



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG

Institut für Reaktorbauelemente

**Experimentelle Bestimmung der konvektiven
Wärmeübertragung an zylindrischen
und schraubenförmigen Absorberstäben
für den THTR-Prototyp 300 MWe**

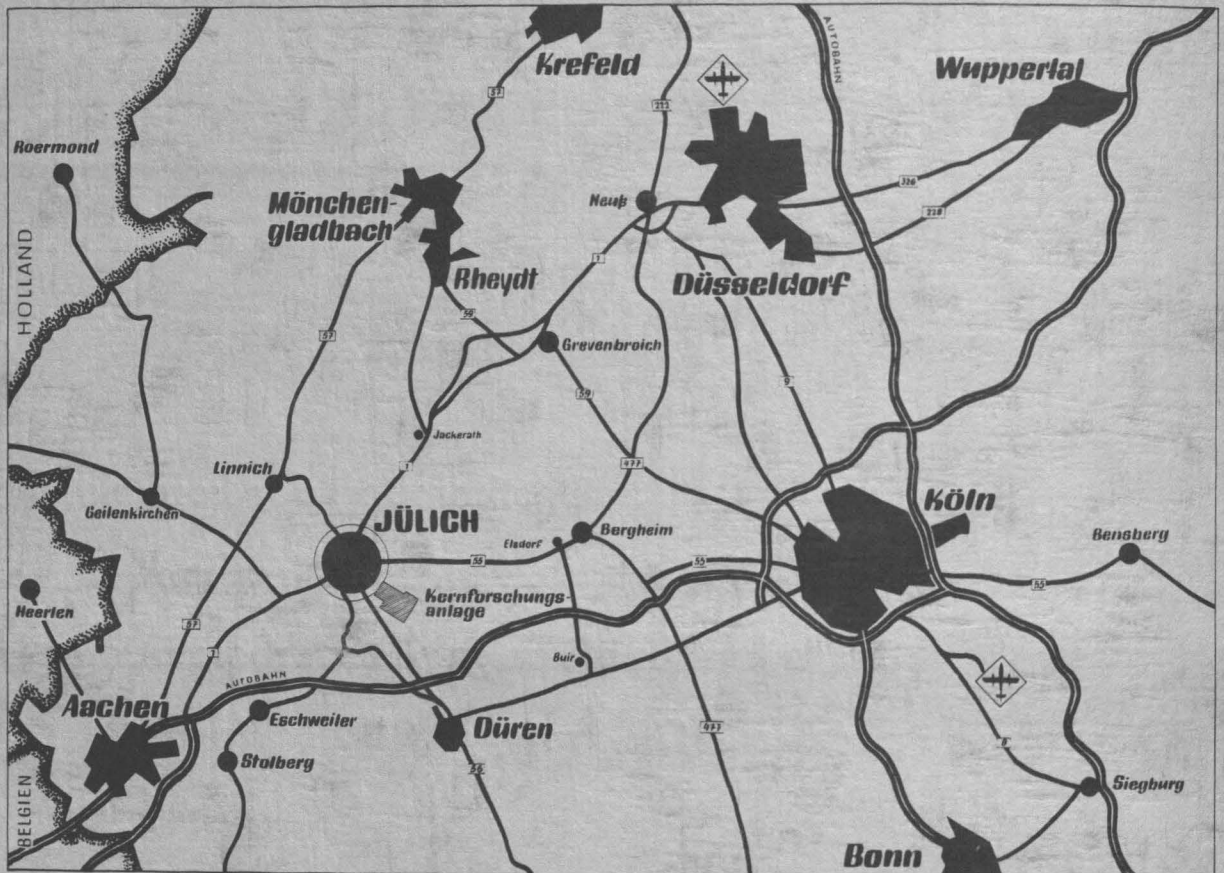
von

Karlheinz Presser

JüI - 585 - RB

April 1969

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 585

Institut für Reaktorbauelemente Jül - 585 - RB

Dok.: Heat Transfer
Pebble Bed Reactor - Heat Transfer
Reactor Control Rods - Heat Transfer

DK: 621.039.534
621.039.54 - 49 : 621.039.534
621.039.562.24 : 621.039.534

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

**Experimentelle Bestimmung der konvektiven
Wärmeübertragung an zylindrischen
und schraubenförmigen Absorberstäben
für den THTR-Prototyp 300 MWe**

von

Karlheinz Presser

1. Einleitung

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten für den THTR-Prototyp 300 MWe soll die konvektive Wärmeübertragung an neu zu entwickelnden, schraubenförmigen Absorberstäben untersucht werden.

Die Absorberstäbe werden bei Laständerungen und beim An- und Abfahren des Reaktors frei in die Kugelschüttung eingefahren. Sie sind Zug-, Druck-, Biege- und Knickbeanspruchungen ausgesetzt. Die im Inneren entstehende Wärme (Gamma- und Neutronenabsorption) sowie die evtl. Wärmeleitung von der Kugelschüttung muß durch eine innere und äußere Primärgaskühlung (Helium) in dem Maße abgeführt werden, daß die Absorberstabtemperatur 600 bis 650 °C nicht übersteigt.

Zur Zeit sind zylindrische Absorberstäbe für den THTR vorgesehen. Die schraubenförmigen Absorberstäbe bringen als Alternative möglicherweise folgende Vorteile gegenüber den zylindrischen Absorberstäben:

1. die Eindrück- und Radialkräfte werden kleiner (die Zerstörungswahrscheinlichkeit der Kugelbrennelemente wird geringer)
2. die Flächenpressung zwischen Kugelbrennelement (Konvex-Fläche) und dem Absorberstab (Konkav-Fläche) ist geringer.
3. die Kugelschüttung wird aufgelockert.

Die Kühlung wird zunächst als ausreichend angesehen, wenn die äußere konvektive Wärmeübergangszahl der schraubenförmigen Absorberstäbe mit der Wärmeübergangszahl für zylindrische Absorberstäbe übereinstimmt.

Die Messungen werden an bereits im Institut für Reaktorentwicklung der KFA Jülich mechanisch untersuchten ein- und zweigängigen schraubenförmigen Stäben im Maßstab 1 : 10 durchgeführt. Zum Vergleich wird der zylindrische Stab untersucht.

Da die Wärmeübertragung an Schüttungsrändern wenig erforscht ist, werden mit der gleichen Versuchsanordnung Messungen am glatten Säulenmantel (Corewand) durchgeführt.

2. Grundlagen des Meßverfahrens

Die Messung von konvektiven Wärmeübergangszahlen in Schüttungen ist aus Gründen der Beheizung und der Oberflächentemperaturmessung schwierig. Insbesondere entstehen schwer übersehbare Wärmeleitungsverluste bei örtlichen Messungen.

Die Messung von konvektiven Stoffübergangszahlen ist dagegen sehr einfach, insbesondere bei Sublimation von Naphthalin in Luft. Für örtliche Messungen ist dieses Verfahren geradezu prädestiniert, da impermeable Begrenzungen und Wände vorliegen. Daher wurde dieses, in der Literatur mehrfach beschriebene, Verfahren für die vorliegenden Meßaufgaben gewählt.

Über die Umrechnung von Stoff- in Wärmeübergangszahlen, die experimentelle Prüfung und die Analogie-Defekte, insbesondere für das Stoffsystem Naphthalin/Luft, wird in der Literatur [1], [2] öfter berichtet. Im folgenden wird daher nur kurz darauf eingegangen.

Ist das Stoffübertragungsgesetz für das Stoffsystem A/B (z. B. A = Naphthalin; B = Luft) experimentell ermittelt worden Gl. (1), so erhält man daraus ein Wärmeübertragungsgesetz für das Medium B Gl. (2), wenn die Sherwood-Zahl durch die Nusselt-Zahl und die Schmidt-Zahl durch die Prandtl-Zahl ersetzt werden. Zwischen der Prandtl- und der Schmidt-Zahl besteht der Zusammenhang $Le = Sc/Pr$

$$\frac{Sh}{K_h} = K Re^m Sc^n \quad (1)$$

$$Nu = K Re^m Pr^n \quad (2)$$

Aus den Gl. (1) und (2) leitet sich der bekannte Zusammenhang zwischen der Wärme- und Stoffübergangszahl, Gl. (3), her.

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{K_h} \int c_p Le^{1-n} \quad (3)$$

Wichtig für die Umrechnung ist der Exponent n bzw. $(1 - n)$. Bei Anlaufvorgängen ist $n = 0,3$ bzw. $(1 - n) = 0,7$ geeignet.

Für das Stoffsystem Naphthalin/Luft ist der Korrekturfaktor für den Stefanstrom $K_h = 1$. Außerdem können ρ und C_p für reine Luft berechnet werden, da der Naphthalinpartialdruck nur etwa 10 N/m^2 beträgt. Weitere Einzelheiten enthält [2].

3. Durchführung und Auswertung der Versuche

3.1 Meßstrecke

Die Meßstrecke bildet ein Plexiglasrohr von 192 mm Innendurchmesser, Bild 1 und Bild 2, in das die Absorberstabmodelle zentral montiert werden. Durch das Versuchsrohr wird mit einem Radialgebläse Luft gesaugt, die einer großen Versuchshalle entnommen wird. Die Schüttung besteht aus Glaskugeln von 6 mm Durchmesser. Das Versuchsrohr hatte einen scharfkantigen und einen abgerundeten Einlauf. Der mit Naphthalin beschichtete Säulenmantelausschnitt befindet sich in Höhe des Naphthalin beschichteten Absorberstabes. Die Anordnung der Druck- und Temperaturmeßstellen zeigen Bild 1 und Bild 2.

3.2 Herstellung der Modelle

Die Absorberstabmodelle (Zylinder, ein- und zweigängige Schraube) wurden im Maßstab 1 : 10 aus Aluminium hergestellt. Die Abmessungen enthält Bild 3. Jeweils ein Abschnitt von 100 mm, der vom Vor- und Nachlauf getrennt werden kann, ist mit Naphthalin beschichtet. Aus meßtechnischen Gründen sind die Absorberstabmodelle hohl. Der Säulenmantelausschnitt (Aluminiumblech) hatte die Maße $98 \times 97 \text{ mm}^2$.

Die Herstellung der Naphthalin-Beschichtung erfolgte durch Eintauchen der leicht aufgerauhten Aluminiummodelle in eine Naphthalinschmelze von ca. 100°C . Der zylindrische Stab wurde überdreht. Die Schraubenkörper und der Säulenmantelausschnitt wurden mit Feile und Schmirgelpapier nachbearbeitet. Die Naphthalinschicht betrug vor dem Versuch 0,2 bis 0,3 mm.

3.3 Durchführung der Versuche

Nach Montage der Modelle in das Versuchsrohr wurden Kugeln mit Hilfe einer Vorrichtung eingefüllt. Die Versuchszeit richtete sich nach Lufttemperatur und Massenstrom der Luft, Tab. 1. Die mittlere Naphthalinabtragung lag bei ca. $50 \mu\text{m}$. Nach Beendigung der Versuche wurden die

Kugeln aus dem Versuchsrohr abgesaugt. Der Volumenstrom der Luft und die Lufttemperatur änderten sich bei den meisten Versuchen während der Versuchszeit praktisch nicht. Bei einigen Versuchen ergab sich eine Temperaturänderung von ca. 1 °C. Diese Änderung wurde bei der Berechnung des Naphthalinpartialdruckes berücksichtigt. In getrennten Versuchen wurde der Massenverlust durch Abrieb ermittelt. Es ergaben sich folgende Werte:

- Zylindrischer Absorberstab 2 bis 3 mg
 - Schraubenförmiger Absorberstab 6 bis 7 mg
- (mehrmals in der Kugelschüttung gedreht)

3.4 Meßwerte

- 3.4.1 Gewicht der mit Naphthalin beschichteten Modelle mit Analysenwaagen vor und nach dem Versuch.
- 3.4.2 Versuchszeit.
- 3.4.3 Ruhetemperatur der Luft mit geeichtem Quecksilber-Thermometer mit 0,1 grd-Teilung und Mantelthermoelement über Mehrfachkompensationsschreiber.
- 3.4.4 Dynamischer Druck mit Staurohr von 3 mm Durchmesser; Anzeige durch Mikromanometer von Hero, Meßbereich: 0,01 bis 14 mm Flüssigkeitssäule.
- 3.4.5 Düsenfaktor durch Integration der Geschwindigkeitsprofile.
- 3.4.6 Relative Luftfeuchtigkeit
- 3.4.7 Barometerstand
- 3.4.8 Druckverlust der Schüttung mit U-Rohr und Mikro-Betz
- 3.4.9 Statischer Druck an der ersten Meßebeine in Strömungsrichtung mit U-Rohr

Die Zusammenstellung der wichtigsten Meßwerte enthält Tab. 1 .

3.5 Berechnung der mittleren konvektiven Sherwood-Zahl

Die Sherwood-Zahl wird mit dem Kugeldurchmesser gebildet. Aus den Meßwerten folgt Gl. (4)

$$\overline{Sh} = \frac{\left(\frac{\Delta G R_w \overline{T_w}}{t S \overline{p_w}} \right) d_K}{D_0 \left(\frac{T_L}{T_0} \right)^2 \left(\frac{P_0}{\overline{P}} \right)} \quad (4)$$

Der Naphthalinpartialdruck in der abströmenden Luft wurde gegenüber dem Naphthalinpartialdruck an der Naphthalinoberfläche vernachlässigt. Die Naphthalinoberflächentemperatur wurde gleich der um 0,15 °C verminderten mittleren Lufttemperatur gesetzt. Die Stoffwerte von Naphthalin und dem Stoffsystem Naphthalin/Luft wurden [2] entnommen.

Bild 7 und Bild 8 zeigt die gemessenen Sherwood-Zahlen für zylindrische und schraubenförmige Absorberstäbe sowie für den Säulenmantel. Zum Vergleich sind die Meßergebnisse von Denton [3], Glaser [4] und von der Decken und Mitarbeiter [5] eingezeichnet.

Denton: Wärmeübertragung; $Pr > 0,5; 50 < Re < 5000 : Nu = 0,58 \cdot Re^{0,7} Pr^{0,3}$
 Stoffübertragung; $Sc > 0,5; 50 < Re < 5000 : Sh = 0,58 \cdot Re^{0,7} Sc^{0,3}$

Glaser: Wärmeübertragung für Luft ($Pr = 0,7$)....: $Nu = 1,42 Re^{0,567}$
 Erweiterung für andere Prandtl-Zahlen..: $Nu = 1,595 \cdot Re^{0,567} Pr^{0,3}$
 Stoffübertragung : $Sh = 1,595 \cdot Re^{0,567} Sc^{0,3}$

von der Decken: Stoffübertragung für Stoffsystem
 Naphthalin/Luft. : $Sh = 0,65 \cdot Re^{0,65}$
 ($Sc = 2,5$) Innenkugel
 Erweiterung für andere Schmidt-Zahlen. : $Sh = 0,775 Re^{0,65} Sc^{0,5}$

3.6 Berechnung der Reynolds-Zahl:

Die Reynolds-Zahl wird mit dem Kugeldurchmesser und der mittleren Geschwindigkeit im leeren Versuchsrohr gebildet, Gl. (5).

Die mittlere Geschwindigkeit folgt aus Gl. (6) mit der maximalen Geschwindigkeit $w_{max} = \sqrt{\frac{2 \Delta P_{dynmax}}{S_L}}$ und dem Düsenfaktor $f_D \leq 1$. Der Düsenfaktor wurde aus den gemessenen Geschwindigkeitsprofilen nach Bild 4 und Bild 5 berechnet. Bei scharfkantigem Einlauf ($f_D = 0,62$) ergab sich als Folge der Strahleinschnürung ein niedrigerer Wert als bei abgerundetem Einlauf ($f_D = 0,95$). Der Düsenfaktor kann unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit im untersuchten Bereich von 7,5 bis 2 m/s angesehen werden.

$$Re_{kor} = \frac{\bar{w} d_K}{(1 - \epsilon) \nu} = \frac{Re}{1 - \epsilon} \tag{5}$$

$$\bar{w} = f_D w_{max} \tag{6}$$

Die korrigierte Reynolds-Zahl berücksichtigt das relative Lückenvolumen ϵ , das nur geringfügig vom Kugeldurchmesser abhängt. Bei unregelmäßiger Kugelschüttung ist $\epsilon = 0,39$. Bei der Berechnung der Luftdichte wurde der Wasserdampfanteil berücksichtigt.

Der dynamische Druck wurde mit einem Staurohr von 3 mm Durchmesser erfaßt und an einem Mikromanometer von Hero abgelesen. Bei Reynolds-Zahlen unter 300 ($Re = \frac{\bar{w} d}{\nu}$; d = Durchmesser des Staurohres) tritt

eine Änderung des Gesamtdruckes durch Zähigkeitswirkung ein (Barker-Effekt [7]). Bei den vorliegenden Messungen bewegte sich die Reynolds-Zahl von 300 bis 1 000. Der Korrekturfaktor β , definiert durch die Beziehung $q_0 = \frac{1}{\beta} q$ (q_0 ist der wirkliche dynamische Druck, q der gemessene), hat den größten Wert 1,01. Die Korrektur ist also vernachlässigbar klein.

Zur Kontrolle der Geschwindigkeitsmessung mit dem Staurohr wurde der Druckverlust für eine Schüttungshöhe von 120 mm gemessen.

3.7 Berechnung des Widerstandsbeiwertes

Der Druckverlust der unregelmäßigen Kugelschüttung wird mit Gl. (7), der Widerstandsbeiwert mit der von Ergun [6] empirisch gefundenen Beziehung, Gl. (8), berechnet.

$$\Delta P = \psi \frac{H}{d_K} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \rho_L \bar{w}^2 \quad (7)$$

$$\psi = 149,76 \frac{1 - \epsilon}{Re} + 1,75 \quad (8)$$

Aus den Meßwerten errechnet sich der Widerstandsbeiwert zu:

$$\psi = \frac{\left(\frac{\Delta P}{2 \Delta P_{dyn max} f_D^2} \right)}{\left(\frac{H}{d_K} \right) \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \right)} \quad (9)$$

Die gemessenen ψ -Werte zeigt Bild 6. Zum Vergleich ist Gl. (8) eingezeichnet. Innerhalb der unvermeidbaren Streubreite stimmen die Meßwerte mit der Gleichung von Ergun gut überein. Damit ist die Zuverlässigkeit der Geschwindigkeitsmessung, auch bei relativ kleinen Geschwindigkeiten, nachgewiesen.

4. Diskussion der Meßergebnisse

Bild 7 und Bild 8 zeigen, daß die zylindrischen- und schraubenförmigen Absorberstäbe praktisch gleich große Sherwood-Zahlen haben, die rund 15 % niedriger liegen als die Sherwood-Zahlen von Kugeln in der unregelmäßigen Kugelschüttung nach Denton. Der Exponent der Reynolds-Zahl stimmt näherungsweise mit dem Wert von Denton überein.

Die Sherwood-Zahlen des glatten Säulenmantels liegen rund 20 % unter der Geraden von Denton. Die Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl stimmt mit Denton gut überein.

Die mit abgerundetem und scharfkantigem Einlauf ermittelten Meßpunkte unterscheiden sich nicht. Die Streubreite der Meßpunkte um die Ausgleichsgeraden beträgt etwa $\pm 5\%$.

Die mittlere Sherwood-Zahl wird offenbar nicht systematisch von der Größe der abgetragenen Naphthalinmasse (variiert von 300 bis 1 500 mg, Tab. 1) verändert, obwohl mit zunehmender Abtragung die Rauigkeit der Oberfläche zunimmt, Bild 9 und Bild 11. Die Massenverluste durch Abrieb machen im Durchschnitt weniger als 1 % in der Sherwood-Zahl aus.

Demzufolge können folgende Potenzgesetze für Stoff- und Wärmeübertragung angegeben werden:

Absorberstäbe: $Sh = 0,49 Re^{0,7} Sc^{0,3}; Nu = 0,49 Re^{0,7} Pr^{0,3}$ (10)

Säulenmantel: $Sh = 0,46 Re^{0,7} Sc^{0,3}; Nu = 0,46 Re^{0,7} Pr^{0,3}$ (11)

Die Strömungs- und Wärmeübertragungsverhältnisse an Schüttungsrändern sind noch wenig erforscht. Bekannt ist, daß das relative Lückenvolumen an den Schüttungsrändern größer ist als im Zentrum der Schüttung. Daraus folgt, daß an den Schüttungsrändern örtlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten vorliegen. Von der Decken [5] bestätigt dies durch die Feststellung, daß die Rundkugeln rund 7 % höhere Nusseltzahlen aufweisen als die Innenkugeln bei unregelmäßiger Schüttung. Trotzdem mißt man an Schüttungsrändern kleinere Nusselt-Zahlen als an Kugeln in Schüttungsmitte. Dies kann folgenden Grund haben: An jeder Berührungstelle, Kugel-Wand oder Kugel-Kugel, erfolgt eine Umlenkung der Strömung mit Wirbelbildung. Je mehr Berührungsstellen je Flächeneinheit, umso größer wird die Wärmeübergangszahl. Experimentell wurden folgende Werte für Kugeln von 6 mm Durchmesser, Bild 9 und Bild 11, ermittelt:

- Kugel in der unregelmäßigen Kugelschüttung 6,6 bis 9,3 Auflagepunkte/cm²; K = 0,58
- Zylindrischer Absorberstab (13 mm Durchmesser) 2,9 bis 3,2 Auflagepunkte/cm²; K = 0,49
- Säulenmantel (Corewand) (192 mm Durchmesser). 2,4 bis 2,5 Auflagepunkte/cm²; K = 0,46

Diese Zusammenstellung zeigt deutlich den systematischen Anstieg der K-Werte (K ist durch Gl. (1) definiert) mit der Anzahl Auflagepunkte je Quadratzentimeter.

Außerdem wird das relative Lückenvolumen wahrscheinlich von der relativen Gesamtkrümmung der berührenden Körper $\frac{1}{r} = \frac{\pm \frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2}}{\pm \frac{2}{r_1}}$ abhängen.

(r_1 ist der Kugelradius, r_2 der Radius des Schüttungsrandes; das Pluszeichen gilt bei Konvex-, das Minuszeichen bei Konkav-Flächen.) Im vorliegenden Fall ist $1/r$ für die Kugel in der Kugelschüttung gleich 1, für den zylindrischen Absorberstab 0,73 und für den Säulenmantel (Corewand) 0,484. Ausführliche Messungen müssen diese Vermutungen noch bestätigen.

Bei den schraubenförmigen Absorberstäben zeigen sich auf den **Konkav**-Flächen nur schwach angedeutete Linienauflagen, Bild 10. Punktauflagen erkennt man deutlich an den Stirnflächen der schraubenförmigen Absorberstäbe, den zylindrischen Absorberstäben, Bild 9, und dem Säulenmantel, Bild 11. Damit kommt wie erwartet zum Ausdruck, daß die geringste Flächenpressung bei der Berührung der konvexen Kugel­fläche mit der konkaven Schraubenfläche vorliegt.

Außerdem bestätigen die Bilder 9 und 10 auf Grund der Abtragungsstruktur die allgemeine Regel, daß die mittlere Stoffübergangszahl einer Fläche umso größer ist, je gleichförmiger die entsprechenden örtlichen Stoffübergangszahlen sind.

Bild 10 zeigt, daß die Naphthalinabtragung an den Stirnflächen der schraubenförmigen Absorberstäbe am größten ist (es wird vorausgesetzt, daß die Naphthalinschicht vor dem Versuch über der ganzen Schraubenoberfläche gleich dick ist). Daher darf angenommen werden, daß an diesen Stellen auch die größten Wärmeübergangszahlen auftreten.

5. Zusammenfassung

An schraubenförmigen und zylindrischen Absorberstabmodellen im Maßstab 1:10, die sich in einer unregelmäßigen Kugelschüttung befanden, wurden Sherwood-Zahlen mit dem Stoffsystem Naphthalin/Luft gemessen. Mit Hilfe der Analogie zwischen Stoff- und Wärmeübertragung wurden Nusselt-Zahlen berechnet.

Die mittleren konvektiven Nusselt-Zahlen für schraubenförmige und zylindrische Absorberstäbe sind gleich. Sie liegen etwa 15 % niedriger als die Nusselt-Zahlen für Kugeln in einer unregelmäßigen Kugelschüttung nach Denton.

Die mittleren konvektiven Nusselt-Zahlen für den Säulenmantel (Corewand) liegen etwa 20 % niedriger als die Werte nach Denton.

Anmerkung:

Für wertvolle Diskussionsbemerkungen danke ich den Herren Dr. C. B. von der Decken, R. Mauersberger, N. Matentzoglu und F. Scholz.

Die Herren E. Hermsen, W. Mentzel und H. Ploppa haben die Versuchseinrichtung gebaut, die Versuche durchgeführt und die Meßergebnisse ausgewertet.

6. Formelzeichen

C_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck [J/kg grd]	<u>Dimensionslose Kenngrößen:</u>	
d_k	Kugeldurchmesser [m]	$Sh = \frac{\bar{\beta} d_k}{D}$	mittlere Sherwood-Zahl
D	Diffusionskoeffizient [m ² /s]	$Nu = \frac{\bar{\alpha} d_k}{\lambda}$	mittlere Nusselt-Zahl
D_0	Diffusionskoeffizient bei P_0 und T_0 [m ² /s]	$Re = \frac{\bar{w} d_k}{\nu}$	Reynolds-Zahl
f_D	Düsenfaktor	$Re_{kor} = \frac{Re}{1-\epsilon}$	korrigierte Reynolds-Zahl
H	Schüttungshöhe [m]	$Pr = \frac{\nu}{a}$	Prandtl-Zahl
K	empirische Zahlenkonstante	$Sc = \frac{\nu}{D}$	Schmidt-Zahl
K_h	Korrekturfaktor für den Stefanstrom	$Le = \frac{a}{D}$	Lewis-Zahl
m	Exponent		
n	Exponent		
P_w	Naphthalinpartialdruck an der Naphthalinoberfläche [N/m ²]		
P_0	$1,01325 \cdot 10^5$ [N/m ²]		
\bar{P}	mittlerer statischer Druck im Bereich der Naphthalin-Modelle [N/m ²]		
R_N	Gaskonstante von Naphthalin [Nm/kg grd]		
S	Gesamtoberfläche [m ²]		
t	Versuchszeit [s]		
T_0	273,16 [°K]		
\bar{T}_L	mittlere Lufttemperatur [°K]		
\bar{T}_w	mittlere Naphthalintemperatur [°K]		
\bar{w}	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im leeren Kanal [m/s]		
w_{max}	Strömungsgeschwindigkeit in Kanalmitte [m/s]		
$\alpha; \bar{\alpha}$	örtliche und mittlere Wärmeübergangszahl [W/m ² grd]		
$\beta; \bar{\beta}$	örtliche und mittlere Stoffübergangszahl [m/s]		
ρ_L	Dichte der Luft [kg/m ³]		
ΔG	Gewichtsverlust der Modelle [kg]		
ΔP_{dynmax}	maximaler dynamischer Druck in Kanalmitte [N/m ²]		
ΔP	Druckverlust [N/m ²]		
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]		
ϵ	relatives Lückenvolumen		
Ψ	Widerstandsbeiwert		

7. Literatur

- [1] Gröber, Erk, Grigull: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung,
Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer (1963)
- [2] Presser K.H., Wärme- und Stoffübertragung, Bd. 1 (1968) S. 225- 236
- [3] Denton B.Sc. General discussion on heat transfer (1951), S. 370 - 373
- [4] Glaser H., ATM, V 23-2, (1959) S. 199 - 202
- [5] Von der Decken, H. J. Hantke, J. Binkebanck, K. P. Bachus
Chemie-Ing. -Techn. 32. Jahrg. (1960) Nr. 9, S. 591 - 594
- [6] Brauer H., Chemie-Ing. -Techn., 29. Jahrg. (1957) Nr. 12, S. 785-790
- [7] Wuest W., ATM, V 116-9, (1960), S. 245 - 248

Tab. 1 Meßwerte

Glatter zylindrischer Absorberstab

Lfd. Nr.	Dynamischer Druck [mm W.S.]	mittlere Lufttemperatur [°C]	Gewichtsverlust [mg]	Versuchszeit [Minuten]	Düsenfaktor
1	0,31	20,29	313	60	0,62
2	0,65	24,31	581	60	0,62
3	1,48	24,06	528	40	0,62
4	2,15	25,77	550	30	0,62
5	2,22	23,69	1 533	120	0,62
6	2,25	25,81	940	55	0,62
7	2,41	25,87	990	55	0,62
8	3,49	23,87	375	20	0,62
9	3,49	22,97	357	20	0,62
10	0,76	23,10	444	35	0,95
11	0,76	23,67	487	35	0,95
12	0,75	24,24	509	35	0,95
13	0,22	20,71	420	70	0,95
14	0,44	20,82	500	60	0,95

Schraubenförmiger Absorberstab (eingängig)

1	0,64	24,93	621	55	0,62
2	1,47	20,23	475	45	0,62
3	2,55	22,79	502	30	0,62
4	3,31	27,19	583	20	0,62
5	2,80	23,65	555	30	0,62
6	1,16	18,40	391	35	0,95
7	0,77	22,79	473	35	0,95
8	0,17	18,56	379	80	0,95
9	0,43	19,93	510	61	0,95

Schraubenförmiger Absorberstab (zweigängig)

1	0,74	19,82	480	60	0,62
2	1,51	20,18	555	50	0,62
3	3,47	24,47	535	25	0,62
4	1,54	23,46	613	40	0,62
5	2,48	25,45	542	25	0,62
6	0,57	19,20	531	60	0,95
7	0,59	19,57	455	50	0,95
8	0,77	23,26	507	35	0,95
9	0,22	19,24	477	80	0,95

Säulenmantel

1	0,74	22,08	1 011	40	0,95
2	0,23	20,28	1 027	80	0,95
3	1,50	20,46	887	30	0,95
4	0,86	21,95	1 182	45	0,95
5	1,13	22,04	1 061	35	0,95
6	0,40	20,62	1 020	60	0,95

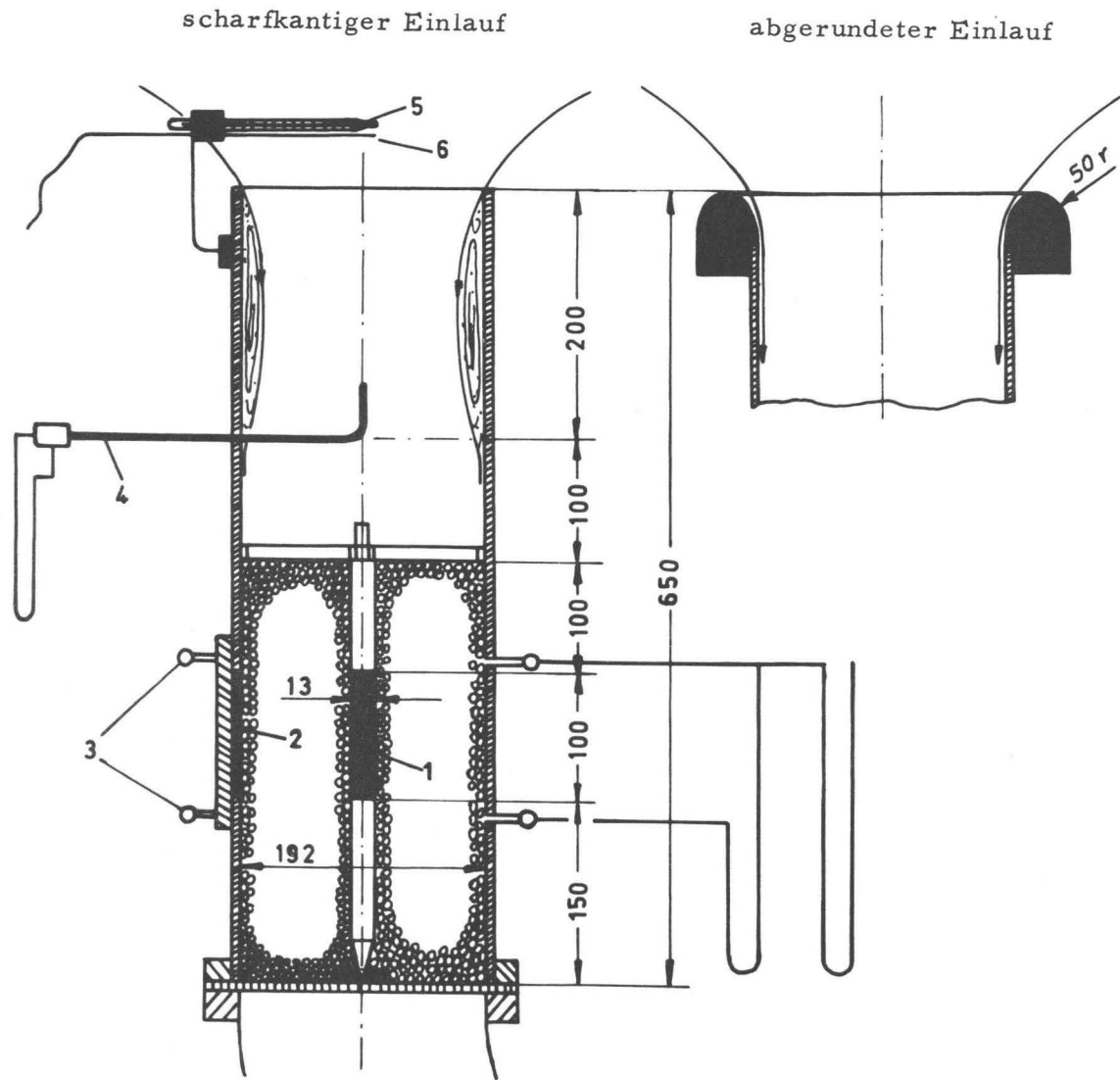


Bild 1:

Aufbau des Versuchsrohres

- 1 - Naphthalin beschichtetes Modell des Absorberstabes
- 2 - Naphthalin beschichtete Fläche des Säulenmantels
- 3 - Druckverlust-Meßebenen, 4- Prandtl'sches Staurohr
- 5 - Quecksilberthermometer, 6 - Mantel-Thermoelement

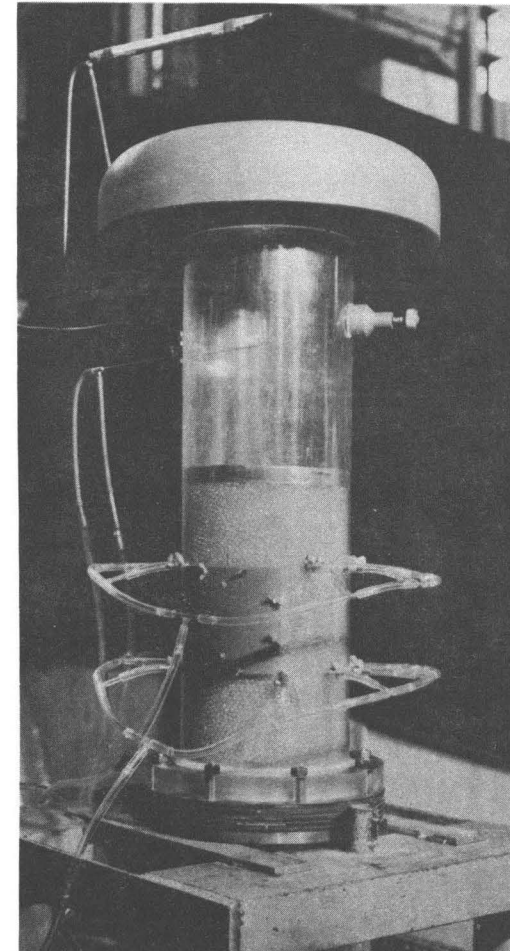


Bild 2:

Ansicht des Versuchsrohres

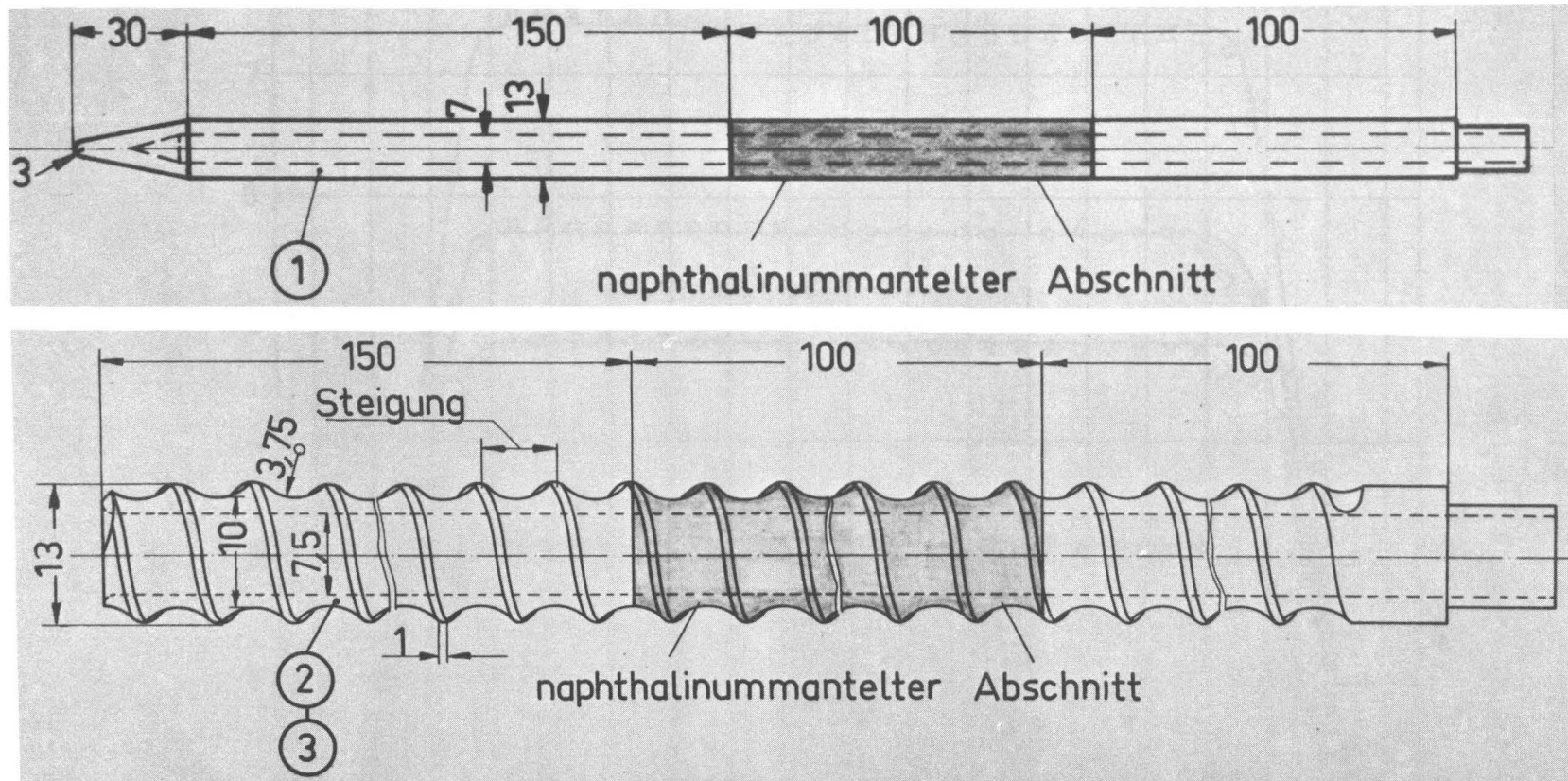


Bild 3:
Abmessungen der Absorberstabmodelle

- ① zylindrischer Stab
- ② schraubenförmiger Stab; Steigung 7 mm
- ③ schraubenförmiger Stab; Steigung 14 mm

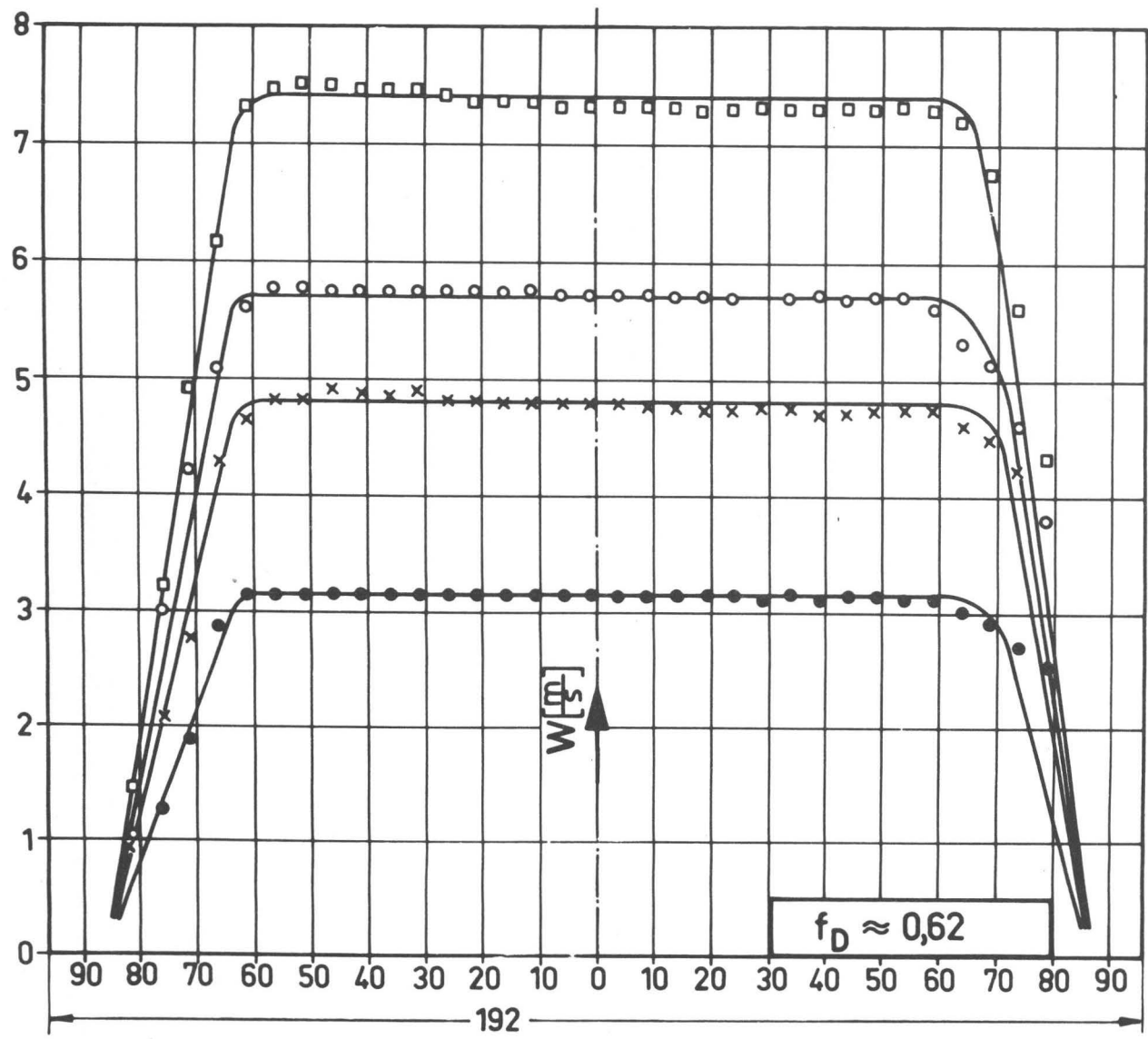


Bild 4: Geschwindigkeitsverteilung bei scharfkantigem Einlauf

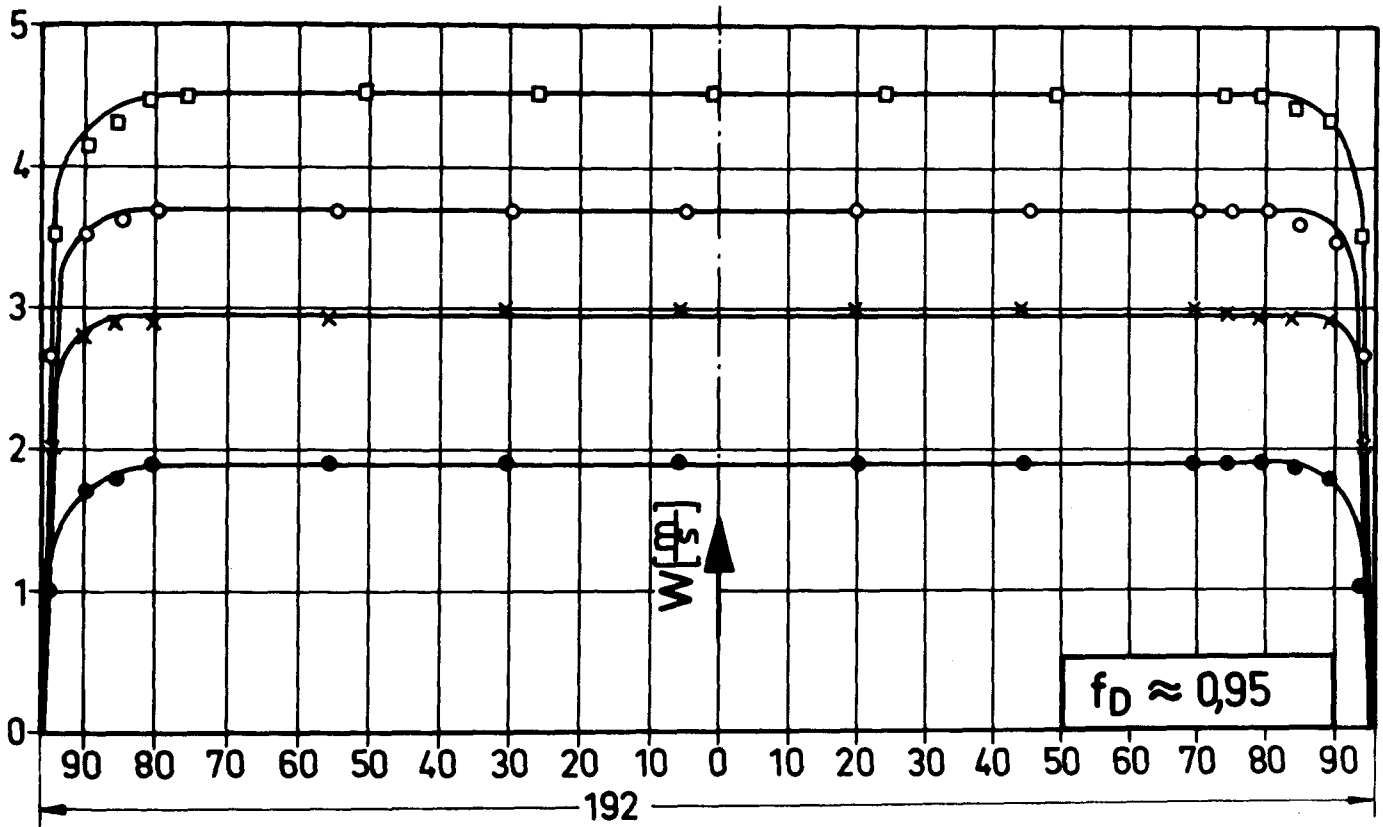


Bild 5:
Geschwindigkeitsverteilung bei abgerundetem Einlauf

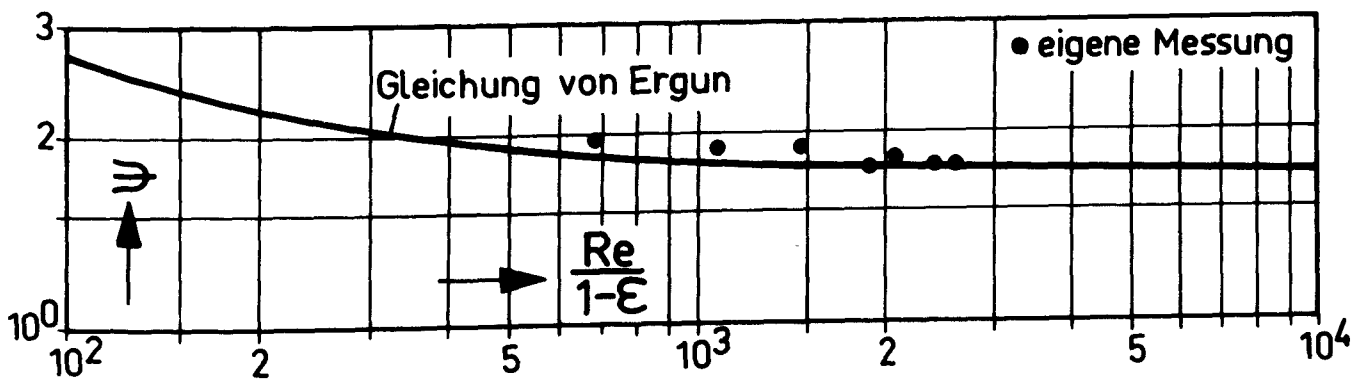


Bild 6:
Widerstandsbeiwert für die unregelmäßige Kugelschüttung

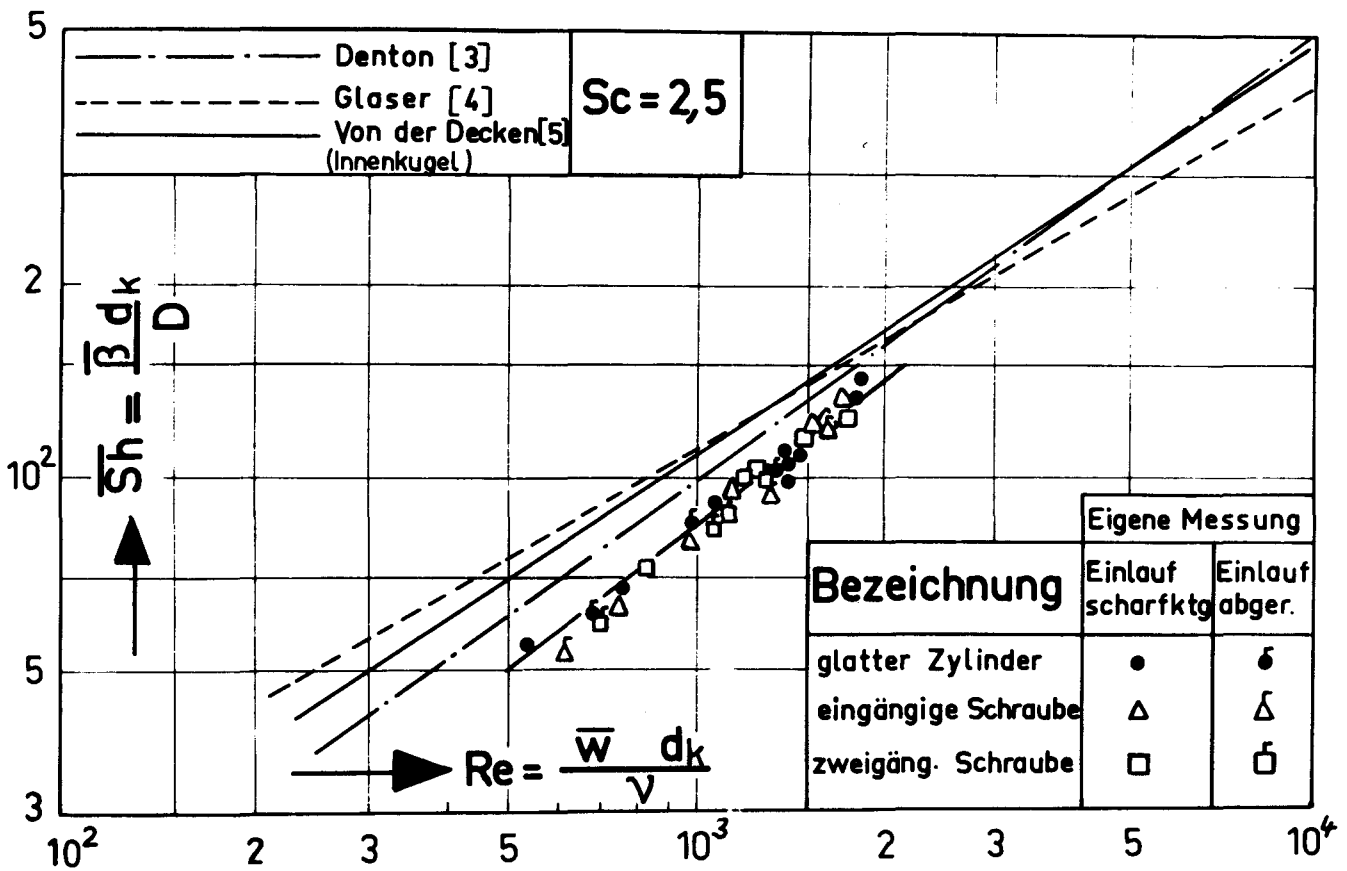


Bild 7:

Mittlere konvektive Sherwood-Zahlen für zylindrische und schraubenförmige Absorberstäbe in der unregelmäßigen Kugelschüttung

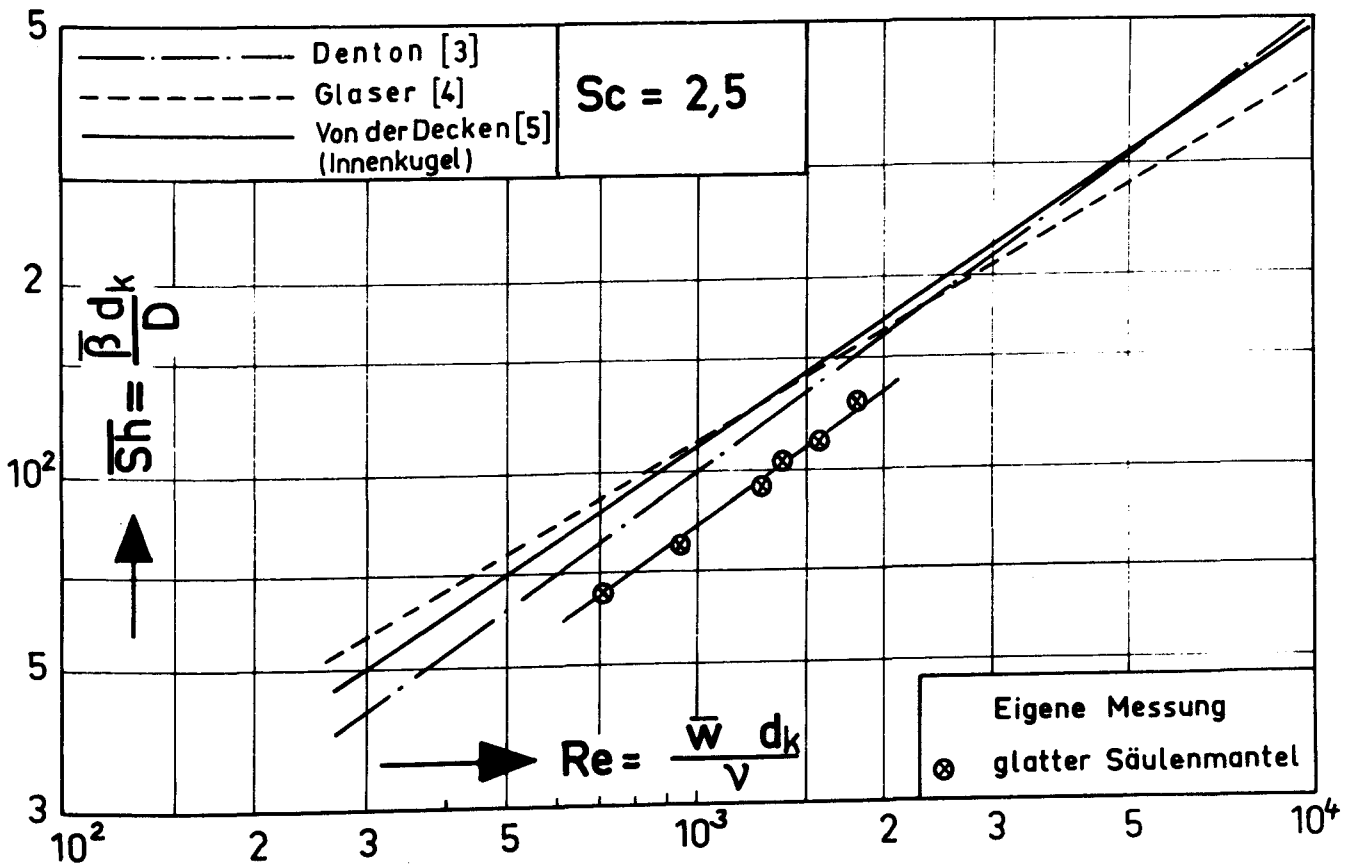


Bild 8:

Mittlere konvektive Sherwood-Zahlen für den glatten Säulenmantel bei unregelmäßiger Kugelschüttung

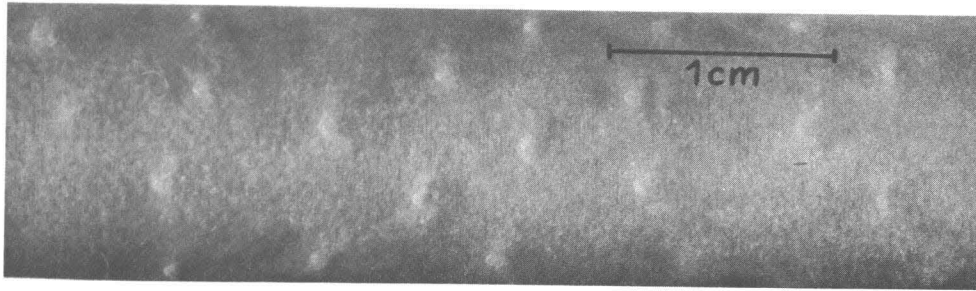


Bild 9:
Naphthalinoberfläche des glatten zylindrischen Absorberstabes nach dem Versuch. Die unregelmäßig verteilten Hügel lokalisieren die Auflagepunkte der Kugeln am Stab.

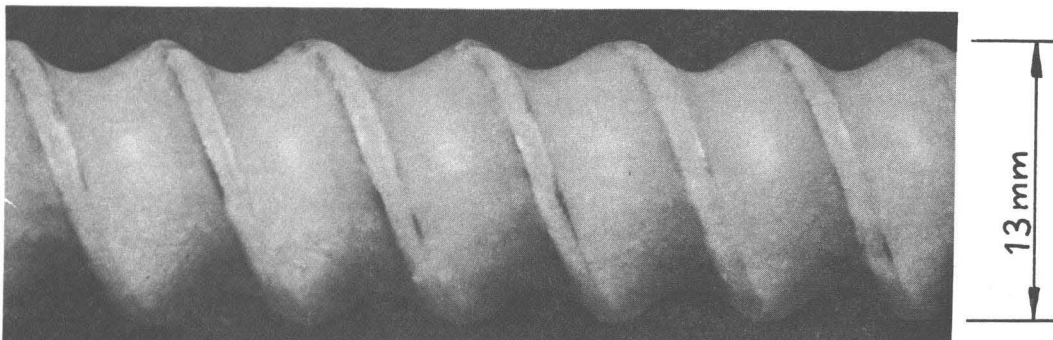


Bild 10:
Naphthalinoberfläche des schraubenförmigen Absorberstabes nach dem Versuch. Die Oberfläche ist vergleichsweise recht glatt. Linienauflagen erkennt man schwach ausgeprägt an den Konkavflächen, Punktauflagen an den Stirnflächen.

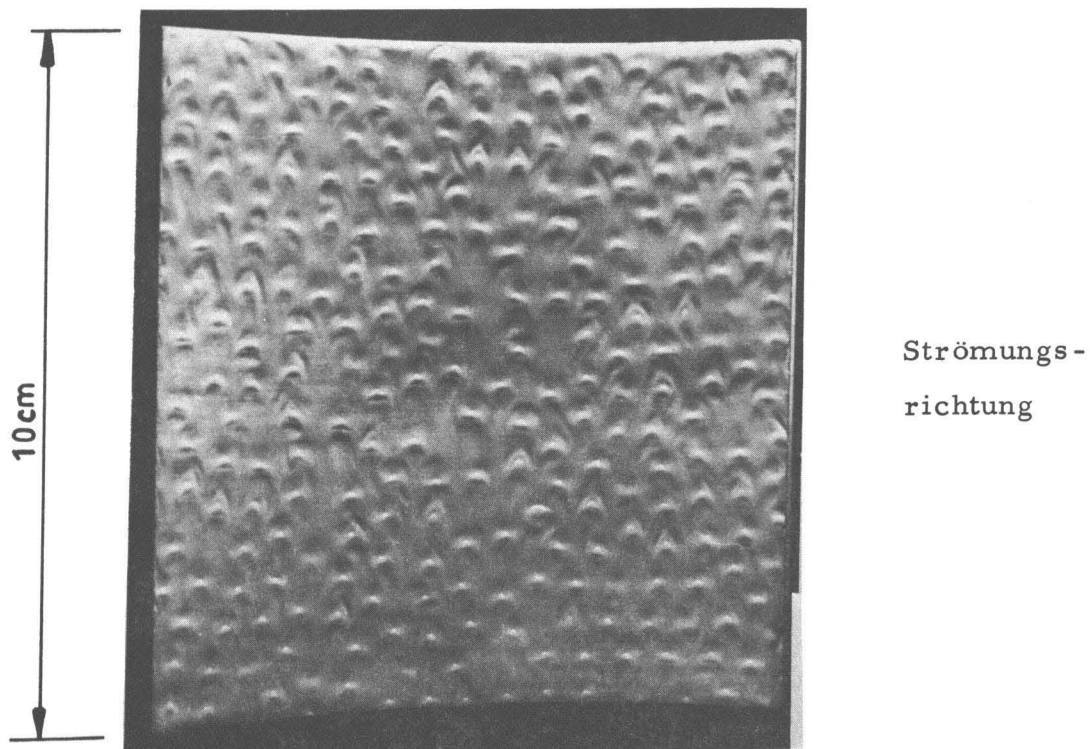


Bild 11:
Naphthalinoberfläche des Säulenmantels nach dem Versuch. Um die Auflagepunkte der Kugeln erkennt man die Strömungspfade.

