Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 85 (1994)

Heft: 22

Artikel: Informationen aus dem Kernbereich von Leistungsreaktoren

Autor: Bart, Gerhard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902621

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 24.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Um den sicheren Betrieb des Kerns eines Reaktors zu gewährleisten, müssen die Veränderungen der unter harten Funktionsbedingungen eingesetzten Werkstoffe bekannt sein. Im PSI «Labor für Werkstoff-Verhalten» (LWV) des Forschungsbereiches «Nukleare Energie, Sicherheit» wird im Rahmen von materialwissenschaftlichen Untersuchungen beurteilt, wie gut Brennstäbe, Steuerstäbe, Brennelementkästen und alle übrigen Kerneinbauten die Bestrahlung überstanden haben. Diese Arbeiten dienen also dazu, Reaktor-Werkstoffe zu optimieren, die Restlebensdauer von Komponenten abzuschätzen, Sicherheitsmargen zu ermitteln und mögliche Schadensmechanismen aufzuklären. Im Brennstoff entstehen bei der Energieerzeugung im Reaktorkern radioaktive Spaltprodukte und Neutronen. Letztere aktivieren die Kerneinbauten, so dass die Brennelemente und Struktur-Werkstoffe nach dem Reaktorbetrieb hochradioaktiv sind. Die Nachbestrahlungsuntersuchungen können deshalb nur in einem speziell ausgerüsteten Labor, dem PSI-Hotlabor, durchgeführt werden. Im Bericht wird einleitend die Hotlabor-Infrastruktur und -Zielsetzung dargestellt und anschliessend an Beispielen die Vielschichtigkeit von Fragestellungen für Nachbestrahlungsuntersuchungen gezeigt.

Informationen aus dem Kernbereich von Leistungsreaktoren

■ Gerhard Bart

Hotlabor-Infrastruktur und -Zielsetzungen

Die Hotlabor-Infrastruktur erlaubt materialwissenschaftliche Untersuchungen an stark radioaktiven Proben. Zu der Infrastruktur gehören abgeschirmte, mit Manipulatoren bediente Zellen (Bild 1), Unterdruck-Boxen, aufwendige Zu- und Abluftsysteme sowie Aktivitätsüberwachungs-, Abwasserreinigungs- und Abfallkonditionierungs-Anlagen. Voraussetzung für chemische und festkörperphysikalische Materialuntersuchungen ist aber auch eine leistungsstarke, gut funktionierende analytische Geräte-Infrastruktur. Bild 2 zeigt dazu als Beispiel den Arbeitsplatz einer abgeschirmten Elektronenmikrosonde.

Die heutigen reaktortechnischen Fragestellungen beziehen sich auf die Komponentensicherheit der Anlagen im Normalbetrieb, auf Fragen zur Schliessung des Brennstoffzyklus, auf Unsicherheiten in der Abfall-Endlagerung. Dabei bilden die

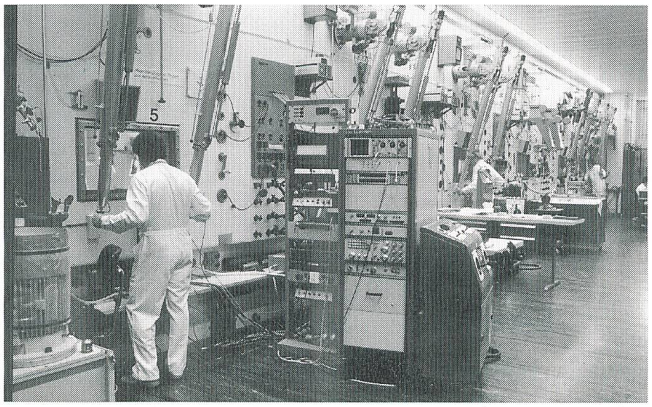


Bild 1 Hinter 1 m dicken Betonabschirmungen werden fernbedient stark radioaktive, grosse Komponenten zuerst zerstörungsfrei untersucht. Je nach Aufgabenstellung analysieren wir später hier separierte Kleinproben in anderen Laboratorien (Bilder PSI)

Adresse des Autors:
Dr. *Gerhard Bart*, Leiter Labor für Werkstoffverhalten, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI.

Bild 2 Mit Hilfe der abgeschirmten Elektronenmikrosonde kann an geschliffenen, hochaktiven Proben auf kleinster Fläche (etwa 1 Quadrat-Mikrometer) die chemische Zusammensetzung ermittelt werden. Das moderne oberflächenanalytische Messgerät (das kleine Bild ermöglicht einen Blick hinter die Abschirmung) ist von einem Prozessrechner gesteuert. In den Abschirmungen im Hintergrund werden die Proben für die Mikrosonde und weitere Geräte vorbereitet (Bild H.R. Bramaz)

experimentellen Resultate die Voraussetzung für die Entwicklung und Validierung von Modellen, die das Werkstoffverhalten voraussagen. Gleichzeitig unterstützt das Hotlabor mit seiner operationellen und analytischen Infrastruktur die PSI-Beschleunigeranlagen, aber auch nichtnukleare Materialforschungsthemen. Verfahrenstechnisch werden keramische Matrizen zur Actinidenverbrennung und Rezepturen zur Entsorgung eigener actinidenhaltiger Abfälle entwickelt. Die Hotlabor-Infrastruktur dient auch zur Manipulation hochradioaktiver in der Medizin und Industrie eingesetzten Strahlenquellen. Das Hotlabor hilft schliesslich mit aktiver Personalausbildung (Physiklaborantenlehrlinge, Praktika für Hochschulabsolventen und Dissertationsthemen) personell mit, die Option Kernenergie offen zu halten. Es bietet Gewähr für materialwissenschaftliche Expertisen im Umgang und in der Beurteilung von Reaktorkern-Komponenten. Der Betrieb und die Wartung der Anlage (Infrastruktur) beanspruchen ein Viertel der Ressourcen. Je ein weiteres Viertel wird für Forschung auf den Gebieten der Entsorgung und fortgeschrittener Brennstoffe eingesetzt. Das letzte Viertel wird dem nachstehend eingehender dargestelltem Projekt EDEN gewidmet.

Hohe materialtechnische Anforderungen an die Reaktorkern-Werkstoffe

Das Projekt EDEN

Die Druckgefässeinbauten der schweizerischen 10- bis 25jährigen Kernkraftwerke sind bezüglich Temperatur, Thermohydraulik, Strahlenbelastung, Radiolyseprodukten und Wasserinhaltsstoffen sehr anspruchsvollen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Die Palette möglicher Materialbeeinträchtigungen ist dementsprechend gross und umfasst je nach dem Zusammenspiel der Werkstoff-Belastungsarten Erosions- und Korrosionsphänomene, Schäden durch statische und zyklische mechanische Überbeanspruchung und vor allem auch Kombinationen dieser schädigenden Wirkungen, definiert zum Beispiel als Spannungs- und Schwingungsrisskorrosion und strahlungsinduzierte Spannungsrisskorrosion. Dank sorgfältiger Auslegung, Werkstoffwahl, Fertigung und Betriebsüberwachung erreichen trotz der Einsatzbedingungen die meisten Komponenten die erwartete Lebensdauer. Diese wird mit zunehmender Erfahrung und Werkstoffentwicklung zwecks Kosten- und Abfallminimierung gezielt auch noch erhöht. Dennoch ist ein frühzeitiges Komponentenversagen nicht ganz ausschliessbar.

Im Spannungsfeld von Werkstoff-Weiterentwicklungen und unerwarteter, frühzeitiger Werkstoff-Korrosion oder -Rissbildung sind vielfältige Untersuchungen notwendig. Im folgenden wird an ausgewählten Beispielen gezeigt, welche Vielfalt von Fragestellungen im LWV-Projekt EDEN[1] mit Nachbestrahlungsuntersuchungen[2] gelöst werden kann (Bild 3).

Untersuchungen am Brennstoff, der Quelle der Energie

Um die Wärme eines elektrischen Haushalt-Warmluft-Heizkörpers von 1200 Watt Leistung vier Jahre lang ununterbrochen zu erzeugen, müssten neun Fässer zu je 200 Liter Heizöl verbrannt werden. Die gleiche Wärmeleistung wird im Kernkraftwerk Gösgen einer Brennstab-Säulenlänge von 5 cm (entsprechend etwa fünf Brennstoffpellets oder total 50 Gramm Brennstoff) entzogen. Dabei fällt dem keramischen nuklearen Brennstoff aus Urandioxid oder Uran-Plutonium-Dioxid (letzterer wird als Mischoxid- oder auch MOX-Brennstoff bezeichnet) als erste Barriere gegen Spaltproduktfreisetzungen in den Wasserkreislauf eine wichtige Sicherheitsfunktion zu. Zusammen mit dem korrosionsresistenten Hüllrohr (zweite Barriere) bildet der Brennstab ein zuverlässiges Schutzsystem gegen Kreislauf-Kontaminationen. Die Statistik zeigt, dass auf 100000 über vier Jahre eingesetzte Brennstäbe heute nur noch deren zwei bis fünf undicht werden. Hinter diesem eindrücklichen, bisher erreichten Ziel steckt sehr viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit, zu der auch im Projekt EDEN mitgewirkt wird. Nach ihrem Reaktoreinsatz werden ausgewählte

[1] EDEN = Entwicklung, Durchführung und Evaluation von Nachbestrahlungsuntersuchungen.
[2] Nachbestrahlungsuntersuchungen (NBU): Untersuchung von Werk- und Brennstoffen nach deren Einsatz in einem Strahlungsfeld (üblicherweise Neutronenstrahlung).

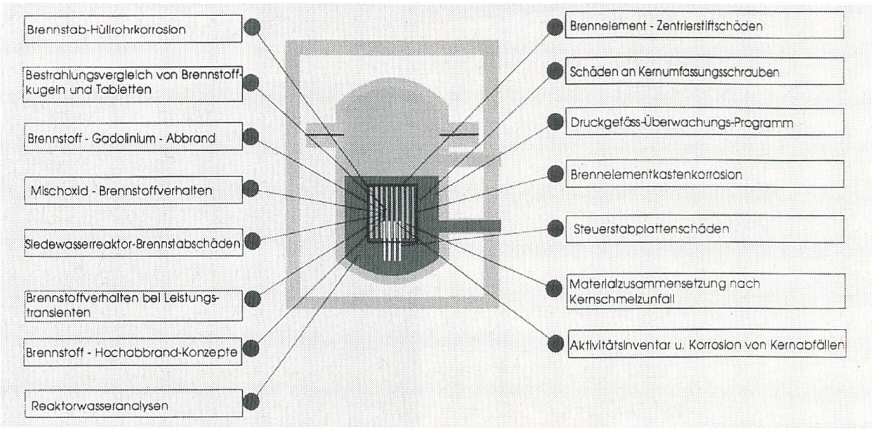


Bild 3 Überblick zu Reaktoren Materialforschungs- und Dienstleistungsaufgaben im Projekt EDEN der letzten zehn Jahre

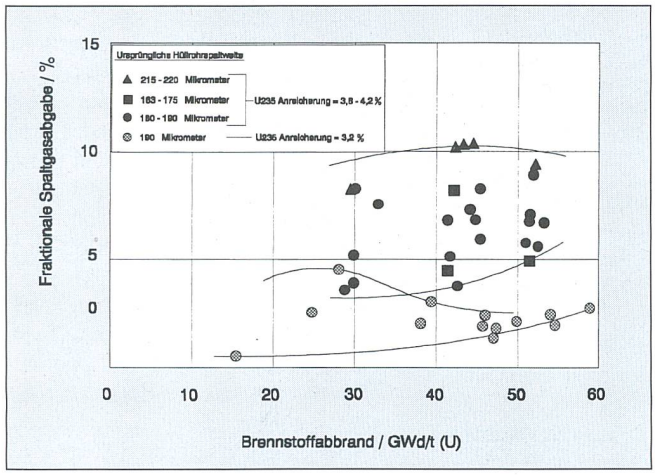


Bild 4 Anteil des aus dem Brennstoff ins Hüllrohr abgegebenen Spaltgases von Druckwasserreaktor-Brennstoff in Abhängigkeit der Brennstoffanreicherung, des Abbrandes und der Einfüllspaltweite. Ein Teil der Daten wurde am PSI analysiert

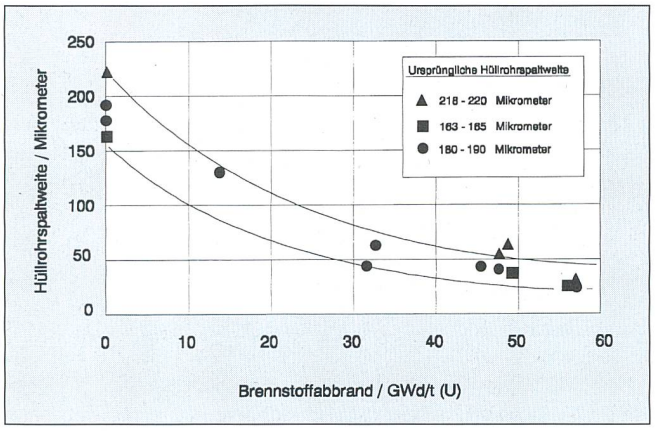


Bild 5 Abnahme des Brennstoff-Hüllrohrspaltes während der Bestrahlung, verursacht durch Hüllrohr-Kriechen und Brennstoff-Schwellung

weiterentwickelte Testbrennstäbe in einer Zusammenarbeit des PSI mit dem Kernkraftwerk Gösgen und der Siemens AG auf Materialveränderungen hin geprüft. Beim Brennstoff interessiert insbesondere, wieviel Xenon- und Krypton-Spaltgase bei einem möglichst hohen Abbrand ins Hüllrohr-Auffangvolumen (Plenum) abgegeben werden. Diese Gasmenge ist abhängig von der Wärmeleistung und dem Wärmefluss-Widerstandswert, die letztlich die Brennstofftemperatur bestimmen. Der Wärmefluss-Widerstand wiederum ist abhängig von der Grösse des Einfüllspaltes zwischen Brennstoffpellet und Hüllrohr (Bild 4), dem Hüllrohr-Wärmeflusswiderstand, der Brennstoff-Mikrostruktur und der Plenums-Gaszusammensetzung. Die meisten dieser Grössen bleiben überdies während der Bestrahlungszeit nicht konstant [3]. Als Beispiel dazu mag der Einfüllspalt dienen, der wegen Pelletdehnung und Hüllrohrkriechens während der Bestrahlung abnimmt (Bild 5). Modellmässige Voraussagen über den Spaltgasaustritt in Abhängigkeit von der Zeit sind deshalb sehr komplex. Sie basieren auf experimentellen Laboruntersuchungen der Brennstoff-Materialveränderungen, wobei makroskopische und mikrostrukturelle Veränderungen gleichermassen hinterfragt werden.

Da der Uran- und Plutonium-Spaltvorgang in einem Leichtwasserreaktor mit langsamen (thermischen) Neutronen inhomogen von der Brennstabperipherie her erfolgt, ist es wichtig, den Abbrand[3] jedes einzelnen Spaltisotops in Abhängigkeit vom Brennstabdurchmesser bestimmen zu können. Für solche Messungen eignet sich die Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS) besonders gut, und es wurden während der letzten Jahre mehrere internationale NBU-Programme am PSI durchgeführt, weil unser SIMS-Gerät bisher weltweit die einzige abgeschirmte Anlage ist, die stark radioaktive bestrahlte Brennstoffproben überhaupt aufnehmen kann. Wie der radiale Plutoniumabbrand in MOX-Brennstoff aussieht, ist in Bild 6 dargestellt [4]. Gegen die Brennstabperipherie hin nimmt die Konzentration des Isotopes Pu-239 bestrahlungsbedingt ab. In der äussersten Brennstoffzone wird Pu-239 durch Neutroneneinfang im Uran-238 erbrütet und steigt nochmals an. Die experimentellen PSI-Untersuchungen dienen hier auch der Entwicklung und Validierung neutronenphysikalischer Abbrand-Rechencodes. Die Zielstellung der Anforderungen an den Brennstoff ist klar: Trotz immer höheren Abbrands soll die Brennstab-Defektrate noch abnehmen.

[3] Abbrand: Anteil des zu einem gegebenen Zeitpunkt gespaltenen Materials, meistens angegeben in produzierter Energie pro Einheit anfänglich vorhandener Spaltstoffmenge.

[4] Zircaloy: Eine Legierung mit geringem Neutronenverlust auf der Basis von Zirkonium.

Begrenzt Wasserstoffversprödung die Einsatzdauer von Hüllrohren?

Gegenwärtig begrenzt die wasserseitige Korrosion am Hüllrohrmaterial den End-Abbrand. Auf der Hüllrohr-Oberfläche bildet sich eine Oxidschicht und das Metall nimmt Wasserstoff (H_2) auf. Deshalb werden im Projekt EDEN die Belastungsgrenzen herkömmlicher Hüllrohrmaterialien unter realen Einsatzbedingungen erforscht und die Korrosionseigenschaften veränderter untersucht. Die Arbeiten erfolgen in internationaler Zusammenarbeit mit Brennstoffherstellern, Kernkraftwerkbetreibern und Forschungsinstituten.

Die *Wasserstoffaufnahme* durch das Zircaloy[4]-Hüllrohr führt zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Die zulässige H_2-Konzentration im Hüllrohr wurde deshalb aus Sicherheitsgründen auf 0,5‰ begrenzt. Für die che-

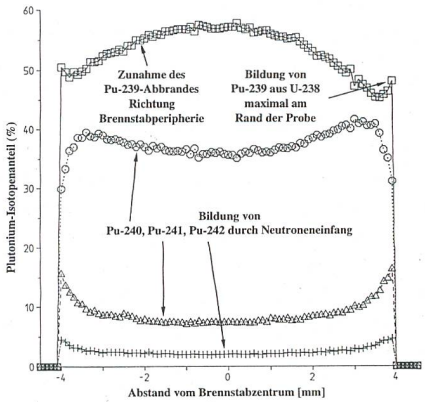


Bild 6 Die Plutonium (Pu)-Isotopenverteilung in Uran-Plutonium-Mischoxid-Brennstoff wurde 1991 im PSI-Hotlabor wohl weltweit erstmals ermittelt. Sie zeigt den Abbrand des Ausgangs-Isotops Pu-239 gegen die Brennstaboberfläche hin. Gleichzeitig steigt die Konzentration der höheren Pu-Isotope

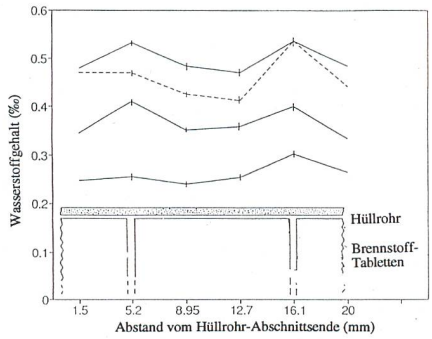


Bild 7 Wasserstoffgehalt in einem Hüllrohr, das mit Brennstofftabletten gefüllt ist. Dort, wo die Tabletten aneinanderstossen, ist der H_2-Gehalt höher

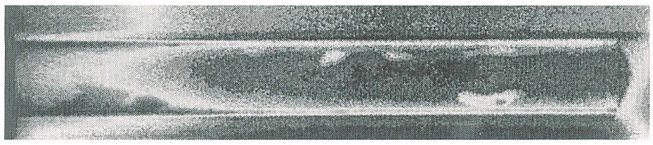


Bild 8 Neutronenradiographie eines Hüllrohrabschnitts mit ungleichmässiger Wasserstoffverteilung (digitalisiert, in Falschfarben)

mische Analytik stellen sich folgende Fragen:

- Wieviel Wasserstoff wird absolut im Durchschnitt aufgenommen?
- Wie verteilt sich der Wasserstoff im Hüllrohr?
- In welcher Richtung werden die Hydride[5] im Hüllrohr ausgeschieden?

Die *absolute Menge an* H_2 wird durch Aufschmelzen der Hüllrohrproben gemessen, wobei der Wasserstoff durch einen Gasstrom in eine Messzelle transportiert wird. Wenn der Zinngehalt im Zircaloy von 1,5% auf weniger als 1,2% abgesenkt oder Zirkonium mit Niob legiert wird, erhöht sich die Korrosionsbeständigkeit, gleichzeitig steigt aber der relative Wasserstoffanteil im Hüllrohr.

Die *Wasserstoffverteilung* untersuchen wir am PSI mit vier Methoden: zerstörungsfrei durch Wirbelstromdefektprüfung und durch Neutronenradiographie; zerstörend durch Metallographie und durch die Wasserstoffbestimmung in einzelnen Hüllrohrringen. Bild 7 zeigt, dass schon die geringe Temperaturabsenkung an den Stossstellen der Brennstofftabletten im Hüllrohr eine Erhöhung der Wasserstoffkonzentration bewirkt. Erreicht die Korrosionsschicht auf dem Hüllrohr eine Dicke von 50 bis 100 mm, platzt sie stellenweise ab. Solche Stellen mit abgeplatzten Oxiden sind ebenfalls Stellen tieferer Temperatur, an denen sich der Wasserstoff ansammeln und als Zirkonhydrid linsenförmig ausscheiden kann. In Bild 8 sind solche Wasserstofflinsen durch Neutronenradiographie am SAPHIR-Reaktor sichtbar gemacht. Wichtig im Zusammenhang mit der Wasserstoffaufnahme ins Hüllrohr ist dessen Ausscheidung als Zirkoniumhydrid und besonders die räumliche Orientierung dieser Hydride, die im Metallographiebild klar hervorgeht. Durch Zug- und Berstversuche an Rohrabschnitten prüfen wir die Konsequenzen der Hydridausscheidungen auf die Materialzähigkeit und -festigkeit.

[5] Hydride: Chemische Verbindungen zwischen Wasserstoff und Metall.

Schadensanalyse an Liner-Brennstäben oder die Frage nach den Gründen für die Entstehung langer Risse

In den 70er Jahren konnte die Mehrzahl auftretender Brennstabrisse von Siedewasserreaktoren ursächlich auf mechanische Spannungen zwischen Brennstoff und Hüllrohr zurückgeführt werden. Solche Pellet-Clad-Interaktionen (PCI) entstehen bei Leistungsänderungen, weil sich Brennstoff und Hüllrohr bei Temperaturänderungen unterschiedlich dehnen oder kontrahieren. Die PCI-Schadensursache wurde eliminiert durch Einbau einer zähen, weichen, etwa 80 mm dicken Hüllrohr-Innenhaut (Liner) aus Rein-Zirkonium. Mit Liner-Hüllrohren wurden PCI-Schäden nicht mehr festgestellt. Seither liegt die häufigste – besser gesagt, am wenigsten seltene – Schadensursache bei Reib- oder Schlagschäden durch Fremdpartikel, vor denen kein Kraftwerk völlig gefeit ist. Solche sogenannten «Fretting-Schäden» zeigen ein typisches, gut identifizierbares Rissbild.

Nun sind aber bei den wenigen auftretenden Hüllrohrschäden der letzten paar Jahre insbesondere bei Zirkonium-Liner-Brennstäben überraschend lange, einer Mantellinie folgende Risse entstanden, die zu unerwünschten hohen Brennstoff- und Spaltprodukt-Freisetzungen im Reaktor-Kreislauf und zu unnötigen, radiologischen und Abfallbelastungen führten. Da auch im Kernkraftwerk Leibstadt bis 1991 zwei solche Brennstäbe anfielen, entschied sich die Leitung des KKL zusammen mit dem Brennstablieferanten General Electric USA (GE), beim PSI eine Schadensursachenanalyse durchführen zu lassen.

Das Ziel der Schadensinspektion war mehrschichtig. Zunächst sollte über der ganzen Stablänge ein vermuteter Primärschaden gesucht werden. Dann interessierte die Frage, ob Reaktorwasser, einmal über den Primärschaden in den Brennstab eingedrungen, diesen inwendig oxidiert und hydriert, ein Vorgang, der später (typischerweise bei einer lokalen Leistungsänderung) zu den langen Rissen führen könnte. Schliesslich war die Frage zu beantworten, ob ausgerechnet der Liner, als Heilmittel gegen PCI-Schäden erfolgreich eingesetzt, ursächlich beteiligt ist am Entstehen der langen Risse, weil er erfahrungsgemäss schneller korrodiert als die Hüllrohrlegierung und so durch Schwellen das Hüllrohr von innen her reissverschlussartig öffnen könnte [6].

Die Risse der zwei untersuchten Stäbe sind schematisch in Bild 9 dargestellt, wobei im weiteren zur Illustration nur noch auf den Schaden des Brennstabes D6 eingegangen wird. Die Ergebnisse der Messung der axialen Gammaaktivitätsverteilung und des Stab-Durchmesserverlaufes sind darge-

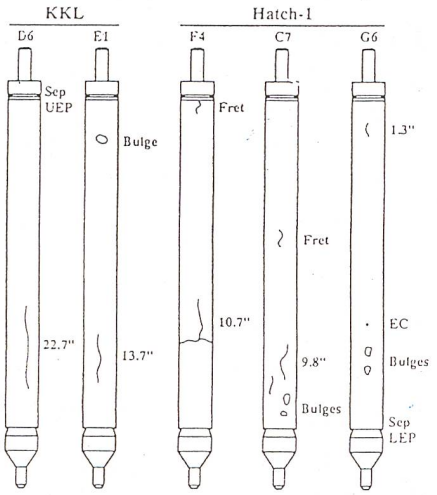


Bild 9 Schematische Darstellung von axialen Rissen in KKL-Liner-Brennstäben [6]

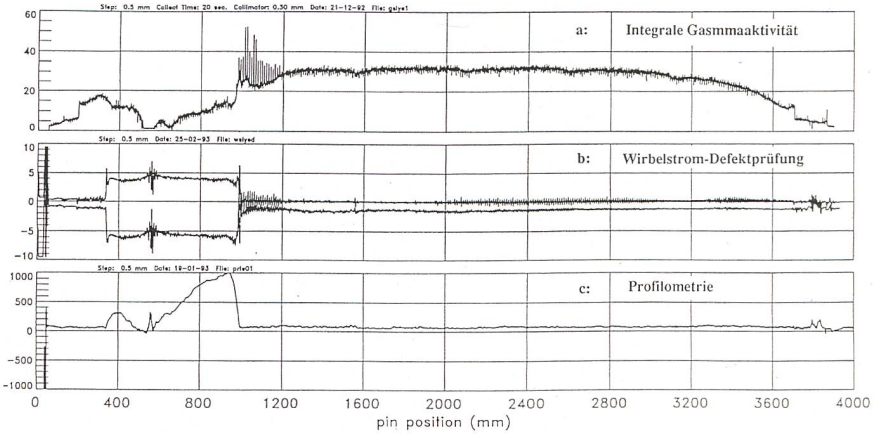


Bild 10 Zerstörungsfreie Messresultate an defekten Liner-Brennstäben

a) Gammaaktivitätsverteilung
b) Wirbelstrom-Defektprüfung
c) Durchmessermessung; in Abhängigkeit der Brennstablänge
(Die Y-Achse der Profile zeigt im Rissbereich ein relatives Mass der Abweichung)

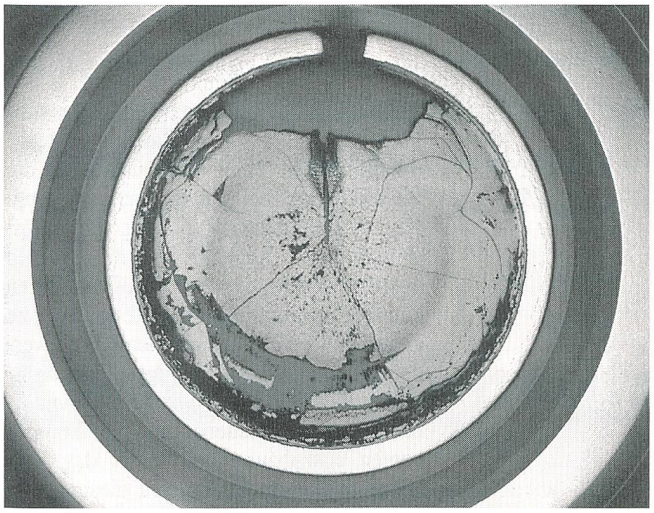
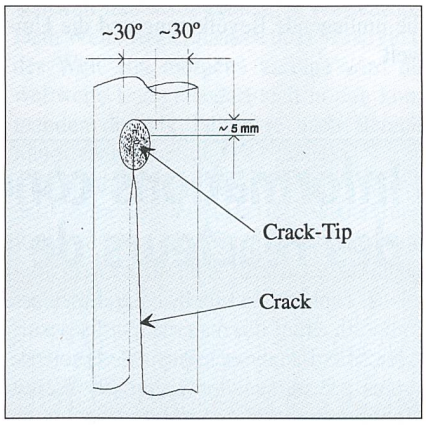


Bild 11 Brennstab-Querschnitt in der Übersicht. Unter dem Hüllrohr-Längsriss ist Brennstoff teilweise ausgewaschen

stellt in Bild 10. Beide Messmethoden zeigen deutlich die Längsrissposition zwischen etwa 350 und 1000 mm. Das Gammaaktivitätsprofil erlaubt einen Brennstoffverlust von etwa 300 g abzuschätzen [7]. Bei genauerem Hinsehen auf das Gammaaktivitäts-Verteilungsbild (Bild 10a) erkennt der Spezialist, dass der Brennstoff oberhalb des Riss-Endes vermutlich durch Oxidation heisser gelaufen ist, was zur Wanderung des flüchtigen Spaltproduktes Cäsium an die kühleren Pelletstossstellen führte (die Gammaaktivitätsmaxima zwischen Stabposition 970 und 1200 mm liegen genau an Pelletstossstellenpositionen. Weiter oben im Brennstab (oberhalb 1250 mm) verläuft die Aktivitätsverteilung wie bei einem intakten Brennstab erwartet, das heisst mit Aktivitätsminima an Pelletstossstellen und im Bereich der Brennstab-Abstandshalter. Die Brennstab-Durchmessermessung (Bild 10c) zeigt zusammen mit anderen zerstörungsfreien Messmethoden keine Hinweise auf einen möglichen Primärfehler im Stab oberhalb des grossen Längsrisses. Es musste deshalb davon ausgegangen werden, dass der Primärschaden, der sich dann zum langen Sekundärschaden entwickelte, im gleichen schadhaften Teilstück lag. Bild 11 zeigt im metallographischen Querschliff-Übersichtsbild die Rissposition und das Ausmass des Brennstoffverlustes. In einer metallographischen Detailarbeit wurden nun der Verlauf der Rissspitzen (Bild 12), die Hüllrohrwand-Oxidation (Bild 13) und -Hydrierung sehr sorgfältig im Sinne einer Spurensicherung untersucht. Dabei können natürlich die gezeigten Bilder nur als Beispiele dienen. Sie zeigen aber als wichtige Hinweise in dem Indizienprozess deutlich, dass der Liner erst nach dem Entstehen des langen Risses massiv oxidiert wurde. Nur so ist verständlich, dass die Lineroxidation auf der Rissstirnseite in gleiche Tiefe erfolgte wie auf der Hüllrohrwand-Innenfläche (Bild 13). Das Bild beweist aber auch, dass der Liner im Vergleich zur Basislegierung Zircaloy etwa zehnmal schneller oxidiert. Die Bilder 11–13 zeigen eindrücklich die Anordnung von Hydridausscheidungen, die mechanischen Spannungsgradienten folgen. Sie demonstrieren aber auch, dass die Hydrierung nicht so weit fortgeschritten ist, wie durch hypothetische, massive Liner-Oxidation vor dem Aufreissen des Längsrisses hätte erfolgen müssen. Kurz: die Liner-Oxidation hat mitgeholfen, den Längsriss breiter zu öffnen, sie war aber kaum Ursache des Längsrisses selbst. Letztere ist vermutlich in Materialinhomogenitäten zu suchen.



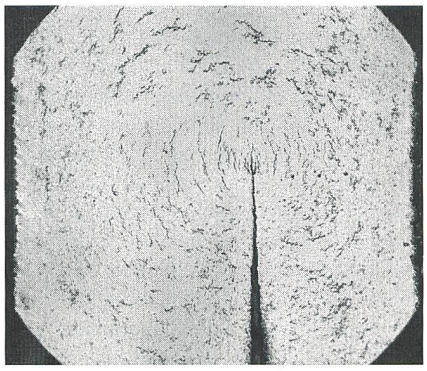


Bild 12 Detaillierte metallographische Untersuchung der Rissspitze mit Hydridausscheidungen

TMI-Schadensanalyse: Teilnahme an der internationalen Evaluation bedeutender Störfälle

Am 28. März 1979 kam es am Three Mile Island 2 Druckwasserreaktor/USA aufgrund von Kühlwasserverlusten zu einem schweren Unfall. Nur 1/3 des Kernbrennstoffes blieb unversehrt, der Rest, 86000 kg, wurde zerstört, oxidiert, geschmolzen oder mechanisch deformiert. Über mehrere Jahre wurde diese Havarie intensiv untersucht, um daraus Rückschlüsse über den Unfallhergang ableiten zu können. Das PSI beteiligte sich im Rahmen einer OECD-NEA-CSNI-Kollaboration an der Schadensabklärung und untersuchte die in Bild 14 gekennzeichneten Proben aus

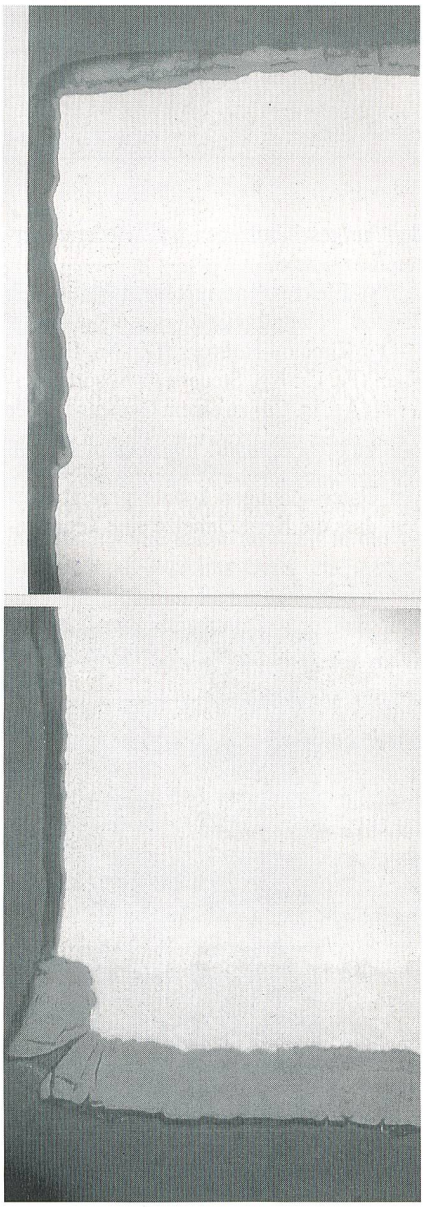


Bild 13 Detail aus Bild 11. Die Lineroxidation an der Rissstirnseite erfolgte in gleicher Tiefe wie die Oxidation von der Hüllrohr-Innenfläche her. Der Liner korrodiert etwa 10mal schneller als das Zircaloy-Grundmaterial

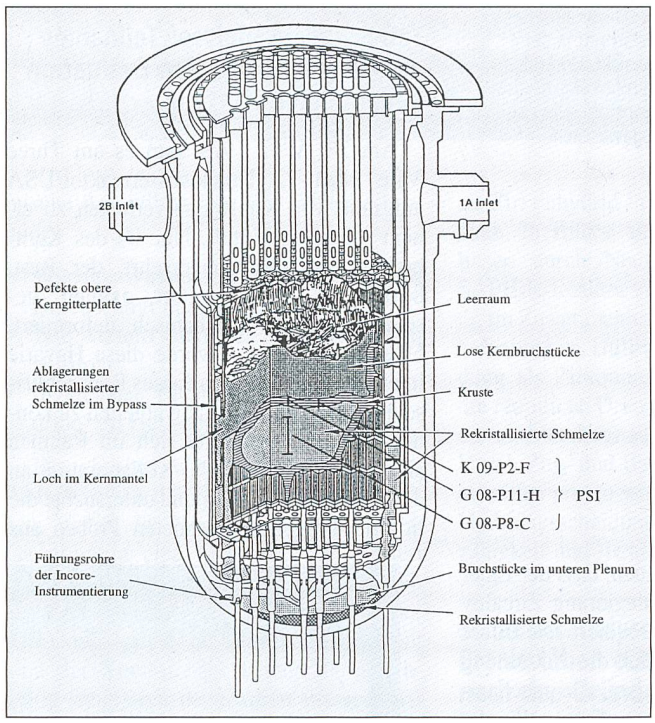


Bild 14 TMI-Reaktorkernübersicht nach erfolgter Havarie 1979. Die am PSI untersuchten Proben sind eingezeichnet

dem aufgeschmolzenen und wiedererstarrten Kernbereich.

PSI-Elektronenmikrosondenanalysen zeigten eindrücklich, wie Brennstoff (UO_2), Zircaloy-Hüllrohre (Zr, Sn, Fe, Cr), Stahl (Fe, Cr, Ni), Steuerstab-Absorbermaterial (Ag, In, Cd) zu einem Gemenge neuer metallischer und oxidischer Phasen erstarrten (Bild 15). Aus detaillierten quantitativen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Kernschmelze eine Temperatur von etwa 3000 °C erreichte und beim Abkühlen während längerer Zeit bei einem Temperaturhaltepunkt von 2000 °C verharrte. Trotz der totalen Kernschädigung blieb dank genügend eingebauter Sicherheitsvorkehrungen der erste schwere Störfall in einem grossen Leistungsreaktor auf die Anlage beschränkt und wurde zu keiner Belastung weder für das Personal noch für die umliegende Bevölkerung und die Umwelt.

Schlusswort

Die dargestellten Beispiele von Brennstabveränderungen unter Bestrahlung und mechanischer Belastung im Reaktorkern geben einen Eindruck über die Vielfalt von Fragestellungen, die durch Nachbestrahlungsuntersuchungen gelöst werden. Als Analysehilfsmittel werden hochentwickelte Geräte eingesetzt, deren einzelne Informationen mosaiksteinartig zu einem ganzen Bild zusammengesetzt werden. Die Resultate tragen dazu bei, das sicherheitstechnisch gründliche Verständnis des Materialverhaltens der Kernkomponenten auszubauen und damit das Vertrauen in die Zuverlässigkeit dieser wichtigen Bauteile der Reaktoren zu vertiefen.

Literatur

[1] *Zwicky, H.-U.; Aerne, E.T.; Bart, G.; Petrik, F.; Thomi, H.A.*: Radiochimica Acta 47, 9–12 (1989).

[2] *Zwicky, H.-U.; Aerne, E.T.; Bart, G.*: PSI Nuclear Energy Research, Progress Report 1988, 69–75, Villigen, 1989.

[3] *Manzel, R.; Bodmer, R.P.; Bart, G.*: IAEA-TEC-DOC-697, 63–67, Wien, 1993.

[4] *Zwicky, H.U.; Aerne, E.T.; Herrmann, A.; Thomi, H.A.; Lippens, M.J.*: Nucl. Materials 202, 65–69 (1993).

[5] PSI-Jahresbericht 1993, 58–59, Villigen, 1994

[6] *Armijo, J.S.*: ANS Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Florida, April 16–19, 1994.

[7] *Davies, J.H.; Armijo J.S.*: KTG-Fuel Conference Karlsruhe, Germany. Nov. 29–30, 1993.

[8] *Restani, R.; Aerne, E.T.; Bart, G.; Linder, H.P., Müller, A.; Petrik, F.*: NAGRA NTB 92–13, Wettingen, 1992.

[9] *Bart, G.; Bührer, W.; Restani, R.; Zwicky, H.U.*: PSI Progress Report 1990, Annex IV, 51–56, 1991.

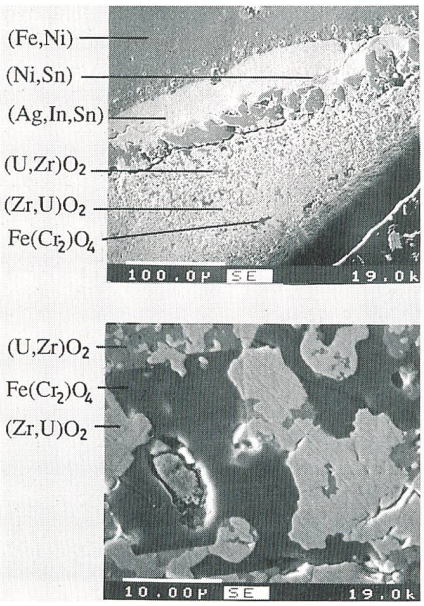


Bild 15 Elektronenmikrosondenanalysen erlauben auf kleinster Fläche (Quadratmikrometer) die aus der Schmelze erstarrten neuen oxidischen und metallischen Phasen zu bestimmen

Informations concernant le cœur des réacteurs de puissance

L'exploitation sûre du cœur d'un réacteur ne peut être garantie que si l'on connaît les modifications des matériaux utilisés sous de dures conditions de fonctionnement. Dans le cadre d'analyses relevant de la science des matériaux, l'Institut Paul Scherrer (IPS), plus précisément le «Labor für Werkstoff-Verhalten» (laboratoire pour l'étude du comportement des matériaux) du domaine de recherche «Energie nucléaire, sécurité» évalue de quelle manière les crayons combustibles, les barres de contrôle, les supports des éléments combustibles et autres éléments installés dans le cœur du réacteur supportent la radioactivité. Ces travaux permettront d'optimiser les matériaux du réacteur, d'évaluer la durée de vie résiduelle de composants, de définir les marges de sécurité et le déroulement de dommages éventuels.

Lors de la production d'énergie dans le cœur du réacteur, des produits de fission radioactifs et des neutrons apparaissent dans le combustible. Ces derniers activent les éléments installés à cet endroit de telle sorte que les éléments combustibles et les matériaux de la structure sont hautement radioactifs après le fonctionnement du réacteur. Des analyses de radioactivité supplémentaires ne peuvent donc être réalisées que dans un laboratoire équipé en conséquence, à savoir le «Hotlabor» IPS. L'article présente tout d'abord l'infrastructure et les objectifs du «Hotlabor», puis, s'appuyant sur des exemples, met en évidence la complexité des questions qui se posent pour des analyses de radioactivité postérieures à l'exploitation.