

**KTA 3203**

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

**Fassung 6/01**

Frühere Fassung der Regel: 3/84 (BAnz. Nr. 119a vom 29. Juni 1984)

**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 .....	4
4.1 Bestrahlungsplan .....	4
4.2 Anforderungen an die Aufnahmebehälter für die Probensätze .....	4
4.3 Lage der Aufnahmebehälter im Reaktordruckbehälter .....	4
4.4 Anzahl der Probensätze .....	4
4.5 Zeitpunkte des Einsatzes und der Entnahme von Probensätzen .....	4
5 Werkstoffauswahl für Bestrahlungsproben .....	4
5.1 Auswahlkriterien .....	4
5.2 Prüfstück .....	4
5.3 Proben und Reservematerial .....	4
5.4 Probenlage und Probenentnahmeorte .....	5
6 Prüfung und Auswertung .....	5
6.1 Allgemeines .....	5
6.2 Bestrahlungstemperatur .....	5
6.3 Bestimmung der Neutronenfluenz .....	6
6.4 Mechanisch-technologische Prüfungen .....	6
7 Probenaufbewahrung .....	7
8 Dokumentation .....	7
Anhang A: Bestimmungen, auf die in dieser Regel verwiesen wird .....	8
Anhang B: Daten zur Herleitung und Kriterien zur Anwendung der $RT_{\text{Grenz}}$ -Kurve .....	9
Anhang C: Änderungen gegenüber der Fassung 3/84 und Erläuterungen (informativ) .....	12
Stichwortverzeichnis .....	12

## Grundlagen

(1) Die Regeln des 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 getroffen ist (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz), um die im Atomgesetz und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten sowie in den „Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke“ und den „Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 StrlSchV - Störfall-Leitlinien -“ weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) In den Sicherheitskriterien wird im Kriterium 1.1 „Grundsätze der Sicherheitsvorsorge“ unter anderem eine umfassende Qualitätssicherung bei Fertigung und Errichtung, im Kriterium 2.1 „Qualitätsgewährleistung“ des weiteren die Anwendung, Aufstellung und Einhaltung von Auslegungs-, Werkstoff-, Bau-, Prüf-, und Betriebsvorschriften sowie die Dokumentation der Qualitätsüberwachung gefordert. Im Kriterium 4.1 „Druckführende Umschließung des Reaktorkühlmittels“ wird unter anderem die Grundsatzforderung gestellt, dass gefährliche Leckagen, rasch fortschreitende Risse und spröde Brüche nach dem Stand von Wissenschaft und Technik ausgeschlossen sein müssen. Die Regel KTA 3203 dient zur Konkretisierung von Maßnahmen zur Erfüllung dieser Forderungen im Rahmen ihres Anwendungsbereichs. Für die Komponenten des Primärkreises werden die Forderungen der genannten Sicherheitskriterien 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

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:

- die Durchführung und Auswertung von Bestrahlungsprogrammen,
- die Bestimmung der Neutronenfluenz,
- die Bestimmung der Bestrahlungstemperatur,
- die Probenaufbewahrung,
- 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.

## 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 ( $RT_{\text{Grenz}}$ )

Der Grenzwert der Referenztemperatur ( $RT_{\text{Grenz}}$ ) 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 vorausgerechneten 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 ( $\Phi$ )

Die Neutronenfluenz ist die über die Bestrahlungszeit integrierte Neutronenflussdichte.

(7) Neutronenflussdichte ( $\phi$ )

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 ( $RT_{\text{NDT}}$ )

Die Referenztemperatur ist durch die folgenden Maßnahmen definiert:

- Festlegung einer Temperatur  $T_{\text{NDT}}$ , welche gleich oder höher ist als die NDT-Temperatur, festgestellt mit Hilfe von Fallgewichtsversuchen.
- Bei einer Temperatur nicht größer als  $T_{\text{NDT}} + 33$  K soll jede Probe aus dem Kerbschlagbiegeversuch (Charpy-V-Querproben) mindestens 0,9 mm laterale Breitung und nicht weniger als 68 J Kerbschlagarbeit aufweisen. Sind diese Anforderungen erfüllt, ist die  $T_{\text{NDT}}$  die  $RT_{\text{NDT}}$ .
- Für den Fall, dass die oben genannten Forderungen nicht erfüllt sind, sind zusätzlich Kerbschlagbiegeprüfungen (Charpy-V-Querproben) durchzuführen, in Sätzen von jeweils drei Proben, um die Temperatur  $T_{\text{KV}}$  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  $RT_{\text{NDT}}$  die höhere Temperatur von  $T_{\text{NDT}}$  und  $T_{\text{KV}} - 33$  K.
- 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 Kerbschlagarbeit von 68 J und der lateralen Breitung von 0,9 mm vorhanden ist, aus der Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve und der Breitung-Temperatur-Kurve ermittelt werden, die aus den unteren Werten aller Proben gebildet werden.

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

Die für den bestrahlten Zustand justierte Referenztemperatur ergibt sich aus der Referenztemperatur, erhöht um den Betrag der Übergangstemperatur-Verschiebung  $\Delta T_{41}$  als:  $RT_{NDTj} = RT_{NDT} + \Delta T_{41}$ .

## (11) Sachverständige

Sachverständige sind die von der Genehmigungs- oder Aufsichtsbehörde benannten oder zugezogenen Personen. Sofern im Einzelfall nicht anders vermerkt, ist in dieser Regel der Sachverständige nach § 20 AtG gemeint.

(12) Übergangstemperatur-Verschiebung ( $\Delta T_{41}$ )

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

### 3 Allgemeine Grundsätze

#### 3.1 Zweck des Bestrahlungsprogramms

Zur experimentellen Überprüfung der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften des Reaktordruckbehälters bei der Nachweisfluenz sind Proben aus den ferritischen Originalwerkstoffen voreilend im Reaktordruckbehälter zu bestrahlen. Die Festlegung der Lage der Bruchzähigkeitskurve ist entweder

a) indirekt nach dem  $RT_{NDT}$ -Konzept durch vergleichende Untersuchungen der voreilend bestrahlten und von nicht bestrahlten Kerbschlagproben

oder

b) direkt nach dem Bruchmechanikkonzept durch Untersuchung von bestrahlten Bruchmechanikproben (z.B. Ermittlung von  $T_0$  nach ASTM E 1921-97)

durchzuführen.

#### 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. Diese  $RT_{Grenz}$  ist mit  $RT_{NDTj}$  als Ergebnis eines Bestrahlungsprogramms entsprechend **Tabelle 3-1** zu verifizieren. Die ermittelte  $RT_{NDTj}$  darf dem Sprödbruchsicherheitsnachweis 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. Diese  $RT_{Grenz}$  ist mit  $RT_{NDTj}$  als Ergebnis eines Bestrahlungsprogramms entsprechend **Tabelle 3-2** zu verifizieren. Die ermittelte  $RT_{NDTj}$  darf dem Sprödbruchsicherheitsnachweis zugrunde gelegt werden.

(4) 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.	Charpy-V-Proben		Zugproben		Entnahme-zeitpunkte
	GW	SG	GW	SG	
1	12	12	3	3	unbestrahlt
2	12	12	3	3	≈ 50 % NWF
3	12	12	3	3	≥ 100 % NWF

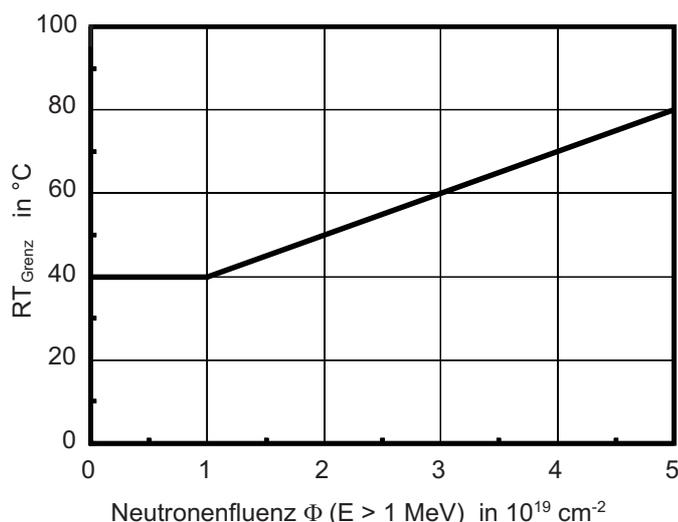
GW : Grundwerkstoff  
SG : Schweißgut  
NWF : Nachweisfluenz

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

Proben-satz-Nr.	Charpy-V-Proben			Zugproben			Entnahme-zeitpunkte
	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 3-2:** Probenumfang für Nachweisfluenzen größer als  $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$  bei Neutronenenergien  $E > 1 \text{ MeV}$



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)

## 4 Bestrahlungsprogramm

### 4.1 Bestrahlungsplan

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

- a) Beschreibung der Werkstoffe des kernnahen Bereiches (chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlungen, Ergebnisse der Abnahmeprüfungen) und welche Werkstoffe in das Bestrahlungsprogramm einbezogen werden,
- b) Werkstoffprüf- und Probenentnahmeplan,
- c) Vorgesehene Position der Probensätze im Reaktordruckbehälter,
- d) Berechnete Fluenz für die ferritische Innenwand des Reaktordruckbehälters (Maximalwert sowie die axiale und azimutale Verteilung) und deren Verlauf über die Wanddicke,
- e) Fluenzvorfaktor der Bestrahlungsproben,
- f) Anzahl und Art der Detektoren für die Neutronenfluenzbestimmung und der Monitoren für die Temperaturbestimmung,
- g) Anordnung der einzelnen Proben, Neutronenfluenzdetektoren und Temperaturmonitoren,
- h) Herstellungsdokumentation der Arbeitsprobe oder Schweißprobe,
- i) Angaben zum Aufnahmebehälter (Werkstoffe, Herstellung, Prüfungen),
- k) Beteiligung des Sachverständigen.

(2) Der Bestrahlungsplan ist vor Beginn der Herstellung der Proben dem Sachverständigen 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 dem Sachverständigen 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 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 12.2.2.2 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 **Tabelle 3-1**) oder die beiden benachbarten Grundwerkstoffe und das Schweißgut (siehe **Tabelle 3-2**) 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, außer zum Nachweis der mechanisch-technologischen Eigenschaften vor und nach der Bestrahlung der nach Abschnitt 4.4 zu wählenden 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 2,0 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 Bestrahlungsplan festzuhalten.

### 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 Wärmebehandlung begradigten Kanten liegen. Die Probenentnahmeorte in Blechen müssen um mindestens 1/4 der Vergütungswanddicke unter der Walzoberfläche und um mindestens die Hälfte der Vergütungswanddicke unter der Stirnfläche von den zur Wärmebehandlung begradigten 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 Schweißnahtoberfläche 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

(1) Prüfungen und Auswertungen sollen in zertifizierten Prüflabors erfolgen.

(2) Die Prüfungen an den bestrahlten Proben sollen innerhalb eines Jahres nach der Entnahme durchgeführt werden.

(3) 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

(1) Die für die Auswertung maßgebliche Bestrahlungstemperatur ist aus der Kühlmitteltemperatur und der Gamma-Aufheizung zu ermitteln.

(2) Durch geeignete experimentelle oder rechnerische Verfahren ist die durch Absorption von Gammastrahlung bewirkte Erhöhung der Temperatur der Proben gegenüber der Kühlmitteltemperatur zu bestimmen.

(3) 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

(1) Zur Bestimmung einer oberen Temperaturgrenze sind Temperaturmonitoren in die Probensätze einzusetzen. Es dürfen z.B. die in **Tabelle 6-1** aufgeführten Temperaturmonitoren verwendet werden.

(2) 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

(1) Zur Ermittlung der während der Bestrahlung in den Proben auftretenden Neutronenfluenzen und zur Berechnung des Fluenzvorfaktors sind Neutronenfeldgrößen zu bestimmen.

(2) 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.

(3) 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.

(4) Die Fluenzberechnung ist mit dem Ergebnis der Auswertung der Detektoren zu vergleichen.

(5) Die Auswertung der Detektoren hat nach DIN 25 456-1 zu erfolgen.

#### 6.3.2 Auswahl der Neutronendetektoren

(1) 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 25 456-2	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
Niob nach DIN 25 456-4	$^{93}\text{Nb}(n,n')^{93}\text{Nb}^m$
Kobalt <sup>1)</sup>	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$

<sup>1)</sup> 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

(1) 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 bestrahlte Probensätze zur Bestimmung der Streckgrenze  $R_{eH}$  oder Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , Zugfestigkeit  $R_m$ , Bruchdehnung  $A_5$  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 wegen des Ausheileffektes nicht überschritten werden.
- Kerbschlagproben (Charpy-V-Proben) für unbestrahlte und bestrahlte Probensätze zur Ermittlung der vollständigen Kerbschlagarbeit-Temperaturkurven einschließlich Breitung und Zähbruchanteil von der Tieflage, gekennzeichnet durch einen duktilen Anteil von  $< 5\%$  der Bruchfläche, bis annähernd zu der Temperatur, die der langzeitigen Bestrahlungstemperatur der Proben entspricht.

#### 6.4.2 Prüfdurchführung

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

(2) Der Zugversuch ist nach DIN EN 10 002-1 und DIN EN 10 002-5 mit einer Probenform nach DIN 50 125 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 10 045-1 instrumentiert an Charpy-V-Proben 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 E 1921-97 durchgeführt werden.

#### 6.4.3 Bestimmung und Bewertung der Werkstoffkennwerte

(1) Folgende Werkstoffkennwerte sind zu bestimmen:

- Streckgrenze  $R_{eH}$  oder Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , Zugfestigkeit  $R_m$ , Bruchdehnung  $A_5$  und Brucheinschnürung  $Z$  sowie Gleichmaßdehnung  $A_g$  für Raumtemperatur und 150 °C sowie bei der Temperatur, die der langzeitigen Bestrahlungstemperatur der Proben entspricht,
- Verschiebung der Übergangstemperatur aus gemittelten Ausgleichskurven bei einer Kerbschlagarbeit von 41 J ( $\Delta T_{41}$ ),
- justierte Referenztemperatur ( $RT_{NDTj}$ ) aus  $RT_{NDT} + \Delta T_{41}$ .

(2) Die ermittelte Referenztemperatur  $RT_{NDTj}$  ist mit dem Wert  $RT_{Grenz}$  des betreffenden Reaktors zu vergleichen. Bei Vorliegen von Werten aus 2 Bestrahlungssätzen darf zur Nachweisfluenz hin inter- oder extrapoliert werden. Für die Inter- und Extrapolation ist jede geeignete Funktion zugelassen, wobei vorzugsweise die Potenzfunktion  $RT_{NDTj} = A \cdot \Phi^n$  zu verwenden ist. Bei Vorliegen von Werten aus nur einem Bestrahlungssatz ist eine Extrapolation nicht zugelassen.

(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
- $RT_{NDTj} \leq RT_{Grenz}$
  - die Hochlage der Kerbschlagarbeit, gekennzeichnet durch einen duktilen Anteil größer als 95 % der Bruchfläche, den Wert 68 J (Einzelwert) nicht unterschreitet.
- (5) Ergeben sich mit zunehmender Neutronenfluenz niedrigere Werte für  $RT_{NDTj}$ , so ist der höchste ermittelte Wert für  $RT_{NDTj}$  für den Nachweis  $RT_{NDTj} \leq RT_{Grenz}$  zu verwenden.
- (6) Sofern die ermittelte Referenztemperatur  $RT_{NDTj}$  den Wert  $RT_{Grenz}$  überschreitet, ist die Sicherheit für den Reaktor-druckbehälter erforderlichenfalls anderweitig nachzuweisen.
- (7) Sofern die Hochlage der Kerbschlagarbeit 68 J (Einzelwert) unterschreitet, ist die Sicherheit erforderlichenfalls anderweitig nachzuweisen.

## 7 Probenaufbewahrung

Alle geprüften und nicht geprüften Proben sowie das Reservematerial sind aufzubewahren.

## 8 Dokumentation

- Die Dokumentation muss eine lückenlose Rückverfolgung der Probengeschichte von der Herstellung bis zur Auswertung der Proben und der Prüfungen nach Bestrahlung erlauben.
- Die Prüfergebnisse vor und nach Bestrahlung sind zu dokumentieren.
- 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.
- Die zu dokumentierenden Unterlagen sind in übersichtlicher Form mit einem vorgeschalteten Inhaltsverzeichnis zusammenzustellen.

## Anhang A

### Bestimmungen, 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 Gesetz vom 5. März 2001 (BGBl. I S. 326)
KTA 3201.1	(06/98)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen
KTA 3201.2	(06/96)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
KTA 3201.3	(06/98)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 3: Herstellung
KTA 3201.4	(06/99)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung
DIN EN 10 002-1	(04/91)	Metallische Werkstoffe; Zugversuch; Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur; enthält Änderung AC 1:1990; Deutsche Fassung EN 10002-1:1990 und AC 1:1990
DIN EN 10 002-5	(02/92)	Metallische Werkstoffe; Zugversuch; Teil 5: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur; Deutsche Fassung EN 10002-5:1991
DIN EN 10 045-1	(04/91)	Metallische Werkstoffe; Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy; Teil 1: Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 10 045-1:1990
DIN 25 456-1	(10/99)	Neutronenflussmessung – Teil 1: Bestimmung der Fluenz schneller Neutronen mit Aktivierungs- und Spaltdetektoren
DIN 25 456-2	(10/99)	Neutronenflussmessung – Teil 2: Bestimmung der Fluenz schneller Neutronen mit Eisen-Aktivierungsdetektoren
DIN 25 456-4	(10/99)	Neutronenflussmessung – Teil 4: Bestimmung der Fluenz schneller Neutronen mit Niob-Aktivierungsdetektoren
DIN 50 125	(04/91)	Prüfung metallischer Werkstoffe; Zugproben
SEP 1325	(12/82)	Fallgewichtsversuch nach W. S. Pellini
ASTM E 1921-97		Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range

## Anhang B

Daten zur Herleitung und Kriterien zur Anwendung der  $RT_{\text{Grenz}}$ -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.

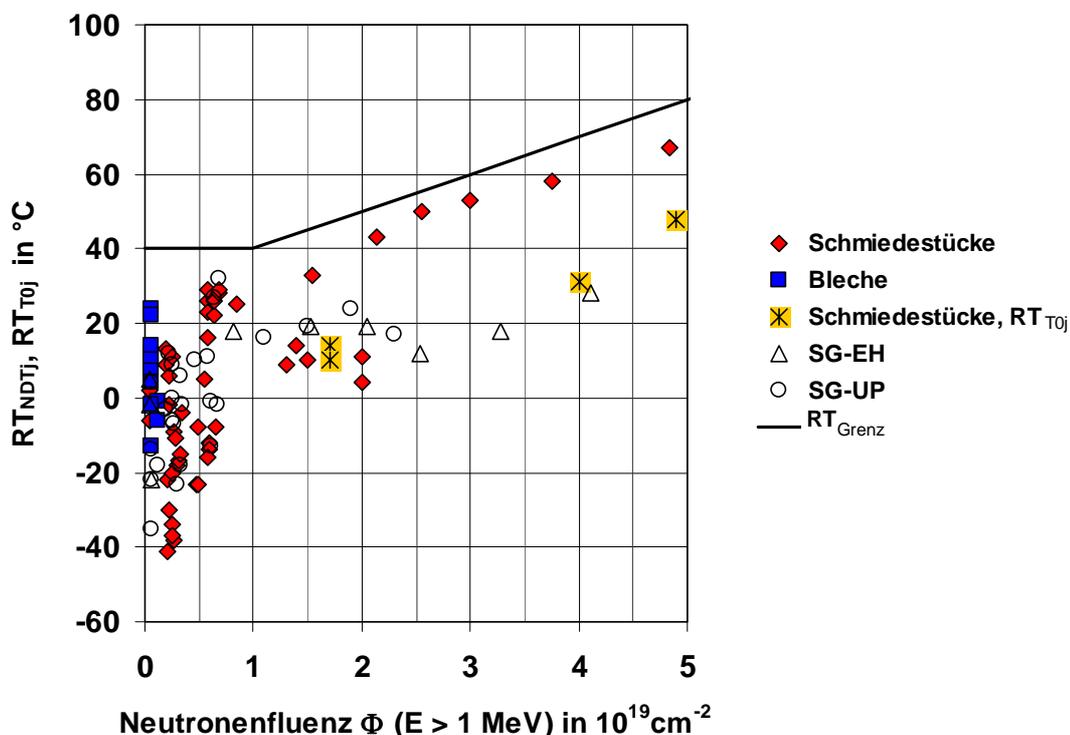
## B 2 Grundsätzliches zur Auswertung der Ergebnisse

(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 Neutronenflussbereich 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 Obrigheim, 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.  $\Delta T_{41}$ , 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  $RT_{\text{NDTj}}$  [1] bzw.  $RT_{\text{Toj}}$  [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  $RT_{\text{NDTj}}$ - bzw.  $RT_{\text{Toj}}$ -Werte für Grundwerkstoffe und Schweißgüter im kernnahen Bereich der Reaktordruckbehälter der deutschen in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke mit Ausnahme der Schweißgüter der Reaktordruckbehälter von Obrigheim und Stade wiedergegeben. Diese wurden ausselektiert, da sie einen gegenüber allen anderen Schweißgütern deutlich höheren Kupferanteil besitzen. Herangezogen wurden die  $RT_{\text{NDTj}}$ - bzw.  $RT_{\text{Toj}}$ -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:**  $RT_{\text{NDTj}}$ ,  $RT_{\text{Toj}}$  als Funktion der Neutronenfluenz, Grundwerkstoff- und Schweißgütergebnisse 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

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

wurde gemäß [1] verwendet. Zur Festlegung von  $RT_{T0j}$  wurde der an bestrahlten Bruchmechanikproben gemäß ASTM E-1921 direkt ermittelte  $T_0$  – Wert entsprechend ASME Code Case [9] zugrunde gelegt (der Index j wurde hier analog zu  $RT_{NDTj}$  für den jeweiligen bestrahlten Zustand angehängt)

$$RT_{T0j} = T_{0j} + 19 \text{ K} \quad (B-2)$$

### 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

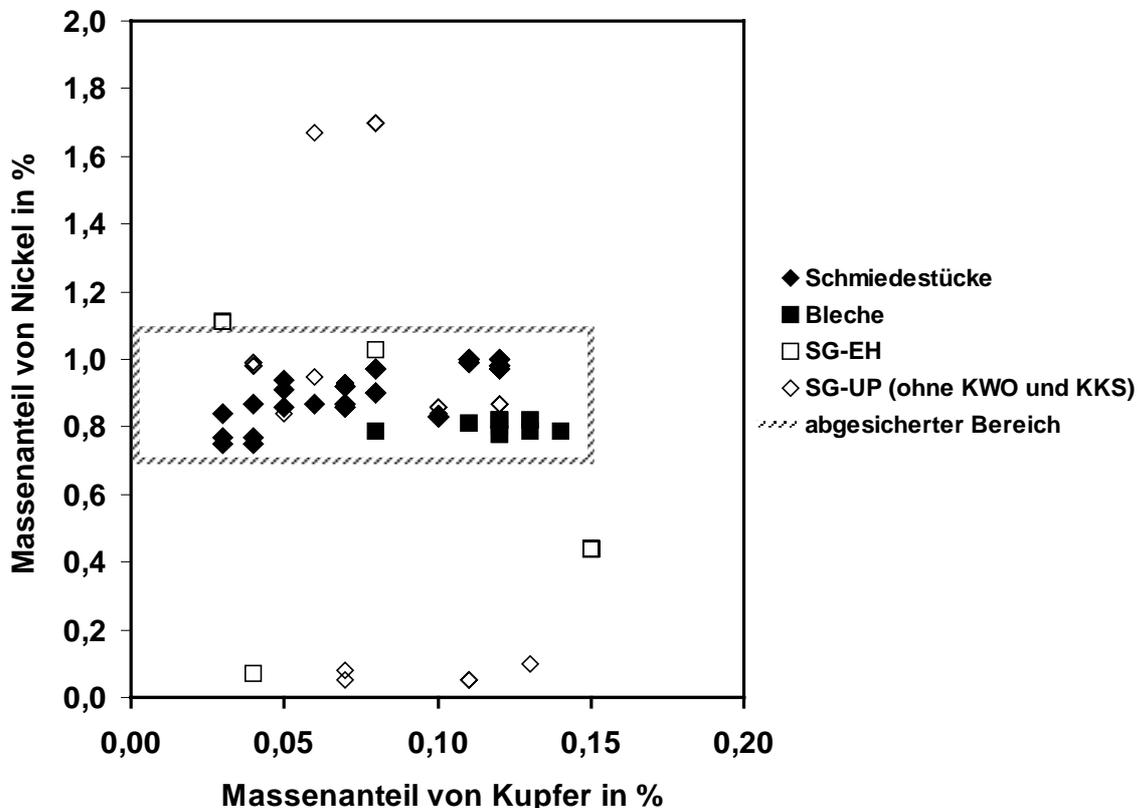
Schweißgüter im kernnahen Bereich der Reaktordruckbehälter. Massenanteile von Nickel von ca. 0,7 % bis 1 % sind mit den deutschen Bestrahlungsergebnissen statistisch abgesichert. Massenanteile bis 1,7 % wurden in der Vergangenheit einigen Schweißgütern zur Steigerung der Zähigkeit zulegiert. Die dadurch 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  $RT_{NDT}$ -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. 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 Kerbschlagarbeit 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:

$$\begin{aligned} RT_{Grenz} &= 40 \text{ }^\circ\text{C} && \text{für } 0 < \Phi < 10^{19} \\ RT_{Grenz} &= \left( \frac{\Phi}{10^{18} \text{ cm}^{-2}} + 30 \right) \text{ }^\circ\text{C} && \text{für } \Phi > 10^{19} \end{aligned}$$

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

## 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 Schweißgutergebnisse 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 3/84 und Erläuterungen

(1) Die im Anwendungsbereich der Fassung 3/84 enthaltene Einschränkung auf Anlagen, die nach KTA 3201 ausgelegt, konstruiert und hergestellt wurden, wurde nicht mehr übernommen. Für die in dieser Fassung enthaltenen Festlegungen ist diese Einschränkung nicht erforderlich.

(2) Zu den Begriffen „Grenzwert der Referenztemperatur ( $RT_{\text{Grenz}}$ )“ und „Nachweisfluenz“ wurde eine Begriffsdefinition neu aufgenommen.

(3) Die Abschnitte 3 „Allgemeine Grundsätze“ und 6 „Prüfung und Auswertung“ wurden grundlegend überarbeitet und an den aktuellen Kenntnisstand angepasst, wobei der Abschnitt 6 durch eine Regelung zur Auswertung der Ergebnisse aus Überwachungsprogrammen ergänzt wurde. Grundlage der Überarbeitung war die in Anhang B aufgeführte Auswertung von nationalen und internationalen Bestrahlungsergebnissen. Mit der vorliegenden Datenbasis ist es möglich, von der Übergangstemperaturverschiebung  $\Delta T_{41}$  als Absicherungsgröße auf die Absicherung der justierten Referenztemperatur als maßgebende Größe überzugehen. Zusätzlich kann nun eine  $RT_{\text{Grenz}}$ -Kurve angegeben werden (Bild 3-1). Die Festlegungen in den Abschnitten 3 und 6 sind auf deutsche Verhältnisse abgestimmt und können deshalb ohne weitergehende Prüfung nur für Werkstoffe gelten, die durch die in Anhang B ausgewertete Datenbasis repräsentiert sind. Aus dem gleichen Grund ist eine Anwendung anderer Vorschriften zur Vorhersage der Bestrahlungsreaktion nicht ohne weiteres sinnvoll.

(4) In Verbindung mit den Änderungen in Abschnitt 6 wurde das Bild 4-1 nicht mehr übernommen.

(5) In Abschnitt 5.4 „Probenlage und Probenentnahmeorte“ wurden

- eine Unterteilung in „Allgemeines“, „Grundwerkstoff“ und „Schweißgut“ vorgenommen,
- diejenigen Festlegungen, die die Wärmeeinflusszone betreffen, hier und in Tabelle 3-2 wurde nicht mehr übernommen, da eine gesonderte Berücksichtigung der Wärmeeinflusszone für Werkstoffe, die durch die in Anhang B ausgewertete Datenbasis repräsentiert sind, nicht erforderlich ist (siehe hierzu z.B. K. Kußmaul, E. Roos, J. Föhl: Forschungsvorhaben Komponentensicherheit - Ein wesentlicher Beitrag zur Komponentensicherheit; 23. MPA-Seminar, 1./2.10.1997, Stuttgart)
- die Möglichkeit der Verwendung von Bruchmechanikproben neu aufgenommen,
- diejenigen Prüfungen nicht mehr übernommen, die zum Standardumfang gehören und bereits in KTA 3201.1 und KTA 3201.3 gefordert werden.

(6) Der Abschnitt 6 „Ermittlung der Werkstoffkennwerte“ wurde geringfügig redaktionell überarbeitet.

(7) Darüber hinaus wurden

- a) die Struktur der Regel überarbeitet und die Abschnitte entsprechend dem chronologischen Ablauf angeordnet,
- b) redaktionelle Berichtigungen und Verbesserungen eingearbeitet,
- c) eine Anpassung an die aktuellen Fassungen der Normen vorgenommen.

### Stichwortverzeichnis

**Bestrahlungsplan** 4.1; 5.4.1; 8 (3)

**Bestrahlungsprobe(n)**

- , Anzahl Tab. 3-1; Tab. 3-2; 4.4
- , Anforderungen an die Aufnahmebehälter 4.2
- , Aufbewahrung 7
- , Positionierung 4.1 (1); 4.3
- , Prüfung und Auswertung 6.1
- , Werkstoffauswahl 5
- , Zeitpunkte des Einsatzes und der Entnahme 4.5

**Bestrahlungsprogramm** 4

- , Auswertung 6.3.1
- , Notwendigkeit 3.2
- , Prüfstück 5.2
- , Reservematerial 5.3
- , Zweck 3.1

**Bestrahlungstemperatur** 6.2

**Dokumentation** 8

**Fluenzvoreilfaktor** 2 (1); 4.1 (1); 4.3 (1); 6.3.1

**Kernnaher Bereich** 2 (3); 4.1 (1); 5.1; Anhang B

**Nachweisfluenz** 2 (4); 3.1; 4.5; 5.2 (5); 6.4.3 (2)

**NDT-Temperatur** 2 (5); 2 (9)

**Neutronendetektor** 6.3; Tab. 6-2

**Neutronenfluenz** 2 (6)

- , Bestimmung 4.1 (1); 6.3

-, Grenzwerte für die Durchführung eines Bestrahlungsprogramms 3.2

**Neutronenflussdichte** 2 (7); 4.2 (3); 6.1 (3); 6.3.1

**Neutronenspektrum** 2 (8); 6.3.1; 6.3.2; B 5.1 (3)

**Probe(n)** siehe *Bestrahlungsprobe*

**Prüfstück** 5.2

**Referenztemperatur**

- , nach dem NDT-Konzept ( $RT_{\text{NDT}}$ ) 2 (9); 3.1; 6.4.3; Anhang B
- , Grenzkurve Bild 3-1; B 5
- , Grenzwert ( $RT_{\text{Grenz}}$ ) 2 (2); 3.2; 6.4.3; Anhang B
- , justierte ( $RT_{\text{NDT},j}$ ) 2 (10); 3.2; 6.4.3; Anhang B

**Reservematerial** 5.3

**Sachverständiger** 2 (11); 4.1; 4.2 (4); 5.2 (1)

**Temperaturmonitor** 6.2; Tab. 6-1

**Übergangstemperatur-Verschiebung** 2 (12); 6.4.3 (1); Anhang B

**Vorprüfung** 4.1 (2)

**Werkstoffprobe** siehe *Bestrahlungsprobe*

**Werkstoffprüfung** 6.1; 6.4