenbildung auswirkt. Für das Hüllrohr aus POM zeigte sich auf Grund der Oberflächenbeschaffenheit eine unzureichende Halterung in der Werkstückaufnahme. Erst die Herstellung eigener Hilfsmittel zum Spannen des Werkstücks ermöglichte eine Bearbeitung.

3.2.3 Einbringung Ionisator

Um die Ladungsträger in den Rauchgasstrom einzukoppeln ist deren Einleitung in den Abscheider notwendig. Damit nicht bereits vor der Einbringung die Ionen teilweise Ihre Ladung an leitfähigen Bauteilen abgegeben, wurde davon ausgegangen, dass die Führungsbahn auf Seite der Ladungsträger einerseits zwar optimal elektrisch isolierend sein sollte, andererseits dürfen keine statischen Aufladungen entstehen. Geschieht dies, wandern die Ionen auf Grund der Coulomb – Kraft an die Wandung und stehen nicht mehr für die Ladung von Staubpartikeln zur Verfügung. Auf Grund dieser Erkenntnisse kommen dafür als Materialien nur:

- (Edel)Stahl
- Innen leitend beschichtetes PTFE
- Aluminium

in Frage. Für das Labormuster wird die Leistungsbahn zunächst mittels eines Edelstahl-Rohres, welches geerdet ist, realisiert. Es wird im Bereich des Rohgaseintritts so eingebacht, dass eine abwärtsgerichtete spiralförmige Bahn der Staubpartikel unterstützt wird.

3.2.4 Labormuster

Aus den gefertigten Baugruppen wurde ein Labormuster des Ionisators montiert (Bild 6).

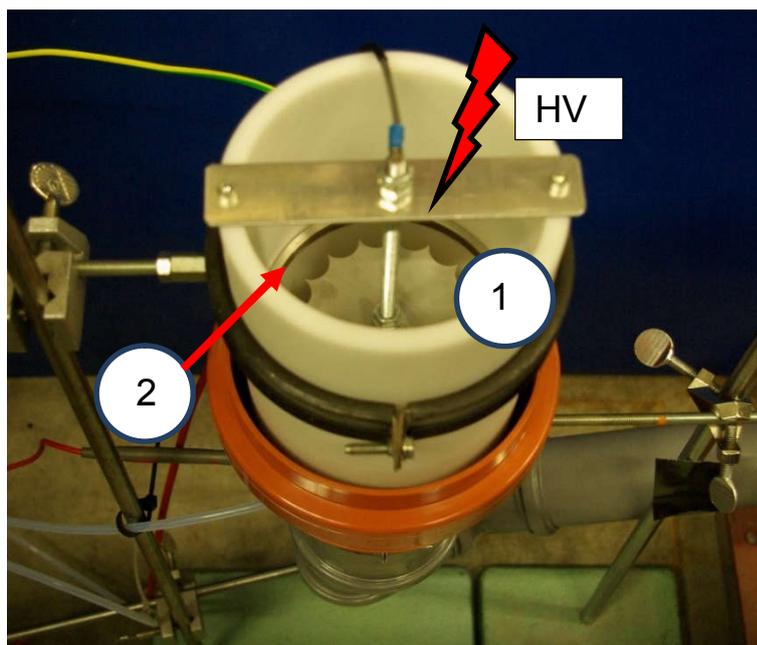


Bild 6: Baugruppe Ionisator (1-Hochspannungsanschluss Sprühelektrode, 2 – Erdungsanschluss Gegenelektrode)

Es wurde in einen Hochspannungs-Versuchsstand im Versuchsfeld des ILK Dresden errichtet um Untersuchungen am Bauteil durchführen zu können. Für die Erzeugung der Hochspannung wurde ein Präzisions-Hochspannungs-Netzgerät, Modell PNC 30000 der Fa. Heinzinger verwendet. Im Bild 7 ist der Versuchsaufbau mit Messtechnik dargestellt.



Bild 7: Versuchsaufbau Ionisator

Um den Trägerluftstrom bereitzustellen, wurde eine günstige Lösung mit dem Anschluss an die Verbrennungsluftversorgung eines Kamins gefunden. Die damit realisierbaren Volumenströme liegen im Bereich von ca. 10 – 40 m³/h und bilden den praktischen Einsatzfall ab. Wie

im späteren Einsatzfall wurde der Ionisator im Unterdruckbereich betrieben. Der anliegende statische Druck betrug bei allen Versuchen rd. -12 Pa auf der Unterseite des Gerätes (Übergang in den Abscheider).

3.2.5 Versuche Laboranlage

Als grundlegendes Charakterisierungsmerkmal wurde die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrodenaufbaus ermittelt. Diese ist im Bild 8 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Corona – Einsatzspannung, für welche durch die Auslegung ein sehr günstiger Wert von 4,5 kV erreicht werden konnte (vgl.[17], Abschnitt 4.2.2). Für einen Elektroabscheider ist es Ziel, möglichst hohe Feldstärken für die Wanderung der geladenen Partikel zur Gegenelektrode zu erreichen. Für die Nutzung als Ionisator hingegen ist es Ziel, mit möglichst geringem Hochspannungspotential eine hohe Ionendichte zu erreichen, da bei hohen Spannungen die Feldstärke zunimmt und mehr Ionen produziert werden, jedoch ebenso vermehrt Ozon entsteht.

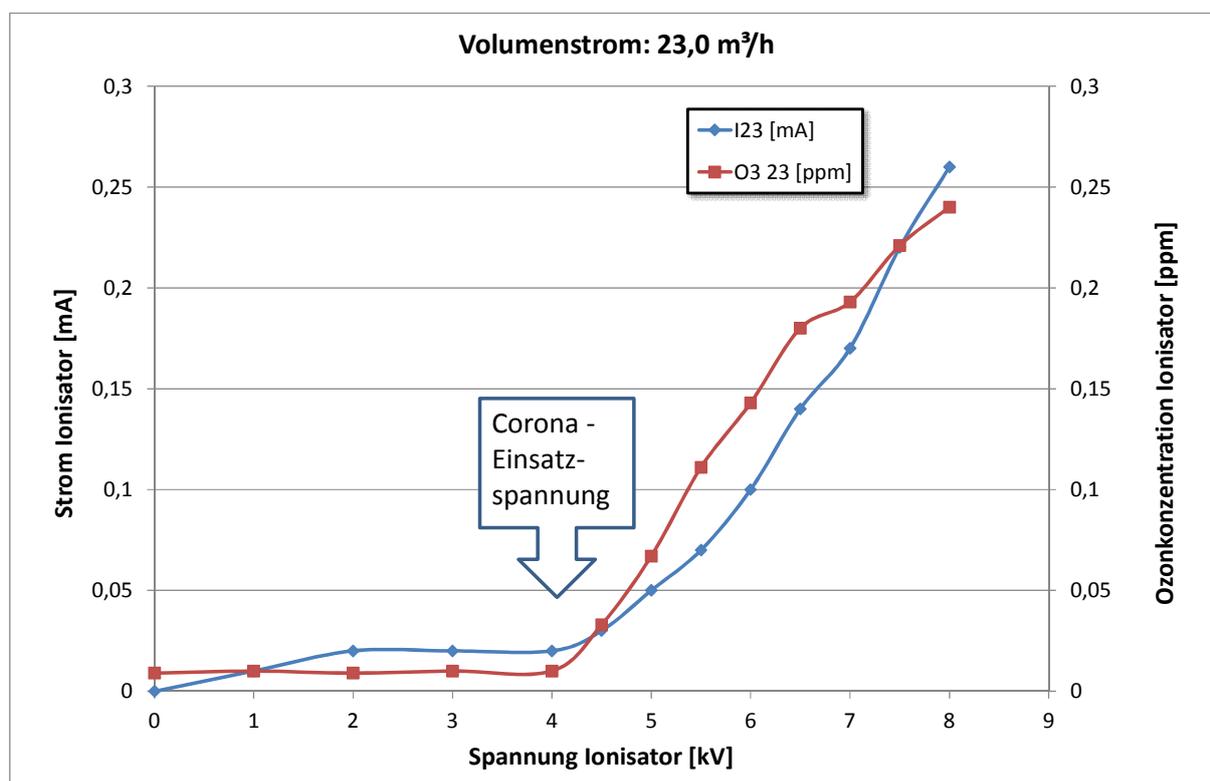


Bild 8: Strom-Spannungs-Kennlinie Ionisator (Negatives Hochspannungspotential) mit Stern d= 100 mm, Gegenelektrode d=130 mm

Daher kann in erster Näherung auch davon ausgegangen werden, dass die Ozonbildung ein Maß für die Bildung der Ionen ist. Um dies zu charakterisieren wurde in Versuchen im Bereich von ca. 200 mm unterhalb des Ionisators im Kernstrom die Ozonkonzentration bestimmt. Dafür wurde das UV-Absorptionsspektrometer Modell O₃ 41M der Fa. Ansyco eingesetzt. Die ermittelten Messwerte sind ebenfalls im Diagramm von Bild 8 dargestellt. Die

Ozonbildung ist von der angelegten Hochspannung abhängig. Es wird deutlich, dass die Ozonkonzentration nahezu parallel zur Stromstärke ansteigt. Der MAK – Wert von O_3 beträgt 0,1 ppm. Dieser Wert wird bei einer Spannung von ca. 6 kV erreicht.

Allerdings ist die Bildung von Ozon vom Trägerluftvolumenstrom abhängig, welcher durch den Ionisator hindurchgeleitet wird. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen wurden weitere Versuche durchgeführt. Bei Variation des Trägerluftvolumenstroms kann der Zusammenhang nach dem Diagramm im Bild 9 hergestellt werden.

Es wird deutlich, dass zwar die resultierenden Stromstärken für jeden Volumenstrom gleich sind, jedoch die Ozonkonzentrationen deutlich variieren. Ausgehend von einer Konzentration in Höhe von ca. 0,25 ppm bei einem Volumenstrom von rd. $10 \text{ m}^3/\text{h}$ steigt die Konzentration um Faktor 2,6 auf 0,65 ppm bei $23 \text{ m}^3/\text{h}$ an.

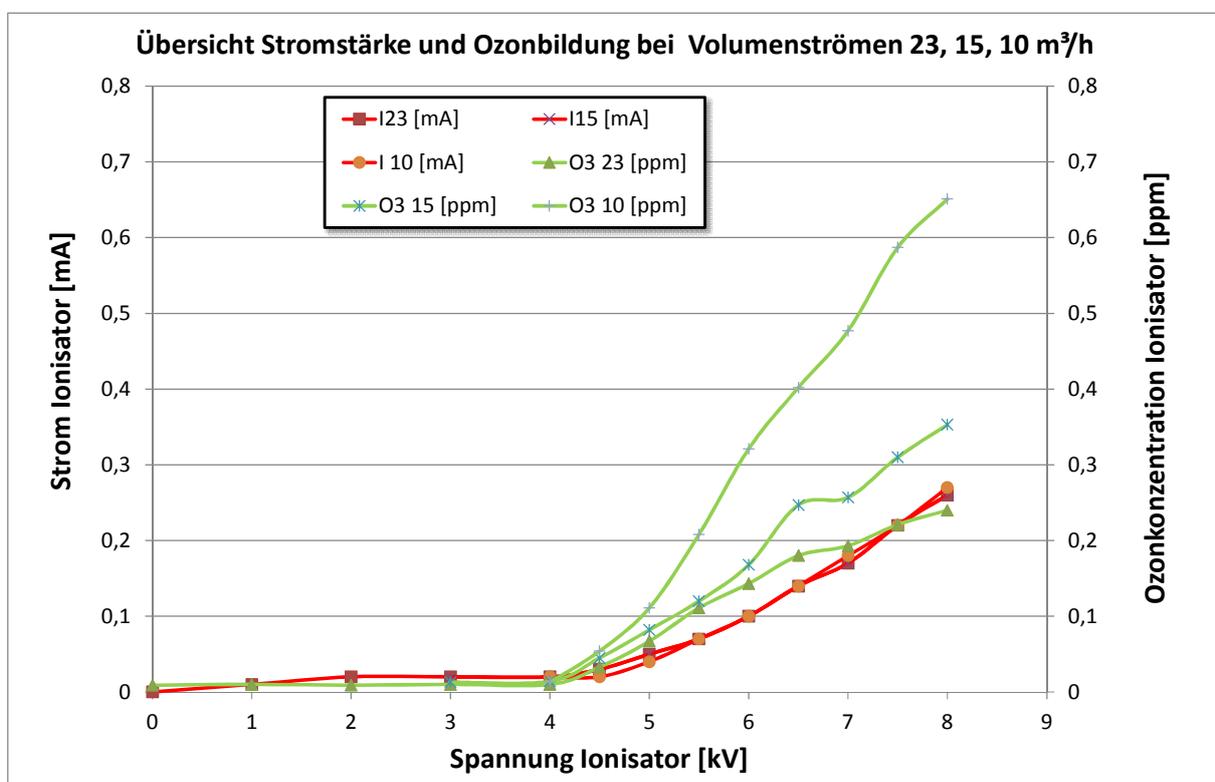


Bild 9: Ozonbildung Ionisator (Negatives Hochspannungspotential)
mit Stern $d=100 \text{ mm}$, Gegenelektrode $d=130 \text{ mm}$

Da zwar die Ozonbildung und die Ionenkonzentration korrelieren, jedoch der Faktor unbekannt ist, muss die erzeugte Ionendichte in einem weiteren Schritt direkt ermittelt werden. Zum Einsatz kam dafür zunächst ein eigener Versuchsaufbau, welcher im FuE Projekt „Druckluftsensor“ (FKZ: 308/04, Euronorm - BMWi) entwickelt wurde. Dazu wurde eine Messelektrode ca. 200 mm unterhalb der Ionisationselektrode installiert. Die Auswertung erfolgte mit einem Nano-Amperemeter der Fa. HP, Modell HP34401A. Das Gerät kann

Gleichströme ab 10 nA messen. Allerdings konnte in den Versuchen auch für den geringsten Volumenstrom kein Gleichstrom oberhalb der Bestimmungsgrenze von ca. 20 nA (Geräterauschen) ermittelt werden. Es muss damit festgestellt werden, dass die Eigenentwicklung zumindest in dieser Ausrüstungsvariante nicht für die Untersuchungen geeignet ist.

Um die Ionendichte verlässlich ermitteln zu können, wurde von der Fa. Holbach Umweltanalytik ein spezielles Ionometer, Modell IM 806v2 bezogen. Zur Messung im Trägerluftstrom nach dem Ionisator wurde eine sog. Ansaugverlängerung (Probenahmeanschluss zur Messung in geführten Luft-Volumenströmen installiert). Das Gerät zieht Probenluft in die Messkammer und wertet die enthaltenen Ladungen aus. Die Probenentnahme erfolgte wiederum in einer Ebene ca. 200 mm unterhalb der Ionisationselektrode. Es wurden mehrere Versuche mit verschiedenen Spannungen und Luftvolumenströmen durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bild 10 dargestellt. Das beschriebene Gerät wurde auch für die weiteren Ionendichtemessungen des FuE-Projektes eingesetzt.

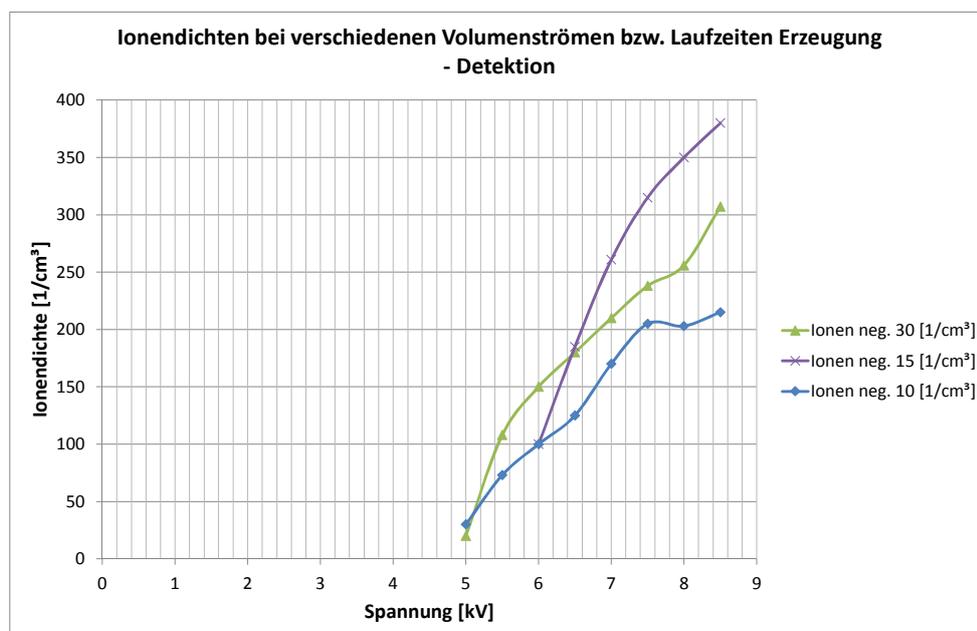


Bild 10: Bestimmung der Ionenkonzentrationen mittels Ionometer

Mit steigender Hochspannung steigt ebenfalls die Ionendichte an. Überraschend ist jedoch, dass die höchste Ionendichte nicht für den geringsten Volumenstrom von 10 m³/h erzielt wurde, sondern für den mittleren Volumenstrom von 15 m³/h. Dieser Zusammenhang ist im Bild 11 dargestellt. Es ist deutlich das Maximum der Ionenkonzentration beim mittleren Volumenstrom erkennbar.

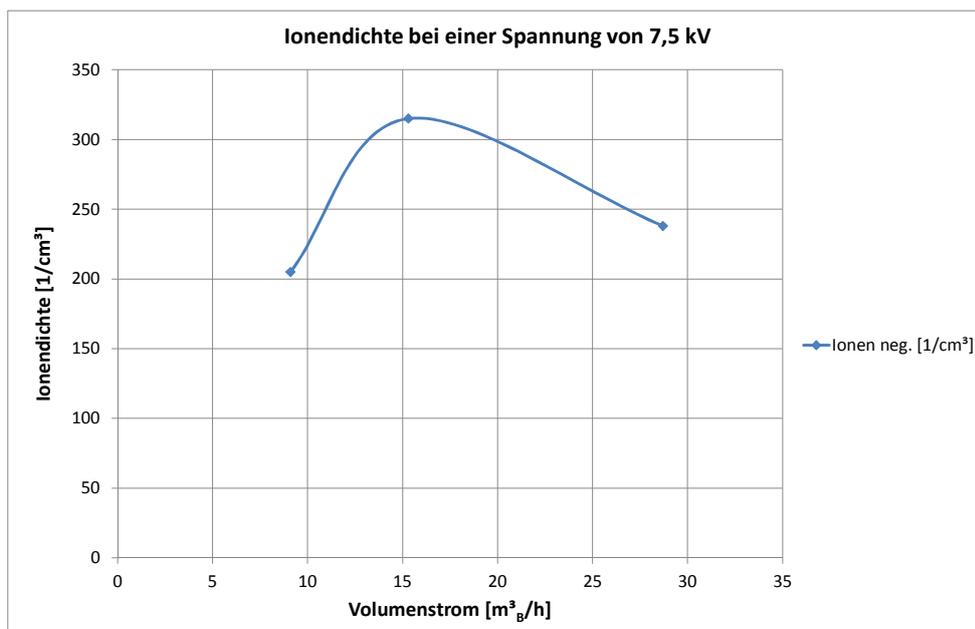


Bild 11: Zusammenhang Ionenkonzentration Trägerluftvolumenstrom

Die realisierte Ionenkonzentration des Ionisators war jedoch unzureichend. Es wurde davon ausgegangen, dass die Ursache vor allem in einer statischen Aufladungen des Versuchsaufbaus und der noch unzureichenden Ionisierungswirkung der Elektrode lag.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass mit diesem 1. Typ des Ionisators die Ionenkonzentration noch unzureichend war. Im Maximum wurden $3,0 \cdot 10^8$ Partikel/m³ gegenüber dem Sollwertniveau von $6 \cdot 10^{13}$ Ionen/m³ erzielt. Um den Zielwert zu erreichen wurden daher weitere Untersuchungen mit einem 2. Ionisortyp vorgenommen.

3.2.6 Erhöhung der Ionendichte

Bei direkt gegenüberstehenden Elektroden wird im direkten Feld zwar eine hohe Ladungsträgerdichte erreicht, jedoch kann es sein, dass durch das gleichzeitig starke Feld sich diese nicht in einen Abluftstrom ablenken und mitführen lassen. Daher wurde ein weiterer Ionisator aufgebaut und erprobt. Grundlage ist eine sog. bipolare Ionisationsröhre. Durch ein elektrisches Feld zwischen 2 durch eine Glaswand als Dielektrikum getrennten Elektroden und Entladung bildet sich ein nichtthermisches instabiles Gas-Plasma. Durch dieses werden an der Außenseite der Röhre Ionen freigesetzt, welche mit einem Luftvolumenstrom abgetragen werden können. Bei Erprobung der Röhre mit einer Wechsel-Hochspannung (50Hz) von ca. 3,2 kV wurden in einer Entfernung von ca. 4 cm eine hohe Ionenkonzentration von $1,15 \cdot 10^{12}$ Ionen/m³ (pos.) und $0,36 \cdot 10^{12}$ Ionen/m³ (neg.) festgestellt. Mit diesen Ergebnissen wurde das gesteckte Zielniveau nahezu erreicht.

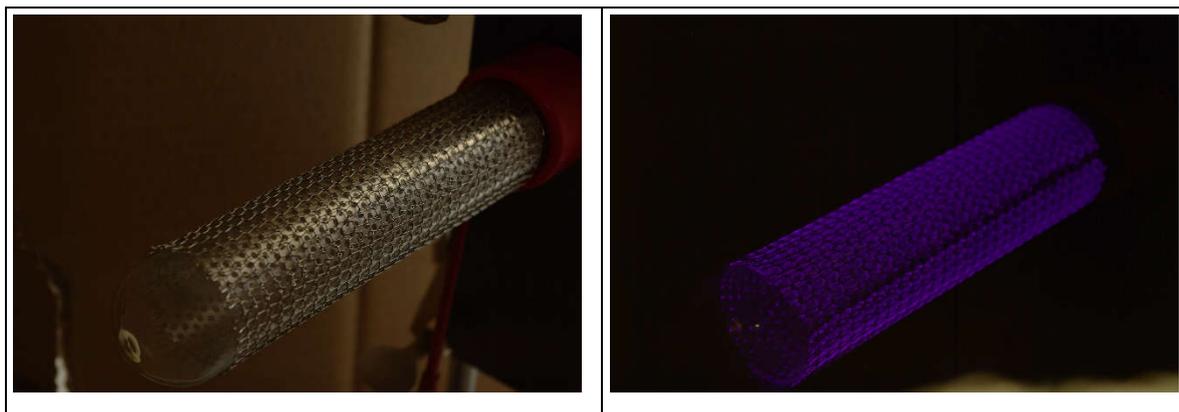


Bild 12: bipolare Ionisationsröhre (Fa. Bentax, Typ VTN,C 200 mm); li.: Erscheinungsbild, re.: Plasma der Röhre bei Betrieb (Langzeitbelichtung)

Weiterhin wurde die Ozon-Produktion des Ionisators ermittelt. Bei Probenahme in einem Abstand von ca. 1 cm aus dem Umfeld der betriebenen Röhre wurde eine Konzentration von 0,35 ppm ermittelt.

3.3 Versuche Ionisierungswirkung

Die weiteren Arbeitsschritte dienen der Feststellung, ob die Ionen über eine Strecke von ca. 0,5 m ohne relevante Verluste in einer Rohrleitung weiterbefördert werden können. Die Versuche dazu zeigten, dass die Rohrleitung zunächst metallisch sein muss, da anderenfalls statische Aufladungen durch mitgerissene Partikel zu einer sofortigen Anziehung und damit Verlust der Ionen führt. Bei den Versuchen wurde die unter Abschnitt 3.2.6 dargestellte Röhre und der vom Hersteller zur Verfügung gestellten Hochspannungseinheit in einen Klein-Versuchsstand integriert. Bei Betrieb der Röhre wurden verschiedene Volumenströme angelegt und am Ende der Rohrleitung im Abstand von 0,6 m die Ionenkonzentration ermittelt. Das folgende Diagramm im Bild 13 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen. Ausgehend von einer Ionenkonzentration von rd. $1,0 \cdot 10^{12}$ Ionen/m³ zeigte sich, dass es möglich ist, unter einem Verlust von ca. 60 % die Ionen in einer metallischen Rohrleitung (d=100 mm) über eine Wegstrecke von 0,6 m bei einer Geschwindigkeit der Trägerluft von ca. 1,1 m/s zu leiten. Dabei ist entscheidend, dass der Trägerluftvolumenstrom nicht zu niedrig gewählt wird, da offensichtlich die „Lebensdauer“ der Ionen auf Grund von Entladungseffekten begrenzt ist und damit zusätzliche Verluste entstehen.

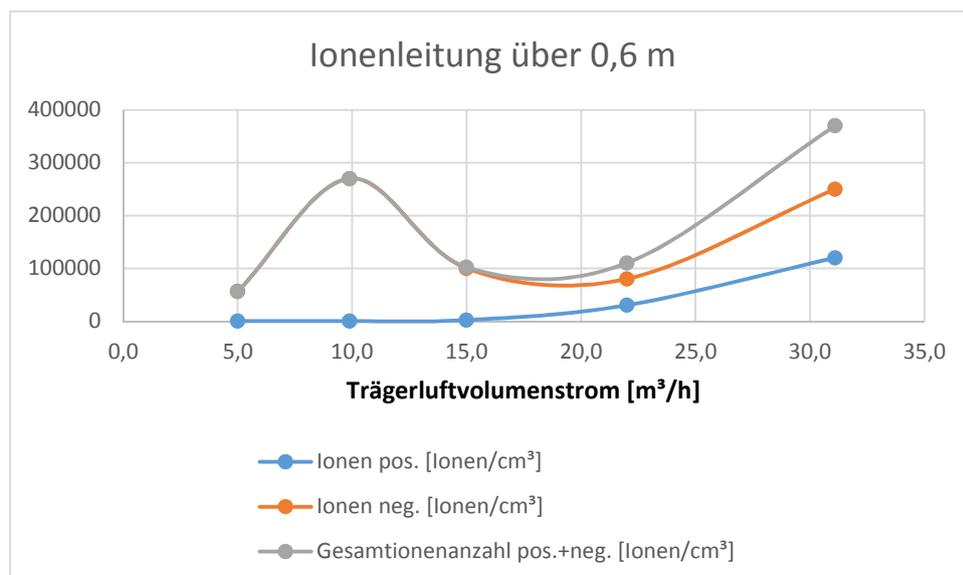


Bild 13: Ionenleitung

Damit kann zusammengefasst werden, dass für die Erzeugung und die Leistung der Ionen alle Zielkriterien erfüllt wurden.

Nach Abschluss dieser Arbeiten wurde als Zwischenschritt vor dem Übergang zu einem Versuchsmuster zunächst noch ein weiteres Labormuster zur Erstuntersuchung des Abscheideverhaltens gefertigt. In eine gerade Rohrleitung einer Länge von ca. 2 m wurde endständig die Ionisationsröhre sowie ein Lufteinlass angebracht. In einem Abstand von ca. 0,5 m wurde ein Aerosol-Einlass zur Aufgabe von Prüfaerosol angeordnet. In Strömungsrichtung danach wurde eine Messöffnung zur Bestimmung der Rohgaskonzentration angeordnet. In weiteren 20 cm Entfernung folgte eine Schüttschicht von V2A-Füllkörpern mit einer Schüttschichtdicke von 20 cm. In Strömungsrichtung folgend wurde nach dieser Abscheidestufe die Reingasmessstelle platziert. Als Prüfersosol diente Flammruß, welcher mittels eines spezial-Rußgenerators, der Fa. Jing ltd. hergestellt wurde. Die Partikelkonzentrationen im Roh- und Reingas wurden mittels SMPS-Systems Modell 3080 der Fa. TSI ermittelt, wodurch gleichzeitig auch das Partikelgrößenspektrum von 16 – 560 nm bestimmt werden konnte. Die Abscheideversuche erfolgten im Vergleich zwischen der Versuchsanstellung mit und ohne Betrieb des Ionisators wechselseitig im Roh- und Reingas (sehr gleichmäßige Dosierung). Bei den Versuchen mit einer Trägerluftgeschwindigkeit von ca. 0,1 – 0,2 m/s konnten an diesem Versuchsaufbau bereits Abscheidegrade im Bereich bis zu ca. 20 % ermittelt werden. Gleichzeitig wurde eine deutliche Agglomeration der Partikel festgestellt. Das Diagramm im Bild 14 zeigt diese Ergebnisse. Dabei ist bei allen Messungen übereinstimmend die Reduktion kleiner Partikel bei Zunahme größerer Partikel sowie für 2 von 3 Messungen der insgesamt positive Abscheidegrad zu erkennen.

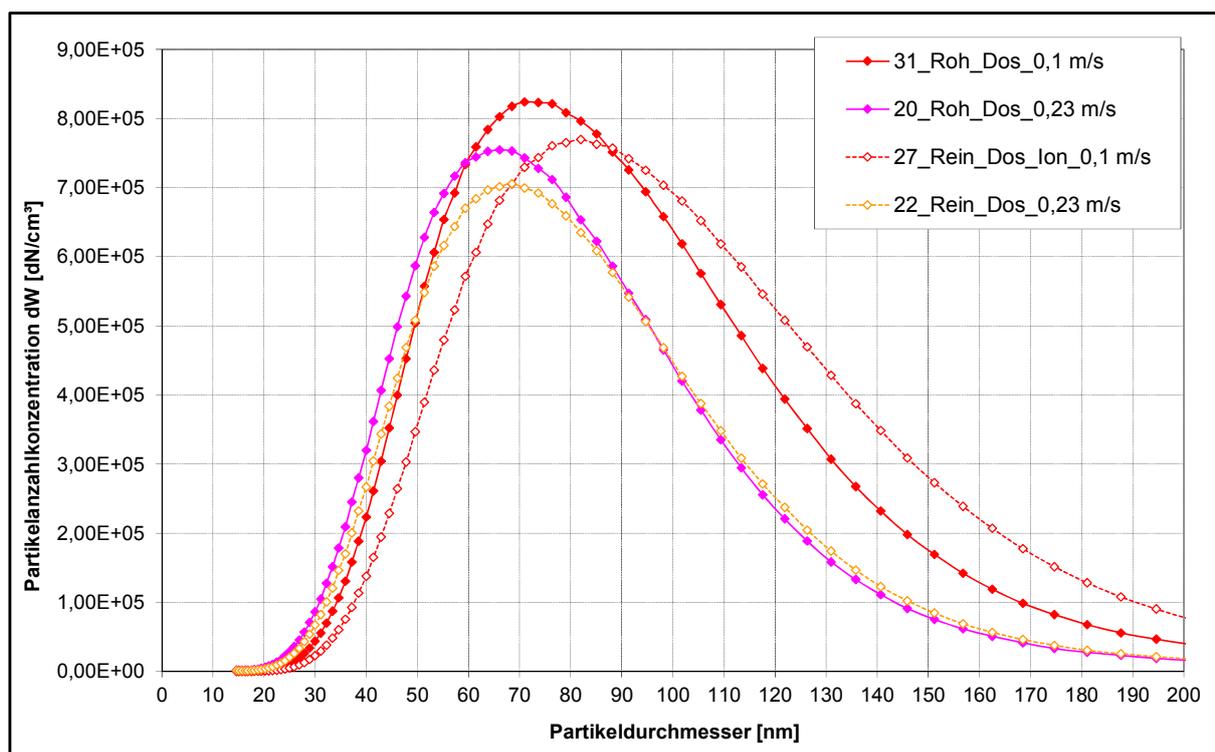


Bild 14: Partikelgrößenverteilung Labormuster

Auf Grund dieser positiven Entwicklungstendenz bei gegenüber der Auslegung sogar noch deutlich zu geringen Verweilzeiten, wurde davon ausgegangen, dass die Entwicklung fortgeführt werden kann.

3.4 Auslegung, Konstruktion Abscheider

Die angestrebte Entwicklung tangiert insgesamt aktuell verfügbare Geräte zur Reinigung und Ionisation von Raumluft. Sie werden eingesetzt, um ein gesundheitlich zuträgliches Raumklima herzustellen, indem aus einem Ionisator mittels Ionenwind die Ionenkonzentration in der Raumluft angehoben wird. Als Nebeneffekte wird die Luftreinigung sowie die Beseitigung von Gerüchen und Zigarettenrauch („Rauchverzehr“), teilweise i.V.m. HEPA-Filtern beschrieben (z.B. in [14] oder [15]). Ein direkter Einsatz in Abscheidern für Kleinfeuerungsanlagen ist bisher nicht bekannt.

Die Literaturrecherche zeigt, dass für die Konstruktion derartiger Geräte keine Normen oder Richtlinien bzw. allgemeingültige Auslegungskriterien verfügbar sind. Grundlage für die Arbeiten sowie das Verständnis bildet die VDI 3678 Bl. 1 (Entwurf) und Blatt 2. Die Richtlinie behandelt dabei vor allem die Abscheidung von Partikeln im elektrischen Feld, nimmt jedoch auch Bezug auf die Coronabildung und Ladungsträger Kinetik. Die DIN 44973-Teil 100 „Luftreiniger und Luftbefeuchter - Teil 100: Elektrische Haushaltsluftreiniger; Verfahren zur Mes-

sung der Gebrauchseigenschaften“ ist zwar seit Januar 2001 als Normen- Entwurf verfügbar, liefert jedoch keine neuen Erkenntnisse und nimmt Bezug auf die Evaluierung der Geräte.

Für den Abscheider wurden 2 Varianten konzipiert. Hauptmerkmal und gleichzeitig Unterscheidungsmerkmal der beiden Varianten ist die Baugruppe der Abscheidung in Verbindung mit der Abreinigung. Die Variante 1 ist im folgenden Bild 15 links dargestellt. Bei dieser Variante findet die Abscheidung der geladenen Staubteilchen in einer Schüttung aus V2A - Füllkörpern statt. Diese bilden ein strömungstechnisches Labyrinth in welchem die Teilchen auf Grund der hohen Auftreffwahrscheinlichkeit abgeschieden werden. Die Abreinigung der beladenen Schüttung kann mittels mechanischer oder thermischer Regenerierung vorgenommen (vgl. Abschnitt 3.12). In der 2. Variante (rechts) wird die Füllkörperschüttung durch eine Trommel aus Lochblech ersetzt. Die Abscheidung erfolgt hierbei auf dem Blechkörper. Positiv an der Variante ist die Möglichkeit eine einfache mechanische Reinigung durch Drehen der Trommel bei gleichzeitigem Anliegen einer Bürste zu realisieren. Nach Abwägung aller Vor- und Nachteile wurde die Variante 1 für die Umsetzung ausgewählt und wird weiter verfolgt.

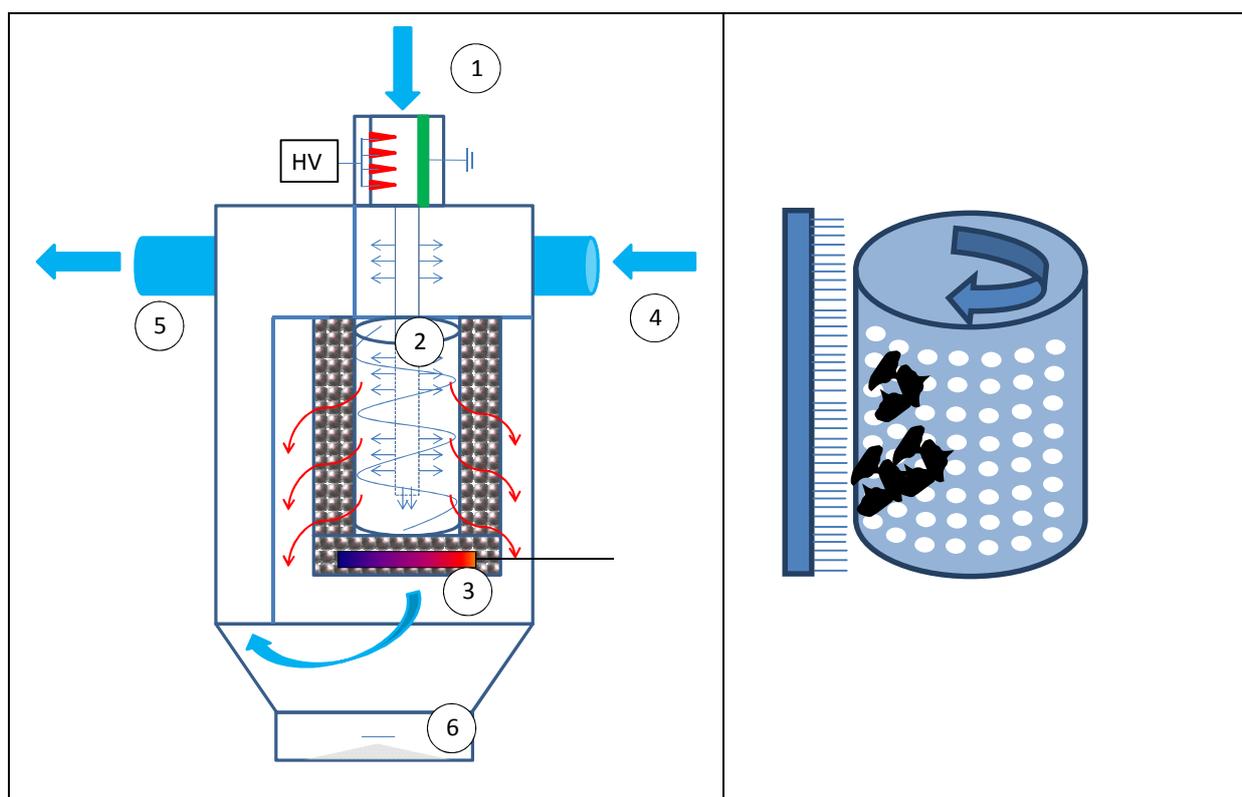


Bild 15: Konzeption Abscheider – Varianten 1-links und 2-rechts

Wird von einer für die Ladung und Durchmischung des Rohgases notwendigen Verweilzeit von $t = 8$ s bei guter Durchmischung ausgegangen (vgl. [16]), so ist bei dem typischen Abgasvolumenstrom eines Kamins von $\dot{V} = 30 \text{ m}_B^3/\text{h}$ und einem Trägerluftvolumenstrom von

$\dot{V} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgegangen, so ist nach Gleichung (1) ein Volumen von $V = 0,089 \text{ m}^3$ notwendig.

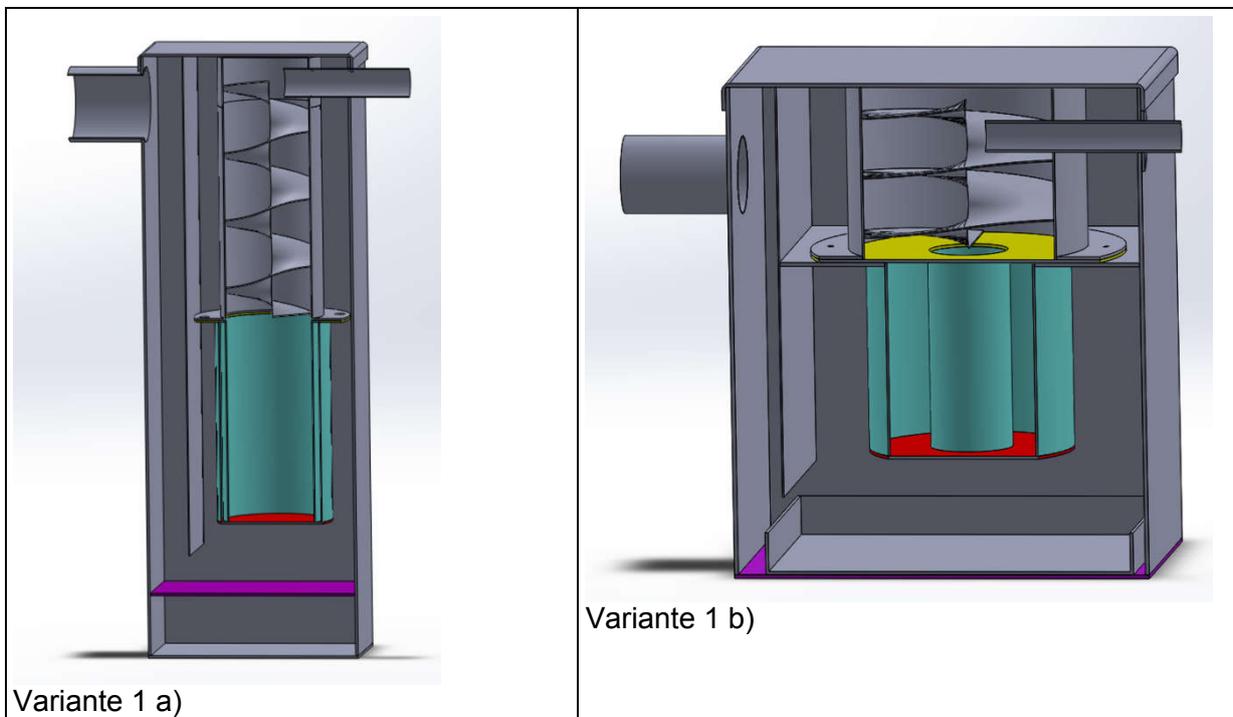
$$V = \dot{V} * t \quad (1)$$

Da weiteres Volumen zur Ladung der Partikel mittels Ionen in der Abscheide-Baugruppe vorhanden ist, wurden die Hauptabmaße der Rohgas – Mischkammer wie folgt geplant:

- Höhe: 500 mm,
- Breite: 400 mm,
- Tiefe: 400 mm.

Aus der Variante 1 wurden weitere 3 Untervarianten a),b) und c) konzipiert. Diese sind im Bild 16 dargestellt.

Allen Varianten gemeinsam ist eine Eintrittskammer, in welche das Rauchgas sowie der Ionenstrom eintritt, sich beide vermischen und die Partikel geladen werden. Bei den Varianten a) und b) wird für den beengten Staubraum ein Spiralblech angeordnet, um die Verweilzeit für den Ladevorgang zu vergrößern. Diese sehr aufwendige Konstruktion kann jedoch eher Gegenstand einer 2. Projektphase sein, um den Abscheider selbst zu entwickeln. Zur Untersuchung des neuen Abscheideprinzips wurde die Variante 1 c) für die Umsetzung ausgewählt.



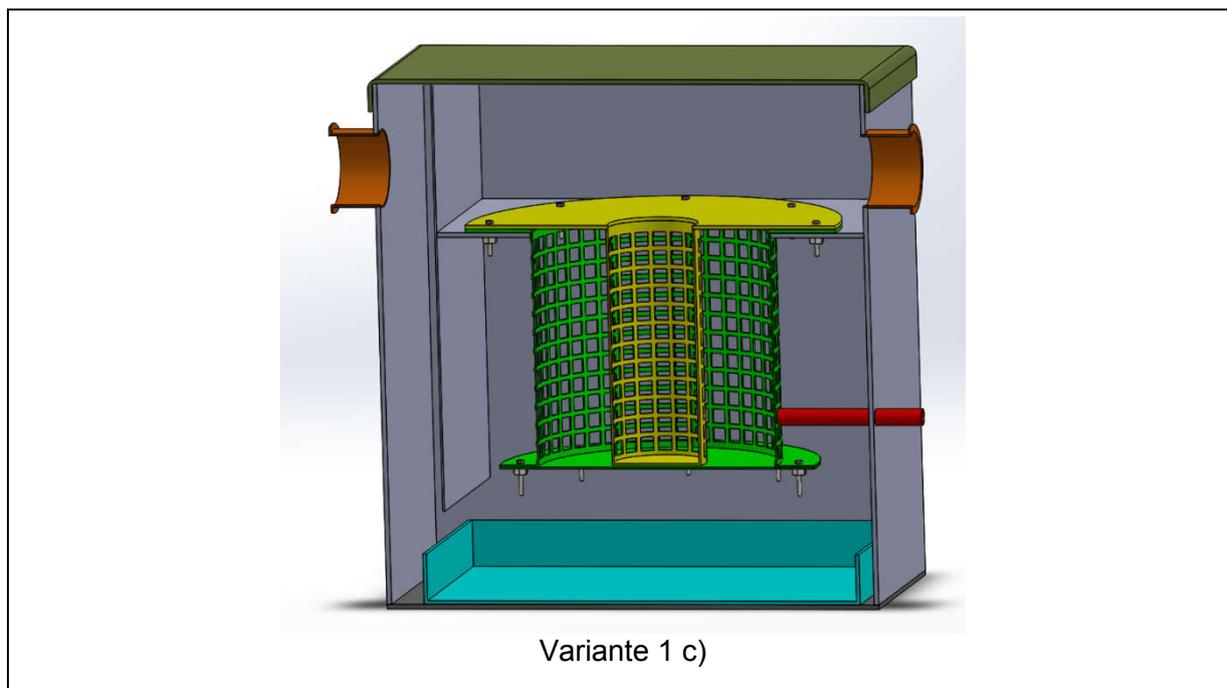


Bild 16: Varianten Abscheider

Auf Grundlage der festgelegten Hauptabmaße wurde von Lehmann UMT eine Detailkonstruktion unter der Maßgabe kostenminimierender Fertigungslösungen erarbeitet. In allen Varianten dient ein Deckel zur Montage und Einbringung der inneren Ausrüstungen. Mit der Konstruktion gelingt es, auf Grund des Rauminhaltes der Eintrittskammer eine Verweilzeit von 9 s zu realisieren. Die Einbringung der Ionen erfolgt direkt in das Verbindungsstück zur Feuerstätte. Damit wurde der Zielparameter einer günstigen Strömungsführung um die erforderliche Verweilzeit für die Diffusionsaufladung von ca. 10 s zu gewährleisten mit der Konstruktion erfüllt.

3.5 Komponentenlisten

Von Lehmann UMT wurde auf Grundlage der verfahrenstechnischen Anforderungen eine Komponentenliste erstellt. Die Zusammenfassung dieser Liste ist in Anlage 1 enthalten. Hierin sind insbesondere die Werkstoffanforderungen in Verbindung mit den möglichen Fertigungsverfahren essentiell. Unabhängig von der Konstruktion bildete diese Liste auch eine Schnittstelle der Arbeiten beider Projektpartner.

3.6 Gestaltung der Abscheideeinheit, Abreinigung und des Staubaustrags

Um wie geplant eine Schüttung metallischer Füllkörper verwenden zu können, musste eine äußere Einfassung der losen Einzelteile erfolgen. Dies wurde durch einen Metallkorb erreicht, welcher zum einen temperaturbeständig ist und zum anderen die Gestaltung mit einer möglichst großen Maschenweite erlaubt, um den Strömungswiderstand gering zu halten. Der

Korb kann von oben in den Abscheidergrundkörper eingesetzt und auf dem Halteboden des montiert werden. Im Bild 16 nicht dargestellt, sind die Schüttkörper sowie ein Schwert am inneren Deckel des Korbes, welches in die Füllkörper eintaucht, damit an der Oberseite durch Zusammenrutschen der Füllkörper sich keine Kurzschlussströmung zwischen Roh- und Reingasseite bilden kann.

Als Füllkörper wurde der Typ „Interpak“ aus V2A der Fa. VFF verwendet. Diese weisen ein großes Oberflächenverhältnis auf, um ebenso möglichst viele Impaktionsflächen zu schaffen und sind thermisch und chemisch beständig.

Für die Abreinigung wurden 2 Varianten untersucht:

- mechanisch
- thermisch

Zum einen kann ein solcher Korb mechanisch bewegt werden, um beim Aneinanderreiben der Füllkörper den anhaftenden Staub abzulösen. Allerdings sind dafür erhebliche Kräfte notwendig. Allein die für die Abscheidung erforderliche Füllkörperschüttung wiegt ca. 6 kg. Diese sowie der Korb mit weiteren ca. 4 kg müssten mit einer großen Beschleunigung auf- und ab bzw. rotierend bewegt werden, um ein Gleiten der Füllkörper zu erreichen. Eine Nocken-Konstruktion könnte den Korb langsam anheben und dann schlagartig fallen lassen. Das Herabfallen könnte mittels einer Feder unterstützt werden.

Für die thermische Variante der Abreinigung wurde eine Zündung der stark kohlenstoffhaltigen Stäube auf den Füllkörpern mit elektrisch beheiztem Element vorgesehen und mit einem weiterführenden, eigenständig stattfindenden Glimmabbrand gerechnet. Eingesetzt werden kann dafür z.B. ein für Pelletskessel typisches Glüh-Zünderlement (z.B. der Fa. Rauschert) mit einer Leistung von 165 W.

Die mechanische Lösung der Problemstellung wird in jedem Fall zu entsprechend starken Geräuschen und Schallemissionen führen, wird ökonomisch gesehen schwieriger zu realisieren sein und ist daher benachteiligt. Auch wenn die mechanische Variante der Abreinigung doch lösbar erscheint, wurde die thermische Variante vorgezogen und eingehender untersucht.

Über ein Halterohr, welches vom äußeren des Abscheiders in den Drahtkorb hineinragt, kann das Zünderlement eingebracht werden.

Die Zündtemperatur von Ruß liegt bei ca. 620°C. Diese Temperatur muss in einem Umfeld von ca. 2 cm³ in der Schüttschicht erreicht werden um den Rußabbrand über die gesamte

Schüttschicht in Gang zu setzen. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist diese Initialzündung am unteren Rand der Schüttschicht durchzuführen, da die heißen Gase weiter nach oben steigen werden. Der Vorgang sollte bei warmen Gerät und Durchleitung von Luft nach Erlöschen der Flamme erfolgen, um ein ausreichend hohes Sauerstoffangebot für die Glühfront zu sichern. Zum Einsatz kam das Glühelement, wie es im Bild 17 dargestellt ist.



Bild 17: Glüh- Zündelement 165 W, Fa. Rauschert

Mit einer Leistung von 165 W, wird gemäß Gleichung (2) für ein Volumen von 2 cm³ in dem sich Luft und Stahl (Füllkörper) gemeinsam befinden eine Zeit von 120 s benötigt, um die Stoffe von 20°C auf 620°C zu erwärmen.

$$m_{\text{Luft}} = 2,55 \text{ g} = 0,00255 \text{ (Luft)}$$

$$m_{\text{Stahl}} = 20 \text{ g} = 0,02 \text{ kg (Stahl)}$$

$$c_{\text{Luft}} = 1,005 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_{\text{Stahl}} = 0,452 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta\vartheta = 600 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\vartheta}{P} \quad (2)$$

Dabei wird das Glühelement in das Hüllrohr des Durchmessers 18 mm eingesetzt. Das Hüllrohr dient als mechanischer Schutz und zur Einleitung erwärmter Luft in den Zündbereich. Diese Luft wird durch ein Stützgebläse oder auch durch Nachströmung auf Grund des Unterdrucks im Abgassystem gefördert. Auf Grund des noch am Abscheiderausgang herrschenden Unterdrucks von ca. 12 Pa (Anforderung Abgasweg) wird bei der Auslegung von der Nachströmung auf Grund des Unterdrucks ausgegangen.

Für den Staubaustrag wurde unterhalb der Abscheideinheit ein Schubkasten angeordnet, in welchen der abgereinigte Staub fällt und vom Anwender wie bei einem Aschekasten im Kamin entnommen werden kann.

3.7 Fertigung Abscheider-Versuchsmuster

Für die unter Abschnitt 3.4 konzipierte Abscheidervariante 1 c) wurde von Lehmann UMT GmbH eine Detailkonstruktion erarbeitet und später alle Einzelteile gefertigt. Mit Blick auf eine Herstellung der Einzelteile aus Blech der Güte 1.4301 und ST 37 mittels Laserschneidverfahren wurde insbesondere die Wichtung auf eine materialsparende Schachtelung der Einzelteile für Normtafeln (z.B. Großformat 1.500 x 3000 x 1 / 2 mm) gelegt.

Weiterhin wurde die Konstruktion so bemessen, dass durch den Einsatz einer CNC-Kantmaschine möglichst viele Bleche in Folge gefertigt werden können und dazu wenig Rüstzeit (Umspannen Blech / Prismen) gebraucht wird. Die Auslegung der Einzelteile erfolgte mit dem Ziel, bei der Fertigstellung auch so wenig wie möglich Wärme in das Blech durch Schweißen zu bringen. Hier wurde Wert auf eine verzugsfreie Fertigung bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieeinsatzes gelegt. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Abdichtung der Fügekanten mit Hochtemperatursilikon, die den Einsatzzweck voll erfüllt (vgl. Bild 18).



Bild 18: gefertigtes Abscheider-Versuchsmuster

Die Hauptabmessungen des entwickelten und hergestellten Versuchsmusters des Filtermoduls betragen 530 x 478 x 600 mm. Der Einsatz kostenminimierender Fertigungslösungen als Zielkriterium des Meilensteins wurde erfüllt. Die Preiskalkulation für die Herstellung des Grundkörpers mit Abscheideeinheit betragen 400 € für die Serienproduktion (Fertigungskalkulation Lehmann UMT).

3.8 Versuchsstand Abscheider, Untersuchungsmethodik

Um an dem Abscheider Untersuchungen vornehmen zu können, wurde dieser in einen Versuchsstand integriert. Dieser stellt die notwendige Luftmenge über Saugbetrieb ein. Im Abscheider befindet sich somit, wie auch in der Abgasleistung, ein stetig ein Unterdruck. Enthaltene Aerosol – Reste werden wirksam abgeschiedenen, so dass die Umgebung nicht

mit Partikeln aus den Versuchen belastet wird. Der Luftvolumenstrom durch den Abscheider kann mittels einer Nebenluftklappe und 2 stufiger Ansaugleistung variiert werden. Messtechnisch erfasst werden können vor allem die Reingas- und teilweise die Rohgaskonzentrationen. Erste Untersuchungen wurden unter der Messung sowohl der Roh- als auch der Reingas- und teilweise der Rohgaskonzentration durchgeführt, um auch den Effekt des Gerätes, ohne Ionenaufgabe untersuchen zu können. Für die Untersuchung des Effektes der Ionisierung wurde nur die Reingas- und teilweise der Rohgaskonzentration jeweils mit und ohne Ionisierung gemessen. Damit ist die Bewertung des Effektes gewährleistet und alle übrigen Randeffekte haben keinen Einfluss. Auch eine Verdünnung durch Leckagen ist für die Messungen mit und ohne Abscheider gleich. Um das abscheidetechnische Verhalten als wichtigstes Kriterium untersuchen zu können, wurden verschiedene Prüfaerosole verwendet:

- DEHS (Diethylhexylsebacat), Partikelgrößenmaximum bei ca. 0,2 – 0,3 μm ,
- Flammrußaerosol (Partikelgrößenmaximum bei ca. 100 nm).

Als Aerosolgeneratoren dienten ein ATM 225 der Fa. Topas für DEHS) sowie das Modell RSG miniCAST Modell 4202 der Fa. Jing Ltd.

Insbesondere das Flammrußaerosol wird dabei als besonders realitätsnah eingeschätzt, da es sowohl in Zusammensetzung, Partikelgrößenverteilung, aber auch Art der Erzeugung sehr gut mit dem Realfall vergleichbar ist. Durch die hohe Gleichmäßigkeit beider Dosierer sowie des Volumenstroms können auch bereits geringe Effekte ermittelt und beurteilt werden. Daher wurden auch keine direkten Versuche mit einem Kamin durchgeführt, da hier die Streubreiten und Einflussfaktoren wesentlich größer sind. Die Versuche mit dem Flammrußaerosol ersetzen diese.

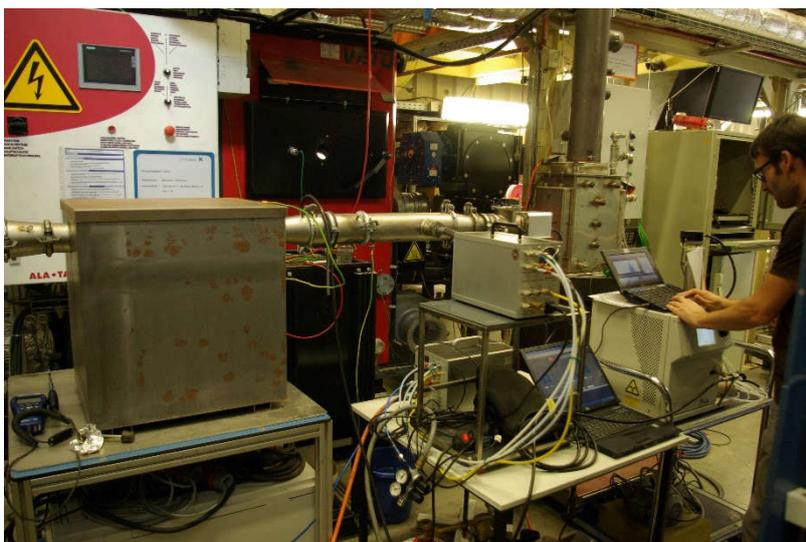


Bild 19: Versuchsstand mit Versuchsmuster im Betrieb

Die Messung des Partikelgrößenspektrums sowie der Partikelanzahlkonzentration erfolgten wie in den Untersuchungen des ersten Versuchsaufbaus zur Abscheidung mit dem SMPS-Systems Modell 3080 der Fa. TSI. Die Verifizierung der Ionenkonzentration erfolgte wiederum mittels Ionometer, Modell IM 806v2 der Fa. Holbach Umweltanalytik. Strömungsgeschwindigkeit und Druckverhältnisse wurden mit dem Multifunktionsgerät TSI VelociCalc 9565-P mit thermischen Anemometer und Drucksensoren bestimmt.

3.9 Untersuchungen zum Verhalten des Versuchsmusters

3.9.1 Abscheidegrad

Die Untersuchungen des Versuchsmusters wurden mit dem Ionisator typ „Röhre“ begonnen. Dabei wurde zunächst für den Abscheider mit Strömungslabyrinth (ohne Ionisierung) ein Abscheidegrad von 36,5 % gegenüber Flammruß ermittelt. Weiterführend wurden Versuche mit Ionisation durchgeführt. Das Bild 20 zeigt die Untersuchungsergebnisse für einen Volumenstrom von ca. 20 m³/h mit aktiviertem Ionisator. Die Anordnung weist einen Abscheidegrad von 38,7 % auf.

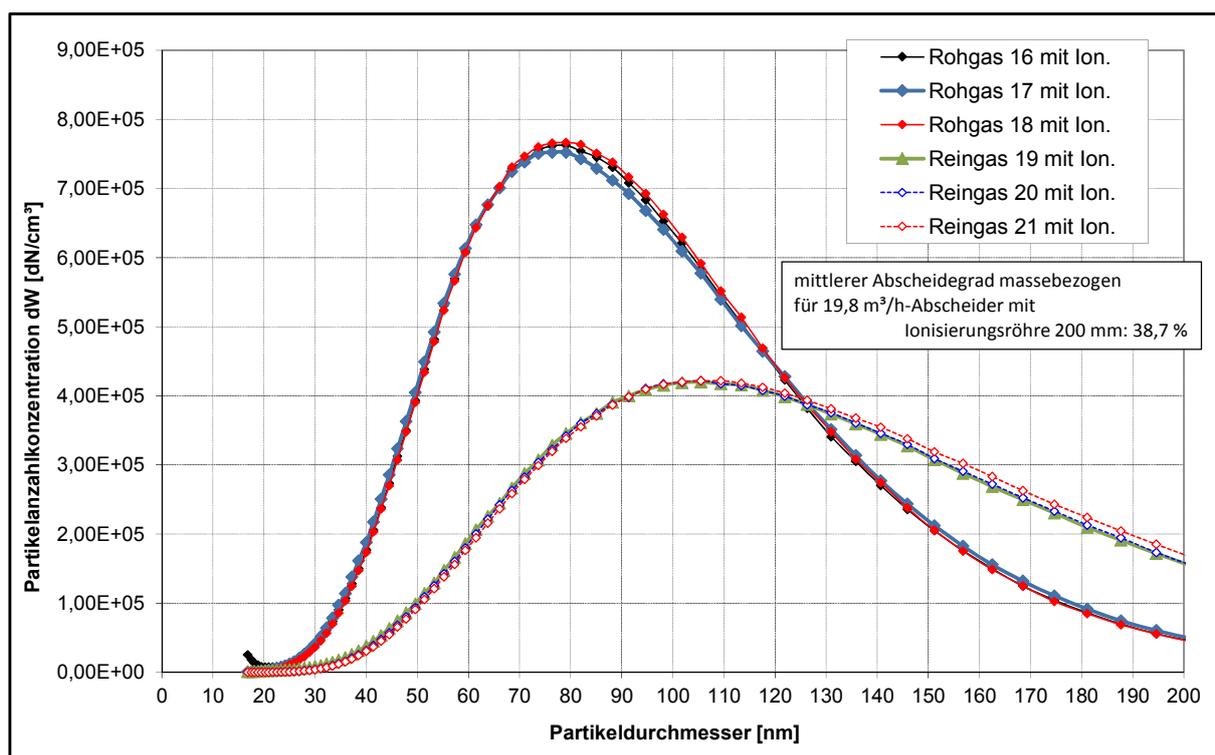


Bild 20: Abscheidegrad Abscheider mit Röhren-Ionisator (l=200 mm)

Diese nur geringe Erhöhung der Abscheideleistung durch die Ionisierung wurde darauf zurückgeführt, dass zum einen die produzierte Ionenanzahl selbst zu gering ist, zum anderen gegenüber den ersten Untersuchungen mit dem Versuchsaufbau doch zu viele Ionen auf der Leitungsstrecke (an der Wand) neutralisiert wurden. Daher wurde eine zweite Röhre gleichen Typs, aber der Länge 450 mm erprobt. Bei gleichem Durchmesser und Art der Röh-

re kann der Faktor der Verlängerung gleichzeitig als Maß der Erhöhung der Ionenanzahl dienen. Die Überprüfung der Ionenanzahl, welche den Abscheider erreicht ergab, dass auch damit die Zielkonzentration für einen Volumenstrom von 28 m³/h mit 3,6*10¹⁰ Ionen/cm³ (neg.) und 1,4*10¹¹ Ionen/cm³ (pos.) nicht erreicht wurde. Auch mit dieser Verbesserung des Ionisators wurde keine deutliche Verbesserung der Abscheideleistung erreicht.

3.9.2 Agglomerationsverhalten

Bei Aktivierung des Ionisators kann zudem eine Agglomeration der Partikel, im Reingas von ca. 14 nm (entspricht ca. 20 % Vergrößerung) festgestellt werden. Dies kann auf die Bildung der bipolaren Ionen mit der diesem Ionisatortyp zurückgeführt werden. Der Effekt ist im Bild 21 sowie Bild 22 als negativer Fraktionsabscheidegrad erkennbar.

In der Versuchsanstellung werden die nach einer Wegstrecke von ca. 0,4 m mit dem Rußaerosol in Kontakt gebracht und passieren nach ca. 0,2 m die Rohgasmessstelle. Hier ist eine Erhöhung der Partikelanzahl, vor allem im Partikelgrößenmaximum bei ca. 80 nm festgestellt worden. Es ist möglich, dass durch die negativen Sauerstoffionen auch Aerosole gespalten werden und so die Partikelanzahl erhöht wird, ohne die Gesamtmasse zu verändern. Diese Effekte sind im Bild 21 zusammengefasst dargestellt.

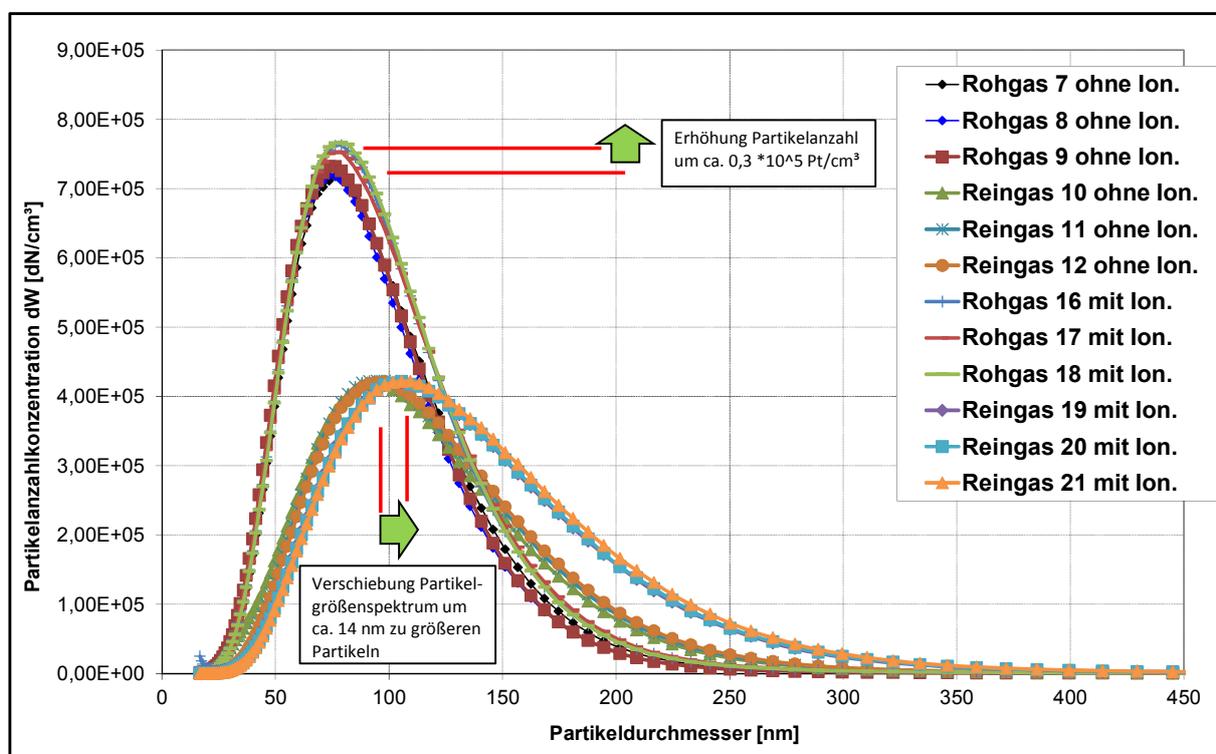


Bild 21: Agglomerationverhalten mit Ionisatortyp Röhre

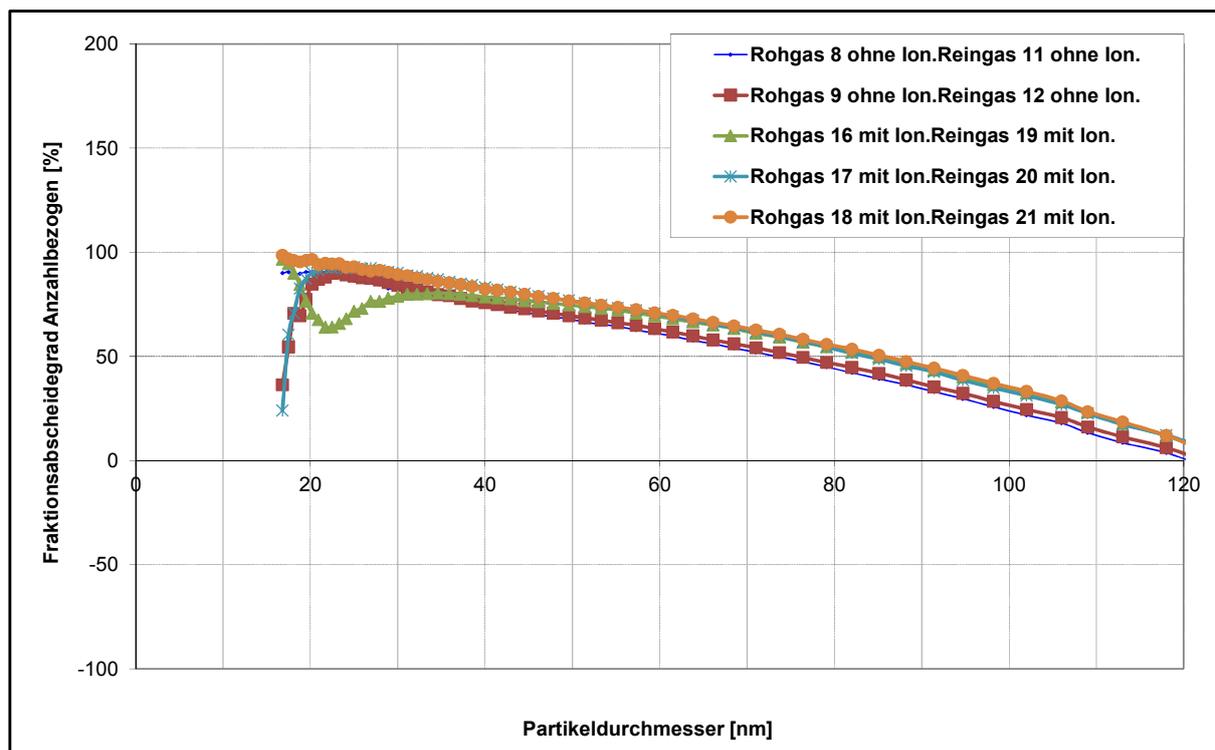


Bild 22: Fraktionsabscheidegrade

Insgesamt bestätigt sich ein positiver Einfluss bei bipolarer Ionisation auf das Agglomerationsverhalten der Partikel.

3.10 Notwendige technische Änderungen

Eine Möglichkeit für die zu geringe Abscheideleistung mit dem Röhrentyp-Ionistaor konnte sein, dass auf Grund der Bipolarität des Röhrenionisators die Partikel zu gering geladen werden, ein weiterer die zu geringe Ionendichte. Trotz Überschusses positiver Ladungsträger kann ein selbst regelnder Effekt auftreten, dass bereits geladene Partikel die Ladung annehmen, welche sie neutralisiert und bei einem Überschuss dieser Ladungen diese wiederum abstößt, so dass sich diese Form der Ladung eher zu einem Ladungsgleichgewicht, als zu einem deutlichen Ladungsbetrag einer Polarität führt (vgl. Bild 28, Anlage 2).

Daher wurde ein weiterer Ionisortyp entwickelt, welcher auf einer negativen, unipolaren Ladungsträgererzeugung basiert und eine höhere Ladungsträgerdichte erzeugt. Die Ionenabgabe wurde dabei auch mit einem anderen Gerätetyp für geringste elektrische Ströme (Typ MV40 DC Milli-Picco-Meter von Präcitronic) geprüft, um die Arbeitsweise des Ionometers zu verifizieren. Die Sprühelektrode des Ionisators hat dabei einen Umfang von 100 mm und weist 16 in Richtung des notwendigen Sprühstroms zeigende Spitzen auf (Fertigung: Lehmann UMT). Für eine angelegte Hochspannung von 9,5 kV wurden mit einer Charge-

Plate Messelektrode im Abstand von 20 cm die Ionen aufzufangen und ein Sprühstrom von 55 nA ermittelt. Die Versuchsanstellung ist im Bild 23 dargestellt.

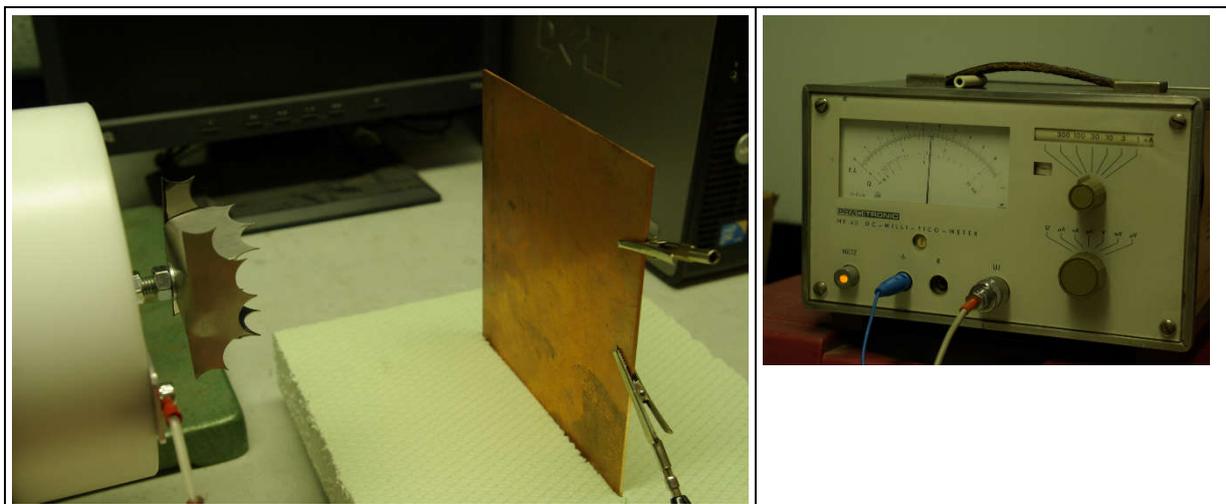


Bild 23: unipolarer Ionisator

Der Ionisator wurde am Abscheider angebracht und die dort entstehende Ionenkonzentration in Abhängigkeit von der angelegten Hochspannung sowie dem Luftvolumenstrom ermittelt. Das Bild 24 zeigt diese Zusammenhänge in 2 Diagrammen. Dabei wird deutlich, dass der Zielwert der Ladungsträgeranzahl von $1 \cdot 10^{12}$ Ionen/m³ mit Hochspannungen von 16–17 kV bei 20 m³/h nahezu und bei etwa 50 m³/h vollständig erreicht wurde.

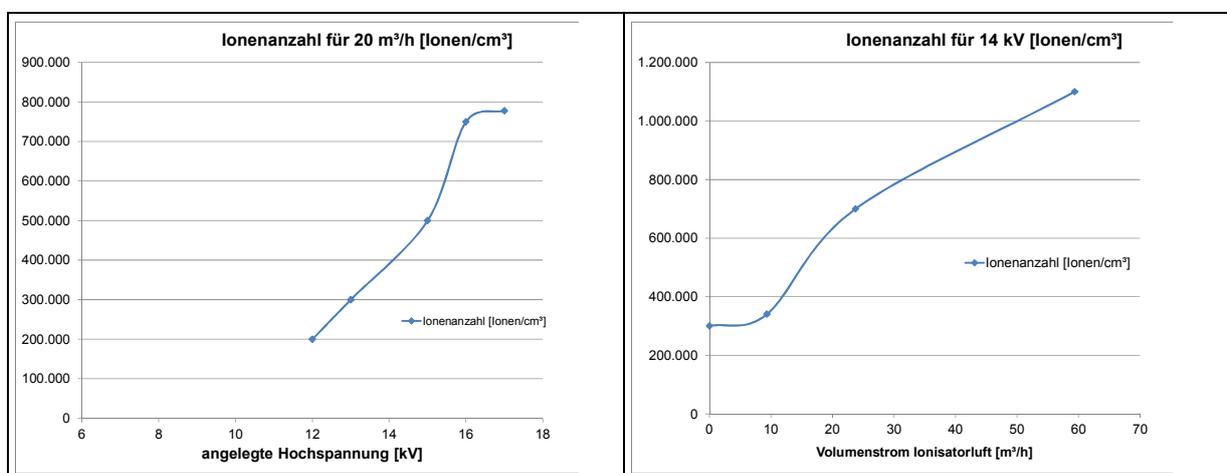


Bild 24: Ionisationselektrode, Abhängigkeiten der Ionendichte

3.11 Abscheideversuche mit optimiertem Ionisator

Die erneuten Versuche zur Abscheideleistung der Versuchsanordnung mit optimierten Ionisator und Gesamtabscheider bei Dosierung von DEHS-Aerosol zeigten zwar eine erfolgreiche Verbesserung Abscheideleistung im Bereich von 7,5 % (bei 20 kV, 15,5 m³/h) bis 21,5 % (bei 24 kV, 11,6 m³/h), jedoch blieben diese Ergebnisse hinter den Erwartungen zurück. Die erstellten Diagramme zur Partikelgrößenverteilung sind in Anlage 3, Bild 29 enthalten.

Es ist möglich, dass sich die Partikel bei dieser „freien“ Diffusionsladung deutlich weniger, als bei dem gleichen Prozess in einem elektrischen Feld aufladen lassen. Die Aufladungsgrenze eines Partikels als Vielfaches der Elementarladung (e) wird beschrieben mit Gleichung (3):

$$n_L = \frac{d_P^2 * E_L * \pi * \epsilon_0}{e} \quad (3)$$

Dabei ist d_P der Partikeldurchmesser, E_L die Oberflächengrenzfeldstärke, ab der eine spontane Emission der Ladungsträger einsetzt sowie ϵ_0 die elektrische Feldkonstante.

Bei einem Partikel der Größe 100 nm sind daher 425 Elementarladungen möglich.

Somit konnte zwar das Teilziel erreicht und die Wirksamkeit des Abscheideeffektes nachgewiesen werden, jedoch ist der Effekt nur von verhältnismäßig geringer Wirkung gegenüber dem notwendigen apparatetechnischen Aufwand. Unter Einbeziehung des Abscheidegrades vom Abscheidergrundkörper (vgl. Abschnitt 3.9.1) von 36,5 % wird somit ein Gesamt-Abscheidegrad von 58 % im Optimalfall erreicht.

3.12 Versuche Abreinigung

Die Abreinigung soll vorzugsweise durch Abbrand der Rußschicht in der Füllkörperschüttung realisiert werden. Effektiv und möglich wäre auch eine Abreinigung durch Rütteln, was jedoch mechanisch aufwendig und damit vergleichsweise teuer ist. Im Projekt gelang der Nachweis der Abreinigung durch Abbrennen. In mit Ruß beladene Füllkörper wurden das im Abschnitt 3.6 vorgestellte Zündelement eingebracht und Abreinigungsversuche durchgeführt. In einem Abstand von ca. 2 cm oberhalb des Zündelements wurde die Temperatur mittels Thermoelement-Sensor bestimmt und durch Wärmebildaufnahmen die Temperaturverteilung sichtbar gemacht. Das Bild 25 zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf am Thermoelement, Bild 26 die Auswertung der Wärmebildaufnahmen.

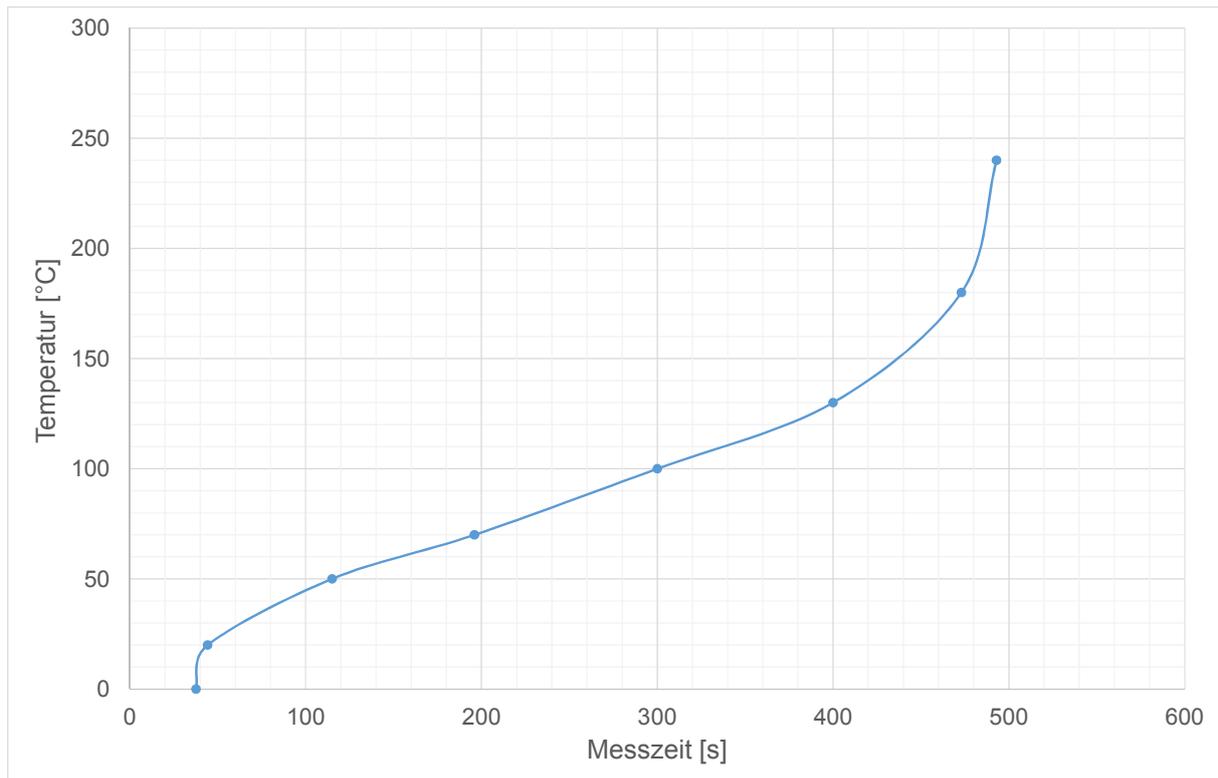


Bild 25: Temperaturkurve bei der thermischen Abreinigung

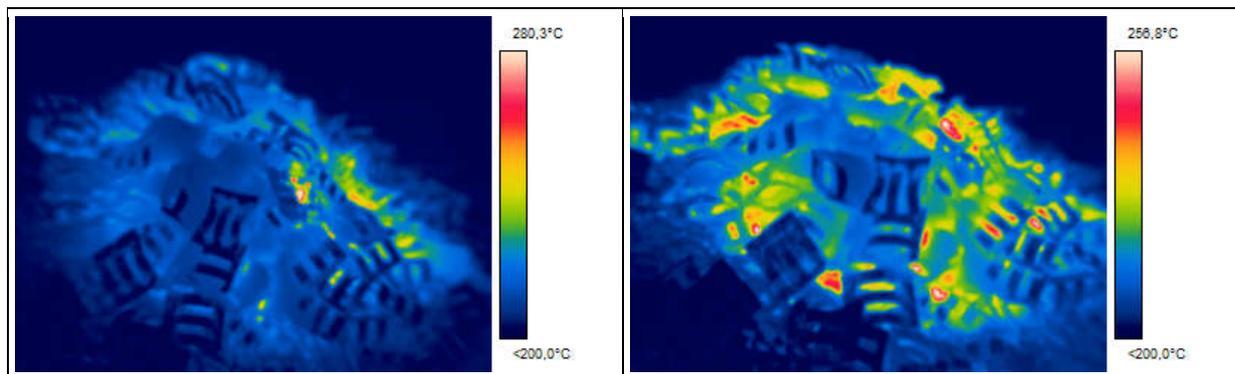


Bild 26: Wärmebildaufnahmen thermische Abreinigung (li.: nach 100 s Glühdauer, re.. nach 400 s Glühdauer)

Deutlich erkennbar dabei ist die vergrößerte Steigung der Kurve ab ca. 450 s. Ab hier ist die Aktivierungsenergie groß genug, so dass der Rußabbrand selbst beginnt und eine gewisse Wärmeenergie freisetzt. Optisch war ein Verglühen der Ascheschicht zu beobachten, wobei sich diese von schwarz in grau verfärbte und ihr Volumens deutlich abnahm. Das Bild 27 zeigt den Vorgang der Rußentzündung und des Abbrennvorgangs.



Bild 27: Glühfronten der Abreinigung durch Abbrennen

Der Nachweis der Wirksamkeit durch Abbrennen gelang. Bei Einsatz der Technik im heißen Rauchgasstrom verbessert sich die Wirksamkeit des Glühzünders, da bereits eine höhere Grundtemperatur vorliegt und durch den Rauchgasstrom mehr Sauerstoff an die Glühfronten herangetragen wird, was zu einer Verbesserung der Oxidationsbedingungen führen wird.

3.13 Schallemissionen, Stromaufnahme

Auf Grund dessen, dass es im entwickelten Abscheidertyp keine mechanisch bewegten Baugruppen gibt, werden nahezu keine Schallemissionen verursacht. Vor allem die Abreinigung durch Abbrand beseitigt eine starke Geräuschquelle. Möglich sind beim Betrieb relativ leise Strömungsgeräusche oder ein leichtes Zischen auf Grund der austretenden Ladungsträger am Ionisator mit Hochspannung. Diese liegen allerdings auf einer als unangenehm empfundenen Frequenz, weshalb trotz allem bei der möglichen Entwicklung eines Prototypen auf die Schallisolation dieser Baugruppe nicht verzichtet werden sollte. Bei Versuchen zeigte sich, dass eine direkte Messung kaum möglich ist, da lautere Geräuschquellen des Versuchsfeldes mit größerem Schalldruckpegel die der Versuchsanordnung überlagerten und zu große Messunsicherheiten die Folge wären.

Die elektrische Leistungsaufnahme des Musters betrug

- max. 1,44 W für die Ionenerzeugung und
- 600 s lang 165 W für die Abreinigung der Abscheideeinheit

3.14 Druckverlust, Ozon – Entstehung

Für die letzte Ionisator-Konfiguration mit dem besten Abscheidegrad-Ergebnis wurde eine Ozon-Konzentration von rd. 2 ppm ermittelt. Dies entspricht einer Konzentration von 4 mg/m³ und liegt damit über dem Zielwert von 60 µg/m³. Der Druckverlust des Gesamtabscheiders im gereinigten Zustand beträgt nur 6 Pa bei 30 m³/h als typischen Abgasvolumenstrom für Kamine. Die aufgenommene Druckverlustkurve ist im Anhang in Anlage 4, Bild 30 dargestellt.

3.15 Ökonomie

Die Kosten für die Bereitstellung eines Abscheiders werden wie folgt abgeschätzt:

- 400 € für die Serienproduktion des Grundkörpers mit Abreinigungseinheit (Fertigungs-Kalkulation Lehmann UMT)
- Füllkörper: 100 €
- Preis Glühzünders 120 €.
- Hochspannungsnetzteil (20 kV, 1 mA): 400 €
- Isolation, Nebenkosten: 100 €

Somit betragen die kalkulierten Gesamtkosten für den Hersteller ca. 1120 €. Ein Verkaufspreis von ca. 1500 € erscheint daher realistisch. Ob dieser Preis für ein mögliches Produkt erzielt werden kann, hängt von den Einsatzfällen ab (z.B. hochwertige Kamine) sowie dem entsprechenden Druck durch gesetzliche Vorgaben und Luftreinhaltepläne.

4 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse, Vergleich zu ursprünglicher Zielsetzung

Das FuE – Projekt wurde von den Projektpartnern Lehmann UMT und ILK Dresden gemeinsam bearbeitet. Dabei konnten alle gesteckten Aufgaben erfüllt werden. Das Hauptziel dieser ersten Projektphase war es, die Wirkung des neuen elektrostatischen Abscheideverfahrens mit ausgelagerter Erzeugung von Ladungsträgern im kalten Bereich und Applizierung in den Rauchgasstrom zu untersuchen und auf seine Eignung für Abscheider an Kleinf Feuerungsanlagen zu überprüfen.

Bei der Vorhabensbearbeitung stellte sich heraus, dass für die Entwicklung und Untersuchung des Ionisators als Einzelbaugruppe deutlich mehr Arbeitsaufwand als geplant eingesetzt werden musste. Weiterhin wurde zu Gunsten systematischer Untersuchungen mit Flammrußaerosol auf Versuche mit einer Feuerstätte verzichtet.

Gemäß Antrag, wurden die Zielkriterien gemäß Tabelle 1 aufgestellt. Nach Abschluss des Vorhabens wurden dieser Zielstellung in der Tabelle den tatsächlich erreichten Ergebnissen gegenübergestellt.

Tabelle 1: Zielkriterien lt. Antragstellung und Prüfung der Erfüllung dieser

Nr.	Parameter	Zielwert	Prüfung Zielkriterien
1	Abscheider	für Kleinfeuerungsanlagen	Auslegung vorgenommen
2	Parameter	Partikel	Auslegung vorgenommen
3	Brennstoff	Holz	Auslegung vorgenommen
4	Feuerungsarten (geprüft, Projektphase II: Variantenentwicklung)	Einzelraumfeuerung, Kleinkessel	-
5	Nennwärmeleistungsbereich	< 15 kW	Erreicht (Rauchgasvolumenstrom bis ca. 30 m ³ /h)
6	Abscheidegrad η_{ges}	70 %	Nicht erreicht, Abscheidegrad max. rd. 50 %
7	Grundprinzip	elektrostatisch	Umgesetzt, Abscheider-Versuchsmuster gefertigt
8	Bauart	Hochspannungspotential außerhalb des Rauchgasstroms	Umgesetzt
9	Reingasstaubgehalte Einzelraumfeuerung	< 75 % des Grenzwertes (2. Stufe, 1. BImSchV) = 30 mg/m ³	Bei Rohgasstaubgehalt < 60 mg/m ³ möglich
10	Reingasstaubgehalte Pelletkessel	< 75 % des Grenzwertes (2. Stufe, 1. BImSchV) = 15 mg/m ³	Bei Rohgasstaubgehalt < 30 mg/m ³ möglich
11	Ozonemissionen	< 60 µg/m ³	Nicht erreicht, Konzentration ca. 4 mg/m ³
12	Emission von Rußflocken aus abgeschiedenem Staub	Vermeiden, Erhöhung der Staubkonzentration bei Abreinigung: ≤ 15 %	Erfüllt, bei thermischer Abreinigung nicht möglich
13	Druckverlust	Für Einzelraumfeuerung: ≤15 Pa (Verzicht auf zusätzliches Stützgebläse)	erreicht, ca. 5-6 Pa bei 30 m ³ /h im unbeladenem Zustand
14	Elektroenergiebedarf	≤ 100 W	Nicht erreicht; Glühzünder: 165 W
15	Ausstattung	Mit Verkleidung (Wärmespeicherung) - Projektphase II	-
16	Herstellungskosten	< 1200 € (ohne Verkleidung)	Erreicht (ca. 1220 €)

Es wurde ein Abscheider für den Einsatz an Kleinfeuerungsanlagen, vor allem Kaminen, entwickelt, gefertigt und untersucht. Es konnte, wie geplant das Prinzip der äußeren Ladungsträgererzeugung umgesetzt und der Abscheideeffekt nachgewiesen werden. Jedoch wurde der Ziel-Abscheidegrad nicht erreicht. Grund hierfür ist die aktuell zu geringe Wirksamkeit des Effektes der Ladung von Staubpartikeln durch Ionen und deren anschließende Abscheidung in einem Strömungslabyrinth. Es besteht die Möglichkeit, dass im Gegensatz zum Feldladungsprozess mit einer erheblichen Triebkraft durch das elektrische Feld bei dem vorliegenden Diffusionsladungsprozess sehr kleine Partikel auch nur wenige Ladungen bis

zur Aufladungsgrenze aufnehmen können, da anderenfalls die Coloumbkräfte diese Ladungen wieder ablösen. Als insgesamt positiv ist eine ökonomisch ansprechende und praktikabel einsetzbare Gesamtlösung für die Abscheiderkonstruktion zu sehen, welche als ein Teilziel erreicht wurde. Auch legt die positive Erprobung einer thermische Abreinigung durch Rußabbrand den Grundstein dieses Einzelverfahren auch für andere Einsatzfälle aufzunehmen.

5 Bewertung der Vorhabensergebnisse

Aus technologischer Sicht sind die Vorhabensergebnisse so zu werten, dass das entwickelte und untersuchte, neue Prinzip zur elektrostatischen Abscheidung von Partikeln nach wie vor seine Innovationskraft nicht verloren hat. Es sind derzeit keine vergleichbaren Techniken für Abscheider bekannt. Eine aktuelle Recherche zeigt kaum Änderungen am Stand der marktverfügbaren Abscheidetechnik für Kleinf Feuerungsanlagen. Die aktuell deutlich gesunkene Nachfrage, sowohl den Kamin-, als auch den Heizkesselmarkt betreffend wirken auch auf diesbezügliche Entwicklungen eher hemmend.

Aus ökologischer Sicht sind die Vorhabensergebnisse als positiv zu bewerten. Bei Fortführung des Projektes könnte die Entwicklungsaufgabe in einer 2. Projektphase mit einem Abscheider-Prototyp beendet werden, welcher die staubförmigen Emissionen, vor allem von Kaminen und kleinen Kesseln deutlich mindern würde und somit direkt als Beitrag der Luftreinhaltung zu einer Entlastung der Umwelt führt.

Die gewonnenen Erkenntnisse können aber auch bereits jetzt für weitere Entwicklungsaufgaben auf dem Gebiet der Emissionsminderung genutzt werden. Realistisch sind hier vor allem:

- Unterstützung von anderen Abscheidetechniken durch Ionisierungen (Agglomerations- und Abscheideeffekt)
- Entwicklung eines Abscheiders auf Basis des gleichen Grundkörpers und Abscheideeinheit jedoch mit Feldaufladung

6 Fazit

Auf Grundlage der durchgeführten FuE – Arbeiten zum neuen Abscheidekonzept wird eingeschätzt, dass damit ein Effekt zwar nachweisbar, jedoch mit einer Wirksamkeit von max. 8 – 22 % Abscheidegrad insgesamt bisher als noch zu gering zu bewerten ist. Mit der vorliegenden Effektivität lässt sich derzeit noch kein Ansatz für ein marktfähiges Kosten-Nutzen-

Verhältnis darstellen. Es gelang die Erzeugung und Applikation von Ionen in den Partikelstrom, jedoch ist die darauf zurückzuführende Abscheidung unzureichend. Dennoch erbrachte das FuE – Projekt wesentliche, positive Ergebnisse hinsichtlich der Abscheider - Konstruktion und der thermischen Abreinigung für Abscheider. Diese Ergebnisse lassen sich in weiteren Entwicklungsarbeiten nutzen.

Für eine Weiterführung der Entwicklungsarbeit unter Beibehalt des Vorhabenszieles wären folgende Schritte notwendig:

- Versuche mit noch höheren Ionendichten
- Direkter Nachweis der tatsächlich vom Partikel aufgenommenen Ladungen
Dazu wären Untersuchungen in einem elektrischen Feld notwendig (ähnlich eines DMA oder Elektrometers)
- Erprobung zusätzlicher Feldeffekte

Daraus abgeleitet wären anschließend Arbeiten zur technischen Umsetzung

- Eines geänderten Ladeprinzips
- Zweistufige Partikelladung (abwechselnd agglomerieren, Ionisieren)

vorzunehmen.

Auf Grundlage des dargestellten Ergebnisses dieser 1. Projektphase evaluieren beide Projektpartner derzeit noch, inwiefern eine 2. Projektphase angeschlossen werden kann. Zum einen besteht die Möglichkeit durch den o.g. Untersuchungsumfang neue Erkenntnisse zur Verbesserung des Wirkungsmechanismus zu finden, zum anderen kann die Zielstellung zur Entwicklung eines Abscheiders für Kleinfeuerungsanlagen durch die Ergebnisse verändert werden, so dass es mit abgeändertem oder optimiertem Prinzip gelingt, höhere Abscheidegrade zu erzielen.

Ungeachtet dessen, ist geplant, die bisherigen Vorhabensergebnisse zu veröffentlichen. Wird keine 2. Projektphase angeschlossen, so werden die Ergebnisse voraussichtlich auf der „22. Fachtagung - nachwachsende Rohstoffe – Bioökonomie 3.0“ am 16./17. März 2018 in Dresden vorgestellt.

Literaturverzeichnis

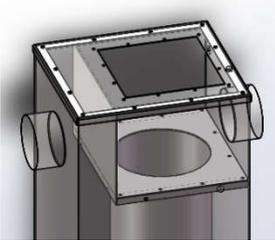
- [1] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) 22.3.2010
- [2] Adler, Jörg; Kalisch, Andreas: „Keramikfilter in der Abgasanlage zur Staubemissionsminderung von Biomassefeuerungsanlagen“ – Abschlussbericht FKZ: 220-22-006; Fraunhofer IBP und IKTS, September 2009
- [3] Dorn, Electron Impact Ionization Studies of Small Rare Gas Clusters; Dissertation Universität Heidelberg, 2012
- [4] Sattler, Michael: „Staubabscheider für den Hausbrand (<50 kW) -in der Schweiz erhältliche oder kurz vor der Einführung stehende Systeme -mit praktischen Informationen für Kaminfeger“; Langenbruck, 30. Mai 2007
- [5] Ellner-Schubert, Frank: „Feinstaub aus der Holzfeuerung – Probleme und Lösungsmöglichkeiten“; Fachvortrag, Regensburg 31.01.2008
- [6] Kiener, Turowski; Hartmann, Schmoeckel: „Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel“ – Berichte aus dem TFZ 23; Straubing, September 2010
- [7] Birnbaum: FuE – Ergebnisse im Projekt: Entwicklung eines emissionsarmen Wärmespeicherheizungssystems, Zwischenbericht 2010; AiF Berlin, Förderkennzeichen KF2067110ST9
- [8] Untersuchungen des TFZ – Straubing (Berichte aus dem TFZ – Nr. 23)
- [9] Jordan: Untersuchungen zum Partikelabscheideverhalten submikroner Partikel in Faserfiltern im elektrischen Feld
Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg, 2001
- [10] http://www.verenum.ch/publikationen/TN_HZBL_Elektro.pdf
- [11] Kaltschmitt et al.: Energie aus Biomasse, 3. Auflage, 2016, Springer Vieweg Verlag, Heidelberg
- [12] Internetadresse: <https://www.slub-dresden.de/startseite/>
- [13] <https://de.wikipedia.org/wiki/Ionisationsger%C3%A4t>
- [14] <https://www.optima-luftreiniger.de/>
- [15] <http://www.luftreiniger.de/>

- [16] Gläser, Birnbaum et al.: Entwicklung eines Abscheiders neuer Bauart auf elektrostatischer Basis für Kleinf Feuerungsanlagen im häuslichen Bereich zur Senkung der Gesamtstaubemissionen;
28.05.2014 Projektantrag an die DBU
- [17] Richtlinie VDI 3678, Februar 2010, Entwurf: Elektrofilter, Prozessgas- und Abgasreinigung

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Übersichtsblatt Komponentenliste
- Anlage 2: Ionenkonzentration, Röhrentyp (l=450 mm)
- Anlage 3: Ergebnisse Abscheidegrad optimierter Ionisator
- Anlage 4: Druckverlustkurve Abscheider

Anlage 1

Pos. gemäß Bild 15	Komponente, Baugruppe (ILK)	Beschreibung (ILK)	Anforderungen (ILK)	Materialauswahl (UMT)	Fertigungsverfahren (UMT)
0	<p>Grundkörper quaderförmig</p> 	<p>Rauchgaseintritt oben, -austritt ebenfalls oben); 2 Züge: 1. Nach unten mit Füllkörpereinsatz und Abscheidung, 2. Zug: nach oben hochführen</p> <p>nach oben zu öffnen um Abscheidereinsatz entnehmen zu können</p>	<p>metallisch, nicht brennbar, rußbrandsicher Temperaturen bis 500 °C, reduziertes Gewicht, rauchgasdicht! spätere Farbgebung möglich</p>	<p>1.4301 Blechstärken bis 5 mm (gute Verfügbarkeit, gute Umformbarkeit, ohne zusätzliche Wärmebehandlung schweißbar)</p>	<p>Laserschneiden Runden / Biegen WiG-Schweißen (geringe Wärmeinflusszone und Gefügeveränderung durch WiG-Schweißen); Dichten mit Glasgewebeschnur</p>
3	Füllkörpereinheit rund	<p>aufgenommen werden V2A-Füllkörper, Größe ca. 15 mm, Anbringen an Filterboden (Platte oberhalb der Einheit</p>	<p>Fassung der Schüttung muss durchlässig für Strömung nach innen und außen sein (siehe Abbildung), trotzdem mechan. stabil Temperatur: wie Pos. 0</p>	<p>Füllkörper „Interpak“ V2A, VFF; Drahtgestrick Maschenweite 10 mm, Kopf- und Fußplatte mit senkrechten Stegen zur Halterung und Aufspannung des Gestricks; 1.4301 Blechstärken bis 5 mm (gute Verfügbarkeit, gute Umformbarkeit, ohne zusätzliche Wärmebehandlung schweißbar)</p>	<p>Laserschneiden WiG-Schweißen (geringe Wärmeinflusszone und Gefügeveränderung durch WiG-Schweißen)</p>
2	Einbringung Ionen	<p>vom Ionistor ausgehend muss ein Luftstrom in einem Isolator eingebracht werden</p>	<p>die Temperatur wird von 20 °C Abgastemperatur erhöht Temperatur: wie Pos. 0; Drallgebung für Verweilzeit, metallisch (kein Ionenverlust durch stat. Aufladung)</p>	<p>Ebenfalls 1.4301, Rohrführung für Drallgebung; Halterung mittels Flansch zum Anschrauben an Grundkörper</p>	<p>Rohr-Biegen, WiG-Schweißen Flansch</p>

Anlage 1

6	Staubaustrag	Sitz im Gehäuse, entnehmbarer „Aschekasten“ Abdichtung	Temperatur: wie Pos. 0	Verzinktes Stahlblech	Laserschneiden Runden / Biegen Widerstandsschweißen Zange
1		<p>Isolation gegenüber elektrischen Spannungen bis 12.000 V, metallische Hülle, geerdet zur Sicherheit; Innenliner: metallisch zur Vermeidung von Ladungseinbußen</p> <p>Spez. Sprühelektrode</p>	<p>Raumtemperatur, Kontakt auf Unterseite mit heißem Abscheider-Gehäuse; Verbindungen Isolationsgehäuse – metallische Hochspannungsteile müssen hergestellt werden</p> <p>Anforderung: Sehr scharfe Spitzen</p>	<p>POM, 1.4301, Hochspannungskabel bis 30 kV, Erdungslaschen Innenrohr mit Flansch an Unterseite zum Aufschauben auf Gehäuse</p> <p>V2A, 0,8 mm</p>	<p>Drehteil, Schraubgewinde, Rohrflansch auf Unterseite geschweißt</p> <p>spez. Laser - Parameter</p>
4/5	Roh- und Reingasstutzen	Ofenrohr 150 mm (spez. Ofenrohrmaße); Rohgasseite (rechts: weiblich), Reingasseite (links: männlich)	Zum Anschluss an Kaminofen und Schornstein Temperatur: wie Pos. 1	1.4401 (gute Verfügbarkeit, gut zerspanbar)	Zukauf; 2mm Stahlblech oder 0,6 mm Edelstahl, WiG-Schweißen

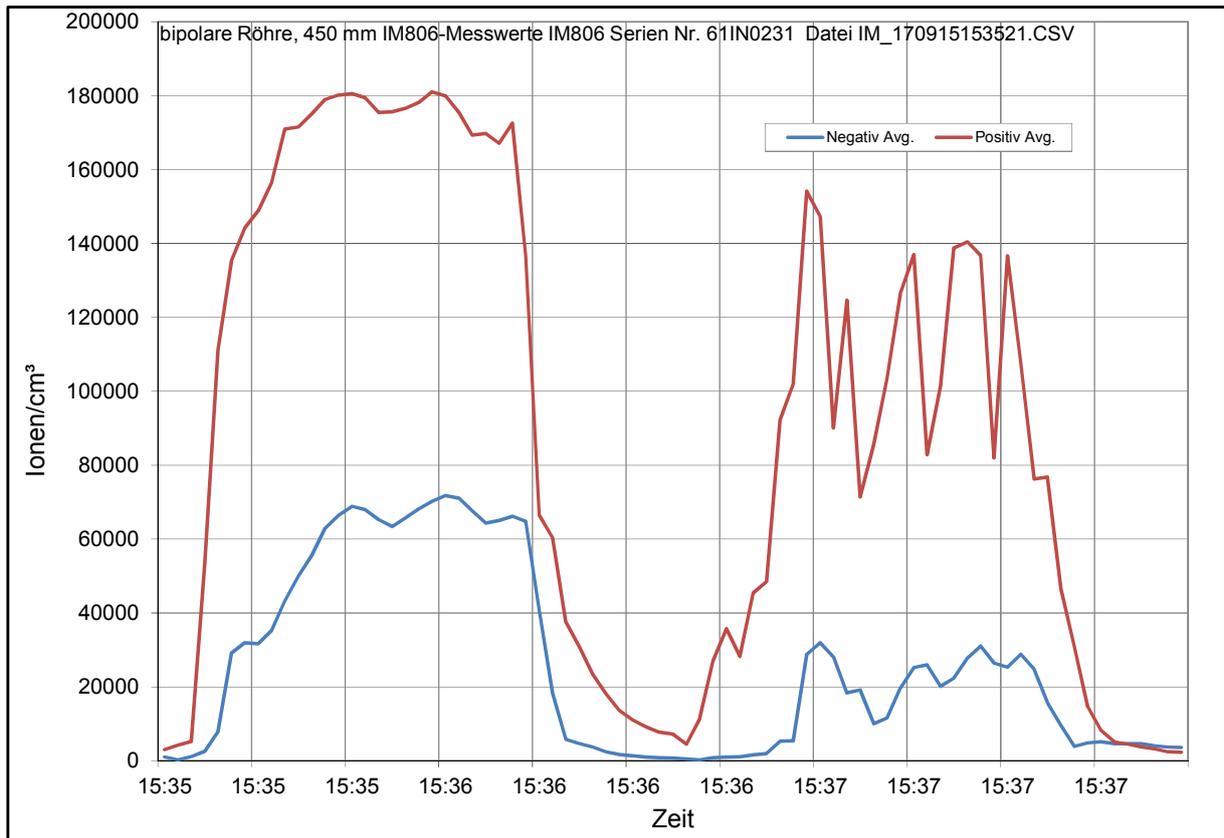


Bild 28: Ionenkonzentration Röhrenionisator (l=450 mm)

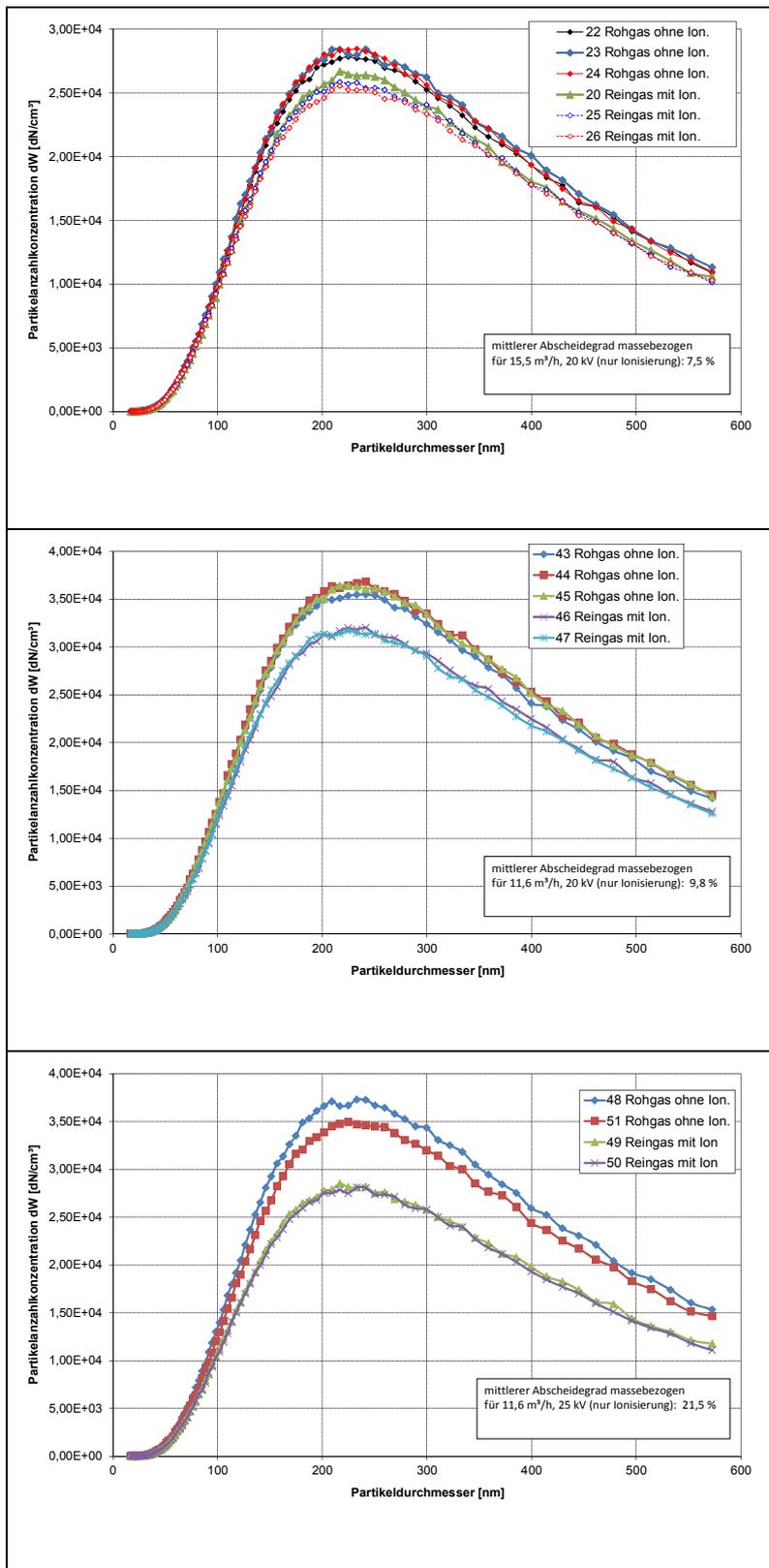


Bild 29: Messergebnisse zum Abscheideverhalten, optimierter Ionisator

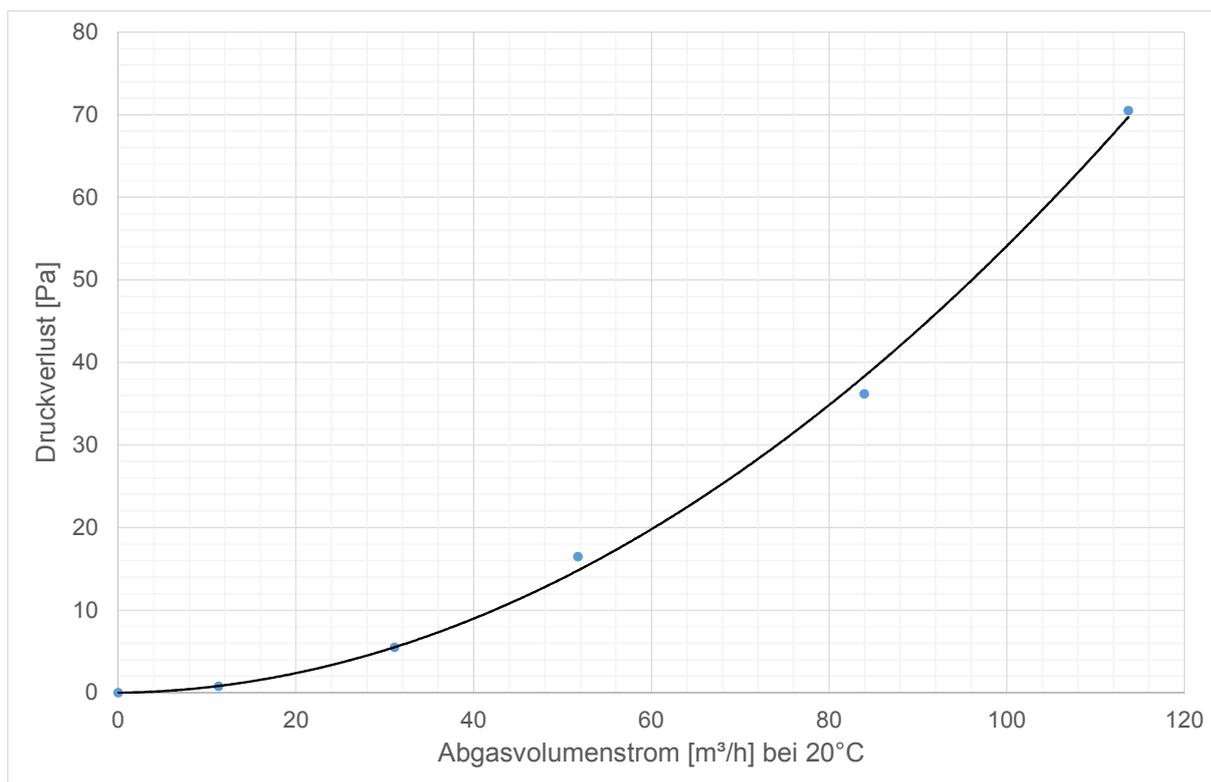


Bild 30: Druckverlustkurve Abscheider