

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

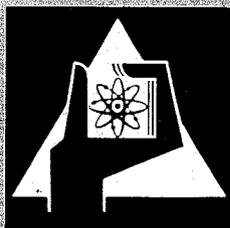
Januar 1972

KFK 1548

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

**Phänomenologische Untersuchungen der Strömungsverteilung
hinter lokalen Kühlkanalblockaden in Stabbündeln**

P. Basmer, D. Kirsch, G. F. Schultheiß



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

Januar 1972

KFK 1548

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Phänomenologische Untersuchungen der Strömungsverteilung
hinter lokalen Kühlkanalblockaden in Stabbündeln

P.Basmer

D.Kirsch

G.F.Schultheiß

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| Zusammenfassung | 1 |
| Abstract | 1 |
| 1. Einleitung | 2 |
| 2. Versuchseinrichtung und Programm | 4 |
| 2.1 Beschreibung der Versuchseinrichtung | 4 |
| 2.2 Versuchsprogramm | 6 |
| 3. Beschreibung der Einzeleinflüsse auf den Strömungsverlauf im Totwasser | 13 |
| 3.1 Einfluß der Reynoldszahl | 13 |
| 3.2 Einfluß der radialen Lage der Störung | 16 |
| 3.3 Einfluß des Restdurchsatzes | 18 |
| 3.4 Einfluß von Abstandshaltern im Totwassergebiet | 21 |
| 3.5 Einfluß der Wandstruktur im durchsichtigen Bereich | 24 |
| 4. Abschließende Bemerkungen | 27 |
| 5. Nomenklatur | 29 |
| 6. Literatur | 30 |

Zusammenfassung

Die Sechskanthülle des SNR-Brennelementbündels wurde in einer Symmetrieebene durch zwei Ecken geteilt. Eine Plexiglasabdeckung der Schnittfläche erlaubte die Betrachtung der Strömungsvorgänge. Die Versuche wurden mit Wasser durchgeführt, als Indikatoren dienten Luftbläschen.

Für alle Versuche war ein zusammenhängender Bereich von 41 % des Strömungsquerschnitts vollständig oder teilweise blockiert.

Verschiedene Lagen der Blockade, der Einfluß des Abstandshaltergitters, des Stabbündels selbst und der Wandstruktur der Abdeckplatte auf die Totwasserströmung hinter der Blockade wurden für jeweils zwei Reynoldszahlen untersucht. Ein Restdurchsatz durch den blockierten Bereich wurde durch Anbohren der Unterkanäle der Störung ermöglicht. Wichtigste Ergebnisse sind: Die Totwasserabmessungen sind praktisch unabhängig von der Reynoldszahl im untersuchten Bereich. Im Totwasser bildet sich auch bei Stabbündelgeometrie eine ausgeprägte Rezirkulationströmung aus. Etwa 15 % Restdurchsatz bezogen auf den gesamten Durchsatz zerstört die Rezirkulationszone hinter der Blockade.

Abstract

The hexagonal case of a SNR-subassembly has been symmetrically divided between two corners. Closing this part by an acryl-glass plate the observation of the flow behaviour was possible. The experiments have performed with water and air bubbles as flow indication.

In all experiments a coherent region of 41 % of the flow area was completely or partially blocked. Different positions of the blockage, the influence of the spacer grid, the pin bundle and the wall structure of the acryl-glass upon the wake downstream of the blockage have been investigated for two Reynolds numbers. A reduced fluid flow rate within the blocked region has been arranged by drilling narrow holes through the blockage. The main results are:

The dimensions of the wake are practically independent from the Reynolds number within the investigated range. Even in a pin bundle a distinct recirculation flow develops in the wake. A fluid flow within the blocked region of about 15 % of the whole flow rate destroys the recirculation zone in the wake behind the blockage.

1. Einleitung

Für die Sicherheitsbetrachtungen von schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren ist auch die Betrachtung von lokalen Kühlungsstörungen von Bedeutung. Durch das Versagen von Brennstäben oder durch Verunreinigungen kann es auch während des stationären Leistungsbetriebes zu lokalen Verstopfungen innerhalb eines Brennelementbündels kommen. Dadurch können im Bereich solcher Blockaden Übertemperaturen auftreten, die dann zum Versagen weiterer Brennstäbe und so zu einer langsamen Schadensfortpflanzung (Propagation) führen können. Wegen der verschlechterten Wärmeabfuhr in dem von der Blockade beeinflussten Bereich des Brennelementes sind auch kritische Situationen, wie das lokale Sieden des Kühlmittels, nicht von vornherein auszuschließen [1, 2].

Um genauere Aussagen über die zu erwartenden Temperaturen im kritischen Bereich von Totwassergebieten zu erhalten, ist eine genaue Untersuchung des Verlaufes der Kühlmittelströmung erforderlich. Für die Berechnung mittlerer Kühlmitteltemperaturen im Totwassergebiet war es ausreichend [2], das Volumen des Totwassers sowie das Massenaustauschverhalten zwischen Totwasser und gesunder Strömung zu ermitteln. Aussagen über die örtliche Temperatur in den enggepackten Brennstabbündeln bei Kühlmitteldurchflußstörungen werden möglich, wenn man genauere Kenntnisse der Strömung im Totwasser selbst besitzt. Zusätzlich ist es wünschenswert, den Einfluß verschiedener Parameter zu kennen wie

- der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Reynoldszahl,
- des Restdurchsatzes durch die verstopften Unterkanäle,
- oder z.B. der geometrischen Verhältnisse, die sich durch die Anwesenheit eines Abstandshalters nach der Störung verändern können.

Auch der Einfluß der veränderten Unterkanalgeometrie an der Brennelementkastenwand ist für das Kühlmittelströmungsverhalten von Interesse, wenn sich z.B. Störungen in diesen wandnahen Bereichen befinden.

Zum Druck eingereicht am 18.2.72

Um diese sehr verschiedenartigen Einflüsse zunächst phänomenologisch zu untersuchen, wurde eine Brennelementattrappe hergestellt, die zwar die Originalgeometrie der Unterkanäle aufwies, aber in einer Symmetrieebene durch die Kanten des Sechskantkastens halbiert wurde. Die dadurch entstehende Längsschnittfläche wurde mit Plexiglasscheiben mit verschiedener Oberflächenstruktur abgedeckt. Dadurch war eine optische Beobachtung des Strömungsverhaltens um Blockaden in diesem wandnahen Bereich möglich. Eine genaue Beschreibung der Versuchseinrichtung und der Versuchsdurchführung folgt in Abschnitt 2. Die Versuchsergebnisse selbst und daraus folgende Schlüsse werden in den Abschnitten 3 und 4 behandelt.

2. Versuchseinrichtung und Programm

2.1 Beschreibung der Versuchseinrichtung

Um die Versuche im Wasserkreislauf des Instituts für Reaktorentwicklung durchführen zu können, wurde lediglich ein Ausschnitt des Brennstab-bündels verwendet. Die gewählte Länge des Ausschnitts betrug etwa 600 mm, das ist das 110fache des hydraulischen Durchmessers der SNR-Bündel-geometrie. Damit waren ausreichend lange Beruhigungsstrecken für den Einlauf und Auslauf dieses Bündelabschnittes möglich und die Störung konnte in ein ausgeprägtes Strömungsfeld eingebaut werden. Die Versuchseinrichtung mit Einlauf- und Auslaufstücken für den Einbau in den Wasserkreislauf ist in Abb. 1 und Abb. 2 im Detail dargestellt.

Der axial in einer Symmetrieebene durch zwei Kanten des Sechskantbrennelementkastens geteilte Versuchskanal ist mit einer Plexiglasplatte abgedeckt (Abb. 1, Pos. 7). Dadurch war die Beobachtung der Strömung um die eingebrachte Störung möglich. Fotografische und kinematografische Aufnahmen wurden in der angegebenen Beobachtungsrichtung gemacht.

Wie Abb. 2 zeigt, wurden zwei verschiedene Abdeckplatten verwendet. Die eine Abdeckplatte hatte auf der dem Bündel zugewandten Seite ein Halb-stabprofil. Die geraden Begrenzungsflächen zwischen den Halbstäben stellen die Symmetrieebene dar. Diese Platte stellt die kleinstmögliche Störung des Versuchsaufbaus bezüglich der Strömungsverhältnisse dar. Die zweite verwendete Platte hatte eine glatte Innenfläche. Mit dieser Abdeckplatte sollte untersucht werden, ob der in Kastenwandnähe veränderte Unterkanalquerschnitt von Einfluß auf die Rezirkulationsströmung im Totwasserbereich ist.

Die Größe des gestörten Bereiches, wie er für alle Versuchsserien verwendet wurde, ist ebenfalls in Abb. 2 gezeigt. Die symmetrische Hälfte einer sechseckigen Störung ist hier in zentraler Position eingebaut. Die Störung blockiert etwa 41 % des Strömungsquerschnitts. Die eingetragene Abmessung D , das Eckmaß der Störung, dient als Vergleichswert für die Totwasserlänge, d.h. den Abstand zwischen Störung und

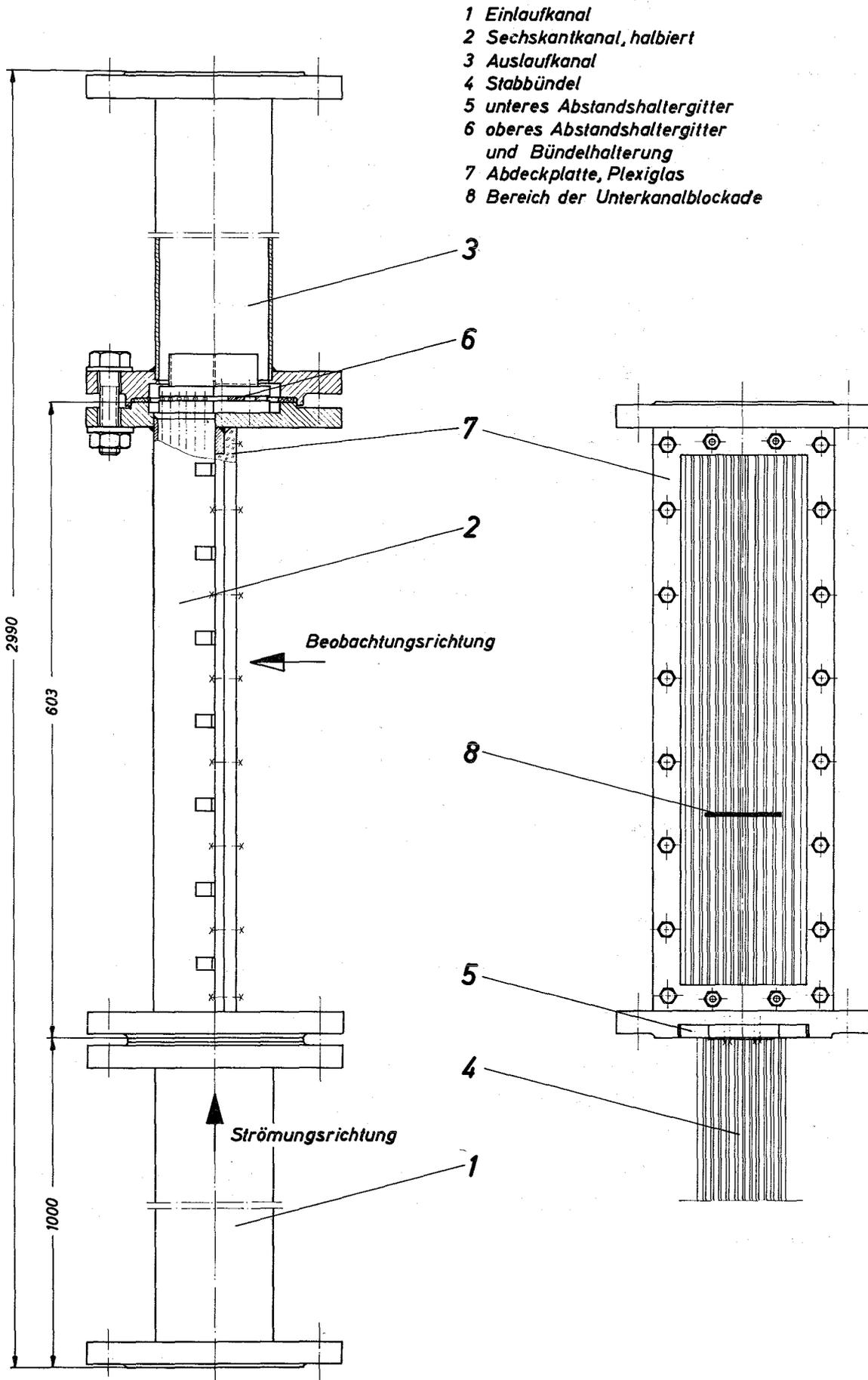


Abb. 1 Versuchsanordnung

stromabliegenden Staupunkt. Abb. 3 zeigt die ausgeführte Versuchsanordnung. Der offene Versuchskanal mit eingebautem Stabbündel und der Störung in zentraler Position ist zu erkennen.

Um eine begrenzte Durchlässigkeit des blockierten Bereiches zu simulieren, wurden die Unterkanäle der Störung mit Bohrungen versehen. Abb. 4 zeigt eine derartige Störung. Die genaue Anordnung der Bohrungen und die für drei Versuchsserien variierten Durchmesser sind in Abb. 16 angegeben.

Da in den SNR-Brennelementen Abstandshaltergitter verwendet werden sollen, wurden auch bei den hier durchgeführten Versuchen Abstandshaltergitter eingesetzt, um ihren Einfluß auf die Totwasserausbildung zu untersuchen. Im Bereich der Abstandshaltergitter muß verstärkt mit lokalen Blockaden, z.B. durch eine Ansammlung von Partikeln auf Grund einer Filterwirkung des Gitters, gerechnet werden. Das verwendete Abstandshaltergitter ist in Abb. 5 gezeigt. Es besteht aus geprägten Blechstreifen, die durch Punktschweißen miteinander verbunden sind. Ein Abstandshaltergitter der Fa. Belgonucleaire wurde - obwohl es vorlag - nicht untersucht, da kein prinzipieller konstruktiver Unterschied zu dem in Abb. 5 gezeigten Gitter besteht.

Die Gesamtanordnung der Versuchseinrichtung im Wasserkreislauf mit den notwendigen Beleuchtungseinrichtungen und der Position der Kamera (angedeutet durch die Position des Stativs) ist in Abb. 6 gezeigt. Die Strömungsrichtung verläuft von unten nach oben (s. auch Abb. 1).

2.2 Versuchsprogramm

Den Versuchen lag zur qualitativen Beantwortung die folgende Reihe von Fragestellungen zugrunde:

- Einfluß der Reynoldszahl? Dazu wurden in jeder Versuchsserie Versuche mit zwei verschiedenen Durchsätzen (ca. $30 \text{ m}^3/\text{h}$ und ca. $50 \text{ m}^3/\text{h}$ mit Bündel, ohne Bündel doppelter Durchsatz) gefahren. Dies bedeutet Strömungsgeschwindigkeiten \bar{u} von 4 m/s bzw. 6 m/s (s. auch Tab. 2) sowohl bei den Versuchen mit wie auch bei den Versuchen ohne Stabbündel.

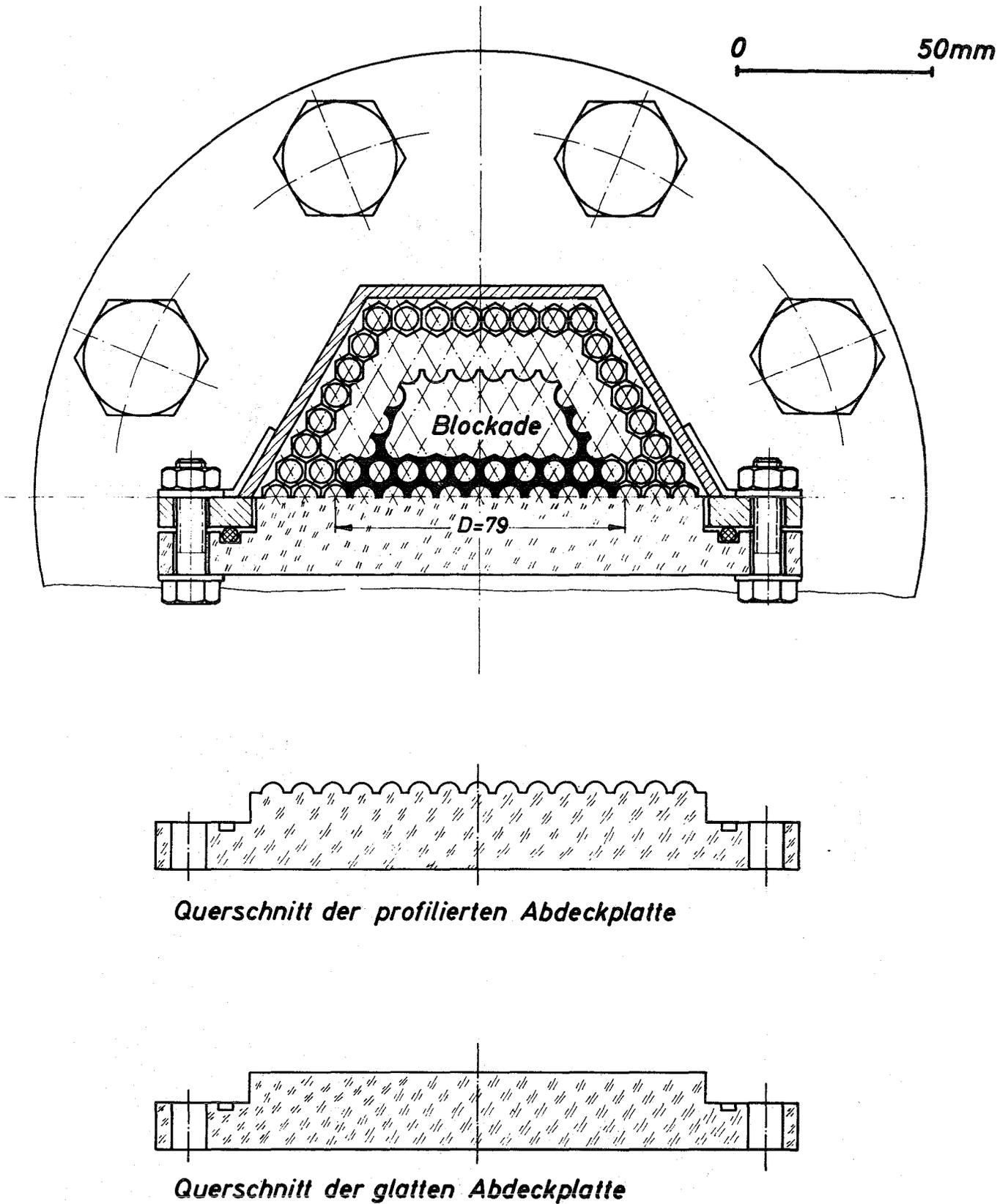


Abb. 2 Querschnitt durch den Versuchskanal

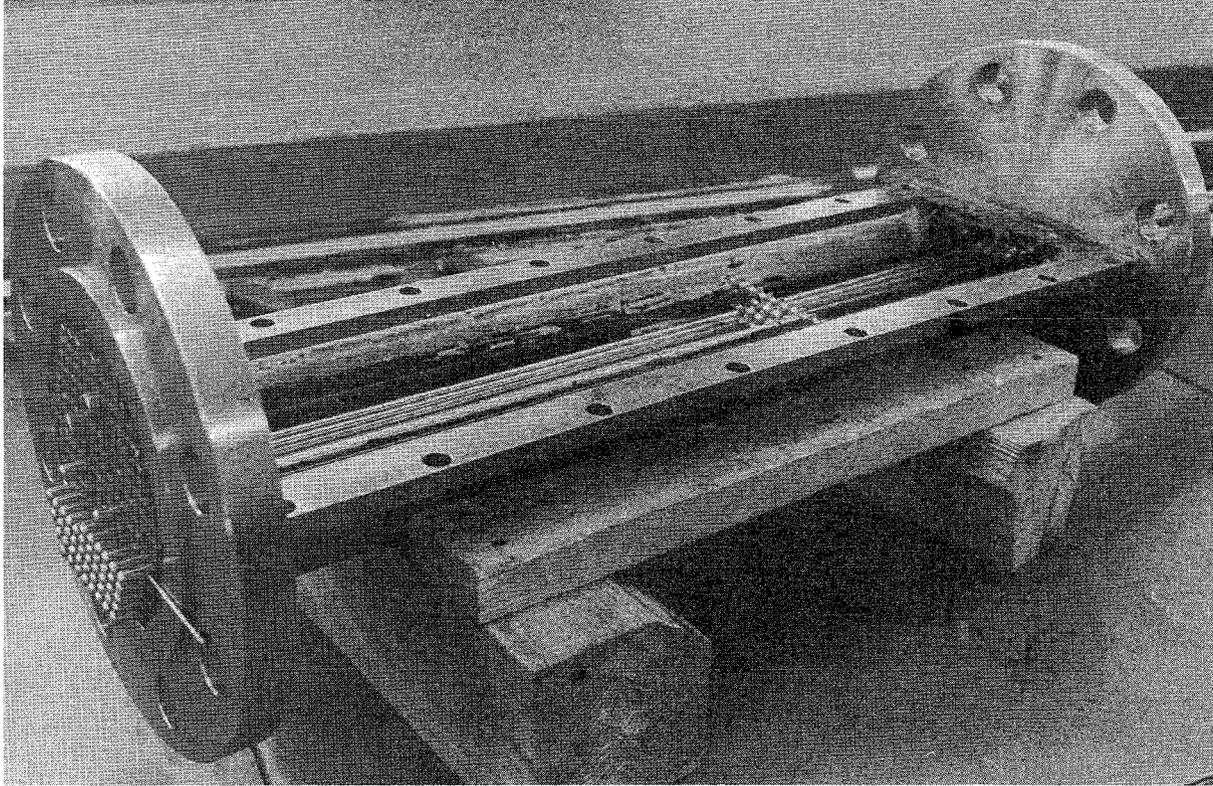


Abb. 3: Ansicht der geöffneten Teststrecke, Abdeckplatte und ein Teil der Stäbe sind entfernt

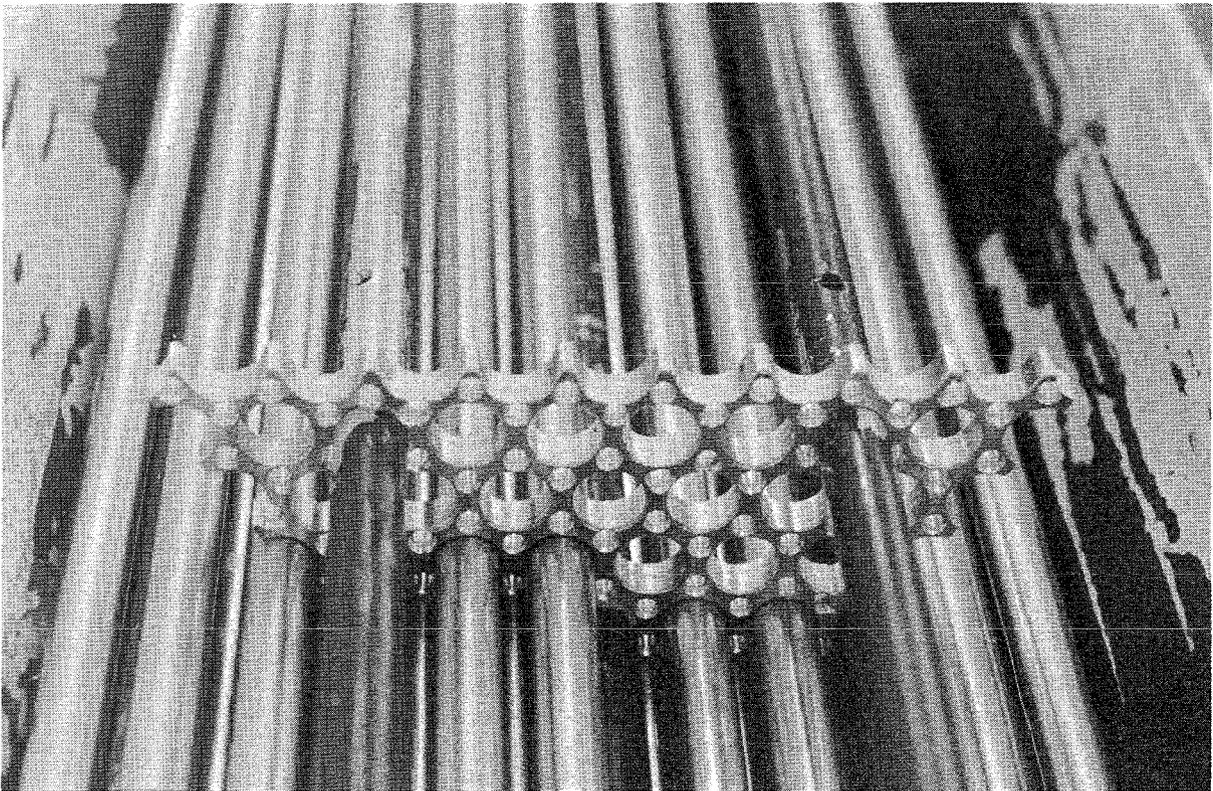


Abb. 4: Teil des Stabbündels im Bereich der Blockade; die kleineren Bohrungen ermöglichen einen Restdurchsatz

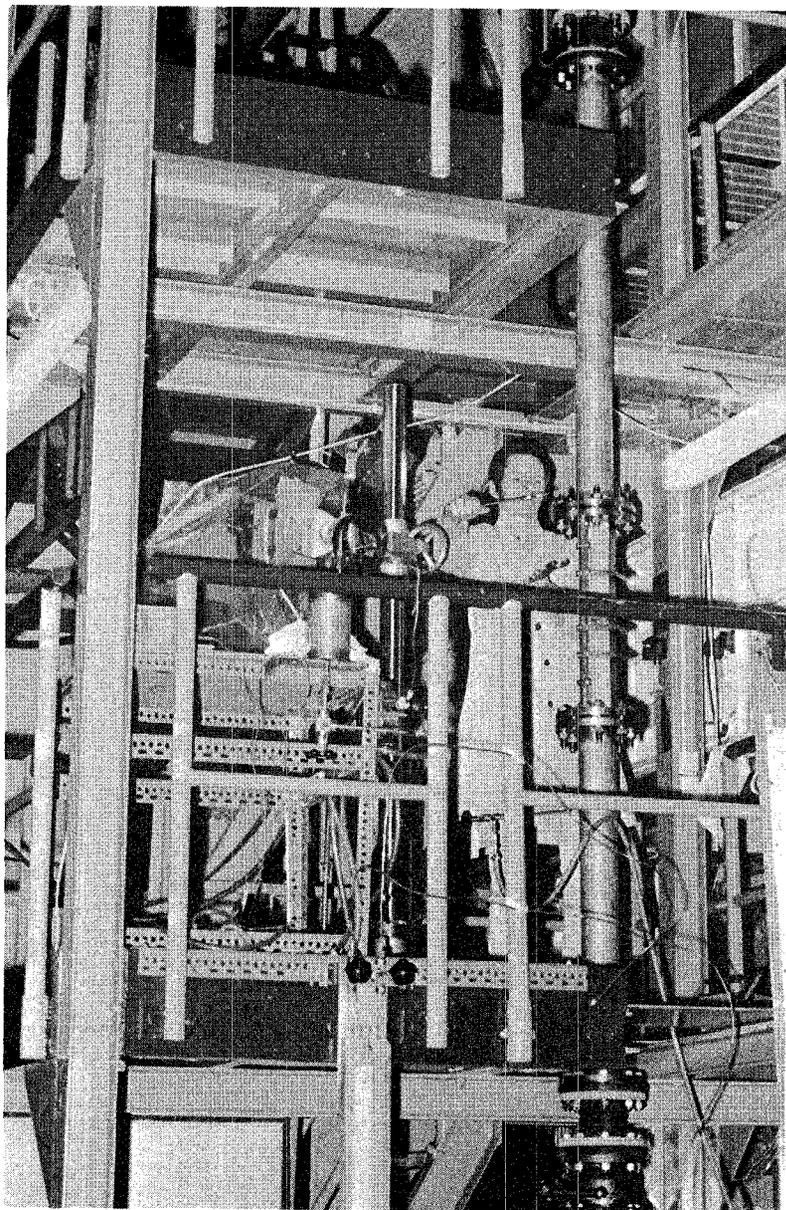


Abb. 6: Gesamtanordnung der Versuchseinrichtung
im Wasserkreislauf des IRE

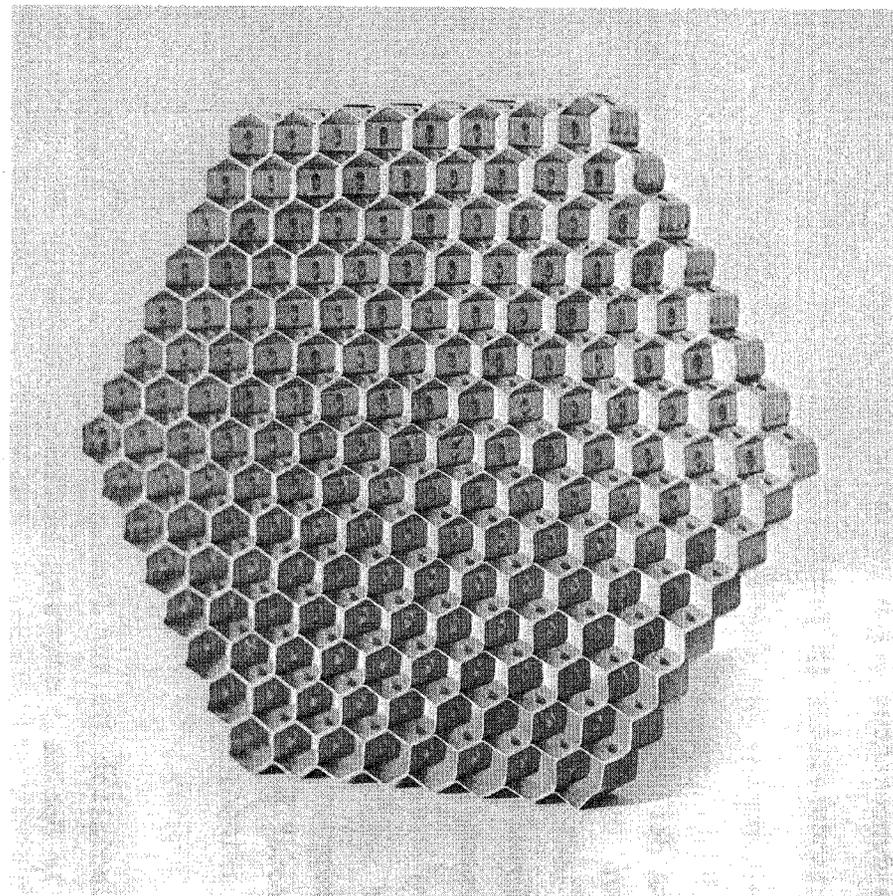


Abb. 5: Abstandshaltergitter

- Einfluß der Lage der Störung?
- Einfluß des Restdurchsatzes durch die blockierte Zone?
- Einfluß von Abstandshaltern im Totwassergebiet?
- Einfluß der Wandstruktur der durchsichtigen Abdeckplatte?

Eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuchsserien mit Detailangaben ist in Tab. 1 gegeben. Die Versuchsserien 1 bis 4 waren als Vorversuche gedacht und dienten lediglich zur Klärung der Beleuchtungsverhältnisse sowie der Belichtungsverhältnisse für die fotografischen Aufnahmen. Die Folge der Versuche entspricht nicht derjenigen der Fragestellungen. Dadurch war es möglich, das Programm kontinuierlich durchzuführen. Die Angabe "Film" in der zweiten Spalte bedeutet, daß in dieser Versuchsserie ein Hochfrequenzfilm mit etwa 1000 Bildern pro Sekunde angefertigt wurde. Die Angabe "Foto" bedeutet, daß fotografische Aufnahmen mit Belichtungszeiten von 1/1000, 1/500, 1/250 und 1/125 Sekunde gemacht wurden.

Die Tab. 1 enthält lediglich die zur Auswertung herangezogenen Versuche, wie die Numerierung in Spalte 1 erkennen läßt. Eine Reihe von Versuchen, die lediglich zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit dienten, wurden in dieser Tabelle nicht aufgeführt. Die Versuche insgesamt ergaben, daß eine für die phänomenologische Untersuchung der Vorgänge ausreichende Reproduzierbarkeit vorlag.

Tabelle 1 Zusammenstellung der durchgeführten Versuchsserien
(Serie 1 bis 4: Vorversuche)

| Versuchs- serie | | Wand | Stab- bündel | Rest- durchsatz d mm | Lage der Blockade | Durchsatz V $\frac{m^3}{h}$ | Bemer- kungen |
|--------------------|------|--------------|-----------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--|
| 5/1 | Foto |) profiliert | mit | ohne | zentral | (32 | |
| 5/3 | Film | | | | | | |
| 5/2 | Foto |) profiliert | mit | ohne | zentral | (50 | |
| 5/4 | Film | | | | | | |
| 6/1 | Film |) glatt | mit | ohne | zentral | (36 | |
| 6/3.1 | Foto | | | | | | |
| 6/2 | Film |) glatt | mit | ohne | zentral | (52 | |
| 6/3.2 | Foto | | | | | | |
| 7/1 | Film |) glatt | ohne | ohne | zentral | (61 | |
| 7/3.1 | Foto | | | | | | |
| 7/2 | Film |) glatt | ohne | ohne | zentral | (100 | |
| 7/3.2 | Foto | | | | | | |
| 8/1.1 | Foto |) glatt | ohne | ohne | s.Abb.13 | (60 | |
| 8/2 | Film | | | | | | |
| 8/1.2 | Foto |) glatt | ohne | ohne | s.Abb.13 | (100 | |
| 8/3 | Film | | | | | | |
| 9/1 | Film |) glatt | mit | ohne | s.Abb.13 | (33 | |
| 9/3.1 | Foto | | | | | | |
| 9/3.2 | Foto | glatt | mit | ohne | s.Abb.13 | 50 | |
| 10/3.1 | Foto | profiliert | mit | ohne | zentral | 34 |) Abstandshalter unmittelbar über Blockade |
| 10/1 | Film |) profiliert | mit | ohne | zentral | (50 | |
| 10/3.2 | Foto | | | | | | (50 |
| 11/2.1 | Foto | profiliert | mit | ohne | zentral | 35 |) Abstandshalter 30 mm über Blockade |
| 11/1 | Film |) profiliert | mit | ohne | zentral | (50 | |
| 11/2.2 | Foto | | | | | | |
| 12/2.1 | Foto | profiliert | mit | 0,5 | zentral | 31 | |
| 12/1 | Film |) profiliert | mit | 0,5 | zentral | (50 | |
| 12/2.2 | Foto | | | | | | |
| 13/3.1 | Foto | profiliert | mit | 1,0 | zentral | 35 | |
| 13/2 | Film |) profiliert | mit | 1,0 | zentral | (50 | |
| 13/3.2 | Foto | | | | | | |
| 14/2.1 | Foto | profiliert | mit | 1,5 | zentral | 37 | |
| 14/1 | Film |) profiliert | mit | 1,5 | zentral | (50 | |
| 14/2.2 | Foto | | | | | | |

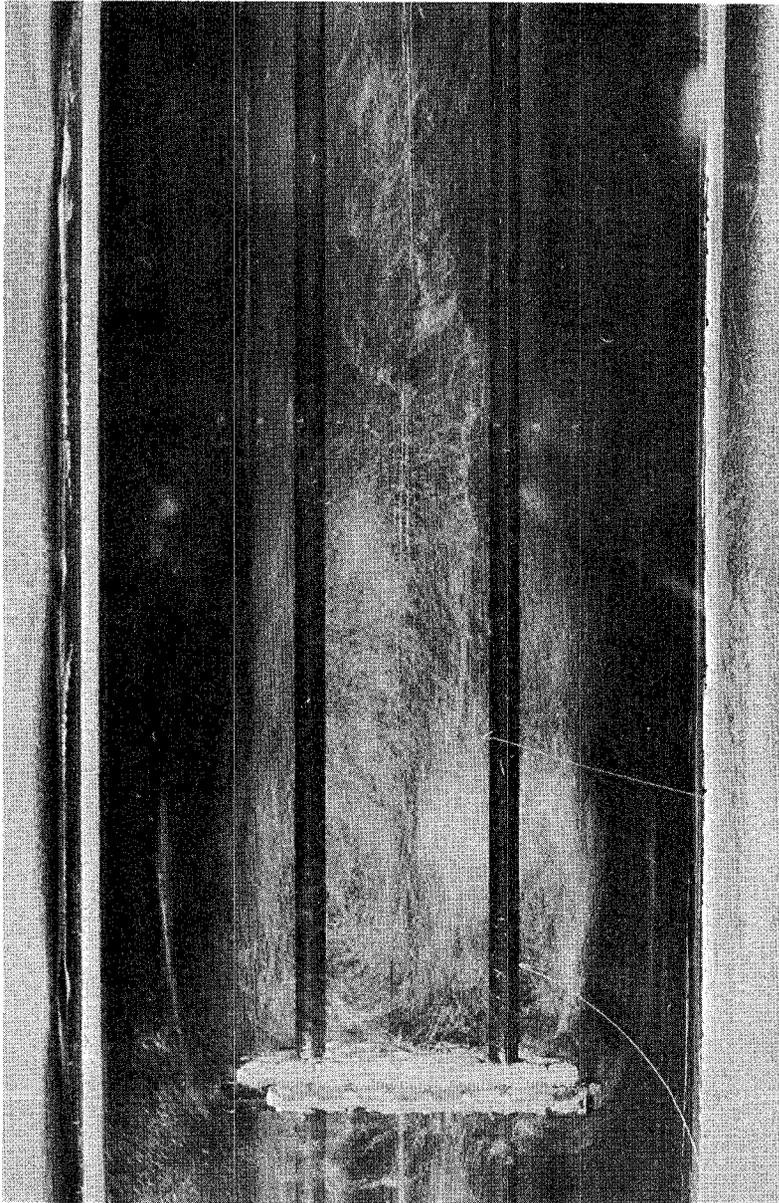


Abb. 8: wie Abb. 7, aber bei schwacher Luftzufuhr



Abb. 7: Momentaufnahme der Strömung im Totwasser bei starker Luftzufuhr (1/250 sec, Serie 7/3.1)

3. Beschreibung der Einzeleinflüsse auf den Strömungsverlauf im Totwasser

In einer großen Anzahl von Einzelversuchen wurden mit Hilfe von fotografischer und kinematografischer Aufzeichnung insbesondere folgende vier Einflüsse genauer untersucht:

- Der Einfluß der Reynoldszahl, die über den Durchsatz variiert wurde,
- der Einfluß von Abstandshaltern im Bereich der lokalen Störung,
- der Einfluß des Restdurchsatzes im Bereich der lokalen Störung selbst und
- der Einfluß der Wandstruktur im durchsichtigen Bereich des halbgeteilten Bündels.

Während der Durchführung der Einzelversuche entstand stellenweise der Eindruck, daß auch die Durchflußrate der zur Indikation zugeführten Luft einen Einfluß auf die Strömung und die Abmessungen im Totwasserbereich haben könnte. Diese Vermutung hat sich jedoch als eine Art optische Täuschung erwiesen. Wie die Abbildungen 7 und 8 zeigen, die bei gleichem Durchsatz und verschieden starker Luftzufuhr aufgenommen wurden, ist kein Einfluß auf Strömungsform und Richtung im Totwasserbereich festzustellen.

3.1 Einfluß der Reynoldszahl

Sowohl die aufgenommenen Fotografien wie auch die Auswertung des Filmmaterials zeigte, daß im untersuchten Bereich der Reynoldszahlen, wenn überhaupt, dann nur ein sehr kleiner Einfluß auf die Abmessungen des Totwassers festzustellen ist. Die Zahlenwerte für alle beschriebenen Einzelergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Einen guten Eindruck von Form und Strömungsverhalten im Totwassergebiet selbst geben die Abbildungen 9 und 10, die aus Versuchen stammen, die mit Stäben und profilierter durchsichtiger Wand durchgeführt wurden. Zum Vergleich dazu zeigen die Abbildungen 11 und 12 die Ergebnisse von Versuchsserien, in denen lediglich die Störung ohne Stäbe eingebaut war. Bei diesen Versuchen wurde auch eine Abdeckplatte ohne Profil verwendet.

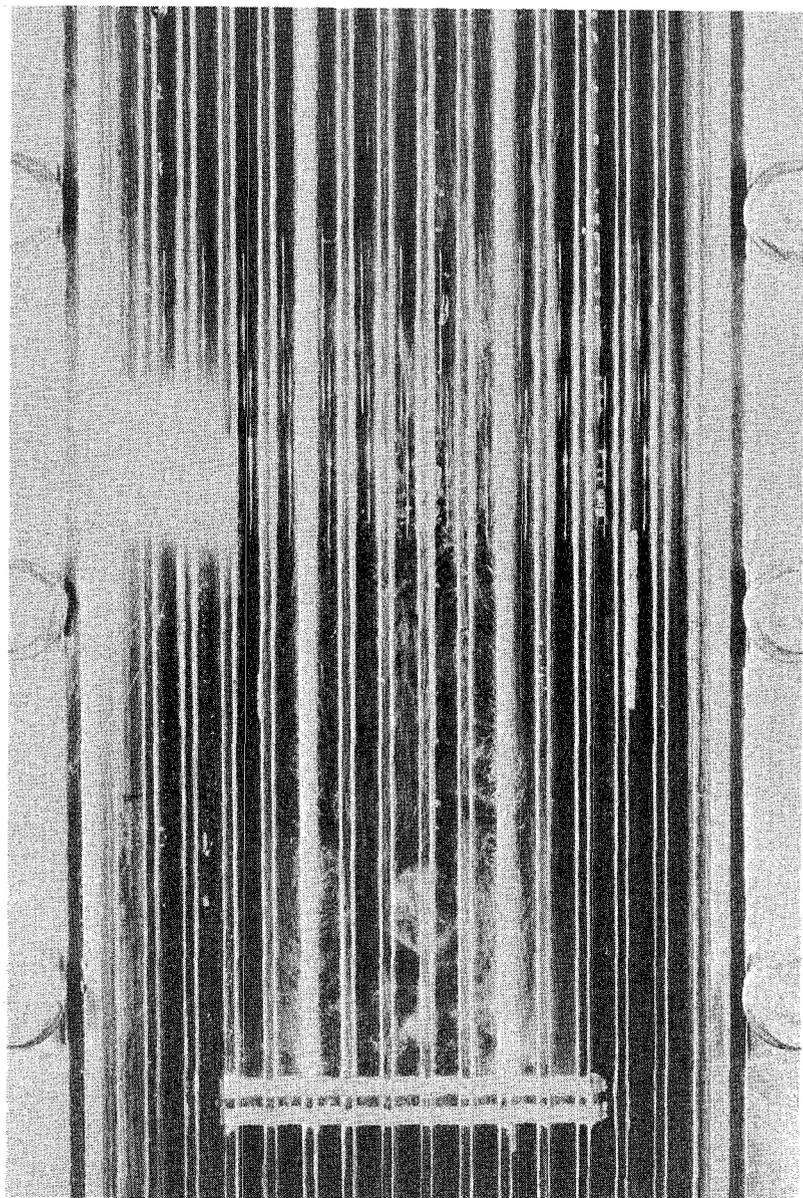


Abb. 10: wie Abb. 9, aber Serie 5/2

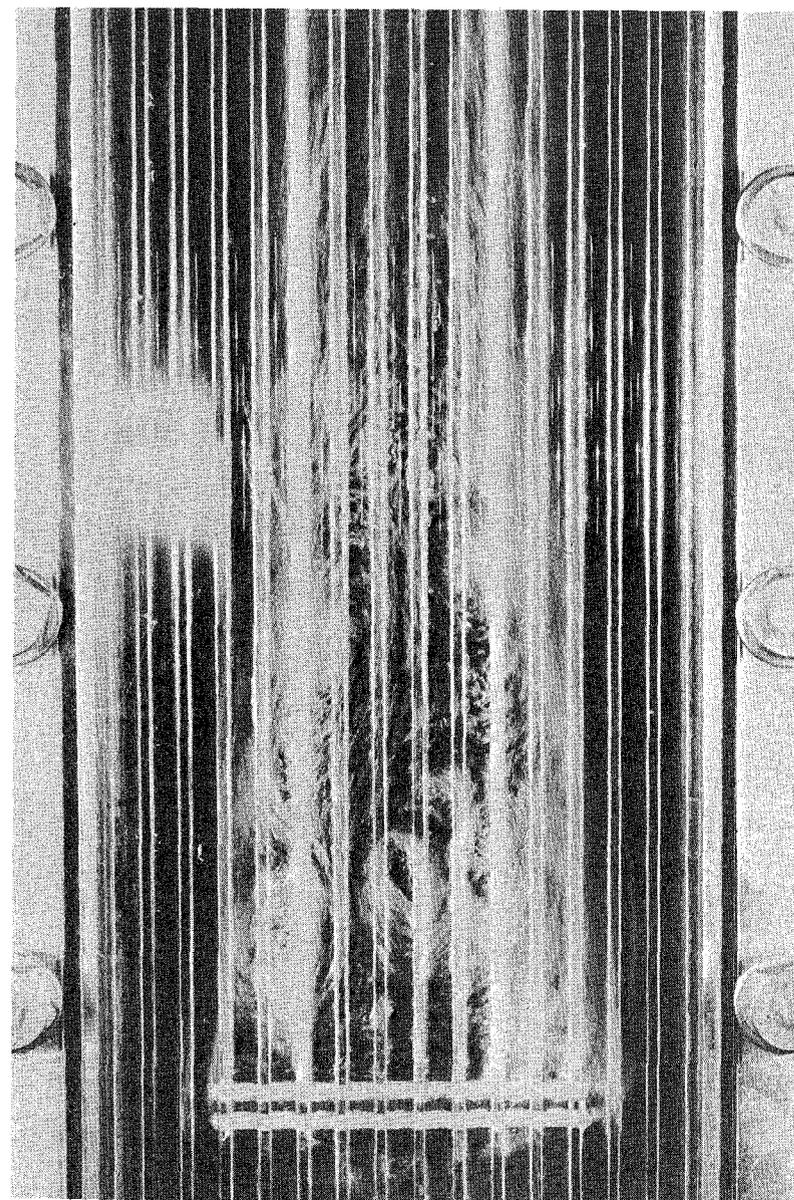


Abb. 9: Momentaufnahme der Strömung im
Totwasser (1/250 sec, Serie 5/1)

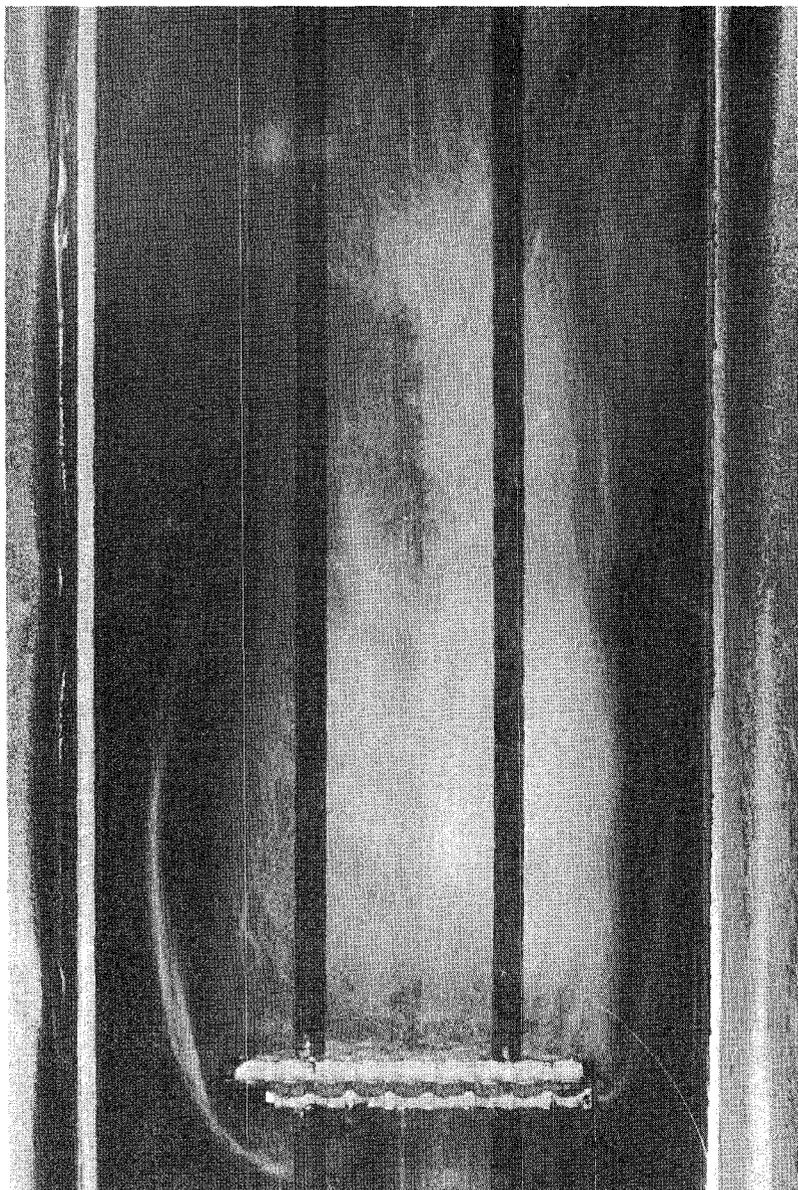


Abb. 12: wie Abb. 11, aber Serie 7/3.2)

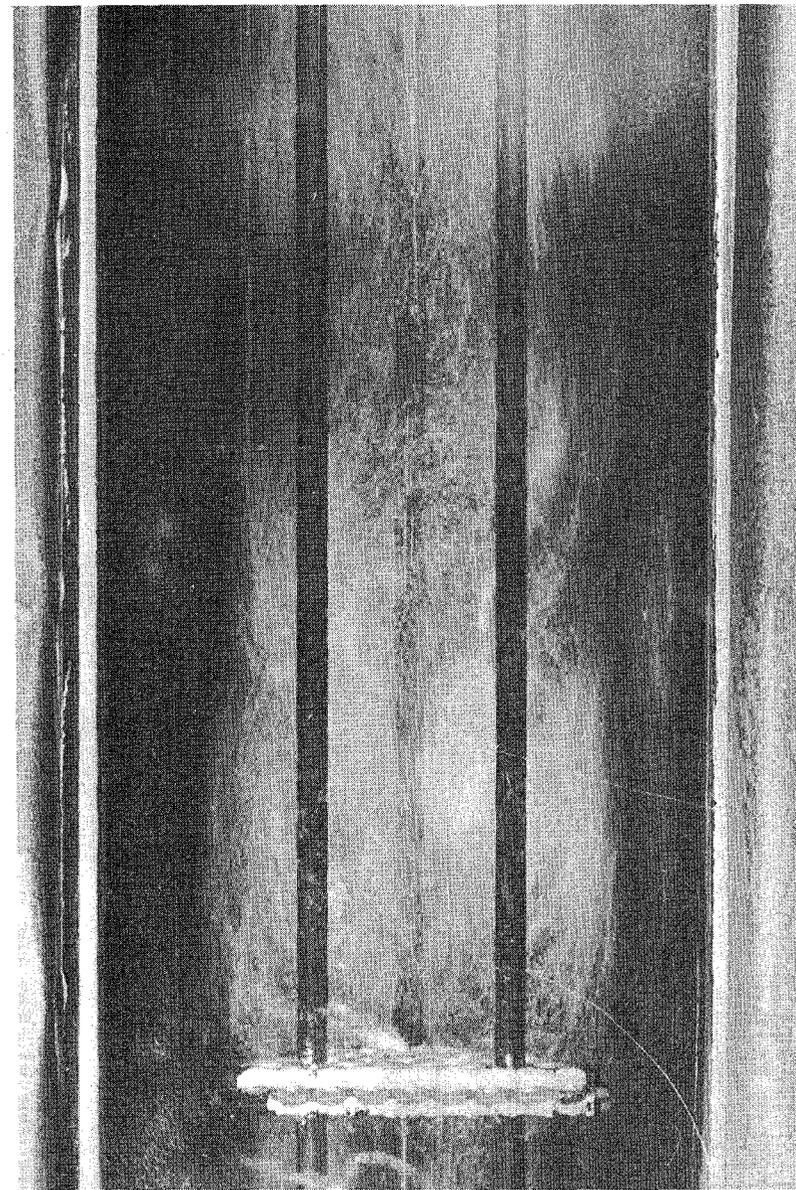


Abb.11: Momentaufnahme der Strömung im Totwasser (1/250 sec, Serie 7/3.1)

Sehr viel deutlicher als aus den hier gezeigten Abbildungen konnte aus dem Filmmaterial entnommen werden, daß zwischen diesen beiden Versuchsgruppen kein großer Unterschied sowohl im Strömungsverhalten als auch in den Abmessungen des Totwassergebietes bestand. Auch bei den Versuchen, die ohne Stäbe durchgeführt wurden, konnte eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl nicht festgestellt werden. Das Verhältnis von Totwasserlänge zu Störungsdurchmesser lag bei allen Versuchen der Serien 5 und 7 bei $L / D = 1,6$.

Im Vergleich zu diesen Ergebnissen müssen die mit einer völlig anderen Meßmethode in [3] angegebenen Totwasserabmessungen gesehen werden. Diese Totwasserabmessungen wurden aus dem radialen Verlauf des statischen Drucks ermittelt. Eine Auswertung dieser Ergebnisse ergibt ein Verhältnis $L / D = 1,65 \pm 0,12$. Eine sehr gute Übereinstimmung mit den hier gewonnenen Ergebnissen kann festgestellt werden.

Auch die Strömungsform im Totwassergebiet selbst weist zwischen den hier genannten Versuchsserien keinen qualitativen Unterschied auf. Insbesondere aus den Filmen war zu entnehmen, daß zwei gegenläufige symmetrische Wirbel an der durchsichtigen Beobachtungsfläche sichtbar werden. Dies läßt den Schluß zu, daß auch in Stabbündelgeometrien ein torusähnlicher Wirbel hinter einer Störung wie der in den Versuchen angewendeten auftritt. Die Auswertung der Filme ergab weiterhin, daß die in den Abbildungen 9 und 10 sichtbaren kleinen zentralen Wirbel direkt oberhalb der Störung wahrscheinlich durch eine Undichtigkeit zwischen Störung und Abdeckplatte hervorgerufen werden.

3.2 Einfluß der radialen Lage der Störung

In den Versuchsserien 8 und 9 wurde die bisher verwendete Störung in eine Ecke gelegt. Abbildung 13 zeigt im Prinzip die dadurch entstehende Anordnung. In beiden Versuchsserien wurde eine glatte Abdeckplatte verwendet. Die Versuchsserie 8 wurde ohne Stabbündel durchgeführt, in der Versuchsserie 9 waren alle Stäbe eingebaut.

Das Strömungsbild ist in beiden Fällen sehr ähnlich, wie die Abbildungen 15 und 16 zeigen. Es ist ein Hauptwirbel festzustellen, der sich axial sehr

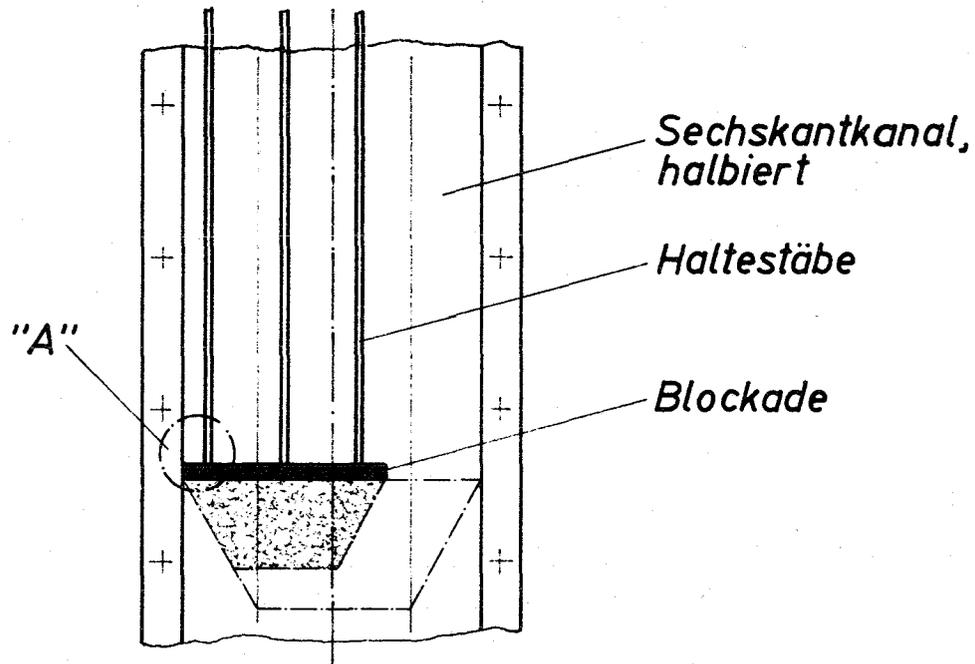
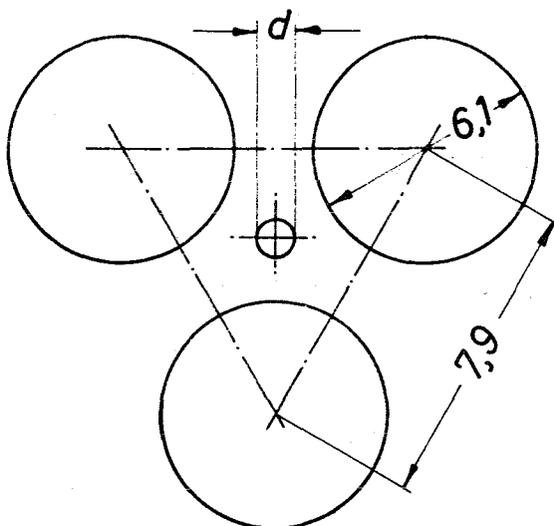


Abb. 13: Anordnung der Blockade in einer Ecke des Stabbündelkastens



| d | Versuchsreihe |
|-----|---------------|
| 0,5 | 12 |
| 1,0 | 13 |
| 1,5 | 14 |

Abb. 14: Anordnung der Bohrungen in der Blockade für die Versuche mit Restdurchsatz

viel länger ausdehnt als bei zentrisch angeordneter Störung. Zusätzlich konnte jedoch aus den Filmen entnommen werden, daß sich ein gegenläufiger Wirbel unmittelbar hinter der Störung in der durch zwei Wände begrenzten Ecke ausbildet (in Abb. 13 mit A bezeichnet).

Wegen der größeren hydraulischen Durchmesser der Kanäle an den glatten Wänden scheint die Rückströmung insbesondere im Bereich der Ecke stärker zu sein als die entsprechende Rückströmung bei zentraler Lage der Störung im Bündel. Auf diesen Umstand muß in Abschnitt 3.5 noch einmal eingegangen werden.

Es muß hier betont werden, daß die in Abb. 13 angegebene Ecke A keine Symmetrieachse für eine sechseckige Störung in der eingebrachten Form darstellt. Aus diesem Grunde ist bei einem Vergleich der Totwasserlänge mit der charakteristischen Abmessung der Störung D auch nicht ohne weiteres auf den doppelten Durchmesser zu extrapolieren. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte für dieses Verhältnis L / D stellen daher nur Orientierungswerte dar und sind nicht vergleichbar mit den Werten für die symmetrisch im Bündel angebrachte Störung.

3.3 Einfluß des Restdurchsatzes

Bei porösen örtlichen Störungen in Stabbündelgeometrie muß damit gerechnet werden, daß der dann auftretende Restdurchsatz von Einfluß auf die Strömungsform im Totwasser nach einer Störung ist. Zu Simulation wurden deshalb besondere Störungen verwendet, bei denen die Unterkanäle mit durchgehenden Bohrungen versehen waren. In Abb. 14 ist die Anordnung skizziert. Der Durchmesser der Durchgangsbohrungen wurde in drei Stufen von 0,5 mm über 1 mm auf 1,5 mm erweitert, entsprechend den Serien 12, 13, 14 in Tabelle 1.

Zur Auswertung dieser Versuchsserien Nr. 12, 13 und 14 (vergl. Tabelle 1) mußten die Filmaufnahmen herangezogen werden. Eine Auswertung auf Grund der Fotografien war nicht möglich. Die in den Abbildungen 17 bis 19 gezeigten Fotografien geben nur einen unvollständigen Eindruck der festgestellten Phänomene. Die Versuchsergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 zusammenfassend dargestellt.

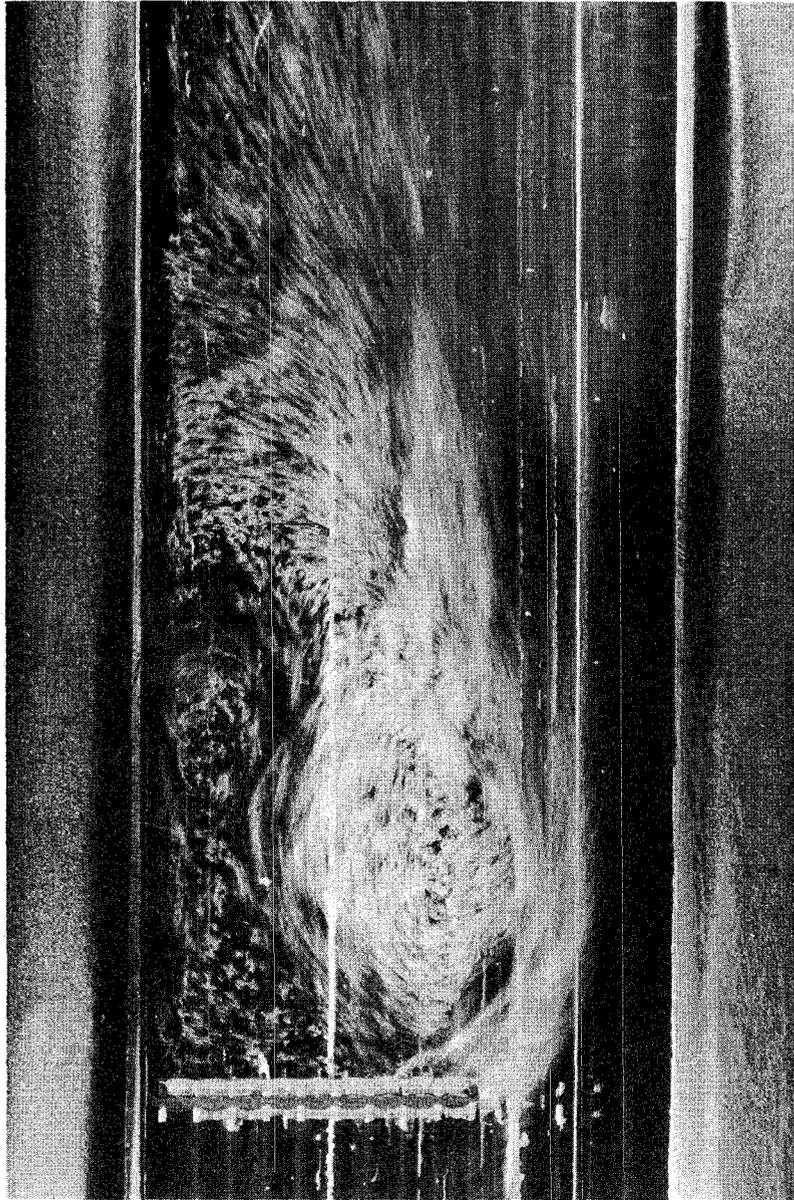


Abb. 16: wie Abb. 15, aber mit Stabbündel,
Serie 9/3.1

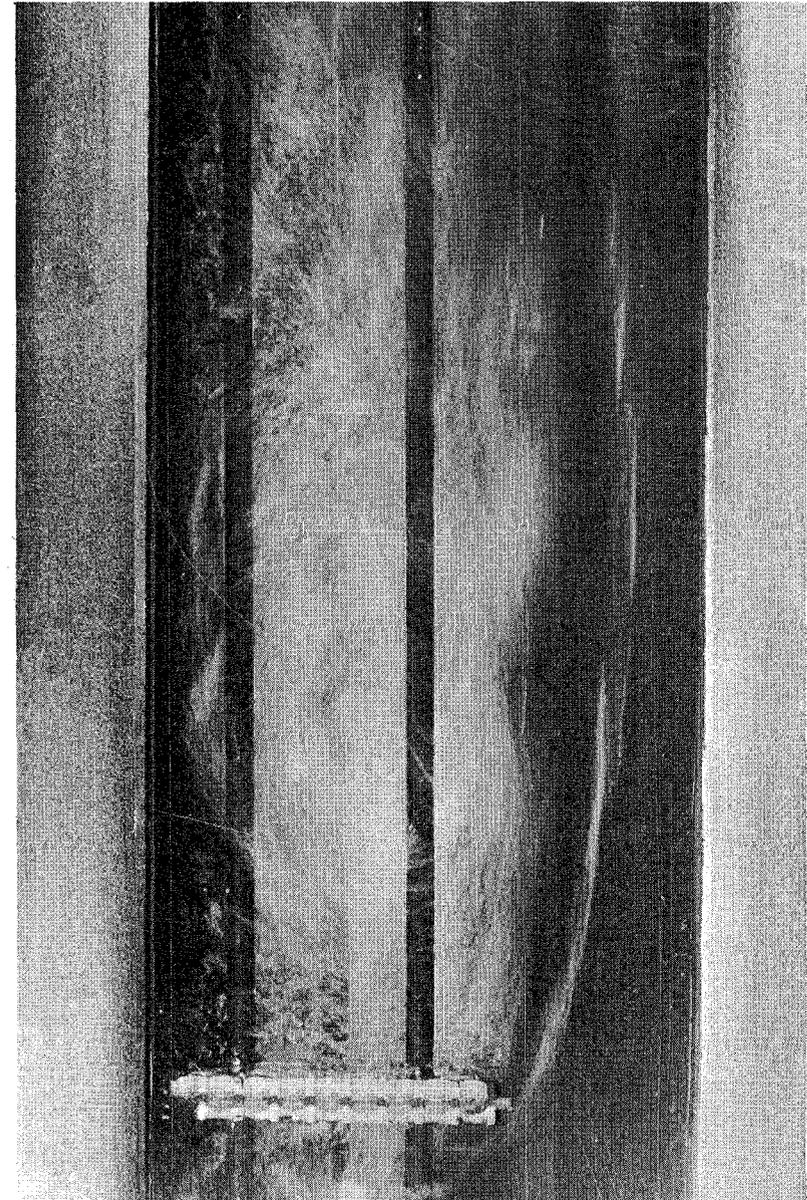


Abb. 15: Momentaufnahme der Strömung in Totwas-
ser bei Ecklage der Blockade (1/250 sec,
Serie 8/1.1)

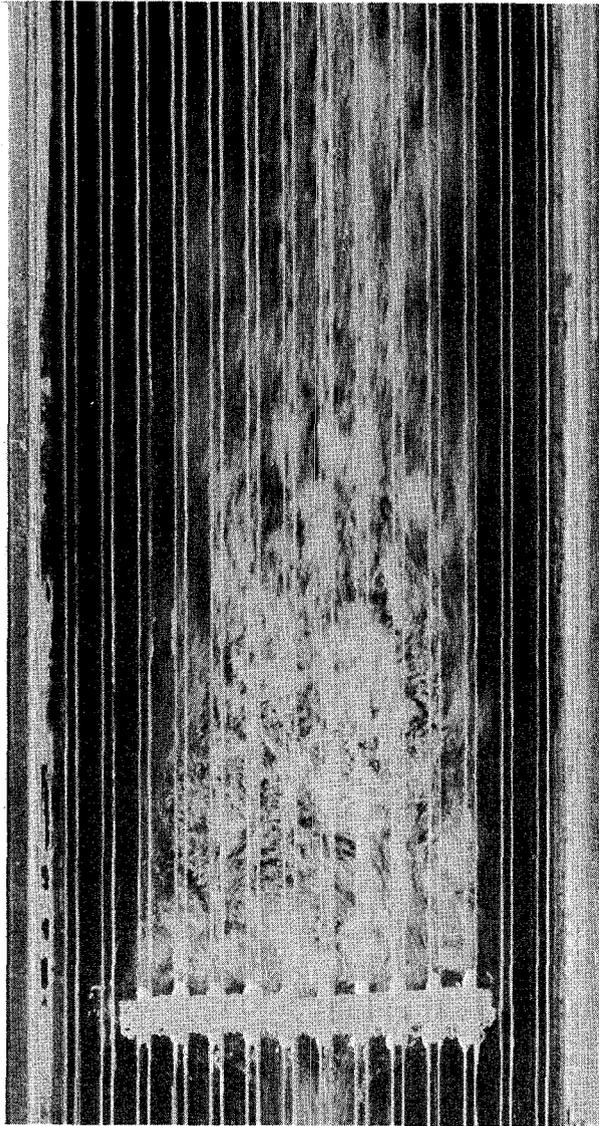


Abb. 19: wie Abb. 17, aber Serie 14/
2.2, 1/1000 sec



Abb. 18: wie Abb. 17, aber Serie 13/
3.2, 1/250 sec

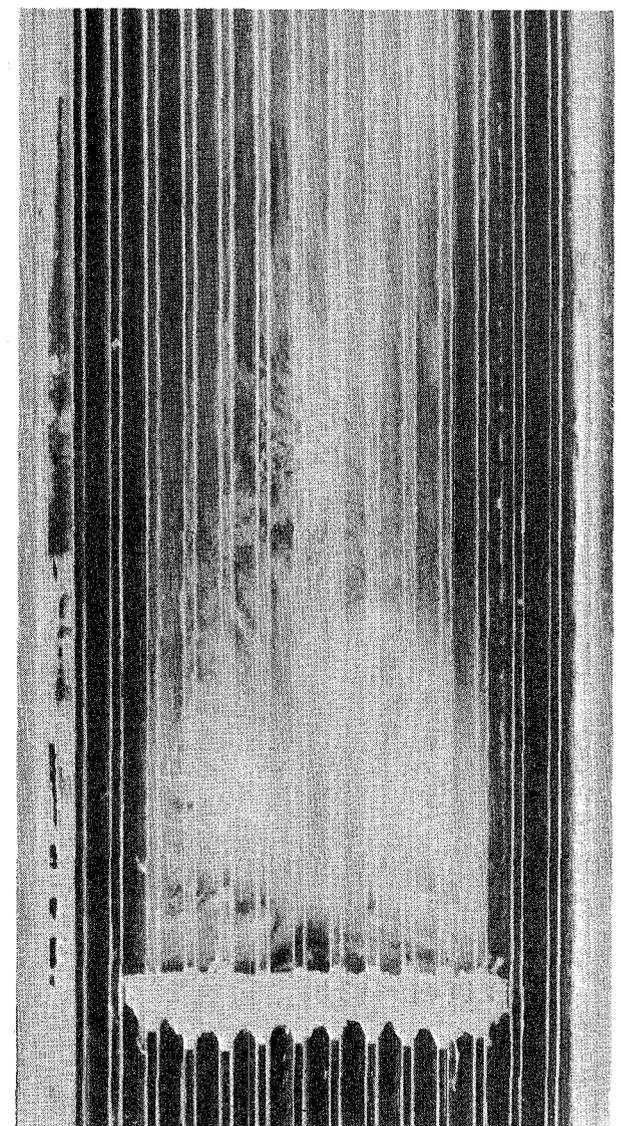


Abb. 17: Momentaufnahme der Strömung
im Totwasser bei Restdurch-
satz (1/125 sec, Serie 12/2.2)

Bei der Betrachtung der aufgenommenen Hochfrequenzfilme konnte festgestellt werden, daß durch einen Restdurchsatz durch die Blockade das Totwassergebiet von der Blockade abgedrängt wird. Die Lage des hinteren Staupunkts des Totwassergebietes verändert sich jedoch nicht wesentlich. Mit steigendem Bohrungsdurchmesser in den Unterkanälen, d.h. mit steigendem Restdurchsatz, nimmt der Abstand zwischen der Rezirkulationsströmung im Totwassergebiet und der Blockade zu. Bei der größten Bohrung (1,5 mm \emptyset) wurde dann eine Auflösung des Totwassergebietes festgestellt. Es war lediglich eine begrenzte Pulsationszone zu bemerken, in der zeitweilig auch Rückströmungen auftraten. Die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit hatte jedoch auch in dieser Zone die Richtung der Hauptströmung.

Um einen Eindruck von der Größe des Restdurchsatzes zu bekommen, wurde eine Abschätzung vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Abschätzung sind ebenfalls in Tabelle 3 bezogen auf den Gesamtdurchsatz eingetragen. Dieser Abschätzung liegt der Druckunterschied zwischen Oberseite und Unterseite der Störung bei vollständiger Blockade (etwa 1200 mm WS bei $\dot{V} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$) zugrunde, der bei der Bestimmung des Totwasservolumens [2] gemessen wurde. Dieser Druckunterschied wird jedoch durch den Restdurchsatz abgebaut, dadurch wird die Abschätzung umso ungenauer, je größer der Durchmesser der Bohrungen ist. Der tatsächliche Wert für den Restdurchsatz wird kleiner als in Tabelle 3 angegeben.

3.4 Einfluß von Abstandshaltern im Totwassergebiet

Da in Brennelementen mit Stabündelgeometrie und Abstandshaltergittern damit gerechnet werden muß, daß insbesondere im Bereich eben dieser Abstandshaltergitter lokale Störungen auftreten können, wurden zwei Versuchsserien mit Abstandshaltergittern durchgeführt. Dabei war einmal das Abstandshaltergitter direkt oberhalb der lokalen Störung angeordnet. Bei einer zweiten Versuchsserie wurde das Abstandshaltergitter in Hauptströmungsrichtung 30 mm über die Blockade verschoben.

Generell kann gesagt werden, daß sich das Strömungsverhalten im Totwassergebiet selbst nicht wesentlich ändert. Bei der Anordnung des Abstandshalters direkt oberhalb der Störung wurde jedoch eine Verlängerung des Totwassergebietes festgestellt (s. Tabelle 2). Dies ist vermutlich auf

Tabelle 2 Auswertung der Versuche

| Versuchs- serie | \dot{V} $\frac{m^3}{h}$ | \bar{u} $\frac{m}{s}$ | Re 1 | $\frac{L}{D}$ 1 |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|
| 5/3 | 35 | 4,10 | $2,02 \cdot 10^4$ | $1,63 \pm 0,07$ |
| 5/4 | 52 | 6,10 | $3,00 \cdot 10^4$ | $1,57 \pm 0,07$ |
| 6/1 | 36 | 3,88 | $2,20 \cdot 10^4$ | $1,96 \pm 0,04$ |
| 6/2 | 52 | 5,60 | $3,18 \cdot 10^4$ | $1,59 \pm 0,04$ |
| 7/1 | 61 | 3,56 | $23,0 \cdot 10^4$ | $1,59 \pm 0,08$ |
| 7/2 | 100 | 5,84 | $38,4 \cdot 10^4$ | $1,59 \pm 0,08$ |
| 8/2 | 60 | 3,50 | $23,4 \cdot 10^4$ | $(2,59 \pm 0,05)$ |
| 8/3 | 100 | 5,84 | $39,0 \cdot 10^4$ | $(3,00 \pm 0,05)$ |
| 9/1 | 33 | 3,56 | $2,32 \cdot 10^4$ | $(2,4 \pm 0,05)$ |
| 10/1 | 50 | 5,86 | $3,19 \cdot 10^4$ | $2,00 \pm 0,05$ |
| 11/1 | 50 | 5,86 | $3,19 \cdot 10^4$ | $1,48 \pm 0,05$ |
| 12/1 | 50 | 5,86 | $3,34 \cdot 10^4$ | $1,50 \pm 0,04$ |
| 13/2 | 50 | 5,86 | $3,23 \cdot 10^4$ | $1,50 \pm 0,04$ |
| 14/1 | 50 | 5,86 | $3,13 \cdot 10^4$ | - |

Tabelle 3 Versuchsserien mit Restdurchsatz

| Versuchs- serie | \dot{V} $\frac{m^3}{h}$ | d mm | $\frac{F_d}{F_{BL}}$ 1 | $\frac{\dot{m}_d}{M}$ 1 | s mm |
|--------------------|------------------------------|---------|---------------------------|----------------------------|---------|
| 12/1 | 50 | 0,5 | 0,015 | 0,008 | 5 |
| 13/2 | 50 | 1,0 | 0,061 | 0,054 | 15 |
| 14/1 | 50 | 1,5 | 0,136 | 0,162 | - |

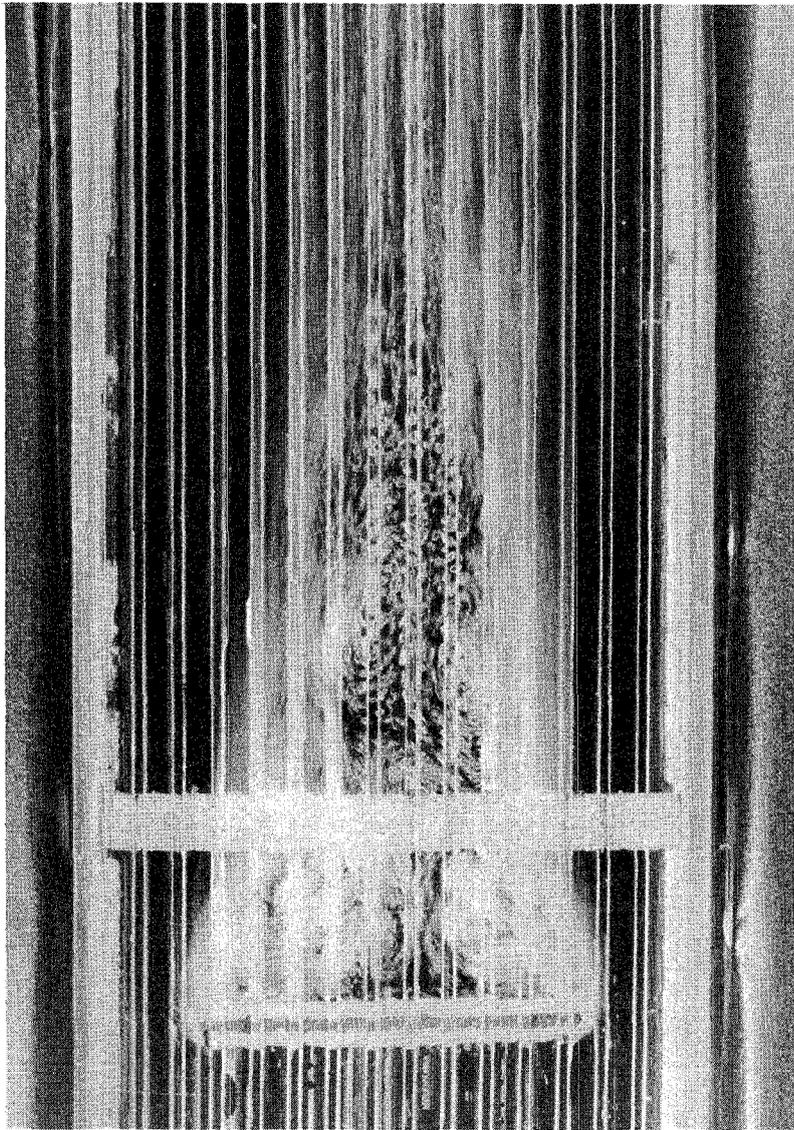


Abb. 21: wie Abb. 20, aber Abstandshalter
30 mm oberhalb der Blockade,
Serie 11/2.2

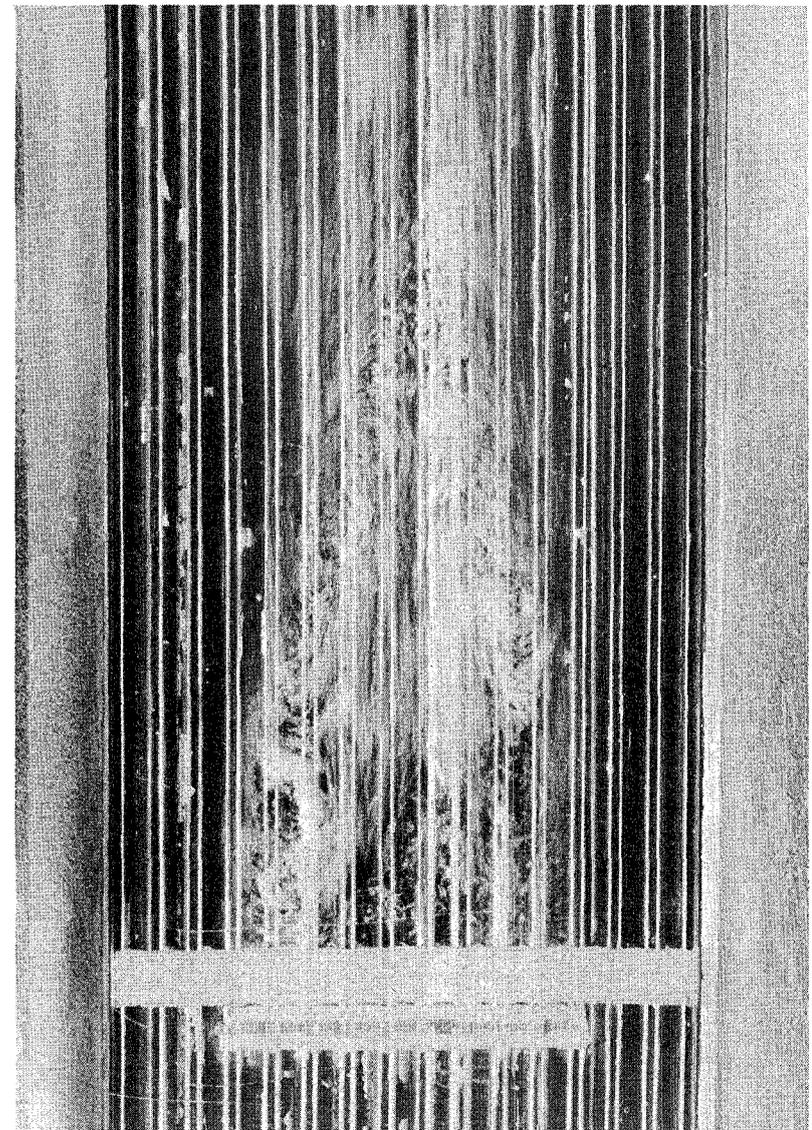


Abb. 20: Momentaufnahme der Strömung im Tot-
wasser, Abstandshalter unmittelbar
oberhalb der Blockade (1/250 sec,
Serie 10/3.2)

eine Richtwirkung des Abstandshaltergitters im Bereich der Hauptströmung zurückzuführen. Im Bereich des Totwassers selbst lag das gleiche Strömungsverhalten vor, wie es in Versuchen ohne Abstandshaltergitter gefunden wurde (vergl. Serie 5). In den Zellen des Abstandshaltergitters oberhalb der Blockade muß jedoch mit stagnierender Flüssigkeit gerechnet werden.

Bei einer Verschiebung des Abstandshaltergitters in Strömungsrichtung über die Störung wurde als deutlichstes Merkmal im Bereich des Abstandshaltergitters eine Einschnürung des Totwassers festgestellt. Auch diese Einschnürung dürfte auf die Richtwirkung des Abstandshaltergitters zurückzuführen sein. Als weiteres besonderes Merkmal konnte festgestellt werden, daß sich der Wirbelkern nach unten in Richtung Störung in den Bereich zwischen Abstandshaltergitter und Störung verlagerte. Eine wesentliche Veränderung der Lage des hinteren Staupunkts des Totwassers gegenüber der Serie 5 (ohne Abstandshaltergitter) konnte bei dieser Serie nicht festgestellt werden (vergl. auch Tabelle 2). Die Abbildungen 20 und 21 geben einen Eindruck von den festgestellten Verhältnissen.

3.5 Einfluß der Wandstruktur im durchsichtigen Bereich

Auf Grund von Einschränkungen bei der zugeführten elektrischen Leistung ist es bei Experimenten sehr oft notwendig, Stabbündel durch Ausschnitte aus Stabbündelgeometrien zu simulieren. Wenn man ein gesamtes Bündel z.B. durch einen 60° -Ausschnitt aus dem Bündel simulieren will, stellt sich die Frage, ob die Begrenzungswände eine bestimmte Struktur aufweisen müssen, damit die hydrodynamischen Eigenschaften des Simulationsexperimentes nicht verfälscht werden.

Um genauere Aufschlüsse über den Einfluß der Wandstruktur, insbesondere bei den Strömungsvorgängen nach einer örtlichen Störung zu bekommen, wurden Versuchsserien mit glatter Begrenzungswand und solche mit strukturierter Begrenzungswand durchgeführt. Die Struktur bestand darin, daß die Wand mit halben Stäben versehen war, die im richtigen Teilungsverhältnis angebracht waren. Eine zusätzliche Wand entsteht im letzteren Fall nur in den Zwischenräumen zwischen den halben Stäben. Befindet sich diese Wand

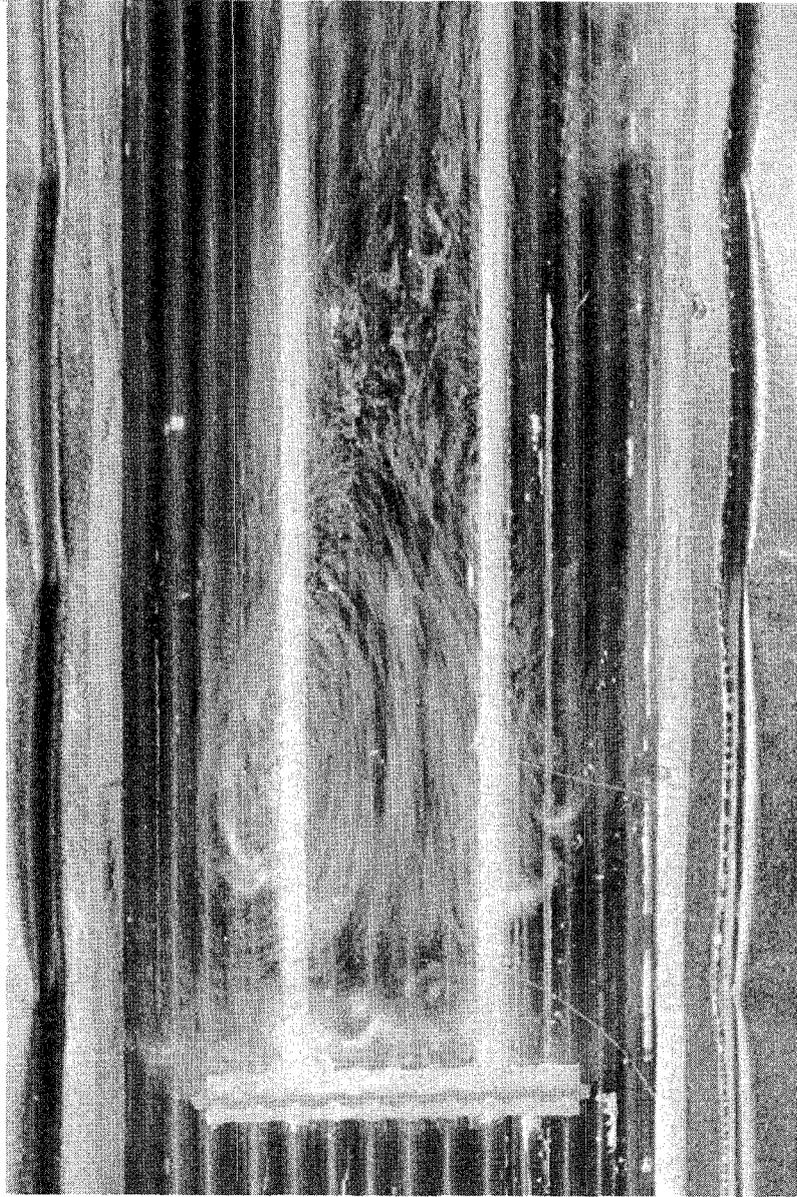


Abb.23: wie Abb.22, aber Serie
6/3.2

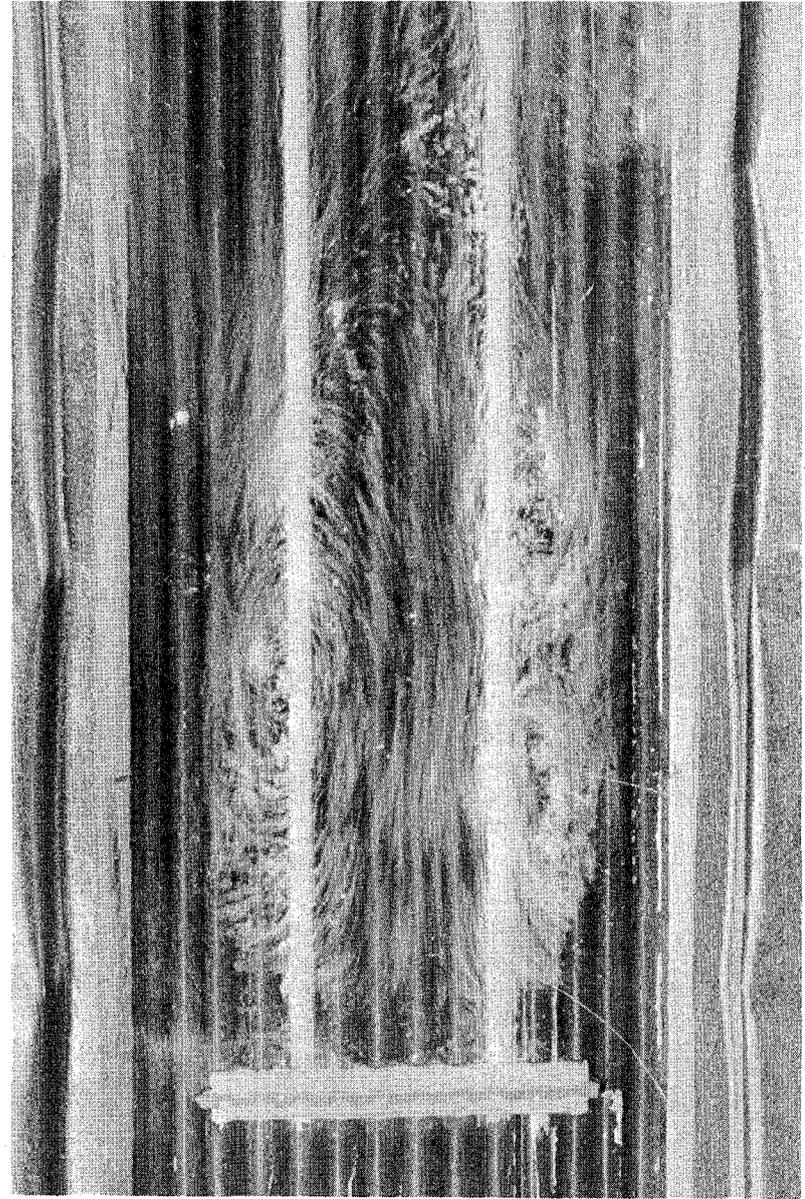


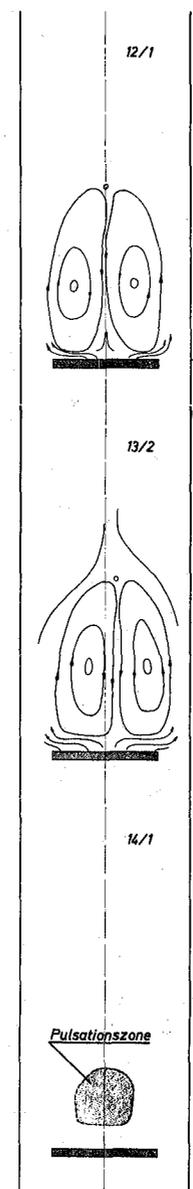
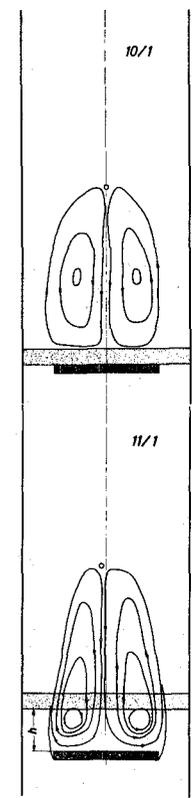
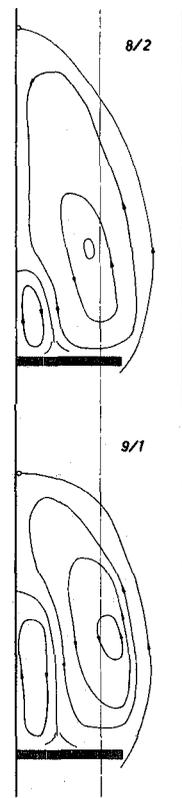
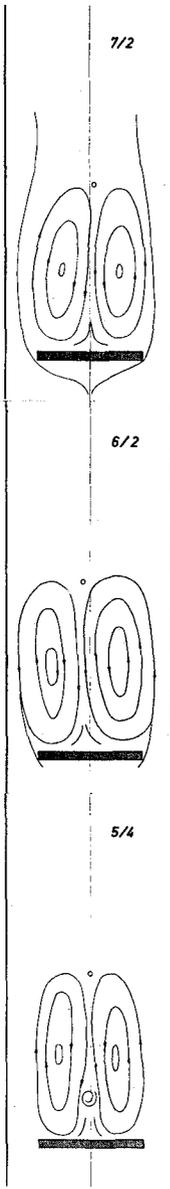
Abb. 22: Momentaufnahme der Strömung
im Totwasser (1/125 sec,
Serie 6/3.1)

- wie bei den hier beschriebenen Versuchen - in einer Symmetrieebene, also an einer Stelle, an der auch ohne Wand kein Netto-Massen- und Impulsaustausch auftritt, dann unterbindet sie lediglich den turbulenten Austausch.

Die Abbildungen 22 und 23 zeigen die Strömungsform bei den Untersuchungen mit der glatten Wand. Diese Abbildungen müssen verglichen werden mit Abbildungen 9 und 10, bei denen bei sonst gleichen Bedingungen lediglich die Abdeckwand mit Stabstruktur versehen war.

Die Untersuchungen mit glatter Wand (Abb. 22 und 23) stellen bei den gesamten Versuchsserien den einzigen Fall dar, bei dem ein Einfluß der Reynoldszahl auf das Längen- zu Durchmesser Verhältnis des Totwassers festgestellt werden konnte (vergl. Tabelle 2, Versuchsserien 6.1 und 6.2). Aus diesem Grunde ist der Schluß zulässig, daß die hydraulischen Verhältnisse bei einer glatten Abdeckwand nicht mehr denjenigen entsprechen, die in einem Stabbündel selbst zu erwarten sind.

Ein weiteres Indiz für den Einfluß der Wandstruktur ist die Abmessung der turbulenten Austauschzone im Randbereich des Totwassers. Bei glatter Wand konnte nach Auswertung der Filme festgestellt werden, daß die radiale Ausdehnung dieser turbulenten Austauschzone sehr viel breiter ist als bei einer Wand mit Stabstruktur. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Austausch zwischen den einzelnen Unterkanälen im Falle der glatten Abdeckwand erleichtert ist.



| Serie | Wand | Stabbündel | Serie | Wand | Stabbündel | Restdurchsatz | Abstandshalter |
|-------|------------|------------|-------|------------|------------|---------------|----------------|
| 5/4 | profiliert | mit | 10/1 | profiliert | mit | ohne | h = 0 |
| 6/2 | glatt | mit | 11/1 | profiliert | mit | ohne | h = 30 mm |
| 7/2 | glatt | ohne | 12/1 | profiliert | mit | d = 0,5 mm | - |
| 8/2 | glatt | ohne | 13/2 | profiliert | mit | d = 1,0 mm | - |
| 9/1 | glatt | mit | 14/1 | profiliert | mit | d = 1,5 mm | - |

○ hinterer Staupunkt

Abb. 24: Strömung im Totwasser hinter der Blockade im zeitlichen Mittel bei den verschiedenen Versuchsserien, schematisch und vereinfacht

4. Abschließende Bemerkungen

Auch wenn die durchgeführten phänomenologischen Versuche nur qualitative Ergebnisse ermöglichten, ist es doch möglich, für die theoretische Untersuchung von lokalen Störungen in Brennelementbündeln und für weitere Versuchsvorhaben eine Reihe von Aussagen zu machen und wichtige Hinweise zu geben. Zusammenfassend kann festgestellt werden (vgl. auch Abb. 24):

- Die Struktur von Begrenzungswänden bei Stabbündelausschnitten für experimentelle Untersuchungen muß erhalten bleiben, damit die hydrodynamischen Verhältnisse nicht verfälscht werden.
- Durch die Anwesenheit von Abstandshaltergittern im Totwasserbereich wird die Strömung im Totwassergebiet nicht wesentlich verändert. Im Abstandshaltergitter selbst muß jedoch mit stagnierender Flüssigkeit gerechnet werden, wenn es sich direkt oberhalb einer Blockade befindet.
- Ein geringer Restdurchsatz durch die blockierte Zone führt lediglich zum Abheben der Rezirkulationsströmung des Totwassergebietes von der Störung. Mit steigendem Restdurchsatz nimmt der Abstand zwischen der Rezirkulationsströmung und der Störung zu. Bei einem Restdurchsatz von etwa 15 % des Gesamtdurchsatzes wurde eine weitgehende Auflösung des Totwassergebietes festgestellt.
- Eine Abhängigkeit der Totwasserlänge von der Reynoldszahl wurde wie in [2, 3] auch in diesen Versuchen nicht festgestellt.

Die Parameter bei den beschriebenen Versuchen waren so weit gestreut, daß die Ergebnisse eine ausreichende Kenntnis der bei Kühlkanalblockaden auftretenden Phänomene vermitteln. Weitere Versuche sind deshalb zur Zeit nicht geplant. Mit der Versuchseinrichtung ist jedoch ein Hilfsmittel vorhanden, das jederzeit die schnelle Durchführung phänomenologischer Untersuchungen ermöglicht, wenn sich neue Fragestellungen ergeben.

5. Nomenklatur

| | | |
|-------------|---------------------|---|
| D | m | Eckmaß der Blockade (vgl. Abb. 2) |
| d | mm | Durchmesser der Bohrungen in den blockierten Unterkanälen (vgl. Abb. 16) bei Restdurchsatz |
| d_h | m | Hydraulischer Durchmesser im ungestörten Bereich der Teststrecke |
| F_{BL} | m^2 | Fläche der Blockade (= Summe aller blockierten Unterkanalflächen einschl. der Bohrungen bei Restdurchsatz) |
| F_d | m^2 | Fläche aller Bohrungen bei Restdurchsatz |
| F_{ges} | m^2 | Gesamter Strömungsquerschnitt im ungestörten Bereich der Teststrecke |
| L | m | Totwasserlänge (zwischen Oberseite der Blockade und hinterem Staupunkt der Rezirkulationszone) |
| \dot{M} | kg/s | Gesamtdurchsatz (Massenstrom) durch die Teststrecke ($\dot{M} = \dot{V} \cdot \rho$) |
| \dot{m}_d | kg/s | Massenstrom durch alle Bohrungen, abgeschätzt aus dem Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite der Blockade, gemessen <u>ohne</u> Restdurchsatz |
| Re | 1 | Reynoldszahl im ungestörten Bereich der Teststrecke, $Re = \bar{u} \cdot d_h / \nu$ |
| s | mm | Ungefähre Distanz zwischen Oberseite der Blockade und Unterseite der Rezirkulationszone bei Restdurchsatz |
| \bar{u} | m/s | Mittlere Geschwindigkeit im ungestörten Bereich der Teststrecke ($\bar{u} = \dot{M} / (\rho \cdot F_{ges})$) |
| \dot{V} | $m^3/s,$ m^3/h | Gesamtdurchsatz (Volumenstrom) durch die Teststrecke (ohne die vernachlässigbaren, zur Sichtbarmachung hinzugefügten Luftbläschen) |
| ν | m^2/s | Kinematische Viskosität des Wassers |
| ρ | kg/m^3 | Dichte des Wassers |

6. Literatur

[1]

K.Gast:

Die Ausbreitung örtlicher Störungen im Kern Schneller Natriumgekühlter Reaktoren und ihre Bedeutung für die Reaktorsicherheit

KFK-Bericht 1380, Mai 1971

[2]

D.Kirsch, R.Meyder, G.F.Schultheiss:

Zur Strömungsverteilung im Bereich lokaler Kühlkanalblockaden in Stabbüdel-Brennelementen

Vortrag Nr. 137, Reaktortagung des Deutschen Atomforums, 30.3.-2.4.1971, Bonn

[3]

H.Nabizadeh:

Konstruktion und Erprobung einer Versuchseinrichtung zur Ermittlung von Totwasserbereichen in örtlich gestörten Brennelementbündeln

Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1970