

KfK 4719
Juni 1990

25 Jahre Institut für Material- und Festkörperforschung

**(Erweiterte Fassung des Vortrages
anlässlich des IMF-Kolloquiums
am 9. Februar 1990)**

**F. Thümmeler
Institut für Material- und Festkörperforschung**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

KfK 4719

25 Jahre Institut für Material- und Festkörperforschung

(Erweiterte Fassung des Vortrages anlässlich des IMF-Kolloquiums am 9. Februar 1990)

F. Thümmler

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Kurzfassung

25 Jahre Institut für Material- und Festkörperforschung
(Erweiterte Fassung des Vortrages anlässlich des IMF-Kolloquiums am 9. 2.1990)

Die Entwicklung des Instituts für Material- und Festkörperforschung seit seiner Gründung am 1.1.1965 bis zur Gegenwart sowie einige der vorangegangenen Aktivitäten auf dem Gebiet der Materialforschung im Kernforschungszentrum werden beschrieben. Viele der experimentellen und theoretischen Arbeiten erfolgten im Rahmen verschiedener institutsübergreifender Projekte des KfK, z.B. Schneller Brüter, Nukleare Sicherheit, Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung und Kernfusion. Die Arbeiten an Brennelementen einschl. der Untersuchungen zur Sicherheit mündeten meist in größeren Bestrahlungsvorhaben und deren Auswertung. Weitere Arbeiten beinhalteten Grundlagen- und anwendungsbezogene Untersuchungen über Dispersionsbrennstoffe und Brennelemente, hochschmelzende Verbindungen und Hartstoffe, mehrphasige Sinterwerkstoffe, Keramiken sowie Technologie-Transfervorhaben. Auch methodische und analytische Entwicklungen gehörten zum Tätigkeitsgebiet des IMF. Bücher und Tagungsbände von IMF-Autoren werden aufgelistet.

Abstract

25 Years of Institut für Material- und Festkörperforschung
(Extended version of lecture presented during IMF-Kolloquium at 9th February, 1990)

The development of the Institut für Material- und Festkörperforschung from its beginning at 1st Jan., 1965 upto the present time is described, including some activities before this date in the field of materials research in the Nuclear Research Centre, Karlsruhe. Much of the experimental as well as theoretical work have been performed in the frame of interdisciplinary KfK-projects, like Fast Breeder, Nuclear Safety, Reprocessing and Waste Disposal, and Nuclear Fusion. The fuel element development and safety experiments often yielded in larger irradiation experiments. Other basic or applied research work was devoted to dispersion fuels, high melting and hard compounds, multiphase sintered materials, ceramics, as well as topics of technological transfer to industry. Methodological and analytical development was also a part of the IMF work. Book and conference reports of IMF-authors are mentioned.

Meine Damen und Herren!

Ich bin der Aufforderung, anlässlich des 25jährigen Bestehens des IMF zu Ihnen zu sprechen, gern nachgekommen. Ich freue mich sehr, daß das Institut die Gelegenheit wahrnimmt, in Form dieses Kolloquiums gleichermaßen rückschauend und in die Zukunft blickend, das Jubiläum zu begehen und sich der Öffentlichkeit zu präsentieren. Mein Beitrag hierzu betrifft die bisherige Tätigkeit des Institutes von Anfang an.

Die gesamte Zeit, während der im Kernforschungszentrum Karlsruhe Materialforschung betrieben wird, beläuft sich auf etwa 28 Jahre. Somit bestanden schon vor der Gründung des IMF, die förmlich am 1.1.1965 erfolgte, einige einschlägige Gruppen. Bereits 1962 wurde im Institut für Reaktorbauelemente (IRB) eine metallographische und prüftechnische Gruppe gebildet, die Untersuchungen an den damals gängigen Reaktormaterialien und in der Industrie in Entwicklung befindlichen Brennelementen aufnahm. Der Leiter des IRB, Dr. Ludolf Ritz, maß der Materialforschung und Werkstoffprüfung schon damals eine große Bedeutung bei. Diese Gruppe wurde im gleichen Jahr in den Stand eines eigenständigen "Laboratoriums für Metallurgie" unter der Leitung von Dr. Helmut Bumm erhoben. Auch im Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, in der Hauptabteilung Reaktorbetrieb und auch bei der Projektleitung Schneller Brüter bildeten sich zunächst voneinander unabhängige Materialforschungsgruppen.

Der eigentliche Vorläufer des IMF war aber das Laboratorium für Metallurgie (LFM). Es wurde am 1.3.1964 verstärkt durch den Eintritt von Dr. Horst Böhm, der eine metallkundliche Gruppe aufbaute und sich mit Brennelement-Hüllwerkstoffen beschäftigte. Das LFM residierte in der sogenannten Euratom-Baracke (Bild 1) Der Name Euratom-Baracke kam dadurch zustande, daß die Planung des zur Europäischen Gemeinschaft gehörenden Instituts für Transurane in diesem Bau erfolgte. Dieser wurde 1963/64 ausgebaut und erhielt noch ein Nebengebäude, in dem die Chemische Analytik des LFM untergebracht wurde (Bild 2). Die Planung für diesen Bereich erfolgte damals recht weitblickend, so daß das Gebäude den Anforderungen auch heute noch etwa entspricht.

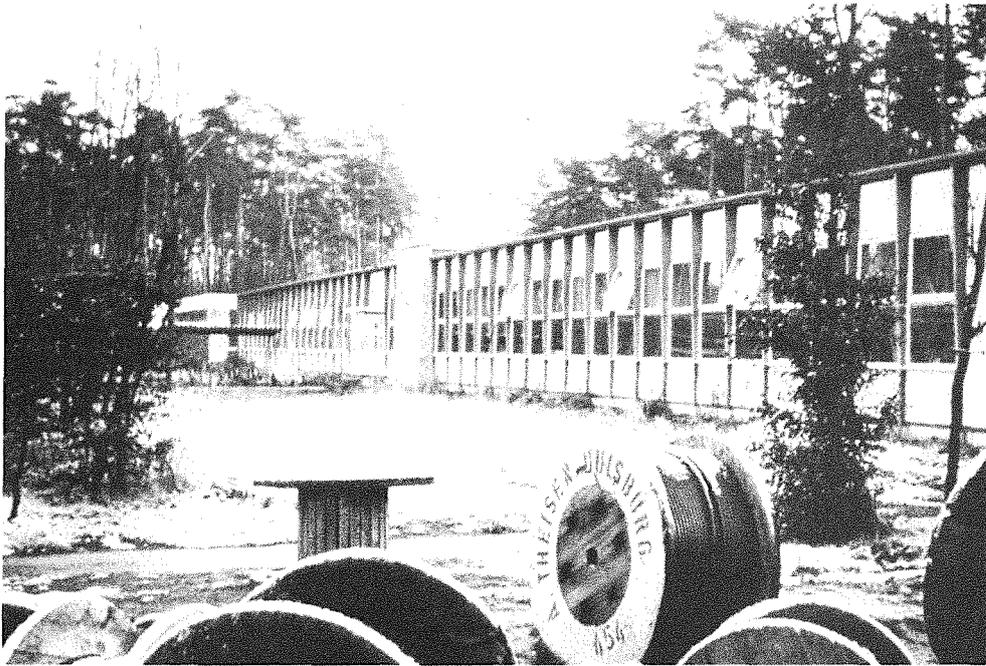


Bild 1: Euratom-Baracke 1964



Bild 2: Gebäude der Chemischen Analytik des IMF

Für die damalige Gesellschaft für Kernforschung (GFK), die in dieser Zeit überwiegend kernphysikalisch und chemisch ausgerichtet war, war die Gründung eines Materialforschungsinstitutes noch nicht selbstverständlich. Die Brennelemente für den FR2 und später auch für Leichtwasser-Leistungsreak-

toren wurden ja von der Industrie entwickelt und hergestellt. Grundlagenforschung über Reaktorwerkstoffe wurde aber z.B. im Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart betrieben. Anfang der 60er Jahre verdichtete sich jedoch mehr und mehr die Meinung, daß der Materialforschung auch im Kernforschungszentrum ein größerer Stellenwert beizumessen sei, und ihre langfristige Bedeutung wurde für die anstehenden kerntechnischen Entwicklungen, speziell die Erfordernisse des Schnellen Brütters evident. Dies führte dann rasch zu dem Entschluß, eine Institutsgruppe für Material- und Festkörperforschung (IMF) ins Leben zu rufen Bild 3).

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

R U N D S C H R E I B E N
GF 6/65

An alle Mitarbeiter

Betr.: Institutsgruppe für Material- und Festkörperforschung

Mit Wirkung vom 1. Januar 1965 wurde eine Institutsgruppe für Material- und Festkörperforschung gegründet, in der künftig alle Arbeiten der Material- und Festkörperforschung im Kernforschungszentrum Karlsruhe zusammengefaßt werden sollen.

Als erstes Teilinstitut wird das

Institut für Materialforschung (IMF)

unter der Leitung von Herrn Professor Dr. Thümler errichtet.

Dem Institut sind angegliedert:

das Laboratorium für Metallkunde (IMF/LM)
- Leitung: Herr Dozent Dr. Böhm -

ferner als gemeinsame Einrichtung

das Laboratorium für Werkstoffuntersuchungen (IMF/LW)
- Leitung: Herr Dr. Bumm -

Die Mitarbeiter des Labors für Metallurgie sowie die wissenschaftlichen Mitarbeiter der RB/Materialkunde, die nicht unmittelbar mit Service- und Sicherheitsaufgaben in den heißen Zellen und am Reaktor FR2 betraut sind, wurden nach Abstimmung mit den betreffenden Instituten und Abteilungen mit Wirkung vom 1. 1. 1965 zu IMF versetzt.

IMF übernimmt ferner die gesamte Einrichtung des Labors für Metallurgie. Die Übernahme der Einrichtung der übrigen in das IMF eingegliederten Gruppen erfolgt in Abstimmung mit den betreffenden Instituten und Abteilungen.

Das Laboratorium für Brennstoffregen des Projektes Schneller Brüter - Leitung: Herr Dr. Theisen -, das bis auf weiteres beim IAR verbleibt, arbeitet mit dem IMF zusammen, wobei eine gegenseitige Abstimmung der gemeinsam interessierenden Themen erfolgt.

Karlsruhe, 1. März 1965

Die Geschäftsführung

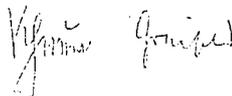


Bild 3: Rundschreiben der Geschäftsführung der GfK (Dr. Schnurr, Dr. Greifeld) zur Gründung der Institutsgruppe für Material- und Festkörperforschung

Nachdem ich im August 1964 an die Universität und gleichzeitig in das Kernforschungszentrum berufen wurde, erhielt ich die Leitung des IMF, d.h. seines ersten Teilinstitutes in Personalunion mit dem damals neugegründeten Lehrstuhl für Mechanische Technologie II. Dieser Lehrstuhl wurde später zum Institut erhoben und in Werkstoffkunde II umbenannt.

Organisatorisch wurde das LFM in Form von nunmehr zwei Einheiten angegliedert, nämlich dem Laboratorium für Metallkunde unter der Leitung von Dr. Böhm und dem Laboratorium für Werkstoffuntersuchungen unter Dr. Bumm. Das aufzubauende IMF sollte sich im wesentlichen mit dem Forschungsgebiet Kernbrennstoffe befassen, das überwiegend komplementär zur Arbeit der genannten Laboratorien war. Die Leitungspersonen des damaligen IMF sehen Sie im Bild 4 in jugendlicher Frische; Sie sehen auch, wie der damalige Senior, Herr Dr. Bumm, gerade eine Weisung erteilt.



Bild 4: Weihnachtsfeier im IMF 1965, (v.l.) Dr. H. Schneider, Dr. H. Bumm, Prof. Dr. F. Thümmel, Doz. Dr. H. Böhm

Damals hatte das IMF insgesamt etwa 45 Mitarbeiter. Natürlich reichte die Euratom-Baracke für die zukünftigen Vorhaben bei weitem nicht mehr aus. Es wurde deshalb ein Provisorium für das IMF I im 2. Obergeschoß des Instituts für Angewandte Kernphysik erstellt (Bild 5), das damals unter der Leitung von Prof. Dr. Karl Beckurts stand. Institutsleiter der damaligen Zeit wurden angehalten, ihr Gebäude mit einer Etage mehr zu errichten als sie selbst benötigten. Dies kam dem IMF als Übergangslösung sehr zugute, und im August 1966 konnte die Etage bezogen werden.



Bild 5: Gebäude des damaligen Instituts für Angewandte Kernphysik, 1966

In dieser Einheit von etwa 1000 m² ließ sich das Arbeitsgebiet Kernbrennstoffe, soweit es "out of pile" zu betreiben war, bestens aufbauen. Ab 1966 entwickelte sich dort ein reges wissenschaftliches Leben, und es wurden Arbeitsgebiete ins Leben gerufen, die für das Institut lange Zeit tragfähig waren und mit denen später das IMF bekannt wurde. So wurden dort die Grundlagen gelegt für das Gebiet der chemischen und mechanischen Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hüllwerkstoffen, das Verhalten von Spaltprodukten im Brennstab, die Gewinnung thermodynamischer Daten in Spaltstoff-Spaltprodukt-Systemen, die Untersuchung bisher unzureichend bekannter ternärer Systeme mit Uran, carbide und nitridische Hochleistungsbrennstoffe und das Gebiet des strahlungsinduzierten Kriechens von Kernbrennstoffen. Bild 6 zeigt die Untersuchung ternärer Uran- und Spaltprodukt-Systeme aus dieser Zeit. Weiter wurden Entwicklungsarbeiten für die Brennelemente des damals in Planung befindlichen Deutsch-Französischen Hochflußreaktors in Grenoble durchgeführt. Damals entwickelten sich auch intensive Beziehungen zur Nukem, zur Fa. Interatom, zur Metallgesellschaft und zu anderen Industriefirmen.

Karbide	Nitride
U - Ru - C	U - Y - N
U - Rh - C	U - La - N
U - Pd - C	U - Ce - N
U - Os - C	U - Pr - N
U - Ir - C	U - Nd - N
U - Pt - C	U - Ti - N
	U - Zr - N
Mo - Ru - C	U - Hf - N
	U - V - N
Ce - C - O	U - Nb - N
Nd - C - O	U - Ta - N
La - C - O	U - Cr - N
Y - C - O	U - Mo - N
	U - Ru - N
U - Ce - C	
U - Nd - C	
Mo - Rh - C	
Mo - Pd - C	

} in Arbeit

Bild 6: Im IMF untersuchte carbidische, nitridische und oxidische, ternäre Uran- und Spaltproduktsysteme, Stand Febr. 1970.

Im Laboratorium für Metallkunde erfolgten in Zusammenarbeit mit der Industrie umfangreiche Legierungsentwicklungen für Schnellbrüterbrennelemente, besonders für Hüllwerkstoffe. Arbeiten zu Austeniten, Ferriten und Vanadinlegierungen wurden in Angriff genommen, die in langzeitigen Bestrahlungsprogrammen mündeten. Ein wichtiges Arbeitsgebiet schon in dieser Zeit war die Untersuchung des Langzeitverhaltens von Hüllwerkstoffen, z.B. in den in Bild 7 gezeigten Zeitstandanlagen. Diese wurden bis heute zu einem umfangreichen Prüflabor mit 30 Anlagen für Luft- und 30 für Vakuumbetrieb ausgebaut, wobei Prüftemperaturen bis ca. 1000°C anwendbar sind. Neben Hüllrohr-Werkstoffen wird auch ein austenitischer Stahl als Tankmaterial bis zu Versuchszeiten von 135000 Std. (> 15 Jahre) untersucht. In neuerer Zeit haben auch Versuche zur Lebensdauer unter transients Beanspruchung an Bedeutung gewonnen.

Um mit plutoniumhaltigen Brennstoffen umgehen zu können, wurde 1967 ein Plutoniumlabor in Betrieb genommen, welches 1970 erweitert wurde (Bild 8). Nach Erarbeitung der damals in Deutschland praktisch unbekanntem Technologie konnte eine Vielzahl von Brennstoffproben und Brennstäb-Prüflingen mit Uran-Plutonium-Mischoxid und später auch mit Mischkarbid hergestellt werden, die im Rahmen des PSB-Bestrahlungsprogrammes in Reaktoren eingesetzt und nach längerer Abklingzeit nachuntersucht wurden. Auch umfangreiche Cha-

rakterisierungsuntersuchungen wurden hier durchgeführt. Insgesamt hat das IMF in dieser Frühphase viel Pionierarbeit geleistet.

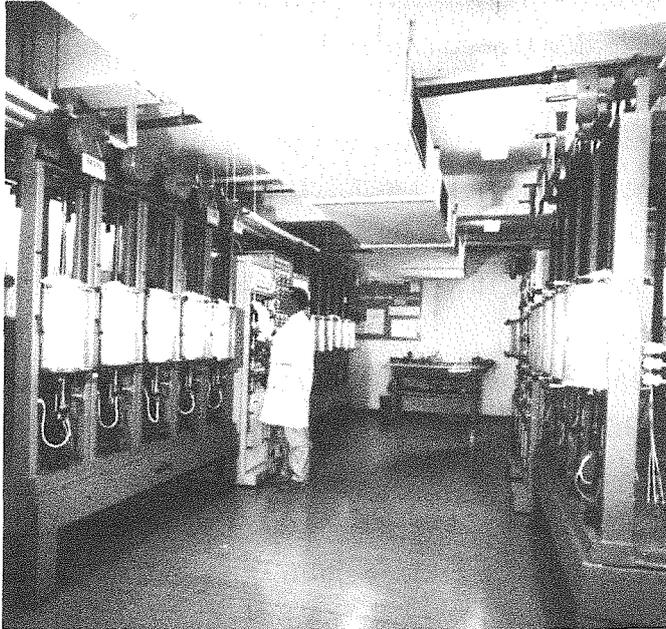


Bild 7: Die ersten Zeitstandanlagen des IMF

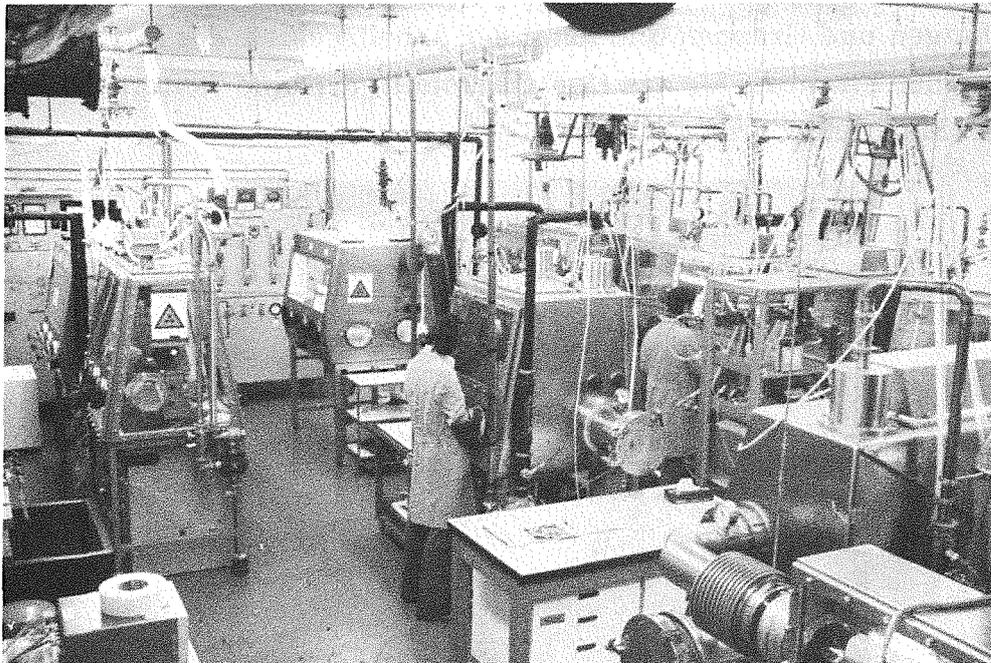


Bild 8: Plutoniumlaboratorium des IMF (bis 1989)

Am 1.10.1966 wurde Herr Dr. Böhm zum Institutsleiter im IMF ernannt und wir leiteten das Institut eine Weile gemeinsam. Ende 1969 erfolgte dessen Teilung und neben dem IMF I wurde das IMF II ins Leben gerufen. Damit entstand auch für die metallkundliche Forschung und Entwicklung eine angemessene organisa-

torische Form. Während dieser Jahre erfolgte auch eine Konsolidierung des IMF in dem Sinne, daß in der KfK an verschiedenen Stellen über Materialforschung arbeitende Gruppen dem IMF eingegliedert wurden. Dies gelang allerdings nicht vollständig, aber es erfolgte der Übertritt der dem PSB unmittelbar unterstellten Microsondengruppe in das IMF, der Wechsel verschiedener wissenschaftlicher Mitarbeiter aus der Abteilung Reaktorbetrieb sowie die Bildung eines Laboratoriums für Brennelement-Technologie am 1.7.1967 unter Herrn Dr. Kummerer. Am 1.7.1970 wurde die Arbeitsgruppe Bestrahlungstechnik aus dem IRE vom IMF übernommen, die dann später ihre endgültige Zuordnung zum IMF III fand.

Die Planung des Hauptgebäudes des IMF, in dem die meisten Mitarbeiter derzeit tätig sind, erfolgte ab 1966. Die Last der Detailplanung, Verhandlungen mit internen und externen Stellen und alles was dazu gehörte, wurde von Institutsseite von einem Hochschul-Assistenten getragen. Der Umzug in den Neubau erfolgte im Mai 1970. Die folgenden Bilder zeigen Phasen des Institutsbaus, nämlich das Hauptgebäude mit Zwischentrakt und Halle (Bild 9) vor der Fertigstellung und den Hauptbau nach Fertigstellung und Inbetriebnahme (Bild 10). Nunmehr war die wichtigste Voraussetzung für die längerfristige Entwicklung der Abteilungen und Gruppen und somit der Arbeitsgebiete des IMF geschaffen. 1971 wurde der Flachbau für das IMF III erstellt, der eine weitere Zusammenführung der Mitarbeiter ermöglichte.

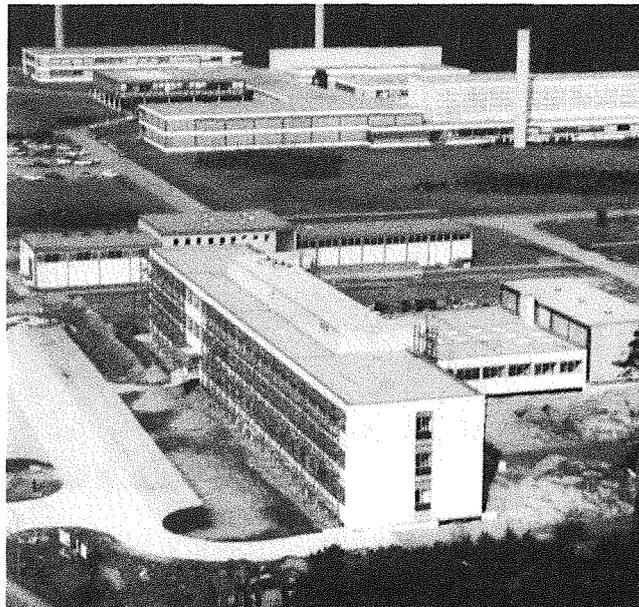


Bild 9: Institutstrakt des IMF vor der Fertigstellung 1969, im Mittelgrund das Gebäude der "Heißen Werkstatt", im Hintergrund das Euratom-Institut für Transurane

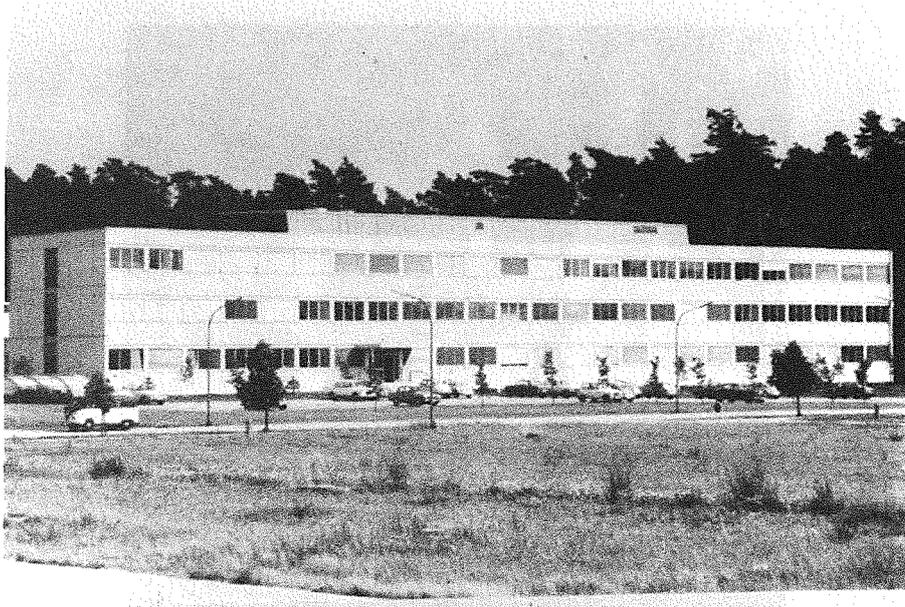


Bild 10: Hauptgebäude des IMF nach der Fertigstellung 1970

Die 70er Jahre brachten dem IMF eine kontinuierliche und bedeutende Zunahme seines Stellenwertes innerhalb und außerhalb des Kernforschungszentrums. Die Aufteilung des Arbeitsgebietes zwischen IMF I und II bewährte sich und die beiden Teilinstitute entwickelten sich in freundschaftlichem Wettbewerb. Nach Berufung von Herrn Böhm in den Vorstand, der inzwischen auch Professor an der TH Aachen war und danach Professor an der Universität Heidelberg wurde, ging Mitte 1975 die Leitung des IMF II an Dr. Kurt Anderko über. Meilensteine im IMF II waren hier der Bau der Na-Kreisläufe 1979 (Bild 11) und die Inbetriebnahme der Dual-Beam-Anlage 1986 (Bild 12) für gleichzeitige Bestrahlung mit α -Teilchen und Protonen. Im IMF I erfolgte z. B. der Ausbau der inaktiven und aktiven Elektronenstrahl-Mikroanalyse 1964, 1974 und 1984, wovon hier das Gerät zur Untersuchung hochaktiver Brennstoffe gezeigt ist (Bild 13).

Am 1.7.1973 wurde das IMF III gegründet, hervorgehend aus dem oben genannten Laboratorium für Brennelementtechnologie. Sein Leiter wurde Dr. Karl Kummerer.



Bild 11: Natriumkreisläufe des IMF mit Pumpen, Wärmetauscher und Teststrecken (l.o.)

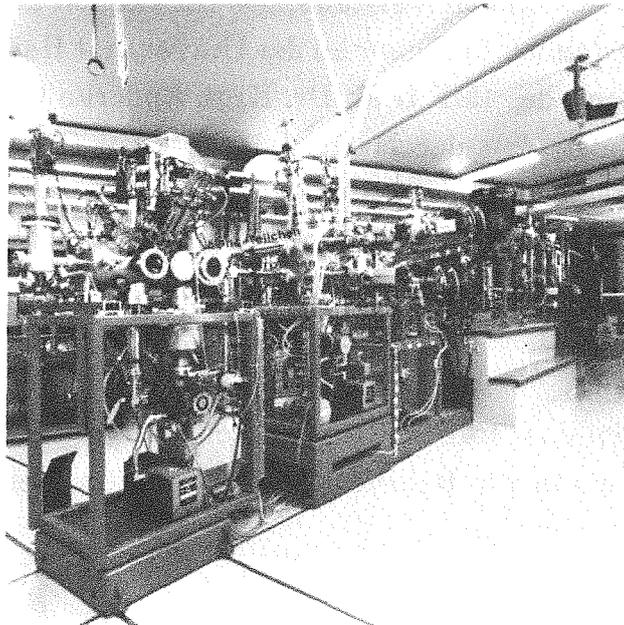


Bild 12: Vorderansicht der Dual-Beam-Targetstation mit Strahlführung für α -Teilchen und Protonen

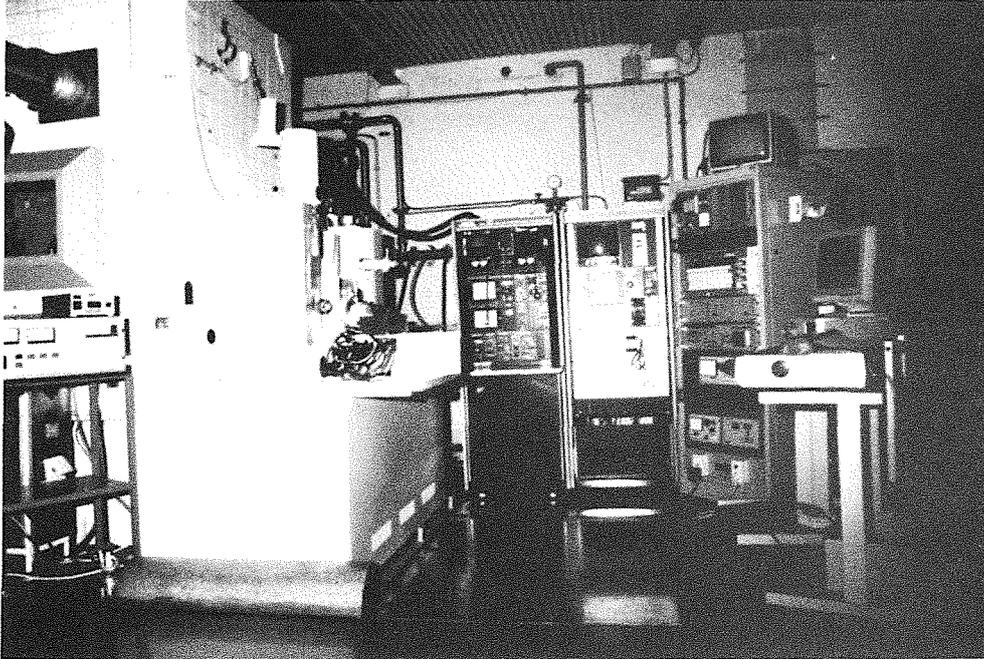


Bild 13: Elektronenstrahl-Mikrosonde für Untersuchungen an hochradioaktiven Kernbrennstoffen nach Bestrahlung

Die Aufgaben des IMF III lagen überwiegend auf dem Gebiet der Brennstäbe und Brennelemente im Hinblick auf ihre Auslegung und ihr Verhalten unter Bestrahlung einschl. Störfällen und Betriebstransienten, und zwar sowohl praktisch als auch modelltheoretisch. Durch die Existenz der Abteilung Bestrahlungstechnik wurde das Institut in die Lage versetzt, weitgehend unabhängig von äußeren Stellen zahlreiche Bestrahlungsvorhaben für das PSB und später für das Projekt Kernfusion (PKF) technologisch vorzubereiten. Bild 14 zeigt eine Bestrahlungskapsel für in-pile-Kriechversuche an Kernbrennstoffen (über deren Ergebnisse unten berichtet wird). Mithilfe dieser Kapsel konnten hinreichend isotherme Druck-Kriechversuche mit guter Genauigkeit der Verformungsmessung durchgeführt werden. Das IMF III konnte sein endgültiges Institutsgebäude 1988 beziehen.

Eine Zäsur - zweifellos nicht nur für das IMF - war das Ausscheiden der damaligen Geschäftsführung (Dr. Greifeld, Prof. Haxel) und die Berufung eines 5-köpfigen Vorstandes, zunächst mit Prof. Dr. E. Becker als Vorsitzenden, ab 1.7.1974. Der für das IMF zuständige Vorstand wurde Prof. Dr. H. Böhm, nach seiner Berufung als Vorstandsvorsitzender am 1.4.1983 Dr. H.-H. Hennies, der heute als

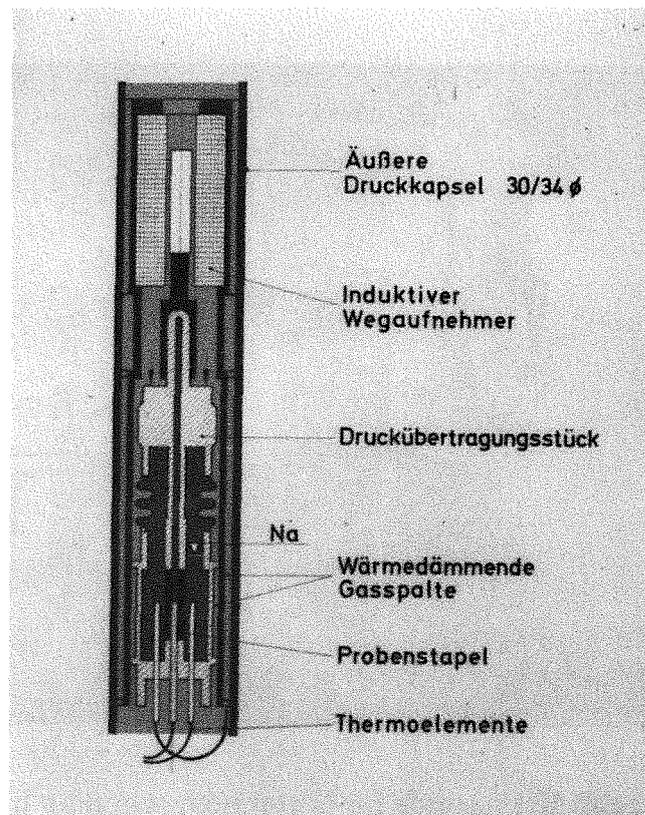


Bild 14: Kapsel für Druckkriechversuche an Kernbrennstoffen im FR 2

Vorstand für das IMF zuständig ist und insbesondere die projektgebundenen Arbeiten und die Bauvorhaben der letzten Jahre gefördert hat.

Die letzte Neugründung innerhalb des IMF war das Teilinstitut IV, das aus der Arbeitsgruppe Zuverlässigkeit und Schadenskunde am Institut für Reaktorbauelemente hervorging. Das IMF IV existiert seit 1.7.1985, sein Leiter ist Prof. Dr. Dietrich Munz. Diese Neugründung war dadurch gekennzeichnet, daß das Arbeitsgebiet Zuverlässigkeit und Schadenskunde aus einem gemeinsamen Interesse des Kernforschungszentrums und der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe hervorging. Es ließ sich deshalb eine weitere Personalunion zwischen Universität und KfK mit all ihren Vorteilen und Arbeitsbelastungen etablieren. Dieses Institut befaßt sich mit Fragen der Dimensionierung von Bauteilen, wofür die verschiedenen möglichen Schadensabläufe und die Werkstoffgesetze ermittelt und Übertragungsgesetze für das Bauteilverhalten entwickelt werden. Untersucht wird das Versagensverhalten durch Rißausbreitung und Kriechen bei metallischen und keramischen Werkstoffen, die Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten anhand der Streuungen der mechanischen Werkstoffkennwerte, die Untersuchung von Polymerwerkstoffen und von Verbundwerkstoffen für den Einsatz bei extrem tiefen Temperaturen. Auch Arbeiten

zur Biomechanik und die Anwendung der hieraus gewonnenen Erkenntnisse auf technische Fragestellungen sind von zunehmender Bedeutung. Ein eigenes Institutsgebäude für das IMF IV steht jedoch noch aus.

Von den großen und übergreifenden Projekten des Zentrums, innerhalb derer die meisten wissenschaftlich-technischen Arbeiten des IMF durchgeführt worden sind, wurde das Projekt Schneller Brüter (PSB) bereits erwähnt. Es hatte für das Institut bis zu seinem Auslaufen Ende 1989 und der Installierung des Folgeprojektes Nukleare Sicherheitsforschung (PSF) eine zentrale Bedeutung. Die Arbeiten für das PSB haben ganz maßgeblich für die langsam aber stetig zunehmende Reputation des gesamten IMF beigetragen. Das Anliegen, möglichst gleichrangig den Erfordernissen der Projekte Rechnung zu tragen, aber auch die wissenschaftlichen Erkenntnisse durch originelle Beiträge zu mehren, ließ sich bei vielen Themen des PSB gut verwirklichen. Ein großer Teil der Anlagen des IMF wurde mit Mitteln des PSB beschafft, so die oben erwähnten Elektronenstrahl-Mikrosonden, Na-Kreisläufe und Zeitstandanlagen, die Elektronenmikroskope, viele Geräte des chem.-analytischen Labors u.a.m. 1980 wurden auch Arbeiten zur Schließung des Brennstoffkreislaufes aufgenommen, so z.B. quantitative Untersuchungen an Lösungsrückständen, radiolytisch bedingte Nachfällungen u.a.

Von diesen Arbeiten seien hier die folgenden Ergebnisse kurz dargestellt. Die Untersuchungen über die Innenkorrosion von Brüter-Brennelementhüllrohren durch Spaltprodukte oder die gemeinsame Wirkung des Brennstoffes mit bestimmten Spaltprodukten ist in Bild 15 zusammengefaßt. Von den zahlreichen Spaltprodukten, die z. Tl. in verschiedenen chemischen Zuständen, einen bestimmten Abbrand simulierend, in Mischungen mit Oxidbrennstoff eingesetzt wurden (linkes Teilbild), haben sich vor allem Cäsium, Jod und Tellur als korrosiv erwiesen. Vor allem beim Cäsium ist der Angriff stark abhängig vom O/U-Verhältnis des Kernbrennstoffes. Die Innenkorrosion findet überwiegend interkristallin statt, wobei im Extremfall Angriffstiefen bis zu 200 µm erreicht wurden. In Bild 16 ist die Abgabe von gasförmigen Spaltprodukten (Cäsium und Krypton) aus oxidischem Brennstoff in Prozent des durch Kernreaktion entstehenden Spaltgases angegeben. Man erkennt die starke Temperatur- und die Abbrandabhängigkeit der Spaltgasabgabe. Die Daten sind wichtig für die Kenntnis des sich aufbauenden Innendruckes in Brennstäben während des Reaktorbetriebes. Bild 17 zeigt eine Gesamtdarstellung der Untersuchungen über den chemischen Zustand von Spaltprodukten im Oxidbrennstoff.

untersuchte Spaltprodukte bzw Spaltproduktverbindungen	als gefährlich anzusehende Spaltprodukte (Abbrand = 20 At%)
Cs , Rb J , Br Te , Se Ru , Rh , Pd Sb , Sn , In , Cd BaO , SrO ZrO ₂ CeO ₂ , Nd ₂ O ₃ Mo , MoO ₃	Cs <u>Reaktionen</u> bei O/M > 2,00 <u>Bildung</u> von Cs-Chromaten; Zertall des Austenites in Ferrit und Ni-Martensit <u>Hüllangriff</u> bevorzugt entlang der Korngrenzen Tiefe 120 µm bei 700°C
	J <u>Reaktionen</u> bei O/M ≈ 2,00 ; stärkere bei O/M > 2,00 <u>Bildung</u> von Cr-Jodiden (Ferrit Martensit) <u>Hüllangriff</u> bevorzugt entlang der Korngrenzen teilweise Lochfraß
	Te <u>Reaktionen</u> wenig vom O/M-Verhältnis abhängig <u>Bildung</u> von Cr-Telluriden , Ni-Telluriden <u>Hüllangriff</u> bei T < 700°C flächenhaft bei T > 700°C Korngrenzenreaktionen

Bild 15: Spaltprodukte, die im Brüterbrennstab die Verträglichkeit Brennstoff-Hülle beeinträchtigen

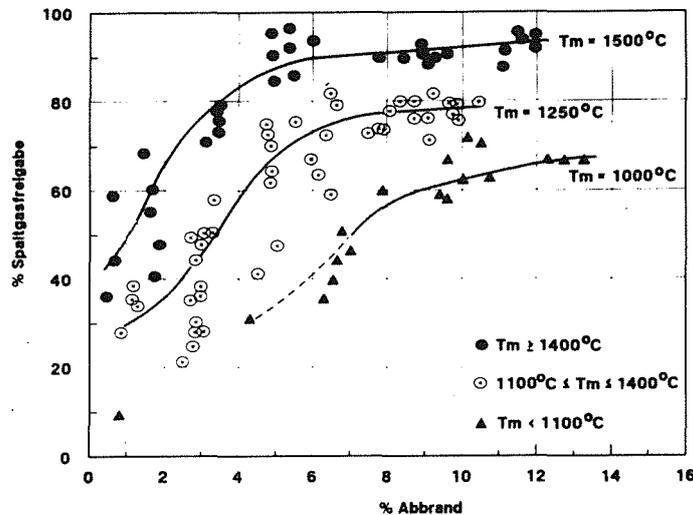


Bild 16: Spaltgasfreigabe in Schnellbrüter-Oxidbrennstäben

Die möglichen Zustände sind in der Legende angegeben. Einige Spaltprodukte können in unterschiedlicher Form im abgebrannten Brennelement vorliegen, was u.a. mit ihrer Sauerstoffaffinität zusammenhängt. Die bei der Wiederaufarbeitung beobachteten Lösungsrückstände hängen mit dem Zustand einiger Spaltprodukte zusammen, darüber hinaus ist dieses Gebiet von grundsätzlichem chemisch-physikalischem Interesse. Verschiedene der gleichermaßen interessanten wie wichtigen Ergebnisse zum in-pile-Kriechen keramischer Kernbrennstoffe sind in Bild 18 in einer Arrhenius-Darstellung zusammengefaßt.

A		T										B																																	
IA	IIA											IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B																												
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																												
Na	Mg	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII				IB	II B	Al	Si	P	S	Cl	Ar																											
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																												
	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																												
	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																													
Fr	Ra	Ac																																											
<table border="1"> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>																		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																

	Volatile fission products
	Metallic precipitates (alloys)
	Ceramic precipitates (oxides)
	Oxides dissolved in the fuel (solid solution)

Bild 17: Der chemische Zustand von Spaltprodukten im Oxidbrennstoff

Man sieht links die steile Gerade - mit Streuband - für das thermisch aktivierte Kriechen, entsprechend einer starken Temperaturabhängigkeit mit unmeßbar kleinen Werten unterhalb ca. 1000°C. Das strahleninduzierte Kriechen hingegen zeigt beim Oxidbrennstoff eine viel geringere Temperaturabhängigkeit mit relativ hohen Kriechgeschwindigkeiten noch bei 400-500°C. Beim Carbidbrennstoff kann eine Abhängigkeit der strahlungsinduzierten Kriechgeschwindigkeit von der Temperatur nicht festgestellt werden, wobei die Werte wesentlich niedriger als beim Oxidbrennstoff liegen. Wegen des Auftretens von spaltprodukt-d. h. abbrandabhängigem Schwellen des Kernbrennstoffes ergibt sich ein Festkörper-Schwellendruck auf den Hüllwerkstoff, der im stationären Zustand umso niedriger ist, je "leichter" der Brennstoff unter dem sich einstellenden Druck der Hülle in seine inneren Hohlräume bzw. Poren kriecht. Bild 19 zeigt Ergebnisse von Zeitstanduntersuchungen an Werkstoffen für den Schnellen Brüter unter realen Kühlmittelbedingungen.

Dabei konnte z.B. nachgewiesen werden, daß bei Einhaltung leicht erfüllbarer Reinheitsforderungen an das Natrium die Außenkorrosion der Brennelementhüllrohre durch das Natrium nicht standzeitbestimmend ist. Der Mo-haltige austenitische Stahl 1.4909 zeigt keine Veränderung gegenüber der Prüfung in Luft, während der Stahl 1.4948 oberflächlich entkohlt wird und dadurch etwas an

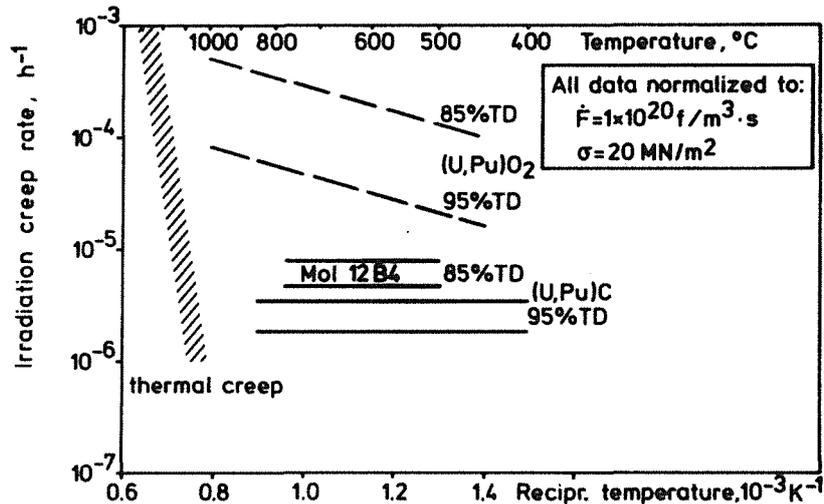


Bild 18: Strahleninduziertes Kriechen von (UPu)O₂ und (UPu)C
Festigkeit verliert.

Das PSB-Bestrahlungsprogramm läuft seit Anfang der 60er Jahre. In seiner ersten Phase wurden Parametertests mit verschiedenen Brennstabkonzepten für den SNR 300, begleitet von umfangreichen modelltheoretischen Arbeiten, für stationären Reaktorbetrieb durchgeführt. Anfang der 70er Jahre konkretisierten sich die Arbeiten auf sicherheitsrelevante Fragestellungen des Leistungsbetriebes und führten zum Betriebstransientenprogramm mit den neuen Stabkonzepten der späten 70er Jahre. Eine der Hauptfragestellungen dieses Programms betrifft das Verhalten der Brennstäbe bei extrem hohen Brennstofftemperaturen, insbesondere bei Überschreiten der Brennstoffschmelztemperatur. In der Experimentserie POTOM (power-to-melt) steht die Bestimmung der Leistung, die gerade zum Anschmelzen des Brennstoffs führt (für frischen Brennstoff im Bereich von ca. 600 W/cm) im Vordergrund. Wie aus Bild 20 zu entnehmen ist, zeigt der Vergleich der theoretischen Vorhersagen mit den Befunden der Nachuntersuchung eine ausgezeichnete Übereinstimmung bei der Bestimmung der axialen Brennstoffposition, bei der gerade Schmelzen nachgewiesen werden konnte, sowie bei den resultierenden Schmelzleistungen. Untersuchungen für umstrukturierten Brennstoff mit längeren Standzeiten, die zu einer Erhöhung der Schmelzleistung führen, werden z. Zt. durchgeführt.

Ein weiterer Schwerpunkt des Betriebstransientenprogramms ist die Untersuchung des Brennstabverhaltens unter Lastwechselbedingungen. Hierbei sind die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hülle sowie daraus resultierende Hüllrohrverformungen zu bestimmen. Wie die bisherigen Ergebnisse zeigen, führen die spezifikationsgerecht durchgeführten Leistungs-

rampen nicht zu signifikanten Kontaktdrücken zwischen Brennstoff und Hülle bzw. zu unzulässigen Verformungen der Hülle.

Ab 1974 waren mehrere Teilinstitute des IMF auch für das Projekt Nukleare Sicherheit tätig, in dem das Störfallverhalten von Brennelementen in Leichtwasserreaktoren bearbeitet wurde. Auch hier spielt das Materialverhalten bei verschiedenen denkbaren Störfällen eine zentrale Rolle. In Bild 21 ist die Anlage zur Simulation eines Kühlmittelverluststörfalles von Brennstäben bei hoher Temperatur, korrosiver Belastung durch Wasserdampf und unter erhöhtem Innendruck dargestellt. Der Zustand des Brennstabes wird dabei jeweils durch Röntgenstrahlen abgebildet. Die Kenntnis der Parameter für das "Aufblasen" von Brennstabhüllen ist für die Reaktorsicherheit von großer Bedeutung, wobei unter bestimmten Bedingungen starke Aufblähungen, unter anderen Bedingungen hingegen verformungsarme Brüche auftreten (Bild 22). Was dabei chemisch passiert, wird im Bild 23 gezeigt. Man erkennt die Kinetik der Schichtbildung sowie der Schichtfolge der auftretenden chemischen Zustände. Die erworbene Expertise bei störfallbezogenen Werkstoff-Untersuchungen führte z.B. zur Einladung von Experten des IMF in die USA zur Teilnahme an der Nachuntersuchung des Harrisburg-Störfalles.

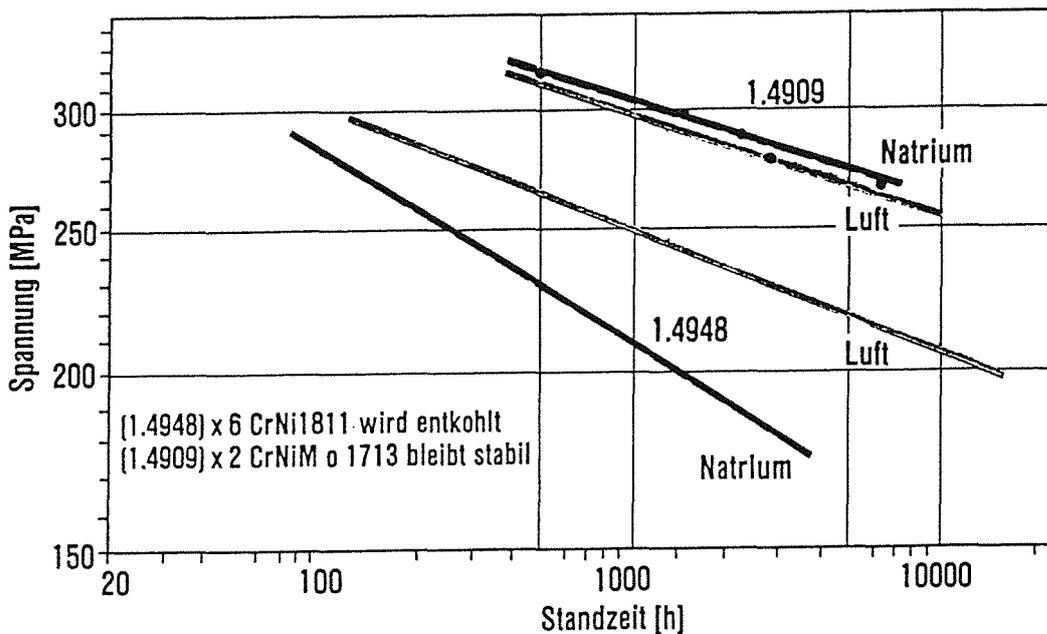
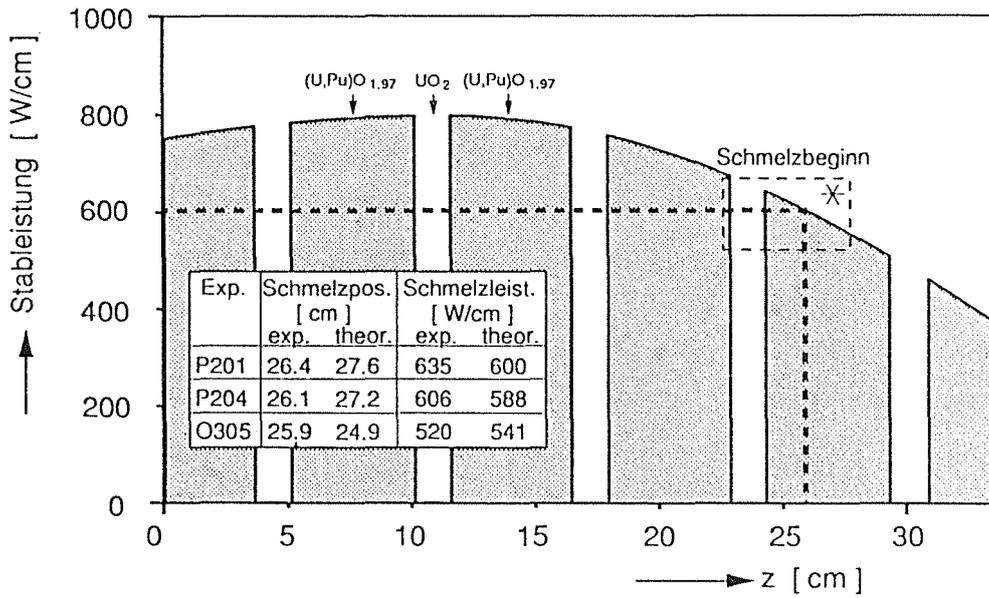
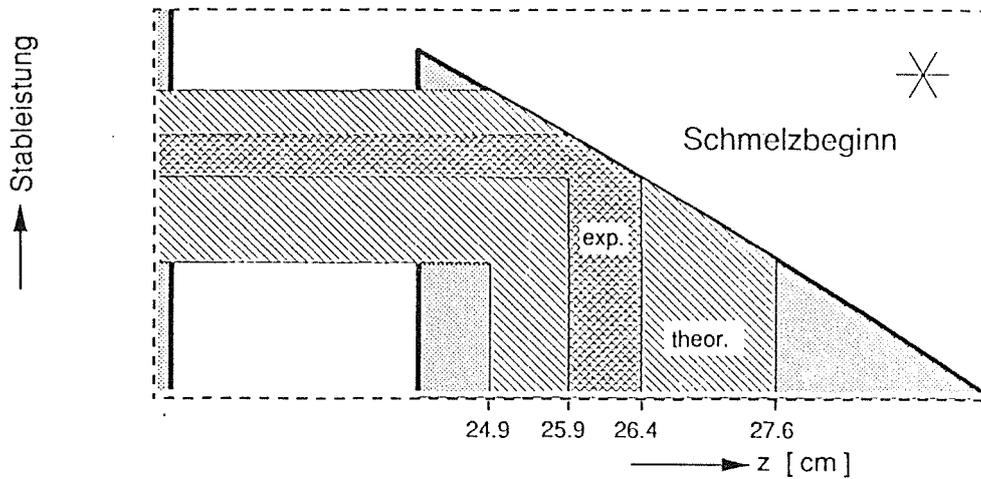


Bild 19: Natriumeinfluß auf das Zeitstandverhalten bei 550°C

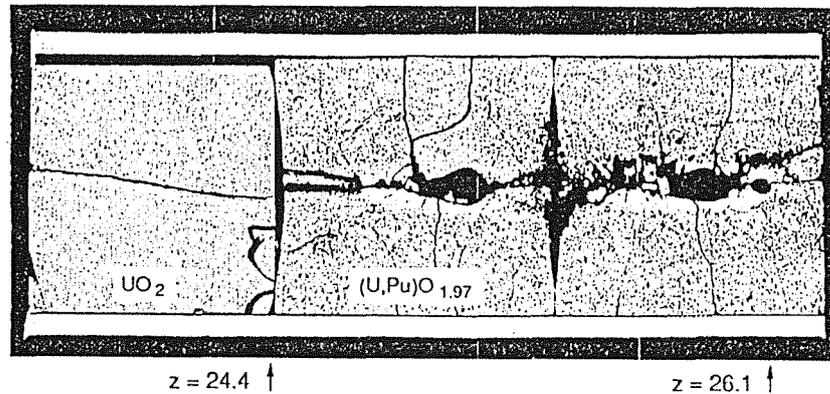
Ende der 70er Jahre kamen Arbeiten des Projektes Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung zum F + E-Programm des IMF hinzu, insbesondere auf dem Gebiet der Korrosion von Anlagenteilen des Auflösers und pulvertechnologischer Verfahren zur Abfallkonditionierung.



a) Axiales Stableistungsprofil über heterogener Brennstoffsäule



b) Detail aus a)



c) Keramographischer Befund bei Experiment P204

Bild 20: Schmelzexperiment POTOM-0

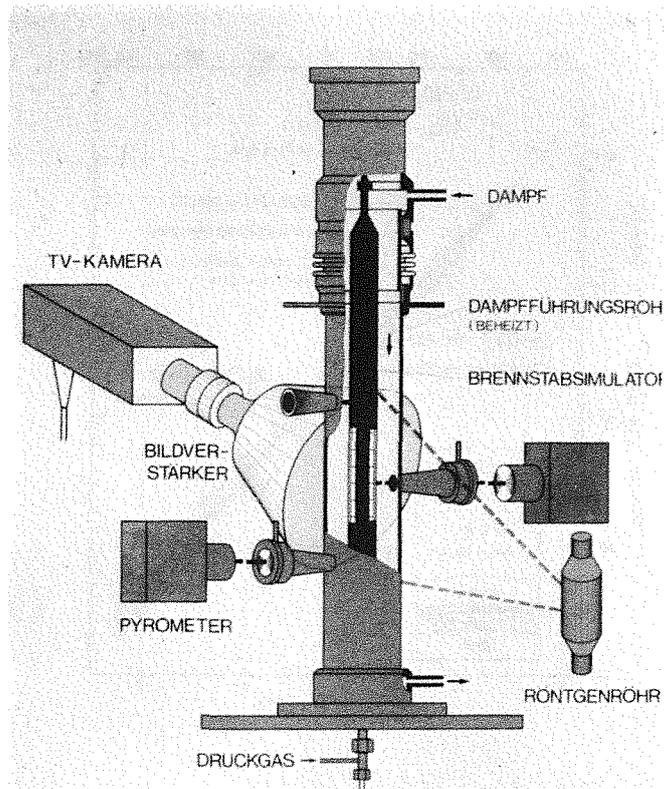


Bild 21: Anlage zur Simulation von Kühlmittelverluststörfällen bei Brennstäben (FABIOLA)

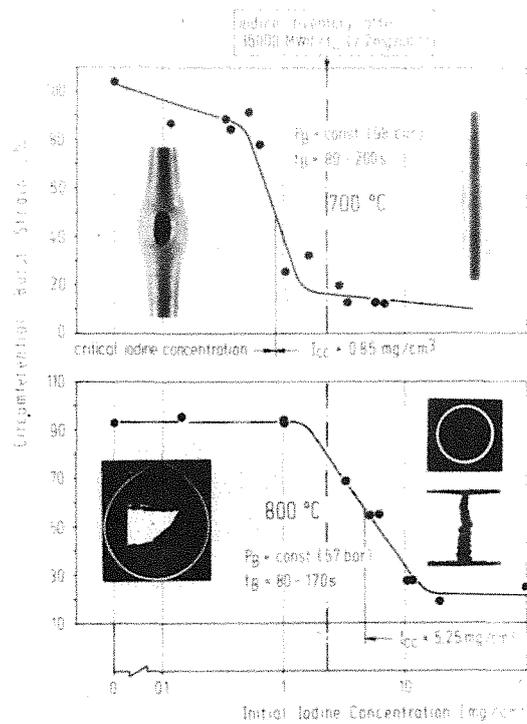


Bild 22: Einfluß der Jodkonzentration auf das Verformungsverhalten von Zircaloy-4-Hüllrohren bei 700°C und 800°C

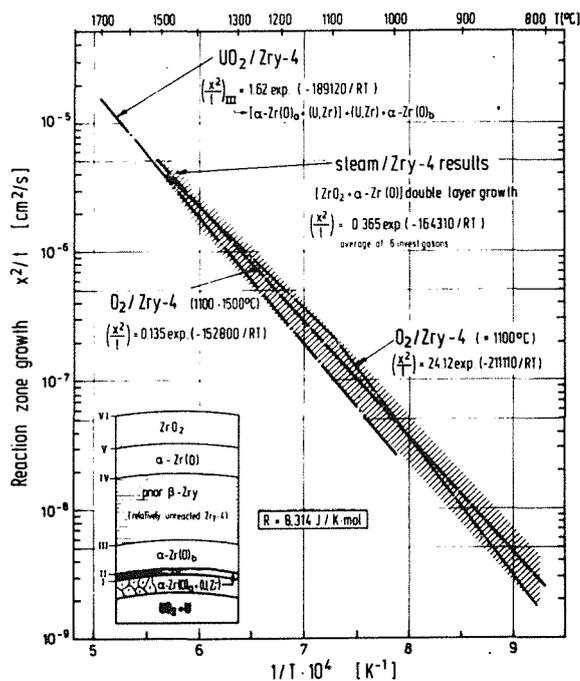


Bild 23: Kinetik des Schichtwachstums bei der Reaktion von Zircaloy-4 mit UO_2 , O_2 und Wasserdampf

Die jüngsten Beteiligungen des IMF liegen im Rahmen des Projektes Kernfusion sowie bei Untersuchungen über keramische Supraleiter. Nach mehrjähriger Vorarbeit des IMF II und nach Gründung des PKF im Jahre 1982 nahmen auch die anderen Teilinstitute und auch das Institut für Werkstoffkunde II an den Arbeiten des PKF teil. Bezüglich der Brutstoff- und Blanketentwicklung konnten wir auf die Ausstattung des IMF I und IMF III zurückgreifen, und es bewährte sich die Komplementarität der Arbeitsgebiete beider Teilinstitute. Auf dem Gebiet der Brutstoffe, d.h. verschiedener Li-Verbindungen sowie der Strukturkeramiken zum Schutz der 1. Wand und für Fenstermaterialien wurden in internationaler Abstimmung wichtige Ergebnisse erzielt.

Bild 24 zeigt, daß die verschiedenen, als Brutstoffe in Betracht kommenden Lithiumverbindungen in sehr unterschiedlichem Maße mit Umhüllungswerkstoffen reagieren, ein Umstand, den man sicherlich berücksichtigen muß. In Bild 25 ist die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verschiedener als Fenstermaterialien für die Hochfrequenz-Energieeinspeisung infrage kommender Keramiken dargestellt. Das Bild zeigt gleichzeitig die im thermophysikalischen Laboratorium des IMF bestehenden Untersuchungsmöglichkeiten.

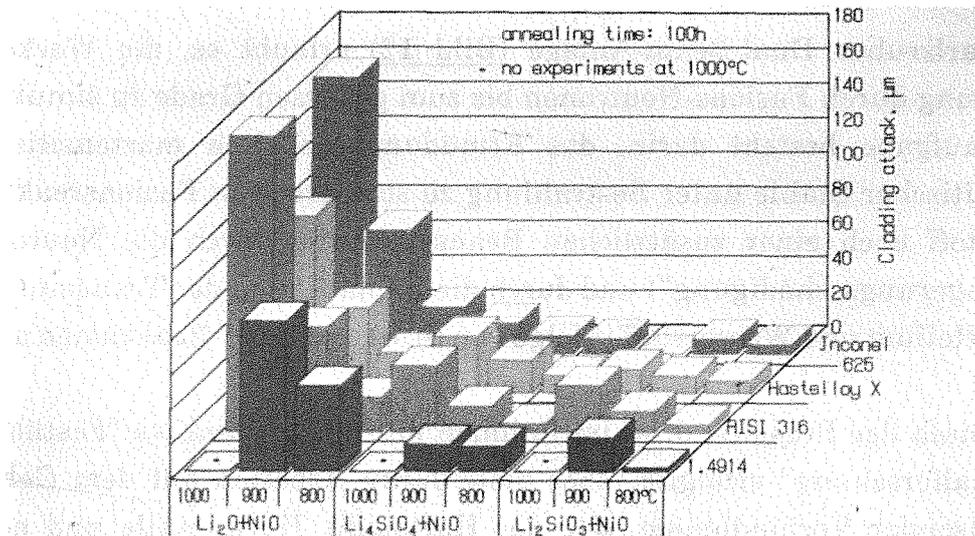


Bild 24: Ausmaß der chemischen Reaktion zwischen Lithiumverbindungen und verschiedenen Umhüllungswerkstoffen

Labor für thermophysikalische Eigenschaften

Untersuchte Werkstoffe:
Keramiken, Carbide, Oxide, Nitride, Silikate sowie Metalle, Legierungen und Metallschmelzen

Laserflash-Apparatur:
Zur Messung der Temperaturleitfähigkeit Wärmeleitfähigkeit, Einsatz der Apparatur von RT bis 2573 K.

Schema der Laserflash-Apparatur

Wärmeleitfähigkeit in W/mK

Temperatur in K

Bild 25: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit verschiedener keramischer Werkstoffe

Die Karlsruher Dual-Beam-Anlage (Bild 12) erlaubt es, die Werkstoffbeanspruchung durch Fusions-Neutronen bis zum gewissen Grade zu simulieren. Die Hauptaufgabe besteht darin, das Ermüdungsverhalten martensitischer und austenitischer Stähle unter Bestrahlung zu studieren. Im Fusionsreaktor ist der Werkstoff noch einer zusätzlichen Beanspruchung durch die Neutronenstöße ("Verlagerungsschädigung") und durch die Implantation der Transmutationsprodukte Helium und Wasserstoff infolge von (n, α) und (n, p)-Reaktionen ausgesetzt.

Außerhalb der Projekte, d. h. im Rahmen des Schwerpunktes "Festkörper- und Materialforschung" erfolgten über viele Jahre Arbeiten auf dem Gebiet hochschmelzender Verbindungen, d.h. der Hartstoffe, Hartmetalle und neuerdings Hartstoffbeschichtungen, d.h. Materialien extrem hoher Verschleißfestigkeit, über Verbundwerkstoffe (Beziehungen zwischen Gefüge und Eigenschaften) über metallische und nichtmetallische Hochtemperaturwerkstoffe, dann erneut über Brennelemente für Hochflußreaktoren aus Uran-Siliziden, seit kurzem über verfahrenstechnische Probleme der Hochleistungskeramik, über Herstellung und Eigenschaften der "Hochtemperatur"-Supraleiter u.a.

Aus dem Arbeitsgebiet: Beziehungen zwischen Gefügeparametern und (Feld)eigenschaften mehrphasiger oder poröser Werkstoffe wird aus Bild 26 ersichtlich, daß z.B. die elektrische Leitfähigkeit eines Verbundwerkstoffes mit stark unterschiedlicher Leitfähigkeit der Komponenten besonders im mittleren Zusammensetzungsbereich je nach geometrischer Anordnung der Phasen sehr variieren kann. Die Arbeiten umfaßten die quantitative Beschreibung von Gefügezuständen, daraus die Berechnung der resultierenden Eigenschaft, die experimentelle Verifizierung dieser Zustände und Vergleich theoretischer und praktischer Resultate. Sofern eine experimentelle Verifizierung gelingt, ergeben sich Möglichkeiten zur Herstellung "maßgeschneiderter" Werkstoffe.

Im Zuge der Bemühungen, besonders der USA, um "non-proliferation" von hoch angereichertem Uran seit 1979 mußten die Forschungsreaktor-Dispersions-Brennelemente von 93 % angereichertem Uran auf 20% umgestellt werden. Hierfür war es notwendig, die bisher verwendeten Verbindungen U_3O_8 und UAl_3 mit mittlerer Urandichte durch solche mit höherer Urandichte zu ersetzen. Von diesen hat sich aus Gründen der Herstellung, der Verträglichkeit mit der Aluminiummatrix und der Neutronenökonomie U_3Si_2 als vorteilhaft erwiesen. Im Bild 27 ist der im IMF erarbeitete Weg zur Herstellung von U_3Si_2 -Al-Brennelementtestplatten für Hochflußreaktoren dargestellt. Der innere Kreis betrifft

die Herstellung des U_3Si_2 mit geeigneter Teilchengröße, der äußere Kreis die Herstellung und Verarbeitung des Brennstoffes mit Al-Pulver zu Dispersionsbrennelementplatten nach der Bilderrahmentechnik.

In großen Teilen seiner F+E-Tätigkeit ist das IMF auf chemisch-analytische Arbeiten angewiesen. In den letzten 10 Jahren konnte ein großer Teil der vorhandenen Ausstattung auf den neuesten Stand der Technik gebracht oder mit Rechnern umgerüstet werden. Bild 28 zeigt den Stand der Ausrüstung des Laboratoriums. Eine sehr wichtige Bereicherung war die hochauflösende AES mit SIMS, Methoden, die zusammen mit dem ITP betrieben werden.

Verschiedene Arbeiten des IMF erbringen Ergebnisse, die auf Gebieten der Technik, auf denen KFK selbst nicht tätig ist, nutzbar gemacht werden können. Daraus entstanden eine Reihe von Technologie-Transfer-Vorhaben, bei denen in der Regel eine unmittelbare Zusammenarbeit mit der einschlägigen Industrie erfolgt. In Tabelle 1 sind die bis 1988 abgeschlossenen Vorhaben des IMF zusammengestellt. Der Stellenwert des TT-Bereiches könnte nach Auslaufen des PSB bzw. der Reduktion der kerntechnischen Vorhaben noch zunehmen.

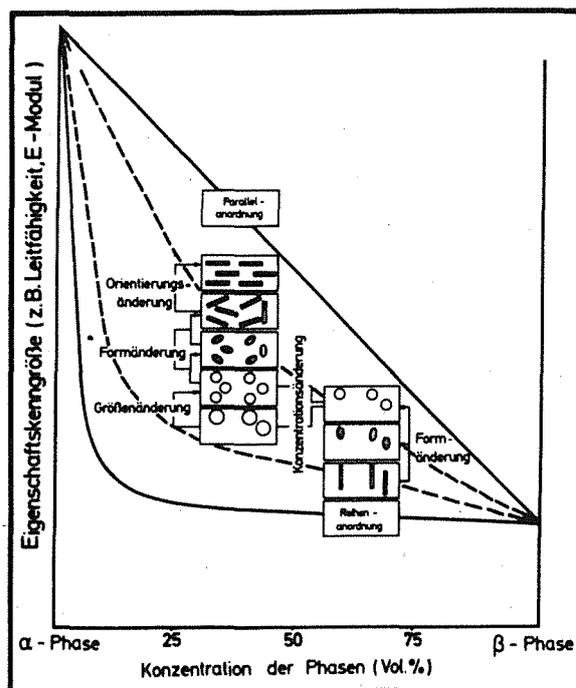


Bild 26: Zusammenhang (schematisch) zwischen Feldeigenschaften und Gefügegeometrie bei mehrphasigen Werkstoffen bei stark unterschiedlichen Eigenschaften der Randphasen

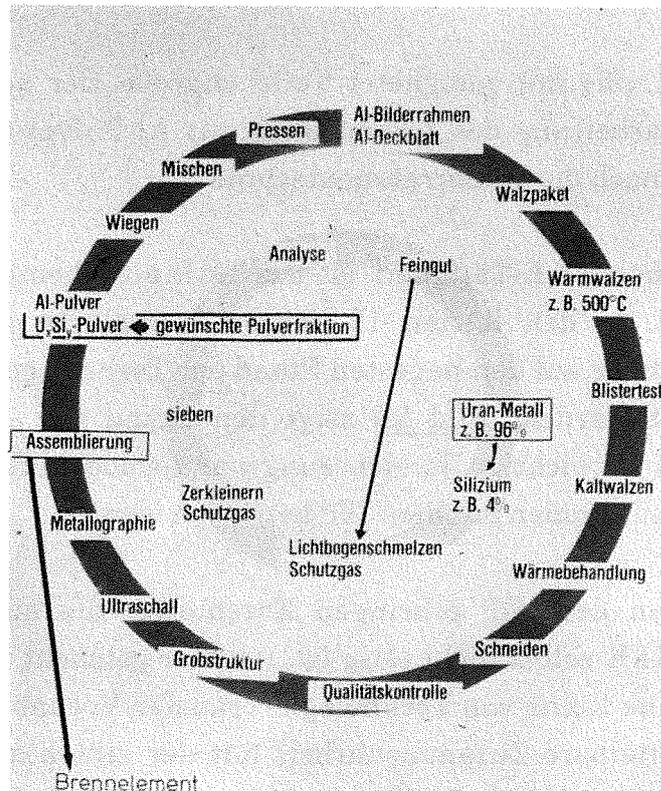


Bild 27: Schema der Herstellung von Uransilizid-Dispensionsbrennelement-Platten

Bereits ab Beginn der 70er Jahre stellten sich zunehmend Gastwissenschaftler im IMF ein, in der Anfangszeit vor allem aus Japan. Insgesamt hatten oder haben wir für längere Aufenthalte Gäste aus Argentinien, Brasilien, China, Frankreich, Großbritannien, Indien, Indonesien, Korea, Jugoslawien, Pakistan, Polen, Spanien, Thailand, Türkei und USA, kürzlich auch aus der DDR. Gastwissenschaftler haben das IMF immer bereichert, sowohl durch fachliche Verstärkung, als auch durch ihre Persönlichkeiten. Mit Institutionen aus vielen der genannten Länder entwickelten sich auch längerfristige wissenschaftliche Beziehungen.

Im Bereich des IMF mit den durch Personalunion verbundenen Hochschulinstituten für Werkstoffkunde II und für Zuverlässigkeit und Schadenskunde erfolgten bis jetzt etwa 70 Dissertationen und 5 Habilitationen. Von diesen sind zahlreiche Arbeiten von der KfK finanziert worden und betreffen Themen des Zentrums. Hierdurch sowie auch durch Diplom- und Studienarbeiten ist die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit des IMF und die Ergiebigkeit vieler Themen und Projekte deutlich gefördert worden. Die Personalunion mit der Universität Karlsruhe sowie auch die Verbindungen zu anderen Universitäten haben sich für beide Partner stets nutzbringend ausgewirkt.

Im letzten Teil des Berichtes soll auf die "literarische" Tätigkeit des IMF eingegangen werden. Neben eingeladenen Haupt- und Übersichtsvorträgen zeigen

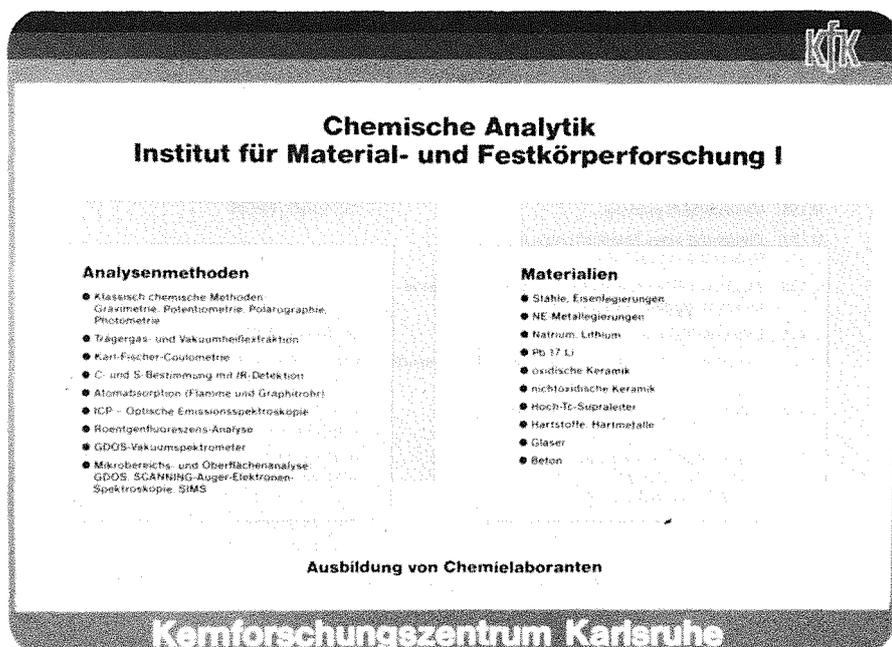


Bild 28: Stand der Ausrüstung Chemische Analytik

zahlreiche Übersichtspublikationen die systematische Erarbeitung von Teilgebieten des nuklearen und nichtnuklearen Materialgebietes; auf eine Zitierung dieser Arbeiten soll hier jedoch verzichtet werden. Erwähnt seien jedoch eine Reihe von Tagungsbänden und Büchern, die seit 1969 erschienen und in Tabelle 2 zusammengestellt sind. Bereits 1969 führte das IMF unter Mitarbeit des Europäischen Instituts für Transurane eine umfassende Bestandsaufnahme über Carbid-Brennelemente mit 17 Beiträgen durch, an die sich eine langjährige F + E-Arbeit auf dem Carbidgebiet anschloß. Ein ähnlicher Berichtsband über Brennelemente für den SNR-300 erschien 1974, der aus 19 Beiträgen besteht, die zahlreiche eigene Ergebnisse beinhalten. 1988 erschien der Tagungsband der 3. Internationalen Konferenz über Fusionsreaktor-Werkstoffe (Karlsruhe, 1987), dessen Herausgabe IMF-, TUI- und auswärtige Fachkollegen besorgt haben. Die aufgeführte Buchliteratur war das Resultat überwiegend der Forschungsgebiete, z. Tl. aber auch der Lehrgebiete der Autoren.

Tabelle 1: Im IMF bis 1988 abgeschlossene TT-Vorhaben

U 133	Vickers-Härteprüfung	Dr. Vollath, IMF III
U 134	Steuerung eines Handhabungsroboters mit Bildschirmverarbeitung	"
U 235	Flexibles Bildverarbeitungssystem für technische und biologische Anwendungen	"
U 208	Labor-Heißpresse	Dr. Weimar, IMF III
U 132	Verwendung von Glas für elektrische Heizelemente	Prof. Ondracek/DWI Kreuzberger, IMF I
U 135	Schmelzleitmaterial für Sicherungen	Prof. Ondracek/DWI Kreuzberger, IMF I
U 218	Glas-Metall-Verbundwerkstoffe	Prof. Ondracek/ DWI Naumann, IMF I
	U 218.1 Gold/Glas	
	U 218.2 Eisen/Glas	
U 232	Berührungsloser Hochtemperatur-Sensor	Prof. Ondracek/ DWI Naumann, IMF I

Am 1. April 1988 hat Prof. Dr. Karl-Heinz Zum Gahr die Leitung des IMF I übernommen. Herr Zum Gahr hat neue Arbeitsgebiete in das IMF und das Institut für Werkstoffkunde II eingebracht; eines davon ist als Buch in Tabelle 2 aufgeführt. Der Autor dieses Berichtes hat somit nach mehr als 23jähriger Tätigkeit im Kernforschungszentrum seine Funktion als Institutsleiter im IMF beendet. Er wünscht dem Institut und allen seinen Mitarbeitern für die zukünftige Arbeit und die Bewältigung der anstehenden Aufgaben alles Gute.

Danksagung

Mehrere Mitarbeiter des IMF haben mich durch Textbeiträge und Bildmaterial bei der Abfassung dieses Berichtes unterstützt. Aus dem Archiv der Literaturabteilung des KfK wurden mir Unterlagen aus der Gründungszeit des IMF zur Verfügung gestellt. Frau A. Gottschalk hat die Fertigstellung besorgt. Allen Betroffenen wird hiermit herzlich gedankt.

Tabelle 2: Buchliteratur und Tagungsbände von Autoren des IMF

K. Kummerer, F. Thümmeler: Karbidische Kernbrennstoffe für schnelle Brutreaktoren, KFK-Bericht 1111, 1969

E. Gebhardt, F. Thümmeler, Seghezzi: Reaktorwerkstoffe, Teil 2: Keramische und pulvermetallurgische Werkstoffe. Verlag Teubner, Stuttgart, 1969

H. Böhm, W. Dienst, K. Kummerer: Arbeiten zur Brennelemententwicklung für den schnellen Brutreaktor SNR-300, KFK-Bericht 1999, 1974

W. Dienst: Hochtemperaturwerkstoffe, Werkstofftechnische Verlagsgesellschaft Karlsruhe, 1978

G. Ondracek: Werkstoffkunde - Leitfaden für Studium und Praxis, Expert-Verlag, Grafenau, 1979

K. Kummerer: Werkstoffe der Kerntechnik, Braun-Verlag, Karlsruhe, 1980

H. Holleck: Binäre und ternäre Carbid- und Nitridsysteme der Übergangsmetalle, Gebr. Bornträger Verlag, Berlin, 1984

D. Munz, Hrsg.: Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe, DGM-Informationsgesellschaft, 1985

H. Holleck: Binäre und ternäre Carbid- und Nitridsysteme der Übergangsmetalle, Verlag Metallurgisdat, Moskau, 1988 (in russischer Sprache)

K. Anderko, C.A. English, H. Kleykamp, H.-J. Matzke, H. Ullmaier, F.W. Wiffen: Fusion Reaktor Materials (Proceedings of the Third International Conference on Fusion Reaktor Materials, Karlsruhe, 4. - 8. Okt. 1987), Part A und B, North-Holland, Amsterdam, 1988

H. Holleck: Binäre und ternäre Carbid- und Nitridsysteme der Übergangsmetalle, Verlag Metallurgisdat, Moskau, 1988 (in russischer Sprache)

D. Munz, T. Fett: Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe, Versagensverlauf, Werkstoffauswahl, Dimensionierung, Springer Verlag, Berlin, 1989

H.U. Borgstedt, C.K. Mathews: Applied Chemistry of the Alkali Metals, Kernforschungszentrum Karlsruhe and Indira Gandhi Center for Atomic Research, Kalpakkam, India, Plenum Press, New York, London, 1987 (auch ins Chinesische übersetzt)

H.U. Borgstedt, H. Wedemeyer: Uranium, Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, 8th Edition, Supplement Vol. B 2, Springer-Verlag, Berlin, 1989