

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM**

**KARLSRUHE**

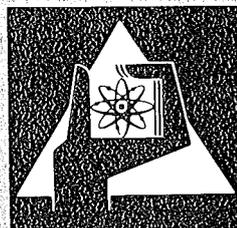
November 1975

KFK 2202

Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Schneller Brüter

**Aerosolerzeugung und Filterverhalten bei  
Natriumbränden**

L. Böhm, S. Jordan



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2202

Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik

Projekt Schneller Brüter

AEROSOLERZEUGUNG UND FILTERVERHALTEN  
BEI NATRIUMBRÄNDEN

von

L. Böhm  
S. Jordan

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



Die Versuche wurden im Rahmen der Arbeiten zum Projekt Schneller Brüter durchgeführt. Die Autoren danken Herrn Dr. W. Schikarski und Herrn Diplomphysiker H. Jordan für Diskussionen und Gespräche. An den Versuchen haben neben den Autoren die Herren Ing. W. Lindner, H. Schmidt, sowie Fräulein Ch. Hofmann mitgewirkt. Fräulein Mäule danken wir für die Anfertigung der Zeichnungen und Fräulein Nanzig für die Erstellung des Manuskriptes.

## Zusammenfassung

Im Rahmen eines längerfristigen Programms wurden Aerosolerzeugungsraten bei Natriumbränden, das Verhalten von Natriumoxidaerosolen in geschlossenen Systemen, sowie die Filterung von  $\text{Na}_2\text{O}_2$ -Aerosolen untersucht.

Die bisherigen Versuche in der NABRAUS-Anlage sollten das Verhalten von Natriumoxidaerosolen nach einem Störfall in natriumgekühlten Brutreaktoren im inneren als auch im äußeren Containment des SNR-300 simulieren. Unter den Bedingungen des inneren Containments (0,7 % Sauerstoff) können bei Natrium-Sauerstoffreaktionen maximale Aerosolkonzentrationen von  $1-10 \text{ g/m}^3$  auftreten. Unter den Bedingungen des äußeren Containments (21 % Sauerstoff) wurden bei Natriumbränden maximale Aerosolkonzentrationen von  $10-50 \text{ g/m}^3$  gemessen.

Die Aerosolerzeugungsraten sind proportional der Sauerstoffkonzentration: bei 21 %  $\text{O}_2$ -Konzentration etwa um den Faktor 10 höher als bei 0,7 %.

Es wurden Aerosolerzeugungsraten von ca.  $20 \frac{\text{kgNa}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$  gemessen.

Unter Berücksichtigung von 3 Aerosolprozessen, Aerosolerzeugung, Thermophorese und Sedimentation, konnte ein Modell erarbeitet werden, daß den zeitlichen experimentell ermittelten Verlauf der Aerosolmassenkonzentration gut wiedergibt.

Die Untersuchungen ergaben, daß Faserfilter, wie sie derzeit in nuklearen Anlagen verwendet werden, für die Filterung von Natriumoxidaerosolen ungeeignet sind.

Es wurde das Verhalten von Sandbettfiltern untersucht und eine Sandbettfilter-Anordnung entwickelt, die sowohl hinsichtlich des Wirkungsgrades (besser als 99,99) als auch hinsichtlich der Beladbarkeit (ca.  $500 \text{ g Natriumoxid/m}^2$ ) dem Faserfilter überlegen ist. Darüber hinaus halten Sandbettfilter höheren Druck- und Temperaturspitzen stand. Auch flüssige Natriumoxidaerosole werden noch mit Wirkungsgraden besser als 99,9 % gefiltert.

Es wurde ein physikalisches Modell erarbeitet, daß eine vernünftige Erklärung für den Druckanstieg am Sandbettfilter und dessen Durchlässigkeit liefert. Das Modell stimmt gut mit den erzielten Ergebnissen überein.

## Abstract

In the scope of a long-termed program

- aerosol-formation rates during sodium fires,
- the behaviour of sodiumoxide-aerosols in a closed system
- and the filtration of sodiumoxide-aerosols

were investigated.

These experiments in the Nabraus-facility should simulate the behaviour of sodiumoxide-aerosols after an accident in the inner and outer containment of the sodium-cooled fast Reactor SNR 300. At the conditions of the inner-containment (0,7 % oxygen content in the atmosphere) aerosol-concentrations by sodium-oxygen-reactions of 1 - 10 g/m<sup>3</sup> are possible. At the conditions of the outer-containment (21 % oxygen-content) aerosol-concentrations at sodium fires of 10 - 50 g/m<sup>3</sup> have been measured.

The aerosol-formation rates are proportional to the oxygen-concentration: the rate at 21 % O<sub>2</sub>-concentration is about 10-times higher than the rate at 0.7 % O<sub>2</sub>. The aerosol formation rate was determined to 20  $\frac{\text{kgNa}}{\text{m}^2 \text{ h}}$  at 21 % O<sub>2</sub>.

Considering the three aerosol processes: aerosol formation, thermophoresis and sedimentation a model was evaluated which calculates the aerosol-mass concentration depending on time. The calculated values were in good agreement with experimental data.

Further experiments had shown that fiber-glas-filters as they are used in nuclear installations up to now are not qualified for filtering sodiumoxide-aerosols.

The behaviour of sand-bed-filters was investigated. A sand-bed-filter arrangement was developed which is better than HEPA-standard of fiber-glas-filters concerning efficiency (better than 99,99) and load capacity (about 500 g Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>). Beyond that sand-bed-filters resist high pressure- and temperature-peaks. Liquid sodiumoxide-aerosols are filtered with an efficiency better than 99.9 %.

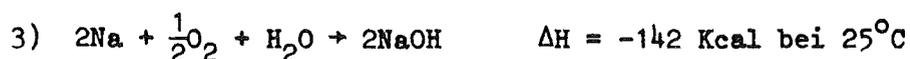
A physical model was evaluated to explain pressure increase at the sand-bed-filter during load and penetration of the filter. The calculated values were in good agreement with experimental results.

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung und Programm	2
2. Beschreibung der Versuchsanlage Nabraus	4
3. Aerosolerzeugung und Aerosolverhalten bei Natriumbränden	6
3.1 Experimentelle Ergebnisse	6
3.2 Modelltheorie	8
3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Natriumbrandversuche	10
4. Verhalten von Schwebstofffiltern gegenüber Natriumoxid-Aerosolen	12
4.1 Versuchsanlage	12
4.2 Versuche an Faserfiltern	12
4.3 Versuche an Sandbettfiltern	13
4.3.1 Experimente mit festen Aerosolen	13
4.3.2 Modelltheorie für Sandbettfilter	15
4.3.3 Experimente mit flüssigen Aerosolen	18
4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Filterversuche	18
5. Literatur	20
6. Verzeichnis der Abbildungen	21

## 1. Einleitung und Programm

Ein Austreten von flüssigem Natrium aus dem Kühlkreislauf von schnellen Brutreaktoren kann zu erheblichen Störungen führen. Hierbei ist sowohl an kleinere Leckagen in Rohrleitungssystemen als auch an eine Leistungsexkursion zu denken, die zu einer Überhitzung des Reaktorcores und somit zum Sieden des Kühlmittels führen kann. Das etwa 500° C heiße Natrium kann je nach der Art des Störfalls dampfförmig, als Aerosol oder als Strahl austreten. Man unterscheidet Dampf-, Strahl- und Lachenbrände. In jedem Fall ist mit der Ausbildung von Lachen am Boden des betreffenden Raumes zu rechnen. Entsprechend dem Sauerstoffgehalt der Atmosphäre im Raum (Zelle, Containment) ist mit unterschiedlich heftigen Reaktionen des Natriums zu rechnen. Das innere Containment des SNR, in den das Natrium entweichen könnte, ist mit Stickstoff inertisiert. In dieser inertisierten Atmosphäre mit ca. 0,5 % Restsauerstoff findet eine relativ langsame Reaktion des Natriums zu Natriumoxid- bzw. peroxid statt.

Die entsprechenden exothermen Reaktionsgleichungen sind:



Bei Sauerstoffmangel wird Natrium hauptsächlich nach Reaktion (1) oxidiert, bei einem Sauerstoffüberangebot jedoch nach (2). Bei Anwesenheit von Luftfeuchte reagiert Natrium und Sauerstoff mit der größten molaren Reaktionsenthalpie. Der Brand nimmt bei Sauerstoffkonzentrationen > 10 % einen sehr heftigen Verlauf unter Flammenentwicklung. Bei diesen Natrium-Sauerstoffreaktionen können Aerosolkonzentrationen von 10 - 50 g/m<sup>3</sup> auftreten.

Die Möglichkeit derartiger Störfälle bedingt den Einbau von natrium- und natriumoxidresistenten Filteranlagen in die Abluftsysteme natriumgekühlter Reaktoren.

Im Rahmen eines längerfristigen Programms (PSB 1252) wurden deshalb Aerosolbildungsprozesse bei der Natrium-Sauerstoffreaktion in geschlos-

senen Räumen und das Verhalten verschiedener Filtertypen, insbesondere von Faserfiltern und Sandbettfiltern gegenüber chemisch reaktiven Natriumoxid-Aerosolen untersucht.

Dieser Bericht gibt einen Überblick über das bisher durchgeführte Versuchsprogramm, die Versuchstechnik sowie die bisherigen Ergebnisse.

## 2. Beschreibung der Versuchsanlage NABRAUS

Die Nabraus-Anlage (Natriumbrand und Schwebstofffilteranlage) wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe gebaut. Mit dieser Anlage werden die oben beschriebenen Versuchsprogramme zeitlich aufeinanderfolgend durchgeführt. Es ergaben sich die folgenden Bedingungen für die Konstruktion des Reaktionskessels:

Die Anlage soll

- groß genug im Volumen und in der Grundfläche sein, um das Aerosolverhalten bei ausgedehnten Natriumflächenbränden untersuchen zu können.
- eine ausreichende Höhe besitzen, um in einem später zu bearbeitenden Teilprogramm die Brandkinetik eines langen Natriumstrahles untersuchen zu können
- gegen aggressive Natronlauge beständig sein
- als Aerosolgenerator für Filteruntersuchungen dienen.

Diese Bedingungen führten zum Bau eines Versuchsgefäßes aus Edelstahl mit folgenden Abmessungen:

Durchmesser 1 m, Höhe 5 m, Inhalt  $3,9 \text{ m}^3$

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die in das Ober- und Untergeschoß der Halle hineinragenden Teile des Kessels.

Einen Überblick über die Funktion des Kessels und aller angeschlossenen Meßinstrumente wird an Hand des Blockschaltbildes der Abb. 3 vermittelt. Das Natrium wird über eine Glovebox unter inerter Atmosphäre in die Brandpfanne eingeschleust. Die Brandpfanne wird durch 3 Heizleiter von je ca. 10 KW Heizleistung auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt. Die Temperatur kann darüberhinaus auch geregelt werden.

Die Pfanne läßt sich vertikal bewegen und bildet in ihrer oberen Lage mit dem Kesselboden einen gasdichten Abschluß. Mit Hilfe der Vakuumpumpe (VP) läßt sich der Kessel evakuieren. Er kann mit Gas definierter Zusammensetzung gefüllt werden.

An Meßgeräten sind ein Filter- bzw. Waschflaschenkreislauf zur Bestimmung der luftgetragenen Massenkonzentration der Natriumoxidaerosole an den Kessel angeschlossen, ferner Meßgeräte zur Registrierung des zeitlichen Verlaufes der relativen Feuchte (rF), der Sauerstoffkonzentration während

des Brandes ( $O_2$ ), ein Druckmeßgerät (P), ein Vakuummeßgerät (V), ein Kondensationskernzähler (CNC) und schließlich ein Überdruckventil (Ü). Die Versuche werden immer bei Atmosphärendruck im Kessel ausgeführt. Sollen in der Anlage nicht nur Aerosolveruche durchgeführt werden, sondern die gebildeten Natriumoxidaerosole, z.B. für Filteruntersuchungen weiterverwendet werden, so muß die Nabraus-Anlage, wie im Teil 4 dieses Berichtes ausführlich beschrieben wird, erweitert werden.

### 3. Aerosolerzeugung und Aerosolverhalten bei Natriumbränden

#### 3.1 Experimentelle Ergebnisse

Es wurden Natriumbrände innerhalb zweier Versuchsserien durchgeführt. Die Serie 1 hatte 250 g Natrium als Ausgangsmenge, die Serie 2 2000 g. Im Rahmen dieser Versuche wurden Aerosolerzeugungsraten gemessen und das Aerosolverhalten bei Natriumbränden untersucht. Hierbei wurde auch geprüft, ob die Natriummenge einen Einfluß auf die luftgetragene Natriumoxidkonzentration und die Aerosolerzeugungsrate ausübt.

- 1) In der Serie 1 wurden Brände bei den Sauerstoffanfangskonzentrationen 0,8 %, 10 % und 14 % durchgeführt, in der Serie 2 bei den Sauerstoffanfangskonzentrationen 0,8 %, 10 %, 21 % und 43 %.

Wie man den Abb. 4 (Serie 1) und 5 (Serie 2) entnimmt, ergibt sich für sämtliche durchgeführten Brände im Containment qualitativ derselbe Aerosolmassenkonzentrationsverlauf von Natriumoxid mit der Zeit.

Man erkennt ein ausgeprägtes Maximum der Aerosolkonzentration noch vor Brandende und einen darauffolgenden stetigen Abfall der Konzentration. Auch die Lage der Kurven zueinander ist interessant: Die Kurve des zeitlichen Massenkonzentrationsverlaufes, die zur höchsten Sauerstoffkonzentration (43 %) gehört, verläuft am tiefsten, über ihr liegen in der Reihenfolge abnehmender  $O_2$ -Konzentration die anderen Kurven (vgl. Abb. 5).

- 2) Eng mit dem Brandgeschehen ist der zeitliche Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Kessel verbunden. Aus dem zeitlichen Verlauf der Sauerstoffabnahme während des Brandes kann man die Oxidationsrate bestimmen. Kennt man diese, so läßt sich aus dieser auch auf den zeitlichen Verlauf der luftgetragenen Aerosolmenge schließen. In Abb. 6 ist für 3 Sauerstoffanfangskonzentrationen 0,8 %, 21 % und 43 % die Abnahme der Sauerstoffkonzentration während des Natriumbrandes aufgetragen. Die Steigung der Kurve ist ein Maß für die Oxidationsrate  $Q$ .

Vergleicht man den zeitlichen Verlauf von Natriumoxidaerosolmassenkonzentration  $c_M$  und Oxidationsrate  $Q$ , dann erkennt man, wie aus Abb. 7 ersichtlich, daß der Zeitpunkt maximaler Oxidationsrate etwa

mit dem Massenkonzentrationsmaximum übereinstimmt. Da man die Oxidationsrate einfacher bestimmen kann als den zeitlichen Verlauf der Aerosolmassenkonzentration, läßt sich der Zeitpunkt der maximalen Massenkonzentration leicht aus dem Verlauf der Oxidationsrate ermitteln.

- 3) Der Einfluß der relativen Feuchte auf die Aerosolbildung bzw. das Aerosolverhalten ist in Abb. 8 dargestellt.

Hier wurden zwei Versuche mit je 250 g Natrium bei 21 %  $O_2$  und bei 28 % bzw. 80 % relativer Feuchte durchgeführt. Die Aerosolkonzentration bei 80 % rel. Feuchte ist über den gesamten Meßzeitraum kleiner als die bei 28 % rel. Feuchte. Die Ursache hierfür ist in dem schnelleren Aussedimentieren hygroskopischer Teilchen bei hohen Feuchten zu sehen.

- 4) Die von uns gemessenen integralen, also sich auf die gesamte Branddauer beziehenden Aerosolerzeugungsraten (Natriumoxid + Natrium), werden in der Abb. 9 als Funktion der Sauerstoffkonzentration gezeigt. Die Aerosolerzeugungsrate läßt sich aus den 3 experimentell ermittelten Größen Brandfläche, Branddauer und luftgetragener Menge Natrium berechnen. Letztere Größe erhält man aus der Differenz der Natriummenge vor dem Brand und der Menge Natrium + Oxid in der Brandpfanne nach dem Brand. Im allgemeinen waren ca. 50 % der Ausgangsnatriummenge luftgetragen. Wir stellten fest, daß die Aerosolerzeugungsrate im Rahmen der durchgeführten Versuche abhängig von der Brandfläche ist (21 %  $O_2$ ) und mit der Sauerstoffkonzentration deutlich zunimmt.

Freisetzungsraten aus siedendem Natrium anderer Autoren [1] im Konzentrationsbereich von 1 - 21 %  $O_2$  stimmen etwa mit unseren Werten überein, dagegen zeigen die in der Studie [2] zusammengefaßten Ergebnisse von 4 Autoren sehr starke Schwankungen der Brandrate von 5 - 83  $kg/h \cdot m^2$ . Es wurden die Brandfläche und die Behältertiefe des flüssigen Natriums variiert.

Auch wir finden, daß die Brandrate bis zu 50 % größer sein kann als die Aerosolerzeugungsrate, aber Werte von 83  $kg/h \cdot m^2$  für die Brandrate wurden bei uns nicht gemessen.

- 5) Bereits einfache physikalische Annahmen genügen, um die experimentellen Ergebnisse modelltheoretisch zu deuten. Dazu unterteilt

man den gesamten Aerosolkonzentrationsverlauf (vgl. Abb. 4 und 5) in zwei zeitlich aneinandergrenzende Bereiche.

1. Im 1. Bereich soll eine zeitlich veränderliche Aerosolerzeugung und eine thermophoretische Abscheidung bis zum Brandende überwiegen und den Konzentrationsverlauf bestimmen.
2. Im 2. Bereich soll die Aerosolerzeugung beendet sein. Neben dem Prozess der Thermophorese wird die Abscheidung der Aerosole durch die Sedimentation bestimmt.

Die Abb. 10 zeigt einen Versuch bei 21 %  $O_2$  und 30 % rel. Feuchte. Die gestrichelte Kurve gibt das Experiment wieder, die ausgezogene Kurve erhält man aus der Rechnung. Die Modellrechnung wird in 3.2 erläutert.

Weitergehende Modellvorstellungen werden mit dem Rechenprogramm PAR-DISEKO [3] verfolgt, besonders auch die Berechnung des Zeitverlaufs der Massenkonzentration für größere reale Containments von SNR-Kraftwerken.

### 3.2 Modelltheorie

Ausgehend von der Gleichung für die Änderung der Partikelkonzentration  $n(r,t)$  eines polydispersen Aerosols durch Koagulation [3], Thermophorese  $\alpha_{TH}(t)$ , Sedimentation  $\alpha_{Sed}(t)$  und Erzeugungsrate  $Q(r,t)$

$$\frac{\partial n(r,t)}{\partial t} = Q(r,t) - \alpha_{TH}(t) n(r,t) - \alpha_{Sed}(t) n(r,t) + \dots$$

$$\dots + \int_0^r \frac{r'}{\sqrt{2}} K(r',r'') n(r',t) n(r'',t) \frac{r^2}{r''^{2/3}} dr' \quad (1)$$

$$- n(r,t) \int_0^r K(r,r') n(r',t) dr'$$

$$\text{mit } r'' = (r^3 - r'^3)^{1/3}$$

erhält man für die zeitlich veränderliche Massenkonzentration  $c_M(t)$ , wenn man Gleichung (1) mit dem Faktor  $f = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho$  beiderseitig multipliziert und jedes Glied der Gleichung von  $0 \rightarrow \infty$  über  $r$  integriert.

Dabei ergibt sich eine wesentliche Vereinfachung dadurch, daß die Summe der der Koagulation zugehörigen Terme zu Null wird. Es bleibt folgende Gleichung übrig:

$$\frac{d c_M}{dt} = Q(t) - \alpha_{TH}(t) c_M - \alpha_{Sed}(t) c_M \quad (2)$$

mit 
$$\alpha_{TH} = 0,15 \frac{\eta}{\rho T} \frac{A}{V} \frac{\Delta T(t)}{\delta} = \alpha_{TH0} \cdot \Delta T(t)$$

$\eta$  = Zähigkeit der Luft

$\rho$  = Dichte von Luft

$A$  = Oberfläche des Kessels

$V$  = Volumen des Kessels

$T$  = absolute Temperatur des Aerosols

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwischen Aerosol und Kesselwand

$\delta$  = Grenzschichtdicke  $\approx 0,01$  cm

$$\alpha_{Sed} = 2/9 \cdot \frac{A}{V} \frac{\rho \cdot g}{\eta} r_g^2(t) e^{8 \cdot \sigma_L^2(t)}$$

$\rho$  : Aerosolpartikeldichte

$g$  : Erdbeschleunigung

$r_g(t)$  : Medianwert einer log. Normalverteilung

$\sigma_L(t)$  : Streubreite einer log. "

$\eta$  : Zähigkeit der Luft

Für den Fortgang der numerischen Berechnung von Gleichung (2) ist folgende und in 3.1.5) bereits erwähnte Fallunterscheidung wichtig.

1. Die Phase I, in der Thermophorese und Aerosolerzeugung vorherrschen, also wird hier Gleichung (2)

$$\frac{d c_M}{dt} = Q(t) - \alpha_{TH}(t) \cdot c_M \quad (2a)$$

Die numerische Lösung ist:

$$c_M(K) = c_M(K-1) + (Q(K-1) - \alpha_{TH}(t) \cdot c_M(K-1)) (t(K) - t(K-1))$$

$K = 1, 2 \dots n$  von  $t = 0 \rightarrow t = t_{BE}$   $t_{BE}$  : Branddauer

2. Die Phase II, in der Thermophorese und Sedimentation den Fällungsvorgang beschreiben, ist gegeben durch:

$$\frac{d c_M}{dt} = -\alpha_{TH}(t) c_M - \alpha_{Sed}(t) c_M \quad (2b)$$

Das Zeitverhalten von  $\alpha_{TH}(t)$  und  $\alpha_{Sed}(t)$  wurde experimentell ermittelt und durch die Gleichungen

$$\alpha_{TH} = \alpha_{THO} \Delta T_{max} \cdot e^{-K_o (t-t_{MS})^2} \quad (3)$$

und  $\alpha_{Sed} = A + \frac{C_{So}}{t}$

angenähert.

Hierin sind  $t_{MS}$  die Zeit, bei der  $\Delta T(t)$  ein Maximum besitzt, und  $Q(t)$ ,  $t_{BE}$ ,  $t_{MS}$ ,  $\Delta T_{max}$ ,  $K_o$ ,  $A$  und  $C_{So}$  experimentell ermittelte Eingabedaten.

Die Lösung der Gleichung (2b) unter Verwendung der beiden experimentell gesicherten Beziehungen (3) ergibt sich zu:

$$c_M(K) = \frac{c_M^{(K-1)} \exp\left[-\frac{\alpha_{THO}}{2\sqrt{K_o/\pi}} \operatorname{erf}\sqrt{K_o} t_{MS} - \frac{\alpha_{THO}}{2\sqrt{K_o/\pi}} \operatorname{erf}(\sqrt{K_o}(t-t_{MS})) - A \cdot (t-t_{BE})\right]^7 \left(\frac{t_{BE}}{t}\right)^{C_{So}}}{\exp\left[-\frac{\alpha_{THO}}{2\sqrt{K_o/\pi}} \operatorname{erf}\sqrt{K_o} t_{MS} - \frac{\alpha_{THO}}{2\sqrt{K_o/\pi}} \operatorname{erf}(\sqrt{K_o}(t_{BE}-t_{MS}))\right]^7} \quad (4)$$

von  $t = t_{BE}$  bis Versuchsende

Durch die Wahl eines günstigen Zeitschrittes im Bereich I und II erhält man die in Abb. 10 dargestellte Kurve.

In Abb. 10 wurde der experimentell ermittelte zeitliche Verlauf der Aerosolmassenkonzentration aufgezeichnet und mit dem oben beschriebenen Rechenprogramm PROMPT (Program for Massconcentration of Particles over Time) aus den Versuchsparametern berechnet.

Die gute Übereinstimmung beider Kurven ist offensichtlich.

Mit Hilfe dieser Modellrechnungen konnte gezeigt werden, daß die Aerosolmassenkonzentration zu Beginn des Brandes überwiegend durch thermophoretische Abscheidung und durch die Aerosolerzeugungsrate beeinflusst wird.

Der weitere Verlauf der Aerosolmassenkonzentration wird zwar noch durch Thermophorese, aber überwiegend durch Sedimentationsabscheidung bestimmt.

### 3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Natriumbrandversuche

- Die maximale Massenkonzentration bei großen und kleinen Sauerstoffkon-

zentrationen liegt etwa bei 1 - 10 g/m<sup>3</sup>. Im mittleren Sauerstoffkonzentrationsbereich (um 20 %) können sogar Maxima bei etwa 40 - 50 g/m<sup>3</sup> auftreten.

- Eine hohe rel. Feuchte hat eine geringere Natriumoxidaerosolkonzentration zur Folge als eine kleinere rel. Feuchte.
- Auch bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen muß im geschlossenen Behälter trotz niedriger Aerosolerzeugungsrate mit hoher luftgetragener Aerosolmassenkonzentration gerechnet werden.
- Die Aerosolerzeugungsrate nimmt mit der Sauerstoffkonzentration zu.
- Die Aerosolerzeugungsraten kleiner Brandflächen scheinen größer als die großer Brandflächen zu sein.
- Mit Hilfe einfacher Modellvorstellungen (also der physikalischen Einzelprozesse wie der Erzeugung von Aerosol, der Thermophorese und einer die Koagulation berücksichtigenden Sedimentation) kann man sich den Massenkonzentrationsverlauf erklären.

#### 4. Verhalten von Schwebstofffiltern gegenüber Natriumoxid-Aerosolen

##### 4.1 Versuchsanlage

Die in 2. bereits beschriebene Versuchsanlage wurde für die Untersuchungen an Faser- und Sandbettfiltern erweitert: Die Filter wurden in einem geschlossenen Gaskreislauf geprüft. Über der Brandpfanne innerhalb des NABRAUS-Kessels wurde eine kaminähnliche Abzugsvorrichtung errichtet, durch die die beim Brand entstehenden Aerosole in den Gaskreislauf gelangten. Dieser bestand aus dem Testfilter (Faser- oder Sandbettfilter), einem dahinter geschalteten Sicherheitsfilter, einem drehzahlgeregelten Gebläse, einem Durchflußmesser und einem Gaserhitzer. Für die Filteruntersuchungen bei verschiedenen relativen Feuchten wurde hinter den Lufterhitzer eine Befeuchtungsanlage eingebaut. Abb.11 zeigt eine schematische Darstellung des Filterkreislaufes. Bild 12 und Bild 13 zeigt die Anlage mit Fasertestfilter und Sandbettfilteranlage.

Im Kreislauf wurden Temperatur, Sauerstoffkonzentration und Durchfluß gemessen. Am Testfilter konnten Temperatur, Druckabfall und relative Feuchte bestimmt werden. Die Aerosolmassenkonzentration und Teilchengrößenverteilungen wurden vor und hinter dem Testfilter gemessen. Die Sauerstoffkonzentration wurde während des Versuchs im Gaskreislauf konstant gehalten.

##### 4.2 Versuche an Faserfiltern

Für die Untersuchungen wurden kommerzielle Faserfilter der Sonderstufe S mit abgedichtetem Metallrahmen der Größe 305 x 305 x 150 mm (CEAG-Hochleistungs-Schwebstoff-Kanal-Luftfilter Typ F 2) verwendet. Die Anströmfläche dieser Filter betrug ca.  $2,6 \text{ m}^2$ .

Zwei Versuche an Faserfiltern hinsichtlich ihrer Belastbarkeit mit Natriumoxid-Aerosolen wurden durchgeführt. Der Gasdurchfluß des unbeladenen Filters betrug  $4,0 - 4,5 \text{ m}^3/\text{min}$  (entsprechend Herstellerangabe). Die Temperatur im Gaskreislauf betrug  $100 - 150^\circ\text{C}$ .

Bei Versuch 1 wurde 1 kg Na bei 21 % Anfangs-Sauerstoffkonzentration verbrannt. Innerhalb von 6 Minuten wurde der Filter mit 110 g Natriumoxid beladen. Hierbei stieg der Differenzdruck am Filter von 23 mm WS auf 240 mm WS an. Der Anstieg des Filterdifferenzdruckes mit der Beladung ist in Abb. 14 wiedergegeben. Der Durchfluß sank von  $4,1 \text{ m}^3/\text{min}$  auf  $3,2 \text{ m}^3/\text{min}$

ab. Insgesamt wurde der Filter während dieses Versuches mit ca. 200 g Natriumoxid beladen. Durch zu hohen Druck zerriß schließlich das Filtermaterial. Vergleichsweise wurde in Abb. 14 der Druckabfall an einem Sandbettfilter miteingezeichnet.

Aus der Filterbeladung und der zeitlich integrierten Durchlaßrate läßt sich ein integraler Abscheidegrad ermitteln: er betrug bei diesem Versuch 99,98 %.

Ein weiterer Versuch wurde bei 1 % Sauerstoffgehalt im Gaskreislauf durchgeführt. Der Filter wurde mit maximal 38 g  $\text{Na}_2\text{O}_2$  beladen, wobei der Differenzdruck von 24 auf 125 mm WS anstieg. Der integrale Abscheidegrad betrug hier 99,5 %.

Abb. 15 zeigt im Hintergrund einen unbeladenen Faserfilter, im Vordergrund den bei Versuch 1 verwendeten Filter. Deutlich waren hier nach dem Versuch Korrosionserscheinungen sowohl am beladenen Filtermaterial als auch an den Abstandshaltern erkennbar.

An den beladenen Filtern wurden nach ca. 3 Tagen explosionsartige Verpuffungen beobachtet, die vermutlich auf eine Natrium-Wasser-(Luftfeuchte)-Reaktion zurückzuführen waren.

Die Versuche zeigten somit, daß bei Glasfaserfiltern nach einer Beladung mit ca.  $60 \text{ g/m}^2$  Natriumoxid-Aerosolen die tolerierbare Druckdifferenz am Filter erreicht ist. Glasfaserfilter können außerdem bei Beladung mit Natriumbrand-Aerosolen durch exotherme Reaktionen im Filter zerstört werden.

#### 4.3 Versuche an Sandbettfiltern

##### 4.3.1 Experimente mit festen Aerosolen

Für die Sandbettfilterversuche wurde ein Filtergehäuse konstruiert und gebaut, dessen äußere Abmessungen aus Abb. 16 zu ersehen sind. Das Gehäuse ist gasdicht und kann bis zu  $2 \text{ m}^3$  Sand aufnehmen. Die Durchströmgeschwindigkeit war von oben nach unten gerichtet. Die Anströmfläche betrug  $0,76 \text{ m}^2$ . Für die Schüttungen wurde Basaltsplit verwendet (da bei Brechsanden aufgrund ihrer kantigen Struktur eine relativ hohe Rückhaltung zu erwarten war). Vier Sandfraktionen standen zur Verfügung:

1. Basaltsplit 0/0,6  
gemessener Medianwert 0,28 mm  
Standardabweichung 1,15
2. Basaltsplit 0,6/2,0  
gemessener Medianwert 1,58 mm  
Standardabweichung 0,32
3. Basaltsplit 2,0/5,0  
gemessener Medianwert 3,0 mm  
Standardabweichung 0,32
4. Basaltsplit 5,0/11,0  
gemessener Medianwert 9,7 mm  
Standardabweichung 0,11

Eine typische Sandschüttung ist in die Abb. 16 eingezeichnet.

Der Boden des Filters bestand aus U-förmigen, ineinander geschachtelten Blechen, die einen ungestörten Gasabfluß gewährleisten. Darüber befindet sich im allgemeinen eine ca. 10 - 20 cm dicke Stützfraktion, an die sich eine Feinsandschicht anschließt. Die oberste Schicht des Filters bildet eine Grobsandschicht, in der der Hauptanteil des Aerosols abgefangen werden soll.

Es wurden Versuche mit verschiedenen Sandschüttungen bei einer Sauerstoffkonzentration von 21 % durchgeführt. Jeweils 5 kg Natrium wurden während eines Versuchs verbrannt. Die Aerosolmassenkonzentration wurde als Funktion der Zeit vor und nach dem Filter gemessen, und zwar vor dem Filter durch Auswaschen der Aerosole in Wasser und spätere Titration und nach dem Testfilter durch einen Massmonitor (Massenwaage). Zu jedem Zeitpunkt konnte somit aus beiden Massenkonzentrationen ein partieller Abscheidegrad ermittelt werden. Über den gesamten Versuch integriert ergibt sich dann ein Gesamtabscheidegrad  $\bar{\eta}$ .

Beispielhaft für die Filterversuche wurden in Ab.. 17 für einen Sandbettfilterversuch die gemessenen Aerosolmassenkonzentrationen vor und nach dem Filter als Funktion der Zeit aufgetragen. Wie es bei Na-Bränden in geschlossenen Behältern stets beobachtet wird, steigt die Massenkonzentration auf ca.  $10 \text{ g/m}^3$  Natriumoxid an, um dann langsam gegen Null abzufallen. Dieser Konzentrationsverlauf spiegelt sich nach dem Filter wieder. Der Filter weist zum Zeitpunkt des größten Aerosolangebotes den niedrigsten Wirkungsgrad auf. Noch vor Versuchsende steigt  $\eta$  wieder

schnell an und liegt bei fast allen Versuchen besser als 99,9 %.

In einer 1. Versuchsserie wurde die optimale Sandschichtung im Filter hinsichtlich des Wirkungsgrades ermittelt. Eine Auswahl der Versuchsergebnisse für zwei verschiedene Schüttungen wird in Tabelle, Abb. 18, gezeigt. Die Stüttschicht mit der Fraktion 2/5 wurde hierbei nicht verändert. Die Schüttungen I und II unterscheiden sich im wesentlichen durch einen veränderten Feinkornanteil der mittleren Schicht, wobei die Schüttung I den Vorteil geringeren Differenzdrucks am Filter hat. Bei beiden Schüttungen enthält die oberste Schicht Grobkornanteil, um eine größere Beladung des Filters zu erzielen. Es wurden Beladbarkeiten  $B_g$  zwischen 400 und 600  $g/m^2$  erzielt.

In einer 2. Versuchsserie wurde für die ermittelte optimale Sandschüttung in mehreren Versuchen der Durchfluß verändert. Die Abb. 18 zeigt Abscheidegrad und Gesamteladung bei Durchflüssen zwischen 2000 und 400 l/min. Dem entsprechen Anströmgeschwindigkeiten zwischen 4,4 und 0,9 cm/sec. Hohe Abscheidegrade wurden bei großen und kleinen Durchflüssen beobachtet.

Die Abb. 19 zeigt für die Schüttung I den Druckabfall am Filter als Funktion der spezifischen Beladung aufgetragen. Bei geringem Durchfluß wurde erst bei einer Beladung von 320  $g/m^2$  ein merklicher Druckanstieg beobachtet, während bei Durchflüssen um und über 1000 l/min der Druck kontinuierlich mit der Zeit bzw. der Beladung anstieg, da die spezifische Beladung etwa linear proportional zur Zeit [4] ist.

#### 4.3.2 Modelltheorie für Sandbettfilter

Im folgenden soll nun versucht werden, den Zusammenhang zwischen  $\Delta p$  und der Zeit  $t$  bzw. der spezifischen Beladung  $B_g$  und die dafür verantwortlichen Aerosol-Abscheidemechanismen zu erläutern. Bei unbeladenem Filter besteht eine lineare Beziehung zwischen  $\Delta p$  und der Anströmgeschwindigkeit  $v_0$ . Diese Beobachtungen und die anderer Autoren [5] legen den Schluß nahe, daß für die von uns verwendeten Strömungsgeschwindigkeiten das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz angewendet werden kann.

Bei den Überlegungen kann man als experimentell gesichert annehmen, daß fast der gesamte Druckanstieg während der Filterbeladung seine

Ursache in der Ausbildung des Filterkuchens in der obersten Schicht des Sandbettfilters hat. Betrachtet man die oberste Schicht des Sandbettfilters (ca. 1 cm dick) als Kapillarenfilter mit  $N_K$  etwa gleich langen und dicken Kapillaren, so erhält das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz die folgende, in Abb. 20 (unten) gezeigte Form.

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen  $\Delta p$  und dem Durchfluß  $\dot{V}$  bzw. der Anströmgeschwindigkeit  $v_0$ .

Betrachtet man nun den oberen Teil der Abb. 20, so kann man in 1. Näherung für den Kapillarverschluß durch die Aerosole ein exponentielles Gesetz finden. Diese Ableitung in das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz eingefügt, ergibt schließlich den Ausdruck

$$\Delta p = C e^{Bt}$$

Um die Gültigkeit dieses Modellansatzes zu testen, wurden die experimentell ermittelten Werte für die Größe B über der Anströmgeschwindigkeit  $v_0$  aufgetragen.

Wie schon Davies [6] in einer Untersuchung an Faserfiltern über die Größe B fand, enthält sie Aerosoleigenschaften ( $\bar{c}$ ,  $r_{pa}$ ,  $D$ ,  $\rho_{pa}$ ,  $v_0$ ,  $\eta$ ) und Filtereigenschaften ( $R_{Krü} \approx r_{coll}$ ,  $r_0$ ). Hält man alle Größen bis auf  $v_0$  konstant, dann müßte B über  $v_0$  aufgetragen, einen quadratischen Verlauf haben, wenn man davon ausgeht, daß die Größe a gegen  $r_0$  zu vernachlässigen ist. Gerade dieses trifft für die oben liegende Filterschicht zu. Man erhält im wesentlichen den erwarteten quadratischen Anstieg der Größe B mit der Anströmgeschwindigkeit (Abb. 21). Dem Abfall von  $\bar{c}$  mit größerem  $v_0$  wurde in Abb. 21 Rechnung getragen, wobei  $\bar{c}$  die mittlere Aerosolmassenkonzentration, D der Diffusionskoeffizient der Aerosolpartikel ist. Die experimentellen B-Werte in Abb. 21 setzen sich aus einem geschwindigkeitsunabhängigen Term  $B_1$  und einem geschwindigkeitsabhängigen Term  $B_2$  zusammen. Während der erste geschwindigkeitsunabhängige Term  $B_1$  einen Abscheidemechanismus z.B. der Interzeption beschreibt, ist für den geschwindigkeitsabhängigen Term vor allem die Impaktion verantwortlich.

Nun zur modellmäßigen Beschreibung der Filterdurchlässigkeit an einem Mehrschichtensandbettfilter.

Man geht von der Annahme aus, daß man es vorwiegend mit drei Abscheidemechanismen zu tun hat, nämlich mit Diffusion, Sedimentation und Träg-

heit. Für diese drei Abscheidemechanismen konnte ein Modellansatz der Abscheidung in Kapillaren erarbeitet werden. Der Kapillaran-satz ist in sofern gerechtfertigt, als die Versuche bei Re-Zahlen ( $N_{Re}$ ) von etwa 1 - 10 durchgeführt wurden, also gerade im Zwischenbereich zwischen viskosem Flußgebiet ( $N_{Re} < 0,2$ ) und potentiellen Fluß ( $N_{Re} > 150$ ) liegen. Die meisten Filtertheorien gelten jedoch nur für  $N_{Re} < 1,0$  [7] und im potentiellen Fluß ( $N_{Re} > 150$ ) [8].

Abb. 22 zeigt den Modellansatz. Man betrachtet ein gerades Stück Kapillare und einen Viertelbogen. Aus Bilanzbetrachtungen ergeben sich die Durchlässigkeiten  $p^{Diff+Sed}$  und  $p^{Träg}$ . Da die ersten beiden Vorgänge gleichzeitig und die Trägheitsabscheidung zeitlich un-abhängig von Sed. und Diff. stattfinden soll, kann man ansetzen, daß die Gesamtdurchlässigkeit das Produkt der Einzeldurchlässigkeiten ist. Für  $p_{ges}$  ergibt sich:

$$p_{ges} = e \left\{ \frac{KT \cdot \epsilon \cdot f}{3\pi r_{pa} \cdot v_o} + \frac{2}{9} \frac{r_{pa}^2 \cdot g \cdot \rho_{pa} \cdot \epsilon \cdot r_{coll}}{v_o} + \frac{2\pi \cdot r_{pa}^2 \cdot \rho_{pa} \cdot v_o}{\epsilon} \right\} \frac{f \cdot L}{\eta \cdot r_{coll}^2}$$

$\epsilon$ : Porosität	$L$ : Kapillarlänge
$f$ : $6,65 < r_{coll} / r_{Kap} < 10$	$\eta$ : Zähigkeit des Gases
$v_o$ : Anströmgeschwindigkeit	$r_{coll}$ : Sandkornradius
$\rho_{pa}$ : Aerosolpartikeldichte	$r_{Kap}$ : Kapillarenradius
$r_{pa}$ : Aerosolpartikelradius	$g$ : Erdbeschleunigung

Die an Mehrschichtensandbettfiltern gemessenen Durchlässigkeiten bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten zeigt Abb. 23. Rechts ist hier der von uns verwendete Mehrschichtensandbettfilter eingezeichnet, die Schichten mit Numerierung 1a bis 3 und die zugehörigen Porositäten  $\epsilon$ . Bis auf die oberste Schicht, die den Filterkuchen aufnimmt, zeichnen sich die nachfolgenden Schichten durch abnehmende Porosität sowie abnehmende Sandkornradien aus. Das soll bewirken, daß die feinsten Aerosole auch noch an tiefer liegenden Sandkornschichten möglichst vollständig abgeschieden werden. Mit dem oben gewonnenen Ausdruck für die Gesamtdurchlässigkeit einer Schicht wurden in Abb. 23 die Einzeldurchlässigkeiten einiger ausgezeichnete Schichten berechnet. Die Gesamtdurchlässigkeit des Filters wird durch die unterste Kurve dargestellt. Die Meßergebnisse sind ebenfalls eingezeichnet. Man erkennt eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Experiment

und der untersten Kurve für die Gesamtdurchlässigkeit.

#### 4.3.3 Experimente mit flüssigen Aerosolen

Die beschriebenen Untersuchungen an Sandbettfiltern wurden bei rel. Feuchten um 30 % und somit an festen Natriumoxid- bzw. -hydroxid-Aerosolen durchgeführt [9].

Der Einfluß höherer Feuchten bzw. flüssiger Aerosole auf das Verhalten der Sandbettfilter wurde in 3 zusätzlichen Versuchen getestet.

Die Versuche wurden wie bisher im Filterkreislauf am Nabrausversuchsstand durchgeführt. In den Kreislauf wurde zusätzlich eine Befeuchtungsanlage eingebaut, die es erlaubte, die rel. Feuchten auf  $\pm 5\%$  genau einzustellen. 5 kg Natrium wurden abgebrannt, der Gasdurchfluß durch den Filter betrug 700 Liter pro Minute. Es wurde die Sandschüttung II [9] gewählt. Die Betriebszeit des Sandbettfilters betrug eine Stunde. Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

<u>Versuch</u>	<u>26</u>	<u>27</u>	<u>28</u>	<u>25</u>
rel. Feuchte [%]	70	40	70	30
Wirkungsgrad [%]	99,93	99,98	99,96	99,99
Spezifische Beladung [g/m <sup>2</sup> ]	206	726	344	660

In die obige Tabelle wurde repräsentativ für die bisherigen Untersuchungen der Versuch 25 mit aufgenommen.

Es ist zu erkennen, daß mit zunehmender Feuchte der Wirkungsgrad des Filters zwar abnimmt, aber trotzdem noch Wirkungsgrade deutlich über 99,9 % erzielt wurden.

Wie in früheren Experimenten bereits erkennbar wurde (3.1/3) zeigte ein Vergleich der spez. Beladung, daß die luftgetragene Aerosolkonzentration mit zunehmender Feuchte abnimmt.

#### 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Filterversuche

1. Sandbettfilter mit oben beschriebener Zusammensetzung haben für feste Natriumoxid-Aerosole Abscheidegrade, die besser als die von HEPA-Filter sind.

2. Das Kapillarmodell mit dem Hagen-Poiseuille'sche Gesetz als Basis gibt eine erste Möglichkeit, den komplizierten Druckanstieg  $\Delta p$  am Filter mit der Zeit bzw. mit der spez. Beladung zu verstehen.
3. Das Kapillarmodell gibt uns weiterhin einen Ausdruck für die Durchlässigkeit  $p$  in einer Filterschicht. Es spielen vor allem Diffusion, Sedimentation und Impaktion als Abscheidemechanismen eine entscheidende Rolle.

5. Literatur

- [1] NAA-SR-Memo 11403, A.N. Lauben, R.L. Koontz, M.A. Greenfield,  
C.T. Nelson
- [2] ANL-7691, DE. Lew
- [3] KFK 2151, H. Jordan, Ch. Sack, PARADISEKO III, "A Computer Code for  
Determining the Behavior of Contained Nuclear Aerosols"
- [4] L. Böhm, S. Jordan, W. Schikarski  
"Aerosolverhalten bei Natriumbränden im SNR-Containment"  
Reaktortagung 1973, Karlsruhe
- [5] J. Gebhart, C. Roth, W. Stahlhofen  
"Filtration Properties of Glass Bead Media for Aerosol Particles  
in the 0,1 - 2  $\mu$ m Size Range"  
J. Aerosol Science 1973, 4, 355-371
- [6] C.N. Davies  
"The Clogging of Fibrous Aerosol Filters"  
J. Aerosol Science 1970, 1, 35-39
- [7] K.T. Whitby  
"Calculation of the Clean Fractional Efficiency of Low Media  
Density Filters"  
Ashrae Journal, Sept. 1965, pp. 56-65
- [8] N.A. Fuchs  
"The Mechanics of Aerosols"  
Pergamon Press, 1964, pp. 211
- [9] L. Böhm, S. Jordan  
3. Vierteljahresbericht 1974, KFK 1974/3 EUR 5199

## 6. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 Oberer Teil des NABRAUS-Versuchsstandes
- Abb. 2 Unterer Teil des NABRAUS-Versuchsstandes
- Abb. 3 Blockschaltplan NABRA-Versuchsstand
- Abb. 4 Zeitlicher Verlauf der Massenkonzentration  $C_M(t)$  bei drei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen, rel. Feuchte 24-32%
- Abb. 5 Aerosolmassenkonzentrationen von Natriumoxid bei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen, Konstante rel. Feuchte
- Abb. 6 Abnahme der Sauerstoffkonzentration während eines Natriumbrandes
- Abb. 7 Zusammenhang zwischen Aerosolmassenkonzentrationen und Oxidationsrate
- Abb. 8 Aerosolmassenkonzentrationen bei Natriumbränden mit verschiedenen rel. Anfangsfeuchten, 250 g Natrium, 21%  $O_2$
- Abb. 9 Tabelle der Aerosolerzeugungsraten
- Abb. 10 Natriumbrand bei 21% Sauerstoff und 30% rel. Feuchte  
Vergleich zwischen experimentellem Ergebnis und modelltheoretischer Deutung
- Abb. 11 Blockschaltplan des Filter-Kreislaufs
- Abb. 12 Filterloop mit Schwebstofffiltergehäusen
- Abb. 13 Filterloop mit Sandbettfiltergehäuse
- Abb. 14 Druckabfall am Faser- und Sandbettfilter während der Beladung mit Natriumoxid-Aerosolen
- Abb. 15 Beladener und unbeladener Glasfaserfilter
- Abb. 16 Cross-Section of a Sandbedfilter
- Abb. 17 Aerosolkonzentration vor und nach dem Sandbettfilter und Abscheidegrad während der Beladung mit Natriumoxid-Aerosolen
- Abb. 18 Sandbettfiltermessungen an zwei verschiedenen Sandschüttungen
- Abb. 19 Druckabfall an einem Sandbettfilter während der Beladung mit Natriumoxid-Aerosolen bei verschiedenen Durchsätzen

- Abb. 20 I. Kinetik des Kapillarenverschlusses und  
II. Hagen-Poiseuille'sches Gesetz
- Abb. 21 Modellansatz für die Größe B der Gleichung  $\Delta p = C \exp(Bt)$
- Abb. 22 Modellansatz zur Ermittlung der Filterdurchlässigkeit  $P_{\text{Gesamt}}$
- Abb. 23 Modell für die Gesamtdurchlässigkeit eines Mehrschichten-  
sandbettfilters

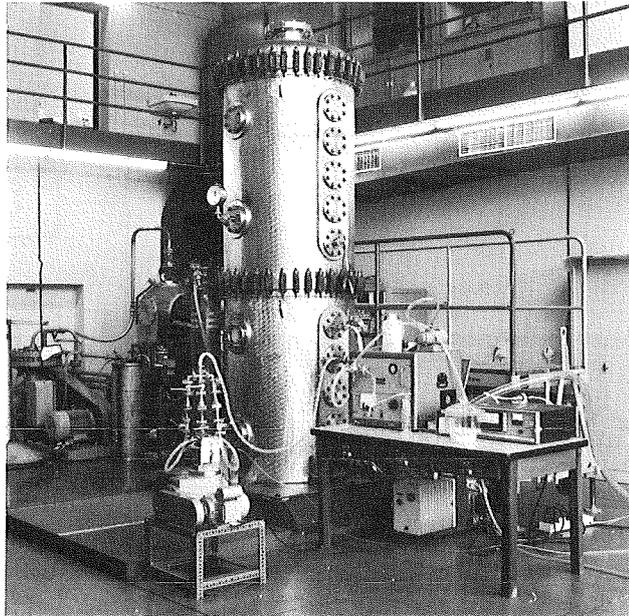


Abb. 1 Oberer Teil des NABRAUS-  
Versuchsstandes

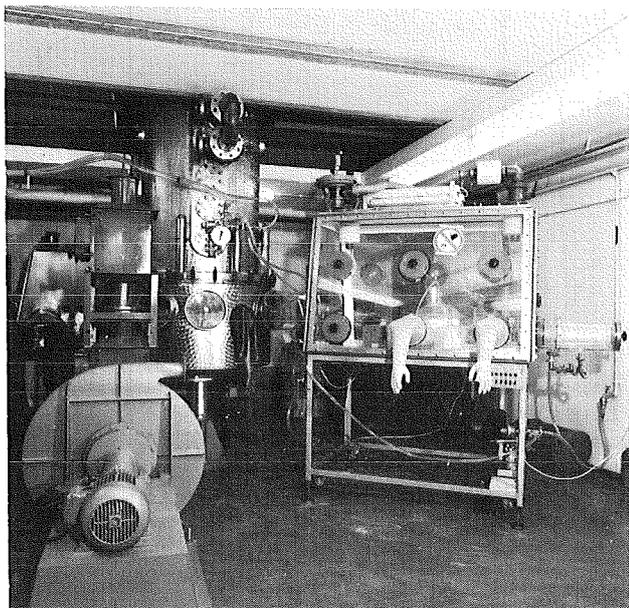


Abb. 2 Unterer Teil des NABRAUS-  
Versuchsstandes

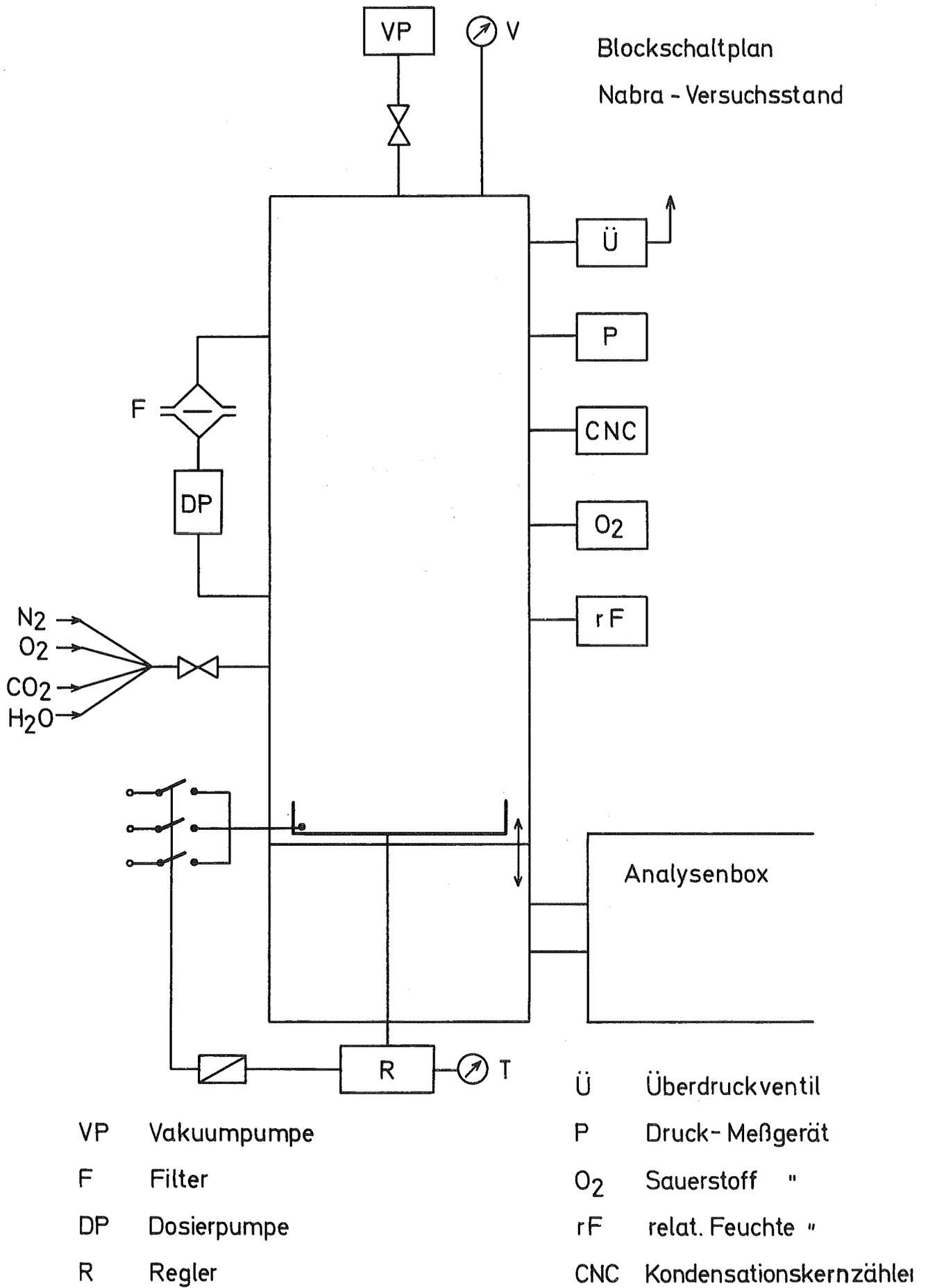


Abb. 3

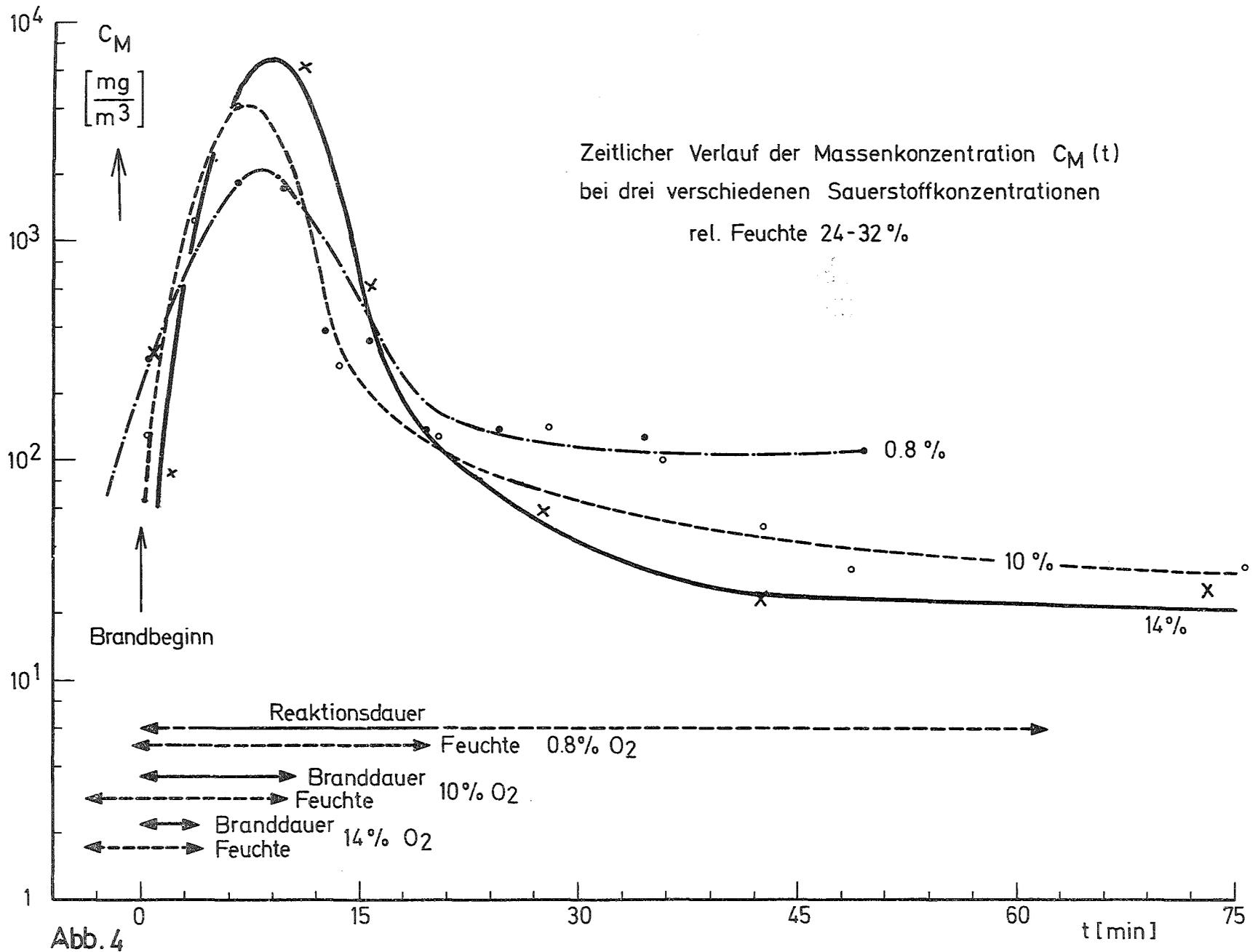


Abb. 4

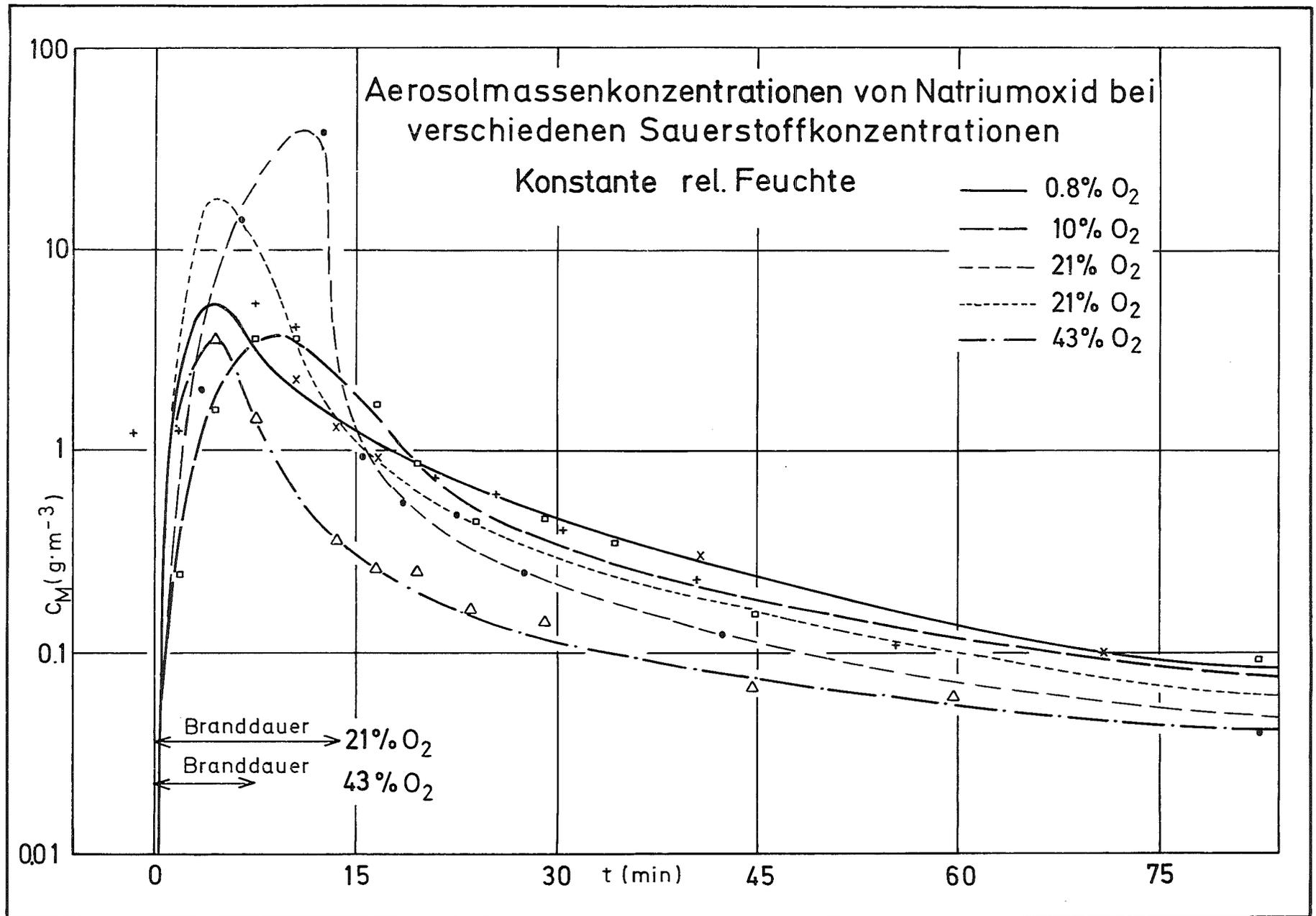


Abb.5

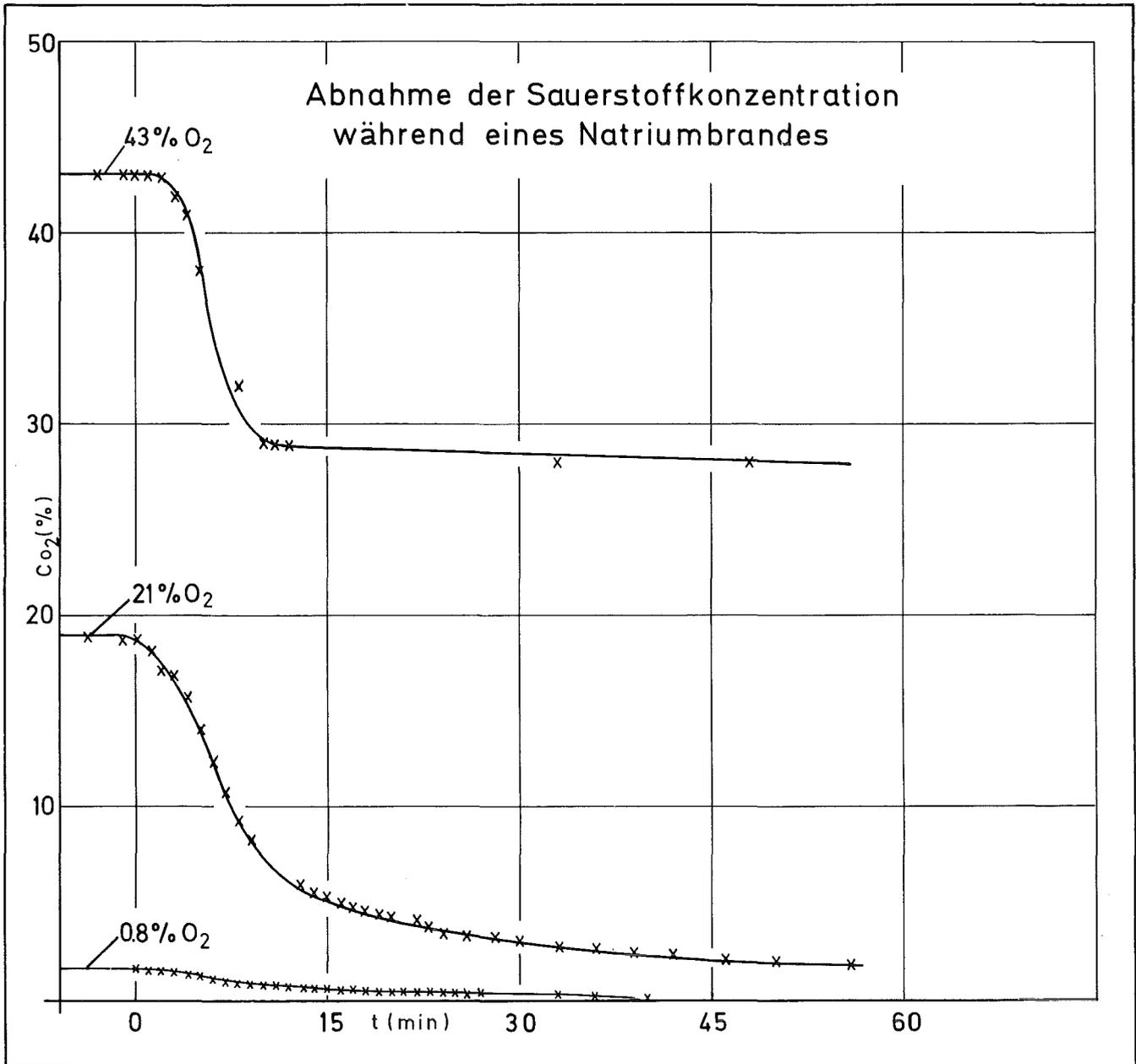
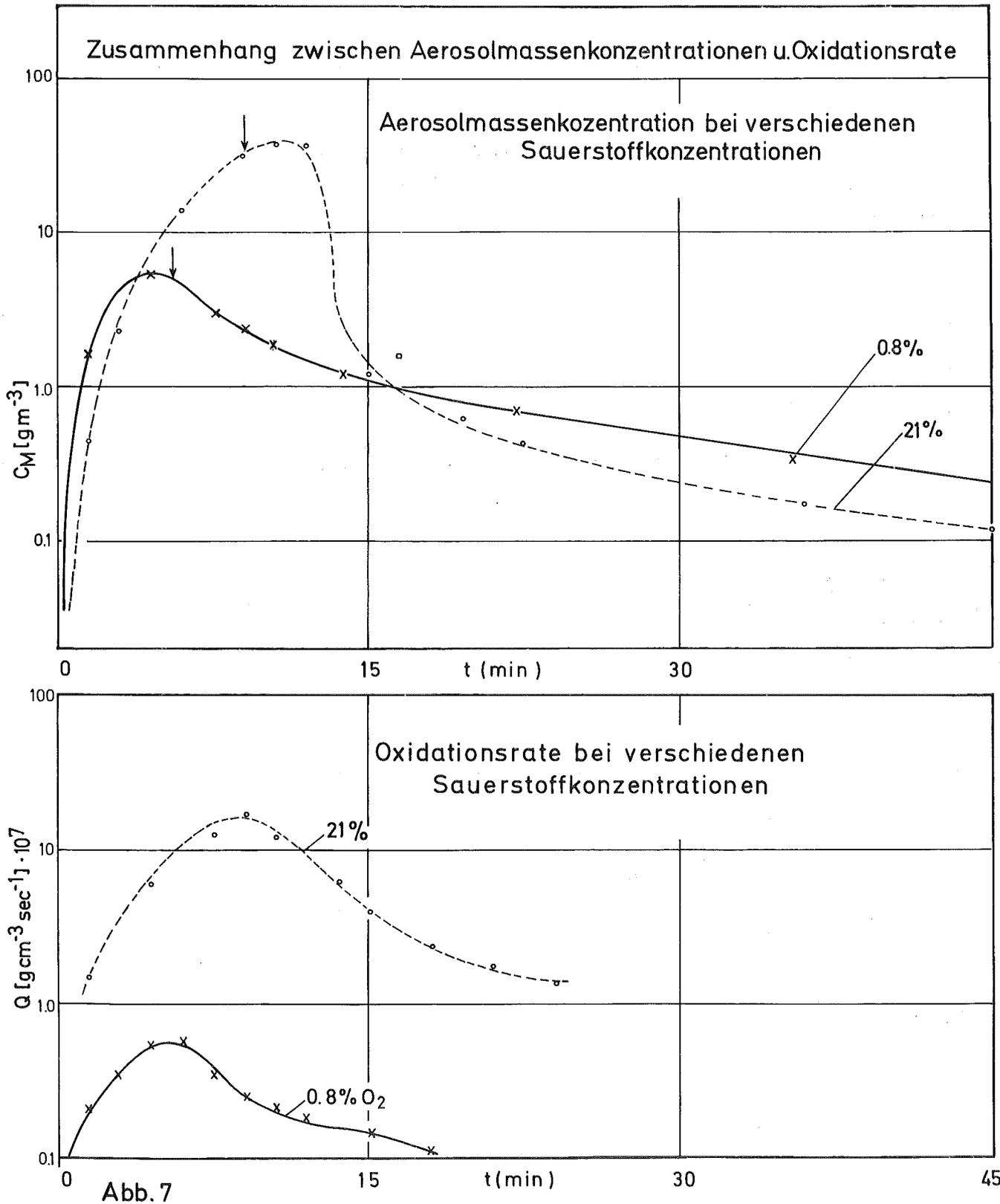


Abb. 6



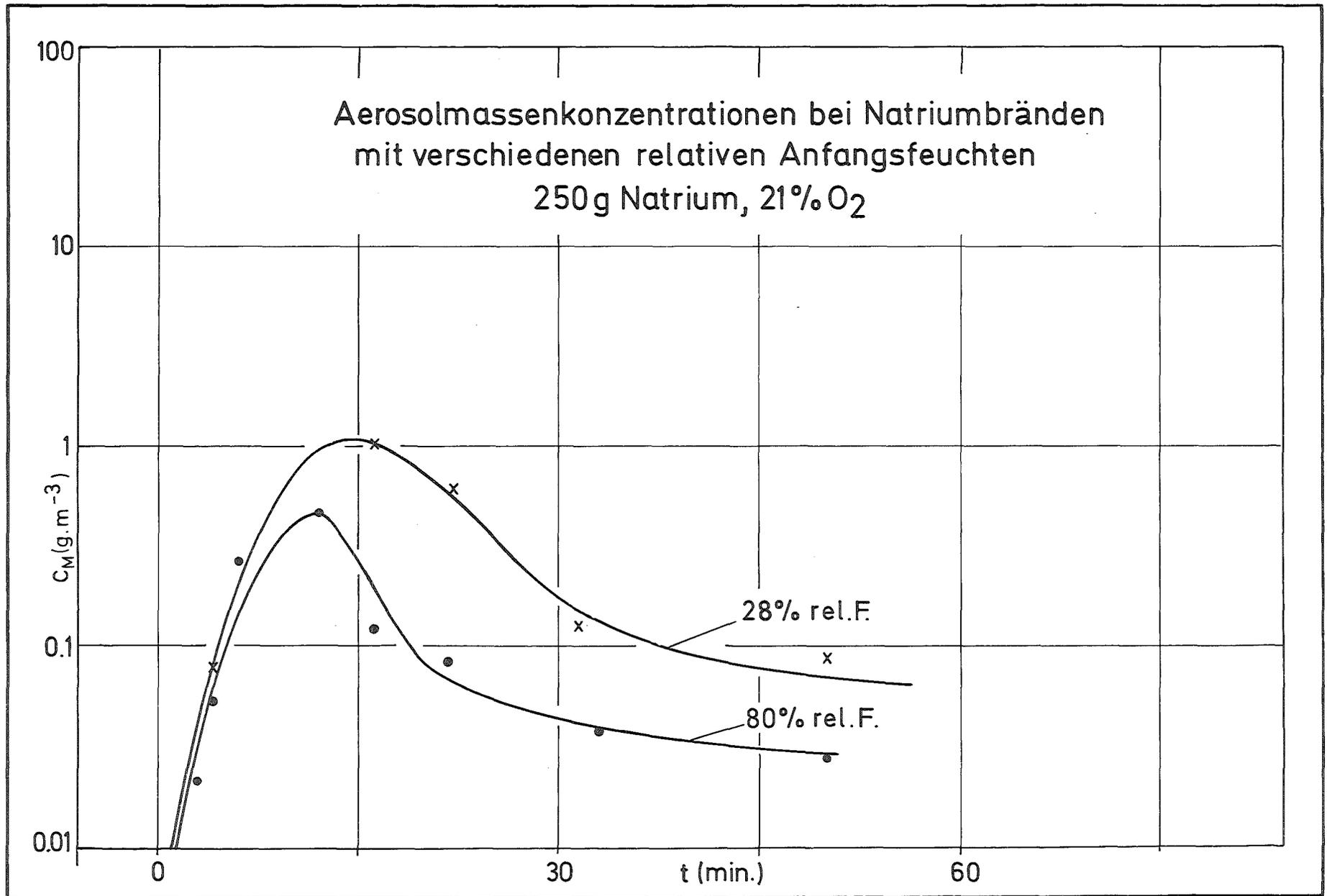


Abb. 8

O <sub>2</sub> -Konzentration [ % ]	Brandfläche [ cm <sup>2</sup> ]	Branddauer [ min ]	Luftgetragene Natriummenge [ g ]	Aerosolerzeugungsrates rate [ $\frac{\text{g} \cdot \text{Na}}{\text{cm}^2 \cdot \text{min}}$ ] [ $\frac{\text{kg} \cdot \text{Na}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ ]	
0.8	3 080	60	464	0.0025	1.5
2	392	62	107	0.004	2.4
10	864	6	135	0.014	8.4
14	935	4	149	0.036	22
21	758	6	135	0.029	18
21	4 770	14	1194	0.018	11
43	2 110	8	800	0.048	29

Abb.9 Tabelle der Aerosolerzeugungsrates

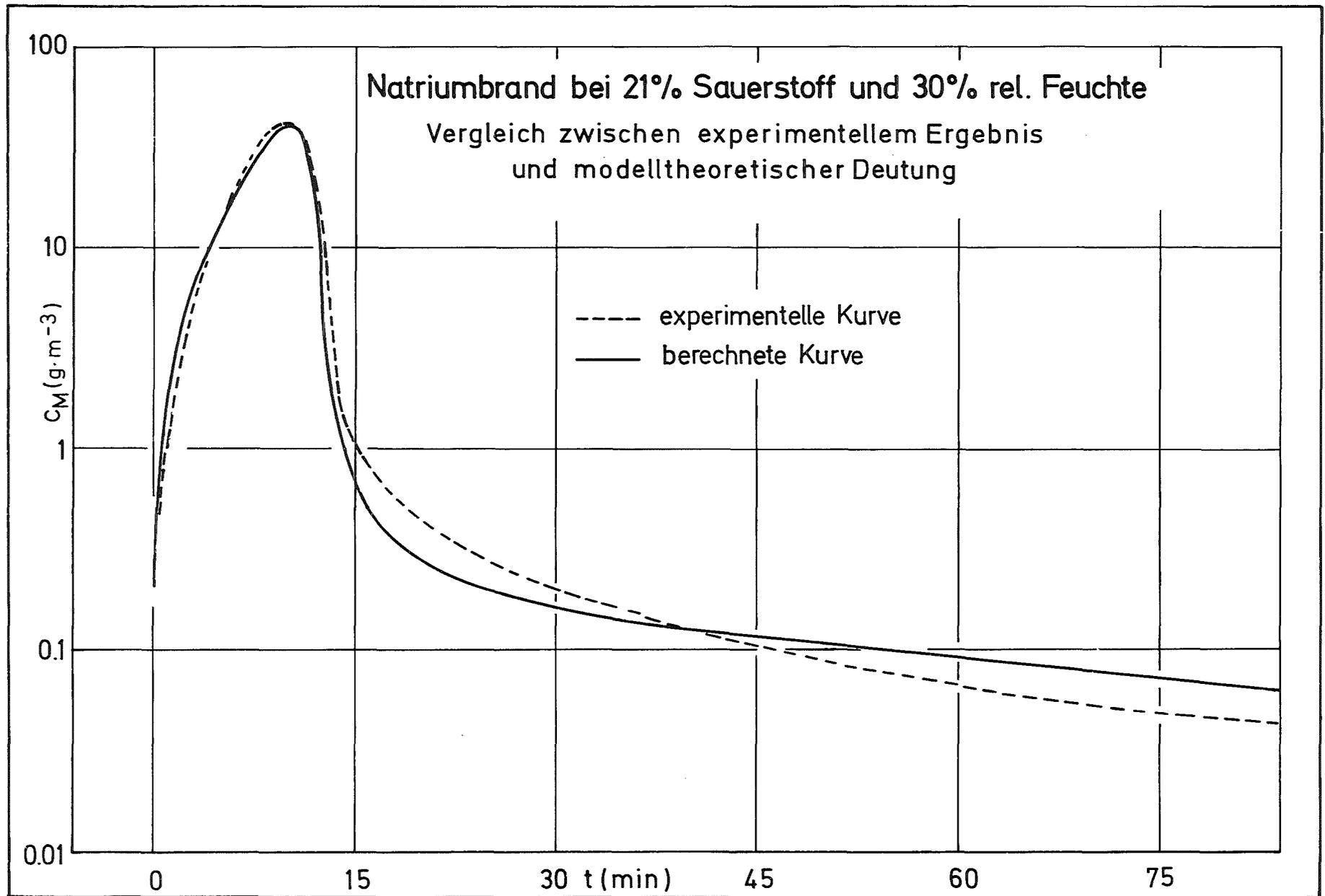
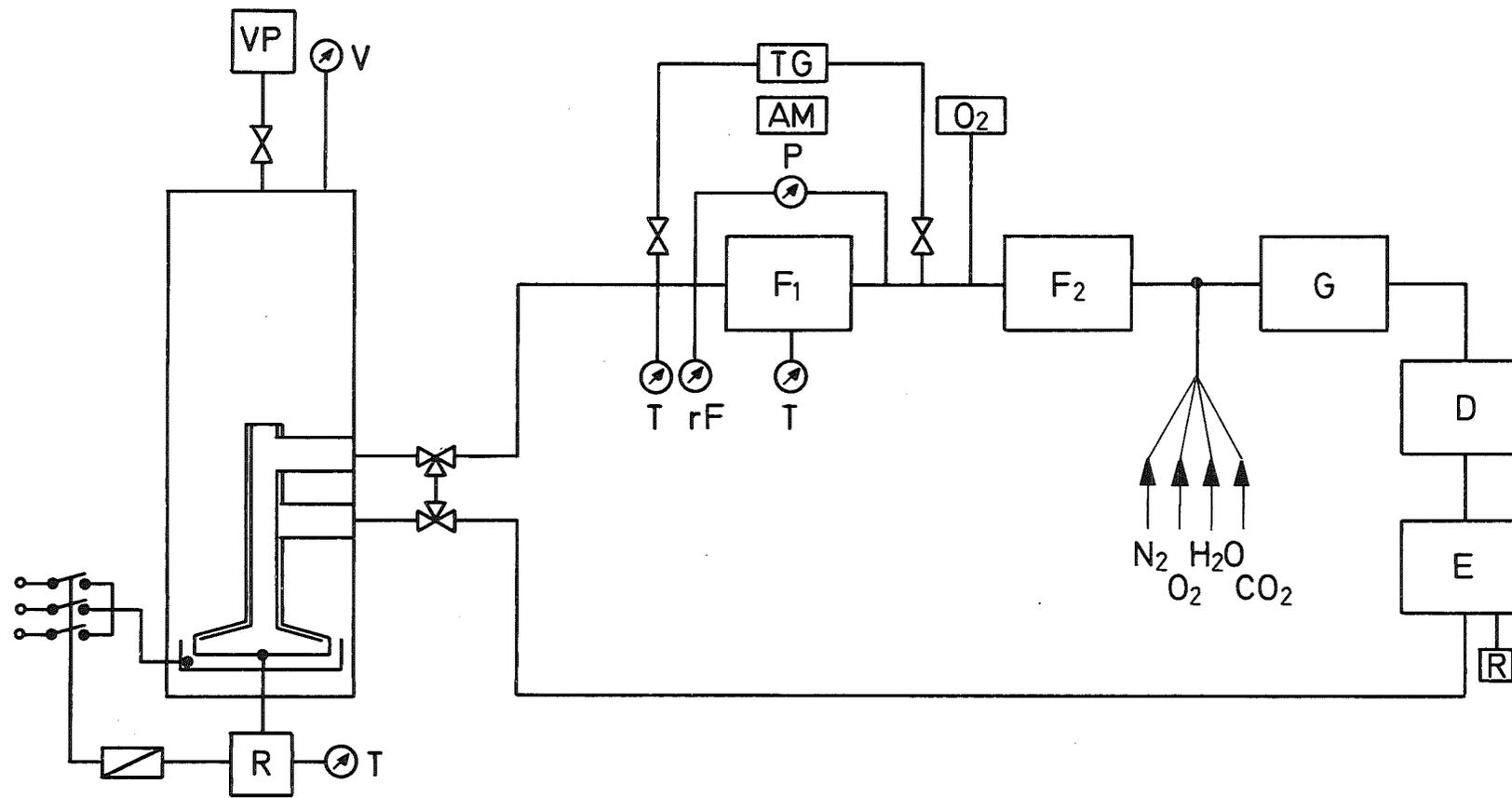


Abb. 10



- |                                    |                                 |   |
|------------------------------------|---------------------------------|---|
| VP - Vakuumpumpe                   | E - Gaserhitzer                 | P - Druck - Messgerät                   |
| F <sub>1</sub> - Testfilter        | R - Regler                      | O <sub>2</sub> - Sauerstoff - Messgerät |
| F <sub>2</sub> - Sicherheitsfilter | V - Vakuum - Messgerät          | AM - Aerosol - Messgerät (Massen-Konz)  |
| G - Gebläse                        | T - Temperatur - Messgerät      | TG - Teilchengrößen -                   |
| D - Durchflussmesser               | rF - Relat. Feuchte - Messgerät | analysator                              |

Abb. 11

Blockschaltplan des Filter-Kreislaufs

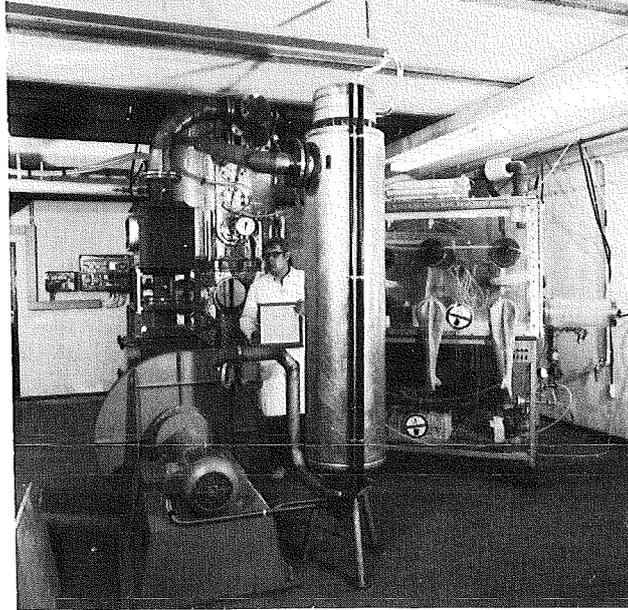


Abb. 12 Filterloop mit Schwebstoff-  
filtergehäusen

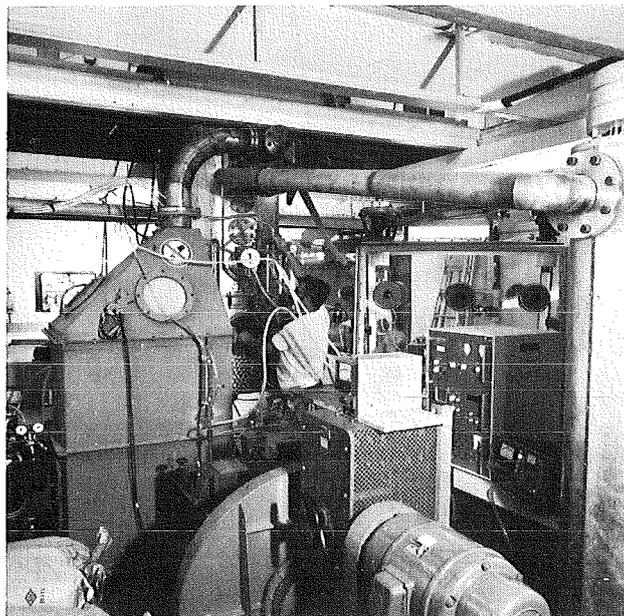


Abb. 13 Filterloop mit Sandbett-  
filtergehäuse

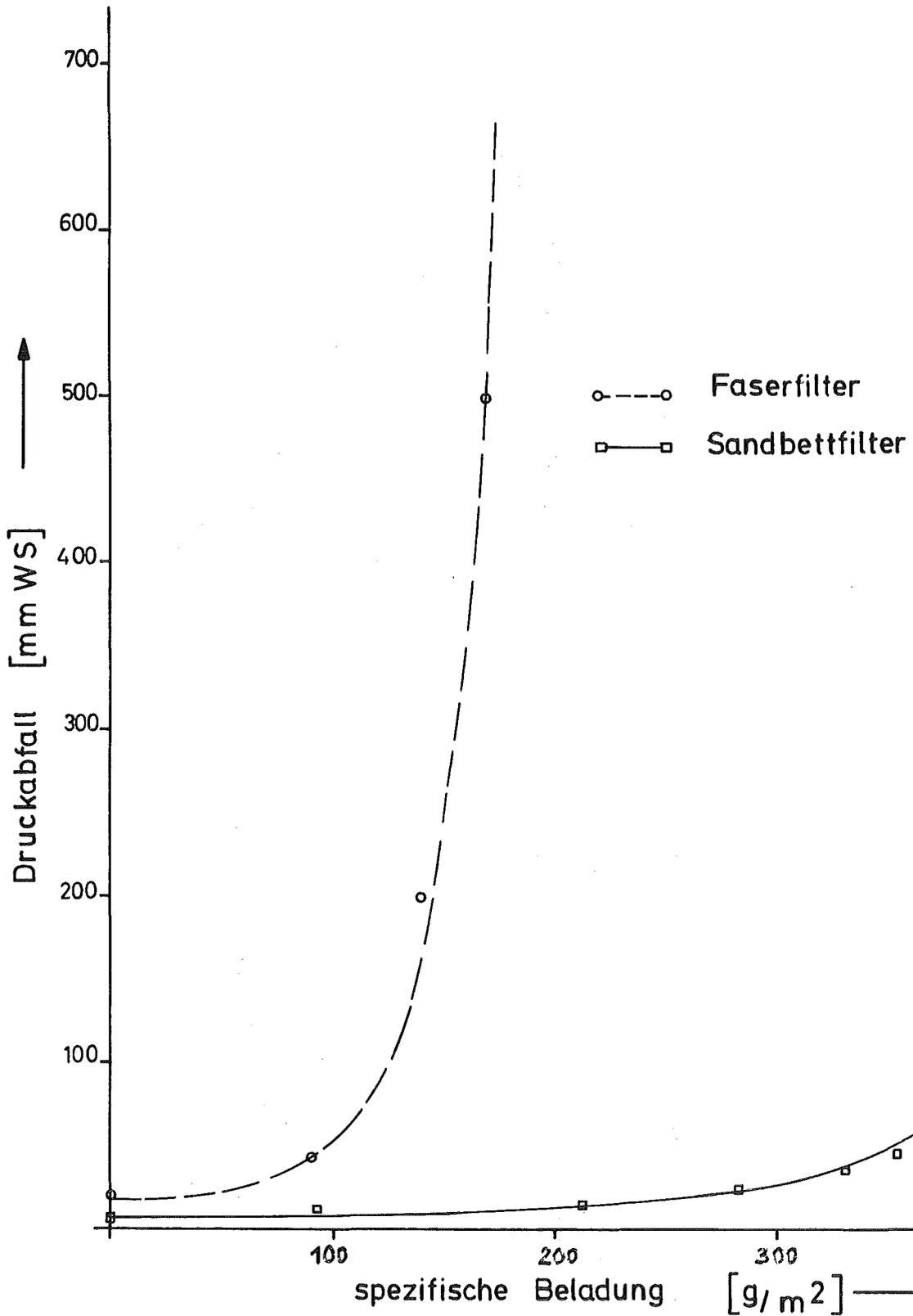


Abb. 14

Druckabfall am Faser- und Sandbettfilter während der Beladung mit Natriumoxid-Aerosolen.

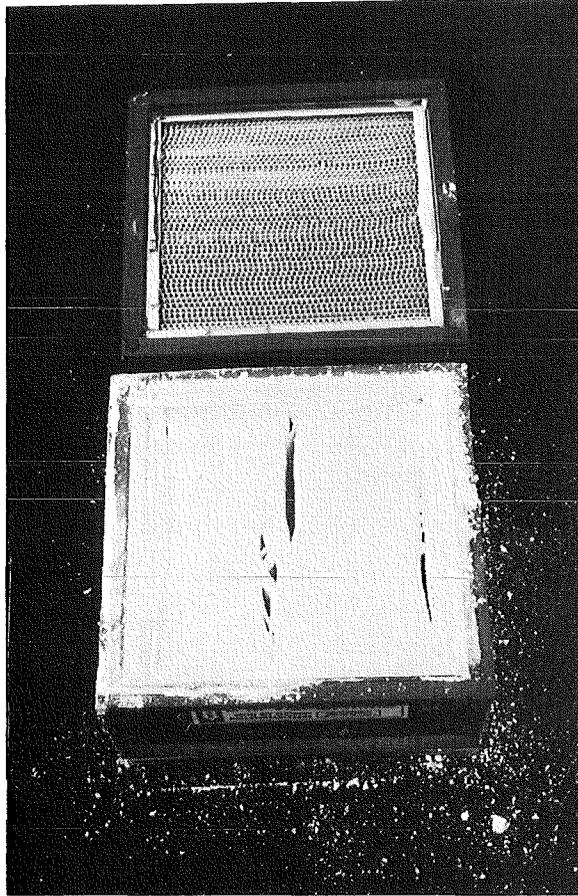
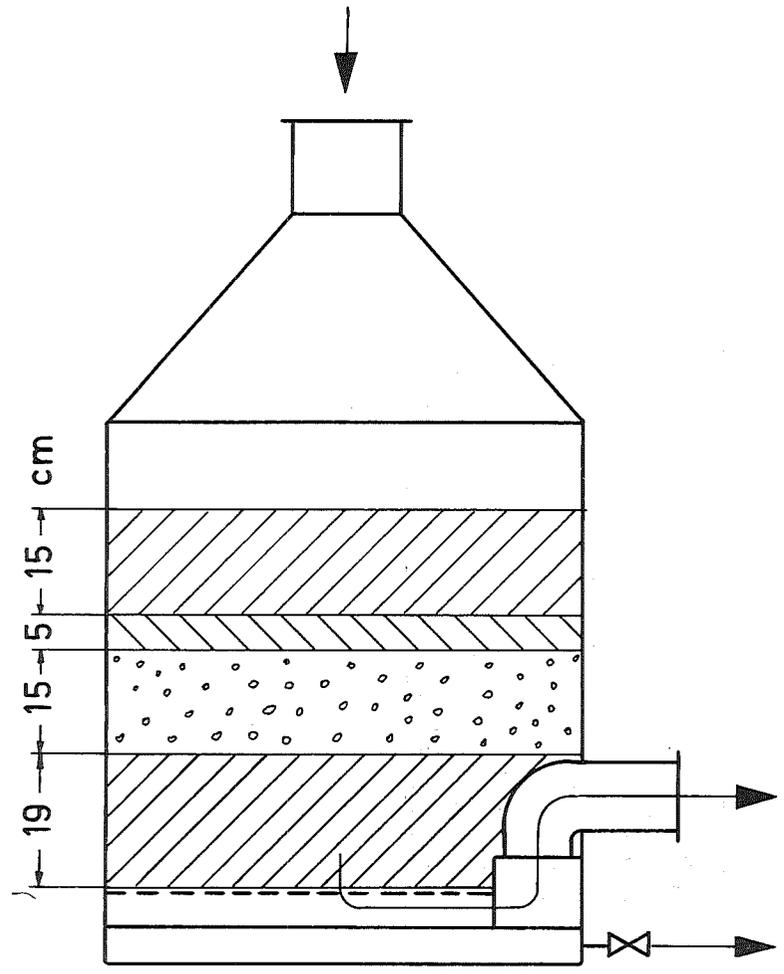


Abb. 15 Beladener und unbeladener  
Glasfaserfilter



Basaltfraction (in mm)

 2/5

 0,6/2

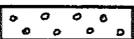
 0/0,6:0,6/2 = 1:3

Abb. 16

Cross - Section of a Sandbedfilter

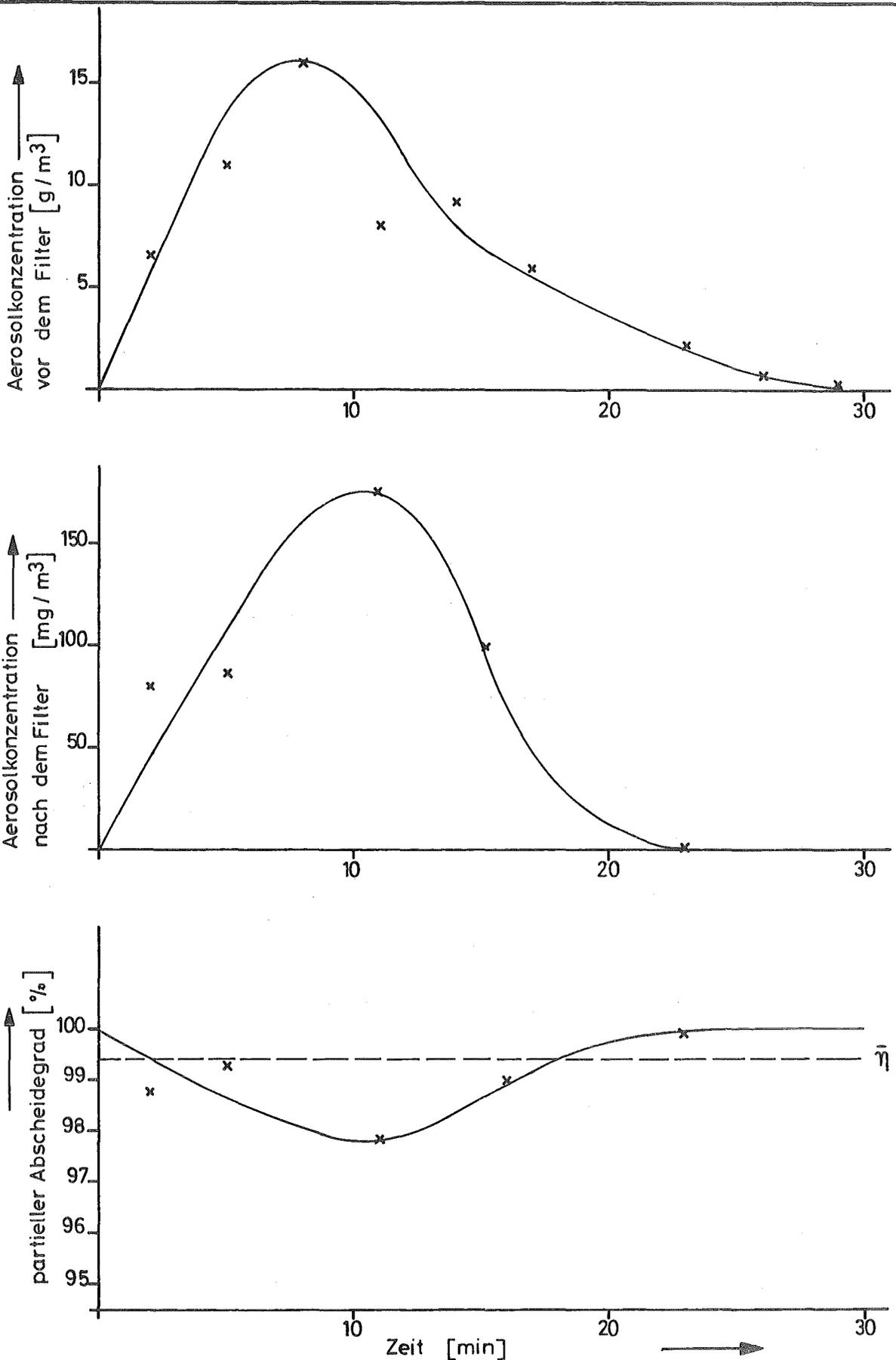
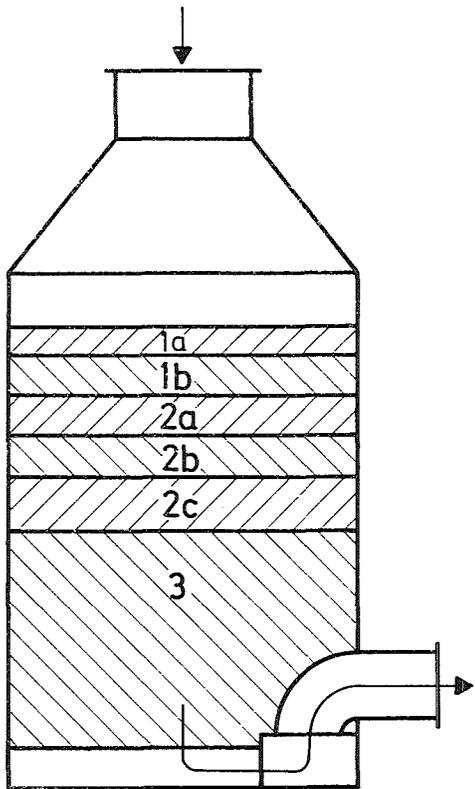


Abb. 17

Aerosolkonzentration vor und nach dem Sandbettfilter und Abscheidegrad während der Beladung mit Natriumoxid-Aerosolen.



Schüttung I			400 l/min	1000l/min	1500l/min	2000l/min
1a } 1b }	150 kg 2/5	P	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-5}$
2a	50 kg 0.6/2					
2b	200 kg 0/0.6/0.6/2 1:3					
2c	—	B <sub>s</sub> [g/m <sup>2</sup> ]	446	465	—	352
3	200 kg 2/5					
Schüttung II			400l/min	550l/min	770l/min	1000l/min
1a	100 kg 2/5/5/11 1:3	P	$\approx 1.5 \cdot 10^{-5}$	$7.2 \cdot 10^{-5}$	$8.5 \cdot 10^{-5}$	$7.1 \cdot 10^{-5}$
1b	150 kg 2/5					
2a	50 kg 0.6/2					
2b	200 kg 0/0.6/0.6/2 1:3	B <sub>s</sub> [g/m <sup>2</sup> ]	443	396	660	600
2c	50 kg 0/0.6					
3	200 kg 2/5					

Abb. 18

Sandbettfiltermessungen an zwei verschiedenen Sandschüttungen

GfK

IASR/RPU

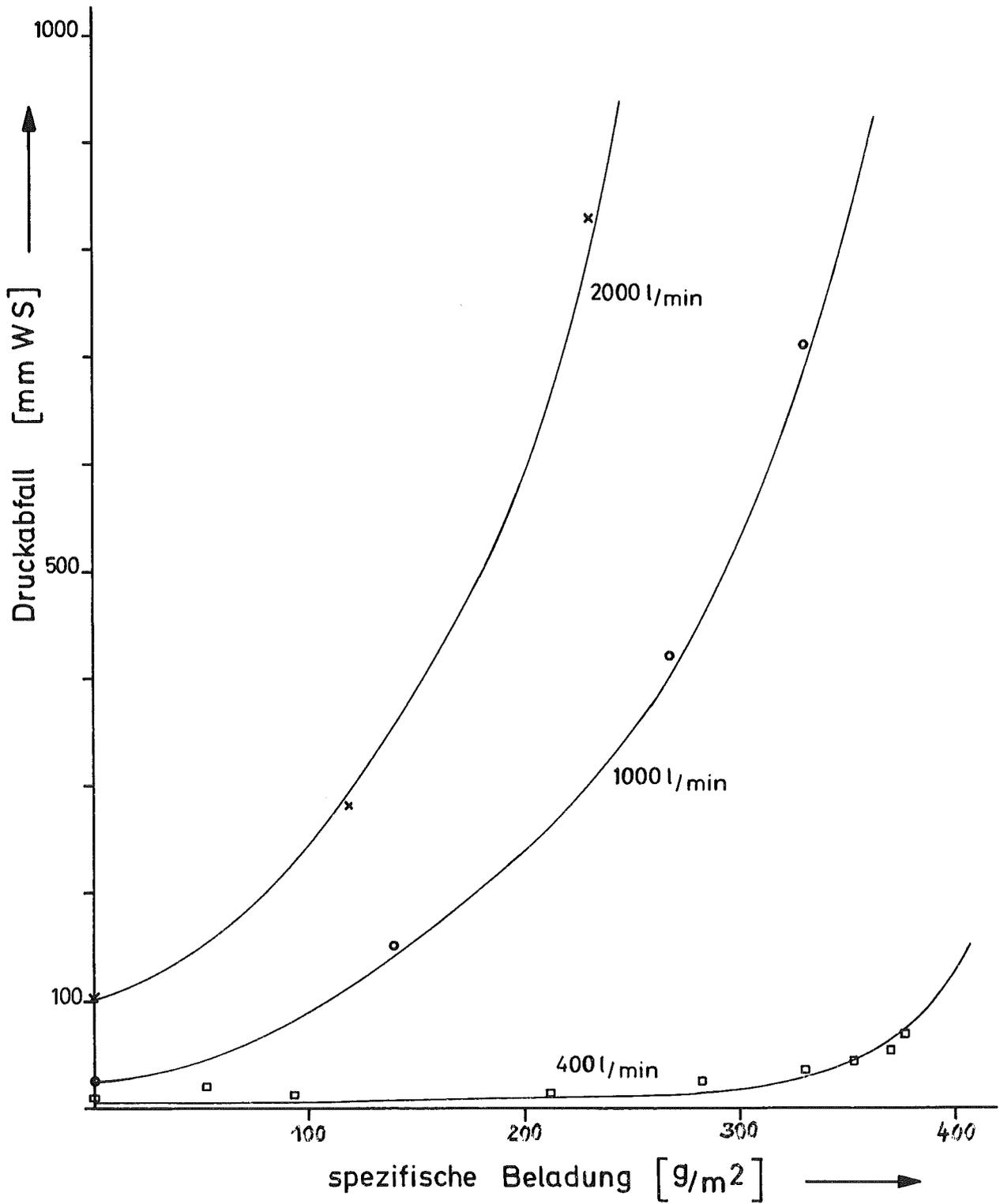
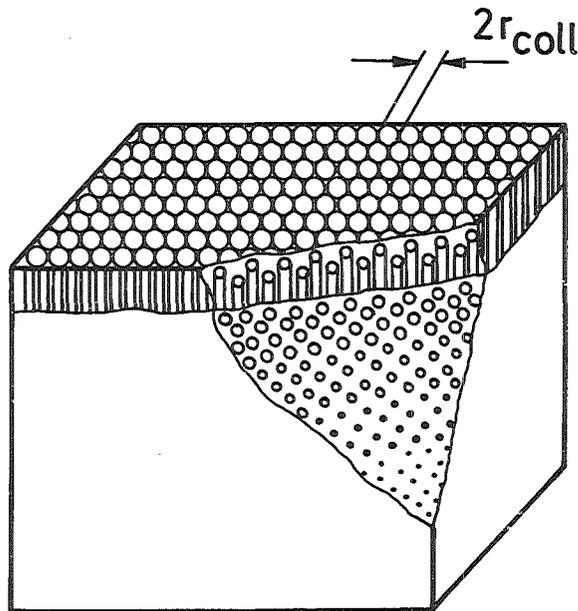
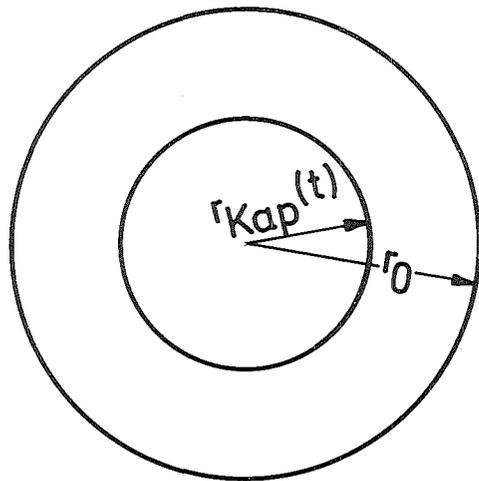


Abb. 19 Druckabfall an einem Sandbettfilter während der Beladung mit Natriumoxid -Aerosolen bei verschiedenen Durchsätzen.



## I. Kinetik des Kapillarenverschlusses :

$$r_{\text{Kap}}(t) = r_0 e^{-\frac{r_0 + a}{r_0^2} A \cdot t}$$

$$\text{mit: } A = \frac{4 \overline{C(t)} v_{\text{II}}^2 r_{\text{pa}}^2}{9 \cdot R_{\text{Krü}} \cdot \eta}$$

$$a = \frac{9 \cdot D \cdot \eta \cdot R_{\text{Krü}}}{2 \cdot g_{\text{pa}} \cdot v_{\text{II}}^2 \cdot r_{\text{pa}}^2}$$

## II. Hagen - Poiseuille'sches Gesetz :

$$\Delta p = \frac{80 \cdot \eta \cdot L \cdot \dot{V}}{N_K \cdot \pi \cdot g \cdot r_{\text{Kap}}^4} \quad [\text{mm WS}]$$

$$\Delta p = C e^{Bt}$$

Abb. 20

I. Kinetik des Kapillarenverschlusses und  
II. Hagen - Poiseuille'sches Gesetz

GfK

IASR/RPU

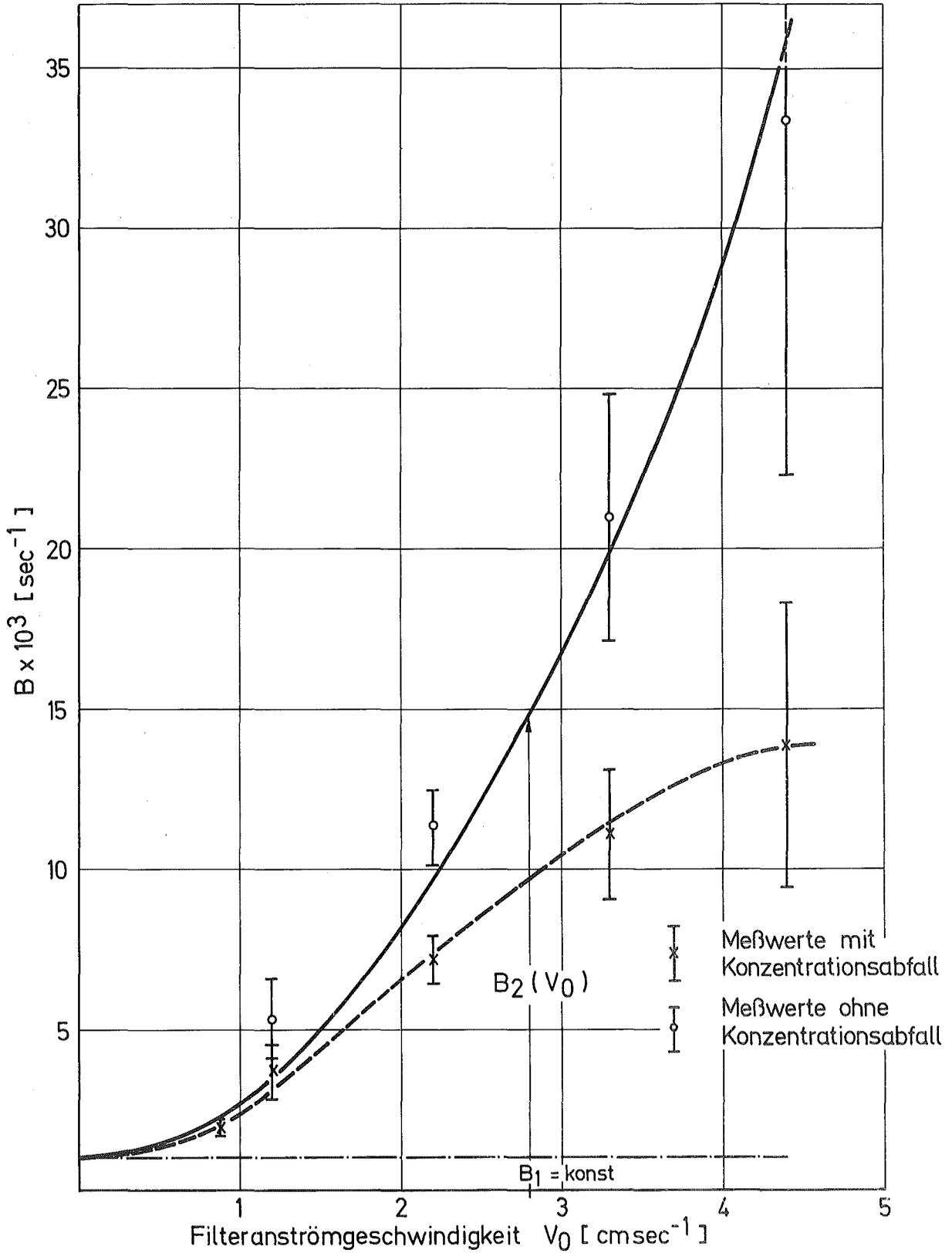
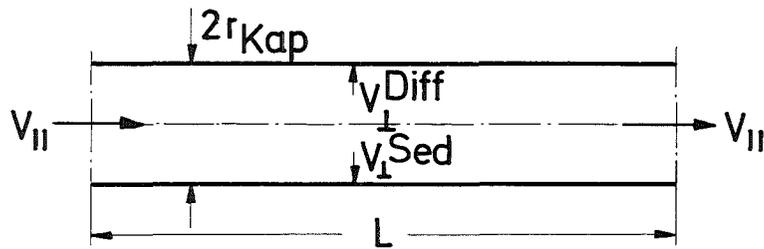


Abb. 21

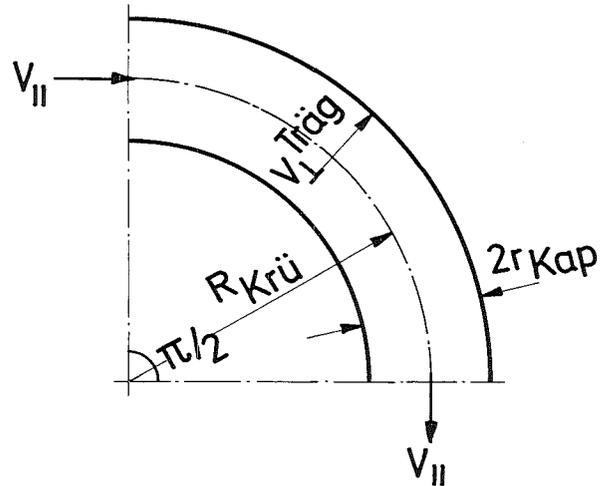
Modellansatz für die Größe  $B$   
 der Gleichung  $\Delta p = C \exp(Bt)$

GfK

IASR/RPU



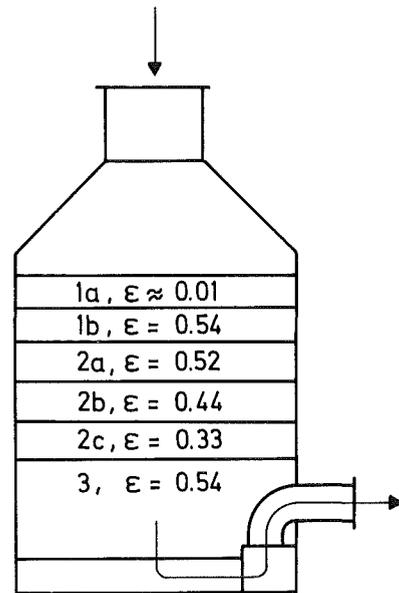
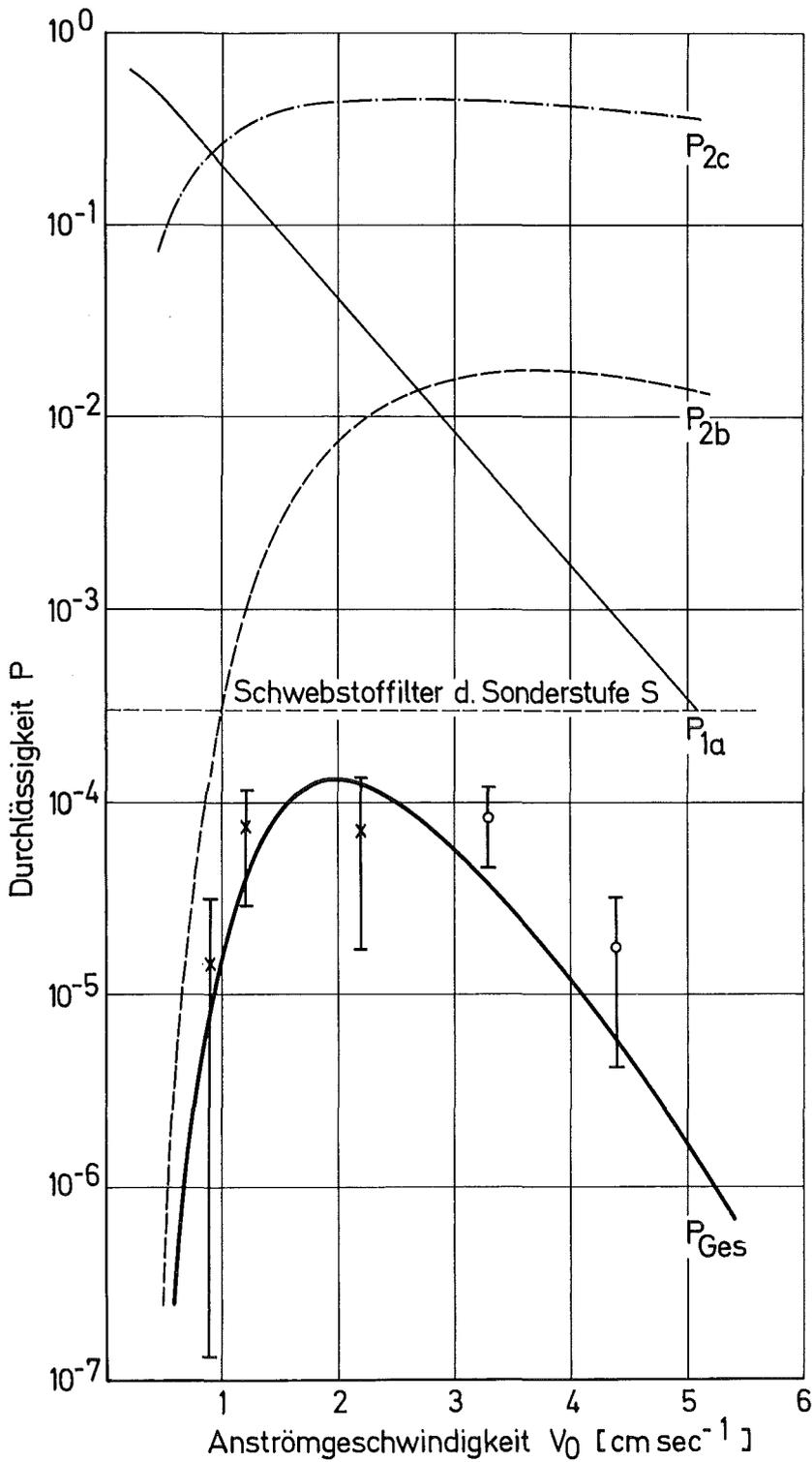
$$p_{\text{Diff+Sed}} = \exp\left(-\frac{L(2v_{\perp \text{Diff}} + v_{\perp \text{Sed}})}{V_{II} \cdot r_{\text{Kap}}}\right)$$



$$p_{\text{Träg}} = \exp\left(-\frac{\pi \cdot v_{\perp \text{Träg}} \cdot R_{\text{Krü}}}{V_{II} \cdot r_{\text{Kap}}}\right)$$

$$P_{\text{Gesamt}} = p_{\text{Diff+Sed}} \cdot p_{\text{Träg}} = e^{-\left\{ \frac{KT\epsilon f}{3\pi r_{pa} V_0} + \frac{2r_{pa}^2 g \cdot g_{pa} \epsilon r_{coll}}{9 V_0} + \frac{2\pi r_{pa}^2 g_{pa} V_0}{9 \epsilon} \right\} \frac{f \cdot L}{\eta r_{coll}^2}}$$

Abb. 22	Modellansatz zur Ermittlung der Filterdurchlässigkeit $P_{\text{Gesamt}}$	GfK
		IASR/RPU



○ Meßwerte der Serie I

× Meßwerte der Serie II

$$P_{Ges} = P_{1a} \times P_{2b} \times P_{2c}$$

Abb. 23

Modell für die Gesamtdurchlässigkeit eines  
Mehrschichtensandbettfilters

GfK

IASR/RPU