

## ERFAHRUNGEN UND GRENZEN DER ZERSTÖRUNGSFREIEN PRÜFUNG VON BRENNSTÄBEN

W. GLÖCKNER,

*AEG-TELEFUNKEN, Kernenergieversuchsanlage, Großwelzheim, Germany*

### ABSTRACT

Nondestructure testing plays an important roll in quality control during fuel element fabrication.

In this paper the various kinds of microdefects in the tubings and end-plug weldings of fuel rods are identified. Testing procedures most applicable for these specific defects and their limitations are described.

### Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Brennstäben und Brennelementen nehmen die zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle einen breiten Raum ein.

Zunächst wird auf die Erscheinungsformen von Fehlern eingegangen, die in Abhängigkeit von den Anforderungen an die Brennstoffstäbe untersucht und nachgewiesen werden. Anschließend werden die in Betracht kommenden Prüfverfahren und-methoden behandelt, die für die speziellen Fehler am geeignetsten erscheinen. Abschließend wird dargelegt, bei welchen Grenzen die Fehlererkennbarkeiten liegen in Verbindung mit den jeweiligen Anforderungen.

### 1. Einleitung

Die Sicherheit und eine möglichst hohe Betriebsbereitschaft von Kernreaktoren sind wesentliche, qualitätsbestimmende Aspekte bei der Herstellung von Komponenten für Kernreaktoren. Dieses gilt unter anderem insbesondere für die Brennstoffstäbe, da sie den höchsten Belastungen ausgesetzt sind. Die Auswahl geeigneter Prüf- und

Meßverfahren zur Qualitätskontrolle und -sicherung an den Halbzeugen für den Brennstoffstab und für das endgültige Fertigprodukt kommt daher große Bedeutung zu.

Neben der Kontrolle durch zerstörende Werkstoffprüfungen (Metallographie, Zug- und Berstversuchen) werden im großen Umfang zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle herangezogen. Im wesentlichen handelt es sich hierbei um Ultraschall-, Wirbelstrom- und Röntgenverfahren bzw. um pneumatische, mechanische oder elektrische Meßverfahren, die Aussagen auf die speziellen Fehler zulassen.

Die aufgrund der eigenen, langjährigen Praxis in der Herstellung von Brennstoffstäben in der Kernenergie-Versuchsanlage Großwelzheim von AEG-TELEFUNKEN gemachten Erfahrungen in der Prüfung von Brennelementen sollen hier den Anforderungen gegenübergestellt werden.

## 2. Fehler in Brennstoffstäben

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, daß bei Brennstoffstab-Hüllen aus Zircaloy-Legierungen hauptsächlich Oberflächenfehler auftreten, meist in Form von Kratzern und Riefen in Richtung der Rohrachse. In seltenen Fällen weisen diese Hüllrohre Fehler in der Art von Pin-holes auf. Längs- oder Querrisse konnten bei Zircaloyrohren bisher nicht gefunden werden. Hier ist hinzuzufügen, daß die Hüllrohre schon beim Hersteller geprüft und größere Fehler dieser Art schon dort ausgeschieden werden.

Bei Hüllrohren aus Chrom-Nickel-Stählen verlagert sich die Fehlerhäufigkeit mehr auf die Pin-holes. Dies sind in der Regel bis zu  $100\mu$  tiefe Mulden oder Löcher an der Hüllrohroberfläche, die teils durch eingedrücktes Fremdmaterial oder durch den Ausbruch von Körnern hervorgerufen wurden. Auch treten hier vereinzelt Risse in axialer Richtung oder Materialüberlappungen als sogenannte "Schalen" auf. Die Ursachen für diese Fehler dürften in dem abschließenden Kaltziehvorgang bei Stahlhüllrohren zu suchen sein. Eine weitere Erscheinung bei Stahlhüllrohren sind gelegentlich auftretende Einlagerungen in der Rohrwandung von Fremdmaterialien.

Die überwiegenden Gründe für nicht spezifikationsgerechte Hüllrohre der Stahl- und Zr-Varianten liegen in den Wandstärkenabweichungen. Die Schwankungen der Wandstärke kommen in zwei verschiedenen Formen vor. Zum einen sind es veränderliche, integrale Absolutwerte der Wandstärke, d.h. der Flächenquerschnitt innerhalb einer Rohrlänge ist veränderlich. Zum anderen treten an einem beliebigen Rohrquerschnitt Minima- und Maximawerte auf. Dies bedeutet eine Exzentrizität des Rohrinnehdurchmessers zum Rohraußendurchmesser. In der Regel zeigen sich diese Erscheinungen in einer einander überlagernden Form. Die Exzentrizität der Wandstärke verläuft außerdem nicht kontinuierlich vom Minima- zum Maximawert sondern es treten dabei Wandstärkensprünge auf die bis zu  $10\mu$  betragen. In kleinerem Umfang sind bei Brennstoffstab-Hüllrohren-Fehler in Form nicht ausreichender Oberflächenqualität zu verzeichnen.

Die möglichen Fehler an den Verschlüssen der Brennstoffrohre, den Endstopfen beschränken sich im wesentlichen auf Kernfehler und Fadenlunker des Vollmaterials, sowie auch bei bestimmten Fertigungsmethoden der Halbzeuge auf Oberflächenschuppen und Anrisse.

Einen großen Raum in der zerstörungsfreien Prüfung an Brennelementstäben und Reaktorteilen nehmen die Untersuchungen an Schweiß- und Lötverbindungen ein. Trotz Lichtbogenschweißung und Induktiv-Lötverfahren unter Schutzgasatmosphäre kommt es selbst bei extremen Reinheitsanforderungen an die zu verbindenden Komponenten gelegentlich zu Gasblasenbildungen. Auf diese Fehlerform konzentrieren sich deshalb auch die Untersuchungen, da Schweißnahtrisse bei den verwendeten Schweißverfahren nahezu unbekannt sind. Um eine gezielte Untersuchung auf mögliche Fehler und deren Ursachen durchzuführen ist es unerlässlich, die Herstellungsmethoden von Halbzeugen und die Schweiß- und Lötverfahren zu kennen. Nur so lassen sich Prüfmethode auf typische Fehlererscheinungen konzentrieren und abzustimmen.

Abgesehen von Fehlern der hier aufgezeichneten Art sind Prüfungen der Hüllrohr-Geometrie in größerem Umfange nicht zu umgehen. Es gibt auch hier, besonders im Zusammenhang mit anderen Fehlerquellen Gründe, die zur Aussonderung eines Hüllrohres führen.

### 3. Anforderungen

Im Rahmen der Qualitätskontrolle soll nun die Frage geklärt werden, in welchem Umfang das Auftreten der eben genannten Fehler nachgewiesen werden soll. Zu diesem Zweck werden je nach den Qualitätsanforderungen an die verschiedenen Brennstoffstabtypen und Reaktorkomponenten verschiedene Spezifikationen erstellt. Diese reichen von extremsten Anforderungen an Versuchselementen und Prototypen bis zu konventionellen Bauteilen. Beim Nachweis von Oberflächenfehlern und Rissen in Hüllrohren kommen Ersatzfehlergrößen in Form von V-Kerben mit  $60^\circ$  in Anwendung. Diese Ersatzfehlergrößen oder Testfehler haben bei scharfen Spezifikationen eine Länge von 3 mm und eine Tiefe von 5-10 % der Wandstärke. Bei den Wandstärken werden zum Teil nur Abweichungen von  $\pm 20\mu$  toleriert. Die Testfehler für Vollmaterialien sind etwa gleich denen der Hüllrohre. Hinzu kommen Sacklochbohrungen von 0,4-2,0 mm  $\phi$ . Die Sacklochbohrungen werden in axialer und radialer Richtung eingebracht und sollen den Nachweis von Kernfehlern ermöglichen.

Wie schon erwähnt sind Gasblasen in Schweißnähten und Lötverbindungen die hauptsächlichste Erscheinungsform von Fehlern. Die Testfehler sind deshalb auch auf diese Fehler ausgerichtet. Nachdem die Endstopfenschweißungen in Ausgleichsstücken geröntgt werden, bietet sich die Anbringung von Testfehlern in diesen Ausgleichsstücken an. Dazu werden Flachbodensacklöcher, abgestuft von 0,2 mm  $\phi$  bis 0,8 mm  $\phi$ , in die Ausgleichsstücke eingebracht.

Die Anforderungen an die Detailkennbarkeit sind außerordentlich hoch. So muß stets der Nachweis der Erkennbarkeit der 0,2 mm Sacklochbohrung erbracht werden. Dies bedeutet, daß bei einem Ausgleichsstück von 20 mm Dicke die Fehlererkennbarkeit bei 1% liegen muß. Die Fehlererkennbarkeit von 1% der durchstrahlten Wandstärke wird allgemein als Grenze des Auflösungsvermögens bei Stahl angesehen, trotzdem muß auch bei Zircaloy-Legierungen mit einem wesentlich höheren Schwächungskoeffizienten dieses Ziel erreicht werden.

Die ganze Problematik der Schaffung von Ersatzfehlergrößen und deren Einbau in Spezifikationen geht daraus hervor, daß es bis heute keine allgemein gültige und anerkannte Regelung für die Art und Aussagekraft von Ersatzfehlern gibt, besonders im Hinblick auf die Ultraschall-, Wirbelstrom- und Röntgenprüfverfahren in der Reaktortechnik.

#### 4. Prüfverfahren

Nachdem eingangs Art und Auftreten von möglichen Fehlern dargelegt wurde, soll nun auf die dafür in Frage kommenden Prüfverfahren eingegangen werden. Zur Zeit bietet bei der Prüfung von Hüllrohren das Ultraschallverfahren noch die größte Aussagekraft durch die speziellen schon erwähnten Erscheinungsformen von Fehlern. Dabei werden die Testfehler sowohl an der Innen- und Außenseite des Rohres in axialer und radialer Richtung angebracht. Die Testfehler können unter Berücksichtigung der Fehlertendenz mit bis zu fünf Prüfköpfen gleichzeitig angeschallt werden. Dabei sollen Schallverläufe im Hüllrohr erzeugt werden, die nicht nur in gegensätzlicher Richtung, sondern auch in verschiedenen tangentialen Ebenen und in axialen Einschallwinkeln wirken. Die Ultraschallgeräte sollten über Monitorblenden mit einem Schnellschreiber verbunden sein. Selbst bei beschränkter Anzahl von Schreibspuren lassen sich durch Kombination der verschiedenen Prüfköpfe mit den verfügbaren Monitorblenden und Schreibspuren alle Anzeigen der Prüfköpfe registrieren. Eine Auswertung der Schreibspuren und Vergleich der einzelnen Anzeigen untereinander erlaubt eine brauchbare Aussage über Art, Umfang und Lage von Fehlern.

Lediglich beim Nachweis von Pin-holes ist die Ultraschallprüfung weniger angebracht. Durch die allzu differenzierte Form dieser Fehler, von flachen glatten Mulden bis zu körnigen Löchern ist hier dem Wirbelstrom-Prüfverfahren mit Streuflußsonden der Vorzug zu geben. Es ist darüber hinaus bei Neigung zu Pin-holes eine visuelle Prüfung mit Lupen oder dergl. angebracht. Auftretende Fehlerstellen werden am besten mit Lichtschnitt- oder Interferenz-Mikroskopen ausgemessen. Bei den meist glatten, glänzenden Hüllrohren lassen sich Pin-holes relativ leicht feststellen. Bei den Wandstärkenmessungen wird ebenfalls die Ultraschallprüfung erfolgreich eingesetzt. Im Gegensatz zur Impuls-Reflexions-Methode kommt hier das Ultraschall-Resonanzverfahren in Anwendung. Neben der hohen Prüfgeschwindigkeit und dem guten Auflösungsvermögen bietet sich der Vorteil, daß die Wandstärkenmessung zusammen mit der U-S-Fehlerprüfung in einer Wasserwanne als Kopplungsmedium durchgeführt wird.

Bei der Prüfung von Stangenmaterial für Endstopfen oder dergleichen bringt das US-Verfahren ebenfalls recht brauchbare Ergebnisse. Sämtliche Prüfungen mit US-Verfahren werden in der Art und Weise durchgeführt, daß die Prüflinge schraubenlinienförmig an den Prüfköpfen vorbeibewegt werden.

Für das Vermessen der Rohrgeometrie wird eine, in der Kernenergie-Versuchsanlage der AEG entwickelte Meßmaschine, das Profilometer eingesetzt. Es gestattet die Vermessung von Rohren von 5-40 mm Außendurchmesser und 5 m Länge. Bei dem Meßvorgang wird ein Meßschlitten mit einem in zwei Koordinaten frei beweglichen Meßrachen über das zu vermessende Rohr bewegt. Ein einziger Meßvorgang bringt die Werte für den Außendurchmesser und die Durchbiegung in je zwei Meßebenen und den Innendurchmesser in einer Meßebene. Die Prüfung kann entlang von Mantellinien oder schraubenlinienförmig verlaufen.

Darüber hinaus kann mittels eines aufgesetzten Mikroskopes die visuelle Inspektion während des Meßvorganges durchgeführt werden. Die Längenmessung des Rohres erfolgt ebenfalls parallel zu der vorgenannten Meßoperation. Die Außendurchmesser und Durchbiegungsmessung erfolgt mit induktiven Wegaufnehmern. Der Innendurchmesser wird pneumatisch und die Länge mit hochgenauen Abrollmeßwerken vermessen. Die Meßgenauigkeiten betragen bei den Durchmessern  $1/\mu$ , bei der Durchbiegung  $50/\mu/m$  und bei der Längenmessung  $20/\mu$  bei einer Meßlänge von 4 Metern. In besonderen Fällen werden bei Hüllrohren auch Oberflächenmessungen stichprobenweise mit elektronischen Tastschnittgeräten durchgeführt.

Die Prüfungen der Schweißnähte an Hüllrohren erfolgt abgesehen von Farbeindringverfahren mit fluoreszierenden Stoffen in überwiegendem Maße mit Röntgendurchstrahlungsgeräten. Wie schon angeschnitten, muß bei den hohen Forderungen an die Detailerkennbarkeit ein nicht unerheblicher Aufwand getrieben werden. Nur bei Optimierung aller in Frage kommenden Faktoren bei der Herstellung von Röntgenbildern können diese Forderungen erfüllt werden. Dies bedeutet bei der Vielfalt der Schweißnahtformen und Lötverbindungen Röntgengeräte mit unterschiedlicher Leistung und vor allem verschiedenen Brennflecken. In unserem Falle wird mit drei Geräten gearbeitet mit Brennflecken von 0,5; 2,6 und 3,6 mm. Mit großer Sorgfalt muß bei der Aufnahmetechnik vorgegangen werden. Hierzu gehören vor allen Dingen die richtige Auswahl von Filtern, Folien und Abschirmungsmitteln und die Anordnung von Film und Objekt in Bezug auf innigen Kontakt und die Vermeidung von Streu- und Kriechstrahlungen. Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Behandlung belichteter Filme in der Dunkelkammer. Auch hier kann bei mangelnder Sorgfalt ein Auftreten von negativen Faktoren ins Gewicht fallen.

## 5. Fehlererkennbarkeit

Die Frage der Grenzen der Fehlererkennbarkeit kann bei allen Prüfverfahren nicht mit einfachen Zahlenangaben beantwortet werden. So lassen sich z.B. in der

Ultraschallprüfung Fehler oder sogenannte Ungänzen in homogenen Materialien bei entsprechenden Prüfköpfen und Prüffrequenzen bis unter  $10\mu$  nachweisen, wenn sie in ihrem Reflexionsverhalten günstig in den Schallebenen liegen. Ausschlaggebend ist jedoch der Aspekt, welche Fehler nachgewiesen werden sollen. So lassen sich Reflexionen, die aus Oberflächenrauheiten oder gar Korngrenzen kommen und für den Einsatz von Hüllrohren kaum Bedeutung haben, nicht mehr von Mikrorissen gleicher Größenordnung unterscheiden. Man begnügt sich deshalb mit dem Nachweis von Fehlern die größer als  $25\mu$  sind. Im übrigen ist es immer problematisch, Aussagen über Größenordnungen von Fehlern zu machen, da man sich mit Ersatzfehlergrößen behelfen muß.

Bei den Messungen der Hüllrohrgeometrie kann gesagt werden, daß die Genauigkeit der Einkaliber gleichzeitig die Grenze der Meßgenauigkeit ist. Dies gilt auch für die Wandstärkenmessung nach dem Resonanzverfahren. Hierfür ist allerdings die Verwendung von geeigneten klimatisierten Räumen notwendig.

In der Durchstrahlungsprüfung ist das Auflösungsvermögen nach Optimierung der Aufnahmeparameter und Aufnahmetechnik immer abhängig von den durchstrahlten Medien und deren Dicke. In Extremfällen, bei dünnwandigen Lötverbindungen lassen sich z.B. bei kontrastierenden Löten nach Details von  $10-20\mu$  erkennen, wobei bei sehr dichten Stoffen und großen Durchstrahlungsdicken kaum Werte unter 5% Fehlererkennbarkeit erreichbar sind.

Die Dichtigkeit der Brennstoffstäbe nach dem Verschließen des Stabes ist ein spezielles Problem. Die mit der He-Sonde zu messende Leckrate von  $10^{-8}$  Torr l/sec kann in fast allen Fällen eingehalten werden. Trotzdem können mit allen hier behandelten Prüfverfahren kleinere Schweißnahtfehler nicht nachgewiesen werden. Erste Versuche laufen z.Zt. an, um hierfür die Brauchbarkeit des US-Verfahrens zu prüfen. Bis dahin muß die Sicherheit der Fehlerfreiheit der Schweißnähte durch extensive metallographische, d.h. zerstörende Untersuchungen in der Vorfertigung und während der Fertigung gewährleistet werden. Die weitgehende Automatisierung des Fertigungsprozesses (z.B. Verwendung von vorgegebenen Schweißprogrammen) unterstützt die geforderte Sicherheit.

Zusammenfassend sei gesagt, daß bei einer Vielzahl von Prüfaufgaben nicht ein bestimmtes Prüfverfahren geeignet ist, sondern erst eine Kombination der Verfahren zu brauchbaren Ergebnissen und einer fast 100 %igen Qualitätssicherung führt.

DISCUSSION

J. H. KOLL, Argentina

Q

Sie sagen: Die mit der Sonde zu messende Leckrate von  $<10^{-8}$  Torr/l/sek kann in fast allen Fällen eingehalten werden. Frage: Gibt es Fälle, in denen diese Leckrate nicht eingehalten werden kann ?

W. GLÖCKNER, Germany

A

Die Leckrate von  $<10^{-8}$  Torr/l/sek muss bei allen Brennstoffstäben eingehalten werden. Grössere Leckraten werden als Ausschuss zurückgewiesen. Dies gilt in der Regel für Versuchselemente und Prototypen.