

Evolution der Brennstäbe

Brennstäbe heute

Brennstäbe für Leichtwasserreaktoren haben einen Durchmesser von nur 11 mm bei einer Länge von fast 5 m. Sie sind deshalb so instabil, daß sie zu sog. Brennelementen fest zusammengebaut werden. Dort werden sie durch Abstandshalter und Befestigungsplatten in ihrer Position gehalten. Zusätzlich enthalten die noch Einbauten für Regelstäbe, Messeinrichtungen usw. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, daß solche Brennelemente mit sehr engen Toleranzen gefertigt werden müssen, da z. B. die sich ergebenden Abstände sehr entscheidend für die Strömungsverhältnisse (Kühlung) und die Abbremsung der Neutronen sind.

Die Brennstäbe bestehen aus Hüllrohren aus Zirkalloy mit Wandstärken von weniger als einem Millimeter und sind mit Tabletten aus Uranoxid gefüllt. Auf die Konsequenzen aus dieser Materialwahl wird später noch eingegangen werden. Die Tabletten sind gesintert („gebrannt“ wie eine Keramik) und anschließend sehr präzise im Durchmesser geschliffen; an den Stirnflächen konkav gearbeitet, um Ausdehnungen im Betrieb zu kompensieren usw. All dieser Aufwand ist nötig, um die Temperaturverteilung im Griff zu behalten.

Das Temperaturproblem

Brennstäbe dürfen nicht schmelzen, denn dann ändert sich ihre mechanische Festigkeit und ihre Abmessungen (Kühlung und Neutronenspektrum). Keramiken sind zwar chemisch sehr beständig, besitzen aber gegenüber Metallen nur eine sehr schlechte Wärmeleitung. Jeder kennt den Unterschied, der schon mal heißen Kaffee aus einem Metallbecher getrunken hat. Außerdem sind Keramiken sehr spröde.

Die gesamte Wärme kann nur über den Umfang an das Kühlwasser abgegeben werden. Sie entsteht aber ziemlich gleich verteilt innerhalb des Brennstabes, da er für Neutronen ziemlich durchsichtig ist. Dies hat zur Folge, daß es einen sehr starken Temperaturunterschied zwischen Zentrum und Oberfläche gibt. Zusätzlich verschlechtert sich auch noch die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur. All das führt dazu, daß der Brennstab in seinem Innern bereits aufschmelzen kann, obwohl er an seiner Oberfläche noch relativ kalt ist. Die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Kühlwasser ist aber in dieser Phase die bestimmende Größe für die Wärmeabfuhr.

Steigt die Oberflächentemperatur über die Verdampfungstemperatur des Kühlwassers, fängt das Wasser (an der Oberfläche) an zu verdampfen. Die Dampfblasen kondensieren nach deren Ablösung im umgebenden „kalten“ Wasser. Durch dieses sogenannte „unterkühlte Blasensieden“ kann man sehr große Wärmemengen abführen. Tückisch ist nur, wenn die Wärmeproduktion durch Kernspaltung einen Grenzwert übersteigt, bildet sich eine geschlossene Dampfschicht auf der Oberfläche, die auch noch stark isolierend wirkt. Als

Folge steigt die Temperatur in der dünnen Brennstabhülle explosionsartig an. Dampf in Verbindung mit hoher Temperatur führt aber zur Oxidation des Zirkalloy. Die Hülle verliert schnell ihre Festigkeit.

Harrisburg und auch Fukushima

Bricht die Kühlung zusammen, überhitzen die Brennstäbe. Wie Fukushima gezeigt hat, kann das auch noch (kurz) nach dem Abschalten des Reaktors geschehen, da dann die Nachzerfallswärme noch sehr groß ist. Durch die hohen Temperaturen in den Brennstabhüllen in Verbindung mit Wasserdampf oxidieren die Hüllen und setzen dabei große Mengen Wasserstoff frei. Dieser Wasserstoff hat zu den fürchterlichen Explosionen in den Reaktorgebäuden geführt. In Harrisburg waren die Wasserstoffmengen zwar beherrschbar, aber auch damals schon zerfielen Teile des Reaktorkerns. Die Wiederbenetzung konnte zwar schlimmeres verhindern – aber man schrecke mal eine glühende Tasse mit Wasser ab.

Für alle Leichtwasserreaktoren bedeutet das, die zulässigen Temperaturen müssen bei allen Betriebsbedingungen in allen Teilen des Reaktorkerns sicher eingehalten werden. Mit anderen Worten, die Kühlung darf nie versagen. In diesem Sinne ist der Sicherheitsgewinn einer passiven (auf die natürlichen Kräfte, wie z. B. Schwerkraft beruhende) Kühlung zu verstehen.

Oberflächenschutz der Brennstäbe

Insbesondere nach den Ereignissen in Fukushima hat man unterschiedlichste Maßnahmen ergriffen, um die Sicherheit bestehender Kraftwerke weiter zu erhöhen. Außerhalb Deutschlands nach den üblichen Vorgehensweisen wie sie bei Flugzeugabstürzen, Schiffsunglücken etc. üblich sind: Akribische Untersuchung der Schadensabläufe mit dem Zweck Schwachstellen zu ermitteln und Lösungen dafür zu finden. Ein Weg war die Verbesserung der Brennstabhüllen. Zu diesem Zweck hat man z. B. in den USA das Entwicklungsprogramm „Enhanced Accident-tolerant Fuel programme“ gestartet.

Aus einer internationalen Zusammenarbeit haben sich zwei neue Konzepte – IronClad und ARMOR – entwickelt, deren Prototypen im Kernkraftwerk Hatch in Georgia, USA seit März 2018 im Normalbetrieb getestet werden. Der Test unter realen Bedingungen in einem laufenden Kernkraftwerk ist ein üblicher Entwicklungsschritt. Nur so kann man Fehlentwicklungen vermeiden.

IronClad sind Hüllrohre, die aus einer Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung bestehen. Man glaubt damit einen wesentlich robusteren Werkstoff gefunden zu haben, der nicht so temperaturempfindlich ist, nicht so leicht oxidiert und kein Wasserstoffgas produziert.

ARMOR ist ein eher evolutionärer Ansatz. Man panzert konventionelle Hüllrohre mit einer Schutzschicht auf der Basis von Chrom. Es sind Produkte dreier Hersteller in der Erprobung: Global Nuclear Fuel-Japan Co (GE-Hitachi), Framatom mit zusätzlich mit Chrom geimpften Brennstofftabletten und EnCore Fuel (Westinghouse) mit Tabletten auf der Basis von Uran-Siliciden.

Ein ganz neues Konzept

Das Unternehmen Lightbridge hat das Bauelement Brennstab noch einmal ganz neu gedacht und bereits prototypenreif entwickelt. Inzwischen ist man eine Kooperation für die Weiterentwicklung und Serienproduktion mit Framatom eingegangen. Entscheidend war die Anforderung des Ersatzes von Brennstäben in konventionellen Leichtwasserreaktoren im Betrieb. Deshalb ist nicht nur ein Ersatz, sondern auch ein gemischter Betrieb mit konventionellen Brennelementen angestrebt worden.

Der Übergang von keramischem Uranoxid auf eine metallische Legierung aus Uran und Zirkon ist für Leichtwasserreaktoren revolutionär. Bisher wurde so etwas nur in schnellen Reaktoren mit Natrium – und nicht Wasser – als Kühlmittel gemacht. Ebenso neu ist die Form: Sie sind nicht mehr zylindrisch, sondern kreuzförmig. Diese Kreuze sind spiralförmig verdreht, sodaß sich vier gewindeähnliche Kanäle für das Kühlwasser bilden. Außen sind sie mit einer dünnen und fest verbundenen Schicht aus Zirkon versehen um eine übliche Wasserchemie zu gewährleisten. Diese „Gewindestäbe“ liegen in dem Brennelement dicht beieinander, sodaß keine Abstandshalter mehr erforderlich sind.

Metall verfügt über eine bessere Wärmeleitung als Keramik und die Kreuzform ergibt eine größere Oberfläche und dünnere Querschnitte. Beides führt zu geringeren Betriebs- und Spitzentemperaturen (starke und schnelle Lastschwankungen). Der Strömungswiderstand solcher Brennelemente ist kleiner, wodurch sich der Durchfluß durch den Kern bei gleicher Pumpenleistung erhöht. Man geht deshalb von einer möglichen Leistungssteigerung von 10% aus. Ein nicht zu unterschätzender wirtschaftlicher Anreiz, wenn man in einer bestehenden Flotte für „kleines Geld“ ganze Kraftwerke zusätzlich erhält.

Die neuen Lightbridge-Brennelemente vertragen alle Leistungstransienten besser, sind aber vom Prinzip her gegen längerfristige Kühlmittelverluste anfälliger, da Metalle einen geringeren Schmelzpunkt als Keramiken besitzen. Dies war der Hauptgrund für die ursprüngliche Wahl von Uranoxid als Werkstoff.

Bei einer Simulation eines Abrisses einer Hauptkühlmittelleitung bei einem VVER-1000 Druckwasserreaktor ergab sich eine maximale Kerntemperatur von 500 °C. Dieser Wert liegt weit unterhalb von der Temperatur, bei der überhaupt Wasserstoff (900 °C) gebildet wird. Durch die hohe Wärmeleitung stellt sich bereits wieder nach 60 Sekunden nach erfolgter Wiederbenetzung erneut die normale Betriebstemperatur ein. Bei konventionellen Brennelementen steigt die Temperatur auf über 1000 °C und erreicht erst nach acht Minuten wieder den stabilen Zustand. Dies hat einen erheblichen Druckanstieg im Reaktor zur Folge, der ein ansprechen der Sicherheitsventile erforderlich macht. Bei diesem Abblasen gelangen auch geringe Mengen von radioaktivem Jod und Cäsium (zumindest) in das Containment. Der Abriß einer Hauptkühlmittelleitung ist der Auslegungsstörfall, der sicher beherrscht werden muß. In diesem Sinne führen die Lightbridge-Brennelemente zu einem Sicherheitsgewinn.

Es sind aber noch etliche praktische Erfahrungen zu sammeln. Ein Reaktor ist

ein komplexes physikalisches und chemisches System. Dies betrifft z. B. das Rückhaltevermögen für Spaltprodukte unter allen möglichen Betriebs- und Störfallbedingungen. In der Kerntechnik dauert wegen der besonderen Sicherheitsansprüche halt alles länger. Die Maßeinheit für die Einführung von Neuerungen ist eher Jahrzehnte als Jahre.

Ein weiterer vielversprechender Entwicklungsaspekt ist der Zusatz von Thorium als „abbrennbarer Brutstoff“ zur Ausdehnung der erforderlichen Ladezyklen auf vier Jahre. Um solch lange Ladezyklen zu erreichen, muß man den Brennstoff höher anreichern. Um diese Überschußreaktivität zu kompensieren muß man abbrennbare Neutronengifte zumischen. Würde man Thorium verwenden, kann man diese Überschußneutronen zum Erbrüten von Uran-233 verwenden. Längere Ladezyklen würden die Wirtschaftlichkeit bestehender Reaktoren weiter erhöhen.

Durch die Verwendung von metallischem Brennstoff ergeben sich auch völlig neue Perspektiven der Wiederaufbereitung. Durch den Übergang auf elektrochemische Verfahren – wie man sie bereits beim EBRII – erfolgreich ausprobiert hat, kann man zu kleinen Wiederaufbereitungsanlagen in der Nähe der Kernkraftwerke übergehen. Ein weiterer Lösungsweg für die angebliche Atommüllproblematik. Gerade im Zusammenhang mit der Wiederaufbereitung und Proliferation ist auch der Zusatz von Thorium besonders interessant.

Schlussbemerkung

Man sieht, daß die Leichtwasserreaktoren noch lange nicht am Ende ihrer Entwicklung angekommen sind. Insbesondere der Einsatz von metallischen Brennstäben ergibt nicht nur einen evolutionären Weg für bestehende Reaktoren, sondern auch für Neukonstruktionen. Im Zusammenhang mit passiver Kühlung kann ein erheblicher Sicherheitsgewinn erzielt werden. Irgendwann wird die Frage der Anpassung der Genehmigungsbedingungen gestellt werden müssen. Dann aber, beginnt das Kernenergiezeitalter erst richtig. Billige Energie im Überfluß. Egal, was in Deutschland darüber gemeint wird.

Der Beitrag erschien zuerst bei NUKEKLAUS [hier](#)