

KfK 4794  
Dezember 1991

# **Simultane Rauchgasreinigung durch Elektronenstrahl Der Teststand AGATE-2**

W. Baumann, H.-R. Paur  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Schadstoffbeherrschung in der Umwelt

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
LABORATORIUM FÜR AEROSOLPHYSIK UND FILTERTECHNIK  
PROJEKT SCHADSTOFFBEHERRSCHUNG IN DER UMWELT

KfK 4794

Simultane Rauchgasreinigung durch Elektronenstrahl  
Der Teststand AGATE-2

W. Baumann und H.-R. Paur

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## **Zusammenfassung**

Das Elektronenstrahlverfahren (ESV) ist ein trockenes Simultanverfahren zur Abscheidung von  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  aus Rauchgasen. Die Versuchsanlage AGATE-2 wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe im Jahr 1989 errichtet. Die wesentlichen Versuchsziele an dieser Anlage sind die Erhöhung der Energieeffizienz des ESV und die Optimierung der Aerosolabscheidung. Die Anlage und ihre wesentlichen Komponenten, insbesondere Sprühkühler, Elektronenbeschleuniger, Filteranlage, Meßtechnik und das Leitsystem werden detailliert beschrieben.

## **Abstract**

### **The AGATE-2 pilot plant**

The Electron Beam Dry Scrubbing (EBDS) process is a dry method for the simultaneous removal of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  from flue gas. The test plant AGATE-2 was constructed in the year 1989 at the Nuclear Research Center in Karlsruhe. The main R & D goals at this plant are the improvement of energy efficiency of the EBDS and the optimization of the aerosol filtration. The test plant and the main components spray cooler, electron accelerator, filter technology, measurement techniques and control system are described in detail.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1 Verfahrensprinzip	7
1.2 Vorgeschichte	9
1.3 Ziele	9
1.4 Projektablauf	10
<b>2. Beschreibung der Gesamtanlage</b>	<b>12</b>
2.1 Teststand AGATE-2	12
2.2 Gebäude mit Abschirmung	17
2.3 Dampferzeuger	20
<b>3. Beschreibung der Komponenten</b>	<b>23</b>
3.1 Sprühkühler	23
3.1.1 Anforderungen	23
3.1.2 Düsenauswahl	24
3.1.3 Sprühkühlergeometrie	26
3.1.4 Aufbau und Instrumentierung	27
3.1.5 Sprühkühlerbetrieb	30
3.2 Elektronenbeschleuniger	32
3.2.1 Aufbau und technische Daten des Beschleunigers	32
3.2.2 Beschreibung der Einzelkomponenten des Beschleunigers	38
3.2.3 Bestrahlungskammer	39
3.2.4 Rauchgasbestrahlung	40
3.3 Schlauchfilter mit Additivdosiersystem	44
3.2.1 Aufgabenstellung und Anforderungen	44
3.3.2 Filtergeometrie und Strömungsführung	44
3.3.3 Abreinigungssystem	47
3.3.4 Additivdosiersystem	48
3.3.5 Filterbetrieb	48
3.4 Schüttschichtfilter	50
3.5 Nebenaggregate	52
3.6 Versorgungssysteme	53

	Seite
<b>4. Meß- und Leittechnik</b>	<b>56</b>
4.1 Betriebsmeßtechnik	56
4.2 Prozeßleittechnik	58
4.2.1 Beschreibung der Hardware	59
4.2.2 Beschreibung der Software	61
4.2.3 Erste Betriebserfahrungen	62
4.3 Gasmeßtechnik	64
4.3.1 Meßgeräte und Meßprinzip	64
4.3.2 Meßgasaufbereitung	67
4.3.3 Störeinflüsse	69
4.3.4 Aufbau der Meßketten	71
4.3.5 Konzentrationsbestimmung und Bezugsgrößen	74
4.3.6 Betriebserfahrungen	78
4.4 Partikelmeßtechnik	79
4.4.1 Bestimmung der Partikelmassenkonzentration	79
4.4.2 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung	81
<b>5. Inbetriebnahme</b>	<b>85</b>
<b>6. Literaturverzeichnis</b>	<b>91</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb.-Nr.	Kapitel	Titel
1	1.1	Vereinfachtes Verfahrensschema des ES-Verfahrens zur Rauchgasreinigung
2	2.1	Vereinfachtes Verfahrensflißbild des Teststandes AGATE-2
3	2.1	Verfahrensflißbild des Teststandes AGATE-2
4	2.2	Gebäudeaußenansicht (Foto)
5	2.2	Gebäudegrundriß
6	2.2	Gebäudelängsschnitt
7	2.2	Abschirmdeckel für Bunker
8	3.1.2	Sauter-Durchmesser als Funktion des Massenverhältnisses von Gas- und Flüssigkeitsstrom für Zweistoffdüsen
9	3.1.2	Zweistoffdüse mit Mischkammer
10	3.1.3	Konstruktionszeichnung des Sprühkühlers
11	3.1.4	Verfahrensflißbild des Sprühkühlers
12	3.1.5	$h,x$ -Diagramm für Rauchgas
13	3.2.1	Aufbau des Hochspannungserzeugers
14	3.2.1	Aufbau des Beschleunigers
15	3.2.1	Elektronenbeschleuniger mit Bestrahlungskammer (Foto)
16	3.2.2	Offener Beschleunigerdruckbehälter mit Trafo (Foto)
17	3.2.3	Bestrahlungskammer (Foto)
18	3.2.3	Konstruktionszeichnung der Bestrahlungskammer

## Abbildungsverzeichnis

Abb.-Nr.	Kapitel	Titel
19	3.2.4	Verfahrensfließbild Rauchgasbestrahlung
20	3.3.2	Pulse-Jet-Schlauchfilter
21	3.3.2	Konstruktionszeichnung des Schlauchfilters
22	3.3.5	Verfahrensfließbild Schlauchfilter
23	3.4	Verfahrensschema QS-Filter
24	3.6	NH <sub>3</sub> -Versorgung
25	3.6	SO <sub>2</sub> - und NO-Versorgung
26	4.2.1	Schematischer Aufbau und Funktionen der Prozeßleittechnik am Versuchsstand AGATE-2
27	4.3	Gasmeßtechnik Teststand AGATE-2
28	4.3	Reingas-Analysen-System (Foto)
29	4.3.1	Meßprinzip Einstrahl-Photometer
30	4.3.4	Rohgas-Analysen-System
31	4.3.4	Reingas-Analysen-System
32	4.4.1	Meßaufbau zur gravimetrischen Bestimmung der Partikelmassenkonzentration nach VDI 2066
33	4.4.1	Aerosolmeßtechnik Teststand AGATE
34	4.4.2	Meßprinzip des Impaktors
35	4.4.2	Kaskaden-Impaktor Andersen Mark III
36	5	Anlagen- und Betriebsparameter

## Tabellenverzeichnis

Tab.	Kapitel	Titel
1	1.4	Eckdaten AGATE-2 Erstellung
2	1.4	Projekttablauf
3	2.1	Technische Daten der Versuchsanlage
4	3.2.1	Technische Daten des Elektronenbeschleunigers
5	3.3	Technische Daten des Pulse-Jet-Schlauchfilters
6	4.1	Meßstellenliste
7	4.2	Übersicht der Aufgaben und Anforderungen für das Prozeßleitsystem und die Datenerfassung
8	4.3.4	Rohgasmeßgeräte
9	4.3.4	Reingasmeßgeräte
10	4.3.5	Steigungsfaktoren der Kalibrierkurven und Wasserquerempfindlichkeit der Prozeßphotometer



## 1. Einleitung

### 1.1 Verfahrensprinzip

Das Elektronenstrahlverfahren (ESV) ist ein trockenes Simultanverfahren zur Abscheidung von  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  aus Rauchgasen. Die Ionisation der Gasbestandteile des Rauchgases durch beschleunigte Elektronen (550 keV) erzeugt Radikale (OH,  $\text{O}_2\text{H}$ , O, N), die  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  in Schwefelsäure bzw. Salpetersäure umwandeln. Diese gas- bzw. tröpfchenförmigen Säuren bilden bei der Zugabe von  $\text{NH}_3$  ein feinkörniges Ammoniumsalzaerosol. Der Gesamtprozeß ist somit dem Abbau von  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  im photochemischen Smog vergleichbar, läuft jedoch unter dem Einsatz von hochenergetischen Elektronen um viele Größenordnungen schneller und unter kontrollierten Bedingungen ab.

Die Vorteile des ESV wurden eingehend von Jordan et al. (1988) diskutiert. Der Prozeß ist abwasserfrei und das anfallende Produkt ist gut für die Herstellung von Kunstdünger geeignet. Die Abscheidegrade für  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  sind hoch, und die Prozeßführung ist einfach. Zudem kann bei geeigneter Temperaturführung die Wiederaufheizung des Rauchgases vor dem Schornstein entfallen.

Abb. 1 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensschema des ESV. Nach Entstaubung der Kraftwerksabgase wird die Rauchgastemperatur durch Einsprühen von Wasser abgesenkt. Bevor das Gas in die Bestrahlungskammer eintritt, wird Ammoniak eingespeist. Die Bestrahlungskammer ist mit einer Abschirmung umgeben, um die entstehende Röntgenstrahlung abzuhalten. Das Produkt wird durch Gewebe- oder Elektrofilter aus dem Rauchgasstrom entfernt. Das gereinigte Gas wird schließlich über ein Saugzuggebläse zum Kamin gefördert.

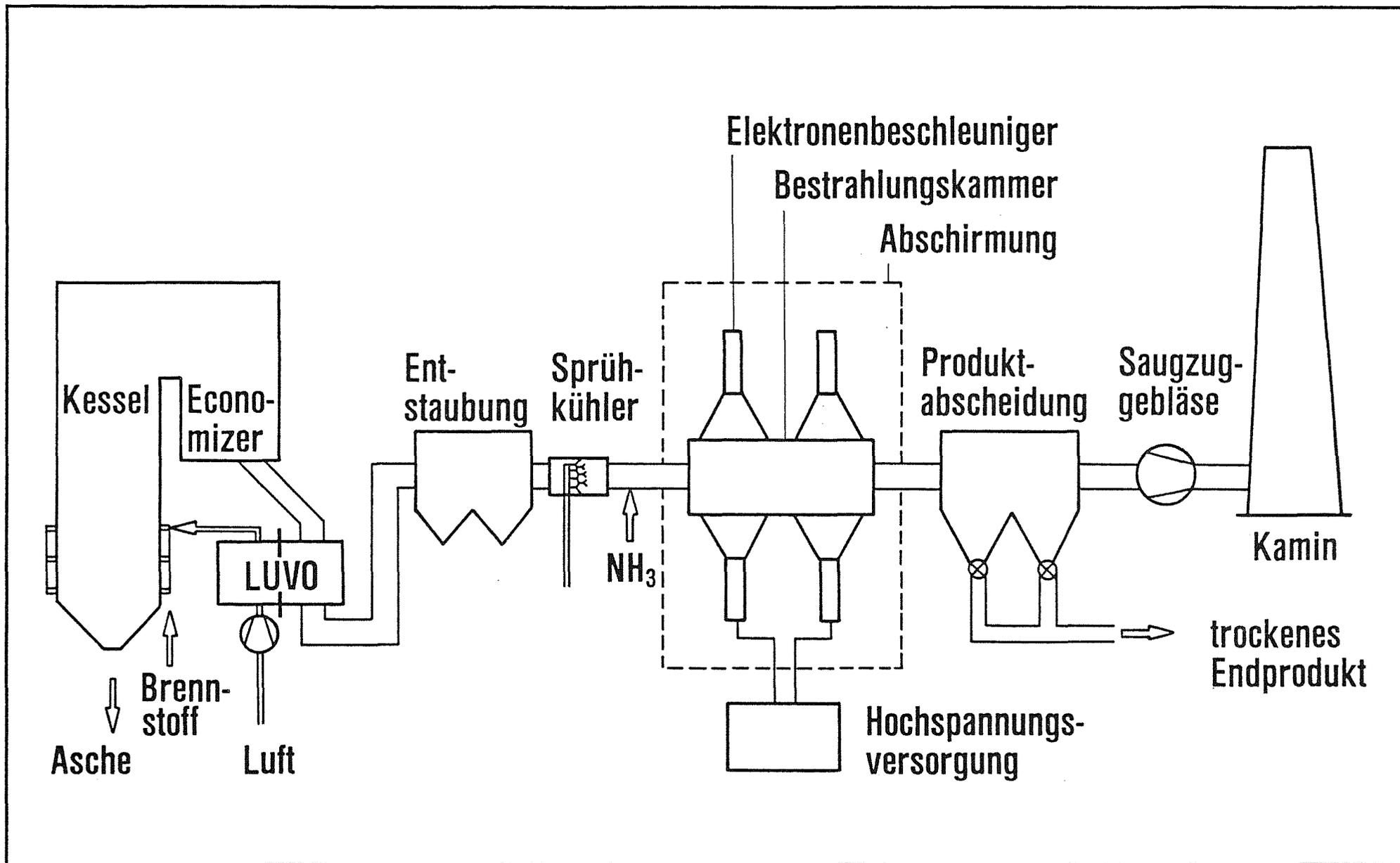


Abb. 1 Vereinfachtes Verfahrensschema des ES-Verfahrens zur Rauchgasreinigung

## 1.2 Vorgeschichte

Grundlegende Forschungsarbeiten zum Elektronenstrahlverfahren wurden von 1971 bis 1981 von der Universität Tokio und dem Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) durchgeführt. Der damalige Betrieb von Klein- und Pilotanlagen hat gezeigt, daß der großtechnische Einsatz des Verfahrens erfolgversprechend sein könnte (Kawamura et al., 1979).

Von 1984 bis 1986 wurden im KfK/LAF 1 mit Unterstützung des PEF (Vorhaben 83/011/3) Untersuchungen zum ESV im Labormaßstab (AGATE-1) aufgenommen (Baumann et al., 1987). Parallel wurden entsprechende Projekte an der Universität Karlsruhe (ITS) und ab 1985 beim Badenwerk (Rheinhardendampfkraftwerk Block 7, Karlsruhe) begonnen. Aufgrund der attraktiven Eigenschaften des ESV gelang es bereits in diesem Stadium, die Industrie für dieses Verfahren zu interessieren. Seit 1986 besteht ein Kooperations- und Lizenzabkommen des KfK mit der Fa. Noell (Würzburg), mit dem Ziel, das ESV in den Rauchgasreinigungsmarkt einzuführen. Zusätzlich bestehen enge Kontakte des KfK zu interessierten Institutionen im Ausland, die ebenfalls am ESV arbeiten.

Die beim Betrieb dieser Anlagen gewonnenen Ergebnisse (Paur et al., 1988) zeigten, daß noch Forschungsbedarf insbesondere in den Bereichen der Produktbildung und der Abscheidung des Aerosols bestand. Darüber hinaus zeigten erste Versuche Ansätze für eine Optimierung der Energieeffizienz des Verfahrens (Paur et al., 1989; Mätzing, 1989).

## 1.3 Ziele

Ziel der Arbeiten bei LAF 1 ist die Demonstration der technischen Reife und der Marktreife des ESV. Die Versuche sind folglich mit Komponenten durchzuführen, die einen problemlosen Scale-up des Verfahrens ermöglichen. Gemeinsam mit dem Industriepartner wurde deshalb die Errichtung der Technikumsanlage AGATE-2 beschlossen.

Die wesentlichen Untersuchungsziele an AGATE-2 sind:

- ▶ Optimierung bzw. Verbesserung der Verfahrenseffizienz
- ▶ Untersuchung von Verfahrensvarianten
- ▶ Demonstration des Schlauchfilterbetriebs im Technikumsmaßstab (Langzeitbetrieb)

#### 1.4 Projektablauf

Der Projektablauf und die wichtigsten Eckdaten sind in Tab. 1 und 2 dargestellt.

Nach der Vor- und Detailplanung, die auch die Spezifikation und Beschaffung der wesentlichen Komponenten einschloß, wurde am 11.10.88 mit der Errichtung der Technikumshalle (Anbau an das Dampfkesselhaus, HDB) begonnen. Bereits nach einer Bauzeit von 5 Monaten konnte am 3.3.89 das Richtfest gefeiert werden. Die Montage der Rauchgasleitungen, der Komponenten und des Elektronenbeschleunigers wurde innerhalb von nur 4 Monaten durchgeführt. Die Installation der Meß- und Regeltechnik einschließlich der Inbetriebnahme der Gesamtanlage wurde in 3 Monaten Ende Oktober 1989 abgeschlossen.

Das Gesamtprojekt wurde somit innerhalb von 12 Monaten abgewickelt. An die Phase der Erstellung schloß sich von Dezember '89 bis Juni '90 die erste Versuchsphase an (vgl. LAF-Notiz Nr. 778).

**Tab. 1: Eckdaten: AGATE-2**

Baugenehmigung	06.07.88
Baubeginn	11.10.88
Richtfest	03.03.89
Montage EB-2 1. EB-Probetrieb	10.07.89
Schlußabnahme Gebäude	26.09.89
Inbetriebnahme MSR	16.10.89
Einweihung AGATE-2	07.11.89
1. Versuchsphase	12/89 - 06/89

Tab. 2: AGATE-2: Projektablauf und Verantwortlichkeiten

Jahr	1988				1989				1990				verantwortlich
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Planung	-----												LAF 1/Noell-KRC
Erstellung Gebäude				-----									Noell/Bau/LAF 1
Hauselektrik						-----							Ing.-Büro Brand/ABB
Montage Elektronenbeschleuniger						-----							LAF 1/NHV/ABB
Montage Komponenten*						-----							LAF 1/Caldyn/ HBT-HW / KRC
Montage Rauchgasleitungen						-----							LAF 1/ HBT-HW
Montage MSR-Technik							-----						LAF 1/MD/ABB
Montage Versuchsmeßtechnik								-----					LAF 1
Inbetriebnahme								-----					LAF 1
1. Versuchsphase									-----				LAF 1

\* Vorfilter, Sprühkühler  
Bestrahlungskammer  
Schlauchfilter  
Luftheritzer

## 2. Beschreibung der Gesamtanlage

### 2.1 Teststand AGATE-2

Zur Untersuchung des ES-Verfahrens wurde der Teststand AGATE-2 an den ölbefeuerten Prozeßdampferzeuger des KfK angeschlossen. Die Versuchsanlage hat die Aufgabe, Rauchgas unter definierten Bedingungen zur Schadgasumwandlung durch Elektronenbestrahlung bereitzustellen.

Abb. 2 zeigt das vereinfachte Verfahrensfließbild der Anlage.

Prozeßbezogen läßt sich die Anlage in die drei Hauptkomponenten

- Sprühkühler zur Rauchgasabkühlung,
- Elektronenbeschleuniger für die Bestrahlung und
- Filter zur Produktabscheidung

unterteilen.

Für die Produktabscheidung sollen drei unterschiedliche Filtersysteme untersucht werden. Es handelt sich um die beiden trockenen Abscheidesysteme Pulse-Jet-Schlauchfilter und Querstrom-Schütttschichtfilter sowie um einen mit nassen Abscheideplatten arbeitenden Kondensationselektrofilter. Als Standardabscheider fungiert der Schlauchfilter.

Zum An- und Abfahren der Anlage wird erwärmte Luft verwendet, um Säure- sowie Wasserkondensation zu vermeiden. Hierzu ist am Anlagenbeginn ein Elektroerhitzer installiert, über den die aus dem Raum angesaugte Luft erwärmt wird.

Den Rauchgas- bzw. Lufttransport übernimmt ein Gebläse, das am Anlagenende installiert ist. Durch die Anordnung des Gebläses am Anlagenende herrscht in dem gesamten Rohrleitungssystem Unterdruck.

In Tab. 3 sind die technischen Daten der Versuchsanlage sowie die Rauchgaszusammensetzung aufgeführt.

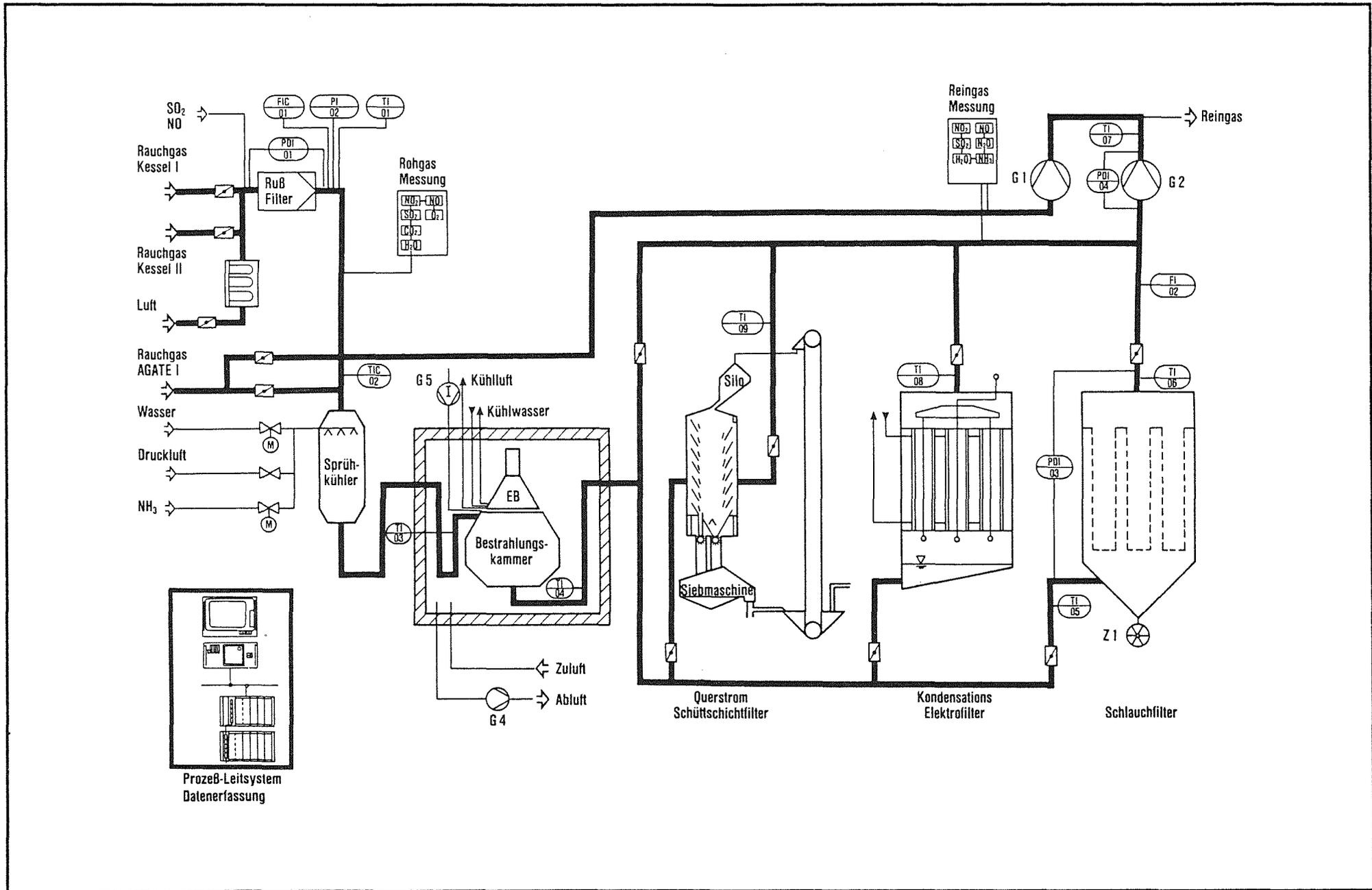
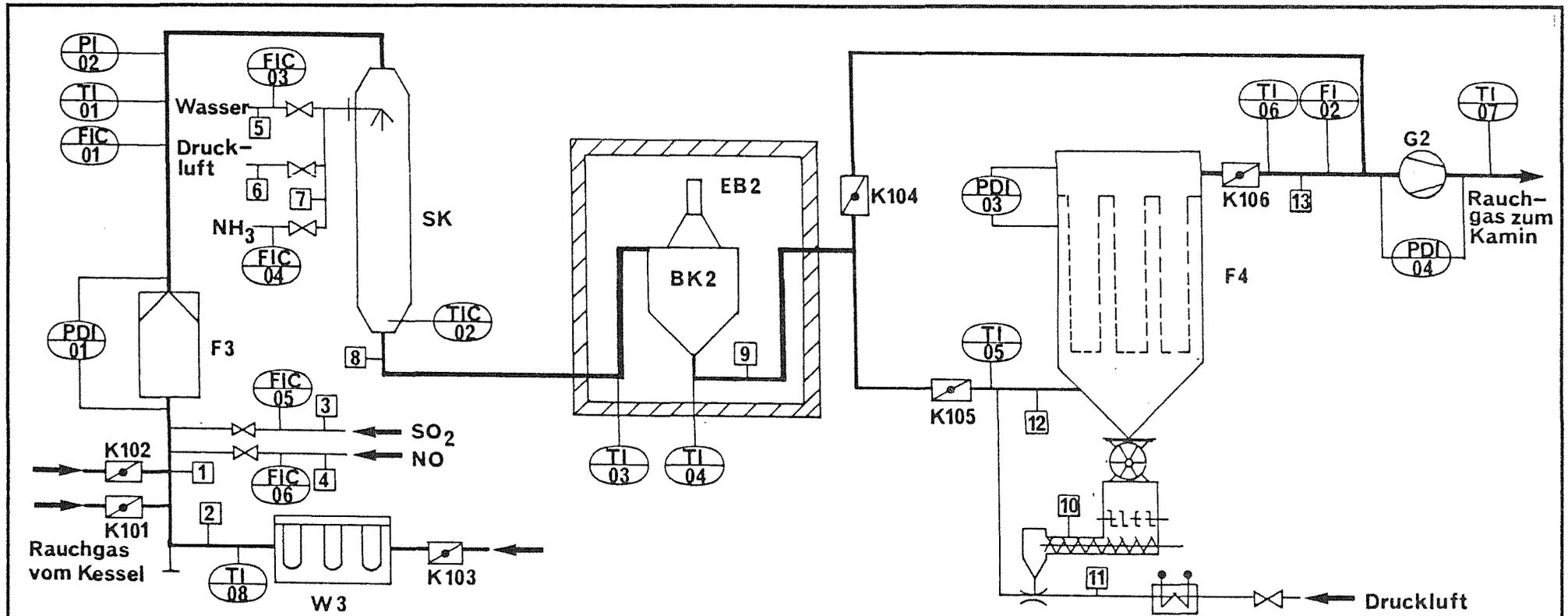


Abb. 2: Vereinfachtes Verfahrensfließbild der Anlage AGATE-2



Stoffstrom-Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Medium		Rauchgas vom Kessel	Luft	SO <sub>2</sub> -Dosierung	NO-Dosierung	Wasser	Zerstäubungsluft	NH <sub>3</sub> -Dosierung	Rauchgas nach Sprünpkühler	Rauchgas nach Bestrahlung	Produktrezyklierung	Transportluft	Rauchgas vor Filter	Rauchgas nach Filter
Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h (i.N.f.) m <sup>3</sup> /h (i.B.f.)	1200 2110	1200 1550	0,96 -	0,24 -	- -	39 -	2,2 -	1363 1730	1361 1823	- -	50 54,6	1411 1873	1410 1873
Dichte (bei Gasen im Normzustand)	kg/m <sup>3</sup>	1,295	1,283	2,926	1,34	1000	1,283	0,77	1,251	1,251	2285	1,283	1,252	1,252
Massenstrom	kg/h	1554	1540	2,8	0,32	97	50	1,7	1706	1703	80	64	1850	1765
Temperatur	°C	200	80	20	20	20	20	20	65	80	-	80	75	70
Druck (abs.)	bar	1,005	1,013	-	-	4,7	6,5	-	0,988	0,978	-	1,2	0,973	0,958
Wasser	kg/h	96,5	9,6	-	-	97	0,3	-	194	194	-	0,4	194	194
NH <sub>3</sub>	kg/h	-	-	-	-	-	-	1,7	1,7	0,74	-	-	0,74	0,016
SO <sub>2</sub>	kg/h	0,70	-	2,8	-	-	-	-	3,5	2,1	-	-	2,1	0,7
NO	kg/h	0,16	-	-	0,32	-	-	-	0,48	0,09	-	-	0,09	0,09
Feststoff	kg/h	0,03	-	-	-	-	-	-	-	2,75	80	-	82,75	0,015

Abb. 3: Verfahrensfließbild des Teststandes AGATE-2

Abb. 3 zeigt das Verfahrensfliessbild des Teststandes AGATE-2 mit Stoffstromangaben, wobei der Schlauchfilter zur Produktabscheidung dargestellt ist. Stoffstrom-Nr. 2 wird wie oben beschrieben nur für die An- und Abfahrphase benötigt. Aus einem der beiden Rauchgaskanäle des ölbefeuerten Prozeßdampferzeugers wird ein Teilstrom entnommen und dem Teststand AGATE-2 zugeführt. Je nach Kessellast tritt das 180 bis 250 °C heiße Rauchgas über die Klappen K101 bzw. K102 in den Versuchskreislauf ein. Unter Standardbedingungen wird ein Volumenstrom von 1200 m<sup>3</sup>/h (i.N.f.) entnommen. Das Rauchgas der ölgefeuerten Kesselanlage hat eine mittlere Schadgaskonzentration von 200 ppm SO<sub>2</sub> und 100 ppm NO. Zur Erhöhung dieser Werte ist eine SO<sub>2</sub>- und NO-Dosierung installiert. Die Zugabe dieser Schadgase kann stufenlos über Mass-Flow-Controller eingestellt werden, wobei Standardversuche mit 1000 ppm SO<sub>2</sub> und 300 ppm NO durchgeführt werden.

Im Rußfilter F3 wird das Rauchgas entstaubt, die Differenzdruckmessung PDI 01 dient zur Filterüberwachung. Anschließend wird der Rauchgas- bzw. Luftdurchsatz FIC 01 mit einer Ringkammer-Normblende bestimmt. Die dazu notwendige Temperatur- und Druckkorrektur erfolgt mit den Messungen TI 01 und PI 02. In dem Sprühkühler SK erfolgt die Rauchgasabkühlung und -befeuchtung durch direkte Eindüsung von Wasser im Gleichstrom. Die Temperatur von 65 °C am Sprühkühlerausstritt liegt etwa 5 K oberhalb der Kühlgrenztemperatur.

Das für den Prozeß benötigte Ammoniak kann der Zerstäubungsluft der Sprühdüse beigemischt werden. Die Dosierung erfolgt stöchiometrisch, bezogen auf die Konzentrationen von SO<sub>2</sub> und NO. Das mit Ammoniak konditionierte Rauchgas wird durch das Abschirmungslabyrinth in die Bestrahlungskammer BK2 geleitet. In dieser erfolgt die Rauchgasbestrahlung mit Elektronen, die von dem Beschleuniger EB2 emittiert werden. Der Beschleuniger befindet sich innerhalb eines Betonbunkers, der für die Abschirmung der Röntgenstrahlung sorgt, die beim Auftreffen von beschleunigten Elektronen auf Materialien entsteht. Die Bestrahlungskammer ist der Isodosenverteilung des Beschleunigers angepaßt und ermöglicht so eine optimale Ausnutzung der eingestrahlten Energie. Nach der Bestrahlung, durch die das Produktaerosol (Ammoniumsulfat und -nitrat) entsteht, wird das Rauchgas durch das Abschirmungslabyrinth dem Schlauchfilter F4 zur Produktabscheidung zugeführt.

**Tab. 3: Technische Daten der Versuchsanlage**

Rauchgasdurchsatz	500 - 1500 Nm <sup>3</sup> /h
Rauchgastemperatur	
- Eintritt	180 - 250 °C
- Austritt	70 - 80 °C
Gaskonzentrationen	
- O <sub>2</sub>	5 - 6 Vol. %
- H <sub>2</sub> O (vor Sprühkühler)	10 - 12 Vol%
- CO <sub>2</sub>	10 - 12 Vol. %
- SO <sub>2</sub>	100 - 2000 ppm
- NO <sub>x</sub>	100 - 1000 ppm
Rauchgasabkühlung	wassergespeister Einspritzkühler
Rauchgasbestrahlung	Elektronenbeschleuniger
- Beschleunigungsspannung	max. 550 kV
- Strahlstrom	max. 30 mA
Poduktabscheidung	Pulse-Jet-Schlauchfilter
- Filterfläche	36 m <sup>2</sup>

Die Filterschläuche werden zum Schutz vor dem klebrigen und hygroskopischen Produktaerosol zusätzlich mit einem inerten Additiv beaufschlagt. Die Mischung bestehend aus Ammoniumsalz und Additiv wird mit einem Feststoffdosierer und einer pneumatischen Förderung kontinuierlich zur Produkthanreicherung recycelt. Das gereinigte Rauchgas wird durch das Saugzuggebläse G2 zum Kamin gefördert. Die Anlage AGATE-2 ist mit einer umfangreichen Meßtechnik zur Bestimmung der Betriebsparameter und der Gaszusammensetzung ausgestattet. Die Überwachung, Steuerung und Regelung der Anlage erfolgt mit einem Prozeßleitsystem.

## 2.2 Gebäude mit Abschirmung

Der Neubau, bestehend aus einem Kellerbereich mit Betonabschirmung und einer darüberliegenden Stahlskelettbauweise wurde anschließend an das vorhandene Dampfkesselhaus erstellt (siehe Abb. 4). Abb. 5 zeigt den Gebäudegrundriß im Kellerbereich. Den größten Teil der 12,8 x 7 m großen Grundfläche nimmt die Betonabschirmung für den Elektronenbeschleuniger ein. Um die geforderte Abschirmwirkung zu erreichen, wurde eine Betonwandstärke zwischen 0,75 und 0,9 m benötigt. Auf der verbleibenden Grundfläche sind folgende Komponenten aufgestellt:

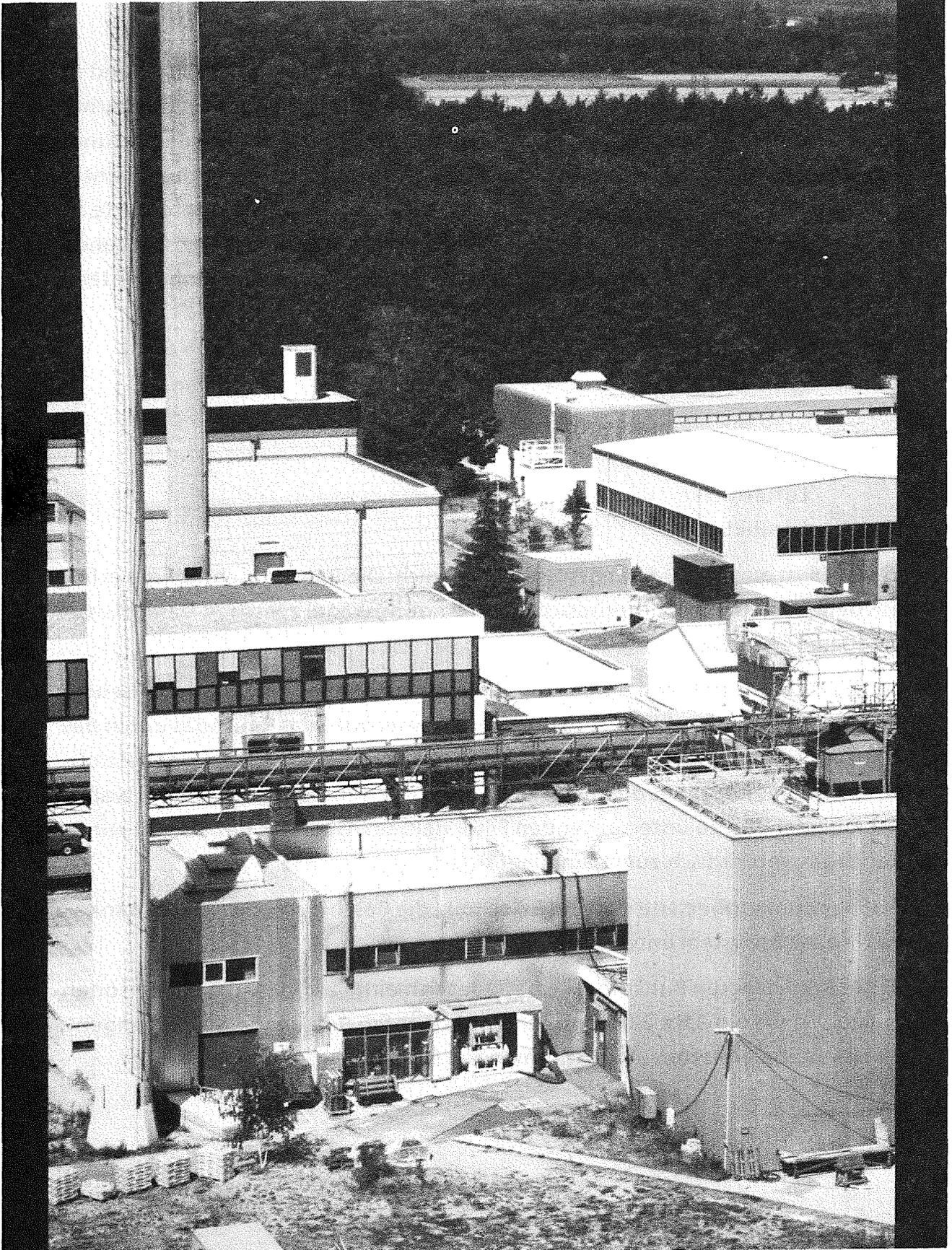
- Schlauchfilter
- Schüttschichtfilter
- Kondensationselektrofilter
- Gebläse G1 und G2
- Lufterhitzer
- Sprühkühler.

In Abb. 6 ist ein Gebäudelängsschnitt ersichtlich. Die Rauchgasentnahme erfolgt aus dem gemauerten, unterirdischen Verbindungskanal zwischen Dampfkesselanlage und Kamin.

Das heiße Rauchgas wird durch Edelstahlrohre in den Kellerbereich des Gebäudes geführt. Über den Rußfilter und den Sprühkühler wird das Rauchgas durch das Abschirmungslabyrinth in die Bestrahlungskammer geleitet. Nach der Bestrahlung wird das Rauchgas durch das Labyrinth zur Produktabscheidung in wahlweise einen der drei zu untersuchenden Filter geleitet. Über das Gebläse G2 wird das Rauchgas unterirdisch zum Kamin gefördert.

Auf der Bunkerobenseite sind die E-Technik, die Beschleunigersteuerschränke und das Prozeßleitsystem untergebracht.

In der 0,9 m starken Bunkerdecke befindet sich ein 1,2 x 1,0 m großer Personenzugang sowie ein 2,6 x 2,6 m großer Komponentenzugang. Beide Öffnungen werden mit Bleiplatten als Abschirmdeckel (s. Abb. 7) verschlossen.



**Abb. 4 Gebäudeaußenansicht**



### **2.3 Dampferzeuger**

Die ölgefeuerte Prozeßdampfanlage des KfK besteht aus zwei getrennten Dampfkesseln (Fa. Loos) mit Zerstäubungsbrennern (Fa. Weißhaupt). Sie erzeugt überhitzten Dampf mit einem Druck von 25 bar und einer Temperatur von 250 °C.

Als Brennstoff wird leichtes Heizöl ,mit einem Schwefelgehalt von 0,2 Gewichts-% verwendet. Die Anlage hat pro Kessel eine thermische Leistung von max. 4 MW, was einer Dampferzeugung von 5 t/h entspricht. Die Brennerleistung kann lastabhängig geregelt werden.





### 3. Beschreibung der Komponenten

#### 3.1 Sprühkühler

##### 3.1.1 Anforderungen

Die Abkühlung des ca. 200 °C heißen Rauchgases erfolgt in dem Sprühkühler SK durch direkte Eindüsung von Wasser.

Da prozeßbedingt eine Verbesserung der SO<sub>2</sub>-Abscheidung mit niedriger Temperatur und hohem Wassergehalt erreicht wird, ist eine Rauchgasabkühlung bis nahe an die Kühlgrenztemperatur wünschenswert.

Die Rauchgasdaten am Sprühkühlereintritt sind von der Feuerungsanlage vorgegeben und entsprechen folgenden Werten, die bei einer mittleren Kessellast und Verbrennung von leichtem Heizöl entstehen:

Rauchgastemperatur	ca. 200 °C
Wassergehalt	10.5 Vol.-%
CO <sub>2</sub> -Gehalt	12.7 Vol.-%
Luftzahl $\lambda$	1,2

Da wie oben beschrieben ein hoher Wassergehalt bei möglichst niedriger Temperatur wünschenswert ist, ergibt die direkte Eindüsung von Wasser die optimalen Bedingungen.

Verfahrenstechnisch würde es sich um eine recht einfache Komponente handeln, wenn nicht folgende Anforderungen zu erfüllen wären:

- ▶ Rauchgasabkühlung bis 5 K über Kühlgrenztemperatur
- ▶ vollständige Tropfenverdampfung
- ▶ Variation des Rauchgasvolumenstroms
- ▶ Variation der Eintrittstemperatur
- ▶ geringer Zerstäubungsluftverbrauch

### 3.1.2 Düsenauswahl

Zur Einhaltung dieser Bedingungen ist eine Flüssigkeitszerstäubung mit sehr feinem Tropfenspektrum notwendig. Zur Flüssigkeitszerstäubung sind folgende Düsensysteme erhältlich:

- ▶ Einstoffdüsen
- ▶ Zweistoffdüsen
- ▶ Rotationszerstäuber
- ▶ Ultraschallzerstäuber.

Für die Beurteilung des erzeugten Tropfenspektrums einer Düse wird häufig der Sauter-Durchmesser verwendet. Dies ist der Äquivalentdurchmesser mit dem gleichen Verhältnis von Volumen zu Oberfläche, bezogen auf das Tropfenspektrum.

Weiterhin muß der maximale Tropfendurchmesser des Spektrums bekannt sein, da diese Tropfen die längste Verdampfungszeit benötigen und somit die Apparatedimensionierung maßgeblich festlegen.

Bei *Einstoffdüsen* stammt die Zerstäubungsenergie aus der vor der Düse unter Druck stehenden Flüssigkeit. Zur Erzeugung feiner Tropfen ist ein hoher Flüssigkeitsdruck und ein kleiner Düsendurchmesser notwendig. Tropfenspektren, bei denen der maximale Durchmesser kleiner als 150 µm ist, sind mit Einstoffdüsen nur schwer erreichbar.

Bei *Zweistoffdüsen* zerreißt ein Luftstrom mit hoher Strömungsgeschwindigkeit einen Flüssigkeitsstrahl. Diese Düsen können in die Ausführungen mit äußerer oder innerer Vermischung unterteilt werden. Das Tropfenspektrum hängt stark vom Verhältnis Gas- zu Flüssigkeitsdurchsatz und von der Bauform ab. Die feinste Zerstäubung erreicht man mit Düsen, die eine innere Vermischung haben.

In Abb. 8 ist der Sauter-Durchmesser über dem Verhältnis Gas zu Flüssigkeit dargestellt. Die starke Bandbreite ist durch unterschiedliche Düsenausführungen (Geometrie, Strömungsverhältnisse, Durchsatzmenge) gegeben. Eindeutig erkennbar ist, daß mit einer Erhöhung der Zerstäubungsluftmenge feinere Tropfenspektren erzeugt werden können.

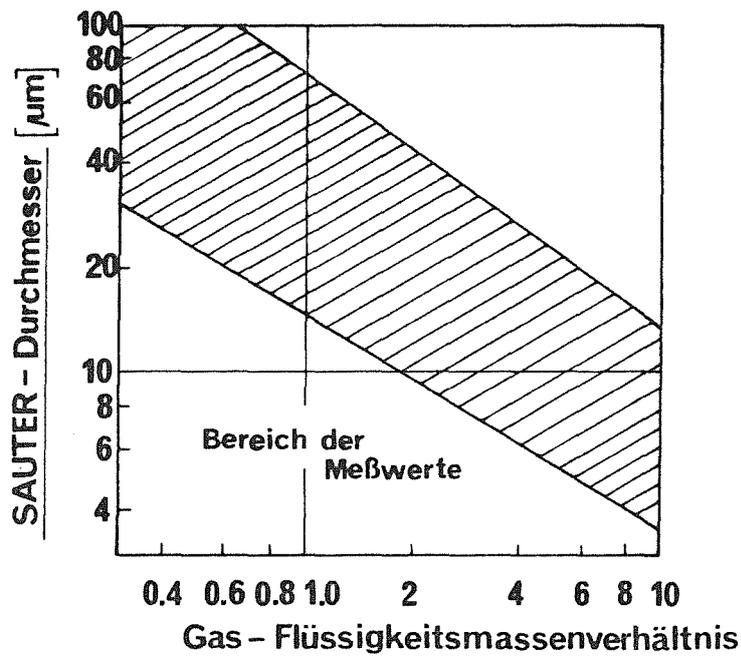


Abb. 8 Sauter-Durchmesser als Funktion des Massenverhältnisses von Gas- und Flüssigkeitsstrom für Zweistoffdüsen (Ullmann, 1972)

Mit *Ultraschallzerstäubern* ist es möglich, sehr feine Tropfen zu erzeugen ( $d_{\text{Sauter}} < 100 \mu\text{m}$ ), jedoch ist der Flüssigkeitsdurchsatz begrenzt.

Bei den *Rotationszerstäubern* wird die Flüssigkeit durch die hohe Relativgeschwindigkeit am Scheibenaustritt zerstäubt ( $d_{\text{Sauter}} > 100 \mu\text{m}$ ).

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurde für den Sprühkühler eine Zweistoffdüse mit innerer Vermischung ausgewählt.

Bei der eingesetzten Düse handelt es sich um eine patentierte Bauform, bei welcher der Gas- und Flüssigkeitsstrom in einer Mischkammer zusammengeführt und auf die Schallgeschwindigkeit des Zweiphasengemisches beschleunigt wird. Die sprunghafte Druckänderung am Düsenaustritt bewirkt eine intensive Zerstäubung (siehe Abb. 9). Im Fall der Zweistoffdüse mit innerer Vermischung lassen sich die beiden Phasenströme nicht unabhängig voneinander einstellen, da der Mischkammerdruck und somit die Differenzdrücke der beiden Teilströme vom Gesamtdurchsatz abhängig sind. Diese Düsenausführung erfordert eine geringe

Druckluftmenge zur Erzeugung feiner Tropfen, da die kritische Geschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit) eines Zweiphasengemisches wesentlich geringer ist als die Schallgeschwindigkeit der entsprechenden Gas- oder Flüssigkeitsphase.

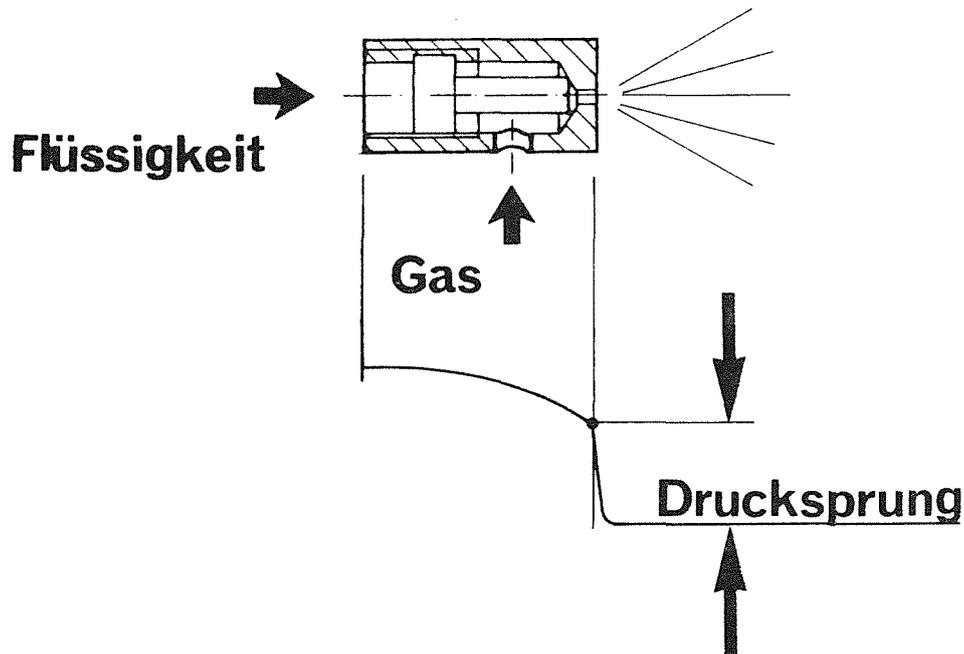


Abb. 9 Zweistoffdüse mit Mischkammer (Caldyn, 1989)

### 3.1.3 Sprühkühlergeometrie

Liegt die Düsenbauform fest und sind die Düsenkennwerte sowie die Rauchgasdaten bekannt, ist eine Auslegung der Kühlergeometrie möglich.

Da die Wasserstäubung mit nur einer Düse erfolgen kann, entspricht der Kühlerdurchmesser dem Düsenstrühkegel.

Die Sprühkühlerlänge ergibt sich aus der Tropfenverdampfungsberechnung, bei der ein Rauchgasvolumen von 1200 m<sup>3</sup>/h (i.N.f.) und der maximale Tropfendurchmesser eingesetzt wurde.

Entsprechend diesen Daten tritt das Rauchgas bei einer Temperatur von 200 °C mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 5,8 m/sec (2110 m<sup>3</sup>/h i.B.f.) in den Sprühkühler ein. Für die Rauchgasabkühlung auf 65 °C wird eine Wassermenge von 98 l/h benötigt. Gibt man den maximalen Tropfendurchmesser mit 50 µm vor, so muß das Massenverhältnis von Gas zu Flüssigkeitsstrom größer 0,5 sein. Somit wird eine Zerstäubungsluftmenge von minimal 50 kg/h benötigt.

Addiert man die Teilströme, erhält man am Kühleraustritt einen Gasvolumenstrom von 1730 m<sup>3</sup>/h (i.B.f.), was einer Strömungsgeschwindigkeit von 4.7 m/sec entspricht.

Aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Baulänge ergibt sich die Gasverweilzeit zu 1,3 sec.

Abb. 10 zeigt die Konstruktionszeichnung des eingesetzten Sprühkühlers. Der Kühler ist vertikal eingebaut und das Rauchgas tritt im oberen Teil über einen 90° -Bogen mit nachfolgendem Strömungsgleichrichter ein.

Die Sprühdüse ist an dem oberen seitlichen Flansch befestigt. Die Rauchgasabkühlung erfolgt im Gleichstrom.

### 3.1.4 Aufbau und Instrumentierung

Abb. 11 zeigt das Verfahrensfließbild des Sprühkühlers. Die Regelung und Überwachung erfolgt durch das Prozeßleitsystem. Folgende Größen werden gemessen und dem Leitsystem übermittelt:

Eintrittstemperatur	TI 01
Austrittstemperatur	TIC 02
Wasserdurchsatz	FIC 03
Rauchgaswassergehalt	QI 13
Position des Motorventils V 306	GOC 01
Füllstand Behälter B1	LIC 01

Die Sprühkühleraustrittstemperatur TIC 02 ist die Regelgröße, über die der Wasserdurchsatz FIC 03 durch das Motorventil V 306 eingestellt wird.

Um einen konstanten Wasserdruck in der Düsenmischkammer zu gewährleisten, wird das Wasser aus dem Vorlagebehälter B1 mittels einer Kreiselpumpe P1 entnommen. Der Behälter wird automatisch über das Magnetventil V 305, das über die Füllstandsmessung LIC 01 gesteuert wird, befüllt.

Mit dem Überströmventil V 307 wird der Wasserdruck auf einem konstanten Wert gehalten. Der Wasserdurchsatz wird mit dem Motorventil V 306 eingestellt und mit einem Flügelraddurchflußmesser FIC 03 überwacht. Zusätzlich ist vor der Sprühdüse für jeden Stoffstrom ein Rückschlagventil installiert.

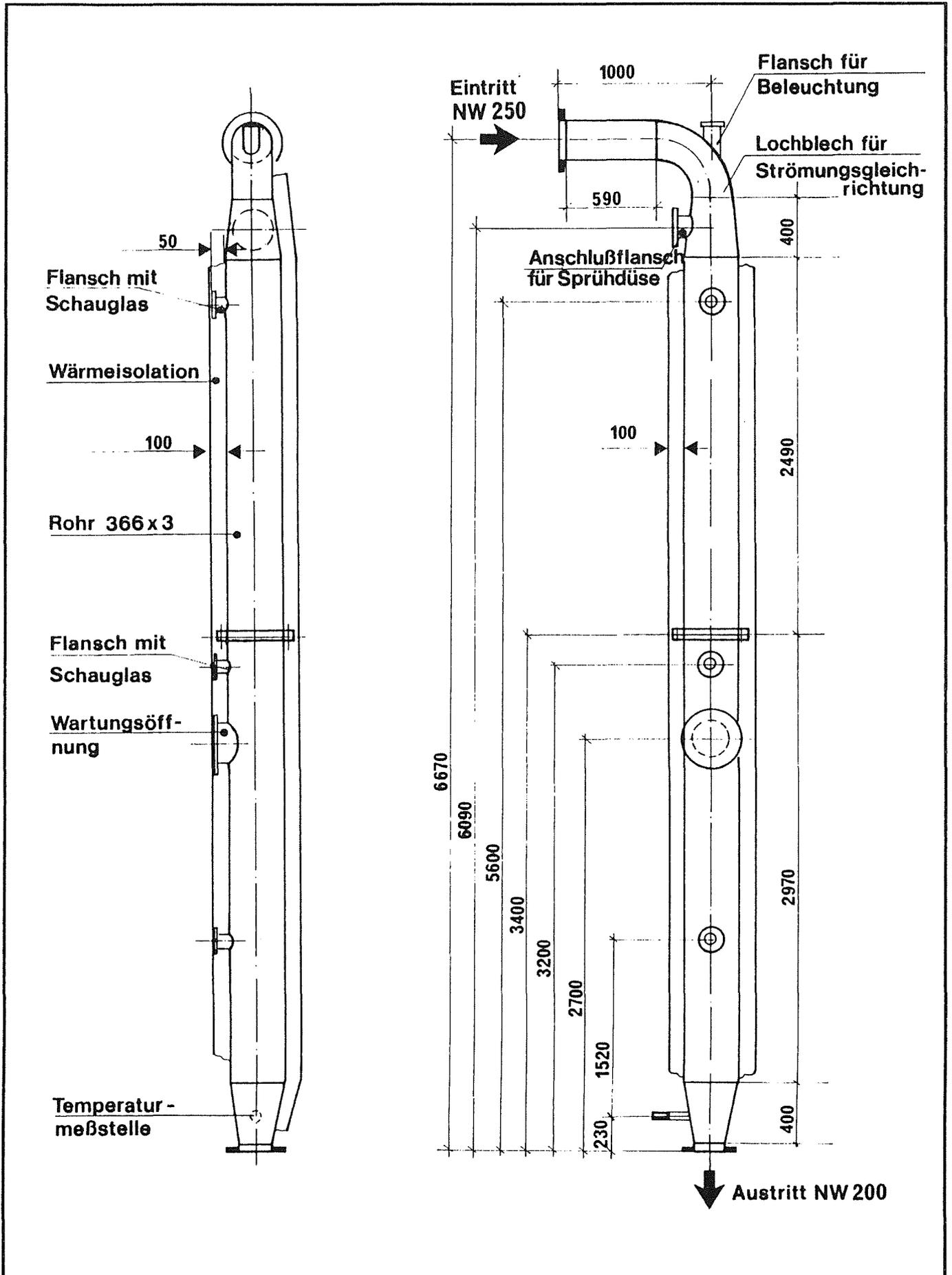
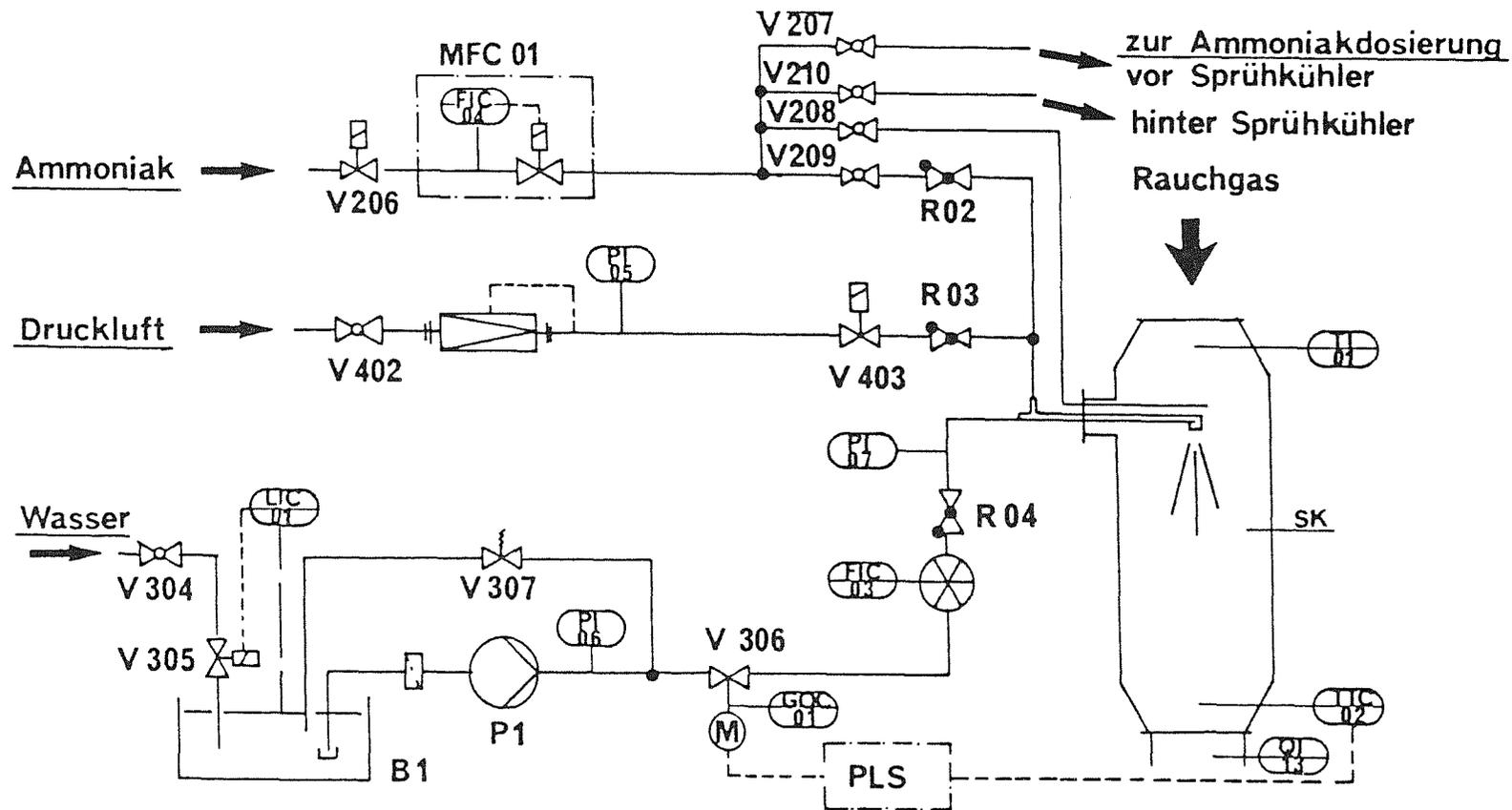


Abb. 10 Konstruktionszeichnung des Sprühkühlers



Stoffstrom-Nr.		1	2	3	4	5
Medium		Rauchgas vor Sprühkühler	Rauchgas nach Sprühkühler	Wasser	Zerstäubungs-luft	Ammoniak-dosierung
Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h (i.N.f.) m <sup>3</sup> /h (i.B.f.)	1021,2 2112,5	1363 1730	- -	39 -	2,21 -
Dichte (bei Gasen im Normzustand)	kg/m <sup>3</sup>	1,296	1,251	1000	1,283	0,7714
Massenstrom	kg/h	1556,7	1705,5	97	50	1,703
Temperatur	°C	200	65	20	20	20
Wasser	kg/h	96,5	193,8	97	0,3	-

Verfahrensfließbild Sprühkühler SK
Teststand AGATE-2
KfK/LAF I / Stand 05/90

Abb. 11 Verfahrensfließbild des Sprühkühlers

Der Zerstäubungsluftdruck wird über den Druckluftkonstanthalter entsprechend der Düsenauslegung auf einen festen Wert eingestellt. Durch das Mischkammerprinzip der Düse ist somit die Zerstäubungsluftmenge vorgegeben. Zur automatischen Steuerung des Sprühkühlers über das Prozeßleitsystem werden die einzelnen Stoffströme mit Magnetventilen geöffnet bzw. geschlossen.

Die Ammoniakdosierung kann wahlweise an mehreren Stellen erfolgen. Bei Standardbedingungen erfolgt die Zugabe über das Ventil V 208 in den Sprühkühler bzw. über V 209 in die Zerstäubungsluft. Die Ammoniakmenge wird mit dem Mass-Flow-Controller MFC 1 eingestellt.

### **3.1.5 Sprühkühlerbetrieb**

Entsprechend der Spezifikation muß der Sprühkühler einen weiten Bereich unterschiedlicher Betriebsparameter abdecken. Die Kühlereintrittstemperatur variiert je nach Kessellast von 180 bis 250 °C.

Der Rauchgasdurchsatz soll in einem Bereich von 500 bis 1500 m<sup>3</sup>/h (i.N.f.) einstellbar sein. Wird das Rauchgas mit einem Eintrittswassergehalt von 10 Vol. % auf 65 °C abgekühlt, so werden minimal 33 kg/h und maximal 146 kg/h Wasser zur Abkühlung benötigt. Die Zusammenhänge zwischen notwendiger Kühlwassermenge, Temperatur und relativer Feuchte können graphisch dem h,x-Diagramm für Rauchgas (Abb. 12) entnommen werden.

Bei einer Abkühlung auf 65 °C hat das Rauchgas, nachdem es den Sprühkühler durchströmt hat, eine relative Feuchte größer 85 %.

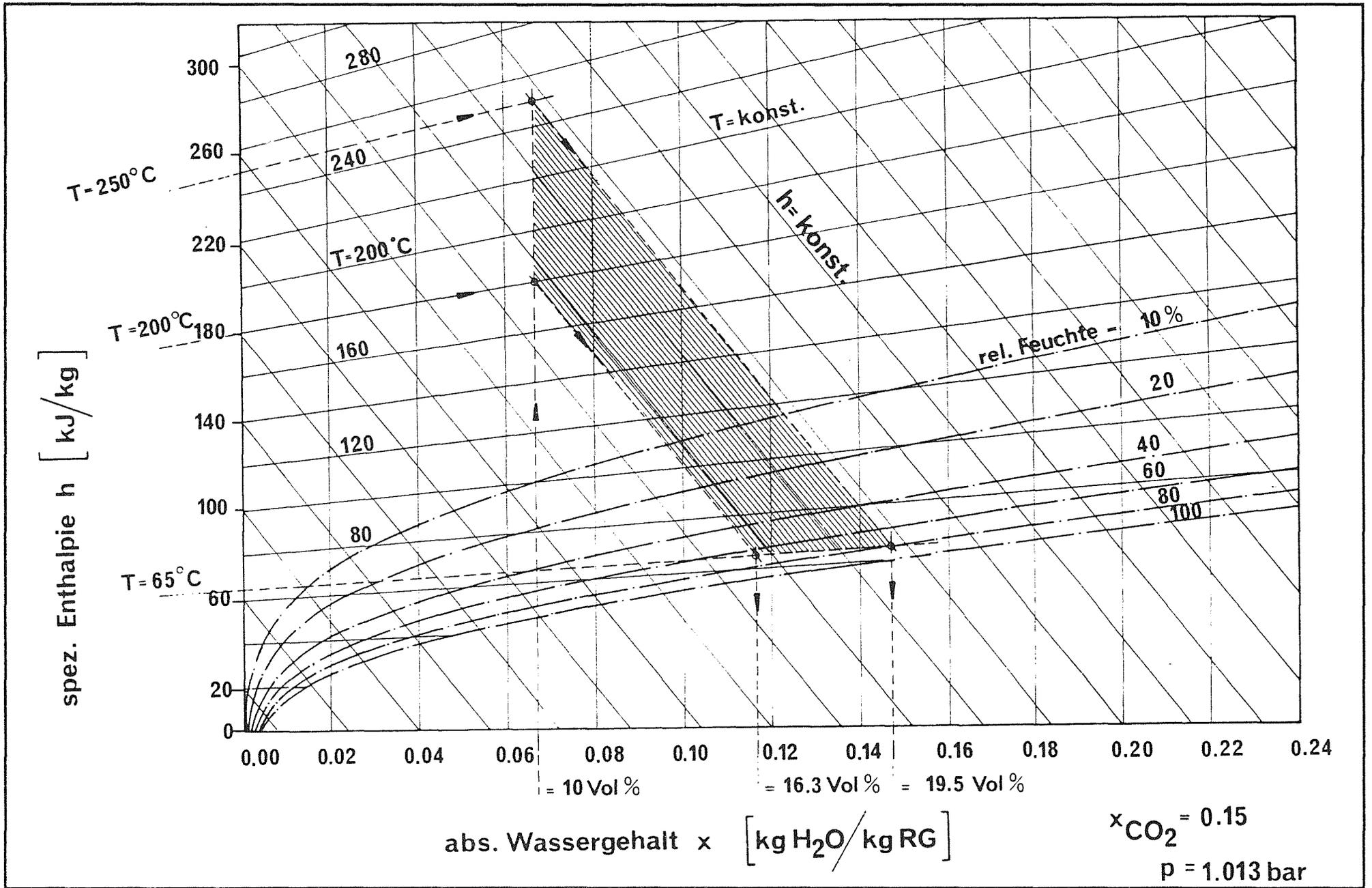


Abb. 12 h,x-Diagramm für Rauchgas (FDBR, 1982)

## 3.2 Elektronenbeschleuniger

### 3.2.1 Aufbau und technische Daten des Beschleunigers

Zur Rauchgasbestrahlung wird ein Elektronenbeschleuniger der Fa. Nissin High Voltage (Japan) eingesetzt.

Der Beschleuniger arbeitet mit einer Beschleunigungsspannung von maximal 550 kV und einem Strahlstrom von maximal 30 mA.

Die Hochspannung wird mit einer Kaskadenschaltung von Gleichrichtern und Kondensatoren (Greinacher-Schaltung) innerhalb eines Drucktanks erzeugt (siehe Abb. 13). Zur Hochspannungsisolation ist der Tank mit Schwefelhexafluorid gefüllt. Über ein Verbindungsrohr ist der Drucktank mit dem eigentlichen Beschleunigerteil (Beschleunigerröhre) verbunden, das gleichfalls mit Schwefelhexafluorid zur Isolation gefüllt ist.

Der Behälter mit der Beschleunigerröhre enthält die Glühkathode, die auf dem Hochspannungspotential liegt und einen nach unten gerichteten Elektronenstrahl von maximal 30 mA emittiert.

Die Elektronen treten in die Beschleunigerröhre ein und werden durch dessen elektrisches Feld beschleunigt. Innerhalb der Beschleunigerröhre mit Kathode herrscht ein Hochvakuum (ca.  $10^{-6}$  mbar), welches über ein Vakuumsystem, bestehend aus einer Ionengetterpumpe und einer Titansublimationspumpe, aufrechterhalten wird.

Da sich die Kathode auf Hochspannungspotential befindet, ist die Einheit von einem mit Schwefelhexafluorid gefüllten Druckbehälter umgeben. An dem auf Erdpotential liegenden Beschleunigerrohrende treten die Elektronen in den Scanner mit Ablensystem ein. Dort werden die Elektronen mit einer Frequenz von 200 Hz durch Magnetspulen abgelenkt. Die Scannerform ist dem maximalen Ablenkwinkel von  $60^\circ$  angepaßt. Am unteren Ende ist der Hochvakuumbereich des Scanners mit einer dünnen Titanfolie abgeschlossen, durch die der abgelenkte Elektronenstrahl austritt.

Da sich die Titanfolie beim Elektronendurchtritt erwärmt, wird die Doppelfensterkonstruktion mit Luft gekühlt. Die Kühlluft wird mit geringem Überdruck (ca. 0,3 bar) durch eine Schlitzdüse auf die gesamte Folienfläche geblasen. Die Kühlluftversorgung erfolgt mit einem Rootsgebläse.

Direkt unterhalb des Scannersystems mit dem Elektronenaustrittsfenster befindet sich die Bestrahlungskammer.

Die technischen Daten des Beschleunigers sind in Tabelle 4 zusammengefaßt.

Abb. 14 zeigt eine Aufstellungszeichnung und Abb. 15 ein Foto des Beschleunigers mit Bestrahlungskammer.

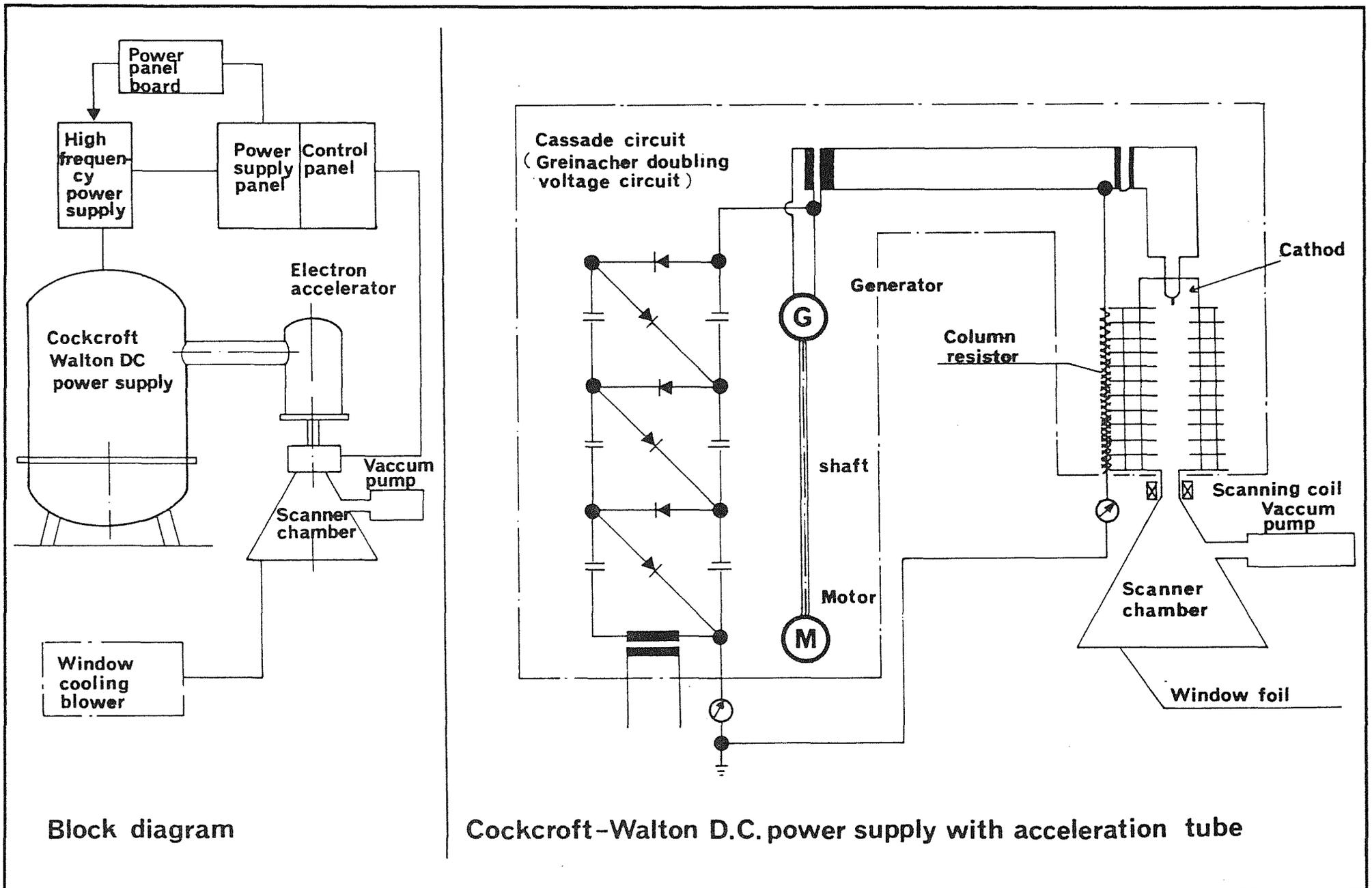
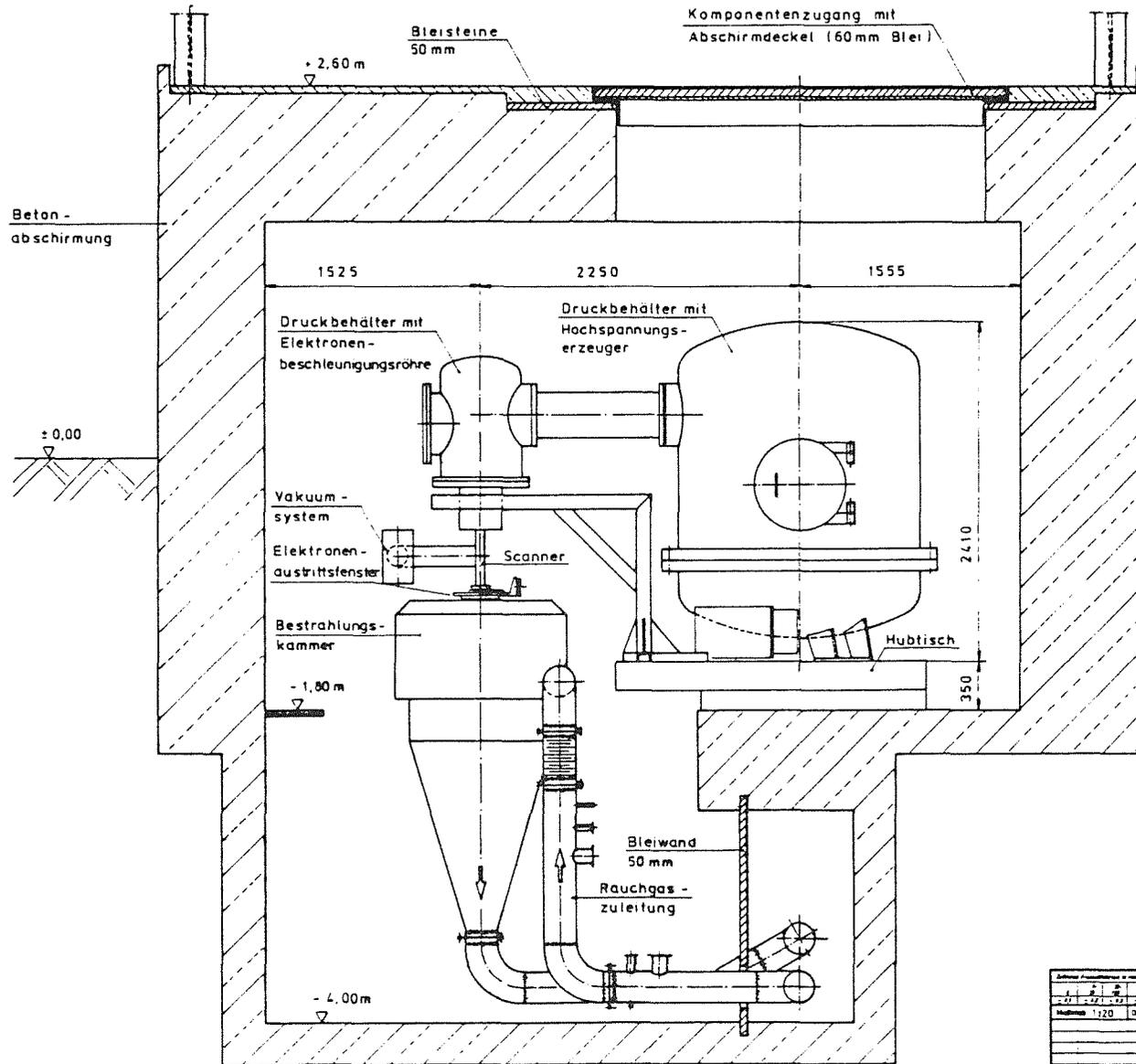


Abb. 13 Aufbau des Hochspannungserzeugers

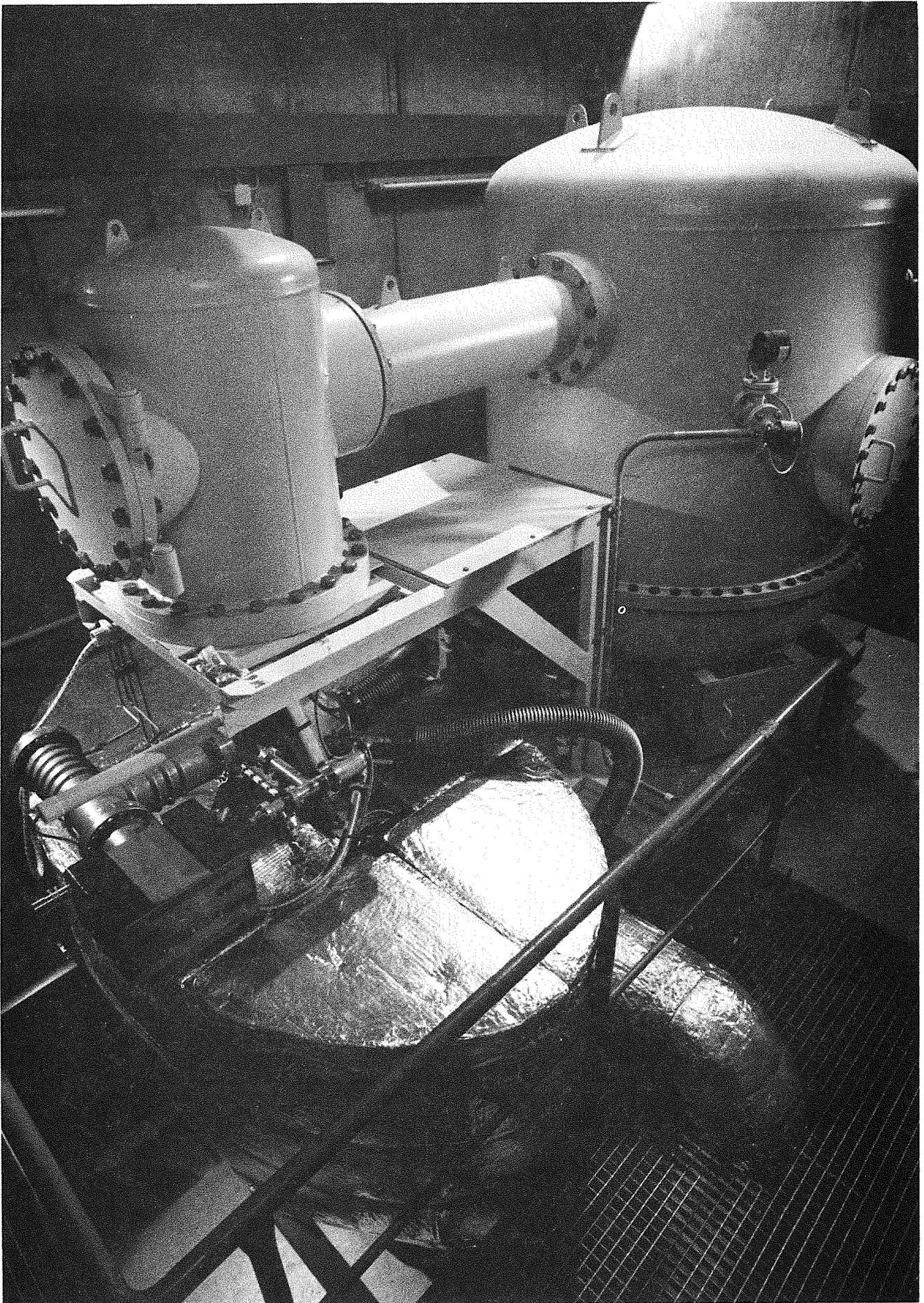
**Tab. 4 Technische Daten des Elektronenbeschleunigers**

Beschleunigungsspannung	550 kV
Strahlstrom	30 mA
Scanning-Länge	60 cm (24 inch)
Ablenkfrequenz	200 Hz
max. Ablenkwinkel	60 °
max. Fensterbelastung	0,55 mA/cm
Hochspannungsisolation	SF <sub>6</sub>
- Tankdruck	5 bar
- Füllmenge	260 kg
Energieaufnahme (gesamt)	59 kVA
- Elektronenbeschleuniger	33 kVA
- Steuerschrank	6 kVA
- Kühlluftgebläse	14 kVA
- Vakuumsystem	6 kVA
Kühlwasser	
- Kühlluftgebläse	10 l/min
- Fensterkonstruktion	5 l/min
- Vakuumsystem	2 l/min
Kühlluft für Elektronenaustrittsfenster	
- Volumenstrom	ca. 5 Nm <sup>3</sup> /min
- Überdruck	0,3 bar

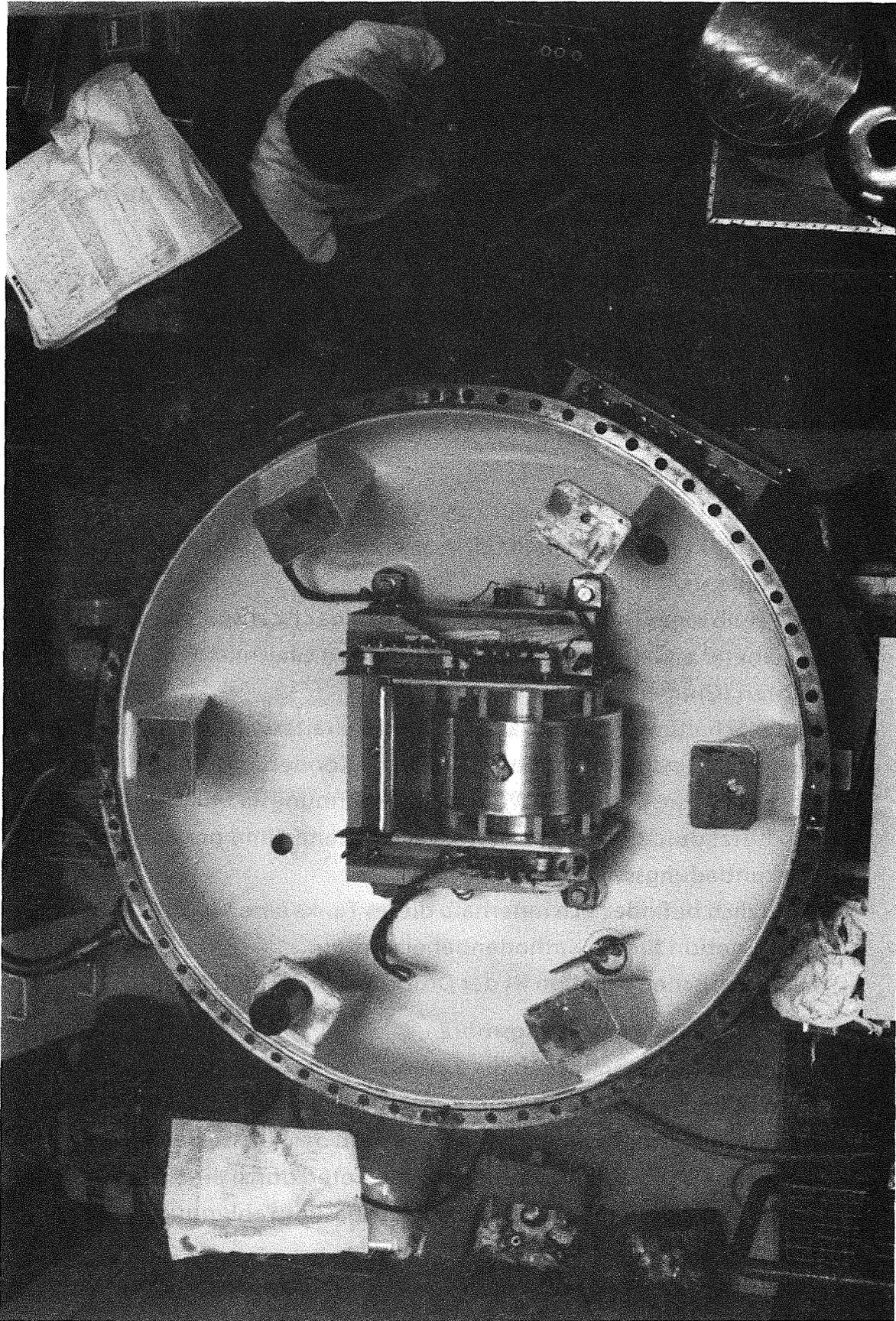


Kernforschungszentrum Karlsruhe 69104	
Maßstab: 1:20 Blatt: 14-08-19a Zeichnungs-Nr.: AG II-09-02	Name: Aufstellungsplan Elektronenbeschleuniger
Teststand AGATE-2	Blatt: 11

Abb. 14 Aufbau des Beschleunigers



**Abb. 15** Elektronenbeschleuniger mit Bestrahlungskammer



**Abb. 16**    **Offener Beschleunigerdruckbehälter mit Trafo**

### 3.2.2 Beschreibung der Einzelkomponenten des Beschleunigers

*Versorgungsschrank* bestehend aus Einspeisetrafo und Stromverteilung für die Zusatzaggregate. Weiterhin ist in diesem Schrank eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) untergebracht, die eine zweite Sicherheitskette zu der beschleunigereigenen Sicherheitskette bildet.

#### *HF-Inverter*

Der HF-Inverter ist das Verbindungsglied zwischen dem Versorgungsschrank und dem Cockcroft-Walton D.C. Hochspannungserzeuger. Er transformiert die Eingangsspannung in eine Ausgangsspannung mit einer Frequenz von 1 kHz.

Die Ausgangsspannung des Inverters ist proportional der Elektronenbeschleunigungsspannung.

#### *Cockcroft-Walton D.C. Power Supply*

Bei dieser Komponente handelt es sich um den Hauptbestandteil des Beschleunigers.

Innerhalb eines Drucktanks befindet sich der Hochspannungserzeuger, bestehend aus einer Kaskadenschaltung von Gleichrichtern und Kondensatoren (Greinacher Schaltung).

Dieser Schaltung ist innerhalb des Druckbehälters ein zusätzlicher Transformator vorgeschaltet (siehe Abb. 16). Die Kondensatoren und Gleichrichter, welche die Cockcroft-Walton Hochspannungserzeugung bilden, sind geschützt durch seriell geschaltete Widerstände und parallel geschaltete Funkentladungsstrecken.

Zusätzlich befindet sich innerhalb dieses Tanks eine Motor-Generator-Kombination für die Kathodenbeheizung.

Zur elektrischen Isolation ist der Drucktank SF<sub>6</sub> befüllt.

#### *Elektronenbeschleunigungsröhre*

In diesem Teil befindet sich die Kathode, welche die Elektronen in den Hochvakuumraum der Beschleunigeröhre emittiert. Die Elektronen werden auf der Strecke zwischen Kathode und der Anode beschleunigt, passieren das Strahlblenksystem und treten durch eine Titanfolie, die den Hochvakuumraum gegen die Rauchgasbestrahlungskammer trennt, aus.

Die Beschleunigeröhre befindet sich innerhalb eines Druckbehälters, der über ein Verbindungsrohr starr mit dem Drucktank der Hochspannungserzeugung verbunden ist.

Durch dieses Verbindungsrohr verläuft die Hochspannungszuleitung für

die Beschleunigerröhre und die Stromversorgung der Kathode. Dieser Bereich ist gleichfalls SF<sub>6</sub> isoliert.

#### *Beam-Scanning System*

Die Elektronen treten wie zuvor beschrieben von der Beschleunigerröhre in den Scanner ein, wobei am oberen Ende des Scanners die Ablenkmagnete angebracht sind.

Am unteren Ende des Scanners ist der Hochvakuumraum mit einer Titanfolie verschlossen. Die Elektronen werden mit einer Frequenz von 200 Hz abgelenkt, wobei der maximale Ablenkwinkel 60 ° beträgt. Bei diesem System werden die Elektronen nur über die Scannerlängsseite abgelenkt, wodurch die Austrittslänge auf der Titanfolie bei vollem Ablenkwinkel maximal 60 cm beträgt.

#### *Elektronenaustrittsfenster*

Beim Einsatz von Beschleunigern zur elektroneninduzierten Rauchgasreinigung ist es angebracht, eine Doppelfensterkonstruktion anzuwenden. Das Hauptfenster trennt den Hochvakuumraum gegen Atmosphärendruck, und das Vorfenster dient zum Schutz des Hauptfensters vor korrosiven Einflüssen durch das Rauchgas.

Beide Fenster bestehen aus dünnen Titanfolien (30 und 17,5 µm), die ohne Stützkonstruktion frei eingespannt sind.

Zur Kühlung der Titanfolien wird über eine Schlitzdüse Kühlluft in den Spaltraum zwischen den beiden Folien eingeleitet. Mit diesem Kühlsystem ist eine maximale Fensterfolienbelastung von 0,55 mA pro cm Fensterlänge möglich. Zusätzlich wird der Fensterflansch mit Wasser gekühlt.

### **3.2.3 Bestrahlungskammer**

Die Rauchgasbestrahlung erfolgt in der Bestrahlungskammer, mittels den vom Beschleuniger emittierten Elektronen. Grundlage für die Auslegung der äußeren Form und der Abmessungen dieser Kammer war der Isodosenverlauf der Elektronenbestrahlung. Die Kammerwände sollten nach Möglichkeit der 1%-Isodosenkurve angenähert werden. Die Elektronenreichweite liegt bei den gegebenen Rauchgasbedingungen und einer Beschleunigungsspannung von 550 keV bei 1,5 m. Die Kammergeometrie sollte so gewählt werden, daß der Rauchgasstrom möglichst gleichmäßig bestrahlt wird. Zusätzlich soll eine Variation der Beschleunigungsspannung möglich sein, die eine Änderung der Elektronenreichweite bewirkt.

Bei der Auslegung war eine möglichst gleichförmige Strömungsführung ohne Totzonen und ohne Strähnenbildung zu berücksichtigen. Die Rauchgaszuführung in die Bestrahlungskammer sollte möglichst gleichförmig nahe des Elektronenaustrittsfensters erfolgen, d.h. im Bereich hoher Dosisleistung.

Die vorgenannten Kriterien ergaben eine Kammergeometrie, wie sie in Abb. 17 und 18 ersichtlich ist. Der Behälter besteht aus einer zylinderförmigen Hauptkammer mit elliptischem Querschnitt und einem anschließendem Austrittskonus.

Die Einbringung der Elektronenstrahlung erfolgt durch den an der Stirnseite der Hauptkammer angeordneten Beschleuniger, dessen Fensterflansch über ein flexibles Blech mit der Bestrahlungskammer gasdicht verbunden ist.

Zur Erzielung einer definierten und gleichförmigen Strömung am Einlaß tritt das Rauchgas tangential in einen Ringraum ein, der um den oberen Teil der elliptisch geformten Bestrahlungskammer liegt.

Nach einer Umlenkung am oberen Kammerumfang durchströmt das Rauchgas im Gleichstrom mit der Bestrahlungsrichtung die zylindrische Hauptkammer.

Das bestrahlte Rauchgas verläßt die Kammer über einen ebenfalls im Querschnitt elliptisch geformten Austrittskonus.

#### **3.2.4 Rauchgasbestrahlung**

In Abb. 19 ist ein Verfahrensfliießbild zur Rauchgasbestrahlung dargestellt. Ausgehend von einem Rauchgasvolumenstrom von 1200 m<sup>3</sup>/h (i.N.f.) vor dem Sprühkühler erhöht sich dieser auf 1360 m<sup>3</sup>/h (i.N.f.) vor der Bestrahlungskammer. Das Rauchgas tritt mit einer Temperatur von 65 °C in die Bestrahlungskammer ein und erwärmt sich bei einer Bestrahlungsdosis von 15 KGy auf eine Temperatur von 80 °C am Austritt. Unter diesen Bedingungen beträgt die Gasverweilzeit in der Bestrahlungskammer 5,5 sec. Bei einem homogenen Strömungsprofil strömt das Gas mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/sec durch die Bestrahlungskammer.

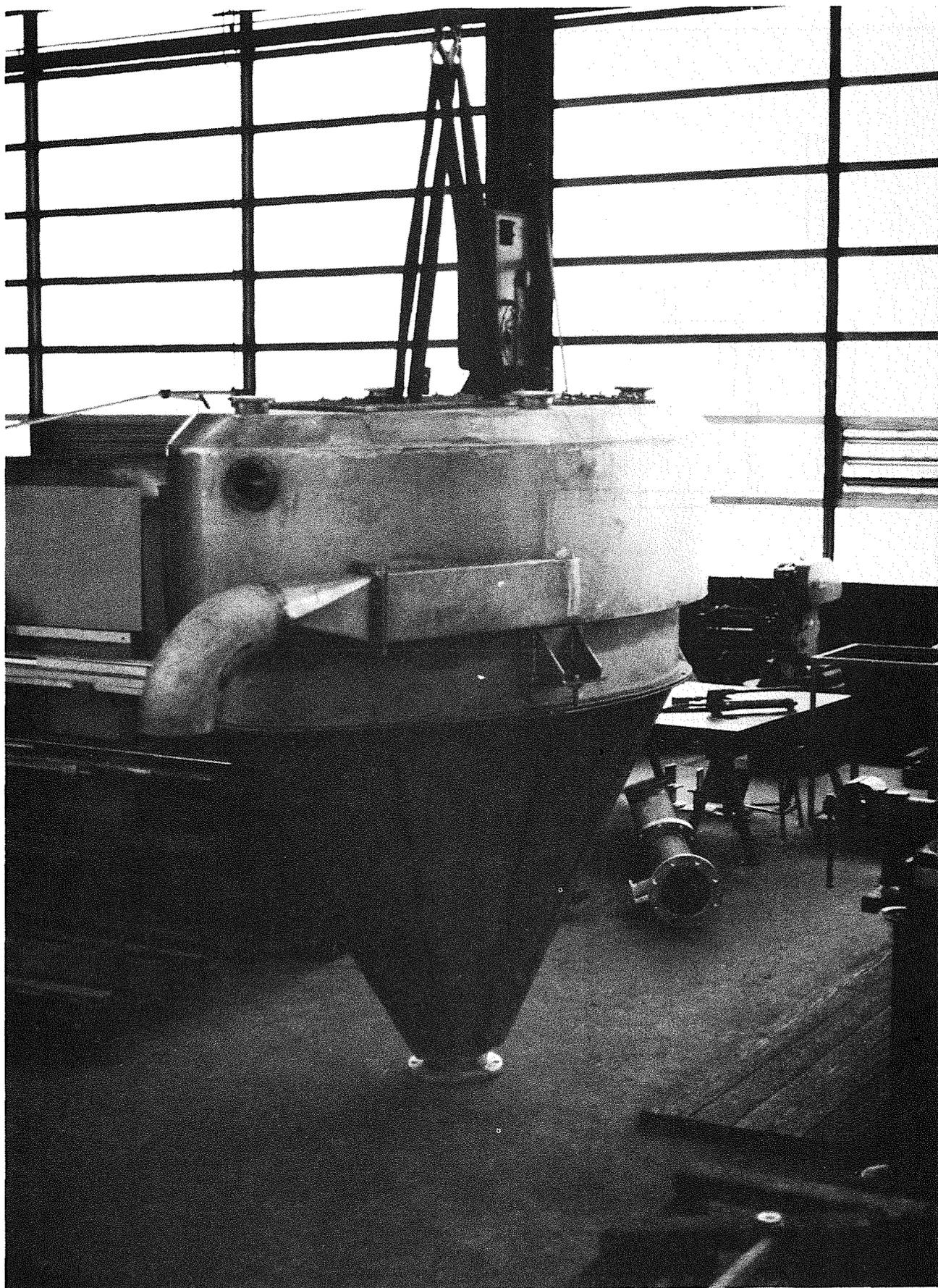


Abb. 17 Bestrahlungskammer

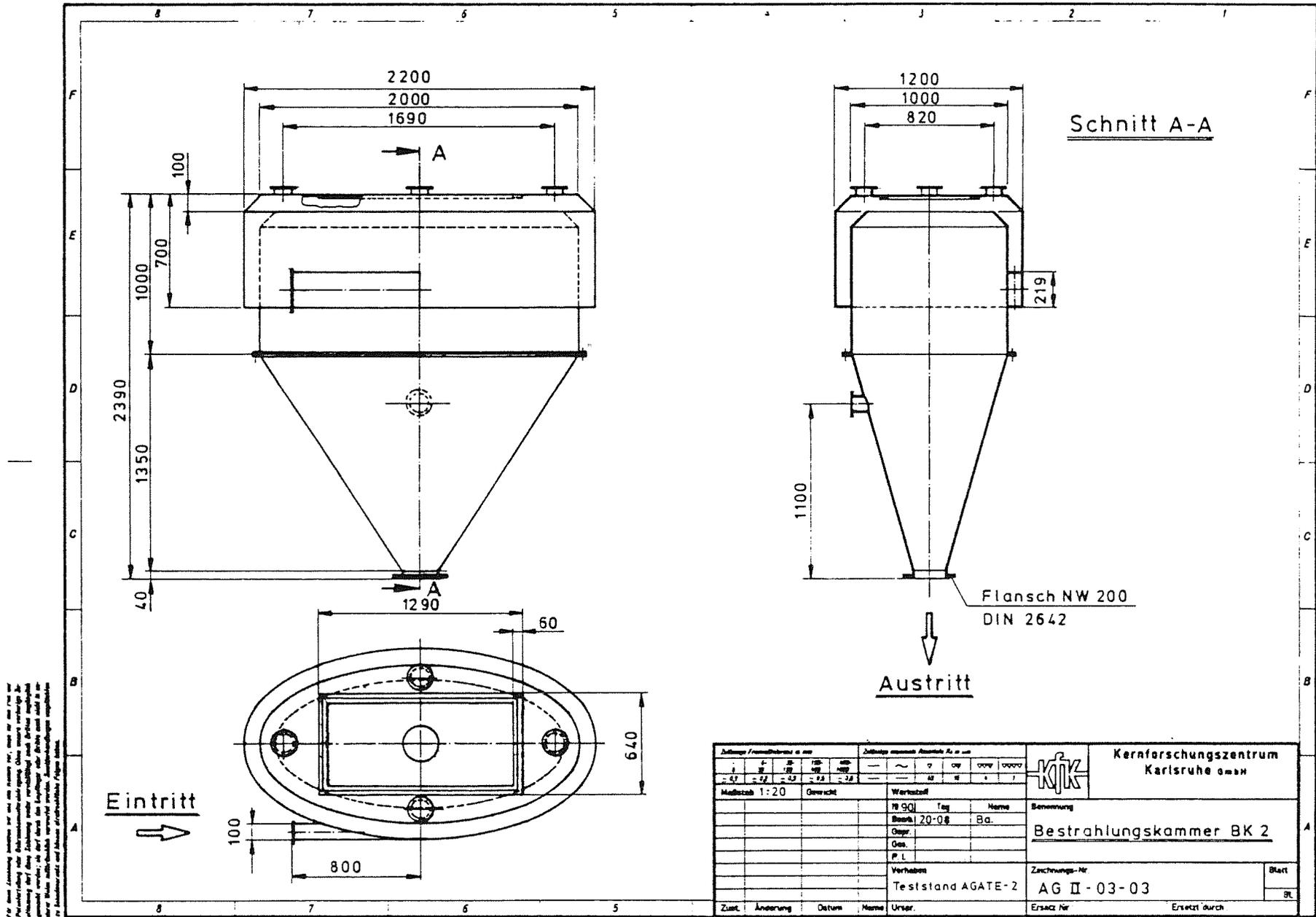
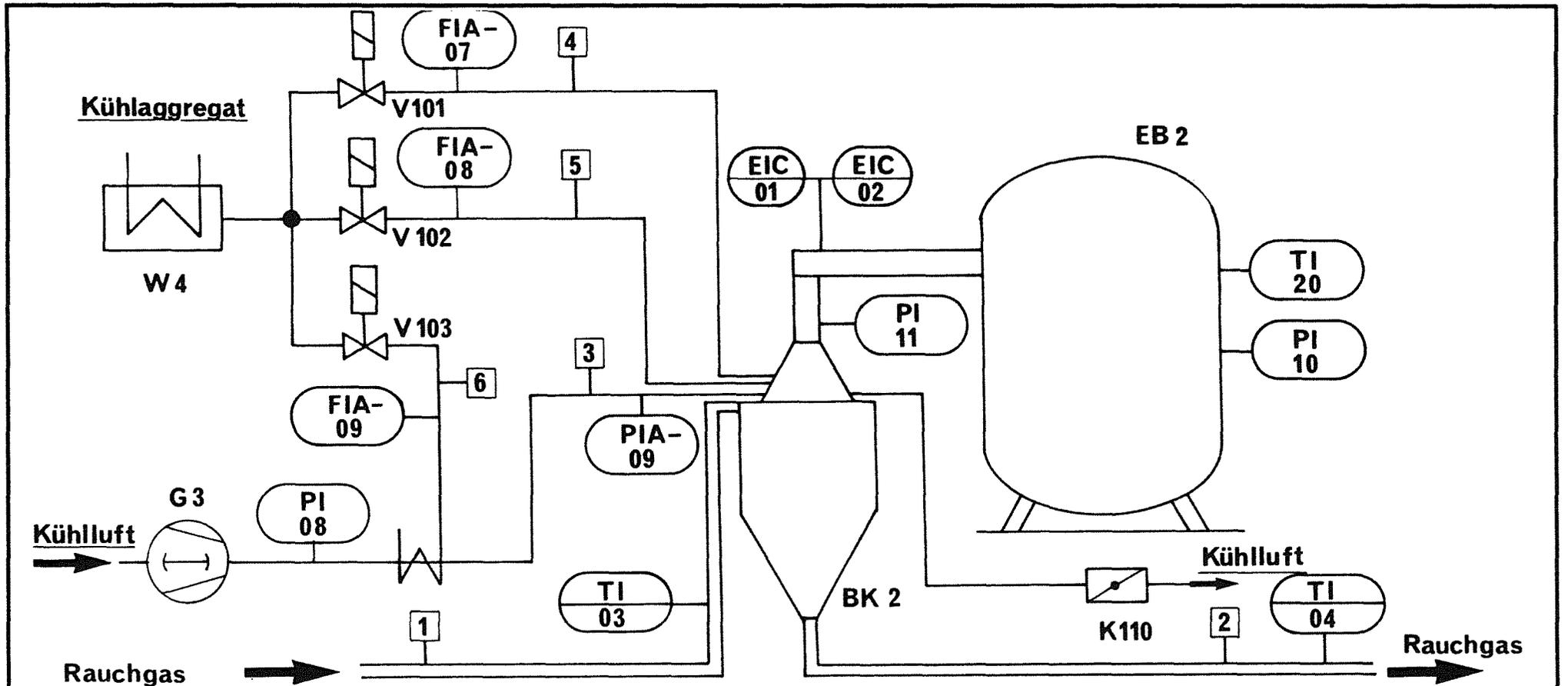


Abb. 18 Konstruktionszeichnung der Bestrahlungskammer



\* Rauchgasmassenstrom (ohne Produktaerosol)

Stoffstrom-Nr.		1	2	3	4	5	6	Verfahrensfließbild Rauchgasbestrahlung  Teststand AGATE-2  KfK/LAF I                      Stand 05/90
Medium		Rauchgas vor Bestrahlung	Rauchgas nach Bestrahlung	Kühlluft für Fenster	Kühlwasser für Titanpumpe	Kühlwasser für Fenster	Kühlwasser für Kühlluft	
Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h (i.N.f) m <sup>3</sup> /h (i.B.f)	1363 1730	1361 1823	300 251	- -	- -	- -	
Dichte (bei Gasen im Normzustand)	kg/m <sup>3</sup>	1,251	1,251	1,283	1000	1000	1000	
Massenstrom	kg/h	1705,5	1705,5 (1702,7)*	385	120	300	600	
Temperatur	°C	65	80	20	15	15	15	
Druck (absolut)	bar	0,983	0,978	1,3	5	5	5	

Abb. 19    Verfahrensfließbild Rauchgasbestrahlung

### **3.3 Schlauchfilter mit Additivdosiersystem**

#### **3.3.1 Aufgabenstellung und Anforderungen**

Der Filter hat die Aufgabe, das Produktaerosol trocken abzuscheiden. Hierbei soll der Reingasstaubgehalt kleiner  $10 \text{ mg/m}^3$  sein. Frühere Filteruntersuchungen am Teststand AGATE-1 haben gezeigt, daß die Filtration des hygroskopischen Produktaerosols nur unter Einsatz einer Beschichtung des Filtermediums (Precoating) mit einem inerten Additiv möglich ist. In dieser Filterkuchenschicht, bestehend aus inertem Additiv und abgeschiedenem Reaktionsprodukt, findet eine zusätzliche Gassorption von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  und  $\text{NO}_2$  statt.

Zu diesem Zweck ist der Filter mit einem Additivdosiersystem ausgestattet, mit dem man die Filterschläuche kontinuierlich mit einer Mischung aus abgeschiedenem Produkt und Additiv beaufschlagen kann.

#### **3.3.2 Filtergeometrie und Strömungsführung**

Die Filtergeometrie wurde so gewählt, daß die Strömungsführung besonders dem On-Line-Betrieb mit großer Produktrezyklierung entgegen kommt. Strömungsleitbleche, wie bei vielen Filterkonstruktionen üblich, sollten nicht eingebaut sein, damit eine Vorabscheidung bei der Produktrezyklierung vermieden wird.

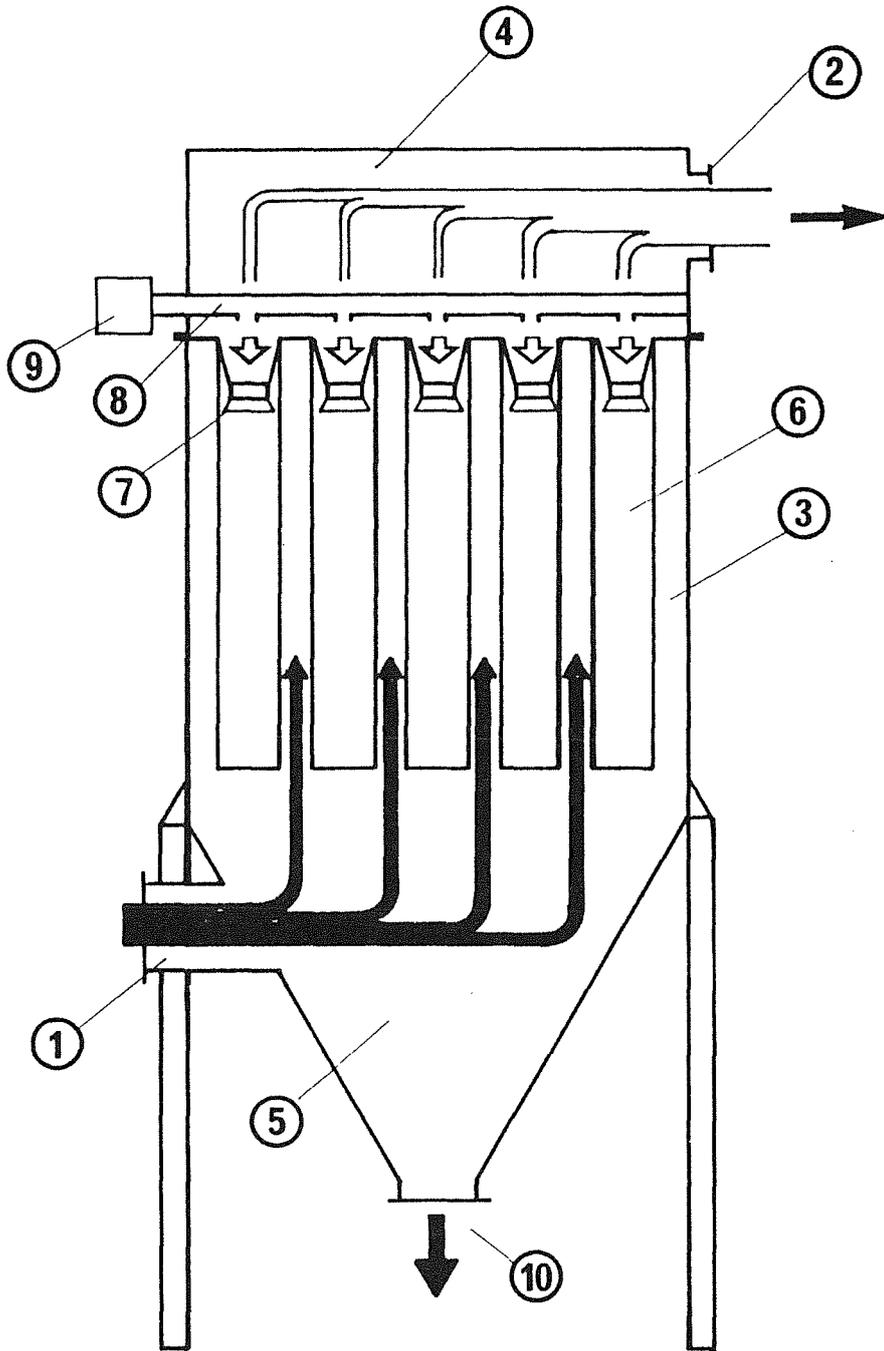
Der Rohgasstrom tritt deshalb im Trichter des Staubsammelbehälters ein und durchströmt den Filter von unten nach oben (siehe Abb. 20). Der Filterquerschnitt wurde möglichst klein gewählt, um eine genügend große Strömungsgeschwindigkeit ( $v = 0,4 \text{ m/s}$ ) zu erreichen, damit das Additiv auch den oberen Schlauchbereich erreicht.

Die Filterschläuche werden von außen beaufschlagt, und das gereinigte Gas verläßt den Filter über den Reingasraum.

Der Filter ist am Ein- und Austritt mit einer Absperrklappe versehen, somit ist auch ein Off-Line-Cleaning möglich.

Der Filter ist mit 20 Schläuchen bestückt, die eine Länge von 3,5 m und einem Durchmesser von 160 mm haben. Als Filtermedium wurde ein Nadelfilz aus Polyacrylnitril mit einer PTFE-Membrane gewählt.

In Abb. 21 sind die Abmessungen des Schlauchfilters dargestellt und in Tabelle 5 die technischen Daten zusammengestellt.



- 1 Rohgaseintritt
- 2 Reingasaustritt
- 3 Rohgaskammer
- 4 Reingaskammer
- 5 Produktsammeltrichter

- 6 Filterschlauch
- 7 Injektor
- 8 Blasrohr
- 9 Druckluftspeicher
- 10 Produktaustritt

Abb. 20 Pulse-Jet Schlauchfilter

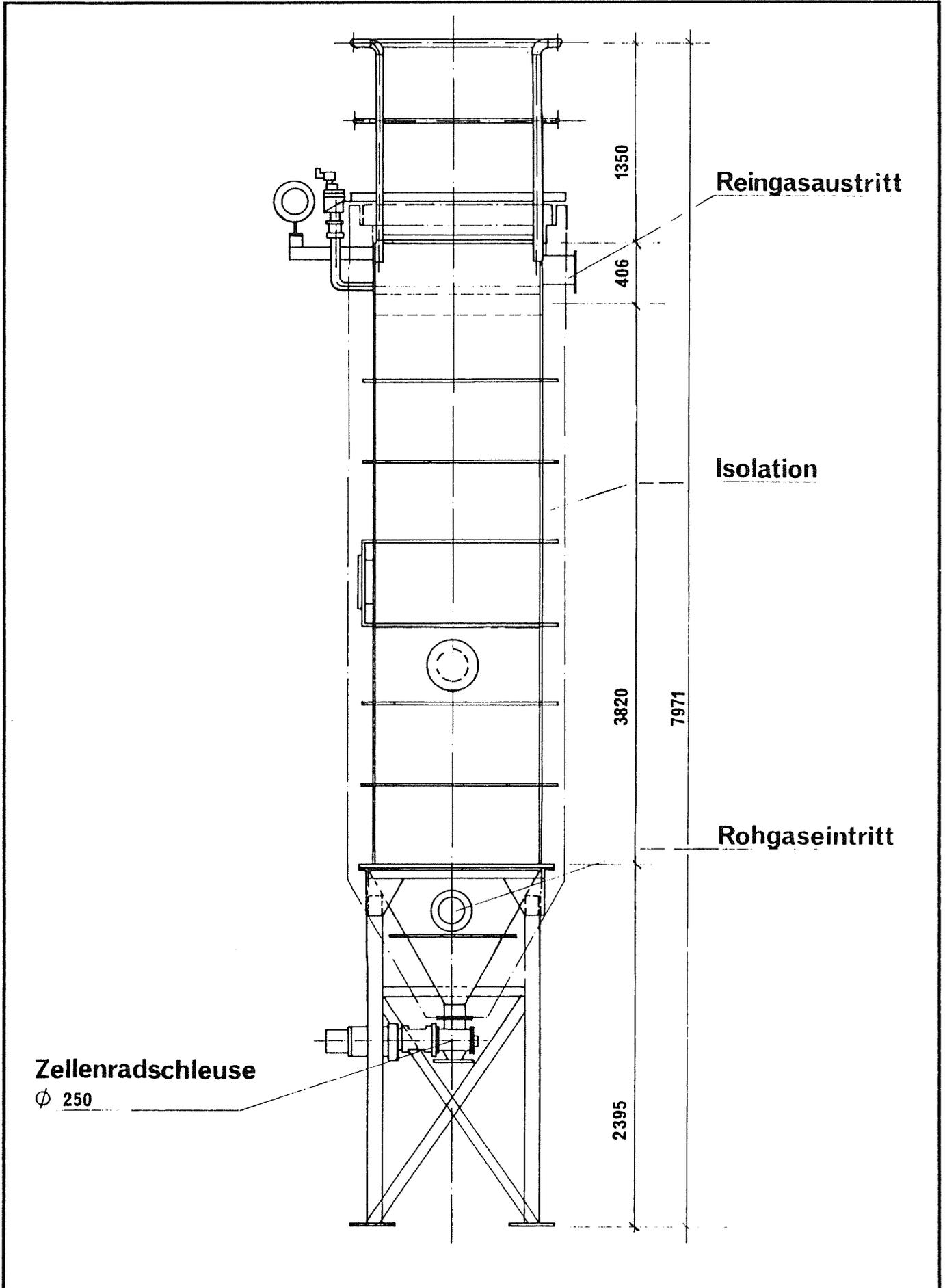


Abb. 21 Konstruktionszeichnung des Schlauchfilters

**Tab. 5 Technische Daten des Pulse-Jet Schlauchfilters**

Rauchgasvolumenstrom (bezogen auf 75 °C)	m <sup>3</sup> /h (i.B.f.)	1870
Anzahl der Filterkammern	Stck.	1
Anzahl der Filterschläuche	Stck.	20
Schlauchlänge	mm	3500
Schlauchdurchmesser	mm	160
Filterfläche	m <sup>2</sup>	34,1
Filterflächenbelastung	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *min	0,91
Filtermedium		PTFE- Membrane auf Dralon T- Nadelfilz
Spülluftbedarf bei 4 min. Umlauf	m <sup>3</sup> /h i.N.	18
Spülluftdruck	bar (ü)	6

### 3.3.3 Abreinigungssystem

Die Regenerierung der mit rezykliertem Produkt und Produktaerosol beaufschlagten Filterschläuche erfolgt mit Druckluftstößen in das Schlauchinnere.

Der Filter ist mit 4 Schlauchreihen à 5 Elementen ausgestattet, die reihenweise nacheinander abgereinigt werden. Die Abreinigung erfolgt on-line, d.h. ohne Unterbrechung des Filtrationsprozesses.

Die Druckluftstöße werden durch das Öffnen von extrem schnell arbeitenden Membranventilen erzeugt. Hierbei strömt Druckluft aus dem Vorratsbehälter über das Membranventil in die Blasrohre. Die Druckluft tritt aus den Blasrohrbohrungen über Injektoren in das jeweilige Filterelement ein und regeneriert dieses durch die Beschleunigung des Filtermediums sowie durch einen Rückspüleffekt.

Die Ansteuerung der Membranventile erfolgt differenzdruckabhängig.

### 3.3.4 Additivdosiersystem

Das Dosiersystem dient zur kontinuierlichen Beladung des Schlauchfilters mit einem Schüttgut zum Schutz des Filtermediums. Frühere Untersuchungen (FPaur et al., 1988, 1989) haben gezeigt, daß ein stabiler Filterbetrieb mit Off-Line-Cleaning und anschließendem Precoating oder On-Line-Cleaning mit Rezyklierung großer Produkt-/Additivmischungen möglich ist.

Da der On-Line-Betrieb verfahrenstechnisch die einfachere Lösung darstellt, wurde am Teststand AGATE-2 diese Variante installiert.

Hierbei wird das Gemisch aus Additiv (Gesteinsmehl) und Ammoniumsalz über die Zellenradschleuse aus dem Filterbunker ausgetragen und dem Vorratsbehälter des Dosiergeräts zugeführt. Die Dosierung erfolgt über einen Schneckenaus-trag, wobei das Gerät volumetrisch oder gravimetrisch betrieben werden kann. Nach dem Schneckenaus-trag wird der Feststoff mit einer pneumatischen Förderung in die Rohgaszuführung des Filters transportiert.

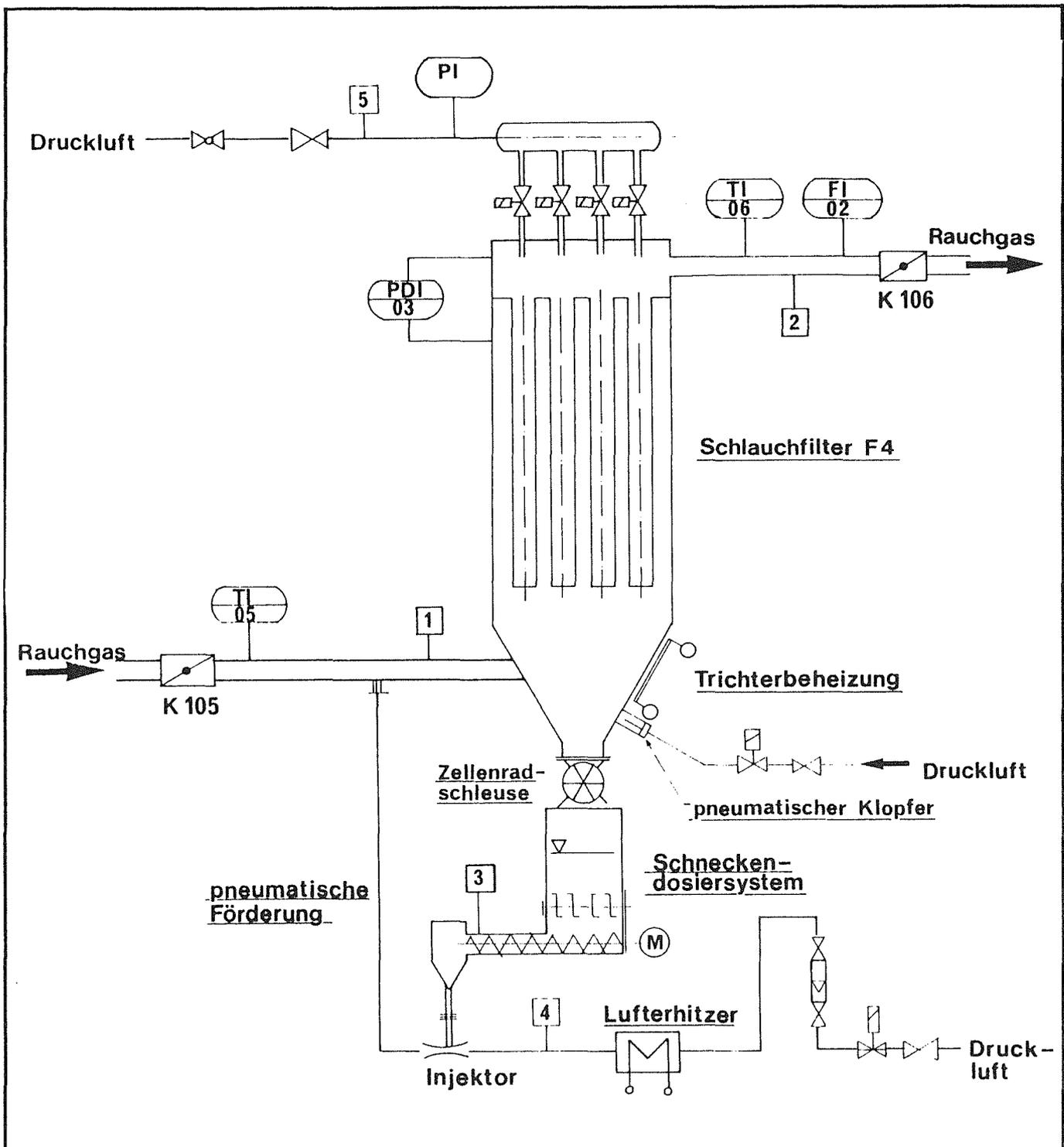
Da das Feststoffgemisch stark mit dem hygroskopischen Ammoniumsalz ange-reichert ist, muß die Tragluft über den Taupunkt des Rauchgases (60 °C) aufge-heizt werden.

### 3.3.5 Filterbetrieb

In Abb. 22 ist das Verfahrensfliessbild des Schlauchfilters dargestellt. Das Rauch-gas tritt über die Klappe K 105 mit einer Temperatur von 75 °C in den Filter ein. Die Filterflächenbelastung beträgt 0,9 m/min. bei einem Volumenstrom von 1870 m<sup>3</sup>/h (i.B.f.). Der Filter wird differenzdruckabhängig über die Membranven-tile abgereinigt. Pro Abreinigungsimpuls wird eine Druckluftmenge von 0,35 kg benötigt. Das abgereinigte Produkt fällt in den Staubsammelbehälter des Filters und wird über die Zellenradschleuse dem Additivdosiersystem zugeführt.

Unter Standardbedingungen werden ca. 80 kg/h der Produktmischung zur Anrei-cherung rezykliert.

Für die pneumatische Förderung dieser Produktmenge wird ein Luftstrom von 50 m<sup>3</sup>/h (i.N.f.) benötigt.



\* Feststoffmassenstrom nicht berücksichtigt

Stoffstrom-Nr.		1	2	3	4	5	Verfahrensfließbild Schlauchfilter F4 Teststand AGATE-2 KFK/LAF I Stand 05/90
Medium		Rauchgas vor Filter	Rauchgas nach Filter	Produkt-rezyklierung	Transport-luft	Druckluft	
Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h (i. N.f) m <sup>3</sup> /h (i. B.f)	1411 1873	1410 1873	- -	50 54,6	- -	
Dichte (bei Gasen im Normzustand)	kg/m <sup>3</sup>	1,252*	1,252	2285	1,283	1,283	
Massenstrom	kg/h	1849,6*	1764,7	80	64,2	0,35 kg pro Impuls	
Temperatur	°C	75	70	20	80	20	
Druck (absolut)	bar	0,973	0,958	-	1,2	7	

Abb. 22 Verfahrensfließbild Schlauchfilter

### **3.4 Schüttschichtfilter**

Als Alternative zum Gewebefilter soll zur Abscheidung des Produktaerosols ein kontinuierlich arbeitender Querstromschüttschichtfilter erprobt werden.

Der Filter zeichnet sich durch mehrere getrennte, vertikal angeordnete Schüttschichten aus. Das Gas durchströmt diese Schichten horizontal. Die einzelnen Schichten können getrennt bewegt und getrennt aus der Filtrationszone ausgeschleust werden. Das mit Produkt beladene Schüttgut wird mit einer Siebmaschine regeneriert und wieder über eine Fördereinrichtung der Filtration zugeführt.

Abb. 23 zeigt schematisch den Aufbau des Filters.

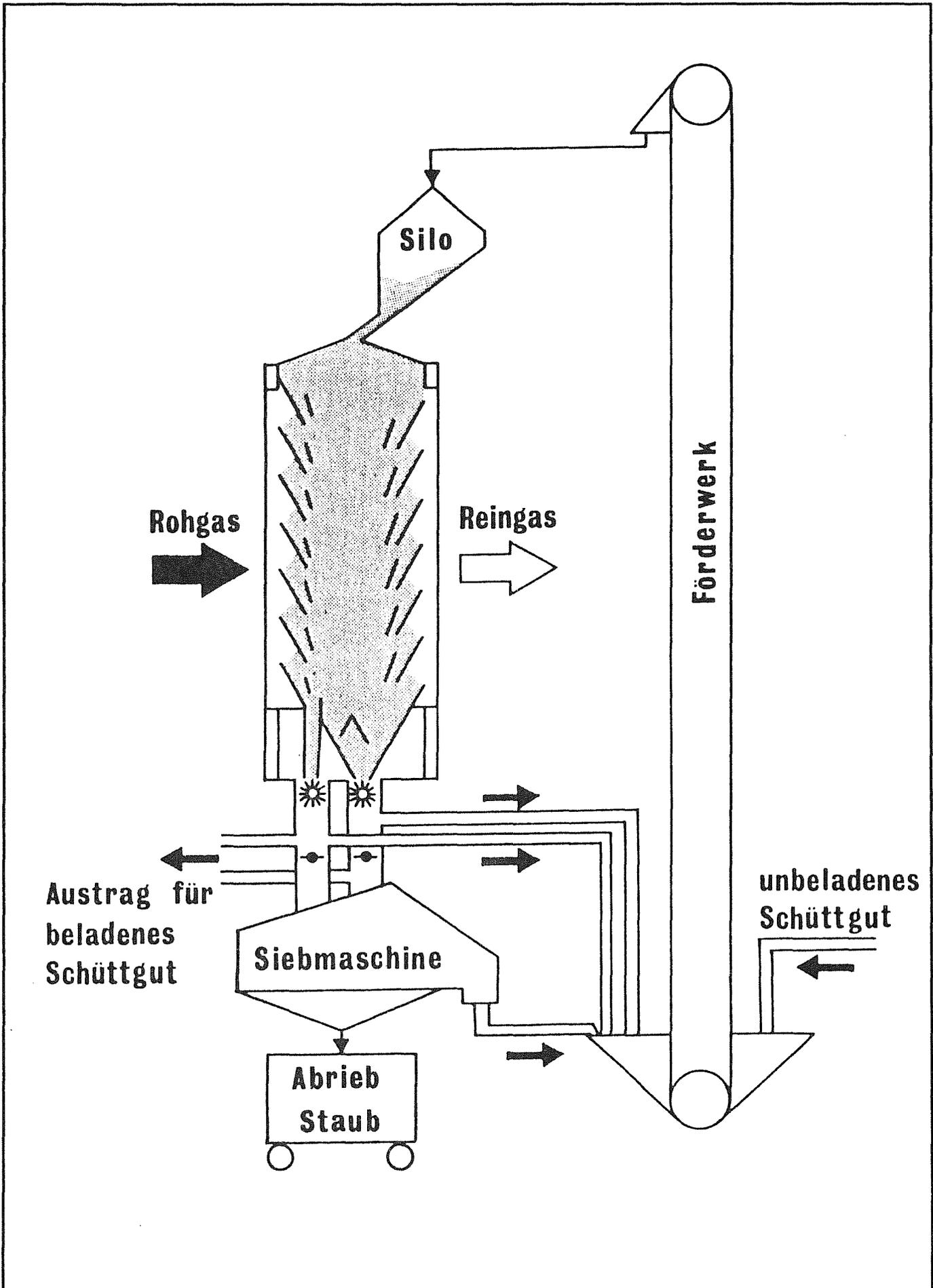


Abb. 23 Verfahrensschema QS-Filter

### 3.5 Nebenaggregate

#### *Luftherhitzer*

Der An- und Abfahrprozeß der Anlage erfolgt mit Luft, die über einen Elektroerhitzer erwärmt wird. Der Erhitzer hat eine maximale Heizleistung von 50 kW und wird über ein Thyristor gesteuert. Zur Absicherung der Heizstäbe gegen Überlastung, z. B. bei Strömungsausfall (Eintrittsklappe geschlossen), ist das Gerät mit einem selbsttätig arbeitenden Temperaturbegrenzer ausgestattet.

#### *Gebläse*

Zum Rauchgastransport durch die Versuchsanlage befindet sich am Anlagenende das Saugzuggebläse.

Durch diese Anordnung herrscht in der gesamten Anlage Unterdruck. Der Rauchgasvolumenstrom wird mit einer Blendenmessung bestimmt und über die Gebläsedrehzahl eingestellt, wobei der Gebläsemotor über einen Frequenzumrichter angesteuert wird.

Entsprechend der Gebläsekennlinie kann z. B. bei einer Druckerhöhung von 90 mbar ein Durchsatz von 1600 m<sup>3</sup>/h erreicht werden.

#### *Rußfilter*

Nach der Teilstromentnahme aus dem gemauerten Rauchgaskanal zwischen Dampfkesselanlage und Kamin erfolgt eine Vorfiltration des Rauchgases. Je nach Kesselleistung hat das Rauchgas an dieser Stelle eine Temperatur von 180 - 250 °C. Bei dem Filter handelt es sich um ein Edelstahlgehäuse, das mit zwei hitzebeständigen Vorfiltern der Fa. Vokes ausgestattet ist. Die Filterelemente haben eine Abmessung von 610 x 610 x 50 mm.

#### *Wasserrückkühler*

Zur Rückkühlung des in der Versuchsanlage benötigten Kühlwassers wurde ein geschlossener Kreislauf mit einem Rückkühler installiert. Das Kälteaggregat hat eine Kühlleistung von 15 kW und arbeitet mit einem Luft-/Kältemittel-Wärmetauscher. Die Zuluft für den Wärmetauscher wird direkt aus dem Gebäude entnommen, die Abluft über einen Kanal nach außen abgeführt.

### 3.6 Versorgungssysteme

#### *NH<sub>3</sub>-Versorgung*

Zur Neutralisation der durch die Bestrahlung gebildeten Säuren wird dem Rauchgas Ammoniak zudosiert. Das Ammoniak wird direkt gasförmig aus einem Vorratsfaß entnommen, wobei dieses als Verdampfer dient, da Ammoniak entsprechend den physikalischen Daten flüchtig vorliegt (s. Abb. 24). Die Messung und Regelung des Ammoniakdurchsatzes erfolgt mit einem Mass Flow Controller (MFC), der für einen maximalen Durchsatz von 50 l/min. ausgelegt ist.

Die Ammoniakzugabe kann wahlweise an verschiedenen Stellen der Anlage erfolgen.

#### *SO<sub>2</sub>- und NO-Versorgung*

Zur Erhöhung der Schadgaskonzentration des Rauchgases ist eine Zudosierung von SO<sub>2</sub> und NO vorgesehen.

Die Messung und Regelung der Volumenströme erfolgt mit einem Mass Flow Controller.

Da SO<sub>2</sub> flüchtig im Vorratsbehälter vorliegt, erfolgt die Verdampfung direkt in diesem (siehe Abb. 25).

#### *Sonstige Versorgungssysteme*

Für den Betrieb der Anlage und der Meßtechnik werden des weiteren folgende Versorgungssysteme benötigt:

- Druckluft
- Leitungswasser
- VE-Wasser
- getrocknete Luft (Nullgas für die Prozeßphotometer)
- Prüfgasversorgung für die Prozeßphotometer
- Stickstoffversorgung

## Ammoniakdosierstellen

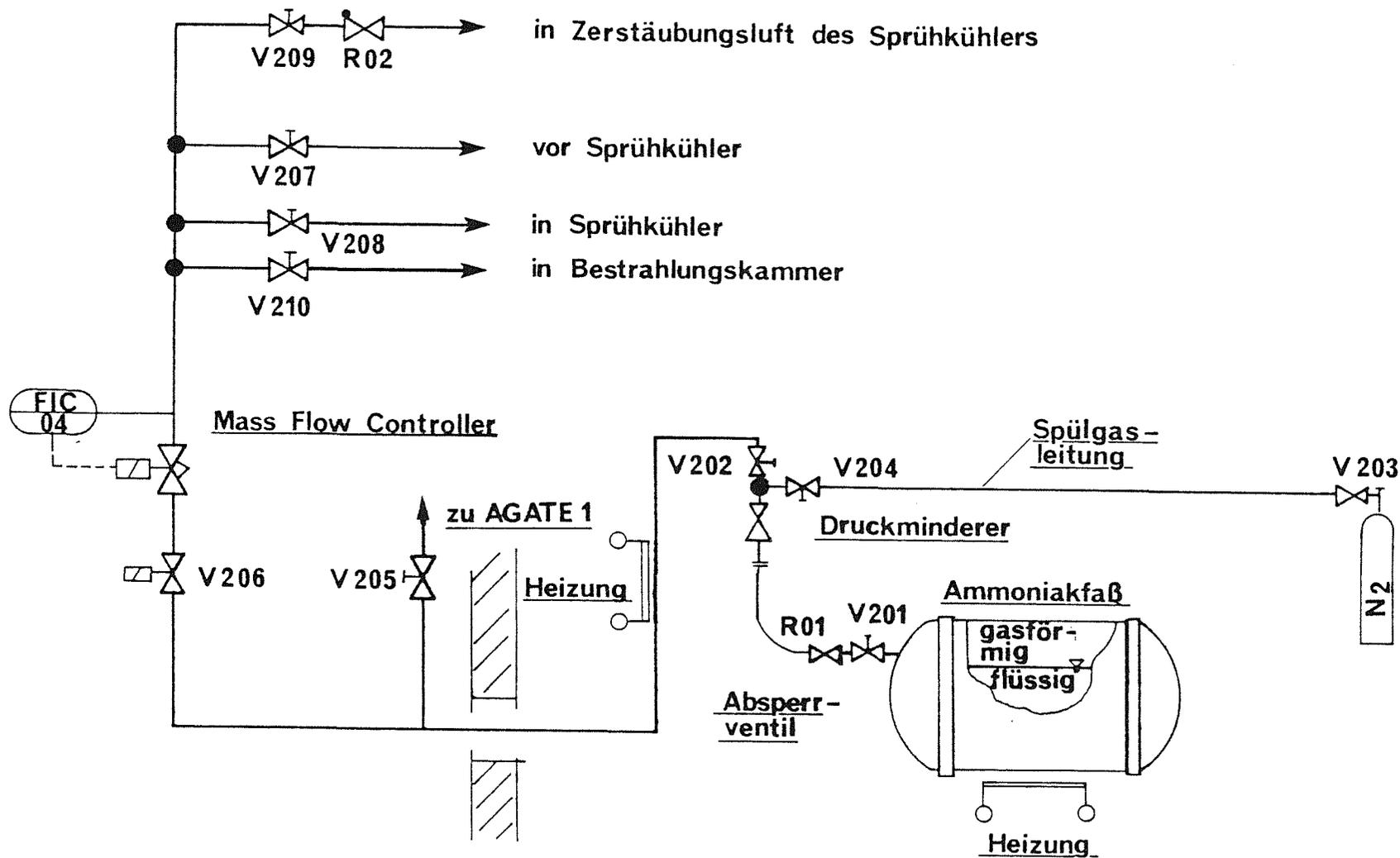


Abb. 24 NH<sub>3</sub>-Versorgung

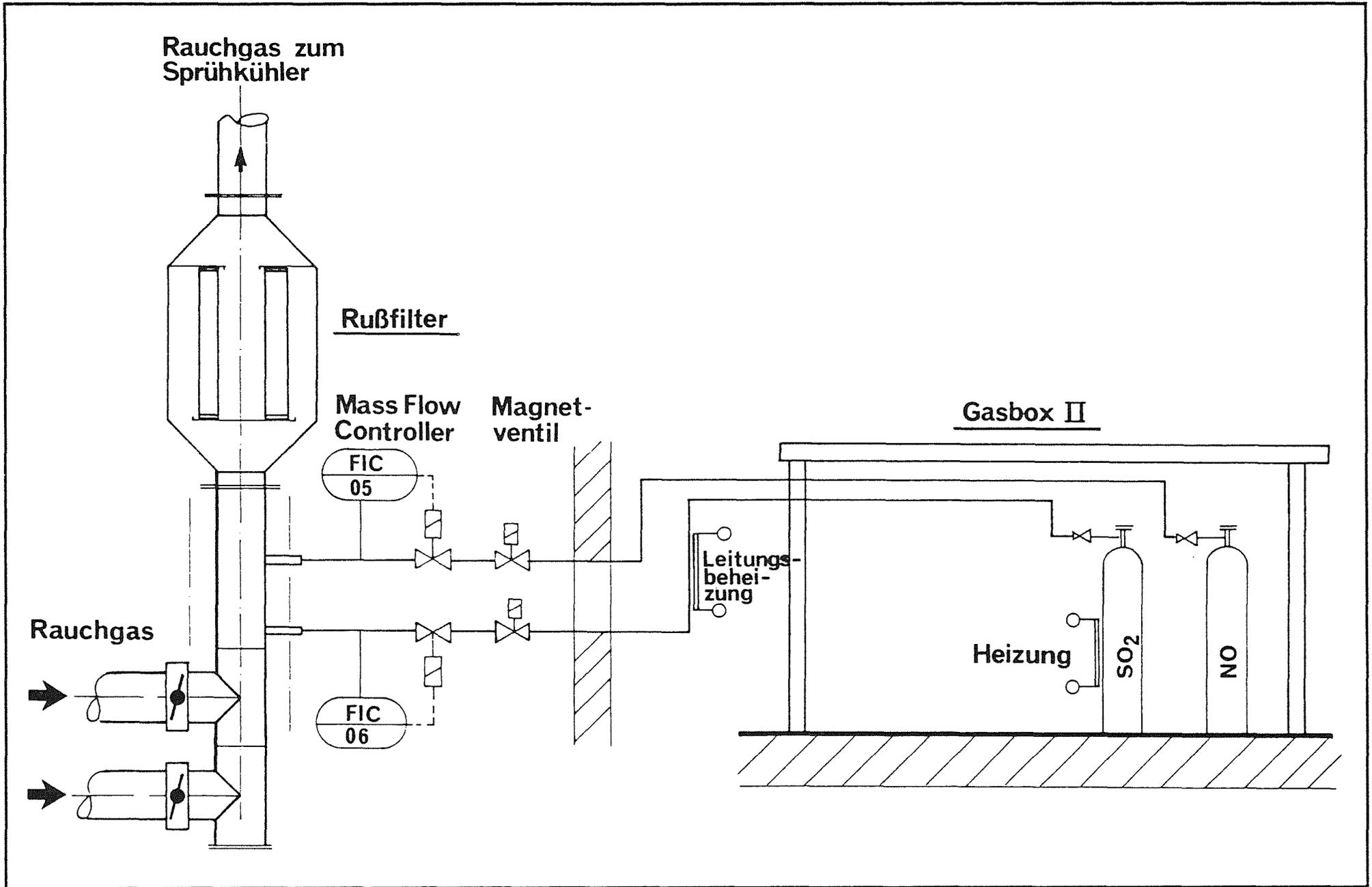


Abb. 25 SO<sub>2</sub>- und NO-Versorgung

## **4. Meß- und Leittechnik**

### **4.1 Betriebsmeßtechnik**

Die MSR-Technik an der Versuchsanlage kann in die Betriebs- und Versuchsmeßtechnik (Gas- und Partikelmessung) unterteilt werden. Zur Betriebsmeßtechnik gehören alle MSR-Aufgaben, die zum Anlagenbetrieb notwendig sind.

Tabelle 6 enthält eine Meßstellenauflistung.

Zusätzlich ist in Abb. 3 die Lage der Meßstellen ersichtlich.

Die verwendeten Abkürzungen sind nach DIN 19227 genormt. Die Betriebsmeßtechnik kann in folgende Gruppen unterteilt werden:

- Druckmessung
- Temperaturmessung
- Durchflußmessung
- sonstige Meßaufgaben.

Sämtliche Meßgrößen werden mit Standardsignalen (0 - 20 mA , 0 - 10V, Pt 100 in 4-Leitertechnik) an das Prozeßleitsystem zur weiteren Bearbeitung übertragen. Bei der Verwendung von Standardsignalen ist an der Meßstelle der Aufnehmer mit einem Signalumformer ausgestattet. Alle Steuer- und Regelvorgänge werden vom Prozeßleitsystem übernommen.

Tab. 6 Meßstellenliste

Druck- bzw. Differenzdruckmessung	PDI 01	Differenzdruck über den Rußfilter F3
	PI 02	Absolutdruck in der Anlage
	PDI 03	Differenzdruck über den Schlauchfilter F4
	PDI 04	Differenzdruck der Gesamtanlage
Temperaturmessung	TIC 01	Gaseintrittstemperatur
	TIC 02	Temperatur nach Sprühkühler
	TI 03	Bestrahlungskammer-Eintrittstemperatur
	TI 04	Bestrahlungskammer-Austrittstemperatur
	TI 05	Schlauchfilter-Eintrittstemp.
	TI 06	Schlauchfilter-Austrittstemp.
	TI 07	Temperatur nach Gebläse G2
	TI 08	Luftherhitzer-Austrittstemp.
Durchflußmessung	FIC 01	Rauchgasdurchsatz gemessen vor Sprühkühler
	FI 02	Rauchgasdurchsatz gemessen nach Schlauchfilter
	FIC 03	Wasserdurchsatz des Sprühkühlers
	FIC 04	NH <sub>3</sub> -Dosierung
	FIC 05	SO <sub>2</sub> -Dosierung
	FIC 06	NO-Dosierung

## 4.2 Prozeßleittechnik

Aufgabe der Prozeßleittechnik ist die Überwachung und Steuerung der wesentlichen Anlagenfunktionen bei minimalem Personaleinsatz. Zusätzliche Aufgabe ist die Visualisierung und Archivierung der im Versuchsbetrieb erhaltenen Daten. Aufgrund der wechselnden und im Vorfeld der Anlagenplanung noch nicht vollständig zu spezifizierenden Anforderungen des Versuchsbetriebs waren für die Auswahl des letztendlich installierten Systems die Kriterien *Flexibilität und Ausbaubarkeit* (Modularität) wesentlich. Somit war eine konventionelle MSR-Technik auf der Basis von Einzelreglern nicht geeignet. Aufgrund der Vielzahl der Aufgaben konnte die Leittechnik kostengünstig als PC-gestütztes digitales Automatisierungssystem realisiert werden. Die Tab. 7 gibt einen Überblick der Detailaufgaben des Prozeßleitsystems.

**Tab. 7: Übersicht der Aufgaben und Anforderungen für das Prozessleitsystem und die Datenerfassung am Teststand AGATE-2**

- Überwachung, Steuerung und Regelung der Prozessgrößen
- Erfassung und Visualisierung der Prozessgrößen
- Archivierung, Visualisierung und Auswertung der Prozessparameter und Meßwerte externer Geräte
- On-Line Manipulation von Steuer- und Regelparametern
- Maximale Flexibilität und Ausbaubarkeit des Systems, um es leicht zukünftigen Aufgabenstellungen anzupassen.
- Ausgereiftes und standardisiertes System, welches auch bei zukünftigen Demonstrationsanlagen eingesetzt werden kann.
- Führung des Prozesses von einer zentralen Warte (Ausbaubarkeit für eine zweite Warte ist vorzusehen).
- Fließbilddarstellung auf hochauflösenden Monitoren mit Teilbildanwahl und mit Einblendung aktueller Meßwerte
- Schaltfunktionen direkt im Fließbild über Tastatur oder andere Eingabegeräte durchführbar
- Echtzeituhr mit Programmiermöglichkeit für Versuchsabläufe

- Protokollsystem mit zeitfolgerichtigem Fehlerprotokoll, Prozessbedienungs-, Prozessdaten- und Prozesszustandsprotokoll (Ausgabe manuell, zyklisch, ereignisorientiert über Drucker)
- Softwarepakete für Anlagensteuerung, -überwachung, -regelung
- Strukturierung des Leitsystems durch Standardbausteine
- Software für Datenerfassung, -archivierung, -visualisierung und -auswertung

Im folgenden wird zunächst die Hardware und anschließend die Software beschrieben.

Der Batchcontroller ist ein Zweiprocessorsystem zum Erfassen analoger und digitaler Prozeßdaten sowie zum Steuern und Regeln von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Prozeßabläufen. Im Batchcontroller können Ein- und Ausgabesignale beliebig verknüpft werden und durch entsprechende Programmanweisungen umgerechnet und verarbeitet werden. Zusätzlich verfügt der Batchcontroller über 4 unabhängige Ablaufsteuerungen (à 128 Schritte) und 8 Prozeßregelkreise.

Der über P-Bus am Batchcontroller angeschlossene PC übernimmt die Kommunikation von Benutzer zum Batchcontroller. Der installierte PC ist ein Sicomp 386-20, der unter dem Betriebssystem OS-2 läuft. Im PC werden alle Aufgaben, die umfangreiche Berechnungen erfordern, z. B. Visualisierung und Archivierung der Daten bearbeitet. Der PC verfügt über die heute übliche Standard-Peripherie.

#### 4.2.1 Beschreibung der Hardware

Das Prozeßleitsystem (Münzer und Diehl) besteht aus folgenden Einzelkomponenten (s. a. Abb. 26):

- E/A-Komponenten (Ein-/Ausgabe)
- Batchcontroller
- Personal Computer

Die E/A-Komponenten stellen die Schnittstelle zwischen Prozeß- und Leitsystem dar. Als E/A-Komponenten kommen Analog/Digital-Wandler und Widerstandsthermometer-Eingänge (4-Leitertechnik) zum Einsatz. Die digitalen und analogen Ein- und Ausgänge sind potentialfrei aufgebaut, so daß auf Meßumformer teilweise verzichtet werden kann.

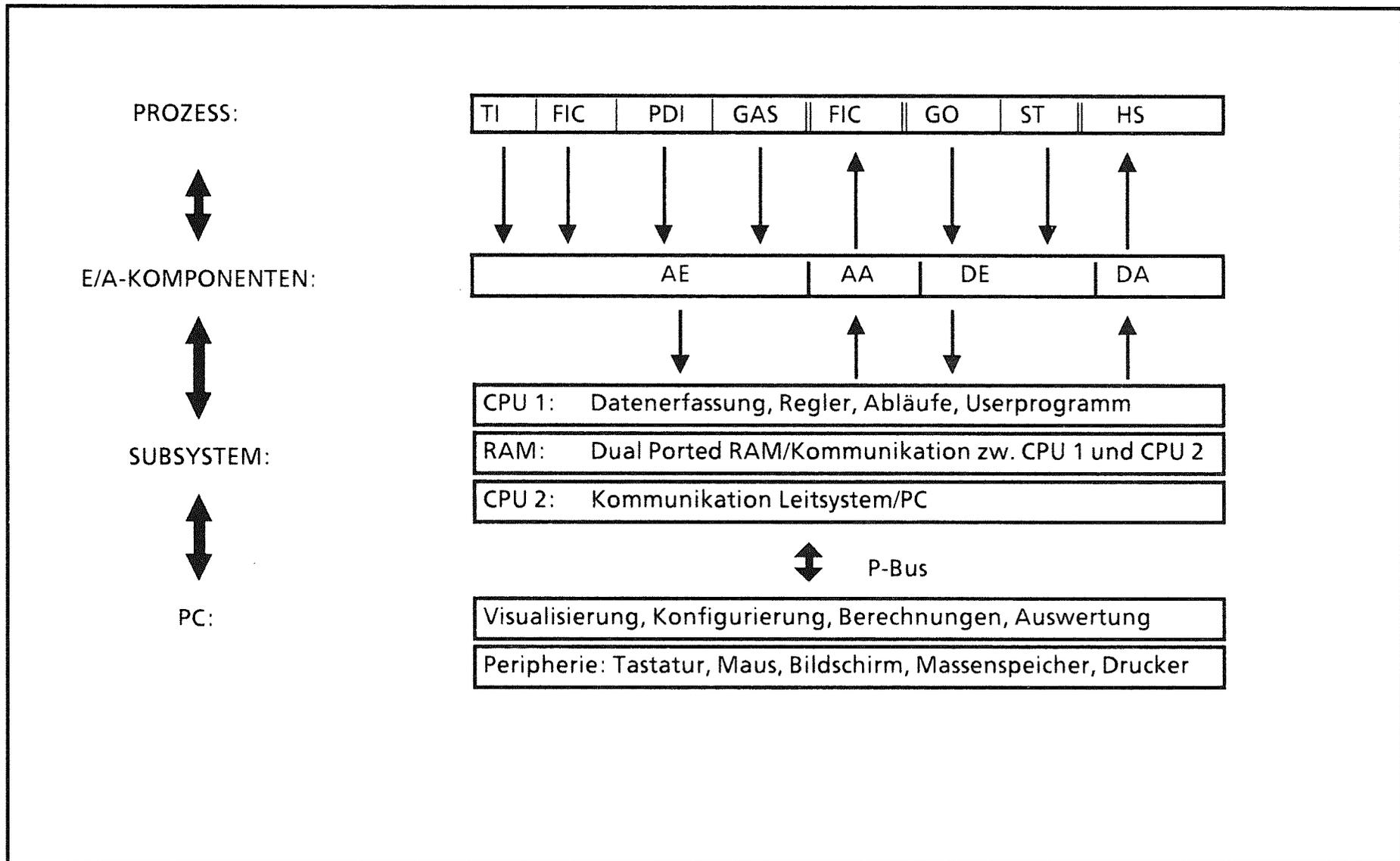


Abb. 26 Schematischer Aufbau und Funktionen der Prozeßleittechnik am Versuchsstand AGATE-2

Im einzelnen ist das Leitsystem mit folgenden Modulen bestückt:

- Analogeingänge (Anschluß von Druckaufnehmer, PT-100, Gasmeßtechnik)
- Analogausgänge (Ansteuerung von Gebläse, Durchflußreglern)
- Digitaleingänge (Rückmeldungen für Klappen, Schütze)
- Digitalausgänge (Ansteuerung für Klappen, Ventile, Schütze)

#### 4.2.2 Beschreibung der Software

Die Software unterteilt sich in Software für den Batchcontroller und die Software für den PC.

Die Batchcontroller-Software besteht aus der sogenannten *Firmware*, die alle Routine-E/A-Operationen, Regler-, Alarm- und Ablaufsteuerungen bearbeitet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, anwenderspezifische Programme zu verwenden. Diese sind ebenso wie die Firmware in FORTH zu programmieren und basieren auf den in der Firmware vorhandenen FORTH-Funktionen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die an AGATE realisierte zyklische Prozeßüberwachung und die Berechnung von Reglerdaten (z. B. für NH<sub>3</sub>-Stöchiometrie-Regler, Durchsatz-Regler) zu erwähnen. Weiterhin wurden Programme für die Prozeß-Steuerung vom Fließbild aus und für spezielle Steuerungen (z. B. Zellenrad-schleuse F4) implementiert.

Zusätzlich zu den hardwaremäßig vorhandenen Kanälen können durch FIRMWARE-Funktionen sogenannte *Pseudo-E/A-Kanäle* definiert werden. Diese Kanäle werden von der PC-Software wie physikalische Kanäle behandelt (z. B. für Regler-Soll/Ist-Werte).

Die käufliche Standard-Software für den PC (ASS) übernimmt alle rechenaufwendigen Operationen, die auf der Subsystemebene nicht ausgeführt werden können wie z. B.:

- Fließbilddarstellung
- Trenddarstellung von Meßwerten
- Tabellendarstellung von Meßwerten
- Gruppendarstellung
- Reglerdarstellung
- Kreisbilder für E/A-Signale (physikalische, Pseudo- und virtuelle Kanäle)
- On-Line-Prozeß-Alarm

- Batchbearbeitung (Ablaufsteuerung)
- Datenverwaltung und -auswertung

Die Darstellung des Gesamtprozesses und von Teilbereichen des Prozesses erfolgt über folgende Fließbilder:

- Fließbild der Gesamtanlage (FB A)
- Fließbild der Rohgasseite (FB F3)
- Fließbild des Sprühkühlers (FB SKL)
- Fließbild des Elektronenbeschleunigers (FB EB2)
- Fließbild des Schlauchfilters (FB F4)
- Fließbild des Schüttschichtfilters (FB SSF)

Die Fließbilder werden mit einem Fließbildeditor in Farbe erstellt und können bei Bedarf leicht wechselnden Erfordernissen angepaßt werden. Über die Fließbilder werden dem Anlagenfahrer wesentliche Informationen zum Prozeßablauf mitgeteilt.

Zudem besteht die Möglichkeit, durch "Mausklicken" auf Schaltflächen direkt in den Prozeß einzugreifen.

Die weiteren Informationen zum Prozeßverlauf können mittels frei konfigurierbarer (online) Trend- und Tabellendarstellungen von Meßwerten erhalten werden. Durch die Zusammenfassung von Signalen innerhalb von Gruppendarstellungen (Sprühkühler, EB 2 usw.) wird ein übersichtliches Alarmwesen ermöglicht. Die Reglermasken und die E/A-Kreisbilder geben Detailinformationen und können jederzeit on-line konfiguriert werden. Die Archivierung der Daten erfolgt auf 3 1/2" Disketten. Die Daten können in D-base-Format umgewandelt werden und dann mit Tabellenkalkulationsprogrammen (MS-Excel) ausgewertet werden.

Eine detaillierte Beschreibung der ASS-Software wird von Münzer und Diehl (1990) gegeben.

#### **4.2.3 Erste Betriebserfahrungen**

Die ersten Erfahrungen mit dem digitalen Leitsystem zeigen, daß die Erwartungen und Anforderungen insbesondere im Hinblick auf die Flexibilität und den Umfang der Systemfunktionen übertroffen wurden.

Vorteilhaft für den Versuchsbetrieb erweist sich auch die Benutzernähe der Hard- und Software. So konnten ohne wesentliche Unterstützung des Herstellers alle für die Inbetriebnahme der Anlage wichtigen Funktionen in kurzer Zeit durch den Anwender konfiguriert und programmiert werden.

Probleme beim Betrieb ergaben sich vor allem durch die Empfindlichkeit des Subsystems bezüglich Einstreuung von Störsignalen und bei Schwankungen der Netzspannung. Diese Probleme konnten jedoch nach Rücksprache mit dem Hersteller beseitigt werden. Softwareseitig erfordert die Programmierung des Systems einige Erfahrung. Insbesondere die bedienerunfreundliche Behandlung von Programmfehlern führte am Anfang zu mehreren Systemabstürzen.

### 4.3 Gasmeßtechnik

Die Gasmeßtechnik ist unterteilt in das Roh- und Reingas-Analysen-System (siehe Abb. 27).

Die Probenahmestelle des Rohgas-Analysen-Systems befindet sich nach der Rußabscheidung jedoch noch vor der  $\text{NH}_3$ -Zudosierung.

Hier erfolgt eine Quantifizierung des unbehandelten Rauchgases.

Die  $\text{NH}_3$ -Rohgaskonzentration wird aus der zudosierten  $\text{NH}_3$ -Menge berechnet, da wegen der thermischen  $\text{SO}_2/\text{NH}_3$ -Reaktion diese meßtechnisch nicht bestimmbar ist. Zur Untersuchung der Gasabscheidung im Produktfilter besitzt das Reingas-Analysen-System je eine Probenahmestelle vor und hinter dem Filter. In Abb. 28 ist das Reingas-Analysen-System dargestellt.

#### 4.3.1 Meßgeräte und Meßprinzip

Zur kontinuierlichen Messung der Rauchgaskomponenten werden nichtdispersive Prozeßphotometer (Spectran, BGS), die im infraroten und sichtbaren Spektralbereich arbeiten, eingesetzt.

Man nutzt dabei die Tatsache, daß Moleküle in ganz bestimmten molekülspezifischen Wellenlängenbereichen Licht absorbieren.

Diese molekülspezifischen Absorptionsbanden ermöglichen die selektive Messung einzelner Gase.

Für die Intensitätsänderung gilt das Lambert-Beer'sche Gesetz. Die Spectran-Prozeßphotometer arbeiten nach dem Einstrahl-Prinzip, wobei zur Unterdrückung von Nullpunktsdriften und Querempfindlichkeiten das Bifrequenz-Verfahren oder die Gasfilter-Korrelationstechnik angewendet wird.

Bei der Bifrequenztechnik erfolgt die Unterdrückung der Querempfindlichkeiten durch die Auswahl von Meß- und Referenzwellenlängen, bei denen keine Absorption durch Störkomponenten erfolgt. Bei der Gasfilter-Korrelationstechnik können Querempfindlichkeiten selbst dann unterdrückt werden, wenn die Banden der Stör- und Meßkomponenten sich überlagern. Durch die Bifrequenz- und Gasfilter-Korrelationstechnik erhält man eine hohe Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit, da folgende Effekte keine Auswirkung auf das Meßsignal haben:

- Änderung des optischen Transmissionsgrades der Küvette (Fensterverschmutzung)
- Intensitätsänderung des Strahlers
- Empfindlichkeitsänderung des Detektors

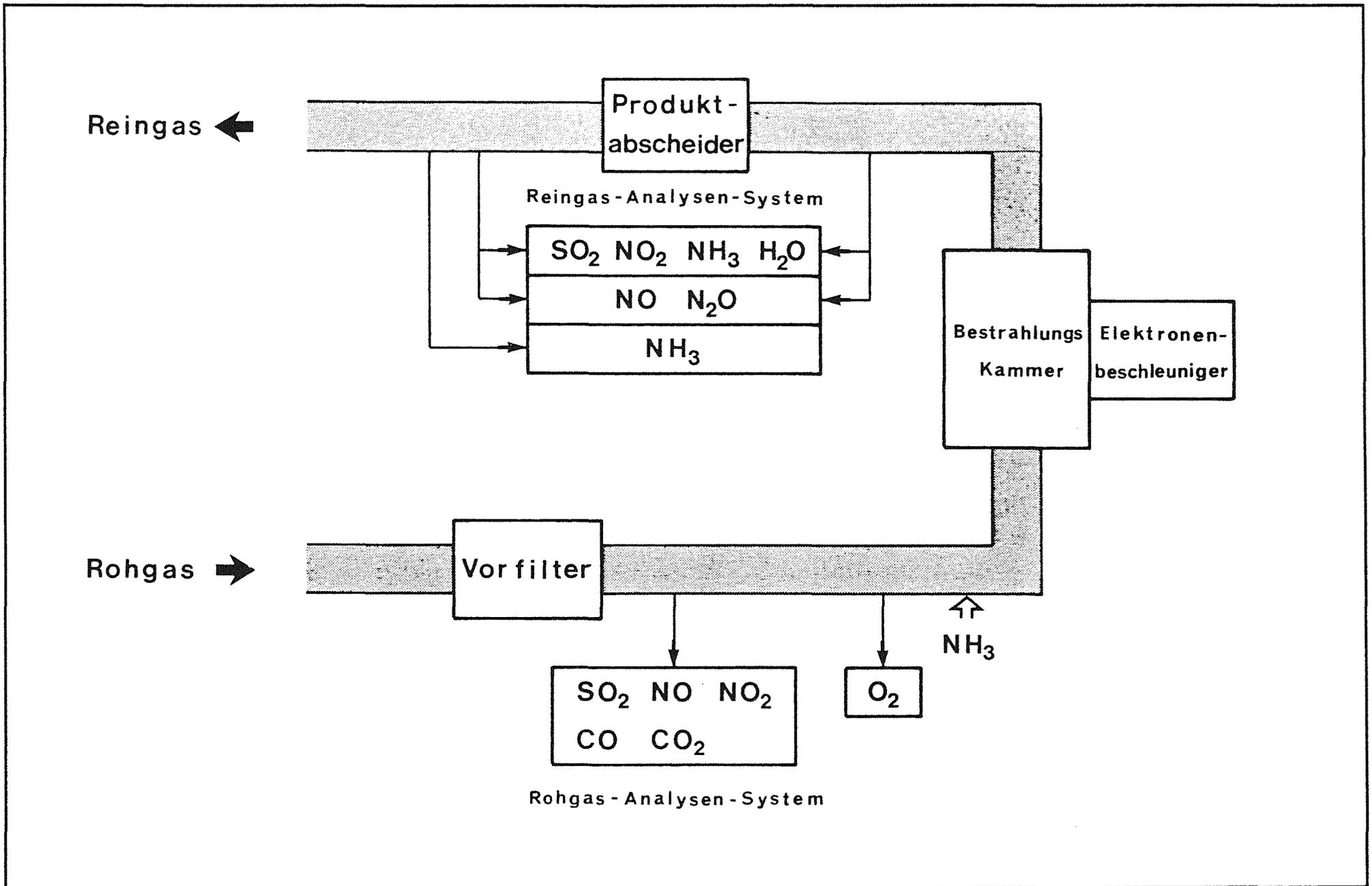
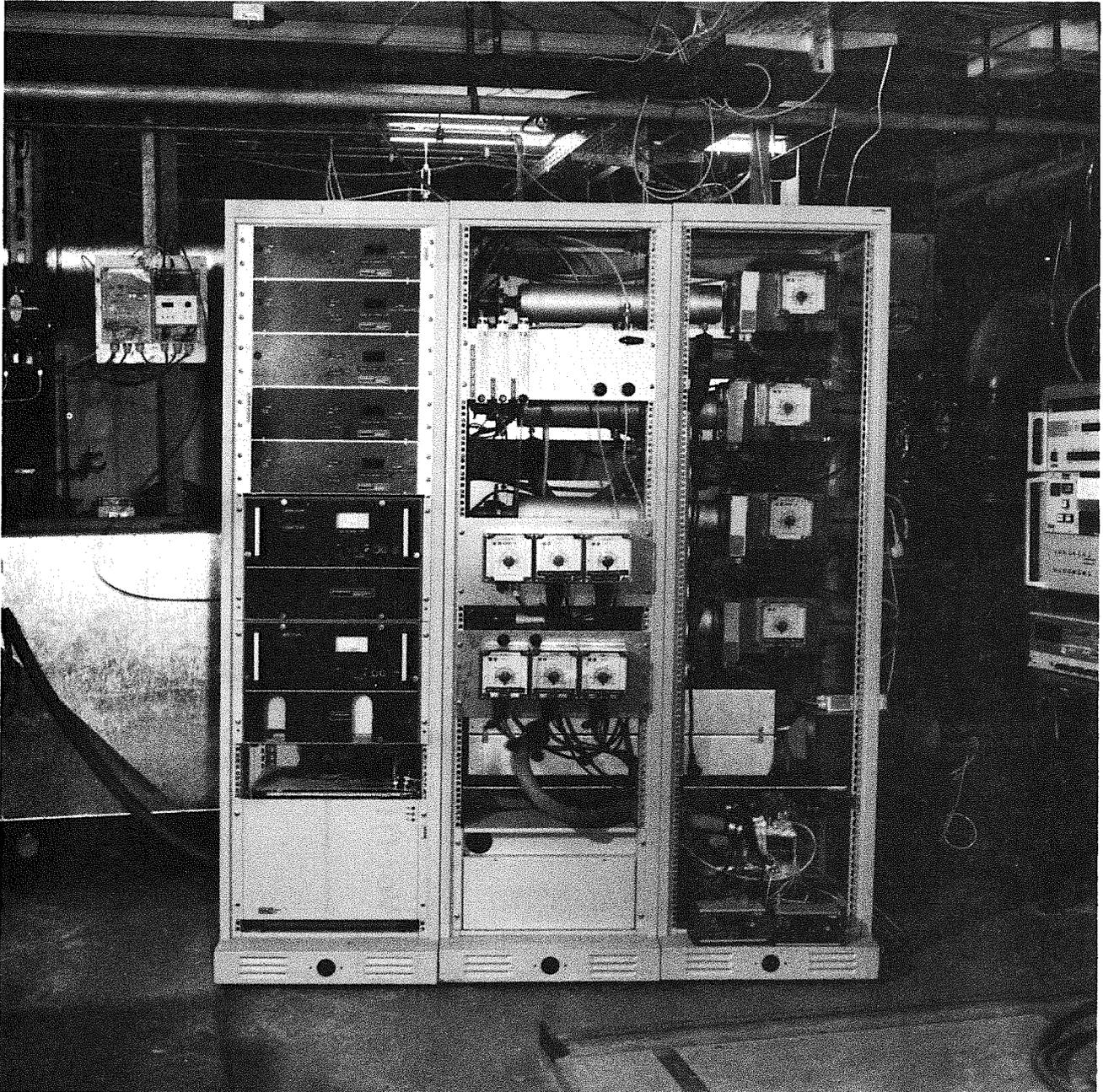


Abb. 27 Gasmess-technik Teststand AGATE-2



**Abb. 28**     **Reingas-Analysen-System**

### *Bifrequenz-Verfahren* (siehe Abb. 29)

Bei dem Bifrequenz-Verfahren sitzen zwei Interferenzfilter auf einem rotierenden Filterrad direkt vor dem Detektor.

Die Transmissionskurve des Meßfilters wird so ausgewählt, daß sie mit der Absorptionsbande der Meßkomponente weitgehend zusammenfällt.

Die Transmissionskurve des Referenzfilters liegt in einem Spektralbereich, in welchem keine Beeinflussung durch die Meßkomponente erfolgt.

### *Gasfilter-Korrelationstechnik* (siehe Abb. 29)

Liegen im Meßmedium Störkomponenten vor, wobei sich die Banden der Meß- und Störkomponente überlagern, so ermöglicht die Gasfilter-Korrelationstechnik diese Messung.

Hierbei befindet sich auf dem direkt vor dem Detektor rotierenden Filterrad eine Miniaturküvette und eine Öffnung.

Die Miniaturküvette enthält hochkonzentriertes Gas der zu messenden Komponente, dadurch wird die Strahlung, die im Absorptionsbereich der Meßkomponente liegt, ausgeblendet.

Das Signal wird dann nur noch durch die Störkomponente beeinflusst.

Der Interferenzfilter vor dem Detektor dient zur Eingrenzung des Spektralbereichs der Strahlungsquelle.

### **4.3.2 Meßgasaufbereitung**

Durch eine geeignete Meßgasaufbereitung muß Sorge getragen werden, daß das Meßgas ohne Konzentrationsänderung bzw. mit einer bekannten Änderung in das Meßsystem transportiert wird.

Die eingesetzten Spectran Prozeßphotometer können bezüglich der Meßtemperatur in Heiß- und Kaltgeräte unterteilt werden. Entsprechend dieser Unterteilung ist eine verschiedenartige Meßgasaufbereitung notwendig.

Besonders die unkontrollierte Kondensierung von Wasser muß im gesamten System verhindert werden.

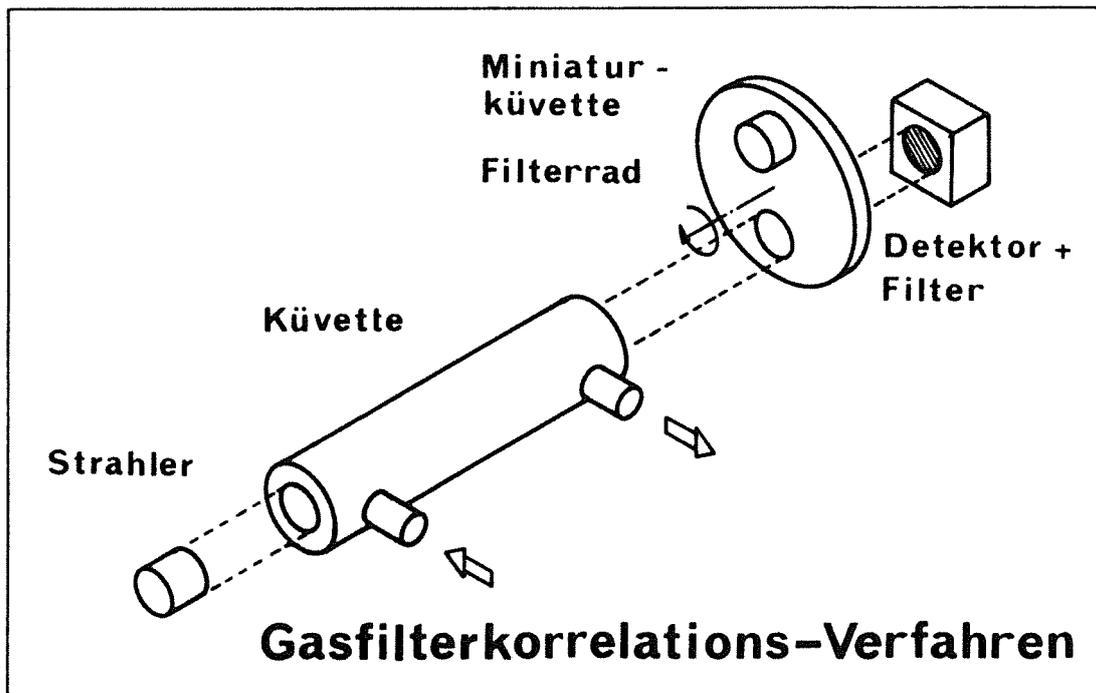
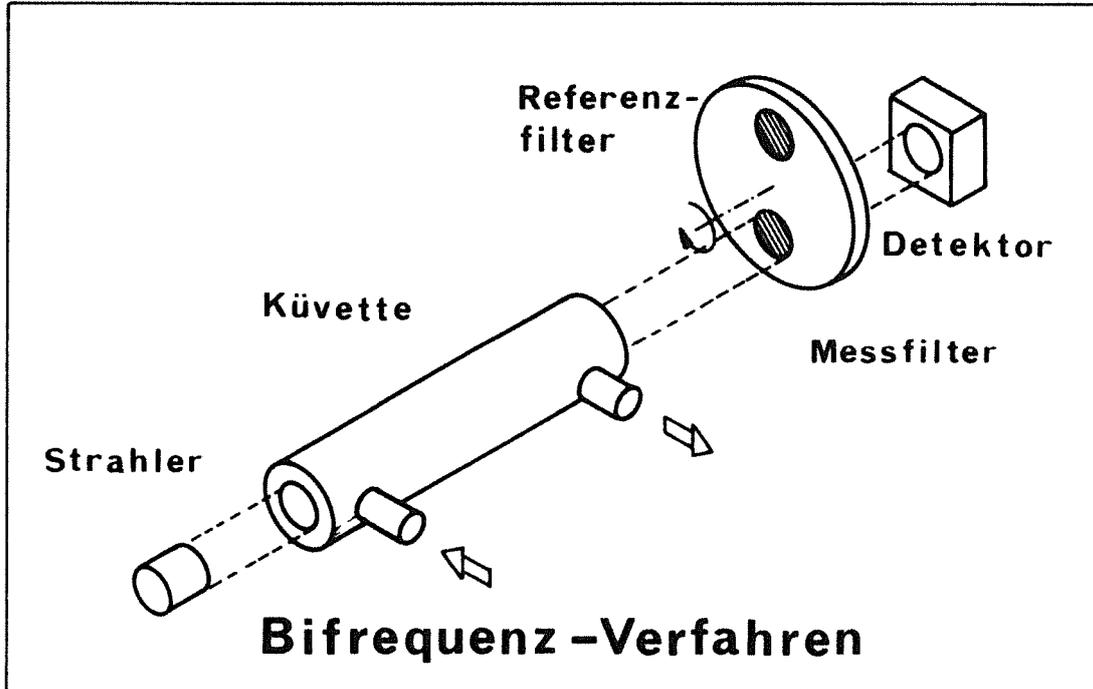


Abb. 29 Meßprinzip Einstrahl-Photometer

Diese Forderung wird erreicht durch eine konsequente Meßgasbeheizung und definierte Abkühlung in einem den Kaltgeräten vorgeschalteten Meßgaskühler bzw. durch die Beheizung der Meßküvette (Heißgeräte).

Zum anderen ist eine quantitative Abscheidung fester Bestandteile (Produkt-aerosol, Ruß bzw. Flugasche) notwendig, wozu beheizte Glasfaserfilter verwendet werden.

Das Reingas-Analysen-System ist nach der Bestrahlungskammer installiert. Wahlweise können hier Gasproben vor und nach dem Produktabscheider entnommen werden. Problematisch ist hier vor allem die Messung wegen einer möglichen  $\text{SO}_2/\text{NH}_3$ -Reaktion, da diese Komponenten bei ungenügender Beheizung miteinander zu Ammoniumsalzen reagieren. Um diese unerwünschten Reaktionen zu verhindern, hat sich eine reingasseitige Beheizung auf  $200\text{ }^\circ\text{C}$  bewährt.

Bei einigen Gaskomponenten ist der Einsatz eines Gaskühlers vor dem Meßgerät ausgeschlossen. Dies gilt natürlich für  $\text{H}_2\text{O}$ , außerdem für die im Kühlerkondensat löslichen Gase wie  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_2$ .

Die reingasseitige Messung von  $\text{NO}$  und  $\text{N}_2\text{O}$  kann dagegen wie auf der Rohgasseite in Kaltgeräten erfolgen.

#### 4.3.3 Störeinflüsse

Bedingt durch das Meßprinzip müssen folgende Störeinflüsse durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden:

- Querempfindlichkeit
- Absorption der Meßkomponenten im Kühlerkondensat
- Volumenänderung durch Kondensation des Wasserdampfes
- Nullpunktsdrift
- Druckänderungen in der Meßküvette
- Memory-Effekte (besonders bei der  $\text{NH}_3$ -Bestimmung im Meßbereich kleiner 30 ppm)

### *Querempfindlichkeiten*

Querempfindlichkeiten treten auf, wenn sich die Absorptionsbande der Meßkomponente mit der eines anderen Gases (Störkomponente) überlagert. Das Ausmaß der Querempfindlichkeit ist meistens eine Funktion der Konzentration der betrachteten Meß- und Störkomponente. Trotz des Gasfilter-Korrelationsverfahrens kann ein Meßsignal im ppm-Bereich durch Störkomponenten, die im Vol.-%-Bereich vorliegen, beeinflußt werden. Besonders der Wassergehalt des Rauchgases stört im IR-Spektrum die Messung von NO, N<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> (siehe Tab. 10). Bei der Messung mit Kaltgeräten (T = 50 °C) ist die Wasserquerempfindlichkeit konstant, da durch die Probengasabkühlung ein konstanter Wassergehalt vorliegt.

### *Absorption*

Die Absorption von leicht löslichen Gaskomponenten (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) im Kühlerkondensat wird durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt. Vernachlässigbar ist die Löslichkeit von NO, CO, CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O.

### *Volumenänderung*

Bei den auf 50 °C thermostatisierten Kaltgeräten wird das Meßgas durch Abkühlung auf + 5 °C getrocknet. Dadurch wird eine Wasser- und Säurekondensation in der Meßküvette vermieden. Durch die Kondensation des im Probengas befindlichen Wassergehalts entsteht eine Volumenreduzierung, entsprechend der abgeschiedenen Wassermenge. Die Konzentration der übrigen Rauchgaskomponenten erhöhen sich entsprechend dieser Volumenänderung. Da der Meßwert auf trockenes Gas bezogen wird, muß bei den Kaltgeräten nur noch der Wasseranteil bei 5 °C durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden.

### *Nullpunktsdrift*

Bedingt durch das Meßprinzip treten keine Nullpunktsdriften auf.

Sollte doch ein Drift beobachtet werden, könnte eine starke Fensterverschmutzung oder ein undichter Gasfilter (nur bei Gasfilter-Korrelationstechnik) die Ursache sein.

#### 4.3.4 Aufbau der Meßketten

Die Quantifizierung der Rauchgaszusammensetzung erfolgt mit den beiden Meßsystemen für Roh- und Reingas.

##### *Rohgas-Analysen-System*

Abb. 30 zeigt den Aufbau der Meßkette. Die technischen Daten der Meßgeräte sind in Tab. 8 zusammengefaßt.

Ein Meßgasstrom von 2 l/min wird über eine Entnahmesonde aus dem Rauchgaskanal abgesaugt und unter Verwendung eines Planfilters (Glasfaserfiltermedium) entstaubt. Das Filtergehäuse wird mit einer Mantelbeheizung auf eine Temperatur von 100 °C thermostatisiert. In dem Gaskühler erfolgt eine Wasserabscheidung durch die Abkühlung auf konstant 5 °C. Das Meßgas verläßt den Kühler mit einem konstanten Wassergehalt von ca. 0,5 Vol.-%. Der Gastransport erfolgt mit einer Membranpumpe, die im Bypass geregelt wird. Vor den Prozeßphotometern ist ein Mehrwegeventil zur Null- und Prüfgasaufgabe eingebaut. Das Meßgas durchströmt nacheinander die einzelnen Meßküvetten der Photometer. Am Meßkettenende ist zur Durchflußüberwachung ein Schwebekörperdurchflußmesser eingebaut.

Die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes erfolgt mit einer Zirkoniumsonde.

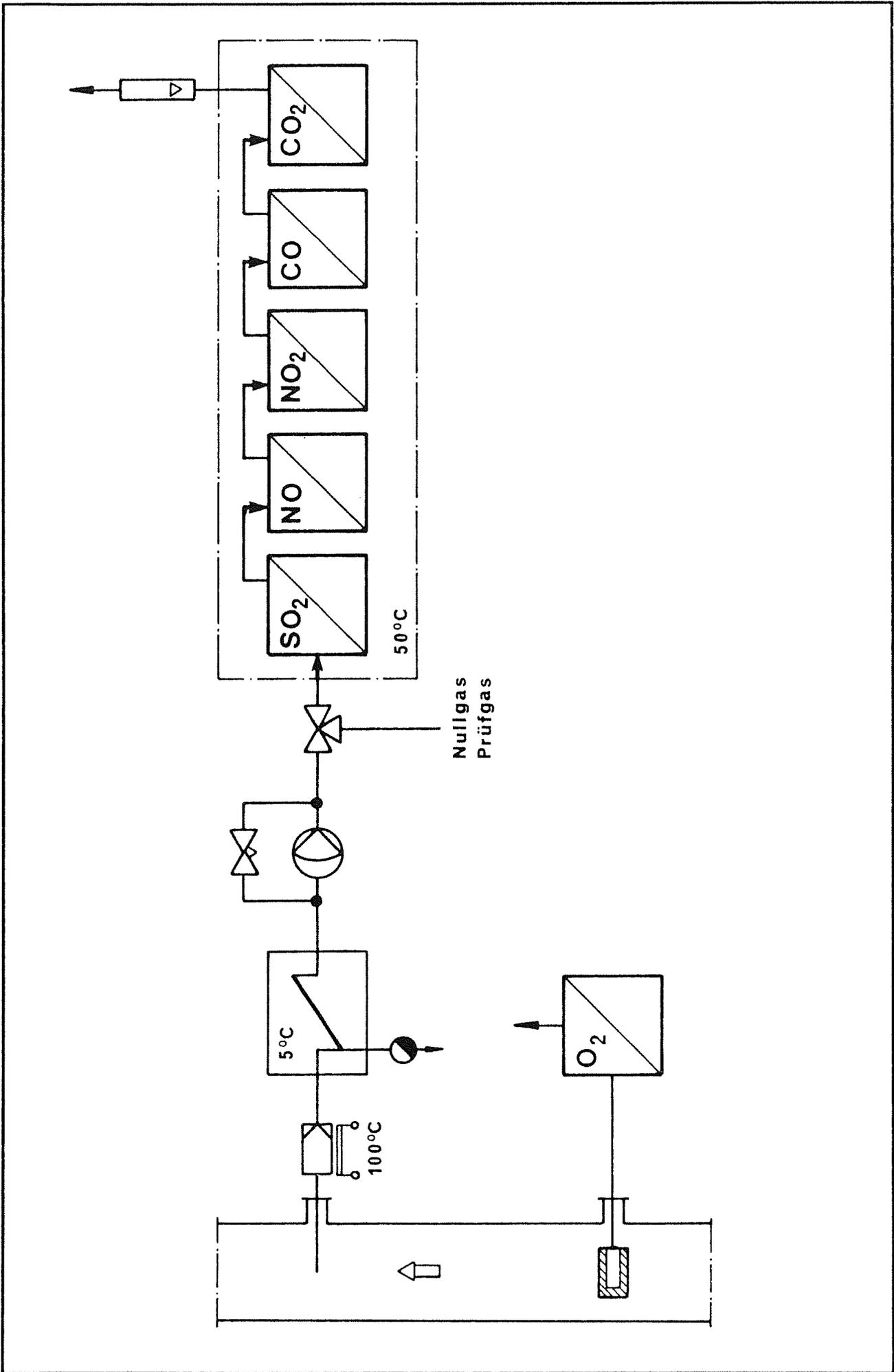


Abb. 30 Rohgas-Analysen-System

Tab. 8 Rohgasmeßgeräte

Meß- gas	Meß- bereich	Meß- prinzip	Meß- Wellenlänge	Referenz- Wellenlänge	optische Weglänge	Meßtem- peratur
SO <sub>2</sub>	0-2000 vpm	NDIR- Bifrequenz	7,4 µm	7,8 µm	24 cm	50 °C
NO	0-2000 vpm	NDIR Gasfilter- korrelation	5,25 µm	-	24 cm	50 °C
NO <sub>2</sub>	0-200 vpm	ND VIS Bifrequenz	450 nm	602 nm	24 cm	60 °C
CO	0-500 vpm	NDIR Gasfilter- korrelation	4,735 µm	-	24 cm	50 °C
CO <sub>2</sub>	0-20 Vol. %	NDIR Gasfilter- korrelation	4,27 µm	-	1,5 cm	50 °C
O <sub>2</sub>	0-25 Vol. %	ZrO <sub>2</sub> Leitfähig- keit	-	-		800 °C

### Reingas-Analysen-System

Der Aufbau des Reingas-Analysen-Systems ist in Abb. 31 dargestellt. Die technischen Daten der Prozeßphotometer können der Tab. 9 entnommen werden.

Die Reingasmessung ist in 3 Meßketten unterteilt, wobei die Gasprobennahme für zwei Meßketten auf vor und nach Produktabscheider umschaltbar ist.

Die erste Meßkette (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und H<sub>2</sub>O) faßt die Heißgasgeräte mit einer Küvettenlänge von 50 cm zusammen. Bei dieser Kette ist der komplette Meßstrang auf eine Temperatur von 200 °C thermostatisiert.

In der zweiten Meßkette (NO, N<sub>2</sub>O) befinden sich die Kaltgeräte mit vorgeschaltetem Meßgaskühler.

Das zweite NH<sub>3</sub>-Gerät mit einer 10 m Küvette hat einen eigenen Meßstrang und wird nur mit Meßgas nach dem Produktabscheider zur NH<sub>3</sub>-Schlupfüberwachung betrieben.

#### 4.3.5 Konzentrationsbestimmung und Bezugsgrößen

Die Meßgröße der Photometer ist die meßkomponentenspezifische, konzentrationsabhängige Intensitätsänderung (Extinktion).

$$Extinktion = \log I_{Ref.} - \log I_{Mess}$$

Bei nichtlinearem Zusammenhang zwischen Konzentration und Meßsignal ist das Gerät mit einem Linearisierer ausgestattet.

Folgende Meßsignale stehen zur Verfügung:

- verstärktes Extinktionssignal, (Spannungsausgang) 0-1 V
- Konzentrationsabhängiges Stromsignal 0 (4) - 20 mA
- Konzentrationsabhängiges Spannungssignal 0 - 10 V

Das Meßsignal wird zur weiteren Verarbeitung an die Datenerfassung des Prozeßleitsystems übertragen.

Die Schadgaskonzentration wird für eine einheitliche Bewertung der Meßergebnisse auf den Normzustand (0 °C, 1013 mbar) trockenes Gas und Bezugssauerstoffgehalt korrigiert. Da mit dem Prozeßphotometer der Volumenanteil (ppm

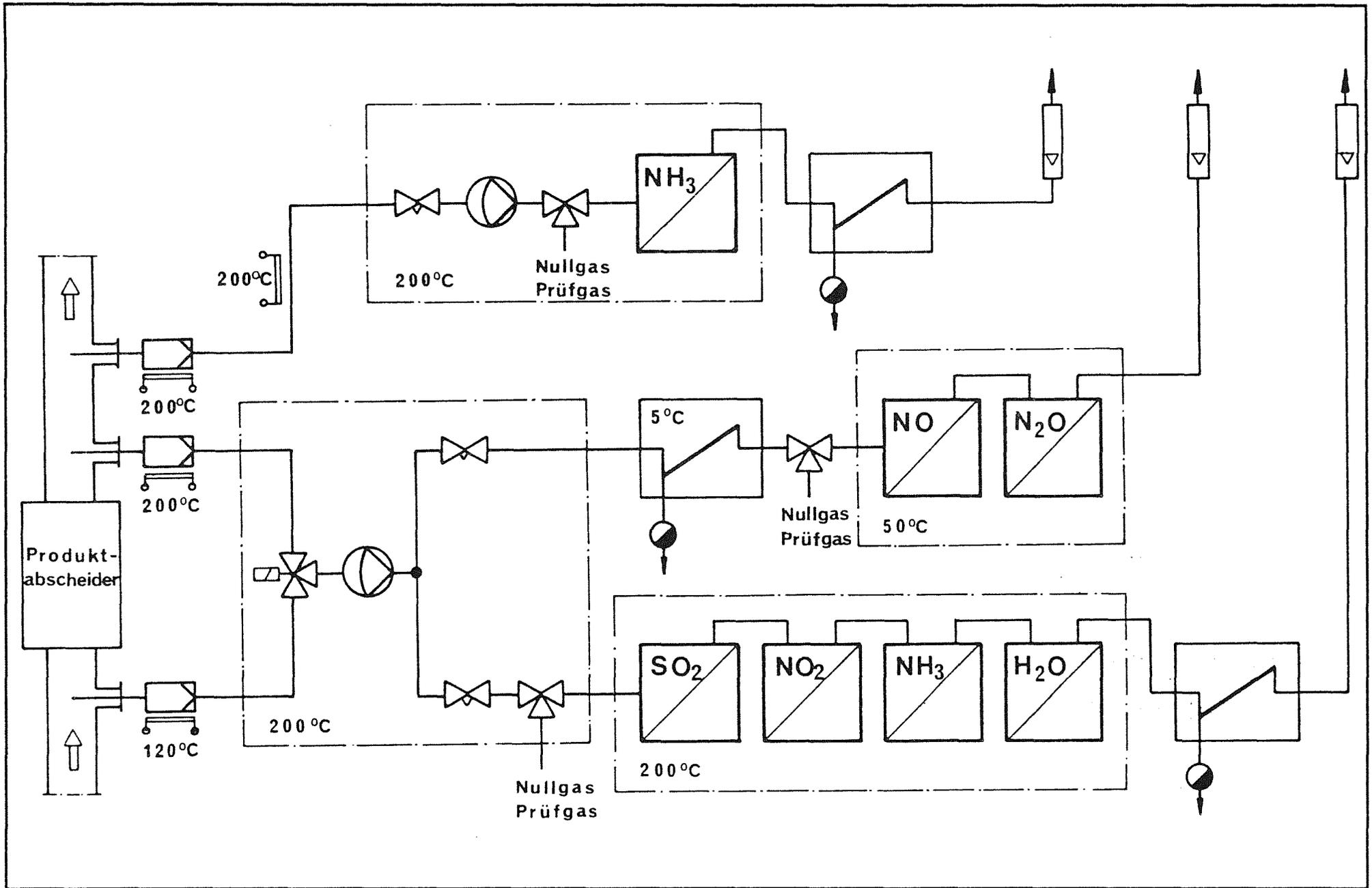


Abb. 31 Reingas-Analysen-System

Tab. 9 Reingasmeßgeräte

Meß- gas	Meß- bereich	Meß- prinzip	Meß- Wellenlänge	Referenz- Wellenlänge	optische Weglänge	Meßtem- peratur
SO <sub>2</sub>	0-1000 vpm	NDIR- Bifrequenz	7,4 µm	7,6 µm	50 cm	200 °C
NO <sub>2</sub>	0-200 vpm	ND VIS Bifrequenz	450 nm	602 nm	50 cm	200 °C
H <sub>2</sub> O	0-40 Vol. %	NDIR Bifrequenz	2,58 µm	2,47 µm	50 cm	185 °C
NH <sub>3</sub>	0-2000 vpm	NDIR Gasfilter- korrelation	10,4 µm	-	50 cm	200 °C
NH <sub>3</sub>	0-200 vpm	NDIR Gasfilter- korrelation	10,4 µm	-	10 m	200 °C
NO	0-500 vpm	NDIR Gasfilter- korrelation	5,25 µm	-	24 cm	50 °C
N <sub>2</sub> O	0-300 vpm	NDIR Bifrequenz	7,8 µm	8,17 µm	6 m	50 °C

bzw. Vol.-%) der Meßkomponente bestimmt wird, ist eine nachträgliche Korrektur bezüglich Temperatur und Druck nicht mehr notwendig. Bei den Kaltgeräten erfolgt eine Meßgastrocknung durch die Wasserkondensation im Gaskühler. Hier muß nur noch der Restwassergehalt von 0,5 Vol.-% am Kühleraustritt, entsprechend der Abkühlung auf 5 °C, berücksichtigt werden.

Der Bezugssauerstoffgehalt ist für die Ölfeuerung 3 Vol.-%. Durch die Korrektur auf einen Bezugssauerstoffgehalt wird der Einfluß einer Verdünnung der Abgase z. B. durch Leckluft oder zusätzlich eingebrachte Stoffströme ausgeschaltet.

Zusätzlich müssen Störeinflüsse (siehe Kapitel 4.3.3) wie Querempfindlichkeit und Absorption nachträglich korrigiert werden.

Die Konzentrationsbestimmung erfolgt nach folgenden Gleichungen, wobei die einzelnen Faktoren in Tab. 10 zusammengestellt sind:

#### *Konzentrationsberechnung bei Kaltgeräten*

$$K = \left[ E \times m - A_1 \right] \times B \times C$$

#### *Konzentrationsberechnung bei Heißgasgeräten*

$$K = E \times m \times A_2 \times B \times C$$

<i>K</i>	Meßgaskonzentration	ppm bzw. Vol.-%
<i>E</i>	Extinktionssignal oder sonstiges Meßgerätesignal	V bzw. mA
<i>m</i>	Steigungsfaktor der Kalibrierkurve	ppm/V bzw. ppm/mA
<i>A<sub>1</sub></i>	Wasserquerempfindlichkeit (bei Kaltgeräten ein absoluter Wert)	ppm
<i>A<sub>2</sub></i>	Wasserquerempfindlichkeit (Faktor ist eine Funktion des Wassergehaltes und der Meßgaskonzentration)	
<i>B</i>	Korrektur auf trockenes Gas	
<i>C</i>	Korrektur auf Bezugssauerstoffgehalt	

**Tab. 10 Steigungsfaktoren der Kalibrierkurven und Wasserquerempfindlichkeit der Prozeßphotometer (Stand 06/90)**

Meßgerät	Steigungsfaktor	Meßgeräteausgangssignal E	Wasserquerempfindlichkeit A <sub>1</sub>
<b>Kaltgeräte</b>			
SO <sub>2</sub> - Roh	1249,5 ppm/V	Extinktion	94 ppm
NO - Roh	133,4 ppm/mA	Konz. 4-20 mA	30 ppm
NO <sub>2</sub> - Roh	13,2 ppm/mA	Konz. 4-20 mA	-
CO - Roh	33,6 ppm/mA	Konz. 4-20 mA	20 ppm
CO <sub>2</sub> - Roh	1,68 Vol.-%/mA	Konz. 4-20 mA	-
NO - Rein	33,6 ppm/mA	Konz. 4-20 mA	-
N <sub>2</sub> O - Rein	29,3 ppm/V	Konz. 0-10 V	45 ppm
<b>Heißgasgeräte</b>			
SO - Rein	-	Extinktion	
NO <sub>2</sub> - Rein	622,5 ppm/V	Extinktion	
NH <sub>3</sub> - Rein 1	19,0 ppm/V	Konz. 0-10 V	
NH <sub>3</sub> - Rein 2	209,6 ppm/V	Konz. 0-10 V	
H <sub>2</sub> O - Rein	4,0 Vol.-%/V	Konz. 0-10 V	

#### 4.3.6 Betriebserfahrungen

##### *Kalibrierung*

Bisherige Betriebserfahrungen haben gezeigt, daß eine Gerätekalibrierung im 2-wöchigen Rhythmus erfolgen sollte (Versuchsbetrieb). Diese Kalibrierung erfolgt mit Prüfgasen bekannter Zusammensetzung, wobei unbedingt die Garantiezeit beachtet werden sollte.

##### *Nullpunkteinstellung*

Die Nullpunkteinstellung erfolgt jeweils vor einem Versuch durch Aufgabe von Nullgas (trockene Luft). Bei den Kaltgeräten wird das Nullgas hinter dem Gaskühler dem Analysator zugeleitet. Dies verhindert eine Wassersättigung des Nullgases im Kühler und eine dadurch hervorgerufene Nullpunktsverschiebung bei Geräten mit Wasserquerempfindlichkeit. Die Wasserquerempfindlichkeit wurde in getrennten Kalibrierungen bestimmt und wird bei der Auswertung durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt.

#### **4.4 Partikelmeßtechnik**

Zur Charakterisierung des durch die Bestrahlung erzeugten Produktaerosols benötigt man die Daten der Massenkonzentration, der Partikelmeßgrößenverteilung und die chemische Zusammensetzung. Zur Bestimmung dieser Größen können prinzipiell kontinuierliche bzw. diskontinuierliche Meßmethoden angewendet werden.

Die gängigen kontinuierlichen Meßverfahren sind jedoch unter den ESV-Bedingungen nur apparativ aufwendig einsetzbar. Die Charakterisierung des Produktaerosols erfolgt deshalb am Teststand AGATE gravimetrisch mit Teilstromentnahme.

##### **4.4.1 Bestimmung der Partikelmassenkonzentration**

Die Bestimmung der Massenkonzentration erfolgt entsprechend den VDI-Richtlinien 2066 (Blatt 1, 2 und 7). Abb. 32 zeigt schematisch den Aufbau der Probenahmeeinrichtung. Hierbei erfolgt eine isokinetische Teilstromentnahme, wobei das Produktaerosol auf einem Planfilter abgeschieden wird. Als Filtermedium werden Teflonmembranfilter (Millipore) mit einer Porenweite von  $0,2 \mu\text{m}$  eingesetzt. Die verwendeten Filterelemente haben einen Durchmesser von 142 mm. Die vorgewogenen Filterelemente werden in das Filtergehäuse eingelegt und in diesem auf die Rauchgastemperatur aufgeheizt. Dies erfolgt mit einer Mantelheizung, die um das komplette Filtergehäuse angebracht wird.

Mit Hilfe einer Membranpumpe wird ein Teilstrom isokinetisch aus dem Hauptstrom entnommen und durch das beheizte Entnahmerohr dem Planfilter zur Partikelabscheidung zugeführt. Nach der Partikelabscheidung wird der Teilstrom durch einen Trockenturm zur Wasserabscheidung geleitet.

Die Messung des abgesauten Teilstromvolumens erfolgt mit einem Gasmengenzähler. Zur Bestimmung des Volumenstroms ist ein Schwebekörperdurchflußmesser eingebaut. Nach Beendigung der Probenahme wird das Filterelement entnommen, in einer Petrischale versiegelt und bis zur Auswertung darin aufbewahrt. Nach dem Auswiegen des Filterelements kann die gesammelte Produktprobe gleichfalls zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung verwendet werden.

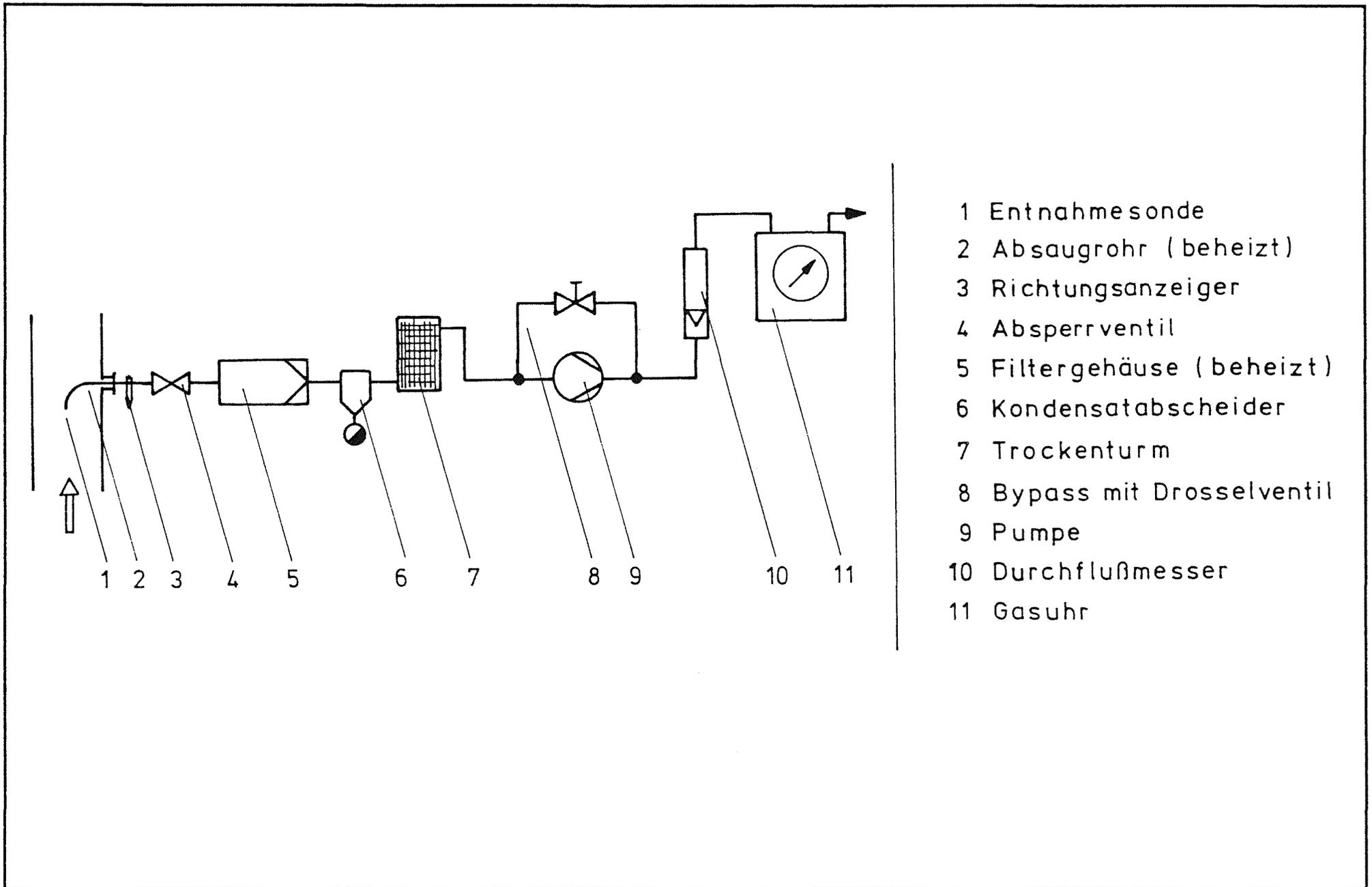


Abb. 32 Meßaufbau zur gravimetrischen Bestimmung der Partikelmassenkonzentration nach VDI 2066

Die Massenkonzentration wird am Teststand AGATE an zwei Meßstellen entsprechend Abb. 33 bestimmt. Die Messung im Rohrleitungssystem zwischen Bestrahlungskammer und Produktabscheider wird einerseits zur Beurteilung der Produktbildung durch die Elektronenbestrahlung benötigt, zum anderen zur Bestimmung des Partikelabscheidegrades des Filters. Die zweite Meßstelle befindet sich hinter dem Produktabscheider.

#### 4.4.2 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung wird mit einem Andersen Mark III Impaktor bestimmt. Es handelt sich hierbei um einen mehrstufigen Vieldüsenimpaktor. Zur Abscheidung der Partikel aus dem Gas wird der Trägheitseffekt genutzt. In den Düsen wird das Partikelgasgemisch beschleunigt, wobei auf der unmittelbar folgenden Prallplatte die Partikel mit einem Durchmesser größer der Trenngrenze der jeweiligen Impaktorstufe abgeschieden werden (siehe Abb. 34). Dieser Vorgang wiederholt sich in den folgenden Impaktorstufen mit immer kleineren Düsendurchmessern.

Die Partikelabscheidung je Stufe wird durch die Trennkurve der jeweiligen Stufe bestimmt. In Abb. 35 ist der Trennkurvenmedianwert (50 %-Wert) als Funktion des Durchsatzes für die verschiedenen Impaktorstufen dargestellt. Die Werte beziehen sich auf eine Temperatur von 70 °F und eine Dichte von 1,0. Als Probenträger werden auf die Impaktorstufen Glasfaserfilter gelegt, die das Rückprallen oder Wegblasen der Partikel erheblich reduzieren.

Bei der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mit dem Kaskadenimpaktor wird wie bei der Messung der Massenkonzentration ein Teilstrom isokinetisch entnommen.

Der Impaktor befindet sich außerhalb der Rauchgasleitung und wird mit einer Mantelheizung auf Rauchgastemperatur erwärmt. Dem Impaktor vorgeschaltet ist ein Vorabscheider, der die Fraktion mit Partikeln größer 17 µm ( $\dot{V} = 20$  SLPM) abscheidet. Der Feinstanteil wird auf einem Back-up-Filter nach der letzten Impaktorstufe gesammelt. Der Impaktor muß während der gesamten Probenahme mit einem konstanten Durchfluß betrieben werden, damit keine Meßwertverfälschung auftritt.

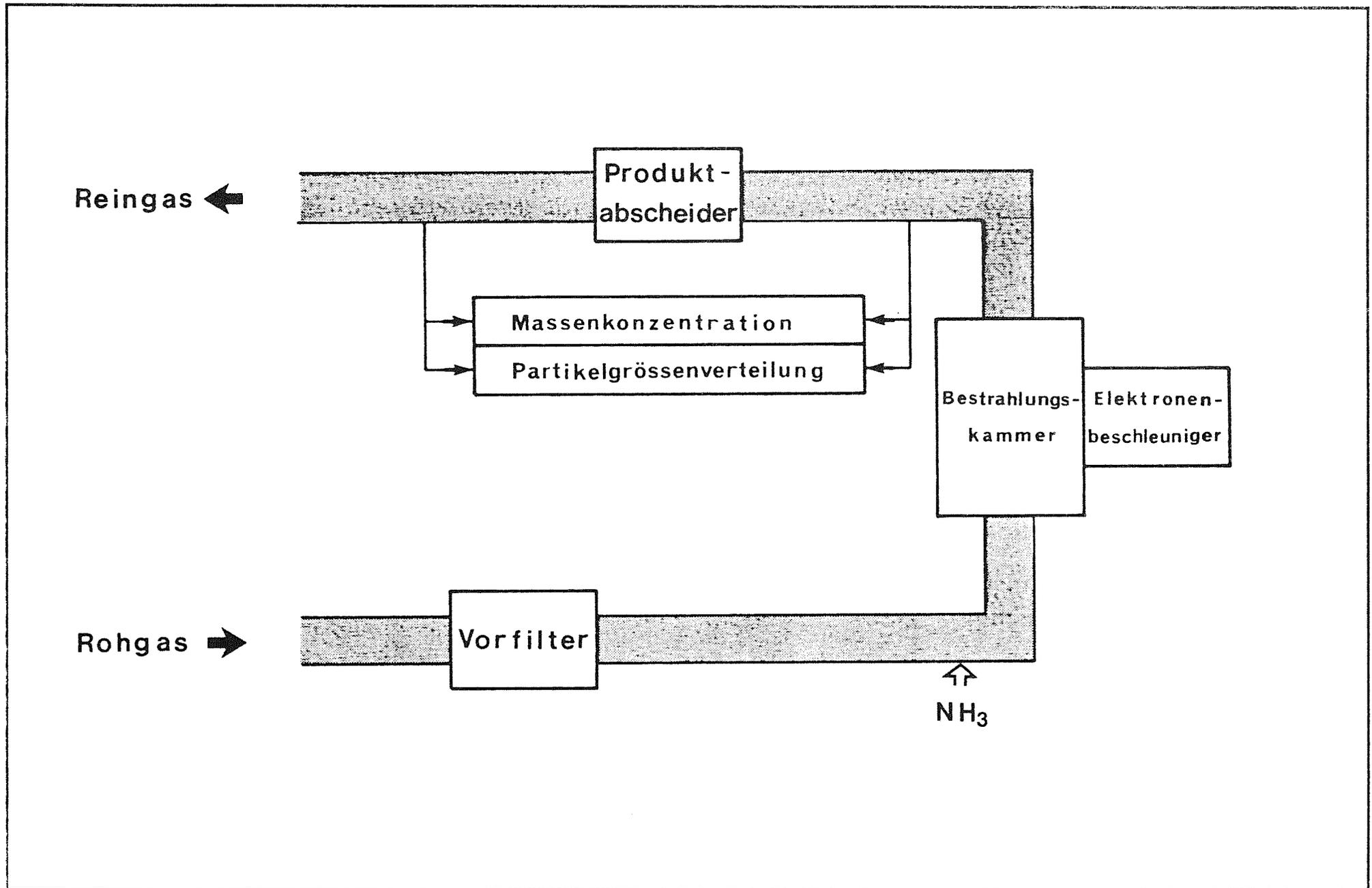


Abb. 33 Aerosolmeßtechnik Teststand AGATE

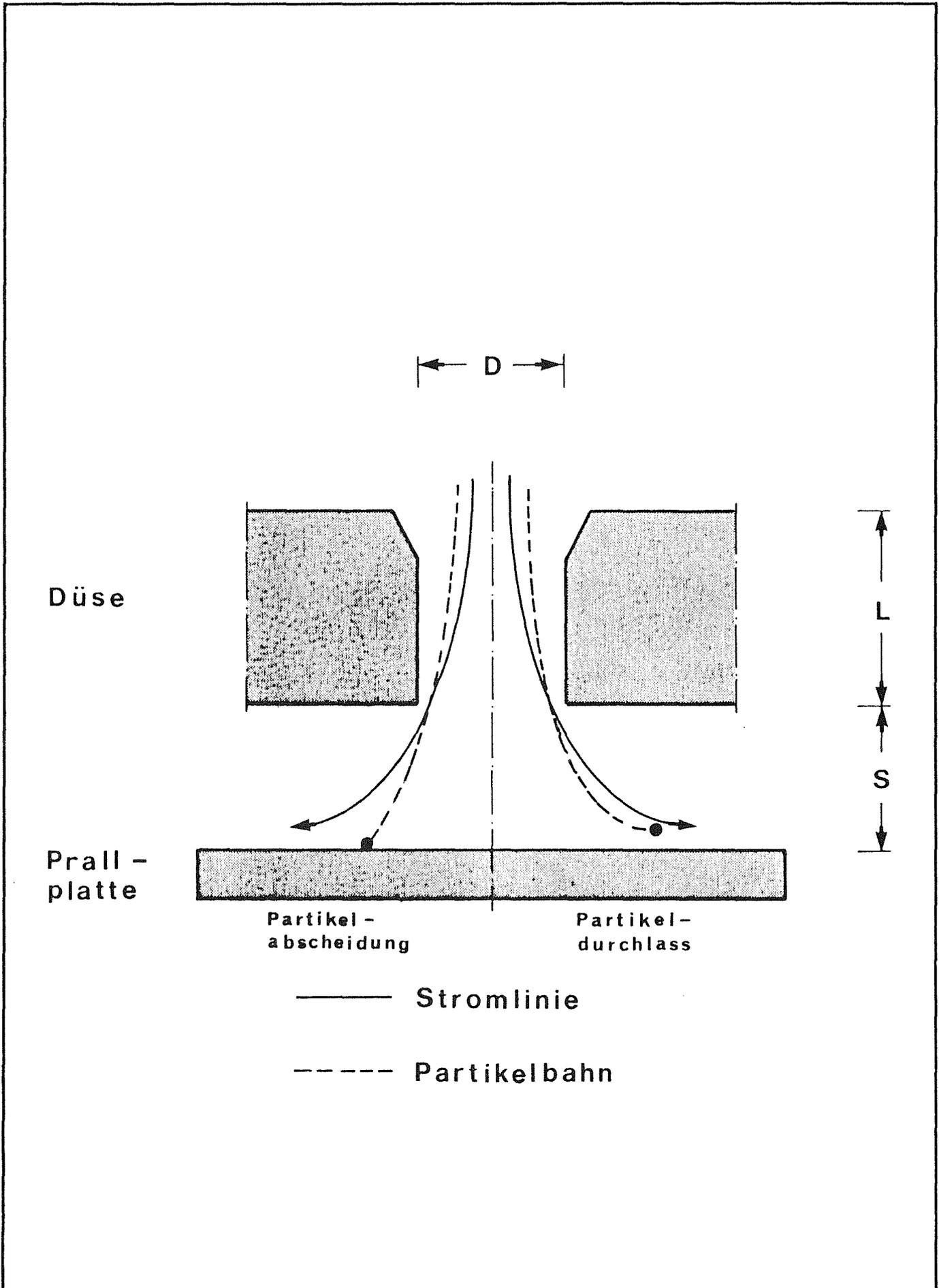


Abb. 34 Meßprinzip des Impaktors

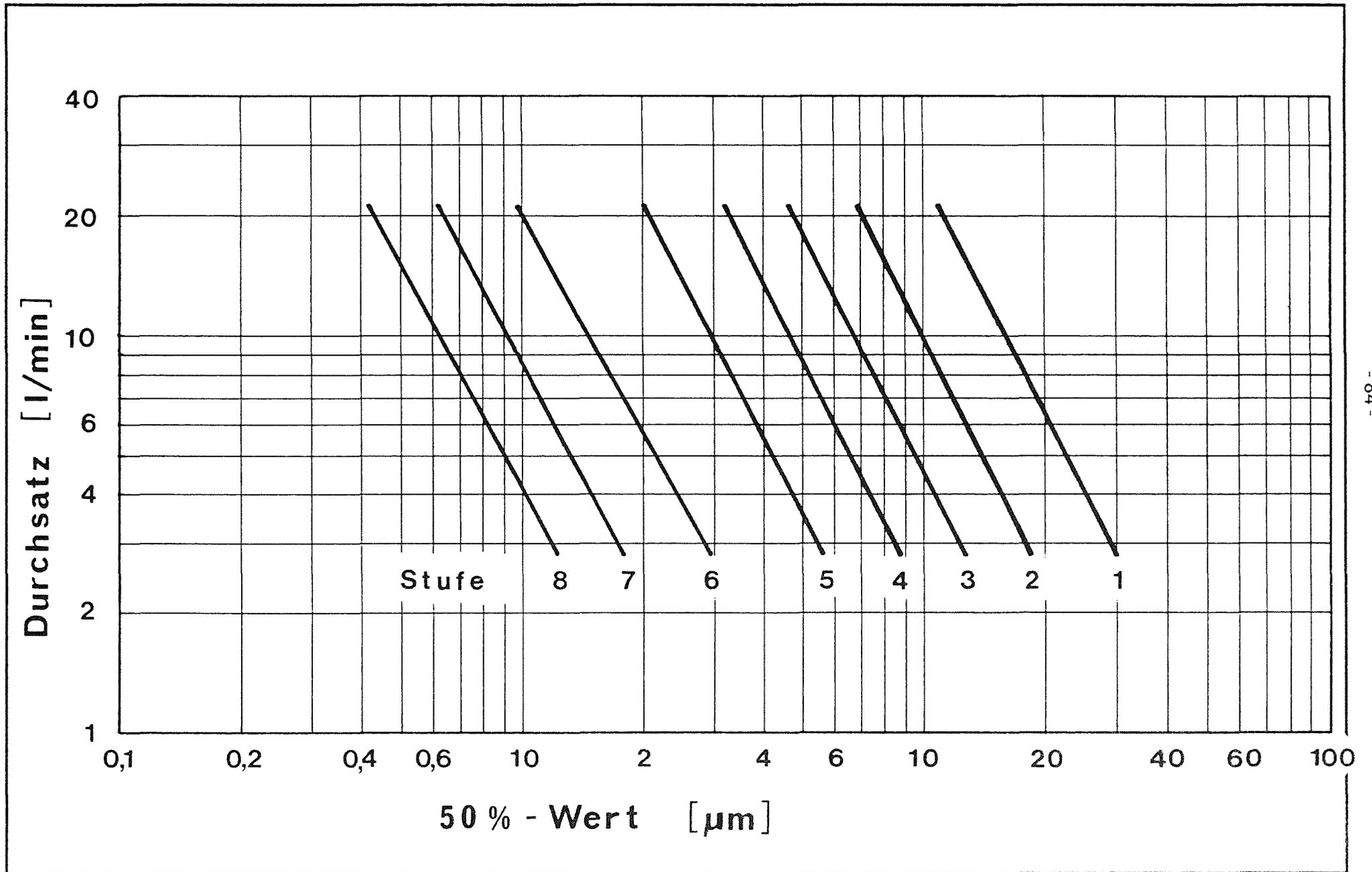


Abb. 35 Kaskaden-Impaktor Andersen Mark III

## 5. Inbetriebnahme

Ziel der Inbetriebnahme war, daß nach Abschluß dieser Phase ein störungsfreier und ordnungsgemäßer Versuchsbetrieb aufgenommen werden konnte.

Die Inbetriebnahme der Anlage unterteilte sich in folgende Phasen:

1. Funktionstest der einzelnen Komponenten
2. Betrieb der einzelnen Funktionsgruppen
3. Luftbetrieb ohne und mit Bestrahlung
4. Rauchgasbetrieb ohne Bestrahlung
5. Rauchgasbetrieb mit Bestrahlung und Produktfiltration

### *Phase 1: Funktionstest der einzelnen Komponenten*

Als erste und gleichzeitig aufwendigste Komponente wurde der Elektronenbeschleuniger installiert. Jeder Schritt des Beschleunigeraufbaus wurde mit einem Funktionstest der jeweiligen Teilinstallation abgeschlossen. Da die Beschleunigeranlage aus mehreren Einzelaggregaten besteht, war allein für diese Anlage ein getrenntes Inbetriebnahmeprogramm erforderlich, da die Funktion folgender Einzelkomponenten überprüft werden mußte:

- Kühlluftgebläse für Fensterkühlung
- Bunkerabluftsystem
- Kühlwasserkreislauf
- Vakuumsystem
- Dichtheit des Drucktanks mit SF<sub>6</sub>-Füllung
- Funktion der Hochspannungserzeugung
- Sicherungssystem
- Strahlblenksystem

Die Inbetriebnahme des Beschleunigers wurde mit einem Dauertest bei maximaler Leistung abgeschlossen.



### *Phase 3: Luftbetrieb*

In diesem Stadium der Inbetriebnahme war es notwendig, daß man sich auf die Funktionsfähigkeit der zuvor geprüften Einzelkomponenten verlassen konnte. Vor dem Betrieb des Sprühkühlers mit Rauchgas wurde dessen Funktionsfähigkeit im Luftbetrieb überprüft. Hierzu wurde die Luft zuerst mit dem Elektroerhitzer erwärmt und anschließend im Sprühkühler durch die Wassereindüsung wieder abgekühlt. Im Luftbetrieb konnten auch die Reglerparameter einfacher optimiert werden.

### *Phase 4: Rauchgasbetrieb ohne Bestrahlung*

In dieser Phase wurde der zuvor im Luftbetrieb optimierte Sprühkühler im Rauchgasbetrieb überprüft. Ansonsten gibt es von der Gasführung keinen Unterschied zwischen Luft- und Rauchgasbetrieb. In dieser Phase wurde besonders auf dem Temperaturverlauf in der Anlage geachtet, da sehr nahe an der Kühlgrenztemperatur gearbeitet wurde.

### *Phase 5: Rauchgasbetrieb mit Bestrahlung und Produktfiltration*

Diese Phase bildete den Abschluß der Inbetriebnahme und den gleichzeitigen Beginn des Versuchsbetriebs. Alle Komponenten wurden zuvor auf ihre Einzelfunktionsfähigkeit überprüft, so daß mit der Untersuchung der Produktfiltration, einem Schwerpunkt des Versuchsprogramms begonnen werden konnte.

Im folgenden werden Anlagen- und Betriebsparameter entsprechend Abb. 36 diskutiert, die entweder kalkuliert oder in der letzten Inbetriebnahmephase meßtechnisch ermittelt wurden. Die gezeigten Größen beziehen sich auf einen Volumenstrom von 1200 m<sup>3</sup>/h (i.N.f.).

### *Strömungsgeschwindigkeit*

Das Rauchgas hat in der Entnahmeleitung bei einer Temperatur von 200 °C eine Strömungsgeschwindigkeit von 10,5 m/s bei einer Rohrleitungsnennweite von 250 mm. Nach dem Sprühkühler erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit im Rohrleitungssystem auf durchschnittlich 14 m/s, da die Rohrnennweite auf 200 mm reduziert wurde.

In den Komponenten liegt die Geschwindigkeit um ein Mehrfaches niedriger, wie im Schlauchfilter mit 0,4 m/s und in der Reaktionskammer mit 0,3 m/s. All diese Angaben beziehen sich auf ein homogenes Strömungsprofil.

### *Verweilzeit des Rauchgases in der Versuchsanlage*

Die Gesamtverweilzeit des Rauchgases in der Versuchsanlage beträgt zwischen der Gasentnahme aus dem Rauchgaskanal der Kesselanlage bis zur Rückführung in den gleichen Kanal ca. 25 s. Den größten Anteil stellt hierbei die Verweilzeit im Schlauchfilter mit 11,6 sec und in der Bestrahlungskammer mit 5,5 s.

### *Anlagenvolumen*

Die Addition der Einzelvolumina ergibt ein Anlagengesamtvolumen von 13,2 m<sup>3</sup>.

Von diesem Gesamtvolumen hat der Schlauchfilter mit 6 m<sup>3</sup> einen Anteil von 46 % und das gesamte Rohrleitungssystem von 26 %.

Das restliche Volumen verteilt sich auf die Einzelkomponenten mit folgenden Werten:

Rußfilter	3 %
Sprühkühler	5 %
Bestrahlungskammer	20 %.

### *Temperaturprofil im Rauchgasbetrieb*

Das Rauchgas tritt bei mittlerer Kessellast mit einer Temperatur von 200 °C in die Versuchsanlage ein. Im Sprühkühler erfolgt eine Abkühlung auf ca. 65 °C, d. h. ca. 5 K oberhalb der Kühlgrenztemperatur. Durch die Bestrahlung wird das Rauchgas bei einer Dosis von 15 kGy um ca. 15 K auf 80 °C erwärmt. Die nachfolgende Abkühlung auf dem Rauchgasweg über den Schlauchfilter bis zum Gebläse hat die gleiche Größe (max. 10 K) wie die Erwärmung über das Gebläse. Das Rauchgas verläßt somit die Anlage mit einer Temperatur von ca. 80 °C.

### *Temperaturprofil im Luftbetrieb*

Wird die Luft im Elektroerhitzer am Anlagenbeginn auf eine Temperatur von 85 °C erwärmt, so verläßt sie die Anlage mit der gleichen Temperatur gemessen nach dem Gebläse. Die Abkühlung zwischen Luftherhitzer und Schlauchfilteraustritt beträgt ca. 10 K, und über das Gebläse erfolgt eine Erwärmung um gleichfalls 10 K.

### *Druckverlauf*

Das Rauchgas tritt bei einem Unterdruck von 5 mbar bezogen auf Atmosphärendruck in die Versuchsanlage ein. Der maximale Anlagenunterdruck wird mit ca. 60 mbar vor dem Saugzuggebläse erreicht. Somit liegt der maximale Druckabfall über die Gesamtanlage bei 55 mbar. Dieser Wert muß vom Gebläse als Druckerhöhung für den Gastransport aufgebracht werden.

### Anlagenfließbild

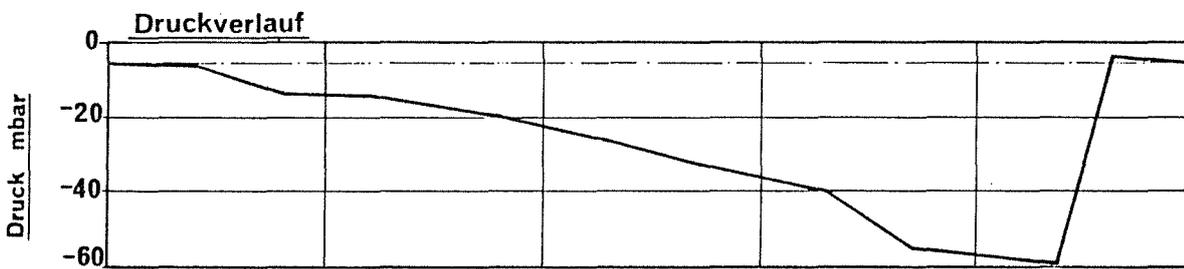
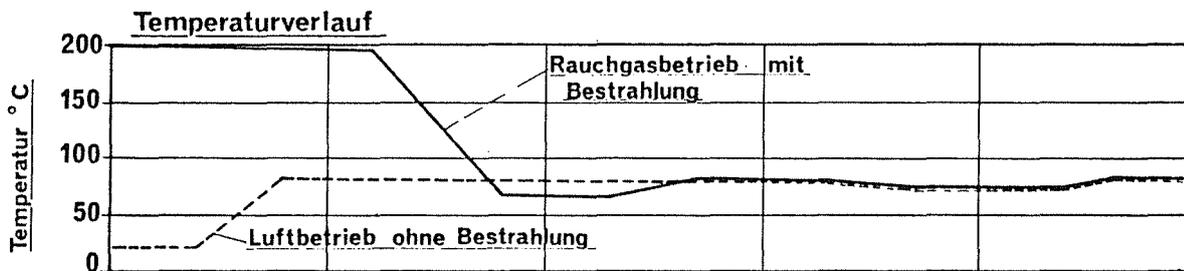
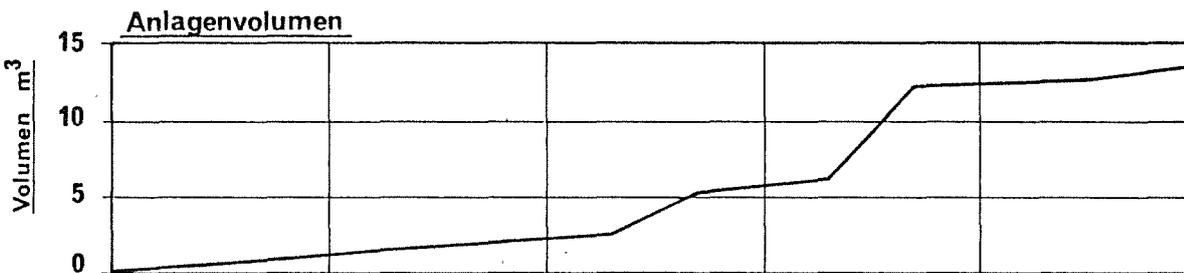
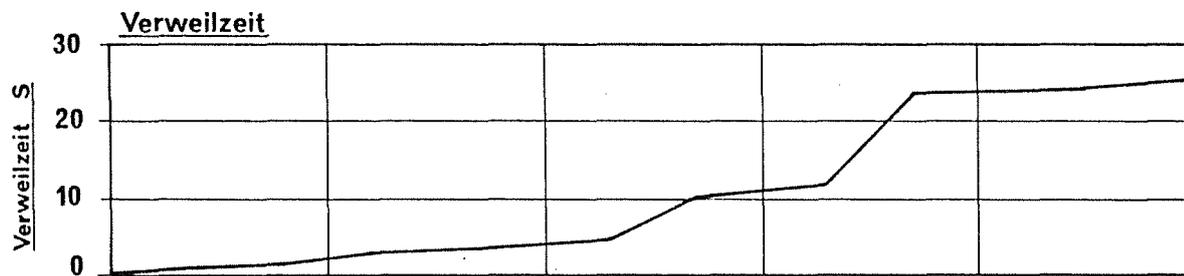
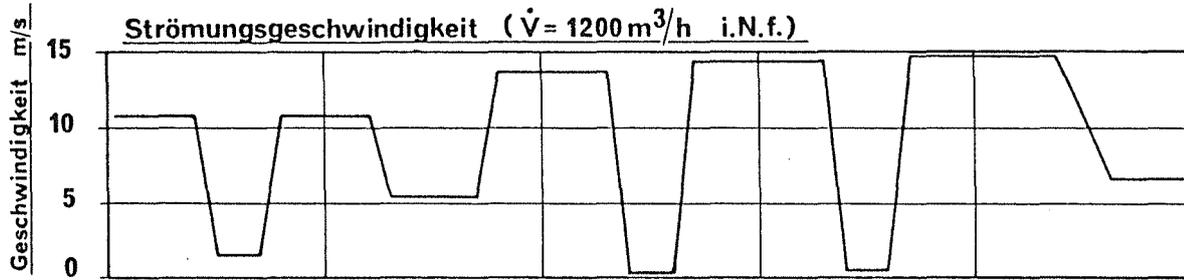
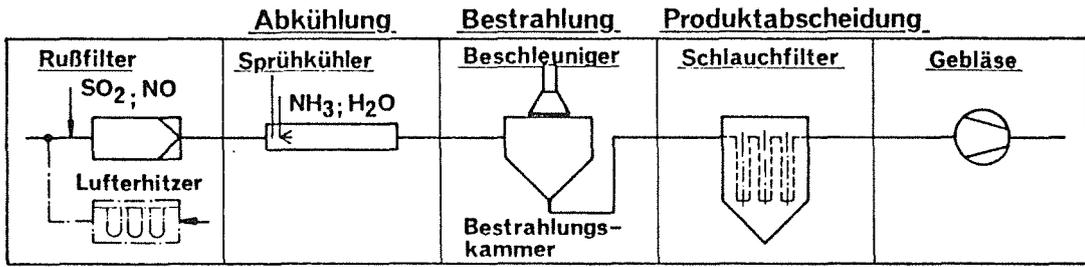


Abb. 36 Anlagen- und Betriebsparameter

## 6. Literaturverzeichnis

Jordan S., Paur H.-R. und Schikarski W. (1988)

Physik in unserer Zeit 19, 8-16.

Kawamura K., Hirose A., Aoki S., Kimura H., Fujii T., Mizutani S., Higo T.,  
Ishikawa R., Adachi K. and Hosoki S. (1979)

Radiat. Phys. Chem. 13, 5-12.

Paur H.-R., Jordan S., Baumann W. (1988)

J. Aerosol Sci. 19, 1397-1400.

Mätzing H. (1989)

Chemical Kinetics of Flue Gas Cleaning by Electron Beam

KfK 4494.

Paur H.-R., Jordan S., Baumann W., Mätzing H. (1989)

Aerosolbildung und heterogene Reaktion bei der simultanen Rauchgasreinigung  
durch Elektronenstrahl

KfK-PEF 50, 723-740

5. PEF-Statuskolloquium, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 7.-9.3.1989.

Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie (1972), 4. Auflage, Band 2,

Seite 257, Abb. 5.

Firma Caldyn, Ettlingen (1989)

Technische Information CSL 11/89.

FDBR-Handbuch Wärme und Strömungstechnik (1982), Abb. 4.5.5-3; Internes

Handbuch des Fachverbandes Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.

(FDBR), Düsseldorf.