

SR 2583
Bewertung des Potentials für unentdeckten Schadensfortschritt an druckführenden Komponenten

Abschlussbericht

SR 2583

Bewertung des Potentials für
unentdeckten Schadens-
fortschritt an druckführenden
Komponenten

Abschlussbericht

H. Reck
U. Jendrich
F. Michel
J. Rodriguez

April 2009

Auftrags-Nr.: 839990

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben SR 2583 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Kurzfassung

Übergeordnete Zielsetzung des Vorhabens war es, den Kenntnisstand zur Auffindbarkeit und Charakterisierung von Fehlern bei wiederkehrenden Prüfungen an druckführenden Komponenten aufzuarbeiten. Hierzu wurden der für das Vorhaben relevante Stand von Wissenschaft und Technik zusammengestellt und die relevante Betriebs- erfahrung anlagenübergreifend ausgewertet. Darauf aufbauend wurden ausgewählte Einzelereignisse hinsichtlich ihrer relevanten Merkmale und sicherheitstechnischen Bedeutung vertieft analysiert.

Die Erkenntnisse zu möglichen Problemen bei der Fehlererkennung werden zusammenfassend dargestellt. Die für deutsche Anlagen als bedeutsam erkannten Schwerpunkte „Fehler in Mischschweißnähten von druckführenden Komponenten“ und „schnell wachsende Fehler an Dampferzeuger-Heizrohren“ werden im Hinblick auf die relevanten Randbedingungen sowie die Sicherstellung der Integrität der betroffenen Komponenten bzw. Bauteile ausführlich diskutiert. Abschließend werden für diese beiden Schwerpunkte Schlussfolgerungen zur Weiterentwicklung der Konzepte für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen bzw. zur Sicherstellung der Komponenten- integrität abgeleitet.

Wie die vorgenommenen Auswertungen zeigen, können Probleme bei der Fehler- erkennung insbesondere im Zusammenhang mit Mängeln bei Geometrie oder Ober- flächenzustand der Bauteile bzw. Komponenten, unzureichender Dokumentation, Fehler des Prüfers, Fehler bei der Auswertung sowie Mängeln bei eingesetzten Prüf- verfahren bzw. -techniken stehen. Für korrosionsgefährdete sicherheitsrelevante Mischschweißnähte in deutschen Kernkraftwerken ist ein in sich geschlossenes an- lagenspezifisches Prüfkonzept für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen er- forderlich. Ansatzpunkte für die Optimierung von Prüfverfahren, -umfang und -zyklus werden benannt. Für Dampferzeuger-Heizrohre ist ein Gesamtkonzept zur Sicher- stellung ihrer Integrität erforderlich. Ansatzpunkte hierfür werden neben einer Er- weiterung der Kenntnisse zum Schädigungsmechanismus im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden, Ermittlung korrosionsgefährdeter Bereiche, Analyse der aufgetretenen Fehler, Optimierung des Prüfkonzpts sowie der ein- gesetzten Prüfverfahren und Prüftechniken gesehen, die weitgehend anlagenspezi- fisch, entsprechend den jeweiligen Gegebenheiten, umzusetzen sind.

Abstract

The general aim of the project was to review the knowledge on the detectability and characterisation of flaws during in-service inspections on pressure-retaining components. For this purpose, the state of the art in science and technology relevant for the project was determined and the relevant operating experience was evaluated in a generic manner. On this basis, selected single events were analysed in depth regarding their relevant characteristics and their safety significance.

The findings on potential problems in the detection of flaws are presented in summary form. The issues “flaws in dissimilar-metal welds of pressure-retaining components” and “rapidly growing flaws on steam generator tubes“ found to be significant for German plants are discussed in detail with regard to relevant boundary conditions and the assurance of integrity of the components and component parts concerned. Finally, conclusions are derived for these two key issues for further development of the concepts for non-destructive tests during in-service inspections and assurance of component integrity.

As the evaluations show, problems in the detection of flaws may be related, in particular, to deficiencies regarding geometry or surface quality of the component parts and components, insufficient documentation, examiner errors of testing personnel, errors in the evaluation and deficiencies regarding the test procedures and techniques. For safety-relevant dissimilar-metal welds in German nuclear power plants being susceptible to corrosion, an integrated plant-specific test concept for non-destructive tests during in-service inspections is required. Starting points for the optimisation of test procedures, scope and cycles are presented. For steam generator tubes, an overall concept for ensuring their integrity is required. Starting points for it are seen – in addition to broadening the knowledge on the damage mechanism – in connection with measures for the prevention of damages, identification of areas susceptible to corrosion, analysis of flaws and errors, optimisation of the test concept and the test procedures and techniques applied. These measures are to be implemented plant-specifically as far as possible according to the specific situation.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik.....	3
2.1	Übersicht	3
2.2	Vorgaben der KTA-Regeln und Handhabung.....	6
2.2.1	Anforderungen an die konstruktive Gestaltung	6
2.2.2	Anforderungen an die Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen	6
2.2.3	Prüfhandbücher	7
2.3	Qualifizierung der wiederkehrenden Prüfungen	8
2.4	Durchführung und Beurteilung der Ergebnisse von wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen.....	10
2.5	Einflussfaktoren auf das Ergebnis zerstörungsfreier Prüfungen	13
2.6	Entwicklungen von zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Verbesserung ihrer Aussagefähigkeit	14
2.6.1	Generelle Entwicklung	14
2.6.2	Ultraschallverfahren mit Gruppenstrahlerprüftechnik	16
2.6.3	Auswertung der Ultraschallprüfung mit synthetischer Apertur (SAFT).....	19
2.6.4	Prüfungen von austenitischen Schweißnähten und Mischnähten.....	20
2.6.5	Prüfung von Dampferzeuger-Heizrohren	23
3	Anlagenübergreifende Auswertung der für das Vorhaben relevanten Betriebserfahrung	27
3.1	Vorgehensweise	27
3.1.1	Datenbasis.....	27
3.1.2	Auswertung.....	28
3.2	Identifizierte Fälle.....	29
3.2.1	Druckführende Komponenten	29
3.2.2	Dampferzeuger.....	62

4	Vertiefte Analyse der identifizierten Ereignisse	81
4.1	Fehlererkennung.....	81
4.2	Fehlercharakteristik	86
4.3	Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung.....	91
4.3.1	Druckführende Komponenten	91
4.3.2	Dampferzeuger-Heizrohre	92
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	95
5.1	Fehlererkennung.....	95
5.2	Fehler in Mischschweißnähten von druckführenden Komponenten	98
5.3	Schnell wachsende Fehler an Dampferzeuger-Heizrohren	102
5.4	Abschließende Bemerkungen	105
6	Literaturverzeichnis.....	107
7	Bilder	115
8	Tabellen.....	119
	Anlage A	
	Bericht zum Workshop „Auffindbarkeit von Fehlern an druckführenden Komponenten bei wiederkehrenden Prüfungen“ am 24. und 25. Januar 2008 bei der GRS in Köln.....	121
	Anlage B	
	Bericht über die “6th International Conference on NED in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components”	127
	Anlage C	
	Bericht zum Seminar mit dem IZfP Saarbrücken zu „Methoden für zerstörungsfreie Wiederkehrende Prüfungen an druckführenden Komponenten“ am 10.12.2008 bei der GRS in Köln.....	131
	Verteiler	133

1 Einleitung und Zielsetzung

Infolge betriebsbedingter Schädigungsmechanismen können an druckführenden Komponenten Fehler entstehen. Zur Überprüfung des Zustandes der druckführenden Komponenten werden stichprobenartig wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Dabei ist nicht vollständig auszuschließen, dass betriebsbedingte Fehler im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen nicht entdeckt werden. Grundsätzlich können hierfür verschiedene Aspekte maßgeblich sein.

Die bisher in Kernkraftwerken aufgetretenen Schäden an druckführenden Komponenten sind hinsichtlich der Schadensursachen und -mechanismen gut bekannt. Zur Beherrschung systematischer Schäden wurden Maßnahmen implementiert, mit denen ein weiterer Schadensfortschritt durch den jeweiligen Schädigungsmechanismus ausgeschlossen oder zumindest verringert werden konnte. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich mit zunehmender Betriebszeit oder an Stellen mit Vorschädigungen Bedingungen einstellen können, die das unvorhergesehene Auftreten betriebsbedingter Schädigungsmechanismen mit einem unerwartet hohen Fehlerwachstum zur Folge haben können. Dies kann dazu führen, dass eine Verfolgung bzw. Auffindbarkeit eines unzulässigen oder gar kritischen Fehlers durch das vorgegebene Prüfintervall nicht mehr sicher gegeben ist.

Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen müssen bei der Durchführung von zerstörungsfreien Prüfungen an druckführenden Komponenten an den Prüfeinrichtungen je nach Prüfverfahren bzw. Prüftechnik unterschiedliche fehlerspezifische Einstellungen vorgenommen werden. Diese Einstellungen haben einen Einfluss auf die Empfindlichkeit für bestimmte Fehlertypen und damit auf die Beschreibung und Auffindbarkeit von Fehlern. Es kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass ein Schadensfortschritt, zum Beispiel aufgrund unerwarteter Fehlergeometrie oder aufgrund von Bauteileinflüssen, mit den spezifizierten Einstellungen nicht gefunden wird. Ebenso können bei der Auswertung von Prüfergebnissen Fehlinterpretationen, zum Beispiel bei der Anwendung der Auswerteprogramme, auftreten.

Aus der Betriebserfahrung sind verschiedene Fälle bekannt, bei denen die oben beschriebenen Sachverhalte zutreffen. Übergeordnete Zielsetzung des Vorhabens war es daher, den Kenntnisstand zur Auffindbarkeit und Charakterisierung von Fehlern bei wiederkehrenden Prüfungen an druckführenden Komponenten aufzuarbeiten und fort-

zuschreiben, um das für die Unterstützung der Bundesaufsicht benötigte Know-how vorzuhalten.

Um die oben beschriebene Zielsetzung zu erreichen, wurde der relevante Stand von Wissenschaft und Technik aufgearbeitet (**Kap. 2**) und die Betriebserfahrung anlagenübergreifend ausgewertet (**Kap. 3**). Darauf aufbauend wurden zwölf ausgewählte Einzelereignisse hinsichtlich ihrer relevanten Merkmale und sicherheitstechnischen Bedeutung vertieft analysiert (**Kap. 4**). Abschließend sind die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und es werden Schlussfolgerungen für die Konzepte für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen für deutsche Anlagen abgeleitet (**Kap. 5**).

2 Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Zur Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik wurden insbesondere die Informationen aus einschlägigen Regelwerken und der Fachliteratur gesichtet. Des Weiteren wurden die Ergebnisse aktueller Beratungen in einschlägigen nationalen und internationalen Gremien berücksichtigt. Darüber hinaus wurde

- ein Workshop zur „Auffindbarkeit von Fehlern an druckführenden Komponenten bei wiederkehrenden Prüfungen“ ausgerichtet (Bericht s. **Anlage A**),
- die “6th International Conference on NED in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components” ausgewertet (Bericht s. **Anlage B**) und zusätzlich
- ein Seminar zu „Methoden für zerstörungsfreie Wiederkehrende Prüfungen an druckführenden Komponenten“ mit dem IZfP Saarbrücken (Bericht s. **Anlage C**) durchgeführt.

Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht zum Status und laufenden Aktivitäten im In- und Ausland auf dem Gebiet der Wiederkehrenden Prüfungen an druckführenden Komponenten in Kernkraftwerken gegeben (**Abschn. 2.1**). Daran anschließend folgen detailliertere Ausführungen zu Vorgaben der KTA-Regeln, Handhabung, Qualifizierung und Durchführung wiederkehrender Prüfungen, Einflussfaktoren auf das Ergebnis zerstörungsfreier Prüfungen und Entwicklung von zerstörungsfreien Prüfungsverfahren zur Verbesserung ihrer Aussagefähigkeit (**Abschn. 2.2 – 2.6**).

2.1 Übersicht

Zur Sicherstellung der Integrität von druckführenden Komponenten während der vorgesehenen Betriebs- und Einsatzzeit kommen wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen zur Anwendung. Zielsetzung der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen ist der Nachweis des schadensfreien Zustandes der druckführenden Komponenten des Primärkreises und der aktivitäts- und druckführenden Komponenten außerhalb des Primärkreises. Die zerstörungsfreien wiederkehrenden Prüfungen werden in repräsentativer Art und Weise mit qualifizierten Prüfverfahren und -techniken durchgeführt. Prüfverfahren und Prüftechniken sollen so ausgewählt und eingesetzt

werden, dass betriebsbedingte Fehler mit ihren möglichen Fehlerorientierungen gefunden werden. Als solche Fehlerorientierungen gelten:

- senkrecht zu den Hauptspannungsrichtungen,
- längs der Schweißnähte (parallel zur Schweißrichtung),
- quer zu den Schweißnähten (senkrecht zur Schweißrichtung).

Die Überwachung der bereits aus der Herstellung resultierenden, dokumentierten und als zulässig belassenen Anzeigen ist eingeschlossen.

Die Vorgehensweise bei der Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen an druckführenden Komponenten innerhalb und außerhalb des Primärkreises ist in einschlägigen Regeln und Richtlinien festgelegt. Diese Regeln und Richtlinien enthalten insbesondere Vorgaben zu Prüfverfahren und deren Qualifizierung, Prüfumfängen und -intervallen sowie Auswertung von Messwerten.

Verschiedene Ereignisse haben zu Diskussionen über die verwendeten zerstörungsfreien Prüfmethoden sowie zu umfangreichen Untersuchungen und Forschungsprogrammen geführt. Insbesondere waren dies:

- Rissbildungen im Bereich austenitischer Schweißnähte in deutschen Siedewasserreaktoren Anfang der 90er Jahre,
- Rissbildungen an Mischschweißverbindungen in den letzten Jahren in verschiedenen ausländischen Anlagen mit Druckwasserreaktor (USA, Schweden, Japan),
- ein nicht erkannter herstellungsbedingter Fehler in einer Mischschweißverbindung einer deutschen Anlage mit Druckwasserreaktor.

In diesem Kontext ist die MPA im BMU-Vorhaben SR 2426 /MPA 04/ der Frage nachgegangen, inwieweit durch Modifikation der bislang angewandten Ultraschall- und Durchstrahlungsverfahren oder durch den Einsatz neuer Techniken die Fehlernachweis- und Beschreibungsmöglichkeiten verbessert werden können.

Nationale und internationale Betriebserfahrung sowie die Weiterentwicklung der Prüftechnik haben zu Weiterleitungsnachrichten der GRS /GRS 99, GRS 01a, GRS 01b, GRS 01c, GRS 03a, GRS 03b, GRS 05a, GRS 05b, GRS 08b, GRS 08c/ und

Stellungnahmen der RSK /RSK 02, RSK 04, RSK 05a, RSK 05b/ geführt und in der Folge auch ihren Niederschlag im KTA-Regelwerk, insbesondere in der Überarbeitung von KTA 3201.4, gefunden. Die sehr umfangreiche Überarbeitung dieser Regel steht kurz vor dem Abschluss. Als wesentliche Schwerpunkte sind dabei zu nennen:

- Präzisierungen zur Anforderung an die Auswahl und zum Nachweis der Eignung der einzusetzenden Prüftechniken, insbesondere auch für die Ultraschallprüfung von Mischnähten,
- Präzisierungen der Anforderungen an die Prüfung der Mischnähte, einschließlich Querfehlerprüfung von Schweißnähten aus Nickellegierungen,
- Anforderungen an Prüfungen von plattierten Bereichen, insbesondere im Kernbereich des Reaktordruckbehälters,
- Erweiterung des Prüfumfangs und eine präzisere Beschreibung der Prüfbereiche für Dampferzeuger-Heizrohre, die auch den Einwalzbereich mit einschließen,
- stärkere Betonung und Regelung der betrieblichen Überwachung und der Sichtprüfungen im Rahmen eines Gesamtkonzeptes zur Sicherstellung der Integrität der Komponenten.

Diskussionen auf internationaler Ebene zu dieser Thematik finden insbesondere im Rahmen der OECD/NEA, der EU und der IAEA statt. Grundsätze für die Qualifikation von Prüfungen wurden im EU Projekt der „European Methodology for Qualification“ im Rahmen des ENIQ-Netzwerkes (European Network for Inspection Qualification) in den 90er-Jahren erstellt /ENIQ 99/. Von der IAEA wurde ein Bericht zur Verbesserung von wiederkehrenden Prüfungen in Kernkraftwerken herausgegeben, in welchem insbesondere die Wirksamkeit von wiederkehrenden Prüfungen breit diskutiert wird /IAE 04/. Einen größeren Raum in der Diskussion auf internationaler Ebene nehmen auch Fragen der Anwendung risikobasierter Methoden zur Ermittlung des Prüfumfangs und der Prüfhäufigkeit ein, z.B. /EU 04/.

2.2 Vorgaben der KTA-Regeln und Handhabung

2.2.1 Anforderungen an die konstruktive Gestaltung

Die Regelwerke KTA 3201. 2 und KTA 3211.2 /KTA 99, KTA 96/ zur Auslegung druckführender Komponenten fordern hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung, dass insbesondere Schweißnähte zerstörungsfrei geprüft werden können. Darunter fallen auch die wiederkehrenden Prüfungen. Diese Forderung beinhaltet, dass die Schweißnahtbereiche von Komponenten und Bauteilen so gestaltet werden, dass die Prüfoberflächen auf die anzuwendenden und durchzuführenden Prüfverfahren und -techniken abgestimmt sein müssen. Die Zugänglichkeit zu den Prüfflächen muss sowohl für manuelle als auch für mechanisierte Prüfungen möglich sein. Zur Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen müssen die Isolier- und sonstige Rüstarbeiten sowie die Prüfarbeiten so ausgestaltet sein, dass die Strahlenbelastung des Prüfpersonals so gering wie möglich ist. Außerdem ist die Anzahl der Schweißnähte zu minimieren, wodurch der Aufwand für zerstörungsfreie Prüfungen begrenzt wird.

2.2.2 Anforderungen an die Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen

Zur stichprobenartigen Überprüfung des Zustandes der druckführenden Komponenten des Primärkreises und der aktivitäts- und druckführenden Komponenten außerhalb des Primärkreises ist die Durchführung von wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen gefordert. Für die Komponenten der genannten Systeme sind die Regeln KTA 3201.4 /KTA 99/ und KTA 3211.4 /KTA 96/ die Grundlage zur Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen. In den genannten KTA-Regeln sind neben den allgemeinen und grundsätzlichen Festlegungen Angaben über den zu prüfenden Prüfgegenstand (Prüfabschnitt), Prüfverfahren bzw. Prüftechnik, Fehlerorientierung, Prüfumfang, Prüfintervall, sicherheitstechnische Bewertung der Prüfergebnisse sowie Einsatz von Analysetechniken enthalten. Die Angaben über den Prüfumfang beschreiben den Mindestumfang für den jeweiligen Anlagentyp für den Fall, dass aufgrund der bisherigen anlagenspezifischen Betriebserfahrung keine Schäden zu erwarten sind. Sie enthalten neben Auflistungen über die zu prüfenden Schweißnähte und Grundwerkstoffbereiche auch die Forderung, dass insbesondere die inneren oberflächennahen Bereiche zu prüfen sind. Dies trägt der Erwartung Rechnung, dass betriebsbedingte Fehler, z. B. durch Korrosion oder thermische Ermüdung, überwiegend von Innenoberflächen ausgehen.

2.2.3 Prüfhandbücher

Anhand der Vorgaben der KTA 1202 /KTA 84/ wurden in allen Anlagen Prüfhandbücher erstellt. Die Bedingungen für die Prüfungen an sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten sind in diesen Prüfhandbüchern detailliert beschrieben. Die Prüfhandbücher setzen die Vorgaben der komponentenspezifischen KTA-Regeln und Genehmigungsbedingungen entsprechend den anlagenspezifischen Gegebenheiten und der Betriebserfahrung um. Dieses Handbuch besteht in der Regel aus zwei Teilen, nämlich aus den Prüflisten und aus den Prüfanweisungen.

Die Prüflisten enthalten den Rahmenprüfplan aller wiederkehrenden Prüfungen und enthalten u. a. folgende Angaben:

- Kennzeichnung in der Anlage, Benennung des Prüfgegenstandes,
- Prüffart, -umfang und -intervall,
- Hinweise auf die zugehörige Prüfanweisung und
- Anlagen- bzw. Betriebszustand bei der Prüfung.

Die Prüfanweisungen enthalten detaillierte Vorschriften darüber, wie die Prüfungen durchzuführen sind und bauen auf den Vorgaben der Angaben der Prüflisten auf. Neben den allgemeinen Angaben aus den Prüflisten enthalten die Prüfanweisungen u. a. Angaben zu:

- Prüfgrundlagen mit Benennung der Unterlagen und Hilfsmittel,
- Durchführende Stelle und Beteiligung, z. B. Sachverständiger,
- Übergeordnetes Prüfziel,
- Prüfdurchführung mit Hinweisen auf Toleranzen, Ablauf der Prüfungen (z. B. Schrittprogramme),
- Wiederherstellung des Ausgangszustandes,
- Protokollierung.

2.3 Qualifizierung der wiederkehrenden Prüfungen

Die zerstörungsfreien Prüfungen an nuklearen druckführenden Komponenten erfordern besondere Anforderungen an die Qualifizierung. Die Methodik für das Vorgehen bei der Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen ist in der VGB-ENIQ-Richtlinie /VGB 01a/ festgeschrieben.

Die Grundsätze dieser Richtlinie stammen aus dem „European Methodology for Qualification“ /ENIQ 99/, die im Rahmen des ENIQ Netzwerkes (European Network for Inspection Qualification) erstellt wurde. Die VGB-ENIQ-Richtlinie ist eine Konkretisierung der „European Methodology for Qualification“ und berücksichtigt die deutsche Genehmigungspraxis, die Regelwerke sowie die Prüfpraxis für den deutschen Bereich und gilt als die allein anzuwendende Richtlinie. Diese Richtlinie wurde im Konsens zwischen Betreibern, Gutachtern, Forschungsinstituten und Prüffirmen erstellt. Die Richtlinie gilt für neue zerstörungsfreie Prüfungen. Nach vorhandenen Vorgaben durchzuführende zerstörungsfreie Prüfungen sind ergänzend zu qualifizieren, wenn die vorliegende Qualifizierung unzureichend ist, eine Erweiterung des Anwendungsbereiches vorgesehen ist oder neue sicherheitstechnische Aspekte dies erfordern.

Die genannte VGB-ENIQ-Richtlinie enthält im Einzelnen allgemeine Aussagen zur Vorgehensweise bei der geräte- und komponentenbezogenen Qualifizierung, Durchführung der Qualifizierung und deren Dokumentation. Neben diesen Themen wird auf das bei der Qualifizierung beteiligte Prüfpersonal eingegangen.

Die gerätebezogene Qualifizierung behandelt die Eignung von Geräten, die zu einer Prüfung eingesetzt werden. Sie behandelt den Nachweis für ein Prüfgerät an Hand von Parametern, die das Prüfgerät beschreiben. Dieser Eignungsnachweis kann auch bauteilbezogen erbracht werden. Die Qualifizierungen sind an Test-, Kontroll- oder Vergleichskörpern vorzunehmen. Der Eignungsnachweis muss so durchgeführt werden, dass er eindeutig reproduzierbar ist. Eine qualifizierte Prüfung muss auch bei Austausch der Prüfgeräte mit den gleichen Parametern gewährleistet sein, die bei der Qualifizierung nachgewiesen wurden.

Die komponentenbezogene Qualifizierung beinhaltet den Nachweis eines Prüfverfahrens an einem Testkörper, der den Einfluss von relevanten Werkstoffeigenschaften, Geometrie, Zugänglichkeit und der zu erwartenden Fehlertypen berücksichtigt. Diese Qualifizierung wird in drei Kategorien durchgeführt:

a) Kategorie 1

Diese Qualifizierung ist dadurch gekennzeichnet, dass an der betroffenen Komponente kein Schadensereignis bekannt ist. Die Qualifizierung erfolgt also zum Nachweis von postulierten Fehlern ohne Bezug zu einem aus der Betriebs- erfahrung bekannten Schädigungsmechanismus. Zum Nachweis der Qualifizierung besteht die Möglichkeit vereinfachte Testkörpermessungen vorzunehmen. Quali- fizierungen dieser Kategorie können auch über die gerätetechnische Qualifizierung abgedeckt werden. In diese Kategorien können Qualifizierungen für Prüfverfahren mit geringer Komplexität fallen, z. B. Ultraschallprüfung an Schweißnähten des Sekundärmantels eines Dampferzeugers.

b) Kategorie 2

In diese Kategorie fällt die Qualifizierung an einer Komponente, bei der kein Schadensereignis bekannt ist, aber Fehlertypen und -lagen anhand von postulierten, d.h. aus der anlagenübergreifenden Betriebserfahrung bekannten Schädigungsmechanismen vorgegeben werden. Diese Qualifizierung geschieht haupt- sächlich über Messungen an Vergleichskörpern mit für die zerstörungsfreie Prüfung gleichartigen Werkstoffeigenschaften. Es werden künstliche und, soweit vorhanden, quasi-natürliche Fehler berücksichtigt. In diese Kategorie kann bei- spielweise eine Prüfung an einer Mischschweißnaht fallen.

c) Kategorie 3

Die Qualifizierung wird aufgrund eines Schadens bzw. gravierender Mängel an einer sicherheitstechnisch wichtigen Komponente durchgeführt. Es sind sowohl künstliche als auch quasi natürliche und natürliche Fehler an den geschädigten Komponenten (soweit verfügbar) zu berücksichtigen. Zur Verifizierung der Eignung des Prüfverfahrens an Bauteilen müssen die realen Fehler (Fehlergeometrie und -lage) anhand von weiteren Maßnahmen, z. B. ergänzende zerstörungsfreie bzw. zerstörende Untersuchungen, festgestellt werden.

Die Durchführung der Qualifizierung ist in einem Bericht zu dokumentieren.

In der Praxis wird im Allgemeinen die Qualifizierung der Prüfverfahren bzw. -techniken an Vergleichskörpern vorgenommen. Für die Erprobung von Prüftechniken sind oft ein- fache Vergleichskörper ausreichend, die mit geringem Aufwand herzustellen sind. Ver- gleichskörper mit künstlichen Fehlern, wie Bohrungen und Nuten sind zumeist zur Er- probung von Prüfverfahren geeignet und können zur Einstellung der Prüfempfindlich- keit herangezogen werden. Sind Schäden in Anlagen aufgetreten, fordert die be-

beschriebene VGB-ENIQ-Richtlinie /VGB 01/ die Verifizierung an bauteilähnlichen Vergleichskörpern mit realistischen Fehlern, wobei sich Art- und Lage der Fehlerbildungen, des Werkstoffes bzw. des Werkstoffgefüges sowie die Geometrie erfassen und quantifizieren lassen. Um bestimmte Prüfaufgaben zu erfüllen kann es notwendig sein, aufwendige Vergleichskörper zu verwenden, deren Geometrie, Werkstoffen und Schweißungen denen der Komponente entsprechen. Die Fehlerbildungen sind möglichst realistisch in die Vergleichskörper einzubringen.

Das die Qualifizierung durchführende Prüfpersonal muss nachweisbare Kenntnisse und Erfahrungen über das zu qualifizierende Prüfverfahren und die Komponente besitzen. Es müssen Erfahrungen mit den Anwendungen der entsprechenden Teile der DIN 25435 /DIN 03a, DIN 03b, DIN 03c, DIN 03d, DIN 05/ vorliegen. Diese Norm befasst sich mit wiederkehrenden Prüfungen des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren.

Bei der Anwendung der qualifizierten Prüfverfahren ist es erforderlich, dass nur Prüfpersonal eingesetzt wird, das über eine Zertifizierung nach DIN EN 473 /DIN 08/ oder eine gleichwertige verfügt. Entsprechende Fachkunde muss vorhanden sein, die durch Schulungsmaßnahmen nachzuweisen ist. Die genannte Norm befasst sich u. a. mit den allgemeinen Grundsätzen wie Qualifizierungsstelle, Verantwortlichkeit und Qualifizierungsstufen sowie der Zulassung zur Zertifizierung, der Qualifizierungsprüfungen und der abschließenden Zertifizierung.

2.4 Durchführung und Beurteilung der Ergebnisse von wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen

Für die Durchführung der zerstörungsfreien Prüfungen kommen folgende Prüfverfahren zur Anwendung:

- Prüfung der Oberflächen: Bevorzugt magnetischer Streufluss (nur für ferromagnetische, d. h. hier ferritische Werkstoffe) und Farbeindringverfahren. Ultraschall-, Wirbelstrom-, und Durchstrahlungsprüfverfahren bei spezifischen Anwendungsgebieten.
- Volumenprüfung: Ultraschall-, Durchstrahlungs- und Wirbelstromprüfverfahren (letztere nur bei dünnen Wandungen).

Für die genannten Prüfverfahren wurden jeweils verschiedene zugehörige spezifische Prüftechniken für unterschiedliche Anwendungen entwickelt. Beispielsweise kann bei der Durchstrahlungsprüfung die Röntgen- oder Isotopentechnik zur Anwendung kommen. Für die insbesondere für die Hauptkühlmittelleitung wichtige Prüfung des Volumens und der inneren oberflächennahen Bereiche ist das Ultraschallverfahren mit Sondertechniken vorgesehen. Die Einschallung erfolgt hierzu von der äußeren Oberfläche aus. In einigen Fällen wird auch das Durchstrahlungsverfahren angewandt. Für Dampferzeuger-Heizrohre bzw. Wärmetauscherrohre erfolgt die Prüfung mit Wirbelstromverfahren von der Innenseite aus zur Auffindung von Befunden auf der Innen- oder Außenoberfläche und von Wanddickenschwächungen. Dabei kommen für verschiedene Fehlertypen und Heizrohrbereiche ebenfalls verschiedene Techniken (Durchlauf-, Rotations- und Array-Sonden) zum Einsatz.

Bezüglich der Anwendung der Prüfverfahren und Prüftechniken besteht die sicherheitstechnische Forderung, dass Vorsorge gegen Schäden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu treffen sind. Dies bedeutet, dass abhängig von Werkstoff, Bauteilgeometrie und möglichen Fehlerformen solche Prüfverfahren und solche Prüftechniken eingesetzt werden, die eine möglichst sichere Auffindbarkeit von anzunehmenden Fehlern gewährleisten. Daraus resultiert, dass die technische Entwicklung der Prüftechniken in die Prüfprozeduren einbezogen werden müssen.

Die angeführten KTA-Regeln regeln nicht die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfungen selbst, sondern es werden die anzuwendenden Verfahren für bestimmte Komponenten vorgeschlagen. Die Verfahren selbst sind in Normen und diesbezüglichen Regelwerken beschrieben. Die nachfolgend aufgeführten Normen bilden lediglich die Grundlagen und geben nicht immer den neuesten Stand der Entwicklung wieder. Für die verschiedenen Verfahren sollten folgende Normen angewendet werden:

- Für die mechanisierte wiederkehrende Ultraschallprüfung DIN 25 435-1 /DIN 05/,
- für die manuelle Prüfung von Schweißverbindungen DIN 54 125 /DIN 89/,
- für die Durchstrahlungsprüfung DIN 25 435-7 /DIN 03d/,
- für die Oberflächenprüfung (magnetischer Streufluss- und Eindringprüfung) DIN 25 435-2 /DIN 03a/,

- für die Wirbelstromprüfung von Dampferzeuger-Heizrohren DIN 25 435-6 /DIN 03c/ und
- für die Durchführung einer Sichtprüfung DIN 25435-2 /DIN 03b/.

Falls bei zerstörungsfreien Prüfungen Hinweise auf Fehler wie Risse, Poren oder Einschlüsse festgestellt wurden, ist deren Auswertung ein wichtiger Punkt. Fehler und Bewertungsmaßstäbe für deren Zulässigkeit sind für die Komponenten definiert. Anzeigen orientieren sich an der Technik der Prüfgeräte und deren Bedienung. Hierzu ist in der KTA 3201.4 /KTA 99/ (**Bild 2.1**) eine Zuordnung von Anzeigen und Fehlern angeführt.



Bild 2.1: Zerstörungsfreie Prüfungen: Zuordnung von Anzeigen und Fehler /KTA 99/

Für die Anzeigen werden Nachweis-, Registrier- und Bewertungsgrenzen definiert. Ausgehend von einem gerätetechnischen Rauschpegel einer Anzeige folgt in einem Abstand die Nachweisgrenze des Prüfverfahrens. Diese Grenze, auch als physikalische Grenze bezeichnet, ist gleichzeitig die Grenze zum nachweisbaren Fehler. Für den Prüfer erkennbar folgen in einem gewissen Abstand die Registrier- und Bewertungsgrenze der Anzeige. Anzeigen, die die Bewertungsgrenze erreichen oder überschreiten, werden als Befunde bezeichnet und sind im Rahmen einer sicherheitstechnischen Bewertung zu behandeln.

Aus der Anzeigencharakteristik, ggf. auch aus ergänzenden Prüfungen, und aus der Kenntnis über mögliche Fehlerbildungen im Bauteil wird dem Befund ein Fehler zugeordnet. Dieser Fehler ist die Grundlage für die weiteren Betrachtungen für die Komponente, wie z. B. bruchmechanische Analysen. Dabei muss festgestellt werden, ob unzulässige oder sogar kritische Fehler vorliegen.

Hinsichtlich der Auswertung von Messergebnissen bei mechanisierten Ultraschallprüfungen an der Druckführenden Umschließung von Leichtwasserreaktoren bei wiederkehrenden Prüfungen steht eine Richtlinie der VGB zur Verfügung /VGB 01b/. Diese Richtlinie enthält Forderungen an die Ergebnisdarstellung und die Auswertestrategien von Daten der wiederkehrenden mechanisierten Ultraschallprüfung. Dabei ist die Zielsetzung, die verwendeten Auswertehilfen und Auswertetechniken so darzustellen, dass der Weg, der zum Prüfergebnis führt, jederzeit nachvollziehbar ist. Die Ergebnisse verschiedener Auswertetechniken und verschiedener Prüffirmen sollten vergleichbar sein.

2.5 Einflussfaktoren auf das Ergebnis zerstörungsfreier Prüfungen

Bei der Durchführung von zerstörungsfreien Prüfungen können sich vielfältige Einflüsse auf das Prüfergebnis und somit auf die Beurteilung von Fehlern auswirken. Das Ergebnis hängt vom Prüfverfahren, der Prüftechnik, von der spezifischen Prüfaufgabe und auch von menschlichen Einflüssen ab. Wichtiger Bestandteil der Prüfverfahren und der Prüftechniken zur zerstörungsfreien Prüfung ist die Entwicklung und die damit verbundene Erprobung sowie die Qualifizierung. Hierzu müssen die Einflüsse des Werkstoffes und des Werkstoffzustandes berücksichtigt werden. Beispielsweise können Gefügeausbildungen an austenitischen Schweißnähten oder an Mischschweißnähten zu Schwierigkeiten bei der Auffindbarkeit und Größenbestimmung von Fehlern mit der Ultraschallprüfung führen. Auch können Besonderheiten in der Geometrie und Konstruktion der zu prüfenden Komponente bzw. des Bauteils zu Einschränkungen führen. Dazu gehören Stutzenkanten oder Kantenversatz, Wurzel Ausbildung, ungleiche Wanddicken, Decklagen (beschiffen / unbeschiffen).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Auswertung der Betriebserfahrung. Bei aufgetretenen Schädigungen in derselben oder anderen Anlagen müssen deren Übertragbarkeit ermittelt und Bereiche von Komponenten mit möglichen oder bereits vorhandenen Schädigungen identifiziert werden. In diesen Fällen sind nicht nur der Prüf-

umfang, sondern auch die für diese Bereiche festgelegten Prüfmethode- und -techniken hinsichtlich der Fähigkeit zu überprüfen, diese Fehlertypen auch zu finden. Dieses schließt die Berücksichtigung der Fehlereigenschaften des vorliegenden Schädigungsmechanismus mit ein. Darunter wird zum Beispiel die Morphologie von Rissverläufen verstanden. Hierzu kann eine erneute Qualifizierung notwendig werden. Falls es sich um neue und bisher nicht geprüfte Bereiche handelt, sind die Prüflisten entsprechend zu ergänzen.

Eine Rolle spielt auch die Zugänglichkeit zu den zu prüfenden Bereichen einer Komponente bzw. eines Bauteils. Beispielsweise können Verkantungen oder Abhebungen von Ultraschallprüfköpfen zu Fehlinterpretationen von Befunden führen.

Menschliche Einflussfaktoren hängen stark von der Ausbildung und der Erfahrung des Prüfpersonals ab. Aber auch die Arbeitsbedingungen für das Prüfpersonal sind hinsichtlich der Umgebungsbedingungen vor Ort, wie Temperatur, Feuchte, Strahlenbelastung und Zugänglichkeit von Bedeutung. Ein weiterer Punkt kann das subjektive Empfinden des Prüfpersonals über die Strahlenbelastung bei der Durchführung der Prüfungen sein. Die Arbeitsbelastung und mögliche negative Empfindungen können vor allem durch Organisation und Planung beeinflusst werden.

2.6 Entwicklungen von zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Verbesserung ihrer Aussagefähigkeit

2.6.1 Generelle Entwicklung

Fehler infolge von Fertigungsprozessen sowie betriebsbedingte Schädigungen sollen bei wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen sicher aufgefunden werden. Die Fokussierung liegt dabei auf rissartigen Trennungen, z. B. durch Korrosion oder Ermüdung. Als Prüfverfahren werden dabei für druckführende Komponenten in Deutschland für die wiederkehrenden Prüfungen überwiegend Ultraschallverfahren eingesetzt, die sich grundsätzlich mit unterschiedlichen Techniken sowohl als Fehlersuch-, als auch als Analyseverfahren eignen und sowohl von innen als auch von außen angewandt werden können. Aber auch Wirbelstromverfahren werden für spezielle Anwendungen wie Dampferzeuger-Heizrohre und als Suchverfahren für Oberflächenfehler an dickwandigen Komponenten vielfältig eingesetzt.

Die wesentlichen Entwicklungen bei Prüfverfahren- und -techniken für druckführende Komponenten konzentrieren sich einerseits auf Verfahren und Techniken zur Prüfung von komplexen oder schwer zugänglichen Geometrien, wie

- Stützenfelder im Deckel von Reaktordruckbehältern von Druckwasserreaktoren oder am Boden von Reaktordruckbehältern von Siedewasserreaktoren,
- Stützen mit Wärmeschutzrohren (Analysetechnik),
- Dampferzeuger-Heizrohre im Bereich der Einwalzung in den Rohrboden.

Bei den oben genannten Prüfungen von „dickwandigen“ Komponenten, wie Stützen und Rohrleitungen, kommen Ultraschallverfahren, im Fall der Dampferzeuger-Heizrohre Wirbelstromverfahren zum Einsatz. Dabei spielen „Gruppenstrahlertechniken“ in Form von Array-Sonden für beide Verfahren eine wesentliche Rolle. Auf die Gruppenstrahlertechnik mit Ultraschall wird im Folgenden noch detaillierter eingegangen. Die Entwicklung der Wirbelstromverfahren wird anschließend direkt anhand der Anwendung auf Dampferzeuger-Heizrohre beschrieben.

Vor dem Hintergrund der aufgefundenen Rissbildungen im Bereich austenitischer Schweißnähte in verschiedenen deutschen Anlagen mit Siedewasserreaktoren und den Schäden an Mischnähten in einer deutschen Anlage und in verschiedenen ausländischen Anlagen mit Druckwasserreaktor bildet die Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißnähten und Mischnähten einen weiteren Schwerpunkt der Entwicklungen bei Prüfverfahren- und -techniken in Deutschland.

Während Ultraschall-Prüfungen von Grundwerkstoffbereichen und Schweißverbindungen aus ferritischen Stählen bei guter Zugänglichkeit und einfacher Geometrie weitgehend unproblematisch sind, ist die Ultraschallprüfung von austenitischen bzw. Mischschweißnähten¹ schwieriger auszuwerten. In diesen Schweißnähten liegen anisotrope, grobkörnige Gefügebereiche (Dendritenstrukturen) im Schweißgut vor, die zu einer Anisotropie der Schallgeschwindigkeit und Streuungen an den Korngrenzen führen. Dieses kann zu Verzerrungen, Störsignalen, verminderten Signalwerten und

¹ Ungleichartige Stähle, z. B. Komponenten aus ferritischem Stahl und Rohrleitungen aus austenitischem Stahl, sind durch Mischschweißnähte verbunden. Die Mischschweißnähte sind so aufgebaut, dass auf den Grundwerkstoff aus ferritischem Stahl eine Pufferung z. B. aus einer Nickelbasis-Legierung oder austenitischem Stahl aufgeschweißt ist. Das Schweißgut der Verbindungsschweißnaht besteht entweder aus austenitischem Stahl oder aus einer Nickelbasis-Legierung.

verstärktem Rauschen und damit zu einem herabgesetzten Fehlernachweisvermögen führen.

Bei der Weiterentwicklung und Anpassung von Ultraschallprüftechnik an spezielle Komponenten nehmen daher Simulationsrechnungen zur Ultraschallausbreitung in komplexer Geometrie und/oder bei anisotropem Gefüge, sowie die Anwendung digitaler Filter zur Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses an Bedeutung zu. Daher kann hier sowohl die nachträgliche rein rechnerische Analyse der Prüfergebnisse (wie „SAFT“, siehe unten), als auch der Vergleich mit der Simulationsrechnung zu deutlichen Verbesserungen der Aussagefähigkeit führen. Dabei ist die Verwendung von geeigneten Testkörpern zur Erprobung und Qualifizierung von Prüfsystemen von entscheidender Bedeutung.

2.6.2 Ultraschallverfahren mit Gruppenstrahlerprüftechnik

Das Prinzip der Gruppenstrahler-Prüftechnik („Array“-Prüftechnik) zeigt **Bild 2.2** am Beispiel eines Ultraschall-Gruppenstrahlers. Ein Ultraschall-Gruppenstrahler besteht aus einer linearen oder matrixartigen Anordnung („Array“) von einzelnen, benachbarten Schwingerenlementen. Jedes dieser Elemente kann einzeln angeregt werden. Durch eine definiert untereinander zeitversetzte Anregung werden im resultierenden Schallfeld die gewünschten Merkmale bezüglich Einschallrichtung und Fokussierung elektronisch erreicht. Daraus resultierende Vorteile sind insbesondere:

- eine bessere Fehlernachweisbarkeit durch variablen Fokuspunkt („Dynamic Depth Focusing“),
- wirtschaftlicheres Prüfen durch flächenhafte Erfassung („electronic scanning“, kein määnderförmiges Abrastern),
- Rückwandecho-Erfassung von schrägen Rückwänden bis 15° durch elektronisch gesteuertes Schallfeld,
- die Möglichkeit einer simultanen, schliffähnliche Darstellung durch elektronisches Abrastern,
- die Möglichkeit der Erfassung von Fehlern, die mit herkömmlicher Technik nicht nachweisbar sind durch sektorielles Abrastern, d. h. permanentes elektronisches Schwenken des Schallfeldes, „sector scan“.

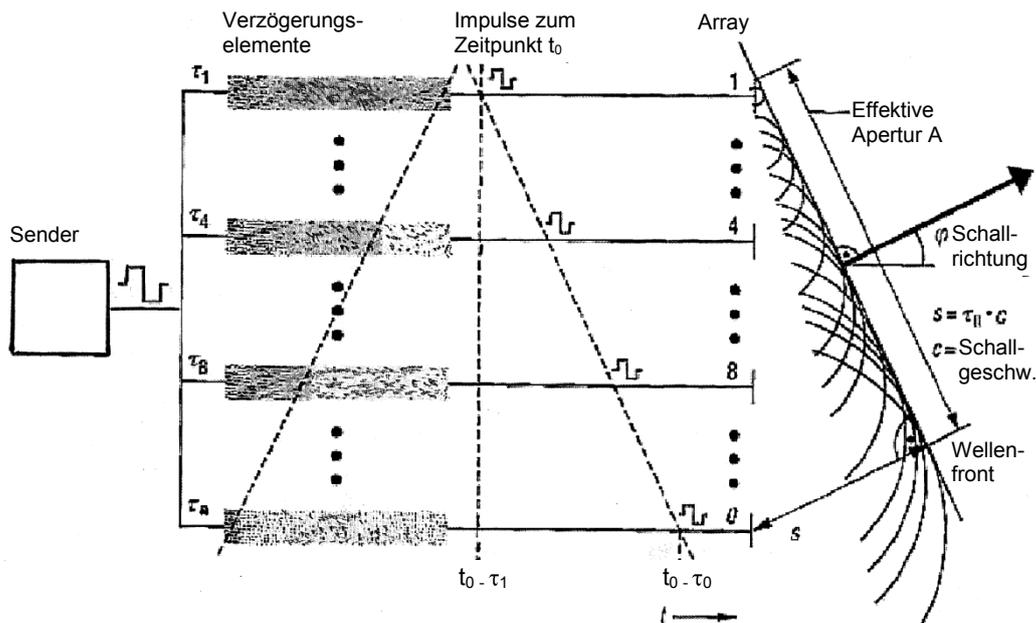


Bild 2.2: Erzeugung einer Wellenfront durch definierte zeitversetzte Anregung einzelner Schwingerelemente des Gruppenstrahlers („Array“)

Um z. B. für bruchmechanische Bewertungen hinreichend aussagekräftige Prüfergebnisse zu erhalten, muss die Ultraschallprüfung bei üblichen Prüfgeschwindigkeiten und vertretbarem Prüfaufwand Fehlerbilder mit tomographischer Qualität liefern. Unbedingt erforderlich dafür ist eine Rekonstruktion der Befunde unter möglichst allen Einschallwinkeln (-90° bis $+90^\circ$) bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit und Auflösung. Mit Hilfe des „getakteten Gruppenstrahlers“ unter Verwendung von Rekonstruktionsalgorithmen der Ultraschallmigration und effizienten, integrierten Rechnerstrukturen können auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten in Echtzeit Ultraschallfehlerbilder erzeugt werden, aus denen beliebige Einschallwinkel und Fokussierungen berechnet werden. Zusätzlich gestattet die Rekonstruktionstechnik die Verletzung des „Sampling Theorems“, das der Gruppenstrahlertechnik zu Grund liegt. Damit können synthetische Aperturen erzeugt werden, die auch bei großen Schallwegen eine Fokussierung mit Auflösungen erlauben, die im Wesentlichen durch die Apertur des Einzelelementes bestimmt wird. Das Leistungsvermögen dieser Technik wurde an verschiedenen Beispielen für dickwandige Komponenten, Rohrleitungsschweißnähte und Turbinenwellen aufgezeigt.

Der „getaktete Gruppenstrahler“ („phased array“) ist eine Weiterentwicklung des Gruppenstrahlers, der bereits in der Prüfpraxis verwendet wird. Das Gruppenstrahlersystem verzichtet jedoch auf einen Großteil der gemessenen Informationen, indem über eine Phasenschiebeelektronik die Signale aufaddiert werden. Damit entspricht der

Gruppenstrahler einem üblichen Prüfkopf, der unter einem wählbaren Winkel ein Schallfeld erzeugt, vorausgesetzt das „Sampling Theorem“ wird eingehalten. Der Vorteil des Gruppenstrahlers beschränkt sich damit auf den elektronisch kontrollierbaren Einschallwinkel. Speichert man die Zeitsignale, die von den einzelnen Elementen der Gruppe empfangen und von einem Element als Sender erzeugt werden (**Bild 2.3**), so erhält man nach Durchtaktung aller Elemente als Sender die für einen Gruppenstrahler typische vollständige Informationsmatrix (**Bild 2.4**).

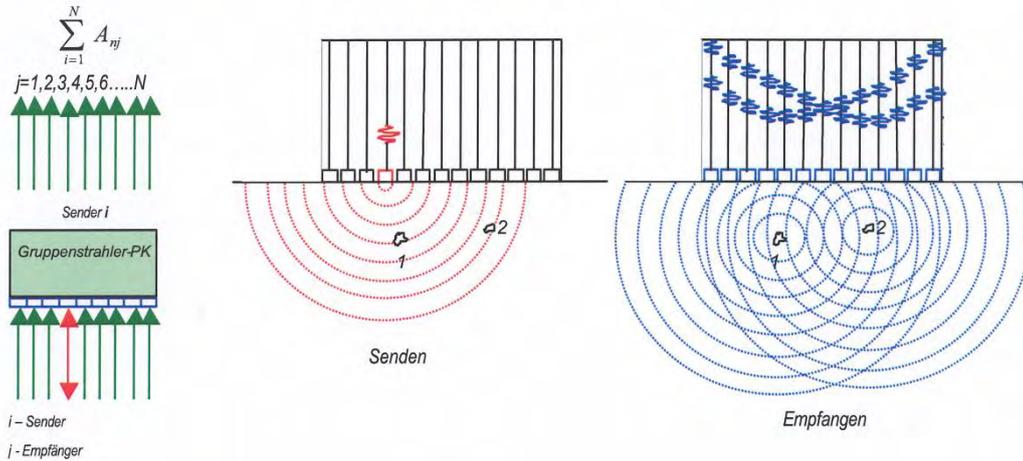


Bild 2.3: Das Messprinzip des getakteten Gruppenstrahlers

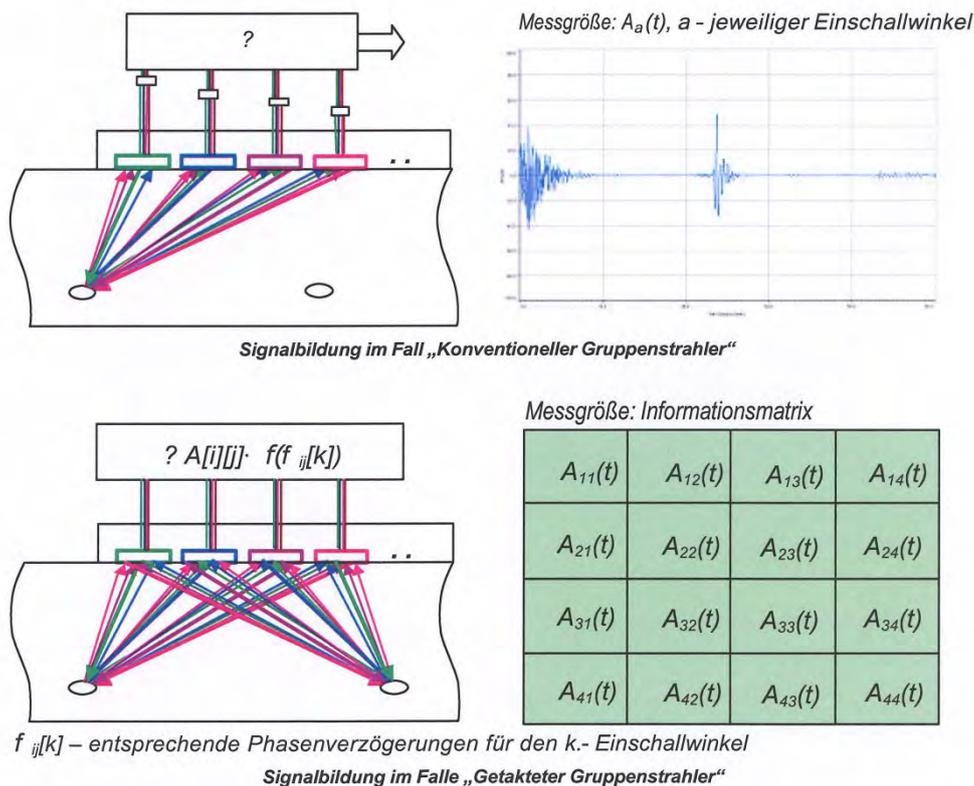


Bild 2.4: Messinformation eines konventionellen und getakteten Gruppenstrahlers

Diese Zeitsignale können nun beliebig addiert werden, d. h. man kann mit einem Messdatensatz beliebige Einschallwinkel und beliebige Fokussierungen errechnen.

2.6.3 Auswertung der Ultraschallprüfung mit synthetischer Apertur (SAFT)

Diese nachträgliche Analyse der Daten dient schon seit längerer Zeit der besseren Charakterisierung von Befunden in ferritischen Komponenten. Numerisch gestützte Fokussierungstechniken nach Datenerfassung einer so genannten synthetischen Apertur (Synthetic Aperture Focusing Technique, SAFT) sind nachweislich in homogenen isotropen Gefügen, wie z. B. ferritischen Schweißnähten, am besten geeignet, Ultraschallanzeigen eines Fehlers an den wirklichen Ort des Fehlers zu fokussieren und damit einer Größenbestimmung zugänglich zu machen. Diese Fähigkeit sollte auch für austenitische Schweißnähte und Mischnähte entwickelt werden. Aus diesem Grunde wurden SAFT-Algorithmen in der numerischen Simulation an Modellen von inhomogenen und anisotropen Mischschweißnähten erprobt, neue Algorithmen ent-

wickelt und an Prüfdaten getestet, die an einem Großbehälter in Stuttgart ermittelt wurden /DOB 06/.

Für Ultraschalluntersuchungen ist SAFT ein leistungsfähiges Instrument für die Fehlergrößenbestimmung. Es ist eine Signalverarbeitungs- und Auswertemethode, die die Schalllaufzeit ausgesandter und empfangener Ultraschallwellen von Prüfköpfen mit divergenten Schallbündeln benutzt. Wesentliche Vorteile der Anwendung von Abbildungsalgorithmen, wie SAFT sind:

- Die mit dem Algorithmus berechneten Abbildungen sind leichter zu interpretieren als die ursprünglich gemessenen Bilder.
- Die synthetische Fokussierung erhöht den Signal/Rauschabstand erheblich.

Weiterhin bietet das Verfahren mit synthetischer Apertur eine zweifach höhere laterale Auflösung im Vergleich zur direkten Fokussierung durch den Prüfkopf bei gleicher Aperturweite. Die laterale Auflösung ist dabei nicht mehr von der Frequenz abhängig, sondern von der Anzahl der Stützstellen innerhalb der Apertur sowie von der Größe des anregenden Schwingers: Je kleiner der Schwinger und je geringer seine Fokussierung, d. h. je mehr er der idealen Punktquelle entspricht, desto besser seine Eignung für SAFT. Ideal geeignet für eine Anwendung mit SAFT sind daher aktuelle getaktete Gruppenstrahler-Prüfköpfe, die aus sehr vielen, sehr kleinen Einzelelementen bestehen. Durch eine direkte Ansteuerung der einzelnen Elemente ergibt sich damit eine synthetische Apertur in der Breite des Phased-Arrays, mit der sogar ohne zu scannen eine Abbildung berechnet werden kann; bei Verfügbarkeit schneller Rechner sogar direkt während der Prüfung.

2.6.4 Prüfungen von austenitischen Schweißnähten und Mischnähten

Nach der Entdeckung von Rissen in austenitischen Schweißnähten in deutschen Anlagen mit Siedewasserreaktoren in den 90er Jahren wurden umfangreiche Untersuchungen und Forschungsprogramme zur Verbesserung von zerstörungsfreien Prüfverfahren durchgeführt. Diese Risse entstanden durch interkristalline Spannungsrisskorrosion, die an austenitischen Werkstoffen und Nickellegierungen als betriebsbedingter Schädigungsmechanismus auftreten kann. Die Arbeiten befassten sich weitgehend mit der Ultraschallprüfung, bei der aufgrund der anisotropen (dendritischen)

Gefügeausbildung in der austenitischen Schweißnaht besondere Herausforderungen bestehen.

Wegen der dendritischen Gefüge, die bei vertikal oder horizontal geschweißten Mischnähten unterschiedlich orientiert vorliegen, erleidet die Ausbreitung von Ultraschallwellen unterschiedliche Schallstrahlablenkungen und -verzerrungen, sowie störende Reflektionen. Beide Effekte beeinflussen die Interpretation der Prüfergebnisse. Wegen des Auftretens von so genannten Artefakten (durch die Methode bedingte Signale, die keine realen Gegebenheiten repräsentieren), resultierend z. B. aus so genannten Mode-Konversionen (Umwandlung von Wellenart, transversal/longitudinal), ist die Empfindlichkeit für den Fehlernachweis eingeschränkt. Ebenso ist die Angabe der Fehlerposition gestört, da die Schallgeschwindigkeit keine Konstante ist und dadurch auch die Fehlergrößenbestimmung beeinflusst wird.

Für andere zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Durchstrahlungsprüfung, Farbeindringprüfung und Wirbelstromprüfung, die auch bei austenitischen Schweißnähten angewendet werden, hat die Problematik, die aus der anisotropen Gefügeausbildung resultiert, keine Bedeutung /MPA 04/.

Neben der anisotropen Gefügeausbildung bildet auch die Morphologie der durch interkristalline Spannungsrisskorrosion erzeugten Risse eine Herausforderung. Diese Risse, die vor allem an Schweißnähten auftreten können, verlaufen entlang der Korngrenzen des Werkstoffs mit teilweise vielen Verästelungen, wodurch ihre Detektion mit Ultraschall erschwert wird. Als alternative Volumenprüfung wäre auch die Durchstrahlungsprüfung denkbar. Eine Detektion dieser Risse ist jedoch mit Durchstrahlungstechniken kaum möglich, da die Risse meistens sehr fein und die freien Volumina damit sehr klein sind. Die entsprechenden Kontraste fallen damit sehr schwach und wegen der Verästelungen diffus aus.

Als weitere alternative Prüfverfahren kommen Oberflächenverfahren infrage (siehe **Abschn. 2.4**), mit denen jedoch eine Risstiefenbestimmung nur eingeschränkt möglich ist. Für die Suche nach Rissen an der inneren Oberfläche von druckführenden Komponenten ist für diese Verfahren außerdem eine direkte Zugänglichkeit von innen oder vollständige Fernsteuerung notwendig. Bisher kamen im Wesentlichen nur Wirbelstromverfahren zum Einsatz, insbesondere dann, wenn eine Ultraschallprüfung von außen aufgrund der geometrischen Gegebenheiten nicht möglich war. Dabei haben

sich in ausländischen Anlagen Wirbelstromprüfungen als Suchverfahren als geeignet erwiesen, erfordern jedoch ggf. ergänzende Maßnahmen zur Risstiefenbestimmung.

Fortgeschrittene Ultraschall-Prüftechniken lösen teilweise diese Probleme und bieten auch Vorteile gegenüber anderen Verfahren. Daher kommt als zerstörungsfreie Prüfmethod für Risse durch interkristalliner Spannungsrisskorrosion für den großflächigen Einsatz in deutschen Kernkraftwerken meistens die Ultraschallprüfung und im geringen Maße die Durchstrahlungsprüfung in Betracht.

Bei Mischnähten erfordert die unterschiedliche konstruktive Ausführung der Verbindungen (mit Nickellegierungen oder rein austenitischem Schweißgut, mit oder ohne Pufferung) individuell angepasste Prüftechniken, die an geeigneten Testkörpern (Werkstoffe, Geometrie, Schweißtechnik) qualifiziert werden müssen. Bei Mischnähten mit Nickellegierungen ergeben sich zusätzliche Herausforderungen durch den Umstand, dass die in ausländischen Anlagen aufgefundenen, ebenfalls durch interkristalline Spannungsrisskorrosion entstandenen Fehler teilweise quer zur Schweißnaht („Querfehler“) verlaufen und sich nicht in Grundwerkstoffbereiche erstrecken /MPA 07a/.

Für die automatisierte Ultraschallprüfung wurden Gruppenstrahlerprüfsysteme entwickelt, mit denen eine Vielzahl von steuerbaren Prüffunktionen erreicht werden kann. So können mit Gruppenstrahlköpfen Linien- oder Flächenfelder ausgebildet werden, womit eine zeitlich unterschiedliche Ansteuerung der einzelnen Elemente, die Realisierung verschiedener Einschallwinkel oder die Formung des Schallfeldes ermöglicht wird. Es sind Prüfungen mit Transversal- oder Longitudinalwellen möglich, und es kann ein Sende-Empfangbetrieb realisiert werden. Voraussetzung ist allerdings eine entsprechende Vorbereitung der Komponentenoberflächen, um für Gruppenstrahlerprüfköpfe auch im Nahtbereich eine Ankoppelung zu erreichen.

Die Ultraschallprüftechniken für die Prüfung von Mischnähten mit Schweißgut aus Nickellegierungen (zum Beispiel Alloy 182 oder 82) auf Längs- und Querfelder wurden weiter optimiert. Die Querfehlerprüfung an Mischnähten mit austenitischem Schweißgut wurde in einer deutschen Anlage ebenfalls erfolgreich durchgeführt. Übliche Praxis bei komplexen Prüfungsaufgaben ist es, für die Entwicklung und Anwendung von Prüftechniken, Vergleichskörper mit realistischen Fehlern zur Validierung zu verwenden. Die Vergleichskörper müssen in den für die Prüfaufgabe relevanten Eigenschaften (Werkstoff, Schweißnahtausführung, Form, Wanddicke, Plattierung) dem Prüfgegen-

stand entsprechen. Bei den meisten Untersuchungen wurden Testkörper mit künstlichen Reflektoren in Form von Nuten verwendet. In einigen Fällen wurden Schwingungsrisse oder Schweißfehler in die Mischnahtkörper eingebracht. Die Qualifizierung der Prüfverfahren erfolgt nach der ENIQ-Methodik (siehe **Abschn. 2.3**).

2.6.5 Prüfung von Dampferzeuger-Heizrohren

Die nachfolgenden Informationen stammen aus /GRS 99, GRS 05b, GRS 08c/ und den zugehörigen Unterlagen.

- Wirbelstromprüfung mit der Innendurchlaufsonde

Die Innendurchlaufsonde ist die Standardprüfsonde für die Prüfung von Dampferzeuger-Heizrohren mit der die gesamte Länge der Heizrohre überprüft werden kann. Diese Prüftechnik ermöglicht eine Unterscheidung zwischen Außen- und Innenfehler. Die Innendurchlaufsonde liefert integrale Messwerte über dem Umfang. Mit Hilfe der Phasenlage kann bei vorheriger Eichung an Testkörpern die Fehlertiefe bestimmt werden. Insbesondere ist dieses Verfahren zur Fehlersuche von großflächigem Korrosionsabtrag geeignet. Kleinere Fehler im Bereich von Störstellen können nicht nachgewiesen werden. Zur Bewertung von Anzeigen wird im Allgemeinen das Prüfsignal mit der 400 kHz-Sonde herangezogen. Die prüftechnisch bedingte Genauigkeit für Testfehler und eindeutig bewertbare Anzeigen liegt bei ca. $\pm 10\%$ der Wanddicke. Neben der genannten Prüffrequenz von 400 kHz werden zusätzlich weitere Frequenzen (z. B. 200 kHz) angewandt und die Signale aus diesen Frequenzen zu einem gemischten Signal (Mix) verarbeitet. Damit wird das Ziel verfolgt, Störsignale z. B. resultierend aus Ablagerungen, Abstandshalter, Einwalzung weitgehend zu eliminieren. Von Vorteil ist die relativ hohe Prüfgeschwindigkeit.

- Wirbelstromprüfung mit der Rotationssonde

Bei dieser Prüftechnik kommt eine rotierende Wirbelstromsonde zum Einsatz. Diese Sonde ist eine Analysesonde und ermöglicht eine Auffindung von kleineren örtlichen und auch rissartigen Fehlern. Es können auch Informationen bezüglich der Fehlerlängenausdehnung gewonnen werden. Diese Prüftechnik wird zur Ergänzung der Anwendung der Innendurchlaufsonde verwendet, wenn bereits mit dieser Prüftechnik Hinweise auf Fehler vorliegen. Es ist jedoch nicht möglich, eine Tieferenerstreckung von

Fehlern in hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Nachteilig ist auch die sehr geringe Prüfgeschwindigkeit.

- Wirbelstromprüfung mit der Array-Sonde

Die neuartige Array-Sonde ist so aufgebaut, dass über dem Umfang in der Regel drei Spulenreihen angeordnet sind. In jeder Spulenreihe sind beispielsweise 16 Spulen angeordnet. Die Sonde arbeitet nach der Sende-Empfänger Methode. Mit den beiden äußeren Spulenreihen erfolgt die Abtastung in axialer Richtung und mit der mittleren Spulenreihe die Abtastung in Umfangsrichtung. Es ist eine separate Trennung zwischen Signalen aus der Umfangsrichtung und der axialen Richtung möglich. Es können mit der Array-Sonde beliebig orientierte lineare Fehler gefunden werden. Es ist jedoch nicht möglich, eine Tiefenerstreckung von Fehlern mit einer hinreichenden Genauigkeit zu bestimmen.

Mit in einer Kombinationsprüfsonde zusammengefassten Innendurchlaufsonde und einer Array-Sonde lassen sich integral sowohl flächenhafte als auch lineare Fehler detektieren. Der Einsatz dieser Prüfeinheit ergibt akzeptable Prüfzeiten (**Bild 2.5**).

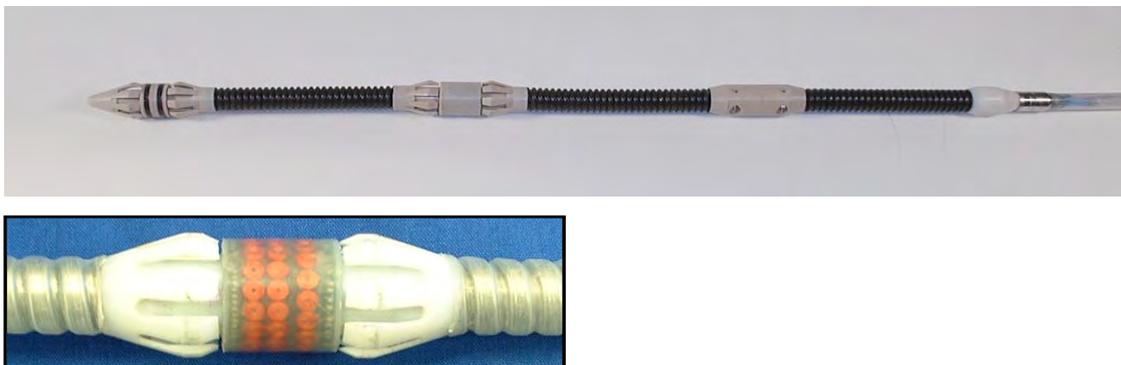


Bild 2.5: **Oben:** Wirbelstromprüfung von Dampferzeuger-Heizrohren mit der Kombinationssonde

Unten: Detail Array-Sonde

- Ultraschallprüfung mit der Rotationssonde

Bei dieser Prüftechnik wird eine rotierende Ultraschallsonde eingesetzt, die bei großflächigen Fehlern gegenüber der 400 kHz Wirbelstromtechnik mit der Innendurchlaufsonde eine genauere Bestimmung der Restwanddicken ermöglicht. Diese Sonde ist somit eine Analysesonde. Nicht geeignet ist diese Prüftechnik zum Auffinden von kleinen örtlichen und rissartigen Fehlern.

- Anwendung der verschiedenen Techniken bei den Prüfungen

Die beschriebenen Prüfverfahren bzw. Prüftechniken sind je nach der dargestellten Fähigkeit in der Lage Fehler an Dampferzeuger-Heizrohren zu erkennen. Vorwiegend kommt bei wiederkehrenden Prüfungen das Wirbelstrom-Verfahren zum Einsatz. Die Prüfung mit der Innendurchlaufsonde ist nach wie vor die Standardprüfung unter Verwendung der Standardfrequenz und zusätzlich mit den unterschiedlichen Prüffrequenzen für geometrisch gestörte Bereiche. Im Allgemeinen sind die bei der Prüfung erzielten integralen Messergebnisse für die Beurteilung der Integrität der Heizrohre ausreichend. Die Array-Sonde und die Rotationssonde dienen zu Analysen zur besseren Beschreibung von bereits detektierten Fehlern. Dabei kann die Array-Sonde aufgrund der relativ hohen Prüffgeschwindigkeit großflächig für gefährdete Bereiche eingesetzt werden. Mit der neuartigen Kombinationsprüfsonde mit der Innendurchlauf- und der Array-Sonde wurden die Prüfungen der Dampferzeugerheizrohre hinsichtlich der Möglichkeit der sicheren Auffindbarkeit und Beschreibung der Fehler sowie der Prüffgeschwindigkeit deutlich verbessert.

3 Anlagenübergreifende Auswertung der für das Vorhaben relevanten Betriebserfahrung

Die Auswertung der Betriebserfahrung ist in vielen Industriebereichen ein bewährtes Mittel, Analysen zu aufgetretenen Schädigungen durchzuführen, gezielt Gegenmaßnahmen einzuleiten und Übertragbarkeitsbetrachtungen für andere Anlagen und deren Komponenten und Bauteile anzustellen. Die anlagenübergreifende Auswertung der Betriebserfahrung in kerntechnischen Anlagen ist seit mehr als drei Jahrzehnten ein wesentliches Arbeitsgebiet der GRS. Informationen über die Betriebserfahrung bilden die Grundlage bei der Beantwortung von Fragestellungen im Rahmen der Bewertung der Sicherheitspraxis von Kernkraftwerken. Die Informationen stammen insbesondere aus Berichten über Ereignisse, die aufgrund von Meldungen, z. B. meldepflichtigen Ereignissen, vorliegen. Zum Verhalten druckführender Komponenten in deutschen und ausländischen Kernkraftwerken steht umfangreiche Betriebserfahrung in strukturierter, gut auswertbarer Form zur Verfügung z. B. /MIF 03, MIF 05, NEA 06, REC 06/.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die verfügbare Information zur Betriebserfahrung aus deutschen und ausländischen Kernkraftwerken im Hinblick auf Ereignisse untersucht, die im Zusammenhang mit Problemen beim Auffinden von Fehlern bei Wiederkehrenden Prüfungen stehen. Vorgehensweise und Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben.

3.1 Vorgehensweise

Für die nachfolgende Auswertung wurde die in **Abschn. 3.1.1** charakterisierte Datenbasis herangezogen. Dabei wurde auf Ereignisse der letzten zehn Jahren zurückgegriffen. Der gewählte Beobachtungszeitraum ist u. E. angemessen, um Aussagen treffen zu können über systematische Schäden bzw. deren Detektion sowie zur Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen. Die Vorgehensweise bei der Auswertung ist in **Abschn. 3.1.2** beschrieben.

3.1.1 Datenbasis

Zur Auswertung wurden die folgenden Quellen herangezogen:

- Datenbank „KomPass“
Für deutsche Anlagen mit Druck- und Siedewasserreaktoren werden alle meldepflichtigen Ereignisse in einer zentralen GRS-internen Datenbank VERA gesammelt. Aus diesem Datenbestand werden die spezifischen Merkmale der Schäden an druckführenden Komponenten in der Datenbank KomPass (für passive druckführende mechanische Komponenten) erfasst. In dieser Datenbank sind zurzeit über 800 Ereignisse dokumentiert. Diese interne GRS Datenbank liegt als Microsoft® Office Programm Access vor. Die Datenbank beinhaltet als wesentliche Informationen: Komponententyp, eingesetzte Werkstoffe, Nennweiten bei Rohrleitungen, Schadensort (z. B. Schweißnähte), Schadensursache (z. B. Korrosion), Schadenserkenkung (z. B. Begehung, Schadensauswirkungen (z. B. Riss, Leckagen). Diese Informationen sind strukturiert in Datenbankfeldern erfasst.
- Datenbank OPDE
Im Rahmen des Projektes OECD Pipe Failure Data Exchange (OPDE) wurde eine Datenbasis über Schäden an sicherheitsrelevanten Rohrleitungen in Kernkraftwerken geschaffen. An dem Projekt beteiligen sich unmittelbar elf Mitgliedsländer, die Meldungen über Rohrleitungsschäden für die Datenbank liefern. Die Struktur dieser Datenbank ähnelt der GRS-internen Datenbank „KomPass“. Die OPDE-Datenbank hat jedoch mehr Felder und damit die Möglichkeit der Speicherung einer breiteren Informationsbasis. In der OPDE- Datenbank sind derzeit über 3.700 Ereignisse dokumentiert. Die Datenbank liegt als Microsoft® Office Programm Access vor.
- Zusätzliche Informationen
Die Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Erstellung von Weiterleitungsnachrichten zu besonderen Ereignissen mit druckführenden Komponenten ermöglichen den Zugang zu weiteren, praxisrelevanten Informationen. Diese Informationen können neben detaillierten Informationen zur Schadensursache auch Hinweise auf die bisherige Geschichte der wiederkehrenden Prüfungen enthalten.

3.1.2 Auswertung

Für die Auswertung wurde der im **Abschn. 3.1** genannte Zeitraum von 10 Jahren gewählt. Die Abfrage der Datenbanken erfolgte zunächst mit der Zielsetzung, die Ereignisse mit Befunden in der drucktragenden Wand zu identifizieren.

Mit Hilfe der Datenbank „KomPass“ konnte eine Vielzahl solcher Ereignisse identifiziert werden. Es zeigte sich allerdings, dass die für eine weitere Bearbeitung erforderlichen Detailinformationen über die zerstörungsfreien Prüfungen bei vielen Fällen nicht verfügbar waren. Deswegen wurden für die weitere Bearbeitung nur die Ereignisse aus der Abfrage ausgewählt, für die Weiterleitungsnachrichten erstellt wurden. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da im Zusammenhang mit der Erstellung der Weiterleitungsnachrichten Zusatzinformationen u. a. über die zerstörungsfreien Prüfungen sowie über die Randbedingungen der Ereignisse selbst zur Verfügung standen, auf die für die vertiefte Analyse zurückgegriffen werden konnte.

Bei der Datenbank OPDE war die Sachlage ähnlich. Für Rohrleitungen wurden zwei bekannte Ereignisse aus US-amerikanischen Kernkraftwerken identifiziert. Ein Ereignis wurde aus einem japanischen Kernkraftwerk herangezogen. Für diese Ereignisse konnten ergänzende Informationen aus der OPDE-Datenbank entnommen werden.

3.2 Identifizierte Fälle

Es wurden die im Folgenden aufgeführten und beschriebenen Fälle für die weitere Auswertung ausgewählt. Wie im **Abschn. 3.1.2** bereits angesprochen, ist die getroffene Auswahl im Hinblick auf die Gesamtheit der Ereignisse als nicht repräsentativ anzusehen. Die Betrachtungen konzentrieren sich vielmehr auf eine Auswahl von Einzelfällen, die alle eine sicherheitstechnische Bedeutung besitzen. Systematische Fehler bei wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen waren aus unseren Auswertungen nicht erkennbar. Hinsichtlich der vorliegenden Schädigungsmechanismen ist teilweise eine Systematik zu erkennen. Bei der nachfolgenden Beschreibung wurde zwischen druckführenden Komponenten und Dampferzeuger-Heizrohren unterschieden.

3.2.1 Druckführende Komponenten

3.2.1.1 Anzeigen in einer Schweißnaht einer Nachkühlleitung im Kernkraftwerk Stade

Die nachfolgenden Informationen zum Ereignis wurden aus /KKS 00/ entnommen.

3.2.1.1.1 Beschreibung

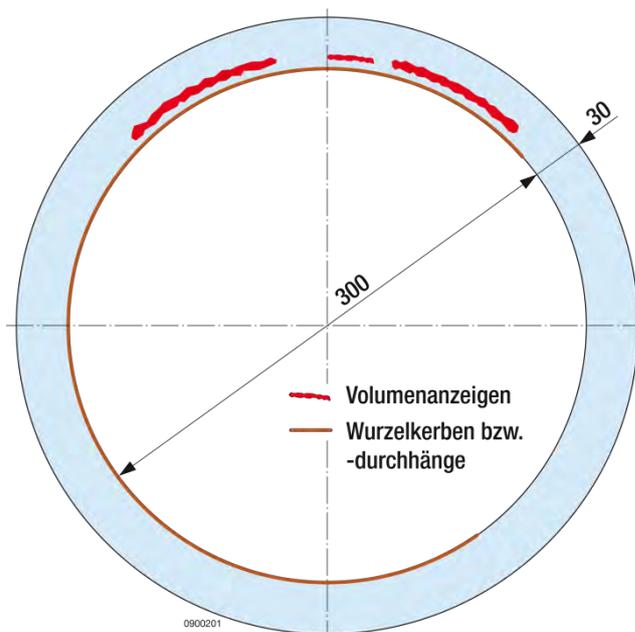
An einer Schweißnaht einer Nachkühlleitung wurden bei wiederkehrenden Prüfungen Anzeigen gefunden. Die betroffene Schweißnaht befindet sich nach dem ersten Bogen in der von der Hauptkühlmittleitung nach unten abzweigenden Nachkühlleitung. Der betroffene Leitungsabschnitt gehört zur Druckführenden Umschließung und liegt somit im vom Reaktordruckbehälter nichtabsperrenbaren Bereich. Die Leitung hat die Nennweite 300 und eine Wanddicke von ca. 30 mm. Die Leitung war aus dem titanstabilisierten austenitischen Stahl X10 CrNiTi 18 9 (1.4541) gefertigt.

Im Zuge der wiederkehrenden Prüfungen 1997 wurde bei Durchstrahlungsprüfungen in der Schweißnaht R5 im Bereich der 12:00-Uhr-Position eine 40 mm lange Anzeige festgestellt. Die Anzeige wurde als Befund eingestuft. Die Decklage auf der äußeren Oberfläche der Schweißnaht war nicht beschliffen. Bei der anschließend durchgeführten Ultraschallprüfung wurden in anderen Nahtbereichen ebenfalls Anzeigen ermittelt. Neben diesen Anzeigen wurden Wurzelkerben bzw. -durchhänge auf der Innenoberfläche festgestellt. Mittels Filmdigitalisierung wurde der Befund aus der Durchstrahlungsprüfung als herstellungsbedingter Schweißlagen-Bindefehler eingestuft.

Im Rahmen einer Sonderprüfung 1999 wurde durch die Decklagenbearbeitung auf der Außenoberfläche die Prüfbarkeit verbessert. Der Befund aus der Durchstrahlungsprüfung 1997 wurde mit verschiedenen Prüftechniken, z. B. Ultraschall-Standardtechnik und -Analysetechnik, überprüft. Aus dieser Überprüfung wurde eine Anzeigenlänge von 160 mm erkannt. Durch eine durchgeführte bruchmechanische Analyse wurde die Anzeige als zulässig bewertet. Der Befundbereich wurde während des nachfolgenden Betriebs mit Potentialsonden-Messtechnik überwacht. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf signifikante Veränderungen des Befundes.

Während der Revision 2000 wurde nochmals eine Sonderprüfung durchgeführt, die zur Zielsetzung hatte, die Tiefe und Ausdehnung der Befunde näher zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Informationen sollte ein Reparatur- oder Austauschkonzept erstellt werden. Aus den vorhergegangenen Prüfungen war bekannt, dass Wurzelkerben bzw. Wurzel-durchhänge auf der Innenoberfläche vorlagen. Diese Ungängen wurden durch Innenbeschleifungen beseitigt. Die durchgeführte Ultraschallprüfung ergab rechts und links der 12-Uhr-Position der Rohrleitung eine langgestreckte Anzeige im Volumen ohne Verbindung zur inneren Oberfläche. Die Gesamtlänge der unterbrochenen An-

zeige betrug ca. 250 mm. Die zusammenhängende Anzeige hatte eine Länge von 220 mm. Der Abstand der Anzeige zur Innenoberfläche erstreckte sich in einem Abstand von ca. 5 bis ca. 9 mm. Das Ligament zwischen den Anzeigen und der Innenoberfläche war somit ca. 5 mm. Die Tiefe (d. h. Breite der Fläche) wurde mit 4 mm angenommen. Die im gleichen Bereich der 12-Uhr Position beidseitig der Wurzel vorgefundenen Anzeigen, deren Ursache auf Wurzel- und Einbrandkerben zurückgeführt wurde, ergaben keinerlei Hinweise auf langgestreckte flächige Fehler, **Bild 3.1**. Es wurde keine Reparatur der Schweißnaht durchgeführt, sondern die gesamte Rohrleitung vom Ab-



zweig der Hauptkühlmitteleitung bis zur ersten Absperrarmatur komplett ausgetauscht.

Bild 3.1 Kernkraftwerk Stade: Anzeigen in der Schweißnaht in der Nachkühlleitung

3.2.1.1.2 Prüfung

Die aufgezeigten Mängel bei der Prüfung hatten ihren Ausgangspunkt eindeutig bei der Beschaffenheit der Oberflächen. Ausgewiesene Befunde aus der Durchstrahlungsprüfung lagen vor. Die äußere Schweißnahtoberfläche musste abgeschliffen werden, damit eine Ankoppelung der Prüfköpfe für die Ultraschallprüfung möglich wurde. Ungängen im Bereich der Wurzelschweißung waren bekannt. Hierdurch war die Prüfbarkeit einschließlich der Auswertbarkeit eingeschränkt, mit der Folge, dass die tatsächlich vorhandenen Fehler auch nach mehreren Prüfungen unterschätzt wurden. Erst durch Bearbeitung der innenliegenden Wurzelschweißung konnten die tatsächlich

vorliegenden Abmessungen der Fehler durch eine erneut durchgeführte Ultraschallprüfung bestimmt werden.

3.2.1.1.3 Integrität

Der Fehler lag im vom Reaktordruckbehälter nichtabsperrbaren Bereich. Ein betriebliches Fehlerwachstum konnte in der Schweißnaht nicht festgestellt werden. Der Umfangfehler, der vermutlich aus der Fertigung stammte, hatte eine stabile Lage. Die stabile Lage wurde durch betriebsbegleitende Messungen bestätigt. Aus diesem Sachverhalt kann abgeleitet werden, dass diese keine direkten Einflüsse auf die Integrität im Bestimmungsgemäßen Betrieb hatten. Außerdem wurde die rechnerisch erforderliche Wanddicke nicht unterschritten.

Durch den Austausch der gesamten Rohrleitung wurde die Fehlerstelle beseitigt. Somit verblieben keine negativen Einflüsse auf die Integrität der Komponente.

3.2.1.2 Rissbefunde am Austrittsstutzen einer Nachkühlarmatur und im anschließenden Rohrleitungsstück im Kernkraftwerk Stade

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 01b/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.2.1 Beschreibung

Im Rahmen der Revision 2001 wurden im Zusammenhang mit einem Befund aus dem Jahr 2000 die beiden Saugleitungen des Nachkühlsystems vom Anschluss an die Hauptkühlmittelleitung bis zur zweiten Absperrarmatur planmäßig ausgetauscht (siehe **Abschn. 3.2.1.1**). Dabei wurden bei der baubegleitenden Oberflächenrissprüfung Rissanzeigen an der für den Wiedereinbau vorgesehenen Erstabsperrarmatur (TH02 S001) auf der absperrbaren Seite festgestellt, **siehe Bild 3.2**. Von den Rissanzeigen betroffen waren die inneren Oberflächen des Stutzens und des Vorschuhendes des geschmiedeten Armaturengehäuses. Ebenfalls wurden im abgetrennten Rohrleitungsteilstück zur Zweitabsperrung hin gleichartige Rissanzeigen gefunden. Die weiteren Nachuntersuchungen ergaben zwei bandartige Rissfelder mit einer axialen Länge von ca. 750 mm, die sich über drei verschiedene Bauteile (Gehäuse, Vorschuhende und Rohr) erstreckten. Dabei entfielen nahezu 400 mm Länge auf den Bereich des Ge-

häuses und des Vorschuhendes. Die beiden Rissfelder lagen im unteren Bereich entlang der 5:00-Uhr und 7:00-Uhr-Position. Sie hatten jeweils eine Breite von ca. 60 mm. Die metallographischen Untersuchungen ergaben Risstiefen zwischen 5 und 8 mm; einzelne Risse waren maximal 12 mm tief. Einige Einzelrisse verliefen auch in die Schweißnähte zwischen dem Stutzen und dem Vorschuhende sowie dem Vorschuhende und dem Rohr. Weitere Anzeigen, orientiert in Umfangsrichtung, wurden in geringerer Anzahl unterhalb des Sitzbereiches im senkrechten Teil des Armaturengehäuses gefunden. Diese Anzeigen waren lineare Anzeigen. Die Ursache der Risse wurde auf chloridinduzierte transkristalline Spannungsrisskorrosion zurückgeführt (**Bild 3.3**). Das Anzeigenmuster deutet darauf hin, dass im unteren Bereich eine Wasserlache gestanden hat, an deren Ufern die Anzeigen vorgefunden wurden. Die Quelle bzw. Art und Zeitpunkt des Eintrages für die vorgefundenen Chloride konnte nicht eindeutig geklärt werden.

Rissbefunde an der Erstabsperrramatur im Saugstrang des Nachkühlsystems (TH)

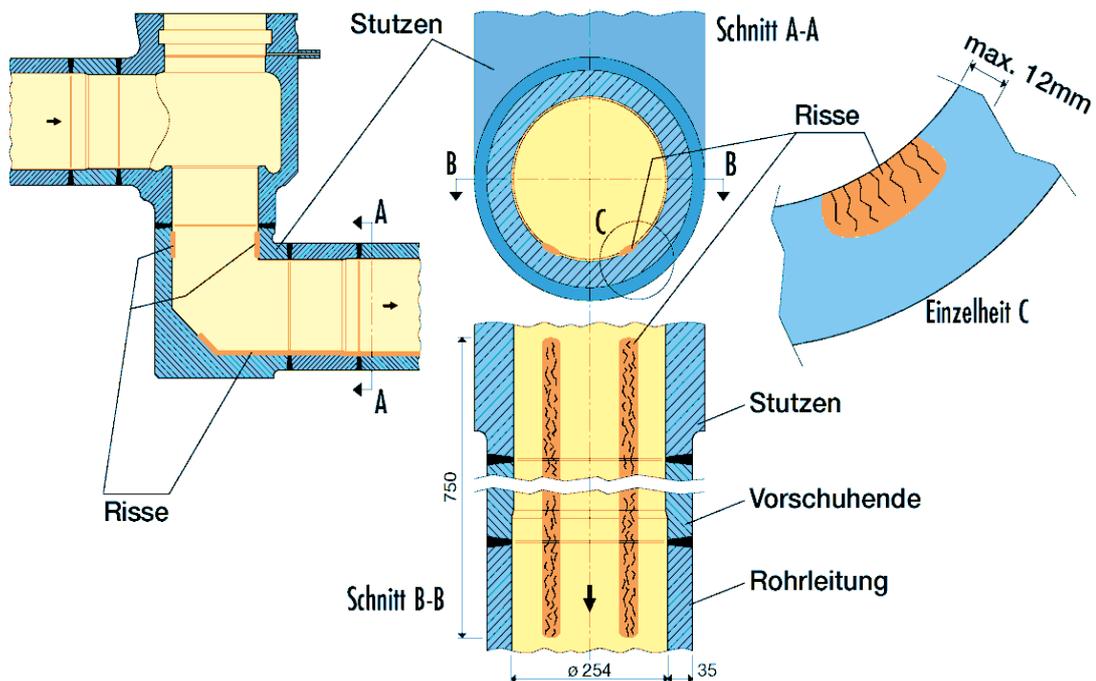


Bild 3.2: Kernkraftwerk Stade: Rissbefunde an der Erstabsperrramatur des Nachkühlsystems

KKS TH02S001

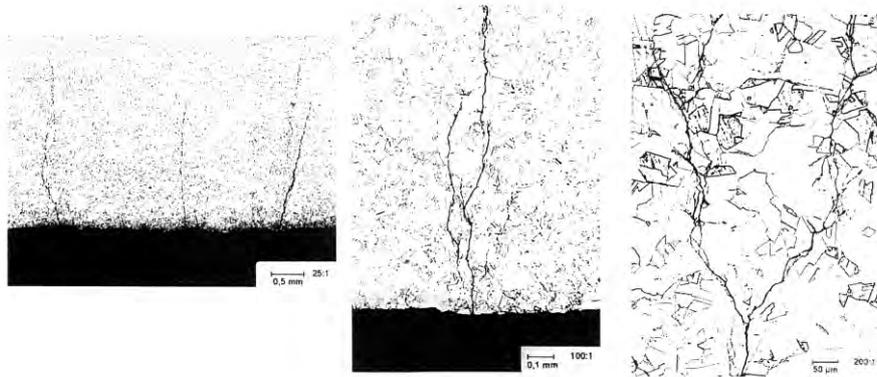


Bild 3.3: Kernkraftwerk Stade: Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen

Das Armaturengehäuse, das Vorschuhende und das Rohrstück waren aus dem titanstabilisierten austenitischen Stahl 1.4541 gefertigt. Die Nennweite betrug 250 mm. Die betroffenen Bauteile wiesen aufgrund der konstruktiven Gestaltung unterschiedliche Wanddicken auf.

Die Rissfelder im unteren Bereich auf der Innenoberfläche der Armatur wurden auf der gesamten Länge ausgefräst. Die anschließende Rohrleitung wurde ausgetauscht. Die Tragfähigkeit der verbliebene Restwanddicke wurde durch eine Spannungsanalyse bestätigt.

3.2.1.2.2 Prüfung

Diese axial ausgerichteten Fehler, verteilt auf mehrere Bauteile, wurden im Zuge einer Austauschmaßnahme zufällig entdeckt. Die betroffenen Grundwerkstoffbereiche waren nicht in den Prüflisten für zerstörungsfreie wiederkehrende Prüfungen enthalten. Inwieweit eine wiederkehrende Prüfung der im Schädigungsbereich vorhandenen Umfangsschweißnähte Hinweise auf die Fehlerbereiche liefern konnten, kann nicht beurteilt werden, weil die Prüfungen nicht auf Fehler quer zu den Umfangsschweißnähten ausgelegt waren. Bis zum Zeitpunkt des Auffindens der Fehler galten diese als unentdeckt.

3.2.1.2.3 Integrität

Die Fehler lagen im vom Reaktordruckbehälter absperrbaren Bereich. Durch Betätigung der Erstabsperrramatur wäre eine mögliche wanddurchdringende Schädigung absperrbar gewesen. Es lagen zwei axial verlaufende ca. 750 mm lange Fehler bestehend aus Rissfeldern über mehrere Bauteile mit teilweise unterschiedlichen Wanddicken vor. Es lag jedoch kein zusammenhängender Fehler vor, und die Fehlertiefen waren unterschiedlich über die gesamte Fehlerlänge verteilt. Ein aktives Fehlerwachstum war bei dem vorliegenden Schädigungsmechanismus nicht ausgeschlossen. Nur unter der Bedingung, dass die Rissfelder unter der Umfangsspannung zu einem führenden Riss zusammengewachsen wären, hätte mit axialen wanddurchdringenden Fehlern gerechnet werden müssen. Mit dem Ausfräsen der axialen Fehlerstellen im Armaturengehäuse und dem kompletten Austausch der Rohrleitung wurde das Problem beseitigt. Die Zulässigkeit der in Ausfräszonen auftretenden örtlich erhöhten Spannungen im Bereich der Restquerschnitte der Wand konnten durch Tragsicherheitsnachweise bestätigt werden. Nach diesen Maßnahmen waren keine negativen Einflüsse mehr auf die Integrität der Komponenten vorhanden.

3.2.1.3 Rissbefunde in einer Mischschweißnaht am Stutzen einer Nachkühlleitung im Kernkraftwerk Biblis A

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 01a/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.3.1 Beschreibung

Im Rahmen einer Sonderprüfung im Jahre 2000 an der Hauptkühlmittelleitung wurden in der Mischschweißnaht am Stutzen zu einer Nachkühlleitung Rissbefunde entdeckt. Der betroffene Stutzen ist im heißen Strang der Hauptkühlmittelleitung zwischen Reaktordruckbehälter und Dampferzeuger, also im nichtabsperribaren Bereich, angeordnet (**Bild 3.4**). Der Innendurchmesser des Abzweigs betrug 236 mm, die Wanddicke 35 mm für den Grundwerkstoff und 5 mm für die Plattierung. Der Stutzen war aus dem ferritischen Stahl 22 NiMoCr 37 und die anschließende Rohrleitung aus dem stabilisierten austenitischen Stahl 1.4550 (X10 CrNiNb 18 9) gefertigt. Die auf die Schweißflanke des ferritischen Stutzens aufgebrachte Pufferung wurde mit einem austenitischen Schweißzusatzwerkstoff ausgeführt. Dabei ist der Schweißzusatzwerk-

stoff überlegiert (ca. 23% Cr, ca. 14% Ni). Der Stutzen hatte ein innenliegendes Wärmeschutzrohr.

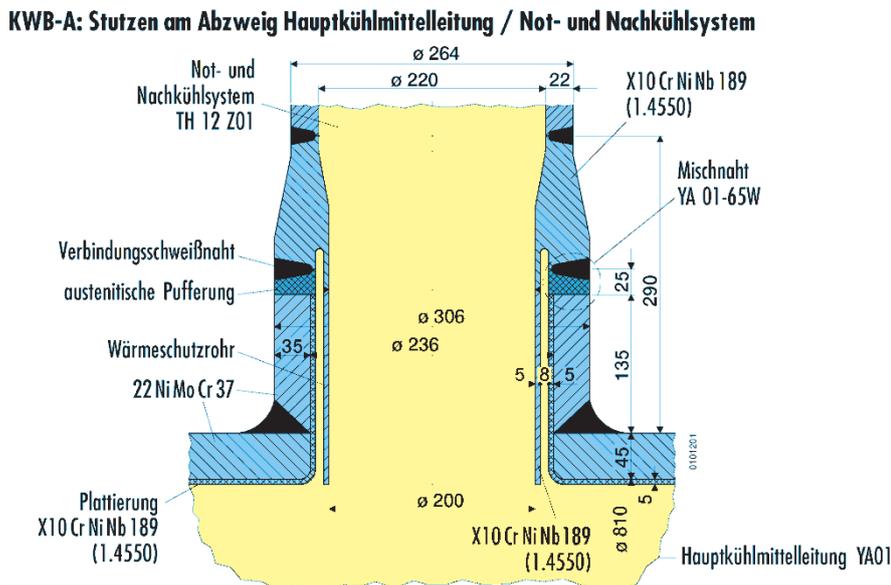


Bild 3.4: Kernkraftwerk Biblis A: Stutzen am Abzweig Hauptkühlmittelleitung zum Not- und Nachkühlsystem

Bei durchgeführten Oberflächenrissprüfungen wurden Anzeigen auf der äußeren Oberfläche umlaufend im Bereich der Mischschweißnaht in einem schmalen Band einer austenitischen Überschweißung des ferritischen Grundwerkstoffes gefunden. Weitere Anzeigen wurden im Volumen nahe der äußeren Oberfläche durch Ultraschallprüfungen festgestellt. Die Untersuchungen ergaben, dass in dem Schweißnahtbereich zwei voneinander unabhängige Anzeigentypen vorlagen.

Die auf der äußeren Oberfläche vorgefundenen Anzeigen wurden vermutlich freigelegt, als die Decklage zum Zwecke der Durchführung von Ultraschallprüfungen im Rahmen der Prüfung austenitischer Schweißnähte im Jahr 1992 abgearbeitet wurde. Da die Fehler sehr klein waren und an der Oberfläche lagen, wurden sie von der Ultraschallprüfung nicht angezeigt. Eine Oberflächenrissprüfung wurde zu diesem Zeitpunkt nicht durchgeführt.

Bei der Sonderprüfung 2000 wurden an der Oberfläche drei größere Anzeigen von der erneut durchgeführten Oberflächenrissprüfung festgestellt. Die dann durchgeführte Ultraschallprüfung mit der Sender-Empfänger-Longitudinalwellentechnik (SEL) ergab Anzeigen, im äußeren Volumen liegend, im Bereich der Flanke an der Schmelzlinie

zwischen ferritischem Grundwerkstoff und austenitischer Pufferung. Es lagen insgesamt drei in Umfangsrichtung verlaufende Anzeigenbereiche vor. Die aus den Ergebnissen der Ultraschallprüfung abgeleiteten Abmessungen waren:

- Anzeigenbereich 1: Länge 190 mm, maximale Tiefe: 7,5 mm,
- Anzeigenbereich 2: Länge: 108 mm, maximale Tiefe: 14 mm über eine Längenerstreckung von ca. 40 mm,
- Anzeigenbereich 3: Länge: 48 mm, maximale Tiefe 16 mm (**Bilder 3.5 und 3.6**).

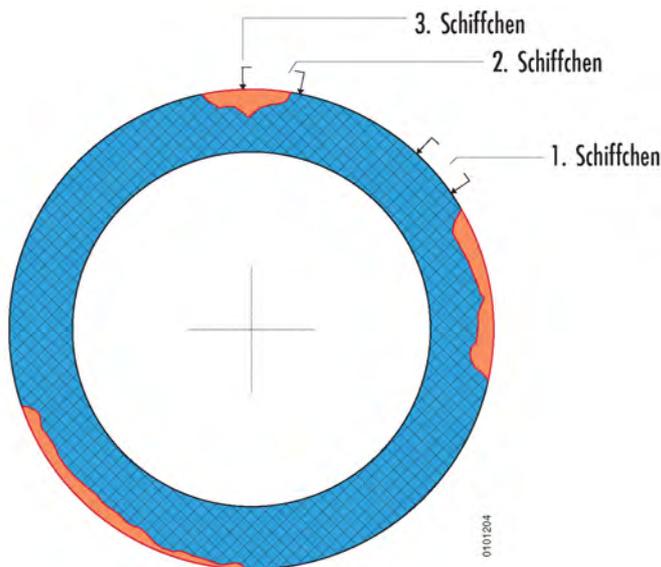


Bild 3.5: Kernkraftwerk Biblis A: Rissbefunde auf dem Umfang der Mischschweißnaht

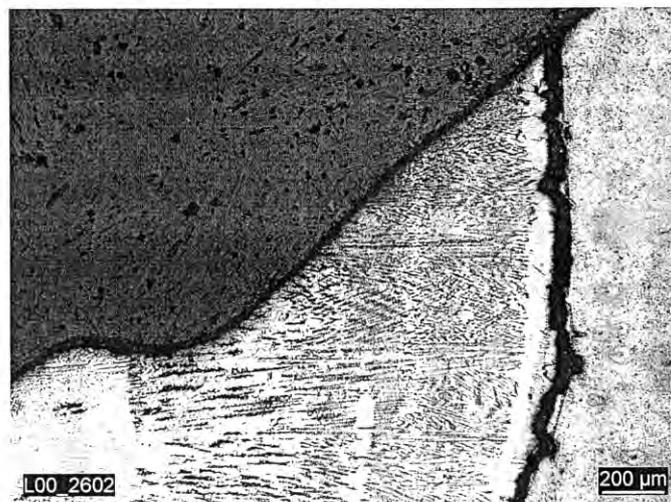


Bild 3.6: Kernkraftwerk Biblis A: Trennung der Pufferung vom ferritischen Grundwerkstoff (Disbondig)

Eine Verbindung zur inneren Oberfläche hatten die Anzeigen nicht. Sie wurden bereits bei der ersten mechanisierten Ultraschallprüfung im Jahre 1992 mit vergleichbaren Abmessungen festgestellt. Damals wurden diese Anzeigen vom durchführenden Prüfpersonal als Störechos aufgrund angenommener Probleme mit dem Prüfmanipulator interpretiert. Sie wurden vom Prüfpersonal in der Annahme des Anstoßens der Prüfköpfe an die Manipulatorfüße als nicht auswertbar eingestuft und entsprechend dokumentiert.

Für die in Umfangsrichtung verlaufenden Anzeigen im Volumen ergab die metallographische Untersuchung rissartige Fehler, die darauf hindeuten, dass sich die Pufferung vom ferritischen Grundwerkstoff gelöst hat („Disbonding“). Die Ablösung der Pufferung soll bereits bei der Fertigung stattgefunden haben, nämlich beim Aufbau der austenitischen Verbindungsschweißnaht und der damit verbundenen Wärmeeinbringung. Hinweise auf betriebliche Risserweiterungen lagen nicht vor.

3.2.1.3.2 Prüfung

Die Anzeigen wurden bereits 1992 erkannt, jedoch durch eine Fehlinterpretation des Prüfers nicht weiter untersucht. Möglicherweise war die Erwartungshaltung des Prüfers, dass die Mischschweißnaht aufgrund der Durchstrahlungsprüfung im Rahmen der Fertigung als fehlerfrei eingestuft worden war und ein solcher Fehler nicht in Erwägung zu ziehen sei. Das vorliegende Messsignal wurde zu diesem Zeitpunkt als Fehlsignal gewertet. Die Auffälligkeiten aus der Prüfung 1992 wurden im Rahmen der Dokumentation für nachfolgende Prüfungen nicht an hinreichend präsender Stelle beschrieben. Diese Fehler wären möglicherweise bis in die Gegenwart unentdeckt geblieben, wenn 2000 keine Sonderprüfungen durchgeführt worden wären. Dabei ist es schwierig zu beurteilen, ob diese Fehler im Volumen im Rahmen von wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen gefunden worden wären, da bei dieser Prüfung der Fokus auf Fehler an den inneren Oberflächen gelegt wird. Von Interesse ist in diesem Zusammenhang auch der Sachverhalt, dass nach dem Abtrag der Schweißraupe zur Ultraschallprüfung 1992 keine Oberflächenprüfung durchgeführt wurde. Diese Prüfung hätte möglicherweise Hinweise auf tiefer liegende Fehler geben können.

3.2.1.3.3 Integrität

Der Fehler lag im vom Reaktordruckbehälter nichtabsperrenden Bereich. Die rechnerisch erforderliche Wanddicke für die Umfangsschweißnaht wurde aufgrund der

relativ geringen Fehlertiefe und der robusten Ausführung des Stutzens nicht unterschritten. Die Integrität der Komponente war daher nicht beeinträchtigt. Ein betriebliches Fehlerwachstum konnte nicht festgestellt werden. Der Fehlerbereich wurde ausgedreht und mittels einer Reparaturschweißung wieder aufgefüllt.

3.2.1.4 Rissbefunde an der Reaktordruckbehälter-Deckelentlüftungsleitung im Kernkraftwerk Brokdorf

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 05a/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.4.1 Beschreibung

Im Kernkraftwerk Brokdorf wurde 2004 aufgrund des gemeldeten Ereignisses im Kernkraftwerk Neckar II eine Überprüfung der gleichartigen Reaktordruckbehälter-Deckel-Entlüftungsleitung YC10 Z301 (**Bild 3.7**) veranlasst. Hierzu wurde zur Vorbereitung einer zerstörungsfreien Prüfung eine Nachbewertung der in der Revision 2003 durchgeführten Durchstrahlungsaufnahmen durchgeführt. Die Nachbewertung ergab eine Anzeige im Grundwerkstoffbereich eines 90°-Rohrbogens hinter der Erstabsperrarmatur YC10 S401, die 2003 neu eingeschweißt worden war. Eine zusätzlich durchgeführte Nachbewertung der Durchstrahlungsaufnahmen im Anschluss an die Fertigung 1985 lässt erkennen, dass bereits vor der Inbetriebnahme eine Anzeige vorhanden war. Im Zuge der Ermittlung der Schadensursache wurden zunächst die digitalisierten Aufnahmen der Durchstrahlungsprüfungen aus den Jahren 1985, 2003 und 2004 bewertet und miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass die Anzeige 1985 keinen Risscharakter hatte und einer herstellungsbedingten Oberflächenanzeige entsprach. 2003 lagen Änderungen im Verlauf der Anzeige vor. 2004 konnte eine Vergrößerung der Länge der Anzeige von ursprünglich ca. 9 auf ca. 11 mm festgestellt werden. Die Farbeindringprüfung zeigte eine unter ca. 45° zur Rohrbogenachse verlaufende Anzeige auf der Innenoberfläche des Rohrbogens (**Bild 3.8**). Die metallographischen und fraktographischen Untersuchungen ergaben einen von der Innenoberfläche des Bogens startenden Fehler mit einer gemessenen Anrisstiefe von 3,7 mm bei einer Wanddicke von 5,3 mm und eine Länge von ca. 11 mm (**Bild 3.9**). Die Schadensursache ließ sich auf einen im Betrieb gewachsenen Schwingriss infolge einer Anregung durch die Leitung zurückführen. Fehlerlage und Ausbildungsform des Fehlers deuten auf eine Biege-/Torsionsbeanspruchung hin.

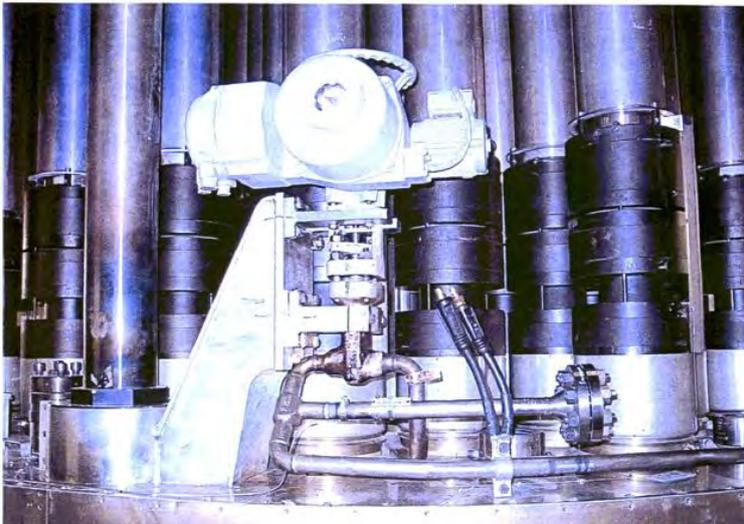


Bild 3.7: KKW Brokdorf: Reaktordruckbehälterdeckel-Entlüftungsleitung

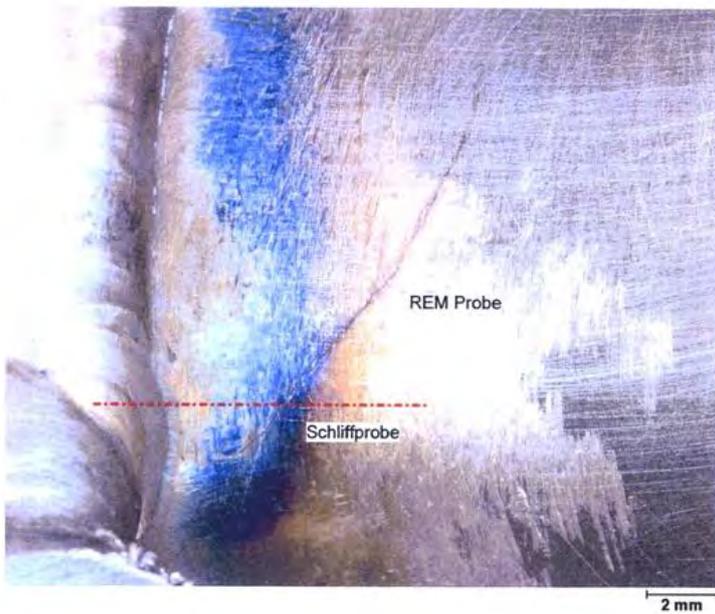


Bild 3.8: KKW Brokdorf: Ansicht des Fehlerverlaufs ca. 45° zur Rohrachse

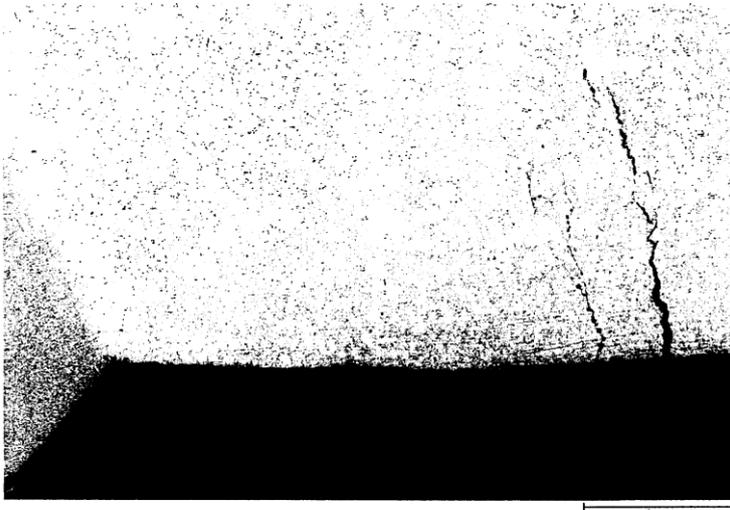


Bild 3.9: KKW Brokdorf: Rissbefund im Grundwerkstoff

Die betroffene Entlüftungsleitung hat die Nennweite DN 25 und verbindet den Reaktordruckbehälter mit dem Druckhalter-Abblasebehälter, mit dem Anlagenentlüftungssystem des Reaktorgebäudes und mit dem Druckhalter. Die schadhafte Stelle lag unmittelbar hinter dem motorbetriebenen Absperrventil im vom Reaktordruckbehälter absperrbaren Bereich. Die Leitung war aus dem titanstabilisierten austenitischen Stahl 1.4541 gefertigt. Der betroffene Rohrbogen wurde gegen einen neuen ausgetauscht.

3.2.1.4.2 Prüfung

Der Fehler wurde im Rahmen einer Übertragbarkeitsprüfung aufgrund einer Leckage in einer anderen Anlage entdeckt. Die sukzessiven Nachbewertungen der über mehrere Jahre erzielten Prüfergebnisse zeigten eine Zunahme der Abmessungen des Fehlers. Es ist jedoch anzumerken, dass der Startpunkt auf eine herstellungsbedingte Oberflächenanzeige zurückgeführt werden konnte und zu diesem Zeitpunkt noch keinen Risscharakter hatte. Dieser Fehler wurde bereits bei früheren Prüfungen beobachtet, lag jedoch unterhalb der Registrierpflicht.

3.2.1.4.3 Integrität

Dieser Fehler lag im vom Reaktordruckbehälter absperrbaren Bereich. Eine mögliche Schädigung mit Wanddurchdringung wäre durch eine motorbetriebene Armatur absperrbar gewesen. Der Fehler war während des Betriebs infolge Schwingungen ge-

wachsen. Das Wachstum war allerdings gering. Der Umfangsfehler lag im Übergang eines Bogens zum Geradrohr im Bereich einer Schweißnaht. An dieser Stelle ist aufgrund von Schweißeigenstress, Biegemomenten und Schwingungen mit einer Konzentration von Spannungen zu rechnen. Langfristig wäre bei einer Nichtentdeckung eine Leckagebildung oder ein Rundabriss nicht auszuschließen gewesen. Durch den Austausch der fehlerhaften Stelle wurde das Problem beseitigt und somit sind keine negativen Einflüsse auf die Integrität der Komponente vorhanden.

3.2.1.5 Befunde an Speisewasserstutzen der Dampferzeuger im Kernkraftwerk Unterweser

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 03b/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.5.1 Beschreibung

Im Zuge der planmäßigen wiederkehrenden Prüfungen 2002 wurden registrierpflichtige Anzeigen ausgehend von der Innenoberfläche des Speisewasserstutzens am Dampferzeuger 10 festgestellt (**Bild 3.10**). Die Anzeige befand sich im Grundwerkstoff der drucktragenden Wand am Beginn der Ausrundung zum Anschluss an das Wärmeschutzrohr. Die mit dem mechanisierten Ultraschallprüfverfahren detektierten Anzeigen lagen nahezu symmetrisch zur 6:00-Uhr-Position in einem Winkelband von etwa 80° und hatten eine Gesamtlänge von 291 mm. Der Längsbereich der Anzeigen war von der 6:00 Uhr-Position nach beiden Seiten hin nahezu gleichmäßig verteilt. Der Vergleich mit den Ergebnissen der 1995 durchgeführten wiederkehrenden Ultraschallprüfung ergab eine deutliche Vergrößerung der Anzeigen. Daraufhin wurden die Speisewasserstutzen der drei übrigen Dampferzeuger mit dem Ultraschallverfahren überprüft. An den Dampferzeugern 20 und 40 wurden ebenfalls registrierpflichtige Anzeigen im gleichen Bereich vorgefunden. Die maximalen Echohöhen entsprachen einer Nut von 2 mm, die der Tiefenerstreckung der Fehler gleichgesetzt werden kann (Registriergrenze: Nut 2 mm – 6 dB). Die ermittelten Längenerstreckungen betrugen beim Dampferzeuger 20 ca. 156 mm und beim Dampferzeuger 40 ca. 204 mm. Auch hier zeigte der Vergleich mit den Ergebnissen vorangegangener wiederkehrender Ultraschallprüfungen eine Vergrößerung der Anzeigen. Der Dampferzeuger 30 war anzeigenfrei. Die ergänzend durchgeführte Durchstrahlungsprüfung bestätigte die Anzeigen. Die anschließend durchgeführte Ultraschall-Analysemessung mit Rissspitzen-

Signaltechnik und Gruppenstrahler-Prüfköpfen zur Ermittlung der Tiefenerstreckung der Anzeigen ergab folgende maximale Werte: Dampferzeuger 10 und 20: Tiefe: 8 mm, Dampferzeuger 40: Tiefe: 5 mm. Die Längenerstreckungen der Anzeigen wurden in etwa bestätigt.

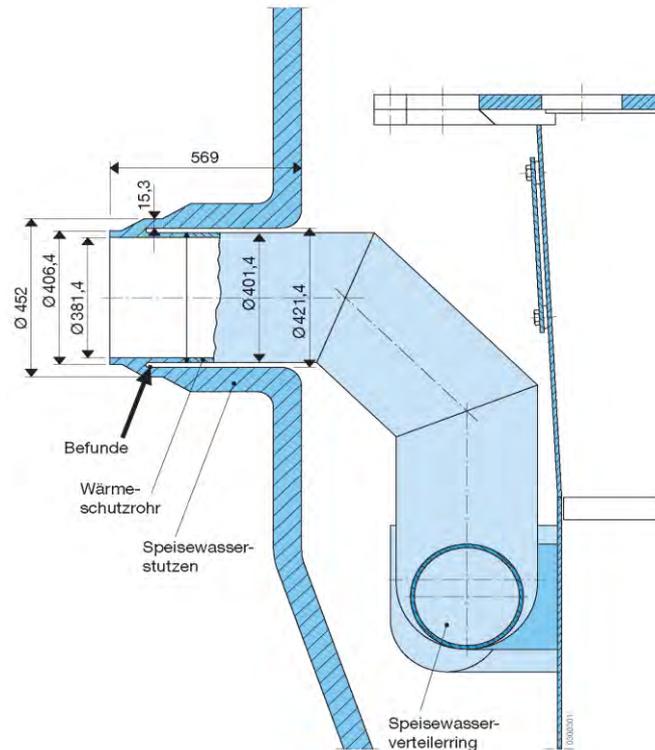


Bild 3.10: Kernkraftwerk Unterweser: Befunde in Speisewasserstutzen der Dampferzeuger

Die Speisewasserstutzen sind aus dem Werkstoff 22 NiMoCr 3-7 und die Wärmeschutzrohre aus dem Werkstoff 15 Mo 3 gefertigt. Der Innendurchmesser des Stutzens beträgt 381,4 mm. Die Wanddicke der drucktragenden Wand an der anzeigenbehafteten Stelle beträgt 15,3 mm.

Aufgrund der Anzeigensituation wurde ein 120 mm breiter Ring im Anschlussbereich des Wärmeschutzrohres am Stutzen des Dampferzeugers 10 herausgetrennt. Im Bereich des Übergangs zur Ausrundung, also im Anzeigenbereich wurden Korrosionsmulden in Umfangsrichtung kettenförmig in einer Reihe, zum größten Teil ineinander gewachsen, gefunden (**Bild 3.11**). Teilweise waren auch die Korrosionsmulden unterbrochen und zwischen einzelnen Korrosionsmulden intakte Grundwerkstoffbrücken vorhanden. Die fraktographischen Untersuchungen ergaben deutlich geringere Fehlertiefen gegenüber der Ultraschall-Analysemessung. Die Überschätzung der Risstiefen

wird dadurch erklärt, dass die Methode der Analysemessung für die vorliegende Prüfaufgabe vor deren Anwendung nicht ausreichend durch Vergleichsmessungen an Testkörpern abgesichert und qualifiziert worden war. Die tatsächlich vorgefundene Fehlertiefe war 2,3 mm bei einer Wanddicke des Stutzens von 15,3 mm.

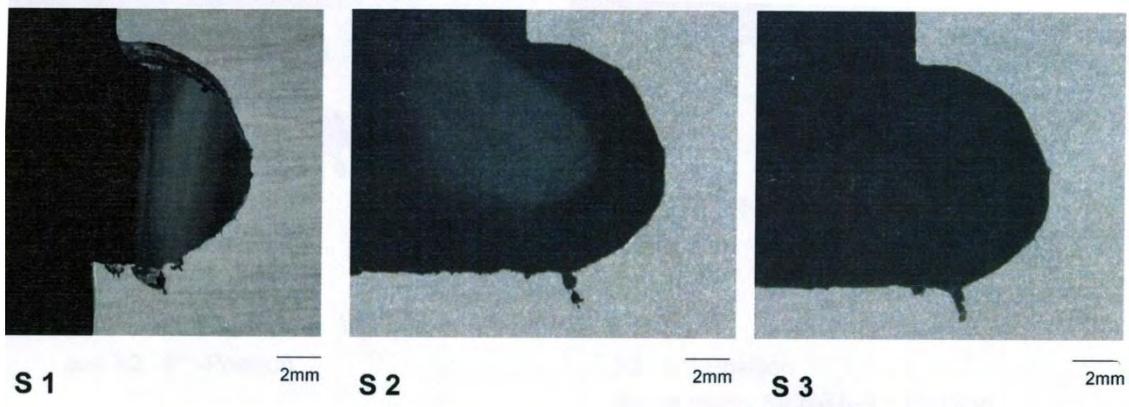


Bild 3.11: Kernkraftwerk Unterweser: Befund in der druckführenden Wand des Speisewasserstutzens

Die Schäden wurden auf Stillstandskorrosion im Zusammenwirken mit dehnungsinduzierter Risskorrosion zurückgeführt. Die Dehnungen traten infolge der örtlichen Spannungserhöhung durch transiente Vorgänge bei An- und Abfahrvorgängen auf. Dabei wurde die Magnetitschutzschicht teilweise zerstört und hierdurch im anschließenden Stillstand ein Korrosionsprozess unter Luftzufuhr ermöglicht. Ein aktives Risswachstum konnte nicht festgestellt werden. Dieses konnte dadurch belegt werden, dass in den Korrosionsmulden keine Risspitzen vorgefunden wurden.

Zur Verhinderung hoher Spannungen wurde die Fahrweise bei Anfahr- und Abfahrvorgängen geändert, wodurch die maximalen Temperaturdifferenzen reduziert wurden. Zudem wurde die Nasskonservierung zur Sauerstoffminimierung auch für relativ kurze Anlagenstillstände eingeführt. Die fehlerbehafteten Stutzenringe einschließlich des Wärmeschutzrohres wurden herausgetrennt und durch neue Bauteile ersetzt.

3.2.1.5.2 Prüfung

Die sich im Grundwerkstoff befindlichen Fehler waren seit der letzten wiederkehrenden Prüfung bekannt. Die tatsächliche Fehlertiefe wurde bei der Prüfung zum Zeitpunkt des Ereignisses überschätzt. Dies lag daran, dass die Auswertetechnik nicht ausreichend an Testkörpern qualifiziert worden war. Eine Überschätzung der Fehlergeometrie kann

im Allgemeinen dazu führen, dass größere Schäden an Komponenten angenommen werden, als tatsächlich vorhanden sind. Dies kann einen Einfluss auf die Bewertung der Prüfergebnisse im Hinblick darauf haben, ob ein Fehler belassen werden kann, oder ob andere Maßnahmen wie z. B. Reparaturen oder ein Austausch der betroffenen Komponente oder des Bauteils ergriffen werden müssen.

3.2.1.5.3 Integrität

Die Fehler lagen im Bereich der Ausrundung im Grundwerkstoff von insgesamt drei Speisewasserstutzen. Diese Bereiche sind ausgewiesene Bereiche für Spannungskonzentrationen, bei denen bei bestimmten Betriebsfällen, z. B. bei An- und Abfahrvorgängen, hohe Spannungen infolge Temperaturtransienten auftreten können. Die vorgefundenen Fehler traten auf etwa 80° über dem Umfang auf. Die Fehlerstellen waren teilweise unterbrochen. Die Fehlertiefen waren mit maximal 2,3 mm bei 15,3 mm Wanddicke relativ gering. Die Fehlertiefen waren unterschiedlich über die gesamten Fehlerlängen verteilt. Es konnte festgestellt werden, dass kein aktives Fehlerwachstum zum Zeitpunkt der Entdeckung vorlag. Es kann angenommen werden, dass nach einem spannungs- bzw. dehnungsunterstützten Korrosionsprozess das Fehlerwachstum zum Stillstand kam. Gründe hierfür sind nicht bekannt. Aus dieser Sachlage konnten keine direkten Einflüsse auf die Integrität abgeleitet werden. Durch den Austausch der fehlerhaften Stellen gegen neue Stutzenteilstücke wurden die Schäden beseitigt.

3.2.1.6 Risse in austenitischen Armaturengehäusen infolge chlorid-induzierter transkristalliner Spannungsrisskorrosion im Kernkraftwerk Krümmel

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 08b/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.6.1 Beschreibung

Im Kernkraftwerk Krümmel wurden nach dem Auffinden von Rissen in Rohrleitungen der Stopfbuchsabsaugung erstmals innere zerstörungsfreie Oberflächenprüfungen an den zugehörigen austenitischen Armaturengehäusen (**Bild 3.12**) vorgenommen. Dabei wurden nach der Reinigung der Oberflächen bei Prüfungen mit dem Farbeindring-

verfahren Anzeigen auf den Innenoberflächen der Gehäuseköpfe von drei Armaturen der Reaktorwasserreinigung und des Nachkühlsystems festgestellt. Die Anzeigen in diesen Gehäusen waren teilweise verastelt in Form von Anzeigenfeldern ohne ausgeprägte Hauptausrichtung, teilweise lagen punktförmige Anzeigen vor. Die Anzeigen lagen im Bereich der Dichtungspartie der Armaturengehäuse (**Bild 3.13**). Diese Armaturen haben einen selbstdichtenden Deckelverschluss (sogenannter Bredtschneider-Verschluss, siehe **Bild 3.12**) im Gehäusekopf, d. h. Verschlussstücke mit einer Doppeldichtung, die den Innendruckraum des Gehäuses nach außen hin abdichtet. Die volle Dichtkraft wird erst durch den betrieblichen Innendruck (druckkraftaktivierte Dichtung) aufgebracht. Konstruktionsbedingt können Dichtungsleckagen während Phasen geringen Innendrucks, z. B. während An- und Abfahrvorgängen, auftreten. Durch eine Absaugleitung werden eventuell auftretende Leckagen in der ersten den Druckraum abgrenzenden Dichtung aus dem Zwischenraum abgesaugt. Die Stopfbuchsichtungen in den betroffenen Armaturen bestanden ursprünglich aus asbesthaltigem Packungs- und Dichtungsmaterial.

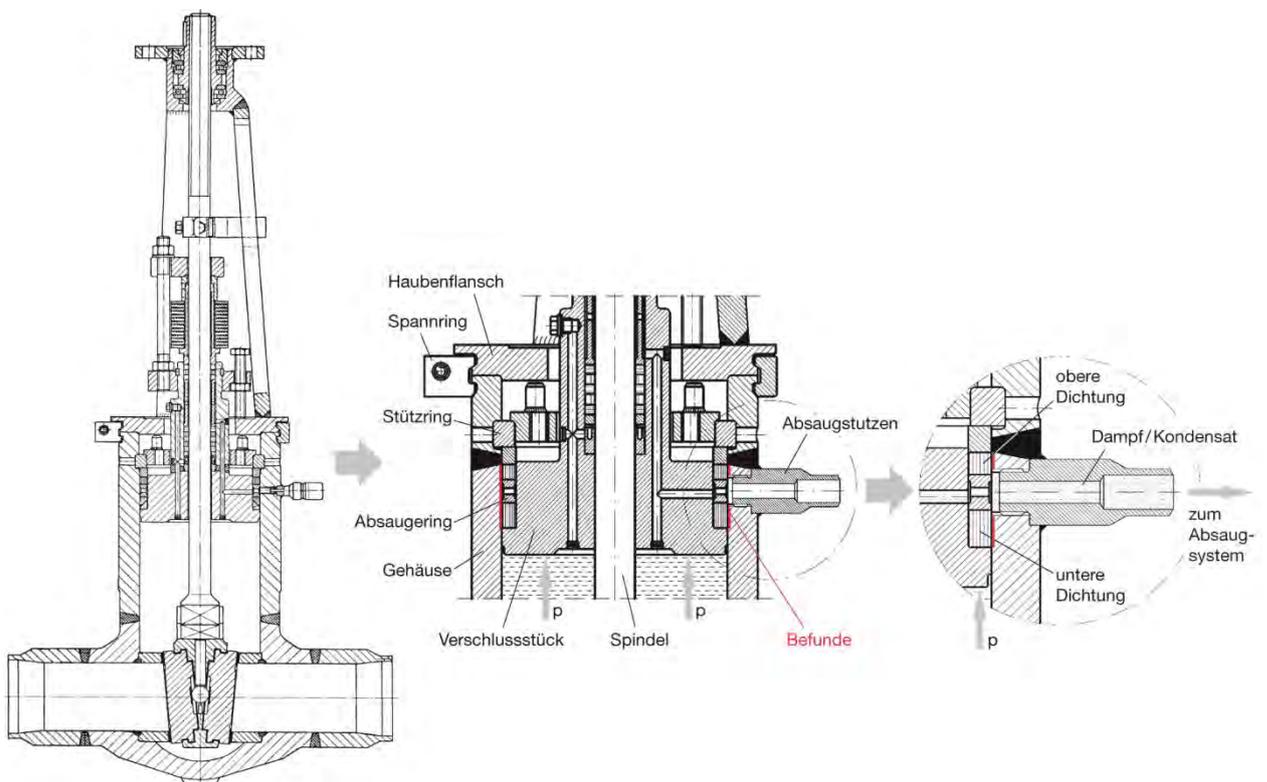


Bild 3.12: Armatur mit Bredtschneider-Verschluss

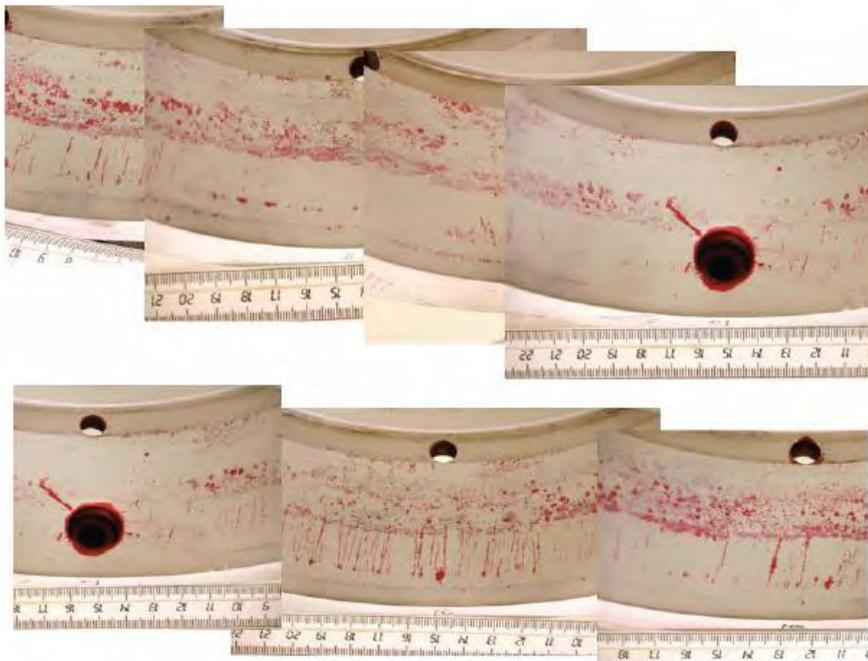


Bild 3.13: Befunde auf der Innenseite eines Armaturengehäuses im Bereich der Dichtung

Aufgrund der vorliegenden generischen Bedeutung der Anzeigen hat der Betreiber eine Übertragbarkeitsprüfung vorgenommen. Diese Überprüfung ergab 37 anzeigen-behaftete Armaturengehäuse. Neben den Gehäusen waren auch die Verschlussstücke betroffen. Die Armaturengehäuse waren hauptsächlich aus dem niobstabilisierten austenitischen Stahl 1.4550 oder aus dem gleichartigen Gussstahl 1.4552 hergestellt. Die Verschlussstücke sind ebenfalls aus diesem austenitischen Stahl hergestellt. Die betroffenen Armaturen sind Bestandteile verschiedener Systeme: Reaktorwasserreinigung (TC), Nachkühlung (TH), Nachspeisung (TM), Einspeisung (TJ) und Absaugung (RY).

Die exemplarisch an einem stark betroffenen Armaturengehäuse durchgeführten metallographischen und fraktographischen Untersuchungen ergaben auf der Innenoberfläche des Gehäuses eine Vielzahl von axialen Rissen, die sich in einem Band über den gesamten Umfang des Gehäuses in Höhe der Bohrung der Stopfbuchsabsaugung konzentrierten. In einem bandartigen Bereich, 10 mm oberhalb der Bohrung der Stopfbuchsabsaugung, wurde eine Vielzahl von Stellen mit Lochkorrosion gefunden. Zudem wurden in diesem Band einige axiale Risse vorgefunden. Die Rissverläufe waren transkristallin. Bei der spektroskopischen Analyse der Korrosions-

produkte konnten u. a. Chloride nachgewiesen werden. Die Ursache für die vor-
gefundene Lochkorrosion und die Risse wird auf chloridinduzierte Korrosion bzw.
transkristalline Spannungsrisskorrosion zurückgeführt (**Bild 3.14**).



Bild 3.14: Transkristalline Rissbefunde im untersuchten Armaturengehäuse

Die festgestellten Fehlertiefen lagen in den Gehäusen meistens unter 1 mm und er-
reichten in wenigen Fällen maximal 28 mm. An den Armaturen wurden zur Wieder-
herstellung des spezifizierten Zustandes Reparaturmaßnahmen durchgeführt. Die Ge-
häuse wurden bis zur Anzeigenfreiheit ausgedreht, ausgeschliffen bzw. örtlich ausge-
muldet. Es wurden Auftragsschweißungen mit dem Werkstoff 1.4539 vorgenommen.
Für die Verschlussstücke und für die Absaugestutzen wurden neben Sanierungen auch
Austauschmaßnahmen durchgeführt. Die Funktion der Armaturen war durch die
Rissbefunde im Dichtungsbereich nicht beeinträchtigt.

3.2.1.6.2 Prüfung

Die Fehler wurden nicht im Zuge von wiederkehrenden Prüfungen, sondern aufgrund
einer Übertragbarkeitsprüfung entdeckt. Zuvor waren an den Leckageabsauge-
leitungen zur Aufnahme von Leckagen an Stopfbuchsen in Armaturen Rissbefunde de-
tektiert worden. Dies führte dazu, dass die zugehörigen Armaturengehäuse ebenfalls

untersucht wurden. Die betroffenen Bereiche der Armaturengehäuse werden in der Regel im Zuge von Inspektionsarbeiten einer inneren Sichtprüfung unterzogen. Die betroffenen Bereiche waren nicht in den Prüfplänen für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen enthalten. Die Bedeutung liegt in der großen Anzahl der betroffenen Armaturengehäuse und stellt somit ein generisches Problem dar.

3.2.1.6.3 Integrität

Die betroffenen Armaturen lagen im vom Reaktordruckbehälter absperrbaren Bereich. Teilweise handelte es sich jedoch um sicherheitstechnisch wichtige Armaturen. Die Fehler lagen in den Dichtungsbereichen der Gehäuse und in den Verschlussstücken der Dichtungen. In den Gehäusebereichen kann von folgendem Beanspruchungszustand ausgegangen werden: Der Gehäusebereich der Dichtung wird nicht direkt mit dem Innendruck des Systems beaufschlagt, da die erste Dichtung diesen Raum abschließt. Die axialen Spannungen und die Umfangsspannungen aus dem Innendruck klingen in Abhängigkeit vom Abstand von der ersten Dichtung ab. Überlagerungen sind jedoch aus den axialen Spannungen, verursacht durch die Dichtungskräfte im Gehäusekopf vorhanden. Aus den Stellkräften des aktiven Teils der Armatur sind ebenfalls noch Spannungen abzuleiten. Ein aktives Fehlerwachstum war bei dem vorliegenden Schädigungsmechanismus nicht ausgeschlossen. Die überwiegende Anzahl der Gehäuse hatte allerdings nur Fehler mit geringer Tiefen- und Längenerstreckung und hatte somit keinen Einfluss auf die Integrität. Bei wenigen Armaturengehäusen lagen jedoch auch tiefere Fehler vor. Aufgrund der vorliegenden Lage und Art der Fehler war mit einem vollständigen Abriss des Gehäusekopfes nicht zu rechnen. Die Fehlerbereiche der Gehäuse wurden ausgedreht und durch Auftragsschweißungen wieder instand gesetzt.

3.2.1.7 Unentdeckte Umfangsrisse im Schweißnahtbereich einer Treibwasserschleife im Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor Fukushima Daini, Block 3 (Japan)

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /JNE 06/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.7.1 Beschreibung

Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung 2005 wurde eine Ultraschallprüfung im Bereich einer Schweißnaht in einer der beiden Treibwasserschleifen durchgeführt (**Bild 3.15**). Die Ultraschallprüfung erfolgte von der Außenseite aus. Zur Auffindung von möglichen auf der Innenseite des Rohres liegenden oberflächennahen Fehlern wurde mit der Prüftechnik der sekundären Kriechwellen geprüft. Bei dieser Prüfung wurde ein in Umfangsrichtung verlaufender Befund mit einer Länge von ca. 17 mm und einer Tiefe von ca. 5,8 mm in einem Bereich einer Verbindungsschweißnaht (Umfangsnah) der Treibwasserschleife festgestellt (**Bild 3.16**). Der Außendurchmesser des betroffenen Rohres betrug 600 mm, die Wanddicke 38 mm. Der verwendete Stahl war vom Typ: 316 (entspricht dem nichtstabilisierten austenitischen Stahl X5 CrNiMo 17 12 2). Die betroffene Stelle lag in einem vom Reaktordruckbehälter nichtabsperrbaren Bereich.

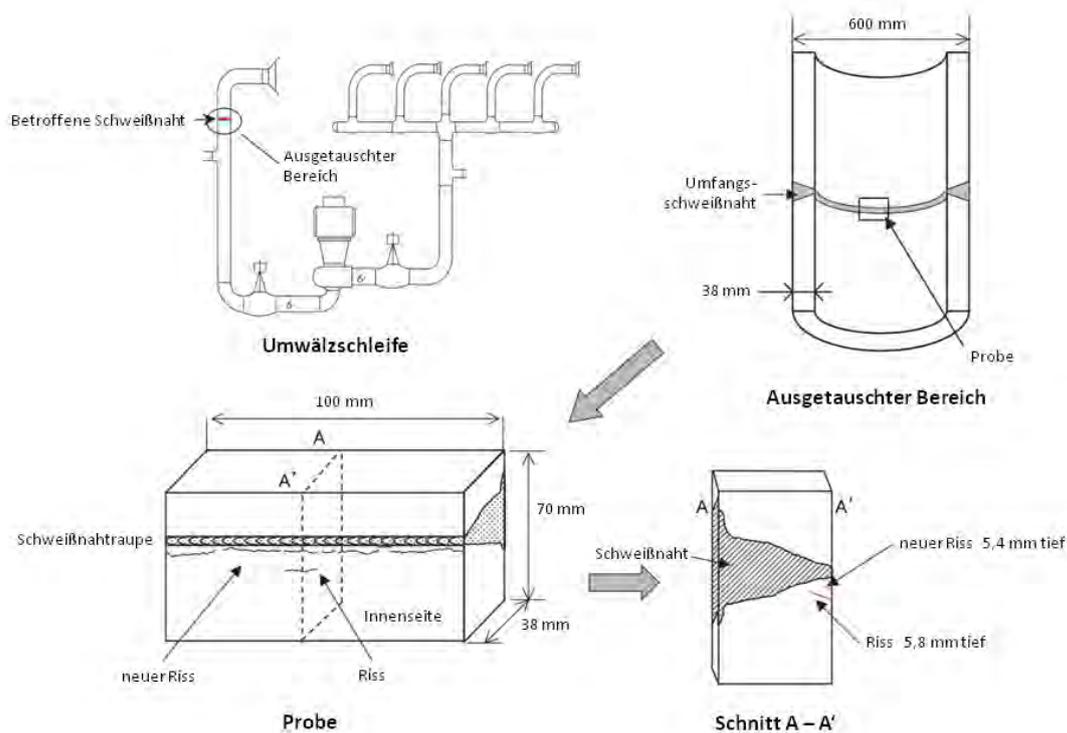


Bild 3.15: Fukushima Daini, Block 3: Lage der Rissbefunde im Schweißnahtbereich der Umwälzschleife

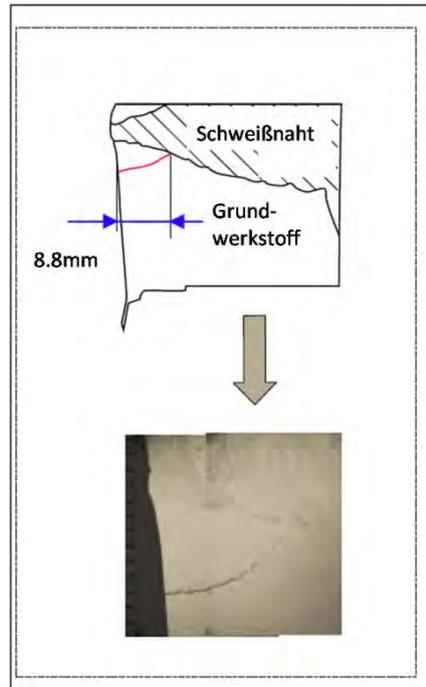


Bild 3.16: Fukushima Daini, Block 3: Rissbefunde im Schweißnahtbereich der Umwälzschleife

Eine sicherheitstechnische Abschätzung des Befundes ergab, dass die Integrität der Rohrleitung sichergestellt war. Trotzdem wurde das betroffene befundbehaftete Rohrstück im Januar 2006 ausgetauscht und die Untersuchungen zur Schadensursache eingeleitet. Hierfür wurde ein Segment aus dem betroffenen Rohrleitungsstück zur Untersuchung des Befundes herausgeschnitten. Der Befund konnte eindeutig als Riss identifiziert werden. Es wurde bei diesen Untersuchungen jedoch noch ein weiterer Riss unmittelbar neben der Schweißnaht festgestellt. In der untersuchten Probe war der Riss 5,4 mm tief. Weitere Untersuchungen ergaben, dass sich dieser Riss 360° umlaufend erstreckte und eine maximale Tiefe von 8,8 mm aufwies. Es konnte festgestellt werden, dass eine Fehlinterpretation der Ergebnisse der Ultraschallprüfung im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung erfolgt sein muss. Der umlaufende Befund wurde ursprünglich als Wurzelfehler in der Schweißnaht interpretiert.

Die Untersuchungen zur Schadensursache ergaben interkristalline Spannungsrisskorrosion. Mögliche Ursache ist die Empfindlichkeit von nichtstabilisierten austenitischen Stählen gegenüber interkristalliner Spannungsrisskorrosion bei höherem Kohlenstoffgehalt.

3.2.1.7.2 Prüfung

Bei diesem Ereignis wurde das ganze Ausmaß des Fehlers nicht bei der zerstörungsfreien wiederkehrenden Prüfung im Einbauzustand gefunden, sondern erst nach dem Ausbau des Rohrstücks und bei den anschließend durchgeführten Untersuchungen. Die Ultraschallprüfungen ergaben für den zu prüfenden Schweißnahtbereich ein Signalmuster, das zur Auswertung herangezogen wurde. Ein Fehler kleiner Ausdehnung konnte identifiziert werden. Das Signal vom umlaufenden Fehler wurde als Formanzeige der Schweißnahtwurzel interpretiert, obwohl ein Abstand zwischen beiden Stellen vorlag. Das kann daran gelegen haben, dass für den Prüfer die Lage der Schweißnaht nicht hinreichend genau bekannt war und er mit Ungängen im Bereich der Schweißnahtwurzel gerechnet hatte. Er konnte hierbei nicht unterscheiden, ob die Signale aus dem Bereich der Mitte der Schweißnahtwurzel oder aus dem Bereich unmittelbar neben der Schweißnaht stammten. Der Prüfer neigte anscheinend dazu, der Interpretation der Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung aus der Fertigungsphase, nach der das Signal durch Ungängen der Schweißwurzel verursacht wird, zu folgen. Diese Annahme des Prüfers wurde dadurch bestärkt, dass sich die Anzeige der neuen Prüfung nicht signifikant von der der vorherigen und der vorvorherigen Prüfungen unterschied. Außerdem entspricht es der bisherigen Erfahrungen, dass die Ausbildung eines vollständigen Umfangsrisses eher unwahrscheinlich ist, weshalb ein während des Betriebs gewachsener Riss über den gesamten Umfang nicht erwartet wurde. Es kann festgestellt werden, dass eine Fehlinterpretation der Ergebnisse der Ultraschallprüfung im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung 2005 erfolgt sein muss. Obwohl das Ultraschallsignal auf dem gesamten Rohrumfang durch die angewandte Prüftechnik erfasst wurde, kam es aufgrund von Mehrdeutigkeiten zu dieser Fehlinterpretation.

3.2.1.7.3 Integrität

Der Fehler lag in der Wärmeeinflusszone einer Rohrleitungsschweißnaht im Bereich der druckführenden Umschließung. Der Fehler erstreckte sich nahezu über den gesamten Umfang des Rohres. Die Fehlertiefe betrug beim untersuchten Rohrstück 8,8 mm bei einer Wanddicke von 38 mm. Ein aktives Risswachstum im Bereich der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht kann bei dem vorliegenden Schädigungsmechanismus nicht ausgeschlossen werden. Bei dem vorliegenden Sachverhalt kann daher unter der Annahme von Fehlerwachstum und einer Nichterkennung durch zer-

störungsfreie wiederkehrende Prüfungen ein Rundabriss der Rohrleitung im Bereich der druckführenden Umschließung nicht ausgeschlossen werden. Ein Einfluss auf die Integrität war gegeben. Das Problem wurde durch den Austausch der fehlerhaften Stelle beseitigt.

3.2.1.8 Umfangsrisse in Mischschweißnähten von Stutzen des Druckhalters in dem Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor Wolf Creek (USA)

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /NRC 06/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.8.1 Beschreibung

Im Herbst 2006 wurden im Rahmen von vorgezogenen wiederkehrenden Prüfungen an mehreren Stutzen des Druckhalters zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Dies waren die Stutzen zur Volumenausgleichsleitung sowie zur Abblase- und Sicherheitsventilleitung. Die Prüfungen waren zur Vorbereitung der Overlay-Schweißung auf der Außenoberfläche für Mischschweißnähte erforderlich. Die Overlay-Schweißung war behördlich aufgrund früherer Befunde an vergleichbaren Mischschweißnähten als eine mögliche Abhilfemaßnahme verfügt worden. Bei der Prüfung des Volumens wurden an allen drei Mischschweißnähten Anzeigen vorgefunden. Die bei der Ultraschallprüfung festgestellten Anzeigen lagen nahe der inneren Oberfläche oder hatten Verbindung zu ihr. Es wurden folgende Anzeigen, denen rissartige Fehler zugeordnet werden können, festgestellt:

- Druckhalterstutzen zur Volumenausgleichsleitung (**Bild 3.17**):
 - ca. 130 mm lang und ungefähr 31% der Wanddicke tief,
 - ca. 70 mm lang und 25% der Wanddicke tief,
 - ca. 25 mm Oberflächenanzeigen.
- Druckhalterstutzen zur Abblaseleitung (**Bild 3.18**):
 - ca. 290 mm lang und ungefähr 26% der Wanddicke tief.
- Druckhalterstutzen zur Sicherheitsventilleitung (**Bild 3.19**):
 - ca. 95 mm lang und ungefähr 23% der Wanddicke tief.

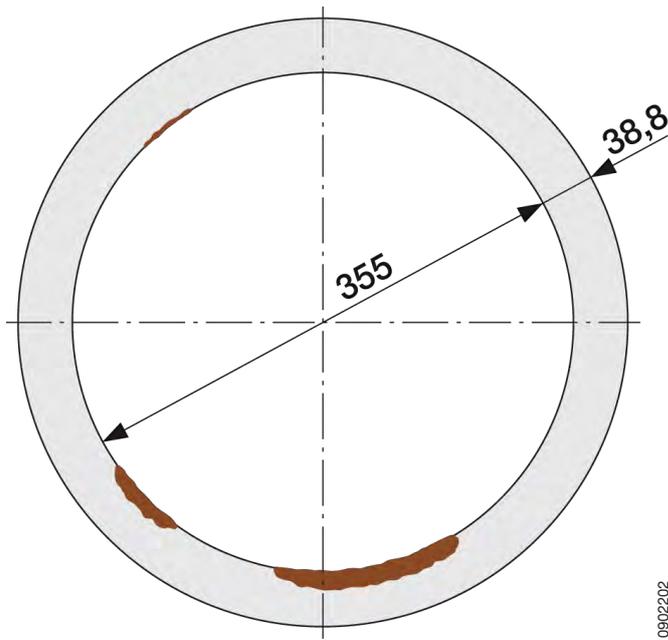


Bild 3.17: Kernkraftwerk Wolf Creek: Rissbefunde in der Mischschweißnaht des Stutzens des Druckhalters zur Volumenausgleichsleitung

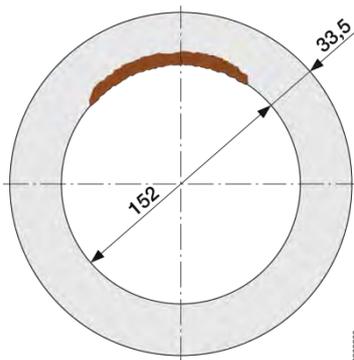


Bild 3.18: Kernkraftwerk Wolf Creek: Rissbefunde in der Mischschweißnaht des Stutzens des Druckhalters zum Sicherheitsventil

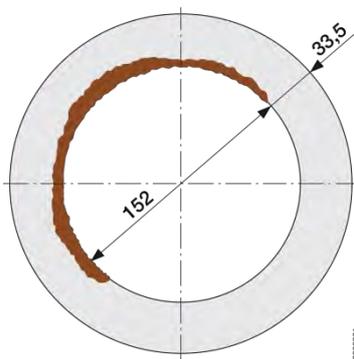


Bild 3.19: Kernkraftwerk Wolf Creek: Rissbefunde in der Mischschweißnaht des Stutzens des Druckhalters zur Abblaseleitung

Das Vorschuhende des Druckhalterstutzens zur Volumenausgleichsleitung hat einen Innendurchmesser von 355 mm und eine Wanddicke von 38,8 mm. Die Vorschuhenden der Abblase- und Sicherheitsventilleitungen haben einen Innendurchmesser von 152 mm und eine Wanddicke von 33,5 mm. Die Leitungsbereiche liegen vom Reaktor-druckbehälter im nichtabsperrbaren Bereich. Die Druckhalterstutzen sind aus ferritischem Stahl gefertigt. Die an die Stutzen angrenzenden Vorschuhenden sind aus austenitischem Stahl gefertigt. Die Druckhalterstutzen sind durch Mischschweißnähte mit den Vorschuhenden verbunden. Die Pufferungen bestehen aus dem Schweißzusatzwerkstoff Alloy 182, einer Nickellegierung (Handelsname „Inconel 182“), und sind auf die ferritischen Vorschuhenden aufgeschweißt. Die Umfangsschweißnähte zur Abblase- und Sicherheitsventilleitung sind mit den Schweißzusatzwerkstoffen Alloy 82 und Alloy 182, ebenfalls einer Nickellegierung, geschweißt. Die Umfangsschweißnaht zur Volumenausgleichsleitung ist aus der Nickellegierung Alloy 82 bzw. 182 als Schweißzusatzwerkstoff. Alle inneren Schweißfülllagen bestehen aus Alloy 182 (**Bild 3.20**).

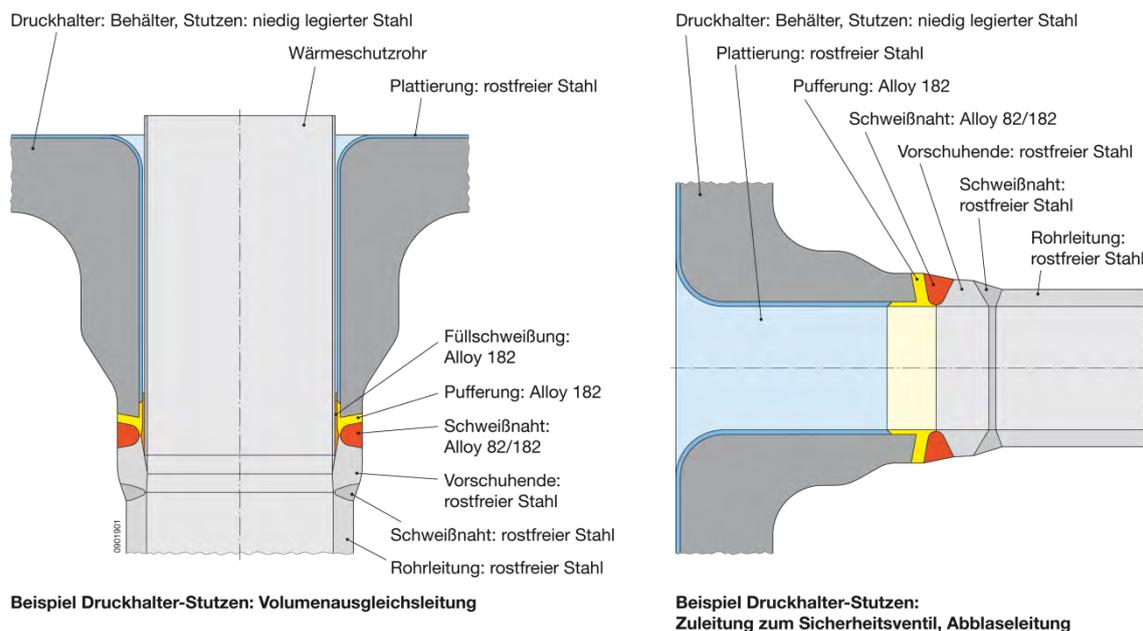


Bild 3.20: Kernkraftwerk Wolf Creek: Aufbau der Mischschweißnähte in den Stutzen der Druckhalter

An der Schweißverbindung der Druckhalterstutzen zu der Abblase- und der Volumenausgleichsleitung wurden während der Fertigung zehn bzw. fünf Reparaturschweißungen dokumentiert. An der Schweißverbindung zur Sicherheitsventilleitung wurden keine

Reparaturen dokumentiert. Es ist jedoch nicht klar, ob dennoch Reparaturen an dieser Schweißverbindung durchgeführt worden sind.

Die letzte wiederkehrende Ultraschallprüfung der Schweißverbindung des Druckhalterstützens zur Volumenausgleichsleitung wurde im Jahr 1993 durchgeführt. An der Schweißverbindung der Druckhalterstützen zur Abblase- und Sicherheitsventilleitung wurde diese Prüfung im Jahr 2000 durchgeführt. Bei diesen Prüfungen ergaben sich keine registrierpflichtigen Anzeigen. Dabei wurden Prüfprozeduren in Übereinstimmung mit den Vorgaben des ASME Section XI, Appendix VIII vorgenommen. Mit den Vorgaben dieser Prüfprozeduren war es jedoch nicht möglich diese rissartigen Anzeigen zu detektieren. Diese Prüfprozeduren wurden zwischenzeitlich geändert, so dass die Ergebnisse der aufeinanderfolgenden Prüfungen nicht direkt vergleichbar sind.

Es wurden keine zerstörenden Prüfungen zur Klärung der Schadensursache vorgenommen. Aufgrund der bekannten Empfindlichkeit der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe gegenüber interkristalliner Spannungsrisskorrosion wird angenommen, dass dieser Mechanismus zu den aufgefundenen Rissen führte. Aus der Historie der Ergebnisse der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen ist nicht ableitbar, wann sich ein Risswachstum einstellte. Die rissartigen Anzeigen wurden belassen und durch eine „Overlay Schweißung“ repariert.

3.2.1.8.2 Prüfung

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen wiederkehrenden Prüfungen (1993 und 2000) ergaben sich keine registrierpflichtigen Anzeigen. Aus diesem Ereignis kann nicht direkt abgeleitet werden, ob die Fehler bei der Anwendung neuerer Prüfprozeduren bereits bei früheren wiederkehrenden Prüfungen erkannt worden wären. Wegen der für den angenommenen Schädigungsmechanismus stark variierenden Inkubationszeit und Risswachstumsraten kann nicht nachvollzogen werden, zu welchem Zeitpunkt Fehlerwachstum eingesetzt hat, wie die Fehlerwachstumsraten waren und ob seinerzeit vorhandene Fehler durch die durchgeführten Prüfungen hätten angezeigt werden können. Es ist jedoch auffällig, dass mit dem Wechsel der Prüfprozeduren, deren Einzelheiten uns nicht bekannt sind, die Fehler eindeutig detektiert werden konnten.

3.2.1.8.3 Integrität

Die Fehler lagen in Mischschweißnähten an drei Stutzen im Bereich der Druckführenden Umschließung. Die Fehler waren in Umfangsrichtung orientiert. Insbesondere erstreckte sich der Fehler im Stutzen der Abblaseleitung auf über 50% des Umfangs; die Ausdehnungen der anderen Fehler in den anderen Stutzen waren geringer. Die Fehler hatten Verbindung zur Innenoberfläche und wiesen Fehlertiefen auf, die im Mittel bei 25% der Wanddicken lagen. Ein aktives Risswachstum im Bereich der Schweißnaht kann bei dem angenommenen Schädigungsmechanismus nicht ausgeschlossen werden. Bei dem vorliegenden Sachverhalt hätte unter der Annahme von Fehlerwachstum und einer Nichterkennung durch zerstörungsfreie Prüfungen ein großflächiger Abriss im Bereich der druckführenden Umschließung nicht ausgeschlossen werden können. Ein Einfluss auf die Integrität war gegeben.

Die Fehler wurden in der Schweißnaht belassen. Durch die Overlay-Schweißung, die eine Art von Auftragsschweißung darstellt, soll nicht nur die Restwanddicke vergrößert werden, sondern es sollen auch Druckspannungen auf die inneren Bereiche der Wand aufgeprägt werden. Damit soll das Spannungsniveau in den betroffenen Schweißnahtbereichen vermindert und so eine treibende Kraft für Risswachstum durch Spannungsrisskorrosion herabgesetzt werden. Die Tragfähigkeit für die Schweißnähte wurde zwar bestätigt, jedoch müssen weitere zukünftige zerstörungsfreie Prüfungen zeigen, dass kein Fehlerwachstum mehr auftritt.

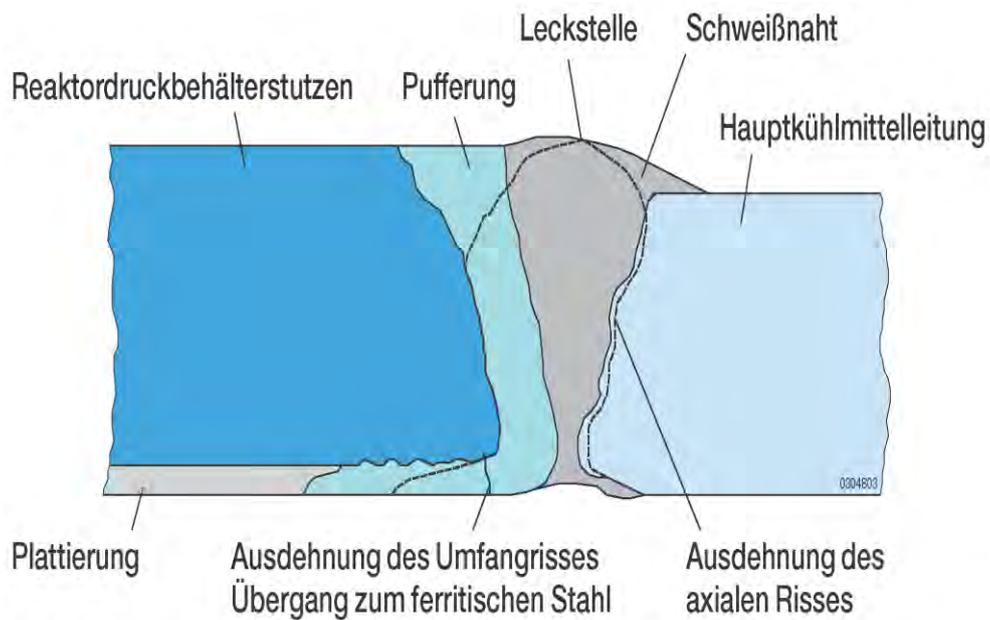
3.2.1.9 Leckage am Stutzen des Reaktordruckbehälters im Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor V.C. Summer (USA)

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 01c/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.1.9.1 Beschreibung

Im Zuge des Abfahrens zum Brennelementwechsel im Jahr 2000 wurde eine größere Menge Borsäurekristalle vorgefunden. Die Borsäurekristalle, offenbar Folge einer Kühlmittelleckage, befanden sich auf dem Fußboden und an Strukturteilen unterhalb einer Hauptkühlmittelleitung (Loop A, heiße Seite). Untersuchungen ergaben, dass ein axial verlaufender Riss in der Schweißnaht die Ursache für die Leckage war

(Bild 3.21). Die Risslänge des axialen Risses entsprach etwa der Breite der Schweißnaht, jedoch war die Penetrationsstelle an der äußeren Oberfläche sehr klein. Der Betreiber hatte während des vorangegangenen Betriebs weder eine ungewöhnlich hohe Primärkühlmittelleckage noch eine ungewöhnlich hohe Aktivität im Sicherheitsbehälter festgestellt. Bei der betroffenen Schweißnaht handelt es sich um eine Mischnaht, die den ferritischen Stutzen des Reaktordruckbehälters und die austenitische Hauptkühlmittelleitung verbindet. Auf die Schweißflanke des ferritischen Stutzens war eine Pufferung aus der Nickellegierung Alloy 182 mit dem Schutzgas-Lichtbogenverfahren aufgebracht worden. Für die Verbindungsschweißnaht war eine Kombination des WIG-Verfahrens und des Schutzgas-Lichtbogen-Verfahrens spezifiziert. Der Schweißzusatzwerkstoff beim WIG-Verfahren war die Nickellegierung Alloy 82. Die durchgeführten metallographischen Untersuchungen an einem herausgetrennten Stück ergaben, dass die wanddurchdringende Leckstelle durch einen axialen Riss verursacht wurde, der in der Verbindungsschweißnaht, der Pufferung und der Wärmeeinflusszone zum Stutzen verlief. Weiterhin wurden in Umfangsrichtung verlaufende und den axialen Riss kreuzende Risse mit einer Tiefe von ca. 5 mm (entspricht der Dicke der Plattierung) gefunden (Bild 3.22). Diese Umfangsrisse hatten in der Plattierung ihren Ausgangspunkt und verliefen bis zum Übergang zum ferritischen Grundwerkstoff. Ebenfalls wurden aus dem Fertigungsprozess stammende Heißrisse entdeckt. Die Risse befanden sich teilweise in Reparaturzonen. Bei dem wanddurchdringenden Riss lag ein interdendritischer (interkristalliner) Rissverlauf in der Schweißnaht vor. Aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten metallographischen Untersuchungen konnte der Schaden auf interkristalline Spannungsrisskorrosion zurückgeführt werden. Das Auftreten dieses Schädigungsmechanismus wurde durch eine hohe verbliebene Restspannung infolge umfangreicher Schweißnahtreparaturen bei der Fertigung begünstigt. Die Heißrisse sollen ebenfalls aus dem Fertigungsprozess stammen.



- Reaktorbehälterstutzen: niedrig legierter ferritischer Stahl ASME SA 508 Class 2,
(ähnlich dem deutschen Reaktorbehälterstahl 22 NiMoCr 37),
- Hauptkühlmittelleitung: nicht-stabilisierter, austenitischer Stahl ASME SA-376 304 N,
(ähnlich dem deutschen Stahl 1.4301),
- Schweißzusatzwerkstoffe: Inconel 182, Inconel 82 (Schweißnaht); Inconel 182 (Pufferung)

Bild 3.21: Kernkraftwerk V.C. Summer: Leckstelle in der Mischschweißnaht am Reaktorbehälterstutzen

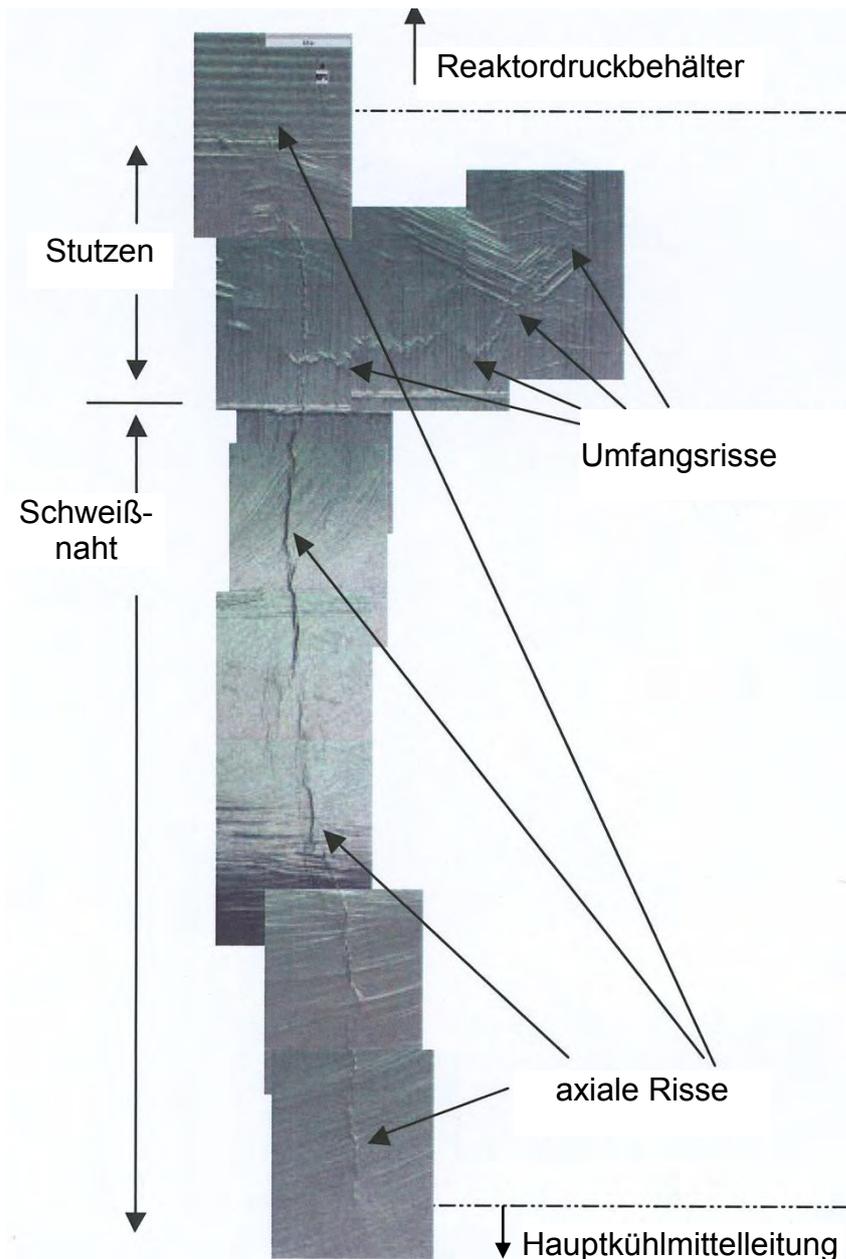


Bild 3.22: Kernkraftwerk V.C. Summer: Rissbefunde in der Schweißnaht, axialer Riss mit dem in Umfangsrichtung kreuzenden Riss, Ansicht von der Innenseite

Das für die Schadensuntersuchungen herausgetrennte Rohrstück wurde einschließlich der Schweißnaht ersetzt. Dabei wurde auf die Schweißflanken des ferritischen Reaktordruckbehälterstutzens und auf das neu einzusetzende Rohrstück der Hauptkühlmittelleitung eine Pufferung aus Alloy 52 aufgeschweißt. Danach wurden die Verbindungsnahte geschweißt.

3.2.1.9.2 Prüfung

Zerstörungsfreie Prüfungen wurden mit dem vorgeschriebenen Ultraschall-Prüfverfahren durchgeführt. Sie ergaben Anzeigen, die jedoch wegen der vorhandenen prüfungünstigen Geometrie auf der Außenoberfläche der Schweißverbindung (schlechte Ankoppelung) keine qualifizierte Aussage zuließen. Ergänzende Prüfungen mit dem Wirbelstromverfahren von der inneren Oberfläche aus ergaben unterschiedliche Anzeigen. Die Nachuntersuchungen zu der geringen Primärkreisleckage ergaben einen wanddurchdringenden quer zur Schweißrichtung liegenden Fehler in der Umfangsschweißnaht. Schon die Ultraschallprüfung 1993 hatte Anzeigen ergeben, die jedoch aus oben genannten Gründen keine qualifizierten Bewertungen zuließen. Schließlich wurden die Fehler vom Prüfpersonal als nicht registrierpflichtig eingestuft. Im Jahre 2000 konnte allerdings nicht mehr geklärt werden, welche Abmessungen der Fehler zum Zeitpunkt der Prüfung in 1993 gehabt hatte. Ebenso können über die Zeitabhängigkeit des Fehlerwachstums für den Schädigungsmechanismus keine Aussagen getroffen werden.

3.2.1.9.3 Integrität

Der wanddurchdringende Fehler lag innerhalb der Druckführenden Umschließung in einer Mischschweißnaht quer zur Schweißrichtung einer Umfangsnaht, also axial in der Rohrleitung. Betroffen war nahezu die gesamte Breite der Mischschweißnaht. Der Fehler befand sich im Bereich der maximalen Umfangsspannung in Überlagerungen mit den Schweißeigenspannungen, die im Rahmen von Reparaturen eingebracht wurden. Ein aktives Fehlerwachstum im Bereich der Schweißnaht kann nicht ausgeschlossen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Bereiche der hohen Schweißeigenspannungen und die Empfindlichkeit gegen Spannungsrisskorrosion auf den engen Bereich der Mischschweißnaht konzentrieren, so dass ein großflächiges Versagen der Rohrleitung in axialer Richtung durch Spannungsrisskorrosion nicht in Erwägung zu ziehen ist. Aus dieser Sachlage kann auch keine Gefahr des Rundabrisses abgeleitet werden. Eine solche Gefahr hätte sich erst durch neue Rissbildungen in Umfangsrichtung im Bereich der Schweißnaht ergeben. Die vorwiegend in der Plattierung befindlichen Risse in Umfangsrichtung fallen nicht ins Gewicht, da diese Risse in den nicht korrosionsgefährdeten Grundwerkstoff laufen. Daraus ergibt sich zwar durch die Leckage eine Beeinträchtigung der Integrität der Rohrleitung, eine sicherheitstechnisch relevante Ausweitung des Schadens wäre

jedoch erst durch neue Rissbildungen in Umfangsrichtung möglich gewesen. Durch den Austausch der fehlerhaften Stelle wurde der Schädigungsbereich beseitigt.

3.2.2 Dampferzeuger

3.2.2.1 Beschreibung der Schäden

3.2.2.1.1 Schäden an Dampferzeuger-Heizrohren aufgrund Rohrbodenreinigung im Kernkraftwerk Biblis Block B

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 99/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

Im Rahmen des Wiederanfahrens nach der Revision 1998 kam es bei der Inbetriebnahme der Dampferzeuger-Abschlämmung vor der Dichtheitsprüfung des Primärkreises kurzzeitig zu einem Anstieg der Aktivität in der Abschlämmung des Dampferzeugers 2, was auf eine Heizrohrleckage hinwies. Die primärseitige Inspektion bei entleerter Primärseite und Druckbeaufschlagung von der Sekundärseite her, ergab einen Feuchtigkeitsanfall von 4 bis 6 Tropfen pro Minute im Dampferzeuger 2 im Bereich unverschlossener Rohre auf der Kühlmittelaustrittsseite. Die Leckstelle konnte lokalisiert werden. Sie lag auf der Kühlmittelaustrittsseite in der zweiten Rohrreihe ungefähr 20 mm oberhalb des Rohrbodens im Zentrum des Rohrbündels.

Bei der vorausgegangenen planmäßigen Revision war in den Dampferzeugern eine Rohrbodenreinigung und Wirbelstromprüfungen aller Heizrohre auf der gesamten Länge mit der Innendurchlaufsonde durchgeführt worden. Dabei waren Wanddickenschwächungen zwischen ca. 30% und 52% im Rohrboden- und Abstandshalterbereich auf der Sekundärseite der Dampferzeuger 1 und 2 an insgesamt elf Heizrohren festgestellt worden. Als Ursache für diese Wanddickenschwächung wurden zunächst Einwirkungen von losen Teilen vermutet. Ein Verschließen mittels Stopfen erfolgte insgesamt bei vier Heizrohren. Dabei wurden im Dampferzeuger 2 zwei Heizrohre verschlossen, die Befunde im Abstandshalterbereich aufwiesen.

Nach dem Auftreten der Leckage wurden nähere Untersuchungen durchgeführt. Eine optische Inspektion ergab visuelle Befunde an den Heizrohroberflächen auf der Sekundärseite. Das Heizrohrstück mit dem Leckschaden wurde zur metallogra-

phischen Untersuchungen gezogen, ebenso ein weiteres, welches keine Wirbelstromanzeige aufwies aber einen visuell erkannten Oberflächenschaden besaß. In dem ersten Heizrohrstück wurde ein ca. 5 mm oberhalb des Rohrbodens beginnender axialer ca. 25 mm langer und ca. 4 mm breiter Materialabtrag mit einer kanalartigen wanddurchdringenden Stelle festgestellt. Das zweite Heizrohrstück hatte einen ähnlichen, aber kleineren Befund, jedoch ohne Wanddurchdringung (**Bilder 3.23** und **3.24**). Lose Teile, die als Ursache für die Befunde in Frage kommen konnten, wurden nicht gefunden.

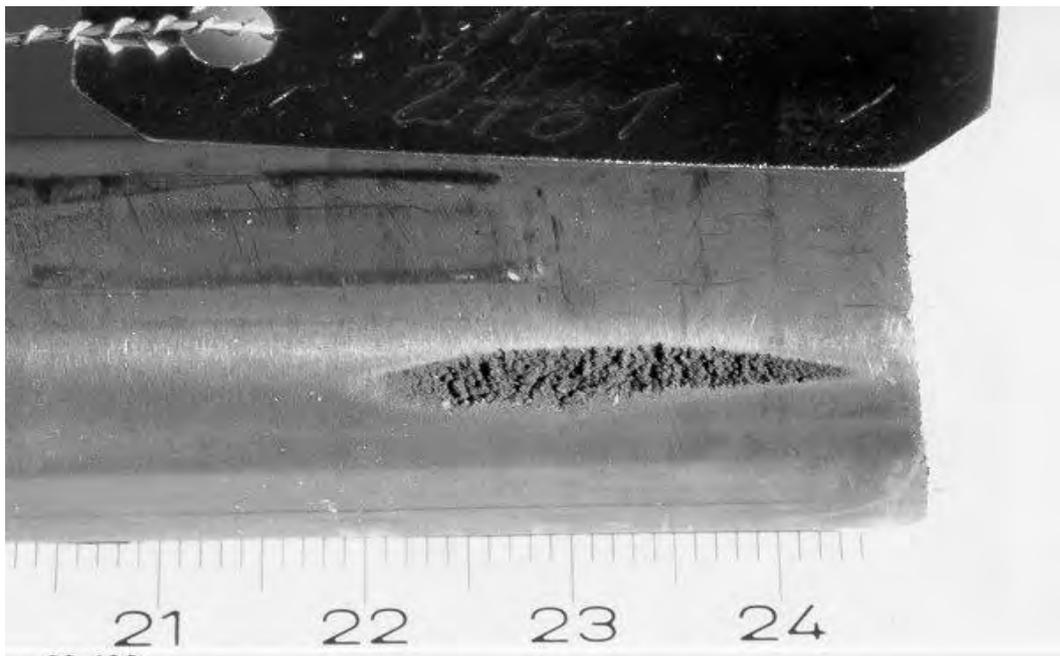


Bild 3.23: Kernkraftwerk Biblis B: Schäden infolge Rohrbodenreinigung



Bild 3.24: Kernkraftwerk Biblis B: Wanddurchdringung im Dampferzeuger-Heizrohr mit Leckage infolge Rohrbodenreinigung

Die Prüfergebnisse zeigten, dass sich mit dem herkömmlichen Wirbelstromprüfverfahren mit der Innendurchlaufsonde bei der angewandten Prüftechnik für den Bereich kurz oberhalb des Rohrbodens nur der großflächige Anteil der Wanddickenschwächung dieses neuen Fehlertyps ermitteln lässt. Tiefergehende kleinflächige und kanalförmige Fehleranteile wurden nicht erkannt, so dass es zu einer Unterschätzung der Befunde während der vorangegangenen Prüfung gekommen war. So wurde für das leckbehaftete Heizrohr ursprünglich mit der Mehrfrequenztechnik eine Wanddickenschwächung von 31% und mit der Einfrequenztechnik (400 kHz) 46 % ausgewiesen. Prüfziel der Mehrfrequenztechnik ist das Auffinden von rohrbodennahen flächigen Fehlern im Anschlussbereich von Heizrohr zum Rohrboden. Die Einfrequenztechnik wird vorwiegend im ungestörten Rohrbereich angewandt. Die erzielten Prüfergebnisse wurden nachbewertet in dem die Signalphase bei der Einfrequenztechnik korrigiert wurde. Hier ergab sich eine Wanddickenschwächung von 59 % obwohl tatsächlich eine volle Wanddurchdringung vorlag.

Die anschließend durchgeführten Wirbelstromprüfungen ergaben insgesamt an 27 Heizrohren weitere Befunde vorwiegend in der zweiten und dritten Rohrreihe teilweise auf beiden Seiten der Rohrgasse im Zentrum des Rohrbündels. Statt der Innendurchlaufsonde wurde dabei die Rotationssonde eingesetzt. Im Gegensatz zu der starr in axialer Richtung zu bewegenden Innendurchlaufsonde, findet mit der Rotationssonde neben der axialen Vorschubbewegung in Überlagerung eine Drehbewegung im Heizrohr statt. Hierdurch können Fehler auf dem Umfang der Heizrohre lokalisiert werden.

Mit dieser Sonde konnte der vorliegende Fehlertyp grundsätzlich nachgewiesen werden. Die exakten Befundtiefen unter Einbezug des kleinflächigen kanalartigen Anteils des vorliegenden Fehlertyps konnten jedoch auch mit dieser Prüftechnik nicht ausgewiesen werden.

Als Verursacher der Befunde konnte die Dampferzeuger-Rohrbodenreinigung mittels eines Hochdruckspritzverfahrens identifiziert werden. Diese wird mit einer speziellen Vorrichtung durchgeführt, die durch die Rohrgasse zwischen der Kühlmiteleintritts- und -austrittsseite des Rohrbündels auf dem Rohrboden fährt. Über vertikal bewegte Sprühköpfe wird ein Hochdruckwasserstrahl mit einem Druck an der Düse von max. 220 bar zwischen die Rohrreihen geleitet. Einige Parameter (z. B. Spritzdruck, Düsenquerschnitt, Spritzdauer des ortsfesten Spritzens) waren bei der letzten Prüfung gegenüber dem davor seit etwa 1980 angewandten Verfahren geändert worden. Anhand von Spritzversuchen an einem geometrisch ähnlichen Modell mit den in der Anlage Biblis B angewandten Parametern konnten die Schädigungen bzw. deren Mechanismen nachvollzogen und nachgewiesen werden. Durch die Vorgänge bei der Rohrbodenreinigung erfolgte der bereits erwähnte Werkstoffabtrag durch Kavitation auf der äußeren Rohroberfläche der Heizrohre.

3.2.2.1.2 Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren im Rohrbodenbereich im Kernkraftwerk Biblis Block A

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 05b/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

Im Kernkraftwerkes Biblis, Block A wurden im Rahmen der Revision 2005 in den Dampferzeugern 3 und 4 alle Dampferzeuger-Heizrohre auf ihrer vollen Länge einer Wirbelstromprüfung unterzogen. Hierbei wurden an mehreren Dampferzeuger-Heizrohren Wirbelstromanzeigen infolge Wanddickenschwächungen auf der Rohraußen-seite gefunden. Die festgestellten Befunde lagen im Bereich des Rohrbodens zwischen der oberen und unteren Einwalzung der Heizrohre in einer Höhe zwischen 340 bis 550 mm, einige auch in der Höhe von 230 bis 280 mm (gemessen von der Rohrbodenunterkante). Die betroffenen geschädigten Heizrohre lagen überwiegend in den Randposition, d. h. außen und in der Rohrgasse des Heizrohbündels.

Die Heizrohre sind aus dem Werkstoff Alloy 800 (X10 NiCrAlTi 32 20, Handelsname Incoloy 800) gefertigt. Der Außendurchmesser beträgt 22 mm und die Wanddicke

1,2 mm. Die Heizrohre haben auf der Unterseite des Rohrbodens (Primärkammer) eine Einwalzzone von ca. 100 mm und auf der Oberseite des Rohrbodens (Sekundärseite) von 80 mm Länge. Auf der Unterseite beginnt die Einwalzzone unmittelbar an der Rohrbodenunterkante. Auf der Oberseite endet die Einwalzzone im geringen Abstand unterhalb der Rohrbodenoberkante. Auf der Unterseite sind die Heizrohre mit der Plattierung der Primärkammer verschweißt. Der axiale Bereich zwischen den Einwalzonen ist frei geführt. Zwischen Heizrohr und Rohrbodenbohrung ist ein radialer Spalt von ca. 0,15 mm (**Bild 3.25**). Die Gesamtdicke des Rohrbodens beträgt 670 mm.

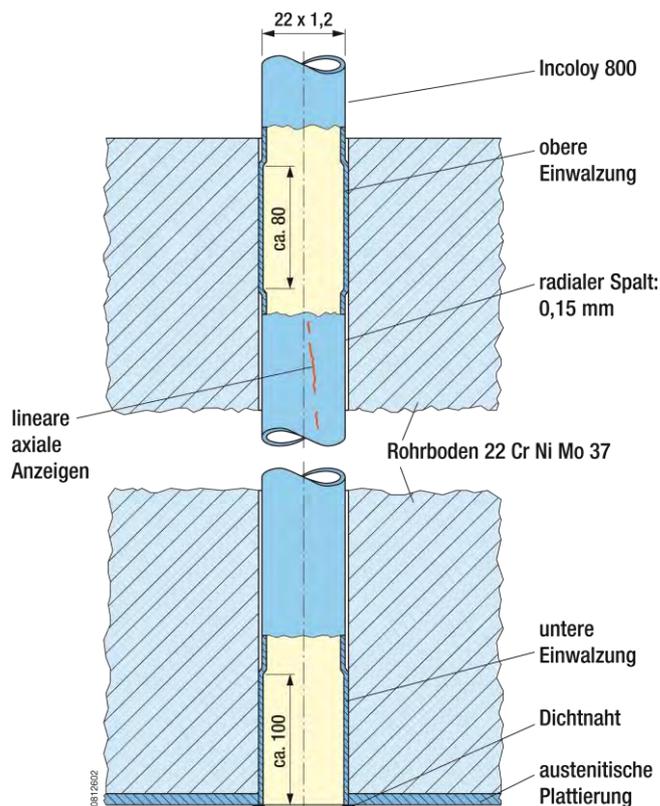


Bild 3.25: KKW Biblis A: Einwalzbereich im Rohrboden des Dampferzeugers

Zunächst wurde mit dem Standardwirbelstromprüfverfahren mit der Innendurchlaufsonde im Mehrfrequenzverfahren geprüft. Die Prüfung erfolgte mit Prüffrequenzen 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz und 950 kHz und dem Frequenzverknüpfungsverfahren gemäß Prüfspezifikation. Bei der Prüfung des Dampferzeugers 3 wurden an sechs Heizrohren Wanddickenschwächungen zwischen 45% und 77% festgestellt. Zum Auffinden der Anzeigen erfolgte eine rechnergestützte Auswertung mit dem 3-Frequenzmix. Diejenigen Anzeigen, deren Signalamplitude die Registerschwelle von 1,5 V überschritten, wurden mit dem Signal der Basisfrequenz bewertet.

Eine Nachbewertung der Ergebnisse der vorangegangenen Wiederkehrenden Prüfung aus dem Jahre 2002 hatte ergeben, dass seinerzeit dort bereits erhebliche Wanddickenschwächungen von mehr als 50% vorlagen, deren Signalamplituden des 3-Frequenzmixes jedoch unter der seinerzeit festgelegten Registrierschwelle von 1,5 V lagen. Daraufhin erfolgte eine Nachbewertung der neuen Prüfergebnisse von 2005 der Heizrohre des Dampferzeugers 3 mit 400 kHz Basisfrequenz bei einer auf 1 V abgesenkten Registrierschwelle. Im Dampferzeuger 4 wurde unter diesen Bedingungen eine Überprüfung vorgenommen. Für beide Dampferzeuger wurden weitere Befunde festgestellt.

Die Überprüfung mit der Wirbelstrom-Rotationssonde ergab Ausdehnungen der Befunde in axialer Richtung zwischen 7 mm und 32 mm sowie in Umfangsrichtung von ca. 4 mm. Mit dieser Rotationssonde wird eine spiralförmige flächige Abtastung der Heizrohr- Innenoberfläche durchgeführt. Diese Sonde ermöglicht eine genauere Bestimmung der axialen Ausdehnung der Befunde. Die in Umfangsrichtung gemessenen Werte entsprechen der Wirkbreite der Sonde und lassen keinen exakten Schluss auf die tatsächliche Kontur des Befundes erkennen. Wanddurchdringungen lagen nicht vor.

Vor dem Hintergrund der Befunde in den Dampferzeugern 3 und 4 wurde der Prüfungsumfang auf die Dampferzeuger 1 und 2 im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung 2005 erweitert. Diese Überprüfung der Dampferzeuger-Heizrohre ergab weitere Befunde im Dampferzeuger 2, aber keine weiteren Befunde in Dampferzeuger 1. Insgesamt wurden Befunde an 20 Heizrohren festgestellt, die ab 20% Wanddickenschwächung verschlossen wurden.

Im Rahmen der Revision 2006 wurden weitere Überprüfungen an allen vier Dampferzeugern mit der Standardwirbelstromprüfsonde vorgenommen. Dabei wurde die Registriergrenze auf 0,5 V abgesenkt und damit gegenüber der Wirbelstromprüfung 2005 halbiert. Dadurch wurde die Nachweisempfindlichkeit weiter verbessert. Zusätzlich wurde die neu qualifizierte Array-Sonde („X-Probe“) als Analysesonde eingesetzt. Die Prüfungen ergaben in den Dampferzeugern 2, 3 und 4 Befunde an insgesamt 26 Heizrohren. Die Befunde lagen im Bereich des Rohrbodens zwischen den Einwalzzonen. Betroffen waren wiederum die Bereiche der äußeren Rohrreihen. Die Anzeigen verliefen axial, von der Außenoberfläche ausgehend und waren nicht wanddurchdringend. Von den Heizrohren mit Befunden wurden acht Heizrohre aufgrund von Verschleißkriterien (Verschleißgrenze: $\geq 1,0V$ und $\geq 30\%$ Wanddickenschwächung oder

≥ 50% Waddickenschwächung) verschlossen. Die Heizrohre im Dampferzeuger 1 waren ohne Befund.

In Dampferzeugern im Kernkraftwerk Biblis A und kurz darauf auch im Kernkraftwerk Unterweser wurden im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen in 2005 erstmals axiale Anzeigen zwischen den Einwalzzonen im Rohrboden festgestellt. Für die Prüfungen wurden die Innendurchlaufsonde und nachfolgend zur Analyse die Rotationssonde eingesetzt. Mit der im Kernkraftwerk Biblis A im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung 2006 erstmals eingesetzten Array-Sonde konnten die Anzeigen als lineare Anzeigen identifiziert werden. Die Untersuchungen an zwei ausgebauten Heizrohren ergaben Risse infolge interkristalliner Spannungsrisskorrosion bzw. interkristallinen Korrosionsangriff als Schadensursache (**Bilder 3.26** und **3.27**). Ausgangspunkt der Korrosion war die Außenoberfläche der Heizrohre. Es wird angenommen, dass es infolge von Undichtigkeiten in der oberen Einwalzung zum sekundärseitigen Eintrag von Medium in den Spalt zwischen Heizrohr und Rohrbodenbohrung und anschließend zur Aufkonzentration von Korrosion fördernden Schadstoffen und niedrigen pH-Werten im Spalt kam.



Bild 3.26: Kernkraftwerk Biblis A: Rissbefund auf der Außenoberfläche eines Dampferzeuger-Heizrohres



Bild 3.27: Kernkraftwerk Biblis A: Interkristalliner Rissverlauf in Wanddickenrichtung eines Dampferzeuger-Heizrohres

3.2.2.1.3 Befunde an Dampferzeuger Heizrohren im Kernkraftwerk Unterweser

Die Informationen zum Ereignis wurden aus /GRS 08c/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

Im Rahmen der in der Revision 2007 im Kernkraftwerk Unterweser durchgeführten Prüfungen wurden zur Anlage KWB-A (siehe **Abschn. 3.2.2.1.2**) vergleichbare Anzeigen an Dampferzeuger-Heizrohren in Bereichen innerhalb und außerhalb des Rohrbodens detektiert. Es waren gemäß Prüfhandbuch an den Dampferzeugern 10 und 20 Wirbelstromprüfungen mit einem Gesamtrohr-Prüfumfang von 25% aller Heizrohre mit der Innendurchlaufsonde und 100% mit der Array-Sonde ein- und austrittseitig bis zum ersten Abstandshaltergitter vorgesehen. Aufgrund von Anzeigen an Heizrohren in den Dampferzeugern 10 und 20 wurde der Prüfumfang auf die Dampferzeuger 30 und 40, jeweils auf 100 % der Heizrohre erweitert. Auch hierbei ergaben sich Anzeigen. Bei diesen Prüfungen wurden an allen Dampferzeugern an insgesamt 31 Heizrohren registrierpflichtige Anzeigen festgestellt.

Im Einzelnen liegen folgende Prüfergebnisse vor:

- Zwischen den Einwalzungen im Rohrboden wurden an fünf Heizrohren lineare axiale Anzeigen, vergleichbar mit denen im Kernkraftwerk Biblis, Block A, festgestellt. Die maximale Wanddickenschwächung betrug 48%, die maximale Anzeigenlänge 16 mm.
- Im Verformungsbereich oberhalb der oberen Einwalzung, vorwiegend im Ablagerungsbereich, lagen lineare Anzeigen mit maximaler Anzeigenlänge von

13 mm in Umfangsrichtung an sieben Heizrohren, eine 4 mm lange lineare axiale Anzeige an einem Heizrohr und flächige Anzeigen geringer Ausdehnung an drei Heizrohren vor.

- Im Bereich zwischen 10 und 80 mm oberhalb des Rohrbodens wurden lineare axiale Anzeigen an fünf Heizrohren festgestellt, wobei die maximale Wanddickenschwächung 75% und die maximale Anzeigenlänge 9 mm betrug. Diese Bereiche waren zwei Jahre vorher ohne Befund geprüft worden. Es wird daher davon ausgegangen, dass diese Ausdehnung innerhalb von zwei Jahren erreicht wurde. Zudem wurden noch an drei weiteren Heizrohren flächige Anzeigen mit einer maximalen Wanddickenschwächung von 40%, jedoch mit geringer Länge, festgestellt.
- An sieben Heizrohren wurden im Bereich der 60 mm hohen Abstandshaltergitterstäbe lineare axiale Anzeigen festgestellt. Die maximale Wanddickenschwächung betrug 69% und die maximale Anzeigenlänge 15 mm. Diese Bereiche waren ebenfalls zwei Jahre vorher ohne Befund geprüft worden. Es wird daher davon ausgegangen, dass diese Ausdehnungen innerhalb von zwei Jahren erreicht wurden.

Die Lage der Fehler innerhalb der Rohrbodens ist mit den Fehlern im Kernkraftwerk Biblis A vergleichbar und ist im **Bild 3.25** und die Lage der Fehler oberhalb des Rohrbodens im **Bild 3.28** dargestellt.

Bis auf die in Umfangsrichtung orientierten Anzeigen waren alle anderen Anzeigen mit der Innendurchlaufsonde integral detektierbar und deren Wanddickenschwächung bestimmbar. Eine Unterscheidung, ob es sich um eine volumetrische oder lineare Anzeige handelt, ist mit dieser Sonde nicht möglich. Mit der Array-Sonde sind die Position und Geometrie der Anzeigen bestimmbar.

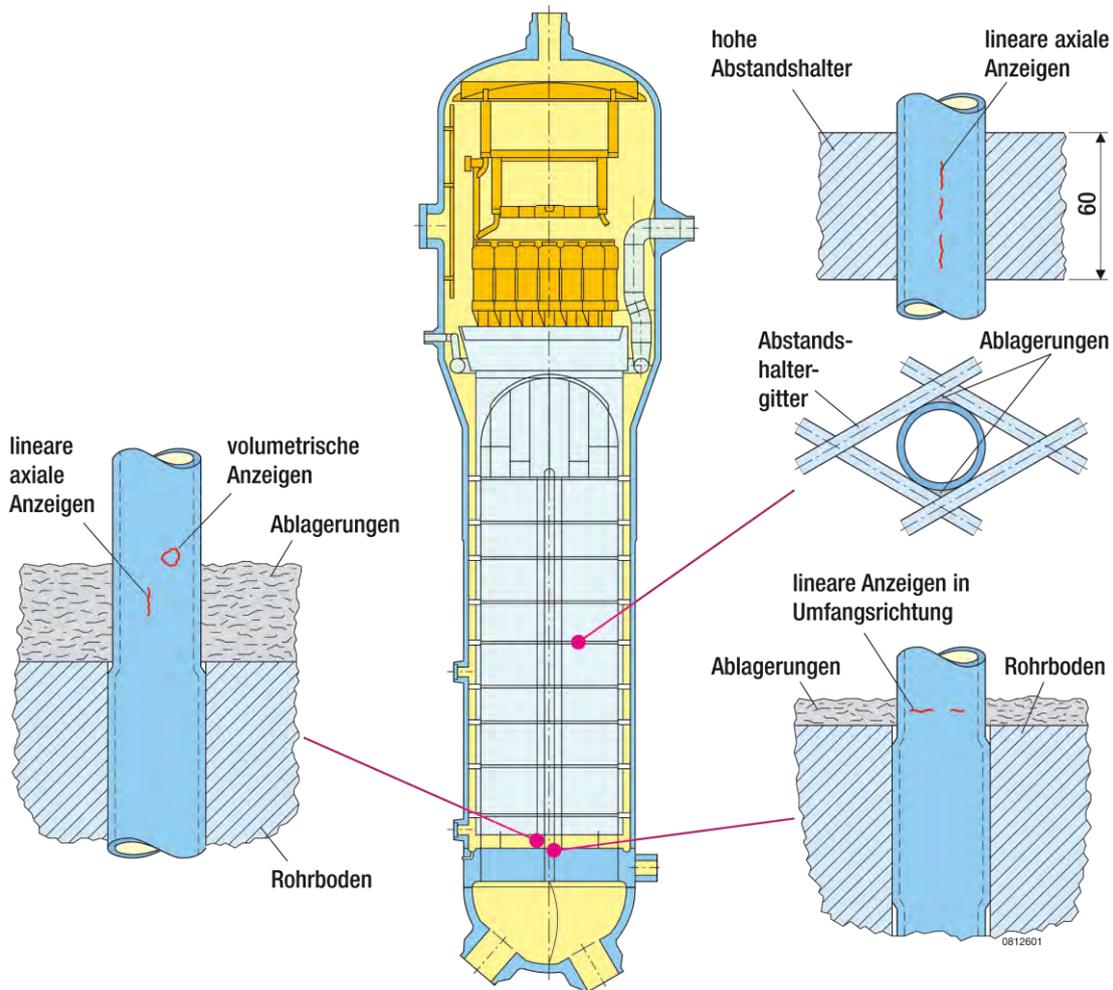


Bild 3.28: Kernkraftwerk Unterweser: Lage der Fehler oberhalb des Rohrbodens

Im Folgenden wird auf die Ursachen der Anzeigen in verschiedenen Bereichen der Dampferzeuger-Heizrohre eingegangen. Die beschriebenen Hypothesen zu den Ursachen stützen sich auf Messergebnisse der zerstörungsfreien Prüfungen und den jetzigen Kenntnisstand zur Schadensursache der Anzeigen im Kernkraftwerk Biblis, Block A, die schon im Jahr 2005 bzw. 2006 entdeckt worden waren. Eindeutige Aussagen zur Schadensursache sind derzeit nicht möglich. Folgende Anzeigen wurden erstmalig an Heizrohren aus dem Werkstoff Alloy 800 festgestellt:

- in Umfangsrichtung orientierte lineare Anzeigen im Bereich des Einwalzübergangs in Höhe der Rohrbodenoberkante,
- lineare axiale Anzeigen oberhalb des Rohrbodens,
- lineare axiale Anzeigen im Bereich von Abstandshaltergitterstäben.

Zu den mit der erstmalig eingesetzten Array-Sonde detektierten linearen Anzeigen in Umfangsrichtung waren keine Aussagen über deren Tiefen und Ursache möglich. Diese Anzeigen konnten bei früheren Prüfungen und mit den dabei angewandten Prüftechniken nicht festgestellt werden.

Die im Kernkraftwerk Unterweser mit der Array-Sonde detektierten linearen axialen Anzeigen zwischen den Einwalzungen im Rohrboden sind in ihrem Erscheinungsbild mit denjenigen in diesem Bereich im Kernkraftwerk Biblis A ähnlich. Die Anzeigen im Bereich von Abstandshaltergitterstäben liegen im stumpfwinkligen Eckbereich von jeweils zwei hohen Abstandshaltergitterstäben, in dem sich in den engen Spalten korrosionsfördernde Schadstoffe ablagern können. Gleichartige Prozesse könnten sich auch oberhalb des Rohrbodens im Bereich von vorhandenen Ablagerungen eingestellt haben. Einträge von Fremdstoffen aus dem Flusswasser (an diesem Standort Brackwasser) infolge undichter Turbinenkondensator-Berohrung haben vermutlich die Korrosionsprozesse begünstigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Schäden an diesen beiden Heizrohbereichen durch den gleichen Korrosionsmechanismus wie im Kernkraftwerk Biblis A verursacht wurden.

3.2.2.2 Prüfungen und betriebliches Vorgehen in den Kernkraftwerken Biblis A, Biblis B und Unterweser

Die Informationen zu den Ereignissen wurden aus /GRS 05b, GRS 08c/ und den zugehörigen Unterlagen entnommen.

3.2.2.2.1 Allgemeines

In jeden Dampferzeuger von Druckwasserreaktoren sind ca. 4000 Heizrohre in U-Form eingebaut, die die Schnittstelle zwischen dem Primär- und Sekundärkreis darstellen. Leckagen an Dampferzeuger-Heizrohren verursachen während des Betriebs den Übertritt von Primärkühlmittel, verbunden mit Radioaktivität, in den Wasser-Dampfkreislauf. Zur Sicherstellung der Integrität werden insbesondere Vorkehrungen in Form der Überwachung der wasserchemischen Parameter und der Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen getroffen. Auswertung der Betriebserfahrung und der daraus zu ziehenden Rückschlüsse gehören ebenfalls zu dieser Zielsetzung. Weiterhin erfolgen präventiv Reinigungsmaßnahmen auf der Sekundärseite.

Die wiederkehrenden Prüfungen erfordern einen hohen Aufwand, wenn alle Heizrohre in allen Dampferzeugern auf der gesamten Länge überprüft werden sollen. Aufgrund der Konstruktion, sowie der Werkstoffwahl und der damit verbundenen Betriebserfahrung, nach der bisher für die meisten deutschen Anlagen keine systematische Schädigung vorliegt, entspricht gemäß den bisherigen Regelungen der Prüfumfang einer Stichprobe. Die Grundlage für den anzuwendenden Prüfumfang und die Prüfzyklen bildet die KTA-Regel 3201.4 /KTA 99/. Diese Regel sieht einen Prüfumfang von 10% aller Heizrohre in einem Prüfintervall von fünf Jahren vor, wobei innerhalb von zwei Jahren die halbe Anzahl der Dampferzeuger erfasst werden muss. Durch die ergänzenden Aussagen der genannten Regel kann der angegebene Prüfumfang jedoch insofern erweitert werden, dass bei jeder wiederkehrenden Prüfung die aus der Konstruktion und Betriebserfahrung bekannten Rohrbereiche mit höherer Korrosionsgefährdung zu untersuchen sind. Der Prüfumfang wird anhand dieser Kriterien in anlagenspezifischen Prüflisten zusammengestellt. Diese Prüflisten müssen gemäß der KTA 3201.4 /KTA 99/ unter Berücksichtigung der Betriebserfahrung in der eignen Anlage sowie vergleichbarer anderer Anlagen vor jeder erneuten wiederkehrenden Prüfung aktualisiert werden, sofern Schäden bzw. neue, bisher nicht bekannte Schädigungsmechanismen bekannt geworden sind. Das Vorgehen schließt auch die Überprüfung der Ergebnisse der vorangegangenen Prüfungen ein und kann zu Änderungen führen, wie Verlagerung festgelegter Prüforte, höherer bzw. erweiterter Prüfumfang und kürzerer Prüfzyklus.

In regelmäßigen Abständen führen die Betreiber Reinigungen der sekundärseitigen Rohrböden durch. Zielsetzung dieser Maßnahme ist es, Ablagerungen vom Rohrboden zu entfernen bzw. zu minimieren. Die Ablagerungen stammen von Einträgen aus dem Dampf-Wasserkreislauf, die sich hauptsächlich auf dem Rohrboden aber auch in Bereichen der Halterungen sammeln. Die Ablagerungen bestehen in der Hauptsache aus Korrosionsprodukten. Zum Reinigungsprozess wird eine Reinigungseinrichtung durch eine Öffnung im Sekundärmantel in den Bereich der Rohrgasse eingebracht. Durch eine Spritzvorrichtung an der Reinigungseinrichtung wird Deionat in die Bereiche auf der heißen und kalten Seite der Heizrohre eingespritzt. Hierdurch werden die Ablagerungen gelöst und über das Dampferzeuger-Abschlammssystem abgezogen.

Eine seltener durchgeführte Maßnahme ist die chemische Reinigung der gesamten Sekundärseite der Dampferzeuger mit dem Ziel, auf den Heizrohren gebildete Beläge zu entfernen. Dies geschieht durch eine mehrstündige Einwirkung von Beizen bei erhöhten Temperaturen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit der chemisch analytischen Messung, auch „Hide-Out-Return“-Verfahren genannt. Hierbei werden an Hand gemessener Konzentrationen von Wasserinhaltsstoffen, insbesondere während des Abfahrens, die pH-Werte in Spalten, z. B. Halterungen, abgeschätzt. Zielsetzung ist es zu ermitteln, inwieweit sich in lokalen Bereichen saure Umgebungsbedingungen eingestellt haben, die einen wesentlichen Einfluss auf das Korrosionsverhalten des eingesetzten Werkstoffes Alloy 800 haben können, da dieser Werkstoff unter entsprechenden Umgebungsbedingungen empfindlich gegenüber interkristalliner Spannungsrisskorrosion ist. Es wird davon ausgegangen, dass sich bei der praktizierten Fahrweise und den durchgeführten Reinigungsprozeduren kritische Umgebungsbedingungen nur dann einstellen können, wenn zusätzliche Einträge in den Sekundärkreis, z. B. infolge Leckagen durch den Turbinenkondensator stattgefunden haben.

Im **Abschn. 3.2.2.1** wurden Schäden an Dampferzeuger-Heizrohren anhand der vorliegenden Betriebserfahrung beschrieben. Hieraus kristallisierten sich zwei Sachverhalte heraus, die für das Vorhaben von Bedeutung sind. Dies sind:

- schnell wachsende Fehler und
- durch Rohrbodenreinigung eingebrachte Fehler.

3.2.2.2.2 Schnell wachsende Fehler an Dampferzeuger-Heizrohren

Die hier durchgeführten Betrachtungen der Ergebnisse von wiederkehrenden Prüfungen erstrecken sich über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum. Ausgehend von Prüfergebnissen aus einem bestimmten Prüffahr, kann anhand der Ergebnisse vorhergehender und/oder nachfolgender Prüfungen in einem zeitlichen Abstand festgestellt werden, ob ein Fehlerwachstum bzw. ein sprunghaftes Ansteigen von Wanddickenschwächungen an denselben Heizrohren vorliegt. Als Ausgangspunkt der Betrachtungen werden Bereiche mit Anzeigen an einigen Heizrohren gewählt, die bei Prüfungen in einigen Anlagen gefunden worden sind. Diese Bereiche ergaben bei vorhergehenden Prüfungen teilweise gar keine detektierbaren Anzeigen oder Anzeigen an oder unterhalb der Registriergrenze (20% nach KTA 3201.4 /KTA 99/) bzw. unterhalb der Verschleißgrenze (allgemein bei 50% Wanddickenschwächung). Die Betrachtung der aufeinanderfolgenden Prüfergebnisse zeigt teilweise ein sehr schnelles Fehlerwachstum Es wurden jedoch auch Heizrohre mit geringem bzw. ohne Fehlerwachstum vorgefunden.

Nachfolgend werden Prüfergebnisse behandelt, die im Bereich der stumpfwinkligen hohen Gitterstäbe in den Abstandhaltergittern im Kernkraftwerk Unterweser und die im Bereich zwischen den Einwalzzonen im Rohrboden im Kernkraftwerk Biblis, Block A ermittelt wurden. Bei der Bewertung der angegebenen Werte für Fehlertiefe, Fehlerwachstum und Anzeigenlänge sind Messungenauigkeiten bzw. die Grenze der Detektierbarkeit des eingesetzten Prüfverfahrens bzw. Prüftechnik zu berücksichtigen.

- Kernkraftwerk Unterweser

Der Sachverhalt der Wirbelstromanzeigen an Dampferzeuger-Heizrohren ist im **Abschn. 3.2.2.1.3** beschrieben. Für die weiteren Betrachtungen wurden die vorliegenden Prüfergebnisse hinsichtlich der Fehlerzunahme analysiert. Die Prüfergebnisse, die teilweise auf Prüfungen im Jahre 1998 zurückgehen, sind in der **Tabelle 3.1** enthalten. Insbesondere ist eine große Zunahme der Fehlertiefe an acht Heizrohren bei den beiden Prüfungen 2005 und 2007 erkennbar. Diese Heizrohre wurden verschlossen. Dagegen hatten die in der **Tabelle 3.2** ausgewiesenen zehn Heizrohre keinen wesentlichen Fehlertiefenzuwachs, weshalb keine Verschließung notwendig wurde.

Tabelle 3.1: Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich hoher Abstandshalter mit maximaler Rate von Wanddickenschwächungen im KKW Unterweser

Heizrohr-Nr.	Prüfergebnisse [Fehlertiefe in %]					Fehlertiefenzunahme [%]
	Prüfjahr					
	1998	2000	2002	2005	2007	
1				¹⁾	68 ²⁾	+68
2				¹⁾	46 ²⁾	+46
3				¹⁾	69 ²⁾	+69
4				¹⁾	54 ²⁾	+54
5				¹⁾	44 ²⁾	+44
6			¹⁾	66 ²⁾		+66
7			¹⁾	56 ²⁾		+56
8	¹⁾	16	69 ²⁾			+69

¹⁾ keine detektierbaren Anzeigen bzw. Anzeige unterhalb der Registriergrenze, Messungengenauigkeit der Prüfverfahren bzw. Prüftechniken $\pm 10\%$
²⁾ Heizrohr verschlossen

Tabelle 3.2: Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich hoher Abstandshalter mit geringer Rate der Wanddickenschwächungen im KKW Unterweser

Heizrohr-Nr.	Prüfergebnisse [Fehlertiefe in %]		Zunahme der Wanddickenschwächung [%]
	Prüfjahr		
	2005	2007	
9	19	21	+2
10	18	17	-1
11	23	20	-3
12	25	29	+4
13	28	23	-5
14	41	49	+8
15	24	28	+4
16	27	32	+5
17	14	16	+2
18	24	20	-4

Messungengenauigkeit der Prüftechniken $\pm 10\%$

Für die im Jahre 2007 verschlossenen Heizrohre konnte mit der eingesetzten Prüftechnik (Array-Sonde, **siehe Abschn. 2.7.2.3**) ermittelt werden, dass es sich um lineare Anzeigen handelt. Für die Heizrohre 1 bis 6 konnten somit auch die Anzeigenlängen ermittelt werden. In der **Tabelle 3.3** ist dieser Sachverhalt, der für Integritätsbetrachtungen geeignet ist, enthalten.

Tabelle 3.3: Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich hoher Abstandshalter, Zuordnung der Fehlertiefe zur Anzeigenlänge im KKW Unterweser

Heizrohr-Nr. (siehe Tabelle 1)	Fehlertiefe in %	Axiale Anzeigenlänge [mm]
1	68	8
2	46	5
3	69	15
4	54	9
5	44	10
Messungenauigkeit der Prüfverfahren bzw. Prüftechniken $\pm 10\%$		

- Kernkraftwerk Biblis A

Der Sachverhalt der Wirbelstromanzeigen an Dampferzeuger-Heizrohren ist im **Abschn. 3.2.2.1.2** beschrieben. Die Prüfergebnisse, die teilweise auf Prüfungen 1997 zurückgehen, sind in der **Tabelle 3.4** enthalten. Die Zunahme der Fehlertiefen an Heizrohren bei den beiden Prüfungen 2002 und 2005 sind erkennbar und führten zum verschließen der Heizrohre. Die Ergebnisse der Prüfung der Heizrohre 2006 liegen nicht im Detail vor und können daher nicht zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

Tabelle 3.4: Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich zwischen den beiden Einwalzungen im Rohrboden im Kernkraftwerk Biblis A

Heizrohr-Nr.	Prüfergebnisse [Fehlertiefe in %]				Zunahme der Fehlertiefe [%]
	Prüfjahr				
	1997	1999	2002	2005	
1	62	62	62	73 ¹⁾	+11
2		33	56 ¹⁾		+23
3			38	76 ¹⁾	+38
4			68	77 ¹⁾	+9
5		37	37	68 ¹⁾	+31
6		31	41	50 ¹⁾	+19
7		47	47	61 ¹⁾	+14
8	66	61	56	66 ¹⁾	+0
9			32	55 ¹⁾	+23
10			28	54 ¹⁾	+26
11			24	49 ¹⁾	+25
12		20	32	71 ¹⁾	+51

¹⁾ Heizrohr verschlossen,
Messungengenauigkeit der Prüfverfahren bzw. Prüftechniken ± 10%

3.2.2.2.3 Durch Rohrbodenreinigung eingebrachte Fehler

Im Kernkraftwerk Biblis B wurden Schäden an Dampferzeuger-Heizrohren beim Reinigen des Rohrbodens durch die Spritzwirkung erzeugt, siehe **Abschn. 3.2.2.1.1**. Ursache war, dass an der Reinigungseinrichtung einige Parameter (Druck, Einwirkungszeit) gegenüber der früheren bewährten Vorgehensweise geändert wurden. Die Zielsetzung der geänderten Vorgehensweise war es, eine verbesserte Reinigungswirkung am Rohrboden zu erreichen. Das durchgeführte Verfahren mit den geänderten Parametern war vorab nicht getestet worden. Erst anhand von durchgeführten Spritzversuchen im Anschluss an die Entdeckung der Schäden konnte die Schädigungswirkung nachvollzogen und somit eindeutig der vorher durchgeführten Reinigung des Rohrbodens zugeordnet werden.

Von den so erzeugten Schäden konnte mit der eingesetzten Innendurchlaufsonde (Standardsonde) nur der großflächige Anteil der Wanddickenschwächung detektiert werden, nicht aber der kanalartige, kleinflächige Anteil bei fortgeschrittener Schädigung.

gung. Mit der anschließend eingesetzten Rotationssonde war eine genauere Charakterisierung der Schädigung möglich.

3.2.2.3 Integrität der Dampferzeuger-Heizrohre in den Kernkraftwerken Biblis B, Biblis A und Unterweser

3.2.2.3.1 Schnell wachsende Fehler

Die Prüfergebnisse der gewählten Beispiele zeigen, dass in einem engen Zeitraum ein hohes Fehlerwachstum festgestellt wurde. Bei linearer Extrapolation des Fehlerwachstums können wanddurchdringende Rissbildungen bis zur nächsten Prüfung nicht ausgeschlossen werden. Eine genaue Prognose des weiteren Wachstums ist jedoch derzeit nicht möglich. Diese würde genaue Kenntnisse über den Schädigungsmechanismus und seine Kinetik (insbesondere Einflussfaktoren, Inkubationszeit, Risswachstumsgeschwindigkeit) voraussetzen. Die betroffenen Rohre wurden verschlossen und sind für Prüfungen nicht mehr zugänglich. Somit können Ergebnisse weiterer Prüfungen nicht mehr herangezogen werden.

Im Hinblick auf die Möglichkeit der Leckagebildung sind die Fehler im Bereich zwischen den Einwalzungen im Rohrboden anders zu betrachten als jene außerhalb des Rohrbodens. Wanddurchdringende Risse im Bereich zwischen den Einwalzungen lassen auch bei großer Öffnungsfläche aufgrund des engen Spaltes im Bereich der oberen Einwalzung nur eine geringe Leckage vom Primär- zum Sekundärkreis erwarten. Oberhalb des Rohrbodens sind die Leckagemengen abhängig von der Öffnungsfläche des Fehlers.

Nach /AZO 85/ können Integritätsbetrachtungen an Dampferzeuger-Heizrohren anhand von Berstdruckversuchen an vorgeschädigten Heizrohren vorgenommen werden. Diese Betrachtungen orientieren sich am Grenztragverhalten von vorgeschädigten Heizrohren. Hierzu können abdeckend für axiale lineare Risse die Versuche an Heizrohren mit erodierten Schlitzern mit verschiedenen axialen Längenausdehnungen herangezogen werden. Demnach ist bei einer Wanddickenschwächung oberhalb des Rohrbodens bei Störfallbelastungen mit $\Delta p = 175$ bar (sekundärseitiger Druckverlust und Ansprechen der primärseitigen Sicherheitsventile) oberhalb von etwa 70% mit Leckagen zu rechnen. Bei Belastungen aus dem Bestimmungsgemäßen Betrieb mit $\Delta p = 105$ bar ist oberhalb von 85% Wanddickenschwächungen mit Leckagen zu rechnen.

Die aktuell gemessenen maximalen Waddickenschwächungen kamen nahe an diesen Wert heran. Leckagen wurden jedoch nicht beobachtet. Es ist jedoch zu bedenken, dass eine direkte Vergleichbarkeit von künstlich eingebrachten Fehlern und tatsächlich vorhandenen Fehlern nicht gegeben sein muss.

3.2.2.3.2 Durch Rohrbodenreinigung eingebrachte Fehler

Der dargestellte Fall zeigt, dass Schädigungen an einer Reihe von Heizrohren durch Änderungen von Parametern bei der Rohrbodenreinigung erzeugt wurden. Diese Schädigung geschah unbemerkt und unerwartet. Erst durch das Auftreten einer Leckage gab es erste Hinweise auf Schädigungen. Bei der Wirbelstromprüfung konnte lediglich der großflächige Teil der Waddickenschwächung detektiert werden. Der tiefere Anteil der Waddickenschwächung konnte mit der eingesetzten Prüftechnik (Standardtechnik mit der Innendurchlaufsonde) nicht gefunden werden. Bei Maßnahmen, die mögliche schädigende Einwirkungen auf Bereiche von druckführenden Wandungen bewirken können, sollten die hierfür angewandten Verfahren vorher qualifiziert und getestet werden.

Auch hier kann /AZO 85/ für die Integritätsbetrachtungen an Dampferzeuger-Heizrohren anhand von Berstdruckversuchen an vorgeschädigten Heizrohren herangezogen werden. Hierzu können abdeckend für die vorliegende Schadensform die Versuche an Heizrohren mit dem sogenannten Wastagefehler (flächiger Waddickenabtrag infolge Korrosion) verwendet werden. Demnach ist bei einer Waddicken schwächung oberhalb des Rohrbodens bei Störfallbelastungen mit $\Delta p = 175$ bar (sekundärseitiger Druckverlust und Ansprechen der primärseitigen Sicherheitsventile) oberhalb von etwa 70% mit Leckagen zu rechnen. Bei Belastungen aus dem Bestimmungsgemäßen Betrieb mit $\Delta p = 105$ bar ist oberhalb von 80% Waddicken schwächungen mit Leckagen zu rechnen. Die aktuell gemessenen maximalen Waddickenschwächungen kamen nahe an diese Werte heran. Die kleinflächigen kanalartigen Fehler können mit den genannten Berstdruckversuchen nicht abgebildet werden. Leckagen wurden jedoch nicht beobachtet.

4 Vertiefte Analyse der identifizierten Ereignisse

Bei wiederkehrenden Prüfungen oder bei Sonderprüfungen sollen Fehler in den Komponenten mittels zerstörungsfreier Prüfungen erkannt werden. Im Rahmen dieses Vorhabens werden nicht erkannte oder nicht hinreichend erkannte Fehler untersucht. Im **Kap. 3** wurden insgesamt neun solche Ereignisse an druckführenden Komponenten und drei Ereignisse an Dampferzeuger-Heizrohren identifiziert und beschrieben. Die Hintergründe für die Schwierigkeiten bei der Fehlererkennung sollen im Folgenden vertieft analysiert und systematisiert werden. Hierzu wurden die einzelnen Ereignisse zunächst durch verschiedene Merkmale charakterisiert. Dabei wird zwischen Fehlererkennung (**Abschn. 4.1**) und Fehlercharakteristik (**Abschn. 4.2**) unterschieden. Im Weiteren werden die daraus gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung analysiert (**Abschn. 4.3**).

4.1 Fehlererkennung

Hinsichtlich der Fehlererkennung wird zwischen folgenden Merkmalen unterschieden:

- Art und Lage der festgestellten Fehler
- Art der letzten Prüfung
- Ergebnisse vorangegangener Prüfungen
- Mängel bei vorangegangenen Prüfungen.

Die einzelnen Merkmale sind im Folgenden näher erläutert:

- Art und Lage der festgestellten Fehler

Fehler an Oberflächen oder im Volumen werden im Hinblick auf deren Ausdehnung und deren Lage in den Komponente bzw. Bauteilen beschrieben. Bei druckführenden Komponenten ist dabei auch zwischen Grundwerkstoff- und Schweißnahtbereichen zu unterscheiden.

- Art der letzten Prüfung

Hier werden die Prüfverfahren bzw.-techniken der durchgeführten Prüfungen, zum Beispiel Ultraschallprüfung, genannt. Es wird angegeben, ob die Fehler bei routinemäßigen wiederkehrenden Prüfungen oder bei Sonderprüfungen gefunden wurden. Bei

den ausgewählten Ereignissen wurden viele Fehler bei Sonderprüfungen detektiert, wobei diese Sonderprüfungen jedoch meistens durch Hinweise auf mögliche Schäden initiiert wurden; Ausnahmen bilden Umbau- oder Reparaturarbeiten aus anderen Anlässen.

- Ergebnisse vorangegangener Prüfungen

Hier wird beschrieben, ob vor der letzten Prüfung bereits Prüfungen stattgefunden haben, ob bei diesen vorangegangenen Prüfungen nach heutiger Kenntnis bereits Fehler vorlagen und ob diese Fehler ggf. entdeckt wurden.

- Mängel bei vorangegangenen Prüfungen

Die nach heutiger Kenntnis bei vorangegangenen Prüfungen aufgetretenen Mängel werden aufgelistet. Darunter fallen: gänzliche Abwesenheit oder unzureichende Qualität von Anzeigen aufgrund ungeeigneter Prüftechnik, prüfungünstigen Bauteilen oder unzureichender Vorbereitung der Oberflächen; Fehlinterpretationen von Auffälligkeiten aufgrund mangelhafter Anzeigen, Vorurteilen des Prüfers oder unzureichender Dokumentation über den Prüfgegenstand oder Ergebnisse vorangegangener Prüfungen; gar keine Prüfungen oder Prüfungen an anderem Ort aufgrund von Lücken im Prüfkonzept.

In **Tabelle 4.1** sind die einzelnen Ereignissen den o. g. Merkmalen der Fehlererkennung zugeordnet. Im **Abschnitt 5.1** werden diese Merkmale zusammengefasst und bewertet.

Tabelle 4.1: Zuordnung von relevanten Ereignissen zu Merkmalen der Fehlerkennung

Anlage / Ereignis	Art und Lage der festgestellten Fehler	Art der letzten Prüfung	Ergebnisse vorangegangener Prüfungen	Mängel bei vorangegangenen Prüfungen
Druckführende Komponenten				
Stade: Anzeigen an einer Schweißnaht einer Nachkühlleitung	Im Volumen liegende Fehler längs der Schweißnaht	Sonderprüfung mit UT nach Beschleifen von Außen- und Innenoberfläche	WKP mit RT und UT: Unvollständige Fehleridentifikation, Fehlergröße unterschätzt	Ungünstige Oberflächen außen und innen; Mängel bei der Qualifizierung (zunächst RT, danach UT)
Stade: Rissbefunde an Nachkühlarmatur und anschließender Leitung	Langgestreckte Rissfelder an innerer Oberfläche im Grundwerkstoff	Sonderprüfung mit PT bei Umbauarbeiten	Keine Prüfung am Befundort	Befundort war nicht in Prüfliste
Biblis A: Rissbefunde in einer Mischnaht am Stutzen einer Nachkühlleitung	Ablösung zwischen Mischnaht und Grundwerkstoff an äußerer Oberfläche	Sonderprüfung mit UT	WKP mit UT: Anzeigen lagen vor und waren dokumentiert, nicht als Befund bewertet	Auffälligkeiten lagen am Rand des Prüfbereiches und wurden als „Störechos“ interpretiert
Brokdorf: Rissbefunde an der Reaktor-druckbehälter- Deckelentlüftungsleitung	Riss von innerer Oberfläche aus im Grundwerkstoff	Sonderprüfung (RT) und Nachbewertung von Durchstrahlungsaufnahmen	WKP mit RT: Anzeigen lagen vor, haben sich jedoch seitdem vergrößert	Anzeigen nicht als Befunde bewertet
Unterweser: Befunde an Speisewasserstutzen der Dampferzeuger	Mulden an innerer Oberfläche hinter Wärmeschutzrohr im Grundwerkstoff	WKP mit UT Such- und Analysetechniken, Erweiterung auf andere Stutzen	WKP mit UT: Anzeigen lagen vor und waren dokumentiert, haben sich jedoch seitdem vergrößert	Vermutlich keine Mängel - Überschätzung der tatsächlichen Fehlertiefe mit Analysetechnik bei letzter Prüfung aufgrund fehlender Qualifizierung
Krümmel: Risse in austenitischen Armaturengehäusen	Fehler an innerer Oberfläche im Grundwerkstoff	Sonderprüfung (PT, UT) anhand von Übertragbarkeitsbetrachtungen	Keine Prüfung am Befundort bzw. Prüfung ohne Befund	Keine oder unzureichende Prüfung (nur VT ohne Reinigung) am Befundort

Anlage / Ereignis	Art und Lage der festgestellten Fehler	Art der letzten Prüfung	Ergebnisse vorangegangener Prüfungen	Mängel bei vorangegangenen Prüfungen
Fukushima Daini 3 (J): Umfangsrisse im Schweißnahtbereich einer Treibwasser-schleife	360° umlaufender Fehler längs der Schweißnaht an innerer Oberfläche; zweiter, kürzerer Fehler in der Nähe	WKP mit UT mit sekundären Kriechwellen für Fehler an innerer Oberfläche	WKP mit UT: 360° umlaufende Anzeige lag vor und war dokumentiert, aber nicht als Befund bewertet	Fehlinterpretation durch Ungenzen in der Schweißnahtwurzel und ungenaue Kenntnis der Lage der Schweißnaht; Erwartungshaltung des Prüfers
Wolf Creek (USA): Umfangsrisse in Mischschweißnähten von Stützen des Druckhalters	Fehler von innerer Oberfläche aus längs der Mischschweißnaht	Bestandsaufnahme vor Schweißarbeiten (Overlay welding) mit neuer UT-Prüftechnik	WKP mit UT: Keine Fehler entdeckt	Ältere Prüftechnik war offensichtlich ungeeignet für diesen Fehlertyp in Mischnähten
V.C. Summer (USA): Leckage am Stützen des Reaktordruckbehälters	Fehler quer zur Mischschweißnaht	Sonderprüfung mit UT nach Entdeckung von Borsäurekristallablagerungen	Nicht interpretierfähige UT-Anzeigen wurden nicht als Befund bewertet	Fehler entdeckt, jedoch wegen ungünstiger Prüfoberfläche keine Aussage möglich
Dampferzeuger Heizrohre				
Biblis B: Schäden an DE-Heizrohren infolge Rohrbodenreinigung	Flächiger Fehler mit kanalartigen Wanddurchbruch von der Sekundärseite ausgehend	Sonderprüfungen: Dichtheitsprüfung, VT, ET mit Innendurchlaufsonde, später Rotationssonde	Bei WKP mit Innendurchlaufsonde nur flächiger Fehleranteil entdeckt	Die Standardsonde für die WKP kann flächige Wanddickenschwächung erkennen, aber nicht die kanalartige Vertiefung.
Biblis A: Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren im Rohrbodenbereich	Lineare Fehler zwischen den Einwalzungen	WKP mit Innendurchlaufsonde, später Array-Sonde	WKP mit ET: Anzeigen lagen vor und waren dokumentiert, nicht als Befund bewertet	Die Standardsonde für die WKP kann Schäden durch integrale Signale erkennen, aber Fehlertyp nicht identifizieren.

Anlage / Ereignis	Art und Lage der festgestellten Fehler	Art der letzten Prüfung	Ergebnisse vorangegangener Prüfungen	Mängel bei vorangegangenen Prüfungen
Unterweser: Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren	Lineare Fehler zwischen den Einwalzungen, Gitterstäben und oberhalb Rohrboden, Umfangsfehler oberhalb Rohrboden, flächiger Fehler oberhalb Rohrboden	Wiederkehrende Prüfung und Sonderprüfung mit Innendurchlaufsonde und Array-Sonde	Fehler zwischen Einwalzungen entdeckt	Keiner

Abkürzungen:

UT: Ultraschall-Prüfung (**U**ltrasonic **T**esting)

PT: Farbeindringprüfung (**P**enetrant **T**esting)

ET: Wirbelstromprüfung (**E**ddy **C**urrent **T**esting)

RT: Durchstrahlungsprüfung (**R**adiographic **T**esting)

VT: Visuelle Prüfung (**V**isual **T**esting)

WKP: Wiederkehrende Prüfung

4.2 Fehlercharakteristik

Hinsichtlich der Fehlercharakteristik wird bei der folgenden Auswertung zwischen folgenden Merkmalen unterschieden:

- Ausgangspunkt der Fehlerentstehung,
- Betrieblicher Schädigungsmechanismus,
- Einfluss auf die Tragfähigkeit,
- Absperrbarkeit vom Reaktordruckbehälter.

Die einzelnen Merkmale sind im Folgenden näher erläutert.

- Ausgangspunkt der Fehlerentstehung

Mit diesem Merkmal werden der Ort des Fehlers und Hinweise zur Fehlerentstehung (z. B. Fertigungsfehler, Reparaturen) näher charakterisiert.

- Betrieblicher Schädigungsmechanismus

Mit diesem Merkmal wird auf während des Betriebs entstandene Fehler eingegangen. Von Bedeutung sind insbesondere Überlagerungen von verschiedenen Fehlern. Ein typisches Beispiel hierfür ist ein Fertigungsfehler, der den Ausgangspunkt für betriebliches Fehlerwachstum infolge entsprechender Schädigungsmechanismen (z. B. Spannungsrisskorrosion) darstellt.

- Einfluss auf die Tragfähigkeit

Im Falle von erkannten Fehlern müssen Überprüfungen erfolgen, ob die Tragfähigkeit des betroffenen Bauteils sichergestellt ist. Hierbei sind folgende Fragestellungen zu betrachten:

- Handelt es um einzelne flächige Fehler oder um Fehlerfelder, bei denen es durch Zusammenwachsen zu einem dominierenden Fehler kommen kann?
- Ist die geometrische Ausrichtung eines Fehlers axial oder in Umfangsrichtung?
- Liegt der Fehler in hochbeanspruchten Zonen bzw. in Bereichen mit Spannungskonzentrationen?

- Ist die erforderliche Wanddicke global unterschritten oder werden die zulässigen Spannungen eingehalten?
- Bei geschädigten Dampferzeuger-Heizrohren: Werden Abstände zur Grenztragfähigkeit eingehalten?

Falls die Fehler auf Korrosion oder Ermüdung als Schädigungsmechanismen zurückgeführt wurden, kann ein aktives Fehlerwachstum während des Betriebs nicht ausgeschlossen werden. Wenn ein aktiver Schädigungsprozess nicht ausgeschlossen werden kann, ist sein Einfluss auf die Integrität des Bauteils bzw. der Komponente zu bewerten.

- Absperrbarkeit vom Reaktordruckbehälter

Anhand der Lage der detektierten Fehler wird unterschieden, ob diese in Bereichen liegen, die vom Reaktordruckbehälter absperrbar oder nichtabsperrbar sind. Ein absperrbarer Bereich liegt dann vor, wenn zwischen der Stelle mit dem Fehler und dem Reaktordruckbehälter ein Absperrorgan vorhanden ist, welches sich auch im Falle eines Lecks schließen lässt.

In **Tabelle 4.2** sind den einzelnen Ereignissen die o. g. Merkmale der Fehlercharakteristik zugeordnet.

Tabelle 4.2: Zuordnung von relevanten Ereignissen zu Merkmalen der Fehlercharakteristik

Anlage / Ereignis	Ausgangspunkt der Fehlerentstehung	Betrieblicher Schädigungsmechanismus	Einfluss auf die Tragfähigkeit	Absperrbarkeit vom RDB
Druckführende Komponenten				
Stade: Anzeigen an einer Schweißnaht einer Nachkühlleitung	Im Schweißgut liegender Fehler infolge Fertigungsfehler	Nicht feststellbar	Risse in Umfangsrichtung orientiert, kein Fehlerwachstum feststellbar, kein Einfluss auf Tragfähigkeit	nicht absperbar
Stade: Rissbefunde an Nachkühlarmatur und anschließender Leitung	Innere Oberfläche im Grundwerkstoff	Chloridinduzierte transkristalline Spannungsrisskorrosion	Aktives Fehlerwachstum und Zusammenwachsen der axialen Rissfelder nicht ausgeschlossen, Einfluss auf Tragfähigkeit gegeben	absperbar
Biblis A: Rissbefunde in einer Mischnaht am Stutzen einer Nachkühlleitung	Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Pufferung der Mischnaht infolge Fertigungsfehler	Nicht feststellbar	Risse in Umfangsrichtung orientiert, kein Wachstum, keine Wanddickenunterschreitung, kein Einfluss auf Tragfähigkeit	nicht absperbar
Brokdorf: Rissbefunde an der Reaktor-druckbehälter- Deckelentlüftungsleitung	Innere Oberfläche im Grundwerkstoff, von einem fertigungsbedingten Oberflächenfehler ausgehend	Ermüdung	Geringes Risswachstum in der Vergangenheit, weiteres Risswachstum nicht ausgeschlossen, Einfluss auf Tragfähigkeit gegeben	absperbar
Unterweser: Befunde an Speisewasserstutzen der Dampferzeuger	Innere Oberfläche im Grundwerkstoff in hochbeanspruchter Zone	Stillstandskorrosion im Zusammenwirken mit dehnungsinduzierter Risskorrosion	Kein aktives Wachstum bei Entdeckung, aber weiteres Wachstum nicht ausgeschlossen, Einfluss auf Tragfähigkeit gegeben	absperbar

Anlage / Ereignis	Ausgangspunkt der Fehlerentstehung	Betrieblicher Schädigungsmechanismus	Einfluss auf die Tragfähigkeit	Absperrbarkeit vom RDB
Krümme!: Risse in austenitischen Armaturengehäusen	Fehler an innerer Oberfläche im Grundwerkstoff	Chloridinduzierte transkristalline Spannungsrissskorrosion	Überwiegend geringe Risstiefen und -längen, weiteres Risswachstum nicht ausgeschlossen, bei tieferen Rissen Einfluss auf Tragfähigkeit möglich	absperrbar
Fukushima Daini 3 (J): Umfangsrisse im Schweißnahtbereich einer Treibwasserschleife	Fehler im Schweißnahtnebenbereich auf der Innenoberfläche	Interkristalline Spannungsrissskorrosion	In Umfangsrichtung orientierter Riss nahezu über dem gesamten Umfang, aktives Risswachstum nicht ausgeschlossen, Abriss möglich	nicht absperrbar
Wolf Creek (USA): Umfangsrisse in Mischschweißnähten von Stützen des Druckhalters	Fehler an innerer Oberfläche, in Reparaturzonen im Schweißgut	Vermutlich interkristalline Spannungsrissskorrosion	In Umfangsrichtung orientierte Risse, aktives Risswachstum nicht ausgeschlossen, Abriss möglich	nicht absperrbar
V.C. Summer (USA): Leckage am Stützen des Reaktordruckbehälters	Fehler in Reparaturzonen im Schweißgut der Mischschweißnaht	Interkristalline Spannungsrissskorrosion	Quer zur Schweißnaht orientierter Riss, aktives Risswachstum nicht ausgeschlossen, Einfluss auf Tragfähigkeit gering	nicht absperrbar
Dampferzeuger-Heizrohre				
Biblis B: Schäden an DE-Heizrohren infolge Rohrbodenreinigung	Fehler an äußerer Oberfläche (Sekundärseite)	Kavitation bei Rohrbodenreinigung	Flächiger Fehler mit kanalartigen Anteil, Einfluss auf Tragfähigkeit gegeben	nicht absperrbar
Biblis A: Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren im Rohrbodenbereich	Fehler an äußerer Oberfläche (Sekundärseite)	Interkristalline Spannungsrissskorrosion	axial orientierte Fehler, aktives Risswachstum nicht ausgeschlossen, Einfluss auf Tragfähigkeit gegeben	nicht absperrbar

Anlage / Ereignis	Ausgangspunkt der Fehlerentstehung	Betrieblicher Schädigungsmechanismus	Einfluss auf die Tragfähigkeit	Absperrbarkeit vom RDB
Unterweser: Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren	Fehler an äußerer Oberfläche (Sekundärseite)	Möglicherweise interkrist. Spannungsrisskorrosion, lineare Umfangsanzeige ungeklärt	axial und in Umfangsrichtung orientierte Fehler, aktives Risswachstum nicht ausgeschlossen, Einfluss auf Tragfähigkeit gegeben	nicht absperrbar

4.3 Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung

Im Rahmen der oben stehenden Analyse wurden die ausgewählten Ereignisse bezüglich Fehlererkennung und Fehlercharakteristik charakterisiert (**Abschn. 4.1** und **4.2**). Für die weitere Untersuchung wird die sicherheitstechnische Bedeutung in den Vordergrund gestellt. Die herausgearbeiteten Merkmale werden dabei auf wenige Merkmale, im Folgenden „Kriterien“ genannt, reduziert, die für die Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung herangezogen werden können. Zielsetzung ist es dabei, die für die Durchführung von Prüfungen in deutschen Kernkraftwerken relevanten Fälle herauszuarbeiten. Bei Ereignissen aus ausländischen Anlagen ist dabei auch die Frage der Übertragbarkeit zu diskutieren. Es wird wiederum zwischen druckführenden Komponenten und Dampferzeuger-Heizrohren unterschieden.

4.3.1 Druckführende Komponenten

Als Merkmale für die sicherheitstechnische Bedeutung wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Schädigung im nichtabsperrbaren Bereich,
- Aktiver Schädigungsmechanismus,
- Fehlerorientierung in Umfangsrichtung.

In **Tabelle 4.3** sind die ausgewählten Ereignisse aufgelistet und den o. g. Bewertungskriterien zugeordnet. Es stellt sich heraus, dass bei druckführenden Komponenten die Ereignisse:

- Fukushima Daini 3 (J): Umfangsrisse im Schweißnahtbereich einer Treibwasserschleife,
- Wolf Creek (USA): Umfangsrisse in Mischschweißnähten von Stützen des Druckhalters

alle Bewertungskriterien erfüllen.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf deutsche Kernkraftwerke liegen Übereinstimmungen bei den Mischschweißnähten der Anlage Wolf Creek vor. In einigen deutschen Anlagen sind Schweißzusatzwerkstoffe aus der betroffenen Nickellegierung

für die Fertigung der Mischschweißnähte verwendet worden. Bei den Umfangsrissen im Schweißnahtbereich einer Treibwasserschleife in der Anlage Fukushima Daini 3 ergibt sich dagegen ein anderes Bild. Der betroffene nichtstabilisierte austenitische Stahl gilt allgemein als korrosionsempfindlich im Bereich von Schweißnähten und wird in deutschen Anlagen nicht eingesetzt. In deutschen Anlagen kommen vorwiegend titan- bzw. niobstabilisierte austenitische Stähle (1.450, 1.4541) zum Einsatz. Der zu Beginn der 90er-Jahre des letzten Jahrhunderts in deutschen Anlagen mit SWR beobachteten interkristallinen Spannungsrisskorrosion im Bereich von Schweißnähten in Rohrleitungen in reaktornahen Bereichen von Siedewasserreaktoren, die aus dem titanstabilisierten austenitischen Stahl 1.4541 gefertigt waren, wurde durch Austausch gegen solche aus 1.4550 in Sonderqualität und unter Verwendung eines verbesserten Schweißverfahrens begegnet.

4.3.2 Dampferzeuger-Heizrohre

Als Merkmale für die sicherheitstechnische Bedeutung wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Aktiver Schädigungsmechanismus,
- Schnell wachsende Fehler,
- Fehlerorientierung in Umfangsrichtung.

In **Tabelle 4.4** sind die ausgewählten Ereignisse aufgelistet und den o. g. Bewertungskriterien zugeordnet. Bei den Dampferzeuger-Heizrohren erfüllt das Ereignis im Kernkraftwerk Unterweser „Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren“ grundsätzlich alle relevanten Bewertungskriterien, jedoch konnte noch nicht hinreichend geklärt werden, ob tatsächlich Fehler in Umfangsrichtung vorliegen. Darüber hinaus besteht noch Klärungsbedarf hinsichtlich des Schädigungsmechanismus. Das Ereignis im Kernkraftwerk Biblis A „Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren im Rohrbodenbereich“ erfüllt nicht alle relevanten Kriterien. Das Ereignis wird jedoch für die weitere Beurteilung berücksichtigt, weil auch hier schnellwachsende Fehler vorlagen und eine Übertragbarkeit auf andere Anlagen gegeben ist.

Tabelle 4.3: Druckführende Komponenten: Zuordnung von Ereignissen zu Kriterien zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung

Anlage / Ereignis	Schädigung im nicht- absperzbaren Bereich	Aktiver Schädigungs- mechanismus möglich	Fehlerorientierung in Umfangsrichtung
KKS: Anzeigen an einer Schweißnaht einer Nachkühlleitung	X		X
KKS: Rissbefunde an Nachkühlarmatur und anschließenden Leitung		X	
KWB-A: Rissbefunde in einer Mischnaht am Stutzen einer Nachkühlleitung	X		X
KBR: Rissbefunde an der Reaktordruckbehälter- Deckelentlüftungsleitung		X	X
KKU: Befunde an Speisewasserstutzen der Dampferzeuger		X	X
KKK: Risse in austenitischen Armaturengehäusen		X	
Fukushima Daini 3 (J): Umfangsrisse im Schweißnahtbereich einer Treibwasserschleife	X	X	X
Wolf Creek (USA): Umfangsrisse in Mischschweißnähten von Stutzen des Druckhalters	X	X	X
V.C. Summer (USA): Leckage am Stutzen des Reaktordruckbehälters	X	X	

Tabelle 4.4: Dampferzeuger-Heizrohre: Zuordnung von Ereignissen zu Kriterien zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung

Anlage / Ereignis	Aktiver Schädigungsmechanismus	Schnell wachsende Fehler	Fehlerorientierung in Umfangsrichtung
Biblis B: Schäden an DE-Heizrohren infolge Rohrbodenreinigung			
Biblis A: Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren im Rohrbodenbereich	X	X	
Unterweser: Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren	X	X	X ¹⁾

¹⁾ noch nicht hinreichend geklärt.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden zunächst die gewonnenen, allgemeinen Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Probleme bei der Fehlererkennung zusammengefasst (s. **Abschn. 5.1**). Danach werden die von uns als für deutsche Anlagen bedeutsam erkannten Aspekte:

- Fehler in Mischschweißnähten von druckführenden Komponenten (s. **Abschn. 5.2**) und
- schnell wachsende Fehler an Dampferzeuger-Heizrohren (s. **Abschn. 5.3**)

näher behandelt. Die relevanten Informationen zu den beiden Aspekten werden dabei zusammengefasst und hinsichtlich der Sicherstellung der Integrität der betroffenen Komponenten bzw. Bauteile diskutiert. Abschließend werden für diese Schwerpunkte jeweils Schlussfolgerungen hinsichtlich der Weiterentwicklung der Konzepte für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen abgeleitet.

Abschn. 5.4 enthält abschließende Bemerkungen.

5.1 Fehlererkennung

Wie die von uns vorgenommenen Auswertungen zeigen, können Probleme bei der Fehlererkennung insbesondere im Zusammenhang mit folgenden Aspekten stehen:

- Mängel bei Geometrie oder Oberflächenzustand

Prüfverfahren und -techniken müssen so ausgewählt werden, dass eine Fehlererkennung möglich ist und eine Fehlinterpretation von Prüfergebnissen vermieden wird. Daher müssen die Konstruktion und die Oberflächen einer Komponente oder eines Bauteils so gestaltet und ausgeführt sein, dass zerstörungsfreie Prüfungen mit dem aussagekräftigsten Prüfverfahren bzw. -techniken durchgeführt werden können.

Bei den Prüfungen des Volumens oder der inneren Oberfläche werden die Prüfungen hauptsächlich von der Außenoberfläche her in Schweißnahtbereichen und weniger in Grundwerkstoffbereichen durchgeführt. Für Ultraschallprüfungen müssen dafür die Prüfköpfe an den Außenoberflächen aufgesetzt werden, die deshalb möglichst eben und glatt sein sollten, um eine Ankoppelung der Prüfsonden für die Einschallung zu gewährleisten. Durchstrahlungsprüfungen werden zwar bei größeren Wanddicken von innen durchgeführt, aber auch hier können Fehlsignale durch Kantenversatz oder

Durchhänge entstehen. Der Idealzustand im Bereich von Schweißnähten ist daher dann gegeben, wenn die Oberflächen eben geschliffen und die Wanddickenübergänge seicht sind.

Eine weitere Fehlerquelle kann mangelnde Zugänglichkeit zu den Prüfzonen oder eine komplizierte Bauteilgeometrie sein, wodurch es zu Problemen mit der Handhabung der Prüfeinrichtung oder Schwierigkeiten bei der Signalgewinnung (Erreichbarkeit möglicher Fehler in allen Bauteil- und Werkstoffbereichen) oder der Anzeigeninterpretation (Überlagerung von Formanzeigen mit Signalen von Fehlern) kommen kann.

Um Fehlerquellen möglichst auszuschließen, sollten daher folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Oberflächen sollten außen und innen eben und möglichst glatt sein.
- Es sollten keine Durchhänge des Schweißgutes oder Kantenversätze vorliegen.
- Alle Prüfzonen sollten für die Handhabung der Prüfeinrichtung und die Signalgewinnung bei der Prüfung ausreichend zugänglich sein.
- Unzureichende Dokumentation

Im Zuge von Prüfungen können Probleme bei der Auswertung der Dokumentation entstehen, wenn Besonderheiten, die bei der Durchführung der Prüfungen auftraten, vom zuständigen Prüfpersonal nicht, nicht hinreichend oder nicht an der geeigneter Stelle beschrieben wurden. Darunter fallen auch zum Zeitpunkt der Prüfungen nicht erklär-bare Sachverhalte, die für nachfolgende Prüfungen nicht kenntlich gemacht wurden.

- Fehler des Prüfers

Die Möglichkeiten menschlicher Fehler bei Prüfungen umfassen ein weites Feld und wurden in allgemeiner Form in **Kap. 2** angesprochen. Fehler können bei der Durchführung der Prüfungen auftreten, wenn

- die Vorgaben des Prüfhandbuches nicht hinreichend eingehalten werden oder diese Vorgaben einen großen Interpretationsspielraum lassen,
- wenn Fehlerlage und -ausdehnung nicht eindeutig erkennbar sind,
- wenn ein ungewöhnlicher Sachverhalt vorliegt, der nicht der Erfahrung und der dadurch geprägten Erwartungshaltung entspricht,

- wenn kein betriebsbedingter Schaden erwartet wird und aus vorangegangenen Prüfungen auch keine Hinweise auf entsprechende Fehler vorliegen.
- Fehler bei der Auswertung

Fehler bei der Auswertung sind möglich, wenn die angewandte Prüftechnik für die vorhandenen Fehler keine ausreichende Empfindlichkeit aufweist oder die Signalausbreitung aufgrund anisotroper Werkstoffe oder komplexer Bauteilgeometrie zu Anzeigen führt, die nicht ohne Simulation oder Qualifizierung an Vergleichskörpern auszuwerten sind. Um Fehler bei der Auswertung möglichst auszuschließen, sollten daher folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die angewandte Prüftechnik muss für die vorhandenen Fehler eine ausreichende Empfindlichkeit besitzen und
- bei komplexeren Prüfaufgaben sollten zur Charakterisierung der Fehler Simulationen oder Prüfungen an Vergleichskörpern herangezogen werden.
- Mängel beim eingesetzten Prüfverfahren bzw. -technik

Prüfverfahren und -techniken müssen so ausgewählt werden, dass sie mögliche Fehler bei der vorhandenen Bauteilgeometrie und dessen Werkstoffzustand möglichst sicher erkennen und charakterisieren können. Der technische Fortschritt führt hier häufig zu wesentlichen Verbesserungen. Daher sollte bei Auswahl der Prüfverfahren und Prüftechniken

- stets die Eignung der gewählten Verfahren und -techniken für den einzelnen Anwendungsfall begründet werden,
- der technische Fortschritt berücksichtigt werden,
- bei Einsatz neuer Prüftechniken die veränderten Randbedingungen beachtet werden und
- bei der Anwendung auch die Weiterentwicklung der Vorgaben in Normen und Regelwerken beachtet werden.

Insgesamt lassen sich hinsichtlich des Aspekts „Fehlererkennung“ die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

Zur Vermeidung von möglichen Problemen bei der Fehlererkennung enthalten das kerntechnische Regelwerk bzw. die nachgeordneten Normen eine Reihe von Vorgaben. Entsprechend den oben dargestellten, möglichen Problemen bei der Fehlererkennung ist allerdings nicht vollständig auszuschließen, dass auch bei Einhaltung dieser Vorgaben vorhandene Fehler bzw. deren Wachstum im Rahmen zerstörungsfreier wiederkehrender Prüfungen nicht erkannt werden. Grundsätzlich sollten zur Vermeidung möglicher Probleme vor der Durchführung von Prüfungen die genauen Randbedingungen, insbesondere auch im Vergleich zu den vorangegangenen Prüfungen hinterfragt werden. Um mögliche Probleme bei der Fehlererkennung frühzeitig zu identifizieren und weitgehend auszuschließen, ist es unseres Erachtens erforderlich, bei der Planung der Prüfungen jeweils die unten stehenden Fragen konsequent zu beantworten:

- Können bei der Durchführung der Prüfung verfälschende Einflüsse aus Geometrie und Oberflächenzustand ausgeschlossen werden?
- Welche menschlichen Fehler können bei der Auswertung und bei der Dokumentation der Prüfungen auftreten und wie können diese vermieden werden?
- Wie sind die Aussagefähigkeit der vorgesehenen Prüfverfahren und -techniken vor dem Hintergrund technischer Weiterentwicklungen zu bewerten?

5.2 Fehler in Mischschweißnähten von druckführenden Komponenten

Im Folgenden werden Fehler in Mischschweißnähten betrachtet, bei denen ein aktiver Schädigungsmechanismus infolge interkristalliner Spannungsrisskorrosion nicht ausgeschlossen werden kann und ein Potential für Leckagen oder Abrisse vorhanden ist. Aus der Betriebserfahrung sind sowohl axiale Fehler (quer zur Schweißrichtung) als auch in Umfangsrichtung verlaufende Fehler (in Schweißrichtung) in Rundschweißnähten bekannt. Bei ausschließlich axialen Fehlern in Schweißnähten ist nur mit Leckagen, nicht aber mit Abrissen zu rechnen. Dagegen sind bei unentdeckten Fehlern in Umfangsrichtung grundsätzlich auch Abrisse in Betracht zu ziehen. Sie müssen daher mit hoher Sicherheit frühzeitig erkannt werden. Die Fehler entstehen durch werkstoff- und verarbeitungsspezifische Gegebenheiten beim Einsatz von Nickellegierungen in Verbindung mit Eigenspannungszuständen, die vornehmlich durch Reparaturschweißungen hervorgerufen wurden.

Die in den Kernkraftwerken eingesetzten Nickellegierungen sind Legierungen mit hohem Nickelgehalt oberhalb 60%. Die Neigung von derartigen Werkstoffen zu interkristalliner Spannungsrissskorrosion in Hochtemperaturwasser von Leichtwasserreaktoren ist aus der Betriebserfahrung seit langem bekannt. Umfangreiche Erfahrungen mit Rissbildungen liegen insbesondere von aus Alloy 600 gefertigten Dampferzeuger-Heizrohren vor. Für die Fehlerentstehung auf der Primärseite wird in diesem Zusammenhang im englischen Sprachraum der Begriff „Primary Water Stress Corrosion Cracking“ (PWSCC) verwendet. Umfangreiche Schäden infolge dieses Mechanismus sind auch an verschiedenen Stützen aus Alloy 600 und Mischnähten aus artgleichen Schweißzusatzwerkstoffen (Alloy 82 und 182) in ausländischen Anlagen bekannt geworden.

Ein maßgebender Parameter ist die anliegende Spannung (auch Eigenspannungen). Aus Forschung und Entwicklung liegen keine ausreichenden Informationen zu Inkubationszeit und Risswachstumsgeschwindigkeit vor, die belastbare Rückschlüsse auf Eintritt und Fortschritt der Korrosion zulassen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Schäden aufgrund langer Inkubationszeiten erst nach langjährigem Betrieb eintreten. Ebenso kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich im Zeitraum zwischen den vorgesehenen Prüfzyklen ein Anfangsrisss mit anschließendem schnellem Risswachstum bildet.

Die im **Kap. 3** beschriebenen Ereignisse mit Schäden an Mischschweißnähten betrafen Anlagen in den USA. Die Auswertung der neuesten Betriebserfahrung ergab weitere gleichartige Fehler sowohl in den USA /NRC 08/ als auch in Japan /JNE 08/. Die Konstruktionen in deutschen und ausländischen Kernkraftwerken sind teilweise unterschiedlich. Zum Beispiel sind bei Druckwasserreaktoren nach dem Konzept von Westinghouse die Hauptkühlmittelleitung aus austenitischem Stahl und die Großkomponenten, wie Reaktordruckbehälter, Dampferzeuger, Druckhalter, aus ferritischem Stahl gefertigt. Dies bedeutet, dass die Großkomponenten durch Mischschweißnähte mit den Hauptkühlmittelleitungen verbunden sind. In deutschen Anlagen sind dagegen die Hauptkühlmittelleitungen aus ferritischem Stahl gefertigt und auf den Innenseiten mit einer Plattierung aus austenitischem Stahl versehen. D. h., dass sich an den Vorschuhenden der Abzweigstützen, z. B. Nachkühlleitungen aus austenitischem Stahl, Mischschweißnähte befinden. Der Aufbau der Mischschweißnähte mit oder ohne Pufferungen ist jedoch prinzipiell vergleichbar. Unterschiede sind aufgrund der oben beschriebenen konstruktiven Merkmale hinsichtlich der Durchmesser und der

Wanddicken gegeben. So können in ausländischen Druckwasserreaktoren insbesondere Hauptkühlmittelleitungen (z. B. DN 700) und in deutschen Kernkraftwerken die abzweigenden Leitungen (z. B. DN 250) betroffen sein. Bei großen Nennweiten ist auch die Menge des eingebrachten Schweißgutes hinsichtlich des Aufbaus und Verbleibs von Eigenspannungen zu beachten.

Insgesamt sind in deutschen Kernkraftwerken eine Vielzahl von Mischschweißnähten im Bereich der druckführenden Umschließung vorhanden /MPA 07b/:

- Druckwasserreaktoren:
 - Reaktordruckbehälter: Stutzen für Steuerstäbe, Instrumentierung, Entlüftung, Druckrohre der Steuerstäbe.
 - Druckhalter: Stutzen der Volumenausgleichs-, Abblase-, Sprühleitung.
 - Hauptkühlmittelleitung: Abzweige der Nachkühl-, Sprüh-, Volumenausgleichsleitung, Zuleitung zum Volumenregelsystem.
- Siedewasserreaktoren:
 - Reaktordruckbehälter: Stutzen der Reaktorwasserreinigung, Abfahrkühlung, Kernflut-, Kernsprühsystem.
 - Nachkühlsystem: Stutzen bis zum Absperrschieber.

Insgesamt ist die Anzahl der Mischschweißnähte in Druckwasserreaktoren deutlich höher als in Siedewasserreaktoren.

Zur Sicherstellung der Integrität werden an den Mischschweißnähten wiederkehrende Prüfungen in Form von zerstörungsfreien Prüfungen gemäß den entsprechenden KTA-Regeln durchgeführt. Auf die Prüfverfahren und -techniken wurde im **Kap. 2** eingegangen.

Aufgrund der beschriebenen Schäden in ausländischen Anlagen infolge Korrosion an Mischschweißnähten wurden für deutsche Anlagen Betrachtungen zur Übertragbarkeit angestellt. Die Übertragbarkeit wurde bestätigt, da derartige Schweißzusatzwerkstoffe auch in sicherheitsrelevanten Mischschweißnähten in deutscher Anlagen Verwendung fanden. Hierzu wurden eine Weiterleitungsnachricht der GRS /GRS 01c/ und Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission /RSK 05b/ erstellt. Daraufhin wurde

ein umfangreiches Sonderprüfprogramm für Mischschweißnähte zur Auffindung von Fehler entwickelt und durchgeführt. Die Randbedingungen für diese Prüfungen wurden so vorgegeben, dass sowohl Quer- als auch Umfangsfehler mit qualifizierten Prüfverfahren und -techniken aufgefunden werden können. Vorrangig sollten die Mischschweißnähte geprüft werden, bei denen im Rahmen der Fertigung Reparatur-schweißungen durchgeführt wurden, die im Temperaturbereich über 300 °C betrieben werden und direkten Kontakt zum Kühlmedium haben. Nach dem jetzigen Kenntnisstand wurden im Rahmen dieser Sonderprüfungen im Bereich der druckführenden Umschließung keine betriebsbedingten Fehler detektiert.

Nach KTA 3201.4 /KTA 99/ sind Ultraschallprüfungen von den Außenoberflächen zur Auffindung von Fehlern auf den Innenoberflächen vorgegeben. Die Auffindung von Fehlern infolge interkristalliner Spannungsrisskorrosion auf den Innenoberflächen durch die Ultraschallprüfung kann insbesondere im Anfangsstadium der Fehlerentstehung problematisch sein, wenn die Risse wegen der geringen Rissöffnung die Schallwellen nicht reflektieren. Hinzu kommen mögliche Prüfschwierigkeiten infolge der dendritisch ausgerichteten Kristallbildungen im Schweißgut. Grundsätzlich wären auch Prüfungen von den Innenoberflächen, z. B. mit Wirbelstrom, zum Auffinden der Fehler geeignet. Dem steht jedoch die mangelnde Zugänglichkeit für derartige Prüfungen entgegen. Beispielsweise sind die Innenoberflächen der Mischschweißnähte durch Wärmeschutzrohre in den Stutzen der Hauptkühlmittelleitungen verdeckt. Die Prüfoberflächen wären nur durch die Räume zwischen den Stutzen und den Wärmeschutzrohren von den Hauptkühlmittelleitungen erreichbar. Hier bestehen jedoch konstruktive Einschränkungen hinsichtlich der Zugänglichkeit.

Die beschriebenen Aspekte erfordern für sicherheitsrelevante Mischschweißnähte in deutschen Kernkraftwerken ein in sich geschlossenes Prüfkonzept für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen. Hierzu werden die folgenden Ansatzpunkte für die Optimierung von Prüfverfahren, -umfang und -zyklus gesehen:

- Prüfverfahren
 - Zerstörungsfreien Prüfverfahren bzw. -techniken, die von den Außenoberflächen ausgeführt werden, sollten im Hinblick auf die sichere Auffindbarkeit von Fehlern, insbesondere im Anfangszustand bewertet werden. Hierzu sollten insbesondere auch aufgefundene Fehler analysiert und mit diversitären Prüfmethoden überprüft werden.

- Die Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren, die von den Innenoberflächen ausgeführt werden können, sollte geprüft werden.
- Prüfumfang und –zyklus
 - Prüfumfang und -zyklus sollten anlagenspezifisch entsprechend den konstruktiven und fertigungstechnischen Randbedingungen sowie den jeweiligen Erkenntnissen zum Schädigungsmechanismus angepasst werden. Dabei ist sicherzustellen, dass mögliche Rissbildungen durch Prüfungen an repräsentativen Stellen frühzeitig erkannt werden.
 - Die Kenntnisse zu Inkubationszeiten und Risswachstums bei interkristalliner Spannungsrisskorrosion an Mischschweißnähten sollten erweitert werden. Hierzu sollten Informationen aus Forschung und Entwicklung sowie aus der Betriebserfahrung systematisch ausgewertet und vertieft analysiert werden.
 - Entsprechend den bisherigen Erkenntnissen sollten Mischschweißnähte mit korrosionsgefährdetem Schweißgut im Kontakt zum Medium mit einem repräsentativen Prüfumfang besonders berücksichtigt werden.

5.3 Schnell wachsende Fehler an Dampferzeuger-Heizrohren

Aus schnell wachsenden Fehlern in Dampferzeuger-Heizrohren infolge Korrosion ergibt sich ein Potential für die Entstehung von Leckagen. Da die Schädigungen in zwei älteren deutschen Kernkraftwerken auftraten, können dabei Beiträge aus der früheren Phosphatfahrweise nicht ausgeschlossen werden. Diese Anlagen gingen mit der genannten Fahrweise mit relativ niedrigen pH-Werten in Betrieb. Die Folge waren Schädigungen infolge Wastage (Wanddickenminderung durch chemischen Werkstoffabtrag) und die Ablagerung größerer Mengen von Korrosionsprodukten in den Dampferzeugern. Bevorzugt fand die Schädigung im Bereich der Ablagerungen statt. Zur Abhilfe wurde danach die so genannte „Hoch-AVT-Fahrweise“ mit pH-Werten größer 9,8 eingeführt, die sich bisher bewährt hat.

In deutschen Anlagen sind bisher keine Abrisse von Dampferzeuger-Heizrohren zu verzeichnen. An Heizrohren aus dem Werkstoff Alloy 800 sind bisher lediglich an sieben Heizrohren Leckagen aufgetreten (Stand Dezember 2008). Die Leckagemengen waren verhältnismäßig gering und nur in zwei Fällen in den 80er Jahren größer als drei Liter pro Stunde /BfS 08/, /ARE 06/. Die bisherige gute Betriebs-

erfahrung schließt jedoch nicht aus, dass es im Laufe des Betriebs zu vereinzelt, unbemerkten, schnell wachsenden Fehlern und damit zu Heizrohrleckagen kommen kann. Diese Möglichkeit besteht grundsätzlich auch wenn wiederkehrende Prüfungen mit verkürzten Prüfintervallen und/oder erhöhtem Prüfumfang durchgeführt werden. Ansatzpunkte für ein Gesamtkonzept zur Sicherstellung der Integrität der Dampferzeuger-Heizrohre werden wie folgt gesehen:

- Erweiterung der Kenntnisse zum Schädigungsmechanismus

Die Kenntnisse zum Schädigungsmechanismus sollten verbessert werden. Hierzu ist zu prüfen, inwieweit durch zerstörende Prüfungen an fehlerbehafteten Dampferzeuger-Heizrohren, Laboruntersuchungen sowie zusätzliche, ingenieurtechnische Überlegungen die Annahmen zum Schädigungsmechanismus, insbesondere zu seiner Kinetik und seinen Randbedingungen, weiter eingegrenzt werden können.

- Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden

Zur Vermeidung von Schäden sollten entsprechend den anlagenspezifischen Gegebenheiten folgende Maßnahmen optimiert werden:

- Maßnahmen zur Vermeidung von Fremdstoffeinträgen,
 - Wasserchemische Überwachung und Analyse der Folgen auch bei zeitlich begrenzten Abweichungen von den Normalbetriebswerten,
 - Rohrbodenreinigung und chemische Reinigung der Heizrohre.
- Ermittlung korrosionsgefährdeter Bereiche

Einträge von Verunreinigungen können sich im Dampferzeugerinhaltswasser und verstärkt lokal, z. B. in Belägen oder Spalten, ansammeln. Die Anwendung des „Hide-Out-Return“-Verfahrens kann Hinweise auf eine Korrosionsgefährdung für die Heizrohre liefern. Durch diese Messungen und anschließende Berechnungen kann ermittelt werden, inwieweit sich lokal saure Umgebungsbedingungen während des vorangegangenen Betriebs eingestellt haben. Die Korrosionsneigung von Alloy 800 nimmt unter sauren Bedingungen zu. Es sollte in diesem Fall analysiert werden, welche Bereiche aufgrund niedriger pH-Werte besonders gefährdet sind. Diese Bereiche sollten im Rahmen von wiederkehrenden Prüfungen bevorzugt überprüft werden.

- Analyse der aufgetretenen Fehler

Es ist zweckmäßig, dass bei der Detektion von Fehlern an Dampferzeuger-Heizrohren die Fehlergrößen und deren Ausdehnung mit unterschiedlichen Prüftechniken verifiziert werden. Für die Beurteilung der Integrität der Dampferzeuger-Heizrohre in bisher nicht betroffenen Kernkraftwerken sollte die Übertragbarkeit überprüft werden.

- Anlagenspezifische Ausrichtung des Prüfkonzepts

Gemäß KTA 3201.4 /KTA 99/ sind vor jeder wiederkehrenden Prüfung, Prüfart, -umfang und -zeitpunkt neu zu bewerten und ggf. zu aktualisieren. Hierbei sind insbesondere die Ergebnisse der vorangegangenen Prüfungen, der Betriebsüberwachung sowie Betriebserfahrungen aus fremden Anlagen zu berücksichtigen. Für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen an Dampferzeuger-Heizrohren in deutschen Anlagen bedeutet das, dass das Prüfkonzept unter Berücksichtigung der jeweiligen anlagenspezifischen Gegebenheiten anzupassen ist. Dabei sind die zum Schädigungsmechanismus und dessen Randbedingungen vorhandene Kenntnisse heranzuziehen. Im Falle von vermehrten Schäden oder Abweichungen von relevanten wasserchemischen Parametern sollte der Prüfumfang erhöht werden. Das Prüfintervall sollte entsprechend der beobachteten Fehlerwachstumsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Anzahl der schadhaften Heizrohre angepasst werden. Bei signifikanter Zunahme der Anzahl der schadhaften Heizrohre sind engere Prüfintervalle festzulegen. Die Fehlerwachstumsgeschwindigkeiten sollten über mehrere Prüfintervalle beobachtet und analysiert werden.

- Auswahl geeigneter Prüfverfahren und -techniken

Die einzusetzenden Prüfverfahren bzw. -techniken sollten abhängig vom Prüfkonzept gewählt werden. Für die integrale Messung kann weiterhin die Innendurchlaufsonde eingesetzt werden. Für spezifische Messungen ist zum Beispiel die Anwendung der Arraysonde geeignet (siehe **Abschn. 2.7.2**).

Die oben zur Sicherstellung der Integrität der Dampferzeuger-Heizrohre beschriebenen Ansatzpunkte verlangen in der Praxis ein differenziertes, anlagenspezifisches Vorgehen.

5.4 Abschließende Bemerkungen

Mit den durchgeführten Arbeiten wurde der Kenntnisstand zur Auffindbarkeit und Charakterisierung von Fehlern bei wiederkehrenden Prüfungen systematisch aufgearbeitet. Daraus wurden sicherheitstechnisch bedeutsame Schwerpunkte abgeleitet, für die jeweils ein aus Sicht der GRS geeignetes Maßnahmenpaket umrissen wurde:

- Für korrosionsgefährdete sicherheitsrelevante Mischschweißnähte in deutschen Kernkraftwerken ist ein in sich geschlossenes anlagenspezifisches Prüfkonzept für wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen erforderlich. Ansatzpunkte für die Optimierung von Prüfverfahren, -umfang und -zyklus wurden benannt.
- Für Dampferzeuger-Heizrohre ist ein Gesamtkonzept zur Sicherstellung ihrer Integrität erforderlich. Ansatzpunkte hierfür sind eine Erweiterung der Kenntnisse zum Schädigungsmechanismus sowie Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden, Ermittlung korrosionsgefährdeter Bereiche, Analyse der aufgetretenen Fehler, Optimierung des Prüfkonzepts und der eingesetzten Prüfverfahren und -techniken. Diese Maßnahmen sollten entsprechend den jeweiligen Gegebenheiten weitgehend anlagenspezifisch umgesetzt werden.

Die Kenntnisse zu den genannten Einzelmaßnahmen und ihrer Wirksamkeit sollten im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Anforderungen an die rechtzeitige Erkennung und Beherrschung des korrosionsgestützten Risswachstums an sicherheitstechnisch bedeutsamen druckführenden Komponenten im Rahmen weiterführender Arbeiten vertieft werden.

6 Literaturverzeichnis

- /ARE 06/ AREVA:
Operating Experience with Siemens Steam Generators in PWR-Plants
as per 2006-06-21
- /AZO 85/ Azodi, D., Reck, H., Schulz, H. (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktor-
sicherheit) und Arenz, R. (Kraftwerk-Union):
Grenztragfähigkeit geschädigter Dampferzeuger-Heizrohre, Abschluss-
bericht, GRS-A-1142, September 1985
- /BfS 08/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Auswertung von meldepflichtigen Ereignissen, Stand 2008
- /DIN 89/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN: DIN 54 125:
Manuelle Prüfung von Schweißverbindungen mit Ultraschall,
Januar 1989 (informativ)
- /DIN 05/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN: DIN 25 435-1:
Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des Primärkreises von
Leichtwasserreaktoren, Teil 1: Mechanisierte Ultraschallprüfung,
September 2005 1987
- /DIN 03a/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) - FB Kerntechnik - im DIN:
DIN 25 435-2: Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des
Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Magnetpulver- und
Eindringprüfung, Mai 2003
- /DIN 03b/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) - FB Kerntechnik - im DIN:
DIN 25 435-4: Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des
Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Sichtprüfung, Mai 2003
- /DIN 03c/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) - FB Kerntechnik - im DIN:
DIN 25 435-6: Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des
Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 6: Wirbelstromprüfung
von Dampferzeuger-Heizrohren, Mai 2003

- /DIN 03d/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) - FB Kerntechnik - im DIN:
DIN 25 435-7: Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des
Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 7: Durchstrahlungs-
prüfung, Mai 2003
- /DIN 08/ Normenausschuss Materialprüfung im DIN: DIN EN 473:
Zerstörungsfreie Prüfung- Qualifizierung und Zertifizierung von Personal
der zerstörungsfreien Prüfung-; Allgemeine Grundlagen;
Deutsche Fassung EN 473: 2008
- /DOB 06/ G. Dobmann, K.J. Langenberg, U. Mletzko, W. Müller, V. Schmitz:
Prüftechnische Vorteile durch die Nutzung von SAFT-Algorithmen bei
der Prüfung von Mischnähten – Nachweis, Positionierung und Größen-
bestimmung der Befunde im anisotropen Gefüge.
32. MPA Seminar, Stuttgart 2006
- /EC 07/ European Commission:
Joint Research Centre: 6th International Conference on NDE in Relation
to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components,
8-10 October 2007, Budapest
- /ENIQ 99/ European Commission:
European Network for Inspection Qualification (ENIQ): Final Report of
the first ENIQ Pilot Study, ENIQ Report nr 20 December 1999
- /EU 04/ Schimpfke, T., Schulz, H., Brickstad, B., Chapman, V., Shepherd, B.,
Kelley, S., Olsson, S., Wintle, J., Muhammed, A., Simola, K.:
Nuclear Risk Based Inspection Methodology (NURBIM),
Final Report, 2004
- /GRS 99/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 1999/04: Kleinstleckage eines Dampferzeuger-Heizrohres im
Kernkraftwerk Biblis B, März 1999

- /GRS 01a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 2001/01: Rissbefunde in einer Mischnaht am Stutzen einer Nach-
kühlleitung im Kernkraftwerk Biblis, Block A, Januar 2001
- /GRS 01b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 2001/04: Rissbefunde am Austrittsstutzen der Nachkühl-
Saugarmatur TH02 S001 (Erstabsperrarmatur) und in dem an-
schließenden Rohrleitungsstück im Kernkraftwerk Stade, Mai 2001
- /GRS 01c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken des Aus-
landes,
WLN 2001/05: Schäden an Mischnähten der Reaktordruckbehälter-
stutzen in den Kernkraftwerken Virgil Summer (USA) und Ringhals 4
(Schweden), Juni 2001
- /GRS 03a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachricht zu Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundes-
republik Deutschland,
WLN 2003/02: Große Korrosionsmulde im Reaktordruckbehälter-Deckel
des Kernkraftwerkes Davis Besse (USA), Januar 2003
- /GRS 03b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 2003/07: Befunde an Speisewasserstutzen der Dampferzeuger im
Kernkraftwerk Unterweser, Mai 2003

- /GRS 05a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 2005/05: Schäden an den Reaktordruckbehälter-Deckel-
entlüftungsleitungen in den Kernkraftwerken Neckar II und Brokdorf,
März 2005
- /GRS 05b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 2005/07: Wirbelstromanzeigen an Heizrohren im Rohrboden-
bereich von Dampferzeugern im Kernkraftwerk Biblis, Block A, Mai 2005
- /GRS 08a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Workshop:
„Auffindbarkeit von Fehlern an druckführenden Komponenten bei WKP“
am 24. und 25. Januar 2008 bei der GRS in Köln
- /GRS 08b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 2008/03: Risse in austenitischen Armaturengehäuse infolge
chloridinduzierter transkristalliner Spannungsrisskorrosion im Kernkraft-
werk Krümmel, April 2008
- /GRS 08c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland,
WLN 2008/04: Befunde an Dampferzeuger-Heizrohren im Kernkraftwerk
Unterweser, Mai 2008
- /IAE 04/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Improvement of In-Service
Inspection in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1400,
Vienna, July 2004
- /JNE 06/ Japan Nuclear Energy Safety Organization:
Cracks of the Primary Loop Recirculation System Piping at Fukushima
Daini Unit 3, April 2006

- /JNE 08/ Japan Nuclear Energy Safety Organisation:
Cracks at Steam Generator Inlet Nozzles in Japan, November 2008
- /KKS 00/ Unterlagen zu Anzeigen in einer Schweißnaht einer Nachkühlleitung im
Kernkraftwerk Stade, 2000
- /KTA 84/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1202:
Anforderungen an das Prüfhandbuch,
Fassung 6/84, Sicherheitstechnische Regel des KTA
- /KTA 99/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3201.4:
Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 4:
Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung,
Fassung: Juni 1999, Sicherheitstechnische Regel des KTA
- /KTA 96/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3211.4:
Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb
des Primärkreises; Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebs-
überwachung,
Fassung: Juni 1996, Sicherheitstechnische Regel des KTA
- /MIF 03/ Michel, F. Schulz, H., Reck, H.:
Entwicklung qualifizierter Werkzeuge zur anlagenübergreifenden Be-
wertung des Alterungsmanagements passiver maschinentechnischer
Einrichtungen in Kernkraftwerken, Beitrag zum 29. MPA-Seminar,
Stuttgart, Oktober 2003
- /MIF 05/ Michel, F.:
Weiterentwicklung der Wissensbasis zur Bewertung der Sicherheit von
druckführenden Komponenten in Kernkraftwerken,
Beitrag zum GRS-Jahresbericht 2004/2005

- /MPA 04/ Materialprüfanstalt (MPA) Universität Stuttgart:
Zerstörungsfreie Prüfung von Mischnähten, austenitischen Schweiß-
nähten, Plattierung und Kerneinbauten,
4. Technischer Bericht, November 2004,
BMU Vorhaben SR 2426, Auswertung des nationalen und inter-
nationalen Kenntnisstandes zu sicherheitsrelevanten Aspekten im Hin-
blick auf die Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerks für
mechanische Komponenten
- /MPA 07a/ Materialprüfanstalt (MPA) Universität Stuttgart:
Erste Bewertung der Aussagesicherheit von zerstörungsfreien
Prüfungen an Mischweißverbindungen auf Querrisse,
Technischer Bericht 1.1, 06/2007,
BMU-Vorhaben SR 2501: Zentrale Untersuchung und Auswertung von
Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende
Anlagenteile von Kernkraftwerken
- /MPA 07b/ Materialprüfanstalt (MPA) Universität Stuttgart:
Auswertung von Unterlagen zur zerstörungsfreien Mischnahtprüfung in
deutschen Kernkraftanlagen,
Technischer Bericht 4.2, November 2007,
BMU-Vorhaben SR 2501: Zentrale Untersuchung und Auswertung von
Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende
Anlagenteile von Kernkraftwerken
- /NEA 06/ OECD/NEA SCAP Project:
Program of Work, Draft, June 2006
- /NRC 06/ Gonzalez, H., und Lupold, T.:
Wolf Creek Pressurizer Weld Flaws,
November 2006, U. S. Nuclear Regulatory Commission
- /NRC 08/ Tergoning, R.L.:
St. Lucie Retired Pressurizer Nozzle Indication,
April 2008, U. S. Nuclear Regulatory Commission

- /REC 06/ Reck, H., Schulz, S.:
Internationale Betriebserfahrung mit Rohrleitungen in Kernkraftwerken:
Fortschritt des OECD Pipe Failure Data Exchange (OPDE) Datenbank
Projektes, Beitrag zum 32. MPA Seminar, Stuttgart Oktober 2006
- /RSK 02/ Anpassung und Optimierung von zerstörungsfreien Prüfungen an den
sicherheitstechnisch bedeutsamen Systemen und Komponenten
Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK),
Anlage zum Ergebnisprotokoll der 350. Sitzung am 11.04.2002
- /RSK 04/ Vorkommnis der INES-Kategorie 3 im amerikanischen Kernkraftwerk
Davis Besse vom 6. März 2002, „Borsäurekorrosion am Reaktordruck-
behälterdeckel“ und Schlussfolgerungen für deutsche Anlagen
Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK),
Anlage zum Ergebnisprotokoll der 370. Sitzung am 04.03.2004
- /RSK 05a/ Untersuchungsvorhaben SR 2318 des BMU „Bewertung der Aussage-
fähigkeit von Ultraschall- und Wirbelstromprüfung austenitischer
Plattierungen von Reaktordruckbehältern“,
Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK),
Anlage 1 zum Ergebnisprotokoll der 379. Sitzung am 27.01.2005
- /RSK 05b/ Derzeitige Vorgehensweise bei zerstörungsfreien Prüfungen, die im
Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen an ferritisch-austenitischen
Mischschweißnähten erfolgen
Stellungnahme zum Schwerpunktthema 1 des Untersuchungsvorhabens
SR 2360 des BMU, Reaktor-Sicherheitskommission (RSK),
Anlage 5 zum Ergebnisprotokoll der 389. Sitzung am 15./16.12.2005
- /VGB-ENIQ/ VGB PowerTech:
Richtlinie: Methodik für das Vorgehen bei der Qualifizierung von zer-
störungsfreien Prüfungen (VGB-ENIQ-Richtlinie) VGB-R 516,
Erste Ausgabe 2001
- /VGB 01/ VGB PowerTech:
Richtlinie: Auswertung von Messergebnissen bei mechanisierten Ultra-
schallprüfungen, VGB-R 515, Erste Ausgabe 2001

7 Bilder

Bild 2.1:	Zerstörungsfreie Prüfungen: Zuordnung von Anzeigen und Fehler /KTA 99/.....	12
Bild 2.2:	Erzeugung einer Wellenfront durch definierte zeitversetzte Anregung einzelner Schwingerelemente des Gruppenstrahlers („Array“)	17
Bild 2.3:	Das Messprinzip des getakteten Gruppenstrahlers	18
Bild 2.4:	Messinformation eines konventionellen und getakteten Gruppenstrahlers.....	19
Bild 2.5:	Oben: Wirbelstromprüfung von Dampferzeuger-Heizrohren mit der Kombinationssonde Unten: Detail Array-Sonde.....	25
Bild 3.1	Kernkraftwerk Stade: Anzeigen in der Schweißnaht in der Nachkühlleitung.....	31
Bild 3.2:	Kernkraftwerk Stade: Rissbefunde an der Erstabsperrearmatur des Nachkühlsystems.....	33
Bild 3.3:	Kernkraftwerk Stade: Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen	34
Bild 3.4:	Kernkraftwerk Biblis A: Stutzen am Abzweig Hauptkühlmittel-leitung zum Not- und Nachkühlsystem	36
Bild 3.5:	Kernkraftwerk Biblis A: Rissbefunde auf dem Umfang der Mischschweißnaht.....	37
Bild 3.6:	Kernkraftwerk Biblis A: Trennung der Pufferung vom ferritischen Grundwerkstoff (Disbondig)	37
Bild 3.7:	KKW Brokdorf: Reaktordruckbehälterdeckel-Entlüftungsleitung	40

Bild 3.8:	KKW Brokdorf: Ansicht des Fehlerverlaufs ca. 45° zur Rohrachse.....	40
Bild 3.9:	KKW Brokdorf: Rissbefund im Grundwerkstoff.....	41
Bild 3.10:	Kernkraftwerk Unterweser: Befunde in Speisewasserstutzen der Dampferzeuger	43
Bild 3.11:	Kernkraftwerk Unterweser: Befund in der druckführenden Wand des Speisewasserstutzens.....	44
Bild 3.12:	Armatur mit Bredtschneider-Verschluss	46
Bild 3.13:	Befunde auf der Innenseite eines Armaturengehäuses im Bereich der Dichtung	47
Bild 3.14:	Transkristalline Rissbefunde im untersuchten Armaturengehäuse	48
Bild 3.15:	Fukushima Daini, Block 3: Lage der Rissbefunde im Schweiß- nahtbereich der Umwälzschleife	50
Bild 3.16:	Fukushima Daini, Block 3: Rissbefunde im Schweißnahtbereich der Umwälzschleife.....	51
Bild 3.17:	Kernkraftwerk Wolf Creek: Rissbefunde in der Mischschweißnaht des Stutzens des Druckhalters zur Volumenausgleichsleitung.....	54
Bild 3.18:	Kernkraftwerk Wolf Creek: Rissbefunde in der Mischschweißnaht des Stutzens des Druckhalters zum Sicherheitsventil	54
Bild 3.19:	Kernkraftwerk Wolf Creek: Rissbefunde in der Mischschweißnaht des Stutzens des Druckhalters zur Abblaseleitung.....	54
Bild 3.20:	Kernkraftwerk Wolf Creek: Aufbau der Mischweißnähte in den Stutzen der Druckhalter	55
Bild 3.21:	Kernkraftwerk V.C. Summer: Leckstelle in der Mischschweißnaht am Reaktordruckbehälterstutzen	59

Bild 3.22:	Kernkraftwerk V.C. Summer: Rissbefunde in der Schweißnaht, axialer Riss mit dem in Umfangsrichtung kreuzenden Riss, Ansicht von der Innenseite.....	60
Bild 3.23:	Kernkraftwerk Biblis B: Schäden infolge Rohrbodenreinigung.....	63
Bild 3.24:	Kernkraftwerk Biblis B: Wanddurchdringung im Dampferzeuger-Heizrohr mit Leckage infolge Rohrbodenreinigung.....	64
Bild 3.25:	KKW Biblis A: Einwalzbereich im Rohrboden des Dampferzeugers	66
Bild 3.26:	Kernkraftwerk Biblis A: Rissbefund auf der Außenoberfläche eines Dampferzeuger-Heizrohres.....	68
Bild 3.27:	Kernkraftwerk Biblis A: Interkristalliner Rissverlauf in Wanddickenrichtung eines Dampferzeuger-Heizrohres.....	69
Bild 3.28:	Kernkraftwerk Unterweser: Lage der Fehler oberhalb des Rohrbodens.....	71

8 Tabellen

Tabelle 3.1:	Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich hoher Abstandshalter mit maximaler Rate von Wanddickenschwächungen im KKW Unterweser	76
Tabelle 3.2:	Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich hoher Abstandshalter mit geringer Rate der Wanddickenschwächungen im KKW Unterweser	76
Tabelle 3.3:	Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich hoher Abstandshalter, Zuordnung der Fehlertiefe zur Anzeigenlänge im KKW Unterweser	77
Tabelle 3.4:	Prüfergebnisse an Dampferzeuger-Heizrohren im Bereich zwischen den beiden Einwalzungen im Rohrboden im Kernkraftwerk Biblis A	78
Tabelle 4.1:	Zuordnung von relevanten Ereignissen zu Merkmalen der Fehlerkennung	83
Tabelle 4.2:	Zuordnung von relevanten Ereignissen zu Merkmalen der Fehlercharakteristik	88
Tabelle 4.3:	Druckführende Komponenten: Zuordnung von Ereignissen zu Kriterien zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung	93
Tabelle 4.4:	Dampferzeuger-Heizrohre: Zuordnung von Ereignissen zu Kriterien zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung	94

Anlage A

Bericht zum Workshop „Auffindbarkeit von Fehlern an druckführenden Komponenten bei wiederkehrenden Prüfungen“ am 24. und 25. Januar 2008 bei der GRS in Köln

Zur Thematik „Auffindbarkeit von Fehlern an druckführenden Komponenten bei wiederkehrenden Prüfungen“ wurde ein zweitägiger Workshop durchgeführt. Dieser Workshop fand am 24. und 25. Januar 2008 bei der GRS in Köln statt. Die Zielsetzung lag darin, eine breitere Diskussion der Thematik mit Fachkollegen aus anderen Institutionen zu führen. Hierzu wurden Vertreter der Gutachterorganisationen, Betreiber und Industrie mit Beiträgen eingeladen. Die Beiträge wurden vorher mit den Beteiligten abgestimmt und in folgende Tagesordnung eingebunden:

1. Vorgehensweise der GRS bei der generischen Auswertung der Betriebserfahrung mit druckführenden Komponenten und Zielsetzung des Vorhabens SR 2583 (Dr. F. Michel, GRS)
2. Vorstellung der ersten Arbeitsergebnisse aus dem Projekt SR 2583: Auswertung der Betriebserfahrung, Vorstellung ausgewählter Fälle (H. Reck, GRS)
3. Integritätskonzept - Strategie zur Auffindbarkeit von Fehlern (W. Hienstorfer, TÜV SÜD Energietechnik)
4. Weiterentwicklung der Prüfkonzepte der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen in Kernkraftwerken (Dr. T. Just, TÜV NORD Sys Tec)
5. Zerstörungsfreie Prüfung an Mischnähten an zwei Beispielen, Vorgehensweise bei GKN (H.-J. Bleher, GKN)
6. Befunde und deren Bewertung an Dampferzeuger-Heizrohren (R. Arenz, AREVA)
7. Auffindbarkeit und Bewertung von Fehlern und Schädigungsmechanismen an druckführenden Komponenten (Dr. G. König, GKN)
8. Abschlussdiskussion

Alle Beiträge sind in /GRS 08a/ dokumentiert. Im Folgenden sind die Inhalte der einzelnen Beiträge kurz zusammengefasst.

Im ersten Beitrag wurde die Vorgehensweise der GRS bei der Auswertung der generischen Betriebserfahrung mit druckführenden Komponenten dargestellt. Ausgehend hiervon wurde den Anwesenden die Zielsetzung des Vorhabens SR2583 erläutert. Im zweiten Beitrag wurden dann Zwischenergebnisse zum Vorhaben SR2583, insbesondere aus der generischen Auswertung der Betriebserfahrung, vorgestellt.

Im dritten Beitrag wurde der Zusammenhang zwischen Integritätskonzept und der Auffindbarkeit von Fehlern beschrieben. Ausgehend von Qualitätszustand nach Auslegung und Herstellung muss die Qualität der Komponente während des Betriebes erhalten bleiben. Hierzu ist es notwendig, anhand von Randbedingungen die Prüfaufgaben für Prüfungen zu definieren um zielgerichtet Veränderungen feststellen zu können. Darunter fällt, dass die Stellen für Prüfungen repräsentativ ausgewählt werden (z. B. maximale Beanspruchungen), dass die Wahl des Prüfverfahrens und der Prüfempfindlichkeit sachgerecht erfolgen soll und dass das Prüfindintervall entsprechend von auftretenden Schädigungsmechanismen festgelegt wird. Am Beispiel eines Wärmeschutzrohres wurde der Ort der maximalen betrieblichen Beanspruchung aufgezeigt, an dem auch die Prüfkriterien ausgerichtet werden sollten. Insgesamt werden diese Zusammenhänge als Zusammenspiel zwischen der Auslegung und Herstellung, dem Betrieb und der Prüfaufgabe gesehen. Dabei sind die Einflüsse von Werkstoff, Konstruktion, Belastung, Spannungs-, Ermüdungsabsicherung, bruchmechanische Bewertung, Wasserchemie, Befundzustand und Schädigungsmechanismen in die Bewertung einzubeziehen.

Der vierte Beitrag ging ausführlich auf die Prüfkonzeppte der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen und deren Weiterentwicklung ein. Anhand der historischen Entwicklung der 1982, 1990 und 1999 erschienen bzw. geänderten KTA-Regel 3201.4 wurde auf die jeweiligen Regelungsschwerpunkte hingewiesen. Nach der letzten Neuerscheinung dieser Regel kamen national und international Ereignisse vor, die auf einen Überarbeitungsbedarf hindeuten. Es wurden Ereignisse aufgezeigt, die zum Teil deckungsgleich mit der Beschreibung der Betriebserfahrung des vorliegenden Berichtes sind. Aufgrund der Auswertung kam der Autor zu dem Schluss, dass die Schäden aufgrund der bisherigen Betriebserfahrung unerwartet kamen, obwohl die Schädigungsmechanismen an sich bekannt waren. Zudem wären die Prüfkonzeppte für bestimmte Fehlertypen zum Nachweis nur ungenügend gewesen oder die Prüfflächen sind für die wiederkehrenden Prüfungen nach Regelwerk nicht zwingend ausgewiesen. Für die frühzeitige Erkennung von Werkstoffschäden gibt es bisher keine Alternative als die gezielten wiederkehrenden Prüfungen. Weiterhin schlägt der Autor z. B. für Mischschweißnähte, für Plattierungen, für Dampferzeuger-Heizrohre modifizierte Prüfungsumfänge im Rahmen der derzeit laufenden Überarbeitung der KTA-Regel 3201.4 vor.

Der fünfte Beitrag konzentrierte sich auf die praktische Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung an Mischschweißnähten im Bereich der druckführenden Umschließung.

Das Ziel dieser zerstörungsfreien Prüfungen ist der Nachweis der Integrität der Komponenten anhand der Beurteilung von Schweißnähten und den Grundwerkstoffbereichen. Voraussetzung vor dem Einsatz an den Komponenten ist die Herstellung von Vergleichskörpern. Diese Vergleichskörper sind Nachbildungen der Originalkomponenten, an denen praxisnahe Prüfungen verifiziert werden. Hierzu gehören gleichartige Werkstoffe, exakte Geometrie, gleichartige Fertigung und deren Schritte, eingebrachte Schweißungen, Wärmebehandlung, fertigungsbegleitende zerstörungsfreie Prüfungen. Ein wichtiger Punkt ist die Einbringung von Nuten als simulierter Fehler zum Nachweis erreichter Prüfeempfindlichkeit bei der zerstörungsfreien Prüfung in Anlehnung an gültige Regelwerke. Zudem müssen Qualifizierungen geeigneter Prüfverfahren in Anlehnung entsprechender Richtlinien erfolgen. Hierzu gehören u. a. verwendeter Prüfmethode mit der Orientierung Längsfehler-/Querfehlerprüfung und das Festlegen von Registrierschwellen. Das beschriebene Verfahren dient der Qualifizierung der gesamten Prüftechnik. Der Autor ging zur Anwendung auf das beschriebene Verfahren anhand von zwei Beispielen näher ein. Das war zum einen der Anschluss der Nachkühlleitung an die Hauptkühlmittelleitung und zum anderen die Anschlüsse der Sprühleitungen an den Druckhalterdom. Es konnte bei der Qualifizierung der Prüfmethode bzw. -techniken gezeigt werden, dass die Auffindbarkeit der eingebrachten Fehler gegeben waren und gute Übereinstimmungen mit den tatsächlichen Fehlerabmessungen erzielt wurden.

In dem sechsten Beitrag wurden die Befunde und deren Bewertung an Dampferzeuger-Heizrohren angesprochen. Nach der Darstellung des Designs der nach dem Siemens/KWU-Konzept gebauten Dampferzeuger wurde die bisherige weltweite Betriebserfahrung mit Heizrohren aus Incoloy 800 dargestellt. Insgesamt wurden im Verhältnis zur Gesamtanzahl (über 370.000) der in Betrieb befindlichen Heizrohre lediglich unter 0,5 % der Heizrohre infolge Schädigungen dichtgesetzt. In der Vergangenheit gab es lediglich 20 Leckagen an Heizrohren. Der Autor ging ausführlich auf die aufgetretenen Schädigungen an Heizrohren im Bereich zwischen den Einwalzungen im Rohrboden ein. Die bisherigen Nachbewertungen ergaben nur für ältere Anlagen, die unter der Phosphatfahrweise in Betrieb gingen, Schädigungen an insgesamt 37 Heizrohren. Bekanntlich wurden die Schädigungen auf interkristalline Spannungsrisskorrosion zurückgeführt. Die jüngeren Anlagen, die unter der Hoch-AVT-Fahrweise in Betrieb gingen, zeigten keine Anzeigen. Es wurden Ursachen für Undichtigkeitspfade, durch die ein Eintrag von Medium durch die obere Einwalzung gelangen konnte, aufgezeigt. Da ein Schwerpunkt der betroffenen Rohre in Randpositionen des Heiz-

rohrbündels lag, wurden die Auswirkungen auf die Heizrohre im Zusammenhang mit dem Spannungsverlauf über den Rohrbodenradius angesprochen. Die Höhe des Spannungsverlaufes ist bei den neueren Anlagen niedriger als bei den älteren Anlagen. Es wurden auch als mögliche Ursache die asymmetrische Einwalzbedingungen an Randpositionen im Zuge der Fertigung diskutiert.

Der siebente Beitrag hatte die Bewertung von Fehlern und Schädigungsmechanismen an mechanischen Komponenten zum Inhalt. Begonnen wurde mit einigen Beispielen zu Schäden, die auf Herstellungsfehler beim Schweißen zurückzuführen waren. Ermüdungsschäden infolge zusätzlicher thermischer Belastungen, die im Zuge der Auslegung nicht spezifiziert waren, lagen auch vor. Einige Schäden waren auch auf die Kombinationen von verschiedenen Mechanismen zurückzuführen. Der Autor zog daraus den Schluss, dass bei einer spezifizierten Herstellung und der Berücksichtigung der spezifizierten Belastungen Schäden ausgeschlossen sind. Hierzu gehört jedoch, dass zur Aussage über den Zustand der Komponenten Verifikationen durch die Betriebsüberwachung einschließlich wiederkehrender zerstörungsfreier Prüfungen notwendig sind. Die betriebsbegleitende Überwachung der Belastungen liefert reale Beanspruchungszustände. Im Rückschluss können die Ergebnisse der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen die Ergebnisse der Betriebsüberwachung verifizieren. Es erscheint sinnvoll, die notwendigen Maßnahmen in ein alterungsmanagementbasiertes Gesamtkonzept einzubinden. Hierbei erfolgt eine Eingruppierung in sicherheitstechnisch wichtige (Gruppen 1 und 2) und weitere Komponenten (Gruppe 3) anhand von vorgegebenen Kriterien. Die Gruppe 1 ist dadurch gekennzeichnet, dass für diese Komponenten ein Versagen auszuschließen ist, die Gruppe 2 lässt einen Ausfall im Einzelfall zu. Die der Gruppe 3 zugeordneten Komponenten dürfen versagen. An dieser Eingruppierung sind die durchzuführenden Maßnahmen nach einem abgestuften Konzept geknüpft. Die Zielsetzung ist die Gewährleistung der anforderungsgerechten vorhandenen Qualität der Komponenten im Betrieb.

In der Abschlussdiskussion wurde insbesondere festgestellt, dass zur Gewährleistung der vorhandenen Qualität der Komponenten ein Gesamtkonzept der durchzuführenden Maßnahmen notwendig ist. Die im Rahmen des Vorhabens SR 2583 zu behandelnden wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen gehören dazu, sollten aber nicht separat betrachtet werden. Sie sind Bestandteil der Maßnahmen zur Sicherstellung der Integrität der Komponenten. Daneben spielen insbesondere auch die sorgfältige Auswertung der Betriebserfahrung sowie der Ergebnisse aus der betrieblichen Über-

wachung eine wesentliche Rolle. Hinsichtlich der Prüfung an Mischschweißnähten wurde festgestellt, dass das im fünften Beitrag beschriebene Vorgehen auch für andere deutsche Anlagen in vergleichbarer Form Anwendung findet.

Anlage B

Bericht über die “6th International Conference on NED in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components”

Die "6th International Conference on NED in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components", die vom 8. bis 10. Oktober 2007 stattfand, wurde im Rahmen des Vorhabens SR 2583 insbesondere mit der Zielsetzung besucht, weitere Informationen zu neueren Entwicklungen und Anwendungen von Prüfverfahren und -techniken zu gewinnen. Die Tagung umfasste ein umfangreiches Programm und wurde von der European Commission, Joint Research Centre, im Zusammenwirken mit weiteren Partnern durchgeführt /EC 07/. Die Tagung hatte neben der Plenarsitzung drei parallele Sektionen, in denen eine Vielzahl von Fachvorträgen gehalten wurde. Nachfolgend erfolgt ein kurzer Überblick.

Sektion 1 befasste sich im Wesentlichen mit der Qualifikation der Prüfverfahren bzw. Prüftechniken für deren Anwendung. Das Vorgehen in einigen Ländern wurde unter Berücksichtigung der jeweiligen Regelwerke vorgestellt. Es wurden auch Beispiele für das komponentenspezifische Vorgehen dargestellt. Einen breiten Raum nahm die Qualifikation der Prüfverfahren- bzw. -techniken ein, die sich mit der Morphologie von Rissen befassten und auf eine sichere Auffindbarkeit konzentrierten. Neben diesen Aspekten wurde auch auf Methoden eingegangen, die für Risiko-basierte wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen (Risk-Informed Inspection) erarbeitet werden. Weitere Themen waren die Zuverlässigkeit bei der Auffindung von Fehlern bei zerstörungsfreien Prüfungen und deren Aussagefähigkeit hinsichtlich der Integrität der Bauteile. Des Weiteren wurden Computerprogramme zur Auswertung bzw. Darstellung der Ergebnisse von zerstörungsfreien Prüfungen vorgestellt.

Die Vorträge im Rahmen der Sektion 2 gingen weitgehend auf die Forschung und Entwicklung der Prüfverfahren und -techniken ein. Hier wurde auf die Durchstrahlungsprüfung, elektromagnetische Akustikverfahren, visuelle Verfahren (z. B. fotografische Verfahren bzw. hochauflösende Kameras) und auf die Ultraschallprüfung eingegangen. Bei der Ultraschallprüfung lag der Schwerpunkt bei Anwendung der Gruppenstrahler-Technik (Phased Array Inspection). Mit der Anwendung dieses Verfahrens hat sich der Anwendungsbereich enorm vergrößert. Die Zuverlässigkeit des Fehlernachweises im Volumen und an den Oberflächen hat sich mit dieser Technik verbessert und auch die Fehlergrößenbestimmung hat Fortschritt erzielt. Auch bei der Durchstrahlungsprüfung wurden Fortschritte erkennbar. Eine große Rolle spielt die Unterstützung der Prüftechniken mit den Methoden der Datenverarbeitung.

Die Vorträge in der Sektion 3 befassten sich mit der praktischen Anwendung der zerstörungsfreien Prüfungen an druckführenden Komponenten. Hier wurde eine breite

Palette von Anwendungen für Reaktordruckbehälter und für Komponenten des Primärkreislaufs vorgestellt. Einen breiten Raum nahmen die diesbezüglichen Prüfungen an austenitischen Schweißnähten und an Mischschweißnähten mit verschiedenen Prüfverfahren bzw. -techniken ein. Wesentliche Zielsetzung war dabei das Auffinden von Schädigungen vornehmlich der Primärwasserseitigen interkristallinen Spannungsrisskorrosion in Schweißnähten. Auch hier wurde die Tendenz der Anwendung zu den bereits erwähnten neueren Prüftechniken erkennbar. Neben diesen Anwendungen wurde auf die zerstörungsfreien Prüfungen von Dampferzeuger-Heizrohren sowie an weiteren Komponenten z. B. Bolzen eingegangen.

Aus der Vielzahl der im hohen Detaillierungsgrad gehaltenen Vorträge kristallisierte sich für die Ultraschallprüfung die Anwendung der Gruppenstrahler-Technik heraus, deren Anwendung insbesondere bei der Prüfung Mischschweißnähten oder austenitischen Schweißnähten gute Ergebnisse gegenüber der bisherigen Technik zeigen. Die Anwendung dieser Technik wird wohl in der Zukunft als Standard angesehen werden. Unverkennbar sind die Fortschritte, die bei Durchstrahlungsprüfungen durch die Auswertung auf digitaler Basis erreicht wurden.

Anlage C

Bericht zum Seminar mit dem IZfP Saarbrücken zu „Methoden für zerstörungsfreie Wiederkehrende Prüfungen an druckführenden Komponenten“ am 10.12.2008 bei der GRS in Köln

Anlässlich eines fachlichen Meinungsaustausches zwischen Vertretern des IZfP und der GRS informierte das IZfP in zwei Beiträgen über die Fortschritte in der Analysetechnik bei zerstörungsfreien Prüfungen.

Der erste Beitrag befasste sich allgemein mit neueren Entwicklungen. Im Mittelpunkt stand die Ultraschall-Analyse Technik mit Synthetic Aperture Focus Technique (SAFT). Die Anwendung wurde beispielhaft für Schweißnähte mit gegebener Geometrie und realistischen Fehlern gezeigt. Als Lösung wurde der Scann und die Analyse mit dem SAPHIR^{plus} System sowie die eigentliche Analyse mit SAFT verwendet. In einem weiteren Schritt konnten die Anzeigen der Geometrieanzeigen in Korrelation zu den Fehleranzeigen gebracht werden. Die metallographischen Untersuchungen ergaben eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Ultraschallanalyse. Im Weiteren wurden Lösungsansätze zur Wirbelstromprüfungen an den Innenoberflächen der Mischschweißnähte an Steuerstabantriebsstutzen in Reaktordruckbehältern von Druckwasserreaktoren vorgestellt; ebenso die Wirbelstromprüfung von Dampferzeuger-Heizrohren unter Anwendung der Array-Sonde (X-Probe). In Ergänzung zu der Prüftechnik wurden Entwicklungen in der Manipulator-Technik, der Ultraschallgerätechnik SAPHR^{plus} und Prüfkopfentwicklung vorgestellt. Zusammenfassend wurden auf die Vorteile der zerstörungsfreien Prüfungen bei der Anwendung der neueren Prüfverfahren und Prüftechniken aufgezeigt.

Der zweite Beitrag befasste sich mit dem Thema „Ultraschallprüfung mit der Gruppenstrahltechnik nach dem Prinzip des getakteten Gruppenstrahlers“. In dem Beitrag wurde ein Vergleich zum konventionellen Prinzip der Gruppenstrahler-Technik, die auf einer Variation der Einschallwinkel und der Wellenmode beruht, hergestellt. Durch die Gruppenstrahler-Technik konnte die Zuverlässigkeit des Fehlernachweises und auch die Fehlergrößenbestimmung im Volumen und an den Oberflächen verbessert werden. Diese Technik wurde nun mit der getakteten Form des Gruppenstrahlers weiterentwickelt. Das Prinzip dieser neuen Technik beruht auf der Abarbeitung in Schritten, wobei die Informationen von Senden und Empfangen in einer Matrix abgelegt und anschließend analysiert werden. Diese Technik bringt gegenüber der konventionellen Gruppenstrahler-Technik weitere Verbesserungen, insbesondere hinsichtlich der Fehlergrößenbestimmung und der anschließenden Bildgebung über vorhandene Fehler, beispielsweise ermöglicht sie die Darstellung in dreidimensionalen Bildern.

Verteiler

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

AG RS I 3 2 x

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

Bereich SK 3 x

AG Forschungskordinierung 1 x

Ländergenehmigungs- und Aufsichtsbehörden 12 x

TÜV-Leitstelle Kerntechnik 1 x

VGB 1 x

GRS

Geschäftsführer hah, stj je 1 x

Bereichsleiter erv, lim, prg, rot, tes, zip je 1 x

Projektbetreuung hab je 1 x

Abteilungsleiter poi, stc, ver je 1 x

Autoren jed, mif, rec, rod je 2 x

Bibliothek Köln hog 1 x

Informationsbearbeitung (TECDO) 1 x

Gesamtauflage **42 x**