

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

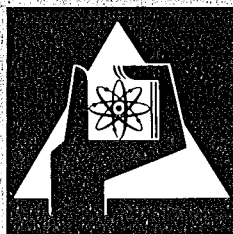
Juni 1974

KFK 1895

Institut für Reaktorentwicklung  
Abteilung Reaktorbetrieb und Technik  
Projekt Schneller Brüter

**Modellversuche zum tankinternen Notkühlsystem  
des Prototyp-Reaktors SNR-300**

H. Hain, F. Hofmann, D. Kirsch,  
K. Kleefeldt, W. Kramer, R. Meyder



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

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1895

Institut für Reaktorentwicklung  
Abteilung Reaktorbetrieb und Technik  
Projekt Schneller Brüter

Modellversuche zum tankinternen Notkühlssystem  
des Prototyp-Reaktors SNR 300

---

H. Hain<sup>++</sup>  
F. Hofmann<sup>+++</sup>  
D. Kirsch<sup>+</sup>  
K. Kleefeldt<sup>+</sup>  
W. Kramer<sup>+</sup>  
R. Meyder<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Institut für Reaktorentwicklung  
<sup>++</sup> Abteilung Reaktorbetrieb und Technik  
<sup>+++</sup> Projekt Schneller Brüter

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH, KARLSRUHE





Die im Bericht beschriebenen Modellversuche wurden als Vorhaben im Rahmen des Projektes Schneller Brüter gemeinsam von der Abteilung Reaktorbetrieb und Technik und dem Institut für Reaktorentwicklung durchgeführt.

Die Autoren danken allen beteiligten Mitarbeitern der Abteilung Reaktorbetrieb und Technik (RBT), der Abteilung Datenverarbeitung und Instrumentierung (ADI), der Abteilung Reprografie (REPRO) und des Instituts für Reaktorentwicklung (IRE), insbesondere den Herren

W. Dennig (REPRO)	G. E. Gering (IRE)
B. Glaser (RBT)	J. Hanauer (RBT)
K. Jannakos (RBT)	K. Rietzschel (ADI)
G. Müller (RBT)	T. Vollmer (RBT)
F. Süß (ADI)	

Als Manuskript eingereicht am 13. Mai 1974.

## Zusammenfassung

Das Notkühlssystem des Schnellen Natriumgekühlten Prototyp-Reaktors SNR 300 hat die Aufgabe, bei bestimmten Störfällen, die zwar höchst unwahrscheinlich, bei den Sicherheitsbetrachtungen jedoch nicht außer acht zu lassen sind, für die Abführung der Nachwärme zu sorgen. Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Störfall ist ein Rohrbruch am Pumpendruckstutzen bei gleichzeitigem Versagen der Pumpenabschaltung. Die Notkühlkonzeption basiert in diesem Fall auf einem tankinternen Naturumlauf, erzeugt durch eine Wärmezufuhr im Kern und durch eine Wärmesenke mittels an der Behälterinnenseite angebrachter Tauchkühler. Für den so zustandekommenden tankinternen Kühlkreislauf hat die Firma Interatom ein Rechenprogramm (NOTUNG) für ein theoretisches Modell erstellt, welches das thermodynamische Verhalten des Kreislaufs beschreibt. Zur Unterstützung der analytischen Berechnungen für einen derart komplizierten thermohydraulischen Vorgang wurden von den Genehmigungsbehörden geeignete Modellversuche gefordert, über die hier berichtet wird.

Der Versuchsaufbau ist eine weitgehende Nachbildung des Reaktortanks und seiner Einbauten im Längenmaßstab 1:3, beschränkt auf einen 120°-Ausschnitt. Als Kühlmittel diente Wasser. Die Brenn- und Brutelemente wurden durch elektrisch beheizte Stabbündel mit zumeist 7 Stäben simuliert, wobei die radiale Leistungsabstufung im Kern und der zeitliche Leistungsverlauf in Anlehnung an die Verhältnisse im Reaktor während des Störfalls gewählt wurden. Die Meßwerte einer umfangreichen Instrumentierung wurden mit Hilfe einer elektronischen Anlage erfaßt und weiterverarbeitet.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß der Naturumlauf wenige Sekunden nach dem Einschalten der Heizleistung ( $\tau = 0$ ) in der erwarteten Weise einsetzt, wobei der Kerndurchsatz und die Kernaustrittstemperatur schnell ansteigen. Der Kerndurchsatz schwenkt kurz nach der ersten Leistungsreduzierung bei  $\tau = 100$  sec auf ein Plateau ein, während die Austrittstemperatur ein erstes Maximum durchläuft und dann bis zur zweiten Leistungsabsenkung (bei  $\tau = 1000$  sec)

nochmals leicht ansteigt. Anschließend verringern sich die genannten Meßgrößen und die für den Reaktor kritische Phase ist, wenn die Vorgänge dort ebenso ablaufen, beendet.

Um den Vergleich zwischen Rechnung und Experiment für mehrere Systemzustände zu ermöglichen und andererseits auch die Antwort des Systems auf bestimmte Veränderungen direkt zu messen, wurden in insgesamt 25 Versuchen folgende Versuchsparameter variiert: Heizleistung, Tauchkühlerkapazität, Heizleistungstransient, Brutmantelleistung, mehrere Querschnittsverengungen, Füllstand und Anfangstemperatur. Die Veränderung des Füllstandes auf die sog. Betriebsspiegelhöhe hatte dabei neben der genaueren Untersuchung der Vorgänge im Oberplenum die Aufgabe, eine Anknüpfung an einen zweiten, hier nicht näher diskutierten Störfall zu erbringen.

Der Vergleich zwischen Rechnung und Experiment wurde an drei ausgewählten Fällen durchgeführt, für die die Firma Interatom Berechnungen erstellt hatte.

Insgesamt kann man feststellen, daß das verwendete Rechenprogramm das dynamische Verhalten des Systems gut wiedergibt. Dort, wo Abweichungen in den Absolutwerten auftreten, liegt das Programm von der verwendeten Modellvorstellung her auf der sicheren Seite.

Die Untersuchung des Problems der Übertragbarkeit führte im Rahmen einer Durchführbarkeitsstudie zu dem Ergebnis, daß die aus der Ähnlichkeitstheorie sich ergebenden, für das Problem bestimmenden Kennzahlen bei diesen mit Wasser durchgeführten Modellversuchen um Größenordnungen von denen im Reaktor SNR 300 verschieden sind. Eine unmittelbare Übertragbarkeit der Ergebnisse im Sinne der Ähnlichkeitstheorie ist also nicht möglich. Dennoch haben die Versuche demonstriert, daß die Wärmeabfuhr durch freie Konvektion bei einer derart komplizierten Strömungsführung möglich ist, und daß wegen der guten Wiedergabe des globalen Systemverhaltens durch das Rechenprogramm angenommen werden darf, daß das Programm auch die Verhältnisse beim Notkühlvorgang im Reaktor richtig darstellt.

## Abstract

### Model tests for the emergency cooling system of the prototype reactor SNR 300

The emergency cooling system of the sodium cooled fast prototype reactor SNR 300 was designed to remove the afterheat in certain incidents which, although they are highly unlikely, cannot be left out of consideration in safety assessments. The incident considered in this study is a pipe rupture of the pump pressure pipe coupled with a failure of the pump shutdown system. In this case, the emergency cooling concept is based upon natural convection inside the tank generated by heat added in the core and a heat sink consisting of immersion coolers attached to the inside of the tank. This cooling circuit within the tank is covered by a computer program (NOTUNG) drafted by the Interatom company for a theoretical model describing the thermodynamic behavior of the circuit. The licensing authorities required suitable model tests to support the analytical calculations of this very complicated thermohydraulic process. These tests will be outlined below.

The test rig is a rather detailed reconstruction of the reactor tank and its internals on a longitudinal scale of 1:3, but limited to a 120 degree section. Water was used as the coolant. The fuel and blanket elements were simulated by electrically heated rod bundles, mostly with seven rods; radial power variation in the core and the decrease of power with time were selected on the basis of reactor conditions during the incident. The data produced by an extensive measuring setup were acquired and processed by an electronic system.

Test results show that natural convection starts in the desired way within a few seconds after the heating power is turned on ( $\tau = 0$ ), core flow and core outlet temperature increase rapidly. Shortly after the first power reduction, at  $\tau = 100$  sec, the core flow settles at a plateau level, while the outlet temperature passes through a first peak and continues to rise slightly up to the second power decrease ( $\tau = 1000$  sec). Afterwards, these quantities decrease and the critical phase to the reactor is over if events in the reactor proceed in the same way.

To allow a comparison to be made between the calculation and the experiment for several system conditions, and also to obtain a direct measurement of the response of the system to certain variations, the following test parameters were varied in a total of 25 experiments: heating power, immersion cooler capacity, heating power transient, blanket power, several cross section reductions, filling level and initial temperature. Changing the filling level to the so-called operating level not only was designed to allow a more accurate investigation of the events occurring in the upper plenum, but was designed also to link up with another incident not discussed in detail in this study.

The comparison between calculation and experiment was made in three cases for which the Interatom company had made available calculations in advance.

On the whole, it can be said that the computer program used is a good representation of the dynamic behavior of the system. In those instances in which there are discrepancies in absolute values, the program is on the safe side as far as the model concept employed is concerned.

An investigation of the similarity problem within the framework of a feasibility study indicated that the determinant dimensionless groups are different in these model scale tests with water from those associated with the SNR 300 reactor by several orders of magnitude. Hence, no direct transfer of results in the sense of the theory of similarity is possible. However, the experiments demonstrated that heat removal by natural convection is possible in a flow pattern as complicated as in this case and that, because of the good representation of the global behavior of the system by the computer program, this program may be assumed also to give a correct representation of the conditions associated with emergency cooling in the reactor.

Inhalt	Seite
1. Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
2. Versuchsaufbau	4
2.1. Aufgabenstellung, technische Hauptdaten	4
2.1.1. Kurzbeschreibung des Modellaufbaues	4
2.1.2. Technische Daten	5
2.1.3. Entwicklungsschwerpunkte, notwendige Vorversuche	7
2.2. Vorversuche	8
2.2.1. Strömungsdarstellung und photographische Registrierung	8
2.2.2. Leistungsversuche am Heizstabbündel und Druckverlustmessungen an der Vordrosselmeßstrecke	9
2.3. Ausführung der Versuchseinrichtung	10
2.3.1. Reaktortank-Modellbehälter	10
2.3.2. Brenn- und Brutelementaufbau	12
2.3.3. Instrumentierung und Heizgruppeneinteilung	14
2.3.3.1. Meßstellenanordnung, Meßgeräte	14
2.3.3.2. Heizgruppeneinteilung, Heizungsregelung	17
2.3.3.3. Meßgenauigkeit	18
2.3.4. Meßwerterfassung	20
2.3.5. Registrierung der Kühlmittelströmungen	21
3. Versuchsdurchführung	23
3.1. Versuchsplan	23
3.2. Versuchsabwicklung	24
3.2.1. Versuchsvorbereitung	24
3.2.2. Versuchsablauf	25

	Seite
4. Auswertung der Versuche	28
4.1. Nachweis des Naturumlaufs und Diskussion des Versuchsa- blaufes am Beispiel des Referenzversuches	28
4.2. Die Versuchsparameter und ihre Einflüsse auf den Naturumlauf im Modell	32
4.2.1. Reproduzierbarkeit des Versuchsa- blaufes	34
4.2.2. Einfluß der Heizleistung	36
4.2.3. Einfluß der Tauchkühlerleistung	37
4.2.4. Einfluß der Heizleistungstransienten	40
4.2.5. Einfluß der Brutmantelleistung	41
4.2.6. Einfluß von Querschnittsverengungen im Naturumlauf	43
4.2.7. Einfluß des Füllstandes	47
4.2.8. Einfluß der Anfangstemperatur	49
4.3. Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im Oberplenum (OP)	51
4.3.1. Radiale Temperaturverteilung im OP	52
4.3.2. Temperaturverteilung in Umfangsrichtung	54
4.3.3. Geschwindigkeitsverteilung im OP	55
4.4. Vergleich der Experimente mit dem Rechenprogramm NOTUNG	60
4.4.1. Kurzbeschreibung des Programms NOTUNG	61
4.4.2. Vergleich wichtiger gemittelter Größen	63
4.4.3. Vergleich der Kühlung im Kern	64
4.4.4. Vergleich der Arbeitsbedingungen der Tauchkühler	68
4.4.5. Wärmebilanz über den Versuch 3 B	69
5. Zusammenfassung der Ergebnisse	71
5.1. Versuchsergebnisse	71
5.2. Vergleich zwischen Rechnung und Experiment	73
5.3. Bemerkungen zur Übertragbarkeit auf Reaktorverhältnisse	74
Literatur	76

## VIII

<u>Anhang A</u>	- Zusammenstellung von Meßwerten	Seite
A 1	Übersicht	A1
A 2	Erläuterungen zu den Tabellen und Abbildungen	A2
A 2.1.	Datentabellen A-1 bis A-4	A2
A 2.2.	Tabellen A-5 bis A-7	A2
A 2.3.	Plots	A2
A 2.4.	Druckbilder (Abb. A-11)	A4

### Anhang B - Das Problem der Übertragbarkeit

B 1	Allgemeine Überlegungen	B1
B 2	Folgerungen für die Übertragbarkeit des Modellversuchs	B8
B 3	Zum Zeitverhalten von Reaktor und Versuchsmodell beim Einsetzen der Notkühlung	B11
B 4	Versuch einer Übertragung der Meßergebnisse im Sinne der Ähnlichkeitstheorie	B13

### Anhang C - Auswertung des Bildmaterials

C 1	Allgemeines	C1
C 2	Nomenklatur für die Bildauswertung	C1
C 3	Beschreibung der Kamerablickfelder	C2
C 4	Zeitfolge der Aufnahmen	C4
C 5	Zusammenfassung der Bildauswertung	C5



## Abbildungen

		Seite
Abb. 2.1-1	Modellbehälter	77
Abb. 2.2-2	Einspritzdüse für Farbmarkierung	78
Abb. 2.2-3	Bündelelementaufbau	79
Abb. 2.2-4	Brennelementprüfkreislauf	80
Abb. 2.2-5	Grenzwerte der Heizflächenbelastung ohne Sieden	81
Abb. 2.2-6	Druckverlustmessung am Heizstabbündel	82
Abb. 2.2-7	Druckverlustmessung Vordrosselstrecke, Versuchsstand	83
Abb. 2.2-8	Druckverlustkennwerte an der Vordrossel- strecke	84
Abb. 2.2-9	Gesamtansicht Modellbehälter, Oberteil	85
Abb. 2.2-10	Gesamtansicht Modellbehälter, Unterteil	85
Abb. 2.2-11	Tauchkühler	86
Abb. 2.3-12	Meßstellenübersicht	87
Abb. 2.3-13	Meßstellenanordnung im Kernbereich	88
Abb. 2.3-14	Gruppeneinteilung der Brenn- und Brutelemente	89
Abb. 2.3-15	Gruppenleistung der Brenn- und Brutelemente	90
Abb. 2.3-16	Elektrische Heizgruppenschaltung; Übersicht	91
Abb. 2.3-17	Blockschaltbild Meßwerterfassung	92
Abb. 2.3-18	Meßwertdarstellung auf dem Sichtgerät	93
Abb. 3.1-1	Versuchsplan	94
Abb. 3.2-2	Zeitlicher Verlauf der Kernleistung im Referenzfall	95
Abb. 4.1-1	Farbeinspritzung zur Sichtbarmachung der Strömung	96
Abb. 4.1-2	Farbeinspritzung zur Sichtbarmachung der Strömung im Oberplenum, oberhalb des Kern- mantels	97

	Seite	
Abb. 4.1-3	Farbeinspritzung zur Sichtbarmachung der Strömung am Eintritt in die Kernmantelperforation	98
Abb. 4.1-4	Leistungen	99
Abb. 4.2-1	Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 9A und 9B zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit	100
Abb. 4.2-2	Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 1B, 2 und 3B zur Darstellung des Einflusses der Heizleistung 20, 40 bzw. 60 kW	101
Abb. 4.2-3	<b>Zusammenhang zwischen der Kernleistung <math>Q_{\text{Kern}}</math> und den Meßgrößen:</b> a) Aufheizspanne, b) Kerndurchsatz, c) Kerndurchsatz/TK.-Durchsatz	102
Abb. 4.2-4	Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 3B, 5, 6, 7 und 8 zur Darstellung des Einflusses der Tauchkühler-Leistung	103
Abb. 4.2-5	Wärmedurchgangszahl $k$ für die Tauchkühler in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit auf der Primärseite	104
Abb. 4.2-6	Kernaustrittstemperatur und Kerndurchsatz für die Versuche 2, 3B, 11, 12, 19 und 21B mit unterschiedlicher Brutmantelleistung	105
Abb. 4.2-7	Beispiel für den Temperaturverlauf am unteren und oberen Ende des Brutelementes 10/5	106
Abb. 4.2-8	Aufheizspanne im BU 10/5 mit unterschiedlicher BU-Leistung zur Veranschaulichung der Strömungsumkehr	107
Abb. 4.2-9	Schwankungsbereiche mehrerer Meßgrößen bei Variation verschiedener Drosselquerschnitte	108
Abb. 4.2-10	Typische Meßgrößen für Versuch 3B (Notspiegel) und Versuch 16 (Betriebsspiegel)	109
Abb. 4.2-11	Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 3B, 13 und 14 zur Darstellung des Einflusses der Anfangstemperatur 20, 35 und 50 °C	110
Abb. 4.3-1	Temperaturverlauf im Oberplenum (Versuch 3B)	111
Abb. 4.3-2	Temperaturverlauf im Oberplenum (Versuch 16)	112
Abb. 4.3-3	Temperaturschwankungen im Oberplenum (Versuch 3B)	113
Abb. 4.3-4	Temperaturverteilung in Umfangsrichtung für mehrere Meßstellen (MS) im Oberplenum	114
Abb. 4.3-5	Strömungsgeschwindigkeiten im Oberplenum und in den angrenzenden Räumen im stationären Zustand	115

# XI

		Seite
Abb. 4.4-1	Vergleich der in den Tauchkühlern insgesamt abgeführten Wärme	116
Abb. 4.4-2	Vergleich der Vordrosseltemperatur	117
Abb. 4.4-3	Vergleich des Kerndurchsatzes	118
Abb. 4.4-4	Vergleich der radialen Temperaturprofile zu verschiedenen Zeitpunkten für Versuch 3B	119
Abb. 4.4-5	Vergleich der radialen Temperaturprofile zu verschiedenen Zeitpunkten für Versuch 16	120
Abb. 4.4-6	Vergleich der radialen Temperaturprofile zu verschiedenen Zeitpunkten für Versuch 19	121
Abb. 4.4-7	Vergleich der primärseitigen Tauchkühlereintrittstemperatur	122
Abb. 4.4-8	Vergleich der primärseitigen Abkühlung am Tauchkühler	123
Abb. 4.4-9	Vergleich des primärseitigen Gesamtdurchsatzes durch die Tauchkühler	124
Abb. 4.4-10	Vergleich der radialen Temperaturdifferenz am Schildtank, Versuch 3B, $\tau = 5000$ sec	125
Abb. 4.4-11	Vergleich der Maximaltemperatur im Kreis	126
Abb. A - 1	Kerndurchsatz gesamt	A 18
Abb. A - 2	Tauchkühlerdurchsatz gesamt, primär	A 19
Abb. A - 3	Kernleistung gesamt	A 20
Abb. A - 4	Tauchkühlerleistung gesamt	A 21
Abb. A - 5	Kernaustrittstemperatur	A 22
Abb. A - 6	Temperatur am Eintritt des Tauchkühlers I	A 23
Abb. A - 7	Temperatur am Eintritt des Tauchkühlers II	A 24
Abb. A - 8	Temperatur vor der Kernmantelperforation	A 25
Abb. A - 9	Kerneintrittstemperatur	A 26
Abb. A -10	Maximaltemperatur im Kreislauf	A 27
Abb. A -11	Beispiel für ein Druckbild mit sämtlichen Meßwerten für den Zeitpunkt $\tau = 28\ 410$ sec	A 28
Abb. B - 1	Dimensionslose Geschwindigkeiten $U^+$ und Temperaturen $\theta^+$ als Funktionen der dimensionslosen Zeit T	B 16
Abb. C - 1	Anordnung der Kameras 1 - 6	C 13
Abb. C - 2	Bildmuster für die Meßstellen M1 bis M6 zur Sichtbarmachung der Strömung	C 14

## XII

### Tabellen

		Seite
Tab. 2.3-1	Brenn- und Brutelemente, Hauptdaten	14
Tab. 4.2-1	Übersicht über die Versuchsparameter	33
Tab. 4.2-2	Leistungsdaten für Versuchsreihe mit veränderter Brutmantelleistung	41
Tab. 4.3-1	Strömungsquerschnitte, Volumenströme und Geschwindigkeiten im OP	57
Tab. 4.4-1	Über den Kern gemittelte Aufheizspannen in °C	64
Tab. 4.4-2	Vergleich der nach Gl. (3) bestimmten und der tatsächlich festgestellten Aufheizspannen in °C	65
Tab. A - 1	Versuchsergebnisse - Leistungen	A 6
Tab. A - 2	Versuchsergebnisse - Durchsätze	A 7
Tab. A - 3	Versuchsergebnisse - Temperatur am Kernaustritt und Kerneintritt	A 8
Tab. A - 4	Versuchsergebnisse - Aufheizspanne im Kern	A 9
Tab. A - 5	Meßkanal- und CALAS-Adressennummern	A 10
Tab. A - 6	Eichkonstanten für Thermoelemente	A 15
Tab. A - 7	Meßgenauigkeit, Übersicht	A 17
Tab. C - 1	Bildfolge für Versuch 3B	C 6
Tab. C - 2	Bildauswertungsprotokoll für den Ref. Versuch	C 7
Tab. C - 3	Vergleich der Bildauswertung für die Versuche V3B, V7, V13, V16, V17	C 10

## 1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Für den Schnellen Natriumgekühlten Prototypreaktor SNR 300 liegt ein Notkühlfall dann vor, wenn beispielsweise folgende Störfälle, die als extrem unwahrscheinlich gelten, angenommen werden:

- Bruch der Rohrleitung am Druckstutzen einer Primärpumpe mit Versagen der Pumpenabschaltung,
- Ausfall der tertiären Wärmesenke infolge äußerer Einwirkungen.

Auf Grund des Störfallablaufs wird der Reaktor über das Schutzsystem abgeschaltet, so daß vom Notkühlssystem nur die Nachzerfallsleistung sicher abgeführt werden muß. Für die Notkühlung kann dann von folgenden Rand- bzw. Anfangsbedingungen ausgegangen werden:

Im zuerst genannten Störfall ist die Spiegelhöhe des Kühlmittels auf Notspiegelhöhe abgesunken, d. h., die Primärkreisläufe können nicht mehr als Umwälzschleifen wirksam werden, so daß die gesamte Notkühlung tankintern ablaufen muß. Die Durchflußgeschwindigkeit durch die Brenn- und Brutelementkanäle ist nahezu auf null zurückgegangen, der Kern ist gegenüber dem normalen Betriebszustand unterkühlt. Die Pumpen im Sekundärteil des Notkühlsystems werden erst mit einer Zeitverzögerung gegenüber dem Zeitpunkt des Störfalleintritts in Betrieb genommen.

Der zweite Störfall unterscheidet sich vom ersten in den Randbedingungen hauptsächlich dadurch, daß sich das Kühlmittel im Tank auf Betriebsspiegelhöhe befindet und die Primärkreisläufe noch intakt sind.

Die Konzeption des Notkühlsystems des SNR 300 basiert also im ersten Störfall auf einem tankinternen Naturumlauf, dessen Antriebskräfte aus den Gewichtsunterschieden des wärmeren Kühlmittels im Kernbereich und des kälteren Natriums nach den Tauchkühlern resultieren. Für den so zustande kommenden Kühlkreislauf mit einer nicht ganz einfachen Strömungsführung innerhalb des Reaktor-

tanks hat die Firma INTERATOM ein Rechenprogramm für ein theoretisches Modell erstellt (NOTUNG |1|), welches das thermodynamische Verhalten des tankinternen Kreislaufs beschreibt. Von den Gutachtern und Genehmigungsbehörden sind in Form einer Genehmigungsaufgabe geeignete Modellversuche gefordert worden, die eine Bestätigung der analytischen Berechnungen für die tankinterne Notkühlung erbringen sollen.

Nachdem die Gesellschaft für Kernforschung mbH. sich bereit erklärt hatte, die geforderten Modellversuche im Rahmen des SNR-bauzugehörigen Forschungs- und Entwicklungsprogramms zu übernehmen, entschied sie sich für ein schrittweises Vorgehen:

- Erarbeitung einer Durchführbarkeitsstudie mit einer speziellen Untersuchung zur Frage der Übertragbarkeit der Modellversuche auf die Reaktorverhältnisse,
- Erstellung einer Spezifikation für die Versuchseinrichtung und für die Durchführung der Experimente,
- Auslegung, Konstruktion, Erstellung und Erprobung der Versuchseinrichtung,
- Durchführung der Versuche und deren Auswertung.

Die Durchführbarkeitsstudie beinhaltet insbesondere eine kritische Wertung des theoretischen Modells zur Beschreibung der Notkühlvorgänge, eine Untersuchung zu Fragen der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus den Modellversuchen auf Reaktorverhältnisse sowie einen Vorschlag für die wesentlichen Merkmale und Auslegungsdaten der Experimente. Dabei mußte davon ausgegangen werden, daß nur Versuche mit einem verkleinerten Modell und mit Wasser als Kühlmittel infrage kamen. Das den Modellversuchen zugrunde gelegte Programm sollte eine breite Parameteruntersuchung berücksichtigen, um sowohl das Rechenprogramm NOTUNG bei verschiedenen Betriebszuständen als auch den Einfluß verschiedener Maßnahmen auf den Ablauf der Notkühlung experimentell direkt zu überprüfen. Die charakteristischen Auslegungsdaten sind nach einem Vorschlag und in Abstimmung mit der Firma INTERATOM konzipiert worden.

Die Untersuchung des Problems der Übertragbarkeit führte zu dem Ergebnis, daß selbst bei einer geometrisch völlig ähnlichen Ausführung der Versuchseinrichtung die bestimmenden dimensionslosen Kennzahlen bei einem mit Wasser durchgeführten Modellversuch um Größenordnungen verschieden sind von den entsprechenden Kennzahlen im Reaktor SNR 300 (vgl. hierzu Anhang B). Eine unmittelbare Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf den Reaktor im Sinne der Ähnlichkeitstheorie ist also nicht erreichbar. Dennoch wurde - in Übereinstimmung mit den Forderungen der Gutachter - die Durchführung der Modellversuche mit Wasser für sinnvoll gehalten, weil

- mit den Modellversuchen zunächst demonstriert werden kann, daß die Wärmeabfuhr durch freie Konvektion bei einer derart komplizierten Strömungsführung grundsätzlich möglich ist (vgl. Abschnitt 4.1.)
- unter der Voraussetzung, daß die Versuchsergebnisse hinreichend gut mit denen einer Vorausberechnung der Versuche mit Hilfe des theoretischen Modells übereinstimmen, gute Argumente für die Schlußfolgerung gegeben sind, daß das Rechenprogramm auch die Verhältnisse beim Notkühlvorgang im Reaktor richtig darstellt.

## 2. Versuchsaufbau

### 2.1. Aufgabenstellung, technische Hauptdaten

#### 2.1.1. Kurzbeschreibung des Modellaufbaues

Der Modellaufbau ist eine vereinfachte Nachbildung des Reaktortanks im Maßstab 1:3, beschränkt auf einen Ausschnitt von 120°. Alle Inneneinbauten, die einen merkbaren Einfluß auf die Strömungsführung haben könnten, wurden im Modell nachgebildet. Anhand der Abb. 2.1-1 sollen der Aufbau und die Strömungsführung kurz erläutert werden.

Die 178 Brenn- und Brutelementrohre werden durch den Kernmantel (1), die mit entsprechenden Bohrungen versehene Tragplatte (2) und die seitlichen, zum Teil durchsichtigen Flächen des Zylinderausschnittes örtlich fixiert. Über den Elementrohren befinden sich an bestimmten Stellen senkrecht angeordnete Plexiglasrohre (in Abb. 2.1-1 nicht dargestellt), analog den im Reaktor vorgesehenen Instrumentierungsrohren. Im Oberplenum (3) strömt das aus den Brennelementen kommende Wasser über die mit Durchbrüchen versehene Umlenkplatte (4), durch die Bohrungen des Schildtanks (5) zu den Tauchkühlern (6). In diesen sekundärseitig mit Leitungswasser gespeisten Tauchkühlern wird das Tankwasser abgekühlt, strömt im äußeren Ringraum (7) zwischen Schildtank und Behälterwand aufgrund der höheren Dichte nach unten und tritt durch die unteren Überströmbohrungen des Schildtanks in den inneren Ringraum (8) zwischen Schildtankwandung und Kernmantel ein. Hierin steigt das Wasser aufwärts bis zu den Perforationsbohrungen im Kernmantel (9), strömt durch diese hindurch und tritt auf gleicher Höhe seitlich in die dort mit Schlitzfenstern versehenen Brutelementrohre (10) ein. Durch die Brutelemente gelangt das Wasser, teilweise in Überwindung der durch die Brutelementheizung erzeugten Auftriebskraft, in das Mitteldruckplenum (11). Von hier strömt es durch die 4 parallel angeordneten Vordrosseln, die im Modell nur in einer Richtung, und zwar von oben nach unten, durchströmt



werden, durch die nachgeschalteten Strömungsmesser (12) und um den Gasblasenabscheider (13) zurück zu den Brennelementeingängen (14).

Abweichungen von diesem vorgezeichneten Strömungsweg könnten durch Bypassströmungen hervorgerufen werden, einmal direkt vom Oberplenum in die Brutelementrohre oder durch die Bohrungen in der Umlenkplatte bzw. über den Spalt zwischen Umlenkplatte und Kernmantel in den inneren Ringraum sowie durch den Spalt zwischen der umlaufenden Kühlerkonsole (15) und dem Schildtank, vorbei an den Tauchkühlern in den äußeren Ringraum.

#### 2.1.2. Technische Daten

Hauptabmessungen:

(Alle Höhenangaben beziehen sich auf Oberkante Tragplatte)

Mitte der Kern-Heizzone	716 mm
Oberkante Elementrohre	1233 mm
Notspiegelhöhe	1400 mm
Betriebsspiegelhöhe	2300 mm
Oberkante Behälter	2450 mm
Behälterboden	- 970 mm
Radius Behälterwand innen	1120 mm
Schildtankradius	800 mm
Kernmantelradius	485 mm
Radius des unteren Behälters	605 mm
Lochteilung in der Tragplatte	38,3 mm
Perforation im Kernmantel: 24 Bohrungen, 30 mm Ø Höhe Mitte Bohrung	1095 mm
Perforation der Umlenkplatte: 12 Bohrungen, 70 mm Ø und Ringspaltbreite Umlenkplatte/Kernmantel	17 mm
Ringspaltbreite Tauchkühlerkonsole/Schildtank:	17 mm

Perforation des Schildtanks:

Lochreihe	Höhe der Lochreihe mm	Anzahl der Löcher	Lochdurchmesser mm	Bemerkung
1	100	24	20	
2	942	24	20	
3	1283	12	20	
4	1370	12	20	
5	1890	12	45	Nur bei Betriebs- spiegel- wirksam
6	2000	12	45	
7	2110	12	45	

Elementdaten:

Elementrohrabmessung	38 x 1	mm
Heizstabdurchmesser	8,5	mm
Heizstabteilung	12	mm
Heizstäbe + Blindstäbe pro Bündel	7	
beheizte Länge	600	mm
max. Kern-Heizleistung (incl. Brutmantelleistung)	60	kW
max. spez. Heizstableistung	1	W/cm <sup>2</sup>

Gruppeneinteilung der Brenn- und Brutelemente (vergl. Abb. 2.3 - 14):

- Gruppe 1, 38 Elemente mit je 7 Heizstäben
- Gruppe 2, 26 Elemente mit je 7 Heizstäben
- Gruppe 3, 17 Elemente mit je 3 Heizstäben und 4 Blindstäben
- Gruppe 4, 19 Elemente mit je 1 Heizstab und 6 Blindstäben
- Gruppe 5, 21 Elemente mit je 1 Heizstab und 6 Blindstäben
- Gruppe 6, 57 Elemente ohne Heiz- und Blindstäbe.

Die Elemente der Gruppe 4 bis 6 sind mit einer Perforation im Kopfteil versehen.

Tauchkühlerdaten (vgl. Abb. 2.2-11):

Anzahl	2
Positionen	30° und 90°
Tauchkühleroberkante	1383 mm
Tauchkühlerdurchmesser	263 mm
Rohranzahl	333
Rohrabmessungen (Dmr. x Wanddicke x Länge)	11 x 0,5 x 200 mm

### 2.1.3. Entwicklungsschwerpunkte, notwendige Vorversuche

Neben der Erfassung von Temperatur-, Durchfluß- und Leistungsmeßwerten war ein Hauptaugenmerk auf die visuelle Darstellung des Strömungsverlaufes zu richten. Im Oberplenum und auch vor der Perforation des Kernmantels sollten der Strömungsverlauf optisch gut kontrollierbar und außerdem noch Rückschlüsse auf die jeweils herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten möglich sein. Es war also erforderlich, ein für den vorliegenden Fall geeignetes Verfahren zur Sichtbarmachung der Strömung zu finden, wobei gleichzeitig eine genaue zeitliche Zuordnung zu den übrigen Meßwerten gegeben sein mußte. Die Vorversuche hierzu sind in Abschnitt 2.2.1. beschrieben.

Die der Vorausrechnung zugrundegelegten Druckverlustannahmen im Modell betragen z. B. für die Brennelemente der Gruppe 1 nur ca. 0,5 mm WS und für die Brutelemente der Gruppe 3 (Gruppeneinteilung siehe Abb. 2.3 - 14) sogar nur ca. 0,03 mm WS. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt mußte also auf die Meßtechnik kleiner Druckdifferenzen im Bereich von  $10^{-2}$  bis 10 mm WS gelegt werden, da die wirklich vorliegenden Druckverlustkennwerte der Modellbrennelemente und auch die der Vordrosselstrecke Eingangswerte der eigentlichen Vorausberechnung der Modellversuche bildeten.

In Vorversuchen unter modellähnlichen Bedingungen waren ferner die Heizstabtemperaturen im Brennelementbündel in Abhängigkeit von der Wassereintrittstemperatur und der Durchsatzmenge jeweils

bis zum Siedebeginn zu ermitteln. Hierzu mußte ein separater Konvektionsversuchskreislauf aufgebaut werden (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Für die Bestimmung des Kühlmittelmengenstromes durch den Kern und die erste Brutelementreihe boten sich Durchflußmessungen an den 4 Vordrosselstellen im Mitteldruckplenum an. Hier durfte der Druckabfall Vordrossel plus Meßgerät rechnerisch etwa 0,4 mm WS betragen, d. h. auch hierzu waren Vorversuche für die Druckabfallmessung an den Originaleinbauteilen in getrennten Versuchseinrichtungen erforderlich (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Die beim Einschalten der Tauchkühler aus dem System abgeführte Leistung bildete einen wesentlichen Eingabewert für das Programm zur Beschreibung des Notkühlvorganges. In einer den eigentlichen Spezifikationsversuchen vorangehenden Versuchsreihe am fertigen Modellaufbau wurde die Tauchkühlercharakteristik ermittelt.

## 2.2. Vorversuche

### 2.2.1. Strömungsdarstellung und photographische Registrierung

In einer vergleichenden Studie wurden die bislang bekannten Verfahren zur Sichtbarmachung von Strömungen betrachtet und einige aussichtsreiche Methoden in einem Versuchsstand unter ähnlichen Bedingungen, wie sie beim späteren Modellbetrieb zu erwarten waren, erprobt. Aus der Palette dieser Verfahren, wie z. B. Zugabe von gasförmigen oder festen Stoffen, dem Wasserstoffblasenverfahren, dem Verfahren der elektrochemischen Farbausstoßung oder den Schlierenverfahren, wurde die Zugabe von flüssigen, gefärbten Stoffen ausgewählt. Als Farbstoff wurde Rhodamin B und Methylen Blau im Verhältnis 1:200 in Wasser gelöst. Um Fehlmessungen zu vermeiden, mußte die Farblösung in Form von feinen Fäden drall- und möglichst geschwindigkeitslos, mit annähernd gleicher Temperatur wie das Strömungsmedium selbst, an geeigneter Stelle in den Modellbehälter eingebracht werden.

In der Abb. 2.2-2 ist die Ausführung der Einspritzdüse zu erkennen, die mit einer keramischen Feinfiltereinlage versehen ist, um möglichst geschwindigkeitslosen Farblösungsaustritt zu erreichen. Die Sinkgeschwindigkeit der Farblösung beträgt etwa 0,3 cm/min, die Diffusionsgeschwindigkeit ungefähr 1 cm/d.

Zur Feststellung der Strömungsgeschwindigkeit nach Richtung und Größe mußte das Entstehen der Streichlinien bei dreidimensionalen Strömungen in zwei zueinander senkrecht stehenden Ebenen aufgenommen werden. In beiden Ebenen ermöglichte ein mit photographiertes Raster, die zeitlichen Veränderungen der Streichlinien zu erfassen. Mit einem Zeitintervall zwischen zwei Aufnahmen von 1,5 s wurden synchron Einzelbilder des Stromfadenverlaufs aufgenommen, wobei als Beleuchtung Elektronenblitze verwendet wurden, um eine örtliche Aufwärmung des Strömungsmediums zu vermeiden.

#### 2.2.2. Leistungsversuche am Heizstabbündel und Druckverlustmessungen an der Vordrosselmeßstrecke

Wie schon in Kapitel 2.1.3. erwähnt, wurden Funktionsversuche mit einem Heizstabbündel gemäß Abb. 2.2-3 in einem dem Modellaufbau analogen Konvektionskreislauf (Abb. 2.2-4) durchgeführt. Der Aufbau der Brenn- und Brutelemente ist in Kapitel 2.3.2. näher beschrieben. Dem in einem Glasrohr (51) als Elementkasten eingebrachten Bündelelement (50) war mit einer Mittenhöhendifferenz von 160 mm ein Rohrschlangenkühler gegenübergeschaltet. Die Wassertemperaturen im Kreislauf wurden an vier Stellen, nämlich kurz vor der Drosselscheibe (22), am Austritt aus dem Bündel (12) sowie vor und nach dem Kühler gemessen. Die Drosselscheibe am Elementfuß wurde nacheinander mit 1, 2, 4, 8 und 15 Bohrungen von 4 mm  $\varnothing$  versehen und bei jeweils 4 Heizstufen (entsprechend einer Oberflächenbelastung von 0,94, 0,61; 0,38 und 0,21 W/cm<sup>2</sup>) wurde die Eingangstemperatur zum Bündelelement von 20 °C solange angehoben, bis Siedebeginn in der oberen Bündelzone erreicht war.

Im Diagramm Abb. 2.2-5 ist die Grenzheizflächenbelastung für ein mit 7 Heizstäben ausgestattetes Bündelelement abhängig von der Wassereintrittstemperatur und der Drosselbohrungszahl angegeben, bei der noch kein Sieden eintritt.

Um notwendige Eingabedaten für die Vorausberechnungen der Modellversuche durch das Programm NOTUNG zu erhalten, mußten Druckverlustkennwerte für das Bündelelement und die Vordrosselmeßstrecke, bestehend aus der Vordrossel und dem Durchflußmeßgerät, ermittelt werden.

Dazu wurde die in der Abb. 2.2-6 dargestellte Meßanordnung entwickelt, mit deren Hilfe Druckunterschiede bis herab zu  $10^{-2}$  mm WS erfaßt werden können. Die Höhenlage der beiden Schwimmer in den Behältern A und B werden in der skizzierten Anordnung mit induktiven Weggebern abgetastet und über eine Differenzschaltung an einem Digitalvoltmeter sichtbar gemacht.

Aus der Abb. 2.2-7 ist der Versuchsstand für die Druckverlustmessungen an der Vordrosselstrecke zu ersehen. An das der Drosselblende nachgeschaltete Durchflußmeßgerät wurde versuchsweise ein Diffusor mit einem Öffnungswinkel von  $6^\circ$  angeflanscht, der, wie aus dem Diagramm Abb. 2.2-8 zu entnehmen ist, eine Druckverlustverminderung von im Mittel 27 % erbrachte.

## 2.3. Ausführung der Versuchseinrichtung

### 2.3.1. Reaktortank-Modellbehälter

Der im Kapitel 2.1.1. bereits grundsätzlich beschriebene Modell-aufbau ist auf den Abb. 2.2-9 und 2.2-10 in seiner technischen Ausführung zu sehen, und zwar getrennt in Oberteil und Unterteil, wobei die in Fußbodenhöhe liegende Tragplatte der Brenn-

elemente als Trennebene anzusehen ist. Die Stirnflächen des Modellbehälters am 120°-Ausschnitt sind teilweise mit Scheiben aus Plexiglas Typ 209 ausgeführt, im unteren Bereich sind die runden Schauöffnungen aus Festigkeitsgründen mit 19 mm starken Spiegelglas-scheiben versehen. Auch von der Umfangseite des Behälters aus gestatten Schauöffnungen die Beobachtung der Konvektionsströmung im Bereich des Tauchkühlers und dessen senkrechte Verlängerung bis zur Tragplatte sowie parallel dazu entlang der Symmetrieebene.

Die ebenfalls aus Plexiglas ausgeführte Umlenkplatte und der durchgehende Schildtank ermöglichen die direkte Sicht auf den interessierenden Strömungsbereich im Oberplenum und vor den Perforationsbohrungen des die Brenn- und Brutelemente seitlich fixierenden Kernmantels.

Die beiden in die Kühlerkonsole eingesetzten Tauchkühler sind auf der Sekundärseite quer angeströmte Geradrohrkühler mit je 333 Rohren von 11 x 0,5 mm (Abb. 2.2-11). Auf der primärseitigen Einlaufseite können jeweils 166 Rohre durch eine Abdeckung verschlossen werden. Die Kühler sind dicht in die Ausschnitte der mit der äußeren Behälterwand verschweißten Kühlerkonsole montiert, lediglich zwischen Schildtank und Kühlerkonsole befindet sich in Umfangsrichtung ein Spalt von 17 mm Breite. Dieser Spalt kann durch eine anschraubbare Dichtungsleiste verschlossen werden, so daß der äußere Ringraum (siehe auch Abb. 2.1-1) in einen unteren und oberen Bereich trennbar ist, die dann miteinander nur über die Tauchkühler verbunden sind.

Im Behälterbereich unterhalb der Tragplatte ist, abgeteilt durch einen Teil des Gasblasenabscheiders und der Vordrosselplatte, das Mitteldruckplenum angeordnet, an das alle Brutelemente mit Ausnahme der Elemente der Reihe 9 angeschlossen sind. In Verlängerung der Vordrosseln befinden sich vier Strömungsmesser, die es ermöglichen, den Mengenstrom durch die Kernbrennelemente zu erfassen.

Die elektrischen Zuleitungen zu den Brenn- und Brutelementen erfolgen durch auf die Stirnflächen des unteren Behälterteiles montierte Durchführungsplatten im Inneren von Wellrohren.

An die beiden seitlichen Schnittflächen des Modellbehälters sind im oberen Behälterteil von innen durchgehende, ebene Plexiglasscheiben angelegt, die einen ungestörten Strömungsverlauf sicherstellen. Gleichzeitig werden durch an sie angelegte Gummilippendichtungen ungewollte Kurzschlußströmungen zwischen den einzelnen Ringräumen verhindert.

Die außerhalb dieser Plexiglasscheiben liegenden Sichtscheiben an den beiden Schnittflächen werden durch eine vorgeschraubte Trägerkonstruktion gegen die Belastung durch den Wasserdruck abgestützt. Die Trägerkonstruktion selbst ist über einen Querverband mit der äußeren Behälterwand verbunden. An die Träger sind, wie später noch näher erläutert wird, die Kameras zur Aufnahme der Strömungsbilder montiert.

Über dem Kernbereich sind auf der Höhenkote + 2415 mm an einer Segmentplatte 11 Rohre 60 x 5 mm entsprechend den Instrumentierungsrohren am Reaktor angeordnet, die bis 5 mm über die oberen Enden der Brenn- und Brutelementrohre herabreichen. Die Rohre sind am unteren Ende offen und sollen im Modell den eventuellen Einfluß der Instrumentierungsrohre auf die Konvektionsströmung simulieren.

### 2.3.2. Brenn- und Brutelementaufbau

Bei der Lochteilung der Tragplatte für die Elementfußaufnahme wurde mit der Maßverkleinerung von 114,6 mm auf 38,3 mm der Verkleinerungsmaßstab 1:3 eingehalten, die runde Elementrohrausführung 38 x 1 mm weicht jedoch von der hexagonalen Elementkastenform (SW 110 mm) des SNR 300-Brennelementes ab, wie auch der Heizstabbündelaufbau mit maximal 7 Heizstäben von 8,5 mm  $\emptyset$  nicht der Geometrie des Originalelementes entspricht.



Der Aufbau des Modellstabbündels ist aus der Abb. 2.2-3 zu ersehen.

In das 1233 mm lange Elementrohr (1) ist das Heizstabbündel (2) mit Fußstück (3) und Drosselscheibe (4) von oben eingeschoben. Durch die Drosselscheibe wird die Höhenlage des Bündels fixiert, und gleichzeitig verhindern die Rundschnurringe unkontrollierbare Leckströme, die sich sonst um die je nach Elementgruppe in Anzahl und Größe verschiedenen Drosselbohrungen in der Scheibe einstellen könnten. Die Heizstäbe (8,5 mm Ø) sind in das Fußstück eingelötet und mit 3 wabenförmigen Abstandshaltern (8) gegeneinander und gegenüber dem Mantelrohr abgestützt. Die eigentliche Heizzone beschränkt sich auf eine Länge von 600 mm des insgesamt etwa 900 mm langen Heizstabes. Am oberen Ende des Stabes ist das kalte Ende der Widerstandswendel mit dem Mantel verschweißt, so daß die elektrische Zuführung, die über die Durchführung (5) und den Wellenschlauch (6) zum Sammelpunkt der parallel geschalteten Heizstäbe führt, nur einfach ausgeführt werden mußte. Aus Sicherheitsgründen wurde jedoch das Massekabel bis zum Bündelfuß mit durchgezogen.

Bei den Elementen der Gruppe 3, 4 und 5 wurden die fehlenden Heizstäbe durch Blindstäbe ersetzt. Die Brutelemente der Gruppe 6 haben an Stelle des Bündels nur einen Einzelstab im Zentrum, an dem die Drosselscheibe befestigt ist.

Alle Brutelementrohre mit Ausnahme der Gruppe 3 (siehe Anordnung der Elemente Abb. 2.3-14) sind unmittelbar über dem Stabbündel mit einer sechsfachen seitlichen Schlitzperforation von 10 x 25 mm versehen (7).

Die technischen Daten der Elemente sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 2.3-1: Brenn- und Brutelemente, Hauptdaten

Gruppe	Brenn- elemente		Brutelemente			
	1	2	3	4	5	6
Elementanzahl	38	26	17	19	21	57
Heizstäbe pro Element	7	7	3	1	1	0
Durchmesser der Drosselbohrung (mm)	4	4	2	2	3	3
Anzahl der Drossel- bohrungen	6	5	10	20	6	2

### 2.3.3. Instrumentierung und Heizgruppeneinteilung

#### 2.3.3.1. Meßstellenanordnung, Meßgeräte

Am Modellaufbau wurden insgesamt 125 Meßstellen festgelegt, deren Meßwerte mit Hilfe einer Datenerfassungsanlage registriert und für die spätere Auswertung herangezogen wurden. Davon unabhängig wurden 40 weitere Meßstellen angeordnet, deren Meßwerte direkt angezeigt und zum Teil über Schreiber aufgezeichnet wurden. Sie dienten einmal zur Übersicht über den Versuchsablauf und hier besonders zum Erkennen von Langzeittendenzen, zum anderen bildeten sie für die Versuchsdurchführung die notwendige Absicherung der Hauptmeßwerte, z. B. bei einem Ausfall der Datenerfassungsanlage während eines Versuches.

Eine Meßstellenübersicht mit Angabe der Meßkanalnummern kann aus den Abb. 2.3-12 und 2.3-13 gewonnen werden sowie aus der Tabelle A-5 im Anhang A.

Auf folgende Details sei noch besonders hingewiesen:

#### Temperaturmeßstellen im Oberplenum

Um das Temperaturfeld im Oberplenum ausmessen zu können, wurde im inneren Bereich des Schildtanks bis zum Modellzentrum hin ein sogenannter Meßrechen angeordnet, der, motorisch angetrieben, den gesamten 120°-Ausschnitt in einer Zeit von 8 min 50 sec überfahren kann. Auf acht radialen Positionen (siehe Abb. 2.3-13) sind senkrecht übereinander an Rohren 8 x 1 mm je sieben Temperaturmeßstellen angebracht, jeweils auf den Höhenkoten 1243 mm, 1293 mm, 1343 mm, 1393 mm, 1700 mm, 2000 mm und 2290 mm über Oberkante Tragplatte. Ein Winkelkodierer zeigt die jeweilige Stellung des Meßrechens an.

#### Axiale Temperaturverteilung im Brenn- und Brutelement

Es wurden Thermoelemente (TE) zur Messung der Ein- und Austrittstemperaturen an 8 Elementen (jeweils 4 Brut- und Brennelemente) angeordnet, welche in oder nahe der 30°-Ebene des Modells positioniert sind.

Zusätzlich wurden an den Heizstabbündeln der Brennelemente 3/2 und 3/4 5 Temperaturmeßstellen verteilt, um das axiale Temperaturprofil erfassen zu können. Die TE sind an den Abstandshaltern befestigt und ragen 10 mm frei in den Spalt zwischen zwei benachbarte Heizstäbe. Diese beiden Elemente sind daher mit 5 Abstandshaltern ausgestattet, gegenüber 3 bei den nichtinstrumentierten Elementen. (Für den Druckverlust über das Bündelelement ist diese Maßnahme, wie Kontrollversuche ergeben haben, ohne Bedeutung, da der bestimmende Druckverlust in den Bohrungen der Drosselscheibe erzeugt wird.)

Die Höhenkoten der TE, bezogen auf Oberkante Tragplatte, sind 306 mm, 496 mm, 696 mm, 896 mm und 1021 mm. Die Mitte der 600 mm langen Heizzone liegt auf der Kote 716 mm.

Diese beiden Elemente besitzen ferner noch je 2 TE, die direkt an die Heizstäbe am oberen Ende des aktiven Heizstabbereiches angelötet sind. Sie dienen dazu, durch Überwachung eines entsprechend groß gewählten Temperaturabstandes ein Sieden an den Stäben mit Sicherheit ausschließen zu können.

#### Durchflußmessung an den Vordrosseln

Wegen des geringen zulässigen Druckverlustes in den Vordrosselstrecken (der einzigen Stelle, an der der gesamte Kerndurchsatz erfaßt werden kann,) schieden die üblicherweise eingesetzten Mengenstrommeßgeräte, wie Turbinendurchflußmesser u. a., an dieser Stelle von vornherein aus. Für die Messung des Kühlmitteldurchsatzes durch den Kernbereich und die Brutelemente der Reihe 9, die ebenfalls im Kernbereich liegen, wurden deshalb hier magnetische Durchflußmesser eingesetzt. Das Meßsystem besteht aus einem Durchflußgeber, der komplett in den Ringraum zwischen Gasblasenabscheider und äußerer Behälterwand eingebaut ist, und einem außerhalb liegenden Meßumformer. Das Meßprinzip basiert auf dem Induktionsgesetz. Mit Hilfe zweier Magnetspulen und lamellierter Eisenkerne wird senkrecht zur Strömungsrichtung ein Magnetfeld erzeugt. Durch die Bewegung des leitfähigen Kühlmittels entsteht wiederum senkrecht zur Strömung eine Spannung, die proportional der Strömungsgeschwindigkeit ist. Diese Spannung wird mit Hilfe zweier in die Wandung eingebauter Elektroden abgenommen und im Meßumformer zu einem Meßsignal verarbeitet. Im Meßrohr selbst befinden sich keine druckverlusterzeugenden Einbauten. Zur Messung des Druckverlustes vergl. Kapitel 2.2.2.

### Durchflußmessung auf der Sekundärseite der Tauchkühler

Die hier im Kühlwasserabflußstrom eingebauten Turbinendurchflußmesser erzeugen im ausgewählten Meßbereich von 20 bis 200 l/min eine entsprechende Impulsrate von 0 bis 500 Imp/l, die verstärkt und umgeformt einen frequenzanalogen Ausgangsgleichstrom von 0 bis 20 mA liefert.

### 2.3.3.2. Heizgruppeneinteilung, Heizungsregelung

Um die örtliche Heizbelastung im Modell dem radialen Leistungsprofil des Reaktors anzunähern, wurden die Brenn- und Brutelemente in Gruppen mit verschiedenen Heizleistungsfaktoren eingeteilt (Abb. 2.3-14). Innerhalb jeder Gruppe kann die Elementbündelleistung als Summe der im Bündel vorhandenen Einzelstäbe zwischen 0 und 160 W je Heizstab stufenlos gewählt werden. Damit ist es möglich, unterhalb der in der Abb. 2.3-15 angegebenen Grenzlinie jedes radiale Leistungsprofil einzustellen.

In den Heizgruppen 1 bis 3 ist jedes Heizstabbündel über einen eigenen Automaten abgesichert, in den Gruppen 4 und 5 sind jeweils 10 Bündel zusammengefaßt. Auf einfache Weise lassen sich so die Widerstandswerte der Bündel und damit die Funktionsfähigkeit der Heizstäbe überprüfen.

Da für die Leistungsregelung der Heizung eine Thyristorschaltung mit Phasenanschnittsteuerung wegen der dadurch erzeugten Störspannungen nicht infrage kommt, wurde die sogenannte Paketsteuerung gewählt, d. h. der Schaltzeitpunkt der Thyristoren liegt im Nulldurchgang der Netzspannung. Der damit verbundene impulsartige Betrieb machte ein Integrationsglied für die Leistungsbestimmung erforderlich. Der hierbei ermittelte Leistungswert wird mit dem am

Potentiometer eingestellten Sollwert verglichen und bei einer festgestellten Differenz das Taktverhältnis Einschaltzeit/Ausschaltzeit entsprechend korrigiert.

Zwei den Heizgruppenpotentiometern übergeordnete Potentiometer ermöglichen die sprunghafte Veränderung aller vorgewählten Gruppenleistungswerte auf einen beliebig einstellbaren Prozentsatz zwischen 0 und 100 %, wobei der prozentuale Anteil jeder Gruppe an der Gesamtleistung unverändert bleibt.

Aus der Abb. 2.3-16 können Einzelheiten der elektrischen Schaltung der Heizbündel entnommen werden.

#### 2.3.3.3. Meßgenauigkeit

Sämtliche Temperaturmeßstellen, deren Meßwerte durch die Datenerfassungsanlage registriert werden, wurden aus Gründen der einheitlichen Erfassung mit Ni-Cr-Ni-Thermoelementen von 1 mm Manteldurchmesser ausgestattet. Als Temperaturvergleichsstellen wurden zwei Eispunktthermostate mit einer Badkonstanz von  $\pm 0,03^\circ$  eingesetzt.

Alle TE wurden einzeln bei den Temperaturen 20, 40, 60 und 80 °C geeicht und die Eichkurve mit einer Näherungsfunktion der Art

$$a \cdot x + b = y$$

beschrieben, mit  $a$  [°C/mV] und  $b$  [°C] als Konstanten,  $x$  [mV] der gemessenen Thermospannung und  $y$  [°C] der zu ermittelnden Meßstellentemperatur. Die Annäherung an die Eichkurve mit einer Geradenfunktion ist in dem relativ engen Betriebstemperaturbereich zulässig.

Aus technischen Gründen muß die Thermospannung verstärkt werden (Verstärkungsfaktor 250), bevor sie digitalisiert zur Datenerfas-

sungsanlage übertragen wird. Damit ergibt sich folgende Beziehung:

$$x \cdot 250 \cdot \left( \frac{a}{250} + b \right) = y$$

digitalisierter Meßstellenwert	Umrechnungskonstante bei der Daten- erfassungsanlage	Meßstellen- temperatur
-----------------------------------	--	---------------------------

Die für die einzelnen Meßkanalnummern gültigen Konstanten a, b und  $\frac{a}{250}$  sind aus der Tabelle A-6 im Anhang A zu entnehmen. Unter Einrechnung der Digitalisierungsabrundung ist mit einer maximalen Temperaturunsicherheit von  $\pm 0,3$  °C zu rechnen.

Analoge Beziehungen wurden aus den Eichkurven für die Durchflußmesser im Sekundärkreis der Tauchkühler und der streng proportionalen Beziehung zwischen Geberspannung und elektronischer Wirkleistung aufgestellt.

Nach Angaben des Herstellers kann **beim Durchflußmesser an den Vordrosseln** für den jeweiligen zeitlichen Meßwertverlauf mit einem Meßfehler von  $\pm 3$  % vom Skalenendwert (12 l/min) gerechnet werden. Nimmt man etwa 3,6 l/min als mittlere Durchflußmenge für alle Versuche an, dann gelten für die erzielte Meßgenauigkeit die geräteabhängigen Werte der Tabelle A-7. Wegen einer für alle vier Meßgeräte unterschiedlichen und zeitlich nicht reproduzierbaren Nullpunktsdrift, die sich besonders gegen Versuchsende auswirkt, muß jedoch mit einer größeren Unsicherheit für den Absolutbetrag des Durchsatzes gerechnet werden. Sie kann für die einzelne Meßstelle bis zu 10 % der oben angenommenen mittleren Durchflußmenge betragen. Der tatsächliche Fehler für den Absolutbetrag des Gesamtdurchsatzes liegt jedoch unter 10 %, da sich die Einzelfehler zum Teil ausgleichen.

Die Genauigkeit der elektronischen Leistungsmessung ist aufgrund der Art der Leistungsregelung auf  $\pm 2,5$  % beschränkt.

Die Winkelstellung des Meßrechens im 120°-Ausschnitt des Oberplenums läßt sich mit einer Meßgenauigkeit von  $\pm 2$ ° angeben.

#### 2.3.4. Meßwerterfassung

Die geforderte Aufnahmefrequenz von 1 Hz je Meßstelle machte bei insgesamt 125 Meßstellen den Einsatz einer elektronischen Meßwerterfassungs- und Registriereinrichtung erforderlich. Das bei der Datenverarbeitungszentrale des Kernforschungszentrums bestehende Datenerfassungs- und Steuerungs-System CALAS 69/4 bot sich für die Meßwertspeicherung an, zumal von dem System neben der reinen Meßdatenerfassung eine Meßwertaufarbeitung sowie Steuer- und Kontrollfunktionen übernommen werden konnten.

Der Anschluß der CALAS-Meßdatenerfassung erfolgt über ein versuchsstandspezifisches Meßwertabfrage-System, aus dem der einzelne Meßwert digitalisiert über eine Übertragungseinheit und eine direkte Kabelverbindung in den sogenannten Experimentierabwickler (Exp.-Rechner TR 86) eingegeben wird. Im Hintergrund zu dieser Meßdatenerfassung stehen zeitunkritische Service-Programme bereit, die dem Steuerprogramm notwendige Informationen zur Verfügung stellen und zu einer vorläufigen Auswertung der erfaßten Rohdaten dienen. Der Verkehr mit dem CALAS-System erfolgt über ein am Versuchsstand aufgestelltes Datensichtgerät mit Tastatur; der Datenfluß ist aus dem Blockschaltbild der Abb. 2.3-17 ersichtlich.

Eine Reihe von Gruppendarstellungen von Meßwerten in Balkendiagrammform kann mit den gerade aktuellen Meßwerten auf dem Sichtgerät dargestellt werden. Ferner kann der zeitliche Verlauf einiger Meßwerte oder bestimmter, bereits durch Rechenoperationen miteinander verknüpfter Meßgrößen in Kurvendarstellung über die letzten 26 min des Versuchsgeschehens abgerufen und sichtbar gemacht werden. Beispiele hierfür sind in Abb. 2.3-18 dargestellt.

Alle Meßwerte und Rechengrößen, einschließlich kennzeichnender Angaben, wie Datum, Versuchszeit, Dimensionen u. a., sind zu jedem Versuchszeitpunkt tabellarisch abrufbar und können mit einer photographischen Registriereinrichtung unabhängig von der Bandspeicherung festgehalten werden. Die Abb. 2.3-18 zeigt eine



Auswahl solcher Aufnahmen sowie ein Bildausschnitt des Steuerstandes.

Alle erfaßten Meßwerte und errechneten Daten eines Versuches werden auf ein gesondertes Band abgespeichert, das zu einem späteren Zeitpunkt durch ein spezielles Programm ausgewertet werden kann (siehe Anhang A).

Die vom CALAS-System erfaßten Meßwerte und errechneten Größen sind mit ihren zugehörigen Meßkanal- und Adressennummern aus der Tabelle A-5 im technischen Anhang A zu entnehmen.

#### 2.3.5. Registrierung der Kühlmittelströmungen

Die Strömung des Kühlmittels wird nach der im Kapitel 2.2.1. angegebenen Methode dargestellt und die Strömungsgeschwindigkeit an bestimmten Punkten durch Auswertung des aufgenommenen Bildmaterials nachträglich ermittelt.

Zu diesem Zweck sind insgesamt 7 Kameras, System Contarex SE mit 17 m Filmkassetten und motorischem Antrieb, am Modell angebracht, die durch die Sichtscheiben bzw. von oben die Strömungsfäden aus zwei senkrecht aufeinanderstehenden Ebenen photographieren (siehe auch Abb. 2.2-9). Eine elektronische Steuerung der Kameras und des Blitzgenerators mit 3 Blitzlampen ermöglicht eine vorwählbare Aufnahmefolge zwischen 1 und 999 sec, wobei die Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelaufnahmen zwischen 0,1 bis 9,9 sec eingestellt werden können. An einer Zähleinheit können Aufnahmedauer, Aufnahmeintervall und die laufende Bildnummer abgelesen werden.

Eine Kamera photographiert taktgleich einen Ausschnitt des Steuerstranges, auf dem neben den erwähnten Aufnahmedaten die an das Meßwertfassungssystem CALAS übermittelte Versuchszeit und versuchsspezifische Angaben, wie Versuchsnummer u. a., zu sehen sind.

Damit ist für eine Bildserie von 6 Filmen mit einer Aufnahmeanzahl von jeweils maximal 400 Aufnahmen eine genaue Zuordnung zu den übrigen auf Band gespeicherten Meßwerten des Versuches gegeben. In einem Bildbetrachtungsgerät, in dem die 7 Filmrollen eines Versuches zeitrichtig nebeneinander eingespannt und abgespult werden können, lassen sich dann das Strömungsbild beurteilen und die Strömungsgeschwindigkeiten durch Ausmessen der farblich gekennzeichneten Strömungsfäden bestimmen.

Das Hauptgewicht der Strömungsbeobachtung wurde auf den Bereich des Oberplenums und die Umgebung der Kernmantelperforation gelegt. Im einzelnen sind folgende Farbeinspritzdüsen im Modellaufbau angeordnet (vgl. auch Anhang C):

- 6 übereinanderliegende Düsen im Oberplenum über dem Kernmantel,
- 6 Düsen vor dem Eintritt in die Kernmantelperforation,
- 6 nebeneinanderliegende Düsen im Oberplenum über dem Kernmantel,
- 6 nebeneinanderliegende Düsen im Oberplenum über der 9. Elementreihe,
- 6 nebeneinanderliegende Düsen im äußeren Ringraum oberhalb des Spaltes zwischen Schildtank und Kühlerkonsole,
- 3 übereinanderliegende Düsen dicht am Tauchkühler,
- 2 nebeneinanderliegende Düsen im äußeren Ringraum in Höhe der untersten Bohrungsreihe im Schildtank.

Nähere Einzelheiten zur Strömungsbeobachtung können dem Anhang C, Abschnitt C3, entnommen werden.

### 3. Versuchsdurchführung

#### 3.1. Versuchsplan

In einem breiten Versuchsprogramm von insgesamt 25 Einzelversuchen wurden die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Funktion der Naturkonvektionskühlung untersucht. Im Versuchsplan Abb. 3.1-1 sind alle charakteristischen Daten tabellarisch zusammengestellt.

Es wurde ein den SNR 300-Verhältnissen möglichst nahekommender Referenzversuch definiert (Versuch Nr. 3), der mit einem Anfangswert der Heizleistung von 60 kW die Basiseinstellung für die übrigen Parameterversuche bildete. Der Versuchsablauf dieses Referenzversuches wird als Beispiel weiter unten näher beschrieben.

In der folgenden kurzen Zusammenstellung sind die Hauptmerkmale der einzelnen Versuche nochmals aufgelistet:

Versuch Nr.	1A, 1B	:	Anfangswert der Heizleistung 20 kW
	2	:	Anfangswert der Heizleistung 40 kW
	3A, 3B	:	Anfangswert der Heizleistung 60 kW, Notspiegelhöhe 1400 mm (Referenzversuch)
	4	:	Heizleistung 30 kW zeitlich konstant
	5	:	Tauchkühler 2 abgeschaltet
	6	:	Tauchkühler 1 abgeschaltet
	7	:	Tauchkühler 1 und 2 halb abgedeckt
	8	:	Tauchkühler 1 und 2 abgeschaltet
	9A,9B+10	:	Querschnittveränderung in der Perforation der Umlenkplatte
	11 + 12	:	Veränderung des Verhältnisses Kernleistung zu Brutmantelleistung
	13 + 14	:	Veränderung der Anfangstemperatur, Anfangswert der Heizleistung 20 bzw. 9 kW
	15	:	Bypass-Strömung zwischen Schildtank und Tauchkühlerkonsole unterbunden
	16	:	Betriebsspiegelhöhe 2300 mm
	17	:	Druckverlustbeiwert der Vordrosseln erhöht
	18	:	Veränderung der Schildtankperforation

- Versuch Nr. 19 : Anlauf gegen vorgeheizten Brutmantel  
20 : Verlegung der untersten Schildtank-  
perforation auf etwa Kernmitte  
21A, 21B : Änderung der Leistungsverteilung im Kern,  
Anfangswert der Heizleistung 40 kW.

### 3.2. Versuchsabwicklung

#### 3.2.1. Versuchsvorbereitung

Für eine Füllung des Modellbehälters mußten etwa 2,5 m<sup>3</sup> Wasser bei Notspiegelhöhe und 3,7 m<sup>3</sup> bei Betriebsspiegelhöhe in einer gesonderten Wasseraufbereitungsanlage behandelt werden.

Die geforderte Temperaturkonstanz des isothermen Anfangszustandes im Modellbehälter von  $\pm 1$  °C bei 20 °C,  $\pm 1,5$  °C bei 35 °C und  $\pm 2$  °C bei 50 °C machte neben einer im Aufbereitungsbehälter eingebauten Heizung den Einsatz einer Umwälzpumpe notwendig. Die Wasserfüllung des Modellbehälters wurde ebenfalls aus Gründen der Temperaturkonstanz bei jedem Versuch erneuert. Die Füllung erfolgte vom tiefsten Behälterniveau - 970 mm aus mit steigendem Wasserspiegel durch Ausnutzung der statischen Gefällhöhe zwischen Aufbereitungs- und Modellbehälter.

Um ein Ausgasen des Wassers während des Versuches zu verhindern - die Gasbläschen würden sich bei Temperaturerhöhung des Wassers an der Struktur und vor allem an den Sichtscheiben festsetzen und dadurch die Sicht beeinträchtigen - wurde der Wasserinhalt des Aufbereitungsbehälters mit Hilfe einer Vakuumpumpe bis auf den der Wassertemperatur entsprechenden Wasserdampfpartialdruck entgast.

Störenden Ablagerungen von den im normalen Leitungswasser vorhandenen gelösten Stoffen wurde durch die Verwendung von vollentsalztem Wasser vorgebeugt, das jedoch aus Korrosionsgründen und um für die Durchflußmessung an den Vordrosseln eine ausreichende

Leitfähigkeit zu besitzen, mit Natriumsulfat und Natriumnitrit auf  $450 \mu \text{ S/cm}$  angesalzt wurde.

Die Wasserfüllung des Modellbehälters erfolgte meistens am Tage vor dem eigentlichen Versuch; damit war ein ruhender, temperaturmäßig ausgeglichener Zustand gewährleistet.

### 3.2.2. Versuchsablauf

Unmittelbar vor Versuchsstart wurden die Übereinstimmung der Versuchseinrichtung mit dem Versuchsplan kontrolliert, die notwendigen versuchsspezifischen Identitätsangaben protokolliert und die Meßwertaufnahme für die Nullpunkts-Erfassung aktiviert.

Die Wasserzuleitungen zu den Tauchkühlern (Sekundärseite) wurden über einen Bypass bis nahe an die Tauchkühler heran mit Leitungswasser vorgekühlt, damit beim Zuschalten der Tauchkühler 100 sec nach Versuchsstart das Kühlwasser sofort mit der Gleichgewichtstemperatur von ca.  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  in die Tauchkühler geleitet werden konnte. Innerhalb der Tauchkühler selbst hatte das Kühlwasser bis zum Zuschaltzeitpunkt weitgehend die Anfangstemperatur des Primärwassers im Modellbehälter. Unmittelbar vor Versuchsbeginn wurden die Vorkühlung beendet und der Bypass geschlossen.

Der Nullpunktsabgleich an den Strömungsmessern der Vordrosselstrecken wurde vorgenommen und die Abweichungen protokolliert.

Nachdem die Verbindung mit dem Meßwertfassungssystem CALAS hergestellt war, wurde die Meßwertaufnahme zur Nullpunktserfassung gestartet. Die Meßdaten wurden auf Band gespeichert. Nach einer Funktionskontrolle der einzelnen Displayschaltungen wurde die Meßwertaufnahme wieder gestoppt und die Zeituhr, die bislang die Ortszeit anzeigte, auf den Versuchszeitpunkt Null zurückgestellt.

Die ersten beiden Heizstufen, nämlich 100 % und 65 % wurden vorgewählt, so daß beim Betätigen des Hauptschalters die volle Leistung auf die Heizgruppen geschaltet wurde. Durch Umlegen eines Kippschalters konnte dann die zweite Heizstufe, nämlich 65 % des Anfangswertes, aufgeprägt werden. In der Zwischenzeit wurde dann das Potentiometer, das die Leistung während der ersten Zeitstufe bestimmte, auf den Wert der dritten Stufe justiert, so daß beim erneuten Umlegen des Kippschalters die dritte Leistungsstufe eingeschaltet war, usw. Die Leistungsfunktion für den Referenzfall ist in Abb. 3.2-2 dargestellt.

Nach Wahl der Betriebsart (Notspiegel oder Betriebsspiegel) wurden mit dem Start der Meßwertaufnahme gleichzeitig die Heizungen schlagartig eingeschaltet. Vom Rechner aus wurde zeitgleich mit dem Beginn der Datenerfassung die Zeituhr gestartet.

Bei etwa 20 sec und 60 sec nach dem Zeitpunkt Null wurde die Farbeinspritzung betätigt und jeweils 15 Aufnahmen des Strömungsbildes mit einer Taktzeit von 1,5 sec ausgelöst.

Nach 100 sec Versuchszeit wurden die Heizleistung auf 65 % des Anfangswertes zurückgenommen und zum selben Zeitpunkt die Kühlwasserzufuhr zu den Tauchkühlern geöffnet.

In Zeitabständen von jeweils 100 sec wurden ab 200 sec bis zum Zeitpunkt 1000 sec nach Versuchsbeginn weitere Bildserien aufgenommen. Danach wurde zur quasistationären Endphase hin der Abstand zwischen zwei Bildserien wesentlich vergrößert (siehe Anhang C). Insgesamt wurden pro Versuch 20 bis 25 Bildserien mit je 15 Einzelbildern aufgenommen. Nach 2000 sec Versuchszeit wurde die Abfragefrequenz der einzelnen Meßstellen von nominell 1 Hz auf 0,1 Hz reduziert, was den Meßdatenanfall von etwa 145 Daten/sec auf 1/10 dieses Wertes verringerte.

Als Kriterium für das Versuchsende wurde die Temperaturveränderung an den Meßkanälen 309 und 310 - das sind die Temperaturmeßstellen an den engsten Stelle zwischen Gasblasenabscheider und

unterer Gehäusewand - sowie die Temperaturänderungsgeschwindigkeit am Eintritt zum Kernbereich herangezogen (Meßkanal 311 und 312), die beide weniger als  $0,5 \text{ }^{\circ}/\text{h}$  erreichen mußten. Ferner wurde die Mindestversuchsdauer auf 15 000 sec festgelegt, nämlich auf den Zeitraum, der vom Rechenprogramm NOTUNG erfaßt wird. Mit diesen Grenzbedingungen ergab sich im allgemeinen eine Gesamtversuchszeit pro Versuch zwischen 6 und 7 Stunden.

Vor Versuchsende wurde der Meßrechen, ausgehend von seiner Normalstellung  $72^{\circ}$  in der Nähe der Tauchkühlerebene 1, im Kreissegment des Schildtankbereiches geschwenkt, um das Temperaturprofil im Oberplenum auszumessen.

#### 4. Auswertung der Versuche

##### 4.1. Nachweis des Naturumlaufs und Diskussion des Versuchsablaufs am Beispiel des Referenzversuches

Im Normalbetrieb erfolgt die Wärmeabfuhr aus dem Reaktor durch Zwangskonvektion. Dabei werden sowohl die Spalt- als auch die Brutzone in der gleichen Richtung, d. h. von unten nach oben, durchströmt. In den Räumen zwischen Kernmantel und Schildtank sowie zwischen Schildtank und Reaktortank ist im wesentlichen stagnierendes Natrium.

##### Für den Störfall

Bruch einer Druckleitung des Primärsystems mit gleichzeitigem Versagen der Pumpenabschaltung,

aus dem im wesentlichen die Systemrandbedingungen für die hier durchgeführten Modellversuche resultieren, soll entsprechend der Konzeption des Notkühlsystems die Abfuhr der Nachwärme durch einen tankinternen Naturumlauf erfolgen. Das hat zur Folge, daß in diesem Fall ein Kühlkreislauf mit einer gegenüber dem Normalbetrieb komplizierten Strömungsführung zustandekommen muß.

Aufgrund der höheren Leistungsdichte und der damit verbundenen Temperaturdifferenz wird erwartet, daß das Natrium im Kern<sup>1)</sup> nach oben steigt und aus Kontinuitätsgründen die gleiche Natriummenge durch den Brutmantel nach unten strömt (Abb. 2.1-1). Das bedeutet, daß im Brutmantel gegenüber dem Normalbetrieb eine Strömungsumkehr stattfinden muß. Das aus dem Kern austretende heiße Natrium sammelt sich im Oberplenum und strömt von dort in radialer Richtung zu den Tauchkühlern. Aufgrund der Abkühlung in den Tauchkühlern treten Temperaturdifferenzen zwischen den Natriumsäulen auf beiden Seiten des Schildtanks auf, die eine Abwärtsströmung im äußeren Ringraum zwischen Schildtank und Reaktortank und, über Bohrungen im untersten Teil des Schildtanks, eine Aufwärtsströmung im inneren Ringraum zwischen Schildtank und Kernmantel bewirken.

<sup>1)</sup> Unter der Bezeichnung Kern wird im Bericht immer die Zone, bestehend aus den Brennelementen und der ersten Reihe Brutelemente, verstanden, da diese strömungstechnisch wie die Brennelemente geschaltet sind.



Der tankinterne Umlauf besteht also nach dem Konzept aus zwei Naturkonvektionsschleifen:

- Schleife 1 durch Kern und Brutmantel
- Schleife 2 durch Wärmetauscher und Schildtank.

Verkoppelt sind diese beiden Schleifen im Oberplenum und im oberen Bereich der Brutelemente, wo das kalte Natrium aus Schleife 2 seitlich in die perforierten Elemente eintritt. Das heiße Natrium aus Schleife 1 strömt über das Oberplenum durch Öffnungen im Schildtank zu den Tauchkühlern.

Dieses Konzept birgt möglicherweise die Gefahr, daß sich zwei Kurzschlußströmungen ausbilden, indem

- das Kühlmittel aus Schleife 1 nach Austritt aus dem Kern direkt in den Brutmantel eintritt
- und
- das Kühlmittel aus Schleife 2 direkt durch die Perforation der Umlenkplatte in das Oberplenum eintritt und somit die Schleife 1 durch den Kern umgeht.

Eine der Aufgaben der Modellversuche war es daher, zunächst qualitativ zu untersuchen, ob der Naturumlauf in der nach dem Konzept erwarteten Form überhaupt zustande kommt. Dieser Nachweis, der mit Hilfe von Temperaturmessungen und der Methode der Farbeinspritzung (vgl. Anhang C sowie Kap. 2.2.1., 2.3.5.) durchgeführt wurde, soll am Beispiel des Referenzversuches im folgenden näher erläutert werden. Eine ausführliche quantitative Diskussion der Ergebnisse aus den Modellversuchen erfolgt in Kap. 4.2. ff. Die Versuchsbedingungen sind in Kap. 2 und 3 näher beschrieben.

Ausgehend vom isothermen Zustand und ruhender Flüssigkeit zum Zeitpunkt  $\tau = 0$ , bildet sich schon nach der relativ kurzen Zeit von etwa 30 sec in der Kernzone eine **meßbare Strömung in Aufwärtsrichtung** aus.

Der Kerndurchsatz und die Kernaustrittstemperatur steigen schnell an und erreichen etwa bei  $\tau = 120$  sec, kurz nach der ersten Leistungsreduktion gemäß der Darstellung der Nachzerfallsleistung nach einer fallenden Treppenfunktion, ein Maximum (Anhang A, Abbildungen A-1, A-3, A-5). Während dieses Anlaufvorgangs beschränkt sich die Temperaturerhöhung im Oberplenum im wesentlichen auf den Bereich über dem beheizten Kern (Abb. 4.3-1). Eine radiale Strömung im Oberplenum in Richtung zu den Tauchkühlern findet demnach bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht statt, was auch durch die Photographien mit der Farbinjektion bestätigt wird (Abb. 4.1-1a). In den Zonen äußerer und innerer Ringraum sind zu diesem Zeitpunkt noch keine wesentlichen Strömungsvorgänge feststellbar (Abb. 4.1-1b).

In den gegenüber den Brennelementen schwach beheizten Brutelementen setzt anfangs ebenfalls eine Aufwärtsströmung wie im Kern ein, die sich jedoch **spätestens bis etwa 150 sec wegen des hohen Kühlmitteldurchsatzes im Kernbereich umgekehrt hat** (vgl. Kap. 4.2.5. und Abb. 4.2 - 8).

In der Zeit von etwa 100 bis 1000 sec liegt im Kern eine ausgebildete Aufwärtsströmung vor. Während der Kerndurchsatz innerhalb dieses Zeitraumes einen konstanten Wert beibehält, der dem Maximalwert zur Zeit der ersten Leistungsreduktion entspricht (bei  $\tau \approx 100$  sec), steigt die Kernaustrittstemperatur nach leichtem Abfall nochmals bis zur Zeit  $\tau = 1000$  sec, dem Zeitpunkt der zweiten Leistungsreduktion, leicht an. Im Oberplenum ist während dieser Phase die Strömung starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Es bilden sich Schichtenströmungen aus, wobei im allgemeinen in der oberen Schicht eine Radialströmung in Richtung zu den Tauchkühlern und in der unteren eine Radialströmung in Richtung auf die Kern- bzw. Brutzone auftritt (Abb. 4.1-2). Aufgrund der zunehmenden Temperatur am Tauchkühlereintritt (Anhang A, Abb. A-6) ist jedoch anzunehmen, daß sich im Oberplenum integral gesehen während dieser Phase eine Strömung in radialer Richtung, d. h. zu den Tauchkühlern hin, ausbildet. Das Eintreten von Kühlmittel aus dem Oberplenum in die Brutelementköpfe, d. h. die Gefahr der eingangs diskutierten Kurzschlußströmung der Schleife 1,

konnte nur in geringem Maße bis etwa zum Zeitpunkt  $\tau = 300 \text{ sec}$  beobachtet werden.

Mit Beginn dieser 2. Phase (von  $\tau = 100$  bis  $1000 \text{ sec}$ ) setzt jetzt auch nach Abkühlung der Flüssigkeit in den Tauchkühlern eine Abwärtsströmung im äußeren Ringraum ein, die mit zunehmender Zeit aufgrund der entstehenden Temperaturdifferenz in den beiden Flüssigkeitssäulen auf beiden Seiten des Schildtanks zunimmt, wie aus den Temperaturmessungen hervorgeht (vgl. Kap. 4.4., Abbildungen 4.4-8 und 4.4-10). Gleichzeitig entwickelt sich durch die Bohrungen im unteren Teil des Schildtanks eine Aufwärtsströmung im inneren Ringraum, die dann horizontal durch die Kernmantelperforation in die Brutelementköpfe eintritt (Abb. 4.1-3).

Innerhalb der Brutelemente hat sich bis spätestens etwa  $\tau = 150 \text{ sec}$  eine Abwärtsströmung zum Mitteldruckplenum und über die Vordrosseln zum Gasabscheideraum eingestellt. Aus den Modellversuchen geht aufgrund der gemessenen Temperaturen weiterhin hervor, daß in der 2. Phase keine Anzeichen von stagnierender Flüssigkeit zwischen den beiden Tauchkühlern auftreten und damit die Gefahr, daß nur eine reduzierte Kühlmittelmenge zur Notkühlung durch Naturkonvektion zur Verfügung steht, nicht vorhanden ist.

In dem Zeitraum größer  $\tau = 1000 \text{ sec}$  ergeben die Untersuchungen, daß sich der oben diskutierte Strömungsverlauf qualitativ wenig ändert. Im Oberplenum wird das Temperaturfeld immer gleichmäßiger, so daß praktisch ab etwa  $2000 \text{ sec}$  eine nahezu isotherme Temperatur-Verteilung vorliegt. Es baut sich dadurch ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen der unteren Schicht des Oberplenums und dem Bereich unterhalb der Umlenkplatte auf, der darauf hindeutet, daß auch während dieser Phase durch die Perforation in der Umlenkplatte kein großer Massenaustausch stattfindet. (Abb. 4.3-1). Das Auftreten einer Bypaß-Strömung im Ringspalt der Tauchkühlerkonsole, deren Betrachtung erst für Zeiten  $\tau > 1000 \text{ sec}$  relevant ist, da die Tauchkühler in den ersten  $1000 \text{ sec}$  auf das Entstehen der Naturkonvektion im Kern ohne Einfluß sind, ist von

einem nicht meßbaren Einfluß auf das globale Verhalten des Naturumlaufts (vgl. Kap. 4.2.3. und 4.2.6.).

Das Verhalten der diskutierten Meßgrößen Kerndurchsatz, Temperaturen am Kernaustritt bzw. Tauchkühlereintritt in diesem Zeitraum größer  $\tau = 1000$  sec entspricht der stufenweisen Leistungsreduktion im Kern.

Ab etwa 2000 sec ist die Naturkonvektionsströmung bereits soweit entwickelt, daß die im Kern zugeführte Leistung in den Tauchkühlern voll abgeführt wird (Abb. 4.1-4).

Insgesamt gesehen haben die Modellversuche gezeigt, daß sich der Naturumlauf in der Form ausbildet, wie er in dem eingangs diskutierten Konzept der Firma INTERATOM aufgrund von theoretischen Überlegungen berechnet wurde.

#### 4.2. Die Versuchsparameter und ihre Einflüsse auf den Naturumlauf im Modell

In diesem Abschnitt werden die Versuchsparameter beschrieben und ihre Auswirkungen auf die den Naturumlauf im Modell charakterisierenden Meßgrößen, wie Temperaturen, Durchsätze und Leistungen, diskutiert. Als Vergleichsbasis dient der Referenzversuch 3B.

Eine Übersicht über die Versuchsparameter und die untersuchten Bereiche ist in der folgenden Tabelle gegeben. Die vollständigen Daten enthält der Versuchsplan, Abb. 3.1-1.

Tabelle 4.2-1: Übersicht über die Versuchsparameter

Parameter	Vergleichbare Versuche	Parameterbereich
Reproduzierbarkeit	1A - 1B, 3A - 3B 9A - 9B, 21A - 21B	paarweise identisch
Heizleistung	3B - 1B - 2	60 - 20 - 40 kW
Tauchkühlerleistung	3B - 5 - 7 - 8, 5 - 6	0 bis nominell 100 % Schieflast
Heizleistungs- transient	3B, 1B, 2 - 4	zeitlich abgestuft und konstant
Brutmantel- leistung	3B - 11 - 12 - 19 - 21B	$\dot{Q}_{BU}/\dot{Q}_{Kern} = 0$ bis 17 %
Querschnitts- verengungen	3B - 9B - 10  3B - 18  3B - 17  3B - 15  3B - 20	Perforation Umlenk- platte 9 - 4 - 15 %  Anzahl Schildtankboh- rungen 12 und 24  Druckverlust Vordros- seln 100 und 300 %  Kühlerbypass offen und abgedeckt  Schildtankbohrungen 100 und 942 mm über Ober- kante Tragplatte
Füllstand	3B - 16	170 und 1070 mm über O. K. BE
Anfangs- temperatur	3B - 13 - 14	20 - 35 - 50 °C

Die Vergleiche stützen sich im wesentlichen auf die für jeden Versuch erstellten Plots und Druckbilder in der Form gemäß Anhang A. Die in den folgenden Unterabschnitten verwendeten Begriffe, wie z. B. Kernaustrittstemperatur, Kerndurchsatz, Tauchkühlerleistung usw., werden in der im Anhang A getroffenen

Definition verstanden. Die wichtigsten Versuchsdaten für Temperaturen, Leistungen und Durchsätze sind in Tab. A-1 bis A-4 zusammengestellt. Sie wurden aus den Plots nach manueller Glättung der Kurven abgegriffen.

#### 4.2.1. Reproduzierbarkeit des Versuchsablaufes

Unter Reproduzierbarkeit des Versuchsablaufes soll im folgenden die Frage verstanden werden, wie gut zwei Versuche mit identischen Versuchsparametern in ihren Ergebnissen übereinstimmen, d. h. also, wie groß der Einfluß von nicht kontrollierten oder nicht kontrollierbaren Größen ist. Zu diesen Größen gehören z. B. Genauigkeit der Datenerfassung und -wiedergabe, Umwelteinflüsse wie Hallen-temperatur, Luftbewegungen, Kühlwassertemperatur, ferner zeitlich und örtlich relativ begrenzte Zufallsströmungen im Versuchsaufbau. Letztere führen z. B. zu statistischen Schwankungen der Temperaturen, die in diesem Zusammenhang unberücksichtigt bleiben sollen. Die Beurteilung der Reproduzierbarkeit beschränkt sich hauptsächlich auf den Vergleich des globalen Versuchsablaufes.

Die Reproduzierbarkeit wurde an den vier Versuchspaaren 1A - 1B, 3A - 3B, 9A - 9B und 21A - 21B durch Vergleich der Plots überprüft. Abb. 4.2-1 zeigt die überlagerten Kurven am Beispiel des Versuchspaares 9A - 9B. Im Rahmen dieses Vergleiches ergeben sich für die Reproduzierbarkeit folgende Resultate:

- Die Kurven für den Temperaturverlauf am Kernaustritt lassen sich für vergleichbare Versuche (abgesehen von oben erwähnten statistischen Schwankungen) nahezu deckungsgleich reproduzieren. Wenn man den Einfluß von Unterschieden in den Anfangstemperaturen, die hier zwischen 0,8 und 2 °C lagen, eliminiert, betragen die Abweichungen in den betrachteten Fällen zu allen Zeiten weniger als ca. 3 % vom jeweiligen Meßwert. Dasselbe trifft auch für die Maximaltemperatur im Kreislauf zu.

Bei den übrigen verglichenen Temperaturen, nämlich am Kerneintritt, vor der Kernmantelperforation und am Tauchkühlereintritt, liegen die Abweichungen der Kurven nach dem Eliminieren des Anfangstemperatureinflusses im Bereich der Zeichengenauigkeit, also bei ca. 2 %.

- Die Reproduzierbarkeit des Kerndurchsatzes ist bei drei der vier ausgewählten Versuchspaare so gut, daß Unterschiede in der gewählten Darstellungsform kaum sichtbar sind, also unter ca. 2 % liegen. Lediglich für sehr große Zeiten ( $\tau > 10^4$  sec) werden Abweichungen bis zu 8 % des Meßwertes beobachtet. (Die Versuche 1A und 1B können hierzu nicht verglichen werden, da der zeitliche Verlauf der Heizleistungen für beide Versuche etwas verschieden war.)
- Die größten Abweichungen im primären Tauchkühlerdurchsatz betragen 11 bis 15 % des Meßwertes, wenn man nur die Kurven für Zeiten  $\tau > 180$  sec vergleicht. Für kleinere Zeiten sind die dargestellten Kurven, die ja aus mehreren Meßwerten berechnet werden, wegen der vereinfachten Berechnungsweise unbrauchbar (vgl. Anhang A). Die größten Abweichungen treten nur im Zeitintervall  $180 \text{ sec} < \tau < 1000 \text{ sec}$  auf. Darüber sind sie kleiner als 5 %. Die relativ großen Unterschiede sind z. T. auf die unterschiedlichen Anfangstemperaturen im Versuchsmodell zurückzuführen. In allen Fällen ist die erwartete Tendenz vorhanden, daß eine höhere Anfangstemperatur eine größere Grädigkeit am Tauchkühler und damit einen größeren Tauchkühlerdurchsatz bewirkt. Wäre die Anfangstemperatur in allen Versuchen gleich, so dürfte die Reproduzierbarkeit in der Größenordnung 3 bis 5 % liegen.
- Für die Tauchkühlerleistung trifft die gleiche Aussage wie für den Tauchkühlerdurchsatz zu. Beide Größen sind über die Wärmebilanzgleichung verknüpft.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Reproduzierbarkeit des Versuchsablaufes im obigen Sinne mit Genauigkeiten von 1 bis 3 % bei Temperaturen, ca. 2 % beim Kerndurchsatz und 3 bis 5 % bei Tauchkühlerdurchsatz und -leistung gewährleistet ist.

#### 4.2.2. Einfluß der Heizleistung

In den Versuchen 1, 2 und 3 betrug der Anfangswert der im Core zugeführten Leistung 20, 40 bzw. 60 kW. Diese Leistungsvariation zeigt qualitativ den erwarteten Einfluß auf den Versuchsablauf. Eine größere Leistung erzeugt eine höhere Aufheizspanne im Kern, die den Kerndurchsatz anregt. Außerdem wird durch die höhere Mischtemperatur im Oberplenum die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz im Tauchkühler vergrößert, was zur Erhöhung der Tauchkühlerleistung und des -durchsatzes führt. Abb. 4.2 - 2 zeigt einige gemessene Zeitfunktionen für die Versuche 1B, 2 und 3B, die diesen Einfluß der Heizleistung auch quantitativ durch die Ähnlichkeit der Kurven verdeutlichen. Abweichungen von der Ähnlichkeit sind lediglich bei den Temperaturkurven am Kerneintritt und vor der Kernmantelperforation für sehr große Zeiten und bei den Tauchkühlerdaten für Zeiten  $\tau < 500$  sec erkennbar. Die ersten lassen sich durch unterschiedliche Einlauf-Temperaturen des sekundären Kühlwassers erklären (sie betragen bei den Versuchen 1B, 2, 3B entsprechend 11,4; 11,9 und 12,5°C), während die Tauchkühlerdaten in der Anlaufphase durch versuchstechnische und rechenstechnische Vereinfachungen in den Kurven nicht echt wiedergegeben werden.

In Abb. 4.2 - 3a ist die Aufheizspanne  $\Delta \vartheta_{\text{Kern}}$  über der im Kern (bis einschließlich Elementreihe 9) erzeugten elektrischen Leistung  $\dot{Q}_{\text{Kern}}$  dargestellt. Dafür wurden die Versuche 1, 2, 3, 4, 9 und 18 ausgewählt, die sich im wesentlichen nur durch die Heizleistung unterscheiden. Für jeden Versuch sind die Werte entsprechend den Tabellen A-1 bzw. A-4 für  $\tau = 1000, 10000$  und  $20000$  sec verwendet worden, also für nahezu stationäre Zustände. Aus der Steigung der Geraden in dieser doppelt-logarithmischen Darstellung ergibt sich somit der folgende Zusammenhang zwischen der Aufheizspanne und der Kernleistung:

$$\Delta \vartheta_{\text{Kern}} \sim \dot{Q}_{\text{Kern}}^{0,7} \quad (1)$$

In dieser Darstellung ist die Aufheizspanne als Mittelwert der Aufheizungen in den Elementen 1/1 und 5/3 definiert. Betrachtet man demgegenüber das räumliche Maximum der Aufheizspanne (etwa in den Elementreihen 3 bis 7), so ergibt sich in Gl. (1) ein etwas kleinerer Exponent von ca. 0,6. Der Unterschied wird durch die apparaturbedingte Unterkühlung des Elementes 1/1 (vgl. Abb. 4.4-4 bis 4.4-6) hervorgerufen.



Um einen Zusammenhang zwischen dem Kerndurchsatz  $\dot{V}_{\text{Kern}}$  und der Kernleistung  $\dot{Q}_{\text{Kern}}$  zu finden, wird von folgender Überlegung ausgegangen:

Die im Brutmantel erzeugte Wärme  $\dot{Q}_{\text{BU}}$  wirkt dem dort abwärts gerichteten Kühlmittelstrom entgegen. Als Antrieb für die Umwälzung durch Kern und Brutmantel ist daher die Differenz zwischen der im Kernbereich (bis incl. 9. Reihe) und im Brutbereich entwickelten Wärme ( $\dot{Q}_{\text{Kern}} - \dot{Q}_{\text{BU}}$ ) in Ansatz zu bringen. Die gemessenen Kerndurchsätze von Tab. A-2 sind in Abb. 4.2-3b über dieser Leistungsdifferenz aufgetragen, und zwar für alle Versuche, bei denen nur die Parameter  $\dot{Q}_{\text{Kern}}$  und  $\dot{Q}_{\text{BU}}$  variiert wurden. Die Meßpunkte für  $\tau = 1000, 10000$  und  $20000$  sec liegen in der doppelt-logarithmischen Darstellung in etwa auf einer Geraden mit der Steigung 0,45, so daß man für den stationären Zustand die Extrapolationsformel (2) als Zusammenhang zwischen dem Kerndurchsatz und der Leistung findet:

$$\dot{V}_{\text{Kern}} \sim (\dot{Q}_{\text{Kern}} - \dot{Q}_{\text{BU}})^{0,45} \quad (2)$$

Dabei ist zu beachten, daß in den Versuchen nur kleine Brutmantelleistungen ( $\dot{Q}_{\text{BU}}/\dot{Q}_{\text{Kern}} < 0,15$ ) untersucht wurden.

Die Zusammenhänge (1) und (2) stimmen mit den Ergebnissen eines vereinfachten Gedankenmodells [37] überein, aus dem für laminare bzw. turbulente Strömung für Gl.(1) ein Exponent von 0,5 bzw. 0,67 und für Gl.(2) ein Exponent von 0,5 bzw. 0,33 (allerdings unter Vernachlässigung von  $\dot{Q}_{\text{BU}}$ ) resultiert.

Es ist noch bemerkenswert, daß das Verhältnis von Kerndurchsatz zu Tauchkühlerdurchsatz bei quasi stationärer Betriebsweise (also etwa  $\tau > 1000$  sec) nahezu unabhängig von der Leistung ist und etwa den Wert 0,5 bis 0,6 annimmt (vgl. Abb. 4.2-3c).

#### 4.2.3. Einfluß der Tauchkühlerleistung

Die Variation der Tauchkühlerleistung bzw. der Kühlkapazität hatte zwei Ziele: erstens sollte der Einfluß der Kühlkapazität auf das Anwerfen des Naturumlaufes, insbesondere im Kern, untersucht werden. Zweitens sollten der Ausfall eines Tauchkühlers simuliert und

die dadurch auftretenden Asymmetrien der Temperatur- und Strömungsfelder im Modell bestimmt werden. Zu diesem Zweck konnten die Kühler wahlweise durch Absperren des sekundären Wasserstromes vollständig wirkungslos gemacht werden, oder ihre Kühlwirkung wurde durch Abdecken einer Hälfte des primärseitigen Durchtrittsquerschnittes auf nominell 50 % herabgesetzt. Es werden hier die Versuche 3B, 7 und 8, die durch die Tauchkühlerleistungen 100 %, 50 % und 0 % gekennzeichnet sind, miteinander verglichen sowie die Versuche 5 und 6, bei denen der Kühler II bzw. I abgeschaltet war.

Der Vergleich der mit dem Plotter erzeugten Meßkurven, die in Abb. 4.2 - 4 auszugsweise wiedergegeben sind, führt zu folgenden Resultaten:

- a) Während der ersten 1000 sec hat die Tauchkühlerkapazität keinen nennenswerten Einfluß auf die Kühlvorgänge im Kern. Die Temperaturkurven für Kernaustritt, Kerneintritt, Tauchkühlereintritt, Kernmantelperforation und für die Maximaltemperatur im Kreislauf verlaufen für alle fünf betrachteten Versuche bis 1000 sec nahezu deckungsgleich. Berücksichtigt man die etwas unterschiedlichen Anfangstemperaturen durch Parallelverschiebung der Kurven, so liegen die Abweichungen in diesem Zeitabschnitt innerhalb ca. 2 °C oder 8 % der Aufheizspanne. In demselben Bereich von 8 % Abweichung liegen auch die Kerndurchsätze mit der Tendenz, daß sich die Durchsätze mit abnehmender Kühlleistung verringern.
- b) Die Asymmetrien der Temperaturen und damit vermutlich auch der Strömungsfelder bei Abschalten eines Tauchkühlers sind sehr gering. Dies folgt aus dem Vergleich der Temperaturkurven für die Versuche 5 und 6, die einmal in der Ebene des betriebenen Tauchkühlers und das andere Mal in der Ebene des stillgesetzten Kühlers registriert wurden. Die entsprechenden Kurven sind, abgesehen von statistischen Schwankungen, deckungsgleich. Es ergeben sich Abweichungen bis zu 1 °C bei den Tauchkühlereintrittstemperaturen, wobei die höhere Temperatur an dem betriebenen Kühler auftritt. Auch die Differenz der Austrittstemperaturen zwischen dem betriebenen Kühler und dem stillgesetzten

beträgt im allgemeinen nur - 1 bis - 1,5 °C (Extremwerte - 2,3 °C). Diese Ergebnisse bestätigen einen nahezu vollständigen Temperatúrausgleich in Umfangsrichtung.

- c) Mit einem abgeschalteten Tauchkühler (Vers. 5 und 6) ist die Kernaustrittstemperatur auch für Zeiten  $\tau > 1000$  sec noch in Grenzen zu halten, ohne ein neues absolutes Maximum zu bilden (vgl. Abb. 4.2 - 4). Sind hingegen beide Tauchkühler stillgelegt, so steigt die Temperatur nach ca. 1300 sec rapide an. Interessant ist hierbei, daß dieser Anstieg erst relativ spät erfolgt, was das Resultat a) unterstreicht.
- d) Die Wirkung der Tauchkühler wird durch die 50 %ige Abdeckung (Vers. 7) nur schwach verringert. Die abgeführten Leistungen verhalten sich im Maximum ( $\tau \approx 1100$  bis 1200 sec) bei den Versuchen 8, 5, 7 und 3 wie 0 : 0,54 : 0,73 : 1,0.

Im folgenden wird die aus den Meßwerten ermittelte Wärmedurchgangszahl der Tauchkühler betrachtet. Allgemein werden Gegenstrom-Wärmetauscher nach der Gleichung

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta_m$$

berechnet. Hierin bedeuten:  $\dot{Q}$  = im Wärmetauscher übertragene Leistung,  $k$  = Wärmedurchgangszahl,  $A$  = Wärmeaustauschfläche, meist mit dem Rohraußendurchmesser berechnet und  $\Delta \vartheta_m$  = mittlere log. Temperaturdifferenz. Bei den Versuchen wurde  $\dot{Q}$  auf der Sekundärseite gemessen sowie auch die zur Bestimmung von  $\Delta \vartheta_m$  erforderlichen Temperaturen, so daß die tatsächliche Wärmedurchgangszahl  $k$  für den in diesen Versuchen stets konstant gehaltenen sekundären Massenstrom (40 l/min) berechnet werden kann. Abb. 4.2-5 zeigt den  $k$ -Wert in Abhängigkeit des Primärdurchsatzes bzw. der Geschwindigkeit auf der Primärseite, d. h. im Inneren der Rohre (11 Ø x 0,5 x 200 mm lang, Messing) für mehrere Versuche. Für Geschwindigkeiten  $v < 0,8$  mm/sec, was einer Reynoldszahl von 80 entspricht, liegen die Meßpunkte in etwa auf einer Geraden, solange sich die thermischen Bedingungen am Tauchkühler nicht sehr verändern. Ist dies jedoch der Fall, wie z.B. bei den Versuchen 13 und 14 mit der erhöhten Anfangstemperatur,

ist diese einfache Abhängigkeit nicht mehr gegeben, da bei den hier vorliegenden kleinen Geschwindigkeiten der Wärmeübergang und damit auch der k-Wert noch von anderen Variablen (u.a. vom Temperaturfeld) beeinflußt wird. Eine genauere Analyse war nicht Aufgabe dieser Experimente und ist mit den wenigen Meßwerten auch nicht möglich.

#### 4.2.4. Einfluß der Heizleistungstransienten

Im Versuch 4 wurde die Heizleistung während der ganzen Versuchsdauer konstant auf 30 kW gehalten. Im Gegensatz zu der zeitlichen Leistungsabstufung bei allen übrigen Versuchen sollte hiermit gezeigt werden, wie schnell und in welcher Weise sich der Gleichgewichtszustand im System einstellt und ob nicht durch Überschwingen Maxima erzielt werden könnten, die bei der sonst stufenförmigen Leistungsreduzierung unterdrückt wurden.

Die Kurven für den zeitlichen Verlauf der Temperaturen und des Kerndurchsatzes zeigen ein monotones Ansteigen der Meßwerte und Einschwenken auf den stationären Zustand. Dabei ist lediglich bei der Kernaustrittstemperatur ein einmaliges geringes Überschwingen um ca. 1 °C zu beobachten (entsprechend ca. 5 % der maximalen Aufheizspanne, die hier 22 °C betrug). Die Tauchkühlerleistung und demzufolge auch der -durchsatz auf der Primärseite weisen den bei allen Versuchen vorhandenen Peak (vgl. Anhang A) bei 100 sec auf, verhalten sich aber im weiteren Verlauf ähnlich wie die übrigen Kurven. Das simulierte Notkühlssystem verhält sich demnach wie ein gut gedämpftes System, das nicht zu Schwingungen oder gar zu instabilen Oszillationen führt.

Der stationäre Zustand wird von den einzelnen Meßgrößen bis auf 5 % genau nach ungefähr folgenden Zeiten erreicht: Kerndurchsatz: 200 sec, Tauchkühlerdurchsatz: 300 sec, Tauchkühlerleistung: 1000 sec, Kernaustrittstemperatur und Maximaltemperatur im Kreis: 500 sec, Tauchkühlereintrittstemperatur: 1500 sec, Temperatur am Kerneintritt und vor der Perforation:  $10^4$  sec.

Im übrigen stellt dieser Versuch eine weitere Leistungsstufe für den in Abschnitt 4.2.2. betrachteten Einfluß der Heizleistung dar. Die dort diskutierten Zusammenhänge für die dimensionslosen Meßgrößen, Gleichungen (1) und (2), treffen auch hierfür zu.

#### 4.2.5. Einfluß der Brutmantelleistung

Das Ziel dieser Versuchsreihe war zu prüfen, in welcher Weise sich eine Veränderung der Leistung in den Brutelementen auswirkt, welche in dem hier betrachteten Notkühlfall i. a. von oben nach unten durchströmt werden und somit der Naturkonvektion entgegenwirken. Besondere Aufmerksamkeit verdient hier der Zeitpunkt einer eventuellen Strömungsumkehr in den betroffenen Brutelementen während der Anlaufphase. Zum Vergleich liegen neben dem Referenzversuch 3B die Versuche 11 und 21B mit erhöhter Brutmantelleistung (BU-Leistung) sowie der Versuch 12 mit verminderter BU-Leistung vor. Außerdem wurde das Experiment 19 durchgeführt, in dem die BU-Leistung einen zeitlichen Vorlauf von 300 sec gegenüber der Kernleistung erhielt, so daß sich hier die anfängliche Aufwärtsströmung in den Brutelementen mit Sicherheit ausbilden konnte. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Leistungsdaten waren eingestellt.

Tabelle 4.2-2: Leistungsdaten für Versuchsreihe mit veränderter Brutmantelleistung

Versuch Nr.	Kernleistung ges./BU-Leistung <sup>+</sup> $\dot{Q}_{ges}/\dot{Q}_{BU}$ [kW/kW]			
	0 - 10 <sup>2</sup> sec	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup> sec	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup> sec	10 <sup>4</sup> sec
2	40,1/3,0	26/1,9	13,9/1,1	10,6/0,8
3B	60/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,1/1,2
11	60,1/5,8	39,0/3,8	20,9/2,0	16,1/1,6
12	59,9/0	38,9/0	20,9/0	16,1/0
19	60,0/4,4 <sup>++</sup>	39,5/2,9	19,9/1,4	16,1/1,1
21B	39,9/5,8	26,0/3,8	13,8/2,0	10,6/1,6

<sup>+</sup> In der BU-Leistung ist die Leistung der innersten BU-Reihe nicht enthalten.

<sup>++</sup> Eine Zeitspanne von 300 sec mit dem Leistungsverhältnis 4,4/4,4 war vorgeschaltet.

Ein Vergleich der Kühlmitteltemperaturen im Kernbereich und des Kerndurchsatzes führt zu folgendem Ergebnis:

- a) Die Aufheizspanne im Kern ist im Rahmen der bei diesen Versuchen üblichen Schwankungen (vgl. 4.2.1.) im untersuchten Bereich unabhängig von der BU-Leistung. Dies folgt aus dem fast deckungsgleichen Verlauf der Temperaturkurven für die Versuche 11, 12 und 19 (vgl. Abb. 4.2-6). Bei der letzten ist dabei zu berücksichtigen, daß sie um 300 sec verschoben und damit in dieser Darstellung verzerrt ist. Auch die Ergebnisse der Versuche 2 und 21B bestätigen dies, wenn man die unterschiedlichen Starttemperaturen berücksichtigt.
- b) Der Kerndurchsatz ist im stationären Zustand umso größer, je kleiner die BU-Leistung ist. In Abschnitt 4.2.2. wurde schon ein Zusammenhang zwischen Durchsatz und Leistung gefunden (Gl. 2), der auch für diese Versuche mit veränderter BU-Leistung bestätigt wird (vgl. Abb. 4.2-3b).
- c) Der zeitliche Vorlauf der BU-Leistung in Versuch 19 zeigt keine wesentlichen Auswirkungen auf den Naturumlauf, wenn man von der Zeitverschiebung absieht.

Der Zeitpunkt der Strömungsumkehr in den Brutelementen läßt sich aus den verfügbaren Meßdaten nicht genau bestimmen. Anhaltswerte liefern jedoch die Temperaturverläufe am Brutelementein- und -austritt. Für den Referenzfall findet man z. B. im Element 10/5 einen fast sprunghaften Anstieg der Temperatur am oberen Ende ( $\vartheta_{\text{oben}}$ ) nach 30 sec um ca. 1,5 °C mit anschließenden statistischen Schwankungen um diesen neuen Mittelwert. Die Temperatur am Elementfuß ( $\vartheta_{\text{unten}}$ ) bleibt hingegen bis 80 sec noch unverändert. Danach beginnt  $\vartheta_{\text{unten}}$  langsam anzusteigen, was darauf hindeutet, daß eine Strömungsumkehr stattgefunden hat (Abb. 4.2-7). Da die Wassersäule dafür zunächst abgebremst und dann abwärts beschleunigt werden muß, sollte man zu diesem Zeitpunkt ein Maximum in der Aufheizspanne erwarten.

Dieses Maximum ist in Abb. 4.2-7 nicht erkennbar, was auf drei Effekte zurückzuführen ist: 1) die starken Temperaturschwankungen

am oberen Elementende, die auch auf Zirkulationen innerhalb des Elementes schließen lassen, 2) die Leistungsabsenkung nach 100 sec, 3) parasitäre Strömungen außerhalb der Elementrohre (vgl. 4.4.3.).

Für den Vergleich des Einflusses der BU-Leistung auf die Strömungsumkehr wird davon ausgegangen, daß diese spätestens zum Zeitpunkt des Nulldurchganges der Aufheizspanne erfolgt ist, wahrscheinlich aber früher, weil eine Transportzeit von der beheizten Zone zum unteren Thermoelement berücksichtigt werden muß. Für den Referenzfall ergeben sich für den Nulldurchgang der Aufheizspanne ca. 150 sec. Abb. 4.2 - 8 zeigt die Aufheizspanne im Element 10/5 für die Versuche 3B, 11, 12, 19 und 21B. In allen Fällen, mit Ausnahme des Versuches 19, liegt die Nullstelle der Aufheizspanne zwischen 120 und 180 sec mit einer Tendenz zu größeren Zeiten mit zunehmender BU-Leistung. Im Versuch 19 liegt dieser Zeitpunkt bei 450 sec, also ebenfalls 150 sec nach dem Einschalten der Kernleistung. Qualitativ ähnliche Bilder mit kleineren Amplituden ergeben sich auch für die Brutelemente 11/6. Aus diesem nahezu gleichmäßigen Verhalten kann geschlossen werden: d) Die Höhe der BU-Leistung im Rahmen der hier durchgeführten Variation hat keinen bedeutenden Einfluß auf die Strömungsumkehr in den Brutelementen. Diese liegt in allen Fällen in den ersten 120 bis 180 sec. Die entstehenden Temperaturspitzen liegen weit unterhalb der Kerntemperaturen.

#### 4.2.6. Einfluß von Querschnittsverengungen im Naturumlauf

Es entstand die Frage, wie das System auf Veränderungen von Querschnittsverengungen reagieren würde. Diese Frage hat insofern eine praktische Bedeutung, als die Druckverluste in solchen Drosselstellen nur ungenau berechenbar sind und die Drosselstellen im Reaktor evtl. auch konstruktiven Änderungen unterliegen können. Im Vergleich zum Referenzversuch 3B wurden die Querschnittsverengungen an fünf Stellen variiert (vgl. auch Tab. 4.2. - 1):

- a) Perforation in der Umlenkplatte von 9,5 % um  $\pm$  5,5 %  
(Versuche 9 und 10)

- b) Anzahl der unteren Schildtankbohrungen von 12 auf 24 erhöht (Vers. 18)
- c) Druckverlust in Vordrosseln um Faktor 3 erhöht (Vers. 17)
- d) Ringspalt an Kühlerkonsole (Kühlerbypass) abgedeckt (Vers. 15)
- e) Untere Schildtankbohrungen um 842 mm höher gelegt (Vers. 20).

Hinsichtlich des globalen Verhaltens des Naturumlaufes läßt sich das Ergebnis dieser Maßnahmen wie folgt zusammenfassen:

Alle vorgenommenen Modifikationen a) bis e) haben nur einen geringen, quantitativ nicht angebbaren Einfluß auf die wesentlichen Meßgrößen. Die geglätteten Kurven liegen innerhalb relativ schmaler Streubänder, die für die Größen Kerndurchsatz, Tauchkühlerdurchsatz und Kernaustrittstemperatur in Abb. 4.2-9 dargestellt sind (eine Ausnahme bildet der Kerndurchsatz im Versuch 17 mit erhöhtem Vordrosseldruckverlust, vgl. w. u.). In den meisten Fällen ist eine schwache Tendenz in der jeweils plausiblen Richtung erkennbar.

Einige Besonderheiten werden im folgenden diskutiert:

Zu a):

Mit Hilfe der Farbeinspritzung unterhalb und oberhalb der Umlenplatte wurde in keinem der hier betroffenen Versuche ein Massenaustausch zwischen Oberplenum und innerem Ringraum durch die Perforation hindurch beobachtet. Vielmehr zogen die Farbschwaden aus der unteren Düsenanordnung waagrecht in die Kernmantelbohrungen hinein (vgl. Anhang C). Auch die Farbe aus dem Oberplenum trat zu keinem Zeitpunkt durch die Perforation. Dies ist ein sicheres Zeichen dafür, daß hier kein beträchtlicher Massenaustausch stattfindet, womit der geringe Einfluß der Perforation in der Umlenplatte, die immerhin im Verhältnis 1:3 verändert wurde, erklärt ist.



Zu b:

Die Vermehrung der Bohrungen im Schildtank kommt wie erwartet im Experiment dadurch zum Ausdruck, daß die Durchsätze jeweils am oberen Rand des Streubandes und die Aufheizspanne am unteren Rand liegen. Der Unterschied ist jedoch für eine zahlenmäßige Bestimmung zu klein. Immerhin hat das Experiment gezeigt, daß Berechnungsunsicherheiten für den Druckverlust in solchen Bohrungen (Kantenrundung) unerheblich sind.

Zu c:

Die Querschnittsverringerungen an den Vordrosseln von 24 auf 17 mm Durchmesser hatte eine Reduktion des Kerndurchsatzes gegenüber dem Referenzversuch von 24 % (für  $\tau > 10^2$  sec) zur Folge. Dies ist nach einer Überschlagsrechnung eben der Durchsatz, der in der Brutmantel-Kern-Schleife den gleichen Druckverlust erzeugt wie im Referenzfall. Da die Aufheizspanne als Antrieb des Naturumlaufes und der Tauchkühlerdurchsatz in beiden Fällen ungefähr gleich waren, ist dieses Ergebnis strömungstechnisch gut erklärbar. Eine Unstimmigkeit besteht allerdings in der abgeführten Kernleistung. Nach den Meßdaten für Kerndurchsatz und Aufheizspanne wird durch den Massenstrom im Versuch 17 ca. 25 % weniger Wärme aus dem Kern abgeführt, was bei gleicher Heizleistung und annähernd gleichen Temperaturverhältnissen gegenüber der Umgebung im stationären Zustand nicht möglich ist. Die Leistungsdifferenz muß daher durch einen zusätzlichen Massenstrom durch die Elementspalte (Element-Bypass, vgl. 4.4.3.) abgeführt werden. Dieses Beispiel deutet darauf hin, daß in dem Element-Bypass eine große Reserve liegt, um die Aufheizspanne auch bei drastischen Querschnittsveränderungen nicht übermäßig ansteigen zu lassen.

Zu d:

Da die Tauchkühler (TK) in den ersten 1000 sec auf das Anspringen der Naturkonvektion im Kern ohne Einfluß sind (vgl. 4.2.3.), ist eine Betrachtung über die evtl. stattfindende Bypass-Strömung im Ringspalt der TK-Konsole auch erst für  $\tau > 1000$  sec interessant. Die Bildauswertung (Anhang C) läßt für einige Versuche (z. B. 7,

13, 16) auf eine schwache Aufwärtsströmung im Ringspalt im Bereich der Symmetrieebene des Modells schließen. Dies ließe sich durch eine Saugwirkung durch die Strömung in den Schildtankbohrungen erklären. Andererseits wurde auch eine Abwärtsströmung in Tauchkühlernähe durch Abkühlung an der Wand beobachtet. Beide Ströme können nicht sehr groß sein, wie sich aus folgender Betrachtung ergibt. Der dem TK-Ringraum oberhalb der Konsole (im folgenden als Kammer bezeichnet) zufließende Massenstrom aus dem Oberplenum erfährt auf seinem Weg von den Schildtankbohrungen bis zum TK-Eintritt einen Temperaturabfall  $\Delta \vartheta_{\text{Kammer}}$ , der durch Wärmeverluste an der TK-Wand sowie an der übrigen Kammerberandung entsteht. Im Versuch 15 mit abgedecktem Spalt beträgt  $\Delta \vartheta_{\text{Kammer}}$  im Mittel  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Im Referenzfall hingegen beträgt dieser Temperaturabfall bei sonst ziemlich gleichen Verhältnissen jedoch nur  $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , was bedeutet, daß bei offenem Ringspalt der Kammer mehr Wärme zufließen muß als bei geschlossenem. Der Wärmezufuß kann nicht von unten durch den Spalt erfolgen, da dort die Temperaturen bedeutend niedriger sind als oberhalb der Konsole und  $\Delta \vartheta_{\text{Kammer}}$  gegenüber dem Fall mit Abdeckung eher noch vergrößern würden. Es ist jedoch plausibel, daß die an der TK-Wand abgekühlten und durch den Spalt aus der Kammer ausfließenden Ströme einen verstärkten Zustrom aus dem Oberplenum bewirken. Bei geschlossenem Spalt hingegen verbleiben diese abgekühlten Teilmengen in der Kammer und vergrößern  $\Delta \vartheta_{\text{Kammer}}$ . Stellt man für beide Fälle (Versuch 3B und 15) die Enthalpie- und Massenbilanzen nach diesem Modell auf, so erhält man mit den gemessenen Temperaturen an der Schildtankperforation ( $\approx 36 \text{ }^\circ\text{C}$ ), am Tauchkühlereintritt ( $\approx 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und am TK-Austritt ( $\approx 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ) für das Verhältnis der Ströme durch Spalt (abwärts) und TK für den Referenzversuch einen Wert von ca. 5 %. Dieser wurde auch in etwa für eine Reihe weiterer Versuche (7, 9B, 17, 20) gefunden. Ein Bypassstrom dieser Größenordnung steht nicht im Widerspruch zu den Beobachtungen bei der Farbeinspritzung, die quantitativ nicht auswertbar sind, und erklärt auch den nicht meßbaren Einfluß auf das globale Verhalten des Naturumlaufes. Von dieser Betrachtung müssen die Versuche 13 und 14 mit erhöhter Anfangstemperatur ausgenommen werden. Hier lagen andere Temperaturverteilungen vor, und es sind

Bypass-Strömungen in beiden Richtungen beobachtet worden (vgl. Anhang C, Tab. C-3, M5 und M6).

Zu e:

Bemerkenswert ist, daß die TE am Boden des Tauchkühlerringraumes auch im Falle der hochgelegenen Schildtankbohrungen (Versuch 20) die gleiche Temperatur wie am TK-Austritt anzeigten. Das bedeutet, daß in jedem Falle der gesamte Ringraum als Wärmespeicher mit praktisch konstanter Temperatur (nämlich mit TK-Austrittstemperatur) in der Rechnung behandelt werden kann. Auch die Versuche mit einem abgeschalteten TK (Nr. 5 und 6) unterstreichen das, da auch hier die Temperaturunterschiede zwischen dem betriebenen und dem nichtbetriebenen TK am Austritt kleiner als ca. 2 °C und weiter unten sogar nicht meßbar waren.

#### 4.2.7. Einfluß des Füllstandes

Wichtigster Grund für die Erhöhung des Füllstandes im Versuch 16 war die Untersuchung der Vorgänge im Oberplenum, die in Abschnitt 4.3. ausführlich behandelt werden. Das größere Wasserinventar - immerhin war die Wärmespeicherkapazität des Oberplenums um das Höhenverhältnis 1070:170 = 6,3 vergrößert worden - läßt aber auch eine Wirkung auf den gesamten Umlauf erwarten, was in diesem Abschnitt vergleichsweise zum Referenzversuch 3B beschrieben wird. Der Füllstand wurde im Versuch 16 im Hinblick auf den Störfall "Ausfall der tertiären Wärmesenke" (vgl. Abschnitt 1) auf die dem normalen Reaktorbetrieb entsprechende Betriebsspiegelhöhe eingestellt.

Die Aufheizspanne im Kern ist im Versuch 16 merklich niedriger als bei 3B. Schon das erste Maximum der Austrittstemperatur ist nicht so ausgeprägt, und auch im weiteren Verlauf steigt die Kurve schwächer (vgl. Abb. 4.2-10). Z. B. für  $\tau = 10^3$  sec betragen die Aufheizspannen 22,4 °C bei Versuch 16 und 27,8 °C bei Versuch 3B. Sie gleichen sich aber für große Zeiten allmählich an. Der gemessene

Kerndurchsatz ist hingegen für beide Versuche identisch, wenn man von Unterschieden in der Anfangsphase absieht. Daraus folgt, daß bei dem hohen Füllstand der Strom im Element-Bypass relativ mehr Wärme abgeführt haben muß als im Falle der Notspiegelhöhe. Dies läßt sich erklären:

Betrachtet man die Gewichtssäulen des Kühlmittels über dem Brutmantel- und über dem Kernbereich, so ist deren Differenz im betrachteten Zeitraum beim Versuch 16 infolge der größeren geodätischen Höhe und der Temperaturverteilung (vgl. Abb. 4.3-1 und 4.3-2) wesentlich höher als im Referenzversuch. Damit ist die treibende Kraft für den Element-Bypass erhöht, so daß dort der Durchsatz und die abgeführte Wärme gesteigert werden.

Das veränderte Temperaturfeld im Oberplenum greift auch auf den Ringraum oberhalb der Kühler über. Die TK-Eintrittstemperatur beginnt erst bei ca.  $10^3$  sec zu steigen, während im Referenzfall der Anstieg schon nach ca. 150 sec einsetzt (Abb. 4.2-10). Entsprechend verhalten sich auch die vom Kühler abgeführten Leistungen. Man muß daraus schließen, daß im Ringraum bei Betriebsfüllstand sich eine ähnliche Temperaturschichtung einstellt wie im Oberplenum, und daß keine heißen Strahlen zum Tauchkühler führen. Das würde bedeuten, daß die Schwerkkräfte die Impulskräfte überwiegen (vergl. Abschn. 4.3.).

Die in Versuch 16 sehr hohen aus den Meßwerten ermittelten Tauchkühlerdurchsätze bis  $\tau \approx 800$  sec scheinen überschätzt zu sein. Die Temperaturdifferenz zwischen dem TK-Ein- und Austritt ist in Versuch 16 aus den oben erwähnten Gründen in diesem Zeitraum besonders klein (2,15 bis 2,9 °C unregelmäßig schwankend). Es wird vermutet, daß die Bestimmung dieser Temperaturdifferenz mit nur je 2 Thermoelementen am Ein- und Austritt der Tauchkühler wegen des kleinen Wertes ungenau ist, weil sich Ungleichförmigkeiten über den TK-Querschnitt hier sehr stark auswirken. Für diese Annahme spricht ferner die Tatsache, daß die aus den Meßwerten berechnete Wärmedurchgangszahl  $k$  stark von der für andere Versuche ermittelten Kurve abweicht (Abb. 4.2. - 5). Für  $\tau > 1000$  sec ist der TK-Durchsatz bei Betriebsfüllstand um

15 bis 20 % größer als bei Notspiegelhöhe. Abgesehen von relativen Meßfehlern, die für lange Zeiten etwa innerhalb der Reproduzierbarkeit von 3 bis 5 % liegen dürften (vgl. 4.2.1.), kann dieser Unterschied zu einem Teil durch den kleineren Durchflußwiderstand im oberen Schildtankbereich bei Versuch 16 (da höher gelegene Bohrungen im Schildtank wirksam wurden) und im übrigen durch veränderte Temperaturprofile im Oberplenum und äußeren Ringraum hervorgerufen werden. Eine quantitative Analyse ist mit den vorhandenen Meßdaten nicht möglich.

#### 4.2.8. Einfluß der Anfangstemperatur

Die Prandtlzahl ( $Pr$ ), die bei den Überlegungen zur Übertragbarkeit eine Schlüsselgröße darstellt, ist im Experiment um ca. drei Größenordnungen höher als bei Reaktorbedingungen. Durch die Erhöhung der Anfangstemperatur in den Versuchen 13 und 14 auf 35 bzw. 50 °C konnte  $Pr$  verringert werden. Der Einfluß der Temperaturveränderung auf die globalen Versuchsergebnisse wird im folgenden beschrieben (vgl. auch Anhang B).

Ein Vergleich der Versuche 13 und 14 mit dem Referenzversuch 3B ist nur bedingt möglich, da neben der Anfangstemperatur auch die Kernleistung verändert wurde (vgl. Tab. A-1), um bei Variation der Prandtlzahl die Grashofzahl konstant zu lassen. Dennoch lassen sich die in 4.2.2 gefundenen Gesetzmäßigkeiten überprüfen und man findet:

Die Meßpunkte für die Aufheizspanne im Kern (bestimmt aus dem Mittelwert der Elemente 1/1 und 5/3) liegen für den Versuch 13 um ca. 20 % unterhalb der Approximationsgeraden für den Zusammenhang zwischen Aufheizspanne und Kernleistung gem. Abb. 4.2-3a. Für den Versuch 14 ist die Abweichung noch größer, wobei aber berücksichtigt werden muß, daß hier wegen der kleinen Leistung die Absolutwerte der Aufheizspanne sehr klein werden und somit u.a. durch Randeffekte des Elementes 1/1 größere Meßfehler verursacht werden können. Insgesamt läßt sich eine schwache Tendenz zu einer Verringerung der Aufheizspanne mit steigendem Temperaturniveau bei sonst gleichen Bedingungen erkennen. Auch der direkte Vergleich der Temperaturkurven für die Versuche 13 und 1B (Abb. 4.2-2 und 4.2-11), die mit gleicher Heizleistung durchgeführt wurden, bestätigt dies.

Die Meßwerte für den Kerndurchsatz zu Zeiten  $\tau = 1000, 10000$  und

20000 sec liegen für die Versuche 13 und 14 z.T. beträchtlich unterhalb der für andere Versuche gefundenen Approximationskurve gemäß Abb. 4.2-3b. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Durchflußmesser eine Nullpunktsdrift bei Temperaturänderungen aufweisen, die besonders bei den Versuchen 13 und 14 in Erscheinung tritt, da hier eine relativ große Temperaturspanne an den Durchflußmessern durchlaufen wird. Korrigiert man diese Meßfehler in der nachfolgend beschriebenen Weise, so liegen die Durchsatzwerte nahe an bzw. teilweise oberhalb der Approximationskurve. Diese Tendenz zu höheren Kerndurchsätzen bei erhöhten Anfangstemperaturen stehen dann in gutem Einklang zu den etwas verminderten Aufheizspannen.

Für die Temperaturkorrektur des gemessenen Kerndurchsatzes wird von folgender Überlegung ausgegangen. Der Antrieb für den Kerndurchsatz ist durch die Differenz der Säulengewichte im Brutmantel- und Kernbereich bis hinab zum Tankboden gegeben. Aus den gemessenen Temperaturen an der Perforation, an den Vordrosseln sowie an der Unter- und Oberkante des Kerns läßt sich die Säulengewichtsdifferenz durch lineare Interpolation näherungsweise bestimmen. Trägt man den gemessenen Kerndurchsatz über der Säulengewichtsdifferenz in einem doppelt-logarithmischen Maßstab auf, so liegen die Punkte für die Versuche 3B, 13 und 14 innerhalb eines schmalen Streubandes auf einer Geraden mit der Steigung ca. 0,9, soweit die Temperatur an den Vordrosseln konstant geblieben ist. Erst wenn sich die Temperatur gegenüber der Abgleichtemperatur merklich verändert hat, treten größere Abweichungen von der Geraden auf. Aus diesen Abweichungen läßt sich die Temperaturkorrektur näherungsweise ermitteln zu  $\Delta V_{\text{Kern}} = 0,0025 \text{ kg/sec}^{\circ\text{C}} \cdot \Delta$ , wobei  $\Delta$  die Differenz zwischen der Abgleichtemperatur der Durchflußmesser und der aktuellen Temperatur bedeutet.  $\Delta V_{\text{Kern}}$  ist den Meßwerten hinzuzufügen.

Die Durchsatzkurven der Versuche 13 und 14 weisen bei  $\tau = 3500$  bzw. 2000 sec deutliche Maxima auf (Abb. 4.2-11). Sie sind dadurch zu erklären, daß nach dieser Zeit das kalte Wasser aus den Tauchkühlern in die Brutelemente gelangt und damit die Säulengewichtsdifferenz stark erhöht ist. Es läßt sich zeigen, daß das Durchsatzmaximum zeitlich genau mit dem Maximum der Säulengewichtsdifferenz zusammenfällt.

Die Tauchkühlerleistung und damit auch der -durchsatz sind bei diesen Versuchen infolge der hohen primären Eintrittstemperatur sofort nach dem Einschalten ( $\tau = 100$  sec) sehr hoch (vgl. Abb. 4.2-11). Die TK-Durchsätze erreichen bei  $\tau = 200$  sec Werte von 1,35 kg/sec bei Versuch 13 und über 2 kg/sec bei Versuch 14, was mehr als das 10- bzw. 20-fache

des Kerndurchsatzes beträgt (gegenüber sonst 1,7 bis 2-fach). Die Umwälzung erfolgt zu diesem frühen Zeitpunkt im Gegensatz zu anderen Versuchen hauptsächlich im Kurzschluß durch den TK-Bypass (aufwärts), was sich aus der Bildauswertung und der relativ starken Temperatursenkung zwischen Oberplenum und TK-Eintritt schließen läßt.

#### 4.3. Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im Oberplenum (OP)

Das OP ist jener Bereich, in dem die beiden Teilkreisläufe Kernschleife (Brutmantel - Unterplenum - Kern) und Tauchkühlerschleife (Tauchkühler - äußerer Ringraum - innerer Ringraum) strömungstechnisch miteinander verkoppelt sind. Dieser Raum hat also im Gegensatz zu den meisten anderen mehrere Zu- und Abflüsse und ist dazu auch geometrisch komplizierter gestaltet. Die Beschreibung der Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen im OP war daher ein besonderes Anliegen der Experimente.

Nach Durchführung der Versuche muß man feststellen, daß die Strömung räumlich und zeitlich so stark veränderlich ist, daß sie mit der hier verwendeten Instrumentierung quantitativ nicht erfaßt werden konnte. Immerhin ergeben sich einige interessante Aufschlüsse aus den Temperatur- und Bildaufzeichnungen, die eine Bewertung der in NOTUNG getroffenen Modellannahmen ermöglichen.

Die geometrischen Verhältnisse im OP, insbesondere auch die Ein- und Ausströmöffnungen, sind aus Abb. 4.3-5 ersichtlich. Das OP wird berandet: unten von den Elementköpfen und der Umlenkplatte, oben vom freien Flüssigkeitsspiegel und radial vom Schildtank. Außerdem befindet sich im OP ein Bündel von 11 Instrumentierungsrohr-Attrappen, welche dicht über der Oberkante der BE enden. Die Instrumentierung dieses Raumes besteht aus 4 x 8 Thermoelementen, die in einer vertikalen Radialebene an einem Schwenkarm angebracht sind sowie aus drei Kameras, in deren Bildfeld die Strömung durch Farbeinspritzung in Intervallen sichtbar gemacht wurde. (Einzelheiten in Abschnitt 2.3.4. und Anhang C). Die in diesem Abschnitt beschriebenen Ergebnisse beruhen auf der Auswertung der hiermit erfaßten Daten und auf der direkten Beobachtung des Versuchsablaufs.

#### 4.3.1. Radiale Temperaturverteilung im OP

Die räumliche und zeitliche Entwicklung der Temperatur im OP ist in Abb. 4.3-1 für den Referenzversuch 3B mit Notspiegelhöhe und im Vergleich dazu in Abb. 4.3-2 für den Versuch 16 mit Betriebsspiegelhöhe veranschaulicht. Der Schwenkarm stand in Position 72 Grad. Die einzelnen Teilbilder zeigen in der x-y-Ebene den Raster der an sich in einer vertikalen Schnittebene durch das Modell liegenden Thermoelemente im Oberplenum. Auf der z-Achse sind die zu jedem Rasterpunkt (= TE) gehörigen Temperaturen zum Zeitpunkt  $\tau$  aufgetragen. Die schraffierten Flächen verdeutlichen dabei die Aufwärmspanne seit Versuchsbeginn ( $\tau = 0$ ). Zur Orientierung sind am unteren Bildrand die Lage der Coremitte, des Corerandes, des Kernmantels und des Schildtanks angedeutet. Die zeitliche Folge der Bilder wurde so gewählt, daß jeweils ein deutlicher Unterschied erkennbar ist. Die folgenden qualitativen Ergebnisse lassen sich aus diesen Bildern ablesen:

- a) Das Temperaturfeld im Oberplenum läßt sich zu allen Zeiten als eine relativ glatte Fläche darstellen. Größere statistische Schwankungen, auf die noch näher eingegangen wird, treten nur im Bereich oberhalb des Kerns auf. Außerhalb dieser Zone sind die Temperaturen sehr gleichmäßig und man darf annehmen, daß dort keine makroskopischen Wirbel von der Größenordnung des TE-Rasters (ca. 10 cm) auftreten.
- b) Während des Anlaufvorganges (etwa in den ersten 100 sec) beschränkt sich die Temperaturerhöhung im wesentlichen auf den Bereich über dem Kern. Dabei ist, wie erwartet, ein sehr guter axialer Wärmetransport durch die Auftriebskräfte erkennbar. Im weiteren Verlauf (vgl. Abb. 4.3-1,  $\tau = 86, 121, 162$  und  $261$  sec) bildet sich an der Oberfläche eine sehr gleichmäßige Temperaturschichtung aus, die langsam nach unten wächst. Dieser Vorgang dauert bei dem Versuch 16 wegen des höheren Wasserspiegels naturgemäß länger, so daß der Boden des OP außerhalb des Kernbereiches erst nach ca. 1000 sec von der Temperaturerhöhung erfaßt wird, gegenüber ca. 250 sec im Referenzversuch.



- c) Die höchste Temperatur wird nicht im Corezentrum, sondern an der Meßstelle 4 (über der 5. BE-Reihe) gemessen. Dies entspricht auch dem radialen Temperaturprofil an der Oberkante der beheizten Zone gemäß Abb. 4.4-4 bis 4.4-6. Die Profilverzerrung wird durch die Wandeinflüsse des Modells verursacht. Es wird vermutet, daß der Element-Bypass (vgl. 4.4.3.) in den Randkanälen besonders intensiv ist und sich somit gerade im Corezentrum stark auswirkt. Die Wärmeabgabe nach außen dürfte demgegenüber gering sein, da das Temperaturgefälle zum Zentrum hin auch bei den Versuchen 13 und 14 mit Isolierung in gleichem Maße festgestellt wurde.
- d) Im unteren Teil des OP muß eine radiale Strömung aus dem Kernbereich heraus, insbesondere die befürchtete Kurzschlußströmung aus den BE- in die BU-Köpfe, nach diesen Bildern ausgeschlossen werden, da die dort vorhandene "kalte" Schicht eindeutig von oben herab und nicht von der Seite her verdrängt wird.
- e) Nach längeren Zeiten vergleichmäßig sich das Temperaturfeld immer mehr, so daß praktisch ab 2000 sec die Annahme völliger Durchmischung bereits gut zutrifft. Bemerkenswert ist auch der deutliche Temperatursprung von der unteren TE-Reihe zum Bereich unterhalb des Umlenkbleches, wo die Temperatur etwa 20 °C oder weniger beträgt. Dies deutet darauf hin, daß durch die Perforation im Umlenkblech kein nennenswerter Massenaustausch stattfindet (vgl. 4.3.3.).

Die statistischen Temperaturschwankungen oberhalb des Kernes sind beträchtlich. Abb. 4.3-3 zeigt die Meßwerte der Thermoelemente 3 und 4, also 10 mm oberhalb der Elementköpfe in den BE-Reihen 2 und 5. Daraus geht hervor, daß die Bandbreite der Schwankungen bei Erreichen des ersten Temperaturmaximums ( $\tau = 120$  sec) bis zu ca. 10 °C, also ungefähr 40 % der Aufheizspanne im Kern beträgt. Später verringert sie sich auf 3 bis 5 °C. Auch die entsprechenden höher gelegenen Meßstellen 11 und 12, 19 und 20, 27 und 28 zeigen Schwankungen in derselben Größenordnung mit nach oben hin abnehmender Tendenz (ca. 3 bzw. 5 °C bei den Meßstellen 27 bzw. 28). Die

nächste TE-Reihe über der 1. Brutelementreihe hingegen weist nur Schwankungen von 1 bis 2 °C auf, allerdings bei deutlich niedrigerem Temperaturniveau.

Aus diesen Erscheinungen folgt der Schluß, daß oberhalb des Kerns eine starke Verwirbelung vorhanden ist, und daß hier eine Vermischung von Strömungen unterschiedlicher Temperaturen stattfinden muß. Der kältere Anteil scheint überwiegend aus dem Element-Bypass und zu einem geringeren Teil aus dem OP selbst zu kommen. Es sei bemerkt, daß an den Meßstellen am Ende der beheizten Zone, aber innerhalb der Elementrohre, die statistischen Temperaturschwankungen kleiner als 3 °C waren. Eine Ausnahme bildete nur das zentrale Element mit einer Bandbreite bis zu 5 °C.

#### 4.3.2. Temperaturverteilung in Umfangsrichtung

Die Erfassung der Temperatur in Umfangsrichtung erfolgte bei allen Versuchen kurz vor Versuchsende, also zu einem Zeitpunkt, in dem für die Dauer der Schwenkbewegung des TE-Halters ein stationärer Betrieb angenommen werden konnte. In Abb. 4.3-4 sind für einige Meßstellen (MS) im Oberplenum die Temperaturen in Abhängigkeit von der Winkelstellung  $\varphi$  des Schwenkarmes dargestellt. Die Werte wurden im Referenzversuch 3B im Zeitraum  $\tau \approx 27600$  bis 28000 sec registriert. Daraus ergibt sich:

- a) Über dem Kern stellt sich infolge von Wandeinflüssen ein nach oben gewölbtes Temperaturprofil ein. Die Differenz zwischen dem Maximum in der Symmetrieebene ( $\varphi = 60^\circ$ ) und den Temperaturen in Wandnähe ist an der MS4 (10 mm über der 5. BE-Reihe) am größten und erreicht in diesem Betriebszustand ca. 4 °C bzw. 25 % der Aufheizspanne. In höheren Schichten schwächt sich die Wölbung ab und verschwindet an den höchsten Temperaturmeßstellen infolge Vermischung.
- b) Über dem Brutmantel und daran nach außen anschließend (MS 5, MS 6, ...) ist die Temperatur in Umfangsrichtung konstant, von kleinen statistischen Schwankungen in der Größenordnung 1 °C

abgesehen. Damit sind die Bedenken ausgeräumt, daß sich in dem Winkelbereich zwischen den Tauchkühlern ein Totwassergebiet ausbilden könnte, welches nicht voll an der Wärmespeicherung im OP beteiligt wäre. Auch die Abweichung des sechseckigen Kernquerschnittes von der Kreisform tritt bei der Temperaturverteilung in Umfangsrichtung praktisch nicht in Erscheinung.

- c) Ein Einfluß der Instrumentierungsrohre auf die globale Temperaturverteilung ist nicht feststellbar. Bei einigen Meßstellen, wie z. B. MS 5, 13, 28 und 29, entsteht der Eindruck, daß dort örtliche Temperaturschwankungen vorhanden wären. Ein Zusammenhang zwischen diesen und den Instrumentierungsrohren ist jedoch nicht erkennbar. Die Schwankungen sind außerdem nicht stationär, so daß sie als statistische Vorgänge angesehen werden müssen.

#### 4.3.3. Geschwindigkeitsverteilung im OP

Wie eingangs dieses Kapitels schon erwähnt, sind die Geschwindigkeiten im OP räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Dies gilt nicht nur für die Anlaufphase, sondern auch für die Versuchszeiten, in denen global gesehen ein thermisches Gleichgewicht im Kreislauf erreicht ist, also etwa für  $\tau > 20\ 000$  sec. In der Bildauswertung im Anhang C wurde versucht, mit Hilfe der Farbeinspritzung ein Geschwindigkeitsprofil über die Höhe des OP zu bestimmen (vgl. Anhang C, Tab. C-2 3B/M1/S13, S15, S16 und S21). Die Veränderungen dieser Profile von einer Bildserie zur nächsten, aber auch das Auftreten von sehr unregelmäßigen Geschwindigkeitskomponenten in Umfangsrichtung, wie an derselben Stelle unter M3 beschrieben, machen eine quantitative Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung unmöglich.

Es soll dennoch versucht werden, aus bekannten Durchsätzen durch bestimmte Kontrollflächen ein qualitatives Bild von den Geschwin-

digkeiten im OP zu skizzieren, das mit den Beobachtungen während des Versuches und den Bildaufzeichnungen in Einklang steht. Abb. 4.3. - 5 zeigt einen Längsschnitt durch das OP mit den angrenzenden Räumen und mit einem konstruierten Stromlinienfeld für den thermisch stationären Zustand. Die Vektoren stellen dabei zeitlich und räumlich über die jeweilige Kontrollfläche gemittelte Geschwindigkeiten dar, deren Beträge auf den Wert am BE-Austritt (Kontrollfläche 6) normiert sind. Die Größe der Kontrollflächen  $A_i$ , die Volumenströme  $\dot{V}_i$  durch diese Flächen und die daraus sich ergebenden Geschwindigkeiten  $v_i$  sind in der Tab. 4.3-1 zusammengestellt. Dafür mußten einige Annahmen getroffen werden, die in den Fußnoten zur Tabelle erläutert sind.

In diesem Strömungsmodell (Abb. 4.3-5) sollen nur die Größenverhältnisse der Geschwindigkeiten an verschiedenen Punkten im stationären Zustand verdeutlicht werden. Alle im folgenden genannten Absolutwerte gelten für einen gemessenen Kerndurchsatz von 0,17 kg/sec, also ca. 70 % des Maximalwertes im Referenzversuch. In den BE-Köpfen (Kontrollfläche 6) beträgt die Geschwindigkeit 0,21 cm/sec. Oberhalb des Kerns (Kontrollfläche 8) erhöht sich der Wert wegen des BE-Bypass-Stromes einerseits und wegen der Instrumentierungsrohre andererseits auf 0,29 cm/sec. Trotz dieser kleinen Reynoldszahl wurde hier an Hand der Schlieren und der sofortigen Verteilung der eingespritzten Farbe eine stark verwirbelte Aufwärtsströmung beobachtet.

Für die Kontrollfläche 10 berechnet sich nach diesem Strömungsmodell eine mittlere Geschwindigkeit von 0,13 cm/sec. Die Bildauswertung ließ ein ausgeprägtes Profil über die Höhe erkennen (s. o.), derart, daß die Geschwindigkeit von einem relativ hohen Wert an der freien Oberfläche (ca. 0,5 cm/sec) zunächst stark abfiel auf 0 bis 0,2 cm/sec in halber Höhe. Etwa 3 cm über der Umlenkplatte schien sich dann eine schneller strömende Zwischenschicht auszubilden, deren Dicke nicht genau festgestellt werden konnte. Diese Erscheinung wurde qualitativ an mehreren Versuchen beobachtet. Eine denkbare Erklärung dafür wäre die Ausbildung eines Rückstaukeils, ausgehend von der Schildtankwand im Bereich zwischen den Bohrungen (Kontroll-

Tabelle 4.3-1: Strömungsquerschnitte, Volumenströme und Geschwindigkeiten im OP (Versuch 3B, stationärer Zustand)

Kontrollfläche (vgl. Abb. 4.3-5)	Quer- schnitt $A_i$ (cm <sup>2</sup> )	$\frac{A_i}{A_6}$	Vol.- Strom $\frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_6}$	Geschw. $\frac{v_i}{v_6}$	Geschw. $v_i$ (cm/sec) im Ref. Vers. bei $\tau \approx$ 20 000 sec
(1) Innerer Ringraum	4223	5,16	1,7 <sup>1)</sup>	0,33	0,069
(2) Perforation Kernmantel	170	0,208	1,41 <sup>3)</sup>	6,8	1,41
(3) Perforation Umlenk- platte	400	0,488	0,29 <sup>4)</sup>	0,6	0,12
(4) Brutelement-Quer- schnitte (ohne Bündel)	988	1,20	1,0	0,83	0,17
(5) Spalte zwischen Brut- elementen	113	0,138	0,41 <sup>5)</sup>	3,0	0,62
(6) BE-Querschnitte (ohne Bündel) (9 Reihen)	820	1,0	1,0	1,0	0,208
(7) Spalte zwischen BE (9 Reihen)	95	0,116	0,41 <sup>2)</sup>	3,5	0,73
(8) Freiquerschnitt über Kern (9 Reihen)	819	1,0	1,41	1,41	0,29
(9) Freiquerschnitt über BU	1260	1,54	0	0	0
(10) Mantelfl. über Kern- mantel	1850	2,26	1,41	0,62	0,13
(11) Perforation Schildtank	75,4	0,091	1,7	18,7	3,9

<sup>1)</sup> Aus TK-Durchsatz und Kerndurchsatz berechnet

<sup>2)</sup> BE-Bypaß-Strom aus Energiebilanz mit gemessener Aufheizspanne berechnet

<sup>3)</sup>  $\dot{V}_2 = \dot{V}_6 + \dot{V}_7$  angenommen

<sup>4)</sup>  $\dot{V}_3 = \dot{V}_1 - \dot{V}_2$  angenommen

<sup>5)</sup>  $\dot{V}_5 = \dot{V}_7$  gesetzt

fläche 11), der von dem ankommenden Kühlmittel umströmt werden muß. Das Kühlmittel wird also nach oben und unten verdrängt und somit beschleunigt. Da im betrachteten Bereich zu diesem Zeitpunkt die Temperatur sehr ausgeglichen ist, wird dieser Vorgang nicht durch Schwerkraft beeinträchtigt. Es fällt jedoch auf, daß die nach unten abgedrängte Zwischenschicht sehr dünn ist und auf der am Boden des OP liegenden etwas kälteren Unterschicht zu schwimmen scheint.

Es wurde schon in Abschnitt 4.2.6. ausgeführt, daß der Massenaustausch durch die Perforation in der Umlenkplatte (Kontrollfläche 3) nur gering sein kann. Nach dem hier beschriebenen Strömungsmodell ergäbe sich immerhin ein Volumenstrom von 17 % des Tauchkühlerdurchsatzes. Dieser Wert ist sicher durch die Summierung von Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Teilströme in den Kontrollflächen 1 und 2 überschätzt. Neben den visuellen Beobachtungen ist dafür die Temperaturverteilung ein gutes Indiz. Würde nämlich in der Perforation die hier errechnete Geschwindigkeit von 0,12 cm/sec vorhanden sein, so müßte beim Überstreichen der Bohrungen an der Temperaturmeßstelle 9 beim Schwenken des Meßrechens jeweils eine deutliche Temperaturabsenkung erfolgen, da das Kühlmittel unterhalb der Umlenkplatte um ca. 10 °C kälter ist als oberhalb. Aus den zu Abb. 4.3-4 analogen Aufzeichnungen ist jedoch an MS 9 keine derartige Absenkung vorhanden.

Es ist noch zu erörtern, wie sich das Strömungsfeld qualitativ in der Anlaufphase verhält. Zunächst steigt das Kühlmittel über dem Kern in einer Art Kolbenströmung aufwärts und verteilt sich radial nach außen in der Oberschicht. Wegen des anfänglich noch starken Temperaturgradienten (vgl. Abb. 4.3-1) bleibt diese Radialströmung auf den oberen Bereich beschränkt und erreicht bei  $\tau \approx 100$  bis 1000 sec Werte in der Größenordnung 1,2 cm/sec bei starker Verwirbelung (vgl. Anhang C, Tab. C-2, V3B/M1/S3-S7). Während dieser Phase ist zunächst im unteren Bereich des OP (aber außerhalb des Kernbereichs) eine zum Zentrum hin gerichtete Strömung vorhanden, die teilweise in den Brutelementen verschwindet und sich teilweise mit dem aus dem Kern kommenden Kühlmittel vermischt. Der Zustrom erfolgt durch die Perforation der Umlenkplatte. Diese Rückströmung beginnt sich nach ca. 300 sec abzuschwächen und nähert sich in den nächsten 1000 bis 1500 sec allmählich dem oben beschriebenen Gleichgewichtszustand an.

Bei Betriebsspiegelhöhe (Versuch 16) läuft der Vorgang qualitativ völlig ähnlich ab, nur mit etwas vergrößertem Zeitmaßstab infolge der höheren Wärmekapazität. Die zum Zentrum gerichtete Strömung im unteren Bereich mit anschließender Vermischung mit der Kernströmung

wurde hier noch deutlicher beobachtet. Im Gegensatz zum Versuch mit Notspiegelhöhe erfolgte der Zustrom deutlich sichtbar durch die unteren Schildtankbohrungen (50 und 140 mm über der Umlenkplatte), die ja sonst die einzigen Auslaßöffnungen des OP darstellen.

#### 4.4. Vergleich der Experimente mit dem Rechenprogramm NOTUNG

Beim Vergleich zwischen Theorie und Experiment ist die Frage nach den Abweichungen beider Ergebnisse voneinander zu stellen. Diese Frage kann allgemein nur in wenigen Fällen beantwortet werden. Bei derart komplexen Problemen wie beim Notkühlkreislauf muß man die Frage einschränken, da eine beliebig feine theoretische Nachbildung des Experiments praktisch nicht möglich bzw., wie die Erfahrung lehrt, auch nicht immer erforderlich ist. Die feine Nachbildung des Experiments wird für die Theorie durch Modelle ersetzt, die die in Wirklichkeit ablaufenden Vorgänge über ein Volumen, das den Erfordernissen eines Rechenprogrammes angepaßt ist, summiert bzw. gemittelt angeben. Daraus folgt, daß Größen nur dann verglichen werden können, wenn sie an vergleichbaren Ortspunkten repräsentativ für dasselbe Volumen gemessen bzw. berechnet worden sind.

Neben diesem ganz allgemein geltenden Kriterium für die Auswahl der zu vergleichenden Meß- bzw. Rechenwerte wird man solche Größen aussuchen, die das Gesamtverhalten des Kreislaufes am meisten bestimmen. Diese Größen sind hier insbesondere:

- Der Massendurchsatz durch den Kern.
- Die Temperatur an den Vordrosseln.
- Die im Tauchkühler abgeführte Wärmemenge.

Mit diesen Größen, mit der gegebenen Kernleistung und unter Vernachlässigung des radialen Wärmeaustausches zwischen Kern und Brutzone läßt sich eine mittlere Kernaustrittstemperatur bestimmen. Über dieser mittleren Temperatur wird sich vorwiegend aufgrund radialer Wärmeleitung ein Temperaturprofil ausbilden, das zwar lokal die



mittlere Temperatur überschreitet, insgesamt gesehen jedoch für das Verhalten des Kreislaufs nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Ein Vergleich der radialen Temperaturprofile am Ende der Heizzone wird dann zeigen, wie groß die Zonen sind, in denen die mittlere Kernaustrittstemperatur überschritten wird, und wie gut die Temperaturprofile für Experiment und Rechnung übereinstimmen. Anschließend werden dann die Arbeitsbedingungen des Tauchkühlers im Rechenprogramm mit denen im Experiment verglichen.

Für den Vergleich stehen drei Versuche zur Verfügung, für die die Firma INTERATOM mit dem Schichtenmodell II des Programms NOTUNG [1] Nachrechnungen durchgeführt hat. Dies sind:

- Versuch Nr. 3 (Referenz)
- Versuch Nr. 16 (Betriebsspiegel)
- Versuch Nr. 19 (Blanketvorheizung)

#### 4.4.1. Kurzbeschreibung des Programms NOTUNG

Hydrodynamisches Modell:

Zur Berechnung der Massenströme wird ein zweidimensionales Schema verwendet. Für jede Leistungsgruppe im Kern und Blanket wird ein Brenn- bzw. Brutelement gerechnet. Die Elemente sind untereinander über das obere und untere Plenum bzw. das Mitteldruckplenum verbunden.

Im oberen Teil des radialen Blankets liegt der sogenannte Perforationsbereich. Es sind dort in den Brutelementwänden Öffnungen, die es dem Kühlmittel ermöglichen, ohne den Umweg über das obere Plenum in die Brutelemente zu gelangen. Zur Simulation der Anordnung der Brutelemente wird in diesem Bereich mit 5 bzw. 6 radial hintereinander angeordneten Brutelementen gerechnet.

Im oberen Plenum, im Mitteldruckplenum und im Bereich der Tragplatte wird nur die Kontinuitätsgleichung, in allen übrigen Punkten dazu die Impulsgleichung gelöst. Die verwendete Impulsgleichung berücksichtigt die Trägheitsglieder.

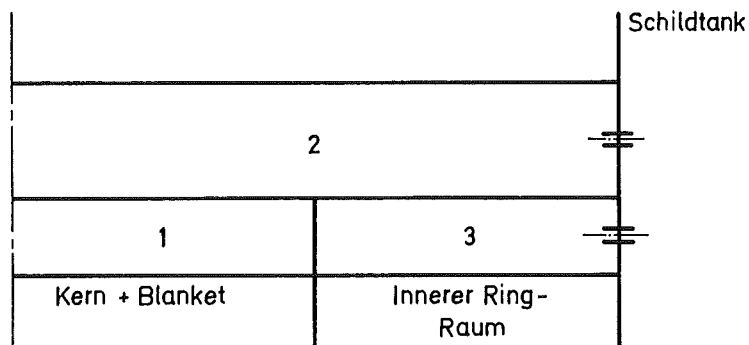
Thermodynamisches Modell:

Für die Thermodynamik wird ein ähnliches Schema wie bei der Hydrodynamik verwendet. Für jede Masche wird eine Energiebilanz gelöst, die davon ausgeht, daß sich alle eintretende und evtl. erzeugte Wärme unmittelbar gleichmäßig auf die ganze Masche verteilt. In der Energiebilanz ist die Wärmeleitung in axialer und radialer Richtung enthalten. Für Kern und Blanket ist in den Energiebilanzen berücksichtigt, daß das Kühlmittel sowohl aufwärts als auch abwärts strömen kann.

Die Integration der Gleichung über die Zeit wird mit einem expliziten Differenzenschema durchgeführt. Dies stellt das einfachste Integrationsverfahren dar, das jedoch bei Wahl geeigneter Zeitschritte zufriedenstellende Ergebnisse liefert.

Schichtenmodell II des Oberplenums:

Das Schichtenmodell II des Programms NOTUNG teilt das Oberplenum innerhalb des Schildtanks in drei Punkte auf (Skizze)



In jedem Zeitschritt wird festgestellt, welcher Massenstrom aus den Brennelementen bzw. Brutelementen in den Knoten 1 ein- bzw. aus diesem ausströmt. Ergibt sich aus dieser Bilanz ein Überschuß für den Knoten 1, so wird dieser Überschuß dem Knoten 2 zugeteilt, wenn die Temperatur des Knotens 1 größer als die mittlere Temperatur der Knoten 2 und 3 ist, anderenfalls wird der Überschuß dem Knoten 3 zugeteilt (siehe auch |1|).

#### 4.4.2. Vergleich wichtiger gemittelter Größen

In Abb. 4.4-1 ist die in den Tauchkühlern abgeführte Wärmemenge über der Zeit aufgetragen. In allen Diagrammen ist eine gleichmäßig gute Übereinstimmung der Kurven zwischen Programm und Experiment festzustellen. So zum Beispiel im Versuch 3, wo das Maximum der Tauchkühlerleistung bei 1000 sec, der leicht abfallende Verlauf bis ca. 10 000 sec und die nachfolgende Stufe als Folge der Heizleistungsänderung für Rechnung und Experiment sehr nahe beieinander verlaufen. Oder im Versuch 16, dessen Tauchkühlerleistung über der Zeit einen ganz andersartigen Verlauf als im Versuch 3 zeigt; auch hier ist die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment sehr zufriedenstellend. Ähnliches gilt schließlich auch für den Versuch 19, dessen Verlauf weitgehend dem von Versuch 3 entspricht, nur daß die linke Flanke wegen der Nullpunktsverschiebung der logarithmischen Zeitachse etwas steiler erscheint. Insgesamt gesehen zeigen die experimentellen Werte gegenüber dem Rechenprogramm eine etwas höhere Wärmemenge an. Allerdings scheinen die Meßwerte um einige Prozent zu hoch zu sein (vergl. hierzu Abschnitt 4.4.5.).

In Abb. 4.4-2 ist die Temperatur an den Vordrosseln aufgetragen. Hier läßt sich, abgesehen von den unterschiedlichen Startbedingungen, eine ausgezeichnete Übereinstimmung der Temperaturen feststellen. Die maximalen Abweichungen bei Zeiten größer 100 sec liegen bei 1 °C.

In Abb. 4.4-3 sind die Kerndurchsätze aufgetragen. Auch hier stimmt der Verlauf der Kurven von Rechnung und Experiment recht gut überein, z. B. die Plateaus von ca. 100 bis 1000 und von 1000 bis 10 000 sec mit den dazwischenliegenden Stufen. Man erkennt aber bei genauerer Betrachtung, daß die Rechnung einen im Durchschnitt etwa 10 bis 20 % höheren Durchsatz als das Experiment angibt. Da die Bewertung dieses Unterschiedes zunächst offen ist, wird er im folgenden näher untersucht.

#### 4.4.3. Vergleich der Kühlung im Kern

Dazu wurden in Tabelle 4.4-1 die mittleren Aufheizspannen aus den gemessenen und berechneten Daten unter der Annahme, daß alle BE gleichmäßig durchströmt werden, zusammengestellt. In dieser Tabelle kommt klar zum Ausdruck, daß die mittlere Aufheizspanne für große Zeiten ( $\tau > 2000$  sec) im Experiment um 3 bis 6 °C niedriger liegt als bei der Rechnung. Dies ist etwas überraschend, da man aufgrund des Verhältnisses der Kerndurchsätze eine Unterschätzung der Aufheizspannen durch die Rechnung erwartet.

Tabelle 4.4-1: Über den Kern gemittelte Aufheizspannen in °C

Versuch Nr.		Zeit [sec]	900	5000	10 000	14 000
3B	Aufheizspanne [°C]	Rechnung	30,9	19,6	20,7	17,5
		Experiment	27	16,7	17	13,3
16		Rechnung	30,5	20,2	21,4	18,0
		Experiment	19,5	15	15,5	11,3
19		Rechnung	31,8	20,7	21,3	17,8
		Experiment	22,2	14,5	15,7	12,2

Um der Aufklärung der Differenz näherzukommen, wird nun in der oben beschriebenen Weise eine Wärmebilanz über den gesamten Kern aufgestellt. Es gilt für den stationären Zustand:

$$\dot{Q}_{\text{Kern}} = \dot{m}_{\text{Kern}} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta_{\text{Kern}} \quad (3)$$

wobei  $\dot{Q}_{\text{Kern}}$  die im Kern freigesetzte Leistung ist. Die nach (3) bestimmbaren Aufheizspannen und die tatsächlich aufgetretenen sind in Tabelle 4.4. - 2 zusammengestellt. Man erkennt daraus, daß die Aufheizspannen für die Rechnung sehr gut übereinstimmen; d. h., daß nach der Rechnung die im Kern freigesetzte Wärme im wesentlichen durch den Massenstrom durch die Brennelemente abgeführt wird. Für das Experiment zeigen die Aufheizspannen aber für Zeiten  $\tau > 2000$  sec durchschnittlich 7 bis 10 °C.

Tabelle 4.4-2: Vergleich der nach Gleichung (3) bestimmten und der tatsächlich festgestellten Aufheizspannen in °C

Versuch Nr.	Zeitpunkt $\tau$ (sec)	Experiment		Rechnung	
		$\Delta\vartheta$ nach Gl. (3)	$\Delta\vartheta$ gemessen	$\Delta\vartheta$ nach Gl. (3)	$\Delta\vartheta$ gemes.
3B	900	36	27	31,4	30,9
	5 000	24	16,7	19,7	19,6
	9 000	24,4	17	20,9	20,7
	14 000	21	13,3	17,7	17,5
16	900	37,5	19,5	31,3	30,5
	5 000	24,4	15	20,3	20,2
	9 000	24,4	15,5	21,7	21,4
	14 000	21,0	11,3	18,2	18,0
19	900	38	22,2	32,1	31,8
	5 000	24,2	14,5	20,8	20,7
	9 000	24,2	15,7	21,5	21,3
	14 000	22,2	12,2	17,9	17,8

Die Ursache kann darin liegen, daß der Massendurchsatz, die Leistung und die Temperatur nicht genau gemessen worden sind und/oder daß der Kern seine Wärme noch auf anderen Wegen abgibt.

Wollte man die Differenz alleine mit Meßungenauigkeiten im Massendurchsatz begründen, so müßte dieser einen Meßfehler von ca. 30 % aufweisen. Dies ist aber sehr unwahrscheinlich. Wahrscheinlicher ist es, daß die Wärme auf anderen Wegen aus dem Corebereich abfließt. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten:

- radiale Wärmeleitung,
- einen Naturumlauf außerhalb der Brennelemente zwischen Kern und Blanket (Element-Bypass).

In den Abb. 4.4-4, 4.4-5, 4.4-6 ist das radiale Temperaturprofil innerhalb der Elemente am Ende der Heizzone aufgetragen. An Hand dieser Diagramme läßt sich folgendes feststellen:

Von der BE-Reihe 4 bis zur 7. BE-Reihe und von der 11. bis zur 14. Reihe ist zwischen Rechnung und Experiment nur ein kleiner Unterschied feststellbar. In den Reihen 1, 2, 3, 8, 9, 10 liegt aber die Austrittstemperatur im Experiment deutlich niedriger als bei der Rechnung.

Bei einem Wärmeverlust des Kerns durch Leitung müßte diese Wärme durch den Brutmantel in den inneren Ringraum gelangen. Sonst würde sie entweder die Temperatur an den Vordrosseln anheben oder durch einen entgegengesetzt gerichteten Wärmestrom unterhalb des Kerns zur Aufheizspanne beitragen. Da diese Bedingungen nicht erfüllt werden, und der radiale Temperaturgradient im Blanket nahezu Null ist, kann die radiale Wärmeleitung keine dominierende Rolle spielen. Dies legt die Annahme eines Naturumlaufts außerhalb der Brennelemente nahe. Dabei tritt das Kühlmittel im Perforationsbereich des radialen Blankets in den Raum zwischen den Brutelementen ein, strömt in diesem Zwischenraum nach unten bis zur Tragplatte, tritt nun seitlich in den Kernbereich ein und strömt schließlich zwischen den Brennelementen wieder axial nach oben aus dem Kern ins Oberplenum.

Für die Richtigkeit dieser Annahme spricht, daß im wesentlichen das Grenzgebiet zwischen Kern und Blanket beeinflußt wird, der mittlere Corebereich des Experiments aber nur schwach. Der Hauptströmungswiderstand dieses Kreislaufs liegt wohl in der Querströmung, so daß der Kreislauf in seiner Eindringtiefe ins Core begrenzt ist. Dies erklärt dann auch die Übereinstimmung der Temperaturprofile in den mittleren Reihen 4 bis 7. Ist nämlich dieser zusätzliche Kühlkreislauf nur noch schwach vorhanden, so kommen die Verhältnisse des Experiments denen der Rechnung sehr nahe. Schließlich kann mit einem derartigen Umlauf auch das Absinken der Temperatur des Zentralelements und seiner Nachbarelemente (Reihe 1 bis 3) im Experiment erklärt werden. Dieses Element ist aufgrund seiner geometrischen Lage von einem verhältnismäßig großen Freiraum umgeben und wird daher besonders stark durch den zusätzlichen Kreislauf gekühlt. Daß der Kreislauf auch das Zentralelement erfaßt, ist leicht damit zu erklären, daß der Strömungswiderstand für die Querströmung entlang der radialen Schnittflächen des Modells sicher kleiner ist als im zentralen Bereich des Kerns.

Nimmt man diesen Element-Bypass an und wählt seinen Durchsatz so groß, wie es aus der Wärmebilanz erforderlich ist, so ergibt sich, daß der tatsächliche Kerndurchsatz im Experiment um ca. 20 % höher liegt als von NOTUNG berechnet.

Dieser große Unterschied ergibt sich daraus, daß in NOTUNG der gesamte Massenstrom durch die Brennelemente fließt. Damit erhöht sich der Strömungswiderstand beträchtlich und begrenzt in NOTUNG den Durchsatz. In diesem Punkt ist NOTUNG also konservativ.

Wie man den Abb. 4.4-4, 4.4-5 und 4.4-6 weiter entnehmen kann, ist die Differenz der mittleren und der maximalen Kernaustrittstemperatur sehr klein.

#### 4.4.4. Vergleich der Arbeitsbedingungen der Tauchkühler

In der Abb. 4.4 -7 ist die mittlere Tauchkühlereintrittstemperatur aufgetragen. Ihr ist zu entnehmen, daß diese Temperatur für die Rechnung höher liegt als im Experiment. In der Abb. 4.4 -8 ist die Temperaturdifferenz an der Primärseite des Tauchkühlers aufgetragen. Auch hier sind die Abkühlspannen in der Rechnung größer als im Experiment. Aus Abb. 4.4 -9, in der die Tauchkühlerdurchsätze verglichen werden, kann man erkennen, daß die Durchsätze in der Rechnung etwa im selben Verhältnis unterschätzt werden, wie die Abkühlspannen überschätzt werden. Dies führt dann dazu, daß - wie in Abb. 4.4 -1 zu sehen - die abgeführten Wärmemengen recht gut übereinstimmen.

Dieses Verhalten läßt sich wie folgt interpretieren: Der Massenstrom des Naturumlaufs um den Schildtank ergibt sich aus dem Gleichgewicht der Antriebs- und Reibkräfte, bzw. hier aus dem Differenzgewicht der Flüssigkeitssäulen innen und außen am Schildtank und den Reibkräften in den Bohrungen des Schildtanks und im Tauchkühler. Vergleicht man nun die Temperaturen innen und außen am Schildtank zwischen Rechnung und Experiment, so stellt man fest, daß der Knoten 3 des Schichtenmodells 2 der Rechnung bei großen Zeiten um ca. 6 bis 7°C kälter ist als das entsprechende Volumen im Experiment. Dies hebt die Lage des Wärmeschwerpunktes dieses Umlaufs an und begrenzt damit den dort möglichen Durchsatz auf einen kleineren Wert als im Experiment.

Da eine Verringerung des Massendurchsatzes bei gleicher transportierter Wärmemenge zu höheren Temperaturen führt, kann man auch hier feststellen, daß die Rechnung vom Experiment in konservativer Richtung (höhere Temperaturen) abweicht.

Schließlich werden in Abb. 4.4 -10 noch die Maximaltemperaturen im Kreislauf gezeigt. Dieser Vergleich kann nur qualitativen Charakter haben, da dabei weder Meßort noch assoziiertes Volumen mit berücksichtigt werden. Er ist aber doch insoweit aufschlußreich,



als daraus zu ersehen ist, daß nicht nur gemittelte Größen, sondern auch die maximalen Temperaturen selbst in guter Übereinstimmung sind.

#### 4.4.5. Wärmebilanz über den Versuch 3 B.

Zum Abschluß der Versuchsauswertung wurde eine globale Wärmebilanz über den gesamten Versuchsaufbau und die Dauer eines Versuchs aufgestellt. Dies dient einmal dem Nachweis, daß die freigesetzte Wärme tatsächlich den vorgesehenen Weg nimmt und nicht durch unkontrollierte Verluste aus dem Behälter fließt. Zum zweiten ergibt sich damit eine Aussage über die Güte der Leistungsmessungen.

Integriert man die zugeführte elektrische Leistung für den Versuch 3 B über eine Versuchsdauer von ca. 15000 sec, so ergeben sich ca. 320 000 KJ eingebrachte Wärme. Die Differenz zwischen zugeführter elektrischer und am Tauchkühler abgeführter Energie ergibt, ebenfalls integriert, einen Wert von ca. - 31000 KJ. D.h., es wurden nach den Meßdaten ca. 10 % mehr Wärme aus dem Behälter abgeführt, als ihm kontrolliert zugeführt wurde. Bereinigt man dieses Ergebnis um die Änderung des Wärmeinhalts des Versuchsaufbaus, so verbleiben noch ca. 2 % bis 4 % an zuviel abgeführter Wärme. Dieses Ergebnis ist in zweifacher Hinsicht zufriedenstellend: zum ersten bedeutet dies, daß die Wärme tatsächlich den vorgesehenen Weg nimmt und der Wärmeaustausch mit der Umgebung insgesamt gesehen vernachlässigbar ist und zum zweiten besagt dies, daß auch die Leistungsmessung zufriedenstellend ist, da man in Anbetracht der Unsicherheiten bei der Integration der Wärmemengen über der Versuchsdauer und bei der Bestimmung des Wärmeinhalts zu Beginn und am Ende des Versuchs durchaus mit einem Fehler in dieser Größenordnung rechnen muß.

Beim Vergleich der Ergebnisse von NOTUNG und der Experimente kann man insgesamt eine gute Übereinstimmung feststellen. Die größten auftretenden Abweichungen sind darauf zurückzuführen, daß im Experiment mit großer Wahrscheinlichkeit ein Element-Bypass vorhanden ist, der von NOTUNG nicht beschrieben wird. Dies führt dazu, daß die Temperaturen im Experiment tiefer liegen. Da im Experiment die Spalte zwischen den Brennelementen nur durch Fertigungstoleranzen entstanden sind, im SNR 300 jedoch definierte Spalte von mehreren mm durch die BE-Abstandshalter sichergestellt sind, wird NOTUNG auch dort zu hohe Temperaturen errechnen.

Insgesamt kann man feststellen, daß das Programm NOTUNG die Verhältnisse recht gut wiedergibt. Dort wo Abweichungen gegenüber dem Experiment auftreten, liegt NOTUNG von der verwendeten Modellvorstellung her auf der sicheren Seite.

## 5. Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Ergebnisse aus den Modellversuchen, die im Bericht im einzelnen diskutiert werden, kurz zusammengefaßt werden.

### 5.1. Versuchsergebnisse

Der Naturumlauf setzt wenige Sekunden nach dem Einschalten der Heizleistung ( $\tau = 0$ ) in der erwarteten Weise (Abb. 2.1 - 1) ein, wobei der Kerndurchsatz und die Kernaustrittstemperatur schnell ansteigen. Der Kerndurchsatz schwenkt kurz nach der ersten Leistungsreduzierung (bei  $\tau = 100$  sec) auf ein Plateau ein, während die Austrittstemperatur ein erstes Maximum durchläuft und dann bis zur zweiten Leistungsabsenkung (bei  $\tau = 1000$  sec) nochmals leicht ansteigt. Anschließend verringern sich die genannten Meßgrößen und die für den Reaktor kritische Phase ist, wenn die Vorgänge dort ebenso ablaufen, beendet.

In den gegenüber den Brennelementen (BE) schwach beheizten Brutelementen (BU) setzt anfangs ebenfalls eine Aufwärtsströmung ein, die sich aber spätestens nach ca. 150 sec wegen des hohen Kühlmitteldurchsatzes im Kernbereich umgekehrt hat. Die dabei auftretende Aufwärmspanne in den BU ist deutlich kleiner als in den BE. Das Eintreten von Kühlmittel aus dem Oberplenum (OP) in die BU-Köpfe konnte nur in geringem Maße während der ersten 300 sec beobachtet werden. Anschließend stellt sich im OP ein deutlich höheres Temperaturniveau ein, so daß die Auftriebskräfte diesen Strom unterbinden und der Zufluß zu den BU ausschließlich durch die Kernmantelperforation erfolgt. Neben dem in Abb. 2.1 - 1 eingezeichneten Kühlmittelstrom setzt ein merklicher Kühlstrom in den Spalten zwischen den Elementen (Element-Bypass) ein und zwar im Brutmantel abwärts, dann radial nach innen und im Kernbereich wieder aufwärts. Nach Wärmebilanzrechnungen führt er bis zu ca. 30 % der Heizleistung ab.

Um den Vergleich zwischen Rechnung und Experiment für mehrere Systemzustände zu ermöglichen und andererseits auch die Antwort des Systems auf bestimmte Veränderungen direkt zu messen, wurden in insgesamt 25 Versuchen folgende Versuchsparameter variiert: Heizleistung, Tauchkühlerkapazität, Heizleistungstransient, Brutmantelleistung, mehrere Querschnittsverengungen, Füllstand und Anfangstemperatur. Die Veränderung des Füllstandes auf die sog. Betriebsspiegelhöhe hatte dabei neben der genaueren Untersuchung der Vorgänge im Oberplenum die Aufgabe, eine Anknüpfung an einen zweiten möglichen Störfall zu erbringen, nämlich den Ausfall der tertiären Wärmesenke infolge äußerer Einwirkung.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für den Zusammenhang zwischen der Aufheizspanne und der erzeugten Leistung im Kern gilt näherungsweise  $\Delta\delta_{\text{Kern}} \sim \dot{Q}_{\text{Kern}}^{0,7}$ .
- Die Tauchkühlerkapazität hat während der ersten 1000 sec keinen nennenswerten Einfluß auf die Kühlvorgänge im Kern. Auch beim Abschalten eines der beiden Tauchkühler findet ein nahezu vollständiger Temperatúrausgleich in Umfangsrichtung statt.
- Auf eine sprungförmige Erhöhung der Heizleistung verhält sich die simulierte Notkühlung wie ein gut gedämpftes System ohne Überzuschwingen.
- Die größte Aufheizspanne im Kern ist im untersuchten Bereich unabhängig von der Brutmantelleistung  $\dot{Q}_{\text{BU}}$ . Der Kerndurchsatz ist im stationären Zustand etwa proportional der Größe  $(\dot{Q}_{\text{Kern}} - \dot{Q}_{\text{BU}})^{0.45}$ . Der Zeitpunkt der Strömungsumkehr in den BU ist unabhängig von  $\dot{Q}_{\text{BU}}$ .
- Die Veränderung verschiedener Drosselquerschnitte, wie z. B. in der Umlenkplatte, im Schildtank und an den Vordrosseln, hat nur einen geringen Einfluß auf den zeitlichen Verlauf der Meßgrößen.
- Bei erhöhtem Füllstand verändert sich die Strömungsform im OP qualitativ nicht gegenüber der Notspiegelhöhe. Die Aufheizspanne ist im ersten Fall etwas niedriger.

- Die Anfangstemperatur hat keinen nennenswerten Einfluß auf das zeitliche Verhalten des Naturumlaufes im Kern. Die Tauchkühler werden wegen der höheren Grädigkeit mit zunehmender Anfangstemperatur schneller wirksam.

Eine Zusammenfassung der Auswertung des Bildmaterials ist im Anhang C, Abschnitt C5 gegeben.

## 5.2. Vergleich zwischen Rechnung und Experiment

Der Vergleich wurde an drei Fällen durchgeführt, für die die Firma Interatom Vorausberechnungen erstellt hat, nämlich am Referenzversuch (Nr. 3B), am Versuch 16 mit erhöhtem Füllstand und am Versuch 19, bei dem die Brutmantelleistung früher eingeschaltet wurde als die Kernleistung, so daß sich hier die anfängliche Aufwärtsströmung in den BU mit Sicherheit ausbilden konnte. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Die zeitlichen Verläufe der in den Tauchkühlern abgeführten Wärmemenge zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment.
- Die Temperatur an den Vordrosseln, die in etwa gleich der Kerneintrittstemperatur ist, zeigt für Rechnung und Experiment, abgesehen von den etwas unterschiedlichen Startbedingungen, einen fast identischen Verlauf.
- Der zeitliche Verlauf des Kerndurchsatzes wird durch die Rechnung gut beschrieben, jedoch sind die Absolutwerte um 10 bis 20 % höher als im Experiment. Dies wird hauptsächlich auf den in Kapitel 4.4.3. erwähnten Element-Bypass zurückgeführt, der im Rechenmodell nicht berücksichtigt ist, im Reaktor aber auch auftreten wird.
- Die räumlich gemittelte Aufheizspanne im Kern liegt bei der Rechnung um 3 bis 6 °C höher als im Experiment, das entspricht ca. 15 bis 40 % der experimentell bestimmten Werte. Im Versuch 16 ist die Abweichung in der Anfangsphase noch größer. Diese relativ

großen Abweichungen sind ebenfalls im wesentlichen durch den Element-Bypass zu erklären, der besonders stark in der Übergangszone zwischen Kern und Brutmantel wirksam ist. Die Maximaltemperaturen hingegen, die im Experiment in den Elementreihen 3 bis 7 erreicht wurden, decken sich gut mit der Rechnung.

Insgesamt kann man feststellen, daß bei dem den Modellversuchen zugrundegelegten Core-Entwurf das verwendete Rechenprogramm das dynamische Verhalten des Notkühlsystems gut wiedergibt. Dort, wo Abweichungen in den Absolutwerten auftreten, liegt das Programm von der verwendeten Modellvorstellung her auf der sicheren Seite.

### 5.3. Bemerkungen zur Übertragbarkeit auf Reaktorverhältnisse

Die Untersuchung des Problems der Übertragbarkeit (vergl. hierzu Anhang B) führte im Rahmen einer Durchführbarkeitsstudie zu dem Ergebnis, daß die aus der Ähnlichkeitstheorie sich ergebenden, für das Problem bestimmenden Kennzahlen bei diesen mit Wasser durchgeführten Modellversuchen um Größenordnungen verschieden sind von denen im Reaktor SNR 300. Eine unmittelbare Übertragbarkeit im Sinne der Ähnlichkeitstheorie ist also nicht möglich.

Geometrische und insbesondere thermohydraulische Ähnlichkeit können vielmehr nur mit einem Modell im Maßstab 1:1 und mit Flüssigmetall als Kühlmittel erreicht werden, d. h. praktisch nur im Reaktor selbst.

Bezüglich der Konservativität der NOTUNG-Rechnungen kann man für für das Verhalten des Kühlmittels im oberen Plenum annehmen, daß die Verhältnisse durch das Rechenprogramm konservativ wiedergegeben werden. Hingegen kann man bei den Brenn- und Brutelementen und den Tauchkühlern nicht mehr von vornherein schließen, daß der Reaktor erst recht konservativ berechnet wird, wenn die Modellversuche konservativ berechnet wurden, da der Einfluß der radial nicht mehr ähnlichen Geometrie der Kühlkanäle berücksichtigt werden muß.

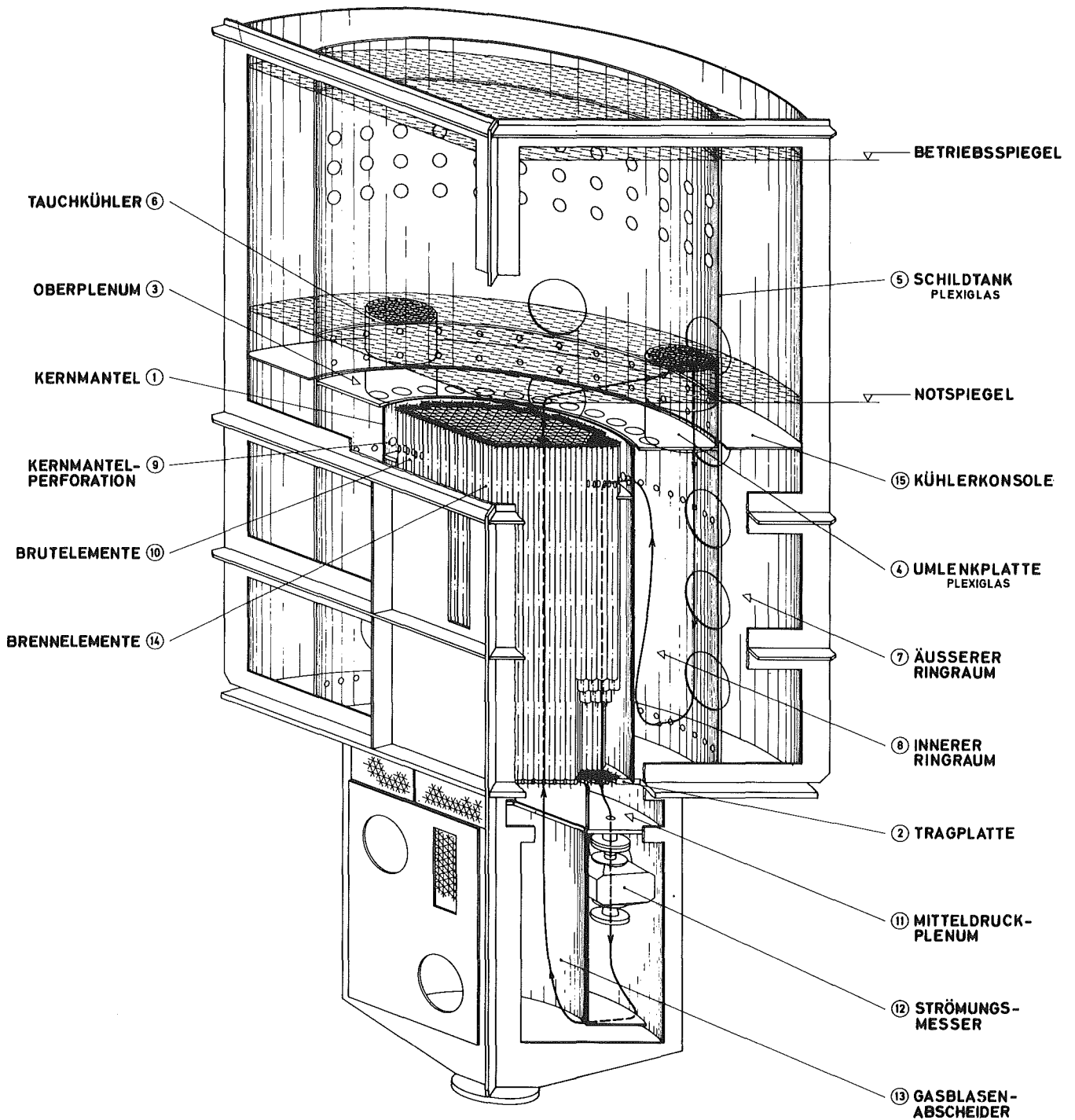
Im Rechenprogramm NOTUNG ist deshalb ein Modell eingebaut, das auf den in |7| angegebenen theoretischen und experimentellen Ergebnissen aufbaut, so daß man annehmen darf, daß NOTUNG auch die Vorgänge an diesen Stellen angemessen beschreibt.

Insgesamt gesehen haben die Modellversuche wertvolle Aufschlüsse in zweifacher Hinsicht gegeben: zum einen wurde experimentell demonstriert, daß die Wärmeabfuhr durch freie Konvektion bei einer derart komplizierten Strömungsführung möglich ist; zum andern erscheint wegen der guten Wiedergabe des globalen Systemverhaltens durch das Rechenprogramm die Schlußfolgerung berechtigt, daß das Programm auch die Verhältnisse beim Notkühlvorgang im Reaktor richtig darstellt.

Literatur

- |1| Timmermann, F.; Vossebrecker, H.  
SNR-Emergency Cooling -  
Heat Transfer Calculations on In-Tank Natural Circulation  
with Blanket Back Flow  
Engineering of Fast Reactors for Safe and Reliable Operation,  
Int. Conf., Karlsruhe, Germany, Oktober 9 - 13, 1972
  
- |2| Audoux, M.; Katz, F. W.; Olbrich, W.; Schlechtendahl, E. G.  
SEDAP - An Integrated System for Experimental Data Processing  
KFK 1594, EUR 4730 e (Januar 1973)
  
- |3| Firma Interatom, persönliche Mitteilung
  
- |4| Kutateladze, S. S.  
Fundamentals of Heat Transfer (Transl. from the second revised  
and augmented edition, Moscow-Leningrad 1962)  
Edward Arnold Ltd., London 1963
  
- |5| Gröber, Erk, Grigull  
Grundgesetze der Wärmeübertragung  
Springer-Verlag, 1963
  
- |6| Pee, A.  
Stoffdaten von Natrium  
KFK 924 (Februar 1969)
  
- |7| W.G. Brown  
Die Überlagerung von erzwungener und natürlicher Konvektion  
bei niedrigen Durchsätzen in einem lotrechten Rohr  
VDI-Forschungsheft 480, Band 26 (1960)





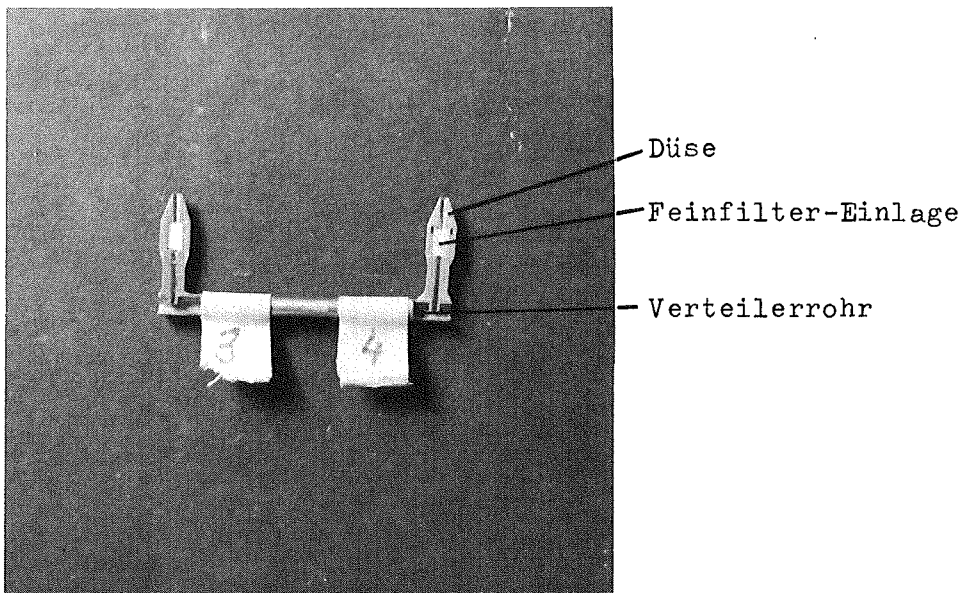
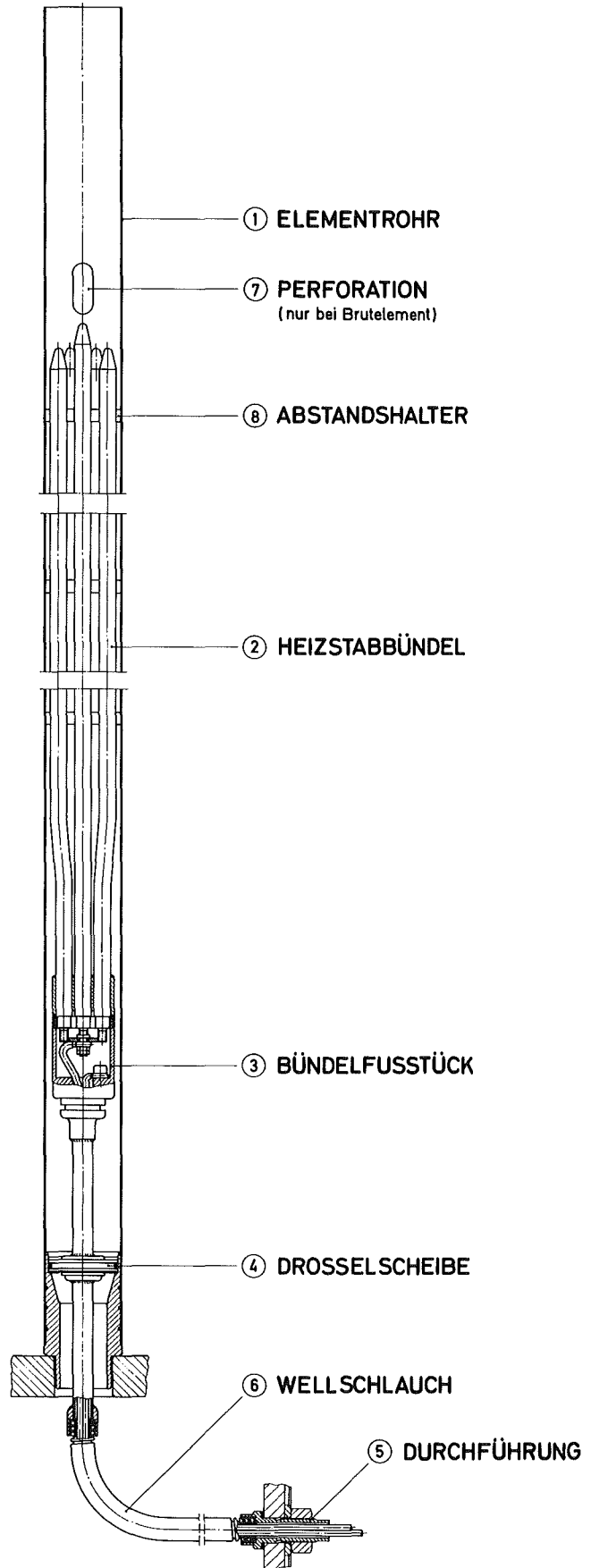
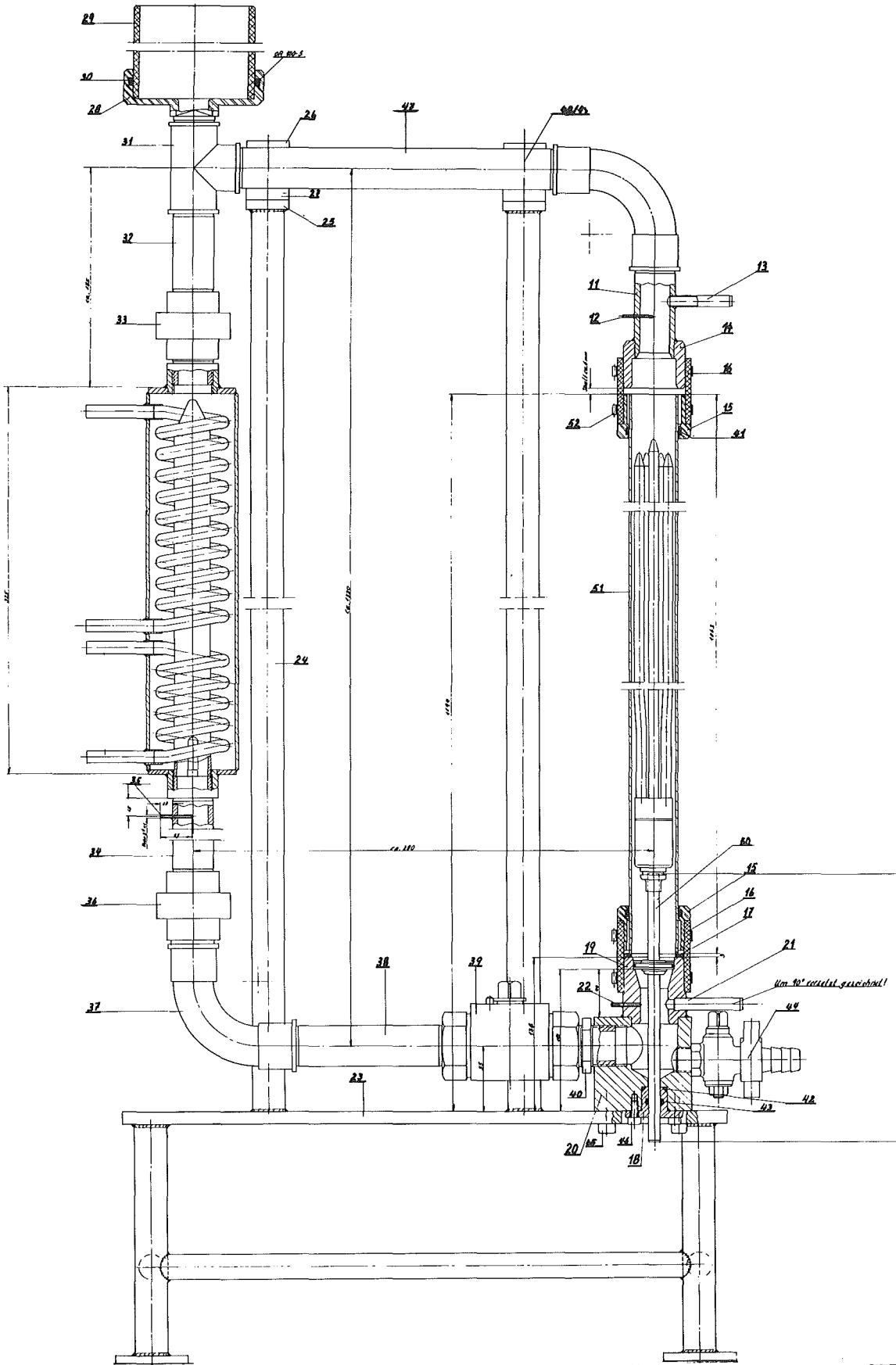


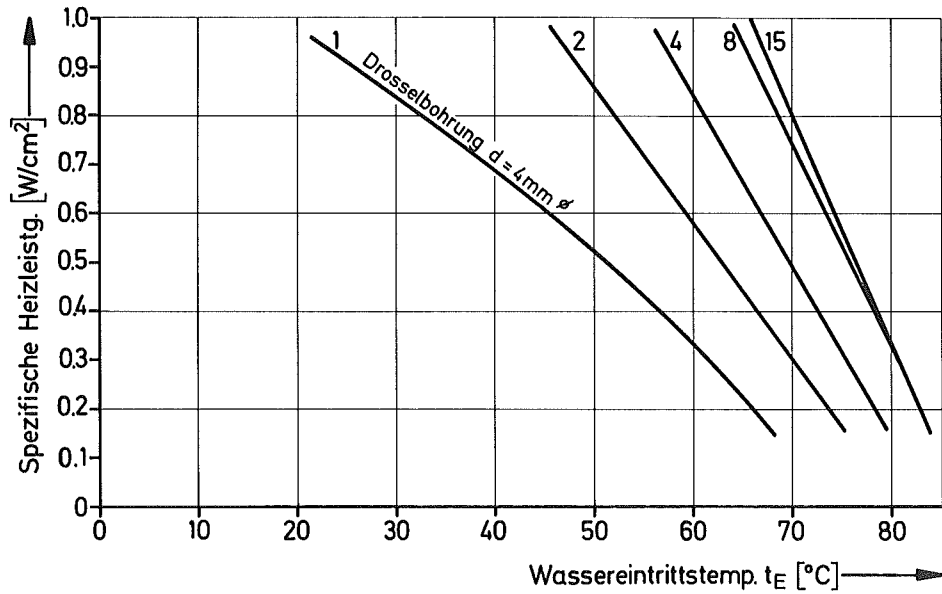
Abb. 2.2-2 Einspritzdüse für Farbmarkierung

### 7er-BÜNDELELEMENT - AUFBAU

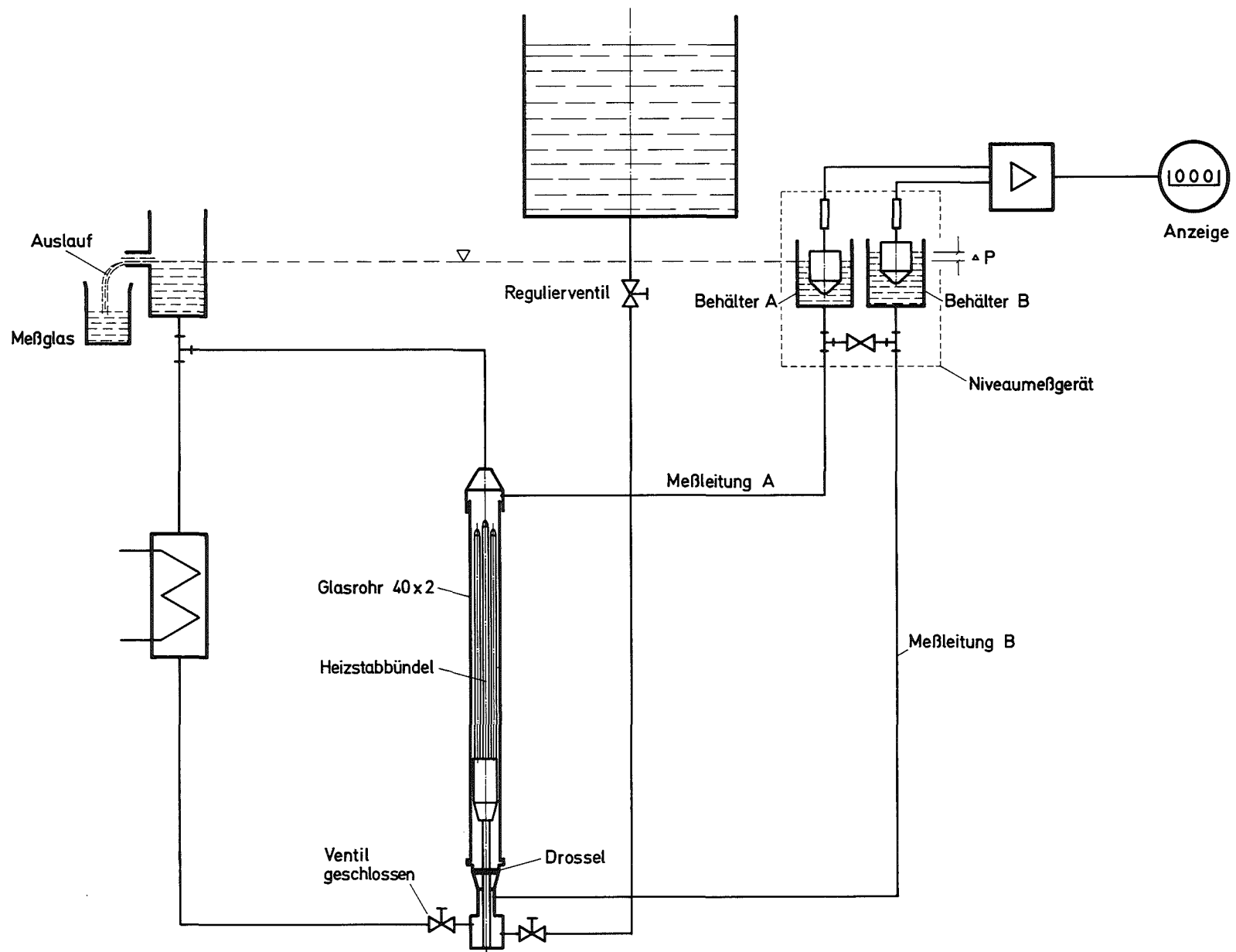




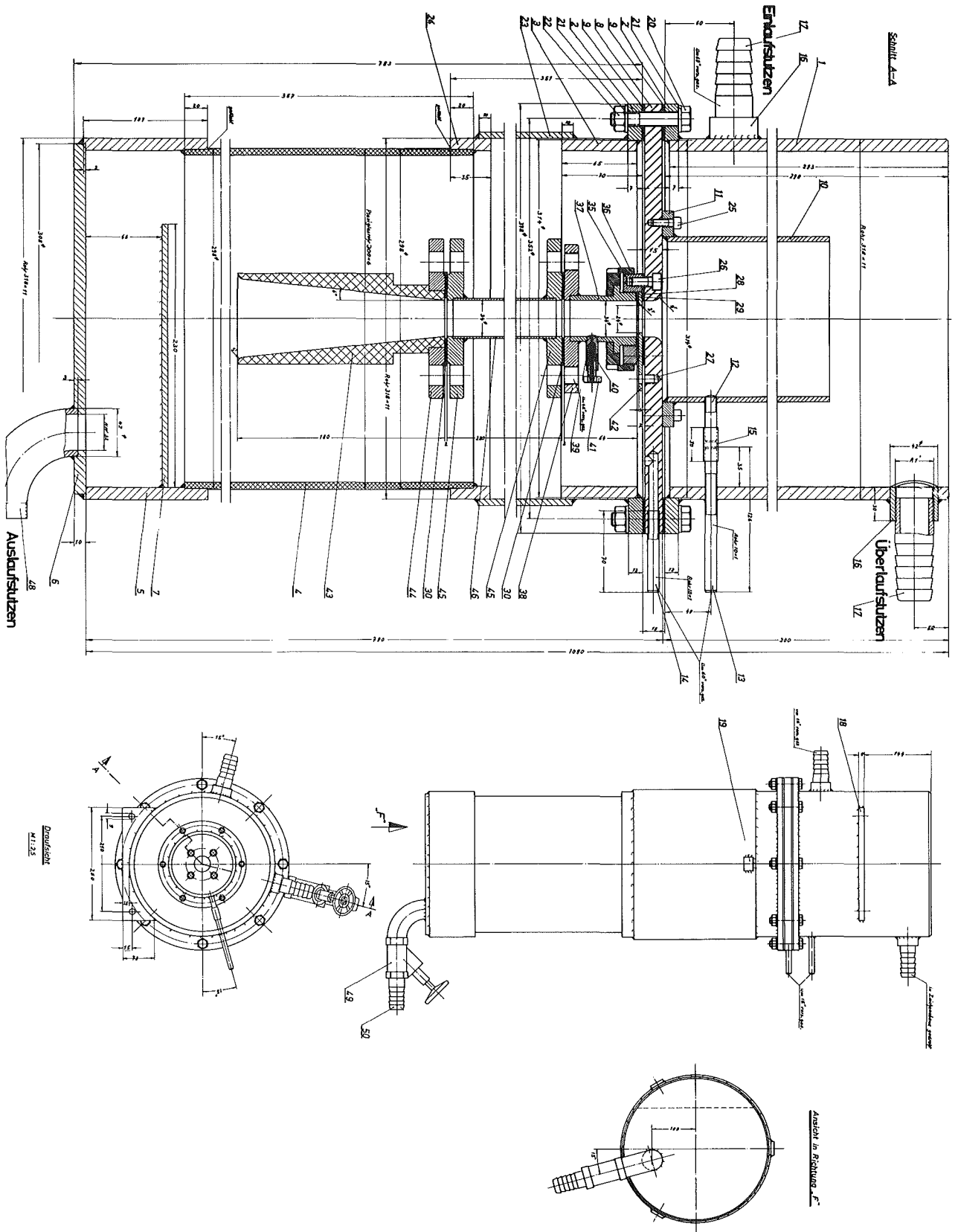
Max. Wassereintrittstemperatur, bei der noch kein Sieden eintritt.  
Werte gelten nur für 7er Heizstabbündel.



GfK	Modellversuche zum Notkühlsystem SNR300	Abb.2.2-5
	Grenzwerte d. Heizflächenbelastg. ohne Sieden	



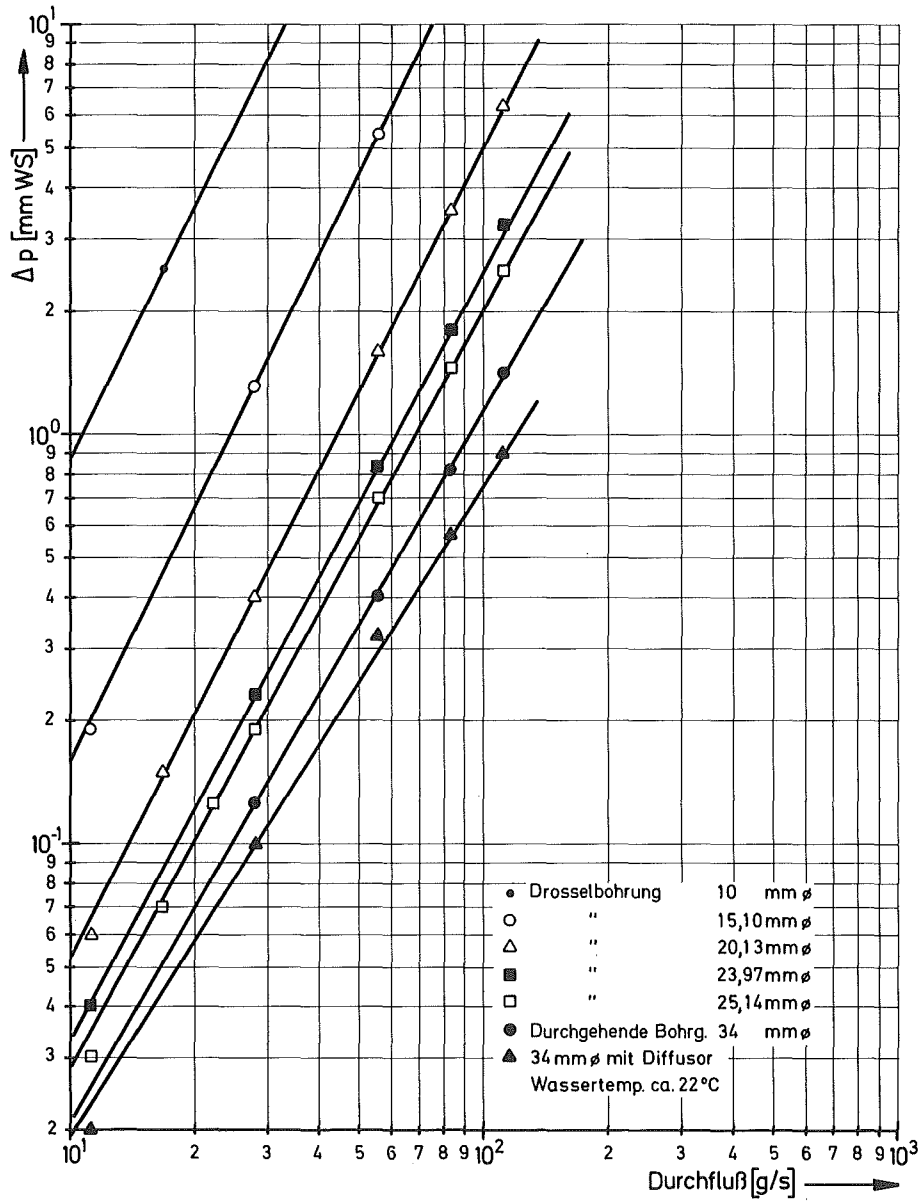
<b>GfK</b>	Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300	Abb. 2.2-6
	Druckverlustmessung am Heizstabbündel	



GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Druckverlustmessung Vordrosselstrecke, Versuchsstand

Abb. 2.2-7



<b>GfK</b>	Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300	Abb. 2. 2-8
	Druckverlustkennwerte an d. Vordrosselstrecke	



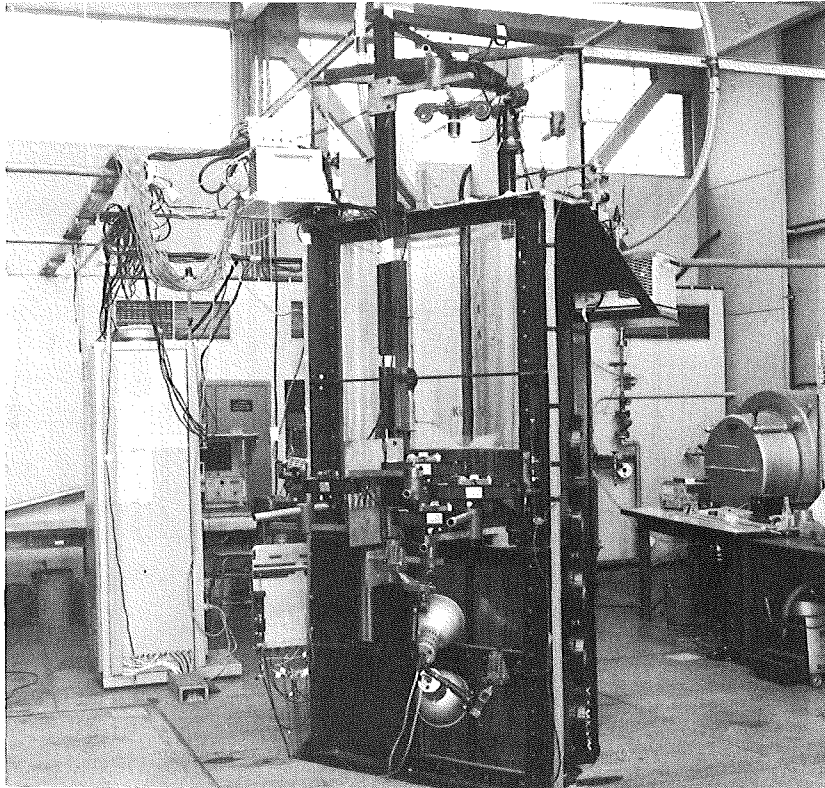


Abb.2.2-9 Gesamtansicht Modellbehälter, Oberteil

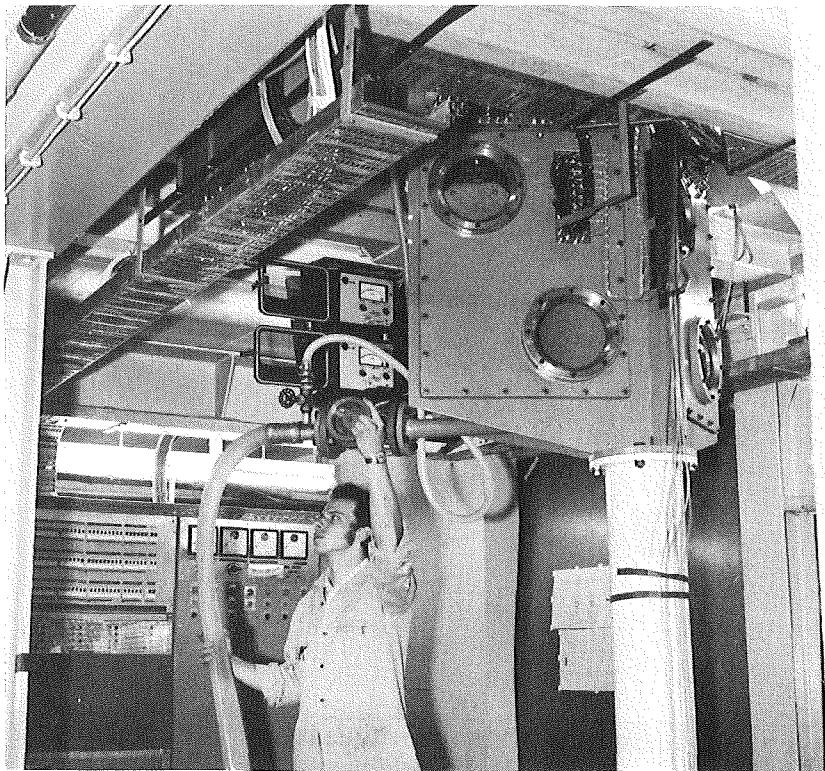
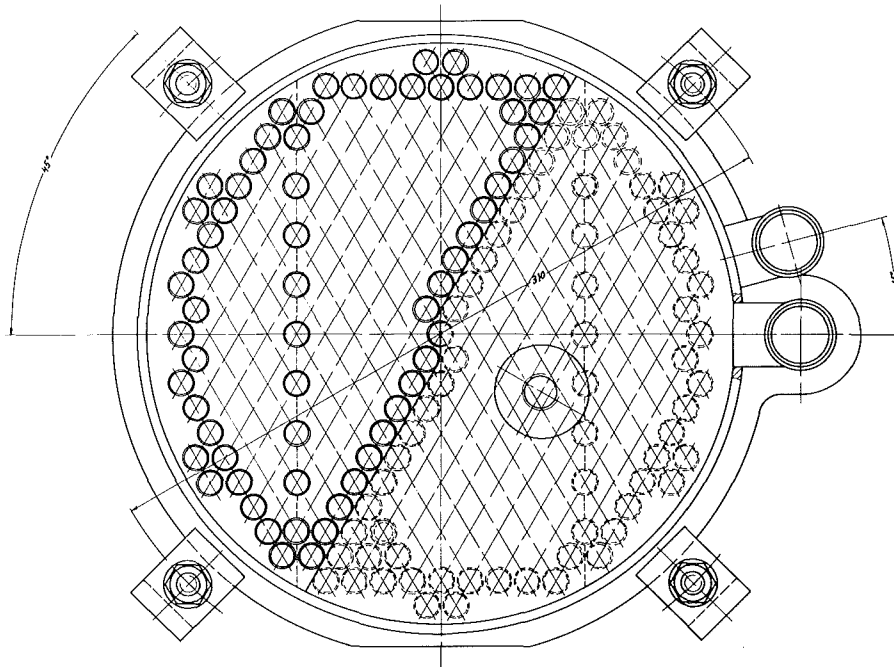
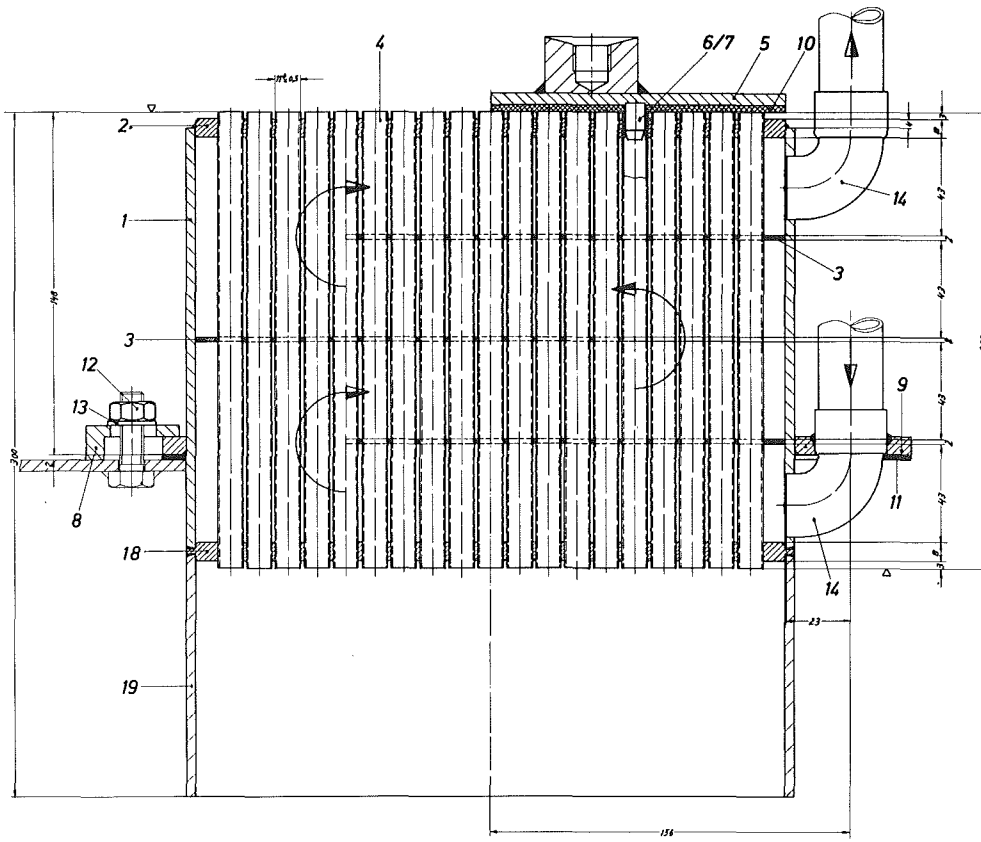


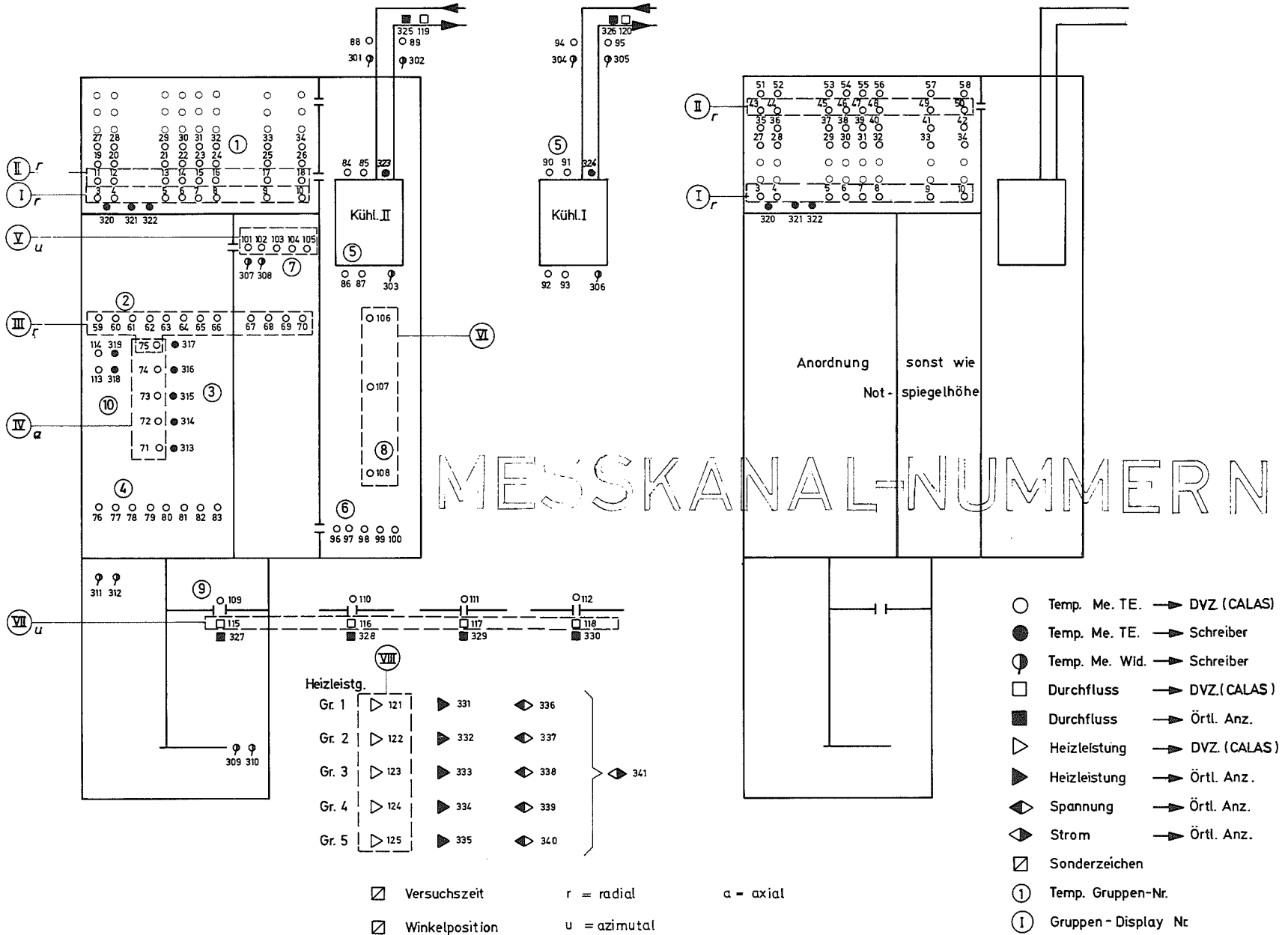
Abb. 2.2-10 Gesamtansicht Modellbehälter, Unterteil

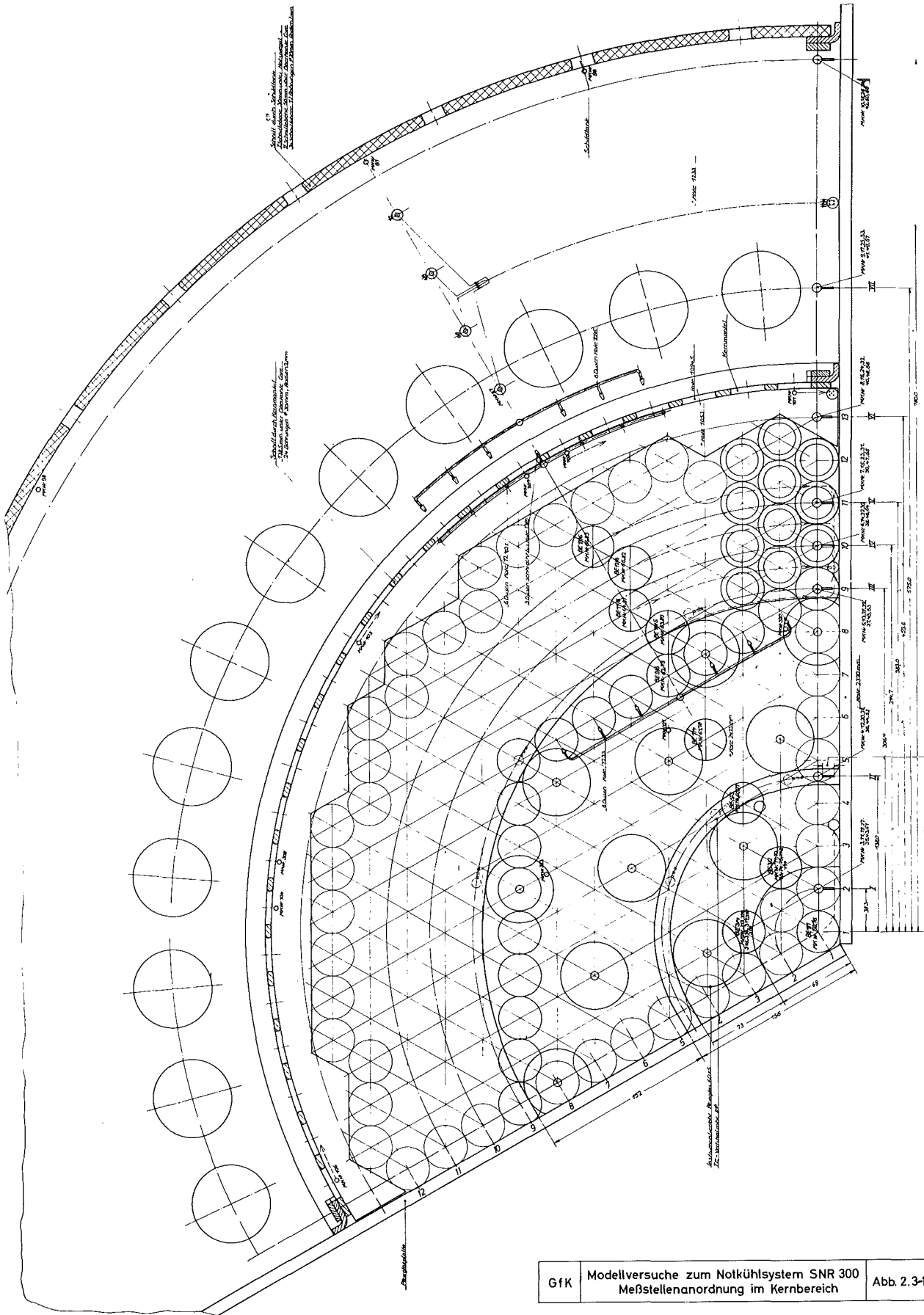


<b>GfK</b>	Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300	Abb. 2.2-11
	Tauchkühler	

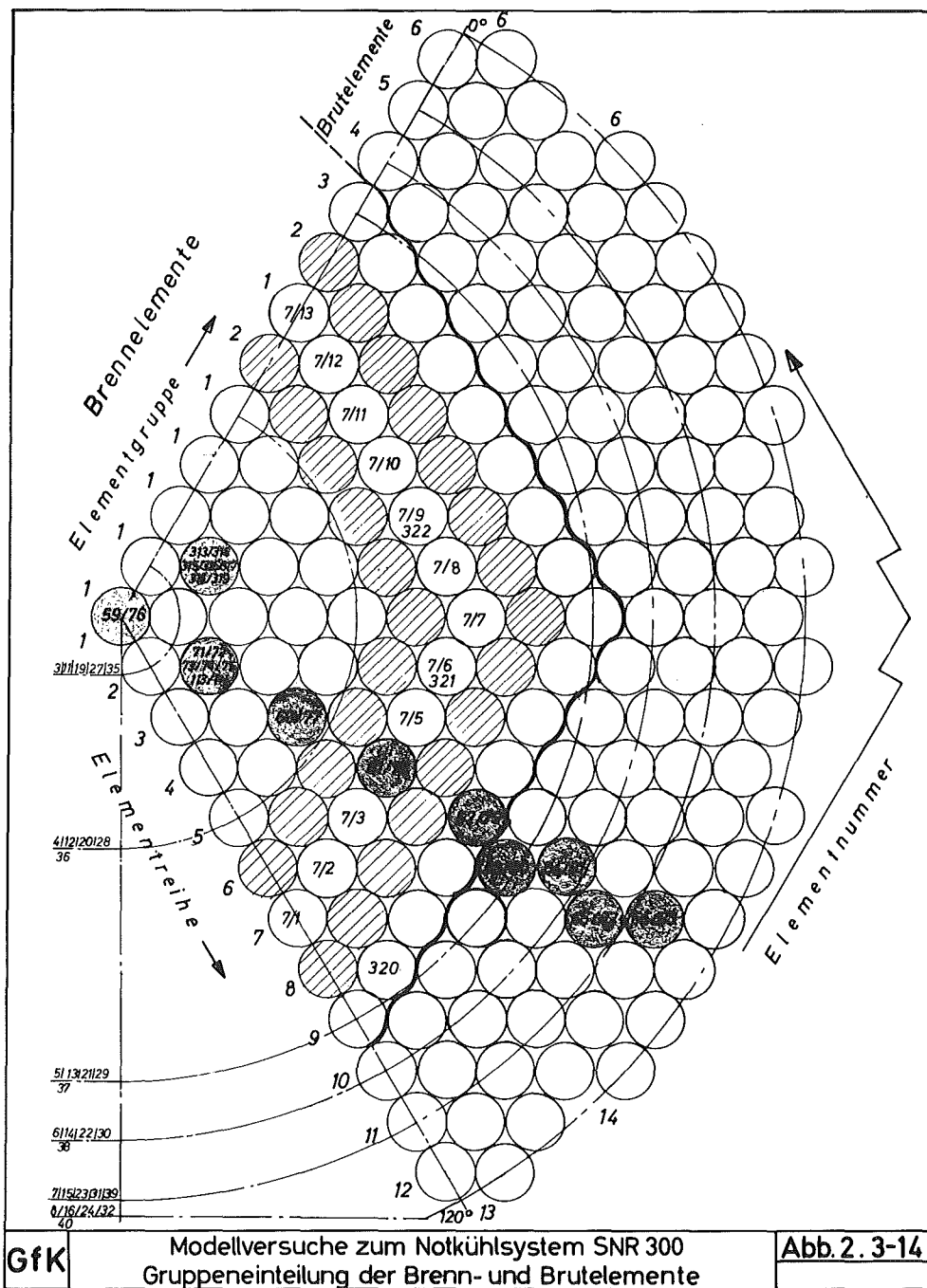
Notspiegelhöhe ( N )

Betriebsspiegelhöhe ( B )





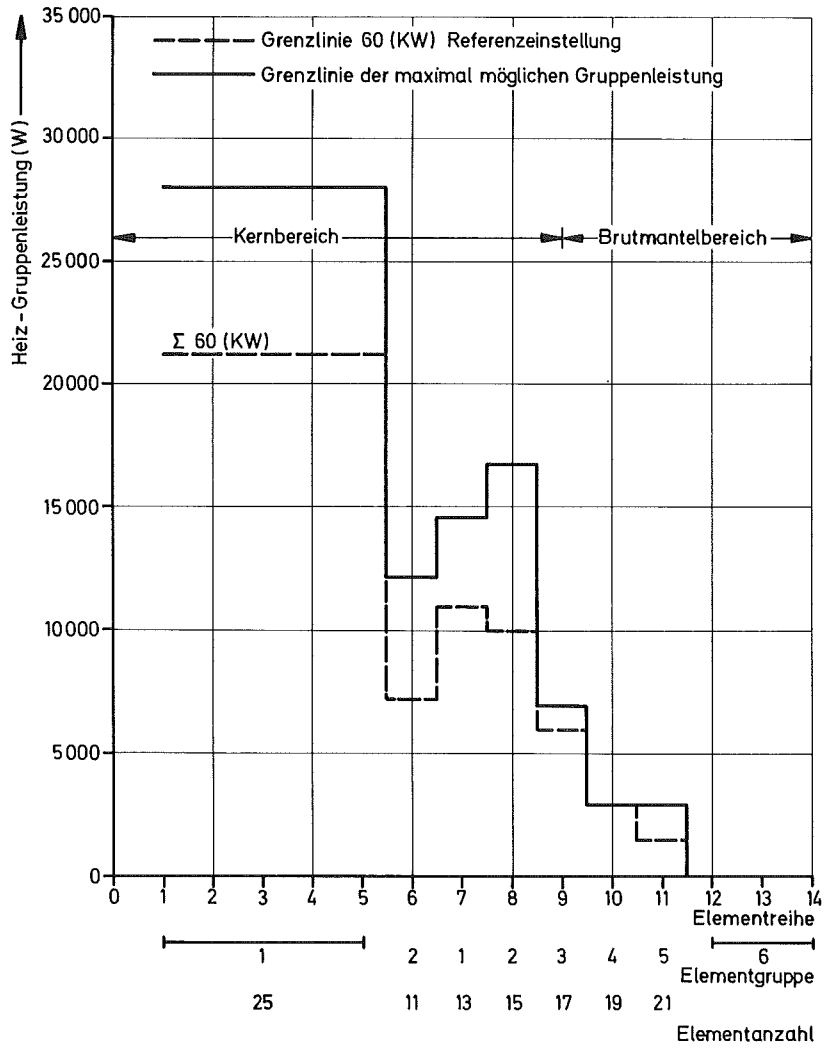
GfK Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300 Meßstellenanordnung im Kernbereich Abb. 2.3-13



GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Gruppeneinteilung der Brenn- und Brutelemente

Abb. 2. 3-14



<b>GfK</b>	Modellversuche zum Notkühlsystem SNR300	<b>Abb. 2.3-15</b>
	Gruppenleistung der Brenn- und Brutelemente	

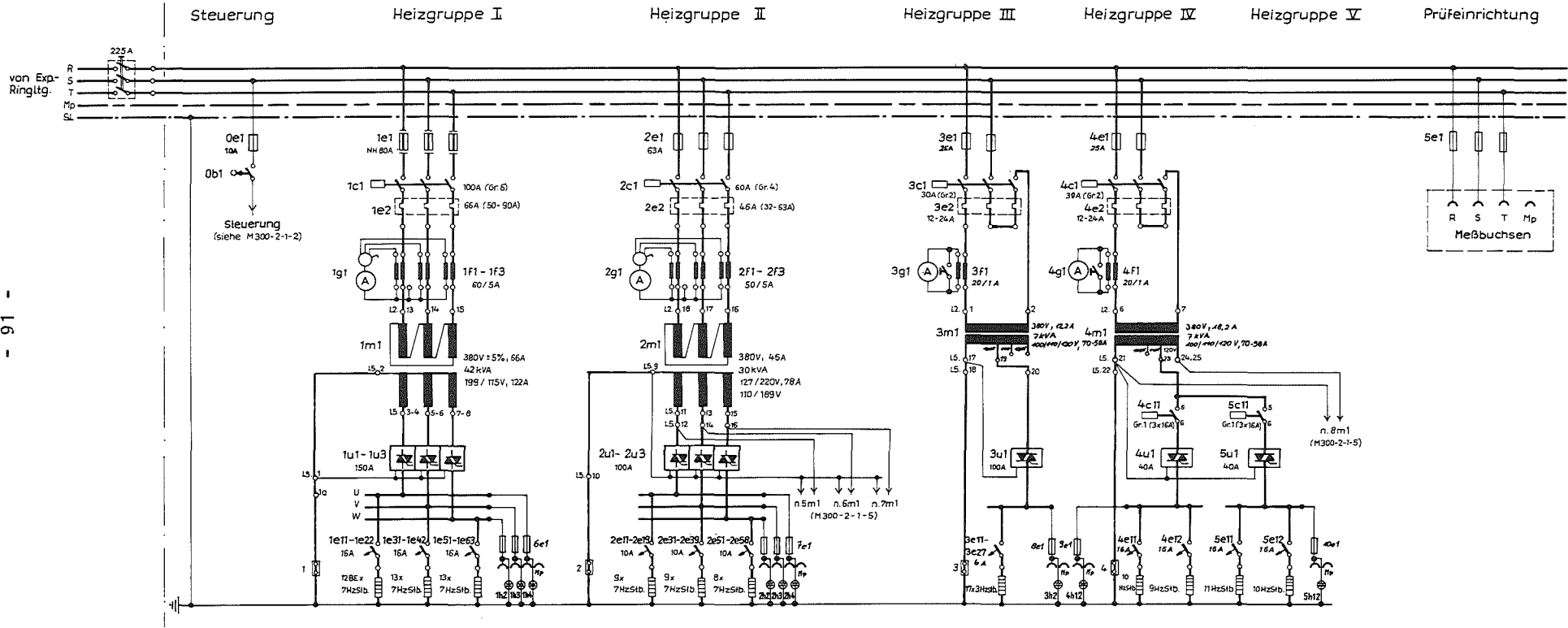
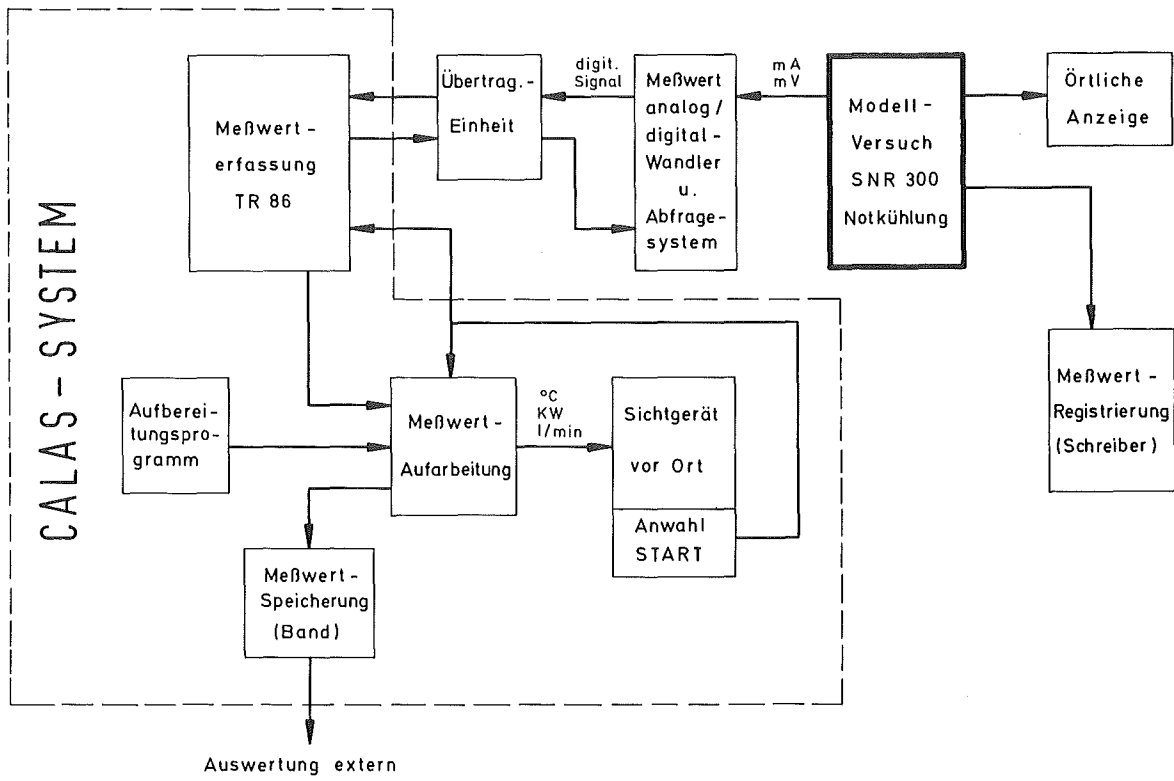


Abb. 2.3-16  
Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Elektr. Heizgruppenschaltung; Übersicht  
GfK



GfK	Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300 Blockschaltbild Meßwert erfassung	Abb. 2. 3-17
-----	---	--------------





○ = Gutachterbesuch bei Versuchsdurchführung

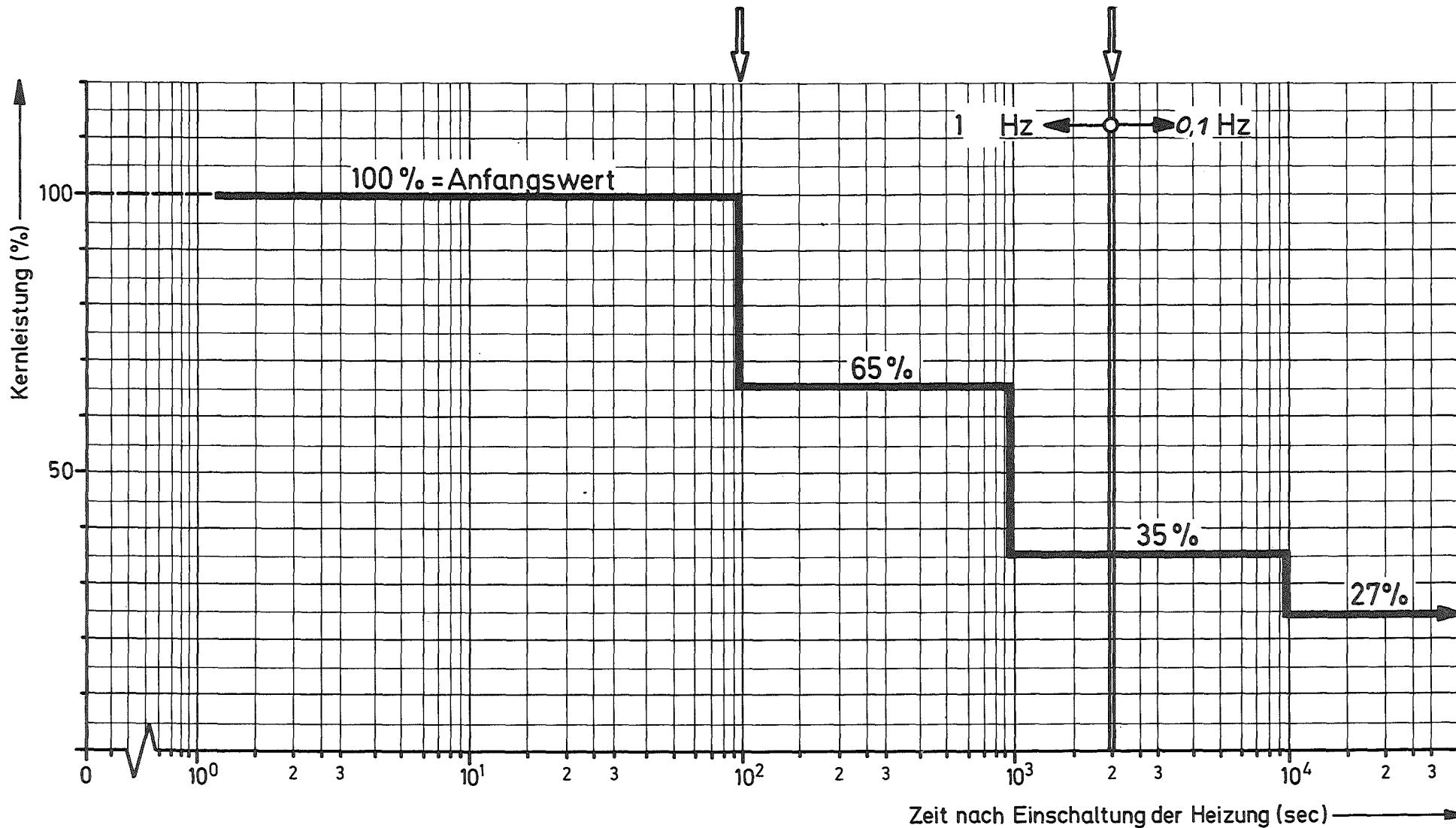
## Versuchsplan SNR 300 - Notkühlung

### Spezifikationsversuche

Versuch Nr.	Zeitbedarf d	Versuchsparameter	Kernleistung Startbed.					Kernleistungs- transient	Kühlerdurchlass				Perforation				Anfangs- temp. °C	Kühlerby- pass	Vordrosseln			Spiegel- höhe HS BS mm	Datum Versuchs- abschl.	Bemerkungen			
			Gesamt KW	Gruppenleistung					Primär Flächen %	Kühler I		Kühler II		Umlenkplatte %	Schildtank				Anzahl Drossel mm	Δp %							
				1 W	2 W	3 W	4 W			5 W	Sekund. l/min	Primär Flächen %	Sekund. l/min		Anzahl d. offenen Bohrg.	Anzahl d. offenen Bohrungen auf Höhen - Kote... über D T											
1A, 1B	1	Heizleistung	20	10750	5774	1996	951	529	a <sup>1)</sup>	100	40	100	40	9,5	6	12	0	12	12	20	auf	4	24	100	1400	2.4.73 u. 29.6.73	1) Transient a: 0-10 <sup>4</sup> s = 100% Heizleistung   10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup> s = 35% Heizleistung 10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup> s = 65% *   10 <sup>4</sup> -Ende = 27% * in jeder Gruppe
2		—//—	40	21500	11548	3992	1902	1058	a																4.4.73		
4		Heizleistungs.-Transient	30	16125	8661	2993	1427	793	0																6.4.73	Versuchsdauer bis Temperaturgleichgewicht	
3A		Heizleistung	60	32250	17322	5987	2854	1586	a																10.4.73	Referenzfall	
3B		—//—																							12.4.73	planmäßige Wiederholung	
5		Tauchkühlerleistung																							16.4.73		
6		—//—								100	0	100	40												18.4.73		
7		Tauchkühlerabdeckung								50	40	50		9,5	6										25.4.73	Beide Tauchkühler halb abdecken	
9A, 9B		Perforation								100		100		4	0										27.4.73 u. 30.4.73		
10		—//—		32250	17322	5987	2854	1586						15	12										3.5.73		
11		Brutmantelleistg.		31345	16836	5819	3000	3000						9,5	6										7.5.73		
12		—//—		34828	18706	6466	0	0																	9.5.73		
19		—//—	60*	32250	17322	5987	2854	1586															24	100	11.5.73	* Brutelemente werden 300 sek. vor Zeitpunkt 0 eingeschaltet Nur Gruppe 4 u. 5!	
17		Druckverlust Vordr.														12								18	~300	15.5.73	
18		Perforation														24	0							24	100	17.5.73	
20		—//—														0	12								1400	21.5.73	
16		Spiegelhöhe														12	0								2300	23.5.73	TE 43 - 58 zuschalten
15		Kühlerbypass																							1400	28.5.73	
8		Tauchkühlerleistg.	60	32250	17322	5987	2854	1586								0	0			20	auf					8.6.73	Behälter isoliert Versuch wird abgebrochen, wenn T <sub>223</sub> ≥ 90°C bzw. t > 15000 s
13		Anfangstemperatur	20	10750	5774	1996	951	529								40	40			35						13.6.73	Behälter isoliert
14		—//—	9	4837	2598	898	428	238												50						15.6.73	Behälter isoliert
21A, 21B		Leistungsverteilung	40	19735	10600	3665	3000	3000												20						26.6.73 u. 28.6.73	GfK Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300 Versuchsplan <span style="float: right;">Abb. 3.1-1</span>

Tauchkühler Ein

Aufnahme-  
Frequenzwechsel



- 95 -

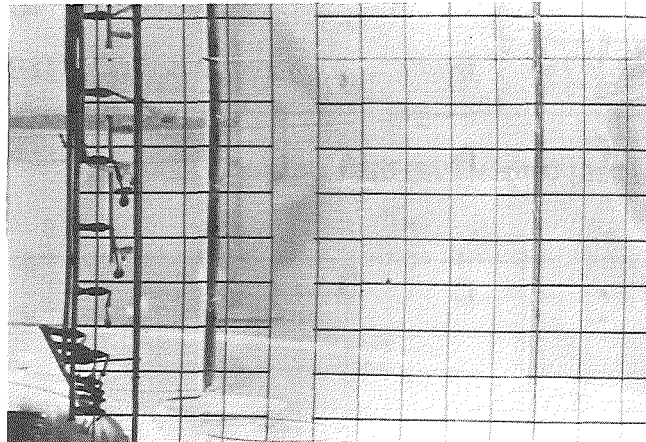
GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Zeitlicher Verlauf der Kernleistung im Referenzfall

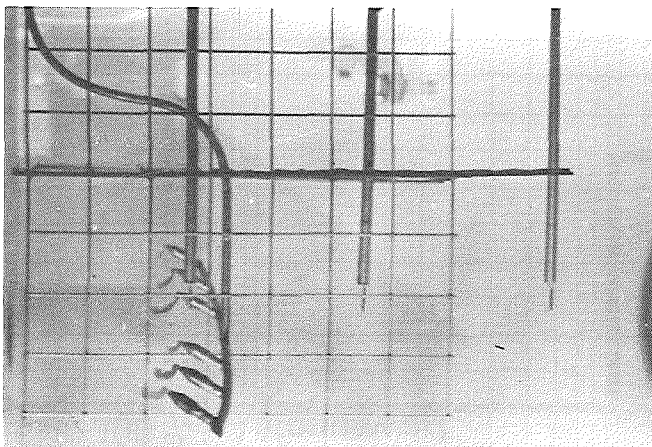
Abb. 3. 2-2



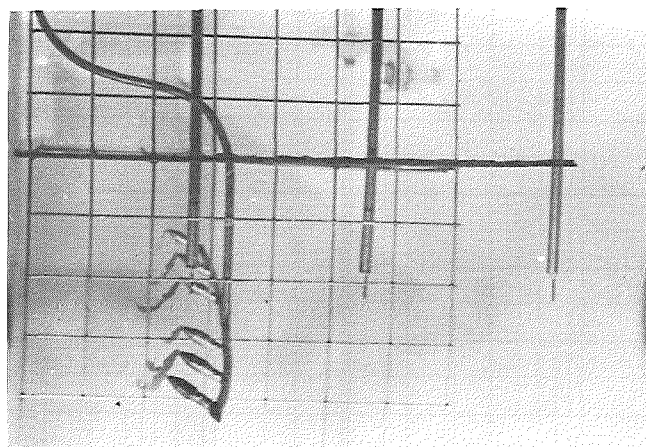
a)  $\bar{z} = 35$  sec



a)  $\bar{z} = 45$  sec



b)  $\bar{z} = 35$  sec



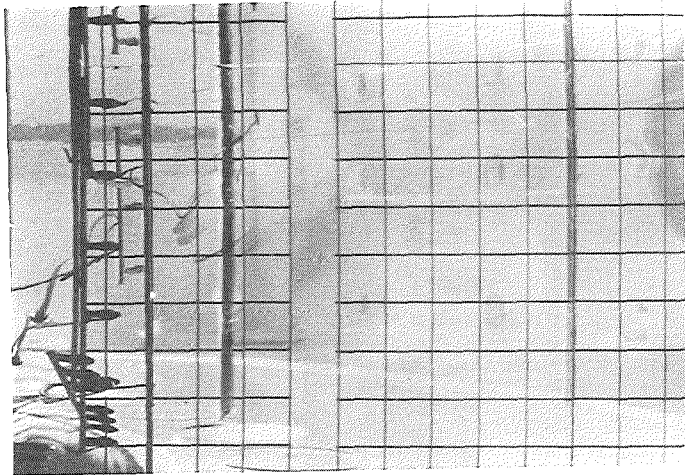
b)  $\bar{z} = 45$  sec

Abb. 4.1-1 Farbeinspritzung zur Sichtbarmachung der Strömung (Versuch 3B)

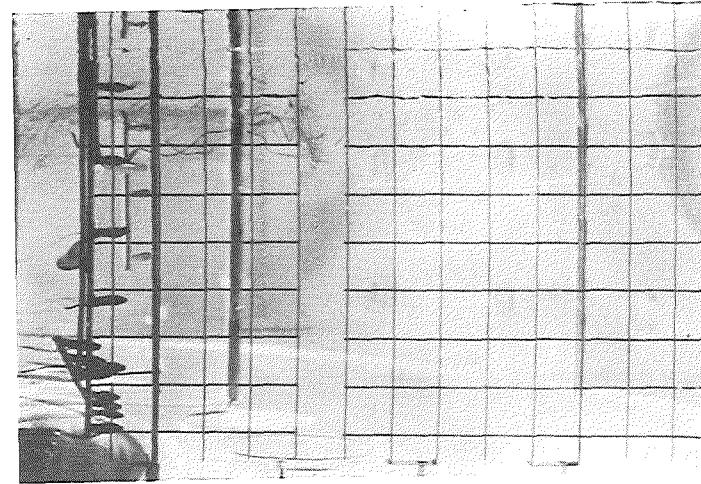
a) Im Oberplenum, oberhalb des Kernmantels (Meßstelle M1)

b) Am Eintritt in die Kernmantelperforation (Meßstelle M2)

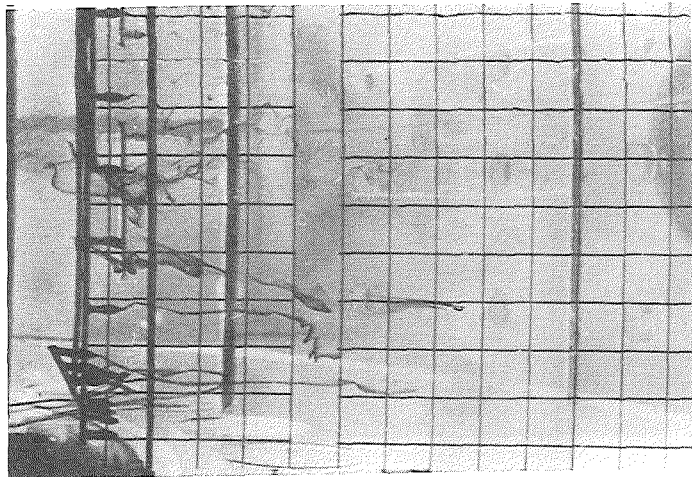




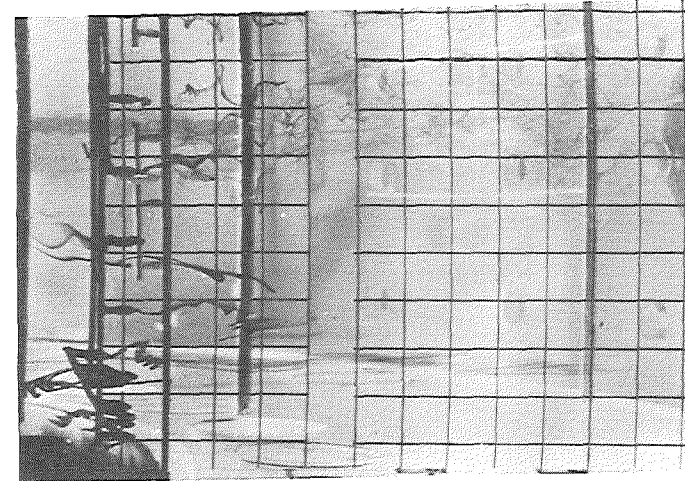
$\tau = 120 \text{ sec}$



$\tau = 153 \text{ sec}$

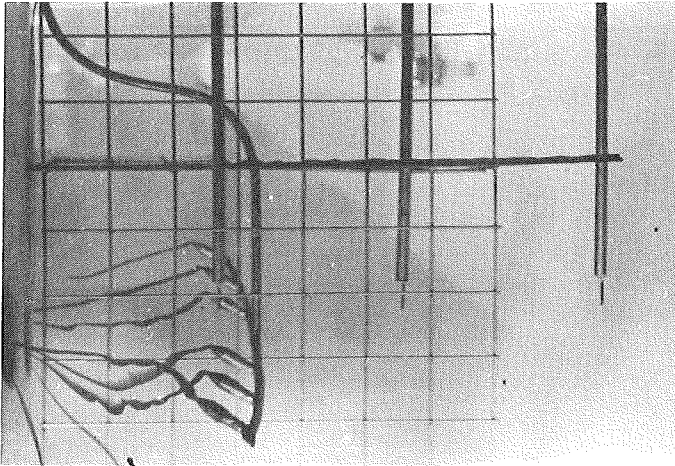


$\tau = 343 \text{ sec}$

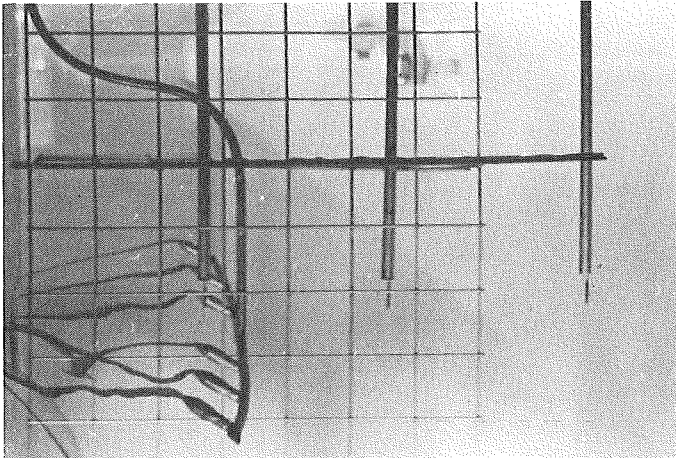


$\tau = 840 \text{ sec}$

Abb. 4.1-2 Farbeinspritzung zur Sichtbarmachung der Strömung im Oberplenum, oberhalb des Kernmantels (Versuch 3B)

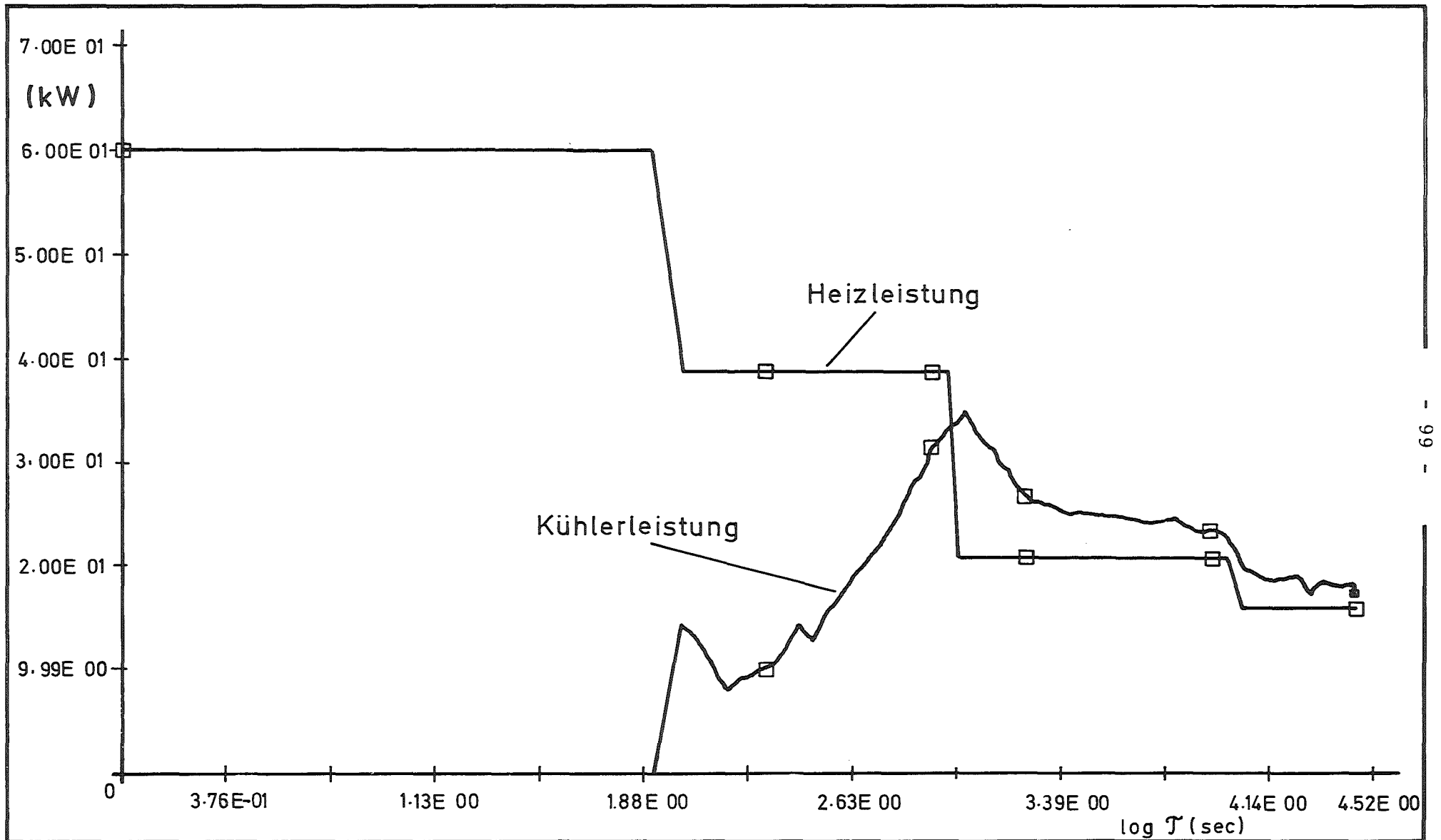


$$\bar{\tau} = 522 \text{ sec}$$



$$\bar{\tau} = 702 \text{ sec}$$

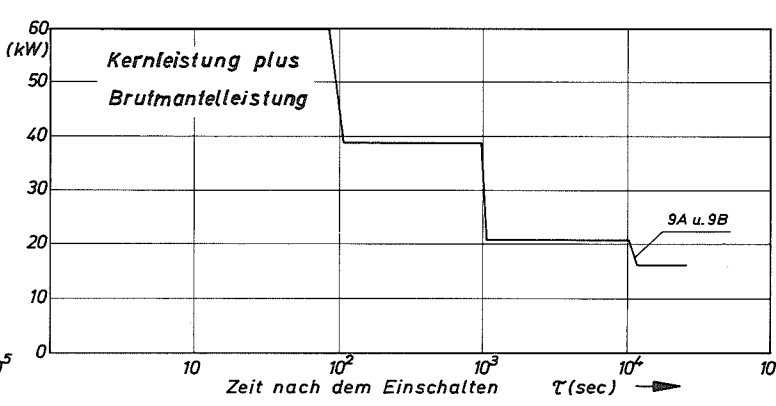
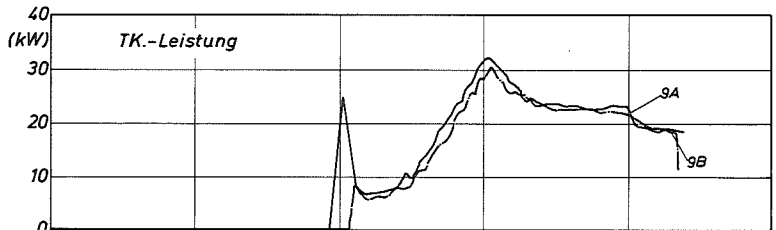
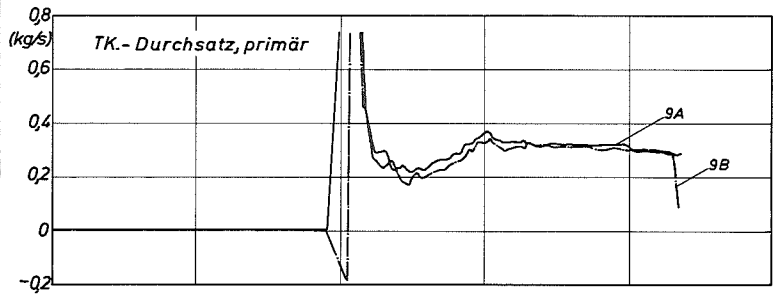
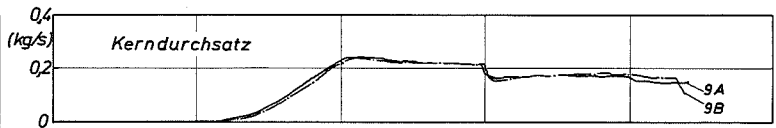
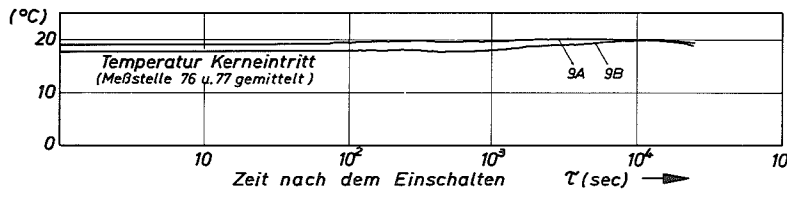
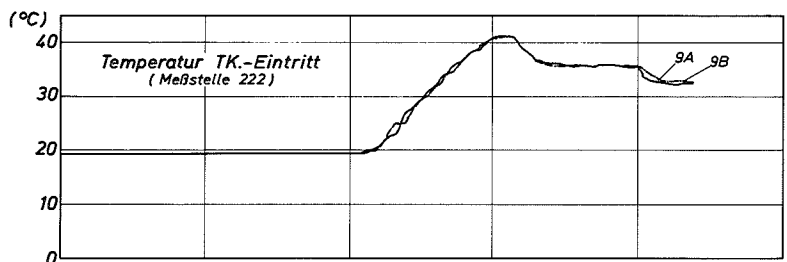
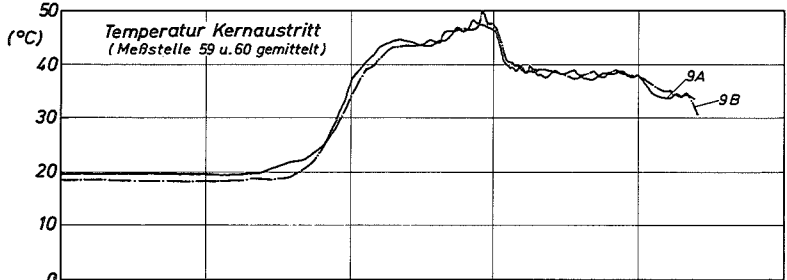
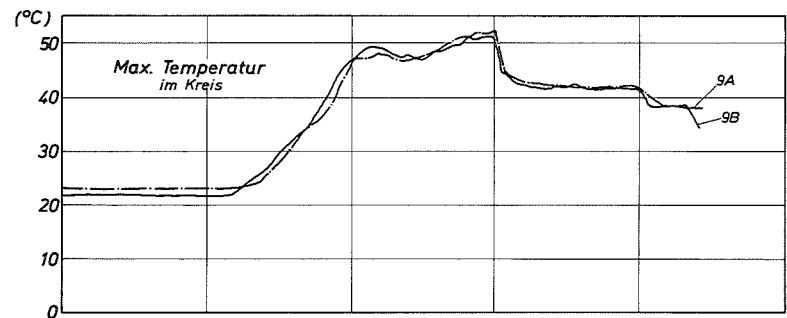
Abb. 4.1-3 Farbeinspritzung zur Sichtbarmachung der Strömung am Eintritt in die Kernmantelperforation (Versuch 3B)



G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Leistungen

Abb. 4.1-4

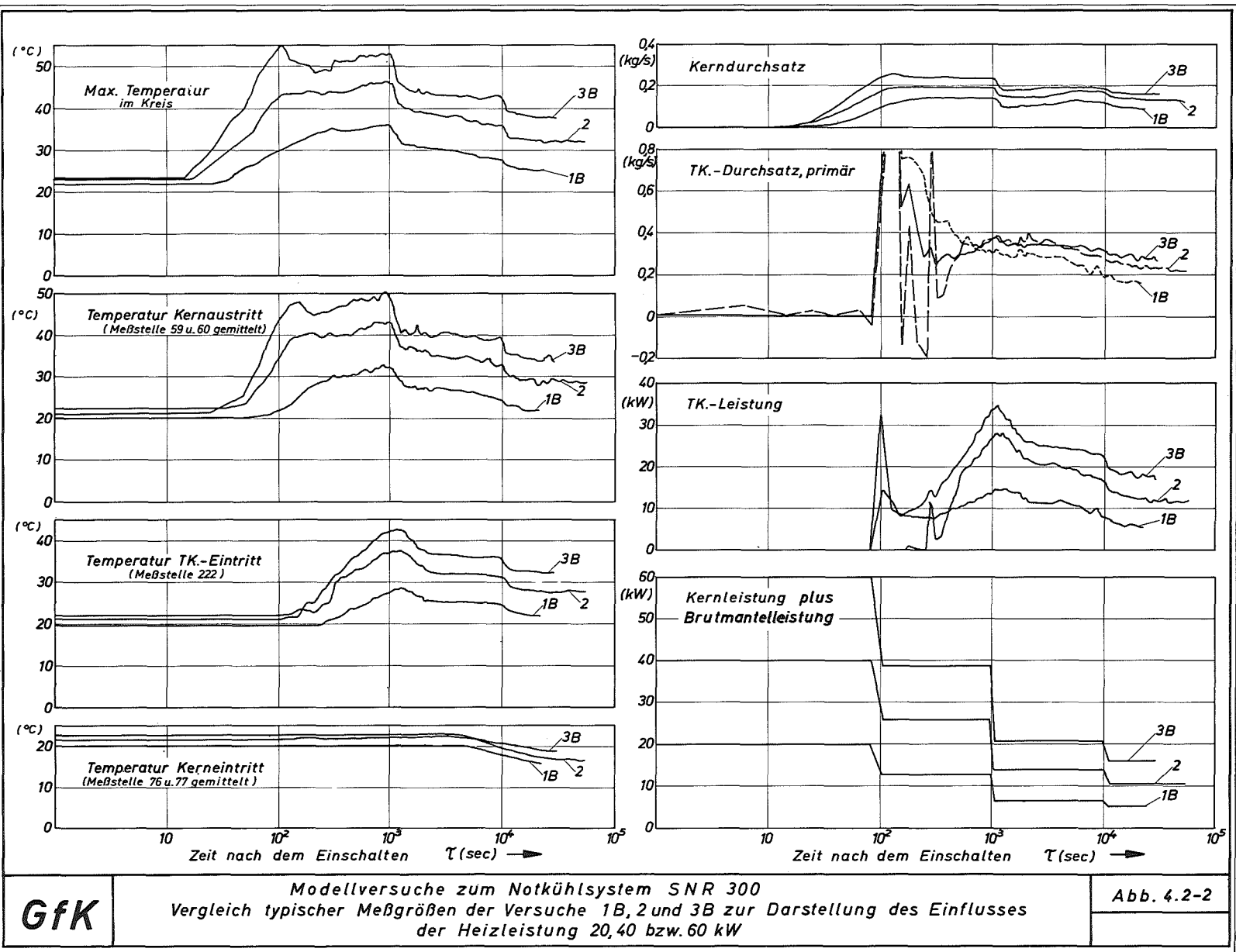


**GfK**

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 9A und 9B zur Kontrolle  
 der Reproduzierbarkeit

Abb. 4.2-1

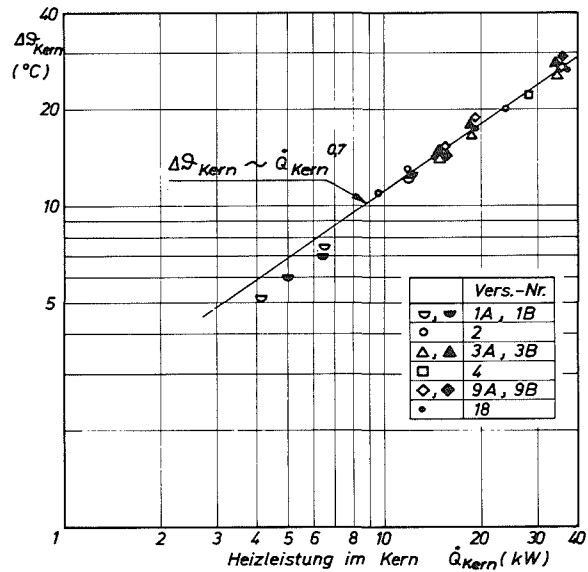




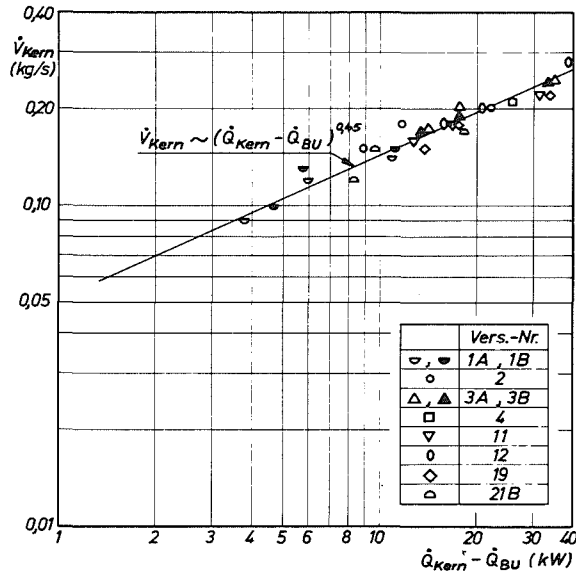
GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 1B, 2 und 3B zur Darstellung des Einflusses  
 der Heizleistung 20, 40 bzw. 60 kW

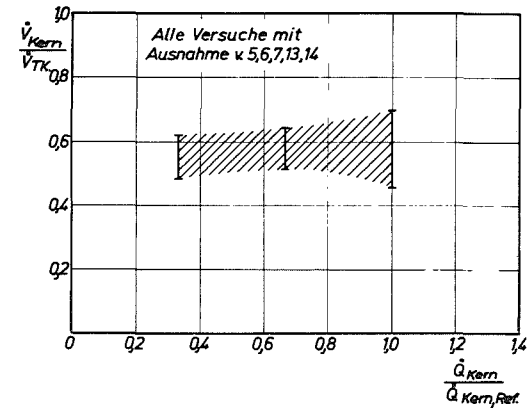
Abb. 4.2-2



a)



b)

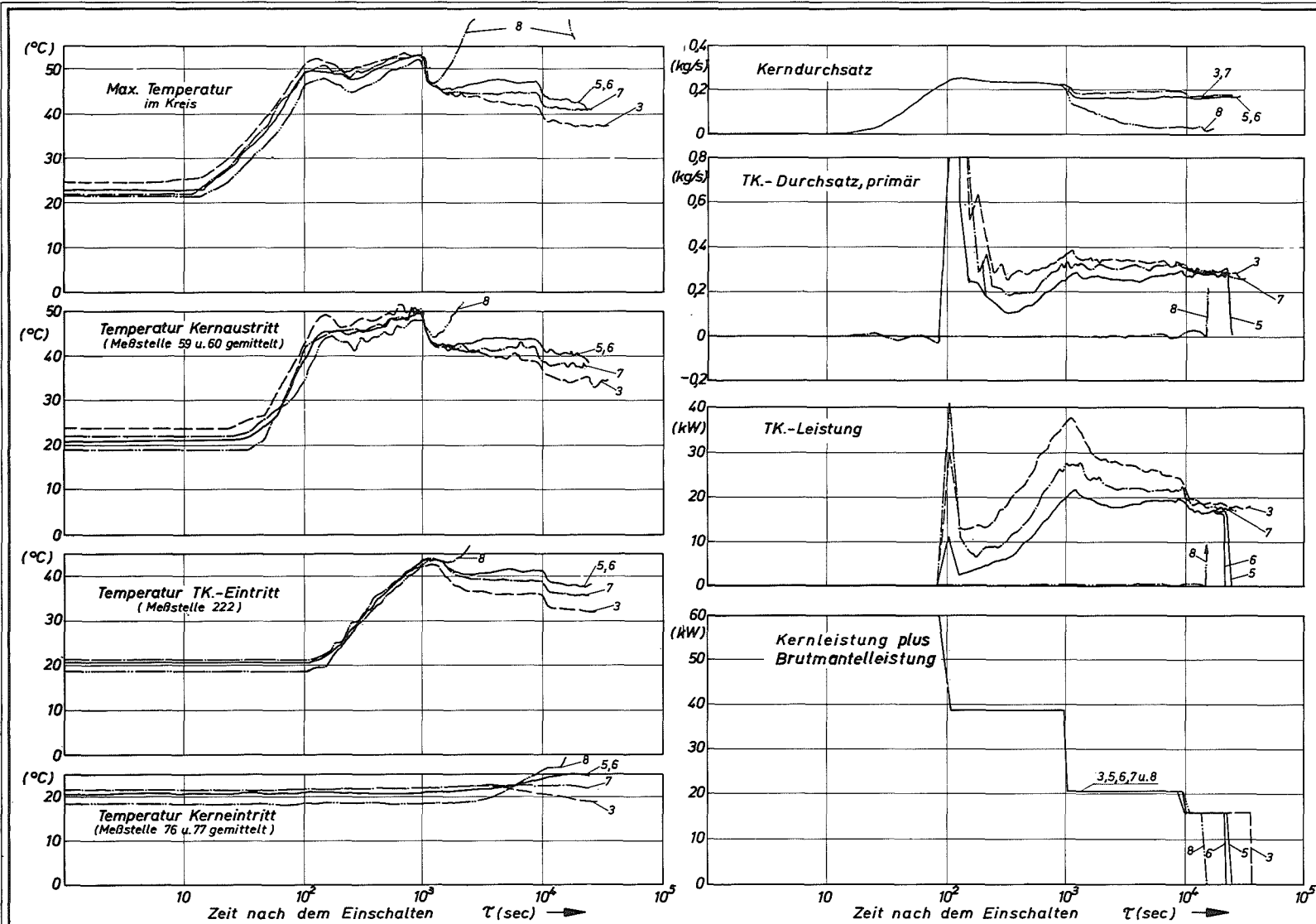


c)

G f K

Modellversuche zum Notkühlssystem SNR 300  
 Zusammenhang zwischen der Kernleistung  $\dot{Q}_{\text{Kern}}$  u. den Meßgrößen:  
 a) Aufheizspanne, b) Kerndurchsatz, c) Kern-/Tauchkühlerdurchsatz

Abb. 4.2-3

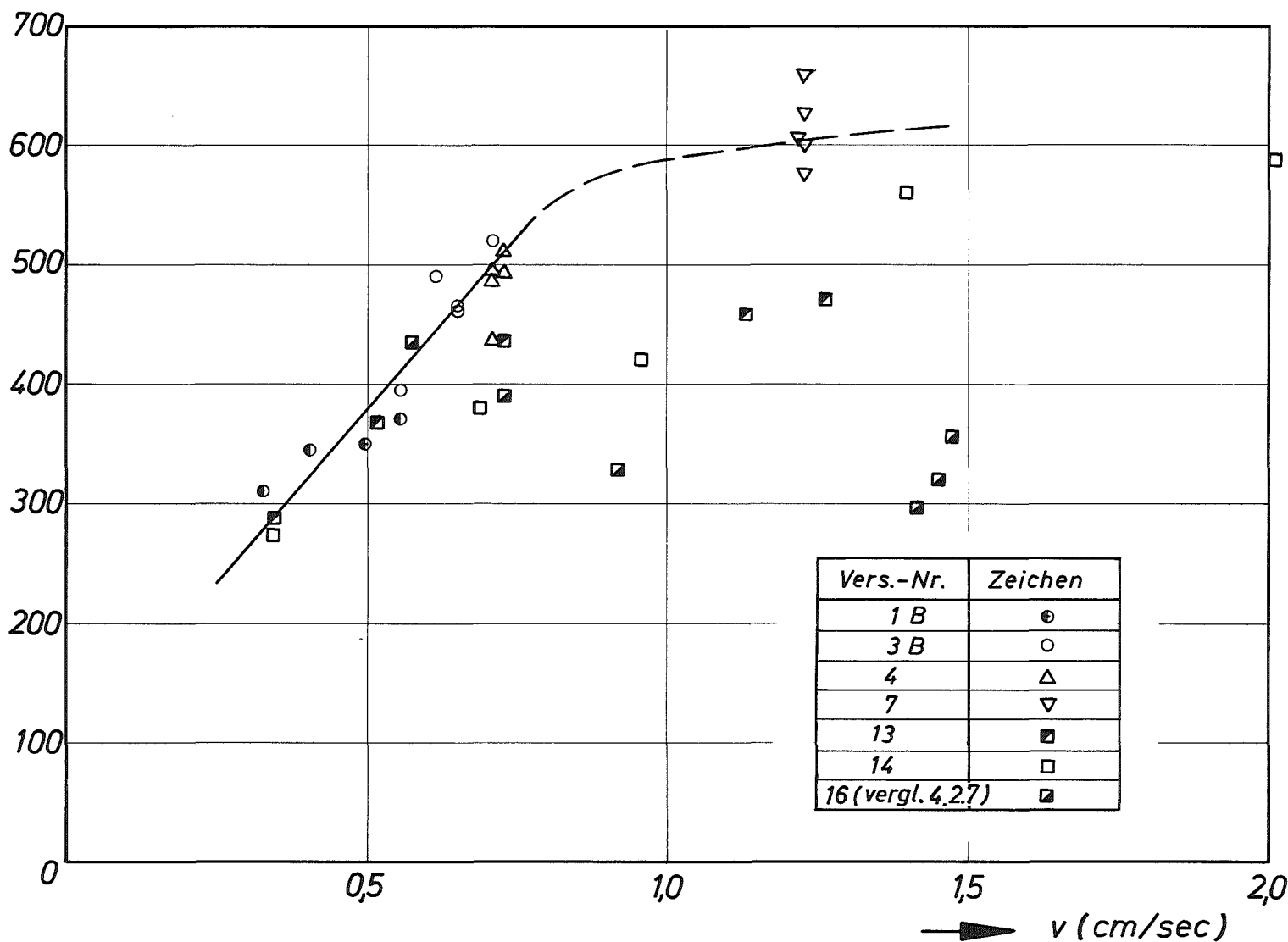


GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 3B, 5, 6, 7 und 8 zur Darstellung  
 des Einflusses der Tauchkühler - Leistung

Abb. 4.2-4

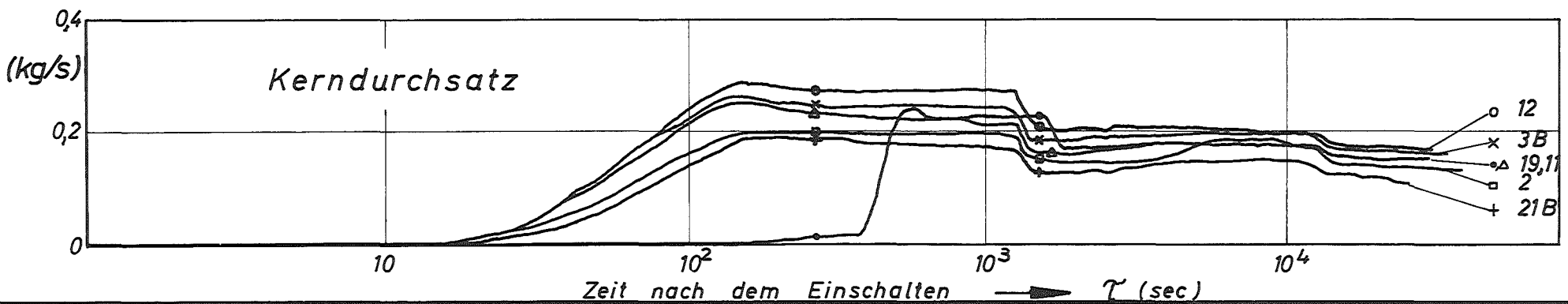
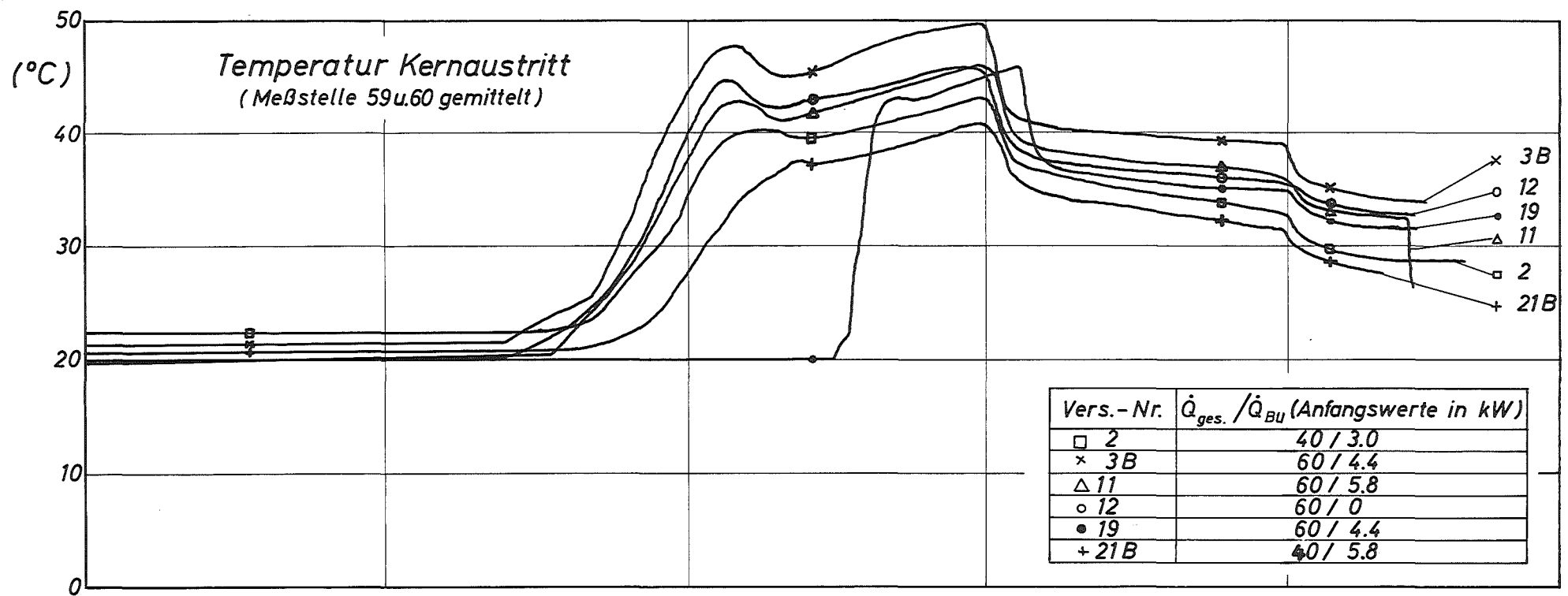
$$k \left( \frac{W}{m^2 \text{grad}} \right)$$



GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Wärmedurchgangszahl  $k$  für die Tauchkühler in Ab-  
 hängigkeit der Geschwindigkeit auf der Primärseite

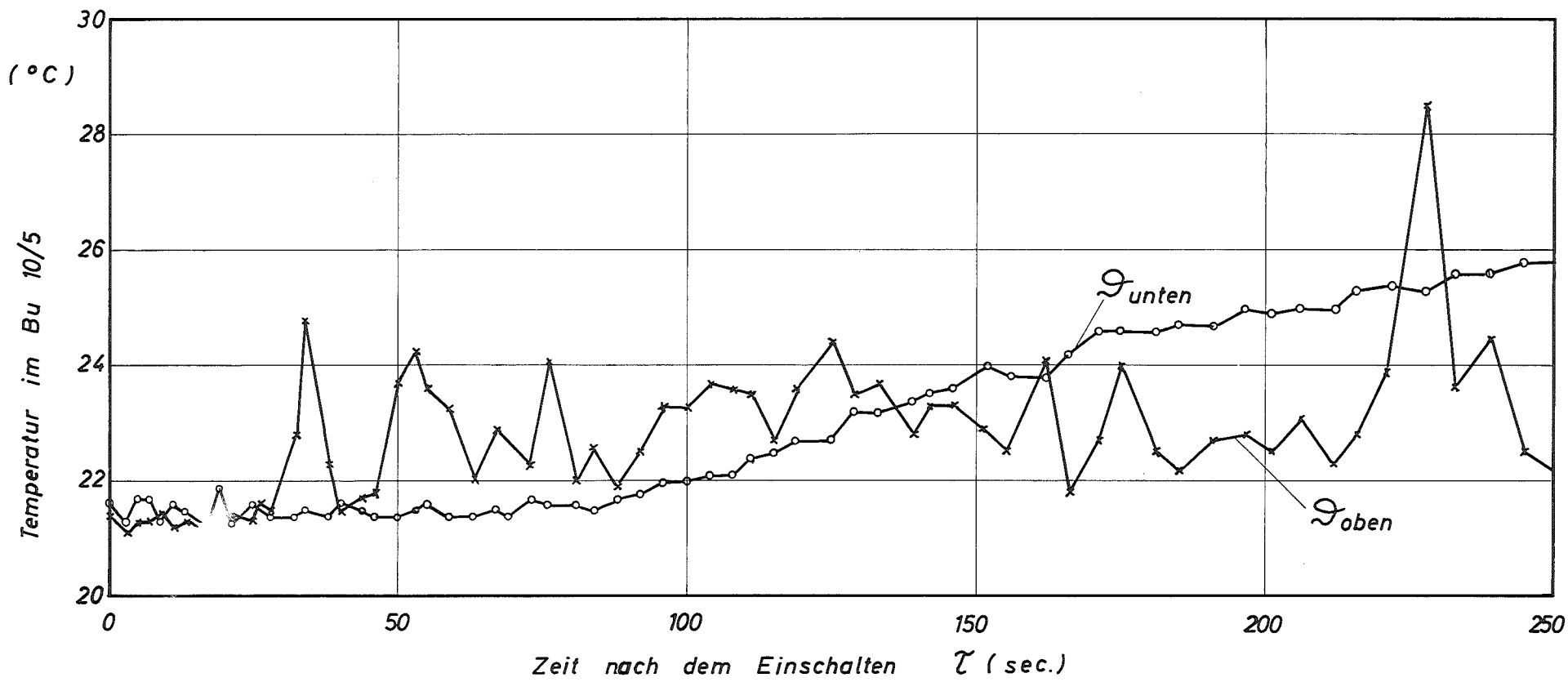
Abb. 4.2-5



G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Kernaustrittstemperatur und Kerndurchsatz für die Versuche 2,3B,  
11,12,19 und 21B mit unterschiedlicher Brutmantelleistung

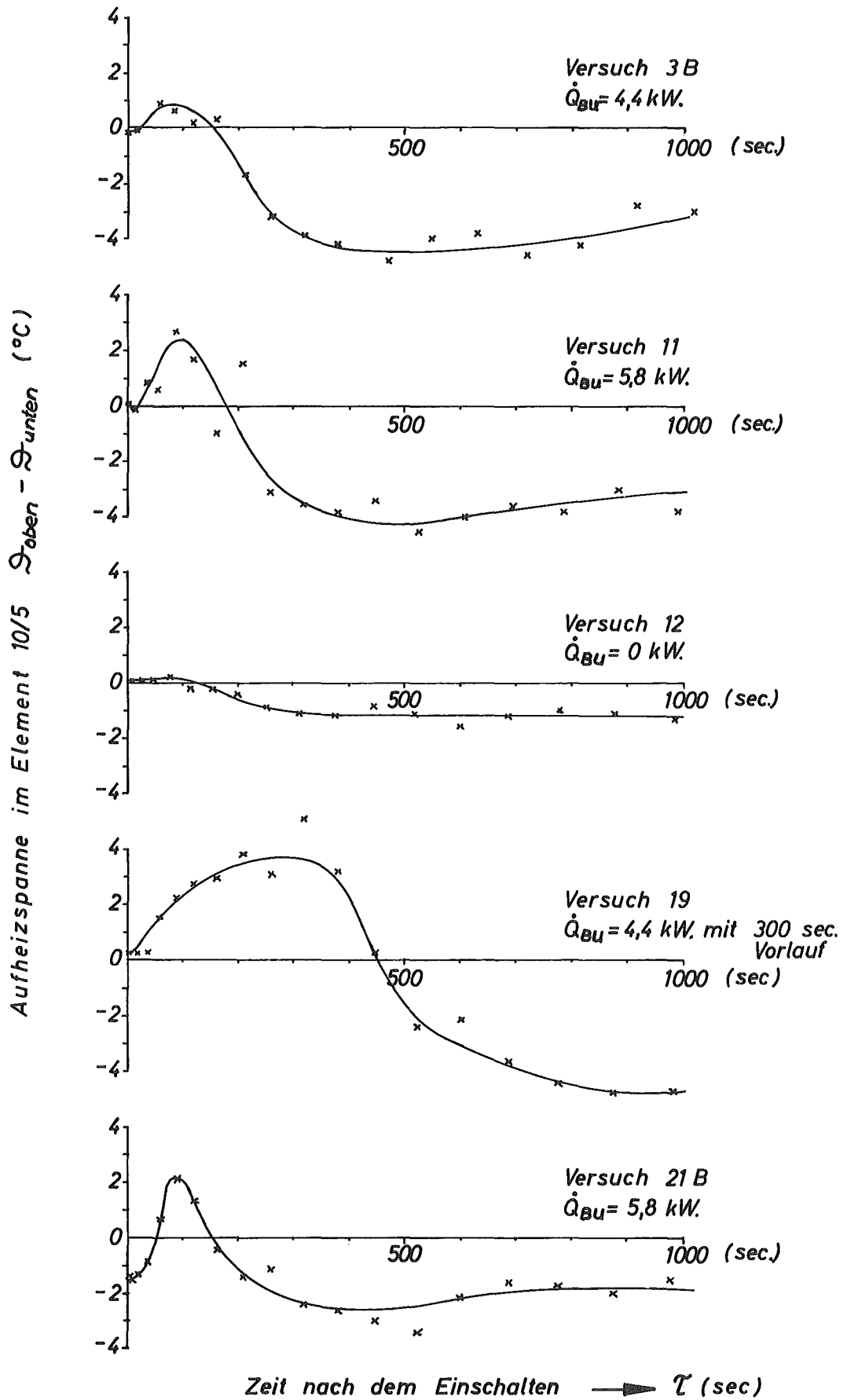
Abb. 4.2-6



G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Beispiel für den Temperaturverlauf am unteren und oberen  
 Ende des Brutelementes 10/5 (Versuch 3B)

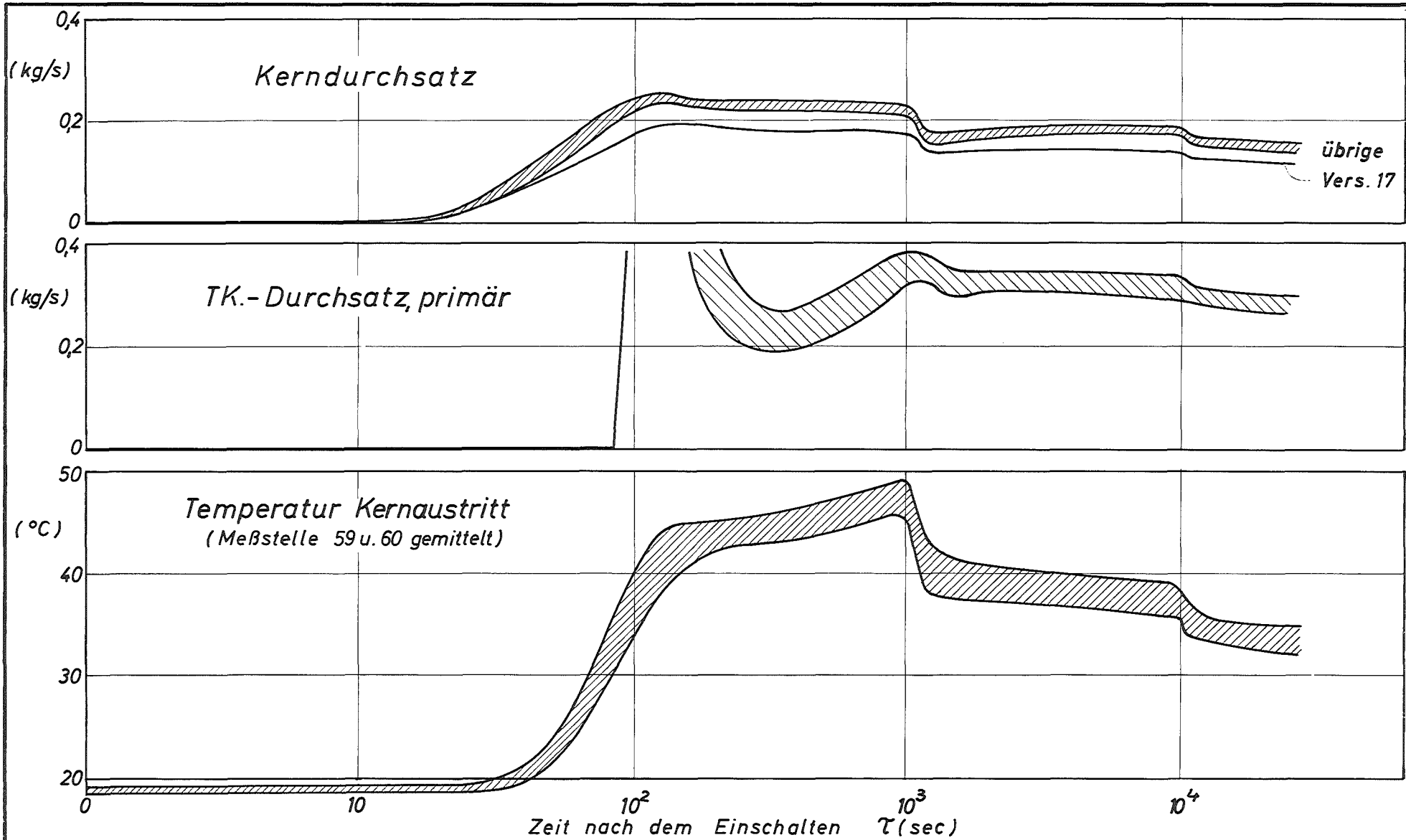
Abb. 4.2-7



G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Aufheizspanne im BU 10/5 mit unterschiedl.  
 BU-Lstg. zur Veranschlg. der Strömungsumkehr

Abb. 4.2-8

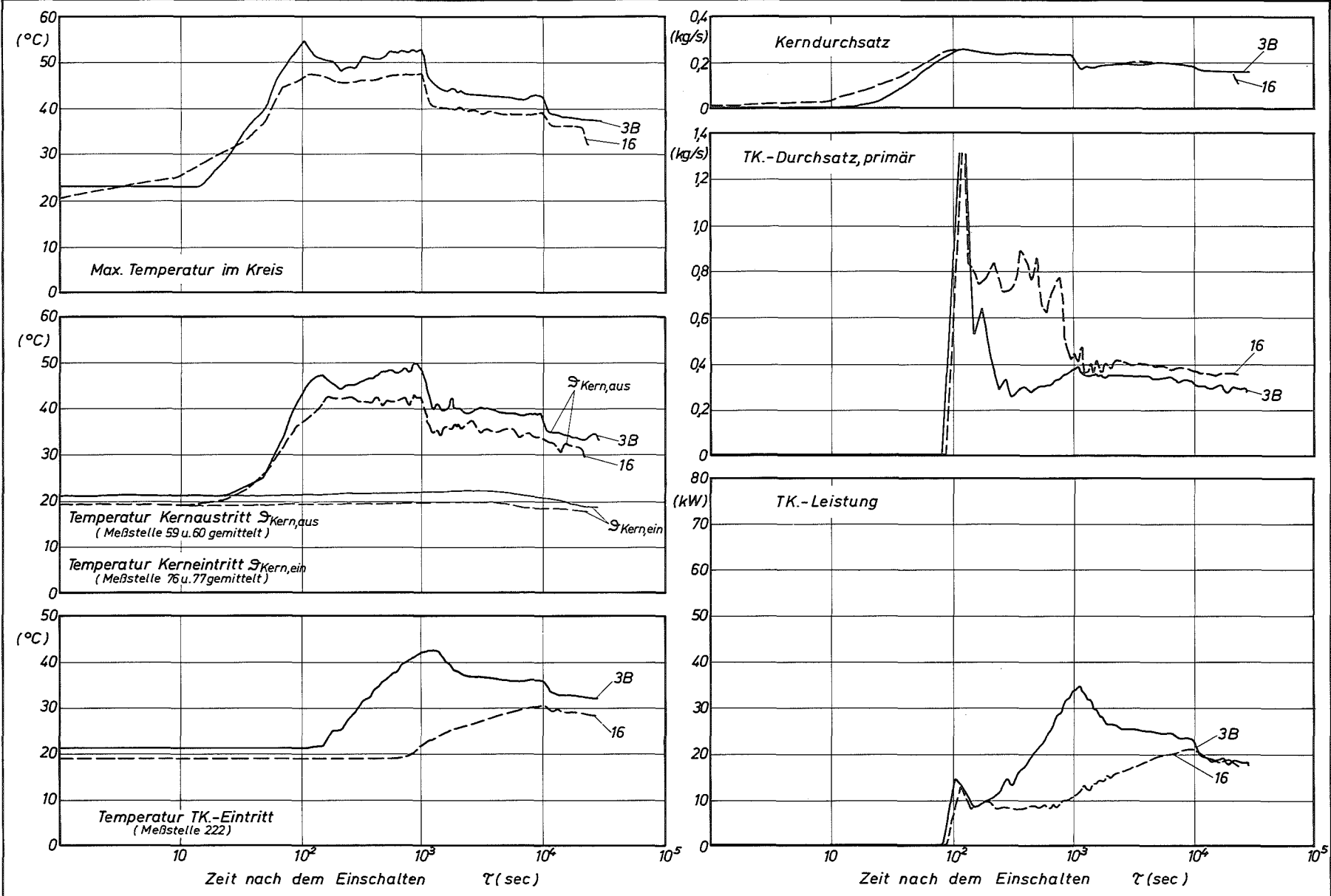


G f K

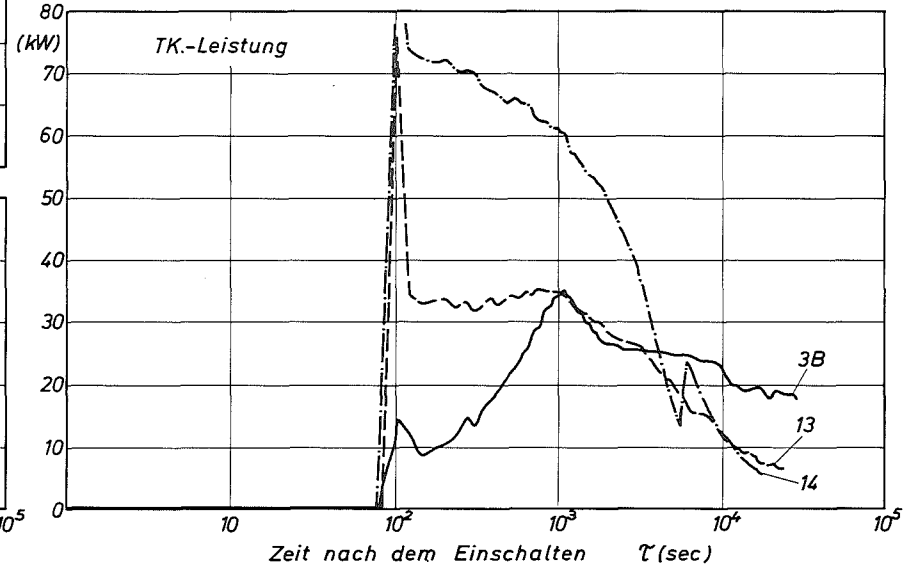
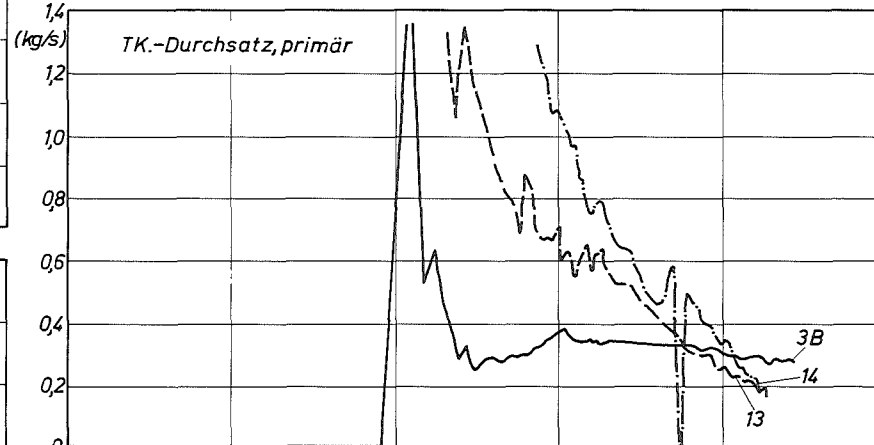
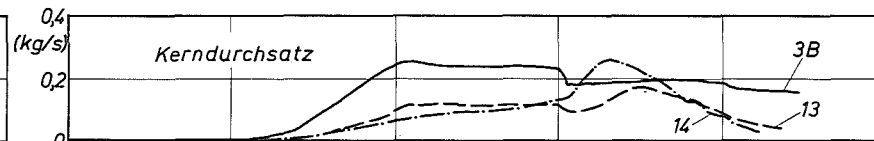
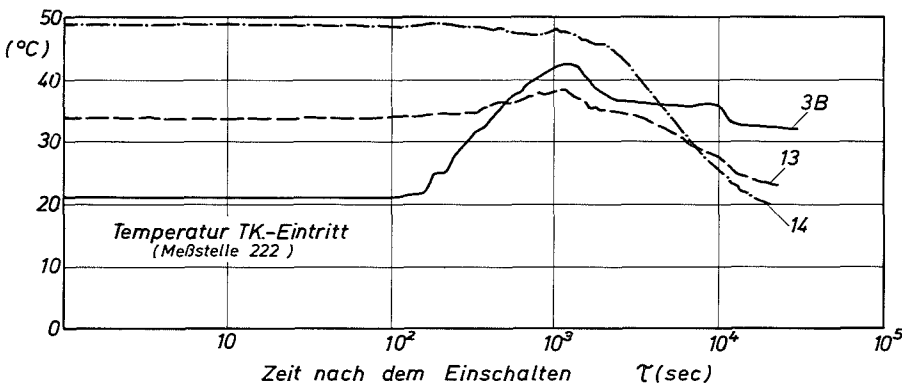
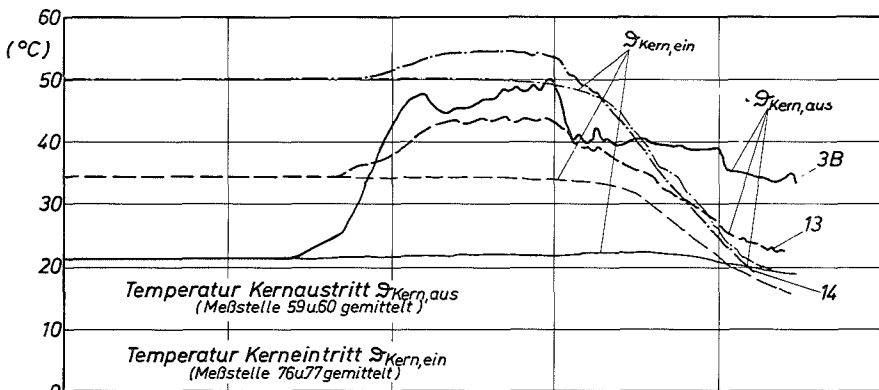
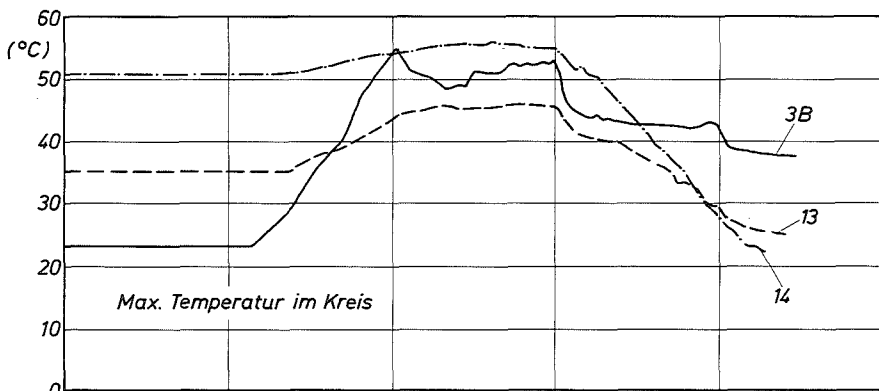
Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Schwankungsbereiche mehrerer Meßgrößen bei Variation ver-  
 schiedener Drosselquerschnitte (Vers. 3B, 9B, 10, 15, 17, 18 u. 21B)

Abb. 4.2-9





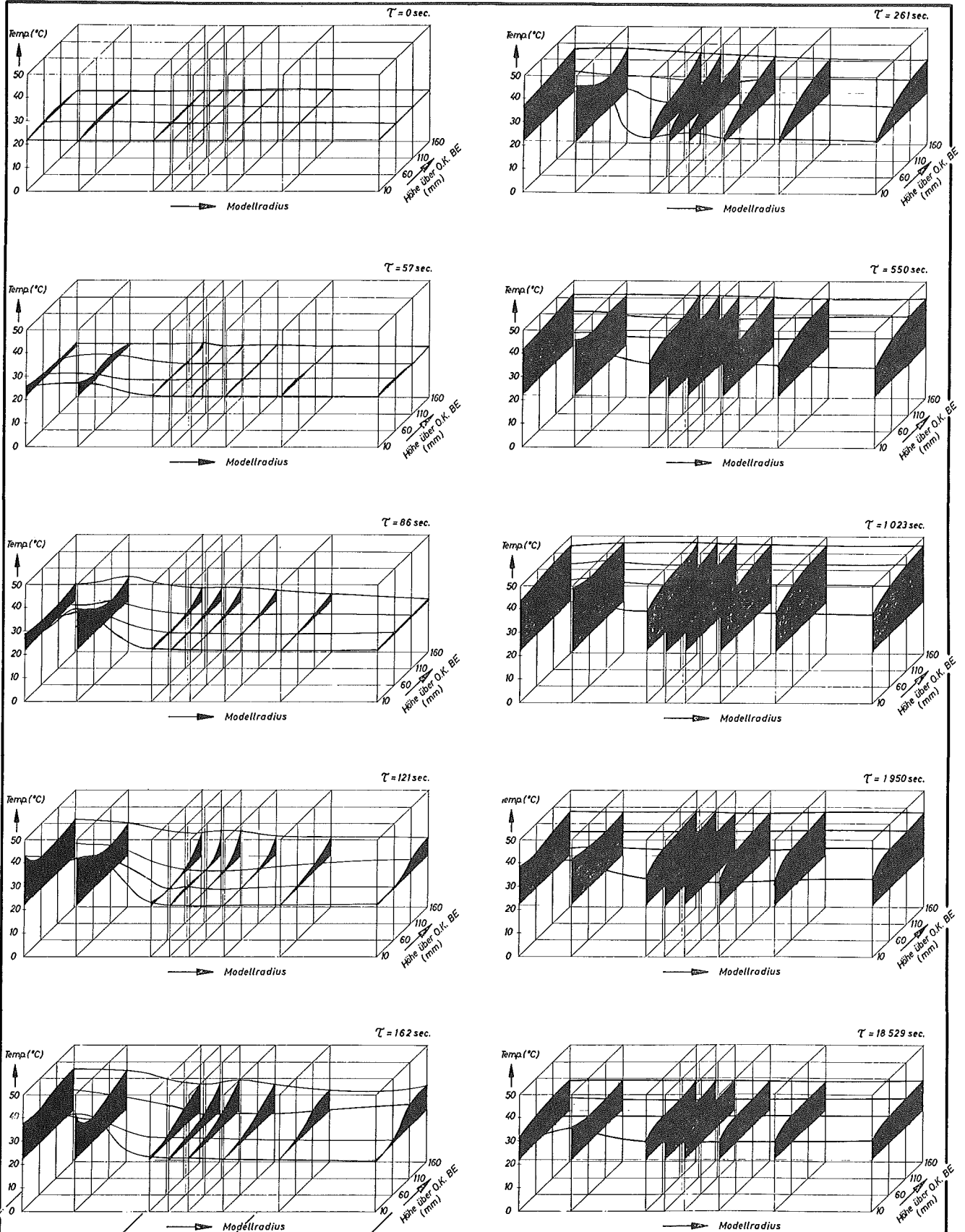
**GfK** Modellversuch zum Notkühlsystem SNR 300  
 Typische Meßgrößen für Versuch 3B (Notspiegel) und Versuch 16 (Betriebsspiegel)  
 Abb. 4.2-10



GfK

Modellversuch zum Notkühlsystem SNR 300  
Vergleich typischer Meßgrößen der Versuche 3B, 13 und 14 zur Darstellung des Einflusses der Anfangstemperatur 20, 35 und 50 °C

Abb. 4.2-11

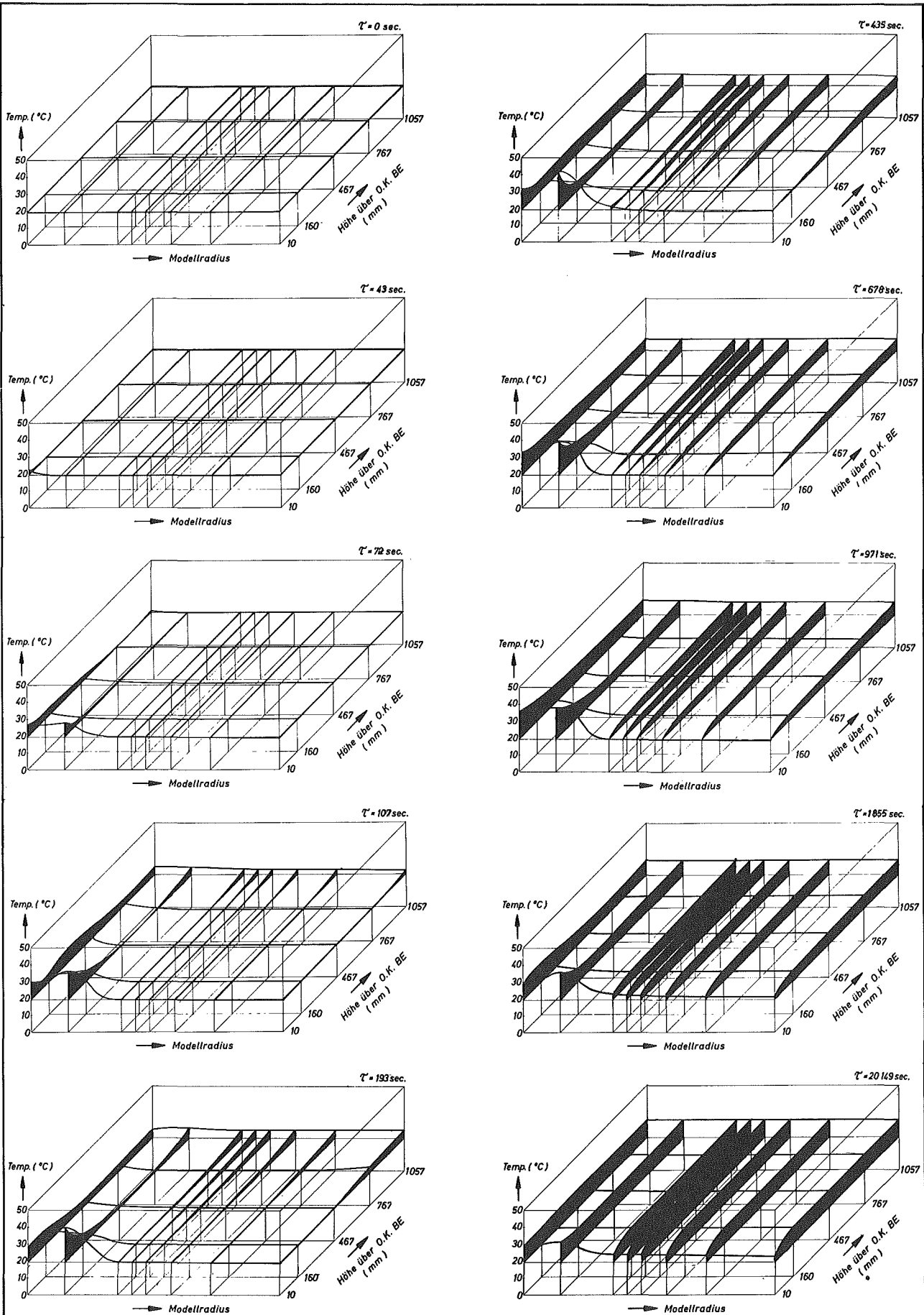


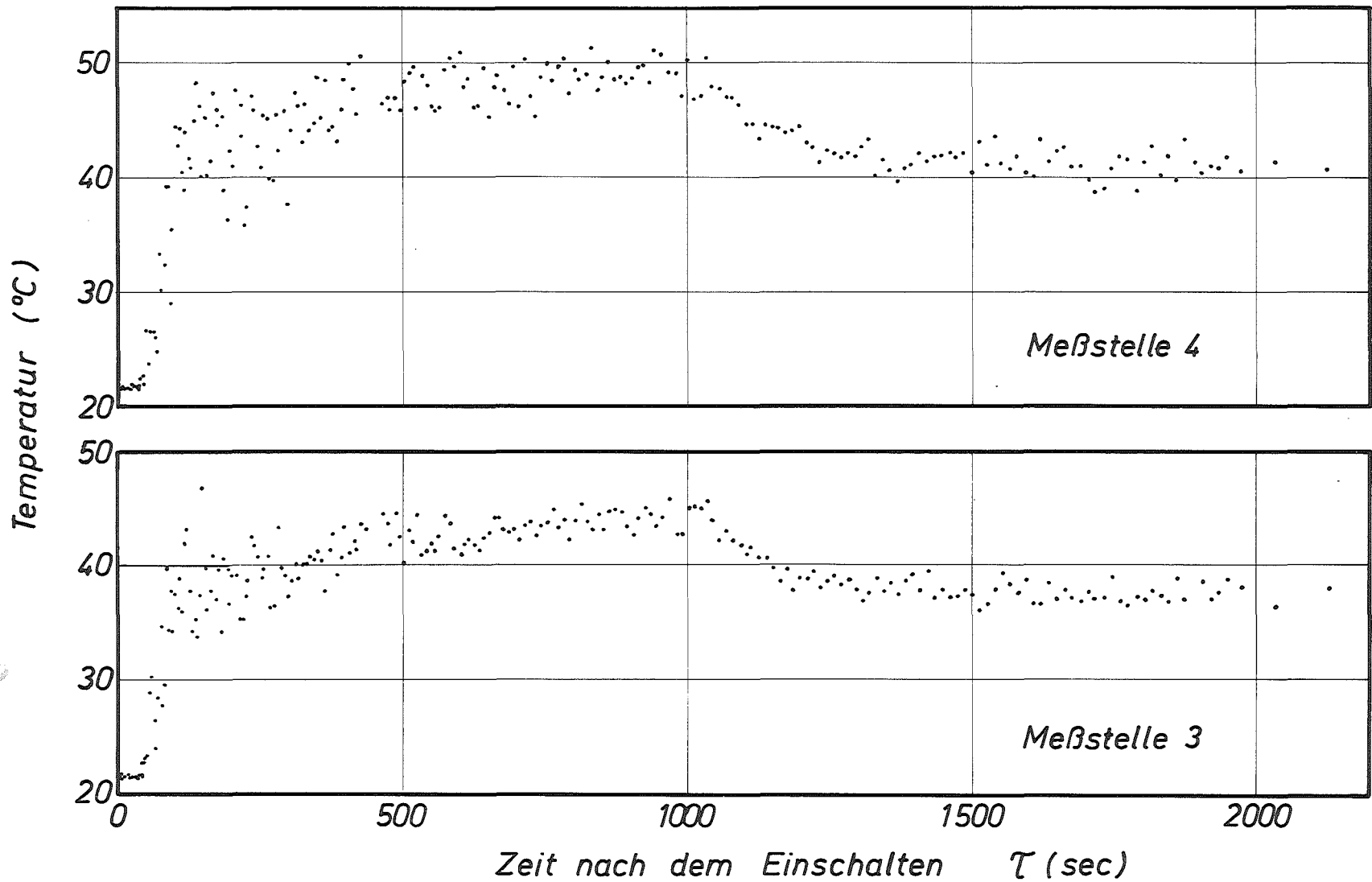
Core-mitte      Core-rand      Kern-mantel      Schild-tank

G f K

Modellversuch zum Notkühlsystem SNR 300  
Temperaturverlauf im Oberplenum (Vers. 3B)

Abb. 4.3-1

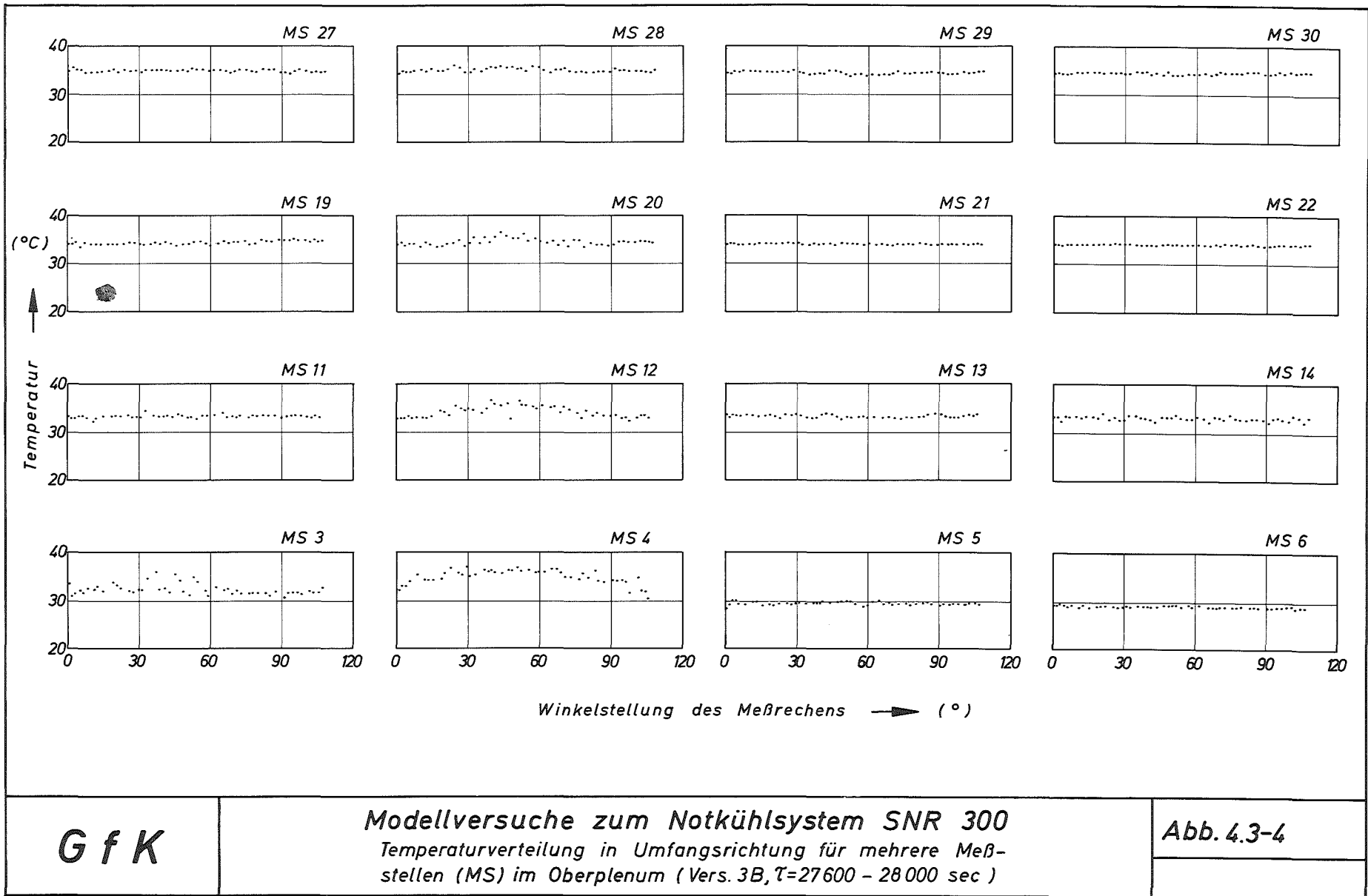




G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Temperaturschwankungen im Oberplenum (Versuch 3B)

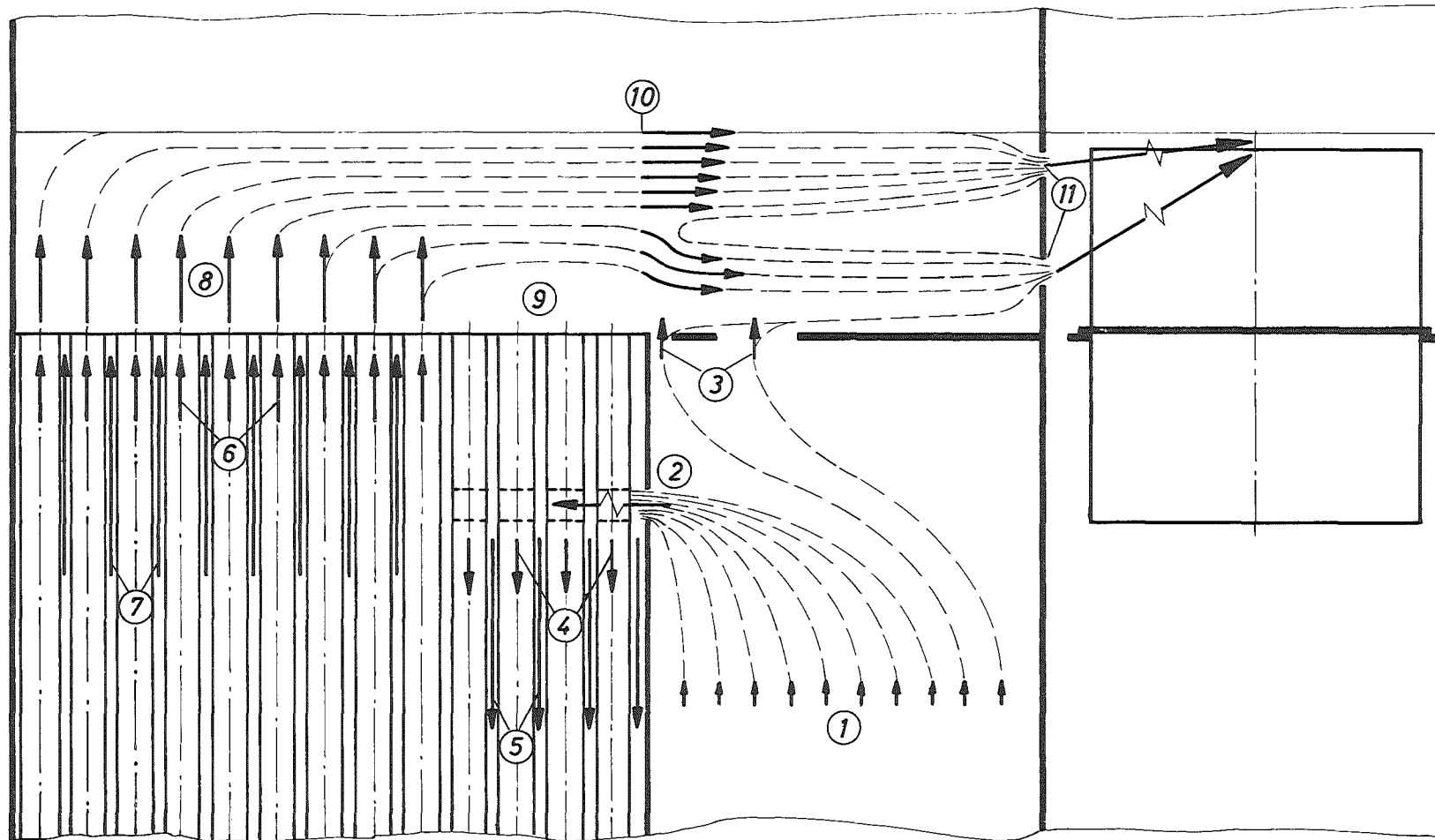
Abb. 4.3-3



G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Temperaturverteilung in Umfangsrichtung für mehrere Meßstellen (MS) im Oberplenium (Vers. 3B,  $\tau=27600 - 28000$  sec)

Abb. 4.3-4



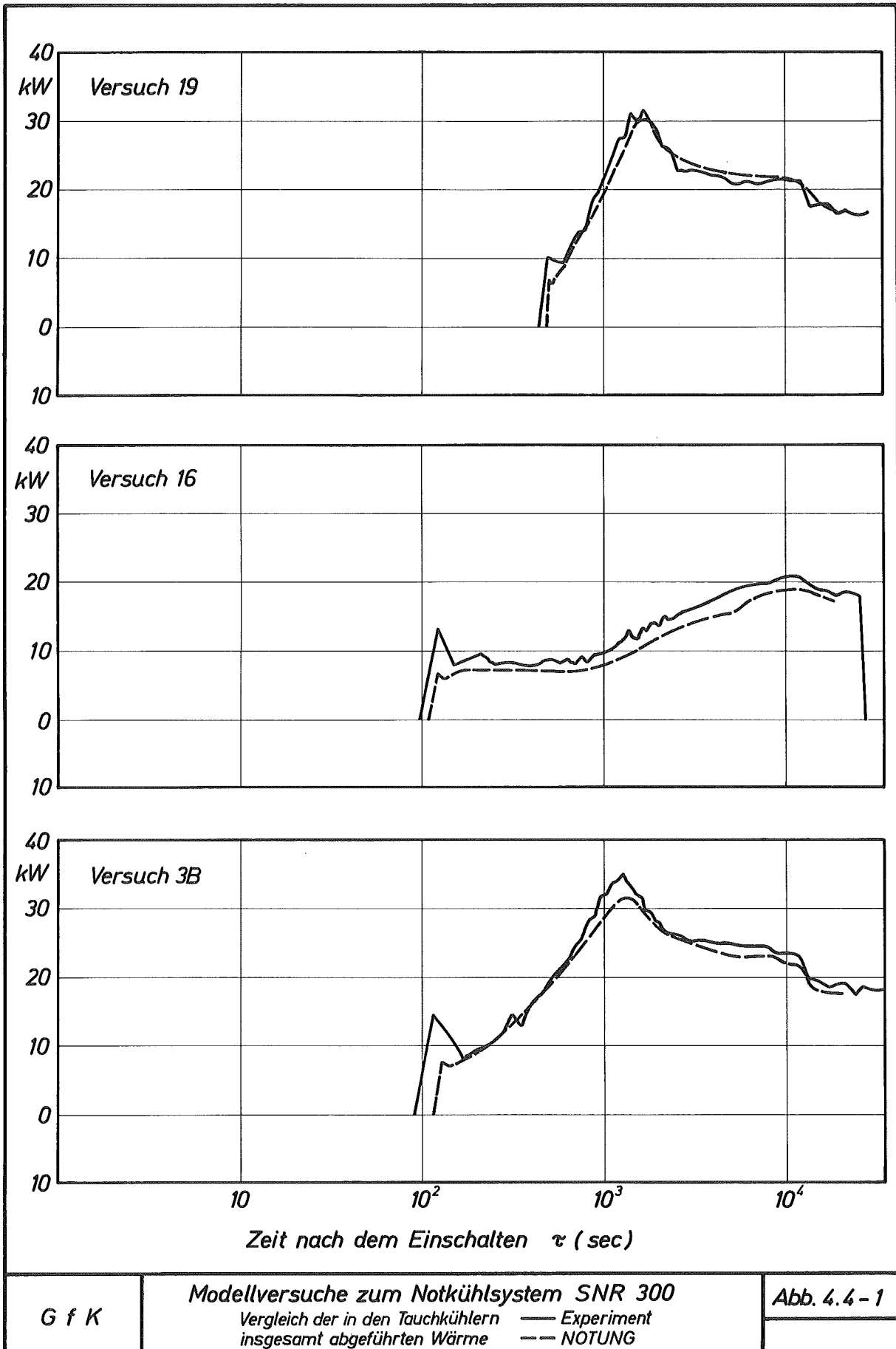
Längenmaßstab: 1:5

Geschwindigkeits-Maßstab:  $1 \text{ cm} \cong 0.2 \text{ cm/sec.}$

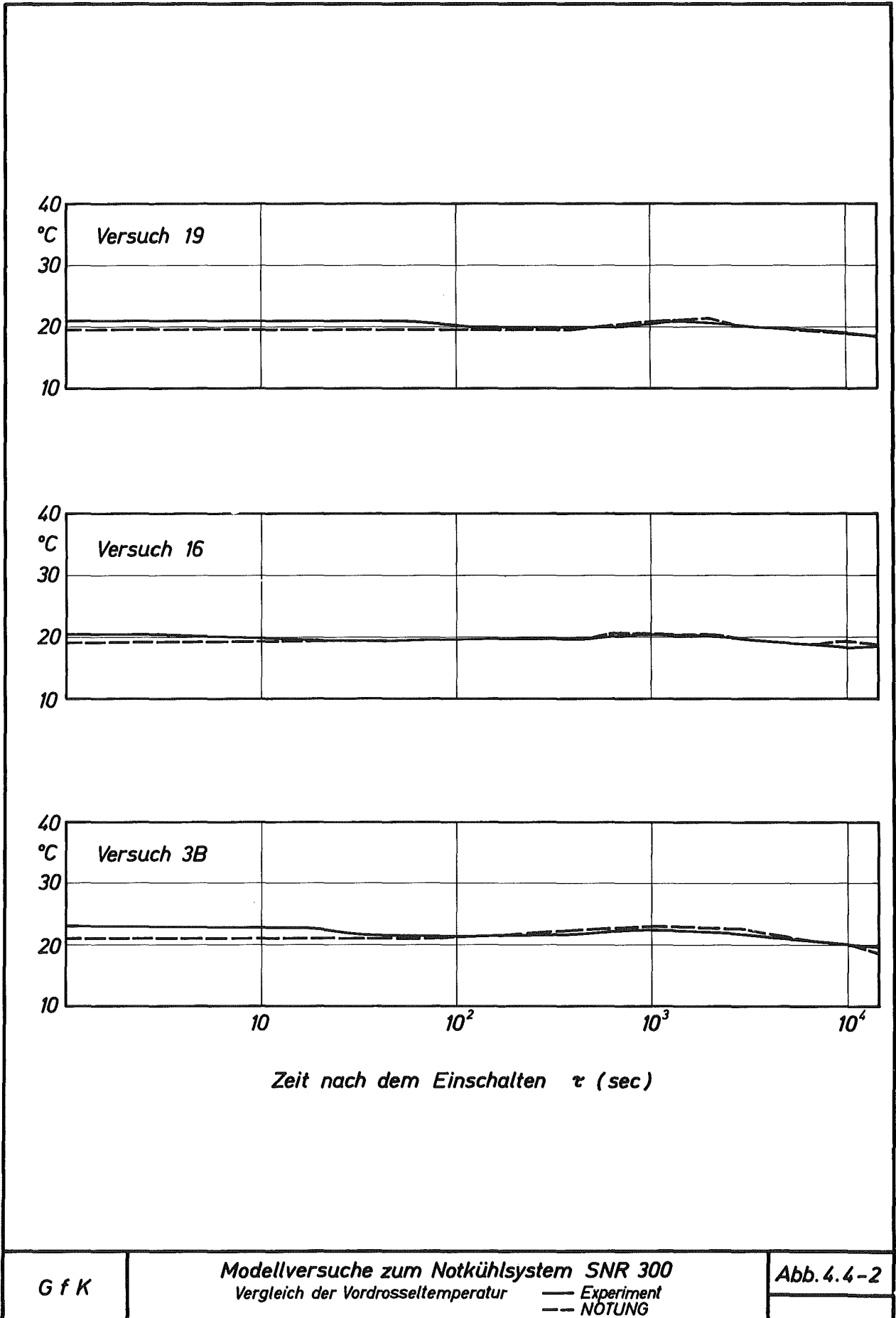
**GfK**

**Modellversuche zum Notkühlssystem SNR 300**  
 Strömungsgeschwindigkeiten im Oberplenium und in den angrenzenden Räumen im stationären Zustand

Abb. 4.3-5



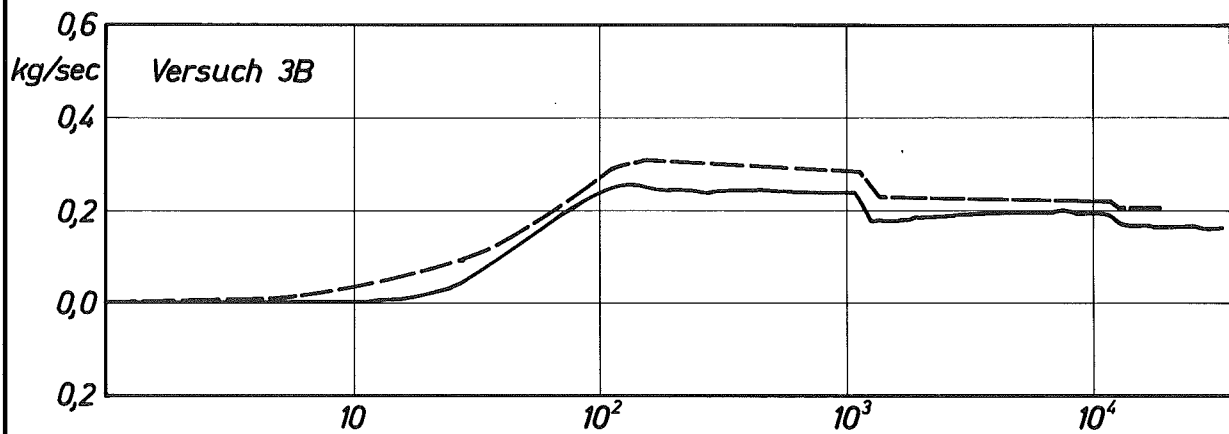
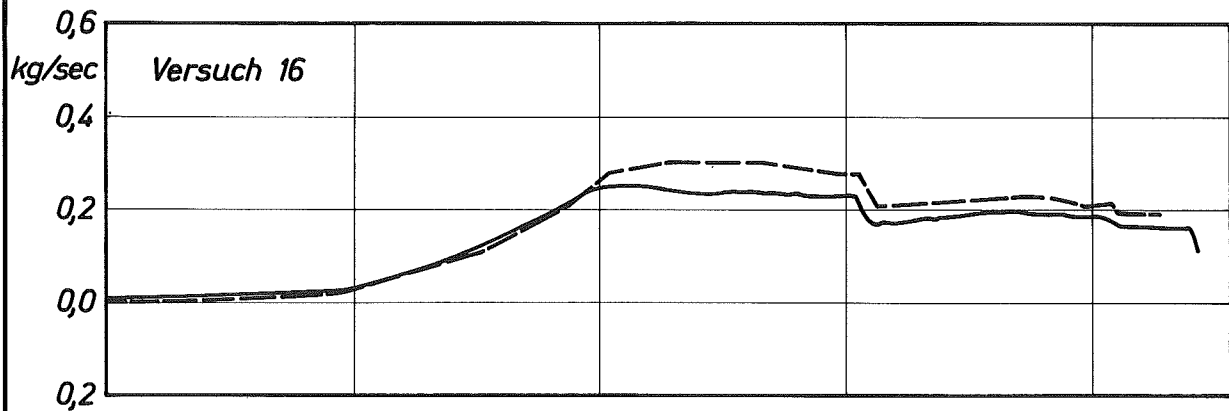
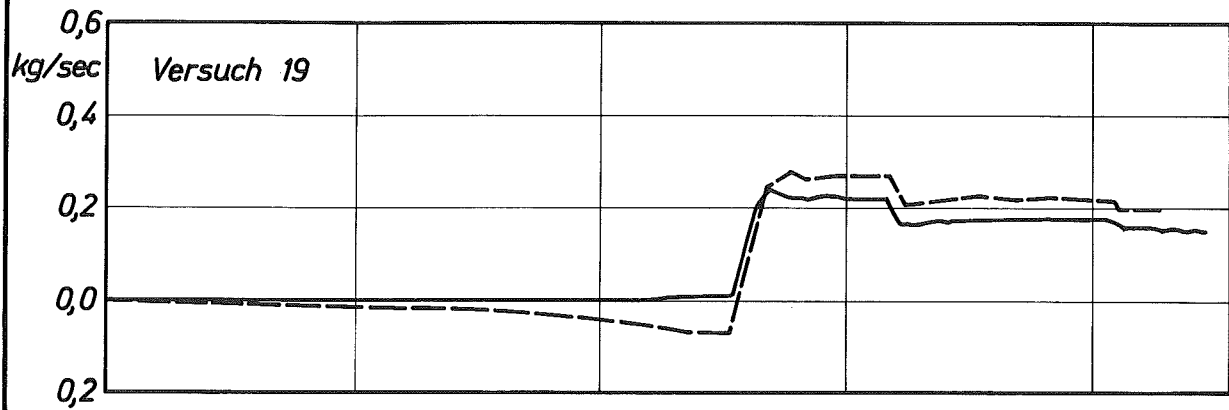




G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Vergleich der Vordrosseltemperatur — Experiment  
--- NOTUNG

Abb. 4.4-2

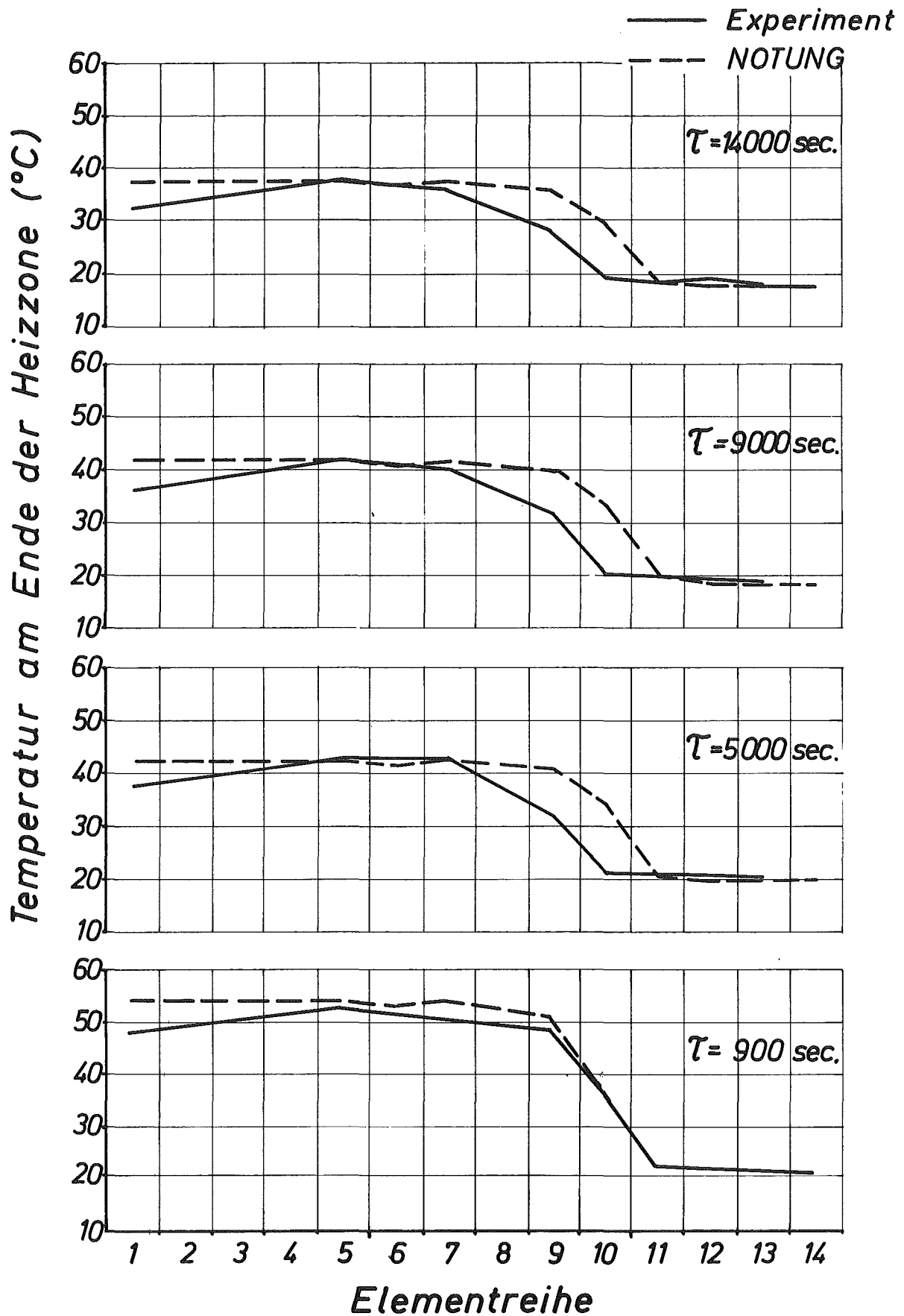


Zeit nach dem Einschalten  $\tau$  (sec)

G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Vergleich des Kerndurchsatzes — Experiment  
 --- NOTUNG

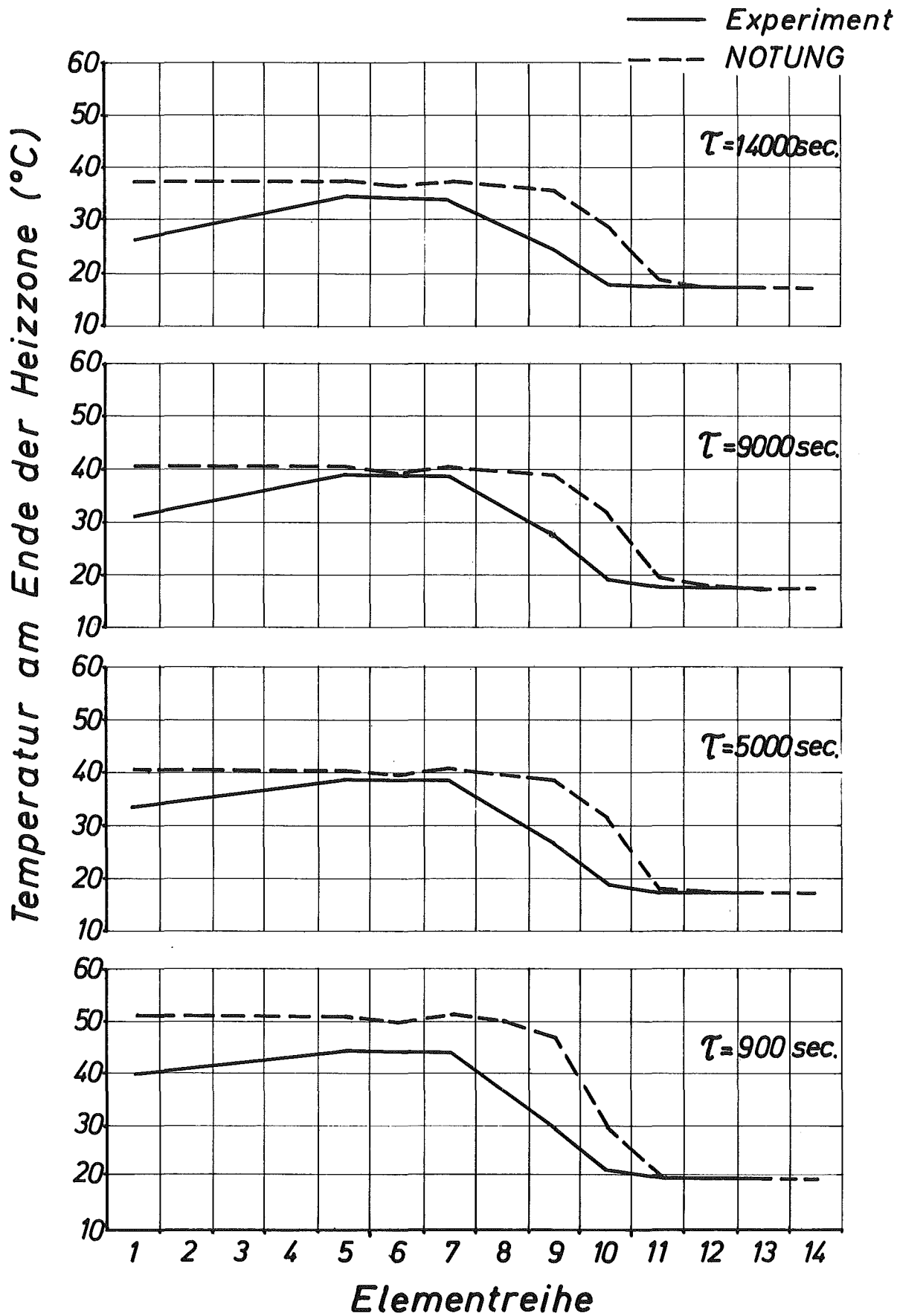
Abb. 4.4-3



GfK

Modellversuch zum Notkühlsystem SNR300  
Vergleich der radialen Temperaturprofile  
zu versch. Zeitpunkten für Versuch 3B

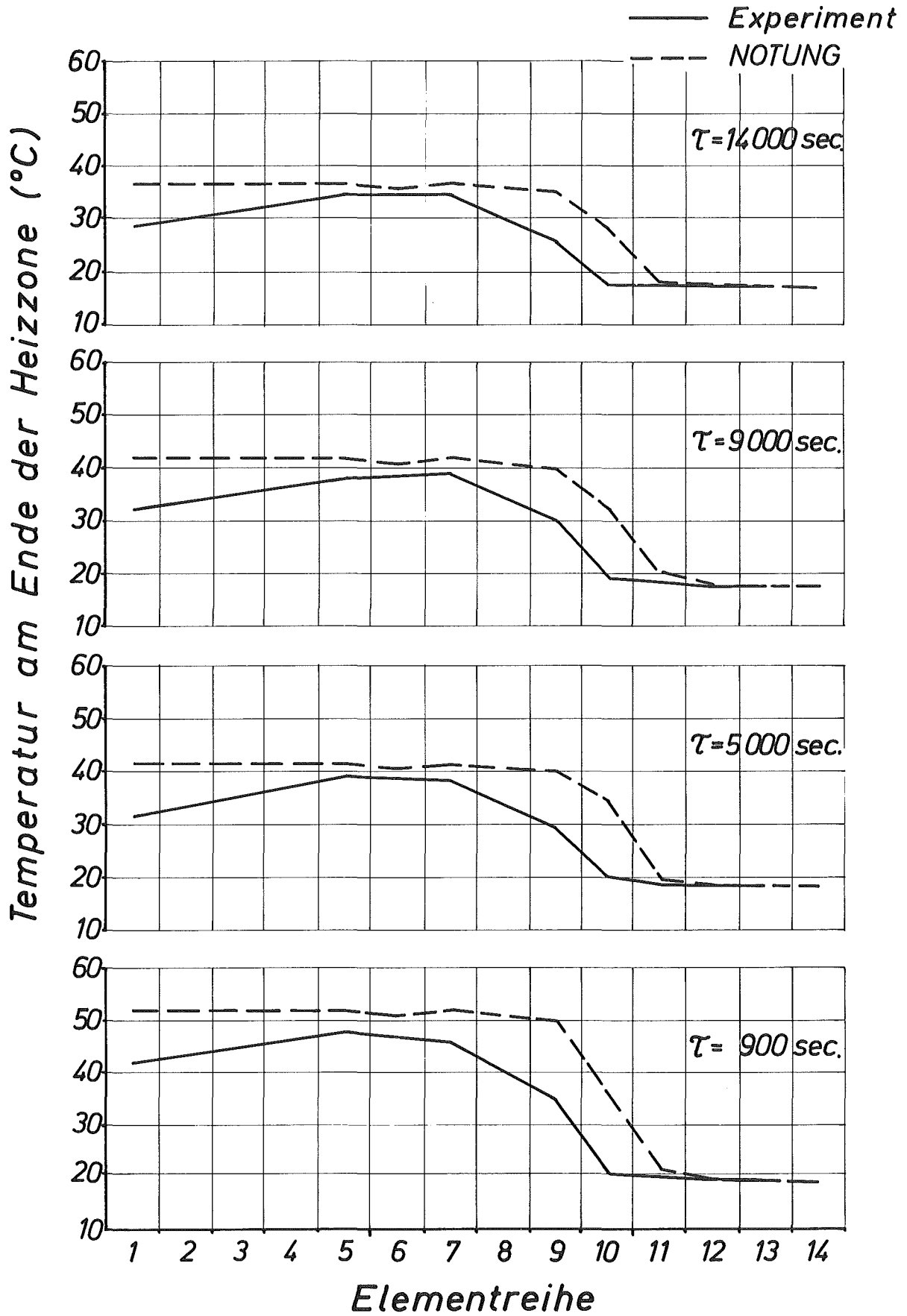
Abb. 4.4-4



GfK

Modellversuch zum Notkühlsystem SNR300  
Vergleich der radialen Temperaturprofile  
zu versch. Zeitpunkten für Versuch 16

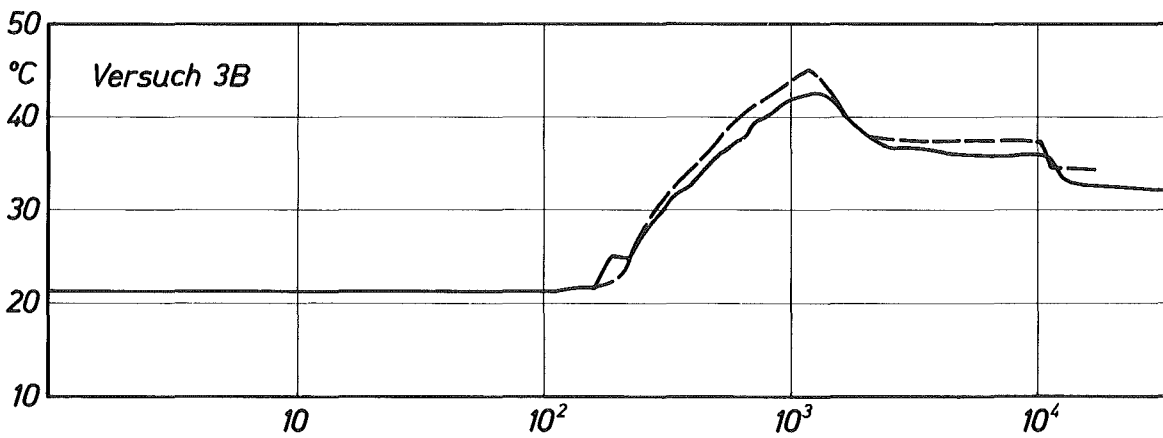
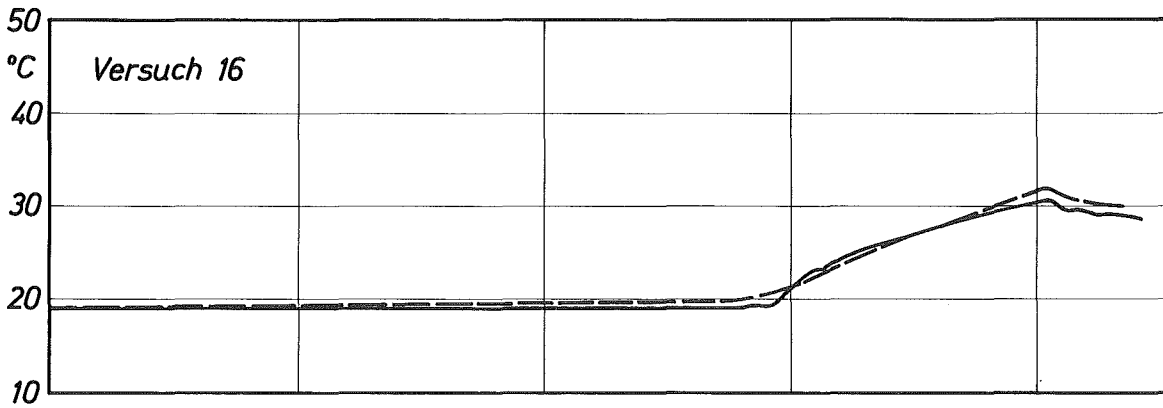
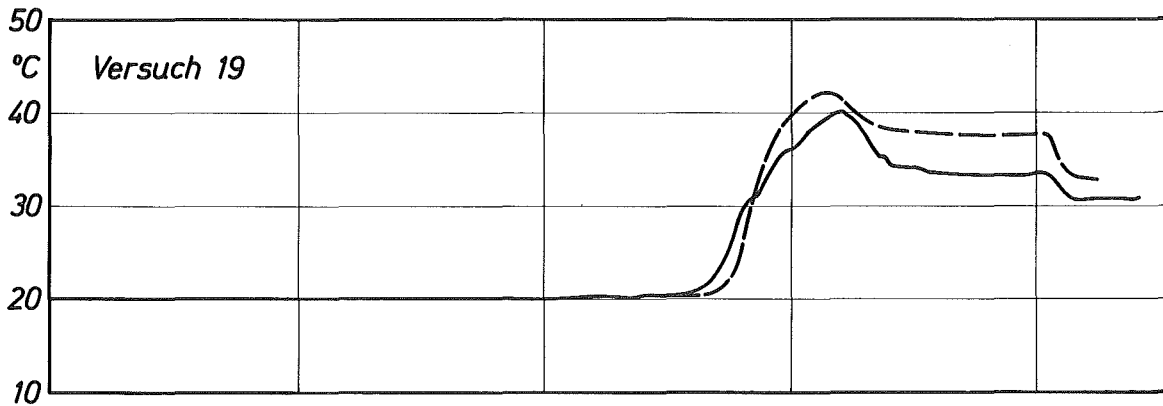
Abb.4.4-5



GfK

Modellversuch zum Notkühlsystem SNR300  
Vergleich der radialen Temperaturprofile  
zu versch. Zeitpunkten für Versuch 19

Abb.4.4-6



Zeit nach dem Einschalten  $t$  (min)

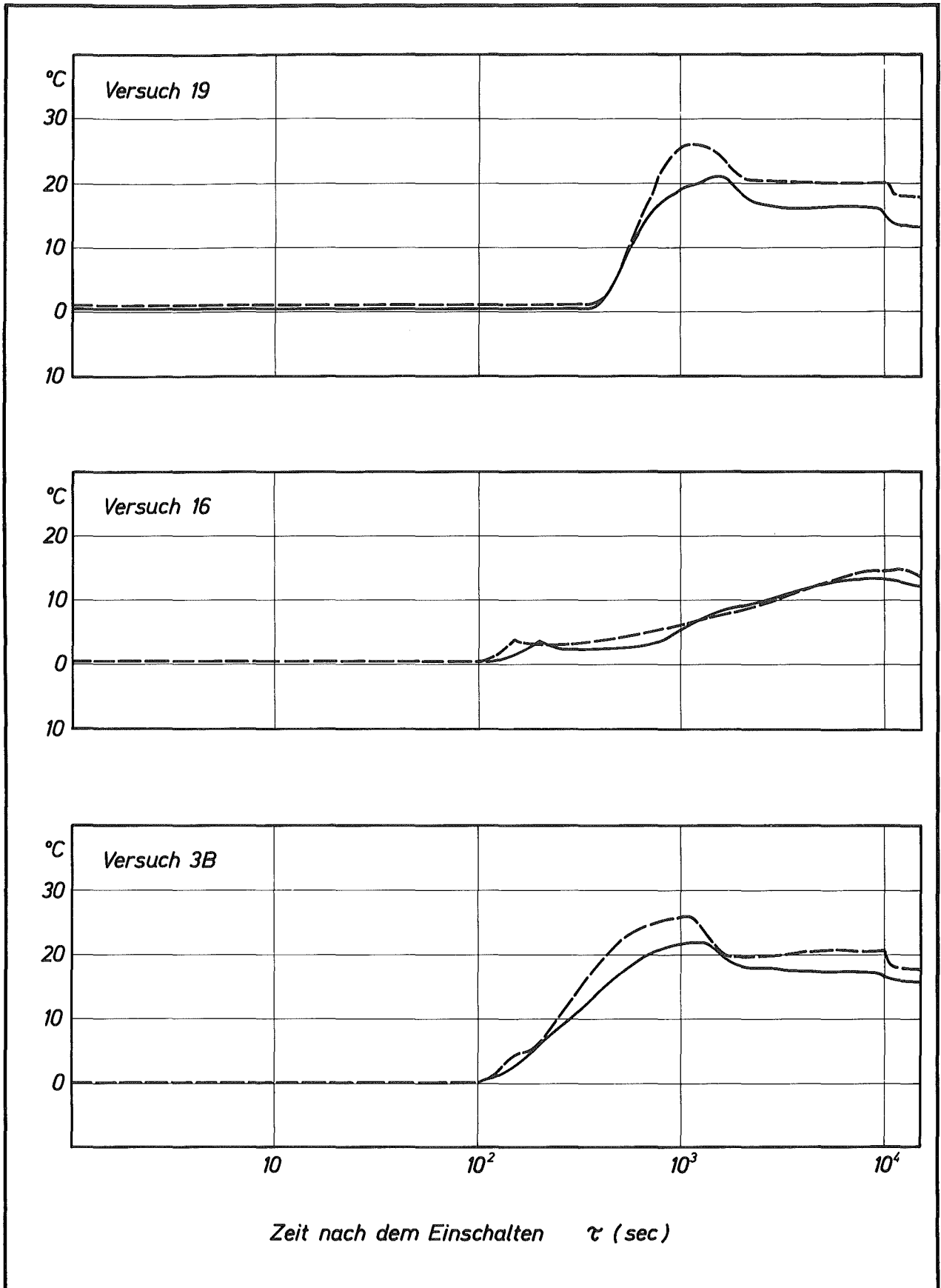
G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300

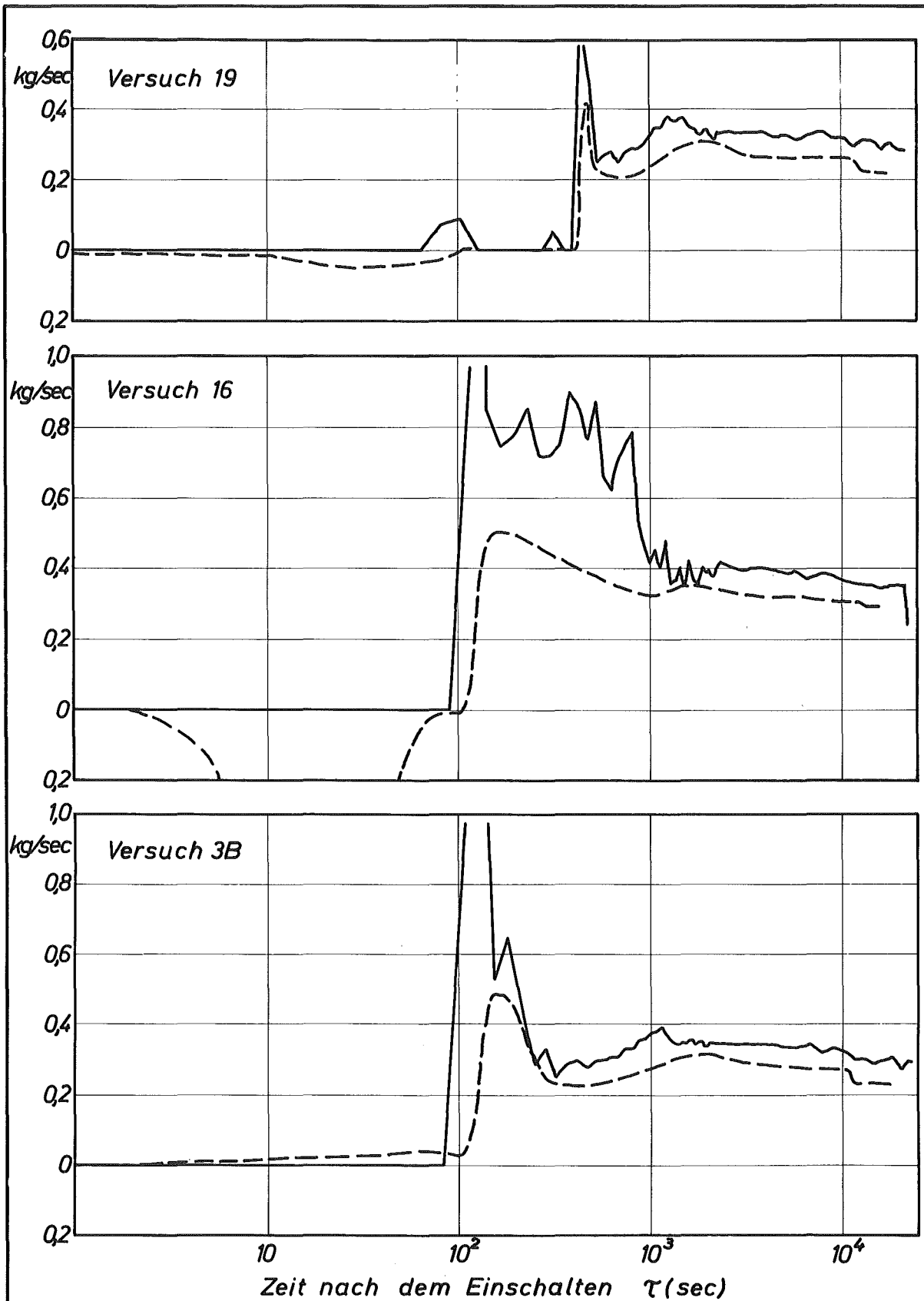
Vergleich der primärseitigen  
Tauchkühlereintrittstemperatur

— Experiment  
--- NOTUNG

Abb. 4.4-7



G f K	<p><b>Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300</b></p> <p>Vergleich der primärseitigen Abkühlung am Tauchkühler</p>	<p>— Experiment</p> <p>- - - NOTUNG</p>
		Abb. 4.4-8



GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Vergleich des primärseitigen Gesamtdurchsatzes durch die Tauchkühler

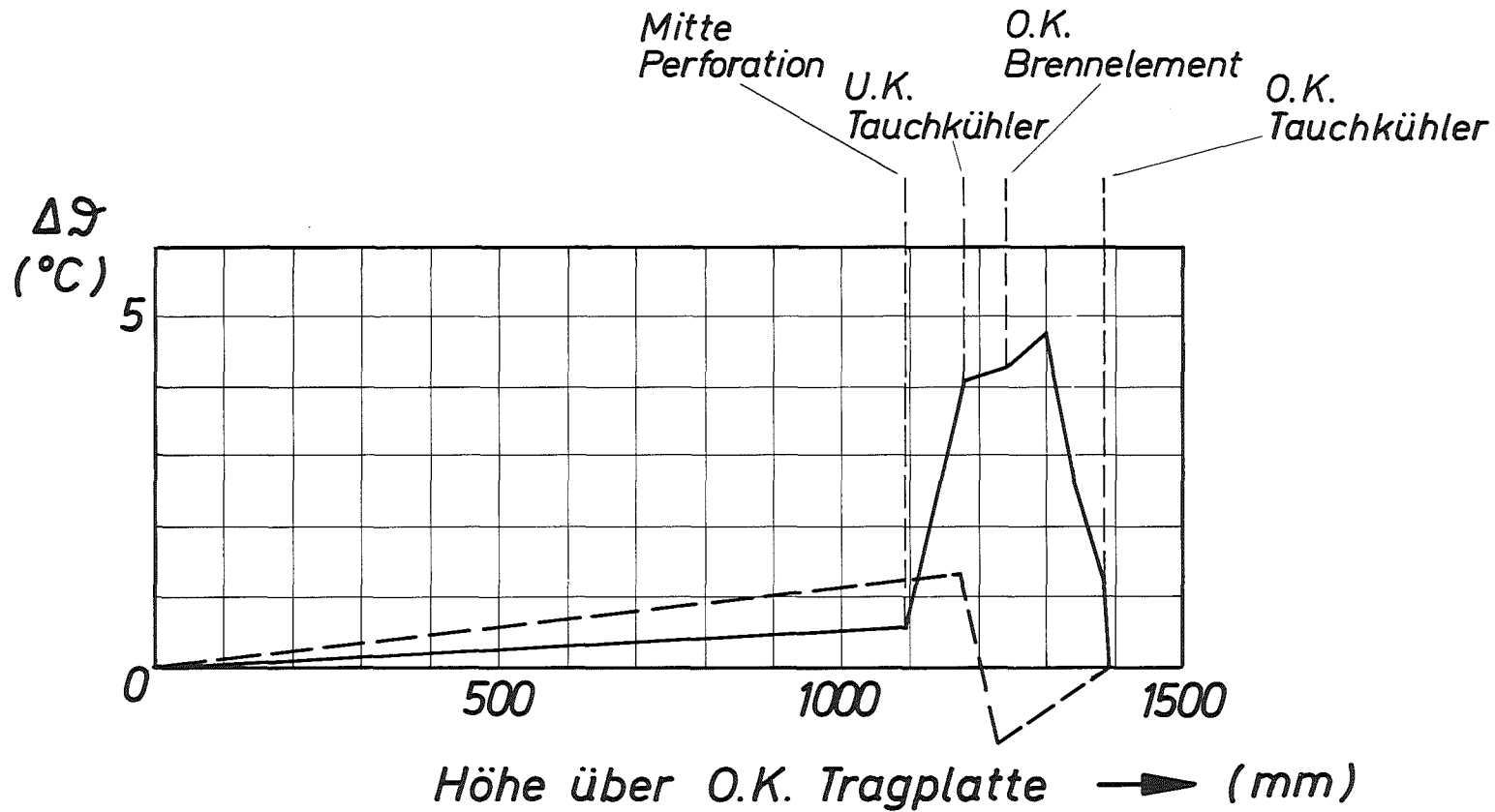
— Experiment  
 - - - NOTUNG

Abb. 4.4-9



— Experiment

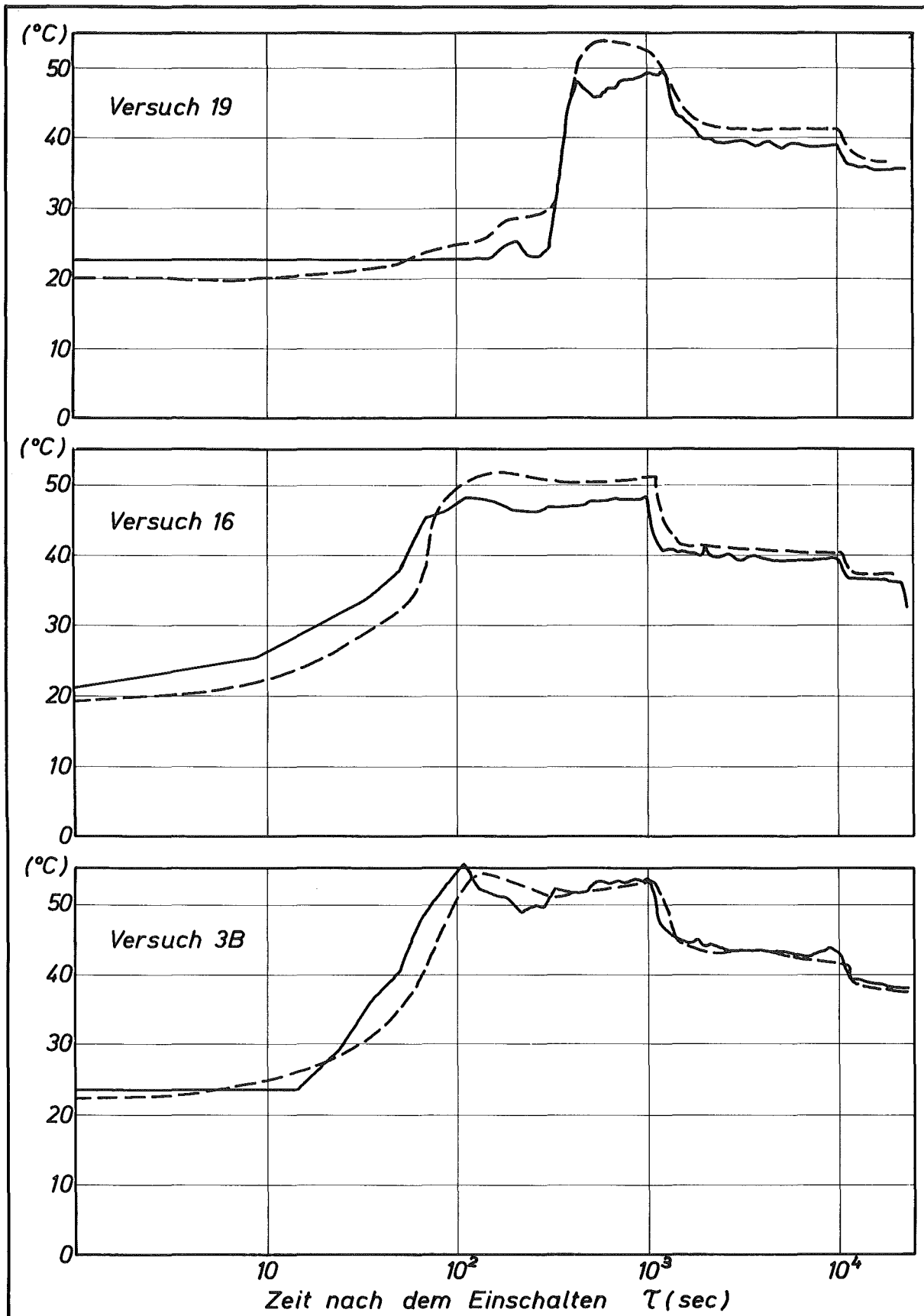
- - - NOTUNG



GfK

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
Vergleich der radialen Temperaturdiffenz am Schild-  
tank, Versuch 3B,  $\tau = 5000$  sec.

Abb. 4.4-10



G f K

Modellversuche zum Notkühlsystem SNR 300  
 Vergleich der Maximaltemperatur im Kreis — Experiment  
 --- NOTUNG

Abb. 4.4-11

Zusammenstellung von Meßwerten

A 1 Übersicht

Die Erfassung der Meßdaten und ihre Speicherung auf Band mit Hilfe des CALAS-Systems ist in Abschnitt 2.3.4. beschrieben. Zur weiteren Aufbereitung der Daten wurde das Programmsystem SEDAP [2] verwendet. Dieses Programmsystem ermöglicht die Umorientierung der Daten, ihre Raffung, die graphische Darstellung zweier Variabler gegeneinander und die tabellarische Ausgabe in beliebiger Anordnung. Wegen der Vielzahl der angefallenen Meßdaten erwies es sich für die Standard-Auswertung der Versuche als unumgänglich, eine starke Zeitraffung vorzunehmen. Die in diesem Anhang beschriebenen Plots (Abb. A-1 bis A-10) sind daher mit nur wenigen Prozent der verfügbaren Meßdaten erstellt worden. Auch die erzeugten Druckbilder, von denen Abb. A-11 ein Beispiel zeigt, stehen für den größten Teil der Versuche nur für einen relativ weiten Zeitsprung zur Verfügung (ca. 35 Druckbilder pro Versuch). Nur in Ausnahmefällen wurden auch Druckbilder in wesentlich engerer Zeitfolge erzeugt. Dieser Anhang enthält:

- 1.) Tabellen A-1 bis A-4      Tabellen der wichtigsten Versuchsergebnisse.
- 2.) Tabellen A-5 bis A-7      Tabellen der Meßgrößen und zur Meßgenauigkeit.
- 3.) Abbildungen A-1 bis A-10      Plots für den Referenzversuch 3B.
- 4.) Abbildung A-11      Druckbild sämtlicher Meßwerte für einen bestimmten Zeitpunkt.

## A 2 Erläuterungen zu den Tabellen und Abbildungen

### A 2.1. Datentabellen A-1 bis A-4

Diese Tabellen enthalten die wichtigsten Daten für Leistungen, Durchsätze und Temperaturen für sämtliche Versuche zu bestimmten Zeitpunkten. Die Werte wurden direkt aus den manuell geglätteten Plots gemäß A 2.3. abgegriffen. Die Bezeichnungen entsprechen daher den dort gegebenen Definitionen. Als Aufheizspanne wird die Differenz zwischen der Temperatur am Kernaustritt und am Kerneintritt verstanden.

### A 2.2. Tabellen A-5 bis A-7

Diese Tabellen enthalten eine Auflistung der Meßstellen, die Eichkonstanten für die Thermoelemente zur Temperaturmessung sowie Angaben über die Meßgenauigkeit verschiedener Meßgrößen.

### A 2.3. Plots

Als zeitlicher Verlauf sind für alle Versuche folgende Meßgrößen geplottet worden und hier als Beispiel für den Referenzversuch 3B wiedergegeben. Entsprechende Kurven für weitere Versuche sind in den Abbildungen der Kapitel 4.2. bis 4.4. dargestellt. Die Zeitachse in den Abbildungen A-1 bis A-10 ist im logarithmischen Maßstab geteilt; die Achsenbeschriftung erfolgt daher als  $\log \tau$ . Zwischen je zwei Kurvenmarkierungen "  $\square$  " sind etwa 10 Werte verarbeitet worden. Die hier genannten Meßstellennummern beziehen sich auf Abbildung 2.3 - 12.

- Abb. A-1: Der Kerndurchsatz wird gemessen als Summe der Durchsätze durch die vier parallelgeschalteten Vordrosseln. (Messstellen 115 bis 118).
- Abb. A-2: Der primäre Tauchkühlerdurchsatz wird aus der sekundärseits abgeführten Leistung und der Temperaturdifferenz auf der Primärseite berechnet. Dazu werden alle an beiden Tauchkühlern erfaßten Temperaturen und Sekundärdurchsätze gemittelt. Ferner wird stets die dem TK auf der Primärseite zugeführte Leistung der sekundärseits abgeführten Leistung gleichgesetzt, was bei instationären Abläufen nicht richtig ist. Der im Plot eingezeichnete Peak bei ca. 100 sec entsteht durch den Umstand, daß beim Einschalten des Sekundärwasserflusses der Eintritt des TK früher kaltes Wasser (von ca. 13 °C) erhält als der Austritt, wo zunächst noch Wasser mit der Starttemperatur (20 bis 22 °C) vorhanden ist. Dadurch wird eine Aufheizspanne vorgetäuscht. Außerdem ist zu Beginn die in der Berechnungsformel im Nenner stehende Temperaturdifferenz der Primärseite sehr klein und kann dadurch bei geringen statistischen Schwankungen große Fehler erzeugen. Auch der weitere Verlauf des Primärdurchsatzes ist bis ca. 300 sec nach Versuchsbeginn durch die oben erwähnte Vernachlässigung der TK-Eigenwärme stark verfälscht. Plausibel wäre ein allmählicher Anstieg wie bei dem Kerndurchsatz.
- Abb. A-3: Die Kernleistung ist praktisch nach einer echten Treppenfunktion abgefahren worden. Die im Plot gezeichneten geneigten Flanken sind durch die für den Plot verringerte Punktdichte bedingt.
- Abb. A-4: Für den Tauchkühlerleistungsverlauf gelten die zu Abb. A-2 gemachten Bemerkungen.

- Abb. A-5: Als Kernaustrittstemperatur ist hier der Mittelwert der Meßstellen 59 und 60, also der 1. und 5. BE-Reihe definiert worden.
- Abb. A-6: Die Temperatur am Eintritt des Tauchkühlers I ist der Mittelwert von zwei Thermoelementen (Meßstellen 90 und 91).
- Abb. A-7: Die Temperatur am Eintritt des Tauchkühlers II ist der Mittelwert von zwei Thermoelementen (Meßstellen 84 und 85).
- Abb. A-8: Die Temperatur vor der Kernmantelperforation ist der Mittelwert aus fünf Thermoelementen (Meßstellen 101 bis 105), die in Höhe der Brutelementperforation über den Kernmantelumfang gleichmäßig verteilt sind.
- Abb. A-9: Die Temperatur am Kerneintritt ist der Mittelwert aus den Meßstellen 76 und 77. Sie liegen in denselben Elementen wie die Meßstellen zur Bestimmung der Kernaustrittstemperatur.
- Abb. A-10: Die Maximaltemperatur im Kreislauf stellt den Größtwert aller Temperaturmeßstellen zu einem gegebenen Zeitpunkt dar. Diese höchste Temperatur tritt im allgemeinen entweder im oberen Kernbereich an den Meßstellen 74 und 75 auf, also in einem Element der 3. BE-Reihe, oder oberhalb des Kerns, z. B. an der Meßstelle 60.

#### A 2.4. Druckbilder (Abb. A-11)

Das Druckbild enthält sämtliche auf Band gespeicherte Meßwerte für einen gestimmten Zeitpunkt. Die räumliche Anordnung der Werte entspricht der Abb. 2.3 - 12. Die meisten Werte stellen Temperaturen in °C dar. Durchsätze werden in l/min und Leistungen in kW

angegeben. Der Winkel des Meßrechens ist in Winkelgraden gemessen und zwar bei Draufsicht auf den Versuchsaufbau im Uhrzeigersinn. Wird eine Meßstelle nicht gemessen (z. B. Oberplenum) oder liefert ein Meßwertaufnehmer eine Null, so werden an dieser Stelle 4 Sterne gedruckt. Alle Werte werden auf eine Dezimalstelle hinter dem Komma ausgeschrieben, so daß Zahlen  $< 0,1$  den Wert Null erhalten.

Tab. A-1: Versuchsergebnisse - Leistungen

Vers. Nr.	Heizleistung gesamt/Brutmantelleistung [kW/kW] für Zeitintervall (sec)				Tauchkühlerleistung [kW] zur Zeit $\tau$ (sec)						
	$< 10^2$	$10^2-10^3$	$10^3-10^4$	$> 10^4$	200	500	1000	2000	5000	10000	20000
1A	12,9-20/1,0	12,9/1,0	7,0/0,5	4,4/0,3	1,5	10,0	15,5	14,5	11,5	10,0	6,0
1B	20/1,4	13,0/0,9	6,9/0,5	5,3/0,3	8,0	10,5	14,0	12,5	10,5	9,5	6,2
2	40,1/3,0	26,0/1,9	13,9/1,1	10,6/0,8	1,5	16,5	27,0	23,5	19,5	17,5	13,0
3A	60,0/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,0/1,1	12,0	25,0	36,5	29,0	25,5	23,5	18,0
3B	60,0/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,1/1,2	10,5	21,0	34,0	26,5	24,5	24,0	18,0
4	30,1/2,2	30,1/2,2	30,1/2,2	30,0/2,2	9,5	19,0	29,0	32,5	32,5	31,5	31,0
5	60,0/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	4,5	10,5	20,0	18,5	19,0	19,5	17,0
6	60,0/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	3,5	11,0	19,5	18,5	18,5	19,5	16,5
7	60,0/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	7,5	15,5	26,5	23,0	21,0	21,5	17,5
8	59,9/4,4	38,9/2,8	20,9/1,6	16,1/1,2	0	0	0	0	0	0	0
9A	60,0/4,4	38,9/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	7,0	19,0	31,5	24,5	22,5	23,0	18,0
9B	59,8/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,1/1,2	6,5	16,0	28,5	24,0	22,0	22,0	19,0
10	59,9/4,4	38,9/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	8,0	21,0	32,5	25,5	24,0	24,0	16,5
11	60,1/5,8	39,0/3,8	20,9/2,0	16,1/1,6	9,0	18,5	31,0	24,5	23,0	23,0	16,5
12	59,9/0	38,9/0	20,9/0	16,1/0	9,0	20,5	31,5	25,0	22,5	22,0	17,0
13	20,0/1,4	13,0/1,0	6,9/0,5	5,3/0,3	33,0	33,0	34,5	28,5	20,0	12,0	6,5
14	9,0/0,6	5,8/0,4	3,0/0,2	2,3/0,2	71,5	66,5	59,5	49,5	27,0	13,0	5,5
15	59,8/4,4	38,8/2,8	20,9/1,5	16,1/1,1	8,5	20,5	31,5	25,5	24,0	23,5	17,5
16	59,9/4,4	38,9/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	8,0	8,5	10,5	14,5	19,0	21,0	18,0
17	60,1/4,4	38,8/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	8,0	18,5	30,5	23,5	22,5	22,5	17,5
18	60,0/4,4	38,9/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	8,5	20,5	31,0	24,5	22,5	22,5	17,5
19	(4,4) 60,0/4,4	39,5/2,9	19,9/1,4	16,1/1,1	0	10,0	25,5	25,5	21,0	21,0	16,5
20	59,9/4,4	38,9/2,8	20,9/1,6	16,1/1,1	10,0	19,5	31,5	25,0	23,5	22,0	17,5
21A	40,0/5,8	26,0/3,8	13,8/2,0	-	8,0	13,5	22,5	-	-	-	-
21B	39,9/5,8	26,0/3,8	13,8/2,0	10,6/1,6	9,0	15,0	24,0	20,0	17,0	16,0	12,5



Tab. A-2: Versuchsergebnisse - Durchsätze

Vers. Nr.	Kerndurchsatz gesamt [kg/sec]								Tauchkühlerdurchsatz gesamt [kg/sec]						
	zur Zeit $\tau$ (sec)								zur Zeit $\tau$ (sec)						
	100	200	500	1000	2000	5000	10000	20000	200	500	1000	2000	5000	10000	20000
1A	0,08	0,11	0,14	0,14	0,10	0,13	0,12	0,09	-	0,42	0,37	0,34	0,29	0,23	0,18
1B	0,10	0,14	0,15	0,15	0,11	0,13	0,13	0,10	0,66	0,37	0,31	0,29	0,26	0,21	0,17
2	0,19	0,20	0,20	0,20	0,15	0,18	0,18	0,15	0,16	0,30	0,37	0,37	0,32	0,28	0,25
3A	0,26	0,25	0,25	0,24	0,20	0,21	0,20	0,17	0,37	0,35	0,40	0,37	0,35	0,33	0,28
3B	0,24	0,24	0,24	0,24	0,19	0,20	0,19	0,17	0,40	0,28	0,37	0,34	0,34	0,32	0,29
4	0,15	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,62	0,34	0,37	0,38	0,38	0,37	0,37
5	0,23	0,23	0,23	0,22	0,16	0,15	0,15	0,17	0,17	0,15	0,25	0,26	0,26	0,28	0,30
6	0,25	0,25	0,24	0,23	0,17	0,17	0,19	0,19	0,21	0,14	0,26	0,28	0,27	0,29	0,29
7	0,26	0,25	0,24	0,24	0,18	0,19	0,18	0,17	0,32	0,21	0,32	0,32	0,32	0,32	0,29
8	0,23	0,24	0,23	0,22	0,08	0,03	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
9A	0,23	0,24	0,22	0,22	0,17	0,17	0,17	0,15	0,28	0,25	0,35	0,33	0,32	0,32	0,29
9B	0,22	0,23	0,22	0,22	0,17	0,18	0,18	0,17	0,26	0,22	0,32	0,32	0,31	0,30	0,30
10	0,24	0,24	0,23	0,23	0,18	0,18	0,18	0,15	0,27	0,28	0,36	0,33	0,33	0,33	0,27
11	0,23	0,24	0,22	0,22	0,17	0,18	0,18	0,16	0,34	0,27	0,36	0,34	0,33	0,31	0,27
12	0,26	0,27	0,27	0,28	0,21	0,21	0,20	0,18	0,31	0,28	0,37	0,35	0,33	0,33	0,28
13	0,10	0,12	0,12	0,12	0,13	0,15	0,09	0,05	1,35	0,86	0,66	0,59	0,38	0,27	0,18
14	0,07	0,09	0,10	0,13	0,26	0,15	0,08	0,03	> 2	1,55	1,09	0,73	0,50	0,36	0,18
15	0,24	0,24	0,23	0,22	0,18	0,20	0,20	0,17	0,32	0,28	0,36	0,33	0,33	0,32	0,28
16	0,25	0,24	0,23	0,23	0,18	0,19	0,19	0,16	0,78	0,76	0,48	0,38	0,38	0,36	0,35
17	0,18	0,19	0,18	0,18	0,14	0,14	0,14	0,13	0,38	0,24	0,33	0,31	0,30	0,30	0,27
18	0,24	0,24	0,23	0,23	0,18	0,18	0,18	0,16	0,36	0,29	0,38	0,34	0,34	0,34	0,29
19	0	0,01	0,23	0,22	0,17	0,18	0,18	0,15	-	0,32	0,32	0,33	0,32	0,31	0,29
20	0,23	0,23	0,22	0,22	0,18	0,18	0,18	0,16	0,33	0,26	0,34	0,33	0,32	0,30	0,28
21A	0,16	0,18	0,18	0,17	0,12	-	-	-	0,55	0,28	0,32	-	-	-	-
21B	0,16	0,19	0,17	0,17	0,13	0,15	0,15	0,12	0,48	0,32	0,33	0,32	0,29	0,27	0,23

Tab. A-3: Versuchsergebnisse - Temperatur am Kernaustritt und Kerneintritt

Vers. Nr.	Temp. Kernaustritt [ $^{\circ}\text{C}$ ]					Temp. Kerneintritt [ $^{\circ}\text{C}$ ]				
	zur Zeit $\bar{t}$ (sec)					zur Zeit $\bar{t}$ (sec)				
	ca. 250 <sup>*</sup>	1000	5000	10000	20000	ca. 250 <sup>*</sup>	1000	5000	10000	20000
1A	32,0	33,4	27,6	26,0	21,7	21,4	21,3	21,0	18,5	16,5
1B	30,5	32,5	26,3	24,3	22,0	20,2	20,0	19,9	18,0	16,0
2	40,6	43,1	34,4	33,0	29,0	23,0	23,0	22,6	19,9	18,0
3A	48,0	50,3	40,0	38,3	33,8	24,0	24,2	23,5	21,4	19,4
3B	47,5	49,8	39,6	39,0	34	21,8	22,0	22,0	20,7	19,2
4	43,0	45,2	44,0	44,0	44,0	23,0	23,0	22,8	22,0	21,5
5	45,5	49,0	43,7	43,6	39,8	20,7	20,7	22,2	23,8	24,9
6	45,5	49,1	44,0	44,0	40,6	21,3	21,4	22,6	24,2	25,0
7	45,8	49,8	41,6	40,2	37,7	21,8	22,2	22,6	22,8	22,5
8	44,2	47,8	64,8	78,3	-	18,6	18,6	21,4	26,2	-
9A	44,2	47,2	38,0	38,5	34,1	19,7	19,7	20,2	19,8	19,2
9B	43,4	47,5	38,0	38,0	34,1	18,1	18,1	19,4	19,8	19,5
10	45,0	47,8	38,7	39,3	35,0	20,6	20,6	21,2	20,6	19,6
11	42,7	46,2	37,2	36,5	32,7	20,3	20,4	20,8	20,1	18,8
12	44,5	45,8	38,8	36,4	32,6	20,0	20,2	19,6	19,0	18,2
13	43,5	44,0	32,2	27,3	23,0	34,5	34,0	27,5	21,4	16,8
14	54,3	53,7	35,0	25,6	19,8	50,0	49,5	33,2	24,6	17,6
15	42,4	46,6	36,6	36,7	32,6	18,8	18,8	19,8	19,0	17,6
16	43,2	42,0	35,5	33,7	30,7	19,4	19,6	19,4	18,6	18,2
17	44,8	47,4	37,5	38,0	33,0	18,5	18,6	18,7	18,4	17,6
18	43,6	45,3	36,5	36,3	32,5	19,0	19,1	19,5	19,0	17,8
19	43,0	46,0	35,4	35,5	31,8	19,7	19,7	20,0	19,2	18,0
20	42,8	47,4	36,6	36,0	33,0	19,0	19,0	19,6	18,9	18,0
21A	36,8	39,5	-	-	-	19,5	19,5	-	-	-
21B	37,7	40,3	32,5	32,2	27,5	20,6	20,6	20,6	18,9	17,4

\* Zeit des ersten Maximums der Kernaustrittstemperatur

Tab. A-4: Versuchsergebnisse - Aufheizspanne im Kern

Vers. Nr.	Aufheizspanne im Kern Zur Zeit $\bar{t}$ (sec)					$\frac{\Delta \vartheta_{\text{Kern}}}{\Delta \vartheta_{\text{Kern, Ref.}}}$ zur Zeit $\bar{t}$ (sec)				
	$\Delta \vartheta_{\text{Kern}} (^{\circ}\text{C})$									
	ca. 250*	1000	5000	10000	20000	ca. 250*	1000	5000	10000	20000
1A	10,6	12,1	6,6	7,5	5,2	0,41	0,44	0,38	0,41	0,35
1B	10,3	12,5	6,4	6,3	6,0	0,40	0,45	0,36	0,34	0,31
2	17,6	20,1	11,8	13,1	11,0	0,69	0,72	0,67	0,72	0,74
3A	24,0	26,1	16,5	16,9	14,4	0,94	0,94	0,94	0,92	0,97
3B	25,7	27,8	17,6	18,3	14,8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	20,0	22,2	21,2	22,0	22,5	0,78	0,80	1,20	1,20	1,52
5	24,8	28,3	21,5	19,8	14,9	0,97	1,02	1,22	1,08	1,01
6	24,2	27,7	21,4	19,8	15,6	0,94	1,0	1,22	1,08	1,05
7	24,0	27,6	19,0	17,4	15,2	0,94	0,99	1,08	0,95	1,03
8	25,6	29,2	42,4	52,1	-	1,00	1,05	2,46	2,85	-
9A	24,5	27,5	17,8	18,7	14,9	0,95	0,99	1,01	1,02	1,01
9B	25,3	29,4	18,6	18,2	14,6	0,99	1,06	1,06	0,99	0,99
10	24,4	27,2	17,5	18,7	15,4	0,95	0,98	0,99	1,02	1,04
11	22,4	25,8	16,4	16,4	13,9	0,87	0,93	0,93	0,90	0,94
12	24,5	25,6	19,2	17,4	14,4	0,95	0,92	1,09	0,95	0,96
13	9,0	10,0	4,8	5,9	6,2	0,35	0,36	0,27	0,32	0,42
14	4,3	4,2	1,8	1,0	2,2	0,17	0,15	0,10	0,05	0,15
15	23,6	27,8	16,8	17,7	15,0	0,92	1,0	0,96	0,97	1,01
16	23,8	22,4	16,1	15,1	12,5	0,93	0,81	0,92	0,83	0,85
17	26,3	28,8	18,8	19,6	15,4	1,02	1,04	1,07	1,07	1,04
18	24,6	26,2	17,0	17,3	14,7	0,96	0,94	0,97	0,95	0,99
19	23,3	26,3	15,4	16,3	0,91	0,91	0,95	0,88	0,89	0,93
20	23,8	28,4	17,0	17,1	15,0	0,93	1,02	0,97	0,93	1,01
21A	17,3	20,0	-	-	-	0,67	0,72	-	-	-
21B	17,1	19,7	11,9	13,3	10,1	0,67	0,71	0,68	0,73	0,68

\* Zeit des ersten Maximums der Kernaustrittstemperatur

Tab. A-5: Meßkanal- und CALAS-Adressennummern

Meßkanal Nr.	CALAS-Adressen-Nr.		Bezeichnung
	Notspiegel	Betriebsspiegel	
1	113	113	Versuchszeit, gerechnet von Versuchsbeginn = Einschalten der Coreheizung
-	112	112	Datum
2	111	111	Wickelposition des Messrechens, 0 - 120°, 0 = Seite von Tauchkühler II
3 + 10	3 + 10	3 + 10	Temp.Oberplenium 1. Reihe des Meßrechens, Höhenkote 1243 mm
11 + 18	11 + 18	-	Temp.Oberplenium 2. Reihe des Meßrechens, Höhenkote 1293 mm
19 + 26	19 + 26	-	Temp.Oberplenium 3. Reihe des Meßrechens, Höhenkote 1343 mm
27 + 34	27 + 34	27 + 34	Temp.Oberplenium 4. Reihe des Meßrechens, Höhenkote 1393 mm
35 + 42	35 + 42	35 + 42	Temp.Oberplenium 5. Reihe des Meßrechens, Höhenkote 1700 mm
43 + 50	-	11 + 18	Temp.Oberplenium 6. Reihe des Meßrechens, Höhenkote 2000 mm
51 + 58	-	19 + 26	Temp.Oberplenium 7. Reihe des Meßrechens, Höhenkote 2290 mm
59	43	43	Temp. Ausgang BE 1/1, Gruppe 1
60	44	44	Temp. Ausgang BE 5/3, Gruppe 1
61	45	45	Temp. Ausgang BE 7/4, Gruppe 1
62	46	46	Temp. Ausgang BR 9/5, Gruppe 3
63	47	47	Temp. Ausgang BR 10/5, Gruppe 4
64	48	48	Temp. Ausgang BR 11/6, Gruppe 5
65	49	49	Temp. Ausgang BR 12/6, Gruppe 6
66	50	50	Temp. Ausgang BR 13/6, Gruppe 6

Tab. A-5 (Forts.): Meßkanal- und CALAS-Adressennummern

Meßkanal Nr.	CALAS-Adressen Nr.		Bezeichnung
	Notspiegel	Betriebsspiegel	
67 + 70	51 + 54	51 + 54	Temp. radial unterhalb der Umlenkplatte, Höhenkote 1095 mm
71 + 75	55 + 59	55 + 59	axiale Temperaturverteilung im BE 3/2, Gruppe 1
76	63	63	Temp. Eingang BE 1/1, Gruppe 1
77	64	64	Temp. Eingang BE 5/3, Gruppe 1
78	65	65	Temp. Eingang BE 7/4, Gruppe 1
79	66	66	Temp. Eingang BR 9/5, Gruppe 3
80	67	67	Temp. Eingang BR 10/5, Gruppe 4
81	68	68	Temp. Eingang BR 11/6, Gruppe 5
82	69	69	Temp. Eingang BR 12/6, Gruppe 6
83	70	70	Temp. Eingang BR 13/6, Gruppe 6
84, 85	71, 72	71, 72	Temp. Eingang Tauchkühler II, primärseitig
86, 87	73, 74	73, 74	Temp. Ausgang Tauchkühler II, primärseitig
88	75	75	Temp. Eingang Tauchkühler II, sekundärseitig
89	76	76	Temp. Ausgang Tauchkühler II, sekundärseitig
90, 91	79, 80	79, 80	Temp. Eingang Tauchkühler I, primärseitig
92, 93	81, 82	81, 82	Temp. Ausgang Tauchkühler I, primärseitig
94	77	77	Temp. Eingang Tauchkühler I, sekundärseitig
95	78	78	Temp. Ausgang Tauchkühler I, sekundärseitig
96,97 + 100	83,87+90	83,87+90	Temp. unmittelbar nach den Schildtankbohrungen, Höhenkote 100 mm, Richtung von Tauchkühler I → Tauchkühler II
101,102+105	60,91+94	60,91+94	Temp. unmittelbar nach den Kernmantelbohrungen, Höhenkote 1095mm, Richtung von Tauchkühler I → Tauchkühler II
106 + 108	84 + 86	84 + 86	Temp. in Verlängerung der Tauchkühlerachse I

Tab. A-5 (Forts.): Meßkanal- und CALAS-Adressennummern

Meßkanal Nr.	CALAS-Adresse Nr.		Bezeichnung
	Notspiegel	Betriebsspiegel	
109 + 112	95 + 98	95 + 98	Temp. nach den Vordrosseln I + IV, im Zuströmrohr zu den Durchflußmessern
113, 114	61, 62	61, 62	Heizstabtemperatur BE 3/2, oberes Ende der Heizzone
115 + 118	99 + 102	99 + 102	Durchfluß an den Vordrosseln I + IV, Richtung Tauchkühler I → Tauchkühler II
119	103	103	Durchfluß Tauchkühler II, sekundärseitig
120	104	104	Durchfluß Tauchkühler I, sekundärseitig
121 + 125	105 + 109	105 + 109	Gruppenheizleistung, Gruppe 1 + 5

Tab. A-5 (Forts.): Meßkanal- und CALAS-Adressennummern

Meßkanal Nr.	CALAS-Adresse Nr.	Bezeichnung
200	115	Ges.Durchfluß durch Vordrosseln, $Q_{115} = Q_{99} + Q_{100} + Q_{101} + Q_{102}$ (l/min)
201	116	Ges.Heizleistung, $N_{116} = N_{105} + N_{106} + N_{107} + N_{108} + N_{109}$ (kW)
202	117	Kühlleistung Kühler II, sekundär, $N_{117} = Q_{103} \cdot (T_{76} - T_{75}) \cdot C$ (kW)
203	118	Kühlleistung Kühler I, sekundär, $N_{118} = Q_{104} \cdot (T_{78} - T_{77}) \cdot C$ (kW)
204	119	Ges.Kühlleistung Kühler I + II, $N_{119} = N_{117} + N_{118}$ (kW)
205	120	Mittl.Austrittstemp. Tauchkühler II, primär, $T_{120} = 1/2 (T_{73} + T_{74})$ (°C)
206	121	Mittl.Austrittstemp. Tauchkühler I, primär, $T_{121} = 1/2 (T_{81} + T_{82})$ (°C)
207 + 211	122 + 126	Heizleistung pro Bündelelement, Gruppe 1 + 5 (kW)
212	127	Temp.Differenz im BE 1/1, $T_{127} = T_{43} - T_{63}$ (°C)
213	128	Temp.Differenz im BE 5/3, $T_{128} = T_{44} - T_{64}$ (°C)
214	129	Temp.Differenz im BE 7/4, $T_{129} = T_{45} - T_{65}$ (°C)
215	130	Temp.Differenz im BR 9/5, $T_{130} = T_{46} - T_{66}$ (°C)
216	131	Temp.Differenz im BR 10/5, $T_{131} = T_{47} - T_{67}$ (°C)
217	132	Temp.Differenz im BR 11/6, $T_{132} = T_{48} - T_{68}$ (°C)
218	133	Temp. Differenz im BR 12/6, $T_{133} = T_{49} - T_{69}$ (°C)
219	134	Temp. Differenz im BR 13/6, $T_{134} = T_{50} - T_{70}$ (°C)
220	135	Temp. Differenz im BE 3/2, $T_{135} = T_{59} - T_{55}$ (°C)
221	136	Mittlere Eintrittstemp. Tauchkühler II, primär, $T_{136} = 1/2 (T_{71} + T_{72})$ (°C)
222	137	Mittlere Eintrittstemp. Tauchkühler I, primär, $T_{137} = 1/2 (T_{90} + T_{91})$ (°C)
223	138	Höchste Wassertemperatur im Notkühlkreis, $T_{138} = \max. T \{ T_3 \dots T_{74}, T_{79} \dots T_{82}, T_{83} \dots T_{98} \}$

Tab. A-5 (Forts.): Meßkanal- und CALAS-Adressennummern

Meßkanal Nr.	~vergleichbar mit CALAS-Adresse Nr.	Bezeichnung
301	75	Temp. Eingang Tauchkühler II, sekundär
302	76	Temp. Ausgang Tauchkühler II, sekundär
303	73, 74, 120	Austrittstemp. Tauchkühler II, primär
304	77	Temp. Eingang Tauchkühler I, sekundär
305	78	Temp. Ausgang Tauchkühler I, sekundär
306	81, 82, 121	Austrittstemp. Tauchkühler I, primär
307, 308	60, 91 + 94	Temp. nach den Kernmantelbohrungen (Tauchkühlerebenen)
309, 310	-	Temp. im Spalt zw. Gasblasenabscheider u. Beh. Wand, Höhenkote - 900 mm
311, 312	-	Temp. vor dem Eintritt in den Kernbereich einschl. 9. Reihe
313 + 317	55 + 59	axiale Temp.-Verteilung im BE 3/4, Gruppe 1
318, 319	61, 62	Heizstabtemperatur BE 3/4, Gruppe 1
320	-	Temp. unmittelbar über Höhenkote 1233 mm in der Nähe von BE 9/2
321	-	Temp. unmittelbar über Höhenkote 1233 mm in der Nähe von BE 7/6
322	-	Temp. unmittelbar über Höhenkote 1233 mm in der Nähe von BE 7/9
323	71, 72, 136	Temp. Eintritt Tauchkühler II, primär
324	79, 80, 137	Temp. Eintritt Tauchkühler I, primär
325	103	Durchfluß Tauchkühler II, sekundär
326	104	Durchfluß Tauchkühler I, sekundär
327 + 330	99 + 102	Durchfluß der Vordrosseln I + IV
331 + 335	105 + 109	Heizleistung der BE + BR-Elemente, Gruppe 1 + 5
336 + 340	-	Stromstärke der Heizleistungsgruppen 1 + 5



Tab. A-6: Eichkonstanten für Thermoelemente

Meß- stelle	b	a	$\frac{a}{250}$	Meß- stelle	b	a	$\frac{a}{250}$
3	1,01	24,36	0,0974	29	0,94	24,42	0,0976
4	1,05	24,35	0,0974	30	0,98	24,45	0,0978
5	1,00	24,37	0,0975	31	1,03	24,37	0,0975
6	1,06	24,35	0,0974	32	1,23	24,38	0,0975
7	1,00	24,36	0,0974	33	1,07	24,37	0,0975
8	1,00	24,36	0,0974	34	1,13	24,53	0,0981
9	0,99	24,35	0,0974	35	1,01	24,49	0,0980
10	1,00	24,48	0,0979	36	0,93	24,51	0,0980
11	1,05	24,34	0,0974	37	0,92	24,50	0,0980
12	0,93	24,36	0,0974	38	0,96	24,48	0,0979
13	0,96	24,36	0,0974	39	1,04	24,45	0,0978
14	0,98	24,37	0,0975	40	1,00	24,50	0,0980
15	1,22	24,33	0,0973	41	1,12	24,49	0,0980
16	1,17	24,36	0,0974	42	1,08	24,46	0,0978
17	1,28	24,33	0,0973	43	0,98	24,49	0,0980
18	1,26	24,48	0,0979	44	0,98	24,59	0,0984
19	1,03	24,36	0,0974	45	0,96	24,49	0,0980
20	1,11	24,35	0,0974	46	1,04	24,48	0,0979
21	1,03	24,36	0,0974	47	0,99	24,48	0,0979
22	1,03	24,35	0,0974	48	0,99	24,48	0,0979
23	1,15	24,36	0,0974	49	1,00	24,47	0,0979
24	1,08	24,41	0,0976	50	1,01	24,45	0,0978
25	1,11	24,50	0,0980	51	1,08	24,47	0,0979
26	1,17	24,52	0,0980	52	1,03	24,50	0,0980
27	0,93	24,38	0,0975	53	1,03	24,49	0,0980
28	0,99	24,41	0,0976	54	1,07	24,49	0,0980

Tab. A-6 (Forts.): Eichkonstanten für Thermoelemente

Meß- stelle	b	a	$\frac{a}{250}$	Meß- stelle	b	a	$\frac{a}{250}$
55	1,07	24,50	0,0980	85	1,00	24,43	0,0977
56	1,08	24,46	0,0978	86	0,97	24,43	0,0977
57	1,09	24,48	0,0979	87	0,97	24,52	0,0980
58	1,05	24,47	0,0978	88	0,69	24,54	0,0982
59	1,00	24,49	0,0979	89	0,45	24,84	0,0994
60	1,02	24,47	0,0978	90	0,90	24,39	0,0976
61	0,97	24,49	0,0979	91	0,90	24,39	0,0976
62	1,00	24,49	0,0979	92	0,95	24,38	0,0975
63	1,01	24,51	0,0980	93	1,00	24,49	0,0979
64	1,02	24,49	0,0979	94	0,45	24,84	0,0994
65	1,03	24,50	0,0980	95	0,45	24,84	0,0994
66	1,00	24,49	0,0979	96	0,58	24,80	0,0992
67	0,83	24,67	0,0986	97	0,62	24,87	0,0995
68	0,84	24,66	0,0986	98	0,59	24,84	0,0994
69	0,87	24,66	0,0986	99	0,66	24,79	0,0992
70	0,80	24,68	0,0987	100	0,62	24,87	0,0995
71	1,07	24,51	0,0980	101	1,15	24,52	0,0981
72	1,00	24,34	0,0973	102	1,09	24,44	0,0978
73	1,03	24,48	0,0979	103	1,15	24,42	0,0977
74	1,01	24,51	0,0980	104	1,22	24,29	0,0972
75	1,09	24,51	0,0980	105	1,12	24,43	0,0977
76	0,92	24,62	0,0984	106	0,58	24,80	0,0992
77	0,84	24,60	0,0984	107	0,63	24,78	0,0991
78	0,80	24,65	0,0986	108	0,66	24,80	0,0992
79	0,97	24,61	0,0984	109	0,71	24,70	0,0988
80	0,74	24,70	0,0988	110	0,66	24,73	0,0989
81	0,82	24,66	0,0986	111	0,82	24,65	0,0986
82	0,71	24,70	0,0988	112	0,63	24,80	0,0992
83	0,91	24,60	0,0984	113	1,21	24,49	0,0979
84	0,97	24,53	0,0981	114	1,21	24,49	0,0979

Tabelle A-7: Meßgenauigkeit, Übersicht

	Spezifizierte Meßgenauigkeit			Erzielte Meßgenauigkeit			Meßkanal Nr.
	absolut	%	bezogen auf	absolut	%	bezogen auf	
Temperatur	$\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 1,1$	90 $^\circ\text{C}$	$\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}^1$	-	-	3 - 114
Durchfluß Vordrosselstrecke	$\pm 0,15 \text{ l/min}$	$\pm 5$	3 l/min		$\pm 2,8^2$	3,6 l/min	115
					$\pm 1,4^2$	3,6 l/min	116
					$\pm 1,4^2$	3,6 l/min	117
					$\pm 2,8^2$	3,6 l/min	118
Tauchkühler sekundär	2,1 l/min	$\pm 3$	70 l/min		$\pm 0,5$	40 l/min	120
					$\pm 1,3$	40 l/min	119
Elektronische Leistung	1,8 KW	$\pm 3$	60 KW		$\pm 2,5$		105 - 109
Fluktuation des Füllstandes durch Leckage	$\pm 2 \text{ mm/h}$	-	-	0 mm			
Winkelstellung MK 3 + 58	-	-	-	$\pm 2^\circ$	1,6	120 $^\circ$	

<sup>1</sup> Einzelwerte siehe Tabelle 2.3.5.

<sup>2</sup> Eichwerte im ausgebauten Zustand und einer Wasserleitfähigkeit von 205  $\mu\text{Scm}^{-1}$   
(siehe Bemerkungen im Text)

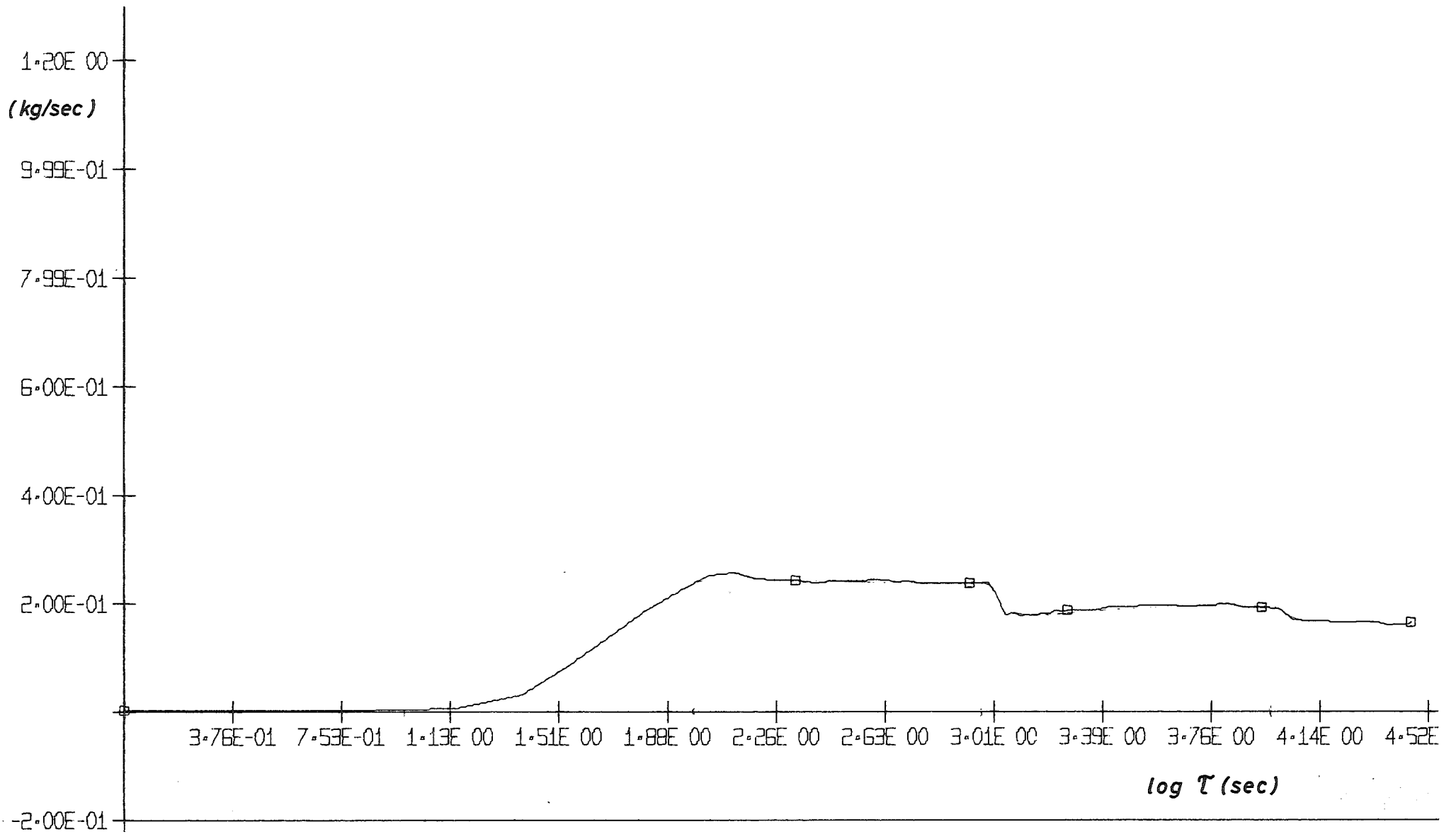


Abb. A-1: Kerndurchsatz gesamt (Versuch 3B)

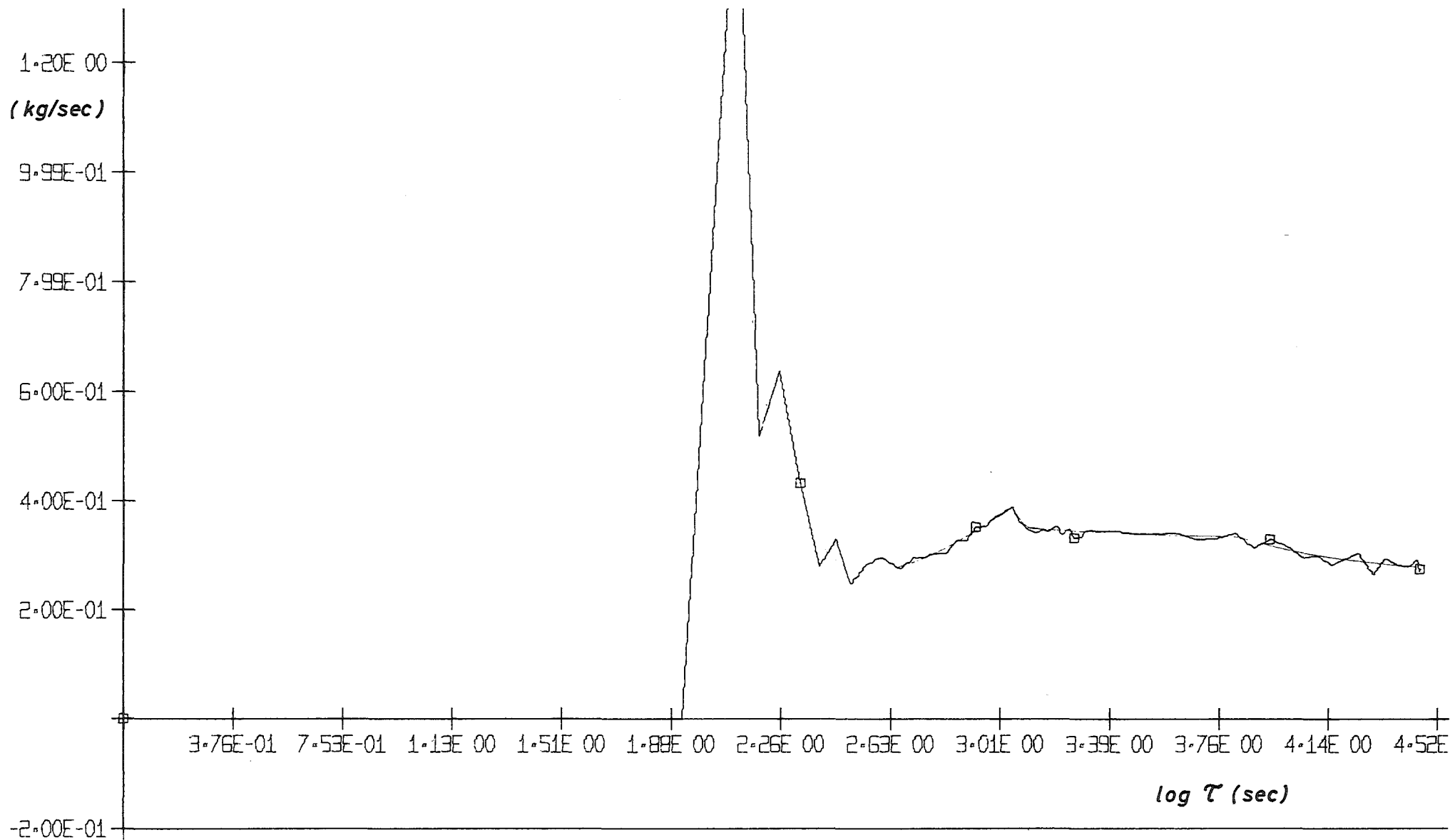


Abb. A-2: Tauchkühlerdurchsatz gesamt, primär (Versuch 3B)

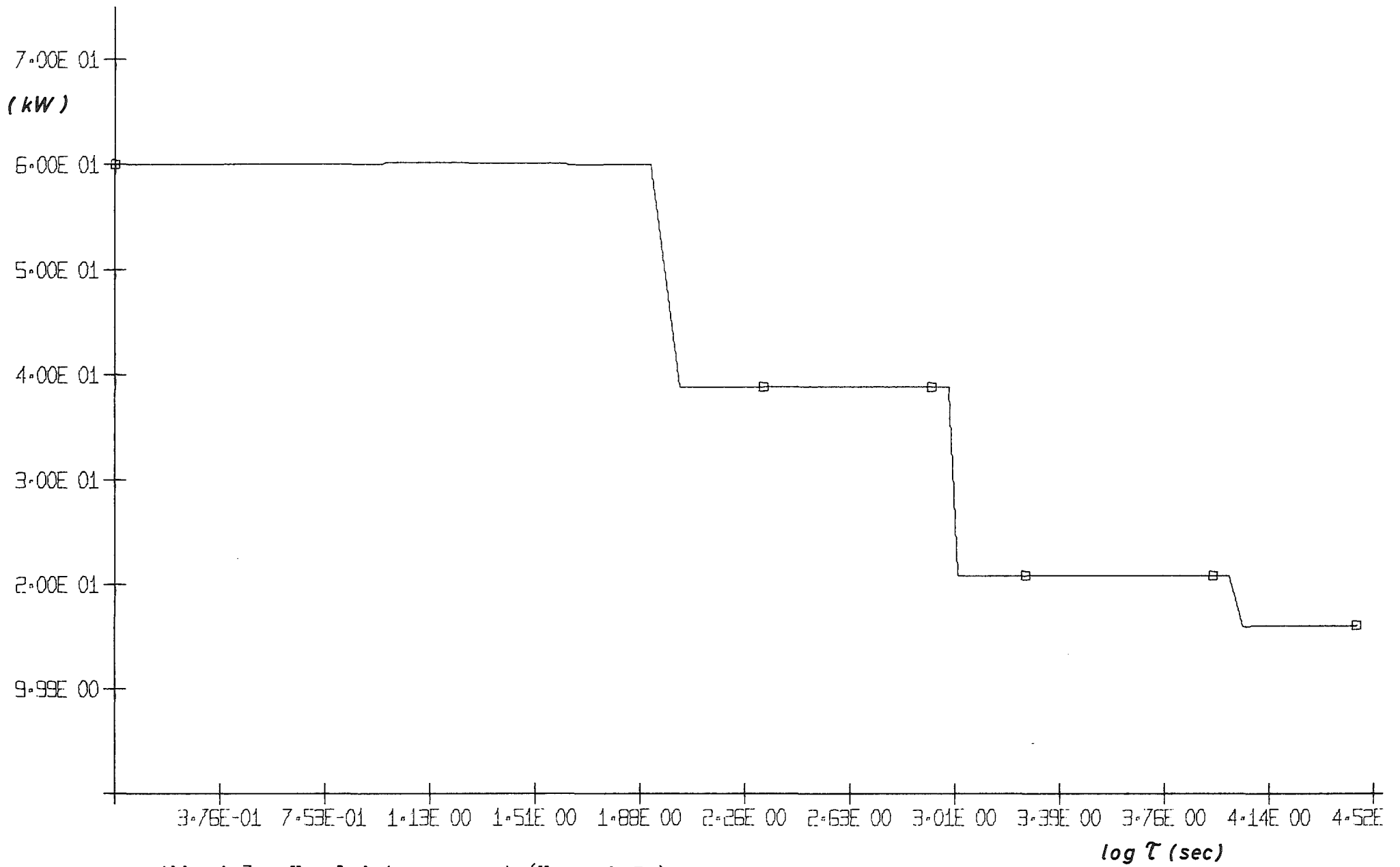


Abb. A-3: Kernleistung gesamt (Versuch 3B)

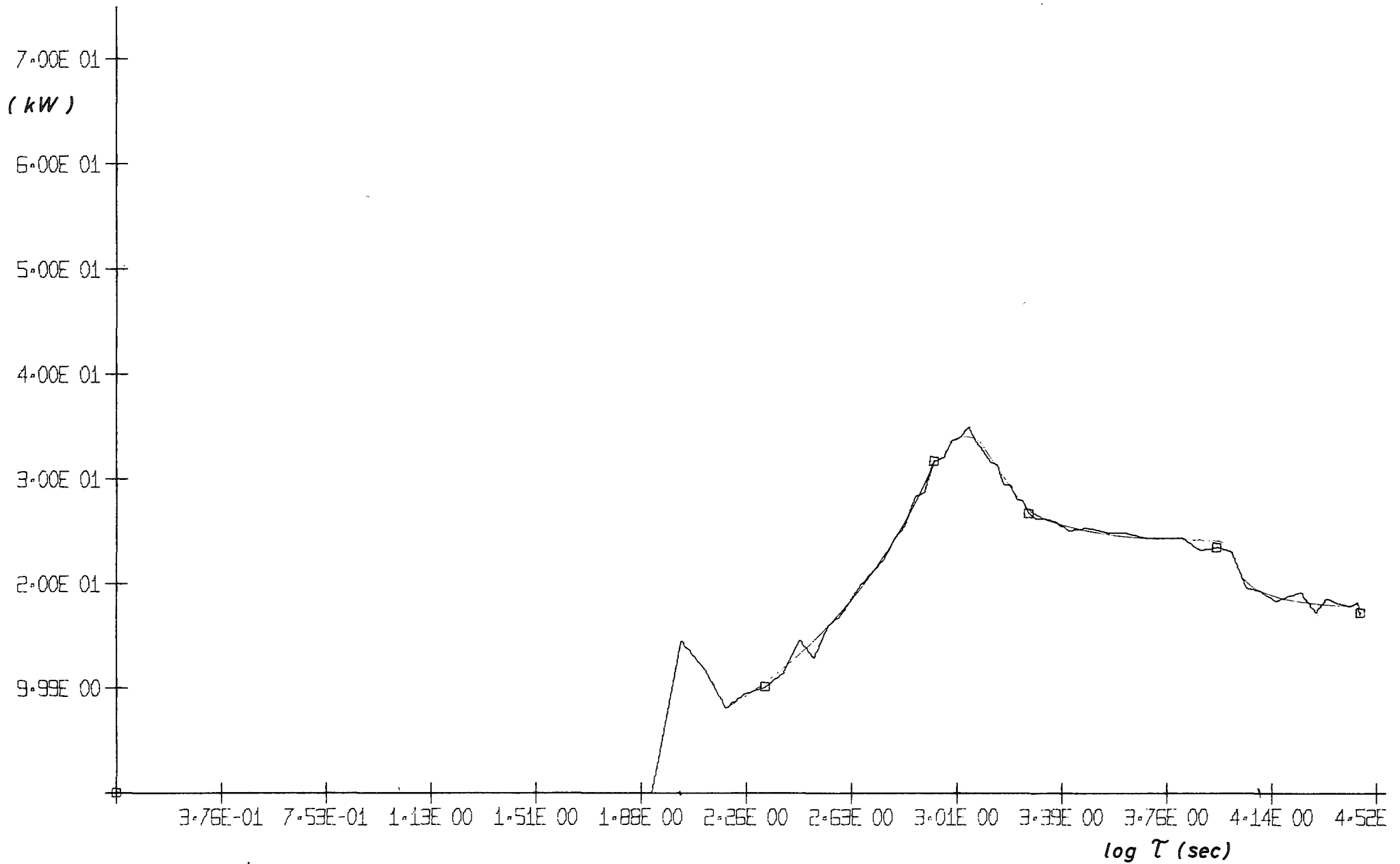


Abb. A-4: Tauchkühlerleistung gesamt (Versuch 3B)

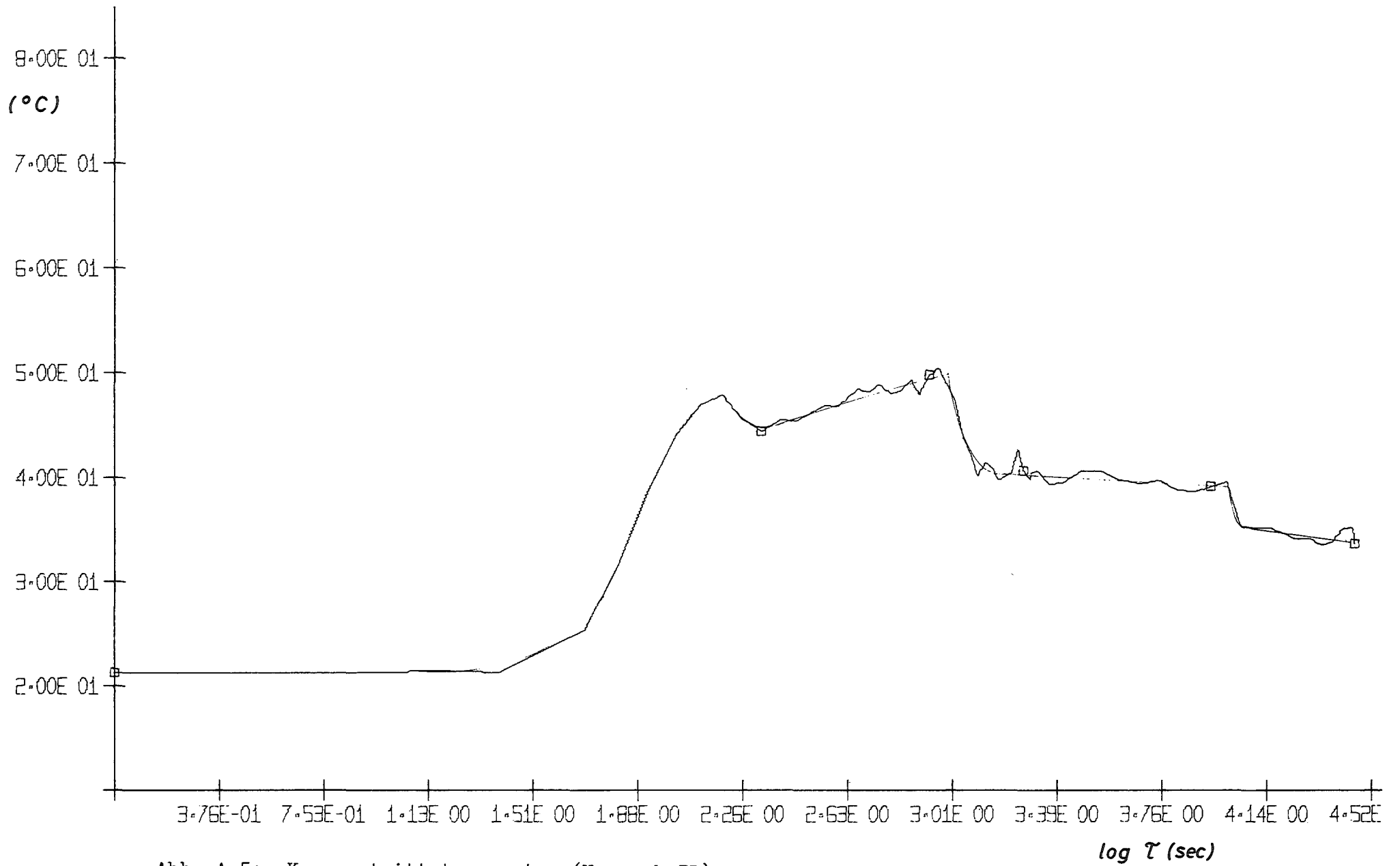


Abb. A-5: Kernaustrittstemperatur (Versuch 3B)



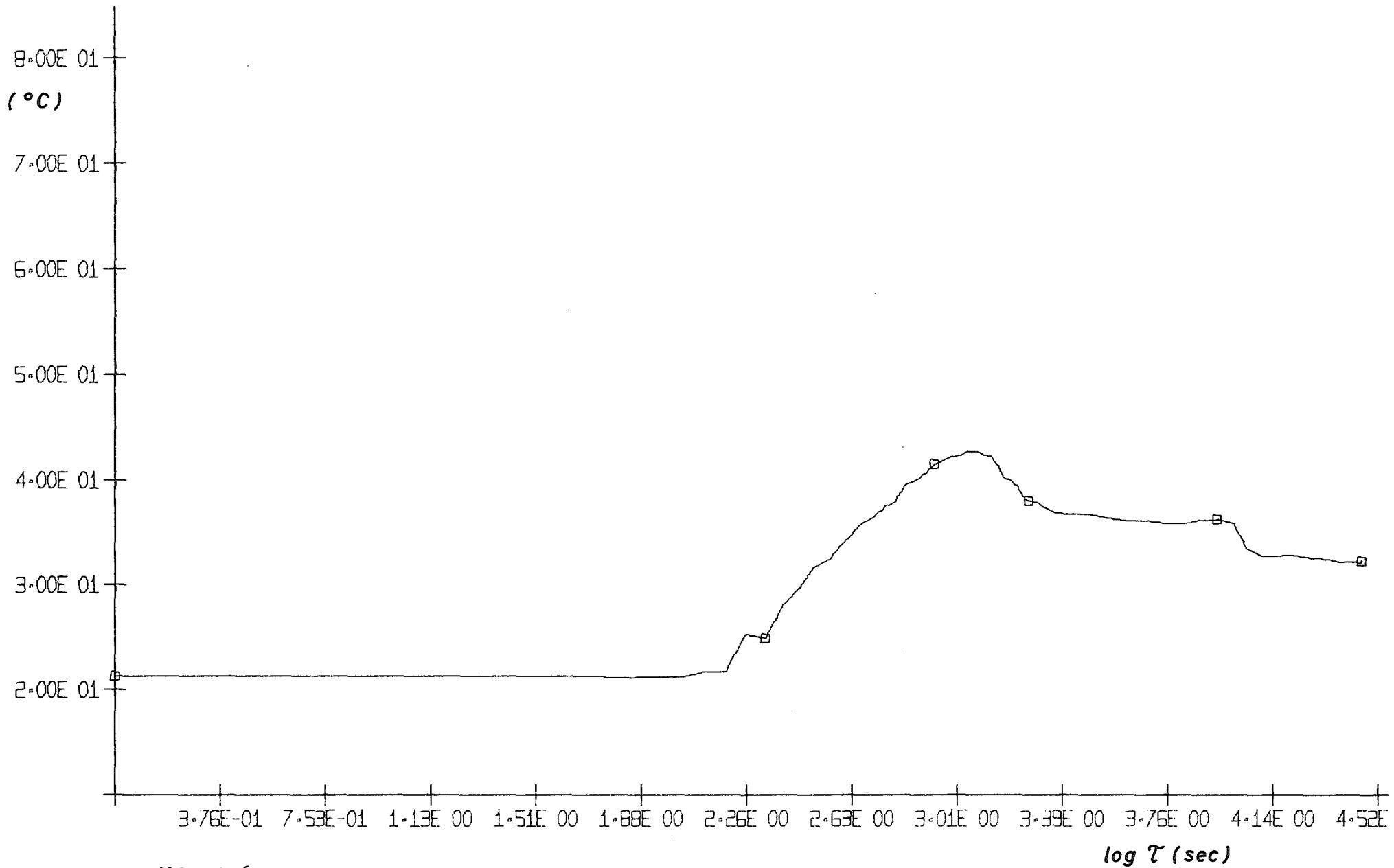


Abb. A-6: Temperatur am Eintritt des Tauchkühlers I (Versuch 3B)

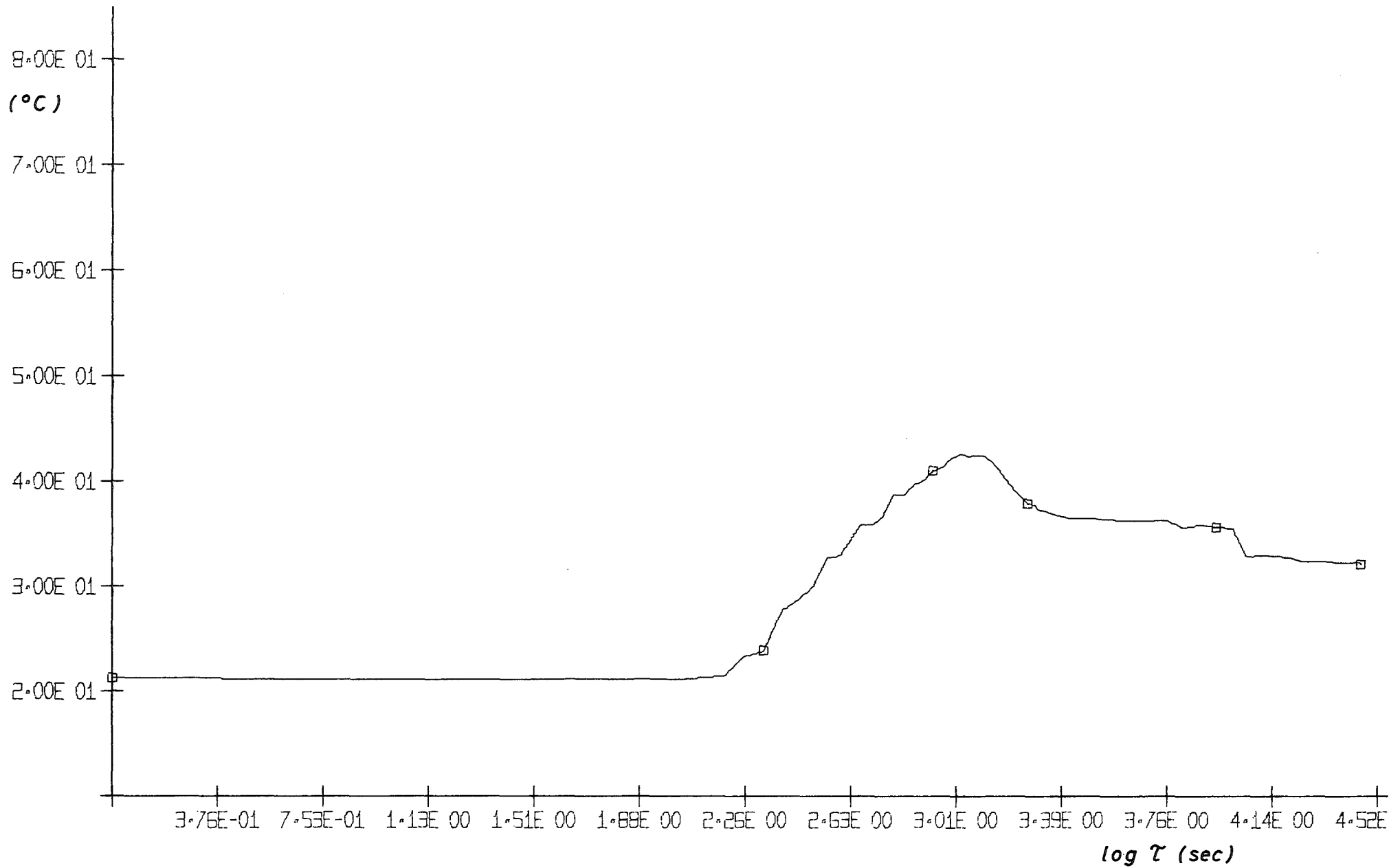


Abb. A-7: Temperatur am Eintritt des Tauchkühlers II (Versuch 3B)

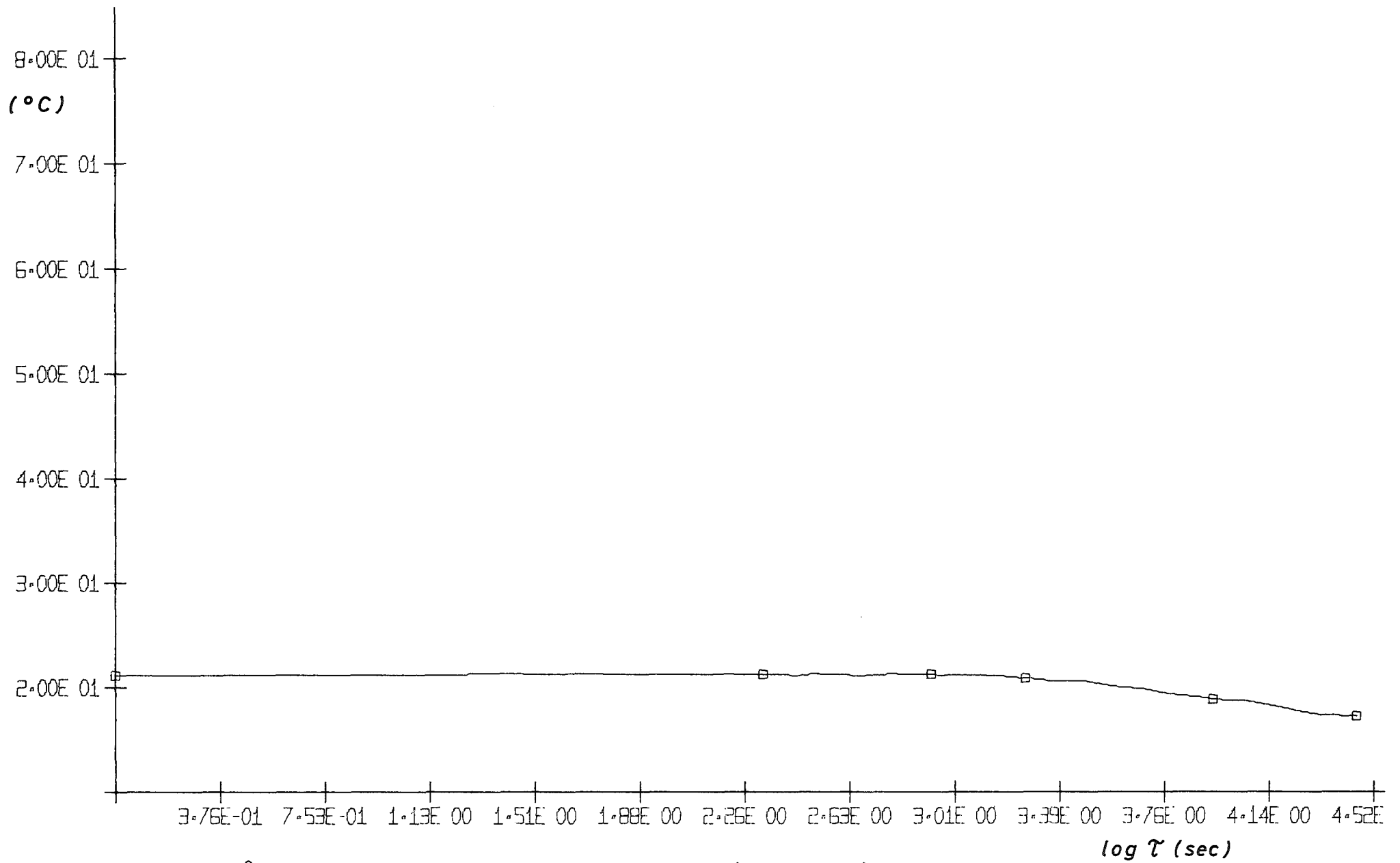


Abb. A-8: Temperatur vor Kernmantelperforation (Versuch 3B)

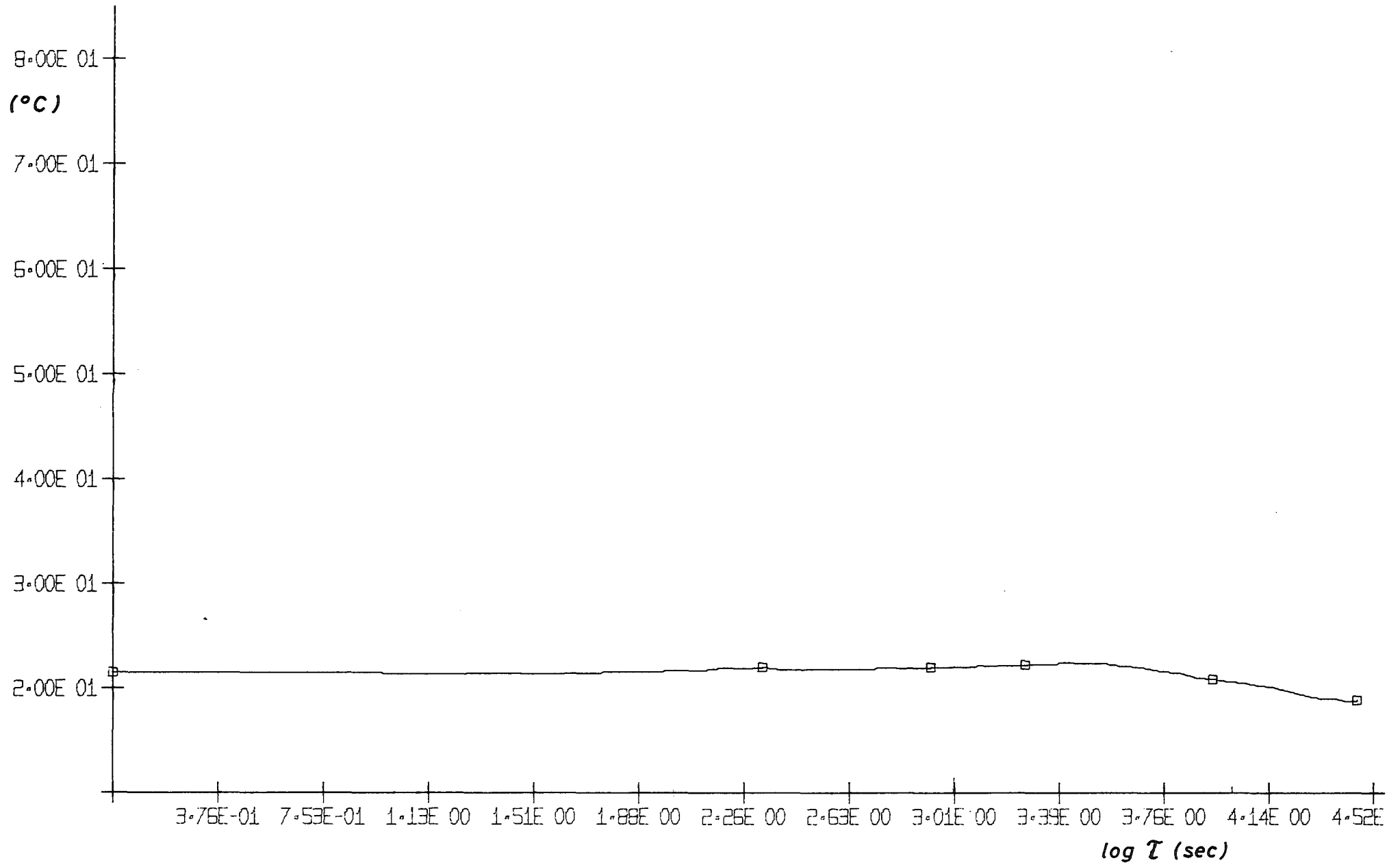


Abb. A-9: Kerneintrittstemperatur (Versuch 3B)

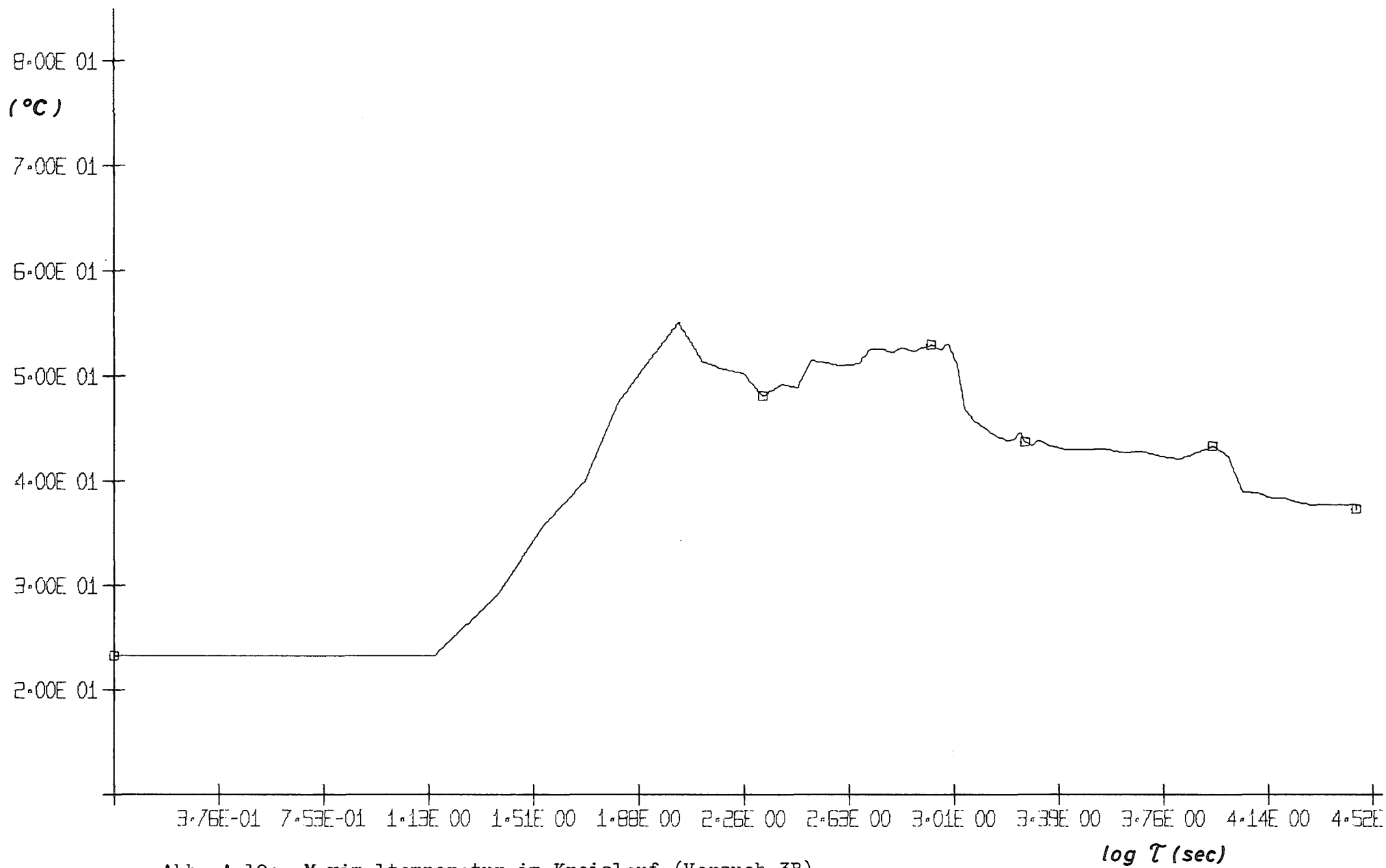


Abb. A-10: Maximaltemperatur im Kreislauf (Versuch 3B)



## Anhang B

### Das Problem der Übertragbarkeit

#### B.1 Allgemeine Überlegungen

Die Ergebnisse des Modellversuchs wären unmittelbar nur dann auf den wirklichen Ablauf der Notkühlung im Reaktor übertragbar, wenn die hydraulische und thermodynamische Ähnlichkeit vorausgesetzt werden könnte. Dazu wären die folgenden Bedingungen zu erfüllen:

- (1) Geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und Reaktor;
- (2) Ähnlichkeit der Rand- und Anfangsbedingungen;
- (3) Ähnlichkeit der Differentialgleichungen, mit denen Strömungs- und Temperaturfeld beschrieben werden.

Zu Punkt (1): Die geometrische Ähnlichkeit kann durch die Konstruktion eines maßstabgetreuen Modells erreicht werden. Mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Modell wird diese Bedingung nicht in allen Punkten erfüllt. Die im Modell nicht völlig ähnlich nachzubildende Geometrie der Brenn- und Brutelemente und der Tauchkühler wird in der folgenden Ähnlichkeitsbetrachtung diskutiert.

Zu Punkt (2): Die Ähnlichkeit der Anfangsbedingungen konnte im Modell nicht erfüllt werden, da die Simulation eines Primärkreislaufes zu aufwendig erschien. Die bei der Beendigung des Pumpennachlaufs vorhandenen Strömungs- und Temperaturverteilungen im Reaktor, die die Anfangsbedingungen für die freie Konvektion darstellen, können also im Modell nicht in ähnlicher Form nachgebildet werden. Mit dem IA-Rechenprogramm NOTUNG wurde bereits untersucht, ob eine Änderung der Anfangsverteilung der Temperatur einen wesentlichen Einfluß auf die Ergebnisse hat. Da ein solcher Einfluß nicht festgestellt werden konnte [3], darf man wohl voraussetzen, daß auch die im Modell i.a. vorhandene isotherme Anfangsverteilung der Temperatur ( $T_a = \text{konst. an allen Punkten des Modells}$ ) keinen wesentlichen Einfluß auf die Ausbildung der freien Konvektion hat.

Die wesentliche, ähnlich nachzubildende Randbedingung ist die Wärme-  
flußverteilung. Dessen radiale Verteilung ist im Modell recht gut nach-  
zubilden, während axial der Wärmefluß im Modell konstant sein muß, was  
jedoch sicher nur einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Ausbildung  
der freien Konvektion hat.

Zu Punkt (3): Geschwindigkeits- und Temperaturfeld werden in kartesischen  
Koordinaten durch die folgenden Differentialgleichungen beschrieben  
(x - Koordinate senkrecht nach oben angenommen, zur Nomenklatur vgl.  
die Liste auf Seite B 4):

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{B 1})$$

Energiegleichung:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) \quad (\text{B 2})$$

Impulsgleichung:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \rho \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g \rho \quad (\text{B 3.1})$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \rho \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{B 3.2})$$

Diese Gleichungen sind hier zur Vereinfachung zweidimensional angeschrie-  
ben, eine Erweiterung auf drei Dimensionen bringt für die folgenden  
Ähnlichkeitsbetrachtungen keine qualitative Änderung. Vorausgesetzt  
ist inkompressible Strömung mit konstanten Stoffwerten, allerdings  
muß bei freier Konvektion die Dichte  $\rho$  im Auftriebsglied der Gl. (B 3.1)  
variabel angenommen werden. Da aber vorausgesetzt werden darf, daß  
trotz relativ großer Temperaturunterschiede die Dichteänderungen klein  
sind, kann in allen anderen Gliedern von Gl. (B3.1) und in den anderen  
Gleichungen die Dichte  $\rho$  weiter konstant angenommen werden.

Die Anfangsbedingungen sind:

$$u(x, y, t = 0) = u_a(x, y) \quad (\text{B 4.1})$$

$$v(x, y, t = 0) = v_a(x, y) \quad (\text{B 4.2})$$

$$\vartheta(x, y, t = 0) = \vartheta_a(x, y) \quad (\text{B 4.3})$$



die Randbedingungen (W: feste Wände des Systems)

$$u(W) = 0 \quad (\text{B 5.1})$$

$$v(W) = 0 \quad (\text{B 5.2})$$

und, da nur an senkrechten Wänden Wärmeströme vorgegeben sind,

$$q_f(W) = -\lambda \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right|_W \quad (\text{B 5.3})$$

In den Tauchkühlern ist an sich eine Randbedingung anderer Art als Gl.(B5.3) vorgegeben, doch hat dies für die folgende Ähnlichkeitsbetrachtung keine Bedeutung. Im folgenden wird angenommen, daß das diskutierte Problem durch die Gleichungen(B1) bis(B5) beschrieben wird, wobei zunächst auch geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und Reaktor vorausgesetzt wird.

In den für die Ausbildung der freien Konvektion entscheidenden Bereichen (im Kern und Blanket sowie im Tauchkühler) kann man voraussetzen, daß die Geschwindigkeit im wesentlichen senkrecht gerichtet ist, es gilt hier also  $v = 0$ . Damit fallen in den Gleichungen (B1) bis (B 3.2) die doppelt unterstrichenen Glieder fort. Weiter darf vorausgesetzt werden, daß in diesen Bereichen Wärmeleitung und molekularer Impulstransport in senkrechter Richtung vernachlässigbar sind, d.h. es fallen in den Gleichungen(B2) und(B3.1) die dreifach unterstrichenen Glieder fort.

Das Auftriebsglied  $g \cdot \rho$  in Gl.(B3.1) wird noch etwas umgeformt. Mit der volumetrischen Ausdehnungszahl  $\beta$  gilt

$$\beta = \rho \frac{d'1/\rho}{d'v} \quad (\text{B 4})$$

Durch Integration erhält man

$$\rho = \rho_0 e^{-\beta(v - v_0)} \quad (\text{B 5})$$

und für kleine Dichteänderungen damit

$$\rho \approx \rho_0 (1 - \beta(v - v_0)) \quad (\text{B 6})$$

Gl.(B6) wird eingesetzt in Gl.(B3.1) und es wird abgekürzt

$$p^* = p - p_0 - g \rho_0 x \quad (\text{B 7})$$

so daß  $-\frac{\partial p^*}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - g \rho_0$  und  $\frac{\partial p^*}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y}$  gilt;

statt  $p^*$  wird dann wieder  $p$  und statt  $\vartheta_0$  wieder  $\vartheta$  geschrieben, so daß sich ergibt:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \rho \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho \beta (\vartheta - \vartheta_0) \quad (\text{B 3.1a})$$

Diese Gleichung wird im folgenden statt Gl. (B 3.1) verwendet.

Für die Ähnlichkeitsanalyse sind in der folgenden Liste die das Problem beschreibenden Parameter (aus den Gleichungen (B 1), (B 2), (B 3.1a), (B 3.2) (B4) u.(B5)) aufgeführt (d.F. bedeutet: des Fluids):

Parameter	Dimension	Bedeutung	
$\vec{u} = \{u, v\}$	$m \ s^{-1}$	Geschwindigkeit d.F.	} abhängige Parameter
$p$	$kg \ m^{-1} \ s^{-1}$	Druck d.F.	
$\vartheta$	K	Temperatur d.F.	
<hr/>			
$x_0$	m	Charakteristische Länge	
$\rho$	$kg \ m^{-3}$	Dichte d.F.	
$\nu$	$m^2 \ s^{-1}$	kinematische Zähigkeit d.F.	
$c_p/\lambda$	$ms \ kg^{-1}$	Quotient aus spezif. Wärme u. Wärmeleitfähigkeit d.F.	
$\beta \cdot g$	$ms^{-2} \ K^{-1}$	Produkt aus volumetrischer Ausdehnungszahl d.F. und Erdbeschleunigung	unabhängige Parameter
$q_{f0}/\lambda$	$K \ m^{-1}$	Quotient aus Wärmefluß am Rand und Wärmeleitfähigkeit d.F.	
<hr/>			
$t_0$	s	Charakteristische Zeitkoordinate (nur instationär)	

Zu dieser Liste ist zu bemerken, daß  $g$  und  $\beta$  in den das Problem beschreibenden Gleichungen nur als Produkt auftreten, sie dürfen deshalb in der Liste nicht unabhängig voneinander aufgeführt werden. Gleiches gilt für  $c_p$ ,  $\lambda$  und  $q_f$ , die in den Gleichungen nur in den Quotienten  $c_p/\lambda$  und  $q_f/\lambda$  auftreten.

Für die Gesamtzahl  $m$  der das Problem beschreibenden dimensionslosen Kennzahlen gilt nun [4, S. 48]

$$m = i - z \quad (\text{B } 8)$$

( $i$  = Zahl der das Problem beschreibenden Parameter,  $z$  = Zahl der Grundeinheiten in den Dimensionen der Parameter). Hier ist  $i = 10$  (für ein stationäres Problem  $i = 9$ ) und  $z = 4$  ( $m, s, kg, K$ ), d.h. wir erhalten 6 (stationär 5) dimensionslose Kennzahlen.

Für die Zahl  $m_{\beta}$  der das Problem bestimmenden dimensionslosen Kennzahl gilt

$$m_{\beta} = i_{\beta} - z_{\beta} \quad (\text{B } 9)$$

( $i_{\beta}$  = Zahl der unabhängigen Parameter,  $z_{\beta}$  = Zahl der Grundeinheiten in den Dimensionen der unabhängigen Parameter). Hier wird mit  $i_{\beta} = 7$  (stationär  $i_{\beta} = 6$ ) und  $z_{\beta} = 4$  die Zahl der bestimmenden dimensionslosen Kennzahlen  $m_{\beta} = 3$  (stationär  $m_{\beta} = 2$ ). Für die Ermittlung, welche der insgesamt das Problem beschreibenden dimensionslosen Kennzahlen nun bestimmende Kennzahlen sind, gibt es keine eindeutigen Kriterien. Jedoch gilt [4, S. 47], daß die bestimmenden Kennzahlen nur unabhängige Parameter enthalten sollen.

Diese Bedingung wird für das vorliegende Problem erfüllt von den drei Kennzahlen

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= \frac{g \rho v^2}{\lambda} \\ \text{Gr}^{\#} &= \frac{g_{\beta} g \beta x_0^4}{\lambda v^2} \quad \text{und} \\ \text{Fo} &= \frac{\lambda t_0}{g \rho x_0^2} \end{aligned}$$

(für ein stationäres Problem fällt hier  $\text{Fo}$  fort).

Man erhält übrigens das gleiche Ergebnis, wenn man in den Gleichungen (B1) bis (B5) dimensionslose Größen einführt, die mit den unabhängig vorgegebenen Parametern definiert sind, also z.B.

$$X = \frac{x}{x_0} \quad Y = \frac{y}{y_0} \quad T = \frac{t}{t_0}$$

$$U = \frac{u}{v/x_0} \quad V = \frac{v}{v/x_0}$$

$$\Theta = \frac{p - p_0}{\rho_f v_0 x_0 / \lambda} \quad P = \frac{p - p_0}{\rho v^2 / x_0^2} \quad (\text{B } 10).$$

Hier sind  $p_0$  und  $v_0$  Referenzdruck und -temperatur, zwei Größen, die auf die Ähnlichkeitsbetrachtung keinen Einfluß haben, da in den Differentialgleichungen nur Differentiale oder Differenzen des Druckes und der Temperatur auftreten [4].

Mit den Definitionen (B10) erhält man aus den Gleichungen (B 1) bis (B 5) die dimensionslosen Gleichungen

$$\frac{\partial u}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (\text{B } 11),$$

$$\frac{x_0^2}{v t_0} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial T} + u \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\lambda}{\rho c_p v} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{B } 12),$$

$$\begin{aligned} \frac{x_0^2}{v t_0} \cdot \frac{\partial u}{\partial T} + u \frac{\partial u}{\partial X} + V \frac{\partial u}{\partial Y} = & - \frac{\partial P}{\partial X} + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \right) + \\ & + \frac{\rho_f g \beta x_0^4}{\lambda v^2} \Theta \end{aligned} \quad (\text{B } 13.1),$$

$$\frac{x_0^2}{v t_0} \cdot \frac{\partial V}{\partial T} + u \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{B } 13.2),$$

$$U(X, Y, T = 0) = U_a(X, Y) \quad (\text{B } 14.1),$$

$$V(X, Y, T = 0) = V_a(X, Y) \quad (\text{B } 14.2),$$

$$\theta(X, Y, T = 0) = \theta_a(X, Y) \quad (\text{B } 14.3),$$

$$U(W) = 0 \quad (\text{B } 15.1),$$

$$V(W) = 0 \quad (\text{B } 15.2),$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right|_W = - \frac{q_f(W)}{q_{f_0}} \quad (\text{B } 15.3).$$

Es erscheinen also als Koeffizienten des Gleichungssystems genau die oben bereits genannten Kennzahlen -  $x_0^2 / (\nu t_0)$  ist das Produkt  $(Fo \cdot Pr)^{-1}$ . Hydraulische und thermodynamische Ähnlichkeit zwischen Modell und Reaktor könnten also dann vorausgesetzt werden, wenn diese Kennzahlen gleich wären, geometrische Ähnlichkeit gegeben wäre und die Randbedingungen ähnlich wären (d.h.  $U_{aR} = U_{aM}$  usw.,  $(q_f(W)/q_{fo})_R = (q_f(W)/q_{fo})_M$ ; R = Reaktor, M = Modell).

Hier sollte erwähnt werden, daß die Kennzahl  $Gr^*$  dann durch die Grashofzahl Gr zu ersetzen ist, wenn statt des Wärmeflusses die Wandtemperatur  $\vartheta_w$  vorgeschrieben ist. Man sieht dies leicht ein, wenn man oben in der Liste der Parameter den Quotienten  $q_f/\lambda$  ersetzt durch  $\vartheta_w - \vartheta_0 = \Delta \vartheta_0$ . Da bei den meisten in der Literatur behandelten Fällen freier Konvektion  $\vartheta_w$  vorgegeben ist, werden auch folgerichtig dann Pr und Gr (und bei instationären Problemen Fo) als bestimmende Kennzahlen angegeben.

Es ist bekannt, daß bei freier Konvektion häufig die Voraussetzung gemacht werden kann, daß in der Impulsgleichung (B 3.1a) (in Gl. (B 3.2) entsprechend) gegenüber dem Auftriebsglied  $\rho g \beta (\vartheta - \vartheta_0)$  entweder die konvektiven Glieder  $\rho (\partial u/\partial t + u \partial u/\partial x + v \partial u/\partial y)$  vernachlässigt werden können (schleichende Strömung) oder aber die Reibungsglieder  $\nu \rho (\partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2)$  (reibungsfreie Strömung). Es soll im folgenden diskutiert werden, ob eine dieser Vernachlässigungen sowohl im Reaktor als auch im Modellversuch zulässig ist.

Schleichende Strömung: Die Vernachlässigung der konvektiven Glieder äußert sich in der Liste der Parameter so, daß die Dichte nur noch in den Kombinationen  $\nu \rho$ ,  $\rho g \beta$  und  $\rho \nu / \lambda$  auftritt, jedoch nicht mehr als unabhängiger Parameter. Man erhält also eine bestimmende Kennzahl weniger und zwar ist neben der Fourierzahl Fo nur noch die Kennzahl

$$Gr^* \cdot Pr = \frac{g \beta \rho \nu^2 x_0^4}{\lambda^2}$$

bestimmend (bei vorgegebener Wandtemperatur wird statt dieser Kennzahl die Rayleighzahl  $Ra = Gr \cdot Pr$  bestimmend).

Die Vernachlässigung der konvektiven Glieder gegenüber dem Auftriebsglied ist aber nur dann möglich, wenn die Temperaturdifferenz  $(\vartheta - \vartheta_0)$  das Auftriebsglied  $\rho g \beta (\vartheta - \vartheta_0)$  groß genug macht; es ist also zu vermuten, daß bei Flüssigkeiten mit hohen Wärmeleitfähigkeiten und demen-

sprechend kleinen Temperaturdifferenzen  $v - v_0$  keine schleichende Strömung angenommen werden darf. Diese Vermutung wird erhärtet durch die experimentell bestätigten Angaben in der Literatur [5, S. 266 ff], [4, S. 290 ff], daß schleichende Strömung nur für Prandtlzahlen  $Pr \geq 1$  angenommen werden kann.

Strömung mit Vernachlässigung der Reibung: Bei Vernachlässigung der Reibung kann in der Liste der Parameter die Zähigkeit  $\nu$  gestrichen werden, so daß man hier ebenfalls eine bestimmende Kernzahl weniger erhält, und zwar ist dann bestimmend neben  $Fo$  nur noch die Kennzahl

$$Gr^* \cdot Pr^2 = \frac{q_{f_0} \rho^2 c_p^2 g \beta x_0^4}{\lambda^3}$$

(bei vorgegebener Wandtemperatur wäre es  $Gr \cdot Pr^2$ ).

Die Vernachlässigung der Reibungsglieder ist dann möglich, wenn die Geschwindigkeitsgradienten klein sind. Das ist bei freier Konvektion dann der Fall, wenn in größeren Bereichen des Fluids die Flüssigkeitsteilchen wenig unterschiedlichen Auftrieb haben, d.h. wenn die Temperaturunterschiede klein sind. Man muß also annehmen, daß die Vernachlässigung der Reibungsglieder nur bei hohen Wärmeleitfähigkeiten möglich ist, und die Angaben in der Literatur [4, S. 294] bestätigen, daß diese Vernachlässigung nur für  $Pr \ll 1$  zulässig ist.

## B.2 Folgerungen für die Übertragbarkeit des Modellversuchs

Die Diskussion der schleichenden Strömung und der Strömung mit Vernachlässigung der Reibung hat gezeigt, daß die für die beiden Strömungsformen möglichen Vereinfachungen jeweils höchstens für eines der beiden zu vergleichenden Systeme zulässig sind. Das bedeutet aber, daß für die thermohydraulische Ähnlichkeit der beiden Systeme (Reaktor R und Modellversuch M) neben der geometrischen Ähnlichkeit und der Ähnlichkeit der Rand- und Anfangsbedingungen die Gleichheit der beiden Kennzahlen  $Pr$  und  $Gr^*$  und gleiches Zeitverhalten gefordert werden muß. Da die geometrische Ähnlichkeit durch das Modell im wesentlichen gegeben ist (zu den Verhältnissen in den Brennelementen und Tauchkühlern s.u.) und die Unterschiede in den Rand- und Anfangsbedingungen nicht schwerwiegend erscheinen, ist das entscheidende Kriterium für die Übertragbarkeit des Modellversuchs die Gleichheit der beiden Kennzahlen und gleiches

Zeitverhalten. Das Zeitverhalten von Reaktor und Modell beim Einsetzen der Notkühlung wird in Abschnitt B.3 diskutiert, hier sollen zunächst die Zahlenwerte von  $Pr$  und  $Gr^*$  angegeben werden.

Zur Berechnung dieser Kennzahlen werden die Stoffwerte für Natrium (R) bei  $400\text{ }^\circ\text{C}$  eingesetzt [6], für Wasser (M) bei  $20\text{ }^\circ\text{C}$  [5]. Der maximale Wärmefluß  $q_{fo}$  ist im Reaktor bei Einsetzen der Naturkonvektion etwa  $15 \cdot 10^4\text{ W/m}^2$ , im Modellversuch ist nicht mehr als  $1 \cdot 10^4\text{ W/m}^2$  erreichbar, wenn unterkühltes Sieden vermieden werden soll.

Die unter diesen Voraussetzungen berechneten Kennzahlen sind bei einer geometrisch ähnlichen Verkleinerung des Modells im Maßstab 1:3:

$$\left. \begin{array}{l} Pr_R = 0,005 \\ Pr_M = 7,01 \end{array} \right\} \frac{Pr_R}{Pr_M} = 0,715 \cdot 10^{-3}$$

$$\left. \begin{array}{l} Gr_R^* = 503 \cdot 10^6 \\ Gr_M^* = 3,52 \cdot 10^6 \end{array} \right\} \frac{Gr_R^*}{Gr_M^*} = 143$$

Da die bestimmenden Kennzahlen also um Größenordnungen verschieden sind, ist eine unmittelbare Übertragung der Ergebnisse des Modellversuchs auf den Notkühlfall im Reaktor sicher nicht möglich. Man kann vielmehr schließen, daß eine vollständige thermohydraulische Ähnlichkeit in einem Modellversuch nur mit einem Flüssigmetall und einem Modell im Maßstab 1:1 möglich ist, d.h. praktisch nur im Reaktor selbst.

Die Unmöglichkeit einer unmittelbaren Übertragung bedeutet nun aber nicht, daß der Modellversuch keine Aussagen über das Verhalten der Notkühlung im Reaktor zuläßt. Zunächst einmal sollte der Modellversuch demonstrieren, daß eine Kühlung durch freie Konvektion auch bei einer derart komplizierten Strömungsführung grundsätzlich möglich ist. Zum anderen liefert ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Berechnungen des NOTUNG-Programmes gute Argumente für den Schluß, daß mit dem Programm NOTUNG auch die Verhältnisse im Reaktor berechnet werden können (vgl. Abschnitt 4.4).

Nicht ohne weiteres abgeschätzt werden kann jedoch, welchen Einfluß es hat, daß auf Grund der in den Brennelementen und Tauchkühlern in

radialer Richtung nicht ähnlich nachgebildeten Geometrie die Ausbildung der Naturkonvektion wesentlich anders beeinflußt sein könnte als bei exakt ähnlicher Geometrie, und zwar wegen einer in der Modellgeometrie anders ausgebildeten radialen Temperaturschichtung (daß dies auch auf die Oberflächentemperaturen der Stäbe Einfluß hat, ist hier ohne Belang).

Aus diesem Grunde sollen an dieser Stelle auch die stark vereinfachten Modelle diskutiert werden, mit denen das Rechenprogramm NOTUNG die Brenn- und Brutelemente (eindimensionale Betrachtungsweise) und das obere Plenum (vollständige Vermischung in einem bzw. wenigen Kontrollvolumen) beschreibt.

Bezüglich der Verhältnisse im oberen Plenum deuten die höheren Grashof<sup>\*</sup>-Zahlen im Reaktor darauf hin, daß sich dort durch die stärkere Ausbildung der Naturkonvektion eher eine Schichtenströmung ausbilden wird als im Modell. Wenn also NOTUNG das Modell konservativ nachrechnen kann, ist anzunehmen, daß das Rechenprogramm das obere Plenum im Reaktor erst recht konservativ berechnet, wenn in beiden Fällen vollständige Vermischung angenommen wird. Ein gegenläufiger Effekt ist hier allerdings durch die bessere Wärmeleitung im Natrium zu erwarten, was sich in den Prandtl-Zahlen ausdrückt; d.h. es ist trotz "stärkerer" Ausbildung einer Schichtenströmung im Reaktor mit einer vermehrten thermischen Vermischung durch Wärmeleitung zu rechnen. Wegen der relativ großen Entfernung, über die die Wärme im oberen Plenum durch Leitung transportiert werden muß, sollte man aber doch annehmen, daß auch trotz der besseren Wärmeleitung bei Natrium konservativ gerechnet wird.

Bei den Brenn- und Brutelementen und den Tauchkühlern kann man allerdings nicht mehr von vornherein schließen, daß der Reaktor erst recht konservativ berechnet wird, wenn der Modellversuch konservativ berechnet war. Im Rechenprogramm NOTUNG ist deshalb zur Beschreibung der Vorgänge an diesen Stellen ein Modell eingebaut, das auf den in [7] angegebenen theoretischen und experimentellen Ergebnissen aufbaut. Durch dieses Modell wird die bei großen radialen Temperaturgradienten mögliche, der Hauptströmung überlagerte "interne" Naturkonvektion in den Kühlkanälen berücksichtigt, so daß man von einer angenähert zweidimensionalen Beschreibung sprechen kann. Man darf also annehmen, daß NOTUNG auch die Kühlkanäle in den Brenn- und Brutelementen und in den Tauchkühlern angemessen berechnet.



B.3 Zum Zeitverhalten von Reaktor und Versuchsmodell beim Einsetzen  
der Notkühlung

Aus den Differentialgleichungen (B 1), (B 2), (B 3.1a) u. (B 3.2) lässt sich nicht ohne weiteres eine das Zeitverhalten charakterisierende Zeitkonstante  $t_0$  ableiten, wie dies etwa bei eindimensionalen Wärmeleitproblemen der Fall ist, wo die in der Fourierzahl  $Fo$  auftretende Größenkombination  $\rho c_p x_0^2 / \lambda$  diese Zeitkonstante darstellt. Man kann aber doch aus den vereinfachten Differentialgleichungen für den Kern- und Blanketbereich (also ohne die in den Gleichungen (B 1) bis (B 3) unterstrichenen Glieder) mit einigen zusätzlichen Annahmen Aussagen über das Zeitverhalten wenigstens in diesen Bereichen gewinnen, die ja gerade für das Einsetzen der Notkühlung entscheidend sind.

Für die hier notwendige eindimensionale Betrachtungsweise werden die Gleichungen (B2) u. (B3.1a) modifiziert. In Gleichung (B2) wird statt des Gliedes  $\lambda \partial^2 \vartheta / \partial y^2$  eine Wärmequellendichte  $q$  eingeführt, die die vom "Rand" durch Leitung in  $y$ -Richtung zugeführte Wärme berücksichtigt. Es ist also  $q = q_f \cdot U/F$  zu setzen, wobei  $U$  den gesamten wärmeabgebenden Umfang eines Brennelements bedeutet und  $F$  den gesamten Querschnitt. Dementsprechend wird in Gl. (B3.1a) das Glied  $\nu \rho \partial^2 u / \partial y^2$  durch das Glied  $- f \cdot \rho u^2 / (2d_h)$  ersetzt, das den Impulsverlust durch Wandreibung berücksichtigt. Da die Strömung beim Einsetzen der Notkühlung sicher laminar ist, kann man für den Reibbeiwert  $f$  schreiben  $f = 64 \nu / (u d_h)$  (gilt genau nur für Kreisrohre) und erhält dann statt der Gleichungen (B 1) bis (B 3) das Gleichungssystem

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (B 16)$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) = q \quad (B 17)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{32 \nu}{d_h^2} \rho u + \rho g \beta (\vartheta - \vartheta_0) \quad (\text{B 18})$$

Integriert man nun die Gleichungen (B17) u. (B18) in x-Richtung über die Höhe der Brennelemente (von  $x = 0$  bis  $x = x_1$ ), dann erhält man

$$\frac{\partial \bar{\vartheta}}{\partial t} + \frac{u}{x_1} (\vartheta_1 - \vartheta_0) = c \quad (\text{B 19})$$

und

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a u = b \bar{\vartheta} + d \quad (\text{B 20})$$

mit den Abkürzungen  $a = 32 \nu / d_h^2$ ,  $b = g \beta$ ,  $d = (p_1 - p_0) / (x_1 \rho)$

$$c = \frac{1}{x_1} \int_0^{x_1} \frac{q}{\rho c_p} dx, \quad \bar{\vartheta} = \frac{1}{x_1} \int_0^{x_1} (\vartheta - \vartheta_0) dx.$$

Nun ist das zweite Glied auf der linken Seite von Gl. (B19) beim Einsetzen der Notkühlung im Versuchsmodell sicher zu vernachlässigen, da  $u(t=0) = 0$  gilt und die Austrittstemperatur  $\vartheta_1$  "für längere Zeit" konstant und gleich der Eintrittstemperatur  $\vartheta_0$  angenommen werden kann. Diese Annahme gilt für den Reaktor nicht ganz in der gleichen Weise, aber doch wohl mit guter Näherung. Ebenso kann mit der Definition von  $p = p^*$  (Gl. (B7)) angenommen werden, daß beim Einsetzen der Notkühlung  $d = 0$  gilt. Dann erhält man aber aus Gl. (B 19)

$$\bar{\vartheta} = c \cdot t \quad (\text{B 21})$$

und damit aus Gl. (B 20)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a u = b c t \quad (\text{B 22})$$

Die Differentialgleichung (B22) ist aber elementar zu lösen und man bekommt mit  $u(t=0) = 0$

$$u = \frac{b \cdot c}{a^2} \left( (e^{-a t} - 1) + a t \right) \quad (\text{B 23})$$

Aus dieser Lösung sieht man, daß  $t_0 = \frac{1}{a}$  eine für das Einsetzen der Strömung im Brennelement charakteristische Zeit ist. Wertet man dies aus, dann ergibt sich

$$\left. \begin{array}{l} t_{0R} = 2,69 \text{ s} \\ t_{0H} = 4,71 \text{ s} \end{array} \right\} \frac{t_{0R}}{t_{0H}} = 0,572.$$

Das Zeitverhalten von Reaktor und Modell ist also nach dieser Abschätzung nicht sehr unterschiedlich. Da das Zeitverhalten nur abgeschätzt werden kann, wurde für die zeitabhängig einzustellenden Versuchsparameter (also insbesondere die Leistung) im Modell der gleiche Zeitmaßstab gewählt wie im Reaktor (vgl. Abschnitt 3.2-2).

#### B.4 Versuch einer Übertragung der Meßergebnisse im Sinne der Ähnlichkeitstheorie

-----

Ein weiteres Ergebnis der Ähnlichkeitsbetrachtungen im Abschnitt B.1 ist, daß sich die abhängigen Größen in dimensionsloser Form als Funktion der dimensionslosen Koordinaten und der bestimmenden Kennzahlen darstellen lassen, also z.B.

$$U = f_1 (X, Y, T, Pr, Gr^{\#}, Fo) \quad (B 27)$$

$$\text{und } \theta = f_2 (X, Y, T, Pr, Gr^{\#}, Fo) \quad (B 28).$$

Mit den Ergebnissen der Wasserversuche können diese Funktionen  $f_1$  und  $f_2$  höchstens für wenige Punkte  $X, Y$  und kleine Bereiche der  $Gr^{\#}$ - und  $Pr$ -Zahl bestimmt werden, so daß der Versuch einer Extrapolation auf die um Größenordnungen verschiedenen  $Gr^{\#}$ - und  $Pr$ -Zahlen des Reaktors in jedem Falle fragwürdig ist, selbst wenn man in allen Punkten ähnliche Geometrie und ähnliche Randbedingungen annehmen könnte. Immerhin könnte es möglich sein, daß man aus der Auswertung des Zeitverhaltens des Versuchsmodells bei Einsetzen der Notkühlung einige Hinweise auf das Zeitverhalten des Reaktors erhält. Nach den Ableitungen im Abschnitt B.3 sollten die Funktionen  $f_1$  und  $f_2$  in der Anfangsphase ja sehr einfach aufgebaut sein, so daß man die dort getroffenen Voraussetzungen überprüfen kann.

Nimmt man - wie in Abschnitt B.3 - an, daß  $t_0 = \frac{1}{a}$  die für das Einsetzen der Strömung charakteristische Zeit ist, dann ist die dimensionslose Zeit  $T$  durch  $T = at$  gegeben. Aus den Gleichungen (B 21) u. (B 23) erhält man dann die dimensionslosen Gleichungen

$$\frac{\bar{\theta}}{c/a} = T$$

und

$$\frac{\mu}{\rho c/a^2} = (e^{-T} - 1) + T$$

oder, mit den Definitionen von a, b, c aus Abschnitt B.3 und den Definitionen aus Gl. (B 10),

$$\bar{\theta}^* = \frac{\bar{\vartheta}}{q_{f_0} x_0 / \lambda} \cdot Pr = c_1 T \quad (\text{B 29})$$

und

$$u^* = \frac{\mu}{\nu / x_0} \frac{Pr}{Gr^*} = c_2 ((e^{-T} - 1) + T) \quad (\text{B 30}).$$

In diesen Gleichungen sind die Faktoren  $c_1$  und  $c_2$  konstant für alle Versuche mit dem Modell, in ihnen sind der Zahlenwert aus der Definition von a und ein Geometriefaktor zusammengefaßt (zur Vereinfachung der Auswertung ist  $x_0 \neq d_h$  gewählt worden).

Für eine Auswertung der Gleichungen (B29) und (B30) bieten sich die Versuche 1B, 2 und 3B (mit nahezu konstanter Prandtl-, aber veränderter Grashof-Zahl) und die Versuche 3B, 13 und 14 (mit nahezu konstanter Grashof-, aber veränderter Prandtl-Zahl) an. Da der integrale Mittelwert  $\bar{\vartheta}$  aus den vorhandenen Meßwerten doch nur näherungsweise ermittelt werden kann, wurde für die Auswertung von Gl. (B29)  $\bar{\vartheta}$  ersetzt durch  $\vartheta_{75} - \vartheta_0$ , worin  $\vartheta_{75}$  die Kühlmitteltemperatur am oberen Rand der beheizten Zone im Brennelement 3/2 bedeutet. (vgl. Abb. 2.3-14). Die hiermit getroffene Näherung  $\bar{\vartheta} \sim \vartheta_{75} - \vartheta_0$  ist gerade für das Einsetzen der Strömung sicher hinreichend. Zur Ermittlung der Geschwindigkeit u für die Auswertung von Gl. (B30) steht nur der in den Vordrosseln gemessene Durchsatz  $\dot{V}$  zur Verfügung. Wie dieser Durchsatz sich auf die Brennelemente verteilt, kann nur abgeschätzt werden; es kann jedoch angenommen werden, daß diese Verteilung für die 5 hier ausgewerteten Versuche gleich ist, da die Geometrie und die Leistungsverteilung bei diesen Versuchen nicht geändert wurden. Die Annahme  $u \sim \dot{V}$  mit einem für alle 5 Versuche gleichen Proportionalitätsfaktor ist also berechtigt.

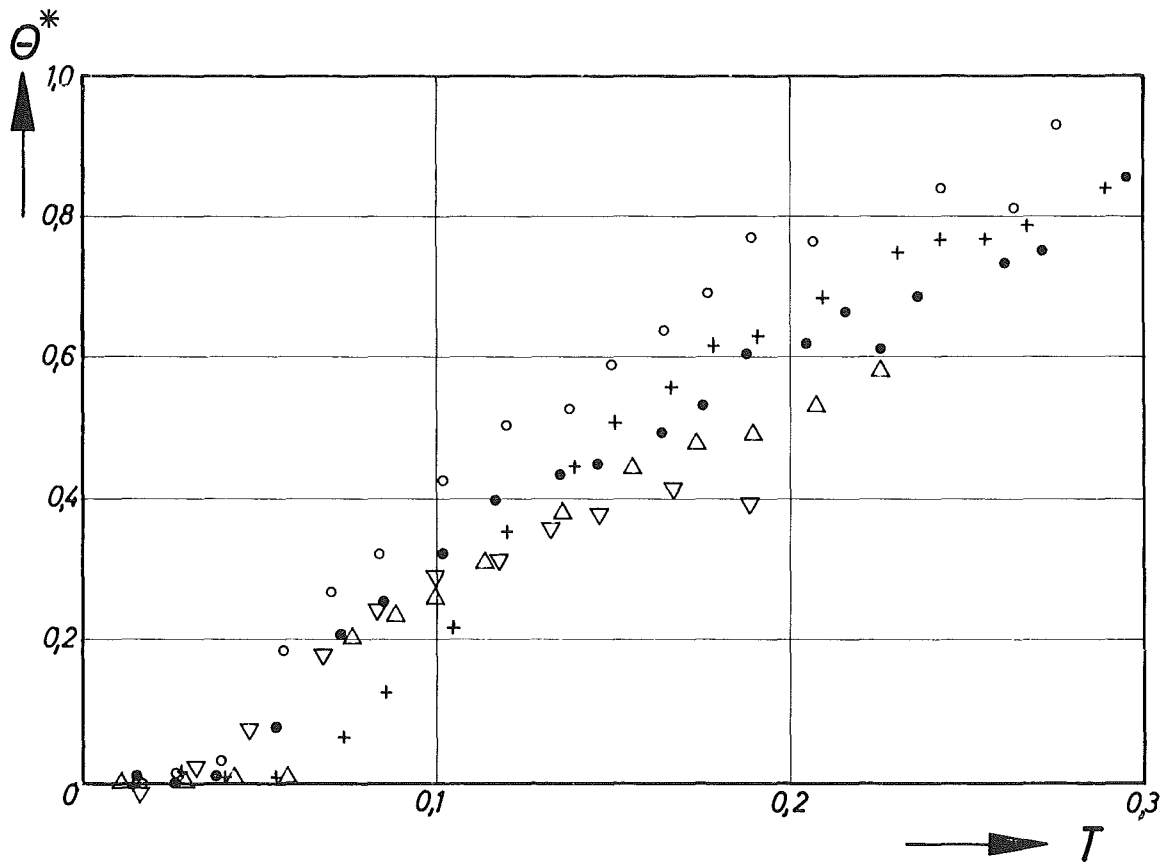
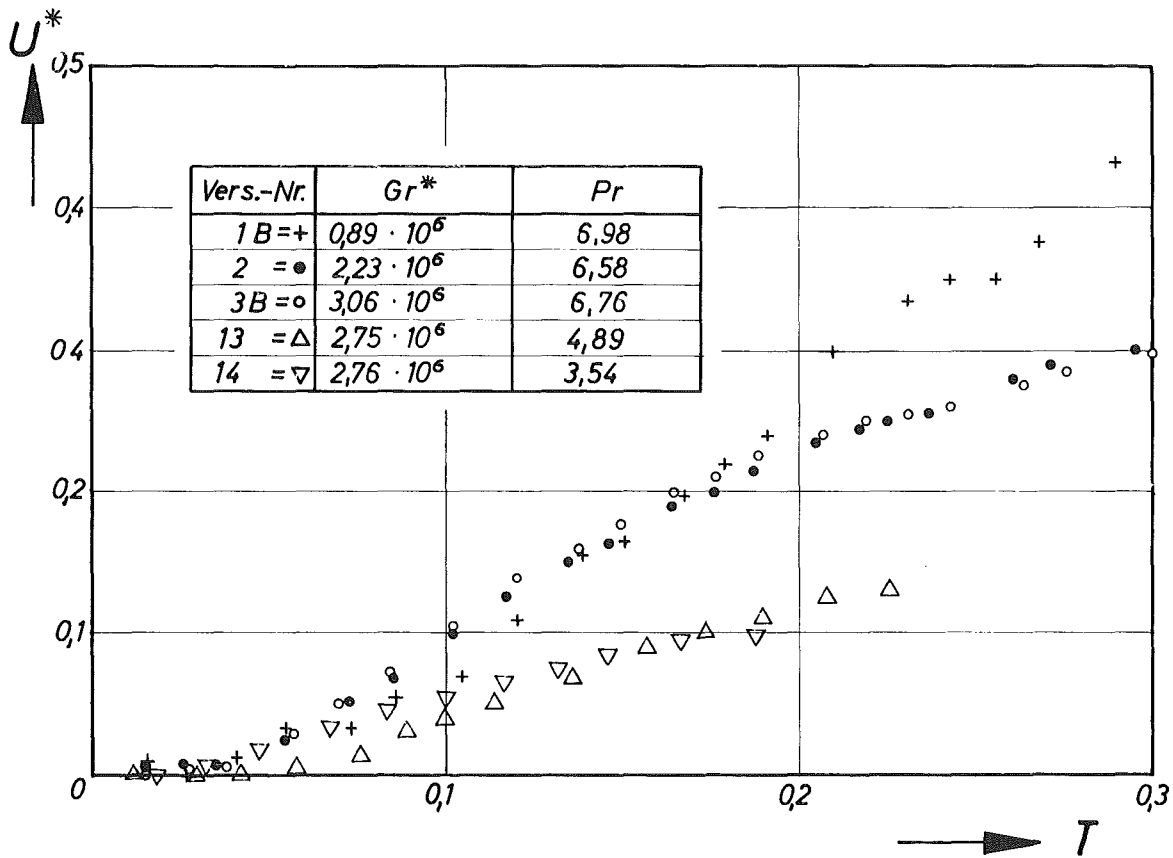
Die in der Abbildung B-1 angegebenen Werte für  $u^*$  und  $\theta^*$  sind also nur bis auf Proportionalitätsfaktoren genau, diese allerdings sind für alle 5 hier ausgewerteten Versuche gleich. Deshalb müßten die aus den Meßwerten berechneten Punkte in dieser Abbildung an sich für alle 5 Versuche auf eine Kurve fallen, wie sie durch Gl. (B29) bzw. (B30) beschrieben wird. Während dies für  $\theta^*$  innerhalb eines Streubereiches noch erfüllt zu sein scheint (insbesondere, wenn man berücksichtigt, daß der Nullpunkt von T nicht exakt feststellbar ist), liegen die Punkte für  $u^*$

aus den Versuchen 13 und 14 deutlich anders als die aus den anderen Versuchen. Eine Erklärung für diese Diskrepanz könnte in dem zusätzlichen Naturumlauf außerhalb der Brennelemente liegen, wie er u.a. im Abschnitt 4.4 diskutiert wird, könnte aber auch durch die Temperaturempfindlichkeit der Durchflußmesser gegeben sein (vgl. Abschnitt 4.2.8), die ja bei Raumtemperatur geeicht wurden.

Der Versuch einer Auswertung der Meßergebnisse im Sinne der Ähnlichkeitsanalyse führt also schon für die Anfangsphase der Versuche, in denen die Verhältnisse noch relativ einfach und überschaubar sind, zu keinem schlüssigen und überzeugenden Ergebnis. Eine entsprechende Auswertung für spätere Versuchszeitpunkte erscheint also nicht sinnvoll. Der Versuch einer unmittelbaren Übertragung auf Reaktorverhältnisse würde sich auch bei völliger geometrischer Ähnlichkeit verbieten. Eine Aussage über die Notkühlung im Reaktor kann also mit den Versuchen nur auf indirektem Wege getroffen werden, nämlich durch den Vergleich der Meßwerte mit den Voraussagen des Rechenprogramms NOTUNG (Abschnitt 4.4). In Kenntnis der für Reaktor und Modell um Größenordnungen unterschiedlichen Kennzahlen war dies auch von vornherein das Hauptziel der Modellversuche.

#### Literatur zum Anhang B

siehe Seite 76



**GfK**

**Modellversuche z. Notkühlsystem SNR 300**  
 Dimensionslose Geschwindigkeiten  $U^*$  und Temperaturen  $\Theta^*$   
 als Funktionen der dimensionslosen Zeit  $T$

**Abb.**  
 B-1

## Anhang C

### Auswertung des Bildmaterials

#### C 1. Allgemeines

Für 23 der 25 durchgeführten Versuche steht ein Satz Farbdiapositive zur Verfügung. Ein solcher Satz besteht aus 7 Filmrollen (je eine Rolle für jede der sechs Meßstellen sowie ein Kontrollstreifen) mit je 300 bis 400 Einzelaufnahmen. Die Aufnahmezeitpunkte sind über den ganzen Versuchsbereich nach einem für alle Versuche i.a. gleichen Schema verteilt (Abschnitt C 4). Die sieben Kameras wurden synchron ausgelöst, so daß zu jedem Bild mit Hilfe des Kontrollstreifens der Aufnahmezeitpunkt bestimmt werden kann.

Die Auswertung des Bildmaterials mußte wegen des hohen Zeitaufwandes auf wenige ausgewählte Versuche beschränkt werden. Für die Versuche V3B, V7, V 13, V 16 und V 17 liegt je ein Bildauswertungsprotokoll vor, welches für den Referenzversuch V3B in Tab. C-2 wiedergegeben ist. Tab. C-3 enthält eine Protokoll-Zusammenstellung für die fünf ausgewerteten Versuche, wobei im wesentlichen nur die Abweichungen gegenüber dem Referenzversuch vermerkt sind. In Abschnitt C 5 wird eine Zusammenfassung der Bildauswertung gegeben.

#### C 2. Nomenklatur für die Bildauswertung

V1, V2, V3A, V3B, ...      Versuchsnummer fortlaufend, in Übereinstimmung mit **Abb. 3.1-1**. Im Falle von Wiederholungsversuchen werden diese durch Buchstaben B (ggf. auch C für 2. Wiederholungsversuch) gekennzeichnet.

M1, M2, M3... M6      Meßstellennummer gemäß Abschnitt C 3

S1, S2 ....      Bildseriennummer gemäß Abschnitt C 4, jede Bildserie entspricht somit einem bestimmten Zeitintervall. Ist bei einem Versuch eine weitere Bildserie eingeschoben, so hat diese Serie die Nummer der vorhergehenden mit Zusatz B (ggf. auch C, D ....)

D1 ... D6	Düsen der vertikalen Düsenanordnung gemäß Meßstelle M1, gezählt von unten.
D7 ... D12	Düsen der horizontalen Düsenanordnung oberhalb des Kernmantels in Meßstelle M1 und M3, gezählt von vorn.
D13 ... D18	Düsen der horizontalen Düsenanordnung vor Kernmantelperforation in Meßstelle M2, gezählt von vorn.
D19 ... D24	Düsen der horizontalen Anordnung zwischen den Kühlern in Meßstelle M5, gezählt von links.
D25 ... D27	Düsen der vertikalen variablen Düsenanordnung in Meßstelle M6, gezählt von unten.
$v_r, v_\varphi, v_z$	Geschwindigkeitskomponenten in einem r, $\varphi$ , z-Koordinatensystem.

### C 3. Beschreibung der Kamerablickfelder

Die Anordnung der Kameras und ihre Blickrichtung sind in Abb. C-1 schematisch dargestellt. Abb. C-2 zeigt zu jeder Kamerastellung Bildmuster, welche auch einen Eindruck von der Qualität der Farbeinspritzung und -verteilung vermitteln sollen. Dazu werden die folgenden Erläuterungen gegeben.

Meßstelle M1 (Oberplenum, horizontale Blickrichtung):

Die Fotos zeigen die sechs übereinander angeordneten Einspritzdüsen, die in der  $30^\circ$ -Ebene über dem Kernmantel angebracht sind (blaue Farbe). Radial nach außen schließt sich ein 2 cm-Raster an. Außerdem ist die horizontale Düsenanordnung (rote Farbe) dicht über dem Kernmantel sichtbar, die zum Zwecke der besseren Auflösung etwas geneigt ist. Die Aufnahme hat zum Ziel, axiale Geschwindigkeitsprofile im Oberplenum aufzuzeichnen.

Meßstelle M2 (Kernmantelperforation, horizontale Blickrichtung):

Etwa 6 cm vor dem Eintritt der Strömung in die Kernmantelperforation befindet sich in Umfangsrichtung ein Düsenatz mit 6 Einspritzdüsen (rote Farbe). Die Düsen sind symmetrisch zur  $30^\circ$ -Ebene angeordnet, in



der sich das 2-cm-Raster befindet. Am oberen Bildrand liegt die perforierte Umlenkplatte (nicht sichtbar). Etwa 5 cm über den Düsen ist ein waagerechtes Raster (in M3 sichtbar) angebracht, welches als dicke Linie sichtbar ist.

Meßstelle M3 (Oberplenum, vertikale Blickrichtung):

Die Aufnahmen zeigen im Schatten des äußeren Corebereiches die unter M1 beschriebenen Düsenanordnungen (nur schwach sichtbar) und den Düsenansatz vor der Kernmantelperforation, der unter der durchsichtigen Umlenkplatte liegt. Die beiden Kreise sind Bohrungen in der Umlenkplatte. Aufgabe dieser Bilder ist die Verfolgung von Stromfäden im Oberplenum in einer horizontalen Ebene.

Meßstelle M4 (Oberkante Core, horizontale Blickrichtung):

Diese Aufnahme dient zur Beurteilung der Strömung am Elementaustritt **und zwar am Übergang vom Kern zum Brutmantelbereich.** Im Vordergrund ist eine der Instrumentierungsrohrattrappen aus Plexiglas sichtbar, die sich über dem Element 8/1 befindet. Hinten rechts erkennt man die Düsenanordnungen gemäß M1. **Der große dunkle Fleck ist ein Schauglas in der Tankwand. Die Perspektive dieser Aufnahme ist bei einigen Versuchen geringfügig verschoben.**

Meßstelle M5 (Tauchkühlerbereich, vertikale bzw. horiz. Blickrichtung):

Zweck der Aufnahme ist, Aussagen über evtl. sich ausbildende Totwassergebiete im Ringraum zwischen den Tauchkühlern sowie auch über Bypass-Strömungen durch den Ringspalt an der Tauchkühlerkonsole zu gewinnen. Das Bild zeigt die unmittelbar über dem Ringspalt angeordneten 6 Düsen, die symmetrisch zur  $60^{\circ}$ -Ebene, d.h. also auch symmetrisch zu den Tauchkühlern, liegen. Bei einigen Versuchen wurden die Aufnahmen von oben (z.B. beim Referenzversuch), bei anderen durch das Schauglas in der Tankwand gemacht.

Meßstelle M6 (variable Meßstelle):

Mit der Kamera 6 wurden entsprechend der spezifischen Fragestellung bei den einzelnen Versuchen unterschiedliche Bereiche photographiert. In vielen Fällen zeigt M6 einen Blick auf den Tauchkühler durch die seitliche Begrenzungsfläche, wobei insbesondere Strömungen, die außen am Kühler vorbeiziehen, durch zusätzliche Einspritzdüsen erfaßt werden

sollen. Im Versuch 16 mit der Betriebsspiegelhöhe wurden dagegen Kamera und Düsen auf die obere Perforation im Schildtank gerichtet.

C 4. Zeitfolge der Aufnahmen

Es wurden im allgemeinen pro Versuch ca. 20-25 Bildserien aufgenommen, deren zeitliche Folge in der Anfangsphase dichter gewählt wurde als in der quasistationären Endphase. Jede Bildserie besteht in der Regel aus 15 Aufnahmen im Abstand von 1,5 sec. Als Richtzeiten für den Beginn der Serien wurden folgende Zeiten nach dem Einschalten der Heizleistung ( $\tau = 0$ ) vereinbart, die aber bei den einzelnen Versuchen geringen Schwankungen unterliegen können.

Bildserie Nr.	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
Richtzeit (sec)	0	100	200	300	500	650	800	1000	1150	1300

Bildserie Nr.	s11	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18	s19	s20
Richtzeit (sec)	1500	1650	3300	5500	12000	25000	35000	45000	55000	usw.

Für den Referenzversuch sind die Anfangs- und Endzeiten jeder Serie mit der dazugehörigen fortlaufenden Bildnummer in Tab. C-1 gegeben.

## C 5. Zusammenfassung der Bildauswertung

Die Strömungsvorgänge im Oberplenum, die ja bei allen Versuchen ähnlich abliefen, wurden in Abschnitt 4.3.3 für den Referenzversuch beschrieben. Charakteristisch dabei ist, wie die Meßstelle M1 zeigt, daß sich im Oberplenum bereits nach ca. 100 sec eine radial nach außen strömende Oberschicht und eine zum Zentrum hin gerichtete Unterschicht ausbilden. Die Trennfläche, die nicht scharf definiert werden kann, liegt zunächst etwa in  $\frac{2}{3}$  Höhe des OP und verschiebt sich in den ersten ca. 1000 sec in das untere Drittel, wobei dann die untere Schicht nahezu zur Ruhe kommt.

Man beobachtet zu Beginn das Hineinziehen von Farbfäden zunächst in die äußeren Brutelementreihen (vgl. V3B/M1/S2), dann auch in die weiter innen liegenden Elementreihen (vgl. V3B/M1/S3). Bei einigen Versuchen (z.B. V7 u. V 13) wurde auch das Eintreten von Farbfäden in den Zwischenraum zwischen Kernmantel und äußerer Brutelementreihe beobachtet, was die Existenz **einer** Element-Bypass-Strömung unterstreicht. Nach ca. 300 sec tritt kein Kühlmittel mehr von oben durch die Brutelementköpfe. Vielmehr vermischt sich jetzt die Farbe mit dem aus den BE austretenden Strom, bis die Rückströmung in der Unterschicht zur Ruhe kommt.

Im stationären Zustand bleiben Farbreste in Form von Schwaden über einen längeren Zeitraum nahezu bewegungslos einige cm über den Brutelementen sichtbar,

In der innersten Brutelementreihe kommt es zu der Erscheinung, daß ein Farbfaden in einem Brutelementkopf verschwindet und dann wieder nach oben herausgespült wird. In einem Falle dauerte dieser Vorgang ca. 20 sec (vgl. V3B/M4/S13). Das deutet darauf hin, daß dem sehr geringen integralen Durchsatz in diesem Brutelement eine interne Konvektionsströmung überlagert sein muß.

Wie die Meßstelle M3 in Tab. C-3 zeigt, treten vorwiegend an den tiefergelegenen Düsen D7 - D12 im Oberplenum Umfangsströmungen auf. Diese sind räumlich und zeitlich sehr unregelmäßig und **ändern im Verlaufe** eines Versuches mehrmals die Richtung.

Im Ringspalt zwischen Schildtank und Tauchkühlerkonsole wurde im Bereich der 60 °-Modellebene bei den meisten Versuchen eine sehr schwache Aufwärtsströmung beobachtet (vgl. Tab. C-3, M5/S2-S8). Ihr Einfluß auf den Gesamtumlauf ist in Abschnitt 4.2.6 beschrieben.

Tab. C-1: Bildfolge für Versuch 3 B

(Angabe sind ab Serie S 2 nur das erste und letzte Bild)

Bild Nr.	Aufnahmezeitpunkt (sec)	Bildserie u. (Bildzahl)	Bild Nr.	Aufnahmezeitpunkt (sec)	Bildserie u. (Bildzahl)
1	119,7	Probe	136	1200,6	S9B
2	159,8		138	1203,6	(3)
3	201,2		139	1326,0	S10
4	24,2	S1 (15)	153	1346,7	(15)
5	25,6		154	1501,3	S11
6	27,1		168	1522,1	(15)
7	28,6		169	1640,1	S12A
8	30,1		182	1659,3	(14)
9	31,6		183	1700,8	S12B
10	33,0		184	3301,7	(1)
11	34,5		198	3322,5	S13
12	36,0		199	13208,0	(15)
13	37,5		213	13228,7	S15
14	39,0		214	22635,9	(15)
15	40,4		228	22656,6	S16A
16	41,9		229	24619,2	(15)
17	43,4		243	24639,9	S16B
18	44,9		244	71255,2	(15)
19	104,4	S2 (15)	247	71259,7	S21A
33	125,1		248	71301,1	(4)
34	143,9	S3A (11)	258	71316,0	S21B
44	158,7		259	72258,5	(11)
45	200,2	S3B (4)	260	72300,0	S21C
48	204,6		273	72319,2	(1)
49	322,5	S4 (15)	274	72922,0	S21D
63	343,3		288	72942,8	(14)
64	502,6	S5 (15)	289	73818,4	S21E
78	523,3		303	73839,1	(15)
79	642,3	S6A (12)	304	523,3	S21F
90	658,7		316	541,1	(13)
91	700,2	S6B (3)			
93	703,1				
94	823,6	S7 (15)			
108	844,4				
109	1004,5	S8 (15)			
123	1025,3				
124	1142,8	S9A (12)			
135	1159,1				

Tab. C-2: Bildauswertungsprotokoll für den Referenzversuch V3B

Meßst. Bildserie	M1	M2	M3	M4	M5	M6
S1 0-100 sec	Oberplenium, horizontal	Kernmantel, horizontal	Oberplenium, vertikal	Elementoberkante	TK-Ringspalt	M6
S1 0-100 sec	Farbtropfen sinken von den unteren Düsen langsam ab mit ca. 0,13 cm/sec. An D5 deutliche $v_r \approx 0,1$ cm/sec erkennbar. Stromfaden aus D6 bewegt sich schwach aufwärts mit ca. 0,06 cm/sec. Farbe aus D7 bis D12 ballt sich in kleinen Tröpfchen, dort keine Geschw. feststellbar.	Farbfahnen aus D13-D18 sinken vermutlich durch Dichteunterschiede langsam ab mit $< 0,1$ cm/sec. Die Wassergeschwindigkeit in der Nähe der Düsen ist praktisch noch null.	Bestätigt teilweise die unter M1 und M2 gemachten Aussagen, liefert keine zusätzliche Information.	keine zus. Information	Keine Farbeinspritzung.	Meßstelle M6 ist in diesem Versuch nicht vorhanden.
S2 100-200 sec	Deutliche Rückströmung an D7-D12 sichtbar ( $v_r \approx -0,5$ cm/sec), Strömung tritt in 1. und 2. BU-Reihe ein (vgl. auch M4). Trennlinie zw. Vorwärts- und Rückwärtsströmung liegt in Höhe zwischen D3 und D4. Farbfäden aus D4 bis D6 werden schnell verwirbelt. Geschwindigkeit bei D4: $v_r \approx 1$ cm/sec, bei D6: aufwärtsgerichtet (vgl. M1/S1).	Farbfahnen ziehen jetzt langsam zu Kernmantelperforation hin (ca. 0,1 cm/sec), nachdem sie insgesamt um ca. 2 cm abgesunken waren (vgl. S1) (laminare Strömung).	An D13-D15 Umfangskomponente in positiver $\varphi$ -Richtung erkennbar, bei D16-D18 hingegen radiale Strömung in die Kernmantelperforation.	Bestätigt Aussage über die Rückströmung gem. M1.	Keine Farbeinspritzung.	
S3 200-300 sec	Rückströmung an D1-D3 und D7 - D12 hat sich verstärkt gegenüber S2. Rote Fäden scheinen jetzt bis zur 10. Elementreihe (bzw. 5. Reihe von außen) durchzugreifen (vgl. M4). Oberhalb von D3 starke Verwirbelung, mittl. Geschwindigkeit kann nur geschätzt werden (ca. 1,3 cm/sec aus M3 ermittelt).	Farbfahnen erreichen erstmals Kernmantelperforation, Geschw. in der Perf. nicht bestimmbar, da in den Bohrungen selbst noch starke Beschleunigungen vorhanden.	An D13 - D15 Umfangsströmung auf $v_\varphi \approx 0,1$ cm/sec angewachsen. An den hinteren Düsen D16 - D18 ist hingegen $v_\varphi \approx 0$ .	Geschwindigkeits-Abschätzung vgl. M1	Geschwindigkeit an Düsen D19 - D24 nahezu gleich null (Hieraus darf nicht geschlossen werden, daß auch die Strömung durch die Schildtankbohrungen noch null ist!)	
S4 300-500 sec	Dicke der vorwärts strömenden Schicht hat sich verbreitert, d.h. an Düsen D2, D3 sowie an D7 und D8 ist Strömung jetzt vorwärtsgerichtet, wenngleich Geschw. dort sehr gering ist. An D3: $v_r \approx 0,5$ cm/sec an übrigen $v_r < 0,1$ cm/sec	Zweiter Farbstoß verhält sich genau wie in S1 und S2 beschrieben. Die ersten Farbschwaden verschwinden jetzt in Perf. Strömung in die Perf. erfolgt zunächst noch aus wandnahen Bereichen, denn Geschw. in der Nähe der Düsen ist noch sehr gering.	Strömung an D6 ist jetzt langsamer ( $v_r \approx 0,6$ cm/sec) als unter M1/S3 beschrieben. Folgerung: Strömung im OP ist nicht quasistationär, was auch während der Versuche beobachtet wurde.	Es hat den Anschein, daß Farbfäden nicht mehr in BU verschwinden, sondern sich im OP mit dem Strom aus dem Kern vermischen.	Keine Anzeichen von Totwasserbildung zw. den Kühlern.	
S5 500-650 sec	Verwirbelung in der Oberschicht des Oberpleniums ist jetzt so stark, daß keinerlei quantitative Aussagen mehr möglich sind. Das qual. Bild ist wie in S4 beschrieben.	Farbe wird jetzt stärker erfaßt und benötigt vom Düsenaustritt bis in die Perf. ca. 20 sec. (entspr. mittl. Geschw. von 0,3 cm/sec) wobei Geschw. in Nähe der Perf. zunimmt. Farbtropfen sinken kaum noch ab. Tendenz zur Umfangsströmung noch vorhanden (wie bei M3/S3).	Blaue Farbwolken sind nur vor dem Raster sichtbar, wo die höhergelegenen Düsen D4-D6 liegen.	Aussage unter S4 wird bestätigt.	Keine Anzeichen von Totwasserbildung zw. den Kühlern.	

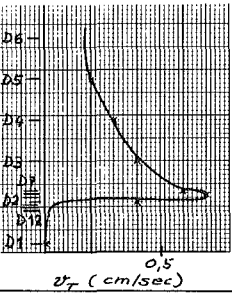
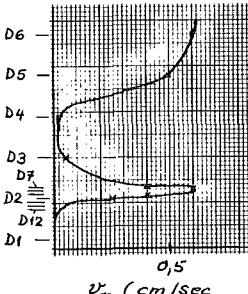
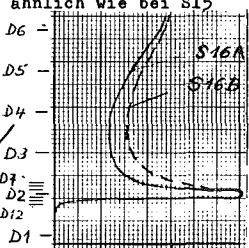
Tab. C-2 (Forts.)

Bildauswertungsprotokoll für den Referenzversuch V3B

Meßst.	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Bildserie	Oberplenum, horizontal	Kernmantel, horizontal	Oberplenum, vertikal	Elementoberkante	TK-Ringspalt	
S6A und S6B 650-800 sec	Geschwindigkeit bei D3: $v_r \approx 0,2$ cm/sec D2: $v_r \approx 0,1$ cm/sec, D7: $v_r \approx +0,12$ cm/sec D10-D12: $v_r = -0,2$ bis $0,1$ cm/sec  laminäre Strömung. Absinkender Farbfaden aus D2 deutet im weiteren Verlauf Rückströmung an. Übergang von Vorwärtsströmung zu Rückwärtsströmung liegt etwa in Höhe von D2, mit kleinen Schwankungen.	Keine nennenswerte Veränderung gegenüber S5  Bemerkung zur Zeitkontrolle: Serie S6B scheint nach den Aufnahmen eine direkte Fortsetzung von S6A zu sein. Die 42 sec Pausenzeit zwischen der letzten Aufnahme von S6A und der ersten von S6B sind nicht erkennbar (Erklärung?)				
S7 800-1000 sec	Geschw. an D2 ist jetzt deutlich positiv (0,2 cm/sec), hingegen wird Farbfaden von D3 teilweise mit 0,4 cm/sec in Richtung Corezentrum bewegt. Ein anderer Teil desselben Fadens bleibt vorwärtsgerichtet. Dies Beispiel in Verbindung mit den Erscheinungen gemäß M3/S4 und M1/S4 bis S6 zeigt: Strömung im OP, insbesondere in Grenzzone zw. Vor- und Rückströmung, ist nicht quantitativ in Form von Geschwindigkeitsfeldern auswertbar. Aber qual. Ergebnis: Oberschicht (oberhalb etwa von D2 bzw. D3) verwirbelt mit mittl. Geschw. um 1,2 cm/sec (örtl. auch 2 cm/sec aus M3 gemessen), Rückströmung in Unterschicht ca. -0,3 cm/sec	Etwa wie unter S5 beschrieben	Geschw.bestimmung an einzelnen Farbwolken über 2-3 Bilder möglich. An drei verschiedenen Farbwolken $v_r \approx 2$ cm/sec ermittelt (vgl. M1). Mehr Information ist hieraus kaum zu erhalten.	Kein Farbeintritt in BUKöpfe.	Farbfäden sind praktisch ohne Bewegung, d.h. eine Bypass-Strömung durch Ringspalt zw. Kühlerkonsole und Schildtank ist in diesem Bereich auch nicht andeutungsweise vorhanden.	
S8 1000-1150 sec	Keine wesentliche Änderung gegenüber S7	wie bei S5	Umfangsströmung gem. S3 schwächt sich ab	wie bei S7		
S9A und S9B 1150-1300 sec	Leistungsreduzierung macht sich noch nicht bemerkbar	wie bei S5	Praktisch keine Umfangsströmung unterhalb der Umlenkplatte	Farbschwaden ziehen mit ca. 0,25 cm/sec in Richtung Corezentrum, kein Eintauchen in BU	wie bei S7	
S10 1300-1500 sec	Keine wesentl. Änderungen gegenüber S7	wie bei S5	Umfangsströmung unterhalb d. Umlenkplatte wieder vorhanden (vgl. S3)	wie bei S7		
S11 1500-1650 sec	Geschw. bei D3: $v_r \approx 0,4$ cm/sec D2: $v_r \approx 0,3$ cm/sec D7: $v_r \approx 0,2$ cm/sec alles laminar, D4 u. D5: $v_r < 1$ cm/sec verwirbelt. Geschw. ist also in der verwirb. Schicht deutlich kleiner geworden, (vgl. S7) in der laminaren Schicht jedoch größer (vgl. S6 u. S7)	An Düsen D13 und D14 jetzt leichte Aufwärtsströmung in Düsennähe erkennbar, gegenüber schwacher Abwärtsströmung früher (vgl. S1 bis S4)	wie bei S10	wie bei S7	Erstmals Farbe in größerer Entfernung vom Düsenmund (> 5+10 cm) sichtbar, die stark verwirbelt wird. In Nähe der Schildtankwand in Höhe der Düsen keine nennenswerte Strömung	
S12A und S12B 1650-3300 sec	Ähnlich wie bei S11	Geradlinige Strömung von Düsen D16-D18 in Perforation, leichter Auftrieb bei D13-D15 (vgl. S11)	wie bei S10	wie bei S9	wie bei S11	

Tab. C-2 (Forts.)

Bildauswertungsprotokoll für den Referenzversuch V3B

Meßst. Bildserie	M1 Oberplenum, horizontal	M2 Kernmantel, horizontal	M3 Oberplenum, vertikal	M4 Elementoberkante	M5 TK-Ringspalt	M6
S13 3300-5500 sec	<p>Geschw. bei</p> <p>D1: <math>v_r \approx 0</math>                      D2: <math>v_r \approx 0,4</math> cm/sec                      D3: <math>v_r \approx 0,4</math> cm/sec                      D4: <math>v_r \approx 0,3</math> cm/sec                      D5: <math>v_r \approx 0,2</math> cm/sec                      D7: <math>v_r \approx 0,6</math> cm/sec                      D8: <math>v_r \approx 0,7</math> cm/sec                      D9: <math>v_r \approx 0,4</math> cm/sec                      D10-D12: <math>v_r \approx 0</math></p> <p>Zeichnet man hiermit ein Geschw.profil, ergibt sich folgendes Bild. Auffallend ist, daß Strömung im ganzen Bereich laminar zu sein scheint.</p> 	<p>Farbe benötigt jetzt für die ersten 3 cm nach Austritt aus Düsen etwa 10 sec, für die restlichen 3 cm bis zur Perf. etwa 6 sec. Schwache Umfangsströmung, aber im Gegensatz zu früher (vgl. M3/S3, M3/S10) jetzt in <u>negativer</u> <math>\varphi</math>-Richtung</p>	<p>Geringe Umfangsströmung in neg. <math>\varphi</math>-Richtung an Düsen D7-D12 erkennbar (wie auch an D13-D18, vgl. M2)</p>	<p>Farbschwaden über d. 8. Elementreihe steigen auf. Geschw. nicht eindeutig feststellbar, jedoch vermutl. <math>&lt; 0,5</math> cm/sec. Einzelner Farbfaden zieht sich in El. 9/1 etwas ein (ca. 5 cm) und kommt dann wieder heraus. Vorgang dauert etwa 20 sec. Erscheinung konnte während des Versuches im "Gleichgewichtszustand" häufig beobachtet werden.</p>	wie bei S11	
S15 12000-25000 sec	<p>Obere Schicht im Oberplenum ist wieder verwirbelt. Geschw.profil hat sich gegenüber S13 völlig verändert, vgl. Abbildung</p> 	<p>Strömung scheint gegenüber S13 wieder etwas langsamer zu sein, etwa wie bei S5. Schwache Umfangsströmung wie bei S13</p>	<p>Geschw. gemäß M1 können teilweise bestätigt werden. Parallaxenfehler sind unbedeutend.</p>	wie bei S13	wie bei S11	
S16A und S16B 25000-35000 sec	<p>Geschwindigkeitsprofil im Oberplenum qual. wie bei S15 mit deutlich höheren Werten an D3 und D4. Auffallend ist die rel. hohe Geschw. an den Düsen D7 bis D9.</p> 	<p>Ähnlich wie bei S15</p>	<p>Umfangströmung beginnt sich wieder umzudrehen gegenüber S13, also in pos. <math>\varphi</math>-Richtung</p>	<p>ähnliche Erscheinungen wie bei S13</p>	wie bei S11	
S21A, S21B, S21C, S21D		<p>Keine nennenswerten Veränderungen gegenüber S16, Feinheiten im Geschwindigkeitsprofil könnten bei Bedarf noch etwas herausgearbeitet werden</p>			keine Aussage möglich	
S21E, S21F, S21G 65000-75000 sec	<p>Geschwindigkeitsprofil hat wieder mehr die Form wie bei S15</p>	<p>Strömung scheint sich weiter zu verlangsamen, quantitative Aussagen kaum möglich</p>	keine wesentliche Aussage	keine Aussage	keine nennenswerte Strömung in Düsenhöhe, in größerer Entfernung Verwirbelung (vgl. S11).	

Tab. C-3: Vergleich der Bildauswertung für die Versuche V3B, V7, V13, V16, V17

Meßst. Bildserie	M1 Oberplenum, horizontal	M2 Kernmantel, horizontal	M3 Oberplenum, vertikal	M4 Elementoberkante	M5 TK-Ringspalt	M6 Tauchkühler
S 1 0-100 sec	An den unteren Düsen ballt sich die Farbe in kleinen Tröpfchen zusammen, die langsam absinken; bei V13 in den Kernmantelspalt.  Mit Ausnahme von V16 ist für alle Versuche eine Vorwärtsströmung an D6 erkennbar, ebenso bei: V3B an D5 V7 an D4 u. D5 V13 an D4 u. D5 Die Geschwindigkeiten sind in allen Fällen klein.	Alles wie beim Referenzversuch.	Keine zus. Information.	Keine zus. Information.	V7: Farbfäden bewegen sich radial nach außen. V13: Farbe aus allen Düsen bewegt sich langsam aufwärts.	V13: Farbe aus D16 strömt durch die Schildtankbohrungen und sinkt auf die Umlenplatte.
S 2 100-200 sec	Bei allen Versuchen, mit Ausnahme von V16, ist eine Vorwärtsströmung im oberen Teil des Oberplenums mit Verwirbelung sichtbar.  Bei allen Versuchen, mit Ausnahme von V13, ist eine Rückströmung an den unteren Düsen erkennbar.  Bei V13 bewegen sich die Farbfäden senkrecht abwärts.  Bei V16 senkt sich die Farbe von allen Düsen in Richtg. Kern, laminar	Alles wie beim Referenzversuch.	Alles etwa wie beim Referenzversuch, jedoch bei V16 ist $v_{\varphi}$ neg.	Bestätigt M 1.	Bei V13 und V 16 strömen aus allen Düsen die Farbfäden im TK-Ringspalt abwärts.  B V17 steigt die Farbe langsam auf.	Für V13 wie bei S1; bei V16 u. V17 sinkt die Farbe aus den Düsen langsam ab.
S 3 200-300 sec	Alles wie beim Referenzversuch. Aber bei V16 ist die Rückströmung im oberen Teil stärker geworden und bleibt laminar.	Alles wie beim Referenzversuch.	V3: $v_{\varphi} > 0$ V7: $v_{\varphi} > 0$ V16: $v_{\varphi} < 0$ V17: $v_{\varphi} > 0$  V16: Verwirbelung im ob. Bereich des Oberplenums sichtbar.	Starke Verwirbelung über den Kernelementen.	V3B u. V7: Keine Bewegung in Düsenhöhe. V17: Farbe steigt langsam auf. V13 und V16: Starke Aufwärtsströmung im TK-Ringspalt.	V13: Die Farbe strömt aus allen Düsen in den Tauchkühler.
S 4 300-500 sec	V 3B, V7, V17: Die Dicke der vorwärtsströmenden Schicht hat sich verbreitert, wie beim Referenzversuch. V13: Im Gegensatz zu übrigen Versuchen herrscht jetzt Rückströmung von unten bis D5. V16: Farbe strömt rückwärts ziemlich horizontal.	Alles wie beim Referenzversuch.	Fast keine Umfangsströmung mehr.	Bestätigt Aussage des Referenzversuches.	V3B, V7, V17: Keine Anzeichen von Totwasserbildung. V13: Die Aufwärtsströmung ist schwächer geworden. V16: Keine Veränderung, Farbe verhält sich ähnlich wie Rauch.	V13: Farbe verwirbelt sich gleich an den Düsen, verschiebt sich aber kaum. V16: Farbe strömt zu den Schildtankbohrungen u. tritt später durch diese hindurch (Rückwärtsströmung).
S 5 500-600 sec	V13: Jetzt hat sich die Vorwärtsströmung verbreitert und ist mit V3B, V7, V17 vergleichbar. Für diese Versuche wird die Verwirbelung stärker	Alles wie beim Referenzversuch, mit Ausnahme von V16, bei dem die Farbtropfen ein wenig absinken.	V16: $v_{\varphi} < 0$ V17: Nur an D3 starke $v_{\varphi} > 0$	Keine zus. Information.	Wie bei S4.	V13: Keine Veränderung. V16: Pos. Umfangsströmung u. Rückwärtsströmung. V17: Geringe Abwärtsströmung.
S 6 650-800 sec	Mit Ausnahme von V16, wo überall eine Rückströmung herrscht, alles ungefähr wie beim Referenzversuch.	Mit Ausnahme von V7, wo die Farbtropfen ein wenig absinken, alles wie beim Referenzversuch.	V13: $v_{\varphi} < 0$ (2-3 cm rad. Abweich.) V16: $v_{\varphi} < 0$ V17: wie bei S5	Keine zus. Information.	Wie bei S4, mit Ausnahme von V16, wo jetzt an D21-D23 die Farbe durch die Schildtanklöcher gerade in Richtg. Kern strömt.	V13: ohne Veränderung. V16: D25 Vorwärtsströmung, D26 u. D27 Rückwärtsströmung zum Zentrum hin.
S 7 800-1000 sec	Mit Ausnahme von V16, wo überall eine Rückströmung herrscht (Farbwolken), alles ungefähr wie beim Referenzversuch.	Mit Ausnahme von V16 u. V17, wo die Farbtropfen ein wenig absinken, alles wie beim Referenzversuch.	V7: große Umfangsströmung. V13: $v_{\varphi} < 0$ (2-3 cm rad. Abweich.) V16: $v_{\varphi} < 0$ V17: $v_{\varphi} < 0$ .	Keine zus. Information.	V13: Farbfäden horizontal u. überall hin gerichtet. Für die anderen Versuche keine Veränderung.	V13: Farbe aus den Düsen verwirbelt sich und strömt aufwärts. V16: Von allen Düsen Strömung durch Schildtank zum Zentrum hin.

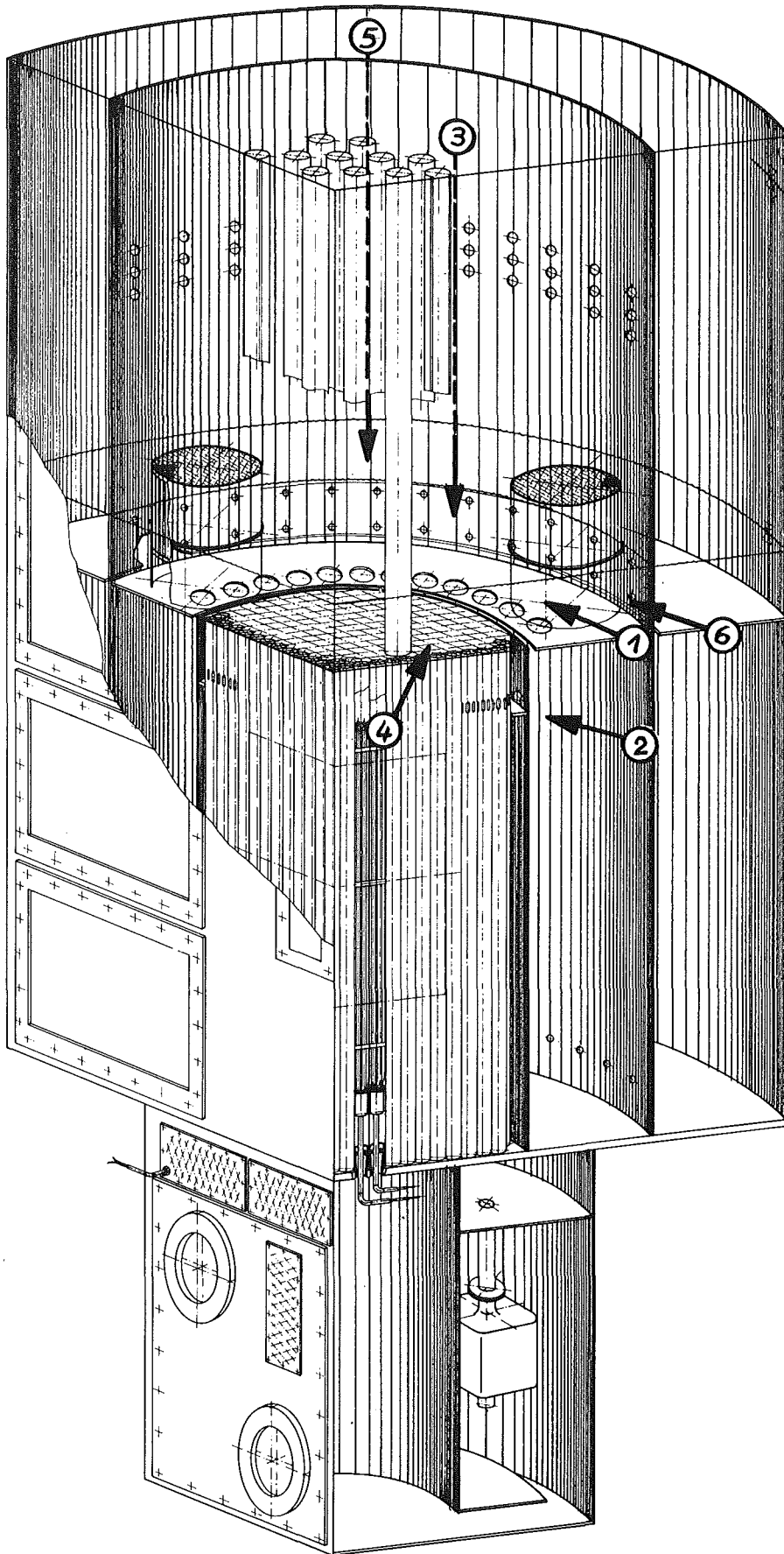


Tab. C-3 (Forts.): Vergleich der Bildauswertung für die Versuche V3B, V7, V13, V16, V17

Meßst. Bildserie	M1 Oberplenum, horizontal	M2 Kernmantel, horizontal	M3 Oberplenum, vertikal	M4 Elementoberkante	M5 TK-Ringspalt	M6 Tauchkühler
S 8 1000-1150 sec	Mit Ausnahme von V16, wo an D6 eine Vorwärtsströmung erkennbar ist, keine Veränderung gegenüber S7.	Wie bei S7.	V7: Umfangsströmung V13: D13 u. D14: $v_{\varphi} < 0$ D16 u. D17: $v_{\varphi} > 0$ V16: $v_{\varphi} < 0$ V17: $v_{\varphi} < 0$	Keine zus. Information.	V7: Aufwärtsströmung im Kühlerbypass. V17: Aufwärtsströmung. Für die anderen Versuche keine Veränderung.	V13: Keine Bewegung mehr. V16: wie bei S6
S9A S9B 1150-1300 sec	Mit Ausnahme von V13, wo die Geschwindigkeiten kleiner geworden sind, keine Veränderung gegenüber S8. Für V17 keine Bildaufzeichnungen.	Mit Ausnahme von V16, wo die Farbfäden ein wenig absinken, alles wie beim Referenzversuch.	Alles wie bei S8, mit Ausnahme von V16 (jetzt $v_{\varphi} > 0$ ).	Keine zus. Information.	Keine Veränderung gegenüber S8.	V13: Farbe aus den Düsen verwirbelt sich u. strömt aufwärts. Für die and. Vers. keine Veränderung.
S10 1300-1500 sec	V7: Die Geschwindigkeiten sind kleiner geworden. V16: keine Vorwärtsströmung an D6 mehr. Für die anderen Versuche keine Veränderung. Für V17 keine Bildaufzeichnungen.	Wie bei S9.	V7: Umfangsströmung. V13: D13-D15: $v_{\varphi} < 0$ D16-D17: $v_{\varphi} > 0$ V16: D13-D15: $v_{\varphi} < 0$ D16-D18: $v_{\varphi} > 0$	Keine zus. Information.	Keine Veränderung.	V16: D25-D26 Vorwärtsströmung. D27 Rückwärtsströmung. Für die anderen Versuche keine Veränderung.
S11 1500-1650 sec	V3B: Geschwindigkeit in der turb. Schicht kleiner geworden, in der laminaren Schicht größer. V7: Die Geschwindigkeiten sind klein. V13: Die Geschwindigkeiten sind größer als früher. V16: An D5 jetzt eine Vorwärtsströmung. Für V17 keine Bildaufzeichnungen.	Wie bei S9.	V7: Große Umfangsströmung. V13: $v_{\varphi} > 0$ V16: D13-D15 u. D18: $v_{\varphi} < 0$ D16 u. D17: $v_{\varphi} > 0$	Keine zus. Information.	Keine Veränderung.	V13: Farbe verwirbelt sich und strömt horizontal um den Tauchkühler. V16: Nur an D25 u. D26 Vorwärtsströmung.
S12 1650-3300 sec	V7: Jetzt weniger Verwirbelung als früher. V16: An D6 jetzt eine Vorwärtsströmung u. nicht mehr an D5. V17: Überall Vorwärtsströmung, ausgenommen an D11 u. D12. Für die anderen Versuche keine Veränderung.	Mit Ausnahme von V16, wo an D15 u. D18 die Farbe aufwärts strömt, ist für alle Versuche die Strömung horizontal zu den Kernmantellöchern.	V13: D13-D14 $v_{\varphi} < 0$ D15-D17 $v_{\varphi} > 0$ V16 u. V17: $v_{\varphi} < 0$	Keine zus. Information.	Keine Veränderung.	V16: Farbe aus den Düsen wird gleich verwirbelt. Farbwolken fließen unregelmäßig durch Schildtankbohrungen. Keine Veränderung für die anderen Versuche.
S13 3300-5500 sec	V3B) Geschwindigkeitsprofile sind ähnlich (lam. Strömung) V17: Geschwindigkeitsprofil ähnelt dem in V3B/S15. V16: Überall horizontale Rückströmung mit vielen Farbwolken. (Verwirbelung)	Für alle Versuche strömt die Farbe direkt zu den Kernmantellöchern.	V13: $v_{\varphi} < 0$ , Abweichg. vom Radius 2-3 cm V17: $v_{\varphi} < 0$ , Abweichg. vom Radius 3-4 cm	Mit Ausnahme von V17 ist die Verwirbelung über den Kernelementen für alle Versuche kleiner geworden.	V16: Farbe aus allen Düsen bewegt sich langsam aufwärts u. strömt nur an D23 durch die Schildtankbohrungen. Keine Veränderung für die anderen Versuche.	Keine Veränderung.
S14 5500-12000 sec	Keine großen Veränderungen.	Wie bei S13, mit Ausnahme von V13, wo die Farbe ein wenig absinkt.	Wie bei S13.	Wie bei S13.	V16: Farbe aus allen Düsen bewegt sich langsam u. strömt aufwärts. Keine Veränderung für die anderen Versuche.	V13: Farbe aus allen Düsen verwirbelt sich u. strömt aufwärts. V16: An allen Düsen Vorwärtsströmung.
S15 12000-25000 sec	V3B) V7) ähnlich V17) Für die anderen Versuche keine Veränderung.	V7: Farbfäden steigen hoch, bevor sie die Löcher erreichen. V13: Die Farbe sinkt ein wenig ab. Für alle anderen Versuche keine wesentl. Änderung.	V7: Sehr starke Umfangsströmung, nahezu tangential in pos. $\varphi$ -Richtung V16 u. V17: $v_{\varphi} < 0$	Wie bei S13.	V13: Aufwärtsströmung im Bypass, Fäden werden durch den Strom in pos. r-Richtung gebogen. Keine Veränderung für die anderen Versuche.	V16: An D27 ist jetzt die Farbe bewegungslos, sonst keine Veränderung.

Tab. C3 (Forts.): Vergleich der Bildauswertung für die Versuche V3B, V7, V13, V16, V17

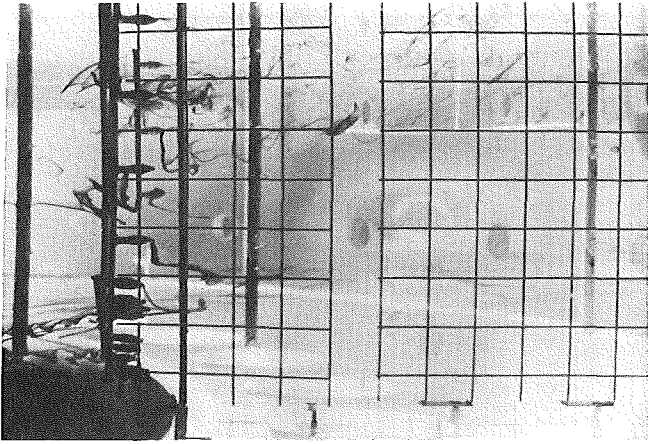
Meßst. Bild- serie	M1 Oberplenum, horizontal	M2 Kernmantel, horizontal	M3 Oberplenum, vertikal	M4 Elementober- kante	M5 TK-Ringspalt	M6 Tauchkühler
S16 25000- 35000 sec	V3B) ähnlich V13) V17) wie V3B/S15 V7 ) V16: ohne Veränderung	Für alle Versuche be- wegt sich die Farbe jetzt gerade zu den Kernmantellöchern.	V3B: $v_{\varphi} > 0$ V7 : D13-D17: $v_{\varphi} > 0$ D18 : $v_{\varphi} < 0$ V13 u. V16: $v_{\varphi} > 0$	Wie bei S13.	V13: An allen Düsen sind die Farbfäden hori- zontal und über- all hin gerich- tet. V17: Aufwärts- strömung. Keine Veränderung für die anderen Ver- suche.	V16: Vorwärts- strömung an allen Düsen, Farbfäden fal- len etwas ab. Keine Verände- rung für V13.
S17 35000- 45000 sec	V16: Nur an den unteren Düsen ist jetzt eine Rückströmung erkennbar. Keine Veränderung gegen- über S16 für die anderen Versuche.	Wie bei S16.	V7: $v_{\varphi} < 0$ V13: $v_{\varphi} > 0$ V16 u. V17: $v_{\varphi} < 0$ , Abweichung vom Radius 3-4 cm.	Die Verwirbel- ung über den Kernelementen ist schwächer geworden.	V17: Sehr ge- ringe Geschwin- digkeit. Keine Veränderung für die anderen Ver- suche.	V13: Farbe strömt laminär schief aufwärts V16: Vorwärts- strömung an al- len Düsen.
S18 45000- 55000 sec	V16: Oberhalb von D2 ist eine kleine Vorwärts- strömung erkennbar. Keine Veränderung für die anderen Versuche.	V13) Die Farbe sinkt V17) ein wenig ab.	Wie bei S17.	Wie bei S17.	V13: Farbe sinkt langsam im By- pass ab. Keine Veränderung für die anderen Ver- suche.	V16: Keine Be- wegung mehr. Keine Verände- rung für V13.
S 19 55000- 65000 sec	V17 ) wie V3B/S15 V7 ) für V7 jedoch an D5 Farbfaden sinkt ab, kleine Rückströmung. V13: jetzt auch wie V3B/ S15 V16: fast keine Vor- wärtsströmung mehr.	Keine Veränderung ge- genüber S18.	Ähnlich wie bei S18.	Wie bei S17.	Wie bei S18.	Keine Bewegung mehr.
S20A 65000- 75000 sec	V7 ) V13 ) wie bei V3B/S15 V17 ) V16: ohne Veränderung	Mit Ausnahme von V17, wo die Farbe am Ende an D14 aufwärtsströmt, keine Veränderung gegenüber S18.		Keine Verwirbel- ung mehr über den Kernelemen- ten.	Wie bei S18.	V13: Farbe sinkt langsam ab.



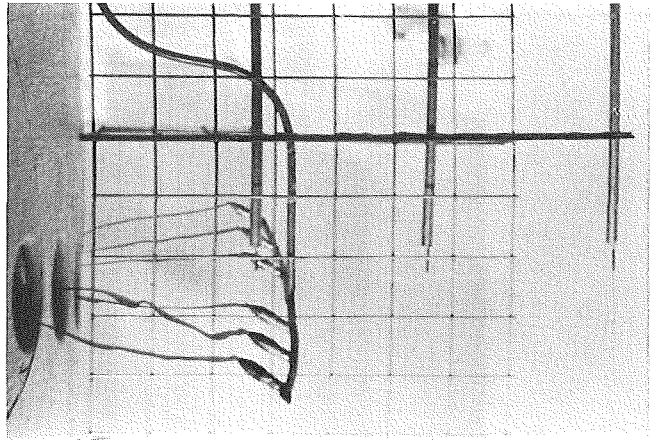
GfK

Modellversuch zum Notkühlsystem SNR 300  
Anordnung der Kameras 1-6

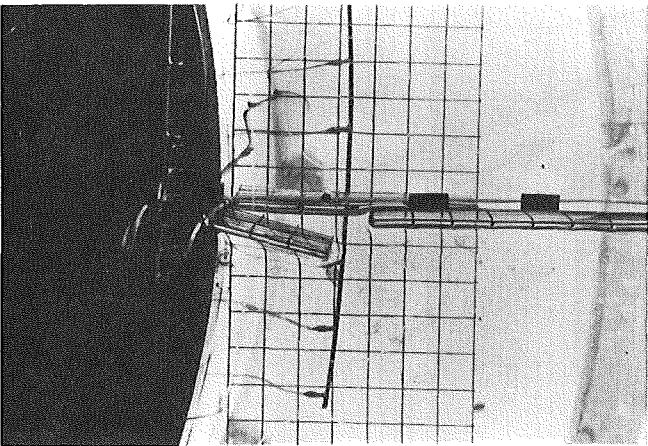
Abb. C-1



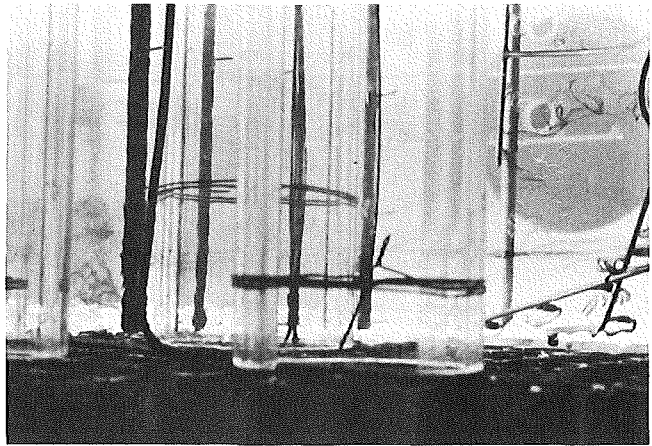
M1: Oberplenum, horizontale  
Blickrichtung



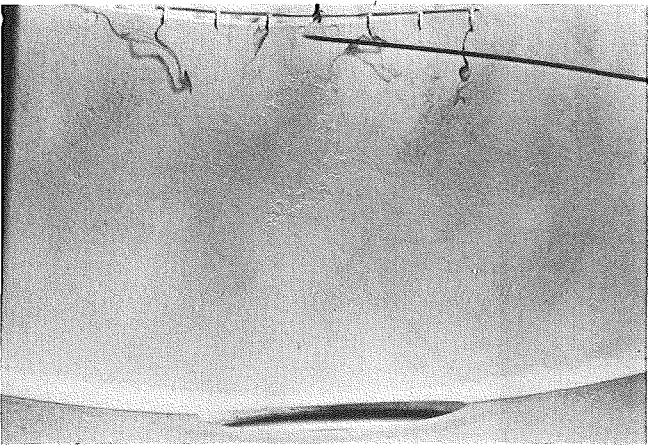
M2: Kernmantel, horizontale  
Blickrichtung



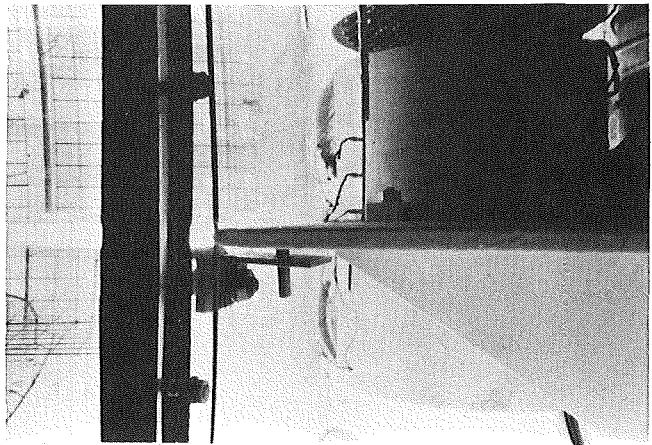
M3: Oberplenum, vertikale  
Blickrichtung



M4: Elementoberkante



M5: Tauchkühlerringspalt,  
vertikale Blickrichtung



M6: Tauchkühler

Abb. C-2 Bildmuster für Meßstellen M1 bis M6  
zur Sichtbarmachung der Strömung  
(Versuch 10,  $\tau = 1350$  sec)