
RSK - STELLUNGNAHME

Untersuchungsvorhaben SR 2392 des BMU „Einsatz von Thermoelementen zur Erfassung der Temperatur von Rohrleitungswandungen in Kernkraftwerken im Rahmen der Ermüdungsanalyse“ und Berücksichtigung des Medieneinflusses bei Ermüdungsanalysen nach dem KTA-Regelwerk

28.04.2005 (382. Sitzung)

- 1 Beratungsauftrag
- 2 Bewertungsumfang
- 3 Beratungsgang
- 4 Ergebnisse der Beratung der RSK
- 5 Sicherheitstechnische Bewertung
- 6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

1 Beratungsauftrag

Mit dem Schreiben (Az.: AG RS I 3 – 17018/1) des Bundesministeriums Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) vom 31.03.2003 (Beratungsunterlage [2]) wurde die RSK um ihre Stellungnahme zu den möglichen Folgen aus den Erkenntnissen des o. g. Untersuchungsvorhabens SR 2392 (Beratungsunterlage [1]) des BMU gebeten. Nach Darlegung des BMU in diesem Schreiben lassen die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben erwarten, dass der Einfluss von schnellen Temperaturänderungen auf der Rohrrinnenseite bisher in den Ermüdungsanalysen unterschätzt wurde. Nicht auszuschließen sei die Bildung von Mikrorissen an der Rohrrinnenoberfläche, die einem anschließenden Risswachstum unterliegen können.

Ziel der Beratung soll die Feststellung sein,

- inwieweit diese Erkenntnisse für Rohrleitungen, für die eine in der Vergangenheit durchgeführte Ermüdungsanalyse erstellt wurde, relevant sind und
- ob eine zukünftige Berücksichtigung der Werte für die zeitlichen Temperaturgradienten bei der Ermüdungsanalyse von dünnwandigen und dickwandigen Rohren erforderlich erscheint.

Mit dem späteren Schreiben (Az.: AG RS I 3 – 17018/1) vom 13.10.2003 (Beratungsunterlage [4]) wurde der Beratungsauftrag des BMU ergänzt. Die RSK wurde gebeten, die beim 29. MPA-Seminar (09./10.10.2003) im Vortrag Nr. 22 „Berücksichtigung des Medieeinflusses bei Ermüdungsanalysen“ vorgetragenen Erkenntnisse in ihrer Beratung zu beachten.

Ziel soll die Feststellung sein,

- inwieweit der Medieeinfluss und die Belastungshistorie bei den Ermüdungsanalysen zu berücksichtigen sind und
- ob den Schweißnahtbereichen besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist.

2 Bewertungsumfang

Die Bewertung umfasst folgende Themen:

- Installationsarten der Thermolemente und, daraus resultierend, der Wärmeübergang zwischen Rohr und Thermolement als Einflussgröße auf den ermittelten Temperaturgradienten Maßstab: nachvollziehbare Toleranz für den zeitlichen Gradienten der Temperatur an der Außenwand
- Bewertung der Versuchsdurchführung und, damit verbunden, die Relevanz der Ergebnisse des Untersuchungsvorhabens SR 2392 für die Gegebenheiten in deutschen Kernkraftwerken,

-
- Bewertung der Überwachungssysteme zur Ermittlung der relevanten Temperaturgradienten,
 - Randbedingungen für die Verwendung von Messdaten als transiente Belastungen in Ermüdungsanalysen,
 - Bewertung der Aussagen zur Ermüdungsrelevanz,
 - Relevanz des Medieneinflusses bei der Bewertung der Ermüdungsbeanspruchung,
 - Anwendbarkeit der Erkenntnisse auf die Schweißnahtbereiche von Rohrleitungen,
 - Bewertung der Übertragbarkeit auf andere Bauteile und
 - Anforderungen an Regelwerksinhalte für die rechnerische Ermittlung der Ermüdungsbeanspruchung.

3 Beratungsgang

Zur Beantwortung der im Beratungsauftrag des BMU gestellten Fragen ließ sich der RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE in der 36. Sitzung am 25.06.2003 zunächst Berichte der TÜV Anlagentechnik GmbH und der Siempelkamp Prüf- und Gutachter-GmbH zum Untersuchungsvorhaben SR 2392 erstatten (Beratungsunterlage [3]).

36. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 25.06.2003

Auf Grund der bei dem Untersuchungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse sollten hinsichtlich der Ermüdungsüberwachung Empfehlungen für eine einheitliche Bewertung vorhandener Installationen sowie für ein einheitliches Vorgehen bei Neuinstallationen gegeben werden.

Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens waren nach Angabe des Berichterstatters TÜV Rheinland

- die Erkenntnisse aus der Studie SR 2218,
- die messtechnischen Erfahrungen aus zahlreichen Betriebsmessungen des Hauptauftragnehmers TÜV Rheinland sowie
- auf der Seite des Unterauftragnehmers Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft die Erfahrungen bei der Umsetzung gemessener Temperaturverläufe in Belastungsannahmen zur Temperaturfeld-, Spannungs- und Ermüdungsberechnung und deren versuchstechnische Möglichkeiten.

Mit den konzipierten Untersuchungen des Vorhabens SR 2392 sei berücksichtigt worden, dass für Rohrleitungen in Kernkraftwerken neben dem Innendruck und eventuellen äußeren Momenten die thermischen Belastungen beanspruchungsrelevant sind, die aus der globalen und lokalen Temperaturverteilung bzw. aus zeitlichen Temperaturänderungen resultieren. Als zugehörige Beanspruchungen träten Spannungen aus globaler und lokaler behinderter Wärmedehnung (einschließlich der Spannungen aus Temperaturschichtungen) sowie Wärmespannungen aufgrund radialer Temperaturdifferenzen im Rohr auf.

Beispielhaft wurden in der folgenden Tabelle Temperaturzustände in einzelnen Systemen benannt:

System	Bauteil	Relevante Belastungen
Hauptkühlmittelleitung (HKL)	HKL	Globale Temperaturdifferenz Temperaturschichtung
Volumenausgleichsleitung (VAL)	VAL	Globale Temperaturdifferenz Temperaturschichtung
Speisewassersystem	Dampferzeuger(DE)-Stutzen	Globale Temperaturdifferenz Temperaturschichtung Schnelle Transienten
Betriebliche Sprühleitungen	YP/JEF-Sprühleitungen	Globale Temperaturdifferenz Temperaturschichtung Schnelle Transienten
Volumenregelsystem	TA/KBA-Hilfssprühleitungen	Globale Temperaturdifferenz Temperaturschichtung Schnelle Transienten
	Reku-Stutzen	Globale Temperaturdifferenz Temperaturschichtung
Nachkühlsystem	TH/JN-Einspeisung in HKL	Globale Temperaturdifferenz

Zur Erfassung der Temperaturen und ihrer Gradienten an Rohrleitungen in Kernkraftwerken würden Thermoelemente nach verschiedenen Installationsarten eingesetzt. Um diese zu vergleichen und ihre Messergebnisse vergleichbar zu bewerten, seien fünf typische Installationen auf einem Testrohr befestigt worden. Neben jedem Thermoelement sei als Referenz eine Thermoperle auf der Rohroberfläche angebracht worden. Ein zusätzliches Testrohr habe neben den äußeren Thermoperlen auch solche in Bohrungen dicht vor der Innenoberfläche enthalten. Beide Testrohre seien in einem Versuchsstand gleichzeitig mit Heißluft auf 350, 280 und 200 °C erhitzt und dann mit kaltem Wasser schockartig abgekühlt worden. Während sich in den stationären Temperaturen nur geringe Temperaturunterschiede gezeigt hätten, hätten sich in den Gradienten – verglichen mit der Anzeige der jeweiligen Referenzperle – deutliche Unterschiede ergeben.

Die Ergebnisse seien rechnerisch weiter verarbeitet worden. Dabei hätten sich Hinweise ergeben, dass die Referenzperle die tatsächlich an der Rohroberfläche ablaufenden Gradienten nicht ausreichend erfasst habe. Dies habe man in zwei Ergänzungsversuchen an dem Versuchsrohr mit den Originalperlen nachvollzogen. Bei diesen Versuchen seien, zur besseren Erfassung der Oberflächentemperaturen, neben den ursprünglichen

Referenzperlen Temperaturmessfolien angebracht worden, die zwar nur bis 260° C einsetzbar seien, aber die rechnerischen Werte (Oberflächengradienten) bestätigt hätten.

Die durchgeführten Versuche seien mit zwei verschiedenen Berechnungsmethoden (Finite Elemente (FE), Inverse Temperaturberechnung) nachvollzogen und ausgewertet worden. Außerdem seien Messbeispiele aus Kraftwerken unter Verwendung der an Hand der Versuche kalibrierten FE-Modelle nachgerechnet worden. Ein Beispiel für die Nachrechnung der Versuche mit FE-Modellen wurde vorgestellt. Es sei gezeigt worden, dass es mit Hilfe dieser Modelle möglich ist, aus den mit den Thermoelement-Installationen gemessenen Temperaturverläufen auf die im Rohrrinneren ablaufenden thermischen Vorgänge zu schließen und somit nicht nur die gemessenen Temperaturverläufe an der Rohraußenwand nachzuvollziehen, sondern auch die thermischen Belastungen im Rahmen von Spannungs- und Ermüdungsberechnungen auf andere Bauteile zu übertragen.

Die Installationsarten seien hinsichtlich schneller Temperaturtransienten bewertet und die Anforderungen an die Thermoelement-Anordnung definiert worden.

Hinsichtlich der Temperaturmessung an Rohrleitungen seien Empfehlungen ausgesprochen worden, um die Messtechnik und die Messwertverarbeitung verbessern zu können. Die folgenden Punkte wurden als relevant für das Kraftwerk genannt:

- Die unterschiedliche Trägheit der Mess-Installationen ist seit ca. 1993 bekannt.
- Der Effekt wurde bei der Belastungs-Spezifikation (konservativ) berücksichtigt.
- Ermüdungsanalysen beruhen auf solchen konservativen Belastungs-Spezifikationen.
- In Sonderfällen werden thermische Belastungen (Mediumtemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten) auch direkt aus Messwerten ermittelt; dabei muss die Trägheit der Mess-Installationen berücksichtigt werden, wenn schnelle Temperaturänderungen vorliegen, hohe Wärmeübergangszahlen auftreten und die Messung an dünnwandigen Rohren erfolgt. Methoden zur Berücksichtigung der Trägheit der Mess-Installationen (z. B. mit FE-Berechnung) sind seit zehn Jahren vorhanden. Die Messfrequenz 0,1 Hz des Ermüdungsüberwachungssystems FAMOS erlaubte im Jahre 1993 keine ausreichende Validierung des Rechenmodells. Die Messfrequenz 200 Hz bei Versuchen im Projekt erlaubte die ausreichende Validierung des FE-Modells.

Nach den Berichterstattungen in der 36. Sitzung am 25.06.2003 und auf Grund von Angaben in den Beratungsunterlagen sah es der RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE als notwendig an, dass zur Vorbereitung seiner Beratung und der sich daran anschließenden Stellungnahme zunächst vorbereitende Auswertungen erforderlich sind. Deshalb wurden im Zusammenhang mit der bisher praktizierten Verwendung von Temperaturkorrekturfaktoren bei Ermüdungsanalysen Framatome ANP und GRS gebeten festzustellen, welches die bisherige Praxis, vorzugsweise in den 90-er Jahren bis heute, gewesen ist, und ob Messwerte für die rechnerischen Ermüdungsanalysen und ggf. mit

welchen Korrekturfaktoren verwendet wurden.

Von der GRS war zwischenzeitig mitgeteilt worden, dass ihr eine solche Temperaturkorrektur gegenüber der gemessenen Temperatur nicht bekannt sei. Dabei sei jedoch zu berücksichtigen, dass die GRS, da sie nicht direkt im Aufsichtsverfahren arbeite, auch nur punktuell mit den Ermüdungsberechnungen von Betreibern oder TÜV konfrontiert würde. Eine systematische Übersicht könne daher von der GRS nicht geliefert werden.

40. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 19.11.2003

Framatome ANP stellte in der 40. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 19.11.2003 zur praktizierten Verwendung von Temperaturkorrekturfaktoren fest, dass sich bei den in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktor (LWR) gegebenen niedrigen Gradienten das Gradientenverhältnis annähern müsse; bei sehr langsamen Vorgängen müsse es zu einer vollständigen Übereinstimmung kommen. Weiterhin sei von den Verfassern des Abschlussberichts festgestellt worden, dass zwischen dem Gradientenverhältnis und der Ermüdung kein Zusammenhang bestehe. Deshalb sollten die angegebenen Faktoren nicht angewandt werden. Bei den von Framatome ANP durchgeführten Ermüdungsanalysen auf der Basis von FAMOS-Messungen (FAMOS: FATigue MONitoring System) seien grundsätzlich

- bei hohen Gradienten (z. B. in Sprühleitungen) Thermoschockbelastungen,
- bei „FAMOS alt“ Messungen Faktoren für die Temperaturänderungsgeschwindigkeit (in der Regel ein Faktor 2) und
- bei „FAMOS neu“ Messungen aufgerundete abdeckende Werte

berücksichtigt.

Über die Fragestellung des Ausschusses hinaus gab der Anlagenhersteller Framatome ANP (Beratungsunterlage [6]) eine Stellungnahme zum Untersuchungsvorhaben SR 2392 ab, die sich auf die Versuchsrandbedingungen und bisher durchgeführte Ermüdungsanalysen bezog. Aus Sicht von Framatome ANP handelte es sich um eine vorläufige Beurteilung. Es sei nicht untersucht worden, welche realistischen Gradienten mit den verschiedenen Messanordnungen noch „fehlerfrei“ erfasst werden können. Die Thermoschockversuche seien mit einem ΔT von 350 K, 280 K und 200 K durchgeführt (Zusatzversuche noch mit 250 K und 220 K) worden. In der Praxis träten bei den Sprühleitungen nur ΔT von ca. 200 K bis 220 K auf. Die im Versuch gemessenen Gradienten an der Außenwand seien bei einem ΔT von 200 K mit ca. 15 K/s immer noch mindestens um den Faktor 3 größer, als sie in der Praxis zu erwarten seien.

Anlässlich der Erweiterung des Beratungsauftrags (Beratungsunterlage [4]), berichteten der

TÜV Süddeutschland Bau und Betrieb und TÜV Nord in der 40. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 19.11.2003 anhand der Beratungsunterlage [5] über die Berücksichtigung des Mediumeinflusses in Kernkraftwerken bei Ermüdungsanalysen nach dem KTA-Regelwerk.

Einleitend wurde verdeutlicht, dass der für die Ermittlung der Ermüdung zulässige Werkstoffkennwert auf Arbeiten basiert, deren Ergebnisse Ende der 60-er Jahre als Regelwerksanforderung in den ASME-Code aufgenommen wurden und der Werkstoffkennwert seitdem in den Grundlagen unverändert geblieben ist. Zu der Zeit wurde das Verfahren „design by analysis“ unter Einbeziehung zyklischer Lasten regelwerksfähig. Es wurden die Festigkeitshypothese und die Spannungskategorien mit zugehörigen Grenzwerten festgelegt. Seit dieser Zeit haben sich die Werkzeuge für die Ermittlung der Beanspruchungen deutlich weiterentwickelt. Durch numerische Rechenmethoden, elasto-plastische Berechnungen und die Einführung der Belastungs-Überwachungssysteme (z. B. FAMOS) können die Spannungsschwingbreiten (Beanspruchungen) realistischer berechnet werden. Im Ergebnis ist die Genauigkeit der Berechnungen mittlerweile gravierend erhöht worden. Eine Überprüfung der sich nach den geltenden Regeln ergebenden zulässigen Erschöpfungsgrade auf die Einhaltung des Standes von Wissenschaft und Technik schein daher naheliegend zu sein.

Die aktuellen Untersuchungen zeigten weiterhin, dass die dem ASME-Code und damit den KTA-Regeln zu Grunde gelegten Anrisslastspielzahlen auch für Luft (d. h. kein Umgebungseinfluss), insbesondere bei austenitischen Bauteilen, nicht reproduziert werden können. Entsprechend der von ANL (ANL: Argonne National Laboratory) auf Basis eines statistischen Modells ermittelten Ermüdungskurven seien bei Bauteilen aus austenitischem Stahl die tatsächlichen ertragbaren Lastspielzahlen – abhängig von der Lastspielzahl – zum Teil deutlich geringer als entsprechend der Design-Kurve im ASME-Code. Abhängig vom Umgebungseinfluss, der bei der Bildung der Design-Kurve im ASME-Code nicht berücksichtigt worden sei, könne es bei austenitischen wie auch bei ferritischen Bauteilen zu weiteren Reduzierungen der ertragbaren Lastspielzahlen kommen.

In der vorliegenden Regeländerungsentwurfsvorlage der KTA-Regel 3211.2 wurde kein Konsens zur Absenkung der vorliegenden Ermüdungskurven erzielt. In der Dokumentationsunterlage zur Regeländerungsentwurfsvorlage der KTA-Regel 3211.2 werde u. a. dargestellt, dass die spezifizierten Lastspielzahlen in Kernkraftwerken meist im Bereich von $N < 1.000$ Lastspiele liegen. In diesem Bereich sei der Unterschied zu den ertragbaren Lastspielzahlen, die den Umgebungseinfluss berücksichtigen, nicht so groß wie bei höheren Lastspielzahlen. Zudem sei der Einfluss der Oberfläche bei diesem Lastspielzahlbereich gering. Die von der MPA Stuttgart durchgeführten Auswertungen des nationalen und internationalen Kenntnisstandes zur Berücksichtigung des Mediumeinflusses bei der Ermüdungsanalyse bestätigen, dass auf der Grundlage des aktuellen Kenntnisstandes keine Bedenken gegen die Verwendung der in KTA-Regel 3211.2 enthaltenen Ermüdungskurven bestehen. Unter Beachtung der Änderungen und Hinweise der Regeländerungsentwurfsvorlage der KTA-Regel 3211.2, dass

- die in den KTA-Regeln enthaltenen Ermüdungskurven nur für Luft gelten,

-
- die Weiterentwicklung des vorhandenen Kenntnisstands auf diesem Fachgebiet aufmerksam verfolgt werden muss,
 - durch die Erweiterung der Ermüdungskurven für austenitische Stähle auf den hochzyklischen Bereich (bis 10^{11} Lastwechsel) bereits eine Verschärfung der Anforderungen erfolgte und
 - bei Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung des Mediums auf die Bauteilintegrität dies durch geeignete Maßnahmen zu berücksichtigen ist

und dem in der Dokumentationsunterlage aufgenommenen Verweis auf Unterlagen, anhand derer der Umgebungseinfluss auch quantitativ berücksichtigt werden kann, sei letztendlich keine Änderung der derzeit in der KTA-Regel enthaltenen Ermüdungskurven erfolgt.

Hinsichtlich der Ermüdungskurven sei gemäß der Regeländerungsentwurfsvorlage prinzipiell zu prüfen, ob ein relevanter Umgebungseinfluss gegeben sei. Aus Sicht der Berichtersteller sei abhängig von

- dem berechneten Erschöpfungsgrad (auf Basis der KTA-Kurven),
- der Konservativität in der Ermüdungsanalyse und
- dem Umgebungseinfluss

zu bewerten, ob die zulässige Bauteilermüdung unter Beachtung des Umgebungseinflusses sichergestellt ist. Wenn ein relevanter Einfluss des Mediums nicht ausgeschlossen werden kann, müsse beim Ermüdungsnachweis auf die in der Dokumentationsunterlage zur Regeländerung der KTA-Regel 3211.2 zitierten Unterlagen und Verfahren zurückgegriffen werden.

Insbesondere in den USA seien Methoden entwickelt worden, die die Berücksichtigung des Medieneinflusses bei der Ermüdungsanalyse als Funktion verschiedener Einflussparameter zulassen.

Wie auch aus der Regeländerungsentwurfsvorlage der KTA-Regel 3211.2 hervorgehe, könne als Alternative zur rechnerischen Berücksichtigung des Umgebungseinflusses eine Erhöhung der Betriebsüberwachung für die betroffenen Bereiche gesehen werden. Entsprechend den Vorgaben zu zerstörungsfreien Prüfungen seien die höher beanspruchten Stellen bevorzugt zu untersuchen. Bei der Ermittlung der de facto höher beanspruchten Stellen könne daher die Berücksichtigung des Umgebungseinflusses erforderlich sein.

Es wurde darauf hingewiesen, dass nach den KTA-Regeln 3201.4 und 3211.4 „Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung“, entgegen den Festlegungen in den KTA-Regeln 3201.2 und 3211.2, ein rechnerischer Erschöpfungsgrad $D > 1$ in Anspruch genommen werden dürfe, wenn durch geeignete betriebliche, betriebsüberwachende oder prüftechnische Maßnahmen oder eine Kombination dieser Maßnahmen sichergestellt sei, dass der Ermüdungsfortschritt (Zunahme des Erschöpfungsgrades ΔD) in sicherheitstechnisch zulässigen Grenzen gehalten wird.

Nach Darlegung der Berichtersteller sind die wesentlichen Parameter, mit denen die Reduzierung der

Ermüdungsfestigkeit bei den in Kernkraftwerken zu unterstellenden Umgebungseinflüssen beschrieben wird, die Temperatur, der Sauerstoffgehalt und die Dehnrate sowie bei ferritischen Bauteilen der Schwefelgehalt des Werkstoffes. Es gebe allerdings auch Einflüsse und Zusammenhänge, die bisher nicht ausreichend bekannt und Gegenstand der Forschung seien. Beispielsweise sei bei hoher Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Ausspülung der aufgelösten Mangansulfide der Einfluss des Schwefelgehaltes des Werkstoffes auf die Ermüdungsfestigkeit vermindert. Zur Berücksichtigung des Umgebungseinflusses hätten sich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen herauskristallisiert. Beide Methoden seien geeignet, den Umgebungseinfluss zu erfassen. Bei der einen Methode würden Ermüdungskurven, welche die Funktion des Umgebungseinflusses berücksichtigen, für neu durchzuführende Ermüdungsanalysen bereitgestellt. Bei der anderen Methode würde ein Korrekturfaktor eingeführt, mit dem die berechneten Erschöpfungsgrade, die den Umgebungsfaktor noch nicht berücksichtigen, zu multiplizieren seien. Diese zweite Methode erfordere daher bei der nachträglichen Bewertung des Umgebungseinflusses einen deutlich geringeren Analyseaufwand und liefere, da sie ungenauer sei, in der Regel konservativere Ergebnisse. Diese zwei Methoden würden von der internationalen Fachwelt prinzipiell als geeignete Werkzeuge angesehen. Es gebe allerdings Hinweise, dass die Reduzierung der Ermüdungsfestigkeit durch die in den bisherigen Ermüdungsnachweisverfahren enthaltenen Konservativitäten bereits abgedeckt sei. Die folgenden Konservativitäten können im Ermüdungsnachweisverfahren enthalten sein:

- Die spezifizierten Belastungen decken die tatsächlichen Belastungen ab.
- Um den Nachweisaufwand zu reduzieren, werden die Belastungen in konservativer Weise zusammengefasst.
- Die Spannungen werden mit abdeckenden Verfahren ermittelt.
- Das Verfahren zur Ermittlung des K_e -Wertes beinhaltet Sicherheiten.

Tatsächlich lägen diese Sicherheiten nicht immer vor. Zudem sei festzustellen, dass in der Praxis bei der Ermittlung der maximalen Erschöpfungsgrade Ungenauigkeiten nicht ausgeschlossen werden können.

Auf die Frage aus dem Ausschuss, warum der Mediumseinfluss auf die Designkurven nicht quantitativ in das Regelwerk eingebaut worden sei, wurde geantwortet, dass dieser zwar grundsätzlich nicht in Frage gestellt werde, aber nur qualitativ Berücksichtigung finde. Aus dem Ausschuss wurde der Hinweis gegeben, dass die Ermittlung der Ermüdung bei höheren Temperaturen im KTA-Regelwerk nicht in gleicher Weise wie im ASME-Code berücksichtigt sei.

Im Zusammenhang mit der aus dem Ausschuss gestellten Frage nach der zu Grunde liegenden Sicherheitsphilosophie wurde vom BMU die Frage gestellt, wie es sich mit Ermüdungsanalysen befundbehafteter Bauteile verhalte. Nach Angaben der Berichterstatter sind die Ergebnisse der für die Nachweisführung verwendeten rechnerischen Ermüdungsanalysen von deren Konzept her und verfahrensbedingt zum Teil nur schwer mit der Realität der Beanspruchungen, wie sie in deutschen Kernkraftwerken vorliege, korrelierbar; als Beispiel wurde auf die Befunde in den Speisewasserstutzen der

Dampferzeuger des Kernkraftwerk Unterweser (KKU) (siehe Ergebnisprotokoll der 34. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 26.03.2003) verwiesen. Deshalb sei es in diesem Zusammenhang von Interesse, Kenntnisse über die betrieblichen Beanspruchungen zu haben; diesbezügliche Erfahrungen aus deutschen Anlagen zeigten, wie von Betreiberseite ergänzt wurde, dass auf dieser Basis der rechnerische Erschöpfungsgrad D meistens bei kleinen Werten, im Bereich von $D = 0,1$, liege. Demgegenüber würden sich die rechnerischen Erschöpfungsgrade in den USA auf spezifizierte Transienten beziehen.

4 Ergebnisse der Beratung der RSK

Die in dem Forschungsbericht beschriebene Messinstrumentierung zur Bewertung der in den Kraftwerken eingesetzten Installationsarten zur Erfassung von Temperatur- Zeitverläufen entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die an der Rohraußenseite angebrachten Referenzperlen bzw. die Temperaturfolien sind geeignet, die auf der Innenseite des Rohres aufgebrachte Temperaturschockbelastungen ausreichend genau am Messort zu erfassen. Allerdings sind die Referenzperlen bzw. die Temperaturfolien unter anderem aus Gründen der Demontierbarkeit und des Strahlenschutzes für den Einsatz in Anlagen nicht geeignet.

Als Ergebnis gibt der Versuchsbericht [1] Korrekturfaktoren für Temperaturmessergebnisse von Installationsarten an, die in den Anlagen üblicherweise zum Einsatz kommen („TÜV-Schelle“, „FAMOS neu“, „FAMOS alt“, „TÜV Polster“, „AMTEC“). Mit diesen für die Installationsart spezifischen Korrekturfaktoren sollen die in den Anlagen gemessenen maximalen Gradienten zum Ausgleich von Messungenauigkeiten angepasst werden. Für die ausgewählten Versuchslasten und -randbedingungen ist die in dem Versuchsbericht [1] vorgeschlagene Vorgehensweise quantitativ unstrittig. Die Versuchsrandbedingungen stellen hinsichtlich der angesetzten Temperaturdifferenzen und der Geschwindigkeit der Temperaturänderungen einen Grenzfall dar; es wird ein nahezu idealer Thermoschock realisiert. Damit wird die Trägheit der einzelnen Messeinrichtungen für den Grenzfall aufgezeigt. Was die allgemeine Übertragbarkeit auf die Randbedingungen in den Anlagen betrifft, können die Ergebnisse aus [1] nur qualitativ herangezogen werden. Bei den derzeitigen Fahrweisen treten sowohl kleinere Temperaturdifferenzen als auch kleinere Temperaturgradienten auf. Bei langsamen Transienten konvergieren die Korrekturfaktoren gemäß [1] gegen 1. Allerdings sind Fahrweisen als zulässig spezifiziert und einige wenige durch Betriebsüberwachung bekannt geworden, die mit den Versuchsrandbedingungen vergleichbar sind. Werden in solchen Fällen gemessene Verläufe von Außenwandtemperaturen für den Nachweis belastet, ist der Einfluss der Messeinrichtung (z. B. Installationsart und -einrichtung, Taktfrequenz, Ist-Wanddicke, maximale Temperaturdifferenzen, Massenstrom) auf die ggf. notwendigen Korrekturfaktoren zu quantifizieren. Hier liefert der Versuchsbericht [1] systematische Hinweise für die Vorgehensweise und spezifiziert entsprechende Randbedingungen.

Grundsätzlich sind die Temperaturmessinstallationen und deren Bewertungsverfahren auch auf dickwandige Bauteile übertragbar. Allerdings ist wegen des physikalischen Verhaltens bei der Wärmeleitung in Bauteilen mit großer Wanddicke die zeitliche Auflösung der Vorgänge im Medium und die Quantifizierung der

abgeleiteten Dehnungen und Spannungen mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Die Aussagen in dem Versuchsbericht zur Ermüdung können nur für die Versuchsrandbedingungen gelten. Die direkte Übertragung der in [1] quantitativ ermittelten Ermüdung auf die Schädigungen realer Komponenten ist nicht gegeben, weil hier lokale Effekte hinsichtlich der Geometrie, des Werkstoffs, der thermohydraulischen Randbedingungen und der kumulativ wirkenden Beanspruchungen des gesamten Lastkollektivs maßgebend sind.

Die Ermüdungskurve der KTA-Regeln 3201.2 [7] bzw. 3211.2 [8] wurde aus dem ASME-Code [9] übernommen. Diese Auslegungskurve (ASME Design Curve) ist aus dehnungsgesteuerten Ermüdungsversuchen in Luft an kleinen polierten Testkörpern abgeleitet worden. Die Testkörper werden zyklisch belastet, bis ein vorgegebenes Lastabfallkriterium erreicht wird. Entsprechend dieser Versuchsdurchführung liefert das Versuchsergebnis einen Wert für das Anrissverhalten bei Ermüdung, bei dem der Testkörper bereits einen technischen Anriss enthält. So wurde für diskrete Versuchsdaten eine Mittelwertkurve für die logarithmisch aufgetragenen Ergebnisse gebildet. Die Ermüdungskurve wurde durch „Verschieben“ der Mittelwertkurve um den jeweils ungünstigeren Wert von zwei Kriterien (Faktor 2 auf die Spannungen bzw. Faktor 20 auf die Zyklenzahlen) konstruiert.

Dieser konstruierte Abstand zwischen der Mittelwertkurve und der Ermüdungskurve wurde im Regelwerk nicht als Sicherheitsfaktor im klassischen Sinn eines Festigkeitsnachweises aufgefasst (Festlegung eines Grenzwertes, bei dem unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstandes das Nachweisziel eingehalten wird). In den „Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis“ [10] wird ausgeführt, dass dieser Abstand einen "moderaten" Umgebungseinfluss, den Einfluss aus dem Übergang vom Probenkörper auf die Abmessungen realer Komponenten und die Streuung aus den Versuchen beinhaltet. Daher ist eine technische Anrissbildung im Einzelfall auch bei Lastspielzahlen links von bzw. unterhalb der Auslegungskurve möglich.

Die Diskussionen über die Quantifizierung von erforderlichen Teilfaktoren zur Berücksichtigung physikalischer Effekte (Größe, Oberfläche, Umgebung, Streuung) bei der Anwendung von Versuchsergebnissen auf die realen Verhältnisse einer Komponente sind z. B. in dem EPRI Bericht [11] zusammenfassend dargestellt.

Internationale Literaturdaten belegen, dass ein Einfluss des Mediums auf die Anrisslastspielzahl bzw. die ertragbare Spannungsamplitude gegeben ist. Auch bei unterstellter Einhaltung der in der VGB-Wasserrichtlinie ([12], [13]) für den Normalbetrieb vorgegebenen Mediumbedingungen ist davon auszugehen, dass der Einfluss des Mediums auf die Ermüdung relevant ist. Seine Nichtbeachtung würde die bisherigen Ermüdungsnachweise in Frage stellen. Die RSK ist jedoch der Meinung, dass Nachweise auf der Basis der Ermüdungskurve des derzeit gültigen ASME-Code unter Einhaltung der spezifizierten Randbedingungen (Herstellung, Analyseverfahren, Einhaltung der wasserchemischen Vorgaben und Verifikation der thermischen und mechanischen Belastungen) bei einem Erschöpfungsgrad von $D \leq 1$ Bestand haben. Wenn in den vorliegenden Nachweisen eine dieser Randbedingungen nicht berücksichtigt ist, muss der Erschöpfungsgrad im Einzelfall ermittelt werden. Es wird dabei berücksichtigt, dass für die

Akkumulation der Schädigung hinsichtlich Ermüdung sowohl im Zeitfestigkeitsgebiet (Low Cycle Fatigue (LCF)) als auch im sog. Dauerfestigkeitsgebiet (High Cycle Fatigue (HCF)) die Beanspruchung über eine Vielzahl von Lastwechseln wirksam werden muss. Daher ist aus Sicht der RSK nicht zu unterstellen, dass über lange Zeiträume ausschließlich extrem ungünstige Mediumbedingungen vorliegen. Wenn weiterhin davon ausgegangen werden kann, dass durch entsprechende Maßnahmen keine Wurzelkerben mit Spaltbildung, Kantenversätze etc. in Schweißverbindungen vorliegen, sind auch seitens der mechanischen und chemischen Beanspruchung Bedingungen gegeben, die zu einem geringen Potenzial für das Entstehen von Rissen nach dem Mechanismus der dehnungsinduzierten Risskorrosion (DRK) (very Low Cycle Fatigue) führen.

Allerdings ist zu beachten, dass für den Fall auftretender wasserchemischer Transienten, die zum Action Level 1 der VGB-Wasserrichtlinie ([12], [13]) oder höher führen, keine gesicherten Kenntnisse über eine Langzeitauswirkung (Memory Effect) vorliegen. Hier ist, insbesondere dann, wenn der rechnerische Erschöpfungsgrad für eine Komponente hoch ist, auf der Basis internationaler Literaturdaten eine Betrachtung im Einzelfall erforderlich.

Derzeit fehlt für eine Modifikation der KTA-Auslegungskurven mit Berücksichtigung des Mediumeinflusses die ausreichende Grundlage, da die verfügbare Datenbasis unter Betriebsbedingungen unzureichend ist. Eine Darstellung zur Berücksichtigung von Korrekturfaktoren sollte in dem KTA erarbeitet werden. Des Weiteren sollte eine Anpassung der Kurve der an in Luft gewonnenen Daten an die neuen vorliegenden Messergebnisse erfolgen. Weiterhin geht die RSK davon aus, dass die bisherigen Ermüdungsschäden in deutschen Kernkraftwerken nicht ausschließlich auf die nicht konservativen Ermüdungskurven, insbesondere durch Unterschätzung des Umgebungseinflusses, zurückzuführen waren. Allerdings ist mittelfristig das Ermüdungsverhalten unter grenzwertigen Mediumbedingungen quantitativ darzustellen. Entsprechende Untersuchungen im HCF-Bereich – insbesondere auch bei positiven Mittelspannungen – und im LCF-Bereich bei entsprechend niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten (Dehnraten) sollten durchgeführt werden, die es ermöglichen, in einen internationalen Erfahrungsaustausch zu treten und die Ergebnisse internationaler Forschungsarbeiten besser bewerten zu können und gegebenenfalls die KTA-Auslegungskurven zu modifizieren.

Für Schweißnähte in sicherheitstechnisch wichtigen Bereichen, die die Anforderungen der einschlägigen KTA-Regeln erfüllen, sind keine spezifischen, über die Anforderung des Regelwerks hinausgehenden Einschränkungen vorgesehen. Bei Schweißnähten mit ungünstiger, mediumberührter Wurzelgeometrie können jedoch Spaltbedingungen mit Schädigungsmechanismen zusätzlich zur Ermüdung wirksam werden.

Die RSK beantwortet die beiden Fragen des Beratungsauftrags [2]

- „inwieweit“ die Erkenntnisse des Forschungsberichtes bezüglich der Temperaturmessergebnisse bei schnellen Transienten „für Rohrleitungen, für die eine in der Vergangenheit durchgeführte Ermüdungsanalyse erstellt wurde, relevant sind“ und
- „ob eine zukünftige Berücksichtigung der Werte für die zeitlichen Temperaturgradienten bei der

Ermüdungsanalyse von dünnwandigen und dickwandigen Rohren erforderlich erscheint.“

zusammenfassend wie folgt:

Werden in Ermüdungsanalysen gemessene Verläufe von Außenwandtemperaturen für den Nachweis belastet, ist als eine notwendige Bedingung für den sachgerechten Nachweis der Einfluss der Messeinrichtung zu quantifizieren und ggf. sind die notwendigen Korrekturfaktoren zu berücksichtigen. Der Versuchsbericht [1] liefert hierbei systematische Hinweise für die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Korrekturfaktoren. Dies gilt für alle Ermüdungsanalysen unabhängig vom Zeitpunkt ihrer Erstellung. Abhängig von den physikalischen Randbedingungen der Messung ergibt sich für den gemessenen Temperaturgradienten ein Korrekturfaktor nach [1] in der Bandbreite zwischen 1 und 1,7.

Die RSK beantwortet die beiden Fragen des Beratungsauftrags [4]

- inwieweit der Mediumeinfluss und die Belastungshistorie bei den Ermüdungsanalysen zu berücksichtigen sind, und
- ob den Schweißnahtbereichen besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist,

wie folgt:

Die Belastungshistorie ist bei Einhaltung der einschlägigen Anforderungen des ASME-Codes [9], wie z. B. die Bildung eines abdeckenden Lastkollektivs, die konservative Erfassung der maximalen Dehnungsschwingbreiten und die Berücksichtigung aller Wechsellasten, konservativ berücksichtigt.

Der Mediumeinfluss auf die Ermüdung ist für „moderate“ Mediumbedingungen konzeptionell durch Verschiebung der Mittelwertskurve auf die Designkurve erfasst.

Hinsichtlich der abdeckenden Erfassung des Mediumeinflusses ist eine Überarbeitung der Regelwerksanforderungen in diesem Punkt zu befürworten. Bis zum Abschluss dieser Arbeiten empfiehlt die RSK, Randbedingungen für die Ermüdungsnachweise druckführender Komponenten vorzugeben (vgl. Abschnitt 6), bei deren vollständiger Einhaltung bestehende Ermüdungsnachweise auch auf Basis der derzeitigen ASME-Auslegungskurve hinsichtlich der Vermeidung von Ermüdungsrissen als ausreichend angesehen werden. Bei Nichteinhaltung der Randbedingungen sind abgestuft vertiefende Nachweise erforderlich. Aktuelle technische Beiträge mit differenzierten Quantifizierungen des Parameters Mediumeinfluss sind z. B. in [14] und [15] enthalten.

Die internationalen Untersuchungen im Labor zum Mediumeinfluss auf die Ermüdung beziehen sich fast ausschließlich auf Grundwerkstoffe. Über das Ermüdungsverhalten von Wärmeeinflusszonen von Schweißverbindungen unter Mediumeinfluss liegt keine Datenbasis vor. Die Ursachen von festgestellten Schäden an Schweißnähten bzw. Wärmeeinflusszonen wurden entweder auf andere Schadensmechanismen wie interkristalline Spannungsrisskorrosion oder nicht erfasste Wechsellasten oder Geometrieeffekte, wie Wurzeldurchhang, zurückgeführt.

Für die Schweißnähte, die nachvollziehbar den heutigen Regelwerksanforderungen entsprechen, leitet sich daher über die einschlägig bekannten Regelwerksanforderungen zur Beanspruchungsbewertung von Schweißnähten kein Handlungsbedarf ab, der über die Betrachtungen, wie sie für Grundwerkstoffe durchgeführt werden, hinaus geht.

5 Sicherheitstechnische Bewertung

Mit

- der Umsetzung der RSK-Leitlinien und der Rahmenspezifikation Basissicherheit bei der Herstellung,
- dem Einsatz hochwertiger Werkstoffe,
- der konservativen Begrenzung von Spannungen und Ermüdung,
- der Vermeidung von Spannungsspitzen durch optimierte Konstruktion,
- der Anwendung optimierter Herstellungs- und Prüftechnologien,
- der Kenntnis und Beurteilung ggf. vorliegender Fehlerzustände und
- der Berücksichtigung des Betriebsmediums in Verbindung mit weiteren Maßnahmen wie der Betriebsüberwachung, Verifikation der spezifizierten Belastungszustände und Wiederholungsprüfungen

werden Randbedingungen geschaffen, bei deren Einhaltung auch unter Berücksichtigung der Diskussionen um die Ermüdungskurven kein sicherheitstechnisches Defizit durch die Verwendung der derzeitigen KTA-Ermüdungskurven zu besorgen ist. Mit dieser Empfehlung reagiert die RSK auf den derzeitigen Kenntnisstand und präzisiert Anforderungen zu den Teilaspekten „konservative Begrenzung von Spannungen und Ermüdung“ und „Verifikation der spezifizierten Belastungszustände“, sodass in Verbindung mit der Erfüllung der anderen Randbedingungen unzulässige Ermüdung als sehr unwahrscheinlich angesehen wird. Der Ausschluss technischer Anrissbildung ist ein Element des Bruchausschlusskonzeptes.

Wenn jedoch Abweichungen von dieser Vorgehensweise vorliegen bzw. nicht auszuschließen sind, ist aufgrund der oben beschriebenen Vorgehensweise zur Bestimmung der Ermüdungskurven trotz formal positivem Ermüdungsnachweis eine technische Anrissbildung in Einzelfällen nicht ausgeschlossen.

Weiterhin zeigt sich beispielhaft bei Anwendung aktuell diskutierter Ermüdungskurven auf die Ermüdungsbewertung von Komponenten eines japanischen Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor (DWR) [16], dass neben der Erhöhung der Ausnutzung auch eine andere Gewichtung der Wechsellastanteile innerhalb des Lastkollektivs festzustellen ist. Dadurch kann sich ein qualitativ geändertes Bild der

Beanspruchungssituation ergeben mit der Folge, dass zusätzliche Orte ermüdungsrelevant werden können.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Grundsätzlich sind Ermüdungsnachweise auf der Basis spezifizierter Lasten zu führen. Temperaturmessungen sollten grundsätzlich lediglich als Indikator für die Zuordnung eines gemessenen Systemzustandes zu einer spezifizierten Transiente dienen.

Wenn mit Ergebnissen von Temperaturmessungen Belastungen für Ermüdungsnachweise generiert werden, ist

- für die Messreihe eine eindeutige Systemzustandsänderung unter Berücksichtigung der Druck- und Massenstromänderungen zu identifizieren und zu benennen,
- ein Korrekturfaktor ≥ 1 für die Überhöhung gemessener Temperaturgradienten unter Berücksichtigung der Hinweise zu den verschiedenen Temperaturmessinstallationen des Forschungsberichtes [1] zu begründen, und
- für alle eventuell auftretenden Messunsicherheiten der Nachweis zu erbringen, dass diese eingehüllt sind.

Diese Anforderungen gelten auch für bestehende Ermüdungsnachweise, die sich auf Ergebnisse von Temperaturmessungen stützen.

Aus dem oben beschriebenen Verständnis zum Auslegungsziel der ASME Design Kurve und der ingenieurmäßigen Vorhersage des Mittelwerts für die Rissinitiierung drucktragender Bauteile unter realen Bedingungen kommt der Beanspruchungsermittlung für den Ermüdungsnachweis eine erhöhte Bedeutung zu. Nur mit konservativen Ansätzen kann bei den derzeitigen Kenntnissen zur Ermüdungskurve und der Ausnutzung eines Erschöpfungsgrades „1“ eine technische Anrissbildung als wenig wahrscheinlich angesehen werden. Die folgende Tabelle spezifiziert die entsprechenden Randbedingungen für die Parameter Konstruktion (Form, Oberfläche) und Medium (Umgebungseinfluss Wasserchemie), Lastansatz und die konservative rechnerische Beanspruchungsermittlung und -bewertung.

Konstruktion	Medium	Mediumtransienten	Werkstoffgesetz	Beanspruchungsermittlung	Bewertungsverfahren	Schwelle
basissicher	überwacht, VB-G-Richtlinie eingehalten	Massenstrom, Druck und Temperatur spezifiziert, Betriebsüberwachung als Indikator für spezifizierte Transiente	linear elastisch	komponentenspezifisch, ASME-Anforderungen erfüllt, Extremwerte von Druck, Moment und Temperaturgradient pro spezifizierter Transiente	Einbeziehung des gesamten Lastkollektivs, S_m und S_a nach ASME, k_e nach vereinfachtem Verfahren, S_a und k_e getrennt maximieren, Kumulation über die Kombination, die die größte Schädigung liefert	$D = 1^*$
		Temperaturverlauf gemessen und ggf. korrigiert, Systemzustand mit Massenstrom- und Druckänderung identifiziert: neue Transiente spezifiziert		allgemeine Analyse des mechanischen Verhaltens, ASME-Anforderungen erfüllt, Beanspruchungen aus zeitlich zugeordneten Lastanteilen		

* Bei Überschreiten einer Schwelle von $D = 0,1$ sind diese Bereiche einer Einzelfallbetrachtung zu unterziehen oder in ein Prüfprogramm für zerstörungsfreie Prüfungen aufzunehmen.

Tabelle: Schema (Trichterdiagramm) zur Vorgehensweise bei der Bewertung

Wird eine Bedingung des Trichterdiagramms nicht eingehalten, darf die jetzige Regelwerkskurve nicht angewendet werden. Hier bedarf es dann einer Einzelfallbetrachtung der einzelnen Einflüsse.

Für die Auswahl von Prüforten an Stellen höchster Ermüdungsausnutzung dürfen nur Nachweiswege gleicher Art bewertet werden.

Nach Meinung der RSK reichen die derzeit bekannten Ergebnisse für eine quantitative Änderung der Ermüdungskurven nicht aus. Auch für Schweißgüter sollten, wie auch für die Grundwerkstoffe, schon bald experimentell Ermüdungskurven in Umgebungen erstellt werden, die den verschiedenen Grenzwerten der angewandten wasserchemischen Leitlinien entsprechen.

Die RSK empfiehlt, das KTA-Regelwerk dem Kenntnisstand anzupassen.

BERATUNGSUNTERLAGEN

- [1] Untersuchungsvorhaben SR 2392 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Einsatz von Thermoelementen zur Erfassung der Temperatur von Rohrleitungswandungen im Rahmen der Ermüdungsüberwachung, Schlussbericht der TÜV Anlagentechnik GmbH, 31.10.2002

- [2] Schreiben (Az.: AG RS I 3 – 17018/1) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 31.03.2003 an die RSK-Geschäftsstelle, betr.: Stellungnahme der RSK zu den möglichen Folgen aus den Erkenntnissen des BMU-Vorhabens SR 2392 (Einsatz von Thermoelementen zur Erfassung der Temperatur von Rohrleitungswandungen in Kernkraftwerken im Rahmen der Ermüdungsanalyse; Beratungsauftrag

- [3] BMU-Projekt SR 2392, Arbeit bei Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft in Dresden, Durchführung der Versuche, Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit verschiedenen Berechnungsverfahren (Finite Elemente, Inverse Temperaturberechnung), Bewertung der Versuchsergebnisse (Einordnung in typische Rohrleitungsbelastungen, Anwendung auf gemessene Belastungen im Kraftwerk), Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft, Kopien von Folien, Tischvorlage

- [4] Schreiben (Az.: AG RS I 3 – 17018/1) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) vom 13.10.2003 an die RSK-Geschäftsstelle, betr.: Stellungnahme der RSK zu den möglichen Folgen aus den Erkenntnissen des BMU-Vorhabens SR 2392 (Einsatz von Thermoelementen zur Erfassung der Temperatur von Rohrleitungswandungen in Kernkraftwerken im Rahmen der Ermüdungsanalyse), Beratungsauftrag AG RS I 3 – 17018/1 vom 31.03.2003

- [5] Ch. Hüttner, S. Dittmar, Berücksichtigung des Medieneinflusses bei Ermüdungsanalysen, 29. MPA-Seminar, Stuttgart 09./10.10.2003, Vortrag Nr. 22

- [6] Untersuchungsvorhaben SR2392, Versuchsrandbedingungen; bisher durchgeführte Ermüdungsanalysen; vorläufige Beurteilung; Anregung für Versuche mit realistischen Randbedingungen, Kopien von Folien der Framatome ANP

-
- [7] KTA-Regel 3201.2, „Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung“, Fassung Juni 1996
- [8] KTA-Regel 3211.2, „Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung Regeländerungsentwurfsvorschlag einschließlich Dokumentationsunterlage Fassung April 2003
- [9] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Subsection NB Class 1 Components
- [10] Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, Division 2, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1969
- [11] Materials Reliability Program (MRP), Evaluation of Fatigue Data Including Reactor Water Environmental Effects (MRP-49), EPRI Technical Report 1003079, Final Report, December 2001
- [12] U. Staudt, M. Lausch, Die VGB-Richtlinie für Chemie in SWR-Anlagen - aktueller Stand VGB-Konferenz "Chemie im Kraftwerk 1995", VGB-Speisewassertagung 1995, Vortrag KKW 3.
- [13] Revision der VGB-Richtlinie für das Wasser in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren (VGB-R 401 J) Mitteilungen aus dem VGB-Arbeitskreis "SWR-Chemie", VGB-Kraftwerkstechnik, 76 (1996), Heft 3, 238-239
- [14] O. K. Chopra, W. J. Shack, Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Crack Initiation in Carbon and Low-Alloy Steels and Austenitic Stainless Steels, 3rd International Conference on Fatigue of Reactor Components, 3.- 6. 10. 2004, Sevilla, Spanien

-
- [15] M. Higuchi, Development of Evaluation Method of Fatigue Damage on Operating Plant Components in Considering Environmental Effect of LWR Coolant, presented at 3rd International Conference on Fatigue of Reactor Components, October 3-6, 2004, Sevilla, Spain
- [16] T. Nakamura, H. Madarame, Current State of Development on Codes for Fatigue Evaluation in JSME, 3rd International Conference on Fatigue of Reactor Components, 3.- 6. 10. 2004, Sevilla, Spanien