

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

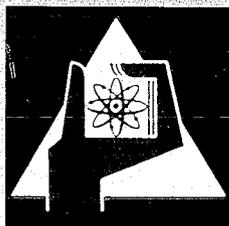
Mai 1969

KFK 980
EUR 4177 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Schmelzphänomene in UO_2 - Bestrahlungsproben

D. Geithoff



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Mai 1969

KFK-980
EUR-4177 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Schmelzphänomene in UO_2 -Bestrahlungsproben *)

D. Geithoff

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

*) Work performed within the association in the field of fast reactors between the European Atomic Energy Community and Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Zusammenfassung

Bei einer Reihe von Brennstoffprüflingen mit Oxidbrennstoff, die unter Bestrahlung partiell geschmolzen waren, wurden in der Nachuntersuchung die Schmelzkavernen sowie die keramische Struktur näher betrachtet. Als Untersuchungsmethode für die Schmelzkavernen wurde die Röntgendurchleuchtung mit einem Betatron gewählt. Es zeigte sich, daß die Kavernenform von Art und Dauer der Bestrahlung abhängig ist. Typische Formen für Langzeit-, Kurzzeit- und Zyklusbestrahlungen konnten unterschieden werden.

Die keramografische Bestimmung der Schmelzgrenze in einem Brennstoffquerschnitt wurde mit Hilfe der β, γ -Autoradiografie und der Kavernenprojektion bestätigt. Weiter konnten anhand von keramischen Schliffen Hinweise auf das Fließverhalten von geschmolzenem Uranoxid gewonnen werden.

Schmelzphänomene in UO_2 -Bestrahlungsproben

1. Einleitung

Aus der Verwendung von Uran und Plutonium in ihrer Oxidform als Kernbrennstoff ergibt sich unmittelbar die Frage nach dem Schmelzverhalten dieser Stoffe. Eine Anzahl von Einzeldaten aus diesem Bereich sind inzwischen hinreichend genau bekannt. So die Schmelzpunkte von UO_2 ($2840 \pm 20^\circ\text{C}$) und PuO_2 ($2390 \pm 20^\circ\text{C}$), das Phasendiagramm ihrer Mischoxide (1) und die molare Schmelzwärme von UO_2 (18,2 kcal/Mol), (2). Weiter wurde die Volumenänderung von UO_2 während des Schmelzvorganges zu + 9,6 % bestimmt (3).

Auf der anderen Seite ist die eindeutige Identifizierung der Schmelzgrenzen in einem teilweise geschmolzenen Oxid-Brennstoff durch keramografische Strukturanalyse noch immer Gegenstand einer Diskussion (4), (5), (6), (7). Auch die Viskosität einer UO_2 - bzw. Mischoxid-Schmelze ist bisher noch nicht exakt ermittelt worden. Es liegen hier lediglich einige Hinweise vor, die noch kein einheitliches Gesamtbild ergeben. Schließlich ist auch die Wärmeleitfähigkeit von flüssigem UO_2 nur durch Extrapolation über weite Temperaturbereiche ungenau zu erhalten.

Das Gesamtverhalten eines zylindrischen Brennstabes bei partiellem Schmelzen des Brennstoffs ist daher nur sehr unsicher im voraus zu bestimmen. Diese Unsicherheit spiegelt sich auch in den Auslegungsdaten für hochbelastete Brennstäbe wieder, bei denen die Spezifikationen ein zentrales Brennstoffschmelzen ausdrücklich ausschließen. So wurde z.B. in der Na-2-Studie des PSB (8) die Zentraltemperatur im Brennstab auf 2400°C festgelegt.

Bestrahlungsexperimente, bei denen partielles Brennstoffschmelzen in zylindrischer Geometrie angestrebt und erreicht wurden, sind mehrfach durchgeführt worden (5), (9), (10), (11), (12).

Bedingt durch die Vielzahl der dabei möglichen Parameter konnte nur ein Teilgebiet der Verhaltensformen des geschmolzenen Brennstoffs untersucht werden. Spezielle Fragestellungen sind damit noch immer unbeantwortet.

Zur Untersuchung des Anfahrverhaltens von Brennstäben hoher Leistungsdichte wurden im Rahmen der "Brennelement-Entwicklung des Projektes Schneller Brüter" in Karlsruhe etwa 40 stabförmige Brennstoffprüflinge bestrahlt, bei denen partielles Schmelzen hervorgerufen wurde. Die Bestrahlungsversuche wurden im heliumgekühlten Zentralloop des FR-2 durchgeführt. Als Brennstoff wurde angereichertes Uranoxid stöchiometrischer Zusammensetzung in Form von Tabletten und einvibriertem Pulver verwendet. Die Schmierdichten lagen zwischen 85 % th.D. für Pulver und 90 % th.D. für Tabletten. Abb. 1 gibt den Aufbau der Prüflinge wieder, die in zwei Versuchsgruppen (2 und 2Z) mit unterschiedlicher Zielsetzung bestrahlt wurden. In Versuchsgruppe 2 wurde als Parameter, die Stableistung, Bestrahlungszeit, Brennstoffform, Brennstoffdichte und der Spalt zwischen Brennstoff und Hülle verändert wobei die Bestrahlungszeit jeweils 10 Minuten, 2 Stunden oder 24 Stunden betrug. Die Prüflinge der Versuchsgruppe 2Z wurden bei konstanter Stableistung zyklisch bestrahlt, d.h. auf eine Bestrahlungszeit von 44 Stunden folgte eine Abkühlzeit von 4 Stunden, nach deren Ablauf der Prüfling erneut bestrahlt wurde.

Daneben wurde in einigen Prüflingen anderer Versuchsgruppen durch unbeabsichtigte Erhöhung der Stableistung lokales Brennstoffschmelzen hervorgerufen.

Die beobachteten Schmelzphänomene sollen im folgenden mit Hilfe von zwei Untersuchungstechniken betrachtet werden.

2. Schmelzkavernen in zylindrischen oxydischen Brennstoffsäulen

In zylindrischen UO_2 -Brennstäben wird beim Betrieb mit genügend hoher Stabileistung im Zentrum der Brennstoffsäule der Schmelzpunkt des Materials überschritten, so daß es zum partiellen Schmelzen des Brennstoffs kommt. Die für diesen Prozeß erforderlichen Wärmeleitintegrale liegen bei Urandioxyd in Tablettenform für eine Brennstoff-Randtemperatur von $500^{\circ}C$ um $70 W/cm^{-1}$. Bei Pulverbrennstoff liegt dieser Wert um etwa 20 % niedriger (7).

2.1. Mechanismus der Kavernenbildung

Da das Volumen des schmelzenden Materials während des Schmelzvorganges um 9,6 % zunimmt, muß, wenn ein Schwellen der Hülle vermieden werden soll, ein ausreichendes Leervolumen zur Verfügung stehen. Dies bedeutet, daß die Brennstoffdichte 90 % th.D. nicht überschreiten darf. Für Pulverbrennstoff wird diese Forderung durch die erreichbaren Vibriedichten automatisch erfüllt, während bei Tabletten die Brennstoffdichte echt begrenzt werden muß. Inwieweit der Spalt zwischen Hülle und Brennstoff in diese Volumenbilanz mit eingeht, ist noch nicht genau bekannt.

Bei den hier betrachteten Brennstoffprüflingen lagen die Brennstoffdichten für Tabletten bei etwa 90 % th.D. für Pulver bei 85 % th.D. Während des Betriebes war damit innerhalb der Schmelzzone die Schmelzausdehnung durch die Brennstoffporosität gerade aufgefangen, so daß sich auf der anderen Seite auch keine größeren Hohlräume bilden konnten. Bei der Abkühlung erstarrt der geschmolzene Brennstoff zunächst weitgehend porositätsfrei, d.h. zu 100 % dichtem Material und erst in der letzten Erstarungsphase wird eine poröse Struktur gebildet, die allerdings nur einen geringen Bruchteil des ursprünglich geschmolzenen Materials ausmacht. Diese integrale Brennstoffverdichtung führt zur Ausbildung von Schmelzkavernen deren typische Formen bei der Nachuntersuchung Hinweise auf den Bestrahlungsablauf bzw. das Brennstoffverhalten geben. Es ist selbstverständlich, daß die Abkühlungsgeschwindigkeit einen wichtigen Einfluß auf das

Erstarrungsgeschehen hat, so daß bei vergleichenden Betrachtungen identische Abkühlungen vorausgesetzt werden müssen.

Im Falle der hier besprochenen Prüflinge wurde eine Gleichmäßigkeit dadurch erreicht, daß das Ausfahren der Proben aus dem Bestrahlungsloop mit einer einheitlichen Geschwindigkeit von 2 mm/sec erfolgte.

2.2. Schmelzkavernen im Betatron-Röntgenbild

Schmelzkavernen können hinsichtlich ihrer Form und Ausdehnung am besten mit Hilfe eines Durchleuchtungsverfahrens untersucht werden. Eine früher praktizierte Methode, den Brennstab in zahlreiche kleine Abschnitte zu teilen und aus der Größe des jeweiligen zentralen Lochs die Schmelzkaverne zeichnerisch zu konstruieren (13) führt nur zu einem sehr groben Bild des Hohlraums. Lokal begrenzte Unregelmäßigkeiten können dabei leicht übersehen werden. Bei unseren Untersuchungen wurden die Prüflinge mit Hilfe eines Betatrons mit Röntgenstrahlen von 18 MeV Maximalenergie durchleuchtet (14). Die Fehlererkennbarkeit liegt bei dieser Methode etwa um 1 % der durchstrahlten Materialdicke. Somit können Hohlräume von der Größe normaler Zentralkanäle bis hinab zu dünnen Haarrissen im Brennstoff sichtbar gemacht werden. Allerdings ist dazu eine auf die speziellen Bedürfnisse entwickelte Arbeitstechnik mit Material-Dickenausgleich und optimalen Durchleuchtungsdaten erforderlich, da andernfalls die Eigen- γ -Strahlung der Prüflinge eine zu starke Untergrundschwärzung ergibt.

Abb. 2 zeigt an einem Tablettenprüfling eine ideal ausgebildete Schmelzkaverne. Der Hohlraum ist rübenförmig und zeigt mit der Spitze nach unten. Ähnliche Hohlräume finden sich als Lunken in vielen Schmelzgußwerkstücken. Im Betriebszustand war das Zentrum der Brennstoffsäule praktisch vollkommen mit flüssigem Oxid erfüllt. Mit Beginn der Abkühlung setzte ein stetiges Absinken des noch flüssigen Materials in den unteren Abschnitt der Brennstoffsäule ein, wodurch die Schmelzkaverne gebildet wurde. Dieser Vorgang setzt voraus, daß die Schmelze leicht flüssig ist und die Abkühlung gleichmäßig erfolgt, so daß jeweils genügend Schmelze von oben nachlaufen kann.

Daß die Form der Schmelzkaverne offenbar von der Bestrahlungszeit abhängig ist, zeigt Abb. 3. Drei Prüflinge mit gleichen Brennstoffspezifikationen wurden unterschiedlich lange (10 min, 2 h, 24 h) bei etwa gleicher Stableistung bestrahlt. Während die Stäbe mit 2 h und 24 h Bestrahlungszeit gleichmäßige Kavernen der erwähnten Rübenform aufweisen, ist es beim 10 min-Stab zu einem Stocken des vertikalen Brennstoffflusses gekommen. Dadurch hat sich eine dicke Brennstoffbrücke ausgebildet. Unmittelbar darunter sind kleinere Kavernen entstanden, ebenfalls wieder mit dazwischenliegenden Brücken.

Die gleichen Phänomene zeigen sich bei einer anderen Prüflingsgruppe mit geringer Stableistung, also auch mit einer dünneren Schmelzzone, Abb. 4. Ungünstigerweise ist hier die mittlere Bestrahlungszeit (2 h) nicht durch einen Prüfling vertreten. Aus anderen ähnlichen Stabgruppen liegen jedoch Hinweise vor, daß die unregelmäßige Kavernenausbildung auch noch bei 2 Stunden Bestrahlungszeit zu beobachten ist und erst bei der 24 Stunden-Bestrahlung eine gleichmäßige Rube erzeugt wird.

Eine Erklärung dieser Beobachtungen bietet sich in folgender Art an: Der geschmolzene Brennstoff ändert mit der Zeit seine Eigenschaften. Nur kurz, d.h. 10 min aufgeschmolzenes Material enthält das beim Brennstoffherstellungsprozeß adsorbierte bzw. eingeschlossene Reduziergas (H_2 , CO, N_2) noch als Gasblasen. Bei der Abkühlung wird dadurch das gleichmäßige Abfließen der Schmelze gestört, es kommt zur Brückenbildung durch lokale Erstarrung. Wird die Schmelze hingegen längere Zeit flüssig gehalten, so findet ein Läuterprozeß statt, ähnlich wie er beim Glasschmelzen herbeigeführt wird. Die Gasblasen wandern dabei an die Oberfläche und zurück bleibt eine blasenfreie Schmelze. Eine solche Schmelze kann dann auch beim Erstarren gleichmäßig nachlaufen und so kommt es zur Ausbildung einer regelmäßigen Kaverne.

Im Einklang mit dieser Erklärung steht die Tatsache, daß bei kleineren Stableistungen die gleichmäßige Rübenkaverne erst nach längerer Schmelzzeit gebildet wird. Der Läuterungsprozeß ist offenbar stark abhängig von der Temperatur der Schmelze, so daß bei niedriger Stableistung die Läuterung verzögert wird.

Darüber hinaus ist die Form einer Schmelzkaverne auch abhängig von der Brennstoffart. Die Gleichmäßigkeit der Dichte von Tablettenbrennstoff spiegelt sich in den gleichmäßigen Schmelzkavernen wieder, während der Pulverbrennstoff mit seinen erheblichen Dichteschwankungen die Kavernen unregelmäßiger formt. Abb. 5 zeigt zwei Schmelzkavernen in Pulverbrennstoff.

Bei allen bisher gezeigten Bildern wurden die Prüflinge mit konstanter Stableistung betrieben, d.h. sie wurden langsam auf die Bestrahlungsposition gefahren, verblieben dort während der gesamten Bestrahlungszeit und wurden danach wieder langsam ausgefahren.

Zyklische Bestrahlungen in der Art, daß der Prüfling nach einer Abkühlpause erneut in den Reaktor gebracht wird, führen zu einer anderen, ebenfalls typischen Kavernenform, Abb. 6. Die Form läßt sich leicht als eine Überlagerung zweier regelmäßiger Kavernen deuten. Die geschmolzene zentrale Säule erreicht nach der ersten Bestrahlung bei den folgenden Zyklen offenbar ihre alte Höhe nicht mehr, ein Hohlraum bleibt auch während des Betriebs über der Schmelze bestehen. Beim Abkühlen bildet sich dann die nach unten verlagerte zweite Rübenkaverne. Die Ursache dafür, daß die Schmelzsäule ihre alte Höhe nicht mehr erreicht, ist möglicherweise die Verdichtung des Brennstoffs im unteren Prüflingsabschnitt nach der ersten Betriebsphase. Dadurch wird beim Wiederanfahren durch größere Dichte und höhere Stableistung und die damit verbundene größere Ausdehnung der Spalt zwischen Hülle und Brennstoff stärker für die Schmelzausdehnung verfügbar. Die Schmelze weicht nun mehr radial und nicht so stark axial aus. Daß der Schmelzpegel bei weiteren Zyklen nicht mehr absinkt zeigt Abb. 7. Hier wurden die Prüflinge

bis zu 10x zyklisiert, ohne daß sich die Kavernenform grundsätzlich änderte. Daraus kann geschlossen werden, daß die Brennstoffumlagerung im wesentlichen in den ersten zwei Zyklen erfolgt.

Brennstoffbrücken wurden bei keiner Kaverne des Zyklus-Typs beobachtet. Die vergleichsweise langen Bestrahlungszeiten von 44 Stunden pro Zyklus sind für den weiter oben erwähnten Läuterprozeß wohl ausreichend.

3. Geschmolzenes Urandioxyd in der Keramografie

In der Keramografie gibt es für UO_2 keine eindeutige Schmelzstruktur in der Art, daß bestimmte Flächenabschnitte aufgrund ihres Aussehens unverkennbar als ursprünglich oder zwischenzeitlich geschmolzen identifiziert werden können. Dies hat dazu geführt, daß die Festlegung der Schmelzgrenzen in einem keramografischen Schliff den Mittelpunkt zahlreicher Kontroversen und Experimente gebildet hat (4), (5), (6). Erschwerend für eine gemeinsame Fixierung war insbesondere die Tatsache, daß gewisse, dem Schmelzzustand zugeschriebene Strukturen nicht in allen geschmolzenen Brennstoffproben gefunden werden konnten. Die Ansichten über die Schmelzgrenzen haben sich inzwischen einander genähert. Allerdings gilt dies nur für UO_2 , das unmittelbar vor Bestrahlungsende noch flüssig war. Brennstoffzonen, die nach anfänglichem Schmelzen erstarrt sind, und im festen Zustand bei genügend hoher Temperatur weiterbestrahlt wurden, wandeln ihre Struktur so stark um, daß sie als ursprüngliche Schmelze nur noch in Ausnahmefällen identifiziert werden können.

Die im folgenden gezeigten UO_2 -Strukturen stammen im wesentlichen aus Brennstoffprüflingen mit kurzen Bestrahlungszeiten, für die angenommen werden kann, daß der anfänglich geschmolzene Brennstoffanteil auch noch bei Bestrahlungsende flüssig war.

Zur Beurteilung der Schmelzstruktur muß zunächst der gesamte Brennstoffprüfling in die Betrachtung einbezogen werden. Der wichtigste Ausgangspunkt ist dabei, die Größe der Schmelzkaverne. Abb. 8 zeigt das obere Ende eines kurzzeitig bestrahlten Pulverprüflings. Geht man von der Vorstellung aus, daß die Kaverne zum Zeitpunkt der Bestrahlung mit flüssigem Brennstoff gefüllt war und der Hohlraum erst durch Abkühlung gebildet wurde, so stellt sich die Frage, ob der maximale Kavernendurchmesser zugleich die maximale Ausdehnung des Schmelzbereiches wiedergibt, oder ob der Hohlraumdurchmesser durch an der Wand haftendes geschmolzenes UO_2 kleiner ist.

Die Detailbilder vom Innenrand der Schmelzkaverne zeigen, daß im Bereich des maximalen Durchmessers Linsenblasen und die durch sie erzeugten Säulenkristalle unmittelbar an die Kavernenwand heranreichen. In den darunterliegenden Bereichen, bei denen die Kaverne bereits verjüngt ist, schiebt sich zwischen Kavernenwand und Linsenblasen eine immer dicker werdende hochdichte Brennstoffschicht. Da bekannt ist, daß Linsenblasen nur in festem UO_2 existieren, ergibt sich zwanglos die Erklärung, daß im Bereich des maximalen Kavernendurchmessers der geschmolzene Brennstoff vollkommen abgeflossen ist und sich in den darunterliegenden Zonen als hochdichte Innenauskleidung festgesetzt hat. Die große birnenförmige Blase im untersten Detailbild spricht ebenfalls für den geschmolzenen Zustand in diesem Bereich.

Somit ist es möglich, durch Projektion des maximalen Kavernendurchmessers nach unten - unter Berücksichtigung etwaiger Leistungsgradienten über die Prüflingslänge - die Schmelzgrenzen in tieferliegenden Querschnitten ohne Kaverne zu ermitteln. In Abb. 9 ist in einem Querschnitt aus dem gleichen Prüfling die Schmelzgrenze in der beschriebenen Art bestimmt worden. Eine Kontrolle ist noch dadurch gegeben, daß die Strukturgrenze zwischen hochverdichtetem Brennstoff und Säulenkristallzone hier besonders klar zu sehen ist.

Wo dies nicht der Fall ist, wie in Abb. 10, ist man auf die Kavernenprojektion angewiesen, wobei als weiteres Hilfsmittel noch die β, γ -Autoradiografie herangezogen werden kann. Der Schmelzbereich ist die dunkle Zone (geringe β, γ -Aktivität) mit dem hellen Kern. Die an Spaltprodukten abgereicherte Zone entsteht offenbar durch eine Schmelzreinigung des Brennstoffes, wobei die Fremdstoffe in die Restschmelze, also in der Mitte des Stabes, angereichert werden. Der dadurch erhöhte Verunreinigungsgrad ist wahrscheinlich die Ursache für die ungewöhnliche Struktur der Restschmelze. Ihre scharfe Begrenzung konnte bisher allerdings nicht für eine Schliffauswertung herangezogen werden, da unklar ist, wovon die Ausdehnung dieser Zone bestimmt wird.

Geschmolzenes UO_2 außerhalb der zentralen Hochtemperaturzone zeigt Abb. 11. Hier ist durch einen Riß im Tablettenbrennstoff flüssiges Material bis zur metallischen Hülle vorgedrungen und anschließend erstarrt. Im äußeren Bereich der Tablette bei Betriebstemperaturen von $<1700^\circ C$ ist die Schmelzstraße gut erkennbar, besonders wenn man, wie in diesem Bild, durch Überätzen der Sinterstruktur den Kontrast verstärkt. Nach innen zu jedoch ist trotz der kurzen Bestrahlungszeit eine Strukturumwandlung soweit vollzogen, daß die Schmelzstraße bis zu ihrem zentralen Ausgangsort nicht mehr zu verfolgen ist. Eine Schar von Linsenblasen ist gerade dabei, die letzten Reste des einstigen Risses durch Transport in den Innenraum zu vernichten. Damit ist besonders deutlich demonstriert, daß Schmelzstrukturen nach ihrer Erstarrung bei hohen Temperaturen schnell umgewandelt und so ursprüngliche Schmelzgrenzen unsichtbar werden.

Als typisches Kennzeichen einer Schmelzstraße kann man den in der Außenzone deutlich sichtbaren Mittelriß ansehen. Er nimmt die Stelle eines zentralen Erstarrungslunkers ein und ist bisher bei allen Schmelzstraßen beobachtet worden.

Aus der Weite der von der Schmelze durchdrungenen Risse kann eine qualitative Aussage über die Viskosität des flüssigen UO_2 gemacht werden. Offenbar ist die Schmelze dünnflüssig genug, um in 75 μ weite Risse einzudringen, wie in Abb. 12 zu sehen ist. Einschränkend muß jedoch gesagt werden, daß über die Temperatur der Schmelze zum Zeitpunkt des Eindringens, also über eine etwaige Überhitzung, keine Hinweise vorliegen. Geschmolzenes UO_2 kann andererseits nämlich auch sirupöse Konsistenz zeigen, wie in Abb. 13. Die Schmelze hat sich hier in mehreren dicken Schichten übereinandergelegt, ohne den ihr zur Verfügung stehenden Raum bis zur Hülle flüssigkeitsartig auszufüllen. Nach außen haben die Schichten einen runden Abschluß. Ähnliche Formen beobachtet man nur bei hochviskosen Flüssigkeiten. Damit ist offenkundig, daß für die Beurteilung des Verhaltens von flüssigem UO_2 -Brennstoff als zusätzlicher Parameter sicher auch die tatsächliche Temperatur der Schmelze entscheidend ist.

Wenn man sagen kann, daß die Kenntnis des Schmelzverhaltens von UO_2 noch heute erhebliche Lücken aufweist, so gilt dies noch in viel größerem Maße für den Brüterkernbrennstoff $(\text{U,PU})\text{O}_2$. Es ist gewiß, daß einige grundsätzliche Verhaltensweisen vom UO_2 unmittelbar auf das Mischoxyd übertragen werden können. Für eine zuverlässige Voraussage des Schmelzverhaltens eines Brüterbrennstabes sind jedoch noch weitere Bestrahlungsversuche notwendig.

An der Ausführung der Nachuntersuchungen im Bereich der Heißen Zellen des KFZ Karlsruhe war eine größere Gruppe von Mitarbeitern beteiligt, denen hier gedankt wird. Darüber hinaus gilt besonderer Dank Herrn H.L. Krautwedel für die keramografischen Untersuchungen und Herrn M. Scheeder für seine allgemeine Unterstützung der Arbeiten.

Literatur

- (1) W.L. Lyon, W.E. Baily
The Solid-Liquid Phase Diagram for the UO_2 - PuO_2 -System
Journ. of Nucl. Mat. 22 (1967) 332 - 339
- (2) R.A. Hein, P.N. Flagella, J.B. Conway
High-Temperature Enthalpy and Heat of Fusion of UO_2
Journ. of the Amer. Ceram. Soc. Vol 51, No. 5, 291 - 292
(May 1968)
- (3) J.A. Christensen
Thermal Expansion and Change in Volume on Melting for
Uranium Dioxide
HW-75148 (Oct. 1962)
Journ. of the Amer. Ceram. Soc Vol 46, No. 12, 607 (Dec. 1963)
- (4) G.R. Horn, J.A. Christensen
Identification of the Molten Zone in Irradiated UO_2
ANS-Transactions Vol. 6 No. 2 (Nov. 1963)
- (5) M.F. Lyons et al.
 UO_2 Fuel Rod Operation with Gross Central Melting
GEAP-4264 (Oct. 1963)
- (6) M.F. Lyons, B. Weidenbaum, H. Hausner, T.J. Pashos
New Evidence to Delineate the UO_2 Molten Boundary
ANS-Transactions Vol. 8, No. 2, p. 376 (Nov. 1965)
- (7) Thermal Conductivity of Uranium Oxide
IAEA Technical Report Series No. 59 (1966)
- (8) K. Gast, E.G. Schlechtendahl et al.
Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na-2
KFK 660 (Okt. 1967)

- (9) M.F. Lyons et al.
High Performance UO_2 -Program
Quarterly Progress Reports
GEAP-3771 (1962 - 1966)
- (10) R.E. Skavdahl, E.L. Zebroski
Sodium-Cooled Reactors
FCR-Development Program
24th Quarterly Report
GEAP-5541 (Dec. 1967)
- (11) J.A. Christensen
Power Rating Required for Melting and Oxygen Redistribution
in Molten Center UO_{2+x} Fuels
BNWL-536 (Dec. 1967)
- (12) A.S. Bain et al.
Melting of UO_2 During Irradiations of Short Duration
AECL-2287 (Aug. 1965)
- (13) E.L. Zebroski
Sodium-Cooled Reactors
FCR-Development Program
7th Quarterly Report
GEAP-5098 (Febr. 1966)
- (14) H.L. Krautwedel, D. Geithoff, H. Enderlein
Die Durchleuchtung von bestrahlten Brennelementen mit Hilfe
eines Betatrons
Kerntechnik 10 Jg. Heft 8/9 S. 494

FR-2 Loop - Prüflinge

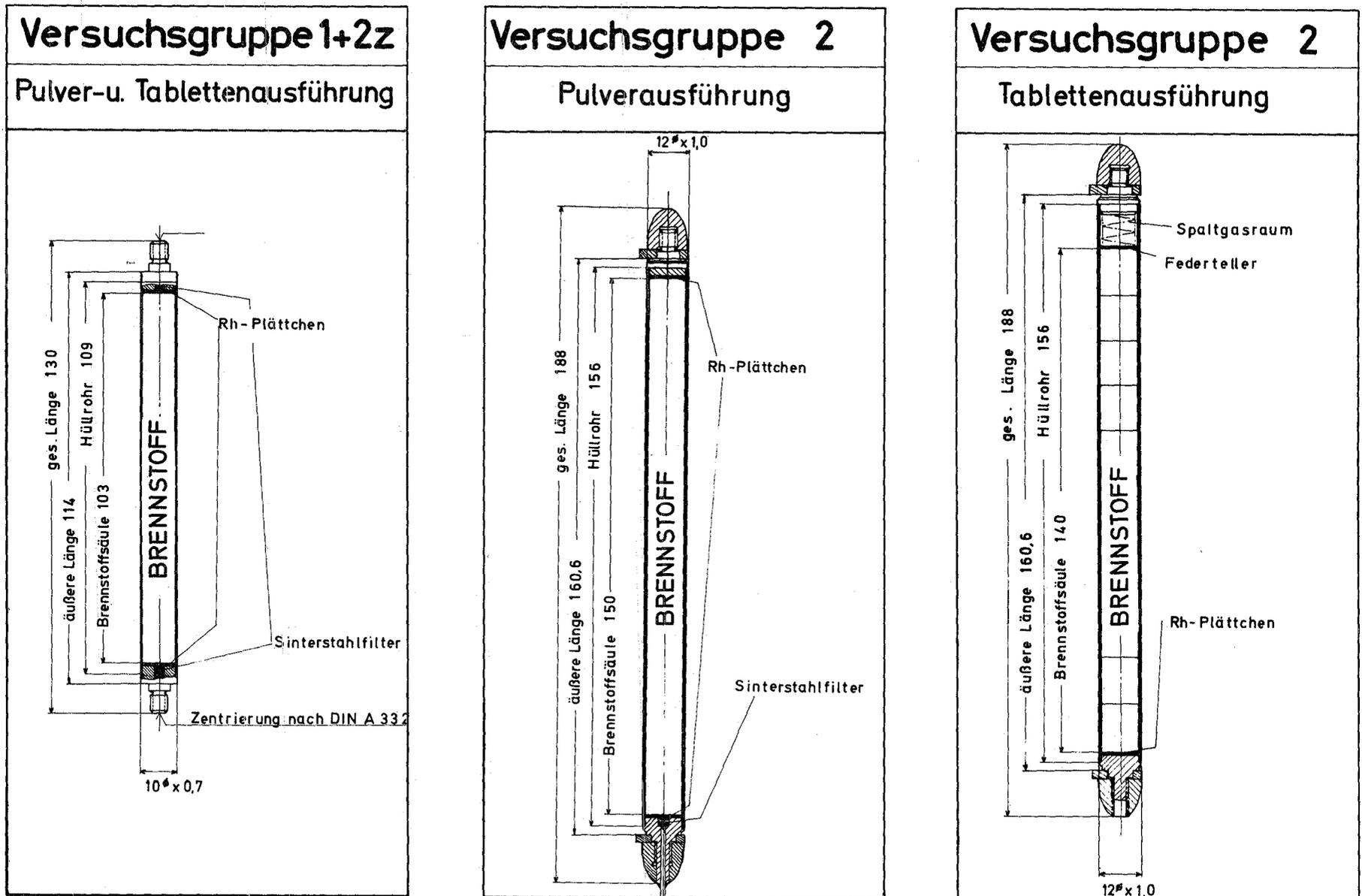
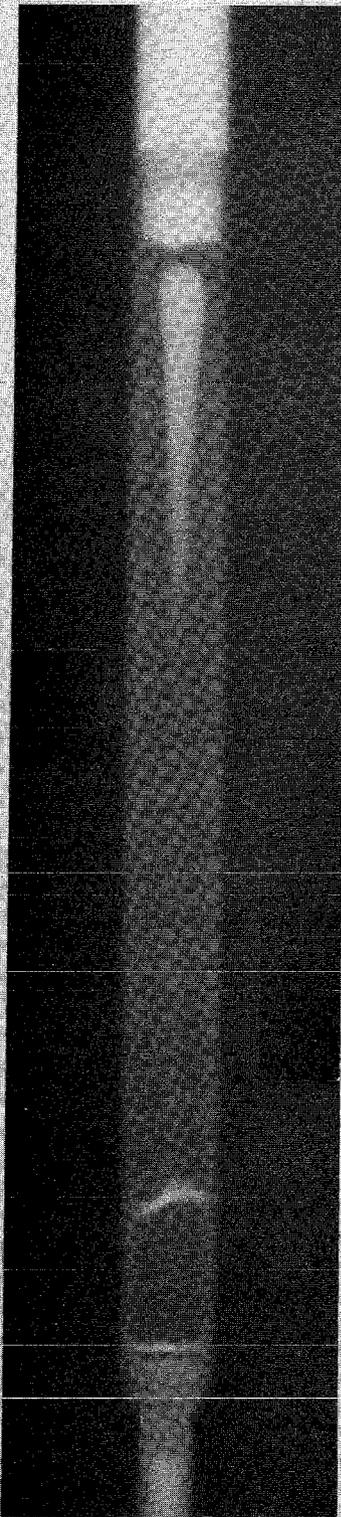
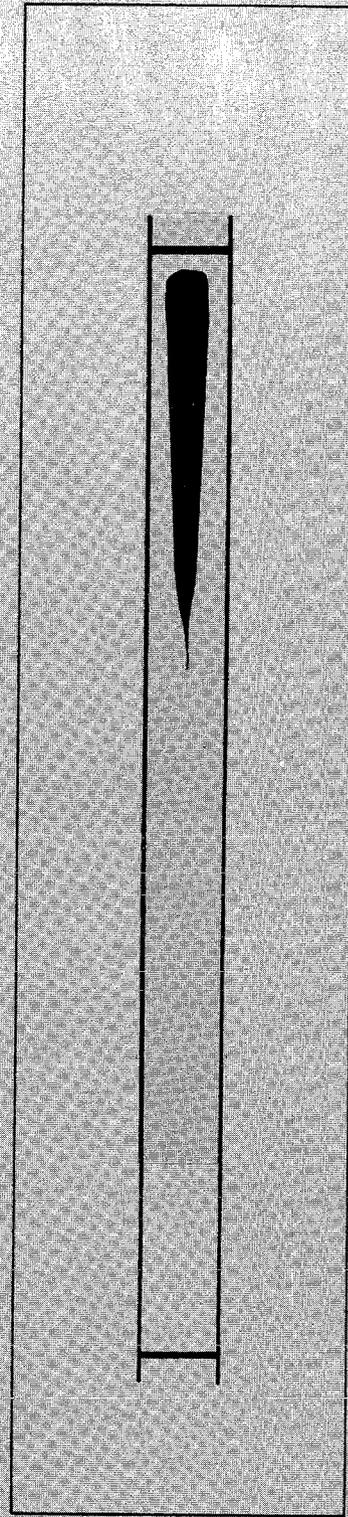


Abb. 1

BETATRON-BILD



SCHEMA



Prüfling L 21

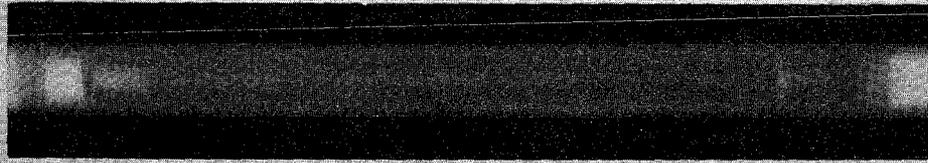
UO₂-Tabletten

960 W/cm

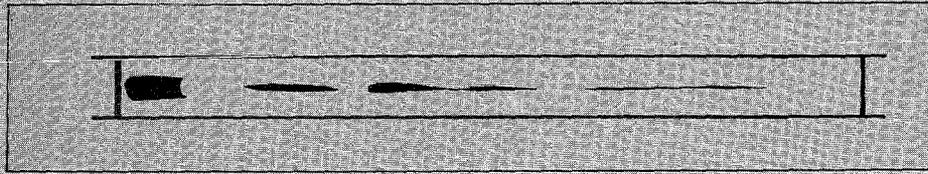
Bestrahl. Zeit 2 h

Abb. 2

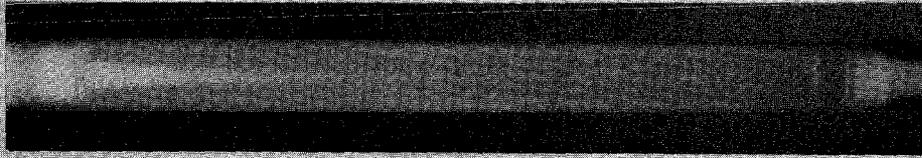
BETATRON-BILD



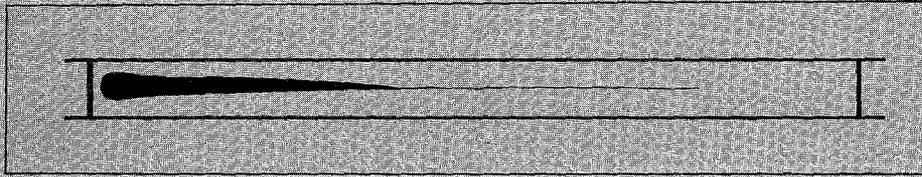
SCHEMA



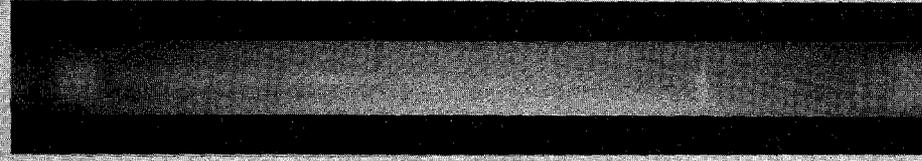
BETATRON-BILD



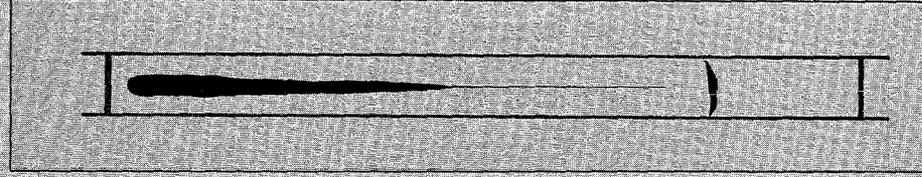
SCHEMA



BETATRON-BILD



SCHEMA



Prüfling L 10

Prüfling L 11

Prüfling L 12

Stableistung 950 W/cm

UO₂-Tabletten

Dichte 88 % th.D.

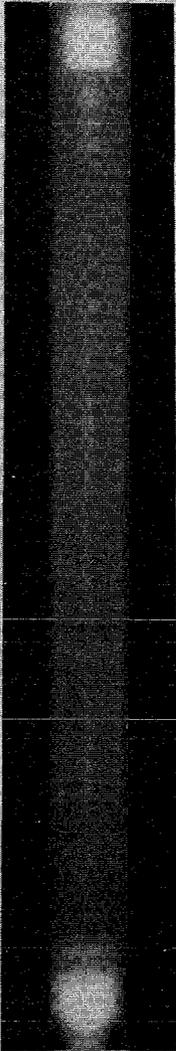
Bestr.-Zeit 10 min

Bestr.-Zeit 2 h

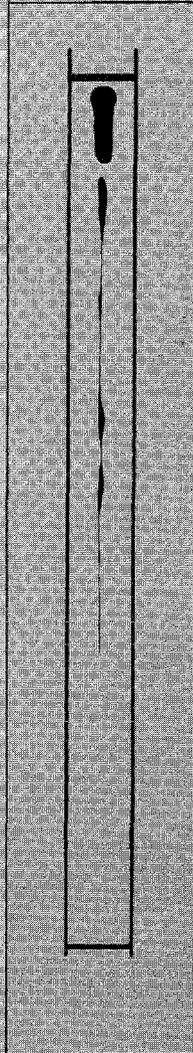
Bestr.-Zeit 24 h

Abb. 3

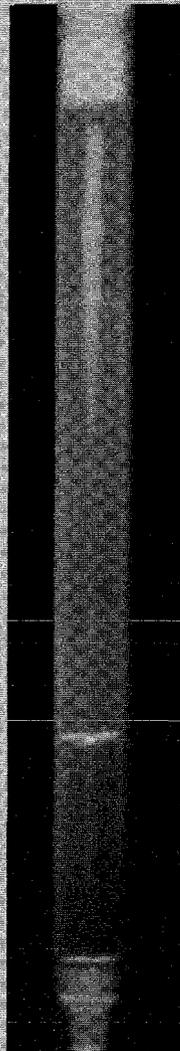
BETATRON-BILD



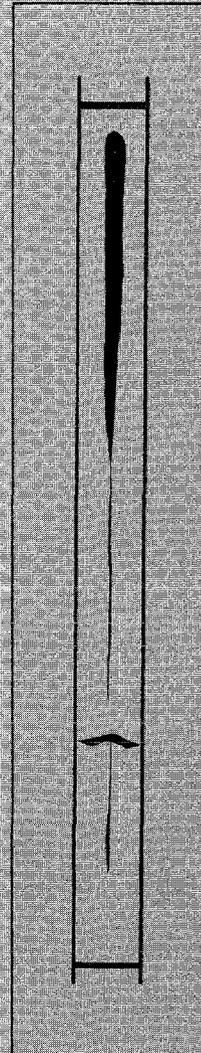
SCHEMA



BETATRON-BILD



SCHEMA



Prüfling L7

Prüfling L9

Stableistg. 750W/cm UO_2 -Tabletten Dichte 88% th.D.

Bestr.-Zeit 10 min

Bestr.-Zeit 24 h

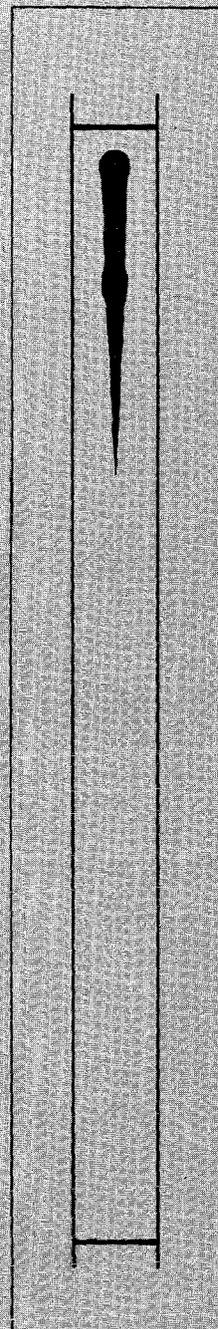
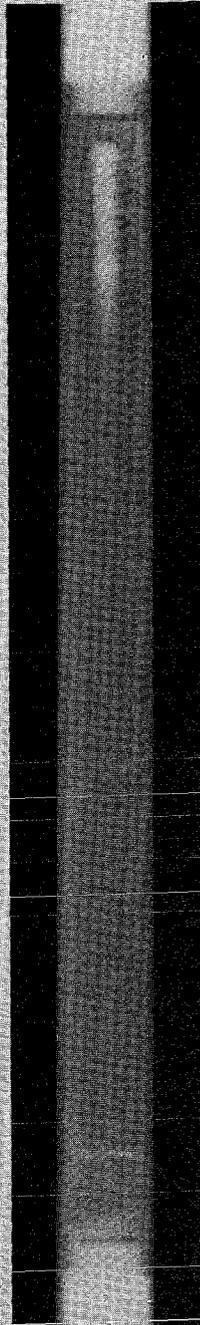
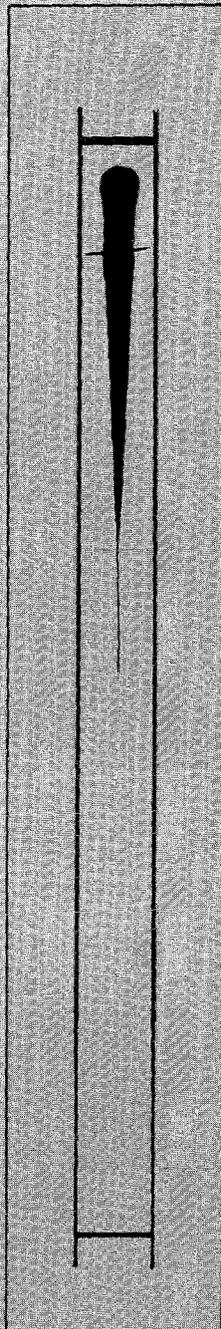
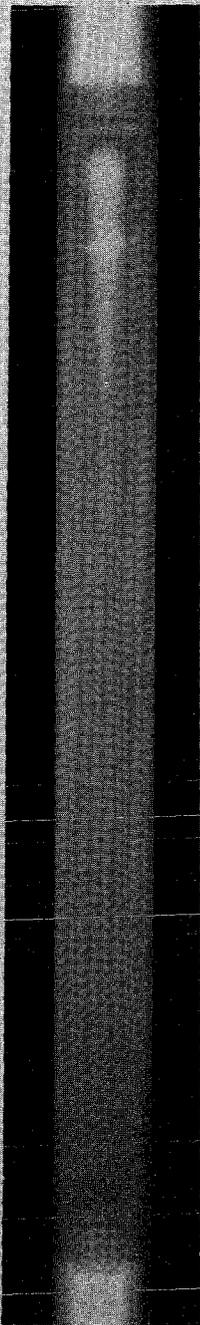
Abb.4

BETATRON-BILD

SCHEMA

BETATRON-BILD

SCHEMA



Prüfling L 34

Prüfling L 31

UO₂-Pulver

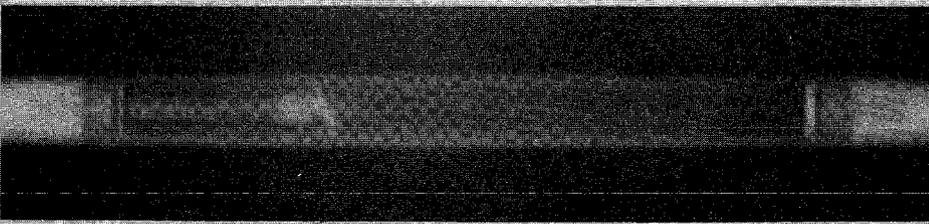
Dichte 85% th.D.

950 W/cm

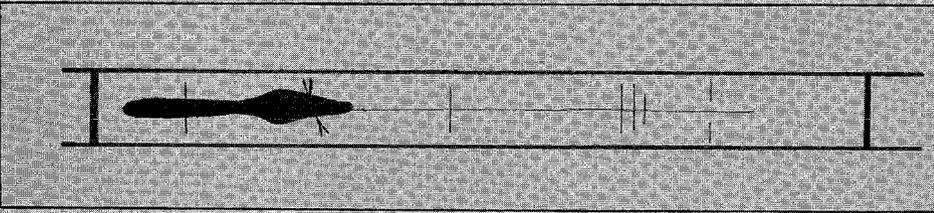
780 W/cm

Abb. 5

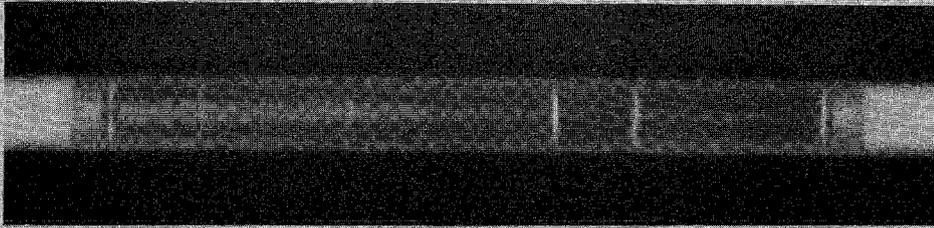
BETATRON-BILD



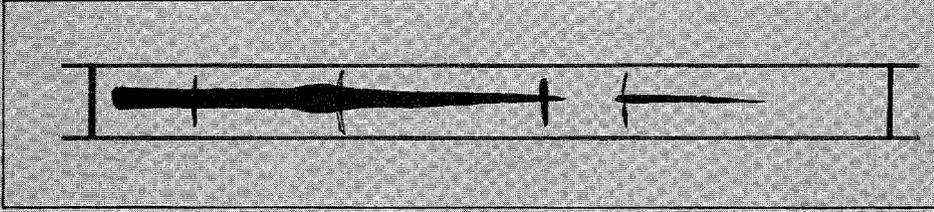
SCHEMA



BETATRON-BILD



SCHEMA



Prüfling J13

Prüfling J14

Stableistg. 700 W/cm

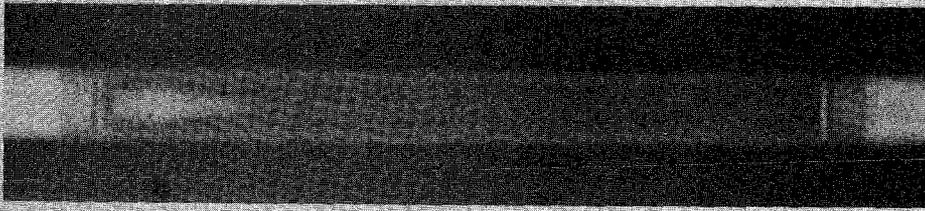
UO₂-Tabletten Dichte 91 % th.D.

2 Bestr.-Zyklen

5 Bestr.-Zyklen

Abb 6

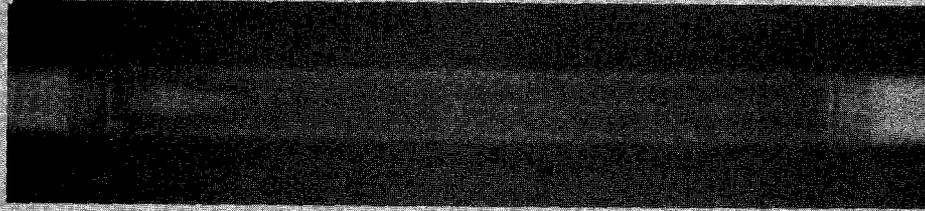
BETATRON-BILD



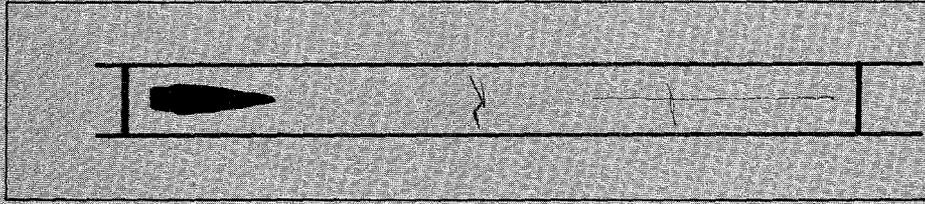
SCHEMA



BETATRON-BILD



SCHEMA



Prüfling J 22

Prüfling J 24

Stableistg. 720W/cm

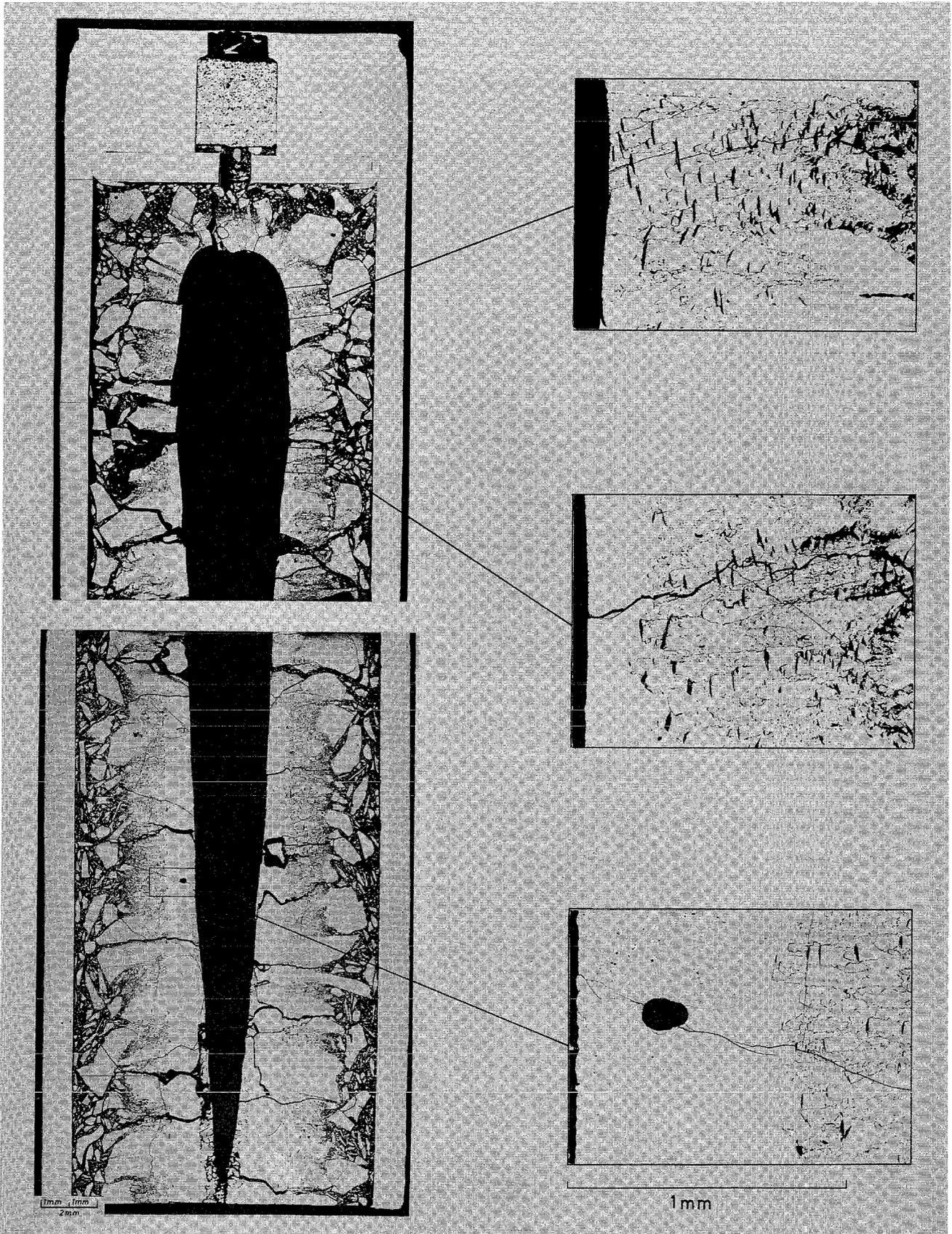
UO₂-Pulver

Dichte 86 % th.D.

4 Bestr.-Zyklen

10 Bestr.-Zyklen

Abb. 7

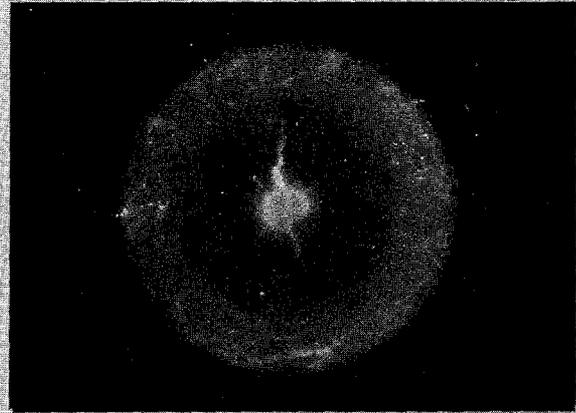
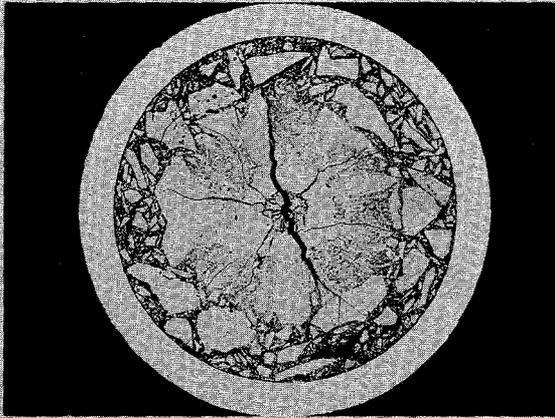


Prüfling L 36

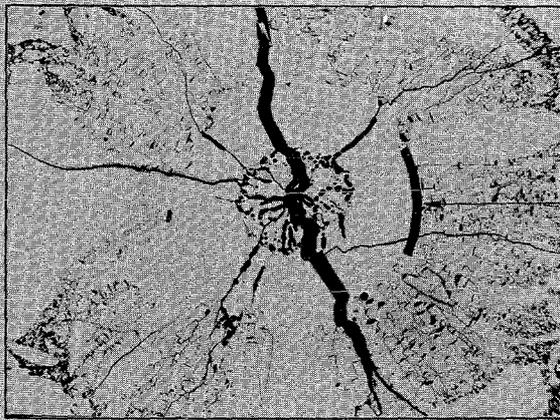
Stableistg. 725W/cm UO₂-Pulv, geschm. 85% th.D.

Bestrahlungszeit 14 min.

Abb. 8



Autoradiografie



Schmelzgrenze

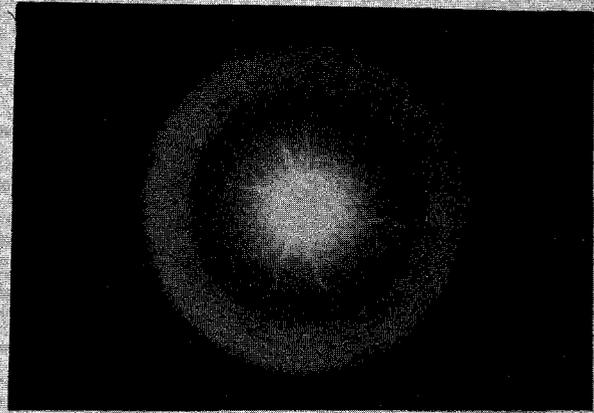
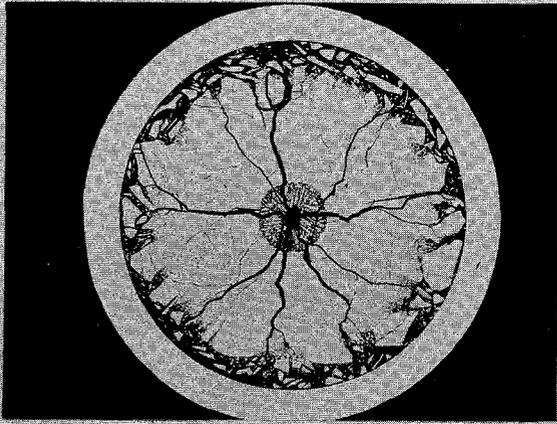
1 mm

Prüfling L 36

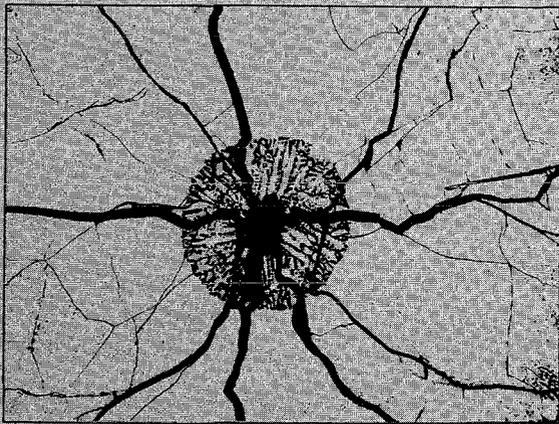
Stableistung 725W/cm UO_2 -Pulver, geschm.Part. 85% th.D.

Bestrahlungszeit 14 min.

Abb. 9



Autoradiografie



1mm

Prüfling L39

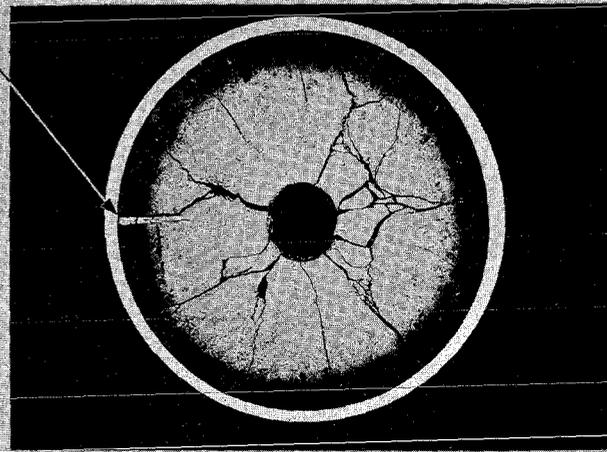
Stableistung 1000 W/cm UO_2 -Pulver, geschm. 85% th.D.

Bestrahlungszeit 2 h

Abb. 10

Schmelzstraße in UO_2 -Tablettenbrennstoff

Schmelzstraße



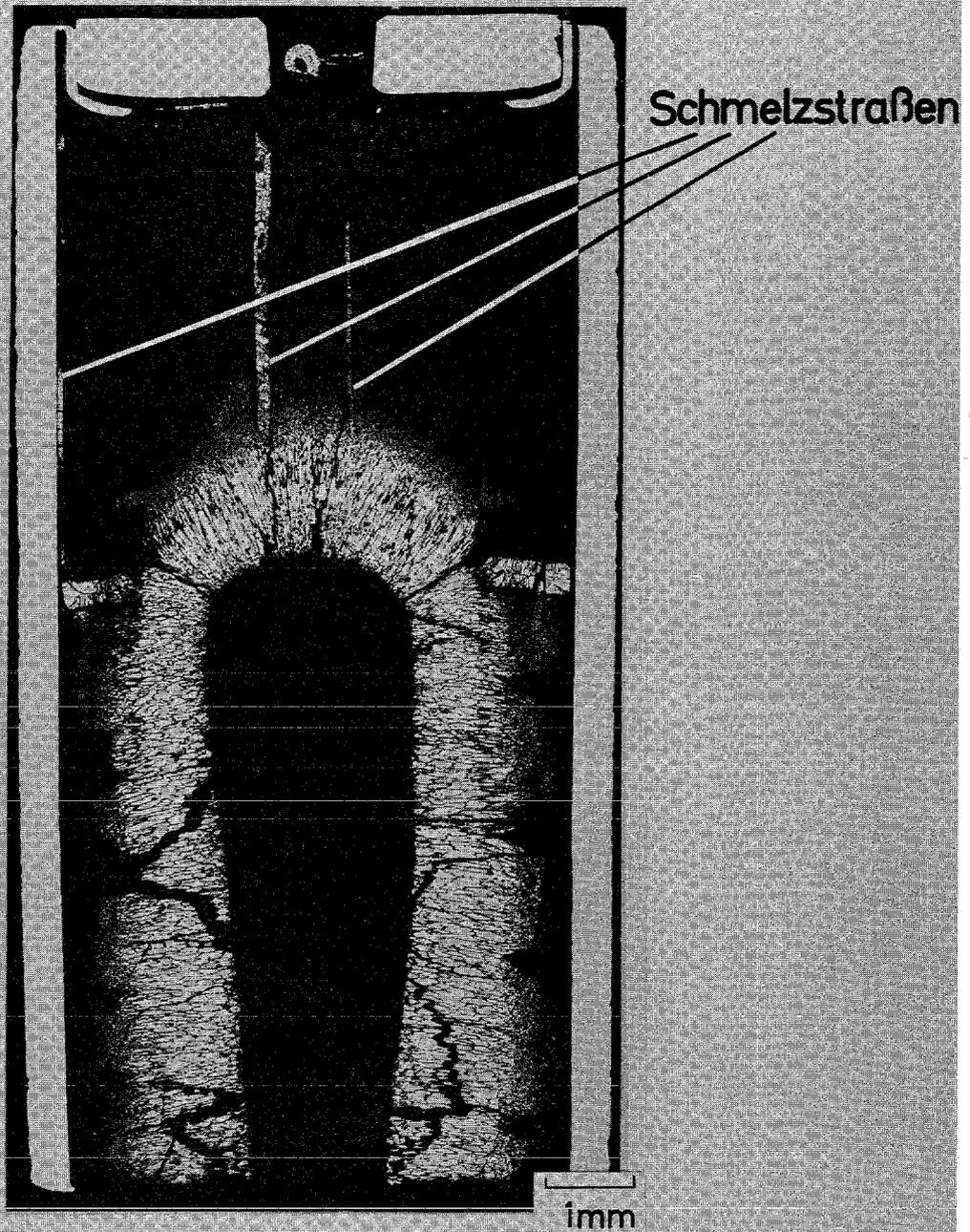
Prüfling L 18

Stableistung 845 W/cm UO_2 -Tabletten 90% th. D.

Bestrahlungszeit 12 min.

Abb. 11

Schmelzstraßen in einer UO_2 -Isoliertablette

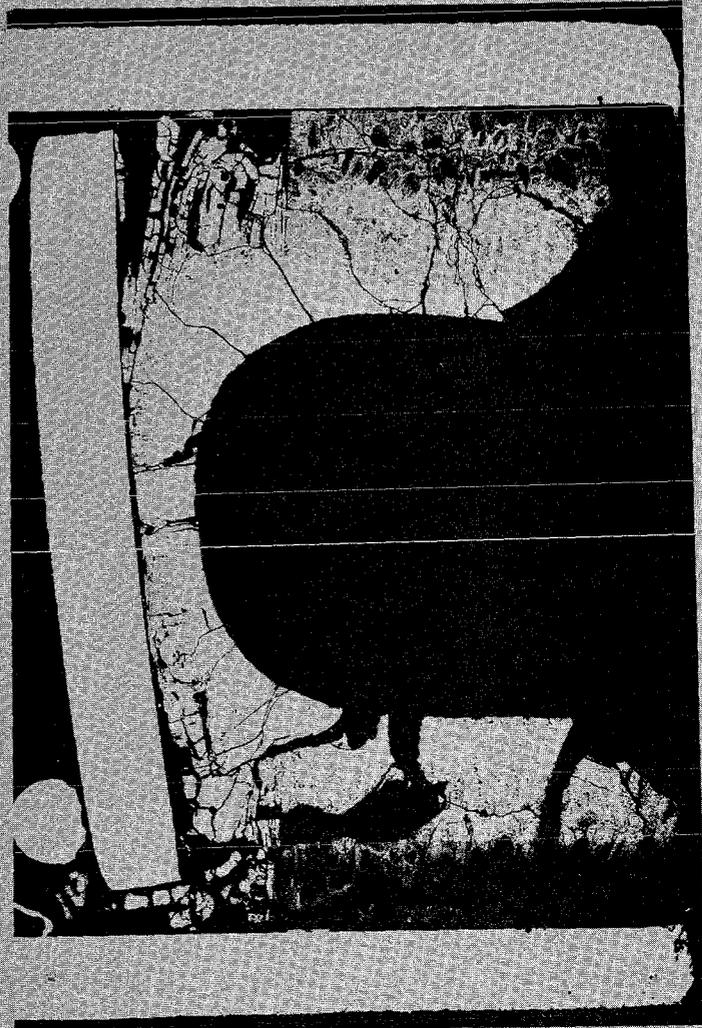


KVE 23 Prüfling 9

Stableistg. 640W/cm	UO_2 -Tabletten	93%th.D.
---------------------	--------------------------	----------

Abbrand 16200 MWd/t

Abb. 12



1mm

Prüfling L 10

Stableistung 975 W/cm UO₂-Tabletten Dichte 88% th.D.

Bestrahlungszeit 11 min

Abb. 13