
Archiv-Ex.:
FZR-186
Juli 1997

H. - M. Prasser, A. Böttger, A. Schaffrath

**Strömungsformen bei
Kondensationsvorgängen im
Notkondensator-Versuchsstand**

Abschlußbericht

Herausgeber:
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon (0351) 26 00
Telefax (0351) 2 69 04 61

Als Manuscript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

Forschungszentrum Rossendorf
Institut für Sicherheitsforschung

Strömungsformen bei Kondensationsvorgängen im Notkondensator-Versuchsstand

Abschlußbericht

H.-M. Prasser
A. Böttger
A. Schaffrath

Rossendorf, d. 23.05.1997

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 15 NU 09485 gefördert. Die Arbeiten wurden vom FZR im Unterauftrag der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	3
2.	Instrumentierung des NOKO-Versuchsstands mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden	4
2.1	Meßprinzip der nadelförmigen Leitfähigkeitssonden	4
2.2	Sonden auf der Primärseite im Einzelrohr	4
2.3	Sonden auf der Sekundärseite am Bündel	6
2.4	Thermoelemente	7
3.	Experimente	7
4.	Strömungsformen im Einzelrohr	8
4.1	Theoretisch vorhergesagte Strömungsformen	8
4.2	Experimentell nachgewiesene Strömungsformen	9
4.2.1	Ermittlung der Freilegungszeitpunkte	9
4.2.2	Geschwindigkeit der Füllstandsabsenkung zum Zeitpunkt der Freilegung	10
4.2.3	Bewertung der Sondensignale hinsichtlich der Strömungsformen	11
4.3	Gegenüberstellung von Sonden- und Thermoelementdaten	13
4.4	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	14
5.	Bewertung der Füllstandsmessung im Einzelrohr	16
5.1	Modell zur Berechnung des Füllstandes aus dem Differenzdruck PD2_3	16
5.2	Vergleich der berechneten Differenzdrücke mit den gemessenen Werten zu den Freilegungszeitpunkten	17
5.2.1	Versuch E3	17
5.2.2	Versuch E5	19
5.2.3	Versuch E7	20
5.2.4	Versuch E9	21
5.3	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	22
6.	Messungen auf der Sekundärseite	22
7.	Schlußfolgerungen	24
8.	Literatur	25
	Liste der verwendeten Formelzeichen	26
	Bilder	27

1. Einleitung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 15 NU 09485 "Berechnung des passiven Notkondensators eines mit Naturumlauf arbeitenden innovativen Siedewasserreaktors (SWR600) mit ATHLET", das eng mit dem Forschungsvorhaben 15 NU 9050 "Notkondensator für einen Siedewasserreaktor mittlerer Leitung – Versuche zur Ermittlung der Leistung" verknüpft ist [HIE-95, HIE-97], wurden seitens des Forschungszentrums Rossendorf (FZR) e.V. im Rahmen des F&E-Vertrages "Mitwirkung bei der Auswertung und Interpretation von Messungen zu Strömungsformen und Kondensationsvorgängen im NOKO-Versuchsstand" durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im dem vorliegenden Bericht dokumentiert. Die Installation der Meßtechnik, u.a. die vom FZR entwickelten nadelförmigen Leitfähigkeitssonden, wurde vom FZR in einem separaten Auftrag des Forschungszentrums Jülich durchgeführt.

Neben den Bündelversuchen wurden im NOKO-Versuchsstand mehrere Experimente mit einem separaten, seitlich vom Bündel angeordneten und umfangreich instrumentierten Einzelrohr durchgeführt, um die Aussagesicherheit der Notkondensatorexperimente zu erhöhen und zusätzlich experimentelle Daten für die Validierung von Thermohydraulikprogrammsystemen (u.a. den ATHLET-Code) bereitzustellen. Hierbei geht es speziell um die Untersuchung der transienten Zweiphasenströmung innerhalb der Notkondensatorrohre hinsichtlich der dort anzutreffenden Strömungsformen, sowie die Bestimmung des volumetrischen Gasgehaltes an verschiedenen Stellen auf der Sekundärseite im Bündel bei unterkühltem und gesättigtem Sieden.

Die theoretische Modellierung des Wärmeübergangs auf der Innenseite der Wärmeübertragerrohre des Notkondensators erfordert die Auswahl geeigneter Korrelationen für die Wärmeübergangszahl bei Kondensation in Abhängigkeit von der vorliegenden Strömungsform. Analysen haben gezeigt, daß im Bereich der Volumenstromdichten, die im NOKO-Rohr vorliegen können, sich die Strömungsform mit abnehmender Volumenstromdichte des Dampfes und zunehmender Volumenstromdichte des Kondensats entlang des Rohrs ändert.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens bestand die Aufgabe, die im NOKO-Rohr auftretenden Strömungsformen mit Hilfe von nadelförmigen Leitfähigkeitssonden meßtechnisch zu bestimmen. Hierzu wurden Sonden in ein speziell zu diesem Zweck in den NOKO-Versuchsstand eingebautes, einzelnes Wärmeübertragerrohr (NOKO-Einzelrohr) eingebaut. Durch die Nutzung von jeweils mehreren Sonden in zwei ausgewählten Strömungsquerschnitten wurde die Phasenverteilung während der Füllstandsabsenkung, d.h. beim Durchgang des Flüssigkeitsspiegels an den Sondenpositionen, instationär gemessen. Daraus läßt sich die Form der Phasengrenzfläche rekonstruieren. Die verwendete Sondenanordnung ist geeignet, verschiedenen Strömungsformen, wie Schwall-, Kolben-, Blasen-, Pfropfen- und Schichtströmung, nachzuweisen.

Neben den Messungen im Einzelrohr fanden mit Nadelsondenkämmen Messungen auf der Sekundärseite des NOKO-Bündels statt. Sie hatten das Ziel, den dort vorliegenden volumetrischen Gasgehalt an verschiedenen Punkten bei unterkühltem und gesättigtem Sieden zu bestimmen. Aus der Anordnung von Sonden in unterschiedlichem Abstand von den Rohren des Bündels sollte auf die Intensität der Kondensation der Dampfblasen in der unterkühlten Flüssigkeit geschlossen werden.

2. Instrumentierung des NOKO-Versuchsstands mit nadelförmigen Leitfähigkeitssonden

2.1 Meßprinzip der nadelförmigen Leitfähigkeitssonden

Nadelförmige Leitfähigkeitssonden bestehen aus einer elektrisch leitfähigen Elektrode, die mit einer Wechselspannung beaufschlagt wird. Sie ist von einem Isolierrohrchen umgeben und steht mit dem Meßmedium in Kontakt. Die Elektrode ist über eine druck- und temperaturfeste elektrische Durchführung von außen beschaltbar. Die Dimensionen der Sonde selbst werden klein gehalten, um die Strömung möglichst wenig zu stören. Sie weisen eine annähernd nadelförmige Gestalt auf.

Die Sondenspitze steht elektrisch mit dem Meßmedium in Verbindung, nach Anlegen einer Spannung fließt ein Strom über das Medium zur Gegenelektrode (Rohr- bzw. Behälterwandung oder Sondenschaft), der von Gaspartikeln, die die Sondenspitze umschließen, zeitweilig unterbrochen wird. Durch Auswertung des Sondenstroms werden die einzelnen Gaspartikel anhand des Zeitpunkts der Entnetzung und der nachfolgenden Wiederbenetzung der Sondenspitze charakterisiert. Die Zeitdifferenz wird Kontaktzeit genannt. Die Summe der Kontaktzeiten bezogen auf eine Meßperiode ergibt den lokalen volumetrischen Gasanteil am Einbauort der Sonde, gemittelt über die Meßperiode. Ebenfalls ermittelt wird die Anzahl der Phasenübergänge innerhalb einer Meßperiode, die Auskunft über die Partikeldichte der Gasphase gibt.

Die Gegenüberstellung der Signale mehrerer, räumlich verteilt angeordneter Sonden erlaubt die Ermittlung der vorliegenden Strömungsform. Hierbei ist es vorteilhaft, die einzelnen Be- und Entnetzungsvorgänge in ihrer chronologischen Abfolge zu betrachten. Auf diese Weise kann bei geeigneter Anordnung der Sonden eine Aussage zum Auftreten von Wellen, Schwallen oder Propfen gemacht werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Auswertung der Zeitdifferenz zwischen der Entnetzung von hintereinander angeordneten Sonden. Bei bekanntem Abstand der Sondenspitzen kann die Strömungsgeschwindigkeit von Gaspartikeln bestimmt werden.

2.2 Sonden auf der Primärseite im Einzelrohr

Für die Charakterisierung der Strömungsform wurden zwei Sondenfelder in ein speziell für diesen Zweck vorgesehenes Einzelrohr eingebaut, daß sich zusätzlich zum Wärmeübertragerbündel im NOKO-Versuchsstand befand. Die Beobachtung der Strömungsform wurde beim Durchgang des Flüssigkeitsspiegels an der Position des Sondenfeldes vorgenommen. Um den Durchgang bei zwei unterschiedlichen Freilegungsgraden des Einzelrohrs untersuchen zu können, war je ein Sondenfeld in der Mitte des oberen und des unterer Schenkels des Einzelrohrs im Einsatz. Gegenüber früheren Messungen an Integralmodellen des Primärkreislaufs von Druckwasserreaktoren (PMK-2, PKL u.ä.) mußte eine Spezialkonstruktion entwickelt werden, die das Herausführen von flexiblen, druck- und temperaturfesten Anschlußleitungen durch die Sekundärseite von NOKO hindurch ermöglichten.

Ein Sondenfeld umfaßt 8 nadelförmige Einpunktsonden. Hiervon sind 7 Sonden gleichmäßig über den Rohrquerschnitt verteilt in einer senkrechten Meßebeine angeordnet (Bild 2.1). Dadurch ist die Beobachtung der Phasenverteilung über den Rohrquerschnitt möglich (Nachweis der Strömungsformen Schicht-, Wellen-, Pfropfen-, Schwall- und Blasen-Strömung). Eine weitere 8. Sonde (Bild 2.2) zur Geschwindigkeitsmessung befindet sich 20 mm hinter der zentralen Sonde in der Meßebeine.

Durch Verdrehung des Sondenfelds gegenüber der Horizontalen um 19,1° wird erreicht, daß die Sondenpositionen über die Höhe gleichmäßig gestaffelt sind. Damit kann der Füllstand bei Vorliegen einer Schichtströmung in Schritten zu ca. 6 mm charakterisiert werden.

Beim Einbau der Sonden in das Einzelrohr sind Abweichungen von den ursprünglich beabsichtigten Maßen aufgetreten. Die tatsächliche Position wurde durch endoskopische Untersuchung und eine nachträgliche Laserpeilung an den ausgebauten Sondenfeldern festgestellt. Sonde 4 (obere Meßebeine) war ausgefallen.

Meßebeine im oberen Schenkel						
Sonde	Einbautiefe (soll)	Einbautiefe (ist)	Abstand von Achse	Höhe vom Boden (soll)	Höhe vom Boden (ist)	Bemerkung
S1	5,7 mm	0,5 mm ¹⁾		33,0 mm	38,1 mm	
S2	5,7 mm	4,3 mm		28,5 mm	29,4 mm	
S3	5,7 mm	1,6 mm		23,9 mm	25,2 mm	
S4	5,7 mm	0,6 mm		14,8 mm	13,1 mm	defekt
S5	5,7 mm	0,5 mm		10,2 mm	6,8 mm	
S6	5,7 mm	2,5 mm		5,7 mm	2,6 mm	
S7	19,4 mm	14,6 mm	4,8 mm	19,4 mm	23,9 mm	
S8	19,4 mm	10,6 mm	8,8 mm	19,4 mm	26,0 mm	

Meßebeine im unteren Schenkel						
Sonde	Einbautiefe (soll)	Einbautiefe (ist)	Abstand von Achse	Höhe vom Boden (soll)	Höhe vom Boden (ist)	Bemerkung
S9	5,7 mm	2,5 mm		33,0 mm	36,1 mm	
S10	5,7 mm	3,7 mm		28,5 mm	29,8 mm	
S11	5,7 mm	1 mm ¹⁾		23,9 mm	25,4 mm	
S12	5,7 mm	1,0 mm		14,8 mm	13,3 mm	
S13	5,7 mm	2,3 mm		10,2 mm	8,0 mm	
S14	5,7 mm	3,4 mm		5,7 mm	3,4 mm	
S15	19,4 mm	13,8 mm	5,6 mm	19,4 mm	24,7 mm	
S16	19,4 mm	12,2 mm	7,2 mm	19,4 mm	24,8 mm	

¹⁾ Sonde nur endoskopisch vermessen, nach Ausbau war Sonde defekt

Tabelle 2.1 Realisierte Einbautiefe der Sonden im Einzelrohr

Die Differenzen zwischen den Soll- und den Istpositionen ergaben sich aus Maßabweichungen bei der Anbringung der Stützen für die Aufnahme der Sonden am Rohr. Durch die erschwerten Bedingungen des Einbaus in das bereits im NOKO-Behälter befindliche Einzelrohr war eine nachträgliche Korrektur der Positionen nicht mehr möglich. Bei zukünftigen Sondeninstallationen muß die Installation von Sonden am FZR erfolgen, bevor das Bündel in den Druckbehälter eingebaut wird.

2.3 Sonden auf der Sekundärseite am Bündel

Auf der Sekundärseite des NOKO-Bündels wurden insgesamt 7 Sonden eingesetzt. Hiervon waren 6 Sonden oberhalb, eine Sonde innerhalb des Bündels angeordnet (Bilder 2.3 und 2.4). Die Sonden befanden sich über den oberen Schenkeln (Zulaufbereich) der Wärmeübertragerrohre in einem Abstand von 200 mm vom Eintritt in den Behälter entfernt.

Mehrere nebeneinander liegende Sonden dienten zur Ermittlung der Ungleichmäßigkeit der Dampfgehaltsverteilung infolge der Anordnung der Rohre im Bündel. Zwei Reihen von übereinander angeordneten Sonden dienten zum Nachweis der Dampfkondensation bei unterkühltem Sieden.

In axialer Richtung befanden sich die Sonden vom Eintritt her gesehen 200 mm hinter Mitte Rohrbündel.

Sonde	Abstand vom Leitblech	Höhe über Oberkante Bündel	Bemerkung
S17	91 mm	-100 mm	50 mm oberhalb von Rohr 5
S18	146 mm	50 mm	125 mm oberhalb von Rohr 4
S19	118,5 mm	50 mm	mittig zwischen S18 und S20
S20	91 mm	50 mm	50 mm oberhalb von Rohr 1
S21	146 mm	150 mm	100 mm oberhalb von S18
S22	118,5 mm	150 mm	100 mm oberhalb von S19
S23	91 mm	150 mm	100 mm oberhalb von S20

Tabelle 2.2 Anordnung der Sonden auf der Sekundärseite des NOKO-Bündels

Die Datenaufzeichnung erfolgte durch ein 16-kanaliges, mikroprozessorgesteuertes Elektronikmodul. Die Sondensignale wurden mit einer Frequenz von 4096 Hz abgefragt, d.h. das Auftreten von Phasenwechseln an den Sondenspitzen wurde mit einer Zeitauflösung von 0,25 ms registriert. Die Meßinformation wurde auf der Festplatte eines Datenerfassungs-PC gespeichert. Die Synchronisation mit dem Meßrechner der NOKO-Warte geschah per Hand mit einer Genauigkeit von 1 s.

2.4 Thermoelemente

Das Einzelrohr war mit Thermoelementen ausgestattet, die von oben und unten in das Rohr eingebaut waren. Die Thermoelemente wurden vom Forschungszentrum Jülich installiert und betrieben. Die Meßstellen befanden sich in einer Einbautiefe von 6 mm von der Innenwand gerechnet und registrierten damit die Fluidtemperatur. Während der Experimente wurden insgesamt 28 Thermoelemente betrieben. Die Einbaupositionen sind in Bild 2.5 angegeben. Die Thermoelemente waren bei den Versuchen E1, E2 und B9 nicht verfügbar.

Zur Bewertung der Sonden-signale von der Sekundärseite des NOKO-Bündels wurden die Meßwerte der Thermoelemente T3D1, T3D3 und T3D6 herangezogen. Diese Thermoelemente befinden sich unterhalb, in der Mitte und kurz oberhalb des Rohrbündels in der Mitte zwischen den Leitblechen (Bild 2.3).

3. Experimente

Für die Charakterisierung der Strömungsform im Einzelrohr wurden die Signale der Sonden während des Durchgangs des Flüssigkeitsspiegels an der Einbauposition des betreffenden Sondenfeldes analysiert. Dabei wird der Übergang zwischen dem noch mit Kondensat gefüllten Bereich und dem bereits freigelegten Rohr am Sondenfeld vorbeigeschoben. Während der Freilegung des Sondenfeldes kann von annähernd konstanten Bedingungen (Kondensationsleistung, Druck, Temperatur) ausgegangen werden, so daß sich die axiale Phasenverteilung in den Sondendaten widerspiegelt.

Test	Reaktor- druck, bar	Sekundär- druck, bar	Füllstands- absenkung	Bündelkon- figuration ¹⁾ (Rohre i.B.)	Bemerkung ²⁾
B9	10	10 (1,5)	stufenweise	1, 4, 5, 8	sekundäre Druckentlastung
E1	10	1	kontinuierlich	E	Messung nur im E
E2	70	1	stufenweise	1, 4, 5, E	Messung im E und am B
E3	50	1	kontinuierlich	E	Thermoelemente am Einzel- rohr verfügbar
E5	70	1	kontinuierlich	E	
E7/8	10	1	kontinuierlich	E	
E9	30	1	kontinuierlich	E	

¹⁾ Siehe Bild 2.3

²⁾ E - Einzelrohr, B - Bündel

Tab. 3.1 Zusammenstellung der durchgeführten Tests

Für eine optimale Beobachtung der Freilegung der beiden Sondenfelder wurde versucht, den Reaktorfüllstand kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von ca. 2 cm/min abzusenken. Aus Gründen der Versuchsstandssteuerung konnte diese Geschwindigkeitsvorgabe nicht eingehalten werden, d.h. die Absenkung verlief in der Regel schneller und die dabei auftretenden Geschwindigkeiten waren nicht konstant. Der Versuch

E2, bei denen das Einzelrohr parallel zum Bündel betrieben wurde, wurde aus Gründen des Versuchsprogramms von NOKO mit stufenweiser Füllstandsabsenkung gefahren.

Bei Versuch B9 kamen nur die Sonden auf der Sekundärseite zum Einsatz. Der Zustand des Wassers auf der Sekundärseite während des spezifikationsgemäßen Betriebs bei 10 bar Sekundärdruck war stets einphasig. Sieden wurde im Anschluß durch Absenkung des Sekundärdrucks auf 1,5 bar erreicht. Der Versuch diente nur zur Funktionserprobung für die Sonden S17-S23.

Bei den Versuchen E1, E3, E5, E7/8 und E9 war das Bündel außer Betrieb. Es wurde nur im Einzelrohr gemessen. Hierbei wurde versucht, den Reaktorfüllstand kontinuierlich abzusenken, damit der Füllstand im Einzelrohr sich langsam an den beiden Sondenfeldern vorbeibewegt. Während des Experiments E1 kam es zum zeitweisen Ausfall des Kessels. Der Moment des Ausfalls ist in den Plots der Meßdaten vermerkt.

Ein Teil der Versuchsdauer einiger Tests sowie die in Tabelle 3.1 nicht aufgeführten Versuche E4 und E6 wurden für Experimente mit definierter Injektion von nicht-kondensierbaren Gasen genutzt, die nicht in den Rahmen dieses Vorhabens fallen.

4. Strömungsformen im Einzelrohr

4.1 Theoretisch vorhergesagte Strömungsformen

Zur Nachrechnung der NOKO-Versuche mit ATHLET wurde dieses mit dem Modul KONWAR gekoppelt, das die Wärmeübergangskoeffizienten bei der Kondensation in waagerechten Rohren berechnet (vgl. [SCA-96]). KONWAR basiert auf der Strömungskarte von Tandon, bei der die Dampfgeschwindigkeit nach Wallis über dem Verhältnis des volumetrischen Flüssigkeits- zu Dampfgehaltes in einem Rohrquerschnitt aufgetragen. In der Definition für die dimensionslose Dampfgeschwindigkeit j_D^* bezeichnet ϵ den Strömungsdampfgehalt, \dot{M} den gesamten Massenstrom der Zweiphasenströmung, A die Querschnittsfläche der Rohres mit dem Durchmesser D , g die Erdbeschleunigung, ρ_D die Dampf- und ρ_W die Flüssigkeitsdichte.

$$j_D^* = \frac{\dot{x}\dot{M}}{A[gD\rho_D(\rho_F - \rho_D)]^{0,5}}$$

Die Strömungskarte wird in den Koordinaten j_D^* und $(1-\epsilon)/\epsilon$ konstruiert. In den Bildern 4.1 bis 4.4 wurde die Zuordnung der Strömungsformen nach [TAT-82] verwendet. Darüber hinaus gibt Palen [PAJ-79] an, daß zwischen Schichten- und Ringströmung ein Übergangsbereich existiert. Die Grenzen für diesen Übergangsbereich, die dem die Wärmeübergangskoeffizienten mittels Interpolation berechnet werden, liegen bei $0,33 < j_D^* < 1,5$ und $(1-\epsilon)/\epsilon < 0,5$.

Im Vorfeld der Experimente wurden nun für die vier Druckstufen 10, 30, 50 und 70 bar mit Hilfe des Moduls KONWAR die Kondensation im Einzelrohr sowie für die beiden Füllstandsdurchgänge durch die Sondenkämme die Strömungsformen entlang des

Einzelrohres berechnet. Hierzu wurde das Einzelrohr in Abschnitte von 20 cm unterteilt und für jeden Abschnitt die vorliegende Strömungsform sowie die wichtigsten Strömungsparameter (volumetrischer und massenbezogener Dampfgehalt, Dampf- und Kondensatgeschwindigkeit, Wärmeübergangskoeffizienten und Kondensationsraten) berechnet.

Die Strömungskarten sind in den Bildern 4.1 – 4.4 dargestellt. Weiterhin kennzeichnen die Linien den Wechsel der Strömungsformen innerhalb des Einzelrohres, wobei der Abstand zwischen zwei Punkten jeweils 20 cm beträgt. Anhand der Bilder wird deutlich, daß sich zunächst innerhalb des Einzelrohres eine Ringströmung einstellt, die mit zunehmender Kondensation und dem damit verbundenen Abbau der Dampfgeschwindigkeit in eine Schichtenströmung übergeht. Mit zunehmendem Druck und damit bei gleicher Freilegung auch zunehmender Kondensationsleistung verschieben sich die Kurven nach oben. Während bei niedrigen Drücken oberhalb des Flüssigkeitsspiegels keine Pfropfen- oder Schwallströmungen zu erwarten sind, besitzen diese bei 70 bar und einer Freilegung von 75% eine Länge von bis zu 0,6 m.

4.2 Experimentell nachgewiesene Strömungsformen

4.2.1 Ermittlung der Freilegungszeitpunkte

Grundlage für die weiteren Auswertungen ist die Ermittlung der Zeitpunkte der Freilegung des oberen und des unteren Sondenfeldes. Als Freilegungszeitpunkt wird der Moment des Übergangs der zentralen Sonde (S7 des oberen bzw. S15 des unteren Sondenfeldes) von Wasser auf Dampf definiert. Die Freilegungszeitpunkte zusammen mit dem dazugehörigen Momentanwert des Differenzdrucks PD2_3 sind in folgender Tabelle zusammengefaßt:

Test	Freilegung, oben			Freilegung, unten	
	Druck	$t_{\text{frei, oben}}$	PD2_3 _{oben}	$t_{\text{frei, unten}}$	PD2_3 _{unten}
	bar	s	mbar	s	mbar
E1	10	1642	-115,8	4300	-53,2
E2	70	1855	-120,4	6472	-29,8
E3	50	303	-118,6	791	-80,5
E5	70	874	-120,9	2872	-46,9
E7/E8	10	245	-103,8	1214	-29,4
E9	30	532	-110,1	2938	-13,4

Tabelle 4.1 Freilegungszeitpunkte ($t=0$ entspricht Start Datenaufzeichnung der Datenerfassungsanlage des NOKO-Versuchsstandes)

4.2.2 Geschwindigkeit der Füllstandsabsenkung zum Zeitpunkt der Freilegung

Die Strömungsform wird aus den SONDENSIGNALEN ermittelt, die während der Passage des Füllstandes am oberen bzw. unteren Sondenfeld auftreten. Bei der kontinuierlichen Füllstandsabsenkung wird das Übergangsgebiet von der Seite der reinen Flüssigkeitsströmung zur Dampfströmung mit Kondensation hin am jeweiligen Sondenfeld vorbeibewegt. Bei Kenntnis der Geschwindigkeit des Füllstandsabfalls im Einzelrohr, der während des Spiegeldurchgangs vorlag, kann aus dem zeitlichen Ablauf der SONDENSIGNALEN auf die räumliche Ausdehnung von Gebieten mit bestimmter Strömungsform geschlossen werden, bzw. die theoretisch vorhergesagte Ausdehnung der Gebiete mit Pfropfen- bzw. Schwallströmung kann in eine entsprechende Zeitdauer umgerechnet werden. Auf dieser Grundlage kann der Vergleich der Meßergebnisse mit der Vorhersage vollzogen werden.

Die Abschätzung der Geschwindigkeit der Füllstandsabnahme wird mit Hilfe des Differenzdrucksignals PD2_3 vorgenommen, daß zwischen dem Ein- und dem Austrittsammler gemessen wurde. Hierzu wurde die Änderung des Differenzdrucks PD2_3 zwischen der Freilegung des oberen und des unteren Sondenfeldes aus den in Tabelle 4.1 angegebenen Werten ermittelt. Diese Differenz wurde auf den bekannten Höhenunterschied zwischen den beiden Sondenfeldern bezogen. Der so ermittelte Proportionalitätskoeffizient wurde in erster Näherung für den jeweiligen Versuch als konstant angenommen. Mit seiner Hilfe wurde aus der momentanen Änderungsgeschwindigkeit des Differenzdrucks zum Zeitpunkt der Freilegung des jeweiligen Sondenfeldes die Geschwindigkeit der Füllstandsabnahme berechnet.

Aus den so ermittelten Geschwindigkeiten ergibt sich die Zeitdauer, innerhalb der ausgehend von der Strömungskarte nach [TAT-82] eine Pfropfen- bzw. Schwallströmung zu beobachten sein müßte. Die entsprechenden Daten sind für alle Experimente und jeweils für das untere und das obere Sondenfeld in den Tabellen 4.2 und 4.3 zusammengefaßt. Dabei wird auch ein Vergleich mit der Geschwindigkeit des Füllstandsabfalls vorgenommen, die sich aus der Zeitdifferenz zwischen der Freilegung von Sonden 2 und Sonde 7 des oberen sowie von Sonde 10 und Sonde 15 des unteren Feldes ergibt.

Test	$\frac{\Delta PD2_3}{\Delta H}$	$\frac{dPD2_3}{dt}$	$\frac{dH}{dT} _{\Delta p}$	$\frac{dH}{dT} _{Sonden}$	ΔL_{Plug}	ΔL_{Slug}	Δt_{Plug}	Δt_{Slug}
	mbar/mm	mbar/s	mm/s	mm/s	mm	mm	s	s
E1	0,172	0,045	0,26	0,29	0	0	0	0
E2	0,250	0,034	0,14	0,04	100	100	20	20
E3	0,105	0,084	0,81	0,92	100	100	4	4
E5	0,204	0,060	0,29	0,79	100	100	10	10
E7/8	0,205	0,295	1,44	1,83	0	0	0	0
E9	0,266	0,097	0,36	0,37	100	50	8	4

Tabelle 4.2 Geschwindigkeit der Füllstandsabsenkung bei Freilegung des oberen Sondenfelds, erwartetes Auftreten von Pfropfen bzw. Schwallen

Test	$\frac{\Delta PD2_3}{\Delta H}$	$\frac{dPD2_3}{dt}$	$\frac{dH}{dT} _{\Delta p}$	$\frac{dH}{dT} _{Sonden}$	ΔL_{Plug}	ΔL_{Slug}	Δt_{Plug}	Δt_{Slug}
	mbar/mm	mbar/s	mm/s	mm/s	mm	mm	s	s
E1	0,172	*)	*)	0,29	50	0	5 **)	0
E2	0,250	0,119	0,47	2,55	0	600	0	70
E3	0,105	0,060	0,57	0,42	0	700	0	70
E5	0,204	0,531	2,60	2,55	0	600	0	13
E7/8	0,205	0,099	0,48	0,24	70	0	8	0
E9	0,266	0,234	0,88	2,55	70	200	4	13

Tabelle 4.3 Geschwindigkeit der Füllstandsabsenkung bei Freilegung des unteren Sondenfelds, erwartetes Auftreten von Pfropfen bzw. Schwällen

- *) Keine Werte verfügbar (Füllstand stagnierte beim unteren Sondenfeld)
 **) Aus Sondenignalen ermittelte Geschwindigkeit wurde genutzt

Wie aus Tabelle 4.2 ersichtlich ist, stimmen die Geschwindigkeiten der Spiegelabsenkung, die aus dem Differenzdruck ermittelt wurden, gut mit den aus den Sondenignalen bestimmten Werten überein. Eine größere Abweichung wurde lediglich bei E5 beobachtet. Am unteren Sondenfeld (Tabelle 4.3) fallen die teilweise recht großen Streuungen auf (E2, E7/8, auch E9).

Bei E1 kam es praktisch zum Stagnieren des Füllstandes auf Höhe des unteren Sondenfeldes. Es kann deshalb keine Geschwindigkeit der Spiegelabsenkung angegeben werden. Die Freilegung des unteren Sondenfeldes zog sich über 700 s hin. Während des Prozesses der Freilegung kam es außerdem zu einem Kesselausfall, der die Versuchsergebnisse stark beeinträchtigt.

Aus der Bewertung der Strömungskarten ergeben sich für das obere Sondenfeld nur kurze Zeitintervalle, in denen Pfropfen bzw. Schwälle zu beobachten sein müssten. Die Zeitdauer liegt zwischen 0 und 20 s. Am unteren Sondenfeld müssten hingegen teilweise über bis zu 70 s Schwälle zu beobachten sein (E2, E3). Auch für E5 und E9 werden Pfropfen und Schwälle vorhergesagt. Wegen der hohen Geschwindigkeit der Füllstandsabsenkung wird der Bereich jedoch relativ schnell durchlaufen.

4.2.3 Bewertung der Sondenignale hinsichtlich der Strömungsformen

Die Visualisierung der Sondenignale wurde wie folgt vorgenommen: Die von den Sonden gelieferte binäre Information über die momentan anstehende Phase (Flüssigkeit, Gas/Dampf) wurde in Gestalt von horizontalen Balken über der Zeitachse dargestellt. Die Zeitintervalle, innerhalb der Wasser an der Sondenspitze vorlag, wurden als schwarze Balken geplottet. Dampf bzw. Gas an der Sonde wurde durch einen weißen Balken gekennzeichnet. Die Balken, die den verschiedenen Sonden des jeweiligen Sondenkamms zugeordnet sind, wurden zeitsynchron übereinander dargestellt, wobei die tatsächlichen vertikalen Positionen der Sonden nach Tabelle 2.1 die Reihenfolge der Balken und deren vertikale Ausdehnung bestimmt. Die so erhaltenen graphischen

Darstellungen veranschaulichen die instationäre Verteilung der Gas- bzw. Flüssigphase an der Position des jeweiligen Sondenfelds im Prozeß der Freilegung.

Bild 4.5 zeigt die Freilegung des oberen Sondenfelds bei Versuch E2. Es wird der Durchgang eines ruhigen Flüssigkeitsspiegels beobachtet. Pfropfen bzw. Schwälle treten nicht auf. Das steht im Widerspruch zu den vorhergesagten Werten aus Tabelle 4.2, denen zufolge beim Test E2 über je 20 s Pfropfen bzw. Schwälle aufweisen müßte. Der Durchgang des Flüssigkeitsspiegels vollzieht sich im Gegensatz dazu sehr ruhig und ist nach ca. 180 s abgeschlossen. Danach wird eine Gerinneströmung detektiert, bei der die beiden unteren Sonden (S5 und S6) im Kondensat verbleiben. Die Gerinnehöhe muß demzufolge mehr als 6,8 mm betragen.

Der Versuch E2 stellt hinsichtlich der vorhergesagten Dauer von Pfropfen und Schwallströmung das Maximum dar. Von der Kondensationsleistung her müßten auch E3, E5 und E9 für kurze Zeiträume Pfropfen bzw. Schwälle aufweisen. Diese wurden jedoch ebenfalls nicht beobachtet. Die Freilegung des oberen Sondenfeldes vollzog sich bei allen Tests sehr ruhig. Es wurde eine ausgeprägte Schichtung beobachtet, wobei die Sonden der Reihe nach freilegt werden. In einigen Fällen trat eine leichte Wellenbewegung auf. Die verfügbaren Sondensignale sind in den Bildern 4.6 bis 4.8 zusammengestellt.

Am unteren Sondenfeld vollzieht sich der Spiegeldurchgang deutlich unruhiger. Das ist ein Resultat der höheren Kondensationsrate infolge der größeren freigelegten Fläche von 75 % im Vergleich zu 25 % bei Freilegung des oberen Sondenfeldes. Dennoch sind Pfropfen bzw. Schwälle nicht oder nur in sehr begrenztem Umfang beobachtet worden. Erscheinungen, die als Pfropfen oder Schwälle interpretiert werden können, wurden nur bei den Experimenten E2, E9 und ansatzweise bei E7/8 beobachtet (Bilder 4.9, 4.10 sowie 4.13). Als Schwall wurden dabei Ereignisse gedeutet, bei denen zumindest die zweite Sonde von oben (S10) bereits freigelegt war und anschließend ein Wasserschwall auftrat, der das Rohr kurzzeitig wieder bis oben füllte, d.h. zur Benetzung der oberen Sonde S9 führte. Obwohl diese Definition sehr weit gefaßt ist, bleibt die Anzahl der entsprechenden Ereignisse gering.

Bei E2 ist die gesamte Freilegung nach ca. 10 s abgeschlossen, danach liegt eine Gerinneströmung mit Wellen vor. Das Gerinne bedeckt die Sonden S13 und S14 (Höhe min. 8,0 mm) vollständig, die Wellen erreichen Sonde S12 mit einer Einbauhöhe von 13,3 mm. Schwälle werden über einen Zeitbereich von ca. 6-7 s beobachtet, vorhergesagt wurden 70 s (vgl. Tabelle 4.3). Bei E9 werden über ca. 4 s Schwälle beobachtet, was ebenfalls deutlich unter dem vorhergesagten Wert von 13 s liegt.

Bei den Versuchen E3 und E5 hätten Schwälle über 70 s bzw. 13 s zu beobachten sein müssen. In der Realität wurden keinerlei Ereignisse registriert, die eine Interpretation als Schwall oder Pfropfen zulassen (Bilder 4.11 und 4.12). Die Ausnahme bildet ein einzelnes Ereignis während des Versuchs E5 (Bild 4.12, $t=804$ s). Der Füllstandsdurchgang vollzieht sich wesentlich ruhiger, als bei E9, obwohl E3 und E5 einen höheren Primärdruck aufweisen und deshalb theoretisch eine höhere Kondensationsleistung vorliegen müßte. Es wurde vermutet, daß bei diesen beiden Versuchen die Kondensation durch das Vorhandensein von nichtkondensierbaren Gasen wesentlich beeinträchtigt war. Die Analyse der Thermoelementdaten (s. Kapitel 4.3) bestätigen diese Annahme.

Bei den Versuchen E1 und E7/8 sind schon aufgrund des geringen Primärdrucks (10 bar) und der damit verbundenen kleinen Kondensationsleistung keine nennenswerten Pfropfen bzw. Schwälle zu erwarten. Die experimentellen Ergebnisse stehen hiermit nicht im Widerspruch (s. Bild 4.13).

Der Versuch E2 ist das einzige Regime, bei dem vor der Freilegung des unteren Sondenfeldes Dampfblasen im gesamten Strömungsquerschnitt verteilt auftraten (s. Bild 4.9). Die Blasen setzen ca. 12 s vor Beginn der Freilegung der oberen Sonde S9 ein. Bei einem Primärdruck von 70 bar führt die Zustandskurve in der Strömungskarte (Bild 4.4) sehr dicht am Gebiet der Blasenströmung vorbei, so daß mit dem Auftreten einer Blasenströmung auch theoretisch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu rechnen ist.

Weiterhin wurde beobachtet (Bild 4.10), daß bei den Versuchen E2 und E9 an der obersten Sonde des unteren Feldes (S9) Gasblasen auftraten, lange bevor der Flüssigkeitsspiegel das Sondenfeld erreichte. Dabei handelt es sich um Blasen von nichtkondensierbaren Gasen, die durch die Kondensatströmung im leicht nach unten geneigten Rohr mitgerissen werden. Der Mißriß von Dampf kann wegen der vorherrschenden Temperaturen (s. Kapitel 4.3, Bild 4.20) ausgeschlossen werden.

4.3 Gegenüberstellung von Sonden- und Thermoelementdaten

Bei den Versuchen E3, E5, E7/8 und E9 waren die Thermoelemente im Einzelrohr verfügbar. Bild 4.14 zeigt die Temperaturverläufe an den von oben eingebauten Thermoelementen im oberen Schenkel des Einzelrohrs im Vergleich zu den Signalen der zentralen Sonden S7 und S15. Die Freilegung des oberen Sondenfeldes wird durch den Übergang von S7 auf Dampf angezeigt. Zu diesem Zeitpunkt geht die Temperatur an TE01A auf Sättigung. Dieses Thermoelement befindet sich jedoch vom Eintritt her gesehen ca. 1,75 m vor dem Sondenfeld. Das Thermoelement TE04A, das sich ca. 460 mm stromauf vor dem Sondenfeld befindet, erreicht die Sättigungstemperatur erst 100 s vor der Freilegung des unteren Sondenfeldes.

Hieraus folgt, daß sich zum Zeitpunkt der Freilegung des oberen Sondenfeldes ein 1,75 m (ca. 25 % der Gesamtlänge des Einzelrohrs) langer Pfropfen aus nichtkondensierbaren Gasen oberhalb des Flüssigkeitsspiegels angesammelt hatte. Zum Zeitpunkt der Freilegung des unteren Sondenfeldes betrug die Länge des Pfropfens bereits ca. 50 % der Gesamtlänge des Einzelrohrs. Diese Pfropfen sind in der axialen Verteilung der Temperatur am Scheitel des Rohrs gut zu erkennen (Bild 4.15).

Die Thermoelemente am Boden des Einzelrohrs (TE03B und TE06B, Bild 4.16) zeigen eine signifikante Temperaturerhöhung, wenn das obere Sondenfeld freigelegt wird. Die Temperatur bleibt dabei jedoch weit unter der Sättigungstemperatur. Der Anstieg wird durch das am Boden des Rohrs abfließende Kondensat hervorgerufen, das sich in der Nähe des Eintritts (hinter dem Pfropfen aus nichtkondensierbaren Gasen) bildet. Das Kondensat ist wärmer, als das darüber befindliche Gas, welches fast bis auf die Sekundärtemperatur abgekühlt wird.

Wenn die Kondensationsfront, d.h. das Ende des Gaspfropfens eines der oberen Thermoelemente erreicht, so steigt dessen Meßwert auf Sättigungstemperatur an, während

die Temperatur am entsprechenden Thermoelement am Boden der Leitung einen geringen Anstieg verzeichnet (Bild 4.16). Die Temperaturkurven kreuzen sich, das Kondensat behält eine gewisse Unterkühlung.

Die Temperaturverläufe in der Umgebung des unteren Sondenfeldes (Bild 4.17) weisen eine weitere Besonderheit auf. Beim Durchgang des Flüssigkeitsspiegels kreuzen sich die Verläufe, die am Scheitel und am Boden des Rohrs gemessen werden. Vor dem Spiegeldurchgang ist die Temperatur am Scheitel höher als am Boden. Das ist darauf zurückzuführen, daß die Abkühlung des Kondensats durch Wärmeabgabe an die Sekundärseite zur Ansammlung kälterer Flüssigkeit am Boden des Rohrs führt. Nach dem Spiegeldurchgang ist am oberen Thermoelement zunächst nichtkondensierbares Gas, das auf geringere Temperaturen abgekühlt wird, als das Kondensat, welches sich in den Gebieten mit Dampfkondensation ständig neu bildet. Der Temperaturanstieg am unteren Thermoelement wird dadurch verursacht, daß nun alles Kondensat, also auch das etwas wärmere, ursprünglich am Scheitel des Rohrs strömende, im Gerinne abfließt.

Das Gegenbeispiel zum Versuch E3 ist der Versuch E9, wo die Temperaturen der oberen Thermoelemente fast zeitgleich mit der Freilegung des jeweiligen Sondenfeldes auf den Sättigungswert ansteigen (Bilder 4.18 bis 4.20). Hier lagen keine Pfropfen aus nichtkondensierbarem Gas vor. Die an der Sonde S9 detektierten Bläschen, die lange vor der Freilegung des Sondenfeldes auftraten (Bild 4.20), weisen jedoch darauf hin, daß auch bei diesem Experiment nichtkondensierbare Gase anwesend waren. Es kam jedoch nicht zu einer erkennbaren Einschränkung der Kondensationsleistung.

Durch die Anhäufung der nichtkondensierbaren Gase bei E3 und E5 wird oberhalb des Flüssigkeitsspiegels die Rohrrinnenfläche, an der in der Regel die Kondensation stattfindet, von nichtkondensierbaren Gasen abgedeckt. Kondensation findet somit ausschließlich in Rohrabschnitten weit vor dem Flüssigkeitsspiegel statt. Hieraus resultiert, daß die Geschwindigkeit des Gemisches von Dampf und nichtkondensierbaren Gasen in der Nähe des Flüssigkeitsspiegels nahezu Null ist und somit keine Phasenreibung oder Oberflächenspannung existiert, die einen Wechsel der Strömungsformen hervorrufen könnte. Dies ist die Ursache dafür, daß bei den Experimenten E3 und E5 keine Schwallströmung zu beobachten war, obwohl ein höherer Primärdruck als bei E9 vorlag, bei dem zumindest einige Schwälle auftraten. Das weitgehende Fehlen von Schwällen bei E7/8 ist wahrscheinlich auf die hier ohnehin geringere Kondensationsleistung zurückzuführen (Primärdruck 10 bar). Es ist jedoch nicht auszuschließen, das nichtkondensierbare Gase auch bei den Experimenten E7/8 und E9 eine Rolle gespielt haben. Hinsichtlich der Versuche E1 und E2 können aufgrund fehlender Temperaturwerte keine näheren Aussagen gemacht werden.

4.4 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Bei den Versuchen mit dem Einzelrohr wurde der durch die Strömungskarte nach [TAT-82] zu erwartende Übergang von einer Schicht- bzw. Ringströmung in eine Schwall- und schließlich eine Pfropfenströmung bei der Annäherung an den Flüssigkeitsspiegel nicht in dem erwarteten Maße nachgewiesen. Dabei weisen Versuche mit großer theoretischer Kondensationsleistung (E3, E5) einen unerwartet ruhigen Spiegeldurchgang auf, während andere Versuche (E2, E9) zumindest für eine kurze

Zeit ansatzweise eine Schwallströmung zu erkennen geben, obwohl insbesondere E9 bei einem geringeren Primärdruck und damit einer geringeren Kondensationsleistung gefahren wurde, als E3 und E5.

Als Ursache für die zuvor beschriebenen Phänomene wurde die Akkumulation von nichtkondensierbaren Gasen gefunden. Versuche mit dem Einzelrohr reagieren besonders sensibel auf nichtkondensierbare Gase, da bereits kleinere Mengen größere Abschnitte des Einzelrohrs ausfüllen können. Innerhalb dieser Pfropfen aus nichtkondensierbaren Gasen wird die Kondensation gehemmt. Das führt zu wesentlich geringeren tatsächlichen Kondensationsleistungen gegenüber den theoretisch erwarteten Werten. Dadurch ist der Kondensatabfluß geringer. Weiterhin fehlt innerhalb des praktisch ruhenden Gaspfropfens die Scherspannung an der Phasengrenzfläche. Beide Effekte führen dazu, daß sich keine Schwälle oder Pfropfen herausbilden können.

Die Ursache für die Akkumulation von nichtkondensierbaren Gasen im Einzelrohr ist bislang nicht endgültig geklärt. Die Austreibung der im Speisewasser gelösten Gase kann hierfür nicht verantwortlich sein, da die im Speisewasser gelösten Mengen zu gering sind. Konservative Abschätzungen zeigen, daß bei einer Speisewasserzufuhr von 0,2 kg/s innerhalb einer Stunde bei 70 bar maximal 0,34 l nichtkondensierbare Gase eingetragen werden. Daraus folgt, daß bei Betrieb eines Einzelrohres sich in der Stunde ein Gaspfropfen von gerade einmal 0,2 m Länge ansammeln könnte. Beobachtet wurden bei den Experimenten hingegen Pfropfen von nichtkondensierbaren Gasen mit Länge bis zu 4,3 m (dies entspricht ca. 50 % der Wärmeübertragerfläche). Beim gleichzeitigen Betrieb von vier Rohren des Bündels würde die maximal abgedeckte Länge nur ca. 0,07 m/h betragen.

Auffällig ist weiterhin, daß die nichtkondensierbaren Gase nur am ersten Versuchstag in signifikanten Mengen zu beobachten waren, nicht aber am zweiten Tag (vgl. Versuche E7/8 und E9). Daher liegt die Vermutung nahe, daß die nichtkondensierbaren Gase beim Anfahren der Versuchsanlage durch das Aufprägen des Stützgaspolters in die Flüssigkeit gepreßt und während des Experimentes kontinuierlich freigesetzt wurden. Zwischen den Versuchstagen bleibt die Anlage hingegen unter hohem Druck und hoher Temperatur stehen, so daß keine weiteren nichtkondensierbaren Gase gelöst wurden. Weiterhin wurden E7/8 und E9 bei geringen Drücken gefahren, so daß beim Anfahren wahrscheinlich eine relativ gute Entgasung des vorgewärmten Reaktorwassers vonstatten ging. Das würde erklären, warum bei E3 und E5 sehr viel, bei E7/8 und E9 hingegen nur wenig nichtkondensierbares Gas vorhanden war.

Zusammenfassend muß festgestellt werden, daß abschließende Aussagen über die Strömungsform in den Wärmeübertragerrohren des Notkondensators aufgrund der zu großen, nicht kontrollierbaren und nicht reproduzierbaren Mengen an nichtkondensierbaren Gasen nicht getroffen werden können. Trotzdem ist davon auszugehen, daß bei sorgfältiger Entgasung der Anlage und des Speisewassers eine wesentlich intensivere Schwallbildung stattfindet. Durch die Kondensatunterkühlung ist auch das Auftreten von Kondensationsschlägen nicht von vorn herein auszuschließen. Allerdings sagt die Strömungskarte solche Effekte nur für einen kleinen Teil (ca. 0,7 m) der Rohre voraus. Es bleibt fraglich, ob sich auf dieser kurzen Strecke (ca. 20 L/D) ausgeprägte Schwälle oder Pfropfen formieren können. Diese Frage bleibt aufgrund der genannten Schwierigkeiten mit den nichtkondensierbaren Gasen offen.

5. Bewertung der Füllstandsmessung im Einzelrohr

5.1 Modell zur Berechnung des Füllstandes aus dem Differenzdruck PD2_3

Ein Ziel der Experimente mit dem Einzelrohr war es nachzuweisen, daß sich aus der gemessenen Druckdifferenz PD2_3 mit Hilfe eines einfachen Modells unmittelbar der Füllstand in den NOKO-Rohren bestimmen läßt. Die genaue Bestimmung des Füllstandes innerhalb des Notkondensatorrohrbündels ist wichtig, da das Rohrbündel nur geringfügig gegenüber der Horizontalen geneigt ist, und Fehler bzw. Ungenauigkeiten bei der Füllstandsbestimmung sofort zu großen absoluten und relativen Fehlern bei der Bestimmung der für Kondensation zur Verfügung stehenden Rohroberflächen führen.

Generell setzt sich der Druckverlust in einer Leitung aus drei Anteilen zusammen. Dies sind der hydrostatische Druckverlust sowie Reibungs-, Form- und Beschleunigungsdruckverluste. Die Reibungs- und Formverluste im Bereich der Kondensation können nur mit Hilfe von Zweiphasen-Druckverlustmodellen berechnet werden. Allerdings ist dies in der Regel sehr aufwendig, da hierzu das Rohr in einzelne Abschnitte zu unterteilen ist und für diese dann iterativ die jeweiligen Werte bestimmt werden müssen.

Alternativ wurde daher in Anlehnung an die thermische Bedingung zur Bestimmung der Notkondensatorleistung [vgl. SCA-96, SCA-97] das Notkondensatorrohr in zwei Bereiche unterteilt - in dem ersten Bereich wird der Dampf kondensiert und in dem zweiten das Kondensat weiter unterkühlt - und die Druckverluste für die einzelnen Teilbereiche separat bestimmt (vgl. Bild 5.1). Die für Kondensation verfügbare Bündeloberfläche wird in Bild 5.1 mit A_{Frei} gekennzeichnet und ergibt zusammen mit der für Unterkühlung verfügbaren Rohroberfläche A_{Un} die gesamte Bündeloberfläche. Die Hauptanteile der Druckverluste liegen in dem ersten Rohrabschnitt, wobei sich diese in guter Näherung anhand der Modelle für eine einphasige Dampfströmung bestimmen lassen. Demgegenüber sind die Reibungs- und Formverluste im Bereich der einphasigen Flüssigkeitsströmung vernachlässigbar.

Die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Druckverluste im Einzelrohr ist jedoch, daß die in der Zulaufleitung des Notkondensators eingebaute Massenstrommessung auf den maximalen Durchsatz von ca. 2,5 kg/s bei 70 bar ausgelegt ist, wobei aufgrund der Sensitivität des Notkondensatorsystems in Bezug auf die Druckverluste nur ein Druckabfall von 2 kPa für die Differenzdruckmessung zugelassen wurde. Speziell im Bereich kleiner Drücke wird die Meßblende jedoch in Bereichen kleiner 5% ihres Auslegungswertes betrieben, so daß die Meßwerte mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Für die Auswertung der Notkondensatorversuche wird nun der Kondensatmassenstrom anhand der Kondensationsleistung des Notkondensatorbündels und der Verdampfungsenthalpie Δh_V bestimmt. Es gilt

$$\dot{m}_{NOKO} = L_{NOKO,Kon} / \Delta h_V$$

mit $L_{NOKO,Kon}$ als Kondensationsleistung, die sich anhand

$$L_{NOKO,Kon} = L_{NOKO,max} F_T \frac{A_{Frei}}{A_{Ges}}$$

ergibt. In obiger Gleichung bezeichnet $L_{NOKO,max}$ die maximale Kondensationsleistung, die anhand der Experimente mit der maximalen Druckdifferenz zwischen dem Druckgefäß und dem Kondensatorbehälter (laut Testmatrix beträgt diese 69 bar) und $A_{Frei} = A_{Ges}$ zu 3,52 MW bestimmt wurde. Weiterhin kennzeichnet F_T den Temperaturkoeffizient, der definiert ist als

$$F_T = \frac{(T_{S,DRU} - T_{S,KON})}{(T_{S,DRU} - T_{S,KON})_{max}}$$

mit $T_{S,DRU}$ als Sättigungstemperatur im Druckgefäß und $T_{S,KON}$ als Sättigungstemperatur im Kondensatorbehälter. Die Temperaturdifferenz $(T_{S,DRU} - T_{S,KON})_{max}$ bezieht sich auf einen Druck im Druckgefäß von 70 bar und einen Druck im Kondensatorbehälter von 1 bar und besitzt folglich den Wert 187 K. Mit dem Faktor F_T können von der maximalen Druckdifferenz abweichende Zustände des Notkondensators berücksichtigt werden.

Über das Verhältnis A_{Frei}/A_{Ges} wird schließlich der Einfluß unterschiedlicher Bündelfreilegungen auf die Kondensationsleistung berücksichtigt. Aufgrund der zuvor beschriebenen Schwierigkeiten bei der Messung des Kondensatmassenstromes wird dieser aus der Freilegung des Notkondensatorbündels, die anhand der nadelförmigen Leitfähigkeitssonden bestimmt wird, sowie der Bündel- bzw. Rohrcharakteristik berechnet. Die Charakteristiken sind geometrische Kennlinien, bei denen die Bündel- bzw. Rohroberfläche über der geodätischen Höhe aufgetragen sind.

5.2 Vergleich der berechneten Differenzdrücke mit den gemessenen Werten zu den Freilegungszeitpunkten

5.2.1 Versuch E3

Der Einzelrohrversuch E3 wurde am 13.11.1996 um 14:16 Uhr gestartet und dauerte 20 Minuten. In Tabelle 5.1 sind für die Zeitpunkte, bei denen der Flüssigkeitsspiegel die Sondenkämme durchläuft, die Meßdaten für die Druckverluste in der Zu- und Ablaufleitung (PD2_2 sowie PD2_4) sowie über dem Notkondensatorbündel (PD2_3) den gemäß mit Hilfe des zuvor beschriebenen Füllstandsmodell berechneten Druckverlusten (vgl. Kap. 5.1) gegenübergestellt. Die anhand der Herstellerangaben der Differenzdruckgeber berechneten Genauigkeit beträgt 1,1 mbar.

Neben den z.T. erheblichen Abweichungen in Tabelle 5.1 fällt bei dem Experiment weiterhin auf, daß auch bei beträchtlichen Freilegungen (bei Erreichen des zweiten

Sondenkamms beträgt diese immerhin ca. 75% der Gesamtrohres) kein Massenstrom zum Notkondensator gemessen wird. Dies bedeutet, daß entweder die Massenstrommessung ausgefallen ist oder innerhalb der Notkondensatorrohre kein Dampf kondensiert. Bestätigt wird die zweite Option durch die Beobachtung, daß die Temperatur des Kondensats am Bündelaustritt während der ersten 900 Sekunden nur minimal ansteigt und das Kondensat folglich im Rohr stagniert.

	Druckverlust		
	Meßwert [mbar]	Berechneter Wert [mbar]	Abweichung [mbar]
Zulaufleitung			
1. Sondenkamm	-5,3	-10,1	4,8
2. Sondenkamm	-5,3	-7,6	2,3
Bündel			
1. Sondenkamm	-119,0	-101,2	-17,8
2. Sondenkamm	-80,0	-21,9	-58,1
Ablaufleitung			
1. Sondenkamm	-400,2	-382,2	-18,0
2. Sondenkamm	-401,3	-384,2	-17,1

Tabelle 5.1: Vergleich der Meßwerte für die Druckverluste des Notkondensatorsystems und der mit Hilfe der Sonden signalen berechneten Werte.

Zur Klärung der oben beschriebenen Auffälligkeiten wurde die Beeinträchtigung der Kondensation durch die mit Hilfe der Thermo elementdaten (Abschnitt 4.3) nachgewiesenen Pfropfen aus nichtkondensierbaren Gasen in der Berechnung des Druckverlusts berücksichtigt. Zuvor wurde zusätzlich mit Hilfe des Versuchsprotokolls versucht, die Nullpunktabweichungen der Differenzdruckaufnehmer zu bestimmen und diese bei der weiteren Auswertung ebenfalls zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der Nullpunktabweichungen wurde aus dem Versuchsprotokoll der Zeitpunkt, bei dem erstmals Dampf in das Notkondensatorbündel eintritt, und die zu diesem Zeitpunkt gemessenen Druckdifferenzen für die einzelnen Abschnitte des Notkondensatorsystems (d.h. Zulaufleitung, Bündel sowie Ablaufleitung) aus den Meßdatenfiles entnommen. Zu Beginn der Freilegung des Notkondensators befindet sich oberhalb des Füllstandes (d.h. in der Zulaufleitung sowie im dem Bereich zwischen dem Eintrittssammler und dem Eintrittspunkt des Bündels in den Kondensatorbehälter) einphasiger, ruhender Sattdampf und in dem übrigen Notkondensatorsystem ruhende Flüssigkeit. Für die stehenden Dampf- bzw. Wassersäulen können nun die geodätischen Druckverluste berechnet werden. Die Differenz zwischen den Rechen- und den Meßwerten sind dann die Nullpunktabweichungen. Bei der Berechnung der geodätischen Druckdifferenzen soll die Flüssigkeit im Bündel die gleiche Temperatur wie die Flüssigkeit im Kondensatorbehälter besitzen. Die Temperatur der Flüssigkeit in der Ablaufleitung ergibt sich anhand des Mittelwertes der hieran eingesetzten Thermo elemente. Für den Versuch E3 ergeben sich somit folgende Nullpunktkorrekturen:

Zulaufleitung	–	5,2 mbar
Bündel	–	12,7 mbar
Ablaufleitung	–	16,9 mbar.

Bei der Auswertung der Thermoelementdaten im Einzelrohr wurde beim Versuch E3 ein Pfropfen von nichtkondensierbaren Gasen nachgewiesen, der zum Zeitpunkt der Freilegung des oberen Sondenfeldes ca. 25 % und bei Freilegung des unteren Feldes ca. 50% der Rohrlänge und damit der Wärmeübertragerfläche abdeckt. Kondensation findet hierbei ausschließlich in Rohrabschnitten weit vor dem Flüssigkeitsspiegel statt.

Nachfolgend wurden nun mit Hilfe der thermischen Bedingung unter Berücksichtigung der oben bestimmten Nullpunktabweichungen sowie der Reduktion der für Kondensation verfügbaren Rohroberfläche infolge nichtkondensierbarer Gase die Kondensationsleistung, der Kondensatmassenstrom sowie die Druckverluste in den einzelnen Abschnitten des Notkondensatorsystems bestimmt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 aufgeführt und den Meßwerten gegenübergestellt. Hierbei zeigt sich nun eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechenwerten.

	Druckverluste				
	Meßwert [mbar]	Berechneter Wert [mbar]	Nullpunkt- korrektur [mbar]	Nichtkon- densier- bare Gase	Abwei- chung [mbar]
Zulaufleitung					
1. Sondenkamm	-10,4	-5,2	-5,2	≈25%	0,0
2. Sondenkamm	-10,0	-5,2		≈50%	0,4
Bündel					
1. Sondenkamm	-119,0	-107,2	-12,7	≈25%	0,9
2. Sondenkamm	-80,0	-67,6		≈50%	-0,3
Ablaufleitung					
1. Sondenkamm	-382,2	-400,2	-16,9	≈25%	1,1
2. Sondenkamm	-384,2	-401,1		≈50%	0,0

Tabelle 5.2: Vergleich der gemessenen Druckverluste des Notkondensatorsystems mit den berechneten Werten nach Berücksichtigung der nichtkondensierbaren Gase sowie der Nullpunktkorrekturen für Versuch E3

5.2.2 Versuch E5

Die Auswertung des Einzelrohrexperimentes E5 erfolgt analog zur Auswertung des Experimentes E3. Das Experiment E5 wurde am gleichen Tag wie E3 durchgeführt, gegen 15:31 Uhr gestartet und dauerte 14 Minuten. Wie beim Experiment E3 zeigt eine Gegenüberstellung der Sonden- und der Thermoelementdaten eine Akkumulation von erheblichen Mengen nichtkondensierbarer Gase innerhalb der Einzelrohres.

Beim Durchgang des Flüssigkeitsspiegels durch den ersten Sondenkamm besitzt der Pfropfen der nichtkondensierbaren Gase eine Länge von 2,15 m, beim Durchgang des

Sondenkamms durch den zweiten Sondenkamm eine Länge von ca. 0,86 m. Erfolgt ferner ein Abgleich der Nullpunkte der Differenzdruckaufnehmer analog zu der in Kap. 5.2.1 beschriebenen Vorgehensweise, so zeigt sich bei diesem Versuch ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Differenzdrücken (vgl. Tabelle 5.3).

	Druckverluste				
	Meßwert [mbar]	Berechneter Wert [mbar]	Nullpunkt- korrektur [mbar]	Nichtkondensierbare Gase	Abweichung [mbar]
Zulaufleitung					
1. Sondenkamm	-10,6	-15,0	-4,4	≈25%	0,0
2. Sondenkamm	-9,9	-12,9		≈10%	-1,4
Bündel					
1. Sondenkamm	-120,4	-104,7	-13,5	≈25%	2,2
2. Sondenkamm	-46,2	-33,1		≈10%	-0,4
Ablaufleitung					
1. Sondenkamm	-392,7	-374,5	-18,2	≈25%	0,0
2. Sondenkamm	-385,4	-366,4		≈10%	0,8

Tabelle 5.3: Vergleich der gemessenen Druckverluste des Notkondensatorsystems mit den berechneten Werten nach Berücksichtigung der nichtkondensierbaren Gase sowie der Nullpunktkorrekturen für Versuch E5

5.2.3 Versuch E7

Das Einzelrohrexperimentes E7 wurde am 14.11. 1996 durchgeführt. Er wurde gegen 12:20 Uhr gestartet und endete gegen 13:28. Dieser Versuch E7 diente speziell zur Bestimmung der Menge von nichtkondensierbaren Gasen, die mit dem Speisewasser dem Notkondensatorsystem zugeführt werden und sich nach dem Austreiben im Elektrokesselkreislauf im Notkondensator (hier im Einzelrohr) akkumulieren. An dieser Stelle soll jedoch nur der Zeitpunkt des Füllstandsdurchganges durch den ersten Sondenkamm sowie die hierbei gemessenen Differenzdrücke im Notkondensatorsystem weiter untersucht werden.

Der Flüssigkeitsdurchgang durch den zweiten Sondenkamm wurde in diesem Experiment nicht untersucht. Auffällig ist jedoch, daß im Gegensatz zu den Versuchen E3 und E5 kein Pfropfen mit nichtkondensierbaren Gasen sich innerhalb des Einzelrohres ansammelt. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung von Meß- und Rechenwerten (vgl. Tabelle 5.4) zeigt bereits allein nach Durchführung der Nullpunktkorrektur eine gute Übereinstimmung.

	Druckverluste				
	Meßwert [mbar]	Berech- neter Wert [mbar]	Nullpunkt- korrektur [mbar]	Nichtkon- densier- bare Gase	Abwei- chung [mbar]
Zulaufleitung					
1. Sondenkamm	-1,4	-3,5	-5,4	≈0%	0,5
Bündel					
1. Sondenkamm	-103,0	-98,9	-6,1	≈0%	-2,2
Ablaufleitung					
1. Sondenkamm	-378,0	-395,4	-18,0	≈0%	0,6

Tabelle 5.4: Vergleich der gemessenen Druckverluste des Notkondensatorsystems mit den berechneten Werten nach Berücksichtigung der Nullpunktkorrekturen für Versuch E7.

5.2.4 Versuch E9

Das Experiment E9 wurde am gleichen Tag wie E7 durchgeführt, gegen 15:31 Uhr gestartet und um 16:45 beendet. An dieser Stelle werden nachfolgend nur die gemessenen Differenzdrücke beim Durchgang des Flüssigkeitsspiegels durch die Sondenkämme den berechneten gegenübergestellt. Analog zum Versuch E7 akkumulieren kaum nichtkondensierbare Gase im Einzelrohr. Die jeweiligen Daten sind in Tab. 5.5 zusammengestellt. Hierbei zeigt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

	Druckverluste				
	Meßwert [mbar]	Berech- neter Wert [mbar]	Nullpunkt- korrektur [mbar]	Nichtkon- densier- bare Gase	Abwei- chung [mbar]
Zulaufleitung					
1. Sondenkamm	-1,2	-5,2	-5,2	≈0%	0,3
2. Sondenkamm	-0,7	-5,2		≈0%	1,4
Bündel					
1. Sondenkamm	-99,3	-107,2	-12,7	≈0%	-3,7
2. Sondenkamm	-9,9	-67,6		≈0%	3,6
Ablaufleitung					
1. Sondenkamm	-365,0	-382,3	-16,5	≈0%	0,8
2. Sondenkamm	-352,5	-370,8		≈0%	1,8

Tabelle 5.5: Vergleich der gemessenen Druckverluste des Notkondensatorsystems mit den berechneten Werten nach Berücksichtigung der Nullpunktkorrekturen für Versuch E9.

5.3 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Die Gegenüberstellung der anhand des in Kapitel 5.1 beschriebenen Modells berechneten sowie den gemessenen Druckverluste (vgl. Kapitel 5.2) zeigt eine gute Übereinstimmung. Das Modell ist folglich in der Lage, mit guter Genauigkeit den Füllstand im Bündel aus dem Differenzdruck über den Sammlern zu berechnen.

Anhand der Experimente wird jedoch deutlich, daß es für die Auswertung der NOKO-Experimente unerlässlich ist, die Nullpunkte der Differenzdruckgeber aufzunehmen und die Nullpunktabweichungen bei der weiteren Auswertung zu berücksichtigen. Diese Nullpunktabweichungen sind die Ursache für die bereits in [SCA-96] beobachteten Abweichungen zwischen den Differenzdrücken im Notkondensatorsystem und im Druckgefäß. Die Größenordnung der seinerzeit festgestellten Abweichungen und der Abweichungen der jetzt durchgeführten Einzelrohrexperimente liegt in der gleichen Größenordnung. Weiterhin müssen bei der Bestimmung der Kondensationsleistung eventuell vorhandene Pfropfen von nichtkondensierbaren Gasen berücksichtigt werden.

6. Messungen auf der Sekundärseite

Messungen mit den Sonden, die sich auf der Sekundärseite befanden, wurden beim Versuch E2 durchgeführt. Es handelt sich um einen Versuch, bei dem drei Rohre des Bündels gemeinsam mit dem parallelgeschalteten Einzelrohr betrieben wurden. Der Primärdruck betrug 70 bar, auf der Sekundärseite befand sich zu Beginn Wasser bei annähernd Zimmertemperatur. Die Sekundärseite von NOKO stand mit der Atmosphäre in Verbindung.

Die Absenkung des Druckgefäßfüllstandes erfolgte stufenweise. Dabei wurde ergänzend zur üblichen Verfahrensweise die Datenaufzeichnung auch in den Perioden der Füllstandsabsenkung in Betrieb gesetzt. Bild 6.1 zeigt hierzu die Verläufe der NOKO-Leistung sowie der Differenzdrücke PD2_2, PD2_3 und PD2_4. Die Dampfgehalte, die mit den Sonden S17 bis S23 gemessen wurden, sind in Bild 6.2, zusammen mit der NOKO-Leistung, dargestellt. Im Intervall zwischen $t=3000$ s und dem Erreichen des Sättigungszustands findet Sieden im unterkühlten Medium statt. Die Reihenfolge des Einsetzens von Sieden kann in Bild 6.3 in höherer Zeitauflösung betrachtet werden. Die Flanken des Anstiegs des Gasgehalts weisen die in Tabelle 6.1 zusammengefaßte zeitliche Reihenfolge auf.

Während des unterkühlten Siedens erreichen die Blasen zunächst nur die Sonden auf der unteren Ebene nahe der Wärmeübertragerrohre, die Kondensation erfolgt auf einer Strecke weniger als 100 mm. Das spätere Auftreten von Blasen an S17 im Vergleich zu S20 deutet auf ein gestaffeltes Inbetriebgehen der Rohrebenen hin, d.h. Rohr 1 wird ca. 500 s vor Rohr 5 freigelegt.

Nr.	Sonde	Beschreibung der Sondenposition
1	S20	50 mm oberhalb Rohr 1
2	S17	innerhalb des Bündels, 50 mm oberhalb Rohr 5
3	S19	Zwischenraum Rohr 1 / Rohr 5, untere Sonde
danach in kurzer Folge:		
4	S18	125 mm oberhalb Rohr 4
5	S23	150 mm oberhalb Rohr 1
6	S22	Zwischenraum Rohr 1 / Rohr 5, obere Sonde
7	S21	175 mm oberhalb Rohr 4

Tabelle 6.1 Zeitliche Reihenfolge des Dampfgehaltsanstiegs an den Sonden auf der Sekundärseite

In Bild 6.4 werden die Dampfgehalte an den Sonden S17, S20 und S23 mit den im Bündel gemessenen Temperaturen gegenübergestellt. Die Temperaturverteilung ist zunächst sehr ungleichmäßig. Die Sonde S20 oberhalb von Rohr 1 detektiert die ersten Dampfblasen bei $t=3000$ s. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Unterkühlung oberhalb des Bündels ca. 10 K. Am mittleren Thermoelement werden etwas mehr als 50 °C gemessen. An Sonde S17 treten bereits nach kurzer Zeit ebenfalls Blasen auf, obwohl in der Mitte des Bündels noch eine starke Unterkühlung von 50 K vorliegt.

Obwohl die Unterkühlung im weiteren rasch abnimmt, findet oberhalb des Bündels noch eine sehr effektive Kondensation der Dampfblasen statt. Es werden zwar Blasen an Sonde S23 nachgewiesen, der Dampfgehalt bleibt jedoch sehr klein. Erst nach Erreichen des Sättigungszustands an allen drei Thermoelementen steigt der Dampfgehalt an S23 auf Werte um 30 % an. An S17 und S20 werden zu diesem Zeitpunkt ca. 40 % gemessen.

Die Dampfgehalte zeigen im weiteren eine deutliche Abhängigkeit von den Leistungsstufen (Bild 6.2). Die Abnahme des Dampfgehalts um ca. 10 % oberhalb von Rohr 1 bleibt auch bei gesättigter Sekundärseite bestehen. Sie ist auf eine Vergleichmäßigung der horizontalen Dampfgehaltsverteilung zurückzuführen. Bild 6.5 zeigt den Versuch der Rekonstruktion der Dampfgehaltsprofile bei gesättigtem Sieden, wobei die Ergebnisse des Vorversuchs B9 mit einbezogen sind. Die Abhängigkeit des Dampfgehalts im Bündel vom Primärdruck ist deutlich zu erkennen. Bei 70 bar Primärdruck (Versuch E2) wurden gegenüber 10 bar (Versuch B9) um etwa den Faktor 1,5 - 2 höhere Dampfgehalte beobachtet.

Eine detailliertere Auswertung hinsichtlich der Kondensationsraten in Abhängigkeit von der Unterkühlung ist nicht möglich, da sowohl die Temperatur- als auch die Dampfgehaltsverteilungen stark ungleichmäßig sind. Eine quantitative Bewertung dieses Effekts erfordert eine umfangreichere Instrumentierung. Wichtig ist hierbei die Übereinstimmung der Meßorte von Dampfgehalts- und Temperaturebern, die bei der eingesetzten Bestückung mit Thermoelementen und Nadelsonden nicht gegeben war.

7. Schlußfolgerungen

Die Einzelrohr-Versuche an der NOKO-Anlage in Jülich haben eine Reihe neuer Erkenntnisse über das Verhalten der Wärmeübertragerrohre ergeben. Das ursprüngliche Ziel der Ermittlung der Strömungsform in horizontalen bzw. leicht geneigten Rohrleitungen bei Kondensation von reinem Dampf, insbesondere die Überprüfung der hierfür vorhandenen Strömungskarten aus der Literatur, konnte nur zum Teil erreicht werden. Die Ursache liegt in einer unerwartet hohen Konzentration von nichtkondensierbaren Gasen, die bei Versuchen mit dem Einzelrohr starken Einfluß auf den Wärmeübergang und damit auf die Massenströme von Wasser und Dampf haben. Die Meßwerte zeigen jedoch, daß bei den Versuchspunkten mit relativ geringer Gaskonzentration Schwälle und Pfropfen im Ansatz zu beobachten sind. Es ist zu erwarten, daß bei sorgfältiger Entgasung der NOKO-Anlage diese Strömungsformen einen größeren Raum einnehmen. Zur endgültigen Klärung sind weitere Versuche erforderlich, bei denen entsprechende Maßnahmen zur Versorgung des Einzelrohrs mit reinem Dampf getroffen werden.

Mit der Aufstellung und Validierung eines einfachen Modells zur Berechnung des Druckverlustes im Wärmeübertragerrohr wurden die Voraussetzungen geschaffen, um mit Hilfe des Differenzdrucks zwischen den Kollektoren bzw. eines an den Wärmeübertragerrohren direkt gemessenen Differenzdrucks den Füllstandsmessung auf der Primärseite des Notkondensators bestimmen zu können. Bei der Validierung mußten jedoch die experimentell ermittelten Volumina des nichtkondensierbaren Gases in die Berechnung berücksichtigt werden. Weiterhin wurde festgestellt, daß die Differenzdruckinstrumentierung von NOKO Nullpunktverschiebungen aufweist, die weit über den ausgewiesenen Meßfehlern der Wandler liegen. Hier ist bei zukünftigen Versuchen eine bessere Kalibrierung von Versuchsbeginn angeraten. Eventuell sind auch Schaltungstechnische Verbesserungen, z.B. hinsichtlich der räumlichen Verlegung von Impulsleitungen bzw. der Anordnung von Pegelgefäßen, zweckmäßig.

Die Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Messungen erfordert einerseits Maßnahmen zur zuverlässigen Entgasung, speziell im Hinblick auf die Versuchsdurchführung beim Anfahren der Anlage, sowie andererseits eine on-line arbeitende Messung der Konzentration der nichtkondensierbaren Gase. Bei der Entgasung ist die Hauptaufmerksamkeit auf das Inventar des Reaktordruckbehälters zu legen. Der Eintrag mit dem Speisewasser ist nicht von großer Bedeutung.

Durch Gegenüberstellung der Sondendaten mit den Meßwerten der Thermolemente im Einzelrohr konnten die Verhältnisse im Einzelrohr bei Vorhandensein eines Pfropfens von nichtkondensierbaren Gasen charakterisiert werden. Die nähere Untersuchung der dabei auftretenden Prozesse besitzt Bedeutung für die Validierung von thermohydraulischen Systemcodes im Hinblick auf die Modellierung des Transports von nichtkondensierbaren Gasen und des Wärmeübergangs bei der Kondensation. Es wird empfohlen, derartige Versuche mit grundlegender Bedeutung vorzusehen, die über die Untersuchung des passiven Notkondensators hinaus gehen. Hierzu ist es erforderlich, die Dampfgehalts- und die Temperaturmessung jeweils am gleichen Meßort zu kombinieren, um eine genaue Zuordnung von Phasenzustand und Temperatur vornehmen zu können.

Die Messungen auf der Sekundärseite haben erstmals eine Information über die Größenordnung des dort vorliegenden volumetrischen Dampfgehalts geliefert. Die Phänomene des Siedens bei unterkühlter Sekundärseite sowie die Verteilungen im Bündel wurden qualitativ beschrieben. Tiefergehende Untersuchungen würden eine umfangreichere Instrumentierung mit speziellen Sonden erfordern, die eine genaue örtliche Zuordnung von Phasenzustand und Temperatur ermöglichen.

8. Literatur

- [PAJ-79] J. W. Palen, G. Breber, J. Taborek. "Prediction of flow regimes in horizontal tube condensation", Heat Transfer Eng. 1 (1979), S. 47 – 57.
- [SCA-96] A. Schaffrath. "Experimentelle und analytische Untersuchungen zur Wirksamkeit des Notkondensator des SWR600/1000". Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1996.
- [TAT-82] T. N. Tandon, H. K. Varma, C. P. Gupta. "A new flow regimes map for conensation inside horizontal tubes", Journal of Heat Transfer 104 (1982), S. 763 – 768.
- [HIE-95] E. F. Hicken, H. Jaegers, A. Schaffrath. "Determination of the Effectiveness of the Emergency Condenser of the BWR600/1000 in the NOKO Test Facility", IAEA Technical Committee Meeting "Progress in Design, Research, Developement and Testing of Safety Systems for Advanced Water Cooled Reactors", Piacenza 16.-19. May 1995
- [HIE-97] E. F. Hicken, H. Jaegers, A. Schaffrath. "Experimentelle Ergebnisse mit der NOKO-Versuchsanlage", Jahrestagung Kerntechnik, Aachen 13.-15. Mai 1997.
- [SCA-97] A. Schaffrath, E. F. Hicken, H. Jaegers. "Überprüfung der Betriebsbedingungen eines passiven Notkondensators", Jahrestagung Kerntechnik, Aachen 13.-15. Mai 1997.

Liste der verwendeten Formelzeichen

A_{Frei}	freigelegte Wärmeübertrager-(WÜ-)fläche	[m ²]
A_{Un}	für die Unterkühlung des Kondensats verfügbare WÜ-Fläche	[m ²]
A_{Ges}	gesamte Wärmeübertragerfläche	[m ²]
H	Füllstand	[m]
j_D^*	dimensionslose Dampfgeschwindigkeit	[-]
L	Leistung	[kW]
L_{NOKO}	NOKO-Leistung	[kW]
$L_{\text{NOKO,Kon}}$	Kondensationsleistung von NOKO	[kW]
$L_{\text{NOKO,max}}$	maximale NOKO-Leistung	[kW]
\dot{M}	Massenstrom	[kg/s]
\dot{m}_{NOKO}	Massenstrom auf der primärseite von NOKO	[kg/s]
PD	Differenzdruck	[mbar]
ϕ	volumetrischer Dampf-/Gasgehalt	[%]
T	Temperatur	[°C]
$T_{\text{S,DRU}}$	Sättigungstemperatur im Druckgefäß	[°C]
$T_{\text{S,KON}}$	Sättigungstemperatur im Kondensatbehälter	[°C]
t	Zeit	[s]
\dot{x}	Massenstromdampfgehalt	[-]
Δh_V	Verdampfungsenthalpie	[kJ/kg]
ΔL_{Plug}	Rohrlänge, innerhalb der Pfropfenströmung anzutreffen ist	[m]
ΔL_{Slug}	Rohrlänge, innerhalb der Schwallströmung anzutreffen ist	[m]
Δt_{Plug}	Zeitdauer, über die Pfropfenströmung anzutreffen ist	[s]
Δt_{Slug}	Zeitdauer, über die Schwallströmung anzutreffen ist	[s]
ϵ	Volumenstromdampfgehalt	[-]
ρ_D	Dichte des Dampfes	[kg/m ³]
ρ_F	Dichte der Flüssigkeit	[kg/m ³]

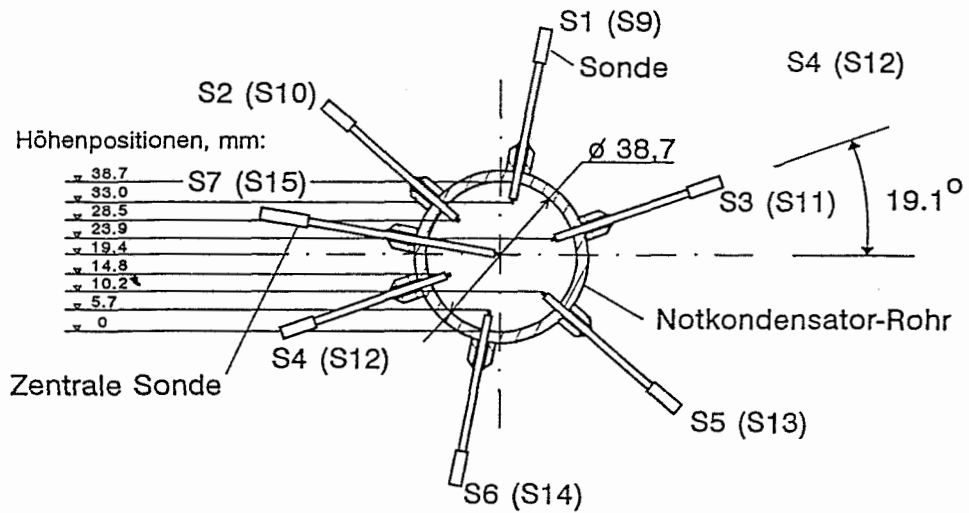


Bild 2.1 Sondenfeld im Einzelrohr des Notkondensator-Versuchsstandes

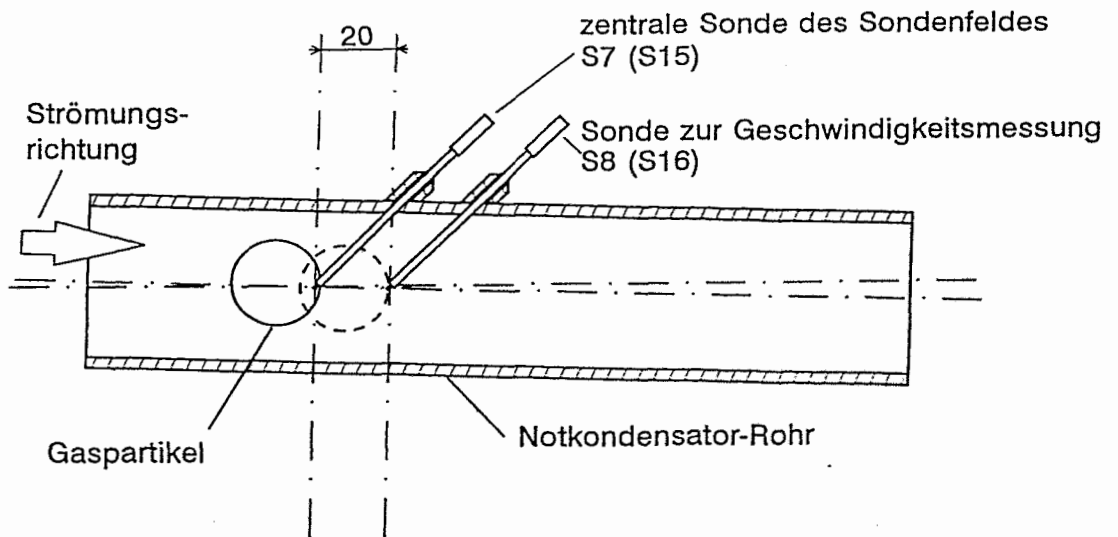


Bild 2.2 Anordnung der zusätzlichen Sonde zur Geschwindigkeitsmessung (schematisch)

Nummerierung der Sonden: Oberes Sondenfeld
 Nummern in Klammern: Unteres Sondenfeld

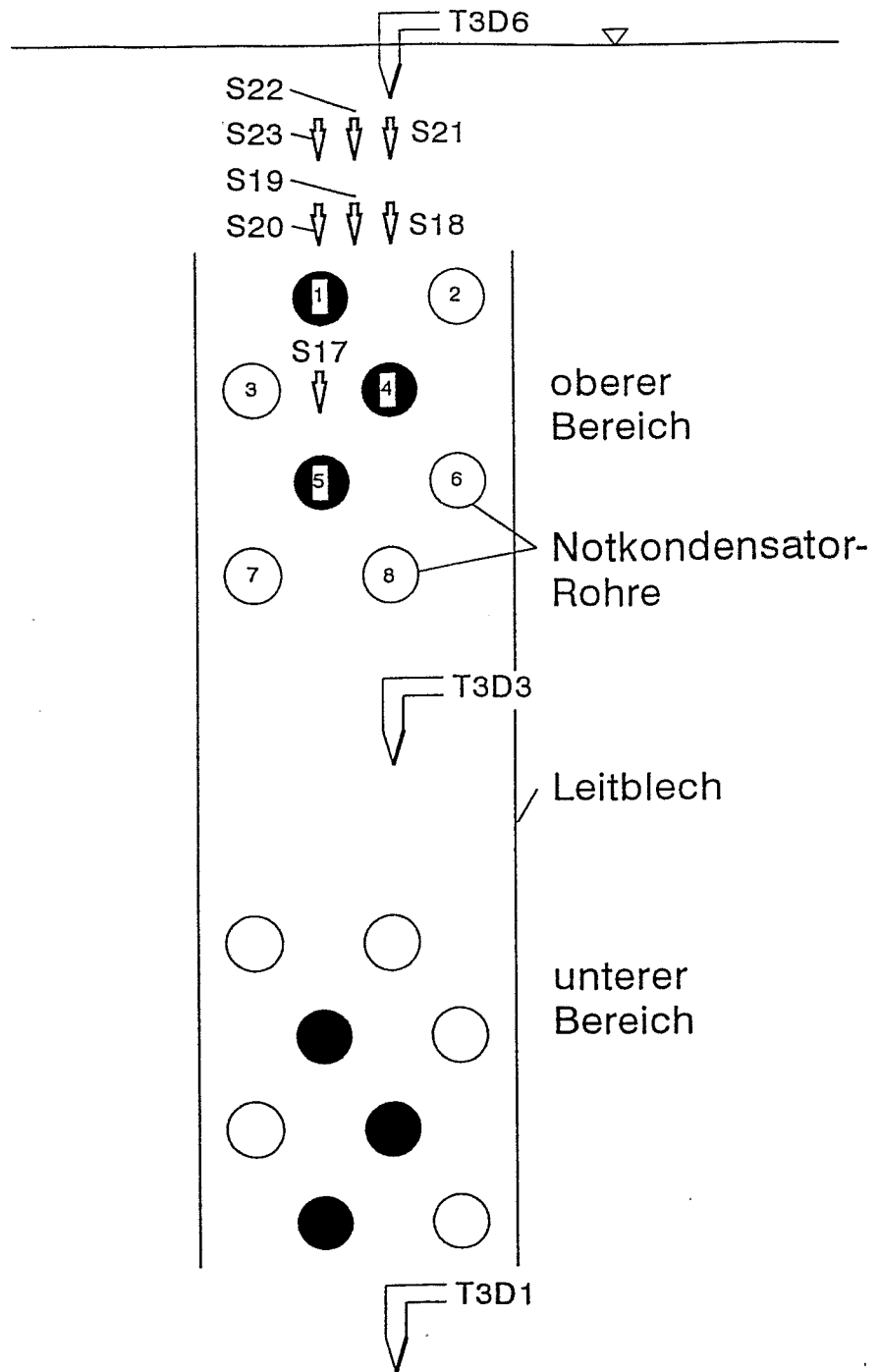






Bild 2.3 Anordnung von Sonden und Thermoelementen auf der Sekundärseite von NOKO

- | | | | |
|---|------------------|---|-------------------------|
|  | - Sondenposition |  | - WÜ-Rohr außer Betrieb |
|  | - Thermoelement |  | - WÜ-Rohr in Betrieb |

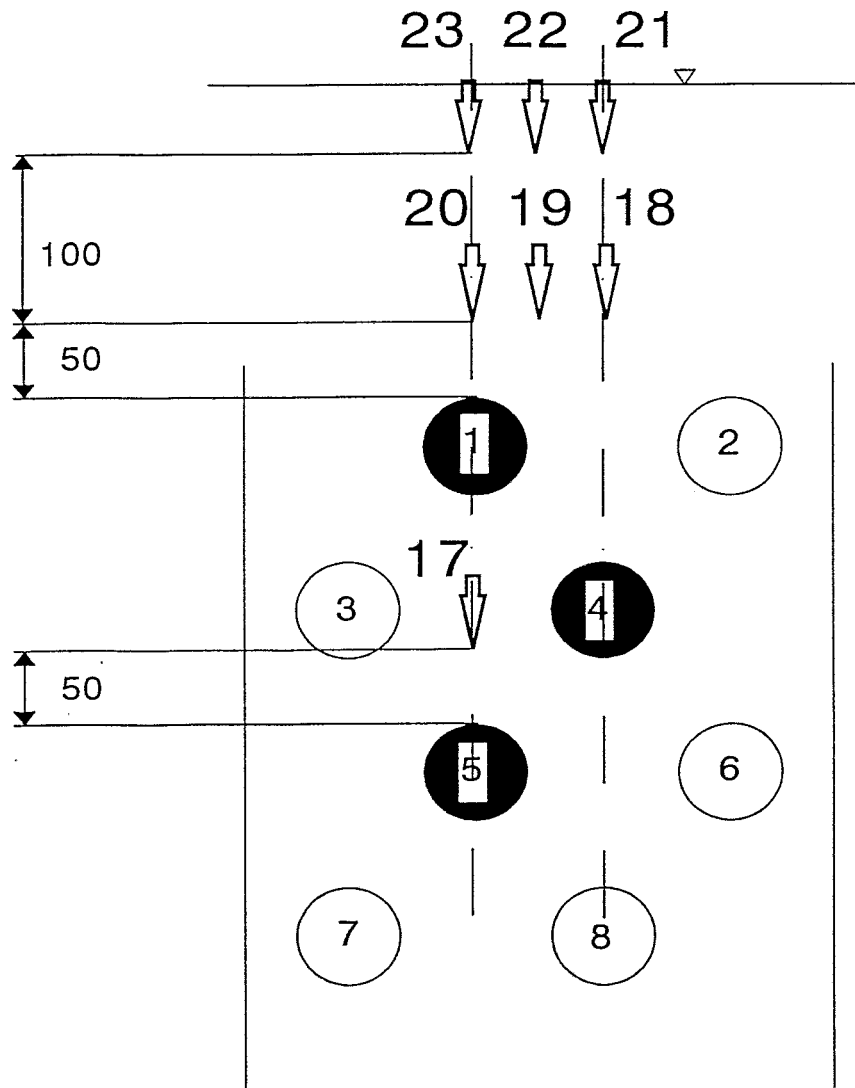


Bild 2.4 Anordnung von Sonden auf der Sekundärseite von NOKO (Ausschnitt)

↓ - Sondenposition

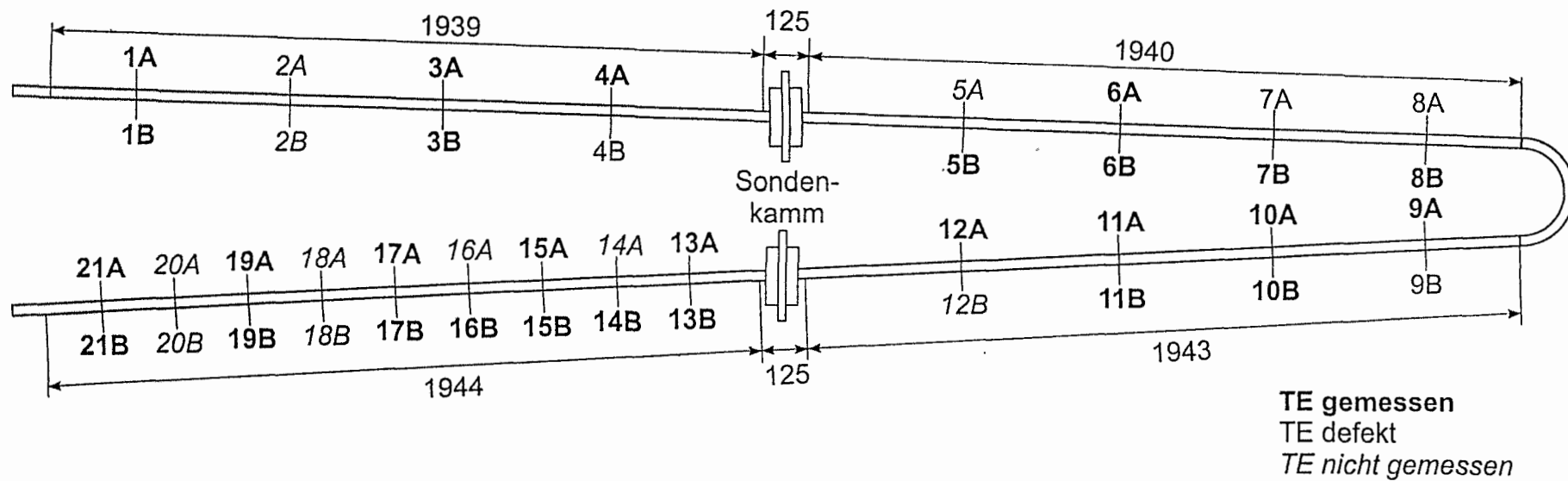


Bild 2.5: Thermoelementpositionen am NOKO-Einzelrohr

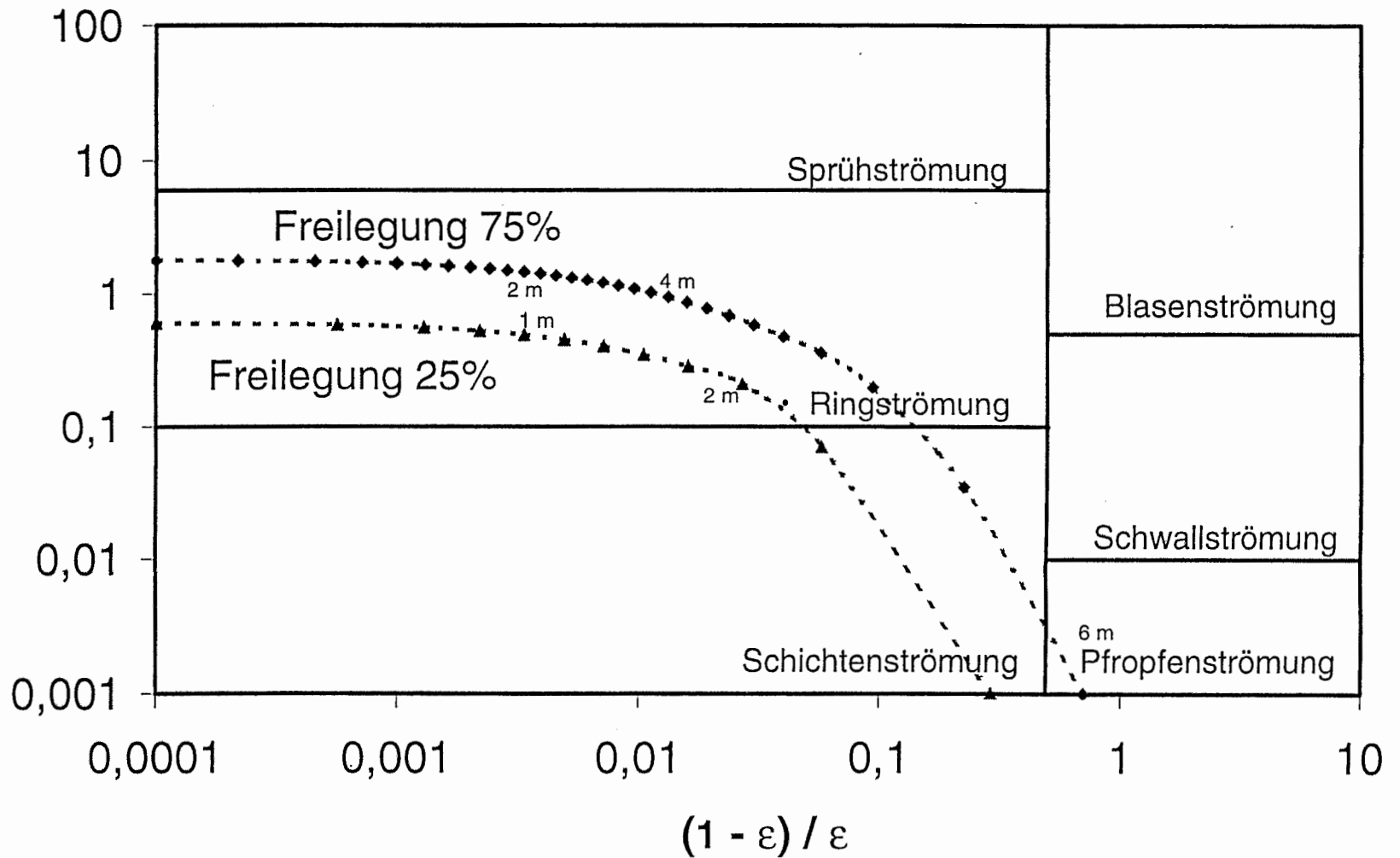


Bild 4.1: Strömungsformen innerhalb der NOKO-Rohre bei 1 MPa

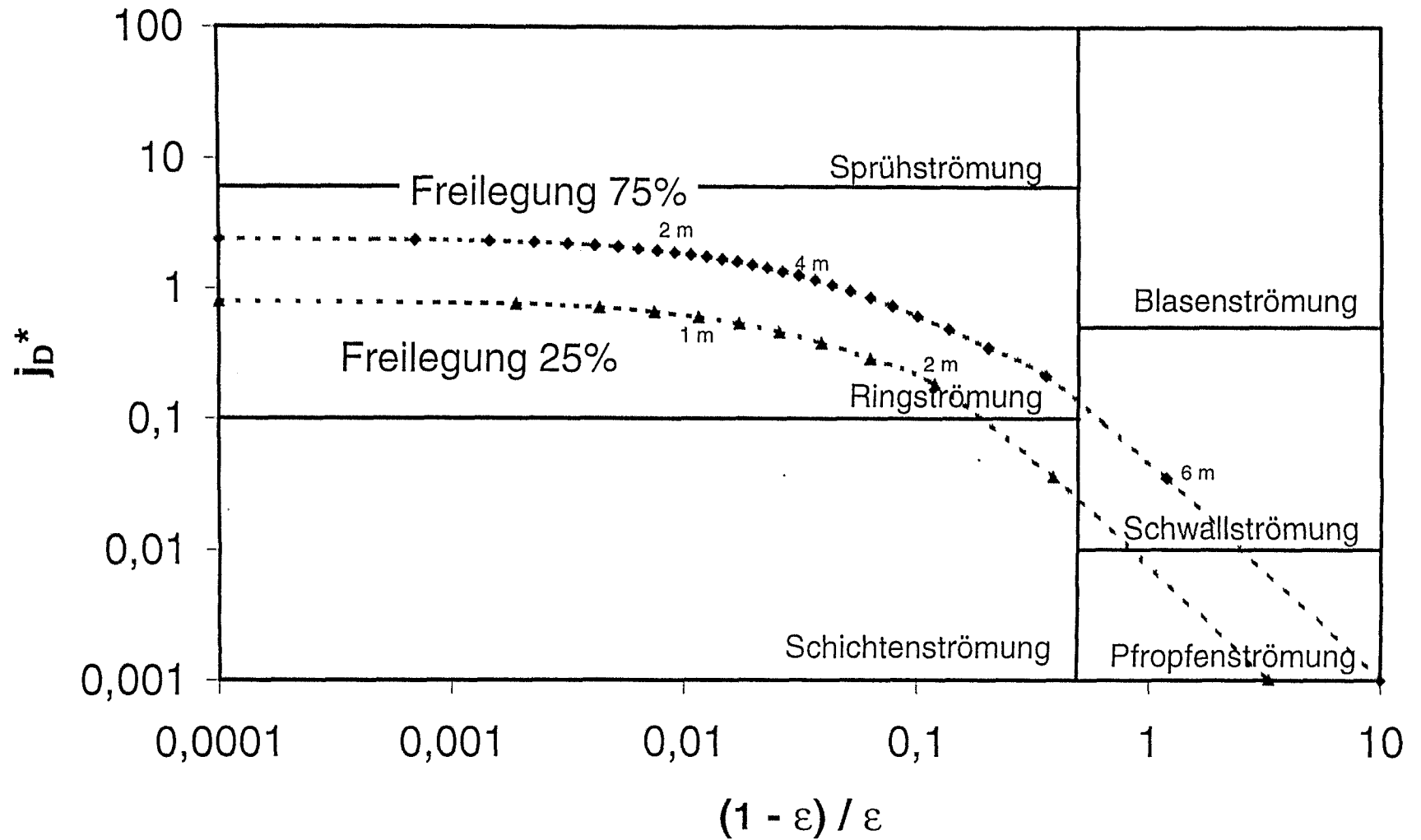


Bild 4.2: Strömungsformen innerhalb der NOKO-Rohre bei 3 MPa

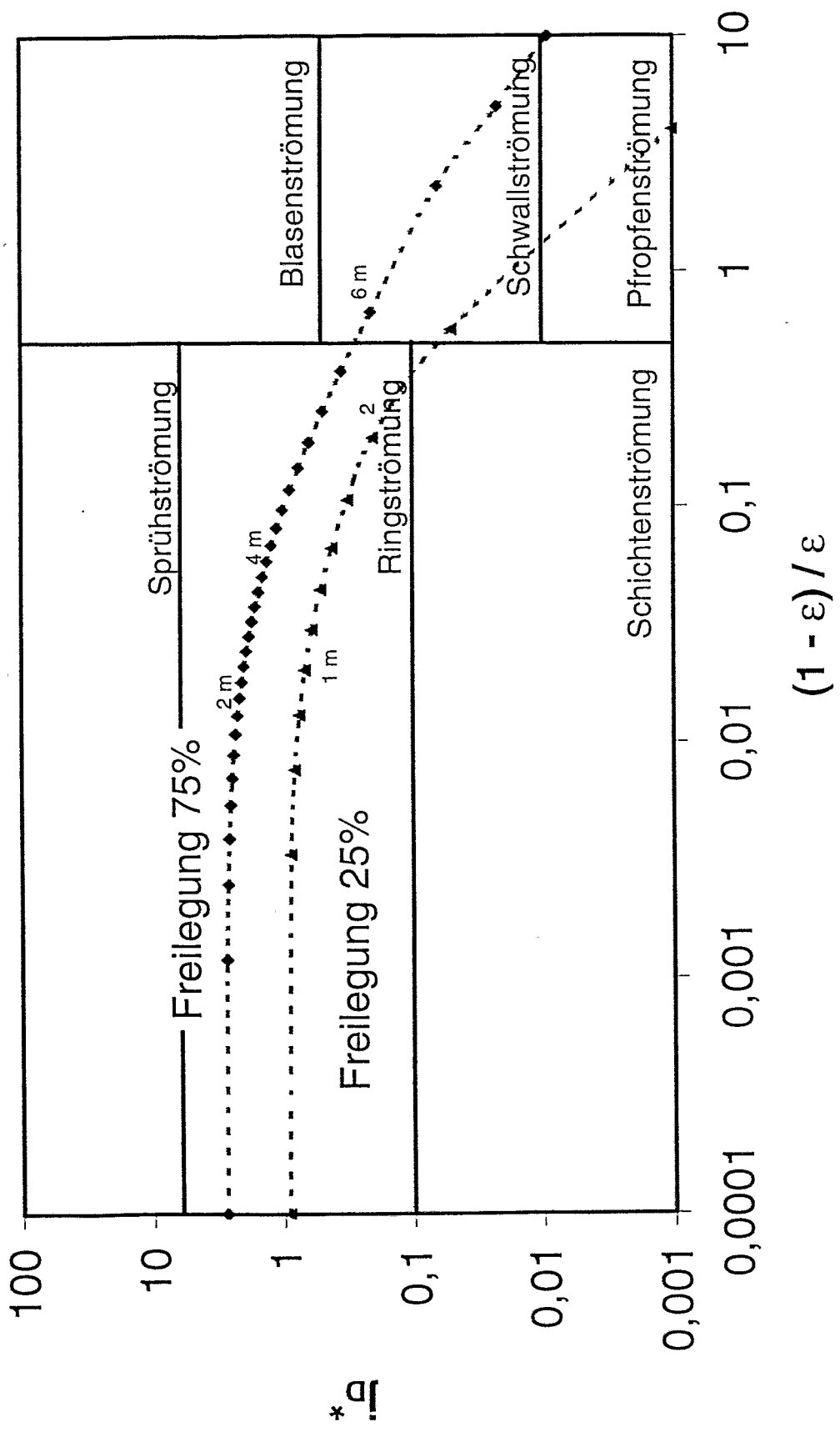


Bild 4.3: Strömungsformen innerhalb der NOKO-Rohre bei 5 MPa

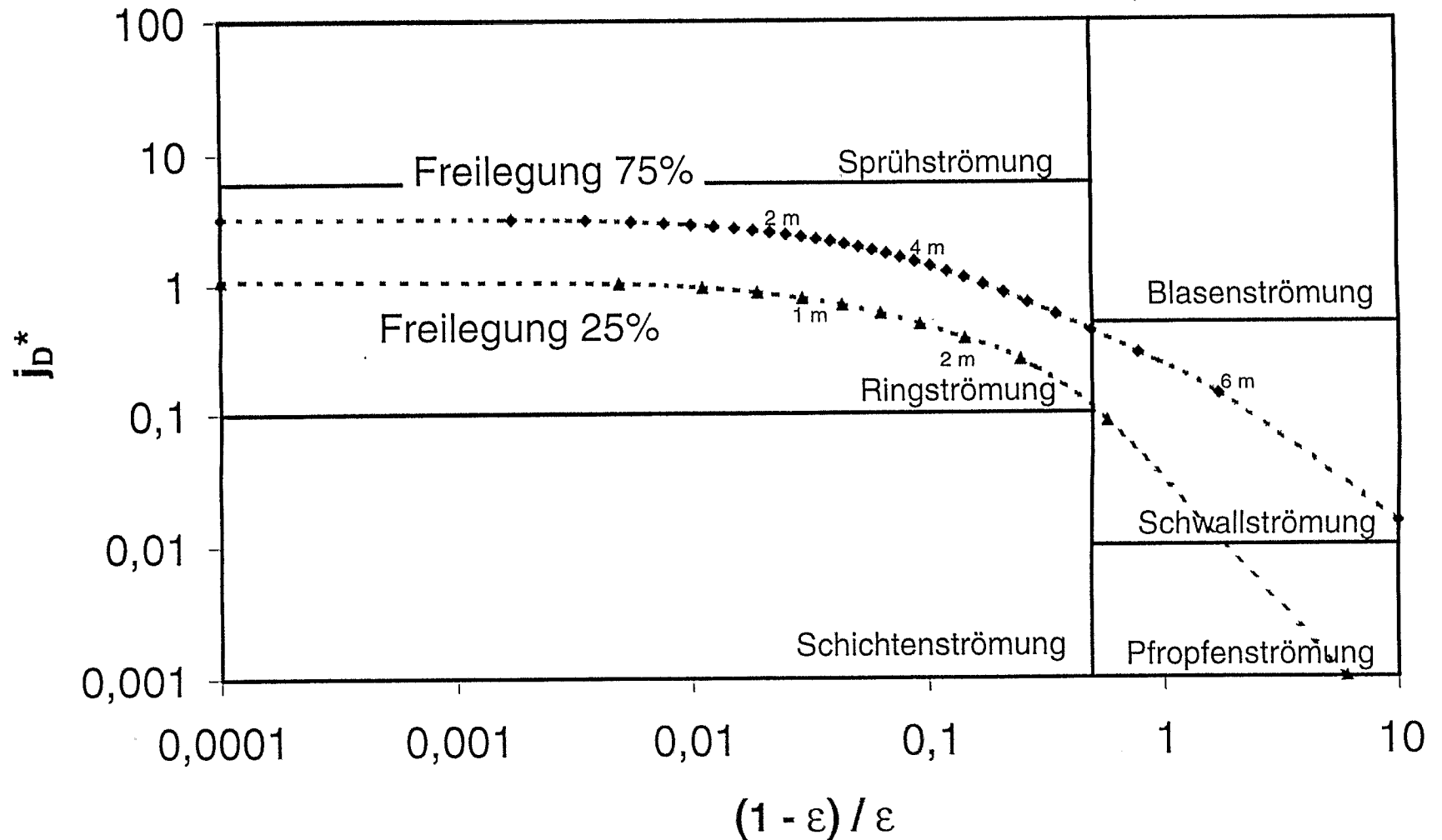


Bild 4.4: Strömungsformen innerhalb der NOKO-Rohre bei 7 MPa

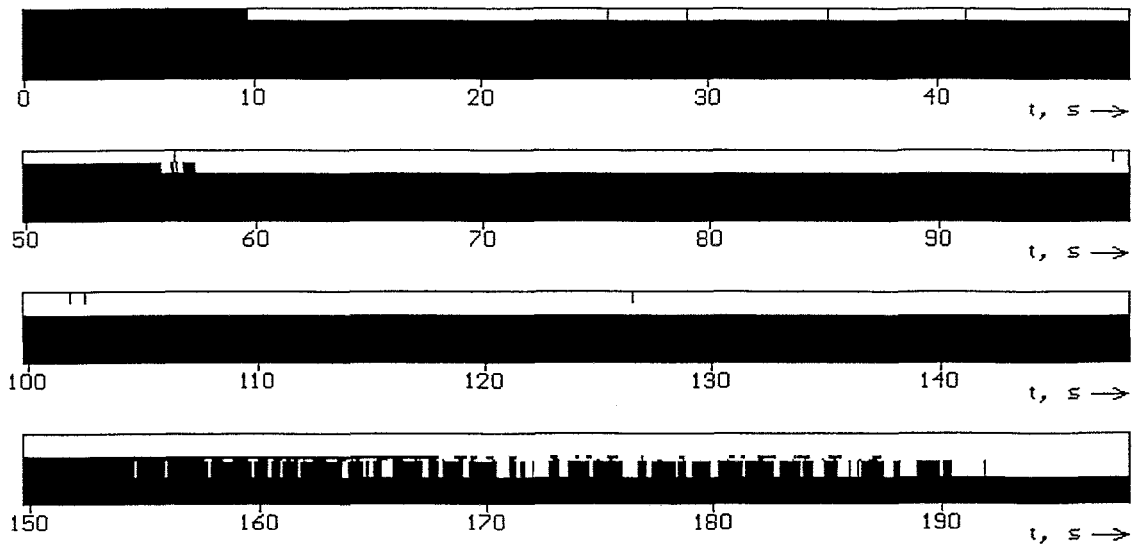


Bild 4.5 Freilegung des oberen Sondenfeldes im Versuch E2 (70 bar, in 1 s werden ca. 10 mm Rohrlänge freigelegt)

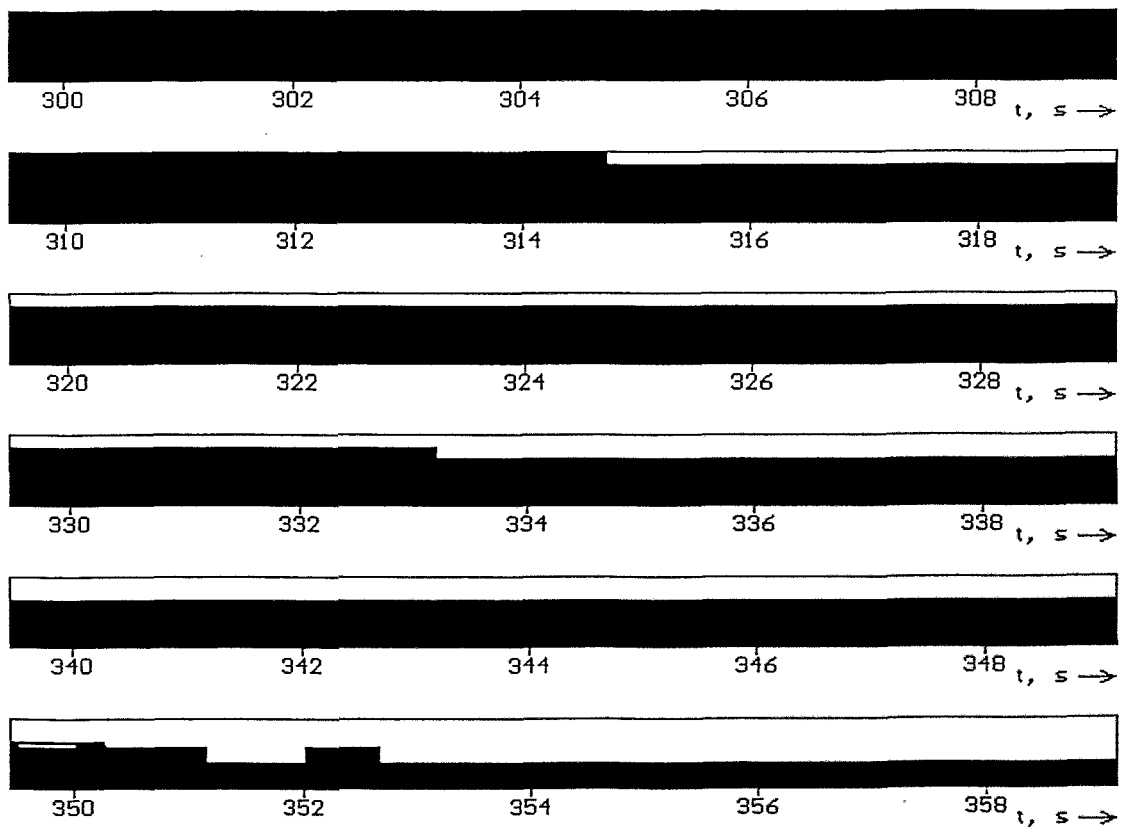


Bild 4.6 Freilegung des oberen Sondenfeldes, Versuch E1 (10 bar, in 1 s werden ca. 10 mm Rohrlänge freigelegt)

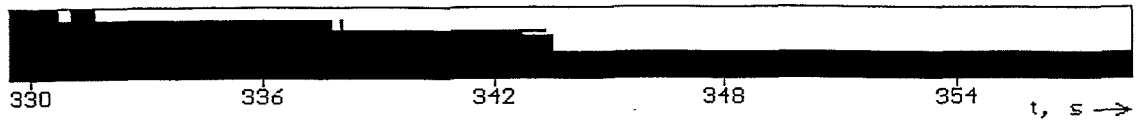


Bild 4.7 Freilegung des oberen Sondenfeldes, Versuch E3 (50 bar, in 1 s werden ca. 30 mm Rohrlänge freigelegt)

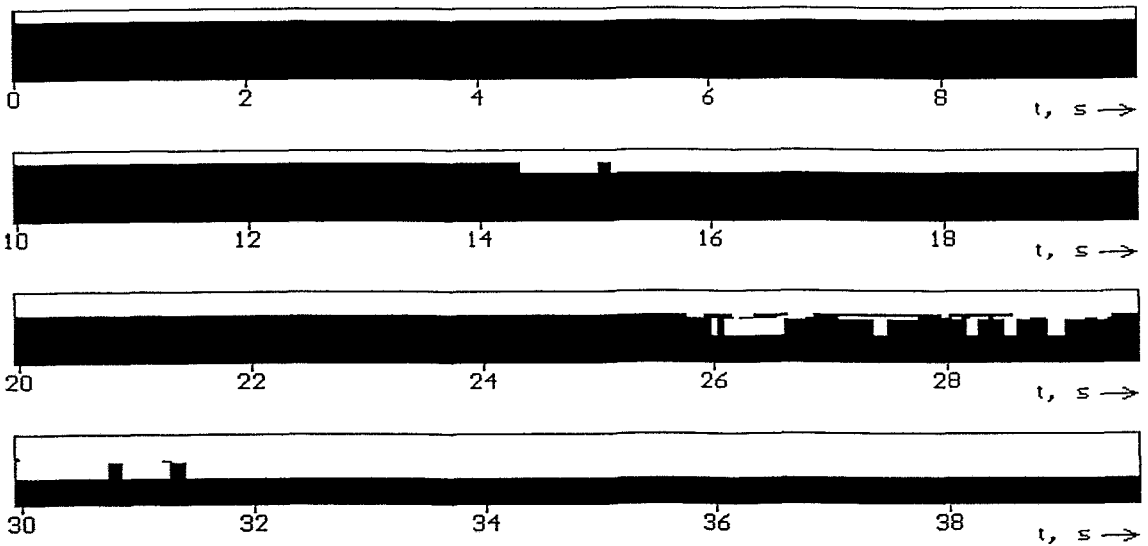


Bild 4.8 Freilegung des oberen Sondenfeldes, Versuch E9 (30 bar, in 1 s werden ca. 13 mm Rohrlänge freigelegt)

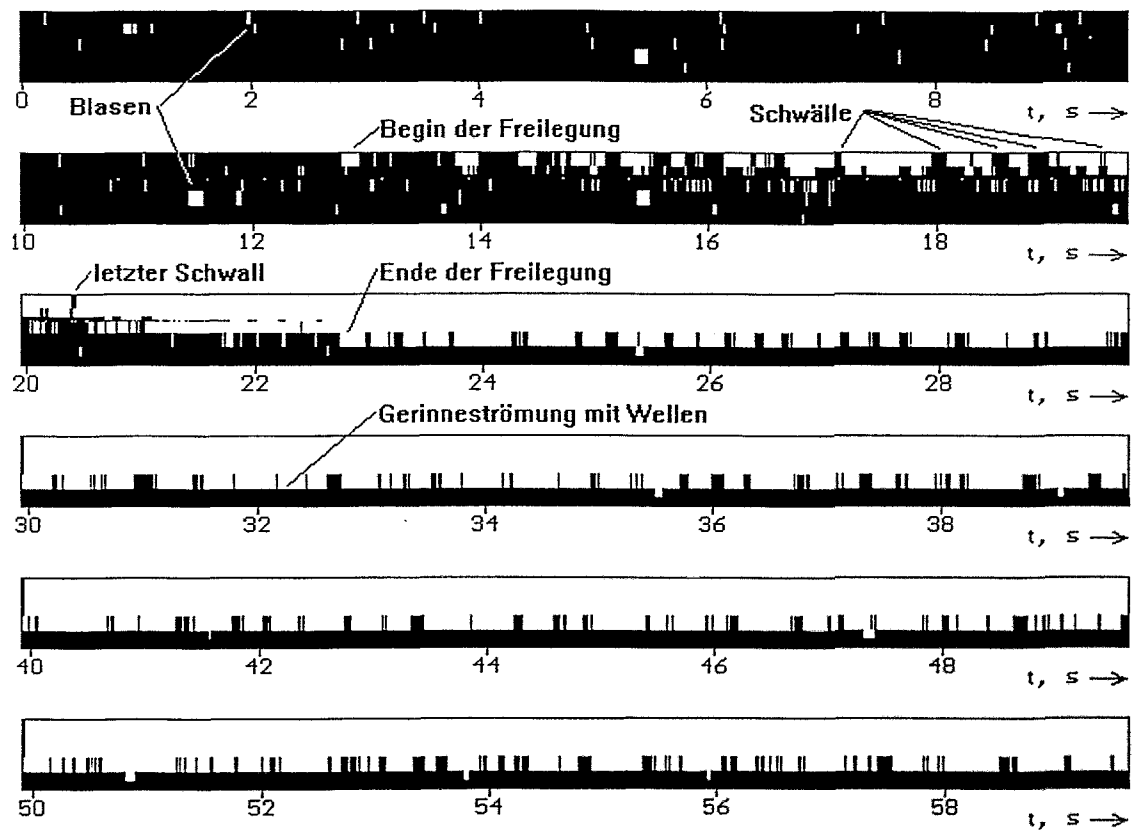


Bild 4.9 Freilegung des unteren Sondenfeldes im Versuch E2 (70 bar, in 1 s werden ca. 8-9 mm der Rohrlänge freigelegt)

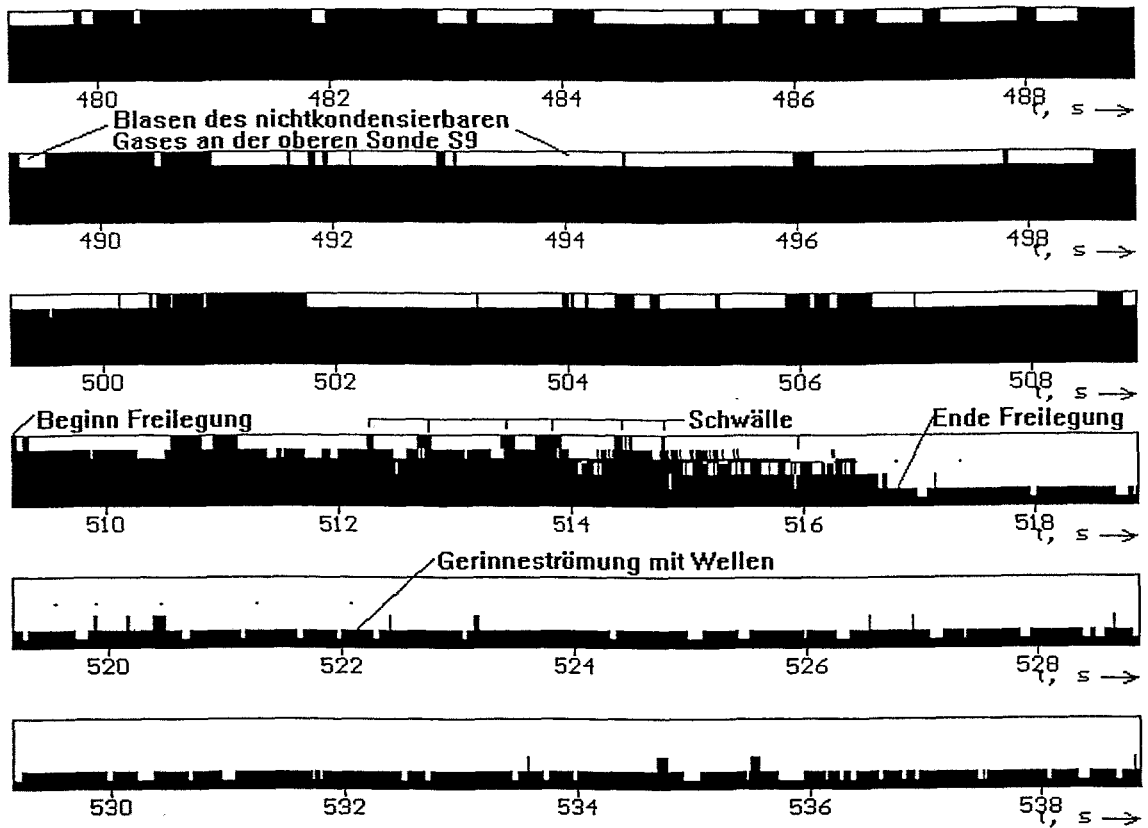


Bild 4.10 Freilegung des unteren Sondenfeldes im Versuch E9 (30 bar, in 1 s werden 16 mm der Rohrlänge freigelegt)

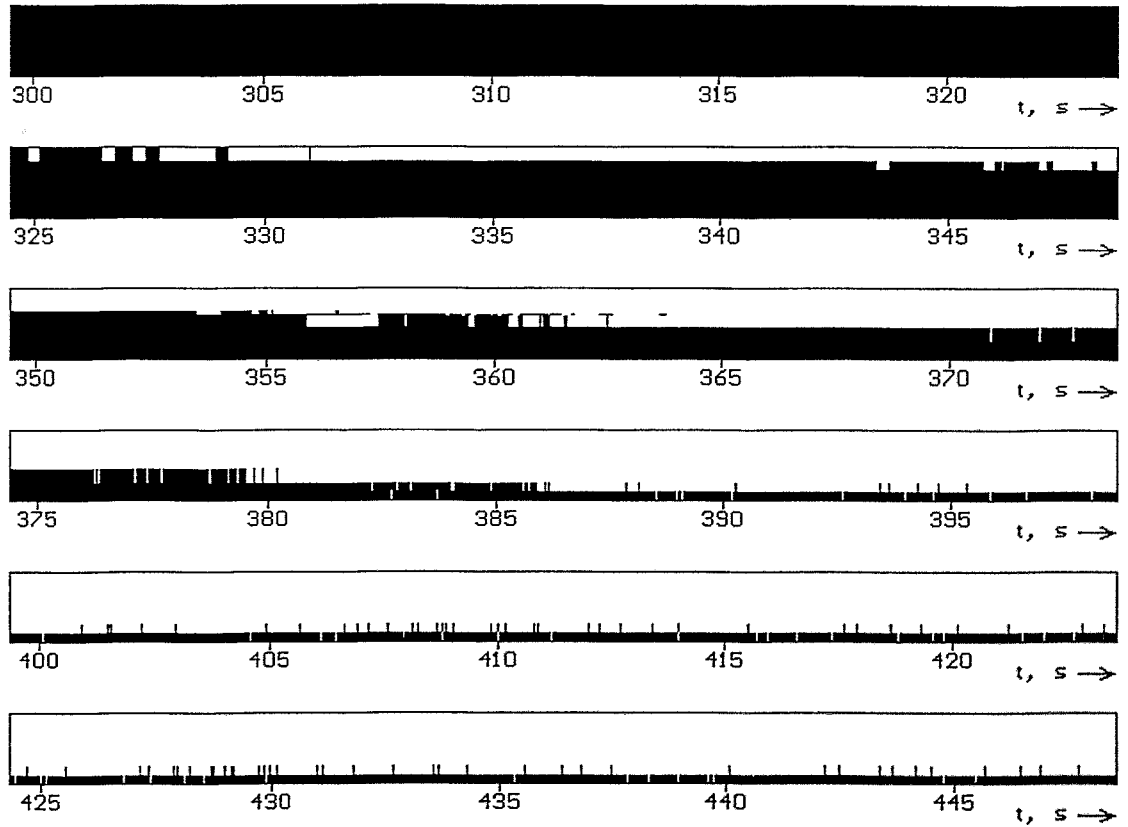


Bild 4.11 Freilegung des unteren Sondenfeldes im Versuch E3 (50 bar, in 1 s werden ca. 10 mm der Rohrlänge freigelegt)

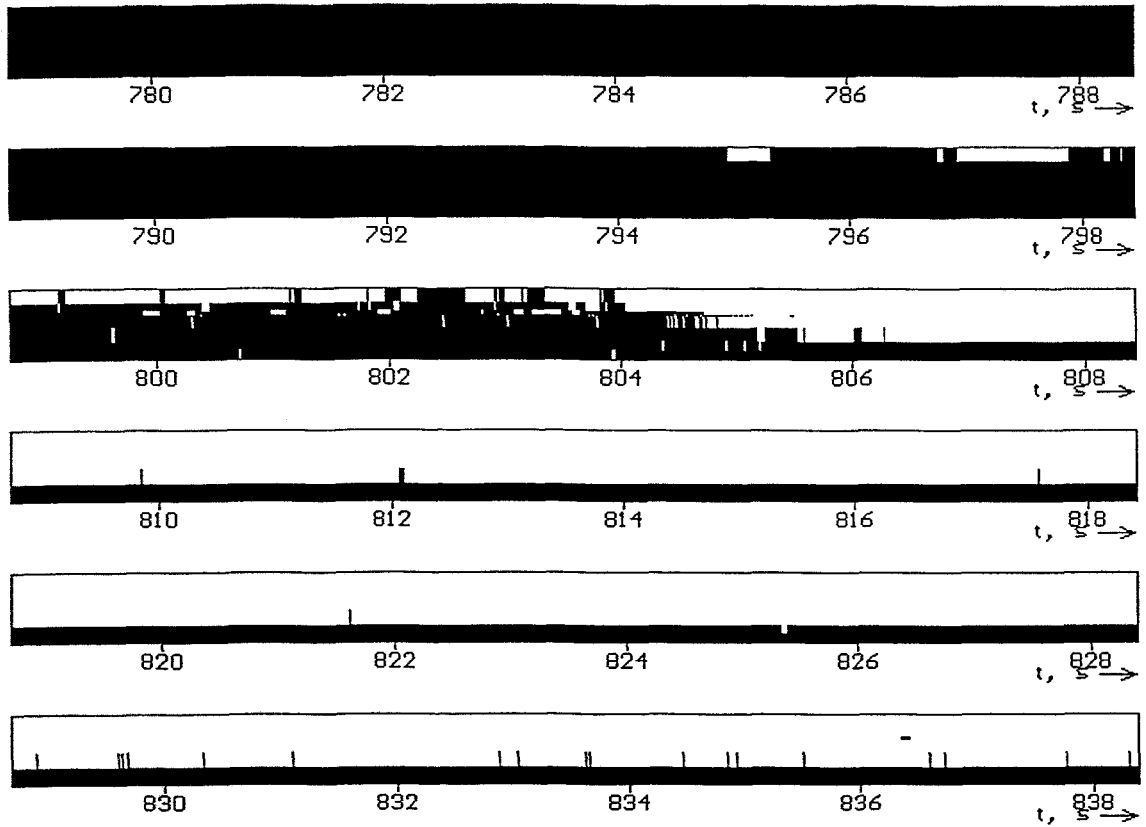


Bild 4.12 Freilegung des unteren Sondenfeldes im Versuch E5 (70 bar, in 1 s werden ca. 50 mm der Rohrlänge freigelegt)

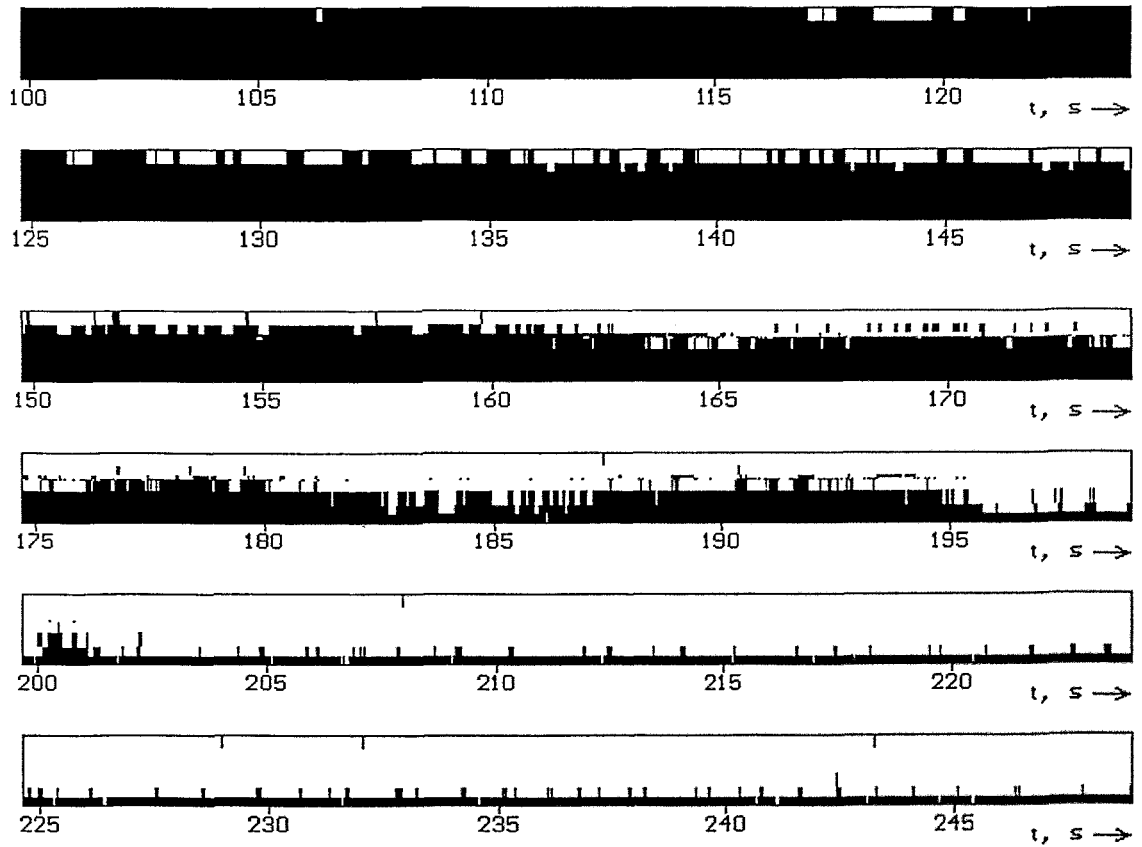


Bild 4.13 Freilegung des unteren Sondenfeldes im Versuch E7/8 (10 bar, in 1 s werden ca. 9 mm der Rohrlänge freigelegt)

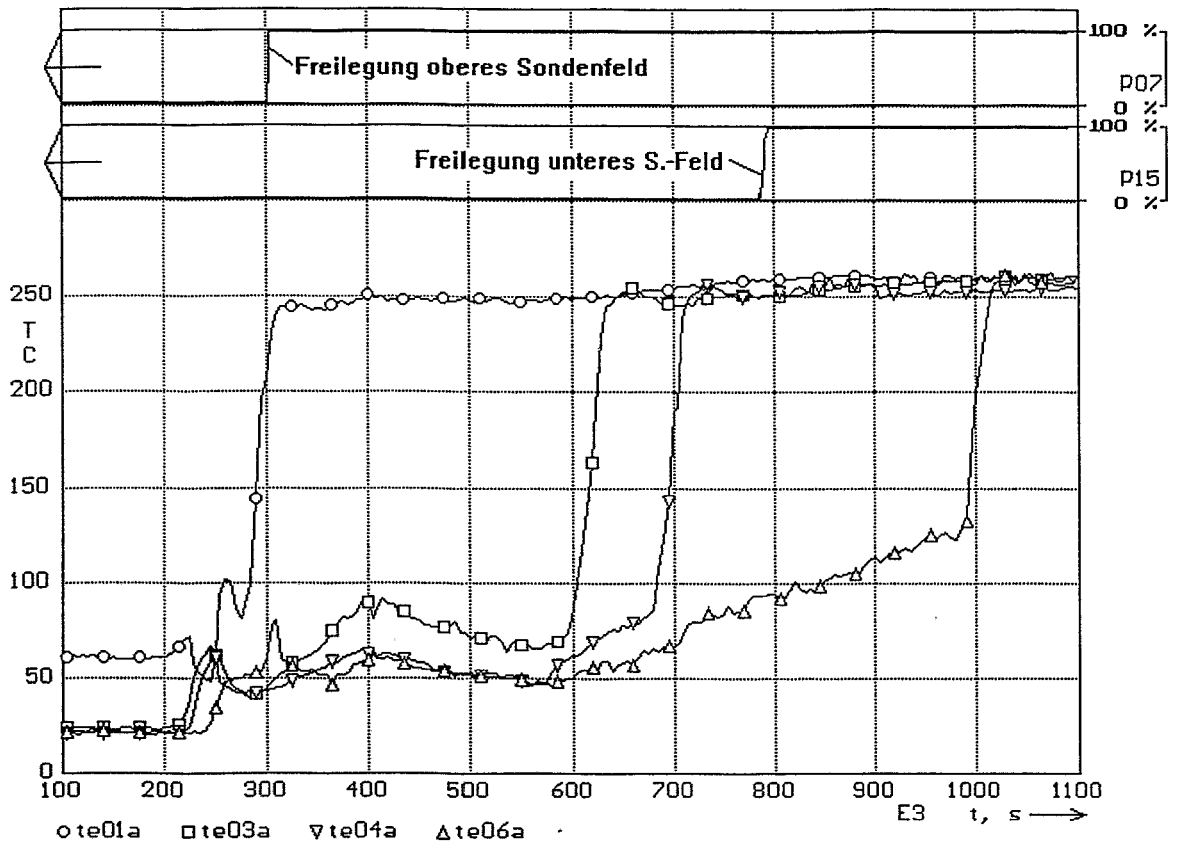


Bild 4.14 Temperaturverläufe am Scheitel des Einzelrohrs im Vergleich mit den Signalen der zentralen Sonden beider Sondenfelder, oberer Schenkel der Einzelrohrs, Versuch E3, Primärdruck 50 bar

te01a - te04a: oberhalb (stromaufwärts) von S7
te06a: unterhalb (stromabwärts) von S7

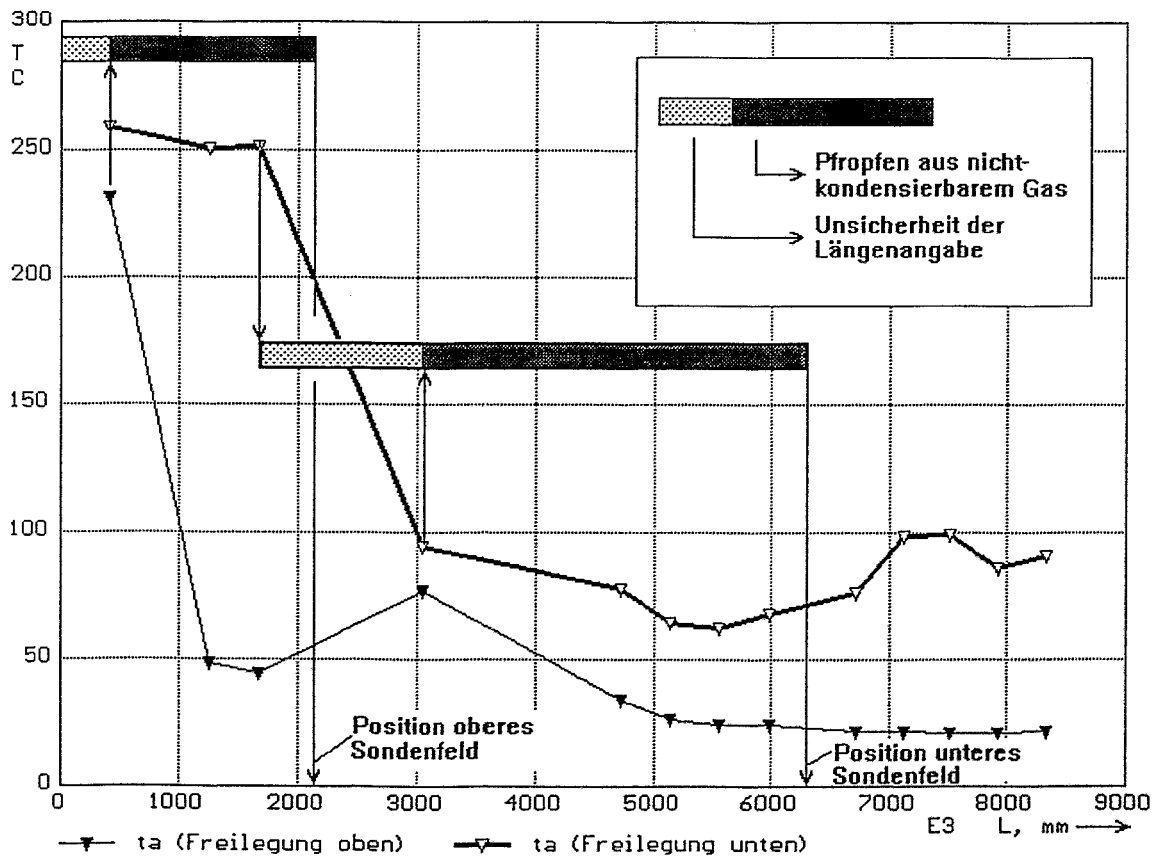


Bild 4.15 Temperaturverteilung entlang des Scheitels des Einzelrohres zum Zeitpunkt der Freilegung des oberen bzw. des unteren Sondenfeldes beim Versuch E3 (50 bar), Nachweis des Vorhandenseins von nichtkondensierbaren Gasen

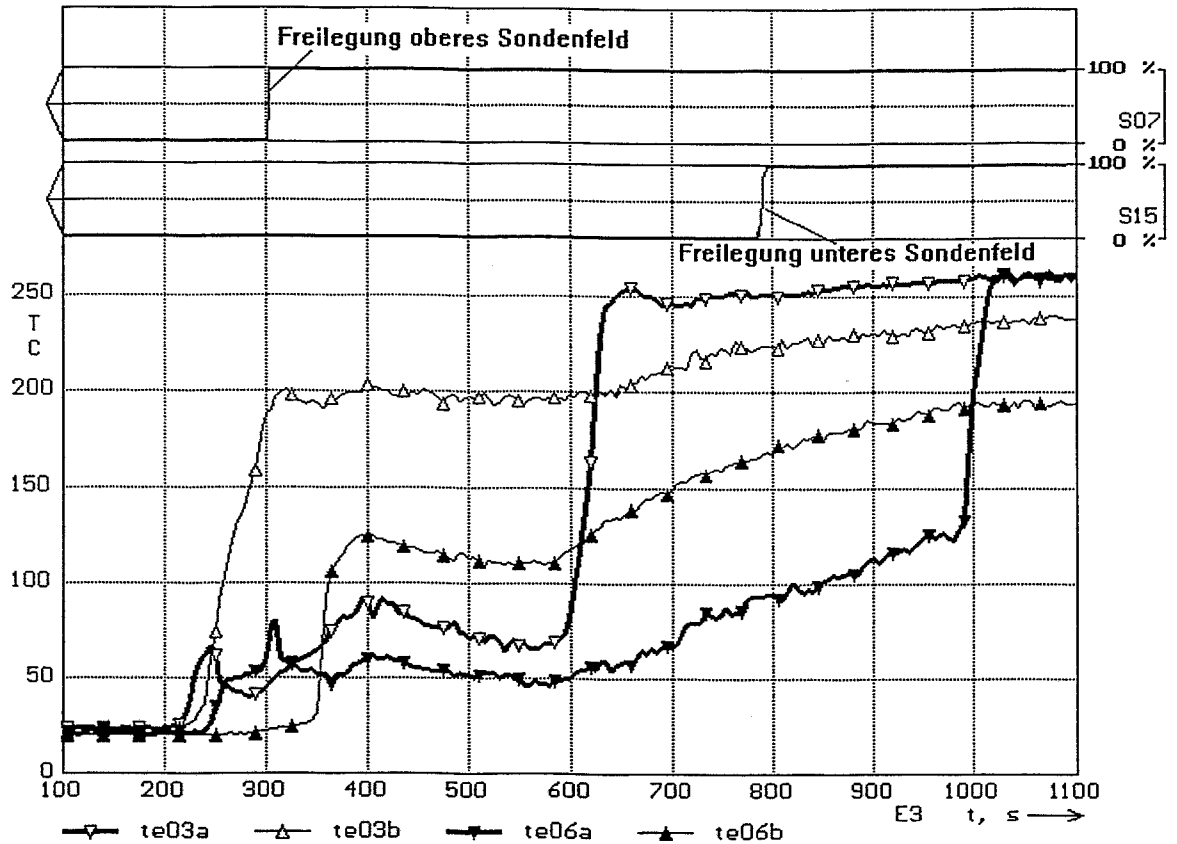


Bild 4.16 Temperaturverläufe im Einzelrohr im Vergleich mit den Signalen der zentralen Sonden beider Sondenfelder, oberer Schenkel der Einzelrohrs, Versuch E3, Primärdruck 50 bar

- te03a: Scheitel des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) von S7
- te06a: Scheitel des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) von S7
- te03b: Boden des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) von S7
- te06b: Boden des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) von S7

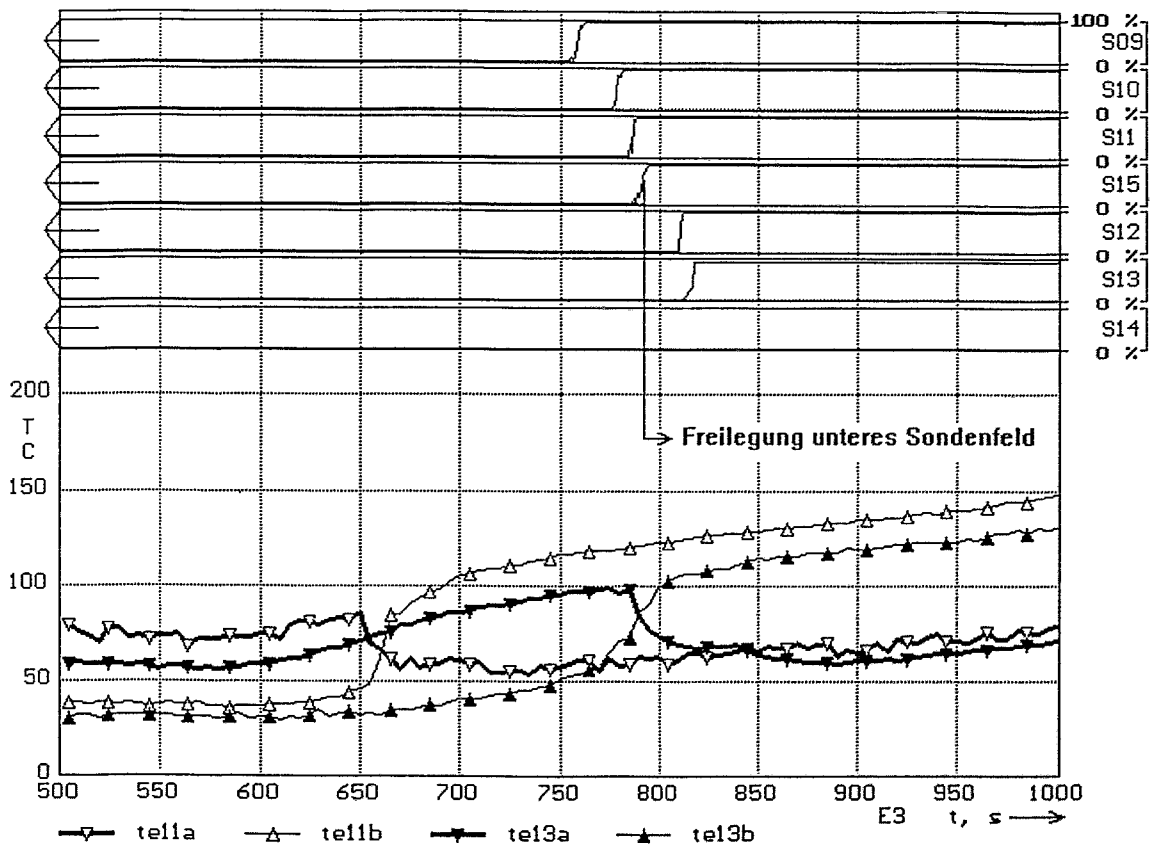


Bild 4.17 Temperaturverläufe bei Freilegung des unteren Sondenfeldes, Versuch E3, Druck 50 bar

Sonden S9 - S15: Unteres Sondenfeld (in der Reihenfolge ihrer vertikalen Anordnung)

- te11a: Scheitel des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) vom Sondenfeld
- te13a: Scheitel des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) vom Sondenfeld
- te11b: Boden des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) vom Sondenfeld
- te13b: Boden des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) vom Sondenfeld

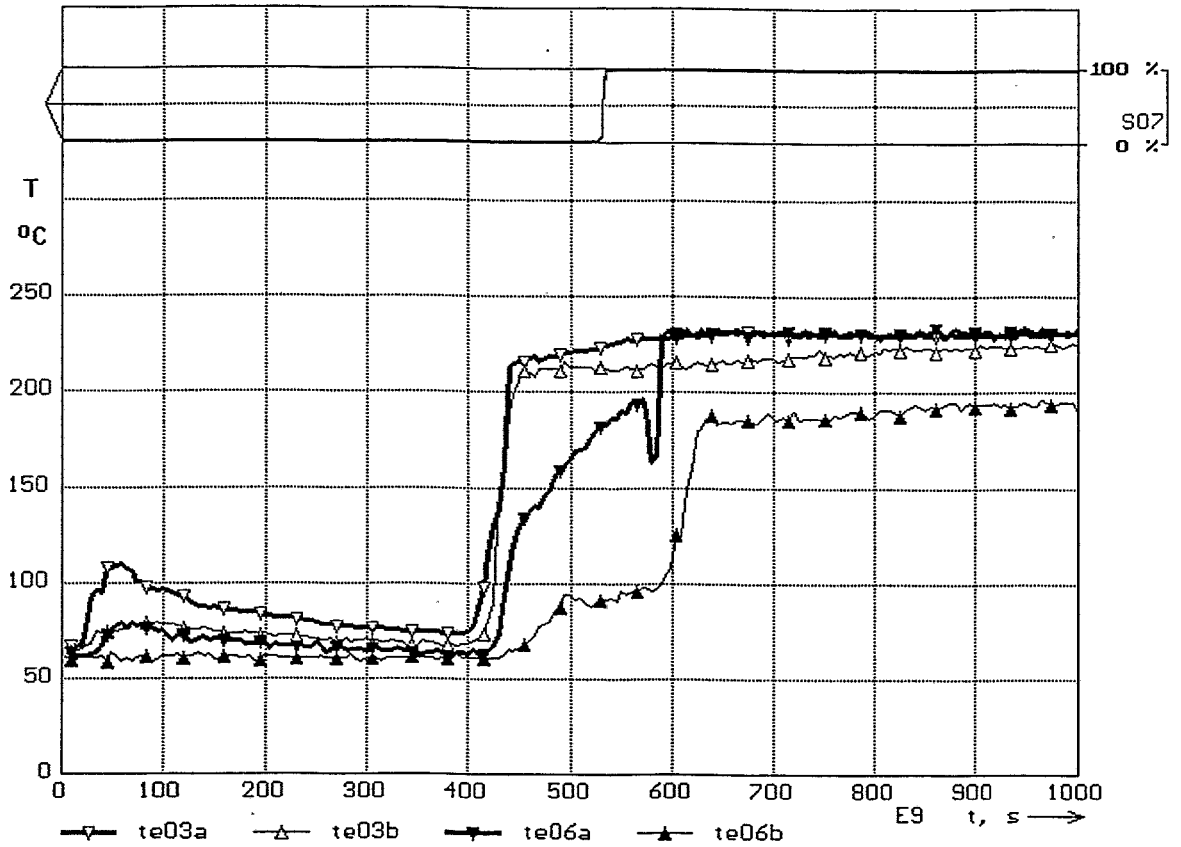


Bild 4.18 Temperaturverläufe im Einzelrohr im Vergleich mit den Signalen der zentralen Sonde des oberen Sondenfeldes, oberer Schenkel der Einzelrohrs, Versuch E9, Primärdruck 30 bar

- te03a: Scheitel des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) von S7
- te06a: Scheitel des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) von S7
- te03b: Boden des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) von S7
- te06b: Boden des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) von S7

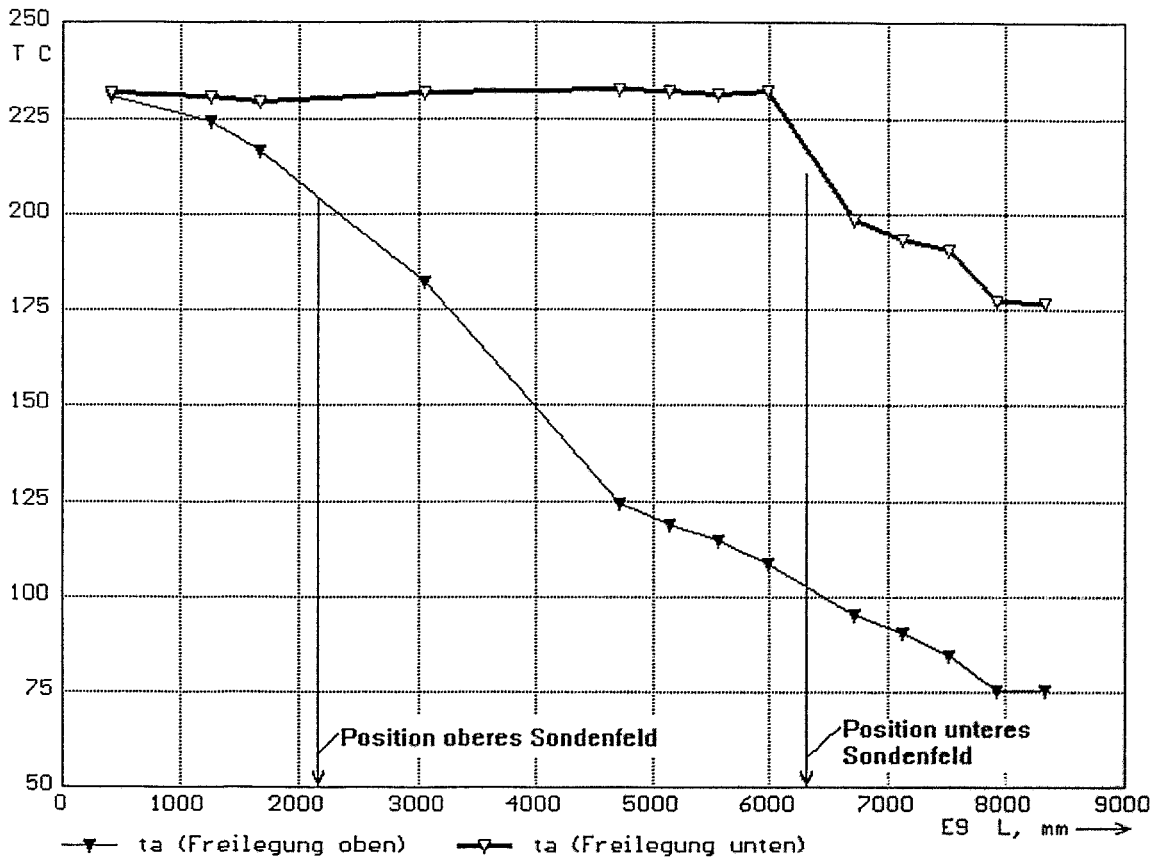


Bild 4.19 Temperaturverteilung entlang des Scheitels des Einzelrohres zum Zeitpunkt der Freilegung des oberen bzw. des unteren Sondenfeldes beim Versuch E9 (30 bar)

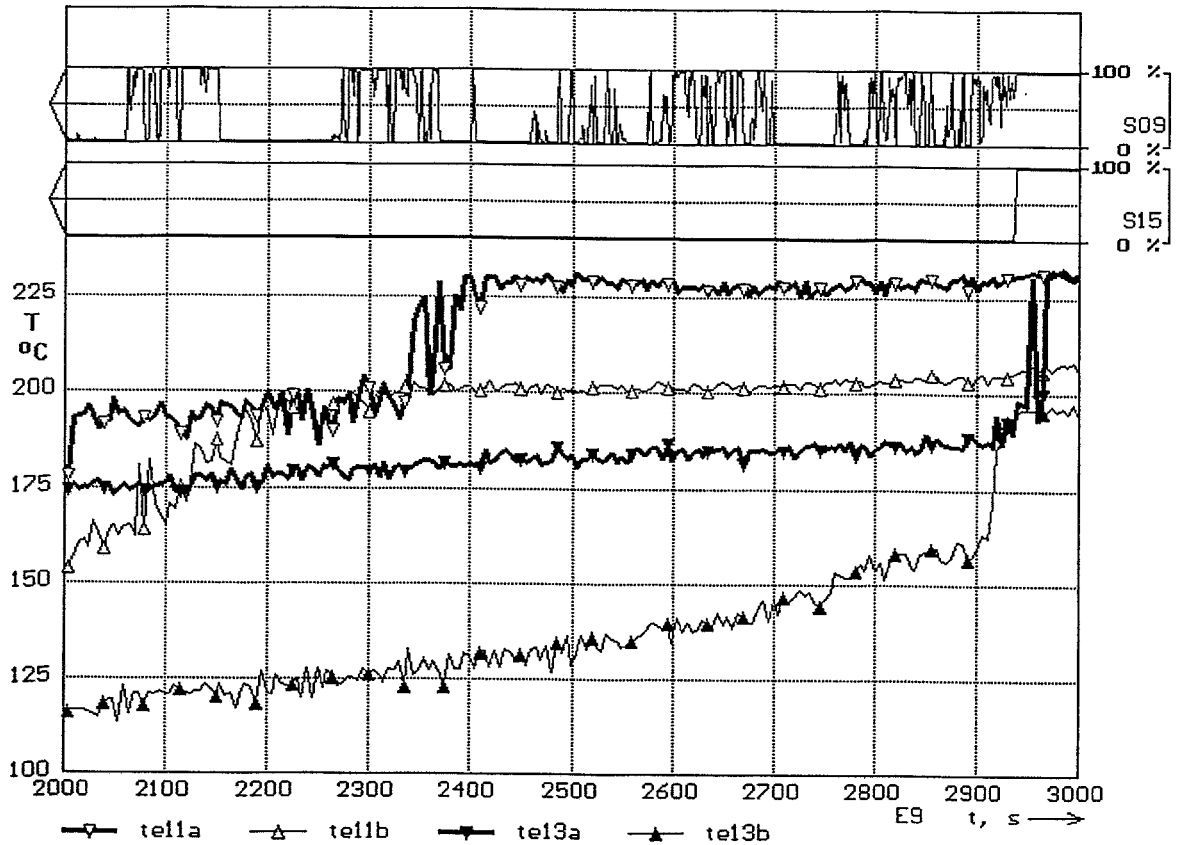


Bild 4.20 Temperaturverläufe bei Freilegung des unteren Sondenfeldes, Versuch E9, Druck 30 bar

Sonde S9: Unteres Sondenfeld, Scheitel
 Sonde S15: Unteres Sondenfeld, zentrale Sonde

te11a: Scheitel des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) vom Sondenfeld
 te13a: Scheitel des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) vom Sondenfeld
 te11b: Boden des Einzelrohrs, oberhalb (stromaufwärts) vom Sondenfeld
 te13b: Boden des Einzelrohrs, unterhalb (stromabwärts) vom Sondenfeld

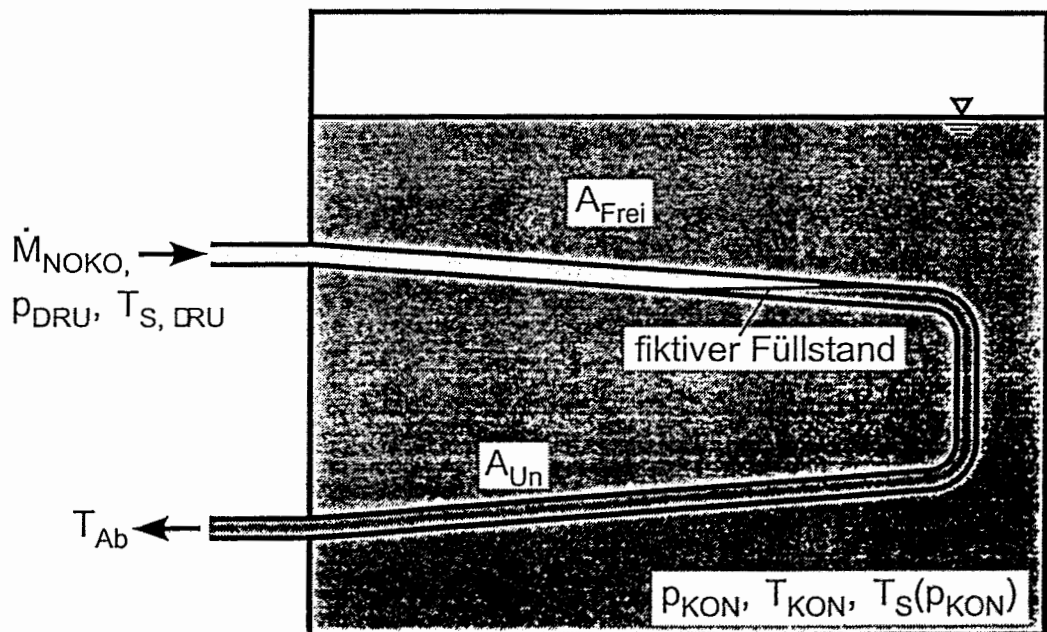


Bild 5.1: Modellvorstellung zur Bestimmung der Notkondensatorleistung und des Füllstandes im Bündel [SCA-96]

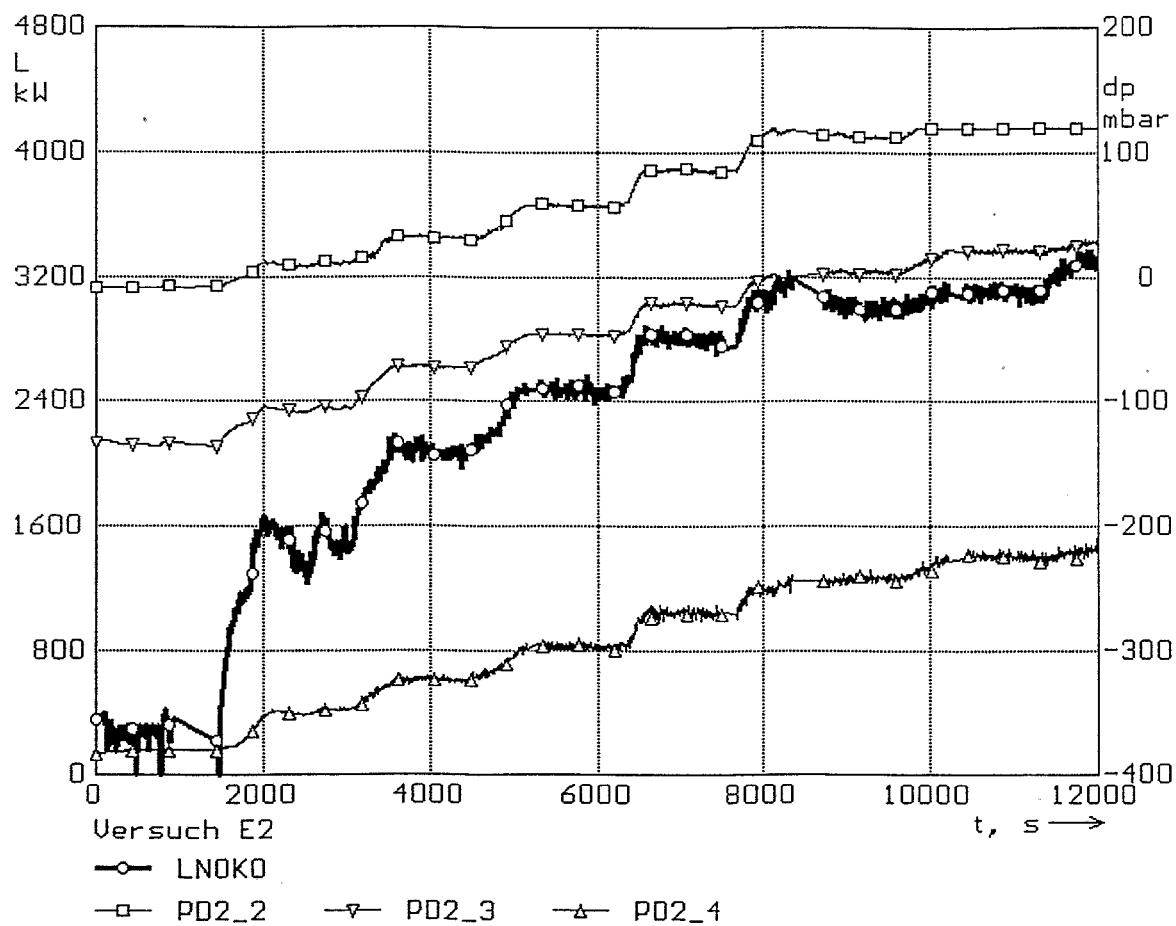


Bild 6.1 Zeitliche Verläufe der Leistung (LNOKO) und der Differenzdrücke beim Versuch E2 (70 bar)

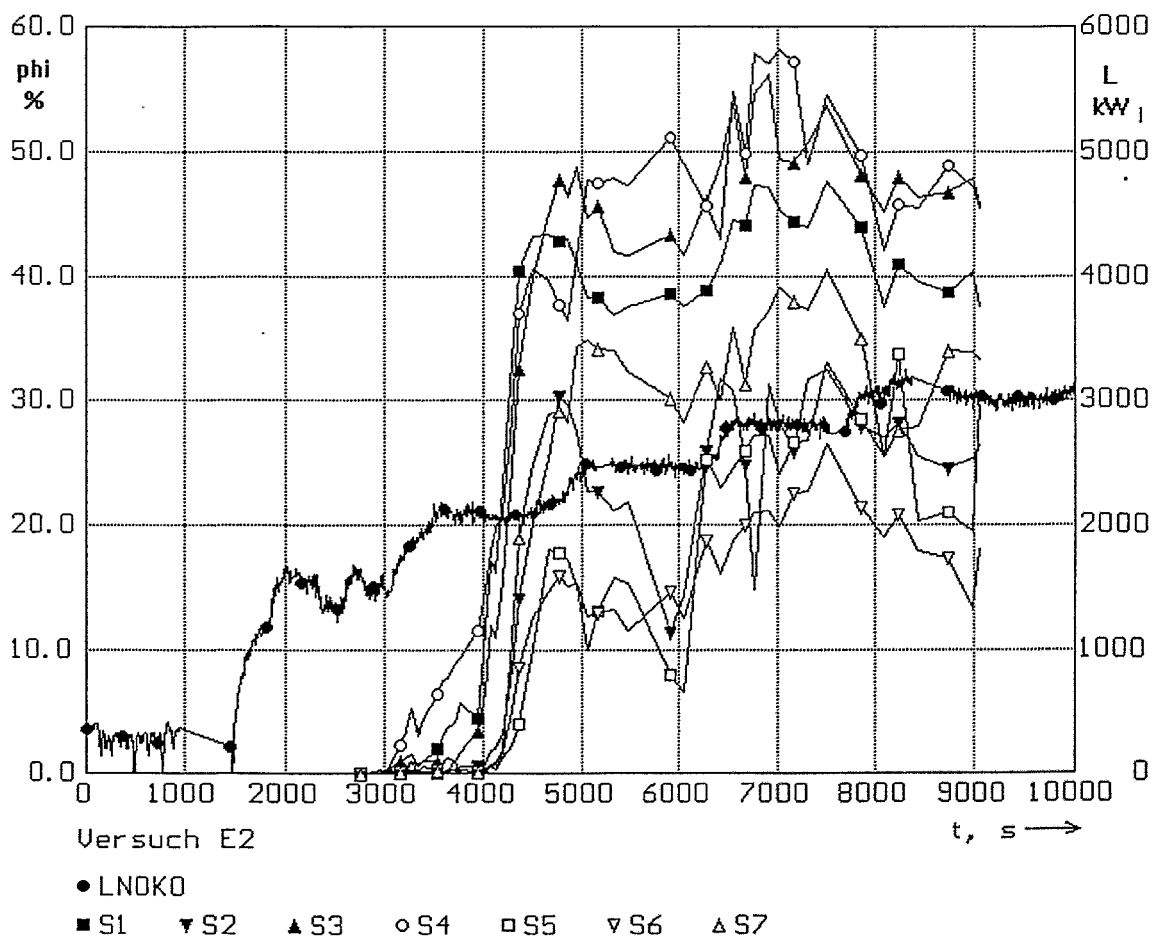


Bild 6.2 Verläufe des Dampfgehalts auf der Sekundärseite des NOKO-Bündels beim Versuch E2 (70 bar)

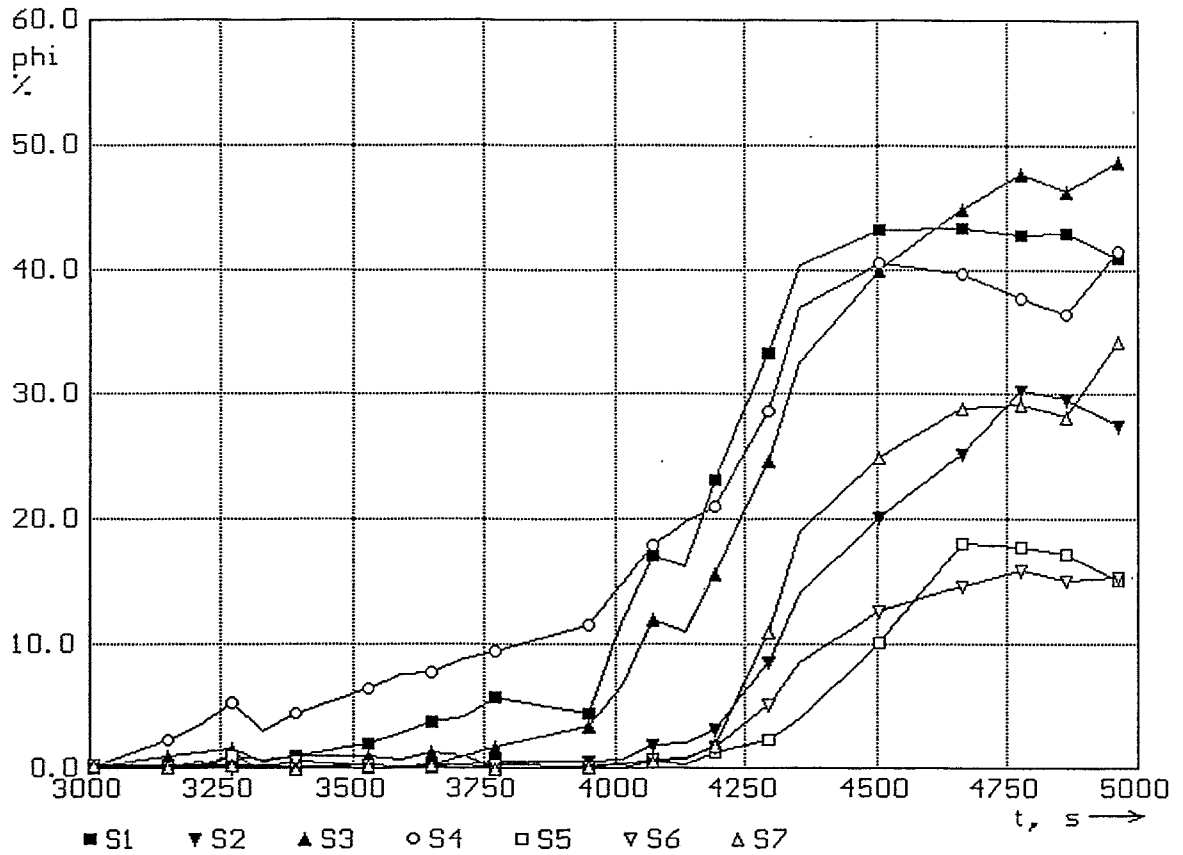


Bild 6.3 Dampfgehaltsverläufe auf der Sekundärseite des NOKO-Bündels beim Versuch E2, Ausschnitt 3000 - 5000 s

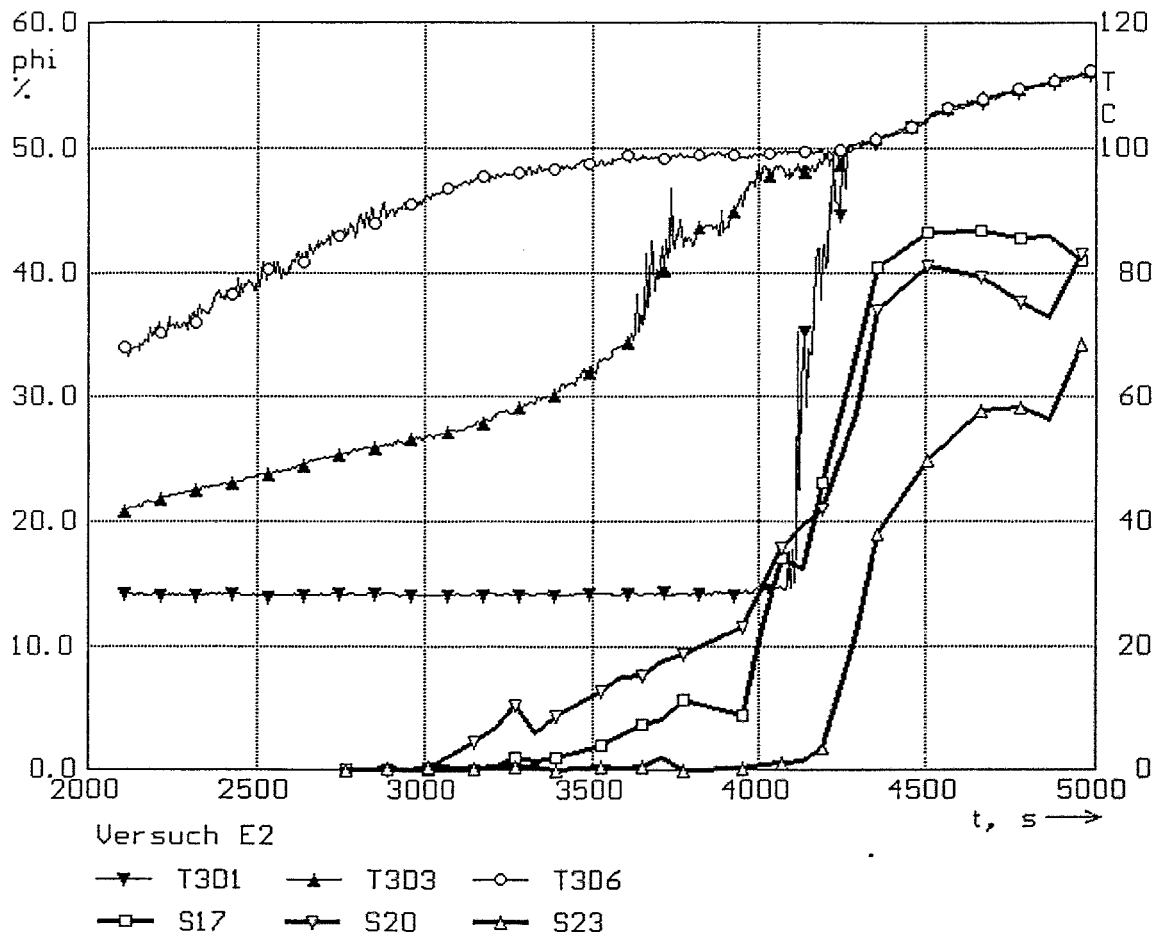


Bild 6.4 Zeitliche Verläufe der Dampfgehalte der Sonden S17, S20 und S23 in Gegenüberstellung mit den Temperaturen auf der Sekundärseite des NOKO-Bündels beim Versuch E2

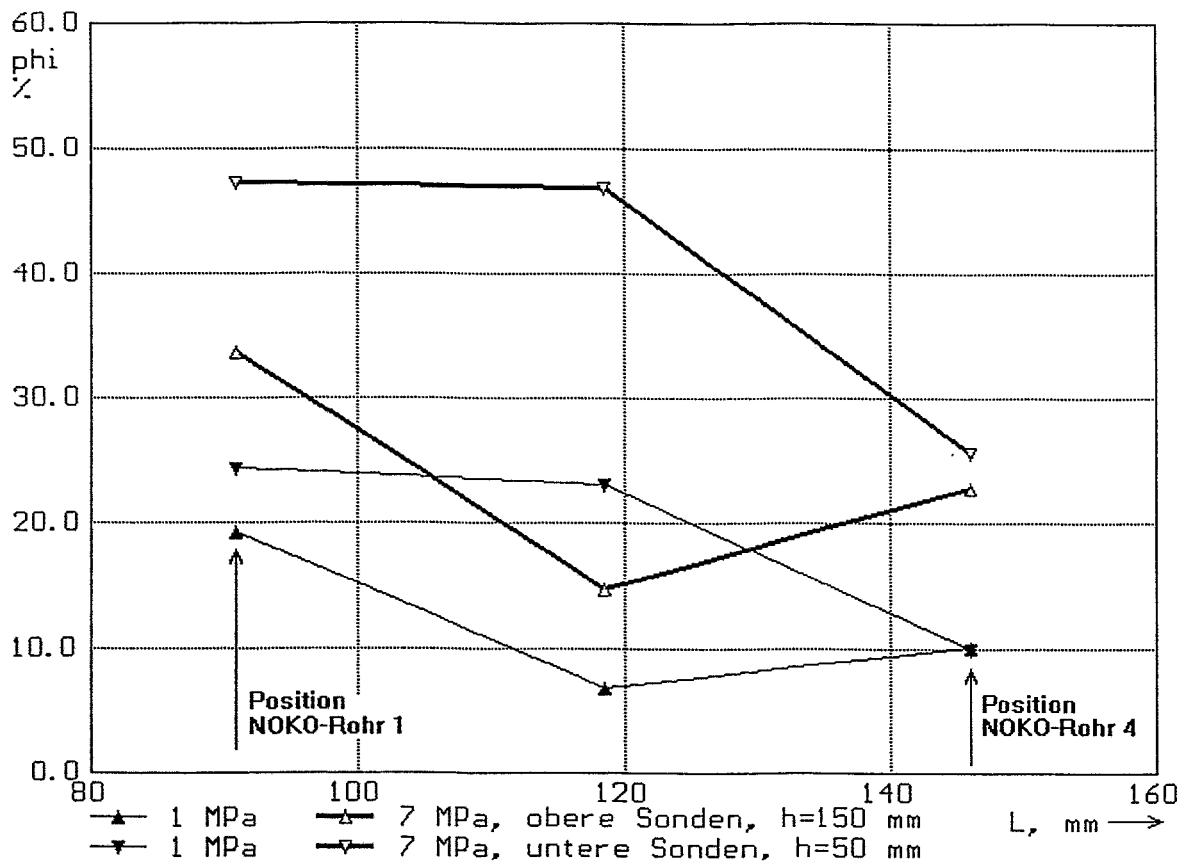


Bild 6.5 Verteilung des Dampfgehalts in Querrichtung über dem NOKO-Bündel bei Versuch E2 und B9 während des ausgeprägten Siedens im Sättigungszustand nach vollständiger Freilegung des Bündels