

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

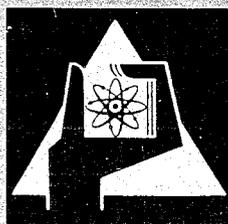
Januar 1969

KFK 925
EUR 4169 d

Institut für Reaktorentwicklung

Simulation der Kühlmittelaustreibung im Na-2 Brennelement

P. Fette, H. D. Großgarten



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Januar 1969

KFK 925

EUR 4169 d

Institut für Reaktorentwicklung

Simulation der Kühlmittelaustreibung
im Na-2 Brennelement ^{x)}

P.Fette

H.D.Großgarten

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

x) Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

1. Einleitung

Im Hinblick auf die Sicherheit schneller natriumgekühlter Brutreaktoren ist die Analyse des Kühlmittelsiedens von großer Bedeutung. Bisherige theoretische und experimentelle Untersuchungen [1, 2] verfolgten das Modell einer Einzelblasenejektion in einem Kühlkanal. Als Teststrecke diente bei Experimenten mit Natrium ein direkt oder auch indirekt beheiztes Rohr und bei Experimenten mit Wasser ein in einem Quarzglasrohr steckender Heizstab. In den Ejektionsversuchen mit Wasser [3] wurde der Austreibungs Vorgang mit einer Hochfrequenz-Filmkamera registriert, wesentliche phänomenologische Einzelheiten der Kühlmittelejektion konnten auf diese Weise interpretiert werden.

Offen bleibt jedoch bei allen Experimenten, die eine Einkanalordnung zugrunde legen, die Frage: Wie verhält sich die Blase beim Durchgang durch ein Brennelement, das aus einer hexagonalen Anordnung von 169 Brennstäben und mehreren Abstandshaltern besteht? Auch im Brennelement ist aus thermodynamischer Sicht - wie aus mehreren Experimenten zu dieser Frage hervorgeht [4, 5] - zu erwarten, daß die Siedeform bei genügend hoher Überhitzung des Kühlmittels die Einzelblasenbildung ist, oder zumindest eine Folge von Einzelblasen ist, die in größeren Zeitabständen hintereinander entstehen. Die in einem Stabbündel geltenden hydrodynamischen Voraussetzungen lassen es jedoch denkbar erscheinen,

- 1.) daß die Blase praktisch noch im status nascendi das Bestreben hat, zunächst den Querschnitt des Brennelementes auszufüllen und dann diesen Querschnitt beibehaltend in axialer Richtung durch das Stabbündel zu schießen
- 2.) daß sie nur den Querschnitt eines oder nur weniger Subkanäle ausfüllt (das ist der Flüssigkeitsraum, der durch jeweils 3 Stäbe begrenzt wird) und dann in diesen axial durchschießt.

Im 1. Fall wäre eine Berechnung der Ejektion des Kühlmittels durch das Anwachsen der Dampfblase modellmäßig nach [2] korrekt. Im 2. Fall ist für eine rechnerische Erfassung des Austreibungs Vorganges die Querschnittsfläche der Blase nicht definiert.

Bei den im folgenden beschriebenen Experimenten soll zur Klärung dieser Fragen die Blasenausbreitung in einem Stabbündel mit original Brennelementabmessungen optisch verfolgt werden.

2. Gesichtspunkte für die Konstruktion des Versuchsstandes

Aus der Forderung nach Sichtbarmachen der Blase im gesamten Brennelementquerschnitt resultiert, daß der Versuch praktisch undurchführbar ist mit Wasser oder gar Flüssigmetallen, wenn man die Blase durch Sieden des Kühlmittels erhalten will. Es bietet sich jedoch an, die Brennstäbe durch Glasstäbe zu ersetzen und diese mit einer Flüssigkeit zu umgeben, die den gleichen optischen Brechungsindex hat wie das Glas. Auf diese Weise wird das Stabbündel unsichtbar. Die Flüssigkeit (eine Mischung aus Petroleum und Monochlornaphtalin) zu beheizen, um Dampfblasen zu erzeugen, ist nicht sinnvoll, da die Mischung ein anderes Siedeverhalten hat als eine einheitliche Flüssigkeit, was sich störend auf den optischen Brechungsindex ausgewirkt hätte. Deswegen wurde mit 2 voneinander unabhängigen Stoffen - Flüssigkeit und Gas - experimentiert. Da nur ein hydrodynamischer und kein thermodynamischer Effekt beobachtet werden soll, spielen die Verwandtschaft von Gas und Flüssigkeit und die Temperatur des Systems nur eine untergeordnete Rolle. Wichtig ist jedoch die Einleitung des Gases:

In natura wächst die Blase so, daß sich ihr Schwerpunkt zunächst senkrecht von der beheizten Oberfläche wegbewegt. Wenige ms nach ihrer Entstehung kann aber ihr Schwerpunkt nur in axialer Richtung der Stäbe wandern, wobei auf jeden Fall einige Stäbe von ihr umschlossen werden. Wenn also das Gas in Richtung der Stäbe eingeleitet wird, ist die Blasenentstehung am sinnvollsten simuliert.

Aus Überhitzungsversuchen ist bekannt, daß die Blasenentstehung mit einem steilen Druckanstieg in der Größenordnung $1000 \text{ kp/cm}^2/\text{s}$ verbunden ist. Die Höhe des Druckes ist äquivalent der Überhitzung am Ort und zum Zeitpunkt der Blasenentstehung. Natrium kann eine Überhitzung von 300°C haben unter reaktornahen Bedingungen [47]. Dieser Überhitzung würde eine Druckdifferenz von ca. 8 kp/cm^2 entsprechen, wenn das Natrium am Ort der Blasenentstehung vor Siedebeginn ca. unter 1 ata Druck gestanden hat.

Diese Ausführungen besagen für die Einleitung des Gases in die Stabbündelanordnung, daß es am sinnvollsten ist, ein Schnellschlußventil so dicht wie möglich unter das Stabbündel anzuordnen. Strömungsverluste in den gasführenden Leitungen und im Schnellschlußventil sollen so klein wie möglich gehalten werden, um größenordnungsmäßig die steilen Druckkrampen simulieren zu können.

Das Gas soll also von unten nach oben durch das Stabbündel gedrückt werden. Der Treibdruck des Gases soll bis zu 9 ata variiert werden können, analog dem o.a. Druck bei Blasenentstehung im überhitzten Natrium.

Eine weitere Auslegungsgröße ist die Wachstumsgeschwindigkeit der Blase. Es sind bei Natrium- und Wasseraustreibungsversuchen in der Einkanalgeometrie Blasengeschwindigkeiten von 6 ./ 12 m/s gemessen worden. Bei diesen Werten sollte auch die Geschwindigkeit der Gasblase in den Simulationsversuchen liegen.

Diese Auslegungswerte von Anfangsdruck der Blase und Blasengeschwindigkeit sind natürlich nur grobe Anhaltswerte, die nicht den Anspruch erheben, für ein natriumgekühltes Brennelement obere Grenzen bei einem Störfall infolge Überhitzung des Natriums zu sein. Es soll mit diesen Auslegungswerten lediglich eine Vergleichsmöglichkeit zu den Verhältnissen im Brennelement geschaffen sein. Gegebenenfalls wird der Gasdruck noch erhöht, wenn die Blasengeschwindigkeit von 12 m/s bei einem Anfangsdruck von 9 ata noch nicht erreicht ist.

3. Aufbau der Anlage

Zugrunde gelegt wird die Geometrie des Brennelementes im Na-2-Reaktor [67]. 169 Stäbe von 6 mm \varnothing und 7,9 mm Mittenabstand sind durch Wabengitterabstandshalter [77] in einer hexagonalen Anordnung fixiert. 3 der Stäbe sind Edelstahlrohre, mit denen die Abstandshalter alle 20 cm auf Distanz gehalten werden. Dieser Einsatz (1440 mm lang) steckt in einem runden Glasrohr (138 \varnothing x 7 mm Wandstärke, Abb. 1-3). Ein sechseckiges Glasrohr analog dem Brennelementrohr war in der benötigten Länge und mit genügender Druckfestigkeit nicht zu beschaffen. Die 6 verbleibenden Hohlräume zwischen dem Stabbündel und der Glasrohrinnenwand wurden durch eng gesteckte

Glasstäbe (4 mm \varnothing) ausgefüllt, so daß sich angenähert die geometrischen Verhältnisse eines Brennelementrohres ergaben. Alle Glasteile sind aus dem Material Duran 50 mit dem Brechungsindex 1.472. Beim Einlassen der Flüssigkeit mit dem gleichen Brechungsindex werden die Stäbe unsichtbar, siehe Ausschnitt der Teststrecke in Abb. 4, hier hat die Flüssigkeit von unten kommend gerade einen Abstandshalter passiert. Die Teststrecke ist senkrecht in einem Gestell montiert, Abb. 5. Aus Sicherheitsgründen ist um das Gestell eine Blechverkleidung gebaut, gefilmt wird durch eine Plexiglasscheibe. Die Beleuchtungseinrichtung - Durchlicht, Auflicht, Mattscheibe und Lichtblenden - ist direkt an der Teststrecke unter der Blechverkleidung installiert. Über der Teststrecke befindet sich ein 2 m langer Auffangbehälter für das austreibende Flüssigkeits-Gasgemisch (Abb. 5 u. 6). Als Treibgas wurde Argon gewählt. Das Schnellschlußventil - pneumatisch betätigt - für den Argon-Eintritt sitzt ca. 9 mm zentral unterhalb der Glasstäbe. Es hat einen Öffnungsdurchmesser von 25 mm, der wahlweise durch eine Blende auf 8 mm \varnothing reduziert werden kann. Jeweils über der Öffnung sitzt ein abnehmbares, ca. 20 mm langes Führungsrohr, welches das Argon in den Glasstäben bis zum 1. Abstandshalter führt. Mit der 25 mm \varnothing Öffnung des Schnellschlußventils werden ca. 13 Stäbe bzw. 24 Subkanäle mit Argon beaufschlagt. Durch die 8 mm \varnothing Blende wird der mittlere Stab des Bündels und ein Ringspalt von 1 mm um diesen Stab mit 6 Subkanälen beaufschlagt. Weitere Einzelheiten der Anlage gehen aus Abb. 6 hervor. Zwischen Argon-Flasche und Schnellschlußventil ist aus Sicherheitsgründen ein Argon-Reservoirbehälter mit einem Volumen von 7 l konzipiert worden. Die Öffnungszeit des Schnellschlußventils kann über ein elektromagnetisches Preßluftventil gesteuert werden.

4. Meß- und Steuereinrichtung

Mit einem Quarzdruckaufnehmer in unmittelbarer Nähe des Argon-Eintritts wird der Druck in der Flüssigkeit bzw. im Flüssigkeits-Gasgemisch gemessen. Der Druck wird auf einem UV-Lichtschreiber registriert. Ebenfalls werden die Einschaltzeit des Elektromagnetventiles \approx Öffnungszeit des Schnellschlußventils sowie Zeitmarkenimpulse auf dem Streifen registriert. Diese Zeitmarke wird gleichzeitig auf dem Film in der Fastax-Zeitdehnerkamera belichtet. Als Synchronpunkt zwischen Film und Registrierstreifen dient

ca. in der Mitte des Filmes die Umschaltung der Zeitmarke von 100 auf 1000 Hz. Gefilmt wurde mit ca. 4000 Bildern pro Sekunde. Die statischen Drücke im Auffangbehälter und im Argon-Reservoir wurden mit üblichen Rohrfederanometern abgelesen.

Die Auslösung eines Versuches geschieht auf Knopfdruck derart, daß über elektronisch gesteuerte Zeitrelais folgende Schaltvorgänge nacheinander ausgeführt werden: UV-Lichtschreiber ein, 0,2 s später Kamera + Beleuchtung + Zeitmarke ein, nach ca. 10 % Filmlänge Schnellschlußventil öffnen, bei ca. Filmmitte Zeitmarke umschalten, wahlweise bei ca. 60 % - 100 % Filmlänge Schnellschlußventil schließen, nach Durchlauf des 30 m langen Filmes Kamera + Beleuchtung + Zeitmarke aus, 1 - 3 s danach UV-Schreiber aus.

5. Ergebnisse

Der Druck im Argon-Reservoir wurde in Stufen von $0,5 \text{ kp/cm}^2$ bis auf 9 ata gesteigert. Im Auffangbehälter wurde bei einigen Versuchen ein Vakuum von 0,5 ata gehalten, bei den meisten Versuchen jedoch ein Druck von 1 ata eingestellt. Mittels der Zeitmarke und der cm-Einteilung auf der rechten Lichtblende wurden Weg-Zeit-Kurven des Blasenwachstums von den Filmaufnahmen erstellt, Abb. 7. Bei $t = 0 \text{ ms}$ beginnt die Blase in der Teststrecke sichtbar zu werden. Durch Differentiation jeder Kurve in ihrem steilsten Teil ergibt sich die maximale Blasengeschwindigkeit. Mit $14,8 \text{ m/s}$ bei einem Argon-Anfangsdruck von 9 ata liegt sie über der eingangs erwähnten maximalen Geschwindigkeit der Blase (eigentlich Geschwindigkeit der Phasengrenzfläche) von 12 m/s bei den Wasseraustreibungsversuchen in Einkanal-Geometrie. Bei allen Versuchen, sowohl bei der $25 \text{ mm } \varnothing$ Öffnung und der auf das Schnellschlußventil gesetzten Blende mit der Öffnung von $8 \text{ mm } \varnothing$, füllte die Gasblase immer den ganzen Querschnitt des Stab-bündels aus, Abb. 8, 9, 10, 11. Bei der engeren Öffnung wurde der ganze Querschnitt zwar erst nach ca. 5 cm Weg ausgefüllt, Abb. 9, aber im weiteren Verlauf bis zum Verlassen der Teststrecke blieb immer der ganze Querschnitt ausgefüllt. Die Form der Gas-Flüssigkeitstrennfläche, also der Blasenspitze, wechselte im Verlauf des Vorganges von Halbkugel- bis Kegelform. Die größte Höhe des Kegels betrug ca. 10 cm; seine Spitze schwankte ca. 3 cm um die Mittelachse des Stabbündels. Durch die Abstandshalter wurde die Form der Blasenspitze jedoch kaum merkbar beeinflusst.

Zwischen den Abstandshaltern in Abb. 10 sind parallel zu den Abstandshaltern liegende Schatten zu erkennen. Dies sind Fronten von kleinen Bläschen, die sich bei dem jeweils vorhergehenden Versuch in den Abstandshaltern abgesetzt haben. Man kann an dieser Bläschenfront sehr deutlich sehen, daß die Flüssigkeit von einer Parallelströmung im ganzen Querschnitt erfaßt wird.

In Abb. 12 sind die vom Quarzdruckaufnehmer gemessenen Druckverläufe für die Versuche 16 und 18 zu sehen. In beiden Fällen betrug der Druck im Argon-Reservoir vor Auslösung der Versuche $P_{Ar} = 9$ ata. Der Druck im Auffangbehälter war $P_o = 1$ ata. Beim Einschießen des Argons in das Stab-bündel tritt in Versuch 18 ein starker Druckverlust auf, der auf die Drosselwirkung der vor das Schnellschlußventil montierten Blende von 8 mm \varnothing zurückzuführen ist. Die Druckanstiegsgeschwindigkeit beim Einschießen des Gases erreicht in Versuch 16 (keine Blende, voller Einlaßquerschnitt von 25 mm \varnothing) einen Wert von ca. 1160 kp/cm²/s und liegt damit größenordnungsmäßig in dem Bereich, der für den Druckanstieg bei Entstehung einer Dampfblase in überhitztem Wasser [3] gemessen wurde. Der Zeitpunkt $t = 0$ in Abb. 12 ist nicht identisch mit $t = 0$ in Abb. 7. Ca. 5 - 10 ms nach Beginn des Druckanstieges wird erst die Blase über dem unteren Flansch der Teststrecke sichtbar.

Zusammenfassend kann aus diesen Versuchen geschlossen werden, daß bei Störungen im Reaktor infolge Blasenbildung durch Überhitzung des Natriums die sich bildenden Blasen immer den ganzen Querschnitt des jeweils betroffenen Brennelementes ausfüllen werden. Eine Berechnung des Austreibungs Vorganges nach BLOW geht damit von einer wirklichkeitsgetreuen Definition der Blasenquerschnittsfläche aus.

Literaturverzeichnis

- [1_] D.Smidt, P.Fette, W.Peppler, E.G.Schlechtendahl,
G.F.Schultheiß:

Problems of Sodium Boiling in Fast Reaktors.
KFK 790, EUR 3960e, Juni 1968.
- [2_] E.G.Schlechtendahl:

Die Ejektion von Natrium aus Reaktorkühlkanälen.
Nukleonik, 10. Band, 5. Heft, 1967, S. 270-274.
- [3_] P.Fette:

Simulation der Kühlmittlejektion in natriumgekühlten
Brutreaktoren durch Experimente mit Wasser.
KFK 940, EUR 3976d, März 1969
(Auszug aus IRE-Bericht Nr. 71/68, Sept. 1968,
unveröffentlicht)
- [4_] K.H. Spiller, D.Perschke, G.Grass:

Überhitzung und Einzelblasenejektion von stagnierendem
Natrium.
Atomkernenergie, 13 Jg., 1968, Heft 4, S. 245-251.
- [5_] G.Grass, H.Kottowski, R.Warningsing:

Das Sieden von flüssigen Alkalimetallen.
Atomkernenergie, 12. Jg. 1967, Heft 314, S. 101-110.
- [6_] K.Gast, E.G.Schlechtendahl:

Schneller natriumgekühlter Reaktor Na-2.
KFK 660, EUR-3706d, Oktober 1967
- [7_] K.Rehme:

Widerstandsbeiwert des Na-2 Abstandshaltergitters.
(unveröffentlicht)

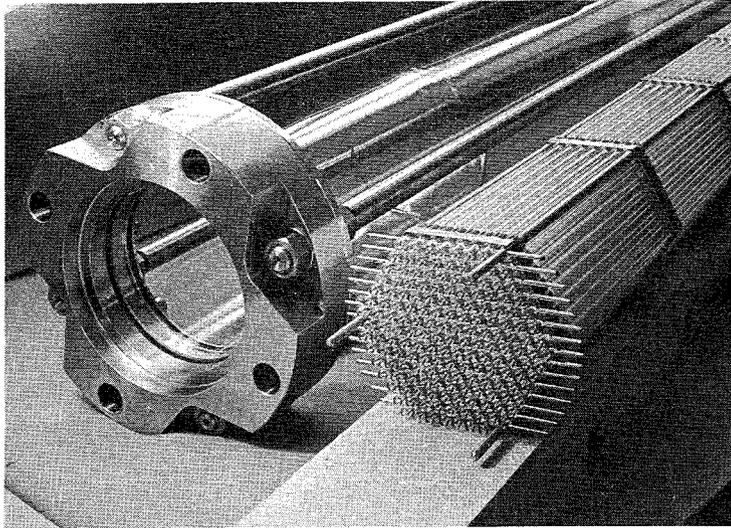


Abb. 1

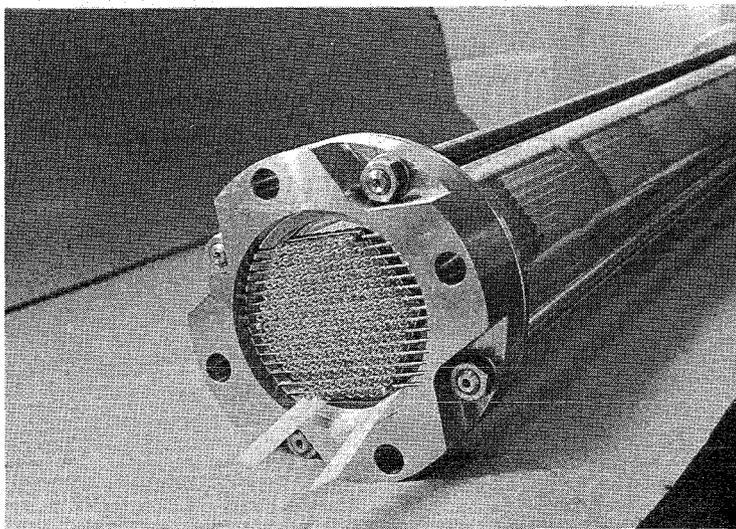


Abb. 2

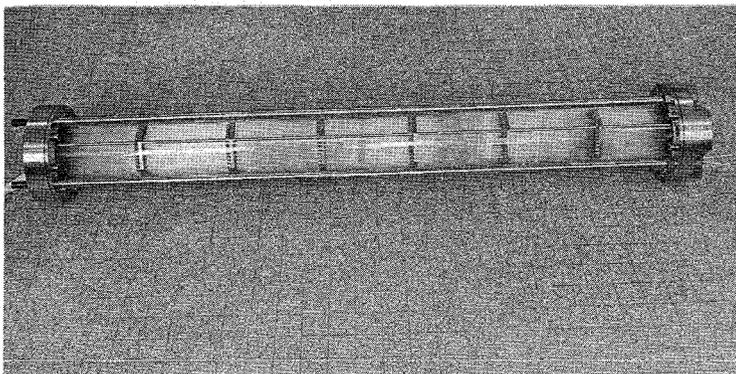


Abb. 3

Montage des Glasstabbündels.
Die Metallstäbe in 3 Eckpunkten des
Gitters (Abb. 1) dienen zur Fixierung der
8 Abstandhalter

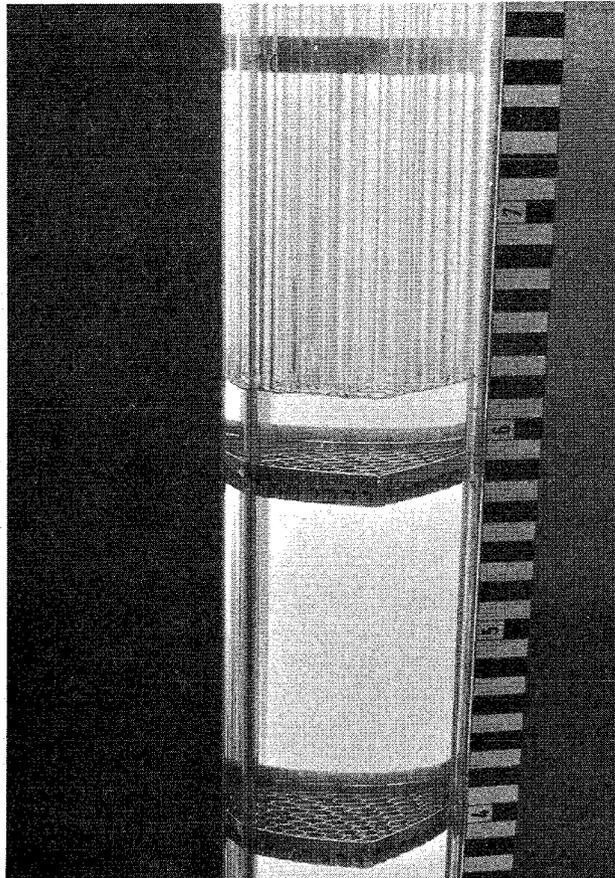


Abb. 4 Beim Einfüllen der optischen Flüssigkeit werden die Glasstäbe unsichtbar

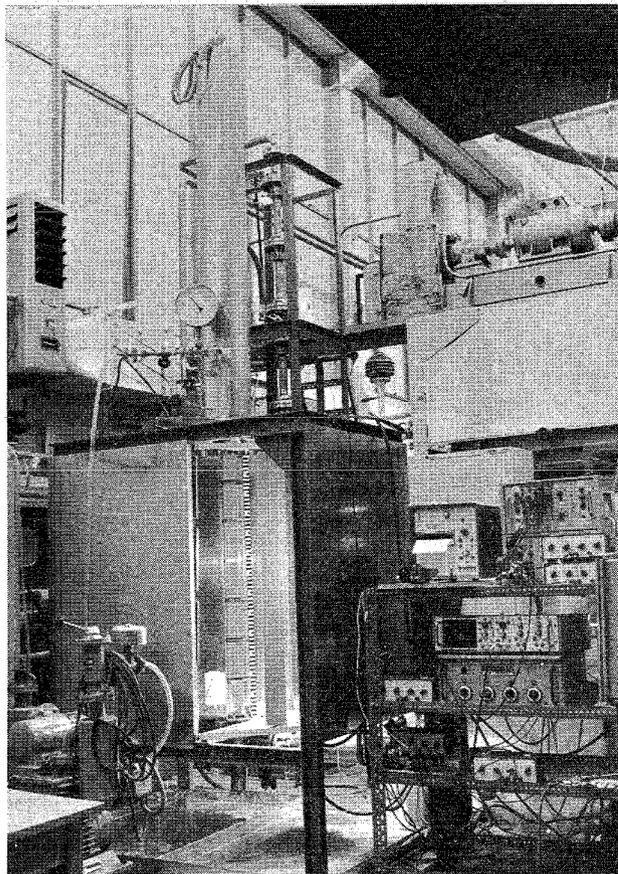
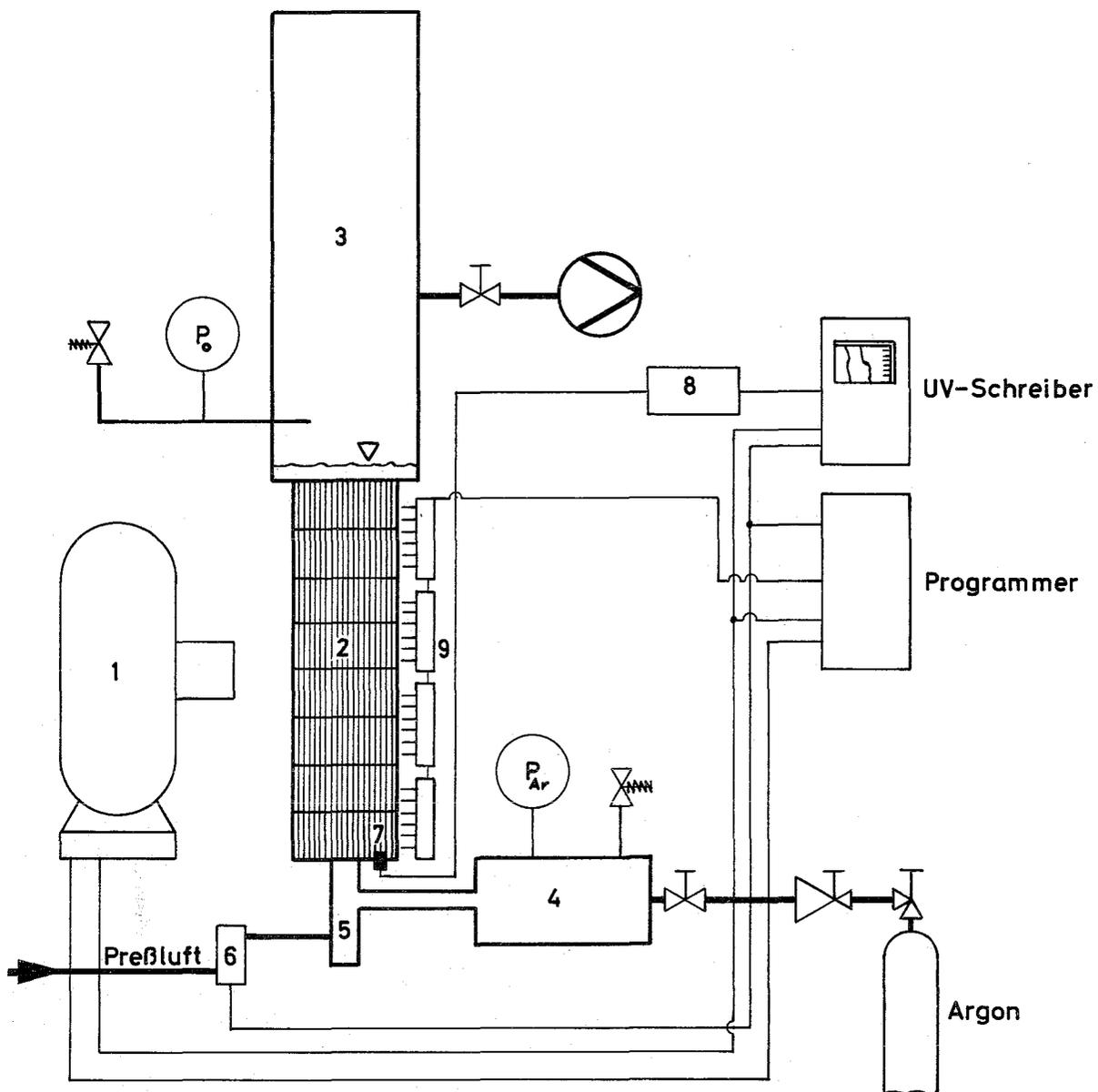


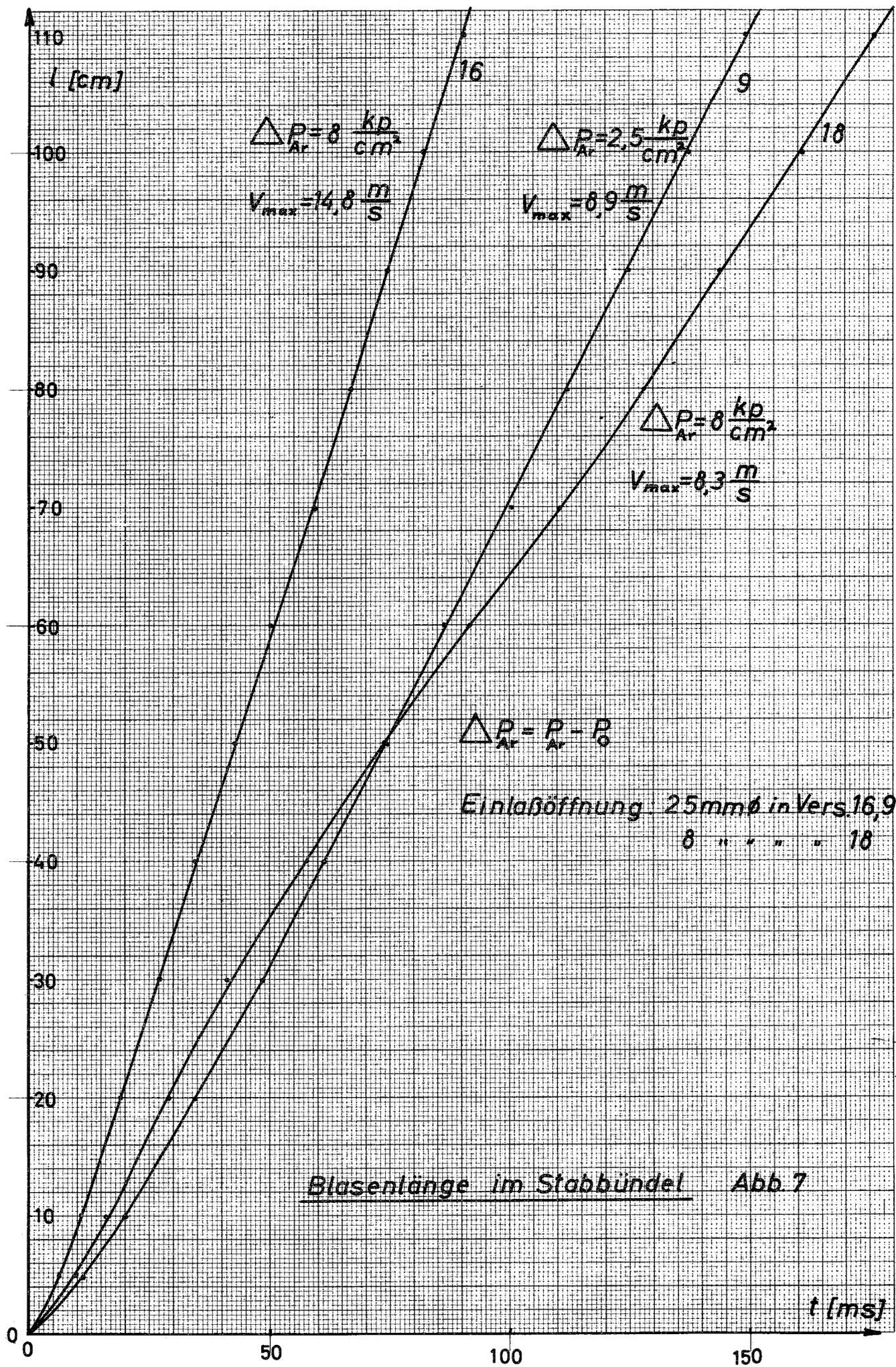
Abb. 5 Gesamtansicht des Versuchsstandes



- 1 Kamera
- 2 Teststrecke mit Glasstabbündeleinsatz
- 3 Auffangbehälter
- 4 Argon-Reservoir
- 5 Pneumatisch betätigtes Schnellschlußventil
- 6 Elektromagnetisches Steuerventil für Prebluft
- 7 Piëzoquarz-Druckaufnehmer
- 8 Ladungsverstärker
- 9 Beleuchtung (Auflicht und Durchlicht)

Schema der Versuchsanlage

Abb.6



Metall-
stäbe

Abstands-
halter

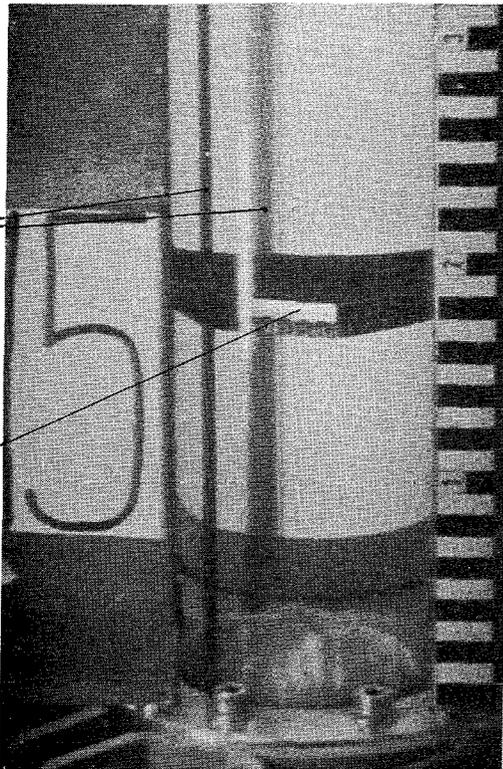


Abb. 8

Gaseintritt, $\Delta p = 4,5 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$
Druckanstieg $700 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$
Öffnung 25 mm \varnothing

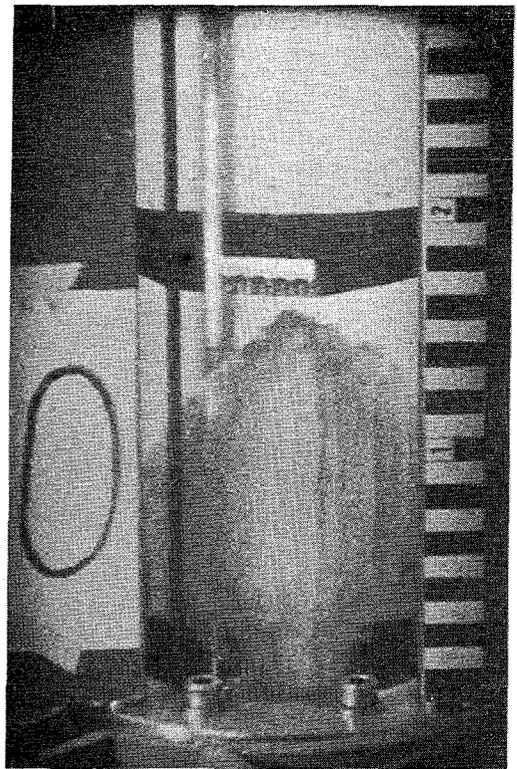


Abb. 9

Gaseintritt, $\Delta p = 2,6 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$
Druckanstieg $350 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$
Öffnung 8 mm \varnothing

Bläschen-
fronten

Abstands-
halter

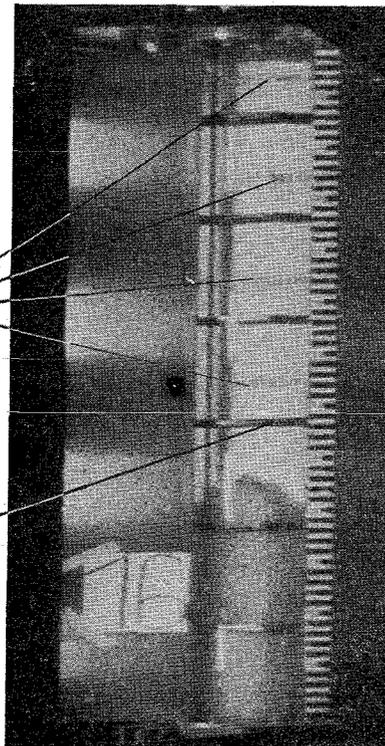


Abb. 10

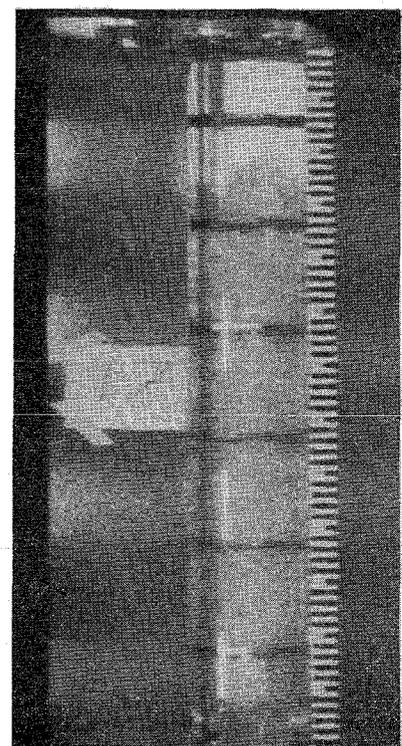


Abb. 11

Austreibung der Flüssigkeit im Stabbindel durch eine Blase, die den ganzen Querschnitt des Bündels ausfüllt

