

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

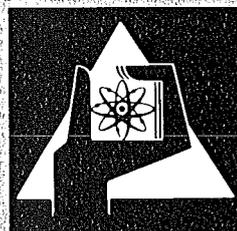
Januar 1977

KFK 2360

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

**Experimentelle Untersuchungen zur
Kühlmittelquervermischung an Stabbündeln mit
gitterförmigen Abstandshaltern bei turbulenter
Natrium-Strömung**

H. Hoffmann, E. Baumgärtner, H. H. Frey



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

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2360

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR KÖHLMITTELQUERVERMISCHUNG
AN STABBÜNDELN MIT GITTERFÖRMIGEN ABSTANDSHALTERN BEI
TURBULENTER NATRIUM-STRÖMUNG.

H. Hoffmann
E. Baumgärtner
H.H. Frey

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR KÜHLMITTELQUERVERMISCHUNG
AN STABBÜNDELN MIT GITTERFÖRMIGEN ABSTANDSHALTERN BEI
TURBULENTER NATRIUM-STRÖMUNG

Inhalt:

Für die thermo- und fluiddynamische Auslegung von Kernelementen Schneller Reaktoren sind Angaben über die Größe des Energieaustausches durch Kühlmittelquervermischung (Mischrate) zwischen benachbarten Bündelteilkanälen nötig. Hierzu wurden am Modell eines 6l-Stabbündels mit den spezifischen Abmessungen des SNR-300-Brennelementes ($P/D = 1,32$) und gitterförmigen Abstandshaltern Experimente in turbulenter Natrium-Strömung nach der "Beheizungsmethode" durchgeführt. Als Parameter wurden variiert:

- . Die Abstandshaltertypen (Röhrchen-, Wabengitter),
- . die Reynoldszahl ($8 \cdot 10^3 \leq Re \leq 8 \cdot 10^4$),
- . die Abstüzlänge der Stäbe im Bündel ($150 \leq H / \text{mm} / \leq 450$),
- . die Entfernung Abstandshalter - Meßebene ($50 \leq \Delta h / \text{mm} / \leq 160$).

Ergänzend wurde ein Vergleichsversuch mit 6l-Stabbündel, $P/D = 1,2$ und Wabengitter-Abstandshaltern durchgeführt.

Gemessene Temperaturen im Austrittsquerschnitt des Bündels sowie mit Hilfe des Rechenprogrammes MISTRAL-II ermittelte Mischraten werden angegeben. Es zeigt sich, daß hauptsächlich die Geometrie des Abstandshalters und das P/D -Verhältnis die Mischraten bestimmen. Sie betragen für $Re > 3 \cdot 10^4$ und

Wabengitter: $\mu = 3 \pm 1$ /%/cm/ für $P/D = 1.32$

$\mu = 6,5 \pm 1$ /%/cm/ für $P/D = 1.2$

Röhrchengitter: $\mu = 1,5 \pm 0,5$ /%/cm/ für $P/D = 1.32$

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS INTO COOLANT CROSS MIXING IN
MULTIROD - BUNDLES WITH GRID-TYPE SPACERS IN TURBULENTLY
FLOWING SODIUM

Summary:

The thermo- and fluiddynamic design of fuel elements of Liquid Metal-Cooled Fast Breeder Reactors needs characteristic values for the magnitudes of the coolant cross mixing. These were determined experimentally in sodium flow. 61-rod clusters were used with the specific dimensions of the SNR-300 fuel element (rod pitch to diameter ratio $P/D = 1,32$) equipped with grid-type spacers. The investigations were performed using the "heating method".

Parameters are:

- . the geometry of spacers (honeycomb-, ferrule-type),
- . the Reynolds-numbers ($8 \cdot 10^3 \leq Re \leq 8 \cdot 10^4$),
- . the support length of the rods within the cluster ($150 \leq H / \text{mm} / \leq 450$),
- . the distance between grids and measuring plane ($50 \leq \Delta h / \text{mm} / \leq 160$).

In addition experiments were carried out using a 61-rod-cluster - $P/D = 1,2$ - equipped with honeycomb-grids.

Measured temperature profiles within the coolant outlet cross-section are reported as well as the mixing rates evaluated with respect to its definition in the MISTRAL-II-Code. The results show that the mixing rates are mainly influenced by the spacer type and the P/D -ratio.

All experimental results can be summarized for Reynolds-numbers $> 3 \cdot 10^4$ as follows:

Honeycomb-grids: $\mu = 3 \pm 1$ %/cm/ ($P/D = 1.32$)
 $\mu = 6,5 \pm 1$ %/cm/ ($P/D = 1,2$)
Ferrule-grids: $\mu = 1,5 \pm 0,5$ %/cm/ ($P/D = 1,32$)

Inhalt:

1. Einführung
2. Versuchsmethode
3. Versuchsaufbau
 - 3.1 Teststrecke
 - 3.2 Na-Kreislaufsystem
4. Versuchsparameter und Versuchsdurchführung
5. Versuchsauswertung
6. Versuchsergebnisse
7. Meßunsicherheiten
8. Zusammenfassung und Schlußfolgerung
9. Literatur
10. Nomenklatur
Tabellen und Abbildungen

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR KÜHLMITTELQUERVERMISCHUNG IN STABBÜNDELN MIT GITTERFÖRMIGEN ABSTANDSHALTERN BEI TURBULENTER NATRIUM-STRÖMUNG

1. Einführung

Der Kern eines Reaktors besteht aus hexagonal angeordneten Kernelementen (Brenn-, Brut-, Absorberelemente). Jedes Kernelement besitzt zylindrische Stäbe, die zu einem dicht gepackten Bündel vereinigt in einen Kasten eingebaut werden. Zur Distanzierung der Stäbe werden Abstandshalter verwendet. Stabanordnung sowie Typ, Geometrie und Anordnung der Abstandshalter beeinflussen das thermo- und fluiddynamische Verhalten des Kernelementes.

Es existieren zwei charakteristische Gegebenheiten:

- Die Geometrien der von den Stäben gebildeten und vom Kühlmittel axial durchströmten Zwischenräume im Kernelement (Teilkänäle) unterscheiden sich im Bereich der Kastwand (Randzonen) von jenen im Inneren des Bündels (Zentralzone),
- die Wärmefreisetzung in den Stäben eines Kernelementes ist von deren Position im Kern abhängig. Mit der Entfernung von der Kernmitte ergeben sich zunehmende Leistungsgradienten über den Kernelementquerschnitt (schiefe Belastung).

Die geometrischen Bedingungen in den Randzonen und die Leistungsgradienten über das Kernelement führen zu Temperaturdifferenzen über den Bündelquerschnitt. Zur Berechnung dieser radialen Temperaturverteilungen im Kühlmittel werden komplizierte Rechenprogramme, wie z.B. ARTIS [1], HERA [2], MISTRAL [3], THESYS [4], verwendet. Sie bauen auf verschiedenen Modellvorstellungen auf und berücksichtigen unterschiedliche Strömungsgeometrien (Zentral-, Wand- und Eckkanäle), Einbauten im Strömungskanal (Abstandshalter) sowie unterschiedliche

Stabanordnungen (dreieckig, viereckig, P/D-, W/D-Verhältnisse). Wichtigster Parameter für die Eingabe in derartige Codes sind theoretisch oder experimentell gefundene Angaben für die Austauschvorgänge (Energie und Impuls) zwischen benachbarten Teilkanälen eines Kernelementes. Die Berücksichtigung dieser Austauschprozesse nach Art und Größe beeinflusst die Kühlmitteltemperaturverteilung im Bündelquerschnitt wesentlich.

Im einfachsten Fall werden dabei alle Wechselwirkungen auf einen einzigen Vermischungskoeffizienten und die Wärmeleitung zwischen den Bündelteilkanälen konzentriert.

Dies soll an zwei Beispielen berechneter Kühlmitteltemperaturen im Austrittsquerschnitt eines Na-durchströmten 61-Stab-bündels mit der Geometrie des SNR-300 - Brennelementes [5] aufgezeigt werden (Abb. 1), wobei zuerst ein sehr extremer Belastungsfall durch gleiche Wärmefreisetzung von nur zwei Stäben im Bündel (Abb. 1c, 1d), sodann unterschiedliche Wärmefreisetzung von allen Stäben (Abb. 1a, 1b) angenommen wurde. Eingegeben sind die berechneten mittleren Kühlkanaltemperaturen für folgende Fälle:

- ohne Berücksichtigung von Austauschvorgängen zwischen einzelnen Teilkanälen im Bündel infolge Wärmeleitung und Quervermischung;
- mit Berücksichtigung von Wärmeleitung und ohne Berücksichtigung der Quervermischung;
- mit Berücksichtigung von Wärmeleitung und verschieden hoher Quervermischung;

Das wesentliche Ergebnis:

Für die Ermittlung der Kühlmittel-Temperaturen im Bündelquerschnitt ist sowohl die Wärmeleitung als auch die Kühlmittelquervermischung zu berücksichtigen. Temperaturunterschiede zwischen benachbarten Teilkanälen werden umso mehr vermindert, je besser die Kühlmittelquervermischung und je extremer die Leistungsverteilungen im Bündel sind.

Die für die Auslegung des Brennelementes des SNR-300 benötigten Kenngrößen für den Energieaustausch durch Kühlmittelquervermischung zwischen benachbarten Teilkanälen sind zur

Zeit allein experimentell zu bestimmen. Die die Kühlmittelquervermischung kennzeichnende Mischrate umfaßt hierbei sämtliche den Vermischungsvorgang bestimmende Einzelphänomene (z.B. den Energieaustausch durch natürliche Turbulenz der Strömung, durch erhöhte Turbulenzen erzeugt von Abstandshaltern). Ihrer Definition nach [3] liegt die in Abb. 2 wiedergegebene Modellvorstellung zugrunde. Die Mischrate zwischen zwei benachbarten Teilkanälen i und j eines Kernelementes ergibt sich danach zu

$$\mu_{ij} = \frac{Q_{ij} - \lambda \cdot (T_i - T_j) \cdot \frac{S_{ij}}{\Delta y_{ij}} \cdot \Delta x}{\dot{M}_i (H_i - H_j) \cdot \Delta x}$$

Sie gibt an, welcher Anteil der Energie eines Teilkanales längs des Strömungsweges mit den Nachbarkanälen ausgetauscht wird. Die bisherigen Untersuchungen zur Kühlmittelquervermischung in Flüssigmetallströmung bezogen sich hauptsächlich auf Bündel, bestehend aus hexagonal angeordneten Stäben, die mit Wendeldrähten oder Wendelrippen als Abstandhalter versehen waren [6,7]. Ergänzend hierzu wurden in [8] erste Ergebnisse aus Experimenten an Bündeln mit gitterförmigen Abstandshaltern berichtet. Diese Untersuchungen wurden mittlerweile erweitert und ergänzt und sollen im folgenden zusammenfassend dargestellt werden.

2. Versuchsmethode

Die experimentelle Bestimmung der Mischrate wird in turbulenter Natrium-Strömung durchgeführt. Als Versuchsmethode wird die "Beheizungs-methode" verwendet. Sie beruht auf der Beheizung einzelner Stäbe in bestimmten Bündelpositionen (Zentralstab, Wandstab). Dies führt zu ausgeprägten radialen Temperaturunterschieden im Kühlmittel über den Bündelquerschnitt. Die radiale Temperaturverteilung wird mit Hilfe von Thermoelementen gemessen, welche am Bündelende im Strömungsmittelpunkte der Teilkanäle installiert sind. Aus den gemessenen Temperaturprofilen läßt sich die Mischrate sodann über

den errechneten Teilkanal-massedurchsatz und der dem Kanal zugeführten Wärmeleistung ermitteln. Dies geschieht mit Hilfe des MISTRAL-Rechenprogrammes [3] durch Anpassung errechneter und gemessener Temperaturverteilungen.

3. Versuchsaufbau

3.1 Teststrecke

Die Versuche wurden zunächst an einer Bündelgeometrie im Originalmaßstab durchgeführt, d.h. Stabdurchmesser, Stabteilung und Stabanordnung stimmten zwischen Modell und Original überein. Lediglich die Stabzahl je Bündel war auf 61 reduziert. Die beheizte Stablänge des Versuchsbündels wurde so gewählt, daß sie der aktiven Kernhöhe des Schnellen Reaktors entspricht. Um eine Aussage auch für Bündeln mit anderen Stabteilungsverhältnissen zu gewinnen, wurde ein ergänzender Versuch mit $P/D = 1,2$ durchgeführt.

Die Zahl der Stäbe im Bündel wurde so gewählt, daß sich sowohl im zentralen als auch im peripheralen Bündelbereich die Simulation der Strömungsverhältnisse in der Originalgeometrie durchführen ließ. Abschätzungen hierzu ergaben, daß die einem beheizten Stab benachbarten Teilkanäle über mindestens 2 Stabreihen der Geometrie des Originals entsprechen müssen. Daraus ergibt sich die für die Experimente erforderliche minimale Stabzahl von 61.

Die Versuche sollten bis in den für die Reaktorauslegung interessierenden Re-Zahlenbereich von etwa $Re = 1 \cdot 10^5$ gefahren werden oder die zu erfassenden Daten leicht auf Reaktorbetriebsverhältnisse extrapolierbar sein. Die erreichbaren Re-Zahlen liegen bei $Re \leq 8 \cdot 10^4$.

Dem beheizten Bündelteil von ca. 1000 mm Länge wurde eine genügend lange hydraulische Einlaufstrecke vorgeschaltet. Sie wurde auf 500 mm festgelegt. Damit ergibt sich $L/D_h \approx 100$.

Die geometrischen Daten der benutzten Modelle und des Brennelementes SNR-300 gehen aus folgender Gegenüberstellung hervor:

	Stabzahl	Stab- \emptyset mm	P/D	W/D	L _{beh} mm	L _{beh} /D _h
SNR - BE	169	6	1,32	1,25	950	175
Modell 1	61	6	1,32	1,28	960	190
				1,21	960	260
Modell 2	61	6	1,2	1,22	960	180

Zur Durchführung der Versuche wurde für jedes zu untersuchende P/D-Verhältnis ein Bündelaufnehmer konstruiert, der den Einbau der Bündel mit verschiedenen Abstandshaltern ermöglichte. Abb. 3 und 4 zeigen diese Testeinrichtungen. Für Versuche mit beheizten Stäben in Randpositionen wurden zur Vermeidung von radialen Wärmeverlusten die Bündelaufnehmer (Abb. 3 teilweise, Abb. 4 voll) isoliert gegenüber dem stagnierenden Natrium des Testbehälters ausgeführt. Zur Messung der Kühlmitteltemperaturen in den Teilkanälen ragten die Thermoelemente aus dem Meßgitter am Bündelende in die jeweiligen Teilkanäle hinein. Das Meßgitter diente gleichzeitig zur einwandfreien Distanzierung der Stäbe am Bündelende. Verschiedene Anordnungen der Thermoelemente im Meßquerschnitt sind aus Abb. 5 zu ersehen. Die wichtigsten Abmessungen und geometrischen Zuordnungen von Thermoelement, Meßgitter und Stab gehen aus Abb. 6 hervor. Die unbeheizten Stäbe des Bündels bestanden aus leeren Hüllrohren, die beheizten Stäbe aus elektrischen Heizstäben. Diese mußten im Interesse hoher Meßgenauigkeit hohe Stabileistungen liefern, damit große Temperaturunterschiede zwischen den Teilkanälen entstanden.

Neben der Herstellbarkeit und Verfügbarkeit war die einwandfreie Funktion der Hochleistungsstäbe Voraussetzung für diese Experimente [9,6]. Im Hinblick auf ihren Einsatz in strömendem Natrium wurden besondere Vorkehrungen für die betriebssichere Leistungszufuhr getroffen. Sie bestanden

- in der Überwachung der Temperaturen der Heizstabwandungen im Bereich der Flanschdurchführung und im Inertgasraum des Testbehälters sowie
- in der Nutzung einer Schnellabschaltvorrichtung mit Schaltzeiten im Milli-Sekundenbereich vom Eintritt eines Schadenereignisses am Heizstab bis zur Leistungsabsenkung.

3.2 Das Na-Kreislaufsystem

Die Untersuchungen wurden in einem Natrium-Kreislauf (Brennelementkreislauf NW 80) durchgeführt. Er bestand im wesentlichen aus dem Versorgungs- und Reinigungskreislauf und dem Schutzgassystem. Er besaß die für Natriumkreisläufe spezifischen Komponenten und war als 8er-Schleife aufgebaut. Abb. 7 zeigt das Schema dieses Kreislaufes. Elektromagnetische Pumpe, Durchflußmesser und Luftkühler waren in einem Teil des Kreislaufes angeordnet, dessen Maximaltemperatur 400°C betrug, während Erhitzer und Teststrecke für maximale Temperaturen von 600°C ausgelegt waren.

Ein Nebenkreis mit kleiner elektromagnetischer Pumpe, Durchflußmesser, Kaltfalle, Kühler und Oxidmeßgerät sorgte für die Reinheit des Flüssigmetalls und deren Meßmöglichkeit. Sie betrug während der Versuche im allgemeinen $<10 - 20$ ppm Oxid.

4. Versuchsparameter und Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen wurden an Bündeln mit gitterförmigen Abstandshaltern durchgeführt.

Als Parameter wurden variiert:

- Die Abstandshaltertypen (Wabengitter, Röhrchengitter),
- der Massendurchsatz im Bündel (Re-Zahl),
- verschiedene Abstützlängen (H) der Stäbe im Bündel, was durch unterschiedliche Anzahl von Abstandshaltern im Bündel erreicht wird;
- verschiedene Entfernungen zwischen Meßgitter und Abstandshalter (Δh);
- das Verhältnis von Stabmittenabstand zum Stabdurchmesser (P/D) bei Wabengitter-Abstandshaltern.

Die wichtigsten Abmessungen der untersuchten Bündelgeometrien und Abstandshalter sind in Tab. 1 zusammengefaßt, weitere Angaben zu den Abstandshaltern sind in Abb. 8 enthalten. Die Abstandshalter waren jeweils in gleichmäßigen axialen Abständen im Bündel angeordnet.

Die Experimente wurden in drei Stufen durchgeführt:

- Bei mehreren Massendurchsätzen und Kühlmitteltemperaturen (Re-Zahlen) wurde im isothermen Zustand der Temperaturabgleich aller Thermoelemente durchgeführt (Nulleistungsversuch).
- Bei konstantem Massendurchsatz wurde die Heizleistung des Stabes hochgefahren, um die Abhängigkeit des radialen Temperaturprofils von der Heizleistung zu ermitteln.
- Bei konstant gehaltenen Leistungen des/der beheizbaren Stabes/Stäbe wurden verschiedene Massendurchsätze gefahren, um die Abhängigkeit des radialen Temperaturprofils von der Reynoldszahl festzustellen.

Die Versuche wurden bei Na-Temperaturen von 300 - 500° C gefahren. Alle interessierenden Meßgrößen, wie Massendurchsatz, Strom und Spannung des Heizstabes sowie alle Temperaturen wurden automatisch abgefragt. Für jeden Versuch wurden bei konstanten Betriebsbedingungen 10 Meßreihen über Stanzer auf Lochstreifen gegeben. Die Meßwerterfassungsanlage verarbeitet maximal 10 Meßwerte/sec. Die Abfragegeschwindigkeit war damit genügend hoch, um Temperaturschwankungen des Kreislaufes zu eliminieren. Letztere betragen etwa $\pm 1^{\circ}$ C/min. Auf im Mittel 60 Meßwerte pro Meßreihe bezogen, ergaben sich damit Temperaturvariationen im Bereich $\approx 0,1^{\circ}$ C.

5. Versuchsauswertung

Die Auswertung der Versuche erfolgte in folgenden Schritten:

- Bereitstellung der Auswertediagramme. Diese wurden mit Hilfe von MISTRAL [3] berechnet. Sie liefern für die interessierenden Fälle die Kühlmitteltemperaturen in den Teilkanälen des Bündels in Abhängigkeit von der Mischrate. Die Stoffwerte für Natrium werden nach [10] verwendet.

- Der Vergleich der gemessenen mit den gerechneten Temperaturprofilen liefert die Mischrate. Es wurden hierbei Mittelwerte der im gleichen Abstand vom jeweils beheizten Stab gemessenen Temperaturen der Teilkanäle benutzt. Die Meßwerte wurden mit Hilfe der im isothermen Betriebszustand ermittelten Temperatur-Korrekturfaktoren korrigiert. Für ein Versuchsbündel mit Röhrchenabstandshalter ist dieses Auswerteverfahren in Abb. 9 wiedergegeben. Es zeigt sich, daß der Vergleich von rechnerisch ermittelten mit experimentell bestimmten Kanaltemperaturen die Größe der Mischrate weitgehend unabhängig von der Teilkanalposition ergibt.

6. Versuchsergebnisse

Für die Wiedergabe der Ergebnisse und der daraus ermittelten Größen sind folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- Die Größe der Mischrate wird nach vorstehender Versuchsauswertung ermittelt und angegeben, d.h. sie basiert auf der im MISTRAL-Rechenprogramm benutzten Modellvorstellung. Sie ist hier bezogen auf einen Teilkanal mit 3 Austauschquerschnitten.
- Es existieren eine Vielzahl von Rechenprogrammen zur thermo- und fluiddynamischen Auslegung von Bündelgeometrien [11]. Sämtliche Programme benötigen Werte für die Größe der Kühlmittelquervermischung der jeweiligen Bündelgeometrie (unter Beachtung der Abstandshaltertypen). Da sich die Modelle verschiedener Programmsysteme unterscheiden, bestimmen sie bei vorgegebenem Temperaturprofil unterschiedliche Mischraten. Deshalb werden hier auch gemessene Temperaturprofile für die eingesetzten Bündelgeometrien mit den zugehörigen Betriebsdaten angegeben.

Ergebnisse der Temperaturprofilmessungen sind für die untersuchten Abstandshalter und P/D-Verhältnisse in den Abb. 10 bis 14 dargestellt, wobei die Differenz zwischen den gemessenen Teilkanaltemperaturen und der Eintrittstemperatur als Funktion der Entfernung des Unterkanals vom beheizten Zentralstab aufgetragen ist. Als Parameter wurden sowohl die Stableistungen (Abb. 10, 13) als auch die Reynoldszahlen (Abb. 11, 12 und 14) betrachtet.

Es zeigt sich, daß die Kühlmitteltemperaturen in den Teilkanälen mit zunehmender Entfernung vom beheizten Zentralstab stark abnehmen und in den vom Zentralstab am weitesten entfernten Teilkanälen bei fast allen betrachteten Anordnungen die Na-Eintrittstemperatur herrscht. Die radiale Ausbreitung des Temperaturprofiles ist umso größer, je

höher die Stableistung bei konstant gehaltener Re-Zahl oder je geringer die Reynoldszahl bei konstant gehaltener Stableistung ist.

Aus derartig gemessenen Kühlmitteltemperatur-Profilen ermittelte Mischraten sind für die verschiedenen Abstandshaltertypen in den Abb. 15 bis 17 wiedergegeben, wobei die Mischraten als Funktion der Re-Zahlen aufgetragen wurden. Die Abstützlängen (H) und die Entfernungen Meßquerschnitt-Abstandshalter (Δh) sind jeweils mit angegeben. Darüberhinaus zeigt Abb. 15 Ergebnisse aus Wiederholungsversuchen (gleiches Bündel, Meßgitter 2 (Abb. 5)) und Abb. 16 Ergebnisse, die aus den gemessenen Temperaturprofilen bei Beheizung des Wandstabes ermittelt wurden.

Daraus ergibt sich allgemein:

- Die Mischraten sind im interessierenden Bereich $Re > 3 \cdot 10^4$ weitgehend unabhängig von der Re-Zahl.
- Für konstant gehaltenes P/D-Verhältnis ($P/D = 1,32$) läßt sich feststellen:
 - . für die Bündel mit Wabengittern ergeben sich minimale Mischraten von etwa 2 %/cm, für das Bündel mit Röhrchengittern von etwa 1 %/cm im betrachteten Reynoldsbereich $10^4 \leq Re \leq 8 \times 10^4$.
 - . Der Abstand zwischen dem letzten Abstandshalter im Bündel und der Meßebeene beeinflusst im betrachteten Bereich $50 \leq \Delta h [\text{mm}] \leq 160$ die Meßergebnisse nicht.
 - . Es ergeben sich etwa die gleichen Mischraten bei Beheizung von Wand- oder Zentralstab.
 - . Die Größe der Mischrate wird durch Änderung der Abstützlänge im Bereich $150 \leq H [\text{mm}] \leq 400$ nicht beeinflusst.
- Abnehmendes P/D-Verhältnis bei konstantem Stabdurchmesser ergibt für den untersuchten Wabengitter-Abstandshalter zunehmende Mischraten. Hierbei wurden Minimalwerte von etwa $\mu = 5.5$ %/cm ermittelt.

Der Grund hierfür könnte sowohl in der reduzierten Austauschlänge Δy (verminderte Teilkanalmittenabstände [12, 13]) als auch im erhöhten Versperrungsverhältnis des Abstandshalter bei den Bündeln mit reduziertem P/D-Verhältnis liegen.

Trägt man sämtliche für das Stabteilungsverhältnis $P/D = 1,32$ ermittelten Ergebnisse für die Bündel mit einem Abstandshaltertyp je in einem Diagramm auf (Abb. 18), so ergibt sich ein relativ enges Band, in dem sämtliche Daten des interessierenden Re-Zahlenbereiches liegen. In diesem Streuband sind enthalten die Werte aus Untersuchungen mit unterschiedlichen

- Abstützlängen der Stäbe im Bündel
- Entfernungen Meßgitter-Abstandshalter
- Beheizten Stabpositionen (Zentral-, Wandstab)
- Ausstattungen der Meßgitter mit Thermoelementen.

Es können daher für die Kernelementauslegung mit den hier untersuchten geometrischen Verhältnissen folgende Mischraten empfohlen werden:

Wabengitter - Abstandshalter $\mu = 3 \pm 1 \text{ \%/cm}$
Röhrchengitter - Abstandshalter $\mu = 1,5 \pm 0,5 \text{ \%/cm}$

7. Meßunsicherheiten

Zur Meßunsicherheit ist festzuhalten:

- Die Messungen wurden unter Wiederholungsbedingungen durchgeführt (Zeitabstand bis 6 Monate).
- Es wurden geeichte Durchflußmesser, bei den ersten Versuchsserien auch geeichte Thermoelemente, verwendet. Wegen der sehr langwierigen Auswertung wurden im weiteren Verlauf der Versuche unterschiedliche Anzeigen der Thermoelemente durch die sogenannten Nulleistungsversuche bestimmt und die daraus ermittelten Korrekturfaktoren bei der Auswertung berücksichtigt. Da für die Auswertung wesentlich Temperaturdifferenzen interessierten, war die exakte Messung der absoluten Temperaturen (geeichte Thermoelemente) von untergeordneter Bedeutung.

- Es muß unterschieden werden zwischen der statistischen Schwankung eines Meßwertes auch unter Beachtung der Unsicherheit der Meßwerterfassungsanlage und den durch die örtlichen Lagen der Thermoelemente in den Teilkanälen des Bündels verursachten Unsicherheiten.

Die Fehlergrenzen von Durchsatz-, Leistungs- und Temperaturmessungen betragen:

- Durchflußmesser (geeicht) inclusive Anzeige: $\leq \pm 4$ %
- Leistung der Heizstäbe inclusive Anzeige: $\leq \pm 1$ %
- Thermoelemente inclusive Anzeige: $\leq \pm 0,2$ %

Die während der Versuchsdurchführung aufgetretenen statistischen Schwankungen der einzelnen Meßwerte, die zur Mittelwertbildung aus jeweils 10 Meßreihen verwendet wurden, führen zu folgenden Standardabweichungen σ (statistische Sicherheit 95 % nach DIN 1319):

- Durchfluß: $\pm 2,5$ %
- Leistung: $\pm 0,3$ %
- Temperatur: $\pm 0,1$ %

(Anzeigenvergleich von bis zu 70 Thermoelementen über 10 Meßreihen \nearrow 700 Meßwerte).

Die Messungen von Temperaturen waren damit im Temperaturniveau 300-500⁰ C mit einer Unsicherheit von $\leq 0,5^0$ C möglich.

Die installierten Thermoelemente von 0,5 bzw. 0,25 mm Durchmesser messen lokale Temperaturen. Die Anzeigen von Thermoelementen, die in Teilkanälen installiert sind, welche nominal auf gleichem Radius zum beheizten Stab liegen, werden gemittelt und diese gemittelten Temperaturen quasi als "mittlere Teilkanaltemperaturen betrachtet. Durch die Einbautoleranzen ergeben sich unterschiedliche Einbautagen und damit unterschiedliche Anzeigen der Thermoelemente, je nachdem, ob diese mehr oder weniger zum beheizten Stab hin liegen. Insgesamt ergibt sich aus der möglichen unterschiedlichen Einbaulage der Thermoelemente eine einer "Toleranzfläche" ($\approx 10\%$ der Teilkanalfläche) zuzuordnende Temperatur.

Unter Beachtung der Unsicherheiten aus der Thermoelementlage ergeben sich gegenüber der statistischen Schwankung einer einzelnen Thermoelementanzeige oder der Anzeige aller Thermoelemente im Nulleistungsversuch wesentlich größere Abweichungen gemessener lokaler Werte vom daraus errechneten Mittelwert vergleichbarer Thermoelemente. Die Vertrauensgrenzen auf 1 Versuchspunkt bezogen werden daher größer. Sie werden beeinflusst durch die Zahl und den Zustand der für die Mittelwertbildung benutzten Thermoelemente und sind daher bei neu installierten Meßgittern ohne defekte Thermoelemente kleiner als nach längeren Betriebszeiten. Die Vertrauensgrenzen für die Teilkanalauflaufspannen liegen für die i.a. ≤ 6 Thermoelemente auf gleichen Radien vom beheizten Stab für die statistische Sicherheit 95 % maximal zwischen ± 15 % und ± 30 %.

Beachtet man, daß für jede Abstandshalteranordnung im Bündel mindestens 25 Versuchspunkte gefahren und darüber hinaus Wiederholungsversuche - auch mit Meßgittern geänderter Thermoelementanordnungen - durchgeführt wurden, so reduzieren sich die Vertrauensgrenzen wesentlich und liegen für die statistische Sicherheit 95 % dann zwischen ± 2 % und ± 6 %. Dies führt zu Unsicherheiten in der Mischrate von ± 10 % bis ± 30 %.

Die Unsicherheit der Durchsatzmessung geht hauptsächlich auf die Unsicherheit der Reynoldszahl ein. Für eine Fehlergrenze der dynamischen Zähigkeit und des benetzten Umfangs von je ± 1 % ergeben sich Unsicherheiten der Re-Zahl von ± 5 % bis ± 10 %.

8. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Die Größe der Kühlmittelquervermischung (Mischrate) zwischen benachbarten Bündelteilkanälen wurde in 1:1 Modell-Experimenten an 61 Stabbündeln mit gitterförmigen Abstandshaltern in Natrium-Strömung untersucht. Als Parameter wurden der Abstandshaltertyp, die Re-Zahl, die Abstützlänge der Stäbe im Bündel, die Entfernung Meßgitter-Abstandshalter sowie das Verhältnis Stabteilung zu Stabdurchmesser (P/D) variiert.

Es zeigte sich, daß die Mischraten im interessierenden Bereich weitgehend unabhängig von der Re-Zahl sind. Sie werden hauptsächlich durch die Geometrie des verwendeten Abstandshaltergitters und das P/D-Verhältnis des Bündels beeinflusst. Die Variation der Meßwerte um den Mittelwert beträgt maximal $\pm 35\%$.

Um den Einfluß verschiedener Mischraten auf die Kühlmittel-Temperaturverteilung im Austrittsquerschnitt zu bestimmen, wurden in Abb. 19 rechnerisch und experimentell bestimmte Temperaturverteilungen für ein 61-Stabbündel bei Beheizung von nur 2 Stäben aufgetragen. Die berechneten Werte zeigen, daß die Genauigkeit und Variationsbreite der ermittelten Mischraten derartige Berechnungen nur unwesentlich beeinflussen, wenn sie größenordnungsgemäß richtig berücksichtigt wird. Erst Abweichungen um Faktoren gegenüber den ermittelten Werten verändern das Temperaturfeld wesentlich.

9. Literatur:

- /1/ G. Straub
ARTIS, Ein Rechenprogramm zur Berechnung der
Temperaturverteilung in hexagonalen Stabbündeln
(unveröffentlicht)
- /2/ R. Nijssing, W. Eifler
HERA-1A, Heat Transfer in Rod Assemblies,
EUR 4905 e (1973)
- /3/ W. Baumann
MISTRAL-II, Thermohydraulischer Mischströmungs-
algorithmus für Stabbündel,
KFK 1605 (Juni 1972)
- /4/ K. Doetschmann
THESYS - Ein FORTRAN-Programm zur Berechnung der
dreidimensionalen nominellen Temperaturverteilung
in schnellen Reaktorkernen,
KFK 1997 (1974)
- /5/ SNR-300 MWe Prototypkernkraftwerk mit Schnellem
Natriumgekühltem Reaktor, INTAT, 1971
(unveröffentlicht)
- /6/ H. Hoffmann
Experimentelle Untersuchungen zur Kühlmittelver-
mischung und zum Druckabfall in Stabbündeln mit
wendelförmigen Abstandshaltern. Einfluß der
Ergebnisse auf die Auslegung von Brennelementen
schneller natriumgekühlter Reaktoren,
KFK 1843 (1973)
- /7/ E. Baumgärtner, H. Hoffmann
Untersuchungen zur Kühlmittelquervermischung in
natriumgekühlten Brennelementen,
KFK 1275/2 (Okt. 1975) S. 126 - 8

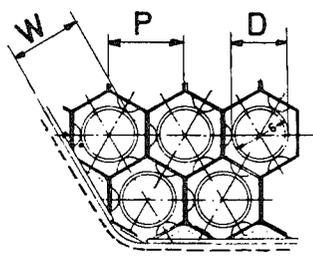
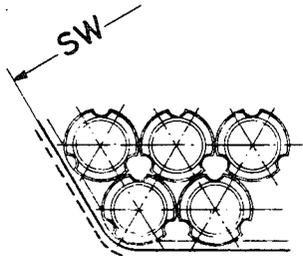
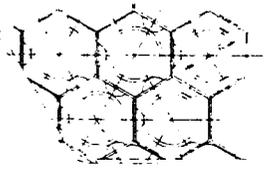
- /8/ H. Hoffmann, E. Baumgärtner
Experimental Investigations of the Thermodynamik
Bahaviour of Fast Breeder Reactor Fuel Elements
with different Spacer Types,
IAEA - SM - 173/20, Brüssel, 1973
- /9/ V. Casal
Heizstäbe mit indirekter Widerstandsbeheizung zur
Simulierung von Kernbrennstäben,
KFK 894, März 1969
- /10/ A. Pee
Stoffdaten von Natrium,
KFK 924, Febr. 1969
- /11/ Thermo- und fluiddynamische Unterkanalanalyse der
Schnellbrüter-Brennelemente und ihre Relation zur
Brennstabmechanik,
Seminar der Fachgruppe Thermo- und Fluiddynamik
der KTG im DATF am 11.3.1975 in Bensberg,
KFK 2232, März 1975
- /12/ W. Baumann
Cross Mixing by Natural Turbulence in Fuel Element-
Bundles,
Atomkernenergie 14, Jg. (1969) H.2 (107-111)
- /13/ W. Baumann, R. Möller
Experimental Study of Coolant Cross-Mixing in
Multirod-Bundles,
Atomkernenergie 14. Jg. (1969) H.5 (298-304)

10. Nomenklatur:

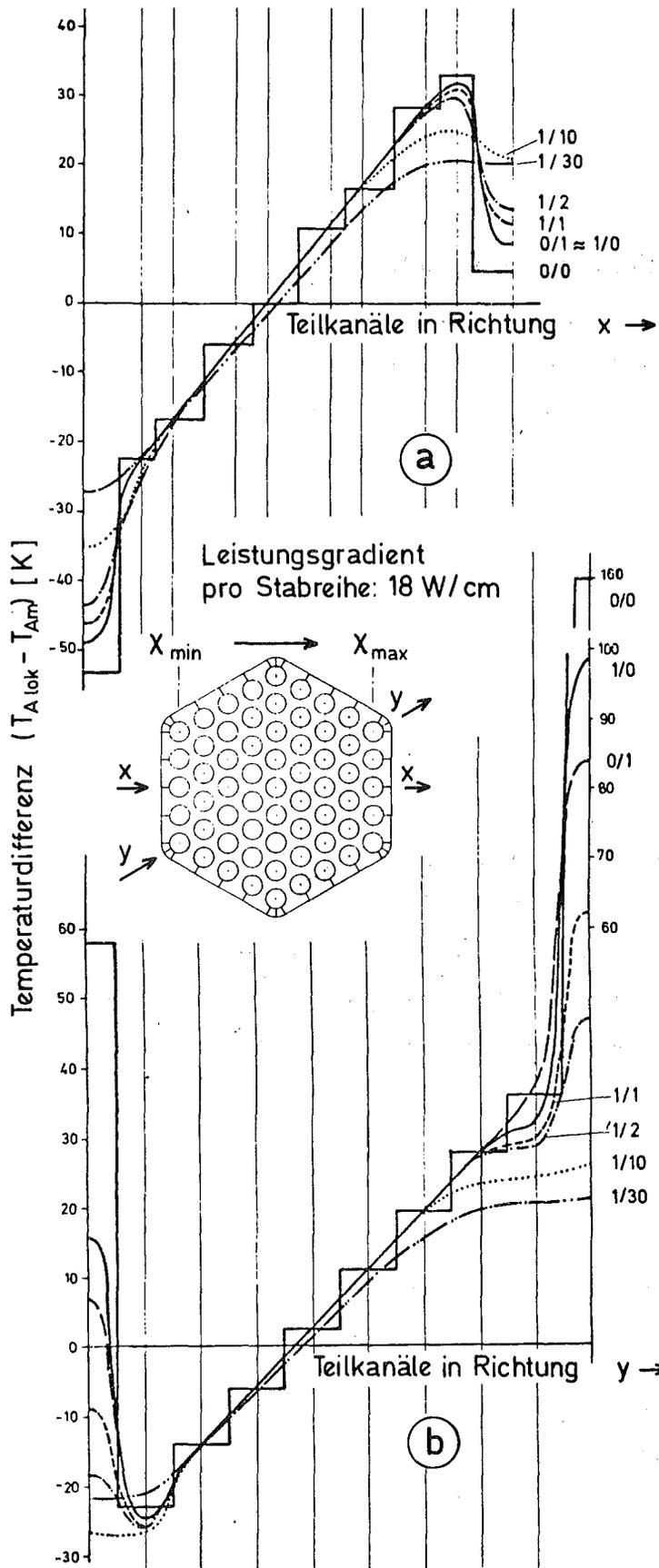
D	Stabdurchmesser
$D_h = 4F/U$	hydraulischer Durchmesser
F	freie Strömungsfläche
H	mittlere Enthalpie
H	Abstützlänge der Stäbe im Bündel
	Entfernung Abstandshalter-Abstandshalter (Abb. 8)
Δh	Entfernung Meßebene-Abstandshalter (Abb. 8)
L	Bündellänge
L_{beh}	beheizte Bündellänge
L_h	hydrodynamische Einlauf­länge
\dot{M}	Massenstrom
P	Stab­mit­ten­ab­stand
Q_{ij}	Wärmestrom vom Kanal i nach Kanal j
$Re = w \cdot D_h / \nu$	Reynoldszahl
S	engster Stababstand
T	absolute Temperatur
t	Temperatur
U	Umfang (benetzt)
W	Wandabstand (gem. Tab. 1)
w	mittlere Kühlmittelgeschwindigkeit im Bündel
Δx	axiale Längeneinheit
Δy	Mittelpunktabstand benachbarter Teilkanäle
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz
λ	Wärmeleit­zahl
μ	Mischrate pro Kühlkanal
μ_{ij}	Mischrate zwischen Kanal i und Kanal j
ν	Kinematische Zähigkeit
ψ_i	dem Kanal i pro Längeneinheit zugeführte Wärme
χ	Stablängenleistung

Indices:

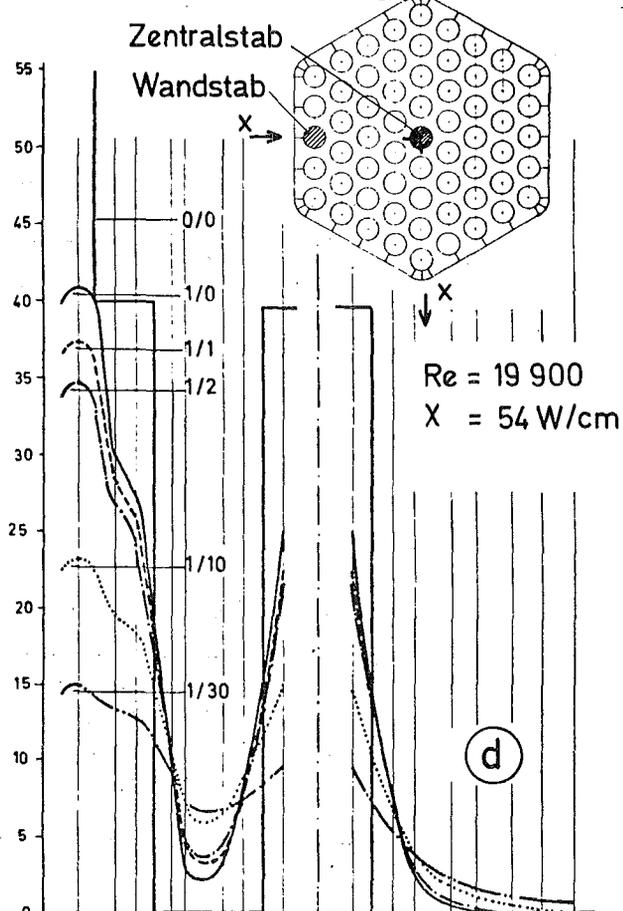
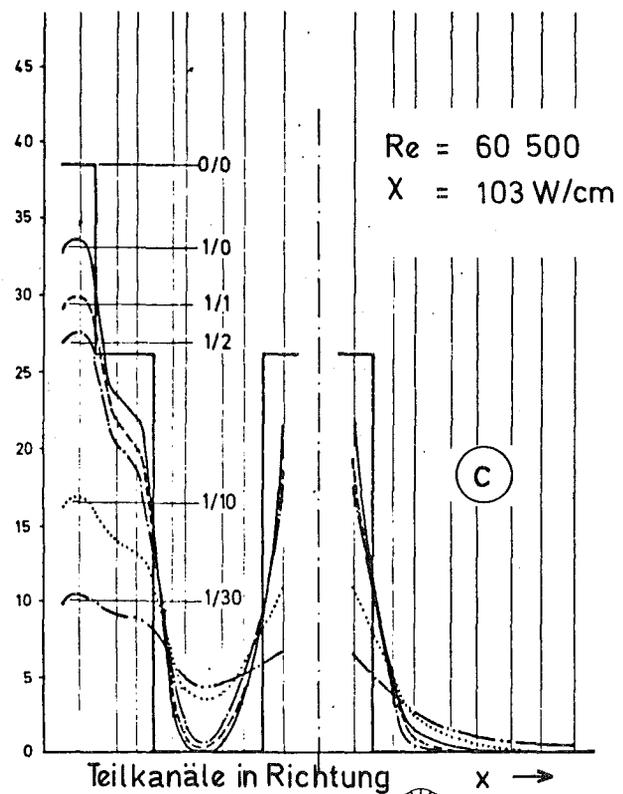
A	Austritt
E	Eintritt
lok	lokal
m	mittel
i, j, ...	Kanal i, j, ...
ij	von Kanal i nach Kanal j

Art des Abstandshalters:				
		Wabengitter	Röhrchengitter	Wabengitter
Stabdurchmesser (D)	mm	6,0	6,0	6,0
Stabteilung (P)	mm	7,9	7,9	7,2
P/D-Verhältnis	-	1,317	1,317	1,2
Wandabstand (W)	mm	7,66	7,24	7,3
W/D-Verhältnis	-	1,28	1,21	1,22
Innere Schlüsselweite				
Elementkasten	mm	64,0	63,2	58,5
Wandstärken:				
- Elementkasten	mm	2,0	2,0	0,5
- Rohre	mm	0,4	0,4	0,4
Kastenradius (innen)	mm	4,0	4,0	3,5
Bündellängen	mm	1467	1467	1460
Abstützlängen der				
Stäbe im Bündel (H)	mm	150	150 200 400	150
Entfernung Meßebene-				
Abstandshalter(Δh)	mm	50 100	80 60 160 60	50
Meßgitter Nr. eingesetzt:		① ②	② ③	④ ⑤

TAB. 1 GEOMETRIEN UND ABMESSUNGEN DER 61-STABBÜNDEL MIT GITTERFÖRMIGEN ABSTANDSHALTERN



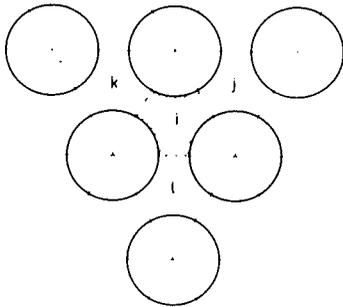
Alle 61 Stäbe beheizt



2 Stäbe von 61 beheizt

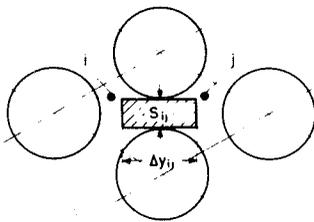
(0/0): ohne Energie Austausch
 (1/10): mit Wärmeleitung, mit Quervermischung (10%/cm)
 (P/D = 1,32; D = 6 mm)

Abb. 1 Kühlmitteltemperaturen am Austritt eines 61-Stabbündels mit Röhrengitter-Abstandshaltern



Wärmebilanz des Kühlkanals i:

$$\psi_i \Delta X - Q_{ij} - Q_{ik} - Q_{il} - \dot{M}_i \cdot \Delta H_i = 0 \quad (1)$$



Energietransport durch Kühlmittelvermischung und Wärmeleitung:

$$Q_{ij} = \mu_{ij} \dot{M}_i \Delta X (\bar{H}_i - \bar{H}_j) + \lambda (\bar{T}_i - \bar{T}_j) \frac{S_{ij}}{\Delta y_{ij}} \Delta X \quad (2)$$

Definitionsgleichung für die Mischrate aus (2):

$$\mu_{ij} = \frac{Q_{ij} - \lambda (\bar{T}_i - \bar{T}_j) \frac{S_{ij}}{\Delta y_{ij}} \Delta X}{\dot{M}_i (\bar{H}_i - \bar{H}_j) \Delta X}$$

Abb. 2 Gleichungen für Wärmebilanz und Energietransport nach [3]

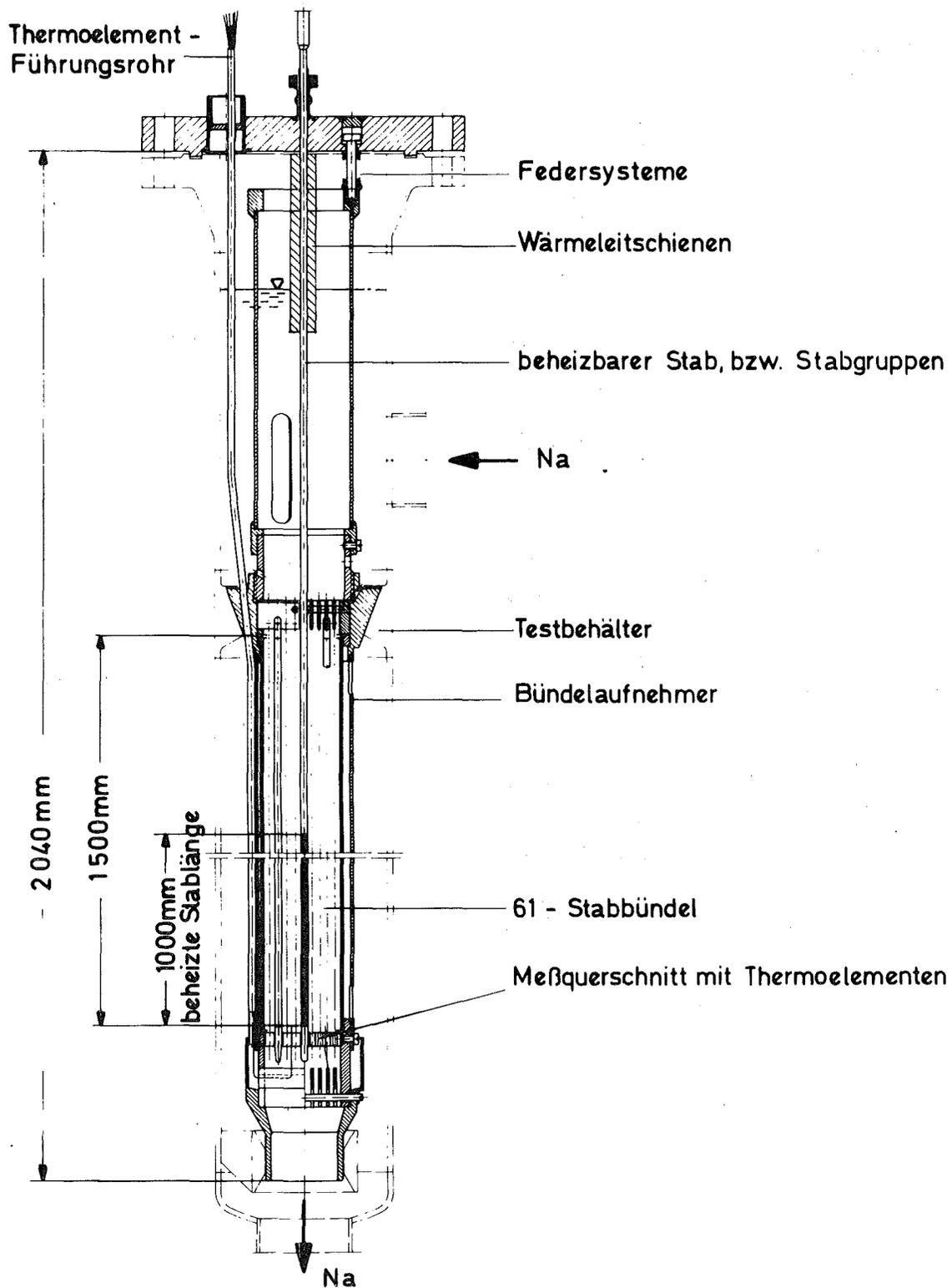


Abb. 3 Teststrecke zur Untersuchung der Kühlmittelquervermischung in strömendem Natrium ($P/D=1,32, D=6\text{mm}$)

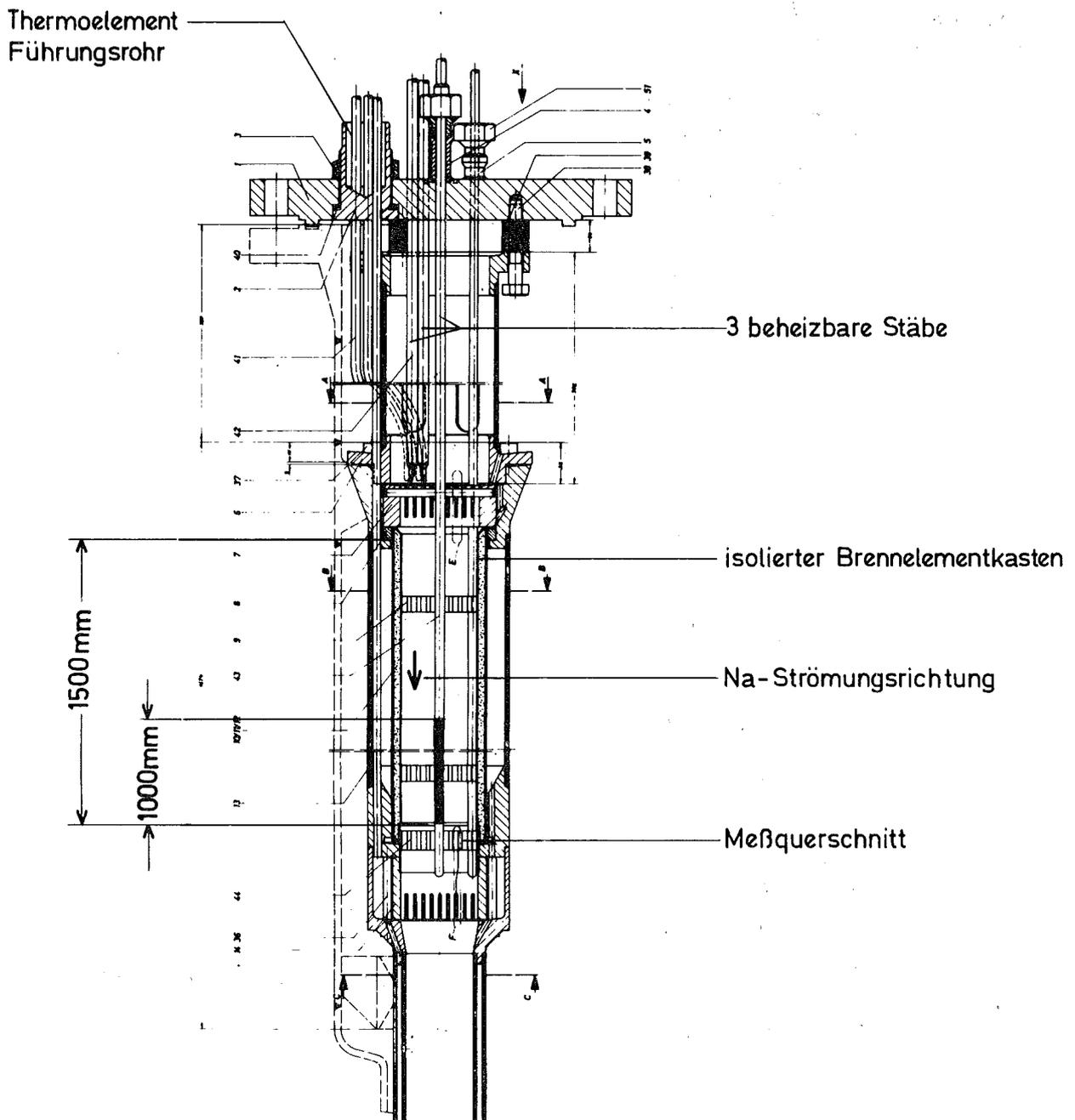


Abb. 4 Teststrecke zur Untersuchung der Kühlmittelquer-
vermischung in strömendem Natrium ($P/D=1,2$; $D=6\text{mm}$)

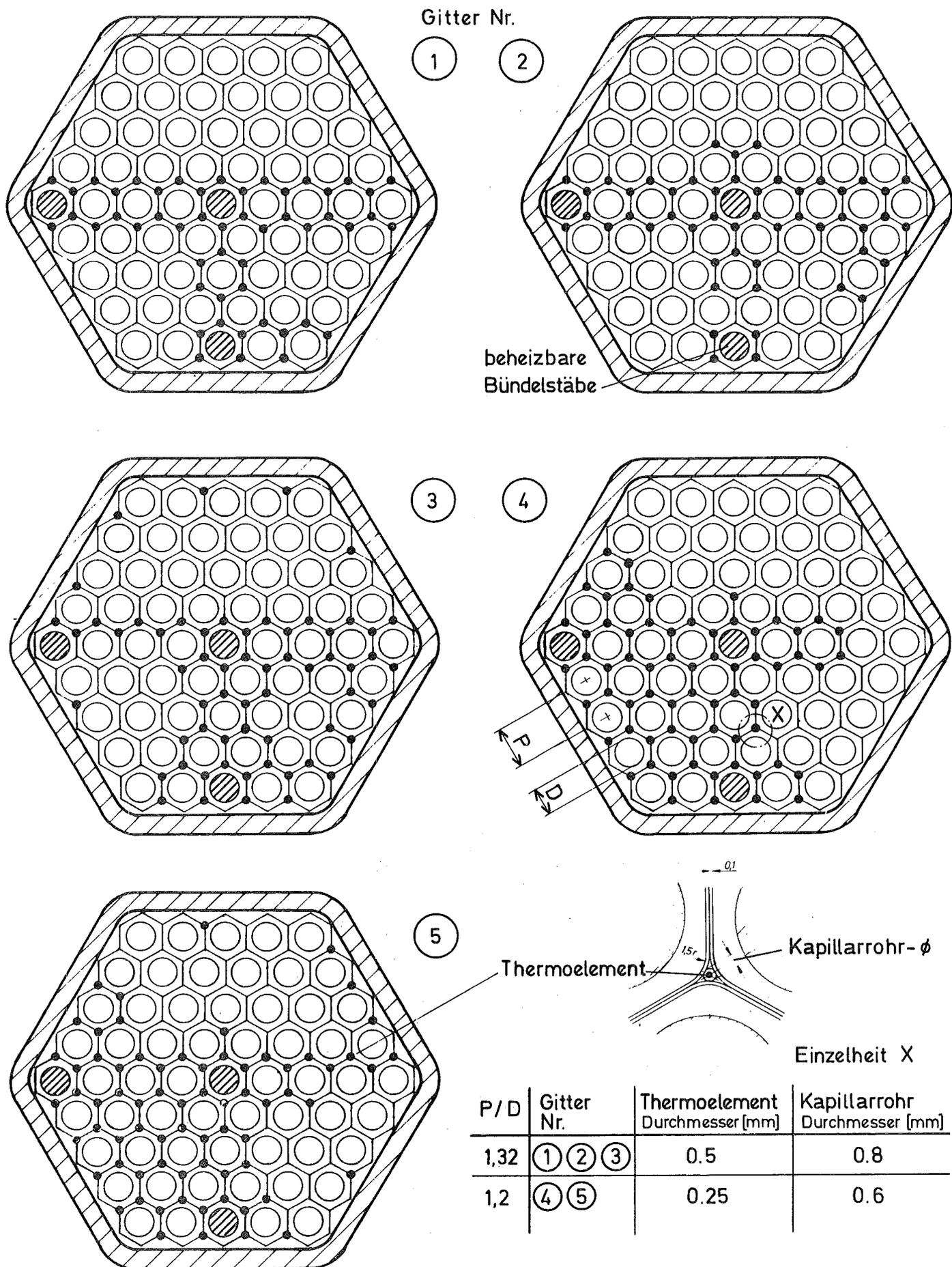


Abb. 5 Untersuchungen der Temperaturverteilungen im Kühlmittelaustrittsquerschnitt eines Bündels. Lage der Thermoelemente im Meßgitter des 61-Stabbündels.

P/D	1,32	1,2
a [mm]	5	4
b [mm]	7	6
c [mm]	0,5	0,25

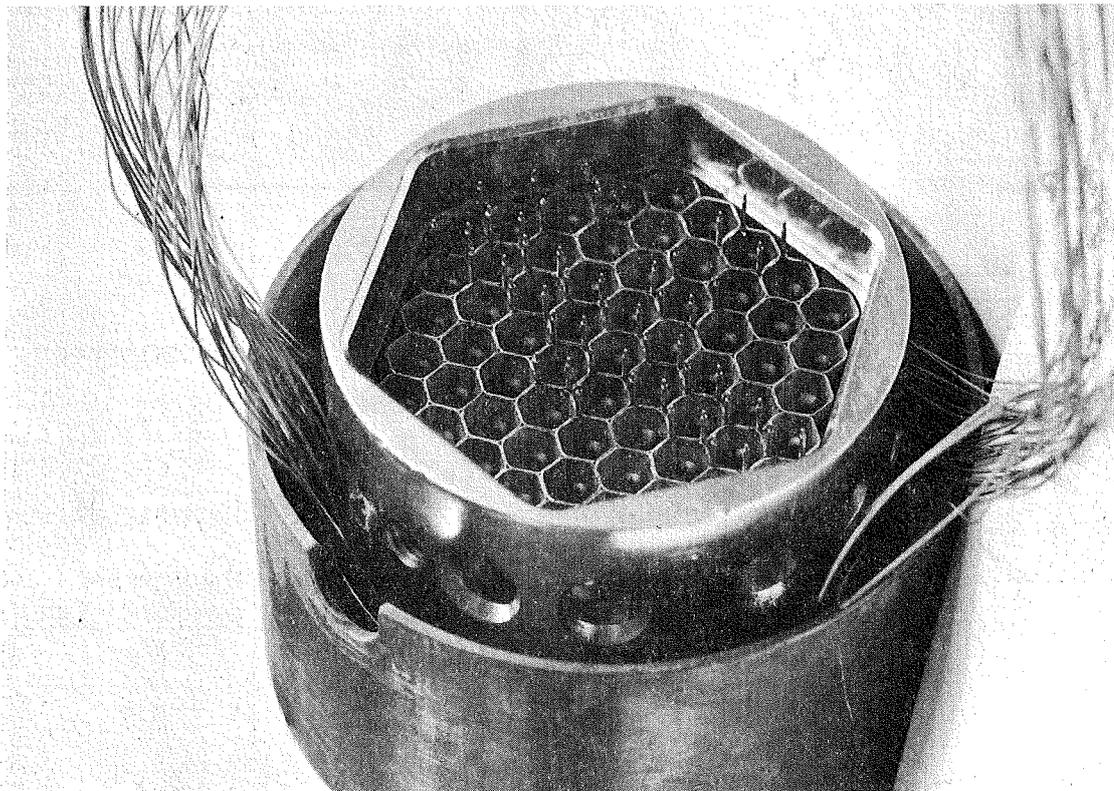
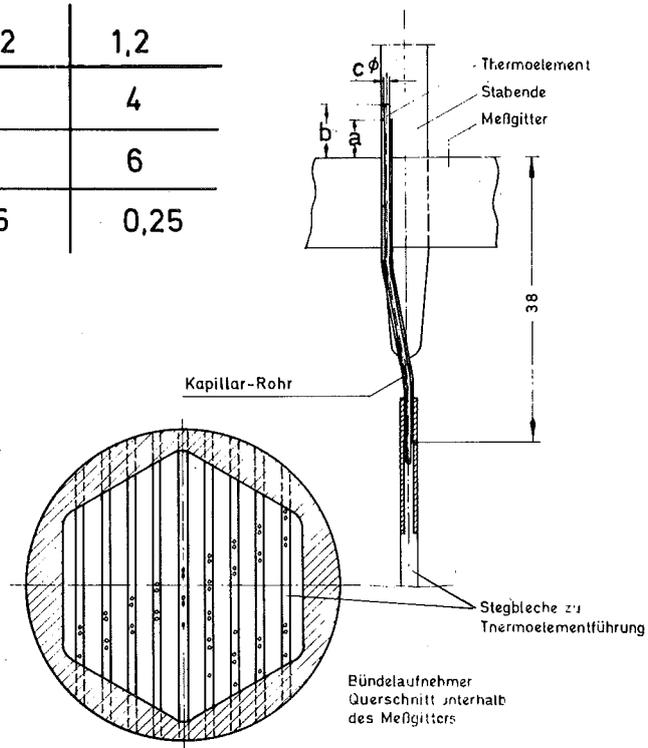


Abb. 6 Zuordnung von Thermolement, Meßgitter, Kapillarrohr im Meßbereich am Brennstabende (P/D=1.32)

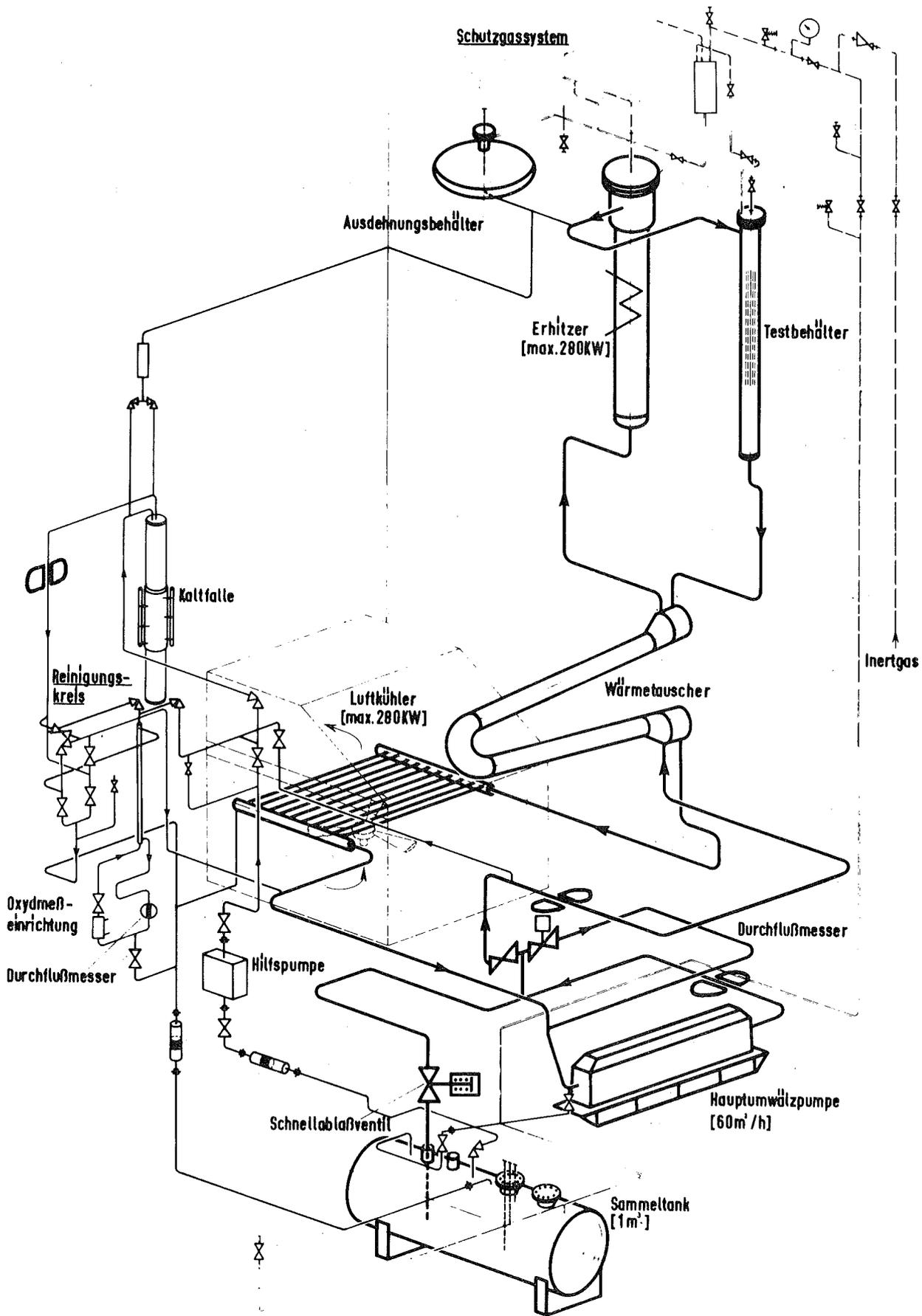


Abb. 7 Na-Prüfstand zur Untersuchung von Brennelementmodellen

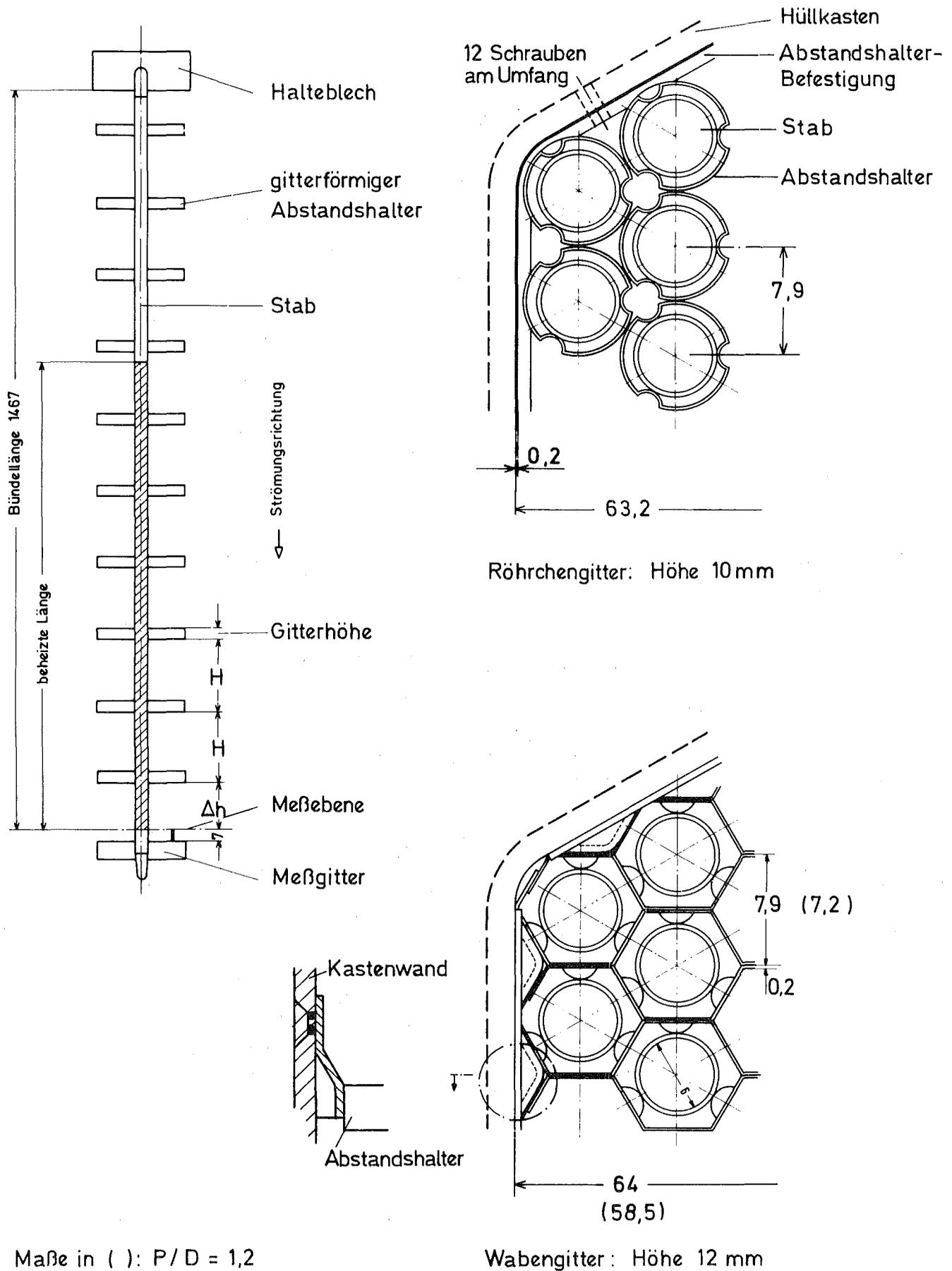


Abb. 8 Abstandshalter-Anordnungen u. Befestigungen im Modell

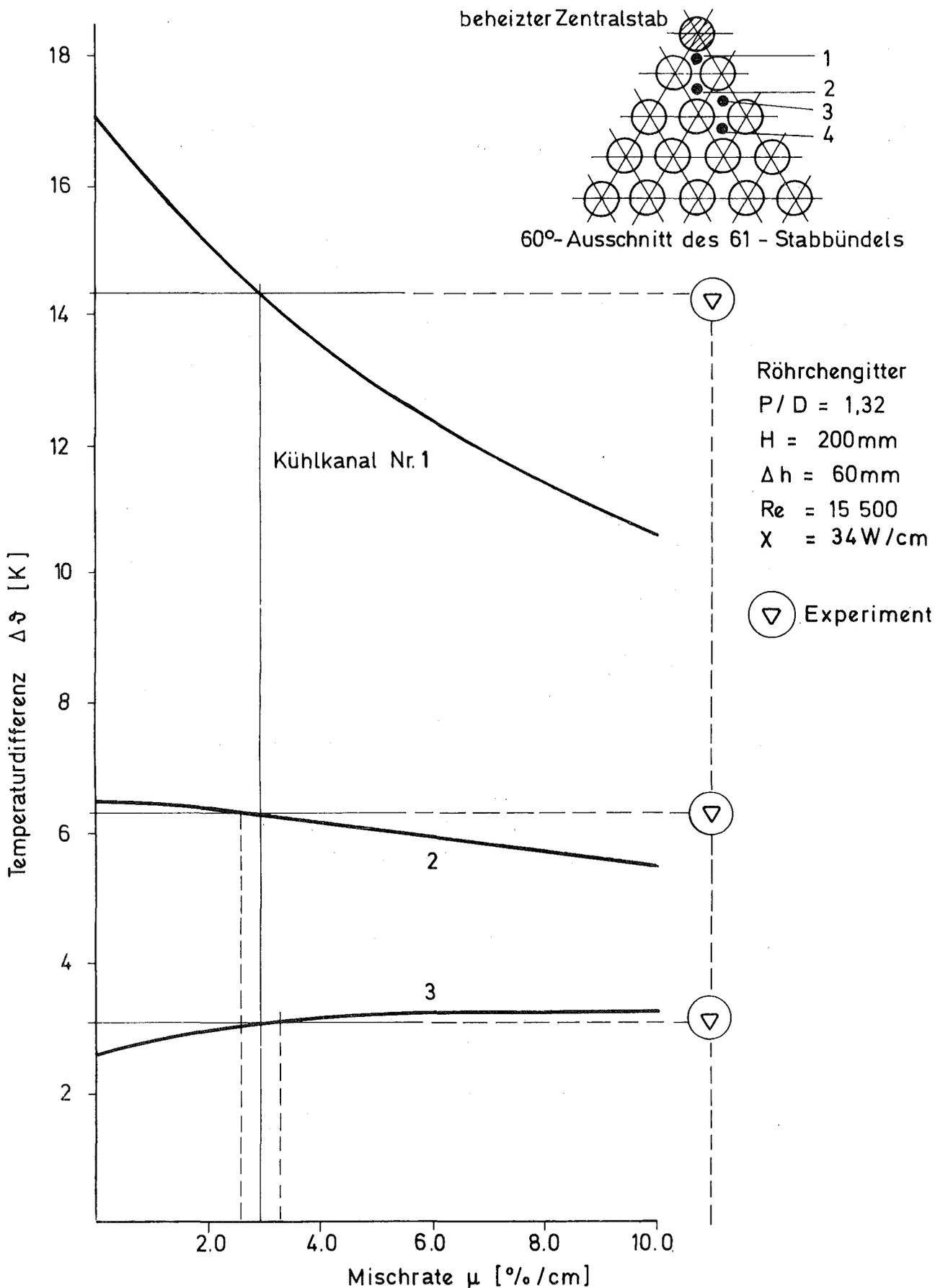
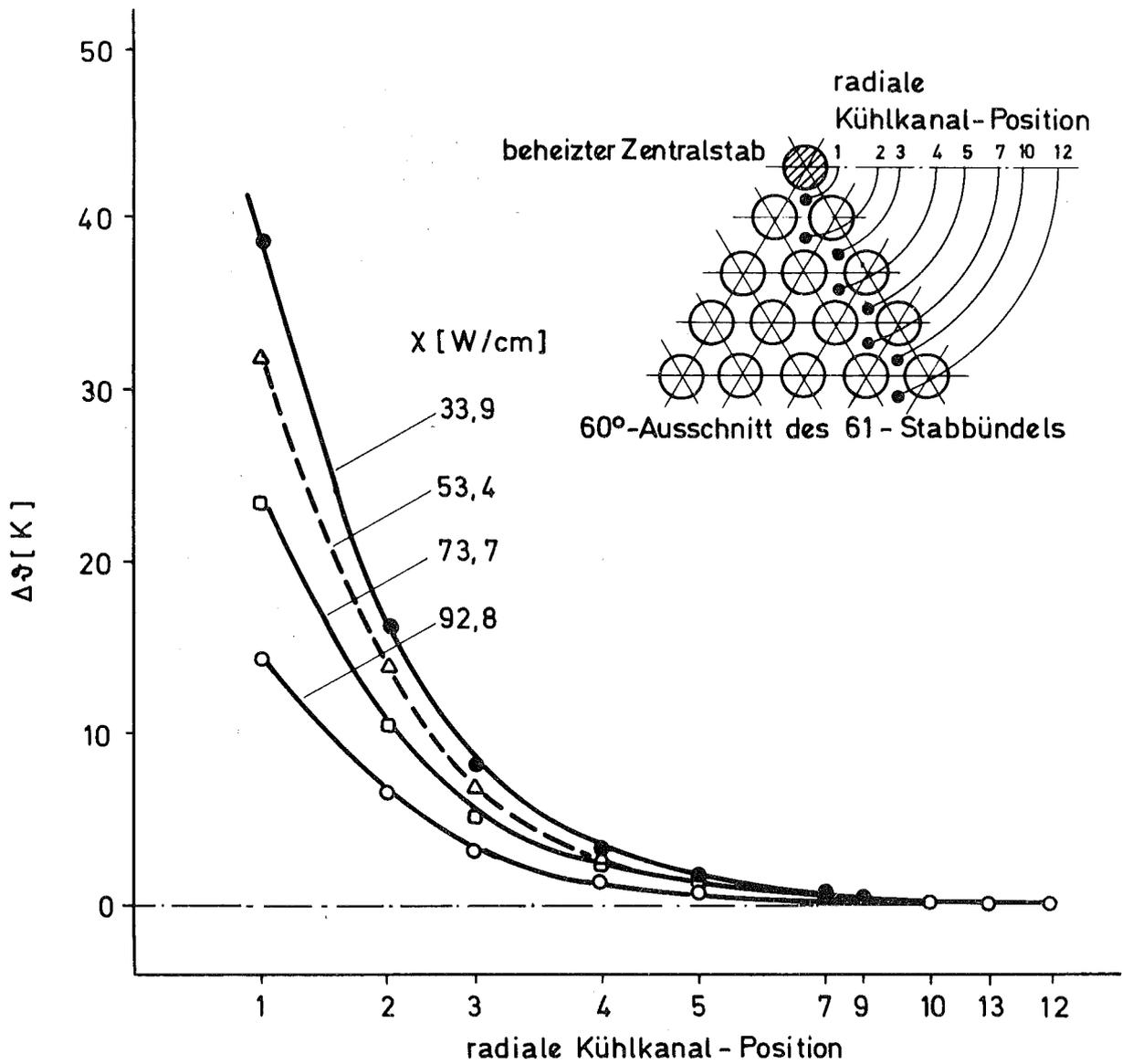


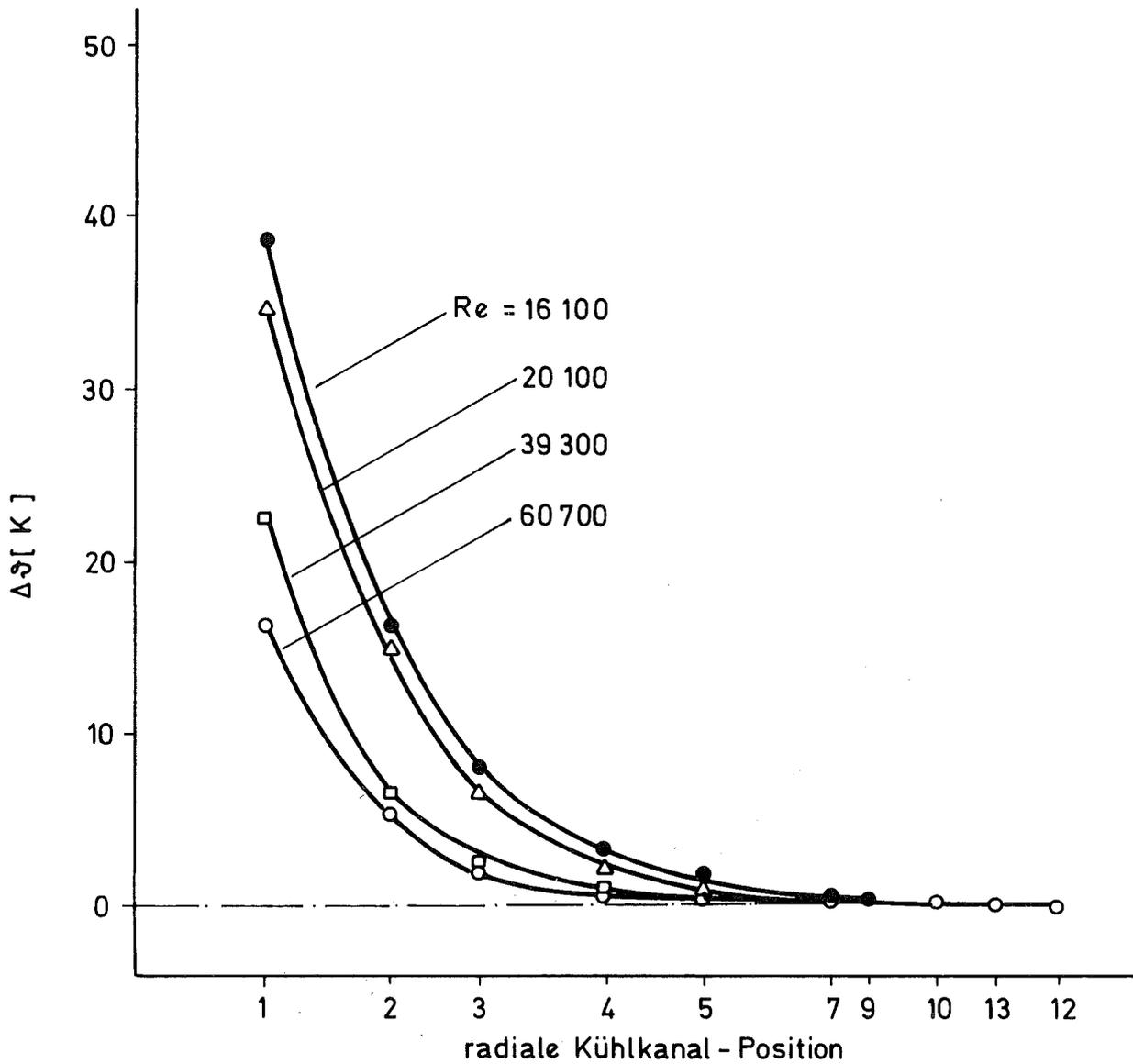
Abb. 9 Kühlmittel-Temperaturen $\Delta \vartheta = (T_A - T_E)_{\text{lok}}$ verschiedener Kühlkanäle im Auslaßquerschnitt eines 61-Stabbündels als Funktion der Mischrate. Vergleich von rechnerischen und experimentellen Werten



Abstandshalter: Röhrengitter ; $P / D = 1.32$; $H = 200 \text{ mm}$ $\Delta h = 60 \text{ mm}$

Vers. Nr	X [W/cm]	\dot{M} [kg / s]	Re
● 11	92,8	1,75	16 100
△ 10	73,7	1,72	17 450
□ 9	53,4	1,73	17 700
○ 5	33,9	1,74	15 500

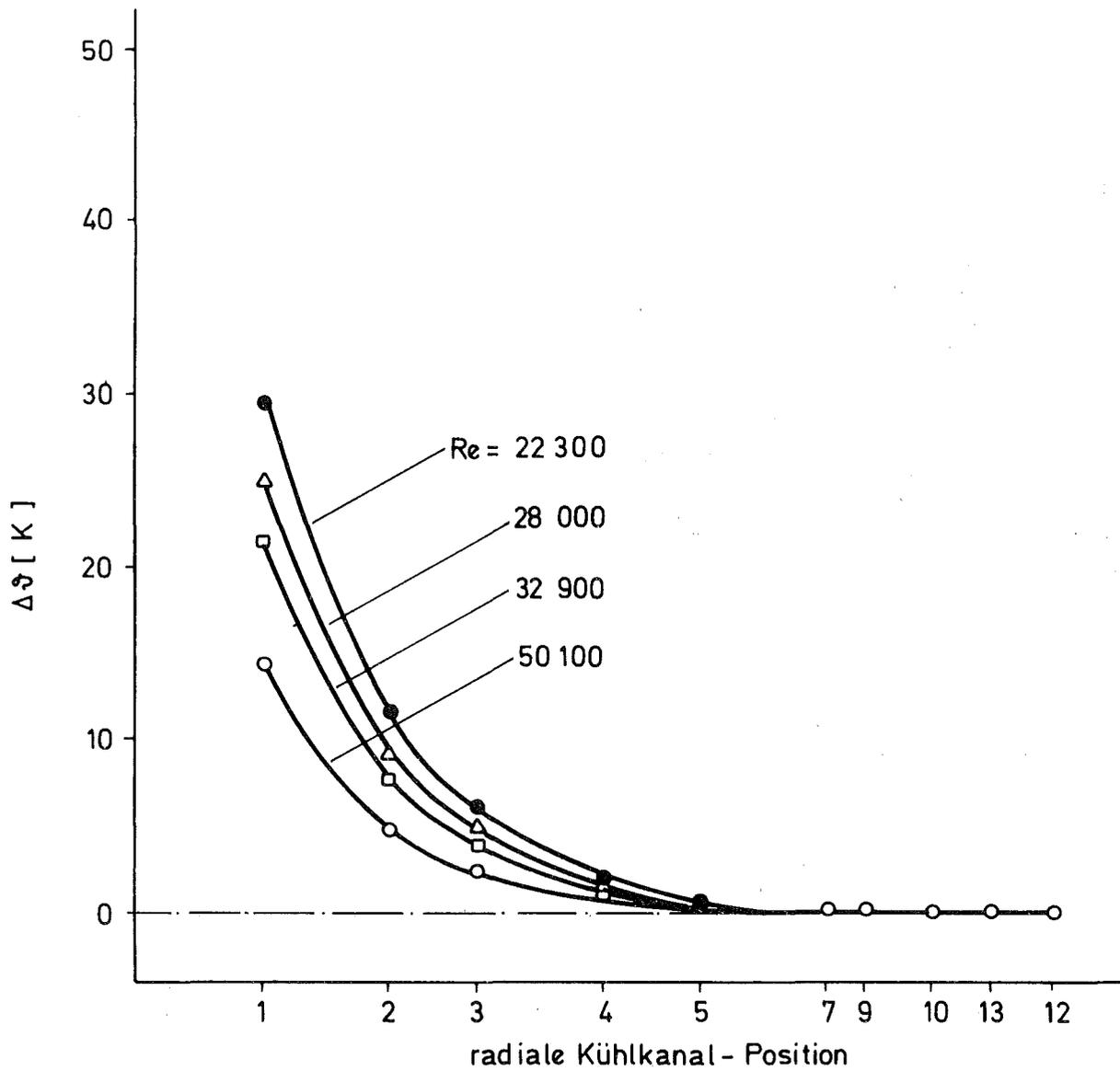
Abb.10 Gemessene radiale Temperaturprofile $\Delta \vartheta = (T_A - T_E)_{\text{lok}}$ im 61-Stabbündel für verschiedene Stabileistungen und konstante Re -Zahl



Abstandshalter: Röhrgitter; $P/D = 1,32$; $H = 200 \text{ mm}$ $\Delta h = 60 \text{ mm}$

Vers. Nr.	X [W/cm]	\dot{M} [kg/s]	Re
● 11	92,8	1,75	16 100
△ 12	94,5	2,22	20 100
□ 13	94,2	4,24	39 300
○ 15	92,4	6,44	60 700

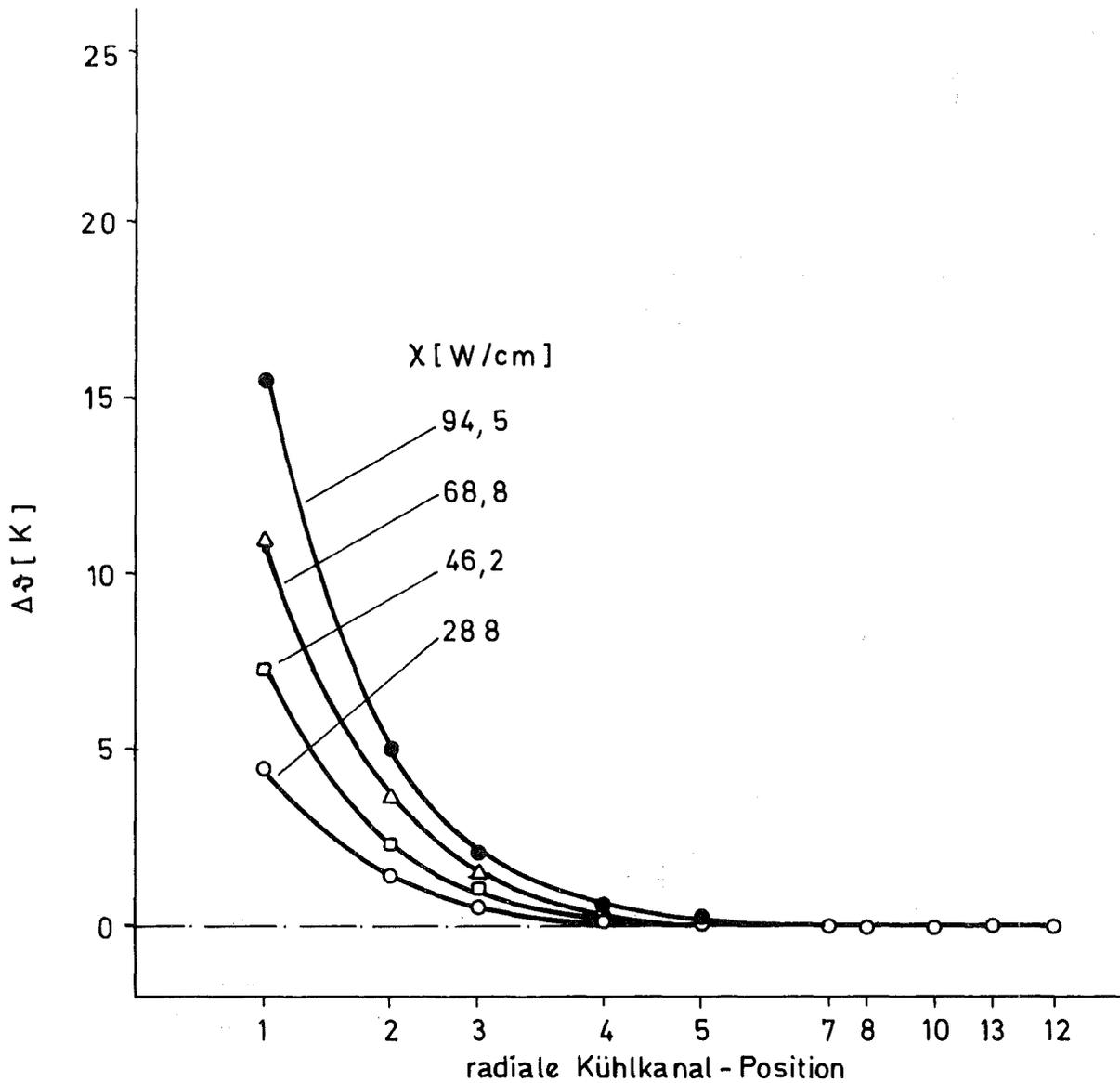
Abb.11 Gemessene radiale Temperaturprofile $\Delta\theta = (T_A - T_E)_{\text{lok}}$ im 61-Stabbündel für verschiedene Re-Zahlen und konstante Stableistungen



Abstandshalter: Wabengitter; P/D 1,32; H = 150 mm; Δh = 100 mm

Vers. Nr.	X [W/cm]	\dot{M} [kg / s]	Re
● 8	78,5	2,46	22 300
△ 9	79,7	3,13	28 000
□ 12	77,8	3,67	32 000
○ 17	76,5	5,57	50 100

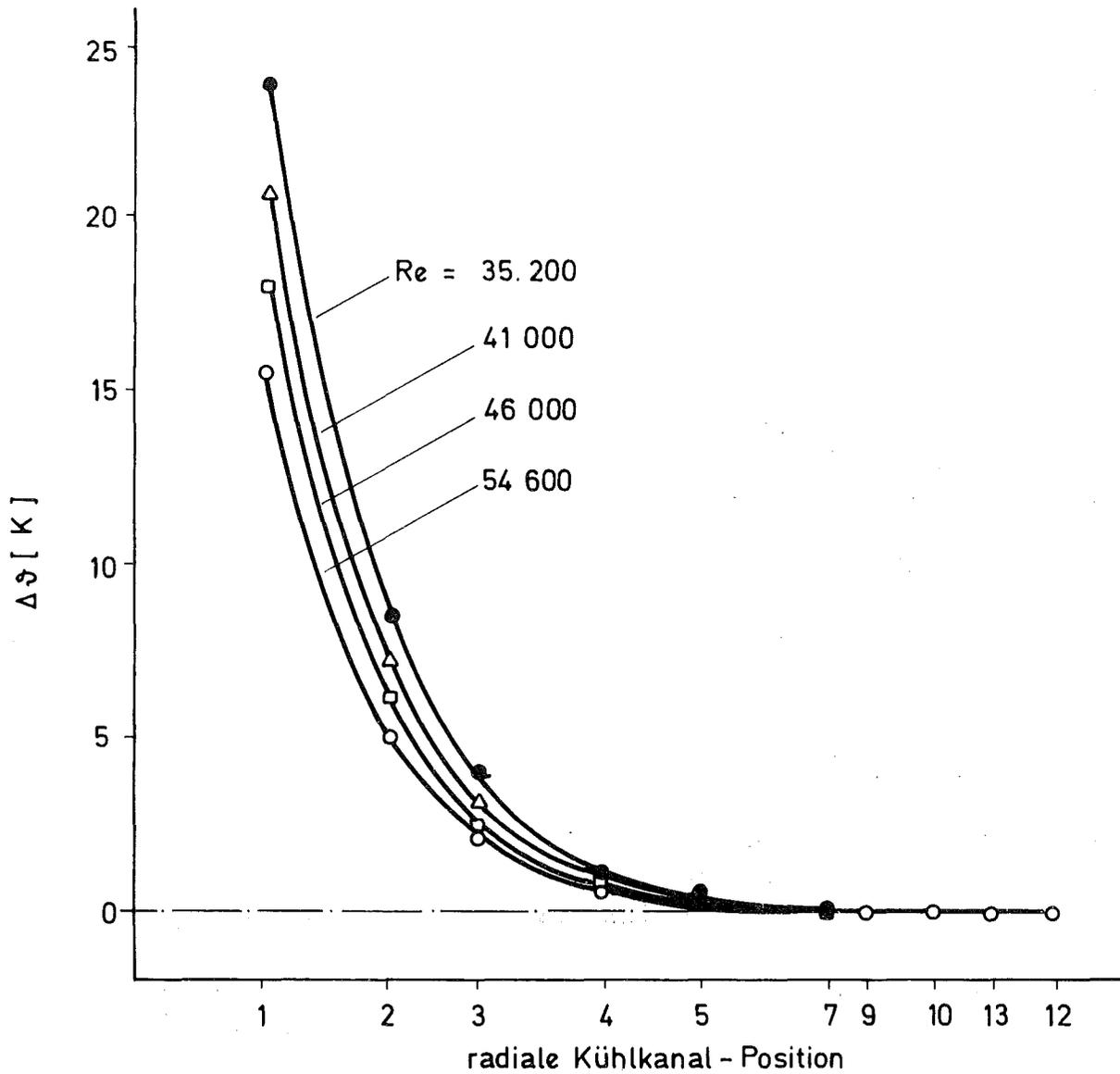
Abb.12 Gemessene radiale Temperaturprofile $\Delta\theta = (T_A - T_E)_{lok}$ im 61-Stabbündel für verschiedene Re-Zahlen und konstante Stableistungen



Abstandshalter: Wabengitter $P/D = 1,2$; $H = 150$ mm; $\Delta h = 50$ mm

Vers. Nr.	X [W/cm]	\dot{M} [kg / s]	Re
● 20	94,5	5,47	54 600
△ 21	68,8	5,45	54 400
□ 22	46,2	5,40	54 000
○ 23	28,8	5,44	54 300

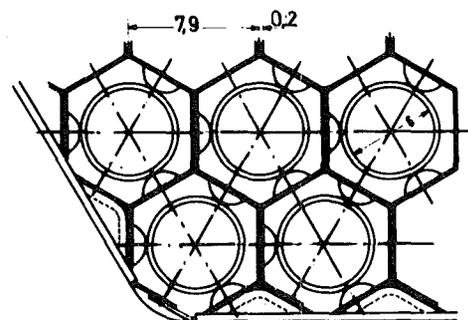
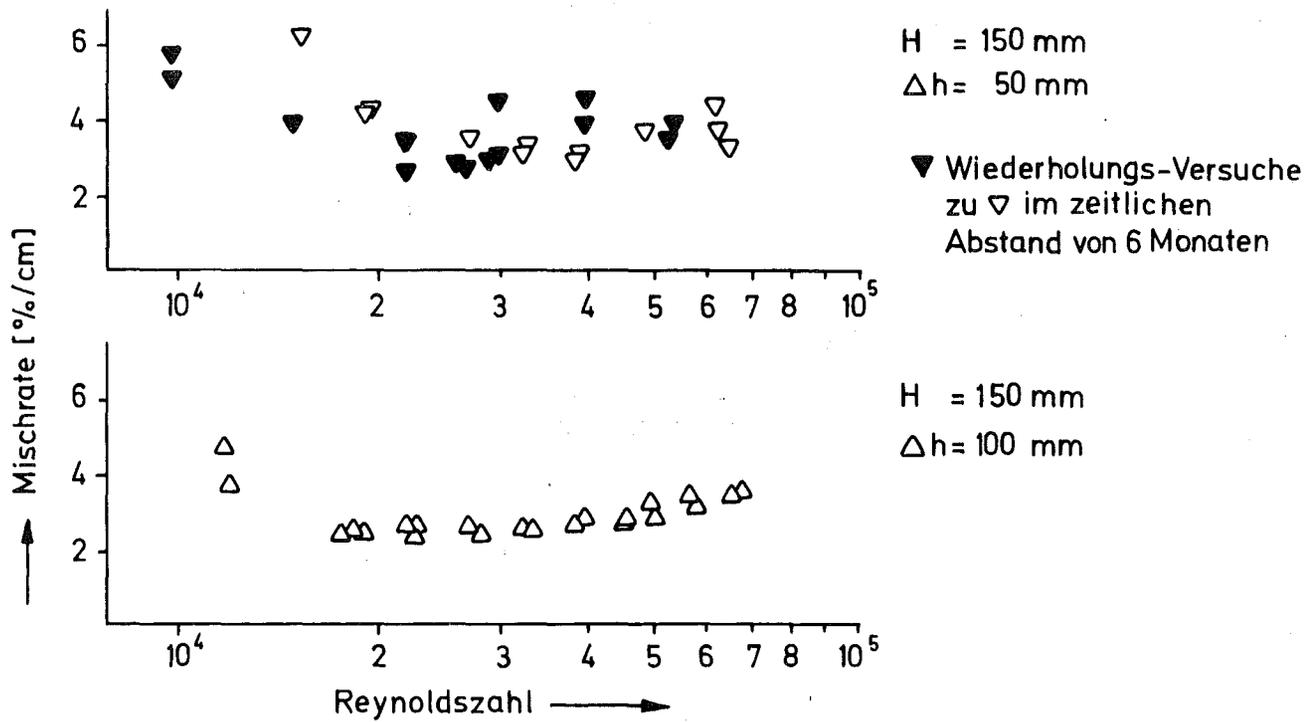
Abb.13 Gemessene radiale Temperaturprofile $\Delta\theta = (T_A - T_E)_{lok}$ im 61-Stabbündel für verschiedene Stableistungen und konstante Re-Zahl



Abstandshalter: Röhrengitter; $P/D = 1,2$; $H = 150$ mm; $\Delta h = 50$ mm

Vers. Nr.	X [W/cm]	\dot{M} [kg/s]	Re
● 15	94,9	3,52	35 200
△ 16	95,2	4,10	41 000
□ 18	95,0	4,68	46 800
○ 20	94,5	5,47	54 600

Abb.14 Gemessene radiale Temperaturprofile $\Delta\theta = (T_A - T_E)_{lok}$ im 61-Stabbündel für verschiedene Re-Zahlen und konstante Stableistung



Wabengitter-Abstandshalter

Abb. 15 Die Mischrate als Funktion der Reynoldszahl für
 Bündel mit Wabengitter-Abstandshaltern
 ($P/D = 1,32$; $D = 6 \text{ mm}$)

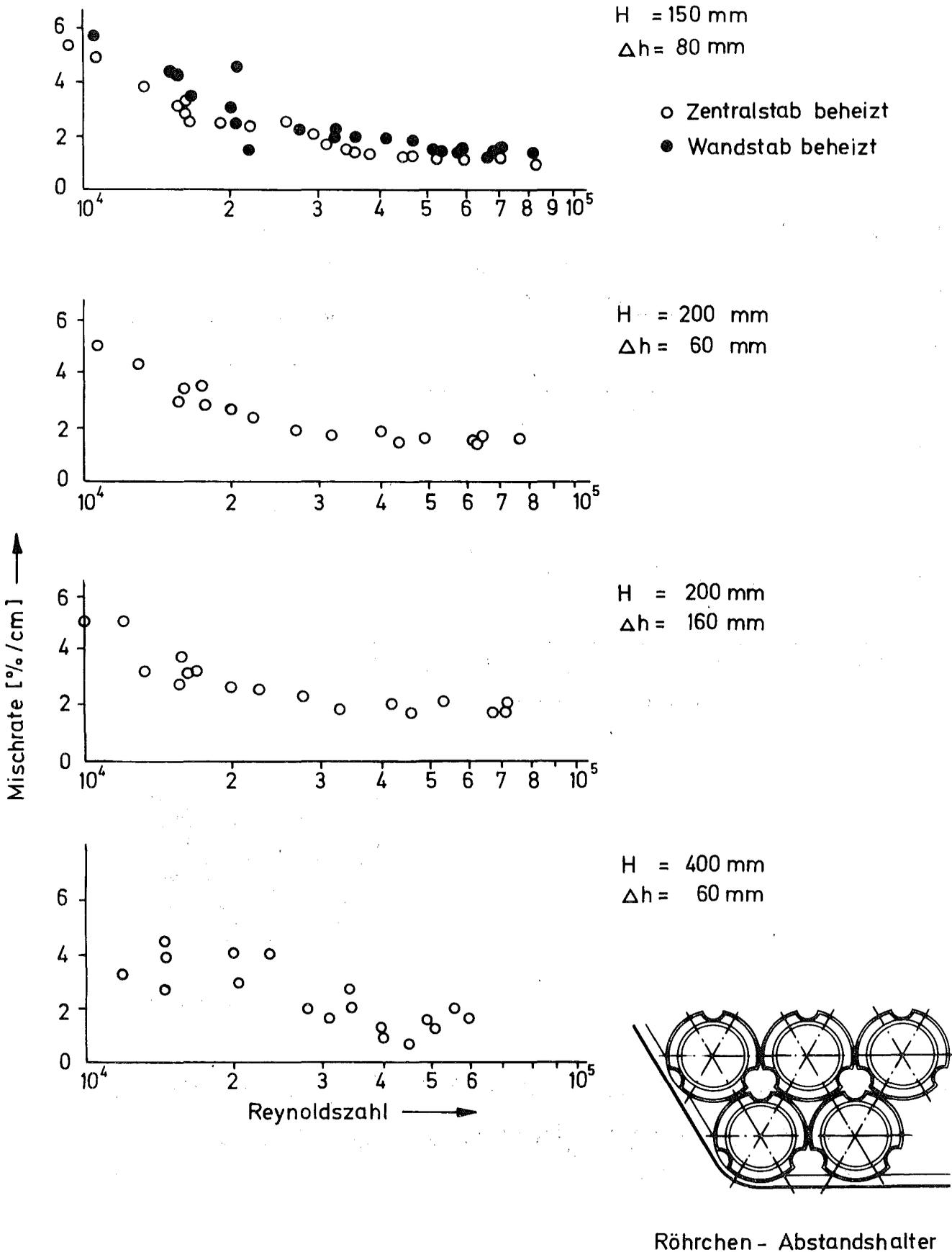


Abb. 16 Die Mischrate als Funktion der Reynoldszahl für Bündel mit Röhrchen-Abstandshaltern ($P/D=1,32$; $D=6\text{mm}$)

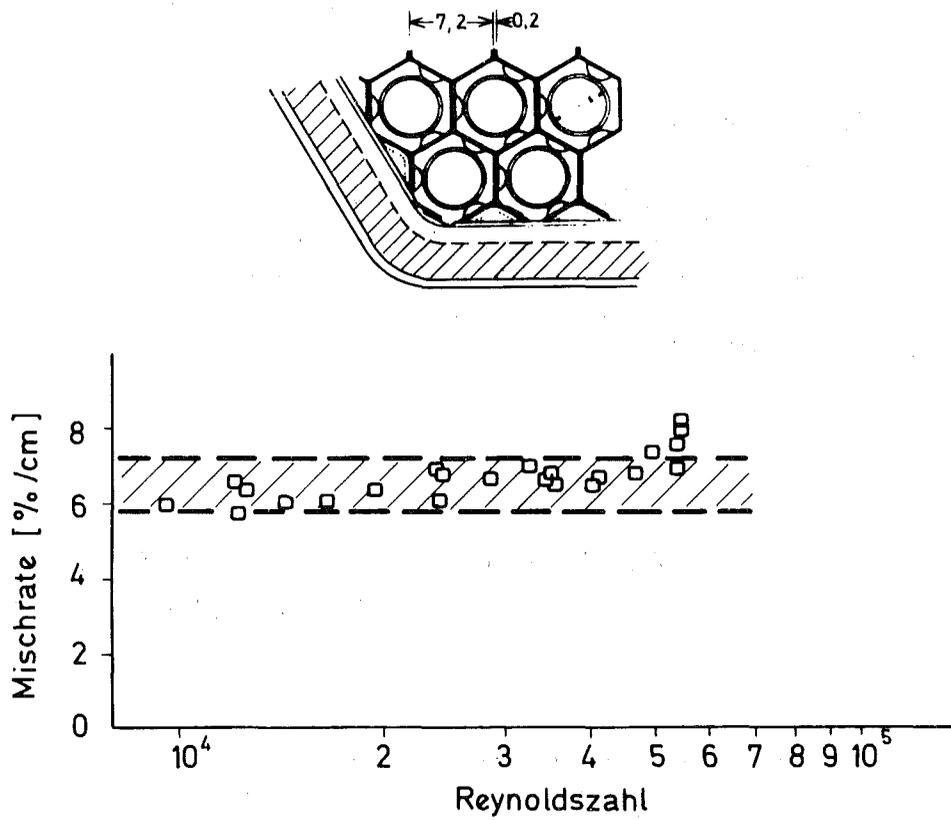


Abb. 17 Die Mischrate als Funktion der Reynoldszahl für Bündel mit Wabengitter - Abstandshaltern ($P/D = 1,2$; $D = 6\text{ mm}$)

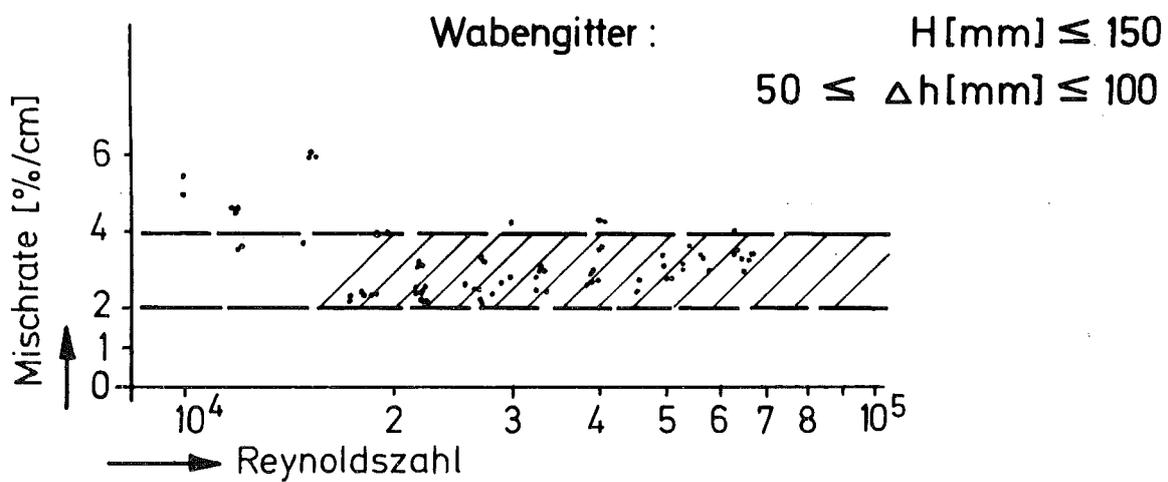
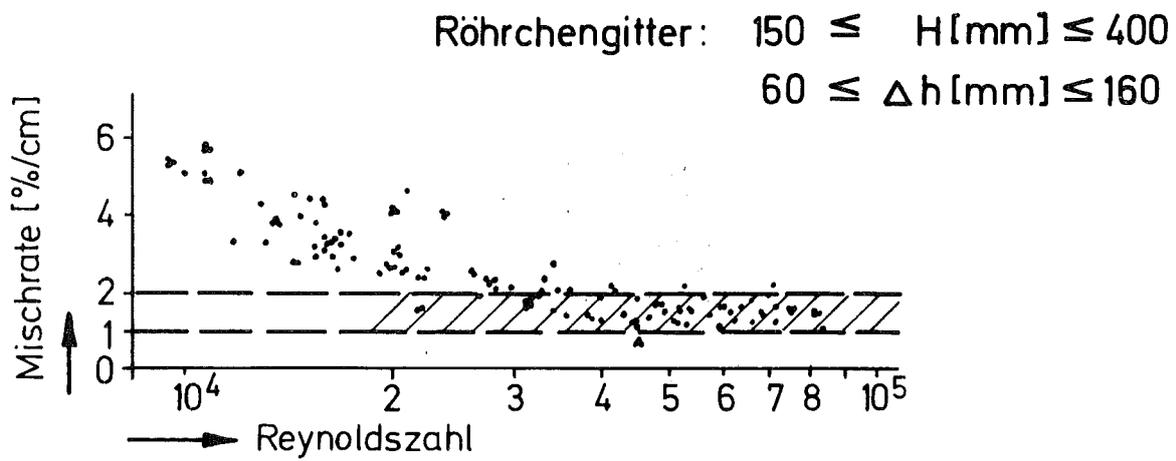
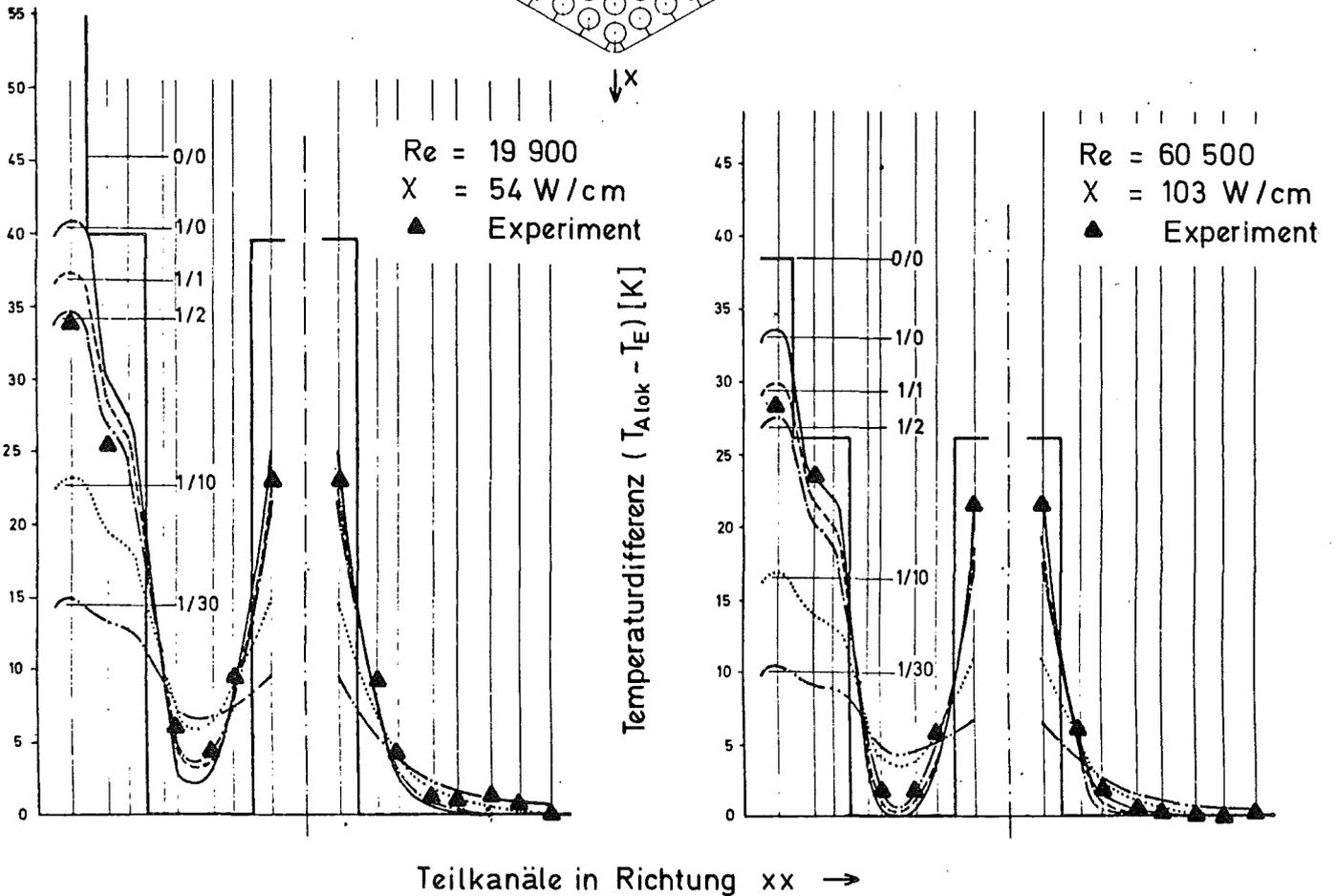
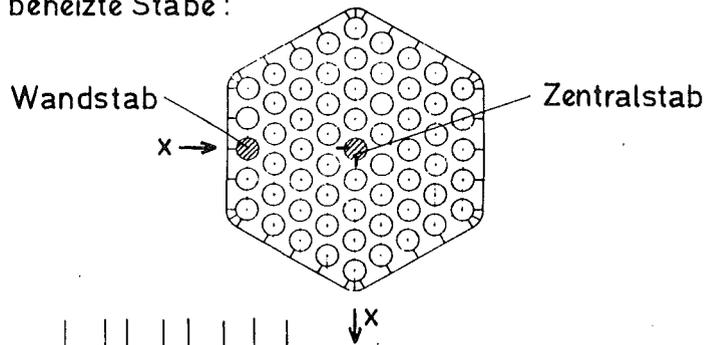


Abb. 18 Die Mischrate als Funktion der Reynoldszahl für Bündel mit gitterförmigen Abstandshaltern ($P/D = 1,32$; $D = 6 \text{ mm}$)

beheizte Stäbe :



(0/0) : ohne Energie -Austausch

(1/10) : mit Wärmeleitung, mit Quervermischung (10% /cm)

(P / D = 1,32; D = 6 mm)

Abb. 19 Vergleich berechneter u. experimentell .bestimmter mittlerer Kühlmitteltemperaturen im Austrittsquerschnitt eines 61 - Stabbündels mit Röhrengitter -Abstandshaltern