

Ingenieurgemeinschaft DR. DICKELS & PARTNER

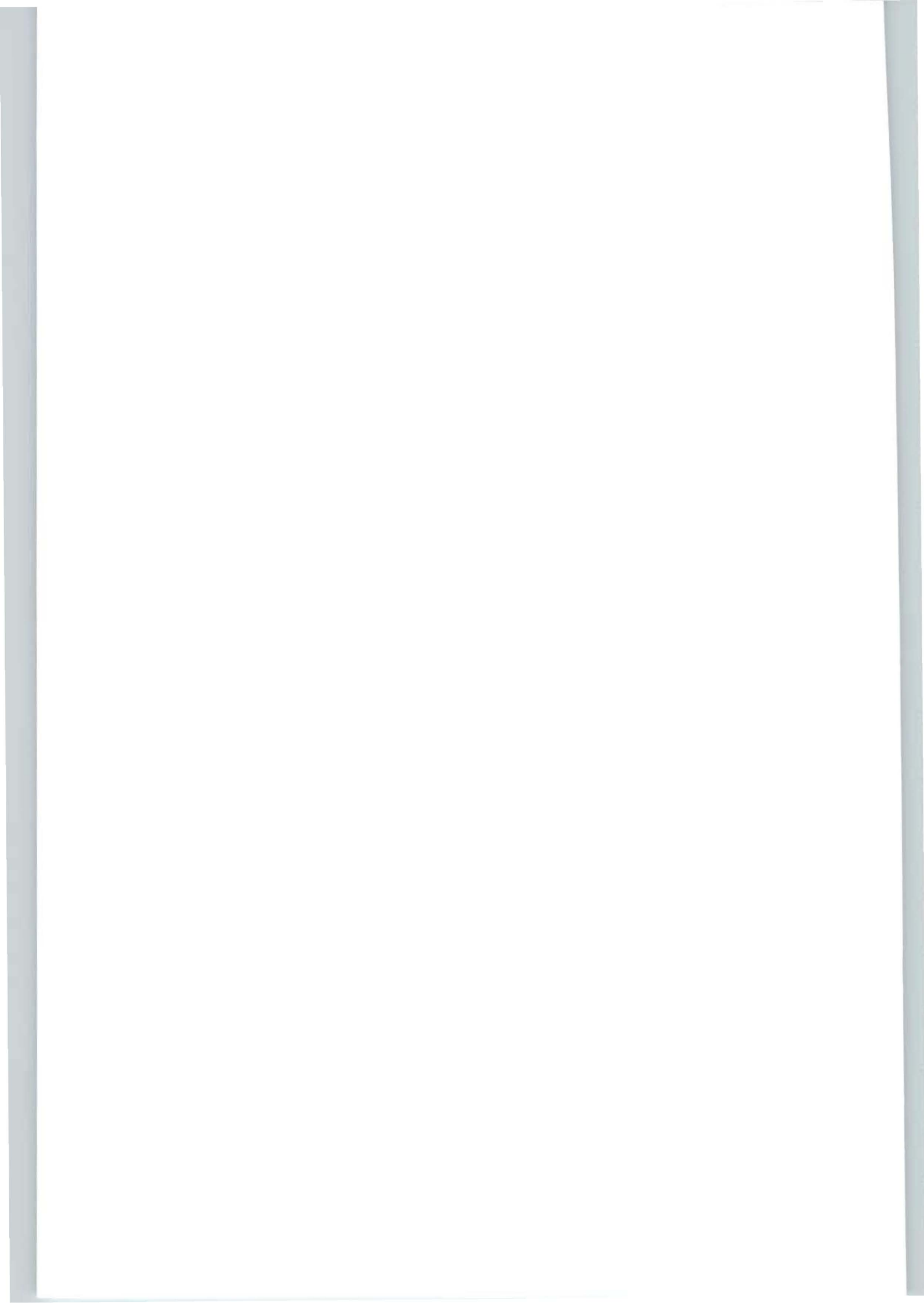
**Erforschung und Entwicklung eines  
Elektrofiltersystems  
zur Partikelabscheidung aus  
Abgasen von  
Schiffsdieselmotoren**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ: 13569/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Paul Kerzel  
Dipl.-Ing./Dipl.-Wirtschaftsing. Dr.rer.pol. Karl Dickels

Starnberg, Februar 2003



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

**UMWELT  
STIFTUNG**

|    |                 |         |               |             |                      |
|----|-----------------|---------|---------------|-------------|----------------------|
| Az | <b>13569/01</b> | Referat | <b>(21/0)</b> | Fördersumme | <b>925.000,00 DM</b> |
|----|-----------------|---------|---------------|-------------|----------------------|

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>Antragstitel</b> | <b>Erforschung und Entwicklung eines Elektrofiltersystems zur Partikelabscheidung aus Abgasen von Schiffsdieselmotoren</b> |
|---------------------|--|

|                   |  |
|-------------------|--|
| <b>Stichworte</b> | Verfahren<br>Emission , Filter , Motor , Optimierung |
|-------------------|--|

|          |                |             |                 |
|----------|----------------|-------------|-----------------|
| Laufzeit | Projektbeginn  | Projektende | Projektphase(n) |
|          | <b>04/1999</b> |             | <b>1. Phase</b> |

|                  |               |
|------------------|---------------|
| Zwischenberichte | quartalsweise |
|------------------|---------------|

|                              |   |                                    |
|------------------------------|---|------------------------------------|
| <b>Bewilligungsempfänger</b> | Dr. Dickels & Partner<br>Ingenieurgesellschaft<br>Berger Straße 15<br>82319 Starnberg | Tel 08151/89955<br>Fax 08151/28249 |
|------------------------------|---|------------------------------------|

|                |
|----------------|
| Projektleitung |
|----------------|

|             |
|-------------|
| Dr. Dickels |
|-------------|

|            |
|------------|
| Bearbeiter |
|------------|

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Kooperationspartner</b> | MET Motoren- und Energietechnik GmbH<br>MWB Motoren & Anlagen GmbH & Co. Marinetechnik KG, Bremerhaven<br>Institut für thermische Maschinen und Anlagen der Universität Rostock<br>Institut für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg |
|----------------------------|---|

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Von Dieselmotoren emittierte Partikel stellen ein hohes Gesundheitsrisiko dar. Schiffsdieselmotoren verursachen ca. 15 % der globalen Luftverschmutzung. Mit motorinternen Maßnahmen konnte die Partikelemission bisher nur in einem geringen Umfang reduziert werden. Keramikfilter und Tiefenfilter mit Druckverlusten bis 10.000 Pa verursachen nachteilige Auswirkungen im Motor.

Elektrofilter erschienen für eine Abscheidung von Rußemissionen aus Dieselmotoren besonders geeignet: Sie besitzen nur einen geringen Druckverlust (50 - 70 Pa) und ermöglichen, den in der Abgasstrecke max. zulässigen Gegendruck einzuhalten. Als Ziel des Vorhabens sollte auf Basis eines Elektrofilters ein praktisch einsetzbarer Dieselußfilter entwickelt werden, der die Nachteile der bekannten Filterverfahren vermeidet.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Eine Erreichung des Projektzieles umfaßt folgende Arbeitsschritte:

- Abgasanalysen verschiedener Motoren, Lastzustände und Brennstoffe
- Strömungstechnische Simulationen (CFD) der Partikelbewegungen
- Entwicklung des Elektrofilters zur Partikelabscheidung aus Dieselabgasen
- Entwicklung einer automatischen Filterabreinigung
- Dauerstandversuche mit einer Prototypfilteranlage
- Prüfung von Verfahren zur Verwertung der Filteranlagerungen

Die Durchführung des Vorhabens erfolgt in Zusammenarbeit mit zwei Kooperationspartnern.

Die Versuche werden an einer Brandversuchsanlage der Bundeswehr und auf einem Motorenversuchsstand der Uni Rostock mit einem Dieselmotor mit Schwerölbetrieb durchgeführt.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Zur Isolierung der unter Hochspannung stehenden Kollektorplatten von den geerdeten Kollektorplatten wurden Isolatoren entwickelt, die auch bei höheren Temperaturen und Rauchkonzentrationen einsetzbar sind. Während der ersten Versuche zeigte sich, daß die Isolatoren aufgrund der hohen Brandrauchkonzentration mit Ruß belegt waren. Bedingt durch die elektrische Leitfähigkeit des Rußes kommt es bereits nach kurzer Betriebsdauer zu Kriechströmen auf den Isolatoren und zu einem Ausfall des Filtermoduls.

Um eine Belegung der Isolatoren mit Ruß zu verhindern, wurden verschiedene Maßnahmen untersucht. Die wirksamste Maßnahme gegen eine Belegung der Isolatoren bieten Schutzkappen aus temperaturfestem Duranglas, die stirnseitig über die Isolatoren gestülpt werden und einen Ringspalt von einigen Millimetern zwischen Isolator und Schutzkappe entstehen lassen.

*Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Abscheideleistung:* Die Abscheidegrade werden erwartungsgemäß mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit im Filtermodul geringer. Es ist jedoch festzustellen, daß die Abscheidegrade oberhalb von 3 m/s in dem hier betrachteten Geschwindigkeitsbereich nicht wesentlich abnehmen.

*Einfluß der Rauchkonzentration:* Mit zunehmender Rauchkonzentration sinkt der Abscheidegrad. Der Grund ist eine mit der Konzentration abnehmende elektrische Aufladung der Partikel. Während bei geringen Partikelkonzentrationen ein oder mehrere elektrische Ladungsträger mit einer hohen Wahrscheinlichkeit an der Oberfläche eines jeden Partikels adsorbieren, nimmt diese Wahrscheinlichkeit mit zunehmender Brandrauchkonzentration ab, da die zur Verfügung stehenden elektrischen Ladungen bereits von den Partikeln abgefangen werden, die sich nahe an den Emissionsquellen der elektrischen Ladung, den Sprühspitzen des Ionisators, befinden. Partikel in der Kernströmung des Ionisators erhalten somit nur eine geringe bzw. keine elektrische Ladung.

*Einfluß der Filterkonfiguration:* Um eine optimale Konfiguration des Filters zu finden, wurden Versuche mit verschiedenen Betriebszuständen von Ionisator (I) und Kollektor (K) durchgeführt. Vier Filterkomponenten (2 Ionisatoren und 2 Kollektoren) wurden in das Filtergehäuse eingebaut, und unterschiedlich mit elektrischer Spannung beaufschlagt.

Das beste Abscheideergebnis wurde mit einem zweistufigen „Tandemfilter“ I-K-I-K erreicht, da die in der ersten Ionisationsstufe nicht aufgeladenen Partikel in der zweiten Ionisationsstufe eine Ladung erhalten und anschließend ebenfalls abgeschieden werden können.

*Filterstandzeit:* Die Versuche zeigten, daß mit einer nahezu gleichbleibenden Abscheiderate über ca. 2,5 h zu rechnen ist. Anschließend nimmt die Abscheiderate etwas ab, ist aber auch nach ca. 4 h noch zufriedenstellend. Erst anschließend ist eine Filterreinigung erforderlich.

*Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Motorlast:* Erwartungsgemäß nimmt die Abscheideleistung mit zunehmender Motorlast ab, da aufgrund der höheren Kraftstoffzufuhr sowohl Abgasgeschwindigkeit als auch Partikelkonzentration im Elektrofilter zunehmen. Eine Analyse der abgeschiedenen Partikel zeigte, daß neben den Rußpartikeln auch nicht verbrannte Kohlenwasserstoffe und Öltröpfchen im Elektrofilter entfernt werden. Bezogen auf den reinen Kohlenstoffgehalt der Partikel beträgt die Abscheiderate ca. 70 %.

*Filterabreinigung:* Es wurde eine Abreinigung des Filters mit Dampf getestet. Der Dampf wurde mittels Düsen, die oberhalb der Filtermodule in das Filtergehäuse eingebaut waren, auf die Filter geblasen. Mit dieser Methode wurden gute Reinigungsergebnisse erzielt. Ein geringer Anteil des eingeblassenen Dampfes kondensiert an den Filterplatten und am Filtergehäuse. Die entstehenden Wassertropfen nehmen einen Teil der Rußpartikel auf, tropfen in den Auffangbehälter am Boden des Filtergehäuses und können dort entfernt werden. Eine Reinigung der Filtermodule mit Dampf hat den Vorteil, daß nahezu keine Temperaturdifferenz zwischen dem Reinigungsmedium und den vom Motorabgas aufgeheizten Filterplatten entsteht, und somit auch keine mechanischen Spannungen und Verformungen der Kollektorplatten auftreten können.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

In Kurzprospekten und Gesprächen wurde das neue Filtersystem mehreren Schiffsbetreibern, Werften und Motorenherstellern im In- und Ausland vorgestellt. In einer Präsentation wurde das zuständige Referat im Bundesverkehrsministerium über die Eigenschaften des Filters informiert. Weitere Kurzinformationen wurden an die zuständige Abteilung des Umweltbundesamtes und des Germanischen Lloyd geschickt.

## **Fazit**

Von allen informierten Stellen wurde anerkannt, daß der Filter eine Möglichkeit für eine Verringerung von Partikelemissionen bei Schiffsmotoren mit Schwerölbetrieb eröffnet. Die erreichten Abscheidegrade von 50 % bezogen auf die Gesamtmasse der Partikel bzw. von ca. 70 % bezogen auf den anteiligen Ruß wurde als ein bedeutender Fortschritt und zunächst als ausreichend angesehen.

# Inhaltsverzeichnis

|  | <u>Seite</u> |
|--|--------------|
| <b>I Verzeichnis der Abbildungen</b>                               | 3            |
| <b>II Verzeichnis der Tabellen</b>                                 | 5            |
| <b>III Verzeichnis von Begriffen und Definitionen</b>              | 6            |
| <b>0. Zusammenfassung</b>  | 7            |
| <b>1. Projektbeteiligte</b>  | 8            |
| <b>2. Ziel und Anlaß des Vorhabens</b>                             | 9            |
| 2.1 Ausgangslage   | 9            |
| 2.2 Technischer Stand  | 10           |
| 2.2.1 Filtersysteme für Dieselmotoren                              | 10           |
| 2.2.1.1 Geschlossene Filtersysteme                                 | 10           |
| 2.2.1.2 Offene Filtersysteme                                       | 11           |
| 2.2.2 Motorenentwicklung   | 11           |
| 2.2.3 Defizite der Verfahren                                       | 11           |
| 2.3 Lösungsansatz  | 12           |
| 2.3.1 Elektrostatische Filter zur Partikelabscheidung              | 13           |
| 2.3.2 Frühere Forschungsarbeiten des Antragstellers auf dem Gebiet | 13           |
| 2.3.3 Vorteile des Filters gegenüber dem Stand der Technik         | 14           |
| <b>3. Versuche</b>   | 15           |
| 3.1 Versuche auf der Anlage der WTD 91                             | 15           |
| 3.1.1 Wirkungsweise und Aufbau des Filters                         | 15           |
| 3.1.2 Versuchsaufbau   | 17           |
| 3.1.3 Versuchsdurchführung   | 20           |
| 3.1.4 Versuchsergebnisse   | 21           |
| 3.1.4.1 Isolatoren   | 21           |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1.4.2 Abscheideleistung des optimierten Elektrofilters                    | 24        |
| 3.1.4.2.1 Berechnung des Abscheidegrades                                    | 24        |
| 3.1.4.2.2 Kinetik der Rauchpartikelabscheidung                              | 27        |
| 3.1.4.2.3 Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit<br>auf die Abscheideleistung | 28        |
| 3.1.4.2.4 Einfluß der Rauchkonzentration auf die Abscheideleistung          | 28        |
| 3.1.4.2.5 Einfluß der Filterkonfiguration auf die Abscheideleistung         | 29        |
| 3.2 Versuche auf dem Motorenversuchsstand der Universität Rostock           | 30        |
| 3.2.1 Versuchsfilter Variante A   | 30        |
| 3.2.1.1 Filteraufbau  | 30        |
| 3.2.1.2 Versuchsaufbau  | 31        |
| 3.2.1.3 Schwingungsproblematik  | 31        |
| 3.2.1.4 Meßtechnik  | 32        |
| 3.2.1.5 Versuchsdurchführung  | 32        |
| 3.2.1.6 Versuchsergebnisse  | 33        |
| 3.2.2 Versuchsfilter Variante B   | 34        |
| 3.2.2.1 Aufbau des Filters  | 34        |
| 3.2.2.2 Versuchsaufbau  | 35        |
| 3.2.2.3 Meßtechnik  | 35        |
| 3.2.2.4 Versuchsdurchführung  | 36        |
| 3.2.2.5 Versuchsergebnisse  | 37        |
| 3.2.2.6 Filterabreinigung   | 39        |
| <b>4. Einbau des Partikelfilters auf Schiffen</b>                           | <b>41</b> |
| 4.1 Ermittlung von Anforderungsmerkmalen                                    | 41        |
| 4.2 Ermittlung von optimalen Bauformen                                      | 42        |
| 4.3 Weitere Schritte  | 43        |
| <b>5. Weitere Einsatzmöglichkeiten des Filters</b>                          | <b>43</b> |
| 5.1 Diesellokomotiven   | 43        |
| 5.2 Blockheizkraftwerke und stationäre Dieselgeneratoren                    | 44        |
| 5.3 Mobile Dieselgeneratoren  | 44        |
| <b>6. Ausblick</b>  | <b>44</b> |

## I Verzeichnis der Abbildungen

|   | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| Abb. 2.1: Abscheidung von Brandrauchpartikeln an der Pilotanlage am Elbtunnel   | 14           |
| Abb. 3.1: Wirkungsweise eines zweistufigen Elektrofilters   | 16           |
| Abb. 3.2: Ausgeführtes Elektrofiltermodul   | 17           |
| Abb. 3.3: Ansicht der Filteranlage auf der Brandsektion Schiff, WTD 91, Meppen  | 18           |
| Abb. 3.4: Strömungsprofil des Rauchgases 0,18 m vor Übergangsstück<br>zum Elektrofilter                                 | 19           |
| Abb. 3.5: Ausführung der Isolatorschutzkappe  | 24           |
| Abb. 3.6: Beziehung zwischen Partikelkonzentration, Transmission und<br>Extinktionskoeffizient                          | 26           |
| Abb. 3.7: Vergleich der mit Gl. 3.6 und Gl. 3.8 berechneten Abscheideraten  | 26           |
| Abb. 3.8: Abscheidegrad als Funktion der Versuchsdauer  | 27           |
| Abb. 3.9: Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Abscheideleistung  | 28           |
| Abb. 3.10: Einfluß der Rohgaskonzentration auf die Abscheideleistung  | 29           |
| Abb. 3.11: Einfluß der Filterkonfiguration auf die Abscheideleistung  | 30           |
| Abb. 3.12: Abscheidegrad als Funktion der Versuchsdauer   | 37           |
| Abb. 3.13: Abscheidegrad als Funktion der Filterkonfiguration   | 38           |
| Abb. 3.14: Abscheidegrad als Funktion der Motorlast   | 39           |
| Abb. 3.15: Mit Ruß belegtes Filtermodul nach einem Betrieb von ca. drei Stunden   | 40           |
| Abb. 3.16: Manuelle Reinigung des Filters mit Druckluft   | 40           |
| <br><u>Anhang</u>   |              |
| A 1: Aufbau und Abmessung der „Brandsektion Schiff“ auf der WTD 91, Meppen  | 49           |
| A 2: Aufbau der Versuchsanlage (Variante A) am Versuchsstand<br>der Universität Rostock                                 | 50           |
| A 3: Aufbau des Filtergehäuses (Variante A)   | 51           |
| A 4: Konstruktionszeichnung des Filtermoduls (Variante B)   | 52           |
| A 5: Ansicht des Filtergehäuses (Variante B)  | 53           |
| A 6: Einbau des Partikelfilters auf dem Versuchsstand der Universität Rostock   | 54           |
| A 7: Zweistufiger Partikelfilter im Abgaskanal des Motorenversuchsstandes der<br>Universität Rostock (Gehäuse geöffnet) | 55           |
| A 8: Vereinfachtes Anlagenschema des Filters  | 56           |
| A 9: Abmessungen eines Partikelfilters für einen Schiffsmotor von 6.000 kW  | 57           |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| A 10: | Partikelfilter für einen Schiffsmotor von 6.000 kW mit Anordnung der Filtermodule auf zwei Ebenen   | 58 |
| A 11: | Einbaumöglichkeit eines Filters in den Schornstein eines Containerschiffs (Motorleistung: 6.000 kW) | 59 |
| A 12: | Einbaumöglichkeit eines Filters auf dem Fährschiff „Prins Joachim“ (Draufsicht)                     | 60 |
| A 13: | Einbaumöglichkeit eines Filters auf dem Fährschiff „Prins Joachim“ (Seitenansicht)                  | 61 |
| A 14: | Einbaumöglichkeit eines Filters in eine Diesellokomotive der Baureihe 218                           | 62 |
| A 15: | Einbaumöglichkeit eines Filters in eine Diesellokomotive der Baureihe G 1206 (Draufsicht)           | 63 |
| A 16: | Einbaumöglichkeit eines Filters in eine Diesellokomotive der Baureihe G 1206 (Schnitt)              | 64 |



## II Verzeichnis der Tabellen

|  | <u>Seite</u> |
|--|--------------|
| Tab. 3.1: Luftvolumenströme und Luftgeschwindigkeiten im Filtermodul für verschiedene Klappenstellungen der Klappen vor dem Ventilator | 20           |

### III Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

|                |  |  |
|----------------|--|--|
| a              | Konstante  | [mg/m <sup>3</sup> ], [mg/m <sup>2</sup> ] |
| c <sub>1</sub> | Rauchkonzentration vor Filter                        | [mg/m <sup>3</sup> ]                       |
| c <sub>2</sub> | Rauchkonzentration nach Filter                       | [mg/m <sup>3</sup> ]                       |
| d <sub>p</sub> | Partikeldurchmesser                                  | [µm]                                       |
| e              | 2,71828... natürlicher Logarithmus                   | [-]  |
| I              | detektierte Lichtmenge bei belasteter Meßstrecke     | [Im · s]                                   |
| I <sub>0</sub> | detektierte Lichtmenge bei partikelfreier Meßstrecke | [Im · s]                                   |
| k <sub>1</sub> | Extinktionskoeffizient vor Filter                    | [1/m]                                      |
| k <sub>2</sub> | Extinktionskoeffizient nach Filter                   | [1/m]                                      |
| T <sub>1</sub> | Transmission vor Filter                              | [%]  |
| T <sub>2</sub> | Transmission nach Filter                             | [%]  |
| x              | Länge der Meßstrecke                                 | [m]  |
| η              | Wirkungsgrad des Filters                             | [%]  |

## 0. Zusammenfassung

Schiffsdieselmotoren verursachen ca. 15 % der globalen Luftverschmutzung. Der Germanische Lloyd nennt deshalb eine Beseitigung der Emissionen von Rußpartikeln eine der vorrangigsten Umweltmaßnahmen auf Seeschiffen. Mit motorinternen Maßnahmen konnte die Partikelemission im Abgas von Dieselmotoren bisher nur geringfügig reduziert werden. Keramikfilter und Tiefenfilter besitzen Druckverluste bis 10.000 Pa und verursachen nachteilige Auswirkungen im Motor. Aufgrund von Versuchen des Antragstellers im Rahmen eines früheren Forschungsprojektes erschienen Elektrofilter für eine Abscheidung von Rußemissionen aus Dieselmotoren besonders geeignet: Elektrofilter besitzen nur einen geringen Druckverlust (50 - 70 Pa).

Als Ziel des Forschungsvorhabens sollte auf Basis eines Elektrofilters ein praktisch einsetzbarer Dieselrußfilter entwickelt werden, der die Nachteile der bekannten Filterverfahren vermeidet. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden mehrere Filtermodule getestet. Die Versuche wurden an einem Versuchsstand der Bundeswehr und an einem Motorenversuchsstand der Universität Rostock durchgeführt. Mit einem noch nicht optimierten Elektrofilter in Rostock durchgeführte Abscheideversuche ließen die Schlußfolgerung zu, daß ein Elektrofilter prinzipiell für eine Abscheidung von Partikeln aus Abgas von Dieselmotoren sowohl bei Verwendung von Dieselkraftstoff als auch von Schweröl geeignet ist.

Ausgehend von den gewonnenen Erfahrungen wurde ein neues Filtermodul mit einer vertikalen Ausrichtung für einen Einbau in einen Schiffsschornstein konstruiert, das auch für die vom Motor verursachten Schwingungen besser geeignet ist, und auf der Versuchsanlage der Universität Rostock getestet. Mit einem zweistufigen „Tandemfilter“ wurde eine Abscheiderate von ca. 70 % bezogen auf den reinen Kohlenstoffgehalt der Partikel erreicht. Durch Ergänzung mit weiteren Filterstufen kann die Abscheideleistung des Filters erhöht werden. Für eine Abreinigung der Filtermodule hat sich Dampf als vorteilhaft erwiesen.

Die im Forschungsantrag genannte Abscheiderate von 95 % konnte mit dem Filtersystem noch nicht realisiert werden. Die erreichten Abscheideraten werden von Schiffsbetreibern und Motorenherstellern jedoch als ein bedeutender Fortschritt und als zunächst ausreichend anerkannt.

Als nächster Schritt für eine praktische Umsetzung der Ergebnisse ist ein Test eines Pilotfilters auf einem Fährschiff der „Viking Line“ geplant.

Mit Herstellern und Betreibern von Diesellokomotiven wird ein Einsatz des Filters in Diesellokomotiven geprüft.

An dem Forschungsprojekt waren die Ingenieurgemeinschaft DR. DICKELS & PARTNER (Antragsteller), die MET Motoren- und Energietechnik GmbH und die Universität Rostock beteiligt.

## 1. Projektbeteiligte

An dem Projekt waren folgende Hochschulinstitute und gewerbliche Unternehmen mit folgenden Aufgaben beteiligt:

### **Ingenieurgesellschaft DR. DICKELS & PARTNER (Antragsteller)**

Die Ingenieurgesellschaft DR. DICKELS & PARTNER wurde 1981 mit den Arbeitsgebieten Energietechnik, Umwelttechnik und betriebstechnische Ausrüstungen von Gebäuden und Bauwerken gegründet. Einen Arbeitsschwerpunkt bildet seit 1990 die Entwicklung von Verfahren zur Abscheidung von Schadstoffen aus Abluft und Abgas. Das Unternehmen war u.a. an einem vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Filtertechniken zur Reinigung von kontaminierter Luft aus Straßentunneln maßgebend beteiligt.

Aufgaben im Rahmen des Forschungsprojektes: Konstruktion Filteranlage, Planung Versuchsanlage, Entwicklung Elektrofilter, Entwicklung Filterabreinigung, Dauerstandversuche (Planung, Auswertung), Bewertung und Umsetzung der Ergebnisse, Projektkoordinierung.

### **MET Motoren- und Energietechnik GmbH (MET) (Kooperationspartner)**

Die MET GmbH ist ein Innovationsunternehmen im Bereich der Produkt- und Technologieentwicklung mit besonderen Erfahrungen im maritimen Sektor, in der Energie- und Verkehrstechnik. Zum internationalen Kundenkreis zählen große Reedereien, Werften und die führenden Hersteller von Schiffs- und Stationäranlagen. Die MET verfügt über modernste Simulationsverfahren der Festkörpermechanik, Fluidodynamik und Reaktionskinetik zur Optimierung von Maschinen und Anlagen und ablaufender Prozesse.

Geschäftsführer der MET ist Prof. Bludszweit, der im Rahmen des Projektes „Clean“ Projektleiter für Maßnahmen am Zwei-Takt-Motor zur Schadstoffreduzierung war.

Aufgaben im Rahmen des Forschungsprojektes: Abgasanalysen, CFD-Simulationen, FEM-Berechnungen, Entsorgung der Filteranlagen, Montage Versuchsanlage Rostock.

### **Universität Rostock, Institut für Thermische Maschinen und Anlagen**

(Kooperationspartner)

Das ITMA (Institut für Thermische Maschinen und Anlagen) der Universität Rostock verfügt neben der modernen Ausstattung des integrierten Betriebsstofflabors in vollem Umfang über meßtechnische Einrichtungen und besitzt umfangreiche Erfahrungen in der Anwendung und Interpretation dieser Methoden. Für die Durchführung der Messungen und Analysen stand hochqualifiziertes Personal unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K. Prescher zur Verfügung.

Aufgaben im Rahmen des Forschungsprojektes: Vorbereitung und Betrieb Motorenprüfstand, Partikelmessungen, Chemische Partikelanalyse, Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Partikel.

## **2. Ziel und Anlaß des Vorhabens**

### **2.1 Ausgangslage**

Von Dieselmotoren emittierte Partikel stellen ein hohes Gesundheitsrisiko dar. Bereits geringe Konzentrationen in der Luft können die Lungenfunktion nachhaltig beeinträchtigen. Einige Partikel besitzen eine extrem hohe kanzerogene Wirkung. Durch weltweite Forschungsarbeiten konnte in den letzten zehn Jahren die hohe Gesundheitsschädlichkeit von feinen Dieselrußpartikeln nachgewiesen werden. So entdeckten u.a. Forscher der Universität Tokyo unter den aus Dieselmotoren emittierten Partikeln nitrierte polyzyklische Kohlenwasserstoffe (3-Nitrobenzanthrone) mit einer hohen kanzerogenen Wirkung. Diese Partikel bilden zwar nur einen geringen Anteil, besitzen jedoch eine extrem hohe Mutationswirkung auf Gewebe.

Die Erkenntnisse haben zu zahlreichen Publikationen und auch zu verschärften Emissionsvorschriften geführt (z.B. neue EU-Richtlinie für reduzierte Grenzwerte von Partikelimmissionen).

Schiffsdieselmotoren verursachen ca. 15 % der globalen Luftverschmutzung. Die von Seeschiffen ausgehenden Schadstoffemissionen sind in stark befahrenen Seeregionen noch mehrere hundert Kilometer landeinwärts feststellbar. Die IMO (International Maritime Organisation) hat deshalb Grenzwerte zunächst für die Emissionen von SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> vereinbart, die ab dem Jahr 2000 für neue Seeschiffe in Kraft getreten sind. Verbindliche Normen für Grenzwerte von Rußemissionen werden im Rahmen der IMO diskutiert.

Der nahezu ausschließliche Einsatz von minderwertigen Restölen (Bunkeröle) als Kraftstoffe in Schiffsmotoren hatte eine starke Erhöhung der Partikelemissionen zur Folge. Es wird deshalb zunehmend auch eine Reduzierung der Rußemissionen gefordert. Neben ihrer Toxizität bilden die sichtbaren Dieselrauchemissionen auf Kreuzfahrtschiffen und Fähren eine erhebliche Belästigung für Passagiere und Besatzungsmitglieder. Die Reeder drängen deshalb auf eine Beseitigung bzw. Verringerung der Rauchemissionen. In seinem GL-Magazin vom 1. Juli 1997 nennt der Germanische Lloyd eine Beseitigung der Emissionen von Rußpartikeln eine der vordringlichsten Umweltmaßnahmen auf Seeschiffen.

Die Partikelemissionen stellen auch bei stationären Dieselmotoren mit Abwärmenutzung (BHKW) ein Problem dar. Die insbesondere bei Startvorgängen und transienten Betriebslasten zu beobachtenden starken Rußemissionen sind eine optisch unangenehme Erscheinung. Die Verrußung der Abgaswärmetauscher im Dauerbetrieb erfordert kurze Reinigungszyklen und ist ein großer Nachteil von BHKW mit Dieselmotoren.

## **2.2 Technischer Stand**

### **2.2.1 Filtersysteme für Dieselmotoren**

Die Erkenntnisse über die hohe Gesundheitsschädlichkeit der von Dieselmotoren emittierten Partikel haben eine Entwicklung von verschiedenen Verfahren zur Partikelabscheidung ausgelöst.

Die Filterverfahren lassen sich grob einteilen in:

- Geschlossene Filtersysteme
- Offene Filtersysteme

#### **2.2.1.1 Geschlossene Filtersysteme**

Das Abgas durchströmt ein Filtermaterial, wobei die Abgaspartikel von dem Filtermaterial zurückgehalten werden. Das hitzebeständige Filtermaterial ist hierbei ein keramischer oder ein metallischer Werkstoff. Das Filtermaterial kann als dünnwandige poröse Keramikplatten gestaltet sein, oder die Form von dünnen Fasern besitzen. So besteht ein auf dem Markt angebotenes Partikelfiltersystem aus Filterkerzen mit einem inneren und äußeren Lochzylinder, zwischen denen sich als Filtermedium ein Gestrück von keramischen Mikrofasern befindet.

Ein von der Universität Karlsruhe entwickelter Abgaspartikelfilter besteht aus metallischen Filterkerzen. Die Abreinigung erfolgt über eine ohm'sche Aufheizung des Filtermaterials. Hierbei muß der Gasdurchsatz verringert werden.

Die Regenerierung der Filter erfolgt durch Abbrennen der Filteranlagerungen mit einer Umwandlung der Rußpartikel in Kohlendioxid und Wasser. Um die Abbrenntemperatur zu verringern, kann dem Abgas ein Additiv, bestehend aus eisenorganischen Verbindungen, beigemischt werden. Hierbei wird eine Selbstzündung der Filteranlagerungen durch die Abgastemperatur angestrebt.

Bei anderen Filtern erfolgt eine Umwandlung der Filteranlagerungen durch einen katalytischen Prozeß unter Nutzung der hohen Abgastemperaturen.

Bei einem von der Technischen Universität Delft (Niederlande) entwickelten Keramikfilter ist die Keramikoberfläche mit einem katalytischen Material imprägniert.

### **2.2.1.2 Offene Filtersysteme**

Hierzu gehören Zyklone und Wäscher, wie sie in der Verfahrenstechnik bekannt sind.

In Kanada wurde ein kompakter Wäscher für eine Abscheidung von Schadstoffen aus Abgas von Schiffsdieselmotoren entwickelt. Das kontaminierte Waschwasser wird anschließend ins Meerwasser eingeleitet.

### **2.2.2 Motorenentwicklung**

Die motorinternen Maßnahmen zielen auf eine Verringerung der Emissionen von  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  ab. Bekannte Maßnahmen sind: 4-Ventiltechnik, Ladeluftkühlung, Hochdruckeinspritzung, Abgasrückführung, Kraftstoff-Wasser-Emulsionseinspritzung.

Soweit diese Maßnahmen zu einer Verbesserung des Motorwirkungsgrades und damit zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs führen, verringert sich auch die emittierte Rußmenge, wobei jedoch in der Regel der Anteil der gesundheitsschädlicheren kleinen Partikel ansteigt.

Einige Motorenhersteller arbeiten an Verfahren zur Rückführung der Partikel in den Verbrennungsprozeß.

### **2.2.3 Defizite der Verfahren**

Keramikfilter : Die mit diesen Filtern verbundenen hohen Druckverluste von 4.000 bis 10.000 Pa haben negative Auswirkungen auf die Gaswechsellvorgänge im Motor, was eine Verringerung des Motorwirkungsgrades und eine erhöhte Schadstoffproduktion zur Folge hat. Ferner besteht die Gefahr von Schäden an den Ventilsitzen.

Keramikfilter sind bei einem Motorbetrieb mit Schweröl nicht einsetzbar. Die Partikelemission ist bei Schweröl sechs mal so hoch wie bei Dieselmotoren. Die hohen Partikelkonzentrationen würden den Filter sehr schnell zusetzen.

Die Tiefenfilter mit Mikrofasern verursachen ebenfalls einen Druckverlust von bis zu 3.000 Pa. Die gleichen Nachteile besitzen auch metallische Filterkerzen.

Bei dem Abbrennen der Filteranlagen werden nur die kohlenstoffhaltigen Partikel umgewandelt, während die Aschepartikel auf dem Filter zurückbleiben und diesen zunehmend zusetzen. Nach einer bestimmten Betriebsdauer ist deshalb ein Austausch des Filters erforderlich.

Das Abbrennen erfordert eine aufwendige Heizeinrichtung.

Die hohen Temperaturen führen zu Rissen an den Keramikbauteilen.

Bei einem Abbrennen mit einem Zusatz von Additiven sind Abgastemperaturen von mindestens 300 °C erforderlich, die nur bei Vollast des Motors erreicht werden.

Die Verbrennungsrückstände von Additiven verursachen ein neues Umweltproblem.

Bei einer katalytischen Abreinigung sind nach Angaben des Herstellers ebenfalls Abgastemperaturen von 325 - 400 °C erforderlich, die bei Normallast des Motors nicht erreicht werden.

Motorinterne Systeme zur Verringerung der Schadstoffemissionen bedeuten einen Einbau von zusätzlichen Komponenten und Regelvorrichtungen am Motor und damit eine erhöhte Störanfälligkeit. Ein Ausfall der Maschinenanlage ist im Seeverkehr mit besonders hohen Folgekosten verbunden. Der Ausfall einer nachgeschalteten Filteranlage muß nicht zwangsläufig zu einem Motorstillstand führen.

Mit motorinternen Maßnahmen konnte die Partikelemission bisher nur in einem geringen Umfang verringert werden.

Motorinterne Maßnahmen sind im Gegensatz zu nachgeschalteten Filtern an vorhandenen Motoren nicht nachrüstbar.

Verfahren zur Rückführung der Partikel in den Brennraum haben sich bisher als zu aufwendig erwiesen.

### **2.3 Lösungsansatz**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte untersucht werden, ob eine Abscheidung von Partikeln aus dem Abgas von Dieselmotoren mit Elektrofiltern möglich ist und ob auf dieser



Basis ein praktisch einsetzbarer Dieselfilter entwickelt werden kann, der die Nachteile der bekannten Filterverfahren vermeidet.

### **2.3.1 Elektrostatische Filter zur Partikelabscheidung**

Elektrostatische Verfahren werden für eine Abscheidung von Partikeln aus einem Luft- oder Gasstrom seit Anfang des 20. Jahrhundert eingesetzt. So werden mit einstufigen Elektrofiltern größere Partikel mit Durchmessern von bis zu 100 µm aus Abgasen von Kohlekraftwerken, Müllverbrennungs- und Industrieanlagen (z.B. Zement- und Hüttenindustrie) abgetrennt. Die mit diesen Prozessen erzielte Reingaskonzentration entspricht in etwa der Konzentration des ungefilterten Abgases von Schiffsdieselmotoren. Filter dieser Bauart sind für den hier vorliegenden Anwendungsfall daher nicht geeignet.

In Japan werden seit 1978 Elektrofilter mit separaten Ionisatoren und Kollektoren zur Abscheidung von Rußpartikeln aus der Abluft von Straßentunneln eingesetzt. Die Partikelkonzentration im Abgas von Schiffsdieselmotoren ist jedoch um zwei Zehnerpotenzen höher als in der Abluft eines Straßentunnels. Die Filter sind nur für einen Betrieb in Tunnels, d.h. für einen Betrieb bei normaler Umgebungstemperatur, geeignet.

### **2.3.2 Frühere Forschungsarbeiten des Antragstellers auf dem Gebiet**

Die für eine Abscheidung von Partikeln aus Tunnelabluft in Straßentunneln eingesetzten Filter wurden von der Ingenieurgesellschaft DR. DICKELS & PARTNER (Antragsteller) im Zuge eines Forschungsprojektes für eine erhöhte Abscheidung von feinen Partikeln weiterentwickelt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes hatte der Antragsteller mit speziell entwickelten Elektrofiltern Versuche zur Abscheidung von Brandrauch bei 250 °C durchgeführt. Bei den Versuchen wurden Abscheideraten von 80 % erreicht (Abb. 2.1). Aufgrund der Versuchsergebnisse erschienen Elektrofilter für eine Abscheidung von Rußemissionen aus Dieselmotoren als besonders geeignet: Elektrofilter besitzen nur einen geringen Druckverlust (50 - 70 Pa) und ermöglichen, den in der Abgasstrecke von Dieselmotoren max. zulässigen Gegendruck einzuhalten. Die ebenen metallischen Filterflächen lassen sich mit einfachen Maßnahmen abreinigen.

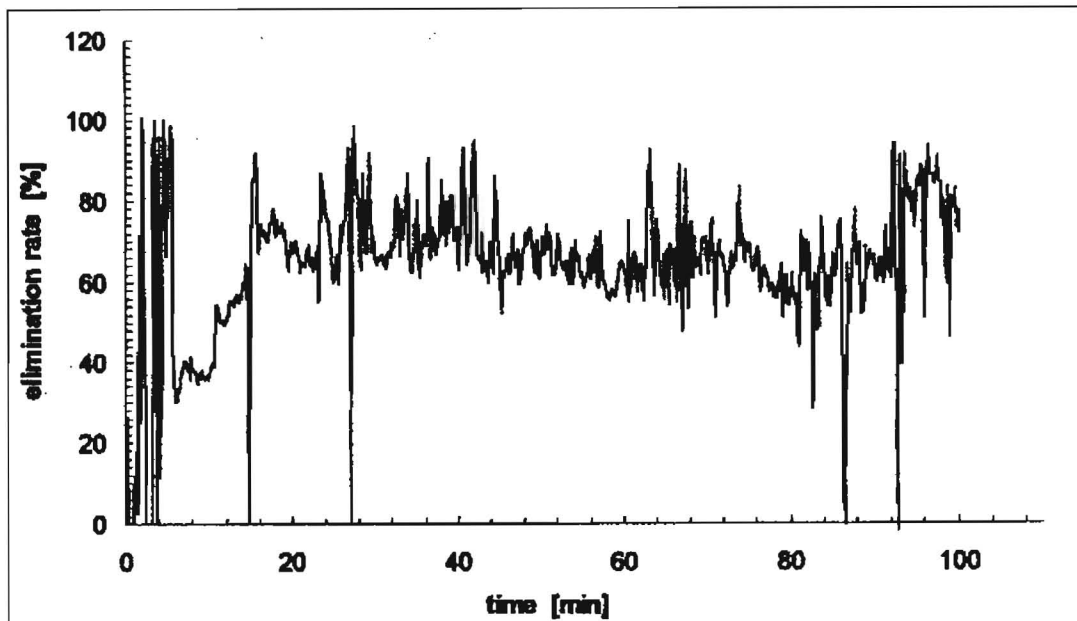


Abb. 2.1: Abscheidung von Brandrauchpartikeln an der Pilotanlage am Elbtunnel

### 2.3.3 Vorteile eines Elektrofilters gegenüber dem Stand der Technik

Der Elektrofilter besitzt gegenüber bisher bekannten Filterverfahren folgende Vorteile:

- Ein Elektrofilter hat einen einfachen Aufbau und lässt sich kostengünstig herstellen. Er erfordert nur einen geringen Wartungsaufwand.
- Bei einer Störung am Filter kann der Abgasstrom weiter über den abgeschalteten Filter geführt werden. Ein Einbau einer Bypass- Abgasleitung mit Klappen ist nicht erforderlich.
- Der Druckverlust des Filters beträgt nur ca. 100 Pa. Bei diesem geringen Druckverlust entstehen keine negativen Auswirkungen auf den Motor. Nach Aussage von Motorenherstellern ist der Filter problemlos auch an eingebauten Motoren nachrüstbar.
- Die Filteranlagerungen lassen sich mit Dampf oder Druckluft von den Filterplatten lösen. Es sind keine Zusatzstoffe für die Filterabreinigung erforderlich.

### **3. Versuche**

Im Laufe des Forschungsprojektes wurden mehrere Filtermodule getestet, die jeweils anhand der gewonnenen Versuchsergebnisse modifiziert wurden.

Die Versuche zur Rauchpartikelabscheidung wurden an einem Versuchsstand der Bundeswehr auf der Wehrtechnischen Dienststelle in Meppen (WTD 91) und an einem Motorenversuchsstand der Universität Rostock durchgeführt.

#### **3.1 Versuche auf der Anlage der WTD 91**

##### **3.1.1 Wirkungsweise und Aufbau des Filters**

Haupteinsatzbereiche von Elektrofiltern sind Anlagen zur Energieerzeugung sowie Anlagen der Zementindustrie und des Hüttenwesens. Sie werden dort zur Reinigung der Abgasströme eingesetzt.

In einem Elektrofilter werden Partikel elektrisch aufgeladen und in einem elektrischen Feld an einer Niederschlagselektrode angelagert. Dabei lassen sich die folgenden vier Vorgänge unterscheiden:

- a) Aufladung der Partikel im elektrischen Feld
- b) Transport durch das Elektrofilter und Ablenkung im elektrischen Feld
- c) Niederschlag an einer Niederschlagsfläche
- d) Abreinigung des Niederschlags von der Niederschlagsfläche

Je nach Bauart des Elektrofilters können diese Vorgänge in einem Teil oder in verschiedenen Teilen des Elektrofilters stattfinden. Besonders vorteilhaft sind zweistufige Elektrofilter, bei denen die Aufladung der Partikel in einem Ionisator und die Abscheidung der Partikel in einem Kollektor stattfindet. In diesem Fall können die elektrischen Spannungen in den einzelnen Teilprozessen optimal angepaßt werden. In Abb. 3.1 ist die prinzipielle Wirkungsweise eines zweistufigen Elektrofilters dargestellt.

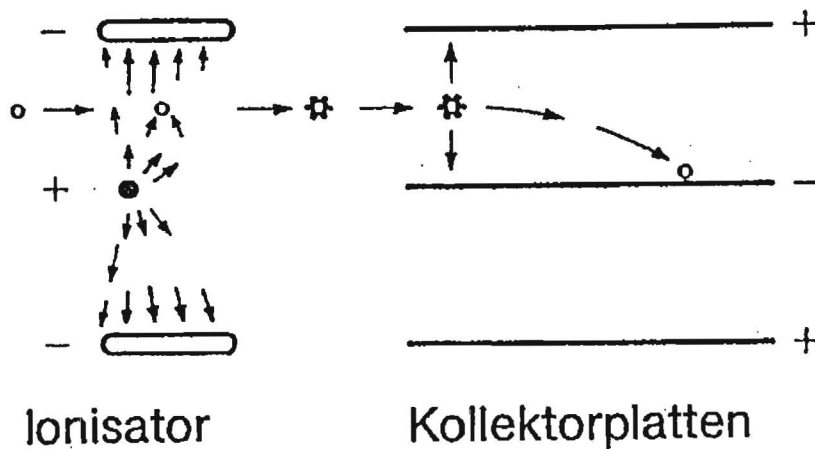


Abb. 3.1: Wirkungsweise eines zweistufigen Elektrofilters

### Partikelaufladung

Für die Aufladung der Partikel in einem ionisierten Gas sind zwei Prozesse maßgebend. Einerseits diffundieren Ionen aufgrund verschiedener Vorgänge durch das Gas und treffen dabei zwangsläufig mit den im Gas dispergierten Partikeln zusammen. Im Falle eines ideal elastischen Stoßes lagern sie sich dort an und erzeugen somit eine Aufladung der Partikel.

Der zweite Prozeß, der bei den größeren Partikeln mit einem Durchmesser  $d_p > 2 \mu\text{m}$  in den Vordergrund tritt, ist die sogenannte „Feldaufladung“. Hier ist der Vorgang dadurch bestimmt, daß die Ionen (und Elektronen) durch die elektrische Feldkraft beschleunigt werden. Diese beschleunigten Ladungsträger treffen dann auf die Partikel und laden sie elektrisch auf.

Die beiden Prozesse überlagern sich. Ihre Gewichtung ist von der Partikelgröße und dem Gaszustand, der die mittlere freie Weglänge der Teilchen bestimmt, abhängig.

### Partikelabscheidung

Die aufgeladenen Partikel bewegen sich unter dem Einfluß der elektrischen Feldkräfte in Richtung Niederschlagselektrode. Hier sollen sie sich so anlagern, daß sie nicht wieder in den Gasstrom eintreten, aber leicht wieder abzureinigen sind. Dabei sollen sie weder die Gasströmung durch Einengen der Filtergasse noch den Fortgang der Partikelabscheidung behindern. Auf die Geschwindigkeit des Niederschlags und die Haftung der Partikel an den Niederschlagselektroden haben Größe und Form der Partikel, elektrische Aufladung der Partikel, Feuchtigkeit, Form und Oberfläche der Niederschlagselektroden, einen Einfluß.

Die Abb. 3.2 zeigt einen zweistufigen Elektrofilter, wie er in den ersten Versuchen (Variante A) eingesetzt wurde.

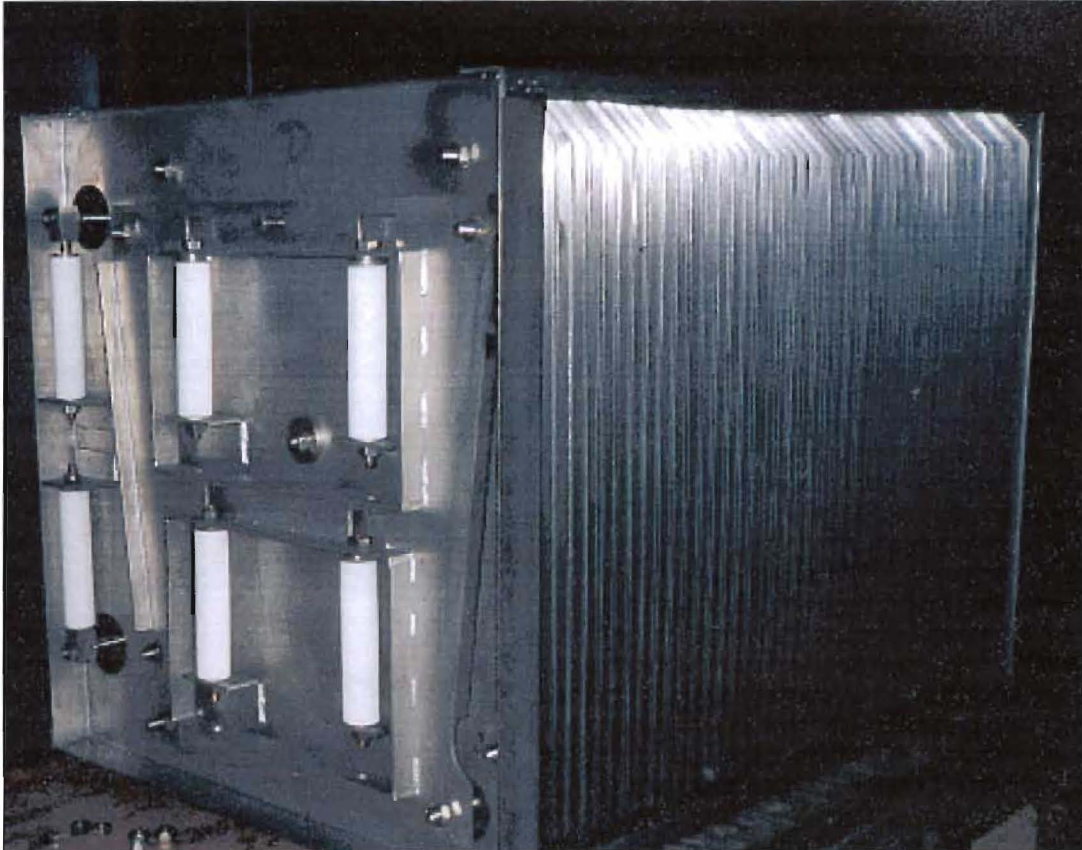


Abb. 3.2: Ansicht Elektrofiltermodul Variante A

Der Filter besteht aus einem als Sprühspitzen ausgebildetem Ionisator und einem separaten Kollektor. Die mit Spannung beaufschlagten Komponenten sind über Stabisolatoren an den beiden Stirnseiten isoliert. Der Plattenabstand im Kollektor beträgt ca. 9 mm. Anzahl der Kollektorplatten und Plattenabstand lassen sich durch Austausch von Distanzhülsen verändern.

### 3.1.2 Versuchsaufbau

Auf dem Gelände der WTD 91 in Meppen steht ein als Stahlkonstruktion ausgeführter Nachbau eines Schiffsmaschinenraumes (s. Anh. A 1). Die als „Brandsektion Schiff“ bezeichnete Einrichtung dient zur Erprobung von Techniken zur Beherrschung eines Brandes in einem Schiffsmaschinenraum. Die im Maßstab 1:1 errichtete Anlage besitzt ein Gesamtvolumen von ca. 700 m<sup>3</sup>. Als Brandquelle dienen mit Wasser und Dieseldieselkraftstoff gefüllte Metallwannen sowie über ein Rohrsystem eingespritzter Dieseldieselkraftstoff, mit dem der Bruch einer Kraftstoffleitung simuliert werden soll.

Die Versuchsanlage zur Partikelabscheidung ist auf dem Dach der Brandsektion Schiff aufgebaut

(s. Abb. 3.3). Mittels eines Ventilators wird der Brandrauch über ein Rohr DN 500 aus der Brandsektion Schiff durch das Filtergehäuse gesaugt. Über einen Abluftstutzen gelangen die behandelten Brandgase ins Freie. Mit einer vor dem Elektrofilter in den Luftkanal eingebauten Klappe läßt sich durch Ansaugen von Frischluft die aus der Brandsektion Schiff abgesaugte Rauchgasmenge einstellen und somit die Rauchgaskonzentration im Filter variieren.

Mittels einer zweiten Luftklappe, die in Strömungsrichtung zwischen Elektrofilter und Ventilator angeordnet ist, kann der durch den Elektrofilter geleitete Abluftvolumenstrom eingestellt werden.



Abb. 3.3: Ansicht der Filteranlage auf der Brandsektion Schiff, WTD 91, Meppen

### Strömungstechnik

Vor Beginn der Versuche wurde das Strömungsprofil im Luftkanal vor dem Elektrofilter ermittelt. Die Meßstelle befindet sich 0,18 m vor dem Übergangsstück zwischen dem Rohr DN 500 und dem rechteckigen Querschnitt des Filtergehäuses. Das Strömungsprofil ist für fünf Stellungen der Luftklappe vor dem Ventilator aus Abb. 3.4 ersichtlich. Das Strömungsprofil ist aufgrund eines in Strömungsrichtung vor dem Meßpunkt liegenden 90 °-Rohrbogens noch relativ unsymmetrisch. Wie Stichprobenmessungen unmittelbar vor dem Elektrofiltermodul zeigten, kann aufgrund der Verzögerung der Luftströmung im Übergangsstück

vom Luftkanal auf das Filtermodul und aufgrund des Druckverlustes im Filtergehäuse von einer nahezu gleichmäßigen Strömungsverteilung im Filtermodul ausgegangen werden.

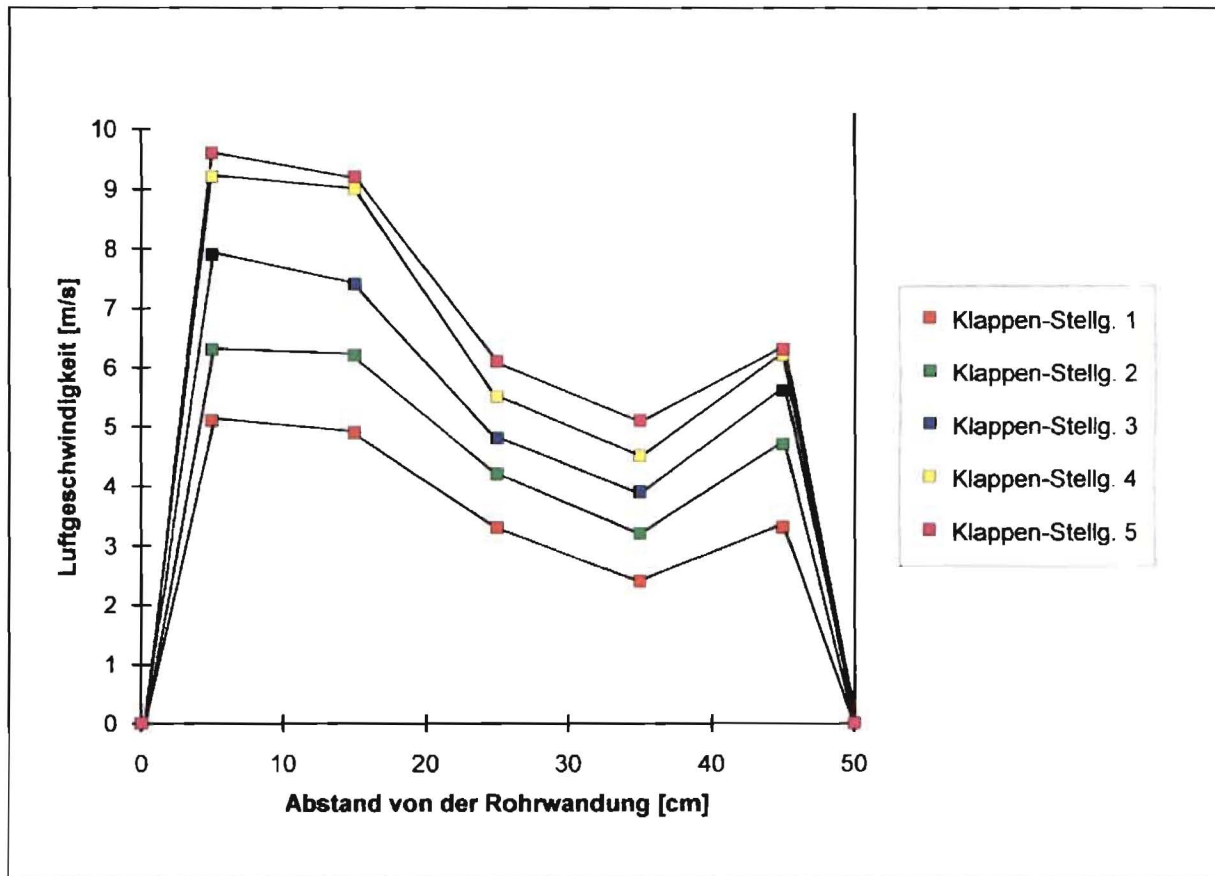


Abb. 3.4: Strömungsprofil des Rauchgases 0,18 m vor Übergangsstück zum Elektrofilter

Mit Hilfe der gemessenen Strömungsprofile lassen sich für die einzelnen Stellungen der Luftklappe vor dem Ventilator die in Tabelle 3.1 angegebenen Luftvolumenströme bzw. mittleren Luftgeschwindigkeiten im Filtermodul berechnen.

Tab. 3.1: Luftvolumenströme und Luftgeschwindigkeiten im Filtermodul für verschiedene Klappenstellungen der Klappe vor dem Ventilator

| Stellungs-Nr. | Klappenstellung   | Luftvolumenstrom [m³/s] | Strömungsgeschw. im Filtermodul [m/s] |
|---------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1             | ganz offen        | 0,7830                  | 1,96                                  |
| 2             | dreiviertel offen | 1,0195                  | 2,95                                  |
| 3             | halb offen        | 1,2409                  | 3,10                                  |
| 4             | viertel offen     | 1,4349                  | 3,59                                  |
| 5             | geschlossen       | 1,4962                  | 3,74                                  |

### Meßtechnik

Eine Messung der Brandrauchkonzentration mit zugehöriger Messung der Partikelgrößenverteilung ist extrem aufwendig und kostenintensiv. Da es bei der Bestimmung des Abscheidegrades zunächst auf eine Verbesserung der Sichtverhältnisse bzw. auf eine visuell erkennbare Partikelabscheidung ankommt, wurde zur Bestimmung des Filterabscheidegrades ein lichtoptisches Verfahren gewählt. Bei dem Meßverfahren wird die Abschwächung eines Lichtstrahls auf einer definierten Meßstrecke bestimmt. Die Abschwächung des Lichtstrahles läßt sich in Form des Extinktionskoeffizienten  $k$  darstellen:

$$I / I_0 = e^{-k \cdot x} \quad (3.1)$$

- wobei
- $I$  = detektierte Lichtmenge des Lichtstrahls bei belasteter Meßstrecke [Im · s]
  - $I_0$  = detektierte Lichtmenge des Lichtstrahls bei partikelfreier Meßstrecke [Im · s]
  - $k$  = Extinktionskoeffizient [1/m]
  - $x$  = Länge der Meßstrecke [m]

Zum Einsatz kommt das Gerät *FW 56-D/T Filterwächter* der Firma Sick.

### **3.1.3 Versuchsdurchführung**

Vor dem Beginn des eigentlichen Abscheideversuchs wurden das gesamte Elektrofiltermodul im Filtergehäuse ausgerichtet und die Stromkabel am Ionisator, Kollektor und am Filtergehäuse montiert. Nach einem elektrischen Funktionstest wurden die Seitendeckel des



Filtergehäuses angeschraubt. Die Optik der Sichttrübungsgeräte wurde gereinigt und an die entsprechenden Halterungen vor und hinter dem Filtergehäuse montiert. Der Rechner zur Aufnahme der Meßdaten wurde installiert und die Meßoptik so justiert, daß die Extinktionswerte ein Minimum erreichten. Nach dem Einschalten des Ventilators wurden sowohl die Spannung am Filtermodul als auch die Extinktionswerte nochmals überprüft und ggf. nachjustiert.

Zur Erzeugung des Brandrauches werden in die Brandsektion Schiff zwei Metallwannen mit einer Fläche von jeweils 1 m<sup>2</sup> gestellt. Jede Wanne wird mit 10 l Dieselkraftstoff gefüllt, wobei zuvor 10 l Wasser zur Vermeidung von Verwerfungen durch Überhitzung eingefüllt wurden. Zur leichteren Zündung des Dieselkraftstoffs wird pro Wanne ca. 1 l Heptan zugefügt und anschließend mit einer in Heptan getränkten Lunte angesteckt. Die Türen der Brandsektion werden geschlossen und der eigentliche Abscheideversuch kann beginnen.

Während des Versuches werden die Extinktionswerte vor und nach dem Filter als Funktion der Zeit aufgenommen. Falls erforderlich, kann die Spannung am Elektrofilter nachjustiert werden, so daß stets eine Spannung kurz unterhalb der Überschlagsspannung am Elektrofilter anliegt. Die Spannungswerte werden regelmäßig notiert.

Nach dem Erlöschen des Feuers bleibt der Ventilator der Versuchsanlage noch in Betrieb, bis die Temperatur des Filters und des Gehäuses nur noch ca. 50 °C beträgt. Anschließend wird das Filtermodul mittels eingebauter Düsen, die oberhalb, seitlich, sowie vor und hinter dem Filtermodul, angeordnet sind, mit Leitungswasser gereinigt. Das Waschwasser mit den abgelösten Brandrauchpartikeln fließt durch einen Trichter unterhalb des Filtermoduls über einen Schlauch in einen Sammelschacht und von dort in die Kläranlage der WTD 91. Nach dem Trocknen des Filters und einer ggf. manuellen Nachreinigung der Isolatoren des Filtermoduls kann ein erneuter Versuch gestartet werden. Pro Tag sind zwei Versuche möglich.

### **3.1.4 Versuchsergebnisse**

#### **3.1.4.1 Isolatoren**

Zur Isolierung der unter Hochspannung stehenden Kollektorplatten von den geerdeten Kollektorplatten wurden in vorausgegangenen Versuchen Stabisolatoren entwickelt, die auch bei höheren Temperaturen einsetzbar sind. Diese Stabisolatoren stellen aufgrund ihrer längeren Isolationsstrecke von ca. 120 mm eine wesentliche Verbesserung gegenüber den üblichen Tellerisolatoren mit einer freien Isolationsstrecke von nur ca. 25 mm dar.

Während der ersten Versuche zeigte sich, daß auch Isolatoren, die sich seitlich am Filtermodul und somit nicht direkt im Abgasstrom befinden, aufgrund der hohen Brandrauchkonzentration mit Ruß belegt waren. Bedingt durch die elektrische Leitfähigkeit des Rußes kam es bereits nach kurzer Betriebsdauer zu Kriechströmen auf den Isolatoren und zu einem Ausfall des Filtermoduls.

Um eine Belegung der Isolatoren mit Ruß zu verhindern, wurden folgende Maßnahmen untersucht:

a) Beschichtung der Isolatoren mit Teflon

Vor Versuchsbeginn wurde ein mit Ethanol gereinigter Isolator aus einer Sprühflasche mit Teflon beschichtet und getrocknet. Nach Beendigung des Brandversuchs und Reinigung von Filter und Isolatoren mittels der eingebauten Waschanlage konnte festgestellt werden, daß ein Teil der Isolatorbeschichtung (ca. 50 %) vom Isolator entfernt war. Der restliche Teil war stark mit Rußpartikeln belegt und wies deutliche Spuren von Spannungsüberschlägen auf. Die verbliebene Teflonschicht konnte außerdem sehr leicht vom Isolator gelöst werden. Eine Beschichtung der Isolatoren mit Teflon ist für diesen Anwendungsfall daher ungeeignet.

b) Beaufschlagung des seitlichen Filtergehäuses mit Überdruck

Um ein Eindringen von Partikeln aus dem Abluftstrom in die seitlichen Filtergehäuseteile, in denen sich die Isolatoren befinden, zu vermeiden, wurde über Bohrungen in den seitlichen Gehäusewänden mittels eines Kompressors ein leichter Überdruck erzeugt. Wie die anschließend durchgeführten Versuche zeigten, muß ein erheblicher Überdruck aufgebaut werden, um eine Verschmutzung der Isolatoren zu verhindern. Die eingeblasene Druckluft gelangt über Öffnungen in das Filtermodul und in den Abluftstrom und führt dort zu unerwünschten Querströmungen und zu einer Vergrößerung des zu behandelnden Luftvolumenstroms.

In weiteren Versuchen wurde die Druckluft über die seitlich am Filtergehäuse angebrachten Waschdüsen in den seitlichen Filterraum geblasen, um eine gleichmäßigere Verteilung der Druckluft zu erreichen. Diese Methode führte jedoch auch zu keiner reduzierten Belegung der Isolatoren mit Rußpartikeln.

c) Direktes Anblasen der Isolatoren mit Druckluft

Um einen effizienteren Schutz der Isolatoren vor einer Belegung mit Ruß mit einem geringen Druckluftvolumenstrom zu erreichen, wurde ein Isolator mit einer Druckluftpistole direkt von der Stirnseite mit Druckluft (ca. 3 bar) angeblasen. Nach Versuchsende und vor dem Reinigen der Filtermodule zeigte sich, daß der Isolator an der direkt angeblasenen Seite sauber

bleibt, auf der gegenüber liegenden Seite jedoch übermäßig belegt ist und Spuren von Spannungsüberschlägen aufweist.

Ein ausreichender Schutz der Isolatoren mit dieser Technik ist nur zu erreichen, wenn die Isolatoren von allen Seiten mit einem Luftstrahl angeblasen werden. Eine solche Technik ist bei insgesamt 12 Isolatoren pro Filtermodul technisch zu aufwendig und würde zudem den permanenten Betrieb eines Druckluftgenerators erfordern. Dadurch würde die Betriebssicherheit der Anlage reduziert und die laufenden Betriebskosten würden übermäßig erhöht. Diese Technik wird daher nicht weiter verfolgt.

#### d) Verwendung von Schutzkappen

Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung einer Belegung der Isolatoren besteht durch Verwendung von Schutzkappen, die stirnseitig über die Isolatoren gestülpt werden und einen Ringspalt von einigen Millimetern zwischen Isolator und Schutzkappe entstehen lassen (Abb. 3.5).

Die ersten Versuche, bei denen eine Schutzkappe aus temperaturbeständigem Material (beschichtetes Gewebe) an einem Isolator montiert wurde, erwiesen sich als vielversprechend. Obwohl einige Rußpartikel bis zu ca. 3 cm in den Ringspalt eindringen, kommt es zu keinen elektrischen Überschlägen, da der weitaus größte Teil der Isolationsstrecke (ca. 9 cm) sauber bleibt.

Das beschichtete Gewebe wurde bei den nachfolgenden Versuchen durch eine Schutzkappe aus temperaturfestem Duranglas mit einem Innendurchmesser von 42 mm und eine Länge von 120 mm ersetzt. Die Glasröhrchen wurden mit Teflonstreifen am oberen Rand des Isolators fixiert.

Da sich diese Technik als sehr erfolgreich herausstellte, wurden alle weiteren Versuche mit derartigen Isolatoren ausgeführt.

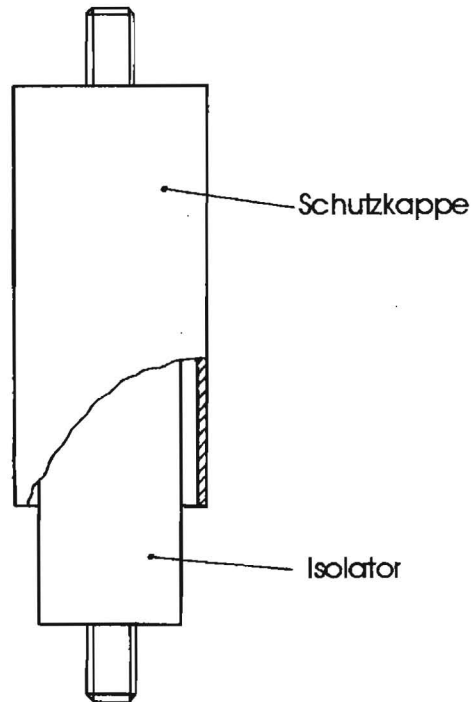


Abb. 3.5: Isolator mit Schutzkappe

### 3.1.4.2 Abscheideleistung des optimierten Elektrofilters

#### 3.1.4.2.1 Berechnung des Abscheidegrades

Wie aus Abb. 3.6 hervorgeht, besteht für eine monodisperse Partikelverteilung ein linearer Zusammenhang zwischen der Konzentration  $c$  der Partikel im Gas und der Transmission  $T$  eines Lichtstrahls, wobei

$$T = I/I_0 = e^{-k \cdot x} \quad (3.2)$$

(vgl. Gl. 3.1). Der Wirkungsgrad  $\eta$  eines Filters wird i.d.R. bestimmt gemäß der Gleichung

$$\eta = (c_1 - c_2)/c_1 \quad (3.3)$$

wobei  $c_1$  = Konzentration vor dem Filter [mg/m<sup>3</sup>]  
 $c_2$  = Konzentration nach dem Filter [mg/m<sup>3</sup>]

Gemäß Abb. 3.6 kann der lineare Zusammenhang zwischen der Konzentration  $c$  und der Transmission  $T$  mathematisch dargestellt werden durch

$$c = a \cdot (1 - T) \quad (3.4)$$

wobei  $a$  = Konstante, abhängig vom Partikeldurchmesser [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ].

Eingesetzt in Gl. 3.3 ergibt sich für den Abscheidegrad in monodispersen Partikelschwärmen

$$\eta = (T_2 - T_1)/(1 - T_1) \quad (3.5)$$

bzw. unter Verwendung von Gl. 3.2

$$\eta = (e^{-k_2 \cdot x} - e^{-k_1 \cdot x})/(1 - e^{-k_1 \cdot x}) \quad (3.6)$$

Wie aus Abb. 3.6 zu erkennen, besteht ebenfalls ein Zusammenhang

$$c = f(k) \quad (3.7)$$

wonach in erster Näherung bei einer ebenfalls linearen Abhängigkeit auch ein Abscheidegrad definiert werden kann zu

$$\eta = (k_2 - k_1)/k_1 \quad (3.8)$$

In Abb. 3.7 sind für einen Versuch die mit Gl. 3.6 und Gl. 3.8 berechneten Abscheidegrade dargestellt. Die errechneten Werte liegen in der gleichen Größenordnung. Im Folgenden wird daher die wesentlich einfachere Gl. 3.8 zur Berechnung des Abscheidegrades des Filters verwendet. Die Ungenauigkeit dieser Gleichung gegenüber Gl. 3.6 liegt im Rahmen der Meßgenauigkeit.

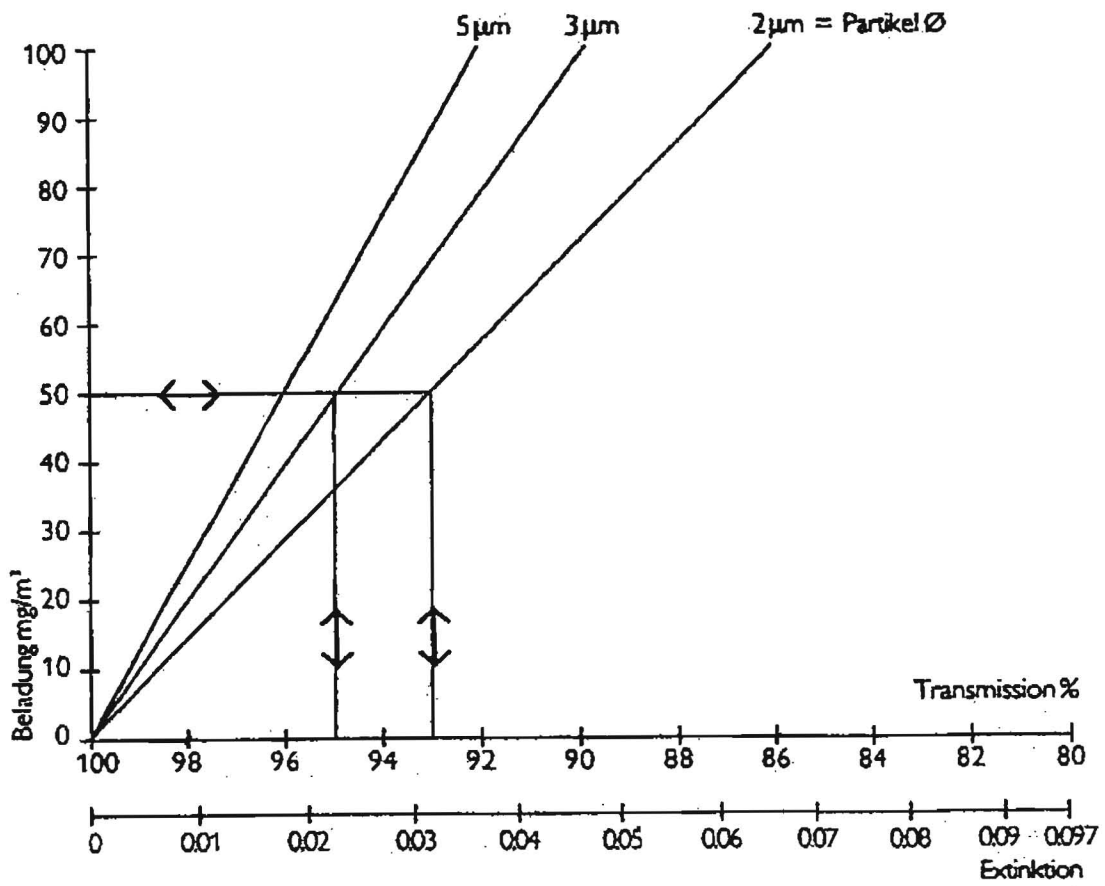


Abb. 3.6: Beziehung zwischen Partikelkonzentration, Transmission und Extinktionskoeffizient

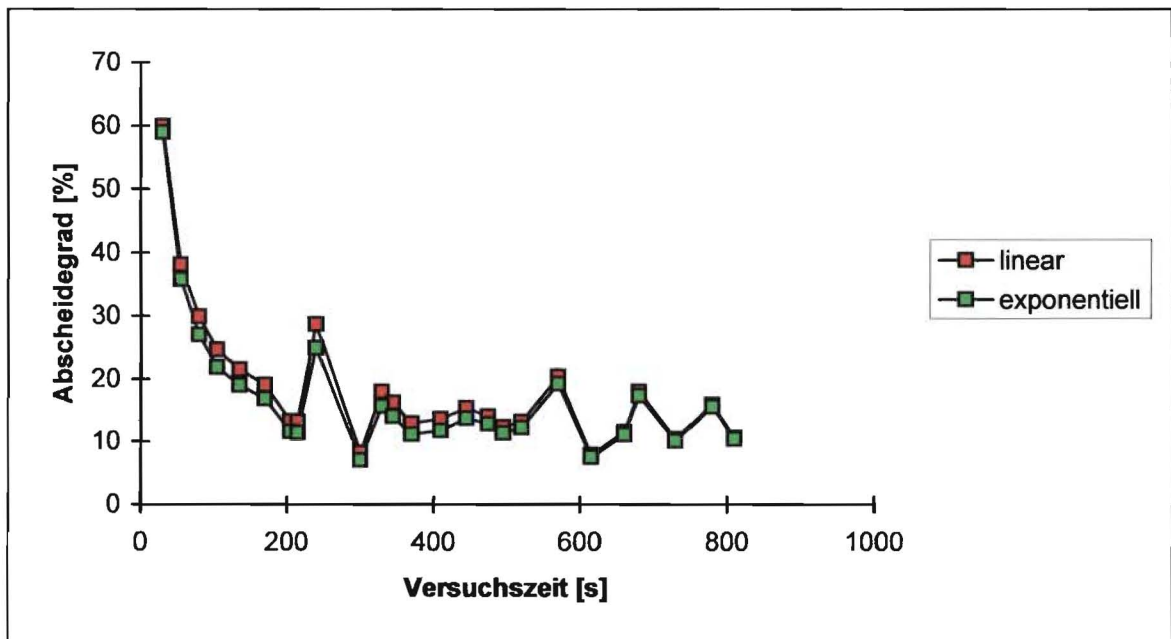


Abb. 3.7: Vergleich der mit Gl. 3.6 und Gl. 3.8 berechneten Abscheideraten

### 3.1.4.2.2 Kinetik der Rauchpartikelabscheidung

Von besonderem Interesse für die Filterfunktion ist das Abscheideverhalten über die Betriebsdauer. Abb. 3.8 zeigt einen typischen Verlauf des Abscheidegrades als Funktion der Zeit. Wie aus der Kurve ersichtlich ist, sinkt die Abscheiderate nach anfänglich hohen Werten (größer 60 %) bei diesem Versuch innerhalb von Minuten auf Werte von ca. 20 % ab. Die größeren Schwankungen der Abscheideraten bei Versuchszeiten von länger ca. 500 s sind darauf zurückzuführen, daß das Feuer zu diesem Zeitpunkt erlischt, und anschließend die Rauchkonzentration im Brandraum großen Schwankungen unterworfen ist.

Die Abnahme des Abscheidegrades ist auf die sehr rasche Belegung des Filters mit Brandrauchpartikeln aufgrund der hohen Ausgangskonzentration des Rauches zurückzuführen (zum Vergleich: Straßentunnel müssen für den Verkehr bereits geschlossen werden, wenn der Extinktionskoeffizient Werte erreicht, die kleiner als 1/100 der hier erreichten Versuchswerte sind).

In den nachfolgenden Auswertungen werden die Abscheidegrade des Filters bei verschiedenen Betriebsbedingungen ermittelt, wobei jeweils die Werte nach unterschiedlichen Versuchsdauern verglichen werden.

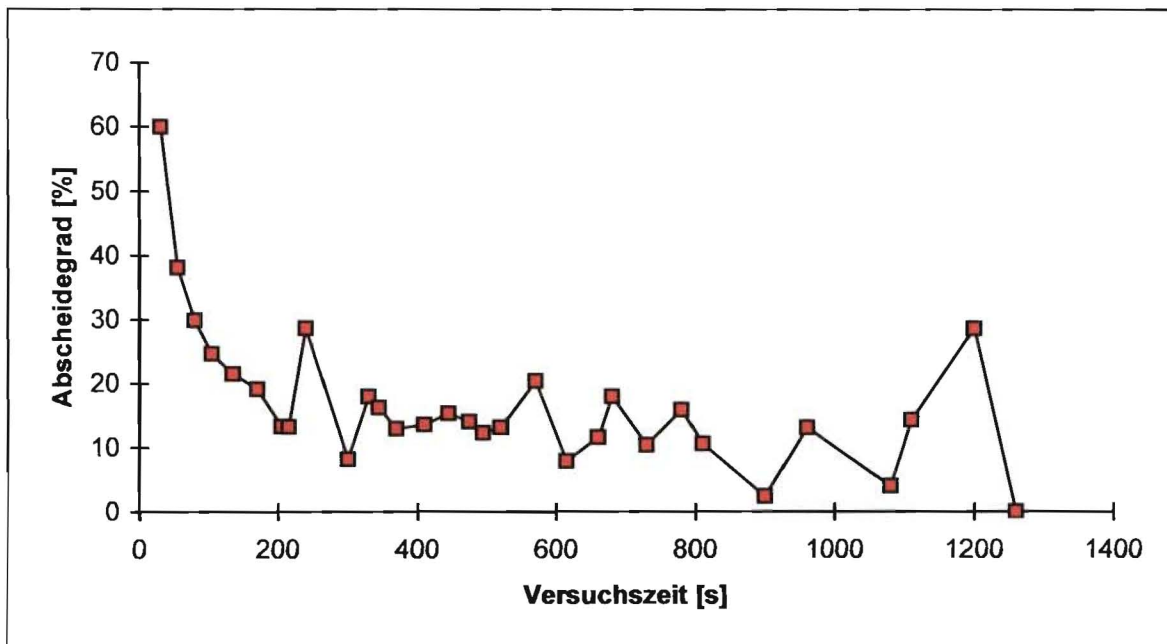


Abb. 3.8: Abscheidegrad als Funktion der Versuchsdauer

### 3.1.4.2.3 Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Abscheideleistung

In Abb. 3.9 ist der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit im Filtermodul mit unterschiedlichen Versuchsdauern dargestellt. Mit Ausnahme des Meßwertes nach 100 s, bei dem es sich offensichtlich um einen Meßfehler handelt, werden die Abscheidegrade erwartungsgemäß mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit im Filtermodul geringer. Es ist jedoch festzustellen, daß die Abscheidegrade oberhalb von 3 m/s in dem hier betrachteten Geschwindigkeitsbereich nicht mehr wesentlich abnehmen. Bei Geschwindigkeiten kleiner als 2 m/s sind erheblich höhere Abscheideraten zu erwarten. Versuche bei Geschwindigkeiten kleiner 2 m/s wurden nicht mehr durchgeführt, da die Elektrofilter in diesem Geschwindigkeitsbereich zu groß werden.

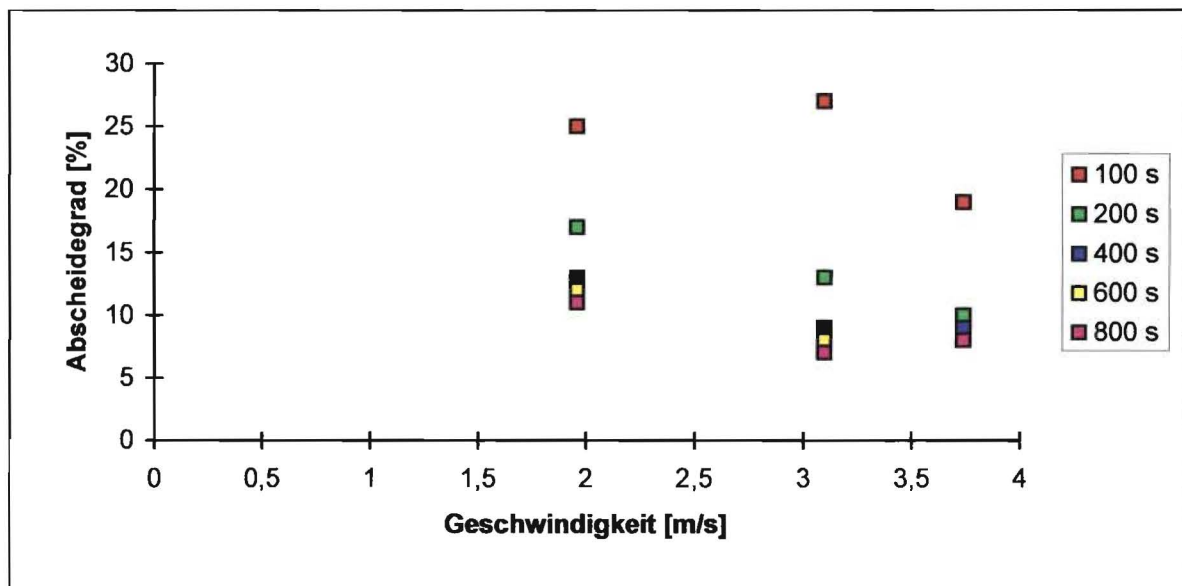


Abb. 3.9: Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Abscheideleistung

### 3.1.4.2.4 Einfluß der Rauchkonzentration auf die Abscheideleistung

In Abb. 3.10 sind die Abscheidegrade als Funktion der Rohgaskonzentration für verschiedene Versuchsdauern dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich, sinkt der Abscheidegrad mit zunehmender Rauchkonzentration. Der Grund für dieses Verhalten ist eine mit der Konzentration abnehmende elektrische Aufladung der Partikel. Während bei geringen Partikelkonzentrationen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ein oder mehrere elektrische Ladungsträger an die Oberfläche eines jeden Partikels adsorbieren, nimmt diese Wahrscheinlichkeit mit zunehmender Brandrauchkonzentration ab, da die zur Verfügung stehenden elektrischen Ladungen bereits von den Partikeln abgefangen werden, die sich nahe an den



Emissionsquellen der elektrischen Ladung, den Sprühspitzen des Ionisators, befinden. Partikel in der Kernströmung des Ionisators erhalten somit nur eine geringe bzw. keine elektrische Ladung.

Durch eine Hintereinanderschaltung mehrerer Filtermodule kann daher der Abscheidegrad bei höheren Rauchgaskonzentrationen wesentlich verbessert werden (s. Kap. 3.2.2.4).

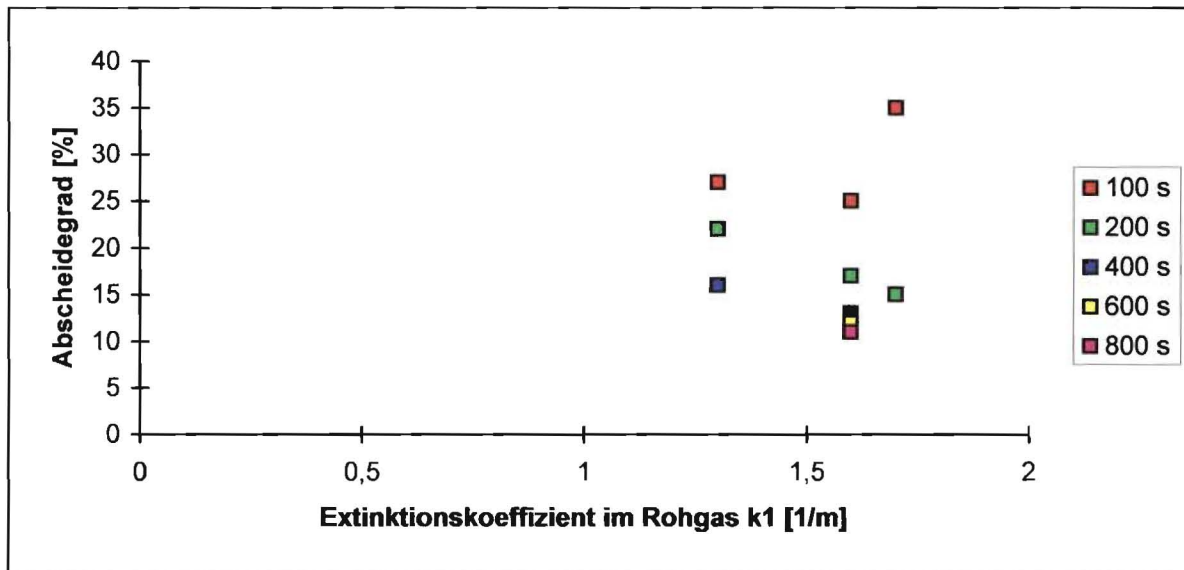


Abb. 3.10: Einfluß der Rohgaskonzentration auf die Abscheideleistung

### 3.1.4.2.5 Einfluß der Filterkonfiguration auf die Abscheideleistung

In einer anschließenden Versuchsreihe wurde untersucht, inwieweit die einzelnen Komponenten des Filtermoduls zur Partikelabscheidung beitragen. Das Ergebnis ist in Abb. 3.11 dargestellt.

Wenn der Elektrofilter nur mit dem Kollektor betrieben wird, ohne daß der Ionisator mit Spannung beaufschlagt ist, ist die Abscheideleistung des Elektrofilters sehr gering und nahezu unabhängig von der hier betrachteten Versuchsdauer, da die Filterplatten kaum belegt werden. Wird hingegen nur der Ionisator mit elektrischer Spannung beaufschlagt - der Kollektor bleibt in der Filterstrecke eingebaut - werden ähnliche Abscheideergebnisse erzielt wie bei der Konfiguration „Ionisator und Kollektor unter Spannung“. Dieses Ergebnis läßt die Schlußfolgerung zu, daß im Kollektorteil bei den hier vorliegenden hohen Partikelkonzentrationen genügend Partikel auch ohne ein angelegtes elektrisches Feld an die Kollektorplatten gelangen und dort haften bleiben. Diese Annahme wird durch die Beobachtung unterstützt,

daß beim Betrieb des Filters mit Ionisator und Kollektor der überwiegende Teil der Partikel an den geerdeten Platten abgeschieden wird.

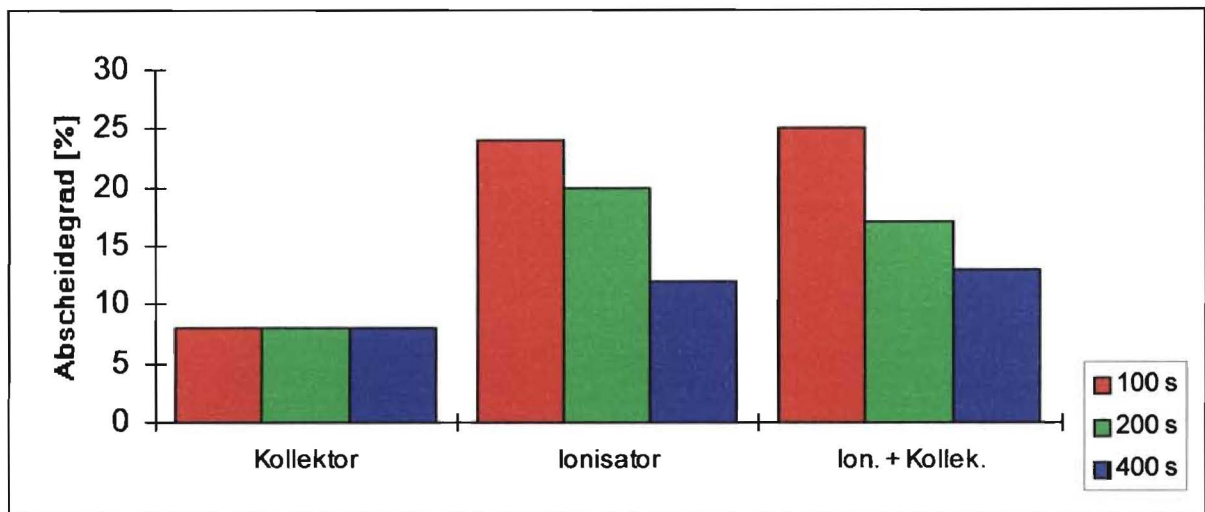


Abb. 3.11: Einfluß der Filterkonfiguration auf die Abscheideleistung

### 3.2 Versuche auf dem Motorenversuchsstand der Universität Rostock

Nachdem die Versuche auf dem Versuchsgelände der WTD 91 gezeigt hatten, daß der Elektrofilter prinzipiell für eine Abscheidung von Partikeln bei höheren Konzentrationen und Temperaturen geeignet ist, sollte geprüft werden, welche Abscheideraten an einem stationären Motor erzielt werden können und welche Maßnahmen zur Verbesserung der Abscheideleistung und zur Anpassung des Filters an den Motorbetrieb erforderlich sind.

Die Versuche wurden an einem Versuchsstand der Universität Rostock durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Varianten des Filtermoduls und der Filteranordnung (Varianten A und B) getestet.

#### 3.2.1 Versuchsfiler Variante A

##### 3.2.1.1 Filteraufbau

In der ersten Versuchsphase wurde das generelle Verhalten der Filterstrecke untersucht. Es wurde das bereits während der Versuche auf der WTD 91 eingesetzte Filtermodul verwendet.

### **3.2.1.2 Versuchsaufbau**

(s. auch Bericht 1 Uni Rostock.) Als Versuchsmotor diente der am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock vorhandene Dieselmotor 3 VDS 24/24-AL. Der ursprüngliche 6-Zylinder-Motor wurde für einen Betrieb mit 3 Zylindern umgebaut und gibt bei einer Drehzahl von  $1.000 \text{ min}^{-1}$  eine max. Leistung von 400 kW ab. Der Motor kann auf der Generatorlinie betrieben werden, d.h. bei gleichbleibender Drehzahl kann die Leistung zwischen 0 kW und 400 kW variiert werden.

Der Motor ist sowohl für den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff als auch mit Schweröl geeignet.

Zur Integration des Filters in die Abgasstrecke des Versuchsmotors mußte das Abgasrohr, das normalerweise oberhalb des Motors direkt aus der Versuchshalle austritt, auf das Hallenniveau geführt werden, so daß das neu konstruierte Filtergehäuse auf den Hallenboden montiert werden kann. Die Abbildung in Anhang A 2 zeigt das in den Abgasstrang integrierte Filtergehäuse.

Um eine gleichmäßige Strömungsverteilung innerhalb des Filtermoduls zu erreichen, wurden die Übergangsstücke vom Abgasrohr auf den rechteckigen Filtergehäusequerschnitt und die am Übergangsstück vor dem Filter eingebauten Leitbleche von der MET mittels CFD-Analyse ausgelegt (s. hierzu Bericht der MET). Aus der Abbildung im Anhang A 3 sind die Anordnung und die Hauptabmessungen der Übergangsstücke und des Filtergehäuses ersichtlich.

### **3.2.1.3 Schwingungsproblematik**

Wie sich nach den ersten Probeläufen herausstellte, wurden die Motorschwingungen und die durch den Abgasstrom induzierten Schwingungen über das Abgasrohr auf das gesamte Filtergehäuse und das eingebaute Filtermodul übertragen, so daß ein ordnungsgemäßer Betrieb des Filters nicht möglich war (s. Bericht MET und Uni Rostock). Das Filtergehäuse wurde deshalb mittels temperaturbeständiger flexibler Schläuche (s. auch Abb. A 2) in den Abgasstrang integriert. Die Umbauarbeiten waren sehr zeitaufwendig.

#### **3.2.1.4 Meßtechnik**

Zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit des Elektrofilters ist eine angepaßte Meßtechnik erforderlich. Zu bestimmen sind folgende Abgasparameter:

- Partikelkonzentration
- Partikelgrößenverteilung
- Konzentration der wesentlichen gasförmigen Komponenten

Diese Parameter werden vor und nach dem Partikelfilter erfaßt. Eine kontinuierliche Bestimmung der Meßwerte ist nicht erforderlich und technisch z.Z. auch nicht möglich. Die Auslegung der Meßtechnik sowie deren Einbau und die Durchführung der Messungen lag im Aufgabenbereich der Universität Rostock. Nähere Angaben zur Meßtechnik (Partikelgrößenverteilung, gasförmige Komponenten) sind dem Bericht der Universität Rostock zu entnehmen.

#### **3.2.1.5 Versuchsdurchführung**

Vor dem Versuchsbeginn wurden das Filtermodul in dem Filtergehäuse justiert, die elektrischen Kabel angeschlossen und die einstellbare Spannung überprüft. Nach dem Einstellen der gewünschten Motorleistung ist ein stationärer Betriebszustand abzuwarten, der bei konstanter Abgastemperatur und Leistungsabgabe erreicht ist. Für Versuche mit Schweröl muß der Start des Motors mit Dieselkraftstoff erfolgen, der nach dem Motorstart kontinuierlich durch Schweröl ersetzt wird. Dieser Vorgang dauert etwa 10 min. Nach Erreichen der gewünschten Motorleistung und einer konstanten Abgastemperatur kann der Abscheideversuch beginnen.

Dazu werden der Elektrofilter mit Spannung beaufschlagt und die Partikelkonzentration vor und nach dem Filter wechselweise gemessen. Die Meßdauer pro Konzentrationsbestimmung beträgt je nach Motorleistung zwischen 5 und 12 min. Die Dauer eines Versuches beträgt in der Regel 2 - 3 h.

Nach dem Ende der Messungen wird der Motor heruntergefahren und das in der Ringleitung des Motors noch vorhandene Schweröl wieder durch Dieselkraftstoff ersetzt, um ein Zusetzen der Kraftstoffleitungen nach Versuchsende zu verhindern. Nach dem Stillstand des Motors wird der Elektrofilter spannungslos geschaltet. Sobald die Temperatur des Filtergehäuses kleiner als ca. 50 °C ist, kann das Filtermodul herausgenommen und manuell mit Druckluft gereinigt werden. Nach einer Kontrolle des Filters, wobei insbesondere die Isolato-

ren inspiziert und ggf. nochmals gereinigt werden, steht das Filtermodul für einen weiteren Versuch zur Verfügung.

### **3.2.1.6 Versuchsergebnisse**

(s. auch Bericht der Universität Rostock)

Mit dem nicht optimierten Filtermodul wurden in den ersten Versuchsläufen Abscheidegrade von ca. 25 - 30 % der gesamten Partikelmasse ermittelt. Die erzielten Werte sind sehr gut reproduzierbar. Ein Vergleich der Partikelgrößenverteilung im Abgas vor und nach dem Elektrofilter zeigt eine nahezu identische Verteilungskurve mit einem Maximum bei ca. 0,7 µm. Nach dem Filter ist eine leichte Zunahme der Partikel mit einem Durchmesser von ca. 2 µm festzustellen. Mögliche Ursachen für dieses Verhalten sind (s. auch Bericht der Universität Rostock):

- bevorzugte Abscheidung der kleinen Partikel
- Agglomeration nicht abgeschiedener kleiner Partikel
- Ablösung von bereits abgeschiedenen Partikelagglomeraten von den Kollektorplatten

In einem weiteren Probelauf wurde untersucht, wie sich der Filter bei einem Ausfall der elektrischen Spannung verhält. Der Filter wird dazu über einen Zeitraum von ca. 1 Stunde mit Partikeln beladen. Nach dem Abschalten des Filters bei laufendem Motorbetrieb geht die Abscheideleistung auf Werte kleiner 0 % zurück, was auf eine Entladung des Filters durch den sog. „Abweheffekt“ hinweist. Nach einer erneuten Inbetriebnahme des Filters werden wieder die gleichen Abscheidegrade wie vor der Unterbrechung erreicht.

Im Anschluß an die mit Dieselkraftstoff durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, daß auch bei einem Betrieb des Motors mit Schweröl eine Abscheidung der Partikel stattfindet. Bedingt durch die um den Faktor sechs höhere Partikelkonzentration im Rohgas ist die Abscheiderate mit ca. 15 % bei sonst gleichen Versuchsbedingungen erwartungsgemäß geringer als bei einem Motorbetrieb mit Dieselkraftstoff.

In einem weiteren Probelauf wurde der Einfluß des Plattenabstandes im Kollektor auf den Abscheidegrad untersucht. Dazu wurde das Filtermodul so umgebaut, daß der Kollektorplattenabstand halbiert und damit die zur Verfügung stehende Filterfläche verdoppelt wurde. Mit dieser Maßnahme konnte der Abscheidegrad für die gesamte Partikelmasse gegenüber der bisherigen Anordnung um den Faktor 1,5 auf ca. 45 % erhöht werden. Dieser Trend be-

stätigte sich auch beim Betrieb des Motors mit Schweröl. Die Abscheideraten stiegen hier bei halbiertem Plattenabstand um den Faktor 1,5 bis 2.

Eine genauere Untersuchung der belegten Kollektorplatten zeigte, daß bei halbiertem Plattenabstand die Kollektorplatten nur im ersten Drittel stark belegt sind. Im hinteren Teil der Platten geht die Belegung deutlich zurück.

#### Fazit der Versuche mit der Filtervariante A:

Die mit dem noch nicht optimierten Elektrofilter durchgeführten Versuche lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

1. Der Filter ist prinzipiell für einen Einsatz an Schiffsdieselmotoren geeignet.
2. Der Filter kann sowohl bei Verwendung von Dieseldieselkraftstoff als auch von Schweröl eingesetzt werden.
3. Der Filter liefert reproduzierbare Abscheideergebnisse.
4. Vorteilhaft ist ein Kollektorplattenabstand von ca. 9 mm.
5. Die eingesetzten Kollektorplatten können in Strömungsrichtung gekürzt werden.
6. Die Filterkonstruktion liegt im Resonanzbereich der vom Motor verursachten Schwingungen. Es ist eine Entkopplung der Filterstrecke vom Motor erforderlich.
7. Nach Rücksprache mit Schiffsbetreibern wird deutlich, daß aufgrund der Anordnung im Schornstein eine vertikale Ausrichtung des Filters besser geeignet ist als die horizontale Ausrichtung bei der Versuchsanordnung.

### **3.2.2 Versuchsfiler Variante B**

#### **3.2.2.1 Aufbau des Filters**

Ausgehend von den mit der Filtervariante A gemachten Erfahrungen wurde ein neues Filtermodul konstruiert.

Die Abbildung im Anhang A 4 zeigt das Filtermodul mit den Hauptabmessungen. Das Filtermodul wurde so umgestaltet, daß eine vertikale Durchströmung möglich ist. Die Ionisatorstufe wurde konstruktiv nicht geändert und von der Filtervariante A übernommen. Die Länge der Kollektorplatten wurde aufgrund der gewonnenen Versuchsergebnisse auf die Hälfte reduziert. Dadurch verringert sich die verfügbare Filterfläche auf ca. 40 %. Die Aufhängung der beiden geerdeten und unter Spannung stehenden Filterplattenpakete des Kollektors wurde völlig neu gestaltet. Während bei der älteren Version noch acht Isolatoren für deren Befestigung benötigt wurden, konnte die Anzahl nunmehr auf vier reduziert werden. Da es

sich bei den Isolatoren um die teuersten Bauteile handelt, führt diese Maßnahme auch zu einer Kostenreduzierung des Filtermoduls.

Durch eine neue Lagerung der Plattenpakete ist ein Justieren des Plattenabstandes zwischen geerdeten und unter Spannung stehenden Platten nun mit Hilfe von Rändelmuttern sehr einfach und schnell möglich. Hierdurch werden sowohl die Montage als auch notwendige Arbeiten bei Inspektionen wesentlich vereinfacht.

Die kompaktere Bauweise des Filtermoduls führt zu einer höheren Resistenz gegenüber Schwingungsanregungen vom Motor.

Das Filtermodul besteht aus Korrosionsgründen aus V-Stahl.

### **3.2.2.2 Versuchsaufbau**

Um den Filter in die vertikale Abgasstrecke des Versuchsmotors zu integrieren, mußte ein neues Filtergehäuse konstruiert und gebaut werden. Eine dreidimensionale Ansicht des Filtergehäuses ist im Anhang A 5 dargestellt. Das Abgas tritt seitlich über die Übergangsstücke, die bereits bei der Filtervariante A eingesetzt wurden, in das Filtergehäuse ein. Dort befindet sich zunächst eine Beruhigungsstrecke zum Erzielen einer gleichmäßigen Strömungsverteilung vor den Filtermodulen. Das Gehäuse bietet Platz für den Einbau von zwei Filtermodulen, die nacheinander durchströmt werden (Anhang A 6 und A 7). Die Module werden stirnseitig in das Filtergehäuse eingeschoben, das mit verschraubbaren Deckeln anschließend geschlossen wird. Das Abgas gelangt über ein weiteres Übergangsstück in das Abgasrohr und wird über Dach aus der Versuchshalle geführt.

In den beiden Zwischenstücken ober- und unterhalb der Filtermodule sind die Meßsonden für die Meßtechnik integriert. Am Boden des Filtergehäuses befindet sich eine konische Verjüngung, die in einen Sammelbehälter mündet. Der Sammelbehälter dient zur Aufnahme der vom Filter abgelösten Rußpartikel.

Das gesamte Filtergehäuse besteht ebenfalls aus V-Stahl.

### **3.2.2.3 Meßtechnik**

Die Meßtechnik hat sich gegenüber der Filtervariante A nicht geändert (s. Kap. 3.2.1.4).

#### **3.2.2.4 Versuchsdurchführung**

Versuchsdurchführung und Messungen wurden gegenüber der bei Filtervariante A beschriebenen Durchführung (s. Kap. 3.2.1.5) nicht geändert. Durch den Einbau von Düsen oberhalb der Filtermodule kann nach der Versuchsdurchführung die Abreinigung des Filtermoduls mit Dampf oder Druckluft in eingebautem Zustand erprobt werden.

Bei den Versuchen wurden folgende Einflußfaktoren auf die Abscheideleistung untersucht:

- Filterstandzeit
- Filterkonfiguration
- Motorlast

#### **3.2.2.5 Versuchsergebnisse**

Die detaillierten Ergebnisse der Messungen sind dem Bericht der Universität Rostock zu entnehmen. Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse kurz zusammengefaßt.

##### Filterstandzeit

Abb. 3.12 zeigt für einen Versuch beispielhaft die Abscheiderate des Filters über der Versuchsdauer. Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist mit einer nahezu gleichbleibenden Abscheiderate über ca. 2,5 h zu rechnen. Anschließend nimmt die Abscheiderate etwas ab, ist aber auch nach ca. 4 h noch zufriedenstellend. Erst anschließend ist eine Filterreinigung erforderlich.



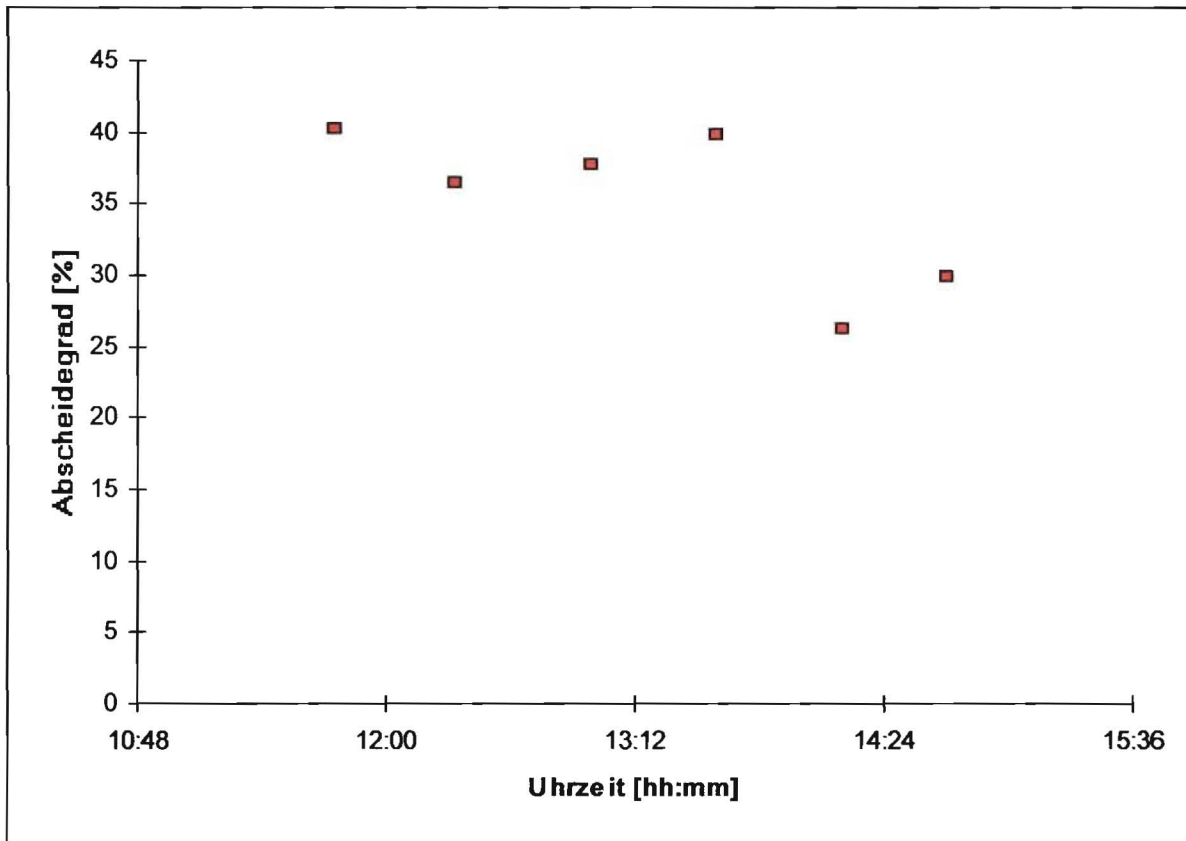


Abb. 3.12: Abscheidegrad als Funktion der Versuchsdauer

#### Filterkonfiguration

Um eine optimale Konfiguration des Filters zu finden, wurden Versuche mit verschiedenen Betriebszuständen von Ionisator (I) und Kollektor (K) durchgeführt. In Abb. 3.13 sind die Versuchsergebnisse für verschiedene Filterkonfigurationen dargestellt. Alle vier Filterkomponenten (2 Ionisatoren und 2 Kollektoren) wurden in das Filtergehäuse eingebaut. Nur die jeweils angegebenen Komponenten sind mit elektrischer Spannung beaufschlagt. Ausgehend von der Konfiguration  $I_1-K_1$  ist festzustellen, daß ein weiterer unter Spannung stehender Kollektor (Konfiguration  $I_1-K_1-K_2$ ) zu keiner nennenswerten Erhöhung des Abscheidegrades führt. Wird hingegen nur der Filter 2 unter Spannung gesetzt, geht die Abscheiderate zurück. Zusammen mit der Beobachtung, daß die Partikel sich vornehmlich an den geerdeten Platten niederschlagen, ist festzustellen, daß die Partikel auf jeden Fall zuerst elektrisch aufgeladen werden müssen, sich anschließend aber auch an nicht unter Spannung stehenden Flächen anlagern, d.h. bei der Konfiguration  $I_2-K_2$  erfolgt keine Abscheidung an dem ebenfalls eingebauten und zuerst durchströmten, aber nicht unter Spannung stehenden Kollektor  $K_2$ , während bei der Konfiguration  $I_1-K_1$  das zweite Filtermodul als zusätzliche Abscheidefläche zur Verfügung steht.

Das beste Abscheideergebnis wurde mit einem sog. „Tandemfilter“  $I_1-K_1-I_2-K_2$  erreicht, da die in der ersten Ionisationsstufe  $I_1$  nicht aufgeladenen Partikel in der zweiten Ionisationsstufe  $I_2$  eine Ladung erhalten und anschließend ebenfalls abgeschieden werden können. Es ist anzunehmen, daß mit einer weiteren Filterstufe die Abscheiderate weiter erhöht werden kann.

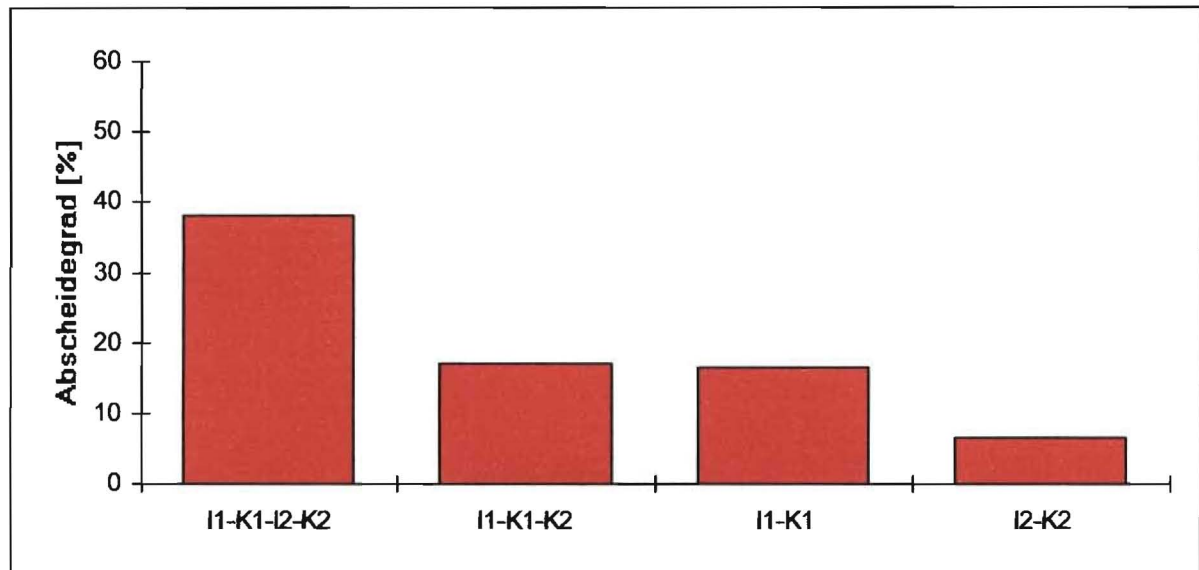


Abb. 3.13: Abscheidegrad als Funktion der Filterkonfiguration

#### Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Motorlast

In Abb. 3.14 ist der Zusammenhang zwischen Motorlast und Abscheidegrad dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt die Abscheideleistung mit zunehmender Motorlast ab, da aufgrund der höheren Kraftstoffzufuhr sowohl die Abgasgeschwindigkeit als auch die Partikelkonzentration im Elektrofilter zunehmen. Eine Analyse der abgeschiedenen Partikel zeigte, daß neben den Rußpartikeln auch nicht verbrannte Kohlenwasserstoffe und Öltröpfchen im Elektrofilter entfernt werden. Bezogen auf den reinen Kohlenstoffgehalt der Partikel beträgt die Abscheiderate ca. 70 % (s. Bericht Universität Rostock).

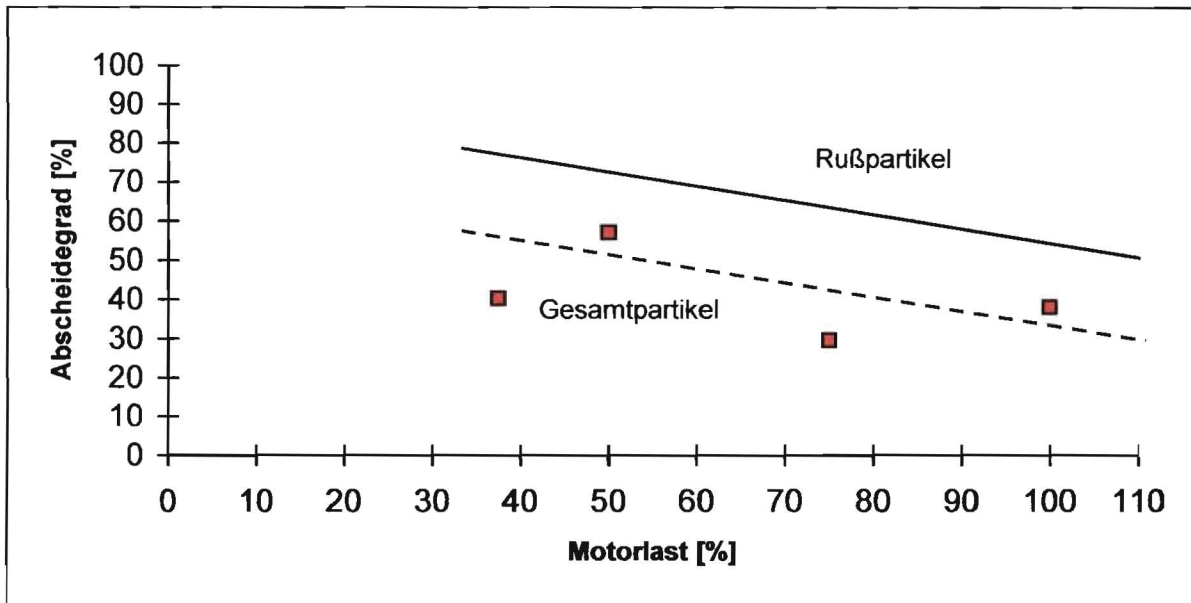


Abb. 3.14: Abscheidegrad als Funktion der Motorlast

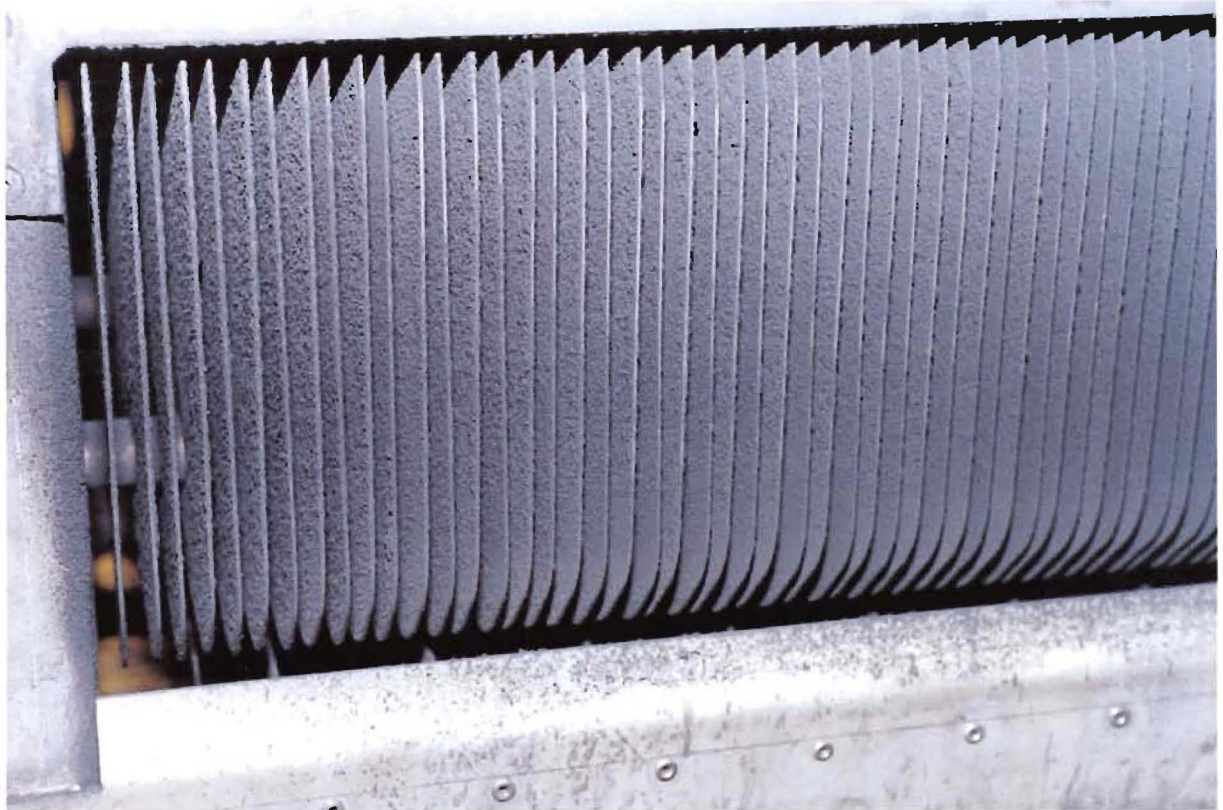
### 3.2.2.6 Filterabreinigung

Die Abb. 3.15 zeigt ein mit Ruß beladenes Filtermodul nach einem Betrieb von ca. 3 h. Wie Abb. 3.16 zeigt, läßt sich der mit dem Elektrofilter aus dem Abgasstrom entfernte Ruß relativ einfach mit Druckluft von den Filterplatten entfernen. Eine anschließende Reinigung mit Wasser oder Detergenzien ist nicht erforderlich.

Alternativ wurde eine Abreinigung des Filters mit Dampf getestet. Der Dampf wurde mittels Düsen, die oberhalb der Filtermodule in das Filtergehäuse eingebaut waren, auf die Filter geblasen. Auch mit dieser Methode wurden gute Reinigungsergebnisse erzielt. Ein geringer Anteil des eingeblasenen Dampfes kondensiert an den Filterplatten und am Filtergehäuse. Die entstehenden Wassertropfen nehmen einen Teil der Rußpartikel auf, tropfen in den Auffangbehälter am Boden des Filtergehäuses und können dort entfernt werden.

Eine Reinigung der Filtermodule mit Dampf hat den Vorteil, daß nahezu keine Temperaturdifferenz zwischen dem Reinigungsmedium und den vom Motorabgas aufgeheizten Filterplatten entsteht, und somit auch keine mechanischen Spannungen und Verformungen der Kollektorplatten auftreten können.

Da an Bord der meisten Schiffe Dampfkessel vorhanden sind, wird eine Abreinigung mit Dampf favorisiert.



**Abb. 3.15:** Mit Ruß belegtes Filtermodul nach einem Betrieb von ca. drei Stunden



**Abb. 3.16:** Manuelle Reinigung des Filters mit Druckluft

## **4 Einbau des Partikelfilters auf Schiffen**

### **4.1 Ermittlung von Anforderungsmerkmalen**

Um die Akzeptanz und die Anforderungen für einen Einbau des Filters an Schiffsmotoren zu ermitteln, wurden ca. 20 Werften und Reeder im In- und Ausland mit Kurzprospekten über die Eigenschaften des neuen Filters informiert. Die Reaktionen lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen:

- Die erreichten Abscheidegrade von 50 % für die Gesamtmasse der Partikel und von ca. 70 % für den anteiligen Ruß wurden als ein bedeutender Fortschritt anerkannt.
- Als besonders positiv wurde der geringe Druckverlust des Filters angesehen.

Als noch nachteilige Merkmale wurden genannt:

- noch zu großes Bauvolumen
- Sammlung der Filteranlagerungen in einem separaten Behälter
- Problem des „Soot-fire“

Zur Zeit existieren noch keine verbindlichen Vorschriften für Partikelemissionen von Seefahrzeugen. Unabhängig hiervon besteht für Kreuzfahrtschiffe, Fährschiffe und Motor-yachten bereits jetzt ein starkes Interesse an Partikelfiltern, um die Schiffe für die Benutzer attraktiver zu machen. Die Forderung nach einem Einbau von Filtern wird auch von Interessenvertretern der Schiffsbesatzungen gestellt, um gesundheitsschädliche Auswirkungen auf das Schiffspersonal zu vermeiden.

Die Abbildung im Anhang A 8 zeigt den schematischen Aufbau eines Partikelfilters für einen Schiffsmotor mit einer Abreinigungsverfahren. Für eine Abreinigung des Filters werden bei laufendem Motor einzelne Segmente des Filters nacheinander mit Dampf beaufschlagt. Gleichzeitig wird der Dampf mit den abgelösten Filteranlagerungen über eine Ansaugdüse oberhalb des Filters abgesaugt und über einen Gewebefilter geführt, in dem die Partikel aus dem Dampf-Abgas-Gemisch abgetrennt werden. Das Dampf-Abgas-Gemisch wird wieder in den Abgasstrom geführt.

Ein herausragendes Problem ist die bauliche Integration des Filters in das Abgassystem des Motors.

## 4.2 Ermittlung von optimalen Bauformen

Aus Kosten- und Platzgründen besteht die Tendenz, die Abgasschornsteine von Schiffen kleiner zu gestalten. Um die Durchmesser der Abgasrohre zu verkleinern, wird die Gasgeschwindigkeit bis auf 40 m/s erhöht. Im gleichen Maße verkleinern sich auch die Abhitzeessel. Um zusätzlich Partikelfilter einbauen zu können, muß die Bauform des Filters an die gegebenen Platzverhältnisse angepaßt werden. Das gilt gleichermaßen für eine Nachrüstung von Filtern wie auch für einen Schiffsneubau.

Anhand von Schiffsbauplänen wurden deshalb verschiedene Bauformen des Filters auf ihre Einbaumöglichkeit untersucht.

### Vertikale Durchströmung des Filters

Der Filter besteht aus mehreren nebeneinander angeordneten Filtermodulen, die senkrecht von unten nach oben von dem Abgas durchströmt werden. Über die Anzahl der Module läßt sich die Filtergröße an nahezu jeden Abgasvolumenstrom anpassen.

Abb. A 9 im Anhang zeigt schematisch einen Filter für einen Motor von 6.000 kW.

Bei einer anderen Bauweise sind die Filtermodule auf zwei versetzten Ebenen verteilt (Abb. A 10 im Anhang). Bei gleicher Filterfläche wird der Filter mit dieser Anordnung schmaler und höher.

Die Abb. A 11 im Anhang zeigt einen möglichen Einbau eines vertikal durchströmten Filters in den Abgasschornstein eines Containerschiffs mit einer Motorleistung von 6.000 kW.

Die Schifffahrtlinie „Scandlines“ hatte gebeten, zu prüfen, ob eine Nachrüstung von Partikelfiltern auf ihrem Fährschiff „Prins Joachim“ möglich ist. Das Fährschiff besitzt 6 Vordieselmotoren mit je 3.200 kW Leistung. Die Abb. A 12 und A 13 im Anhang zeigen skizzenhaft den Einbau eines Filters auf einem der Abgasrohre. Ein nachträglicher Einbau von 6 Filtern wäre demnach problemlos auf dem Oberdeck des Schornsteins möglich.

### Horizontale Durchströmung des Filters

Eine kompaktere Bauweise des Filters eröffnet sich bei einer horizontalen Durchströmung der Filtermodule. Die Abgase treten hierbei seitlich in die Filtermodule ein, durchströmen diese in horizontaler Richtung und werden anschließend wieder in den senkrechten Schornstein umgelenkt. Diese Bauweise ermöglicht eine sehr schlanke Gestaltung des Filtergehäuses.

### **4.3 Weitere Schritte**

Als nächster Schritt für eine Einführung des Filters ist eine praktische Erprobung auf einem Schiff vorgesehen. Die Schifffahrtlinie „Viking Line“ hat angeboten, einen Partikelfilter als Pilotfilter auf ihrem Fährschiff „Cinderella“ einzubauen und zu testen. Der Filter soll an einem Hilfsmotor mit einer Leistung von 2.300 kW eingebaut werden. Der Einbau soll im August 2003 im Zuge von fälligen Überholungsarbeiten erfolgen. Vor einem Einbau muß die Absaugvorrichtung für die Partikelanlagerungen noch in einem Standversuch erprobt werden. Während der Versuche in Rostock konnte lediglich die Ablösung der Partikelanlagerungen über Düsen mit Dampf getestet werden.

Der Einbau von Filtern auf Schiffen würde erleichtert, wenn mit dem Filter der Schalldämpfer im Schornstein verkleinert werden könnte. Mit den parallelen Filterflächen hat der Filter einen ähnlichen Aufbau wie ein Schalldämpfer. Bei der praktischen Erprobung ist deshalb die Auswirkung des Filters auf die Schalldämmung zu untersuchen.

## **5. Weitere Einsatzmöglichkeiten des Filters**

### **5.1 Diesellokomotiven**

Nach einer Präsentation des neuen Filtersystems prüft die Deutsche Bahn AG einen möglichen Einbau des Filters in ihren Diesellokomotiven. Die DB betreibt ca. 5.000 Diesellokomotiven, die ca. 27 % der gesamten Fahrleistungen erbringen. Ein besonderes Interesse besteht an einer Nachrüstung von älteren Diesellokomotiven.

Nach einer Studie über Kosten und Dauer einer Umrüstung sollen in einem praktischen Feldversuch Betrieb und Effizienz des Filters in einer Diesellok praktisch erprobt werden. Die Abb. A 14 im Anhang zeigt einen möglichen nachträglichen Einbau eines Partikelfilters in eine Diesellok der Baureihe 218.

Die Fa. Vossloh in Kiel fragte an, ob ein Einbau eines Partikelfilters in die Diesellok G 1206 möglich ist. Die Abb. A 15 und A 16 im Anhang zeigen die Einplanung eines Filters in den vorgesehenen Filterraum.

## **5.2 Blockheizkraftwerke und stationäre Dieselgeneratoren**

Die hohen Partikelemissionen verhindern einen Einsatz von kostengünstigem schweren Heizöl für eine Stromerzeugung mit Dieselmotoren. Mit einem Einbau eines Partikelfilters ließen sich die Partikelemissionen auf einen zulässigen Wert verringern.

Bei Dieselgeneratoren mit einer Abwärmenutzung (BHKW) lagern sich die Partikel an den Wärmetauscherflächen ab und verringern so den Wirkungsgrad der Abwärmenutzung. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist nur bei einer ständigen Reinigung der Abhitzewärmetauscher möglich, was einen Einsatz von Dieselkraftstoff für BHKW stark einschränkt.

## **5.3 Mobile Dieselgeneratoren**

Ein weiterer möglicher Einsatz für den Partikelfilter sind mobile Dieselgeneratoren, die von den Energieversorgungsunternehmen zur Deckung von Spitzenstromlast eingesetzt werden. Der Betrieb des Generators stellt für die Anwohner eine erhebliche Immissionsbelastung dar.

## **6. Ausblick**

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß ein Elektrofilter für eine Abscheidung von Partikeln aus dem Abgas von Dieselmotoren geeignet ist. Das beste Abscheideergebnis wird mit einem zweistufigen „Tandemfilter“ erreicht. Bezogen auf den reinen Kohlenstoffgehalt der Partikel beträgt die Abscheiderate ca. 70 %. Durch Ergänzung mit weiteren Filterstufen kann die Abscheideleistung des Filters beliebig erhöht werden.

Für eine Abreinigung der Filtermodule hat sich Dampf als vorteilhaft erwiesen.

Die im Forschungsantrag genannte Abscheiderate von 95 % konnte mit dem Filtersystem noch nicht realisiert werden. Die erreichten Abscheideraten werden von Schiffsbetreibern und Motorenherstellern jedoch als ein bedeutender Fortschritt und als zunächst ausreichend anerkannt. Als besonders positiv wird der geringe Druckverlust des Filters angesehen.

Als nächster Schritt für eine praktische Umsetzung der Ergebnisse ist ein Test eines Pilotfilters auf einem Fährschiff der „Viking Line“ geplant. Der Einbau soll im August 2003 stattfinden.

Mit Herstellern und Betreibern von Diesellokomotiven wird ein Einsatz des Filters in Diesellokomotiven geprüft.



Für einen Einsatz des Filters sind die folgenden Aufgaben zu bearbeiten:

- Konstruktion und Test der Abreinigungsverrichtung
- Verbesserung der Stoß- und Rüttelfestigkeit des Filters (Einsatz in Diesel-lokomotiven)

Die Herstellkosten des Filters liegen nach Umfragen bei Schiffsbetreibern in einer akzeptablen Größenordnung.

Ob das ökologische Ziel, eine Verringerung der Partikelemissionen und damit der Schwebstaubkonzentration in der Luft erreicht wird, hängt davon ab, die Schiffsbetreiber zu einem Einbau von Filtern zu veranlassen. Für Kreuzfahrtschiffe und Fährschiffe besteht bereits eine begrenzte Nachfrage. Mit Hinweisen auf eine verringerte Partikelemission möchten die Schiffsbetreiber ihre Schiffe für die Passagiere attraktiver machen („Blauer Engel“). Von den Hafenbehörden wird eine Verringerung der Emissionen gefordert. Die Interessenvertreter der Schiffsbesatzungen fordern von den Schiffsbetreibern eine Beseitigung der Gesundheitsgefährdung durch Rußemissionen aus dem Schiffsschornstein.

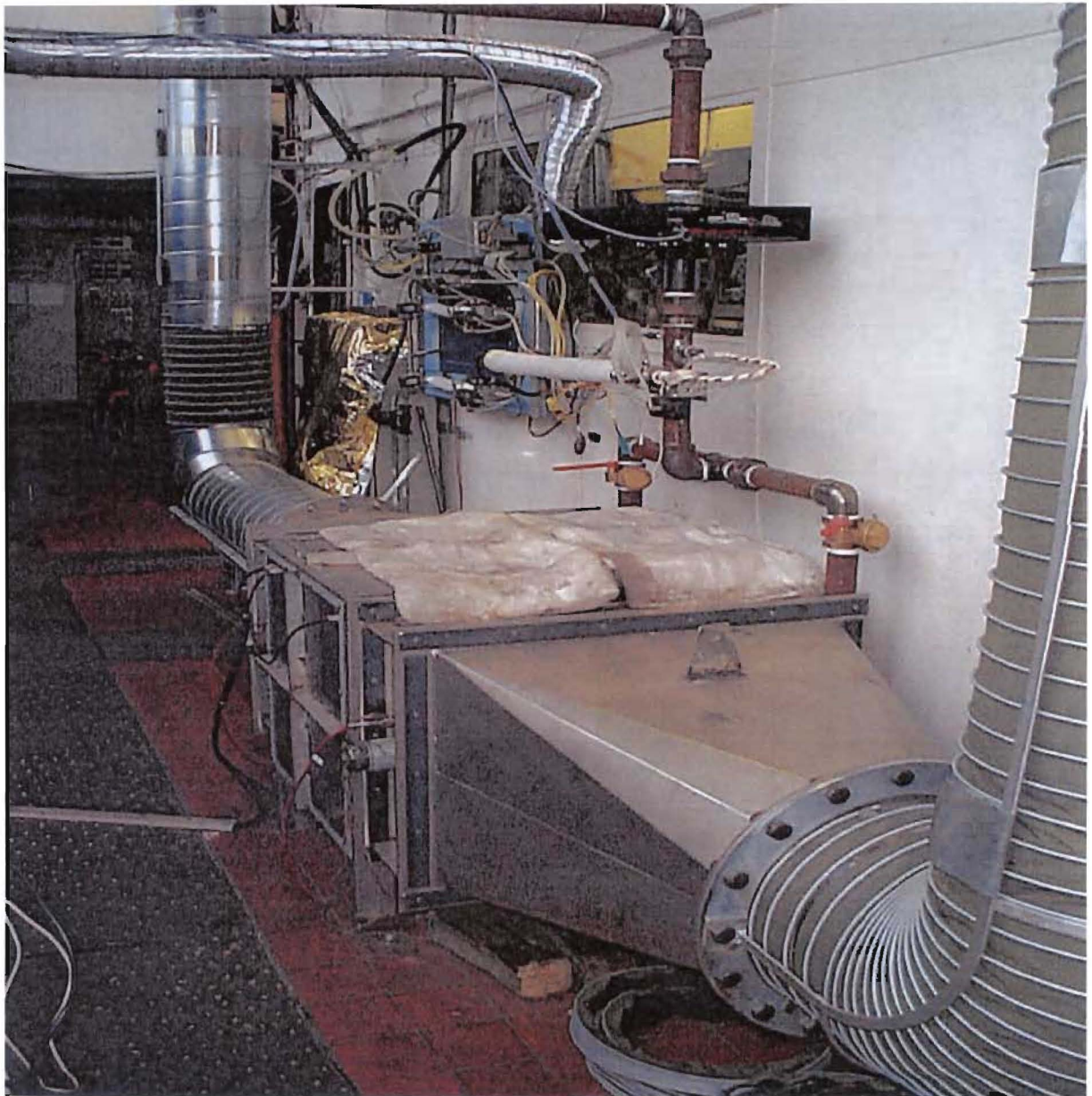
Falls sich der Filter in den weiteren Tests bewährt, könnte er Anlaß für entsprechende gesetzliche Vorschriften für den Einbau von Rußfiltern sein.



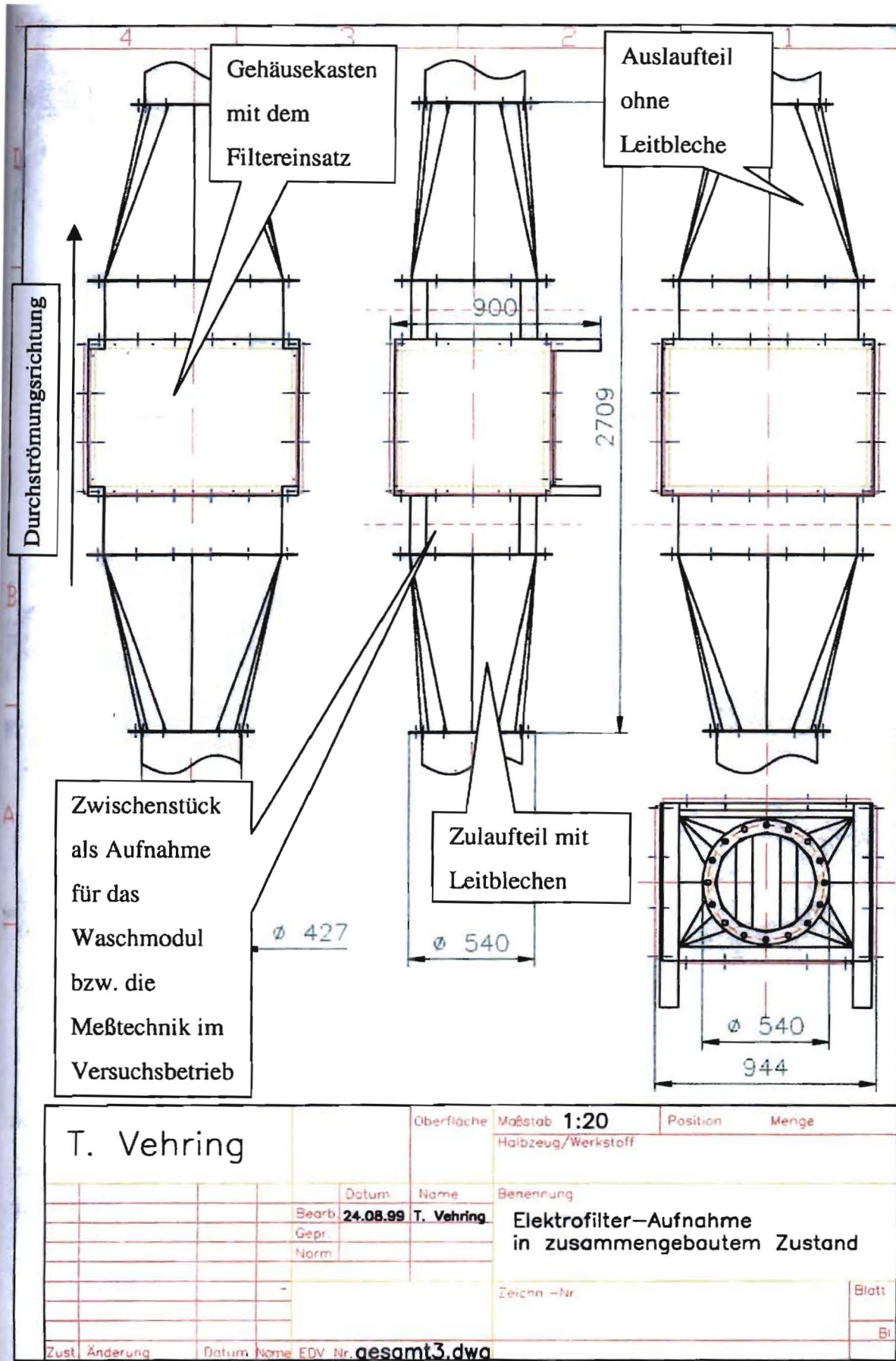
# A N H A N G







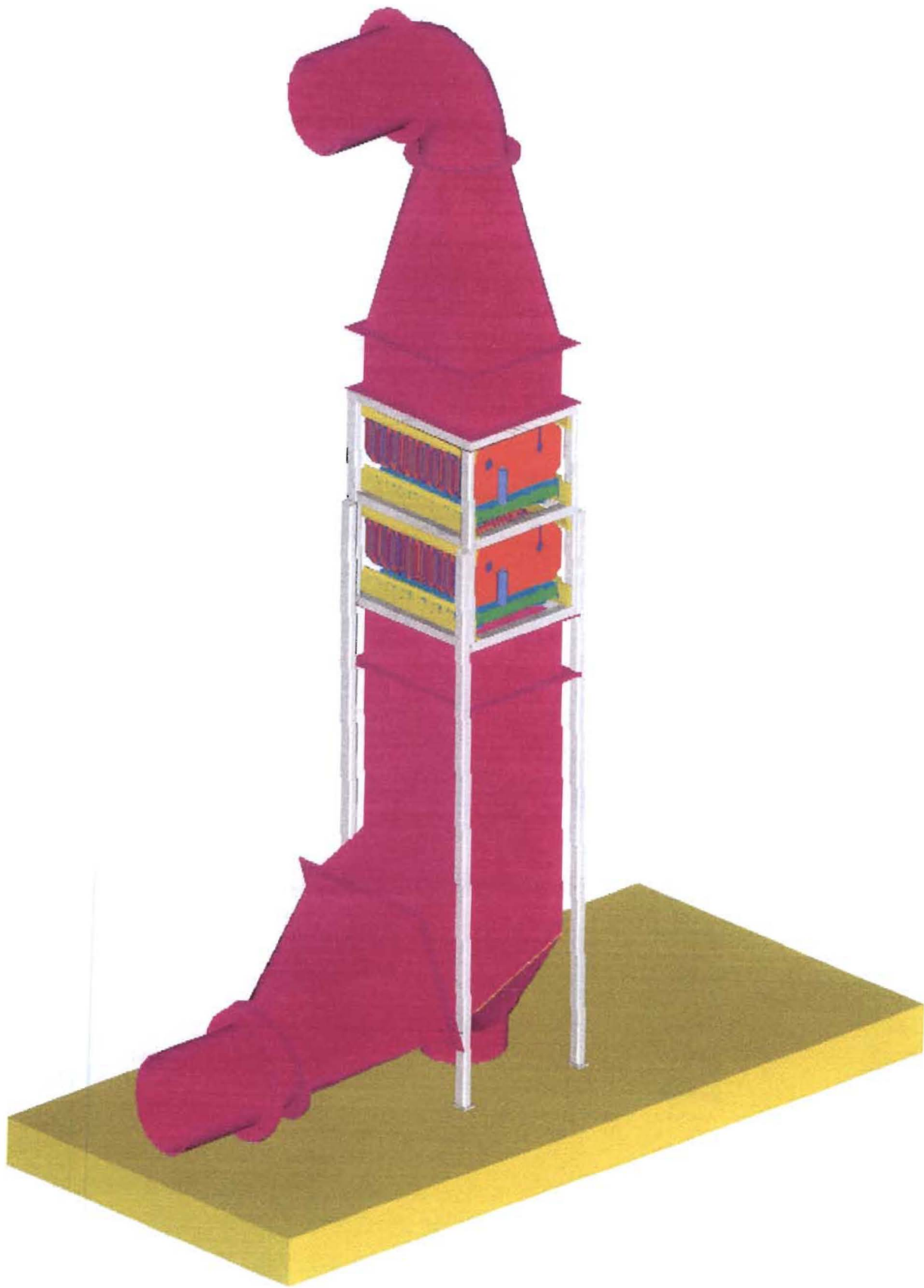
A 2: Aufbau der Versuchsanlage (Variante A) am Versuchsstand der Universität Rostock



A 3: Aufbau des Filtergehäuses (Variante A)



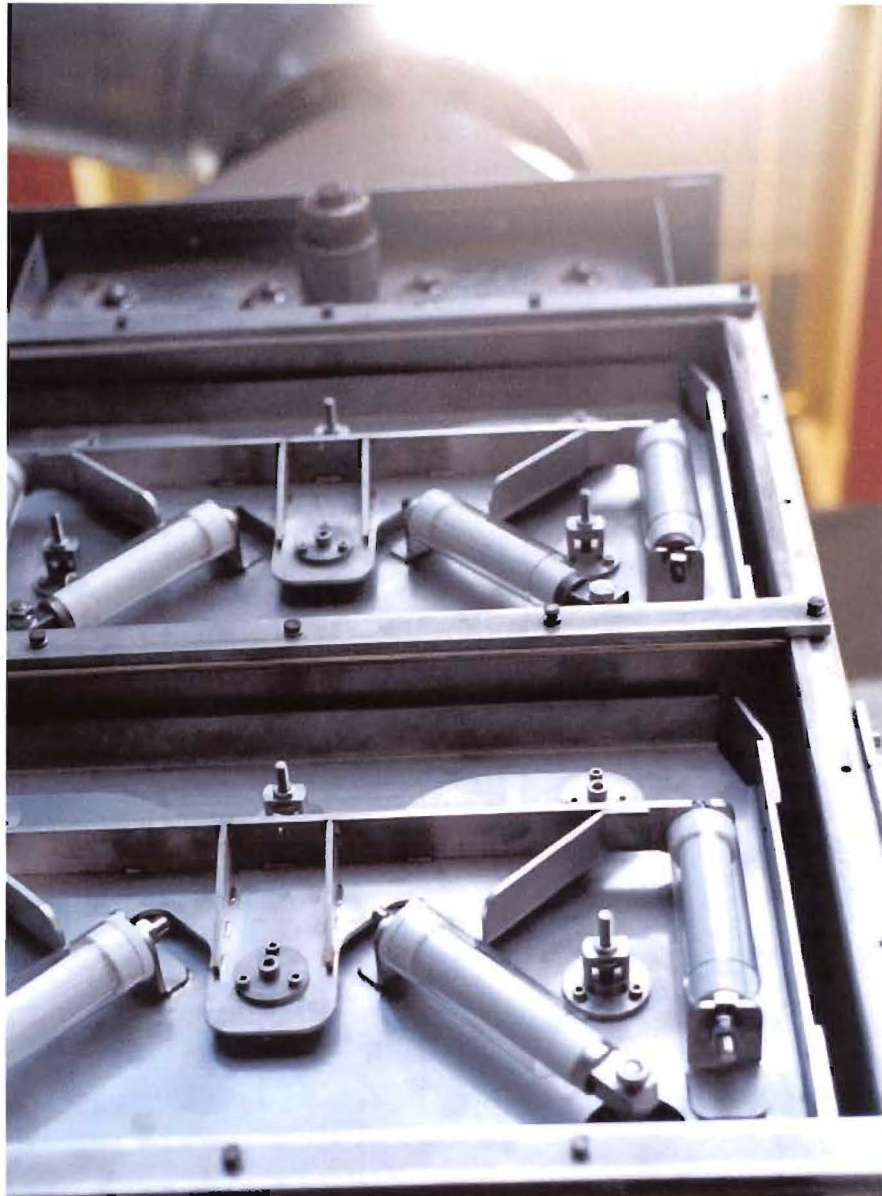




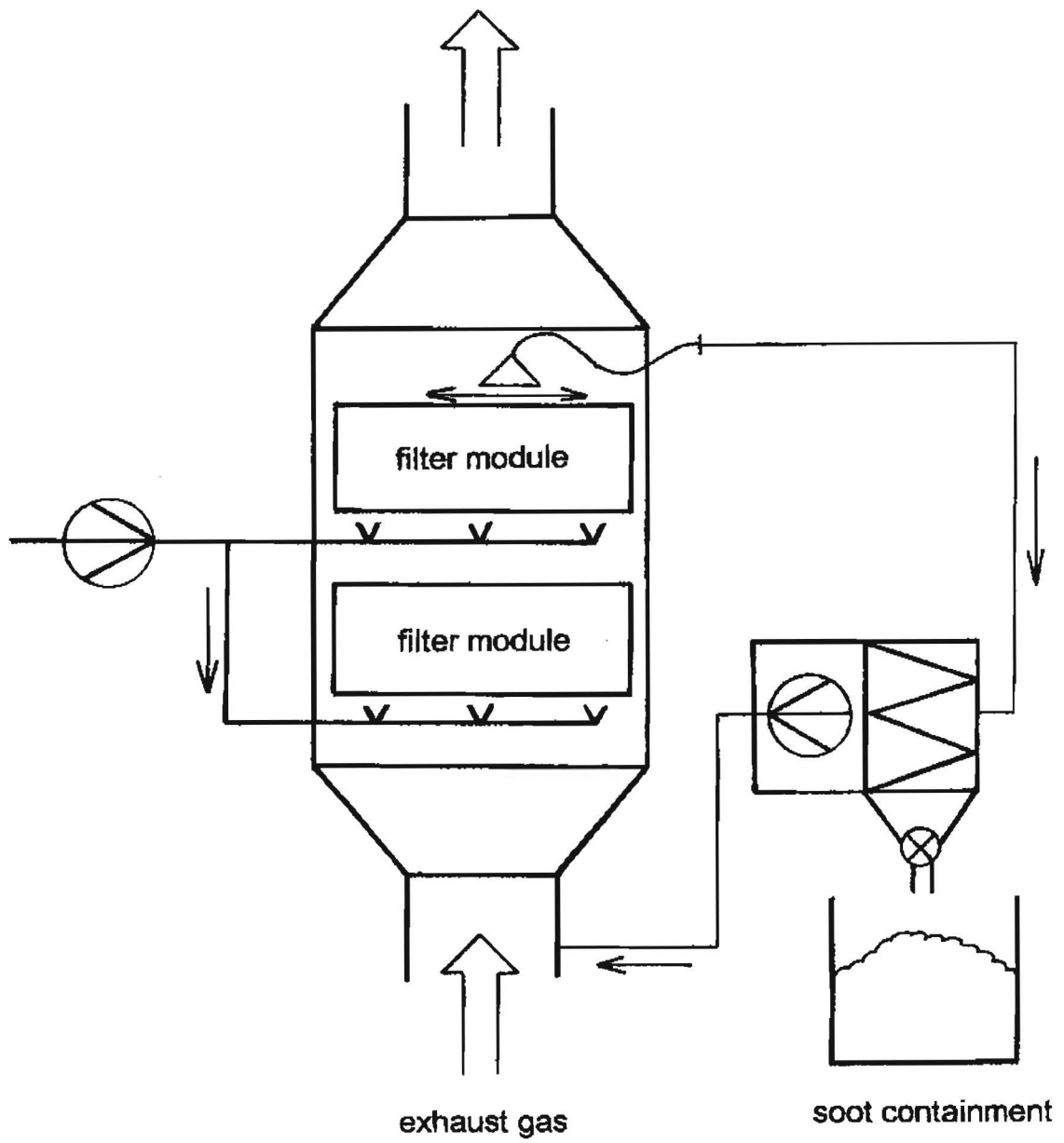
A 5: Ansicht des Filtergehäuses (Variante B)



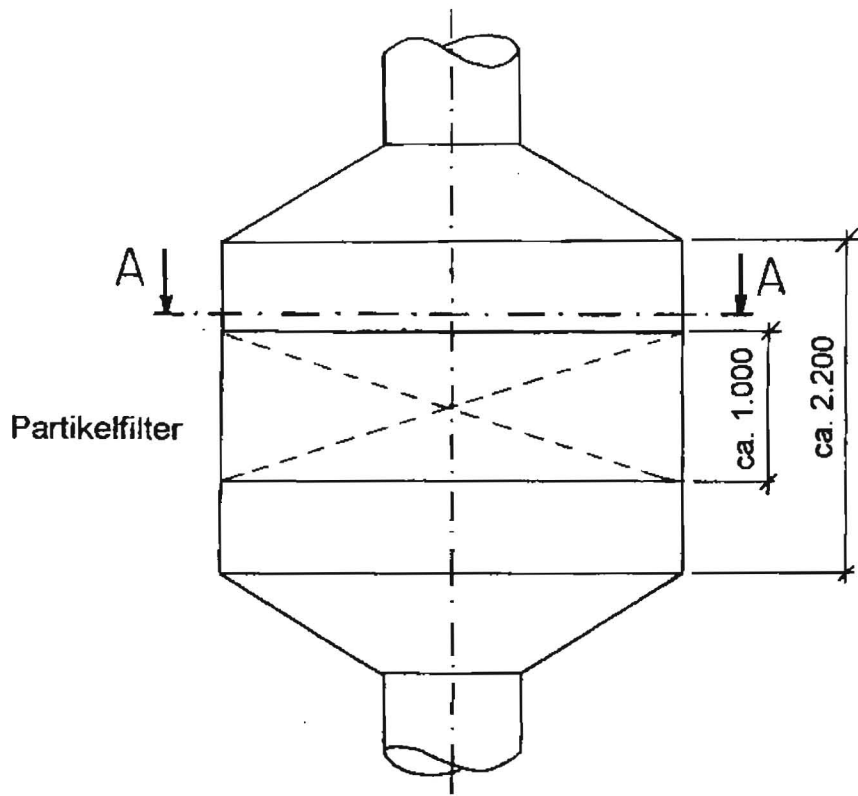
A 6: Einbau des Partikelfilters auf dem Versuchsstand der Universität Rostock



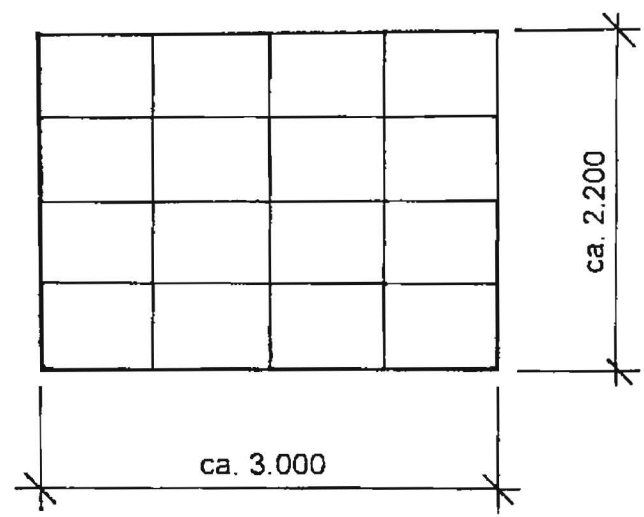
A 7: Zweistufiger Partikelfilter im Abgaskanal des Motorenversuchsstandes der Universität Rostock (Gehäuse geöffnet)



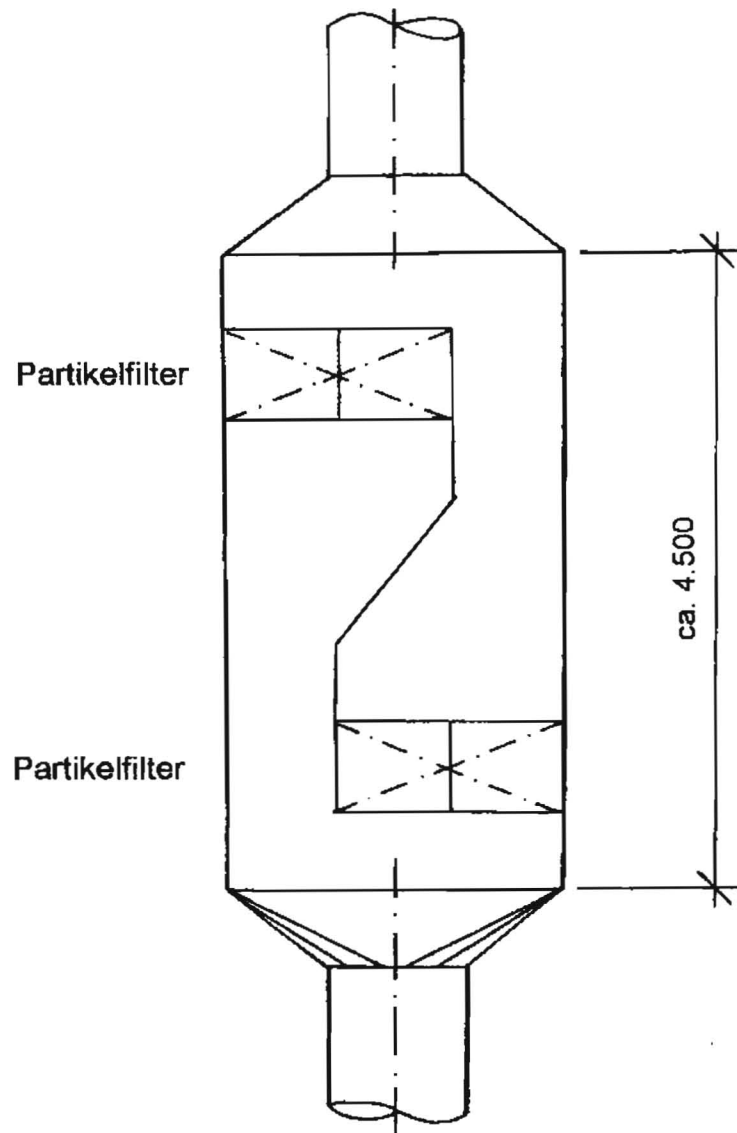
A 8: Vereinfachtes Anlagenschema des Filters



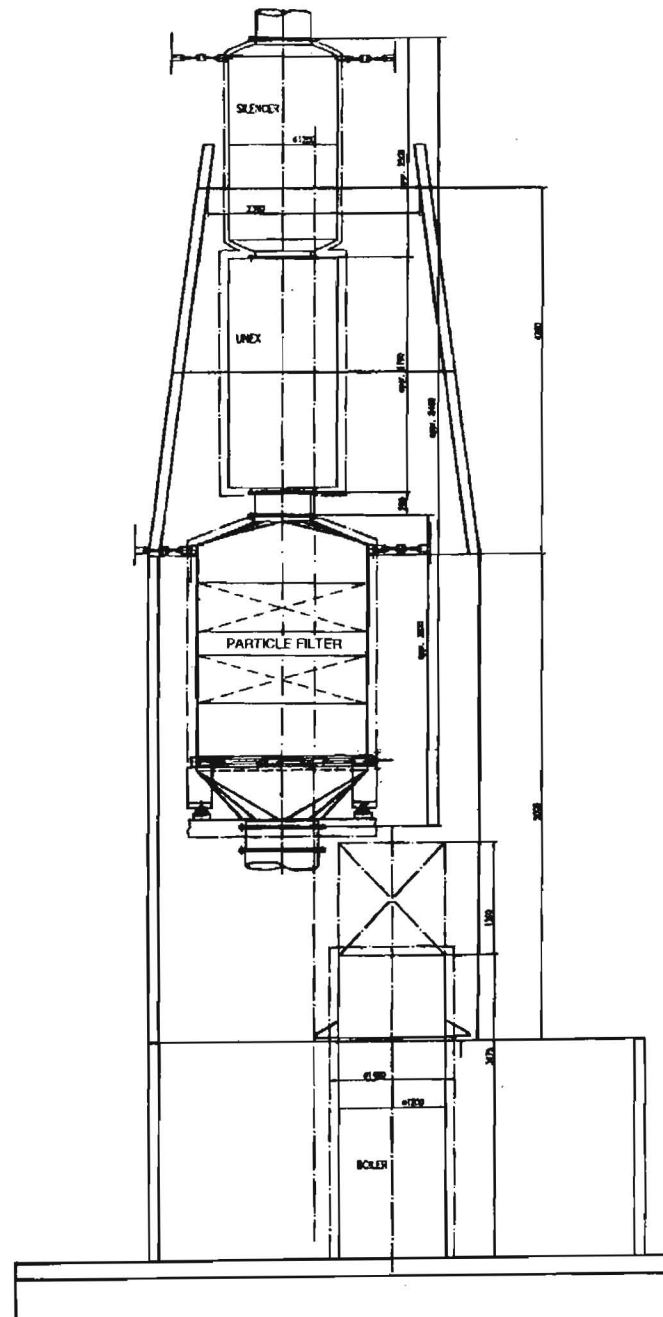
Schnitt A-A



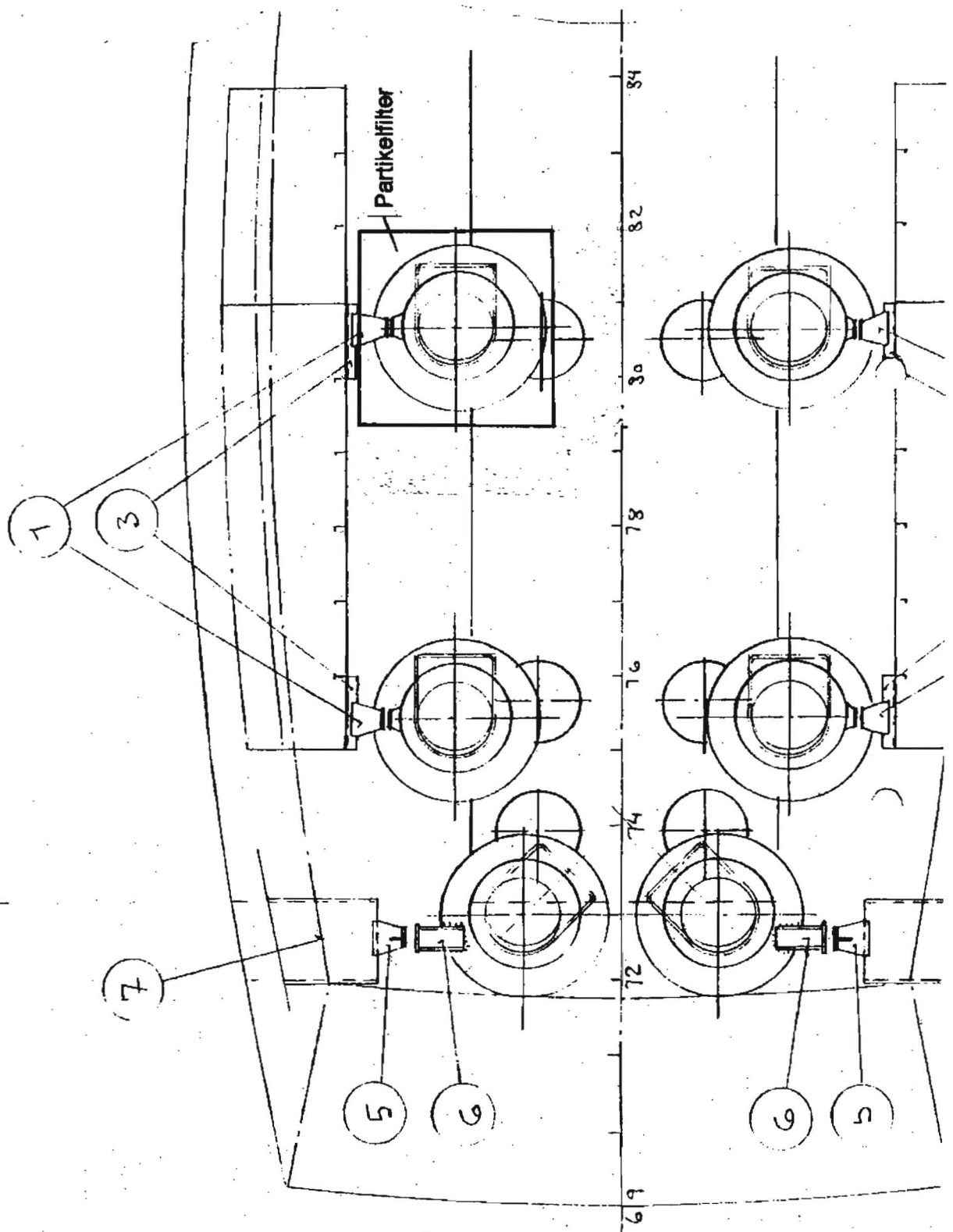
A 9: Abmessungen eines Partikelfilters für einen Schiffsmotor von 6.000 kW



A 10: Partikelfilter für einen Schiffsmotor von 6.000 kW mit Anordnung der Filtermodule auf zwei Ebenen

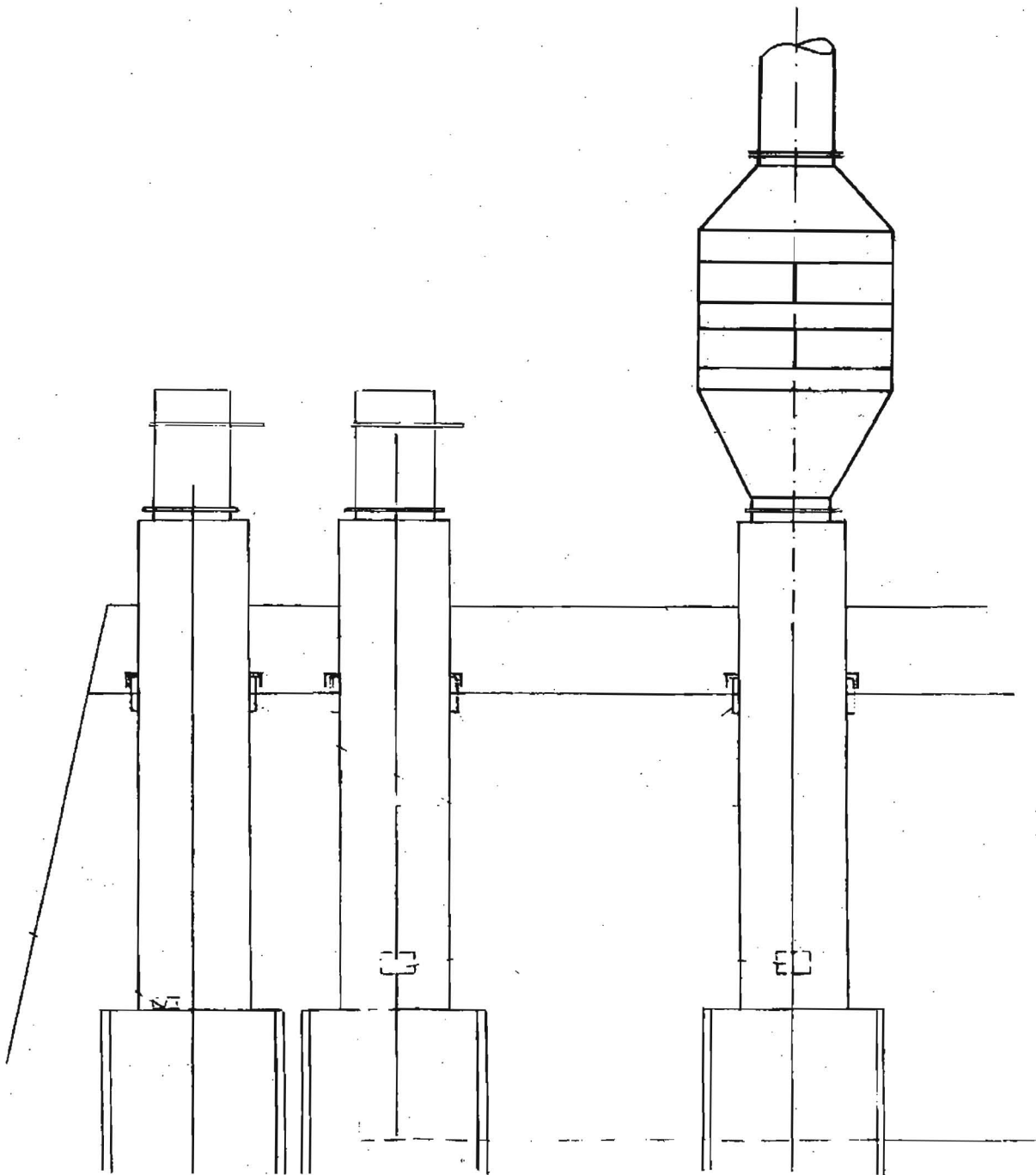


A 11: Einbaumöglichkeit eines Filters in den Schornstein eines Containerschiffs  
(Motorleistung: 6.000 kW)

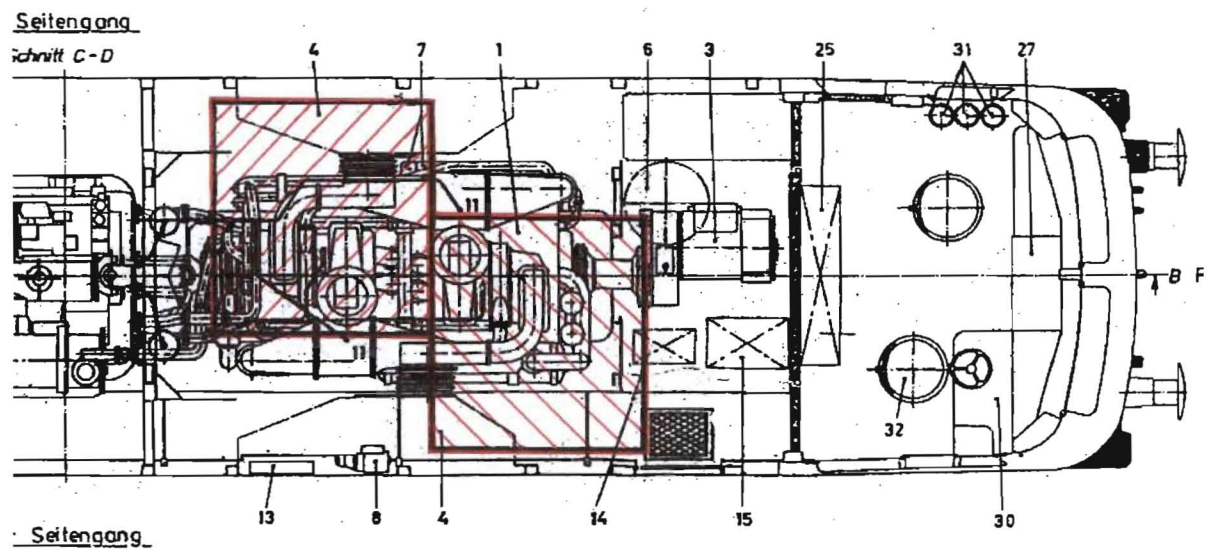
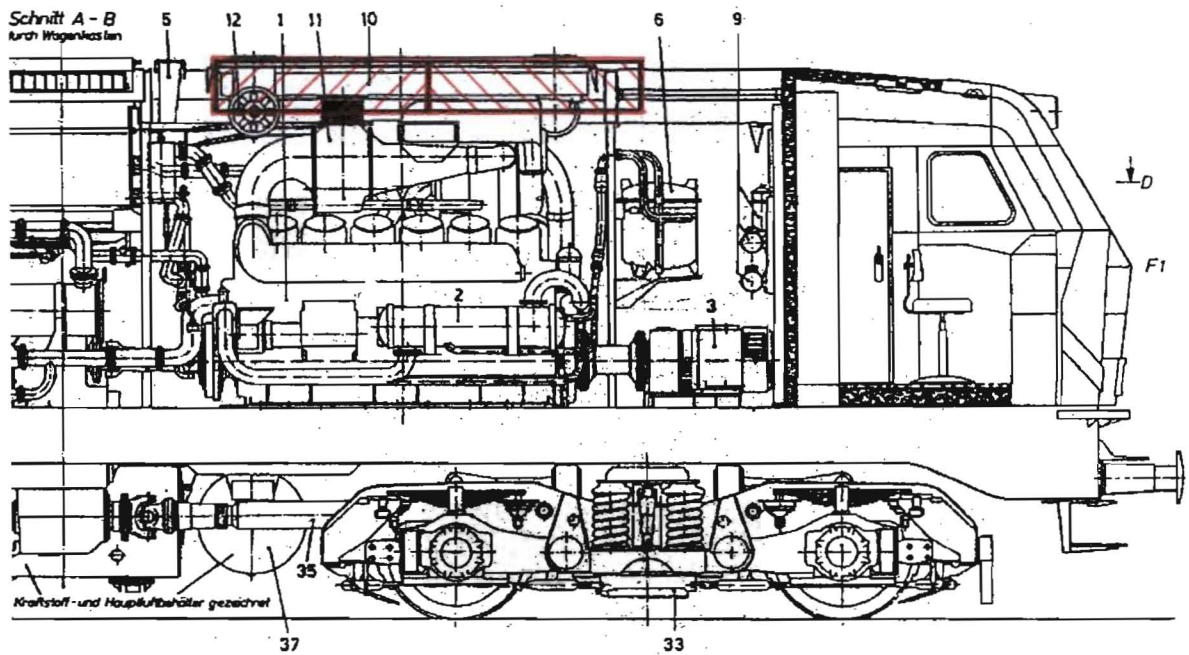


A 12: Einbaumöglichkeit eines Filters auf dem Fährschiff „Prins Joachim“ (Draufsicht)





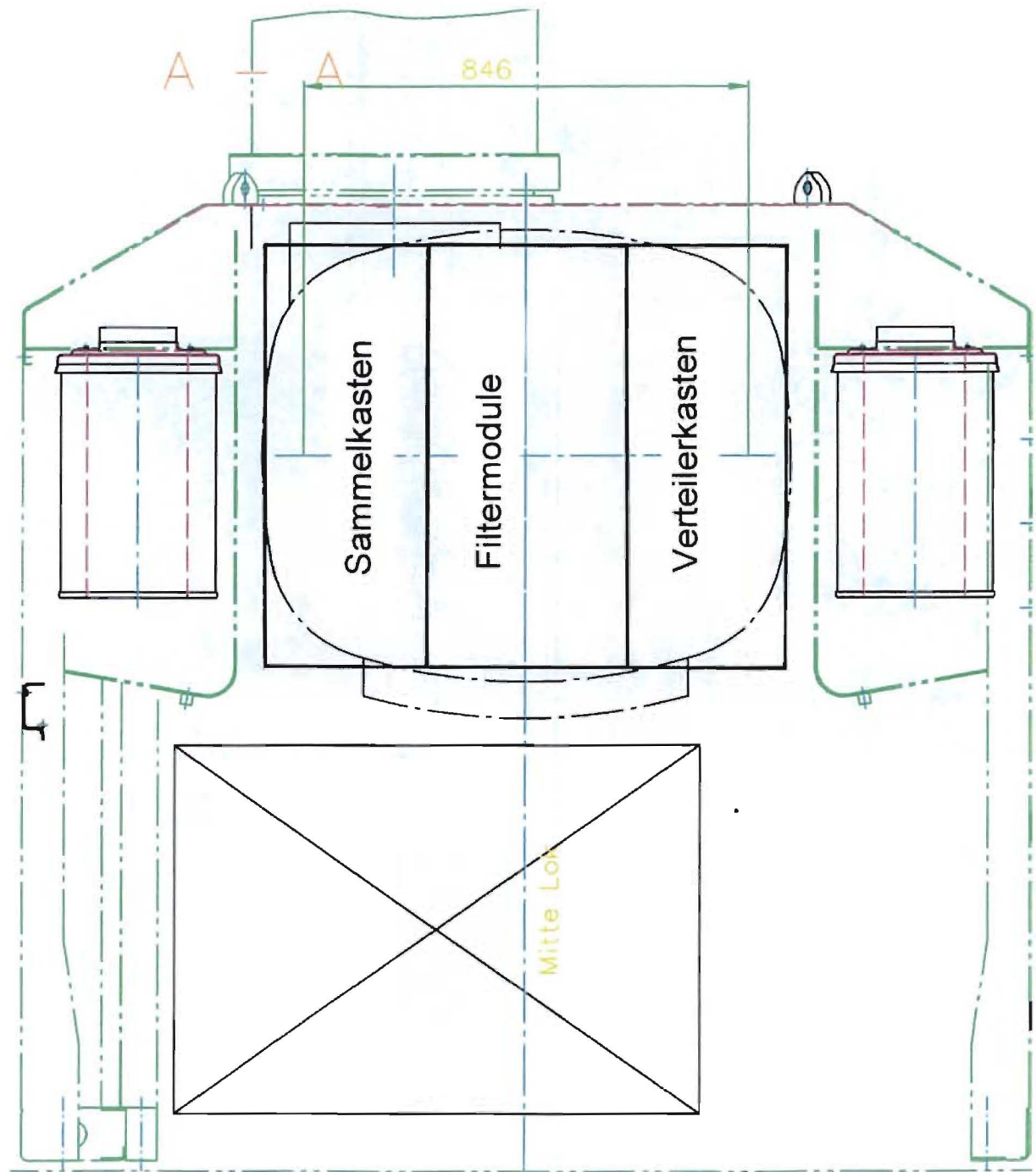
A 13: Einbaumöglichkeit eines Filters auf dem Fährschiff „Prins Joachim“  
(Seitenansicht)



Schnittzeichnung d. Diesellok 218

A 14: Einbaumöglichkeit eines Filters in eine Diesellokomotive der Baureihe 218





A 16: Einbaumöglichkeit eines Filters in eine Diesellokomotive der Baureihe G 1206 (Schnitt)