

KTA 3203

**Überwachung des Bestrahlungsverhaltens von Werkstoffen
der Reaktordruckbehälter von Leichtwasserreaktoren**

Fassung 2017-11

Frühere Fassungen der Regel: 1984-03 (BAnz. Nr. 119a vom 29. Juni 1984)
2001-06 (BAnz. Nr. 235b vom 15. Dezember 2001)

Inhalt

	Seite
Grundlagen	2
1 Anwendungsbereich	2
2 Begriffe	2
3 Allgemeine Grundsätze	3
3.1 Zweck des Bestrahlungsprogramms	3
3.2 Notwendigkeit zur Durchführung eines Bestrahlungsprogramms	3
4 Bestrahlungsprogramm	5
4.1 Bestrahlungsplan	5
4.2 Anforderungen an die Aufnahmebehälter für die Probensätze	6
4.3 Lage der Aufnahmebehälter im Reaktordruckbehälter	6
4.4 Anzahl der Probensätze	6
4.5 Zeitpunkte des Einsatzes und der Entnahme von Probensätzen	6
5 Werkstoffauswahl für Bestrahlungsproben	6
5.1 Auswahlkriterien	6
5.2 Prüfstück	6
5.3 Proben und Reservematerial	6
5.4 Probenlage und Probenentnahmeorte	6
6 Prüfung und Auswertung	7
6.1 Allgemeines	7
6.2 Bestrahlungstemperatur	7
6.3 Bestimmung der Neutronenfluenz	7
6.4 Mechanisch-technologische Prüfungen	8
7 Probenaufbewahrung	9
8 Dokumentation	9
Anhang A: Bestimmungen und Literatur, auf die in dieser Regel verwiesen wird	10
Anhang B: Daten zur Herleitung und Kriterien zur Anwendung der RT_{Grenz} -Kurve	12
Anhang C: Änderungen gegenüber der Fassung 2001-06 und Erläuterungen (informativ)	15

Grundlagen

(1) Die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) haben die Aufgabe, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz -AtG-) getroffen ist), um die im AtG und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten sowie in den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) und den „Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) In den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ werden in Anforderung Nr. 2.1 unter anderem hohe Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit der Fertigung, in Anforderung Nr. 3.1 des Weiteren die Verwendung qualifizierter Werkstoffe sowie die Sicherstellung und Erhalt der Qualitätsmerkmale bei der Fertigung gefordert. In Anforderung Nr. 3.4 wird unter anderem die Grundsatzforderung gestellt, dass die Druckführende Umschließung so beschaffen sein muss, dass das Auftreten von rasch fortschreitenden Rissen und spröden Brüchen nicht zu unterstellen ist. Gemäß der Anforderung Nr. 5 (3) ist eine Dokumentation erforderlich, dass der Zustand der Einrichtungen die Anforderungen erfüllt. Interpretation I-2 fordert in Abschnitt 3.2 (3) ein Überwachungsprogramm mit voreilend bestrahlten Einhängeproben zur Charakterisierung der durch Bestrahlung veränderten Werkstoffeigenschaften. Die Regel KTA 3203 dient zur Konkretisierung von Maßnahmen zur Erfüllung dieser Forderungen im Rahmen ihres Anwendungsbereichs. Für die Komponenten des Primärkreises werden die Festlegungen der genannten Sicherheitsanforderungen zusammen mit den weiteren Regeln

- KTA 3201.1 Werkstoffe und Erzeugnisformen,
- KTA 3201.2 Auslegung, Konstruktion und Berechnung,
- KTA 3201.3 Herstellung,
- KTA 3201.4 Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung

und

- KTA 3206 Nachweise zum Bruchausschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken

somit umfassend konkretisiert.

(3) Im Einzelnen werden in KTA 3203 die Anforderungen festgelegt, die zur Überwachung des Verhaltens von Werkstoffen des Reaktordruckbehälters unter Neutronenbestrahlung zu stellen sind an:

- a) die Durchführung und Auswertung von Bestrahlungsprogrammen,
- b) die Bestimmung der Neutronenfluenz,
- c) die Bestimmung der Bestrahlungstemperatur,
- d) die Probenaufbewahrung,
- e) die Dokumentation.

(4) Das Bestrahlungsprogramm dient insbesondere dazu, durch voreilend bestrahlte Einhängeproben die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften von Grundwerkstoff und Schweißgut im kernnahen Bereich des Reaktordruckbehälters nach bestimmter Neutronenbestrahlung zu ermitteln und die Lage der im Sprödbruchsicherheitsnachweis gemäß KTA 3201.2 zu verwendenden Bruchzähigkeitskurve zu bestätigen oder neu festzulegen.

1 Anwendungsbereich

Diese Regel ist anzuwenden bei der Überwachung des Bestrahlungsverhaltens von Werkstoffen des kernnahen Bereichs der drucktragenden Wand des Reaktordruckbehälters von Leichtwasserreaktoren.

2 Begriffe

(1) Fluenzvoreilfaktor

Der Fluenzvoreilfaktor ist das Verhältnis der Neutronenfluenzen (für Neutronenenergien $E > 1$ MeV) der Bestrahlungsproben und des maximal bestrahlten Bereichs der ferritischen Reaktordruckbehälterinnenwand bei gleicher Bestrahlungszeit.

(2) Grenzwert der Referenztemperatur (RT_{Grenz})

Der Grenzwert der Referenztemperatur (RT_{Grenz}) ist die höchste im Sprödbruchsicherheitsnachweis zugrunde zu legende justierte Referenztemperatur.

(3) Kernnaher Bereich

Der kernnahe Bereich ist der der Bestrahlung ausgesetzte Wandungsbereich des Reaktordruckbehälters, der direkt den aktiven Teil des Reaktorkerns (Länge des mit Brennstoff beladenen Teils der Brennstäbe) umgibt, sowie angrenzende Bereiche, die aufgrund der vorausberechneten Erhöhung der Referenztemperatur bei der Auswahl der zu überwachenden Werkstoffe in Betracht zu ziehen sind.

(4) Nachweisfluenz (NWF)

Die Nachweisfluenz NWF ist der im Sprödbruchsicherheitsnachweis zugrunde gelegte Wert der Neutronenfluenz.

(5) NDT-Temperatur

Die NDT-Temperatur (Nil Ductility Transition-Temperature) ist die höchste Temperatur, bei der eine Probe im Fallgewichtsversuch noch bricht.

(6) Neutronenfluenz (Φ)

Die Neutronenfluenz ist die über die Bestrahlungszeit integrierte Neutronenflussdichte.

(7) Neutronenflussdichte (φ)

Die Neutronenflussdichte ist der Quotient aus der Anzahl der Neutronen eines definierten Energiebereichs, die in einer Zeitspanne in eine kleine Kugel um den betrachteten Raumpunkt eintreten, und dem Produkt aus der Querschnittsfläche dieser Kugel und der Zeitspanne. Sie ist identisch mit dem Produkt aus der Neutronenzahldichte und der mittleren Geschwindigkeit der Neutronen.

(8) Neutronenspektrum

Das Neutronenspektrum ist die Verteilung der Neutronenflussdichte als Funktion der Neutronenenergie. Im Allgemeinen wird das Neutronenspektrum in Gruppen, die bestimmten Energieintervallen zugeordnet sind, angegeben.

(9) Referenztemperatur RT_{NDT}

Die Referenztemperatur nach dem RT_{NDT} -Konzept ist durch die folgenden Maßnahmen definiert:

- a) Festlegung einer Temperatur T_{NDT} , welche gleich oder höher ist als die NDT-Temperatur, festgestellt mit Hilfe von Fallgewichtsversuchen.
- b) Bei einer Temperatur nicht größer als $T_{\text{NDT}} + 33$ K soll jede Probe aus dem Kerbschlagbiegeversuch (Querproben mit V-Kerb) mindestens 0,9 mm laterale Breitung und nicht weniger als 68 J Schlagenergie aufweisen. Sind diese Anforderungen erfüllt, ist die T_{NDT} die RT_{NDT} .
- c) Für den Fall, dass die oben genannten Forderungen nicht erfüllt sind, sind zusätzlich Kerbschlagbiegeprüfungen (Querproben mit V-Kerb) durchzuführen, in Sätzen von jeweils drei Proben, um die Temperatur T_{KV} zu bestimmen, bei welcher oben genannte Anforderungen erfüllt sind. In diesem Fall ist die Referenztemperatur $RT_{\text{NDT}} = T_{\text{KV}} - 33$ K. Somit ist die Referenztemperatur RT_{NDT} die höhere Temperatur von T_{NDT} und $T_{\text{KV}} - 33$ K.
- d) Falls der Kerbschlagbiegeversuch nicht bei $T_{\text{NDT}} + 33$ K durchgeführt wurde, oder wenn er nicht bei $T_{\text{NDT}} + 33$ K die Minimalwerte von 68 J und 0,9 mm laterale Breitung

aufweist, soll die Temperatur, bei der das Minimum der Schlagenergie von 68 J und der lateralen Breitung von 0,9 mm vorhanden ist, aus der Schlagenergie-Temperatur-Kurve und der Breitung-Temperatur-Kurve ermittelt werden, die aus den unteren Werten aller Proben gebildet wird.

(10) Referenztemperatur RT_{NDT} , justiert (RT_{NDTj})

Die nach dem RT_{NDT} -Konzept für den bestrahlten Zustand justierte Referenztemperatur ergibt sich aus der Referenztemperatur RT_{NDT} des unbestrahlten Werkstoffs, erhöht um den Betrag der Übergangstemperatur-Verschiebung ΔT_{41} zu:

$$RT_{NDTj} = RT_{NDT} + \Delta T_{41} \quad (2-1)$$

(11) Referenztemperatur RT_{T_0} , direkt ermittelt

Die Referenztemperatur RT_{T_0} ergibt sich aus der am bestrahlten RDB-Werkstoff bestimmten Referenztemperatur T_0 des Masterkurven-Konzepts zu:

$$RT_{T_0} = T_0 + 19,4 \text{ K} + M \quad (2-2)$$

Der Temperaturzuschlag M berücksichtigt den Einfluss einschließlich der statistischen Streuung von Probenart, Werkstoffart (Grundwerkstoff oder Schweißgut), Werkstoffvariabilität, Probendicke und Probenanzahl auf die T_0 .

(12) Referenztemperatur RT_{T_0} , justiert (RT_{T_0j})

Die nach dem Masterkurven-Konzept für den bestrahlten Zustand justierte Referenztemperatur ergibt sich aus der am unbestrahlten RDB-Werkstoff bestimmten Referenztemperatur T_{0u} zu:

$$RT_{T_0j} = T_{0u} + k \cdot \Delta T_{41} + 19,4 \text{ K} + M \quad (2-3)$$

Der Temperaturzuschlag M berücksichtigt den Einfluss einschließlich der statistischen Streuung von Probenart, Werkstoffart (Grundwerkstoff oder Schweißgut), Werkstoffvariabilität, Probendicke und Probenanzahl auf die T_0 .

Der Faktor k beschreibt die Korrelation zwischen der Übergangstemperatur-Verschiebung ΔT_{41} und der Temperaturverschiebung ΔT_0 der Masterkurve [1]. Für deutsche RDB-Werkstoffe gilt ein Wert von $k = 1,0$ [2].

(13) Referenztemperatur T_0 , bestrahlt

Die Referenztemperatur T_0 ist die nach ASTM E1921 für den bestrahlten Zustand ermittelte Referenztemperatur des Masterkurven-Konzepts.

(14) Referenztemperatur T_0 , unbestrahlt (T_{0u})

Die Referenztemperatur T_{0u} ist die nach ASTM E1921 für den unbestrahlten Ausgangszustand ermittelte Referenztemperatur des Masterkurven-Konzepts.

(15) Sachverständiger

Sachverständiger für die Prüfungen nach dieser Regel ist der nach § 20 des Atomgesetzes von der Genehmigungs- oder Aufsichtsbehörde zugezogene Sachverständige. Die in dieser Regel vorgesehenen Prüfungen/Überprüfungen erfolgen auf der Grundlage eines entsprechenden Auftrags der zuständigen Behörde.

(16) Übergangstemperatur-Verschiebung (ΔT_{41})

Die Übergangstemperatur-Verschiebung ΔT_{41} ist der Temperaturabstand zwischen gemittelten Ausgleichskurven des Kerbschlagbiegeversuchs für den unbestrahlten und bestrahlten Werkstoffzustand bei einer Schlagenergie von 41 J.

3 Allgemeine Grundsätze

3.1 Zweck des Bestrahlungsprogramms

(1) Zur experimentellen Überprüfung der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften des Reaktordruckbehälters während des Betriebs bis zur Nachweisfluenz sind Proben aus den

ferritischen Originalwerkstoffen voreilend im Reaktordruckbehälter zu bestrahlen.

(2) Anhand der Ergebnisse des Bestrahlungsprogramms ist die Lage der im Sprödbruchsicherheitsnachweis gemäß KTA 3201.2 zu verwendenden Bruchzähigkeitskurve entweder

a) indirekt durch Verwendung von voreilend bestrahlten Kerbschlagproben zur Bestimmung der Übergangstemperatur-Verschiebung ΔT_{41}

oder

b) direkt durch Verwendung von voreilend bestrahlten Bruchmechanikproben zur Bestimmung der Referenztemperatur T_0 des Masterkurven-Konzepts nach ASTM E1921

zu bestätigen oder neu festzulegen.

(3) Die Lage der Bruchzähigkeitskurve ist durch die Referenztemperatur RT_{NDTj} unter Verwendung der Übergangstemperatur-Verschiebung ΔT_{41} festzulegen.

(4) Alternativ zur Referenztemperatur RT_{NDTj} ist die Verwendung der Referenztemperatur RT_{T_0} oder RT_{T_0j} zulässig. Der Temperaturzuschlag M ist in Abhängigkeit der maßgeblichen Einflussgrößen und deren statistischer Streuung geeignet festzulegen und zu begründen.

Hinweise:

(1) Die alternative Verwendung der um 19,4 K erhöhten Referenztemperatur T_0 des Masterkurven-Konzepts zur Festlegung der Lage der Bruchzähigkeitskurve wird in den im ASME Code umgesetzten Code Cases N-851 (Section XI) und N-631 (Section III) beschrieben. Hinweise zur Anwendung des Masterkurven-Konzepts im Rahmen eines deterministischen Sprödbruchsicherheitsnachweises und zur Bestimmung eines geeigneten Temperaturzuschlags M können z. B. IAEA Technical Reports Series No. 429 entnommen werden.

(2) Weitere Hinweise zur Anwendung des Masterkurven-Konzepts finden sich z. B. in [3] bis [9].

3.2 Notwendigkeit zur Durchführung eines Bestrahlungsprogramms

(1) Bei einer Neutronenfluenz im maximal bestrahlten Bereich der ferritischen Innenwand des Reaktordruckbehälters von weniger als $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (für Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$) ist beim Sprödbruchsicherheitsnachweis kein Einfluss der Bestrahlung auf die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften zu berücksichtigen. Ein Bestrahlungsprogramm ist deshalb nicht erforderlich.

(2) Ab einer Neutronenfluenz im maximal bestrahlten Bereich der ferritischen Innenwand des Reaktordruckbehälters gleich oder größer als $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ und gleich oder kleiner als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ (für Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$) ist dem Sprödbruchsicherheitsnachweis gemäß KTA 3201.2 Abschnitt 7.9 der Wert $RT_{Grenz} = 40 \text{ °C}$ entsprechend **Bild 3-1** zugrunde zu legen. Die Einhaltung der RT_{Grenz} ist mit RT_{NDTj} oder RT_{T_0} oder RT_{T_0j} als Ergebnis eines Bestrahlungsprogramms entsprechend **Tabelle 3-1**, **Tabelle 3-2** oder **Tabelle 3-3** zu bestätigen. Die ermittelte RT_{NDTj} oder RT_{T_0} oder RT_{T_0j} darf dem Sprödbruchsicherheitsnachweis alternativ zu RT_{Grenz} zugrunde gelegt werden.

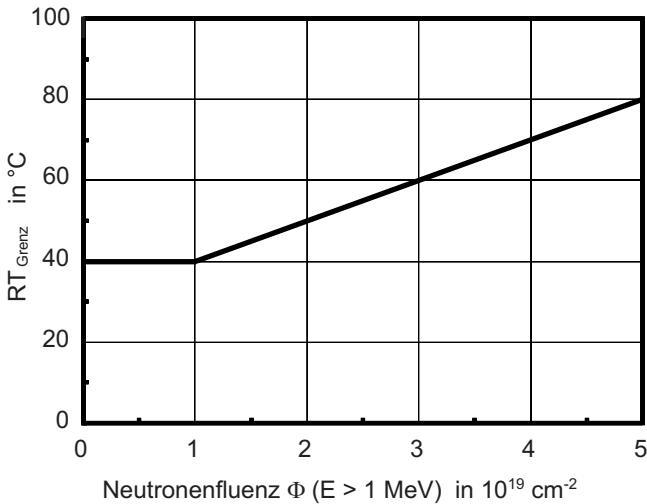
(3) Bei einer Neutronenfluenz im maximal bestrahlten Bereich der ferritischen Innenwand des Reaktordruckbehälters größer als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ (für Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$) ist dem Sprödbruchsicherheitsnachweis gemäß KTA 3201.2 Abschnitt 7.9 der Wert RT_{Grenz} entsprechend **Bild 3-1** zugrunde zu legen. Die Einhaltung der RT_{Grenz} ist mit RT_{NDTj} oder RT_{T_0} oder RT_{T_0j} als Ergebnis eines Bestrahlungsprogramms entsprechend **Tabelle 3-4**, **Tabelle 3-5** oder **Tabelle 3-6** zu bestätigen. Die ermittelte RT_{NDTj} oder RT_{T_0} oder RT_{T_0j} darf dem Sprödbruchsicherheitsnachweis alternativ zu RT_{Grenz} zugrunde gelegt werden.

(4) Bei einer Neutronenfluenz im maximal bestrahlten Bereich der ferritischen Innenwand des Reaktordruckbehälters gleich oder kleiner als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ (für Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$) sind bei Werkstoffen im abgesicherten Bereich von **Bild B-2** keine an bestrahlten Zugproben ermittelten Kennwerte erforderlich, siehe Fußnote 1 in **Tabelle 3-1** und Fußnote 2 in **Tabelle 3-3**.

Hinweise:

- (1) Aus den Ergebnissen der bestrahlten Zugproben der deutschen DWR- und SWR-RDB sowie aus den Ergebnissen von Forschungsprogrammen wie CARINA ist in diesem Fluenzbereich der Einfluss der Neutronenbestrahlung auf die Festigkeitseigenschaften ausreichend bekannt.
- (2) Beim Grundwerkstoff sowie bei Schweißgütern mit maximalen Massenanteilen von Cu $\leq 0,15\%$ und Ni $\leq 1,1\%$ findet in diesem Fluenzbereich eine moderate Erhöhung der Streckgrenze um bis ca. 80 MPa statt.

(5) Wird als Absicherungskonzept gemäß (2) oder (3) die Verwendung der direkt an bestrahlten Bruchmechanikproben ermittelten Referenztemperatur RT_{T0} gewählt, so sind nach ASTM E1921 sowohl zur Ermittlung der Größenbedingungen für gültige Kennwerte als auch zur Einbringung eines Ermüdungsanrisses in die Bruchmechanikproben abweichend zu (4) zusätzlich die an bestrahlten Zugproben ermittelten Kennwerte erforderlich, siehe **Tabelle 3-2** und **Tabelle 3-5**.



Der Grenzwert gilt für Neutronenfluenzen (für Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$) gleich oder größer als $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ und für Werkstoffe, die die in Abschnitt B 5.1 aufgeführten Kriterien erfüllen. Für SWR-Anlagen liegen derzeit Ergebnisse für Neutronenfluenzen (für Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$) bis $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ vor.

Bild 3-1: Grenzwert der Referenztemperatur RT_{Grenz} für Grundwerkstoffe und Schweißgüter als Funktion der Neutronenfluenz (RT_{Grenz} -Kurve)

(6) Für Werkstoffe, für die kein Bestrahlungsprogramm vorgesehen ist und die in ihrem Bestrahlungsverhalten nicht durch andere Werkstoffe abgedeckt sind, ist die RT_{Grenz} nach **Bild 3-1** zu verwenden.

Proben-satz-Nr.	Kerbschlagproben mit V-Kerb		Zugproben ¹⁾		Entnahmezeitpunkte
	GW	SG	GW	SG	
1	12	12	3	3	unbestrahlt
2	12	12	3	3	$\approx 50\%$ NWF
3	12	12	3	3	$\geq 100\%$ NWF

GW : Grundwerkstoff
SG : Schweißgut
NWF : Nachweisfluenz

¹⁾ Bestrahlte Zugproben sind bei Werkstoffen im abgesicherten Bereich von **Bild B-2** nicht erforderlich.

Tabelle 3-1: Probenumfang bei Anwendung des RT_{NDT} -Konzepts für Nachweisfluenzen gleich oder kleiner als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bei Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$

Proben-satz-Nr.	Bruchmechanikproben ¹⁾		Zugproben		Entnahmezeitpunkte
	GW	SG	GW	SG	
1	10	10	3	3	unbestrahlt
2	10	10	3	3	$\approx 50\%$ NWF
3	10	10	3	3	$\geq 100\%$ NWF

GW : Grundwerkstoff
SG : Schweißgut
NWF : Nachweisfluenz

¹⁾ Die angegebene Anzahl von Bruchmechanikproben wird empfohlen. Die Anforderungen der ASTM E1921 für eine gültige T_0 -Bestimmung sind einzuhalten.

Tabelle 3-2: Probenumfang bei Anwendung des Masterkurven-Konzepts zur Ermittlung der Referenztemperatur RT_{T0} für Nachweisfluenzen gleich oder kleiner als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bei Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$

Proben-satz-Nr.	Kerbschlagproben mit V-Kerb		Bruchmechanikproben ¹⁾		Zugproben ²⁾		Entnahmezeitpunkte
	GW	SG	GW	SG	GW	SG	
1	12	12	10	10	3	3	unbestrahlt
2	12	12	—	—	3	3	$\approx 50\%$ NWF
3	12	12	—	—	3	3	$\geq 100\%$ NWF

GW : Grundwerkstoff
SG : Schweißgut
NWF : Nachweisfluenz

¹⁾ Die angegebene Anzahl von Bruchmechanikproben wird empfohlen. Die Anforderungen der ASTM E1921 für eine gültige T_0 -Bestimmung sind einzuhalten.

²⁾ Bestrahlte Zugproben sind bei Werkstoffen im abgesicherten Bereich von **Bild B-2** nicht erforderlich.

Tabelle 3-3: Probenumfang bei Anwendung des Masterkurven-Konzepts zur Ermittlung der justierten Referenztemperatur RT_{T0j} für Nachweisfluenzen gleich oder kleiner als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bei Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$

Proben-satz-Nr.	Kerbschlagproben mit V-Kerb			Zugproben			Entnahmezeit-punkte
	GW I	GW II	SG	GW I	GW II	SG	
1	12	12	12	3	3	3	unbestrahlt
2	12	12	12	3	3	3	≈ 50 % NWF
3	12	12	12	3	3	3	≥ 100 % NWF

GW : Grundwerkstoff
SG : Schweißgut
NWF : Nachweisfluenz

Tabelle 3-4: Probenumfang bei Anwendung des RT_{NDT} -Konzepts für Nachweisfluenzen größer als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bei Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$

Proben-satz-Nr.	Bruchmechanikproben ¹⁾			Zugproben			Entnahmezeit-punkte
	GW I	GW II	SG	GW I	GW II	SG	
1	10	10	10	3	3	3	unbestrahlt
2	10	10	10	3	3	3	≈ 50 % NWF
3	10	10	10	3	3	3	≥ 100 % NWF

GW : Grundwerkstoff
SG : Schweißgut
NWF : Nachweisfluenz

¹⁾ Die angegebene Anzahl von Bruchmechanikproben wird empfohlen. Die Anforderungen der ASTM E1921 für eine gültige T_0 -Bestimmung sind einzuhalten.

Tabelle 3-5: Probenumfang bei Anwendung des Masterkurven-Konzepts zur Ermittlung der Referenztemperatur RT_{T_0} für Nachweisfluenzen größer als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bei Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$

Proben-satz-Nr.	Kerbschlagproben mit V-Kerb			Bruchmechanikproben ¹⁾			Zugproben			Entnahmezeit-punkte
	GW I	GW II	SG	GW I	GW II	SG	GW I	GW II	SG	
1	12	12	12	10	10	10	3	3	3	unbestrahlt
2	12	12	12	—	—	—	3	3	3	≈ 50 % NWF
3	12	12	12	—	—	—	3	3	3	≥ 100 % NWF

GW : Grundwerkstoff
SG : Schweißgut
NWF : Nachweisfluenz

¹⁾ Die angegebene Anzahl von Bruchmechanikproben wird empfohlen. Die Anforderungen der ASTM E1921 für eine gültige T_0 -Bestimmung sind einzuhalten.

Tabelle 3-6: Probenumfang bei Anwendung des Masterkurven-Konzepts zur Ermittlung der justierten Referenztemperatur RT_{T_0j} für Nachweisfluenzen größer als $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bei Neutronenenergien $E > 1 \text{ MeV}$

4 Bestrahlungsprogramm

4.1 Bestrahlungsplan

(1) Für die Durchführung des Bestrahlungsprogramms ist ein Bestrahlungsplan mit folgenden Angaben zu erstellen:

- Beschreibung der Werkstoffe des kernnahen Bereiches (chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlungen, Ergebnisse der Abnahmeprüfungen) und welche Werkstoffe in das Bestrahlungsprogramm einbezogen werden,
- Werkstoffprüf- und Probenentnahmeplan,
- Vorgesehene Position der Probensätze im Reaktordruckbehälter,
- Berechnete Fluenz für die ferritische Innenwand des Reaktordruckbehälters (Maximalwert sowie die axiale und azimutale Verteilung) und deren Verlauf über die Wanddicke,

- Fluenzvoreilfaktor der Bestrahlungsproben,
 - Anzahl und Art der Detektoren für die Neutronenfluenzbestimmung und der Monitoren für die Temperaturbestimmung,
 - Anordnung der einzelnen Proben, Neutronenfluenzdetektoren und Temperaturmonitoren in der Bestrahlungskapsel,
 - Herstellungsdokumentation der Arbeitsprobe oder Schweißprobe,
 - Angaben zum Aufnahmebehälter (Werkstoffe, Herstellung, Prüfungen),
 - Beteiligung des Sachverständigen.
- (2) Der Bestrahlungsplan ist vor Beginn der Herstellung der Proben zur Vorprüfung einzureichen.

4.2 Anforderungen an die Aufnahmebehälter für die Probensätze

(1) Die Werkstoffproben, die Detektoren und die Temperaturmonitoren sind in Aufnahmebehältern aus korrosionsbeständigem Werkstoff unterzubringen.

(2) Die Aufnahmebehälter einschließlich der Füllstücke müssen so gestaltet sein, dass ein ausreichender Wärmeübergang von den eingesetzten Proben durch die Wand des Aufnahmebehälters hindurch an das Kühlmittel stattfinden kann. Das kann z. B. durch einen flächenhaften Kontakt zwischen Proben, Füllstücken und Aufnahmebehälter erreicht werden.

(3) Die Neutronenflussdichteunterschiede einer Probenserie sind durch entsprechende Anordnung der Proben so gering wie möglich zu halten.

(4) Die Aufnahmebehälter sind so zu konstruieren, dass sie während der vorgesehenen Einsatzdauer dicht bleiben. Die Dichtheit ist vor Einbau in den Reaktordruckbehälter nachzuweisen.

4.3 Lage der Aufnahmebehälter im Reaktordruckbehälter

(1) Die Aufnahmebehälter sollen im Reaktordruckbehälter so angeordnet werden, dass der Fluenzvorfaktor 1,5 bis 12 beträgt.

(2) Die Vorrichtungen für die Positionierung der Aufnahmebehälter innerhalb des Reaktordruckbehälters müssen so ausgeführt und angeordnet sein, dass der Einsatz und die Entnahme der Aufnahmebehälter leicht und zuverlässig möglich sind, und eine Beschädigung während des Betriebs auszuschließen ist.

4.4 Anzahl der Probensätze

Es sind mindestens zwei Probensätze für den bestrahlten Zustand sowie ein Probensatz für den unbestrahlten Zustand als Grundprogramm vorzusehen.

4.5 Zeitpunkte des Einsatzes und der Entnahme von Probensätzen

(1) Die Probensätze sind frühestens nach dem Warmprobetrieb einzusetzen.

(2) Die Zeitpunkte für die Entnahme von bestrahlten Probensätzen sind so zu wählen, dass die Neutronenfluenz bei Verwendung von zwei Probensätzen, deren anzustrebende Zielfluenz etwa 50 % und mindestens 100 % der Nachweisfluenz des Reaktordruckbehälters beträgt.

(3) Die Probensätze dürfen anlässlich planmäßiger Stillstände wie z. B. beim Brennelementwechsel, entnommen werden.

5 Werkstoffauswahl für Bestrahlungsproben

5.1 Auswahlkriterien

Die Bestrahlungsproben müssen aus Originalwerkstoffen stammen und in ihrem Herstellungsablauf denen entsprechen, die im kernnahen Bereich des Reaktordruckbehälters eingesetzt sind.

5.2 Prüfstück

(1) Für das Bestrahlungsprogramm ist ein Prüfstück unter den gleichen Bedingungen wie die zu überwachende Originalschweißverbindung des Reaktordruckbehälters in Anwesenheit des Sachverständigen herzustellen.

(2) Ein in den Abmessungen ausreichend langes Prüfstück der Arbeitsprüfung (Arbeitsprobe) darf zur Werkstoffentnahme für das Bestrahlungsprogramm genommen werden, wenn die nach KTA 3201.3 Abschnitt 11.2.2.1 (1) durchgeführte Arbeitsprüfung nach den gleichen Bedingungen wie die Originalschweißverbindung des Reaktordruckbehälters geschweißt wurde.

(3) Sofern eine eigene Schweißprobe für das Bestrahlungsprogramm erforderlich ist, sind diejenigen Grundwerkstoffe und Schweißzusätze und -hilfsstoffe zu verwenden, die auch bei der Schweißung der zu überwachenden Schweißverbindung des Reaktordruckbehälters eingesetzt wurden. Für eine solche Schweißprobe sind Teile, die von den Originalschmiederingen oder -blechen im vergüteten Zustand abgeschnitten wurden, zu verwenden. Das Schweißverfahren sowie die Einstellung der Schweißparameter müssen ebenfalls die Bedingungen erfüllen, die bei der Schweißung der zu überwachenden Schweißverbindung des Reaktordruckbehälters vorliegen.

(4) Die Wärmebehandlungen der Schweißprobe müssen denen der zu überwachenden Schweißverbindung des Reaktordruckbehälters entsprechen. Sie sollen als mitlaufende oder als simulierende Wärmebehandlungen durchgeführt werden.

(5) Die aus der Arbeits- oder Schweißprobe zu entnehmenden Prüfstücke für die Herstellung von Bestrahlungsproben müssen in Abhängigkeit von der Nachweisfluenz entweder einen Grundwerkstoff und das Schweißgut (siehe **Tabellen 3-1 bis 3-3**) oder die beiden benachbarten Grundwerkstoffe und das Schweißgut (siehe **Tabellen 3-4 bis 3-6**) repräsentieren. Die erforderlichen Prüfstücke für die Grundwerkstoffe dürfen auch chargengleichen Werkstoffcoupons entnommen werden.

5.3 Proben und Reservematerial

Für die Probenentnahme ist eine ausreichende Menge Werkstoff vorzusehen, so dass zusätzlich zu der nach Abschnitt 4.4 gewählten Anzahl von Probensätzen eine genügende Menge Werkstoff von mindestens einer Schweißnahtlänge von 1,5 m zur Entnahme von weiteren Probensätzen oder für ergänzende Untersuchungen vorhanden ist.

Hinweis:

Im Allgemeinen reicht ein Prüfstück mit einer Schweißnahtlänge von etwa 2 m für das Bestrahlungsprogramm einschließlich des Reservematerials aus.

5.4 Probenlage und Probenentnahmeorte

5.4.1 Allgemeines

Die Proben für die unbestrahlten und die zu bestrahlenden Probensätze sind möglichst nahe nebeneinander zu entnehmen und ihre Lage ist im Probenentnahmeplan festzuhalten, siehe Abschnitt 4.1 (1) b).

5.4.2 Grundwerkstoff

(1) Die Proben aus dem Grundwerkstoff sind als Querproben (Axialproben) zu entnehmen, bei denen die Probenlängsachse entweder quer zur Hauptverformungsrichtung oder parallel zur Rotationssymmetrieachse liegt. Bei Kerbschlag- oder Bruchmechanikproben liegt die Kerbachse senkrecht zur Ebene der Quer- und Längsrichtung oder senkrecht zur zylindrischen Oberfläche.

(2) Die Probenentnahmeorte in nahtlosen, ungestörten, zylindrischen Ringen für Mantelschüsse müssen mindestens in einem Viertel der Vergütungswanddicke, höchstens jedoch 80 mm unter der zylindrischen Innenoberfläche sowie um mindestens die Hälfte der Vergütungswanddicke, höchstens jedoch 160 mm unter der Stirnoberfläche von den zur Wärmebe-

handlung begrdigten Kanten liegen. Die Probenentnahmeorte in Blechen mssen um mindestens 1/4 der Vergtungs-wanddicke unter der Walzoberflche und um mindestens die Hlfte der Vergtungs-wanddicke unter der Stirnflche von den zur Wrmebehandlung begrdigten Kanten liegen.

5.4.3 Schweißgut

Für die Probenentnahme aus dem Schweißgut gilt:

- Die Kerbschlag- oder Bruchmechanikproben sind als Querproben zu entnehmen, wobei die Kerbachse senkrecht zur Schweißrichtung und Schweißnahtoberflche liegt.
- Die Zugproben aus dem Schweißgut sind parallel zur Schweißrichtung zu entnehmen.
- Flankenraupen, Decklagen und der Mischbereich zwischen Wurzel- und Fülllagen sind nicht für Proben zu verwenden.
- Die übrigen Bereiche des Schweißnahtvolumens sind als gleichwertig zu betrachten.

6 Prüfung und Auswertung

6.1 Allgemeines

- Prüfungen und Auswertungen sollen in zertifizierten Prüflabors erfolgen.
- Die Prüfungen an den bestrahlten Proben sollen innerhalb eines Jahres nach der Entnahme durchgeführt werden.

Hinweis:

Mit Ausnahme der Neutronenflussdetektoren (Abschnitt 6.3) führt eine Prüfung der Proben zu einem späteren Zeitpunkt unter der Voraussetzung einer als geeignet nachgewiesenen Probenlagerung zu keiner Verringerung der technischen Aussagegenauigkeit.

- Besondere Auswertungen zur Berücksichtigung der Neutronenflussdichte sind für RDB-Werkstoffe, die die in Abschnitt B 5.1 aufgeführten Kriterien erfüllen, nicht erforderlich.

6.2 Bestrahlungstemperatur

6.2.1 Bestimmung der Bestrahlungstemperatur

- Die für die Auswertung maßgebliche Bestrahlungstemperatur ist aus der Kühlmitteltemperatur und der Gamma-Aufheizung zu ermitteln.
- Durch geeignete experimentelle oder rechnerische Verfahren ist die durch Absorption von Gammastrahlung bewirkte Erhöhung der Temperatur der Proben gegenüber der Kühlmitteltemperatur zu bestimmen.
- Die Bestrahlungstemperatur soll die Temperatur der ferritischen Reaktordruckbehälterinnenwand um nicht mehr als 5 K übersteigen.

Hinweis:

Unter Kühlmitteltemperatur ist für den Druckwasserreaktor die Kühlmittelintrittstemperatur und beim Siedewasserreaktor die Temperatur im Rückströmraum im Kernbereich zu verstehen.

6.2.2 Temperaturmonitoren

- Zur Bestimmung einer oberen Temperaturgrenze sind Temperaturmonitoren in die Probensätze einzusetzen. Es dürfen z. B. die in **Tabelle 6-1** aufgeführten Temperaturmonitoren verwendet werden.
- Die zu verwendenden Temperaturmonitoren sind so auszuwählen, dass die höchste Temperatur der Bestrahlungsproben während der gesamten Einsatzzeit unter Berücksichtigung der Gamma-Aufheizung und betrieblich bedingten Temperaturänderungen mit einer Messunsicherheit von 10 K bestimmt werden kann.

6.2.3 Lage der Temperaturmonitoren

Die Temperaturmonitoren sollen vergleichbar den Neutronendetektoren angebracht sein.

Temperaturmonitor	Aufschmelztemperatur in °C
Pb Ag 1,7 Sb 6	263
Bi	271
Pb Ag 1,9 Sb 5	272
Pb Ag 1,9 Sb 4,5	273
Pb Ag 1,9 Sb 4,3	278
Pb Ag 2 Sb 4	280
Pb Ag 2 Sb 3,5	284
Pb Ag 2 Sb 3	288
Pb Pt 5	290
Pb Ag 2 Sb 2	293
Pb Ag 2,5	304
Pb Ag 1,75 Sn 0,75	308
Pb In 5	314
Pb Zn 0,5	318
Pb	327

Die Aufschmelztemperatur entspricht der Temperatur, bei der an der Probe eine deutliche Formänderung auftritt. Sie ist chargenweise zu bestimmen.
Erfahrungsgemäß lassen sich mit Schmelzmonitoren Temperaturen mit einer Messunsicherheit von etwa 5 K bestimmen.

Tabelle 6-1: Temperaturmonitoren

6.3 Bestimmung der Neutronenfluenz

6.3.1 Grundsätze

- Zur Ermittlung der während der Bestrahlung in den Proben auftretenden Neutronenfluenzen und zur Berechnung des Fluenzvorfaktors sind Neutronenfeldgrößen zu bestimmen.
- Für jeden Reaktor ist einmal das gesamte Neutronenspektrum für den Probenort und an der Reaktordruckbehälter-Innenwand an der Stelle der maximalen Neutronenflussdichte zu berechnen. Die Berechnung muss auf einem Berechnungsprogramm nach der Neutronentransporttheorie basieren.
- Bei der Auswertung von Bestrahlungsprogrammen sind unter Berücksichtigung der Bestrahlungsgeschichte folgende Größen zu bestimmen:
 - die spektrale Verteilung der Neutronenflussdichte für den zur Detektorauswertung benötigten Energiebereich der Bestrahlungsproben,
 - die Neutronenfluenz für Neutronenenergien $E > 1$ MeV der Bestrahlungsproben,
 - die maximale Neutronenfluenz für $E > 1$ MeV an der ferritischen Innenwand des Reaktordruckbehälters,
 - der Fluenzvorfaktor.
- Die Fluenzberechnung ist mit dem Ergebnis der Auswertung der Detektoren zu vergleichen.
- Die Auswertung der Detektoren hat nach DIN 25456-1 zu erfolgen.

6.3.2 Auswahl der Neutronendetektoren

- Es ist eine an repräsentativen Reaktoren erprobte Methode, die die Berechnung der Neutronenspektren und die

Auswahl, Anbringung und Auswertung der Neutronendetektoren umfasst, anzuwenden.

(2) Wird das erprobte Verfahren geändert, so ist das neue Verfahren parallel zum und mit dem bereits erprobten Verfahren an mindestens einem repräsentativen Reaktor in seiner Zuverlässigkeit zu verifizieren.

(3) Innerhalb eines jeden Bestrahlungsprobensatzes müssen zur Überprüfung des axialen Gradienten 3 gleichartige Detektoren zur Fluenzbestimmung in entsprechender Position eingesetzt, bestrahlt und ausgewertet werden.

(4) Es sollten die in **Tabelle 6-2** aufgeführten Neutronendetektoren verwendet werden.

Neutronendetektor	Auszuwertende Kernreaktion
Eisen nach DIN 25456-2	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
Niob nach DIN 25456-4	$^{93}\text{Nb}(n,n')^{93}\text{Nb}^m$
Kobalt ¹⁾	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$

¹⁾ Der Kobaltdetektor wird zur Bestimmung der thermischen Neutronenfluenz verwendet. Diese darf bei Bedarf für die Durchführung von Korrekturen an den über die anderen Detektoren ermittelten schnellen Neutronenfluenzen herangezogen werden.

Tabelle 6-2: Neutronendetektoren

6.4 Mechanisch-technologische Prüfungen

6.4.1 Prüfumfang

Ergänzend zu den nach KTA 3201.1 und KTA 3201.3 durchgeführten Prüfungen sind die nachstehend aufgeführten Proben zur Bestimmung der angegebenen Kenngrößen bereitzustellen:

- Zugproben für unbestrahlte und, sofern nach Abschnitt 3 erforderlich, zusätzlich für bestrahlte Probensätze zur Bestimmung der Streckgrenze R_{eH} oder Dehngrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung A sowie Gleichmaßdehnung A_g und Brucheinschnürung Z für Raumtemperatur und bei 150 °C sowie bei der Temperatur, die der langzeitigen Bestrahlungstemperatur der Proben entspricht. Diese Temperatur darf bei bestrahlten Proben wegen des Ausheilungseffektes nicht überschritten werden.
- Kerbschlagproben (Proben mit V-Kerb) für unbestrahlte Probensätze zur Ermittlung der vollständigen Schlagenergie-Temperaturkurven einschließlich Breitung und Zähbruchanteil von der Tieflage, gekennzeichnet durch einen duktilen Anteil von höchstens 5 % der Bruchfläche, bis annähernd zu der Temperatur, die der langzeitigen Bestrahlungstemperatur der Proben entspricht.
- bei Verwendung des RT_{NDT} -Konzepts sowie bei Verwendung des Masterkurven-Konzepts mit Bestimmung der justierten Referenztemperatur RT_{T0j} zusätzlich zu den Proben nach a) und b) Kerbschlagproben (Proben mit V-Kerb) für bestrahlte Probensätze zur Ermittlung der vollständigen Schlagenergie-Temperaturkurven einschließlich Breitung und Zähbruchanteil von der Tieflage, gekennzeichnet durch einen duktilen Anteil von höchstens 5 % der Bruchfläche, bis annähernd zu der Temperatur, die der langzeitigen Bestrahlungstemperatur der Proben entspricht.
- bei Verwendung des Masterkurven-Konzepts zur Bestimmung der justierten Referenztemperatur RT_{T0j} zusätzlich zu den Proben nach a), b) und c) Bruchmechanikproben zur Ermittlung der Referenztemperatur T_0 im unbestrahlten Zustand,

- bei Verwendung des Masterkurven-Konzepts zur direkten Bestimmung der Referenztemperatur zusätzlich zu den Proben nach a) und b) Bruchmechanikproben zur Ermittlung der Referenztemperatur T_0 im bestrahlten Zustand.

6.4.2 Prüfdurchführung

(1) Für die Prüfdurchführung dürfen Kompakt- und Verbundproben verwendet werden.

(2) Der Zugversuch ist nach DIN EN ISO 6892-1 und DIN EN ISO 6892-2 mit einer Probenform nach DIN 50125 mit kurzem Proportionalstab ($L_0 = 5 \cdot d_0$) durchzuführen. Die Kopfform darf abweichend von dieser Norm ausgeführt werden. Es sind Last-Verformungs-Diagramme aufzunehmen.

(3) Der Kerbschlagbiegeversuch ist nach DIN EN ISO 148-1 an Proben mit V-Kerb unter Verwendung einer Hammerfinne mit 2 mm Radius (KV_2) instrumentiert durchzuführen; es sind Kraft-Zeit- oder Kraft-Weg-Schriebe aufzunehmen und auszuwerten.

(4) Falls die Überprüfung der Zähigkeitseigenschaften durch Untersuchung von bestrahlten Bruchmechanikproben erfolgt, dürfen die Bruchmechanikversuche z. B. nach ASTM E1921 durchgeführt werden.

6.4.3 Bestimmung der Werkstoffkennwerte

(1) An den gemäß Abschnitt 6.4.1 zu prüfenden Proben sind folgende Werkstoffkennwerte zu bestimmen:

- an Zugproben: Streckgrenze R_{eH} oder Dehngrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung A und Brucheinschnürung Z sowie Gleichmaßdehnung A_g für Raumtemperatur und 150 °C sowie bei der Temperatur, die der langzeitigen Bestrahlungstemperatur der Proben entspricht,
- an Kerbschlagproben: Verschiebung der Übergangstemperatur aus gemittelten Ausgleichskurven bei einer Schlagenergie von 41 J und daraus abgeleitet ΔT_{41} ,
- an Bruchmechanikproben: J_c und daraus abgeleitet K_{Jc} und T_0 nach ASTM E1921.

Hinweis:

J_c ist das für elastisch-plastisches Werkstoffverhalten ermittelte J-Integral bei Einleitung eines Spaltbruchs. K_{Jc} ist der aus J_c abgeleitete elastisch-plastische Spannungsintensitätsfaktor. Die Definition und die Bestimmung dieser Werte sind in ASTM E1921 geregelt.

(2) Zur Verwendung der im Zugversuch ermittelten Werte für die Prüfung und Auswertung der Bruchmechanikproben gemäß den **Tabellen 3-2, 3-3, 3-5 und 3-6** dürfen die Prüftemperaturen der Zugversuche im unbestrahlten und bestrahlten Zustand an die Erfordernisse der ASTM E1921 angepasst werden. Die geeignet angepassten Prüftemperaturen sind vor Durchführung der Zugversuche der Aufsichtsbehörde zur Zustimmung vorzulegen.

(3) Bei Anwendung des Masterkurven-Konzepts ist zusätzlich der E-Modul erforderlich.

6.4.4 Bewertung der Werkstoffkennwerte

(1) Aus den gemäß Abschnitt 6.4.3 bestimmten Werkstoffkennwerten sind zu ermitteln:

- bei Verwendung des RT_{NDT} -Konzepts: justierte Referenztemperatur RT_{NDTj} ,
- bei alternativer Verwendung des Masterkurven-Konzepts: justierte Referenztemperatur RT_{T0j} oder direkt ermittelte Referenztemperatur RT_{T0} .

(2) Die ermittelte Referenztemperatur RT_{NDTj} oder RT_{T0j} oder RT_{T0} ist mit dem Wert RT_{Grenz} des betreffenden Reaktors zu vergleichen. Bei Vorliegen von Werten aus 2 Bestrahlungsprobensätzen darf zur Nachweisfluenz hin inter- oder

extrapoliert werden. Für die Inter- und Extrapolation ist jede geeignete Funktion zugelassen, wobei vorzugsweise die Potenzfunktion $RT = A + B \cdot \Phi^n$ zu verwenden ist. Bei Vorliegen von Werten aus nur einem Bestrahlungsprobensatz (Probensatz 2 in den **Tabellen 3-1 bis 3-6**) ist bis zur Ermittlung der Werte aus dem zweiten Bestrahlungsprobensatz (Probensatz 3 in den **Tabellen 3-1 bis 3-6**) bis zu dessen Zielwert der Neutronenfluenz eine qualifizierte Extrapolation z. B. unter Verwendung des NRC Regulatory Guide 1.99 Rev. 2, Position 1 (auf Basis von Cu- und Ni-Gehalt) zugelassen. Die Vorhersage der justierten Referenztemperatur ist hierbei für die erreichte Ist-Fluenz von Probensatz 2 und die Zielfluenz von Probensatz 3 durchzuführen und bei wesentlicher Abweichung bei Probensatz 2 für beide Probensätze geeignet an die Versuchsergebnisse von Probensatz 2 anzupassen.

(3) Für den Fall, dass die Bestimmung der gemittelten Ausgleichskurven zur Ermittlung der Übergangstemperaturverschiebung stets nach dem gleichen Auswerteverfahren erfolgt, ist bei der Ermittlung von RT_{NDTj} kein Sicherheitszuschlag erforderlich.

(4) Es ist nachzuweisen, dass

a) $RT_{NDTj} \leq RT_{Grenz}$ oder

$$RT_{T0} \leq RT_{Grenz} \text{ oder}$$

$$RT_{T0j} \leq RT_{Grenz}$$

b) die Hochlage der Schlagenergie, gekennzeichnet durch einen duktilen Anteil von mindestens 95 % der Bruchfläche, den Wert 68 J (Einzelwert) nicht unterschreitet.

(5) Ergeben sich mit zunehmender Neutronenfluenz niedrigere Werte für RT_{NDTj} oder RT_{T0} oder RT_{T0j} , so ist der höchste ermittelte Wert für RT_{NDTj} oder RT_{T0} oder RT_{T0j} für den Nachweis $RT_{NDTj} \leq RT_{Grenz}$ oder $RT_{T0} \leq RT_{Grenz}$ oder $RT_{T0j} \leq RT_{Grenz}$ zu verwenden.

(6) Sofern die ermittelte Referenztemperatur RT_{NDTj} oder RT_{T0} oder RT_{T0j} den Wert RT_{Grenz} überschreitet, ist der Spröbruchsicherheitsnachweis für den Reaktordruckbehälter

gemäß KTA 3201.2 Abschnitt 7.9 unter Verwendung des ermittelten Wertes durchzuführen oder erforderlichenfalls die Sicherheit für den Reaktordruckbehälter unter Verwendung des ermittelten Wertes anderweitig nachzuweisen.

Hinweis:

Der ASME Code Case N-830 (Section XI) beschreibt eine zusätzliche Möglichkeit zur Festlegung einer direkt aus der Masterkurve abgeleiteten deterministischen Bruchzähigkeitskurve für Class 1 Druckbehälter, siehe auch [10].

(7) Sofern die Hochlage der Schlagenergie 68 J (Einzelwert) unterschreitet, ist die Sicherheit erforderlichenfalls gemäß KTA 3201.2 Abschnitt 7.9 oder anderweitig nachzuweisen.

7 Probenaufbewahrung

Alle geprüften und nicht geprüften Proben sowie das Reservematerial sind bis zur endgültigen Einstellung des Leistungsbetriebs der Anlage aufzubewahren.

8 Dokumentation

(1) Die Dokumentation muss eine lückenlose Rückverfolgung der Probengeschichte von der Herstellung bis zur Auswertung der Proben und der Prüfungen nach Bestrahlung erlauben.

(2) Die Prüfergebnisse vor und nach Bestrahlung sind zu dokumentieren.

(3) Die für die Herstellung der Schweißprobe oder der Arbeitsprobe (siehe Abschnitt 5.2) erforderlichen Unterlagen wie Prüffolgeplan, Schweißplan, Wärmebehandlungsplan sowie der Werkstoffprüf- und Probeentnahmeplan sind Bestandteil der Dokumentation. Außerdem sind der vorgeprüfte Bestrahlungsplan sowie alle durchgeführten Prüfungen mit ihren Ergebnissen in die Dokumentation aufzunehmen.

(4) Die zu dokumentierenden Unterlagen sind in übersichtlicher Form mit einem Inhaltsverzeichnis zusammenzustellen.

Anhang A

Bestimmungen und Literatur, auf die in dieser Regel verwiesen wird

(Die Verweise beziehen sich nur auf die in diesem Anhang angegebene Fassung. Darin enthaltene Zitate von Bestimmungen beziehen sich jeweils auf die Fassung, die vorlag, als die verweisende Bestimmung aufgestellt oder ausgegeben wurde.)

Atomgesetz (AtG)		Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808)
StrlSchV		Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert nach Maßgabe des Artikel 10 durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 1222)
SiAnf	(2015-03)	Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B2)
Interpretationen	(2015-03)	Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012, geändert am 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B3)
KTA 3201.1	(2017-11)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen
KTA 3201.2	(2017-11)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
KTA 3201.3	(2017-11)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 3: Herstellung
KTA 3201.4	(2016-11)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung
KTA 3206	(2014-11)	Nachweise zum Bruchausschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken
DIN EN ISO 148-1	(2017-05)	Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 148-1:2016
DIN EN ISO 6892-1	(2017-02)	Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016
DIN EN ISO 6892-2	(2011-05)	Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur (ISO 6892-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 6892-2:2011
DIN 25456-1	(1999-10)	Neutronenflussmessung – Teil 1: Bestimmung der Fluenz schneller Neutronen mit Aktivierungs- und Spaltdetektoren
DIN 25456-2	(1999-10)	Neutronenflussmessung – Teil 2: Bestimmung der Fluenz schneller Neutronen mit Eisen-Aktivierungsdetektoren
DIN 25456-4	(1999-10)	Neutronenflussmessung – Teil 4: Bestimmung der Fluenz schneller Neutronen mit Niob-Aktivierungsdetektoren
DIN 50125	(2016-12)	Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben
SEP 1325	(1982-12)	Fallgewichtsversuch nach W. S. Pellini
ASTM E1921	(2017)	ASTM E1921-17a, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017
ASME Code Case N-631		Use of Fracture Toughness Test Data to Establish Reference Temperature for Pressure Retaining Materials, Other Than Bolting, Class 1 Vessels; Approval Date: 24. September 1999
ASME Code Case N-830		Direct Use of Master Fracture Toughness Curve for Pressure-Retaining Materials of Class 1 Vessels; Approval Date: 4. September 2014
ASME Code Case N-851		Alternative Method for Establishing the Reference Temperature for Pressure Retaining Materials; Approval Date: 5. November 2014
IAEA TRS 429		Guidelines for Application of the Master Curve Approach to Reactor Pressure Vessel Integrity in Nuclear Power Plants; Technical Reports Series No. 429, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005
US NRC Regulatory Guide 1.99		Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, Revision 2; Mai 1988

Literatur

- [1] M. A. Sokolov, R. K. Nanstad: Comparison of Irradiation-Induced Shifts of K_{Jc} and Charpy Impact Toughness for Reactor Pressure Vessel Steels (NUREG/CR-6609), Oak Ridge National Laboratory, November 2000
- [2] H. Hein, E. Keim, E. Bechler, P. Efsing, J. Ganswind, R. Knobel, G. König, P. Barreiro, M. Widera, A. de Jong: CARINA – A programme for experimental investigation of the irradiation behavior of German reactor pressure vessel materials, VGB PowerTech 5 (2013), S. 43-49
- [3] Erweiterung der Datenbasis für bruchmechanische Kennwerte bestrahlter deutscher RDB-Werkstoffe - Anwendung des Master-Curve-Konzeptes für Neutronenfluenzen im abdeckenden Bereich (CARINA), Abschlussbericht, RS-Vorhaben 1501357 des BMWi, AREVA NP GmbH, Erlangen, 30.09.2012
- [4] S.T. Rosinski, W.L. Server: Application of the Master Curve in the ASME Code, Int. Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000), S. 591-598
- [5] Kritische Überprüfung des Masterkurven-Ansatzes im Hinblick auf die Anwendung bei deutschen Kernkraftwerken, RS-Vorhaben 1501239 des BMWi, Fraunhofer IWM, Freiburg, 9.3.2005
- [6] Kritische Überprüfung des Masterkurve-Ansatzes im Hinblick auf die Anwendung bei deutschen Kernkraftwerken. Abschlussbericht, RS-Vorhaben Nr. 1501240 des BMWi, MPA Universität Stuttgart, Februar 2006
- [7] Anwendung des Master Curve-Konzepts zur Charakterisierung der Zähigkeit neutronenbestrahlter Reaktor-druckbehälterstähle, RS-Vorhaben 1501277 des BMWi, FZR Rossendorf, Dresden, Juli 2007
- [8] Ermittlung von Bruchmechanikkennwerten mittels vorbestrahlter Proben an Werkstoffen der deutschen DWR-Baulinien. Einordnung der Ergebnisse in das Master-Kurve-Konzept, RS-Vorhaben 1501284 des BMWi, AREVA NP GmbH, Erlangen, 30.9.2008
- [9] Verbesserung lokaler Spaltbruchmodelle unter Berücksichtigung mikromechanischer Vorgänge. Abschlussbericht, RS-Vorhaben 1501354 des BMWi, Fraunhofer IWM, Freiburg, 16.12.2011
- [10] W. Server, R. Cipolla: Direct Use of the Fracture Toughness Master Curve in ASME Code, Section XI, Applications, Proc. ASME 2013 PVP Conference, July 14-18, 2013, Paris, PVP2013-97210

Anhang B

Daten zur Herleitung und Kriterien zur Anwendung der RT_{Grenz} -Kurve

B 1 Allgemeines

(1) Die Auslegungskurven der KTA 3203 (3/84) [1] wurden auf der Basis der aus den 60er und frühen 70er Jahren vorhandenen Bestrahlungsergebnisse, die weitgehend aus den USA stammten, erstellt. Die Fertigungstechniken für die Grundwerkstoffe und die Schweißverbindungen haben in den darauffolgenden Jahren wesentliche Fortschritte gemacht, so dass die alten Bestrahlungsergebnisse für die heutigen und zukünftigen Kernkraftwerke nicht mehr unbedingt repräsentativ sind. In der Zeit seit Einführung der KTA 3203 hat sich bei der Bewertung der Ergebnisse aus den Bestrahlungsüberwachungsprogrammen gezeigt, dass die damals erstellten Auslegungskurven die Bestrahlungsreaktion in einigen Fällen überschätzt und in Einzelfällen unterschätzt haben [2], [3].

(2) Dieser Anhang zeigt Kriterien zur Bewertung der Ergebnisse der Bestrahlungsüberwachungsprogramme und zur Voraussage der Bestrahlungsreaktion zukünftiger Reaktordruckbehälter auf.

B 2 Grundsätzliches zur Auswertung der Ergebnisse

(1) Alle deutschen Kernkraftwerke besitzen ein Bestrahlungsüberwachungsprogramm, das Grundwerkstoff und Schweißgut des kernnahen Bereichs der Reaktordruckbehälterwand enthält. Für die meisten Kernkraftwerke liegen die Ergebnisse des unbestrahlten und des ersten bestrahlten Satzes vor, für viele Anlagen auch die des zweiten bestrahlten Satzes. Die damit vorhandenen Ergebnisse der Bestrahlungsüberwachungsprogramme der deutschen Kernkraftwerke wurden in zwei Berichten [4] und [5] detailliert dargestellt und in [6] bewertet. Die Mehrheit dieser Ergebnisse liegt in

einem Neutronenfluenzbereich von ca. $0,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ bis $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ($E > 1 \text{ MeV}$). Der anschließende Bereich bis ca. $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ($E > 1 \text{ MeV}$) ist durch Werte der Reaktordruckbehälter Obergiebel, Stade, und GKN 1 belegt.

(2) Bei bisherigen Auswertungen von Bestrahlungsergebnissen wurde eine quantifizierbare Abhängigkeit der Bestrahlungsreaktion von der chemischen Zusammensetzung oder anderen Werkstoff- oder/und Bestrahlungsparametern gesucht [2], [7]. Die Bestrahlungsreaktion wurde dabei gemäß Regelwerk z. B. [1], [8] als ein Verschiebungswert, z. B. ΔT_{41} , der gemittelten Ausgleichskurven der Kerbschlagenergie vom Ausgangszustand zum bestrahlten Zustand quantifiziert. Die Neufassung der Regel KTA 3203 zielt nicht auf die Verschiebungsgröße ab, sondern direkt auf RT_{NDTj} [1] bzw. RT_{TOj} [9], den Wert, der den aktuellen Zustand in Abhängigkeit von der Neutronenfluenz beschreibt und der in der Sicherheitsanalyse eines Reaktordruckbehälters für den zu betrachtenden Werkstoff heranzuziehen ist.

(3) In **Bild B-1** sind die experimentell ermittelten RT_{NDTj} - bzw. RT_{TOj} -Werte für Grundwerkstoffe und Schweißgüter im kernnahen Bereich der Reaktordruckbehälter der deutschen in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke mit Ausnahme der Schweißgüter der Reaktordruckbehälter von Obergiebel und Stade wiedergegeben. Diese wurden ausselektiert, da sie einen gegenüber allen anderen Schweißgütern deutlich höheren Kupferanteil besitzen. Herangezogen wurden die RT_{NDTj} - bzw. RT_{TOj} -Werte, die bei der jeweiligen Genehmigungsbehörde als Ergebnis des Bestrahlungsüberwachungsprogrammes eingereicht wurden. Für Werkstoffe mit einem Massenanteil von Nickel über 1,1 % liegen Werte nur bis zu einer Neutronenfluenz von $\Phi = 6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, ($E > 1 \text{ MeV}$) vor.

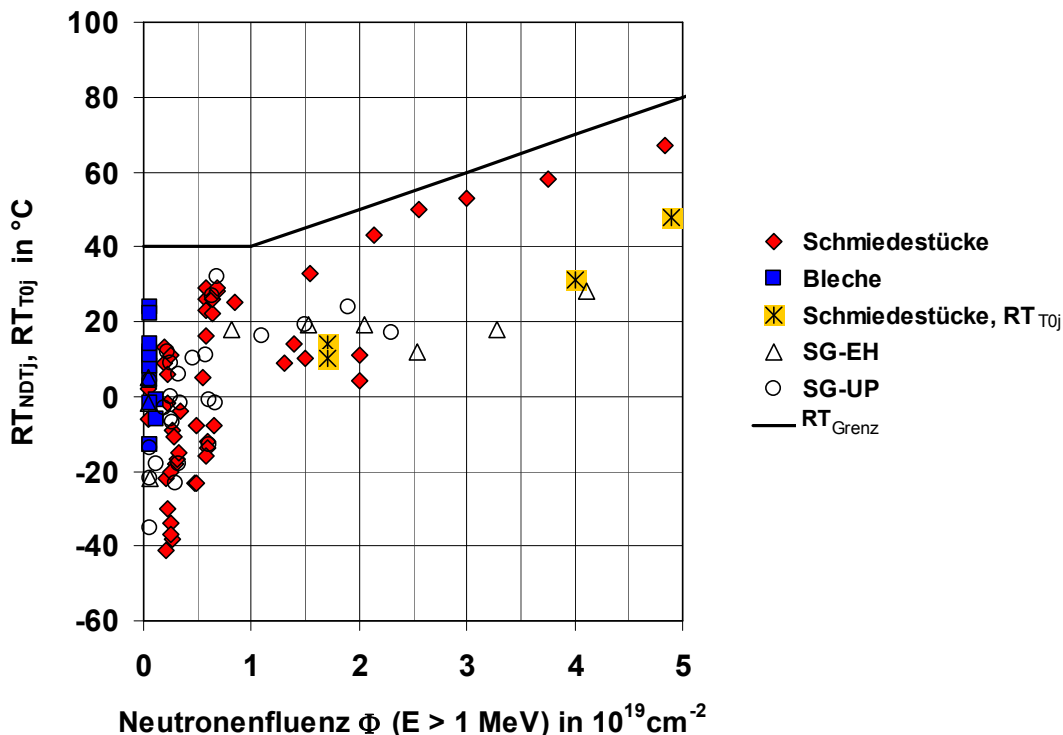


Bild B-1: RT_{NDTj} , RT_{TOj} als Funktion der Neutronenfluenz, Grundwerkstoff- und Schweißgutergebnisse der Bestrahlungsüberwachungsprogramme der deutschen RDB (SWR und DWR); nur Schweißgüter mit Massenanteilen $\text{Cu} \leq 0,15 \%$ und $0,05 \% < \text{Ni} \leq 1,7 \%$.

Die Definition

$$RT_{NDT_j} = RT_{NDT} + \Delta T_{41} \quad (B-1)$$

wurde gemäß [1] verwendet. Zur Festlegung von RT_{T_0j} wurde der an bestrahlten Bruchmechanikproben gemäß ASTM E1921 direkt ermittelte T_0 – Wert entsprechend ASME Code Case [9] zugrunde gelegt (der Index j wurde hier analog zu RT_{NDT_j} für den jeweiligen bestrahlten Zustand angehängt)

$$RT_{T_0j} = T_{0j} + 19 \text{ K} \quad (B-2)$$

B 3 Einflüsse der Legierungs- und Begleitelemente

(1) Die Bestrahlungsreaktion wird neben der Fluenz noch von einer Reihe von Parametern beeinflusst. Nach heutigem Stand der Wissenschaft ist ein Einfluss für einige Legierungs- und Begleitelemente der Reaktordruckbehälter-Werkstoffe zumindest qualitativ gesichert. Dazu zählen Kupfer, Nickel und Phosphor, was sich in den Regelwerken, die sich mit dem Bestrahlungsverhalten befassen, nieder schlägt.

(2) Massenanteile von Kupfer größer als 0,18 % kamen in der Vergangenheit in Deutschland nur bei den Schweißverbindungen vor, für die badverkupferte Schweißdrähte verwendet wurden. Seit der negative Einfluss auf das Bestrahlungsverhalten bekannt ist, wurden über die Werkstoffspezifikationen niedrige Kupferanteile für die Grundwerkstoffe und Schweißverbindungen sichergestellt.

(3) Auswirkungen des Nickelanteils auf die Bestrahlungsreaktion wurden erst relativ spät erkannt, werden inzwischen aber ebenfalls weltweit bestätigt und in internationalen Regelwerken, wie z. B. dem Reg. Guide 1.99 Rev. 2 [8], auch berücksichtigt. Nickel ist ein Legierungsbestandteil aller in Deutschland eingesetzten Grundwerkstoffe und der meisten

Schweißgüter im kernnahen Bereich der Reaktordruckbehälter. Massenanteile von Nickel von ca. 0,7 % bis 1 % sind mit den deutschen Bestrahlungsergebnissen statistisch abgesichert. Massenanteile bis 1,7 % wurden in der Vergangenheit einigen Schweißgütern zur Steigerung der Zähigkeit zulegiert. Die dadurch merklich verstärkte Bestrahlungsreaktion wird durch die günstigeren RT_{NDT} -Werte im Ausgangszustand im Bereich von Neutronenfluenzen bis ca. $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ($E > 1 \text{ MeV}$), für die Werte aus deutschen Kernkraftwerken vorliegen, wieder kompensiert.

(4) Ein Phosphoreinfluss wird ebenfalls weltweit anerkannt. Bei den bei Werkstoffen im kernnahen Bereich der deutschen Reaktordruckbehälter vorhandenen Unterschieden im Phosphoranteil wurde keine quantifizierbare Differenzierung bezüglich dieses Begleitelements festgestellt.

(5) Für einige weitere Elemente kann eine Beeinflussung der Bestrahlungsreaktion nicht ausreichend differenziert werden [10]. Allgemein anerkannte Bewertungen liegen daher für diese Elemente nicht vor. Solche Einflüsse sind jedoch in den ausgewerteten Bestrahlungsergebnissen mit erfasst.

B 4 Erfasster Bereich und abgesicherter Bereich

(1) **Bild B-2** zeigt die Massenanteile von Kupfer- und Nickel der Werkstoffe aus **Bild B-1**. Aus Bild B-2 geht hervor, dass Kupferanteile von 0,03 % bis 0,15 % in statistisch ausreichender Belegung vorliegen. Da der Einfluss von Kupfer und Nickel auf die Bestrahlungsreaktion, soweit bisher quantifizierbar, mit dem Massenanteil steigt, sind damit auch niedrigere Anteile zumindest bei Kupfer mit abgedeckt. Eine deutliche Absenkung des Nickelanteiles führt zu anderen Werkstoffen, mit u.U. anderen mechanisch-technologischen Eigenschaften.

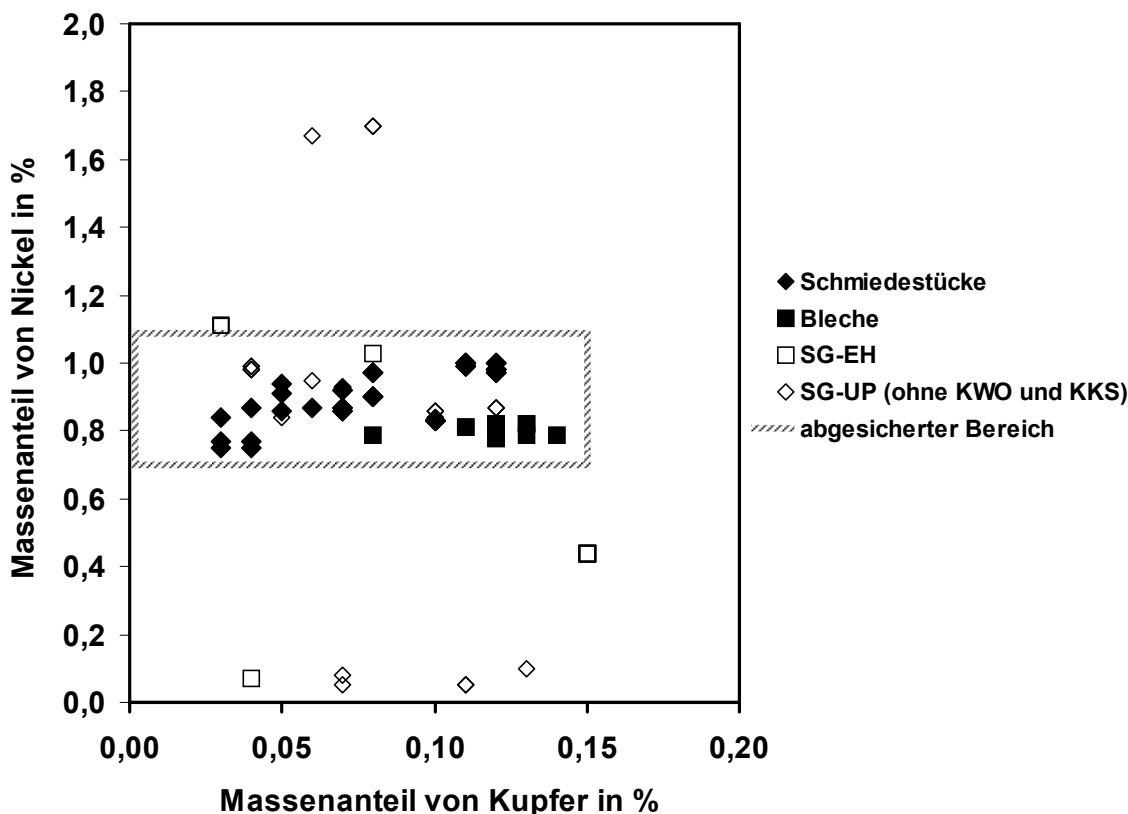


Bild B-2: Bereich der Massenanteile von Kupfer und Nickel, der durch Ergebnisse aus den RDB Bestrahlungsüberwachungsprogrammen abgedeckt ist

(2) Es zeichnet sich ab, dass niedrigere Massenanteile von Nickel ($Ni < 0,7 \%$) in **Bild B-1** keine Auffälligkeiten zeigen. Die bekannt stärkere Bestrahlungsreaktion durch hohe Nickelanteile ($Ni = 1,7 \%$) wird durch die günstigeren RT_{NDTj} -Werte im Ausgangszustand im Bereich von Neutronenfluenzen bis ca. $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ($E > 1 \text{ MeV}$), für die Werte aus deutschen Kernkraftwerken vorliegen, wieder kompensiert. Dadurch liegen auch diese Schweißgüter unterhalb der RT_{Grenz} gemäß **Bild B-1**. Da aber keine ausreichende statistische Belegung vorliegt, wird der abgesicherte Bereich bei einem Massenanteil von Nickel in Höhe von $1,1 \%$ eingegrenzt. Der sich so ergebende abgesicherte Bereich ist in **Bild B-2** gekennzeichnet.

B 5 RT_{Grenz} -Kurve

B 5.1 Anwendungsbereich der RT_{Grenz} -Kurve

(1) Der Anwendungsbereich der RT_{Grenz} -Kurve (RT_{Grenz}) ergibt sich aus dem Spezifikationsbereich, den die Werkstoffe der Ergebnisauswertung repräsentieren. Speziell muss der Massenanteil von Kupfer und Nickel berücksichtigt werden, aber auch die Werkstoffherstellung und Wärmebehandlung müssen entsprechend sein, was durch die spezifizierten Werte für Festigkeit und Zähigkeit entsprechend KTA 3201.1 und KTA 3201.3 sichergestellt wird und bei der Abnahme nachzuweisen ist.

(2) Die deutschen Reaktordruckbehälter, die nicht entsprechend KTA 3201.1 und KTA 3201.3 gefertigt wurden, erfüllen dennoch die wesentlichen Festigkeits- und Zähigkeitsanforderungen, z. B. der Schlagenergie an Querproben in der Hochlage; weshalb die in **Bild B-1** angegebene RT_{Grenz} -Kurve auch diese Werkstoffe einschließt. Darüber hinaus dürfen folgende Grenzen für die Massenanteile von Kupfer und Nickel nicht überschritten sein:

$$\begin{aligned} Cu &\leq 0,15 \% \\ Ni &\leq 1,1 \% \end{aligned}$$

Bei Massenanteilen von Nickel größer als $1,1 \%$ und kleiner als oder gleich $1,7 \%$ gilt die RT_{Grenz} -Kurve bis zu Neutronenfluenzen von $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ($E > 1 \text{ MeV}$).

(3) Zusätzlich muss sichergestellt sein, dass die Parameter Neutronenspektrum und Bestrahlungstemperatur vergleichbar sind. Da die Bestrahlungstemperatur für DWR und SWR unterschiedlich ist, kann der Temperaturbereich von

$$\text{ca. } 275 \text{ }^\circ\text{C} < T < \text{ca. } 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

als abgesichert angesehen werden.

(4) Eine Überprüfung von ausländischen Bestrahlungsdaten [11], [12], [13] hat ergeben, dass die RT_{NDTj} -Werte derjenigen Werkstoffe, welche die vorher definierten Anwendungsbedingungen erfüllen, ebenfalls durch die RT_{Grenz} abgedeckt sind [6].

B 5.2 Festlegung der RT_{Grenz}

(1) **Bild B-1** zeigt, dass alle RT_{NDTj} -Werte der deutschen Reaktordruckbehälter, unabhängig ob SWR oder DWR, Schmiedeteil oder Blech, 22 NiMoCr 3 7 oder 20 MnMoNi 5 5 und alle Schweißgüter mit Massenanteilen von Kupfer kleiner als oder gleich $0,15 \%$ unter einer Grenzwertlinie liegen. Die so definierte RT_{Grenz} gibt **Bild 3-1** wieder.

(2) Die RT_{Grenz} kann formelmäßig dargestellt werden als:

$$RT_{Grenz} = 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{für } 0 < \Phi < 10^{19}$$

$$RT_{Grenz} = \left(\frac{\Phi}{10^{18} \text{ cm}^{-2}} + 30 \right) \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{für } \Phi > 10^{19}$$

mit der Neutronenfluenz Φ in cm^{-2} ($E > 1 \text{ MeV}$).

Referenzen

- [1] Sicherheitstechnische Regel des KTA, Überwachung der Strahlenversprödung von Werkstoffen des Reaktordruckbehälters von Leichtwasserreaktoren, KTA 3203, Fassung 03/84
- [2] B. Kastner, R. Langer, J. Schmidt „Results of German Irradiation Surveillance Programs in the Light of International Codes“, Proceedings of „The Fifth International Conference on Material Issues in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment“ 7.-14. June 1998, St. Petersburg
- [3] Langer, R., A. Ballesteros, M. G. Horsten, A. M. Kryukov „Results of Irradiation Surveillance Programs of the Netherlands, Spain, the Russian Federation and Germany and the Comparison with the Predictions According to the National Codes“, SFEN 14 - 18 Sept. 1998, Fontevraud
- [4] Kastner, B., R. Langer „Statusbericht zum Bestrahlungsverhalten der Werkstoffe des RDB Core-Bereichs von SWR-Anlagen“, Siemens Arbeitsbericht KWU NT13/97/068a vom 6.8.98
- [5] Kastner, B., R. Langer „Statusbericht zum Bestrahlungsverhalten der Werkstoffe des RDB Core-Bereichs von DWR-Anlagen“, Siemens Arbeitsbericht KWU NT13/98/023 vom 8.4.98
- [6] Langer, R. B. Kastner, R. Bartsch „Referenzunterlage zur Änderung der KTA 3203 Auswertungen zur Festlegung einer $RT_{NDTj, Grenz}$ “, Siemens Arbeitsbericht KWU NT1/2000/071 vom 17.03.2000
- [7] Eason, E.D., G.R. Odette „Improved Embrittlement Correlations for Reactor Pressure Vessel Steels“, NUREG/CR-6551, MCS 970501, Nov.1998
- [8] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.99 (TASK ME 305-4) "Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials", Revision 2, May 1988
- [9] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Code Case N-629, 1998 Edition
- [10] Wang, J. A. "Development of Embrittlement Prediction Models for U.S. Power Reactors and the Impact of Heat-Affected Zone to Thermal Annealing", ASTM STP 1325, 1999
- [11] Reactor Vessel Integrity (RVID) Data Base, Internet unter <http://www.nrc.gov/NRR/RVID/index.html> (Abrufzeitraum Jan. 2000)
- [12] 3. Irradiated Nuclear Pressure Vessel Steel Data Base, EPRI Report NP- 2428, Project 1240-1, Topical Report, June 1982
- [13] Ch. Brillaud, F. Hedin, „In- service Evaluation of French Pressurized Water Reactor Vessel Steel“, ASTM STP 1125 (1992), pp. 23-49

Abbildungen

Bild B-1: RT_{NDTj} , RT_{Toj} als Funktion der Neutronenfluenz, Grundwerkstoff- und Schweißgüterergebnisse der Bestrahlungsüberwachungsprogramme der deutschen RDB (SWR und DWR); nur Schweißgüter mit Massenanteilen $Cu \leq 0,15 \%$ und $0,05 \% < Ni \leq 1,7 \%$.

Bild B-2: Bereich der Massenanteile von Kupfer und Nickel, der durch Ergebnisse aus den RDB Bestrahlungsüberwachungsprogrammen abgedeckt ist

Anhang C (informativ)

Änderungen gegenüber der Fassung 2001-06 und Erläuterungen

- (1) Der Abschnitt „Grundlagen“ wurde im Absatz 1 an die für alle KTA-Regeln einheitliche Form angepasst und im Absatz 2 um Vorgaben aus den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) sowie den „Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ ergänzt.
- (2) Durch Ergänzungen im Absatz 4 des Abschnitts „Grundlagen“, im Abschnitt 3.1 und im Abschnitt 5.3 wurden die Ziele des Bestrahlungsprogramms präzisiert.
- (3) Im Abschnitt 2 „Begriffe“ wurden folgende Ergänzungen vorgenommen:
- Es wurden Begriffsbestimmungen zur Referenztemperatur des Masterkurven-Konzepts ergänzt, die in Verbindung mit den Ergänzungen in den Abschnitten 6.4.1, 6.4.3 und 6.4.4 das grundsätzliche Vorgehen bei Anwendung des Masterkurven-Konzepts übereinstimmend mit KTA 3201.2 (2013-11) regeln. Detailregelungen bei Anwendung des Masterkurven-Konzepts werden im aufsichtlichen Verfahren getroffen.
 - Es wurde eine Begriffsbestimmung des „Sachverständigen“ übereinstimmend mit den aktuellen Regeln des KTA ergänzt.
- (4) In den Abschnitten 3.1 und 3.2 wurden Festlegungen zur Verwendung der Referenztemperatur nach dem Masterkurven-Konzept sowie zu dem in diesen Fällen erforderlichen Probenumfang ergänzt.
- (5) Mit dem heutigen guten Kenntnisstand ist der Einfluss der Neutronenbestrahlung auf die Festigkeitseigenschaften für Werkstoffe im abgesicherten Legierungsbereich von Bild B-2 bei begrenzten Fluenzen bis $1 \times 10^{19}/\text{cm}^2$ ausreichend bekannt. Deshalb wurde im Abschnitt 3.2 (4) sowie mit der Fußnote 1 in Tabelle 3-1 und der Fußnote 2 in Tabelle 3-3 und der daraus folgenden Anpassung im Abschnitt 6.4.1 a) ergänzt, dass bestrahlte Zugproben in diesem definierten Geltungsbereich nicht erforderlich sind. Dieser Geltungsbereich entspricht dem konstanten Bereich der RT_{Grenz} von 40 °C im Bild 3-1. Zusätzlich erfolgte im Hinweis zu 3.2 (4) die Angabe eines Orientierungswerts für die Erhöhung der Streckgrenze.
- (6) Im neuen Absatz 3.2 (5) und mit den Tabellen 3-2 und 3-5 wurde klargestellt, dass im Falle der direkten RT_{T0} -Bestimmung mit bestrahlten Proben nach ASTM E 1921 Ergebnisse bestrahlter Zugproben zur Parameterfestlegung für die Bruchmechanikversuche benötigt werden.
- (7) In Abschnitt 4.5 (2) wurde präzisiert, dass es sich bei den angegebenen Neutronenfluenzen um „anzustrebende Zielfluenzen“ der Bestrahlungsproben handelt.
- (8) Im Abschnitt 6.1 (2) wurde durch Aufnahme eines Hinweises klargestellt, dass mit Ausnahme der Neutronenflussdetektoren (Abschnitt 6.3) eine Prüfung der Proben zu einem späteren Zeitpunkt als nach Ablauf eines Jahrs bei geeigneter Lagerung zu keiner Verringerung der technischen Aussagegenauigkeit führt.
- (9) Im Abschnitt 6.4.4 (2) wurde die für $RT_{\text{NDT},j}$, $RT_{\text{T0},j}$ und RT_{T0} zutreffende und deshalb ohne Index formulierte Potenzfunktion für RT korrigiert. Außerdem wurde neu aufgenommen, dass für die deutschen RDB-Werkstoffe eine qualifizierte Extrapolation der Werte des ersten bestrahlten Probensatzes bis zur Zielfluenz des zweiten bestrahlten Probensatzes unter Verwendung des Reg. Guide 1.99 Rev. 2, Position 1 (auf Basis von Cu- und Ni-Gehalt) erlaubt wird, solange die Ergebnisse des zweiten bestrahlten Probensatzes nicht vorliegen.
- (10) Die Anforderungen in den Abschnitten 6.4.4 (6) und (7) für den Fall von Abweichungen wurden ergänzt und präzisiert.
- (11) Im Abschnitt 7 wurde die Aufbewahrungszeit des Probenmaterials präzisiert.
- (12) Die gesamte Regel wurde an den aktuellen Stand der Normen angepasst, wobei auch eine Anpassung der Begriffe an die aktuellen Normen erfolgte.
- (13) An mehreren Stellen wurden redaktionelle Änderungen vorgenommen.
- (14) Die normativen Verweise im Anhang A wurden aktualisiert und ergänzt.