

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Februar 1977

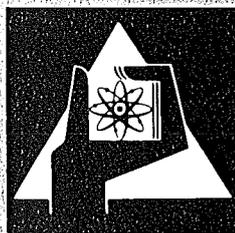
KFK 2353

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

TUFCI

**Eine Versuchsanlage für Experimente zur
Brennstoff-Natrium-Reaktion in
Brennelementgeometrie
(Erste Ergebnisse mit dem Natrium-Injektor)**

H. Beutel



**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 2353

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

TUFCI

Eine Versuchsanlage für Experimente zur
Brennstoff-Natrium-Reaktion in Brennelementgeometrie

(Erste Ergebnisse mit dem Natrium-Injektor)

H. Beutel

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Kurzfassung

Die Sicherheitsuntersuchungen zu den Na-gekühlten Schnellen Brutreaktoren umfassen u.a. Experimente zur Brennstoff-Natrium-Reaktion, bei denen insbesondere die Konversion von Wärmeenergie in mechanische Energie in einem simulierten Brennelement ermittelt werden soll.

Dieser Bericht beschreibt die Entwicklung einer Versuchsanlage, mit der Brennstoff-Natrium-Reaktionen in Geometrien, wie sie für Brennelemente typisch sind, durchgeführt werden sollen. Im Unterschied zu tatsächlichen Brennelementen eines Kernreaktors sind die Wände des Reaktionsraumes für die zu erwartenden Drucktransienten nahezu starr.

Der Natrium- UO_2 -Kontakt wird dabei sowohl durch das Auftreffen des Natriums auf das geschmolzene UO_2 als auch durch Injektion geringer Mengen Natrium in das UO_2 (Startreaktion) hergestellt.

Abschließend wird über ein erstes Experiment berichtet, bei dem 14 Kubikzentimeter Natrium in 3 kg flüssiges Urandioxyd injiziert wurden.

ABSTRACT

TUFCI, AN EXPERIMENTAL FACILITY TO STUDY THE MOLTEN-FUEL-COOLANT-INTERACTION IN A FULL SCALE FUEL ELEMENT

The safety-investigations for the Liquid-Metal-Fast-Breeder-Reactor also include experiments for fuel-coolant-interactions (FCI) in a simulated fuel element to find out the conversion factor from thermal to mechanical energy.

This report describes the development of an experimental facility which makes it possible to produce an FCI in a geometry, which is typical for a fuel element. Other than in real fuel elements the wall of the reaction tube is rigid.

Fuel-sodium contact is achieved by the impact of sodium and molten UO_2 as well as by the injection of smaller quantities of sodium into UO_2 (initiating-reaction).

Finally an experiment is described in which smaller quantities of sodium were injected into liquid fuel.

	Seite
4. Versuchsablauf	19
5. Rechnungen mit TIGER VB	21
6. Modellversuche	23
7. Erste Ergebnisse mit dem Na-Injektor	25
7.1 Versuche mit feststehendem Dorn (Vorversuche)	26
7.2 Injektorversuche mit Natrium	27
8. Schlußbetrachtung	28
9. Literatur	30

Anhang:

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabelle 1: Technische Daten Ispra-Anlage	33
Tabelle 2: Technische Daten Ispra-Strahlungssofen	33
Tabelle 3: Technische Daten TUFCl-Na-Vorratstank	33
Tabelle 4: Technische Daten TUFCl-Na-Einspeisevorrichtung	34
Tabelle 5: Technische Daten TUFCl-Sicherheitstank	35
Tabelle 6: Technische Daten TUFCl-Teststrecke	36
Tabelle 7: Technische Daten TUFCl-Druckaufnehmer (Ispra/Kaman)	37
Tabelle 8: Technische Daten TUFCl-Hochtemperatur- Dehnmeßstreifen	38
Tabelle 9: Technische Daten Kraftaufnehmer	39
Tabelle 10: Technische Daten Thermoelemente	40
Tabelle 11: Technische Daten Tauchheizpatronen (Na-Vorratstank)	41
Tabelle 12: Technische Daten Mantelheizleiter (Test- strecke, Außenheizung, Na-Vorratstank und übrige Komponenten)	41
Tabelle 13: Technische Daten 6 Farben-Punktendrucker	41
Tabelle 14: Technische Daten des Injektorversuchs	42

Abb. 1: Logismus und Verknüpfungen mit weiteren Arbeiten (Schema)	44
Abb. 2: Schmea der Ispra-Versuchsanlage	45
Abb. 3: Schema des TUFCl-Versuchsstandes	46
Abb. 4: Gesamtlängsschnitt der TUFCl-Anlage	47
Abb. 5: Längsschnitt der Na-Einspeisevorrichtung	48
Abb. 6: Draufsicht der TUFCl-Anlage	49
Abb. 7: Ansicht des TUFCl-Versuchsstandes	50
Abb. 8: Transportwagen	51
Abb. 9: Ansicht des TUFCl-Bedienungspultes	52
Abb. 10: Flußschema (Tableau des Bedienungspultes)	53
Abb. 11: Schnitte und Ansichten zur Blende	54
Abb. 12: Schematischer Stromlaufplan der Natrium-Vorrats- tankheizung	55
Abb. 13: Schematischer Stromlaufplan der Anlagenheizungen	55
Abb. 14: Schema der Na-Höhenstandsmeßeinrichtung	56
Abb. 15: Schema über die Meßwerterfassung	57
Abb. 16: Flußdiagramm des Versuchsablaufs	58
Abb. 17: Diagramm über UO_2 -Krustenwachstum (bis 1,6 s)	59
Abb. 18: Diagramm über UO_2 -Krustenwachstum (bis 60 s)	59
Abb. 19: Foto des Modellversuchsstandes	60
Abb. 20: Foto des Modellversuchsstandes	60
Abb. 21: Foto des Natriuminjektors	61
Abb. 22: Injektor-Belastungsdiagramm	61
Abb. 23: Foto des Wolframschmelztiegels	62
Abb. 24: Foto des Modelltiegels	62
Abb. 25: Foto des Wolframtiegels mit Na-Injektor	62
Abb. 26: Diagramm des Druck-Zeitverlaufs während einer Wasserinjektion	63
Abb. 27: Foto (nach 1. Dornversuch)	64
Abb. 28: Foto (Schnitt UO_2 -Regulus des 1. Dornversuchs)	64
Abb. 29: Abdruck des Tiegelbodens nach 1. Dornversuch	64
Abb. 30: Foto des Wolframtiegels nach 2. Dornversuch	65
Abb. 31: Foto des Tiegelbodens nach 2. Dornversuch	65
Abb. 32: Ausschnitte eines High-speed-Films über Injek- torversuche	66

1. Einleitung

Die Arbeiten über die Sicherheit Schneller Natrium-gekühlter Brutreaktoren beinhalten Untersuchungen zur Brennstoff-Natrium-Reaktion (BNR) in einem Brennelement (BE). Solche Reaktionen besitzen das Potential, die nuklear erzeugte Wärmeenergie der Brennstäbe im Schadensfalle teilweise in mechanische Energie umzusetzen. Dieser Schadensfall tritt ein, wenn man postuliert, daß beispielsweise das thermische Fließgleichgewicht in einem BE durch Blockaden, die den Kühlmitteldurchsatz reduzieren, derart gestört wird, daß örtliche Brennstoffüberhitzungen mit Brennstabversagen auftreten, die eine BNR zur Folge haben. Bei dieser Ereigniskette wurde in konservativer Weise unterstellt, daß der Reaktor nicht rechtzeitig abgeschaltet werden kann.

Im Jahre 1965 wurde bereits von Hicks und Menzies / 1 / berichtet, daß hochenergetische explosionsartige Freisetzungsraten auftreten, wenn flüssiges UO_2 und Natrium (Na) fein genug verteilt zusammen vermischt werden.

Über die BNR in einem BE und deren Folgeereignisse sowie mögliche Mechanismen zur Unfallauslösung in LMFBR's (Liquid Metal Fast Breeder Reactor) wurde von Gast berichtet / 2 /, wo anhand von Fehlerbäumen der kausale Zusammenhang dieser Ereignisse diskutiert und ihre Bedeutung für die Sicherheit des Reaktors gewichtet wird.

Zum gleichen Zeitpunkt wurde ein Rechenmodell von Caldarola entwickelt / 3 /, das die BNR in Kanalgeometrie beschreibt. Damit werden in einer Phase A (akustische Phase) enorme Druckspitzen ermittelt, die jedoch von sehr kurzer Dauer sind. In Phase B (Verdampfungsphase), in der die Annahme getroffen wird, daß sämtliche Brennstoffpartikel in einem Dampffilm eingeschlossen sind, ergibt sich, daß die daraus resultierende thermische Isolation zwischen Brennstoff und Natrium starke reduzierende Auswirkungen auf die Energiefreisetzung hat. Die Modellannahmen waren jedoch so konservativ, daß der Nachweis zur Beherrschung

der BNR nicht geführt werden konnte. Weiterentwicklungen waren deswegen notwendig.

Neuerdings ist es möglich, die BNR in Kanalgeometrie mit veränderlichen Brennstoff- und Natriummassen zu rechnen / 4 /, wobei vor allem die drei Parameter: Fragmentationszeit, Durchmischungszeit und Dampfbildungszeit variiert und die jeweils geleistete Arbeit bzw. der entstandene Druck in dem verdämmten System ermittelt wird.

Jüngere Rechnungen mit dem BNR-Modell Murti / 5 / zeigen, daß die Energiefreisetzung der BNR in einem BE unter konservativen Annahmen maximale Druckspitzen zwischen 350 und 400 bar in der Zeit von 2,5 bis 6,5 ms nach dem ersten Kontakt zur Folge haben. Dabei ging man von der konservativen Annahme aus, daß die Brennstoffmasse, die jeweils neu in die Reaktionszone eintritt, in Partikelgrößen von $117\mu\text{m}$ momentan zerlegt und mit dem gleichen Volumenanteil flüssigen Natriums vermischt wird.

Außerdem bleibt in diesem Modell unbeachtet, daß der lichte Querschnitt des BE's, aus dem die Brennstäbe weggeschmolzen sind, wesentlich größer ist als die freie Strömungsquerschnittsfläche des BE's. Es kann deshalb mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, daß die Druckspitzen im Schadensfalle niedriger liegen werden, zumal die Wände des Brennelementkastens, trotz gegenseitiger Abstützung im Reaktor, nachgiebig sind.

Eine Reihe weiterer theoretischer Arbeiten zu diesem Thema zeigen, daß Kenntnislücken über die Auswirkungen einer BNR in einem Be vorhanden sind und der endgültige Nachweis zur Beherrschung der BNR bis heute noch nicht geführt werden konnte. Deshalb wurden die TUFCE-Experimente geplant / 6 /, die besonders pessimistische Ergebnisse erwarten lassen und die unter Einbeziehung der Sprengversuche an Core-Modellen und entsprechenden Code-Rechnungen den Sicherheitsnachweis erbringen sollen / 7, 9 /.

2. Philosophie und Zielvorstellungen

Brennstoffschmelzen innerhalb größerer LMFBR-Subassembly-Bereiche und Wiedereintritt des zuvor ejektierten Natrium in die Schmelzzone gilt allgemein als unwahrscheinlich. Die Vorgänge vom Zeitpunkt Natriumsieden hinter Blockaden über den Dryout bis hin zum Niederschmelzen größerer BE-Bereiche sind jedoch besonders rasch ablaufende Vorgänge, die möglicherweise von dem Reaktorsystem nicht frühzeitig genug detektiert werden können. Deshalb ist die BNR in Brennelementen nicht auszuschließen, weshalb der Nachweis geführt werden muß, daß eine solche BNR im ungünstigsten Fall tolerierbare Schäden im Reaktorkern verursachen kann.

Dieser Nachweis wird, wie bereits erwähnt, durch entsprechende Rechnungen und durch Experimente erbracht, die mit maßstabsgetreuen Kernmodellen durchgeführt werden / 7, 9 /. Im Zentrum des Modells wird eine BNR simuliert, in dem man einen Gasgenerator in einem Core zündet. Somit ist es möglich, eine obere Grenze des Druckverlaufs herauszufinden, bei der die verursachten Schäden noch tolerierbar sind. In Parallelversuchen, den sogenannten overstrong wrapper tests, wird die Eichung des Generators vorgenommen, in dem die gleiche Charge in einem dickwandigen Rohr gezündet wird, das axial durch eine Blende teilweise verblockt ist.

Durch Vergleich der von der TUFICI-Anlage zu erwartenden Druckzeit-Verläufe mit denen der oben erwähnten overstrong wrapper tests, wird man in der Lage sein, den einzelnen Sprengversuchen äquivalente BNR-Abläufe zuzuordnen. Voraussetzung für einen solchen Vergleich ist, daß die BNR-Versuche in gleicher BE ähnlicher Geometrie mit gleicher Verdämmung durchgeführt werden. Da die Verdämmung der overstrong wrapper tests so festgelegt wurde, daß sie einer fünfzigprozentigen Reduzierung der freien Kühlungsstromquerschnittsfläche eines BE's entspricht, war an die TUFICI-Anlage die Bedingung geknüpft, die freie Strömungsquerschnittsfläche des Reaktionsrohres um den gleichen Betrag zu reduzieren.

Nachdem die Ergebnisse für Sicherheitsbeurteilungen des SNR 300 verwendet werden sollen, ist der Ablauf der BNR-Versuche so zu steuern, daß die Ergebnisse zum Pessimistischen hin tendieren (realistisch-pessimistische Ergebnisse). Deshalb wurde der UO_2 -Natrium-Kontakt sowohl von oben durch Auftreffen von Natrium auf das UO_2 als auch durch Natrium-Injektion in das UO_2 vorgesehen. Eine weitere Voraussetzung für die Planung der BNR-Versuche war, daß eine in Ispra existierende Tankanlage verwendet werden sollte.

Damit waren die notwendigen Grundlagen für die Entwicklung der TUFICI-Anlage gegeben:

- a) BNR-Versuche in BE-Geometrie (identisch mit overstrong wrapper tests)
- b) Verblockung des Reaktionsrohres entspricht der 50 % Verblockung des freien Strömungsquerschnitts eines BE's
- c) Erzeugung möglichst realistisch-pessimistischer Ergebnisse durch Na-Injektion und totaler Radialverdämmung
- d) Die Experimentieranlage muß in das italienische Ispra-Anlage-system integriert werden können.

Da das Brennstoffinventar eines BE's mehrere Kilogramm beträgt, war es notwendig, die TUFICI-Anlage so zu konzipieren, daß diese UO_2 -Menge im erschmolzenen Zustand mit Na reagieren kann. Es kann somit der im BNR-Experiment gemessene Druckzeit-Verlauf dem, der bei den overstrong-wrapper-Versuchen gemessen wurde, direkt zugeordnet und entsprechend bewertet werden.

Im Einzelnen stellten sich folgende Versuchsziele als wichtig heraus:

1. Bestätigung, daß die bei den Sprengversuchen bisher verwendeten Druckzeit-Verläufe jene Druckzeit-Verläufe, die bei einer BNR entstehen, in konservativer Weise beschreiben.
2. Festlegung von realistischen Druckzeit-Verläufen für eventuell notwendige spätere Sprengversuche an Coremodellen zum endgültigen Sicherheitsnachweis für den SNR 300.

3. Definition typischer Druckverläufe als Input für theoretische Modelle zur dynamischen Coreverformung infolge einer BNR / 6 /.
4. Ermittlung des mechanischen Wirkungsgrades von typischen BNRs.
5. Verifizierung theoretischer BNR-Modelle bzw. Bestimmung der Anfangsparameter für realistisch-pessimistische BNR-Modelle.

Das Schema in Abb. 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen theoretischen und experimentellen Arbeiten, in dem die TUFCI-Experimente ein Element darstellen.

3. Anlagenbeschreibung

3.1 Vorhandene Ispra-Anlage

Seit mehreren Jahren beschäftigt sich die Europäische Forschungsanstalt Ispra sowohl mit Brennstoff-Natrium- als auch mit Brennstoff-Wasser-Reaktionen / 8 /.

Die Tankanlage besteht in ihren Hauptteilen aus dem UO_2 -Schmelzofen, der Fallstrecke mit Schleuse, dem Reaktionsbehälter und dem Vorratsbehälter (Abb. 2).

Das zur Reaktion vorgesehene Material wird in einem Wolframtiegel im Strahlungs-ofen geschmolzen und gleitet dann zusammen mit dem Gefäß im freien Fall (nach Passieren der Schleuse) durch die Fallstrecke in den Reaktionsbehälter, in dem eine Umkehrvorrichtung den Tiegel soweit kippt, daß das Schmelzgut abfließen kann. Danach erfolgt die Reaktion mit dem im Reaktions-tank befindlichen Stoff.

3.1.1 Fallstrecke, Reaktions-tank, Vorrats-tank

Zusammen mit dem Schmelzofen und dem Reaktionsbehälter bildet die Fallstrecke eine komplette Einheit, in der ein Plattenventil und zwei Kugelventile eingebaut sind. Der Befehl für die Bestätigung der Schnellschlußventile wird von einem quarzgesteuerten

programmierbaren Zeitgeber erteilt, der seinen Impuls vom herabfallenden Tiegel über einen durchreißenden Draht erhält. Die Schaltzeit der Kugelventile reicht aus, um eine echte Schleusenwirkung zu erzielen, die den Anlagenbetrieb zwischen Ofen und Reaktionsstank bei unterschiedlichen Drücken und verschiedenen Gasen ermöglicht.

Zwischen Reaktionsstank und Vorratsbehälter ist ein Sintermetallfilter eingebaut, das die UO_2 -Partikel bei Na-Ablauf zurückhält. Unmittelbar unter dem Schmelzofen, in Höhe der 5,7 m Bühne ist eine Vakuumanlage am Rohrsystem angeschlossen, die mit zwei Kühlfällen und einer Öldiffusionspumpe ausgerüstet ist. Den Sicherheitsbestimmungen entsprechend führt ein Rohrstutzen des Reaktionsbehälters über eine Berstmembrane in einen Expansionsstank (in Abb. 2 nicht gezeigt). Technische Daten siehe Anhang Tab. 1.

3.1.2 UO_2 -Schmelzofen

Als Wärmequelle für den UO_2 -Schmelzvorgang dient ein Widerstandstrahlungsstank, dessen Heizelement aus einem dreifach geschlitzten Wolfram-Rohr besteht.

Die Leistung ist über einen Transformator von Hand regelbar.

Während des Aufheizvorganges hängt der Wolframtiegel mit dem Schmelzgut an einer U-förmigen Wolframstange im Zentrum des Heizelements. Zum Zweck des Tiegelabwurfs wird die Wolframstange an beiden U-Schenkeln durchgeschmolzen. Die oberen Enden des Heizelements, das aus drei Rohrsegmenten besteht, sind mit einem 50 mm breiten Kontaktring zusammen vernietet, der den elektrischen Sternpunkt des Heizelements bildet.

Technische Daten: siehe Anhang Tab. 2.

3.2 TUFCI-Experimentieranlage

A) Mechanik

Wie schon erwähnt, ist geplant, das TUFCI-Experiment in der Groß-

versuchsanlage in Ispra durchzuführen. Dabei bleibt die gesamte italienische Versuchseinrichtung erhalten; lediglich der Reaktionsbehälter mit dem Transportwagen werden ausgetauscht. Die hier vorgestellte Anlage umfaßt somit Reaktions- bzw. Sicherheitstank mit Teststrecke und Transportwagen, Schema siehe Abb. / 3 /.

Ein Längsschnitt der Anlage zeigt Abb / 4 /.

Steuertechnische Kompliziertheiten wurden nach Möglichkeit vermieden. Deshalb strebte man einen Versuchsablauf an, der von dem herabfallenden Tiegel zwangsgesteuert wird. Lediglich das Signal für die Na-Einspeisevorrichtung wird von einem durchreisenden Draht gegeben. Die übrigen beiden Funktionen wie Schließen der Blende und Na-Injektion durch den Tiegel in das UO_2 erfolgen automatisch und schließen weitere Unsicherheiten aus.

3.2.1 Natrium-Vorratstank

Als Druckbehälter ausgeführt, übernimmt der Vorratstank erstens die Bereitstellung der zur Reaktion kommenden Na-Menge bei entsprechender Temperatur und zweitens die Speicherung einer Argondruckenergie, die das beschleunigte Füllen des Reaktionsrohres bewirken soll.

Eine im IRE entwickelte Na-Höhenstandsanzeige wird im oberen Flanschdeckel NW65 eingebaut.

Um die im Tank eingebauten Heizstäbe vor Trockenbetrieb zu schützen, wurde in den Heizkreis eine Heizverriegelung eingeplant. Technische Daten siehe Anhang Tab. 3.

3.2.2 Natrium-Einspeisevorrichtung

Diese Vorrichtung (Abb. 5) hat die Aufgabe, das im Vorratstank unter Überdruck stehende Natrium im gewünschten Moment in das Reaktionsrohr beschleunigt einströmen zu lassen. Genau genommen sollte in dem Zeitpunkt, in dem der Wolframtiegel auf den Natriuminjektor aufschlägt, das Reaktionsrohr gefüllt und die Rohrleitung zwischen Vorratstank und Reaktionsrohr zur Vermeidung der Rückströmung geschlossen sein. Diese beiden Aufgaben werden von einem Rückschlagventil übernommen, das zwischen Vorratstank und Reaktions-

rohr eingebaut ist und über vier pfeilartig, im rechten Winkel zueinander angeordneten Messerchen, die gegenüber des Ventilkegels angebracht sind, das Schlitzeln einer Berstmembrane bewirken. Angetrieben wird das Ventil, das vom herabfallenden Tiegel gesteuert wird, über einen Pneumatikzylinder, der eine Hubbewegung impulsartig ausführt und danach in seine Ausgangsstellung zurückgeht. Die eingebaute Rückschlagfeder (Werkst. Sanicro 75X), die nach vorheriger Wärmebehandlung für 700 °C zugelassen ist, wurde so ausgelegt, daß erst bei Strömungsstillstand sicheres Schließen gewährleistet ist. Die Abdichtung der Antriebsstange geschieht mit einem Kompensator, wobei im Falle des Bruches die nächste Umgebung vor ausströmendem Natrium durch eine Spezialasbestpackung geschützt bleibt. Technische Daten siehe Anhang Tab. 4.

Zusammen mit dem Natrium-Vorratstank wurde die Na-Einspeisevorrichtung bereits gefertigt, da vor der konstruktiven Festlegung des Reaktionsrohres Modellversuche mit Wasser stattfanden.

3.2.3 Sicherheitstank

Legt man die gesamte Wärmeenergie von 5 kg UO₂ mit 3000 °C und 9 kg Na mit 650 °C zu Grunde und ermittelt den Druckanstieg im Sicherheitstank bei angenommener verlustloser Energieumwandlung in Na-Dampf, so ergibt sich ein Druckanstieg von $4 \cdot 10^5$ N/m² im Tank. Danach wurde der Auslegungsdruck auf $10 \cdot 10^5$ N/m² festgelegt. Um darüber hinaus unvorhersehbaren Druckerhöhungen vorzubeugen, wurde der Sicherheitstank an einen weiteren Tank über eine Berstscheibe angeschlossen, die bei Überschreitung des Sicherheitstankauslegungsdruckes bricht und somit eine Druckentlastung des geschlossenen Systems bewirkt.

Im Sicherheitstank ist die Teststrecke mit ihren zugehörigen Aufnehmern und Zuleitungskabeln untergebracht, die über entsprechende Durchführungsflansche nach außen geführt werden. Am oberen Teil des Tankes sind die Flansche der Fallstrecke, der Na-Einspeisevorrichtung und der Vakuumanlage vorgesehen. Um möglichst kurze

Montagezeiten zu bekommen, wurde die Befestigung des Tankdeckels mit Klammerschrauben ausgeführt. Bei der Konstruktion des Sicherheitstanks auf dem Transportwagen mußte darauf geachtet werden, daß bei Beachtung der vorhandenen ital. Anschlüsse ein guter Kraftfluß vom Reaktionsrohr über entsprechende Stützen in den Betonboden gewährleistet werden konnte, um jegliche Federwirkung beim Aufschlagen des Wolframtiegels auf den Na-Injektor zu vermeiden.

Technische Daten des Sicherheitstanks siehe Anhang Tab. 5.

3.2.4. Teststrecke

Der Ablauf und die zu erwartenden Versuchsergebnisse einer thermischen Wechselwirkung zwischen UO_2 und Na hängen in starkem Maße von dem umgebenden Raum bzw. dessen Verdämmung ab.

Bei der konstruktiven Gestaltung der Teststrecke waren folgende Forderungen zu berücksichtigen:

- radiale Verdämmung (starre Geometrie)
- teilweise axiale Verblockung (identisch mit overstrong wrapper tests)
- anschließbar an die Ispra-Anlage.

Die Verblockung des freien Strömungsquerschnitts eines Brennelements - gemeint ist hier die Querschnittsfläche des Sechskantkastens abzüglich Pins und Abstandshaltern - um 50 %, wird durch eine Blende erreicht, die von dem herabfallenden Tiegel freigegeben und von vorgespannten Zugfedern über das Reaktionsrohr bewegt wird. Der Zugfederwerkstoff Sanicro, ist ein hochwarmfester Federstahl, der den Einsatz nach vorheriger Wärmebehandlung (Ausscheidungshärtung) bis zu 700 °C gestattet.

Die Ermittlung des Impulses während der Na-Ejektion aus dem Reaktionsrohr erfolgt über zwei von einander unabhängigen Meßsystemen in der Meßplatte, die unmittelbar über der Blende angebracht ist.

Die vier auf der verschiebbaren Blende angeordneten Kraftaufnehmer sind vollständig gekapselt und müssen über Ringwellschläuche mit Pressluft gekühlt werden, da die maximale Temperaturbelastbarkeit bei 240 °C liegt. Diese Schläuche dienen auch zugleich als Schutzhülle für die gesamten Meßkabel und Thermoelemente gegen das austretende Natrium.

Auf der Länge der Teststrecke verteilt sind 10 Druckaufnehmer in 5 Ebenen untergebracht, die die Druckzeitverläufe in der Teststrecke während der Reaktion erfassen sollen. Die Zwischenräume sind mit Meßspulen ausgefüllt, die eine Aussage über die Na-Geschwindigkeit während der BNR ermöglichen.

Für ausreichende Abdichtung des Reaktionsrohres im Boden sorgt ein Kegel, der zum Zweck des Na-Ablasses mit Hilfe zweier Pneumatikzylinder angehoben werden kann. Siehe Teilschnitt GG Abb. 4.

Technische Daten des Reaktionsrohres: siehe Anhang Tab. 6.

3.2.5 Ablaufwanne und Na-Auffangbehälter

Der Sicherheitstank kann in zwei Bereiche unterteilt werden, den Na-Expansionsbereich und den Bereich der Meßinstrumentierung. Die Abtrennung erfolgt über einen Axialkompensator Teil 101/26, der Ablaufwanne und dem Auffangbehälter Teil 100 Abb. 4. Der Axialkompensator - Sonderanfertigung der Fa. Metallschlauchfabrik Pforzheim nach Zeichnung IRE 5-80-4-542 - übernimmt dabei den Wärmedehnungsausgleich des Reaktionsrohres. Es muß gewährleistet werden können, daß das Na nach Möglichkeit ohne Rückstände abfließen kann und die Meßinstrumentierung frei von Na-Dampf bleibt. Der Auffangbehälter ist mit einer eigenen Heizungsregelung versehen, so daß die Möglichkeit besteht, den Expansionsraum auszudampfen, wobei das Na im Auffangbehälter gerade noch flüssig gehalten wird und danach über Filter abgelassen werden kann. Es ist jedoch auch möglich, das Na auszufrieren und nach Abnehmen des Sicherheitstankdeckels den Behälter mit dem Na aus der Ablaufwanne auszubauen.

Die Ablaufwanne hat darüber hinaus noch den Zweck, die Aufnahme für vier Einschraubverschraubungen der Kraftaufnehmerkühlungen, Thermoelemente und der vier Zuleitungskabel für die Dehnungsmeßstreifen auf der Meßplatte zu übernehmen (Abb. 6, Schnitt F-F).

3.2.6 Montagewagen

Die in Ispra vorhandene Experimentieranlage wurde so kopiert, daß der Reaktionstank mit seiner gesamten Meßinstrumentierung auf einem Wagen aus dem explosions sicheren und entsprechend klein gebauten Bunker, in dem die Anlage untergebracht ist, herausgehoben werden kann. Das hatte den Vorteil, daß die Dekontaminationsarbeiten und auch alle vorbereitenden Montagearbeiten für das nächste Experiment außerhalb des Bunkers unter erleichterten Bedingungen durchgeführt werden konnten. Dieses System wurde bei der Entwicklung der TUFCl-Anlage mit einer kleinen Änderung übernommen (Abb. 2 und 7). Die Änderung bestand darin, daß zur Erleichterung der Reaktionsrohrmontage in ca. 1 m Höhe eine Bühne vorgesehen wurde, die auch eine Erleichterung der Wartungsarbeiten an Aufnehmern und Durchführungen mit sich brachte. Der Aufstieg auf die Bühne erfolgt über eine Treppe, die auf dem Boden durch eine mitlaufende Rolle abgestützt wird. In Höhe der Reaktionsrohrmitte sind Querschnittsverstärkungen vorgesehen, um eine möglichst unnachgiebige Abstützung des Reaktionsrohres gegen den Betonboden zu erreichen, Abb. 8.

B) Meß-Regel- und Steuertechnik

Die Aufgabe, die mit dieser Experimentieranlage gelöst werden soll, stellt hohe Anforderungen an die Meß- und Steuertechnik, denn zum einen ist das zu messende Ereignis extrem kurz und zum anderen bringen die hohen Temperaturen des UO_2 und des Na Schwierigkeiten mit sich. Beides war bei der Auswahl der Meßaufnehmer zu berücksichtigen. Um von Anfang an Fehlermöglichkeiten auszuschalten, wurde ein besonderes Augenmerk auf die Einfachheit gelegt. Nachdem jedoch die Durchführung eines Experimentes in weniger als 1,3 Sekunden erfolgt, ist der automatische Versuchsablauf zwingend. Mit dem Ausklinken des Wolframtiegels, der mit flüssigem UO_2 gefüllt ist, wird der Versuchsablauf eingeleitet. Auf dem

Wege in das Reaktionsrohr wird von dem Tiegel ein frei gespannter Draht durchgerissen, der einen elektrischen Impuls erzeugt und den Weg des Natriums in das Reaktionsrohr freigibt. (Eine genauere Beschreibung des Ablaufs siehe 4)

Die Gesamtübersicht des Schaltschranks wird in Abb. 9 und eine detaillierte Aufzeichnung des Anlagen-Fließschemas, wie es für die Schrank-Frontplatte vorgesehen ist, in Abb. 10 gezeigt.

3.2.7 Druckmessung

Der Druckverlauf in Abhängigkeit von der Zeit und der Höhe ist in diesem Experiment die wichtigste Information, da er die Berechnung der freigesetzten Energie während der BNR gestattet und als Vergleichsgröße für den gemessenen Druck-Zeitverlauf bei den Simulationsversuchen (overstrong wrapper tests / 7 /) benützt werden soll. Insgesamt wurden zehn Aufnehmer in fünf Ebenen verteilt - zwei verschiedene Systeme pro Ebene - auf dem Reaktionsrohr so montiert, daß die Membranoberfläche ca. 1 mm hinter der Reaktionsrohrinnenkant zurückspringt. Zum Zeitpunkt des Experimententwurfs standen zwei Druckaufnehmer-Typen zur Auswahl, System Kaman und eine Eigenentwicklung aus Ispra, die den gestellten Anforderungen gerecht wurden.

Technische Daten der Druckaufnehmer: siehe Anhang Tab. 7.

3.2.8 Messungen an der Blende

Zur Beurteilung der freigewordenen mechanischen Energie genügt allein nicht die Kenntnis des Druckverlaufs, da dieser in großem Maße von der Geometrie bzw. von der Verdämmung des umhüllten Systems abhängt und deshalb nur eine Relativaussage liefert. Vielmehr gilt es, die geleistete mechanische Arbeit $\int pdV$ so genau wie möglich zu bestimmen.

Gerade hier liegt jedoch die Schwierigkeit. Es ist z.B. nicht möglich, exakte Meßwerte für die Geschwindigkeit des durch die Blende getriebenen Natriums zu erhalten, da erstens bei Aufschlag

des Tiegels auf den Injektor noch Natrium (das Gasblasen mit sich führen kann) durch die Einspeisevorrichtung in das Reaktionsrohr nachströmt und zweitens ab dem Zeitpunkt der Startreaktion (Na-Injektion in das flüssige UO_2) das Na als Zweiphasengemisch durch die Blende getrieben wird, so daß eine kontinuierliche Geschwindigkeitsmessung ausgeschlossen ist. Umso wichtiger war es, eine Meßmethode einzusetzen, die es ermöglicht, gleichzeitig an einer bestimmten Stelle des Reaktionsrohres den Füllungsgrad und die Geschwindigkeit der bewegten Na-Mengen zu messen, wobei jeweils die Strömungsrichtung erkennbar sein muß. Da für diesen Fall momentan kein Marktangebot vorhanden ist, wurde eine bereits in der GfK bestehende Methode weiterentwickelt und für diesen Zweck nutzbar gemacht / 10 /.

Weitere Informationen liefern die an der Prallplatte montierten vier Kraftaufnehmer Teil 236 und Dehnungsmeßstreifen, Teil 282 Abb. 11, die über die bekannte Beziehung des Impulssatzes eines Flüssigkeitsstrahles $\Sigma F_x = \Sigma \rho \cdot Q \cdot \Delta W_x$ und der gemessenen Geschwindigkeit durch die Blende eine bestätigende Aussage des Massendurchsatzes liefern.

3.2.8.1 Impuls an der Prallplatte (Dehnung)

Die Erfassung der Dehnungen auf den vier Biegearmen der Prallplatte wie sie auf der Draufsicht in Abb. 11 zu sehen ist, sollen Aufschluß über die Kraft des Flüssigkeitsstrahles bzw. des Massendurchsatzes durch die Blende geben. Dabei konnten Dehnungsmeßstreifen (DMS) im üblichen Sinne nicht verwandt werden, weil Temperaturen zwischen 500 und 560 °C auftreten. Verwendet wurden Hochtemperatur-DMS, die auf das zu vermessende Material direkt punktgeschweißt werden und deshalb die selben Wärmedehnungseigenschaften aufweisen müssen wie der Grundwerkstoff. Die Biegearme wurden als "Träger gleicher Biegebeanspruchung" ausgeführt, so daß die Positionierungstoleranz von ± 3 mm auf dem Biegearm keinen Einfluß auf den Meßwert hat.

Technische Daten der Hochtemperatur Platin-Wolfram-Halbbrücken: siehe Anhang Tab. 8.

3.2.8.2 Impuls an der Prallplatte (Kraftaufnehmer)

Die vier Kristall-Meßunterlegscheiben, die über den vier Biegearmen der Prallplatte montiert werden, sind piezoelektrische Kraftaufnehmer, die bei Einwirken einer mechanischen Kraft ein elektrostatisches Ladungssignal abgeben. Die Meßwerte dienen hauptsächlich als Referenzgröße für die gemessenen Dehnungen an den Biegearmen und erfüllen darüberhinaus die Möglichkeit der Meßbereichserweiterung. Im Schnitt A-A Teil 236 der Abb. 11 ist der gekapselte Einbau des Aufnehmers gezeigt. Vier Druckfedern sorgen dafür, daß die Prallplatte mit genügend großer Kraft gegen die Meßunterlegscheiben gedrückt werden und eine gewollte Vorspannungskraft ausüben, die unmittelbar vor dem Ereignis auf "0" abgeglichen werden kann. Die Kapselung war notwendig, um ein Kühlungssystem installieren zu können, da die max. Temperaturbelastbarkeit der Meßscheiben bei 240 °C liegt. Die technischen Daten der Meßunterlegscheiben: siehe Anhang Tab. 9.

3.2.9 Na-Geschwindigkeit und Füllungsgrad im Reaktionsrohr

Wie schon erwähnt, konnte kein Marktprodukt für diesen Zweck eingesetzt werden, so daß die Notwendigkeit bestand, eine brauchbar erscheinende Methode weiterzuentwickeln und sie für diesen Fall verfügbar zu machen.

Hierzu eignete sich das im Institut für Reaktorbauelemente entwickelte Handmeßgerät zur Feststellung von Natrium hinter austenitischen Wänden / 10 /. Schwierigkeiten ergaben sich durch die Rohraußentemperatur von 560 °C und die Rohrwanddicke von 20 mm. Nach mehreren "Vorversuchen" war es jedoch möglich, die gewünschte Doppelinformation - Geschwindigkeit und Füllungsgrad - zu erhalten. Das durchströmende Na konnte mit verschiedenen großen Messing-Körpern die in einem PVC-Kolben eingegossen und mit Preßluft durch das Rohr geschossen wurden gut simuliert werden, da Messing annähernd die gleichen Permeabilitätseigenschaften wie flüssiges Na aufweist.

Die Meßmethode beruht auf dem Prinzip der Dämpfung eines in Resonanz befindlichen L-C-Generators, dessen Spannungsänderungen - hervorgerufen durch Eindringen eines elektrisch leitenden Stoffs

in den Spulenbereich (z.B. Na) - zur Ermittlung des Füllungsgrades im Reaktionsrohr entsprechend ausgewertet werden können. Das zweite System, das in derselben Spulebene eingebaut ist und auf dem Induktionsprinzip beruht, liefert Meßwerte für die Na-Geschwindigkeit mit Richtungserkennung. Durch diese Doppelinformation wird es möglich, eine Aussage des Na-Durchsatzes über die Zeit bei veränderlichen Füllungsgraden von Ebene zu Ebene machen zu können. Die Spulen sind als komplette Einheit zwischen den Druckaufnehmerpositionen über Tellerfederpakete außerhalb der Reaktionsrohrisolierung im oberen Drittel montiert (Abb. 4).

3.2.10 Temperatur-Messung und Regelung

3.2.10.1 Messungen an der Prallplatte

Es sind insbesondere die Temperaturen in drei Bereichen von Interesse, erstens in der Umgebung der eingebauten Kraftaufnehmer, zweitens an der Unterseite der vier Meßarme und drittens in der Umgebung der HTDMS auf der Oberseite der Prallplatte. Die acht Thermoelemente der zuletzt genannten Bereiche müssen schnelle Temperaturänderungen erfassen können und werden entsprechend dünn ausgeführt. Zweck dieser Messungen ist es, den Temperatureinfluß auf die Biegesteifigkeit der Meßarme bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigen bzw. eliminieren zu können. Die Temperaturen der Kraftaufnehmer dienen lediglich zur Überwachung, um Zerstörung der Aufnehmer durch Temperaturüberschreitung zu vermeiden. Die dünnen Thermoelemente, die für alle drei Bereiche verwendet werden, hatten darüberhinaus noch den Vorteil der leichten Handhabung bei der Montage durch die Kühlungsleitungen und des geringen mechanischen Widerstandes bei der Blendenbewegung.

Technische Daten der Thermoelemente: siehe Anhang Tab. 10.

3.2.10.2 Messung und Regelung der übrigen Anlagekomponenten

Die Thermoelemente im Vorratstank sind längere Zeit dem Na ausgesetzt und keinen schnellen Temperatur-Schwankungen unterworfen, deshalb wurde ein stabil auswechselbares Element in einer Tauchhülse gewählt. Die Schaltung mit der entsprechenden Temperatur-

Vergleichsstelle ist in Abb. 12 gezeigt. Die Regelung erfolgt über einen elektronisch arbeitenden Zweipunktregler mit eingebauter Regelabweichungsanzeige und Elementbruchüberwachung.

Zur Regelung der übrigen Heizkreise werden Mantelthermoelemente mit 1,0 mm Außendurchmesser und NiCr-Ni-Thermodrähte, die bis 700 °C einsetzbar sind, verwendet. Jedem Regelkreis sind zwei Elemente zugeordnet. Die Regelung erfolgt ebenfalls über 2-Punktregler des gleichen Typs (Bitric M2AHB). Abb. 13 zeigt den schematischen Schaltplan der Heizkreise.

Technische Daten der Thermoelemente: siehe Anhang Tab. 10.

3.2.11 Heizung Na-Vorratstank mit Verriegelung

Nachdem der Tank während des Einströmvorgangs des Na in das Reaktionsrohr als Druckenergiespeicher funktioniert und aus diesem Grunde der Tank in den meisten Fällen nur bis zum unteren Drittel mit Na gefüllt wird, hat man von einer Außenheizung für den Betrieb bis 650 °C Abstand genommen. Lediglich für den Aufheizvorgang, vor dem Füllen des Tanks, wird eine Außenheizung bis ca. 150 °C in Betrieb genommen.

Technische Daten dieser Heizung: siehe Anhang Tab. 12

Für den Versuchsbetrieb bis 650 °C sind im Vorratstank Tauchheizpatronen vorgesehen, die eine Heizflächenbelastung von 18 Watt/cm² aufweisen. Der Einbau der sechs Patronen in den Tank erfolgt von oben, so daß die eingesetzte Dichtung dem Natrium nicht ausgesetzt ist.

Die heizbaren Längen der Patronen blieben auf 100 mm beschränkt, so daß sie in der gewünschten Na-Menge eben eintauchen.

Um Trockenbetrieb der Patronen zu vermeiden wurde eine Heizungsverriegelung vorgesehen, die auf dem Prinzip der Schwingkreisdämpfung beruht und ohne Komplikationen außerhalb der Isolierung an den Tank angebracht werden kann. Erst wenn der Na-Flüssigkeits-

Spiegel eine bestimmte Höhe erreicht hat, ist der Kreis entriegelbar und die Heizpatronen können eingeschaltet werden. Technische Daten der Heizstäbe: siehe Anhang Tab. 11.

3.2.12 Heizungen der Teststrecke und aller übrigen Anlagenkomponenten

Der Grund für die Verwendung von Miniatur-Mantelheizleitern liegt darin, daß insbesondere im Bereich der Teststrecke enge Platzverhältnisse vorlagen. Die Lösung wurde in einem Gewinde gesehen, das auf das Reaktionsrohr aufgeschnitten wird. Entsprechende Längsnuten ermöglichen die Rückführung der Anschlüsse. Jeder Abschnitt zwischen den Druckaufnehmerebenen entspricht einem Heizkreis, dem zwei Thermoelemente und ein Regler zugeordnet sind. Ein Element dient zur Regelung, das andere zur Registrierung auf dem Punktdrucker. Die kalten Enden der Heizleiter des Reaktionsrohrs und des Auffangbehälters sind Lemoso-Stecker, die auf die Durchführungen in den Flanschen 118 und 119 (Abb. 4) aufgeteilt werden. Um die Reinigung des Reaktionsraumes möglich zu machen, wurden neben der Na-Einspeisevorrichtung auch die Bereiche des Sicherheitstankdeckels und der Ablaufwanne beheizbar gemacht. Alle Heizkreise außerhalb des Reaktionsraumes werden mit 2,0 cm dicker Isolationswolle isoliert.

Technische Daten der Mantelheizer: siehe Anhang Tab. 12.

3.2.13 Steuerung Na-Eintritt und -Abfluß

Nachdem sich die Methode der Schleusenventilsteuerung der Ispra-Anlage bewährt hat, wurde die Steuerung des Na-Eintritts mit dem gleichen System gelöst. Der herabfallende Tiegel durchreißt einen dünnen, gespannten Kupferdraht in der Fallstrecke und liefert einen sicheren Impuls, der hier zur Aussteuerung eines 5/2-Wegeventils benützt wird. Dieses Ventil öffnet den Eintritt des Pneumatikzylinders, Teil 20, der eine Hubbewegung ausführt und nach Erreichen seiner Endstellung einen Impuls an das 5/2 Wegeventil

zurückliefert, das danach seine Ausgangsstellung wieder einnimmt. Diese Ventilstellung bewirkt wiederum, daß auch der Pneumatikzylinder in seine Ausgangsstellung zurückgeht und keine Behinderung des Rückschlagventils bewirken kann. Bei dieser Hubbewegung wird eine Membrane geschlitzt, die dann den Querschnitt für den Na-Eintritt in das Reaktionsrohr freigibt. Die Einströmzeit des Na vom Impuls bis zum Auftreffen auf den Injektor im Reaktionsrohr beträgt 630 ms. Die Gesamtfallzeit des Tiegels durch die Rohrstrecke von 5942 mm beträgt 1210 ms.

Wenn nun erreicht werden soll, daß beim Auftreffen des Tiegels auf den Injektor bereits Na im Reaktionsrohr vorhanden ist, muß der Impulsdraht 4730 mm über dem Injektor angebracht werden. Das entspricht einer Fallzeit von 695 ms. Es strömt somit 65 ms lang Na in das Reaktionsrohr ein, wenn die Na-Injektion in das flüssige UO_2 erfolgt.

Zum Zweck des Na-Ablasses aus dem Reaktionsrohr nach dem Versuch wird der Kegel im Boden des Reaktionsrohres über zwei Pneumatikzylinder angehoben. Die beiden Zylinder, Teil 263, Abb. 4, Schnitt GG sind über Knopfdruck bedienbar.

3.2.14 Na-Höhenstand im Vorratstank

Die mit dem UO_2 zu reagierende Natriummenge wird unter Luftabschluß aus einem weiteren Tank mit Gasüberdruck in den Vorratstank eingebracht. Da die reagierende Menge für die Ergebnisauswertung eine wichtige Rolle spielt, war es notwendig, eine entsprechende Füllstandanzeige in dem Tank vorzusehen. Hierzu eignete sich das im IRE entwickelte Na-Füllstandsmeßgerät / 11 /, bei dem die Verstimmung einer Trägerfrequenzmeßbrücke - hervorgerufen durch die Induktionsänderung zweier Spulen, die in die Höhe des Natriumfüllstands gebracht werden - zur Ermittlung des zuvor geeichten Höhenstands herangezogen wird. Die Meßgenauigkeit liegt bei ± 1 mm Höhenstand, was einer Menge von ± 130 ml entspricht. Die Drahtqualität der Spulen müßte für diesen speziellen Anwendungsfall verbessert werden, da momentan der Betrieb nur bis 500 °C möglich ist. Der Einbau erfolgt über den oberen Flansch des Vorratstanks mit Nennweite 65 mm. In der Warte

befindet sich das geeichte Anzeigegerät, von dort auch die Induktionsspulen auf und ab bewegt werden können. Abb. 14 zeigt das Prinzipschaltbild dieser Meßanordnung.

3.2.15 Meßwerterfassung

Die Instrumentierung der Teststrecke umfaßt insgesamt 34 Meßstellen, die während des Ereignisses registriert werden. Mit entsprechenden Verstärkungsfaktoren, die kontinuierlich verstellbar sind, können die Meßwertausgänge an die einzelnen Kanäle des Magnetbandes angepaßt werden. Um eventuellen Brummüberlagerungen vorzubeugen, erfolgt die Verstärkerversorgung über Trenntransformatoren. Die zu erfassenden Meßdaten werden wie in dem Schema Abb. 15 gezeigt, analog auf Magnetband z.B. (Bell u. Howell CPR 4010) aufgezeichnet und nach Digitalisierung im IRE über das Programmsystem SEDAP / 12 / ausgewertet. Zur Bandkanaleinsparung werden die acht Thermoelemente der Hochtemperaturdehnmeßstreifen auf einen PCM-Modul übertragen das bei einer Bandgeschwindigkeit von 60 Zoll/s die Bandbreite von 500 Hz übertragen kann und zur Erfassung der Temperaturänderungen ausreicht. Um unmittelbar nach dem Versuch die wichtigsten Informationen sofort zu erhalten und darüberhinaus bei eventuellen Bandstörungen nicht auf Ergebnisse verzichten zu müssen, wurde ein Lichtpunktschreiber neben den beiden Bandmaschinen vorgesehen, der diese Meßwerte parallel dazu registriert. Zur Registrierung der geregelten 23 Heizkreistemperaturen des Na-Vorratstanks, der Na-Einspeisevorrichtung und der Teststrecke sind sechs Punktdrucker, wie in Abb. 9 gezeigt, vorgesehen. Technische Daten: Siehe Anhang Tab. 13.

4. Geplanter Versuchsablauf

In diesem Abschnitt wird detailliert auf die einzelnen Ereignisse eingegangen, die vom Zeitpunkt der Tiegelfreigabe bis hin zur BNR automatisch ablaufen.

Zunächst wird einiges über die UO_2 -Vorbehandlung und dem Schmelzprozess gesagt, wie es in der Ispraanlage bereits praktiziert

wird. Vor dem Versuch wird das UO_2 -Pulver in Pellets gepreßt und in einem Wolframtiegel längere Zeit bei $1800\text{ }^\circ\text{C}$ unter ständigem Abpumpen gesintert. In der Regel dauert das Ausheizen und Sintern von ca. 3 kg UO_2 , was in periodischen Aufheiz- und Abkühlphasen erfolgt, rund acht Stunden. Danach beginnt der eigentliche Schmelzprozess unter Inertgas-Atmosphäre. Durchschnittlich werden hierfür zwei Stunden für die Aufheizphase und eine Stunde für die UO_2 -Schmelzphase benötigt. Zu dem Zeitpunkt, in dem das UO_2 im W-Tiegel geschmolzen ist, befinden sich die Komponenten der TUFICI-Anlage wie Teststrecke, Na-Vorratstank und Einspeisevorrichtung auf dem gewünschten Temperaturniveau zwischen 300 und $560\text{ }^\circ\text{C}$. Nach Überprüfung einiger wichtiger Anlagenkomponenten an Hand einer Checkliste werden sämtliche Verstärker noch einmal abgeglichen und die Registriergeräte eingeschaltet. Danach ist die Anlage für die Experimentdurchführung startbereit.

Im folgenden wird der Ablauf beschrieben. Zuerst wird ein Thermoschild unterhalb des Wolframtiegels zur Seite bewegt. Danach ist die Fallstrecke bis zur Schleuse frei. Nach Durchschmelzen der Aufhängung gleitet das auf $3000\text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizte Schmelzgefäß im freien Fall in die Rohrstrecke, wobei unmittelbar unterhalb des Ofens ein quer gespannter Kupferdraht durchgerissen wird. Dieser Impuls wird an einen quartzesteuerten Geber weitergeleitet, der die Steuerung der Schleusenventile übernimmt. Dabei wurde darauf geachtet, daß eine echte Schleusenwirkung erzielt wird, denn zum einen könnte bei Gaseinbruch in die TUFICI-Anlage der freie Fall des Tiegels behindert werden und zum anderen besteht die Gefahr, daß durch Lufteinbruch im Ofen das Heizelement zerstört wird. Auf seinem Wege durch die Rohrstrecke durchreißt der Tiegel einen zweiten Draht, der die Aussteuerung eines $5/2$ Wegeventils übernimmt, das die Betätigung des Pneumatikzylinders an der Na-Einspeisevorrichtung zur Folge hat. Dieser wiederum führt eine Hubbewegung aus, bei der das Rückschlagventil eine Membrane schlitzt, die den Einströmquerschnitt zwischen Na-Vorratstank und Reaktionsrohr freigibt. In der Zeit, in der das unter Überdruck stehende Natrium in den Ringkanal bzw. in das Reaktionsrohr einströmt, bewegt sich der Tiegel beschleunigt

nach unten, tritt in den Fangkorb ein, der von der Blende über Federn vorgespannt in das Reaktionsrohr eingeklemmt wird, löst ihn aus seiner Einklemmung und schlägt schließlich auf den Na-Injektor auf. Durch die kinetische Energie, die der Tiegel in diesem Moment hat, wird die Sollbruchstelle des Tiegelbodens von dem Hohldorn des Injektors durchbrochen. Seine Geschwindigkeit beträgt rund 10 m/s, so daß von diesem Zeitpunkt an für das Eindringen des 60 mm langen Hohldorns in das flüssige UO_2 ca. 6 ms vergehen.

Zu dem Zeitpunkt, in dem der Tiegel mit seiner verbleibenden Restenergie den mit Na gefüllten Injektor (Axialfaltenbalg) axial zusammendrückt und durch den Hohldorn eine Na-Injektion bewirkt, strömt bereits ca. 60 ms lang Na von oben in das Reaktionsrohr ein. Die Injektion kann als Startreaktion betrachtet werden, bei der das UO_2 aus dem Tiegel herausgeschleudert und fragmentiert wird. Es wird angenommen, daß das fragmentierende UO_2 in Form von kleinen Tröpfchen mit dem herabströmenden Natrium in Kontakt kommt und die Brennstoff- Natrium-Reaktion einleitet. Die Blende ist zu diesem Zeitpunkt geschlossen und bewirkt eine Teilverblockung des Reaktionsrohres. Es wird erwartet, daß mehrere Druckstöße auftreten, die bewirken, daß ein Großteil des Na durch die Blende nach oben angetrieben wird. Über die entsprechenden Aufnehmer erfolgt die Registrierung der Meßwerte, und zwar insbesondere die Druckverläufe, die Na-Geschwindigkeiten in den verschiedenen Reaktionsrohrebenen mit deren Füllungsgrad, der Impuls auf der Prallplatte und die Temperaturen der Biegearme. Sie ermöglichen bei der Auswertung eine Beurteilung der BNR hinsichtlich ihrer Energiefreisetzungsrates bzw. ihres Wirkungsgrades. Ein Flußdiagramm, das den Versuchsablauf stichpunktartig darstellt, wird in Abb. 16 gezeigt.

5. Rechnungen mit TIGER VB

Der Erfolg des Experiments zur BNR hängt in starkem Maße von der Startreaktion ab, die durch die Injektion einiger Kubikzentimeter Na in das flüssige UO_2 bewirkt wird. Hierzu ist es notwendig, daß der auf 3000 °C aufgeheizte Wolframtiegel, der mit flüssigem UO_2 gefüllt ist, von einem Hohldorn an einer Sollbruchstelle auf

dem Boden durchbrochen wird. Durch die kinetische Energie, die der Tiegel nach 6 m Fallhöhe noch besitzt, dringt der Hohldorn so weit in das UO_2 ein, bis der Injektor nach axialer Zusammendrückung Na aus dem Hohldorn austreten läßt und die Injektion bewirkt.

Das Problem lag nun darin, daß zum einen das Schmelzgefäß in der Aufheizphase intakt bleiben soll und die Sollbruchstelle im Boden somit nicht beliebig dünn ausgeführt werden konnte. Zum anderen darf der Tiegelboden während seiner Fallzeit sich nicht so weit abkühlen, daß die zwischenzeitlich sich gebildete UO_2 -Kruste das Eindringen des Hohldorns erschweren oder möglicherweise verhindern kann. Des weiteren war von Interesse, mit welcher Krustendicke im Schmelzgefäß zu rechnen ist, die u.U. die UO_2 -Fragmentation unmöglich macht.

Deshalb wurden instationäre Rechnungen mit dem Wärmeleitungs-Computer-Code-Programm TIGER VB für den Wolframtiegel durchgeführt, der mit 3 kg UO_2 gefüllt war / 13, 14 /. Ziel war es, Ergebnisse über das UO_2 -Krustenwachstum auf dem Tiegelboden und auf der Oberfläche im Schmelzgefäß zu erhalten und einen guten Überblick über die Temperaturen auf der Sollbruchstelle des Wolframbodens zu bekommen.

Bei der Durchführung war von Vorteil, daß der Tiegel als Rundkörper ausgeführt ist, so daß er mit dem UO_2 in rotationssymmetrische Nodes eingeteilt werden konnte. Die während der Erstarrung entstehende Latentwärmeentwicklung blieb bei der Rechnung nicht unberücksichtigt. Nachdem in dem Code die Wärmeentwicklung nicht automatisch berücksichtigt wird, war es notwendig, zum Zeitpunkt der Phasenumwandlung Wärmequellverläufe den einzelnen Nodes explizit zuzuordnen, die identisch sind mit dem Integral der Latentwärmemenge der betreffenden Nodes.

Die Rechnungen zeigten, daß die UO_2 -Krustenbildung auf dem Tiegelboden bis zu 7 mm anwachsen kann, wenn vom Öffnen des Ofen-Thermoschildes bis zum Aufschlag auf dem Injektor ca. 60 Sekunden vergehen, wie es bisher im Ispra-Ofen üblich war. Das bedeutete für das Experiment, daß die Startreaktion in Frage gestellt werden mußte. Dieses Ergebnis wurde durch einen Vorversuch bestätigt, bei dem

der Tiegel auf einem feststehenden Dorn aufschlägt und nur wenige Millimeter in die Sollbruchstelle eindringt. Nach entsprechenden Ofenänderungen konnte diese Zeit auf 4 Sekunden verkürzt werden, so daß nur noch eine Kruste entsteht, die im Zehntelmillimeterbereich liegt und für das Experiment akzeptabel erscheint. Der Beweis konnte mit dem 2. Dornversuch und mit einem Experiment erbracht werden, bei dem der Injektor getestet wurde und 14 Kubikzentimeter Na in das UO_2 injizierte.

Die Ergebnisse über das Krustenwachstum werden im Anhang Abb. 17 und 18 gezeigt.

6. Modellversuche im Plexiglasrohr mit Wasser

Vor Beginn der Anlagenkonstruktion waren Modellversuche notwendig, bei denen insbesondere der Strömungsverlauf in das Reaktionsrohr, die Funktionstüchtigkeit des Natriuminjektors und die Synchronisierung versuchsspezifischer Ereignisse näher untersucht wurden. Das Reaktionsrohr und die Fallstrecke sind in Plexiglas aufgeführt. Um möglichst wirklichkeitsnahe Strömungsverhältnisse zu bekommen und eine realistische Synchronzeit mit dem Tiegel zu erhalten, sind Na-Vorratstank, Na-Einspeiseeinrichtung, Rückschlagventil und Berstmembrane im Original gefertigt worden. Abb. 19 und 20.

Ziel der Modellversuche war es:

- a) Ermittlung des günstigsten Einström-Querschnitts und Einströmform (das Füllen sollte schnell und blasenfrei im Reaktionsrohr erfolgen)
- b) Ermittlung des optimalen Vordruckes im Na-Vorratstank im Zusammenhang mit Einströmquerschnitt
- c) Ermittlung der Höhe, in der der Impuls für die Na-Einspeisevorrichtung erfolgen muß, um rechtzeitiges, aber auch nicht zu frühes Einströmen des Na in das Reaktionsrohr zu erreichen

d) Optimierung des Na-Injektors (Injektionsmenge im Zusammenspiel mit Antrittsbohrungen des Hohldorns)

In mehreren Versuchen, bei denen das Na mit Wasser simuliert wurde, ergab sich, daß das Füllen des Reaktionsrohres relativ blasenfrei mit einer Rotationsströmung sehr günstig war, die von dem Tangentialwinkel 30° zur Mittelpunktsachse und 30° zur Längsachse über 6 Bohrungen angeregt wurde. Als günstigster Vordruck im Na-Vorratstank erwies sich $3,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Bei höherem Druck wurde die Wassersäule so unruhig, daß das Reaktionsrohr nur teilweise gefüllt werden konnte.

Die Höhe der Impulsgabe für die Na-Einspeisevorrichtung wurde so gewählt, daß zum Zeitpunkt des Tiegelaufschlags auf den Injektor ca. 60 ms Na in das Reaktionsrohr bereits einströmt. Dieser Einströmvorgang bleibt im eigentlichen Experiment so lange erhalten, bis ein erster Druckimpuls das Schließen des Rückschlagventils bewirkt.

Umfangreiche Untersuchungen waren zur Erprobung des Na-Injektors (Abb. 21) notwendig, der in dieser Anlage ebenfalls mit Wasser getestet und optimiert wurde. An Stelle des Wolframtiegels (Abb. 23) trat ein Modelltiegel (Abb. 24) aus mehreren Bleigewichten, dessen Boden aus einer auswechselbaren Bleiplatte bestand, die die geschwächte Sollbruchstelle (Abb. 25) im Wolframtiegel ersetzt. Die Versuche zeigten jedoch, daß die Energie für das Durchstoßen der Sollbruchstelle so klein war, daß sie auf den Ablauf der Ereignisse keinen nennenswerten Einfluß hatte. Als Energie standen 350 J zur Verfügung, die der herabfallende Modelltiegel beim Auftreffen auf die Injektionsnadel hatte und zur Injektion ausgenützt wurde. Dabei ist die Tatsache, daß der Edelstahlaxialfaltenbalg aus mehreren Lagen besteht, von entscheidender Bedeutung, der somit eine Radialfederwirkung hat, die in diesem Moment als Druckenergiespeicher funktioniert. Dieser Energiespeicher bewirkt dabei eine Zeit-Intervallverschiebung zwischen der abnehmenden kinetischen Energie des Tiegels und der steigenden Injektionsenergie der be-

schleunigten Flüssigkeit im Injektor und verhindert damit, daß der Einspritzdruck zu stark ansteigt und keine nennenswerte Injektionsarbeit geleistet wird.

Abb. 22 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm des Injektors bei Axialbelastung, der vor der Messung vollständig mit Wasser gefüllt und danach verschlossen wurde. Bei einem Federweg von 6,8 mm trat eine Axialkraft von $2,1 \cdot 10^4$ N und ein Balginnendruck von $120 \cdot 10^5$ N/m² auf. Das Diagramm läßt deutlich erkennen, daß der vielwandige Axialbalg die Druckenergie bis zu $35 \cdot 10^5$ N/m² zu speichern in der Lage ist, das einem Federweg von 5,5 bis 6 mm entspricht. Die zweite Kurve in diesem Diagramm ist der Verlauf der Federkonstante des entleerten und geöffneten Injektors.

In mehreren Fallversuchen wurde schließlich der Injektor optimiert. Sein Auslegungsdruck beträgt $160 \cdot 10^5$ N/m², der jedoch nicht ausgenutzt werden kann, da die Betriebstemperatur über 500 °C liegt, die die maximale Belastbarkeit auf ca. $80 \cdot 10^5$ N/m² reduziert. Der Druckzeitverlauf während des Aufschlags, wie er in Abb. 26 gezeigt ist, wurde mit einer Hohlornaustrittsquerschnittsfläche von $0,76$ cm² erreicht, wobei der Modelltiegel die Masse von 5200 g hatte und die Fallstrecke 5,1 m betrug. Injektionsflüssigkeit war kaltes Wasser. Legt man die wirksame Querschnittsfläche des Axialbalgs von 14 cm² zu Grunde, so errechnet sich die Einspritzmenge bei 10 mm Hub mit 14 cm³. Diese Menge tritt, wie in Abb. 26 zu sehen ist, in ca. 2 ms aus dem Hohlorn aus, was schließlich einer Einspritzgeschwindigkeit von ca. 90 m/s entspricht. Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß die Injektion bei dem eigentlichen Versuch in die verzögernde UO₂-Flüssigkeit erfolgt, die dem Injektionsdruck entgegenwirkt und in den Modellversuchen nicht untersucht wurde.

7. Injektor-Versuche mit Natrium und UO₂

Der Funktionstüchtigkeitsnachweis des Injektors mit Wasser, wie unter Modellversuche beschrieben, ist keine ausreichende Garantie dafür, daß eine Na-Injektion in das flüssige UO₂ ohne weiteres

möglich ist. Der Unsicherheitsfaktor ist vor allen in dem hydrodynamischen Druck des flüssigen UO_2 zu sehen, der während der Verzögerung des Wolframtiegels beim Aufschlag auf den Injektor im Tiegel aufgebaut wird und überwunden werden muß. Eine weitere Unsicherheit war das Durchstoßen der Sollbruchstelle auf dem Tiegelboden, weil vor allem die genauen Temperaturen und somit die exakten Festigkeitseigenschaften in diesem Moment nicht bekannt sind. Da jedoch dem Injektor in dem TUFICI-Experiment eine wichtige Stellung eingeräumt werden muß, wurden entsprechende Versuche durchgeführt.

7.1 Dornversuche

Bevor der Injektor mit Na getestet wurde, sollten die TIGER-Code-Rechnungen durch entsprechende Vorversuche bestätigt werden. Ziel dieser Versuche war es, zu beweisen, daß ein Dorn, der die geometrische Form des Hohldorns hat, mit seiner ganzen Länge in die Sollbruchstelle des herabfallenden Tiegels und in das flüssige UO_2 eindringt. Zu diesem Zweck ließ man einen Wolframtiegel bei ca. 2850°C mit 3 kg UO_2 gefüllt auf einen feststehenden Dorn aus 6 m Höhe aufschlagen. Dabei betrug die Zeitspanne von dem Moment der Theroschildöffnung im Ofen bis zum Aufschlag auf den Dorn ca. 60 Sekunden. In dieser Zeit konnte der Wolframtiegelboden Wärmeenergie in einen schwarzen Raum abstrahlen. Obwohl die Tiegelzylinderfläche in der Zwischenzeit außen noch geheizt wurde, kühlte sich der Boden so weit ab, daß der Dorn nicht in das UO_2 eindringen konnte. Das Ergebnis war eine geringe Vertiefung in der Sollbruchstelle des Tiegelbodens und ein niedergeschmolzener Dorn wie Abb. 27, 28 und 29 zeigen. Dies war aufgrund der TIGER-Rechnungen zu vermuten und es wurde gefolgert, daß Änderungen an dem Ispra-Strahlungsofen vorgenommen werden müssen. Es galt vor allem, den Theroschild zu beschleunigen und die Tiegelabwurfzeit zu verkürzen.

Der Wiederholungsversuch, der nach entsprechenden Änderungen am Strahlungsofen durchgeführt wurde, fiel positiv aus. Bei diesem Versuch betrug die Zeitspanne vom Öffnen des Theroschilds bis zum Dornaufschlag zwischen 2 und 4 Sekunden. Der Dorn drang mit seiner

ganzen Länge in das UO_2 ein und hinterließ die unveränderte Dorngeometrie, wie Abb. 30 und 31 zeigen. Leider war eine Schnittaufnahme nicht möglich, da das UO_2 in dem teilweise zerbrochenen Tiegel sehr brüchig war.

7.2 Injektorversuch mit Natrium

Nachdem die erwähnten Ofenverbesserungen durchgeführt wurden und der Tiegel vor seinem Abwurf nur noch 4 Sekunden lang Wärmeenergie verlieren kann, bestand eine gute Chance zur erfolgreichen Durchführung der Natrium-Injektion durch den Wolframtiegelboden in das flüssige UO_2 .

Vor dem Einbau in die Versuchseinrichtung wurde der Injektor evakuiert, aufgeheizt und mit Na vollständig gefüllt. Die Versuchseinrichtung bestand dabei aus einem Rohrkreuzstück, das nach unten gut abgestützt und oben an die Fallstrecke der Ispra-Versuchseinrichtung angeflanscht wurde. An einer Seite des Kreuzstückes war ein Schauglas eingebaut, das die Verfilmung des Versuchsablaufes mit einer High-Speed-Kamera ermöglichte. Rechtwinklig hierzu war eine Einrichtung zur Röntgenblitzkinematographie vorgesehen, die ebenfalls mit einer Hochgeschwindigkeitskamera den gesamten Versuchsablauf im Röntgenbild festhalten sollte, um eine Vorstellung über den zeitlichen Ablauf des Fragmentationsprozesses zu erhalten.

Nach Auslösen der Tiegelaufhängung gleitete der Wolframtiegel im freien Fall durch die Strecke und schlug planmäßig auf den Natriuminjektor auf. Aus dem High-Speed Film, der in diesem Bericht ausschnittsweise in Abb. 32 gezeigt wird, ist zu erkennen, daß ca. 1-2 ms nach der Injektion aus der oberen Tiegelöffnung feinverteilter UO_2 herausgeschleudert wird. Eine nachträgliche Untersuchung der UO_2 -Partikel war nur in beschränktem Maße möglich, da es in der Umgebung verspritzt wurde und zum Teil Stahlteile angeschmolzen hatte. Dieser Fragmentationsprozess konnte ca. 30-35 ms beobachtet werden; danach war der Tiegel durch das be-

schlagene Schauglas nicht mehr erkennbar. Aufgrund der Tiegel-differenzgewichte vor und nach dem Versuch konnte die fragmentierte UO_2 -Masse mit 800 Gramm ermittelt werden. Die Tiegelaufschlaggeschwindigkeit betrug laut High-speed-Film 8,25 m/s. Der Film, der von der Röntgenblitzkanone belichtet wurde, läßt leider nur unscharfe Bilder erkennen. Eine nachträgliche Rekonstruktion ergab, daß ausschließlich die UO_2 -Masse fragmentiert wurde, die sich oberhalb der Injektionsaustrittsbohrungen befand. Es war erwünscht, die Na-Injektion in der Nähe der UO_2 -Oberfläche durchzuführen, um einen möglichst niedrigen hydrostatischen Druck im UO_2 überwinden zu müssen.

Dieser Versuch hat gezeigt, daß die Na-Injektion in flüssiges UO_2 möglich ist und als Startreaktion für eine BNR in Brennelementgeometrie verwendet werden kann.

Technische Daten des Injektorversuchs: Siehe Anhang Tab. 14.

8. Schlußbemerkungen

Aus den Ergebnissen der Reaktortechnik war es bisher nicht möglich, eine eindeutige Aussage darüber zu machen, wie groß die mechanische Energiefreisetzung ist, die im Falle einer BNR beim Reentry-Störfall in einem BE eines Schnellen Brutreaktors entstehen kann.

Die umfangreichen theoretischen und praktischen Arbeiten über dieses Thema lassen jedoch die Annahme zu, daß eine derartige BNR milde verlaufen wird in Bezug auf die Gefährdung der rechtzeitigen Reaktorabschaltung.

Dieser Aussage liegen hauptsächlich zwei Punkte zugrunde; die Sprengversuche an Core-Modellen und die theoretischen Untersuchungen zur BNR. Bei den Sprengversuchen zündet man im Zentrum des Cores einen Gasgenerator, der als BNR-Simulation funktionierte, einen Druckaufbau von 100 bar im Zentralelement erzeugte und tolerierbare Schäden im Sinne der Reaktorsicherheit hinterließ. In

Eichgeometrie (overstrong wrapper tests) erzeugte dieser Generator einen Spitzendruck von 720 bar. BNR-Rechnungen, die unter pessimistischen Annahmen mit exakten thermodynamischen Modellen in BE-ähnlicher Geometrie durchgeführt wurden und somit mit diesen Tests vergleichbar sind, zeigten deutlich niedrigere Druckzeitverläufe als die, die bei den overstrong-wrapper-Eichversuchen gemessen wurden.

Das waren ausreichende Gründe dafür, daß im Nov. 1975 in Übereinstimmung mit der Projektleitung Schneller Brüter die Entwicklung der TUFCI-Anlage vorläufig unterbrochen und weitere Arbeiten zur BNR in Kanalgeometrie eingestellt wurden.

Wie aus dem Logik-Schema Abb. 1 zu ersehen ist, entsteht durch den Ausfall der TUFCI-Experimente eine Lücke zwischen den laufenden Arbeiten, die für den Sicherheitsnachweis des SNR-300 durchgeführt werden. Diese Lücke ist möglicherweise mit Experimenten zu schließen, die in der Corect II-Anlage (Grenoble) durchgeführt werden.

Dort versucht man, eine Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung herbeizuführen, bei der mehrere kg flüssiges UO_2 mit einer herabfallenden Natriumsäule in verdämmter Geometrie reagieren / 15 /. Um die Übertragbarkeit dieser Meßwerte auf SNR-Verhältnisse prüfen zu können, wurden instationäre Vergleichsrechnungen bezüglich des hydrodynamischen Verhaltens beider Anlagen mit dem DYSYS-Programm durchgeführt / 16, 17 /. Als Vergleichsgröße diente hauptsächlich das Blasenwachstum in Abhängigkeit von der Zeit, das für beide Fälle bei vorgegebenem Druck-Zeit-Verlauf berechnet wurde. Die Rechnungen ergaben, daß das Blasenwachstum, bei gleichem Druckverlauf als Input bis 4 ms gut übereinstimmen und mit fortschreitender Zeit immer größere Differenzen auftreten.

Da jedoch die ersten 20-25 ms für die Entwicklung der BNR von Bedeutung sind und bis zu diesem Zeitpunkt das Blasenvolumen des Grenoble-Experiments nur den 3,8-fachen Wert des TUFCI-Experiments erreicht, kann von guter Übereinstimmung gesprochen werden. Das bedeutet, daß die Lücke, die durch das TUFCI-Experiment entstanden ist, von den Grenoble Correct II- Experimenten geschlossen werden könnte.

Für die technische Beratung in Diskussionen ergeht eine Dank-sagung an die Herren Dr. Holtbecker, Schlittenhardt und Jorzik (Ispra) und Herrn St. Müller (RBT).

9. Literatur

- / 1 / Hicks and Menzies: Theoretical studies on fast reactor maximum accident, ANL 7120 (1965)

- / 2 / K. Gast: Die Ausbreitung örtlicher Störungen im Kern Schneller Natriumgekühlter Reaktoren und ihre Bedeutung für die Reaktorsicherheit, KFK 1380 (1971)

- / 3 / L. Caldarola: A theoretical model for the molten fuel sodium interaction in a nuclear fast reactor, Nucl.Eng. & Des. 22 (2) (1972) S. 175-211

- / 4 / L. Caldarola: A theoretical Model with variable Masses for the molten Fuel-Sodium-Thermal-Interaction in a Nuclear Fast Reactor, Nuc. Eng. & Design (Mai 1975) Vol. 34, no. 2, Seite 181-201

- / 5 / H. Jacobs: Die Analyse der thermischen Wechselwirkung von Brennstoff und Natrium unter Verwendung eines exakten thermo- und hydrodynamischen Modells, (Dissertation, Univ. Karlsruhe) (1976) KFK 2260

- / 6 / H. Beutel, K. Gast: Large Scale FCI - Experiments in Sub-assembly Geometry - Test Facility and Model Experiments, 2nd Specialist meeting, Ispra, Nov. 1973

- / 7 / H. Will: Dokumentation der Ergebnisse von vier Sprengversuchen an Core-Modellen des SNR 300, (1975) unveröffentlicht

- / 8 / H. Holtbecker, P. Schlittenhardt, E. Soma, et al.: Results of Thermal Interaction Tests for Various Materials Performed in the Ispra Tank Facility. CREST sec. Meeting SFI, Ispra, Nov. 1973

- / 9 / H. Beutel, R. Liebe, H. Will, H. Zehlein: Mechanische Auswirkungen einer Brennstoff-Natrium-Reaktion auf die Corestruktur eines Schnellen Brutreaktors. Reaktortagung Nürnberg, 8.-11. April 1975. Leopoldshafen 1975: ZAED S. 221-24

- / 10 / St. Müller: Entwicklung einer Meßeinrichtung zur Ermittlung der Natriumgeschwindigkeit und des Füllungsgrades in Austenitischen Rohren, (1973) unveröffentlicht

- / 11 / I. Kornelson: Natrium Füllstandsmessungen (1970), unveröffentlicht

- / 12 / M. Andoux, F.W. Katz, W. Olbrich, E.G. Schlechtendahl: SEDAP - An Integrated System for Experimental Data Processing, KFK 1594, EUR 473e (Jan. 1973)

- / 13 / Y.S. Hoang: TIGER VB - Temperaturberechnung zu einem dreidimensionalen System, Programmbeschreibung (1970) unveröffentlicht

- / 14 / H. Beutel, Y.S. Hoang: Rechnungen des Temperaturverlaufs während der Abkühlung an einem Wolframtiegel - gefüllt mit flüssigem UO_2 , (1975) unveröffentlicht

- / 15 / M. Amblard, J. Costa u.a.: Out-of-pile Studies on Sodium Fuel Interactions, ANS-Topical Meeting on Fast Reactor Safety, Beverly Hills, Calif., (April 1974)

- / 16 / H. Beutel: Vergleich der BNR-Experimente Ispra und Grenoble in der Hydrodynamik, (1976) unveröffentlicht

/ 17 / E.G. Schlechtendahl: DYSYS - A Dynamic System Simulation
for Continuous and Discrete Changes of State, KFK-Bericht
1209 (Juli 1970)

Anhang:

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabelle 1

Technische Daten Ispra-Anlage

Nennweite der Fallstrecke	150 mm
Gesamtlänge der Fallstrecke (incl. Ventile)	6 m
Schaltzeit der Schleusenventile	70 ms
Reaktionstank Außendurchmesser	600 mm
Tankwandstärke	20 mm
Höhe des Reaktionstanks	1,7 m
Auslegungsdruck des Reaktionstanks	$16 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
Auslegungstemperatur	650 °C
Berstmembrandruck	10^6 N/m^2

Tabelle 2

Technische Daten Ispra-Strahlungssofen

Heizleistung	110 KW
Maximale Betriebsspannung von Phase zu Phase	20 V
Heizelementlänge	400 mm
Heizelementaußendurchmesser	116,6 mm
Heizelementwandstärke	0,8 mm
Durchschmelzleistung für Tiegelabwurf	44 KW
Inertgasdruck im Ofen (abs.)	10^5 N/m^2

Tabelle 3

Technische Daten Natrium-Vorratstank (TUFCI)

Höchstzulässiger Betriebsdruck	16 bar
Prüfüberdruck	21 bar
Betriebstemperatur dauernd	400 °C
Maximaltemperatur bei Versuchsbetrieb < 1000 Stunden	650 °C
Inhalt	50 Ltr.

Werkstoff: X10CrNiTi189 mit
Abnahmezeugnis: 3B, DIN 50049
Schweißart: Elektroschmelzschweißung V = 0,8
Schweißzusatz: DEW Thermit H.

Die Vor- und Bauprüfungen wurden vom TÜV-Baden am 15.5. bzw. 9.10.1973 durchgeführt. Der Prüfstempel lautet TÜV9, Köln.

Es lagen die Prüfbedingungen § 18(2) und (3) der UVV-"Druckbehälter" (VBG 17), Juli 1965 zu Grunde.

Der Bau des Tanks erfolgte bereits zum Zeitpunkt der Modellversuche, da er für die Modellversuchsdurchführung benötigt wurde.

Hersteller: E. Gessner, Untereschbach
Fabr. Nr.: 5331
Baujahr: 1973 nach Zeichnung IRE5-80-0-264.

Ein federbelastetes Vollhubsicherheitsventil NW6 mit Kupplungsstück ist im oberen Klöpperboden vorgesehen.

Hersteller: Andreas Hofer, Mülheim (Ruhr)
Ansprechdruck: 16 bar
Schließdruck: 15,7 bar
Kennzeichnung: Ventil Nr. 736228
Bauteilkennzeichen: TÜV.SU.70-299.6 D/G. 0,7.16
Werk - Nr.: 73 6228

Die Einstellung wurde vom Rheinisch-Westfälischen TÜV 4 plombiert.

Tabelle 4

Technische Daten Natrium-Einspeisevorrichtung (TUFCI)

- 1) Antriebszylinder, Teil 20 Abb. 16
- Durchmesser 50 mm
 - Hub 25 mm
 - Betriebsdruck $6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
 - beidseitige Endlagendämpfung und
 - berührungslose Stellungsanzeige

Hersteller Fa. Bosch B.Nr. 0822302200

2) Spezialasbestpackung, Teil 26 Abb. 6

- 5 x 5 mm
- max. Temp. 650 °C

Hersteller Fa. Kempchen, Oberhausen

3) Berstmembranhalter, Teil 19 Abb. 6

- Nennweite 25 mm
- Nenndruck $10-40 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- Werkstoff 4541
- Membranberstdruck $13,2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- Membranwerkstoff 4571

Hersteller Fa. Degussa, Hanau

4) Kompensator, Teil 23 Abb. 6

- Nennweite 25 mm
- Nenndruck $10 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- Werkstoff 4541
- Type 1713

Hersteller Metallschlauchfabrik Pforzheim

Tabelle 5

Technische Daten Sicherheitstank (TUFCI)

1) Sicherheitstank

Höchstzulässiger Betriebsüberdruck	$10 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
Prüfüberdruck	$13 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
Betriebstemperatur	100 °C
Inhalt	810 l
Werkstoff	X10CrNiTi189/4541
Schweißart	Elektroschmelzschweißung
Schweißzusatz	DEW Thermanit H

2) Segment-Klammerschrauben

- Type M20-L2-8
- Werkstoff u. Kappe u. Bolzen 34Cr4
entsprechend DIN 17200
- Mutterwerkstoff C35
entsprechend DIN 17200
- $P_{zul.}$ bei 300 °C 3450 kp/mm²

Hersteller Rathmann, Koblenz

Die Vorprüfung des Tanks wurde vom TÜV Baden am 9. Juli 1974 durchgeführt.

Tabelle 6

Technische Daten Teststrecke (TUFCI)

1) Teststrecke

Außendurchmesser	150 mm
Wandstärke	20 mm
Gesamtlänge	1500 mm
Werkstoff Rohr	4631 Nimonic 70A (Böhler)
Werkstoff Kegel	4981 1616M (Böhler)

2) Zugfedern für Blende

Außendurchmesser	25 mm
Drahtdurchmesser	2,0 mm
federnde Windungen	65 -
Werkstoff	Sanicro 75 X nach DIN 2076-A Gütevorschrift nach DIN 17223

3) Ringwellschläuche

Nennweite	8 mm
Nenndruck	$4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
Nennlänge	520 mm
Werkstoff	4541 -
Typ	RS2712 -

Hersteller Metallschlauchfabrik Pforzheim

Der Grund für die unterschiedlichen Werkstoffe von Rohr und Kegel liegt darin, daß Selbsthemmung des Kegels beim Abkühlen im Reaktionsrohr vermieden wird. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten Rohr/Kegel verhalten sich wie 14,5/18,7.

Tabelle 7

Technische Daten Druckaufnehmer

a) System "Kaman"

aa) Druckaufnehmer Typ K-1908-A

Meßbereich:	0 - 200×10^5	N/m^2
Spitzendruck max.:	220×10^5	N/m^2
Eingang (Uni-Vit):	117; 60	Vac; Hz
Ausgang:	0 - 500	mV dc
Auflösung (dyn.):	0,1	%F.S.
Einsatztemp. dauernd:	- 73 bis + 566	$^{\circ}\text{C}$
Spitzentemp. kurzfristig:	+ 650	$^{\circ}\text{C}$
Linearität:	$\pm 0,5$	%F.S.
Temp.-Drift:	0,01	%F.S./ $^{\circ}\text{F}$

ab) Mehrkanalmeßbrücke UNI-VIT-System Kaman Typ K 3011

Netzanschluß:	230, bzw. 115 ± 10 %	V
Frequenzbereich:	0 - 100	KHZ
Temperatur-Bereich:	+ 30 bis + 130	$^{\circ}\text{F}$
Empfindlichkeit:	$\pm 0,02$ für Elektronik	%/ $^{\circ}\text{F}$
	$\pm 0,005$ bis 0,02 für	%/ $^{\circ}\text{F}$
	Aufnehmer	
	$\pm 0,005$ für matching	%/ $^{\circ}\text{F}$
	network	

Demodulator Ausgang:	0 - 1000 Standard	mV dc
	0 - 300 Aufnehmer	mV dc
Ausgangs-Impedanz:	200	Ω
Abmessungen:	19 Zoll-Einschub	

b) System "Ispra"

ba) Kapazitiv-Druckaufnehmer Eigenentwicklung, Ispra

Meßbereich:	0 - 200.10 ⁵	N/m ²
Bandbreite:	0 - 12	KHz
Membran- ϕ :	ca. 18	mm
Einsatztemp. dauernd	700	$^{\circ}\text{C}$
Spitzentemp. kurzzeitig:	800	$^{\circ}\text{C}$
Linearität:	3 - 10	%
Temperaturdrift:	10	% F.S.
Standzeit:	50	h

bb) Kapazitiv-Verstärker Eigenentwicklung, Ispra

Netzanschluß:	220	V
Oszillator:	4 \pm 1 (einstellbar)	MHz
Ausgang:	50	mV
Eingang Aufnehmer:	12	V DC
Demodulator:	HF-Bandbreite 5kHz-20MHz NF-Bandbreite 0-100kHz-3dB	
Poweramplifier:	\pm 10 oder \pm 50	V mA

Tabelle 8

Technische Daten

a) HT DMS Platin-Wolfram-Halbbrücke Type SG 425 Fa. Micro Epsilon

ohmscher Widerstand:	115 \pm 10	Ω
Isolationswiderstand (10 $^{\circ}\text{C}$):	1 x 10 ⁹	Ω
Isolationswiderstand (650 $^{\circ}\text{C}$):	1 x 10 ⁷	Ω
k-Faktor:	4,5	-
Länge:	28	mm
Breite:	4,8	mm
Dicke:	0,9	mm

b) Gleichspannungsverstärker der Fa. Meclec Type M. 128

Section A

Anstiegszeit bei 300 kHz	1,25	μs
Frequenzgang:	300 (-3 db)	kHz
Verstärkung:	0,5 bis 200 u. 50 bis 20.10 ³	-fach
Filter einstellbar:	10,20,50,100,150,200,250,300	kHz

Eingang:

Stecker:	Lemo, Type RA2306 6 Anschlüsse	-
Impedanz:	2	M-Ohm
C.M.R.R.:	100 (max)	db
Rauschen:	10 (bei voller Bandbreite)	μV r.m.s.

Ausgang:

Stecker:	50; BNC	Ω
Impedanz:	10	Ω
Belastbarkeit:	30 (minimum)	Ω
Spannungsschwankung:	+ 10 (maximum)	Volt
Anschluß an:	220 V oder 110 V ac 50 oder 60 Hz	
allgemein:	60 bei Vollast	mA

Tabelle 9

Technische Daten

a) Kraftaufnehmer der Fa. Kistler Typ 901 A

Meßbereich max.:	1,5.10 ⁴	N
Außendurchmesser:	14	mm
Innendruckmesser:	6,5	mm
Höhe:	8,0	mm
Empfindlichkeit:	4,0	pC/N
Kapazität:	12	pF
Eigenfrequenz:	60	kHz
Linearität:	+ 1	%

Einsatztemperatur:	-150, +240	°C
Anstiegszeit:	7	µs
Ansprechschwelle:	10	N

b) Ladungsverstärker der Fa. Kistler Typ 5001

Netzanschluß:	220/110 ± 20 %	V
Meßbereich:	+ 10 - 500'000	pC
Ausgangsspannung:	+ 10	v
Spannungsbegrenzung:	< + 15	V
bei 50 mA Belastung:	> + 10	V
A.-Impedanz:	100	Ω
Zul. Umgeb. Temp:	0 + 50	°C
Abmessungen mit Gehäuse:	74 x 145 x 210	mm

Tabelle 10

Technische Daten:

a) Thermoelemente auf der Prallplatte

Thermoelement-Type:	2ABACO25 (Philips)
Thermomaterial:	NiCr-Ni
Mantelmaterial:	rostfreier Austenit Werkstoff Nr. 4301
Außendurchmesser:	0,25 mm
Leitungswiderstand:	ca. 530 (20 °C) Ω/m

b) Alle übrigen Anlagen-Thermoelemente mit Regler

Elementtype:	TGC 14 (Heraeus)
Meßeinsatz:	NiCr-Ni 8 mm Ø
Schutzrohr:	14aØ x 2,5 W.Nr.1.7380
Anschluß:	Form 3 DIN 43729
Einbaulänge:	460 mm
Betriebstemperatur:	650 °C
Betriebsdruck:	16.10 ⁵ N/m ²

Regler

Type:	Bitric M2A (Hartm. + Braun)
Sollwertbereich:	20 - 900 °C
Sollwerttoleranz:	1 % der Meßspanne
Arbeitspunkt:	einstellbar, $\Delta W = 0 - \pm 5 \%$
Abmessungen:	96 x 96 mm (Frontplatte)
Ausgang:	max. 4A bei Wechselstrom $\cos\psi = 1$

Tabelle 11

Technische Daten Tauchheizpatronen (Na-Vorratstank)

Type/Werkstoff Nr.	HLPL 20, 470/4301
Außendurchmesser	20 mm
Betriebsspannung:	220 Volt
Heizleistung	1100 Watt

Tabelle 12

Technische Daten Mantelheizleiter der Teststrecke, Außenheizung Natr.-Vorratstank, alle übrigen Anlagenkomponenten

Außendurchmesser:	2	mm
Widerstandverhältnis Heizung/Anschluß:	20:1	-
Mantelmaterial Werkstoff Nr.:	4301	-
Isolationsmaterial:	MgO	-
Länge des Heizteils:	5000	mm

Tabelle 13

Technische Daten 6 Farben Punktdrucker

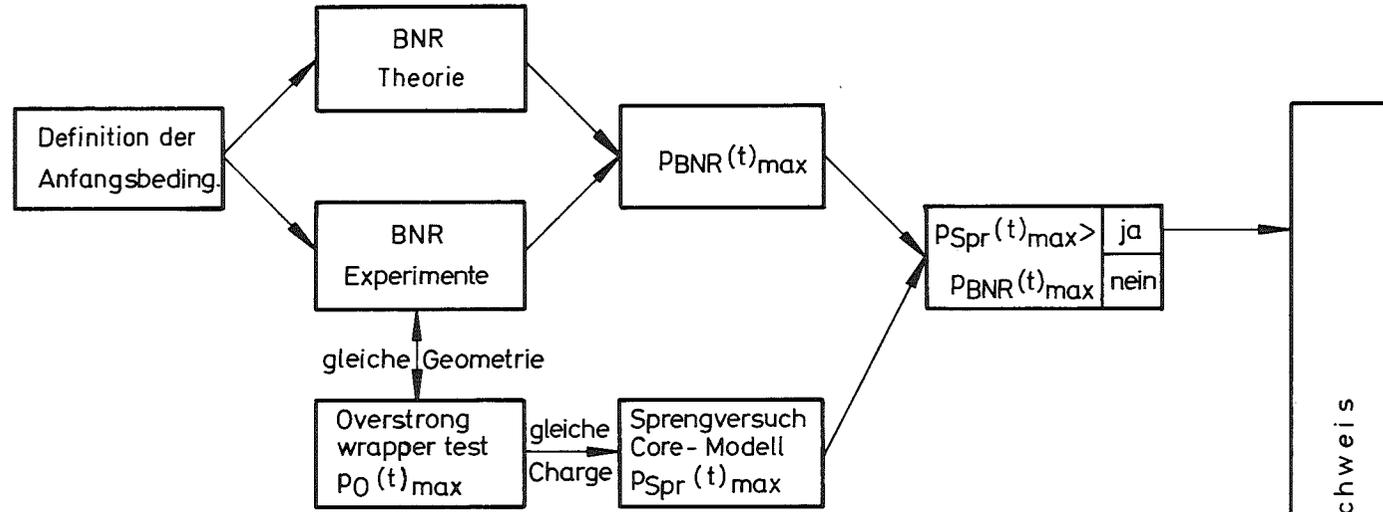
Type:	Elektronischer Komp.-Sechsfach-Punkt- schreiber SP (43)
Meßverfahren:	Servo-System mit Poti-Stellglied
Abmaße:	Rahmen 192 x 288 mm
Fehlergrenze:	$\pm 0,5 \%$ vom Skalenumfang (DIN 43742)
Meßbereich:	0...900 °C
Thermoelement:	NiCr-Ni

Tabelle 14

Für den Injektor-Versuch lagen folgende technischen Daten zu Grunde:

UO ₂ -Temperatur im Schmelzofen unmittelbar vor dem Abwurf	2800	°C
UO ₂ -Masse (geschmolzen)	3,0	kg
Länge des Wolfram Schmelztiegels	130,0	mm
Außendurchmesser des Tiegels	84,0	mm
Wandstärke des Tiegels	2,0	mm
Bodendicke des Tiegels	5,0	mm
Sollbruchstelle im Tiegelboden	2,0	mm
Injektorfüllmenge	290	cm ³
Injektionsmenge	14	cm ³
Injektortemperatur	230	°C
Fallhöhe	4,8	m
Objektivfilterstärke	12	-
Blendeneinstellung	16	-
Bildfrequenz 1. Kamera	3000	Bilder/Sek.
Röntgenblitzfrequenz 2. Kamera	200	Bilder/Sek.

Direkter Sicherheitsnachweis durch Experiment im Maßstab 1:1



Indirekter Sicherheitsnachweis durch Komponenten - Analyse

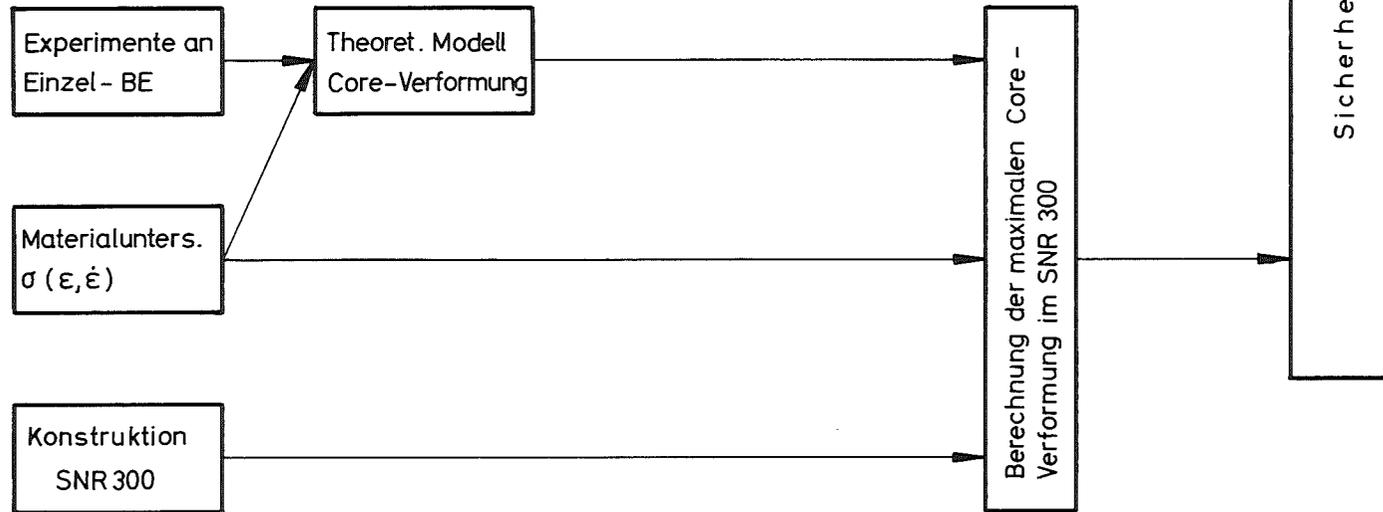


Abb. 1 Logismus zum Sicherheitsnachweis des SNR 300

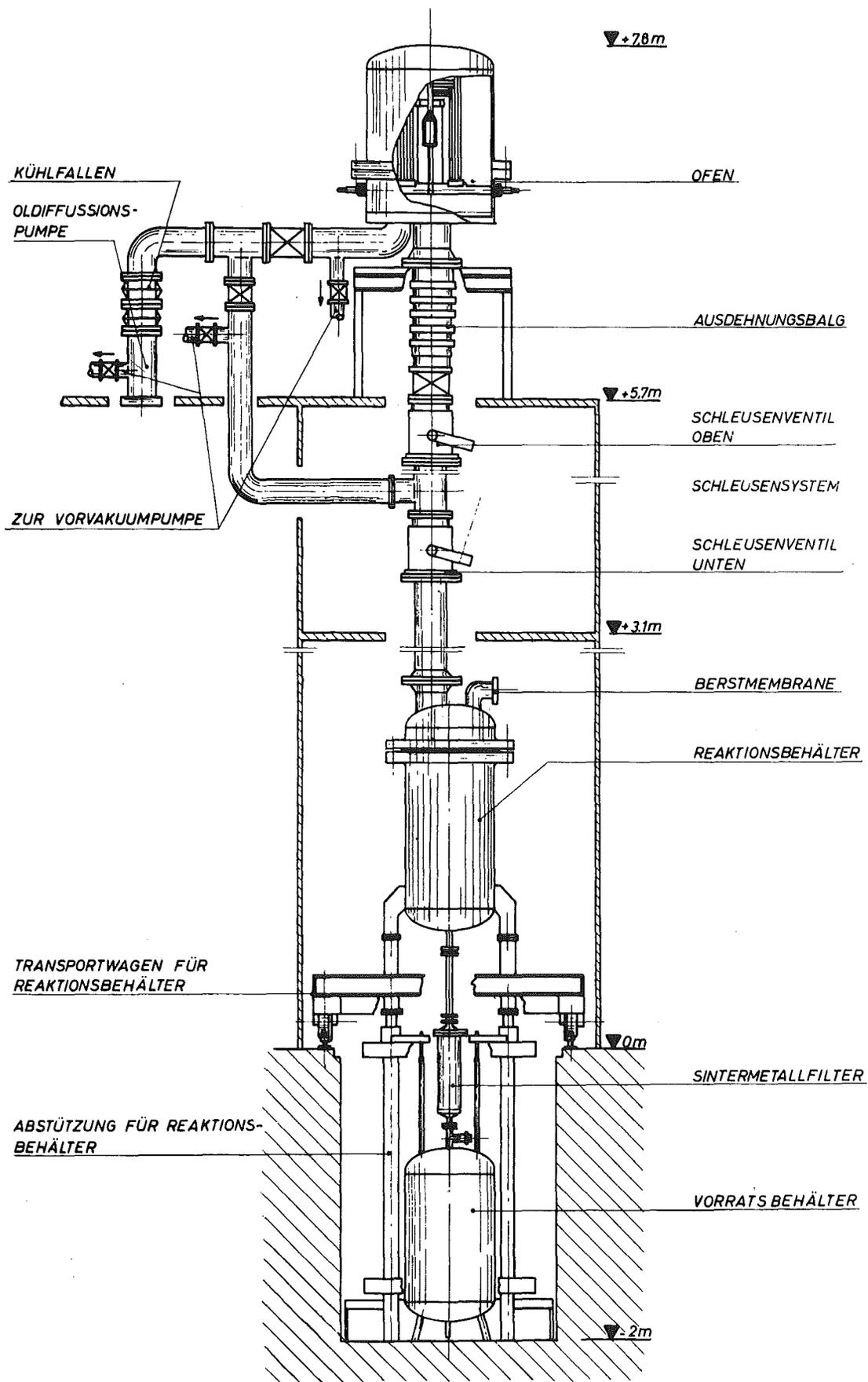


Abb. 2 Schema der Ispra - Versuchsanlage

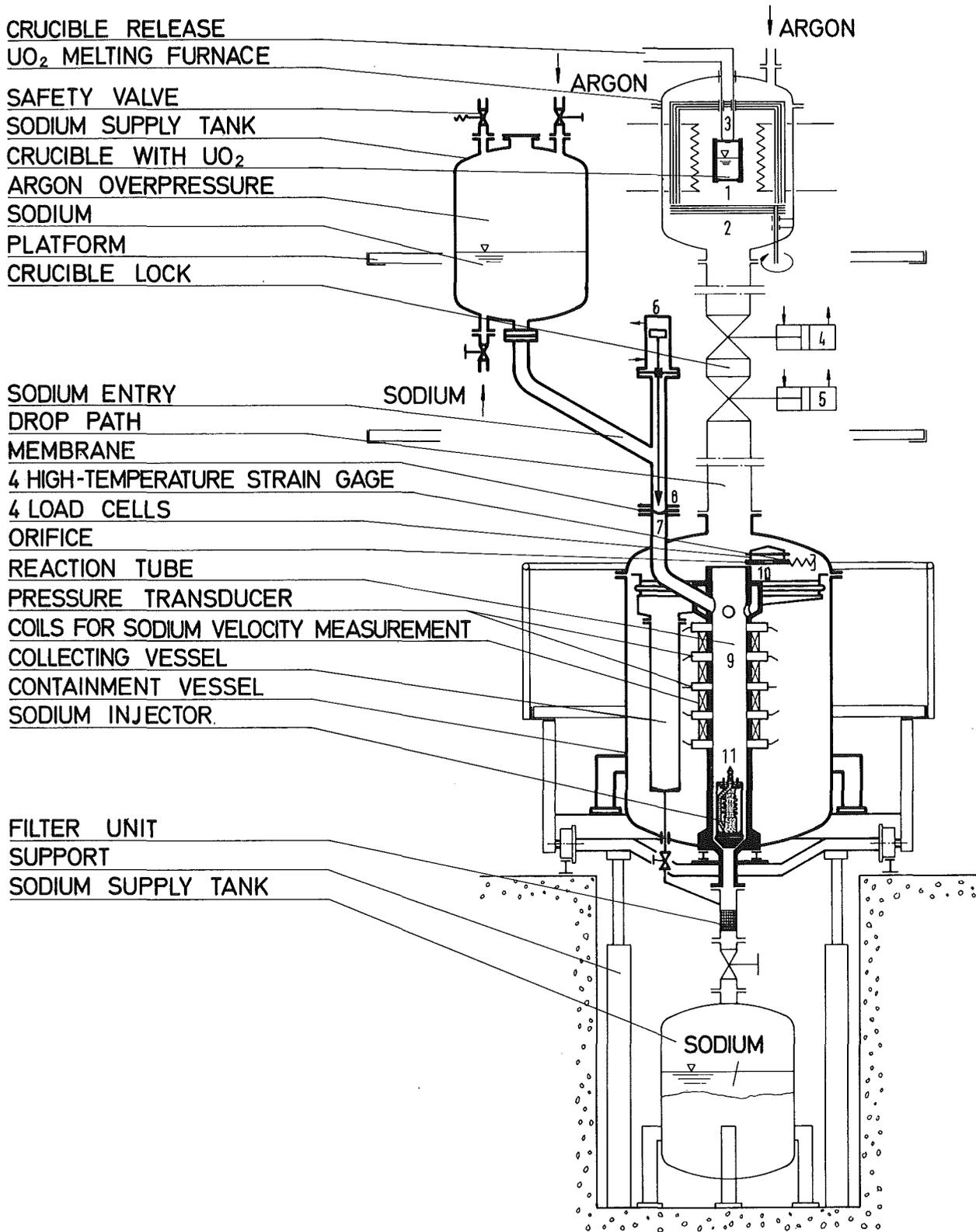
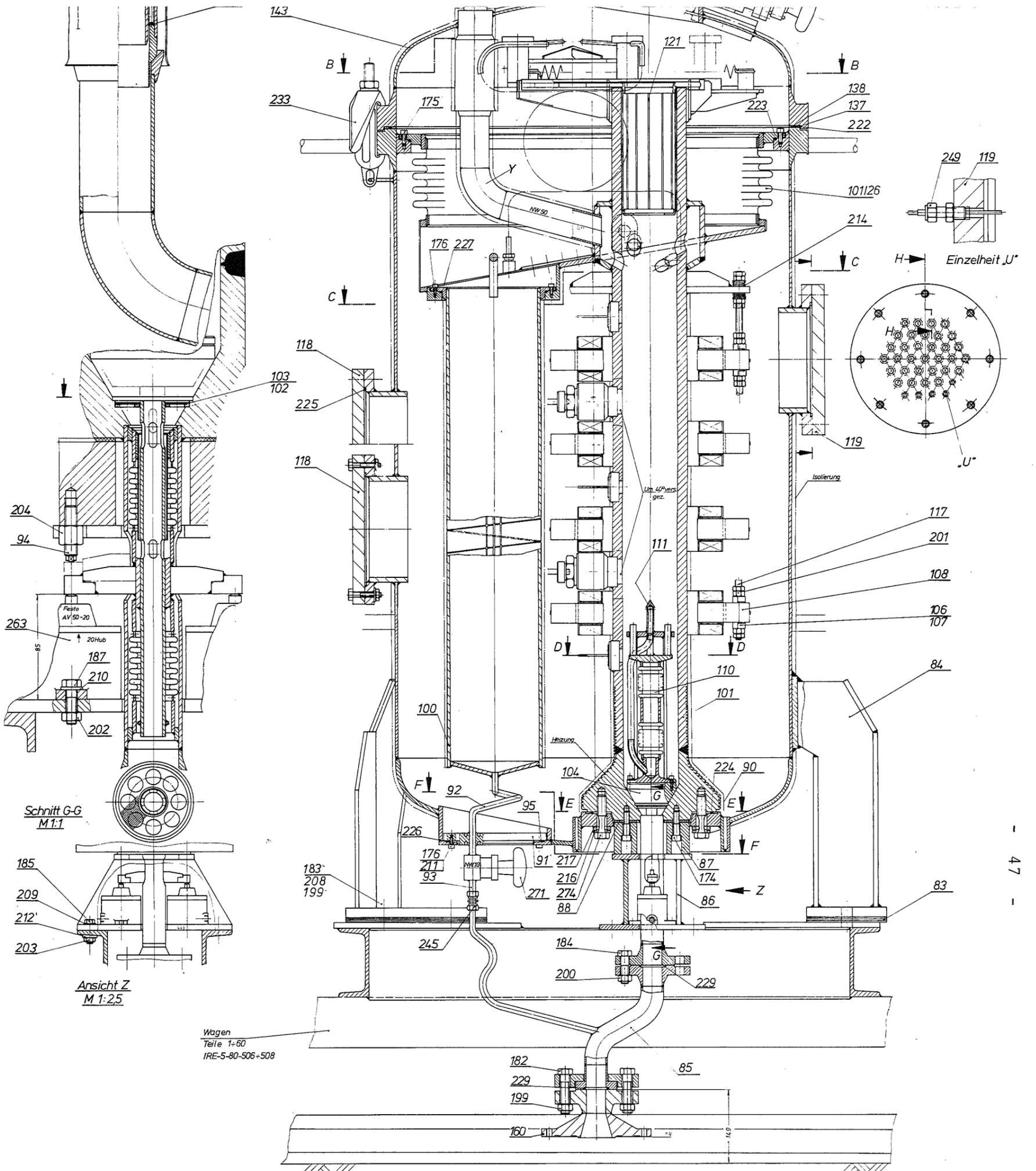
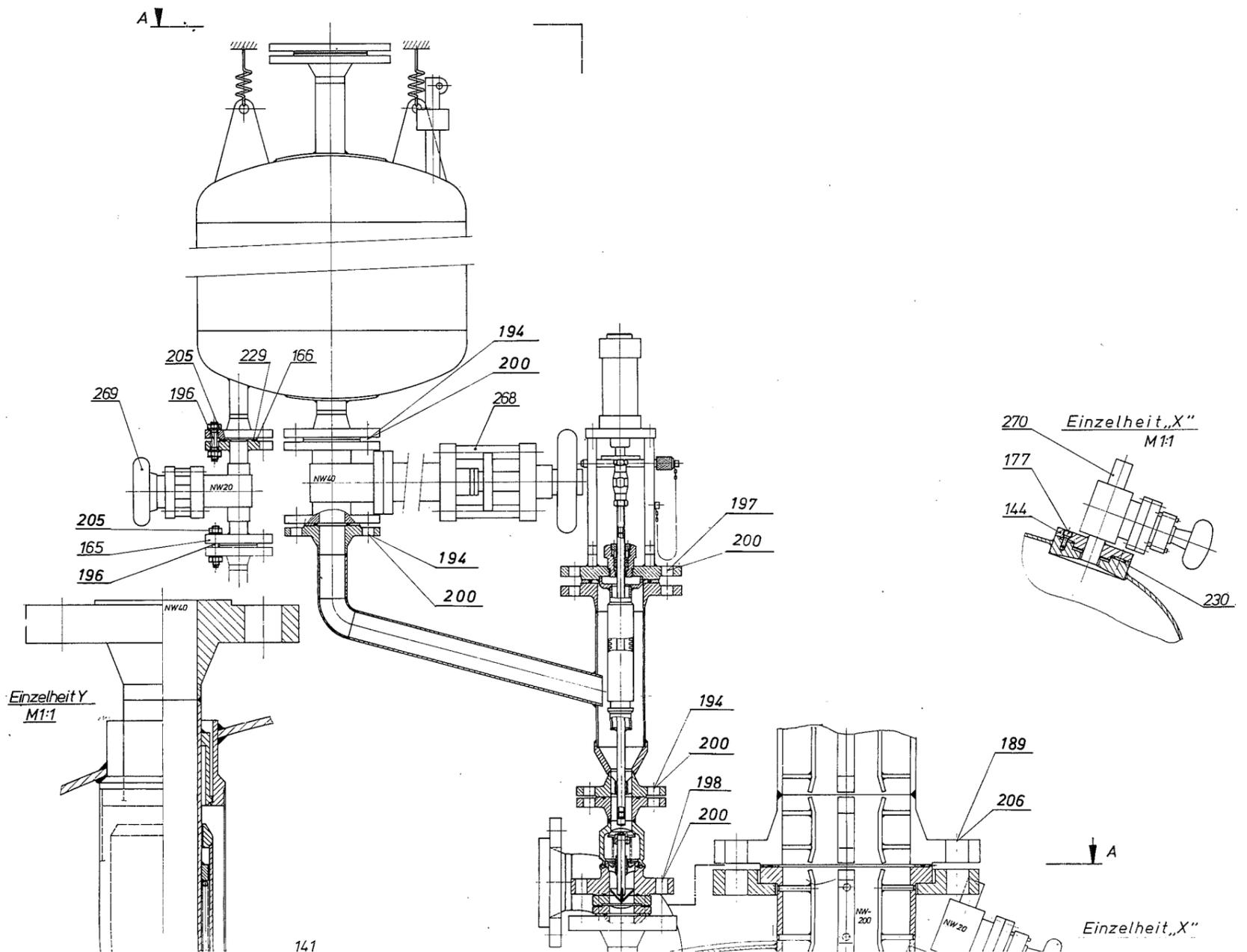


Abb. 3 Schema TUFCI-Versuchsstand

Abb. 4 Längsschnitt TUFCI - Versuchsstand





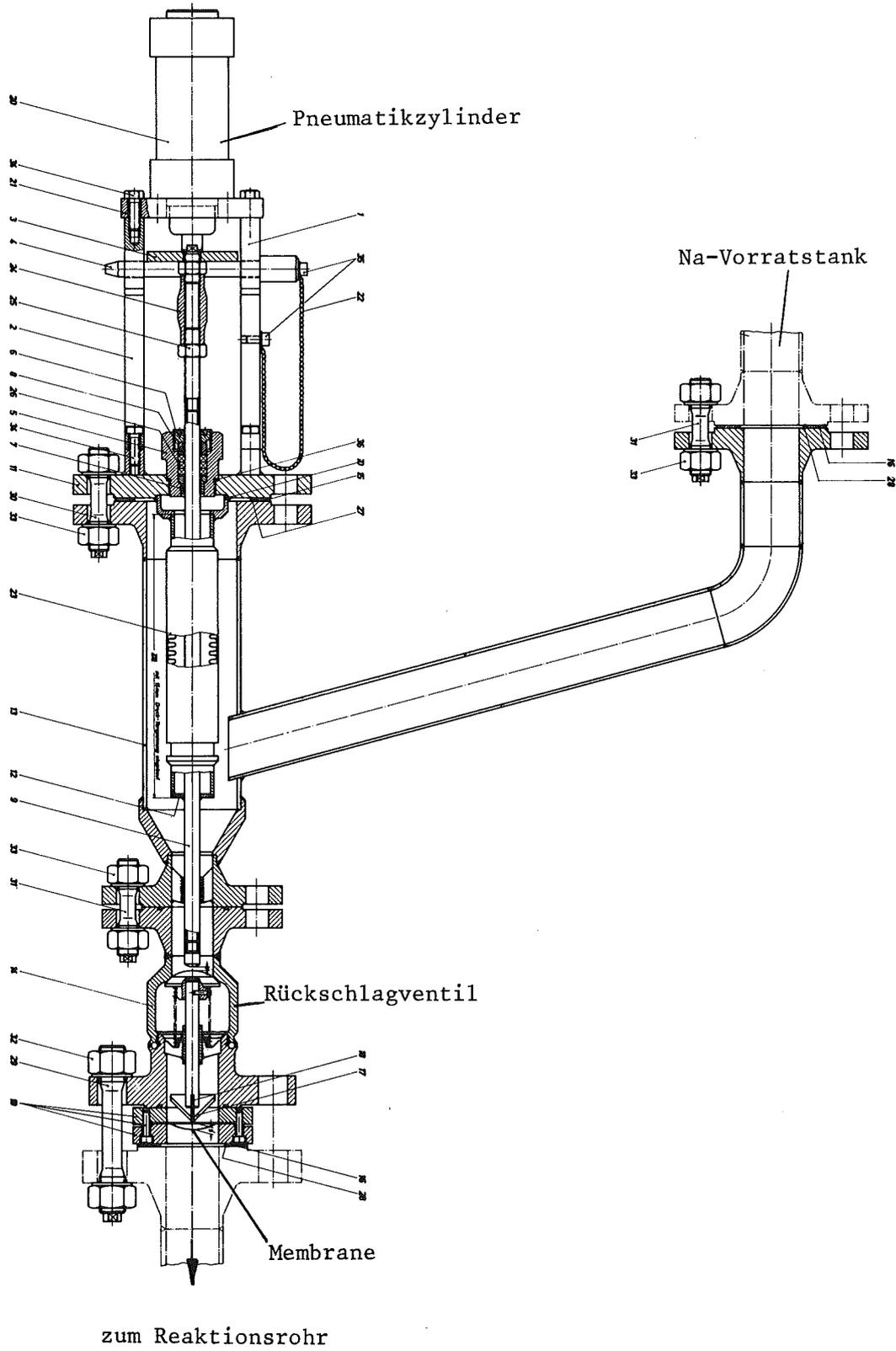


Abb. 5 Längsschnitt Na.-Einspeisevorrichtung

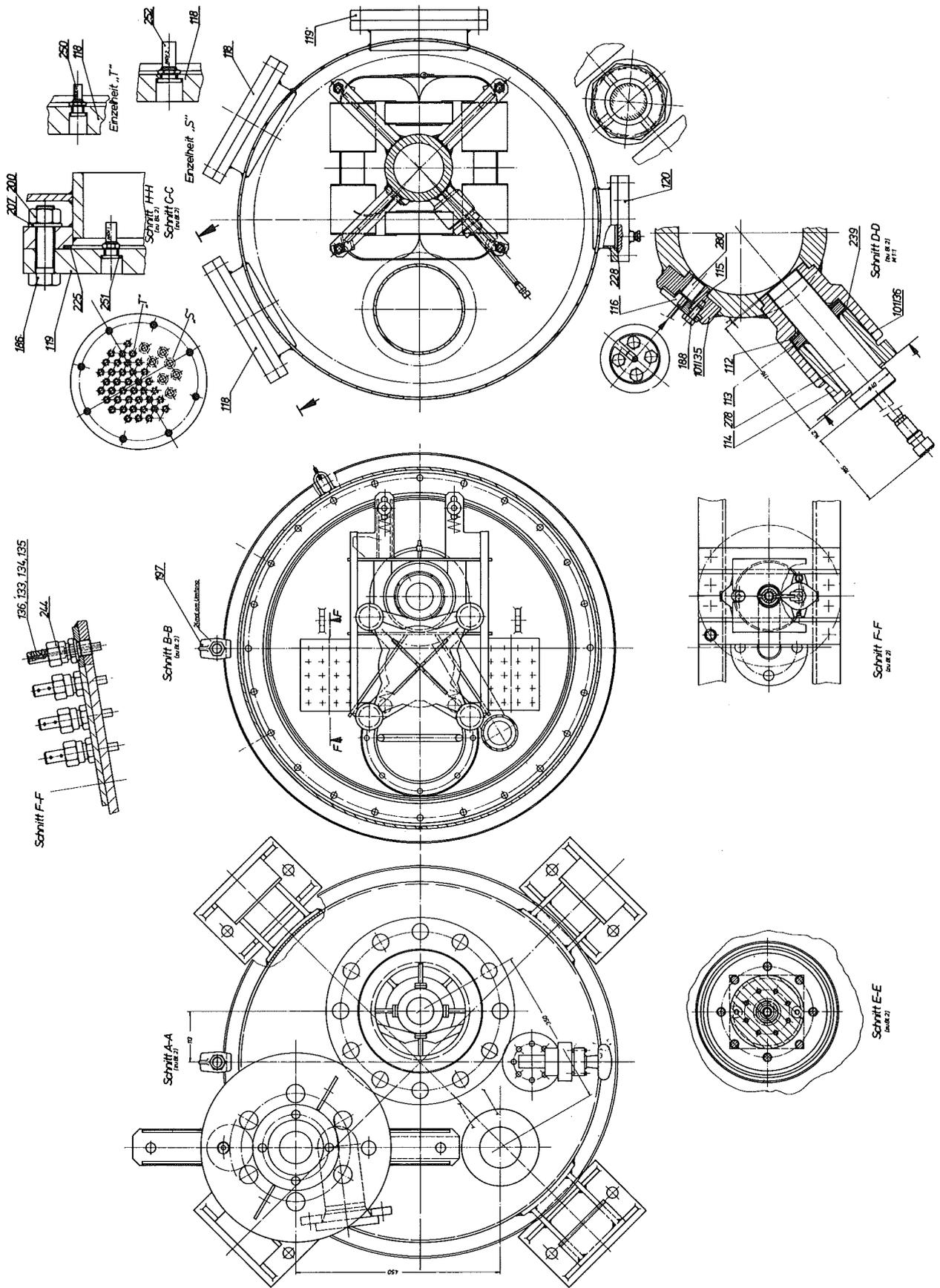


Abb. 6 Draufsicht TUFCI-Anlage

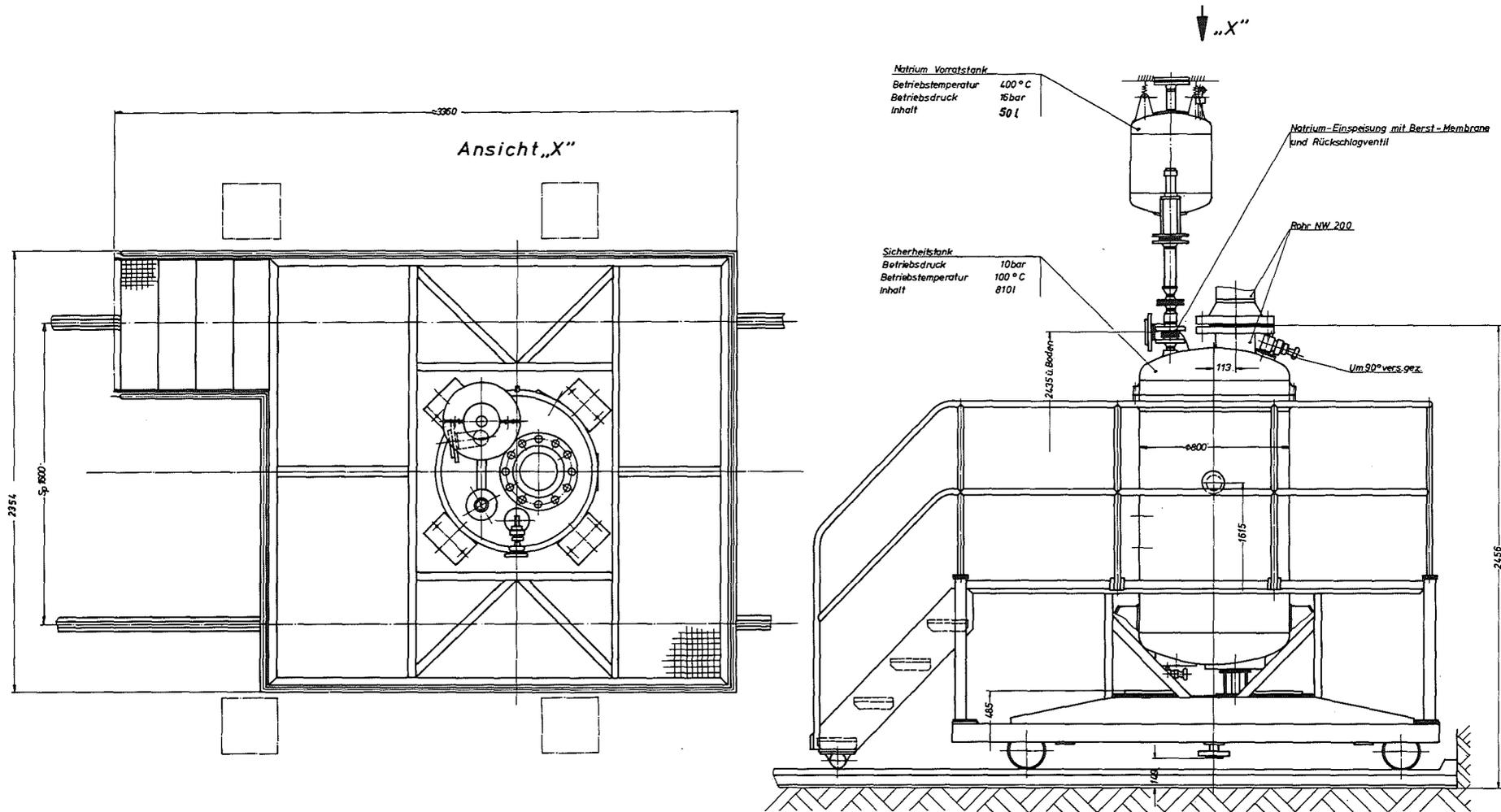
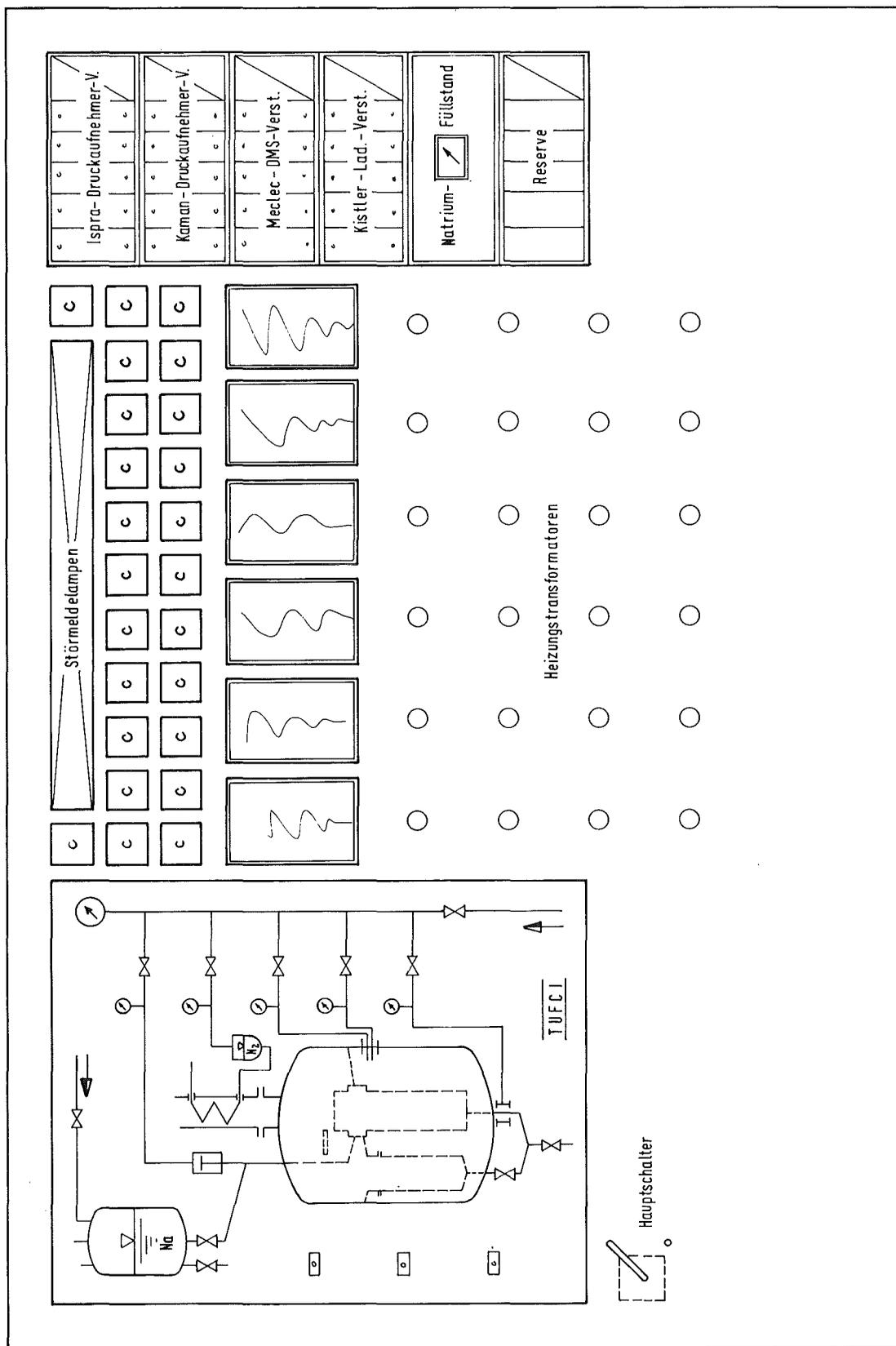


Abb. 7 Ansicht TUFCl - Versuchsstand



2000

3000

Abb. 9 Bedienungspult Ansicht

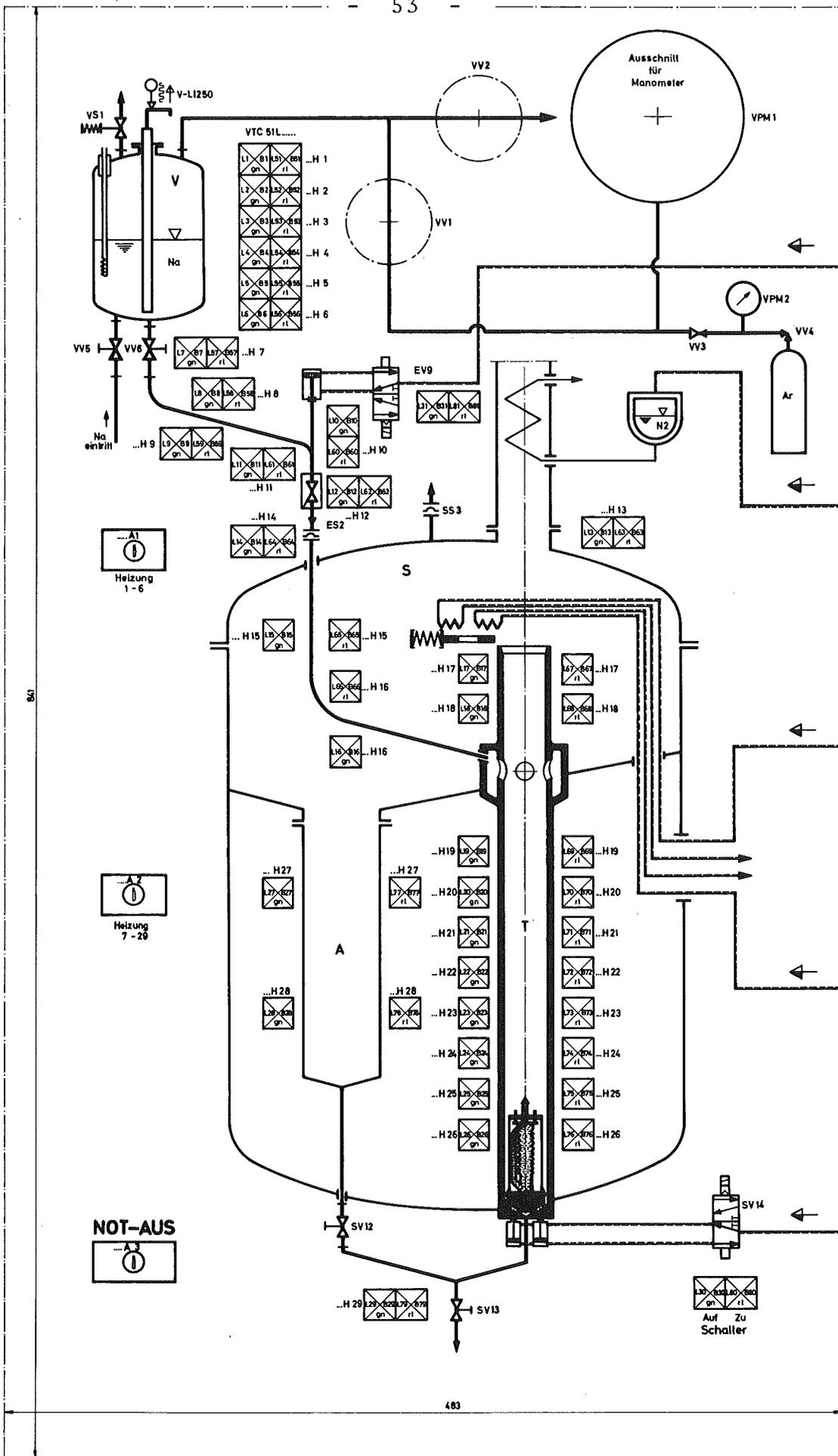


Abb. 10 Flußschema des Bedienungspultes

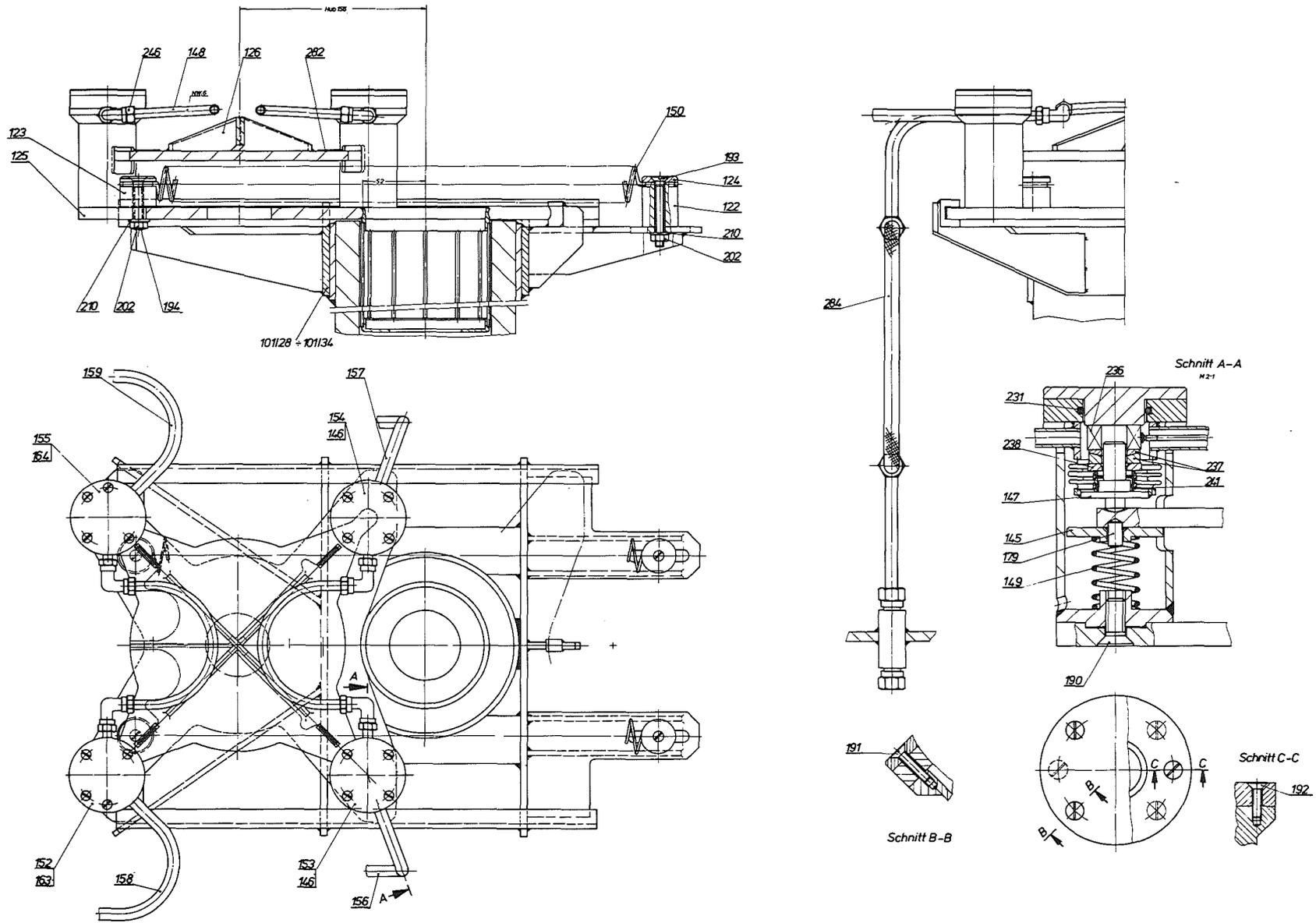
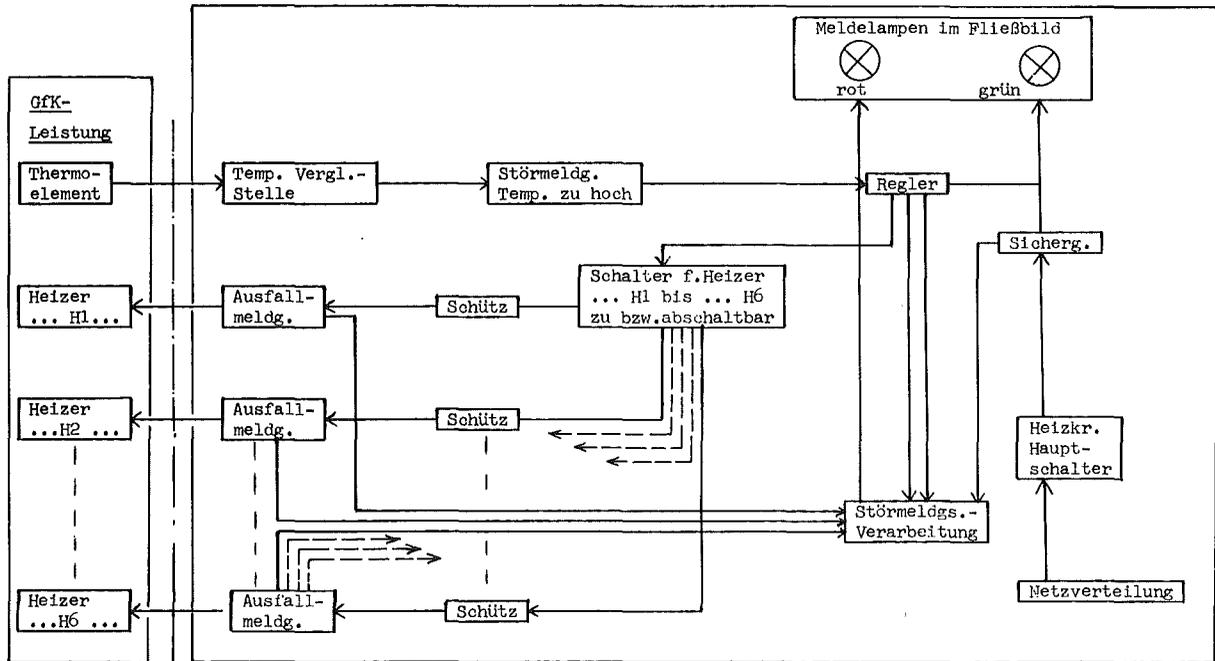


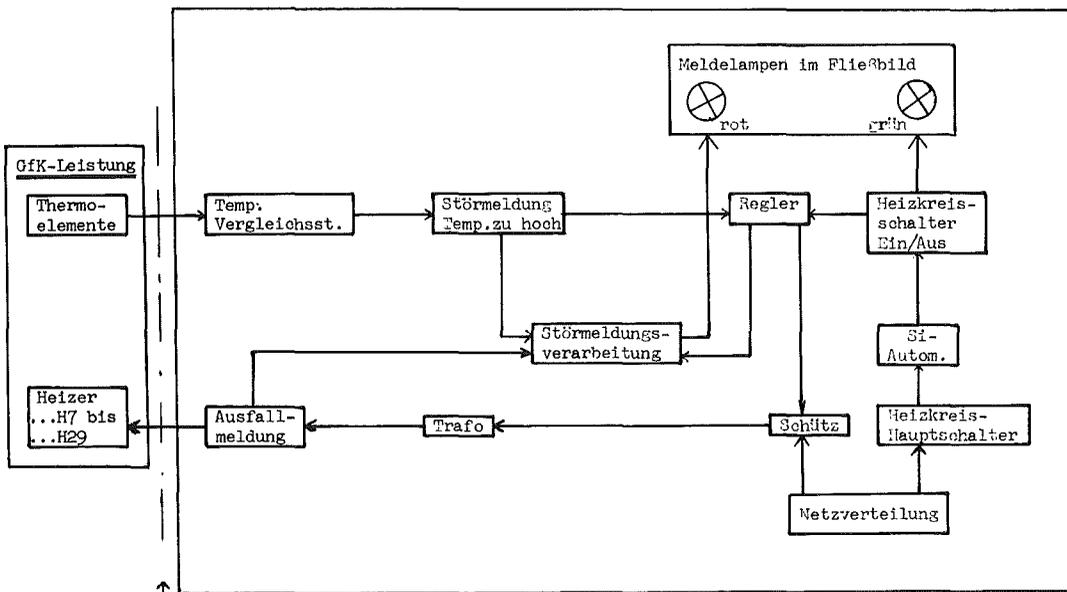
Abb. 11 Schnitte und Ansichten zur Blende

Schema Stromlaufpläne



↑
Durchführungen im
Sicherheitstank

Abb. 12 Vorratstankheizung



↑
Durchführungen im
Sicherheitstank

Abb. 13 Anlagenheizung

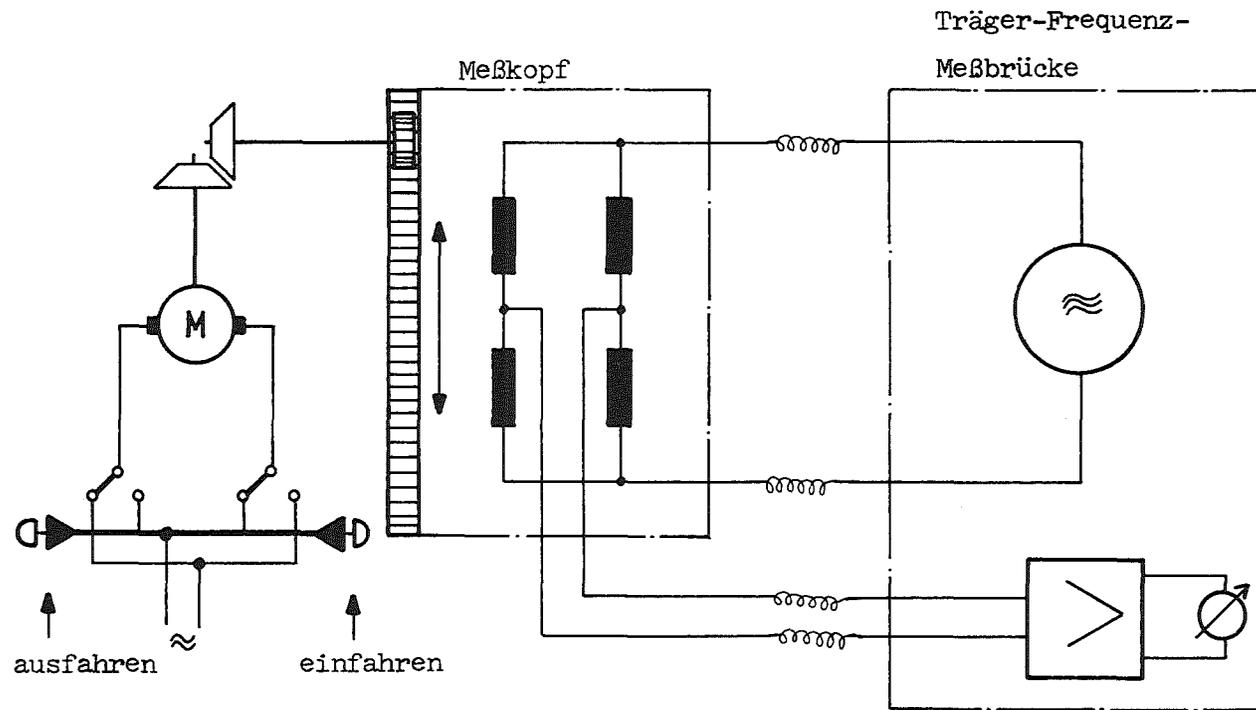


Abb.14 Schema Na.-Höhenstandsmessung

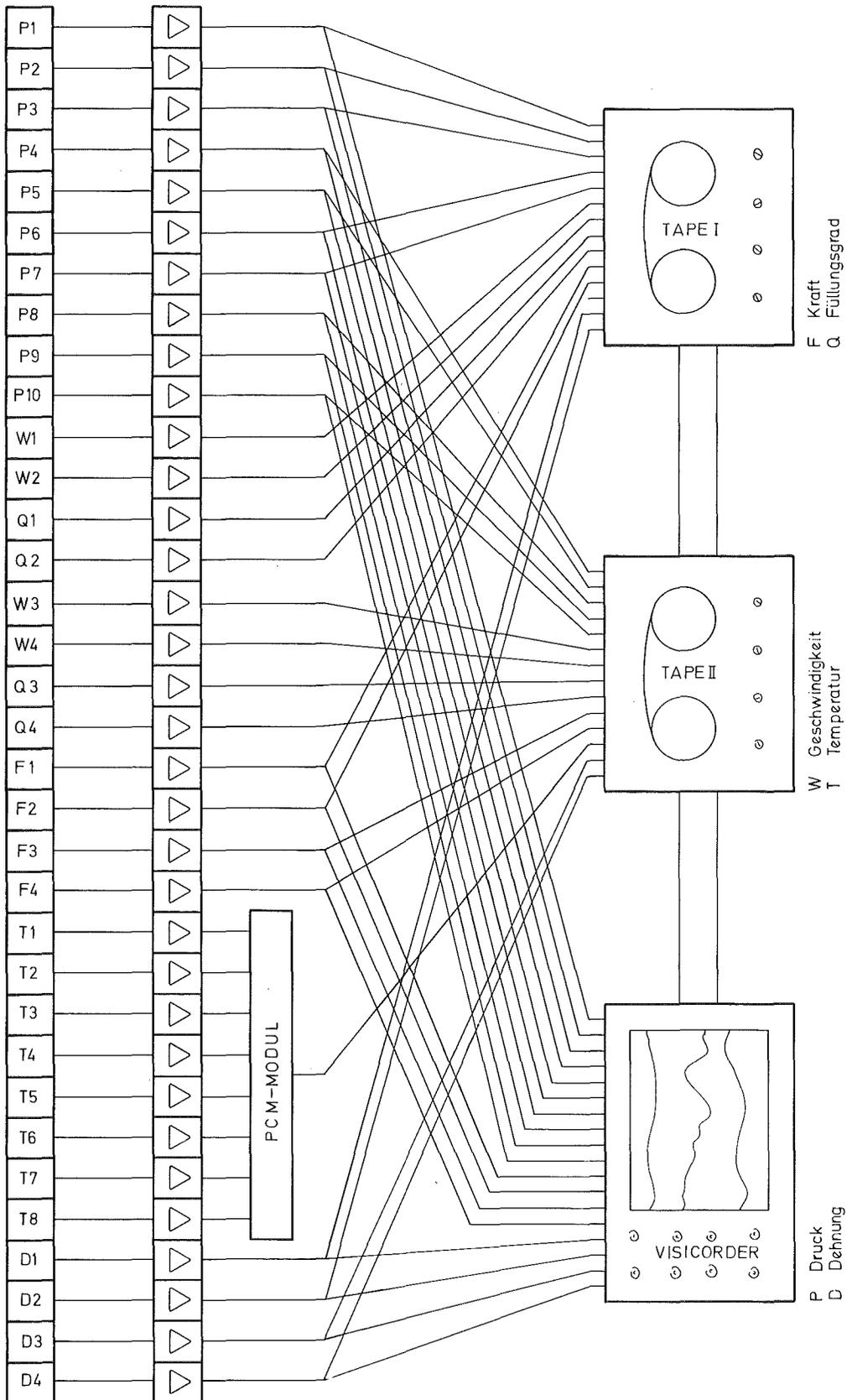
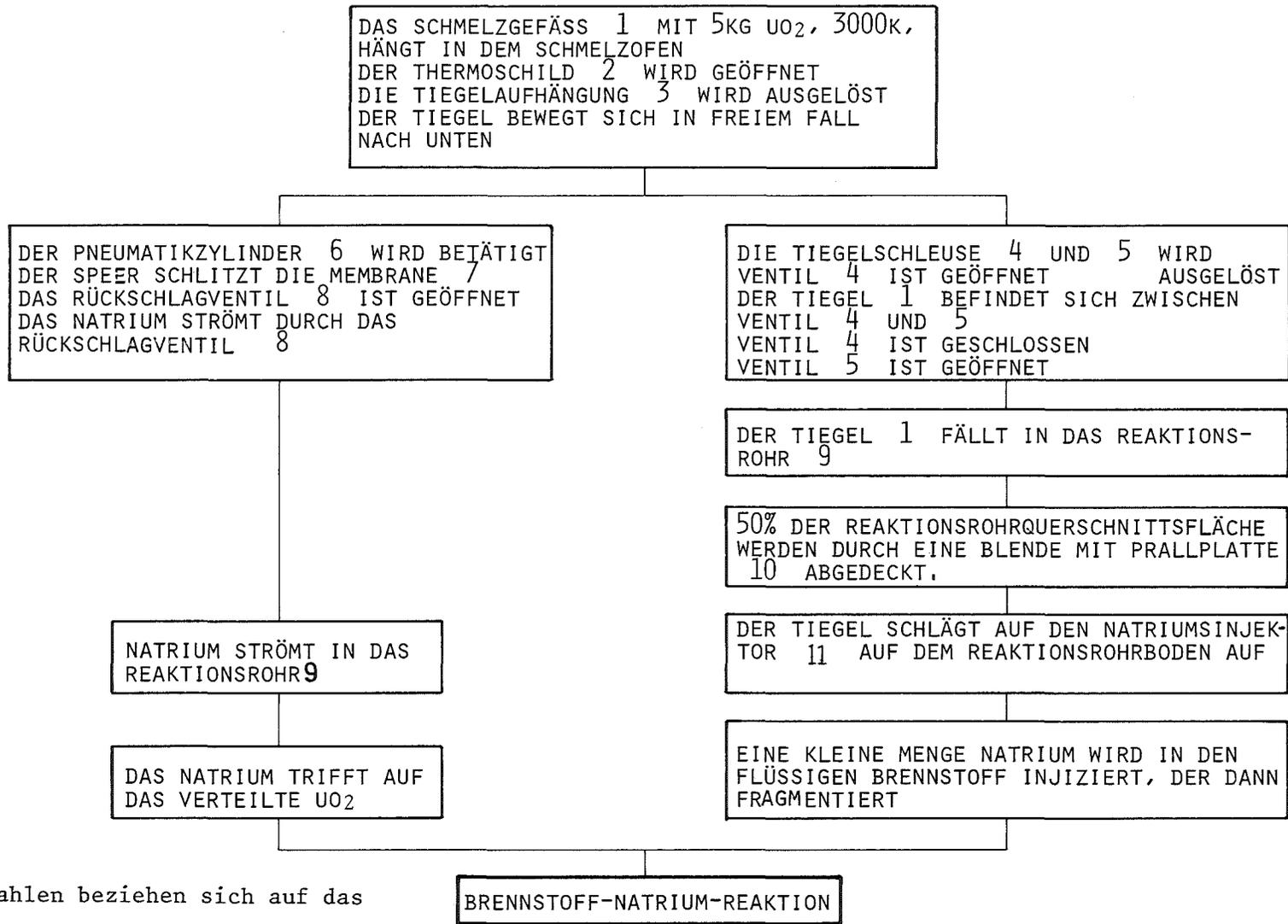


Abb. 15 Schema Meßwertfassung

Abb. 16 Flußdiagramm des Versuchsablaufs



Die Zahlen beziehen sich auf das
TUFCl - Schema (Abb.3)

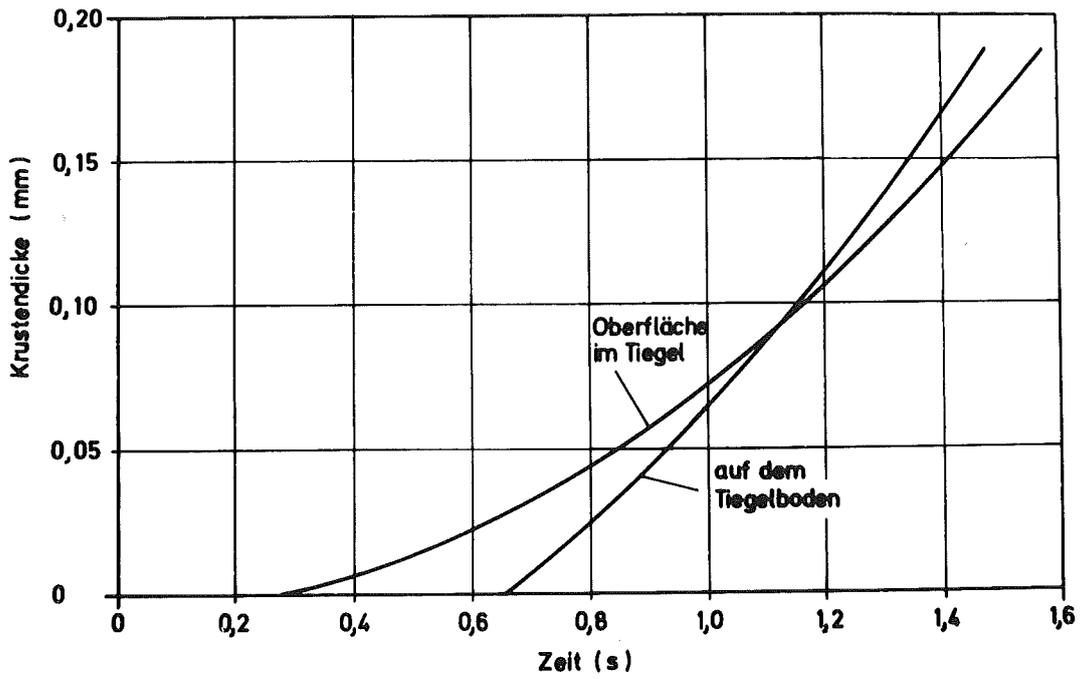


Abb. 17 UO_2 -Krustenwachstum

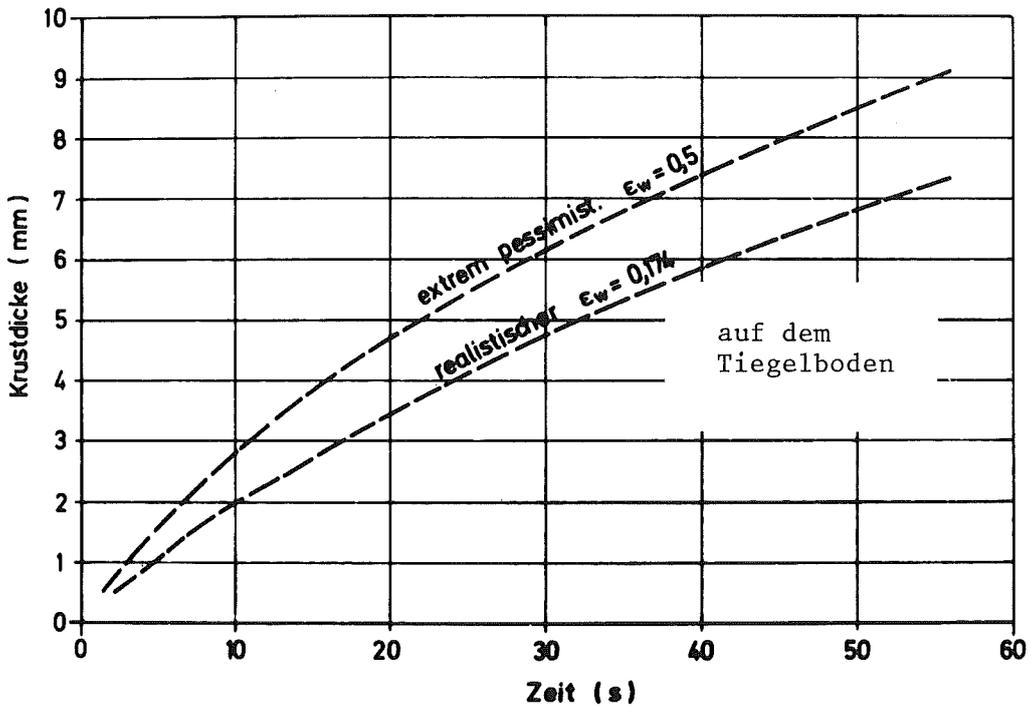
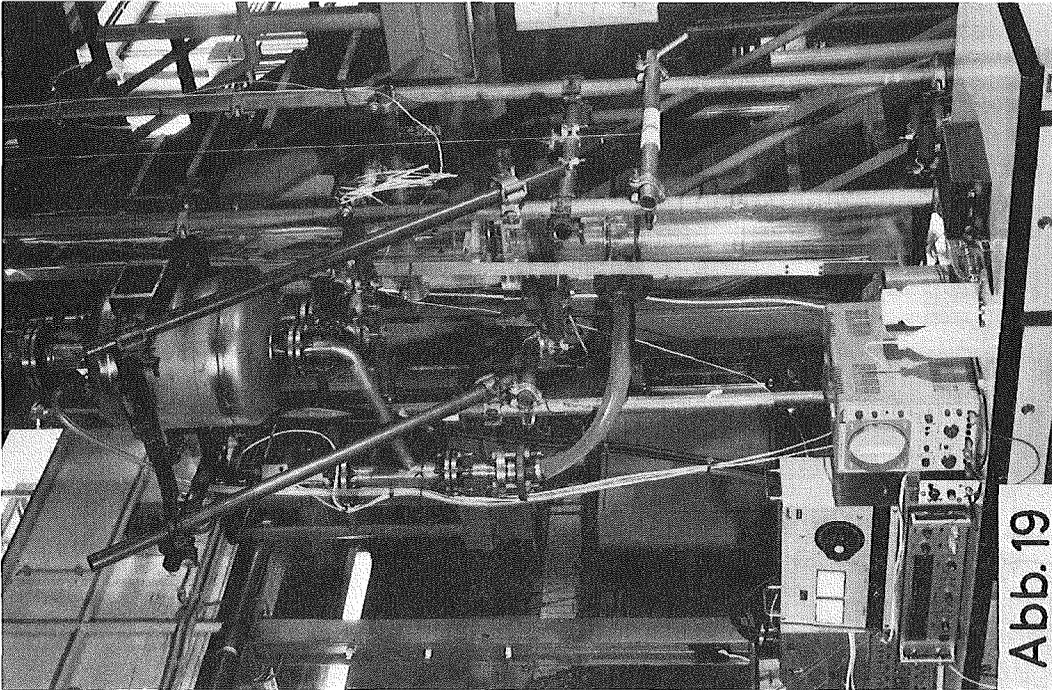
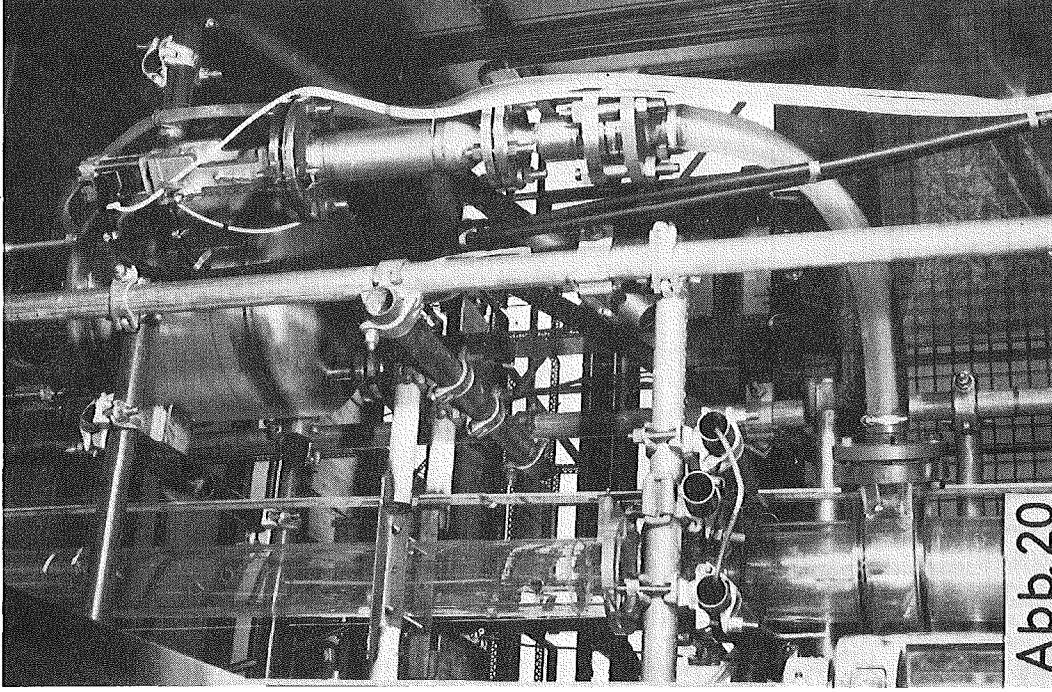
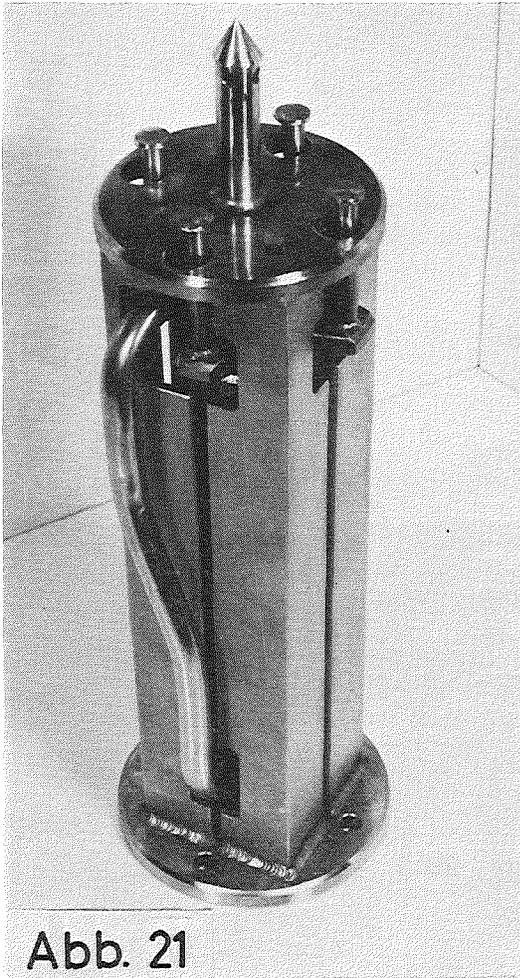


Abb. 18 UO_2 -Krustenwachstum



TUFCI - Modellversuchsstand



Natriuminjektor

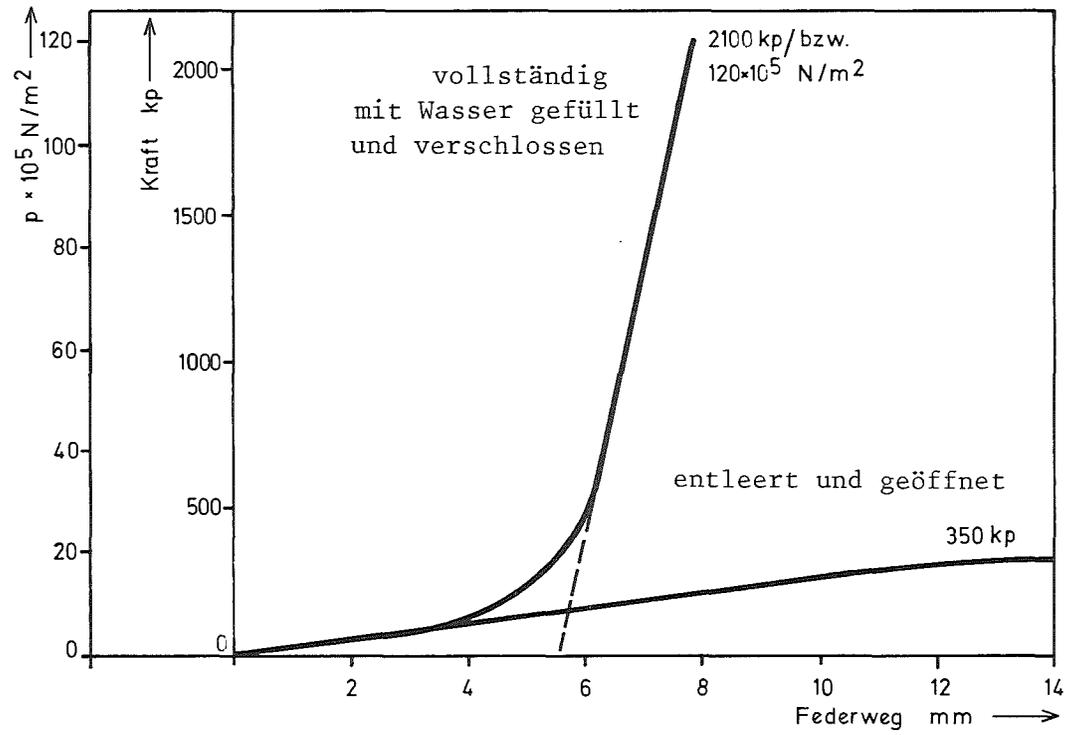


Abb. 22 Injektor - Belastungsdiagramm

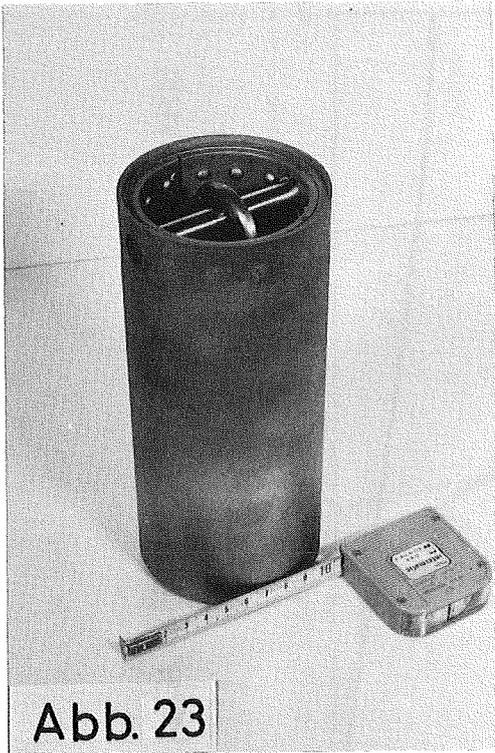


Abb. 23

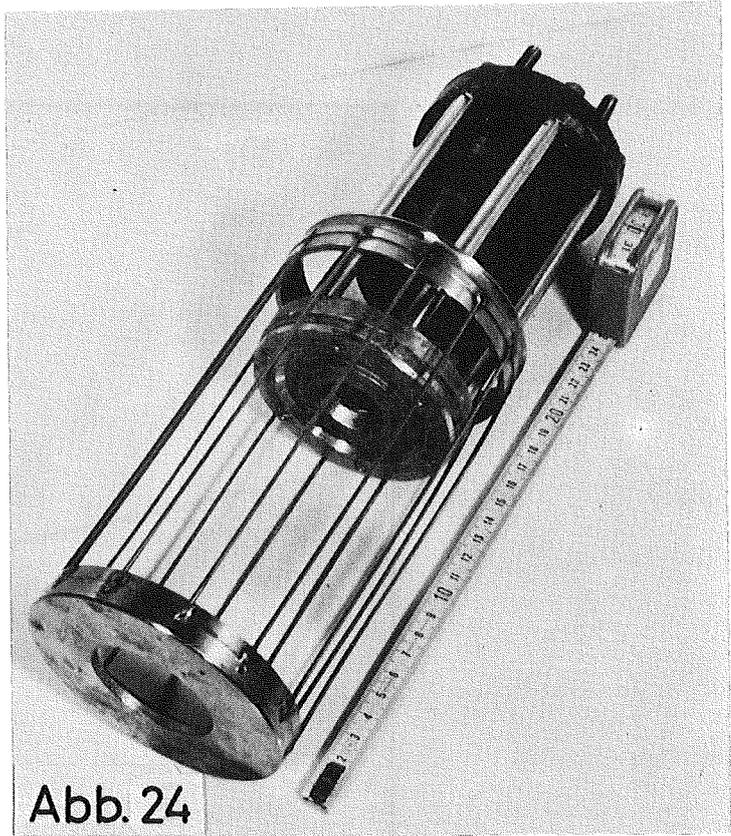


Abb. 24

Wolframschmelzgefäß Modelltiegel und Fangkorb

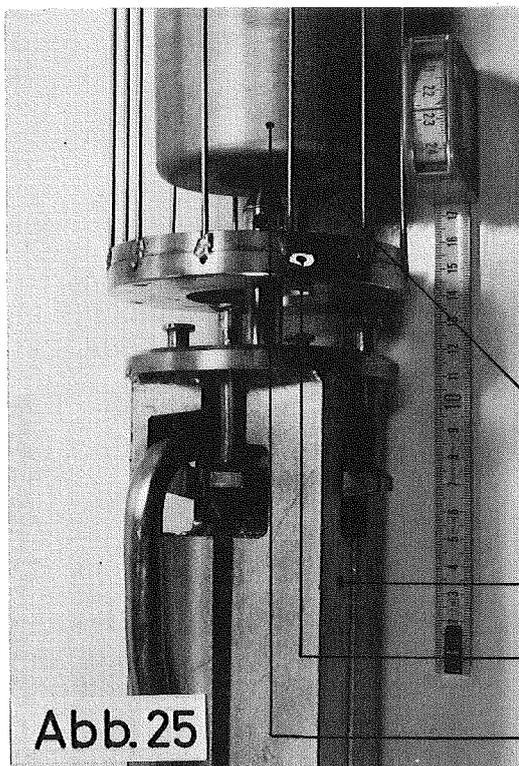


Abb. 25

Sollbruchstelle

Na.- Injektor
Fangkorb
und Wolframtiegel

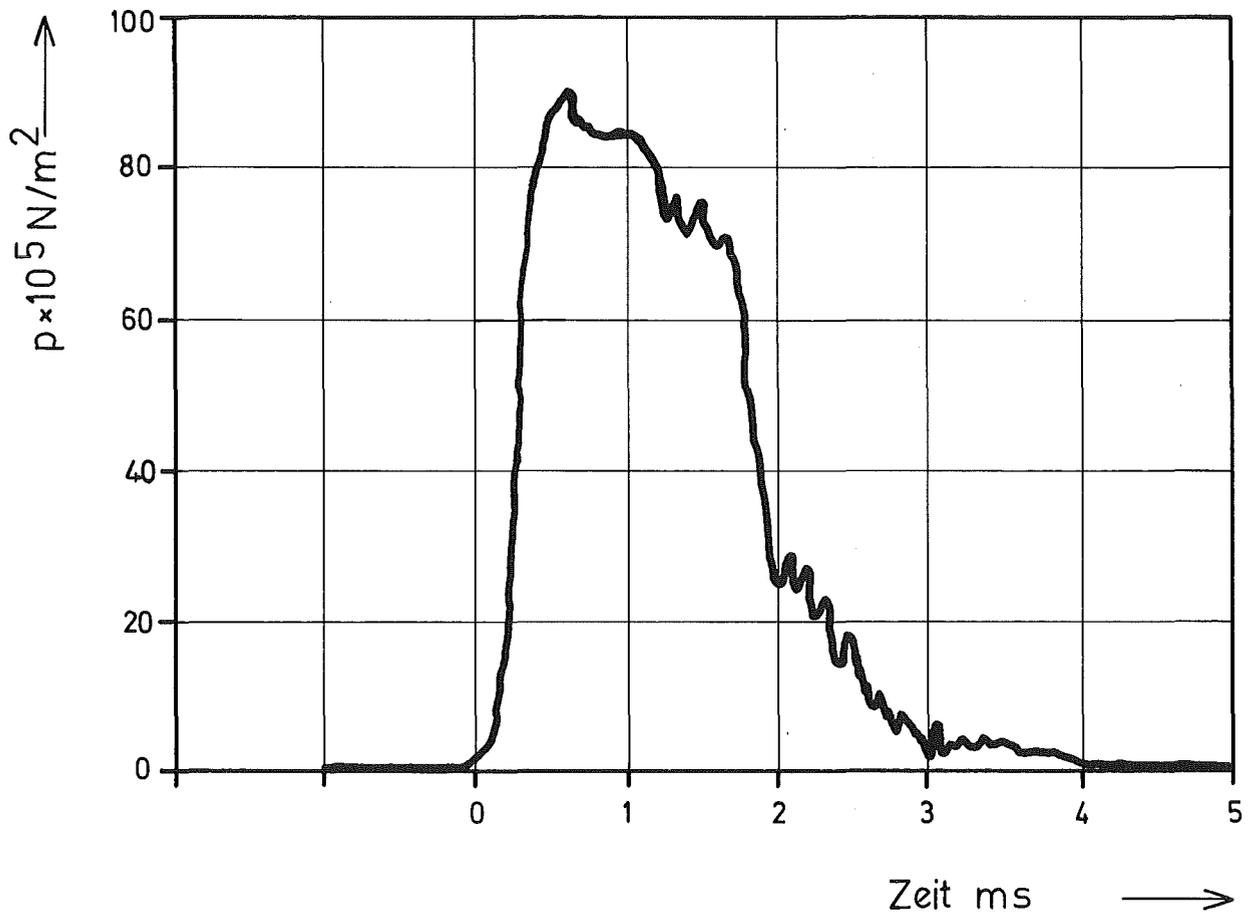


Abb. 26 Injektor-Druckverlauf bei Wasserinjektion

Ergebnisse nach 1. Dornversuch

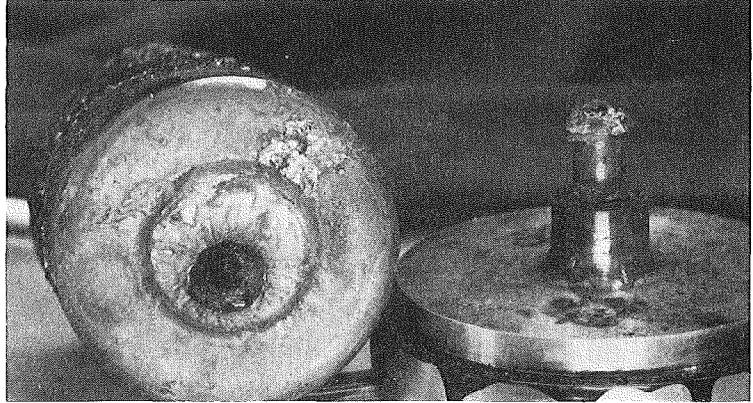
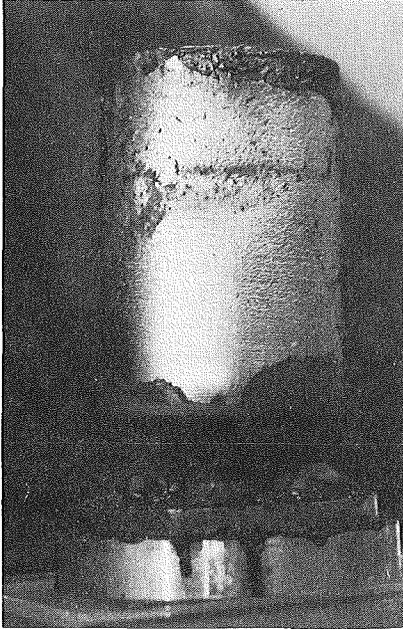


Abb. 27 Wolframtiegel

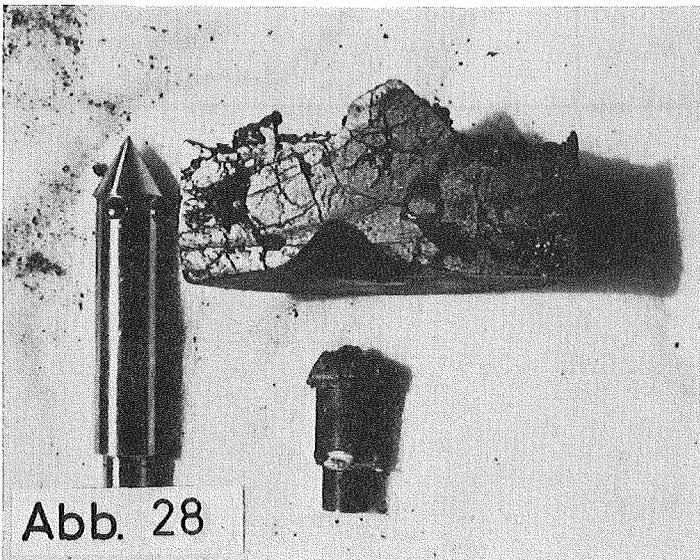


Abb. 28

Schnitt des UO_2 -Regulus

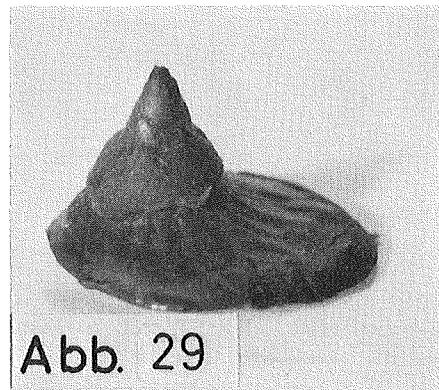
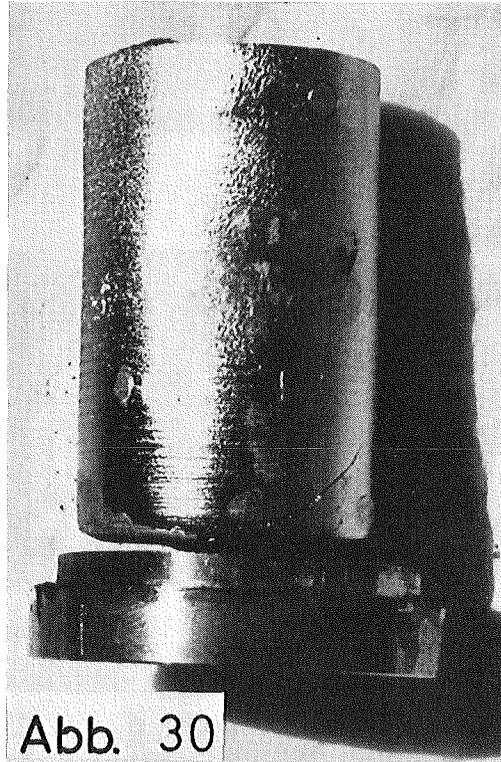


Abb. 29

Tiegelbodenabdruck

Ergebnisse nach 2. Dornversuch



Wolframtiegel

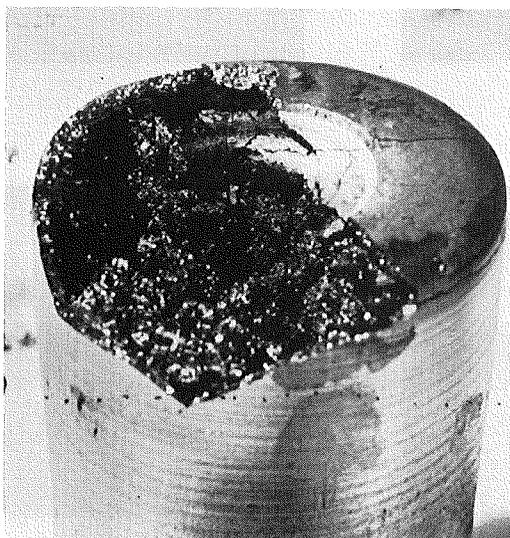
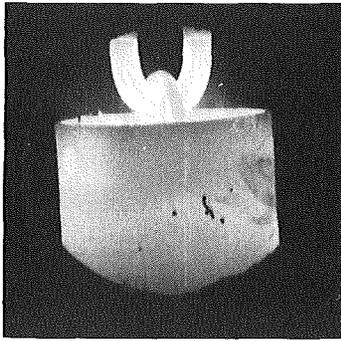
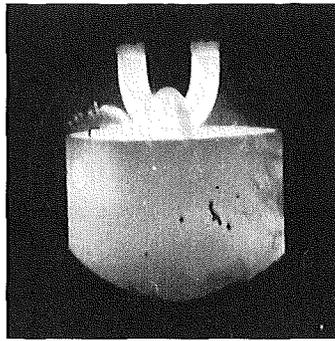


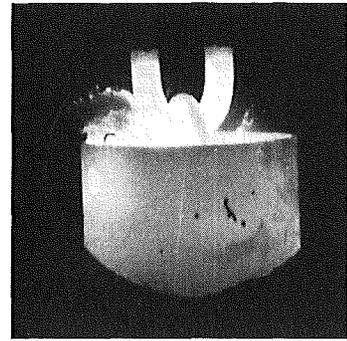
Abb. 31 Tiegelboden



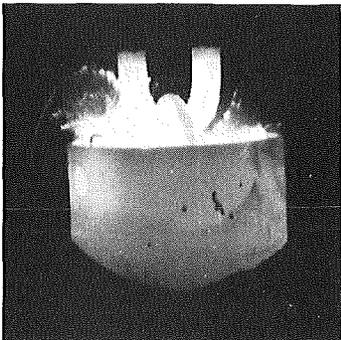
EVENT



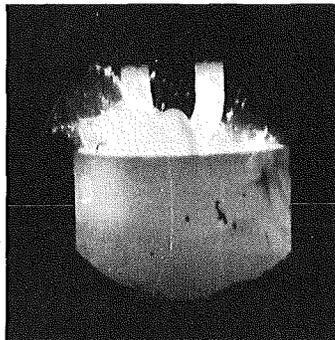
3 ms



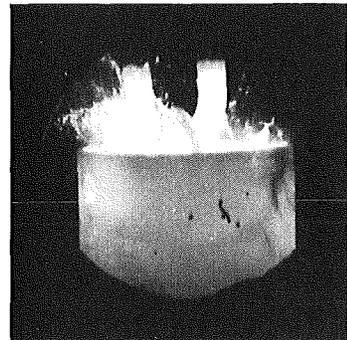
6 ms



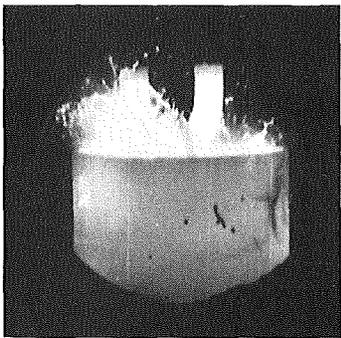
9 ms



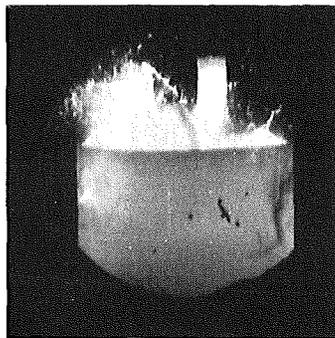
12 ms



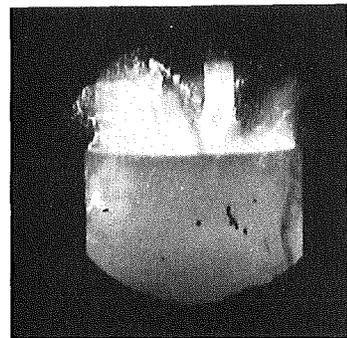
15 ms



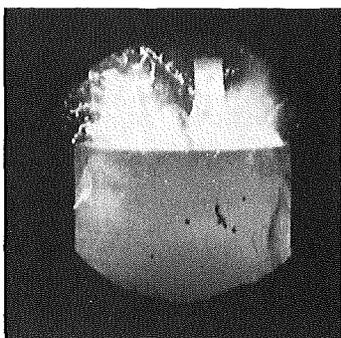
18 ms



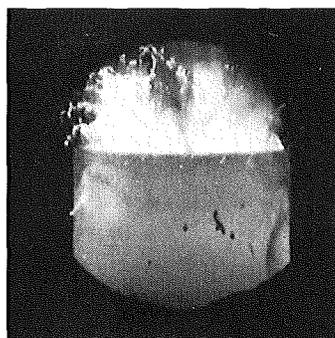
21 ms



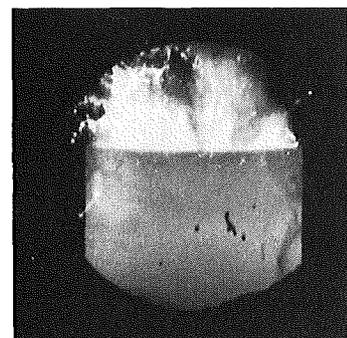
24 ms



27 ms



30 ms



33 ms

Abb. 32 Filmausschnitte der Na.-UO₂-Injektion