

KfK 3857  
Dezember 1984

# **Ablagerung von Tropfen und Partikeln der Größen 1 bis 9 $\mu\text{m}$ in waagerechten Rohrleitungen und Rohrbögen**

J. Furrer, H. G. Dillmann, A. Linek  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

KfK 3857

PWA 104/84

Ablagerung von Tropfen und Partikeln der Größen 1 bis 9  $\mu\text{m}$   
in waagerechten Rohrleitungen und Rohrbögen

J. Furrer, H.G. Dillmann, A. Linek

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

Ablagerung von Tropfen und Partikeln der Größen 1 bis 9  $\mu\text{m}$   
in waagerechten Rohrleitungen und Rohrbögen

Kurzfassung

Der vorliegende KfK-Bericht gibt die Berechnungsformeln und die Ergebnisse in Form von Diagrammen wieder, die als Grundlage zur Abschätzung der Ablagerung von Aerosolen in waagerechten Rohrleitungen und Rohrbögen von  $90^\circ$  verwendet werden können.

Die Berechnungen wurden aufgrund von zahlreichen Anfragen zu diesem Problem von der Industrie und von Forschungseinrichtungen im Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik II durchgeführt.

Plating-out of Droplets and Particles with Diameter from  
1 - 9  $\mu\text{m}$  in Horizontal Pipes and in  $90^\circ$  Pipe Bends

Abstract

This KfK report presents the types of calculation as well as the results as diagrams which can be used as a basis for estimating plating out of aerosols in horizontal pipeworks and in  $90^\circ$  pipe bends.

The calculations were carried out to comply with many inquiries concerning this problem addressed by industry and research institutions to the Laboratory for Aerosol Physics and Filter Technology II.

## 1. Einleitung

In vielen Bereichen der Forschung und der Industrie treten tröpfchen- oder partikelhaltige Gase auf, deren Konzentration und Größenverteilung bestimmt werden sollen. Dazu werden üblicherweise Teilströme entnommen, die mittels Rohrleitungen zu Probesammlern geführt werden. Meßfehler können auftreten, indem sich Partikeln in der Probenahmeleitung niederschlagen und sich dadurch einer Messung entziehen. Die Menge der abgesetzten Partikeln hängt von der Partikelgröße und -dichte, von der Gasgeschwindigkeit, von der Länge, dem Durchmesser und der Oberflächenrauigkeit der Leitung ab.

Gleichungen für die Ablagerung von Partikeln in waagrecht liegenden Rohrleitungen in laminaren und in turbulenten Strömungen sind in /1/ und in /2 - 4/ aufgeführt. Vergleiche mit experimentellen Werten sind in /5/ aufgezeigt. Wie die Autoren ermittelten, beträgt die Abweichung von errechneten und gemessenen Abscheidegraden maximal einen Faktor von 2.

Dieser Bericht soll eine Abschätzung erlauben, ob bei gegebenen, waagrecht liegenden Rohrleitungen mit einer nennenswerten Ablagerung von Partikeln zu rechnen ist.

## 2. Berechnung der Partikel-Ablagerungen

Es wurde von den Gleichungen 1 - 5 für den laminaren und 1 - 5 in Verbindung mit den Gleichungen 6 - 14 für den turbulenten Bereich ausgegangen. Auf die Ableitung der Gleichungen soll hier nicht näher eingegangen werden, da sie in der angegebenen Literatur ausführlich nachgelesen werden können.

Im Bereich der laminaren Strömung gilt:

$$A = 1 - \frac{2}{\pi} \cdot (\alpha \cdot \beta + \arcsin \beta - 2 \cdot \alpha^3 \cdot \beta) \quad (1)$$

mit

$$\alpha = (3 \cdot Z \cdot L / (4 \cdot D_R \cdot U))^{1/3} \quad (2)$$

$$\beta = (1 - \alpha^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$Z = g \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot (1 + 2 \cdot B \cdot \lambda / d_p) / (18 \cdot \eta) \quad (4)$$

$$B = B_0 + B_1 \cdot \exp(-B_2 \cdot d_p / (2 \cdot \lambda)) \quad (5)$$

$$B_0 = 1,25 \quad B_1 = 0,44 \quad B_2 = 1,10$$

A : Abscheidegrad

L : Rohrlänge

$D_R$  : Rohrdurchmesser

U : mittlere Gasgeschwindigkeit

Z : Absetzgeschwindigkeit eines Partikels

g : Erdbeschleunigung

$\rho_p$  : Partikeldichte

$d_p$  : Partikeldurchmesser;  $0,9 < d_p \leq 10 \mu\text{m}$

$\lambda$  : mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle, ca  $10^{-7}$  m für aus 2 Atomen bestehenden Molekülen bei 1 bar und 25 °C.

$\eta$  : dynamische Viskosität des Gases

Im Bereich turbulenter Strömung gilt:

$$A = 1 - \exp(-4 \cdot K \cdot L / (U \cdot D_R)) \quad (6)$$

Die Absetzgeschwindigkeit K errechnet sich nach folgenden Gleichungen:

$$0 \leq S^+ < 5$$

$$\begin{aligned} \frac{U'}{K} = & \frac{14.5}{3} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{2/3} F\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right) - \\ & - \frac{14.5^2}{1.5h^+} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} G\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right) + \\ & + \left[5 + \frac{50}{\nu h^+} (D - 0.959\nu)\right] \cdot \\ & \cdot \ln\left(\frac{D + 5.04\nu}{D + 0.04\nu}\right) - \frac{250}{h^+} + \\ & + \frac{1 - 13.73\sqrt{f/2}}{\sqrt{f/2}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$F\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right) = \frac{1}{2} \ln A_1 - \frac{1}{2} \ln A_2 + \\ + \sqrt{3} \tan^{-1} A_3 - \sqrt{3} \tan^{-1} A_4$$

$$G\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right) = -\frac{1}{2} \ln A_1 + \frac{1}{2} \ln A_2 + \\ + \sqrt{3} \tan^{-1} A_3 - \sqrt{3} \tan^{-1} A_4$$

$$A_1 = \frac{\left[1 + \frac{5}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3-2}\right]}{1 - \frac{5}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} + \left(\frac{5}{14.5}\right)^2 \left(\frac{\nu}{D}\right)^{2/3}}$$

$$A_2 = \frac{\left[1 + \frac{S^+}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3-2}\right]}{1 - \frac{S^+}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} + \left(\frac{S^+}{14.5}\right)^2 \left(\frac{\nu}{D}\right)^{2/3}}$$

$$A_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{10}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$A_4 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{2S^+}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$5 \leq S^+ < 30$$

$$\begin{aligned} \frac{U'}{K} = & 5 \left[ 1 + \frac{10}{\nu h^+} (D - 0.959\nu) \right] \ln \left[ \frac{D + 5.04\nu}{D + \nu \left( \frac{S^+}{5} - 0.959 \right)} \right] - \\ & - \frac{10}{h^+} \left( 6 - \frac{S^+}{5} \right) + \frac{1 - 13.73\sqrt{f/2}}{\sqrt{f/2}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$S^+ \geq 30$$

$$\frac{U'}{K} = 1 - 13.73\sqrt{f/2} \quad (9)$$

mit

$$U' = U \cdot \sqrt{f/2} \quad (10)$$

$$f = \frac{1}{4} \cdot \left( 3.2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}} \right) \quad (11)$$

$$S^+ = \frac{U'}{\nu} \cdot \left( \frac{0.05 \cdot U' \cdot d_p^2 \cdot \rho_p}{\eta} + \frac{d_p}{2} \right) \quad (12)$$

$$h^+ = D_R \cdot U' / \nu \quad (13)$$

$$D = K_B \cdot T / (3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \eta) \quad (14)$$

f : Reibungsfaktor für die Rohroberfläche

Re: Reynoldszahl

S<sup>+</sup>: dimensionslose 'stopping distance' eines Partikels; Strecke, die es nach Einschießen mit einer definierten Geschwindigkeit in einem ruhenden Fluid zurücklegt

ν : Kinematische Viskosität des Gases

D : Diffusionskoeffizient für Partikeln

K<sub>B</sub>: Boltzmann-Konstante;

$$1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Kgm}^2 / (\text{Ks}^2)$$

T : abs. Temperatur

In den Abbildungen 1 - 24 sind die Abscheidegrade A von Partikeln mit Durchmessern von 1, 3, 5, 7 und 9  $\mu\text{m}$  gegen die mittlere Gasgeschwindigkeit U aufgetragen.

Die Abscheidegradkurven gelten für Partikeln in Luft mit einer Temperatur von 25  $^{\circ}\text{C}$  und einem Druck von 1 bar. Unter diesen Bedingungen beträgt die dynamische Viskosität  $\eta$  der Luft  $1,81 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m/s}$ , die kinematische Viskosität  $\nu$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_L} = 1,41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (15)$$

Die Gleichung 11 zur Ermittlung des Reibungsfaktors f gilt für glatte Rohrwandungen und führt im Bereich der Kurven nach den Abscheideminima zu günstigeren Werten (geringeren Ablagerungen) als bei rauhen Rohrwandungen. Eine Gleichung für diesen Fall ist in /5/ angegeben.

Soll zusätzlich die Abscheidung in einem liegenden Rohrbogen ermittelt werden, so wird in Gleichung 4 die Zentrifugalbeschleunigung  $U^2/R$  mit R als Krümmungsradius des Rohrbogens zur Erdbeschleunigung g hinzuzugaddiert.

In den Abbildungen 13 - 24 sind die Abscheidegradkurven für Rohrbögen dargestellt, bei denen der Krümmungsradius R eines  $90^{\circ}$ - Bogens dem doppelten Rohrdurchmesser gleichgesetzt ist. Geht man von gleichen Parametern und Bedingungen der geraden Rohrleitung und des Rohrbogens aus, so kann der Gesamtabscheidegrad  $A_{\text{ges}}$  bei Zusammenschalten von Rohrleitung und -bogen nach Gleichung 16 errechnet werden.

$$A_{\text{ges}} = A_L + A_B - A_L \cdot A_B \quad (16)$$

L : Rohrleitung

B : Rohrbogen

Werden beispielsweise eine 5 m lange Rohrleitung und ein 90<sup>0</sup>- Rohrbo-  
gen mit einem Durchmesser von 100 mm aneinander gekoppelt, so ergeben  
sich für Partikeln von 3 µm Durchmesser und einer Dichte von 1 g/cm<sup>3</sup>  
bei einer Gasgeschwindigkeit von 0,05 m/s die Einzelabscheidegrade  
zu 33 % (Abb. 7) und 2 % (Abb. 19), der Gesamtabscheidegrad nach  
Gleichung 16 also zu 34 %.

Es ist zu beachten, daß die Abscheidegrade nur für Aerosole mit gleich-  
mäßiger Verteilung der Teilchen im Gasstrom gelten.

Rechnungen und den Abbildungen kann entnommen werden, daß höhere Ab-  
lagerungen in einer Rohrleitung auftreten, wenn

1. die Rohrlänge zunimmt,
2. der Rohrdurchmesser abnimmt,
3. Rohrbögen in der Leitung auftreten,
4. die Rauigkeit der Wandung zunimmt,
5. der Partikeldurchmesser ansteigt,
6. die Partikeldichte zunimmt,
7. die Gasgeschwindigkeit von ca. 1 m/s ab verringert wird.

### 3. Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Konzentration und der Größenverteilung von Partikeln in Gasen werden die Aerosole mittels Rohrleitungen zu Probennehmern geführt. Meßfehler können auftreten, wenn sich Partikel in den Probenahmeleitungen niederschlagen und sich dadurch einer Messung entziehen. Die Menge der abgesetzten Partikel hängt von der Partikelgröße und -dichte, von der Gasgeschwindigkeit, von der Länge, dem Durchmesser und der Oberflächenrauigkeit der Rohrleitungen und von vorhandenen Rohrbögen ab.

Gleichungen für die Ablagerung von Partikeln in waagrecht liegenden Rohrleitungen in laminaren und turbulenten Strömungen wurden der Literatur entnommen. Darin wird auch an Hand von Messungen gezeigt, daß die errechneten und gemessenen Abscheidegrade maximal um einen Faktor von 2 voneinander abweichen.

Die Abbildungen dieses Berichtes erlauben eine Abschätzung, inwieweit sich die Abscheidung von Partikeln unterschiedlicher Größe und Dichte bei verschiedenen Rohrdurchmessern in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit ändert. Die Abscheidegrade wurden für eine 5 m lange Rohrleitung und für 90°- Rohrbögen berechnet, deren Krümmungsradien dem zweifachen Rohrdurchmesser entsprechen. Dies sind Auslegungswerte, die bei Aerosolprobenahme in kerntechnischen Anlagen häufig zur Anwendung kommen.

4. Literaturhinweise

- /1/ Thomas, J. W. : J. Air Pollut. Contr. Ass., 8, 32 (1958)
- /2/ Friedlander, S. K.; Johnstone, H. F. : Ind. Eng. Chem.,  
49, 1151 (1957)
- /3/ Davis, C. N. : Aerosol Science, p. 393 (1966), Academic  
Press, London and New York
- /4/ Beal, S. K. : Nucl. Sci. Eng., 40, 1 (1970)
- /5/ Matsui, H.; Yoshida, Y.; Murata, M.; Ohata, T. :  
J. Nucl. Sci. Technol., 11, 300 (1974)

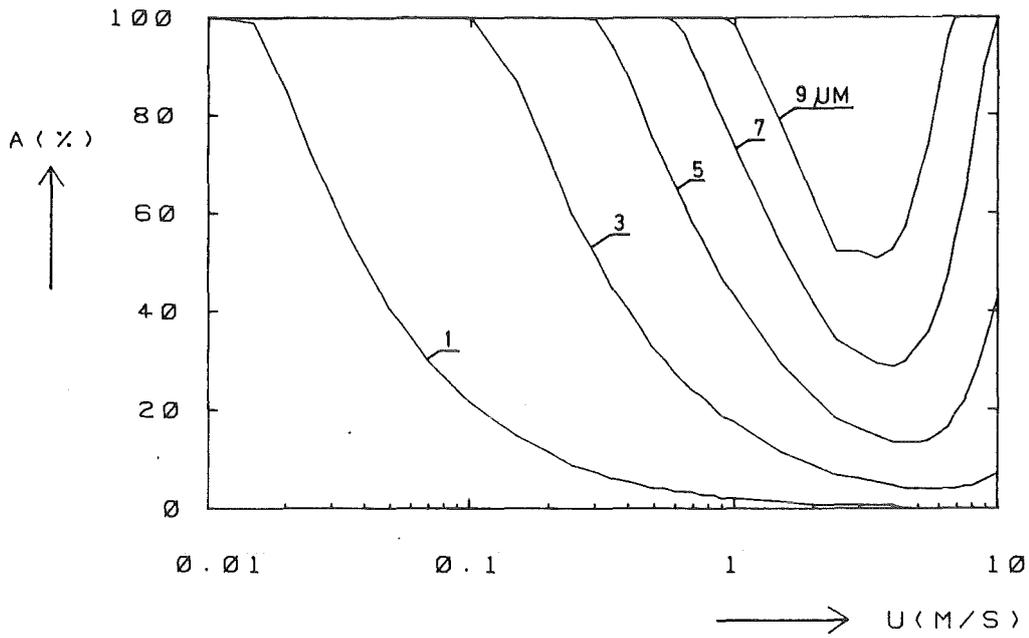


ABB. 1 L = 5 M, D = .01 M, DICHT E = 1000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μM

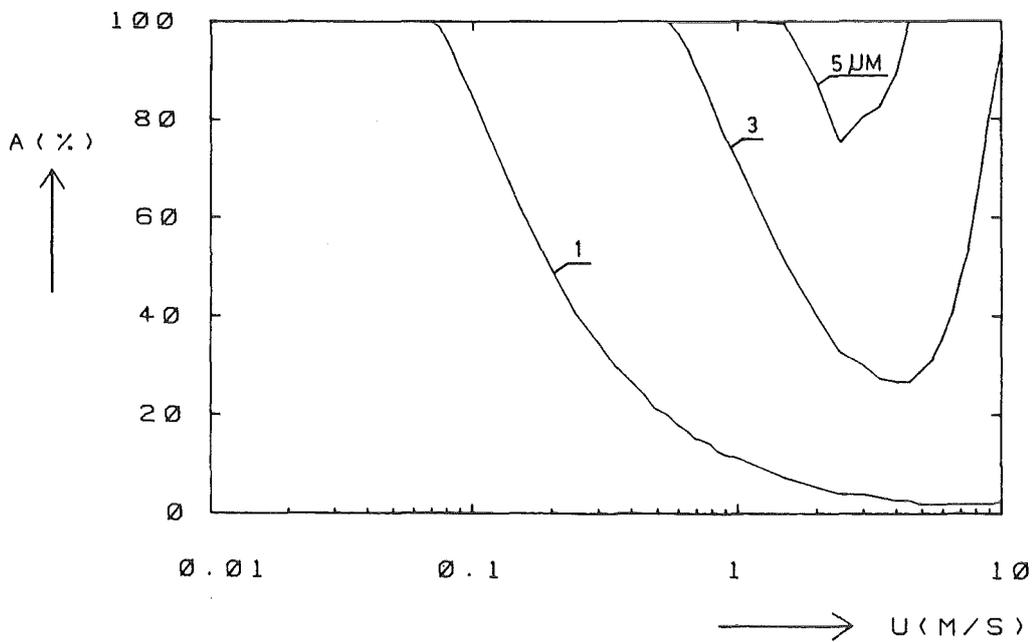


ABB. 2 L = 5 M, D = .01 M, DICHT E = 5000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μM

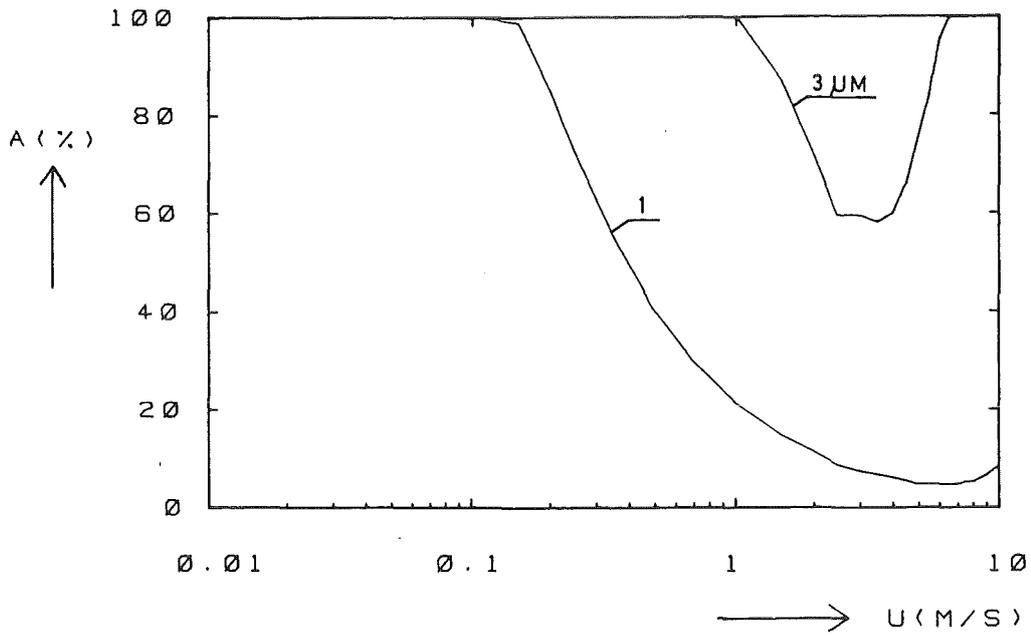


ABB. 3 L = 5 M, D = .01 M, DICHTE = 10000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 µM

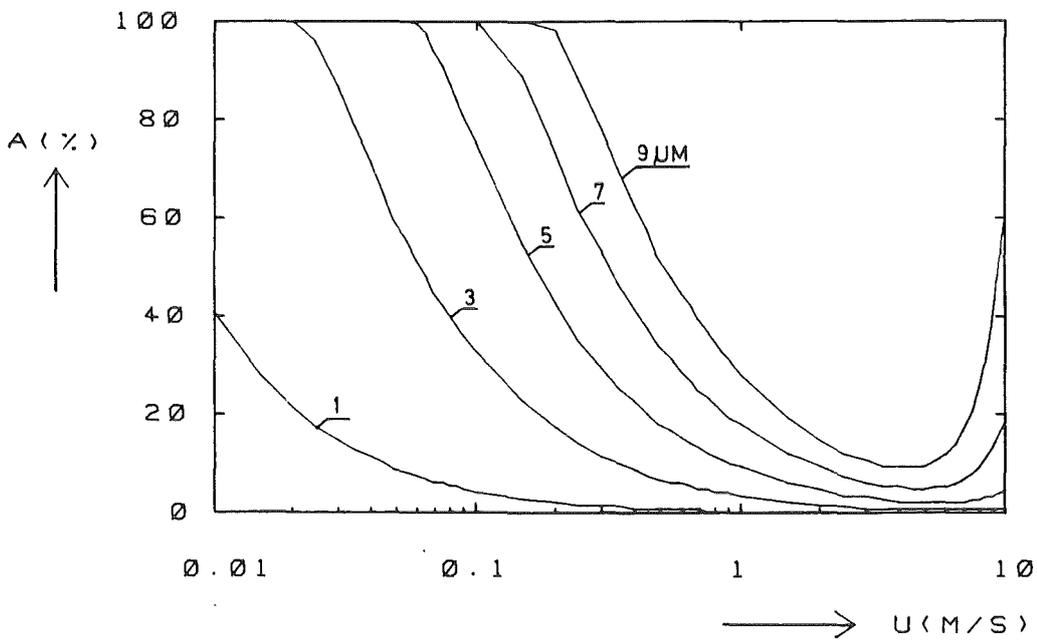


ABB. 4 L = 5 M, D = .05 M, DICHTE = 1000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 µM

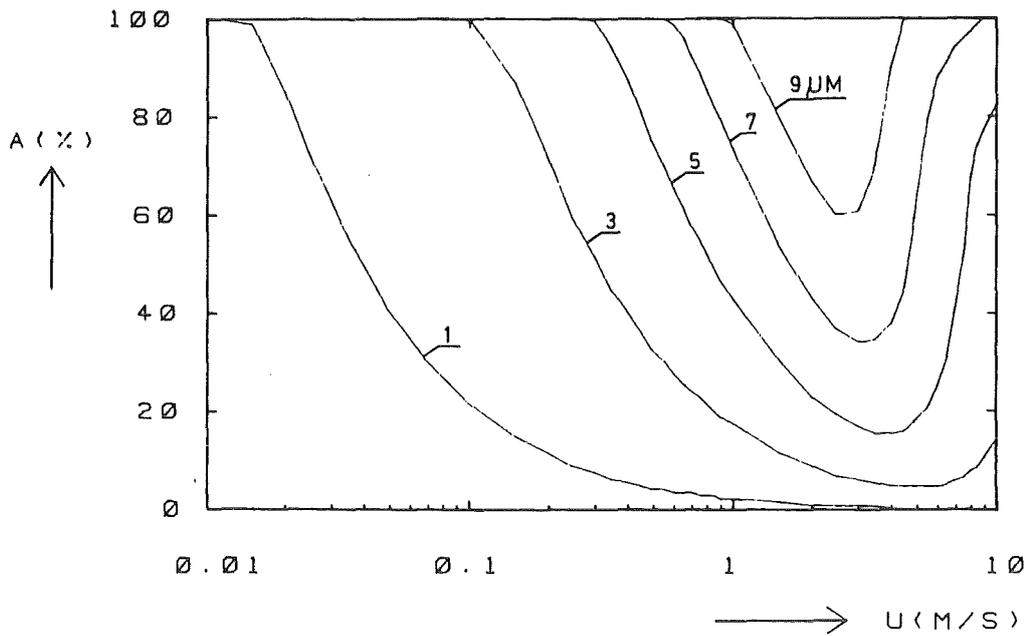


ABB. 5 L = 5 M. D = .05 M. DICHTE = 5000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{m}$

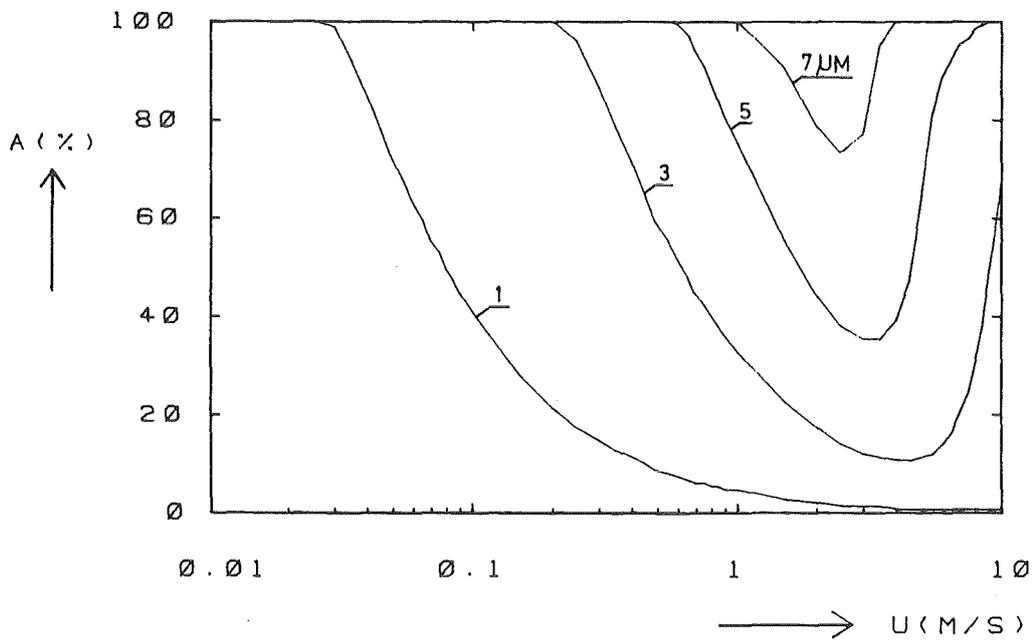


ABB. 6 L = 5 M. D = .05 M. DICHTE = 10000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{m}$

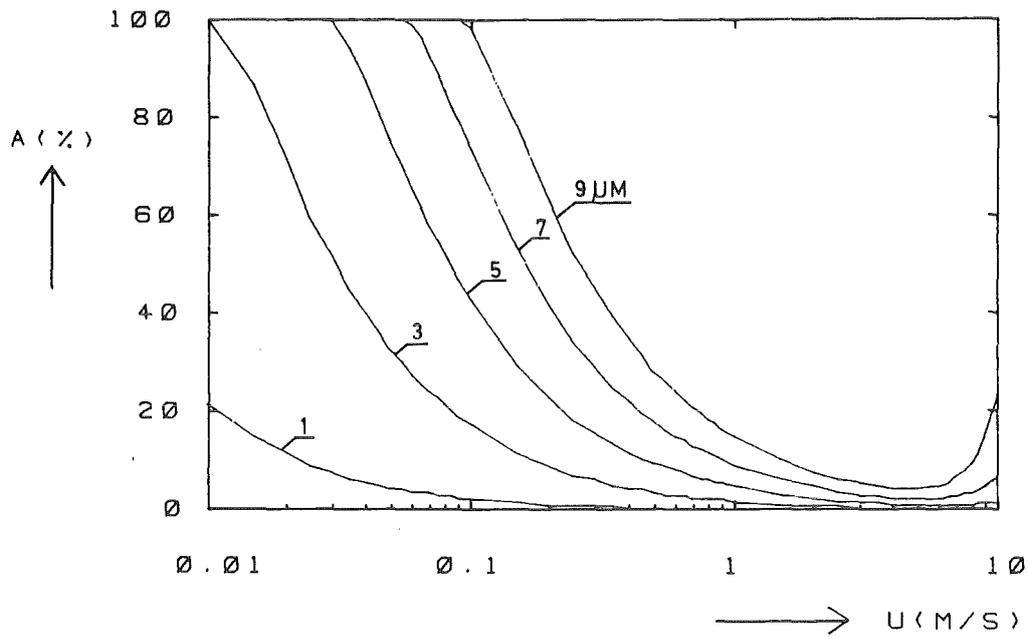


ABB. 7 L = 5 M. D = .1 M. DICHTE = 1000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μM

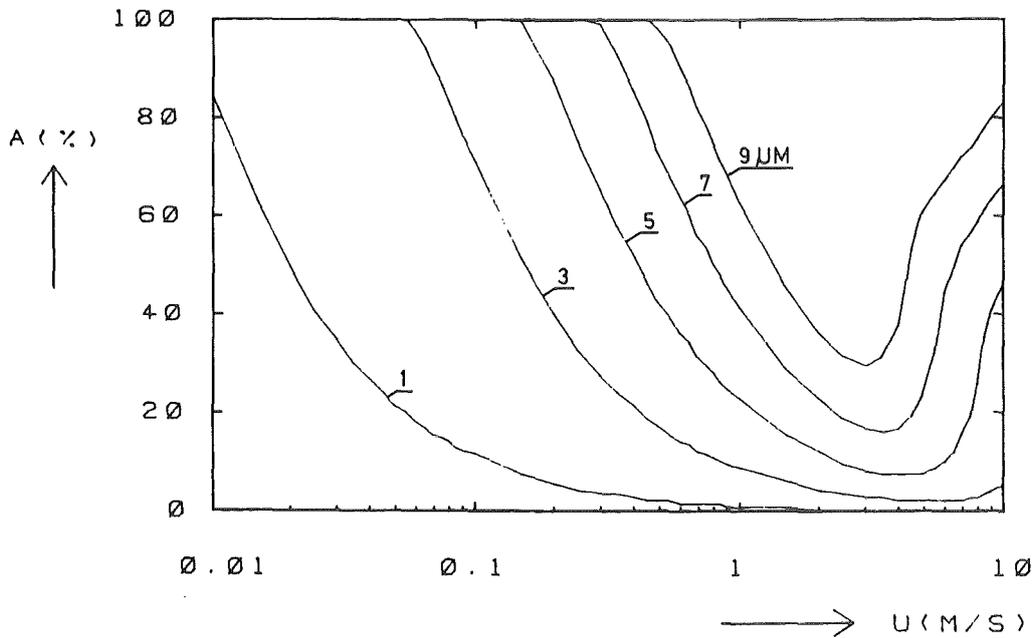


ABB. 8 L = 5 M. D = .1 M. DICHTE = 5000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μM

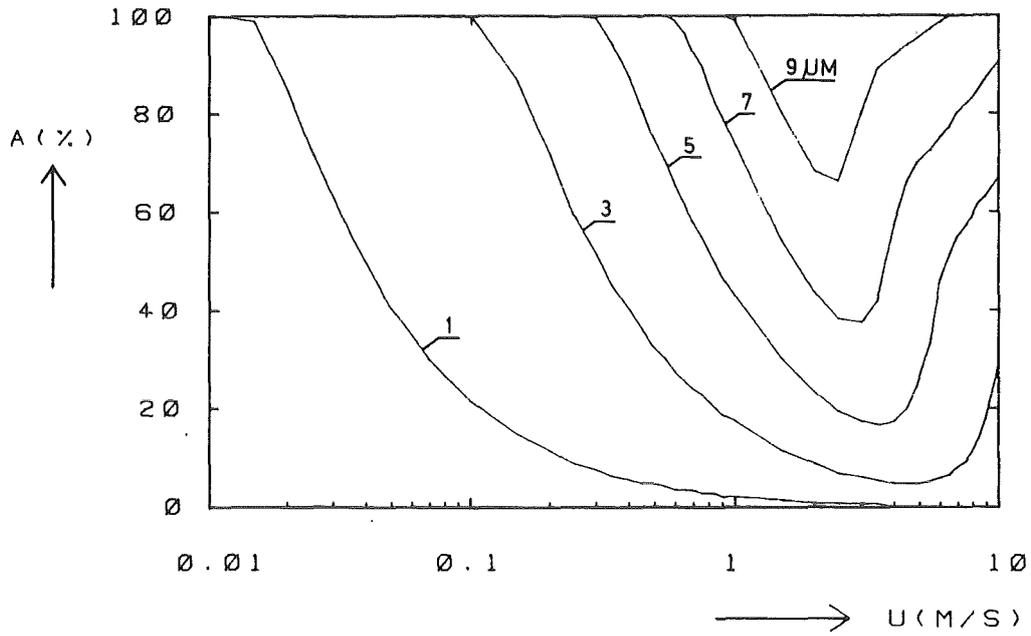


ABB. 9 L = 5 M. D = .1 M. DICHTe = 10000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μm

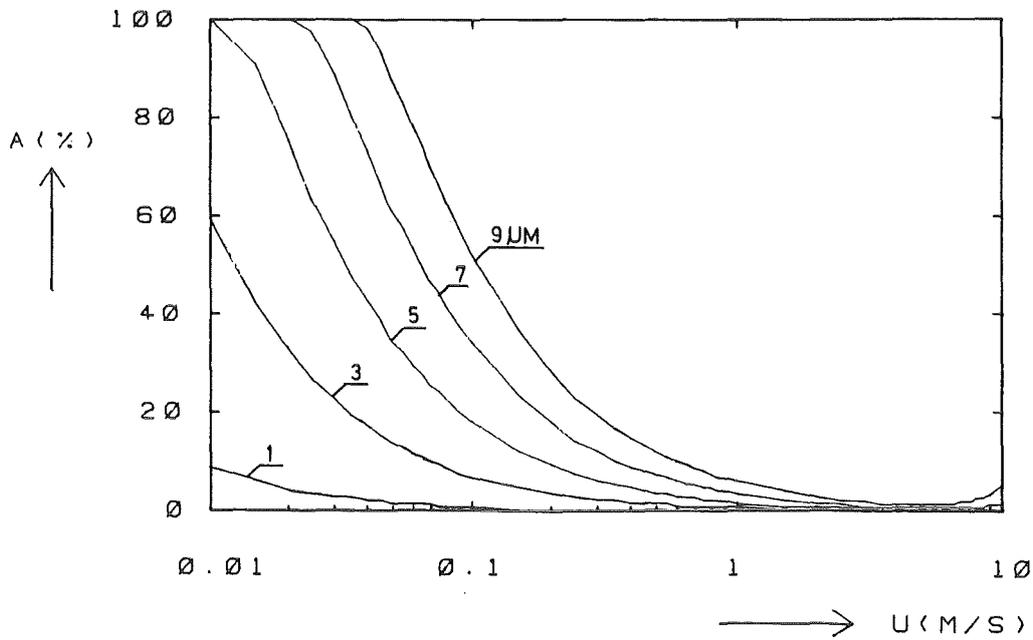


ABB. 10 L = 5 M. D = .25 M. DICHTe = 1000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μm

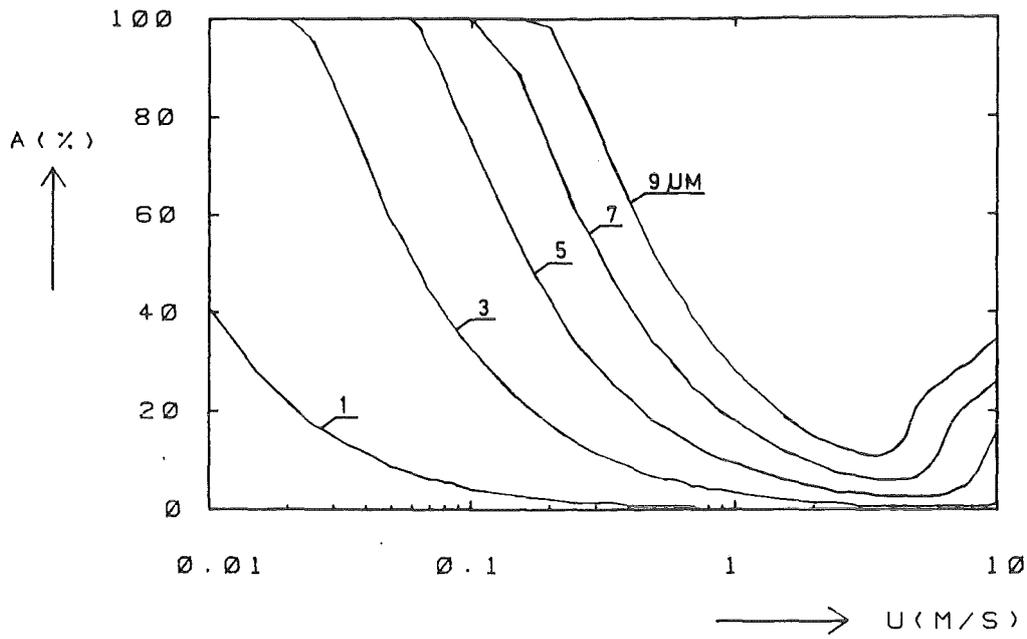


ABB. 11 L = 5 M. D = .25 M. DICHTe = 5000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μM

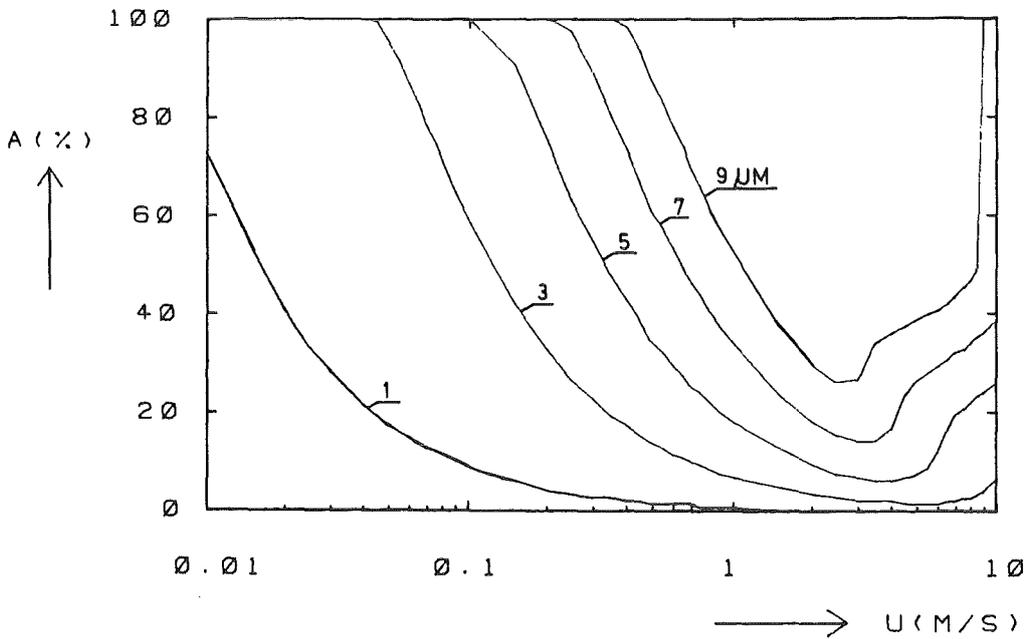


ABB. 12 L = 5 M. D = .25 M. DICHTe = 10000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9 μM

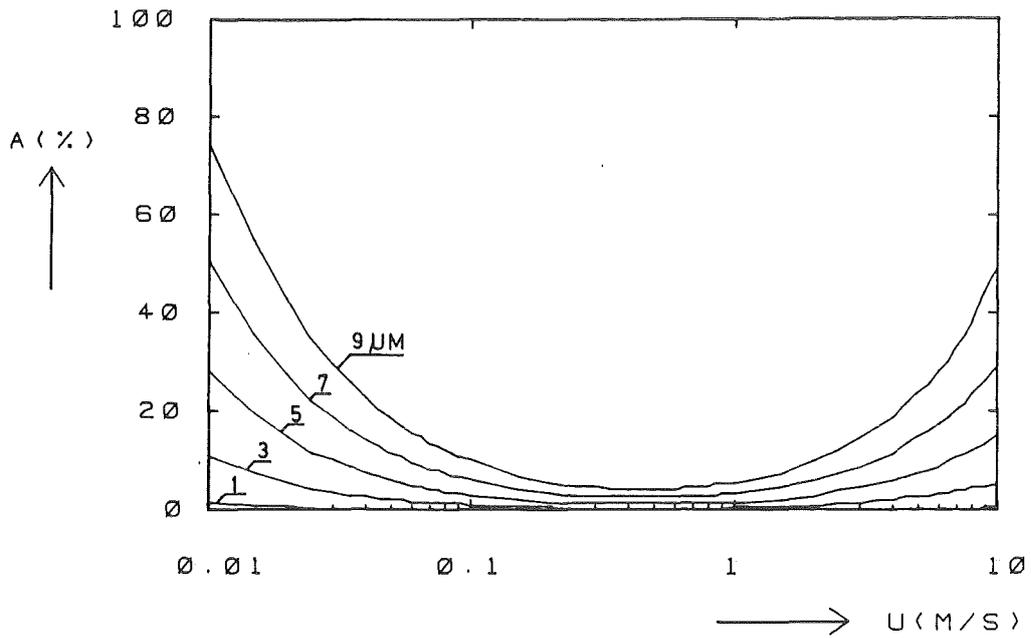


ABB. 13 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUENNUNGSRADIUS =  $2 \cdot D$   
 $D = .01$  M, DICHTe =  $1000$  KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{m}$

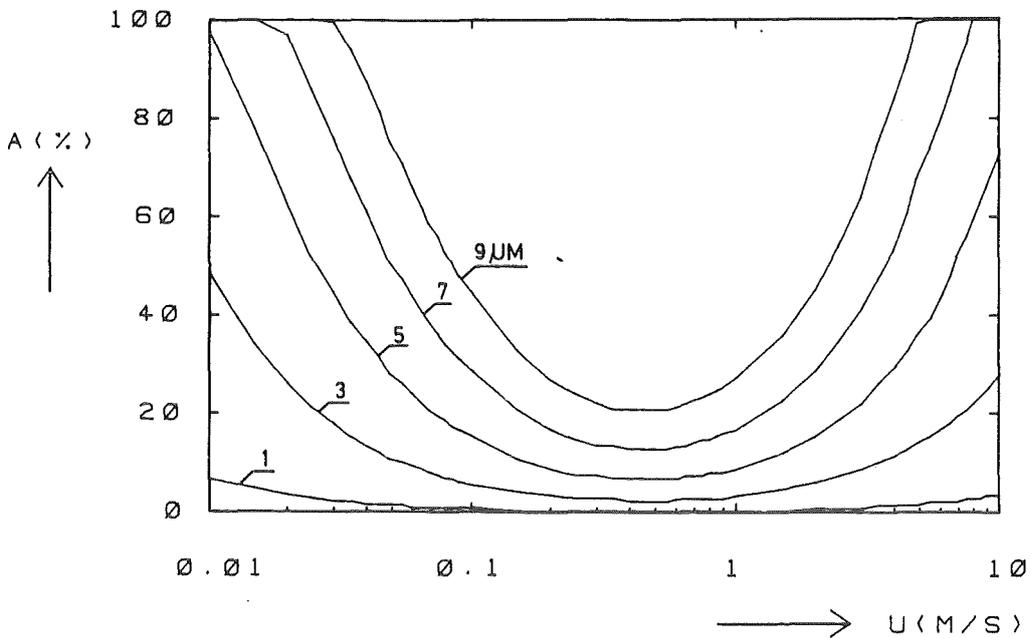


ABB. 14 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUENNUNGSRADIUS =  $2 \cdot D$   
 $D = .01$  M, DICHTe =  $5000$  KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{m}$

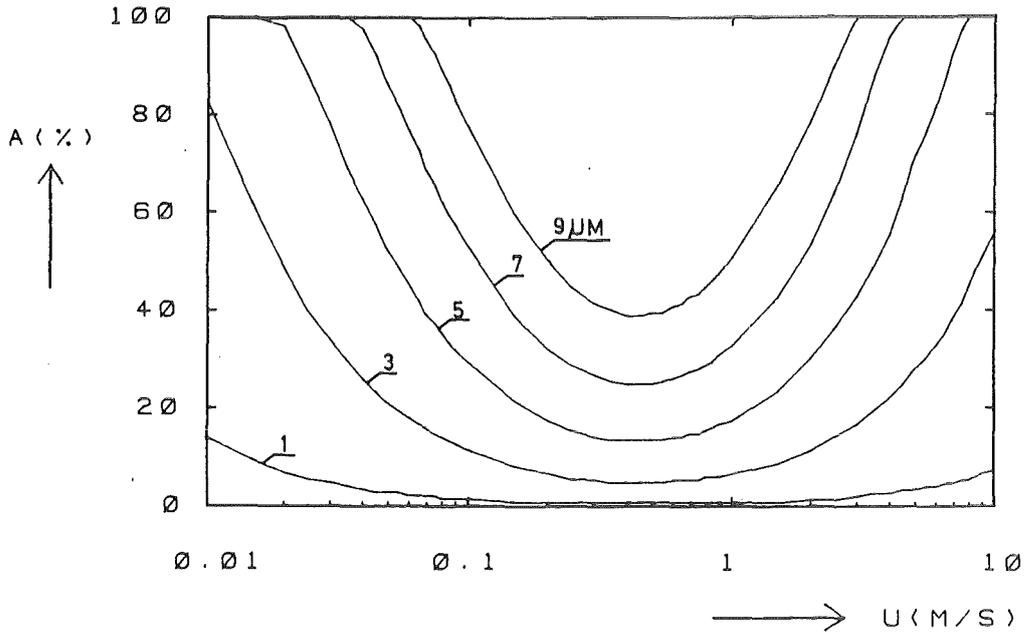


ABB. 15 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
 $D = .01$  M, DICHTe =  $10000$  KG/M $\uparrow$ 3  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{M}$

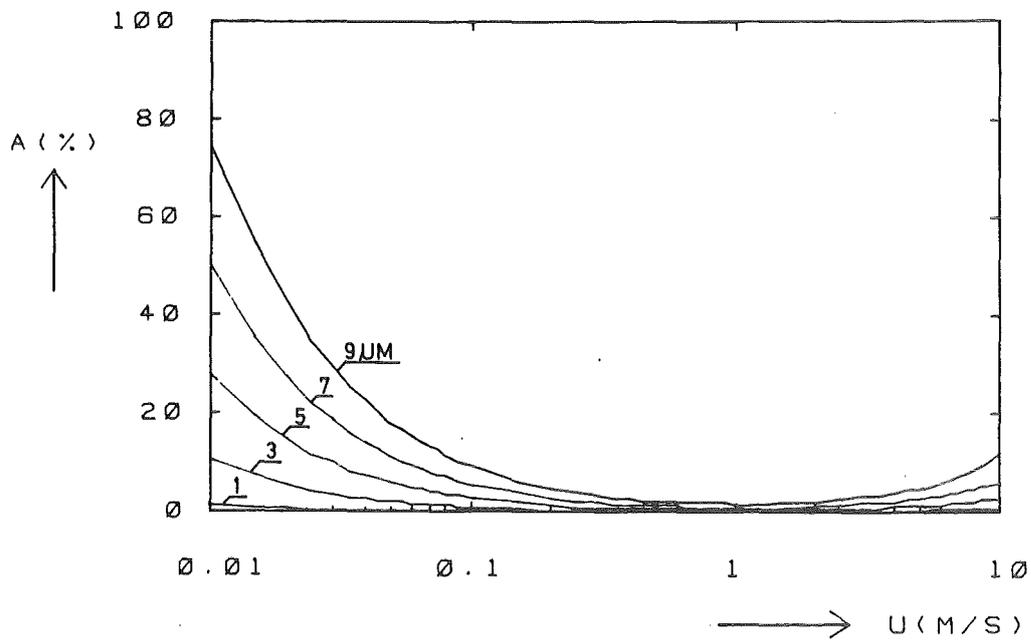


ABB. 16 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
 $D = .05$  M, DICHTe =  $1000$  KG/M $\uparrow$ 3  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{M}$

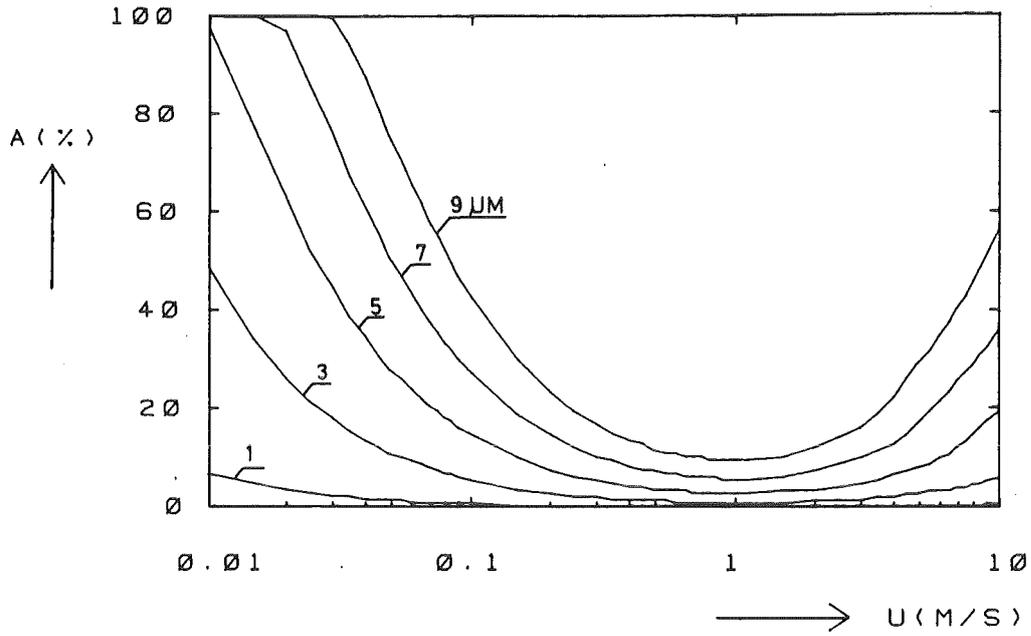


ABB. 17 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .05 M, DICHTe = 5000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{m}$

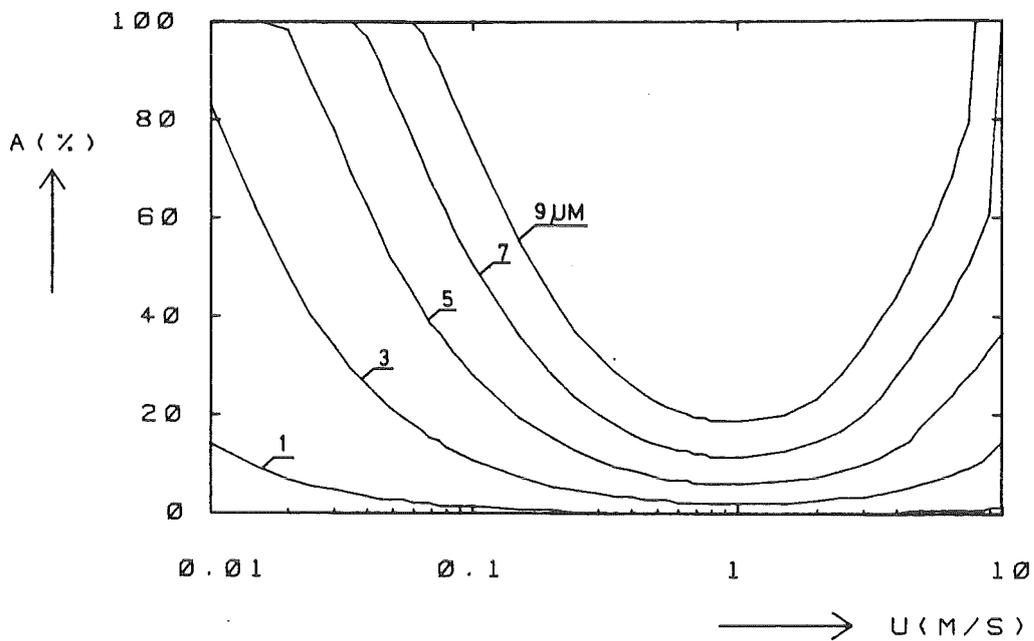


ABB. 18 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .05 M, DICHTe = 10000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{m}$

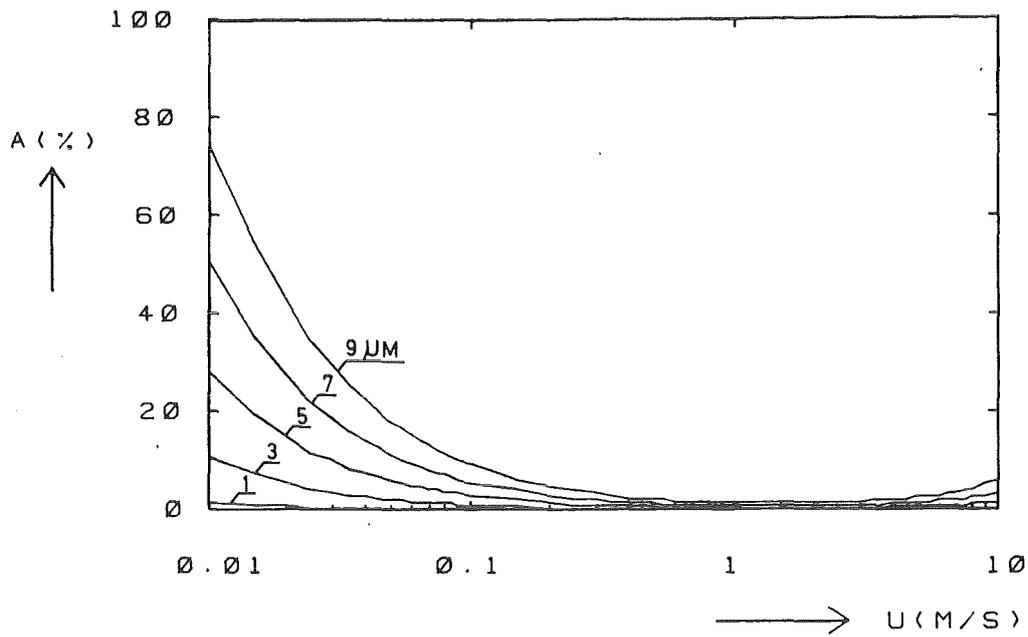


ABB. 19 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .1 M, DICHTE =  $1000 \text{ KG/M}^3$   
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{M}$

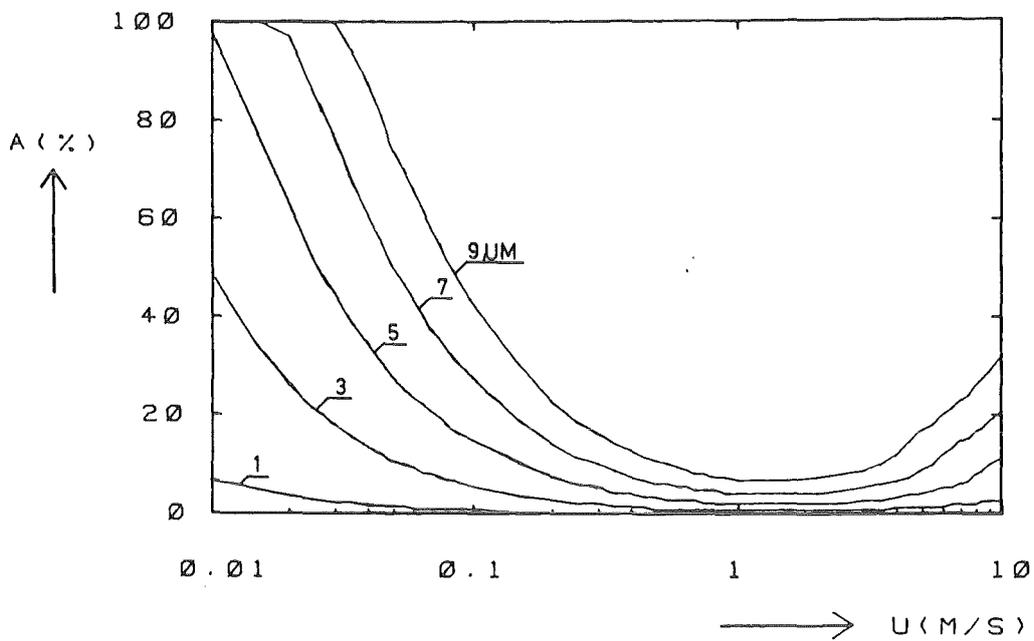


ABB. 20 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .1 M, DICHTE =  $5000 \text{ KG/M}^3$   
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{M}$

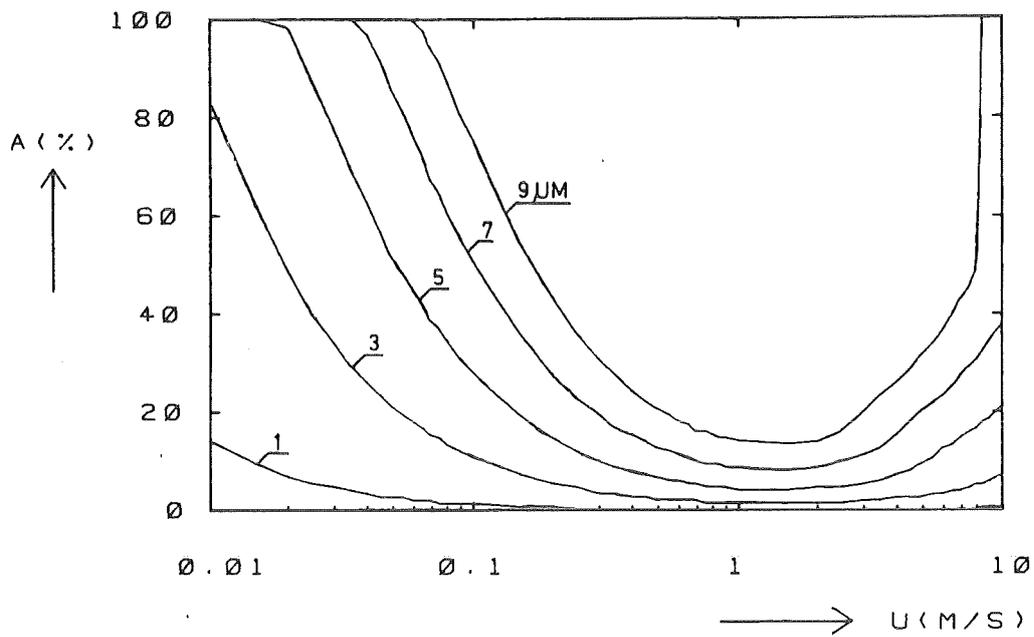


ABB. 21 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ . KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .1 M. DICHTE =  $10000 \text{ KG/M}^3$   
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{M}$

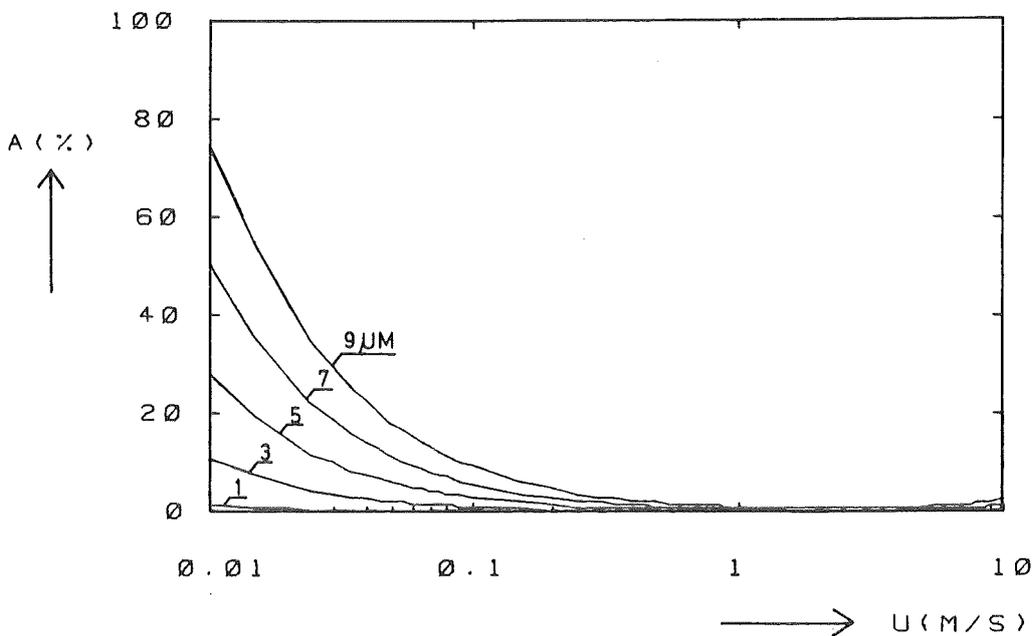


ABB. 22 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ . KRUEMMUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .25 M. DICHTE =  $1000 \text{ KG/M}^3$   
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu\text{M}$

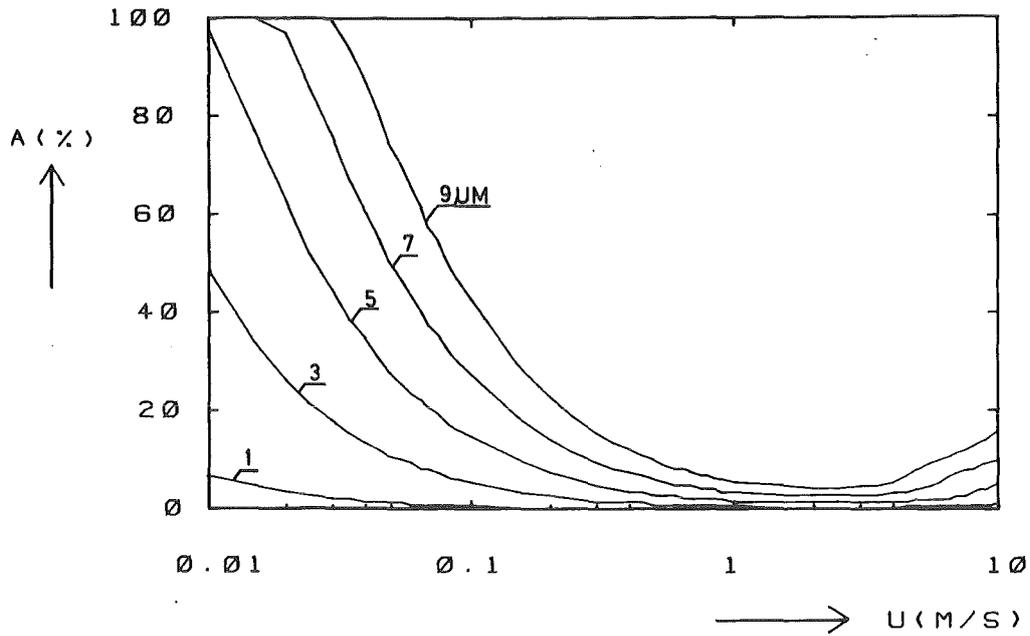


ABB. 23 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUENNUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .25 M, DICHTe = 5000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu$ M

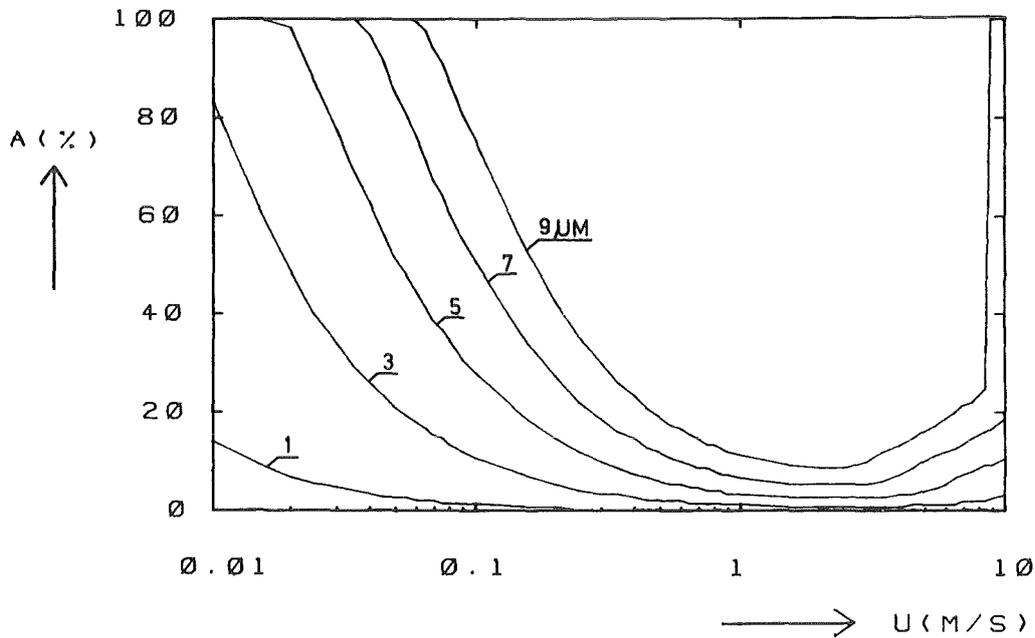


ABB. 24 ROHRBOGEN =  $90^\circ$ , KRUENNUNGSRADIUS =  $2 * D$   
D = .25 M, DICHTe = 10000 KG/M<sup>3</sup>  
PARTIKELDURCHMESSER = 1 - 9  $\mu$ M