

Dokumentationsunterlage zur Regeländerung von

KTA 3201.2

"Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung"

Fassung 1996-06

Inhalt:

- 1 Auftrag des KTA
- 2 Beteiligte Fachleute
- 3 Erarbeitung des Regeländerungsentwurfs und der Regeländerungsvorlage
- 4 Ausführungen zum Regeltext

1 Auftrag des KTA

Der Kerntechnische Ausschuss hat auf seiner 47. Sitzung am 15. Juni 1993 beschlossen, die Regel

KTA 3201.2 (03/84) Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren
Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
Fassung 1996-06

zu ändern. Mit der Vorbereitung eines Regeländerungsentwurfs wurde der FDBR beauftragt. Im Rahmen dieser Überarbeitung sollte auf Grundlage der in der Regel KTA 3211.2 (06/92) "Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung" formulierten Anforderungen eine Anpassung an den Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt und redaktionelle Änderungen im Hinblick auf die Anpassung der Regeltexte an das Merkblatt des KTA vorgenommen werden.

2 Beteiligte Fachleute

2.1 Zusammensetzung des Arbeitsgremiums

- aus Datenschutzgründen in dieser Datei gelöscht

2.2 KTA-Unterausschuss MECHANISCHE KOMPONENTEN (UA-MK)

- aus Datenschutzgründen in dieser Datei gelöscht

2.3 Mitarbeiter der KTA-Geschäftsstelle

Dr.-Ing. Bath

3 Erarbeitung des Regeländerungsentwurfs und der Regeländerungsvorlage

3.1 Erarbeitung des Regeländerungsentwurfes

(1) Der KTA-Unterausschuss MECHANISCHE KOMPONENTEN hielt eine Regeländerung der KTA 3201.2 zwecks Fortschreibung des Standes von Wissenschaft und Technik sowie Einarbeitung der mit der Anwendung der Regel gewonnenen Erfahrungen für unbedingt erforderlich. Gleichzeitig hielt er es für zweckmäßig, sich bei der Erarbeitung des Regeländerungsentwurfs auf die notwendigen Punkte zu beschränken.

(2) Am 03. November 1993 traf sich das vom FDBR einberufene Arbeitsgremium zu seiner konstituierenden Sitzung und begann mit der Diskussion der erforderlichen Änderungen.

(3) Der Regeländerungsentwurfsvorschlag wurde auf den nachstehend genannten Sitzungen des Arbeitsgremiums erarbeitet:

1. Sitzung	am 03. November 1993	in Düsseldorf
2. Sitzung	am 02. Dezember 1993	in Düsseldorf
3. Sitzung	am 25. Januar 1994	in Hamburg
4. Sitzung	am 21./22. Februar 1994	in Erlangen
5. Sitzung	am 15. März 1994	in Düsseldorf
6. Sitzung	am 30. März 1994	in Düsseldorf

(4) Auf der Sitzung am 30. März 1994 verabschiedete das Arbeitsgremium einstimmig den Regeländerungsentwurfsvorschlag zur Behandlung im zuständigen Unterausschuss MECHANISCHE KOMPONENTEN (UA-MK).

(5) Der UA-MK hat den Regeländerungsentwurfsvorschlag auf seiner 18. Sitzung am 12.04.1994 behandelt. Die dabei gegebenen Hinweise wurden auf den Sitzungen

7. Sitzung	am 26. Mai 1994	in Düsseldorf
8. Sitzung	am 28./29. Juni 1994	in Stuttgart

im Arbeitsgremium diskutiert. Das Arbeitsgremium beschloss einstimmig, die Abschnitte 7.9 und 7.12 durch Ad-hoc-Arbeitsgruppen nochmals zu präzisieren und den überarbeiteten Regeländerungsentwurfsvorschlag dem UA-MK zu dessen 19. Sitzung am 29.09.1994 vorzulegen.

(6) Der UA-MK hat den präzisierten Regeländerungsentwurfsvorschlag auf seiner 19. Sitzung am 29.09.1994 behandelt und mit geringfügigen Präzisierungen für den Fraktionsumlauf freigegeben.

(7) Im Rahmen des Fraktionsumlaufs wurden Änderungsvorschläge eingereicht seitens

- Dr. Breitbach, KFA Jülich, vom 14.10.94
- Prof. Dr. Hübel, Bergisch Gladbach, vom 29.11.94
- Sommer (Obmann UA-EL), TÜV Rheinland, vom 02.01.95
- Büro Engel, Mannheim, vom 12.01.95
- Büro Linder/Pape, Schwerte, vom 13.01.95
- Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, vom 13.01.95
- Prof. Dr. Munz, Uni Karlsruhe, vom 13.01.95
- Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen, vom 16.01.95
- Siemens AG/KWU, Offenbach, vom 30.01.95
- Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., Essen, vom 02.02.95

(8) Das Arbeitsgremium beriet über diese Änderungsvorschläge auf Sitzungen am 16./17. Februar 1995 und am 02./03. März 1995 und verabschiedete eine präzierte Textfassung zur Behandlung im UA-MK.

(9) Auf seiner 20. Sitzung am 28. März 1995 beriet der UA-MK die vorliegende Textfassung. Er verabschiedete sie mit geringfügigen Änderungen für die Weiterleitung an den KTA zur Verabschiedung als Regeländerungsentwurf.

(10) Der KTA hat den Regeländerungsentwurf auf seiner 49. Sitzung am 13. Juni 1995 verabschiedet. Die Bekanntmachung des BMU erfolgte im Bundesanzeiger Nr. 120 am 30. Juni 1995.

3.2 Erarbeitung der Regeländerungsvorlage

(1) Nach Ablauf der 3-monatigen Einreichungsfrist waren Änderungsvorschläge eingegangen seitens

- Prof. Dr. Munz, Uni Karlsruhe, vom 03.04.95
- Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen, vom 07.04.95, 04.10.95 und 09.10.95
- Mannesmann-Anlagenbau AG, Düsseldorf, vom 10.05.95
- TÜV Bayern Sachsen, München, vom 11.05.95
- Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., Essen, vom 04.10.95
- Siemens AG/KWU, Offenbach, vom 25.09.95
- Prüfstelle der KTA-Geschäftsstelle vom 02.10.95
- RSK-Ausschuss „Druckführende Komponenten“ (Ergebnisprotokoll der 230. Sitzung am 25.04.1995)

- (2) Das Arbeitsgremium beriet über diese Änderungsvorschläge auf seiner 11. Sitzung am 21./22. November 1995 und verabschiedete eine geänderte Fassung zur Behandlung im UA-MK.
- (3) Der UA-MK verabschiedete die Regeländerungsvorlage auf seiner 21. Sitzung am 11. Januar 1996 mit geringfügigen Änderungen und empfahl dem KTA, die Regeländerungsvorlage als Regel aufzustellen.
- (4) Der KTA entsprach der Empfehlung und hat auf seiner 50. Sitzung am 11. Juni 1996 die Regeländerungsvorlage als Regel (Regeländerung) in der Fassung 1996-06 aufgestellt. Die Veröffentlichung erfolgte im Bundesanzeiger Nr. 216a am 19. November 1996

4 Ausführungen zum Regeltext

4.1 Konzept für die Regeländerung (Gründe)

Im Rahmen der Erarbeitung der Regel KTA 3211.2 "Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung" durch das Arbeitsgremium und den KTA-Unterausschuss MECHANISCHE KOMponentEN wurde eine umfassende Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik vorgenommen. Die im Ergebnis dieser Analyse in KTA 3211.2 (1992-06) formulierten Anforderungen sind weitestgehend auch auf Komponenten des Primärkreises anzuwenden. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, die Regel KTA 3201.2 insbesondere hinsichtlich folgender Punkte an den in KTA 3211.2 dargelegten Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen:

- Präzisierung des Anwendungsbereiches hinsichtlich kleiner Nennweiten
- Überarbeitung der Konstruktionsdetails
- Aufnahme der Vergleichsspannung und der Vergleichsspannungsschwingbreite nach der von-Mises-Festigkeitshypothese
- Öffnung für andere als die bisher vorgegebenen K_e -Faktoren
- Ergänzung der Festlegungen zur Vermeidung des Versagens infolge von Ratcheting
- Überarbeitung der Tabelle für zulässige Spannungen für Schrauben
- Überarbeitung der Abschnitte für die Berechnung von Kegelschalen, Schrauben und Flanschen

4.2 Anmerkungen zu den wesentlichsten Änderungen

Zu Abschnitt Grundlagen

Der Abschnitt Grundlagen wurde entsprechend dem KTA-Merkblatt über Inhalt, Aufbau und äußere Form der Regeln des KTA ergänzt.

Zu Abschnitt 1: Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich wurde zwecks Angleichung an den Anwendungsbereich der Regeln KTA 3201.1 "Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen" und 3201.3 "Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 3: Herstellung" hinsichtlich der Nennweitenbegrenzung präzisiert. Über den Abschnitt 8.4.1 (6) besteht die Möglichkeit zu vereinfachten Nachweisverfahren, z.B. mit Verlegerichtlinien. Für Kleinleitungen mit komplexen Belastungsverhältnissen, z.B. bei Kleinleitungen im Druckhaltesystem, besteht die Möglichkeit eines rechnerischen Nachweises nach den Gleichungen (8.4-1) und (8.4-2), im Bedarfsfall auch als vollständiger Nachweis nach Abschnitt 8.4. Nach Ansicht des Arbeitsgremiums ist diese Verfahrensweise notwendig und praktikabel, da der Unterausschuss MECHANISCHE KOMponentEN auf seiner 18. Sitzung beschlossen hat, die Arbeiten zur Erstellung einer Kleinleitungsregel einzustellen.

Zu Abschnitt 2: Allgemeine Grundsätze

Die allgemeinen Grundsätze für die Auslegung, Konstruktion und Berechnung wurden hinsichtlich der Standsicherheits-, Integritäts- und Funktionsfähigkeitsnachweise in Anlehnung an KTA 3211.2 präzisiert.

Es wurde klargestellt, dass für die Anwendbarkeit des Abschnittes 7 keine Einschränkungen hinsichtlich Geometrie und Belastung bestehen.

Das Arbeitsgremium ist der Ansicht, dass ein Anhang "Experimentelle Methoden" nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand zu erarbeiten und auch nicht zwingend erforderlich ist. Es wurden deshalb alle diesbezüglichen Verweise in der Regel gestrichen.

Zu Abschnitt 3: Lastfallklassen des Primärkreises und Beanspruchungsstufen der Komponenten

Auf die Tabellen 3.2-1 und 3.3-1 kann verzichtet werden, da sie Unkorrektheiten enthielten und ohnehin lediglich Beispielcharakter trugen.

Zu Abschnitt 4: Einwirkungen auf die Komponenten infolge von mechanischen und thermischen Belastungen, Korrosion, Erosion und Bestrahlung

Die Tabelle 4-1 wurde aus KTA 3211.2 übernommen und ergänzt. Gegenüber KTA 3211.2 wurde die Einordnung der Belastung aus dem Bemessungserdbeben, aus sonstigen Einwirkungen von außen und der transienten Belastungen präzisiert. Auf nähere Erläuterungen wurde im Regeltext zwecks Erzielung einer einheitlichen Darstellung und aufgrund des Beispielcharakters verzichtet.

Die Tabelle 4-1 hat Beispielcharakter für die Überlagerung von Lastfällen, die anlagenbezogene Detailregelung ist für die jeweiligen Systeme und Komponenten in den Anlagenspezifikationen festgelegt.

Folgende Kriterien gelten jedoch übergeordnet:

1. In der Auslegungsstufe 0 werden die Komponenten mit abdeckenden statischen Belastungen aus dem Auslegungsdruck, dem Eigengewicht und anderen Belastungen mit den zulässigen Spannungen bei Auslegungstemperatur dimensioniert.
2. In der Prüfstufe P werden, vergleichbar der Vorgehensweise bei der Dimensionierung in der Auslegungsstufe 0, die Belastungen der Prüfstufen (erstmalig/wiederkehrend) zugrunde gelegt.
3. Bei den Betriebszuständen A (normaler Betrieb) und B (anomaler Betrieb) werden die tatsächlichen betrieblichen Belastungen der jeweiligen Komponente (einschließlich transients Vorgänge) sowie die Einflüsse aus dem zugehörigen System (Rohrleitungsmomente usw.) berücksichtigt. Außer dem Nachweis der Primärspannungen werden auch das Dehnungsverhalten über die Sekundärspannungsbegrenzung kontrolliert und der Ermüdungsgrad über die Lebensdauer bestimmt.
4. Bei Störfällen mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit genügt der Primärspannungsnachweis für die Störfalllasten. Die Einstufung in die Klasse C (Notfall), z. B. für das "kleine Leck", oder in die Stufe D (Schadensfall), z. B. für das Bemessungserdbeben (siehe KTA-Regel 2201.4), ergibt sich aus dem Regelwerk.

Anlagenspezifikationen sehen teilweise eine schärfere Einstufung vor, um besondere Schutzziele zu erfüllen (z. B. Erdbebennachweis für eine Armatur in Stufe B, um durch die daraus resultierende Absenkung des Spannungsniveaus die gestellten Funktionsfähigkeitsanforderungen zu erfüllen).

Zu Abschnitt 5: Konstruktive Gestaltung

Der Abschnitt 5 wurde durch Übernahme von Anforderungen aus KTA 3211.2 und Präzisierung einiger Abschnitte an den aktuellen Stand der Technik angepasst. In diesem Zusammenhang erfolgte eine gemeinsame redaktionelle Überarbeitung der Abschnitte 5 und 8.2.

Die Anforderungen an die Mindestgröße von Schrauben gemäß Abschnitt 5.2.5 (4) wurden aus AD-Merkblatt B 7 übernommen.

Zu Abschnitt 7: Allgemeine Analyse des mechanischen Verhaltens

Der bisher nicht ausgefüllte Abschnitt 7.1.3 "Plattierung" sowie weitere der Präzisierung dienende Abschnitte wurden aus KTA 3211.2 übernommen.

Der bisher nicht ausgefüllte Abschnitt 7.6.2.6.2 "Dynamische Entkopplungsbedingungen" wurde aus KTA 2201.4 "Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 4: Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile" übernommen.

Zu Abschnitt 7.1.3 (3) Berücksichtigung der Plattierung bei der Sprödbruchanalyse

Im Rahmen der Sprödbruchanalyse ist von Fall zu Fall zu entscheiden, ob die Einbeziehung der Plattierung zu einer Beanspruchungssituation an der Risspitze und damit zu einem KI(T)-Verlauf führt, der sich begünstigend oder verschärfend auswirkt. Dabei sind von Bedeutung die Art der postulierten Fehler (Länge, Tiefe, Form), die Wirkung des unterschiedlichen thermischen Verhaltens von Plattierung und Grundwerkstoff mit der zugehörigen Belastungssituation an der Rissflanke einschließlich der Eigenspannungen sowie der Einfluss auf das Temperaturfeld und die zugehörigen Wärmespannungen.

Zu Abschnitt 7.7: Spannungsanalyse

Durch die in Abschnitt 7.7.2.2 "Primäre Spannungen" vorgenommene Präzisierung wird Übereinstimmung mit den Festlegungen im ASME-Code hergestellt.

Zu Abschnitt 7.7.3: Spannungsüberlagerung und Spannungsbeurteilung

Wie bereits in anderen Regeln des KTA (z.B. KTA 3204, KTA 3211.2, KTA 3401.2) erfolgt, wurde die von-Mises-Festigkeithypothese aufgenommen. Aus den nachfolgend aufgeführten Gründen wird es für zweckmäßig erachtet, im KTA-Regelwerk zukünftig der von-Mises-Hypothese den Vorrang gegenüber der Tresca-Hypothese einzuräumen. Um die Verwendung erprobter und auf der Festigkeitshypothese nach Tresca beruhender numerischer Berechnungsverfahren weiterhin zu ermöglichen, werden beide Festigkeitshypothesen gleichberechtigt zugelassen. Die Indexverfahren der komponentenspezifischen Rohrleitungsanalyse bleiben hiervon unberührt.

In Angleichung an den internationalen Sprachgebrauch wird anstelle "Schubspannungshypothese" die Bezeichnung "Tresca-Hypothese" und analog anstelle "Gestaltänderungsenergiehypothese" die Bezeichnung "von-Mises-Hypothese" verwendet.

Zur Frage der Einführung der von-Mises-Hypothese zusätzlich zur Tresca-Hypothese in das KTA-Regelwerk für Komponenten des Primärkreises (KTA 3201.2) lässt sich aufgrund theoretischer Untersuchungen und experimenteller Befunde feststellen:

- a) Für die Berechnung der Vergleichsspannung nach KTA 3201.2, Abschnitt 7.7.3.2 zur Begrenzung der Primär- und Sekundärspannungen bei statischer oder quasi-statischer Beanspruchung kann die von-Mises-Hypothese ohne Bedenken anstelle der Tresca-Hypothese angewandt werden.
- b) Die Berechnung der Vergleichsspannungsschwingbreiten nach KTA 3201.2, Abschnitt 7.7.3.3 - entsprechend ASME NB-3216.2 - geht bei körperfesten Hauptspannungsrichtungen von den tatsächlichen Hauptspannungen, bei nichtkörperfesten Hauptspannungsrichtungen von modifizierten Hauptspannungen (vgl. Abschnitt 7.7.3.3 (3)) aus. Auf dieser Basis kann die

Vergleichsspannungsschwingbreite sowohl nach der Tresca-Hypothese als auch nach der von-Mises-Hypothese berechnet werden. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur graduell, nicht prinzipiell. Dies ergibt sich auch daraus, dass die von-Mises-Hypothese inhaltsgleich mit der Oktaederschubspannungshypothese ist, zwischen letzterer und der Tresca-Hypothese aber eine völlige Analogie besteht. Grundsätzlich kann also zur Berechnung der Vergleichsspannungsschwingbreiten nach Abschnitt 7.7.3.3 für die Ermüdungsanalyse anstelle der Tresca-Hypothese immer auch die von-Mises-Hypothese verwendet werden.

- c) Das Verhältnis der Vergleichsspannungen nach Tresca- und von-Mises-Hypothese liegt je nach Spannungsverhältnis im Bereich von 1,0 bis 1,155. Demnach liefert die Tresca-Hypothese nicht in jedem Fall konservativere Ergebnisse. Insofern ist kein genereller Abbau oder Gewinn von Konservativitäten bei der Anwendung beider Hypothesen zu begründen.
- d) Bei allen auftretenden Lastfällen (auch bei Notfällen) liegen die Dehnungsschwingbreiten im Bereich $\leq 1\%$. Bei solchen Dehnungsschwingbreiten (weit entfernt von der Gleichmaßdehnung) ist die von-Mises-Hypothese bei statischer und quasi-statischer Beanspruchung unstrittig die zutreffendere. Dies gilt auch für schwingende Beanspruchung in denjenigen Bereichen, wo die Belastung vergleichsweise einfach zu bestimmen und experimentell zu überprüfen ist. In diese Kategorie fällt der weitaus überwiegende Teil schwingbeanspruchter technischer Komponenten. Die Anwendung der von Mises-Hypothese führt somit zu einer besseren Erfassung des Werkstoffverhaltens und stellt folglich keinen Abbau von Sicherheiten dar. Der mit der Zulassung der von-Mises-Hypothese im Vergleich zur Tresca-Hypothese bei bestimmten Spannungsverhältnissen auftretende geringfügige Abbau von Konservativitäten ist aus den genannten Gründen berechtigt.

Die Frage, welche Festigkeitshypothese das Werkstoffverhalten am besten beschreibt, lässt sich letztlich nur durch sorgfältige experimentelle Überprüfungen entscheiden. Festigkeitshypothesen sind keine physikalischen Gesetze. Sie sind nicht richtig oder falsch, sondern - gemessen an entsprechenden Versuchsergebnissen - mehr oder weniger zutreffend. Für einige wenige, sehr spezielle Fälle schwingender Belastung mit komplexen Bedingungen (neben mehrachsiger, phasenverschobener Beanspruchung drehende Hauptachsensysteme, ungleiche Frequenzen, unübliche Schwingungsformen u.a.) ist eine eindeutige Entscheidung für eine bestimmte Festigkeitshypothese derzeit noch schwierig. Die Probleme liegen zum einen auf Seiten der Theorie zur Erfassung der Werkstoffbeanspruchung, zum andern in der äußerst aufwendigen Versuchstechnik. Dieser Bereich ist z.Zt. Gegenstand der Forschung. Es sind verschiedene konkurrierende Berechnungsverfahren vorgeschlagen worden, unter ihnen das Verfahren nach ASME NB 3216.2 oder KTA 3201.2, Abschnitt 7.7.3.3. Um für derartige komplexe Belastungsfälle eine definitive Aussage machen zu können, welches Verfahren das Werkstoffverhalten am zutreffendsten beschreibt, bedarf es noch weiterer theoretischer und experimenteller Untersuchungen.

Weitere Ausführungen hierzu finden sich z.B. in der Arbeit von H. Dietmann und H. Kockelmann: Verwendung der Gestaltänderungsenergiehypothese im Anwendungsbereich der KTA-Regeln, VGB Kraftwerkstechnik, Heft 6, 1994.

Zu Abschnitt 7.7.3.4: Begrenzung der Vergleichsspannungen und Vergleichsspannungsschwingbreiten

Es wurde eine Angleichung der KTA 3201.2 (03/84) an die Festlegungen für die Prüfgruppe A1 in KTA 3211.2 (1992-06) bezüglich der Bestimmung der Spannungsvergleichswerte S_m für austenitische Werkstoffe (KTA 3201.2, Abschnitt 7.7.3.4 (4)) vorgenommen. Folge dieses Angleichs ist eine Mitberücksichtigung des Kriteriums $R_{p0,2T}/1,5$ bzw. $R_{p1,0T}/1,5$ für die Dimensionierung. Die S_m -Werte zur Spannungsanalyse nach KTA 3201.2 Abschnitte 7 und 8 bleiben unverändert.

Für die austenitischen Walz- und Schmiedestähle 1.4541 S, 1.4550 S und 1.4571 S nach KTA 3201.1 (1990-06) wurden die Auswirkungen auf den Fall der Dimensionierung untersucht. Aus der Gegenüberstellung der Werte S_m -alt (KTA 3201.2, Fassung 1984-03) und S_m -neu (KTA 3211.2, Fassung 1990-06) ist ersichtlich:

1. Das Verhältnis $R_{p0,2RT}/R_{mRT}$ ist in den genannten Fällen kleiner als 0,5 und somit sind die Werte $R_{p1,0T}$ anwendbar.
2. Für Temperaturen zwischen 20°C und ca. 100°C sind die Werte S_m -alt und S_m -neu gleich, da jeweils der Wert $R_{p0,2RT}/1,5$ den S_m -Wert bestimmt.
3. Für Temperaturen oberhalb ca. 100 °C ist S_m -neu kleiner als S_m -alt. Die maximalen Abweichungen betragen abhängig vom jeweiligen Werkstoff zwischen 11 und 13 %. Bei der Dimensionierung von Zylinderschalen wird damit die Mindestwanddicke maximal ca. 13 % dicker als bisher errechnet.

Zusätzlich wurde ein Vergleich der S_m -Werte für die Prüfgruppe A1 nach KTA 3211.2 (1990-06) mit den K/S-Werten nach den AD-Merkblättern durchgeführt. Oberhalb ca. 100 °C sind die Werte identisch und unterhalb sind die S_m -Werte kleiner als die K/S-Werte.

Eine Gegenüberstellung der Bestimmung der S_m -Werte nach KTA 3201.2 (1984-03), KTA 3211.2 (1992-06), ASME III NB (1992) und AD-Merkblatt B 0 (03/90) zeigt:

1. Für ferritische Walz- und Schmiedestähle werden die S_m -Werte identisch bestimmt.
2. Austenitische Walz- und Schmiedestähle weisen in der S_m -Wert-Bestimmung Besonderheiten auf, die in der vorstehenden gesonderten Betrachtung für die Werkstoffe nach KTA 3201.1 (1990-06) behandelt wurden.
3. Für Stahlguss werden die S_m -Werte nach den KTA-Regeln mit höheren Sicherheiten gegenüber den Bruchwerten abgesichert als nach dem ASME Code III NB.

Zu Abschnitt 7.7.4: Grenztragfähigkeitsanalyse

Der bereits in KTA 3204 "Reaktordruckbehälter-Einbauten" enthaltene Nachweis mittels Grenztragfähigkeitsanalyse wurde nach redaktioneller Überarbeitung von dort übernommen. Anstatt des Nachweises der Einhaltung zulässiger Spannungen kann durch die Grenztragfähigkeitsanalyse die Integrität eines Bauteils oder einer Komponente nachgewiesen werden. Auf diesem Verfahren basieren auch, wie in Abschnitt 5 erwähnt, Dimensionierungsgleichungen des Anhanges A.

Die Grenztragfähigkeitsanalyse wird mit ideal elastisch-plastischem Werkstoffverhalten durchgeführt. Die so ermittelte Grenzlast ist immer kleiner als die tatsächliche Kraft, unter der die Struktur kollabiert.

Der Nachweis mittels Grenztragfähigkeitsanalyse ist seit langem im ASME-Code enthalten. In Deutschland wurde er bisher kaum genutzt, da für plastische Analysen wenig Anwendungsbedarf bestand. Entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik wird die Grenztragfähigkeitsanalyse in Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren zunehmend angewendet, weshalb nunmehr eine Regelung in der KTA 3201.2 erforderlich wurde.

Bei Anwendung der Grenztragfähigkeitsanalyse werden darüber hinaus die in bestimmten Fällen auftretenden Schwierigkeiten bei der Spannungs kategorisierung vermieden.

Zu Abschnitt 7.8: Ermüdungsanalyse

Die bei der Ermüdungsanalyse anzuwendenden Verfahren wurden hinsichtlich der zugelassenen elasto-plastischen Verfahren in Anlehnung an KTA 3211.2 erweitert. Die unterschiedlichen Verfahren der elasto-plastischen Ermüdungsanalyse unterscheiden sich in Abhängigkeit von Konstruktion, Belastung und Werkstoffgesetz der zu untersuchenden Komponente. In Anbetracht der Konservativität aller Ergebnisse aus den mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführten elasto-plastischen Ermüdungsanalysen gibt es keine Veranlassung, den Maximalwert aus den unterschiedlichen Verfahren zu verwenden.

Die Ermüdungskurven in den Bildern 7.8-1 bis 7.8-3 sind auf der Grundlage von einachsigen Dehnungswechselversuchen bis zum Bruch und ohne Berücksichtigung des Medieneinflusses aufgestellt worden, wobei die Dehnungen mit dem E-Modul multipliziert sind, damit auf der Ordinate Spannungseinheiten (im plastischen Bereich fiktive Werte) angegeben werden können. Die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate hieraus gewonnene Kurve ist durch Verwendung eines Abminderungsfaktors 2 gegenüber den Spannungen bzw. eines Abminderungsfaktors 20 gegenüber den Lastwechselzahlen, je nachdem welche Abminderung den konservativeren Kurvenpunkt ergibt, und unter zusätzlicher Berücksichtigung des Effektes der maximalen Mittelspannung in eine Kurve für zulässige Spannungsamplituden bei vorgegebenen Lastwechselzahlen bzw. in eine Kurve für zulässige Lastwechselzahlen bei vorgegebenen Spannungsamplituden umgewandelt worden.

Das Arbeitsgremium hat sich bei der Erarbeitung der Regeländerungsvorlage ausführlich mit dem aktuellen Kenntnisstand auf dem Gebiet der Schädigung sowohl ferritischer als auch austenitischer Stähle unter Medieneinfluss befasst und vertritt im Ergebnis der hierzu geführten Diskussionen folgenden Standpunkt:

- Zur Zeit wird keine Notwendigkeit gesehen, die in KTA 3201.2 (1984-03) enthaltenen Ermüdungskurven zu ändern. Eine diesbezügliche Entscheidung ist frühestens nach Abschluss der im internationalen Maßstab laufenden Untersuchungen möglich.
- Die in den USA diskutierte Verschiebung der Auslegungs-Ermüdungskurven wird nicht als sinnvoll angesehen. Eine solche Verfahrensweise berücksichtigt nicht, dass die Ermüdung durch lokale Bereiche (Kerbwirkung, Spannungsspitzen etc.) bestimmt wird. Als wesentlich zweckmäßiger wird angesehen, die betreffenden lokalen Bereiche zu ermitteln, nach Möglichkeit zu beseitigen (Beschleifen der Schweißnähte etc.) und gegebenenfalls verstärkt zu überwachen.
- Unsicherheiten, die sich hinsichtlich einer möglichen korrosionsgestützten Rissbildung ergeben können, müssen durch andere Maßnahmen behoben werden, wie z.B. durch die Wahl der Werkstoffe, Verarbeitung, Konstruktion, gezielte wiederkehrende Prüfung (vergleiche KTA 3201.4) und die Sicherstellung eines Betriebsmediums mit geringem Korrosionspotential.

Nach Vorliegen aller Ergebnisse der z.Zt. laufenden Untersuchungen ist die Berücksichtigung des Medieneinflusses bei der Ermüdungsanalyse erneut zu diskutieren.

Zu Abschnitt 7.9: Sprödbbruchanalyse

Es wurden zahlreiche rein redaktionelle Änderungen vorgenommen.

In Ergänzung zu den bereits vorhandenen Kurven wurden die entsprechenden Approximationsgleichungen für die Ermittlung der K_{Ic} - und K_{IR} -Werte aus dem ASME-Code übernommen, die eine konservative Näherung dieser Kurven darstellen.

Es wurde bei der Erarbeitung der Regeländerungsvorlage die Möglichkeit geprüft,

- Festlegungen zur Zähbruchmechanik in die Regel aufzunehmen und
- das in Abschnitt C 2 enthaltene Berechnungsverfahren zur Ermittlung der K_I -Werte durch ein analytisches Verfahren zu ersetzen.

Im Ergebnis der hierzu geführten Diskussionen wurde festgestellt, dass die Aufnahme von Festlegungen zur Zähbruchmechanik weiterer Vorbereitungsarbeiten bedarf.

Der von Prof. Dr. Munz vorgelegte Vorschlag zu Abschnitt C 2 weicht in der vorliegenden Form in nicht konservativer Weise vom bewährten und im Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren etablierten Nachweiskonzept des ASME-Code ab, da er den Q-Faktor zur Berücksichtigung begrenzter plastischer Verformungen nicht enthält. Das Arbeitsgremium hält es für zweckmäßig, die erforderlichen Präzisierungen des Vorschlages im Rahmen der Arbeiten zur Aufnahme der Zähbruchmechanik zu diskutieren und den Abschnitt C 2 bis zur nächsten Überarbeitung der Regel in der bisherigen Form beizubehalten.

Der WPS-Effekt ist für Stähle, die in den hier relevanten Eigenschaften des Verformungsverhaltens mit genügender Genauigkeit den deutschen Stählen entsprechen, als werkstoffmechanische Beeinflussung der Werkstoffzähigkeit nachgewiesen. Deutsche Untersuchungen für den Stahl 22 NiMoCr 3 7 wurden z. B. umfangreich vom IWM der FhG in Freiburg durchgeführt.

Der WPS-Effekt ergibt sich aus der Ausbildung einer lokalen plastischen Zone an Bauteilfehlern. Der dabei eingestellte Wert des Spannungsintensitätsfaktors definiert eine untere Schwelle für die zur Fehlerausweitung mindestens zu überwindende kritische Bruchzähigkeit.

Der WPS-Effekt wird wirksam, wenn in einem Lastpfadverlauf der Anstieg beendet ist und der Lastpfad bereits wieder abfällt.

Bei üblichen Temperaturtransienten für Sprödbruchsicherheitsnachweise stellt sich ein von Betriebstemperatur zu tieferen Temperaturen ansteigender Lastpfadverlauf ein, der nach dem Erreichen eines durch die aufgeprägte Transiente bestimmten Höchstwertes zu niedrigeren Temperaturen bis zur Kühlmitteltemperatur abfällt. Die Untersuchungen des IWM der FhG haben hierzu nachgewiesen, dass die übliche, linear elastische Weiterrechnung des Lastpfades jenseits des Höchstwertes wegen des WPS-Effekts keine zutreffende Beschreibung des aufgebrachten Spannungsintensitätsfaktorverlaufs ist.

Werkstoffmechanisch begründet ist stattdessen ein Steilabfall des Spannungsintensitätsfaktors gegeben.

Die Wirksamkeit des WPS-Effekts ist an die dargestellten und auch im ASME-Code Section XI, A-5300, so beschriebene Lastpfadaufbringung gebunden. Der Textvorschlag zur KTA 3201.2 folgt dieser Vorlage. Die Aufnahme des WPS-Effekts berücksichtigt einen werkstoffmechanischen Vorgang und ermöglicht die zutreffende Darstellung des abfallenden Lastpfadverlaufs für die Sprödbruchsicherheitsanalyse. Für die zutreffende Beschreibung der Lage von Risswiderstand und Rissantrieb ist bei der Gegenüberstellung von Bruchzähigkeitskurve und Lastpfadverlauf der WPS-Effekt zu berücksichtigen.

Zu Abschnitt 7.12: Spannungs-, Verformungs- und Ermüdungsanalyse für Flanschverbindungen

Die Durchführung von Spannungs-, Verformungs- und Ermüdungsanalysen für Flanschverbindungen wurde im Abschnitt 7.12, der bisher nur die Spannungs- und Ermüdungsanalyse für Schrauben behandelte, neu geregelt.

Ergänzend zu der bisherigen Möglichkeit einer allgemeinen Spannungs- und Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 7 der Regel KTA 3201.2 wurden in Anhang A "Dimensionierung" unter den Abschnitten A 2.8 "Schraubenverbindungen", A 2.9 "Flansche" und A 2.10 "Dichtungen" die entsprechenden Regelungen der Regel KTA 3211.2 (als Ersatz für die bisherigen Abschnitte A 12 bis A 14 der Regel KTA 3201.2) übernommen, um auch für den Anwendungsbereich der Regel KTA 3201.2 Dimensionierungen nach Auslegungsgleichungen für die relevanten Belastungen (u.a. Rohrleitungslasten und Schraubenvorspannung) der jeweiligen Beanspruchungsstufen durchführen zu können. Außer der aus der Regel KTA 3211.2 übernommenen Tabelle A 2.8-2 zur Spannungsabsicherung für Schrauben in den verschiedenen Beanspruchungsstufen wurde eine entsprechende Tabelle (Tabelle A 2.9-1) für die Spannungsabsicherung der Flansche für die verschiedenen Beanspruchungsstufen neu aufgenommen.

Die im Anhang A vorgegebene Spannungsabsicherung ist an die dort enthaltenen Dimensionierungsgleichungen gebunden, so dass sich für die Schrauben teilweise abweichende zulässige Spannungen gegenüber der Schrauben-Spannungsabsicherung gemäß der beibehaltenen Tabelle 7.7-5 bei Anwendung der allgemeinen Analyse des mechanischen Verhaltens nach Abschnitt 7 der Regel KTA 3201.2 ergeben.

Darüber hinaus wurden in Abschnitt 7.12 Ergänzungen vorgenommen, um die Dichtheit der Flanschverbindung unter Berücksichtigung des elastischen Zusammenhangs zwischen Einbau- und Betriebszustand sicherzustellen.

Zu Abschnitt 7.13: Vermeidung des Versagens infolge thermisch bedingter fortschreitender Deformation

Durch die Aufnahme des Abschnittes 7.13 werden für bestimmte Anwendungsfälle konservative Abschätzverfahren vorgegeben und damit die bisher nur allgemeine Forderung zum Nachweis der Vermeidung des Versagens infolge thermisch bedingter fortschreitender Deformation spezifiziert. Diese Abschätzverfahren beruhen auf den im ASME-Code (NB 3228 und Code Case N 47) angegebenen.

Zu Abschnitt 7.13.2.3: Nachweis durch Begrenzung der Dehnungen

Abweichend vom Code Case N 47 wurde als Begrenzung für die akkumulierte plastische Dehnungszunahme (Umfangsaufweitung) als Grenzwert 2 % vorgegeben. Der Code Case N 47 gibt hier einen Grenzwert von 1 % vor. Allerdings gilt dort dieser Grenzwert für die Einbeziehung von Kriechbeanspruchungen im Hochtemperaturbereich, wo aufgrund des Kriechversagensverhaltens geringere Grenzwerte als bei plastischer Beanspruchung im Streckgrenzenbereich einzuhalten sind. Bei den nach KTA 3201.1 zugelassenen Werkstoffen ist in der Regel ein Kaltumformungsgrad von 5 % ohne zusätzliche Wärmebehandlung zugelassen. Gemessen hieran ist die Begrenzung auf einen akkumulierten Gesamtdehnungszuwachs von 2 % unbedenklich.

Zu Abschnitt 7.13.3: Allgemeiner Nachweis durch elastisch-plastische Analyse

Der Code Case N 47 gibt für einen allgemeinen Nachweis durch elastisch-plastische Analyse einen Grenzwert der lokal akkumulierten plastischen Zughauptdehnung von maximal 5 % für den Grundwerkstoff und von maximal 2,5 % für das Schweißgut vor. Diesen Grenzwerten wurde gefolgt, obwohl im Anwendungsbereich der Regel KTA 3201.2 nur plastische Verformungen im Streckgrenzenbereich betrachtet werden und die werkstoffmechanisch ungünstigeren Verhältnisse des Kriechbereiches nicht eingeschlossen sind. Inwieweit das Schweißgut hierdurch zu ungünstig bewertet wird, kann an dieser Stelle nicht quantifiziert werden. Mit der Festlegung von maximal 2,5 % akkumulierter plastischer Zughauptdehnung für Schweißnähte soll vor allem erreicht werden, dass Schweißnähte nicht in hochbeanspruchten Bereichen vorgesehen werden.

Zu Abschnitt 8: Komponentenspezifische Analyse des mechanischen Verhaltens_

In Anlehnung an die Regel KTA 3211.2 erfolgte teilweise eine inhaltliche Ergänzung und redaktionelle Überarbeitung. Dabei wurden u.a. der bisher nicht ausgefüllte Abschnitt "Armaturen" (unter Berücksichtigung der Festlegungen in ASME Code Section III Division 1 - Subsection NB) und das in KTA 3211.2 enthaltene Verfahren zur Berechnung von radialen Stützen mittels der Spannungsindexmethode für primäre und sekundäre Spannungen infolge Innendruck ergänzt.

Der in Abschnitt 8.3.3 enthaltene und aus dem ASME-Code übernommene Primärspannungsnachweis für Armaturengehäuse wird vom Arbeitsgremium für erforderlich gehalten, da das vereinfachte komponentenspezifische Verfahren zum Spannungs- und Ermüdungsnachweis als ein in sich geschlossenes Verfahren aus dem ASME-Code übernommen wurde. Die Dimensionierung von Armaturengehäusekörpern nach Anhang A 3.1.3 basiert hingegen auf der DIN 3840. Die vereinfachte Spannungs- und Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 8.3 kann auf einen nach Anhang A 3.1.3 dimensionierten Armaturengehäusekörper nicht ohne weiteres angewandt werden.

In die pauschale Spannungsanalyse (Abschnitt 8.3.4) wurde für die Beanspruchungsstufen 0, A und B entsprechend der Vorgehensweise im französischen RCCM-Code außer dem Spannungsanteil aus Rohrleitungsbelastungen P_{eb} auch der primäre Innendruck-Anteil P_{lp} aufgenommen - Gleichung (8.3-4). Die konstruktiven Anforderungen für die Durchführung der pauschalen Spannungsanalyse wurden durch Eintragung der entsprechenden Größen in Bild 8.3-5 präzisiert (Durchmesser und Wanddicke des Armaturengehäuses müssen größer sein als beim Rohrleitungsanschluss).

Zu Anhang A:

Die Gliederung des Anhangs A "Dimensionierung" wurde in Anlehnung an KTA 3211.2 komponentenbezogen gestaltet.

In Abschnitt A 1 wurde klargestellt, dass die in Abschnitt A 2 enthaltenen Festlegungen für allgemeine Bauteile der drucktragenden Wand unter Beachtung der jeweiligen Voraussetzungen grundsätzlich auch auf spezifische Bauteile von Armaturen gemäß Abschnitt A 3 und Rohrleitungen gemäß Abschnitt A 4 anwendbar sind.

Der Geltungsbereich des Abschnittes A 2.4 "Kegelschalen" wurde auf $0,005 \leq s_{0n}/d_a \leq 0,2$ beschränkt (Anpassung an die Neufassung des AD-Merkblattes B 2).

In Abschnitt A 2.6 "Ebene Platten" wurde eine Empfehlung zur Überprüfung der Durchbiegung einer unverankerten runden Platte mit zusätzlichem Randmoment im Hinblick auf Dichtheitsanforderungen neu aufgenommen.

Der Abschnitt A 2.8 "Schraubenverbindungen" wurde komplett aus KTA 3211.2 übernommen und um die Tabelle A 2.8-2 ergänzt, da die in KTA 3201.2 bisher enthaltenen Berechnungsverfahren nicht mehr dem heutigen Kenntnisstand entsprechen.

In den Abschnitten A 2.9 "Flansche" und A 2.10 "Dichtungen" wurde in Anlehnung an KTA 3211.2 eine Anpassung an den aktuellen Stand der Technik vorgenommen.

Zur Vermeidung von Unsicherheiten bei der Spannungsabsicherung von Flanschen wurde Tabelle A 2.9-1 neu in die Regel aufgenommen. Die Abminderung der Spannungsgrenzen bei $d_a/d_i > 2$ ergibt sich aus DIN EN 1591.

Der Abschnitt A 3 "Armaturen" wurde weitgehend aus KTA 3211.2 übernommen.