

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

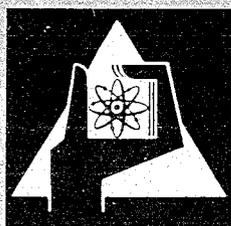
März 1969

KFK 941
EUR 4163 e
EANDC(E)-114"U"

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Basic Requirements of Advanced Neutron Data Storage and
Retrieval Systems (CSISRS)

J. J. Schmidt



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

März 1969

KFK 940

EUR 3976d

Institut für Reaktorentwicklung

Simulation der Kühlmittlejektion in natriumgekühlten
Brutreaktoren durch Experimente mit Wasser

P.Fette

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

*) 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.

12/12/2023

12/12/2023

12/12/2023

12/12/2023

12/12/2023

12/12/2023

12/12/2023

Zusammenfassung

Die Kühlmittlejektion als Folge einer Kühlungsstörung im Brennelement eines natriumgekühlten Brutreaktors wurde mit Wasser als Simulationsflüssigkeit untersucht. Durch Hochfrequenz-Filmaufnahmen wurde der zeitliche Verlauf des Blasenwachstums verfolgt und den gleichzeitig registrierten Signalen von Temperatur- und Druckaufnehmern korreliert. Die Unterschiede in den Druckverläufen einzelner Experimente werden auf die verschiedenen Anfangsbedingungen hinsichtlich der Beheizung und des Temperaturprofils im Kühlkanal zurückgeführt.

1. Einleitung

Sicherheitsbetrachtungen bei schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren haben zu intensiven theoretischen und experimentellen Arbeiten über das Kühlmittelsieden geführt [1, 2, 3]. Das in [2] beschriebene Modell BLOW berechnet die Dynamik der Kühlmittelaustreibung infolge störungsbedingter Überhitzung und anschließendem Sieden des Kühlmittels im Reaktor.

Im folgenden wird über Analogieexperimente mit Wasser berichtet, in denen derartige Kühlmittel-Austreibungs Vorgänge bis ins Detail optisch und meßtechnisch verfolgt werden können, so daß Einflüsse auf den Vorgang wie Überhitzung, Temperaturprofil, Wärmestromdichte und Systemdruck interpretiert werden können. Darüber hinaus dienen die Experimente der Ergänzung und Bestätigung des BLOW-Codes.

2. Zielsetzung

Überhitzung und Sieden des Kühlmittels treten auf, wenn Störungen im Kühlmittelfluß entstehen, z.B. durch Ausfall der Kühlmittelpumpen oder durch Verstopfung des Kühlmittelleintritts oder -austritts. Der einsetzende Siedevorgang bewirkt eine Austreibung des Kühlmittels aus dem betroffenen Brennelement nach oben und unten bzw. nach einer der beiden Richtungen. Die im Euratom-Forschungszentrum in Ispra durchgeführten Experimente [4] zeigen als Siedeform bei Flüssigmetallen überwiegend die Einzelblasenbildung. In den Simulationsexperimenten mit Wasser wird also auch diese Siedeform anzustreben sein. Der Auswurf des Wassers soll analog den Störungsursachen im Reaktor nach oben und/oder nach unten aus der Teststrecke möglich sein.

Die Temperatur des Wassers und der Druckverlauf in der Blase sollen auf Schnellschreibern registriert werden. Synchron zu der Meßwert- erfassung soll durch eine Zeitdehnerkamera das Wachsen der Blase optisch festgehalten werden.

Experimentiert wird in einer Einkanal-anordnung in der nur ein Brennstab und seine nächste Umgebung simuliert werden. Diese Anordnung ist für eine optimale Auswertung der Filmaufnahmen am sinnvollsten.

Der Unterschied zwischen Einkanal- und Stabbündelanordnung (196 Brennstäbe im Original Brennelement) ist hinsichtlich der Thermodynamik gering, da (wie in [2] abgeleitet) zwischen Dampf und Blasenoberfläche thermodynamisches Gleichgewicht besteht. Ein mögliches unterschiedliches Verhalten aus hydrodynamischer Sicht wurde in einem besonderen Stabbündelexperiment [5] untersucht. Hier wurde nachgewiesen, daß auch die hydrodynamischen Bedingungen von Einkanal- auf Bündelanordnung direkt übertragbar sind.

3. Versuchsanlage

Die Teststrecke besteht aus einem elektrisch betriebenen Heizstab (10 mm ϕ , 600 mm lang) in einem Quarzglasrohr (18 mm i ϕ), was seinerseits in einem gläsernen Vierkantrohr steckt, in dem thermostatisiertes Glycerin zirkuliert (Abb. 1.).

Der Glycerinkreislauf dient zur Vorüberhitzung des Wassers. Dadurch kann ein ähnlich flaches Temperaturprofil im Wasser erzeugt werden, wie es im überhitzten Natrium aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Natriums existieren würde (s.a. Abb.6, Film 69). Die Behälter A und C bilden eine Destillationseinheit, die es ermöglicht, praktisch gasfreies Wasser in die Teststrecke einzufüllen. Durch Vorheizen und Verdampfen des Wassers in Behälter B wird der Systemdruck P'_0 eingestellt. Er wurde hier in den Grenzen $0,015 \leq P'_0 \leq 4$ ata variiert.

In der Teststrecke werden die Wassertemperaturen 0,3 und 3 mm von der Heizstaboberfläche entfernt gemessen (T_3, T_9). Der Druck $P_{1,2}$ bei Blasenentstehung wird durch 2 Miniatur-Quarzdruckaufnehmer P_1 und P_2 oberhalb und unterhalb der Teststrecke gemessen. In unmittelbarer Nähe dieser Druckaufnehmer werden die Wassertemperaturen T_4 und T_6 gemessen. Im Bereich der Teststrecke befinden sich weitere Temperaturmeßstellen im Glycerin (T_1, T_2). Alle Meßstellen werden von einem 12-Punktdrucker bzw. von einem UV-Lichtschreiber registriert. Genauigkeit der Temperaturmessung $\pm 1^\circ\text{C}$, der Druckmessung $\pm 0,01$ bis $\pm 0,05$ kp/cm^2 je nach Empfindlichkeitseinstellung des zur Druckmessung gehörenden Ladungsverstärkers. Strom und Spannung des Heizstabes wurden mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5\%$ zusätzlich vom UV-Schreiber registriert. Parallel zu dieser Meßwerterfassung wurden bei einigen Versuchen die Drücke auf dem Oszillographen getriggert und fotografiert.

Über die Filmeinrichtung gibt Abb. 2 Auskunft. Es wurde eine Fastax WF-14 Zeitdehnerkamera verwendet mit der max. Bildfrequenz von 9000 Bilder/s.

Zwei Typen von Heizstäben dienten in der Teststrecke zur Simulation eines Brüter-Brennstabes. Durchmesser, Oberflächenbeschaffenheit und Material der Oberfläche waren bei beiden Heizern gleich. Der erste wurde jedoch indirekt beheizt durch ein von der Außenfläche isoliertes Heizleiterrohr im Innern des Stabes. Bei dem anderen Heizer wurde die Oberfläche (ein Rohr aus Inconel 600) direkt beheizt. Bei dem direkt beheizten Stab ist die Oberflächentemperatur errechnet und bei dem indirekt beheizten durch 4 nachträglich aufgelötete Thermoelemente als Funktion der Einschaltdauer gemessen worden.

Als künstliches Blasenkeimzentrum wurde die polierte Oberfläche jedes Heizers an einer Stelle mit einer Nadel geritzt. Bei ebenen Heizflächen hatte sich diese Methode bewährt, hier jedoch versagte dieses künstliche Blasenkeimzentrum. Nur sehr selten und nicht vorhersehbar entstanden hier Blasen.

4. Versuchsdurchführung

Nach Einstellen des gewünschten Systemdruckes P_0' durch den Heizer in Behälter B (Abb.1) wird das Wasser im Bereich der Teststrecke mittels des thermostatisierten Glyzerinkreislaufs aufgeheizt (1 - 2° pro min), bis eine gewünschte Vorüberhitzung im Rahmen des Möglichen erreicht ist. Dabei bewirkte die sich einstellende Konvektionsströmung eine recht konstante Temperaturverteilung des Wassers im Ringspalt. Die Ventile V_1 und V_2 sind entsprechend der gewünschten Austreibungsrichtung geschlossen bzw. geöffnet worden. Dann wird durch Auslösen einer Schaltautomatik der eigentliche Versuchsablauf gestartet. Durch 4 Zeitrelais gesteuert werden folgende Schaltvorgänge nacheinander getätigt: UV-Lichtschreiber ein, Heizer ein, Kamera + Beleuchtung + Zeitmarke ein, Zeitmarke umschalten von 100 Hz auf 1000 Hz. (Die Zeitmarke wird gleichzeitig auf Film und Streifen belichtet; die Umschaltung dient zur Synchronisation), Heizer aus, Kamera + Beleuchtung + Zeitmarke aus, UV-Lichtschreiber aus.

5. Ergebnisse

Bei der Auswertung der Registrierstreifen des UV-Schreibers interessiert im folgenden der Druckverlauf der Meßstelle P_1 bei den Versuchen, in denen das Ventil V_1 geschlossen war und die Austreibung des Wassers infolge Einzelblasenbildung somit nur nach oben aus der Teststrecke erfolgen konnte.

Es sind 5 unterschiedliche Druckanstiegsformen bei Blasenbildung beobachtet worden (Abb. 3), deren Abhängigkeit von Überhitzung, Temperaturprofil und Heizleistung erklärt werden kann. In den Fällen I bis IV wird ein rascher Druckanstieg mit Anstiegsfrequenzen von 0,5 bis zu 2 kHz beobachtet. Die Höhe der ersten Druckspitze ist proportional der Überhitzung des Wassers am Ort der Blasenentstehung. Trägt man die Temperatur des überhitzten Wassers bei Blasenentstehung auf über dem Druck $P = P_0 + \Delta P_1$ (Gesamtdruck in der Blase), so gruppieren sich diese Punkte in befriedigender Genauigkeit um die Dampfdruckkurve. Der Druckverlauf I kennzeichnet eine Blasenentstehung, bei der ein relativ konstantes Temperaturprofil im überhitzten Testwasser bestand. Nach dem steilen Anstieg ist der Druck eine gewisse Haltezeit lang (8 - 20 ms) konstant auf fast derselben Höhe wie die erste Spitze, oder er pendelt um diesen konstanten Wert. Dann nimmt er langsam stetig ab. Diese Druckabnahme kann einige 100 ms dauern und richtet sich nach dem Wärmefluß des Heizers. Bei dem indirekt beheizten Stab, der nur bis zu einer zugeführten Leistung von 100 W/cm betrieben wurde, gab es immer einen Druckabfall.

Bei dem direkt beheizten Stab stellte sich der Druckverlauf II ein, wenn wie bei I durch Vorüberhitzung ein konstantes Temperaturprofil im Wasser erreicht war und die Blasenentstehung praktisch mit Einschalten des Heizers einsetzte. Auch hier ist die Höhe der Druckspitze proportional der Überhitzung des Wassers. Nach ähnlich langer Haltezeit wie bei I steigt der Druck jedoch langsam weiter an. Schon bei Heizleistungen unter 20 W/cm wird durch den direkt beheizten Stab im Bereich der Blase soviel Dampf nachproduziert, daß diese langsame Drucksteigerung erfolgen kann.

Bei Versuchen, in denen der Druckverlauf vom Typ III war, hatte die Vorüberhitzung durch das Glycerin nur eine geringe bis mittlere Höhe der maximal möglichen Vorüberhitzung erreicht.

Der indirekte Heizer konnte in diesen Versuchen eine längere Zeit über eingeschaltet sein, bis die Blasenbildung einsetzte. Es bildete sich im Wasser dabei ein zum Heizer hin ansteigendes Temperaturprofil aus. Die erste Druckspitze bei Blasenentstehung entspricht wieder der Überhitzung am Ort der Blasenentstehung. Nach 2- 4 ms pendelt der Druck wieder für ca. 8 - 20 ms um einen konstanten Wert ΔP_B . Die Höhe dieser Druckdifferenz entspricht der mittleren Vorüberhitzungsenergie des Wassers (Bulk-Überhitzung). Danach nimmt der Druck wie bei I ab.

Der Druckverlauf vom Typ IV ist der entsprechende zu III mit dem direkt beheizten Stab. Auch hier entspricht wieder die Höhe der ersten Druckspitze der Überhitzung am Ort der Blasenentstehung. Aber während man bei III für die Temperatur am Ort der Blasenentstehung mit befriedigender Näherung die Oberflächentemperatur des Heizers einsetzen konnte, ist beim direkt beheizten Stab das Temperaturprofil im Wasser so sehr viel steiler, daß die entstehende Blase an ihrer Oberfläche von dem Temperaturabfall ihrer Umgebung beeinflusst wird. Die sich einstellende erste Druckspitze entspricht einer "mittleren" Temperatur der dünnen überhitzten Zone um den Heizstab. Im weiteren Verlauf pendelt der Druck in IV, wie in den vorher beschriebenen Druckverlaufformen, eine Haltezeit von 8 - 20 ms lang um einen konstanten Wert ΔP_B , entsprechend der Bulk-Überhitzung, und steigt dann langsam an wie bei Typ II.

Bei einer Blasenbildung, die den Druckverlauf vom Typ V zur Folge hat, liegt keine oder eine kaum meßbare Überhitzung vor. Dieser Druckverlauf ist nur bei Versuchen mit direkt beheiztem Stab und bei Systemdrücken $P'_0 > 1,5$ ata zu finden. Der langsame Druckanstieg entspricht den langsamen Druckanstiegen innerhalb der Druckverläufe II und IV. Druckstöße bei Kondensation sind meistens so steil, daß die Empfindlichkeit der Galvanometer-Schleifen im UV-Schreiber nicht ausreicht, sie zu registrieren. Um sie dennoch aufzunehmen, sind sie auf dem Oszillographen getriggert und vom Bildschirm fotografiert worden. Es ergaben sich maximale Kondensationsdruckspitzen bis zu 8 kp/cm^2 mit Anstiegsfrequenzen $> 25 \text{ kHz}$ (Abb.4). Häufig ist sogar die Eigenresonanz des Druckaufnehmerquarzes von 125 kHz angeregt worden.

Kondensation wurde meistens an der Meßstelle P_2 angezeigt. Zwischen P_2 und P_1 befanden sich in diesen Fällen Blasen, die eine so hochgradige Dämpfung der Kondensationsstöße bewirkten, daß sie von P_1 nicht mehr bemerkt wurden.

Bei der Auswertung der Filme mit Einzelblasenbildung ergibt sich, daß der Blasenentstehungsort auf dem Heizer statistischen Schwankungen unterworfen ist. Das gilt selbst für eine Versuchsreihe, in der die Ausgangsbedingungen bei jedem Versuch die gleichen waren. Im künstlichen Blasenkeimzentrum ist die Blase nur selten entstanden. In einigen Filmen mit Nahaufnahmen von der Blasenentstehung und den dazugehörigen UV-Schreiberstreifen wurde festgestellt, daß die Blase im Film und der Druck auf dem Streifen fast zur gleichen Zeit ihren Ursprung hatten. (Genauigkeit dieser Analyse $\pm 0,3$ ms). Die Tendenz ging aber dahin, daß die Blase wenige 100 μ s eher als der zugehörige Druckanstieg zu sehen war. Ziel der Filmauswertung ist, Weg-Zeit Kurven der Blasenlänge aufzutragen. Die Fotos in Abb. 5 vermitteln einen Eindruck des Blasenwachstums.

Der Einfluß der Überhitzung und des Temperaturprofils auf die Schnelligkeit des Blasenwachstums soll an den Versuchen Nr. 30, 44 und 69 diskutiert werden. Am Ort der Blasenentstehung herrschte hier jeweils ein Druck von $P_0 = 0,1$ ata. In Nr. 30 war die Vorüberhitzung des Wassers durch den Glyzerinkreislauf mit $\Delta T_g = 17,5^\circ\text{C}$ am höchsten. In Nr. 44 bestand vor Einschalten des Heizers eine Unterkühlung von ca. $4,5^\circ\text{C}$ und in Nr. 69 war eine Vorüberhitzung von $\Delta T_g = 9,5^\circ\text{C}$ vorhanden. Nach Einschalten des Heizers stellten sich bis Siedebeginn die in Abb.6 wiedergegebenen Temperaturprofile in der Teststrecke ein. Die zugeführte Heizleistung betrug in allen 3 Versuchen 100 W/cm.

In Versuch Nr. 30 wächst die Blase am schnellsten, s. Abb.7. Die gesamte in das Wasser eingebrachte Überhitzungsenergie ist hier am größten, vergl. Abb.6. Dementsprechend ist auch der Druck in der Blase hier am größten. In Versuch Nr. 44 liegt fast gleich große Überhitzung einer dünnen Zone um den Heizer vor. Die Druckverläufe beider Siedevorgänge sind vom Typ III (Abb. 3). Die mittlere Überhitzung in Nr. 44 ist jedoch geringer als in Nr. 30.

Dementsprechend ist der Druck ΔP_B in der Blase, der der mittleren Überhitzung entspricht, geringer in Nr. 44 als in Nr. 30 und somit wächst die Blase in Nr. 44 langsamer.

In Versuch Nr. 69 ist die gesamte Überhitzungsenergie zwar größer als in Nr. 44; jedoch hat Nr. 44 eine beträchtlich höhere Zonenüberhitzung an der Heizstaboberfläche. Diese Zonenüberhitzung bestimmt die Anfangsbeschleunigung der Blase und läßt sie in Nr. 44 schneller wachsen als in Nr. 69.

Der Einfluß der Heizleistung bzw. der Temperaturanstiegsgeschwindigkeit auf der Heizstaboberfläche ist in den Versuchen Nr. 41, 79 und 81 zu erkennen (Abb. 8). Eine höhere Heizleistung bedingt eine schnellere Austreibung, siehe Kurven der Versuche Nr. 79 und 81 mit 191 bzw. 31 W/cm zugeführte Leistung des direkt beheizten Stabes. Entsprechend verhält sich der Druck in der Blase - Typ IV (Abb. 3) -, der ca. 20 ms nach der ersten Spitze je nach Heizleistung mehr oder weniger stark ansteigt.

In Nr. 41 wird mit einem indirekt beheizten Stab geheizt. Die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit auf der Oberfläche dieses Heizers ist wesentlich geringer als die des direkt beheizten Stabes in den Versuchen Nr. 79 und 81. Somit vergeht auch mehr Zeit vom Einschalten des Heizers bis zur Blasenentstehung bei einer bestimmten Oberflächentemperatur. Das Temperaturprofil wird flacher, d.h. es wird eine dickere Zone um den Heizstab herum überhitzt als bei dem schnelleren direkten Heizer. Bei Vergleich der Kurven von Nr. 41 und Nr. 79 erkennt man das anfangs schnellere Anwachsen der Blase in Nr. 41. In diesem Stadium überwiegt die in Nr. 41 steckende größere Anfangsüberhitzungsenergie, die sich infolge der langen Einschaltzeit des indirekten Heizers aufbauen konnte. Nach ca. 30 ms Blasenlebensdauer ist jedoch schon die Steilheit in Nr. 41 von Nr. 79 erreicht; ab hier beginnt sich die höhere Temperaturanstiegsgeschwindigkeit des direkten Heizers in Nr. 79 auszuwirken, und bei 70 ms Lebensdauer überholt Nr. 79 die Blase Nr. 41. Der Systemdruck hatte in den hier gemachten Versuchen keinen nachweisbaren direkten Einfluß auf die Wachstumsgeschwindigkeit der Blase. Infolge der schwächeren Krümmung der Dampfdruckkurve zu höheren Drücken hin, ist jedoch zu erwarten, daß bei höheren Systemdrücken der Austreibungsvorgang schneller abläuft, da - gleiche Überhitzung vorausgesetzt - bei hohen Systemdrücken sich bei Blasenbildung ein höherer Druck ΔP in der Blase einstellt als bei niedrigen Systemdrücken.

Diese Tendenz ist in den Versuchen Nr. 41 und Nr. 44 zu erkennen, obgleich sich die Überhitzungen in diesen beiden Versuchen stark unterscheiden. Demgegenüber ist durch die Abnahme des Dichteverhältnisses ρ_{fl}/ρ_d mit steigendem Systemdruck ein langsames Blasenwachstum zu erwarten.

Eine einwandfreie Bestimmung des Druckeinflusses auf das Blasenwachstum war aber nicht nachzuweisen, weil bei der Variation des Systemdruckes die Parameter Überhitzung und Temperaturprofil nicht bis zur Blasenentstehung gleich gehalten werden konnten.

Es wurde jedoch die bei vielen anderen Flüssigkeiten bekannte Tatsache bestätigt, daß mit steigendem Systemdruck die Überhitzbarkeit abnimmt. Und zwar nimmt die Überhitzbarkeit - in den hier beschriebenen Versuchen ab ca. $P'_0 = 0,6$ ata - so stark ab, daß trotz schwächer werdender Krümmung der Dampfdruckkurve auch die der jeweiligen Überhitzung entsprechende Druckerhöhung ΔP in der Blase abnimmt. Somit kann pauschal gesagt werden, daß ab einem gewissen Systemdruck der Austreibungsvorgang langsamer wird.

6. Schlußfolgerung

Die durchgeführten Versuche haben folgende Ergebnisse gebracht:

- 1.) Wasser kann bei Einhaltung bestimmter Bedingungen (niedriger Druck, Reinheit, Gasfreiheit, langsame Vorüberhitzung) trotz der unterschiedlichen Stoffeigenschaften hinsichtlich der Siedephänomene als Simulationsflüssigkeit für Natrium benutzt werden.
- 2.) Alle Einzelphasen des Siedevorganges bei Einzelblasenbildung mit Ausnahme des Siedeverzuges und der Keimbildung sind theoretisch erklärbar.
- 3.) Insbesondere treten während des Siedens keine Drücke auf, die über dem Sattedampfdruck der höchsten Flüssigkeitstemperatur liegen. Die Anforderungen an die Auslegung der Brennelement-Mantelrohre sind damit hinsichtlich des Siedevorganges begrenzt. Höhere Drücke treten nur bei Kondensation auf. [6]
- 4.) Der Betrag des Siedeverzuges und der Ort der Blasenentstehung waren starker Streuung unterworfen. Eine Gesetzmäßigkeit war nicht feststellbar.

Literaturverzeichnis

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

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

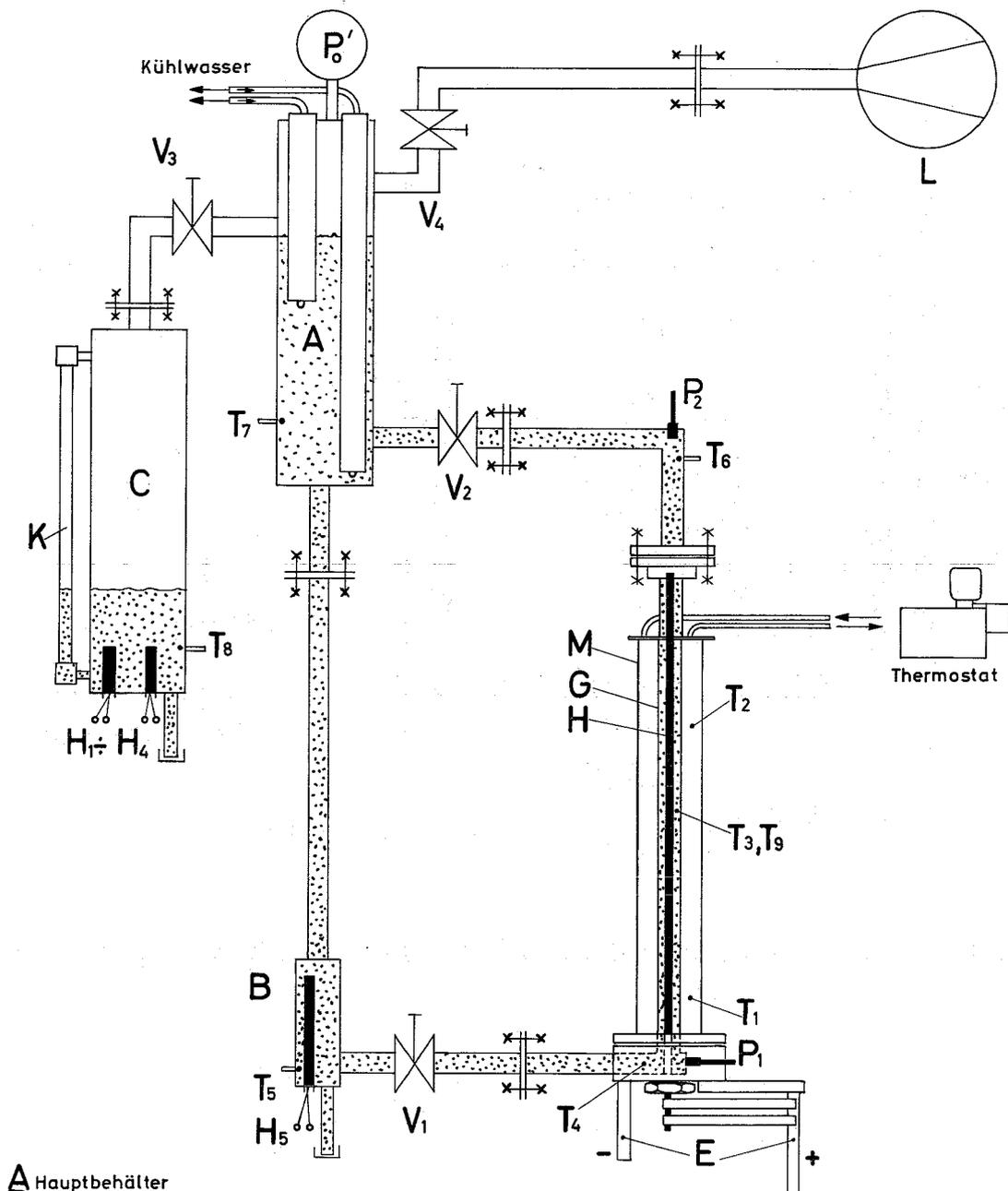
Die Ejektion von Natrium aus Reaktorkühlkanälen.
Nukleonik, 10 Band, 5. Heft 1967. S 270 - 274.
- [3_] K.H.Spiller, D.Perschke, G.Grass:

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

Das Sieden von flüssigen Alkalimetallen.
Atomkernenergie 12. Jahrgang 1967, H.3/4. S. 101-110.
- [5_] P.Fette, H.D.Großgarten:

Simulation der Kühlmittelaustreibung im Na-2Brennelement.
KFK 925, EUR 4169 d.
- [6_] P.Fette:

Simulationsexperimente zum Rückström- und Rekondensations-
vorgang im Na-2 Brennelement (in Vorbereitung)



- A Hauptbehälter
- B Behälter mit Heizer H₅ für Druckaufbau
- C Wasservorratsbehälter
- E Elektroden
- G Quarzrohrteststrecke
- H Heizstab, H₁÷ H₄ Destillationsheizer
- K Schauglas
- L Vakuumpumpe
- M Pyrex-Glas, Vierkantrohr
- P₁, P₂ Mano-Vakuummeter
- T₁ - T₈ Temperaturmeßstellen
- V₁, - V₄ = Faltenbalgventile NW18 ; Rohrleitungen NW18

Abb.1 Versuchsanordnung

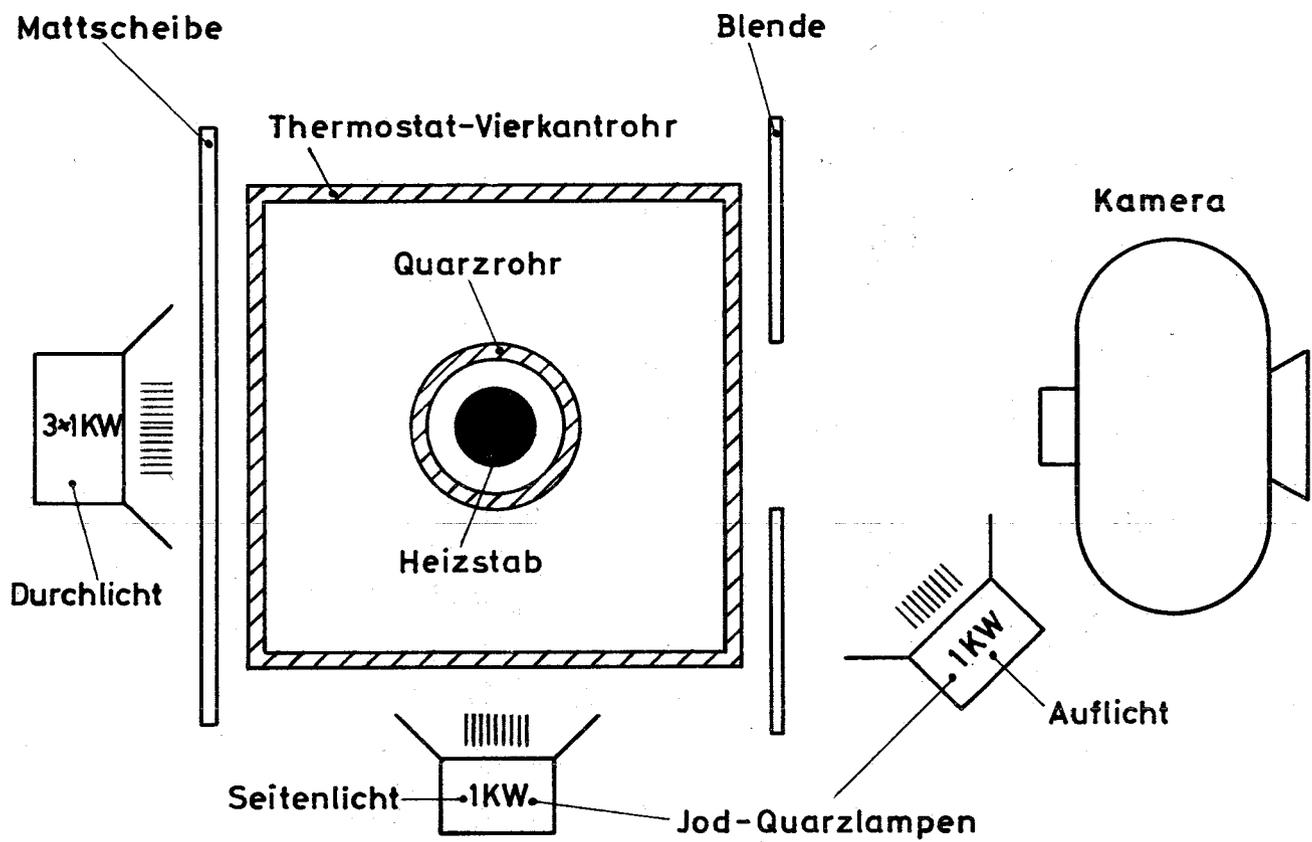


Abb. 2 Querschnitt durch die Teststrecke mit Anordnung der Filmeinrichtung

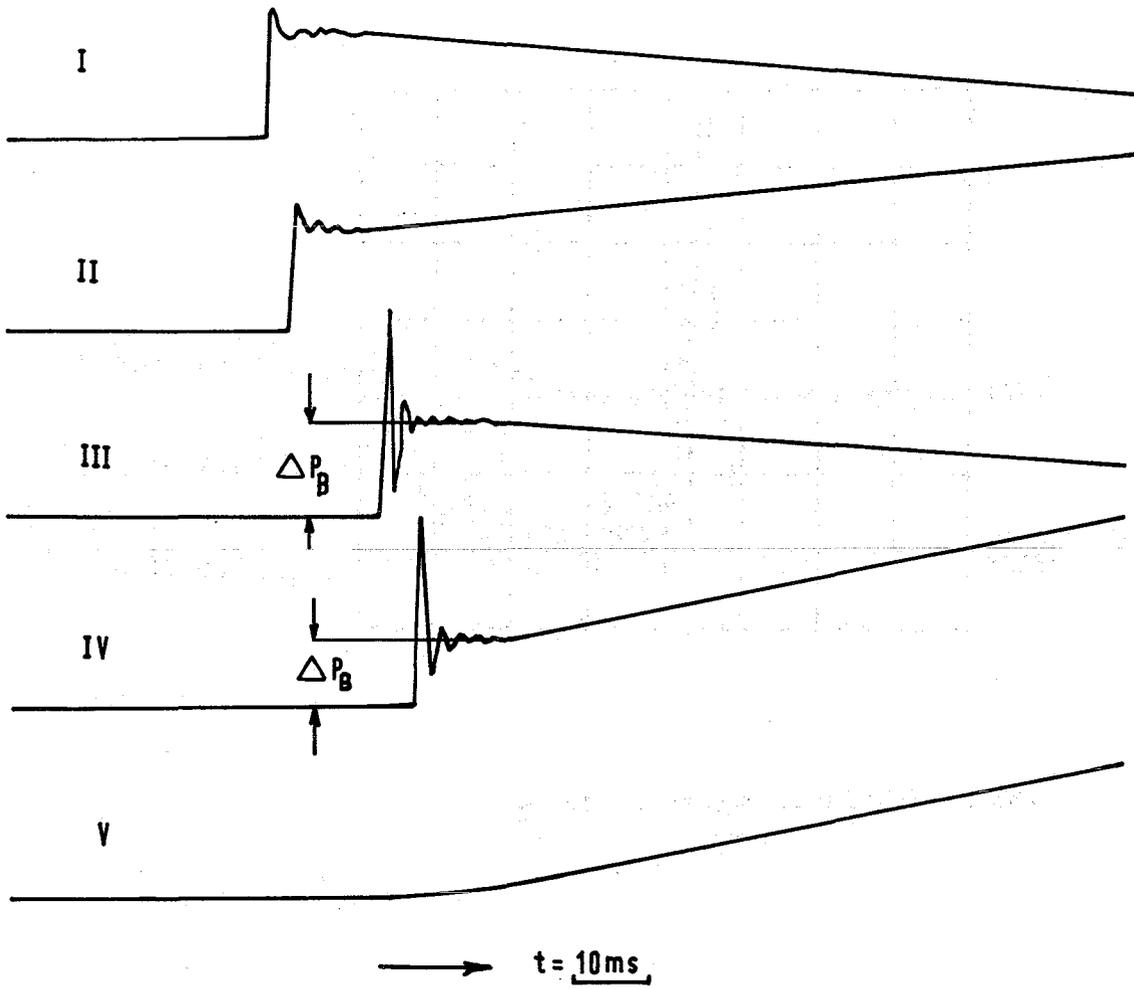


Abb.3 Druckanstiegsformen

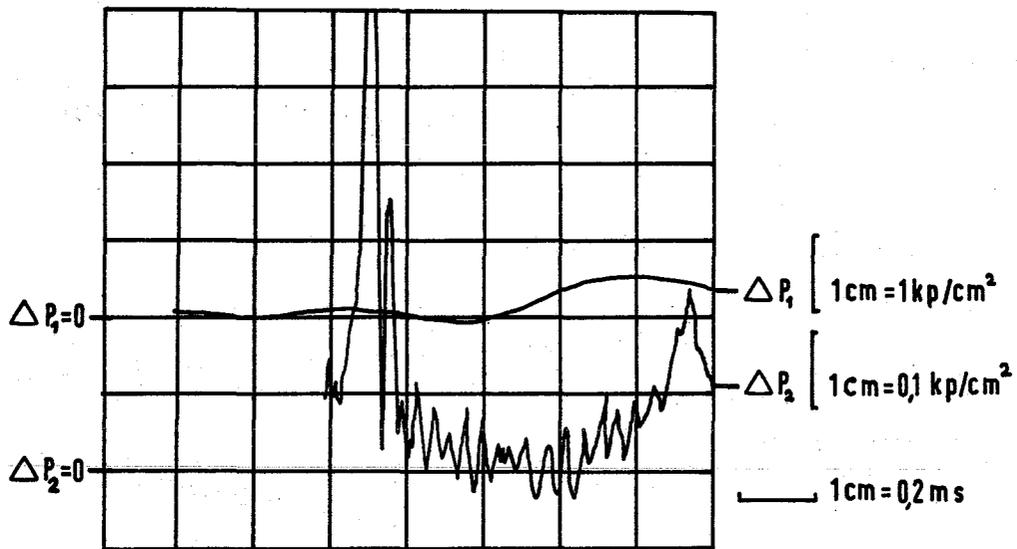
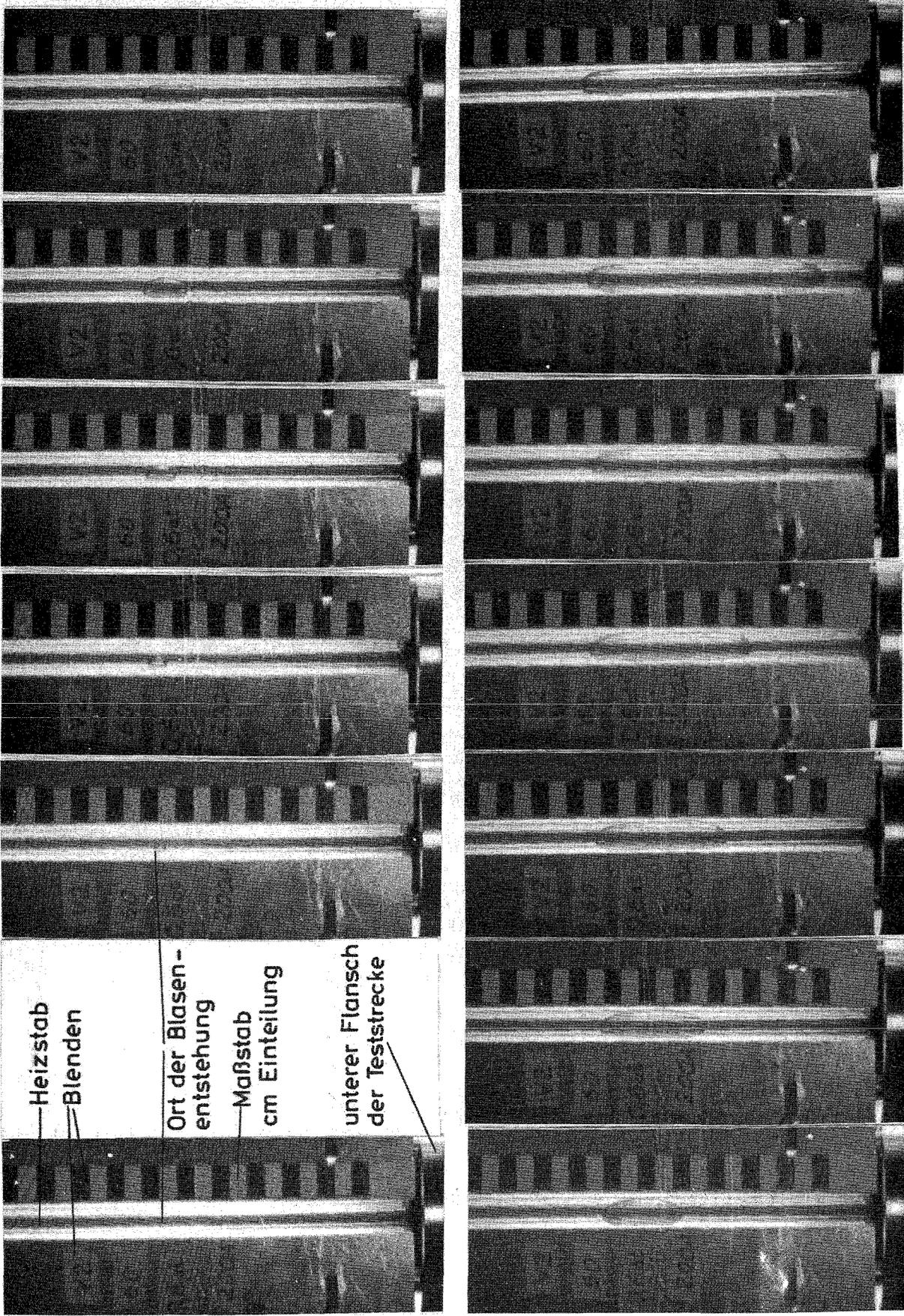


Abb. 4 Kondensationsdruck an P_2



Austreibungs Vorgang nach Film Nr. 60.

Bildfolge: 10 ms

Abb. 5

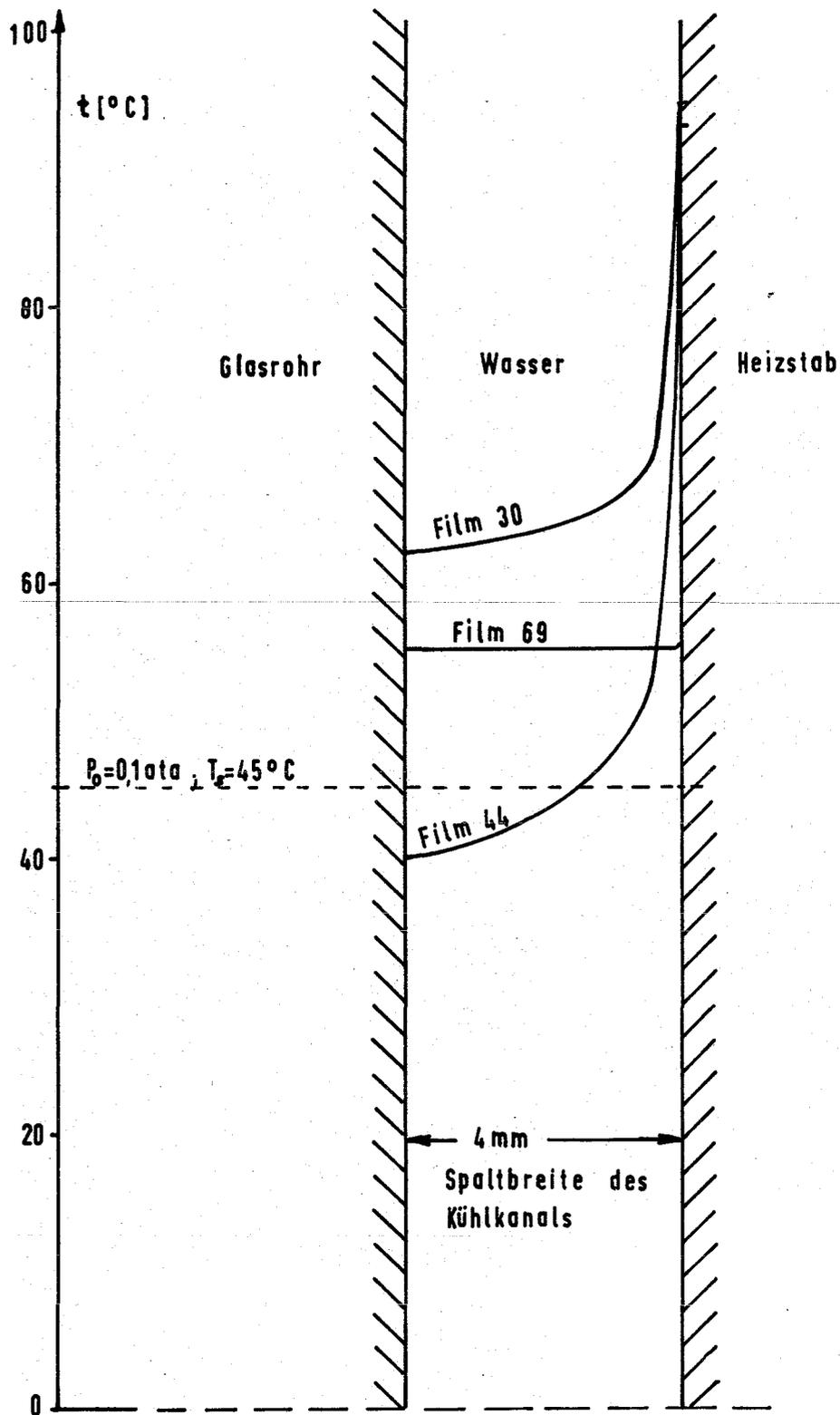


Abb. 6 Temperaturprofile im Kühlkanal bei Blasenentstehung

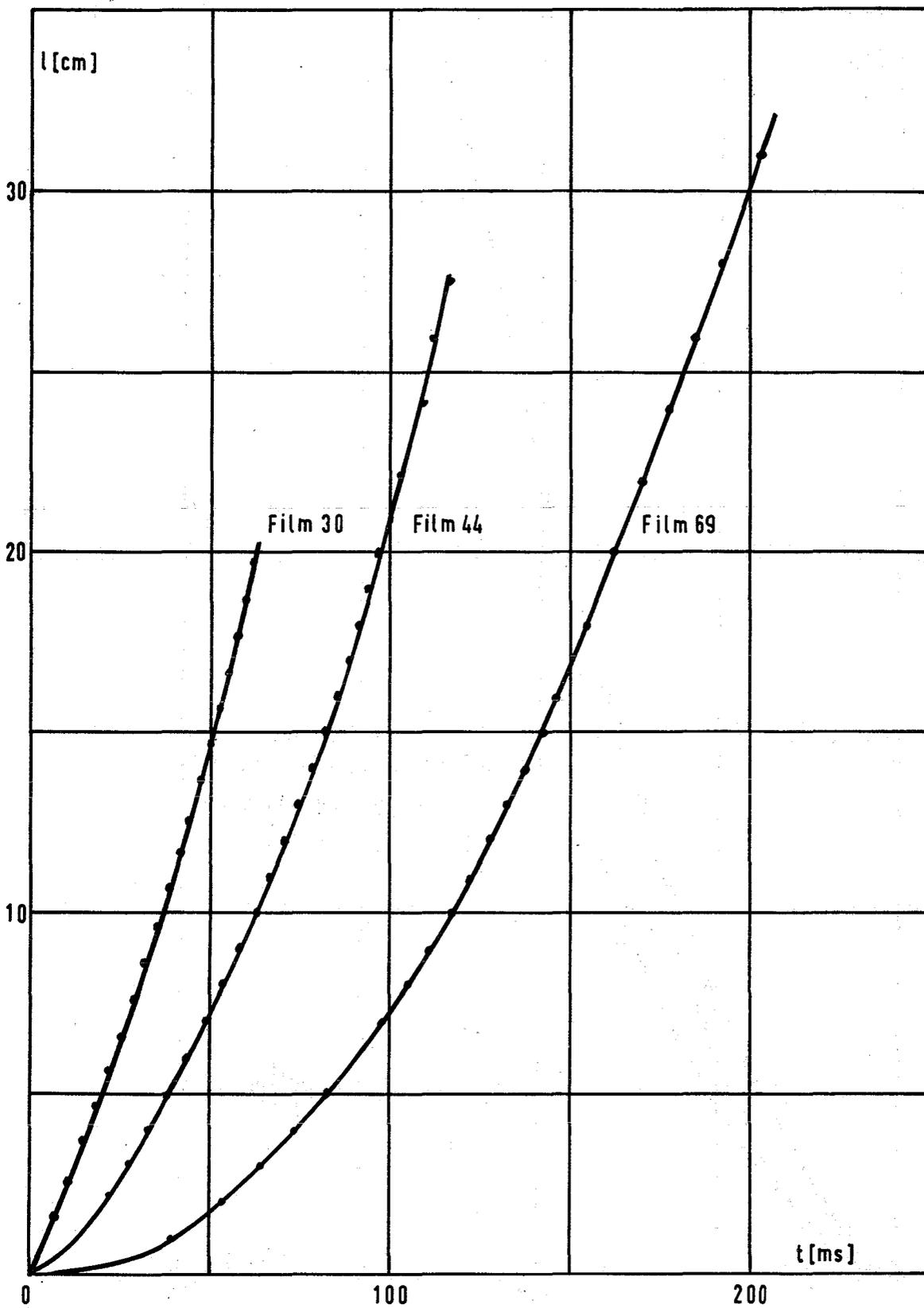


Abb.7 Einfluß der Überhitzung auf den Austreibungs Vorgang

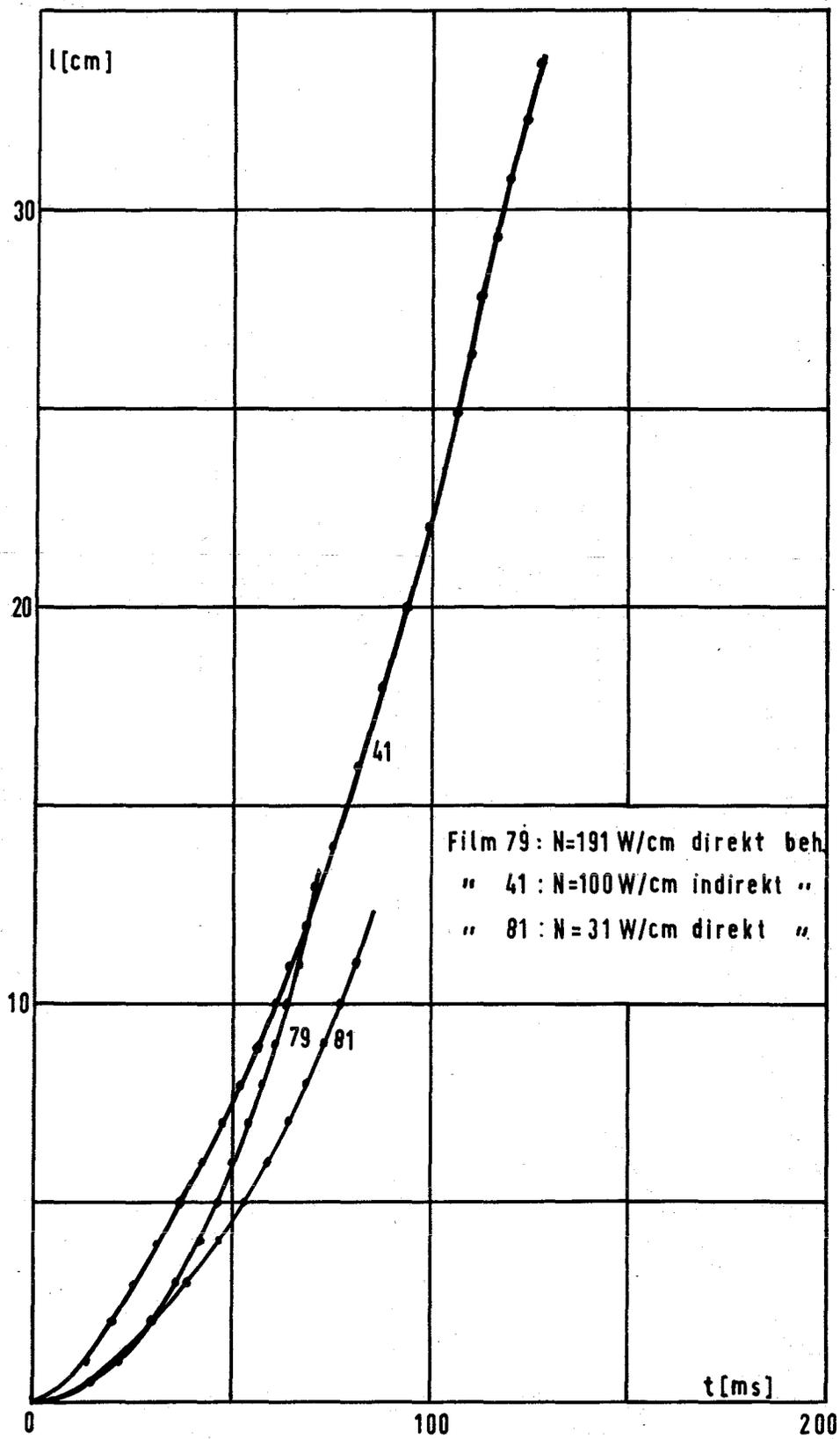


Abb.8 Einfluß der Heizleistung auf den Austreibungsprozess