

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM**

**KARLSRUHE**

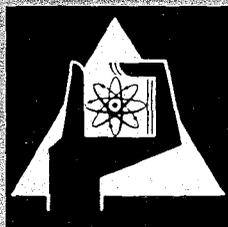
März 1969

KFK 807

Institut für Reaktorbauelemente

Experimentelle Untersuchung der Kühlmittel-Quervermischung an  
Vielstabbündeln, bestehend aus unberippten, ein-, drei- und  
sechsfach berippten Brennstäben

W. Baumann, R. Möller



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1969

KFK 807

Institut für Reaktorbauelemente

Experimentelle Untersuchung der Kühlmittel-  
Quervermischung an Vielstabbündeln

bestehend aus: unberippten,  
ein-, drei und sechsfach  
berippten Brennstäben

von

W. Baumann      R. Möller

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE

1977

7

## Inhalt

Die Kühlmittel-Quervermischung zwischen den engen Kanälen der Brennelemente Schneller Brutreaktoren hat entscheidenden Einfluss auf die maximale Hüllrohrtemperatur und gewinnt damit Bedeutung für die Auslegung der gesamten Anlage.

Die Arbeit berichtet über experimentelle Untersuchungen der Kühlmittel-Quervermischung in Stabbündeln mit der Geometrie von Brennelementen Schneller Brutreaktoren. Die Versuchsbündel waren mit berippten oder unberippten Stäben ausgestattet. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, stellt die Mischrate in erster Linie eine Funktion der Abstandshalterart dar. Sie ist in jedem der untersuchten Fälle so gross, dass in den kommunizierenden Bündelkanälen Temperaturunterschiede, die in sog. Heissen Kanälen ohne Quervermischung entstehen müssten, nur stark vermindert auftreten.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	3
3. Versuchsbeschreibung	5
3.1 Aufbau und Instrumentierung der Versuchsbündel	6
3.2 Beschreibung der Versuchsstrecke	7
3.3 Messtechnik	8
4. Versuchsauswertung	8
4.1 Herleitung der Vermischungs- Differentialgleichung	8
4.2 Lösung der Vermischungs- Differentialgleichung	11
4.2.1 als geschlossener Ausdruck, näherungsweise	11
4.2.2 durch numerische Integration	12
5. Diskussion der Versuchsergebnisse	13
6. Zusammenfassung	17
Literatur	18
Bezeichnungen	21

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1: Abmessungen der Versuchsbündel
- Tab. 2: Theoretisch ermittelte Mischraten für die Versuchsbündel

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Oberflächentemperatur als Funktion der Quervermischung
- Abb. 2: Versuchsbündel M4
- Abb. 3: Mischbündel-Stabquerschnitte und Temperaturmessstellen
- Abb. 4: Schema der Versuchsstrecke
- Abb. 5: Bündelquerschnitte in der Messebene für Bündel M1 und M4
- Abb. 6: Bündelquerschnitte in der Messebene für Bündel M2 und M3
- Abb. 7: Typische radiale Temperaturprofile in der Messebene für Bündel M1 und M4
- Abb. 8: Typische radiale Temperaturprofile in der Messebene für Bündel M2 und M3
- Abb. 9: Modell zur Ableitung der Vermischungsdifferentialgleichung
- Abb.10: Normierte Temperatur  $T_N$  des beheizten Ringkanals als Funktion der Mischrate  $\mu$
- Abb. 11: Quervermischung  $\mu$  als Funktion der Re-Zahl für Brennelemente mit berippten und unberippten Stäben
- Abb. 12: Vermischungsschaubild nach MOYER [8]
- Abb. 13: Mischrate  $\mu$  bei unberippten Stabbündeln als Funktion der Stabteilung  $p$

## EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER KÜHLMITTEL-QUERVERMISCHUNG AN VIELSTABBÜNDELN

---

### 1. Einleitung

Die Wirtschaftlichkeit Schneller Brutreaktoren erfordert hohe Leistungsdichten im Reaktorkern. Diese sind zu verwirklichen durch Brennelementbündel mit kleinem Stabdurchmesser, geringem Stababstand und damit engen Kühlkanälen.

Unvermeidbare Abweichungen von Geometrie, Leistung, Neutronenfluss usw. führen zu Unterschieden in den Kühlmittel-, Hüllrohr- und Brennstofftemperaturen der einzelnen Gitterzellen. Es entstehen sog. Heisse Kanäle, die aufgrund der vorgegebenen maximal zulässigen Hüllrohr- und Brennstofftemperatur den Auslegungspunkt des Reaktors stark beeinträchtigen.

Die existierende Parallelschaltung der Kühlkanäle eines Brennelementes ermöglicht den kontinuierlichen Massen- und damit Energieaustausch zwischen Heissen Kanälen und ihrer Umgebung, den man als Quervermischung (QM) bezeichnet. Dieser wirkt ausgleichend auf die Temperaturunterschiede benachbarter Kanäle [1, 2, 3]. Die Grösse des Massen- und Energieaustausches wird durch die Geometrie des Bündels sowie durch die Art und Anordnung der Abstandshalter bestimmt.

Als Masseinheit der QM wird die Mischrate  $\mu$  (%/cm) definiert. Sie stellt das Verhältnis des pro Längeneinheit ausgetauschten Massenstromes bezogen auf den Gesamtmassenstrom eines Teilkanals dar und berücksichtigt alle drei Austauschquerschnitte.

Man unterscheidet:

- a) natürliche QM - hierunter wird eine unkontrollierte Querbewegung des Kühlmittels aufgrund der natürlichen Turbulenz der Strömung verstanden;
- b) künstliche QM - sie stellt definitionsgemäss eine kontrollierte, durch Wendelrippen erzwungene Querbewegung des Kühlmittels dar.

Berechnet man die maximale Oberflächentemperatur eines Brennstabes als Funktion der QM für folgende Betriebsbedingungen:

Heisser Kanal  
Frisches Brennelement  
Stableistung 420 W/cm  
Heissdampf Temperatur 510 °C  
Heissdampfdruck 120 at  
akt. Stablänge 1130 mm

so erhält man für glatte und rauhe Stäbe die in Abb. 1 dargestellten Kurven.

Man erkennt daraus folgendes:

- a) Für  $QM = 0$  ergibt sich die höchste Oberflächentemperatur.
- b) Grössere QM führt zu niedrigeren Heisskanaltemperaturen.
- c) Der Einfluss der QM sinkt mit zunehmender QM stark ab, d.h. eine relativ kleine Mischrate erzielt einen relativ hohen Temperatenausgleich.
- d) Durch Rauigkeit lässt sich die Oberflächentemperatur um weitere 60 °C senken.

Daraus folgt aber:

Je geringer die Kühlmittel-QM, umso genauer muss ihre Grösse bestimmt werden. Insbesondere interessiert ihre Abhängigkeit von der Geometrie und Anordnung der Stäbe sowie von den Abstandshaltern im Bündel.

## 2. Aufgabenstellung

Die uns bekannten experimentellen Untersuchungen zur Kühlmittel-QM in berippten Stabbündeln beruhen auf Konzentrationsmessungen von in die Strömung eingegebenen Fremdstoffen. Sie wurden für verschiedene Geometrien und Abstandshalter durchgeführt.

COLLINS und FRANCE [4] untersuchten ein 6-fach beripptes 19-Stabbündel im Luftstrom. Der Stabdurchmesser betrug dabei  $d = 88,9$  mm, die Stabteilung  $p = 98,2$  mm und die Steigungshöhe der Abstandshalter  $h = 1468$  mm. Für  $Re = 58\ 000$  stellten sie eine Mischrate von  $\mu = 1,55$  %/cm fest <sup>+</sup>).

LANE [5], HOWIESON und McPHERSON [6] untersuchten ein einfach beripptes 19-Stabbündel im Wasserstrom mit den Abmessungen  $d = 15,2$  mm,  $p = 16,5$  mm. In Abhängigkeit von Rippensteigung und Re-Zahl fanden sie folgende Mischraten <sup>+</sup>):

$h$ (mm)	Re	$\mu$ (%/cm)
457,5	85 000	6,3
234	85 000	12,3
234	265 000	18,5

Danach wächst die QM mit abnehmender Rippensteigung und zunehmender Re-Zahl.

---

<sup>+</sup>) Die Werte sind für 3 Austauschquerschnitte umgerechnet:  $\mu = 3 \cdot \bar{\mu}$

Im Gegensatz zu [5, 6] kamen BISHOP et al. [7], die die gleichen Versuche für  $d = 12,7$  mm,  $p = 15,2$  mm durchführten, zu dem Ergebnis, dass die QM mit steigender Re-Zahl abnimmt:

h (mm)	Re	$\mu$ (%/cm)
381	24 000	18,6
381	37 000	15,6
381	48 000	13,4

Die Vielfältigkeit der gemessenen Werte und der Versuchsparameter veranlasste MOYER [8], nach einer Gesetzmässigkeit für die Kühlmittel-Quervermischung in berippten Stabbündeln zu suchen. Die von ihm angegebenen empirischen Berechnungsmethoden liefern jedoch Ergebnisse, die, wie er selbst feststellt, Fehler von etwa  $\pm 50$  % aufweisen.

QM-Messungen in unberippten Stabbündeln wurden neuerdings von PIETRALLA et al. [9] veröffentlicht. Die dabei angewandte Versuchstechnik entspricht der unsrigen. Sie ist in Abschnitt 3 beschrieben.

Eine theoretisch begründete Berechnungsmethode wird in [10, 11] beschrieben. Sie bezieht sich auf die natürliche QM bei unberippten Kanälen.

Diese Betrachtungen führen zu dem Schluss:

Die möglichst genaue Bestimmung der Quervermischung für Brennelemente Schneller Brutreaktoren kann nur durch Messungen an Brennelementattrappen mit Brüterabmessungen erfolgen.

Da die zitierten Arbeiten [4, 5, 6, 7] sich auf Bündelgeometrien beschränken, welche von der Schneller

Brüter abweichen, sind ihre Ergebnisse für deren Auslegung nur bedingt anwendbar. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden daher Stabbündel mit den spezifischen Abmessungen Schneller Brutreaktoren [12] gewählt. Sie bestehen aus unberippten, ein-, drei- und sechsfach berippten Stäben in hexagonaler Anordnung, wobei alle Stäbe eines Bündels gleiche Abstandshalter besitzen. Zur Abstützung des unberippten Bündels dienen senkrecht auf den Stäben befestigte Stifte, deren Einfluss auf die QM vernachlässigbar ist.

Die Versuche am unberippten Bündel sollten die in [10, 11] beschriebene Berechnungsmethode bestätigen. Die gewählten Rippensteigungen verhalten sich proportional zu den Rippenzahlen pro Stab, was zu gleichen Abstützlängen der Stäbe im Verband und damit zu vergleichbaren Versuchsergebnissen führt.

### 3. Versuchsbeschreibung

Die Methoden zur experimentellen Bestimmung der Kühlmittel-QM in axial durchströmten Vielstabbündeln beruhen auf folgendem Prinzip:

Unterschiedliche Zugaben von Masse oder Energie in die Teilkanäle eines durchströmten Bündels führen zu Konzentrations- oder Energiegradienten quer zur Hauptströmungsrichtung, die von der Grösse der Kühlmittel-QM abhängen. Die gemessenen Gradienten liefern deshalb ein Mass für die Kühlmittel-QM.

Bei der vorliegenden Arbeit wählten wir der einfacheren und genaueren Versuchstechnik wegen das Prinzip der partiellen Energiezufuhr, das auch PIETRALLA et al. [9] verwendeten.

Einzelne elektrisch beheizte Stäbe, in unserem Falle nur die Zentralstäbe, erzeugten in den sonst unbeheizten Bündeln die mit Thermoelementen ermittelten Temperaturgradienten.

### 3.1 Aufbau und Instrumentierung der Versuchsbündel

Die Abmessungen der vier Versuchsbündel gehen aus Tabelle 1 hervor. Sie bestehen aus je 61 hexagonal angeordneten Stäben, die von einem Sechskant-Führungsrohr umgeben sind (Abb. 2). Aufbau und Abmessungen der unbeheizten Einzelstäbe sind in Abb. 3 dargestellt. 660 mm lange VA-Stützrohre werden von je einem Teflonschlauch der Wandstärke 1 mm umspannt, der auf den gewünschten Aussendurchmesser geschliffen ist. Die Oberflächenrauigkeit der Schleifriefen beträgt im Mittel 6  $\mu\text{m}$ . Die Teflonhülle soll die beim Versuch unerwünschte, weil die Ergebnisse verfälschende, radiale Wärmeableitung durch die Stäbe verhindern.

Die Stäbe sind unten auf der Eintrittsseite des Kühlmittels auf Stegblechen befestigt, die untereinander durch Querbolzen mit Distanzbuchsen verbunden sind (Abb. 2d).

Die Temperaturmessebene liegt jeweils etwa  $250 \cdot d_h$  oberhalb der Bündelbefestigung und  $20 \cdot d_h$  vor dem Bündelende (Abb. 4). Beim unberippten Bündel liegt die Messebene in Strömungsrichtung  $50 \cdot d_h$  hinter der vorletzten und  $3 \cdot d_h$  vor der letzten Stützebene, so dass dort in allen Fällen mit ungestörter Strömung gerechnet werden kann. Die Kühlmitteltemperatur über den Bündelquerschnitt wird mit isolierten Mantel-TE (0,5 mm  $\emptyset$ ) gemessen.

Ihre Anordnung geht aus den Abb. 5 und 6, ihre Einbauweise aus Abb. 3 hervor. Die Mantel-TE bei den Bündeln M1 und M2 sind an ihrer Messstelle in den als Abstandshalter dienenden Kapillarröhrchen verlötet. Bei den Bündeln M3 und M4 sind die Mantel-TE in einer aus Montagegründen schräg durch die Stabwand laufenden Bohrung eingeklebt, so dass die Messstelle 0,3 mm aus der Staboberfläche herausragt. Pro Stab wurden maximal 4 TE installiert.

Die beheizten Zentralstäbe sind aus keramisch isolierten Heizkabeln mit rohrförmigem Heizleiter im Innern hergestellt. Die beheizte Länge beträgt bis zur Messebene 600 mm, insgesamt 612 mm. Ausserhalb derselben sind die Heizleiterrohre mit eingehämmerten Kupferbolzen versehen, so dass die Wärmeerzeugung in diesem Bereich vernachlässigt werden darf.

### 3.2 Beschreibung der Versuchsstrecke

Durch ein Filter saugen 4 Kolbenkompressoren Luft aus der Atmosphäre an und fördern maximal 1,2 kg/s bei 12 atü (Abb. 4) über eine Filter- und Trocknungsanlage, eine Druckregelanlage, eine geeichte Mengemessstrecke mit auswechselbaren Blendenscheiben (Anlauf 30 D, Auslauf 10 D) zur Teststrecke. Die etwa mit Umgebungstemperatur eintretende Luft durchströmt das in der Teststrecke eingebaute Mischbündel, in welchem der Zentralstab beheizt ist. Am Ein- und Austrittsstutzen der Teststrecke befinden sich Druck- und Temperatur-Messstellen. Die Durchsatzregelung geschieht über ein nachfolgendes Drosselventil und eine Bypassleitung.

### 3.3 Messtechnik

Die in Form von Gleichstrom den Zentralstäben zugeführten elektrischen Leistungen werden digital mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5\%$ , die mit Thermoelementen gemessenen Temperaturen mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ermittelt.

Zur Bestimmung der Absolutdrücke dienten Feinmessmanometer der Klasse 0,6; die Differenzdrücke wurden an U-Rohrmanometern auf 0,2 mm Hg genau abgelesen.

## 4. Versuchsauswertung

Die Beheizung des Bündelzentralstabes bewirkt am Bündelaustritt ein weitgehend radial symmetrisches Temperaturprofil, das von der thermischen Expansion und der QM des Kühlmittels bestimmt wird. Der Verlauf des Temperaturprofils (Abb. 7, 8), im engeren Sinne die Kühlmittel-Temperatur des den Zentralstab umgebenden Ringkanals, stellt daher ein Mass für die QM im Bündel dar. Zur mathematischen Verknüpfung von Kanaltemperatur und QM dient die den Vermischungsvorgang beschreibende Differentialgleichung.

### 4.1 Herleitung der Vermischungs-Differentialgleichung

Der den Zentralstab umgebende Ringkanal mit dem beheizten Umfang  $U$  ist von Ebenen durch je zwei Achsen benachbarter Stäbe begrenzt. Er wird in axiale Abschnitte der infinitesimalen Länge  $dx$  geteilt, die als Kontrollräume fungieren. Die Energiebilanz eines beliebigen Kontrollraumes (Abb. 9) führt zu der Gleichung:

$$d\dot{Q} = d\dot{Q}_e + d\dot{Q}_1 - d\dot{Q}_2 - d\dot{Q}_3 \quad (1)$$

Die Grössen dieser Gleichung bedeuten:

$$d\dot{Q} = (\dot{M} - d\dot{M}) \cdot i_2 - \dot{M} \cdot i_1 \quad \begin{array}{l} \text{Wärmegewinn der} \\ \text{Strömung} \end{array} \quad (2)$$

$$d\dot{Q}_e = \dot{q} \cdot U \cdot dx = \chi \cdot dx \quad \begin{array}{l} \text{im Kontrollraum} \\ \text{erzeugte Wärme} \end{array} \quad (3)$$

$$d\dot{Q}_1 = \bar{\mu} \cdot \dot{M}_a \cdot i_a \cdot dx \quad \begin{array}{l} \text{durch QM von} \\ \text{aussern zugeführte} \\ \text{Wärme} \end{array} \quad (4)$$

$$d\dot{Q}_2 = \bar{\mu} \cdot \dot{M}_a \cdot i \cdot dx \quad \begin{array}{l} \text{durch QM nach} \\ \text{aussern abgeführte} \\ \text{Wärme} \end{array} \quad (5)$$

$$d\dot{Q}_3 = d\dot{M} \cdot i \quad \begin{array}{l} \text{durch radiale} \\ \text{thermische Expan-} \\ \text{sion verdrängte} \\ \text{Wärme} \end{array} \quad (6)$$

Setzt man diese Gleichungen zusammen mit

$$di = i_2 - i_1 = c_p \cdot dT \quad (7)$$

und der Bedingung für gleichen Druckabfall

$$\frac{\dot{M}_a}{\dot{M}} = \sqrt{\frac{T}{T_a}} \quad +) \quad (8)$$

in (1) ein, so ergibt sich die Beziehung:

$$\frac{di}{dx} = \frac{\chi}{\dot{M}} + \bar{\mu} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_a}} \cdot (i_a - i) \quad (9)$$

oder explizit nach der Temperatur:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\chi}{\dot{M} \cdot c_p} + \bar{\mu} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_a}} \cdot \left( \frac{c_{pa}}{c_p} \cdot T_a - T \right) \quad (10)$$

+ ) Die Druckverlustgleichung

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \lambda + \rho \cdot w \cdot \Delta w$$

liefert nach der Bedingung gleichen Druckabfalles  $\Delta p$  für das Verhältnis der Massenströme  $\dot{M}$  und  $\dot{M}_a$  die Beziehung:

$$\frac{\dot{M}_a}{\dot{M}} = \frac{\rho_a \cdot \Delta w_a}{\rho \cdot \Delta w} \cdot \frac{\sqrt{1 + B_a} - 1}{\sqrt{1 + B} - 1},$$

wobei  $B_a = \frac{2\Delta p \cdot L \cdot \lambda}{d_h \cdot \rho_a \cdot \Delta w_a^2}$ ,  $B = \frac{2\Delta p \cdot L \cdot \lambda}{d_h \cdot \rho \cdot \Delta w^2}$

Da in allen untersuchten Fällen  $B_a > 100$  und  $B > 100$ , folgt mit Hilfe des Gesetzes für ideale Gase in guter Näherung:

$$\frac{\dot{M}_a}{\dot{M}} = \sqrt{\frac{T}{T_a}}$$

Ihre Lösung beschreibt den axialen Temperaturverlauf im beheizten Ringkanal als Funktion der Mischrate  $\mu$  des Kühlmittels, woraus man direkt die gesuchte Funktion

$$T = T(x = L, \mu)$$

erhält.

#### 4.2 Lösung der Vermischungs-Differentialgleichung (10)

##### 4.2.1 als geschlossener Ausdruck, näherungsweise

Zunächst wird versucht, mit Hilfe von Vereinfachungen eine geschlossene Näherungslösung zu finden, die als Vergleichsbasis für die komplizierteren numerischen Rechnungen gelten kann.

Die Versuchsauswertung erfolgt nach Abschnitt 4.2.2.

Unter den Voraussetzungen

$$\sqrt{\frac{T}{T_a}} \approx 1 \quad (11)$$

$$\frac{c_{pa}}{c_p} \approx 1 \quad (12)$$

und  $T_a \approx T_{\text{ein}} = \text{konst.}$

entsteht aus Gleichung (10) der folgende Ausdruck:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\chi}{\dot{M} \cdot c_p} + \bar{\mu} \cdot (T_{\text{ein}} - T), \quad (13)$$

der für  $\dot{M} = \text{konst.}$  eine geschlossene Lösung besitzt.

Sie lautet:

$$T - T_{\text{ein}} = \frac{\chi}{\bar{\mu} \cdot \dot{M} \cdot c_p} (1 - e^{-\bar{\mu} \cdot x}) \quad (14)$$

Die Aufheizung bis zum Ende der beheizten Strecke ergibt sich für  $x = L$  zu:

$$T_L - T_{\text{ein}} = \frac{\chi}{\bar{\mu} \cdot \dot{M} \cdot c_p} (1 - e^{-\bar{\mu} \cdot L}) \quad (15)$$

Bezieht man diese Funktion auf ihren Maximalwert

$$T_L (\bar{\mu} = 0) - T_{\text{ein}} = \frac{\chi \cdot L}{\dot{M} \cdot c_p}, \quad (16)$$

so erhält man die einfache Beziehung:

$$TN (\bar{\mu} \cdot L) = \frac{T_L - T_{\text{ein}}}{T_{L(0)} - T_{\text{ein}}} = \frac{1}{\bar{\mu} \cdot L} (1 - e^{-\bar{\mu} \cdot L}) \quad (17)$$

Diese Funktion ist gestrichelt in Abb. 10 dargestellt.

#### 4.2.2 durch numerische Integration

Unter Zuhilfenahme einer elektronischen Rechenanlage gewinnt man leicht eine numerische Lösung der Gleichung (10) nach dem Runge-Kutta-Verfahren.

Mit der Anfangsbedingung

$$T (x = 0, \bar{\mu}) = T_{\text{ein}}$$

wobei  $\bar{\mu}$  vorgegeben wird, gelangt man zu einer beliebigen Schar axialer Temperaturprofile für den beheizten Ringkanal. Die Endtemperaturen der Profile, aufgetragen über der Mischrate  $\bar{\mu}$ , stellen die gesuchte Funktion dar.

In Abb. 10 sind 2 verschiedene, durch numerische Integration gefundene Lösungen als Grenzfälle bei geringer und grosser Kühlmittelexpansion aufgetragen und der Näherungslösung Gleichung (17) gegenübergestellt. Man erkennt, dass die numerischen Lösungen, die praktisch zusammenfallen, von der Näherungslösung nur wenig abweichen.

## 5. Diskussion der Versuchsergebnisse

Die im Versuch ermittelten Mischraten für Bündel mit 0; 1; 3 und 6 Rippen pro Stab und den Hauptabmessungen  $d \approx 6$  mm,  $p/d \approx 1,17$  sind als Funktion der Re-Zahl in Abb. 11 dargestellt. Der Bereich erstreckt sich von  $Re = 20\ 000$  bis max.  $Re = 150\ 000$ , bei 6 Rippen bis  $Re = 70\ 000$ . Da sich beim unberippten und dreifach berippten Bündel auch bei  $Re > 100\ 000$  keine Abhängigkeit der  $QM$  von  $Re$  zeigt, können die Versuche am sechsfach berippten Bündel mit Sicherheit auch auf grössere  $Re$ -Zahlen extrapoliert werden.

Aus Abb. 11 kann man folgendes erkennen:

- a) Die Mischraten steigen bei konstanter axialer Stützweite der Stäbe mit abnehmender Rippenzahl, d.h. abnehmender Rippensteigung, stark an.

- b) Für das einfach berippte Bündel beobachtet man mit wachsender Re-Zahl einen Anstieg der Mischrate von etwa  $\mu = 17 \text{ \%/cm}$  bei  $Re = 20\ 000$  auf  $\mu = 23 \text{ \%/cm}$  bei  $Re = 130\ 000$ .

Für die Bündel mit 6; 3 und 0 Rippen je Stab sind die Mischraten dagegen von der Re-Zahl unabhängig.

Sie betragen  $\mu = 4 - 6 \text{ \%/cm}$  beim 6-fach berippten,  
 $\mu = 9 - 11 \text{ \%/cm}$  beim 3-fach berippten,  
und  $\mu = 6 - 8 \text{ \%/cm}$  beim unberippten Bündel.

- c) Die Messwerte weisen im Mittel einen Streubereich von etwa  $\pm 15 \text{ \%}$  auf und stimmen mit den in Tab. 2 enthaltenen Rechenwerten [11] gut überein.

zu a): Das starke Anwachsen der QM mit abnehmender Rippenzahl hat seine Ursache in der grösser werdenden Neigung der Rippen gegen die Hauptströmungsrichtung. Der den Rippen folgende Strömungsanteil wird auf kürzerer axialer Strecke zwischen den Kanälen ausgetauscht. Da dieser im betrachteten Rippensteigungsbereich in erster Näherung seinen Wert beibehält, nimmt die Mischrate etwa umgekehrt proportional zu der Austauschstrecke und damit umgekehrt proportional zur Rippensteigung zu.

Bei einfach berippten Bündeln mit der Abstützung Rippe/Hülle überlappen sich die Rippen teilweise gegenseitig und decken damit einen grösseren Anteil des Strömungskanales ab als bei drei- und sechsfach berippten Stäben mit der Abstützung Rippe/Rippe. Daraus könnte für das einfach berippte Bündel möglicherweise eine zusätzliche Förderung der Quervermischung folgen.

zu b): Das Anwachsen der Mischrate mit der Re-Zahl beim einfach berippten Bündel hängt offenbar mit der dabei verwendeten Stababstützung Rippe/Hülle zusammen.

Im Gegensatz zu der bei 3 und 6 Rippen üblichen Abstützung Rippe/Rippe [10] erstreckt sich beim einfach berippten Bündel die Rippe über die gesamte Trennfläche zwischen zwei Stäben. Dies wirkt sich auf die Strömung im Bündel aus:

- Die Rippen decken für  $p/d \geq 1,17$  den gesamten freien Strömungsquerschnitt der Teilkanäle ab und schliessen damit das unbehinderte axiale Durchströmen der Kanalmitte aus.
- Zwischen zwei Stäben existiert in jeder Ebene nur ein Mischungsmassenstrom, dessen Richtung vom Verlauf der jeweiligen im Eingriff befindlichen Rippe bestimmt wird. Bei Abstützung Rippe/Rippe gleichen Drehsinns sind dagegen zwei einander entgegengerichtete Austauschströme vorhanden, die sich in der Mitte der Trennfläche behindern.

In Abb. 12 sind nach dem Vorschlag von MOYER [8] die Kurven R (CV) für verschieden berippte Bündel aufgetragen. Die Kurven a, b und d stellen Messergebnisse für einfach berippte Bündel dar. Man erkennt, dass die Messungen anderer Autoren (a, b) relativ gut zu den eigenen (d) passen. Die Unterschiede im Verlauf dürften darauf beruhen, dass bei d alle Stäbe, bei a und b jedoch nur etwa 2/3 derselben mit Rippen versehen waren.

zu c): Die gemessene Mischrate ist bei 1 Rippe etwas kleiner, bei 0 Rippen etwas grösser als die berechneten Werte; bei 3 und 6 Rippen herrscht gute Übereinstimmung (Tab. 2). Demzufolge würde bei 1 Rippe weniger als  $1/3$ , bei 3 und 6 Rippen jedoch  $1/3$  bis  $1/2$  der von den Rippen abgedeckten Strömung aus dem Kanal herausgeschält.

Die Erklärung dafür ist einfach:

Mit zunehmender Rippensteigung sinkt der Schlupf der Strömung. Die Strömung folgt umso mehr der Windungsrichtung der Rippen, je weniger diese von der Bündelachse abweicht. Der Unterschied wird deutlich, wenn man bedenkt, dass 600 mm Rippensteigung einer Neigung von  $2^\circ$  gegen die Bündelachse, 100 mm aber einer solchen von  $12^\circ$  entsprechen.

Die nach [11] theoretisch bestimmte Mischrate für unberippte Bündel mit  $p/d \approx 1,17$  stellt Abb. 13 als hyperbolische Funktion der Stabteilung  $p$  dar. Als Parameter dient die Schwankungsgeschwindigkeit  $v$  der turbulenten Kühlmittelteilchen quer zur Hauptströmungsrichtung bezogen auf die Hauptgeschwindigkeit  $U$ .

Zum Vergleich zeigt die Abbildung die eigenen experimentellen, am unberippten Bündel gewonnenen Quervermischungsergebnisse sowie neuerdings veröffentlichte Messergebnisse anderer Autoren [9]. Da diese für die Stabteilung  $p = 18$  mm gelten, bestätigen sie zusammen mit den eigenen Messungen die Gültigkeit des theoretisch begründeten Kurvenverlaufes.

## 6. Zusammenfassung

Die vorliegenden experimentellen Untersuchungen zur Kühlmittel-Quervermischung in berippten und unberippten Stabbündeln zeigen, dass die Mischrate des einfach berippten Bündels zwar 3 bis 4 mal grösser als die des sechsfach berippten ist, sich jedoch bezüglich der Heisskanaltemperaturen nur wenig günstiger auswirkt. Nach Abb. 1 sinkt die Oberflächentemperatur bei  $\mu = 6 \text{ \%/cm}$  um  $56^\circ\text{C}$ , bei  $\mu = 20 \text{ \%/cm}$  um nur weitere  $5^\circ\text{C}$ . Die Reserven bei 3 und besonders bei 1 Rippe könnten jedoch bei Schiefbelastung Bedeutung erlangen. Die Klärung dieser Probleme bleibt ergänzenden theoretischen und experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der QM bei unsymmetrischen Bündelbelastungen und Stabanordnungen vorbehalten.

Literatur:

- [1] DOETSCHMANN K.  
"Kühlmittel-Quervermischung und deren Auswirkung  
auf die Heisskanal-Temperaturen in dampfgekühlten  
Schnellen Reaktoren"  
KFK 848 Oktober 1968  
EUR 4151 d
- [2] DOETSCHMANN K., HOFMANN F., KIRSCH D.  
"PRAWDA - Ein FORTRAN-Programm zur wärmetechni-  
schen Auslegung dampf- und gasgekühlter Reaktoren"  
KFK 725 August 1968  
EUR 3974 d
- [3] DOETSCHMANN K.  
"Drei FORTRAN-Programme zur Bestimmung der Heiss-  
kanaltemperaturen in dampf- und gasgekühlten  
Reaktorkernen unter Berücksichtigung der Kühl-  
mittel-Quervermischung"  
KFK 815 August 1968  
EUR 3973
- [4] COLLINS R.D., FRANCE J.  
"Mixing of coolant in channels between close-  
packed fuel elements"  
United Kingdom Atomic Energy Authority  
Research and Development Branch, Capenhurst,  
IGR-TN/CA-847, Januar 1958
- [5] LANE A.D. et al.  
"The thermal and hydraulic characteristics of  
power reactor fuel bundle designs."  
The Canadian Journal of Chemical Engineering,  
Vol. 41, Nr. 5, Okt. 1963, S. 226 - 234

- [6] HOWIESON J., McPHERSON G.D.  
"Coolant mixing in 19-element fuel bundles"  
Atomic Energy of Canada Limited, Nucl. Power  
Plant Divis., Toronto, Ontario, Canada,  
T D S I - 31, Juli 1961
- [7] BISHOP A.A., et al.  
"Coolant mixing in a 19-rod fuel assembly"  
Transactions of the American Nuclear Soc.,  
Vol. 4, 1961, S. 43 - 44
- [8] MOYER C.B.  
"Coolant mixing in multirod fuel bundles"  
Risö Report Nr. 125, Juli 1964
- [9] PIETRALLA G., PRESSER K.H., RAUBER A., RITTER M.  
"Kühlgasdurchmischung und Druckverlust in Brenn-  
elementbündeln mit 19 Stäben"  
Nukleonik, 11. Band, Heft 6, 1968,  
sowie persönl. Mitteilungen von Herrn Pietralla
- [10] BAUMANN W., CASAL V., HOFFMANN H., MÖLLER R., RUST K.  
"Brennelemente mit wendelförmigen Abstandshaltern  
für Schnelle Brutreaktoren"  
KFK 768, April 1968
- [11] BAUMANN W.  
"Cross mixing by natural turbulence in fuel-  
element bundles"  
Atomkernenergie 2/69
- [12] MÜLLER A., et al.  
"Referenzstudie für den 1000 MWe dampfgekühlten  
Schnellen Brutreaktor (D1)"  
KFK 392, August 1966

[13] WATERS E.D.

"Fluid mixing experiments with a wire-wrapped  
7-rod bundle fuel assembly"

General Electric Co., Hanford Atomic Products  
Operation, Richland, Washington, HW-70178,  
August 3, 1961

Bezeichnungen:

c	Rippenhöhe
$c_p$	spezifische Wärme
d	Stabdurchmesser
$d_h$	hydr. Durchmesser
$f_o$	Öffnungsfaktor
$F_{\text{frei}}$	freier Strömungsquerschnitt des Bündels
h	Rippensteigung
h/d	dimensionslose Rippensteigung
i	Rippenzahl
i	Enthalpie des Kühlmittels
L	Bündellänge
$\dot{M}$	Massenstrom durch den beheizten Ringkanal
n	Stabzahl
p	Stabteilung
p/d	dimensionslose Stabteilung
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$\dot{q}$	Wärmestromdichte
r	auf das halbe Eckmass bezogener dimensionsloser Bündelradius
Re	Reynoldszahl
SW	Schlüsselweite des Bündels
T	Temperatur
TN	normierte Temperatur
U	beheizter Umfang des Bündels
v/U	Verhältnis der Schwankungsgeschwindigkeit zur Hauptströmungsgeschwindigkeit
x	axiale Position
$\Delta t_m$	mittlere Kühlmittelaufheizung
$\mu = 3 \cdot \bar{\mu}$	Mischrate eines Teilkanals
$\bar{\mu}$	Mischrate bezogen auf einen Austauschquerschnitt
$\sigma$	Bogenlänge zwischen zwei Rippen
$\chi$	Stableistung

Indizes:

a	unbeheizte Aussenkanäle des Bündels
1	Eintritt in den Kontrollraum
2	Austritt aus dem Kontrollraum
ein	Eintritt in das Bündel
k	künstlich
L	Messquerschnitt des Bündels
n	natürlich

Abkürzungen:

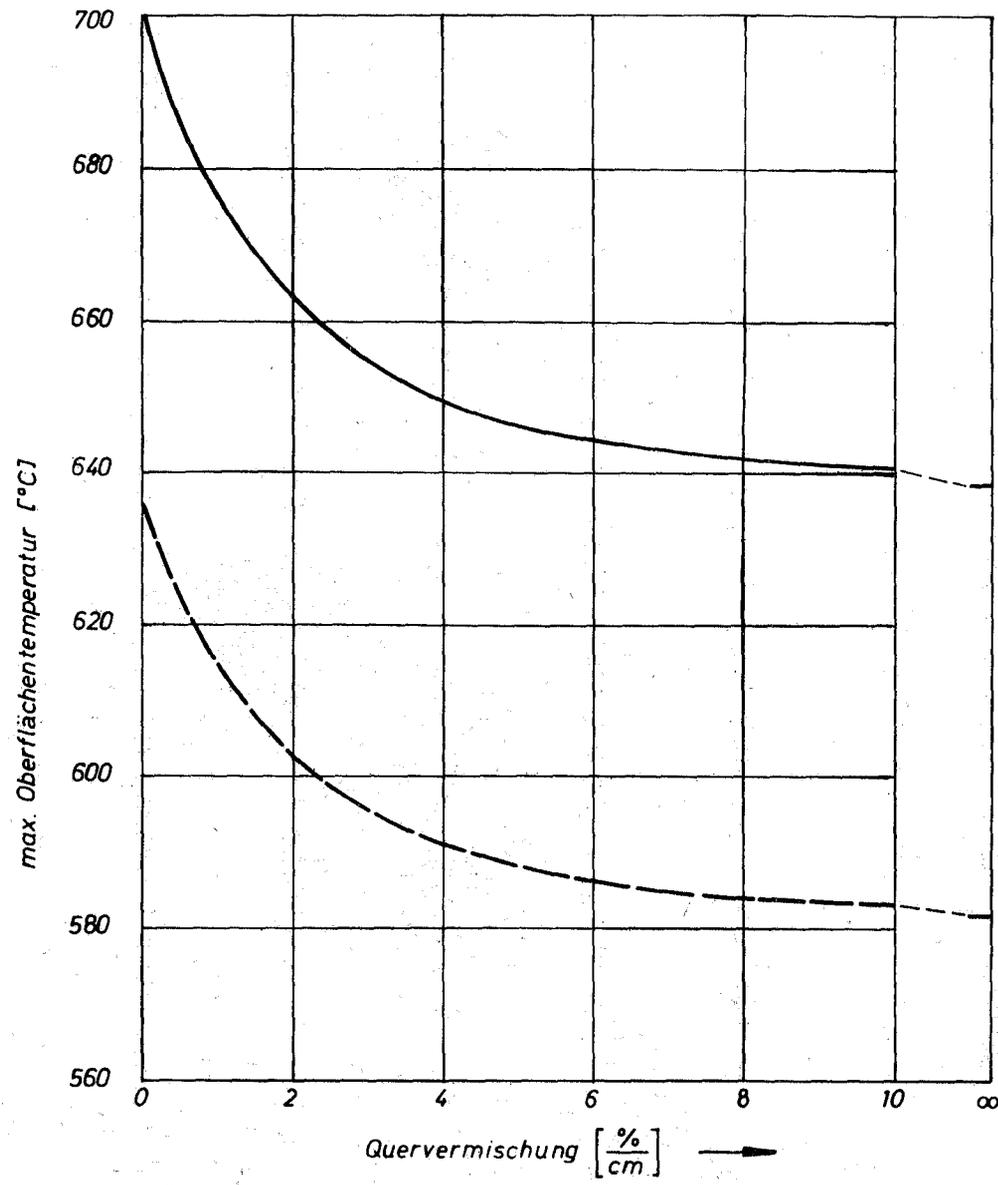
AH	Abstandshalter
QM	Quervermischung
TE	Thermoelement

Bündel-Nr.:	M1	M2	M3	M4
Stabzahl n:	61	61	61	61
Rippenzahl i:	1	6	0	3
Stabdurchmesser d (mm):	6,0	6,14	6,0	6,0
engster Spalt a (mm):	1,0	1,0	1,0	1,14
Stabteilung p/d:	1,167	1,162	1,167	1,189
Rippensteigung h (mm):	100	600	-	300
dimensionslose Rippensteigung h/d:	16,7	97,7	-	50
Schlüsselweite SW (mm):	56,7	56,7	56,7	56,7
freier Ström.- querschnitt $F_{\text{frei}}$ (mm <sup>2</sup> ):	1011	851	1059	989
Hydraulischer Durchmesser $d_h$ (mm):	2,633	2,076	3,145	2,60

Tab. 1: Abmessungen der Versuchsbündel

i	h(mm)	$f_o$	$f_o \cdot \mu_n$ [%/cm]	$\mu_k$ [%/cm]	$\mu = \mu_k + f_o \cdot \mu_n$ [%/cm]
1	100	0,722	4,1	20 (30)	24,1 (34,1)
3	300	0,655	3,7	4,9 (7,3)	8,6 (11,0)
6	600	0,312	1,8	2,3 (3,5)	4,1 (5,3)
0	-	1	5,7	0	5,7

Tab. 2: Theoretisch ermittelte Mischraten für die Versuchsbündel [11]. Es liegt die Annahme zugrunde, dass  $1/3$  ( $1/2$ ) der von den Rippen abgedeckten Strömung aus dem Kanal herausgeschält wird.



Annahmen:

Heißer Kanal

Frisches Brennelement

Stableistung  $420 \frac{W}{cm}$

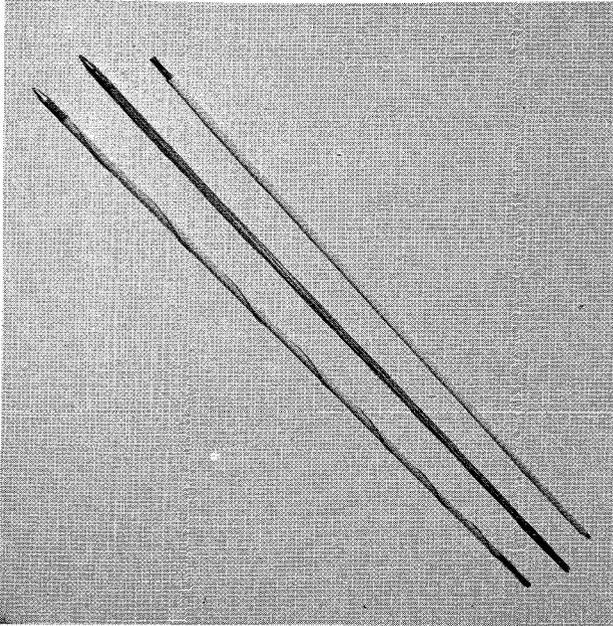
Heißdampftemp.  $510 \text{ } ^\circ\text{C}$

Heißdampfdruck  $120 \text{ at}$

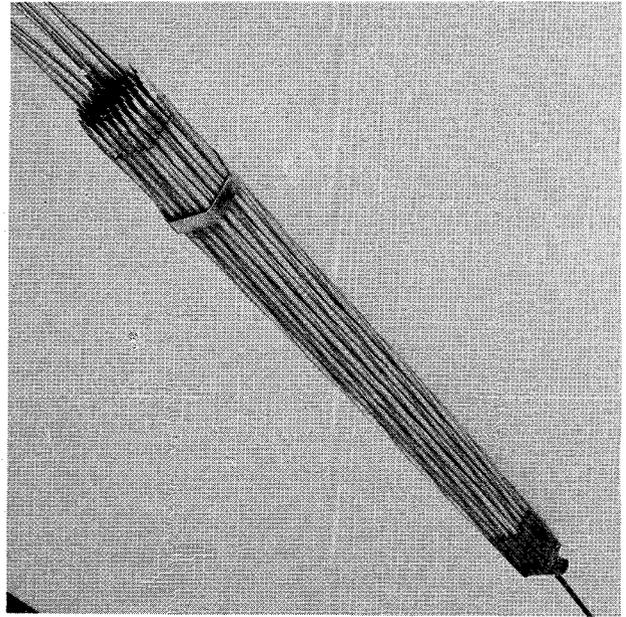
akt. Stablänge  $1130 \text{ mm}$

— ohne  
 - - - mit Rauigkeit

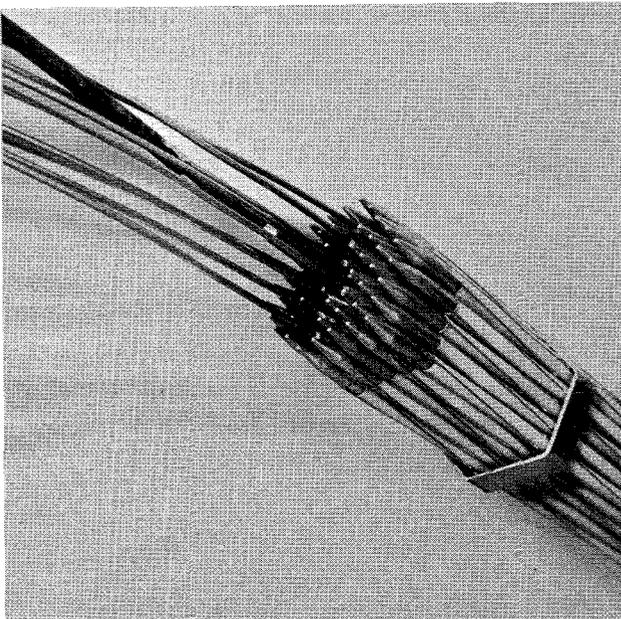
Abb 1 Oberflächentemperatur als Funktion der Quervermischung



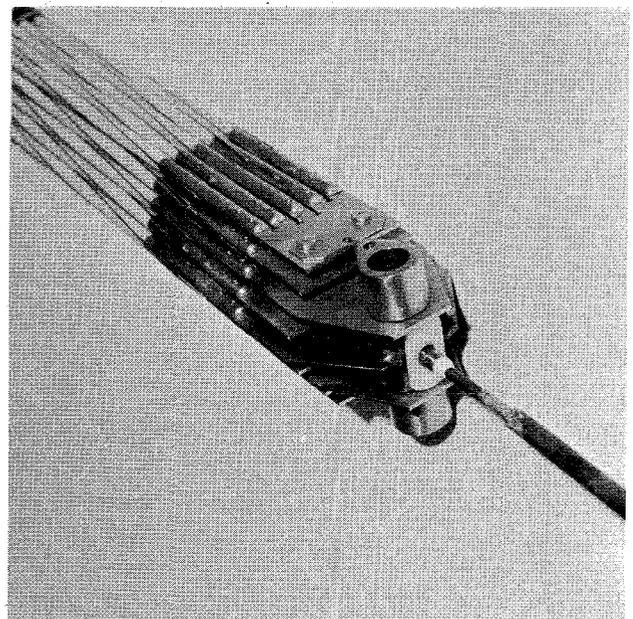
a) Einzelstäbe mit 1,6  
und 0 Rippen



b) Versuchsbündel M4  
mit 3 Rippen



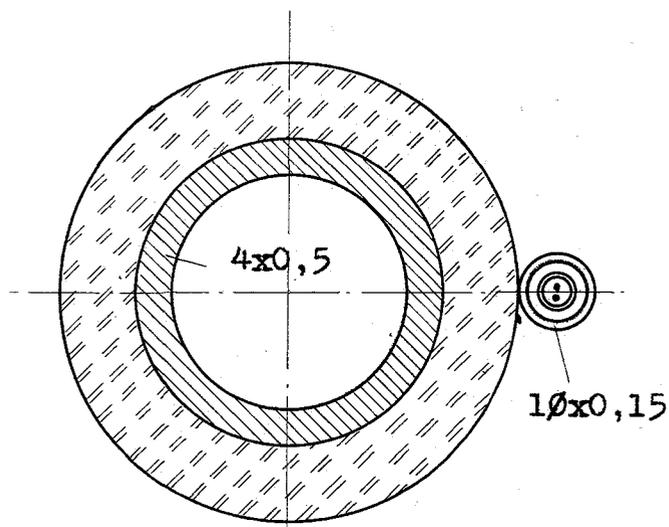
c) Austrittsseite des Bündels  
M4 mit den Schutzröhrchen  
der Thermoelemente



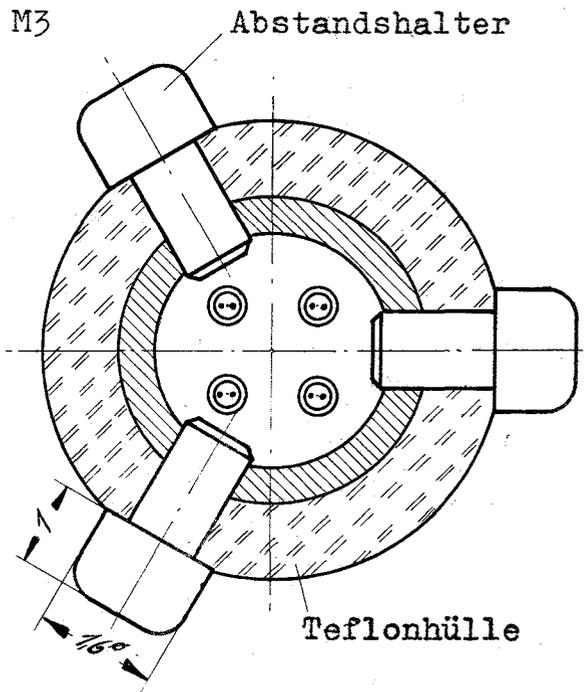
d) Eintrittsseite des Bündels  
M4 mit Aufhängung und  
Stromzuführung zum Zen-  
tralstab.

Abb. 2: Versuchsbündel M4

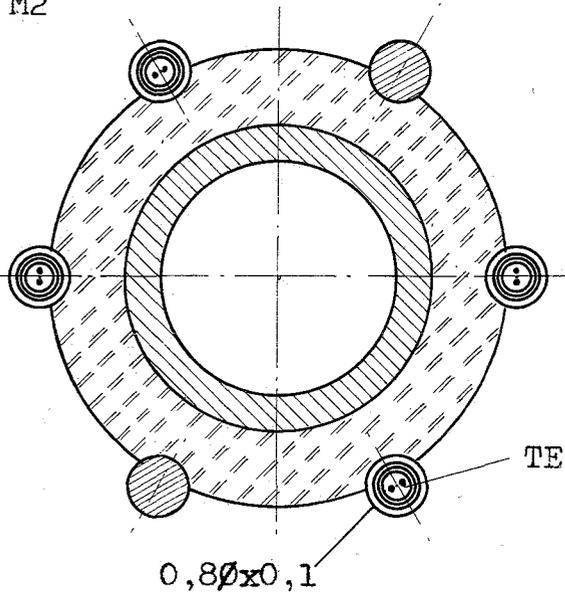
M1



M3



M2



M4

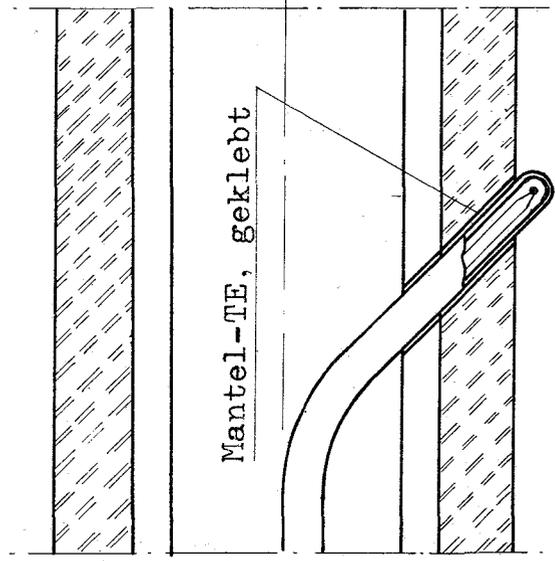
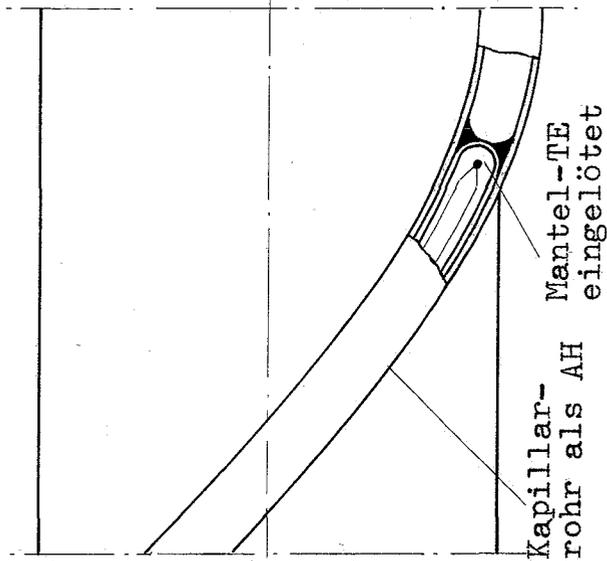
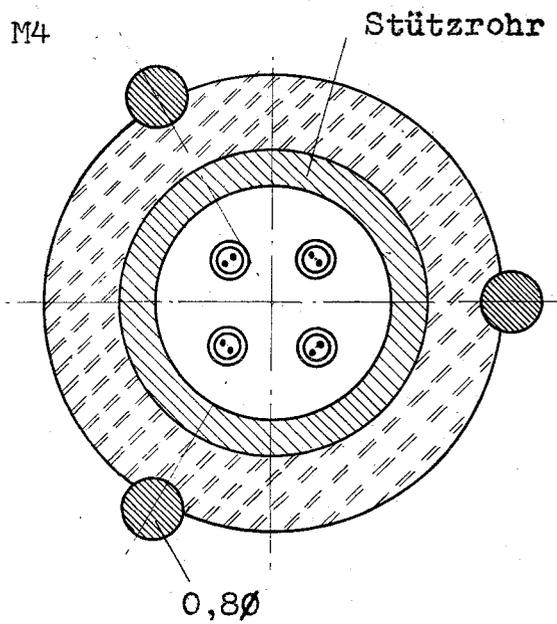


Abb. 3 Mischbündel-Stabquerschnitte u. Temp.-Mess-Stellen

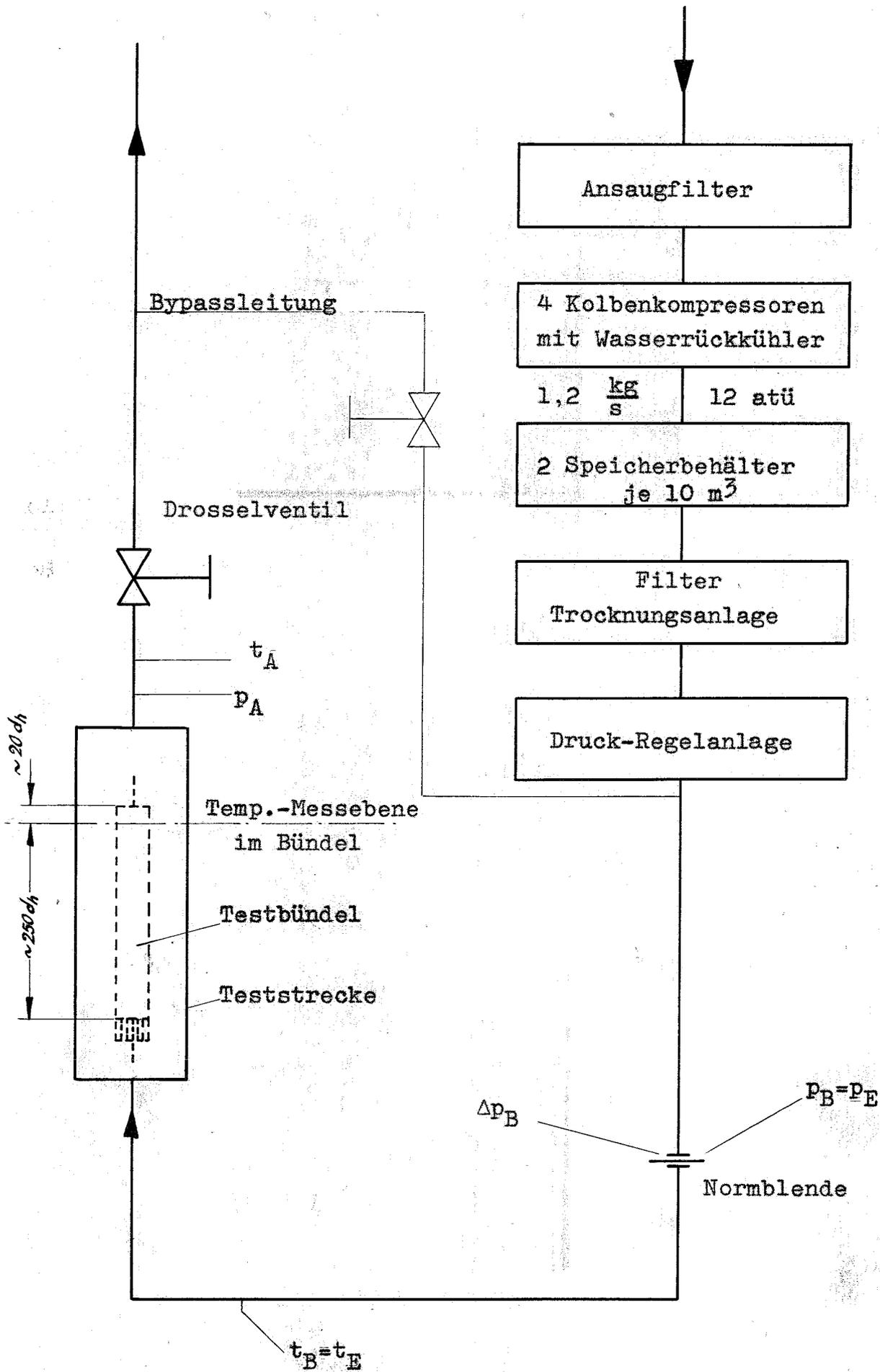
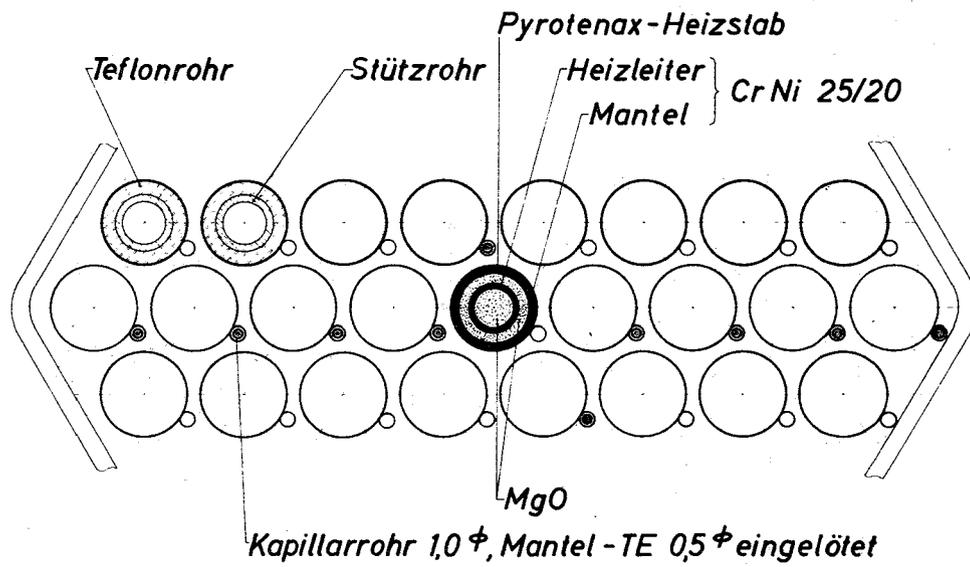


Abb. 4 Schema der Versuchsstrecke

## Bündel M1

1 Wendeldraht je Stab



## Bündel M2

6 Wendelrippen je Stab

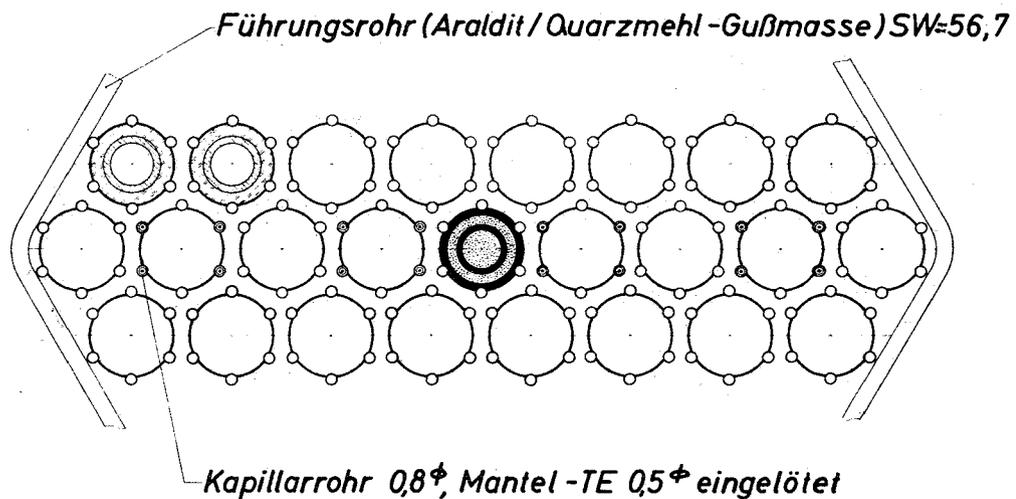
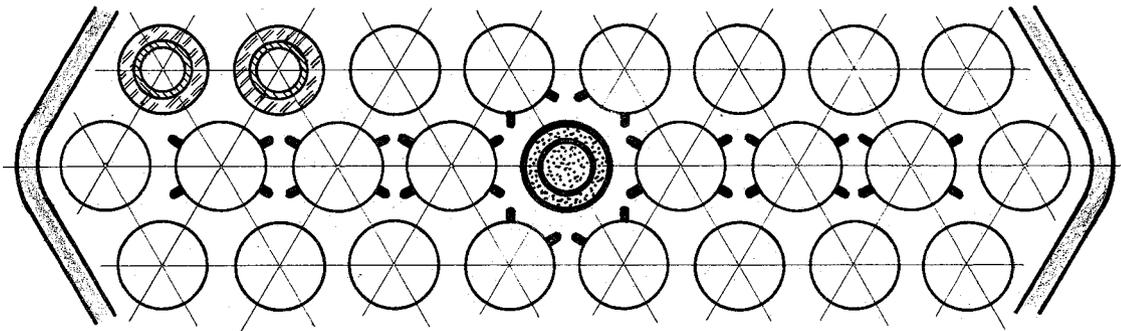


Abb. 5 Bündelquerschnitte in der Meßebe

## Bündel M3

ohne Abstandshalter



## Bündel M4

3 Wendelrippen je Stab

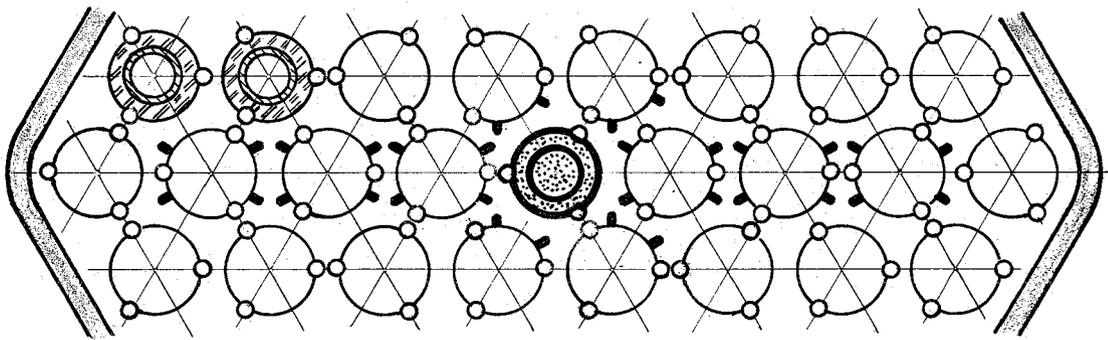


Abb. 6 Bündelquerschnitte in der MeßeEbene

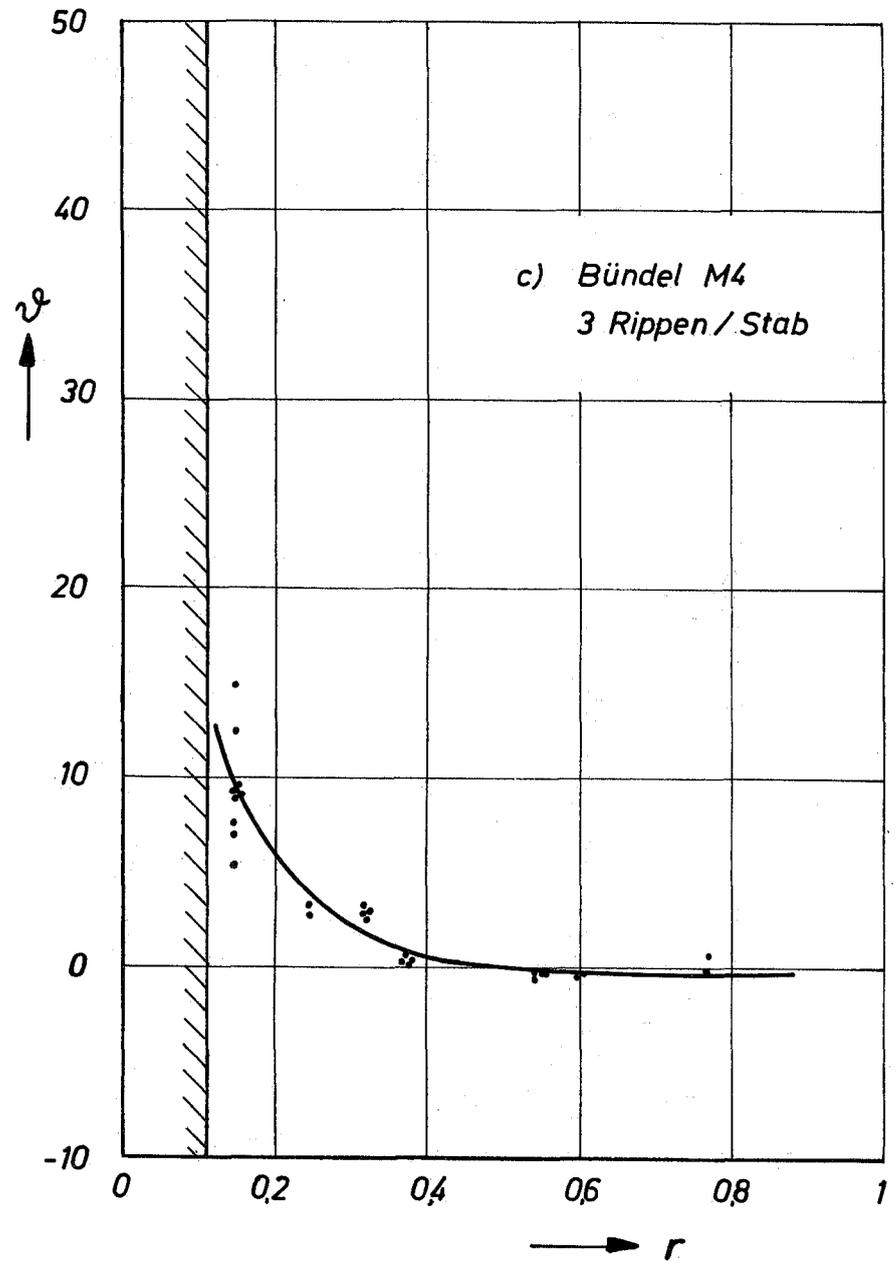
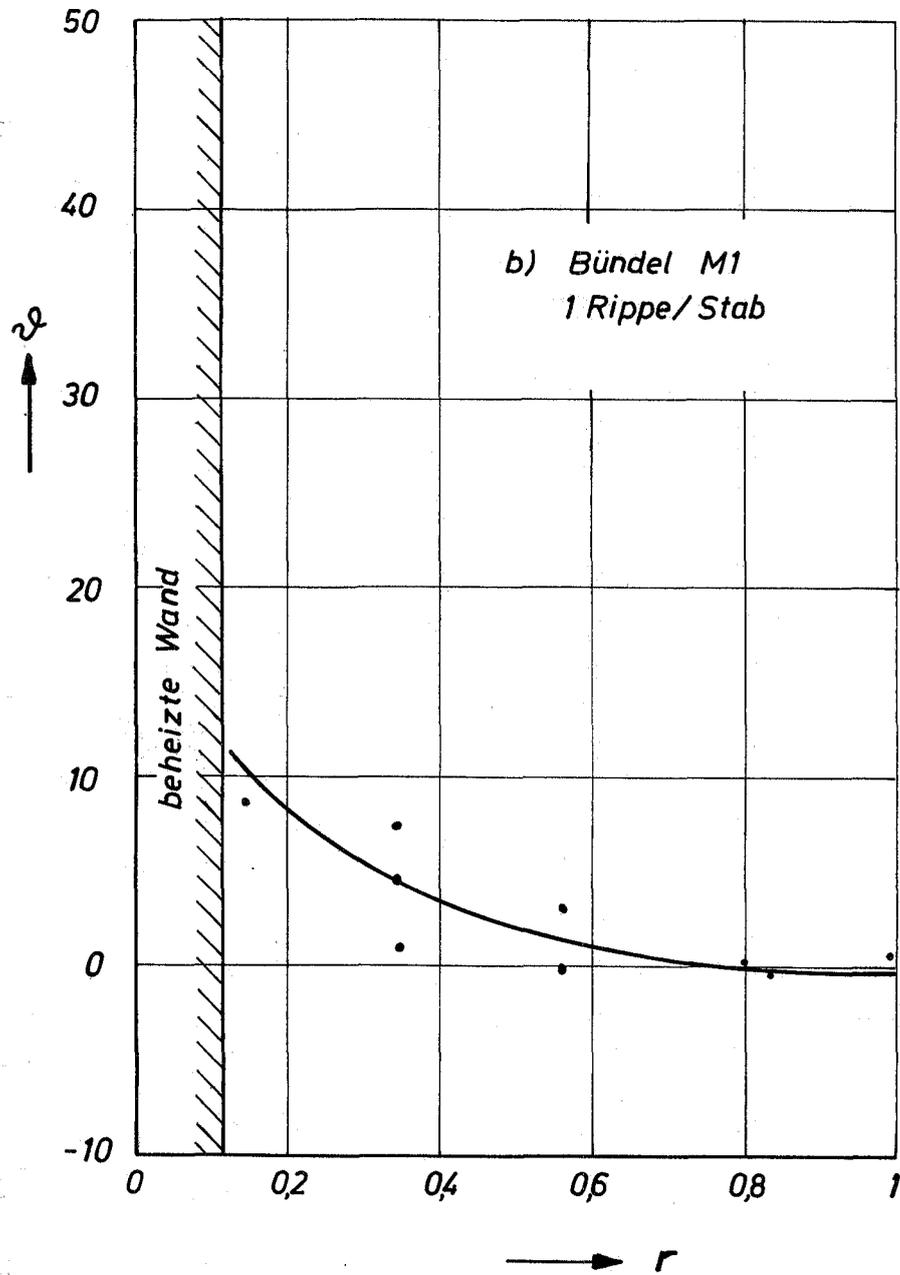


Abb. 7: Typische radiale Temperaturprofile  $\psi = \frac{t - t_{\text{ein}}}{\Delta t_m}$  in der Messebene

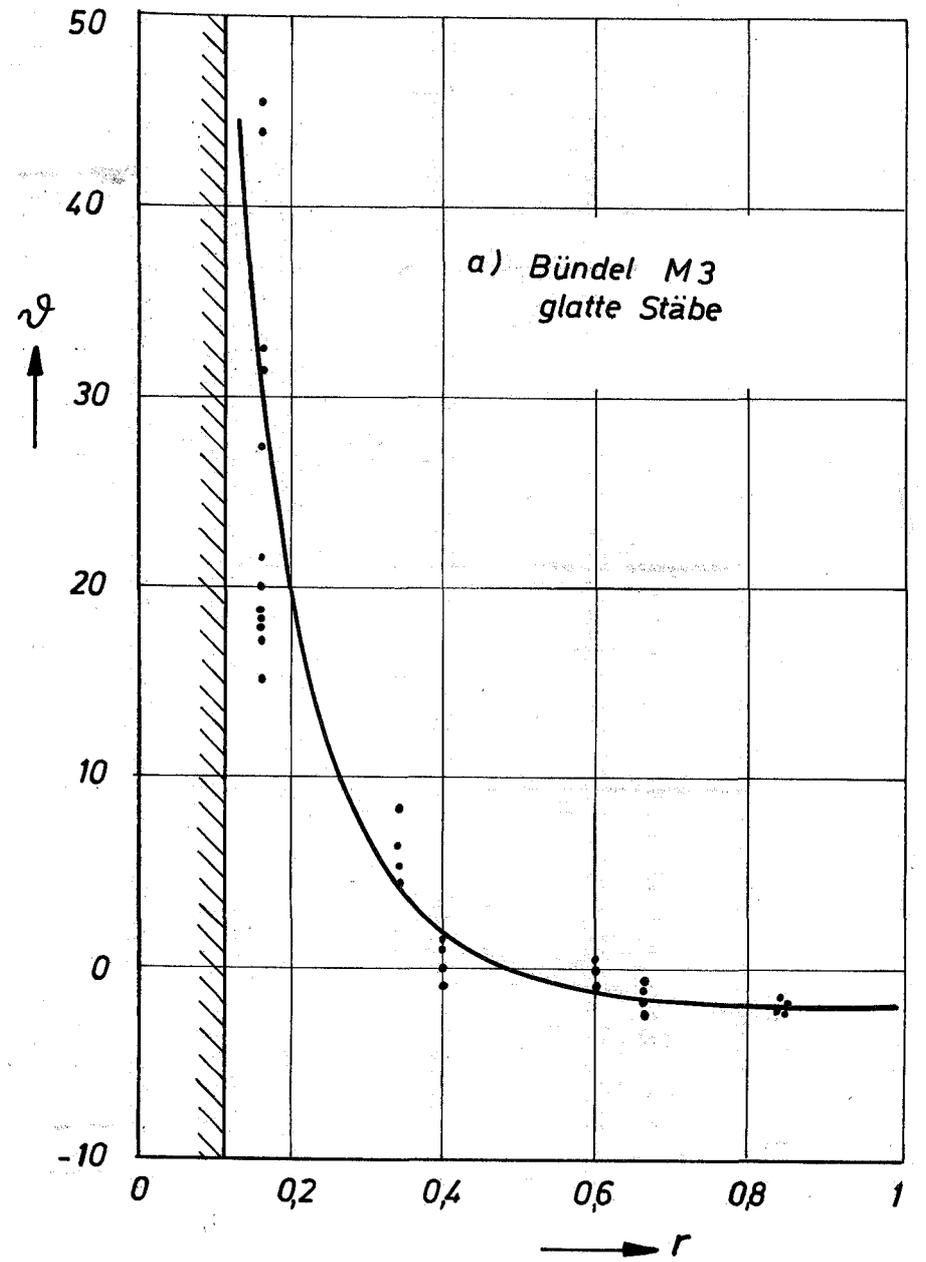
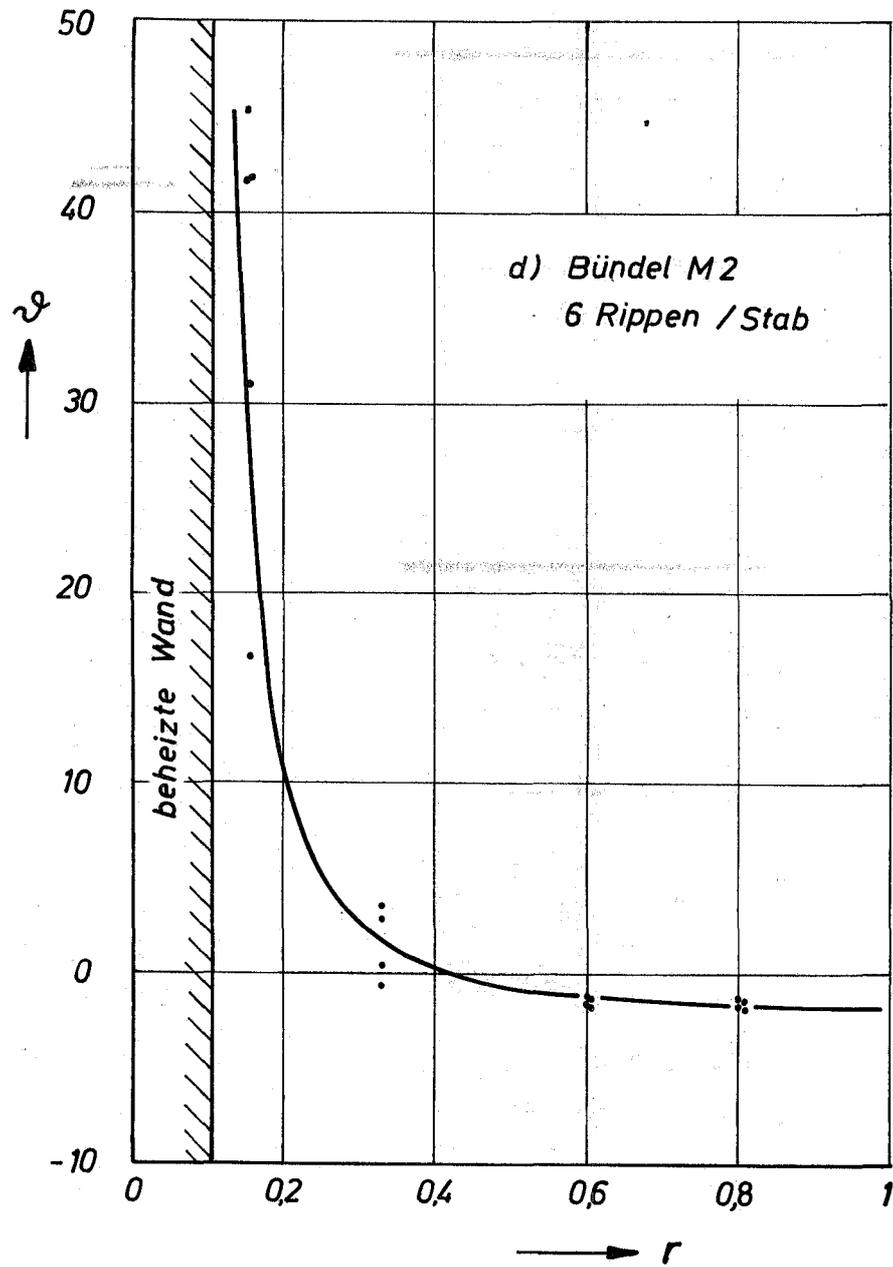
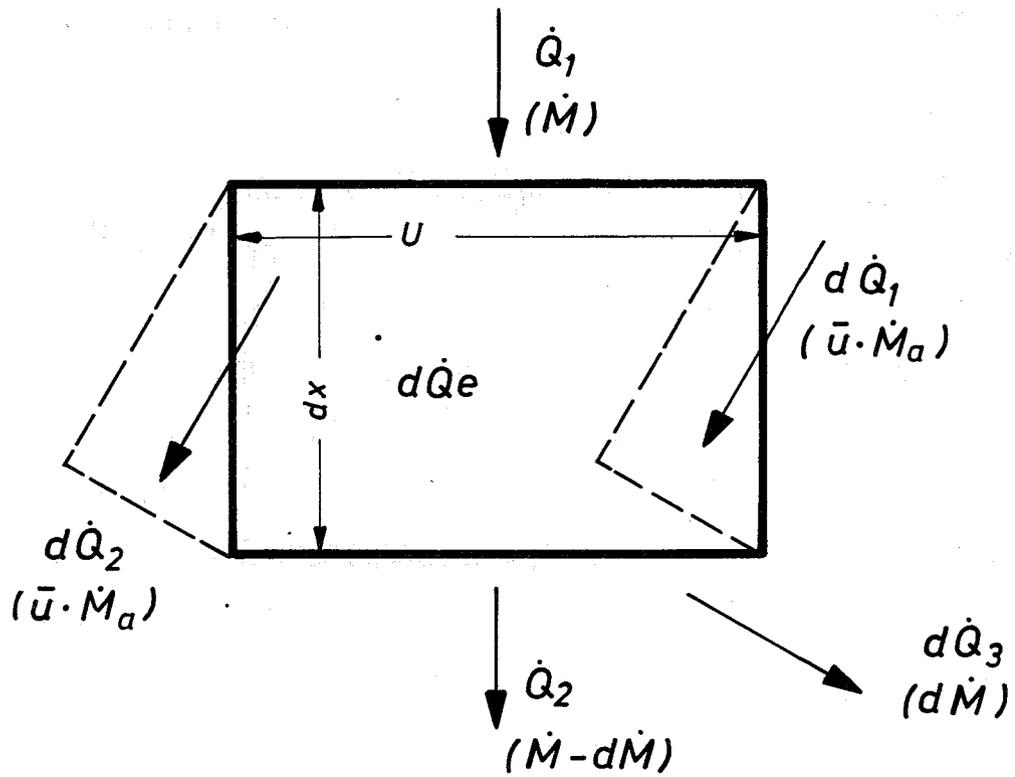


Abb. 8: Typische radiale Temperaturprofile  $\psi = \frac{t-t_{ein}}{\Delta t_m}$  in der Messebene



$$\dot{Q}_1 = \dot{M} \cdot i_1$$

$$\dot{Q}_2 = (\dot{M} - d\dot{M}) \cdot i_2$$

$$d\dot{Q}_e = \dot{q} \cdot U \cdot dx = \chi \cdot dx$$

$$d\dot{Q}_1 = \bar{\mu} \cdot \dot{M}_a \cdot i_a \cdot dx$$

$$d\dot{Q}_2 = \bar{\mu} \cdot \dot{M}_a \cdot i \cdot dx$$

$$d\dot{Q}_3 = d\dot{M} \cdot i$$

$$\frac{di}{dx} = \frac{\chi}{\dot{M}} + \bar{\mu} \cdot \frac{\dot{M}_a}{\dot{M}} (i - i_a)$$

Abb. 9: Modell zur Ableitung der Vermischungs-Dgl.

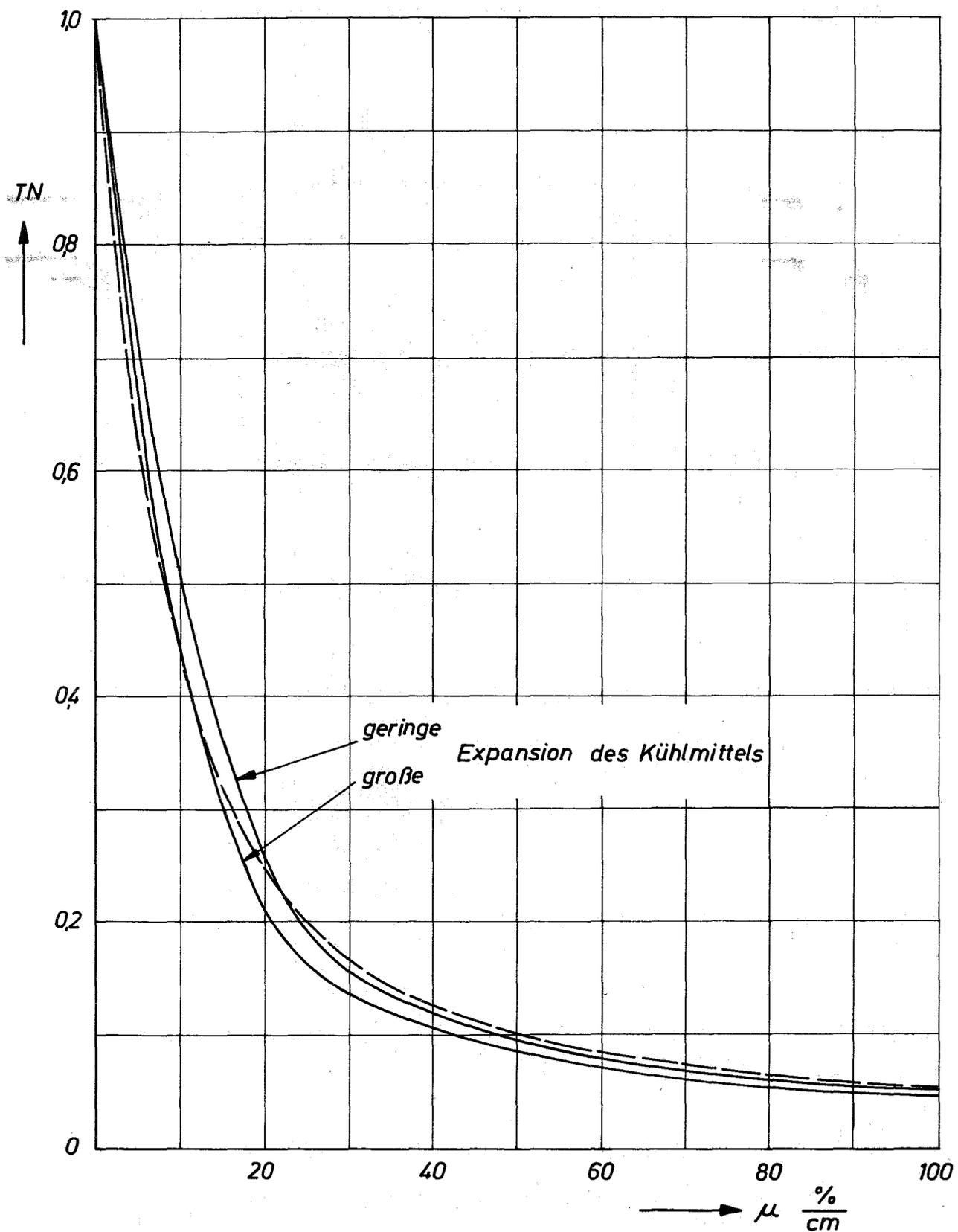


Abb.10: Normierte Temperatur  $TN$  des beheizten Ringkanals als Funktion der Mischrate  $\mu$ .  
 — digital berechnete Korrelationskurven  
 --- vereinfachte geschlossene Lösung

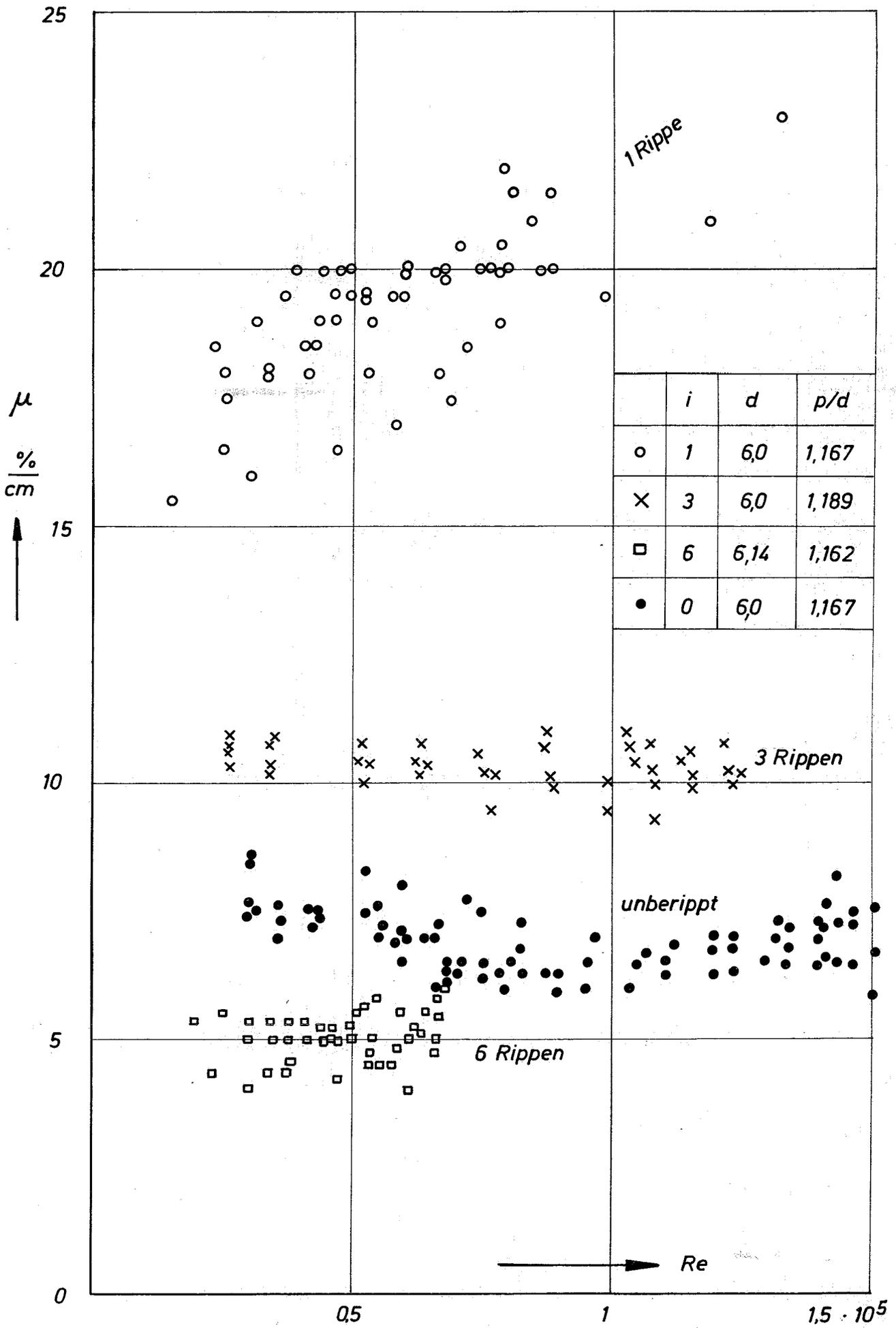


Abb. 11: Quervermischung  $\mu$  als Funktion der Re-Zahl für Brennelemente mit berippten und unberippten Stäben

Kurve a und b: gleichgericht. Wickelsinn, 19 Stäbe [7]  
 c: entgegenges. Wickelsinn, 7 Stäbe [13]  
 d: gleichgericht. Wickelsinn, 61 Stäbe  
 e: gleichgericht. Wickelsinn, 61 Stäbe  
 f: gleichgericht. Wickelsinn, 61 Stäbe } eig. Mess.

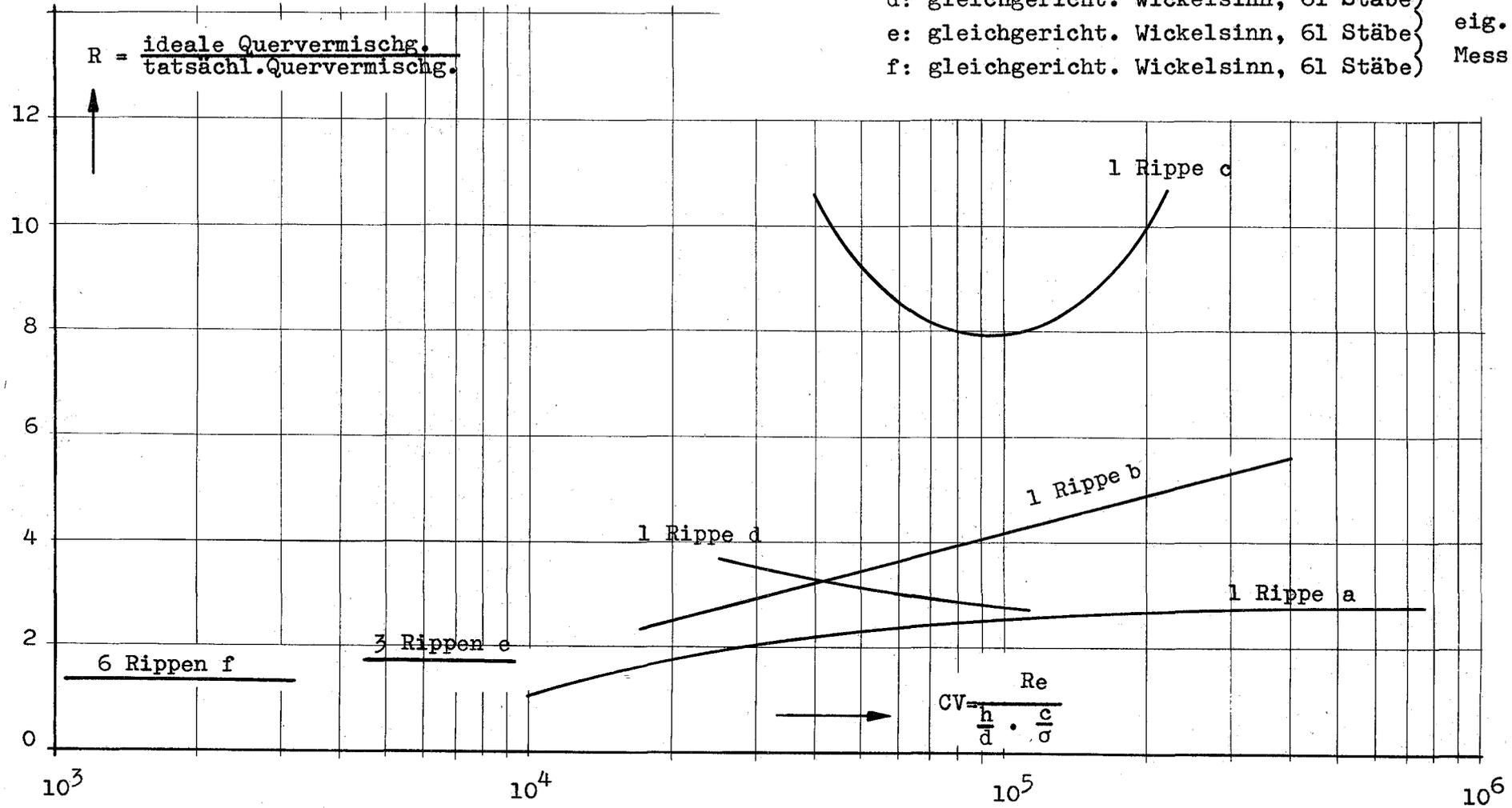
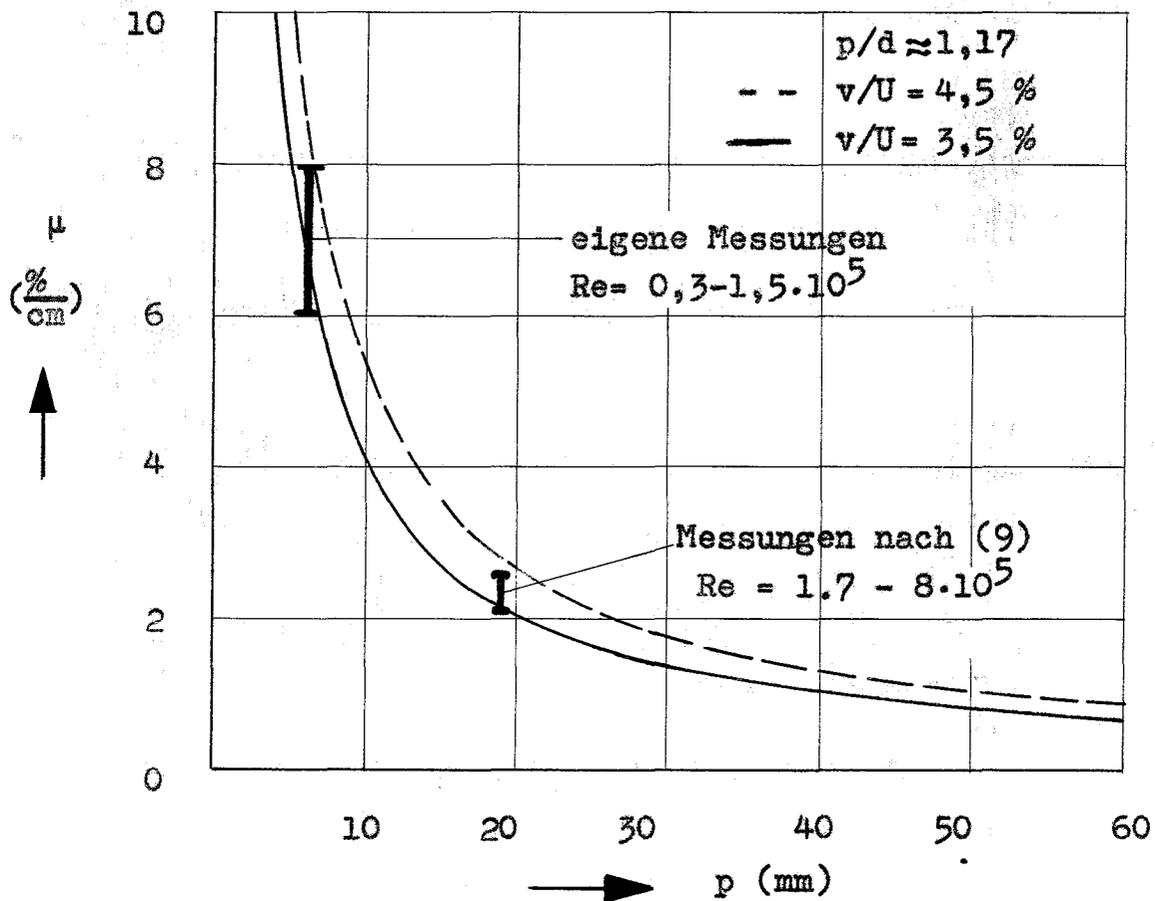


Abb. 12: Vermischungsschaubild nach MOYER [8]



**Abb. 13:** Mischrate  $\mu$  bei unberippten Stabbündeln als Funktion der Stabteilung  $p$ . Kurvenverlauf berechnet nach (11) mit den angenommenen Schwankungsgeschwindigkeiten der Strömung  $v/U = 3,5 \%$ ;  $4,5 \%$ .