



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5524

Abluftreinigung durch Elektronenstrahl Die mobile Versuchsanlage AGATE-M

G. Albrecht, W. Baumann, H.-R. Paur
Institut für Technische Chemie

Februar 1995

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5524

Abluftreinigung durch Elektronenstrahl
Die mobile Versuchsanlage AGATE-M

G. Albrecht, W. Baumann und H.-R. Paur

Institut für Technische Chemie

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1995

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung

Industrielle Abgase, die Schadstoffe (Lösungsmittel, NO_x) enthalten, können durch Bestrahlung mit beschleunigten Elektronen gereinigt werden. In Laborversuchen konnte gezeigt werden, daß das Verfahren sich durch hohe Abscheidegrade bei niedrigem Energieverbrauch auszeichnet, insbesondere für stark verdünnte Abluft. Weiterhin sind die Unempfindlichkeit des Verfahrens gegenüber staubförmigen Verunreinigungen sowie seine leichte Regelbarkeit hervorzuheben.

Für Versuche und Demonstration des Verfahrens zur Abluftreinigung durch Elektronenstrahl wurde der mobile Versuchsstand AGATE-M in Zusammenarbeit mit dem Institut für Oberflächenmodifizierung (Leipzig) geschaffen. Zunächst sind Einsätze der Anlage zur Reinigung der Abgase einer Lackproduktion, einer CKW-Sanierungsmaßnahme sowie der Abluft eines Autotunnels vorgesehen.

Die verunreinigte Abluft wird mit einem Vorfilter entstaubt und sodann durch ein Reaktionsgefäß geleitet. Dort wird das Gas durch beschleunigte Elektronen ionisiert. Die Elektronen ($U = 150\text{-}200\text{ kV}$, $I_{\text{max}} = 150\text{ mA}$) werden mit einem selbstabgeschirmten LEA-3 Beschleuniger erzeugt. Durch Gasphasenreaktionen zwischen den Ionen und den im Gas enthaltenen Wassermolekülen entstehen oxidierende Hydroxylradikale, die in sehr kurzen Reaktionszeiten den Schadstoffabbau bewirken. Nach Verlassen des Reaktionsgefäßes werden die gas- und partikelförmigen Oxidationsprodukte auf einem mit basischen Additiven precoatierten Hochleistungsfilter abgeschieden. Spuren von Ozon, das bei der Gasphasenreaktion ebenfalls entsteht, werden mit Hilfe eines Aktivkohlekatalysators vollständig zerstört.

Der mobile Abgasteststand AGATE-M ist in einem transportablen 30-Fuß-Container untergebracht. Die Anlage ist für einen Abluftstrom von max. $1200\text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt. Sie hat ein Gewicht von 13 to. Im Vollastbetrieb beträgt die Leistungsaufnahme der gesamten Anlage 12,5 kW.

Die Versuchsanlage ist weitgehend automatisiert. Sie wird durch eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) gesteuert. Die wesentlichen Betriebsdaten werden meßtechnisch erfaßt und mittels eines Datenloggers abgespeichert. Die Gaszusammensetzung wird roh- und rein-gasseitig durch einen Flammenionisationsdetektor (FID) sowie durch einen Gaschromatographen (GC) überwacht. Weitere Analysengeräte werden je nach Bedarf eingesetzt.

Abstract

Off Gas Cleaning by Electron Beam - The Mobile Test Facility AGATE-M -

Industrial off gases, containing pollutants (Volatile Organic Compounds, NO_x) may be cleaned by irradiation with accelerated electrons. Laboratory tests show, that this process is especially suitable for low concentrated off gases because of high removal efficiencies at low energy consumption. In addition it must be noted, that the process is insensitive towards particulates and may be easily adjusted to different load conditions.

The goals of this project are the test and the demonstration of the process in an industrial environment. The mobile test facility AGATE-M was constructed in cooperation between the Forschungszentrum Karlsruhe and the Institute for Surface Modification (IOM). As first projects we plan to use the mobile plant for cleaning the waste gases from paint production plant, from a remediation plant emitting chlorinated hydrocarbons (CHC) and from an automobil tunnel.

In the first stage of the process dust is removed from the waste gas. Then the gas flows into the reaction vessel. There the gas is ionized by accelerated electrons ($U = 150-200$ keV, $I_{\max} = 150$ mA) from a selfshielded LEA-3 accelerator. By gas phase reaction of the ions and water molecules in the off gas, hydroxyl-radicals are formed, which initiate a rapid decomposition of the pollutants. The gaseous and particulate reaction products are precipitated on a high efficiency filter, which is coated with an alkaline additive. By an active coal catalyst traces of ozone, which stem also from the gas phase reaction, are completely decomposed.

The mobile test facility AGATE-M is housed in a transportable 30ft-container. The plant was constructed for a flow rate of $1200 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. The weight of the plant is 13 metric tons. The plant's electricity consumption is typically in the order 12 kW.

The test plant is automated through-out. The plant and the electron accelerator are controlled by programmable computer units. The relevant operation data are being measured by suitable instruments and saved by an electronic data logger. The gas compositions at the plants inlet and outlet are measured by flame ionization detector (FID) and by gas chromatography (GC). Additional analyzers are employed according to demand.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
1.1 Problemstellung.....	5
1.2 Stand der Technik	5
1.3 Verfahrensbeschreibung.....	7
1.4 Ziel des AGATE-M Projektes.....	7
1.5 Projektablauf	7
2 Anlagenbeschreibung	8
3 Komponentenbeschreibung	11
3.1 Vorfilter.....	11
3.2 Elektronenbeschleuniger LEA-3	12
3.3 Hauptabscheider	15
3.4 Sorptionsfilter.....	18
3.5 Gebläse.....	19
3.6 Druckluftkompressor.....	20
3.7 Ultraschallzerstäuber.....	21
3.8 Annubar-Durchfluß-Sonde.....	22
4 Elektrotechnik	23
5 MSR-Technik	25
6 Konstruktion	28
6.1 Container	28
6.2 Rohrleitungs- und Anlagenplanung	30
7 Literaturverzeichnis	31

Abbildungsverzeichnis

Bild 1. Zeitlicher Ablauf des Projektes AGATE-M.....	7
Bild 2. Vereinfachtes Fließbild der mobilen Anlage AGATE-M.....	8
Bild 5. Vorfilter mit Schwebstofffiltereinsatz.....	11
Bild 6. Niederenergie-Elektronenbeschleuniger LEA, schematisch dargestellt.....	12
Bild 7. Schematische Darstellung des Bestrahlungssystems LEA-3.....	13
Bild 8. Herding Sinterlamellenfilter.....	17
Bild 9. Krantz Sorptionsfiltergehäuse.....	18
Bild 10. Direktantriebener Radialventilator A9 A/RU 200 MDCC.....	19
Bild 11. Druckluftkompressor Mehrer AVT 55-3-150-HM.....	20
Bild 12. Fließbild AGATE-M mit MSR-Technik.....	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Konzentration der Schadstoffe und vorgesehene Bestrahlungsdosis.....	8
Tabelle 2. Technische Daten des Elektronenbeschleunigers LEA-3.....	14
Tabelle 3. Abmessungen und Gewichte des Elektronenbeschleunigers LEA-3.....	14
Tabelle 4. Tunnelabluftzusammensetzung nach der Bestrahlung.....	15
Tabelle 5. Zusammensetzung der der mit VOC beladenen Abluft nach der Bestrahlung.....	16
Tabelle 6. Übersicht der elektrischen Verbraucher.....	24
Tabelle 7. Übersicht der MSR-Feldinstrumentierung.....	26
Tabelle 8. Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Rohrleitungssystem.....	30
Tabelle 9. Übersicht der Rohrleitungen und Komponenten.....	30

Einleitung

Problemstellung

Die Emission von flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) ist neben den Stickoxiden für die Bildung des photochemischen Smogs verantwortlich, der vor allem durch hohe Konzentrationen an schädlichen Photooxidantien und Aerosolbildung gekennzeichnet wird. Laut UBA waren 1986 für die jährlichen VOC-Emissionen in der BRD (2.4×10^6 to) der Verkehrssektor (47,7 %) und der Lösungsmittelverbrauch (38,1 %) verantwortlich. 14,4 % der emittierten VOC stammten aus Lackanwendungen. Laut Obermeier [1] waren 1985 in Baden-Württemberg von 330.000 to anthropogener VOC-Emissionen 22 % auf Lackanwendungen und 44 % auf den Verkehrssektor zurückzuführen. An den industriellen VOC-Emissionen waren z.B. der Straßenfahrzeugbau (26,3 %), der Maschinenbau (12,3 %) und die Elektrotechnik (18,8 %) beteiligt. Bei den emittierten VOC handelt es sich im wesentlichen um Aromaten, Alkohole und Halogenkohlenwasserstoffe.

Insbesondere wenn die Schadstoffe in stark verdünnter Form anfallen (d.h. deutlich unter 100 mg C/m^3), ist ihre Abscheidung durch die derzeit bekannten Verfahren sehr aufwendig. Dies ist vor allem auf die großen zu behandelnden Volumenströme zurückzuführen. Daher setzen sich bei vielen industriellen Anwendungen alternative Lackierverfahren (Wasserlacke, Spritzverfahren mit hohem Wirkungsgrad, high-solids, Lacke mit reduziertem VOC-Gehalt usw.) durch. Die Volumenströme werden durch Umluftführung und gezielte Absaugung reduziert. Hierdurch sollen bis 1996 die VOC-Emissionen auf 1,4 Mio to/a zurückgehen (UBA). Der Anteil der Lackieranwendungen wird dann bei ca. 39 % liegen. So ist bei modernen Lackierstraßen mit Restemissionen von $< 20 \text{ mg C/m}^3$ zu rechnen. Problematisch sind auch weiterhin verdünnte Emissionen aus großen Lackierhallen, in denen MAK-Werte eingehalten werden sowie aus Handspritzzonen. Häufig enthalten diese Abgase mehrere organische Komponenten und Feinstaub, die auf Emissionen bei unterschiedlichen Arbeitsvorgängen zurückzuführen sind. Konventionelle Verfahren wie Adsorption mit Lösungsmittelrückgewinnung, TNV, KNV sind unter diesen Bedingungen nur bei hohen Betriebskosten einsetzbar.

Eine ähnliche Problematik liegt bei Automobiltunnels vor. Um die sehr niedrigen Schadstoffgrenzwerte einzuhalten, fallen hier große Abluftströme an, die im wesentlichen mit NO_x , aromatischen Kohlenwasserstoffen, toxischen polyzyklischen Aromaten, Dieselruß und stark riechenden organischen Komponenten verunreinigt sind (s.a. Vanderstraeten [2]). Mit der Zunahme des Autoverkehrs wird sich die Problematik trotz flächendeckender Einführung der katalytischen Abgasreinigung bei Automobilen in den kommenden Jahren nur unwesentlich verbessern. Dies führt bereits in manchen Kommunen zu massiven Bürgerprotesten, die die Tunnelprojekte in Frage stellen, da bisher keine wirtschaftlichen Methoden zur Abgasreinigung verfügbar sind.

Stand der Technik

Zur Abluftreinigung bei industriellen Anlagen wird heute eine Vielzahl von Technologien angeboten. Diese werden vor allem bei Konzentrationen von über $1 \text{ g Lösungsmittel pro m}^3$ eingesetzt. Bedingt durch die bisherigen Anforderungen der Gesetzgebung liegen nur wenige Erfahrungen mit großvolumigen Abgasströmen niedriger Belastung (unter 100 mg C/m^3) vor.

Kondensationsverfahren: Durch Abkühlung der organischen Dämpfe unter ihren Taupunkt werden die Lösungsmittel zurückgehalten und können wiederverwertet werden. Wird vorzugsweise bei höheren Lösungsmittelgehalten der Abluft (gekapselten Produktionsanlagen) und einheitlicher Lösungsmittelzusammensetzung verwendet.

Adsorptionsverfahren: Anreicherung der Lösungsmitteldämpfe auf Adsorbentien (Aktivkohle, Zeolithe) und nachfolgende Desorption. Die so gewonnenen Lösungsmittel können wiederverwertet oder durch Verbrennung entsorgt werden. Das Verfahren wird auch bei niedrigen Konzentrationen eingesetzt. Wegen der Verstopfungsgefahr durch Staubeintrag in den Adsorber werden häufig Vorabscheider eingesetzt. Eine Spezialentwicklung ist das Aktivkohle-faser-Verfahren. Hier werden die Lösungsmitteldämpfe niedriger Konzentration auf einem Aktivkohlerotor gebunden und anschließend desorbiert.

Absorptionsverfahren: Die Lösungsmitteldämpfe werden in Wäschern mit hochsiedenden Flüssigkeiten bzw. Wasser gebunden (meist physikalisch). Die beladenen Absorberlösungen werden zur Wiederverwertung z.B. durch Destillation gereinigt. Bisher findet dieses Verfahren wegen der schwierigen Handhabung und Weiterbehandlung der Absorberlösungen in der Lackierindustrie kaum Verwendung.

Thermische Verbrennung: Die gas- und aerosolförmigen Verunreinigungen werden in Brennkammern bei 700 °C bis 1000 °C zu CO₂ und H₂O oxidiert. Bei niedrigen Konzentrationen muß ein Zusatzbrennstoff (Gas, Öl) eingesetzt werden, der im wesentlichen die Betriebskosten bestimmt (Abwärmenutzung wünschenswert). Das Verfahren ist insbesondere bei Lacktrocknern über viele Jahre bewährt. Die Abscheidegrade betragen 70% bis deutlich über 90%.

Katalytische Verbrennung: Bei staubfreien Abgasen, die keine desaktivierenden Stoffe enthalten, können bei 300-500 °C an Katalysatoren Reinigungsgrade zwischen 70-90% erzielt werden. Dem Vorteil der geringeren Energiekosten stehen die Nachteile größerer Störanfälligkeit und die Katalysator-Ersatzkosten gegenüber.

Biologische Abluftreinigung: Durch Mikroorganismen, die auf festen Trägern (Biofilter) bzw. in Schlamm/Wassermischungen (Biowäscher) fixiert sind, wird das organische Lösungsmittel zu H₂O und CO₂ umgesetzt. Wegen der relativ langsamen biologischen Oxidationsvorgänge sind große Behälter-Volumina erforderlich. Das Verfahren wird bevorzugt zur Geruchsbeseitigung und für wasserlösliche Substanzen eingesetzt.

Membrantrennverfahren: Bei diesem in der Entwicklung befindlichen Verfahren werden organische Lösungsmittel über semipermeable Membranen aus der Abluft entfernt, konzentriert und kondensiert.

Stand der Kenntnis beim strahlungsinduzierten Abbau von VOC

Wie Untersuchungen am Teststand AGATE-1 zeigen, können Benzol, Toluol und handelsübliche Lackverdünner mit hohen Ausbeuten durch Elektronenbestrahlung abgeschieden werden. Für Lackverdünner (20-40 mg C/m³) wurden Abscheidegrade bis 95 % nachgewiesen und eine Massenbilanz erstellt, Paur [3]. Die organischen Komponenten wurden im wesentlichen in CO₂ und Aerosol umgewandelt, das mit einem Taschenfilter abgeschieden wurde. Bei der Bestrahlung entstehende Spuren von Ozon können durch handelsübliche Katalysatoren in Sauerstoff zersetzt werden. Die Gasphasenoxidation der VOC erfolgt bei Raumtemperatur. Daher sind Energieverbrauch und Investitionskosten relativ niedrig (ca. 150 kW für 100.000 Nm³h⁻¹). Auf Grund der bisherigen Erfahrungen bei der Elektronenstrahl-Rauchgasreinigung kann man davon ausgehen, daß der Staubgehalt des Rohgases den Abbau der Kohlenwasserstoffe nicht beeinflusst.

Verfahrensbeschreibung

Gasförmige Schadstoffe werden in den unteren Atmosphärenschichten im wesentlichen durch Radikalreaktionen abgebaut, die durch die UV-Strahlung der Sonne ausgelöst werden. Durch Bestrahlung von Abgas mit beschleunigten Elektronen werden dieselben Abbaureaktionen bereits an der Quelle eingeleitet. Hierbei wird das zu reinigende Abgas in ein Reaktionsgefäß geleitet und dort durch die schnellen Elektronen ionisiert. Durch Umsatz der Ionen mit Wasserdampf entstehen im Abgas Hydroxylradikale, die in schnellen Reaktionen die Schadstoffmoleküle oxidieren. Die Oxidationsprodukte (Aerosole, organische Säuren, CO₂) werden in einer kompakten Filteranlage aus dem Abgasstrom entfernt.

Ziel des AGATE-M Projektes

Ziel des AGATE-M Projektes ist die Untersuchung und Demonstration der Abluftreinigung durch ESV im industriellen Umfeld. Durch den Einsatz der mobilen Abluftreinigungsanlage sollen unter typischen Anwendungsbedingungen (Lackpartikel, Konzentrationsgradienten, komplexe chemische Zusammensetzungen usw.), Auslegungsdaten für die spätere Errichtung von Großanlagen erarbeitet und Erfahrungen gesammelt werden. Im einzelnen sollen Untersuchungen bei lösemittelverarbeitenden Industrien (Lackieranlagen, Klebefolienherstellern, Lackherstellern, chemische Industrie, Stripperabluft bei Grundwassersanierungen) sowie bei geruchsemitzierenden Anlagen (Lebensmittelindustrie, Automobil tunnels) durchgeführt werden.

Projekttablauf

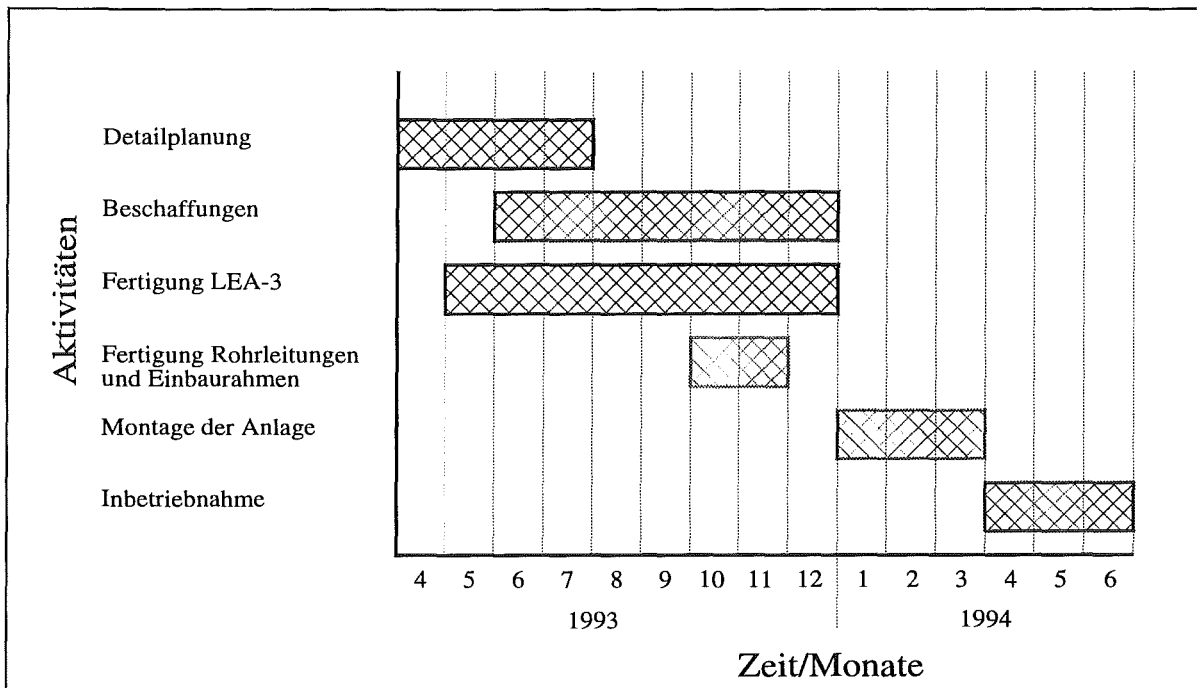


Bild 1. Zeitlicher Ablauf des Projektes AGATE-M

Anlagenbeschreibung

An der Versuchsanlage AGATE-2 wurden grundlegende Versuche zur elektroneninduzierten Abluftreinigung durchgeführt. In Technikumsversuchen wurden Abluftströme (bis 1000 m³/h) untersucht. Dabei wurden die Abscheidegrade bestimmt, die Produkte aufgeklärt sowie die Massenbilanzen erstellt. Nachstehend sind die für die mobile Anlage relevanten Daten [4; 5] aufgeführt.

Tabelle 1. Konzentration der Schadstoffe und vorgesehene Bestrahlungsdosis

Schadstoffe	Emissionsquelle	Konzentration [mg/m ³]	Dosis [kGy]	Minderungsrate [%]
Lacklösemittel	Lackierbetriebe	200-300	ca. 10	90-80
NO _x	Automobiltunnel	15-20	max. 1-2	90

Die Versuchsanlage AGATE-M (Bilder 3 und 4) wurde erstellt, um die neue Verfahrenstechnik im betrieblichen Umfeld zu testen und zu demonstrieren. Die gesamte Anlagentechnik und die dazugehörige Meß- und Steuerungstechnik befinden sich in einem 9 m- Container.

Das zu reinigende Gas tritt über den Vorfilter F1 (optional) in die Reaktionskammer ein. Dort wird die Abgasfeuchte durch Eindüsen von Wasser erhöht. Die Verweilzeit in der Reaktionskammer beträgt etwa 0,15 sec. Die Elektronen der Energie bis 190 keV werden mit einem Niederenergie-Beschleuniger (LEA-3) erzeugt. Der Reaktionskammer ist ein abreinigbarer Hochleistungsfilter (F2) nachgeschaltet. Dieser wird zur Sorption der Reaktionsprodukte und zur Rückhaltung der staubförmigen Abgasbestandteile mit einem basischen Additiv bestaubt. Das durch die Bestrahlung erzeugte Ozon wird in einem Aktivkohlefilter (F3) katalytisch zerstört. Mit dem Gebläse G1 wird das gereinigte Abgas gefördert.

Die für den Betrieb der Anlage erforderliche Druckluft sowie das Kühlwasser werden durch eingebaute Zusatzaggregate bereitgestellt. Die Anlage ist standardmäßig mit einem VOC-Monitor (FID) und einem Gaschromatographen ausgerüstet. Eine Datenerfassung (Datenlogger) zur Aufzeichnung der wesentlichen Betriebsparameter (Temperatur, Differenzdruck, Durchsatz) ist eingebaut. Bei Bedarf kann spezielle chemische und physikalische Meßtechnik installiert werden.

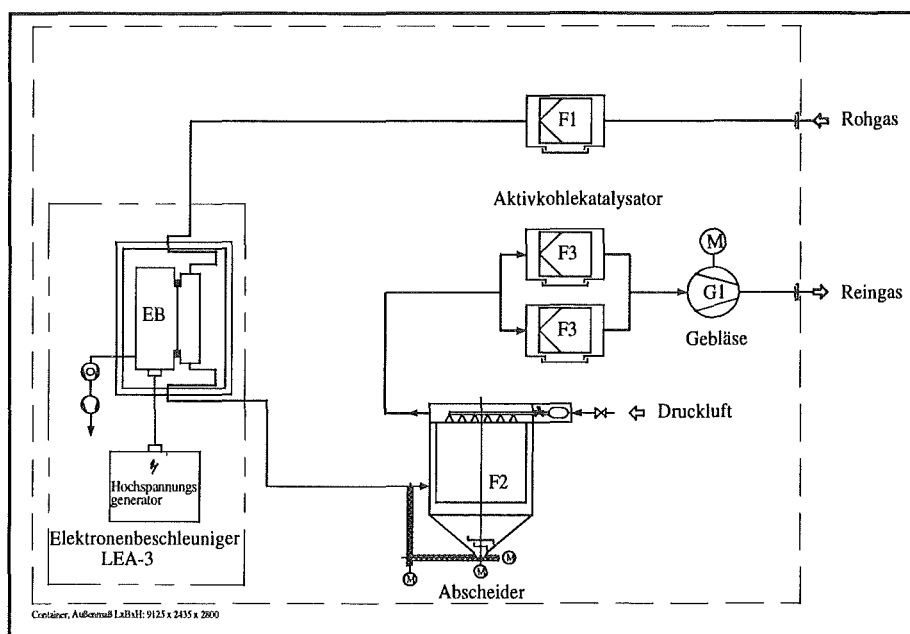


Bild 2. Vereinfachtes Fließbild der mobilen Anlage AGATE-M

Technische Daten

Containerabmessungen:	9,125 x 2,435 x 2,800 m
(ohne Auflieger)	(LxBxH)
Gewicht:	13 t
Elektroanschlüsse:	32 A (3 Phasen) Anlagentechnik 63 A (3 Phasen) HS-Aggregat
Durchsatz:	
Dauerbetrieb	1000 m ³ /h Abgas
max.	1200 m ³ /h
Rohgastemperatur:	bis zu 70 °C
Wasser:	max. 2 l/h
Additiv/Reststoffe:	
Additive	ca. 0,5 kg/h (1200 m ³ /h)
Aktiv-Koks	ca. 0,2 kg/h (1200 m ³ /h)
Filterfläche:	
Vorfilter (F1)	20 m ²
Hauptabscheider (F2)	36 m ²
Sorptionsfilter (F3)	Filtereinsatz 610 x 610 x 292 mm mit V-förmigem Schüttungsprofil Filterfläche 2 x 1,66 m ²
Elektronenenergie:	150-200 keV
Max. Elektronenstrom:	150 mA
Verbrauchswerte (elektrisch):	
Elektronenbeschleuniger	6 kW (bei 10 kGy und 1000 m ³ /h)
Gebläse	4 kW (1200 m ³ /h)
Filteranlage	1 kW
Nebenaggregate	1,5 kW

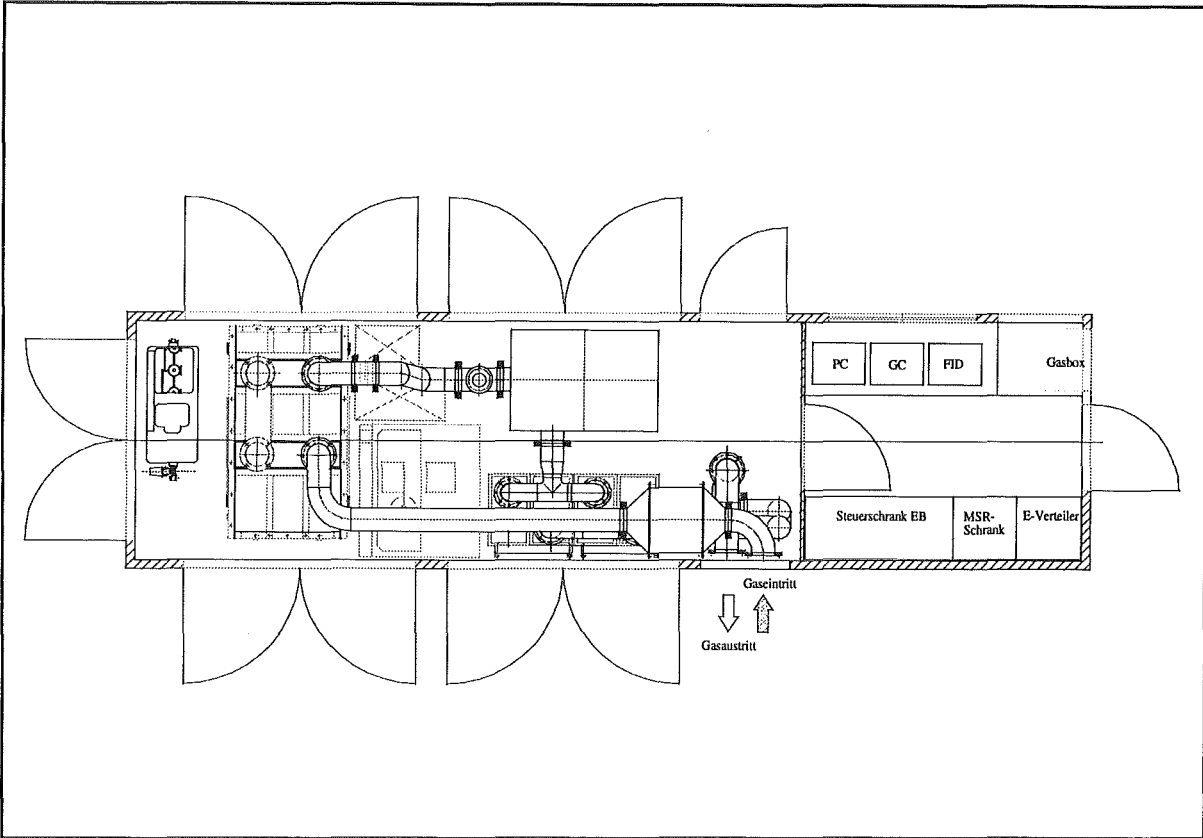


Bild 3. Draufsicht der mobilen Anlage AGATE-M

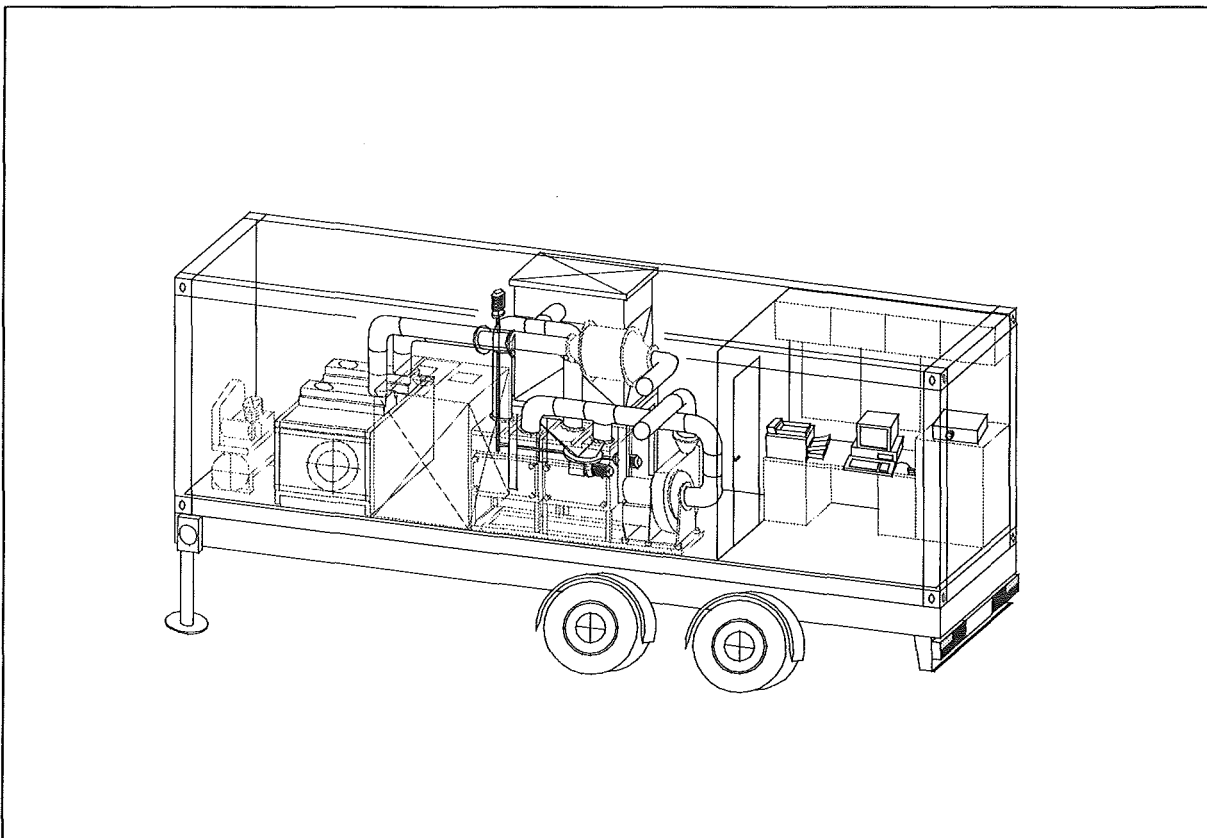


Bild 4. 3-D Ansicht der mobilen Anlage AGATE-M

Komponentenbeschreibung

Vorfilter

In der mobilen Anlage kann optional eine Schwebstofffilterzelle als Vorfilter in das vorhandene Filtergehäuse eingesetzt werden. Der als Wechselzelle ausgeführte Filtereinsatz ist für eine Einfachbeladung ausgelegt und hat eine Größe von 610 x 610 x 292 mm sowie eine Filterfläche von 20 m². Daraus resultiert eine Anströmgeschwindigkeit von 8,3 m/min auf das Element. Der Filter ist differenzdrucküberwacht und wird beim Erreichen eines Differenzdruckes von $\Delta p > 5$ mbar ausgewechselt. Das unbeladene Element hat ein $\Delta p < 1$ mbar bei einem Durchsatz von $\dot{V} = 1000$ m³/h.

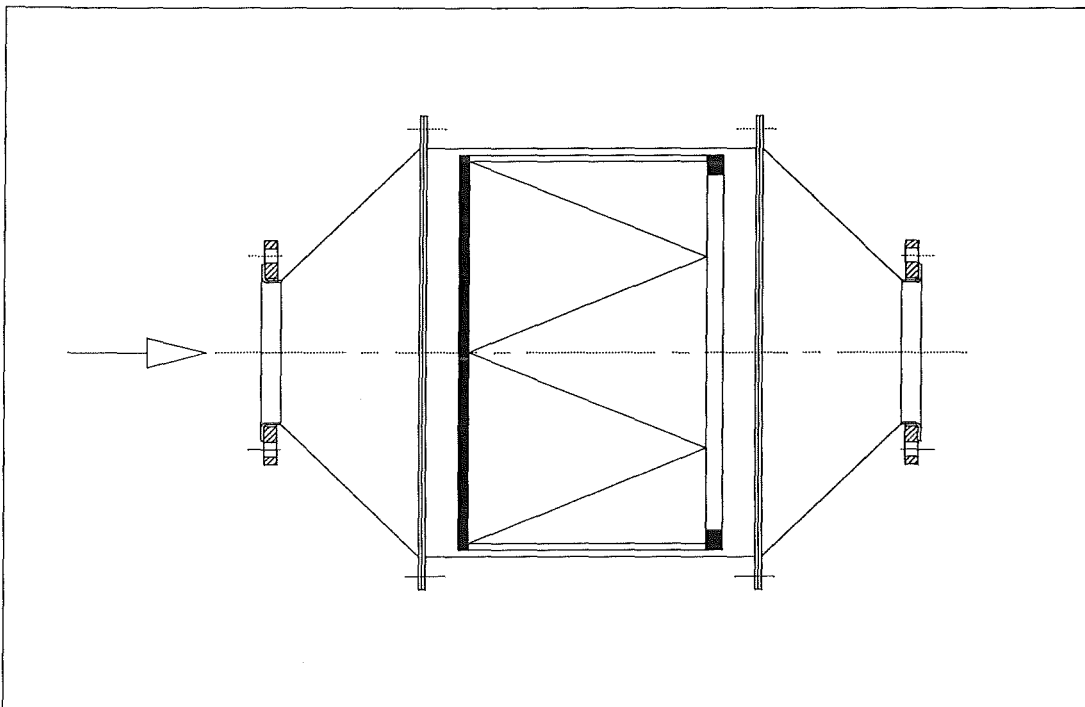


Bild 5. Vorfilter mit Schwebstofffiltereinsatz

Elektronenbeschleuniger LEA-3

Die mobile Anlage AGATE-M ist mit einem Elektronenbeschleuniger des Typs LEA-3 (Flächenstrahler) ausgerüstet. Dieser Niederenergie-Elektronenbeschleuniger LEA (Low Energy Accelerator) wurde am Institut für Oberflächenmodifizierung (IOM) in Leipzig entwickelt und besitzt eine Linearkathode. Die Elektronen werden von der Glühelektrode emittiert und im Hochvakuum (10^{-7} - 10^{-6} mbar) beschleunigt. Eine dünne Titanfolie ($15 \mu\text{m}$) durch die die Elektronen austreten, verbindet den Beschleuniger mit der Bestrahlungskammer. Alternativ kann auch eine $50 \mu\text{m}$ dicke Aluminiumfolie verwendet werden. Die Fensterfolie liegt auf einer Kupferlochplatte auf, die als Stützgitter für die Folie und zur Wärmeableitung benötigt wird. Für eine möglichst große optische Transmission wurde die Kupferstützplatte in Wasserstrahl-Schneidtechnik mit einer Langlochanordnung hergestellt. Der Beschleuniger befindet sich innerhalb einer Abschirmung bestehend aus 10 mm starken Bleiplatten. In der Hauptstrahlrichtung (Elektronenaustrittsrichtung) ist die Abschirmung auf 20 mm starkes Blei erhöht. Außerhalb der Abschirmung bzw. in einem Abstand von 10 cm von der berührbaren Oberfläche muß nach Röntgenverordnung (RöV) die Dosisleistung kleiner als $1 \mu\text{Sv/h}$ sein. Die Leistungsaufnahme des Beschleunigers beträgt ca. 6 kW, bei einer Bestrahlungsdosis von 10 kGy (Anwendungsfall Lösemittelbehandlung) und einem Gasdurchsatz von $1.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Dies entspricht einem Strahlstrom von ca. 30 mA bei 180 kV.

Die Bestrahlungsdosis berechnet sich aus:

$$D = \frac{\text{Energie [kJ]}}{\text{Masse [kg]}} = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{\dot{V} \cdot \rho_{\text{Gas}}} = \frac{30 \text{ mA} \cdot 180 \text{ kV} \cdot 0,65 \cdot \text{h} \cdot \text{m}^3}{1000 \text{ m}^3 \cdot 1,3 \text{ kg}} \cdot 3,6 = \underline{\underline{9,7 \text{ kGy}}}$$

Der Aufbau des Strahlkopfes ist schematisch in Bild 6 dargestellt. Eine Skizze des Beschleunigersystems ist in Bild 7 gezeigt. Die technischen Daten des Beschleunigers sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

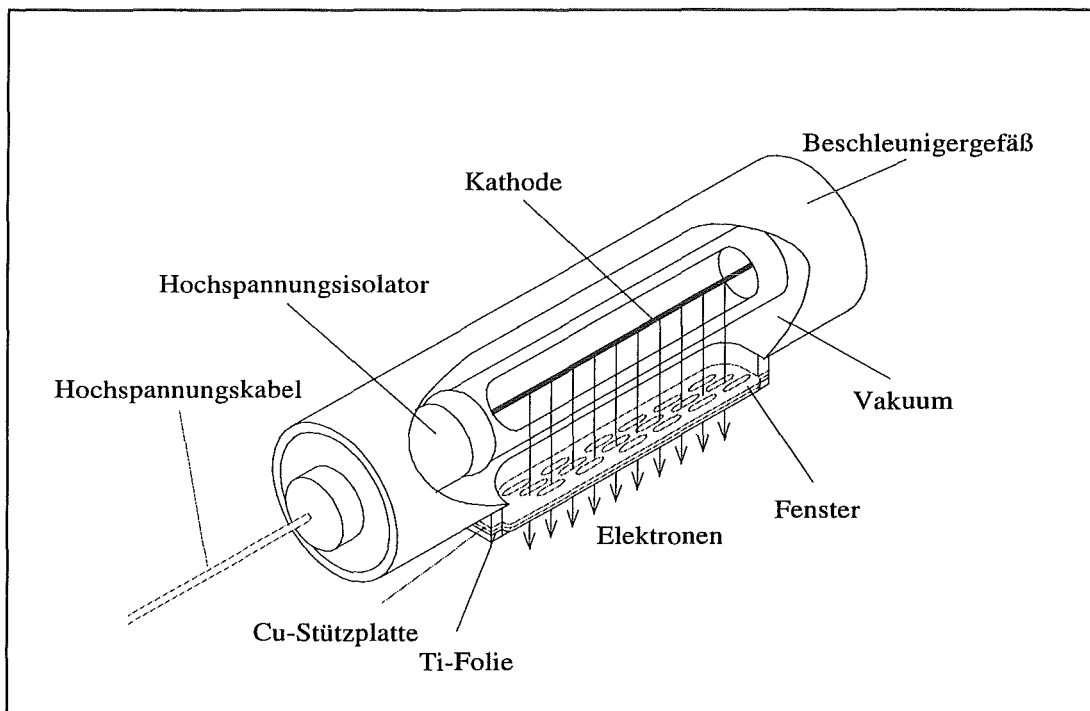


Bild 6. Niederenergie-Elektronenbeschleuniger LEA, schematisch dargestellt

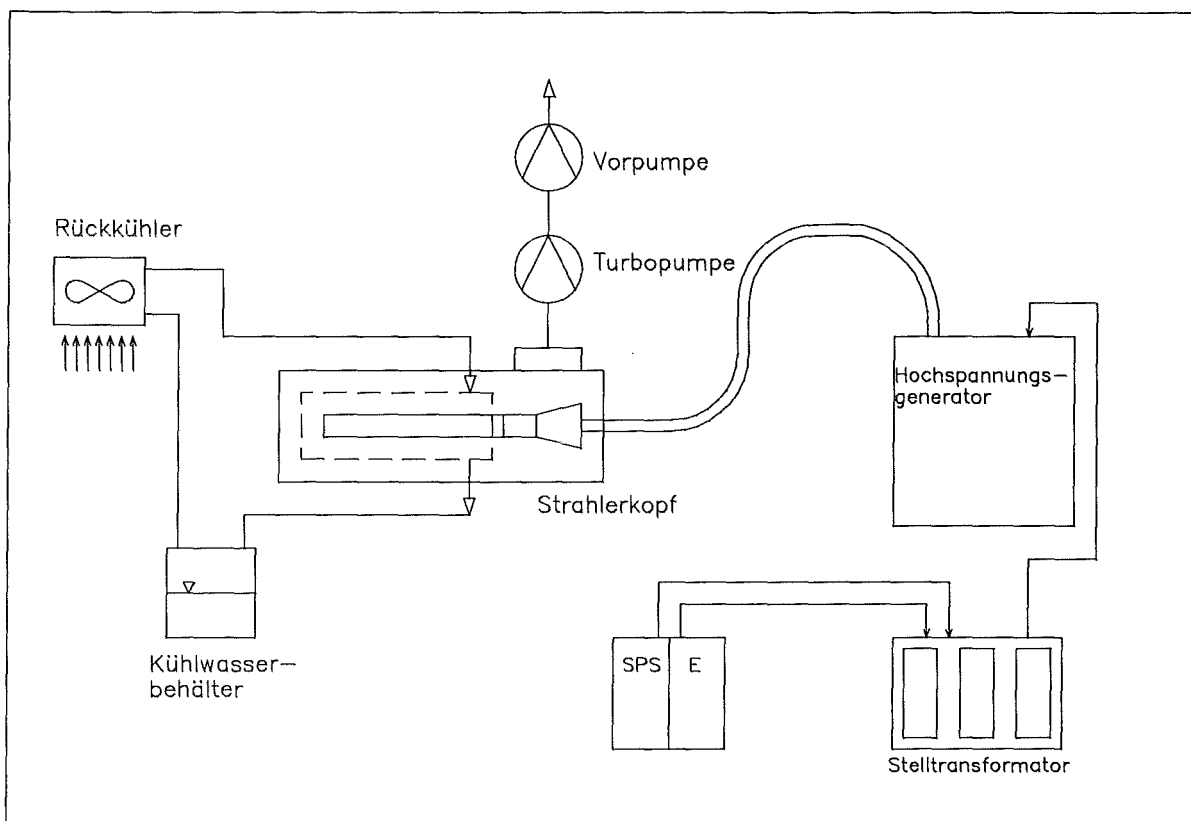


Bild 7. Schematische Darstellung des Bestrahlungssystems LEA-3

Hauptkomponenten des Beschleunigers:

- Strahlkopf
- Vakuumsystem (Turbomolekularpumpe und Drehschiebervorpumpe)
- Abschirmung
- Transformator (Hochspannungsgenerator)
- Kühlaggregat (Wasserrückkühler für die Fensterkühlung)
- E-Versorgungsschrank
- Steuerschrank mit SPS
- Stelltrafo

Nebenkomponenten:

- Bestrahlungskammer
- Verrohrung durch das Labyrinth

Tabelle 2. Technische Daten des Elektronenbeschleunigers LEA-3

Bezeichnung	Einheit	Wert
Elektronenenergie	kV	130 - 200
Strahlstrom	mA	1 - 150
Strahlaustrittsfenster - Dicke - Werkstoff - Fensterabmessungen	μm - mm	15 Titan 100 x 900
Transmission der Kupferplatte für das Austrittsfenster (geometrisch)	%	>70
Folienverlust bei 200 kV und 15 μm Ti-Folie	%	8
Kühlwasser	l/min	~ 10
Bleiabschirmung	mm	10
Leistungsaufnahme bei $D = 10 \text{ kGy}$ und $\dot{V} = 1.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$	kW	6
Bestrahlungskammer L x B x T	mm	1000 x 250 x 250
Dosisleistung direkt unter dem Austrittsfenster	kGy/s	~ 600
Kathode	-	Wolframdraht
Zeit für Kathodenwechsel	h	~ 2
Hochspannungsgenerator	-	ölisoliert

Tabelle 3. Abmessungen und Gewichte der Hauptkomponenten des Elektronenbeschleunigers LEA-3

Komponente	Abmessungen			Gewicht [kg]
	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	
Strahlkopf mit Abschirmung	2.110	1.160	1.460	2000
Hochspannungsgenerator	1.300	1.200	1.000	2.500
Kühlaggregat	800	400	1.500	
Versorgungsschrank EB	800	600	2.000	
Steuerschrank EB	600	600	2.000	

Hauptabscheider

Aufgabe und Verfahrenskonzept des Abscheiders

Allgemein wird durch die Bestrahlung der Abluft eine Autoxidation der Schadgaskomponenten erreicht, wobei der Hauptanteil in ein festes Produktaerosol überführt wird. In einer kombinierten Partikel- / Schadgasabscheidung erfolgt die Abtrennung der Bestrahlungsprodukte.

Der Produktabscheider hat die Aufgabe, das klebrige und teilweise hygroskopische Submikronaerosol (d_{50} ca. 0,5 - 1 μm) aus dem Gasstrom abzutrennen. Zusätzlich ist eine Trockensorption durch die Zugabe eines basischen Absorbens (Sorbalit) notwendig. Das Sorbens wird durch ein Rohrschneckenfördersystem direkt vom Staubsammelbehälter in den Rohgasstrom vor dem Abscheider aufgegeben. Da die Sorption hauptsächlich im Filterkuchen erfolgt und nicht luftgetragen auf der Strecke zwischen der Aufgabestelle und dem Filterkuchen, soll sich auf dem Filtermedium eine konstante Precoatschicht von mehreren Millimetern Dicke befinden.

Damit der Gesamtdruckverlust des Abscheiders ($\Delta p_{\text{Gesamt}} = \Delta p_{\text{Filtergehäuse}} + \Delta p_{\text{Filtermedium}} + \Delta p_{\text{Filterkuchen}}$) möglichst klein bleibt ($\Delta p_{\text{max}} \leq 15$ mbar), wird eine niedrige Filteranströmgeschwindigkeit ($v \approx 0,5$ m/min) gewählt. Bei einem Volumenstrom von 1.000 m^3/h und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/min wird eine Filterfläche von ca. 33 m^2 benötigt.

Die Regenerierung des Abscheiders erfolgt On-Line mit Druckluftimpulsen (Pulse-Jet). Das Additiv wird wahlweise kontinuierlich über die gesamte Filtrationsphase, bzw. diskontinuierlich als Precoating nach jeder Abreinigung zugegeben. Erstrebenswert ist eine möglichst dicke Additivschicht auf dem Filtermedium, bei einem geringen Druckverlust.

Zusammensetzung der Abluft nach der Elektronenbestrahlung

Da die Anlage zunächst für die Reinigung von Abluftströmen, die mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen beladen sind, vorgesehen ist, sowie für die Reinigung von Abluftströmen aus Automobiltunneln, sind nachfolgend diese beiden Anwendungsbereiche [4] berücksichtigt.

Tabelle 4. Tunnelabluftzusammensetzung nach der Bestrahlung

Komponente	Einheit	Konzentration
NO	ppm	< 0,5
NO ₂	ppm	≈ 5
HNO ₂	ppm	≈ 3
HNO ₃	ppm	≈ 5
N ₂ O	ppm	< 1
SO ₂	ppm	< 0,05
H ₂ SO ₄	ppm	$\approx 0,1$
CO	ppm	100
Kohlenwasserstoffe	ppm	<0,1
Aerosol (Staub, Ruß und Bestrahlungsprodukte)	mg / m ³	1 - 2
Wassergehalt	Vol.-%	1 - 2
O ₃	ppm	8

Tabelle 5. Zusammensetzung der mit VOC beladenen Abluft nach der Bestrahlung [5].
Anfangskonzentration $c_a = 200 \text{ mg C/Nm}^3$.

Komponente	Einheit	Konzentrationen		
		2 kGy	5 kGy	8 kGy
O ₃	vpm	10,4	24,2	35,4
N ₂ O	vpm	0,4	2,6	4,7
CO	vpm	2,1	8,3	13,7
NO ₂	vpm	0,3	1,7	2,0
Organische Säuren	mg/Nm ³	32,1	55,3	62,3
Aerosol	mg/Nm ³	36,3	71,7	96,1

Beschreibung des Abscheiders

Als Hauptabscheider (Bild 8) wird ein Filtersystem mit integrierter Pulse-Jet- Abreinigung verwendet. Die Sinterlamellen-Filtereinsätze bestehen aus einer PTFE-Membrane auf einem PE-Träger. Das Filtergehäuse mit einer Wartungstür ist aus Edelstahl geschweißt. Die Pulse-Jet- Abreinigung ist komplett mit dem Druckkessel und den erforderlichen Magnetventilen innerhalb des Filtergehäuses angeordnet. Die Magnetventile sind über eine weitere Wartungstür zugänglich. Der Rohgasanschluß hat eine Nennweite von 200 mm, für einen Gegenflansch ND 10 in Losflanschausführung nach DIN 2642. Im Gehäuse ist ein demontierbarer Prallvorabscheider integriert. Das Gehäuseunterteil dient als Austragstrichter und ist mit einem Flanschanschluß für das Additivdosiersystem versehen. Das Flanschbild und die Nennweite sind dem Additivdosiersystem der Fa. ADT, Köln, angepasst. Am Filteroberteil ist der Reingasstutzen (NW 200, ND 10) für Gegenflansch in Losflanschausführung nach DIN 2642 angebracht. Ein elektronisches Ventilsteuergerät (Impuls- und Pausenzeit variabel) ist fertig mit den Magnetventilen verdrahtet in einem Gehäuse IP 65 am Filtergehäuse angebaut. Alle produktberührenden Teile sind in Werkstoff 1.4541 gefertigt. Die Unterstützkonstruktion besteht aus dem Werkstoff St 37/2. Weiterhin ist ein Differenzdruckmeß- und Schaltgerät zur differenzdruckgesteuerten Abreinigung mit einem externen Signalausgang 0 - 20 mA angebracht.

Technische Daten des Abscheiders

Abscheidersystem:	Sinterlamellenfilter
Hersteller:	Fa. Herding, Amberg
Filbertyp:	HSL 900-8/18 GZ
Filterfläche:	36,32 m ²
Anzahl der Filterelemente:	8
Typ der Filterelemente:	900/18 NDA
max. Betriebstemperatur:	70 °C
Luftmenge:	max. 1.750 m ³ /h
Filterflächenbelastung:	0,80 m/min
E-Anschluß der Abreinigungssteuerung:	220 V
Anzahl der Magnetventile:	4
Steuerspannung der Magnetventile:	24 V DC
Schutzart aller elektrischen Bauteile:	min. IP 54
Druckluftanschluß (Vordruck):	min. 5 bar
eingestellter Betriebsdruck:	max. 5,5 bar
Druckluftverbrauch der Anlage:	ca. 160 l/min

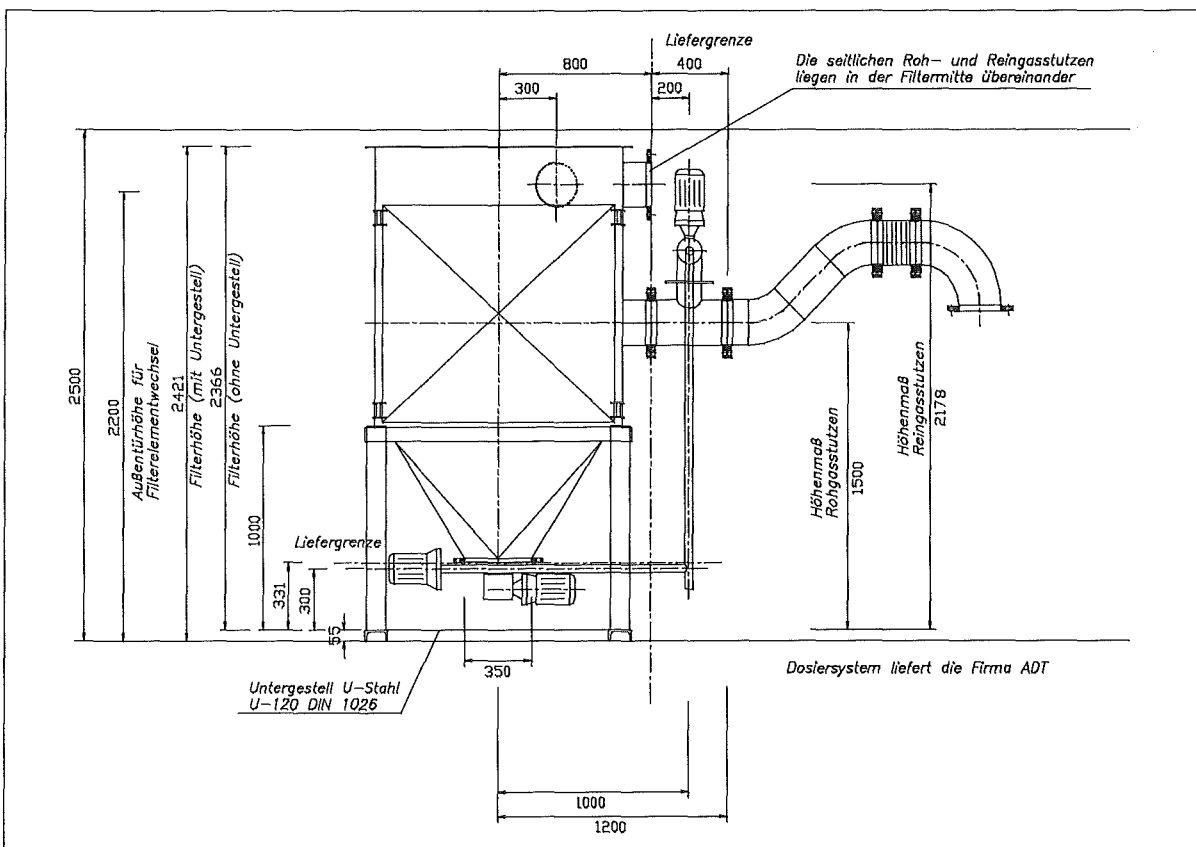


Bild 8. Herding Sinterlamellenfilter

Sorptionsfilter

Zum Ozonabbau wird der Gasstrom durch ein Sorptionsfiltergehäuse geleitet. Hierfür befinden sich in AGATE-M zwei Filtergehäuse der Fa. Krantz (Bild 9). Die Sorptionszelle hat eine V-förmige Faltung und wird mit Aktivkohle befüllt. Um eine optimale Adsorption zu gewährleisten, darf die Strömungsgeschwindigkeit im Filterbett 0,5 m/s nicht überschreiten. Durch den Einsatz von zwei parallel geschalteten Filtergehäusen und die gefaltete Oberfläche, wird eine Vergrößerung der Anströmfläche erreicht. Somit liegt die Anströmgeschwindigkeit deutlich unter 0,5 m/s.

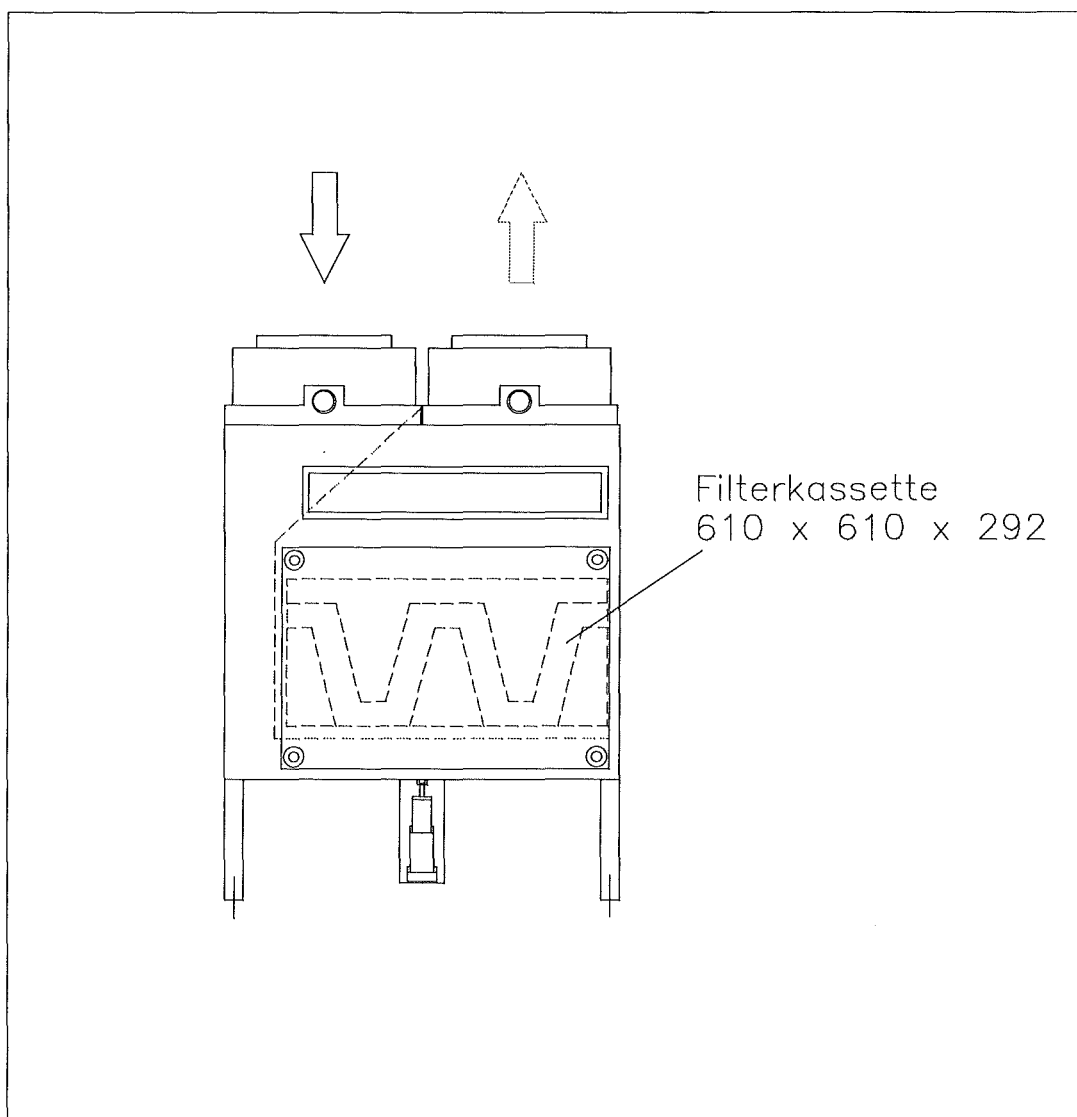


Bild 9. Krantz Sorptionsfiltergehäuse

Gebläse

Um die zu reinigende Abluft durch die Filter und den Beschleuniger zu saugen, ist am Ende der Anlage ein Saugzuggebläse installiert (Bild 10). Dabei handelt es sich um einen direktangetriebenen Radialventilator, Typ A9 A/RU 200 MDCC, der Fa. Gebhardt, Waldenburg. Das Gebläse ist auf einen maximalen Durchsatz von $1200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bei einem Druckverlust von 55 mbar ausgelegt. Über einen Frequenzumrichter kann das Gebläse drehzahlregelt werden. Der Durchsatz kann somit in einem weiten Bereich (1:10) geregelt werden.

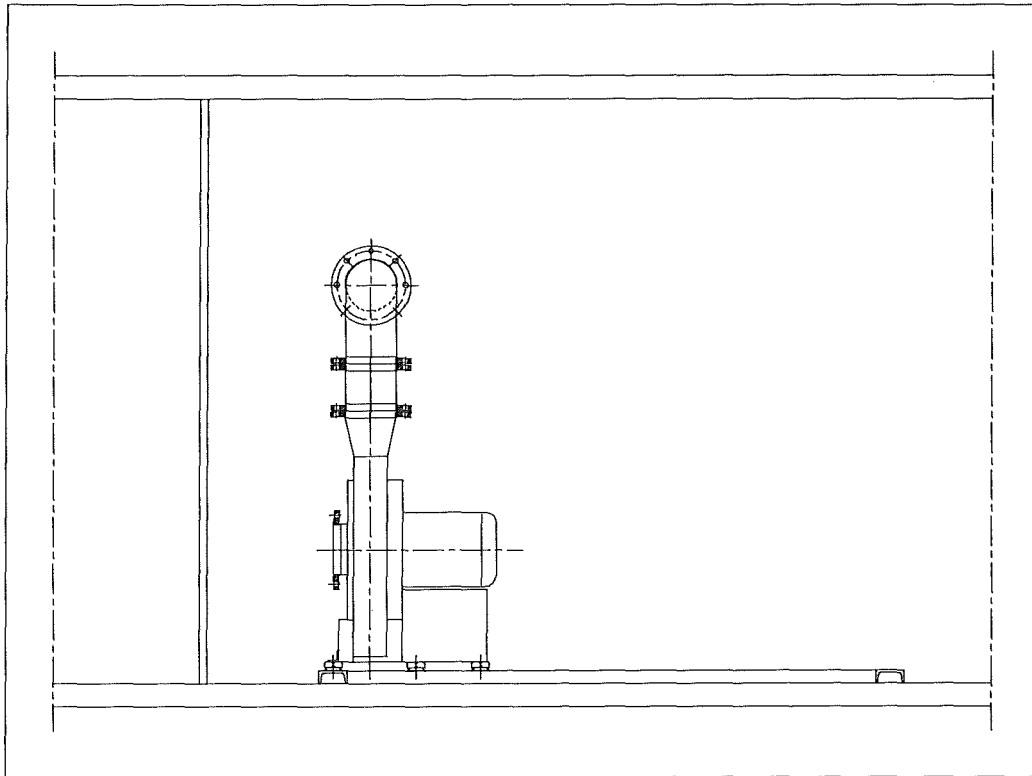


Bild 10. Direktangetriebener Radialventilator A9 A/RU 200 MDCC

Ventilatorausführung

Das Gehäuse, das Laufrad, die gasdichte Nabensicherung, die Versteifungen auf Saug- und Antriebsseite sowie die Wellenspaldichtung sind aus Werkstoff 1.4571 gefertigt. Der Motorblock und die Gehäusefüße sind aus Normalstahl, standardlackiert hergestellt. Die Saug- und Druckflansche haben eine Nennweite von 200 mm.

Technische Daten des Ventilators

Volumenstrom	$V = 1.200 \text{ Nm}^3/\text{h}$
Gesamtdruckdifferenz	$\Delta p_t = 5.500 \text{ Pa}$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$
Fördermitteltemperatur, max.. zul.	$t_{\text{max}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$
Ventilator Drehzahl	$n_{\text{vent}} = 2.880 \text{ min}^{-1}$
Drehzahl, max. zul.	$n_{\text{max}} = 3.550 \text{ min}^{-1}$
Wellenleistung	$P_w = 3,05 \text{ kW}$

Druckluftkompressor

Für die Druckluftversorgung der Versuchsanlage ist ein Kompressor (Bild 11) zur ölfreien Druckluftherzeugung und -speicherung vorhanden. Bezogen auf den Druckluftbedarf für den Sinterlamellenfilter wurde der im folgenden beschriebene Kompressor ausgewählt.

Der Druckluftkompressor hat drei Zylinder und ist für einstufigen Betrieb ausgelegt. Um die beim Lauf entstehenden Vibrationen nicht auf den Container zu übertragen, ist das Aggregat schwingungsgedämpft aufgestellt. Zur Kühlung der Zylinder und des Nachkühlers ist ein Ventilator direkt angebaut und wird von Keilriemen angetrieben. Die Trockenansaugluftfilter sind gleichzeitig als Ansaug-Schalldämpfer ausgeführt. Die Wälzlager sind mit einer Dauerschmierung versehen und somit wartungsfrei. Der notwendige Wasserabscheider ist direkt angebaut und unter dem Druckluftkessel angebracht. Der Kompressor befindet sich hinter der Beschleuniger im Container. Er ist mit Rädern versehen und kann bei Wartungsarbeiten am Beschleuniger einfach aus dem Container herausgenommen werden.

Technische Daten

Hubvolumenstrom	≈ 570 l/min
Volumenstrom nach VDMA gemessen, bezogen auf Saugzustand 1 bar abs. bei 20 °C, bei gegendruck 6 bar (ü)	≈ 360 l/min
Höchstdruck	10 bar (ü)
Druckschaltereinstellung	EIN 6 bar, AUS 10 bar (ü)
Kesselinhalt	≈ 150 Liter
Kesselbetriebsdruck, max.	11 bar (ü)
Motor	Drehstrom IEC-Normausführung
Antriebsmotorleistung	3 kW
Antriebsmotordrehzahl (bei 50 Hz)	3000 min ⁻¹
Schutzart	IP 54
Steuerspannung	220 V, 50 Hz
Betriebsspannung	380 V, 50 Hz

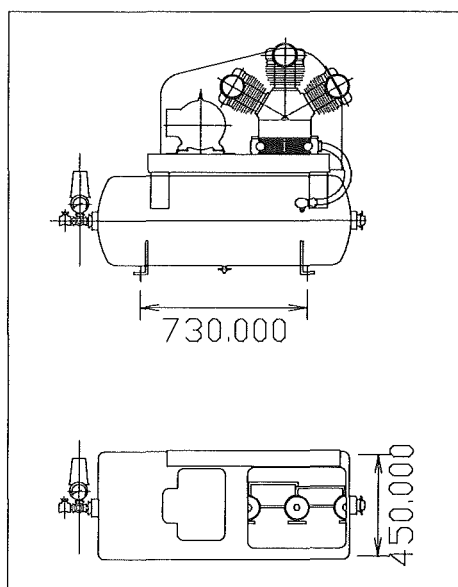


Bild 11. Druckluftkompressor Mehrer AVT 55-3-150-HM

Ultraschallzerstäuber

Da die VOC-Abscheidegrade prozeßbedingt bei hoher Luftfeuchtigkeit verbessert werden, ist eine zusätzliche Wassereindüsung vorgesehen, um den Wassergehalt in der Luft bis zur Sättigung zu erhöhen. Das Wasser wird mit einem Ultraschallzerstäuber eingedüst.

Zur Ermittlung der benötigten Wassermenge wurden folgende Annahmen getroffen:

Relative Luftfeuchte	$\varphi = 0,4$
Lufttemperatur	$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
max. Luftdurchsatz	$\dot{V} = 1200 \text{ m}^3 / \text{h}$
Luftdichte	$\rho = 1,17 \text{ kg/m}^3$
Enthalpie	$h = \text{konstant}$
Luftdruck	$p \approx 1 \text{ bar}$

Mit Hilfe des Mollier-h, x-Diagramms wurden folgende Werte ermittelt:

Wassergehalt	$x_{\varphi=0,4} = 5,8 \text{ g/kg}$
	$x_{\varphi=1,0} = 9,0 \text{ g/kg}$

Vorhandene Wassermenge in der Luft:

$$\dot{m}_{\text{Luft}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} = \frac{1200 \text{ m}^3 \cdot 1,17 \text{ kg}}{\text{h} \cdot \text{kg} \cdot 1000 \text{ g}}$$

$$\dot{m}_{\text{Luft}} = 1404 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{Wasser}, \varphi=0,4} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot x_{\varphi=0,4} = \frac{1404 \text{ kg} \cdot 5,8 \text{ g} \cdot \text{kg}}{\text{h} \cdot \text{kg} \cdot 1000 \text{ g}}$$

$$\dot{m}_{\text{Wasser}, \varphi=0,4} = 8,35 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{Wasser}, \varphi=1,0} = \dot{V} \cdot x_{\varphi=1,0} = \frac{1404 \text{ kg} \cdot 9,0 \text{ g} \cdot \text{kg}}{\text{h} \cdot \text{kg} \cdot 1000 \text{ g}}$$

Maximal mögliche Wassermenge in der Luft (aus Diagramm):

$$\underline{\underline{\dot{m}_{\text{Wasser}, \varphi=1,0} = 12,64 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}}$$

Die Differenz von $\dot{m}_{\text{Wasser}, \varphi=1,0}$ und $\dot{m}_{\text{Wasser}, \varphi=0,4}$ ergibt die Menge an Wasser, die über den Ultraschallzerstäuber maximal eingedüst werden kann.

$$\dot{m}_{\text{W}, \text{Zerst}} = \dot{m}_{\text{W}, 1,0} - \dot{m}_{\text{W}, 0,4} = 12,64 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 8,35 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \approx \underline{\underline{4,3 \frac{\text{l}}{\text{h}}}}$$

Nach dieser Berechnung wurde ein Ultraschallzerstäuber für eine maximale Wasserdosierung von 10 l/h ausgewählt.

Annubar-Durchfluß-Sonde

Um den Luftdurchsatz der Abluftreinigungsanlage messen und regeln zu können, ist eine Annubar-Meßsonde installiert. Diese Meßsonde hat den Vorteil eines geringeren Druckverlustes gegenüber einer Meßblende. Die Annubar-Sonde entspricht dem Meßprinzip eines Prandtl-Staurohrs, mit der die Differenz zwischen dem Gesamtdruck und dem statischen Druck, d. h. der dynamische Druck gemessen wird. Für eine genaue Messung hat die Annubar-Sonde über dem Leitungsquerschnitt mehrere Meßöffnungen, die als Staudruckaufnehmer ausgebildet sind. Der Gesamtdruck und der statische Druck der Sonde werden auf einem empfindlichen Differenzdrucktransmitter geführt. Der Meßumformer radiziert das Drucksignal, wodurch das Ausgangssignal (4-20 mA) direkt durchsatzproportional ist. Dieses durchsatzproportionale Signal wird als Durchsatz-Istwert an die Steuerungstechnik (SPS) übertragen und für die Durchsatzregelung des Gebläses verwendet.

Technische Daten der Annubar-Durchfluß-Sonde

Rohrleitung	
lichte Weite:	215,1 mm
Wandstärke:	2,0 mm
Werkstoff	Edelstahl 1.4571
Durchsatz, max.	1500 m ³ /h i.N.
Meßbereichsverhältnis	1:10
Druck	Atmosphärendruck
Temperatur	
Betrieb:	≈ 20 °C
max.:	≈ 120 °C
Montage	Einschweißstutzen aus Edelstahl, 1.4571

Zubehör

Meßumformer	
Ausgangssignal:	4 - 20 mA, durchflußproportional (radizierend)
Hilfsenergie:	24 V DC (2 Leiter-Technik)

Dreifach Ventilblock

Elektrotechnik

Die mobile Abluftreinigungsanlage AGATE-M wird über zwei E-Zuleitungen versorgt. Die erste Zuleitung (max. 25 A notwendig) versorgt die gesamte Containerinfrastruktur (Beleuchtung, Steckdosen, Heizung, Klimagerät), die Anlagentechnik (Gebläse, Druckluftkompressor, Abscheider, Additivdosiersystem), die Versuchsmesstechnik (FID, GC, Ozonanalysator), die Anlagen MSR-Technik sowie die Nebenaggregate des Beschleunigers (Steuerschrank, Vakuumsystem, Kühlwasserrückkühler, Kathodenheizung). Über die zweite Zuleitung wird ausschließlich das Hochspannungsaggregat des Elektronenbeschleunigers (max 32 A notwendig; 15 kGy und 1000 m³/h) versorgt.

Für die Abluftreinigung ist je nach Schadgaskonzentration und Zusammensetzung eine spezifische Strahlleistung notwendig die in kGy (kJ/kg) angegeben wird. Für die Reinigung von lösemittelhaltiger Abluft (Rohgaskonzentration um 250 mg C/m³) ist eine typische Bestrahlungsdosis von 10 kGy notwendig. Bei der Reinigung von Tunnelabluft ist eine Bestrahlungsdosis von 1 bis 2 kGy ausreichend. Bei der Bestrahlung eines Abluftstroms von 1.000 m³/h mit einer Dosis von 10 kGy hat der Beschleuniger eine Leistungsaufnahme von 6 kW. Das Gebläse ist ein weiterer Hauptverbraucher. Bei einem Abluftstroms von 1.000 m³/h und einem Gesamtdruckverlust der Anlage von ca. 35 mbar hat der Gebläseantrieb eine Leistungsaufnahme von 3 kW.

Die Aufteilung auf zwei E-Anschlüsse wurde gewählt, um an einem neuen Aufstellungsort möglichst schnell die Anlage in einen Standby-Betriebszustand mit einer reduzierten Leistungsaufnahme zu bekommen.

Beide Zuleitungen werden im Meßraum über den E-Verteiler geführt. Für die den Elektronenbeschleuniger befindet sich im Meßraum ein eigener Versorgungsschrank. Die E-Verbraucher können in folgende Gruppen unterteilt werden:

- 1) Containerinfrastruktur
- 2) Versuchsmesstechnik
- 3) Anlagentechnik
 - MSR-Technik
 - Verfahrenstechnische Komponenten
- 4) Beschleuniger
 - Nebenaggregate
 - Hochspannungsgenerator

Von diesen Verbrauchern wird, wie oben beschrieben, nur der Hochspannungsgenerator separat von der zweiten Zuleitung versorgt. In der nachfolgenden Tabelle 6, sind alle Verbraucher einzeln aufgeführt, wobei die obige Unterteilung übernommen wurde. Die Anlage hat unter Standardbetriebsbedingungen (1000 m³/h und 10 kGy) ein Gesamtleistungsaufnahme von etwa 18 kW. Die Hauptverbraucher sind das HS-Aggregat (6 kW) und das Gebläse (3 kW). Alle sonstigen Einzelverbraucher liegen unterhalb einer mittleren Leistungsaufnahme von 1 kW.

Alle Verbraucher der Anlagentechnik im E-Verteiler über von der SPS angesteuerte Schütze geschaltet. Mit diesem Konzept ist ein Handbetrieb als auch automatischer Betrieb möglich. Der Beschleuniger wird von dem eigenen Verteiler versorgt und hat auch eine eigene SPS. Das Konzept eines automatischen Betriebs ist auch dort verwirklicht.

Tabelle 6. Übersicht der elektrischen Verbraucher

Bezeichnung	Kurzzeichen	Absicherung [A]	Leistung (berechnet aus der Absicherung) [kW]	Leistungsaufnahme (Herstellerangabe) [kW]	gemessene Stromaufnahme [A]	mittlere Leistungs- aufnahme (Leistung / Einschalt- zeit) [kW]
Beleuchtung Meßraum	3F5	6	1,3	1 x 0,060	--	(0,060) / 1 = 0,060
Beleuchtung Anlagenbereich	3F8	6	1,3	4 x 0,060	--	(0,240) / 1 = 0,240
PC (Datenerfassung und -auswertung)	4F3	16	3,5	(0,5)	--	(0,5) / 1 = 0,5
Gaschromatograph GC	4F5	16	3,5	(1,0)	--	(1,0) / 1 = 1,0
Flammionisationsdetektor FID	4F7	16	3,5	(1,0)	--	(1,0) / 1 = 1,0
Meßgaspumpe	4F9	6	1,3	0,2	--	(0,2) / 1 = 0,2
Klimagerät im Meßraum (nicht gleichzeitig mit Heizung)	5F4	16	3,5	1,4	--	(1,4) / 1 = 1,4
Heizung im Meßraum (nicht gleichzeitig mit Klimagerät)	5F6	16	3,5	2,0	--	(2,0) / 0 = 0
Steckdose im Anlagenbereich	6F3	16	3,5	--	--	--
Steckdose im Anlagenbereich	6F5	16	3,5	--	--	--
Steckdose im Anlagenbereich	6F7	16	3,5	--	--	--
Steckdose im Anlagenbereich	6F9	16	3,5	--	--	--
Leistungsaufnahme der Containerinfrastruktur und Versuchsmesstechnik						4,4
Filtersteuergerät für Abscheider F2	4F11	6	1,3	(0,1)	--	(0,1) / 1 = 0,1
Druckluftkompressor	6F11	3 x 16	10,5	3,0	--	(3,0) / 5 = 0,6
Wandabluftventilator (2 Stück)	7Q3	1,8	0,4	2 x 0,1 = 0,2	--	(0,2) / 1 = 0,2
MSR-Schrank für die Anlagentechnik	7F7	16	3,5	(0,5)	--	(0,5) / 1 = 0,5
Ultraschallzerstäuber - Steuereinheit	7F11			0,030	--	(0,030) / 1 = 0,03
Ultraschallzerstäuber - Schlauchpumpe	7F13			0,2	--	(0,2) / 1 = 0,2
Additivdosiersystem - Dosierer	8Q3	0,5	0,3	--	0,5	0,3 / 5 = 0,06
Additivdosiersystem - Förderer	8Q6	1,1	0,7	--	1,1	0,7 / 5 = 0,14
Additivdosiersystem - Rührwerk	8Q8	1,5	1,0	--	1,5	1,0 / 5 = 0,2
Gebälse G1	8Q11	3 x 6	4,0	4,0	4,6	3,0 / 1 = 3,0
Steuerschrank Beschleuniger - SPS Simatic - Vakuumsystem - Kühlwasserrückkühler - Kathodenheizung	9F3	3 x 16	10,5	(2,0)	--	(2,0) / 1 = 2,0
Reserve	9Q6	3 x 6	4,0	--	--	--
Außensteckdose	9Q8	3 x 2	1,3	--	--	--
Steuerspannung	10Q5	2	0,5	(0,4)	--	(0,4) / 1 = 0,4
Leistungsaufnahme der Anlagentechnik (ohne Hochspannungsgenerator für EB)						7,43
Hochspannungsgenerator für EB	2F8	3 x 32	--	--	--	6,0 / 1 = 6,0
Leistungsaufnahme der Gesamtanlage (1000 m³/h; 10 kGy)						~ 18 kW

MSR-Technik

Die MSR-Technik der Versuchsanlage AGATE-M ist in die beiden Teilbereiche Anlagentechnik und Beschleuniger unterteilt (Bild 13). Der Beschleuniger verfügt über eine von der Anlagentechnik unabhängige und eigene Steuerungs- und E-Technik. Die Beschleunigersteuerung, Bedienung und Überwachung erfolgt über ein Siemens SPS (Simatic S5-115U).

Der Beschleuniger wird über ein Bildschirmsystem bedient und überwacht. Für die Anlagentechnik ist im MSR-Schrank (Anlagentechnik) eine Klöckner Moeller SPS PS306 und PS3 eingebaut. Die Anlagen- und Versuchdaten werden von einem Datenlogger (Fluke; Typ Hydra mit max. 21 Kanäle) erfaßt und gespeichert. Über eine serielle Schnittstelle können die Meßdaten On-Line dargestellt werden. Die Feldinstrumentierung besteht größtenteils aus Standard-Meßumformern (Durchsatz, Druck) mit 0-20 mA Signal, die Temperaturmessung erfolgt mit Pt-100. Alle für die Steuerung der Anlagentechnik notwendigen Größen werden an die Klöckner Moeller SPS übertragen. Bild 11 zeigt das Verfahrensfließbild einschließlich der Feldinstrumentierung, in Tabelle 7 ist die Instrumentierung aufgelistet. Die Anlagen-SPS hat 3 analoge Ausgänge, über die der Gasdurchsatz, die Additivdosierleistung und die Beschleunigerleistung geregelt werden.

In dem MSR-Schrank (Anlagenteil) sind folgenden Komponenten untergebracht:

- Klöckner Moeller SPS für die Steuerung der Anlagentechnik
- Anzeige- und Bedieneinheit MMI für die SPS
- Datalogger Hydra
- Trennverstärker usw.

SPS (Klöckner Moeller PS306 und PS3)

Über die SPS erfolgt die Steuerung der Anlagentechnik, außer des Beschleunigers. Die SPS besteht aus einem Master (PS306), zwei PS3 als Slave 1 und Slave 2 sowie einer Anzeige- und Bedieneinheit MMI als Slave 3. Die SPS verfügt über die folgende Kanalanzahl:

PS306 (Master)

4	analoge Eingänge	0-10 V
1	analoger Ausgang	0-10 V
16	digitale Eingänge	
16	digitale Ausgänge	

PS3 (Slave 1)

4	analoge Eingänge	0-10 V
1	analoger Ausgang	0-10 V
16	digitale Eingänge	
8	digitale Ausgänge	

PS3 (Slave 2)

4	analoge Eingänge	0-10 V
1	analoger Ausgang	0-10 V
16	digitale Eingänge	
8	digitale Ausgänge	

Anzeige- und Bedieneinheit MMI

Über die Anzeige- und Bedieneinheit MMI werden Status- und Fehlermeldungen angezeigt und mit den Funktionstasten können Funktionen bzw. Abläufe in der SPS ausgelöst werden.

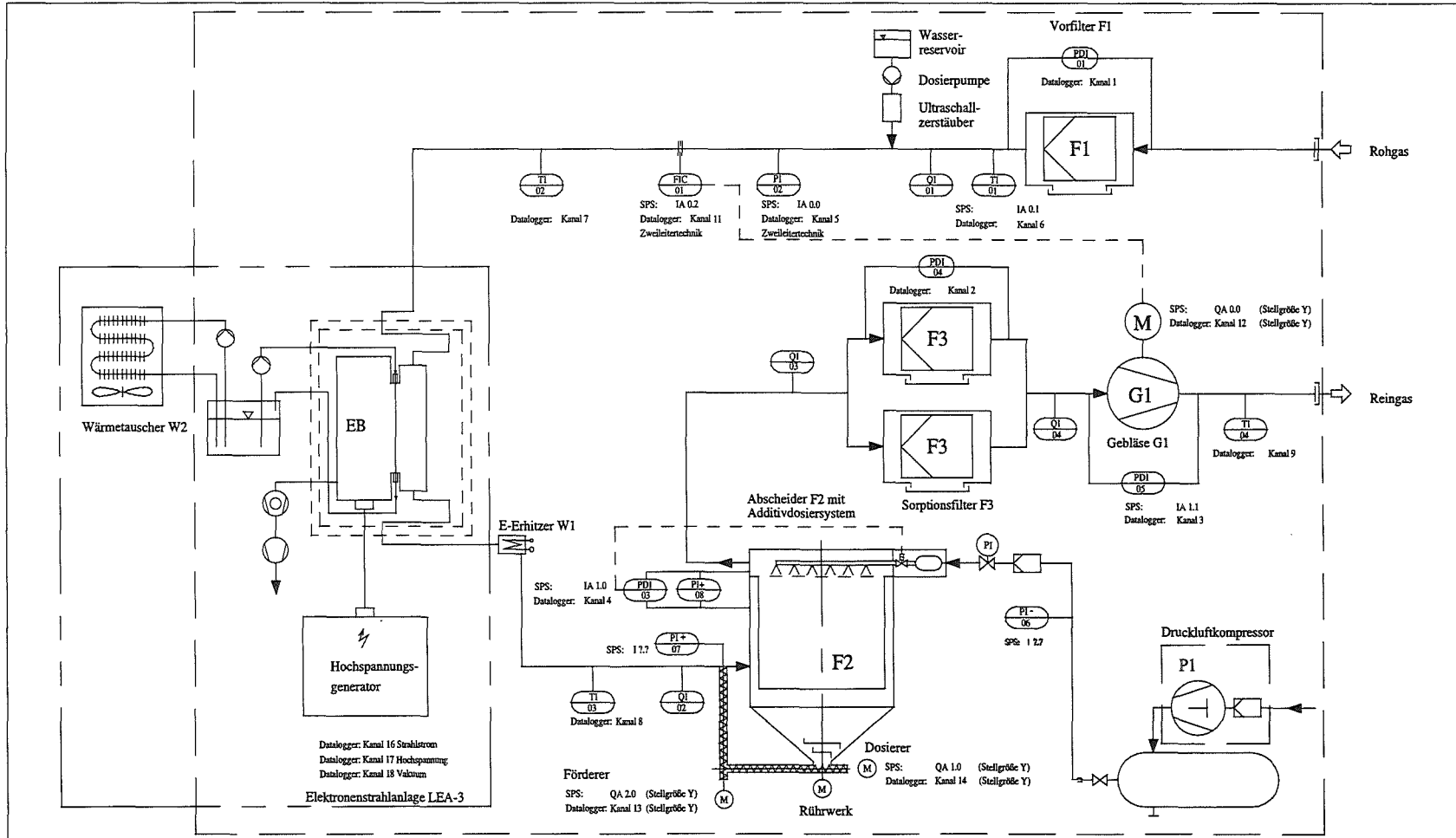
Datalogger HYDRA (Fluke; Typ: Hydra Data Bucket 2635A)

Mit dem Datalogger werden die Meßdaten aufgezeichnet. Der Datalogger kann maximal 21 analoge Signale erfassen. Über eine serielle Schnittstelle (RS-232) ist der Datalogger mit dem PC verbunden. Die Meßdaten werden mit der Datalogger-Software „Scanscape“ auf den PC-Bildschirm online dargestellt. Die Bedienung des Dataloggers erfolgt komplett über die Scanscape-Software vom PC aus. Zusätzlich ist eine Online-Meßdatenübertragung an Tabellenkalkulationsprogramme (Excel) über das Austauschformat DDE (Direct Data Exchange) möglich.

Tabelle 7. Übersicht der MSR-Feldinstrumentierung

MSR- Bezeichnung	Benennung	Signalübertragung an:	
		SPS	Datalogger
FIC 01	Gasdurchsatz (Annubar-Sonde)	X	X
PDI 01	Differenzdruck über den Vorfilter F1	--	X
PI 02	Absolutdruck in der Anlage	X	X
PDI 03	Differenzdruck über den Abscheider F2	X	X
PDI 04	Differenzdruck über den Sorptionsfilter F3	--	X
PDI 05	Differenzdruck der Gesamtanlage (gemessen über das Gebläse G1)	X	X
PI 06	Druckluftwächter	X (binär)	--
PI + 07	Überwachung Additivdosierung	X (binär)	--
PI + 08	Druckwächter für Abscheider F2	X (binär)	--
PI 09	Vakuum des Beschleunigers	--	X
TI 01	Gaseintrittstemperatur	X	X
TI 02	Temperatur nach der Wassereindüsung	--	X
TI 03	Temperatur nach der Bestrahlung	--	X
TI 04	Gasaustrittstemperatur (nach Gebläse G1)	--	X
EI 01	Strahlstrom des Beschleunigers	X	X
EI 02	Hochspannung des Beschleunigers	X	X
QI 01	Probenahme für Gasmeßtechnik „Rohgas“	--	X (FID-Signal)
QI 02	Probenahme für Gasmeßtechnik „Nach Bestrahlung“	--	X (FID-Signal)
QI 03	Probenahme für Gasmeßtechnik „Nach Abscheider F2“	--	X (FID-Signal)
QI 04	Probenahme für Gasmeßtechnik „Nach Sorptionsfilter F3“	--	X (FID-Signal)

Bild 12. Fließbild AGATE-M mit MSR-Technik



Container, Außenmaß LxBxH: 9125 x 2435 x 2800

Kanalbelegung Datalogger / Analogteil

Kanal	MSR-Bezeichnung	Kanal	MSR-Bezeichnung
1	PDI 01	11	FIC 01
2	PDI 04	12	Stellwert G1
3	PDI 05	13	Stellwert Dosierer
4	PDI 03	14	Stellwert Dosierer
5	PI 02	15	Reserve
6	TI 01	16	EI 01 Strahlstrom EB
7	TI 02	17	EI 02 Hochspannung EB
8	TI 03	18	PI 07 Vakuum EB
9	TI 04	19	Reserve
10	Reserve	20	Reserve

Kanalbelegung SPS / Analogteil

Kanal	MSR-Bezeichnung	Kanal	MSR-Bezeichnung	Kanal	MSR-Bezeichnung
PI 02		PDI 05		Reserve	
TI 01		PDI 05		Reserve	
FIC 01		Reserve		Reserve	
Reserve		Reserve		Reserve	
Stellgröße G1		Stellgröße Dosierer		Stellgröße Förderer	

Date		File: Flib003	Maßstab
Datum	15.12.93	Name	Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Gepr.		Bearbeiter	LIT
Norm			AGATE-M
Rv.	15.08.94	Abreicht	Verfahrensfließbild
			Blatt 1

Konstruktion

Container

Die komplette Anlage zur Abluftreinigung ist in einen Container montiert, der mit einem Sattelaufleger direkt vor Ort transportiert wird. Innerhalb des Containers sind alle für die Abluftreinigung notwendigen Komponenten und Nebenaggregate, sowie die Anlagensteuerung und die Meßtechnik untergebracht. Die Anlage ist somit völlig autark betreibbar und benötigt am Aufstellungsort lediglich eine Stromzuführung und eine Anschlußleitung für die zu reinigende Abluft.

Die Bilder 3a und 3b zeigen schematisch den Aufstellungsplan der Anlage. Alle Komponenten sind in einem 30-Fuß-Container untergebracht, der durch eine Trennwand in zwei Bereiche unterteilt ist. Im vorderen Bereich „Meß- und Steuerungsraum“ ist die Anlagensteuerung, Meßdatenerfassung und Versuchsmeßtechnik untergebracht. Im hinteren Bereich befinden sich die Komponenten der Abluftreinigungsanlage einschließlich der abgeschirmten Bestrahlungsanlage LEA-3.

Aufteilung des Meß- und Steuerungsraums

Der Meß- und Steuerungsraum ist durch eine Zwischenwand von der Anlage abgetrennt. In diesem Teil des Containers sind die Schaltschränke, die Datenerfassung und die Versuchsmeßgeräte untergebracht. Dieser Bereich hat eine allseitige Wärme- und Schallisolation sowie ein Kompaktklimagerät und eine Heizung. Weiterhin sind eine Eingangstür, eine Verbindungstür zum Anlagenbereich und ein Fenster eingebaut. Die für die Gasmeßtechnik benötigten Gase befinden sich in einer von außen zugänglichen Gasbox. Unter dem Fenster ist eine Arbeitsfläche für den Aufbau der Datenerfassung und der Gasmeßtechnik (GC, FID) angebracht.

Aufteilung des Anlagenbereichs

Auch der Anlagenbereich ist allseitig wärme- und schallisoliert, um zu große Temperaturschwankungen im Container und eine Lärmbelastung außerhalb zu vermeiden. In den Außenwänden sind große Türen angebracht, um die Komponenten leicht warten zu können. Auf dem Containerboden sind Befestigungsrahmen aufgeschraubt, welche die Komponenten aufnehmen, die Montage erleichtern, sowie eine bessere Gewichtsverteilung besonders der schweren Teile wie Beschleuniger (ca. 2000 kg) und Hochspannungsgenerator (ca. 2500 kg) ermöglichen.

Ausstattung des Containers

Meß- und Steuerraum:

1 Eingangstür	Größe: BxH	800 x 2000
1 Verbindungstür zur Anlage	Größe: BxH	800 x 2000
1 Doppelfenster zum Öffnen und Kippen mit Rollo allseitige Isolation, (Wärme und Schall)	Größe: BxH	1400 x 1000

Kompaktklimagerät

Heizung

Arbeitsfläche für Datenerfassung und Gasmeßtechnik (massive Ausführung)

Unterschränke unterhalb der Arbeitsfläche

Hängeschränke über der Arbeitsfläche

Gasbox mit Flaschenbefestigung, Außenklappe und Zwangsentlüftung (8 Flaschen a 10 ltr.)

Beleuchtung und Steckdosen.

4 Schaltschränke

1 E-Außenanschluß 3x32 A für die Anlagentechnik

1 E-Außenanschluß 3x63 A für den Hochspannungsgenerator

Anlagenbereich:

1 Eingangstür	Größe: BxH	800 x 2000
---------------	------------	------------

4 Doppeltüren in den Seitenwänden	Größe: BxH	2200 x 2500
-----------------------------------	------------	-------------

1 Doppeltür an der Rückseite	Größe: BxH	2200 x 2500
------------------------------	------------	-------------

1 Außenklappe zum Anschluß von

Rohrleitungen NW 200 (Zuluft / Abluft)	Größe: BxH	600 x 600
--	------------	-----------

2 Wandabluftventilatoren für ca. 10-fachen Luftwechsel pro Stunde im Anlagenbereich, mit Wetterschutzgitter

Rohrleitungs- und Anlagenplanung

Die abluftführenden Rohrleitungen (Edelstahlrohr 219,1 x 2) haben eine Nennweite von 200 mm und sind auf einen max. Durchsatz von ca. 1500 m³/h ausgelegt. Als Werkstoff wurde Edelstahl (1.4571) gewählt, damit ein möglichst geringer Korrosionsangriff auch bei aggressiven Gasen stattfindet. Edelstahl hat auch den Vorteil, daß dünnwandigere Rohre mit dem entsprechenden Rohrzubehör (Flansche, Bögen, T-Stücke usw.) erhältlich sind. Die Innenrohrrauigkeit von Edelstahlrohren ist gegenüber Normalstahlkomponenten geringer, was sich an anderen Versuchsanlagen bezüglich Druckverlust, Produktablagerungen, Verschmutzung und Reinigungsmöglichkeit positiv auswirkt. Die einzelnen Leitungsabschnitte sind mit losen Flanschen verbunden und am Ein- und Austritt von Komponenten sind Kompensatoren angebracht.

Tabelle 8. Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Rohrleitungssystem in Abhängigkeit vom Durchsatz

Durchsatz [m ³ /h]	mittlere Strömungs- geschwindigkeit [m/sec]
500	3,8
1000	7,6
1500	11,5

Tabelle 9. Übersicht der Rohrleitungen und Komponenten mit Volumenangabe und mittlerer Verweilzeit

Rohrleitungs- Nr.	Verbindung	Volumen [m ³]	Verweilzeit (V = 1000 m ³ /h) [sec]
1	Gaseintritt bis Vorfilter	0,02	0,073
	Vorfilter F1	0,21	0,76
2	Vorfilter bis Abschirmung	0,172	0,62
	Bestrahlungskammer	0,049	0,18
3	Abschirmung bis Abschei- der	0,116	0,42
	Abscheider F2	1,56	5,6
4	Abscheider bis Sorptions- filter	0,08	0,29
	Sorptionsfilter F3	0,32	1,15
5	Sorptionsfilter bis Gebläse	0,066	0,24
	Gebläse	0,03	0,12
6	Gebläse bis Gasaustritt	0,066	0,24

Literaturverzeichnis

- [1] Horsch, F., W. G. Filby, N., F. und S. Gross, B. Hanisch, W. Reinhardt, A. Seidel: KfK-PEF-Bericht Nr. 50 (1989), 5. Statuskolloquium des PEF. S. 537 ff.
- [2] Vanderstraeten, P. F.: The carbon balance as an alternative to evaluate traffic emissions. Staub Reinhaltung der Luft Nr. 51 (1991), S. 83-90. Springer Verlag.
- [3] Paur, H.-R., S. Jordan, H. Mätzing: Abluftreinigung durch Elektronenbestrahlung. Chem.-Ing. Tech. Nr. 62 (1990), S. 321-323.
- [4] Paur, H.-R., H. Mätzing: Studie zur Reinigung von Abgasen aus Automobiltunnels mit Elektronenstrahlen. LAF-Notiz Nr. 719, AGATE-Bericht Nr. 53 (1989).
- [5] Mätzing, H., K. Woletz, H.-R. Paur: Abscheidung von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) aus Abluft durch Elektronenstrahl. KfK-PEF-Bericht Nr. 104 (1993), S. 445-454.