

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

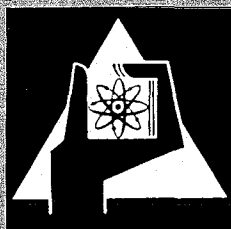
Dezember 1971

KFK 1427

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Der Druckverlust für isotherme, inkompressible turbulente Strömung
in Stabbündeln mit hexagonaler Stabanordnung

K. Rehme



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

Dezember 1971

KFK 1427

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Projekt Schneller Brüter

Der Druckverlust für isotherme, inkompressible
turbulente Strömung in Stabbündeln mit
hexagonaler Stabanordnung

von

K. Rehme

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Druckverlust für die inkompressible, isotherme, voll ausgebildete turbulente Strömung in Stabbündeln mit hexagonaler Stab-anordnung wurde systematisch untersucht. Die Ergebnisse von Druckverlustmessungen über einen Reynolds-Zahl Bereich von $Re = 6 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^5$ an 25 Teststrecken werden mitgeteilt. Die Stäbe mit Stababstandsverhältnissen von $P/D = 1.025 \div 2.324$ waren von Sechskantkanälen umgeben. Die Anzahl der Stäbe betrug 7, 19, 37 bzw. 61.

Anhand einer kritischen Durchsicht der Schrifttumsangaben und der vorgelegten neuen Meßergebnisse wird eine allgemeingültige Aussage über den Druckverlust in Stabbündeln gemacht, die im Gegensatz zu zahlreichen experimentellen und theoretischen Ergebnissen anderer Autoren steht. Der Druckverlustbeiwert steigt von etwa 60% des Kreisrohrwertes bei aneinanderliegenden Stäben ($P/D = 1.0$) rasch auf den Kreisrohrwert für $P/D \approx 1.08$ an. Für größere Stababstandsverhältnisse steigen die Druckverlustbeiwerte nur noch wenig bis auf etwa 10% über die Kreisrohrwerte bei $P/D = 2.0$ an. Die Anzahl der Stäbe im Stabbündel hat keinen feststellbaren Einfluß auf den Druckverlustbeiwert.

Abstract

Systematic investigations were carried out on the pressure drop for an incompressible, isothermal, fully developed turbulent flow in rod bundles with hexagonal arrangement of rods. The results of measurements of the pressure drop over a range of Reynolds numbers $Re = 6 \times 10^2 \div 2 \times 10^5$ in 25 test sections are communicated. The rods with rod distance ratios of $P/D = 1.025 \div 2.324$ were surrounded by hexagonal channels. The number of rods was 7, 19, 37 and 61 respectively.

On the basis of a critical survey of data from the literature and of the new measured results it was possible to give a generally valid statement about the pressure drop in rod bundles which is in contrast to numerous experimental and theoretical results by other authors. The pressure drop coefficient quickly rises from approximately 60% of the circular tube value for closely packed rods ($P/D = 1.0$) to the value for circular tubes for $P/D \approx 1.08$. For even higher rod distance ratios, the pressure drop coefficients rise but a little to about 10% above the values for circular tubes at $P/D = 2.0$. The number of rods in the rod bundle has no measurable effect on the pressure drop coefficient.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Literaturübersicht
 - 2.1 Messungen des Druckverlusts
 - 2.2 Berechnungen des Druckverlusts
3. Experimente
 - 3.1 Versuchsbedingungen
 - 3.2 Auswertungsverfahren
4. Ergebnisse
5. Vergleich der Literaturangaben mit den Meßergebnissen
 - 5.1 Vergleich mit Meßwerten anderer Autoren
 - 5.2 Vergleich mit theoretischen und empirischen Beziehungen
6. Schlußfolgerungen
7. Verwendete Symbole
8. Literaturverzeichnis
9. Tabellen
10. Diagramme

1. Einleitung

Trotz der großen Bedeutung der Strömung längs paralleler Stäbe, insbesondere in der Reaktortechnik, besteht immer noch eine große Unsicherheit über den Druckverlustbeiwert für die turbulente Strömung. Das mag zum Teil an der großen Zahl von Untersuchungen mit teils widersprüchlichen Ergebnissen, zum Teil an einer fehlenden systematischen Messung des Druckverlusts mit entsprechender Variation der Geometrieparameter liegen. Auch theoretische Überlegungen und Berechnungsmethoden finden sich im Schrifttum in großer Zahl mit weiter Streubreite der Ergebnisse. Es scheint daher nötig zu sein, die Schrifttumsangaben kritisch durchzusehen und neuen Meßergebnissen gegenüberzustellen, um eine sichere Voraussage über den Druckverlust in Stabbündeln machen zu können.

Um die Vielzahl der möglichen Randbedingungen zu ordnen, soll das in dieser Arbeit verwendete Schema kurz angeführt werden. Es werden nur Stabbündel in hexagonaler Anordnung betrachtet; quadratische Anordnungen, die sich hinsichtlich des Druckverlustbeiwerts anders verhalten, sollen nicht betrachtet werden.

Man kann folgende Parameter unterscheiden:

1. Abstandsverhältnis der Stäbe untereinander P/D (Abb. 1b)
2. Abstandsverhältnis der Stäbe zur Kanalwand W/D (Abb. 1b)
3. Anzahl der Stäbe im Stabbündel Z
4. Form des Kanals, durch den das Stabbündel umschlossen ist:
 - a) Kreisrohr (Abb. 1a),
 - b) Sechskantkanal (Abb. 1b)
 - c) quasi-unendliche Kanäle; derartige Kanäle werden gebildet, indem die Stabbündel auf den Linien engsten Stababstandes geschlossen werden, (Abb. 1c,d)
 - d) Sonderkanäle (Abb. 1e-1).

Es soll nur die inkompressible, isotherme, vollausgebildete turbulente Strömung betrachtet werden.

2. Literaturübersicht

2.1 Messungen des Druckverlusts

Es gibt eine Reihe von Untersuchungen des Druckverlusts in Stab-
bündeln in den letzten 15 Jahren. In Tabelle 1 sind alle dem Autor
bekannten Untersuchungen zusammengestellt; dabei sind die wichtig-
sten Parameter der Untersuchungen angegeben.

In Kreisrohren wurden - abgesehen von 3 Stäben durch PRESSER [6] -
nur 7 Stäbe untersucht in OAK RIDGE [1,2], durch DRAYCOTT und LAWTHER
[3], WATERS [4], HOFFMANN et al. [5], PRESSER [6] und COURTAUD
[52]. Die Stababstandsverhältnisse für diese Untersuchungen lagen
zwischen $P/D = 1.05 \div 1.536$. Für größere Stabzahlen wurden nur Sechs-
kantkanäle für hexagonale Anordnungen verwendet. Es gibt zwar Unter-
suchungen von Stabbündeln mit mehr als 7 Stäben in Kreisrohren, je-
doch sind die Stäbe dabei auf konzentrischen Kreisen angeordnet und
ergeben eine gemischte hexagonal-quadratische Anordnung; diese Un-
tersuchungen bleiben unberücksichtigt. LE TOURNEAU et al. [7],
BISHOP et al. [8,9], GALLOWAY [10,11], MIKHAYLOV et al. [12] und
MÖLLER et al. [13] untersuchten 19-Stab-Bündel für $P/D = 1.105 \div 2.055$;
SHEYNINA [14] und REHME [15] 37-Stab-Bündel für $P/D = 1.05 \div 1.417$.
Stabbündel mit größeren Stabzahlen wurden von WANTLAND [58] mit 102,
SIMONEK [17] mit 163 und REHME [15] mit 169 Stäben untersucht.

In quasi-unendlicher Anordnung wurden Untersuchungen von PRESSER
[6], SUBBOTIN et al. [16] und SHEYNINA [14], außerdem in quasi-
unendlicher Kreisrohranordnung durch FIRSOVA [19] und MILLER et al.
[20] durchgeführt.

Teststrecken mit nur wenig Stäben verwendeten PALMER und SWANSON
[21], EIFLER und NIJSING [22], EIFLER [23] und KJELLSTRÖM und STEN-
BÄCK [24]. Einen Kanal in Rhombusform benutzten DINGEE und CHASTAIN
[25], einen quadratischen Kanal SALIKOV et al. [26]. Besondere Ka-
näle wurden von IBRAGIMOV et al. [27] und HOFFMANN et al. [5]
verwendet.

Eng gepackte Stabbündel ($P/D = 1.0$) wurden von LEVCHENKO et al.
[28,29], SUBBOTIN et al. [16], EIFLER und NIJSING [22] und SUTHER-
LAND und KAYS [18] untersucht.

Da es wenig sinnvoll erscheint, alle Meßergebnisse der aufgeführten Untersuchungen in einer Abbildung darzustellen, wurden für zwei charakteristische Reynoldszahlen $Re = 10^4$ bzw. $Re = 10^5$ die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengestellt; dabei wurde darauf geachtet, daß nur geringfügig extrapoliert wurde. Die Daten, die dazu verwendet wurden, sind in Tabelle 2 angegeben. In Abb. 2 sind alle Werte relativ zum Druckverlustbeiwert des glatten Kreisrohres dargestellt. Für das Kreisrohr wurde das kürzlich von MAUBACH [30] durch eine kritische Interpretation der NIKURADSE'schen Meßwerte [31] gewonnene Druckverlustgesetz verwendet:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_R}} = 2,035 \log Re \sqrt{\lambda_R} - 0,989 \quad (1)$$

Danach ergibt sich der Druckverlustbeiwert für $Re = 10^4$ zu $\lambda_R = 0,0316$ und für $Re = 10^5$ zu $\lambda_R = 0,0182$.

Wie man in Abb. 2 sieht, streuen die Meßwerte sehr stark (bis zu $\pm 40\%$), so daß eine sichere Vorhersage des Druckverlusts in Stabbündeln auf Grund dieser Ergebnisse unmöglich ist. Aus diesem Grund finden sich auch in früheren Übersichtsdarstellungen von WAGGENER [32], SUTHERLAND [33] oder TONG [34] keine eindeutigen Aussagen zu dieser Frage.

2.2 Berechnungen des Druckverlusts

Die Berechnungsverfahren im Schrifttum beziehen sich zum größten Teil auf unendlich-ausgedehnte Stabbündel, also ohne Kanalwand-einfluß. Die grundlegende theoretische Arbeit stammt von DEISSLER und TAYLOR [35]. Es folgen eine Reihe sowohl theoretischer als auch empirischer Arbeiten bzw. Empfehlungen über den Druckverlustbeiwert russischer Autoren, wie OSMACHKIN [36], MIKHAYLOV et al. [12], BULEEV et al. [37], KOKOREV et al. [38], BOGDANOV [39] und IBRAGIMOV et al. [40,41]. Ergebnisse von Berechnungen des Druckverlustbeiwerts werden außerdem von GRÄBER [42], NIJSING et al. [43], VONKA [44] und ARANOVITCH [55] angegeben. Sie fallen bei der Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung in Stabbündeln an. SUBBOTIN et al. [45] teilen ebenfalls Werte für den Druckverlustbeiwert in Stabbündeln mit und PRESSER [6] kann seine Meßergebnisse durch eine empirische Gleichung beschreiben. In weiteren Arbeiten über die Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung in Stabbündeln, wie z.B. von BENDER und SWITICK [45], von RAPIER und REDMANN [47] und von HOFMANN [48] sind explizit leider keine Angaben über den

Druckverlust enthalten.

In Abb. 3 sind alle Angaben aus dem Schrifttum zum Vergleich aufgetragen. Dabei beziehen sich die Berechnungen auf den Fall eines unendlich ausgedehnten Stabbündels. Nur die Kurven von MIKHAYLOV, BOGDANOV und PRESSER gelten für Stabbündel; es sind empirische Formeln auf Grund von Meßergebnissen. Es besteht relativ gute Übereinstimmung für Stababstandsverhältnisse $P/D < 1,1$. Für größere Stababstandsverhältnisse ergibt sich ein weiterer Bereich der Ergebnisse. In Abb. 3 sind die Jahreszahlen der jeweiligen Veröffentlichung miteingetragen. Anhand dieser Jahreszahlen erkennt man, daß die berechneten Werte im Laufe der Jahre nicht gegen den wahrscheinlichen Verlauf konvergieren. Die Unsicherheit über den Druckverlustbeiwert auch bei den verschiedenen Berechnungsmethoden ist folglich ebenso groß wie bei den Meßwerten.

3. Experimente

Aus den dargelegten Gründen wurde der Druckverlust in Stabbündeln in hexagonaler Anordnung systematisch experimentell untersucht. Um eine sichere Vergleichsbasis für die Experimente untereinander zu bekommen, wurden die folgenden Einschränkungen der möglichen Geometrieparameter getroffen.

3.1 Versuchsbedingungen

Es wurden Stabbündel untersucht mit

- a) dem Abstand zwischen äußerer Stabreihe und der Kanalwand gleich dem Abstand zwischen den Stäben,
- b) einem Sechskantkanal als äußerer Begrenzung.

Variiert wurden

- a) das Stababstandsverhältnis,
- b) die Anzahl der Stäbe im Stabbündel.

Durchgeführt wurden die Versuche an einem im Kreislauf arbeitenden Wasserversuchsstand mit einem Durchsatz von $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem Differenzdruck an der Teststrecke von $1,3 \text{ MPa}$. Die Stäbe aus Edelstahl von $D = 12 \text{ mm}$ Durchmesser waren am Ein- und Austritt durch Lochplatten gehalten und in Sechskantkanäle eingesetzt (Abb. 4,5). Die Kanäle waren die gleichen, die in [49] ausführlich beschrieben sind, sie

wurden mit Kunstharz um Sechskantkerne gegossen. Die Teststrecken hatten eine Länge von $L = 1500$ mm, die Bündellänge betrug 1000 mm. Die gesamte Versuchsanlage wurde in [49,50] ausführlich beschrieben, eine Ansicht zeigt Abb. 6. Kleine Durchsätze ($2,5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) wurden mit Turbinendurchflußmessern, größere mit einem induktiven Durchflußmesser bestimmt. Die Differenzdrucke wurden mit U-Rohrmanometern gemessen, als Sperrflüssigkeiten dienten je nach Größe der Druckdifferenz Dichloraethan, Tetrachlorkohlenstoff, Bromoform und Quecksilber gegen Wasser.

An insgesamt 25 Teststrecken wurden die Druckverluste gemessen. Die Abmessungen und geometrischen Parameter der Stabbündel sind in Tab.3 angegeben. Man sieht, daß die Bedingung Abstand der äußeren Stabreihe von der Wand gleich dem Abstand zwischen den Stäben ($P/D = W/D$) sehr gut erfüllt ist, wenn man von den Teststrecken bei kleinen Stababständen absieht ($P/D < 1.1$). Bei diesen Teststrecken war es schwierig, die kleinen Abstände zur Wand hin so genau einzuhalten auf Grund der Toleranzen in der Kanalschlüsselweite und der Bündelanordnung.

3.2 Auswertungsverfahren

Zur Berechnung des Druckverlustbeiwertes λ wurden Druckdifferenzen Δp über eine Meßlänge ΔL , in der keine Abstandshalter enthalten waren, gemessen. Vor der Meßstrecke war in der Regel eine Anlaufstrecke von mehr als $30 D_h$ vorhanden. Nur für Stababstandsverhältnisse $P/D > 1.5$ betrug die Anlaufstrecke weniger als $30 D_h$, jedoch mindestens $15 D_h$. Ungestörte Anlaufstrecken dieser Größe dürften für Druckverlustmessungen ausreichend sein.

Der Druckverlustbeiwert λ ist definiert zu

$$\lambda = \frac{\Delta p / \Delta L}{\frac{\rho}{2} u_m^2 \frac{1}{D_h}} \quad (2)$$

mit u_m als der über den gesamten Strömungsquerschnitt F gemittelten Strömungsgeschwindigkeit, ρ als der Dichte des Strömungsmediums (Wasser), bestimmt über eine Temperaturmessung, und D_h als dem hydraulischen Durchmesser, definiert mit dem gesamten benetzten Umfang U (einschließlich Kanalwand) zu

$$D_h = \frac{4 F}{U} \quad (3)$$

Die ermittelten Druckverlustbeiwerte für alle Teststrecken sind in den Tabellen 4 bis 8 zusammen mit den zugehörigen Reynoldszahlen angegeben. Die Reynoldszahl ist definiert mit η als der dynamischen Viskosität des Strömungsmediums, die über eine Temperaturmessung bestimmt wurde, als

$$\text{Re} = \frac{\rho u_m D_h}{\eta} \quad (4)$$

4. Ergebnisse

In den Abb. 7 bis 9 sind alle Meßergebnisse als Druckverlustbeiwert über der Reynoldszahl dargestellt. Als Vergleichskurve bei turbulenter Strömung ist der Verlauf des Druckverlustbeiwerts für das glatte Kreisrohr nach Gl. (1) eingetragen. Der angegebene Verlauf für die laminare Strömung ist nach den Angaben einer früheren Arbeit des Autors [51] berechnet worden.

Wie aus den Abbildungen ersichtlich ist, brachte die experimentelle Untersuchung folgende Ergebnisse:

- a) Eine Auswirkung der Stabzahl Z auf den Druckverlustbeiwert ist nicht feststellbar. Falls die Anzahl der Stäbe einen Einfluß auf den Druckverlustbeiwert hat, so liegt dieser innerhalb der Meßungenauigkeit der Ergebnisse. Hauptursache für dieses Ergebnis dürfte die gleichmäßige Durchströmung der Stabbündel in allen untersuchten Fällen sein. Setzt man in erster Näherung für alle Unterkanäle eines Stabbündels den gleichen Druckverlustbeiwert voraus, so ergibt sich eine gleichmäßige Durchströmung, wenn die hydraulischen Durchmesser der Unterkanäle gleich sind. Bei den durchgeführten Untersuchungen war das weitgehend der Fall; man kann diese Tatsache der Tabelle 3 entnehmen, wenn man die hydraulischen Durchmesser D_h der Gesamtanordnungen mit denen eines unendlich-ausgedehnten Stabbündels vergleicht. Die hydraulischen Durchmesser unterscheiden sich im allgemeinen um weniger als 8%.
- b) Der Einfluß des Stababstandsverhältnisses P/D auf den Druckverlustbeiwert ist sehr schwach für Stababstandsverhältnisse $P/D > 1.1$. Die Druckverlustbeiwerte steigen vom Druckverlustbeiwert des glatten Kreisrohrs für $P/D \approx 1.1$ auf nur etwa 10% über die Kreisrohrwerte bei $P/D \approx 2$ an. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu vielen Meßergebnissen aus dem Schrifttum. Für $P/D < 1.1$ fällt der Druckverlustbeiwert stark ab, bis auf etwa

60% vom Kreisrohrwert für $P/D = 1,0$, wie man aus dem Schrifttum entnehmen kann $\sqrt[16,22,28]$.

- c) Ein Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf den Druckverlustbeiwert ist nicht feststellbar. Die gemessene Rauhtiefe der Staboberfläche betrug im Mittel $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-6}$ m. Die Rauhtiefe der Kanaloberflächen wurde nicht gemessen, die Kanalwände waren jedoch sehr glatt durch die Herstellung aus Kunstharz.
- d) Für kleine Reynoldszahlen ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten; die Zahl der Meßpunkte in dem laminaren Bereich ist wegen der sehr kleinen Druckdifferenzen allerdings gering.
- e) Einen Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung kann man für die meisten Stabbündel nicht feststellen. Es gibt ein Übergangsbereich, wobei die Druckverlustbeiwerte allmählich aus einem mehr laminaren Verhalten (Re^{-1}) in ein turbulentes ($\sim Re^{-0,2}$) übergehen. Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, daß in den engen Spalten zwischen den Stäben bei schon turbulenter Kernströmung verzögertes Strömungsmedium vorhanden ist. Bei großen Stababständen ist das natürlich nicht mehr der Fall und man stellt hier einen Umschlag fest. Die Reynoldszahl, bei der der Umschlag erfolgt, ist im Vergleich zum Kreisrohr zu höheren Werten verschoben. Das kann durch die Definition des hydraulischen Durchmessers erklärt werden, der bekanntlich quadratisch mit dem Stababstandsverhältnis wächst und die Reynoldszahl dadurch beeinflusst.

5. Vergleich der Literaturangaben mit den Meßergebnissen

5.1 Vergleich mit Meßwerten anderer Autoren

Um zu gesicherten allgemeinen Aussagen über den Druckverlustbeiwert in Stabbündeln zu kommen, sind in Abb. 10 alle Meßergebnisse für Stabbündel in hexagonaler Anordnung in Sechskantkanälen (Literaturwerte und eigene Messungen) für $Re = 10^4$ bzw. $Re = 10^5$ bezogen auf den Druckverlustbeiwert des Kreisrohres über dem Stababstandsverhältnis aufgetragen. Die verwendeten Daten der eigenen Messungen sind in Tabelle 9 zusammengestellt, sie sind in Abb. 10 je nach Stabzahl unterschiedlich eingetragen. Zum Vergleich ist der Verlauf des Druckverlustbeiwerts der "äquivalenten" Ringzone miteingetragen. Die "äquivalente" Ringzone ergibt sich, wenn die Sechskantelementarzelle um jeden Stab in einem unendlich-ausgedehnten Stabbündel durch die

flächengleiche Ringzone ersetzt wird (s. Abb. 11). Wird das NIKURAD-SE'sche universelle Geschwindigkeitsprofil $\sqrt[31]{}$ für Kreisrohre:

$$u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5 \quad (5)$$

mit $u^+ = \frac{u}{u^*}$ als der dimensionslosen Strömungsgeschwindigkeit und $y^+ = \frac{\rho y u^*}{\eta}$ als dem dimensionslosen Wandabstand mit $u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ als der Schubspannungsgeschwindigkeit auch für die Ringzone vorausgesetzt, so ergibt sich nach MAUBACH $\sqrt[30]{}$ für die Ringzone:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2,5 \ln \frac{\rho L \cdot u^*}{\eta} + 5,5 - \frac{3,75 \cdot 1,0576 + 1,25 x}{1 + x} \quad (6)$$

wobei $x = r_o / r_1$ (siehe Abb. 11) der Ringzonenparameter,
 $L = r_o - r_1$ die Breite der Ringzone

und $D_h = \frac{r_o^2 - r_1^2}{2 r_1}$ deren hydraulischer Durchmesser ist.

Man erhält

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2,5 \ln \operatorname{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} + 5,5 - \frac{3.966 + 1,25 x}{1 + x} - 2,5 \ln 2(1+x) \quad (7)$$

Für die "äquivalente" Ringzone von hexagonal angeordneten Stabbündeln ergibt sich x zu

$$x = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}} \frac{P}{D} \quad (8)$$

Als Näherung ergibt sich für ∞ -ausgedehnte Stabbündel für den Druckverlustbeiwert bezogen auf den Kreisrohrwert λ_R nach Gl. (1) aus der Ringzonenlösung:

$$\text{für } \operatorname{Re} = 10^4 : \lambda / \lambda_R = 1,045 + 0,071 (P/D - 1) \quad (9)$$

$$\text{für } \operatorname{Re} = 10^5 : \lambda / \lambda_R = 1,036 + 0,054 (P/D - 1) \quad (10)$$

Die "äquivalente" Ringzone ist eine gute Näherung für Stabbündel mit großen Stababstandsverhältnissen ($P/D > 1,2$), für die die Wandschubspannung am Stabumfang relativ konstant ist. Für kleinere Stababstandsverhältnisse liegen die Druckverlustbeiwerte unter denen der Ringzone. Das ergibt sich aus der ungleichmäßigen Geschwindigkeits- und Wandschubspannungsverteilung und daraus, daß durch den hydraulischen Durchmesser diesen Ungleichmäßigkeiten nicht Rechnung getragen wird. Man sieht in Abb. 10, daß fast alle Meßwerte unterhalb der Linie für die "äquivalente" Ringzone liegen. Das gleiche Verhalten stellt man auch bei laminarer Strömung in Stabbündeln fest $\sqrt[51]{}$. Die Kanalwand wirkt sich bei Stabbündeln derart aus, daß die Druckverlustbeiwerte stets unter den Werten für unendlich-ausgedehnte

Stabbündel und damit unter den Werten der "äquivalenten" Ringzone liegen.

Ein Maximum des Druckverlustbeiwerts erhält man für eine gleichmäßige Durchströmung des Stabbündels $\overline{[6,27,52]}$, d.h. bei gleichem hydraulischen Durchmesser der Unterkanäle (s. 4.a), was bei den Untersuchungen weitgehend erfüllt war. Für engere oder weitere Wandabstände ergeben sich mehr oder weniger ungleichmäßige Strömungsverteilungen und dadurch stets kleinere Druckverlustbeiwerte. Diese Tatsache findet man durch Untersuchungen bei laminarer Strömung bestätigt $\overline{[51,52]}$.

Da sich der Kanalwandeinfluß bei Stabbündeln, die nicht von Sechskantkanälen umgeben sind, in ähnlicher Weise auswirken muß, kann geschlossen werden, daß die Werte für die "äquivalente" Ringzone auch für diese Anordnungen die obere Grenze für den Druckverlustbeiwert darstellen.

In Tabelle 1 bzw. Abb. 2 aufgeführte Meßergebnisse, die höhere Werte als die Ringzonenlösung liefern, müssen also auf andere Ursachen zurückgeführt werden, wie

- a) Einfluß von Oberflächenrauigkeiten,
- b) Geometrie Größen (F,U) zu ungenau bekannt,
- c) Erhöhung des Druckverlusts durch Ein- und Austrittsverlustanteile,
- d) Erhöhung des Druckverlusts durch Abstandshalter,
- e) Messung bei nicht vollentwickelter Strömung,
- f) Meßfehler und Ungenauigkeiten, da die Druckverlustergebnisse zum Teil als Nebenergebnisse von Wärmeübergangsmessungen angefallen sind.

Daß der Druckverlustbeiwert je nach Wandabstand der Stäbe bei gleichem hydraulischen Durchmesser höhere oder niedrigere Werte aufweist, demonstriert recht anschaulich, wie ungeeignet der hydraulische Durchmesser ist als die charakteristische Länge, die für alle Stabbündel die Druckverlustbeiwerte auf die Kreisrohrwerte bringt. Es ist seit langem bekannt, daß der hydraulische Durchmesser diese Eigenschaft nicht für alle Geometrien besitzt. Eine charakteristische Länge auf andere Weise so zu definieren, daß alle Stabbündel nur einem Druckverlustgesetz folgen, erscheint besonders auch in Anbetracht der Laminarlösungen $\overline{[51]}$ nicht möglich.

Deshalb muß der Versuch von SUBBOTIN $\overline{[16]}$, auch in $\overline{[19]}$ verwendet,

als charakteristische Länge statt des hydraulischen Durchmessers den Durchmesser des einbeschriebenen Kreises einzuführen, als gescheitert angesehen werden. Der so definierte Druckverlustbeiwert sinkt für große Stababstandsverhältnisse unter den Kreisrohrwert (bei $P/D = 2$ etwa auf 40% des Kreisrohrwertes) und ist damit ungeeignet, für alle Stababstandsverhältnisse die Kreisrohrwerte zu erzeugen. Allerdings hatte schon SUBBOTIN auf die Möglichkeit einer zufälligen Übereinstimmung der Druckverlustbeiwerte von Kreisrohr und Stabbündel bei Verwendung des Durchmessers des einbeschriebenen Kreises als charakteristische Länge hingewiesen.

5.2 Vergleich mit theoretischen und empirischen Beziehungen

Zu den theoretischen und empirischen Empfehlungen für den Druckverlustbeiwert von unendlich-ausgedehnten Stabbündeln ist folgendes zu bemerken:

- a) Die vorgeschlagenen empirischen Beziehungen von MIKHAYLOV et al. $\overline{12}$ und BOGDANOV $\overline{39}$ sind zu simpel, da eine lineare Abhängigkeit des Druckverlustbeiwertes vom Stababstandsverhältnis angenommen wird, und sie sind deshalb zu ungenau.
- b) Die spezielle Methode von OSMACHKIN $\overline{36}$ aus der Laminarlösung die charakteristische Länge durch Vergleich mit dem laminaren Kreisrohrwert zu erhalten und diese Länge bei turbulenter Strömung in den Kreisrohrgesetzen zu verwenden, liefert zu hohe Werte.
- c) Berechnungen, die auf anderen Geschwindigkeitsgesetzen als den von NIKURADSE $\overline{31}$ bzw. von REICHARDT $\overline{53}$ angegebenen aufbauen, ergeben ebenfalls zu hohe Druckverlustbeiwerte. Experimentelle Untersuchungen der Geschwindigkeitsverteilung in Stabbündeln ergaben stets eine sehr gute Übereinstimmung mit diesen Gesetzen $\overline{22, 23, 24, 27, 28, 29}$.

Die Berechnungen nach SUBBOTIN et al. $\overline{45}$ auf Grund eines von ROTHFUS et al. $\overline{54}$ angegebenen Verfahrens für Ringspalte, bei dem man unter der falschen Annahme, daß die Linie der Nullschubspannung für laminare und turbulente Strömung an der gleichen Position und gleichzeitig an der Linie der Maximalgeschwindigkeit liegt, durch Modifikation der wandnormalen Koordinate die Geschwindigkeitsverteilung des Rohres erhält, liefert Druckverlustbeiwerte, die zu hoch sind. Auch Berechnungen von GRÄBER $\overline{42}$, der einen Ansatz über den Verlauf der Austauschgröße bei bekannter Schub-

spannungsverteilung macht und dann das Geschwindigkeitsfeld berechnet, und Berechnungen, die mit den von EIFLER [59] angegebenen Geschwindigkeitsprofilen durchgeführt werden, führen zu zu hohen Druckverlustbeiwerten.

Die von EIFLER entwickelten Geschwindigkeitsprofile stützen sich ebenso wie die GRÄBER'schen Berechnungen stark auf die Fehlmesungen von BRIGHTON und YONES [56] für Ringspalte mit extremen Radienverhältnissen, für die eine Koinzidenz der Linien der Maximalgeschwindigkeit u_{\max} und Nullschubspannung $\tau = 0$ angenommen wurde. Diese Koinzidenz kann nach neueren Erkenntnissen [57] nicht länger angenommen werden.

- d) Berechnungen von IBRAGIMOV et al. [40] mit empirischen Faktoren für die Wandkrümmung und die Ungleichförmigkeit des durchströmten Kanalquerschnitts führen ebenfalls auf zu hohe Druckverlustbeiwerte.

Als brauchbare Berechnungsmöglichkeiten ergeben sich demnach auf Grund der experimentellen Befunde:

- A) Die grundlegende Arbeit von DEISSLER und TAYLOR [35], sie verwenden das DEISSLER'sche Profil, das sich nur wenig vom NIKURADSE'schen unterscheidet. Das gleiche Profil verwendet ARANOVITCH [55]. KOKOREV et al. [38] verwenden das REICHARDT'sche Profil. Die Ergebnisse dieser Berechnungen stimmen für $P/D > 1.4$ sehr gut mit den Ringzonenlösungen nach MAUBACH [30] überein und scheinen auch für $P/D < 1.4$ die besten Druckverlustbeiwerte zu liefern.
- B) Als empirische Beziehung, die als gute Näherung für die obere Grenze des Druckverlustbeiwerts in Stabbündeln angesehen werden kann, kann die Formel von PRESSER [6] empfohlen werden.

6. Schlußfolgerungen

Anhand der dargelegten Ausführungen und der mitgeteilten neuen Meßergebnisse kann man schließen, daß der Druckverlustbeiwert für die isotherme, inkompressible, voll ausgebildete turbulente Strömung in Stabbündeln eine obere Grenze, nämlich die Ringzonenlösung, nicht übersteigt. Für in praxi vorkommende Stabbündel mit Kanalwänden ist der Druckverlustbeiwert je nach Art und Lage der Kanalwände niedriger als die genannte Ringzonenlösung. Für üblicherweise benutzte Stabbündel mit gleichmäßiger Durchströmung liegt der Druckverlustbeiwert

nahe an der oberen Grenze; je ungleichmäßiger die Durchströmung ist, desto niedriger wird der Druckverlustbeiwert werden. Damit ist nachgewiesen, daß die zahlreichen im Schrifttum mitgeteilten teilweise sehr hohen Druckverlustbeiwerte nicht der Wirklichkeit bei der Strömung in Stabbündeln mit glatten Wänden entsprechen. Es ergibt sich für den Druckverlustbeiwert ein rascher Anstieg von 60% des Kreisrohrdruckverlustbeiwertes beim Stababstandsverhältnis $P/D = 1$ auf etwa 100% bei $P/D \approx 1.08$. Für höhere Stababstandsverhältnisse steigt der Druckverlustbeiwert nur noch auf etwa 110% vom Rohrwert für $P/D = 2.0$ an.

Für die Durchführung der Versuche, die numerische Auswertung und die Herstellung der Diagramme sei Herrn G. Wörner an dieser Stelle sehr gedankt.

7. Verwendete Symbole

D	Stabdurchmesser
D_h	hydraulischer Durchmesser
F	Strömungsquerschnitt
L	charakteristische Länge
ΔL	Meßlänge
P	Stabmittenabstand
Δp	Druckabfall
r_o	Radius der Ringzone
r_i	Radius der Ringzone
U	benetzter Umfang
u_m	über den Strömungsquerschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit
u_{max}	Maximalgeschwindigkeit
u^+	dimensionslose Geschwindigkeit
u^*	Schubspannungsgeschwindigkeit
W	Wandabstand (s. Abb. 1b)
x	Ringzonenparameter
y^+	dimensionsloser Wandabstand
y	Wandabstand
Z	Anzahl der Stäbe
Re	Reynolds-Zahl
ε	Rauhtiefe
λ	Druckverlustbeiwert
λ_R	Druckverlustbeiwert des glatten Kreisrohres
ρ	Dichte des Strömungsmediums
η	dynamische Viskosität
τ	Schubspannung
τ_w	Wandschubspannung

8. Literaturverzeichnis

- [1] Gas-Cooled Reactor Project Semiannual Progress Report for Period Ending December 31, 1958. Bericht ORNL-2676 des Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. (1959)
- [2] Gas-Cooled Reactor Project Semiannual Progress Report for Period Ending June 30, 1959. Bericht ORNL-2767 des Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. (1959)
- [3] A. Draycott, K.R. Lawther, Improvement of Fuel Element Heat Transfer by Use of Roughened Surfaces and the Application to a 7-Rod Cluster, ASME Int.Dev. in Heat Transfer 1961/1962, S. 543-552
- [4] E.D. Waters, Effect of Wire Wraps on Pressure Drop for Axial Turbulent Flow through Rod Bundles, Report HW-65173 REV der Hanford Atomic Products Operation, Richland (1963)
- [5] H.J. Hoffmann, C.W. Miller, G.L. Sozzi, W.A. Sutherland, Heat Transfer in Seven-Rod Clusters, Report GEAP-5289 der General Electric Company, San Jose, Calif., (1966)
- [6] K.H. Presser, Wärmeübergang und Druckverlust an Reaktor-brennelementen in Form längsdurchströmter Rundstabbündel, Bericht Jül-486-RB der KFA Jülich (1967)
- [7] B.W. Le Tourneau, R.E. Grimble, J.E. Zerbe, Pressure Drop for Parallel Flow Through Rod Bundles, Trans.ASME 79, 1751-1758 (1957)
- [8] A.A. Bishop, P.A. Nelson, E.A. McCabe, Thermal and Hydraulic Design of the CVTR-Fuel-Assemblies, Report CVNA-155 der Westinghouse Electr. Corp., Atomic Power Dep., Pittsburgh(1962)
- [9] R. Berringer, A.A. Bishop, E.A. McCabe, Research and Development Program Quarterly Progress Report for the Period October 1, 1959 to December 31, 1959, Report CVNA-45 der Westinghouse Electric Corp., Atomic Power Dep., Pittsburgh (1960)
- [10] L.R. Galloway, Longitudinal Flow Between Cylinders in Square and Triangular Arrays, University of British Columbia, Ph.D.Thesis (1964)
- [11] L.R. Galloway, N. Epstein, Longitudinal Flow Between Cylinders in Square and Triangular Arrays and in a Tube with Square-Edged Entrance, A.I.Ch.E.-I.Chem. E.Symposium Series No.6, London (1965)
- [12] A.I. Mikhaylov, E.K. Kalinin, G.A. Dreyster, Investigation of Hydraulic Resistance to the Longitudinal Flow of Air over a Staggered Tube Bundle. Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal 7, No.11, p.42-46 (1964) (in Russisch)

- [13] W. Baumann, V. Casal, H. Hoffmann, R. Möller, K. Rust, Brennelemente mit wendelförmigen Abstandshaltern für Schnelle Brutreaktoren, Bericht KFK 768, EUR 3694d der Ges.f.Kernforschung mbH, Karlsruhe (1968)
- [14] A.V. Sheinina, Hydraulic Resistance of Bundles of Cores in Axial Fluid Flow, In: Liquid Metals, Atomizdat, Moscow (1967), p.210-223, KFK-tr-365
- [15] K. Rehme, Widerstandsbeiwerte von Gitterabstandshaltern für Reaktorbrennelemente, ATKE 15, Lfg.2, 127-130 (1970)
- [16] V.I. Subbotin, P.A. Ushakov, B.N. Gabrianovic, Hydraulischer Widerstand bei durch Flüssigkeiten längsumströmten Stabbündeln, Kernenergie 4, 658-660 (1961) s.a. Atomnaya Energiya 9, 308 (1960)
- [17] J. Šimonek, Příspěvec K problematice přestupu tepla v proutkovém palivovém článku, Jaderná energie 12, H.7, 246-249 (1966)
- [18] W.A. Sutherland and W.M. Kays, Heat Transfer in Parallel Rod Arrays, Report GEAP-4637 der General Electric Company, San Jose, Cal., (1965)
- [19] E.V. Firsova, Investigation of Heat Transfer and Hydraulic Resistance in a Longitudinal Flow of Water past a Bundle of Tubes. Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal 6, No.5, p.17-22 (1963) (in Russisch)
- [20] P. Miller, J.J. Byrnes, and D.M. Benforado, Heat Transfer to Water Flowing Parallel to a Rod Bundle, A.I.Ch.E. Journal 2, No.2, 226-234 (1956)
- [21] L.D. Palmer and L.L. Swanson, Measurements of Heat-Transfer Coefficients, Friction Factors and Velocity Profiles for Air Flowing Parallel to Closely Spaced Rods, ASME Int.Dev. in Heat Transfer 1961/1962, S.535-542
- [22] W. Eifler and R. Nijsing, Fundamental Studies of Fluid Flow and Heat Transfer in Fuel Element Geometries. Pt.II. Experimental investigation of velocity distribution and flow resistance in a triangular array of parallel rods. Report EUR 2193.e der European Atomic Energy Community, (1965) s.a. Nucl.Eng.and Design 5, 22-42 (1967)
- [23] W. Eifler, Über die turbulente Geschwindigkeitsverteilung und Wandreibung in Strömungskanälen verschiedener Querschnitte, Dissertation TH Darmstadt (1968)
- [24] B. Kjellström, A. Stenbäck, Pressure drop, velocity distributions and turbulence distributions for flow in rod bundles, Paper submitted to "Zürich Club" Gas Cooled Fast Reactor Heat Transfer Meeting, Würenlingen (1970)
- [25] D.A. Dingee and J.W. Chastain, Heat Transfer from Parallel Rods in Axial Flow, Reactor Heat Transfer Conference of 1956, New York, TID-7529 (pt.1), Bork 2, p.462-501 (1956)

- [26] A.P. Salikov, Ya.L. Polynovskij, K.I. Belyakov, Untersuchung des Wärmeübergangs und Druckverlusts in längsdurchströmten Glattrohrbündeln, Teploenergetika 1, 13-17 (1954) (in Russisch)
- [27] M.Kh. Ibragimov, I.A. Isupov, V.I. Subbotin, Calculation and experimental study of velocity fields in a complicated channel. In Collection "Liquid Metals" Atomizdat, Moscow, (p.234-250) (1967) KFK-tr (im Druck)
- [28] Yu.D. Levchenko, V.I. Subbotin, P.A. Ushakov, A.V. Sheynina, Geschwindigkeitsverteilung in der Zelle eines dicht gepackten Stabbündels. In: Liquid Metals, Atomizdat, Moskau (1967), S.223-34, s.a. KFK-tr-371
- [29] Yu. D. Levchenko, V.I. Subbotin, P.A. Ushakov, The distribution of coolant velocity and wall stresses in closely packed rods, Atomnaya Energiya 22, No.3, S.262 (1968)
- [30] K. Maubach, Reibungsgesetze turbulenter Strömungen, Chem. Ing.Techn. 42, H.15, 995-1004 (1970)
- [31] J. Nikuradse, Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren, Forsch.-Arb. Ing.-Wesen, VDI-Forschungs. H. 356 (1932)
- [32] J.P. Waggener, Friction Factors for Pressure-Drop Calculations, Nucleonics 19, No.11, 145-147 (1961)
- [33] W.A. Sutherland, Experimental Heat Transfer in Rod Bundles in: Heat Transfer in Rod Bundles, The Winter Annual Meeting of ASME, New York (1968)
- [34] L.S. Tong, Pressure Drop Performance of a Rod Bundle in: Heat Transfer in Rod Bundles, The Winter Annual Meeting of ASME, New York (1968)
- [35] R.G. Deissler, M.F. Taylor, Analysis of Axial Turbulent Flow and Heat Transfer Through Banks of Rods or Tubes, Reactor Heat Transfer Conference of 1956, TID-7529 (Pt.1), Book 2, p.416-461 (1957)
- [36] V.S. Osmachkin, Some Problems of Heat Transfer in Liquid-Cooled Reactors, A/CONF.28/P/326 USSR (1964) Third United Nations International Conf.on the Peaceful Uses of Atomic Energy
- [37] N.I. Buleev, K.N. Polosukhina, V.K. Pyshin, Hydraulic Resistance and Heat Transfer in a Turbulent Liquid Stream in a Lattice of Rods, High Temperature 2, 673-681 (1964) (aus: Teplofizika Vysokikh Temperatur 2, 5, p.749-757 (1964))
- [38] L.S. Kokorev, A.S. Korsun, V.I. Petrovichev, Méthodes approchées de calcul de la distribution des vitesses dans le écoulements turbulents des canaux à section non circulaire, Rapport Inzherno-Fizicheskii Inst., Moskau (1966), s.Report CEA-tr-R-1922 (1968)

- [39] F.F. Bogdanov, Friction Factors for Longitudinal Stream-line Flow Through Tube Bundles, *Atomnaya Energiya* 23, No.1, 46-47 (1967)
- [40] M.Kh. Ibragimov, I.A. Isupov, L.L. Kobzar, and V.I. Subbotin, Calculation of Hydraulic Resistivity Coefficients for Turbulent Fluid Flow in Channels of Noncircular Cross Section, *Atomnaya Energiya* 23, No.4, 300-305 (1967)
- [41] M.Kh. Ibragimov, I.A. Isupov, L.L. Kobzar, V.I. Subbotin, Calculation of the Tangential Stresses at the Wall of a Channel and the Velocity Distribution in a Turbulent Flow of Liquid, *Atomnaya Energiya* 21, No.2, pp.101-107 (1966)
- [42] A. Gräber, Der Wärmeübergang in glatten Röhren, zwischen parallelen Platten, längs der ebenen Platte, in Ringspalten und längs Rohrbündeln bei exponentieller Wärmeflußverteilung in erzwungener laminarer oder turbulenter Strömung, Bericht EUR 4381d (1969), s.a. *Int.J. Mass Heat Transfer* 13, p.1645-1730 (1970)
- [43] R. Nijsing, I. Gargantini, and W. Eifler, Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in a Triangular Array of Parallel Heat Generating Rods, *Nucl. Eng. and Design* 4, 375-398 (1966)
- [44] V. Vonka, Numerical Calculation of Velocity and Temperature Profiles of an Incompressible Fluid Flowing In-line through a Triangular Rod Bundle under Fully Developed Heat Transfer Conditions. Paper submitted to "Zürich Club" Gas Cooled Fast Reactor Heat Transfer Meeting, Würenlingen (1970)
- [45] V.I. Subbotin, M.Kh. Ibragimov et al., Approximate Calculations of Averaged Hydrodynamic Values and Investigation of Turbulent Processes in Channels, *Heat Transfer 1970*, Paris, Paper FC3.8 (1970)
- [46] D.J. Bender and D.M. Switick, Turbulent Velocity Distribution in a Rod Bundle, ASME Winter Annual Meeting 1968, New York (1968) Paper 68-WA/HT-35
- [47] A.C. Rapier and J.D. Redman, Calculation of Velocity Distributions in Rod Clusters, *J. Mech. Eng. Sci.* 7, No.4, 460-468 (1965)
- [48] F. Hofmann, Flow and Temperature Distribution Including Coolant Mixing in Sodium Cooled Fuel Elements with Excentric Geometry. Report KFK 1155 der Ges.f. Kernforschung, Karlsruhe (1970). s.a. IAEA-SM-130/40.
- [49] K. Rehme, Systematische experimentelle Untersuchung der Abhängigkeit des Druckverlustes von der geometrischen Anordnung für längs durchströmte Stabbündel mit Spiraldrahtabstandshaltern. Bericht INR-4/68-16 der Gesellschaft f. Kernforschung mbH., Karlsruhe (1968)
- [50] K. Rehme, Druckverlust in Stabbündeln mit Spiraldrahtabstandshaltern, *Forsch. Ing.-Wes.* 35, Nr.4, 107-112 (1969)
- [51] K. Rehme, Laminarströmung in Stabbündeln, *Chem. Ing. Techn.* 43, 962-966 (1971)

- [52] M. Courtand, R. Ricque, M. Martinet, Etude des pertes de charge dans des conduites circulaires contenant un faisceau de barreaux, Chemical Eng.Science 21, p.881-893 (1966)
- [53] H. Reichardt, Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen, ZAMM 31, Nr.7, 208-219 (1951)
- [54] R.R. Rothfus, J.E. Walker and G.A. Whan, Correlation of Local Velocities in Tubes, Annuli and Parallel Plates A.I.Ch.E.Jl.4, 240-244, (1958)
- [55] E. Aranovitch, A Method for the Determination of the Local Turbulent Friction Factor and Heat Transfer Coefficient in Generalized Geometries. Trans.ASME, Journal of Heat Transfer 93, H.1, p.61-68 (1971)
- [56] J.A. Brighton and J.B. Jones, Fully Developed Turbulent Flow in Annuli, Trans.ASME, J.Basic Eng.,D86,835-44 (1964)
- [57] K. Maubach und K. Rehme, Negative Eddy Diffusivities for Asymmetric Turbulent Velocity Profiles? Int.Jl.Heat Mass Transfer (im Druck)
- [58] J.L. Wantland, Compact Tubular Heat Exchangers, Reactor Heat Transfer Conference of 1956, TID-7529 (pt.2), Book2, 525-548 (1956)
- [59] W. Eifler, Berechnung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung und der Wandreibung in konzentrischen Ringspalten, Wärme- und Stoffübertragung 2, H.1,S.36-46 (1969).

Tabelle 1: Zusammenstellung aller Untersuchungen an Stabbündeln in hexagonaler Anordnung

Autor	Literatur	Jahr	Z	P/D	W/D	D /mm	Kanal-Abb.	Re-Bereich * 10 ⁻³	Medium	Zeichen
PRESSER	[6]	1967	3	1.1	1.06	42.0	1a	15-150	Luft	▽
(OAK RIDGE)	[1]	1958	7	1.536	1.131	19.05	1a	15-70	Luft	⊙
(")	[1]	1958	7	1.136	1.531	19.05	1a	15-70	Luft	⊙
(")	[2]	1959	7	1.299	1.131	21.39	1a	15-60	Luft	⊙
DRAYCOTT, LAWTHER	[3]	1961	7	1.125	1.125	25.4	1a	10-200	Luft	⊙
"	[3]	1961	7	1.219	1.219	25.4	1a	10-200	Luft	⊙
WATERS	[4]	1963	7	1.11	1.11	19.81	1a	30-200	Wasser	⊙
"	[4]	1963	7	1.2	1.2	17.88	1a	25-200	Wasser	⊙
HOFFMANN et al.	[5]	1966	7	1.141	1.141	25.4	1a	6-200	Luft	⊙
PRESSER	[6]	1967	7	1.29	1.29	24.0	1a	10-200	Luft	▽
"	[6]	1967	7	1.05	1.53	24.0	1a	10-170	Luft	▽
COURTAUD	[52]	1966	7	1.25	1.25	25.0	1a	20-400	Wasser	▲
LE TOURNEAU et al.	[7]	1957	19	1.12	1.12	12.7	1b	6-100	Wasser	X
BISHOP et al.	[8,9]	1962	19	1.205	1.205	12.6	1b	13- 70	Wasser	+
GALLOWAY	[10,11]	1964	19	1.105	1.105	11.87	1b	10 ⁻³ - 10	Wasser + Polyäthyl- -Glykol	□
"	[10,11]	1964	19	1.266	1.266	10.36	1b	3.10 ⁻³ - 30		□
"	[10,11]	1964	19	1.51	1.51	8.68	1b	10 ⁻² - 40		□
"	[10,11]	1964	19	2.055	2.055	6.38	1b	10 ⁻² - 50		□
MIKHAYLOV et al.	[12]	1964	19	1.2	1.156	11.0	1b	0.7- 90	Luft	◇
MÖLLER et al.	[13]	1968	19	1.227	1.227	6.62	1b	35-230	Luft	▽
SHEYNINA	[14]	1967	37	1.05	1.02	10.0	1b	3-100	Wasser	⊙
"	[14]	1967	37	1.4	1.42	10.0	1b	12-120	Wasser	⊙
REHME	[15]	1970	37	1.417	1.417	12.0	1b	6-130	Wasser	△
"	[15]	1970	37	1.275	1.275	12.0	1b	3-200	Wasser	△
"	[15]	1970	37	1.392	1.209	12.0	1b	3-100	Wasser	△
WANTLAND	[58]	1956	102	1.19	1.153	4.82	1b	0,9- 15	Wasser	⊙
SIMONEK	[17]	1966	163	1.40	1.213	5.0	1b	150-700	Luft+CO ₂	⊙
REHME	[15]	1970	169	1.317	1.285	6.0	1b	3- 80	Wasser	△
PRESSER	[6]	1967	1/7	1.05	1.05	74.0	1c	10-100	Luft	▽
"	[6]	1967	19/37	1.2	1.2	15.0	1c	5-50	Luft	▽
"	[6]	1967	19/37	1.67	1.67	15.0	1c	10-200	Luft	▽
SUBBOTIN et al.	[16]	1960	7/19	1.13	1.13	12.0	1c	15- 70	Wasser	⊙
SHEYNINA	[14]	1967	19/37	1.05	1.05	14.0	1c	3-120	Wasser	⊙
SUTHERLAND, KAYS	[18]	1965	7/19	1.15	1.15	25.4	1c	8-200	Luft	⊙
"		1965	7/19	1.25	1.25	25.4	1c	8-200	Luft	⊙
FIRSOVA	[19]	1963	7	1.2	1.2	22.0	1d	5- 20	Wasser	⊙
MILLER et al.	[20]	1956	37	1.46	1.46	15.88	1d	40-800	Wasser	⊙
PALMER, SWANSON	[21]	1961	4	1.015	-	-	1e	3- 30	Luft	⊙
EIFLER, NIJSING	[22]	1965	4	1.021	-	40.0	1e	18- 60	Wasser	⊙
"	[22]	1965	4	1.059	-	40.0	1e	25-100	Wasser	⊙
"	[22]	1965	4	1.102	-	40.0	1e	30-100	Wasser	⊙
"	[22]	1965	4	1.147	-	40.0	1e	40-150	Wasser	⊙
"	[22]	1965	4	1.202	-	40.0	1e	40-170	Wasser	⊙
EIFLER	[23]	1968	4	1.08	-	40.0	1e	5-160	Wasser	⊙
KJELLSTRÖM, STENBÄCK	[24]	1970	6	1.217	-	156.5	1f	50-200	Luft	⊙
DINGEE, CHASTAIN	[25]	1956	9	1.12	1.12	12.7	1g	90-500	Wasser	⊙
"	[25]	1956	9	1.2	1.2	12.7	1g	90-500	Wasser	⊙
"	[25]	1956	9	1.27	1.27	12.7	1g	200-400	Wasser	⊙
SALIKOV et al.	[26]	1954	39	1.76	?	19.0	1h	6- 70	Luft	⊙
"	[26]	1954	39	2.05	?	19.0	1h	6 -70	Luft	⊙
"	[26]	1954	39	2.37	?	19.0	1h	6- 70	Luft	⊙
IBRAGIMOV et al.	[27]	1967	3	1.147	1.147	85.0	1i	18- 40	Luft	⊙
HOFFMANN et al.	[5]	1966	7	1.141	1.141	25.4	1k	6-150	Luft	⊙
LEVCHENKO et al.	[28]	1967	3	1.0	-	205.0	1l	8-630	Wasser	⊙
SUBBOTIN et al.	[16]	1960	19	1.0	-	17.6	1c	1- 15	Wasser	⊙
EIFLER, NIJSING	[22]	1965	4	1.0	-	40.0	1e	15- 60	Wasser	⊙
SUTHERLAND, KAYS	[18]	1965	7	1.0	-	25.4	1c	5- 20	Luft	⊙

Tabelle 2 Zusammenstellung der in Abb. 2 verwendeten Daten

Autor	Literatur	P/D	Re = 10 ⁴		Re = 10 ⁵	
			λ	λ/λ_R	λ	λ/λ_R
PRESSER	[6]	1.1	0.0250	0.791	0.0153	0.842
OAK RIDGE	[1]	1.536	0.0319	1.009	0.0199	1.095
"	[1]	1.136	0.0298	0.943	0.0231	1.271
"	[2]	1.299	0.0333	1.054	0.0195	1.072
DRAYCOTT	[3]	1.125	0.05	1.582	0.0178	0.979
"	[3]	1.219	0.05	1.582	0.0178	0.979
WATERS	[4]	1.11	0.0299	0.946	0.0169	0.927
"	[4]	1.2	0.029	0.918	0.0183	1.007
HOFFMANN	[5]	1.141	0.0369	1.163	0.0215	1.183
PRESSER	[6]	1.29	0.0292	0.922	0.0180	0.988
"	[6]	1.05	0.0248	0.785	0.0147	0.809
COURTAUD	[52]	1.25	0.0322	1.019	0.0188	1.034
LE TOURNEAU	[7]	1.12	0.03	0.949	0.0175	0.963
BISHOP	[8]	1.205	0.0261	0.842	0.022	1.21
GALLOWAY	[10]	1.105	0.03015	0.954	-	-
"	[10]	1.266	0.03125	0.989	-	-
"	[10]	1.51	0.0325	1.028	-	-
"	[10]	2.055	0.0339	1.073	-	-
MIKHAYLOV	[12]	1.2	0.03	0.949	0.02	1.100
MÖLLER	[13]	1.227	0.034	1.076	0.0188	1.034
SHEYNINA	[14]	1.05	0.024	0.759	0.0158	0.869
"	[14]	1.4	0.033	1.044	0.019	1.045
REHME	[15]	1.417	0.0325	1.028	0.0187	1.029
"	[15]	1.275	0.031	0.981	0.018	0.99
"	[15]	1.392	0.0315	0.997	0.018	0.99
WANTLAND	[58]	1.19	0.0418	1.323	-	-
SIMONEK	[17]	1.4	-	-	0.0218	1.196
REHME	[15]	1.317	0.0325	1.028	0.018	0.99
PRESSER	[6]	1.05	0.0266	0.842	0.0173	0.953
"	[6]	1.2	0.0320	1.011	0.0198	1.089
"	[6]	1.67	0.03	0.949	0.0188	1.032
SUBBOTIN	[16]	1.13	0.034	1.076	0.0225	1.238
SHEYNINA	[14]	1.05	0.0316	1.00	0.0195	1.073
SUTHERLAND	[18]	1.15	0.0364	1.152	0.0202	1.109
"	[18]	1.25	0.0407	1.289	0.0224	1.234
FIRSOVA	[19]	1.2	0.038	1.203	-	-
MILLER	[20]	1.46	0.0469	1.484	0.0296	1.628
PALMER	[21]	1.015	0.032	1.013	-	-
EIFLER	[22]	1.021	-	0.89	-	0.89
"	[22]	1.059	-	0.97	-	0.97
"	[22]	1.102	-	1.01	-	1.01
"	[22]	1.147	-	0.99	-	0.99
"	[22]	1.202	-	1.04	-	1.04
"	[23]	1.08	-	0.99	-	1.025
KJELLSTRÖM	[24]	1.217	-	-	0.0172	0.946
DINGEE	[25]	1.12	-	-	0.0175	0.963
"	[25]	1.2	-	-	0.0136	0.745
"	[25]	1.27	-	-	0.0182	1.001
SALIKOV	[26]	1.76	0.0445	1.408	0.0266	1.463
"	[26]	2.05	0.043	1.361	0.032	1.760
"	[26]	2.37	0.047	1.487	0.0278	1.529
IBRAGIMOV	[27]	1.147	-	.948	-	-
HOFFMANN	[5]	1.141	-	-	0.0198	1.088
LEVCHENKO	[28]	1.0	0.0215	0.68	0.0113	0.622
SUBBOTIN	[16]	1.0	.02	0.633	-	-
EIFLER	[22]	1.0	-	0.58	-	0.58
SUTHERLAND	[18]	1.0	0.0106	0.335	-	-

Tabelle 3 Daten der untersuchten Stabbündel

Nr.	Stabzahl Z	Stababstand a $\overline{[mm]}$	Stababstands- verhältn. P/D	Schlüsselweite Kanal SW	Wandabstands- verhältn. W/D	hydraulischer Durchmesser D_h $\overline{[mm]}$	hydraulischer Durchmesser D_∞ $\overline{[mm]}$
1	61	0.30	1.025	98.67	1.060	2.322	1.902
2	37	0.89	1.075	81.27	1.095	3.665	3.291
3	61	1.00	1.084	103.93	1.076	3.693	3.548
4	7	1.50	1.125	38.80	1.142	5.143	4.747
5	19	1.51	1.126	62.19	1.142	5.157	4.776
6	61	1.48	1.124	108.33	1.122	4.88	4.717
7	7	2.77	1.231	43.61	1.251	8.249	8.051
8	19	2.78	1.231	69.23	1.252	8.375	8.051
9	37	2.82	1.235	94.98	1.250	8.420	8.182
10	7	3.35	1.279	45.22	1.276	9.314	9.645
11	19	3.32	1.276	72.44	1.308	9.907	9.544
12	37	3.29	1.275	98.67	1.300	9.783	9.510
13	7	4.15	1.346	48.19	1.342	11.33	11.97
14	19	4.13	1.344	76.05	1.341	11.68	11.90
15	37	4.14	1.345	103.93	1.335	11.78	11.94
16	7	5.05	1.421	51.66	1.422	13.73	14.72
17	19	5.05	1.421	81.27	1.425	14.33	14.72
18	37	5.04	1.420	110.64	1.420	14.43	14.68
19	61	5.00	1.416	139.60	1.411	14.34	14.53
20	19	9.09	1.757	103.93	1.786	26.78	28.85
21	37	9.07	1.756	139.60	1.754	27.03	28.80
22	7	10.40	1.867	72.44	1.902	29.16	34.12
23	19	10.38	1.865	110.64	1.880	30.75	34.02
24	7	15.88	2.324	94.98	2.445	47.47	59.47
25	19	15.78	2.315	139.60	2.306	49.10	58.91

Tabellen 4 - 8

Zusammenstellung aller Meßergebnisse

Es bedeuten:

Z	Stabzahl
D	Stabdurchmesser
PZUD	Stababstandsverhältnis (Arbeitswert)
SW	Schlüsselweite Sechskantkanal
LM	Meßlänge
RE	Reynoldszahl
F	Druckverlustbeiwert

Z = 61
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.02766
 SW = 0.09867 M
 LM = 0.45000 M

Z = 37
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.07500
 SW = 0.08127 M
 LM = 0.49750 M

Z = 61
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.08333
 SW = 0.10393 M
 LM = 0.55000 M

Z = 7
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.12500
 SW = 0.03880 M
 LM = 0.45000 M

Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.12500
 SW = 0.06219 M
 LM = 0.45000 M

RE	F	RE	F	RE	F	RE	F	RF	F
3.2780E 02	0.116849	3.1311E 02	0.201424	3.9309E 02	0.171566	6.9090E 02	0.130182	6.1371E 02	0.130301
3.7732E 02	0.105666	3.8003E 02	0.177325	4.4648E 02	0.153603	9.0001E 02	0.110254	7.2783E 02	0.122921
4.4042E 02	0.094263	4.4898E 02	0.158753	4.8700E 02	0.147630	1.1237E 03	0.093045	8.8369E 02	0.108614
5.0477E 02	0.086067	5.2767E 02	0.143082	4.8700E 02	0.145288	1.4197E 03	0.079360	1.0437E 03	0.097213
5.7868E 02	0.077841	5.2767E 02	0.140422	5.7403E 02	0.130960	1.7350E 03	0.068374	1.2212E 03	0.086805
6.7948E 02	0.071434	6.3353E 02	0.125588	6.4852E 02	0.120278	1.9625E 03	0.061914	1.4169E 03	0.078433
8.0467E 02	0.066753	7.2884E 02	0.114028	7.3279E 02	0.111456	1.9625E 03	0.059622	1.4169E 03	0.079282
9.2960E 02	0.060093	8.4970E 02	0.102869	8.3695E 02	0.102826	2.4307E 03	0.052249	1.6366E 03	0.071169
1.1043E 03	0.054848	1.0144E 03	0.091856	9.6257E 02	0.094590	2.8350E 03	0.047859	1.8267E 03	0.066830
1.1043E 03	0.054281	1.2354E 03	0.080981	1.1332E 03	0.083649	3.2141E 03	0.044863	2.1253E 03	0.060296
1.3723E 03	0.049537	1.5368E 03	0.069358	1.3143E 03	0.076092	3.7615E 03	0.041829	2.4676E 03	0.054607
1.6546E 03	0.046091	1.8868E 03	0.061420	1.5069E 03	0.069194	4.4483E 03	0.039302	2.9013E 03	0.049281
1.9386E 03	0.043058	1.8868E 03	0.061146	1.7016E 03	0.064105	5.1995E 03	0.037446	3.3894E 03	0.045185
2.2845E 03	0.040119	2.2153E 03	0.055829	1.9880E 03	0.059416	5.9829E 03	0.035979	3.9436E 03	0.042103
2.6319E 03	0.037813	2.6619E 03	0.050403	1.9880E 03	0.057315	5.1995E 03	0.037174	4.6203E 03	0.039413
3.0296E 03	0.035694	3.1198E 03	0.046556	2.2429E 03	0.053683	5.9829E 03	0.035834	4.6203E 03	0.039666
3.2669E 03	0.034581	3.5554E 03	0.043597	2.6166E 03	0.048875	6.4480E 03	0.035080	5.2978E 03	0.037722
3.6581E 03	0.033038	4.0246E 03	0.041182	3.0529E 03	0.045958	7.5229E 03	0.033649	5.9872E 03	0.036297
4.0105E 03	0.031874	4.7226E 03	0.038393	3.5315E 03	0.042842	8.7553E 03	0.032571	6.8731E 03	0.034745
4.4037E 03	0.030759	5.2694E 03	0.036784	4.0840E 03	0.039467	9.8070E 03	0.031722	7.7858E 03	0.033406
4.7606E 03	0.029901	6.1901E 03	0.034651	4.7152E 03	0.037109	1.1005E 04	0.030922	8.8385E 03	0.032377
4.7606E 03	0.030445	7.1704E 03	0.032936	5.4823E 03	0.035024	1.1562E 04	0.030517	1.0316E 04	0.031050
5.2885E 03	0.029342	8.2261E 03	0.031539	6.5127E 03	0.033011	1.2618E 04	0.030001	9.8487E 03	0.031023
6.1148E 03	0.026024	9.8241E 03	0.029992	6.2465E 03	0.033667	1.3949E 04	0.029259	1.1080E 04	0.031157
6.0215E 03	0.029426	9.8241E 03	0.030040	6.8635E 03	0.032564	1.4735E 04	0.028861	1.2065E 04	0.030642
6.7163E 03	0.028179	9.4454E 03	0.031177	7.8969E 03	0.031476	1.5772E 04	0.028511	1.4034E 04	0.028959
7.3532E 03	0.027611	1.0767E 04	0.029716	8.9148E 03	0.030113	1.6597E 04	0.028181	1.4773E 04	0.028351
8.4823E 03	0.026406	1.2186E 04	0.028753	8.9148E 03	0.030284	1.7789E 04	0.027727	1.4773E 04	0.028810
9.2494E 03	0.025850	1.3532E 04	0.027900	9.9482E 03	0.029475	1.6597E 04	0.028148	1.6456E 04	0.028062
1.0180E 04	0.025324	1.5171E 04	0.027245	1.1259E 04	0.028417	1.7789E 04	0.027666	1.8261E 04	0.027478
1.0927E 04	0.024933	1.6468E 04	0.026740	1.2431E 04	0.027546	1.9452E 04	0.027170	1.9697E 04	0.026958
1.1777E 04	0.024370	1.8010E 04	0.026174	1.3511E 04	0.027272	2.0973E 04	0.026776	2.160E 04	0.026093
1.2685E 04	0.024150	1.9454E 04	0.025644	1.4575E 04	0.026856	2.3094E 04	0.026109	2.3801E 04	0.025696
1.4007E 04	0.023630	2.1411E 04	0.025182	1.5547E 04	0.027975	2.5588E 04	0.025468	2.6058E 04	0.025145
1.5000E 04	0.023199	2.3491E 04	0.024698	1.7984E 04	0.027170	2.8568E 04	0.024838	2.8972E 04	0.024726
1.5859E 04	0.024344	2.6134E 04	0.024330	1.9588E 04	0.026582	3.1943E 04	0.024238	3.2213E 04	0.024091
1.8201E 04	0.023157	3.0294E 04	0.022932	2.1408E 04	0.026033	3.5958E 04	0.023603	3.4717E 04	0.023820
		3.3377E 04	0.022621	2.4184E 04	0.025563	4.0058E 04	0.022989	3.8164E 04	0.022985
		3.6313E 04	0.022144	2.7608E 04	0.024383	4.4184E 04	0.023205	4.0790E 04	0.023344
		3.9837E 04	0.021425	3.0292E 04	0.023983	4.8358E 04	0.022819	4.4730E 04	0.022898
		4.2676E 04	0.021293	3.3859E 04	0.022071	5.2939E 04	0.022369	4.9572E 04	0.021528
		4.6786E 04	0.020985	3.6972E 04	0.021775	5.8946E 04	0.021892	5.4742E 04	0.021795
		5.1387E 04	0.020274	4.2435E 04	0.020436			6.1226E 04	0.021441
		5.7300E 04	0.019784	4.7009E 04	0.019989			6.7956E 04	0.020646
		6.3010E 04	0.019552	5.0757E 04	0.019570			7.6492E 04	0.020090
		6.8516E 04	0.019154	5.5902E 04	0.019476			8.4309E 04	0.019570
				6.1111E 04	0.019040			8.8026E 04	0.019777

Tabelle 4

Z = 61
 D = 0.01200 M
 PZUC = 1.12500
 SW = 0.10833 M
 LM = 0.45000 M

Z = 7
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.23330
 SW = 0.04361 M
 LM = 0.45100 M

Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.23330
 SW = 0.06923 M
 LM = 0.45200 M

Z = 37
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.23330
 SW = 0.09498 M
 LM = 0.45000 M

Z = 7
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.27500
 SW = 0.04522 M
 LM = 0.45000 M

RE	F	RE	F	RE	F	RE	F	RE	F
6.6700E 02	0.123865	8.7224E 02	0.097785	8.1102E 02	0.106681	8.4972E 02	0.106221	7.0980E 02	0.129941
7.1248E 02	0.132523	1.1124E 03	0.083223	9.0941E 02	0.100609	9.3625E 02	0.103757	1.0853E 03	0.091474
9.5502E 02	0.099966	1.3372E 03	0.072238	1.0458E 03	0.092065	1.0505E 03	0.093795	1.3621E 03	0.077100
1.1673E 03	0.087931	1.5890E 03	0.064220	1.1849E 03	0.082382	1.1748E 03	0.085737	1.6336E 03	0.066948
1.3037E 03	0.082786	1.8287E 03	0.058181	1.3423E 03	0.072508	1.3065E 03	0.079843	1.9518E 03	0.058706
1.4235E 03	0.076945	2.0944E 03	0.051100	1.5075E 03	0.067136	1.4632E 03	0.072585	2.3575E 03	0.051918
1.5883E 03	0.070229	2.4399E 03	0.046371	1.7139E 03	0.062089	1.6039E 03	0.071869	2.9037E 03	0.046122
1.6782E 03	0.068269	2.8324E 03	0.042240	1.9015E 03	0.058064	1.8781E 03	0.060943	3.4989E 03	0.042676
1.7681E 03	0.068122	3.2423E 03	0.039435	2.1470E 03	0.054363	2.1674E 03	0.055189	4.0958E 03	0.040074
2.0078E 03	0.061983	3.6695E 03	0.037297	2.3662E 03	0.050741	2.5044E 03	0.049818	4.9989E 03	0.037295
2.3225E 03	0.055607	4.3495E 03	0.036334	2.8058E 03	0.046621	2.8958E 03	0.047328	4.9989E 03	0.038046
2.6072E 03	0.053445	4.8345E 03	0.034904	3.3885E 03	0.042789	3.2929E 03	0.043668	5.8705E 03	0.035793
3.0417E 03	0.048319	4.8345E 03	0.034763	3.9941E 03	0.040530	3.7447E 03	0.041296	6.8653E 03	0.034199
3.3264E 03	0.046949	5.3783E 03	0.033133	3.9941E 03	0.036290	4.2770E 03	0.039508	7.9437E 03	0.032934
3.8958E 03	0.043645	6.2848E 03	0.031536	4.6365E 03	0.038568	4.2770E 03	0.039252	9.1832E 03	0.031906
4.3153E 03	0.041736	7.5664E 03	0.029803	5.2705E 03	0.036908	5.0952E 03	0.037587	1.0590E 04	0.030857
4.8547E 03	0.040091	8.8897E 03	0.028881	6.0588E 03	0.035520	5.5412E 03	0.036416	1.2122E 04	0.029965
5.3941E 03	0.038673	1.0157E 04	0.028192	6.7477E 03	0.034520	6.5017E 03	0.035251	1.3248E 04	0.029199
5.9336E 03	0.037411	1.0157E 04	0.028142	7.6478E 03	0.033234	7.2651E 03	0.033641	1.6583E 04	0.027297
6.5029E 03	0.036490	1.1316E 04	0.027832	8.6916E 03	0.032375	8.8424E 03	0.031997	1.8585E 04	0.025929
6.9674E 03	0.035355	1.2835E 04	0.027043	8.6916E 03	0.032903	9.8387E 03	0.031354	2.0312E 04	0.025659
7.4319E 03	0.034839	1.4820E 04	0.026275	1.0314E 04	0.031693	1.1084E 04	0.030343	2.3848E 04	0.024936
8.3909E 03	0.033673	1.6593E 04	0.025583	1.2355E 04	0.030323	1.2504E 04	0.029663	2.9327E 04	0.023932
9.1401E 03	0.032657	1.8827E 04	0.024987	1.5778E 04	0.028522	1.4098E 04	0.029175	3.4568E 04	0.023109
1.0189E 04	0.031994	2.1030E 04	0.024378	1.9222E 04	0.026112	1.5493E 04	0.028363	4.0186E 04	0.021966
1.1582E 04	0.030931	2.3019E 04	0.023734	2.2763E 04	0.025784	1.6913E 04	0.027744	4.5005E 04	0.021338
1.2287E 04	0.030343	2.4861E 04	0.023547	2.6810E 04	0.024744	1.9354E 04	0.027397	4.5005E 04	0.021902
1.3186E 04	0.029831	2.7009E 04	0.022594	3.1025E 04	0.024068	2.0674E 04	0.026807	5.1096E 04	0.021385
1.4534E 04	0.029367	2.9465E 04	0.021910	3.6854E 04	0.022798	2.2517E 04	0.026391	5.5006E 04	0.020875
1.5463E 04	0.028999	3.2738E 04	0.021596	4.0608E 04	0.022384	2.3912E 04	0.025799	6.2279E 04	0.020175
1.6782E 04	0.028163	3.5296E 04	0.021198	4.0608E 04	0.022369	2.5905E 04	0.025306	6.7825E 04	0.019755
1.8790E 04	0.027792	4.0411E 04	0.020572	4.5385E 04	0.021765	2.8864E 04	0.024388	7.6371E 04	0.019515
2.0078E 04	0.027334	4.2764E 04	0.020198	5.2210E 04	0.021114	3.0739E 04	0.024102	8.3281E 04	0.018958
2.2625E 04	0.026546	4.6857E 04	0.019764	5.8352E 04	0.020374	3.4232E 04	0.023418	9.0900E 04	0.018890
2.4394E 04	0.025958	4.9619E 04	0.019440	6.6201E 04	0.019716	3.7188E 04	0.022980	1.0084E 05	0.018278
2.6491E 04	0.025607	5.4018E 04	0.019151	7.2172E 04	0.019281	3.9995E 04	0.022534	1.0764E 05	0.017983
2.8649E 04	0.025115	5.8111E 04	0.018881	7.8485E 04	0.018857	4.3640E 04	0.022239	1.2246E 05	0.017530
3.1616E 04	0.023998	6.5477E 04	0.018264	8.7870E 04	0.018665	4.6847E 04	0.021826	1.3229E 05	0.017171
3.4463E 04	0.022832	6.7911E 04	0.018181	9.5889E 04	0.018122	5.1741E 04	0.021078	1.4734E 05	0.016660
3.7394E 04	0.022877	7.3150E 04	0.017584	1.0596E 05	0.017876	5.8031E 04	0.020644	1.5783E 05	0.016385
4.1467E 04	0.022377	7.9082E 04	0.017639			6.2495E 04	0.020371	1.7289E 05	0.016438
4.5687E 04	0.021965	8.9560E 04	0.017229			6.7801E 04	0.020248		
4.9982E 04	0.021588	9.5689E 04	0.016944			7.4220E 04	0.019820		
5.5017E 04	0.021049	1.0122E 05	0.016651			8.1241E 04	0.019504		
5.9936E 04	0.020996	1.0992E 05	0.016410			9.0468E 04	0.018899		
6.4327E 04	0.020899	1.1842E 05	0.016073			9.7890E 04	0.018634		
7.0621E 04	0.020468	1.3325E 05	0.015918			1.0712E 05	0.017935		
		1.4788E 05	0.015627			1.1133E 05	0.017624		
		1.6113E 05	0.013814			1.2116E 05	0.017206		
		1.6726E 05	0.015465			1.3600E 05	0.016619		
						1.5004E 05	0.016150		
						1.6308E 05	0.015990		
						1.7953E 05	0.015782		

Tabelle 5

Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.27500
 SW = 0.07244 M
 LM = 0.45000 M

Z = 37
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.27500
 SW = 0.09867 M
 LM = 0.45000 M

Z = 7
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.34166
 SW = 0.04819 M
 LM = 0.30000 M

Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.34166
 SW = 0.07605 M
 LM = 0.56050 M

Z = 37
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.34166
 SW = 0.10393 M
 LM = 0.55000 M

RE	F	RE	F	RE	F	RE	F	RE	F
1.0641E 03	0.093947	7.4358E 02	0.126084	1.3501E 03	0.071708	7.1256E 02	0.146967	7.5601E 02	0.149310
1.2556E 03	0.074663	8.5497E 02	0.111549	1.6182E 03	0.064886	8.4784E 02	0.123774	8.6369E 02	0.128906
1.4870E 03	0.067506	9.6451E 02	0.102114	1.9742E 03	0.059643	1.0039E 03	0.104806	9.7398E 02	0.119105
1.6998E 03	0.062274	1.1207E 03	0.091130	2.3285E 03	0.054937	1.1713E 03	0.092050	1.1209E 03	0.102845
1.9195E 03	0.058123	1.3280E 03	0.080554	2.7246E 03	0.050720	1.3421E 03	0.081844	1.3146E 03	0.089733
2.1955E 03	0.054019	1.5490E 03	0.071872	3.1706E 03	0.047331	1.5457E 03	0.077675	1.5419E 03	0.078375
2.5065E 03	0.049867	1.9072E 03	0.060595	3.6011E 03	0.044608	1.7379E 03	0.071015	1.7928E 03	0.070321
2.9252E 03	0.046222	2.2635E 03	0.054552	3.9917E 03	0.042561	1.9852E 03	0.065017	2.0957E 03	0.062966
3.3607E 04	0.000485	2.6507E 03	0.049649	4.6220E 03	0.039980	2.3127E 03	0.059935	2.4378E 03	0.057361
3.9542E 03	0.040215	3.0210E 03	0.046247	5.4188E 03	0.037566	2.7144E 03	0.054234	2.8197E 03	0.052406
4.5512E 03	0.038279	3.5178E 03	0.042377	6.4561E 03	0.034568	3.1782E 03	0.049728	3.2215E 03	0.048783
5.2140E 03	0.036448	4.0142E 03	0.042187	6.4561E 03	0.034412	3.7665E 03	0.045792	3.6915E 03	0.045666
5.2140E 03	0.037247	4.5564E 03	0.039490	7.4735E 03	0.033554	4.3058E 03	0.042803	4.1796E 03	0.042967
5.9150E 03	0.035826	5.3218E 03	0.036211	8.7976E 03	0.031852	4.8989E 03	0.040427	4.7267E 03	0.040630
6.7519E 03	0.034531	6.4160E 03	0.034079	1.0107E 04	0.030314	5.5704E 03	0.038584	5.5024E 03	0.038012
7.5750E 03	0.033493	7.7481E 03	0.032477	1.1627E 04	0.029404	6.3837E 03	0.036504	6.4317E 03	0.035747
8.6192E 03	0.032361	9.1037E 03	0.031223	1.3162E 04	0.028468	6.3837E 03	0.036882	7.5638E 03	0.033510
9.9908E 03	0.031344	8.7624E 03	0.031015	1.5020E 04	0.027576	7.1970E 03	0.035436	7.5638E 03	0.033598
1.1638E 04	0.030203	9.8411E 03	0.031961	1.5020E 04	0.027673	8.1803E 03	0.034040	9.1944E 03	0.032142
1.4750E 04	0.028602	1.1118E 04	0.030557	1.6958E 04	0.026913	9.4853E 03	0.032374	1.0088E 04	0.031229
1.4750E 04	0.028538	1.2476E 04	0.029053	1.9514E 04	0.025696	1.1112E 04	0.031089	1.1421E 04	0.030511
1.6405E 04	0.026951	1.3616E 04	0.028793	2.5913E 04	0.025334	1.3024E 04	0.029664	1.2347E 04	0.029700
1.7986E 04	0.026359	1.4789E 04	0.028130	3.0713E 04	0.024446	1.5688E 04	0.028327	1.3648E 04	0.028950
2.0561E 04	0.025488	1.6254E 04	0.027411	3.4125E 04	0.024070	1.2041E 04	0.030925	1.5238E 04	0.027860
2.2361E 04	0.025196	1.7922E 04	0.026923	3.7984E 04	0.023504	1.3565E 04	0.030296	1.5238E 04	0.027159
2.4682E 04	0.024778	2.0064E 04	0.026469	4.2255E 04	0.022762	1.6765E 04	0.028232	1.6665E 04	0.026900
2.7404E 04	0.024208	2.1944E 04	0.025785	4.6799E 04	0.022315	1.9590E 04	0.027219	1.8339E 04	0.026394
3.0480E 04	0.023482	2.3723E 04	0.025156	5.2225E 04	0.022015	2.1826E 04	0.026406	1.9543E 04	0.026112
3.3759E 04	0.023039	2.4482E 04	0.024882	5.5903E 04	0.021579	2.4757E 04	0.025763	2.1529E 04	0.025487
3.6552E 04	0.022560	2.5519E 04	0.024575	6.2339E 04	0.021079	2.6300E 04	0.025225	2.2979E 04	0.025897
3.9426E 04	0.022221	2.7954E 04	0.023722	6.8959E 04	0.020461	2.8762E 04	0.024962	2.5790E 04	0.024306
4.1531E 04	0.022134	3.0750E 04	0.023319	7.6499E 04	0.019931	3.2976E 04	0.024330	2.8378E 04	0.023878
4.5336E 04	0.021701	3.3861E 04	0.022636	8.2383E 04	0.019684	3.5903E 04	0.023730	3.1011E 04	0.023288
4.9788E 04	0.021208	3.7197E 04	0.022182	8.2383E 04	0.019486	3.8479E 04	0.023535	3.3197E 04	0.022800
5.0432E 04	0.021511	4.1300E 04	0.021547	8.9492E 04	0.019381	4.2538E 04	0.023221	3.5428E 04	0.022405
5.5049E 04	0.021092	4.3239E 04	0.021467	1.0568E 05	0.018945	4.7143E 04	0.022419	3.8782E 04	0.021828
6.0399E 04	0.020581	4.8375E 04	0.020725	1.1219E 05	0.018345	5.1513E 04	0.022263	4.2006E 04	0.021613
6.5139E 04	0.020258	5.2414E 04	0.020523	1.2038E 05	0.017763	5.6587E 04	0.022149	4.5482E 04	0.020897
7.2039E 04	0.019735	5.9365E 04	0.019930			5.6587E 04	0.022283	5.1927E 04	0.020280
7.6553E 04	0.019474	6.4625E 04	0.019575			6.0723E 04	0.021765	5.6466E 04	0.019896
8.3756E 04	0.019293	7.1295E 04	0.019119			6.6031E 04	0.021629	5.6466E 04	0.020160
9.2761E 04	0.018340	7.7400E 04	0.018668			7.3758E 04	0.020710	6.2276E 04	0.019788
1.0090E 05	0.017889	8.5290E 04	0.018446			7.8051E 04	0.020709	6.8540E 04	0.019269
1.0922E 05	0.017697	9.0457E 04	0.018184			8.8620E 04	0.020226	7.3079E 04	0.019025
1.2422E 05	0.017356	9.4872E 04	0.017941			9.9840E 04	0.019411	7.9888E 04	0.018616
1.3318E 05	0.016996	1.0553E 05	0.017592			1.0878E 05	0.019371	8.7332E 04	0.018235
1.4748E 05	0.016318	1.1629E 05	0.016936			1.2293E 05	0.018879	9.5865E 04	0.017324
1.5874E 05	0.016214	1.2831E 05	0.016635			1.3236E 05	0.018381		
1.7823E 05	0.015875	1.4127E 05	0.016223			1.4260E 05	0.017444		
1.8734E 05	0.015618	1.5424E 05	0.016175			1.5382E 05	0.016984		
		1.5955E 05	0.015926			1.7074E 05	0.016905		
		1.7589E 05	0.015796			1.8212E 05	0.016963		
		1.9341E 05	0.015427			1.9968E 05	0.016405		

Tabelle 6

Z = 7
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.41667
 SW = 0.05166 M
 LM = 0.39850 M

Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.41667
 SW = 0.08129 M
 LM = 0.49750 M

Z = 37
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.41667
 SW = 0.11064 M
 LM = 0.49750 M

Z = 61
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.41667
 SW = 0.13960 M
 LM = 0.55000 M

Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.75833
 SW = 0.10393 M
 LM = 0.30000 M

RE	F	RE	F	RE	F	RE	F	RE	F
6.7266E 02	0.154689	6.8878E 02	0.162396	7.3869E 02	0.151285	1.2979E 03	0.088623	2.2529E 04	0.028224
9.6898E 02	0.100598	8.1523E 02	0.134965	8.3932E 02	0.125681	1.5620E 03	0.077056	2.6489E 04	0.026847
1.2831E 03	0.075729	9.5710E 02	0.119270	9.5308E 02	0.106696	1.3447E 03	0.073772	3.0414E 04	0.024574
1.5764E 03	0.064969	1.1461E 03	0.099929	1.0894E 03	0.091744	2.1479E 03	0.064006	3.3757E 04	0.024770
1.8683E 03	0.060553	1.3121E 03	0.087937	1.2956E 03	0.074283	2.5017E 03	0.056728	3.7298E 04	0.024617
2.2224E 03	0.053705	1.4891E 03	0.080254	1.5155E 03	0.064280	2.8815E 03	0.052885	4.2346E 04	0.024394
2.5765E 03	0.050646	1.6983E 03	0.073147	1.7701E 03	0.057723	3.3591E 03	0.047865	4.9881E 04	0.023453
2.9944E 03	0.048781	1.9673E 03	0.066396	2.0675E 03	0.053539	3.8310E 03	0.044771	5.7115E 04	0.022605
3.4196E 03	0.046283	2.3331E 03	0.060424	2.4070E 03	0.050335	4.6608E 03	0.041287	6.4574E 04	0.022247
3.7844E 03	0.045292	2.6637E 03	0.055137	2.7653E 03	0.047954	5.8403E 03	0.036835	7.2335E 04	0.022543
4.4007E 03	0.042733	3.1133E 03	0.050791	3.1086E 03	0.045375	5.5564E 03	0.037168	7.2335E 04	0.022678
5.1400E 03	0.040759	3.6710E 03	0.046984	3.5593E 03	0.043054	6.2316E 03	0.034969	9.0262E 04	0.020738
6.0052E 03	0.037570	4.2792E 03	0.043785	4.0922E 03	0.042324	6.9631E 03	0.033505	1.0549E 05	0.020251
7.0703E 03	0.036259	4.8144E 03	0.040433	4.6144E 03	0.040062	7.9421E 03	0.032612	1.2181E 05	0.019355
8.2808E 03	0.034384	5.4467E 03	0.039199	5.3513E 03	0.037558	8.8531E 03	0.032284	1.3845E 05	0.018233
9.6291E 03	0.032778	6.2747E 03	0.036979	6.2804E 03	0.035232	9.6786E 03	0.032384	1.5274E 05	0.017876
9.6291E 03	0.033231	7.0938E 03	0.035539	7.2885E 03	0.033290	1.0789E 04	0.031101	1.8712E 05	0.016197
1.1096E 04	0.032211	8.0792E 03	0.034193	8.9102E 03	0.031039	1.1629E 04	0.030357	2.2071E 05	0.015455
1.2575E 04	0.031266	9.2994E 03	0.032603	6.4663E 03	0.030115	1.2454E 04	0.030169	2.4928E 05	0.014916
1.4250E 04	0.029984	9.2994E 03	0.033058	7.5160E 03	0.030583	1.3578E 04	0.029956	2.7785E 05	0.015284
1.6317E 04	0.028912	1.0958E 04	0.031686	8.2928E 03	0.033289	1.4948E 04	0.029091	3.0768E 05	0.015363
1.8600E 04	0.028135	1.3014E 04	0.030044	1.0050E 04	0.031364	1.6042E 04	0.028430	3.4535E 05	0.015566
2.1612E 04	0.027223	1.5515E 04	0.028712	1.1516E 04	0.030461	1.7742E 04	0.027244	3.4535E 05	0.015414
2.1612E 04	0.027404	1.9461E 04	0.026654	1.3216E 04	0.028826	1.9585E 04	0.027478	3.9244E 05	0.015364
2.5669E 04	0.026390	2.1265E 04	0.026005	1.4597E 04	0.028154	2.1889E 04	0.026726	4.3954E 05	0.014623
2.7283E 04	0.025958	2.1265E 04	0.025928	1.5893E 04	0.027882	2.1889E 04	0.025754	4.4142E 05	0.006987
3.2203E 04	0.025074	2.3871E 04	0.025265	1.7740E 04	0.026662	2.3819E 04	0.025407		
4.0999E 04	0.023714	2.5978E 04	0.024744	1.9697E 04	0.026394	2.5345E 04	0.025836		
4.8149E 04	0.023229	2.8239E 04	0.024156	2.1202E 04	0.026110	2.7527E 04	0.024794		
5.4304E 04	0.022415	3.1113E 04	0.023424	2.1202E 04	0.025673	3.0246E 04	0.023769		
6.1091E 04	0.021770	3.3641E 04	0.023183	2.4083E 04	0.025321	3.3092E 04	0.023557		
7.2495E 04	0.020918	3.6860E 04	0.022813	2.6491E 04	0.024337	3.7212E 04	0.023247		
8.2722E 04	0.020053	3.9695E 04	0.022827	2.8728E 04	0.024078	4.0149E 04	0.022641		
9.0506E 04	0.020026	4.3116E 04	0.022198	3.2254E 04	0.023446	4.3725E 04	0.022110		
1.0408E 05	0.019169	4.7692E 04	0.021608	3.6254E 04	0.022790	4.7300E 04	0.021126		
1.1675E 05	0.018940	5.2267E 04	0.021241	4.0124E 04	0.022143	5.1285E 04	0.020957		
1.2485E 05	0.018494	5.7308E 04	0.020861	4.4529E 04	0.021734	5.7322E 04	0.020617		
1.4771E 05	0.017912	6.3046E 04	0.020395	4.9725E 04	0.021059	6.0956E 04	0.020153		
1.5904E 05	0.017616	7.1499E 04	0.020250	5.5101E 04	0.020465	6.6466E 04	0.020102		
1.7807E 05	0.013675	7.7082E 04	0.019844	5.9660E 04	0.020181	7.2210E 04	0.019808		
1.9858E 05	0.017113	7.7082E 04	0.020002	6.4296E 04	0.019875	7.9243E 04	0.019152		
2.0146E 05	0.017254	8.2879E 04	0.019165	7.2081E 04	0.019213	8.6980E 04	0.018835		
		9.0957E 04	0.018733	8.0654E 04	0.018785	9.5420E 04	0.018769		
		1.1443E 05	0.018077	8.0654E 04	0.019101	1.0339E 05	0.018514		
		1.2915E 05	0.017420	8.7477E 04	0.018821	1.1136E 05	0.017915		
		1.5056E 05	0.017326	9.7975E 04	0.018300	1.2051E 05	0.017578		
		1.6348E 05	0.016833	1.0777E 05	0.018067	1.2968E 05	0.017452		
		1.9290E 05	0.016368	1.1932E 05	0.017419	1.4817E 05	0.017153		
		2.2585E 05	0.015676	1.2936E 05	0.018246				
		2.2887E 05	0.017388	1.4569E 05	0.017528				
		2.6483E 05	0.017826	1.6734E 05	0.017501				
				1.8349E 05	0.016764				
				2.1908E 05	0.015678				

Tabelle 7

Z = 37
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.75833
 SW = 0.13960 M
 LM = 0.55000 M

Z = 7
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.86600
 SW = 0.07246 M
 LM = 0.30100 M

Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 1.86660
 SW = 0.11064 M
 LM = 0.49750 M

Z = 7
 D = 0.01200 M
 PZUD = 2.31670
 SW = 0.09511 M
 LM = 0.08500 M

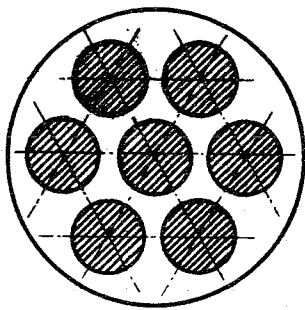
Z = 19
 D = 0.01200 M
 PZUD = 2.31670
 SW = 0.13960 M
 LM = 0.55000 M

RE	F	RE	F	RE	F	RE	F	RE	F
1.4173E 04	0.030322	2.1695E 04	0.029481	2.8588E 03	0.041555	1.9788E 04	0.030117	1.4736E 03	0.073718
1.5673E 04	0.028480	2.4849E 04	0.029567	3.6264E 03	0.034153	2.7193E 04	0.029873	1.8836E 03	0.078931
1.7112E 04	0.027923	2.7866E 04	0.028623	4.6137E 03	0.028263	3.3991E 04	0.026099	2.4438E 03	0.067033
1.8600E 04	0.026993	3.2848E 04	0.027059	5.4036E 03	0.027755	3.9733E 04	0.024213	2.8692E 03	0.049898
2.0287E 04	0.026117	3.7985E 04	0.025958	6.4931E 03	0.028249	4.7883E 04	0.023255	3.4407E 03	0.042703
2.1932E 04	0.026946	4.3589E 04	0.024689	7.7015E 03	0.027535	5.6497E 04	0.023270	3.9852E 03	0.034535
2.3577E 04	0.026144	5.1373E 04	0.023595	9.1278E 03	0.030053	6.5405E 04	0.023019	4.5121E 03	0.029056
2.6066E 04	0.025836	5.9546E 04	0.022895	1.0964E 04	0.027379	8.0405E 04	0.022050	5.0342E 03	0.028350
2.8428E 04	0.025162	6.6863E 04	0.022248	1.2781E 04	0.026916	9.2310E 04	0.020319	5.6410E 03	0.027226
3.1928E 04	0.024964	7.3791E 04	0.021943	1.5074E 04	0.026753	1.0829E 05	0.019974	6.1743E 03	0.025020
3.4543E 04	0.024669	8.6400E 04	0.021300	1.5346E 04	0.028427	1.2638E 05	0.019110	6.8691E 03	0.025112
3.6933E 04	0.024537	9.8699E 04	0.020596	1.7038E 04	0.027232	1.5449E 05	0.018216	7.6576E 03	0.027398
4.0518E 04	0.024079	9.8699E 04	0.020637	1.9103E 04	0.026287	1.8808E 05	0.017689	8.5203E 03	0.033715
4.4898E 04	0.023029	1.1489E 05	0.020077	2.0892E 04	0.025514	2.2462E 05	0.017419	9.8096E 03	0.032897
4.8233E 04	0.022528	1.2999E 05	0.019680	2.3355E 04	0.025090	2.2462E 05	0.017460	1.1307E 04	0.029412
5.3554E 04	0.021801	1.4867E 05	0.019324	2.5444E 04	0.024617	2.5659E 05	0.017461	1.3012E 04	0.027964
5.3554E 04	0.021557	1.7935E 05	0.017856	2.8167E 04	0.024050	3.1431E 05	0.016681	1.5865E 04	0.027184
5.7840E 04	0.021609	2.0530E 05	0.017509	3.0667E 04	0.023858	3.5728E 05	0.017692	1.6870E 04	0.026968
6.2420E 04	0.021236	2.4000E 05	0.017114	3.3465E 04	0.023513	3.8609E 05	0.017551	1.8436E 04	0.025818
6.8187E 04	0.021179	2.7633E 05	0.016861	3.3465E 04	0.023018	4.5352E 05	0.017630	2.0073E 04	0.025093
7.6753E 04	0.020690	3.1297E 05	0.016686	3.4634E 04	0.023287	5.2421E 05	0.017222	2.1254E 04	0.025888
8.5997E 04	0.020361	3.5546E 05	0.016834	3.8598E 04	0.022781			2.4154E 04	0.023782
9.5327E 04	0.019789	4.0235E 05	0.016195	4.2562E 04	0.022155			2.5971E 04	0.023325
1.0762E 05	0.019131			4.8208E 04	0.021605			2.7787E 04	0.022782
1.1706E 05	0.018860			5.3064E 04	0.020957			3.0591E 04	0.023810
1.2530E 05	0.018551			5.7709E 04	0.020587			3.4131E 04	0.022315
1.3697E 05	0.017832			6.1932E 04	0.020300			3.5987E 04	0.022072
1.5036E 05	0.017145			7.5776E 04	0.019365			3.9921E 04	0.021720
1.6598E 05	0.016945			8.6353E 04	0.018733			4.3726E 04	0.021500
1.9210E 05	0.015854			8.6353E 04	0.018779			4.7353E 04	0.022271
2.0912E 05	0.015777			1.0200E 05	0.018234			5.2515E 04	0.020313
2.3864E 05	0.016062			1.1663E 05	0.017804			5.6084E 04	0.020571
2.3864E 05	0.016217			1.3359E 05	0.017326			6.0545E 04	0.020542
2.5636E 05	0.016142			1.5126E 05	0.016764			6.0545E 04	0.021115
2.7929E 05	0.015625			1.7300E 05	0.016184			6.8910E 04	0.020031
				2.0719E 05	0.015651			7.3690E 04	0.020883
				2.3327E 05	0.015384			7.9467E 04	0.019086
				2.7210E 05	0.014812			8.9084E 04	0.018741
				3.1904E 05	0.014074			9.9843E 04	0.018717
				3.1904E 05	0.014209			1.0824E 05	0.018386
				3.8121E 05	0.013581			1.1808E 05	0.018825
								1.2595E 05	0.018723
								1.3809E 05	0.018573
								1.5428E 05	0.018357
								1.6464E 05	0.017645
								1.6464E 05	0.017054
								1.8137E 05	0.016733

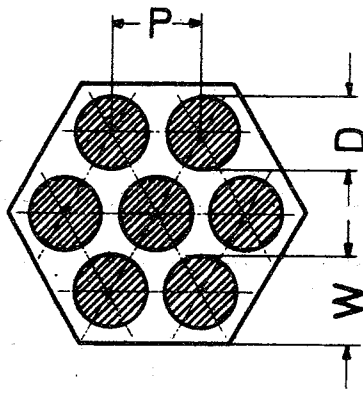
Tabelle 8

Tabelle 9 Zusammenstellung der in Abb. 10 verwendeten Daten

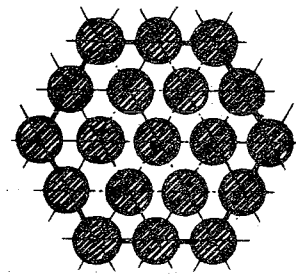
Teststrecken Nr.	Z	P/D	Re = 10 ⁴		Re = 10 ⁵	
			λ	λ / λ_R	λ	λ / λ_R
1	61	1.025	0.0254	0.804	—	—
2	37	1.075	0.0300	0.949	0.0174	0.957
3	61	1.084	0.0296	0.937	0.0169	0.930
4	7	1.125	0.0317	1.003	0.0184	1.012
5	19	1.126	0.0310	0.981	0.0184	1.012
6	61	1.124	0.0318	1.006	0.0184	1.011
7	7	1.231	0.0294	0.930	0.0168	0.942
8	19	1.231	0.0315	0.997	0.0180	0.990
9	37	1.235	0.031	0.981	0.0183	1.004
10	7	1.279	0.0315	0.997	0.0183	1.007
11	19	1.276	0.0314	0.994	0.0179	0.985
12	37	1.275	0.0308	0.973	0.0178	0.976
13	7	1.346	0.0306	0.968	0.0189	1.040
14	19	1.344	0.0320	1.013	0.019	1.045
15	37	1.345	0.0310	0.981	0.0178	0.976
16	7	1.421	0.0325	1.028	0.0192	1.056
17	19	1.421	0.0320	1.013	0.01865	1.026
18	37	1.420	0.0315	0.997	0.0182	1.001
19	61	1.416	0.0320	1.013	0.0185	1.018
20	19	1.757	0.0342	1.082	0.020	1.100
21	37	1.756	0.034	1.076	0.0195	1.073
22	7	1.867	0.0352	1.114	0.0202	1.111
23	19	1.865	(0.028)	(0.886)	0.0185	1.018
24	7	2.324	0.0358	1.133	0.02	1.100
25	19	2.315	0.031	0.981	0.019	1.045



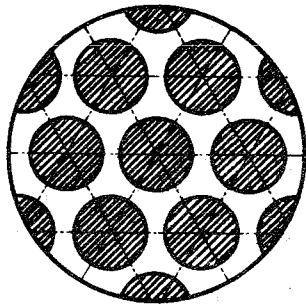
a) Kreisrohr



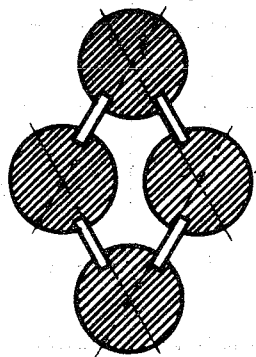
b) Sechskant



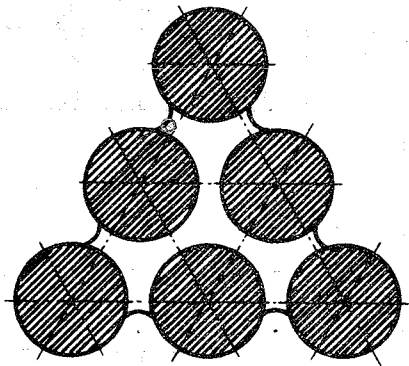
c) Quasi-unendlich Sechskant



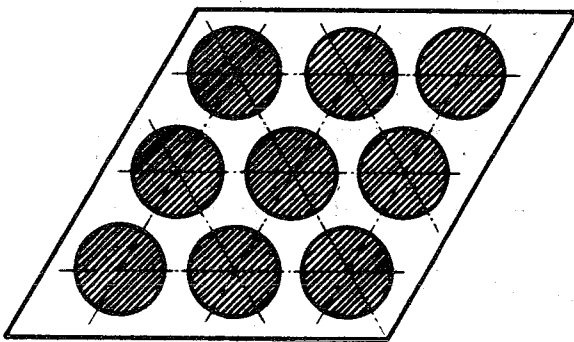
d) Quasi-unendlich Kreisrohr



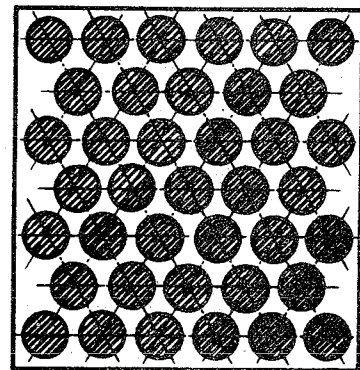
e) Kanal nach $[21, 22, 23]$



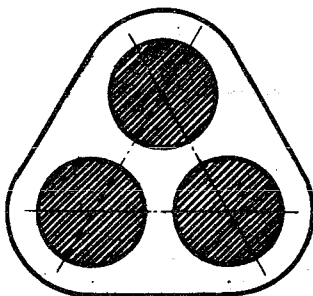
f) Kanal nach $[24]$



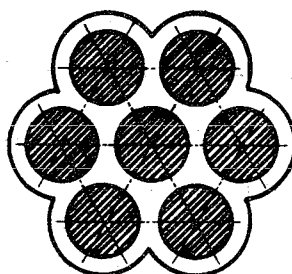
g) Kanal nach $[25]$



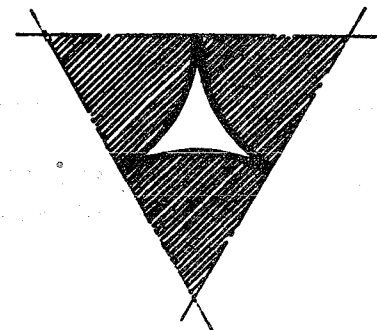
h) Kanal nach $[26]$



i) Kanal nach $[27]$



k) Kanal nach $[5]$



l) Kanal nach $[28]$

Abb.1 Kanalformen für Stabbündel in hexagonaler Anordnung

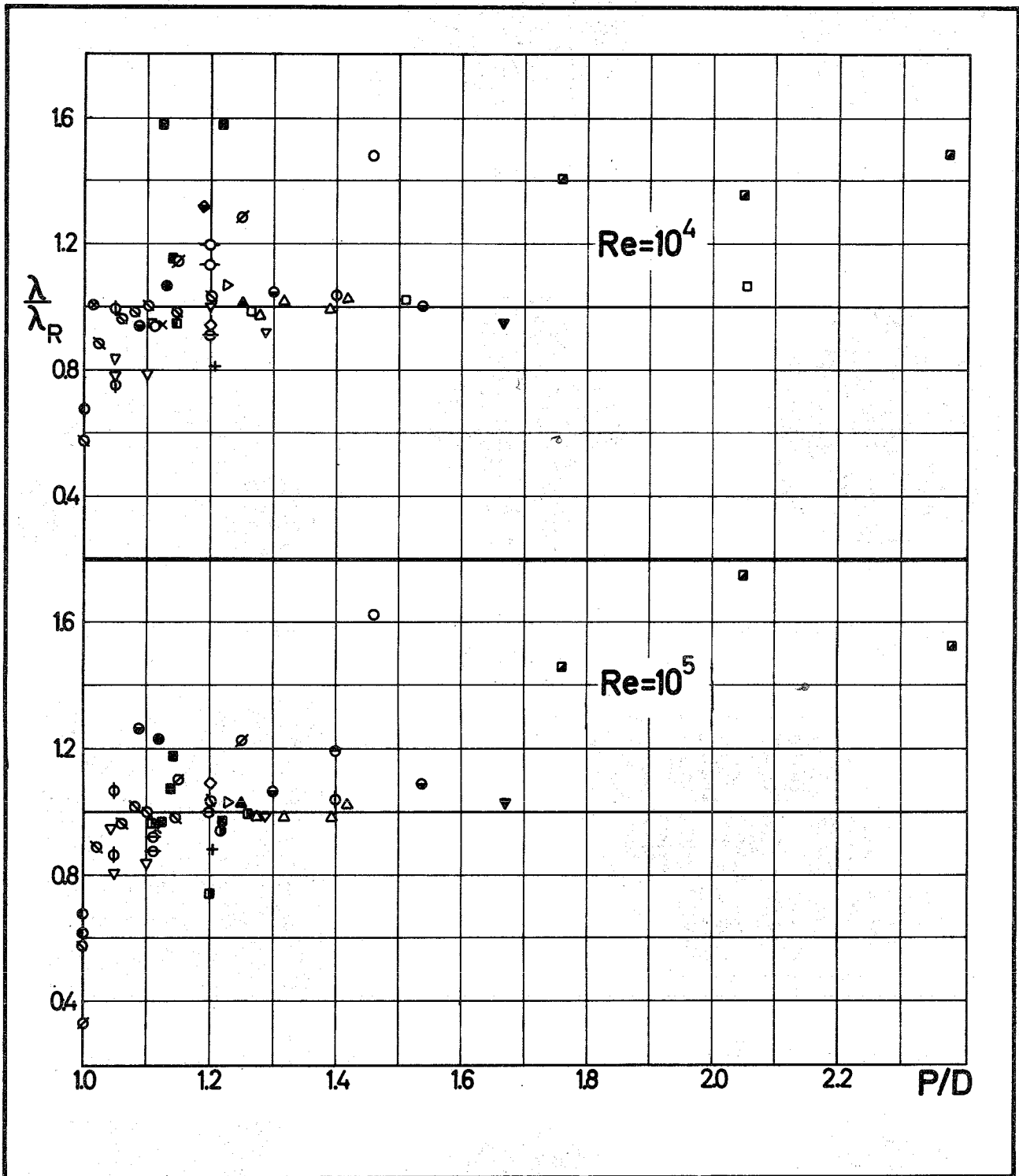


Abb. 2 Meßergebnisse für den Druckverlust in Stabbündeln
 Zeichen siehe Tabelle 1

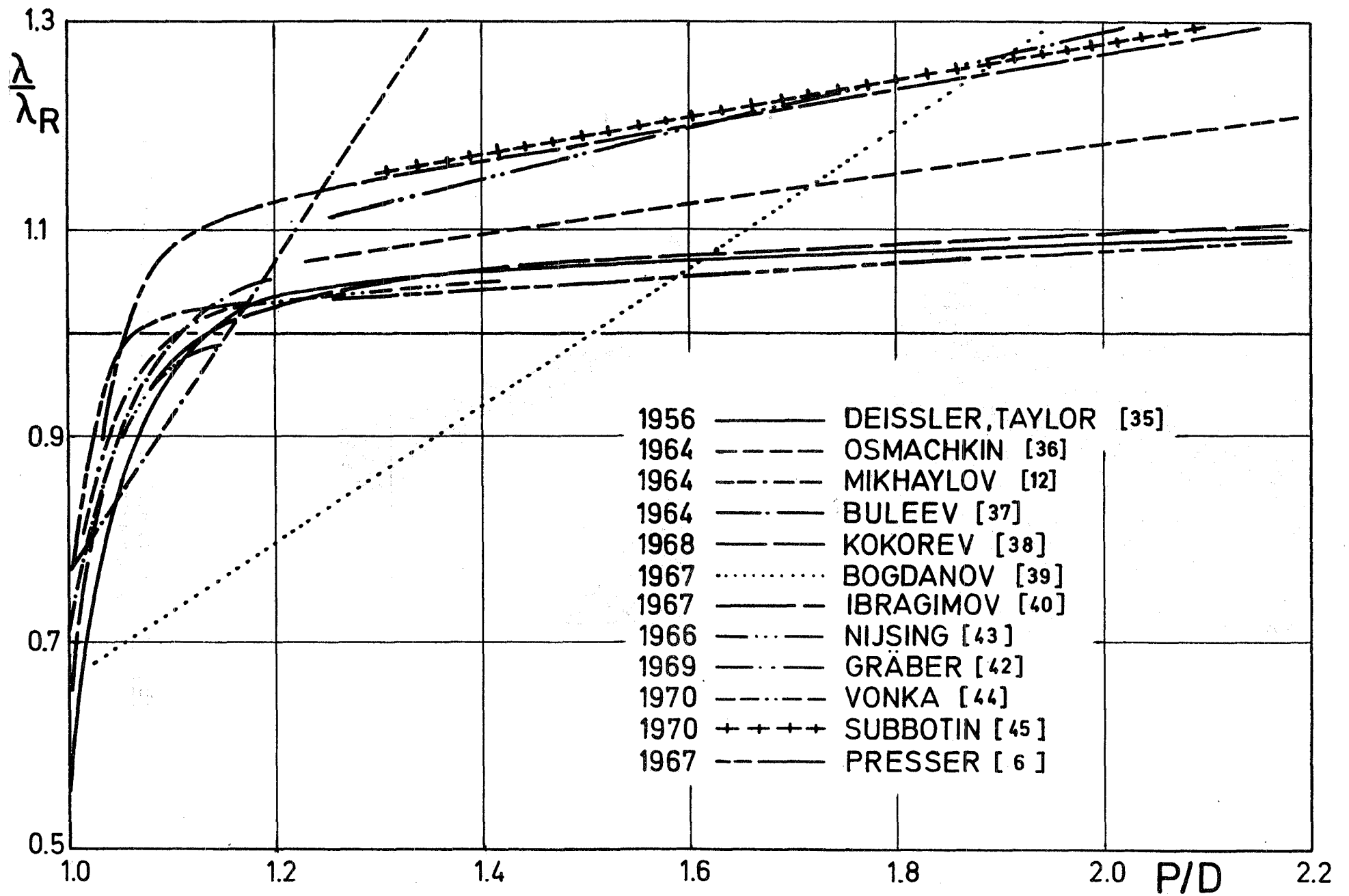


Abb. 3 Druckverlustbeiwert in Stabbündeln, Empfehlungen und Berechnungen

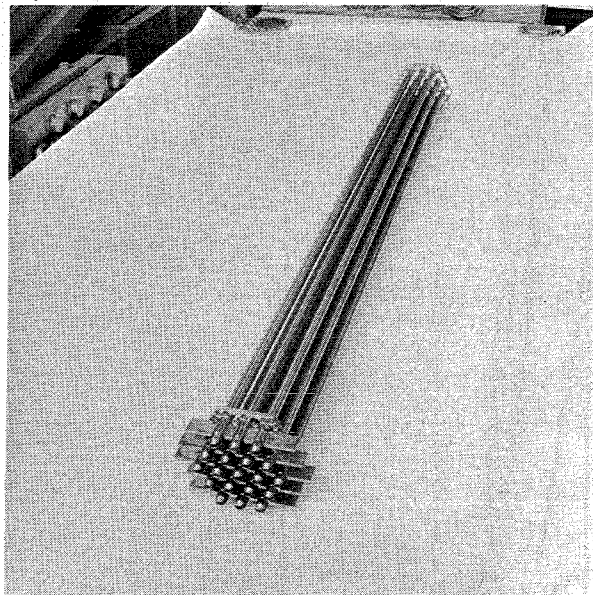
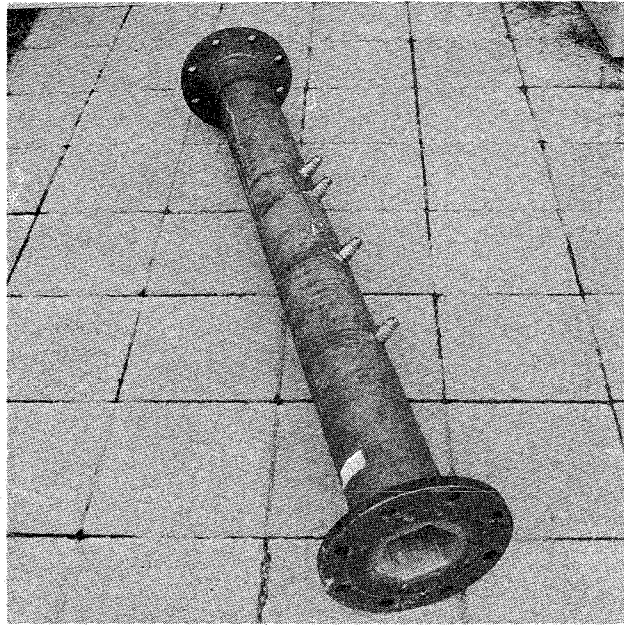


Abb. 4 Strömungskanal und fertig montiertes Stabbündel

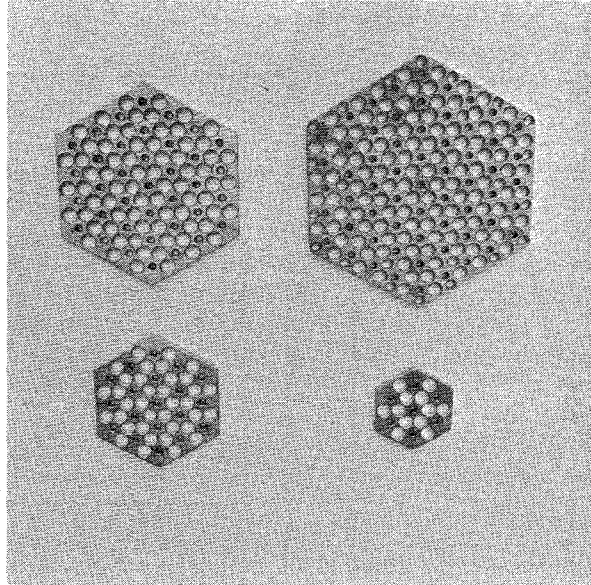


Abb. 5 Lochplatten zum Fixieren der Stäbe

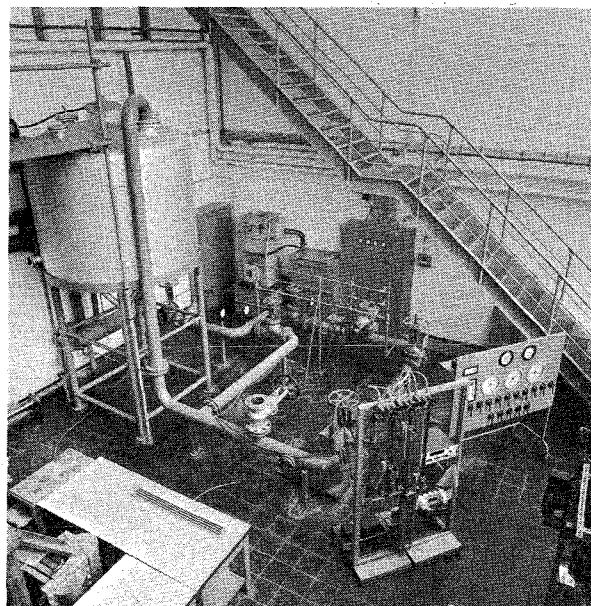


Abb. 6 Ansicht der Versuchsanlage

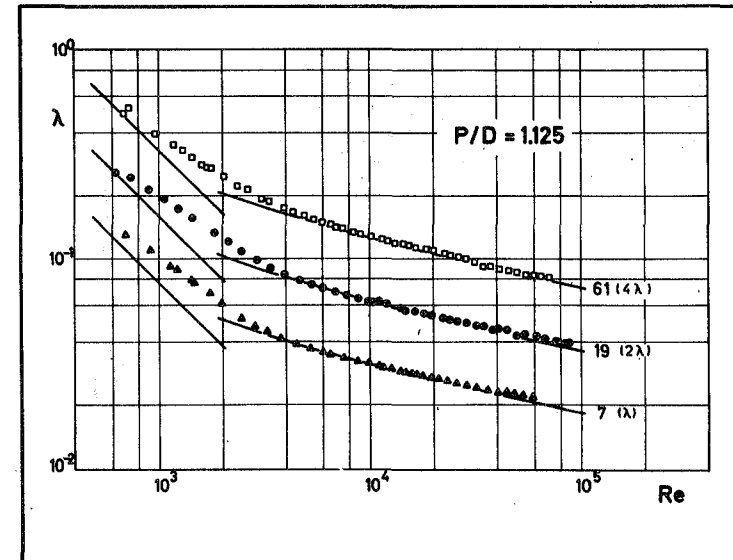
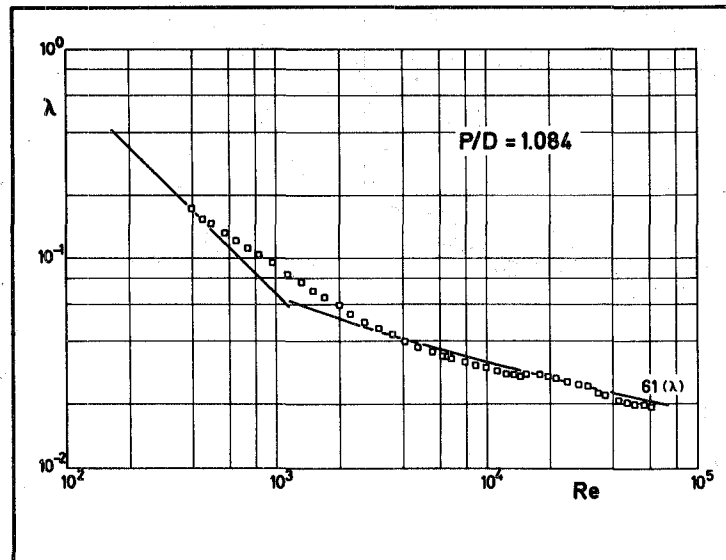
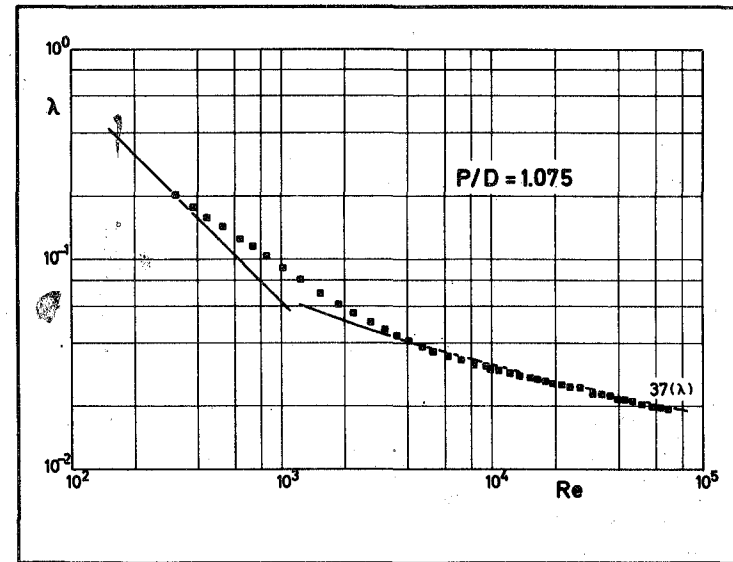
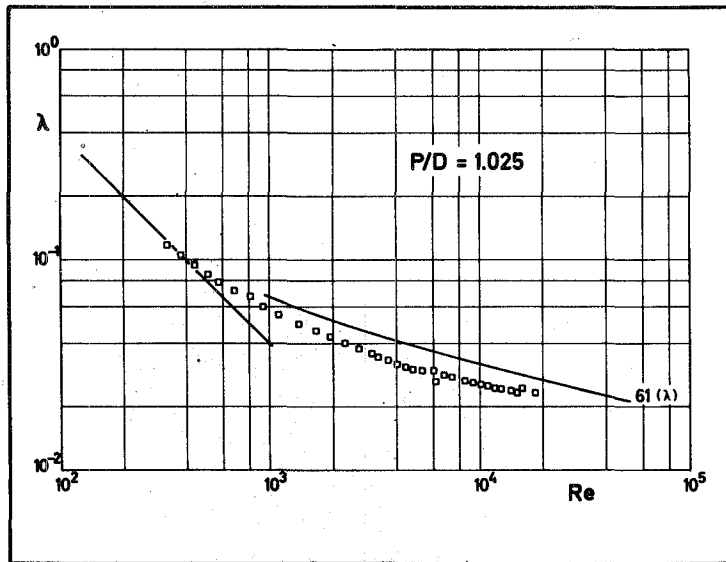


Abb. 7 Gemessene Druckverlustbeiwerte als Funktion der Reynoldszahl

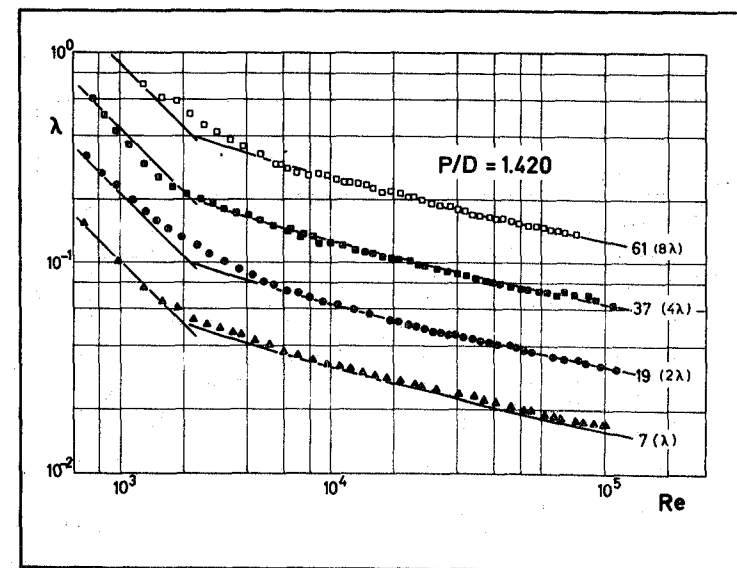
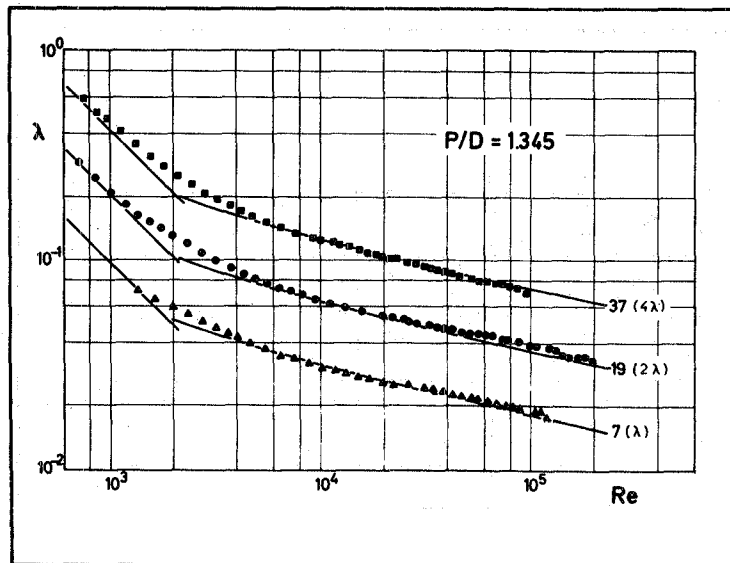
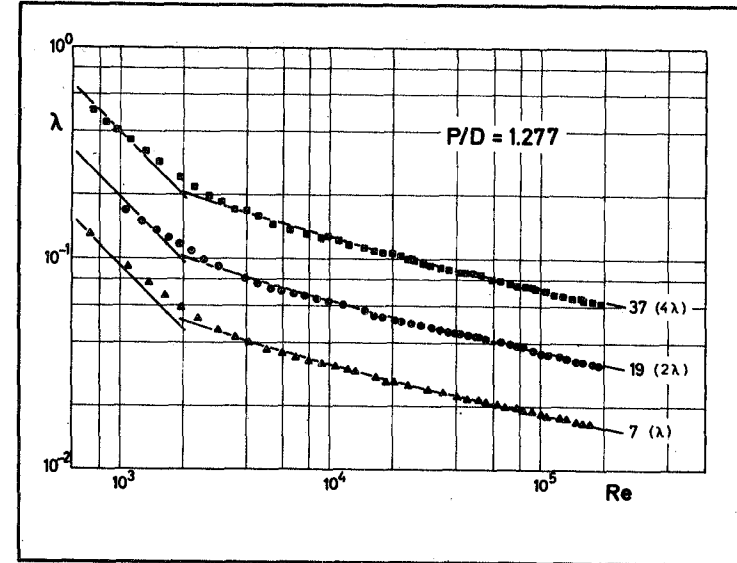
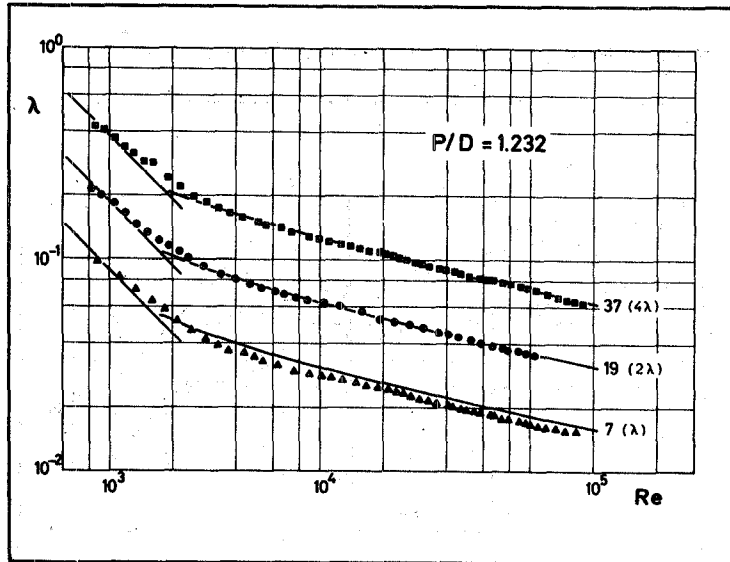


Abb. 8 Gemessene Druckverlustbeiwerte als Funktion der Reynoldszahl

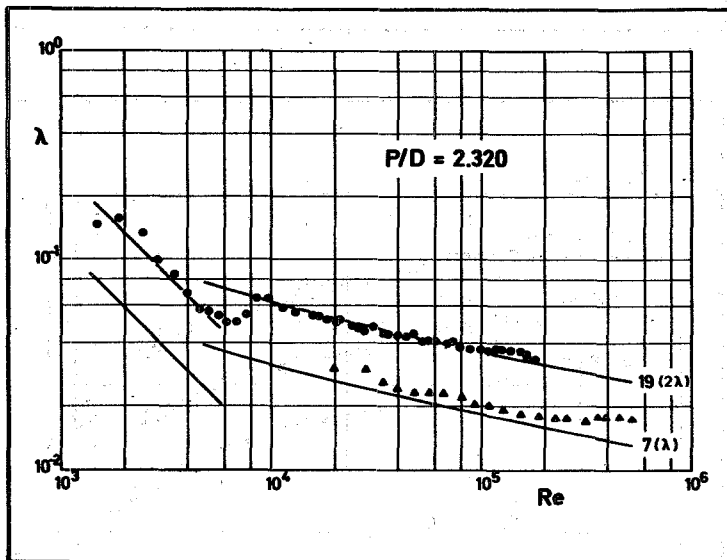
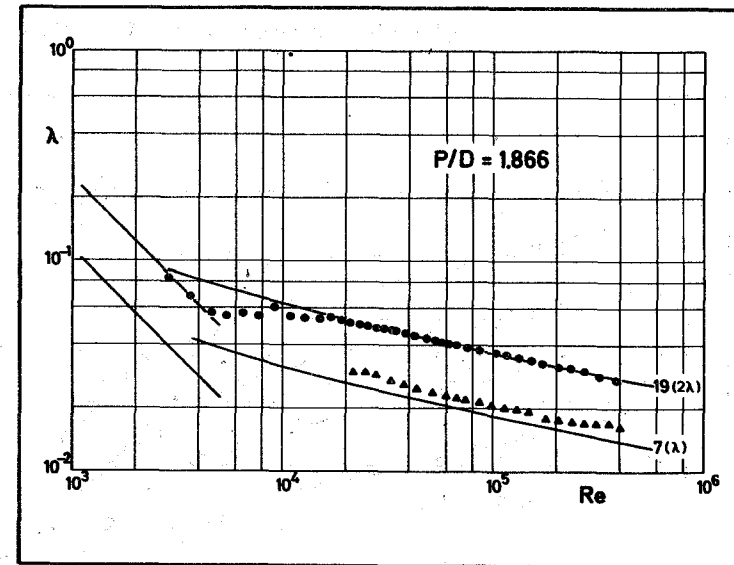
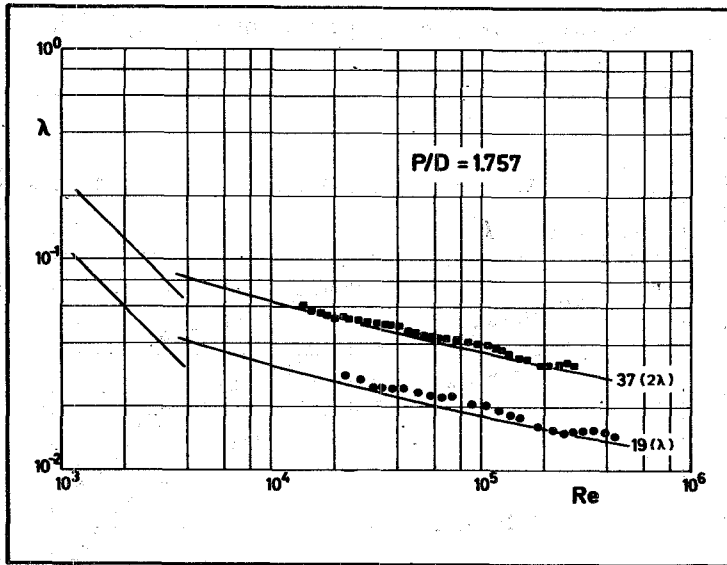


Abb. 9 Gemessene Druckverlustbeiwerte als Funktion der Reynoldszahl

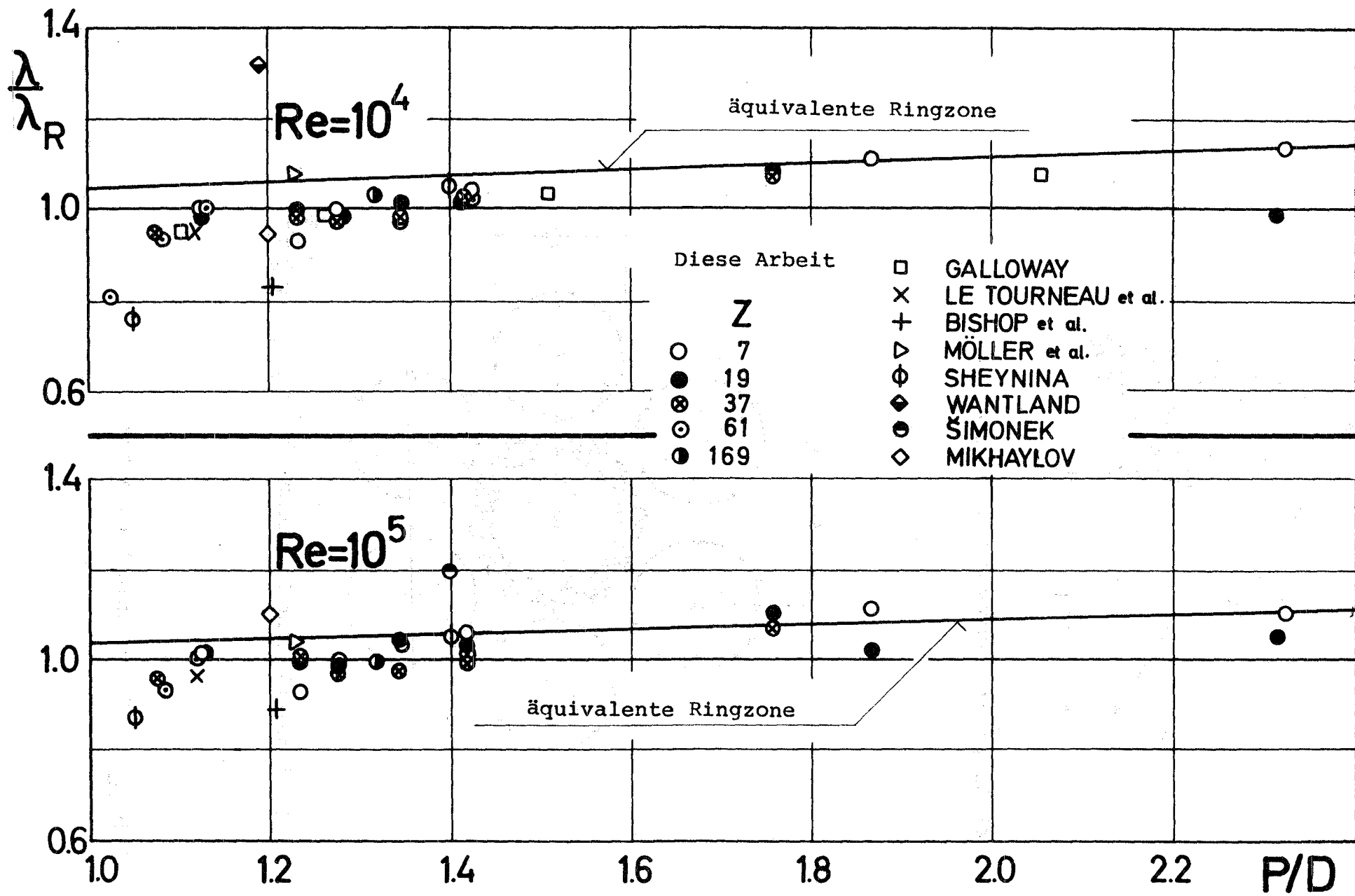
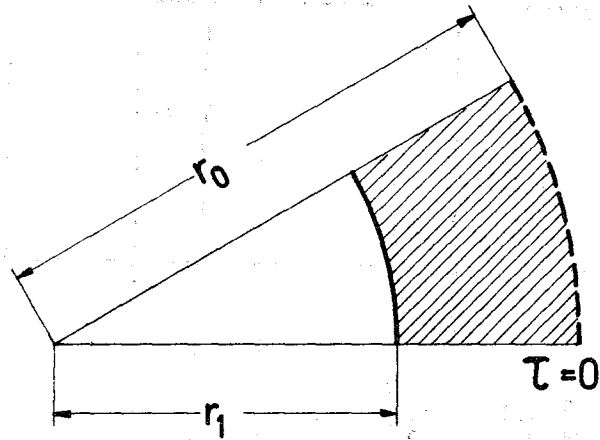
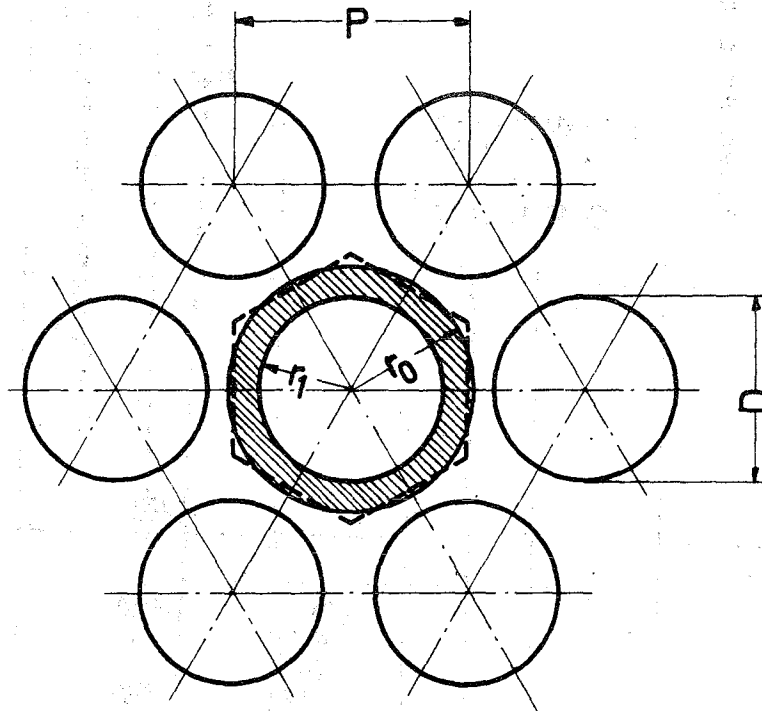


Abb. 10 Druckverlustmeßergebnisse für Stabbündel in Sechskantkanälen



a) Ringzone, Parameter $\chi = r_0/r_1$



b) Flächengleiche Ringzone, $\chi = r_0/r_1 = \frac{P}{D} \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}}$

Abb. 11 "Äquivalente" Ringzone