

**Betriebserfahrung  
mit Komponenten der  
sicherheitstechnisch  
wichtigen Nebenkühl-  
wassersysteme in  
deutschen Anlagen mit  
DWR und SWR**



**Betriebserfahrung mit  
Komponenten der  
sicherheitstechnisch  
wichtigen Nebenkühl-  
wassersysteme in deutschen  
Anlagen mit DWR und SWR**

M. Elmas,  
H. Reck,  
D. von der Cron

Februar 2012

Auftrags-Nr.: 820405

**Anmerkung:**

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3609R01320 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

Gegenstand dieses Berichts ist eine anlagenübergreifende Auswertung der Betriebserfahrung mit Komponenten des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen im Zeitraum von 1997-2009. Die Auswertungen wurden auf Basis meldepflichtiger Ereignisse sowie des Rückflusses zweier für die Thematik bedeutsamer Weiterleitungsnachrichten der GRS durchgeführt.

Bei der Sichtung des Datenbestandes wurden die zwei Schadensschwerpunkte „Schäden an Rohrleitungen“ und „Schäden an sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlern“ identifiziert. Diese Schwerpunkte wurden im Weiteren einer vertieften Untersuchung bezüglich der Randbedingungen der Schädigungen unterzogen.

Wie die Analysen zeigen, sind Rohrleitungen aller Nennweitenbereiche von Schädigungen betroffen – insbesondere also auch sicherheitstechnisch wichtige Rohrleitungen großer Nennweiten. Ein typisches Schadensbild sind wanddurchdringende Beschädigungen am Grundwerkstoff ferritischer Werkstoffe. Die dominierende Schadensursache hierbei ist Korrosion, häufig auch als Folge von Fertigungsfehlern oder äußeren mechanischen Beschädigungen. Ein signifikanter Alterungseinfluss auf die Ereignishäufigkeiten konnte nicht festgestellt werden. Wie die große Anzahl der Ereignisse, bei denen eine Beschichtungsschädigung als Primärschaden vorausgegangen war, zeigt, kommt der Integrität der Beschichtungen eine große Bedeutung zu. Bezüglich der Eignung gängiger Beschichtungsmaterialien für den Langzeiteinsatz bestehen unterschiedliche Auffassungen von Betreibern, Gutachtern und Herstellern.

Übliche Prüfkonzepte im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme umfassen i. a. Sichtprüfungen und Anlagenbegehungen, aber keine im Sinne einer präventiven Vorgehensweise notwendigen Ultraschall-, Durchstrahlungs- oder Wirbelstromprüfverfahren. Diese versagensorientierte Vorgehensweise spiegelt sich in der hohen Zahl von Leckschäden wider.

Ereignisse an sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlern betreffen schwerpunktmäßig die Wärmetauscherrohre. Hierbei konnten die rohrseitigen Schädigungen meist auf Korrosionserscheinungen wie Erosionskorrosion, und die mantelseitigen auf Materialermüdung infolge von Schwingbeanspruchungen zurückgeführt werden.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Nebenkühlwassersysteme in deutschen KKW.....</b>	<b>3</b>
2.1	Aufbau und Aufgaben des Nebenkühlwassersystems .....	3
2.1.1	Besonderheiten beim DWR .....	4
2.1.2	Besonderheiten beim SWR.....	5
2.2	Sicherheitstechnische Bedeutung des Nebenkühlwassersystems .....	5
2.3	Typischer Aufbau eines Zwischenkühlers .....	6
2.4	Betriebskennwerte, Medium und Werkstoffe.....	7
2.5	Beschichtungen .....	7
2.6	Wiederkehrende Prüfungen gemäß KTA 3211.4 (Fassung 1996-06).....	8
2.7	Relevante Weiterleitungsnachrichten der GRS .....	9
<b>3</b>	<b>Datenbasis, Datenbestand und Vorgehensweise.....</b>	<b>11</b>
3.1	Datenbasis.....	11
3.2	Datenbestand .....	11
3.3	Vorgehensweise .....	12
<b>4</b>	<b>Analyse der Schadensschwerpunkte.....</b>	<b>21</b>
4.1	Schäden an Rohrleitungen .....	23
4.1.1	Ereignisse aufgeschlüsselt nach Nennweitenbereichen.....	23
4.1.2	Schadensursachen bei Ereignissen an Rohrleitungen .....	26
4.1.3	Ereignisse mit Beschichtungsschädigungen als Primärschaden .....	28
4.1.4	Schäden an erdverlegten Rohrleitungen.....	29
4.1.5	Einfluss der Mediumsbedingungen .....	30
4.1.6	Einfluss der Betriebszeit .....	34
4.1.7	Maßnahmen der Betreiber bei Schäden an Rohrleitungen.....	37
4.2	Schäden an sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlern.....	37
4.2.1	Schäden an WT-Rohren .....	40
4.2.2	Schäden an sonstigen Einbauten des Zwischenkühlers.....	43

4.2.3	Maßnahmen der Betreiber bei Schäden an WT-Rohren .....	44
4.3	Sicherheitstechnische Bedeutung bei Schäden an Bauteilen des gesicherten Nebenkühlwassersystems .....	45
<b>5</b>	<b>Erkenntnisse im Zusammenhang mit Weiterleitungsnachrichten der GRS .....</b>	<b>47</b>
5.1	Zusätzliche Erkenntnisse im Zusammenhang mit der WLN 2007/02.....	47
5.1.1	Betriebserfahrung zur Langzeiteignung von Beschichtungsmaterialien....	47
5.1.2	Prüfpraxis .....	50
5.1.3	Potentiell gefährdete Bereiche .....	55
5.2	Erkenntnisse im Zusammenhang mit der WLN 2005/06 – Betriebserfahrung mit mikrobiologisch induzierter Korrosion (MIK) .....	56
5.2.1	Erkenntnisse zum Schädigungsmechanismus MIK.....	56
5.2.2	Auftreten in deutschen Kernkraftwerken .....	57
5.2.3	Reaktion der Betreiber und Gutachter auf die Empfehlungen der GRS- WLN 2005/06.....	58
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>69</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>71</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>73</b>
	<b>Verteiler.....</b>	<b>75</b>



# 1 Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Das gesicherte Nebenkühlwassersystem ist Bestandteil der Nachkühlkette, mit der Aufgabe, sicherheitstechnisch wichtige Komponenten zu kühlen und deren Wärme an die Luft oder einen Fluss abzugeben. Das System ist mehrfach redundant aufgebaut.

Infolge betriebsbedingter Schädigungsmechanismen können an den Komponenten von Nebenkühlwassersystemen Schäden entstehen und z. B. Leckagen und Wanddickenschwächungen verursachen. Die bisher an den Komponenten von Nebenkühlwassersystemen aufgetretenen Schäden sind hinsichtlich der Schadensursachen und Schädigungsmechanismen grundsätzlich bekannt und werden hauptsächlich im Rahmen von Anlagenrundgängen entdeckt.

Zielsetzung der nachfolgend beschriebenen Arbeiten war es, die Betriebserfahrung mit gesicherten Nebenkühlwassersystemen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR anlagenübergreifend auszuwerten und im Hinblick auf die sicherheitstechnische Bedeutung zu diskutieren. Die Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens 3609R01320 durchgeführt.

In **Kapitel 2** des vorliegenden Berichtes sind zunächst Informationen zum Aufbau und Betrieb von Nebenkühlwassersystemen, zur sicherheitstechnischen Bedeutung, zu Anforderungen an die Prüfungen sowie relevante Weiterleitungsnachrichten zusammengestellt. In **Kapitel 3** werden die zur Auswertung herangezogene Datenbasis und die gewählte Vorgehensweise charakterisiert. Die Analyse der identifizierten Schadensschwerpunkte erfolgt in **Kapitel 4**. In **Kapitel 5** sind zusätzliche Erkenntnisse zusammengestellt, die sich bei der Auswertung des Erfahrungsrückflusses zu relevanten Weiterleitungsnachrichten der GRS ergaben. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in **Kapitel 6** zusammengefasst und in **Kapitel 7** werden Schlussfolgerungen zum Betrieb von gesicherten Nebenkühlwassersystemen in deutschen Anlagen gezogen.



## **2 Nebenkühlwassersysteme in deutschen KKW**

Zum besseren Verständnis der Bedeutung des Nebenkühlwassersystems für den Anlagenbetrieb sowie für die Störfallbeherrschung erfolgt in diesem Kapitel – unter Berücksichtigung der typischen Unterschiede zwischen Druck- und Siedewasserreaktoren, der sicherheitstechnischen Bedeutung sowie der verwendeten Werkstoffe und Beschichtungsmaterialien – zunächst eine kurze Beschreibung dieses Systems. Hierbei wird das Bindeglied des Nebenkühlwassersystems zum Zwischenkühlwassersystem, der Zwischenkühler, aufgrund seines vergleichsweise komplexen Aufbaus gesondert betrachtet. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel die Vorgaben der KTA 3211.4 /KTA 96/ hinsichtlich wiederkehrender Prüfungen im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme skizziert sowie die für die Thematik dieser Arbeit relevanten Weiterleitungsnachrichten der GRS vorgestellt.

### **2.1 Aufbau und Aufgaben des Nebenkühlwassersystems**

In kerntechnischen Anlagen gibt es zahlreiche betriebliche als auch sicherheitstechnische Kühlstellen, die entweder kontinuierlich oder im Anforderungsfall gekühlt werden müssen. Die den Kühlstellen entzogene Wärme wird an die Umgebung abgegeben. Der Wärmetransport von der jeweiligen Kühlstelle zur endgültigen Wärmesenke (Fluss, Meer, Atmosphäre) wird durch die sogenannte Kühlkette realisiert: Das Zwischenkühlwassersystem steht in direktem Kontakt mit der jeweiligen Kühlstelle und kühlt diese. Die vom Zwischenkühlwassersystem aufgenommene Wärme wird an das Nebenkühlwassersystem abgegeben. Dieses System gibt die Wärme an die Umgebung (Fluss oder Atmosphäre) ab. Das Bindeglied zwischen den beiden Systemen stellt der Zwischenkühler dar. Neben dem Wärmeaustausch zwischen den beiden Systemen sorgt der Zwischenkühler für eine stoffliche Trennung der Kühlmedien beider Systeme und erfüllt somit eine Barrierefunktion gegen Aktivitätsfreisetzungen in das Nebenkühlwassersystem und damit an die Umgebung.

In der Kernkraftwerkstechnik wird zwischen dem konventionellen Nebenkühlwassersystem und dem gesicherten Nebenkühlwassersystem unterschieden. Das konventionelle Nebenkühlwassersystem sorgt für die Kühlung des konventionellen Zwischenkühlsystems, das seinerseits die Kühlung konventioneller Kühlstellen übernimmt. Die konventionelle Kühlkette hat ausschließlich betriebliche, jedoch keine sicherheitstechnische Aufgaben und ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Das ge-

sicherte Nebenkühlwassersystem ist für die Kühlung des gesicherten und des nuklearen Zwischenkühlsystems zuständig. Besonderheiten dieses Systems bei Siedewasser- und Druckwasserreaktoren werden unten erläutert (s. Abschnitt **2.1.1** und **2.1.2**).

Alle Nebenkühlwassersysteme haben den gleichen prinzipiellen Aufbau. Das durch Grob- und Feinrechen und teilweise auch durch Siebbandmaschinen gereinigte Flusswasser wird durch die Nebenkühlwasserpumpen angesaugt und über die entsprechenden Zwischenkühler geleitet. Das erwärmte Nebenkühlwasser wird dann wieder zurück in den Fluss geleitet (Flussbetrieb). In manchen Anlagen wird es jedoch über Zellenkühler rückgekühlt und dem Kreislauf wieder zugeführt (Kreislaufbetrieb). Teilweise sind auch Kombinationen dieser beiden Methoden üblich. Zur Reinigung der nebenkühlwasserseitigen Innenoberflächen der Wärmetauscher-Rohre (im Folgenden WT-Rohre) des Zwischenkühlers kommt eine Schwammkugel-Reinigungsanlage (Taproge-System) zur Anwendung. Durch dieses System werden ständig kugelförmige Schwämme in den Vorlauf des Nebenkühlwassersystems eingespeist und im Rücklauf wieder abgezogen. Die Schwammkugeln haben einen etwas größeren Durchmesser als die WT-Rohre und sollen die Bildung von Ablagerungen auf den Innenoberflächen vermeiden.

### **2.1.1 Besonderheiten beim DWR**

Das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen wird hier am Beispiel der Anlage GKN II /GKN 07/ beschrieben. Das System ist vierfach redundant (4 x 50%) aufgebaut und dient der Wärmeabfuhr aus dem gesicherten und dem nuklearen Zwischenkühlkreislauf. Der gesicherte Teil des Zwischenkühlsystems ist für die Kühlung sicherheitsrelevanter Komponenten im Notstromgebäude (Notstromdiesel, Kältemaschinen) zuständig. Der nukleare Zwischenkühlkreislauf hingegen sorgt für die Kühlung nuklearer Kühlstellen. Über Nachwärmekühler ist das nukleare Zwischenkühlwassersystem an das nukleare Nachwärmeabfuhrsystem („Not- und Nachkühlsystem“) des Reaktors angeschlossen. Entsprechend den vier Redundanzen des Nachwärmeabfuhrsystems bzw. den vier Notstromscheiben ist sowohl das nukleare als auch das gesicherte Zwischenkühlsystem vierfach redundant aufgebaut. Hierbei werden jeweils ein nuklearer und ein gesicherter Zwischenkühlstrang von einer Redundanz des gesicherten Nebenkühlwassersystems gekühlt.

### **2.1.2 Besonderheiten beim SWR**

Das Nebenkühlwassersystem eines SWR wird hier am Beispiel der Anlage KKB (Bau-  
linie 69) /KKB 09/ beschrieben. Man unterscheidet bei dieser Anlage die Nebenkühl-  
wassersysteme VF mit den Teilsystemen VF01, VF02, VF03 und VE. Das Teilsystem  
VF01 ist Bestandteil des Betriebskühlkreis 1 eines SWR und entspricht dem konventi-  
onellen Nebenkühlwassersystem des DWR. Es hat nur betriebliche und keine sicher-  
heitstechnische Aufgaben. Die Teilsysteme VF02 und VF03 dagegen haben sowohl  
betriebliche als auch sicherheitstechnische Aufgaben. Beide zusammen stellen das  
Analogon zum Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen einer DWR-Anlage  
dar.

Das Teilsystem VF02 ist zweisträngig aufgebaut und dem Betriebskühlkreis 2 zuge-  
ordnet. Am Zwischenkühlwassersystem dieses Kreises sind Kühlstellen angeschlos-  
sen, die auch nach Ausfall der Eigenbedarfsversorgung des Kraftwerks zusätzlich zum  
Nachkühlsystem weiter gekühlt werden müssen, da sie für das Abfahren der Anlage  
und die Nachwärmeabfuhr benötigt werden.

Das Teilsystem VF03 ist viersträngig aufgebaut und ist Bestandteil der nuklearen  
Nachkühlkette des SWR. Die vier Nachkühlkreise sind über separate Zwischenkühlsys-  
teme mit jeweils einem Strang des Nebenkühlwassersystems (VF03) verbunden. In-  
nerhalb einer Nachkühlkette erfolgt der Wärmeaustausch zwischen Nachkühlkreis und  
Zwischenkühlkreis über einen nuklearen Nachwärmekühler und zwischen Zwischen-  
kühlkreis und Nebenkühlwassersystem entsprechend über einen Zwischenkühler.

Das Nebenkühlwassersystem VE hat ausschließlich sicherheitstechnische Aufgaben.  
Es gehört zum unabhängigen Notstandssystem (UNS) und wird bei Störfällen infolge  
Einwirkungen von außen (EVA) und einigen speziellen Störfällen infolge Einwirkungen  
von innen (EVI) angefordert. Das System dient der Abfuhr der Wärme aus dem UNS-  
Nachkühlkreis zur Kernkühlung. Hierbei existiert kein Zwischenkühlkreis als Barriere  
gegen Aktivitätsübertritt aus dem UNS ins VE-System.

## **2.2 Sicherheitstechnische Bedeutung des Nebenkühlwassersystems**

Das Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen ist Bestandteil der Kühlkette  
„nukleares Nachwärmeabfuhrsystem – nukleares Zwischenkühlsystem / gesichertes  
Zwischenkühlsystem – Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen“. Über diese

Kette muss bei jedem Betriebs- und Störfall die an den Kühlstellen der Anlage übertragene Wärmemenge sicher an das Nebenkühlwasser abgeführt werden.

Zu den betrieblichen Aufgaben der Kühlkette gehören die Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlsystem bei allen Betriebszuständen (An- und Abfahren der Anlage, Normalbetrieb, Stillstandsphasen) sowie die Abfuhr der Nachzerfallswärme aus dem BE-Becken.

Die sicherheitstechnische Aufgabe besteht in der Abfuhr der Nachzerfallswärme bei Störfällen. Hierbei wirkt das Zwischenkühlsystem als Barriere gegen einen Aktivitätsübertritt aus dem Reaktorkühlkreis ins Nebenkühlwassersystem und damit an die Umgebung.

### **2.3 Typischer Aufbau eines Zwischenkühlers**

Zwischenkühler stellen das Bindeglied zweier ansonsten unabhängiger Kühlkreisläufe dar, wobei die stoffliche Trennung beider Systeme gewahrt bleibt. Im Bereich der Kerntechnik ermöglichen sie den Wärmeaustausch zwischen dem Nebenkühlwassersystem und dem Zwischenkühlwassersystem. Systemtechnisch werden sie dem Zwischenkühlwassersystem zugeordnet.

Der typische Aufbau eines Zwischenkühlers ist wie folgt: In einem Behälter (Mantelraum) befindet sich ein Bündel WT-Rohre, die meist getrennt durch Rohrböden in Wasserkammern für den Zu- und Ablauf des Nebenkühlwassers geführt werden. Mantelseitig werden die Zwischenkühler durch das Zwischenkühlwasser durchströmt, rohreseitig vom Nebenkühlwasser. Für den Zu- und Ablauf des Zwischenkühlwassers sind Stutzen direkt am Behältermantel angebracht. Der Wärmeaustausch erfolgt über die Wandung der WT-Rohre. Die realisierte Durchflussschaltung ist durch die unterschiedliche Reinheit der Wässer und der besseren Reinigungsmöglichkeit auf der Rohrseite begründet.

Von der Bauart der Berohrung her unterscheidet man u. a. zwischen Geradrohr- und U-Rohr-Wärmetauschern. Der Transport beider Medien kann im Gleichstrom (Gleichstromwärmetauscher) oder Gegenstrom (Gegenstromwärmetauscher) erfolgen.

Als Bestandteil der Nachkühlkette erfüllen auch die Zwischenkühler sowohl betriebliche als auch sicherheitstechnische Aufgaben. Neben der Wärmeabfuhr im Normalbetrieb und bei Störfällen sorgen sie für eine physische Trennung von primärkühlmittelführen-

den und äußeren Systemen und stellen somit eine Barriere gegen Aktivitätsfreisetzungen insbesondere in das Nebenkühlwassersystem dar.

#### **2.4 Betriebskennwerte, Medium und Werkstoffe**

Die unterschiedlichen Nebenkühlwassersysteme werden bei einem Druck von 2.2 bis 3.5 bar betrieben. Ausgelegt sind die Systeme für Drücke von 5 bis 6 bar und Temperaturen von 50 bis 80 °C. Die Nebenkühlwasservorlauftemperaturen an den verschiedenen Zwischenkühlern betragen ca. 30 °C, die Rücklauftemperaturen liegen etwas höher. Der Druck auf der Mantelseite („zwischenkühlwasserseitig“) der Zwischenkühler liegt etwas höher als auf der Rohrseite („nebenkühlwasserseitig“). Dadurch können bei evtl. Kühlerleckagen keine Verunreinigungen aus dem Nebenkühlwasser in das Zwischenkühlwasser gelangen.

Als Kühlmedium des Nebenkühlwassersystems dient Flusswasser. Das Zwischenkühlwassersystem ist dagegen mit Deionat (vollentsalztes Wasser) beaufschlagt, welchem ggf. Hydrazin zur Vorsorge gegen Korrosion zugesetzt wird.

Die Rohrleitungen des Nebenkühlwassersystems bestehen in der Regel aus einem ferritischen Werkstoff. Bei kleinen Nennweiten werden vereinzelt auch austenitische Werkstoffe eingesetzt. Für die WT-Rohre der Zwischenkühler wurde früher Messing verwendet. Bei neueren Anlagen bzw. im Falle eines Rohrtausches wird Titan eingesetzt. Titan gilt bei den vorherrschenden Bedingungen im Zwischenkühler als sehr korrosionsbeständig. Allerdings haben die WT-Rohre aus Messing den Vorteil, dass das in Messing enthaltene Kupfer wasserchemisch die Umgebung „vergiftet“ und somit das Ansiedeln von Mikroorganismen unterbindet. Bei WT-Rohren aus Titan ist das nicht der Fall; hier steht die mechanische Reinigung im Vordergrund. Der Mantel der Zwischenkühler ist in der Regel aus einem C-Stahl gefertigt.

#### **2.5 Beschichtungen**

In deutschen Kernkraftwerken kommen im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme unterschiedliche Beschichtungsmaterialien zum Einsatz. Häufig werden für den Schutz der Innenoberflächen der Rohrleitungen Epoxidharz-Beschichtungen, Gummierungen oder Zementmörtelauskleidungen verwendet. In seltenen Fällen sind die Innenoberflächen mit einem Innenanstrich belegt. Die Außenoberflächen sind übli-

cherweise im nicht erdverlegten Bereich mit einem Schutzanstrich und im erdverlegten Bereich mit einer Bitumenschicht gegen Umgebungseinflüsse geschützt.

## **2.6 Wiederkehrende Prüfungen gemäß KTA 3211.4 (Fassung 1996-06)**

Als Bestandteil der Nachkühlkette gehört das gesicherte Nebenkühlwassersystem zum Anwendungsbereich der KTA 3211.4 /KTA 96/. In dieser Regel sind die Anforderungen an die wiederkehrenden Prüfungen von druck- und aktivitätsführenden Komponenten außerhalb des Primärkreises festgelegt. Im Einzelnen werden Anforderungen an zerstörungsfreie Prüfungen, Dichtheitsprüfungen, Sichtprüfungen und Druckprüfungen gestellt. Die KTA-Regel nennt die anzuwendenden Prüfverfahren und -techniken und macht Angaben über Prüfumfang, -art und -intervalle.

Für ferritische Rohrleitungen mit  $DN > 50$  schreibt die Regel gezielte Sichtprüfungen im Achtjahresrhythmus vor. Die Sichtprüfung dient der Beurteilung eines Prüfbereichs zur eindeutigen Erkennung von spezifizierten Merkmalen wie z. B. Erosion, Korrosion und Rissbildung. Sie ist als direkte Sichtprüfung mit dem menschlichen Auge oder mit geeigneten Hilfsmitteln wie Kamerasystemen durchzuführen. Für austenitische und ferritische Leitungen mit  $DN \leq 50$  ist keine Wiederkehrende Prüfung (WKP) vorgesehen. Ihre Überwachung hat durch regelmäßige Betriebsrundgänge des Betriebspersonals zu erfolgen. Bei austenitischen Rohrleitungen mit  $DN \geq 50$  gelten andere Vorgaben. Darauf wird hier jedoch nicht eingegangen, da im Betrachtungszeitraum keine Ereignisse an solchen Leitungen aufgetreten sind.

Bezüglich WKP an Wärmetauschern deckt die KTA 3211.4 nur den (Wärmetauscher-) Behälter, jedoch nicht die WT-Rohre ab. Im Einzelnen sind folgende Prüfungen für den Behälter vorgeschrieben:

- Druckprüfungen im Achtjahresrhythmus gemäß Druckbehälterverordnung mit anschließender Kontrolle auf Leckage.
- Oberflächenprüfungen an repräsentativen Stellen (z. B. Schweißnähte) im Prüfintervall von 8 Jahren. An Stellen hoher Beanspruchung sind Stichprobenprüfungen im Vierjahresrhythmus durchzuführen. Hierbei dürfen Techniken der magnetischen Streufluss-, Ultraschall-, Wirbelstrom- und Durchstrahlungsprüfverfahren angewandt werden.
- Sichtprüfungen der inneren/äußeren Oberflächen im Prüfintervall von 4/2 Jahren.



Zusätzlich schreibt die KTA 3211.4 vor, im Vorfeld zu jeder WKP Prüffart, -umfang und -zeitpunkt für die jeweiligen Komponenten, soweit notwendig zu aktualisieren. Hierbei ist insbesondere die Betriebserfahrung sowohl aus der eigenen Anlage als auch aus fremden Anlagen zu berücksichtigen.

Da das Nebenkühlwassersystem nicht zwingend den Anforderungen der KTA 3211.1-3 hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe, Herstellung, Auslegung und Konstruktion unterliegen muss, ist die Anwendung eines Prüfkonzeptes gemäß KTA 3211.4 für die Betreiber von Kernkraftwerken nicht immer bindend. In der Regel ist jedoch ein Mindestmaß an Anforderungen festgelegt, daher bildet sie die Basis bestehender Prüfkonzepte deutscher KKW. Weitere Prüfgrundlagen können Auflagen, Gutachtensbedingungen, Vorgaben aus Sicherheitsanalysen usw. sein.

## **2.7 Relevante Weiterleitungsnachrichten der GRS**

Die erhöhte Anzahl von meldepflichtigen Ereignissen im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme veranlasste die GRS zur Erstellung von zwei Weiterleitungsnachrichten (WLN). In der WLN 2007/02 /WLN 07/ wurden Schäden an Rohrleitungen infolge Korrosion, ohne Beschränkung auf einen speziellen Korrosionsmechanismus, thematisiert und verschiedene, die Rohrleitungen des Systems betreffende Empfehlungen ausgesprochen. Insbesondere wurde – mit der Zielsetzung Leckagen weitgehend zu vermeiden und die Möglichkeit eines großflächigen Versagens der Wandungen auszuschließen – den Betreibern empfohlen, ein Konzept zur frühzeitigen Erkennung von systematischen alterungsbedingten Schäden zu entwickeln. Hierzu sollten zunächst die potentiell gefährdeten Rohrleitungsbereiche identifiziert werden sowie eine Analyse der inneren Beschichtungen zu alterungsbedingten Schädigungsmechanismen erfolgen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sollten in das Prüf- und Überwachungskonzept für wiederkehrende Prüfungen einfließen.

Der Schädigungsmechanismus „mikrobiologisch induzierte Korrosion (MIK)“ wurde in der WLN 2005/06 /WLN 05/ thematisiert. Es wurden zunächst die auslösenden Ereignisse beschrieben und ihre sicherheitstechnische Bedeutung bewertet. Darauf aufbauend wurde den Betreibern empfohlen, die in den Nebenkühlwassersystemen vorhandenen werkstofftechnischen, konstruktiven und betrieblichen Randbedingungen im Hinblick auf die Möglichkeit des Auftretens von MIK zu analysieren sowie die Eignung

ihres Konzepts für wiederkehrende Prüfungen im Hinblick auf das rechtzeitige Auffinden von sicherheitstechnisch bedeutsamen Schäden infolge MIK zu überprüfen.

### **3 Datenbasis, Datenbestand und Vorgehensweise**

Die Datengrundlage der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Auswertungen bilden Schadensmeldungen der Betreiber gemäß der bundeseinheitlichen Meldeverordnung AtSMV /VSB 92/. Nach dieser Verordnung sind die Betreiber von Kernkraftwerken verpflichtet, Schäden an Sicherheitseinrichtungen sowie an sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten in ihren Anlagen den zuständigen Aufsichtsbehörden zu melden. Die Meldeberichte zu diesen sogenannten meldepflichtigen Ereignissen enthalten – neben einer Beschreibung des Schadens – wichtige Informationen bezüglich der Schadensursachen, Auswirkungen auf die Anlage, Schadensbehebung und Vorkehrungen gegen Wiederholung.

#### **3.1 Datenbasis**

Von der GRS werden alle meldepflichtigen Ereignisse systematisch in der zentralen internen Datenbank VERA dokumentiert. Gegebenenfalls enthält die Datenbank VERA zu den Ereignissen Zusatzinformationen, etwa in Form von TÜV-Gutachten oder Laborberichten. Zusätzlich werden die meldepflichtigen Ereignisse an druckführenden Komponenten in der Datenbank KOMPASS erfasst. In dieser Datenbank sind die Informationen in Form von Datenfeldern in einer den Problemstellungen bei passiven druckführenden Komponenten angepassten Form dokumentiert. Die Felder können einzeln und kombiniert abgefragt werden. Wesentliche Felder in der Datenbank KOMPASS sind: Anlagengeneration, Anlage, System, Komponente, Bauteil, Ereignisdatum, Betriebszeit, Schadensart, -ort, -mechanismus, -ursache, Alterungsrelevanz, Auslegungsparameter (Abmessungen, Werkstoff), Betriebsbedingungen, Art der Erkennung sowie Behebungs- und Vorkehrungsmaßnahmen. Der Informationsgehalt der Datenbank KOMPASS geht dabei weit über die Angaben in den Meldeberichten hinaus. Die zusätzlichen Informationen stammen beispielsweise aus der Sichtung von entsprechenden Schaltplänen.

#### **3.2 Datenbestand**

Näher analysiert wurde der Datenbestand der letzten 13 Jahre, d. h. der Zeitraum von 1997 bis 2009. Bei der Sichtung der KOMPASS hinsichtlich Schäden an Komponenten des Nebenkühlwassersystems einschließlich der angrenzenden Zwischenkühler konnte der in **Tab. 1-3** charakterisierte Datenbestand identifiziert werden. Im betrachteten

Zeitraum waren hauptsächlich Rohrleitungen (44 Einträge, **Tab. 1**) sowie Bauteile des Zwischenkühlers (29 Einträge, **Tab. 2**) von Schäden betroffen. Darüber hinaus sind in geringerem Umfang Ereignisse an Gehäusen von Nebenkühlwasserpumpen aufgetreten (3 Einträge, **Tab. 3**).

In diesem Zusammenhang muss der Unterschied zwischen meldepflichtigen Ereignissen und Einträgen in der Datenbank beachtet werden. Mehrere meldepflichtige Einzelereignisse können gleichzeitig mit einer Sammelmeldung gemeldet werden. Bei der Erfassung in der Datenbank KOMPASS wird die Sammelmeldung von uns hinsichtlich der betroffenen Systeme, Komponenten, Schädigungsanzeigen, Nennweiten bei Rohrleitungen etc. in mehrere Einzelereignisse aufgeteilt. Daher ist die Zahl der Datenbankeinträge (Einzelereignisse) im betrachteten Zeitraum höher als die Zahl der im gleichen Zeitraum gemeldeten Ereignisse. Zur Vermeidung der Verwechslung von „meldepflichtiges Ereignis“ und „Einzelereignis in einer Sammelmeldung“ wird daher in dieser Arbeit der Begriff „Einzelereignis“ für jedes meldepflichtige Vorkommnis in einer Meldung verwendet.

Für die Eingrenzung des Betrachtungszeitraums sprechen verschiedene Gründe. So unterliegt das Meldeverhalten der Kraftwerksbetreiber z. B. aufgrund von Änderungen der Meldeverordnung AtSMV /VSB 92/ zeitlich veränderlichen Anforderungen. Zudem werden Prüfkonzepete auf Grund neuer Erkenntnisse ständig weiterentwickelt. Dadurch ändern sich auch die Randbedingungen, unter denen es zu Ereignismeldungen kommt. Aus diesem Grund geht die Vergleichbarkeit zwischen Ereignissen in weit auseinander liegenden Jahren verloren. Darüber hinaus erforderten die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen einen Informationsgehalt zu den Einzelereignissen, der von uns nur für den hier betrachteten Zeitraum als ausreichend erachtet wurde. Damit wurde der Zielsetzung dieser Arbeit Rechnung getragen, einen Überblick über die aktuelle Situation bei Schäden an Komponenten des gesicherten Nebenkühlwassersystems unter den aktuell gültigen Randbedingungen (Meldeverhalten, Prüfkonzepete) zu erarbeiten.

### **3.3 Vorgehensweise**

Die in den folgenden **Kapiteln 4 bis 5** geführte Diskussion zur Betriebserfahrung mit Komponenten des Nebenkühlwassersystems basiert auf dem oben charakterisierten Datenbestand. Die Untersuchungen wurden komponentenspezifisch durchgeführt, wobei nur die beiden oben genannten Schwerpunkte (Rohrleitungen und Zwischenkühler)

vertieft betrachtet wurden. Ereignisse an Pumpengehäusen wurden aufgrund des zu geringen Datenbestands nicht berücksichtigt.

Wesentliche Untersuchungsparameter bei beiden behandelten Schwerpunkten waren Anlagentyp, Anlagengeneration, eingesetzte Werkstoffe sowie die Betriebszeit der Anlage zum Zeitpunkt des Ereigniseintritts. Ziel der Untersuchungen war es, bestimmte wiederholt auftretende Konstellationen zwischen Werkstoff, Mediumsbedingungen und beobachtetem Schädigungsmechanismus zu erkennen. Mit dieser Vorgehensweise sollten besonders gefährdete Bereiche identifiziert und daraus Rückschlüsse zu eventuell vorhandenen Schwächen im Auslegungskonzept und/oder Prüfkonzentrat abgeleitet werden.

Bei Rohrleitungen wurden entsprechende Untersuchungen auch nennweitenabhängig unter Berücksichtigung der Ausgangsseite der Schädigungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden statistische Ansätze herangezogen, um den Einfluss der zunehmenden Betriebszeit auf die Häufigkeit der Ausfälle zu quantifizieren.

Bei der Auswertung der Betriebserfahrung mit Zwischenkühlern wurden diese zunächst als Ganzes betrachtet. In einem weiteren Schritt wurden WT-Rohre und sonstige Einbauten der Zwischenkühler getrennt behandelt. Ferner wurde bei WT-Rohren zwischen „Schäden von außen“ (zwischenkühlwasserseitig) und „Schäden von innen“ (nebenkühlwasserseitig) unterschieden. Hierdurch wurde den stark unterschiedlichen Mediumsbedingungen auf der Innen- und Außenseite Rechnung getragen.

Durch die auf meldepflichtigen Ereignissen basierenden Auswertungen konnte der Erkenntnisstand zur Betriebserfahrung mit Komponenten des gesicherten Nebenkühlwassersystems quantitativ aufgearbeitet werden. Zur Beantwortung weitergehender Fragestellungen wurde als zusätzliche Informationsquelle der anlagenspezifische Betrieberrückfluss zu relevanten GRS-Weiterleitungsnachrichten gesichtet. Diese zusätzlichen Informationen sollen dazu beitragen, über die meldepflichtigen Ereignisse hinaus einen tieferen Einblick in die anlagenspezifischen Gegebenheiten zu geben und damit das Bild zur Integrität der gesicherten Nebenkühlwassersysteme in deutschen Anlagen zu vervollständigen. Insbesondere wurden hierbei folgende Punkte berücksichtigt: Betriebserfahrung zur Langzeiteignung von Beschichtungsmaterialien, anlagenspezifische Prüfpraxis und Betriebserfahrung mit mikrobiologisch induzierter Korrosion (s. **Kapitel 5**).

**Tab. 1** Einzelereignisse mit Schäden an Rohrleitungen des Nebenkühlwassersystems für gesicherte Anlagen in deutschen DWR- und SWR-Anlagen im Zeitraum von 1997 bis 2009

Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Werkstoff	Schadensanzeige	Erkennung	Schadensursache	Behebung
1997/014.1	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	St 35.8	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
1997/014.2	Vorlaufleitung zum Kühler Notstromdiesel	Rohr	St 35.8	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
1997/041	Entlüftungsleitungen	Rohr	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
1997/061	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	C-Stahl	Riss mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Überbeanspruchung	Austausch
1999/022	Anschlussstutzen	Schweißnaht	RSt 35.8	Riss mit Leck	Wiederkehrende Prüfung	Fertigung, Korrosion	Austausch
1999/032	Entlüftungsleitung	Rohr	1.4541	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
1999/109	Kühlwasserleitung	Schweißnaht	1.4541	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2000/002.1	Messstutzen	Schweißnaht	St 37-3 N	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Druck-/Dichtheitsprüfung	Fertigung, Korrosion	Austausch
2000/002.2	Messleitung	Rohrbogen	St 37-3 N	Wanddickenschwächung	Druck-/Dichtheitsprüfung	Fertigung, Korrosion	Austausch
2000/026	Nebenkühlwasserrücklaufleitung	Rohrbogen	St 35.8 III	Riss	Wiederkehrende Prüfung	Fertigung	Austausch
2000/039	Siebrohr der Taprogge-Anlage	Siebrohr	RSt 37-2	Riss mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Fertigung, Korrosion	provisorische Reparatur
2000/061	Druckmessstutzen	Stutzen	15Mo3	Riss mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Ermüdung	Austausch
2000/067	Fettversorgungsleitung	Schweißnaht	1.4571	Riss mit Leck	Instandsetzung/Wartung	Fertigung	Austausch
2000/077	Prüfleitung	Rohr	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Fertigung, Korrosion	Austausch
2001/033	Druckmessstutzen	Stutzen	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Fertigung, Korrosion	Austausch
2002/066	Neben-und Notkühlleitung	Rohrbogen	St 35	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2002/131.1	Neben-und Notkühlleitung	Rohr	St 35	Wanddickenschwächung mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2002/131.2	Neben-und Notkühlleitung	Flansch	C22	Wanddickenschwächung mit Leck	Inspektion	Korrosion	Austausch
2005/044.1	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	St 37-2	Wanddickenschwächung	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2005/044.2	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	St 37-2	Lochförmiger Wanddurchbruch	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion, Beschädigung	Austausch

Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Werkstoff	Schadensanzeige	Erkennung	Schadensursache	Behebung
				mit Leck			
2005/096.1	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	RSt 37-2	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Inspektion	Fertigung, Korrosion	Austausch
2005/096.2	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	RSt 37-2	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Inspektion	Fertigung, Korrosion	Austausch
2005/096.3	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	RSt 37-2	Wanddickenschwächung	Inspektion	Fertigung, Korrosion	Austausch
2005/115	Entwässerungsleitung/Notkühlwassersystem	Rohrabzweig	St 37	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2005/127	Probenahmeleitung/ Nebenkühlwassersystem	Schweißnaht	St 35.8	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Sanierung
2006/025	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Rohrabzweig	St 35.8	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2006/031	Entleerungsleitung nukl. Zwischenkühler	Rohrbogen	St 35.8	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2006/054	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Rohrabzweig	St 37-2	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2006/074.1	Nebenkühlwasserleitung	Stutzen	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Druck-/Dichtheitsprüfung	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2006/074.2	Nebenkühlwasserleitung	Stutzen	St 35.8 III	Wanddickenschwächung	Druck-/Dichtheitsprüfung	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2006/087.1	Entleerungsleitung Nebenkühlwasserleitung	Rohr	St 35.8	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2006/087.2	Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	St 35.8	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2006/124	Entleerungsleitung des TF-Kühlers (VE-seitig)	Bogen	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2007/037	Nebenkühlwasserleitung (Hauptleitung, Vorlauf)	Rohr	St 37	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Instandsetzung/Wartung	Korrosion, Beschädigung	Reparatur
2007/099	Kühlwasserleitung	Schweißnaht	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2007/108	Leitung vom Notstandssystem RX	Bogen	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2008/014	VE-Vorlaufleitung	Kompensator	Gummigewebe EPDM	Riss mit Leck	Wartenüberwachung, Begehung/Überwachung vor Ort	Überbeanspruchung	Austausch
2008/025.1	Leitung der Taprogge-Anlage	Rohr	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch	Inspektion	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2008/025.2	Leitung der Taprogge-Anlage	Rohr	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch	Inspektion	Korrosion, Beschädigung	Austausch
2008/037	Leitung zur Aktivitätsmessstelle VE00 R001	Rohr	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2009/003.1	Vorlaufleitungen VE	Rohr	St 37-2	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion, Beschädigung	Austausch

Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Werkstoff	Schadensanzeige	Erkennung	Schadensursache	Behebung
2009/003.2	Rücklaufleitungen VE	Rohr	St 37-2	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2009/020.1	Rohrleitung Aktivitätsmessstelle	Rohr	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Begehung/Überwachung vor Ort	Korrosion	Austausch
2009/020.2	Rohrleitung Aktivitätsmessstelle	Rohr	St 35.8 III	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion	Austausch



**Tab. 2** Einzelereignisse mit Schäden an sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlern in deutschen Anlagen mit LWR im Zeitraum von 1997 bis 2009

Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Werkstoff	Schadensanzeige	Erkennung	Schadensursache	Behebung
1997/040	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion	Verschließen
1997/055	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Bruch mit Leck	Wartenüberwachung	Fertigung, Ermüdung	Verschließen/Reparatur Haltegitter
1997/096	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wartenüberwachung	Korrosion	Verschließen
1998/039	Nuklearer Zwischenkühler	Bodenplatte	Ferrit	Riss mit Leck	Inspektion	Korrosion	Reparatur
1998/040	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wartenüberwachung	Fertigung, Ermüdung	Verschließen/Reparatur Haltegitter
1998/041	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Bruch mit Leck	Wartenüberwachung	Fertigung, Ermüdung	Verschließen/Reparatur Haltegitter
1998/044.1	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Inspektion	Korrosion	Verschließen
1998/044.2	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Inspektion	Beschädigung	Verschließen
1998/084	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wartenüberwachung	Beschädigung	Verschließen
1998/085.1	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wartenüberwachung	Korrosion	Verschließen
1998/085.2	Nuklearer Zwischenkühler	Abstandshalter	nicht genannt	Bruch	Inspektion	Ermüdung	Austausch
1999/061	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Titan	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wartenüberwachung	Beschädigung	Verschließen
1999/120	Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Wanddickenschwächung mit Leck	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion	Verschließen, später: Austausch
2000/016.1	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wartenüberwachung	Korrosion	Verschließen
2000/016.2	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Wanddickenschwächung	Wartenüberwachung	Beschädigung	Verschließen
2001/057	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Titan	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wartenüberwachung	Beschädigung	Verschließen
2001/069.1	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Titan	Wanddickenschwächung mit Leck	Test	Korrosion, Ermüdung	Austausch
2001/069.2	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Titan	Wanddickenschwächung mit Leck	Test	Korrosion, Ermüdung	Austausch

Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Werkstoff	Schadensanzeige	Erkennung	Schadensursache	Behebung
2001/087	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Wanddickenschwächung	Wartenüberwachung	Korrosion	Verschließen
2002/152	TF-Kühler-Mantel	Schweißnaht	Ferrit	Wanddickenschwächung	Wiederkehrende Prüfung	Fertigung	Reparatur, später Austausch
2003/121	Gesicherter Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wiederkehrende Prüfung	Fertigung	Ziehen und Verschließen des WT-Rohres
2003/123	Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wartenüberwachung	Korrosion	Verschließen
2004/108	Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Kupferbasis	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wartenüberwachung	Korrosion	Austausch
2005/002	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Riss mit Leck	Wartenüberwachung	Korrosion, Ermüdung	Instandsetzung durch Setzen von Dichtstopfen
2005/057	Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wartenüberwachung	Korrosion	Verschließen
2005/108	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Titan	Wanddickenschwächung	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion	Verschließen, später Austausch
2006/088	Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Inspektion	Korrosion	Verschließen
2007/018	Nuklearer Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Messing	Wanddickenschwächung	Wiederkehrende Prüfung	Korrosion	Austausch
2007/054	Zwischenkühler	Wärmetauscher-Rohr	Kupferbasis	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wartenüberwachung	Fertigung, Korrosion	Austausch und Verschließen der WT-Rohre

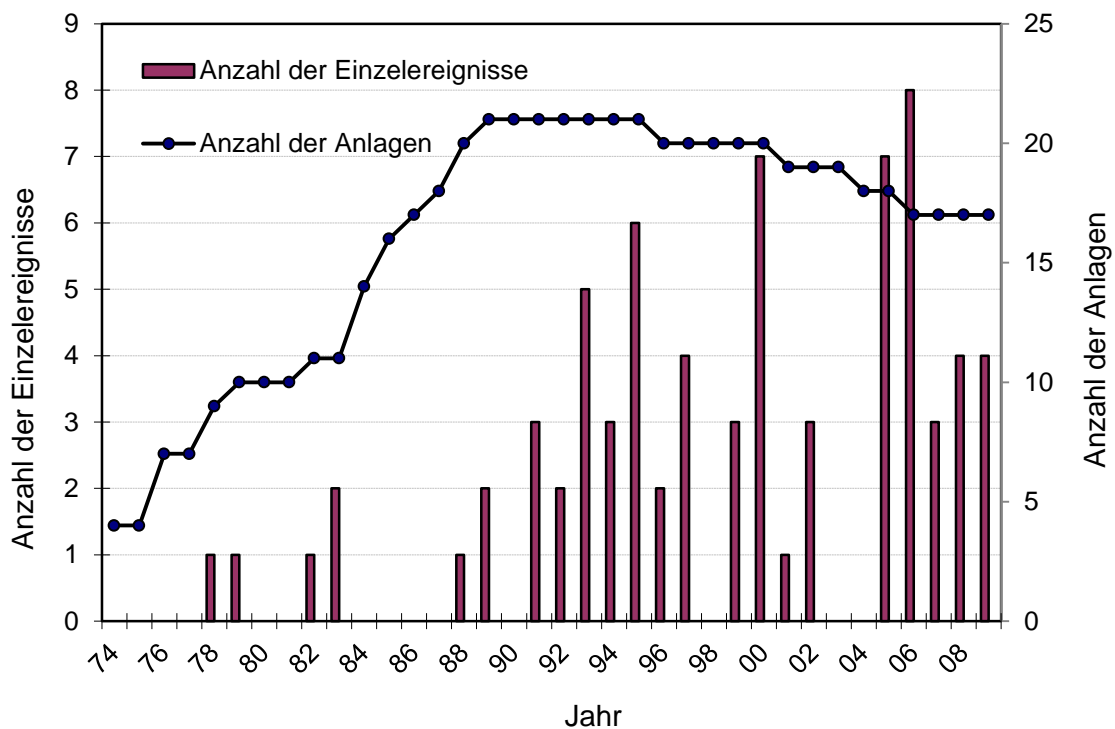
**Tab. 3** Einzelereignisse mit Schäden an Gehäusen von Pumpen des Nebenkühlwassersystems für gesicherte Anlagen in deutschen DWR- und SWR-Anlagen im Zeitraum von 1997 bis 2009

Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Werkstoff	Schadensanzeige	Erkennung	Schadensursache	Behebung
1997/064	Nebenkühlwasserpumpe	Stopfbuchse	nicht genannt	Flansch/Dichtungsleck	Wartenüberwachung	Verschleiß	Austausch
2004/071	Nebenkühlwasserpumpe	Ansaugtrichter	St 37-3	Lochförmiger Wanddurchbruch mit Leck	Wiederkehrende Prüfung	Fertigung, Korrosion	Reparatur
2004/076	Nebenkühlwasserpumpe	Schraube für Stopfbuchse	1.4571	Beschädigung	Instandsetzung/Wartung	Korrosion	Austausch



## 4 Analyse der Schadensschwerpunkte

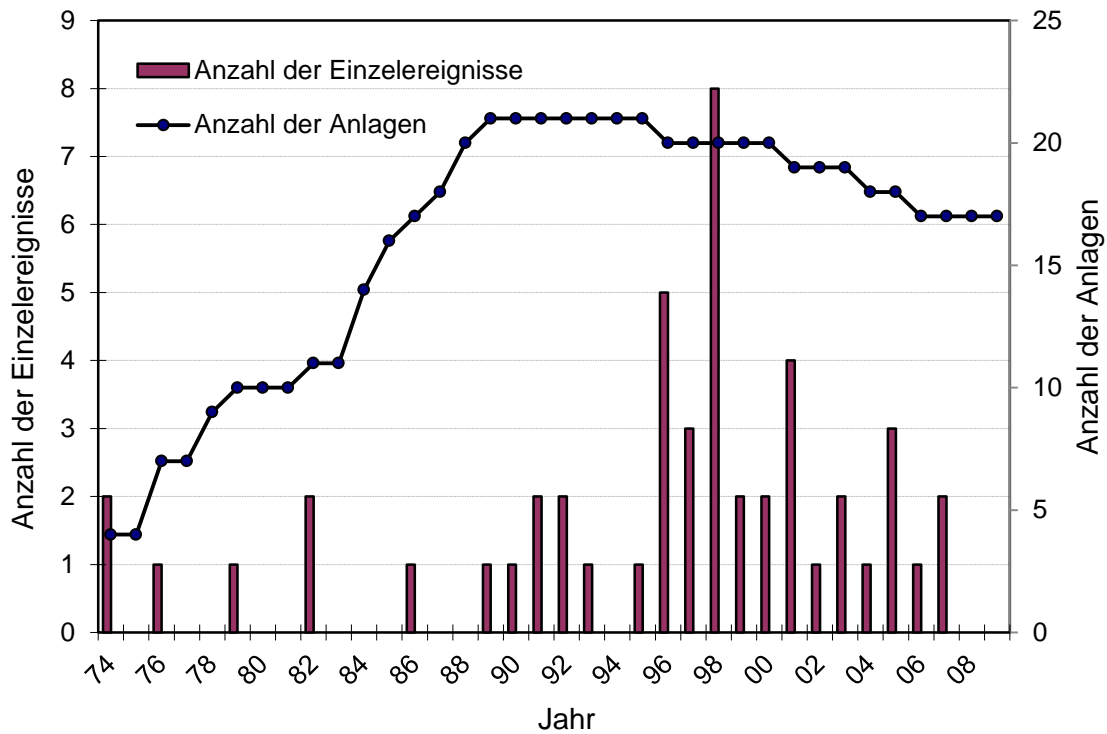
Der zeitliche Verlauf von gemeldeten Schäden an Rohrleitungen des Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen im Zeitraum von 1974 bis 2009 sowie die Anzahl der im jeweiligen Jahr in Betrieb befindlichen Anlagen sind in **Bild 1** dargestellt. Wie in der Grafik zu erkennen ist, hat es seit Beginn der 90er Jahre bis einschließlich des Jahres 2006 einen Anstieg der Einzelereignisse gegeben, wobei die absolute Anzahl der Einzelereignisse pro Jahr (max. acht Einzelereignisse) gering war. Die geringeren Meldedaten der Jahre 2007 bis 2009 sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die in diesem Zeitraum gemeldeten Ereignisse, die zum Zeitpunkt der Recherche zu dieser Arbeit als vorläufige Meldungen vorlagen, aufgrund geringer Datenlage noch nicht in die Datenbank KOMPASS eingegangen waren, bzw. aus dem gleichen Grund nicht in den in Abschnitt 3.2 charakterisierten Datenbestand aufgenommen wurden.



**Bild 1** Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit LWR pro Kalenderjahr sowie Anzahl der im jeweiligen Kalenderjahr in Betrieb befindlichen Anlagen (1974-2009)

In **Bild 2** ist der entsprechende Sachverhalt für Zwischenkühler aufgezeigt. In diesem Fall sind die Meldedaten, nach einem Anstieg ebenfalls in den 90er Jahren, seit der

Jahrtausendwende tendenziell rückläufig. Mit maximal acht Einzelereignissen pro Jahr ist auch hier die Absolutzahl der Ereignisse gering. Wie bei den Rohrleitungen angedeutet, kann auch hier nicht von einem vollständigen Datenbestand insbesondere im Zeitraum von 2007 bis 2009 ausgegangen werden.



**Bild 2** Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Zwischenkühlern des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit LWR pro Kalenderjahr sowie Anzahl der im jeweiligen Kalenderjahr in Betrieb befindlichen Anlagen (1974-2009)

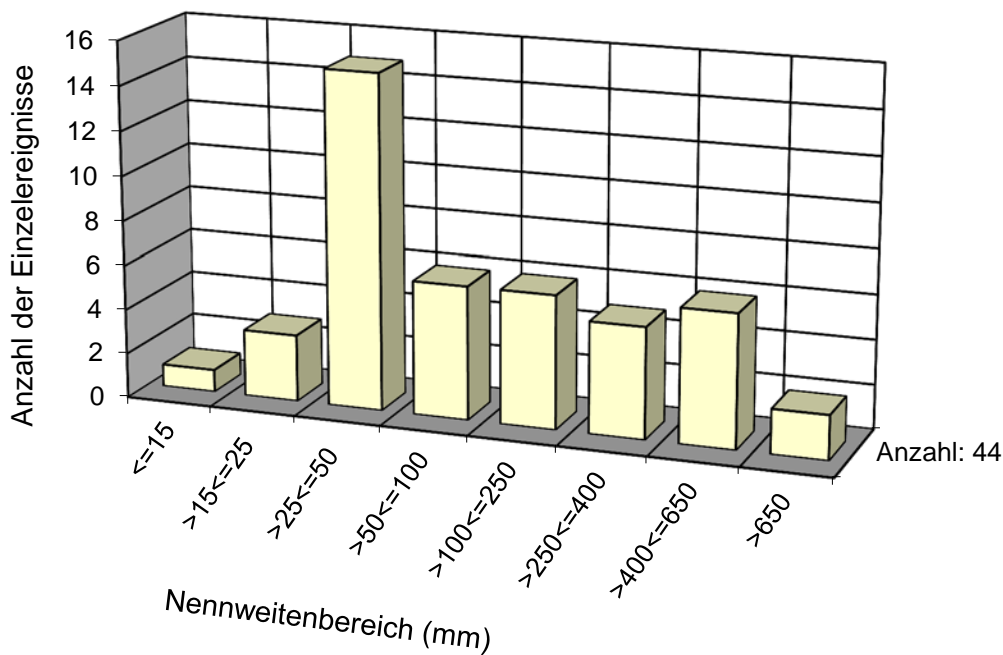
Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Detailuntersuchungen wurden auf der Grundlage des in **Tab. 1** und **Tab. 2** charakterisierten Datenbestandes erzielt, d. h. es werden ausschließlich Einzelereignisse im Zeitraum von 1997 bis 2009 diskutiert. Die Gründe hierfür wurden in Abschnitt **3.2** genannt. Für den Fall, dass bei bestimmten Ereigniskategorien Abhängigkeiten mit der Betriebsdauer festgestellt wurden, wurde jedoch der gesamte Zeitraum seit Beginn der Datensammlung (1974-2009) zu Grunde gelegt.

## 4.1 Schäden an Rohrleitungen

### 4.1.1 Ereignisse aufgeschlüsselt nach Nennweitenbereichen

Bei der Aufschlüsselung der eingetretenen Vorkommnisse nach Nennweitenbereichen der beteiligten Rohrleitungen (**Bild 3**) zeigte sich, dass Rohrleitungen aus allen Nennweitenbereichen betroffen waren. Insbesondere waren also auch sicherheitstechnisch wichtige Rohrleitungen großer Nennweiten betroffen.

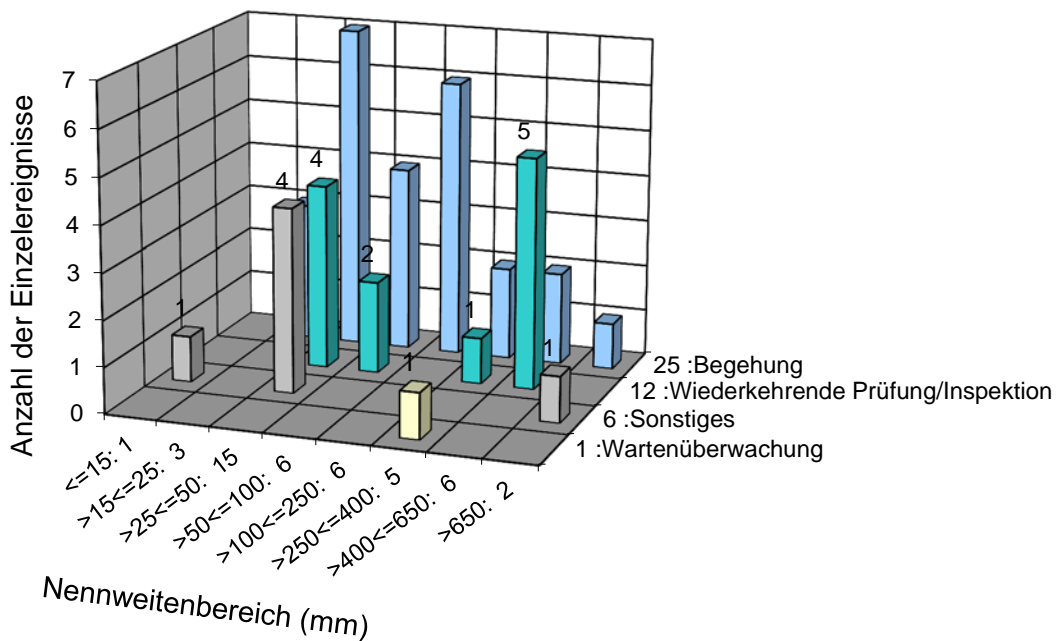
Von den bislang elf eingetretenen Fällen mit Schädigungen an Rohrleitungen mit  $DN \geq 400$  waren ausschließlich die älteren Anlagen betroffen (Anlagen der 1. und 2. Generation bei DWR bzw. der Baulinie 69 bei SWR). Von Ereignissen an kleineren Rohrleitungen ( $DN < 400$ ) dagegen waren alle Anlagengenerationen betroffen.



**Bild 3** Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR nach Nennweitenbereiche aufgeschlüsselt (1997-2009)

Die Art der Schadenserkenntnis (s. **Bild 4**) gibt Aufschluss über die Vorgehensweise der Betreiber bei der Überwachung des Nebenkühlwassersystems hinsichtlich möglicher Schäden. Unabhängig von der Nennweite wurden die meisten Schäden im Rah-

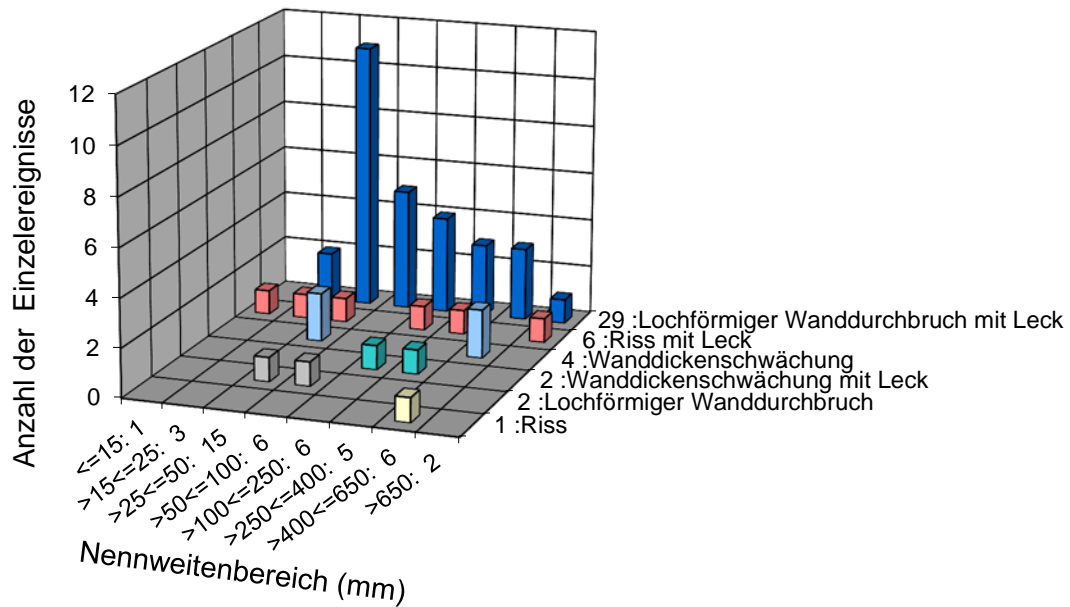
men von Anlagenbegehungen entdeckt. Bei Wiederkehrenden Prüfungen dagegen wurden in erster Linie Beschädigungen an Rohrleitungen mit DN > 400 entdeckt. Zu den sonstigen Erkennungsarten gehörten Druck- und Dichtheitsprüfungen (vier Fälle) sowie Instandsetzungs- bzw. Wartungsarbeiten (zwei Fälle). Mittels Wartenüberwachung konnte lediglich ein Einzelereignis identifiziert werden.



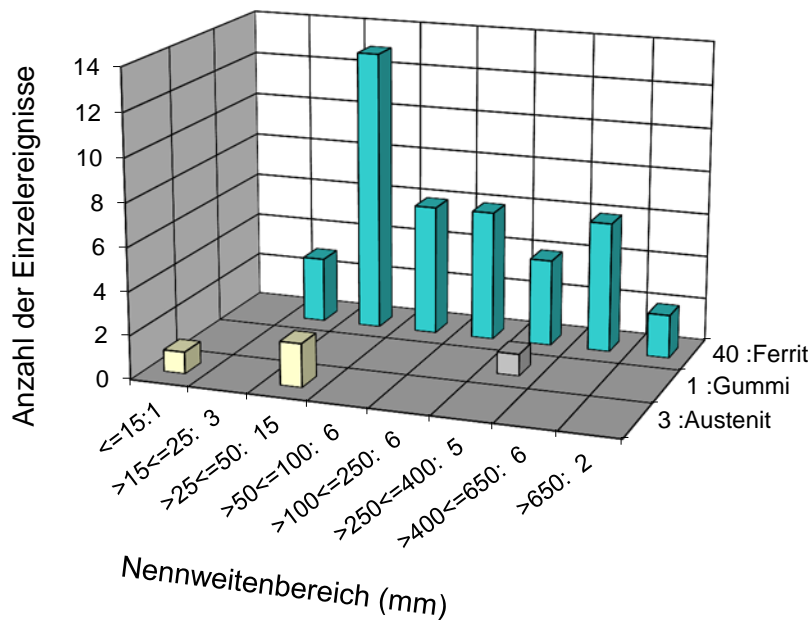
**Bild 4** Art der Erkennung bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009)

Bei den Schadensarten handelte es sich überwiegend um wanddurchdringende Beschädigungen am Grundwerkstoff ferritischer Rohrleitungen (s. **Bild 5** bis **Bild 7**). Die größtenteils lochförmigen Beschädigungen waren weitgehend mit Leckagen verbunden. Ferner waren in geringerem Umfang auch Schweißnähte bzw. der Übergangsbereich zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff betroffen.

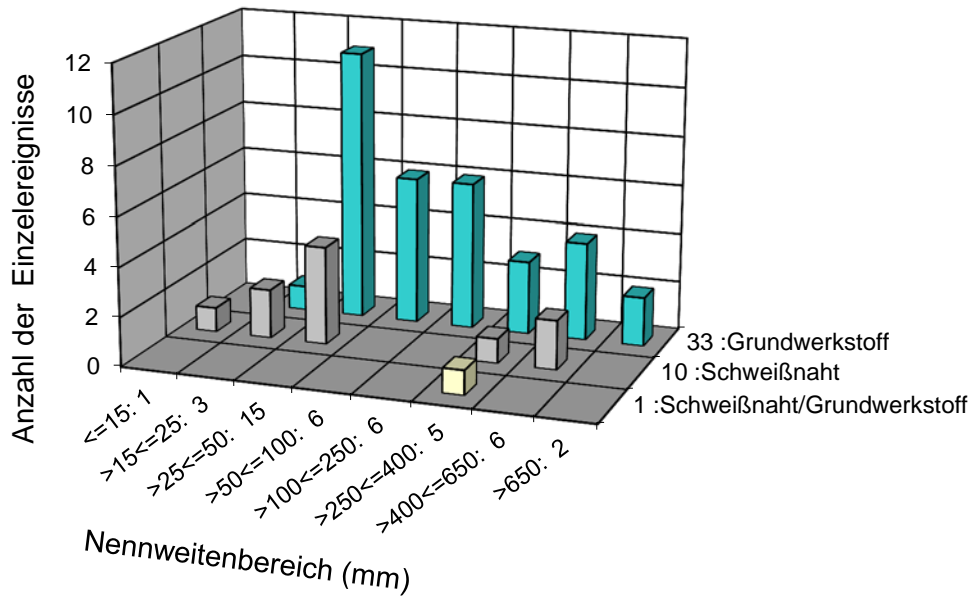




**Bild 5** Schadensarten bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009)



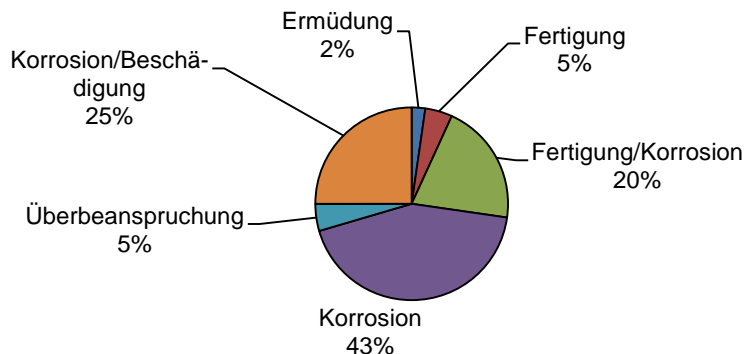
**Bild 6** Betroffene Werkstoffgruppen bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009)



**Bild 7** Schadensorte bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenköhlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009)

#### 4.1.2 Schadensursachen bei Ereignissen an Rohrleitungen

Die Mehrzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen konnte auf Langzeitschäden infolge Korrosion zurückgeführt werden (s. **Bild 8**). Korrosionsbegünstigend wirkten hierbei in vielen Fällen fertigungsbedingte oder durch mechanische Einwirkungen im Betrieb herbeigeführte Vorschäden. Insbesondere betraf das örtliche Beschädigungen der Beschichtungsschichten mit anschließender Korrosionsausbildung.

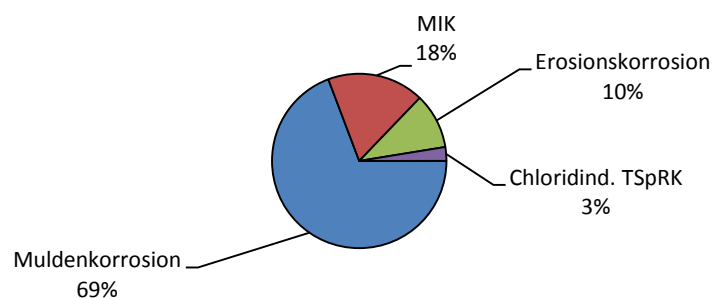


**Bild 8** Schadensursachen bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenköhlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009)

Als fertigungsbedingte Auslöser von Korrosionserscheinungen im Langzeitbetrieb konnten ausschließlich Beschichtungsfehler identifiziert werden. Daneben führten in geringerem Umfang auch Schweißfehler zu Vorkommnissen, jedoch ohne Korrosionsbeteiligung.

Mechanische Einwirkungen resultierten entweder in einer lokalen Zerstörung von Schutzschichten an der äußeren/inneren Rohrwandung mit anschließendem Korrosionsangriff von außen/innen oder bewirkten unmittelbar eine Zerstörung des Grundwerkstoffs.

Einzelereignisse mit Korrosionsbeteiligung konnten in etwa 70 % aller Fälle auf Muldenkorrosion zurückgeführt werden (s. **Bild 9**). Durch die Muldenkorrosion entstanden mehrheitlich örtlich eng begrenzte wanddurchdringende Öffnungen mit der Folge von Leckagen. In der Mehrzahl dieser Fälle lagen die Schadensorte in Bereichen mit stagnierendem Medium wie etwa Abzweigungen. Daneben war ein signifikanter Anteil von Schäden die Folge von mikrobiologisch induzierter Korrosion (MIK). Diese beiden Mechanismen sind typisch für die im Nebenkühlwassersystem herrschenden Mediumsbedingungen (Flusswasser). Hierbei ist die MIK kein eigenständiger Schadensmechanismus. Typisch für MIK ist, dass durch die Anwesenheit von Mikroorganismen an der Werkstoffoberfläche die Bedingungen für das Auftreten von Korrosion geschaffen werden. Weitergehende Informationen zum Schädigungsmechanismus MIK sowie der Betriebserfahrung mit diesem Mechanismus in deutschen Anlagen finden sich unter **Abschnitt 5.2**.



**Bild 9** Anteil der einzelnen Korrosionsmechanismen an der Gesamtzahl der Einzelereignisse mit Korrosionsbeteiligung an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009)

Erosionskorrosion im Bereich der Rohrleitungen der gesicherten Nebenkühlwassersysteme wurde bislang nur in der Anlage KWO beobachtet. Hier war es aufgrund eines

Materialabtrags infolge Wirbelbildung hinter zwei stark durchflussdrosselnden Armaturen zu geringfügigen Leckagen gekommen.

Aufgrund der weitgehenden Abwesenheit von austenitischen Werkstoffen im Bereich der Nebenkühlwassersysteme ist die chloridinduzierte transkristalline Spannungsrisskorrosion ein selten beobachtetes Phänomen.

#### **4.1.3 Ereignisse mit Beschichtungsschädigungen als Primärschaden**

Bei 20 von insgesamt 44 Einzelereignissen waren nachweislich Beschichtungsfehler oder -schäden dem anschließenden Korrosionsangriff vorausgegangen. Vielfach konnte jedoch auf Grundlage der vorhandenen Informationen zu den Ereignissen nicht eindeutig geklärt werden, ob eine Schutzschicht vorhanden war oder nicht. Daher ist es möglich, dass weitere Ereignisse im Zusammenhang mit Beschichtungsschädigungen eingetreten sind. Schäden an den Beschichtungen konnten zurückgeführt werden auf Fehler beim Aufbringen der Beschichtung während der Herstellungsphase (elf Einzelereignisse), mechanische Einwirkungen während des Betriebs (sechs Einzelereignisse) sowie Alterungseinflüsse (drei Einzelereignisse).

Neben unzureichend bzw. lückenhaft aufgetragener Beschichtungen kann eine typische Schadensabfolge bei fertigungsbedingten Beschichtungsfehlern wie folgt beschrieben werden: im Rahmen des Fertigungsprozesses wird das Beschichtungsmaterial fehlerhaft aufgetragen. In Folge dessen löst sie sich im Laufe der Betriebszeit von der Rohrwand, wird unterostet und dadurch weiter von der Rohrwand weggedrückt. Über Undichtigkeiten in der Beschichtung gelangt Flusswasser an die Grundwerkstoffoberfläche und setzt den weiteren Korrosionsprozess in Gang.

Mechanische Einwirkungen resultierten stets in einer Beschädigung der Schutzschichten mit anschließendem Korrosionsangriff infolge des direkten Kontaktes der Werkstoffoberfläche mit dem eindringenden Medium. Solche Vorgänge sind sowohl an der Außenoberfläche als auch an der Innenoberfläche aufgetreten. Hierbei ist die Beschädigung der Schutzschicht auf der Innenoberfläche in der Regel eine Folge des Einwirkens äußerer Kräfte (beispielsweise während Montagetätigkeiten) auf die Außenoberfläche der Rohrleitungen gewesen. In einem Fall wurde die Schutzschicht bereits während des Einbauvorgangs beschädigt.

Beschichtungsschädigungen, die nicht die Folge von Fertigungsfehlern oder dem Einwirken äußerer Kräfte waren, konnten auf Alterungseinflüsse zurückgeführt werden. Beispielsweise können bei manchen Gummierungen wie z. B. dem Produkt „VULCOFERRAN 2154“ Aushärtungsprozesse während des Langzeiteinsatzes die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber mechanischen Einwirkungen stark herabsetzen.

Bis auf zwei Ausnahmen, die zum Einsetzen von MIK führten, war die Folge jeglicher oben aufgezählter Beschichtungsfehler stets Muldenkorrosion.

#### **4.1.4 Schäden an erdverlegten Rohrleitungen**

Die Besonderheit bei erdverlegten Rohrleitungen besteht darin, dass die Schäden (z. B. Leckagen) nicht unmittelbar erkannt werden können. Daher besteht hierbei die potentielle Gefahr für einen unentdeckten Schadensfortschritt, der im ungünstigsten Fall zum Ausfall eines Nebenkühlwasserstrangs führen kann.

Bei der Sichtung der Datenbank KOMPASS im Hinblick auf Vorkommnissen im Bereich erdverlegter Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems im Zeitraum von 1997 bis 2009 konnten lediglich drei Einzelereignisse (ME 1997/061, ME 2007/037, ME 2009/003.1,2, siehe **Tab. 1**) identifiziert werden. Zusätzlich wurde im Rahmen der Recherchen ein weiterer Schadensfall (ME 2008/027) an erdverlegten Rohrleitungen identifiziert. Zu diesem letztgenannten Vorkommnis lag zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieses Vorhabens nur die vorläufige Meldung vor und das Vorkommnis war aufgrund des unzureichend fortgeschrittenen Bearbeitungsstandes noch nicht in die KOMPASS eingegangen.

Sämtliche Schäden wurden erst nach Freilegen der Rohrleitungen erkannt. Während des Betriebs lagen in keinem Fall Hinweise auf etwaige Beschädigungen vor. Hinsichtlich der Schadensursachen nimmt das Vorkommnis ME 1997/061 insofern eine Sonderstellung ein, als die betroffene Rohrleitung beim Herstellen einer Baugrube durch Anbohren mit der Bohrkronen beschädigt wurde. Die restlichen Vorkommnisse wiesen hingegen Langzeitschäden in Folge Korrosion auf. Im Wesentlichen wiesen die Korrosionsstellen typische Merkmale von Muldenkorrosion von außen auf. Hierbei gingen dem Korrosionsangriff entweder lokal unzureichend aufgebrachte Beschichtungen oder mechanische Beschädigungen derselben voraus. In einem Fall konnte die Beschichtungsschädigung auf mechanische Einwirkungen durch das grobe Verfüllmaterial, wel-

ches insbesondere Steine enthielt, zurückgeführt werden. In einem anderen Fall gingen die Anzeigen von der Innenoberfläche der oberen Halbschale aus. Von Seiten der Betreiber wurde dieser Sachverhalt mit dem temporärem Vorliegen von teilbefüllten Zuständen mit stagnierenden Bedingungen z. B. während Stillstandphasen begründet.

#### **4.1.5 Einfluss der Mediumsbedingungen**

Die Mediumsbedingungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems wurden in Abschnitt 2.4 global dargestellt. Lokal können jedoch spezifische Gegebenheiten vorliegen, die das Auftreten bestimmter Schädigungsmechanismen begünstigen. An dieser Stelle wird daher der Zusammenhang zwischen bestimmten Mediumsbedingungen und den „zugehörigen“, wiederholt auftretenden Schädigungsmechanismen analysiert.

Hierzu wurden die in **Tab. 4** zusammengestellten Einzelereignisse unter Berücksichtigung der am Schadensort herrschenden Mediumsbedingungen aufgelistet. Wie zu erkennen ist, waren aufgrund der vorhandenen Datenlage zu den Einzelereignissen die Mediumsbedingungen nicht immer explizit bekannt. Dennoch konnten bei der Untersuchung der Ereignisse an Rohrleitungen unter diesem Gesichtspunkt zwei potentiell gefährdete Bereiche identifiziert werden, die im Weiteren vertieft diskutiert werden.

- **Bereiche mit stagnierendem Medium, Nachweis von Ablagerungen oder Belüftungselementen**

In **Tab. 4** sind diejenigen Einzelereignisse, bei denen Ablagerungen auf den Rohrinnenoberflächen beobachtet wurden bzw. Belüftungselemente nachweislich zur Schadensinitiierung beigetragen haben, blau hinterlegt. In vielen weiteren Fällen ist die Bildung von Belüftungselementen aufgrund konstruktiver und/oder strömungstechnischer Gegebenheiten als sehr wahrscheinlich einzuschätzen.

Bekanntermaßen entstehen Belüftungselemente immer dann, wenn an der Werkstoffoberfläche lokal bedeckte und unbedeckte Bereiche vorliegen. Dabei spielt die chemische Zusammensetzung des Belags eine untergeordnete Rolle. Die bedeckte Werkstoffoberfläche verhält sich aufgrund des Sauerstoffmangels anodisch, die besser belüftete unbedeckte Oberfläche kathodisch. In der Folge setzt ein elektrochemischer Korrosionsprozess ein, bei dem die anodischen Bereiche angegriffen werden. Günstige Bedingungen für die Bildung von Belüftungselementen liegen insbesondere in stagnie-

renden Medien vor. Dieser Zusammenhang geht bis auf eine Ausnahme, wo das Medium nachweislich permanent umgewälzt wurde, auch aus **Tab. 4** hervor.

Bei sämtlichen Einzelereignissen infolge MIK lagen stagnierende bzw. teilweise stagnierende Strömungsverhältnissen vor. Dieser Sachverhalt ist insofern plausibel, als die Ansiedelung von Mikroorganismen an Werkstoffoberflächen bei diesen Bedingungen stark begünstigt wird. Die übrigen Vorkommnisse mit Nachweis von Ablagerungen und/oder Belüftungselementen sind aufgrund von Muldenkorrosion eingetreten. Man beachte jedoch, dass die Unterscheidung zwischen MIK und Muldenkorrosion nicht immer möglich ist (siehe auch **Abschnitt 4.1.1**).

Grundsätzlich sind Bereiche mit stagnierenden Strömungsverhältnissen im Hinblick auf das Eintreten von Korrosionsmechanismen besonders gefährdet. Ein Grund hierfür ist die Möglichkeit der Aufkonzentration von Schadstoffen an der Werkstoffoberfläche. Der tatsächlich eintretende Korrosionsmechanismus hängt dann u. a. von der Zusammensetzung der Schadstoffe und dem Werkstoff selbst ab.

- **Bereiche mit turbulenten Strömungsverhältnissen**

Neben stagnierenden Mediumsverhältnissen sind Bereiche mit turbulenter Strömung als besonders korrosionsgefährdet identifiziert worden (siehe grün hinterlegte Einzelereignisse in **Tab. 4**). Bei vier von sechs Einzelereignissen, bei denen turbulente Strömungsverhältnisse vorlagen oder aufgrund strömungsungünstiger Bauteilform als sehr wahrscheinlich erachtet wurden, ist nachweislich Erosionskorrosion aufgetreten. Die betroffenen Bauteile bestanden aus unterschiedlichen ferritischen Stählen. Die übrigen beiden Einzelereignisse (ME 2005/096.1, 2) wurden unter Muldenkorrosion aufgelistet. In den zugehörigen Unterlagen finden sich jedoch Hinweise auf ein „Tigerfellmuster“ im beschädigten Bereich, was als Indiz für Erosionskorrosion gewertet werden kann.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit identifizierten vier Einzelereignissen infolge Erosionskorrosion ging dem Korrosionsangriff in zwei Fällen eine Zerstörung einer Schutzschicht aus Teerepoxidharz durch Erosion voraus. Bei den beiden anderen Vorkommnissen konnte nicht geklärt werden, ob eine Schutzschicht vorhanden war.

**Tab. 4** Einzelereignisse mit Schäden an Rohrleitungen des Nebenkühlwassersystems für gesicherte Anlagen in deutschen DWR- und SWR-Anlagen unter Berücksichtigung der Mediumsbedingungen (1997 bis 2009)

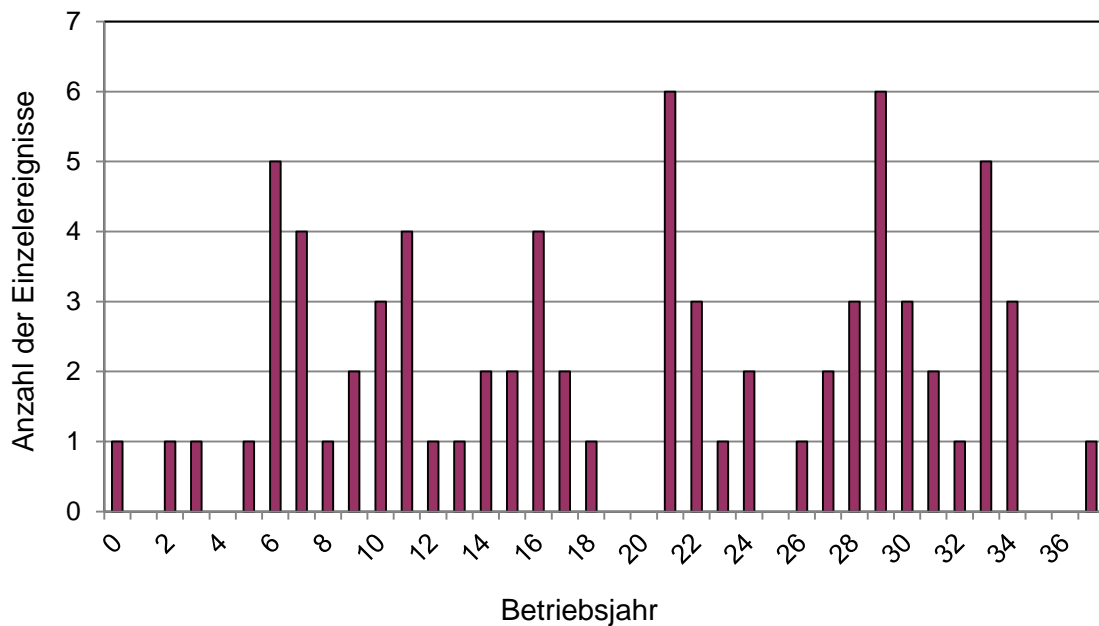
Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Korrosion	Mediumsbedingungen
2000/026	Nebenkühlwasserrücklaufleitung	Rohrbogen	---	---
2000/061	Druckmessstutzen	Stutzen	---	---
2000/067	Fettversorgungsleitung	Schweißnaht	---	ständige Durchströmung mit Fett und Flusswasser
2008/014	VE-Vorlaufleitung	Kompensator	---	---
1997/061	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	---	---
1999/109	Kühlwasserleitung	Schweißnaht	Chloridind. TSpRK	stagnierende Mediumsbedingungen können vorliegen
2002/131.1	Neben- und Notkühlleitung	Rohr	Erosionskorrosion	Turbulenzen nach Drosselstellung einer Armatur
2002/131.2	Neben- und Notkühlleitung	Flansch	Erosionskorrosion	Turbulenzen nach Drosselstellung einer Armatur
2005/044.1	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	Erosionskorrosion	Turbulenzen möglich wegen strömungsungünstiger Bauteilform
2005/044.2	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	Erosionskorrosion	Turbulenzen möglich wegen strömungsungünstiger Bauteilform
1999/032	Entlüftungsleitung	Rohr	MIK	teilweise stagnierendes Medium
2005/127	Probenahmeleitung/Nebenkühlwassersystem	Schweißnaht	MIK	stagnierendes Medium
2006/074.1	Nebenkühlwasserleitung	Stutzen	MIK	stagnierendes Medium
2006/074.2	Nebenkühlwasserleitung	Stutzen	MIK	stagnierendes Medium
2006/087.1	Entleerungsleitung Nebenkühlwasserleitung	Rohr	MIK	teilweise stagnierendes Medium
2006/087.2	Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	MIK	teilweise stagnierendes Medium
2006/124	Entleerungsleitung des TF-Kühlers (VE-seitig)	Bogen	MIK	stagnierendes Medium
1997/014.1	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	Muldenkorrosion	---
1997/014.2	Vorlaufleitung zum Kühler Notstromdiesel	Rohr	Muldenkorrosion	---
1997/041	Entlüftungsleitungen	Rohr	Muldenkorrosion	---
1999/022	Anschlussstutzen	Schweißnaht	Muldenkorrosion	stagnierendes Rheinwasser, Flusssedimente, Korrosionsprodukte
2000/002.1	Messstutzen	Schweißnaht	Muldenkorrosion	---



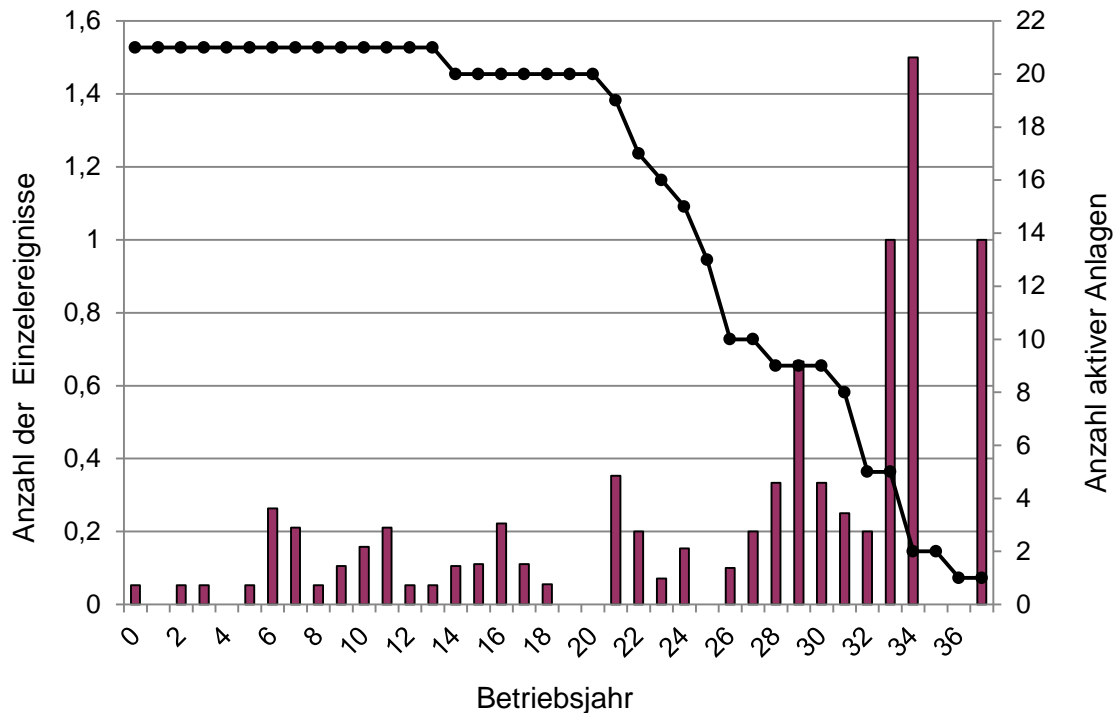
Vorkommnis	Komponente	Bauteil	Korrosion	Mediumsbedingungen
2000/002.2	Messleitung	Rohrbogen	Muldenkorrosion	---
2000/039	Siebrohr der Taprogge-Anlage	Siebrohr	Muldenkorrosion	---
2000/077	Prüfleitung	Rohr	Muldenkorrosion	---
2001/033	Druckmessstutzen	Stutzen	Muldenkorrosion	---
2002/066	Neben-und Notkühlleitung	Rohrbogen	Muldenkorrosion	Spaltbedingung an der Außenseite
2005/096.1	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	Muldenkorrosion	Turbulenzen, da strömungsungünstige Bauteilform
2005/096.2	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	Muldenkorrosion	---
2005/096.3	Nebenkühlwasserleitung	Rohr	Muldenkorrosion	Turbulenzen, da strömungsungünstige Bauteilform
2005/115	Entwässerungsleitung/Notkühlwassersystem	Rohrabzweig	Muldenkorrosion	---
2006/025	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Rohrabzweig	Muldenkorrosion	permanent umwälzend
2006/031	Entleerungsleitung nukl. Zwischenkühler	Rohrbogen	Muldenkorrosion	---
2006/054	Abzweig Nebenkühlwasserleitung	Rohrabzweig	Muldenkorrosion	---
2007/037	Nebenkühlwasserleitung (Hauptleitung, Vorlauf)	Rohr	Muldenkorrosion	---
2007/099	Kühlwasserleitung	Schweißnaht	Muldenkorrosion	---
2007/108	Leitung vom Notstandssystem RX	Bogen	Muldenkorrosion	stagnierendes Medium
2008/025.1	Leitung der Taprogge-Anlage	Rohr	Muldenkorrosion	---
2008/025.2	Leitung der Taprogge-Anlage	Rohr	Muldenkorrosion	---
2008/037	Leitung zur Aktivitätsmessstelle VE00 R001	Rohr	Muldenkorrosion	---
2009/003.1	Vorlaufleitungen VE	Rohr	Muldenkorrosion	---
2009/003.2	Rücklaufleitungen VE	Rohr	Muldenkorrosion	---
2009/020.1	Rohrleitung Aktivitätsmessstelle	Rohr	Muldenkorrosion	---
2009/020.2	Rohrleitung Aktivitätsmessstelle	Rohr	Muldenkorrosion	---

#### 4.1.6 Einfluss der Betriebszeit

Da nicht alle Anlagen im gleichen Jahr in Betrieb gesetzt wurden, ist im Hinblick auf die Untersuchung von Alterungseinflüssen nicht das Kalenderjahr, sondern das Betriebsjahr, in dem das Ereignis eingetreten ist, der maßgebende Parameter. Betrachtet man die Anzahl der Einzelereignisse in allen deutschen Anlagen als Funktion des Betriebsjahres, indem der Schaden registriert wurde, so ist keine nennenswerte Zunahme mit fortschreitender Betriebszeit festzustellen (s. **Bild 10**). Eliminiert man in dieser Darstellung den Einfluss der Anlagenzahl durch Normierung des Ordinatenwertes auf die Anzahl der im jeweiligen Betriebsjahr tatsächlich in Betrieb befindlichen Anlagen, so ergibt sich das in **Bild 11** dargestellte Ergebnis. Die Aussage dieser Darstellung kann wie folgt gedeutet werden: Pro Anlage ist mit fortschreitender Betriebsdauer mit mehr Vorkommnissen zu rechnen. Integral gesehen bleibt die Zahl gemeldeter Vorkommnisse zwar nahezu unverändert (vgl. **Bild 10**), diese werden jedoch von weniger Anlagen verursacht.



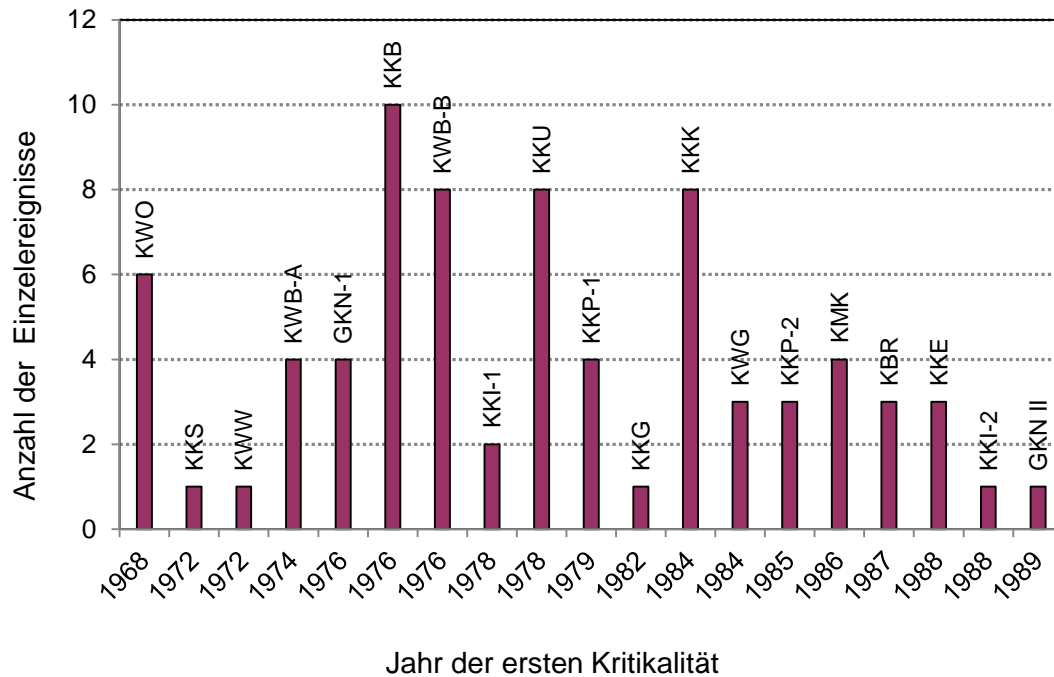
**Bild 10** Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems in deutschen Anlagen mit DWR und SWR in Anhängigkeit des Betriebsjahres der Anlagen (1974-2009)



**Bild 11** Betriebsjahrabhängige Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutschen Anlagen mit DWR und SWR pro aktive Anlage (1974-2009)

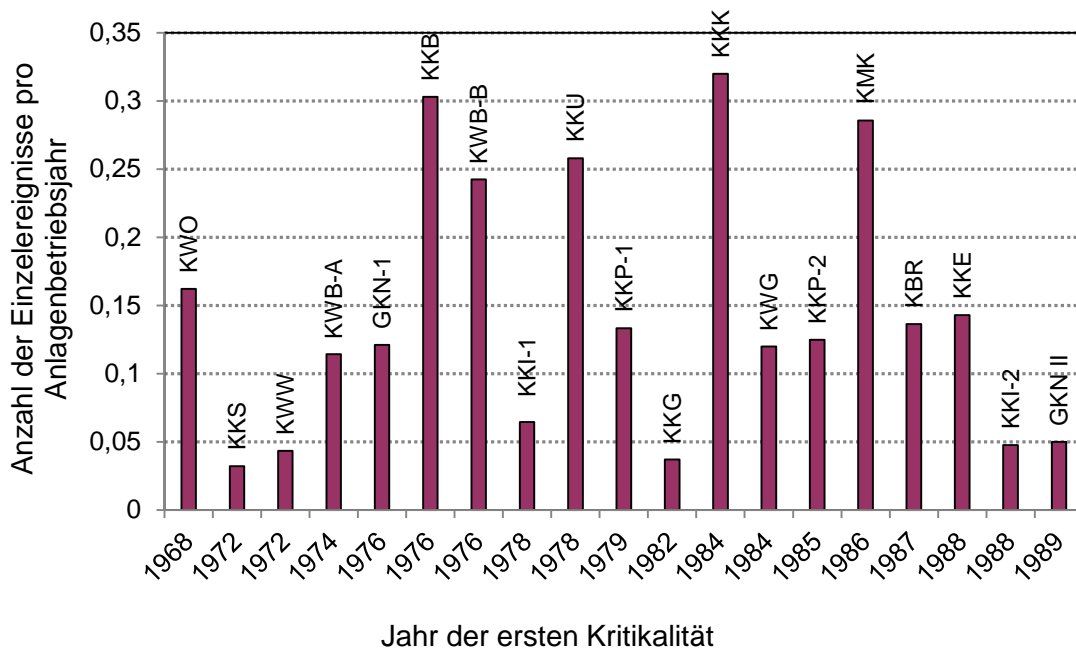
Die bisherigen Betrachtungen erfolgten ohne Unterscheidung der beteiligten Anlagen. Da sich die deutschen Kernkraftwerke jedoch nicht nur hinsichtlich Entwicklungsstufe, Anlagenalter und -typ, sondern auch hinsichtlich des Konzepts zu Wiederkehrenden Prüfungen im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme stark unterscheiden, ist es sinnvoll auch diese Parameter bei den Untersuchungen zu berücksichtigen. Dazu wurden in **Bild 12** alle bisher aufgetretenen Einzelereignisse an Rohrleitungen nach den betroffenen Anlagen aufgeschlüsselt.

Wertet man beispielsweise diejenigen Anlagen, deren Jahr der ersten Kritikalität vor 1980 lag, als „alt“ und die anderen als „neu“, dann haben sich in den „älteren Anlagen“ bislang mehr Vorkommnisse ereignet als in den „Neueren“. Die Ereigniszahl variiert jedoch stark von Anlage zu Anlage. Unerwartet gibt es „ältere Anlagen“ (KKS, KWW), die mitunter die wenigsten Vorkommnisse verursacht haben, aber auch eine „neuere Anlage“ (KKK), die zu den Anlagen mit den meisten Vorkommnismeldungen gehört.



**Bild 12** Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR geordnet nach dem Jahr der ersten Kritikalität (1974-2009)

Führt man für jede Anlage eine Ereignisrate (Einzelereignisse pro Anlagenbetriebsjahr) ein, dann werden Ereignisse in Anlagen mit kürzerer Betriebszeit stärker gewichtet. Wie **Bild 13** zeigt, verschiebt sich der Schwerpunkt hin zu neueren Anlagen. Unbeachtet der Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen sind in den „älteren Anlagen“ zwar global mehr Vorkommnisse aufgetreten, die Anlagen mit den größeren Ereignisraten hingegen zählen zu den „Neueren“.



**Bild 13** Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR pro Anlage und Anlagenbetriebsjahr (1974-2009)

#### 4.1.7 Maßnahmen der Betreiber bei Schäden an Rohrleitungen

Mehrheitlich konnten die Leckagestellen aufgrund des niedrigen Systemdrucks zunächst provisorisch mittels Schellen abgedichtet und anschließend entweder instandgesetzt oder ausgetauscht werden. Etwas seltener wurden die betroffenen Rohrleitungen direkt gegen neue ausgetauscht. Teilweise wurden Wanddickenmessungen in vergleichbaren Bereichen durchgeführt und erforderlichenfalls diese ebenfalls instandgesetzt. In weiteren Fällen wurden auch Teile der beschädigten Innenbeschichtungen erneuert.

#### 4.2 Schäden an sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlern

Die Betriebserfahrung mit Wärmetauschern und Kühlern wurde zuletzt im Rahmen von /GRS 99/ im Jahr 1999 analysiert. Zuvor war ein Anstieg an gemeldeten Schäden registriert worden. Gegenstand der damaligen Untersuchungen waren alle sicherheitstechnisch wichtigen Kühler und Wärmetauscher, z. B. auch Nachwärmekühler in deutschen Anlagen mit DWR. Im Rahmen dieses Berichts wurde die Betriebserfahrung zu

Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen deutscher Anlagen mit DWR und SWR ausgewertet.

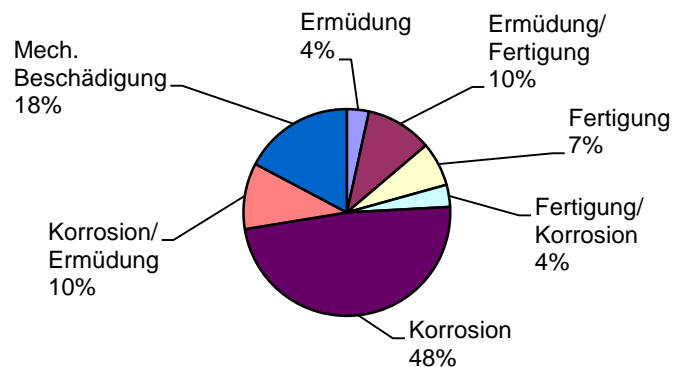
Im betrachteten Zeitraum (1997-2009) wurden 29 Einzelereignisse mit Schädigungen an Bauteilen des Zwischenkühlers in der Datenbank KOMPASS identifiziert (s. **Tab. 2** und **Bild 2**). Hiervon bezogen sich 26 Einzelereignisse auf Schäden an WT-Rohren, wobei elfmal die Zwischenkühlwasserseite und 15mal die Nebenkühlwasserseite betroffen war. In **Tab. 5** wurden diese nach den betroffenen Anlagen aufgelistet. In über 80 % der Fälle waren ältere Anlagen der 2. DWR-Generation bzw. SWR-Anlagen der Baulinie 69 betroffen. Die übrigen Einzelereignisse verteilten sich auf zwei Anlagen der 3. DWR-Generation.

In etwa der Hälfte der Fälle war Korrosion die ausschließliche Schadensursache (s. **Bild 14**). Darüber hinaus trat Korrosion auch im Verbund mit bzw. als Folge von Fertigungsfehlern oder Materialermüdung auf. Die dominierenden Korrosionsmechanismen hierbei waren Erosions- und Reibkorrosion (s. **Bild 15**). Muldenkorrosion trat im Unterschied zu Rohrleitungen nur in geringem Umfang auf. Als typische Fertigungsfehler konnten Montage-, Beschichtungs-, Schweiß- und Verarbeitungsfehler identifiziert werden. Ursächlich für die Ermüdung der Komponenten war eine Materialbeanspruchung, meist verursacht durch strömungsinduzierte Schwingungen.

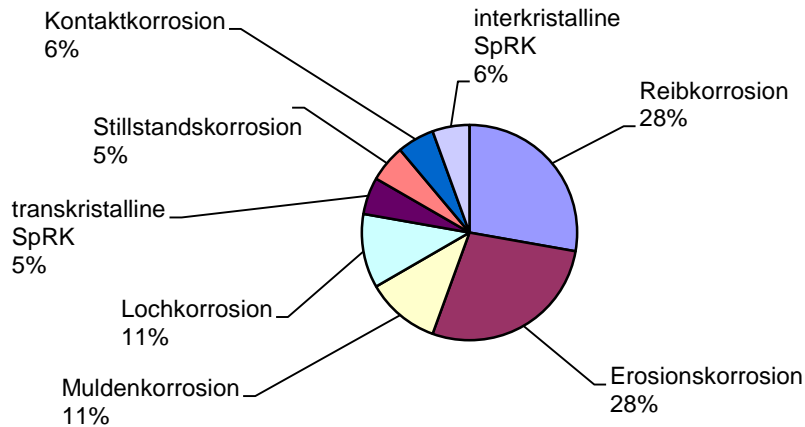
Neben diesen Langzeitschäden konnte etwa ein Fünftel aller Einzelereignisse auf verschiedene äußere mechanische Einwirkungen zurückgeführt werden. So war bei einem Einzelereignis beispielsweise ein WT-Rohr beim Transportvorgang durch einen Nagel in der Transportkiste unbemerkt beschädigt worden. Darüber hinaus wurden mechanische Beschädigungen auch durch die Wechselwirkung mit Fremdkörpern sowie bei Reinigungsarbeiten verursacht.

**Tab. 5** Betroffene Anlagen bei Einzelereignissen an Bauteilen von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009)

Anlage	Entwicklungsstufe	Wärmetauscher-Rohre		Sonstige Einbauten	Anteil (%)
		Innen	Außen		
KWB-B	2	4	1	1	21
GKN I	2	3	1	1	17
KKU	2	4	0	1	17
KWB-A	2	0	3	0	10
KKG	3	3	1	0	14
KKB	69	3	0	0	10
KKI-1	69	2	0	0	7
KBR	3	0	1	0	4



**Bild 14** Schadensursachen bei Einzelereignissen an Bauteilen von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009)



**Bild 15** Anteil der verschiedenen Korrosionsmechanismen bei korrosionsbedingten Einzelereignissen an Bauteilen von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009)

#### 4.2.1 Schäden an WT-Rohren

Wie bereits ausgeführt, stellt der Zwischenkühler das Bindeglied zweier ansonsten unabhängiger Systeme (Nebenkühlwassersystem/Zwischenkühlwassersystem) dar. Beide Systeme unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der Betriebskennwerte (Druck, Temperatur), sondern auch hinsichtlich des Mediums, mit dem sie betrieben werden. Während die Rohrseite der WT-Rohre mit Nebenkühlwasser (Flusswasser) beaufschlagt wird, wird die Mantelseite mit Zwischenkühlwasser (Deionat) beaufschlagt. Aufgrund dieser stark unterschiedlichen Mediumsbedingungen werden daher im Folgenden rohr- und mantelseitige Schäden differenziert betrachtet.

- **Rohrseitige Schäden**

Von 15 rohrseitigen Einzelereignissen (s. **Tab. 6**) stehen 12 im Zusammenhang mit Korrosionsbeteiligung, wobei in einem Fall ein Fertigungsfehler vorausgegangen war. Die übrigen 3 Einzelereignisse wurden durch mechanische Beschädigung herbeigeführt. Bis auf zwei Ausnahmen, bei denen WT-Rohre aus einer Kupferbasislegierung betroffen waren, waren die beschädigten WT-Rohre aus Messing gefertigt. An titanbe-rohrten Wärmetauschern sind im betrachteten Zeitraum keine Schäden an den Innenoberflächen der WT-Rohre aufgetreten.



**Tab. 6** Rohrseitige Einzelereignisse an WT-Rohren von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009)

Vorkommn.	Anlage	Werkstoff	Schadensursache
1997/040	KKG	CuZn28SnF38	Lochkorrosion (Eintrag von schwefel- und chloridhaltigen Substanzen)
1997/096	KWB-B	CuZn20	Erosionskorrosion/ erhöhte Strömungsgeschwindigkeit
1998/044.1	KKG	CuZn28SnF38	Transkr. SpRK (korrosive Inhaltsstoffe des Mainwassers)
1998/044.2	KKG	CuZn28SnF38	mech. Beschädigung/ beim Transport eingebrachte Delle
1998/084	GKN I	SoMs71	mech. Beschädigung bei Reinigungsarbeiten
1998/085.1	KWB-B	CuZn20	Erosionskorrosion (erhöhte Strömungsgeschwindigkeit)
2000/016.1	GKN I	SoMs71	Interkr. Korrosion (keine Angaben)
2000/016.2	GKN I	SoMs71	mech. Beschädigung (Polierwirkung von Taprogge-Kugeln an herstellungsbedingter Beule)
2001/087	KWB-B	SoMs71	Erosionskorrosion (erhöhte Strömungsgeschwindigkeit)
2003/123	KKB	SoMs76	Erosionskorrosion (Materialabtrag an herstellungsbedingte Beulen)
2004/108	KKI-1	CuNi10Fe1MnF29	Stillstandskorrosion (festsitzende Taprogge-Kugel, Flusswasserablagerungen)
2005/057	KKB	SoMs76	Reibkorrosion (Brackwasser mit hohem Salzgehalt)
2006/088	KKB	Messing	Reibkorrosion (Einzelfehler, keine Fremdkörper)
2007/018	KWB-B	CuZn28Sn1	Muldenkorrosion (stehendes Medium infolge Fremdkörper, Aufkonzentration von korrosiven Stoffen)
2007/054	KKI-1	CuNi10Fe	Lochkorrosion (Beschichtungsfehler / stagnierendes Medium, festsitzende Taprogge-Kugeln)

Häufig bildeten Behinderungen des Strömungsweges innerhalb der WT-Rohre, meist verursacht durch festsitzende Taprogge-Kugeln, den Ausgangspunkt für die darauffolgenden Schäden. In Folge dessen kam die Strömung entweder nahezu vollständig zum Erliegen, oder aber es kam zu einer Querschnittsverengung mit Bereichen erhöhter Strömungsgeschwindigkeit. Im Falle stagnierenden Mediums konnten sich schädliche Flusswasserinhaltsstoffe aufkonzentrieren, welche sich begünstigend für Lochkorrosion, Stillstandkorrosion oder Muldenkorrosion auswirkten. Als Folge erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten konnte Erosions- oder Reibkorrosion zu meist wanddurchdringenden Schädigungen führen. In einem Fall sorgte eine herstellungsbedingte Beule für die Querschnittsverengung mit der Folge einer mechanischen Überbelastung des Werkstoffs beim Durchgang der Taprogge-Kugeln.

Neben festsitzenden Taprogge-Kugeln sorgten auch andere Fremdkörper wie Muscheln oder Steine sowie Verschlammung zur Blockade des Strömungsweges mit den gleichen Auswirkungen wie oben beschrieben.

- **Mantelseitige Schäden**

Mantelseitige Schäden an WT-Rohren (s. **Tab. 7**) konnten meist auf Materialermüdung infolge strömungsinduzierter Schwingbeanspruchungen zurückgeführt werden. Den Ausgangspunkt für die zyklischen Beanspruchungen bildeten Montage- und Auslegungsfehler.

Von Montagefehlern war vor allem die Anlage KKV betroffen. Bereits im Jahr 1996 waren die Strömungsleitmäntel, die dazugehörigen Abstandshalter in den Kühlern TF 10 und 30 sowie ein WT-Rohr von TF 10 als Abhilfemaßnahme nach einem meldepflichtigen Ereignis (siehe ME 1996/125) infolge fluidinduzierter Schwingungen und Reibkorrosion entfernt worden. Das gezogene Rohr wurde durch ein neues WT-Rohr ersetzt. Im Bereich des gezogenen Rohres ereignete sich 1997 (ME 1997/055) ein weiteres Ereignis, bei dem es zu einem Rohrabriss durch Schwingbeanspruchungen gekommen war. Als Ursache gab der Betreiber eine herstellungs- oder transportbedingte Verformung der Gitterstabskonstruktion eines Abstandhalters an, die in Verbindung mit dem oben beschriebenen Rohraustausch, der in der betroffenen Zone vorgenommen wurde, zu einer lokalen Beschädigung des Gitterverbandes und einer Lockerung der Führung einiger WT-Rohre führte und schwingungsinduzierte Schäden an diesen verursachte. Das Fehlen des Leitmantels hatte nach damaligen Betreiberangaben keinen Anteil an der Schadensentstehung. Die beiden Einzelereignisse im Jahr 1998 wurden jedoch mit dem Fehlen des Leitmantels begründet. Infolge des Ausbaus waren die Strömungsverhältnisse in den Eintrittsbereich des Kühlers dahingehend verändert worden, dass nun die örtlich begrenzte Queranströmung des Rohrbündels stärker ausgeprägt war. Hierdurch wurde das Schwingverhalten des Rohrbündels in diesem Bereich so verändert, dass die Abstandshaltegitter infolge Ermüdung lokal beschädigt wurden (Primärschaden). Dies hatte stärkere Schwingungen der dort befindlichen WT-Rohre zur Folge, die letztendlich infolge Ermüdung versagten.

**Tab. 7** Mantelseitige Einzelereignisse an WT-Rohren von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009)

Vorkommn.	Anlage	Werkstoff	Schadensursache/Schadensbegünstigung
1997/055	KKU	Messing	Schwingbeanspruchung/Montagefehler
1998/040	KKU	Messing	Schwingbeanspruchung durch Strömung / Montagefehler
1998/041	KKU	Messing	Schwingbeanspruchung durch Strömung / Montagefehler
1999/061	KBR	Titan	Schwingbeanspruchung durch Strömung / mech. Beschädigung bei Kühlerfertigung
1999/120	KKU	Messing	Erosionskorrosion im Bereich einer Einschnürung (Beule)
2001/057	KWB-A	Titan	Mech. Beschädigung durch Aufprall eines Fremdkörpers
2001/069.1	KWB-A	Titan	Reibkorrosion infolge strömungsinduzierter Schwingungen infolge konstruktionsbedingten Auslegungsfehlers
2001/069.2	KWB-A	Titan	
2003/121	KKG	Messing	Verarbeitungsfehler (äußere Beschädigung bei Montage vor Erstinbetriebnahme)
2005/002	GKN I	Messing	Schwingbeanspruchung/Kontaktkorrosion / Verarbeitungsfehler (herstellungsbedingte rissartige Vorschädigung, äußerer Materialabtrag)
2005/108	KWB-B	Titan	Reibkorrosion infolge strömungsinduzierter Schwingungen infolge konstruktionsbedingten Auslegungsfehlers

Ein „klassischer“ Auslegungsfehler hat sich in den Anlage Biblis-A und B ereignet. Im Einströmbereich des Zwischenkühlers war der Abstand zwischen der Eigenfrequenz der WT-Rohre und der Erregerfrequenz durch das Fluid zu klein. Infolge strömungsinduzierte Schwingungen während des Betriebs kam es daher im Bereich der Gitterhalterung zum Reibverschleiß an den WT-Rohren aus Titan. Neben diesen konstruktionsbedingten Schädigungen sind bislang lediglich zwei weitere Einzelereignisse mit Schädigungen an titanberohrten WT eingetreten. Diese konnten auf mechanische Einwirkungen (Aufprall eines Fremdkörpers bzw. Beschädigung bei Kühlerfertigung) zurückgeführt werden.

#### 4.2.2 Schäden an sonstigen Einbauten des Zwischenkühlers

An sonstigen Einbauten des Zwischenkühlers konnten in der Datenbank KOMPASS im vertieft betrachteten Zeitraum (1997-2009) die drei Vorkommnisse:

- ME 1993/039
- ME 1998/085.2 und
- ME 2002/152

identifiziert werden (vgl. **Tab. 2**). Das Einzelereignis ME 1998/039 betraf die Bodenplatte der Wasserkammer eines nuklearen Zwischenkühlers in der Anlage GKN I. Die Schadensursache konnte auf lokale Korrosion infolge schadhafter Beschichtung der flusswasserbeaufschlagten Bodenplatte zurückgeführt werden. Die Korrosionsstellen waren an einer Stelle wanddurchdringend, so dass es zu einer Leckage kam. Nach Instandsetzung des betroffenen Bauteils konnte der Zwischenkühler weiterbetrieben werden.

Das Einzelereignis ME 1998/085.2 betraf den Abstandshalter im nuklearen Zwischenkühler TF30 B001 der Anlage KWB-B. Hier war der Abstandshalter im Anströmbereich des Prallbleches am Zwischenkühlwasser-Eintrittsstutzen gebrochen. Ursächlich hierfür war ein Materialabtrag im Bereich der Lochbleche infolge Verschleißes, der einen Schwingungsanriss und Restgewaltbruch zur Folge hatte. Der befundbehaftete Abstandshalter wurde instandgesetzt.

Das Einzelereignis ME 2002/152 betraf die Anlage KKU. Aufgrund der in Abschnitt **4.2.1** beschriebenen Ereignisse und weiterer vorangegangener Ereignisse waren die nuklearen Zwischenkühler in den Jahren 1999 bis 2002 komplett gegen neue titanberohrte Kühler ausgetauscht worden. Die neuen Wärmetauscher wiesen einerseits registrierpflichtige Befunde an diversen Schweißnähten auf, andererseits waren Abweichungen der Schweißnähte von der spezifizierten Ausführung festgestellt worden. Darüber hinaus wurde bei den Prüfungen im Rahmen der Fertigung fälschlicherweise ein anderer als der spezifizierte 45°-Ultraschall-Prüfkopf verwendet worden.

### **4.2.3 Maßnahmen der Betreiber bei Schäden an WT-Rohren**

Die befundbehafteten WT-Rohre wurden mehrheitlich gezogen und die Rohrposition durch Setzen eines Einwalzstopfens verschlossen. In geringerem Umfang erfolgte ein Austausch der beschädigten WT-Rohre ggf. gegen dickwandigere oder solchen aus dem Werkstoff Titan. In den Fällen, in denen die Schädigungen im Zusammenhang mit Montagefehlern am Haltegitter eingetreten waren, wurden die betroffenen WT-Rohre verschlossen und die Haltegitter wieder instandgesetzt.

#### **4.3 Sicherheitstechnische Bedeutung bei Schäden an Bauteilen des gesicherten Nebenkühlwassersystems**

Die potentielle sicherheitstechnische Bedeutung der betrachteten Vorkommnisse liegt darin, dass das Versagen einer wichtigen Rohrleitung bzw. eines Zwischenkühlers den Ausfall des betreffenden Stranges der Nachkühlkette zur Folge hätte. Hierdurch wäre nicht nur die Nachwärmeabfuhr beeinträchtigt, sondern auch die Kühlung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten. Je nach Lecklage könnte auch ein erhöhter Wasseranfall in Räumen mit sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen auftreten und deren Funktion beeinträchtigen. Unter diesen Umständen wäre jedoch im Anforderungsfall die Abfuhr der Nachwärme durch redundante Stränge sichergestellt.

Die tatsächliche sicherheitstechnische Bedeutung der behandelten Vorkommnisse sowohl an Rohrleitungen als auch an WT-Rohren war für alle Ereignisse gering. Die Schäden hatten keinen direkten Einfluss auf den Reaktorbetrieb. Im Anforderungsfall wäre die Funktion der Nebenkühlwassersysteme stets gewährleistet gewesen.

Schädigungen an Rohrleitungen äußerten sich hauptsächlich in lochförmigen Wanddurchdringungen. Diese wurden aufgrund der Leckagen sehr frühzeitig erkannt, sodass ein plötzliches Versagen der Leitungen vermieden werden konnte. Lediglich in drei Fällen kam es im Zusammenhang mit einem Vorkommnis an einer Rohrleitung des gesicherten Nebenkühlwassersystems zu einem vorübergehenden Ausfall eines Nachkühlstranges. Bei einem dieser Vorkommnisse war es aufgrund eines durch einen Druckstoß verursachten Risses in einem Gummigewebekompensator zur Flutung der Pumpenkammer einer gesicherten Nebenkühlwasserpumpe bis auf die Höhe von 2,3 m gekommen. Teilweise waren auch elektrische und leittechnische Einrichtungen von der Überflutung betroffen. Infolgedessen wurde jeweils eine Redundanz der Nachkühlkette sowie der Notnachkühlkette als nichtverfügbar erklärt. Die übrigen Redundanzen standen uneingeschränkt zur Verfügung.

Bei den untersuchten Einzelereignissen an gesicherten Zwischenkühlern handelte es sich in der überwiegenden Anzahl der Fälle um kleine Leckagen aufgrund undichter WT-Rohre. Hierbei waren weitestgehend einzelne WT-Rohre im Bereich der Auslegungsreserven der Zwischenkühler betroffen, sodass die Funktion der Wärmetauscher nicht unzulässig beeinträchtigt war. Mittelbar erfolgte jedoch die Freischaltung des betroffenen Nachkühlstranges für Inspektions- und Instandsetzungsmaßnahmen, sodass dieser für die Dauer der Maßnahmen nicht zur Verfügung stand.



## **5 Erkenntnisse im Zusammenhang mit Weiterleitungsnachrichten der GRS**

In diesem Kapitel werden beispielhaft weitergehende Erkenntnisse aus der Betriebserfahrung zu den gesicherten Nebenkühlwassersystemen in deutschen Anlagen dargestellt. Diese wurden im Zuge der Auswertung des anlagenspezifischen Erfahrungsrückflusses zu den Weiterleitungsnachrichten WLN 2005/06 /WLN 05/ und WLN 2007/02 /WLN 07/ gewonnen und sollen über die systematische Auswertung der meldepflichtigen Ereignisse (s. **Kapitel 4**) hinaus dazu beitragen, die Auswertung der Betriebserfahrung zu den gesicherten Nebenkühlwassersystemen deutscher Anlagen zu vervollständigen.

### **5.1 Zusätzliche Erkenntnisse im Zusammenhang mit der WLN 2007/02**

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit lag der Rückfluss aus Anlagen GKN I und II, KKU, KWG, KKP 1 und 2, KBR, KKE, KKB, KKK, KWO, KKS und KMK zur Verfügung.

#### **5.1.1 Betriebserfahrung zur Langzeiteignung von Beschichtungsmaterialien**

Aus der Betriebserfahrung sind nur sehr wenige Vorkommnisse bekannt, bei denen nachweislich Alterungsprozesse zu Beschichtungsschädigungen geführt haben (**s. Abschnitt 4.1.3**). Dennoch ist nicht auszuschließen, dass beispielsweise die relativ hohe Anzahl an Einzelereignissen mit Beschichtungsschädigungen infolge mechanischer Einwirkungen indirekt auf Alterungseffekte zurückzuführen ist, zumal bekannt ist, dass sich die elastischen Eigenschaften bestimmter Beschichtungsmaterialien während des Langzeiteinsatzes dahingehend ändern können, dass ihre Resistenz gegenüber mechanischen oder erosiven Einwirkungen herabgesetzt wird. Aus diesem Grund ist die Kenntnis hinsichtlich der Eignung bestimmter Beschichtungsmaterialien für den Langzeiteinsatz von großer Bedeutung. Nachfolgend werden daher diesbezügliche Angaben von Betreibern, Herstellern und Gutachtern zusammenfassend wiedergegeben.

- **Epoxidharzbeschichtungen**

In deutschen Anlagen kommen unterschiedliche Epoxidharz-Produkte zur Anwendung. In der Anlage KKK wird die zäh-elastische Epoxidharz-Teerpechkombination EPITER eingesetzt. Die „normale“ Nutzungsdauer des Produktes wird mit über 30 Jahren angegeben. Nach Aussage des Herstellers Fa. SIKA können bei der Durchführung von regelmäßigen Inspektionen mit Ausbesserungen im Wasserbau bis zu 50 Jahren Haltbarkeit erreicht werden. Die Erfahrungen des Gutachters (TÜV Nord) haben jedoch gezeigt, dass generell von einem Alterungsprozess bei Beschichtungen jeglicher Art auszugehen ist. Insbesondere führt der Gutachter an, dass Teerepoxidharzbeschichtungen im Bereich von flusswasserbeaufschlagten Rohrleitungen mit erhöhtem Anteil an Schwebestoffen keine Haltbarkeit von 50 Jahren erreichen können.

In der Anlage KKB sind die Produkte PRODOTEX UW und ARC im Einsatz. Hinsichtlich der Eignung des Langzeiteinsatzes von PRODOTEX UW verweist der Betreiber auf eigene Untersuchungen. Ein Vergleich der seit der Inbetriebnahme vorhandenen Beschichtungen, einer ca. 6 Jahre alten Beschichtung, einer neuwertigen Beschichtung (allesamt aus der Anlage KKB) sowie einer mehr als 20 Jahre alten Beschichtung aus der Anlage KKS zeigte keine Veränderungen der wesentlichen Eigenschaften des Materials. Auch die länger in Betrieb befindlichen Beschichtungen wiesen gute mechanisch-technologische Eigenschaften sowie eine gute Haftung am Grundwerkstoff auf. Hieraus leitet der Betreiber die grundsätzliche Eignung seines Beschichtungssystems für den langfristigen Schutz der Rohrwand gegenüber dem Elbwasser ab. Laut Auffassung des Gutachters unterliegt PRODOTEX UW ebenfalls Alterungsprozessen, die zu systematischen Fehlern an der Beschichtung führen können, jedoch nicht zu einem großflächigen Versagen. Zum Beschichtungsmaterial ARC liegen ebenfalls keine näheren Angaben vor.

Epoxidharzbeschichtungen finden sich auch in der Anlage KKE im nicht erdverlegten Bereich des gesicherten Nebenkühlwassersystems. Hierzu liegen uns jedoch keine detaillierten Informationen vor.

- **Gummierungen**

Auch hiervon sind verschiedene Produkte in deutschen Kernkraftwerken im Einsatz. In der Anlage KKV sind die Leitungen des Nebenkühlwassersystems VE und des Notstandsnebenkühlwassersystems VX 10 mit dem Material VULCOFERRAN 2154 in-



nenbeschichtet. Bei Ausbesserungen oder Nachbeschichtungen wird das Nachfolgeprodukt VULCOFERRAN 2105 verwendet. Laut Angaben des Betreibers sind beide Produkte „aufgrund von Beimischungen relativ alterungsbeständig und damit für den Langzeiteinsatz geeignet“. Jedoch räumt er ein, dass Aushärtungsprozesse nach dem Einsatz über mehrere Jahrzehnte grundsätzlich nicht auszuschließen sind. Nach Ansicht des Betreibers hätte die Aushärtung zwar keine direkten Auswirkungen hinsichtlich der Schutzwirkung des Materials, indirekt werde jedoch die Empfindlichkeit der Innenbeschichtung gegenüber inneren und äußeren Einwirkungen erhöht. Von Seiten der Hersteller existiert keine Angabe über die Haltbarkeit dieser Produkte. Die Nutzungsdauer ist neben dem bekannten Aushärtungsphänomen auch von den jeweiligen Betriebsbedingungen z. B. Temperatur abhängig. Daher empfiehlt der Hersteller den Alterungsprozess durch geeignete Prüfungen an repräsentativen Systembereichen zu überwachen.

VULCOFERRAN 2105 ist auch in der Anlage KWO seit dem Bau der Notstandsnebenkühlwassersysteme im Jahre 1984 im Einsatz. Laut Betreiberangaben konnten bei visuellen Prüfungen des Korrosionsschutzes im Jahre 1995 an ausgebauten Rohrleitungen keine Beschädigungen der Gummierungen festgestellt werden. Der Hersteller bescheinigt eine Langzeitbeständigkeit der Beschichtung von mindestens 25 Jahren.

In der Anlage KWG sind die Rohrleitungen des Nebenkühlwassersystems für sicherheitstechnisch wichtige Komponenten teilweise mit einer Innengummierung zum Schutz vor Korrosion versehen. Genauere Angaben zum eingesetzten Produkt liegen der GRS nicht vor. Laut Betreiberangaben ist das eingesetzte Beschichtungsmaterial grundsätzlich für den Langzeiteinsatz geeignet. Hierbei stützt sich der Betreiber auf die Ergebnisse wiederkehrender Sichtprüfungen und visueller Inspektionen. Die Eignung des Materials für den Langzeiteinsatz wird vom Gutachter bestätigt. Laut dessen Aussage liegen keine Hinweise auf alterungsbedingte Schädigungsprozesse vor.

Auch in der Anlage KBR sind die als potentiell gefährdet eingeschätzten Bereiche innen mit einer Hartgummierung geschützt. Bezüglich dessen Langzeiteignung liegen keine weiteren Angaben vor.

- **Zementmörtel**

Zementmörtelauskleidungen sind in der Anlage KKE im Bereich erdverlegter ferritischer Rohrleitungen im Einsatz. Die genaue Zusammensetzung des Materials sowie

die Produktbezeichnung sind der GRS nicht bekannt. Hinsichtlich der Haltbarkeit dieses Materials liegen seitens Betreiber und Gutachter ebenfalls keine Angaben vor. Der Betreiber schließt jedoch aufgrund des großen Inspektionsumfangs sowie seiner Erfahrung mit bisher aufgetretenen Befunden systematische alterungsbedingte Schäden bislang aus. Zwecks frühzeitiger Erkennung alterungsbedingter Beschädigungen wird wiederkehrend geprüft.

Zementmörtelauskleidungen werden auch in der Anlage KWG neben den Innengummierungen eingesetzt.

### 5.1.2 Prüfpraxis

In **Abschnitt 2.6** wurden die Vorgaben der KTA 3211.4 hinsichtlich wiederkehrender Prüfungen im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme zusammengestellt sowie der eingeschränkte Gültigkeitsbereich der Regel erläutert. Bestehende Prüfkonzepte deutscher Anlagen sind stark anlagenspezifisch. Prüfumfang, -art und -intervalle sind abhängig von der sicherheitstechnischen Bedeutung der Systeme und Komponenten festgelegt. Ihre Umsetzung erfolgt in den sogenannten Prüflisten. Die Prüflisten enthalten ihrerseits diverse Prüfanweisungen. Beispielhaft sind in **Tab. 8** und **Tab. 9** die Prüfintervalle für wiederkehrende Prüfungen der Anlagen KKP 1 und 2 ohne Nennung der verwendeten Prüfverfahren zusammengestellt.

**Tab. 8** Prüfintervalle bei wiederkehrenden Instandhaltungen von Nebenkühlwassersystemen in der Anlage KKP 1

<b>Nebenkühlwassersystem für Betriebskühlkreis 1 und 2</b>	
<b>Komponente</b>	<b>Wiederkehrende Instandhaltung</b>
Nebenkühlwasserpumpen	Alle 8 Jahre
Rohrleitungen überirdisch	Kontrolle im Bereich demontierter Komponenten
Rohrleitungen erdverlegt	Keine Kontrolle
Armaturen	SIWI-Armaturen 8-12 Jahre
Zwischenkühler	Alle 4 Jahre
Diesekühler (BKK 2)	Alle 4 Jahre
<b>Nebenkühlwasser für den unabhängigen Sabotage- und Störfallschutz (USUS)</b>	
USUS-Nebenkühlwasserpumpen	Alle 8 Jahre
USUS-Umwälzpumpen	Alle 4 Jahre
REWAS-Brunnenpumpen	Alle 8 Jahre
Rohrleitungen überirdisch	Kontrolle im Bereich demontierter Komponenten
Rohrleitungen erdverlegt	Keine Kontrolle
Armaturen	SIWI-Armaturen alle 8-12 Jahre
USUS-Kühler	Alle 4 Jahre
Sonstige Kühler	Teilweise alle 1-2 Jahre

**Tab. 9** Prüfintervalle bei wiederkehrenden Instandhaltungen von gesicherten Neben Kühlwassersystemen in der Anlage KKP 2

<b>Neben Kühlwassersystem für gesicherte Zwischenkühlkreise und Notneben Kühlwassersystem</b>	
<b>Komponente</b>	<b>Wiederkehrende Instandhaltung</b>
Neben Kühlwasserpumpen	Alle 8 Jahre
Rohrleitungen überirdisch	Kontrolle im Bereich demontierter Komponenten
Rohrleitungen erdverlegt	Kontrolle mit Molch soweit zugänglich
Armaturen	SIWI-Armaturen alle 8-12 Jahre
Nukl. Zwischenkühler	Alle 4 Jahre
Ges. Zwischenkühler	Alle 4 Jahre
<b>Gesicherte Notneben Kühlwasserversorgung für USUS</b>	
REWAS-Brunnenpumpen	Bisher befundabhängig zukünftig alle 16 Jahre
Rohrleitungen überirdisch	Kontrolle im Bereich demontierter Komponenten
Rohrleitungen erdverlegt	Keine Kontrolle
Armaturen	SIWI Armaturen alle 8-12 Jahre

Konkrete Informationen zu den Prüfkonzepten der einzelnen Anlagen liegen der GRS nicht immer in ausreichendem Umfang vor. Die folgende anlagenspezifische Zusammenstellung von einzelnen Prüfanweisungen konnte aus dem Erfahrungsrückfluss zur Weiterleitungsnachricht 2007/02 /WLN 07/ gewonnen werden.

### 5.1.2.1 Wiederkehrende Prüfungen

Im Rahmen von wiederkehrenden Prüfungen kommen in deutschen Anlagen als Prüfverfahren die Sichtprüfung sowie die Druckprüfung zum Einsatz. Darüber hinaus werden regelmäßig Anlagenbegehungen zur Kontrolle des äußeren Zustands der gesicherten Neben Kühlwassersysteme durchgeführt.

- **Sichtprüfungen**

In der Anlage KKE werden Sichtprüfungen der inneren Oberflächen von erdverlegten Rohrleitungen sowie der gesicherten Neben Kühlwasserpumpen durchgeführt. Hierbei wird jährlich in einer Redundanz die innere Oberfläche der Rohrleitungen hinsichtlich Beschädigungen, Beschichtungsablösungen, Korrosion und Verunreinigungen untersucht. Die nicht erdverlegten Rohrleitungen sowie die Armaturen des Systems werden durch äußere Sichtprüfungen in einem größeren Prüfintervall (in jeder Revision im Durchschnitt eine Armatur und mindestens bei jeder zweiten jährlichen Revision ein Teil der Rohrleitungen) geprüft.

In der Anlage KKK sind Innenbesichtigungen ausgewählter Rohrleitungsbereiche hinsichtlich Beschichtungsschädigungen in einem Intervall von vier Jahren festgelegt. Laut Betreiberangaben orientiert sich die Auswahl der zu prüfenden Rohrleitungen für die WKP an der Betriebserfahrung und wird entsprechend den vorangegangenen Prüfergebnissen angepasst. Die gleiche Anlage gibt an, Bereiche mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit nach Rohrleitungsbögen oder Messblenden regelmäßig von innen zu besichtigen. Dazu wird innerhalb jeder Revision eine Stranginspektion durchgeführt, in dessen Rahmen visuelle Prüfungen der Innenbeschichtungen unter Gutachterbeteiligung erfolgen.

Auch in der Anlage KKV existiert eine Prüfanweisung, die laut Betreiberangaben alle potentiell gefährdeten Bereiche des gesicherten Nebenkühlwassersystems VE abdeckt. Die Prüfanweisung hat visuelle Inspektionen der Innengummierung in Rohrbereichen von Armaturen und Behältern zum Gegenstand und erfasst Bereiche mit hohen/niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten sowie verschiedene Rohrgeometrien wie Bögen und Reduzierungen. Zum Nachweis der Integrität der Innengummierung und Außenumhüllung erdverlegter Rohrleitungen zählen darüber hinaus stichprobenartige Prüfungen im Beisein des Gutachters zur gängigen Prüfpraxis des Betreibers. Zwecks weiterer Optimierung der Überwachung der inneren Beschichtungen sowie der Vermeidung der Korrosion von innen nach außen ist weiterhin geplant, einen Hinweis bezüglich möglicher Auswirkungen von äußeren Beschädigungen auf die Innenbeschichtung von Rohrleitungen in das (visuelle) Prüfprogramm aufzunehmen.

Zur visuellen Prüfpraxis in der Anlage KWG zählt die Innenbesichtigung der drucktragenden Wandungen der gesicherten Nebenkühlwasserpumpen und Notnebenkühlwasserpumpen im VE-System einschließlich der Anschlussleitungen. Für die im VE-System befindlichen Armaturen und Rohrleitungen sind mit Ausnahme der visuellen Prüfung der VE-Leitung VE21 Z002 im Bereich des Mannlochstutzens keine wiederkehrenden Prüfanweisungen festgeschrieben.

Im Rahmen der Umsetzung eines verbesserten Prüfkonzeptes für das VF-System wurden in der Anlage KKB die Prüfanweisungen für die visuelle Innenbesichtigung überarbeitet. Während bisher nur ausgewählte Rohrleitungsbereiche des VF-Systems Bestandteil des WKP-Umfangs waren, werden zukünftig nahezu 100 % der VF-Rohrleitungen > DN 500 im Prüfintervall inspiziert. Im Zuge dieser Überarbeitung des Prüf- und Überwachungskonzeptes wurde zum Vorgehen bei Unterschreitung der nominalen Wanddicke in den Prüfanweisungen festgelegt, dass eine Sanierung vorzu-

nehmen ist, falls die vorhandene Wanddicke die nominale um mehr als 10 % unterschreitet, mit der mindestens der zulässige Ist-Zustand hergestellt wird. Alternativ kann ein Tolerierungsantrag gestellt werden.

Visuelle Zustandsprüfungen bilden auch in der Anlage KBR einen festen Bestandteil des Prüfkonzepts. Zu Prüfumfang und -intervallen liegen keine Angaben vor. Der Betreiber dieser Anlage gibt jedoch an, im Beisein des Sachverständigen Prüfungen mit der Herstellerfirma der Hartgummierungen bzw. der Bitumenbeschichtungen durchzuführen.

- **Anlagenbegehungen**

Diese Prüfmethode dient der Kontrolle des ordnungsgemäßen (äußeren) Zustands eines Systems und ermöglicht beispielsweise das Auffinden von Leckagen. Nur wenige Betreiber (KKK, KKV und KWG) weisen explizit Anlagenbegehungen als Bestandteil ihres Prüfkonzeptes aus. So werden in der Anlage KWG Bereiche, in denen Verwirbelungen auftreten können, z. B. hinter Pumpen, Rückschlagklappen und Rohrleitungserweiterungen, zyklisch mittels Systembegehungen begutachtet. Die Systembegehungen in dieser Anlage dienen darüber hinaus der Überprüfung der Beschichtungen hinsichtlich äußerer Beschädigungen.

Aufgrund der Tatsache, dass die überwiegende Mehrheit der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einzelereignisse an Rohrleitungen durch Systembegehungen entdeckt wurde, und dieser Sachverhalt auf nahezu jede Anlage zutraf, ist jedoch davon auszugehen, dass die Anlagenbegehung nicht nur zum Prüf-Repertoire aller Anlagen gehört, sondern vielmehr die bevorzugte Methode darstellt.

- **Sonstige Prüfungen**

Ein weiteres gängiges Prüfverfahren im Bereich des gesicherten Nebenkühlwassersystems stellt – neben Sichtprüfung und Anlagenbegehung – die Druckprüfung dar. Mittels dieser Methode ist die Möglichkeit einer integralen Prüfung aller Rohrleitungen gewährleistet. Im Rückfluss zur besagten WLN 2007/02 erwähnen lediglich die Betreiber der Anlagen KKK (alle vier Jahre) und KBR die regelmäßige Durchführung dieser Prüfung. Zum wiederkehrenden Prüfprogramm der Anlage KKK zählen darüber hinaus eine Grundwasserspiegelkontrolle sowie eine Wirksamkeitskontrolle des kathodischen Korrosionsschutzes erdverlegter Rohrleitungen.

### **5.1.2.2 Eigenverantwortlich durchgeführte Prüfungen, Sonderprüfungen etc.**

In einigen Anlagen wurden in der Vergangenheit – jenseits von wiederkehrenden Prüfungen – eigenverantwortlich Prüfungen durchgeführt. So wurden die VE-Leitungen der Anlage KWG im Rahmen von betrieblichen Kontrollen mittels stichprobenweise durchgeführter Kamerafahrten inspiziert. Dies betraf erdverlegte Rohrleitungen mit Zementmörtelauskleidung zu den TF-Kühlern sowie gummierte Leitungen zu den VJ-Kühlern. Der Gutachter dieser Anlage sieht in diesem Umstand einen Mangel und fordert daher, die Sichtprüfung von Rohrleitungen und Armaturen in wiederkehrende Prüfanweisungen festzuschreiben.

In der Anlage KKB wurde für ausgewählte Bauteile des Haupt- und Nebenkühlwassersystems ein umfangreiches Wanddickenmessprogramm aufgelegt, welches Wanddickenmessungen an stark beanspruchten Positionen (hinter Armaturen, Formstücken, Blenden, hinter Taprogge-Sieben, Stutzen mit DN 50-100, Geradrohr- und Bogenbereiche, Bereiche mit erhöhter sicherheitstechnischer Bedeutung) in einem befundabhängigen Intervall umfasste. Darüber hinaus wurden in der Revision 2006 visuelle Innenbesichtigungen des VF-Systems durchgeführt, welche befundabhängige Maßnahmen wie Beschichtungsreparaturen, lokale Reparaturen durch Auftragsschweißen, Komplettsanierung von Ausbauteilen oder Austausch durch Neuteile zur Folge hatte.

In der Anlage KKP 1 wurde ein Prüf- und Überwachungskonzept für die als gefährdet eingestufteten Rohrleitungsbereiche (ferritische Rohrleitungsstutzen) entwickelt und eingeführt, welches insbesondere wiederkehrende Wanddickenmessungen umfasste und bei Unterschreiten bestimmter Wanddicken entweder eine Verkürzung des Prüfintervalls oder einen Austausch der betroffenen Rohrleitungsabschnitte vorsah. Das Programm wurde 2006 begonnen und sollte bis Ende 2007 abgeschlossen sein. Zusätzlich dazu wurden auch stichprobenartige Wanddickenmessungen an den ständig durchströmten Hauptleitungen vorgenommen. In der Anlage KKP 2 wurde ebenfalls ein Prüf- und Sanierungsprogramm eingerichtet, in dessen Rahmen beschädigte Stutzen ausgetauscht werden sollten. Für die Zeit nach Abschluss des Austauschprogrammes war eine Fortsetzung der zerstörungsfreien Prüfungen der Rohrstutzen und die Aufnahme des mechanischen Reinigens und Spülens der Rohrstutzen in das Instandhaltungsprogramm geplant. Nach Angaben der Betreiber dieser Anlagen sollten die o. g. Prüfprogramme in den folgenden Jahren, mit dem Ziel einer 100 %-Prüfung der mit den geschädigten Stutzen vergleichbarer Rohrleitungsstutzen, bis 2009 fortgeführt

werden. Abhängig vom Prüfergebnis waren nach maximal vier Jahren Wiederholungsprüfungen vorgesehen.

### 5.1.3 Potentiell gefährdete Bereiche

Die Einstufung von Rohrleitungsbereichen als potentiell gefährdet hängt stark von der Betriebserfahrung in den einzelnen Anlagen ab. Daher gibt es zu diesem Aspekt keine Übereinstimmung unter den Betreibern zu verzeichnen. Am häufigsten wurden Bereiche mit stagnierendem Medium sowie Bereiche mit Verwirbelungen, wie sie hinter Pumpen, Rückschlagklappen und Rohrleitungserweiterungen vorliegen, als gefährdet eingestuft. Anlagenspezifisch wurde auf das Gefährdungspotential folgender Bereiche/Komponenten hingewiesen: Bereiche an denen Montagetätigkeiten oder Beschichtungsreparaturen durchgeführt wurden (KKE), Bereiche erdverlegter Rohrleitungen (KKU), Rohroberflächen (KKK, KKE, KKU), Absperr- und Rückschlagklappen (KWO), ferritische Rohrleitungsstutzen (KKP 2), Anschlussstutzen von Rohrleitungen der Systeme VE und VF (KKP 1) sowie Rohrleitungsabschnitte aus dem Werkstoff St35 bzw. St37 (KBR) genannt.

Einige Betreiber haben ihre Strategien bezüglich der Überwachung der o. g. Bereiche bzw. ihre Vorgehensweise im Falle von festgestellten Befunden dargelegt. Zu ergriffenen Maßnahmen der Anlagen KKP 1 und KKP 2 bezüglich der gefährdeten Stutzen siehe **Abschnitt 5.1.2.2**. Die Vorgehensweisen bei Bereichen mit stagnierendem Medium sind unterschiedlich. Die Anlage KWG gibt z. B. an, dass diese zur Durchführung von Instandsetzungsarbeiten überprüft werden und somit einem zyklischen Wasseraustausch unterliegen. Der Betreiber der Anlage KKE hingegen sieht aufgrund der Werkstoffwahl (Austenit) keine Notwendigkeit für das Spülen der Leitungen mit stagnierendem Medium. In den Anlagen KKP 1 und KKP 2 wiederum werden die Hauptleitungen des Nebenkühlwassersystems während Funktions- und wiederkehrenden Prüfungen oder betrieblichen Fahrweisen regelmäßig gespült. Die Nebenleitungen hingegen werden nicht systematisch gespült, da aufgrund niedriger Fließgeschwindigkeit kein Reinigungseffekt erwartet wird.

## **5.2 Erkenntnisse im Zusammenhang mit der WLN 2005/06 – Betriebserfahrung mit mikrobiologisch induzierter Korrosion (MIK)**

Aufgrund stetiger Verbesserung der Flusswasserqualität sowie der in jüngerer Vergangenheit wiederholt aufgetretenen Perioden mit hohen Außentemperaturen haben sich die Existenzbedingungen für Mikroorganismen in deutschen Gewässern verbessert. Dadurch ist auch die potentielle Gefahr von mikrobiologisch induzierter Korrosion (MIK) in flusswasserführenden Systemen wie dem Nebenkühlwassersystem gestiegen, was sich auch in einer Häufung der Schadensfälle infolge MIK in der jüngeren Vergangenheit niederschlägt. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle eine Aufarbeitung des Erkenntnisstandes zum Schädigungsmechanismus MIK sowie der Betriebserfahrung zu dessen Auftreten in deutschen Kernkraftwerken.

### **5.2.1 Erkenntnisse zum Schädigungsmechanismus MIK**

Grundvoraussetzung für das Auftreten von MIK ist das Vorhandensein von Mikroorganismen (Bakterien und/oder Pilzen) im beaufschlagten Medium. Insbesondere in stagnierenden oder langsam fließenden, biozidfreien Medien können sich einzelne Mikroorganismen an der Werkstoffoberfläche anhaften und durch Wachstum und Vermehrung einen makroskopischen Film bilden. Durch absterbende Mikroorganismen, dem sogenannten Biofouling, können sich dickere Beläge aufbauen und die Korrosionsgefahr weiter erhöhen, insbesondere dann, wenn es zur Ausbildung von Belüftungselementen kommt.

Die Initiierung des Korrosionsmechanismus beruht nicht auf der direkten Wechselwirkung zwischen den Mikroorganismen und dem Werkstoff. Vielmehr werden durch die Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen die Voraussetzungen für den beschleunigten Ablauf verschiedener Korrosionsprozesse geschaffen, die dann z. B. Flächenkorrosion, selektive Korrosion sowie Lochfraß und Muldenkorrosion zur Folge haben.

Nach derzeitigem Kenntnisstand können grundsätzlich alle metallischen Werkstoffe – mit Ausnahme von Titan und Nickel-Cadmium Legierungen – bei Vorliegen entsprechender Umgebungsbedingungen durch mikrobiologisch induzierte Korrosion angegriffen werden. Hierbei können ungünstige Randbedingungen einen sehr schnellen Schadensfortschritt zur Folge haben.



Neben dem Rückgriff auf korrosionsbeständigere Werkstoffe kann das Gefährdungspotential von Mikroorganismen durch den Einsatz eines geeigneten Biozids verringert werden. Bei offenen Kühlkreisläufen mit Flusswasserkühlung ist der Einsatz dieser Mittel aus Naturschutzgründen jedoch bedenklich. Eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit trägt ebenfalls zur Verhinderung des Anwachsens von Biofilmen bei.

## 5.2.2 Auftreten in deutschen Kernkraftwerken

Die ersten Vorkommnisse in deutschen Kernkraftwerken infolge MIK wurden in den 90er Jahren registriert. Bei allen Vorkommnissen war ein austenitischer Werkstoff von den Schädigungen betroffen. Alle Schädigungen waren wanddurchdringend, sodass es zu Tropfleckagen kam.

Im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme gab es im Jahr 2006 eine Häufung von Vorkommnismeldungen infolge MIK an ferritischen Rohrleitungen. Betroffen waren in erster Linie Komponenten der mit Rheinwasser beaufschlagten Nebenkühlwassersysteme in den Anlagen KKP 1 und KKP 2 aus dem ferritischen Stahl St 35.8 bzw. St 35.8 III (s. **Tab. 10**). Zuvor war in der GRS-Weiterleitungsnachricht WLN 2005/06 anlässlich eines Vorkommnisses in der Anlage KKV im Jahre 2004 auf das korrosionsauslösende Potential von Mikroorganismen im Nebenkühlwassersystem hingewiesen worden.

**Tab. 10** Bisher gemeldete Einzelereignisse infolge mikrobiologisch induzierter Korrosion in deutschen Kernkraftwerken

Vork.	Anlage	Komponente	Bauteil	Werkstoff	DN
1992/108	KWB-B	Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	1.4571	200
1997/113	KKP 2	Messleitung zu pH-Messung	Schweißnaht	1.4550	25
1999/032	KKU	Entlüftungsleitung	Rohr	1.4541	50
2004/076	KKU	Schraube für Stopfbuchse	Schraube	1.4571	-
2004/055	KWG	Messleitung, pH Bestimmung	Schweißnaht	1.4550	25
2005/127	KKP 1	Probenahmeleitung Nebenkühlwassersystem	Schweißnaht	St 35.8	25
2006/074.2	KKP 2	Nebenkühlwasserleitung	Stutzen	St 35.8 III	50
2006/074.1	KKP 2	Nebenkühlwasserleitung	Stutzen	St 35.8 III	50
2006/087.2	KKP 1	Nebenkühlwasserleitung	Schweißnaht	St 35.8	400
2006/087.1	KKP 1	Entleerungsleitung Nebenkühlwasserleitung	Rohr	St 35.8	50
2006/124	KWB-B	Entleerungsleitung des TF-Kühlers	Bogen	St 35.8 III	50
2008/076	KMK	Abwasserleitung	Rohrbogen	1.4541	k. A.

Aufgrund der Tatsache, dass die Grenzen zwischen MIK und anderen Korrosionsarten wie beispielsweise der Muldenkorrosion nicht scharf sind, ist zu vermuten, dass Mikroorganismen auch in der Vergangenheit in weit größerem Umfang zur Initiierung und Beschleunigung verschiedener Korrosionsarten beigetragen haben. Diese Vermutung lässt sich jedoch auf der Grundlage der vorhandenen Datenlage zu den Einzelereignissen nicht bestätigen.

### **5.2.3 Reaktion der Betreiber und Gutachter auf die Empfehlungen der GRS-WLN 2005/06**

Im Folgenden wird die Stellungnahme der Betreiber zu den Empfehlungen der besagten WLN 2005/06 einschließlich der Bewertungen durch den jeweiligen Gutachter zusammengefasst wiedergegeben. Alle Angaben stammen aus den Rückflüssen zur WLN 2005/06, wobei zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit der Rückfluss aus folgenden Anlagen zur Verfügung stand: KBR, KKB, KKE, KKK, GKN I/II, KKG, KKI-1/2, KKP 1/2, KKS, K KU, KMK, KWB-A/B, KWG und KWO.

Die Übertragbarkeit der WLN wurde von allen Betreibern von Kernkraftwerken, die sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der WLN im Leistungsbetrieb befanden, und/oder deren Gutachtern bestätigt. Hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von MIK gibt es jedoch, abhängig von Flusswasserqualität, Werkstoffkonzept etc., anlagenspezifische Unterschiede.

Die Prüfungen hinsichtlich MIK geschehen bei nahezu allen Betreibern im Rahmen ihres übergeordneten Prüfkonzepts im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme. Umfang und Intervalle der Prüfungen sind sowohl aus Betreiber- als auch aus Gutachtersicht geeignet, um Schädigungen durch MIK frühzeitig zu erkennen. Im Bedarfsfall können diese angepasst werden.

Einige Betreiber vertreten die Auffassung, bei beschichteten Bauteilen sei MIK nicht zu unterstellen. Dies wird jedoch seitens der Gutachter ausnahmslos mit dem Hinweis revidiert, dass durch Alterungsprozesse oder Beschichtungsfehlern MIK am Grundwerkstoff initiiert werden kann. Hierdurch liege insofern ein anderer Sachverhalt vor als bei herkömmlichen Korrosionsmechanismen, als bei MIK deutlich höhere Abtragraten erreicht werden können.

Die Betreiber von GKN I und GKN II sind der Ansicht, durch die Wahl der verwendeten Werkstoffe, der Konstruktionen und betrieblichen Fahrweisen seien geeignete Vorsorgemaßnahmen getroffen, um MIK zu vermeiden. Hierbei stützen sie sich auf die Tatsache, dass bisher keine Fälle von MIK in ihren Anlagen bekannt geworden sind. Der Gutachter dieser Anlagen weist jedoch darauf hin, dass Bedingungen für MIK durchaus gegeben sind und zudem nicht mit absoluter Sicherheit auszuschließen ist, dass MIK bei keinem der bislang festgestellten Korrosionsbefunde eine Rolle gespielt hat. Daher empfiehlt er, Bereiche mit stagnierendem oder langsam fließendem Medium zu identifizieren und an den identifizierten Stellen stichprobenartige Sichtprüfungen durchzuführen. Bei Korrosionsbefunden seien Wanddickenmessungen durchzuführen sowie der Korrosionsmechanismus zu klären.

In einigen Anlagen wurden als Reaktion auf die WLN 2005/06 konkrete Maßnahmen ergriffen. So wurde in der Anlage KBR der Werkstoff der Pumpenlauf- und Leiträder ausgetauscht und die betrieblichen Randbedingungen für mögliche Schwebstoffablagerungen dahingehend verändert, dass nunmehr kürzere Stillstandzeiten eingehalten werden. Zudem wurde angekündigt, strömungsberuhigte Bereiche oder Bereiche mit stagnierendem Medium keramisch zu beschichten. Der Betreiber der Anlage KGU gab an, die mit Flusswasser beaufschlagten Pumpenteile zur Vermeidung von MIK mit Säkaphen G60 zu beschichten. Weiterhin beabsichtigt er, ein langfristiges Schutzkonzept gegen MIK zu erarbeiten sowie die Intervalle für die vorbeugende Instandhaltung neu festzulegen.

Die Umsetzung der GRS-Empfehlungen wird seitens der Gutachter i. A. für die betrachteten Anlagen als erfüllt angesehen. Die Ergreifung weiterer Maßnahmen wird nicht als notwendig erachtet.



## 6 Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit war eine generische Auswertung der Betriebserfahrung mit Komponenten des gesicherten Nebenkühlwassersystems in deutschen Anlagen mit LWR. Hierzu wurden alle meldepflichtigen Ereignisse im Zeitraum von 1997-2009 vertieft analysiert. Als Informationsquellen diente in erster Linie die GRS-interne Datenbank für passive druckführende Komponenten KOMPASS. Darüber hinaus wurden auch weitere der GRS vorliegende Informationen, z. B. Betreiberprotokolle zu den Einzelereignissen, TÜV-Gutachten sowie Rückläufe zu entsprechenden Weiterleitungsnachrichten der GRS herangezogen.

Bei der Sichtung des Datenbestandes konnten als Schadensschwerpunkte „Schäden an Rohrleitungen“ und „Schäden an gesicherten Zwischenkühlern“ identifiziert werden. Diese wurden hinsichtlich der Schadensursachen und insbesondere der Randbedingungen (Werkstoffe, konstruktive Gegebenheiten, Mediumsbedingungen usw.) zu den Schädigungen vertieft analysiert.

Bei Rohrleitungen war – bei insgesamt geringem Niveau (maximal acht Einzelereignisse pro Jahr) – ein sukzessiver Anstieg der Vorkommismeldungen seit Beginn der 90er Jahre festzustellen. Diese verteilten sich stark ungleichmäßig auf die einzelnen Anlagen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass pro laufende Anlage mit zunehmender Betriebszeit mehr Einzelereignisse gemeldet wurden. Möglicherweise hängt dieser Sachverhalt mit einer verbesserten Überwachung, veränderten Meldekriterien, vermehrte wiederkehrende Prüfungen und eingeleiteten Gegenmaßnahmen zusammen. Inwieweit dabei zunehmende Alterungseffekte eine Rolle spielen, konnte nicht eindeutig geklärt werden.

Nennweitenabhängige Untersuchungen zeigten, dass zwar überwiegend Rohrleitungen kleiner Nennweiten von Schädigungen betroffen waren, jedoch betraf auch ein signifikanter Anteil der Schädigungen sicherheitstechnisch wichtige Hauptrohrleitungen großer Nennweiten ( $DN > 400$ ). Während Ereignisse an kleinen Rohrleitungen in Anlagen aller Anlagengenerationen aufgetreten sind, waren ausschließlich die älteren Anlagen der DWR-Generationen 1 und 2 sowie der SWR-Baulinie 69 von Ereignissen an Rohrleitungen größerer Abmessungen betroffen.

Überwiegend sind wanddurchdringende Beschädigungen am Grundwerkstoff ferritischer Rohrleitungen aufgetreten. Die mehrheitlich mit Leckagen verbundenen Wand-

durchdringungen waren größtenteils lochförmig, seltener rissartig. Hierbei stellten Langzeitschäden infolge Korrosion den dominierenden Anteil. Korrosionsbegünstigend wirkten sich vielfach Vorschäden aus, die entweder bereits während des Fertigungsprozesses oder aber durch mechanische Einwirkungen während des Betriebs eingebracht wurden. Dabei handelte es sich überwiegend um Beschichtungsschädigungen. Ereignisse mit Korrosionsbeteiligung erfolgten hauptsächlich aufgrund von Muldenkorrosion (ca. 70 %) und mikrobiologisch induzierter Korrosion (ca. 20 %).

Mehr als die Hälfte der Befunde an Rohrleitungen wurde bei Anlagenrundgängen entdeckt. Mittels wiederkehrender Prüfungen wurden dagegen weit weniger Ereignisse erkannt. Dieser Sachverhalt lässt darauf schließen, dass eine ausfallorientierte Vorgehensweise vorliegt, d. h. dass Vorsorgemaßnahmen wie z. B. wiederkehrende Prüfungen nicht immer greifen. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass einzelne Betreiber Prüfflächen z. B. an für Korrosion sensible Stellen für wiederkehrende Prüfungen ausgewiesen haben.

Die Analyse der durch Korrosion verursachten Ereignisse hinsichtlich der am Schadensort herrschenden Mediumsbedingungen ergab die zwei besonders gefährdeten Bereiche: „stagnierende Medien“ und „turbulente Medien“. In stagnierenden Medien, wie es beispielsweise in Abzweigungen, Entlüftungsleitungen und Leitungen, die nur gelegentlich durchströmt werden, der Fall ist, können sich Schadstoffe sedimentieren und zur Bildung von Belüftungselementen an der Innenoberfläche der unteren Halbschale der Rohrleitungen führen. Dadurch werden Voraussetzungen für elektrochemische Korrosionsprozesse geschaffen, bei denen die schlechter belüfteten Bereiche des Werkstoffs angegriffen werden. In flusswassergekühlten Systemen wie dem Nebenkühlwassersystem sind es häufig Mikroorganismen, die in Form von Biofilmen zur Bildung von Belüftungselementen führen. Dieser Zusammenhang wurde durch die im Rahmen dieser Arbeit ausgewertete Betriebserfahrung insofern bestätigt, als bei sämtlichen Vorkommnissen infolge MIK stagnierende bzw. teilweise stagnierende Strömungsverhältnisse vorlagen. Die übrigen Fälle, bei denen nachweislich stagnierende Strömungsverhältnisse vorlagen, wurden der Muldenkorrosion zugerechnet. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass MIK und Muldenkorrosion nicht eindeutig voneinander zu trennen sind, da auch MIK zu Muldenkorrosion führen kann.

Die vertiefte Untersuchung hinsichtlich des Auftretens von MIK in deutschen Kernkraftwerken machte deutlich, dass dieser Schädigungsmechanismus sowohl an austenitischen als auch an ferritischen Werkstoffe auftreten kann. Am häufigsten wurde MIK

im Bereich der flusswasserführenden Nebenkühlwassersysteme an ferritischen Werkstoffen beobachtet, wobei hiervon besonders die Anlagen KKP 1 und 2 betroffen waren.

Als weitere besonders gefährdete Bereiche konnten solche mit turbulenten Strömungsverhältnissen identifiziert werden. Oftmals zeigte sich die Wirkung turbulenter Strömung zunächst in einer erosiven Auswaschung der Schutzschichten, vornehmlich in Bereichen mit strömungsungünstiger Bauteilform sowie nach Armaturen mit Drosselwirkung. In Bereichen freiliegenden Grundwerkstoffs führte dies zu einer flächigen Waddickenschwächung.

Die Bedeutung von intakten Rohrrinnenbeschichtungen für die Korrosionsbeständigkeit von ferritischen Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems zeigte sich sehr deutlich am großen Anteil der Schadensfälle, bei denen eine Beschichtungsschädigung als Primärschaden vorausgegangen war (ca. 50 %). Zudem konnte bei den restlichen Fällen nicht immer eindeutig geklärt werden, ob eine Schutzschicht vorhanden war oder nicht. Den Beschichtungen kommt insofern eine generische Bedeutung zu, als viele Anlagen auf die gleichen Beschichtungsmaterialien zurückgreifen.

Tatsächlich konnten lediglich drei der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten 20 Einzelereignisse mit Beteiligung von Beschichtungsschädigungen eindeutig auf Alterungsprozesse der Beschichtungen zurückgeführt werden. Die übrigen Beschichtungsfehler wurden entweder bereits während der Herstellungsphase (11 Einzelereignisse) oder aber durch äußere mechanische Einwirkungen während des Betriebs (6 Einzelereignisse) verursacht.

Hinsichtlich des zweiten Schadensschwerpunkts „Schäden an gesicherten Zwischenkühlern“ konnten im Betrachtungszeitraum von 1997-2009 29 Einzelereignisse in der Datenbank KOMPASS identifiziert werden. Davon waren 26 Schäden an Wärmetauscherrohren, die restlichen drei Einzelereignisse betrafen übrige Bauteile des Zwischenkühlers. Etwa 80 % der Fälle ereigneten sich in den älteren Anlagen der zweiten DWR-Generation und in Anlagen der SWR-Baulinie 69. Die Untersuchung der Schadensursachen zeigte, dass etwa in der Hälfte aller Fälle Korrosion die alleinige Schadensursache war. Darüber hinaus trat Korrosion auch im Verbund mit bzw. als Folge von Fertigungsfehlern (Montage-, Beschichtungs-, Schweiß- und Verarbeitungsfehler) und Materialermüdung auf. Des Weiteren war etwa ein Fünftel der Schadensfälle auf

äußere mechanische Einwirkungen, beispielsweise durch die Wechselwirkung mit Fremdkörpern zurückzuführen.

Bei 12 von 15 rohrseitigen Einzelereignissen war eine Korrosionsform ursächlich für die Beschädigungen, die übrigen 3 Einzelereignisse ereigneten sich aufgrund mechanischer Einwirkungen. Die beschädigten WT-Rohre bestanden in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle aus Messing. An titanberohrten Wärmetauschern sind im Betrachtungszeitraum keine Schäden an den Innenoberflächen der WT-Rohre aufgetreten. Den Ausgangspunkt der Beschädigungen bildeten häufig Behinderungen des Strömungsweges – meist verursacht durch festsitzende Taprogge-Kugeln, aber auch durch andere Fremdkörper wie Muscheln oder Steine. Im Falle stagnierenden Mediums konnten sich schädliche Flusswasserinhaltsstoffe kritisch aufkonzentrieren und zu Lochkorrosion, Stillstandkorrosion oder Muldenkorrosion führen. Als Folge erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten verursachten Erosions- oder Reibkorrosion meist wanddurchdringende Schädigungen.

Mantelseitige Schäden an WT-Rohren konnten überwiegend auf Materialermüdung meist infolge strömungsinduzierter Schwingbeanspruchungen zurückgeführt werden. Den Ausgangspunkt für die zyklischen Beanspruchungen bildeten Montage- und Auslegungsfehler. Zum Teil waren hiervon auch WT-Rohre aus Titan betroffen.

Ergänzend wurde der Betreiberrückfluss zu zwei für die Thematik dieser Arbeit relevanten Weiterleitungsnachrichten im Hinblick auf wichtige Aspekte wie Beschichtungsmaterialien, Prüfpraxis sowie Vorsorge gegen mikrobiologisch induzierte Korrosion analysiert. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse hiervon zusammenfassend wiedergegeben.

In deutschen Kernkraftwerken sind verschiedene Produkte von Epoxidharzbeschichtungen, Gummierungen sowie Zementmörtelverkleidungen im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme im Einsatz. Hinsichtlich ihrer Langzeiteignung gibt es keine einheitliche Meinung von Betreibern, Gutachtern und Herstellern. Grundsätzlich sind die Betreiber, gestützt auf eigene Erfahrungen, von der Langzeiteignung ihrer Beschichtungen überzeugt. Dies wird jedoch weder von Seiten der Hersteller noch der Gutachter bestätigt. Bei Gummierungen etwa ist nach dem Einsatz über mehrere Jahrzehnte der Effekt des Aushärtens, welcher die Resistenz des Materials gegenüber inneren und äußeren Einwirkungen deutlich herabsetzt, bekannt.



In den Prüfanweisungen zu wiederkehrenden Prüfungen im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme sind in erster Linie Sichtprüfungen und Anlagenbegehungen festgelegt. Darüber hinaus geben einige Anlagen die Durchführung einer integralen Druckprüfung an. Die Sichtprüfungen erfolgen an ausgewählten Positionen meist in einem Prüfintervall von vier Jahren. Bei der Wahl der Prüfpositionen werden insbesondere potentiell gefährdete Bereiche, z. B. Bereiche mit hohen/niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten oder Rohrleitungsabschnitte im Anschlussbereich von verschiedenen Komponenten wie Pumpen, Armaturen, Behälter etc. berücksichtigt. Gegenstand der Sichtprüfungen ist die Untersuchung der inneren/äußeren Oberflächen hinsichtlich Beschädigungen, Korrosion, Beschichtungsschädigungen und Verunreinigungen. Die überwiegende Mehrheit der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Schadensfälle wurde im Rahmen von Anlagenbegehungen nachgewiesen. Dennoch geben lediglich drei Anlagen die Durchführung dieser Prüfmethode an. Ähnlich wie bei der Sichtprüfung dient auch die Begehung der Kontrolle des ordnungsgemäßen (äußeren) Zustands ausgewählter Prüfbereiche und ermöglicht das Auffinden beispielsweise von Leckagen und Beschichtungsschädigungen.

Zusätzlich zu wiederkehrenden Prüfungen haben einige Betreiber eigenverantwortlich Prüfungen z. B. im Rahmen von Sonderprüfprogrammen durchgeführt. So wurde in der Anlage KKB ein Wanddickenmessprogramm für besonders stark beanspruchte Positionen und in der Anlage KKP 1 ein Überwachungsprogramm für die als gefährdet eingestuften ferritischen Rohrleitungsstutzen aufgelegt, welches insbesondere wiederkehrende Wanddickenmessungen vorsah. Die Sonderprüfprogramme waren zeitlich begrenzt und mit befundabhängigen Maßnahmen verbunden.



## 7 Schlussfolgerungen

Die sicherheitstechnische Bedeutung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Vorkommnisse sowohl an Rohrleitungen als auch an WT-Rohren war in allen Fällen gering. Die Schädigungen an Rohrleitungen zeigten sich hauptsächlich in lochförmigen Wanddurchdringungen. Großflächige Schädigungen, die zum Versagen der Rohrleitungen hätten führen können, lagen nicht vor. Die Schäden hatten keinen direkten Einfluss auf den sicheren Reaktorbetrieb sowie die Verfügbarkeit des Nebenkühlwassersystems.

Die Mehrheit der untersuchten Schadensfälle ist auf Alterungserscheinungen wie Korrosion zurückzuführen. Hinweise auf eine Häufung von Vorkommnissen mit zunehmender Betriebszeit liegen jedoch nicht vor. Die eintretenden Schädigungsmechanismen sind hinlänglich bekannt und werden bei den regelmäßigen durchgeführten Prüfungen berücksichtigt.

Gemäß Rückfluss verfügen die meisten Anlagen über ein Prüfkonzept im Bereich der gesicherten Nebenkühlwassersysteme. Die Prüfkonzepte der einzelnen Betreiber sind jedoch sehr verschieden. Die bevorzugt verwendeten Prüfmethode (Sichtprüfung und Begehung) lassen auf ein ausfallorientiertes Vorgehen schließen.

Die neueren Erkenntnisse aus der Betriebserfahrung mit Nebenkühlwassersystemen wurden bei der Überarbeitung der KTA 3211.4 weitgehend berücksichtigt und finden sich im aktuellen Regeländerungsentwurf (Fassung 2011-11) /KTA 11/ wieder. So wird mit der darin neu aufgenommenen Prüfung ferritischer Rohrleitungen (DN > 50) auf Wanddickenabtrag mittels Ultraschall- oder Durchstrahlungsprüfung den in der Vergangenheit vermehrt beobachteten Korrosionsphänomenen (insbesondere Erosionskorrosion, Stillstandkorrosion, Muldenkorrosion) Rechnung getragen. Ferner enthält der Regeländerungsentwurf allgemeine Anforderungen zur Berücksichtigung besonders gefährdeter Bereiche im Prüfumfang, d.h. von solchen mit stagnierendem Medium im Betrieb (Aufkonzentration schädlicher Stoffe) und solchen mit turbulentem Medium (mögliche Schädigung von Innenbeschichtungen). Darüber hinaus schreibt der Regeländerungsentwurf für die oben genannten Rohrleitungen eine gezielte Sichtprüfung der äußeren Oberflächen im Intervall von 8 Jahren vor. Da diese bei erdverlegten Rohrleitungen nicht praktikabel ist, regen wir an, in der KTA 3211.4 für diese Rohrleitungen eine gezielte Sichtprüfung von innen zu fordern.

Wie die Auswertungen zeigen, ist das Vorhandensein intakter Beschichtungen von großer Bedeutung für die Integrität insbesondere der Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems. Auch hier existiert kein einheitlicher Standard. Je nach Betreiber sind unterschiedliche Beschichtungssysteme im Einsatz. Es finden sich auch Bereiche gänzlich ohne Beschichtungen. Hinsichtlich der Eignung der eingesetzten Beschichtungsmaterialien für den Langzeiteinsatz existieren unterschiedliche Auffassungen. Alterungseffekte können nicht ausgeschlossen werden.

Dem Auftreten von Schäden an gesicherten Zwischenkühlern wurde in der Vergangenheit mit Austauschmaßnahmen, dem Einsatz beständigerer Werkstoffe und konstruktiven Optimierungsmaßnahmen begegnet. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen zeigt sich in einem Rückgang der Schadensfälle ab Ende der 90er Jahre.

## 8 Literaturverzeichnis

- /WLN 05/ Weiterleitungsnachricht: Mikrobiologisch induzierte Korrosion an Komponenten von Nebenkühlwassersystemen von Kernkraftwerken. WLN 2005/06. 2005. Köln, Hrsg. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH.
- /WLN 07/ Weiterleitungsnachricht: Schäden an Rohrleitungen in Nebenkühlwassersystemen für sicherheitstechnisch wichtige Kühlstellen. WLN 2007/02. 2007. Köln, Hrsg. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH.
- /WLN 04/ Weiterleitungsnachricht: Befunde an nuklearen Zwischenkühlern. WLN 2004/04. 2004. Köln, Hrsg. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH.
- /KKB 09/ KKB-Systembeschreibung: Nebenkühlwassersystem VF. 2009. Brunsbüttel, Hrsg. Kernkraftwerk Brunsbüttel.
- /KKB 03/ KKB-Systembeschreibung: Zwischenkühlwassersystem VK für das Nachkühlsystem. 2003. Brunsbüttel, Hrsg. Kernkraftwerk Brunsbüttel
- /GKN 07/ GKN II Systembeschreibung: Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen PE. 2007. Neckarwestheim, Hrsg. Kernkraftwerk Neckarwestheim Block II.
- /KTA 96/ Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 3211 Teil 4, Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung. Fassung 6/96. 2006. Hrsg. Kerntechnischer Ausschuss (KTA).
- /KTA 11/ Sicherheitstechnische Regel des KTA: Regeländerungsentwurf KTA 3211 Teil 4, Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung. Fassung 2011-11. 2011. Hrsg. Kerntechnischer Ausschuss (KTA).
- /GRS 99/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH: Betriebserfahrung mit sicherheitstechnisch wichtigen Wärmetauschern und Kühlern in deutschen Druckwasserreaktoren, GRS-A-2769. 1999. Köln, Hrsg. GRS.

/VSB 92/ Verordnung über den kerntechnischen Sicherheitsbeauftragten und über die Meldung von Störfällen und sonstigen Ereignissen (Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten und Meldeverordnung – AtSMV), vom 13. Oktober 1992, BGBl. IS. 1766, zuletzt geändert am 18.06.2002, BGB. IS. 1869.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Bild 1</b>	Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit LWR pro Kalenderjahr sowie Anzahl der im jeweiligen Kalenderjahr in Betrieb befindlichen Anlagen (1974-2009).....	21
<b>Bild 2</b>	Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Zwischenkühlern des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit LWR pro Kalenderjahr sowie Anzahl der im jeweiligen Kalenderjahr in Betrieb befindlichen Anlagen (1974-2009).....	22
<b>Bild 3</b>	Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR nach Nennweitenbereiche aufgeschlüsselt (1997-2009).....	23
<b>Bild 4</b>	Art der Erkennung bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009).....	24
<b>Bild 5</b>	Schadensarten bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009).....	25
<b>Bild 6</b>	Betroffene Werkstoffgruppen bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009).....	25
<b>Bild 7</b>	Schadensorte bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR in Abhängigkeit der Nennweite (1997-2009).....	26
<b>Bild 8</b>	Schadensursachen bei Einzelereignissen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009).....	26
<b>Bild 9</b>	Anteil der einzelnen Korrosionsmechanismen an der Gesamtzahl der Einzelereignisse mit Korrosionsbeteiligung an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009).....	27

<b>Bild 10</b>	Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems in deutschen Anlagen mit DWR und SWR in Anhängigkeit des Betriebsjahres der Anlagen (1974-2009).....	34
<b>Bild 11</b>	Betriebsjahrabhängige Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutschen Anlagen mit DWR und SWR pro aktive Anlage (1974-2009) .....	35
<b>Bild 12</b>	Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR geordnet nach dem Jahr der ersten Kritikalität (1974-2009) .....	36
<b>Bild 13</b>	Anzahl der Einzelereignisse mit Schädigungen an Rohrleitungen des gesicherten Nebenkühlwassersystems deutscher Anlagen mit DWR und SWR pro Anlage und Anlagenbetriebsjahr (1974-2009).....	37
<b>Bild 14</b>	Schadensursachen bei Einzelereignissen an Bauteilen von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009).....	39
<b>Bild 15</b>	Anteil der verschiedenen Korrosionsmechanismen bei korrosionsbedingten Einzelereignissen an Bauteilen von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009).....	40



## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1</b>	Einzelereignisse mit Schäden an Rohrleitungen des Nebenkühlwassersystems für gesicherte Anlagen in deutschen DWR- und SWR-Anlagen im Zeitraum von 1997 bis 2009.....	14
<b>Tab. 2</b>	Einzelereignisse mit Schäden an sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlern in deutschen Anlagen mit LWR im Zeitraum von 1997 bis 2009.....	17
<b>Tab. 3</b>	Einzelereignisse mit Schäden an Gehäusen von Pumpen des Nebenkühlwassersystems für gesicherte Anlagen in deutschen DWR- und SWR-Anlagen im Zeitraum von 1997 bis 2009 .....	19
<b>Tab. 4</b>	Einzelereignisse mit Schäden an Rohrleitungen des Nebenkühlwassersystems für gesicherte Anlagen in deutschen DWR- und SWR-Anlagen unter Berücksichtigung der Mediumsbedingungen (1997 bis 2009) .....	32
<b>Tab. 5</b>	Betroffene Anlagen bei Einzelereignissen an Bauteilen von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009).....	39
<b>Tab. 6</b>	Rohrseitige Einzelereignisse an WT-Rohren von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009) .....	41
<b>Tab. 7</b>	Mantelseitige Einzelereignisse an WT-Rohren von Zwischenkühlern in sicherheitstechnisch wichtigen Zwischenkühlkreisen in deutschen Anlagen mit DWR und SWR (1997-2009).....	43
<b>Tab. 8</b>	Prüfintervalle bei wiederkehrenden Instandhaltungen von Nebenkühlwassersystemen in der Anlage KKP 1 .....	50
<b>Tab. 9</b>	Prüfintervalle bei wiederkehrenden Instandhaltungen von gesicherten Nebenkühlwassersystemen in der Anlage KKP 2 .....	51
<b>Tab. 10</b>	Bisher gemeldete Einzelereignisse infolge mikrobiologisch induzierter Korrosion in deutschen Kernkraftwerken .....	57



## Verteiler

<b>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit</b>	2 x
<b>Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)</b>	
Fachbereich SK	1 x
RSK-Geschäftsstelle	1 x
KTA-Geschäftsstelle	1 x
<b>Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden der Länder</b>	10 x
<b>Technische Überwachungs-Vereine</b>	10 x
<b>Betreiber Kernkraftwerke/Forschungsreaktoren</b>	28 x
<b>Energieversorgungsunternehmen</b>	3 x
<b>Hersteller Kernkraftwerke</b>	3 x
<b>VGB</b>	1 x
<b>Sachverständigenorganisationen</b>	6 x
<b>GRS-Bibliothek</b>	1 x
<b>Autoren</b> (elm, rec, vdc je 1x, A6110 3x)	6 x
<b>Gesamtauflage</b>	<b>73</b>

## GRS (pdf-Datei)

Geschäftsführung	stj, wfp
Bereichsleiter	erv, paa, prg, rot, stc, ver, zir
Projektbetreuung	hab
Abteilungsleiter	gls, poi, sit, som, wil, vek
Abteilung 621	rop

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**  
Telefon +49 221 2068-0  
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

**[www.grs.de](http://www.grs.de)**