

Verstopfungsarmes Düsensystem für nasse Rauchgasentschwefelungsanlagen von fossil befeuerten Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen



Gegenstandsbeschreibung/Verfahrens zur innerstädtischen Partikelreduktion

In Kohle befeuerten Kraftwerken werden zur SO_2 - Reduktion nasse Rauchgasreinigungsanlagen eingesetzt, in denen Kalksteinsuspension in die Rauchgase eingesprüht wird. Hierfür werden spezielle Düsen benötigt. Die im Folgenden beschriebene Entwicklung der Kegeldüse soll im Markt eingeführt werden. Die Düsen wurden in 17 Ländern patentiert.

Marktpotenzial:

Bis 2030 soll der Kohle-Anteil bei der Welt-Stromerzeugung nach Schätzung der Internationalen Energie-Agentur von jetzt 40 auf 45 Prozent steigen. „Steinkohle ist die am schnellsten wachsende fossile Primärenergie der Welt“, sagt Wolfgang Cieslik, Vorsitzender des Vereins der Kohlenimporteure (VDKi) in Hamburg: Förderung und Verbrauch sind im vergangenen Jahr um 600 Millionen auf 6,7 Milliarden Tonnen gewachsen. Indien und China sind zusammen für 90 Prozent des Verbrauchsanstiegs bei der Kohle verantwortlich. Sie decken ihren Strombedarf heute und in Zukunft überwiegend mit Kohle. Nach dem Hauptszenario der IEA wird China bis 2035 Kohlekraftwerke mit einer Leistung von rund 600 Gigawatt hinzubauen; das entspricht der heutigen Kapazität der USA, der EU und Japans zusammengenommen.

Prognosen zur Reichweite von Kohle variieren stark je nach Annahmen über die Entwicklung von Nachfrage und Angebot sowie den veranschlagten Reserven, die vom Kohlepreis und der Fördertechnik abhängen. Bei Fortschreibung des Jahresverbrauchs in 2007 ergibt sich eine "statische Reichweite" (bei konstantem Verbrauch) von ≈ 129 Jahren bei Steinkohle und von ≈ 286 Jahren bei Braunkohle, also weitaus höhere Werte als bei Erdöl (42 Jahre) und Erdgas (58 Jahre).

Deutschland hatte im Jahr 2010 eine Bruttostromerzeugung von 621 Terawattstunden (TWh), das entspricht einem Anteil von 2,9% an der weltweiten Bruttostromerzeugung.

In Deutschland kommen ca. 30.000 MWh elektrische Leistung aus Kohlekraftwerken, die mit insgesamt ca. 28.000 REA – Düsen bestückt sind. Der Preis pro Düse schwankt je nach Größe und Form, zwischen 600 € und 5.000 €. Sonderformen sind noch weitaus kostenintensiver.

Vorteile für den Kunden:

Kurze Amortisationszeit der Investition im Vergleich zum Stand der Technik. Die derzeit eingesetzten Düsen sind verschleißträchtig, daher bietet sich der Austausch der herkömmlichen Düsen bei Anlagenstillständen oder in Revisionen an. Die verstopfungsarme Kegeldüse erhöht die Verfügbarkeit des Kraftwerksblockes merkbar. Allein durch die Einhaltung der Emissionsvorschriften, was mit verstopften



Düsensystemen nicht zu erreichen ist. Das An- und Abfahren eines Kraftwerksblockes ist mit erheblichen Kosten verbunden, die sich durch den Einsatz der Kegeldüsen stark reduzieren bzw. gänzlich vermeiden lassen.

Seit über 18 Jahren sind Kegeldüsen im Feldversuch eingesetzt, die den Nachweis der Verstopfungsarmut bestätigen. Wesentlicher Bestandteil der Entwicklung ist aber der kaum messbare Verschleiß der Düsenflächen. So wird über viele Jahre ein gleichbleibendes Auswaschungsergebnis des Schwefelgehaltes aus den Rauchgasen gewährleistet.

Einsatzbereich:

Kohle enthält von Natur aus nicht nur Kohlenstoff, sondern auch nicht brennbare Anteile – die spätere Asche – und Schwefel. Wird Kohle verbrannt, entstehen Rauchgase, die ganz unvermeidlich Luftschadstoffe enthalten, vor allem Stäube und Schwefeldioxid (SO₂).

Seit den 80er Jahren filtern Rauchgas-Entschwefelungs-Anlagen (REA) Schwefeldioxid (SO₂) aus dem Rauchgas der Braun- und Steinkohlenkraftwerke. Das Reinigungsverfahren, bei dem das SO₂ mit Hilfe einer Kalksteinlösung ausgewaschen wird, hat sich seit langem bewährt. Heute werden mehr als 95 Prozent der Entschwefelungsanlagen in Kraftwerken und Industrieanlagen weltweit auf Basis dieser Verfahrenstechnik zuverlässig und erfolgreich betrieben.

Feinstaub gilt wegen seiner Lungengängigkeit als Belastung für die menschliche Gesundheit. Schwefeldioxid bildet mit Wasser den einst gefürchteten „Sauren Regen“.

Im Kraftwerk wird der Staub vor allem durch Elektrofilter aus dem Rauchgas abgeschieden. Feinere Fraktionen werden ebenso wie das SO₂ in der angeschlossenen Rauchgas-Entschwefelungs-Anlage (REA) zurückgehalten.

REAs sind heute Stand der Technik. Die Luftqualität hat sich dadurch in den letzten 30 Jahren messbar und nachhaltig verbessert.

Stand der Entwicklung:

- Das Kegel - Düsensystem ist fertig entwickelt.
- Wissenschaftliche Vergleichsmessungen wurden mit positivsten Ergebnissen belegt.
- Das erzeugte Tropfenspektrum wird mit Doppler - Laser Messung bestimmt und rechnerisch als Sauter Durchmesser d_{32} ermittelt. So ist die Vergleichbarkeit der reaktiven Oberfläche des Sprühgutes unter den Düsen gegeben.
- Der Sauter Durchmesser d_{32} ist bei den Kegel Düsen kleiner als bei allen



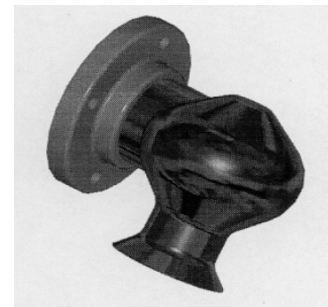
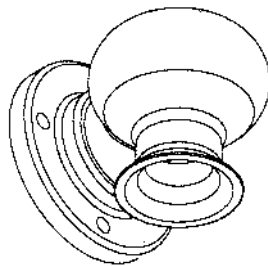
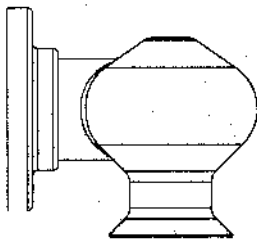
- ändern Düsen der Mitbewerber und somit besser als der Stand der Technik.
- Die Umwelt wird mit weniger Schwefeldioxid (SO₂) belastet.
 - Verschiedene Ausführungsarten der Kegel - Düsen sind im Feldversuch über viele Jahre erfolgreich im Einsatz.

Der Finanzmittelbedarf beträgt 2,8 Mio. € und wird für folgende Schritte benötigt:

- Die Weiterentwicklung der Düsen bezogen auf die Optimierung des Herstellungsprozesses.
- Festlegung der Herstellungsverfahren in Stellite (Metall) oder Keramik - Werkstoffen
- Aufbau eines weltweiten Vertriebes
- Herstellung der Düsen nach Abstimmung mit dem Kunden
- Die Markteinführung scheiterte bisher an den Monopolen der Düsenhersteller, die nur ihre Entwicklungen vertreiben wollten. Obwohl die Kegeldüsen allen bisherigen Entwicklungen der Mitbewerber überlegen sind.

Stand der Technik:

Drallzerstäuber- bzw. Tangentialdüsen



Bei den Drallzerstäuberdüsen wird die Flüssigkeit tangential in eine Drallkammer eingebracht, verwirbelt dort und tritt unter großem Einfluss der Zentripetalkraft („Fliehkraft“) aus dem Düsenloch aus. Die Drallzerstäuberdüsen ermöglichen eine relativ feine Zerstäubung bei geringem Druckniveau. Die Drallzerstäuberdüsen weisen jedoch Nachteile auf. Das sind zum einen die hohen Druckverluste, die in der Drallkammer durch die Rotation der Strömung an den Wänden entstehen. Bis zu 50% der zur Verfügung stehenden Druckenergie kann im schlechtesten Fall verbraucht werden, ohne dass das zur Zerstäubung beiträgt. Durch den Einsatz dieses Düsentyps erhöht sich der Energieverbrauch der Kalkmilchpumpen drastisch. Ein weiteres Manko der Drallzerstäuberdüsen ist die Entmischung der Flüssigkeit und der Ver-



schleiß in den Düsen durch starke Wandreibung von ungelösten Kalkpartikeln. Durch die Düsengeometrie und die tangentialen Eintrittsgeschwindigkeiten ergibt sich

gemäß der Gleichung

$$a = w^2 / R$$

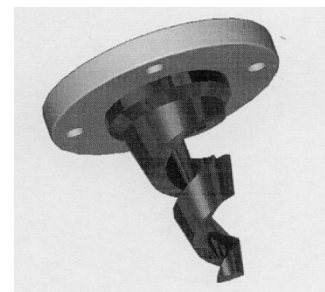
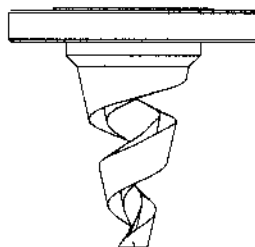
R = Radius der Drallkammer,

w = tangentielle Strömungsgeschwindigkeit,

a = Beschleunigung,

der Wert für die Fliehkräfte denen die Strömung ausgesetzt ist. Bei großen Dralldüsen können so mehrere hundert „g“ (g= Erdbeschleunigung 9,81 m/s²) entstehen. Dadurch kommt es in der Drallzerstäuberdüse zu einer Entmischung bei Flüssigkeiten die nicht gelöste, Kalkkristalle enthalten. Im Weiteren reiben die gelösten Kristalle durch die hohen Fliehkräfte wie Schmirgelpartikel auf der Innenkontur der Drallkammer. Im Regelfall kommt es durch den Materialabtrag zu Unsymmetrien in den Drallkammern, was dann wieder zu einer unsymmetrischen Zerstäubung und erhöhten Bauteilbelastungen, sowie zu Frequenzen führt. In größeren Drallzerstäuberdüsen kam es zur Kavitationsbildung an der oberen Düsenabdeckung, die dadurch regelrecht heraus implodiert wurde. Das Auswaschungsergebnis ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Der Anlagenbetrieb muss durch diesen Verschleiß, aus verfahrenstechnischen Gründen ständig angepasst werden. Die Düsengeometrie ist durch den Verschleiß in der Drallkammer ständigen Veränderungen (Korrekturen des Anlagenbetriebes) ausgesetzt, was sich bei diesem Düsen - Typ als sehr nachteilig erweist. Die Drallkammerzerstörung und die Verstopfung der herkömmlichen Düsensysteme ist dieser Präsentation als Bildmaterial beigefügt.

Spiraldüsen





Bei den Spiraldüsen treten hinsichtlich des Verschleißes und der Entmischung die zuvor beschriebenen Effekte nicht auf, jedoch neigen diese Düsen auf Grund der

sehr komplexen Geometrie zum Verstopfen und zum Zusetzen der freien Ausströmquerschnitte. Verschleiß entsteht bei dieser Düsenart durch die mehrfache

Umlenkung des abrasiven Flüssigkeitsgemisches, was dann zu Veränderungen in der Tropfenverteilung und Tropfengröße führt und damit das Auswaschungsergebnis der Rauchgase stark mindert. Im Weiteren impliziert die komplexe Austrittsgeometrie einen höheren Druckbedarf um fein zerstäuben zu können und die entstehenden Druckverluste zu kompensieren.

Durch den Einsatz von Drallzerstäuber- und Spiraldüsen besteht die Gefahr der Entstehung von Frequenzen die keinesfalls vernachlässigt werden dürfen. Durch die Druckimpulse der REA – Pumpen, die Strömungsänderungen der Flüssigkeit, die konstruktive Gestaltung der REA Wäscher und die Eigenschaften der Flüssigkeit, können Schwingungen entstehen, die Folge davon, es kommt zu Frequenzausbildungen. Die Frequenzen führen zu Bauteil-Mehrbelastungen die zu einer frühzeitigen Bauteilzerstörung führen können. Die Gefahr der Ausbreitung und Überlagerung dieser Schwingungen kann bei Nichterkennung mittel- und langfristig zu erheblichen Schädigungen an Rohrsystemen, Halterungen, Behältern und Pumpen führen.

Nachteile:

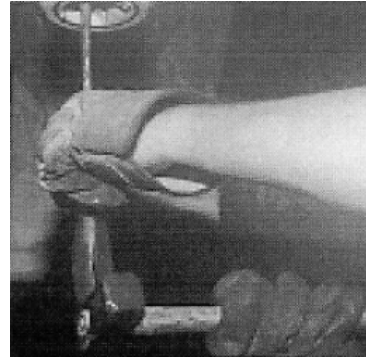
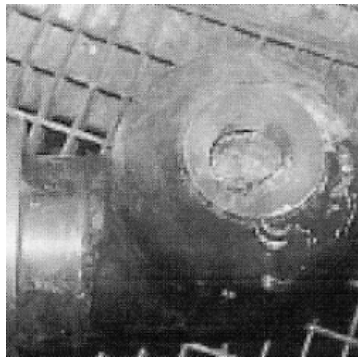
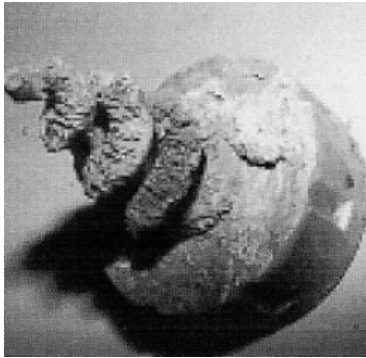
Vollständige Verstopfungen der Düsen führt in der Folge zur Verstopfung der Bedüsungssysteme und zwingt den Betreiber die Anlage vom Netz zu nehmen, da sonst Emissionsüberschreitungen drohen. Bergmännische Reinigungsarbeiten an den verstopften Düsensystemen kosten Zeit und Geld.

Beispiele von Anbackungen und Verstopfungen an den bisher verwendeten Kalkmilchsuspensionsdüsen

Bild 1:
Spiraldüse

Bild 2:
Tangentialdüse

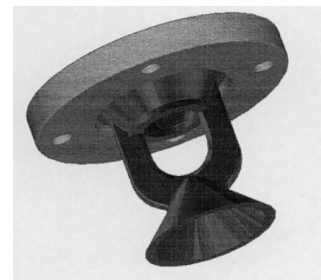
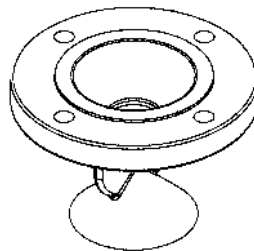
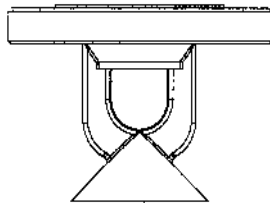
Bild 3:
Verstopfter Düsenanschluß
das kann bis zur Verstopfung des
Zulaufrohres führen
>erhebliche Kosten entstehen<



Unsere Lösung:

Die verstopfungs- und verschleißarme Kegeldüse

Kegeldüsen:



Bei Kegeldüsen, sogenannten Filmzerstäubern entsteht der Zerstäubungseffekt über die Flüssigkeitsverteilung auf der Strömungsoberfläche. Die Flüssigkeit wird über den Kegelmantel geleitet, bis zum Ende des Kegelmantels wird der Flüssigkeitsfilm immer dünner, um schließlich an der Abrisskante als ein sehr feiner und gleichmäßiger Tropfenfilm die Düse zu verlassen. Durch die laminare Strömung baut sich ein turbulenzfreies Grenzschichtprofil zwischen Düsenkegel und Flüssigkeit auf, was dazu führt, dass sich die Druckverluste minimieren und es wird eine sehr feine Zerstäubung ermöglicht. Zudem schützt Flüssigkeitsfilm, die Hydroadhäsion, die Düse vor Verschleiß bzw. Abrieb.

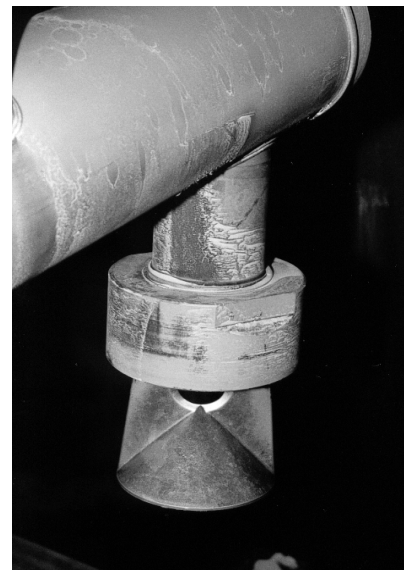
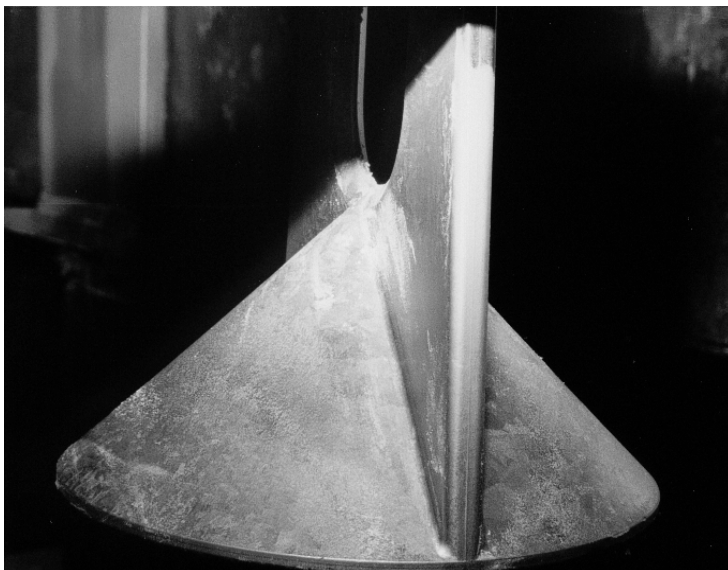
Resümee: Bei vorgegebenem Flüssigkeitsstrom und Druckniveau ermöglicht die Kegeldüse die effektivste Zerstäubung mit dem niedrigsten Energiebedarf. Zudem ist die Gefahr des Verstopfens gebannt, da es keine komplexen, immer enger



werdenden Geometrien gibt. Der Verschleiß, sofern er wegen des laminaren Grenzschichtprofils stattfindet, ist quasi Null.

Die Düsen aus dem Feldversuch zeigen einen glatten, sauberen Kegelmantel, der die Voraussetzung für ein gleichbleibendes Tropfenspektrum und somit ein garantiertes Auswaschungsergebnis von SO_2 gewährleistet. Der Verstopfungsgefahr wird durch die ausgeklügelte Form des Düsensystem sichtbar entgegengewirkt.

Kegeldüse aus metallischem Werkstoff nach über 40.000 Betriebsstunden



Vorstudie zur Machbarkeit eines Verfahrens zur innerstädtischen Partikelreduktion

Institut für Produktionstechnik und Logistik
Lehrstuhl für Umweltgerechte Produkte und Prozesse
Universität Kassel



Prof. Dr.-Ing. J. Hesselbach

1. Aufgabenstellung

Entsprechend den gesetzlichen Richtlinien der EU zur Luftqualität müssen die Kommunen Gegenmaßnahmen ergreifen, wenn der Grenzwert an PM10-Partikel (Partikel mit Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$) mehr als 35-mal pro Jahr den Grenzwert von $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ überschreitet. Dies liegt darin begründet, dass nach den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen gerade von den feinen Partikeln mit hochkomplexer chemischer Zusammensetzung ein hohes gesundheitliches Gefahrenpotenzial ausgeht. Allerdings zeigen sich die Behörden heute trotz vielfacher Überschreitungen recht hilflos, da es noch zu wenig

Handlungsmöglichkeiten gibt. Eine Möglichkeit besteht in der Sperrung der Innenstädte für den Schwerlastverkehr um eine Reduktion der rassistbedingten Emissionen zu erreichen. Eine andere Möglichkeit bestünde im Einsatz mobiler Reinigungsverfahren zur Reinigung der Luft in hoch belasteten Ballungsräumen. Ein solches Verfahren wird aktuell von der Firma Reintanz entwickelt. Aufgabe der Studie ist es die prinzipielle Machbarkeit eines mobilen Verfahrens zur Feinstaubabscheidung in Ballungsräumen zu überprüfen.

2. Reinigungsverfahren

Für die Reinigung ist eine transportable Tuchfiltereinheit mit integrierter Absaugung vorgesehen. Das Fahrzeug bewegt sich vergleichbar mit Straßenreinigungsfahrzeugen mit langsamer Geschwindigkeit durch die belasteten Bereiche der Innenstädte. Die Besonderheit liegt vor allem in der strömungstechnisch optimalen Gestaltung der Ansaugereinheit um einen möglichst weit reichenden Reinigungseffekt zu erzielen. Für die Berechnungen wird zunächst von einer Fahrzeuglänge von 10m und einem Einzugsbereich der Absaugung von $2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$ (Breite \times Höhe) ausgegangen. Der Abscheidegrad des Tuchfilters beträgt unabhängig von der Feinstaubkonzentration im Mittel 80%.

3. Berechnungen

Ausgehend von den Standardbedingungen entsprechend Tabelle 1 wurden unterschiedliche Parametervariationen durchgeführt, um deren Einfluss auf die Wirksamkeit des Verfahrens abzuschätzen. Dies betrifft vor allem die Geschwindigkeit des Reinigungsfahrzeuges und die Größe des Volumenstroms der Absaugung. Mit der beigefügten EXCEL-Tabelle können jedoch auch weitere Parameter variiert werden.

Tabelle 1: Standardbedingungen für die Parametervariation



Partikelkonzentration (mg/m ³)	100
Abscheidegrad Tuchfilter (%)	80
Länge Reinigungsfahrzeug (m)	10
Breite Einzugsbereich Absaugung (m)	2,5
Höhe Einzugsbereich Absaugung (m)	2,5
Volumenstrom Absaugung (m ³ /h)	36.000
Geschwindigkeit (km/h)	5

Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getätigt:

- Das Reinigungsfahrzeug durchfährt jeweils nacheinander Volumenabschnitte der Größe 10m x 2,5m x 2,5m (Länge x Breite x Höhe) und reinigt die Luft dort entsprechend der Höhe des Volumenstroms und dem Abscheidegrad des Tuchfilters.
- Eine Vermischung mit benachbarten Luftvolumen findet während der Reinigungsphase nicht statt, da das angesaugte Luftvolumen auch wieder abgereinigt in das gleiche Volumenelement zurückgeblasen wird und dadurch große Druckunterschiede vermieden werden (Dies hängt in der Realität sicher stark von den örtlichen Gegebenheiten und der Ausführung der Absaugung ab).
- Die Luft innerhalb des Volumenelements ist ideal durchmischt, d.h. zu jedem Zeitpunkt ist die Partikelkonzentration an jeder Stelle des Volumenelements gleich groß (analog einem idealen Rührkesselreaktor).
- Während der Abreinigung befinden sich keine weiteren Partikelquellen in dem Volumenelement.

Auf Basis dieser Annahmen und den Standardbedingungen entsprechend Tabelle 1 ergibt sich der Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Reinigungsfahrzeuges entsprechend Bild 1:

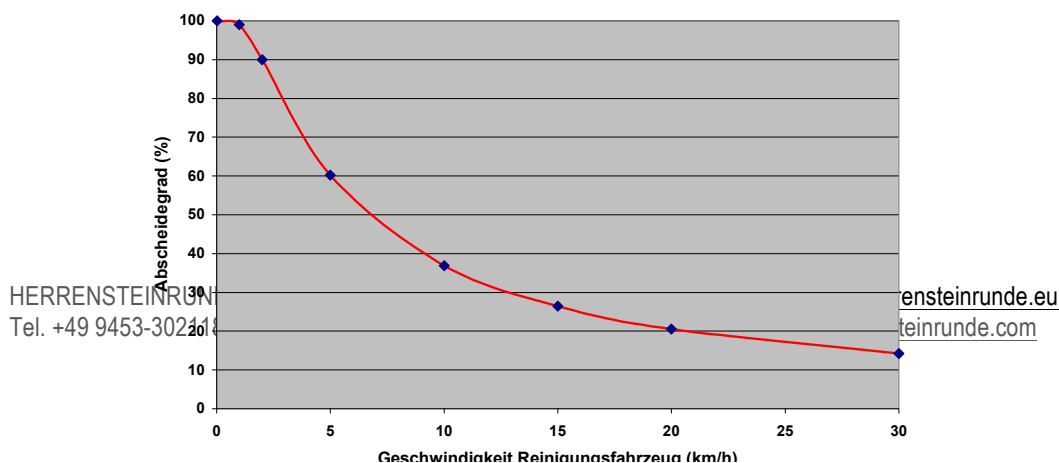




Bild 1: Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Reinigungsfahrzeuges

Wie aus Bild 1 zu erkennen ist, sollte die Geschwindigkeit des Fahrzeugs möglichst nicht größer als 5 km/h sein, um sinnvolle Abscheideleistungen erzielen zu können. Dies entspricht in etwa auch den Geschwindigkeiten von Straßenreinigungsfahrzeugen und stellt somit ein auch heute schon „übliches“ Verkehrshindernis dar. Allerdings ergibt sich aus der Geschwindigkeit indirekt auch die Anzahl der notwendigen Filterfahrzeuge für eine Innenstadt. Bei insgesamt 2,5 km betroffener Straßenzüge, also 5 km Fahrstrecke (beide Fahrbahnseiten), erfolgt die örtliche Abreinigung einmal pro Stunde. Ob dies ausreicht hängt stark von der jeweiligen Verkehrs- und Wettersituation ab, so dass sich ggf. mehrere Fahrzeuge gleichzeitig im Einsatz befinden müssen.

Ebenfalls einen großen Einfluss hat die Höhe des abgesaugten Volumenstroms (Bild 2).

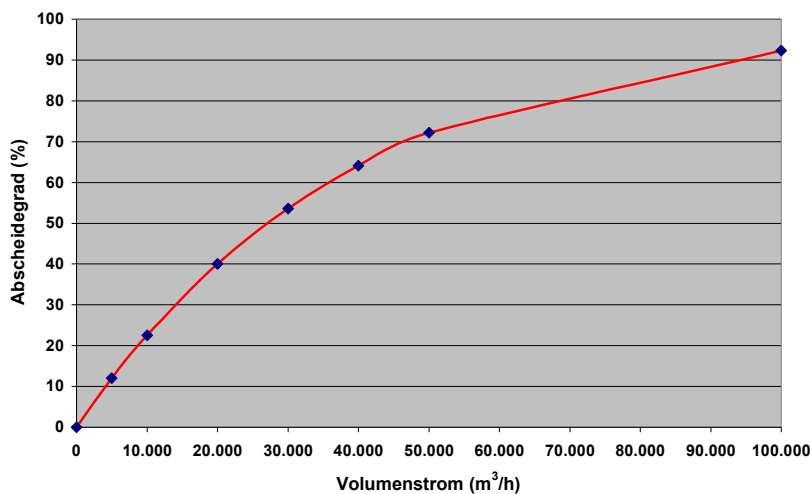




Bild 2: Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Höhe des abgesaugten Volumenstroms

Bei einer Reinigungsleistung von 80% bezogen auf die angesaugte Partikelkonzentration sollte der Volumenstrom im Bereich von 40.000 – 50.000 m³/h liegen, um ausreichende Abscheidegrade von etwa 60 – 70% zu erreichen. Hieraus ergibt sich direkt die notwendige Größe der Filtereinheit und die notwendige elektr. Leistung für den Betrieb der Ansauggebläse über einen ebenfalls im Fahrzeug untergebrachten Stromgenerator.

1. Abschlussbemerkungen und Handlungsempfehlungen:

Aufgrund der ersten Ergebnisse erscheint das geplante Verfahren durchaus sinnvoll und technisch machbar. Bei Fahrgeschwindigkeiten von etwa 5 km/h, abgesaugten Volumenströmen von 40.000 m³/h und 80% Abscheidegrad der Tuchfilter können auf Grundlage der obigen überschlägigen Berechnungen Reinigungsleistungen von 60-70 % bezogen auf die Anfangskonzentration erreicht werden.

Zur genauen Auslegung der Ansaugung und des Reinigungsfahrzeuges sowie deren Reinigungsleistung müssen jedoch genauere Berechnungen auf Basis von strömungstechnischen Simulationsprogrammen wie z.B. FLUENT durchgeführt werden. In diesem Zuge kann dann auch der Einfluss unterschiedlicher baulicher Gegebenheiten und des Straßenverkehrs ermittelt werden. Aufgrund der ersten Ergebnisse dieser Studie erscheint dieser erhöhte Aufwand sinnvoll und lohnenswert für die weitere Entwicklung des geplanten Verfahrens zur innerstädtischen Partikelreduktion.

2. Bau eines Prototypen:

Die patenrechtliche Absicherung ist hierfür dringend erforderlich, denn der Bedarf ist weltweit vorhanden. Die Realisierung des Prototypen kann mit ca. 500.000 € beziffert werden. Die Bauzeit, sowie die genehmigungsrechtlichen Abnahmen, die eine Betriebserlaubnis und die Bauartzulassung als Ziel haben, beträgt ca. 1 Jahr. Der Investor bekommt dafür den ausentwickelten Prototypen, den er als Lizenznehmer in seiner Regie fertigen lassen kann. Sollte wegen des Innovationsvorsprunges Interesse an der Koopertion mit den Entwicklern bestehen, so wird hierfür auch ein Weg gesehen.

RW